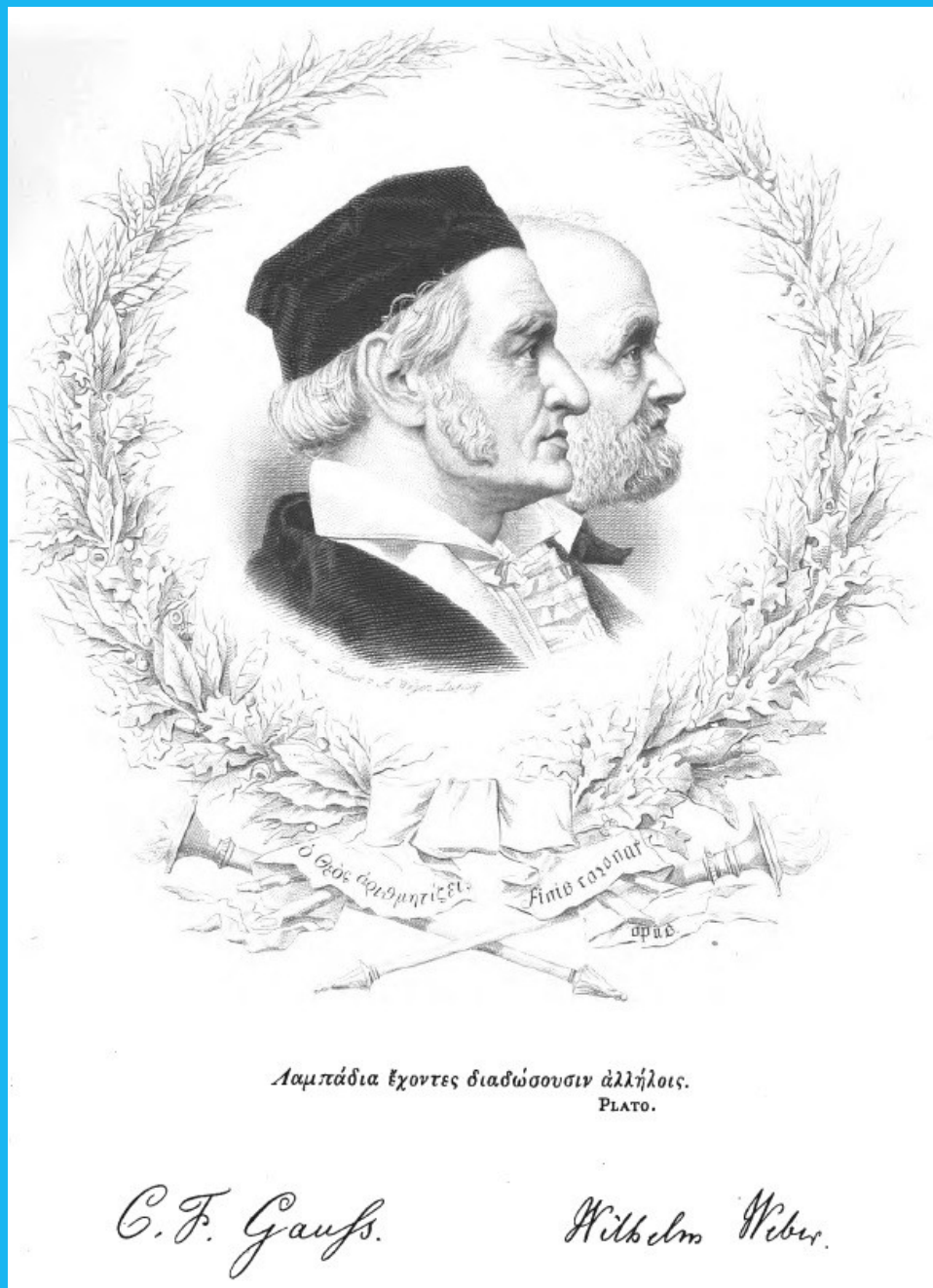


**Obras de Weber sobre
Eletrodinâmica
Traduzidas e Comentadas
Volume I: Biografia, Magnetismo,
Indução Unipolar, e o Sistema Absoluto
de Unidades de Gauss e Weber**



André Koch Torres Assis

Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas

*Volume I: Biografia, Magnetismo,
Indução Unipolar, e o Sistema Absoluto de
Unidades de Gauss e Weber*

André Koch Torres Assis



**Apeiron
Montreal**

Published by C. Roy Keys Inc.
4405, rue St-Dominique
Montreal, Quebec H2W 2B2 Canada

© André Koch Torres Assis, 2025

First Published 2025

Library and Archives Canada Cataloguing in Publication

Title: Obras de Weber sobre eletrodinâmica traduzidas e comentadas / André Koch Torres Assis.
Other titles: Weber's works on electrodynamics translated and commented. Portuguese
Names: Assis, André Koch Torres, 1962- author, translator
Description: Includes bibliographical references. | Contents: Volume I: Biografia, magnetismo, indução unipolar, e o sistema absoluto de unidades de Gauss e Weber
Identifiers: Canadiana (print) 20250223821 | Canadiana (ebook) 20250223864 | ISBN 9781987980370 (v. 1 ; softcover) | ISBN 9781987980387 (v. 1 ; ebook)
Subjects: LCSH: Weber, Wilhelm Eduard, 1804-1891. | LCSH: Electrodynamics.
Classification: LCC QC631 .A8713 2025 | DDC 537.6—dc23

A imagem na capa do Volume I mostra Carl Friedrich Gauss (1777-1855) e seu colaborador Wilhelm Weber (1804-1891). Essa figura vem do frontispício do segundo volume de um livro de Friedrich Zöllner (1834-1882) contendo a coleção de seus artigos, F. Zöllner, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, Volume 2, Part I (L. Staackmann, Leipzig, 1878). Zöllner explicou a origem dessas imagens e das frases que as acompanham nas páginas v-vii de seu livro.

Obras de Weber sobre Eletrodinâmica

Traduzidas e Comentadas

Volume I: Biografia, Magnetismo, Indução Unipolar,
e o Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber



Λαμπάδια ἔχοντες διαδώσουσιν ἀλλήλοις.
PLATO.

C. F. Gauss.

Wilhelm Weber.

André Koch Torres Assis

Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

© A. K. T. Assis

Sumário

I	Introdução Geral	9
1	Agradecimentos	11
2	Introdução ao Volume I	15
2.1	A Vida e os Trabalhos de Weber	15
2.2	Os Trabalhos de Weber com o Título Geral de <i>Elektrodynamische Maassbestimmungen</i>	16
2.3	Aspectos Práticos do Projeto	17
2.4	Conteúdo do Volume I	18
3	Os Motivos Pelos Quais Realizei a Tradução Comentada as Obras de Weber	21
II	Estudos Biográficos sobre Weber	29
4	Introdução ao Discurso Memorial de Riecke de 1891	31
5	[Riecke, 1891] Discurso Memorial	33
6	[Heinrich Weber, 1893] Wilhelm Weber: Um Esboço Biográfico	61
6.1	Prefácio	63
6.2	A Juventude de Wilhelm Weber, 1804-1825	63
6.3	Anos Adicionais de Estudo 1824-1831	67
6.4	Primeiro Período em Göttingen 1831-1837	75
6.5	O Período Intermediário 1837-1843	86
6.6	Período de Leipzig 1843-1849	102
6.7	Segundo Período em Göttingen 1849-1891	110
7	Introdução ao Artigo de 1899 de Voigt	123
8	[Voigt, 1899] Monumento em Homenagem a Gauss e Weber	125
III	Tradução Comentada das Obras de Gauss e Weber	131
9	Introdução ao Artigo de 1832 de Gauss	133

9.1	A Razão entre os Valores Numéricos de uma Mesma Grandeza Expressa com Duas Unidades Diferentes É o Inverso da Razão entre as Unidades Correspondentes	133
9.2	A Intensidade Absoluta da Força Magnética Convertida em Termos do Campo Magnético	134
9.3	Medição da Componente Horizontal da Força Magnética Terrestre	135
10	[Gauss, 1832, Resumo do Artigo:] <i>Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata</i> (Medição Absoluta da Força Magnética Terrestre)	137
10.1	Introdução da Versão em Inglês desse Trabalho de Gauss	137
10.2	Tradução do Trabalho de 1832 de Gauss	138
11	Introdução ao Artigo de 1833 de Gauss	147
12	[Gauss, 1833] Medição Absoluta da Força Magnética Terrestre	149
12.1		153
12.2		154
12.3		154
12.4		155
12.5		156
12.6		157
12.7		158
12.8		160
12.9		161
12.10		162
12.11		164
12.12		166
12.13		166
12.14		167
12.15		167
12.16		168
12.17		170
12.18		171
12.19		173
12.20		174
12.21		174
12.22		176
12.23		177
12.24		179
12.25		179
12.26		180
12.27		182
12.28		182
13	[Dorn, 1894] Notas de E. Dorn sobre o Artigo de Gauss	183
13.1	Introdução às Notas de Dorn	183
13.2	Notas de Dorn	183
13.2.1	Sobre a Seção 12.6	186

13.2.2	Sobre a Seção 12.7	188
13.2.3	Sobre a Seção 12.8	190
13.2.4	Sobre a Seção 12.10	190
13.2.5	Sobre as Seções 12.17 e 12.18	191
14	[Gauss, 1837] Introdução aos Resultados das Observações Feitas pela Associação Magnética no Ano de 1836	195
15	[Weber, 1837a] Observações sobre a Instalação dos Observatórios Magnéticos e Descrição dos Instrumentos a Serem Colocados Neles	201
15.1	Observações sobre as Partes Separadas do Observatório Magnético e dos Instrumentos Magnéticos	207
15.2	Explicação da Gravura III	212
15.3	Despesa de Construção e Mobiliário de um Observatório Magnético	217
16	[Weber, 1837b] Descrição de um Pequeno Aparelho Portátil para a Medição da Intensidade Absoluta do Magnetismo Terrestre para Viajantes	221
16.1	As Partes do Pequeno Instrumento	222
16.2	Observações a Serem Realizadas com Esse Instrumento	223
16.2.1	Experiências de Deflexão	223
16.2.2	Experiências de Oscilação	225
16.3	Aplicação das Observações	226
16.4	O Cálculo das Observações Feitas com o Aparelho de Medição Descrito, de Acordo com as Regras que Acabamos de Mencionar	236
16.5	Exame do Resultado Encontrado	239
16.6	Vantagens das Dimensões Escolhidas para o Pequeno Instrumento de Medida	240
17	[Gauss, 1838] Sobre um Novo Instrumento para a Observação Direta das Mudanças na Intensidade da Componente Horizontal da Força Magnética Terrestre	243
18	[Weber, 1838] Observações sobre a Instalação e Uso do Magnetômetro Bifilar	257
18.1	Observações Gerais	258
18.2	As Partes Separadas do Magnetômetro Bifilar	265
18.3	Sobre a Utilização do Magnetômetro Bifilar	268
18.4	Custo dos Magnetômetros Bifilares de Vários Tamanhos, de Acordo com o Preço do Fabricante de Instrumentos, Sr. Meyerstein de Göttingen	271
19	[Weber, 1839] O Magnetômetro Transportável	273
19.1	Observações Gerais	274
19.2	Descrição das Várias Partes	277
19.3	Exemplos de Observações e Medidas	280
19.3.1	Medição da Declinação Absoluta	280
19.3.2	Observação das Variações de Declinação	284
19.3.3	Medição da Intensidade Absoluta do Magnetismo Terrestre	285

20	[Gauss, 1840] Teoremas Gerais Relativos às Forças de Atração e Repulsão que Atuam na Razão Inversa do Quadrado da Distância	307
21	Introdução ao Primeiro Artigo de Weber sobre Indução Unipolar	309
21.1	A Experiência de Faraday	309
21.2	Conhecimento de Weber sobre a Experiência de Faraday	310
21.3	A Experiência de Weber	310
21.4	Sobre a Existência dos Fluidos Magnéticos	312
21.5	Sobre a Existência das Correntes Moleculares	312
21.6	Indução Unipolar Explicada com a Eletrodinâmica de Weber	313
22	[Weber, 1840] Indução Unipolar	317
22.1	Comentários Gerais	318
22.1.1	Indução Bipolar e Unipolar	318
22.1.2	<i>Método</i>	318
22.1.3	Leis	321
22.2	Instrumentos	323
22.2.1	Os Ímãs Cilíndricos	324
22.2.2	A Engrenagem	324
22.2.3	Magnetômetro e Multiplicador	325
22.2.4	Conexão das Extremidades do Fio com o Ímã Giratório	326
22.2.5	A Bobina Indutora	326
22.3	Experiências	326
22.3.1	Primeira Série	327
22.3.2	Segunda Série	330
22.3.3	Terceira Série	331
22.3.4	Quarta Série	331
22.3.5	Quinta Série	332
22.3.6	Sexta Série	333
22.3.7	Sétima Série	333
22.4	Aplicações	333
22.4.1	Aplicação à Teoria Eletrodinâmica de Ampère dos Fenômenos Magnéticos	333
22.4.2	Aplicação à Distribuição do Magnetismo no Interior de Ímãs Permanentes	335
22.4.3	Aplicação à Distribuição do Magnetismo no Ferro Doce	336
22.5	Conclusão	337
23	Introdução ao Segundo Artigo de Weber sobre Indução Unipolar	339
24	[Weber, 1841] Indução Unipolar	343
25	[Wöhler e Weber, 1841] Composição das Pilhas Galvânicas	349
26	[Weber, 1841a] Medição de Intensas Correntes Galvânicas com Baixa Resistência de Acordo com Unidades Absolutas	353
27	[Weber, 1841b] Sobre o Equivalente Eletroquímico da Água	361

28 [Weber, 1842] Medição de Intensas Correntes Galvânicas de Acordo com Unidades Absolutas	367
IV O Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber	373
29 O Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber, Juntamente com Sua Diferença em Relação ao Moderno Sistema “Gaussiano” de Unidades	375
29.1 O Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber	375
29.2 O Sistema CGS de Unidades	378
29.3 A Confusão Criada pelo Assim Chamado Sistema “Gaussiano” de Unidades	379
30 O <i>Weber</i> como uma Unidade de Medida Elétrica	383
Referências Bibliográficas	385

Parte I

Introdução Geral

Capítulo 1

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço enormemente aos colegas que entenderam a importância desse projeto e que trabalharam comigo na edição e tradução comentada, do alemão para o inglês, das principais obras de Weber sobre eletrodinâmica:¹ Laurence Hecht, David H. Delphenich, Urs Frauenfelder, Joa Weber, Peter Marquardt, Hermann Härtel, Jonathan Tennenbaum, Peyman Ghaffari, Christof Baumgärtel, Mathias Hüfner e Frédéric Julian Linz. Sem o auxílio desses colegas não seria possível a publicação comentada das obras de Weber em inglês e português.

Roy Keys, o Editor da Apeiron, tem me apoiado por muitos anos. Sem o seu encorajamento e suporte alguns de meus livros poderiam não ter sido publicados. Ele sempre foi muito receptivo a esse projeto em particular.

Agradeço ao Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP e ao Fundo de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão da Unicamp — FAEPEX, que forneceram o apoio necessário para o desenvolvimento desse projeto. Agradeço também à Fundação Alexander von Humboldt, da Alemanha. Essa Fundação me apoiou para estudar alemão no Instituto Goethe da cidade de Göttingen (de abril a julho 2001). A Fundação Humboldt também me concedeu quatro bolsas de pesquisa que me permitiram trabalhar no Instituto de História das Ciências Naturais da Universidade de Hamburgo (de agosto de 2001 a novembro de 2002, assim como de fevereiro a maio de 2009), na Universidade Tecnológica de Dresden (de abril a junho de 2014), e na Universidade de Augsburg (de setembro a dezembro de 2023). Durante essas estadias tive o prazer de trabalhar com Karin Reich, Gudrun Wolfschmidt, Martin Tajmar, Kai Cieliebak, Urs Frauenfelder e com o falecido Karl-Heinrich Wiederkehr (1922-2012) que escreveu a principal biografia de Weber.² Também agradeço enormemente às Universidades de Hamburgo, Dresden e Augsburg que forneceram excelentes condições de trabalho durante minhas estadias no exterior. Fui sempre extremamente bem recebido, tive todo o apoio científico necessário dessas Universidades, fiz muitos amigos e contatos pessoais extremamente importantes. Durante esses quatro períodos de pesquisa na Alemanha pude ler e coletar uma quantidade enorme de material bibliográfico que foi essencial para o desenvolvimento desse projeto.

Gostaria também de agradecer ainda a várias pessoas por suas sugestões, referências, ideias, apoio e encorajamento: Simon Maher, Frederick David Tombe, Elena Roussanova, Elisabeth Becker-Schmollmann, Gilberto Orenge, Decio Schaffer, Robert W. Gray, Alan Aversa, Alexander Unzicker, Kjell Prytz, Jan Rak, Karel Janecek, Reiner Zieffle, Wallace

¹[Ass21f], [Ass21g], [Ass21h], [Ass21i] e [Ass24b].

²[Wie60] e [Wie67].

Thornhill, Tim Hooker, Lucy Wyatt, Thomas Herb, David de Hilster, John Lord, Karl-Heinz Glassmeier, Orges Leka, João Paulo Martins de Castro Chaib, Fabio Menezes de Souza Lima, Paulo Sakanaka, Thiago Pedro Mayer Alegre, Sandro Guedes de Oliveira, Mario Tamashiro, Pedro Raggio, Mikael Frank Rezende Junior, Sônia Maria Dion, Gildo Magalhães, Paulo Henrique Dias Menezes, Edson Eduardo Reinehr, Eloi Teixeira Cesar, Frederico Ayres de Oliveira Neto, Sérgio Roberto de Paulo, Arthur Baraov, Pietro Cerreta, Riccardo Urigu, Chuck Stevens, Wallace do Couto Boaventura, Danny Augusto Vieira Tonidandel, Marcos Cesar Danhoni Neves, Daniel Gardelli, Domingos Soares, Ivan Mingireanov Filho, Luciano Romenius Ferreira Guimarães, Luis Gustavo Vitti, Anderson William Mol, Ciro Lino Bellan, Cezar Cavanha Babichak, Arden Zylberstajn, Fernando Lang da Silveira, Moacir Pereira de Souza Filho, Lúcio Costa, Breno Arsioli Moura, José Emílio Maiorino, Elizabeth Silber, Hannes Täger, Amitabha Ghosh, Julian Barbour, Carlos Adriano Cardoso, Roberto de Andrade Martins, Christine Blondel, Bertrand Wolff, Ana Paula Bispo da Silva, Daniel dos Anjos Silva, Douglas Soares da Silva, Frederico Ayres de Oliveira Neto, Mario Novello, Marcio Peron Franco de Godoy, Eduardo Luis Estrada, Ricardo Roberto Plaza Teixeira, Haroldo Fraga Campos Velho, Kathryn Olesko, Yuri Heymann, Jörg Fischera, Juan Muñoz Madrid, David Bower, Ismo V. Lindell, Ovidio Bucci, John Plaice, Klaus Hentschel, Tony C. Scott, Luis Carlos Malacarne, Renio dos Santos Mendes, Werner Martins Vieira, Ruy Hanazaki do Amaral Farias, Carlos Augusto Silva, Itala D'Otaviano, Marcio Antônio de Faria Rosa, Fabio Mibielli Peixoto, Alexandre Carlos Tort, Rolando Axt, Markus Wirz, John Eastmond, José Manuel Ferreirós Dominguez, Bernard Guy, Koen van Vlaenderen, Kirk McDonald, Rolf Laeuppi, Franz Pichler, Samer al Duleimi, Greg Volk, Mario Wingert, Michael D. Godfrey, Jocelyne Lopez, David Dameron, Mario J. Pinheiro, Hermann Borotschnig, Mischa Moerkamp, Mario Natiello, Júlio Akashi Hernandez, Giovana Trevisan Nogueira, José Luiz Matheus Valle, José Roberto Tagliati, Marco Antônio Escher, Simon Brunnquell, Andreas Otte, Max Tran, Konstantinos Kifonidis, Hans Günter Dosch, Albert Gerard Gluckman, Steve Hutcheon, Christian Ucke, Hartwig Thim, Steffen Kühn, Friedrich Steinle, Peter Heering, Rainer Müller, Sahand Tokasi, Cesar Pagan, Romis Attux, Joachim Schlichting, Matthias Heumesser, Stefan Suhr, Marcelo de Almeida Bueno, Dario Sassi Thoher, Ademir Xavier Jr., Valter Cesar Montanher, Nelson Studart, Leandro de Paula, Jenner Barreto Bastos Filho, Olival Freire Jr., Dimas Guido Silva, Alexandre Alberto Visentin Ramos de Araújo, Thales Costa Soares, Mario Novello, Hugo Bonette de Carvalho, Valter Aparecido da Silva Junior, Wilson Bagni Jr., Manfred Pohl, Andreas Schuldei, Fritz A. Krafft, Wolfgang Engelhardt, Osvaldo Pessoa Jr., Filipe Pamplona, Alvaro Vannucci, Iberê Caldas, João F. N. Cortese, Ricardo Karam, Edmundo Capelas de Oliveira, Hector Torres Silva, Peter Puschnig, Michael de Carvalho, Pieter Jacqmaer, Matthias Dörries, Helmut Hansen, Juan Manuel Montes Martos, Manuel Filipe P. C. M. Costa, Roberto Machado Junior, João José Caluzi, Sergio Luiz Bragatto Boss, Ricardo Paupitz Barbosa dos Santos, Ceno Pietro Magnaghi, Fabio Ravanelli, Cesar Calderon, Juliano Camillo, Nivaldo Benedito Ferreira Campos, Alexander Montero Cunha, Alexandre Gomes Pinto, Alexandre Rodrigues, Karl-Heinz Schlote, Junichiro Fukai, Francisco Gonzalez Redondo, Olivier Darrigol, John Lewis Heilbron, Marco Mamone Capria, Andrew Chubykalo, Carlos Fiolhais, Wolfgang R. Dick, Neal Graneau, Klaus Reinsch, Daniel Steil, Jason Ross, Sepp Hasslberger, Hans-Joachim Linthe, Gustav Beuermann, Harry Hamlin Ricker III, Michael Matthews, Charbel El-Hani, Paulo Maurício, Jenaro Guisasola, Alexander N. Tarakanov, Franz Streibl, Chan Rasjid, Timothy Newton, Lei Zhao, Eugene Bagashov, Matthew Ehret, Michael Shilo, Anastasia Bendebury, Kirstie Finster, Michael Clarage e Alfonso San-Miguel Fuster.

André Koch Torres Assis
Instituto de Física Gleb Wataghin
Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP
Rua Sérgio Buarque de Holanda 777
13083-859 Campinas, SP, Brasil
E-mail: assis@ifi.unicamp.br
Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

Capítulo 2

Introdução ao Volume I

Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) foi um dos cientistas mais importantes do século XIX. A partir de 1831 ele trabalhou em colaboração com Carl Friedrich Gauss (1777-1855) na Universidade de Göttingen, Alemanha. Esse livro contém traduções do alemão para o português, completas e comentadas, de seus principais trabalhos sobre eletrodinâmica.

O principal objetivo dessas traduções é o de fazer com que os trabalhos originais de Weber fiquem conhecidos de uma ampla audiência, especialmente daqueles que não dominam o alemão. Ele está direcionado aos alunos e cientistas que desejam desenvolver experimentalmente e teoricamente a eletrodinâmica de Weber, assim como as aplicações de sua lei de força para a gravitação.

Ele também é voltado aos leitores que desejam saber mais sobre o sistema absoluto de unidades introduzido por Gauss e Weber. Um outro objetivo é o de permitir uma boa apreciação dos instrumentos e técnicas observacionais de alta precisão desenvolvidos por Gauss e Weber durante o século XIX. James Clerk Maxwell (1831-1879), por exemplo, descreveu em seu *Tratado de Eletricidade e Magnetismo* as contribuições experimentais de Gauss e Weber com as seguintes palavras:³

A introdução, por W. Weber, de um sistema absoluto de unidades para a medida de grandezas elétricas é um dos passos mais importantes no progresso da ciência. Tendo já, junto com Gauss, colocado a medida das grandezas magnéticas nos primeiros lugares dos métodos de precisão, Weber continuou em suas *Electrodynamic Measurements*⁴ não apenas estabelecendo princípios sólidos para fixar as unidades a serem empregadas, mas também fazendo determinações de grandezas elétricas particulares em termos destas grandezas, com um grau de precisão até então nunca alcançado. Ambos os sistemas de unidades, eletromagnético e eletrostático, devem seu desenvolvimento e suas aplicações práticas a estas pesquisas.

2.1 A Vida e os Trabalhos de Weber

Wilhelm Eduard Weber nasceu em 1804 e morreu em 1891. Ele assinava seus trabalhos como Wilhelm Weber. As obras completas de Weber foram publicadas em seis volumes entre 1892

³[Max54a, Vol. 2, Artigo 545, págs. 193-194].

⁴Maxwell estava se referindo a um conjunto de trabalhos que recebeu o título geral de *Elektrodynamische Maassbestimmungen*. O título da sexta Memória desse conjunto, publicada em 1871, [Web71], recebeu essa tradução como *Electrodynamic Measurements* (Medições Eletrodinâmicas) quando foi publicada em 1872, [Web72].

e 1894.⁵ Os obituários mais antigos apareceram em 1891 e 1892.⁶ Biografias importantes foram publicadas por Eduard Riecke (1845-1915), que sucedeu Weber na Universidade de Göttingen,⁷ e por Heinrich Weber (1839-1928), sobrinho de Wilhelm Weber e editor de alguns volumes de seus trabalhos completos.⁸ A biografia mais completa foi escrita por Karl-Heinrich Wiederkehr.⁹

Trabalhos importantes sobre sua vida, sua colaboração científica com Gauss, seus instrumentos e medidas eletromagnéticas, sua teoria eletrodinâmica e suas atividades científicas em geral foram publicados por diversos autores.¹⁰

Algumas técnicas experimentais utilizadas por Gauss e Weber foram discutidas por Friedrich Wilhelm Georg Kohlrausch (1840-1910), filho de Rudolf Hermann Arndt Kohlrausch (1809-1858) que foi um grande colaborador de Weber.¹¹

Existem algumas homepages excelentes com uma quantidade enorme de material sobre Ampère e Gauss tendo uma relação direta com a eletrodinâmica de Weber.¹² Muitos trabalhos sobre Ampère, Gauss e Weber foram publicados no periódico *Mitteilungen der Gauss-Gesellschaft*, relacionado com a Sociedade Gauss, sediada na cidade de Göttingen, Alemanha.¹³

2.2 Os Trabalhos de Weber com o Título Geral de *Elektrodynamische Maassbestimmungen*

Weber escreveu oito Memórias principais com o título geral de *Elektrodynamische Maassbestimmungen*.¹⁴ Esse título recebeu traduções diferentes para o inglês:

- Electrodynamic measurements.¹⁵

⁵[Web92e], [Web92d], [Web93b], [Web94d], [Web93a] e [Web94c].

⁶[F.91], [Ano91] e [Ano92].

⁷[Rie92]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 5.

⁸[Web92a], [Web92b], [Web92c] e [Web93a]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 6.

⁹[Wie60] e [Wie67]. Artigos relevantes de Wiederkehr podem ser encontrados em: [Wie64], [Wie73], [Wie82], [Wie88], [Wie90], [Wie91], [Wie92], [Wie93c], [Wie93b], [Wie93a], [Wie94], [Wie97], [Wie04], [Wie07] e [Wie08].

¹⁰[Dor07], [Sch36], [Hes55], [Kir56] com tradução para o inglês em [Kir57], [Ros56], [Hes61], [Woo62], [O'R65, Volume 2, Capítulo 11], [Woo68], [Bie71], [Mol72], [Mil72], [Whi73, Capítulo 7], [Cla76], [Rei77], [Can78], [Woo81], [Wis81], [D'A81], [Ros81], [Ass92a], [Har82, págs. 32, 96 e 103–107], [Fri82], [Bev83], [Bev84], [Buc84], [Buc85], [JM86], [Ath89], [Ath89], [Arc89], [Mey90], [Mar90], [Ass91], [Sch93b], [Sch93a], [Wie93b], [Bev93], [Dar93a], [Dar93b], [Ass94], [Bev94], [Gra94], [Bev95], [Ten96], [Hec96b], [Hec96a], [D'A96], [Dar96], [Ole96], [GG96], [Ten97b], [Ten97a], [Hec97], [Gib97], [Ass98], [Ass99b], [Ass99c], [Glu99], [Hec00], [D'A00], [Dar00], [BA01], [Gar01], [Hec01], [Kär02], [Lin05], [Wol05], [Tim05], [Pic06], [Lin06], [Men06], [AH07], [Hec07b], [Hec07a], [AH09], [Kra10], [AC11], [AWW11], [Hee11], [Rei11], [Kra12], [RR12], [AH13], [Ass13], [Rei13], [Ass14b], [AWW14], [RR14], [Rib14], [Bev14], [GT14], [Ass15a], [BA15], [AC15], [Men15], [JM17], [RR17], [AWW18], [Cah18], [Buc20], [Fer20], [Tom20], [BW21b] com tradução para o inglês em [BW21b], [Wis21], [Hun21] etc.

¹¹[Koh83a] e [Koh10].

¹²Na homepage *Ampère e a História da Eletricidade*, <http://www.ampere.cnrs.fr>; na homepage da *Sociedade dos Amigos de André-Marie Ampère*, <https://saama.fr>; na homepage do *Museu Ampère*, <https://amperemusee.fr/en>; na homepage da *Sociedade Gauss de Göttingen*, <http://www.gauss-gesellschaft-goettingen.de/gauss-e.htm>; e na homepage contendo *A Correspondência Completa de Carl Friedrich Gauss*, <https://gauss.adw-goe.de>. Ver também [Blo05], [Gau24] e [Gau d].

¹³Ver a homepage <https://www.gauss-gesellschaft-goettingen.de/mitteil.html>.

¹⁴[Web46], [Web52b], [Web52a], [KW57], [Web64], [Web71], [Web78] e [Web94a].

¹⁵[Web71] com tradução para o inglês em [Web72], [Kir49, pág. 510] com tradução para o inglês em [Kir50,

- On the measurement of electro-dynamic forces.¹⁶
- Electrodynamic determinations.¹⁷
- Determinations of electrodynamic measure.¹⁸
- Electrodynamic determinations of measure.¹⁹
- Electrodynamic measure determinations.²⁰
- Determinations of electrodynamic units.²¹

A tradução adotada para esse título quando da publicação da tradução em inglês das principais obras de Weber foi *Electrodynamic Measurements*.²²

Essa expressão foi traduzida em francês como “Mesures électrodynamiques”.²³

A palavra “Maass”, hoje em dia escrita como “Maß”, pode ser traduzida como medição, medida, dimensão, unidade, unidade de medida, padrão, dose, escala etc.

A palavra “bestimmungen” pode ser traduzida como: determinações, especificações, fixações, definições, medidas, regulamentações, estipulações etc.

A palavra “Maassbestimmungen” pode ser traduzida como: medições, medidas, determinação das medidas, determinação das dimensões, determinações dimensionais etc.

Nesse livro decidi adotar a tradução de *Elektrodynamische Maassbestimmungen* como sendo *Medições Eletrodinâmicas*. A Sexta Memória principal de Weber foi publicada em 1871: *Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über das Princip der Erhaltung der Energie*.²⁴ Ela foi traduzida para o inglês por George Carey Foster (1835-1919) e publicada no periódico *Philosophical Magazine* de 1872: *Electrodynamic measurements — Sixth memoir, relating specially to the principle of the conservation of energy*.²⁵ Nesse livro também vou especificar no título de cada um de seus 8 trabalhos principais a qual Memória com o título de *Medições Eletrodinâmicas* — *ME*, Weber estava se referindo, assim como foi feito por Foster no título da tradução em inglês da Sexta Memória.

2.3 Aspectos Práticos do Projeto

Além dos principais artigos sobre eletrodinâmica escritos por Weber, foram incluídos nesse projeto traduções comentadas de trabalhos de outros cientistas relacionados com as obras de Weber. Em particular, foram incluídas traduções de algumas obras importantes de Carl

pág. 465], [Web53, pág. 163] e [Web66c, pág. 163], [Max73a, Vol. 2, Artigo 545, pág. 179] e [Max54a, Vol. 2, Artigo 545, págs. 193-194], [Ano92], [Kir56] com tradução para o inglês em [Kir57, págs. 623 e 625], [Hec07b] e [Wis21, pág. 36].

¹⁶[Web48] com tradução para o inglês em [Web52c], [Web66d] e [Web19].

¹⁷[Kir57b, pág. 194] com tradução para o inglês em [Kir57a, pág. 394].

¹⁸[JM86, Vol. I, pág. 140] e [JM17, pág. 159], [Web46] com tradução para o inglês em [Web07] e [Web21e], [Web94b] com tradução para o inglês em [Web08] e [Wis21, pág. 36].

¹⁹[Hec96b, págs. 31-32].

²⁰[Dar00, pág. 56].

²¹[Jac06, pág. 113].

²²[Ass21f], [Ass21g], [Ass21h], [Ass21i] e [Ass24b].

²³[Web46] com tradução parcial para o francês em [Web87].

²⁴[Web71].

²⁵[Web72].

Friedrich Gauss, Johann Christian Poggendorff (1796-1877), Gustav Theodor Fechner (1801-1887), Carl Gottfried Neumann (1832-1925), François Félix Tisserand (1845-1896), Friedrich Wöhler (1800-1882), Rudolf Hermann Arndt Kohlrausch (1809-1858) e Gustav Kirchhoff (1824-1887). Elas foram incluídas devido ao impacto mútuo entre esses trabalhos e as obras de Weber. Com isso torna-se possível ter uma ideia mais completa do desenvolvimento da lei de Weber aplicada ao eletromagnetismo e à gravitação durante o século XIX.

Foi feito um grande esforço tentando localizar e listar os trabalhos relevantes que foram mencionados diretamente ou indiretamente por Weber. Algumas vezes ele mencionou apenas um nome. Nesses casos tentei identificar quem pode ter sido essa pessoa e quais artigos desse cientista poderiam estar sendo indicados por Weber. Essa informação foi incluída nas notas de rodapé de cada tradução. Sempre que possível inseri as referências completas, incluindo o nome do periódico, título do artigo, primeira e última página etc. Também tentei indicar todas as traduções que conheço, em qualquer língua, de todo artigo específico citado nesse projeto. Essas referências ajudam a contextualizar as influências, métodos, contatos e pesquisas de Weber.

Digitei todo o trabalho utilizando o editor de textos LaTeX. Erros são inevitáveis em um projeto tão grande. Sugestões para melhorá-lo são bem vindas.

Inseri as palavras entre colchetes, [], no meio de algumas sentenças para clarificar o significado dessas frases.

Escrevi todas as Notas de rodapé nas quais não aparece o nome do autor. Em todos os outros casos indiquei o nome da pessoa que escreveu aquela Nota de rodapé.

Espero que essas traduções em português dos principais trabalhos de Weber sobre eletrodinâmica ajudem a tornar sua teoria brilhante e suas experiências de altíssima precisão mais conhecidas por uma ampla audiência. Com isso a eletrodinâmica de Weber, juntamente com suas experiências e as aplicações dessa teoria para a gravitação, poderão ser desenvolvidas mais amplamente tanto do ponto de vista teórico quanto experimental. Dessa forma todo o trabalho de Weber ficará mais uma vez na fronteira da ciência moderna.

2.4 Conteúdo do Volume I

A imagem na capa do Volume 1 mostra Carl Friedrich Gauss (1777-1855) e seu colaborador Wilhelm Weber (1804-1891). Essa figura vem do frontispício do segundo volume de um livro de Friedrich Zöllner (1834-1882) contendo a coleção de seus artigos.²⁶ Zöllner explicou a origem dessas imagens e das frases que as acompanham nas páginas v-vii de seu livro.²⁷

Incluí no Volume 1 alguns estudos biográficos sobre Weber: (a) O discurso memorial proferido por Eduard Riecke na reunião de 5 de dezembro de 1891 da Sociedade de Ciências de Göttingen; (b) o esboço biográfico de 1893 escrito por Heinrich Weber; e (c) o discurso de 1899 de Woldemar Voigt durante a inauguração do monumento dedicado a Gauss e Weber em Göttingen.

Em seguida vem o trabalho fundamental de Gauss sobre a medição absoluta da força magnética terrestre. Ele foi anunciado em 1832 e o artigo completo em latim circulou em uma pequena edição em 1833. A primeira tradução completa em alemão apareceu em 1833, embora o artigo original em latim só tenha sido publicado em 1841. Nesse trabalho Gauss introduziu o sistema absoluto de unidades com o qual grandezas eletromagnéticas eram

²⁶[Zöl78].

²⁷Ver também [Fer07].

medidas com base nas dimensões de comprimento, massa e tempo (especificamente milímetro, miligrama e segundo). Em particular, ele obteve medições absolutas da força magnética terrestre e do momento magnético de uma barra imantada. Como ele reconheceu no artigo, Weber o auxiliou de diversas maneiras nesse trabalho. Weber havia obtido o cargo de professor de física na Universidade de Göttingen em 1831 através da recomendação do próprio Gauss.

Esse Volume também contém traduções de outros artigos de Gauss, Weber e Wöhler publicados até 1842. Eles estão relacionados com a Associação Magnética criada por Gauss e Weber, seus instrumentos para realizar medições eletromagnéticas de alta precisão incluindo os magnetômetros unifilares e bifilares, a composição de pilhas galvânicas e o equivalente eletroquímico da água. Uma grande parte dos trabalhos de Weber em física foi dedicada a implementar e ampliar o sistema absoluto de unidades. Em particular, ele criou métodos e realizou medições absolutas efetivas de alta precisão da carga elétrica, corrente elétrica, força eletromotriz e resistência.

Incluí também traduções de dois artigos de Weber sobre indução unipolar publicados em 1840 e 1841, precedidos de meus comentários introdutórios.

Além disso, escrevi um capítulo descrevendo brevemente o sistema absoluto de unidades criado por Gauss e Weber, enfatizando suas semelhanças e diferenças com o sistema CGS de unidades e com o assim denominado sistema “Gaussiano” de unidades. Incluí ainda um capítulo discutindo a unidade “Weber” de medida elétrica.

Capítulo 3

Os Motivos Pelos Quais Realizei a Tradução Comentada as Obras de Weber

Decidi trabalhar nesse projeto porque acredito na eletrodinâmica de Weber e desejo torná-la mais conhecida pelos estudantes e cientistas.

A motivação está relacionada às minhas concepções filosóficas e às minhas principais linhas de pesquisa. Trabalho com a interação direta entre corpos afastados espacialmente, sem a utilização de conceitos tais como campo gravitacional, campo elétrico e campo magnético. Essa visão da física foi iniciada em 1687 por Isaac Newton (1642-1727) com sua lei da gravitação universal na qual a força gravitacional entre as partículas é central, diretamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas, seguindo o princípio de ação e reação. Em seguida foi ampliada em 1785 por Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806) ao lidar com a interação entre corpos eletrizados (força central proporcional ao produto das cargas elétricas dessas partículas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas) e com a interação entre polos magnéticos (força central proporcional ao produto das intensidades de polos magnéticos e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles). Essa linha de pesquisa teve continuidade entre 1820 e 1826 com a força entre elementos de corrente devida a André-Marie Ampère (1775-1836). Novamente há aqui uma força central apontando ao longo da reta que une os elementos de corrente e satisfazendo ao princípio de ação e reação. Ela é proporcional às intensidades de corrente elétrica nos dois elementos, aos seus tamanhos, sendo ainda inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Ela depende ainda do ângulo entre esses dois elementos, assim como dos ângulos entre cada um desses elementos e a reta que os une. O coroamento dessa linha de pesquisa ocorreu com a eletrodinâmica de Wilhelm Weber (1804-1891). Nesse caso a força entre partículas eletrizadas depende não apenas da distância entre elas, mas também da velocidade relativa entre elas e da aceleração relativa entre elas. Novamente temos uma força central que segue o princípio de ação e reação. As forças de Newton, Coulomb, Ampère e Weber são ainda compatíveis com o princípio de conservação da energia.

Essa linha de pesquisa foi praticamente abandonada no ensino de física por mais de 100 anos, principalmente no que diz respeito às eletrodinâmicas de Ampère e Weber. Durante praticamente todo o século XX o ensino e a pesquisa em física foi baseada essencialmente nos conceitos de campos elétricos e magnéticos devidos a Michel Faraday (1791-1867) e James

Clerk Maxwell (1831-1879). Com isso o próprio desenvolvimento de toda a linha de pesquisa devida a Ampère e Weber foi abandonado pela comunidade científica, sendo suas obras esquecidas e algumas vezes ensinada de forma completamente errônea. Com o objetivo de tornar mais conhecidas e difundidas as ideias fundamentais de Newton, Coulomb, Ampère e Weber, tenho feito um enorme esforço para traduzir e comentar suas obras. Já traduzi para o português os principais trabalhos de Newton como o livro *Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*²⁸ e o livro *Óptica*.²⁹ Recentemente publiquei a tradução comentada, do francês para o português, assim como do francês para o inglês, das principais obras de Coulomb sobre torção, eletricidade e magnetismo.³⁰ Publiquei juntamente com João Paulo M. d. C. Chaib traduções comentadas para o português e inglês não apenas do primeiro artigo de Ampère sobre eletrodinâmica de 1820, mas também de sua obra-prima de 1826, *Teoria dos Fenômenos Eletrodinâmicos Deduzida Unicamente da Experiência*. Essas traduções foram publicadas em nosso livro *Eletrodinâmica de Ampère: Análise do Significado e da Evolução da Força de Ampère, Juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica*, que está disponível em português e inglês.³¹

No caso de Weber, editei com o auxílio de diversos colegas a tradução comentada do alemão para o inglês das principais obras de Weber. Essas traduções comentadas foram publicadas no livro *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*. Volume 1: O Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber.³² Volume 2: A Força Fundamental de Weber e a Unificação das Leis de Coulomb, Ampère e Faraday.³³ Volume 3: Medição da Constante c de Weber, Diamagnetismo, a Equação do Telégrafo e a Propagação de Ondas Elétricas com a Velocidade da Luz.³⁴ Volume 4: Conservação da Energia, o Modelo Planetário de Weber para o Átomo e a Unificação do Eletromagnetismo com a Gravitação.³⁵ Volume 5: Indução unipolar, galvanometria, estudos biográficos, e a eletrodinâmica de Weber contra diferentes teorias de campo.³⁶ Nessa tradução comentada das obras de Weber incluímos ainda 6 artigos de Carl Friedrich Gauss, traduções de uma parte da correspondência entre Gauss e Weber, 1 artigo de Weber e Friedrich Wöhler, 2 artigos de Weber e Rudolf Kohlrausch, 1 artigo de Gustav Theodor Fechner, 1 artigo de Johann Christian Poggendorff, 1 artigo de François Felix Tisserand, 2 artigos de Carl Neumann, assim como 3 artigos de Gustav Kirchhoff.

Com a presente tradução do alemão para o português das principais obras de Weber sobre eletrodinâmica espero tornar seu trabalho original conhecido para uma comunidade ampla de cientistas e estudantes. Com isso suas pesquisas e concepções filosóficas podem ser exploradas e aprofundadas por mais pesquisadores tanto do ponto de vista experimental quanto teórico.

Descobri a eletrodinâmica de Weber no livro de Whittaker intitulado *Uma História das Teorias do Éter e da Eletricidade*.³⁷ Li essa obra pela primeira vez em 1985. Desde então aprendi muitas propriedades da força de Weber que concordam com minha intuição física.

²⁸[New90], [New08] e [New10].

²⁹[New96].

³⁰[Ass22] e [AB23].

³¹[AC11] e [AC15]. Ver também [Cha09].

³²[Ass21f].

³³[Ass21g].

³⁴[Ass21h].

³⁵[Ass21i]. Ver ainda [WK08].

³⁶[Ass24b].

³⁷[Whi73].

Também percebi ao longo do tempo quão poderosa é essa formulação. Os detalhes e as referências do que digo aqui podem ser encontrados nos trabalhos de Weber e nos meus artigos e livros descritos a seguir.

Weber publicou sua lei de força em 1846. Com essa lei ele unificou a força de Coulomb entre partículas eletrizadas (1785), a força de Ampère entre elementos de corrente (1822 e 1826), assim como a lei de indução de Faraday (1831). A força de Weber entre duas partículas eletrizadas sempre aponta ao longo da linha reta que as une. Ela satisfaz à lei de ação e reação de Newton na forma forte. Ela é uma generalização da força de Coulomb. Ela depende não apenas da distância r entre as partículas que estão interagindo, mas também da velocidade *relativa* entre elas, dr/dt , e da aceleração *relativa* entre elas, d^2r/dt^2 . Ela pode ser deduzida de uma energia potencial que depende da velocidade, sendo que essa energia também foi introduzida por Weber em 1848. A lei de Weber segue os três princípios básicos de conservação da física, a saber, do momento linear, momento angular e energia. Toda a eletrostática (força de Coulomb e lei de Gauss) está contida na lei de Weber. A força entre elementos de corrente de Ampère pode ser deduzida da força de Weber. A partir daí pode ser deduzida a lei circuital magnética, incluindo a corrente de deslocamento. Weber também conseguiu deduzir a lei de indução de Faraday a partir de sua força. A primeira conexão quantitativa entre a óptica e o eletromagnetismo foi obtida na eletrodinâmica de Weber. Ela foi o resultado da medição realizada por Weber e Kohlrausch de uma constante fundamental que Weber havia introduzido em sua lei de força. O resultado de suas medições foi publicado em 1855, 1856 e 1857. Em 1857 Kirchhoff e Weber deduziram independentemente um do outro a equação completa do telégrafo. Em termos modernos, essa equação levou em conta não apenas a resistência e capacitância do fio condutor, mas especialmente sua auto-indutância. Tanto Kirchhoff quanto Weber basearam suas deduções na eletrodinâmica de Weber. Seus trabalhos foram publicados em 1857 e 1864. Eles mostraram, em particular, que quando a resistência do fio era desprezível, a equação do telégrafo ficava reduzida à equação de onda. Mostraram que a velocidade de propagação de uma onda elétrica ao longo do fio era independente da área de seção reta do fio, de sua condutividade e da densidade de eletricidade ao longo da superfície do fio. O valor dessa velocidade era igual à conhecida velocidade da luz no vácuo. Esse resultado notável da eletrodinâmica de Weber indicou pela primeira vez na história da física uma conexão quantitativa entre a eletrodinâmica e a óptica.

Durante meus estudos de graduação e pós-graduação em física fui introduzido à assim chamada força de “Lorentz”, atribuída a H. A. Lorentz (1853-1928). Como usualmente mencionado nos livros didáticos, se uma partícula eletrizada com uma carga q está deslocando-se com uma velocidade $\vec{v}$ na presença de um campo elétrico $\vec{E}$ e de um campo magnético $\vec{B}$, então a força de Lorentz $\vec{F}$ atuando nessa carga é dada por

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} . \quad (3.1)$$

Os livros didáticos usualmente não especificam o significado dessa velocidade. Ou seja, $\vec{v}$ é a velocidade da carga q em relação a que? Essa força só pode ser aplicada e utilizada quando sabemos o significado dessa velocidade. Quando descobri que atualmente essa velocidade $\vec{v}$ é interpretada como sendo a velocidade da partícula eletrizada q em relação ao observador, não aceitei essa interpretação. Essa interpretação é contrária à minha intuição física, já que a carga q não está interagindo com o observador. Ela está interagindo com outras cargas elétricas. Logo, na lei de força só deveriam aparecer velocidades *relativas* entre as partículas eletrizadas que estão interagindo.

Vou tornar bem claro meu ponto de vista com uma analogia. Considere um cientista

localizado na Terra e estudando a órbita de um satélite de Júpiter. De acordo com a lei de Newton da gravitação, na análise desse problema o parâmetro importante especificando a órbita do satélite e influenciando nas propriedades de sua órbita é a distância r entre o centro do satélite e o centro de Júpiter. Ou seja, não é relevante nesse problema a distância ℓ entre o satélite e o observador localizado na Terra. No futuro podemos concluir que a força gravitacional depende não apenas da posição relativa entre os corpos que estão interagindo, mas também de suas velocidades. Nesse exemplo específico, acredito que a órbita do satélite de Júpiter, assim como as propriedades dessa órbita, vão então depender de velocidade relativa dr/dt entre o satélite e Júpiter, mas não vão depender da velocidade $d\ell/dt$ entre o satélite e o observador na Terra.

A lei de Weber chamou minha atenção devido às suas propriedades filosóficas que faziam sentido para mim. Em particular, ela sempre atua ao longo da linha reta que conecta as duas partículas que estão interagindo e satisfaz à lei de ação e reação de Newton. Além disso, ela depende apenas da distância r entre as partículas que estão interagindo, assim como da velocidade *relativa* entre elas, dr/dt , assim como da aceleração *relativa* entre elas, d^2r/dt^2 . Essas grandezas r , dr/dt e d^2r/dt^2 são intrínsecas ao sistema. Elas possuem o mesmo valor para todos os observadores e para todos os sistemas de referência, não importando se esses sistemas de referência são inerciais ou não inerciais. Devido a esse fato denominei essas grandezas de *grandezas relacionais*.

Discussões adicionais sobre esses tópicos podem ser encontradas nas Seções 2.9.1 (Definições do conceito de campo), 2.9.2 (Estas definições são contraditórias entre si) e 14.5 (Origens e significados da velocidade $\vec{v}$ que aparece na força magnética $q\vec{v} \times \vec{B}$) do livro *Mecânica Relacional e Implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber Gravitacional*, assim como nas Seções 3.1 (Multiple Definitions of the Field Concept), 3.2 (These Different Field Definitions Contradict One Another), 15.5 (Origins and Meanings of the Velocity $\vec{v}$ which Appears in the Magnetic Force $q\vec{v} \times \vec{B}$), e no Apêndice A (Relational Magnitudes) do livro *Relational Mechanics and Implementation of Mach's Principle with Weber's Gravitational Force*.³⁸ Nessas Seções 14.5 (livro em português) ou 15.5 (livro em inglês), assim como no Capítulo 24 do Volume 5 do livro *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*,³⁹ discuto cinco definições diferentes para o significado da velocidade $\vec{v}$ que aparece na força magnética, a saber, as definições apresentadas por (a) J. C. Maxwell; (b) J. J. Thomson (1856-1940); (c) O. Heaviside (1850-1925); (d) H. A. Lorentz; (e) A. Einstein (1879-1955). Esses autores apresentaram as seguintes definições, respectivamente, para a velocidade $\vec{v}$ da partícula com carga elétrica q que aparece na Equação (3.1): (a) em relação ao campo magnético; (b) em relação ao meio de permeabilidade magnética μ ; (c) em relação ao dielétrico; (d) em relação ao éter; (e) em relação ao observador ou em relação ao sistema de referência. Essas definições da velocidade $\vec{v}$ são diferentes entre si. Portanto, embora a expressão matemática dessa força possa ser expressa pela mesma equação por esses autores, suas forças são diferentes entre si, já que as velocidades são interpretadas e medidas de 5 maneiras diferentes. Logo essas forças não pertencem a uma única teoria. Ou seja, temos aqui 5 teorias independentes entre si. Elas são não apenas diferentes entre si, mas também diferentes da força de Weber.

Meu enfoque inicial foi o de estender a lei de Weber para a gravitação. Isto é, supor que a força de Newton da gravitação deveria ser complementada com um termo dependendo da velocidade relativa entre as massas que estão interagindo e de um outro termo dependendo

³⁸Em português: [Ass13]. Em inglês: [Ass14b].

³⁹Cap. 24: The velocity in Weber's electrodynamics versus the velocities in different field theories, [Ass24a].

da aceleração relativa entre essas massas. Só comecei a trabalhar seriamente com a lei de Weber no final da década de 1980, quando consegui implementar matematicamente o princípio de Mach, devido a Ernst Mach (1838-1916), utilizando a força de Weber aplicada à gravitação.⁴⁰ *Foi então possível mostrar que movimentos cinematicamente equivalentes eram também dinamicamente equivalentes*, um resultado altamente intuitivo que não era implementado nem na mecânica newtoniana, nem com as teorias da relatividade restrita e geral de Einstein. A experiência do balde de Newton pôde ser explicada não apenas com o balde e a água girando juntos em relação a um pano de fundo composto pela matéria distante em repouso, mas também com o balde e a água parados entre si e em relação ao solo, enquanto os corpos distantes do universo estão girando juntos ao redor do eixo do balde. Ambos pontos de vista levam à mesma concavidade da superfície da água no balde, desde que a rotação *relativa* entre o balde e o conjunto de corpos distantes seja o mesmo nos dois casos. A experiência do pêndulo devida a J. B. L. Foucault (1819-1868) também pôde ser explicada não apenas com a rotação diurna da Terra em relação a um pano de fundo no qual a matéria distante do universo está em repouso, mas também com uma Terra parada enquanto os corpos distantes do universo giram juntos uma vez por dia ao redor do eixo da Terra. *Também foi possível deduzir a segunda lei do movimento de Newton a partir da lei de Weber aplicada à gravitação, aplicando o princípio de equilíbrio dinâmico para chegar a esse resultado.* De acordo com esse princípio, a soma de todas as forças atuando em qualquer corpo é sempre nula em todos os sistemas de referência.

Desde meu primeiro artigo de 1989, já publiquei vários livros lidando diretamente com os trabalhos de Coulomb sobre torção, eletricidade e magnetismo; sobre a eletrodinâmica de Ampère e sua força entre elementos de corrente ao longo da linha reta que os une; e sobre a lei de Weber aplicada ao eletromagnetismo e à gravitação:

- Eletrodinâmica de Weber.⁴¹
- Mecânica Relacional.⁴²
- Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos.⁴³
- A Força Elétrica de uma Corrente: Weber e as Cargas Superficiais de Condutores Resistivos com Correntes Constantes.⁴⁴
- Eletrodinâmica de Ampère: Análise do significado e da evolução da força de Ampère, juntamente com a tradução comentada de sua principal obra sobre eletrodinâmica, “Teoria dos fenômenos eletrodinâmicos, deduzida unicamente da experiência”.⁴⁵
- O Modelo Planetário de Weber para o Átomo.⁴⁶
- Tradução Comentada das Principais Obras de Coulomb sobre Eletricidade e Magnetismo.⁴⁷

⁴⁰[Ass89]. Ver também [Ass13] e [Ass14b].

⁴¹Em português: [Ass92a] e [Ass15a]. Em inglês: [Ass94].

⁴²Em português: [Ass98] e [Ass99c]. Em inglês: [Ass99b].

⁴³Em português: [BA15]. Em inglês: [BA01].

⁴⁴Em português: [AH09]. Em inglês: [AH07]. Em alemão: [AH13].

⁴⁵Em português: [AC11]. Em inglês: [AC15].

⁴⁶Em português: [AWW14]. Em inglês: [AWW11]. Em alemão: [AWW18].

⁴⁷Em português: [Ass22]. Em inglês: [AB23].

- Mecânica Relacional e Implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber Gravitacional.⁴⁸

Meus artigos sobre esses assuntos podem ser encontrados em minha homepage.⁴⁹

Sempre tive um grande interesse na história da ciência. Tinha muita curiosidade de ler os trabalhos originais de Weber. Porém, entre o final da década de 1980 e durante toda a década de 1990 ainda não sabia alemão. Por muitos anos tinha de depender das únicas traduções para o inglês a que tinha acesso dos trabalhos de Weber, a saber, apenas seus dois artigos de 1848 e 1871.⁵⁰ Em relação aos trabalhos de Kirchhoff relacionados com a eletrodinâmica de Weber, só tinha acesso a um único trabalho de 1857,⁵¹ sendo que o segundo deles, também de 1857, só tive acesso quando solicitei ao meu colega Peter Graneau (1921-2014) que o traduzisse.⁵² Esses dois trabalhos de Kirchhoff tratam da propagação de ondas elétricas ao longo de condutores utilizando a eletrodinâmica de Weber, chegando na equação do telégrafo e também na equação de onda em alguns casos particulares. Trabalhei com Peter Graneau entre 1991 e 1992 em Boston, EUA, apoiado por uma bolsa de pesquisa concedida pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP.⁵³

Em 2000 recebi o convite de Karl-Heinrich Wiederkehr (1922-2012) e de Karin Reich para trabalhar no Instituto de História das Ciências Naturais da Universidade de Hamburgo, Alemanha.⁵⁴ Wiederkehr tinha escrito a principal biografia de Weber.⁵⁵ Comecei então a estudar alemão por 1 semestre na Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Recebi uma bolsa de pesquisa da Fundação Alexander von Humboldt da Alemanha para desenvolver o projeto “Lei de Weber Aplicada ao Eletromagnetismo e à Gravitação”. Antes de iniciar o projeto, a Fundação Humboldt concedeu-me a oportunidade de participar de um curso intensivo de alemão no Instituto Goethe na cidade de Göttingen, Alemanha. Foi fascinante poder finalmente aprender alemão, especialmente estudando na cidade onde Gauss e Weber passaram a maior parte de suas carreiras acadêmicas. Trabalhei com K. H. Wiederkehr e K. Reich em Hamburgo de agosto de 2001 a novembro de 2002. Durante esse período li a maior parte dos 6 volumes das obras completas de Weber. Uma das joias que descobri nesses trabalhos foi o cálculo pioneiro realizado por Weber da distribuição de cargas espalhadas ao longo da superfície de condutores resistivos conduzindo correntes constantes, um assunto com o qual já vinha trabalhando por vários anos. Em 2007 publiquei em colaboração com J. A. Hernandez o livro *A Força Elétrica de uma Corrente: Weber e as Cargas Superficiais de Condutores Resistivos com Correntes Constantes* discutindo os cálculos originais de Weber, juntamente com diversas experiências e deduções teóricas relativas a esse tema.⁵⁶

Foi durante esse período de 2001-2002 enquanto estava em Hamburgo que tive a ideia desse projeto de publicar as traduções para o inglês e português dos principais trabalhos de Weber sobre eletrodinâmica. Certamente muitos estudantes e cientistas ao redor do mundo não sabem alemão e estão na mesma situação pela qual passei por muitos anos sem ter acesso aos trabalhos de Weber. Um dos motivos para o abandono da eletrodinâmica de

⁴⁸Em português: [Ass13]. Em inglês: [Ass14b].

⁴⁹<https://www.ifi.unicamp.br/~assis>

⁵⁰[Web48] com tradução para o inglês em [Web52c], [Web66d] e [Web19]; assim como [Web71] com tradução para o inglês em [Web72].

⁵¹[Kir57b] com tradução para o inglês em [Kir57a].

⁵²[Kir57c] com tradução para o inglês em [GA94].

⁵³[AG95], [AG96], ver também [Ass14c].

⁵⁴[ARW02], [AW03] e [ARW04].

⁵⁵[Wie60] e [Wie67].

⁵⁶Livro em português: [AH09]. Em inglês: [AH07]. Em alemão: [AH13].

Weber durante todo o século XX foi a falta de conhecimento de seus trabalhos originais. Traduções de suas obras principais poderiam ajudar enormemente a trazer suas ideias uma vez mais à fronteira da ciência moderna.

Nesse período me encontrei pessoalmente com Laurence Hecht na Faculdade de Física da Universidade de Göttingen. Fomos guiados pelo Prof. G. Beuermann às salas onde estavam preservados os equipamentos originais de Gauss e Weber utilizados em suas experiências eletrodinâmicas.⁵⁷ Ajudei L. Hecht a editar a primeira tradução em inglês do trabalho fundamental de Gauss introduzindo o sistema absoluto de unidades no magnetismo.⁵⁸ Também ajudei-o a editar e publicar o artigo de Weber e Kohlrausch de 1856 sobre a quantidade de eletricidade que flui através da seção reta de um circuito com corrente constante.⁵⁹ Esses dois trabalhos haviam sido traduzidos para o inglês por S. P. Johnson.⁶⁰ Também ajudei L. Hecht a editar a primeira e a última grande Memória de Weber sobre *Medições Eletrodinâmicas* (*Elektrodynamische Maassbestimmungen*) durante os anos de 2007-2008.⁶¹ Dessa maneira o projeto com as traduções das obras de Weber havia finalmente começado.

Retornei mais uma vez à Universidade de Hamburgo de fevereiro a maio de 2009, mais uma vez com uma bolsa de pesquisa concedida pela Fundação Humboldt. Dessa vez trabalhei com K. H. Wiederkehr e Gudrun Wolfschmidt no projeto “O Modelo Planetário de Weber para o Átomo” que deu origem a um livro com esse título.⁶²

De abril a junho de 2014 trabalhei com Martin Tajmar na Universidade Tecnológica de Dresden, Alemanha, com uma nova bolsa de pesquisa concedida pela Fundação Humboldt no projeto “Explorando a Massa Inercial Efetiva das Partículas”.⁶³

De setembro a dezembro de 2023 trabalhei com Kai Cieliebak e Urs Frauenfelder na Universidade de Augsburg, novamente com uma bolsa de pesquisa concedida pela Fundação Humboldt desenvolvendo o projeto “Principais Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas em Inglês”. Esse projeto deu origem ao quinto volume da tradução em inglês das obras de Weber.⁶⁴

Sempre fui muito bem recebido na Alemanha, tive todo o apoio científico necessário dessas Universidades, fiz muitos amigos e importantes contatos pessoais. Durante essas quatro estadias na Alemanha pude ler e coletar uma grande quantidade de material bibliográfico que tem sido essencial para o desenvolvimento desse projeto.

Sempre estive envolvido em muitas atividades profissionais simultaneamente. Só pude dedicar a maior parte de meu tempo à tradução comentada das principais obras de Weber a partir de 2018. Felizmente encontrei muitos colegas competentes que viram a importância dessas traduções e me auxiliaram a fazer com que esse projeto fosse concluído no caso das versões em inglês de seus trabalhos mais relevantes.⁶⁵

A eletrodinâmica de Weber essencialmente desapareceu dos livros didáticos a da consci-

⁵⁷Ver https://sammlungen.uni-goettingen.de/sammlung/slg_1020/ e <https://www.uni-goettingen.de/en/47114.html>. Ver ainda [Beu d] e [Beu97].

⁵⁸[Gau94] com tradução para o inglês em [Gau03] e [Gau21e], juntamente com a tradução para o português em [Ass03b].

⁵⁹[WK56] com tradução para o inglês em [WK03] e [WK21], juntamente com a tradução em português em [WK08]. Ver ainda [Ass03a].

⁶⁰[Joh97].

⁶¹[Web46] com tradução para o inglês em [Web07] e [Web21e]; e [Web94b] com tradução para o inglês em [Web08] e [Web21c].

⁶²Em inglês: [AWW11]. Em português: [AWW14]. Em alemão: [AWW18].

⁶³[TA15b] com tradução para o alemão em [TA15c], [TA15a], [TA16], [AT17] e [AT19].

⁶⁴[Ass24b].

⁶⁵[Ass21f], [Ass21g], [Ass21h], [Ass21i] e [Ass24b].

ência da comunidade científica durante todo o século XX. Tive a felicidade de encontrar essa teoria no livro de Whittaker. Tomei uma decisão correta, assumindo todas as consequências dessa escolha, quando decidi trabalhar no final da década de 1980 com a lei de Weber aplicada ao eletromagnetismo e à gravitação. Essa escolha consciente foi um momento decisivo em minha carreira científica. Ela fez toda a diferença em minha vida profissional. Desde então tenho lutado todos os dias da minha vida contra aquilo que se aprende na física estabelecida no século XX, baseada nos campos elétricos e magnéticos, juntamente com a chamada força de “Lorentz”. No lugar dessas teorias de campo, tenho batalhado incansavelmente a favor das minhas intuições físicas que são contempladas pela lei de Weber. Tenho tido uma satisfação enorme com essa decisão. Me sinto completamente realizado cientificamente. Já produzi muito mais do que aquilo que sempre sonhei como estudante.

Venho aqui dividir com o leitor a tradução comentada para o português dos principais trabalhos de Weber. Com isso você pode aprender sobre a eletrodinâmica de Weber com as palavras do próprio Weber. Espero que ao perceber a grande importância dessas obras, você comece a seguir seus passos escrevendo artigos de pesquisa e livros didáticos, passe a ensinar a teoria de Weber para seus estudantes de graduação e pós-graduação, retome e amplie os trabalhos experimentais de Weber, e que também desenvolva a teoria de Weber aplicada ao eletromagnetismo e à gravitação.

Parte II

Estudos Biográficos sobre Weber

Capítulo 4

Introdução ao Discurso Memorial de Riecke de 1891

A. K. T. Assis⁶⁶

Eduard Riecke (1845-1915) foi um físico experimental alemão que estudou sob a orientação de Weber na Universidade de Göttingen, onde obteve o doutorado em 1871. Em 1881 ele sucedeu a Weber como professor titular da Universidade de Göttingen, assumindo o Laboratório e o Instituto de Weber.

Weber faleceu em 23 de junho de 1891. O discurso memorial de Riecke foi proferido na reunião da Sociedade de Ciências de Göttingen em 5 de dezembro de 1891, sendo publicado em 1892.⁶⁷

Não concordo com muitos pontos de vista apresentados por Riecke relacionados com os seguintes conflitos de paradigma: (a) ação à distância contra a ação mediada por um meio, (b) constituição atômica da matéria contra uma distribuição contínua de matéria, e (c) a eletrodinâmica de Weber contra as teorias de campo de Faraday e Maxwell. Apesar dessa discordância, decidi incluir esse discurso memorial nesse livro. Um motivo para isso é que esse trabalho é um dos primeiros estudos biográficos sobre Weber. Um outro motivo é para mostrar quão rapidamente a eletrodinâmica de Weber foi substituída pelas teorias de campo de Faraday e Maxwell não apenas na Alemanha como um todo, mas especificamente na Universidade de Göttingen, onde Weber trabalhou durante a maior parte de sua vida.

⁶⁶Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

⁶⁷[Rie92].

Capítulo 5

[Riecke, 1891] Discurso Memorial

Eduard Riecke^{68,69}

Wilhelm Weber (nasceu em 24 de outubro de 1804, faleceu em 23 de junho de 1891).

Discurso proferido na reunião pública da *K. Gesellschaft der Wissenschaften* (Sociedade Real de Ciências [de Göttingen]) em 5 de dezembro de 1891.

⁶⁸[Rie92] com tradução para o inglês em [Rie24].

⁶⁹Todas as Notas são de minha autoria.

Ao nos reunirmos hoje para homenagear a memória de Wilhelm Weber, que pertenceu à nossa Sociedade por seis décadas, sentimos que com ele passou um tempo que provavelmente não aparecerá uma segunda vez para nossa Sociedade e nossa Universidade. Pois quando ouvimos o nome Weber, também pensamos no homem que atraiu o camarada mais jovem para Göttingen, em Gauss,⁷⁰ um verdadeiro rei que construiu os campos da matemática, astronomia e física de tal forma que até hoje os carroceiros não conseguiram limpar as pedras que ele quebrou. Pensamos em Wöhler,⁷¹ que sintetizou pela primeira vez uma substância animal a partir de materiais inorgânicos e preparou o caminho para o desenvolvimento da química fisiológica. A luz que emana desses nomes continuará a brilhar em nossa Universidade em um futuro distante; eles colocam Göttingen na vanguarda dos lugares de onde partiu o desenvolvimento das ciências naturais em nosso século. A posição privilegiada de que desfrutávamos foi vítima de objetivos mais elevados, mas o pensamento do passado permanecerá vivo e o contato com o terreno em que nos encontramos nos impulsionará a trabalhar pelo avanço da ciência na medida do poder que nos foi concedido. É nesse espírito que eu gostaria de falar sobre Wilhelm Weber, um homem a quem todo o mundo científico prestou um tributo de admiração e todos aqueles que se aproximaram dele demonstraram sua mais profunda afeição.

Wilhelm Weber nasceu em Wittenberg em 24 de outubro de 1804, filho de Michael Weber, professor de teologia da cidade.⁷² Ele era o quinto de sete irmãos em crescimento. Sua infância foi uma época de profunda humilhação para nossa pátria. Ele viu sua cidade natal nas mãos dos franceses e vivenciou seu cerco pelo corpo do exército prussiano do General von Bülow.⁷³ As balas lançadas contra a cidade provocaram um incêndio que também destruiu a casa de seu pai; a família Weber fugiu para o vilarejo vizinho de Schmiedeberg e lá o trovão dos canhões da batalha de Leipzig chegou aos ouvidos do menino. Em 1815, a Universidade de Wittenberg uniu-se a Halle e a família Weber mudou-se para essa cidade. Wilhelm Weber frequentou a escola do orfanato de lá e, mais tarde, a Universidade. Nada se sabe sobre a influência de seus professores em seu desenvolvimento; ele mesmo menciona que apenas algumas palestras foram realizadas em Halle que teriam sido importantes para ele. O caso de três irmãos em uma família teológica que se dedicam ao estudo das ciências naturais é provavelmente raro, e surge a questão de como as inclinações científicas surgiram na família, na qual o pai era essencialmente dedicado a interesses teológicos e filológicos. Em primeiro lugar, deve ser mencionado aqui o fato de que a família de Weber vivia em Wittenberg na casa de um professor de ciências naturais, Langguth,⁷⁴ que era amigo deles e cujas coleções de ciências naturais eram um tanto famosas na época. Além disso, Chladni, o descobridor das figuras sonoras e o primeiro pesquisador de massas meteóricas que caem na Terra, era um amigo de infância do proprietário e morava na mesma casa.⁷⁵ Em Wittenberg, ele pertencia ao círculo muito ativo que sua mãe animada e talentosa, em particular, sabia como vincular à casa de Weber. Podemos supor que Chladni, que também era

⁷⁰Carl Friedrich Gauss (1777-1855) foi um matemático, astrônomo e físico alemão.

⁷¹Friedrich Wöhler (1800-1882) foi um químico alemão que ficou famoso pela síntese do composto orgânico ureia. Ele publicou alguns trabalhos com Weber: [WW41c] com tradução para o inglês em [WW21] e tradução para o português no Capítulo 25, [WW41a] e [WW41b].

⁷²Michael Weber (1754-1833) foi um teólogo alemão.

⁷³Friedrich Wilhelm Freiherr von Bülow (1755-1816) foi um general prussiano das guerras napoleônicas.

⁷⁴Christian August Langguth (1754-1814) foi um médico e físico alemão.

⁷⁵Ernst Chladni (1756-1827) foi um físico e músico alemão. Ele é especialmente conhecido pelas assim chamadas figuras ou padrões de Chladni, isto é, os modos de vibração sobre uma superfície rígida e elástica. Elas são visualizadas utilizando um pó sobre a superfície em vibração.

um hóspede bem-vindo na casa de Weber em Halle, foi quem primeiro despertou o desejo de fazer experimentos físicos em seu irmão mais velho, Ernst Heinrich.⁷⁶ No entanto, esse último reconheceu logo de início o talento incomum de seu irmão Wilhelm, que era dez anos mais novo, e, como o próprio Weber relata, foi praticamente seu único professor no campo das ciências naturais até obter seu doutorado. Por esse motivo, Wilhelm Weber não apenas sentiu o profundo amor de seu irmão por ele durante toda a sua vida, mas também uma reverência por seu professor e amigo quase paternal. Durante os últimos anos de estudo de Wilhelm, os dois irmãos se dedicaram a investigações experimentais, cujos resultados foram publicados na obra “Die Wellenlehre auf Experimente gegründet” (A Teoria Ondulatória Baseada em Experimentos).⁷⁷ Em 1826, Weber obteve seu doutorado com a dissertação “Ueber die Wirksamkeit der Zungen in den Orgelpfeifen” (Sobre a Eficácia das Palhetas no Órgão de Tubos) e, no ano seguinte, habilitou-se em Halle com a tese “Ueber die Gesetze der Schwingungen zweier Körper, welche so mit einander verbunden sind, dass sie nur gleichzeitig und gleichmässig schwingen können” (Sobre as Leis de Vibração de Dois Corpos que estão Conectados Um ao Outro de tal Forma que Só Podem Vibrar Simultaneamente e em Uníssono). Ele foi premiado com uma cátedra extraordinária em Halle em 1828. No outono daquele ano, partiu a pé de Halle para participar do Encontro de Cientistas Naturais em Berlim, pois o primeiro salário que o jovem professor havia recebido era apenas o suficiente para cobrir a contribuição para o fundo da viúva e, além disso, a família de Weber estava acostumada a ser restrita, pois sua fortuna havia sido perdida nas tempestades da guerra. A estadia em Berlim foi decisiva para Weber, pois foi lá que ele atraiu a atenção de Gauss com uma palestra bem organizada e bem conduzida sobre a compensação do órgão de tubos e, quando a cátedra de física em Göttingen ficou vaga devido à morte de Tobias Mayer em 1830,⁷⁸ Gauss o propôs, juntamente com Bohnenberger e Gerling,⁷⁹ para ocupar a cátedra, enfatizando especialmente a maior genialidade no trabalho esperado para a *K. Gesellschaft der Wissenschaften* como um fator importante a favor de Weber. Em 1837, Wilhelm Weber foi destituído de seu emprego por ser um dos Sete de Göttingen;⁸⁰ Gauss e Alexander von Humboldt tentaram promover sua reabilitação em Göttingen,⁸¹ mas as medidas tomadas com essa intenção fracassaram devido à declaração de Weber de que não queria separar seu destino daquele de seus companheiros nessa questão. No entanto, Weber não foi exilado e o salário que recebia da Associação fundada para apoiar os sete permitiu que ele, que sempre se contentava com pouco, permanecesse em Göttingen como cidadão privado por enquanto. No entanto, mais tarde ele reembolsou as quantias transferidas para ele e as entregou à Sociedade Saxônica de Ciências como uma doação para fins científicos. O que o prendia a Göttingen era o desejo de permanecer próximo a Gauss, que o persuadiu a recusar uma oferta de um cargo de professor na Escola Politécnica de Dresden em 1841. No ano seguinte, no entanto, ele foi chamado a Leipzig para assumir o lugar de Fechner,⁸² que havia renunciado à cátedra de física com grande sofrimento, e dessa vez ele seguiu o chamado porque não queria mais

⁷⁶Ernst Heinrich Weber (1795-1878) foi um dos fundadores da fisiologia experimental.

⁷⁷[WW25].

⁷⁸Johann Tobias Mayer (1752-1830) foi um matemático e físico alemão. Em 1799 tornou-se professor na Universidade de Göttingen.

⁷⁹Johann Gottlieb Friedrich von Bohnenberger (1765-1831) foi um astrônomo, matemático e físico alemão. Christian Ludwig Gerling (1788-1864) foi um matemático alemão que estudou com Gauss.

⁸⁰Ver https://en.wikipedia.org/wiki/G%C3%B6ttingen_Seven.

⁸¹Alexander von Humboldt (1769-1859) foi um cientista natural e explorador alemão, gênio universal e cosmopolita, sábio e patrono da ciência.

⁸²Gustav Theodor Fechner (1801-1887) foi um físico, filósofo e psicólogo experimental alemão. Ver [Fec60].

ser o único a aceitar o pagamento contínuo de seu salário anterior pela Associação de Leipzig. Ele também reencontrou seus irmãos Ernst Heinrich e Eduard em Leipzig,⁸³ que eram tão próximos a ele, e ao conviver com eles encontrou um substituto para suas relações com Gauss. Mas quando a reviravolta dos acontecimentos fez com que os professores expulsos fossem chamados de volta a Göttingen, ele não hesitou em romper os laços que o prendiam a Leipzig e retornar à sua antiga cátedra.

Vamos agora tentar obter uma visão geral das realizações científicas de Wilhelm Weber. Começaremos com a já mencionada investigação sobre o movimento ondulatório; a razão para isso foi acidental; um dia, um dos dois irmãos despejou mercúrio de uma garrafa em outra através de um funil de papel para purificá-lo; ele observou figuras altamente regulares, mas intrincadas, na superfície do mercúrio nessa segunda garrafa, que foram produzidas pelo escoamento do mercúrio, e as reconheceu como um efeito das ondas que sempre se cruzavam regularmente nos mesmos pontos. Na época em que os irmãos Weber começaram suas investigações, a teoria das ondas havia ganhado grande importância com a constatação de que os fenômenos da luz se baseiam em movimentos de ondas em uma substância elástica, o éter, que permeia todo o espaço. Uma teoria das ondas que viajam nesse meio foi elaborada nos mínimos detalhes e estava em perfeita concordância com os fenômenos da óptica. Em contraste com isso, pouco se sabia sobre as ondas que produzimos na superfície de um lago ao jogar uma pedra nele, e o conhecimento das ondas que se propagam no ar, nas quais se baseiam as sensações de som e tons, também era incompleto em muitos aspectos. O objetivo do trabalho realizado pelos irmãos Weber era preencher essas lacunas e dar à pesquisa experimental uma certa vantagem sobre a teoria. O “Wellenlehre auf Experimente gegründet” (A Teoria Ondulatória Baseada em Experimentos)⁸⁴ permanecerá para sempre como uma das obras fundamentais da pesquisa física, caracterizada pela abundância das observações mais precisas e peculiares, pela simplicidade clássica dos recursos experimentais, pelos métodos de medição significativos e exatos, bem como pela apresentação encantadora, por meio da qual o leitor é levado a participar ativamente do trabalho dos dois pesquisadores. Vemos os irmãos em sua calha de ondas,⁸⁵ um deles deixa a coluna de líquido sugada por um tubo de vidro cair de volta na calha e, assim, cria a onda, enquanto o outro usa o relógio para determinar a velocidade de seu progresso; como eles traçam a imagem da onda em uma ardósia mergulhada rapidamente na calha e seguem com o microscópio os caminhos pelos quais as partículas suspensas na água se movem para cima e para baixo, para frente e para trás. Com grande cuidado, os autores também coletaram os fatos relacionados ao amortecimento das ondas por uma fina camada de óleo espalhada na superfície da água e os ampliaram com suas próprias observações; no interesse da navegação, eles pedem uma repetição em maior escala dos experimentos que Franklin realizou sem sucesso para moderar as ondas do mar;⁸⁶ por meio de vários experimentos próprios, eles ampliaram consideravelmente nosso conhecimento sobre o espalhamento de um líquido na superfície de outro.

As percepções de Weber enquanto trabalhava na teoria das ondas o levaram a um problema ao qual ele dedicou sua dissertação, sua tese de habilitação e uma série de ensaios no [periódico] *Annalen der Physik*. O som produzido por um corpo vibratório, como uma corda de violino ou um órgão de tubos, é, sob certas circunstâncias, um reagente extremamente fino

⁸³Eduard Friedrich Weber (1806-1871) foi um anatomista e fisiologista alemão.

⁸⁴[WW25].

⁸⁵Em alemão: *Wellenrinne*. Essa expressão pode ser traduzida como calha, cuba, tanque ou canal de ondas.

⁸⁶Benjamin Franklin (1706-1790).

de suas propriedades físicas. As cordas são desafinadas pelo aquecimento ou resfriamento, por mudanças na umidade e, a partir das mudanças no tom, pode-se deduzir as mudanças que ocorreram nessas condições externas. No entanto, sempre que quiser usar o tom para tirar uma conclusão sobre a natureza de um corpo, você deve ser capaz de comparar o som que ele produz com um tom padrão absolutamente invariável. No entanto, não é nada fácil produzir um corpo cujo tom mantenha sempre a mesma altura imutável. Em um exame mais detalhado, o tom de um diapasão é ligeiramente mais baixo quando o diapasão é batido com força e ligeiramente mais alto quando é batido levemente. Por outro lado, o tom de um órgão de tubos é mais alto quando é soprado com força e mais baixo quando é soprado suavemente. Weber usou essa relação peculiar para construir um instrumento que produz o mesmo tom quando é tocado com força e com pouca força. Isso consiste na combinação de uma placa de metal ou palheta vibratória com um órgão de tubos; nem a palheta nem o órgão de tubos podem executar a vibração que cada um executaria naturalmente por conta própria; um dos dois corpos que vibram entre si deve adaptar suas vibrações às do outro corpo, de modo que ambos vibrem no mesmo ritmo. Weber agora configura as coisas de modo que o tom do tubo seja elevado pela placa de ressonância tanto quanto o tom da placa é reduzido pela coluna de ar de ressonância. Essa proporção permanece a mesma, mesmo que a palheta e o tubo sejam colocados em vibrações de maior amplitude ao se soprar com mais força; o tom produzido por esse “tubo compensado” mantém sua altura independentemente da força da excitação.

Se a *Wellenlehre* (Teoria Ondulatória) é um monumento à íntima comunidade intelectual que unia Wilhelm Weber a seu irmão mais velho, Ernst Heinrich, a “*Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge*” (Mecânica do Aparelho de Caminhada Humana),⁸⁷ na qual os métodos de pesquisa física foram aplicados a um problema fisiológico de maneira exemplar, surgiu de um relacionamento semelhante com o irmão mais novo, Eduard. Os autores descrevem no Prefácio o apelo do trabalho conjunto com as seguintes palavras características:

Embora estejamos convencidos de que a escolha de nosso assunto não precisa de defesa, não queremos ocultar o motivo real que nos levou a perseguir persistentemente esse tema por um longo tempo com forças unidas. Foi o prazer que encontramos em uma ocupação comum, uma ocupação para a qual cada um de nós trouxe seus próprios poderes e recursos especiais, e que foram ainda mais apreciados e valorizados pelo outro porque ele não os tinha. O homem nunca é mais capaz e perseverante na pesquisa científica do que nessa participação e estímulo mútuos, que ocorrem não apenas após a conclusão do trabalho, mas durante todo o seu curso.

A *Mechanik der Gehwerkzeuge* (Mecânica do Aparelho de Caminhada [Humana]) já pertencia ao primeiro período de Weber em Göttingen; no entanto, sua atividade científica nesse período foi essencialmente determinada por seu relacionamento próximo com Gauss. Afinal, foram sobretudo os benefícios que ele esperava obter que tornaram a cátedra de Göttingen tão desejável para ele. Gauss havia desenvolvido uma teoria geral do geomagnetismo, que preparou o terreno para todos os trabalhos destinados a investigar essa força enigmática. Para prosseguir com o caminho recém-aberto, ele ganhou um companheiro em Weber, que foi capaz de aceitar a sugestão dada e desenvolvê-la ainda mais de maneira independente e significativa. Weber fez uma contribuição extraordinária para a criação da “*magnetischen Vereins*” (Associação Magnética), que reuniu um grande número de observadores espalhados

⁸⁷[WW94] com tradução para o inglês em [WW92].

por uma ampla área para trabalharem juntos de acordo com um plano comum, para a construção de instrumentos de medição de forças magnéticas, para o desenvolvimento de novos métodos de observação, para a edição da revista publicada pela Sociedade⁸⁸ e ao resumir os resultados das observações da Sociedade. Também devemos agradecer a ele por um atlas de geomagnetismo, que ilustra as conclusões decorrentes da teoria geral de Gauss por meio de um grande número de mapas magnéticos.⁸⁹

Devemos às investigações conjuntas de Gauss e Weber um dispositivo que estava destinado a marcar época na história da telegrafia. Ele consistia em um circuito galvânico entre o Sternwarte e o Gabinete Físico,⁹⁰ com fios esticados no ar sobre as casas até o Johannisthurm (Torre de São João) e de volta até o início; o comprimento total do fio era de 8.000'; em ambas as extremidades, ele era conectado a fios multiplicadores, que eram guiados em torno de hastes magnéticas de uma libra suspensas de acordo com os arranjos de Gauss.⁹¹ Esse magnífico dispositivo, cuja realização prática é mérito de Weber, foi usado para investigações galvânicas, mas também provou diretamente a viabilidade de um telégrafo eletromagnético e, de fato, proporcionou uma comunicação telegráfica conveniente durante anos, o que foi de grande benefício para as medições correspondentes no Observatório Astronômico e no Instituto de Física. O dispositivo criado por Gauss e Weber resolveu o problema da telegrafia elétrica pela primeira vez de uma forma segura que atendia às necessidades do futuro. Os dois pesquisadores reconheceram que sua invenção era a semente de um desenvolvimento que, de acordo com Gauss, quase surpreende a imaginação, mas contentaram-se por terem satisfeito seus propósitos especiais, mesmo tendo em vista a escassa dotação de seus Institutos; eles deixaram a exploração posterior da ideia para fins de tráfego mundial para outros e, assim, Steinheil recebeu o impulso de Göttingen para o trabalho por meio do qual ele tanto promoveu o desenvolvimento da telegrafia elétrica.⁹² É natural que a estima popular e o som brilhante que o nome de Weber desfrutava em amplos círculos estejam relacionados à invenção do telégrafo; afinal de contas, Weber foi o único sobrevivente daquela época memorável! Por mais que se deva valorizar o mérito da primeira realização bem-sucedida de uma ideia que vários físicos notáveis tentaram em vão realizar, a invenção do telégrafo não é o trabalho mais característico de Weber; pelo contrário, as notícias preservadas daquela época sugerem que as ideias originais em movimento devem ser buscadas no lado de Gauss, enquanto o mérito da realização prática cabe principalmente a Weber.

Ao estabelecer o telégrafo, Weber e Gauss fizeram uma aplicação engenhosa das leis da indução magnética, que Faraday havia descoberto pouco antes.⁹³ Assim, a atenção de Weber

⁸⁸[GW37], [GW38], [GW39b], [GW40b], [GW41] e [GW43].

⁸⁹[GW40a].

⁹⁰O *Sternwarte* era o Observatório Astronômico onde Gauss morava e trabalhava, enquanto Weber trabalhava no Instituto de Física da Universidade de Göttingen.

⁹¹Um multiplicador é um galvanômetro usado para medir a intensidade da corrente elétrica passando por ele. Dependendo do contexto essa palavra também pode se referir à bobina de um galvanômetro ou a uma bobina genérica com seus enrolamentos ou espiras. Algumas vezes também o multiplicador ou bobina pode ser usado como um indutor de correntes elétricas em outros circuitos ou para produzir torques eletrodinâmicos sobre outros circuitos. O instrumento recebeu esse nome “multiplicador” do químico, físico e matemático alemão Johann Schweigger (1779-1857) que construiu o primeiro galvanômetro em 1820. Ele amplificou o efeito que Oersted observou pela primeira vez em 1820 ao formar uma bobina com várias espiras enroladas ao redor de uma estrutura retangular, no centro da qual estava suspensa uma agulha imantada, [Sch20] e [Sch21d]; [Sch21c] com tradução para o francês em [Sch21a]; e [Sch21b]. Ver também [Chi64] e [LSN21].

⁹²Carl August von Steinheil (1801-1870) foi um físico, inventor, engenheiro e astrônomo alemão. Ver [Pri83].

⁹³Michael Faraday (1791-1867). Ver [Far32a] com tradução para o português em [Far11] e tradução para

foi atraída para as descobertas do grande cientista britânico e encontramos evidências de sua preocupação contínua com os novos fenômenos em vários tratados que ele apresentou nos “Resultaten aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins” (Resultados das Observações da Associação Magnética).⁹⁴ Entre os assuntos tratados nesses documentos, deve ser enfatizado o uso de correntes induzidas pelo geomagnetismo para medir a inclinação [magnética terrestre]. O indutor terrestre construído para esse fim tornou-se mais tarde de fundamental importância para medições absolutas de resistência. Weber também aplicou o princípio de determinar elementos do magnetismo da Terra por meio de observações galvânicas à medição da intensidade horizontal [do magnetismo terrestre]. Do trabalho magnético, que havia sido o principal tema de sua atividade desde sua nomeação em Göttingen, Weber foi imediatamente levado ao campo em que seu gênio se desenvolveria da forma mais livre e individual, a eletrodinâmica. Sua mudança para Leipzig marcou o início da série de tratados sobre “elektrodynamische Maassbestimmungen” (Medições Eletrodinâmicas), que formam a principal obra de sua vida e um monumento clássico à sua mente para todos os tempos.⁹⁵ Na medida em que esses trabalhos desenvolvem uma teoria que abrange todo o campo de fenômenos elétricos conhecidos na época, eles representam o ápice de um grande desenvolvimento científico, cujos primórdios podem ser rastreados até Newton.⁹⁶ Se quisermos entender o significado da teoria eletrodinâmica de Weber nesse contexto, devemos primeiro relembrar as características essenciais do desenvolvimento anterior.

Kepler já havia concebido a ideia de que os planetas eram mantidos em suas órbitas por alguma força exercida pelo Sol; ele comparou essa força à atração de um ímã sobre o ferro e supôs que ela diminuía com a distância, da mesma forma que os efeitos da luz.⁹⁷ Entretanto, ainda havia um longo caminho a percorrer desde essas suposições vagas até a teoria da gravitação de Newton. Primeiro, era preciso criar uma teoria do movimento e, em seguida, um método matemático para determinar o movimento resultante das pequenas mudanças que uma determinada velocidade sofre em um grande número de partículas temporais sucessivas.⁹⁸ A criação da dinâmica é obra de Galileu,⁹⁹ enquanto devemos o método das fluxões ou cálculo diferencial a Newton e Leibniz.¹⁰⁰ Mas então Newton realizou a grande façanha. Em uma estrita dedução matemática, ele desenvolveu as leis de Kepler a partir da suposição de que o Sol exerce uma força sobre os planetas que é inversamente proporcional ao quadrado da distância; ele mostrou que essa força é idêntica à gravidade que causa a queda de uma pedra na superfície da Terra. Assim, Newton se tornou o fundador da mecânica celeste, que até hoje se apresenta como o modelo incomparável de uma teoria físico-matemática; ela não apenas reproduz as grandes características dos fenômenos, mas também rastreia os fatos até os mínimos detalhes, e cada avanço na observação sempre foi apenas um novo teste da perfeição da teoria. A base da doutrina de Newton, no entanto, foi formada por uma suposição altamente desconcertante para seus contemporâneos, que estavam presos à visão

o alemão em [Far32b] e [Far89].

⁹⁴Ver a Nota de rodapé 88.

⁹⁵Ver a Seção 2.2.

⁹⁶Isaac Newton (1642-1727). Ver [New34] e [New99]. Tradução para o português em [New90], [New08] e [New10].

⁹⁷Johannes Kepler (1571-1630) foi um astrônomo, matemático e filósofo natural alemão. Ver o livro de Koestler para uma bela descrição de sua vida e obra, [Koe89].

⁹⁸Em alemão: *einanderfolgenden Zeittheilchen*. Isto é, era necessário determinar as mudanças na velocidade ao longo de uma série de pequenos intervalos de tempo.

⁹⁹Galileu Galilei (1564-1642) foi um astrônomo, físico e engenheiro italiano. Ver [Gal85].

¹⁰⁰Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) foi um matemático, filósofo, cientista e diplomata alemão.

cartesiana,¹⁰¹ que o próprio Newton parecia considerar pouco mais do que uma ficção matemática, mas que logo se tornou um dogma incontestável para seus discípulos: a suposição de uma ação direta à distância entre os corpos do universo, bem como entre a Terra e os corpos sobre ela ou, finalmente, entre esses últimos.

A questão da natureza das ações que observamos no mundo físico, seja a ação direta à distância ou a ação mediada por pressão e impacto, está agora intimamente relacionada a um contraste de pontos de vista sobre a natureza da matéria que traçamos ao longo da história da física até Demócrito e Aristóteles.¹⁰² Um dos pontos de vista supõe que a matéria preenche o espaço continuamente; o outro ponto de vista compõe a matéria a partir de pequenas partículas, as moléculas e os átomos, e imagina que elas estejam separadas entre si por espaços vazios. Podemos ver o quanto a ideia de uma ação imediata à distância teve que ajudar o atomismo e, portanto, não ficaremos surpresos ao perceber em particular que os físicos franceses, no final do século passado e no início deste século, combinaram a visão atomística com a ideia de ação à distância para entrar no campo dos fenômenos moleculares. Laplace¹⁰³ já havia observado que um corpo ponderável¹⁰⁴ poderia ser comparado a uma mancha de nebulosidade que, no céu noturno, oferece a visão de um disco que brilha como uma estrela. Assim como essa [nebulosa] consiste em um número incontável de estrelas, entre as quais se estendem vastos espaços vazios de estrelas, os corpos ponderáveis podem ser considerados como compostos de moléculas, separadas umas das outras por interstícios, em comparação com os quais as dimensões das próprias moléculas desaparecem; e assim como as estrelas de uma mancha nebular agem atrativamente umas sobre as outras pela força newtoniana, o mesmo aconteceria com as moléculas de um corpo. Mas essa suposição não é adequada para explicar os fenômenos da elasticidade ou capilaridade; em vez disso, nos átomos de um corpo, outras forças devem ser adicionadas à atração de Newton, que têm a propriedade de possuir uma força perceptível apenas em distâncias muito pequenas e desaparecer em distâncias maiores. A introdução dessas chamadas forças moleculares levou, de fato, a uma teoria que estava de acordo com os fenômenos da elasticidade e capilaridade, mas que celebrou seus maiores triunfos na teoria ondulatória da luz. A visão de que o éter tinha as propriedades de um corpo elástico sólido em relação às oscilações da luz já havia sido desenvolvida por Fresnel para estabelecer a possibilidade de oscilações transversais.¹⁰⁵ Com esses sucessos, a teoria molecular na física teve de se tornar ainda mais dominante, pois, por outro lado, a química também havia chegado ao pressuposto de que os corpos eram compostos de átomos ou complexos atômicos, as moléculas.

Entretanto, uma questão de fundamental importância foi deixada em aberto pela teoria molecular ou, pelo menos, foi abordada apenas superficialmente: a questão da estabilidade dos presumidos sistemas moleculares. No início, comparamos esse sistema com um aglome-

¹⁰¹René Descartes (1596-1650) foi um filósofo, cientista e matemático francês. Ver [Des47], [Des52], [Des54], [Des65], [Des83], [Des97], [Des02], [Des09] e [Des10].

¹⁰²Demócrito (aproximadamente 460-370 a. C.) foi um filósofo grego. Aristóteles (384-322 a. C.) foi um filósofo e polímata grego.

¹⁰³Pierre-Simon Laplace (1749-1827) foi um cientista e polímata francês.

¹⁰⁴Em alemão: *der ponderablen Materie*. Ou seja, matéria com peso ou que pode ser pesada.

¹⁰⁵Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) foi um engenheiro e físico francês. Inicialmente Fresnel acreditava que as ondas luminosas eram decorrentes de vibrações longitudinais no éter, em analogia às ondas sonoras no ar. Foi Ampère quem lhe sugeriu vibrações transversais em vez de longitudinais, para com isso poder explicar satisfatoriamente diversos fenômenos, como a polarização da luz. O próprio Fresnel reconheceu que essa ideia fundamental de vibrações transversais perpendiculares à direção de propagação da onda luminosa foi devida a Ampère. Ver a Seção 5.2 (As Contribuições de Fresnel) de [AC11] e [AC15].

rado de estrelas; mas a semelhança não é muito abrangente, o que fica evidente se considerarmos nosso sistema planetário em vez de um aglomerado de estrelas. Como resultado das atrações que os planetas exercem mutuamente uns sobre os outros, suas órbitas se desviam continuamente da elipse de Kepler; mas as relações do sistema são tais que as perturbações nunca se somam a grandes quantidades; as órbitas realmente percorridas pelos planetas realizam, por assim dizer, apenas pequenas oscilações em torno de uma posição média invariável. O sistema planetário é estável no que diz respeito às órbitas nas quais os corpos individuais se movem, mas a configuração do sistema está sujeita às maiores mudanças como resultado desses mesmos movimentos. Da mesma forma, a estabilidade de um aglomerado de estrelas só pode ser uma estabilidade de movimento. Em contraste, a teoria molecular pressupõe que as moléculas individuais de um corpo sólido estão em um equilíbrio estável em determinados pontos sob a influência de forças exercidas reciprocamente e que a configuração do sistema é completamente determinada e imutável, desde que nenhuma força externa atue sobre o corpo. Embora tenha sido observado que essa suposição só parece possível se as forças que atuam entre as moléculas contiverem componentes atrativos e repulsivos, não foi tentado um desenvolvimento real das condições de estabilidade e uma formulação mais precisa da lei da força. Por enquanto, portanto, essa suposição é justificada apenas pelo sucesso com que foi introduzida.

Podemos ver como foi difícil para a ideia de uma ação direta à distância ganhar importância geral, apesar do grande sucesso da teoria da atração de Newton, pelo fato de que foi somente por volta de 1760 que as forças que agiam à distância foram introduzidas na teoria da eletricidade friccional e do magnetismo. Mas, ao mesmo tempo, Euler,¹⁰⁶ um oponente da ação à distância, explicou as atrações e repulsões elétricas alterando as condições de pressão do ar e desenvolveu uma teoria para as ações magnéticas que não está muito distante das visões desenvolvidas posteriormente por Faraday. Somente as medições de Coulomb decidiram a alternativa em favor da ação à distância por enquanto.¹⁰⁷ Para explicar os fenômenos elétricos, ele supôs a existência de dois fluidos, correspondentes às eletricidades do vidro e da resina.¹⁰⁸ Partículas do mesmo fluido se repelem, partículas de fluidos diferentes se atraem com uma força que, como a gravitação, é inversamente proporcional ao quadrado da distância. Uma suposição correspondente foi então transferida para a teoria do magnetismo e foi confirmada pelas medições de Gauss.

No início de nosso século, o campo dos fenômenos magnéticos e elétricos sofreu uma enorme expansão com a descoberta do eletromagnetismo por Oerstedt,¹⁰⁹ a interação entre as correntes galvânicas por Ampère,¹¹⁰ e a indução por Faraday. Todos esses fenômenos são

¹⁰⁶Leonhard Euler (1707-1783) foi um matemático, astrônomo e físico suíço.

¹⁰⁷Charles Augustin de Coulomb (1736-1806). As principais obras de Coulomb sobre torção, eletricidade e magnetismo já se encontram traduzidas e comentadas em português e inglês: [Ass22] e [AB23]. Ver também [Pot84]; [Gil71b] e [Gil71a].

¹⁰⁸A eletricidade vítrea é chamada hoje em dia de eletricidade positiva, enquanto que a eletricidade resinosa é chamada de eletricidade negativa. Ver o Capítulo 5 (Cargas Positivas e Negativas) de [Ass10b], [Ass10a], [Ass15b] e [Ass17].

¹⁰⁹Hans Christian Ørsted (1777-1851). Ver [Oer20b], [Oer20a], [Oer20c], [Oer65], [Ørs86] e [Ørs98]. Ver também [Fra81], [Mar86] e [Rei13].

¹¹⁰André-Marie Ampère (1775-1836). Sua obra-prima foi publicada em 1826, *Teoria dos Fenômenos Eletrodinâmicos, Deduzida Unicamente da Experiência*, [Amp26] e [Amp23]. Há uma tradução completa em português desse trabalho, *Eletrodinâmica de Ampère: Análise do Significado e da Evolução da Força de Ampère, Juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica*, [Cha09] e [AC11]. Traduções parciais para o inglês podem ser encontradas em [Amp65] e [Amp69b]. Traduções completas e comentadas em inglês podem ser encontradas em [Amp12] e [AC15]. Uma quantidade imensa de

os efeitos da eletricidade em fios em estado de corrente galvânica. Essa é a razão pela qual as leis que Biot, Savart e Ampère estabeleceram para as ações descobertas têm um caráter substancialmente diferente das leis anteriores de ação à distância.¹¹¹ No caso da interação eletromagnética de Oerstedt, a lei determina a ação de um pedaço de fio reto muito curto, que é o portador da corrente galvânica, em um polo magnético; a lei de Ampère determina a interação mútua entre dois pedaços de fio desse tipo. Portanto, não se trata, como na lei de Newton ou de Coulomb, da interação entre massas pontuais ou centros de força, mas da interação entre pontos e elementos de linha, e da interação entre elementos de linha.¹¹² Chamamos as leis que se referem a esses efeitos de leis elementares, em contraste com a lei pontual de Newton.¹¹³ Entretanto, deve-se enfatizar que um elemento de uma corrente galvânica não pode existir por si só; ele só é concebível como parte de um círculo maior, o arco de fechamento de uma célula galvânica,¹¹⁴ ou uma garrafa de Leiden em descarga.¹¹⁵ Essa observação leva à questão de saber se não é possível reduzir essas leis elementares a ações mais simples. Se, no entanto, a causa dos fenômenos elétricos é baseada na existência de fluidos elétricos, não há dúvida de que as mesmas partículas que, em um estado de repouso, se atraem ou se repelem de acordo com a lei de Coulomb, devem, em um estado de corrente galvânica, dar origem às ações descobertas por Ampère. Isso cria a tarefa, já colocada pelo próprio Ampère, de investigar como a ação eletrostática à distância entre as partículas pode ser modificada pelo movimento de tal forma que surja a lei de Ampère como

material sobre Ampère e sobre sua força entre elementos de corrente pode ser encontrada na homepage *Ampère e a História da Eletricidade*, <http://www.ampere.cnrs.fr> e [Blo05], na homepage da Sociedade dos Amigos de André-Marie Ampère, <https://saama.fr>, e na homepage do Museu Ampère, <https://amperemusee.fr/en>.

Existem diversas obras apresentando experimentos e discussões teóricas recentes relacionadas com a eletrodinâmica de Ampère: [BW], [Tri62], [Tri65], [Whi73], [Blo78], [Blo82], [Gra82b], [Gra82a], [Pap83], [Gra83a], [Gra83b], [Gra84b], [Gra84a], [PM85], [Nas85], [Gra85b], [Gra85a], [GG85], [Jol85], [Ter85a], [Ter85b], [GG85], [GG86], [Gra86], [Ter86], [GG86], [Aze86], [Asp86], [MP86], [Wes87], [Gra87c], [Gra87b], [Gra87a], [Chr87], [Asp87], [Peo88], [Chr88], [Blo89], [Chr89], [Str89b], [Str89a], [Moy89b], [Moy89a], [Moy89c], [Wes89], [Cor89], [PP90], [Phi90], [PV90], [Cor90], [GTM90], [Pap90], [Gra90], [BE90], [BM90], [Ive90], [Wes90b], [Wes90a], [Ive91], [Wes91], [GG92], [Ass92a], [GG92], [Ive92], [Sin92], [Phi93], [Pap93], [Gra93], [GG93], [Sin93b], [Sin93a], [Ive93], [Ass94], [Gra94], [BA95], [AB95], [Blo95], [BC95], [Phi96], [GG96], [AB96], [BA97a], [BA97c], [BA97b], [PG98], [Ass99b], [Gra00], [AB00], [GPR01], [BA01], [Blo04], [AC06], [CA06], [CA07b], [CA07c], [CA07a], [ASCC07], [CA09b], [CA09a], [BW11a], [BW11c], [BW11b] com tradução para o inglês em [BW15], [AC12], [BW12], [CA13], [BW13c], [BW13a], [BW13b], [Ass15a], [BA15], [CS17], [Cha18], [Cha19], [CL20], [BW21b], [BW21a], [Gra24] e [Cha25].

¹¹¹Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841) foram físicos, astrônomos e matemáticos franceses. Ver [BS20] com tradução para o inglês em [BS65b] e para o português em [AC06]. Ver também [Bio21b]; [Bio21a] e [BS24] com tradução para o inglês em [BS65a].

¹¹²Em alemão: *Linienelementen*. No caso da interação entre pontos e elementos de linha, teríamos a interação entre polos magnéticos pontuais e elementos de corrente. No caso da interação entre elementos de linha, teríamos a interação entre elementos de corrente.

¹¹³Carl Neumann (1832-1925), professor de física e matemática na Universidade de Leipzig, classificou em 1872 as teorias existentes da eletrodinâmica baseadas na ação à distância em três tipos, [Neu72]. (a) Havia as leis pontuais (*Punktgesetze* em alemão), do tipo utilizado por Coulomb e Weber, baseadas na suposição de forças entre partículas elétricas ou entre massas pontuais; (b) havia as leis elementares (*Elementargesetze* em alemão), referindo-se ao enfoque de Ampère utilizando elementos de corrente descritos matematicamente e às forças entre esses elementos de corrente; e (c) havia as leis integrais (*Integralgesetze* em alemão), do tipo desenvolvido por seu pai, o físico Franz Neumann (1798-1895), relacionadas com os circuitos elétricos fechados.

¹¹⁴Em alemão: *einer galvanischen Säule*. A palavra *Säule* pode ser traduzida como célula, coluna, pilha ou bateria elétrica.

¹¹⁵Ver o Capítulo 12, A Garrafa de Leiden e os Capacitores, de [Ass18b], [Ass18a] e [Ass19b].

resultado das várias ações. Foi essa tarefa que Weber resolveu no Primeiro Tratado sobre *elektrodynamische Maassbestimmungen* — Medições Eletrodinâmicas.¹¹⁶ O fato de que sua intenção, desde o início, foi direcionada não apenas para a especulação teórica, mas também diretamente para as tarefas fundamentais da física experimental, pode ser visto nas palavras a seguir, que introduzem a parte matemática da investigação.¹¹⁷

Então, se lidarmos com a conexão entre os fenômenos *eletrostáticos* e *eletrodinâmicos*, não precisamos simplesmente ser levados por seu interesse científico geral a penetrar nas relações existentes entre os vários ramos da física, mas além e acima disso, podemos nos colocar um objetivo mais claramente definido, que tem a ver com a *determinação experimental da indução eletrovoltaica por meio de uma lei mais geral da teoria elétrica pura*.¹¹⁸ Essas medições da indução eletrovoltaica pertencem então às *medições eletrodinâmicas* que formam o tema principal desse tratado e que, quando estiverem completas, também precisam incluir os fenômenos *eletrovoltaicos*. Contudo, é auto-evidente que estabelecer tais medições está conectado mais profundamente com o estabelecimento das *leis* às quais esses fenômenos estão sujeitos, de tal forma que um [assunto] não pode ser separado do outro.

No entanto, se a teoria geral dos fenômenos elétricos fosse baseada no fundamento da lei de Ampère, primeiro parecia necessário submeter essa lei a um novo teste por meio de medições exatas. Weber realizou esse teste com o eletrodinamômetro que ele havia construído e que, desde então, tornou-se um importante dispositivo de medição na teoria da eletricidade. Quando ele afirmou que as observações estavam em perfeita concordância com a lei de Ampère, quando ele a considerou como a expressão precisa para uma classe muito extensa de fatos, ele ignorou uma circunstância cujo significado só foi reconhecido posteriormente. O objeto de observação é sempre apenas a ação de circuitos elétricos fechados; no entanto, a maneira como a ação geral é distribuída entre os elementos de corrente individuais é, até certo ponto, arbitrária, e essa arbitrariedade significa que a lei de Ampère parece ser uma expressão possível, mas não a única possível, da interação eletrodinâmica. Ao assumir essa lei, Weber, portanto, introduziu um elemento um tanto hipotético em sua teoria; no entanto, ele resolveu brilhantemente a tarefa de revelar a conexão entre as leis fundamentais da eletrostática e da eletrodinâmica por meio da lei que leva seu nome, que faz com que a força

¹¹⁶[Web46] com tradução parcial para o francês em [Web87] e uma tradução completa e comentada para o inglês em [Web21e].

¹¹⁷[Web46, pág. 134 das *Obras* de Weber] e [Web21e, pág. 130].

¹¹⁸A expressão utilizada por Weber, *Volta-induktion*, havia sido sugerida inicialmente pelo próprio Michael Faraday (1791-1867) no parágrafo 26 de seu primeiro artigo sobre indução eletromagnética de 1831 ao definir a expressão *volta-electric induction*, [Far32a, parágrafo 26, pág. 267 do *Great Books of the Western World*] com tradução para o alemão em [Far32b] e tradução para o português em [Far11, págs. 158-159]:

For the purpose of avoiding periphrasis, I propose to call this action of the current from the voltaic battery, *volta-electric induction*.

Isto é:

Com a finalidade de evitar perífrase, proponho chamar essa ação da corrente da bateria voltaica de *indução eletrovoltaica*.

A palavra “perífrase” significa circunlóquio ou rodeio de palavras. Nessa tradução em português das obras de Weber vou utilizar as expressões *indução eletrovoltaica* ou *indução voltaica* para essa classe de fenômenos que hoje em dia é chamada de lei de indução de Faraday.

que atua entre duas partículas elétricas dependa não apenas de suas massas¹¹⁹ e distâncias, mas também de seu movimento relativo. Com o estabelecimento dessa lei, Weber chegou a um ponto a partir do qual uma representação unificada dos fenômenos elétricos parecia possível; em toda a série de tratados posteriores, ele perseguiu a meta que havia estabelecido para si mesmo com grande consistência e de forma cada vez maior incorporou os fenômenos do magnetismo ao círculo de seus pontos de vista e, em seus últimos trabalhos, também procurou vincular a gravitação e as ações moleculares à lei da força elétrica. Mas, fiel ao programa que havia estabelecido desde o início, sua atividade científica sempre foi dupla; sua especulação teórica andava de mãos dadas com as medições elétricas, que se tornaram de fundamental importância para o lado prático e técnico da física.

Antes de mais nada, a lei de Weber teve de ser aplicada aos fenômenos de indução voltaica descobertos por Faraday, [ou seja,] à produção de uma corrente em um fio condutor ao se aproximar de um circuito existente [conduzindo uma corrente elétrica,] e à formação de uma corrente quando muda a intensidade da corrente no circuito vizinho. De fato, verifica-se que em ambos os casos são exercidas forças sobre a eletricidade neutra que repousa no interior do condutor, o que impulsiona as partículas positivas em uma direção e as partículas negativas na direção oposta. Essas forças, portanto, não buscarão mover os próprios condutores, como é o caso da ação descoberta por Ampère, mas buscam apenas mover a eletricidade contida nos condutores e, portanto, nos referimos a elas como forças eletromotrizes. A aplicação da lei de Weber aos casos mencionados leva a leis elementares de indução voltaica, que são confirmadas pelas observações em circuitos fechados de correntes e condutores. A extensão das leis encontradas para os fenômenos de indução magnética é possível graças à observação de que a ação indutora das espirais galvânicas¹²⁰ está sujeita à mesma lei que a ação indutora de uma barra magnética.

Enquanto no Primeiro Tratado sobre Medições Eletrodinâmicas o interesse está centrado principalmente no desenvolvimento da lei fundamental geral, no Segundo Tratado o lado prático da tarefa definida vem à tona e, desse ponto de vista, ele tem uma importância tão fundamental quanto o primeiro para o desenvolvimento da teoria.¹²¹ Devido à dupla correlação que existe entre eletricidade e magnetismo, devido à distinção peculiar entre fenômenos eletrostáticos e eletrodinâmicos, é multiplicado o número de grandezas que formam o objeto de observação e medição; portanto, é ainda mais urgente ter definições específicas para essas grandezas, um sistema padronizado de unidades, além de métodos convenientes e precisos de medição. Ao estabelecer seu sistema de unidades, Weber partiu de uma ideia de grande importância, que foi introduzida pela primeira vez na ciência por Gauss em seu tratado *Zurückführung der Intensität der magnetischen Kraft auf absolutes Maass* — Medição Absoluta da Força Magnética Terrestre.¹²² Imaginemos que um agente

¹¹⁹No caso da lei de Newton da gravitação a força depende das massas das partículas que estão interagindo. Já no caso das forças de Coulomb e Weber, a força depende do valor das cargas elétricas das partículas.

¹²⁰Ou seja, bobinas ou solenoides conduzindo correntes elétricas.

¹²¹[Web52b] com tradução para o inglês em [Web21f].

¹²²O trabalho de Gauss sobre a medição absoluta da força magnética terrestre foi anunciado na Sociedade Real de Ciências de Göttingen em dezembro de 1832, [Gau32], com traduções para o inglês em [Gau33a], [Gau37a] e [Gau21a], ver ainda [Rei02, págs. 138-150]. O artigo original em latim só foi publicado em 1841, embora ele tenha circulado em pequena edição já em 1833, [Gau41b] e [Rei19]. Já foram publicadas várias traduções. Existem duas versões em alemão, uma traduzida por J. C. Poggendorff e publicada em 1833, a segunda traduzida por A. Kiel com notas de E. Dorn e publicada em 1894; uma versão em francês por F. J. D. Arago (1786-1853) publicada em 1834; duas versões em russo, uma por A. N. Drašusov publicada em 1836 e outra de A. N. Krylov publicada em 1952; uma versão em italiano de P. Frisiani publicada em 1837; um resumo em inglês foi publicado em 1935, com uma tradução completa em inglês de S. P. Johnson (1995) que

arbitrário seja distribuído em quantidades iguais sobre dois corpos ponderáveis iguais e que a consequência disso seja uma interação mecânica, uma atração, repulsão ou rotação dos dois corpos. A intensidade da força exercida pode ser determinada de acordo com a unidade geral da mecânica, por exemplo, por pesagem; ela só pode depender das condições espaciais e da quantidade dos agentes; se a dependência das linhas e dos ângulos a serem medidos for conhecida, obtém-se uma medida da quantidade do agente em questão, ou seja, uma medida que requer apenas o estabelecimento das unidades de medida para linhas,¹²³ intervalos de tempo e massas. Nesse sentido, Gauss nos ensinou a determinar em unidades absolutas a quantidade de magnetismo contida em uma barra de aço; no mesmo sentido, a quantidade de eletricidade transmitida a duas esferas condutoras carregadas pode ser calculada em unidades eletrostáticas absolutas a partir da repulsão entre elas. Na aplicação do princípio às correntes galvânicas, no entanto, surge a circunstância peculiar de que a intensidade de uma corrente pode ser julgada tão bem por sua ação sobre um ímã quanto por sua ação sobre uma segunda corrente; para a intensidade da corrente galvânica, portanto, resultam duas unidades absolutas diferentes, e é natural contrastar essas duas com uma terceira, que é particularmente importante, pois estabelece uma relação direta entre as medições eletrodinâmicas e eletrostáticas. De acordo com a forma como medimos a intensidade da corrente de um rio, a unidade de medida de uma corrente galvânica é representada como sendo aquela na qual a quantidade total de eletricidade que flui através da seção transversal do fio condutor em um segundo é igual à unidade eletrostática determinada pela repulsão entre dois condutores carregados. De acordo com isso, três unidades diferentes também podem ser estabelecidas para as forças eletromotrizes; os fenômenos de indução magnética ou voltaica podem ser usados para esse fim, mas também podemos nos guiar pela observação de que a força eletromotriz de indução não é essencialmente diferente das forças eletrostáticas, que também buscam causar uma separação dos fluidos elétricos, e que a força eletromotriz pode, portanto, ser expressa tão bem quanto a força eletrostática com as unidades gerais da mecânica. Por fim, como a resistência de um condutor é igual à razão entre a força eletromotriz e a intensidade da corrente galvânica gerada, a possibilidade tripla de determinar as unidades também é transferida para essa última [grandeza, ou seja, para a resistência]. De particular interesse aqui é a relação entre a unidade eletromagnética e eletrodinâmica, por um lado, e a unidade eletrostática, por outro, que é mediada pela chamada constante da lei de Weber. De acordo com essa lei, a repulsão eletrostática entre duas partículas semelhantes é reduzida pelo seu movimento, e a constante mencionada indica a velocidade relativa na qual as duas partículas não exercem mais nenhuma ação uma sobre a outra, mas, ao mesmo tempo, também fornece o fator pelo qual uma intensidade de corrente medida eletromagneticamente deve ser multiplicada para expressá-la em unidades mecânicas, ou seja, para obter o número de unidades eletrostáticas que a corrente conduz pela seção transversal do condutor em um segundo. Weber realizou a determinação experimental de sua constante em cooperação com Robert Kohlrausch;¹²⁴ para a razão entre a unidade de medida eletromagnética da corrente

foi publicada em 2003 e outra revisada e com Notas adicionais publicada em 2021; além de uma versão em português publicada em 2003: [Gau33b], [Gau34c], [Gau36a], [Gau39b], [Gau94], [Gau35], [Gau52], [Gau75], [Gau03], [Ass03b] e [Gau21e]. Ver ainda [Mer84].

¹²³Isto é, unidades de medida para distâncias.

¹²⁴Embora Riecke tenha escrito “Robert Kohlrausch”, o nome correto é Rudolf Kohlrausch (1809-1858). Essa constante c representa a velocidade relativa uniforme na qual a força de Weber entre as duas partículas cai para zero. A constante c de Weber (conhecida durante o século XIX como a *constante de Weber*) não é a mesma constante que também é representada hoje em dia pela letra c e cujo valor moderno é o mesmo que a velocidade da luz no vácuo, v_L , isto é, $c = v_L = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$. A constante de Weber é dada

e a unidade de medida eletrostática, foi obtido o valor $3,111 \times 10^{10}$ centímetros por segundo, enquanto que, de acordo com as medições mais recentes, ela é igual a $3,012 \times 10^{10}$ centímetros por segundo; ambos os valores podem ser considerados iguais à velocidade da luz. Com a determinação da constante de Weber, o sistema de unidades elétricas alcançou sua conclusão interna; é a base desse sistema por meio do qual Weber exerceu uma influência decisiva na ciência e, no atual período de desenvolvimento, as pessoas estarão inclinadas a buscar a fonte de sua fama principalmente no trabalho pertencente a esse campo. Isso se deve, em parte, à importância cada vez maior da eletricidade para a tecnologia e o transporte; a medição precisa não era apenas uma necessidade da ciência, mas também da tecnologia, e Weber já havia satisfeito essa necessidade antecipadamente. Se o trabalhador de uma fábrica eletrotécnica opera agora com [as unidades de medida] Ampères, Volts e Ohms com total segurança, então Weber merece, antes de tudo, o crédito por isso e, nesse contexto, não se deve deixar de lamentar que o Congresso Eletrotécnico de Paris tenha suprimido o nome Weber na designação popular das unidades elétricas.¹²⁵

Voltemos ao trabalho de Weber, que é importante para o desenvolvimento posterior de sua teoria. Ampère já havia demonstrado que é supérflua a suposição de fluidos magnéticos especiais, que os fenômenos do magnetismo são totalmente explicados se, supondo uma constituição molecular do ferro, cada molécula for envolvida por uma corrente galvânica em forma de anel.¹²⁶ Em um pedaço de ferro não magnético, essas chamadas correntes moleculares de Ampère terão todas as orientações possíveis; em um campo magnético, elas serão giradas de maneira uniforme pela ação eletromagnética e, em seguida, exercerão as mesmas ações externas que, de acordo com a visão anterior, haviam sido explicadas pela separação dos fluidos magnéticos. Com base em uma observação muito atraente, Weber também incluiu nessa teoria as repulsões diamagnéticas descobertas por Faraday, que muitos corpos sofrem nas proximidades de um polo magnético.¹²⁷ Se as moléculas de um corpo são cercadas por caminhos nos quais os fluidos elétricos se movem sem força eletromotriz, ou seja, também sem resistência, então as correntes de indução devem ser capazes de ocorrer nesses caminhos, e elas devem persistir até serem destruídas por uma causa oposta. As correntes, entretanto, que são induzidas pela aproximação de um polo magnético, têm uma direção tal que produzem uma repulsão entre o polo e o corpo que se aproxima, o que seria precisamente aquilo que foi descoberto por Faraday. Com essa teoria, Weber acreditava que havia decidido a alternativa entre a suposição de fluidos magnéticos separáveis e a suposição das correntes moleculares de Ampère em favor da última [suposição]; no entanto, todos os fenômenos do diamagnetismo também podem ser explicados pela suposição de que o ar e o éter que preenchem o chamado espaço vazio são capazes de polarização magnética em um grau maior do que os chamados corpos diamagnéticos. Portanto, não se pode afirmar a existência real das correntes moleculares de Ampère com base na investigação de Weber.

por $\sqrt{2}$ vezes esse último valor (ou seja, $c_{Weber} = \sqrt{2} \cdot v_L = 4,24 \times 10^8$ m/s). A *constante de Weber*, c , foi medida pela primeira vez por Weber e Kohlrausch entre 1854 e 1856. Eles obtiveram $c = 4,39 \times 10^8$ m/s. Ver [Web55] com traduções para o inglês em [Web21j]; [WK56] com traduções para o inglês em [WK03] e [WK21], e tradução para o português em [WK08]; e [KW57] com tradução para o inglês em [KW21]. Ver também [Pog57] com tradução para o inglês em [Pog21], [Ass21a]. Discuto a diferença entre a constante c de Weber e a atual constante c , assim como a relação dessas duas constantes diferentes com a velocidade da luz no vácuo, v_L , em [Ass21d].

¹²⁵Apresento no Capítulo 30 o motivo do nome “Weber” ter sido suprimido entre as unidades elétricas no Congresso de Paris de 1881.

¹²⁶Ver o Capítulo 19 (Os polos magnéticos são hipóteses descartáveis) de [AC11] e [AC15].

¹²⁷[Web52a] com tradução para o inglês em [Web21i].

Contudo, não devemos abandoná-la sem lembrar que com base nela, pela primeira vez, foi não só demonstrada, mas também medida com precisão, a excitação magnética do bismuto dentro de uma espiral galvânica,¹²⁸ a indução pelo movimento de um diaímã, e que foi determinada pela primeira vez a relação entre a excitabilidade diamagnética do bismuto e a excitabilidade magnética do ferro.

As investigações de Weber que relatamos anteriormente, estavam essencialmente relacionadas com a ação à distância entre as correntes galvânicas. A teoria do circuito galvânico, que Weber já havia discutido em detalhes em seu tratado sobre medições de resistência,¹²⁹ deve ser considerada como uma área da eletrodinâmica que, em alguns aspectos, oferece uma visão mais profunda da natureza dos fenômenos elétricos. O conhecimento das forças eletromotrizes exercidas sobre o fluido contido em um condutor não é suficiente para lidar com esse problema. Também é necessário conhecer as resistências moleculares com as quais o movimento da eletricidade dentro do condutor tem de lidar e, por fim, a massa inercial da eletricidade colocada em movimento também deve ser fornecida para que o movimento seja calculado de acordo com os princípios usuais da mecânica. Kirchhoff foi o primeiro a fornecer equações gerais para o movimento da eletricidade em condutores,¹³⁰ assumindo a validade geral da lei de Ohm.¹³¹ Para determinar as leis de movimento para fios condutores com base nessas equações, ele introduziu a suposição de que cada pedaço desse fio que ainda pudesse ser considerado reto fosse um milhão de vezes maior que sua espessura. Não é possível julgar desde o início até que ponto essa suposição pode ser cumprida em experimentos viáveis e até que ponto ela é compatível com a validade geral da lei de Ohm. Apenas um pouco mais tarde que Kirchhoff, Weber apresentou um estudo sobre as leis gerais das correntes galvânicas ao editor dos *Annalen für Physik und Chemie*, mas retirou-o quando soube da existência do trabalho de Kirchhoff. Independentemente da validade geral da lei de Ohm, ele então desenvolveu as equações de movimento da eletricidade novamente, partindo da abordagem geral da mecânica e, conseqüentemente, atribuindo à eletricidade uma massa a ser determinada em gramas.¹³² Entre os resultados teóricos do trabalho de Weber, dois são de interesse especial. Ele descobriu que os movimentos ondulatórios da eletricidade são possíveis em um condutor linear, semelhante à propagação de uma onda em um tubo cheio de ar; a velocidade de propagação das ondas pode ser expressa pela constante da lei de Weber e descobriu-se que, sob certas condições, essa velocidade de propagação é igual à velocidade da luz. Weber não estava inclinado a atribuir qualquer significado físico a esse resultado. Maxwell, entretanto, baseou sua teoria da luz na relação entre a constante de Weber e a velocidade da luz quando descobriu que a velocidade de propagação das oscilações elétricas no ar corresponde à velocidade da luz.¹³³ Uma segunda observação está relacionada à inércia da eletricidade e aos desvios resultantes da lei de Ohm. A teoria desenvolvida por Weber mostra que a amplitude das oscilações elétricas rápidas que são excitadas em um condutor fechado por uma força que muda periodicamente, depende da massa inercial da eletricidade;

¹²⁸Isto é, dentro de uma bobina ou solenoide conduzindo uma corrente elétrica.

¹²⁹[Web52b] com tradução para o inglês em [Web21f].

¹³⁰Gustav Kirchhoff (1824-1887) foi um físico alemão. Ver [Kir49] com traduções para o inglês em [Kir50] e [Kir21a], e tradução para o francês em [Kir54]; [Kir57b] com traduções para o inglês em [Kir57a] e [Kir21c]; e [Kir57c] com tradução para o inglês em [GA94] e [Kir21b].

¹³¹Georg Simon Ohm (1789-1854). A lei de Ohm é de 1826: [Ohm26a], [Ohm26c], [Ohm26d], [Ohm26b] e [Ohm27] com tradução para o francês em [Ohm60] e tradução para o inglês em [Ohm66].

¹³²[Web64] com tradução para o inglês em [Web21d]. Ver também [Pog57] com tradução para o inglês em [Pog21], e [Ass21a].

¹³³James Clerk Maxwell (1831-1879) foi um físico escocês. Ver [Max73a], [Max73b] e [Max54a].

as fórmulas indicam, pelo menos em princípio, a possibilidade de determinar, medindo a amplitude, a relação entre a quantidade de eletricidade contida na unidade de comprimento do fio condutor e a raiz quadrada de sua massa inercial, ou [a relação entre] a intensidade da corrente e a raiz quadrada da energia cinética da corrente. A parte experimental do trabalho, na qual Robert Kohlrausch novamente desempenhou um papel importante, foi interrompida logo em seu início pela doença e morte do último. Mais tarde, Hertz¹³⁴ descobriu que a energia cinética da eletricidade em um milímetro cúbico de um condutor através do qual flui uma unidade eletromagnética de corrente, ou seja, 3×10^{10} unidades eletrostáticas (g. cm. seg.) em um segundo, deve ser menor do que a força viva¹³⁵ de 1/500 milígrama movendo-se à velocidade de 1 milímetro [por segundo].

Weber tentou desenvolver a teoria das correntes galvânicas de forma ainda mais completa em um tratado publicado nos *Annalen der Physik und Chemie* intitulado “Über die Bewegung der Elektrizität in Körpern von molekularer Constitution” — Sobre o Movimento da Eletricidade em Corpos de Constituição Molecular.¹³⁶ Ele substituiu a concepção dualista mantida em seus trabalhos anteriores por uma unitária, supondo que as partículas elétricas negativas aderem às moléculas ponderáveis e que as positivas estão em movimento central ao redor das moléculas, de modo que os anéis de Ampère se dissolvem em sistemas de satélites elétricos.¹³⁷ Weber busca a diferença entre condutores e isolantes no fato de que, nos primei-

¹³⁴Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) foi um físico alemão.

¹³⁵Em alemão: *die lebendige Kraft*. A expressão em latim *vis viva* (plural *vires vivae*) é traduzida em português, inglês e alemão por, respectivamente, *força viva*, *living force* e *lebendige Kraft*. Ela foi cunhada por G. W. Leibniz (1646-1716). Originalmente a força viva de um corpo de massa m deslocando-se com velocidade v em relação a um sistema de referência inercial era definida por mv^2 , isto é, o dobro da energia cinética como definida hoje em dia. Contudo, durante o século XIX muitos autores como Wilhelm Weber e Hermann von Helmholtz (1821-1894) definiram a força viva como $mv^2/2$, isto é, com o mesmo valor da energia cinética atual. Em 1847 Helmholtz expressou-se como segue, [Hel47, pág. 9] com tradução para o inglês em [Hel53, pág. 119]:

Para haver uma melhor concordância com a maneira usual de medir a intensidade das forças, proponho denominar a grandeza $\frac{1}{2}mv^2$ como sendo a quantidade de *força viva*, por meio da qual ela fica idêntica à quantidade de trabalho.

Em 1872 ele fez uma definição análoga, [Hel72a, pág. 640 das *Obras* de Helmholtz] com tradução para o inglês em [Hel72b, pág. 533]:

Se denominarmos, como sempre foi feito até agora, a *força viva* ou a *energia atual* como sendo a soma das massas inerciais móveis multiplicadas cada uma pela metade do quadrado de sua velocidade, então, [...]

Weber também utilizou a expressão *força viva* como sendo dada por $mv^2/2$. Isso pode ser visto, por exemplo, em seu trabalho de 1871, [Web71, Nota de rodapé número 1, págs. 256-257 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [Web72, Nota de rodapé nas págs. 9-10] e [Web21h, Nota de rodapé 140, págs. 74-75].

¹³⁶[Web75] com tradução para o inglês em [Web24c].

¹³⁷Na concepção dualista de uma corrente elétrica supõem-se partículas positivas e negativas deslocando-se em relação ao condutor com velocidades iguais e opostas. Na concepção unitária supõe-se que as partículas com cargas de um sinal estão fixas no condutor, enquanto que a corrente elétrica é devida apenas ao movimento das partículas de cargas opostas deslocando-se em relação ao condutor. Ou seja, em vez de pensar nas correntes moleculares de Ampère como sendo análogas aos anéis de Saturno, teríamos agora um sistema análogo às luas de Júpiter, mas com partículas eletrizadas orbitando ao redor de um núcleo eletrizado com cargas de sinal oposto. Ver o Capítulo 5 (A Evolução da Concepção de Weber sobre uma Corrente Elétrica — Começando com uma Corrente Dupla até Chegar em uma Corrente Simples) de [AWW14], [AWW11] e [AWW18].

ros, as órbitas das partículas positivas alcançam as esferas de atração das moléculas vizinhas, causando uma transição constante das partículas positivas de uma molécula para a outra, uma mudança constante entre movimento central e movimento de corrente. Se nenhuma força externa estiver presente, todas as direções do espaço serão igualmente representadas nesse movimento de fluxo; no entanto, se uma força eletromotriz atuar no condutor, as partículas serão desviadas da direção inicial do movimento, e a corrente galvânica consistirá no deslocamento conjunto causado por isso. A força eletromotriz realiza trabalho que encontra seu equivalente no aumento da força viva da eletricidade positiva. Como, por outro lado, o trabalho realizado pela corrente é convertido em calor de acordo com a lei de Joule,¹³⁸ Weber conclui que a energia térmica de um corpo nada mais é do que a energia cinética da eletricidade positiva deslocando-se em movimento central.

Nos anos em que Weber concentrou seus esforços nos trabalhos sobre *Medições Eletrodinâmicas*, o princípio da conservação da energia, fundado por R. Mayer, Joule e Helmholtz, alcançou sua posição central no campo das ciências naturais exatas; nenhuma lei poderia ser considerada admissível que não estivesse de acordo com as exigências do princípio da energia.¹³⁹ Dado o caráter peculiar da lei de Weber, parecia duvidoso desde o início se ela atendia a essa condição, se o fundamento de toda a teoria era legítimo. Weber mostrou que, para um sistema de partículas agindo umas sobre as outras de acordo com sua lei, aplicava-se a lei da conservação da força, ou seja, que a soma da energia cinética e potencial era constante.¹⁴⁰ A diferença em relação à forma usual em que a energia potencial de um sistema mecânico aparece é que, em um sistema de partículas elétricas, ela também depende da velocidade relativa. Isso impõe uma certa limitação à lei de Weber. Acontece que sua aplicação aos movimentos de corpos eletricamente carregados leva a sérias consequências se a densidade da carga ou o tamanho dos corpos excederem certos limites. Uma dificuldade semelhante surge quando a lei de Weber é usada para analisar o fluxo de correntes que, de alguma forma, foram excitadas em um corpo condutor. Somente para fios finos as conclusões concordam com os fatos observados. No caso de corpos de dimensões maiores, no entanto, as equações de movimento da eletricidade possuem, além das integrais que indicam um desaparecimento mais rápido ou mais lento do movimento excitado, outras pelas quais são representados movimentos que aumentam até o infinito. Helmholtz, que fez essas observações, demonstrou que, em certos casos, a lei de Weber leva a resultados que contradizem os pontos de vista gerais da mecânica. Enquanto essas contradições não puderem ser resolvidas, só se pode atribuir à lei o significado de uma fórmula de interpolação; dentro de uma área delimitada pela experiência, ela leva a resultados corretos, mas, além dessa área, não pode ser aplicada sem entrar em conflito com outros fatos da experiência. No entanto, faz diferença se as condições sob as quais a lei leva a contradições são meramente concebíveis ou se também podem ser realizadas experimentalmente, e esse ponto requer mais esclarecimentos.

Não importa o peso que se atribua às preocupações enfatizadas, o edifício de Weber ainda

¹³⁸Denominando por dq a quantidade de calor produzida no intervalo de tempo dt temos $dq = wi^2dt$. Esse resultado é devido a James Prescott Joule (1818-1889), [Jou41b] e [Jou41a] com tradução para o francês em [Jou42]. Uma análise detalhada do artigo de Joule pode ser encontrada em [MS20] e [Mar22].

¹³⁹O princípio de conservação da energia levando em consideração a energia térmica foi estabelecido por Julius Robert von Mayer (1814-1878) em 1842 e por James Prescott Joule (1818-1889) em 1843, sendo também discutido por Hermann von Helmholtz (1821-1894) em 1847. Ver [May42] com tradução para o inglês em [May62] e tradução para o português em [May84]; [Jou43]; e [Hel47] com tradução para o inglês em [Hel53] e [Hel66]. Ver também [Mar84] e [Ass21b].

¹⁴⁰[Web71] com traduções para o inglês em [Web72] e [Web21h]; e [Web78] com tradução para o inglês em [Web21g].

abrangia todo o campo dos fatos observados; com seu trabalho preliminar, ele alcançou o campo dos fenômenos moleculares e abriu uma visão do distante mundo das afinidades químicas. Portanto, era de se esperar que as brechas que haviam sido feitas nas paredes em lugares individuais fossem apenas um incentivo para redobrar o trabalho, que alguém se esforçasse avidamente para preencher as lacunas e fortalecer os alicerces. E se alguém fosse da opinião de que as leis físicas eram, em última análise, nada mais do que fórmulas de interpolação que coincidiam com um determinado círculo de fatos, então se poderia esperar que uma fórmula que abrangesse um círculo tão grande também fosse adaptável a um círculo um pouco maior por meio de pequenos acréscimos. Se isso não aconteceu, se a teoria de Weber foi abandonada para que um novo edifício fosse erguido sobre uma nova base, há outras razões para isso, que não são dirigidas contra lacunas individuais na teoria, mas contra toda a sua base, e essas razões tentaremos descrever a seguir, na medida em que a brevidade do tempo permitir.

Em primeiro lugar, temos que mencionar um tipo de preconceito que é dirigido contra a suposição de forças atuando à distância e que se baseia em uma autoridade não menor do que a de Newton. De fato, Newton descreveu a gravitação, que ele introduziu na ciência, apenas como uma causa matemática; o fato de um corpo agir sobre outro através do espaço vazio sem qualquer mediação lhe pareceu absurdo.¹⁴¹ No entanto, ele deixou a cargo de seus leitores decidir se o agente que gera a gravidade de acordo com certas leis era material ou espiritual. Ocasionalmente, ele expressou a ideia de que a tensão variável do éter que preenche o espaço leva os corpos de lugares mais densos para lugares menos densos e que a gravidade se baseia nisso. De modo geral, ele provavelmente não deu muita importância a essas especulações e ficou satisfeito com o fato de que a gravidade existe e que os corpos do céu e as marés do mar se movem de acordo com suas leis.

As alusões vagas de Newton ganharam um terreno mais firme com Faraday, que, não acostumado com a linguagem matemática, buscou um meio descritivo de visualizar e compreender as interações dos corpos, inicialmente nos campos da eletricidade e do magnetismo. Esse meio se apresentou a ele nas linhas de força, cujo sistema é facilmente gerado em um ímã com a ajuda de limalhas de ferro. Se considerarmos uma corrente formada por essas limalhas e conectando dois polos amigáveis, veremos que todos os seus elos são pequenos ímãs que giram os polos diferentes um em direção ao outro, atraindo-se mutuamente e procurando encurtar a corrente. Se imaginarmos suas extremidades soldadas aos polos que ela liga, ela os atrairá um para o outro, e o movimento dos polos, que antes era considerado uma consequência de suas forças agindo à distância, agora parece ser causado pela tensão da corrente. Faraday viu linhas de força semelhantes irradiando de um corpo eletricamente carregado para o espaço isolante ao redor; uma voltagem seria gerada ao longo das linhas de força por processos de natureza oculta, e essa seria a causa dos fenômenos elétricos observados. O fio no qual uma corrente galvânica se move é cercado por linhas anelares de força magnética, e nelas há uma voltagem do mesmo tipo daquelas produzidas por um polo. A perturbação recíproca entre as tensões causadas por duas correntes localizadas uma ao lado da outra no mesmo espaço é a causa da aparente ação eletrodinâmica à distância. Faraday também conseguiu conectar os fatos da indução com o sistema de suas linhas de força, mostrando que uma corrente indutora sempre surge em um circuito fechado quando muda o número de linhas de força que o atravessam, mas ele não encontrou nenhuma imagem

¹⁴¹Para uma discussão sobre ação à distância com um ponto de vista diferente ver [Ass92b], [Ass99a] com tradução para o alemão em [Ass14a] e tradução para o português em [Ass19a], [TCA04], [Ass06], [Hen11], [Hen14], [Hen19], [Hen20a] e [Hen23].

mecânica clara para a relação entre o circuito indutor e o induzido. A teoria desenvolvida por Faraday virou de cabeça para baixo a visão generalizada e aparentemente óbvia de que os condutores eram os verdadeiros portadores das forças elétricas e que o espaço ao redor deles desempenhava apenas um papel passivo, desde que fosse impenetrável para os fluidos elétricos. Segundo ele, a verdadeira causa dos efeitos elétricos está justamente nos isolantes; os chamados condutores são incapazes de conduzir as linhas de força elétrica e estão sujeitos apenas às tensões do isolante que os envolve. Mas essa teoria era muito mais do que um jogo engenhoso com possibilidades e linhas geométricas; pois Faraday havia demonstrado que os isolantes de fato desempenham um papel essencial nos fenômenos elétricos, que ao longo das linhas de força há realmente uma mudança em seu estado elétrico; ele havia descoberto que todos os corpos são capazes de excitação magnética e que, portanto, ao longo das linhas de força magnética que irradiam de um polo há realmente uma polarização do espaço circundante. Mas se os estados dielétrico e diamagnético assumidos por Faraday têm uma existência real, então a tentativa de considerá-los como as únicas causas dos efeitos observados também é justificada.

A física matemática, em particular a teoria do potencial, também levou a pontos de vista que contradiziam a suposição de uma ação não mediada à distância, mas que tocava em pontos essenciais da teoria de Faraday. O meio mais confiável e simples de representar os fatos observados era cada vez mais considerado não como forças emanadas dos corpos, mas sim como equações diferenciais, que eram satisfeitas pelas grandezas características dos fenômenos. Entretanto, toda equação diferencial pode ser entendida como uma instrução para calcular o estado de qualquer elemento espacial a partir do estado de um elemento vizinho. A partir disso, pode-se de fato reconhecer a relação entre o conceito matemático e a ideia de Faraday de uma tensão dielétrica ou diamagnética que progride de elemento para elemento.

Em outra direção, no entanto, a física matemática passou por um desenvolvimento que se afastou da busca de teorias atomísticas e enfatizou um novo método de pesquisa teórica. Com base em dois teoremas gerais, os princípios de energia e entropia, foi possível desenvolver uma teoria do calor que trouxe uma riqueza de esclarecimentos novos e surpreendentes. A vantagem peculiar dessa teoria parecia ser o fato de ela ser independente de qualquer suposição específica sobre a natureza do calor, de modo que a mudança de ideias não poderia ter influência sobre sua validade inalterada e geral. Era óbvio aplicar a outros campos o método assim fornecido e conectar as leis dos fenômenos não por hipóteses especiais sobre a natureza dos corpos, mas por esses princípios gerais. Assim, o princípio da energia no campo da eletricidade permitiu desenvolver uma a partir da outra as leis das ações ponderomotrizes e eletromotrizes da corrente galvânica.

A intuição engenhosa de Faraday sobre a existência física das linhas de força, por mais proveitosa que tenha sido para suas próprias descobertas, teve que ficar em segundo plano em relação à teoria da ação à distância enquanto não encontrou uma formulação matemática. Isso lhe foi concedido por Maxwell; a batalha das teorias agora era travada com armas iguais e, inicialmente, foi demonstrado que seus resultados estavam totalmente de acordo em um grau surpreendente. Logo, porém, Maxwell fez uma grande e importante descoberta com base em sua teoria, mostrando que as ondas elétricas e magnéticas transversais podem se propagar em um isolante e que, no espaço aéreo, sua velocidade de propagação é igual à velocidade da luz. Com base nisso, ele fundamentou sua teoria eletromagnética da luz, que foi confirmada, embora não completamente, por uma série de observações posteriores. Embora Helmholtz tenha conseguido obter as fórmulas da teoria da luz de Maxwell a partir das leis

das ações elétricas e magnéticas à distância, os desenvolvimentos de Maxwell permaneceram mais simples e diretos. Aqui, também, o método de Faraday provou ser superior à teoria das ações à distância quando se tratava de descrever os fenômenos usando equações diferenciais. Entretanto, a teoria de Maxwell não foi importante apenas porque combinou os fenômenos da luz com os da eletricidade em um todo unificado, mas também porque abriu um novo caminho para a própria teoria da eletricidade. Pois se a luz se baseia em oscilações elétricas, então, inversamente, as oscilações elétricas também devem possuir as propriedades da luz; os raios de força elétrica devem se propagar pelo espaço de acordo com as mesmas leis dos raios de luz. Essa constatação apontou o caminho para a decisão entre a teoria das ações à distância e a visão de Faraday. As oscilações elétricas ocorrem sempre que as cargas elétricas opostas de dois condutores são equalizadas na faísca saltitante;¹⁴² de acordo com a teoria antiga, esse ponto é a origem de uma força dupla, primeiramente uma ação imediata à distância que não requer tempo para se propagar e que deve ser considerada como a causa essencial dos fenômenos. Além disso, porém, há um efeito secundário resultante da polarização elétrica e magnética do espaço aéreo circundante, que emana do centelhador¹⁴³ na velocidade da luz. De acordo com a teoria de Maxwell, os raios de força elétrica que obedecem às leis da luz são a única coisa que existe; todos os efeitos produzidos pelo centelhador são mediados por ondas que viajam no espaço à velocidade da luz. Hertz demonstrou com seu trabalho, tão brilhantemente desenvolvido a partir de um início discreto e meticuloso, que as ações são de fato propagadas a partir de um centelhador a uma velocidade finita, que seu caminho retilíneo é refletido e refratado pelos meios intermediários da mesma forma que os raios de luz, e os fatos observados por ele em nenhum lugar tornam necessário supor que, além das ações mediadas, há também uma ação imediata à distância do centelhador.¹⁴⁴ De acordo com o princípio de Newton de que não se deve admitir mais causas para explicar os fenômenos do que aquelas que são verdadeiras e suficientes para explicar esses fenômenos, no campo da eletricidade teremos, portanto, que abandonar a suposição de forças agindo diretamente à distância e considerar a teoria de Maxwell como a que corresponde ao ponto de vista atual de nossa experiência.

O que foi provado contra os pontos de vista básicos da eletrodinâmica de Weber pelo desenvolvimento descrito anteriormente, e o que foi colocado em seu lugar? A teoria de Weber foi fundamentada em dois pilares diferentes, a suposição de ação direta à distância e a concepção da constituição atomística da matéria; a primeira delas provou ser insuficiente e supérflua em vista dos fenômenos; a segunda, por outro lado, não é de forma alguma abalada pela teoria de Maxwell, pois esta última não faz nenhuma suposição especial sobre o mecanismo no qual se baseia a propagação da força elétrica. Pode-se pensar tanto em ondas em um meio que preenche continuamente o espaço, em tensões e pressões entre os elementos de volume vizinhos desse meio, quanto em transmissão de partícula para partícula em um meio constituído atomisticamente. No último caso, a ação à distância é então introduzida novamente na teoria, com a mudança de que não é mais considerada como existente para distâncias arbitrariamente grandes, mas apenas para distâncias moleculares. Entretanto, se essa suposição for útil e proveitosa para o progresso da ciência, o preconceito existente contra ações à distância em geral não impedirá que ela seja adotada. A convicção de que as ações existem por meio de pressão e tensão pode ser mais imediata, sua suposição pode estar mais próxima de nossa percepção, mas, na verdade, não sabemos nada sobre como elas surgem e,

¹⁴²Ou seja, na faísca que ocorre entre os dois condutores próximos eletrizados com cargas opostas.

¹⁴³Em alemão: *Funkenstrecke*.

¹⁴⁴[Her94] com tradução para o inglês em [Her00].

mesmo com elas, todo corpo acaba agindo onde não está, ou seja, à distância. Nesse sentido, a confirmação da teoria de Maxwell não decidiu contra a suposição de ação à distância.

A teoria das ações à distância tem dois séculos de existência; não podemos esperar que os novos métodos que tomarão seu lugar nos confrontem em uma forma igualmente bem desenvolvida e unificada. Por enquanto, de qualquer forma, os fenômenos da gravidade estão separados dos outros campos da física por um abismo profundo, enquanto não for possível explicar a atração newtoniana como uma ação indireta causada por mudanças no estado de um éter que preenche o espaço. As tentativas que foram feitas nesse sentido recentemente, desde a hidrodinâmica metafísica de Riemann até a teoria cinética de Isenkrahe, não têm o caráter de uma explicação física.¹⁴⁵ Elas se baseiam em um tipo de física transcendental, na medida em que atribuem aos corpos que geram gravidade propriedades que nenhum corpo físico possui. Mas, mesmo fora isso, não nos deparamos com um método uniforme; pelo contrário, uma atração inegável do desenvolvimento atual reside precisamente na diversidade de pontos de vista a partir dos quais são feitas tentativas de trazer coerência e ordem ao reino dos fenômenos. As ideias-guia não são tão separadas umas das outras que uma exclua a outra; ao contrário, elas são capazes de se interpenetrar e se complementar de muitas maneiras, e não queremos esquecer essa relação quando enfatizamos separadamente a seguir alguns pontos que são importantes no desenvolvimento mais recente da física teórica.

O primeiro deles diz respeito ao conceito de energia, que é de fundamental importância porque é o único que todos os campos da física têm em comum. Portanto, é óbvio colocar a energia no topo da teoria em cada um deles e conectar os diferentes campos entre si por meio do princípio da conservação da energia. Mas fomos ainda mais longe ao tentar considerar a energia como uma substância real, a matéria como a manifestação da energia; de acordo com as diferentes classes de fatos físicos, temos uma forma de energia mecânica, térmica, eletromagnética e química. Se até agora foi considerado um objetivo da ciência reduzir essas diferentes energias a uma única forma de energia mecânica ou, mais especificamente, cinética, a tarefa da pesquisa agora se limita à investigação dos fatores de energia nas áreas individuais, nas maneiras pelas quais ela se move e realiza suas transformações. A exigência feita no início de que o conceito de energia deveria ter um papel de liderança no desenvolvimento de teorias deve ser cumprida em grande parte. Em sua forma original, o princípio da mecânica de Hamilton contém a diferença entre energia cinética e potencial; em seu desenvolvimento posterior, ele revela a possibilidade de substituir a energia potencial pela energia de movimentos ocultos, de explicar ações à distância por movimentos em um meio intermediário.¹⁴⁶ A teoria mecânica do calor fez a contribuição mais importante para o desenvolvimento do conceito de energia, e as representações mais recentes da teoria da eletricidade também têm seu ponto de partida nela. Em nenhum campo, entretanto, o princípio da conservação da energia fornece uma base suficiente para o desenvolvimento da teoria; em vez disso, outros fatos de observação completamente independentes dele são acrescentados em todos os lugares. Também deve ser enfatizado que o interesse prático que atribuímos à formulação de teorias gerais é, em pouquíssimos casos, satisfeito pelo mero conhecimento da energia e de suas transformações e que, portanto, o princípio da energia também é insuficiente nesse aspecto. A visão de que a energia tem uma existência independente dos corpos, que esses são meramente os recipientes nos quais os movimentos da energia ocorrem,

¹⁴⁵Bernhard Riemann (1826-1866) foi um matemático alemão que estudou com Gauss e foi assistente de Weber. Ver [Rie67b] com tradução para o inglês em [Rie67a] e [Rie77]. Caspar Isenkrahe (1844-1921) foi um matemático, físico e filósofo alemão.

¹⁴⁶William Rowan Hamilton (1805-1865) foi um matemático, astrônomo e físico irlandês.

provavelmente será difícil de ser concretizada, especialmente no campo da mecânica. Por fim, a ciência da física não ficará satisfeita com a existência de diferentes tipos de energia e com o fato de que eles podem ser transformados, mas sempre buscará saber se isso não pode ser explicado pela correspondência interna das formas de energia. Da mesma forma, a luz, o calor, a eletricidade e o magnetismo costumavam ser explicados pelas ações de outros tantos corpos imponderáveis, ao passo que, atualmente, só precisamos supor a existência de um único [corpo].

Na medida em que a energética se opõe aos métodos da física molecular, ela está subordinada às teorias que fazem uso da ideia de um preenchimento contínuo do espaço. Com base em vários fatos, elas atribuem propriedades aos elementos de volume de um corpo que podem sofrer um aumento ou diminuição contínua dependendo da localização; elas procuram encontrar relações matemáticas entre as quantidades assim dadas que reflitam as correlações observadas. As equações fornecidas pelas teorias do contínuo têm a grande vantagem de serem válidas independentemente das ideias que associamos às grandezas que elas contêm. Elas nos fornecem uma descrição dos fenômenos que é a mais completa e simples possível. No entanto, nossa tarefa não é descrever os fenômenos, mas explicá-los, ou seja, criar sistemas móveis que sejam imagens dos processos reais desconhecidos, de modo que cada relação que ocorre entre os corpos corresponda a uma relação semelhante no modelo, e cada mudança que podemos fazer com ele corresponda a um processo real no mundo dos fenômenos. Esse requisito não é satisfeito pelas fórmulas matemáticas das teorias do contínuo; sempre estaremos buscando uma interpretação descritiva delas para obter uma diretriz para pesquisas futuras. De acordo com isso, Maxwell diz em sua obra *On the Dynamical Theory of Gases* — Sobre a Teoria Dinâmica dos Gases:¹⁴⁷

De fato, as propriedades de um corpo que se supõe ser um *pleno* uniforme¹⁴⁸ podem ser afirmadas dogmaticamente, mas não podem ser explicadas matematicamente.

Na introdução do artigo sobre as linhas de força de Faraday, Maxwell contrasta de forma atraente a representação de fenômenos por fórmulas matemáticas e por hipóteses físicas.¹⁴⁹ Ele diz que, no primeiro caso, perde-se de vista os fenômenos a serem explicados e que a busca por consequências matemáticas não abre nenhuma nova perspectiva sobre o contexto das coisas. Por outro lado, as hipóteses físicas nos mostram os fenômenos apenas em um espelho; a explicação bem-sucedida de um círculo limitado nos cega para os fatos e nos leva a conclusões precipitadas. Maxwell, portanto, procura descobrir um método de investigação que forneça à mente o apoio de uma visão física clara a cada passo, sem afastá-la dos fenômenos para a busca de sutilezas analíticas e sem levá-la para além dos fatos em favor de qualquer opinião preconcebida. Ele satisfaz essas condições pelo método da analogia mecânica, no qual baseou sua teoria da eletrodinâmica. A hipótese na qual ela se baseia é que duas correntes galvânicas possuem uma concatenação do mesmo tipo que os mecanismos que hoje chamamos de sistemas bicíclicos.¹⁵⁰ De acordo com essa suposição, as equações típicas dos sistemas bicíclicos também devem se aplicar a duas correntes galvânicas, e Maxwell chega assim às leis das ações eletromotrizes e ponderomotrizes da eletrodinâmica.

¹⁴⁷[Max67, pág. 49].

¹⁴⁸No texto original de Maxwell: “a uniform *plenum*”, ou seja, um *pleno* ou *plenum* uniforme. Na tradução em alemão de Riecke: “ein einförmiges Continuum”, ou seja, um contínuo uniforme.

¹⁴⁹[Max58].

¹⁵⁰Em alemão: *bicyklische Systeme*.

O método de analogias mecânicas não está, como a energética e as teorias do contínuo, em oposição à teoria molecular. A conexão natural, que subordinamos à forma típica de um sistema cíclico, pode muito bem ser causada por uma ação exercida de molécula sobre molécula ou por um meio que preenche continuamente o espaço. Entretanto, não se pode presumir que logo poderemos prescindir das ideias da teoria molecular. Na química, acima de tudo, os fenômenos de equilíbrio químico acessíveis à energética formam apenas uma parte dos fenômenos a serem explicados. A questão de por que os elementos químicos se unem em certas proporções para formar corpos sólidos de uma determinada forma cristalina está tão pouco ligada às leis do equilíbrio químico quanto a teoria da elasticidade está ligada às leis de fusão e vaporização. Na óptica, sempre que os fenômenos da luz estão ligados à constituição química dos corpos, somos levados a supor a existência de partículas minúsculas independentes umas das outras, cuja natureza é tão absolutamente invariável que elas executam exatamente as mesmas oscilações na estrela mais remota e na chama de um bico de Bunsen.¹⁵¹ Mesmo que a teoria cinética dos gases deva ser considerada meramente uma analogia mecânica, ela tornaria muito provável que em um gás existam partículas minúsculas que, em certo sentido, se movem independentemente umas das outras. A biologia no campo da botânica e da zoologia baseia-se inteiramente nas ideias da teoria molecular. A teoria do contínuo em si não tentou provar que as moléculas e os átomos são supérfluos nos fenômenos mencionados, apenas sustenta que a concepção deles não é a última em que podemos penetrar, e foi nesse sentido que William Thomson utilizou a teoria dos vórtices em um fluido sem atrito.¹⁵² Por sua vez, a teoria do contínuo não considera mais os corpos como preenchendo uniformemente o espaço; ela apenas imagina um fluido ideal por trás dos corpos, em cujas formas de movimento os fenômenos do mundo físico se baseiam.

Chegamos à conclusão de que a suposição de ação não mediada à distância, conforme feita na lei de Weber, era insuficiente e supérflua, mas que a ideia da constituição molecular dos corpos não foi afetada pela teoria de Maxwell. De acordo com as observações anteriores, o desenvolvimento futuro da ciência não mudará isso. Quais eram as opiniões de Weber sobre as questões discutidas? Ele acreditava que poderia defender a exatidão de sua lei contra as objeções levantadas; no entanto, ele foi claro desde o início sobre a possibilidade de que essa lei não fosse a causa final dos fenômenos elétricos. No final do Primeiro Tratado sobre *Medições Eletrodinâmicas* ele disse:¹⁵³

Contudo, é possível *conceber* que as forças incluídas na lei fundamental descoberta também são o tipo de forças que duas massas elétricas exercem *indiretamente* entre si e que, portanto, têm de depender, *em primeiro lugar* do meio intermediário¹⁵⁴ e, além disso, [têm de depender] de todos os corpos, que atuam nesse meio. [...] Contudo, uma outra questão ainda não decidida é saber se o conhecimento do meio intermediário, mesmo se ele não for necessário para a determinação das forças, ainda assim seria útil. [...] A ideia da existência de tal meio intermediário já é encontrada na ideia do fluido elétrico neutro difundido em todos os lugares, e mesmo se esse fluido neutro, sem considerar os condutores, tenha até o momento

¹⁵¹Robert Bunsen (1811-1899) foi um químico alemão. O bico de Bunsen é um dispositivo usado para efetuar aquecimento de soluções em laboratório.

¹⁵²William Thomson (1824-1907), também conhecido como Lorde Kelvin. Ver [Llo80] com tradução para o português em [Llo07].

¹⁵³Ver [Web46, págs. 213-214 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [Web21e, pág. 202].

¹⁵⁴Em alemão: *vermittelnden Medium*. Essa expressão pode ser traduzida como meio intermediário, meio mediador ou meio transmissor.

escapado das observações dos físicos, contudo há agora esperança de que podemos ser bem sucedidos em ganhar uma elucidação mais direta, de várias formas novas, desse fluido difundido por toda parte. Talvez em outros corpos, com exceção dos condutores, não ocorram correntes [elétricas], mas apenas *vibrações*, que só poderão ser observadas com mais precisão no futuro [...]. Além disso, preciso apenas lembrar da última descoberta de Faraday sobre a influência *das correntes elétricas sobre as vibrações da luz*,¹⁵⁵ o que não torna improvável que o meio elétrico neutro difundido em todos os lugares seja o próprio éter que está em toda parte, que cria e propaga as vibrações luminosas [...]¹⁵⁶

No último período de sua atividade científica, Weber se preocupou especialmente com as investigações teóricas moleculares, tentando inicialmente penetrar nas relações dos movimentos moleculares por meio de sua lei. Ele descobriu que dois tipos diferentes de movimento são possíveis com duas partículas elétricas do mesmo tipo.¹⁵⁷ No primeiro caso, ocorre uma reflexão mútua de duas partículas que se aproximam; no segundo caso, as partículas formam um sistema persistente no qual a distância entre elas aumenta periodicamente de zero até um certo valor e depois diminui novamente para zero. Ele relaciona o primeiro movimento à teoria cinética dos gases e o último à estabilidade dos compostos químicos. Ele também seguiu a suposição de Mossotti e Zöllner de que as moléculas ponderáveis deveriam ser consideradas como compostos de átomos elétricos positivos e negativos e que a gravitação poderia ser explicada pela predominância da atração elétrica sobre a repulsão.¹⁵⁸ Ele lidou com o problema de explicar os fenômenos da luz por meio de ondas em um éter elétrico, supondo que os movimentos de seus átomos correspondessem às suposições da teoria dos gases. Enquanto pôde trabalhar, perseguiu o objetivo que descreveu em 1875 com as seguintes palavras:¹⁵⁹

A verdadeira constituição dos corpos e os verdadeiros processos, embora mais complicados, que dependem dela, que só podem ser parcialmente representados por processos mais simples, permanecerão, apesar de todos os obstáculos, sempre o objeto e a meta final da pesquisa.

Gostaríamos de concluir nossa análise do trabalho científico de Weber com essa perspectiva. Para nós, no entanto, Weber é mais do que o famoso pesquisador que deu à ciência novos objetivos e novas direções; aqui ele trabalhou no auge de sua vida, aqui ele desfrutou da paz de sua velhice, experimentamos a simpatia e a bondade de sua natureza e, em sua aparência despretensiosa, honramos um caráter de rara grandeza e pureza. Portanto, como aluno e amigo mais jovem do falecido, também posso tentar relembrar a imagem de sua personalidade em nossas memórias. As horas em que ouvi suas aulas sobre física experimental como aluno mais velho sempre estarão entre minhas lembranças favoritas. Alguns podem ter sentido falta da fluidez de seu discurso, do charme de experimentos eficazes; mas com que rapidez se esquecia das externalidades, que podem ter sido notadas no início, devido à

¹⁵⁵[Far46a].

¹⁵⁶Mais tarde Maxwell apresentou ideias semelhantes às de Weber ao apresentar sua teoria eletromagnética da luz no Capítulo XX de seu livro *Tratado de Eletricidade e Magnetismo* publicado em 1873, [Max73b] e [Max54b].

¹⁵⁷Isto é, com duas partículas eletrizadas com cargas de mesmo sinal.

¹⁵⁸Ottaviano Fabrizio Mossotti (1791-1863) foi um físico italiano. Johann Karl Friedrich Zöllner (1834-1882) foi um astrofísico alemão. Ver [Web94b] com tradução para o inglês em [Web21c]. Ver também [Ass21e].

¹⁵⁹[Web75, pág. 357 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [Web24c, pág. 375].

maravilhosa arte com que ele sabia como desenvolver a conexão entre os fenômenos, expandir e aprofundar o conhecimento passo a passo. Suas palestras tiveram um efeito estimulante muito além do círculo dos físicos, graças às observações finas e pertinentes com as quais ele costumava iluminar o espírito e os métodos da pesquisa exata. Logo tive a sorte de poder conhecer pessoalmente o homem que eu admirava como professor. Qualquer pessoa que já tenha visitado Weber se lembrará da sala estreita, da escrivaninha simples; ela o verá lendo e trabalhando, com sua foto emoldurada pela janela através da qual a vista caía sobre o gramado e as árvores imponentes do jardim; ela se lembrará, não sem emoção, da maneira calorosa com que Weber cumprimentava o visitante, da simpatia calorosa que ele tinha por suas preocupações. Para o estranho, era uma surpresa quando ele chegava à residência de Wilhelm Weber pela passagem estreita e sinuosa entre as casas da Jüdenstrasse.¹⁶⁰ No centro da cidade, separada por alguns muros do barulho e da agitação do dia a dia e, ainda assim, repousando pacífica e tranquilamente dentro de si mesma, como o homem que havia concluído sua grande vida nela. Como Weber apreciava a bela propriedade, especialmente o grande e bem cuidado jardim com sua riqueza de flores e frutas e os lugares aconchegantes que o convidavam a descansar e relaxar. Quantas festas bonitas haviam sido celebradas ali, há pouco tempo, sob seus olhos; pois ele, que havia mantido o coração e a fé de uma criança durante toda a vida, ficava muito feliz quando o jardim ressoava com a alegria de uma juventude feliz. Quando seu irmão mais velho se aposentou do magistério, ele costumava passar o verão com sua família em Göttingen, na casa de Weber, que havia sido ampliada para esse fim. Uma nova vida cresceu em torno do falecido.¹⁶¹ Embora [Wilhelm Weber] não fosse casado, ele tinha uma vida doméstica agradável; em seu retorno a Göttingen [em 1849], sua sobrinha Sophie Weber o acompanhou e, a partir de então, com uma breve interrupção, ela administrou sua casa e cuidou de seu honrado tio. Cada vez mais, no entanto, a casa em Göttingen se tornou o centro da família e, neste ano, os filhos e netos de seu irmão Ernst Heinrich se reuniram em torno do homem já sofrido. E assim como essa casa era um lugar de trabalho tranquilo e celebrações alegres, também era um lugar ao qual todos aqueles que tinham a honra de frequentá-la deviam muita inspiração e incentivo. Pois os interesses de Weber não se limitavam ao círculo de sua ciência; ele era um amigo da contemplação filosófica, tinha uma mente aberta para a beleza da poesia, conhecia e amava nossa música clássica; e também acompanhava os assuntos deste mundo e o curso dos eventos políticos com um julgamento perspicaz e um espírito patriótico. Quando a imagem de Weber aparece em nosso olhar interior, pensamos primeiro em sua bondade e gentileza, em sua modéstia diante de todas as honras que lhe foram concedidas em abundância sem que ele as pedisse, no otimismo amável que ele manteve mesmo quando as coisas não saíam como ele queria. Mas sua bondade não se tornou uma fraqueza. Quando via uma injustiça, o homem, que de outra forma era tão calmo, podia se exaltar violentamente, fosse um assunto grande ou pequeno, e alguém poderia ter sorrido do zelo com que ele defendia o que reconhecia como certo, se não fosse pela reverência pelo profundo sentimento de verdade e justiça que estava expresso nele. Ele demonstrou sua seriedade em relação a isso em 18 de novembro de 1837, quando o novo rei revogou a constituição e liberou os funcionários públicos do juramento que haviam feito à constituição. A concepção de Dahlmann afirmava:¹⁶²

¹⁶⁰Nome da rua onde Weber morava em Göttingen.

¹⁶¹O irmão mais velho de Weber, Ernst Heinrich Weber, se aposentou da Universidade de Leipzig em 1871 e faleceu em 1878.

¹⁶²Friedrich Christoph Dahlmann (1785-1860) foi um historiador e político alemão. Ele foi o líder do movimento que ficou conhecido como os Sete de Göttingen, <https://en.wikipedia.org/wiki/G%C3>

Todo o sucesso da nossa atividade não se baseia mais seguramente no valor científico dos nossos ensinamentos do que na nossa integridade pessoal. Assim que aparecermos diante dos jovens estudantes como homens que brincam levianamente com seus juramentos, a bênção de nossa atividade desaparece.

Weber sabia o que estava em jogo para ele quando assinou essas palavras; embora não tivesse família para cuidar, a demissão foi um duro golpe, pois abalou profundamente todas as condições de sua existência. Para o cientista natural, mais do que para os representantes das ciências humanas, a possibilidade de um trabalho bem-sucedido está ligada à posse de uma cadeira acadêmica, e o chamado para outra Universidade teve de pôr fim ao relacionamento próximo com Gauss e ao trabalho conjunto entre os dois pesquisadores. No entanto, Weber tinha sentimentos fortes e profundos por Gauss, que são expressos nas seguintes palavras de uma carta escrita após sua demissão:

Você certamente está convencido de que nunca tive, nem jamais terei, um maior desejo em minha vida do que ficar perto de você o tempo todo, e que estou profundamente abalado pelos perigos que agora ameaçam a realização do meu desejo — se eu não for exilado, ficarei perto de você e saberei como me estabelecer no futuro, mesmo sem um gabinete.

Mas não foi apenas em uma grande ocasião e com uma grande decisão que Weber colocou a consideração por seu próprio benefício atrás do que considerava ser seu dever. Ele demonstrou o mesmo senso de dever em relação aos muitos pequenos assuntos associados ao cargo de professor, que tão frequentemente perturbavam seu ambiente em momentos inoportunos. Toda a personalidade de Weber o tornava inadequado para representar a universidade em um cargo de prestígio; ele também não gostava de aparecer em público com sua personalidade. A sua influência nos assuntos da Universidade e a participação que desempenhou neles foram, portanto, significativos. Ele administrou a direção da Faculdade de Filosofia três vezes; os relatórios sobre os assuntos gerais da Faculdade ou sobre as necessidades do Instituto que ele dirigia, que possuímos das suas mãos, foram escritos com o mesmo cuidado que seus tratados científicos e proporcionam várias instruções e inspiração. Weber era um homem completo e o que ele fazia, fazia com toda a sua força e com toda a sua mente. Ele era puro, verdadeiro e íntegro; e como não havia falsidade em si mesmo, ele não podia acreditar em nenhuma falsidade nos outros; portanto, seu julgamento também podia estar errado, mas a razão do erro era a bondade interna de sua natureza. O trabalho de sua vida, como foi transmitido à posteridade em seus tratados científicos, desenvolveu-se com admirável consistência desde o início, sem aberrações, sem regressão, como se fosse uma necessidade interna. O maior cuidado no desenvolvimento matemático, a confiabilidade mais incondicional na execução dos experimentos, a avaliação mais precisa do terreno seguro andam de mãos dadas com a visão mais ampla do que deve ser alcançado. E ele não enganou Weber, pois em todo o seu trabalho ele não buscou seus próprios interesses, mas, livre de todo egoísmo e de qualquer indício de vaidade, colocou-se a serviço da verdade. Quando se cansou de trabalhar, entregou uma parte de seus deveres oficiais, uma após a outra, a mãos mais jovens, sem queixas ou amargura. Quando o declínio de sua memória também impossibilitou o trabalho científico, ele largou a caneta, não sem dor, mas sem nunca perturbar a paz tranquila de sua alma. Com o passar dos anos, ele se tornou mais solitário; seu amado irmão havia partido antes

dele, o círculo de amigos que costumava se reunir todas as semanas para instrução mútua e troca informal de ideias havia se dissolvido e, portanto, ele estava cada vez mais limitado aos relacionamentos que o ligavam aos membros da família que estavam por perto e a alguns amigos leais de tempos antigos. Assim, sua mente gostava de retornar com frequência a dias passados e o mundo atual aparecia para ele como se fosse através de um véu; o que ele vivenciava internamente nessas horas, quando parecia perdido em sonhos, é um mistério diante do qual nos curvamos em reverência. Nos dias de outono desse ano, a saúde de Weber, que havia mantido um vigor admirável em sua velhice, piorou, e logo não era mais possível se iludir de que o fim estava próximo. Quando, depois de dias sombrios que impediam o desfrute do ar livre, o esplendor total do Sol voltou a brilhar pela primeira vez, ele se permitiu ser levado ao jardim, onde permaneceu o dia todo. Depois do meio-dia, ele adormeceu sentado em sua poltrona; quando o Sol começou a se pôr, seus olhos se abriram clara e brilhantemente; ele olhou para longe, seu olhar não mais fixo nas coisas deste mundo, mas para uma ordem mais elevada, para a qual ele ansiava há muito tempo, pois havia se cansado de trabalhar neste mundo. Então, ele adormeceu naquele longo sono do qual não há como despertar aqui, sob as árvores que ele plantou e que foram testemunhas de seu trabalho abençoado por tanto tempo.

Capítulo 6

[Heinrich Weber, 1893] Wilhelm Weber: Um Esboço Biográfico

Heinrich Weber^{163,164}

¹⁶³[Web93a] com tradução para o inglês em [Web24a]. Heinrich Weber (1839-1928) foi um físico alemão e professor na Universidade Técnica de Brunsvique. Era sobrinho de Wilhelm Eduard Weber, filho de seu irmão, o médico Ernst Heinrich Weber (1795-1878), um dos fundadores da psicologia experimental. Foi membro da Academia Leopoldina, a academia nacional da Alemanha, conhecida como Academia Alemã Leopoldina dos Cientistas Naturais.

¹⁶⁴As Notas de Heinrich Weber são representadas por [Nota de Heinrich Weber:]; as Notas de Carl Friedrich Gauss são representadas por [Nota de Gauss:]; todas as outras Notas são de minha autoria. A foto a seguir de Weber de 1884 foi feita pelo fotógrafo alemão Bernhard Petri (1840-1887). Ela aparece em [Web92e, frontispício] e [Web93a, frontispício].



H. Petri, Phot. Göttingen.

Meisenbach, Ruffarth & Co., Berlin, heliograv

Wilhelm Weber

6.1 Prefácio

A intenção era que o esboço de vida a seguir fosse publicado antes, mas a análise de um grande material de cartas, em sua maioria desorganizado, impediu que esse desejo fosse concretizado. Espero que os amigos de Wilhelm Weber recebam esse pequeno texto com gentileza. Gostaria de aproveitar esta oportunidade para corrigir alguns detalhes que não foram muito precisos na “Deutsche Revue”, na qual o esboço de vida foi incluído.¹⁶⁵ Na edição de agosto de 1892, página 184, a Nota deveria ser: E. H. Weber manteve ambas as cátedras (de anatomia e fisiologia) até 1865 (em vez de 1870), quando o professor Ludwig foi nomeado para a fisiologia. Ele ocupou o cargo de professor de anatomia por 51 anos (em vez de 55). Seu irmão mais novo, Eduard, foi professor extraordinário e professor de anatomia.

O autor.

6.2 A Juventude de Wilhelm Weber, 1804-1825

A família Weber é originária de um pequeno vilarejo na Turíngia, Gröben, próximo ao vilarejo de Teuchern, entre Weißenfels e Zeit; o avô de Wilhelm Weber possuía uma propriedade lá, que, de acordo com os costumes da época, deveria ter passado para seu filho mais velho, Michael,¹⁶⁶ pai de [Wilhelm] Weber. No entanto, Michael demonstrou pouca aptidão ou inclinação para a agricultura, mesmo em uma idade jovem. “Michael nunca se tornará um fazendeiro capaz, ele pode, no máximo, estudar”, disse seu pai, não colocando mais nenhum obstáculo no caminho da inclinação de seu filho para se dedicar à teologia, embora não sem relutância. Assim, encontramos Michael Weber em 1784, com 30 anos de idade, já como professor de teologia na Universidade de Wittenberg. Erudição minuciosa, um grande senso de justiça e boas maneiras — essas são as qualidades que A. M. Meyner enfatiza particularmente em sua *Geschichte der Stadt Wittenberg* — História da Cidade de Wittenberg, Dessau, 1854, página 147.¹⁶⁷ Em suas convicções religiosas, Michael Weber¹⁶⁸ se baseou total e completamente na revelação e, até o fim de sua vida (1833), manteve-se firme na defesa desse ponto de vista contra o racionalismo que estava se espalhando na época. Não poderia faltar o fato de que sua disposição séria, profundamente religiosa e, ainda assim, alegre, exerceu uma poderosa influência sobre seus filhos, como também foi demonstrado por Wilhelm Weber, que, embora avesso ao ponto de vista eclesiástico-dogmático, não era alheio à religião e sempre foi um inimigo do materialismo. Michael era um grande estudioso do latim; além de vários textos teológicos, ele escreveu um grande número de hinos em verso latino, bem como cartas e diálogos em latim para seus filhos. Seu primeiro casamento com Christiane Friederike Wilhelmine, nascida Lippold, descrita como uma mulher fina e delicada, gerou doze filhos, dos quais apenas quatro, três filhos e uma filha, atingiram idade avançada, além de Wilhelm.¹⁶⁹ Após a morte dela, ele se casou pela segunda vez com Eleo-

¹⁶⁵[Web92a], [Web92b] e [Web92c].

¹⁶⁶Ver a Nota de rodapé 72 na página 34.

¹⁶⁷[Mey54].

¹⁶⁸[Nota de Heinrich Weber:] C. F. Fritzsche, *Narratio de Michaele Webero primo nuper Halensi theologo*, Halis Saxonum 1834.

¹⁶⁹[Nota de Heinrich Weber:] Gustav Weber, nascido em Wittenberg em 7 de fevereiro de 1790, pastor em Rackith, perto de Wittenberg, viveu mais tarde em Niemegk, perto de Bitterfeld, morreu em Klein-Wittenberg em 11 de novembro de 1852.

Ernst Heinrich, nascido em Wittenberg em 24 de junho de 1795, frequentou a Fürstenschule zu Meißen de 1806 a 1811, estudou em Wittenberg de 1811 a 1813, também em Leipzig de 1813 a 1815 e tornou-se

nore Friederike Henriette, nascida Pallas, que, sem ter filhos próprios, foi uma grande mãe para os filhos de seu primeiro casamento, alguns dos quais ainda não eram adultos, e cuidou fielmente do marido até sua morte em 1º de agosto de 1833. Diz-se que Michael tinha uma “voz de trovão”, o que era muito adequado para discursos públicos. Ele ocupou o cargo de *Rector magnificus*¹⁷⁰ nas comemorações do 300º aniversário da Universidade de Wittenberg em 1802 e também em 2 de julho de 1807 no Festival da Paz.¹⁷¹ Após a unificação das duas Universidades de Halle e Wittenberg, Michael Weber mudou-se para Halle e desempenhou diligentemente suas funções como professor de teologia até sua morte.

Wilhelm Eduard Weber nasceu em 24 de outubro de 1804. Naquela época, alugavam um apartamento na “goldnen Kugel”, Schloßstraße nº 5 (atual nº 15).^{172,173} O proprietário

doutor em medicina em Schmiedeberg em 1815, quando a Universidade foi transferida para lá após o cerco de Wittenberg. Em 1817, qualificou-se como professor particular em Leipzig. Como resultado de uma nomeação para a recém-fundada Universidade de Bonn, tornou-se professor associado de anatomia em Leipzig em 1819 e logo depois, após a morte de Rofenmüller em 1820, tornou-se professor titular de anatomia e, após a morte de Kühn, assumiu também a cátedra de fisiologia. Ele manteve ambas as cátedras até 1865 quando, após a nomeação do Professor Ludwig para a fisiologia, uma cátedra especial foi criada juntamente com um Instituto. Mais tarde, ele representou a anatomia junto com seu irmão mais novo, Eduard, que trabalhou como professor associado. Logo após a morte de Eduard [em 1871], ele também renunciou a esse cargo, que ocupou por 51 anos, pouco antes de adoecer. Ele morreu em 26 de janeiro de 1878.

Eduard Friedrich, nascido em 10 de março de 1806 em Wittenberg, formou-se na Faculdade de Educação Franke’schen Stiftungen em Halle, inicialmente obteve o doutorado em medicina em Naumburg, depois tornou-se professor associado de anatomia em Leipzig em 1833, morreu em 18 de maio de 1871.

Lina Weber, nascida em 6 de abril de 1802, permaneceu solteira, morreu em 1º de julho de 1881 em Halle.

¹⁷⁰Magnífico Reitor.

¹⁷¹[Nota de Heinrich Weber:] Meyner, *Geschichte der Stadt Wittenberg*, Dessau 1845, págs. 147-148 e C. F. Fritzsche, Narratio etc.

¹⁷²[Nota de Heinrich Weber:] Segundo comunicado do prefeito de Wittenberg, Dr. Schild, no *Göttinger Zeitung* em 13 de agosto de 1891, nº 8.634.

¹⁷³A casa onde Weber nasceu era conhecida como a esfera ou bola de ouro, *goldnen Kugel* em alemão. Uma imagem moderna dessa casa é mostrada na Figura (a) dessa Nota de rodapé, https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Eduard_Weber e <https://www.hmdb.org/m.asp?m=69820>. Na Figura (b) mostro as placas comemorativas. Placa superior: Wilhelm Eduard Weber, professor de física e inventor da telegrafia elétrica, nasceu nessa casa em 24 de outubro de 1804. Placa inferior: Inventor do telégrafo eletromagnético, local de nascimento:



(a)



(b)

dessa casa era o Prof. Dr. Langguth, colega de Michael.¹⁷⁴ Por morarem juntos há muito tempo — já que o irmão Ernst Heinrich, dez anos mais velho, também nasceu na mesma casa — as duas famílias eram amigas íntimas. Pouco se sabe sobre o início da juventude de Wilhelm. Provavelmente, ele a passou com seu irmão Eduard, que era dois anos mais novo, sob os cuidados atentos de sua mãe em um ambiente doméstico tranquilo. No entanto, não há dúvida de que as relações entre as famílias Weber, Langguth e Chladni (que morou na casa de Langguth entre 1801 e 1813), tiveram uma influência decisiva não apenas na vida de Wilhelm, mas também na de seus irmãos.¹⁷⁵ Entre 1782 e 1784 Langguth obteve seu doutorado e tornou-se professor associado de medicina, a partir de então professor titular de história natural (falecido em 9 de fevereiro de 1814 em Wittenberg). Ele possuía coleções de história natural, economia, física e medicina. Esse gabinete particular era excelente, em parte por causa dos inúmeros espécimes magníficos e raridades extraordinárias, em parte por causa de sua utilidade para o ensino.¹⁷⁶ Chladni, doutor em filosofia e direito, sem cargo oficial, morava em Kemberg, perto de Wittenberg (de 1756 a 1827), era amigo íntimo de Langguth desde sua juventude — ambos eram filhos de professores de Wittenberg.^{177,178} Sob tais circunstâncias, como poderia ser diferente, as ciências naturais se tornaram a direção permanente dos meninos, especialmente pelo fato de que o irmão mais velho, Gustav, já havia seguido o pai e estudado teologia, enquanto o segundo irmão, Fritz, que infelizmente morreu cedo, dedicou-se ao exército. É também devido à influência de Chladni, que se manteve em correspondência com os irmãos Weber até o fim de sua vida, que E. H. e W. Weber mais tarde trabalharam juntos na teoria ondulatória e que a acústica foi o campo no qual Wilhelm Weber iniciou sua carreira na física.

A vida familiar acolhedora não duraria muito tempo. A terrível retirada do exército de Napoleão da Rússia havia sido concluída, a batalha em Kazbach (26 de agosto de 1813) havia sido vencida por Blücher, as batalhas em Groß-Beeren e Dennewitz, em 23 de agosto e 6 de setembro, por Bernadotte, Bülow e Tauenzien, e em todos os lugares havia um movimento para expulsar os franceses das posições que haviam ocupado. A fortaleza de Wittenberg também tinha uma guarnição francesa, e Bülow avançou para libertar a cidade dos franceses em setembro de 1813. Os franceses se recusaram a se render, e a resposta foi um terrível bombardeio. Bernhardt escreve sobre isso:¹⁷⁹

Foi na noite de 27 de setembro de 1813 que os prussianos, sob o comando de Bülow, dirigiram o segundo terrível bombardeio contra nossa infeliz cidade, disparando de 10 baterias espalhadas do Rote Mark ao longo da Belzigerstrasse e Bruchstrasse até o Elba, e de 24 canhões de grande calibre. Durante esse terrível incêndio, a torre da igreja do castelo ficou em chamas, houve também um incêndio no prédio dos fundos do castelo, depois na agência dos correios, e o fogo se espalhou dali para a casa nº 3 de Dörffel, a casa nº 4 de Meiner e a casa nº 15 de Langguth (atual herança de Voigt). Neste caso, várias famílias, e a do Professor Weber foi mencionada especificamente entre elas, não salvaram nada além de suas vidas.¹⁸⁰

¹⁷⁴Christian August Langguth (1754-1814) foi um médico e físico alemão.

¹⁷⁵Ver a Nota de rodapé 75 na página 34.

¹⁷⁶[Nota de Heinrich Weber:] Meyner, pág. 43.

¹⁷⁷[Nota de Heinrich Weber:] Bernhardt, *Dr. Ernst Chladni, der Akustiker*, Wittenberg 1856, pág. 39.

¹⁷⁸[Ber56].

¹⁷⁹Bernhardt, *Wittenberg vor 50 Jahren*, Wittenberg 1863, pág. 33. — Meyner, págs. 69 e 70, e prefeito Dr. Schild, *Göttinger Zeitung* de 13 de agosto de 1891.

¹⁸⁰[Nota de Heinrich Weber:] A casa de Langguth, a bola de ouro, não foi totalmente incendiada, mas foi

Como resultado do desastre ocorrido naquela noite de setembro, o Professor Weber, assim como muitos outros professores, mudou-se da fortaleza sitiada, inicialmente para a vizinha Schmiedeberg, onde permaneceu até o Natal de 1814, antes de se estabelecer em Halle, depois que a Universidade foi completamente abolida.¹⁸¹

Em Halle, Wilhelm frequentou o estabelecimento educacional da Fundação Francke e estudou idiomas antigos com grande entusiasmo. O interesse que ele tinha pelos escritores clássicos naquela época é demonstrado por uma lista ainda existente de escritores latinos e gregos, que ele comprou com o dinheiro que havia economizado, muito além do que era exigido pela escola. Quando ainda era aluno, foi chamado por seu irmão mais velho, Ernst Heinrich, que já era professor em Leipzig, para realizar experimentos sobre o movimento das ondas, cujos resultados mais tarde formaram a *Wellenlehre*, que publicaram em conjunto.^{182,183} Para poder realizar essas investigações conjuntas sem ser perturbado, Ernst conseguiu que Wilhelm fosse completamente dispensado de frequentar a escola por um longo período de tempo. Os irmãos, que já estavam intimamente ligados por estreitos laços familiares, tornaram-se tão conectados entre si por compartilharem interesses comuns que juraram permanecer sempre fiéis um ao outro em suas vidas posteriores, “não importando o que o destino pudesse lhes reservar”. Raramente a estrada rural entre Leipzig e Halle viu viajantes ansiosos mudarem de uma cidade para a outra com tanta frequência quanto na época em que Wilhelm e Eduard moravam em Halle, enquanto Ernst morava em Leipzig. A distância de cerca de 8 horas nem sequer era levada em consideração. A primeira grande viagem que Wilhelm fez aos banhos da Boêmia na companhia de seu irmão Ernst, sobre a qual ele fez muitas anotações, provavelmente também ocorreu nessa época, em 1821.

Na páscoa de 1822, Wilhelm deixou a escola e se matriculou como estudante de matemática em Halle. Não é mais possível saber quais professores o atraíram particularmente naquela época, mas pode-se presumir que ele recebeu seu treinamento matemático de J. F. Pfaff e seu treinamento físico de J. H. Chr. Schweigger.¹⁸⁴ Durante seu período como estudante, Wilhelm fez várias vezes viagens curtas e longas a pé, incluindo uma viagem de três meses à Suíça e ao Norte da Itália com seu irmão Ernst no verão de 1822. Nos semestres posteriores, ele participou ativamente do seminário de física liderado por Schweigger, e seu gosto pela acústica o levou a publicar trechos dos escritos de Savart sobre a teoria do som e do timbre no *Jahrbuch für Chemie und Physik* de Schweigger, volume 14, página 385.¹⁸⁵ Durante esse período, as investigações conjuntas sobre os movimentos das ondas foram finalizadas e publicadas em 1825 com o título *Wellenlehre auf Experimente gegründet* — A Teoria Ondulatória Baseada em Experimentos.¹⁸⁶ Esse trabalho o tornou conhecido pela primeira vez no mundo científico, e o reconhecimento que recebeu de todos os lados contribuiu muito para estimulá-lo a continuar no caminho da pesquisa experimental que havia iniciado. Os dois autores dedicaram o trabalho a seu velho amigo Chladni. Após receber o trabalho, Chladni escreve de Kemberg para Wilhelm em 20 de agosto de 1825:

Meu querido amigo, lhe agradeço muito sinceramente por essa dedicação tão gentil da

restaurada ao seu antigo esplendor por meio de grandes reparos. Ela ainda está de pé hoje e foi decorada com uma placa memorial.

¹⁸¹[Nota de Heinrich Weber:] Meyner, pág. 68.

¹⁸²[Nota de Heinrich Weber:] *Die Wellenlehre auf Experimente gegründet*, Leipzig 1825.

¹⁸³A Teoria Ondulatória Baseada em Experimentos, [WW25].

¹⁸⁴Johann Friedrich Pfaff (1765-1825) foi um matemático alemão. Johann Salomo Christoph Schweigger (1779-1857) foi um químico, matemático e físico alemão.

¹⁸⁵Felix Savart (1791-1841) foi um físico e matemático francês. Ver [Web25a] e [Web25b].

¹⁸⁶[WW25].

Wellenlehre — Teoria Ondulatória, na qual você e seu irmão trabalharam juntos em Leipzig, e eu a considero ainda mais honrosa porque é um trabalho realmente clássico, no qual o que acontece nesse tipo de movimento é apresentado de forma mais clara e coerente do que qualquer um já fez antes, e que também contém muitas contribuições completamente novas para nosso conhecimento do assunto. A propósito, o método de apresentar apenas os resultados imediatos da observação e da experiência da maneira mais simples possível é muito mais valioso para a verdadeira ciência natural do que toda uma série de tramas meramente idealizadas, onde a natureza, tal como criada por si mesma, muitas vezes corresponde muito pouco ao que realmente existe.

Cartas de agradecimento chegaram não apenas de acadêmicos, mas também do governo. Em uma carta datada de 14 de março de 1826, o então Ministro da Cultura da Prússia, von Altenstein, escreve:

Reconheço em sua totalidade o excelente serviço que prestou, juntamente com seu irmão, ao avanço da ciência através de sua rica escrita. Se eu puder facilitar a realização de outras investigações fornecendo meios externos, pode contar com minha disposição e solicito que me informe sobre seus desejos a esse respeito.

O ministro também anexou a esta carta a opinião de um “excelente físico” não identificado, a quem enviou o livro para revisão.

Este brilhante sucesso de seu primeiro trabalho teve consequências muito favoráveis para Wilhelm Weber.^{187,188} Desde então, até sua transferência para Göttingen, o Ministério não apenas lhe concedeu fundos abundantes para comprar os aparelhos e instrumentos necessários para sua pesquisa, mas também melhorou sua situação financeira por meio de remunerações, mesmo antes de ele se tornar professor na Universidade. A mesma benevolência foi demonstrada mais tarde, depois que ele obteve o cargo de Professor Associado, por meio de repetidos suplementos salariais.

6.3 Anos Adicionais de Estudo 1824-1831

Depois de receber seu doutorado em 26 de agosto de 1826, com base em sua tese “*Theoriam efficaciae laminarum maxime mobiliū arctequē tubas aërem sonantem etc. continens*” (A teoria da eficiência das palhetas altamente móveis e dos tubos contendo ar ressonante etc.), Weber sentiu que Halle não poderia lhe oferecer o que ele queria para sua formação futura. Portanto, ele desejava urgentemente ir para Göttingen por um ano para aprofundar sua formação em matemática e ciências exatas sob a influência do famoso matemático Gauss e, em seguida, passar um ano em Paris, onde a disciplina física-matemática era brilhantemente representada na época. Tendo em vista o tratamento favorável que havia recebido até então do Ministério da Cultura da Prússia, teve coragem em pedir apoio financeiro para esse fim,

¹⁸⁷[Nota de Heinrich Weber:] As obras de Wilhelm Weber, publicadas pela *Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen* (Sociedade Real de Ciências em Göttingen) e publicadas por Julius Springer em Berlim, estão sendo editadas atualmente. O primeiro e o segundo Volumes da obra de 6 volumes serão publicados no próximo outono.

¹⁸⁸Os seis Volumes que foram publicados: [Web92e], [Web92d], [Web93b], [Web94d], [WW93] e [WW94]. A maior parte de seus trabalhos já foram traduzidos em inglês, com comentários, nos 5 Volumes do livro *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*: [Ass21f], [Ass21g], [Ass21h], [Ass21i] e [Ass24b].

mas em uma carta datada de 29 de abril de 1826 todo o apoio foi recusado. O Ministro da Educação escreve:

O Ministério também considera aconselhável, por várias razões, que o Senhor primeiro experimente ser professor particular na Faculdade de Filosofia da Universidade local por algum tempo e só depois empreenda uma viagem científica a Paris. Para poder fazer uso do conselho e do apoio do Conselheiro Gauss¹⁸⁹ na continuação de suas investigações hidráulicas e afins, a estadia de um ano em Göttingen que o senhor pretendia não parece ser urgentemente necessária; o senhor poderá atingir o objetivo de uma maneira menos dispendiosa, em parte por correspondência e em parte viajando para Göttingen durante suas férias e repetindo a viagem, se necessário.

Portanto, Weber teve que ser modesto e voltou-se novamente para a acústica, como mostram alguns ensaios menores no *Jahrbuch* de Schweigger, que foram seguidos em 1827 por sua tese de habilitação “Leges oscillationis oriundae etc.”¹⁹⁰ É digno de nota que Joh. Tobias Mayer,¹⁹¹ entre outros, o parabenizou por esse trabalho, sem saber que Weber assumiria seu cargo em Göttingen quatro anos depois. Entretanto, seu cargo de professor particular teve vida curta. Ele foi nomeado Professor Associado no outono do ano seguinte, tendo recebido sua primeira homenagem estrangeira em julho, quando foi nomeado membro correspondente da Academia Real de Ciências de Turim. Em setembro, Weber visitou a Naturforscher-Versammlung [Conferência de Cientistas Naturais] em Berlim, onde teve seu primeiro contato com os professores e palestrantes de lá. Nessa ocasião, ele mesmo proferiu uma palestra sobre a compensação do órgão de tubos em relação à intensidade dos tons, [publicada nos] *Annalen* de Poggendorff, Volume 14, 1828,¹⁹² que foi elogiada e atraiu a atenção de Alexander von Humboldt e Gauss, que estavam presentes na reunião.¹⁹³

O desejo de continuar seus estudos fora de Halle não deixou Weber em paz. Quase imediatamente após o Naturforscher-Versammlung, ele embarcou (em 17 de outubro de 1828) em uma viagem para Berlim para uma estadia prolongada, que teria uma influência decisiva em toda a sua vida futura. Uma grande quantidade de estímulos intelectuais fluiu para ele de imediato, não apenas pelo contato íntimo com um grande número de colegas quase da mesma idade, como Dirichlet, Dove, Magnus e Wöhler, mas também com personalidades mais velhas, a maioria das quais já estava no cargo há algum tempo, como Mitscherlich, Heinrich e Gustav Rose, Poggendorff, Enke, Seebeck, Steiner, Weiß, Ehrenberg, Ermann, Crelle e outros, além disso pelo fato de que a casa de Alexander e até mesmo de Wilhelm von Humboldt se abriu para ele.¹⁹⁴ O interesse de A. von Humboldt pelo jovem acadêmico aspirante é melhor ilustrado por uma anotação que Weber fez na época. Em 12 de novembro, ele escreve:

¹⁸⁹Em alemão: *Hofrath Gauss*. O título pelo qual o Ministro se referiu a Gauss, *Hofrat*, pode ser traduzido como Conselheiro, Conselheiro Privado ou Conselheiro da Corte.

¹⁹⁰Título completo em latim: *Leges oscillationis oriundae si duo corpora diversa celeritate oscillantia ita conjunguntur ut oscillare non possint nisi simul et synchronice exemplo illustratae tuborum linguatorum* — As leis de oscilação que surgem quando dois corpos oscilando em velocidades diferentes são unidos de tal maneira que só podem oscilar simultânea e sincronicamente são ilustradas pelo exemplo dos tubos com palheta. Ver [Web27].

¹⁹¹Ver a Nota de rodapé 78 na página 35.

¹⁹²[Web28].

¹⁹³Ver a Nota de rodapé 81 na página 35.

¹⁹⁴Wilhelm von Humboldt (1767-1835) foi um filósofo, linguista e diplomata alemão. Fundou a Universidade de Berlim, hoje em dia chamada de Universidade Humboldt de Berlim. Foi ministro do interior da Prússia em 1819.

Humboldt (Alexander) me chamou às 12 horas. Ele me aconselhou a ficar com a física experimental e quer promover a compra de uma balança, aparelhos de medição e um monocórdio. Portanto, ele me enviou a Schulze (Dr. J. Schulze, funcionário do Ministério da Cultura) e quer falar com ele pessoalmente e, se necessário, escrever para o Ministro. Ele recomenda que eu viaje para Hamburgo e quer me recomendar a Schumacher lá. Ele também me aconselhou a ouvir as aulas de Dirichlet sobre a teoria do calor de Fourier e me convidou para visitar seu irmão Wilhelm com ele no dia seguinte, às 8 horas. De acordo com a declaração de Humboldt, tenho alguma esperança de ser nomeado para um cargo em Göttingen, caso haja um disponível.

Weber também escreve sobre a visita no dia seguinte:

Por volta das 8 horas da noite, fui até Humboldt, que me presenteou com dois novos Volumes das *Philosophical Transactions*, onde Barlow havia usado objetivas para binóculos contendo líquido para investigar a mudança na refração desse líquido.¹⁹⁵ Viajamos em uma carruagem sem assento traseiro, demos carona a um inglês, de modo que nós três ficamos empilhados como arenques em um lado da carruagem e fomos até o Ministro Wilhelm v. Humboldt, que não estava em casa, mas estavam presentes sua esposa, filha e dois convidados. Tomamos chá, olhamos algumas das pinturas presentes em todos os cômodos e falamos muito francês por consideração ao inglês.¹⁹⁶ Em seguida, veio Wilhelm v. Humboldt, que parece muito mais velho do que Alexander, fala mais claramente, com mais certeza, mas com menos fluência do que Alexander. Durante toda a noite, eles seguraram seus chapéus nas mãos. A conversa foi muito leve e despretensiosa e dizia respeito à disputa sobre a instalação do maior vaso de granito da Europa dentro ou em frente ao museu, como Cotta poderia ser usado para o bem da ciência e assim por diante.¹⁹⁷ Às 10 horas, voltamos para casa.

Outra vez, em 3 de dezembro, Weber escreve:

Eu havia combinado de me encontrar com Dirichlet à noite na casa de Wilhelm v. Humboldt. Dirichlet não veio por causa do degelo. Na casa de Wilhelm v. Humboldt, foi lida uma carta sobre a viagem do príncipe herdeiro da Itália e discutiu-se a guerra.¹⁹⁸ Alexander v. Humboldt veio com a Sra. v. Cotta.

Weber também teve contato frequente com Alexander von Humboldt em um outro local. Além de Dirichlet e Poggendorff, Weber conviveu bastante com Mitscherlich.¹⁹⁹ Embora Mitscherlich fosse professor titular de química, ele demonstrava grande interesse pela pesquisa física. Ele mantinha um animado diálogo científico em sua casa, na forma de festas noturnas informais, das quais participavam A. v. Humboldt, os dois Rose, Dove, Karsten, Dirichlet,

¹⁹⁵Peter Barlow (1776-1862) foi um matemático e físico inglês.

¹⁹⁶Que provavelmente não falava alemão.

¹⁹⁷Provavelmente estavam se referindo a Johann Friedrich von Cotta (1764-1832), que editou várias obras de Alexander Humboldt.

¹⁹⁸[Nota de Heinrich Weber:] Provavelmente refere-se à guerra da Grécia pela independência.

¹⁹⁹Peter Gustav Lejeune Dirichlet (1805-1859) foi um matemático alemão. Johann Christian Poggendorff (1796-1877) editou o *Annalen der Physik und Chemie* de 1824 a 1876, onde muitos dos artigos de Weber foram publicados. O moderno *Annalen der Physik* é o sucessor deste periódico. Eilhard Mitscherlich (1794-1863) foi um químico alemão.

Wöhler, Ehrenberg, Poggendorff, Magnus e outros. Nessas noites, Mitscherlich demonstrava novos instrumentos ou eram repetidos e discutidos novos experimentos, como o de Arago sobre magnetismo rotacional.²⁰⁰ Weber foi convidado para ir à casa de Mitscherlich toda terça-feira à noite. Além disso, Weber e Mitscherlich realizaram experimentos conjuntos em seu laboratório sobre os tons da harmônica química,²⁰¹ sendo que para isso Weber mandou enviar seu monocórdio de Halle, bem como experimentos sobre a velocidade de propagação do som em vários gases e assim por diante. Mitscherlich tinha um grande público em suas palestras, às quais Weber também comparecia. Weber escreve em uma nota:

Mitscherlich se esforça muito em suas palestras, abordando os principais componentes de nossos nutrientes: goma, glúten, albumina e açúcar.²⁰² Ele fala fluentemente, mas em voz baixa. Seus experimentos são preparados de maneira excelente e, com o maior prazer pelos fenômenos naturais, ele ensina todos os pequenos truques para sua produção segura. Muito pode ser aprendido com a maneira como configura seus instrumentos.

O conselho de A. v. Humboldt para assistir às aulas de Dirichlet não foi em vão. Weber logo se transformou de um ouvinte ávido em um amigo íntimo, e essa amizade mais tarde contribuiu em grande parte para a decisão de Dirichlet de trocar Berlim por Göttingen em 1855.²⁰³

Wilhelm Weber escreve em 21 de novembro sobre Dirichlet:

Suas aulas não são totalmente livres de constrangimentos. Elas também não são tão bem preparadas quanto as aulas de Scherk, mas ainda assim são muito instrutivas, porque Dirichlet sabe muito bem como explicar os pontos sutis do cálculo superior.^{204,205} Steiner e o Dr. Scheibler também estão ouvindo às suas aulas.

As aulas, que aconteciam três vezes por semana, das 12 às 13 horas, eram geralmente seguidas de uma caminhada, da qual Dirichlet participava com frequência, e à tarde era costume irem à cafeteria “Dirichlet”.

Depois da aula, um de nós sempre convida os outros para a cafeteria Dirichlet, onde chegamos às 2 ou 3 horas e ficamos muito felizes até as 6 horas.

²⁰⁰François Arago (1786-1853) apresentou sua descoberta na Academia de Ciências de Paris em reuniões que ocorreram em 22 de novembro de 1824, 7 de março de 1825 e 3 de julho de 1826, [Ara24], [Ara25] e [Ara26]. Esses artigos também foram incluídos em suas obras completas, [Ara54].

²⁰¹Em alemão: *Töne der chemischen Harmonika*.

²⁰²Em alemão: *Gummi, Kleber, Eiweiß, Zucker*. A palavra “Eiweiß” pode ser traduzida como albumina, proteína ou clara de ovo.

²⁰³[Nota de Heinrich Weber:] Gustav Peter Lejeune Dirichlet, nascido em 13 de fevereiro de 1805 em Düren, perto de Aachen, filho do comissário de correio de lá (Düren era francesa na época), foi estudar em Paris depois de frequentar a escola de gramática em Köln [Colônia], assumiu um cargo de tutor com o General Fon em 1823, mas depois mudou-se para a Prússia, provavelmente por instigação de A. v. Humboldt. Em 1827 obteve seu doutorado em Bonn e depois obteve um emprego em Breslau. Depois de se tornar Professor Associado em 1828, ele também recebeu um convite para a Escola Superior de Guerra em Berlim, que aceitou. No entanto, manteve seu cargo em Breslau até 1831, quando se tornou Professor Associado na Universidade de Berlim. Em 1839, recebeu o título de professor titular. Em 1855, sucedeu Gauss em Göttingen, onde faleceu em 1859.

²⁰⁴[Nota de Heinrich Weber:] Essa observação se refere ao primeiro ano de Dirichlet como professor. Posteriormente, suas palestras poderiam ser consideradas modelos para aulas de matemática, como o autor [isto é, o próprio Heinrich Weber] teve a sorte de conhecer por experiência própria.

²⁰⁵Heinrich Weber assistiu a algumas das palestras de Dirichlet.

Naquela época (de 1825 a 1863), Steiner era professor de matemática na Gewerbeschule [escola técnica profissionalizante] e um colega de Wöhler.²⁰⁶ Weber escreve:

Steiner, que fez contribuições geométricas excelentes para o *Journal* de Crelle,²⁰⁷ é obviamente um suábio de nascimento,²⁰⁸ com muito talento cômico. Ele zombou um pouco do grande Ohm e contou suas histórias sobre a oval.

Por meio dos amigos que fez, Weber foi novamente introduzido em círculos mais especializados. Dirichlet o convidou para a Sociedade de Matemática na Englische Hause, Poggendorff para a Sociedade de Humanidade, onde Leopold von Buch deu uma palestra, e assim por diante. Mas apesar desse diálogo animado com pessoas mais jovens, Weber ainda tinha tempo para socializar com autoridades científicas mais velhas, como o mineralogista Weiß, os dois Roses, Ehrenberg, Schaffrinsky e o acadêmico Seebeck.²⁰⁹ Durante uma conversa sobre seu envolvimento com assuntos matemáticos, Seebeck contou a ele sobre uma observação interessante que Gauss havia feito a Pfaff, dizendo que ele (Gauss) tinha tido suas ideias mais brilhantes justamente em momentos de maior desespero. Weber também aproveitou a oportunidade para visitar a oficina mecânica de Pistor, onde conheceu Schieck, os irmãos Müller, o fabricante de cronômetros Tiede e grandes estabelecimentos, como a fundição de ferro, a fábrica de gás e assim por diante. Schleiermacher também queria ouvir Weber pregar, mas ele foi impedido de realizar o culto.²¹⁰

Em 22 de janeiro de 1829, às 7 horas da noite, Wilhelm Weber, cheio de experiências e impressões, e bem equipado com cartas de recomendação de A. v. Humboldt, Enke, Ermann e Poggendorff, deixou Berlim para visitar Repsold e Schumacher em Hamburgo e Altona. Ele mesmo descreve a viagem fria, tediosa e desconfortável, que naquela época demorava 38 horas para os correios. No entanto, isso foi muito facilitado pelo encontro (provavelmente pré-arranjado) com Rosenberger, professor de matemática e astronomia em Halle, que, vindo de Magdeburg, o encontrou em Klötze para visitar Hamburgo e Altona junto com ele. Schumacher deu aos dois jovens colegas de Halle uma recepção muito calorosa e mostrou-lhes suas instalações e instrumentos em detalhes, e o próprio Repsold apresentou-lhes todos os detalhes e especialidades da oficina, que já era famosa na época. Não é mais possível determinar quanto tempo durou a estada em Hamburgo; os dois colegas provavelmente viajaram juntos de volta para Halle.

A partir de então, Weber permaneceu em Halle até sua nomeação para Göttingen. Ele parece ter tido a intenção de passar o semestre de verão de 1829 em Berlim novamente; o Ministério da Cultura já havia lhe concedido permissão para isso em 14 de março. No entanto, o plano aparentemente não foi realizado, pois todas as cartas oficiais de Halle e Berlim foram enviadas para seu endereço em Halle. Weber agora se dedicava especificamente a suas aulas e pesquisas, para as quais, como mencionado anteriormente, o Ministério estava muito disposto

²⁰⁶Jakob Steiner (1796-1863) foi um matemático suíço. Friedrich Wöhler (1800-1882) foi um químico alemão, ver a Nota de rodapé 71 na página 34.

²⁰⁷O *Journal für die reine und angewandte Mathematik* (Jornal ou Periódico para Matemática Pura e Aplicada), também conhecido como *Jornal de Crelle* ou simplesmente *Crelle*, foi fundado pelo matemático alemão August Leopold Crelle (1780-1855) em Berlim, em 1826, e por ele editado até seu falecimento, em 1855.

²⁰⁸[Nota de Heinrich Weber:] Na verdade, como se sabe, Steiner é suíço de nascimento.

²⁰⁹Thomas Johann Seebeck (1770-1831) foi um físico báltico-alemão. Ver [See25] e [See26] com tradução parcial para o inglês em [See69] e tradução parcial para o português em [FS16].

²¹⁰Provavelmente Heinrich Weber está se referindo nessa última frase ao pai de Wilhelm Weber, ou seja, ao teólogo Michael Weber, ver a Nota de rodapé 72 na página 34.

a fornecer os meios. Ele também permaneceu em contato com seus amigos berlinenses, especialmente Poggendorff, cujas cartas de 30 de janeiro e março de 1830 mostram claramente que Weber não foi esquecido em Berlim.

Para promover sua causa, envie seus últimos tratados para Humboldt; Leopold von Buch é um ávido leitor de seus artigos e o elogiou muito na Sociedade.²¹¹

Poggendorff também foi instruído por Humboldt a providenciar para que Weber enviasse um resumo de seu trabalho anterior em francês, pois ele queria enviá-lo a Arago.²¹² Por outro lado, A. von Humboldt lhe enviou um tratado de Poisson²¹³ por intermédio de Enke. Incentivado por essas solicitações, Weber também enviou seus tratados a Gauss. Em uma carta datada de 2 de abril de 1830, provavelmente a primeira troca de ideias por escrito entre eles, Gauss responde:²¹⁴

Prezado Senhor, Excelentíssimo Professor, recebi sua gentil carta juntamente com seus estimáveis tratados acústicos em um momento em que minha sobrecarga de trabalho me obrigou a deixar os últimos de lado por enquanto e reservar a leitura deles para um momento um pouco mais livre. No momento, pelo menos, estamos nas férias ou, mais corretamente para mim, chegou a época das férias. Peguei seus ensaios em mãos, mas, por mais que tenha me interessado pela originalidade de seus trabalhos, logo percebi que eles exigem e merecem mais atenção para uma avaliação completa de seu rico conteúdo do que sou capaz de dedicar a eles no momento. Portanto, não devo mais demorar em expressar meus mais humildes agradecimentos pela sua gentil comunicação e, ao mesmo tempo, minha satisfação por estar se dedicando a essas interessantes investigações com tanto zelo quanto sucesso.

Sempre fui da opinião de que a acústica pertence àquelas partes da física matemática em que o progresso mais brilhante ainda está por ser feito. De fato, é apenas uma questão de relações espaciais e temporais, e o assunto deveria, portanto, estar completamente subordinado à matemática; e, no entanto, quão pouco, quão extremamente pouco ainda sabemos! No caso do que parecem ser as coisas mais óbvias, não sabemos nem mesmo como abordá-las. Todas as nossas investigações anteriores foram limitadas, em primeiro lugar, à velocidade de propagação e, em segundo lugar, à intensidade²¹⁵ das ondas sonoras; a altura dos tons depende da proporção entre essas duas quantidades. Mas o caráter distinto e peculiar dos tons, que em alguns casos é denotado pela palavra timbre, mas que se expressa de forma mais maravilhosa nos chamados tons articulados, é, na medida em que uma visão matematicamente clara é necessária, uma completa terra incógnita. Parece que isso só pode depender da forma das ondas sonoras. Que campo imensurável ainda está diante de nós aqui. Estou convencido de que a mente humana um dia o abrirá e criará aqui a mesma clareza que é dada às ciências ópticas. Deve-se acreditar que não seria tão difícil trazer luz a

²¹¹Poggendorff provavelmente está se referindo à Sociedade de Ciências de Berlim.

²¹²[Nota de Heinrich Weber:] Humboldt também escreveu diretamente a Weber em várias ocasiões, mas essas cartas provavelmente foram doadas por Weber como autógrafos.

²¹³Siméon Denis Poisson (1781-1840). Ver [Poi12a], [Poi12b] com tradução para o inglês em [Poi19], [Poi13], [Poi25a], [Poi25b], [Poi22a] e [Poi22b].

²¹⁴Ver também [Gau d].

²¹⁵Em alemão: *Dicke*. Essa palavra pode ser traduzida como espessura, densidade, intensidade, amplitude etc.

essa escuridão para alguém que unisse zelo vivo, poder matemático, inclinação para experimentar e lazer suficiente. É apenas uma questão de demonstrar quais são as diferenças específicas para sons diferentes, não no corpo produtor de som e não no ouvido, mas no meio elástico entre os dois. Em relação ao corpo produtor de som, muito já foi feito sobre esse assunto pelo trabalho engenhoso de von Kempelen, de modo que devemos nos surpreender com o fato de não termos feito nenhum progresso desde então (quarenta anos).²¹⁶

Espero sinceramente que seja reservado a você abrir novos caminhos nesse sentido. Com a certeza de minha mais sincera estima, recomendo-me à sua gentil lembrança. Göttingen, 20 de abril de 1830.

Atenciosamente,
C. F. Gauss."

Tobias Mayer, professor titular de física na Universidade de Göttingen, morreu em 30 de novembro de 1830.²¹⁷ Após a declaração de A. von Humboldt, era óbvio para Weber direcionar seus pensamentos para Göttingen. Portanto, ele escreveu a Gauss para saber o que deveria ser feito com relação a esse assunto. Gauss escreve sobre isso:

Caro amigo, o fato de eu ainda não ter respondido à sua gentil carta provavelmente não o surpreendeu, tendo em vista os eventos públicos em nossa cidade, portanto, não preciso acrescentar às minhas desculpas que, além desses eventos, minhas próprias atividades ainda estão prejudicadas por um grave sofrimento doméstico e meu trabalho foi interrompido várias vezes. Mas não posso mais ficar em silêncio em resposta à sua carta. Acredito que já lhe mostrei várias vezes como, desde que tive o prazer de conhecê-lo pessoalmente em B. [Berlim], me senti atraído por sua personalidade e também por seus talentos, que aprecio sinceramente.

Gauss então escreve que apoiaria o apelo de Weber assim que tivesse a oportunidade e que não acharia nada indigno o fato de Weber tentar atrair a atenção das autoridades.

Infelizmente, o curso normal do mundo é que o mérito modesto é preterido em relação à escrita prolífica e superficial, e a última tem precedência sobre a primeira. Não sei se e até que ponto tal coisa é concebível no presente caso. — Eu me recomendo à sua bondade com sincera devoção.

Göttingen, 27 de janeiro de 1831.

C. F. Gauss.

Provavelmente, pode-se presumir que Gauss foi consultado posteriormente pelo governo de Hanover sobre a questão da nomeação; de qualquer forma, em 29 de abril de 1831, Weber recebeu a nomeação como professor titular na Universidade de Göttingen do Conselheiro do Gabinete Hoppenstedt, que ele aceitou definitivamente em 14 de maio, embora seu desejo de ter um lugar na Sociedade [de Ciências de Göttingen] não pudesse ser atendido no momento “porque dois matemáticos, Thibaut e Gauss, e apenas um filólogo e um orientalista já estavam representados na Sociedade”. Em 5 de julho de 1831, Gauss o parabenizou pela nomeação:

²¹⁶[Nota de Heinrich Weber:] Wolfgang von Kempelen, *Mechanismus der menschlichen Sprache, nebst Beschreibung einer sprechenden Maschine*, Wien, 1791.

²¹⁷Ver a Nota de rodapé 78 na página 35.

Fiquei muito feliz ao encontrar em sua carta a confirmação de que aceitou a indicação que lhe enviei. Desejo-lhe sinceramente boa sorte, mas também desejo boa sorte a Göttingen e a mim mesmo, pois estou contando com o fato de que o contato científico e amigável com você será uma melhoria considerável em minha vida. Onde quer que eu possa ser útil, peço que conte com minha total disposição.

Gauss acrescentou, então, que não tinha dúvidas de que Weber logo seria aceito na Sociedade [de Ciências de Göttingen].

No relacionamento próximo que existia entre Wilhelm Weber e seus irmãos Ernst Heinrich e Eduard, no qual todas as situações da vida e todas as pesquisas científicas eram objeto de uma profunda troca de ideias, a decisão de Wilhelm de se mudar para Göttingen foi de importância decisiva. Muitas cartas testemunham como ambos os lados sentiram profundamente a separação espacial, e apenas algumas passagens delas serão citadas aqui. Wilhelm escreve para seu irmão Ernst Heinrich pouco depois de se mudar para Göttingen:

No perigo atual,²¹⁸ só preciso reiterar a nossa promessa que sempre mantivemos de nunca separar os nossos interesses uns dos outros, mas de sempre nos vermos como uma família, não importa como queiramos estar separados, se isso puder lhe dar alguma segurança. Você sempre manteve sua promessa. Agora, pela primeira vez, temos a oportunidade de seguir seu exemplo. E como Eduard logo chegará ao ponto de fazer o mesmo, acredito que nossa aliança nos proporcionará total segurança mútua. Estou preparado, caro Ernst, para fazer tudo o que puder, mesmo à maior distância, para garantir que permaneçamos em contato próximo de agora em diante.

Não se tratava apenas de uma intenção. A estrada rural entre Halle e Leipzig foi substituída pela estrada entre Leipzig - Halle - Sangershausen - Nordhausen - Heiligenstadt - Göttingen. Às vezes os irmãos se encontravam em um local previamente combinado, às vezes percorriam a rota em uma direção ou outra, já que a ferrovia ainda não existia na época, embora essas visitas não pudessem mais ocorrer com a mesma frequência de antes. Em abril de 1832 Ernst Heinrich escreve para Wilhelm:

A conclusão [da edição do livro de] Hildebrandt, do qual só me faltam três folhas para terminar e que deve ser publicado após o final da feira, e também os negócios da reitoria, não me permitem ir a Göttingen no momento. Mas decidi que, no futuro, quando estiver livre desses negócios, usarei as férias para passar mais tempo com você. Se, então, você também puder vir aqui de vez em quando, não acharemos mais tão desagradável a nossa separação mútua. Durante os períodos intermediários, trabalharemos individualmente e nos prepararemos; durante as férias, trocaremos ideias e organizaremos novas pesquisas.

Weber havia se comprometido a iniciar suas aulas em Göttingen no período de inverno de 1831. Ele levou algum tempo para contabilizar os fundos transferidos a ele pelo governo prussiano para a compra de instrumentos e para entregá-los oficialmente. Depois de obter a isenção de impostos de importação para seus pertences em Hanover e enviá-los por meio de um vagão de carga, ele partiu para Göttingen em setembro, usando sua mudança para viajar a pé por Weimar, Erfurt e Mühlhausen. O próprio Weber relatou sua pequena aventura de

²¹⁸[Nota de Heinrich Weber:] A doença de Ernst Heinrich não era inofensiva.

viagem com grande prazer. Ele havia chegado a Weimar com alegria e decidiu ir ao teatro à noite. Por acaso, no entanto, ele estava lá em um dia em que um grande número de estudantes de Jena estava lotando o teatro, e aconteceu que um estudante da corporação de alunos sentou-se ao lado dele, que não deixou de iniciar uma conversa com seu vizinho. “Bem”, disse ele, olhando confiantemente para o recém-nomeado professor de Göttingen, de aparência leve e nada imponente, que ele achava ser um aluno da escola secundária de Weimar, “você provavelmente também irá para a Universidade em breve”. Ainda não se sabe se Weber esclareceu seu vizinho ou o deixou com sua opinião.

Não se deve ficar muito surpreso com a observação do membro da corporação de estudantes de Jena, pois, conforme testemunha ocular, Wilhelm Weber, quando jovem, ao caminhar entre seus dois irmãos mais imponentes, dava a impressão de ser o mais fraco e exteriormente mais discreto entre eles, de modo que ninguém poderia imaginar na época que ele viveria mais do que os dois e chegaria a uma idade excepcionalmente avançada.

Assim, Wilhelm Weber chegou a um importante ponto de virada em sua vida, que marcou o início de um novo período nos seus contatos e pesquisa científica.

6.4 Primeiro Período em Göttingen 1831-1837

A primeira coisa que Weber fez após sua chegada a Göttingen foi montar o Gabinete de Física,²¹⁹ ele também estava ocupado com as aulas experimentais recém-assumidas e, em conexão com isso, pretendia republicar o *Handbuch für Physik* (Manual de Física) de Tobias Mayer, que lhe havia sido solicitado pelos livreiros. No entanto, isso nunca se concretizou. Desde o início, Weber iniciou um diálogo científico com Gauss, que, apesar da diferença de idade de 27 anos, se transformou em uma verdadeira amizade. Notas individuais escritas pela mão de Gauss, que foram encontradas em seu espólio, convidam Weber para almoçar, geralmente com as seguintes palavras:

Estamos sozinhos,
de todo o coração,
C. F. Gauss.

Por outro lado, Gauss também era um hóspede frequente de Weber. Em uma carta para Ernst Heinrich, datada de 2 de junho de 1832, até mesmo a irmã de Weber, que administrava a casa para ele nos primeiros anos de sua estada em Göttingen, reclama dos convites frequentes e, às vezes, despreparados que Wilhelm fazia.

Wilhelm pode desfrutar de Gauss todos os dias, pelo tempo que quiser. Gauss leva uma vida muito solitária, e Wilhelm é bem-vindo a qualquer hora. Gauss é um homem tão sociável e educado que nunca fala de coisas eruditas em minha presença e exige que eu esteja presente; ele conversou conosco das 12 às 17 horas sobre todos os tipos de coisas. Outro dia, Wilhelm convidou o Conselheiro Gauss²²⁰ para almoçar três dias seguidos (suas filhas estão fora).

²¹⁹[Nota de Heinrich Weber:] Naquela época, o Gabinete de Física ficava na diagonal oposta àquele que ainda existe em Göttingen. O Museu de História Natural estava localizado no mesmo prédio. Quando a nova biblioteca foi construída nos últimos anos, o prédio antigo foi demolido e uma ala da biblioteca foi construída em seu lugar. Weber só trabalhou no atual Gabinete de Física após ser novamente nomeado em 1849.

²²⁰Ver a Nota de rodapé 189.

Nessas circunstâncias, era inevitável que o grande interesse que Gauss tinha na época pelos fenômenos magnéticos, especialmente o geomagnetismo, fosse transferido para seu jovem amigo. O primeiro fruto dos esforços magnéticos de Gauss foi o famoso tratado: *Intensitas vis magneticae ad mensuram absolutam revocata*, que Gauss apresentou na reunião da *königlichen Societät* (Sociedade Real [de Ciências de Göttingen]) em 15 de dezembro de 1832.^{221,222}

Daquela época em diante, Weber foi completamente conquistado pelas investigações magnéticas, que ele realizou em parte de forma independente no Gabinete Físico e em parte junto com Gauss. A distância física entre o Observatório Astronômico²²³ e o Gabinete Físico (cerca de um quarto de hora de caminhada) poderia levar a alguns inconvenientes nesse trabalho sobre o mesmo assunto, especialmente porque certos estudos sobre a mudança na declinação magnética tornavam desejável a observação simultânea nos instrumentos instalados no Observatório e no Gabinete, o que tornava necessárias comparações frequentes de relógios. Pequenas anotações de Gauss relacionadas a observações magnéticas mostram que os mensageiros frequentemente viajavam de um lado para o outro entre os dois Institutos. O desejo de remediar esses inconvenientes resultou no primeiro grande sistema de telégrafo em 1833, no qual as correntes galvânicas transmitiam os sinais.²²⁴ Em um relatório escrito por Gauss no *Göttingische gelehrte Anzeigen* de 9 de agosto de 1834, Volume 128, página 1265, sobre o Observatório Magnético recém-construído em Göttingen, Gauss diz, depois de dar detalhes sobre os equipamentos do Observatório e as observações feitas nele.²²⁵

Não podemos deixar de mencionar aqui uma aparelhagem magnífica, a única do gênero até o momento, que está intimamente ligada às instalações e que devemos ao nosso Professor Weber. No ano passado, ele já havia instalado uma conexão de fio duplo do Gabinete Físico através das casas da cidade até o Observatório As-

²²¹[Nota de Heinrich Weber:] *Göttingische gelehrte Anzeigen* do ano de 1832, Vol. 205, pág. 2041 e Vol. 206, pág. 2049.

²²²Ver a Nota de rodapé 122 na página 44.

²²³Ver a Nota de rodapé 90 na página 38.

²²⁴A Figura (a) dessa Nota de rodapé mostra o Observatório Astronômico (Sternwarte) de Göttingen, onde Gauss morava e trabalhava, https://de.wikipedia.org/wiki/Sternwarte_G%C3%B6ttingen. A Figura (b) mostra a placa comemorativa colocada na frente do Observatório. Ela diz: Primeiro telégrafo elétrico de Gauss e Weber, páscoa de 1833:



(a)



(b)

²²⁵[Gau34a, págs. 524-525 das *Obras* de Gauss].

trônômico, que atualmente está sendo estendida do Observatório Astrônômico para o Observatório Magnético. Isso forma um grande circuito galvânico, no qual a corrente galvânica tem de percorrer um comprimento de fio de quase nove mil pés, incluindo os multiplicadores localizados nos dois pontos finais.²²⁶ — A facilidade e a certeza com que a direção da corrente e o movimento da agulha que depende dela podem ser controlados pelo comutador já haviam motivado tentativas no ano passado de usá-lo para sinalização telegráfica, que também funciona perfeitamente com palavras inteiras e pequenas frases. Não há dúvida de que seria possível estabelecer uma conexão telegráfica direta de maneira semelhante entre dois lugares separados por um número considerável de milhas. Mas é claro que este não é o lugar para desenvolver ideias sobre esse assunto.²²⁷

Não se pode falar de uma invenção da telegrafia eletromagnética por Gauss e Weber no sentido adequado, uma vez que as ações da corrente galvânica (Örstedt 1819, Arago 1820)

²²⁶Ver a Nota de rodapé 91 na página 38.

²²⁷Wilhelm Weber e Gauss inventaram em 1833 o primeiro telégrafo eletromagnético operacional do mundo, [LB67, Seção 66: Telégrafo de Gauss e Weber, págs. 41-42], [Ano89], [Fey33a], [Fey33b], [Wie60, Capítulo 5, págs. 17-20], [Wie67, págs. 85-90], [Tim05], [Wol05], [MRGL10] e <https://www.uni-goettingen.de/de/historische-sammlung/47114.html>. Era um cabo bifilar de 3 km conectando o Laboratório de Física da Universidade de Göttingen, onde Weber era Professor de Física, com o Observatório Astrônômico (*Sternwarte*), dirigido por Gauss. Esse telégrafo funcionava baseado na lei de indução de Faraday que havia sido descoberta dois anos antes, [Far32a] com tradução para o alemão em [Far32b] e [Far89], e com tradução para o português em [Far11]:



Friedrich Gauß und Wilhelm Weber beim Arbeiten mit dem von ihnen erfundenen ersten elektrischen Nadel-Telegraphen
Links Weber am Gebe-Apparat, an dem er die stromverdringende Spule bewegt; rechts Gauß am Empfänger, durch das Fernrohr auf den Spiegel des Galvanometers schauend. In der Multiplikatorspule unter dem Spiegel die Magnethand, ein schwerer Eisenstab. Die Verbindungsdrähte sind über die Stadt Göttingen gespannt und auch am Johannisturm befestigt. Nach einer Zeichnung von A. Wald.
(Su Seite 18)

nas quais ela se baseia, os dispositivos para amplificar essas ações (multiplicador de Schweigger 1820), o método para torná-las visíveis e acessíveis à observação precisa (dispositivo de espelho de Poggendorff 1826) já eram conhecidos em 1833. Mesmo antes de Gauss e Weber, várias propostas foram feitas para basear a telegrafia nas ações eletromagnéticas da corrente galvânica (Ampère, Barlow, Green, Triboaillet, Fechner, Schilling von Cannstadt), e até mesmo experimentos foram realizados em menor escala. No entanto, nos experimentos realizados, a corrente percorria apenas distâncias relativamente curtas e, na época, acreditava-se que se a corrente galvânica tivesse que percorrer distâncias maiores, sua potência seria tão enfraquecida que suas ações seriam insuficientes para o propósito declarado. Apenas alguns, como Fechner, eram da opinião de que a telegrafia eletromagnética também era possível em longas distâncias.^{228,229} Entretanto, essa opinião não foi confirmada experimentalmente. Barlow relatou que havia realizado testes com um fio de 200 pés de comprimento, mas que os resultados foram negativos.

Gauss e Weber, sem dúvida, merecem o grande mérito de terem sido os primeiros a estabelecer de fato uma conexão telegráfica em longas distâncias, usando apenas dois fios, fornecendo assim a prova real de que a corrente galvânica também pode ser usada para telegrafia em longas distâncias. Como foi somente com o passar do tempo, quando a atenção começou a ser voltada para a história da telegrafia, que os primeiros experimentos telegráficos se tornaram mais conhecidos, não há dúvida de que Gauss e Weber fizeram seus arranjos sem ter qualquer conhecimento dos experimentos feitos antes deles.^{230,231}

Em especial, foi Weber quem se esforçou para estabelecer a conexão telegráfica entre os dois Institutos, [a saber,] o Observatório Astronômico e o Gabinete de Física. As seguintes cartas do magistrado da cidade de Göttingen referem-se à permissão para passar os dois fios telegráficos pelos telhados da cidade até a Johannisturm (Torre de São João) e de lá para o Observatório Astronômico.

Com a carta prestativa de 15 e 16 desse mês endereçada ao Magistrado Diretor Ebell e apresentada por ele ao Magistrado, Vossa Senhoria se antecipou a uma solicitação sobre a finalidade das instalações feitas na Torre Johannis sem nosso conhecimento prévio. Embora estejamos sempre dispostos a ajudar no estabelecimento e na promoção de institutos científicos da melhor forma possível, devemos, no entanto, solicitar uma explicação favorável sobre os seguintes pontos para o bem de nossos deveres no presente caso. (1) As precauções tomadas devem ser consideradas apenas como um teste ou devem se tornar permanentes? (2) Será necessário, portanto, permitir o acesso de pessoas individuais (e quais?) à torre a qualquer momento? (3) As linhas agora traçadas serão complementadas por fios e de que metal eles serão? (4) É necessário que as persianas em frente às aberturas da torre, que já foram removidas, também sejam removidas no futuro e que as escotilhas em questão permaneçam abertas?

Ao solicitar uma notificação imediata sobre isso, observamos antecipadamente, com relação ao último ponto, que a torre está muito exposta aos efeitos do clima para que

²²⁸[Nota de Heinrich Weber:] Fechner, *Lehrbuch des Galvanismus und der Elektrochemie*, Leipzig, 1829, pág. 269.

²²⁹[Fec29b]. Ver a Nota de rodapé 82 na página 35.

²³⁰[Nota de Heinrich Weber:] Uma história detalhada da telegrafia pode ser encontrada em Zetzsche, *Handbuch der elektrischen Telegraphie*, Vol. 1, Julius Springer. Berlin, 1877.

²³¹[Zet77].

possamos permitir que as escotilhas do telhado permaneçam abertas sem prejudicar muito as estruturas internas.

A propósito, aproveitamos esta oportunidade para assegurar a Vossa Senhoria nossa mais alta consideração.

Göttingen, 18 de abril de 1833.

O Magistrado da cidade de Göttingen.

Assinado: Vossa Senhoria. G. Ebell.

Para o Professor Weber.

Após as explicações que nos foram dadas por Vossa Senhoria, estamos satisfeitos em permitir que os dispositivos sejam deixados na Torre Johannis em um futuro próximo para realizar observações magnético-galvânicas. Também permitimos que Vossa Senhoria, junto com um assistente, fique de tempos em tempos na torre.

Com a garantia do nosso maior respeito.

Göttingen, 6 de maio de 1833.

O magistrado da cidade de Göttingen,

G. Ebell.

Para contar a pré-história do telégrafo de Göttingen da forma mais completa possível, também podem ser mencionados aqui os documentos que aparentemente foram publicados por uma fonte competente no suplemento da *Allgemeine Zeitung*, nº 248 de 1887, dos quais se depreende que Weber teve que superar várias dificuldades para poder montar seu equipamento.

Arquivos sobre a pré-história da invenção do telégrafo elétrico por Gauss e Weber.

I. Carta do Conselho de Curadores da Universidade de Hanover.

“O Professor Weber, em Göttingen, nos informou que o espaço alocado para os experimentos ópticos²³² no andar inferior do Museu Acadêmico é muito limitado e não tem a luz necessária, e que, portanto, é altamente desejável que outra sala no mesmo prédio, por exemplo, uma das salas onde estava localizada anteriormente a coleção de pinturas de Flügge, seja disponibilizada para essa finalidade. Gostaríamos agora de receber um relatório especializado do Museu Acadêmico sobre se e até que ponto seria conveniente, nessas circunstâncias, alocar outra sala no prédio do Museu Acadêmico para os experimentos ópticos, antes de tomar qualquer outra decisão.

Hanover, 10 de fevereiro de 1832.

Conselho de Curadores da Universidade Real Grã-Britânica-Hanoveriana.

Arnswaldt.

Para o Museu Acadêmico em Göttingen.”

²³²[Nota de Heinrich Weber:] Devido ao conhecimento insuficiente do assunto, esta expressão foi utilizada diversas vezes em vez de “elétricos”.

II. Resposta de Blumenbach. Bloco de notas manuscrito.

“Para o Conselho Real de Curadores da Universidade. Relatório do OMR. BI.²³³ de 27 de fevereiro de 1832 sobre as salas pertencentes à seção de história natural do Museu Acadêmico. Imediatamente após receber o honroso escrito emitido por Vossa Excelência para o Museu Acadêmico no dia 10 deste mês, referente a um desejo expresso pelo Prof. Weber de que lhe fosse dada uma sala no andar intermediário do museu para realizar seus experimentos ópticos, entrei imediatamente em contato com os colegas curadores do Museu HR. H.,²³⁴ HR. D.²³⁵ e o assistente Dr. H.,²³⁶ que me enviaram uma cópia do ensaio anexo, com o qual os dois co-expositores mencionados acima, assim como eu, concordamos incondicionalmente com relação aos planos preliminares propostos, que também foram considerados perfeitamente adequados pelo Inspetor de agricultura Praël, que foi consultado para esse fim.”

III. Relatório (manuscrito) do Dr. Herbst.

“(1) Não foram reservadas salas separadas para os quadros de Flügge, mas eles foram exibidos aqui e ali, próximos e em frente uns dos outros, em duas salas em locais com menor probabilidade de serem usados. (2) Uma parte considerável da coleção ictiológica, bem como contribuições para as coleções osteológica e fitológica, sempre foi exibida nas salas em que as pinturas mencionadas acima estão localizadas e, recentemente, devido ao espaço limitado disponível, uma parte da valiosa coleção de espécimes também teve que ser adicionada. (3) Muitos dos artefatos que foram gradualmente incorporados ao Museu Acadêmico foram empilhados nas outras salas e só foram colocados lá até que os armários e repositórios necessários fossem adquiridos. (4) Além disso, uma das duas salas tem sido usada para experiências e trabalhos do Museu Acadêmico. (5) A separação de uma das duas salas interromperia a comunicação entre os andares intermediário e superior do Museu Acadêmico e também dificultaria a visualização de todo o museu pelos visitantes. (6) Por outro lado, uma ante-sala razoavelmente espaçosa, muito clara e bem iluminada em frente a essas duas salas no andar intermediário do A. M. [Museu Acadêmico], bem como uma sala do mesmo tipo no andar superior, talvez proporcionasse espaço e luz suficientes para experimentos físicos.”

IV. Voto manuscrito.

“Com relação ao projeto, inspecionei e considerei o local do museu e concordo plenamente com os comentários do Dr. Herbst. Göttingen, 15 de fevereiro de 1832, muito obedientemente Hausmann.”

“O museu perderia uma de suas salas mais bonitas se o salão descrito pelo Sr. Prof. Weber fosse separado dele, e como a ante-sala de 16 pés de comprimento e 12 pés de largura com duas janelas seria adequada para experimentos físicos, concordo plenamente com o Dr. Herbst e Conselheiro Hausmann. 20 de fevereiro de 1830 (sic).²³⁷ Muito obediente, Osiander.”

V. Carta do Conselho Curador da Universidade.

²³³[Nota de Heinrich Weber:] Conselheiro Médico Sênior Blumenbach.

²³⁴[Nota de Heinrich Weber:] Conselheiro Hausmann.

²³⁵[Nota de Heinrich Weber:] Conselheiro Osiander.

²³⁶[Nota de Heinrich Weber:] Dr. Herbst.

²³⁷Ou seja, no texto original aparece a data de 1830 em vez de 1832.

“Cópia para o Museu Acadêmico de Göttingen. Com referência à nossa carta do dia 10 do mês passado, informamos ao Professor Weber que uma sala no Museu Acadêmico não pode ser alocada a ele para a realização de experimentos ópticos, pois nenhuma das salas desse prédio pode ser reservada para esse fim. Por outro lado, uma antessala no andar intermediário do Museu, que dizem ser bastante espaçosa, muito clara e bem iluminada, bem como uma sala equipada de forma semelhante no andar superior, podem ser usadas pelo Professor Weber para realizar experimentos ópticos no futuro e, portanto, deixamos que ele faça uso delas conforme as circunstâncias exigirem. Informamos o Museu Acadêmico sobre isso, enviando-lhe uma cópia deste rescrito.”

Hanover, 6 de março de 1832, Curadoria da Universidade Real Britânica de Hanover.

Para o Professor Weber em Göttingen.

Os documentos anteriores, que o remetente resgatou há vários anos de um pacote de escritos considerados sem valor e incorporados à Biblioteca da Universidade, foram lembrados por um artigo no suplemento deste jornal de 12 de agosto deste ano, intitulado: “A pré-história da introdução do telégrafo elétrico na Inglaterra”, motivado pela comemoração do quinquagésimo aniversário dessa introdução (25 de julho de 1837) em um longo trecho da ferrovia Noroeste em Londres utilizando a sinalização de Gauss e Weber.

Blumenbach, Hausmann e Osiander não tinham ideia de que se tratava de um assunto, uma invenção, que agora governa o mundo; eles parecem ter demonstrado pouca cooperação ao confiar o relatório ao seu assistente, Dr. Herbst, para não se sentirem constrangidos em dar uma resposta completamente negativa, e o mais antigo dos membros atualmente vivos da Universidade de Göttingen, Prof. Dr. Herbst, merece agradecimentos por ter encontrado essa feliz solução, pois Weber, em sua grande modéstia, ficou satisfeito com esse plano preliminar improvisado. Poucas pessoas sabem onde a instalação estava localizada e, para neutralizar os erros que já estão disseminados, aqui está uma breve descrição de onde e como ela foi feita. Costuma-se dizer que está “no Gabinete de Física”, e há também uma placa de mármore fixada no atual Gabinete de Física com a inscrição:

Primeiro telégrafo elétrico Weber-Gauss 1833.

Contudo, essa casa foi ocupada naquela época pelo Diretor da Chancelaria da Justiça, v. Werthoff e, mais tarde, ainda era conhecida na cidade por seu nome; o Gabinete de Física mais antigo e muito limitado, onde Tobias Mayer e Weber trabalhavam e davam suas aulas em seus primeiros anos, estava localizado na metade Norte do andar inferior do Museu de História Natural, que foi demolido em 1881 com o objetivo de ampliar a Biblioteca, no canto Noroeste da Biblioteca atual, onde a nova parede encerra a sala que ainda não havia sido construída na época e onde Hausmann abrigou a coleção mineralógica após a instalação do atual Gabinete de Física ter sido montado para Weber. No andar superior do Museu, ficava localizado o pátio acima mencionado na escadaria, onde se encontravam as pinturas dos antigos professores de Göttingen atualmente penduradas no Auditório, estando agora pronto para as experiências elétricas. Desse ponto, o fio atravessou a (antiga) Biblioteca até a Igreja de São João e, do outro lado, até a farmácia da Universidade, depois atravessou os telhados e as ruas até o canto extremo sudeste da muralha no portão Geismar, onde foi preso a um poste erguido em uma árvore e, de lá, desceu até a pequena casa construída para esse fim em frente ao Observatório Astronômico, na qual nem mesmo o menor prego é

feito de ferro, mas tudo que serve de fixação é feito de cobre, até mesmo a chave da casa. Inicialmente, temia-se que as centenas de rifles que se encontravam nos quartéis próximos pudessem exercer uma força de atração [magnética], mas esse não foi o caso, e com Gauss operando nessa pequena casa e Weber na outra extremidade do Museu, os experimentos foram realizados até que o mais brilhante sucesso foi alcançado e uma das mais importantes invenções deste século foi feita.

A placa de mármore no novo Gabinete de Física, portanto, não marca de fato o lugar certo, mas como, por assim dizer, ela flutua no ar acima da pequena porta na sala não reformada da Biblioteca, a placa pode permanecer onde está como uma lembrança, especialmente depois que foi removido o fio que inicialmente levava daqui para o outro lado da rua até a esquina da casa de Benfey, que deve ter dado uma falsa impressão. Alguns ainda se lembrarão de como, muitos anos depois, o velho fio foi destruído em pedaços de 30 centímetros de comprimento por um raio durante uma forte tempestade; e o fato de um pedaço de fio brilhante ter atravessado o vestido da esposa do professor Grisebach na Johannisstrasse não é uma fábula, como se ouve aqui e ali.

Göttingen. ..d ..d.

Nenhum registro escrito de experimentos daquela época sobreviveu, apenas algumas pequenas cartas de Gauss foram encontradas no espólio de Weber, que, por si só, não têm valor, mas podem ser mencionadas aqui devido ao interesse demonstrado pelo assunto. Gauss escreve em uma nota sem data:

Infelizmente, só posso lhe enviar sinais, mas não posso receber os seus no momento, pois a haste magnética foi removida ontem à tarde e a haste de madeira com peso de 20 libras foi colocada em seu lugar. No entanto, eu lhe enviarei os sinais para que você tenha uma data para as leituras do relógio com antecedência. Amanhã, creio eu, uma haste magnética será inserida novamente. G. [Gauss.]

A carta a seguir é datada de 28 de agosto às 7 $\frac{1}{2}$ da manhã (sem ano):

Uma senhora que gostaria de admirar nossas ações à distância e que está viajando novamente esta tarde virá ao Observatório Astronômico esta manhã, conforme combinado. Caro Weber, você não acha muito indecente da minha parte pedir-lhe que passe uma corrente galvânica pelo nosso circuito às 10 horas? Como você sabe exatamente a posição do relógio do Observatório em relação ao seu, se colocar um par de placas [voltaicas] ou um par de pares com alguns minutos de antecedência, poderia fazê-lo de tal forma que eles fossem introduzidos no circuito ou que a corrente começasse quando o relógio do Observatório marcasse exatamente 10h 0' 0". Um par de trocas de comutadores em intervalos de 43" provavelmente aumentaria ainda mais a admiração. Eu vi e observei o cometa ontem à noite. Sempre seu Gauss.

Embora em 1834 “palavras e pequenas frases” pudessem ser telegrafadas usando o equipamento que havia sido desenvolvido, ele ainda sofria com o problema de que o uso dos pares de placas voltaicas fazia com que as agulhas vibrassem demais, especialmente porque a instalação de um amortecedor ainda não era conhecida na época. Esse problema levou Gauss a usar correntes de indução, que eram geradas pelo movimento de bobinas de fio contra os polos de grandes ímãs. O relato de uma palestra proferida por Gauss na *Königl. Societät* (Sociedade Real [de Ciências de Göttingen]) diz:^{238,239}

²³⁸[Nota de Heinrich Weber:] *Göttingische gelehrte Anzeigen*, 30 de outubro de 1837, Número 173, pág. 172.

²³⁹[Gau37b, pág. 356 das *Obras* de Gauss].

Em vez do método usado originalmente (para telegrafia), outro método foi adotado em 1835, ao qual o Conselheiro Gauss foi levado ao considerar as leis de indução, e que é muito preferível ao método utilizado pela primeira vez.

De fato, o novo método provou ser excelente. Uma pequena nota, aparentemente escrita por Gauss durante os primeiros experimentos usando esse novo método, diz:

Para minha grande satisfação, a indução por inserção na bobina com fio vermelho está completamente resolvida, totalizando cerca de 12 partes da escala.

Esse novo dispositivo permitiu que as agulhas em ambos os Institutos dessem pequenas oscilações para a direita ou para a esquerda simultaneamente à vontade, sem fazê-las vibrar muito. As combinações dessas oscilações para a direita e para a esquerda formavam os caracteres das letras, das quais 4 podiam ser transmitidas por minuto com o equipamento usado na época e, posteriormente, 8. Ao mesmo tempo, Weber havia conectado um despertador ao dispositivo telegráfico, que era acionado por vários impulsos de indução²⁴⁰ sucessivos e que podia ser usado para sinalizar o início da telegrafia.

É justo dizer que, a partir desse momento, as instalações telegráficas estavam totalmente maduras o suficiente para serem amplamente utilizadas pelo público. Na primeira grande tentativa de telegrafia submarina, a conexão telegráfica entre a Inglaterra e a América do Norte, o método telegráfico descrito foi usado por um longo tempo porque o método usual com correntes mais fortes resultava em fenômenos de carga perturbadores.

O desejo de tornar o sistema de télégrafo, que havia sido testado apenas em pequena escala, utilizável para a vida pública, tinha a perspectiva de ser realizado já em 1835. Naquele ano, foi iniciada a construção da ferrovia Leipzig-Dresden, e Ernst Heinrich Weber, irmão de Wilhelm, sugeriu à diretoria que fosse estabelecida de acordo com o modelo de Göttingen uma conexão telegráfica entre as estações ao longo da ferrovia. O relatório conclui nas seguintes palavras com uma visão clara do desenvolvimento futuro da telegrafia elétrica:

Quando um dia a Terra for conectada por uma rede de ferrovias, coberta por linhas telegráficas, essa rede prestará serviços semelhantes aos prestados pelo sistema nervoso no corpo humano, em parte transmitindo o movimento, em parte propagando sensações e ideias na velocidade de um raio.

Gauss e Weber, que só haviam adquirido experiência com os télégrafos que construíram, ainda tinham a impressão equivocada de que a Terra poderia ser considerada um isolante nas instalações telegráficas, já que os experimentos sobre a resistência dos condutores haviam demonstrado que a Terra tinha uma resistência vários milhões de vezes maior que a do ferro - um resultado que aparentemente se referia à resistência específica. Em uma carta para Erdmann,²⁴¹ membro da empresa ferroviária Leipzig-Dresden, datada de 12 de julho de 1835, Weber sugeriu o uso dos trilhos sem isolamento adicional para os fios condutores de ida e volta. Entretanto, em uma carta datada de 15 de setembro do mesmo ano, Gauss considerou essa proposta difícil de ser implementada porque os eixos das rodas dos vagões criariam uma conexão condutora.²⁴² Por esse motivo, ele recomendou conectar as estações

²⁴⁰Em alemão: *Induktionsstoss*. Essa expressão pode ser traduzida como impulso de indução, impulso indutivo, choque indutivo, choque de indução, pulso indutivo ou pulso de indução.

²⁴¹[Nota de Heinrich Weber:] Arquivos da Companhia Ferroviária Leipzig-Dresden, Vol. I, pág. 2.

²⁴²[Nota de Heinrich Weber:] Arquivos da Companhia Ferroviária Leipzig-Dresden, Vol. I, pág. 5.

umas às outras com condutor especial feito com um fio de cobre de 1,6 mm de espessura ou com um fio de ferro de 3,8 mm de espessura e usar os trilhos apenas como condutor de retorno. O assunto foi adiado devido ao fato de o Conselho de Administração ter dúvidas sobre a viabilidade do projeto; para dissipar essas dúvidas, Weber escreveu em um segundo relatório ao Conselho de Administração em março de 1836.²⁴³

Gauss finalizou a teoria da telegrafia elétrica.²⁴⁴ A distância da ação, a força dos fios, as correntes etc. podem ser calculadas com a mesma certeza infalível de um eclipse lunar.

Para ele a instalação

não era um teste, mas um empreendimento garantido.

Era igualmente certo

que dois fios de cobre de 3/4 de polegada de diâmetro, colocados através do oceano até as Índias Orientais ou a América, estabeleceriam uma comunicação telegráfica com esses países.

Ele calculou que o sistema entre Leipzig e Dresden custaria apenas 500 táleres,²⁴⁵ já que não eram necessários fios condutores especiais. Embora Weber tenha se enganado na época quando deduziu o comportamento do solo terrestre a partir da resistência específica, a telegrafia de hoje provou que suas últimas afirmações são verdadeiras.

A diretoria ficou ainda mais hesitante quando os testes telegráficos realizados por Steinhil tiveram resultados desfavoráveis.²⁴⁶ Steinheil havia sido solicitado por Gauss para desenvolver ainda mais os aspectos técnicos da telegrafia elétrica. Isso o levou à descoberta de que a Terra se comportava como um condutor e poderia ser usada como condutor de retorno. Ele também foi o descobridor do primeiro telégrafo de impressão, concebido de forma extremamente engenhosa, razão pela qual seu nome sempre será mencionado nos primeiros lugares na história da telegrafia. O assunto finalmente chegou a uma conclusão em 26 de outubro de 1837, quando o Conselho de Administração decidiu não instalar um telégrafo elétrico, logo depois que o Mestre Hülse, mais tarde Diretor da Politécnica de Dresden, que havia inspecionado detalhadamente as instalações de telégrafo em Göttingen, apresentou uma estimativa de custo muito alta para uma conexão telegráfica com dois fios de cobre isolados.

As pesquisas magnéticas,^{247,248} para as quais Gauss havia criado uma base completamente nova com sua mente penetrante sobre a natureza, ganharam um significado especial,

²⁴³[Nota de Heinrich Weber:] Arquivos da Companhia Ferroviária Leipzig-Dresden, Vol. I, pág. 13. Ver também M. M. Freiherr von Weber, *Das Telegraphen- und Signalwesen der Eisenbahnen 1867*, onde a proposta de Weber é severamente criticada de um ponto de vista técnico.

²⁴⁴[Nota de Heinrich Weber:] No que se refere às experiências realizadas em Göttingen.

²⁴⁵Em alemão: “500 Thaler”. O táler foi uma moeda de prata usada na Europa por quase quatrocentos anos. Seu nome sobreviveu em várias moedas contemporâneas, tais como o dólar.

²⁴⁶Carl August von Steinheil (1801-1870) foi um físico, inventor, engenheiro e astrônomo alemão. Ver [Pri83].

²⁴⁷[Nota de Heinrich Weber:] Gauss relata sobre elas nos *Göttingischen gelehrten Anzeigen*, 07 de março de 1835, Número 36, pág. 345 e 30 de outubro de 1837, Número 173, pág. 1721.

²⁴⁸[Gau35b] e [Gau37b].

pois deram origem à fundação de uma Associação Magnética, que se propôs a determinar observacionalmente as ações do geomagnetismo em vários pontos da superfície da Terra. Inicialmente, as observações simultâneas foram feitas apenas em Berlim por Enke em datas especialmente marcadas, mas logo Leipzig, Copenhague e Brunswick se juntaram e, a partir de então, o número de lugares onde as observações correspondentes foram feitas aumentou tão rapidamente que não apenas lugares geograficamente distribuídos de forma apropriada na Europa, mas também lugares fora da Europa foram representados na Associação. Essas observações correspondentes já haviam sido feitas em Göttingen e Leipzig em 23 e 24 de setembro de 1834 e, mais tarde, foram repetidas com cuidado especial em 1 e 2 de outubro pelo próprio Weber, que estava passando as férias em Leipzig.^{249,250} Gauss escreve sobre isso em 3 de outubro:

Meu caro amigo, em primeiro lugar, meus melhores agradecimentos pela comunicação das observações magnéticas de Leipzig de 23 e 24 de setembro. Ainda faltam os protocolos de seu irmão e do professor Möbius, cuja inspeção continua sendo desejável em alguns lugares desta vez, pois houve apenas pequenas oscilações nesses dois dias. Aqui as observações só foram concluídas com dificuldade, pois meu filho ainda não havia retornado e o professor Ulrich estava ausente devido à doença de um filho. — Estou muito ansioso por seu rápido retorno, meu caro amigo. Minha solidão também aumentou com a ausência de minha filha mais nova, que não está aqui há oito dias. Saudações calorosas para sua querida família.

Sempre seu de coração,

C. F. Gauss.

A necessidade de padronizar o material de observação recebido levou Gauss e Weber a publicar uma compilação anual dos resultados mais importantes sob o título *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins* (Resultados das Observações da Associação Magnética), o primeiro dos quais foi publicado em 1836 e o último em 1841.²⁵¹ Ao mesmo tempo, o *Resultate* proporcionou uma oportunidade de discutir tópicos intimamente relacionados às investigações magnéticas em trabalhos menores e maiores. Somente Gauss publicou quatorze artigos, incluindo os famosos de importância fundamental sobre o potencial e a teoria geral do geomagnetismo,²⁵² e Weber publicou vinte e três, incluindo artigos sobre o galvanômetro tangente, o equivalente eletroquímico da água, a indução unipolar e o indutor de rotação, todos os quais se tornaram fundamentais para investigações posteriores.²⁵³ Intimamente relacionado a esses trabalhos está o *Atlas des Erdmagnetismus* (Atlas do Magnetismo Terrestre) publicado por Gauss e Weber em 1840, que foi editado principalmente por Weber e Goldschmidt.²⁵⁴

²⁴⁹[Nota de Heinrich Weber:] *Annalen* de Poggendorff, Vol. 33, pág. 426.

²⁵⁰[Gau34b].

²⁵¹Ver [GW37], [GW38], [GW39b], [GW40b], [GW41], [GW43] e [GW40a].

²⁵²[Gau39a] com traduções para o inglês em [Gau41a] e [GT14], e uma tradução para o espanhol em [Gau21d]; e [Gau40] com tradução para o inglês em [Gau43].

²⁵³[Web39c]; [Web40] com tradução para o inglês em [Web24d]; [Web41b] com tradução para o inglês em [Web21i]; e [Web41g] com tradução para o inglês em [Web21p]. Alguns desses trabalhos estão traduzidos em português nos Capítulos 22, 26 e 27.

²⁵⁴Carl Wolfgang Benjamin Goldschmidt (1807-1851) foi um astrônomo, matemático e físico alemão. Ver [GW40a].

Por maior que tenha sido o interesse de Weber no campo do magnetismo recém-aberto por Gauss, nós o encontramos, ao mesmo tempo, nos anos de 1833 a 1836, junto com seu irmão mais novo Eduard, envolvido em experimentos físico-fisiológicos, cujos resultados estão registrados na obra *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge* (A Mecânica do Aparelho de Caminhada Humana), Göttingen, 1836.²⁵⁵ O irmão mais novo, Eduard, permanecia repetidamente em Göttingen por períodos mais longos para realizar experimentos com Wilhelm sobre caminhadas, para os quais dados valiosos sobre o tamanho dos passos, o ritmo, o tamanho das marchas comuns e rápidas e assim por diante também eram fornecidos do lado militar por von Gersdorf em Berlim. O material cresceu tão rapidamente que Poggendorff escreve para Weber em 10 de fevereiro de 1833:

O fato de sua teoria sobre o caminhar ter crescido a tal ponto que formará uma obra própria é, obviamente, mais um obstáculo para o avanço da próxima geração, que terá de aprender a mover habilmente as pernas.

Os anos de 1831 a 1837 haviam se passado sob intensa atividade científica para Weber, quando ocorreu um novo evento que teria um impacto profundo na sua vida futura, um evento que despertou grande interesse não apenas nos círculos científicos, mas também nos círculos políticos além das fronteiras da Alemanha: a demissão dos sete professores de Göttingen.

6.5 O Período Intermediário 1837-1843

Ernst August mal havia se mudado para sua capital em 20 de junho de 1837 como príncipe alemão de Hanover, que até então estava unida à Inglaterra sob o comando de Guilherme IV, quando logo depois, em 5 de julho, declarou que a Constituição de 1833 não era mais válida e que a antiga Constituição permanente de 1819 deveria ser reintroduzida.²⁵⁶ O júbilo inicial com a independência conquistada logo se transformou em uma fermentação preocupante nos círculos instruídos e, nessas circunstâncias, surgiram preocupações nos círculos universitários de Göttingen sobre o curso favorável do centenário da Universidade em 17 de setembro, mas Weber não atribuiu nenhuma importância especial a elas. Em uma carta datada de 13 de agosto, na qual ele convida seus irmãos Ernst Heinrich e Eduard a participarem do jubileu, Weber escreve:

As circunstâncias políticas também não terão nenhuma influência sobre o jubileu, exceto pelo fato de que alguns príncipes a menos virão para cá. Agora mesmo, quando os inimigos da educação superior estão direcionando seus planos contra as universidades e gostariam de transformá-las em escolas públicas como as da Áustria, essa celebração, organizada com pompa real e ecoando por toda a Alemanha, também terá um efeito político muito ativo. Ela testemunhará em alto e bom som que as universidades não são instituições obsoletas, mas que estão avançando com o tempo, liderando a bandeira da civilização que toda a Alemanha está seguindo.

De fato, a celebração secular foi comemorada com grande esplendor nos dias 17 a 19 de setembro. Até mesmo o rei Ernst August participou das comemorações no primeiro dia e, além dos ministros hanoverianos, Alexander von Humboldt e vários deputados de outras

²⁵⁵[WW94] com tradução para o inglês em [WW92].

²⁵⁶Ernst August I (1771-1851), ou Ernesto Augusto I, foi rei de Hanover de 1837 até sua morte.

universidades. Foi nessa ocasião (19 de setembro) que Gauss deu sua palestra mencionada anteriormente sobre experimentos magnéticos em uma reunião solene da Sociedade [de Ciências de Göttingen].

Depois que o Parlamento foi dissolvido em 30 de outubro de 1837 e, ao mesmo tempo, os “funcionários reais” foram declarados liberados de seu juramento à Constituição de 1833, em 1º de novembro, os funcionários públicos e, mais tarde, também os advogados foram obrigados a prestar um novo juramento. Em seguida, em 18 de novembro, os sete professores de Göttingen, Albrecht, Dahlmann, Ewald, Gervinus, Jakob e Wilhelm Grimm, e Weber,²⁵⁷

²⁵⁷Wilhelm Eduard Albrecht (1800-1876) foi um advogado e jurista alemão. Friedrich Christoph Dahlmann (1785-1860) foi um historiador e político alemão. Georg Heinrich August Ewald (1803-1875) foi um orientalista e teólogo alemão. Em 1830 Ewald casou-se com Wilhelmine Gauss (1808-1840), a filha de Gauss. Georg Gottfried Gervinus (1805-1871) foi um historiador e político alemão. Jakob Ludwig Karl Grimm (1785-1863) foi um linguista, filólogo e mitólogo alemão. Wilhelm Carl Grimm (1786-1859) foi um linguista, escritor e mitólogo alemão. Jakob e Wilhelm Grimm ficaram conhecidos como os “irmãos Grimm” que dedicaram-se ao registro de várias fábulas infantis que tornaram-se muito famosas. Apresento nessa Nota de rodapé uma litografia feita a partir de um desenho do artista sueco Carl Gustav Adolph Rohde (1806-1873), de 1837/1838, mostrando os Sete de Göttingen, https://en.wikipedia.org/wiki/G%C3%B6ttingen_Seven. Parte superior: Wilhelm Grimm e Jakob Grimm. Parte intermediária: Wilhelm Eduard Albrecht, Friedrich Christoph Dahlmann e Georg Gottfried Gervinus. Parte inferior: Wilhelm Eduard Weber e Heinrich Georg August Ewald:



enviaram uma petição conjunta ao Conselho de Curadores da Universidade, escrita por Dahlmann, na qual declaravam que estavam vinculados por seu juramento à Constituição de 1833 e que não poderiam reconhecer como legitimamente existente um novo Parlamento eleito de acordo com outros princípios, nem fazer o juramento exigido. Essa famosa petição tem o seguinte texto:

Para o Conselho de Administração da Universidade Real.

Göttingen, 18 de novembro de 1837.

Petição muito humilde de alguns membros da Universidade sobre o Édito Real de 1º de novembro.

Os abaixo-assinados sentem-se humildemente compelidos em sua consciência a submeter sua honrosa declaração ao Conselho de Curadores da Universidade com relação ao conteúdo do Édito Real do dia 1º deste mês.

Os abaixo-assinados, com toda a reverência devida à Palavra Real, não podem se convencer em sua consciência de que a Constituição foi estabelecida ilegalmente e que, portanto, seja inválida, pelo fato de que o Rei Abençoado [anterior] não baseou todo o conteúdo da mesma em um contrato, mas no momento de sua promulgação não aprovou algumas propostas do Parlamento e acrescentou algumas emendas sem que estas tenham sido comunicadas e aprovadas previamente pelo Parlamento. Pois essa reprovação de invalidez, de acordo com a regra reconhecida do direito de que o válido não é destruído pelo inválido, afetaria apenas esses pontos individuais, que, de acordo com seu conteúdo, não determinam de forma alguma o todo, e de forma alguma toda a Constituição. O mesmo caso ocorreria, entretanto, se os direitos dos agnados²⁵⁸ fossem estabelecidos na Constituição; pois o princípio de que toda mudança na Constituição está sujeita ao consentimento dos agnados não poderia ser estabelecido sem o maior perigo para os direitos reais. Finalmente, com relação à violação dos direitos reais essenciais, que se alega ter sido cometida contra a Constituição, os abaixo-assinados não têm outro recurso a não ser apontar que o Édito de Publicação Real de 26 de setembro de 1833 visa expressamente garantir os direitos do soberano, que a Assembleia Federal Alemã, que criou uma comissão para o mesmo propósito ao mesmo tempo em que as negociações entre os Estados sobre a Constituição, nunca emitiu uma repreensão desse tipo, mas que a Constituição desse reino foi elogiada em toda a Alemanha por sua sábia moderação e prudência. Portanto, se os abaixo-assinados, após séria consideração da importância do caso, não puderem se convencer de outra coisa senão que a Constituição e seu conteúdo são válidos, eles não podem, sem violar sua consciência, permitir que a Constituição pereça apenas pela força, sem mais investigação e defesa por parte das partes legítimas. Em vez disso, continua sendo seu dever irrefutável declarar abertamente, como fazem neste documento, que devem se manter vinculados ao juramento que fizeram à Constituição e, portanto, não podem participar da eleição de um deputado para um Parlamento nomeado com base em outros fundamentos que não os da Constituição, nem aceitar a eleição, nem finalmente reconhecer como legalmente existente um Parlamento que se reúne em contradição com as disposições da Constituição.

Se os honrosos membros da Universidade abaixo-assinados aparecem aqui como indivíduos, não é porque duvidam da uniformidade das convicções de seus colegas,

²⁵⁸Em alemão: *Agnaten*.

mas porque desejam se proteger o mais cedo possível dos conflitos que cada hora seguinte pode trazer. Eles estão cientes de que, ao mesmo tempo em que defendiam fielmente sua profissão oficial, sempre alertaram a juventude estudantil contra os extremos políticos e, na medida em que lhes cabia, fortaleceram sua lealdade ao governo. Todo o sucesso de sua atividade não se baseia mais seguramente no valor científico de seus ensinamentos do que na sua integridade pessoal. Assim que eles aparecem diante dos jovens estudantes como homens que brincam levemente com seus juramentos, a bênção de sua atividade desaparece. E o que o juramento de nossa lealdade e homenagem significaria para Sua Majestade, o Rei, se fosse feito por aqueles que acabaram de perder seu juramento?

F. G. Dahlmann, E. Albrecht, Jakob Grimm, Wilhelm Grimm, G. Gervinus, H. Ewald, Wilhelm Weber.

Em 28 de novembro de 1837 Ernst Heinrich escreve para Wilhelm:

A declaração pública dos sete professores trouxe grande alegria a todos os simpatizantes. Isso é bravo! Estou muito ansioso para ver o efeito dessa medida.

O efeito não demorou a chegar, pois os sete professores foram demitidos do cargo por decreto do Gabinete em 14 de dezembro, e até mesmo Dahlmann, Jakob Grimm e Gervinus foram expulsos do território. Esses últimos mal tiveram tempo de colocar seus negócios em ordem, fugindo para a cidade vizinha de Witzenhausen, em Hesse, e depois se mudando para Kassel.

Se a turbulência hanoveriana já havia provocado manifestações nas propriedades de Baden, Bavária, Saxônia, Hesse, Brunswick e Württemberg, agora toda a Alemanha participava do destino dos “Sete”. De todos os lados, tanto dos círculos eruditos quanto dos burgueses, chegavam cartas de simpatia e reconhecimento, e poemas glorificavam suas ações. Mas esse apoio moral não parou por aí. Imediatamente foram formados comitês em toda a Alemanha, que se propuseram a levantar fundos para pagar a cada um dos sete professores o salário que vinham recebendo, até o momento em que recebessem novas nomeações. Acima de tudo, foi Leipzig que abriu o caminho para outras cidades nesse sentido. Seu exemplo foi seguido por Berlim, Hamburgo e outras cidades. Inicialmente, os Sete tinham reservas quanto a aceitar a oferta, então E. H. Weber escreve para Wilhelm em 7 de janeiro de 1838:

Sinto muito que você esteja relutante em aceitar e usar os valores subscritos. Temo que, como resultado, a assinatura em si fique paralisada. Considero muito honroso o fato de essa assinatura ter sido feita, e não por homens do partido, mas por moderados, alguns dos quais estão bem distantes da política. Devo desaconselhá-lo veementemente a não decidir dar aulas como professor particular em Göttingen ou mesmo de completar suas aulas. Seria outra coisa se vocês fossem reintegrados em seus cargos e se abstivessem de fazer o novo juramento. Seria ruim se vocês fossem atraídos de um passo para o outro e, finalmente, desviados do caminho. Em minha opinião, os sete professores só podem dar passos juntos.

Para comemorar o nobre feito representado por essa coleta, algumas passagens do documento impresso emitido pelo comitê em Leipzig,²⁵⁹ em dezembro de 1842, quando foi dissolvido após atingir seus objetivos, podem ser citadas aqui.

²⁵⁹[Nota de Heinrich Weber:] O comitê da “Associação Göttingen” foi formado pelo Dr. M. Crusius, presidente, E. Hirzel-Lampe, secretário e tesoureiro, A. Dufour-Féronce, Professor Erdmann, Gustav Harkort, Dr. Härtel, S. Hirzel, Karl Reimer, G. L. Preußner, Professor E. H. Weber e Otto Wigand.

Quando informamos aos Senhores, no início deste ano, sobre a situação da questão de Göttingen, não podíamos esperar que o objetivo do nosso trabalho fosse alcançado o mais rápido possível. No entanto, nesse meio tempo, o Sr. Conselheiro Dahlmann, o único dos sete para quem nossa Associação ainda era chamada a trabalhar, encontrou uma posição segura. Assim, o objetivo de nossa Associação foi plenamente alcançado. Devemos nos orgulhar de nossa pátria comum quando consideramos que a realização de nosso objetivo foi possível sem a necessidade de um apelo público, e quando podemos dizer a nós mesmos que, mesmo na pior das hipóteses, teríamos sido capazes de oferecer por um longo tempo o respeitável apoio nacional aos homens de honra de Göttingen.

Temos recebido continuamente contribuições generosas de todos os lados e garantias de participação contínua. A soma total, que foi colocada nas mãos do comitê abaixo-assinado, totalizou 22.357 táleres reais em dezembro de 1842. A maioria dos documentos de apoio relativos ao uso desse dinheiro está à sua disposição. Como sabem, o Sr. Professor Wilhelm Weber renunciou a uma grande parte dos fundos devidos a ele em favor de seus colegas. No entanto, agora que o motivo que o induziu a fazer essa renúncia deixou de existir devido ao cumprimento completo do objetivo da Associação, acreditamos que tínhamos que disponibilizar a ele os 1.400 táleres reais que ele teria recebido antes de seu emprego em Leipzig.²⁶⁰ Após a dedução dessa última quantia, o saldo é de 2.404 táleres reais. — Propomos que a soma total de 2.404 táleres reais seja enviada aos sete professores com a solicitação de que eles a utilizem como desejarem, talvez para estabelecer uma fundação de caridade para comemorar o evento de Göttingen, talvez para estabelecer bolsas de estudo em uma ou mais universidades nas quais eles encontraram um lugar após sua expulsão de Göttingen. De passagem, tomamos a liberdade de mencionar que, estritamente falando, ninguém além dos professores Ewald e Gervinus teria de fato uma reivindicação legal a esse fundo, pois ele só foi criado por sua renúncia sacrificial e isso só foi feito por eles em favor de seus colegas. — Com o cumprimento dessa última obrigação, no entanto, pretendemos concluir nossas atividades como Comitê da Associação Göttingen e depositar as atas de nossas negociações na Biblioteca da Universidade local.

Por fim, aproveitamos esta oportunidade para agradecer a confiança que depositaram em nós e para nos recomendar o seu favor, o qual reconhecemos respeitosamente.

O Comitê da Associação Göttingen.

Leipzig, dezembro de 1842.

Wilhelm Weber também recebeu apoio financeiro de fontes privadas. O professor Fritzsche, de Halle, escreveu a Weber em 17 de janeiro de 1838:

Amigos locais e ex-colegas seus, meu estimado Professor, estão colocando 200 táleres por ano à sua disposição, que podem ser coletados em parcelas trimestrais de 50 táleres, pré-numerando, e pedem que isso seja visto como prova da alta estima que têm por você e da reverência que têm por seu inesquecível pai, a quem todos nós chamávamos de Padre Weber. Por favor, tenha a gentileza de me informar como esse dinheiro pode ser enviado a você. Não sabemos se você ainda está em Göttingen.

²⁶⁰[Nota de Heinrich Weber:] Weber usou sua parte para um fundo patrimonial na Universidade de Leipzig, com a estipulação de que os juros sobre o capital deveriam ser usados para apoiar o trabalho científico.

Pequenos eventos mostram claramente até que ponto a participação dos Sete se estendeu a círculos mais distantes. Quando Dahlmann se mudou de Kassel para Leipzig, ele passou a residir na pousada “Stadt Rom” (Cidade de Roma). Descobriu-se que as três filhas do estalajadeiro eram todas signatárias da Associação Göttingen. O Sr. Nies, em Leipzig, imediatamente ofereceu hospedagem gratuita a Dahlmann. Em Göttingen, Weber foi nomeado membro honorário do Museu Literário enquanto permanecesse lá sem emprego e recebeu os direitos de um membro pleno sem precisar pagar uma assinatura. A família Dieterich, em cuja casa Weber tinha seu apartamento na época, devolveu-lhe o aluguel e assim por diante. Foi também nessa época (28 de dezembro de 1837) que Weber foi honrosamente nomeado *Doctor medicinae* (Doutor em Medicina) pela Faculdade de Medicina de Königsberg,

porque a fisiologia também experimentou um enriquecimento considerável através de suas pesquisas meritórias.

Das muitas cartas que Weber recebeu na época, apenas algumas podem ser mencionadas aqui. Pouco depois de assumir o cargo, E. H. Weber escreve a Wilhelm:

Estávamos preparados para o golpe que você estava nos contando. É muito difícil para você ser afastado de seu relacionamento com Gauss, que o liga acima de tudo a Göttingen, e de seu laboratório de física, no qual sua diligência de muitos anos foi acumulada. Mas você não pode se arrepender de ter agido como um homem honesto, fiel ao seu juramento. O exemplo dos Sete tem um efeito sobre a Alemanha, e as consequências dessa ação exemplar não podem ser previstas. Ela não passará sem efeito! Teria sido vergonhoso se a lei tivesse se curvado à força em Hanover sem se defender. No que diz respeito à subscrição, ela está se espalhando cada vez mais. Ela também começou em Berlim. Avise-me quando deverá ser enviado o dinheiro para as três pessoas expulsas. Assim que quiser vir para cá, você será muito bem-vindo.

Com amor sincero seu,

Ernst.

Steinheil, de Munique, também escreve em 25 de dezembro de 1837:

Caro Weber, não tenho palavras para expressar o quanto todos nós fomos afetados pelo infortúnio que Göttingen e você tiveram que vivenciar. Esperemos que Deus recompense o que o homem faz com a mais profunda convicção e que o futuro cure as feridas infligidas pelo presente. O que Gauss, a quem peço que me recomende com toda a obediência, fará? Ele permanecerá em Göttingen?

Seu amigo sincero,

Steinheil.

Na época, muitas pessoas eram da opinião de que a estrela mais brilhante de Göttingen, Gauss, e outros professores estariam inclinados a deixar Göttingen assim que tivessem a oportunidade, devido à situação política desagradável. Assim, E. H. Weber escreve para Wilhelm:

Dahlmann tem notícias de que a doação em Hamburgo é muito respeitável. O mesmo acontece em Berlim. Isso também continua aqui. Em Voigtland e Erzgebirge, as pessoas mais pobres, os tecelões e assim por diante estão contribuindo. — Devo me declarar totalmente contra todas as meias medidas. É por isso que é melhor que você saia de Göttingen logo. Espero que Gauss, você e Ewald encontrem emprego em Berlim, Bonn ou em outro lugar, desde que saibamos apenas que Gauss aceitará um emprego.

Mas todas essas opiniões foram refutadas por acontecimentos posteriores.

No que diz respeito a Gauss, ele levava um estilo de vida isolado; completamente ocupado com problemas matemáticos e físicos, ele tinha pouco interesse na vida política e, em sua idade (60 anos), também relutava muito em ter que mudar seu local de trabalho. Escreve Gauss em uma carta para A. von Humboldt:

Começar de novo em outro lugar é difícil na minha idade e com muitos pesos de chumbo que pesam sobre mim e que não são tão fáceis de se livrar e, de qualquer forma, sempre envolve a perda de vários anos, o que na minha idade é muito precioso.

Presumivelmente, a política desempenhou apenas um papel secundário no diálogo científico entre Gauss e Weber. De qualquer forma, na época em que Gauss estava se esforçando para reverter a demissão e manter Weber em Göttingen, ele não julgou Wilhelm Weber corretamente do ponto de vista político ao retratá-lo em cartas a pessoas influentes como uma personalidade inofensiva que estava longe da política. Pelo contrário, Weber se interessou muito por política até a velhice e podia se tornar extremamente apaixonado por questões políticas. As circunstâncias de Weber eram bem diferentes das de Gauss. Como um jovem solteiro de 33 anos, ele se socializava muito com as famílias dos professores, onde as questões do dia eram discutidas; ele era sempre um amigo bem-vindo na casa dos Ewalds, Grimms e Kraut, como atestam muitas cartas endereçadas a ele pela Sra. Dorothea Grimm e pela Sra. Minna Ewald (filha de Gauss).²⁶¹ As cartas daquela época também contêm uma animada troca de opiniões políticas com seu irmão Ernst Heinrich. Em 9 de junho (1838?), por exemplo, Wilhelm escreve sobre a corrente política predominante na cidade de Hanover:

As notícias que lhe dei em minha última carta sobre a situação aqui precisam ser corrigidas. Embora nesta região as novas eleições tenham sido muito ruins e a maior indiferença tenha sido demonstrada, houve um movimento contrário nas províncias. A Câmara parece estar aderindo à Constituição com uma grande maioria, como prova a eleição presidencial, o que vocês devem ter percebido pelos jornais. Vocês ficarão sabendo pouco sobre as negociações pelos jornais, porque o *Hannoversche Zeitung* (Jornal de Hanover) deve permanecer em silêncio e, de acordo com a lei federal, os outros jornais só podem noticiar o que os jornais das províncias contêm. Esse silêncio é, portanto, a melhor indicação de como as coisas estão. Suspeita-se que a Câmara tomará medidas tão decisivas que se pode esperar que ela seja dissolvida em breve. Infelizmente, a Primeira Câmara não fará nada e, portanto, os esforços da Segunda Câmara serão infrutíferos. Muitos acreditam que seria melhor se a Segunda Câmara fosse menos impetuosa em tais circunstâncias. De qualquer forma, é muito gratificante que a injustiça que foi cometida seja sentida de forma tão generalizada

²⁶¹ Ver a Nota de rodapé 257.

e profunda no país e, mais uma vez, seja pronunciada em alto e bom som. Como resultado, o Gabinete será induzido a tomar novas medidas violentas e o mal no presente aumentará ainda mais. No entanto, a esperança de uma solução futura foi adiada. Fala-se de um pedido que já foi feito à Câmara pelo Presidente com relação à questão constitucional. O presidente anterior da Câmara, Sr. Jacobi, que declarou como princípio que é preciso ter coragem para ir além do ponto legal, recebeu apenas 9 votos desta vez. O atual Presidente é o Senador Meier, de Lüneburg.

Muitas vezes foi levantada a questão de como foi possível que apenas sete professores, e não mais, participassem do protesto. O próprio Weber respondeu a essa pergunta aos 85 anos de idade, em resposta a uma consulta do Superintendente Geral Schuster, em Hanover.²⁶² Esse último havia recebido uma carta do filósofo Ritter de 1837, na qual ele expressava seu descontentamento por ter tomado conhecimento do protesto somente depois de sua publicação. Weber escreve:

Falávamos muito entre amigos durante as caminhadas, não fazíamos segredo de nossas opiniões e, de qualquer forma, nossas intenções chegaram mais ou menos a círculos mais amplos, e ninguém pode reclamar que não sabia de nossas opiniões. Na época, o assunto estava no ar; qualquer pessoa que quisesse participar poderia fazê-lo, mas sabíamos que estávamos sendo observados e evitamos expressamente tomar a iniciativa de discussões adicionais que pudessem ser interpretadas como publicidade. Estávamos totalmente cientes das consequências de uma possível declaração e não podíamos assumir a responsabilidade de forçar outros a aderir. Foi um protesto de consciência que ocorreu em todos. Eu não sabia, quando assinei, quem e quantos fariam o mesmo. Eu mesmo conversei com Albrecht em particular, cujo julgamento como jurista eu endossava; ele me informou sobre o protesto escrito por Dahlmann, com o qual concordei e assinei. Ritter estava em Göttingen há apenas um ano, e teria parecido inadequado arrastá-lo para essas lutas partidárias, às quais ele era um estranho; cabia a cada indivíduo procurar se alinhar com suas próprias opiniões.

A propósito, logo após o protesto dos Sete, em 13 de dezembro de 1837, seis outros professores da Universidade, Müller, Kraut, Ritter, Thöl, von Leutsch e Schneidewin, quando o assunto foi apresentado em jornais públicos como se os Sete tivessem sido abandonados por seus colegas, declararam que nunca haviam expressado desaprovação à atitude de seus colegas que haviam sido destituídos do cargo e, além disso, um número não desprezível de cidadãos não aceitou o novo juramento ou o assinou apenas com reservas. No entanto, o Governo de Hanover provavelmente não tomou conhecimento desses eventos devido ao furor que a demissão dos Sete já havia causado na Alemanha.

É natural que os afetados pela demissão em 14 de dezembro tenham se tornado ainda mais próximos uns dos outros do que já eram. Albrecht, Ewald e Weber permaneceram inicialmente em Göttingen, enquanto Dahlmann, Jacob e, mais tarde, Wilhelm Grimm e sua esposa, este último por um período mais longo, estabeleceram-se em Kassel. Isso levou a um intenso intercâmbio entre Göttingen e Kassel, e Weber frequentemente viajava para lá a pé ou por carruagem. Naquela época, as pessoas evitavam confiar discussões políticas ao correio, preferindo usar canais privados quando uma discussão verbal não era possível. Weber escreve para sua mãe:

²⁶²[Nota de Heinrich Weber:] *Zeitschrift des Historischen Vereins für Niedersachsen* (1889).

A senhora perceberá facilmente que não consegui me libertar imediatamente das relações de amizade em que vivo aqui, que involuntariamente se tornaram mais firmes devido ao perigo iminente. Ainda sou mantido aqui por uma grande quantidade de trabalho que, como a senhora sabe, ainda estou fazendo com Gauss.

Foi também nessa época que foi tomada a decisão, já que os Sete não podiam reconhecer suas demissões como sendo legais, de mover uma ação contra o Gabinete do Rei para o pagamento de seus salários. No entanto, o Dr. Grefe, em Göttingen, que foi aceito como advogado, não entrou com a ação até dezembro de 1838, mas fracassou após vários anos de negociações. Embora a ação tenha sido aceita pela Chancelaria de Justiça de Hanover, o Gabinete do Rei argumentou que o objeto do julgamento não era uma questão judicial, mas governamental, e solicitou que a Chancelaria de Justiça se declarasse incompetente, o que foi recusado. Assim, o julgamento teve de ser suspenso até que o conflito de jurisdição, que estava intimamente relacionado à disputa constitucional, fosse resolvido. Era inevitável que as partes envolvidas publicassem escritos de natureza política, alguns dos quais traziam a marca da discordância pessoal, em vista do que E. H. Weber escreve a seu irmão:

Toda a Europa participou dessa questão. Um texto escrito por um ou mais dos sete professores deve expressar o caráter dos sete professores, mas não deve ser muito pessoal. Pode conter a ideia principal de que vocês não tomaram essa medida para se colocarem ao lado de um partido político, mas para dar um exemplo para aqueles que, por razões morais, não querem ser levados ao perjúrio por aqueles que destruíram o estado social. Dahlmann também está trabalhando em um ensaio.

Inicialmente, ainda era possível manter a opinião de que uma solução favorável para as diferenças entre o Parlamento e o Governo não excluiria a reintegração dos professores demitidos; mas quanto mais o conflito se arrastava, mais essa esperança se esvaía. O Governo de Hanover já estava se esforçando para eliminar, na medida do possível, os transtornos causados à Universidade de Göttingen pela demissão dos sete professores. Weber escreve para seu irmão:

A questão do Gabinete de Física será esclarecida em breve, mas ainda está bastante incerto como isso será resolvido. O Curatório solicitou uma opinião especializada do Senado, e o Senado exigiu por unanimidade que o Gabinete [de Física] permaneça dedicado aos experimentos conjuntos de Gauss comigo. Ewald escreveu de Londres. À noite, vou alternadamente a Gauss, Ewald, aos [irmãos] Grimm, Albrecht, Kraut, Müller.

Ewald, que havia viajado para Londres no início de 1838, aceitou uma oferta de trabalho para Tübingen feito a ele por volta da Páscoa do mesmo ano e, conseqüentemente, Weber perdeu o contato direto com um amigo, embora a amizade tenha sido mantida com muito entusiasmo por carta e mais tarde, depois que ambos retornaram a Göttingen em 1849, permaneceu até a morte de Ewald em maio de 1875. Weber pode muito bem ter se tornado solitário com o tempo, depois que todos os sete, exceto Albrecht e ele próprio, deixaram Göttingen. O plano há muito concebido de conhecer os círculos científicos do exterior, especialmente os de Londres e Paris, foi realizado por volta de março de 1838. Weber viajou via Leipzig para Berlim, onde Poggendorff se juntou a ele para visitar Londres e, mais tarde, Paris. As duas cidades cosmopolitas lhe ofereceram tanto estímulo que ele só

retornou a Göttingen em agosto de 1838. A companhia de seu amigo íntimo Poggendorff era extremamente valiosa para Weber, mas essa viagem foi quase fatal para a amizade deles. O relacionamento de Weber com Gauss, por mais ideal que fosse em si mesmo, não encontrou aprovação total nos círculos berlinenses. Acreditava-se que Weber tinha sido prejudicado no seu próprio desenvolvimento pela sua ligação com Gauss. Essa opinião também é expressa na carta que Poggendorff escreve a Weber em 6 de abril de 1839, após um longo intervalo:

Perdoe-me por só agora responder à sua carta, por meio da qual você restabeleceu de forma tão agradável o contato há muito interrompido entre nós. — Tenho certeza de que acreditará sem que eu lhe assegure que também tenho pensado em você com muita frequência desde que nos separamos em Cambridge, e mais de uma vez estive a ponto de quebrar o longo silêncio. — O fato de você não deixar de dedicar suas energias à ciência em sua já difícil situação só pode servir para aumentar o respeito que sempre tivemos por você. Todos nós esperamos sinceramente que você encontre alívio contínuo para as dificuldades que tem de enfrentar. Você também pode ter certeza de que nenhum dos seus amigos aqui diminuiu de forma alguma o interesse em você e em suas atividades. Até mesmo a diferença de opinião que às vezes se expressa entre você, eu e outros tem sua razão de ser exclusivamente no interesse que temos por você, porque eu, como outros, sou da opinião e a tenho guardado por anos de que você se prejudicou quando deixou um círculo independente de pesquisadores para se juntar a outro como membro servidor. Só recentemente fui reafirmado nesse ponto de vista pelo fato de que Gauss recebeu a Medalha Copley e o seu trabalho quase não foi mencionado.²⁶³ Entretanto, não quero negar que, nas atuais circunstâncias, esperamos que temporárias, sua aliança com Gauss seja frutífera. Espero que, quando as circunstâncias mudarem, você possa mais uma vez pertencer somente a si mesmo na ciência.

Não há registros da viagem em si, mas uma carta de Dirichlet nos diz que Weber estava em contato com os amigos de Dirichlet durante sua estada em Paris.

Foi principalmente durante essa viagem que Gauss se esforçou ao máximo para reverter a demissão de Weber, a fim de mantê-lo em Göttingen. Para esse fim, Gauss recorreu a personalidades próximas ao rei, inicialmente sem sucesso, como mostra claramente a carta de Gauss a Weber, datada de 12 de março de 1838:

Meu caro Weber, o Conselheiro da Legação, von L., chegou aqui apenas dois dias após a sua partida; a conclusão dos assuntos eleitorais no condado de Hohnstein o impediu até então. Ele só ficou aqui por um dia, já que o objetivo de sua viagem foi, se não totalmente, pelo menos parcialmente derrotado. Isso mostra que a questão de sua nomeação está muito bem encaminhada, mas requer necessariamente sua presença pessoal. Você sabe que eu mesmo só desejo uma presença que seja totalmente compatível com a honra. A esse respeito, entretanto, induzi G. v. L. a envolver outra pessoa no assunto, a saber, Müller. Este último teve uma conferência com ele

²⁶³ A Medalha Copley é um prêmio concedido pela *Royal Society*, a academia nacional de ciências do Reino Unido. É a medalha de maior prestígio e também a mais antiga concedida por essa Sociedade. A medalha de 1838 foi concedida a Gauss por suas invenções e pesquisas matemáticas sobre o magnetismo, juntamente com Faraday por suas pesquisas sobre a indução elétrica. Weber ganhou essa medalha apenas em 1859 por suas investigações contidas em suas obras *elektrodynamische Maassbestimmungen* (Medições Eletrodinâmicas), juntamente com suas pesquisas em eletricidade, magnetismo e acústica.

sobre isso, e L. se declarou completamente satisfeito com essa conferência, pois me procurou novamente depois. Entretanto, como eu disse, os detalhes não podem ser determinados sem uma audiência oral. Portanto, eu me censuraria muito por não ter tentado dissuadi-lo ainda mais urgentemente de viajar para Leipzig tão cedo, se eu não me consolasse com o fato de que essa viagem servirá para aliviá-lo de uma certa falta de liberdade. Entretanto, para não ser repreendido mais tarde por ter permanecido em silêncio no momento errado, devo mencionar mais duas circunstâncias: (1) A nota anexa, que minha filha me enviou para lhe encaminhar, menciona uma viagem que você fará a Londres. Você nunca me disse nada sobre essa viagem e, portanto, não tenho certeza se a intenção é séria e até que ponto. De qualquer forma, não vejo como essa viagem poderia ser realizada antes da conclusão das negociações em questão, a menos que elas sejam canceladas ou interrompidas. (2) Lembro-me de que você me mostrou uma procuração em branco para um advogado, mas não sei mais se Albrecht, você ou Ewald deveriam preenchê-la. Aqui, também, admito a compatibilidade de tal autorização. Não entendo como o processo poderá ser conduzido com um retorno por meios pacíficos. Parece-me (mesmo sem contar o fato de que o julgamento certamente não pode levar a nenhum resultado) que nem o objeto material ostensivo, a quantidade de dinheiro, nem o verdadeiro objeto, a saber, causar algum aborrecimento e vexação ao oponente, são proporcionais, por outro lado, o que está em jogo é o retorno ao elemento verdadeiro (o científico) do falso (eficácia política), a salvação da *Georgia Augusta*,²⁶⁴ que está amplamente ligada a isso, e a preservação de laços de amizade tão preciosos. Portanto, eu gostaria que o Conselheiro Albrecht suspendesse o início efetivo do julgamento enquanto um retorno pacífico ainda não tiver sido abandonado. De qualquer forma, nada será prejudicado por isso, pois ainda falta muita coisa na prescrição. — Por favor, recomende-me a ambos (Möbius e Enke), a seus dois irmãos, bem como a Humboldt e Dirichlet,

sempre seu,

C. F. Gauss.

Entretanto, a opinião favorável revelada nessa carta logo se transformou no oposto. Provavelmente, um clima de irritação havia se instalado nos círculos governamentais como resultado de eventos políticos, de modo que Gauss viu a última chance de atingir seu objetivo em uma influência direta sobre o rei Ernst August. A viagem do rei a Berlim ofereceu uma oportunidade favorável para isso. Gauss sabia que, nesse caso, A. von Humboldt entraria em contato com o rei e esperava que expressar sua opinião não passasse despercebido ao rei. Por isso, ele escreveu uma carta detalhada para A. von Humboldt em 13 de maio de 1838, que é particularmente interessante porque nela Gauss desenvolve seus pontos de vista. Gauss escreve:

Meu estimado amigo, o interesse acolhedor que você demonstrou pelos novos meios de conhecer os segredos do geomagnetismo, sobre os quais tive o prazer de dar uma palestra ao seu lado em 19 de setembro, faz com que eu tenha o dever de relatar o que aconteceu desde então. — Em março deste ano, foram feitas novamente observações nos dois dispositivos em Göttingen, mas desta vez não estamos mais sozinhos. Graças aos cuidados de nosso maravilhoso e inquieto amigo Weber, também

²⁶⁴Isto é, da Universidade de Göttingen.

foram feitas observações em três outros locais: (1) em Munique, após Weber ter instruído completamente o Prof. Steinheil sobre a construção do magnetômetro bifilar e este último ter mandado construir um que era completamente idêntico ao que está aqui, (2) em Leipzig, onde Weber pegou um aparelho que era reconhecidamente apenas um modelo rudimentar e instruiu o Prof. Fechner sobre seu uso, (3) em Berlim, onde Weber mandou construir um similar às pressas sob sua própria direção e participação. Os resultados estão agora à minha frente, e todas as quatro curvas de intensidade têm a mesma consistência maravilhosa, eu gostaria de dizer uniformidade militar, que conhecemos há tanto tempo nas curvas de declinação. Não há grandes movimentos em lugar algum, por isso é ainda mais impressionante reconhecer a harmonia nos muitos movimentos pequenos. Na última hora, um tanto inquieta, das 11h às 12h do dia 1º de abril, tracei a declinação e a intensidade de cada espécie de curva de acordo com o método que você conhece. Com prazer nostálgico, apreciei a concordância entre elas.

Por que com um prazer nostálgico? Parece-me que um novo mundo foi descoberto, o caminho para ele foi pavimentado e de repente o portão foi fechado na nossa frente! A existência contínua de nossa publicação, o “Resultate”,²⁶⁵ que pelo menos por enquanto mantém a atividade conjunta dos participantes, na verdade, a existência contínua de toda a minha atividade científica em Göttingen, está essencialmente ligada à preservação de Weber em Göttingen.

Eu costumava ter grandes esperanças de manter Weber em Göttingen, mas elas quase desapareceram nos últimos tempos. Agora estou depositando quase que minha última esperança somente em você. Com a atual presença de nosso rei em Berlim (pelo que vejo no jornal, ele saiu de lá anteontem), espero que você encontre um momento favorável para evitar a destruição de todas as minhas esperanças e conseguir Weber para nós. A esse respeito, estou informando-o confidencialmente de todas as circunstâncias relevantes para que possa avaliar o progresso até o momento e a situação atual.

Preciso apenas abordar brevemente o que você já sabe. Ou seja, Weber deve ser distinguido de todos os outros Sete, dos quais não excludo nem mesmo meu genro (Ewald), mas, no máximo, apenas o Grimm mais jovem. Weber não fez absolutamente nada além de incluir as cinco letras de seu nome na apresentação ao Curatório da Universidade em 18 de novembro, o que foi muito infeliz para Göttingen. Ele não se envolveu em nada político, não tinha nada impresso que justificasse isso, os temas de suas aulas não tinham a mais remota conexão com a política. Desde o início, portanto, considere sua reintegração possível, na verdade, com boa vontade do outro lado, fácil. Mas não consegui fazer nada diretamente, nem no nível mais alto nem com os mais próximos, por motivos que, em parte, não são adequados para uma carta e, em parte, são fáceis de adivinhar. Mas, indiretamente, tentei muitas coisas. Vários dos intermediários podem ter sido muito fracos de coração ou talvez não tenham se aquecido completamente. Mas uma das maneiras realmente parecia estar muito próxima do objetivo.

Nosso representante da Universidade, o Conselheiro da Legação Laffert, que não mora em Göttingen, mas em Ilfeld, despertou o interesse do conde Münster e me informou

²⁶⁵Ver a Nota de rodapé 88 na página 38.

que trataria do assunto com vigor e me deu as melhores esperanças. Entretanto, só fiquei sabendo dos detalhes durante uma visita pessoal de H. L. von L. a Göttingen, vários dias após a partida de Weber para Leipzig. O conde Münster não havia apresentado sua intercessão ao rei pessoalmente, mas por meio do ministro von Scheele, e o rei havia se declarado inclinado a permitir que Weber voltasse “se Weber desse o primeiro passo e pedisse desculpas por causa do chamado protesto”, segundo as palavras. O próprio Conde Münster declarou que essa condição era favorável.

De minha parte, ainda não considerava a questão como perdida, pois essas duas expressões permitem uma grande margem de manobra. Se “dar o primeiro passo” não significa oferecer-se em Hanover, mas apenas fazer uma declaração específica, por exemplo, de que ele estava disposto a ser recontratado, então isso era algo bastante necessário, já que o rei não poderia se expor à possibilidade de receber uma recusa em sua reintegração. E mesmo “pedir desculpas” não parecia excluir a possibilidade de uma versão que fosse compatível com o mais fino senso de honra. Mas, de qualquer forma, mesmo na opinião de H. v. Laffert, a questão era delicada demais para ser resolvida por cartas, especialmente porque Weber havia inicialmente se mudado daqui para a atmosfera de Leipzig, cuja neutralização provavelmente poderia ser esperada em Berlim. Portanto, não me restava mais nada a fazer a não ser escrever uma carta a Weber em geral, avisá-lo para não participar de nenhuma diligência preliminar e aguardar seu retorno.

No entanto, este último [retorno] foi adiado por três ou quatro semanas a mais do que o esperado e, nesse meio tempo, parece que a situação mudou consideravelmente. Recebi um comunicado da Curadoria da Universidade, que estava ciente do que me havia sido dito, no sentido de que, devido a várias coisas que haviam acontecido nesse meio tempo, o rei estava mais exacerbado contra os Sete do que antes, havia declarado muito positivamente sua relutância em renomear um deles, e dificilmente se contentaria com uma explicação como a que Weber estaria disposto ou seria capaz de dar, e estava pressionando para que todos os cargos fossem preenchidos novamente em breve, e assim por diante. Passarei agora em silêncio sobre algumas coisas relacionadas ao último ponto.

Após o retorno de Weber, passei a considerar questionável continuar no caminho aberto inicialmente por correspondência. De fato, comuniquei todos os pontos essenciais a Weber. No entanto, minha sensibilidade não me permitiam nem mesmo perguntar se ele era capaz de dar uma “explicação” que se assemelhasse a uma revogação. Na verdade, eu mesmo não faria isso no lugar dele, mesmo que sentisse que tinha tomado uma decisão precipitada na época, e se ele já tivesse tido uma sugestão desse sentimento, minha sensibilidade não me permitiu jamais tocar nesse ponto. Mas mesmo sem um delicado senso de honra, até mesmo a prudência comum proibiria alguém de concordar com tal coisa, pois em que posição tal pessoa estaria entre seus colegas e alunos! Não preciso lembrá-lo de que estou aqui apenas observando as circunstâncias como elas são nestes tempos agitados, sem expressar qualquer opinião própria sobre nossos assuntos públicos.

Nessa situação, não consigo fazer nada por escrito. Mesmo fazer algo verbalmente não era viável por vários motivos. Minha última esperança agora está em você. Você conhece agora toda a situação tanto quanto eu mesmo a conheço. Se encontrar um momento favorável, certamente o aproveitará. Faça com que o rei devolva um

acadêmico distinto e inofensivo a Göttingen! E por que não fazer isso de uma forma majestosamente magnânima e honrosa para ambos, para esquecer o passado em reconhecimento ao grande valor científico de Weber. Estou firmemente convencido de que isso causaria uma impressão extremamente favorável. O que posso acrescentar é que ainda não é tarde demais, e isso com certeza.

Minha filha partiu para Tübingen com Ewald anteontem; eu nem sequer tentei fazer qualquer coisa por ele, pois é contra meu comportamento fazer valer considerações pessoais. Göttingen sentirá muito sua perda. É claro que a separação de minha filha é infinitamente mais dolorosa para mim. Que o laço mais forte que me une a Göttingen não seja rompido também! Mas nem lugar, nem tempo, nem circunstâncias podem enfraquecer meus sentimentos de amor e confiança por você.

Com profunda admiração,

C. F. Gauss.

Quando essa tentativa também não levou a nenhum resultado, Gauss aproveitou a oportunidade que lhe foi oferecida quando o Conselho de Curadores lhe pediu para fazer sugestões para o preenchimento do cargo deixado por Weber, a fim de fazer uma última tentativa de reabilitar Weber, uma tentativa que, no entanto, não deu certo. Em resposta a um relatório escrito por Gauss, no qual ele mais uma vez esclareceu as circunstâncias, ele recebeu uma carta na qual foram listadas as condições sob as quais Weber teria a perspectiva de ser reintegrado, condições que mostram claramente o que se acreditava ser oferecido a um cidadão leal à constituição em Hanover na época dos “servos reais”. O próprio Gauss informou Weber sobre essa resposta em uma carta enviada a Londres em 18 de julho de 1838, mas ela só chegou às mãos de Weber depois que ele retornou de sua viagem. Na carta está escrito:

Meu caro amigo, antes mesmo de receber sua carta de 18 de junho, eu também havia recebido uma de H. (provavelmente Humboldt), que contém aproximadamente as mesmas informações sobre as negociações que a carta endereçada a você. Após uma análise cuidadosa de todas as circunstâncias, no entanto, ainda não pude considerar o resultado que ele indicou como a última palavra, (1) porque podemos estar menos inclinados a ser indulgentes com alguém considerado hostil, (2) porque tenho alguma desconfiança quanto ao fato de os intermediários utilizados terem tido um interesse sincero no assunto. Essa desconfiança tem alguns motivos, pelo menos em relação a uma das pessoas mencionadas. Nesse estado de coisas, ainda não acreditava que pudesse responder a um pedido que recebi do Diretor do Gabinete, agora Conselheiro do Gabinete, List, para nomear a pessoa mais adequada para ocupar seu cargo, embora, de acordo com sua carta, você mesmo quase pareça desejar que eu faça propostas para outra nomeação. Respondi ao Sr. L. que eu poderia e, se ele insistisse, indicaria várias pessoas qualificadas com as quais a possibilidade de continuidade da existência da Associação Magnética continuaria concebível por enquanto, mesmo em caráter condicional, “contanto que Weber continue a honrar Göttingen com sua presença”, mas que eu tinha o dever de apresentar toda a situação a ele primeiro. Fiz isso de uma maneira e em um sentido que você certamente concordaria, apenas no sentido que descrevi em minha carta anterior. Recebi uma resposta ontem, que estou copiando aqui literalmente para que você saiba tanto quanto eu:

“Excelência, estou em dívida com V. Sa. pela carta detalhada de 28 de janeiro,²⁶⁶ com a qual o Senhor teve a gentileza de me honrar, e agradeço-lhe com muita obediência por ela. Lamento muito a perda do Professor Weber para minha²⁶⁷ *Georgia Augusta*,²⁶⁸ e tenho certeza de que todos que conhecem os grandes méritos científicos desse homem farão o mesmo. Fico feliz em acreditar que o Professor Weber não estava familiarizado com a agitação política de nosso tempo e que foi induzido²⁶⁹ a assinar o infeliz documento por outras pessoas, e que ele também acreditava que o documento não era destinado ao público, mas apenas ao Conselho de Curadores da Universidade Real. Mas, de acordo com toda a situação do caso, isso não pode ser suficiente para causar sua reintegração em Göttingen.”

“Sem a autorização de Sua Majestade, o Rei, gostaria de compartilhar com o Senhor minhas opiniões sobre a possibilidade de reintegração imediata do Prof. W. [Weber], e não posso suprimir meu vivo desejo de que o Sr. W. [Weber] considere estas ideias.”

“Acho que o Sr. Weber deve enviar uma carta detalhada a Sua Majestade o Rei, declarando (a) como ele sempre se manteve afastado de todas as atividades e disputas políticas, e viveu apenas para sua ciência; que, portanto, (b) a questão da revogação válida ou inválida da lei constitucional, cujo conteúdo lhe era estranho, não tinha nenhum interesse para ele, mas que (c) ele se deixou tentar pela agitação que surgiu entre seus colegas após a Patente Real em 1º de novembro de 1837, e se deixou induzir em erro²⁷⁰ ao assinar um documento que teria resultado em sua demissão, que (d) ele nunca teria assinado o referido documento se tivesse acreditado apenas remotamente que ele se destinava ao público, enquanto ele estava firmemente convencido de que a intenção era meramente enviar o documento para a Curadoria da Universidade Real, que finalmente (e) ele lamentava muito tudo o que aconteceu depois, pois era muito contrário aos seus princípios de relacionamento do súdito com o soberano.”²⁷¹

“Essa carta à Majestade do Rei teria que ser redigida de forma que seu conteúdo essencial pudesse ser tornado público. Aguardo notícias do Senhor sobre se o Professor Weber poderá enviar uma carta do tipo mencionado anteriormente à Sua Majestade, o Rei, que, em minha opinião, não contém nada prejudicial para ele. De qualquer forma, no entanto, devo desejar que o Senhor tenha a grande gentileza de me indicar os acadêmicos que, se Weber não puder ser renomeado, seriam os mais adequados para substituí-lo e, ao mesmo tempo, expressar qual deles é o mais digno em todos os aspectos. É com prazer que aproveito esta oportunidade... L.”

Não vou, meu caro amigo, antecipar seu julgamento da maneira mais remota possível,

²⁶⁶[Nota de Gauss:] A data está incorreta, minha carta foi escrita antes, mas não sei exatamente em que dia.

²⁶⁷[Nota de Gauss, indicando que ele está reproduzindo exatamente como está no texto original:] Sic!

²⁶⁸Isto é, para a Universidade de Göttingen.

²⁶⁹[Nota de Gauss:] Eu não havia escrito tal suposição.

²⁷⁰[Nota de Gauss:] É desnecessário notar que minha carta não fez tal afirmação.

²⁷¹[Nota de Gauss:] Não está totalmente claro para mim o que realmente significa esse item (e).

mas apenas me limitarei a dizer que, apesar da frase “sem a autorização de Sua Majestade”, não tenho dúvidas de que L. deixou o Rei ciente de minha carta e escreveu sua resposta com seu conhecimento prévio. Essa resposta foi escrita de maneira extremamente limpa, de modo que certamente houve um conceito prévio. Agradeceria se pudesse me enviar uma resposta ostensiva, mas não quero impor isso a você.

Entretanto, gostaria de lhe pedir que considere a possibilidade de responder inteiramente de acordo com os seus desejos. ... Por favor, envie-me uma carta em breve, querido Weber, de preferência com a notícia de seu retorno iminente.

Seu fiel,

C. F. Gauss.

A resposta negativa de Weber foi evidente, e isso selou sua suspensão permanente do cargo, que foi posteriormente transferido para Listing.²⁷² Desse momento em diante, Weber viveu como cidadão privado em Göttingen, ocupado em parte com a publicação dos *Resultate*²⁷³ e em parte com suas próprias investigações. É possível que tenha sido particularmente doloroso para ele ver-se destituído de todos os recursos que antes lhe eram disponibilizados pelo Estado. Seguindo o conselho de Dirichlet, ele solicitou à Seção de Física da Academia de Berlim quando precisou de 8.000 metros de fio de cobre trançado para uma pesquisa.²⁷⁴ A Academia lhe concedeu a quantia necessária para a compra e lhe emprestou o fio.

Embora a situação de Weber na época certamente não pudesse ser descrita como fácil em muitos aspectos, ele sempre esperou que, mais cedo ou mais tarde, lhe fosse oferecido um cargo em algum lugar, assim que houvesse um disponível. Já em janeiro de 1841, foi-lhe oferecido um cargo de Diretor do Instituto de Ensino Técnico em Dresden, mas, embora o ministério saxão tenha acomodado seus desejos na medida do possível, ele acreditava, após cuidadosa consideração, que teria de recusá-lo

porque sentia que sua carreira acadêmica seria completamente alterada ao aceitá-lo. Todo meu contato com Gauss seria cancelado, uma vez que a correspondência não teria qualquer utilidade aqui. Minha participação nas investigações e nos esforços magnéticos teria de passar para outras mãos, se quisessem continuar. Eu desistiria imediatamente de coeditar os *Resultate*. Teria que devolver imediatamente o fio que me foi dado pela Academia de Berlim. Todos esses sacrifícios seriam muito lamentados, e não sei se eu estaria a salvo de censura. Suspeito que Humboldt diria facilmente que, se eu quisesse me separar de Gauss, o que ele não queria aconselhar no interesse da ciência, eu poderia ter sido tratado de forma diferente e que foi errado eu não ter ido a Berlim e dito algo.

Uma nomeação em Brunsvique, no então *Collegium Carolinum*, hoje Universidade Técnica Carolo Wilhelmina, parecia muito mais aceitável porque, de acordo com uma declaração de Blasius, que conduziu as negociações, as condições lá eram organizadas inteiramente em bases acadêmicas. Mas as negociações preliminares continuaram, porque uma cátedra estava

²⁷²Johann Benedict Listing (1808-1882) foi um matemático alemão. Em 1839, ele sucedeu Wilhelm Weber como professor de física na Universidade de Göttingen.

²⁷³Ver a Nota de rodapé 88 na página 38.

²⁷⁴Em alemão: *übersponnenen Kupferdraht*. Um fio de cobre trançado significa aqui um fio de cobre revestido de seda ou algodão para fins de isolamento.

em perspectiva quase simultaneamente em Halle e Leipzig. Em Halle, Kämtz havia recebido um chamado para Dorpat e, quando aceitou o chamado, Weber foi oficialmente nomeado para o cargo de Kämtz em Halle, em abril de 1842. Mas, mesmo antes disso, Weber já estava em negociações com o ministério da Saxônia há algum tempo em relação à aceitação da Cátedra de Física na Universidade de Leipzig, que só se arrastou por tanto tempo porque o titular desse cargo, o professor Fechner, amigo de todos os três irmãos Weber, que sofria de um grave problema ocular, tinha a chance de se recuperar e, assim, estar em condições de assumir seu cargo novamente mais tarde.²⁷⁵

Albrecht, a quem Weber entrou em contato devido às condições de saúde de Fechner, escreve para Weber em 18 de abril de 1842:

Você certamente utilizou o melhor meio de obter informações [sobre a saúde de Fechner], ao permitir que se passasse mais um ano antes da aceitação efetiva [do novo cargo].

Os irmãos que viviam em Leipzig naturalmente encorajaram muito a Wilhelm. Ernst Heinrich escreve:

Também estou muito feliz por você estar em um relacionamento tão próximo e amigável com o maior matemático vivo, com um homem que você ama e admira tanto, e posso sentir como é doloroso para você se afastar de Göttingen. Mas precisa haver uma separação. Meio ano antes ou meio ano depois, isso não importa se sua situação futura pode agora ser melhor justificada. Você pode dizer a si mesmo que fez tudo o que estava ao seu alcance para prolongar sua estadia o máximo possível.

As negociações finalmente chegaram ao fim em 18 de junho de 1842 com a nomeação de Weber, sob a condição estabelecida por Weber de que Fechner, caso se recuperasse, retomaria seu antigo cargo de Diretor do Instituto de Física e da Faculdade de Filosofia, mas que lhe seria fornecido um Laboratório de Física e um Observatório Magnético. Embora Weber tivesse que perder o contato pessoal com Gauss, um amigo que ele tanto admirava, para seu grande pesar, ele, por outro lado, ganharia experiência com seu contato com o círculo de professores em Leipzig, que já eram seus amigos e, acima de tudo, com a convivência com seus irmãos.²⁷⁶

6.6 Período de Leipzig 1843-1849

Weber assumiu seu novo cargo em Leipzig na Páscoa de 1843. As investigações magnéticas pelas quais ele havia se afeiçoado foram inicialmente o foco principal de seu trabalho. A construção de um Observatório Magnético isolado e sem ferro, para o qual o Ministério da Saxônia havia lhe concedido os fundos, foi um estímulo especial para isso. Ele também

²⁷⁵Ver a Nota de rodapé 82 na página 35.

²⁷⁶Em 1998, o monumento de bronze dos Sete de Göttingen, criado pelo artista italiano Floriano Bodini (1933-2005), foi erguido em Hanover no pátio do Parlamento Estadual da Baixa Saxônia na Praça dos Sete de Göttingen. A Figura (a) dessa Nota de rodapé mostra a imagem do monumento, https://en.wikipedia.org/wiki/G%C3%B6ttingen_Seven e https://www.myheimat.de/hannover-mitte/c-freizeit/die-goettinger-sieben-ein-landesdenkmal-in-hannover-an-der-leine_a54843. A Figura (b) mostra o detalhe da estátua representando Wilhelm Weber:

pretendia publicar um sétimo volume dos *Resultate*, além dos seis já publicados.²⁷⁷ Mais tarde, essa intenção não foi concretizada porque o número de locais de observação magnética aumentou extraordinariamente em um curto espaço de tempo e o processamento do material de observação detalhado excedeu os poderes de qualquer pessoa. Além disso, após a saída de Weber, Gauss perdeu o desejo de continuar trabalhando com magnetismo e voltou-se para investigações puramente matemáticas, enquanto Goldschmidt, até então um colaborador entusiasmado com os *Resultate*, foi separado de Weber. Uma carta que Gauss escreveu para Weber, datada de 21 de maio de 1843, logo após a mudança de Weber [para leipzig], já indica essa reviravolta.

Com muito agradecimento, meu caro amigo, estou lhe enviando de volta a carta de Repsold e o desenho. — Além da perda dolorosa e jamais superada que sofri com sua partida daqui, recentemente houve outra. O Major Müller, com quem mantive contato próximo por 25 anos e que sempre me demonstrou a mais leal afeição, faleceu repentina e inesperadamente há algumas semanas. Ele estava prestes a fazer as medições trigonométricas neste verão; eu havia me correspondido com ele na segunda metade de abril sobre o plano para essas medições e lhe enviei um par de heliotrópios dois ou três dias antes de sua morte.²⁷⁸ O triste destino associado à velhice é que, quanto mais tempo se vive, mais isolado se fica. — Nos últimos dois meses, estive ocupado com minhas próprias especulações matemáticas, que me tomaram muito tempo sem que eu tivesse realmente atingido meu primeiro objetivo. Sempre fui atraído de uma direção para outra pelos muitos pontos de vista que se cruzavam, às vezes até mesmo por fogos-fátuos,²⁷⁹ o que não é incomum em especulações matemáticas. Também lamento que essa ocupação (que não devo interromper ainda, se não for em vão) e a necessidade urgente de dedicar minhas energias à preparação de um tratado para a Sociedade [de Ciências de Göttingen] logo em seguida, dificilmente me darão a oportunidade de fazer uma contribuição



(a)



(b)

²⁷⁷Ver a Nota de rodapé 88 na página 38.

²⁷⁸O heliotrópio é um instrumento que usa um espelho para refletir a luz solar a grandes distâncias para marcar as posições dos participantes em um levantamento topográfico. Ele foi inventado por Gauss em 1821.

²⁷⁹Ou seja, por acertos efêmeros.

para o próximo volume dos *Resultate* (se você pretende continuá-los no futuro). Em geral, estou preocupado com o fato de que, após sua partida daqui e a perda associada de sua ajuda sempre imediata, o estudo do magnetismo perderá muito de seu antigo apelo para mim. — Com muitas saudações calorosas a seus queridos irmãos e irmãs, sempre seu amigo mais leal e dedicado,

C. F. Gauss.

Outras cartas de Gauss daquela época, que ele escreveu para Weber ao enviar material de observações magnéticas, também mostram sua relutância em continuar as investigações magnéticas que ele havia feito com tanto entusiasmo no passado, mas especialmente uma carta datada de 8 de janeiro de 1844, que afirma:

Faz muito tempo, querido amigo, que não recebo notícias diretas. Eu tinha tanta certeza de que você me encantaria com uma visita durante as férias de outono e mantive essa esperança até que Ewald a destruiu e trouxe a outra de que você certamente viria na Páscoa. Estou ainda mais certo disso. A próxima razão para esta carta é um artigo de Herschel em nome do Comitê da Associação Inglesa, da qual anexo aqui uma cópia completa e fiel, de modo que você não precise enviá-lo de volta para mim. Alienado como tenho estado do estudo do magnetismo desde sua partida de Göttingen, acho-me completamente incapaz de responder às três perguntas que me foram feitas. Mas mesmo que essa alienação não existisse, não seria possível responder à primeira e à terceira perguntas sem ter um conhecimento preciso das realizações dos estabelecimentos estrangeiros ingleses, o que ainda me falta completamente no momento. — De qualquer forma, como você permaneceu e permanecerá muito mais nativo nesse campo do que eu, enquanto eu não tiver a sorte de colaborar com você novamente, espero que tenha algum conhecimento que possa servir de base para responder à segunda pergunta. Portanto, solicito sua opinião sobre o assunto.

As circunstâncias mencionadas anteriormente, bem como o fato de que os ingleses, equipados com enormes recursos,^{280,281} estavam assumindo cada vez mais o controle das medições geomagnéticas de uma forma que não era totalmente aprovada por Gauss e Weber, podem ter levado Weber a voltar suas energias intelectuais para um campo científico relacionado, a eletrodinâmica, uma área na qual ele continuou a atuar incansavelmente até sua força de trabalho se esgotar. Esse campo não era estranho para Weber. Durante seus anos em Göttingen, ele já havia produzido trabalhos importantes nessa área, como o da medição de intensidade [da corrente elétrica] usando o galvanômetro tangente, sobre o equivalente eletroquímico da água, bem como trabalhos que ligavam os campos do magnetismo e da eletrodinâmica, como o trabalho do inclinômetro de indução, do indutor de rotação, da indução unipolar e do atrito magnético.²⁸²

Os frutos dessas investigações eletrodinâmicas são sete tratados publicados sob o título “Elektrodynamische Massbestimmungen” (Medições Eletrodinâmicas) publicados pela *Kö-*

²⁸⁰[Nota de Heinrich Weber:] Sartorius soube por Herschel, quando ele visitou a Assembleia de Naturalistas Ingleses em 1845, que 34.000 libras esterlinas haviam sido usados para pesquisas magnéticas.

²⁸¹Wolfgang Sartorius von Waltershausen (1809-1876) foi um geólogo alemão.

²⁸²[Web38b], [Web39b], [Web39c], [Web40] com tradução para o inglês em [Web24d], [Web41b] com tradução para o inglês em [Web21i], [Web41g] com tradução para o inglês em [Web21p], [Web41h] com tradução para o inglês em [Web24e], [Web41f] e [Web42d]. Alguns desses trabalhos estão traduzidos em português nos Capítulos 22, 24, 26 e 27.

nigl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften (Sociedade Real Saxônica de Ciências),²⁸³ que, juntamente com os tratados do amigo de Weber, F. E. Neumann, em Königsberg,^{284,285} podiam ser considerados como os fundamentos mais essenciais da eletrodinâmica até pouco tempo atrás. Somente em tempos recentes outras visões sobre a natureza da eletricidade, além das defendidas por Weber, tornaram-se mais aceitas, depois que Maxwell resumiu em uma teoria matemática os pontos de vista que Faraday obteve com seus experimentos. Além de seu conteúdo, esses tratados de Weber também são caracterizados por sua forma, por sua formulação clara e científica, assim como pela consistência na implementação das questões individuais, o que faz com que todos os sete tratados pareçam um todo coerente. Já em 1844, Weber estava envolvido em investigações puramente elétricas, tentando determinar com mais precisão, em termos qualitativos e quantitativos, o experimento fundamental de Alessandro Volta, no qual se baseia a teoria do galvanismo.²⁸⁶ Para isso, Weber usou uma esfera composta de dois hemisférios feitos de metais diferentes, que ele suspendeu em um fio de modo que a superfície de separação ficasse paralela à direção do fio. Um corpo elétrico colocado nas proximidades dessa esfera deve, então, fazer com que a esfera gire. Entretanto, para poder deduzir da magnitude da rotação as cargas elétricas que os hemisférios assumem como resultado de seu contato, era necessário conhecer a lei de distribuição da eletricidade em tal esfera unida, um problema que apresenta grandes dificuldades. Gauss, que havia sido informado sobre essa pesquisa por Weber, demonstrou grande interesse por ela. Gauss escreve em 27 de janeiro de 1844:

Seu experimento no qual você torna a desigualdade elétrica do zinco e do cobre diretamente reconhecível, me interessou muito, e estou inclinado a acreditar que ele pode se tornar o ponto de partida para avanços altamente importantes nessa teoria. Mais uma vez, sinto com tristeza como seria bom se eu pudesse trabalhar com você diretamente nisso.

Em seguida, Gauss expressa sua opinião sobre a continuidade conveniente de tais experimentos. Naquela época, Weber também estava interessado na medição de correntes galvânicas. Quando ele visitou Poggendorff em Berlim, no outono de 1844, este lhe pediu que trouxesse “tudo o que ele havia desenvolvido sobre a ponte galvânica, ou seja, sobre um fio condutor da forma de uma ponte de Wheatstone”, pois ele estava muito interessado nisso.²⁸⁷ As investigações científicas chegaram a uma conclusão inicial com a publicação do Primeiro Tratado sobre *[elektrodynamische] Massbestimmungen* (Medições Eletrodinâmicas), “Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung” (Sobre uma Lei Fundamental Geral da Ação Elétrica). Ele foi publicado na fundação da *Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften in Leipzig* (Sociedade Real Saxônica de Ciências em Leipzig), em 1846.²⁸⁸

²⁸³Ver a Seção 2.2.

²⁸⁴[Nota de Heinrich Weber:] F. C. Neumann, Die mathematischen Gesetze der induzierten elektrischen Ströme, *Abhandlungen der Berliner Akademie*, 1845; e Über ein allgemeines Prinzip der mathematischen Theorie induzierter elektrischer Ströme, *Abhandlungen der Berliner Akademie*, 1847.

²⁸⁵[Neu46] e [Neu47] com tradução para o francês em [Neu48].

²⁸⁶Alessandro Volta (1745-1827) foi um físico e químico italiano que inventou a pilha elétrica. Ver [Vol00a] com tradução para o inglês em [Vol00b] e [Vol64], tradução para o italiano em [Vol23], tradução para o espanhol em [Col00], e tradução para o português em [MA08].

²⁸⁷A assim chamada ponte de Wheatstone foi inventada por S. H. Christie (1784-1865) em 1833 e popularizada por C. Wheatstone (1802-1875) em 1843, [Chr33], [Whe43, pág. 325] com tradução para o francês em [Whe44b] e tradução para o alemão em [Whe44a]. Ver também [Eke01].

²⁸⁸[Web46] com tradução para o inglês em [Web21e].

Nesse tratado, Weber parte da interação que duas correntes ou elementos de corrente exercem entre si, para a qual Ampère já havia estabelecido sua famosa lei em sua obra clássica “*Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l’expérience, Mémoires de l’académie royale des sciences de l’Institut de France, Année 1823*”.²⁸⁹ A lei de Ampère, que agora é familiar a todos, estava quase esquecida na época. O próprio Weber mencionou que teve muita dificuldade para encontrar o tratado de Ampère. Ampère estabeleceu sua lei da maneira mais engenhosa por meio de vários experimentos bem planejados, que, no entanto, não atendiam aos requisitos de medições quantitativas exatas devido à falta de instrumentos de medição precisos. É mérito de Weber ter desenvolvido os instrumentos sensíveis necessários para a comprovação exata da lei de Ampère em termos de medida e número, incluindo o eletrodinamômetro, que é usado até hoje para medições técnicas.

Este não é o lugar para entrar em mais detalhes sobre o conteúdo desse tratado, portanto, acrescentarei aqui apenas algumas observações gerais sobre ele. Na época em que W. Weber estava envolvido em seu trabalho, eram conhecidas as ações das grandezas elétricas em repouso umas sobre as outras (lei de Coulomb), bem como as ações que as correntes constantes ou os elementos de corrente individuais dessas correntes exercem entre si (lei de Ampère), assim como as ações de indução descobertas por Faraday e uma lei empírica estabelecida por Lenz, pela qual os fenômenos de Ampère estão relacionados aos fenômenos de indução.²⁹⁰ Pouco antes da publicação do tratado de Weber, F. E. Neumann havia desenvolvido todas as leis de indução qualitativa e quantitativamente como uma consequência necessária da lei de Ampère com base na lei de Lenz, que ele havia aperfeiçoado. Naquela época, portanto, as ações que as grandezas elétricas em repouso exerciam umas sobre as outras não tinham nenhuma relação com as ações que exerciam quando estavam em movimento, ou seja, quando formavam uma corrente galvânica. Entretanto, como todas as ações se originam, em última análise, das quantidades de eletricidade, estejam elas em repouso ou em movimento, pode-se supor que haveria uma lei que regeria a ação entre duas quantidades de eletricidade, que determinaria completamente a ação entre quantidades elétricas tanto em repouso quanto em movimento. Weber conseguiu estabelecer essa “lei elétrica fundamental” e deduzir dela como uma consequência necessária todos os fenômenos conhecidos na época. Entretanto, essa lei difere significativamente de outras leis da natureza. Enquanto as ações das forças em outras leis da natureza dependem apenas das quantidades de matéria que agem entre si e da distância entre elas, de acordo com essa lei fundamental [de Weber] a força também depende do estado de movimento no qual se encontram essas quantidades, ou seja, de sua velocidade e aceleração relativas. Embora mais tarde tenham sido descobertas outras leis a partir das quais os fenômenos da eletricidade em repouso e em movimento também podem ser previstos, a lei estabelecida por Weber tem a vantagem de relacionar entre si apenas as grandezas que dependem do estado instantâneo do sistema, ou seja, as quantidades [de carga], a distância, a velocidade relativa e a aceleração relativa. Essa lei fundamental foi posteriormente objeto de debate científico. Chegou-se à conclusão de que todas as leis naturais, para existirem corretamente, devem satisfazer uma lei da natureza muito geral e suprema, que deve, portanto, ser considerada como uma pedra de toque, uma lei que Robert Mayer enunciou pela primeira vez, mas que foi estabelecida por Helmholtz e Joule.²⁹¹ Essa lei suprema é chamada de lei de conservação da energia. De fato, sob condições normais,

²⁸⁹Ver a Nota de rodapé 110 na página 41.

²⁹⁰Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865), ver [Len34] com tradução parcial para o inglês em [Len69].

²⁹¹Ver a Nota de rodapé 139 na página 49.

a lei fundamental [de Weber] satisfaz a essa lei [de conservação da energia], mas sob certas suposições podem ser imaginados casos em que essa correspondência não mais ocorre. Para, no entanto, concluir dessa circunstância que a lei fundamental é inadequada, ainda seria necessário provar que essas suposições são admissíveis, ou seja, fundadas na natureza e compatíveis com ela. Em tempos mais recentes, entretanto, por outras razões, essa lei começou a não ser mais considerada uma lei fundamental. Em nossa época, houve uma mudança gradual na visão da natureza das forças. Estamos retornando a pontos de vista que já eram difundidos antes de Newton, segundo os quais a ação entre dois centros de força separados espacialmente não é direta e imediata, mas requer a mediação de um meio. Assim como as ações da luz e do calor que o Sol produz na Terra são mediadas por vibrações do éter luminoso, que é difundido por toda parte, supõe-se de modo geral que toda ação à distância requer um meio de propagação, e que uma ação à distância não existe na natureza. Em contraste com esses pontos de vista, que foram reintroduzidos por Faraday, fundamentados matematicamente por Maxwell e recentemente corroborados por Hertz em termos elétricos, nem a lei da gravitação de Newton, nem a lei de Weber, constituem leis fundamentais, já que ambas pressupõem a ação à distância. Mas é de se supor que, se no futuro for possível explicar todas as ações à distância por meios intermediários,²⁹² essas leis manterão um certo significado, mesmo tendo em vista essa nova maneira de encarar as coisas.

Durante sua estada em Leipzig, Wilhelm Weber morou em parte com seu irmão mais novo, Eduard, que ainda não era casado na época, e em parte com a família de seu irmão mais velho, Ernst Heinrich. O convívio social nos círculos de professores de Leipzig era extremamente simples e livre do luxo de nossos dias. Uma peculiaridade especial era o caráter não excludente e sem preconceitos que dominava os mais diversos círculos sociais de Leipzig, o que significava que homens das mais diversas classes, da classe mercantil, dos círculos de livreiros e acadêmicos, dos círculos da administração da cidade e assim por diante, entravam em contato próximo uns com os outros, dando assim aos interesses públicos uma grande diversidade. Os cidadãos de Leipzig deram a Ernst Heinrich Weber a mais honrosa ovação quando ele retornou de Dresden, depois de ter representado os interesses da Universidade e da cidade de Leipzig como membro da Primeira Câmara. Escreve Eduard a Wilhelm na época:

Ernst está de volta há alguns dias e foi recebido com muita festa em sua chegada. O Dr. Müller (então prefeito) e dois ilustres comerciantes viajaram até Borsdorff para encontrá-lo em uma carruagem de quatro cavalos e o convidaram para descer do expresso e acompanhá-los. Na estalagem verde no final das hortas de couves, eles foram recebidos por cerca de 60 cavaleiros e muitas carruagens, incluindo os comerciantes mais respeitados. Após uma solene saudação e ação de graças, foi dado um viva e a comitiva seguiu em direção à cidade. Diz-se que cerca de 300 pessoas estavam presentes. No portão foi dada outra saudação.

Wilhelm Weber, que era mais quieto do que seus irmãos, foi particularmente atraído pelo contato íntimo em um círculo próximo, que se reunia regularmente em um determinado dia da semana sob o nome de “Fechner-Kränzchen”, e que, além de Fechner, Dr. Härtel (Breitkopf & Härtel) e os irmãos Weber, mais tarde também teve como participante o filósofo Professor Weise. Nessas reuniões, que também contavam com a presença de membros da família,

²⁹²Em alemão: *vermittelnden Medien*. Essa expressão pode ser traduzida como meios intermediários, mediadores ou transmissores.

eram discutidos com grande fervor os assuntos do dia, as questões políticas, filosóficas e científicas. Fechner, espirituoso e sempre aberto à discussão, contribuiu particularmente para a vivacidade dessas reuniões. Ele, que havia contraído uma grave doença ocular como resultado de experimentos extenuantes sobre fenômenos subjetivos de cores, o que o forçou a ficar em quartos escuros por anos e a renunciar a qualquer atividade que exigisse o uso dos olhos, teve a sorte de poder utilizar os olhos novamente mais tarde, embora de forma muito limitada.

O ano politicamente significativo de 1848 havia chegado e exercido sua influência não apenas sobre o povo alemão, mas também sobre os governos. Em Hanover, o passo que os sete professores haviam dado dez anos antes em relação à questão constitucional agora era visto de forma diferente, e Ernst August sentiu-se motivado a tentar reconquistar para Göttingen esses sete professores que haviam sido demitidos de seus cargos. Em 16 de abril daquele ano, Weber recebeu uma consulta de Hanover perguntando se ele estaria inclinado a aceitar novamente o cargo de professor em Göttingen. Quase ao mesmo tempo, chegou uma carta de Gauss datada de 16 de abril, referindo-se a esse processo. Gauss escreve:

— Mas agora chego ao ponto mais importante que Sartorius já sugeriu a você. Parece que já está muito mais próximo de ser realizado. Tudo o que sei sobre isso é o seguinte: Tanto a Universidade quanto a cidade enviaram uma petição ao Ministério para que os Sete fossem recontratados. O curador em questão já respondeu que as razões que causaram a conhecida medida há 10 anos agora são ineficazes e não são obstáculo para que esses homens voltem a lecionar aqui, e que ele já foi autorizado pelo rei a iniciar negociações para recuperar alguns deles. Até aqui menciono o rescrito, do qual me refiro apenas de memória. No entanto, mensagens privadas de Hanover revelaram que se referem inicialmente a você e Albrecht, que seriam recontratados. Se essa notícia for bem fundamentada, você provavelmente já saberá mais sobre ela do que eu, e eu gostaria de acreditar que agora você estará em posição de apresentar suas próprias condições. Mas como posso agora, meu caro Weber, expressar meus sentimentos! Vou seguir sua carta. Não acredito de forma alguma que essa medida tenha como objetivo principal recuperar muitos estudantes, mas o principal é a reabilitação moral da justiça, que é, obviamente, também a primeira condição para levantar Göttingen novamente. É claro que não se deve esperar que você, em particular, tenha uma grande influência na frequência [estudantil], embora eu não tenha dúvidas de que você também contribuirá para isso. Há algumas semanas, um ex-aluno meu, que obteve seu doutorado ano passado, um certo Quintus Icilius, saiu daqui simplesmente para ir a Leipzig por sua causa e se dedicar à física sob sua orientação. Você daria uma nova vida à Seção Matemática de nossa Sociedade [de Ciências de Göttingen]. É claro que não posso esperar que trabalhem juntos tanto quanto naqueles felizes anos anteriores, mas certamente não por causa de meus muitos outros trabalhos importantes, mas porque estou dez anos mais velho, meus poderes físicos declinaram muito acentuadamente e talvez eu esteja declinando em um ritmo acelerado, não mais *sum qualis eram*.²⁹³ Sim, devo acrescentar que meu ânimo também afundou, e esses eventos anteriores tiveram um papel importante nisso. Tenho me sentido dolorosamente sozinho nos últimos anos. Mas posso e devo dizer que tudo o que estiver ao meu alcance para promover seu trabalho está à sua disposição, e que conviver com você e sua devoção leal a mim seria uma das coisas

²⁹³Essa é uma expressão em latim. Gauss está afirmando que não é mais a mesma pessoa que era antes.

mais belas da minha vida. Mas não devo antecipar mais suas próprias resoluções! Ewald esteve aqui há oito dias e, entre nós dois, pareceu-me que, se ele recebesse um convite para voltar, estaria inclinado a aceitar. Para que esta carta seja enviada pelo correio, devo encerrar rapidamente e acrescentar que espero vê-lo aqui em breve e que você é muito bem vindo em minha casa, se você não desgosta de nosso isolamento monástico.

Atenciosamente,

C. F. Gauss.

Mais uma vez, Weber se deparou com uma decisão difícil: por um lado, seu círculo de amigos em Leipzig, o contato com seus irmãos, as mil conexões que haviam sido forjadas durante sua estada e, por outro lado, ele não podia esconder o fato de que Gauss, agora com 72 anos, não poderia mais ser para ele em termos científicos o que havia sido para ele nos anos anteriores. Os dez anos de separação não podiam ser substituídos! Havia também vozes alertando-o para não desistir de Leipzig. Poggenдорff escreve:

Quer seguir meu conselho? Não vá! O que você ganha? Gauss, com certeza. Mas nada mais, e Gauss é um homem velho que pode morrer a qualquer momento e, mesmo que não morra logo, ficará mais velho e sem graça a cada dia que passa. Em Leipzig, você está bem cuidado, na companhia dos seus familiares, cercado de amplos recursos que não precisa criar de novo. Não, na minha opinião, você não tem nada em que pensar, porque deve ao povo de Leipzig tanta gratidão quanto ao povo de Göttingen, que teria de lhe oferecer pelo menos o dobro. Leipzig cuidou de você nos momentos ruins, isso pesa muito. Nos bons tempos é fácil encontrar amigos.

Mas, por outro lado, a personalidade de Gauss, o “maior matemático desde Arquimedes”, exerceu uma atração irresistível sobre Weber; ele também encontraria seus velhos amigos Wöhler, Sartorius e seus companheiros de sofrimento em Göttingen, e uma cidade menor era mais adequada à natureza de Weber do que uma cidade grande. Já em 26 de junho de 1848 Gauss escreve para Weber:

Foi com o maior prazer que fiquei sabendo, por meio de sua carta de 21 deste mês, recebida ontem, que seu assunto, meu caro amigo, ou como prefiro dizer, nosso assunto, está quase chegando à conclusão desejada. Pedi imediatamente a Sartorius que discutisse o tema confidencialmente com Listing, mas agora ele mesmo veio até mim. Ele deu, ou melhor, repetiu a explicação de que, desde o início, considerou o cargo apenas como algo que um dia gostaria de lhe devolver, e estou convencido de que ele vê seu retorno com a mais sincera alegria. — A chegada de Ewald no outono parece ser certa, embora eu não saiba de nenhuma confirmação direta disso, seja de Hanover ou dele próprio.

A posição de Listing, que havia ocupado o antigo cargo de Weber em Göttingen como professor associado, causou algumas dificuldades. A proposta de Weber, de que Listing continuasse com as aulas de física experimental enquanto que ele próprio daria aulas de física matemática, não foi aceita pelo Conselho de Curadores de Hanover. Após várias negociações, Weber finalmente recebeu a carta oficial de nomeação em 16 de outubro, na qual as condições que ele havia estabelecido — que Listing seria nomeado professor titular

de física matemática e, ao mesmo tempo, receberia um fundo especial e recursos para a compra de instrumentos de medição — foram concedidas. O próprio Weber assumiria o mesmo cargo na Faculdade de Filosofia que havia deixado em 1837 e assumiria o cargo que lhe foi atribuído na Páscoa de 1849. Em uma carta datada de 20 de outubro de 1848, Gauss expressou sua satisfação com a conclusão definitiva desse assunto de nomeação, escrevendo:

Embora, como resultado de uma indisposição catarral, eu esteja com uma forte dor de cabeça hoje, não posso deixar de expressar minhas alegres felicitações em algumas linhas na hora em que finalmente recebo a plena certeza de seu retorno para nós, meu querido amigo. Acabei de ler em uma circular da Faculdade o rescrito que nos anuncia essa feliz notícia. — Tudo de bom para você, querido amigo, contarei as semanas que ainda faltam para que você volte a ser totalmente nosso.

Atenciosamente,

C. F. Gauss.

6.7 Segundo Período em Göttingen 1849-1891

A mudança de Weber para Göttingen na Páscoa de 1849 deu a ele a oportunidade de participar da comemoração do quinquagésimo aniversário do doutorado de Gauss em 16 de julho, não apenas como amigo, mas mais uma vez como colega. Embora Gauss, assim como Weber, tivesse aversão a todas as festividades que envolvessem sua pessoa, o dia foi comemorado com grande solenidade. Além dos discursos formais, que contaram com a presença de amigos e deputados, incluindo Jacobi e Dirichlet de Berlim, a entrega de diplomas renovados e sua nomeação como cidadão honorário de Göttingen e Brunswick, o jubileu foi comemorado com uma reunião especial da Sociedade Real de Ciências, na qual Gauss apresentou o tratado: “Beiträge zur Theorie der algebraischen Gleichungen” (Contribuições para a teoria das equações algébricas), no qual ele voltou ao assunto de sua tese de doutorado. Esse foi o último tratado que Gauss escreveu, e logo ficou claro para Weber que não era mais possível trabalhar com ele da maneira que estava acostumado. Gauss dedicou a maior parte de seu tempo a atividades mais leves, especialmente à literatura, e estava particularmente interessado na língua russa, de modo que a dominou quase completamente.

Em contraste com Gauss, Weber ainda estava em seu auge, e várias de suas obras mais importantes foram publicadas em rápida sucessão. Após o Primeiro Tratado sobre as Medições [Eletrodinâmicas], o Segundo sobre medições de resistência apareceu nos textos da *Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften* (Sociedade Real Saxônica de Ciências) em 1851 e o Terceiro sobre diamagnetismo no ano seguinte.²⁹⁴ No Segundo Tratado, Weber introduziu as chamadas unidades absolutas de medida para as três grandezas de intensidade de corrente, força eletromotriz e resistência, que estão relacionadas entre si pela lei descoberta por Ohm, ou seja, unidades de medida que podem ser rastreadas até as unidades fundamentais de comprimento, massa e tempo e que são independentes das condições aleatórias e variáveis sob as quais os tipos de grandeza são medidos. Gauss já havia começado com a introdução de tais unidades absolutas de medida para grandezas magnéticas no tratado publicado em 1832: *Intensitas vis magneticae etc.*²⁹⁵ Já naquela época, Weber reconheceu

²⁹⁴Ver a Seção 2.2.

²⁹⁵Ver a Nota de rodapé 122 na página 44.

as grandes vantagens da introdução de unidades absolutas de medida não apenas na eletrodinâmica, mas na física em geral. De fato, nos escritos que ele deixou, as unidades absolutas são desenvolvidas para um grande número de grandezas de várias áreas da física. Desde que o Congresso Internacional de Eletricistas (Paris, 1881), reconhecendo as grandes vantagens do sistema absoluto de unidades, propôs a introdução geral desse sistema de medição na eletricidade, ele também tem sido usado em outros campos da física, e parece ser apenas uma questão de tempo até que ele se torne o sistema dominante na física e até mesmo na tecnologia. Esse já é o caso da engenharia elétrica. As unidades usadas para medir intensidades de corrente, forças eletromotrizes e resistências, a saber, Ampères, Volts e Ohms, estão diretamente relacionadas ao sistema absoluto de unidades, mas deve parecer estranho que os fundadores do sistema, Gauss e Weber, tenham sido completamente ignorados ao nomear as unidades com nomes de homens que fizeram contribuições extraordinárias para a ciência da eletricidade.²⁹⁶

No Terceiro Tratado [das Medições Eletrodinâmicas] sobre diamagnetismo, Weber chegou a ideias precisas sobre a natureza do magnetismo e do diamagnetismo com base em seus experimentos. Ampère já havia demonstrado que pequenas correntes galvânicas circulando sem resistência ao redor das moléculas de corpos magnéticos, as chamadas correntes moleculares, eram capazes de explicar todos os fenômenos magnéticos e tornavam desnecessária a suposição da existência de fluidos magnéticos especiais. Weber mostrou agora que, se os fenômenos diamagnéticos também fossem levados em consideração, apenas a hipótese de Ampère é satisfatória.²⁹⁷ Ele chegou à ideia de que as moléculas de corpos magnéticos, como ferro, níquel, etc., são cercadas por correntes moleculares cujas órbitas estão firmemente conectados às moléculas, enquanto as próprias moléculas podem girar. As moléculas dos corpos diamagnéticos, por outro lado, que incluem todos os corpos não magnéticos, não podem girar; elas possuem órbitas sem corrente, nas quais as correntes moleculares só surgem quando os corpos são levados ao estado diamagnético por forças magnéticas. Quando Weber tirou as conclusões finais resultantes de suas investigações, ele estava longe de atribuir às correntes moleculares uma existência real na natureza. Ele enfatizou principalmente o fato de que os conhecimentos adquiridos poderiam ser úteis para pesquisas futuras. Weber escreve em seu tratado:²⁹⁸

E mesmo que por enquanto atribuamos *realidade* às *correntes elétricas moleculares* dentro do corpo, como o éter de luz que propaga ondas na ótica, ainda pode acontecer que no futuro, à medida que a ciência se desenvolva, elas também tenham que ser colocadas na classe das concepções *ideais*.

Em 1857, Weber, juntamente com seu amigo Rudolph Kohlrausch, publicou o Quarto Tratado sobre *Medições [Eletrodinâmicas]*, cujo conteúdo está internamente relacionado aos tratados anteriores. Uma mesma intensidade de corrente pode ser medida de acordo com três unidades absolutas de medida diferentes, a saber, eletrostática, eletromagnética e eletrodinâmica, e o objetivo era determinar a relação entre essas unidades de medida. Para a relação entre as unidades de medida eletromagnética e eletrostática, foi encontrado um

²⁹⁶ Apresento no Capítulo 30 o motivo do nome “Weber” ter sido suprimido entre as unidades elétricas no Congresso de Paris de 1881.

²⁹⁷ Ou seja, Weber mostrou que só é possível explicar todos esses fenômenos com a hipótese das correntes moleculares de Ampère, não sendo possível explicá-los com a suposição da existência de fluidos magnéticos.

²⁹⁸ [Web52a, pág. 538 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [Web21i, pág. 68].

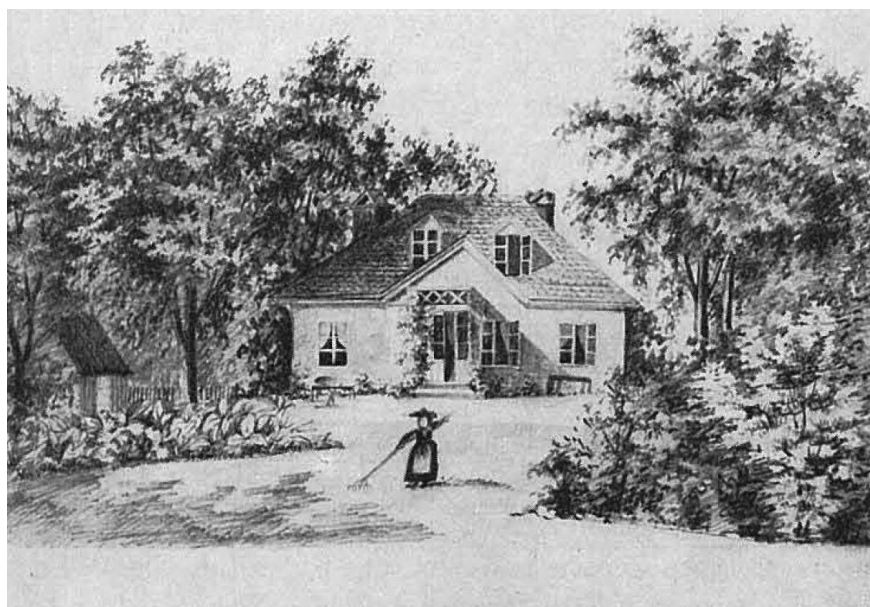
número muito próximo da velocidade de propagação da luz, um fato que se tornou de particular importância para a teoria eletromagnética da luz recentemente estabelecida. Ao mesmo tempo, porém, o valor numérico da constante contida na lei elétrica fundamental de Weber também depende dessa relação. Esses tratados foram seguidos em 1864, 1871 e 1878 por tratados cujo conteúdo é tão teórico que podem ser ignorados aqui. Weber não conseguiu mais concluir seu último trabalho, que havia começado em uma idade avançada e que, em termos de conteúdo, pertencia ao campo das *Medições [Eletrodinâmicas]*.²⁹⁹

Alguns anos após seu retorno a Göttingen, ele teve a oportunidade de comprar um terreno com uma pequena casa originalmente construída apenas para residência de verão. Situada no centro da cidade, mas cercada por jardins, a pequena propriedade lhe ofereceu a paz e o descanso de que precisava para seu trabalho.³⁰⁰ Aqui, em reclusão tranquila, ele preparava os esboços de suas obras, enquanto geralmente adia suas investigações experimentais para as férias, quando podia se dedicar inteiramente ao seu trabalho sem as perturbações das questões acadêmicas. Weber procedeu inteiramente de acordo com o planejado. Todos os principais experimentos já haviam sido preparados com muito cuidado e podiam ser concluídos em um tempo relativamente curto. Nessas ocasiões, o Gabinete de Física ficava cheio de atividades. Sem se importar com sua agenda diária habitual, Weber levava a série de experimentos planejados a uma conclusão definitiva graças à sua energia peculiar.

Incidentes dramáticos que Weber experimentou frequentemente em seus anos mais jovens não ocorreram mais. No entanto, Weber teve que lidar com a morte de muitos de seus amigos. Não foi apenas a idade avançada de 87 anos, que ele teve o privilégio de alcançar, a culpada por isso; ele também perdeu amigos mais jovens que, de acordo com o julgamento humano, poderiam ter vivido até uma idade mais avançada. Ele só pôde desfrutar da companhia de Gauss por seis anos após o seu retorno. Em 23 de fevereiro de 1855, a morte rompeu os laços íntimos de amizade nesta Terra, depois que a doença persistente de Gauss e o declínio de sua força nos últimos seis meses prenunciaram esse desfecho. Weber sofreu uma nova perda

²⁹⁹Ver a Seção 2.2.

³⁰⁰A imagem dessa Nota de rodapé mostra a casa de Weber em Göttingen, no meio de um grande jardim. Essa figura pertence ao Museu de Göttingen, [Wie67, págs. 143 e 221]:



apenas alguns anos depois. Em 9 de março de 1858, Rudolph Kohlrausch morreu em Erlangen, com quem ele havia realizado o trabalho mencionado anteriormente “Zurückführung der Stromintensitätsmessung auf mechanisches Mass”.³⁰¹ Com ele, Weber perdeu um amigo com uma excelente mente científica e uma visão livre da vida, cuja cooperação Weber esperava firmemente em seu trabalho futuro.

Após a morte de Gauss, dificilmente haveria um remédio melhor para Weber se recuperar do duro golpe do destino do que a perspectiva de ganhar Dirichlet para Göttingen. O inesperado aconteceu. Dirichlet iniciou suas aulas na Georgia Augusta [Universidade de Göttingen] no outono de 1855 e deu um novo impulso à ciência matemática. Weber mantinha correspondência constante com Dirichlet desde sua estada em Berlim, em 1828, e suas frequentes visitas a Poggendorff, que mais tarde se tornaram uma ocorrência regular, sempre o reuniam com Dirichlet, em cuja casa e na de seu cunhado Paul Mendelsohn ele se socializava com frequência. Escreve Dirichlet em dezembro de 1852:

Espero que você atenda às solicitações urgentes de seus amigos daqui e venha para Berlim. Eles acham que, de acordo com a tradição, têm o direito de que você os visite. Infelizmente, ainda não pude resolver sua questão elétrica, pois estou totalmente ocupado com dois tratados acadêmicos, um dos quais será impresso em breve, e estou pensando sobre o outro. Assim que esse trabalho for concluído, tentarei resolver seu problema.

O problema mencionado aqui estava relacionado ao movimento de duas massas iguais que se atraem de acordo com a lei de Newton e sobre as quais, além disso, atuam duas forças paralelas, opostas e iguais, constantes em intensidade e direção. Mais tarde Dirichlet escreve para Weber sobre a solução desse problema:

Sinto muito por não ter tentado resolver antes seu problema elétrico. Achei que era difícil e supus que a solução, se eu conseguisse, exigiria mais tempo do que tenho à minha disposição neste inverno. Há alguns dias, quando finalmente analisei a questão com calma, convenci-me de que a suposta dificuldade do problema está correta, mas que, felizmente, há quase 100 anos, pessoas mais poderosas (Euler e Lagrange) já haviam se empenhado em superar a dificuldade.

A amizade pessoal e os interesses científicos levaram, pode-se dizer, ao contato diário, que também se estendeu aos membros da família. Mas como isso durou pouco!

No outono de 1858, Dirichlet voltou doente de uma viagem de férias. Ele supostamente havia contraído uma doença cardíaca devido a um banho muito quente, o que resultou em um longo e difícil período de doença e terminou com sua morte em 5 de maio de 1859. Poggendorff escreve em 11 de março de 1859 durante seu período de doença:

Sempre que Göttingen é mencionada aqui, a primeira pergunta é sempre: como está Dirichlet? Sei que é triste, muito triste. Você me tranquilizaria se escrevesse algo sobre ele o mais rápido possível. Seria uma pena se um homem em seu auge sucumbisse ao destino humano. Humboldt, que tem quase 90 anos de idade, ainda é relativamente vigoroso; ele ainda estava na Academia anteontem e no baile da Universidade há oito dias! São tão estranhos os destinos dos homens!

³⁰¹Ver a Nota de rodapé 124 na página 45.

No entanto, a doença e a morte subsequente de Dirichlet não foram o único destino cruel que se abateu sobre a infeliz família. Ainda durante a doença de Dirichlet, sua esposa Rebekka, nascida Mendelsohn, foi surpreendida pela morte. Um derrame, causado por agitação interna, repentinamente pôs fim à sua vida. Assim, em pouco tempo, o relacionamento animado e estimulante foi extinto, a casa de Dirichlet ficou deserta e Weber, como um dos mais próximos e queridos, foi deixado apenas com o triste dever de agir como guardião, da melhor forma possível, dos filhos de seu amigo, enquanto eles ainda não eram maiores de idade.

Além de seus deveres de guardião, Weber também era responsável por várias outras tarefas na época. Em primeiro lugar, após a morte de Gauss, ele foi encarregado da direção do Sternwarte [Observatório Astronômico] e, em segundo lugar, o plano de publicar as obras completas de Gauss pela *Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen* (Sociedade Real de Ciências de Göttingen), que já havia sido previsto durante a vida de Dirichlet, foi realizado. Foi formada uma comissão composta pelos Srs. Stern, Riemann, Dedekind, Schering e Weber, na qual Weber cuidou até mesmo dos detalhes mais minuciosos, do formato, da impressão e assim por diante, com o maior zelo.³⁰² No entanto, a doença de Riemann, que logo ocorreu, juntamente com outras circunstâncias, levaram à dissolução da comissão, e Schering assumiu sozinho a publicação das obras de Gauss.

Weber reconheceu o extraordinário talento matemático de Bernhard Riemann em um estágio inicial e o apoiou tanto quanto pôde. Após a morte de Dirichlet, ele se convenceu de que ninguém além de Riemann seria tão adequado para ocupar o lugar de Dirichlet. Mas ele só ocuparia esse cargo por pouco tempo, pois Riemann ficou doente. Por instigação de Weber, o governo de Hanover, com louvável disposição, concedeu a Riemann os meios para buscar a cura de seus pulmões doentes no Sul. A estada de inverno em Messina [na Itália], no inverno de 1862, havia sido um grande sucesso, mas infelizmente Riemann fez sua viagem de volta pelo Simplon, o clima inesperadamente frio causou uma recaída e ele voltou para Göttingen doente. Outra tentativa foi feita para preservar o extraordinário homem para a ciência com uma viagem para o Sul, mas sem sucesso. Riemann morreu em Selasca, no Lago Maggiore, em 20 de julho de 1866.

Göttingen sempre teve a reputação de ser mais rica e mais bem representada em matemática e ciências naturais do que outras universidades do mesmo porte, por isso era ainda mais importante preencher a lacuna deixada pela morte de Riemann. Clebsch foi nomeado de Giessen, mas apenas alguns anos se passaram e Weber teve que lamentar a perda desse jovem amigo, que mal havia sido conquistado. Um ataque de difteria de gravidade quase sem precedentes pôs um fim abrupto à atividade do homem em seu auge. Foi nessa época que Weber entrou em contato mais próximo com Zöllner, um professor da Universidade de Leipzig.³⁰³ Zöllner, uma pessoa inteligente, calorosa, cheia de visões idealistas da vida, associou-se intimamente a Weber e exerceu uma influência sobre ele devido ao frescor de sua mente e ao seu espírito científico empreendedor. Inicialmente Zöllner foi guiado pelos motivos mais nobres, e somente nos últimos anos, provocado por ataques violentos, acabou indo muito além da meta que havia estabelecido para si mesmo. Além disso, houve aqueles conhecidos experimentos espiritualistas com o americano Slade, para os quais ele atraiu Weber, Fechner e outros, e que levantaram tanta poeira por um tempo. Weber, de natureza sincera e independente, estava preparado para trazer para o âmbito de suas investigações todos os

³⁰²Moritz Abraham Stern (1807-1894), Bernhard Riemann (1826-1866), Richard Dedekind (1831-1916) e Ernst Christian Julius Schering (1833-1897) foram matemáticos alemães. Ver a Nota de rodapé 145 na página 53.

³⁰³Ver a Nota de rodapé 158 na página 56.

fenômenos para os quais não conseguia dar uma explicação, mas, apesar de seus poderes de observação tão agudos e precisos, ele não era o homem certo para tais experimentos, para os quais não são necessários poderes de observação, mas conhecimento da natureza humana. Apenas os experimentos, e não o experimentador, foram testados, e nem o ardente Zöllner nem a maioria dos outros participantes eram adequados para a realização de testes neste último aspecto.

Zöllner tinha as instalações do antigo Observatório Astronômico em Pleissenburg, em Leipzig, à sua disposição, e essa circunstância deu a Weber a oportunidade, embora ele já estivesse com setenta e poucos anos, de realizar novamente um grande trabalho experimental. Como já havia entregado a direção do Gabinete de Física em Göttingen ao professor Riecke, que o substituiu em suas atividades de ensino na [Universidade de Göttingen] Georg-Augusta,³⁰⁴ ele se voltou para Leipzig, onde não só pôde realizar seu desejo de viver com seu irmão Ernst Heinrich (seu irmão mais novo Eduard havia morrido) por um período mais longo, mas também podia se encontrar com Fechner, Scheibner e Carl Neumann, com quem já mantinha contato científico por muitos anos.

Assim como é necessário uma unidade de peso padronizada para pesar um conjunto de corpos e verificar o peso, também ao fazer comparações de resistência há necessidade de uma escala de resistência e de um padrão de resistência, por meio do qual a escala de resistência pode ser verificada quanto à precisão. Esse requisito foi atendido para pesos na época da Revolução Francesa, em 1789, por meio da produção de um peso padrão (quilograma de platina). Para medições de resistência, inicialmente Jacobi, em São Petersburgo, sugeriu um determinado padrão (fio de Jacobi); sugestões posteriores foram feitas por Werner Siemens (unidade de mercúrio) e pela *British Association* (Associação Britânica [de Ciência]), a saber, a unidade da Associação Britânica. No entanto, logo ficou evidente que esse tipo de padrão de resistência, desde que fosse feito de fio metálico, variava com o tempo e não poderia atender ao requisito de constância. Portanto, Weber já havia planejado, em anos anteriores, produzir um fio condutor padrão de tal qualidade e disposição que tanto sua resistência quanto suas condições espaciais pudessem ser verificadas a qualquer momento por meio de medições diretas de acordo com unidades absolutas. Com esse dispositivo, o usuário ficava independente de qualquer alteração na resistência do condutor padrão e tinha um meio de verificar a precisão das escalas de resistência a qualquer momento, comparando-as com o condutor padrão. Se a proposta da Siemens se baseava no mercúrio, cuja resistência específica pode ser considerada invariável, a vantagem era que a resistência do mercúrio poderia ser medida com precisão em unidades absolutas. Para executar esse plano, dois grandes multiplicadores, ambos do mesmo tamanho e com mais de um metro de diâmetro, foram instalados no antigo Observatório Astronômico, um dos quais serviu como galvanômetro e o outro como indutor terrestre. O próprio Weber participou com entusiasmo quase juvenil do enrolamento do fio, da instalação e da configuração do aparelho, bem como das medições realizadas com eles. Para tornar o dispositivo utilizável no futuro e não apenas para uma medição única, o fio podia ser desenrolado dos multiplicadores usando dispositivos convenientes e o número de enrolamentos e o tamanho das áreas de enrolamento podiam ser verificados a qualquer momento. Infelizmente, no entanto, Weber só conseguiu concluir a primeira parte de seu trabalho, a determinação da resistência do fio condutor padrão; a segunda parte, a comparação desse condutor padrão com outras unidades de resistência, teve que ficar inacabada porque Zöllner morreu repentinamente em 1881, sendo que as salas e os aparelhos disponíveis para ele não podiam ser transferidos por um tempo maior para pessoas não afiliadas à Universi-

³⁰⁴Ver o Capítulo 4.

dade [de Leipzig]. Mais tarde, o aparelho passou para as mãos do Conselheiro Wiedemann, que o utilizou para determinar o Ohm em unidades absolutas. Embora Zöllner estivesse mais distante desse tema de pesquisas e tivesse participado apenas de uma parte relativamente pequena do trabalho, Weber publicou os resultados das observações sob o nome de Zöllner e o seu no tratado “Über die Einrichtungen zum Gebrauche absoluter Maasse in der Elektrodynamik mit praktischer Anwendung von W. Weber und F. Zöllner” (Sobre os dispositivos para uso de unidades absolutas em eletrodinâmica com aplicação prática, por W. Weber e F. Zöllner) nas publicações da *Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften*, Vol. 32, 1880.³⁰⁵

Esse foi o último trabalho experimental de Weber; a velhice havia chegado e, com ela, a época dos aniversários. Depois de comemorar seu 70º aniversário em um círculo menor em 24 de outubro de 1873, seu 50º aniversário de doutorado seria comemorado oficialmente em 26 de agosto de 1876. Mas Weber, cuja natureza modesta era perturbada por todas as ovações que recebia pessoalmente, evitou a comemoração oficial viajando para Karlsbad, onde comemorou esse importante dia em particular com o economista Conselheiro Hanssen, seu amigo de longa data e companheiro de viagem frequente, juntamente com alguns amigos íntimos. Mas, mesmo lá, ele recebeu um grande número de cartas oficiais e congratulações de amigos e ex-alunos. Após a comemoração do quinquagésimo aniversário de sua nomeação como professor titular em Göttingen, em 24 de setembro de 1883, e de seu 80º aniversário, em 24 de outubro de 1883, foi digna a comemoração do 60º aniversário de seu doutorado, em 26 de agosto de 1886. Foi extraordinário o carinho que o idoso, ainda vigoroso, recebeu de todos os lados. O aniversariante foi homenageado por delegações da Universidade de Göttingen, da qual era membro sênior há muito tempo, da Sociedade Real de Ciências de Göttingen e da própria cidade, que o tornou cidadão honorário; inúmeras cartas honrosas chegaram de sociedades científicas, das quais Weber era membro em sua maioria, de corporações e indivíduos, e tanto os correios quanto o telégrafo tiveram seu trabalho dificultado para entregar em seu endereço todas as encomendas que recebiam. Até mesmo o chefe desses Institutos Imperiais, o Secretário de Estado Dr. von Stephan, que já havia expressado sua mais calorosa admiração em ocasiões anteriores, enviou suas felicitações ao aniversariante. Weber também recebeu um reconhecimento externo brilhante ao ser condecorado com a Estrela da Grã-Cruz da Ordem Ducal de Brunswick de Henrique, o Leão, por Sua Alteza Real o Príncipe Alberto da Prússia,³⁰⁶ e ao ser nomeado Conselheiro Privado Real da Prússia com o título de Excelência por Sua Majestade o Imperador Alemão. O fato de Wilhelm Weber ter sido o primeiro professor a receber uma honra tão alta sem ter nenhuma ligação com a corte de Berlim, e de o conde Bismarck ter sido o motivo disso, tornou essa nomeação ainda mais especial. Com essas altas honrarias, que lhe foram oferecidas sem que ele as procurasse, Weber se retirou da vida pública para passar os anos restantes de sua tranquila velhice em reclusão.

Weber foi membro de 19 Academias e Sociedades de Ciências na Alemanha, Áustria, Inglaterra, França, Itália, Holanda, Suécia, Dinamarca e Rússia, e de cerca de 23 Associações Científicas. Ele recebeu a Medalha Leopoldina (Acad. Caesar. Leopold. Caroli Herm.), a Medalha Copley inglesa,³⁰⁷ a Medalha Becquerel francesa e muitas ordens, incluindo a Ordem *pour le mérite* e a Ordem Maximiliana. Ao enviar esta última, Justus Liebig acrescentou as seguintes linhas particulares à carta oficial de 25 de novembro de 1858:

³⁰⁵[WZ80].

³⁰⁶O Príncipe Alberto da Prússia (1809-1872) foi um general prussiano.

³⁰⁷Ver a Nota de rodapé 263.

Caro amigo, não posso deixar de acompanhar esta carta oficial com algumas linhas para expressar a você o quanto sinto que o reconhecimento que o Rei da Baviera lhe concedeu está muito abaixo do mérito que você tem o direito de reivindicar por seu grande e admirável trabalho. Entretanto, de acordo com as regras da Fundação, não nos foi permitido voltar às suas investigações anteriores (antes do ano de 1856/57). Para não lhe causar mais problemas, dividi a quantia e já enviei metade dela para Kohlrausch. O pobre homem está muito doente, tememos por sua vida. Aceite meus parabéns novamente e visite-me em Munique em breve.

Atenciosamente,

Justus Liebig.

Não é raro constatar que o reconhecimento e as honrarias concedidas a homens de mérito não permanecem sem repercussão em seu caráter. Com Weber foi diferente! Qualquer pessoa que entrasse em sua simples sala de trabalho, seja quando ele tinha apenas o título de Professor ou quando tinha o título de Excelência, sempre encontrava o mesmo homem amigável e benevolente. Seu trabalho e seus esforços eram pela causa e não pela pessoa. Disso vem sua aversão a disputas sobre prioridades, sua disposição em compartilhar suas ideias e experiências com outras pessoas para o benefício da pesquisa científica. Livre de necessidades, ele também era despretensioso em sua vida doméstica e mantinha um perfil discreto. Ele abandonou seu único hábito, o de fumar, depois de ter ficado confinado à cama por um longo período em julho de 1871 devido a um caso grave de varíola. Weber levava uma vida extremamente moderada e regular. Mesmo em sua idade avançada, costumava sair para caminhar de manhã cedo, e seus companheiros de viagem tiveram ampla oportunidade de experimentar a resistência e a energia que ele desenvolveu durante as caminhadas que geralmente fazia durante parte de suas longas férias. Em todos os empreendimentos, mesmo os menores, Weber foi preciso e consciencioso e agiu de acordo com um plano bem pensado, sem cair no erro do pedante de vincular-se incondicionalmente ao plano, uma vez elaborado. Ele sempre reservou para si “a política da liberdade de ação”. Sua própria consciência o levou a antecipar a mesma qualidade nos outros, o que explica o reconhecimento incondicional da autoridade por parte daqueles em quem ele havia depositado sua confiança. Embora a gentileza e a tolerância formassem um traço básico do caráter de Weber, que veio à tona principalmente na velhice, ele também possuía uma energia extraordinária, combinada com uma disposição viva e facilmente excitável. Weber poderia ter um acesso de raiva e, como isso era contra sua disposição natural, tal ataque poderia vir à tona por motivos bastante acidentais.

Embora não fosse casado, Weber levava uma vida familiar sólida. A partir de sua segunda mudança para Göttingen, em 1849, sua sobrinha mais velha chefiou a casa sem interrupção, com exceção de alguns anos, e sua casa e jardim sempre receberam muitos convidados alegres de idades mais jovens e mais avançadas. Weber sempre teve gosto pelas relações domésticas, conforme evidenciado pela correspondência pessoal e íntima que mantinha com mulheres, principalmente com as de seus colegas, especialmente a Sra. Dorothea Grimm, a Sra. Pogendorff, a primeira e a segunda esposas de seu amigo Ewald, a Sra. Dirichlet e assim por diante. Ele era amigo da casa em quase todos os lugares e era frequentemente chamado como conselheiro. No entanto, ele tinha o contato mais próximo com seus irmãos e suas famílias. Havia um relacionamento ideal entre os irmãos, especialmente entre ele e Ernst Heinrich, porque este último, 10 anos mais velho do que ele, tinha sido seu conselheiro mais próximo em todas as situações desde sua juventude. Ele sempre expressava o quanto lhe devia em

gratidão, e era revigorante ouvir como cada um reconhecia plenamente os méritos do outro. Portanto, sempre houve um contato familiar intenso entre Göttingen e Leipzig, e era quase uma exceção quando sua casa hospitaleira não acomodava um ou outro membro da família. Especialmente depois que Ernst Heinrich abandonou suas atividades de professor no início dos anos 70, os dois irmãos costumavam passar grande parte do verão juntos em Göttingen, e quando Wilhelm também abandonou parcialmente suas aulas em 1874 e depois completamente em 1876, foi ainda mais aproveitada a oportunidade de socializar um com o outro pessoalmente. Quando Ernst Heinrich se sentiu obrigado a passar o inverno de 1874/75 na Riviera e em Nápoles devido a queixas asmáticas, Wilhelm o acompanhou. Essa foi a última vez que viajaram juntos. Wilhelm tinha um prazer especial na reunião anual dos vários membros da família em Göttingen, no Pentecostes. Nessa época Weber se tornava jovem novamente e participava de todas as atividades.

Weber não tinha o dom de orador e, ainda assim, eletrizava os ouvintes em suas aulas com a singularidade de sua apresentação. Partindo dos fatos mais simples, ele construía o edifício de sua ciência em uma sequência estritamente lógica diante dos olhos atônitos de seus ouvintes, colocando a ênfase principal não nos detalhes, mas na progressão das ideias e no método de pesquisa científica. Weber não gostava de falar sobre religião e pontos de vista religiosos; embora ele próprio tivesse uma certa convicção religiosa, era extraordinariamente tolerante com os outros. Anotações individuais intercaladas entre anotações de natureza científica mostram que ele próprio estava frequentemente ocupado com a religião. Alguns ditos recorrentes são os seguintes:³⁰⁸

Estou ciente de cada pensamento, cada sensação e cada memória, eles são minha propriedade; o fato de eu poder pensar, sentir e lembrar foi concedido a mim por Deus.

O homem tem consciência de cada pensamento, cada sensação e cada memória que tem e os chama de seus. Ele não tem nada que possa chamar de seu com mais direito. Mas, ao mesmo tempo, ele está ciente de que não tem seus pensamentos, sensações e lembranças de si mesmo; portanto, ele os chama de concedidos a ele e chama o doador de Deus. Sua consciência de não ter seus pensamentos, sentimentos e memórias de si mesmo é sua consciência religiosa.

O sono é uma interrupção do pensamento. A falta de memória é a interrupção da ligação dos pensamentos, ou seja, a interrupção do trabalho mental. Nossa vida é uma existência intermitente.

Difícilmente seria possível construir as convicções religiosas de Weber a partir dessas declarações isoladas sem entrelaçar suas próprias opiniões. Mas o resultado dessas convicções, sua vida, fala alto e claro. Assim como Weber estava livre da busca vã por honra e reconhecimento, o dinheiro e a propriedade não o atraíam. O que teria feito a felicidade de outros era um fardo para ele. Seu irmão Ernst Heinrich era o principal responsável por administrar sua escassa renda e, quando Ernst Heinrich morreu, libertou-se de todos os bens terrenos ao distribuir sua propriedade entre os filhos de seu irmão muitos anos antes de sua morte.

No entanto, tornou-se difícil para ele suportar a idade quando sua memória começou a falhar. Ele costumava dizer:

Minha memória é tão fraca que, quando chego à próxima página de um tratado, não consigo mais lembrar o conteúdo da página anterior.

³⁰⁸Ver [Web94a] com tradução para o inglês em [Web97] e [Web21a]. Ver ainda [Ten97b].

Assim como Gauss, Weber passou a ler textos literários, especialmente Goethe e Shakespeare, aos quais ele já era particularmente dedicado nos anos anteriores, bem como Chamisso, as cartas de Bismarck, a correspondência de Dahlmann, Wöhler, Grimm e assim por diante.

No início de 1891, Weber foi acometido por icterícia, o que interferiu na nutrição de seu corpo e afetou extraordinariamente suas forças. Embora seu estado de saúde tenha melhorado e quase parecesse que ele superaria a doença, uma recorrência da enfermidade lentamente minou suas forças e causou sua morte em 23 de junho. Durante essa doença prolongada, que não o manteve confinado à cama, mas o impediu de ocupar sua mente com estímulos externos, Weber ficou muito entregue a si mesmo e a seus próprios pensamentos. Sua mente tornou-se cada vez mais desapegada desta Terra e ele transferiu para a realidade os pensamentos que ocupavam sua alma.

Ele falava muitas vezes da viagem que estava fazendo:

ele queria viajar para Göttingen,

e, ao ser respondido de que estava em Göttingen, ele dizia:

essa não é a minha Göttingen, quero dizer a Göttingen, onde Gauss vive.

Vários dias antes de sua morte, ele sentiu que seu fim estava se aproximando e, com seu altruísmo característico, disse que

a casa estaria em grande agitação, muitas pessoas viriam ver se as providências já haviam sido tomadas.

Ele havia terminado sua carreira terrena e ansiava pelo fim.

Não tenho mais vontade de trabalhar nesta terra escura,

disse ele e perguntou se as pessoas esperadas ainda não haviam chegado. Seus pensamentos frequentemente se concentravam em seu irmão falecido, Ernst Heinrich:

Deus me chamou. Tenho que ir, meu irmão Ernst está me esperando.

Na manhã de 23 de junho, o primeiro dia ensolarado após um longo período de chuva, ele foi pessoalmente, com a ajuda de sua sobrinha, para o jardim onde gostava de passar o tempo e se acomodou em uma poltrona. Sob os raios quentes do Sol, ele passou o dia inteiro ali, quase ininterruptamente, em um sono suave. Mas, quando o Sol começou a se pôr, ele levantou a cabeça abaixada, seus olhos arregalados adquiriram um brilho próprio e, por muito, muito tempo, ele contemplou o céu e o Sol poente, como se o outro mundo tivesse se aberto para seus olhos. Alguns minutos depois, Wilhelm Weber havia concluído o curso de sua vida terrena. Assim, ele partiu na véspera do aniversário de seu amado irmão Ernst Heinrich, para permanecer eternamente unido a ele, a seu irmão mais novo Eduard e a todos os seus outros irmãos.

O telégrafo levou a mensagem de luto em todas as direções, despertando a mais profunda simpatia de todos que conheciam o falecido. Na manhã de 26 de junho, o funeral foi assistido por um número extraordinário de pessoas. Além dos professores, do corpo discente e dos representantes dos cidadãos de Göttingen, admiradores de fora, antigos alunos, parentes e conhecidos correram para prestar suas homenagens ao homem reverenciado e amado. Inúmeras

foram as coroas, palmas e flores enviadas por pessoas físicas e jurídicas cujos doadores não eram apenas membros de círculos acadêmicos. Os cidadãos de Göttingen há muito contavam o homem simples e despretensioso entre os seus, e o falecido mal havia percebido, durante sua vida, como havia conseguido fazer amigos entre todos os setores da população. O Imperador Wilhelm fez com que o curador expressasse suas condolências, e o Príncipe Alberto da Prússia fez com que seu ajudante colocasse uma coroa de flores no caixão. O Secretário de Estado, Dr. von Stephan, também se fez presente. O pregador da Universidade, Conselheiro Consistorial Dr. Schulz, fez um discurso comovente no caixão, que havia sido colocado ao ar livre sob grandes árvores.

Assim, ele se foi, o grande e ainda assim modesto homem, amado por todos que se aproximavam dele, honrado ainda mais, quanto menos seu esforço na vida era direcionado ao reconhecimento. Que Wilhelm Weber continue sendo um modelo para os jovens acadêmicos! Livre de arrogância e vaidade mesquinhas, livre de preconceitos de classe, um verdadeiro sábio alemão. A Alemanha sempre se orgulhará de tê-lo entre seus filhos!

Agora ele está enterrado em um dos primeiros túmulos do cemitério de Göttingen.

Descanse em paz!³⁰⁹

³⁰⁹O túmulo de Weber aparece nessa Nota de rodapé, https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Eduard_Weber. Nele está escrito: Chamado por Deus para uma atividade superior, repousa aqui o corpo mortal de Wilhelm Weber, nascido em Wittenberg em 24 de outubro de 1804, falecido em Göttingen em 23 de junho de 1891:



Capítulo 7

Introdução ao Artigo de 1899 de Voigt

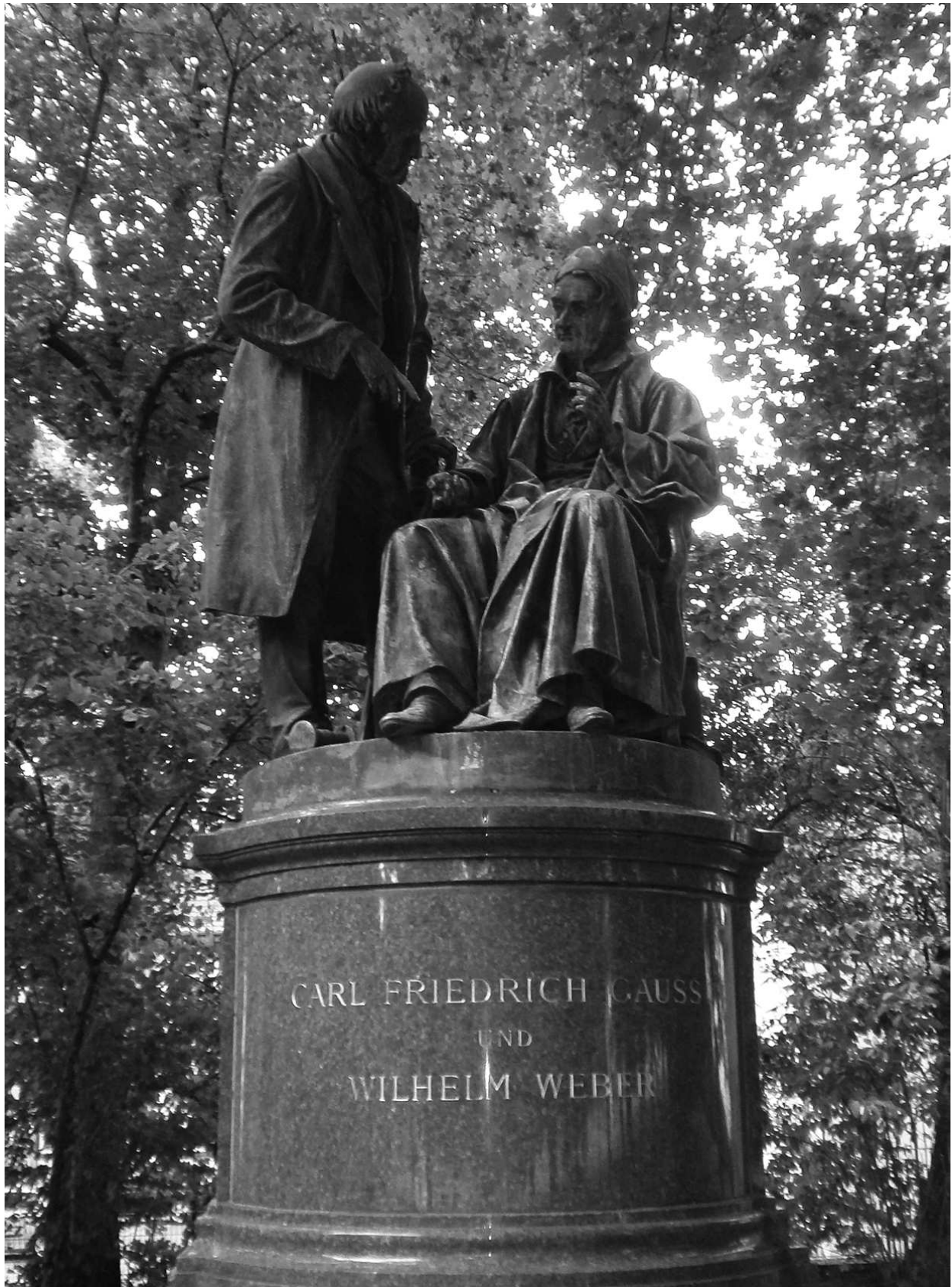
A. K. T. Assis³¹⁰

Apresento no próximo Capítulo uma tradução do discurso de Woldemar Voigt (1850-1919) de 1899 durante a inauguração do monumento dedicado a Gauss e Weber em Göttingen.³¹¹ Agradeço à Profa. Karin Reich por me chamar atenção para esse texto e também pela seguinte informação: Voigt foi o sucessor de Johann Benedikt Listing (1808-1882) na cátedra de física teórica da Universidade de Göttingen. Listing havia concluído seu doutorado com Carl Friedrich Gauss (1777-1855) em 1834 com uma tese matemática e tornou-se sucessor de Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) em Göttingen em 1838. Quando Weber foi chamado de volta a Göttingen em 1849, uma nova cátedra foi criada para ele. A partir de então, Weber representou a física experimental e Listing, assim como seu sucessor W. Voigt, ocupou a cadeira de física teórica.

O modelo do monumento dedicado a Gauss e Weber foi feito pelo escultor alemão Carl Ferdinand Hartzer (1838-1906). A fundição de bronze foi feita pela companhia Aktien-Gesellschaft Gladenbeck localizada em Berlim/Friedrichshafen. Fonte da imagem: <https://denkmale.goettingen.de/portal/seiten/gauss-weber-denkmal-900000619-25480.html> e <https://www.flickr.com/photos/unigoettingen/15178191062/in/photostream/>.

³¹⁰Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

³¹¹[Voi99] com tradução para o inglês em [Voi24].



Capítulo 8

[Voigt, 1899] Monumento em Homenagem a Gauss e Weber

W. Voigt^{312,313}

Em 17 de junho deste ano [de 1899], ocorreu em Göttingen a inauguração do monumento em homenagem a

Carl Friedrich Gauss e Wilhelm Weber

que a Associação de Engenheiros Alemães também ajudou a erguer. Publicamos abaixo o discurso de dedicação que o professor W. Voigt, decano da Faculdade de Filosofia da Universidade de Göttingen, gentilmente nos disponibilizou. Na ocasião da comemoração, foi organizada uma exposição sobre Gauss e Weber que, por um lado, exibiu uma rica abundância de objetos, instrumentos, textos e assim por diante da rica vida de trabalho dos dois pesquisadores e, por outro, tesouros surpreendentes em manuscritos até então desconhecidos. O discurso de dedicação teve o seguinte teor:

Prezada Cerimônia Muito Respeitável!

Em nome do Comitê, é com o coração aquecido que lhes dou as boas-vindas aos pés do trabalho que temos nos esforçado para realizar há sete anos, no momento festivo e alegre que representa o objetivo de nossos desejos.

A Universidade e a cidade de Göttingen tornaram a comemoração sua, e seus representantes se reuniram aqui em grande número; convidados estimados vieram de longe e de perto para se alegrar conosco pelo que alcançamos e para celebrar a memória de homens cujos nomes são conhecidos e honrados em todos os lugares onde as ciências exatas são amadas e cuidadas.

Foi no inverno de 1891 a 1892, alguns meses após a morte de Wilhelm Weber, que os representantes das disciplinas anteriormente ensinadas por Gauss e Weber na Georgia Augusta [Universidade de Göttingen] se reuniram com o desejo de erguer um memorial conjunto para esses dois grandes pesquisadores no local de seu trabalho mais importante.

³¹²[Voi99] com tradução para o inglês em [Voi24].

³¹³Todas as Notas são de minha autoria.

A ideia não surgiu apenas naquela época; ela já havia tido uma existência secreta desde a morte de Gauss [em 1855]. Este pensamento, entre outras coisas, levou a nossa Associação a dar preferência à cidade natal do grande Gauss, Brunswick, que está tão perto de nós, para homenageá-lo. Pois ficou claro para os envolvidos que, na história da Universidade e da cidade de Göttingen, o nome de C. F. Gauss está para sempre inseparavelmente ligado ao nome de W. Weber.

Agora que o trabalho de Weber havia chegado ao fim, a ideia desse memorial duplo parecia se materializar por conta própria. Afinal de contas, estávamos em lugares que haviam sido consagrados pelo trabalho de ambos, e estávamos ligados a um deles por uma tradição viva e ao outro por um relacionamento pessoal mais curto ou mais longo.

O que Gauss e Weber significam para nós?

O mundo científico já suspeitava que C. Fr. Gauss, um descobridor de primeira linha, havia entrado na arena da batalha depois de seus primeiros sucessos há cem anos. Quando ele faleceu, há 45 anos, lamentou-se a partida de um rei que dominava as mais amplas áreas da ciência.

Contudo, as discretas folhas soltas do espólio de Gauss nos revelam coisas ainda mais maravilhosas do que a beleza gelada e cristalina de suas obras publicadas. Em particular, um pequeno diário que nos foi dado recentemente para uso pelo neto do grande mestre e que, ao longo de muitos anos, contém registros das descobertas que ele fez.³¹⁴

Incansavelmente, como se fosse guiado e controlado por um demônio, ele cava poço após poço, galeria após galeria no território inexplorado; um demônio lhe mostra o caminho para incontáveis veios de metal precioso; mas somente de alguns ele extrai o ouro e o molda em formas elaboradas para o uso de outros, a maioria dos quais ele esconde do mundo, feliz com o conhecimento de sua posse secreta.

Somente décadas depois, quando outros abriram a veia de outro lado, apareceram os traços de sua poderosa mão.

Mal saído da infância, ele enfrentou com sucesso problemas que as maiores mentes das eras anteriores não haviam dominado. Aos 16 anos, mergulhou nas questões mais difíceis sobre os fundamentos da geometria; aos 17 anos, descobriu o inestimável método de utilizar observações de forma racional e imparcial; aos 19 anos, deu o primeiro passo importante na teoria da divisão de círculos desde Euclides;³¹⁵ aos 22 anos, antecipou as ideias básicas da teoria dos quatérnios, desenvolvida muito mais tarde por Hamilton;³¹⁶ aos 23 anos, descobriu vários resultados sobre funções elípticas que só foram redescobertos mais tarde. Aos 25 anos, voltou-se repentinamente para a astronomia, obteve imediatamente um sucesso de primeira classe ao determinar a órbita de Ceres e, pouco tempo depois, causou tanta sensação com outros resultados teóricos e observacionais obtidos com meios limitados que foi nomeado professor de astronomia em Göttingen aos 30 anos de idade. Aos 32 anos, publicou *Theoria motus corporum coelestium*, que o colocou ao lado dos melhores astrônomos teóricos de todos os tempos.³¹⁷

³¹⁴Ver https://en.wikipedia.org/wiki/Gauss%27s_diary.

³¹⁵Euclides floresceu ao redor de 300 a.C. Ele foi um matemático grego que trabalhou na cidade de Alexandria. Sua obra principal, *Os Elementos*, é o livro didático mais influente e bem-sucedido da história da matemática, [Euc09]. Aos 19 anos Gauss desenvolveu o processo exato com régua e compasso para a divisão da circunferência em 17 partes iguais. Esta prova representou o primeiro progresso na construção de polígonos regulares desde Euclides.

³¹⁶William Rowan Hamilton (1805-1865) foi um matemático, físico e astrônomo irlandês.

³¹⁷[Gau09] com tradução para o inglês em [Gau57]. Título em latim: *Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis solem Ambientium* — Teoria do movimento dos corpos celestes que se movem em

Com sua nomeação para Göttingen, Gauss ganhou uma posição honrosa e segura na vida, mas também perdeu a preciosa liberdade de escolher como quisesse seu próprio caminho. Uma série de trabalhos demorados e cientificamente infrutíferos recaiu sobre ele.

No entanto, ele se voltou com energia vitoriosa para dois novos campos científicos: a geodésia e a física matemática, dos quais extraiu um grande número dos frutos mais valiosos. Eles também incluem dois empreendimentos científicos do maior valor, que ocuparam Gauss até sua morte: a medição do arco terrestre em Hanover e a organização de observações geomagnéticas, que foram de grande benefício para a ciência, tanto diretamente pelos resultados obtidos quanto indiretamente pelo estímulo a certos problemas de importância geral. Gauss atraiu W. Weber para Göttingen como colaborador e companheiro em seus planos geomagnéticos.

Ao lado do esplendor quase assustador do poderoso meteoro Gauss, a bela e pura estrela de Weber brilha com um feixe calmo e amigável, guiando o caminho e prometendo o objetivo.

Os primeiros estímulos científicos que Weber recebeu em sua cidade natal, Wittenberg, de um amigo de sua família, o conhecido músico Chladni, bem como de seu irmão mais velho, Ernst Heinrich, levaram-no aos campos da teoria ondulatória e da acústica.³¹⁸ Os resultados significativos que obteve nessas áreas lhe renderam o cargo de professor associado em Halle quando ainda era jovem, bem como o interesse e a confiança de Gauss.

Para apreciar adequadamente o relacionamento mútuo entre os dois homens, a diferença de idade não deve ser ignorada. Gauss estava com 53 anos quando Weber transferiu-se para Göttingen, enquanto Weber estava com 26 anos. O fato de Weber, 27 anos mais jovem, ter sido inicialmente liderado e estimulado por Gauss não o desmerece. H. Hertz também foi intensamente influenciado pelo muito mais velho Helmholtz e, ainda assim, alcançou resultados notáveis.³¹⁹

Gauss havia desenvolvido a teoria geral do magnetismo terrestre.³²⁰ Agora era uma questão de organizar observações sistemáticas que possibilitassem a aplicação dessa teoria. A organização da nova Associação Magnética, o desenvolvimento dos métodos de observação e a utilização dos resultados devem-se, principalmente, ao grande e inesquecível mérito de Weber.

Esse trabalho magnético conjunto deu origem à invenção que tornou os nomes Gauss e Weber particularmente populares, o estabelecimento do primeiro telégrafo eletromagnético em 1833. Pela realização prática de uma ideia com grande impacto na comunicação, eles se tornaram os pioneiros do florescente campo da Engenharia Elétrica.

A cooperação entre Gauss e Weber foi interrompida em 1837 quando Weber foi demitido de seu cargo devido à defesa intransigente de suas convicções. O fato de Gauss, com 60 anos de idade, ter permanecido neutro no conflito é algo pelo qual não o culpamos; o fato de Weber, com 33 anos de idade, por suas convicções, ter sacrificado seu cargo em nossa Universidade, que era muito importante para ele devido ao seu relacionamento com Gauss, permanecerá inesquecível para sempre.

Talvez, no entanto, a separação temporária de Gauss tenha sido uma vantagem científica para ele. De qualquer forma, ele se desenvolveu de forma eminentemente independente e significativa em Leipzig, onde a Sociedade Real de Ciências o apoiou enfaticamente em seu trabalho.

torno do Sol em seções cônicas.

³¹⁸Ver as Notas de rodapé 75 e 76 na página 34.

³¹⁹Ver a Nota de rodapé 134 na página 48.

³²⁰Ver a Nota de rodapé 122 na página 44.

As inspirações gaussianas certamente estão em ação nas obras clássicas de Weber “elektrodynamische Maassbestimmungen” (Medições Eletrodinâmicas),³²¹ que começaram lá e chegaram até os últimos anos de Weber, pois continuam vivas em cada sucessor as realizações de seu predecessor. Contudo, são motivos indiscutíveis e eternos da fama de W. Weber a feliz descoberta, pela primeira vez, de uma lei fundamental que abrange vários campos da eletricidade; a engenhosa determinação experimental da notável constante de Weber, cujo valor, encontrado como sendo igual à velocidade da luz, deu a Maxwell o impulso para a nova base da eletrodinâmica teórica;³²² as ideias básicas amplamente frutíferas sobre o movimento de íons em eletrólitos; a esplêndida realização do sistema absoluto de unidades de medida, bem como a engenhosa construção de instrumentos de medição altamente úteis tanto para a ciência quanto para a tecnologia.

Essa era a imagem vívida que tínhamos dos homens quando nos reunimos há sete anos com o objetivo de construir um monumento para eles.

Nossa primeira tarefa foi levantar os fundos necessários, não desprezíveis, para os quais uma organização amplamente ramificada parecia essencial. Portanto, na primavera de 1892, pedimos a um grande número de acadêmicos, técnicos e funcionários públicos de todos os países civilizados que formassem outro Comitê para a construção de um memorial para Gauss e Weber em Göttingen e que defendessem ativamente esse objetivo.

Recebemos uma resposta amigável e uma aprovação entusiasmada de quase todos os lados, o que nos deu a firme esperança de que nosso trabalho seria bem-sucedido.

Com essa confiança, ousamos pedir ao ilustre presidente de nossa Universidade, Sua Alteza Real o Príncipe Alberto da Prússia, Regente do Ducado de Brunswick, que assumisse o protetorado de nossa organização.³²³ O fato de Sua Alteza Real ter se dignado a atender a esse pedido promoveu muito o nosso trabalho, não apenas diretamente, por meio da considerável soma doada por sua ordem a partir dos fundos estatais do Ducado de Brunswick, mas também indiretamente, por meio do efeito de seu nome principesco, que bateu mais alto em muitas portas do que a nossa modesta solicitação.

Nossa esperança confiante de que Sua Alteza Real pudesse, com sua presença, consagrar a coroação da obra que tão graciosamente apoiou infelizmente não se concretizou. Sua Alteza Real está sendo mantido afastado desta celebração por recomendação de seus médicos. Mas enviamos nossos mais reverentes agradecimentos ao nosso augusto protetor, mesmo de longe.

A coleta para o memorial de Gauss e Weber em Göttingen produziu os resultados mais gratificantes. Não apenas doações individuais grandes e pequenas foram recebidas em números impressionantes; amigos de nossa organização também montaram pontos de coleta em várias cidades, desde a vizinha Brunswick até a distante Tbilisi, e nos enviaram as quantias lá coletadas.

No entanto, há cerca de dois anos, esse riacho dourado secou antes mesmo de encher a bacia que o continha. No entanto, tanto havia sido conquistado que o trabalho podia ser considerado seguro e passos ousados para a conclusão podiam ser dados com alguma confiança.

Por meio de uma petição imediata, que foi calorosamente endossada por patronos de alto escalão de nosso projeto, conseguimos interessar Sua Majestade o Imperador e Rei no monumento para Gauss e Weber, e a rica doação graciosamente concedida não apenas aumentou nossas posses e encheu nosso humor de alegre confiança, mas também inspirou

³²¹Ver a Seção 2.2.

³²²Ver a Nota de rodapé 133 na página 47.

³²³Ver a Nota de rodapé 306 na página 116.

imitação em outros lugares.

Recordamos este sinal da generosidade de Sua Majestade com respeitosa gratidão.

Essa grande ajuda foi seguida por ajuda semelhante da Administração da Província de Hanover e da cidade de Göttingen, pelas quais também gostaríamos de aproveitar esta oportunidade para expressar nossos mais sinceros agradecimentos.

A última dificuldade remanescente foi finalmente superada pela intervenção ativa de dois amigos berlinenses de alto nível de nosso trabalho, o Sr. Sydow e o Sr. Boedicker. Eles conseguiram fazer com que as principais empresas de engenharia elétrica da Alemanha se interessassem pelo memorial de Gauss e Weber em Göttingen e, com a ajuda do vento fresco que eles enviaram às nossas velas, nosso pequeno navio finalmente chegou ao seu destino há algumas semanas.

Neste momento, gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos a todos os doadores e patrocinadores.

O lado artístico de nosso projeto foi abordado ao mesmo tempo que o lado financeiro.

O professor Hartzler, de Berlim, que já estava intimamente associado a Göttingen por meio de seu monumento a Wöhler e de uma série de bustos excelentes de professores universitários famosos, produziu um modelo após um trabalho incansável e fiel, que encheu o Comitê de alegria e satisfação.³²⁴ Gostaria de aproveitar esta oportunidade para expressar nossa admiração e nossos agradecimentos calorosos ao artista altamente estimado, que infelizmente está afastado deste festival por motivo de doença.

Foi acordado que a diferença de idade entre Gauss e Weber deveria ser apenas sutilmente sugerida e que os dois homens deveriam ser retratados em seu auge. O motivo que une as duas figuras do grupo foi concebido para ser uma referência à sua criação mais popular, a invenção do telégrafo.³²⁵ A empresa Gladenbeck, em Friedrichshagen, executou a fundição do minério com a perfeição de sempre.

O local onde se encontra o memorial foi gentilmente oferecido e preparado pelas autoridades municipais de Göttingen. Ele corresponde aos desejos do artista e também é atraente para nós, na medida em que estará localizado nas proximidades dos Institutos de Matemática, Física e Astronomia da Universidade quando os novos edifícios planejados forem erguidos nos locais que desejamos.

Assim, as imagens de bronze de C. Fr. Gauss e W. Weber estão prontas para fazer sua entrada na cidade onde esses homens realizaram sua obra abençoada. Bandeiras tremulantes e coroas verdes as saúdam; o querido e tão esperado Sol está esperando para dourá-las; convidados de honra, representantes da cidade, da Universidade e do corpo estudantil estão esperando para prestar-lhes homenagem.

Que o monumento seja revelado! E que a eternamente jovem canção de vitória de Händel ressoe para os vindouros!³²⁶

(Durante a lenta descida da capa que cobria o monumento, a orquestra entoa a melodia de “Vede, o herói conquistador vem!” de Judas Macabeu, de Händel.³²⁷ Os participantes se levantaram de seus assentos, os alunos das delegações acadêmicas puxaram as braçadeiras e saudaram com elas, assim como as bandeiras das corporações.)

³²⁴Carl Ferdinand Hartzler (1838-1906) foi um escultor alemão. Friedrich Wöhler (1800-1882) foi um químico alemão. Ver a Nota de rodapé 71 na página 34.

³²⁵As estátuas mostram Weber com um rolo de fio na frente do pé e apoiado no sinalizador telegráfico ao lado de seu colega Gauss sentado, [Ker13].

³²⁶George Frideric Händel (1685-1759) foi um compositor alemão, naturalizado cidadão britânico.

³²⁷<https://www.youtube.com/watch?v=XAKzwmYdcQ4>.

Uma canção de vitória saúda aqueles que virão!

Eles merecem honras heroicas, pois os heróis intelectuais são os homens que lutaram pela posição da pátria como uma grande potência no campo da ciência. Após a terrível devastação da Grande Guerra, durante séculos pareceu que o solo alemão não poderia mais produzir grandeza intelectual. Ao mesmo tempo em que a Itália, a França, a Inglaterra e a Holanda ganhavam fama imortal nas ciências exatas, tudo estava morto aqui, com algumas exceções isoladas. Com C. Fr. Gauss, surgiu um tempo novo e melhor, e, com ele, Bessel, Jacobi, Dirichlet, Weber, Neumann, Helmholtz, Clausius e Kirchhoff formaram o exército intelectual que lutou por nossa posição científica no mundo.³²⁸

Senhores colegas! Foi confiado a vocês o legado desses heróis espirituais; valorizem-no, juntamente com o legado de nossos heróis políticos e de guerra!

Qualquer pessoa que já tenha participado de uma reunião de cientistas naturais italianos, franceses, ingleses ou até mesmo holandeses terá se emocionado com o senso da gloriosa história científica de seus países que preenche e eleva esses homens. A Alemanha entrou na competição centenas de anos depois desses países; ainda está muito longe de ter igualado ou mesmo superado seus predecessores.

O gênio é um dom que é jogado no colo do povo e também do indivíduo. Mas o que o indivíduo, assim como o povo, pode fazer pela ciência por meio de sua vontade é preparar o terreno para que a preciosa semente do talento, quando semeada nele, possa se desenvolver. Essa é uma tarefa sagrada para cada um de vocês. Cultivem a mente científica, em qualquer posição que a vida os conduza, para que, quando a sorte enviar o gênio para o nosso meio, ele possa abrir suas asas livre e poderosamente.

Gostaria também de dizer uma palavra a vocês neste momento, meus queridos concidadãos, pois estou feliz e orgulhoso de ser um de seus colegas de trabalho.

Se o nome de Göttingen se espalhou mais longe do que os nomes de outras cidades do mesmo tamanho, se Göttingen aparece como uma flor nobre na coroa das cidades alemãs, isso se deve ao trabalho científico realizado dentro de seus muros. Por favor, continuem a garantir que um lugar para esse trabalho permaneça preparado em sua cidade; não considerem uma perda de tempo oferecer hospitalidade à Universidade e a seus Institutos em crescimento e expansão. A prosperidade de sua comunidade está intimamente relacionada à da ciência e da Universidade. O monumento que acabamos de inaugurar lembra-vos disso.

E assim, em nome do Comitê, apresento o Monumento de Gauss e Weber à cidade de Göttingen como um memorial a dois de seus maiores cidadãos, como um símbolo do trabalho científico que une países e povos, como um ornamento e uma joia de nossa querida cidade, que é nosso querido lar.

³²⁸Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846), Carl Gustav Jacob Jacobi (1804-1851), Peter Gustav Lejeune Dirichlet (1805-1859), Franz Ernst Neumann (1798-1895), Rudolf Clausius (1822-1888) e Gustav Kirchhoff (1824-1887) foram cientistas alemães.

Parte III

Tradução Comentada das Obras de Gauss e Weber

Capítulo 9

Introdução ao Artigo de 1832 de Gauss

A. K. T. Assis³²⁹

Apresento nesse Capítulo alguns tópicos que ajudam a entender o sistema absoluto de unidades de Gauss e Weber.

9.1 A Razão entre os Valores Numéricos de uma Mesma Grandeza Expressa com Duas Unidades Diferentes É o Inverso da Razão entre as Unidades Correspondentes

Seja uma distância d entre dois pontos medida em centímetros (cm) e polegadas (in):

$$\text{distância} = d = 3,28 \text{ cm} = 1,29 \text{ in} . \quad (9.1)$$

Temos então

$$\frac{3,28}{1,29} = \frac{\text{in}}{\text{cm}} = \frac{2,54}{1} . \quad (9.2)$$

Esse é um resultado geral. Vamos supor que temos um certa grandeza medida em duas unidades diferentes:

$$\text{grandeza} = n_1 \cdot \text{unidade}_1 = n_2 \cdot \text{unidade}_2 , \quad (9.3)$$

onde n_1 e n_2 representam dois valores numéricos adimensionais, enquanto que unidade_1 e unidade_2 representam as duas unidades. Essa grandeza pode ser uma distância, um intervalo de tempo, o valor de uma carga elétrica, uma intensidade de corrente etc. No caso específico da Equação (9.1) tínhamos $n_1 = 3,28$, $n_2 = 1,29$, $\text{unidade}_1 = \text{cm}$ e $\text{unidade}_2 = \text{in}$.

Da Equação (9.3) temos então

³²⁹Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{unidade}_2}{\text{unidade}_1} = \frac{k}{1} . \quad (9.4)$$

Nessa equação k é um fator numérico adimensional. Ele serve para converter o valor numérico da medida de uma grandeza expresso em uma unidade no valor numérico da mesma grandeza expressa em outra unidade. Ele também serve para converter uma unidade de medida na outra unidade de medida. No caso da Equação (9.2) tínhamos $k = 2,54$ e $1 \text{ in} = 2,54 \text{ cm}$, ou $\text{unidade}_2 = k \cdot \text{unidade}_1$.

Ou seja, em geral a razão entre os valores numéricos da mesma grandeza expressa com duas unidades diferentes é o inverso da razão entre as unidades correspondentes, como indicado pela Equação (9.4), ou seja:

$$\frac{\text{unidade}_1}{\text{unidade}_2} = \frac{1}{k} . \quad (9.5)$$

Isto é, se $n_1/n_2 = k/1$ então $\text{unidade}_1/\text{unidade}_2 = 1/k$.

9.2 A Intensidade Absoluta da Força Magnética Convertida em Termos do Campo Magnético

No sistema absoluto de unidades de Gauss e Weber todas as grandezas elétricas e magnéticas podem ser medidas em termos de comprimento, massa e tempo. Em particular, eles usaram como unidades fundamentais ou absolutas o milímetro (mm), miligrama (mg) e segundo (s). Gauss explicou algumas de suas ideias em uma carta para o astrônomo alemão Heinrich Olbers (1758-1840) em 18 de fevereiro de 1832:³³⁰

Agora estou trabalhando no geomagnetismo, em especial na determinação absoluta de sua intensidade. O amigo Weber faz os experimentos de acordo com minhas instruções. Da mesma forma que só é possível dar um conceito claro de velocidade, por exemplo, assumindo um tempo e um espaço, também acho que, para determinar completamente a intensidade do magnetismo da Terra, é preciso especificar (1) um peso = p , (2) uma linha = r , e então pode-se expressar o magnetismo terrestre por $\sqrt{p}/r$, ou seja, um magnetismo terrestre dobrado resultaria em um peso quatro vezes maior com o mesmo r , ou, para o mesmo peso, uma distância r com a metade de seu valor.

Ou seja, a intensidade da força magnética tem como unidade absoluta aquela dada pela unidade de $\frac{\sqrt{p}}{r}$. Utilizando a segunda lei de Newton de acordo com a qual uma força ou um peso é igual a uma massa vezes uma aceleração, temos então a seguinte unidade absoluta para a intensidade da força magnética:

$$\frac{\sqrt{mg \cdot mm/s^2}}{mm} = \frac{\sqrt{mg}}{s\sqrt{mm}} . \quad (9.6)$$

As medidas feitas por Gauss e Weber em 21 de maio 1832 indicaram que a componente horizontal da força magnética terrestre na cidade de Göttingen era de $1,7820 \sqrt{mg}/(s\sqrt{mm})$,

³³⁰Ver <https://gauss.adw-goe.de/handle/gauss/990>. Ver também [MB82], [Mal82], [Sch88] e [Mal07].

sendo esta grandeza representada pela letra T .³³¹ Essa foi a primeira medida absoluta dessa grandeza:

$$T = 1,7820 \frac{\sqrt{mg}}{s\sqrt{mm}} . \quad (9.7)$$

O que eles chamaram de intensidade da força magnética é denominada de campo magnético na teoria eletromagnética atual ensinada nos livros didáticos. O campo magnético é usualmente representado pela letra, $B = |\vec{B}|$, cuja unidade no sistema internacional de unidades MKSA é o Tesla ($1 \text{ Tesla} = 1 \text{ kg}/(\text{As}^2)$). A conversão entre as medidas absolutas de Gauss e Weber e o sistema internacional de unidades é a seguinte:³³²

$$1 \frac{\sqrt{mg}}{s\sqrt{mm}} \Longleftrightarrow 10^{-5} \text{ Tesla} . \quad (9.8)$$

Ou seja, de acordo com as medidas de Gauss e Weber feitas em Göttingen em 21 de maio de 1832 temos que a intensidade da componente horizontal T da força magnética terrestre é equivalente à componente horizontal $B_{horizontal}$ do campo magnético terrestre dado por:

$$T = 1,7820 \frac{\sqrt{mg}}{s\sqrt{mm}} \Longleftrightarrow B_{horizontal} = 1,7820 \times 10^{-5} \text{ Tesla} . \quad (9.9)$$

9.3 Medição da Componente Horizontal da Força Magnética Terrestre

Em 1832 Gauss e Weber obtiveram o valor da componente horizontal da força magnética terrestre, equivalente à componente horizontal do campo magnético terrestre ao utilizarmos a teoria eletromagnética atual ensinada nos livros didáticos. Foi a primeira vez em que essa grandeza foi medida em unidades absolutas, isto é, em termos de comprimento, massa e tempo. Esse sistema absoluto de unidades foi introduzido por eles, ver a Seção 9.2.

Para fazer essa medida usaram dois métodos distintos. As imagens apresentadas nessa Seção ajudam a entender os procedimentos experimentais de Gauss e Weber como apresentados nos próximos Capítulos. O método dinâmico está ilustrado na Figura 9.1.³³³

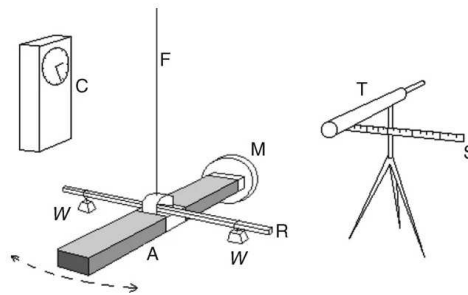


Figura 9.1: Método dinâmico para a determinação da componente horizontal da força magnética terrestre.

³³¹[Gau32] com tradução para o inglês em [Gau21a, pág. 44] e [Gau94] com tradução para o inglês em [Gau21e, pág. 77]. Ver ainda a página 145 dessa tradução em português.

³³²Ver a Nota de rodapé 330.

³³³[MB82] e [Mal07].

O ímã A está suspenso por uma linha de seda F e oscila no plano horizontal ao redor dessa linha. Seu momento de inércia pode ser alterado ao pendurar os pesos W na barra R , ao mudar o valor desses pesos ou ao alterar suas distâncias até a linha F . O espelho M está fixo na extremidade do ímã. Ao cronometrar um número inteiro de oscilações com o relógio C , pode ser obtido o período de oscilação do ímã observando a reflexão da escala ou régua S pelo espelho M através do telescópio T .

Apresento aqui algumas ordens de grandeza típicas desses experimentos, embora os detalhes possam variar, apenas para que se tenha uma ideia geral dos procedimentos. O ímã A é uma barra prismática com uns 32 cm de comprimento pesando aproximadamente 1 libra ou 0,45 kg. O tempo para 1 vibração era tipicamente de 14 segundos, tal que o período para uma extremidade do ímã sair e voltar ao mesmo ponto era de aproximadamente 28 s. A distância do telescópio ao centro do ímã era de 16 pés de Paris, ou seja, 5,2 m. A escala ou régua tinha aproximadamente 4 pés, ou seja, 1,3 m.

O método estático está ilustrado na Figura 9.2.

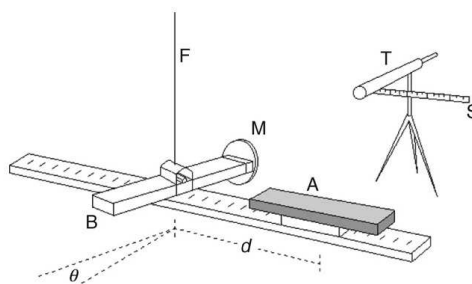


Figura 9.2: Método estático para a determinação da componente horizontal do magnetismo terrestre.

Nesse caso o ímã B é suspenso por uma linha de seda F . Quando está sozinho ele aponta ao longo do meridiano magnético. Porém, ao colocar um ímã A a uma distância conhecida, o ímã B fica desviado em relação ao meridiano magnético. A régua sobre a qual está apoiado o ímã A não está ligada ao ímã B nem à linha de seda F . Essa régua serve para medir a distância entre os centros dos dois ímãs. O espelho M está preso à extremidade do ímã B . A deflexão do ímã B em relação ao meridiano magnético é medida observando a reflexão da escala ou régua S pelo espelho M através do telescópio T .

Capítulo 10

[Gauss, 1832, Resumo do Artigo:] *Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata* (Medição Absoluta da Força Magnética Terrestre)

Carl Friedrich Gauss³³⁴

10.1 Introdução da Versão em Inglês desse Trabalho de Gauss

14 de fevereiro de 1833. — O seguinte anúncio foi feito pela presidência [da *Royal Society* da Inglaterra]:³³⁵

“Sua Alteza Real o Presidente recebeu do Professor Gauss o resumo de um trabalho lido por ele na reunião de 15 de dezembro [de 1832] da Sociedade Real de Göttingen intitulado “*Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata*” (Medição absoluta da força magnética terrestre). Como os pontos de vista do Sr. Gauss possuem grande interesse, Sua Alteza Real tem o desejo que eles sejam conhecidos pelos membros da *Royal Society* — *Sociedade Real*; porém, como o artigo original ainda vai levar alguns meses para ser publicado, e o resumo que apareceu no [periódico] *Göttingische gelehrte Anzeigen* está escrito em uma língua que não é normalmente conhecido nesse país, Sua Alteza Real solicitou a seu Secretário para Assuntos Estrangeiros que o traduzisse; e devido a isso solicitei ao Secretário que apresentasse o resumo nessa reunião.

“Ao se desviar dessa maneira da rotina usual dos assuntos da *Royal Society*, Sua Alteza Real atua com o desejo de promover a comunicação rápida e recíproca das novas descobertas

³³⁴[Gau32] com tradução para o inglês em [Gau33a], [Gau37a] e [Gau21a]. Ver também [Rei02, págs. 138-150]. Todas as Notas são de minha autoria.

³³⁵[Gau33a], [Gau37a] e [Gau21a].

e importantes pontos de vista da ciência, entre a nossa Sociedade e as outras Sociedades da Europa, devotadas, como essa, ao ‘*aperfeiçoamento do conhecimento natural*’.

“Contudo, comunicações dessa natureza não podem ser admitidas nas *Transactions*; porém a publicação, de tempos em tempos, de seus *Proceedings*, oferece uma maneira satisfatória de dar-lhes ampla circulação; e assim será efetuada a propagação rápida de muita informação útil que, de outra maneira, se não for absolutamente perdida para nós, ficaria pelo menos por um longo tempo desconhecida do público britânico com interesse científico.”

A seguir vem o resumo da Memória do Professor Gauss.

10.2 Tradução do Trabalho de 1832 de Gauss

Carl Friedrich Gauss³³⁶

Na reunião da Sociedade Real [de Ciências de Göttingen] em 15 de dezembro [de 1832], foi proferida uma palestra pelo Conselheiro Gauss:

Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata
Medição Absoluta da Força Magnética Terrestre

cujo tema é relatado aqui.

O fato de que dos três elementos que determinam a manifestação do magnetismo da Terra em um determinado local, declinação, inclinação e intensidade, o primeiro se tornou objeto de observações e pesquisas mais cedo, o segundo muito mais tarde e o terceiro apenas em tempos recentes, é explicado principalmente pelo fato de que a declinação é de interesse mais imediato para navegadores e geodestas, e a inclinação pode ter parecido mais intimamente relacionada a ela do que a intensidade. Para o filósofo natural esses três elementos possuem absolutamente a mesma importância: nosso conhecimento do sistema geral do magnetismo terrestre vai permanecer incompleto, até que uma atenção igual seja dada a esses ramos independentes.

Devemos ao Barão Humboldt os primeiros esclarecimentos sobre esse assunto, sua atenção foi particularmente direcionada a esse tema durante suas viagens, sendo que ele forneceu uma grande série de observações a partir da qual foi deduzida o crescimento gradual da intensidade a partir do equador magnético terrestre em direção aos polos magnéticos.³³⁷ Desde então muitos observadores seguiram os passos desse grande naturalista; e quase todas as partes da Terra que, em tempos recentes, foram visitadas pelos viajantes científicos, forneceram seu tesouro de observações, a partir do qual Hansteen (a quem esse ramo da pesquisa filosófica tanto deve) já conseguiu fundamentar a tentativa de um mapa isodinâmico geral.³³⁸

O procedimento adotado em todas essas observações consiste em perturbar o equilíbrio de uma mesma agulha magnética nos locais onde é para ser determinada a intensidade com-

³³⁶[Gau32] com tradução para o inglês em [Gau33a], [Gau37a] e [Gau21a]. Ver também [Rei02, págs. 138-150].

³³⁷Alexander von Humboldt (1769-1859). Ver: [Hum01], [HB04], [HB05], [Hum29b], [Hum29a], [MB91] e [MKSG10].

³³⁸Christopher Hansteen (1784-1873). Ver [Han19], [Han25], [Han27]. Ver também [RR14] e [RR15].

parada, medindo exatamente a duração das oscilações. Essa duração depende, em igualdade de circunstâncias, do tamanho do arco de oscilação; mas de tal maneira que não interessando quão pequeno o arco se torne, ela se aproxima de um só limite determinado, chamado por excelência de período de oscilação,³³⁹ ao qual pode ser reduzido a duração do arco de oscilação de fato observado. A intensidade do magnetismo terrestre é assim inversamente proporcional ao quadrado da duração do período de oscilação da mesma agulha [imantada], ou diretamente proporcional ao quadrado do número de oscilações realizadas em um tempo dado; e o resultado se relaciona com a força total, ou com a componente horizontal dessa força total, caso a agulha oscile no plano do meridiano magnético, ao redor de um eixo horizontal, ou caso ela oscile em um plano horizontal, ao redor de um eixo vertical.

É evidente que a admissibilidade desse método baseia-se totalmente na suposição de que o estado magnético da agulha empregada permaneça inalterado. Caso seja utilizada nas experiências uma agulha magnetizada de maneira apropriada feita de um bom aço endurecido cuidadosamente armazenado, e caso essas experiências não ocupem um espaço muito grande nem durem muito tempo, o perigo que pode vir dessa alteração não é de fato considerável; além disso, o observador pode ficar mais tranquilo a esse respeito se, ao retornar ao mesmo local, encontrar o mesmo período de vibração; contudo a experiência nos ensina que não se pode contar com esse resultado; também não pode ser negado que ao utilizar tal prova estamos raciocinando em círculos. De fato, há muito tempo já se sabe que tanto a declinação quanto a inclinação em um mesmo lugar de maneira alguma permanecem imutáveis; sabendo-se que essas duas grandezas, ao longo do tempo, sofrem consideráveis variações progressivas, além de sofrerem variações periódicas diárias e sazonais indicadas por observações precisas. Portanto, não resta dúvida que a intensidade do magnetismo terrestre também deve estar sujeita a essas variações; de fato, as variações periódicas diurnas são percebidas claramente nas observações delicadas. Se, portanto, for encontrado novamente no mesmo local o mesmo período de oscilação após um longo intervalo de tempo, não há absolutamente nenhuma garantia de que isso não se deva a uma compensação acidental pelas mudanças que a intensidade do magnetismo terrestre neste local e o condição magnética da própria agulha sofreram durante esse intervalo de tempo. Mesmo admitindo que por esta circunstância a certeza do método comparativo, na medida em que ocorrem apenas intervalos moderados [de tempo], é apenas um pouco reduzida, mas não totalmente eliminada, é claro que este método perde toda a utilidade nos casos em que é necessário estimar as variações sofridas pela intensidade da força magnética terrestre em um determinado lugar durante um período de tempo muito longo, e que esta questão, que é extremamente interessante do ponto de vista científico, permanece completamente sem resposta se não se pode substituir o método puramente comparativo por outro método, que reduza a intensidade do magnetismo terrestre a unidades³⁴⁰ fixas muito específicas que podem ser verificadas a qualquer momento com a maior precisão e que sejam completamente independentes da individualidade das agulhas utilizadas.

Não é difícil especificar os princípios teóricos nos quais deve ser baseado tal método independente. O período de oscilação de uma dada agulha depende de três grandezas; a saber, a

³³⁹Em alemão: *Schwingungsdauer*. Gauss e Weber utilizavam a antiga definição francesa do período de oscilação t que é a metade da definição inglesa do período de oscilação T , isto é, $t = T/2$, [Gil71a, págs. 154 e 180]. Por exemplo, o período de oscilação para pequenas vibrações de um pêndulo simples de comprimento ℓ é $T = 2\pi\sqrt{\ell/g}$, onde g é a aceleração local de queda livre devida à gravidade terrestre, enquanto que $t = T/2 = \pi\sqrt{\ell/g}$.

³⁴⁰Em alemão: *Einheiten*.

intensidade do magnetismo terrestre, o momento estático do magnetismo livre na agulha,³⁴¹ e o momento de inércia dessa agulha. A última grandeza pode ser prontamente determinada por métodos apropriados; assim, a partir da duração da oscilação é deduzida, não o valor da intensidade do magnetismo terrestre, mas sim o produto dessa grandeza com o momento estático do magnetismo livre na agulha. Porém, é impossível separar esses dois fatores entre si, a não ser que sejam obtidas observações de um outro tipo bem diferente e que envolvam uma combinação diferente dessas duas grandezas. Esse fim pode ser obtido utilizando uma segunda agulha [imantada], a qual, para obter a razão entre essas forças, está sujeita tanto à influência do magnetismo terrestre quanto à influência da primeira agulha. De fato, essas duas ações dependem do estado magnético da segunda agulha; contudo, uma organização apropriada as experiências permite-nos eliminar esse fato, na medida em que quanto maior for a distância entre as duas agulhas, mais a *razão* entre as duas ações se torna dependente disso. Aqui, contudo, é obviamente necessário, ao mesmo tempo, considerar a orientação dos eixos magnéticos das duas agulhas e da linha reta conectando seus centros em relação ao meridiano magnético, assim como o estado magnético da primeira agulha; sendo que não podemos calcular todas essas grandezas a menos que conheçamos a lei de força exercida mutuamente por dois elementos de magnetismo livre, ou, em outras palavras, com a qual, de acordo a se eles possuem a mesma denominação ou denominações diferentes, eles se repelem ou se atraem. Tobias Mayer já havia conjecturado que essa lei era a mesma da gravitação universal, isto é, que a força é inversamente proporcional ao quadrado da distância.³⁴² Coulomb e Hansteen tentaram confirmar experimentalmente essa conjectura;³⁴³ os experimentos contidos neste artigo colocaram isso fora de qualquer dúvida. Mas esta lei refere-se apenas à ação elementar; o cálculo da ação total de um corpo magnético sobre outro torna-se uma tarefa puramente matemática assim que a natureza da distribuição do magnetismo livre nesses corpos é completamente conhecida e, portanto, permanece dependente de sua individualidade particular. Contudo, quanto maior for a distância [entre os corpos que estão interagindo], menor será a influência desses aspectos particulares; e se a distância tornar-se muito grande, podemos, sendo tudo o mais igual, assumir (como segue de fato dessa lei fundamental,) que a ação total é inversamente proporcional ao cubo da distância.³⁴⁴ O produto desse cubo [da distância] com a fração que expressa a razão da ação da primeira agulha e do magnetismo terrestre sobre a segunda agulha tenderá, portanto, na medida em que as distâncias aumentarem continuamente, a um limite determinado. Uma combinação apropriada de observações feitas em várias distâncias selecionadas cuidadosamente, ao serem tratadas matematicamente, tornará conhecido esse limite, a partir do qual pode ser deduzida a *razão* das duas grandezas, sendo que o produto entre elas foi deduzido dos períodos de vibração observados. A combinação desses dois resultados fornecerá obviamente essas duas grandezas.

Os experimentos para comparar as ações do magnetismo terrestre, assim como a ação da primeira agulha sobre a segunda, suspensa por um fio, podem ser realizados de duas maneiras diferentes; desde que a segunda agulha possa ser observada em um estado de movimento ou de repouso. O primeiro procedimento pode ser melhor realizado ao colocar a primeira

³⁴¹Ou seja, o momento magnético dessa agulha imantada.

³⁴²Tobias Mayer (1723-1762). Gauss está se referindo ao trabalho de 1760 de Mayer, [May72]. Ver ainda [Hei82, págs. 83-85] e [Hei99, págs. 91-93].

³⁴³Ver as Notas de rodapé 107 e 338.

³⁴⁴Gauss está se referindo aqui à força exercida por um dipolo magnético ao atuar sobre um polo magnético que está a uma grande distância do dipolo.

agulha no meridiano magnético da segunda agulha, por meio do qual o tempo de vibração da segunda agulha é aumentado ou diminuído, dependendo se os polos [magnéticos] do mesmo tipo ou de tipos diferentes estão se encarando. A comparação do tempo de vibração assim modificado, com o tempo de vibração ocasionado apenas pelo magnetismo terrestre, ou ainda melhor, a comparação de um período aumentado com um período diminuído (devidos às direções opostas da primeira agulha), vão levar prontamente à razão procurada. O segundo procedimento é aquele de colocar a primeira agulha de tal forma que a direção de sua influência sobre a segunda agulha faça um ângulo com o meridiano magnético terrestre; nesse caso o ângulo de desvio em relação ao meridiano magnético, em um estado de equilíbrio, vai levar igualmente a um conhecimento da razão procurada. E aqui novamente é mais vantajoso comparar entre si dois desvios opostos, obtidos com as posições opostas da primeira agulha. A posição mais vantajosa da primeira agulha é ao longo da linha reta traçada através do centro da segunda agulha e perpendicular ao meridiano magnético.³⁴⁵ O primeiro procedimento concorda totalmente com o método proposto alguns anos atrás por Poisson;³⁴⁶ contudo, as experiências feitas por alguns filósofos naturais tentando aplicar aquele procedimento, ou falharam completamente, ou então seus resultados podem ser considerados no melhor dos casos apenas como aproximações imperfeitas.

O autor [ou seja, Gauss] já utilizou esses dois procedimentos de forma variada e verificou que o segundo método é de longe preferível ao primeiro por várias razões.

A real dificuldade consiste nesse aspecto, a saber, que outros elementos que dependem da natureza individual das agulhas afetam não apenas o valor do limite, mas também nas influências observadas. Essa ação é representada por uma série que avança com potências negativas da distância, começando com a terceira potência; na qual, contudo, os termos seguintes tornam-se mais consideráveis na medida em que a distância é menor. Agora esses termos seguintes devem ser eliminados por meio de várias observações; contudo, um breve conhecimento da teoria da eliminação facilmente nos convence de que erros inevitáveis de observação nunca deixarão de ameaçar a exatidão dos resultados, na medida em que aumenta o número de coeficientes a serem eliminados; de tal forma que esse número não precisa ser muito grande para tornar totalmente inúteis os resultados do cálculo. Portanto, não se pode esperar qualquer precisão nos resultados, a não ser que sejam utilizadas distâncias consideráveis que farão com que a série convirja rapidamente, tal que serão necessários apenas alguns termos. Contudo, nesse caso as próprias ações são muito pequenas para serem determinadas com exatidão pelos nossos procedimentos atuais de observação; e assim se explica prontamente o fracasso das experiências feitas até o momento.

Portanto, embora possam parecer fáceis na teoria os métodos de reduzir a intensidade do magnetismo terrestre a unidades absolutas,³⁴⁷ contudo sua aplicação sempre permanecerá precária até que as observações magnéticas tenham alcançado um grau muito maior de precisão do que aquele que possuem até o momento. Foi tendo isso em vista que o autor desenvolveu várias ideias há muito tempo relativas à melhoria de nossas técnicas de observação, esperando confiantemente que as observações magnéticas serão rapidamente desenvolvidas até um grau de perfeição próximo ou igual às observações astronômicas mais delicadas. A expectativa foi correspondida pelo resultado. Dois instrumentos mantidos no Observatório

³⁴⁵Ver a Figura 9.2 na página 136. A primeira agulha, fixa em relação ao solo, é representada pela letra *A* nessa Figura. A segunda agulha é representada pela letra *B* nessa Figura.

³⁴⁶Ver a Nota de rodapé 213 na página 72.

³⁴⁷Em alemão: *absolute Einheiten*.

Astronômico³⁴⁸ [de Göttingen], e que têm sido utilizados para fazer as observações, sendo que várias delas são apresentadas nessa Memória, não deixam nada a desejar, sendo necessário apenas um local conveniente protegido completamente da influência do ferro e das correntes de ar.

Este não é o lugar para uma descrição completa desses aparelhos e suas funções: no entanto, acreditamos que podemos prestar um serviço aos cientistas naturais comunicando os aspectos mais importantes.

O autor tem utilizado normalmente agulhas (caso possamos designar por esse nome barras prismáticas tendo certa intensidade [magnética]) tendo quase 1 pé de comprimento, pesando cada uma ao redor de uma libra.³⁴⁹ Elas são suspensas por um fio não torcido tendo $2\frac{1}{2}$ pés de comprimento, composto de 32 linhas de seda, e assim capaz de suportar até mesmo o dobro desse peso sem se romper. A extremidade superior do fio é giratória, sendo o grau de torção medido por meio de um círculo graduado. Um espelho plano é fixado na extremidade Sul ou Norte da agulha (dependendo se a localidade torna uma ou outra extremidade mais conveniente), sendo que a superfície do espelho pode ser colocada perpendicular ao eixo da agulha por meio de dois parafusos ajustáveis; contudo, não é necessário dar uma atenção exagerada a esse ajuste, já que qualquer desvio pode ser medido bem exatamente pelas próprias observações, sendo levado em conta como erros de colimação. A agulha assim equilibrada é colocada dentro de uma caixa cilíndrica de madeira a qual, além de uma pequena abertura na tampa para a passagem do fio, tem uma abertura lateral maior que é bem mais alta e mais larga do que o espelho já mencionado.

Um teodolito é colocado em frente ao espelho, estando seu eixo vertical no mesmo meridiano magnético que o fio de suspensão, e a uma distância dele de aproximadamente dezesseis pés de Paris.³⁵⁰ O eixo óptico do telescópio no teodolito é ligeiramente superior ao da agulha e é inclinado para baixo no plano vertical do meridiano magnético de modo que seja direcionado para o centro do espelho da agulha.

No tripé do teodolito é fixada uma escala³⁵¹ horizontal de quatro pés de comprimento, dividida em milímetros: ela forma um ângulo reto com o meridiano magnético. Aquele ponto na escala que se encontra em um plano vertical com o eixo óptico do telescópio, e que

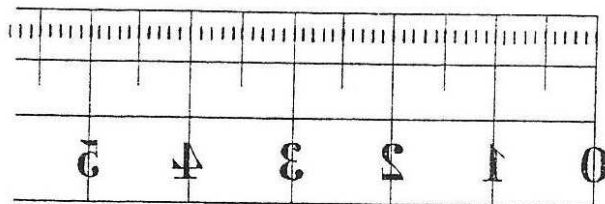
³⁴⁸Em alemão: *Sternwarte*.

³⁴⁹Ou seja, barras com aproximadamente 32 cm de comprimento e uma massa de cerca de 0,45 kg.

³⁵⁰Ou seja, aproximadamente $16 \times 0,3248 \text{ m} = 5,2$ metros. O teodolito é um instrumento de precisão óptico que mede ângulos verticais e horizontais.

³⁵¹Em alemão: *Scale*. Essa palavra pode ser traduzida como escala ou régua. Ela tem pelo menos 1 metro de comprimento é fixada abaixo do teodolito-telescópio. A imagem dela refletida no espelho preso à extremidade da barra magnetizada é observada com o telescópio, ver a Seção 9.3. Coloquei nessa Nota de rodapé uma imagem de uma escala desse tipo que aparece no artigo de 1837 de Weber, [Web37a] com traduções para o inglês em [Web41e], [GW66], [GW39a] e [Web21r]; tradução para o francês em [Web38d]; e com tradução para o português no Capítulo 15, a saber:

Fig. 10.



aqui pode ser chamado de ponto zero por brevidade, é designado por um fio de ouro fino pendurado no centro da objetiva e levado para baixo com um peso. A escala é fixada em uma certa altura tal que uma imagem de uma porção dela possa ser vista no espelho através do telescópio, sendo a ocular ajustada de acordo com isso. No lado oposto da agulha, no mesmo plano vertical, e a uma distância do telescópio igual à distância da imagem, é fixada uma marca, que serve a cada instante para indicar a posição imutável do teodolito.

É agora evidente que se as condições acima forem cumpridas exatamente, a imagem do ponto zero da escala deve aparecer exatamente no eixo óptico do telescópio, e que se um objeto de azimuth conhecido for visível no local do teodolito, com a ajuda deste instrumento a declinação magnética absoluta pode ser obtida imediatamente. Por outro lado, caso as condições sejam apenas parcialmente satisfeitas então, falando de maneira geral, a imagem de um outro ponto da escala, diferente do ponto zero, vai aparecer no eixo óptico; e se a distância horizontal da escala até o espelho tiver sido medida com exatidão, o valor das divisões da escala será facilmente reduzido ao ângulo correspondente, corrigindo dessa maneira o resultado que foi obtido inicialmente. O erro de colimação do espelho pode ser medido com a maior nitidez e facilidade girando a agulha em seu suporte (de modo que o lado superior se torne o lado inferior). Nos dois instrumentos, uma parte ou divisão da escala é aproximadamente igual a 22 segundos [de arco]; intervalo esse que mesmo uma pessoa com pouca prática pode facilmente subdividir em dez partes.

Portanto, com esse procedimento de operação a direção da agulha e suas variações são determinados com a maior precisão possível. Não é de forma alguma necessário sempre esperar até que ela entre em repouso, já que as duas elongações para a direita e para a esquerda podem ser observadas com grande acurácia, e a combinação entre elas, trabalhada apropriadamente, vai indicar o ponto correspondente de repouso com a mesma precisão. Durante o horário matutino, quando as variações diurnas são mais rápidas, esse procedimento pode ser adotado quase que de minuto a minuto.

O procedimento para observar o período das oscilações tem a mesma importância. A passagem do fio vertical no telescópio diante de um ponto fixo da escala (falando apropriadamente, ocorre o oposto), pode, mesmo se o desvio total chegar a apenas alguns minutos, ser observado com tal grau de precisão de forma a nunca deixar qualquer incerteza chegando a um décimo de segundo no tempo. A duração considerável de uma vibração (ao redor de 14 segundos nas agulhas mais intensamente magnetizadas), e os graus lentos com que o arco decresce, oferecem outras vantagens importantes: são necessárias poucas vibrações para nos permitir determinar o tempo de uma vibração com tal precisão que, embora a agulha seja deixada por si própria por uma hora ou mesmo por algumas horas, não resta dúvida na mente do observador em relação ao número de oscilações realizadas durante o intervalo de tempo na sua ausência. Podemos começar com vibrações tão pequenas (mais ou menos do tamanho daquelas em que você costuma parar), que a redução para as vibrações infinitamente pequenas torna-se quase imperceptível; e, contudo, após um intervalo de seis horas ou mais, as vibrações ainda são suficientemente grandes tal que se possa admitir terem sido observados seus começos com toda a precisão necessária.

Nos casos em que anomalias ainda aparecem nas observações (as quais, contudo, são sempre *tão* pequenas, que teriam sido de todo imperceptíveis com os procedimentos anteriores), elas devem ser atribuídas às correntes de ar que, no local onde são feitas as observações, não podiam ser evitadas *de maneira alguma*. Para resolver esse inconveniente, a abertura da caixa poderia ser fechada com um vidro plano; mas não havia nenhum disponível para o autor, além do que isso não poderia ser feito sem que ocorresse uma perda inconveniente de

luz.

Além das vantagens listadas desse método pode ser adicionada uma outra, a saber, que o observador permanece constantemente a uma grande distância da agulha, enquanto que no procedimento antigo sua proximidade em relação a ela era inevitável; de tal forma que, mesmo se estivesse fechada em um recipiente de vidro, ela ainda estaria exposta à influência perturbadora que poderia ser exercida pelo calor do corpo, ou por aquele da lâmpada, pelo ferro ou até mesmo pelo latão que o experimentador poderia estar levando consigo.

A vantagem oferecida por agulhas fortes e pesadas, que o autor usa exclusivamente, é tão óbvia que é incompreensível que apenas agulhas extremamente pequenas tenham sido usadas para a maioria das observações magnéticas, especialmente para obter o período de oscilação. Desde então ele tem utilizado com sucesso uma agulha pesando além de duas libras, e expressa sua convicção que se fossem usadas agulhas de quatro a seis libras, nas quais leves correntes de ar deixariam de exercer qualquer influência perceptível, as observações magnéticas poderiam atingir uma exatidão e precisão definitivamente não inferior às observações astronômicas mais delicadas. De fato seriam necessários fios de suspensão bem mais fortes, sendo que a torção deles produziria uma reação maior; mas isto não é de modo algum um motivo negativo, já que, para bons resultados, a força de torção³⁵² do fio nunca deve ser ignorada, mas sim, o que não tem nenhuma dificuldade, deve ser sempre levada exatamente em consideração.

Para além do propósito principal, os dispositivos descritos também servem outro objetivo que, embora não esteja diretamente relacionado com o propósito principal, pode ser mencionado aqui em poucas palavras. Eles são os galvanômetros mais sensíveis e convenientes tanto para as maiores quanto para as menores intensidades da corrente galvânica, e também não haverá dificuldade em reduzir essas medições a *unidades absolutas*.³⁵³ Para medir as maiores intensidades, só é necessário trazer um único fio condutor a uma considerável distância (ao menos de alguns pés), no meridiano magnético abaixo e acima da agulha; para medir intensidades bem fracas, enrola-se um multiplicador ao redor da caixa contendo a agulha.³⁵⁴ Algumas experiências foram feitas com um multiplicador de 68 voltas, utilizando um comprimento de fio igual a 300 pés. Não é necessário um par de grandes placas [voltaicas]; um par de pequenos botões, ou até mesmo as extremidades de dois fios de metais diferentes mergulhados em água acidificada, produz uma corrente indicada pelo movimento da imagem ao longo de muitas centenas de partes da escala; mas ao usar um par de placas de dimensões bem moderadas, a imagem de toda a escala, tão logo o circuito seja fechado, é vista atravessando o campo de visão do telescópio. É óbvio que por esse método as correntes galvânicas podem ser medidas com uma facilidade e grau de precisão inalcançáveis pelos métodos trabalhosos utilizados até o momento por meio dos tempos de vibração observados; e é literalmente verdade que por esse procedimento podemos seguir de segundo a segundo a diminuição de intensidade da corrente galvânica que, como é bem conhecido, é mais rápida no início.³⁵⁵ Se, além disso, ao invés de uma única agulha, forem utilizadas duas agulhas (astáticas),³⁵⁶ nenhuma força eletromagnética será considerada tão pequena que não possa

³⁵²Em alemão: *Torsionskraft*. Essa expressão pode ser traduzida como “força de torção”, “torção” ou “torque”.

³⁵³Em alemão: *absolute Maasse*.

³⁵⁴Ver a Nota de rodapé 91 na página 38.

³⁵⁵Ou seja, a intensidade de uma corrente de um circuito ligado a uma bateria elétrica diminui mais rapidamente logo que o circuito é fechado do que depois de algum tempo que o circuito esteja fechado.

³⁵⁶O adjetivo “astática” é utilizado na física com o significado de não ter qualquer tendência a assumir uma posição ou direção definida. Uma agulha astática pode ser uma combinação de duas agulhas magnetizadas paralelas possuindo o mesmo momento magnético, mas com seus polos voltados para lados opostos, isto é, em

ser medida com a maior precisão. Portanto, aqui abre-se um amplo campo ao cientista para as investigações mais interessantes.

No que diz respeito ao conteúdo principal do tratado, ou seja, o desenvolvimento da teoria matemática; vários métodos próprios do autor, por exemplo, para determinar o momento de inércia da agulha vibratória, independentemente da suposição de uma forma regular; as experiências efetuadas para estabelecer a lei fundamental mencionada anteriormente para as ações magnéticas; finalmente, as experiências para determinar o valor da intensidade do magnetismo terrestre neste local: devemos, portanto, remeter para o próprio tratado.³⁵⁷ Apenas os últimos resultados serão resumidos aqui.

Ainda antes da montagem do aparelho descrito, o autor tinha efetuado um grande número de experiências com agulhas das mais variadas dimensões, até ao peso de meio lot,³⁵⁸ cujos resultados são todos bastante próximos aos de outros posteriores, mas que, por se basearem em ferramentas muito imperfeitas e por ser impossível obter uma grande precisão com agulhas pequenas, não merecem mais ser preservados. Por outro lado, todos os resultados obtidos até agora com a ajuda do aparelho descrito para a intensidade da componente horizontal do magnetismo terrestre podem encontrar um lugar aqui.³⁵⁹

I.	21 de maio [de 1832]	1,7820
II.	24 de maio	1,7694
III.	4 de junho	1,7713
IV.	24-28 de junho	1,7625
V.	23 e 24 de julho	1,7826
VI.	25 e 26 de julho	1,7845
VII.	9 de setembro	1,7764
VIII.	18 de setembro	1,7821
IX.	27 de setembro	1,7965
X.	15 de outubro	1,7860

Foram adotadas como unidades o milímetro, o miligrama e o segundo. A maneira *como* a medida da intensidade foi determinada por essas unidades não pode ser especificada aqui: os números, contudo, permanecem os mesmos, desde que a unidade de espaço e a de peso (falando apropriadamente, a unidade de massa), sejam modificadas na mesma proporção. Essas experiências variam parcialmente no que diz respeito ao maior ou menor grau de cuidado com o qual foram conduzidas, parcialmente com relação aos lugares onde foram realizadas, e parcialmente no que diz respeito às agulhas empregadas.

As experiências VII, VIII e IX foram em todos os aspectos realizadas com toda a precisão permitida pelos instrumentos, sendo as distâncias medidas com precisão microscópica. Nas experiências IV, V, VI e X foram realizadas algumas operações com muito menos cuidado; sendo os três primeiros experimentos ainda menos perfeitos nesse aspecto.

uma orientação anti-paralela. Esse arranjo protege o sistema de qualquer influência do magnetismo terrestre. Ele foi inventado por Ampère, [Amp21] e [LA98]. Um sistema anterior composto por uma única agulha magnetizada também havia sido criado por Ampère, [Amp20c, pág. 198] com tradução para o português em [CA09b, pág. 133], [Amp20a, pág. 239] e [Amp20b, pág. 2]. Ver também [AC15, pág. 57].

³⁵⁷O tratado principal, do qual esse artigo é apenas um resumo, encontra-se traduzido no Capítulo 12.

³⁵⁸Em alemão: *Loth*. Um lot, antigamente escrito como loth, é uma antiga unidade de massa usada em vários países de língua alemã desde a idade média até o início do século XX. Ele corresponde a 0,0146 kg.

³⁵⁹Ver a Seção 9.2 para a conversão desses valores absolutos da componente horizontal da força magnética terrestre em termos da componente horizontal do campo magnético utilizado hoje em dia nos livros didáticos.

As agulhas utilizadas nas primeiro oito experiências não foram as mesmas, mas elas tinham aproximadamente o mesmo tamanho e peso (entre 400 e 440 gramas); a agulha principal na experiência X pesava 1062 gramas; já a experiência IX foi feita com uma agulha bem menor (peso de 55 gramas), apenas com o objetivo de determinar o grau de precisão que pode ser alcançado com uma agulha de dimensões tão pequenas, sendo similares todas as outras precauções: portanto, o resultado dessa experiência não é tão confiável.

As experiências VII a X foram feitas em um mesmo local no Observatório Astronômico; as anteriores em outros lugares, parte no Observatório e parte na sala de estar do autor. Portanto, resultados perfeitamente puros não podem ser deduzidos dessas últimas experiências, já que o ferro nesses locais, particularmente no Observatório, ao tornar-se magnético através do magnetismo da Terra, vai necessariamente atuar na agulha, confundido sua influência com a influência do magnetismo terrestre. De fato, tais lugares foram sempre escolhidos, nos quais não haviam massas fixas ou móveis de ferro que estivessem *próximas*; contudo, mesmo as massas de ferro distantes certamente não ficaram sem influência. Porém, ao dar uma analisada nos diferentes resultados, parece provável que em nenhum desses locais a modificação do magnetismo terrestre ocasionado por influências externas tenha excedido a centésima parte do todo. Entretanto, um resultado que seja realmente puro e apropriado à acuidade do próprio método só pode ser obtido em um local separado, onde todo o ferro foi completamente removido.

Para obter a intensidade da força *total* do magnetismo terrestre, os números obtidos devem ser multiplicados pela secante da inclinação. O autor pretende no futuro tratar também desse elemento de acordo com métodos particulares; enquanto isso ele menciona apenas que em 23 de junho encontrou $68^{\circ} 22' 52''$ com o inclinômetro³⁶⁰ da coleção de instrumentos da Universidade, um resultado que possivelmente pode ser alterado em vários minutos [de arco] por outras observações, já que a observação foi feita no Observatório Astronômico estando, portanto, ao alcance de interferências locais.

³⁶⁰Em alemão: *Inclinatorium*. O inclinômetro, inclinatório, ou bússola de inclinação, é um instrumento para medir o ângulo de inclinação de uma bússola em relação à horizontal. Ele consiste essencialmente em uma agulha magnética que pode girar em um círculo vertical graduado ao redor de um eixo horizontal passando pelo centro de gravidade da agulha.

Capítulo 11

Introdução ao Artigo de 1833 de Gauss

A. K. T. Assis³⁶¹

O trabalho de Gauss sobre a medição absoluta da força magnética terrestre foi anunciado com um resumo do artigo completo na *Königlichen Societät der Wissenschaften zu Göttingen* (Sociedade Real de Ciências de Göttingen) em dezembro de 1832, ver o Capítulo 10. O artigo completo forma a base do sistema absoluto de unidades. Ele foi lido na Sociedade Real de Ciências de Göttingen em 15 de dezembro de 1832.

O artigo original em latim foi publicado apenas em 1841, embora ele tenha circulado em pequena edição já em 1833.³⁶² Já foram publicadas várias traduções. Existem duas versões em alemão, uma traduzida por J. C. Poggendorff e publicada em 1833, a segunda traduzida por A. Kiel com notas de E. Dorn e publicada em 1894; uma versão em francês por F. J. D. Arago (1786-1853) publicada em 1834; duas versões em russo, uma por A. N. Drašusov publicada em 1836 e outra de A. N. Krylov publicada em 1952; uma versão em italiano de P. Frisiani publicada em 1837; um resumo em inglês foi publicado em 1935, com uma tradução completa em inglês de S. P. Johnson (1995) que foi publicada em 2003 e outra revisada e com Notas adicionais publicada em 2021; além de uma versão em português publicada em 2003.³⁶³

De acordo com Merzbacher,³⁶⁴ pelo menos até 1984 nunca foram publicadas traduções de nenhum trabalho de Gauss para o português nem para o espanhol. Com esta tradução em português desse trabalho de Gauss espera-se contribuir para superar esta deficiência.

Embora o artigo original tenha sido publicado apenas em 1841, estou considerando aqui que ele tornou-se conhecido em 1833, já que a versão original em latim circulou nesse ano em pequena edição, além do fato que uma tradução completa para o alemão também foi publicada em 1833.³⁶⁵

³⁶¹Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

³⁶²[Gau41b] e [Rei19].

³⁶³[Gau33b], [Gau34c], [Gau36a], [Gau39b], [Gau94], [Gau35], [Gau52], [Gau75], [Gau03], [Gau21e] e [Ass03b]. Ver ainda [Mer84].

³⁶⁴[Mer84, pág. 323].

³⁶⁵[Gau33b], [Gau41b] e [Rei19].

Capítulo 12

[Gauss, 1833] Medição Absoluta da Força Magnética Terrestre

Carl Friedrich Gauss^{366,367}

[O tratado “*Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata*” foi lido por *Gauss* na *Göttingen Gesellschaft der Wissenschaften* (Sociedade Real de Ciências de Göttingen) em 15 de dezembro de 1832, sendo publicada no Volume 8 dos Tratados dessa Sociedade, págs. 3-44.³⁶⁸

A Tradução do latim para o alemão foi feita pelo Diretor de Escola Dr. *Kiel* em Bonn. Ela foi editada por E. Dorn, Leipzig, Wilhelm Engelmann Verlag, 1894.]³⁶⁹

Para a determinação completa da força magnética terrestre em uma certa localização são necessários três elementos: o desvio (declinação) ou o ângulo entre o plano (vertical) no qual atua a força e o plano meridiano [geográfico]; a inclinação da direção [desta força] em relação ao plano horizontal; e finalmente o terceiro, a magnitude (intensidade). A declinação, que é para ser considerada como o elemento mais importante em todas as aplicações da navegação e da geodésia, tem atraído a atenção de astrônomos e físicos desde o início, os quais já por um século têm dado sua atenção constante também para a inclinação. O terceiro elemento, a intensidade da força magnética terrestre, ao contrário, o qual certamente é um assunto de igual valor para a ciência, permaneceu totalmente desprezado até épocas mais recentes. A Humboldt deve-se o mérito, entre tantos outros, de ter sido o primeiro a direcionar sua atenção para este assunto, sendo que em suas viagens juntou uma grande quantidade de observações relativas à intensidade relativa do magnetismo, que forneceu o resultado de um aumento contínuo desta intensidade desde o equador magnético em direção

³⁶⁶A versão em português apresentada nesse livro é baseada nas traduções em alemão e inglês do texto em latim, [Gau33b], [Gau94], [Gau03] e [Gau21e]. Ela apresenta melhorias em relação à versão de 2003, [Ass03b].

³⁶⁷As Notas de Carl Friedrich Gauss são representadas por [Nota de Gauss:]; as Notas de E. Dorn, o editor da tradução em alemão do trabalho de Gauss publicado em 1894, são representadas por [Nota de Dorn:]; todas as outras Notas são de minha autoria.

³⁶⁸[Gau41b].

³⁶⁹Essa Nota apareceu na publicação de 1894 contendo a tradução em alemão desse trabalho, [Gau94, pág. 49].

ao polo.³⁷⁰ Muitos físicos seguiram os passos deste grande cientista e já juntaram uma quantidade tão grande de determinações que Hansteen, muito respeitado por seu conhecimento do magnetismo terrestre, publicou recentemente um compreensivo mapa isodinâmico.³⁷¹

O método empregado em todas estas pesquisas consiste em observar o intervalo de tempo que uma mesma agulha magnetizada leva para realizar o mesmo número de oscilações em locais diferentes, ou então o número de oscilações da mesma agulha no mesmo intervalo de tempo [em locais diferentes], e se assume ser a intensidade [magnética terrestre nesse local] proporcional ao quadrado do número de oscilações em um certo intervalo de tempo. Se for a agulha de inclinação suspensa no centro de gravidade por meio de um eixo horizontal perpendicular ao meridiano magnético, que se deixa oscilar, as intensidades totais [do magnetismo terrestre] são comparadas entre si desta forma; por outro lado, se se deixar uma agulha horizontal oscilar em torno de um eixo vertical, serão determinadas as intensidades da componente horizontal da força [magnética terrestre]. O último modo de observação leva a uma precisão maior, e os resultados que surgem daqui podem, após determinar-se a inclinação, ser facilmente relacionados às intensidades totais.

É evidente que a confiabilidade deste procedimento depende da suposição que a distribuição do magnetismo livre nas partículas da agulha usada nesta comparação permanece invariável durante as experiências individuais; isto é, se a força magnética da agulha tivesse sofrido qualquer tipo de enfraquecimento ao longo do tempo, ela oscilaria subsequentemente mais lentamente, e o observador, que não tem conhecimento de tal alteração, atribuiria um valor muito baixo à magnitude do magnetismo terrestre para a localização subsequente. Se as experiências ocorrem apenas em um intervalo de tempo moderado e se a agulha é feita de aço bem temperado e magnetizada cuidadosamente, não é para ser esperado um enfraquecimento significativo da força; além disto, a incerteza será ainda mais diminuída, se várias agulhas são utilizadas como comparação; finalmente, esta suposição será mais confiável se for verificado, após retornar ao local inicial, que a duração da oscilação da agulha não modificou-se. Contudo quaisquer que sejam as precauções, dificilmente pode ser evitado um enfraquecimento lento da força da agulha e, portanto, dificilmente será esperada tal concordância após uma longa ausência. Logo, ao comparar intensidades para locais muito distantes sobre a Terra, não pode ser obtida uma precisão com o grau que desejamos.

De resto, esta desvantagem no método é menos importante desde que seja apenas uma questão de comparar intensidades simultâneas ou intensidades correspondentes a intervalos de tempo não distantes um do outro. Mas como a experiência nos ensinou que tanto a declinação quanto a inclinação sofrem mudanças contínuas em um certo local, que tornam-se muito grandes após muitos anos, não pode ser duvidado que a intensidade do magnetismo terrestre está sujeita a mudanças seculares análogas. É evidente, tão logo surge esta questão, que o método descrito acima perde toda utilidade. E contudo seria altamente desejável para o progresso da ciência que esta questão altamente importante fosse completamente resolvida, o que não pode ocorrer se um outro método não substitui este puramente relativo, e se a intensidade do magnetismo terrestre não for reduzida a unidades fixas e a medida independente.³⁷²

Não é difícil especificar os princípios teóricos fundamentais nos quais tem de ser baseado este método a tanto tempo desejado. O número de oscilações efetuado por uma agulha em um certo intervalo de tempo depende da intensidade do magnetismo terrestre assim

³⁷⁰Ver a Nota de rodapé 337 na página 138.

³⁷¹Ver a Nota de rodapé 338 na página 138.

³⁷²Em alemão: *auf feststehende Einheiten und unabhängige Maasse zurückführt.*

como do estado da agulha, a saber, do momento estático dos elementos de magnetismo livre contidos nela³⁷³ e do seu momento de inércia. Como este momento de inércia pode ser obtido sem maiores dificuldades, fica evidente que a observação das oscilações nos forneceria o produto da intensidade do magnetismo terrestre com o momento estático do magnetismo da agulha. Mas estas duas grandezas não podem ser separadas, se não são feitas adicionalmente observações de um outro tipo que fornecem uma relação diferente entre elas. Este objetivo pode ser alcançado se uma segunda agulha é adicionada como auxiliar e exposta à influência do magnetismo terrestre e da primeira agulha, com o objetivo de determinar a relação destas duas forças entre si.³⁷⁴ Cada uma destas duas ações dependerá obviamente da distribuição do magnetismo livre na segunda agulha, mas a segunda ação vai depender além disto do estado da primeira agulha, da distância entre seus pontos médios,³⁷⁵ da orientação da linha reta conectando seus pontos médios, e finalmente das leis de atração e repulsão magnética. Tobias Mayer foi o primeiro a sugerir que esta lei está em concordância com a lei da gravitação,³⁷⁶ já que essas forças também variam com o quadrado da distância; as experiências de Coulomb e Hansteen forneceram grande plausibilidade a esta sugestão,³⁷⁷ e as últimas experiências [descritas nesse trabalho Gauss e Weber] a elevaram acima de qualquer suspeita. Mas é bom notar que esta lei se refere apenas aos elementos individuais do magnetismo livre; a força total de um corpo magnético será completamente diferente e, a distâncias muito grandes, será aproximadamente proporcional ao inverso do cubo da distância,³⁷⁸ como pode ser deduzido por esta própria lei, de tal forma que, outras condições sendo iguais, a ação da agulha multiplicada pelo cubo da distância, dadas distâncias cada vez maiores, aproxima-se de um valor limite. Este valor limite, tão logo um comprimento definido seja tomado como unidade, e as distâncias sejam expressas numericamente, será do mesmo tipo que a ação da força terrestre,³⁷⁹ e comparável com ela.

Através de experiências preparadas e realizadas apropriadamente pode-se determinar o valor limite desta relação. Como o limite contém apenas o momento estático do magnetismo da primeira agulha, então será obtida a razão deste momento pela intensidade do magnetismo terrestre, se essa [razão] é agora comparada com o produto já obtido destas grandezas, ela servirá para eliminar este momento estático e fornecerá o valor da intensidade do magnetismo terrestre.

Com relação às possíveis maneiras de testar as ações do magnetismo terrestre e da primeira agulha sobre a segunda agulha, há duas possibilidades, pois a segunda agulha pode ser observada em estado de movimento ou então em estado de equilíbrio. O primeiro método consiste em observar as oscilações desta segunda agulha enquanto a ação do magnetismo terrestre é associada com a ação da primeira agulha. Esta primeira agulha tem de ser colocada a uma distância conveniente tal que seu eixo esteja sobre o meridiano magnético passando através do ponto médio da agulha oscilante. Dessa maneira as oscilações são aceleradas ou retardadas, dependendo se os polos opostos ou do mesmo tipo estão apontando

³⁷³Em alemão: *von dem statischen Momente der in jener enthaltenen Elemente des freien Magnetismus*. Gauss está se referindo aqui ao momento magnético da agulha.

³⁷⁴Ou seja, com a utilização da segunda agulha Gauss vai mostrar que pode ser determinada a razão entre a intensidade do magnetismo terrestre e o momento magnético da primeira agulha.

³⁷⁵Ou seja, da distância entre os pontos médios das duas agulhas imantadas.

³⁷⁶Ver a Nota de rodapé 342 na página 140.

³⁷⁷Ver as Notas de rodapé 107 e 338.

³⁷⁸Gauss está se referindo aqui à força exercida por um dipolo magnético ao atuar sobre um polo magnético que está a uma grande distância do dipolo.

³⁷⁹Isto é, da força gravitacional da Terra.

em direção um ao outro, e a comparação entre si dos tempos de oscilação para cada uma das duas posições da primeira agulha, ou do tempo de oscilação de uma das duas posições com o tempo de oscilação que (após distanciar a primeira agulha) acontece devido apenas à ação do magnetismo terrestre, nos mostrará a razão desta força para a ação da primeira agulha. No segundo método, a primeira agulha é colocada de tal forma que a direção de sua força exercida na localização da segunda agulha suspensa livremente, forma um ângulo (por exemplo, um ângulo reto) com o meridiano magnético;³⁸⁰ desta forma a segunda agulha será desviada para fora do meridiano magnético, e a partir da grandeza deste desvio, pode-se inferir a razão entre a força magnética terrestre e a ação da primeira agulha.

A propósito, o primeiro método coincide essencialmente com aquele proposto há alguns anos por Poisson.³⁸¹ Mas as experiências efetuadas por certos físicos de acordo com esta formulação, pelo menos até onde sei, falharam totalmente, ou podem no máximo ser consideradas como aproximações imperfeitas.

A dificuldade real reside no fato de que a partir das influências observadas da agulha a distâncias moderadas, pode-se calcular um limite que baseia-se, essencialmente, em uma distância infinitamente grande, e que as eliminações necessárias para este fim são perturbadas pelos menores erros nas observações, na verdade são tornadas totalmente inúteis, quanto mais estas [quantidades] desconhecidas, que dependem da condição específica da agulha, têm de ser eliminadas. O cálculo pode apenas ser reduzido a um número pequeno de incógnitas, contudo, quando as influências ocorrem a distâncias que tornam-se bem grandes em relação ao comprimento da agulha, elas tornam-se muito pequenas. Mas para medir influências tão pequenas os procedimentos práticos empregados até agora são insuficientes.

Reconheci que tinha de devotar meus esforços acima de tudo em descobrir novos expedientes através dos quais os alinhamentos da agulha pudessem ser observados e medidos com uma precisão muito maior do que antes. Os esforços levados a cabo para este fim, que foram realizados durante vários meses, e nos quais fui auxiliado por Weber de muitas formas,³⁸² levaram ao objetivo desejado, ao ponto de que eles não apenas não desapontaram as expectativas, mas as excederam de muito. E nada mais resta a ser desejado com o objetivo de tornar a precisão das experiências equivalente à acuidade das observações astronômicas, a não ser um local totalmente protegido da influência do ferro em suas proximidades e das correntes de ar. Dois equipamentos foram colocados à nossa disposição que são reputados tanto pela simplicidade quanto pela precisão que permitem. Deixo a descrição destes equipamentos para uma outra ocasião, enquanto submeto aos físicos no presente tratado as experiências efetuadas até o momento em nosso Observatório Astronômico³⁸³ com o objetivo de determinar a intensidade do magnetismo terrestre.³⁸⁴

³⁸⁰Ver a Figura 9.2 na página 136. A primeira agulha, fixa em relação ao solo, é representada pela letra *A* nessa Figura. A segunda agulha é representada pela letra *B* nessa Figura.

³⁸¹Ver a Nota de rodapé 213 na página 72.

³⁸²Wilhelm Eduard Weber (1804-1891).

³⁸³Em alemão: *Sternwarte*.

³⁸⁴Uma breve descrição dos instrumentos utilizados por Gauss apareceu no resumo de 1832 desse trabalho, ver a página 142 desse livro em português. Uma discussão geral desse método pode ser encontrado no Capítulo 59 (Medição da intensidade horizontal do magnetismo terrestre pelo método de Gauss) do livro de Friedrich Kohlrausch, [Koh83a].

12.1

Para explicar os fenômenos magnéticos assumimos dois fluidos magnéticos: a um chamamos de Norte e ao outro de Sul. Supomos que os elementos de um fluido atraem aqueles do outro fluido e que por outro lado dois elementos do mesmo fluido repelem-se mutuamente, e que cada uma dessas forças varia na razão inversa do quadrado da distância. Será mostrado abaixo que a própria exatidão desta lei foi confirmada por nossas observações.

Estes fluidos não ocorrem independentemente, mas apenas em associação com as partículas ponderáveis³⁸⁵ dos corpos que admitem o magnetismo, e suas ações manifestam-se ou quando eles colocam os corpos em movimento ou quando evitam ou transformam o movimento que seria gerado por outras forças, por exemplo pela força da gravidade, agindo sobre estes corpos.

*Portanto a ação de uma dada quantidade de fluido magnético sobre uma dada quantidade seja do mesmo fluido ou do fluido oposto, a uma dada distância, é comparável à ação de uma força motriz dada, isto é, à ação de uma dada força aceleradora sobre uma dada massa, e como os próprios fluidos magnéticos só podem ser conhecidos através das ações que eles próprios geram, essas últimas ações têm de servir para medir os primeiros.*³⁸⁶

Contudo, para que sejamos capazes de reduzir esta medida a conceitos definidos, acima de tudo têm de ser estabelecidas unidades para três tipos de grandezas, a saber, a unidade de distância, a unidade de massa ponderável, e a unidade de aceleração. Para a terceira, pode ser assumida a gravidade no local da observação. Se, contudo, isto não for conveniente, a unidade de tempo também tem de entrar, e para nós será = 1 a aceleração que, na unidade de tempo, produz uma mudança de velocidade do corpo na direção de seu movimento que é equivalente à unidade.

Correspondentemente, a unidade da quantidade de fluido Norte será aquela cuja força repulsiva em uma outra quantidade igual a ela separada pela unidade de distância é = 1 [unidade] da quantidade de força motriz, isto é, a ação de uma força aceleradora = 1 sobre uma massa = 1; o mesmo será verdadeiro para uma unidade da quantidade de fluido Sul. Nesta definição claramente o fluido ativo, assim como aquele que está sujeito à ação, têm de ser pensados como, fundamentalmente, concentrados em pontos físicos. Além disto, contudo, tem de ser assumido que a atração entre quantidades dadas de tipos diferentes de fluidos a uma dada distância é igual à repulsão entre as mesmas quantidades do mesmo tipo de fluido. Portanto a força de uma quantidade m do fluido magnético Norte sobre uma quantidade m' do mesmo fluido a uma distância r (cada um dos dois fluidos sendo assumidos como concentrados em pontos) será expressa como $\frac{mm'}{rr}$, ou é equivalente a uma força motriz = $\frac{mm'}{rr}$, que age na direção do primeiro em direção ao segundo fluido, e evidentemente esta fórmula vale em geral quando, como daqui para a frente queremos estipular, uma quantidade do fluido Sul será considerada como negativa, e um valor negativo da força $\frac{mm'}{rr}$ significará atração.

Portanto se quantidades iguais de fluido Norte e Sul são encontradas simultaneamente em um ponto físico, nenhuma ação surgirá. Contudo, se as quantidades são desiguais, apenas o excesso de uma, que queremos chamar de magnetismo livre (positivo ou negativo), será levado em consideração.

³⁸⁵Em alemão: *wägbaren Theilchen*. Ou seja, partículas que possuem peso. Essa expressão pode ser traduzida como partículas ponderáveis, pesadas, pesáveis ou com peso.

³⁸⁶Isto é, o valor da força medida tem de servir para estimar as quantidades de fluido magnético que estão interagindo.

12.2

A estas precondições fundamentais temos de adicionar uma outra, que é sempre confirmada pela experiência, a saber, que todo corpo no qual estão presentes fluidos magnéticos sempre contém uma quantidade igual de cada um dos dois [fluidos]. A experiência mostra até mesmo que esta suposição é para ser estendida às menores partículas deste corpo que ainda podem ser diferenciadas por nossos sentidos. Contudo, de acordo com o que enfatizamos no final da Seção anterior, uma ação só pode surgir desde que ocorra uma separação dos fluidos, de tal forma que temos de necessariamente assumir que isto ocorre através de intervalos tão pequenos que são inacessíveis a nossas medidas.

Um corpo magnetizado tem de ser concebido então como a união de inúmeras partículas, das quais cada uma contém uma certa quantidade do fluido magnético Norte e uma quantidade igualmente grande do Sul, especificamente, de tal forma que eles estão ou homogeneamente misturados (o magnetismo é latente), ou sofreram uma maior ou menor separação (o magnetismo está desenvolvido), uma separação, contudo, que nunca pode envolver uma transferência de fluido de uma partícula para a outra. Não faz diferença se assumirmos que uma maior separação origina-se de uma maior quantidade de fluido liberado ou de um maior espaçamento entre eles. Mas é evidente que além do tamanho da separação, sua direcionalidade tenha de ser levada em conta simultaneamente, pois é de acordo a se esta [direcionalidade] está ou não em conformidade nas diferentes partículas do corpo, que pode surgir uma ação total maior ou menor com relação aos pontos fora do corpo.

Contudo, qualquer que seja a distribuição de magnetismo livre dentro de um corpo, sempre pode-se colocar em seu lugar como resultado de um teorema geral, de acordo com uma lei específica, uma distribuição diferente sobre a superfície do corpo, que exerce exatamente a mesma força externa que a primeira distribuição, de tal forma que um elemento de fluido magnético situado em qualquer lugar do exterior sofre exatamente a mesma atração ou repulsão tanto da distribuição real de magnetismo dentro do corpo, quanto da distribuição pensada como estando em sua superfície.^{387,388} A mesma ficção pode ser estendida a dois corpos os quais, de acordo com a proporção de magnetismo livre desenvolvida neles, agem um sobre o outro, de tal forma que para cada um deles a distribuição imaginada como estando sobre suas superfícies pode substituir a distribuição interna real. Desta forma pode-se finalmente dar um sentido verdadeiro à maneira usual de falar que, por exemplo, atribui exclusivamente um magnetismo Norte a uma extremidade de uma agulha magnetizada, e um magnetismo Sul à outra [extremidade], pois é evidente que este modo de falar não está em harmonia com o princípio enunciado acima, o qual é exigido incondicionalmente por outros fenômenos. Mas pode ser suficiente ter dito isto de passagem, discutiremos o próprio princípio mais amplamente em uma outra ocasião, pois ele não é necessário para nossos objetivos atuais.

12.3

O estado magnético de um corpo consiste na relação da distribuição de magnetismo livre em suas partículas individuais. Com relação à variabilidade deste estado, percebemos uma diferença essencial entre os diferentes corpos magnetizáveis. Em alguns, por exemplo em ferro

³⁸⁷[Nota de Dorn:] Conferir Gauss, *Allgemeine Lehrsätze ...*, Seção 36. *Obras* de Gauss, Vol. V, pág. 240 (também os *Clássicos* de Ostwald, Número 2, pág. 49).

³⁸⁸[Gau40, pág. 240 do Vol. V das *Obras* de Gauss] com tradução para o inglês em [Gau43, pág. 195].

doce, este estado modifica-se imediatamente como resultado da aplicação da menor força, e se esta força cessa, [o corpo] retorna a seu estado anterior. Em contraste com isto, em outros [corpos], especialmente no aço temperado, a força tem de ter atingido uma certa grandeza antes que ela possa gerar uma mudança perceptível no estado magnético, e se esta força cessa, o corpo permanece em seu estado transformado, ou então ao menos ele não retorna completamente para seu estado anterior. Portanto, em corpos do primeiro tipo as partículas do fluido magnético ordenam-se de tal forma que existe um completo equilíbrio entre as forças magnéticas que originam-se parcialmente dos próprios corpos e parcialmente de fontes externas, ou ao menos o estado não diferencia-se apreciavelmente deste que acabamos de descrever. Em corpos do segundo tipo, ao contrário, o estado magnético pode ser duradouro mesmo sem haver um equilíbrio completo entre estas forças [magnéticas], desde que forças externas mais fortes permaneçam distantes. Mesmo se a fonte deste fenômeno ainda é desconhecida, ela pode contudo ser representada como se as partes ponderáveis de um corpo do segundo tipo opusessem ao movimento dos fluidos magnéticos associados com elas um obstáculo similar ao atrito, uma resistência que no ferro doce é totalmente inexistente, ou então é apenas muito pequena.

Nas pesquisas teóricas estes dois casos exigem um tratamento totalmente diferente; mas neste tratado lidaremos apenas com corpos do segundo tipo. Nas experiências que queremos mencionar, será uma hipótese fundamental a imutabilidade do estado dos corpos individuais, e portanto tem que se tomar cuidado durante o período das experiências de evitar aproximar demais outros corpos que podem alterar este estado.

Contudo, existe uma fonte certa de mudança em relação à qual os corpos do segundo tipo também estão sujeitos, a saber, o calor. A experiência nos ensina indubitavelmente que o estado magnético de um corpo muda com sua temperatura, contudo de tal forma que, se o corpo não for excessivamente aquecido, ele retorna a seu estado magnético anterior quando volta à temperatura anterior. Essa dependência deve ser determinada por experimentos adequados e, se as operações pertencentes a um experimento forem realizadas em temperaturas diferentes, elas devem, acima de tudo, ser reduzidas à mesma temperatura.

12.4

Independentemente das forças magnéticas mútuas que observamos serem exercidas por corpos que estão suficientemente próximos, uma outra força age sobre os fluidos magnéticos que, como manifesta-se em todos lugares sobre a Terra, a atribuímos ao próprio globo e a chamamos de magnetismo terrestre. Esta força expressa-se de forma dual. Corpos do segundo tipo no qual o magnetismo é induzido são, se apoiados no centro de gravidade, girados ao longo de uma direção definida. Em corpos do primeiro tipo, ao contrário, os fluidos magnéticos são automaticamente separados por esta força, uma divisão que pode ser tornada bem perceptível se escolhermos corpos de forma apropriada e os colocamos em um local apropriado. Os dois fenômenos são explicados pela interpretação de que em um local arbitrário esta força impele o fluido magnético Norte em uma direção definida e, por outro lado, impele o fluido magnético Sul com uma força igual na direção oposta. Sempre é para ser entendida a direção da primeira [força] quando falamos da direção do magnetismo terrestre; portanto ela será determinada tanto pela inclinação em relação ao plano horizontal, quanto pelo desvio do plano vertical no qual ela age em relação ao plano meridiano [geográfico]; sendo este plano vertical [no qual atua a força magnética terrestre] chamado de plano meridiano magnético. Contudo, a intensidade do magnetismo terrestre é para ser medida pela força motriz que ela

exerce sobre a unidade de fluido magnético livre.

Esta força é não apenas diferente em diferentes lugares sobre a Terra, mas também variável no mesmo local ao longo dos séculos e dos anos, assim como ao longo das décadas e das horas. Esta mutabilidade já é de fato há muito tempo conhecida no que diz respeito à direção; mas com relação à intensidade até o momento só foi possível observar isto ao longo das horas de um dia, pois não tínhamos nenhum meio apropriado de observar isto em períodos de tempo maiores. A redução da intensidade à unidade absoluta³⁸⁹ fornecerá no futuro um remédio para esta deficiência.

12.5

Com o objetivo de calcular a ação do magnetismo terrestre sobre corpos magnéticos do segundo tipo (daqui para a frente estes são os únicos tipos a serem considerados), concebe-se este corpo como dividido em partes infinitesimalmente pequenas; seja dm o elemento de magnetismo livre em uma partícula³⁹⁰ cujas coordenadas em relação a três planos fixos no corpo, perpendiculares entre si, sejam designadas por x , y , z . Consideramos os elementos do fluido Sul como sendo negativos. Então é claro, inicialmente, que a integral considerada para todo o corpo (e até mesmo para toda parte mensurável do corpo), é dada por $\int dm = 0$. Queremos ainda designar $\int xdm = X$, $\int ydm = Y$ e $\int zdm = Z$, cujas grandezas significam os momentos do magnetismo livre³⁹¹ em relação aos três planos ortogonais ou em relação aos eixos perpendiculares a eles. Com a suposição de que a é uma grandeza constante arbitrária, vem que $\int (x-a)dm = X$. Logo é evidente que o momento [magnético] em relação a um eixo dado depende apenas de sua direção, mas não de sua origem. Se traçarmos um quarto eixo através da origem de coordenadas, formando com os três primeiros [eixos] os ângulos A , B , C , o momento do elemento dm em relação a este eixo será $(x \cos A + y \cos B + z \cos C)dm$, e além disto o momento do magnetismo livre no corpo como um todo será

$$= X \cos A + Y \cos B + Z \cos C = V .$$

Se assumirmos que

$$\sqrt{(XX + YY + ZZ)} = M$$

e

$$X = M \cos \alpha , \quad Y = M \cos \beta , \quad Z = M \cos \gamma ,$$

e se traçarmos um quinto eixo formando os ângulos α , β , γ com os três primeiros eixos, e formando com o quarto [eixo] um ângulo ω , então, como [vale a seguinte relação] em consequência destas suposições

$$\cos \omega = \cos A \cos \alpha + \cos B \cos \beta + \cos C \cos \gamma ,$$

³⁸⁹Em alemão: *auf absolutes Maass*.

³⁹⁰Em alemão: *es sei dm das Element des freien Magnetismus in einem Theilchen*. Ou seja, dm representa a quantidade resultante de fluido magnético, Norte ou Sul, contido em uma partícula. Essa partícula é análoga ao conceito moderno de um monopolo magnético.

³⁹¹Em alemão: *die Momente des freien Magnetismus*. Essas são as componentes do momento magnético do corpo em relação aos três eixos ortogonais.

vem que $V = M \cos \omega$. Chamamos este quinto eixo simplesmente de *eixo magnético* do corpo, e assumimos que sua *direção* é parte do valor positivo da raiz quadrada $\sqrt{(XX + YY + ZZ)}$. Se o quarto eixo coincide com este eixo magnético, o momento torna-se $V = M$, que é claramente o maior de todos os momentos. O momento em relação a um outro eixo arbitrário é encontrado multiplicando-se este momento máximo (o qual, desde que uma ambiguidade não possa surgir, pode ser chamado simplesmente de momento do magnetismo)³⁹² pelo cosseno do ângulo entre ele e o eixo magnético. O momento em relação a um eixo arbitrário perpendicular ao eixo magnético será $= 0$, mas será negativo em relação ao eixo que forma um ângulo obtuso com o eixo magnético.

O eixo magnético, portanto, não é uma linha reta definida, pois pode passar por qualquer ponto, mas é apenas uma direção definida; em outras palavras, há um número infinito de eixos magnéticos paralelos entre si. Se escolhermos qualquer um deles à vontade e lhe atribuirmos um certo comprimento, as extremidades deste eixo serão chamadas de polos, uma extremidade será o polo Sul, de onde parte a direção do eixo, e a outra extremidade será o polo Norte, para onde vai a direção do eixo.

12.6

Se³⁹³ uma força com intensidade e direção constante age sobre as partículas individuais do fluido magnético, a força resultante total sobre o corpo pode ser facilmente inferida dos princípios da estática, pois nos corpos em consideração estas partículas perderam seu estado fluido até certo ponto, e formam uma massa presa ao corpo ponderável. Sobre uma partícula magnética arbitrária dm a força motriz $= Pdm$ pode agir em uma direção D (onde para as moléculas do fluido Sul o sinal negativo significa a direção oposta);³⁹⁴ sejam A e B dois pontos sobre o corpo ao longo da direção do eixo magnético, e seja a distância entre eles $= r$, tomada positivamente quando o eixo magnético está direcionado de A para B . Então vê-se facilmente que se duas novas forças são adicionadas a estas forças, cada uma $= \frac{PM}{r}$, das quais uma age sobre A na direção D , a outra sobre B na direção oposta, haverá um equilíbrio entre todas estas forças. Portanto as forças anteriores serão equivalentes a duas forças $= \frac{PM}{r}$, das quais uma age sobre B na direção D , a outra sobre A na direção oposta, e claramente estas duas forças não podem ser reunidas em uma só.

Se além da força P , age uma outra força similar P' na direção D' sobre os fluidos magnéticos do corpo, então elas podem ser substituídas por duas outras, que agem ou sobre os mesmos pontos A e B ou mais geralmente sobre outros pontos A' e B' , desde que $A'B'$

³⁹²Em alemão: *das Moment des Magnetismus*. Essa expressão pode ser traduzida como momento do magnetismo, ou como momento magnético.

³⁹³Ver os comentários de Dorn na Subseção 13.2.1 para uma discussão dessa parte do trabalho de Gauss.

³⁹⁴Essa partícula magnética (*ein magnetisches Molekül* em alemão) possui uma quantidade resultante dm de fluido magnético, seja esse fluido magnético do tipo Norte ou do tipo Sul. Essa partícula é análoga ao conceito moderno de um monopolo magnético. Ver a Nota de rodapé 390. Quando Gauss e Weber utilizam as palavras “molécula” ou “molecular”, eles em geral não estão utilizando o conceito moderno usado para distinguir, por exemplo, os termos “núcleo”, “átomo”, “molécula” ou “íon”. Naquela época até mesmo a existência dos átomos ainda não era totalmente aceita. A palavra “molécula” era um diminutivo derivado da palavra em latim “moles”, que significa massa ou grande massa. A palavra “molécula” foi aparentemente utilizada pela primeira vez em francês no século XVII, significando uma pequena massa ou partícula. Logo, usualmente Gauss e Weber utilizavam a palavra “molécula” significando uma partícula, massa microscópica ou corpúsculo. O adjetivo “molecular” se referia ao mundo microscópico ou à constituição corpuscular da matéria.

seja igualmente um eixo magnético e, se a distância for $A'B' = r'$, estas forças têm de ser $= \frac{P'M}{r'}$, e têm de agir sobre B' na direção D' , sobre A' na direção oposta. O mesmo vale para várias forças.

Pode seguramente ser atribuída à força magnética terrestre, dentro de um espaço tão pequeno como aquele ocupado pelo corpo sujeito à experiência, uma intensidade e direção que são constantes em todos lugares, embora variáveis com o tempo; assim, o que acabamos de dizer pode ser aplicado a ela.³⁹⁵ Contudo, pode ser vantajoso separá-la logo de início em duas forças, uma horizontal $= T$ e uma vertical $= T'$, a qual em nossa localização é direcionada para baixo. Caso queiramos utilizar em vez da última força duas outras agindo sobre os pontos A' e B' , então como é permissível posicionar arbitrariamente o ponto A' e também o intervalo $A'B' = r'$, queremos escolher A' como o centro de gravidade e, denotando por p ao peso do corpo, isto é a força motriz da gravidade sobre sua massa, dizemos que $\frac{T'M}{p} = r'$. Por este meio a ação da força T' é decomposta em uma força $= p$ direcionada para cima sobre A' , e em uma outra de mesma grandeza direcionada para baixo sobre B' , e como além disto a primeira é claramente cancelada pela própria força da gravidade, a ação da componente vertical é reduzida simplesmente a uma transferência do centro de gravidade de A' para B' . Além disto, é claro que para aquelas situações onde a força magnética terrestre forma um ângulo agudo com a linha vertical ou, em outras palavras, onde a componente vertical empurra o fluido Norte magnético para cima, uma transferência similar do centro de gravidade ocorre para o eixo magnético em direção ao polo Sul.

Nesta maneira de pensar fica auto-evidente que, quaisquer que sejam os tipos de experiências que sejam realizadas com agulhas magnéticas em um único estado magnético, é impossível inferir a inclinação apenas a partir daí, mas a posição do centro de gravidade real tem de já ser conhecida de alguma outra forma. Este local é em geral determinado antes da agulha estar magnetizada; mas esta prática não é suficientemente confiável, pois em geral uma agulha de aço já adquire magnetismo, embora fracamente, enquanto está sendo manufaturada. É portanto necessário para a determinação da inclinação induzir uma outra transferência do centro de gravidade por meio de uma alteração apropriada no estado magnético da agulha. Para que este se diferencie tanto quanto possível do primeiro, será necessário reverter os polos, através do qual é obtida uma transferência dupla. Contudo, mudar o centro de gravidade até mesmo em agulhas que têm a forma mais apropriada e estão saturadas com magnetismo, não pode exceder um certo limite, o qual (para uma transferência simples) é aproximadamente em nossa região igual a $0,4 \text{ mm}$, e em regiões onde a força vertical é máxima fica abaixo de $0,6 \text{ mm}$, e uma precisão mecânica tão grande é necessária na agulha que vai servir para determinar a inclinação.

12.7

Quando³⁹⁶ qualquer ponto C de um corpo magnético é assumido como estando fixo, a condição necessária e suficiente para o equilíbrio, é que um plano passando por C , pelo centro de gravidade e pelo eixo magnético coincida com o meridiano magnético e que, além disto, os torques³⁹⁷ com que a força magnética terrestre e o centro de gravidade tentam girar este plano ao redor do ponto C , cancelem-se mutuamente. A segunda condição se resume ao

³⁹⁵Isto é, o que foi mencionado anteriormente pode ser aplicado à força magnética terrestre.

³⁹⁶Ver os comentários de Dorn na Subseção 13.2.2 para uma discussão dessa parte do trabalho de Gauss.

³⁹⁷Em alemão: *die Momente*. Essa expressão pode ser traduzida aqui como torque, momento de força, momento de alavanca ou momento.

fato de que, se T denota a componente horizontal do magnetismo terrestre e i a inclinação do eixo magnético em relação ao plano horizontal, então $TM \sin i$ deve ser igual ao produto do peso do corpo pela distância do centro de gravidade deslocado B' da linha vertical traçada através de C . Claramente esta distância tem de estar sobre o lado Norte ou Sul, dependendo se i é uma elevação ou depressão, e para $i = 0$, B' fica sobre a própria linha vertical. Se o corpo já moveu-se ao redor desta linha vertical de tal forma que o eixo magnético atingiu o plano vertical cujo azimute magnético, isto é, seu ângulo com a parte Norte do meridiano magnético (considerada arbitrariamente como positiva em direção a Leste ou Oeste) é $= u$, então o magnetismo terrestre exercerá uma força sobre o corpo giratório ao redor do eixo vertical, que tenta diminuir o ângulo u e cujo torque será $= TM \cos i \sin u$, e o corpo realizará oscilações ao redor deste eixo, cuja duração pode ser calculada de acordo com métodos conhecidos. Ou seja, se K denota o momento de inércia do corpo em relação ao eixo de oscilação (isto é, a soma das [massas das] moléculas ponderáveis multiplicada pelo quadrado da distância até o eixo) e, como usual, denotamos por π à semi-circunferência de raio $= 1$, então a duração de uma oscilação infinitamente pequena será³⁹⁸

$$= \pi \sqrt{\frac{K}{TM \cos i}},$$

se as grandezas T e M forem baseadas na unidade das forças de aceleração que produzem a velocidade $= 1$ na unidade de tempo. A redução de oscilações finitas para infinitamente pequenas é calculável em uma maneira similar às oscilações de um pêndulo. Portanto, se a duração de *uma* oscilação infinitamente pequena é encontrada pelas observações como sendo $= t$, teremos a equação:

$$TM = \frac{\pi \pi K}{tt \cos i},$$

e quando, além disso, como sempre assumiremos daqui por diante, o corpo está suspenso de tal forma que seu eixo magnético seja horizontal:

$$TM = \frac{\pi \pi K}{tt}.$$

Se preferir-se assumir a gravidade como unidade das forças de aceleração, deve-se dividir este valor por $\pi \pi l$, onde l denota o comprimento de um pêndulo de segundos simples,³⁹⁹ de tal forma que em geral teríamos:

$$TM = \frac{K}{ttl \cos i},$$

ou para nosso caso

$$TM = \frac{K}{ttl}.$$

³⁹⁸Ver a Nota de rodapé 339 na página 139.

³⁹⁹Um pêndulo de segundos é um pêndulo cujo período é precisamente de dois segundos; um segundo para uma oscilação em uma direção e um segundo para a oscilação de retorno, uma frequência de 0,5 Hz. Conforme a definição francesa utilizada por Gauss e Weber discutida na Nota de rodapé 339, temos então para esse pêndulo $t = 1$ s e $T = 2$ s.

12.8

Quando⁴⁰⁰ experiências como estas são realizadas com agulhas magnetizadas suspensas por um fio vertical, então a reação que é exercida pela torção não pode ser desprezada em experiências mais refinadas. Identificamos dois diâmetros horizontais em tal fio, um deles, D , na extremidade inferior onde a agulha está presa, paralelo ao eixo magnético da agulha, o outro, E , na extremidade superior, onde o fio está preso, e de fato E seria paralelo com D se o fio não estivesse torcido. Queremos assumir que E forma um ângulo v com o meridiano magnético, enquanto que D , ou o eixo magnético, forma o ângulo u com o meridiano magnético; então a experiência mostra que a força de torção⁴⁰¹ será proporcional, ao menos aproximadamente, ao ângulo $v - u$. Portanto vamos colocar o torque com o qual esta força tenta tornar o ângulo u igual ao ângulo v , como $= (v - u)\Theta$.⁴⁰² Como o torque da força magnética terrestre que tenta diminuir o ângulo u , é agora $= TM \sin u$, a condição para o equilíbrio está contida na equação:

$$(v - u)\Theta = TM \sin u ,$$

a qual fornece muitas soluções reais, quão menor seja Θ em comparação com TM . Contudo, desde que se lide apenas com valores pequenos de u , em vez desta equação pode-se seguramente assumir a seguinte:

$$(v - u)\Theta = TMu$$

ou

$$\frac{v}{u} = \frac{TM}{\Theta} + 1 .$$

Em nosso instrumento a extremidade superior do fio está presa a um braço móvel, que carrega um ponteiro que toca na periferia de um círculo dividido em graus. Portanto mesmo se o erro de colimação (isto é, o ponto correspondente ao valor $v = 0$) não seja conhecido com precisão suficiente, apesar disto este ponteiro indica a diferença para cada segundo valor de v para frente; assim como uma outra parte do instrumento fornece a diferença entre os valores de u , correspondendo à condição de equilíbrio, com a maior precisão, e fica claro que o valor de $\frac{TM}{\Theta} + 1$ será obtido pela divisão da diferença entre dois valores de v pela diferença entre os valores correspondentes de u . Se há um período de tempo um pouco maior entre as experiências conduzidas para este fim, será necessário, para atingir uma precisão maior, levar em conta a mudança diária na declinação magnética, o que é facilmente obtido com a ajuda de observações simultâneas em um segundo instrumento, no qual a extremidade superior do fio permanece inalterada. Quase não é necessário lembrar que a distância entre os dois instrumentos tem de ser grande o suficiente para que não possam interferir significativamente um com o outro.

Com o objetivo de mostrar o grande refinamento que estas observações permitem, introduzimos um exemplo do diário. Em 22 de setembro de 1832, salvo o erro de colimação,

⁴⁰⁰Ver os comentários de Dorn na Subseção 13.2.3 para uma discussão dessa parte do trabalho de Gauss.

⁴⁰¹Em alemão: *Torsionskraft*. Ver a Nota de rodapé 352 na página 144.

⁴⁰²A constante Θ é chamada de coeficiente de torção do fio ou sua constante de torção. Foi Coulomb quem descobriu que o torque exercido pelo fio é proporcional ao ângulo de torção $v - u$, ver a Nota de rodapé 107 na página 41.

foram observadas as seguintes declinações u e ângulos v :⁴⁰³

Experiência	Horário	Primeira agulha		Segunda agulha
		u	v	u
I	9h 33' da manhã	+ 0° 4' 19,5"	300°	+ 0° 2' 12,1"
II	9h 57'	− 0° 0' 19,6"	240°	+ 0° 1' 37,7"
III	10h 16'	− 0° 4' 40,5"	180°	+ 0° 1' 18,8"

Portanto as declinações da primeira agulha, relacionadas com a posição da primeira observação, são como segue:

I	$u = 0^\circ 4' 19,5''$	$v = 300^\circ$
II	$+0^\circ 0' 14,8''$	240°
III	$-0^\circ 3' 47,2''$	180°

Daqui vem o valor da fração $\frac{TM}{\Theta}$ a partir da combinação das observações

I e II 881,7
 II e III 891,5
 I e III 886,6.

As mudanças diárias na declinação magnética são diminuídas pela torção na proporção da unidade para $\frac{n}{n+1}$ onde é colocado $\frac{TM}{\Theta} = n$, uma mudança que pode ser considerada insignificante se usarmos fios com uma torção tão baixa como mostra o exemplo anterior. No que diz respeito à duração das oscilações (infinitamente pequenas), pode ser facilmente concluído a partir dos princípios dinâmicos, que ela é diminuída pela torção na proporção da unidade para $\sqrt{\frac{n}{n+1}}$. Na realidade, isto relaciona-se ao caso onde $v = 0$. Contudo, as fórmulas continuariam válidas em geral se colocássemos $\frac{TM \cos u^\circ}{\Theta}$ onde denotamos o valor de u por u° , o qual corresponde ao equilíbrio; mas a diferença será certamente insignificante.

12.9

O coeficiente Θ depende essencialmente do comprimento, da espessura e do material do fio, e adicionalmente em fios metálicos [depende] da temperatura, em linhas de seda [depende] da umidade. Em contraste com isto, ele não parece depender no primeiro caso (talvez também no último, se são fios simples) do peso que suportam. A situação é diferente quando são utilizadas várias linhas de seda, como têm de ser usadas para suportar agulhas pesadas. Neste caso Θ aumenta com o peso suspenso, contudo permanece bem menor do que o valor de Θ para um fio metálico com exatamente o mesmo comprimento e capacidade de carga. Assim, através de um método muito similar àquele desenvolvido na Seção anterior (embora com um fio diferente e com uma agulha diferente), é encontrado o valor $n = 597,4$ enquanto o fio suporta apenas a agulha com o equipamento usual, onde o peso total era de 496,2 g; em contraste com isto, encontra-se o valor $n = 424,8$, quando o peso foi aumentado para 710,8 g, ou no primeiro caso encontrou-se $\Theta = 0,0016740TM$, no segundo caso $\Theta = 0,0023542TM$. O fio cujo comprimento era de 800 mm, é composto de 32 fios individuais,⁴⁰⁴ os quais

⁴⁰³[Nota de Gauss:] Ambos elementos crescem da esquerda para a direita.

⁴⁰⁴[Nota de Gauss:] Falando estritamente, estes fios não são realmente simples, mas meramente o tipo que é vendido como não fiado.

individualmente suportam quase 30 *g* firmemente e estão arrançados de tal forma que sofrem uma tensão igual. Além disto, é provável que o valor de Θ seja constituído de um elemento constante e de um elemento proporcional ao peso, e que a parte constante seja igual à soma dos valores de Θ para os fios simples individuais. Sob esta hipótese (que até o momento não foi adequadamente confirmada pelas experiências), é encontrado 0,0001012 *TM* como sendo o valor constante para o exemplo acima, e assim 0,00000316 *TM* como o valor de Θ para um fio simples. Utilizando o valor que logo será desenvolvido para *TM*, será calculado a partir desta hipótese que a resistência de um fio simples, enrolado em um arco igual ao raio (57° 18'), é equivalente ao peso de um miligrama pressionando sobre o braço de uma alavanca com o comprimento de aproximadamente 1/17 *mm*.

12.10

Se⁴⁰⁵ o corpo oscilante é uma agulha simples de forma regular e massa homogênea, o momento de inércia K pode ser calculado de acordo com métodos conhecidos. Se, por exemplo, o corpo é um paralelepípedo retangular, cujos lados são a , b , c , cuja densidade = d e cuja massa q é então = $abcd$, o momento de inércia em relação a um eixo passando através do ponto médio e paralelo ao lado c será = $(aa + bb)q/12$. E como em agulhas magnéticas de tal forma o lado que é paralelo ao eixo magnético, a saber, a , é usualmente bem maior do que b , será além disto suficiente para experiências grosseiras tomar $K = aaq/12$. Mas em experiências mais refinadas, mesmo se fosse utilizada uma agulha simples, dificilmente poderíamos fazer a suposição confortável de uma massa completamente homogênea e de uma forma completamente regular, e para aquelas experiências nossas nas quais foi utilizada uma agulha envolvendo equipamento mais complicado, em vez de uma agulha simples, é totalmente impossível determinar as coisas através de tais cálculos, e um procedimento diferente foi procurado para a determinação precisa do momento [de inércia] K .

Na agulha foi presa uma barra de madeira transversal sobre a qual pendiam dois pesos iguais através dos quais pontas muito finas exerciam pressões sobre os pontos A e B da barra. Estes pontos estavam sobre uma linha reta horizontal, no mesmo plano vertical que o eixo de suspensão, e estavam equidistantes dele de ambos os lados.⁴⁰⁶ Se a massa de cada um dos dois pesos é denotada por p e a distância AB por $2r$, então ao adicionar este instrumento o momento [de inércia] K será aumentado pela grandeza $C + 2pr^2$, onde C é o momento de inércia da barra em relação ao eixo de suspensão, e $[2pr^2]$ é o momento de inércia dos pesos em relação ao eixo vertical através das pontas e do centro de gravidade. Portanto, se são observadas as oscilações da agulha sem os pesos, juntamente com as oscilações da agulha com os pesos em duas distâncias diferentes, a saber, para $r = r'$ e $r = r''$, e se são encontradas as durações das oscilações (após serem reduzidas a amplitudes infinitamente pequenas e liberadas do efeito da torção), respectivamente, = t , t' , t'' , então combinando as equações:

$$TMt = \pi\pi K ,$$

$$TMt't' = \pi\pi (K + C + 2pr'r') ,$$

e

⁴⁰⁵Ver os comentários de Dorn na Subseção 13.2.4 para uma discussão dessa parte do trabalho de Gauss.

⁴⁰⁶Ver a Figura 9.1 na página 135.

$$TMt''t'' = \pi\pi(K + C + 2pr''r'') ,$$

podem ser determinadas as três incógnitas TM , K e C . Atingiremos uma precisão ainda maior se, para vários valores de r , a saber $r = r'$, r'' , r''' e assim por diante, observarmos a duração associada das oscilações t' , t'' , t''' , e assim por diante e, de acordo com o método dos mínimos quadrados, determinarmos as duas incógnitas x e y tal que

$$t' = \sqrt{\frac{r'r' + y}{x}} ,$$

$$t'' = \sqrt{\frac{r''r'' + y}{x}} ,$$

$$t''' = \sqrt{\frac{r'''r''' + y}{x}} ,$$

e assim por diante.

Por este meio obtemos:

$$TM = 2\pi\pi x ,$$

e

$$K + C = 2py .$$

Em relação a este método deve ser observado o seguinte:

I. Se é empregada uma agulha não muito lisa, é suficiente colocar simplesmente a barra de madeira sobre ela. Se, contudo, a superfície é muito lisa, de tal forma que o atrito não possa retardar o deslizamento da barra, é necessário conectar a barra mais firmemente ao restante do instrumento, de tal forma que o instrumento possa mover-se como um corpo sólido único. Em ambos os casos deve ser tomado cuidado para que os pontos A e B estejam localizados com precisão suficiente em uma linha reta horizontal.

II. Como o conjunto destas experiências requer várias horas, a variabilidade do magnetismo terrestre dentro deste intervalo de tempo não pode ser desprezada, pelo menos caso se deseje a maior precisão. Portanto, antes que a eliminação seja efetuada, os tempos observados têm de ser reduzidos a um valor constante T , por exemplo o valor médio, correspondente à primeira experiência. Para este fim são necessárias observações simultâneas de uma outra agulha (assim como na Seção 12.8). Se estas observações têm como a duração de uma oscilação para o tempo médio da experiência única, respectivamente, $= u$, u' , u'' , u''' e assim por diante, então em vez de utilizar para os cálculos os valores observados t , t' , t'' , t''' e assim por diante, utiliza-se $\frac{ut'}{u'}$, $\frac{ut''}{u''}$, $\frac{ut'''}{u'''}$, e assim por diante.

III. Vale um comentário similar com relação à variabilidade de M , que surge da mudança de temperatura se esta ocorre durante a experiência. Mas é claro que a redução que acabamos de descrever já inclui esta melhoria por si própria, se cada uma das duas agulhas está sujeita à mesma temperatura, e se são influenciadas na mesma maneira por esta mudança.

IV. Se a tarefa é apenas determinar o valor de TM , claramente a primeira experiência é supérflua. Contudo será útil associar à experiência conduzida com uma agulha com peso, uma outra experiência com uma agulha sem peso,⁴⁰⁷ para que o valor de K seja determinado

⁴⁰⁷Ou seja, uma agulha que não esteja sobrecarregada com a barra de madeira e os pesos adicionais.

ao mesmo tempo, de tal forma que possa ser tomado como uma base para as experiências que são realizadas em uma outra época com a mesma agulha, pois é evidente que este valor permanece constante mesmo quando T e M sofrem uma mudança ao longo do tempo.

12.11

Para explicar melhor este método, incluímos aqui um exemplo tirado da grande quantidade de aplicações. A experiência realizada em 11 de setembro de 1832 forneceu a seguinte Tabela:

Experiência	Oscilações simultâneas		
	da primeira agulha		da segunda agulha
	Peso	Uma oscilação	Uma oscilação
I	$r = 180 \text{ mm}$	24,63956"	17,32191"
II	$r = 130 \text{ mm}$	20,77576"	17,32051"
III	$r = 80 \text{ mm}$	17,66798"	17,31653"
IV	$r = 30 \text{ mm}$	15,80310"	17,30529"
V	Sem peso	15,22990"	17,31107"

Os tempos foram observados com um relógio que diariamente atrasava 14,24" em relação ao tempo médio, e cada um dos dois pesos era de 103,2572 g; as distâncias r em milímetros foram determinadas com precisão microscópica; a duração de uma oscilação, que foi apurada a partir de no mínimo 100 oscilações (na quinta experiência até mesmo para 677 [oscilações] para a primeira agulha), já foi reduzida para arcos infinitamente pequenos. A propósito, estas reduções eram insignificantes devido à amplitude muito pequena das oscilações⁴⁰⁸ que podem ser aplicadas ao nosso aparelho sem prejuízo da maior precisão. Queríamos reduzir estes tempos de oscilação em primeiro lugar ao valor médio de TM , que ocorreram durante a quinta experiência aplicando as regras da Seção II acima,⁴⁰⁹ então aos valores que teriam resultado sem torção através da multiplicação por $\sqrt{\frac{n+1}{n}}$, onde nas quatro experiências $n = 424,8$, na quinta experiência $= 597,4$ (conferir a Seção 12.9); finalmente ao tempo solar médio através da multiplicação por $\frac{864,00}{86385,76}$; nossos resultados foram:

- I. $t' = 24,65717''$ para $r' = 180 \text{ mm}$,
- II. $t'' = 20,79228''$ para $r'' = 130 \text{ mm}$,
- III. $t''' = 17,68610''$ para $r''' = 80 \text{ mm}$,
- IV. $t'''' = 15,82958''$ para $r'''' = 30 \text{ mm}$,
- V. $t = 15,24515''$ para a agulha sem peso [adicional].

Se tomarmos o segundo, o milímetro e o miligrama como unidades de tempo, distância e massa, de tal forma que $p = 103257,2$, inferimos da combinação da primeira experiência com a quarta:

$$TM = 179\,641\,070, \quad K + C = 4\,374\,976\,000,$$

⁴⁰⁸[Nota de Gauss:] Assim a amplitude das oscilações na primeira experiência era de $0^\circ 37' 26''$ no início, $0^\circ 28' 34''$ no fim; na quinta experiência $1^\circ 10' 21''$ no início, após 177 oscilações $0^\circ 45' 35''$, e após 677 oscilações $0^\circ 6' 44''$.

⁴⁰⁹Ver a página 163.

e então da quinta experiência

$$K = 4\,230\,282\,000 \quad \text{e similarmente} \quad C = 144\,694\,000 .$$

Quando, contudo, é desejado levar em consideração todas as experiências, o método dos mínimos quadrados é o mais conveniente da forma seguinte. Procedemos a partir dos valores aproximados das incógnitas x e y , que surgem da combinação da primeira e da quarta experiências e, designando as correções ainda a serem adicionadas por ξ e η , colocamos:

$$x = 88,13646 + \xi ,$$

e

$$y = 21184,85 + \eta .$$

A partir daqui são deduzidos como valores calculados os tempos t' , t'' , t''' , t'''' por métodos familiares:

$$t' = 24,65717 - 0,13988\xi + 0,00023008\eta ,$$

$$t'' = 20,78731 - 0,11793\xi + 0,00027291\eta ,$$

$$t''' = 17,69121 - 0,10036\xi + 0,00032067\eta ,$$

e

$$t'''' = 15,82958 - 0,08980\xi + 0,00035838\eta ,$$

cujas comparação com os valores observados, tratados de acordo com o método dos mínimos quadrados, gera os resultados:

$$\xi = -0,03230 ; \quad \eta = -12,38 ;$$

e

$$x = 88,10416 ; \quad y = 21172,47 .$$

A partir disto resulta finalmente

$$TM = 179\,575\,250 , \quad K + C = 4\,372\,419\,000 ,$$

e então com a adição da primeira experiência:

$$K = 4\,228\,732\,400 , \quad C = 143\,686\,600 .$$

Apresento a seguir uma comparação dos tempos calculados a partir dos valores corrigidos das grandezas x , y , com os valores observados.

Experiência	Tempo calculado	Tempo observado	Diferença
I	24,65884''	24,65717''	+0,00167''
II	20,78774	20,79228	-0,00454
III	17,69046	17,68610	+0,00436
IV	15,82805	15,82958	-0,00153

Em Göttingen colocamos o comprimento do pêndulo de segundos simples = 994,126 mm,⁴¹⁰ portanto o peso, medido por aquela unidade das forças de aceleração na qual é baseada os cálculos precedentes, = 9811,63; assim se preferirmos tomar a própria gravidade como unidade, então $TM = 18302,29$. Este número expressa a quantidade de miligramas cuja pressão,⁴¹¹ sob a influência da gravidade, sobre uma alavanca de um milímetro de comprimento, é igual à força com que o magnetismo da Terra tende a girar essa agulha em torno do eixo vertical.

12.12

Após termos completado a determinação do produto da componente horizontal T da força magnética terrestre com o momento magnético M da agulha dada, procedemos para a segunda parte da experiência, a saber, para a determinação da razão M/T . Obteremos isto comparando a ação desta agulha sobre uma outra agulha, com a ação do magnetismo terrestre sobre a mesma agulha. Especificamente isto será observado, como já foi discutido na Introdução, em um estado de movimento ou então em um estado de equilíbrio. Investigamos repetidamente cada um dos dois métodos, mas por vários motivos o último é muito preferível ao primeiro. E assim confinaremos as investigações aqui a este último método, sendo que o primeiro pode ser tratado de maneira similar sem dificuldade.

12.13

As condições de equilíbrio em um corpo móvel sobre o qual agem forças arbitrárias, podem ser facilmente combinadas em uma única fórmula por meio do princípio dos deslocamentos virtuais. A saber, a soma dos produtos de uma força qualquer multiplicada na projeção de um pequeno deslocamento infinitesimal de seu ponto de atuação na direção da força, tem de ser constituída de tal forma que para nenhum movimento virtual (isto é, um movimento condizendo com as condições) ela possa atingir um valor positivo, de tal forma que se os movimentos virtuais são possíveis coletivamente em direções opostas, este agregado, que queremos designar por $d\Omega$, é $= 0$ para todo movimento virtual.

O corpo móvel que consideramos aqui é a agulha magnética, que é conectada em um ponto G a um fio giratório preso no alto. Este fio meramente evita que a distância do ponto G até a extremidade fixa do fio torne-se maior do que o comprimento do fio, de tal forma que aqui também, assim como no caso do corpo completamente livre, a posição do corpo no espaço depende de seis variáveis e além disto o próprio equilíbrio [depende] de seis condições. Contudo, como a solução do problema é apenas para determinar a razão M/T , é suficiente considerar o movimento virtual que ocorre na rotação ao redor do eixo vertical intersectando G ; e é evidente que tal eixo pode ser considerado como fixo, e apenas o ângulo entre o plano

⁴¹⁰Ver a Nota de rodapé 399.

⁴¹¹Em alemão: *deren Druck*.

vertical sobre o qual está localizado o eixo magnético, e o plano meridiano magnético, [deve ser considerado] como variável. Tomaremos este ângulo a partir do lado Norte do meridiano em direção ao Leste e o designaremos por u .

12.14

Conceberemos o volume da agulha magnética móvel como dividido em elementos infinitamente pequenos, deixando as coordenadas de um elemento arbitrário serem x, y, z , enquanto que e é o elemento de magnetismo livre contido nele. Colocamos a origem das coordenadas no ponto arbitrário h dentro da agulha sobre uma linha vertical passando através de G ; os eixos das coordenadas x e y devem ser horizontais, o primeiro no meridiano magnético direcionado em direção ao Norte, o último em direção a Leste; a coordenada z é direcionada para cima. Então a ação do magnetismo terrestre sobre o elemento e produz a parte $Tedx$ de $d\Omega$.

De forma similar, o volume da segunda agulha fixa é dividido em elementos infinitamente pequenos, e um elemento qualquer corresponde às coordenadas X, Y, Z , e à quantidade E de magnetismo livre; finalmente, seja $r = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}$. Sob esta condição, a ação do elemento E sobre o elemento e gera a contribuição $eEdr/r^n$ para a soma $d\Omega$, caso seja assumido que a ação é inversamente proporcional à potência r^n da distância r . Se denotarmos por N ao valor de u que corresponde ao estado do fio não torcido, então o momento de torção do fio pode ser expresso como $\Theta(N-u)$. Esta força pode ser concebida de tal forma como se a força tangencial $= \Theta(N-u)/D$ agisse sobre cada extremidade de um diâmetro horizontal do fio passando através de G , onde D denota este diâmetro, e é fácil ver que obtemos $\Theta(N-u)du$ como parte da soma $d\Omega$.

O peso das partículas da agulha claramente não contribui para a soma $d\Omega$, pois apenas u é variável; portanto temos a equação:

$$d\Omega = \sum Tedx + \sum \frac{eEdr}{r^n} + \Theta(N-u)du ,$$

na qual a soma no primeiro termo relaciona-se com todos elementos e , no segundo com todas as combinações dos e individuais com os E individuais. Portanto fica claro que a condição de equilíbrio consiste em

$$\Omega = \sum Tex - \sum \frac{eE}{(n-1)r^{n-1}} - \frac{1}{2}\Theta(N-u)^2$$

tornar-se um máximo.

12.15

É conveniente para nosso propósito sempre configurar as experiências de tal forma que o eixo magnético de cada uma das duas agulhas seja horizontal, e que ambas as agulhas estejam aproximadamente na mesma altura; portanto desejamos confinar nossos próximos cálculos a estas precondições.

Queremos relacionar as coordenadas dos pontos da primeira agulha a eixos fixos na agulha, que também ainda intersectam o ponto h ; isto é, o primeiro eixo estaria na direção do eixo magnético, o segundo horizontal e à direita do primeiro, o terceiro vertical e apontando

para cima; as coordenadas do elemento e em relação a estes eixos são a, b, c . De forma semelhante A, B, C são as coordenadas do elemento E em relação a eixos similarmente fixados na segunda agulha, que intersectam esta agulha em um ponto H . Seleccionamos este ponto próximo ao centro da agulha e à mesma altura que o ponto h .

A posição do ponto H seria mais convenientemente determinada pela distância do ponto h e pela direção da linha reta que conecta esses dois pontos, se fosse apenas uma experiência. Como, contudo, para nossos fins são necessárias sempre várias experiências, que estão relacionadas a posições diferentes do ponto H , todas as quais estando certamente na mesma linha reta, contudo não necessariamente em uma linha através do ponto h , então é melhor configurar os sinais desde o início de tal forma que o sistema de tais experiências dependa de uma única incógnita. Portanto queremos relacionar o ponto H a um ponto arbitrário h' no mesmo plano horizontal, que está próximo de h e cujas coordenadas possam ser $\alpha, \beta, 0$, e desejamos tornar a distância $h'H = R$ e o ângulo das linhas $h'H$ com o meridiano magnético $= \psi$. Se agora denotarmos o ângulo do eixo magnético da segunda agulha com o meridiano magnético por U , teremos então:

$$x = a \cos u - b \sin u ,$$

$$y = a \sin u + b \cos u ,$$

$$z = c ,$$

$$X = \alpha + R \cos \psi + A \cos U - B \sin U ,$$

$$Y = \beta + R \sin \psi + A \sin U + B \cos U ,$$

e

$$Z = C .$$

Assim tudo está pronto para desenvolver a soma $d\Omega$ e a fração $\frac{d\Omega}{du}$, a qual tem de desaparecer no estado de equilíbrio.

12.16

Inicialmente teremos

$$\sum Tex = T \cos u \sum ae - T \sin u \sum be = mT \cos u ,$$

se denotarmos o momento do magnetismo livre da primeira agulha $\sum ae$ por m , pois $\sum be = 0$. A parte de $\frac{d\Omega}{du}$, que vem do primeiro termo de Ω , será $= -mT \sin u$.

Se colocarmos para simplificar:

$$k = \alpha \cos \psi + \beta \sin \psi + A \cos(\psi - U) + B \sin(\psi - U) - a \cos(\psi - u) - b \sin(\psi - u) ,$$

e

$$l = [\alpha \sin \psi - \beta \cos \psi + A \sin(\psi - U) - B \cos(\psi - U) - a \sin(\psi - u) - b \cos(\psi - u)]^2 + (C - c)^2 ,$$

então teremos $rr = (R + k)^2 + l$.

Como nas experiências úteis R tem de ser muito maior do que as dimensões de cada uma das agulhas, a grandeza $\frac{1}{r^{n-1}}$ pode ser desenvolvida em uma série rapidamente convergente

$$R^{-(n-1)} - (n-1)kR^{-n} + \left(\frac{nn-n}{2}kk - \frac{n-1}{2}l \right) R^{-(n+1)} - \left(\frac{1}{6}(n^3-n)k^3 - \frac{1}{2}(nn-1)kl \right) R^{-(n+2)} + \dots ,$$

cujas leis, se valesse à pena o esforço, poderia ser facilmente especificada. Os termos individuais da soma $\sum \frac{eE}{r^{n-1}}$, que surgem ao se inserir os valores das grandezas k e l , conterão um fator da forma:

$$\sum eEa^\lambda b^\mu c^\nu A^{\lambda'} B^{\mu'} C^{\nu'} ;$$

que é igual ao produto dos fatores $ea^\lambda b^\mu c^\nu$ e $EA^{\lambda'} B^{\mu'} C^{\nu'}$, que dependem respectivamente do estado magnético da primeira e da segunda agulhas. Levando isto em consideração, o que podemos estabelecer confina-se às equações:

$$\begin{aligned} \sum e &= 0 , & \sum ea &= m , & \sum eb &= 0 , & \sum ec &= 0 , \\ \sum E &= 0 , & \sum EA &= M , & \sum EB &= 0 , & \sum EC &= 0 , \end{aligned}$$

onde denotamos por M ao momento do magnetismo livre da segunda agulha. No caso especial em que a forma da primeira agulha (a móvel) e em que a distribuição do magnetismo na direção longitudinal são simétricos, de tal forma que dois elementos sempre se correspondam, para os quais a e e tenham valores opostos equivalentes b e c , então, tão logo os pontos médios coincidam com o ponto h , sempre teremos $\sum ea^\lambda b^\mu c^\nu = 0$ para um valor par do número $\lambda + \mu + \nu$, e similarmente para a segunda agulha, se a forma e a distribuição do magnetismo são simétricos em relação ao ponto H . Portanto, em geral, na soma $\sum \frac{eE}{r^{(n-1)}}$ os coeficientes das potências $R^{-(n-1)}$ e R^{-n} desaparecem; no caso especial em que cada uma das duas agulhas tem o formato simétrico e estão simetricamente magnetizadas, enquanto que ao mesmo tempo o ponto médio da primeira, h e h' , coincidem, e de forma semelhante o ponto médio da segunda e H coincidem, então os coeficientes das potências $R^{-(n+2)}$, $R^{-(n+1)}$, $R^{-(n+6)}$ e assim por diante também vão desaparecer; todas as vezes em que estas condições ocorrem de forma bem aproximada, estes coeficientes têm de ser ao menos muito pequenos. O termo principal que é deduzido pelo desenvolvimento da segunda parte de Ω , a saber de $-\sum \frac{eE}{(n-1)r^{(n-1)}}$, será:

$$= -\frac{1}{2}R^{-(n+1)} \left(n \sum eEkk - \sum eEl \right)$$

$$= mMR^{-(n+1)} (n \cos(\psi - U) \cos(\psi - u) - \sin(\psi - U) \sin(\psi - u)) .$$

Daqui segue-se que o elemento de $d\Omega/du$, que corresponde à influência da segunda agulha, pode ser expresso pela seguinte série:

$$fR^{-(n+1)} + f'R^{-(n+2)} + f''R^{-(n+3)} + \dots ,$$

na qual os coeficientes contêm funções racionais do cosseno e do seno dos ângulos ψ , u , U e das grandezas α , β , e além disto contêm magnitudes constantes que dependem do estado magnético das agulhas; especificamente, eles serão:

$$f = mM (n \cos(\psi - U) \sin(\psi - u) + \sin(\psi - U) \cos(\psi - u)) .$$

Não é necessário para nossos fins o desenvolvimento completo dos coeficientes seguintes f' , f'' e assim por diante; é suficiente notar que:

1) no caso de simetria completa, os coeficientes que acabamos de indicar f' , f'' e assim por diante desaparecem;

2) se as magnitudes restantes permanecem inalteradas e ψ é aumentado de dois ângulos retos (ou, a mesma coisa, se a distância R é considerada ao longo da mesma linha reta prolongada para trás sobre o outro lado do ponto h'), os coeficientes f , f'' , f'''' e assim por diante mantêm seus valores, enquanto que f' , f''' , f''''' e assim por diante ficam com valores opostos, ou esta série transforma-se em

$$fR^{-(n+1)} - f'R^{-(n+2)} + f''R^{-(n+3)} - \dots ;$$

isto é inferido facilmente do fato que por meio desta mudança em ψ , k torna-se $-k$, mas l não é transformada.

12.17

A⁴¹² condição para que a agulha móvel não gire ao redor do eixo vertical pela combinação das forças é então resumida na seguinte equação:

$$0 = -mT \sin u + fR^{-(n+1)} + f'R^{-(n+2)} + f''R^{-(n+3)} + \dots - \Theta(u - N) .$$

Como pode ser facilmente obtido que o valor de N , se não é $= 0$, é ao menos muito pequeno, e também u , na experiência que está sendo considerada, permanece dentro de valores estreitos, então, sem temer um erro significativo, para o termo $\Theta(u - N)$ pode-se usar $\Theta \sin(u - N)$, ainda mais que $\frac{\Theta}{mT}$ é uma fração muito pequena. Seja u° o valor de u que corresponde ao equilíbrio da primeira agulha na ausência da segunda, ou seja

$$mT \sin u^\circ + \Theta \sin(u^\circ - N) = 0 ;$$

daqui segue-se facilmente que:

$$mT \sin u + \Theta \sin(u - N) = (mT \cos u^\circ + \Theta \cos(u^\circ - N)) \sin(u - u^\circ) ,$$

⁴¹²Ver os comentários de Dorn na Subseção 13.2.5 para uma discussão dessa parte do trabalho de Gauss.

onde, em vez do primeiro fator pode-se adotar $mT + \Theta$ sem maiores reservas. Assim nossa equação torna-se:

$$(mT + \Theta) \sin(u - u^o) = fR^{-(n+1)} + f'R^{-(n+2)} + f''R^{-(n+3)} + \dots$$

Se mantivermos apenas o termo $fR^{-(n+1)}$, então a solução fica ao alcance da mão, a saber, temos

$$\tan(u - u^o) = \frac{mM (n \cos(\psi - U) \sin(\psi - u^o) + \sin(\psi - U) \cos(\psi - u^o)) R^{-(n+1)}}{mT + \Theta + mM (n \cos(\psi - U) \cos(\psi - u^o) - \sin(\psi - U) \sin(\psi - u^o)) R^{-(n+1)}}$$

onde com o mesmo direito podemos suprimir no denominador a parte que contém o fator $R^{-(n+1)}$, ou definir:

$$\begin{aligned} \tan(u - u^o) &= \frac{mM}{mT + \Theta} [n \cos(\psi - U) \sin(\psi - u^o) \\ &+ \sin(\psi - U) \cos(\psi - u^o)] R^{-(n+1)} = FR^{-(n+1)}. \end{aligned}$$

Contudo, quando queremos levar em consideração termos adicionais, então é claro que $\tan(u - u^o)$ pode ser desenvolvida em uma série da seguinte forma:

$$\tan(u - u^o) = FR^{-(n+1)} + F'R^{-(n+2)} + F''R^{-(n+3)} + \dots,$$

na qual, como mostra uma simples reflexão, os coeficientes F , F' , F'' e assim por diante até o coeficiente da potência $R^{-(2n+1)}$, respectivamente, incluindo em relação a

$$\frac{f}{mT + \Theta}, \quad \frac{f'}{mT + \Theta}, \quad \frac{f''}{mT + \Theta}, \quad \text{e assim por diante,}$$

resultam da mudança de u para u^o ; do termo seguinte em diante, contudo, novos elementos entrarão, os quais para nossos fins não precisamos determinar mais precisamente. Além disto, é claro que $u - u^o$ pode ser desenvolvido em uma série de uma forma similar que, até a potência $R^{-(3n+2)}$, coincide com a série para $\tan(u - u^o)$.

12.18

É⁴¹³ agora claro que, se a segunda agulha é colocada em pontos diferentes sobre a mesma linha reta, de tal forma que ψ e U mantêm seus valores, enquanto que apenas R é modificado, e é observado o desvio da agulha móvel a partir da posição de equilíbrio, por meio da qual a segunda agulha é deslocada, a saber, o ângulo $u - u^o$, daqui segue-se que os valores dos coeficientes F , F' , F'' e assim por diante, tantos quantos ainda sejam significativos, podem ser apurados por eliminação; por este meio obteremos a equação:

⁴¹³Ver os comentários de Dorn na Subseção 13.2.5 para uma discussão dessa parte do trabalho de Gauss.

$$\frac{M}{T} = \left(1 + \frac{\Theta}{Tm}\right) \frac{F}{n \cos(\psi - U) \sin(\psi - u^o) + \sin(\psi - U) \cos(\psi - u^o)} ,$$

na qual o valor da grandeza $\frac{\Theta}{Tm}$ pode ser obtido pelo método que demonstramos na Seção 12.8. Para uma demonstração mais conveniente, contudo, será útil observar o seguinte:

I. Em vez da comparação de u com u^o é preferível comparar os dois desvios opostos entre si revertendo a posição da segunda agulha, a saber, de tal forma que R e ψ permaneçam inalterados e o ângulo U seja aumentado em dois ângulos retos. Se os valores de u correspondendo a estas posições são denotados por u' e u'' , então no caso de simetria completa teremos precisamente $u'' = -u'$, se ao mesmo tempo valesse $u^o = 0$. Mas é supérfluo ficar ansiosamente preso a estas condições, pois é claro que u' e u'' são determinados por séries similares nas quais os primeiros termos têm *precisamente* valores opostos, e além disto também $\frac{1}{2}(u' - u'')$, assim como $\tan \frac{1}{2}(u' - u'')$ por uma série similar, na qual o coeficiente do primeiro termo é *precisamente* F .

II. Será ainda melhor sempre combinar todas as quatro experiências, também depois do ângulo ψ ser modificado por dois ângulos retos ou a distância R ter sido tomada sobre o outro lado. Se as duas últimas experiências correspondem aos valores u''' e u'''' , então a diferença $(u''' - u'''')/2$ será expressa por uma série similar, cujo primeiro termo similarmente terá um coeficiente $= F$. Deve ser notado (o que segue prontamente do que veio antes) que, se n fosse um número ímpar, os coeficientes F, F'', F'''' , e assim por diante seriam exatamente os mesmos até o infinito em qualquer série para $u' - u^o$ e $u''' - u^o$, e os coeficientes F', F''', F''''' e assim por diante seriam precisamente opostos até o infinito, e o mesmo para $u'' - u^o$ e $u'''' - u^o$, de tal forma que na série para $u' - u'' + u''' - u''''$ os termos alternados desapareceriam. Mas no caso da realidade, onde $n = 2$, em geral não está estritamente presente tal relação entre as séries para $u' - u^o$ e para $u''' - u^o$ pois para a potência R^{-6} , já surgem coeficientes que não são precisamente opostos. Contudo, pode ser mostrado que também para este termo ocorre um cancelamento completo na combinação $u' - u'' + u''' - u''''$, de tal forma que $\tan \frac{1}{4}(u' - u'' + u''' - u'''')$ fica com a forma:

$$LR^{-3} + L'R^{-5} + L''R^{-7} + \dots$$

ou, mais geralmente, se deixarmos o valor de n indeterminado por hora, [possui] a seguinte forma:

$$LR^{-(n+1)} + L'R^{-(n+3)} + L''R^{-(n+5)} + \dots ,$$

onde $L = F$.

III. Será útil escolher os ângulos ψ e U de tal forma que pequenos erros ocorrendo no próprio processo de medida não mudem significativamente o valor de F . Para este fim o valor de U para um dado valor de ψ tem de ser assumido de tal forma que F seja um máximo; isto é, tem de valer

$$\cot(\psi - U) = n \tan(\psi - u^o) .$$

Então

$$F = \pm \frac{mM}{mT + \Theta} \sqrt{(nn \sin(\psi - u^o)^2 + \cos(\psi - u^o)^2)} .$$

Contudo, o ângulo ψ é para ser escolhido tal que este valor de F seja ou um máximo ou um mínimo. O primeiro caso ocorre para $\psi - u^\circ = 90^\circ$ ou 270° , sendo que neste caso

$$F = \pm \frac{nmM}{mT + \Theta} ,$$

o último caso ocorre para $\psi - u^\circ = 0$ ou 180° , onde

$$F = \pm \frac{mM}{mT + \Theta} .$$

12.19

Portanto dois métodos estão disponíveis, os quais são os mais apropriados para realizar nossa tarefa. Seus elementos são mostrados no esquema seguinte.

Primeiro Método.

O ponto médio e o eixo da segunda agulha estão sobre a linha reta perpendicular ao meridiano magnético.⁴¹⁴

Deflexão	Posição da agulha		Ponto médio em direção ao	Polo Norte em direção ao
$u = u'$	$\psi = 90^\circ$	$U = 90^\circ$	Leste	Leste
$u = u''$	$\psi = 90$	$U = 270$	Leste	Oeste
$u = u'''$	$\psi = 270$	$U = 90$	Oeste	Leste
$u = u''''$	$\psi = 270$	$U = 270$	Oeste	Oeste

Segundo Método.

O ponto médio da segunda agulha está sobre o meridiano magnético.

Deflexão	Posição da agulha		Ponto médio em direção ao	Polo Norte em direção ao
$u = u'$	$\psi = 0^\circ$	$U = 270^\circ$	Norte	Oeste
$u = u''$	$\psi = 0$	$U = 270$	Norte	Leste
$u = u'''$	$\psi = 180$	$U = 90$	Sul	Oeste
$u = u''''$	$\psi = 180$	$U = 90$	Sul	Leste

Se colocarmos

$$\frac{1}{4}(u' - u'' + u''' - u''') = v ,$$

e

⁴¹⁴[Nota de Gauss:] Mais precisamente, sobre o plano vertical, que corresponde ao valor $u = u^\circ$, isto é, no qual o eixo magnético encontra-se em equilíbrio quando a segunda agulha não está presente. Para o restante, na prática, a diferença pode seguramente ser ignorada, tanto por causa do tamanho pequeno e principalmente por causa da relação que discutimos na Seção III apresentada anteriormente.

$$\tan v = LR^{-(n+1)} + L'R^{-(n+3)} + L''R^{-(n+5)} + \dots ,$$

então para o primeiro método

$$L = \frac{nmM}{mT + \Theta} ,$$

para o segundo método

$$L = \frac{mM}{mT + \Theta} .$$

12.20

A partir da teoria de eliminação será facilmente concluído que o cálculo torna-se mais impreciso devido aos erros inevitáveis de observação quanto maior for o número de coeficientes que têm de ser determinados por eliminação. Portanto o método prescrito na Seção 12.18, II,⁴¹⁵ é para ser altamente apreciado por ele suprimir os coeficientes $R^{-(n+2)}$, $R^{-(n+4)}$. No caso de simetria completa estes coeficientes já seriam eliminados por si mesmos, mas seria muito incerto depender da ocorrência deste caso. Além disto, um pequeno desvio da simetria teria uma influência muito menor no primeiro método do que no segundo, e se ao menos é tomado cuidado para que o ponto h' , a partir do qual são medidas as distâncias, esteja com precisão suficiente no meridiano magnético passando através do ponto h , não haverá diferença significativa entre $u' - u''$ e $u''' - u''''$. Contudo, as coisas ficam diferentes no segundo método, especialmente se o instrumento requer suspensão excêntrica. Este método sempre atingirá uma precisão muito menor sempre que o espaço não permitir observações de ambos os lados. Além disto, o primeiro método é também especialmente preferível por permitir um valor de L duas vezes tão grande quanto no segundo, no caso da realidade, onde $n = 2$. Se, a propósito, queremos descartar, tanto quanto possível no segundo método, o termo dependente de $R^{-(n+2)}$ no caso de suspensão excêntrica, o ponto h' deve ser escolhido de tal forma que o ponto médio da agulha (para $u = u^0$) esteja no centro entre h e h' . Contudo, devo omitir o cálculo que mostrou isto por questão de brevidade.

12.21

Nos cálculos anteriores deixamos o expoente n indeterminado. Durante os dias de 24 de junho a 28 de junho de 1832, realizamos duas séries de experiências com extensões até as maiores distâncias permitidas pela sala, através das quais mostra-se mais inteligivelmente qual o valor que a natureza exige. Na primeira série a segunda agulha (de acordo com o método da Seção 12.19) foi colocada em uma linha reta perpendicular ao meridiano magnético, na segunda série o ponto médio da agulha foi ele próprio colocado no meridiano. Aqui vai um panorama destas experiências, nas quais as distâncias R estão expressas em frações de metros e os valores do ângulo $(u' - u'' + u''' - u'''')/4$ estão denotados para a primeira série por v , e para a segunda série por v' .

⁴¹⁵Ver a página 172.

R	v	v'
1,1 m		1° 57' 24,8''
1,2		1 29 40,5
1,3	2° 13' 51,2''	1 10 19,3
1,4	1 47 28,6	0 55 58,9
1,5	1 27 19,1	0 45 14,3
1,6	1 12 7,6	0 37 12,2
1,7	1 0 9,9	0 30 57,9
1,8	0 50 52,5	0 25 59,5
1,9	0 43 21,8	0 22 9,2
2,0	0 37 16,2	0 19 1,6
2,1	0 32 4,6	0 16 24,7
2,5	0 18 51,9	0 9 36,1
3,0	0 11 0,7	0 5 33,7
3,5	0 6 56,9	0 3 28,9
4,0	0 4 35,9	0 2 22,2

Mesmo uma olhada superficial mostra que para valores maiores os números na segunda coluna são aproximadamente duas vezes tão grandes quanto os números da terceira, e também os números em cada coluna seguem aproximadamente o inverso do cubo da distância, de tal forma que nenhuma dúvida permanece em relação à precisão do valor $n = 2$. Para confirmar ainda mais esta lei através de experiências específicas, lidamos com todos os números de acordo com o método dos mínimos quadrados, através do qual surgiram os seguintes valores dos coeficientes:

$$\tan v = 0,086870R^{-3} - 0,002185R^{-5} ,$$

e

$$\tan v' = 0,043435R^{-3} + 0,002449R^{-5} .$$

O resumo seguinte mostra a comparação dos valores calculados por esta fórmula com os valores observados.

Valores calculados.				
R	v	Diferença	v'	Diferença
1,1 m			1° 57' 22,0''	+2,8''
1,2			1 29 46,5	-6,0
1,3	2° 13' 50,4''	+0,8''	1 10 13,3	+ 6,0
1,4	1 47 24,1	+ 4,5	0 55 58,7	+ 0,2
1,5	1 27 28,7	-9,6	0 45 20,9	-6,6
1,6	1 12 10,9	-3,3	0 37 15,4	-3,2
1,7	1 0 14,9	-5,0	0 30 59,1	-1,2
1,8	0 50 48,3	+ 4,2	0 26 2,9	-3,4
1,9	0 43 14,0	+ 7,8	0 22 6,6	+ 2,6
2,0	0 37 5,6	+ 10,6	0 18 55,7	+ 5,9
2,1	0 32 3,7	+ 0,9	0 16 19,8	+ 4,9
2,5	0 19 2,1	-10,2	0 9 38,6	-2,5
3,0	0 11 1,8	-1,1	0 5 33,9	-0,2
3,5	0 6 57,1	-0,2	0 3 29,8	-1,0
4,0	0 4 39,6	-3,7	0 2 20,5	+ 1,7

12.22

As experiências precedentes foram realizadas principalmente com a intenção de colocar a lei de ação magnética acima de qualquer suspeita e, além disto, de examinar quantos termos da série são para ser levados em conta, assim como saber o grau de precisão que as experiências permitem. Elas mostraram que, se não fizemos as distâncias menores do que quatro vezes o comprimento da agulha, dois termos são suficientes.⁴¹⁶ Além disto, as diferenças que o cálculo produziu não podem simplesmente ser devidas a erros observacionais. Várias medidas preventivas ainda não estavam prontas na época, com a aplicação delas pode ser esperado uma conformidade maior. Estas incluem correções para a variabilidade horária da intensidade do magnetismo terrestre, para a qual deve-se levar em consideração a utilização de uma outra agulha para comparação, de acordo com o método do qual falamos na Seção 12.10. Contudo, para que possamos saber o valor do magnetismo terrestre, até onde pode ser obtido por estas experiências, acrescentamos uma sinopse das experiências restantes neste grupo.

O valor da fração $\frac{\Theta}{T_m}$ para a primeira agulha e para o fio sobre o qual ela está pendurada, é obtido pelo método descrito na Seção 12.8 como sendo $= \frac{1}{251,96}$.

Daqui vem o resultado:

$$\frac{M}{T} = 0,0436074 .$$

Este número é baseado no metro como unidade de comprimento. Se preferirmos considerar o milímetro, este número deve ser multiplicado pelo cubo de 1000, de tal forma que

$$\frac{M}{T} = 43\,607\,400 .$$

⁴¹⁶[Nota de Gauss:] O comprimento das agulhas utilizadas nestas experiências era de aproximadamente 0,3 m ; se tivéssemos tentado incluir o termo R^{-7} no cálculo, a precisão teria diminuído em vez de aumentar.

Para a segunda agulha, experiências foram efetuadas em 28 de junho assemelhando-se às aquelas que descrevemos para uma outra agulha na Seção 12.11; milímetros, miligramas e os segundos do tempo solar médio foram tomados como unidades, resultando em:

$$TM = 135\,457\,900 ,$$

e a partir disto, por eliminação da grandeza M ,

$$T = 1,7625 .^{417}$$

12.23

Se são realizadas experiências para determinar o valor absoluto T do magnetismo terrestre, é muito significativo tomar cuidado que o conjunto destas experiências seja completado dentro de um intervalo de tempo não muito longo, de tal forma que não se receie uma mudança significativa no estado magnético das agulhas utilizadas nas experiências. É recomendado que ao observar os desvios da agulha móvel seja aplicado apenas o procedimento da Seção 12.20, após apenas duas distâncias diferentes terem sido escolhidas apropriadamente, assumindo que dois termos da série sejam suficientes. Escolhemos como exemplo uma entre as várias aplicações deste método, a saber, aquela para a qual foi devotado o maior cuidado ao medir-se as distâncias com precisão microscópica.

As experiências foram efetuadas em 18 de setembro de 1832 com dois instrumentos que queremos denotar por A e B , e especificamente com três agulhas, denotadas por 1, 2, 3. As agulhas 1 e 2 são as mesmas referidas como a primeira e a segunda na Seção 12.11. As experiências são divididas em duas partes.

Inicialmente foram observadas as oscilações simultâneas da agulha 1 no instrumento A e da agulha 2 no instrumento B . Resultaram como duração de uma oscilação, reduzida a amplitudes infinitamente pequenas:

$$\begin{array}{ll} \text{para a agulha 1} & \dots\dots 15,22450'', \\ \text{para a agulha 2} & \dots\dots 17,29995'', \end{array}$$

a primeira para 304 oscilações, a última para 264 oscilações.

Em seguida a agulha 3 foi suspensa no instrumento A , enquanto a agulha 1 era colocada na linha reta perpendicular ao meridiano magnético, direcionada ao Leste e também ao Oeste e em ambos os lados em uma maneira dupla, e foi observado o desvio da agulha 3 para a posição única da agulha 1. Esta experiência, que foi repetida para duas distâncias diferentes R , deu os seguintes valores do ângulo v , cujo significado é o mesmo que na Seção 12.19 e na Seção 12.21:

$R = 1,2\ m$	$v = 3^\circ\ 42'\ 19,4''$
$R' = 1,6\ m$	$v' = 1^\circ\ 34'\ 19,3''$

Também durante esta experiência foram observadas as oscilações da agulha 2 no instrumento B . O tempo médio calculado para 414 oscilações correspondeu ao valor da duração da oscilação para arcos infinitamente pequenos = 17,2948''.

⁴¹⁷Ver a Seção 9.2.

Os períodos de tempo foram observados em um relógio cujo atraso diário era de $14,24''$. Se M e m denotam os momentos do magnetismo livre para as agulhas 1 e 3, e Θ a constante de torção do fio no instrumento A , enquanto suporta a agulha 1 ou a 3 (cujo peso é quase idêntico), então temos:

$$\frac{\Theta}{TM} = \frac{1}{597,4} ,$$

como na Seção 12.11;

$$\frac{\Theta}{Tm} = \frac{1}{721,6} ,$$

pois a agulha 3 estava mais fortemente magnetizada do que a agulha 1.

O momento de inércia da agulha 1 já era conhecido de experiências anteriores (ver a Seção 12.11), que haviam fornecido: $K = 4228732400$, onde foram utilizados o milímetro e o miligrama como unidades.

A mudança no termômetro em ambas as salas onde foram instalados os instrumentos foi tão pequena durante todo o período das experiências que é supérfluo considerá-la aqui.

Queremos agora proceder ao cálculo destas experiências com o objetivo de inferir delas a intensidade T do magnetismo terrestre. A variação nas oscilações da agulha 2 indicam uma mudança pequena nesta intensidade. Portanto, para que possamos falar de um valor definido, vamos reduzir a duração observada das oscilações da primeira agulha ao estado médio do magnetismo terrestre durante a segunda parte das observações. Esta duração requer ainda uma outra redução devido ao atraso do relógio, e uma terceira devido à torção do fio. Desta forma a duração reduzida de uma oscilação produziu:

$$= 15,22450 \times \frac{17,29484}{17,29995} \cdot \frac{86400}{86385,76} \cdot \sqrt{\frac{598,4}{597,4}} = 15,23500'' = t .$$

Daqui segue o valor do produto

$$TM = \frac{\pi\pi K}{tt} = 179\,770\,600 .$$

A pequena diferença entre este valor e aquele na Seção 12.11 encontrado em 11 de setembro é para ser atribuído à mudança no magnetismo terrestre e também à mudança no estado magnético da agulha.

Dos desvios observados deduzimos:

$$F = \frac{R'^5 \tan v' - R^5 \tan v}{R'R' - RR} = 113\,056\,200 ,$$

se considerarmos o milímetro como unidade, e portanto

$$\frac{M}{T} = \frac{1}{2}F \left(1 + \frac{\Theta}{Tm} \right) = 56\,606\,437 .$$

Finalmente, a comparação deste número com o valor de TM produz

$$T = 1,782088$$

como valor da intensidade horizontal da força magnética terrestre em 18 de setembro às 5 horas.⁴¹⁸

12.24

As experiências precedentes foram feitas no Observatório Astronômico onde a localização para o instrumento foi procurada de tal forma que o ferro fosse mantido longe de suas proximidades tanto quanto possível. Contudo, não pode ser duvidado que massas de ferro exerceram um efeito de forma alguma insignificante sobre as agulhas suspensas, massas estas que estavam distribuídas abundantemente nas paredes, janelas e portas do prédio, na verdade, até as componentes de ferro dos grandes instrumentos astronômicos, sendo que nestas massas o magnetismo é induzido pela força magnética terrestre. As forças surgindo daqui alteram não apenas a direção mas também a intensidade do magnetismo terrestre em um pequeno valor, e nossas experiências não fornecem o valor puro da intensidade do magnetismo terrestre, mas o valor modificado pelo local do instrumento *A*. Desde que as massas de ferro permaneçam em seus lugares e os elementos do próprio magnetismo terrestre (a saber, a intensidade e a direção) não modifiquem-se muito consideravelmente, esta modificação tem de permanecer significativamente constante, mas é de fato desconhecida até agora qual intensidade ela alcançava; todavia, estou ligeiramente inclinado a acreditar que ela excede em um ou dois centésimos do valor total. Contudo, não deve ser difícil determinar os valores [das modificações] através de experiências, ao menos aproximadamente, a saber, através da observação das oscilações simultâneas de duas agulhas, uma das quais estaria no local usual de observação, a outra neste meio tempo estaria a uma distância bem grande do prédio e de outras massas de ferro perturbadoras, as quais teriam então de trocar de lugar. Mas até o momento não foi possível realizar esta experiência. O remédio mais seguro, contudo, é construir um prédio especial devotado a observações magnéticas, o qual será logo construído como resultado da graça real, sendo que em sua construção o ferro é para ser totalmente excluído.

12.25

Além das experiências descritas, realizamos muitas outras experiências similares, mesmo que tenhamos tomado menos cuidado do que nas anteriores. Todavia, será de interesse juntar aqui os resultados em uma tabela na qual, contudo, estes resultados são transitórios, os quais antes da instalação do instrumento mais refinado, foram obtidos através de outros, com recursos mais toscos em agulhas das mais variadas dimensões, embora todos eles tenham fornecido pelo menos uma aproximação da realidade. Através de experiências repetidas resultaram os seguintes valores sucessivos de T :

⁴¹⁸Ver a Seção 9.2.

Número	Data, 1832	T
I	21 de maio	1,7820
II	24 de maio	1,7694
III	4 de junho	1,7713
IV	24-28 de junho	1,7625
V	23, 24 de julho	1,7826
VI	25, 26 de julho	1,7845
VII	9 de setembro	1,7764
VIII	18 de setembro	1,7821
XI	27 de setembro	1,7965
X	15 de outubro	1,7860

As experiências V-IX foram realizadas juntas no mesmo local, mas as I-IV em locais diferentes; a experiência X é de fato uma mistura, pois os desvios foram observados no lugar usual, mas as oscilações em um outro local. Nas experiências VII e VIII, foi aplicada uma precisão quase idêntica; contudo, nas experiências IV, V, VI e X, uma precisão um pouco menor, e nas experiências I-III uma muito menor. Nas experiências I-VIII, de fato, foram utilizadas agulhas diferentes, embora tivessem o mesmo peso e o mesmo comprimento (o peso estava entre 400 g e 440 g); a experiência X, ao contrário, utilizou uma agulha cujo peso era de 1062 g e cujo comprimento era de 485 mm . A experiência IX só foi realizada para determinar qual grau de precisão pode ser obtido através de uma agulha muito pequena. O peso da agulha empregada era de apenas 58 g , contudo, além disto a precisão não era muito menor do que nas experiências VII e VIII. Não há dúvida que será significativamente aumentado o refinamento destas observações quando forem empregadas agulhas ainda mais pesadas, por exemplo agulhas pesando até 2000 ou 3000 g .

12.26

Se a intensidade T do magnetismo terrestre é para ser expressa por um *número* k , então este número é baseado em uma certa unidade V , a saber, uma força idêntica com aquela força, cuja conexão com as outras unidades dadas diretamente está certamente contida na acima, mas em uma forma um pouco complicada. Portanto, valerá à pena demonstrar esta conexão aqui novamente, para mostrar com clareza elementar que mudança sofre o número k , se começarmos com outras unidades em vez das unidades originais.

Para estabelecer a unidade V , tem-se de proceder da unidade de magnetismo livre M ⁴¹⁹ e da unidade de distância R , e fazemos V igual à força exercida por M na distância R .

Como unidade M , assumimos aquela quantidade de fluido magnético que exerce, em uma quantidade igualmente grande M na distância R , uma força motriz W (ou, caso prefira-se, uma pressão), que é equivalente a esta [força] que serve como unidade, isto é, equivalente à força que atua sobre a massa P suposta unitária com uma aceleração A suposta unitária.

Para estabelecer a unidade A , estão disponíveis dois caminhos. A saber, A pode ou ser deduzida a partir de uma força dada imediatamente similar, por exemplo a partir da gravidade no local da observação, ou do efeito de A , o qual manifesta-se no movimento dos corpos. O segundo método, o qual seguimos em nossos cálculos, requer duas novas unidades, a saber, a unidade de tempo S e a unidade de velocidade C , de tal forma que a aceleração

⁴¹⁹[Nota de Gauss:] Quase não é necessário lembrar que cessa aqui a notação anterior dada para as letras.

que é considerada como unitária é aquela que, se age no tempo S , produz a velocidade C ; finalmente, assumimos para a última velocidade aquela que corresponde ao movimento uniforme através do espaço R no tempo S .

Assim é claro que a unidade V depende de três unidades, ou R, P, A ou R, P, S .

Se agora em lugar das unidades V, R, M, W, A, P, C, S , assumirmos outras unidades, [a saber,] $V', R', M', W', A', P', C', S'$, que estão conectadas entre si como as anteriores, e o magnetismo terrestre for expresso pelo número k' pelo emprego da unidade V' , então é para ser investigado como este [número k'] relaciona-se com k .

Se colocarmos:

$$V = vV'$$

$$R = rR'$$

$$M = mM'$$

$$W = wW'$$

$$A = aA'$$

$$P = pP'$$

$$C = cC'$$

$$S = sS' ,$$

então v, r, m, w, a, p, c, s serão números abstratos e

$$kV = k'V' \quad \text{ou} \quad kv = k' ,$$

$$v = \frac{m}{rr} ,$$

$$\frac{mm}{rr} = w = pa ,$$

$$a = \frac{c}{s} ,$$

$$c = \frac{r}{s} .$$

Da combinação destas equações encontramos:

$$\text{I.} \quad k' = k \sqrt{\frac{p}{rss}}$$

$$\text{II.} \quad k' = k \sqrt{\frac{pa}{rr}} .$$

Desde que sigamos o caminho utilizado em nossas observações, somos obrigados a empregar esta primeira fórmula. Se, por exemplo, assumirmos o metro e a grama como unidades em vez do milímetro e da milígrama, então $r = \frac{1}{1000}$, $p = \frac{1}{1000}$, portanto $k = k'$; se [são

utilizados como unidades] a linha de Paris e a libra de Berlim⁴²⁰ então teremos: $r = \frac{1}{2,255829}$, $p = \frac{1}{467711,4}$, conseqüentemente

$$k' = 0,002196161k ,$$

e assim, por exemplo, a experiência VIII fornece o valor $T = 0,0039131$.

Se preferirmos seguir um outro caminho e assumirmos a gravidade como unidade da força aceleradora então, para o Observatório Astronômico de Göttingen, $a = \frac{1}{9811,63}$; então, se mantivermos o milímetro e o miligrama, os números k são para ser multiplicados por 0,01009554 e a alteração da unidade anterior é para ser tratada de acordo com a fórmula II.

12.27

A intensidade da componente horizontal da força magnética terrestre, T , é para ser multiplicada pela secante da inclinação com o objetivo de obter-se a intensidade total. Foi mostrado pelas observações de Humboldt o fato de que a inclinação é variável em Göttingen e que esta sofreu uma diminuição no período recente, sendo que ele encontrou no mês de dezembro de 1805 o valor $69^\circ 29'$, mas no mês de setembro de 1826 encontrou $68^\circ 29' 26''$. De forma semelhante encontrei em 23 de junho de 1832, com ajuda do mesmo aparelho para medir as inclinações que Mayer empregou, $68^\circ 22' 52''$, o que parece indicar uma desaceleração da diminuição; contudo estou inclinado a dar um valor menor a esta observação, não apenas devido à imperfeição do instrumento, mas também devido à circunstância de que a observação realizada no Observatório não estava protegida adequadamente da influência das massas de ferro. Contudo, estes fatores também ganharão uma precisão maior no futuro.

12.28

Neste tratado seguimos a maneira usualmente adotada de explicar os fenômenos magnéticos, não apenas por ela ser completamente adequada, mas também devido a ela levar a cálculos bem mais simples do que a outra maneira, que atribui o magnetismo a correntes galvano-elétricas ao redor das partículas do corpo magnético.⁴²¹ Não foi nossa intenção confirmar nem refutar esta visão que com certeza recomenda-se em diversos aspectos; isto seria inoportuno, pois a lei do efeito mútuo entre os elementos de tais correntes ainda não parece ter sido investigada suficientemente. Qualquer que seja a visão adotada no futuro para os fenômenos, sejam eles puramente magnéticos ou eletromagnéticos, a primeira teoria tem de sempre levar aos mesmos resultados que a teoria usual.⁴²² E o que está desenvolvido com base na teoria usual no presente tratado, estará em uma posição de ser modificado apenas na forma, mas não no essencial.

⁴²⁰Em alemão: *das Berliner Pfund*.

⁴²¹Gauss está se referindo à hipótese das correntes moleculares de André-Marie Ampère (1775-1836). Ela foi desenvolvida entre 1820 e 1827, ver o Capítulo 5 (A Conceção Magnética de Ampère) do livro *Eletrodinâmica de Ampère*, [AC11] e [AC15]. Ver ainda a Nota de rodapé 110 na página 41.

⁴²²Ou seja, a teoria das correntes moleculares de Ampère tem de sempre levar aos mesmos resultados que a teoria usual do magnetismo que assume a existência de fluidos magnéticos Norte e Sul.

Capítulo 13

[Dorn, 1894] Notas de E. Dorn sobre o Artigo de Gauss

13.1 Introdução às Notas de Dorn

A. K. T. Assis⁴²³

Apresento nesse Capítulo os comentários feitos por E. Dorn relacionados ao trabalho de 1833 de Gauss para dar o contexto e o significado dessa obra. Essas Notas de Dorn, datadas de 22/09/1893, encontram-se na série de clássicos da ciência editados por Ostwald e foram publicadas em 1894 juntamente com a tradução em alemão do artigo de Gauss feita por A. Kiel. Não tenho conhecimento de nenhuma tradução em inglês nem para qualquer outra língua desses comentários de Dorn, exceto a tradução que fiz do alemão para o português e que foi publicada em 2003. A versão apresentada aqui tem melhorias em relação à versão de 2003.⁴²⁴

13.2 Notas de Dorn

E. Dorn^{425,426}

O tratado de Gauss, cuja tradução está impressa acima, tem por diversos motivos um significado extraordinário para a física: pelo *novo princípio* de medida das grandezas físicas (o assim chamado sistema absoluto de unidades),^{427,428,429} pela possibilidade de determinar com sua ajuda a intensidade do magnetismo terrestre a qualquer momento em uma medida

⁴²³Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

⁴²⁴[Gau94] e [Ass03b].

⁴²⁵[Gau94] com tradução para o português em [Ass03b].

⁴²⁶As Notas de rodapé de Dorn são representadas por [Nota de Dorn:], todas as outras Notas de rodapé são de minha autoria.

⁴²⁷Em alemão: *das sogennant absolute Maasssystem*.

⁴²⁸[Nota de Dorn:] Uma descrição coerente do sistema absoluto de unidades encontra-se por exemplo em F. Kohlrausch, *Leitfaden der praktischen Physik*, Apêndice.

⁴²⁹Ver [Koh70] e [Koh10], com tradução para o inglês em [Koh83a].

invariável e, finalmente, pelos novos métodos de observação com uma precisão até então inigualável.

Na mecânica analítica já era comum a longo tempo deduzir, a partir das unidades fundamentais para comprimento, massa e tempo (para Gauss estas eram mm , mg , s ; após a resolução do Congresso de Paris de 1881 elas são agora cm , g , s), as unidades para as grandezas mecânicas restantes. Como unidade de velocidade vale aquela pela qual a unidade de comprimento é percorrida na unidade de tempo; a unidade de aceleração acontece então quando a velocidade cresce na unidade de velocidade que acaba de ser definida no tempo 1; a unidade de força motriz é aquela que confere a aceleração 1 à massa 1.

Gauss⁴³⁰ ampliou este procedimento para além do campo da mecânica pura: baseado na lei de interação de Coulomb entre dois polos magnéticos,⁴³¹ definiu ele como unidade de magnetismo à quantidade de magnetismo Norte que exerce em uma outra quantidade igual a esta separada pela unidade de distância a força absoluta medida 1,⁴³² e definiu como unidade da intensidade magnética (a magnitude do campo magnético) como sendo aquela que atua no polo unitário com uma força de 1.

O próprio Gauss^{433,434} já havia chamado a atenção que “não haverá dificuldade em reduzir essas medições galvânicas a *unidades absolutas*”, e seu amigo e colaborador Wilhelm Weber^{435,436} resolveu de fato este problema, ao mesmo tempo que estabeleceu o sistema absoluto de unidades eletromagnéticas.

Atribui-se atualmente para as unidades derivadas certas “dimensões” com relação às unidades fundamentais, por exemplo se l , m , t indicam as unidades fundamentais, coloca-se como dimensão de velocidade lt^{-1} , e similarmente para um polo magnético $l^{3/2}m^{1/2}t^{-1}$, para um campo magnético $l^{-1/2}m^{1/2}t^{-1}$.^{437,438} O principiante deve ser advertido do mal-entendido de considerar as dimensões como o significado verdadeiro das grandezas respectivas e de querer considerar um polo magnético equivalente a $l^{3/2}m^{1/2}t^{-1}$. Gauss não forneceu nenhum motivo para este mal-entendido, muito pelo contrário expôs claramente o verdadeiro sentido do que hoje chamamos de dimensões, que as mesmas meramente possuem significado para a passagem de um sistema de unidades fundamentais para um outro. A saber, se adota-se em lugar das unidades l , m , t novas unidades l' , m' , t' , as quais relacionam-se com as antigas por $l = \lambda l'$, $m = \mu m'$, $t = \tau t'$, então por exemplo o número que expressa a intensidade horizontal [da força magnética terrestre] no sistema l , m , t é para ser multiplicado por $\lambda^{-1/2}\mu^{1/2}\tau^{-1}$ para se encontrar o número que representa a mesma grandeza no novo sistema. Assim atualmente no centro da Alemanha a intensidade horizontal [da força magnética terrestre] nas unidades Gaussianas mm , mg , s é de cerca de 1,9. Se quisermos passar para o sistema cm , g , s então como $1\text{ mm} = 0,1\text{ cm}$ e $1\text{ mg} = 0,001\text{ g}$ temos de multiplicar 1,9 por $0,1^{-1/2} \cdot 0,001^{1/2} = 0,1$, com o que se obtém 0,19.

⁴³⁰[Nota de Dorn:] Ver a Seção 12.26.

⁴³¹Ver a Nota de rodapé 107 na página 41.

⁴³²Ou seja, 1 unidade de polo magnético Norte é aquela unidade que exerce em outra quantidade unitária de polo magnético Norte, separada da primeira unidade pela unidade de distância, a força unitária.

⁴³³[Nota de Dorn:] Anúncio lido em Göttingen em 24 de dezembro de 1832. Gauss, *Obras*, Vol. V, pág. 301.

⁴³⁴[Gau32, pág. 301 das *Obras* de Gauss], traduzida em português no Capítulo 10. Ver, em particular, a página 144.

⁴³⁵[Nota de Dorn:] W. Weber, *Obras*, Vol. III, págs. 6, 276, 320, 591.

⁴³⁶[Web41b], [Web51], [Web52b, pág. 320 das *Obras* de Weber] e [Web55] com traduções para o inglês em [Web21i], [Web61], [Web21q], [Web21f] e [Web21j]. O trabalho [Web41b] está traduzido no Capítulo 26.

⁴³⁷[Nota de Dorn:] Comparar Gauss, Seção 12.26. A teoria das “dimensões” foi desenvolvida inicialmente por Fourier para o ramo do calor. Ver Fourier, *Théorie Analytique de la Chaleur*. Parágrafos 159-162. 1822.

⁴³⁸[Fou22] com tradução para o inglês em [Fou52].

Que as grandezas no sistema absoluto de unidades não indicam o verdadeiro significado das mesmas, já resulta sem dúvida do fato de que existem dois sistemas absolutos de unidades elétricas^{439,440} nos quais as mesmas grandezas possuem dimensões bem diferentes, isto também já resulta por mostrar-se que quase todas as grandezas físicas expressam-se através de comprimento, massa e tempo.

A opinião sobre o sistema absoluto de unidades passou por muitas mudanças no decorrer do tempo; após um período de superestimação, parece que agora caímos no erro oposto.

Em primeiro lugar, a aplicação das unidades absolutas — que serão discutidas mais detalhadamente posteriormente para a área do magnetismo — garante a comparabilidade de medições feitas em diferentes momentos e em diferentes lugares. Além disso a expressão de muitas leis naturais assume uma forma muito simples quando certos fatores tornam-se iguais a 1 (por exemplo a força entre dois polos magnéticos μ_1 e μ_2 separados pela distância r torna-se igual a $\frac{\mu_1\mu_2}{r^2}$) e particularmente a unidade de “energia” para o ramo da eletricidade e do magnetismo torna-se análoga à unidade de energia mecânica.

Estas vantagens tiveram como consequência que, como na última década a eletrotécnica desenvolveu-se imensamente, seus representantes unanimemente adotaram o sistema de unidades baseado nas unidades absolutas eletromagnéticas.

Uma tentativa notável de transformação e de desenvolvimento adicional do sistema absoluto de unidades foi empreendido recentemente por W. Ostwald.^{441,442} Suas sugestões positivas dependem em essência, em primeiro lugar em introduzir para os diversos ramos como unidades fundamentais comuns o comprimento, tempo e energia (em lugar do significado apenas limitado que possui a massa).

Para a mecânica bastam estas unidades; para todo outro ramo — eletricidade, magnetismo, calor, energia radiante, química — precisa-se ainda de estabelecer uma quarta [unidade], para cada ramo respectivo uma unidade especial.

Percebe-se que por esse meio torna-se possível a aplicação de unidades absolutas também para os fenômenos de calor, da energia radiante e das forças químicas — o que não deu resultado pelo caminho preparado por Gauss e Weber.

Porém para o magnetismo resulta por aqui uma dificuldade particular.

Aparentemente a quarta unidade de Ostwald, se é para ser útil na prática, tem de permanecer imutável (como o metro original) ou tem de ser sem dúvida reproduzível (como a unidade de resistência de Siemens).⁴⁴³

Contudo não há um ímã imutável nem um lugar de intensidade imutável do magnetismo terrestre, de tal forma que a sugestão de Ostwald torna-se impraticável, se nos limitarmos apenas ao magnetismo.

Levando em conta a eletricidade o problema torna-se solúvel: após a determinação da unidade elétrica⁴⁴⁴ toma-se como unidade do momento magnético (o “magnetismo em barra”) aquele que a grande distância exerce uma ação igual à ação produzida por uma corrente [elétrica] de grandeza 1 fluindo na unidade de área.

Para se apreciar adequadamente o significado do trabalho de Gauss para o nosso conhecimento do magnetismo terrestre, em especial de sua intensidade, tem de se ter presente o

⁴³⁹[Nota de Dorn:] Ou até mesmo quatro. Comparar Hertz, *Wied. Ann.*, Vol. 24, pág. 114, 1885.

⁴⁴⁰[Her85].

⁴⁴¹[Nota de Dorn:] W. Ostwald, *Studien zur Energetik, Ber. d. Sächs. Ges. d. Wissenschaften*, 1891, pág. 271, e 1892, pág. 211.

⁴⁴²F. W. Ostwald (1853-1932). Ver [Ost91] e [Ost92].

⁴⁴³E. W. von Siemens (1816-1892).

⁴⁴⁴[Nota de Dorn:] Esta é realizável de diversas maneiras.

estado deste ramo da ciência antes de sua publicação.^{445,446} Antes de Gauss podia-se (através da observação das oscilações de uma agulha magnética, especialmente de uma agulha de inclinação) obter uma comparação bem grosseira da intensidade presente em um lugar com a presente em um outro lugar padrão. Contudo, devido às mudanças que acontecem [na força magnética terrestre e no momento magnético da agulha], estas comparações em intervalos de tempo maiores perdem todo o valor. Gauss mostrou como determinar a intensidade usando a todo momento uma unidade inalterável; ele a designou como “absoluta” em oposição às medições relativas anteriores. Ele não contentou-se de empregar seu método em Göttingen, mas fundou a Sociedade Magnética de vasta ramificação, cujas valiosas observações ele publicou em associação com Weber.^{447,448}

Gauss refere-se a um trabalho de Poisson,^{449,450} contudo estaria-se enganado caso se considerasse este como inventor do sistema absoluto de unidades. Poisson mostra que quando a unidade de magnetismo⁴⁵¹ exerce a força f em uma outra [unidade] igual separada pela unidade de distância, a intensidade do magnetismo terrestre pode ser expressa com ajuda de f . O método sugerido para isto são as oscilações de duas agulhas magnéticas apenas sob a influência do magnetismo terrestre e então cada agulha sob a influência conjunta da outra [agulha] e do magnetismo terrestre.

Nota-se que Poisson deixa como arbitrária a unidade de magnetismo, enquanto que o cerne do sistema absoluto de unidades de Gauss repousa justamente em determinar a mesma pela ação da força.⁴⁵²

Para o aperfeiçoamento dos métodos de observação^{453,454} — os quais a propósito não estão descritos neste tratado — foi de auxílio para Gauss suas qualidades como astrônomo prático. Pode-se considerar como fundamentos de uma grande parte da arte de observação moderna as medições de ângulo inventadas por Gauss,^{455,456} e experimentadas pela primeira vez com as medições do magnetismo terrestre, realizadas com telescópio, espelho e escala, assim como suas prescrições para determinar o período de oscilação de um ímã e para a obtenção empírica de seu momento de inércia.

13.2.1 Sobre a Seção 12.6

1) Para os iniciantes não serão supérfluos alguns esclarecimentos.

⁴⁴⁵[Nota de Dorn:] Pode-se ver a introdução do próprio Gauss. As observações de Humboldt lá citadas acham-se nos *Annalen* de Gilbert, Vol. 7, pág. 329, 1801, e Vol. 20, pág. 257, 1805; as de Sabine nos *Annalen* de Poggendorff, Vol. 6, pág. 88, 1826.

⁴⁴⁶Ver a Nota de rodapé 337 na página 138. Dorn também está se referindo a Edward Sabine (1788-1883), ver [Sab26].

⁴⁴⁷[Nota de Dorn:] *Resultate aus den Beobachtungen des magnet. Vereins*, 1836-1841.

⁴⁴⁸[GW37], [GW38], [GW39b], [GW40b], [GW41] e [GW43].

⁴⁴⁹[Nota de Dorn:] Poisson, Solution d’un problème relatif au magnétisme terrestre. *Connaissance des temps*, 1828, pág. 322.

⁴⁵⁰Ver [Poi25a] e [Poi25b].

⁴⁵¹Ou seja, a unidade de polo magnético, ou o polo magnético de intensidade = 1.

⁴⁵²Ou seja, Gauss determina a unidade de fluido magnético a partir da força exercida entre duas unidades iguais de fluido magnético separadas pela unidade de distância.

⁴⁵³[Nota de Dorn:] Comparar *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins*, especialmente 1836, pág. 13.

⁴⁵⁴[Web37a] com traduções para o inglês em [GW39a], [Web41e], [GW66] e [Web21r]; e tradução para o francês em [Web38d]. Esse trabalho está traduzido para o português no Capítulo 15.

⁴⁵⁵[Nota de Dorn:] E independentemente por Poggendorff.

⁴⁵⁶Johann Christian Poggendorff (1796-1877).

A força magnética possui direção e intensidade constantes (“o campo magnético é homogêneo”) na parte do espaço em consideração aqui.

É introduzido um sistema de coordenadas fixo xyz no espaço; a força $\mathfrak{H}$ que atua na unidade do magnetismo (comparar Seção 12.26) tem as componentes X, Y, Z ,⁴⁵⁷ de tal forma que as componentes da força translacional atuando em uma partícula magnética μ ⁴⁵⁸ são dadas por

$$\mu X, \mu Y, \mu Z ,$$

e para o ímã inteiro

$$\sum \mu X, \sum \mu Y, \sum \mu Z .$$

Porém como X, Y, Z são constantes e $\sum \mu = 0$, vem que esta grandeza = 0, e em um campo magnético homogêneo não atua nenhuma força translacional. Portanto só pode haver um torque.⁴⁵⁹

Sejam x, y, z as coordenadas de μ , assim resulta ter o torque ao redor do eixo x o valor

$$\mathfrak{M}_x = \sum (y \cdot \mu Z - z \cdot \mu Y) = Z \sum \mu y - Y \sum \mu z .$$

Colocando-se

$$\sum mx = \alpha, \quad \sum my = \beta, \quad \sum mz = \gamma ,$$

então

$$\mathfrak{M}_x = \beta Z - \gamma Y ,$$

e similarmente

$$\mathfrak{M}_y = \gamma X - \alpha Z ,$$

$$\mathfrak{M}_z = \alpha Y - \beta X .$$

As grandezas α, β, γ são os momentos [magnéticos] do ímã na direção dos eixos x, y, z .

Denota-se por M o momento principal do ímã, e seja este entendido ao mesmo tempo na direção fixa do eixo magnético do ímã, de tal forma que (compare com a Seção 12.5)

$$\alpha = M \cos(M, x) , \quad \beta = M \cos(M, y), \quad \gamma = M \cos(M, z) .$$

Para que — na ausência de outras forças — o ímã encontre-se em equilíbrio em um campo homogêneo, tem de valer

$$\mathfrak{M}_x = \mathfrak{M}_y = \mathfrak{M}_z = 0 ,$$

⁴⁵⁷[Nota de Dorn:] A designação não corresponde à de Gauss, que não é apropriada para a utilização de coordenadas ortogonais.

⁴⁵⁸Em alemão: *ein magnetisches Theilchen* μ . Nesse caso μ seria uma partícula contendo apenas um único fluido magnético, Norte ou Sul, com intensidade μ . Essa partícula seria análoga ao conceito moderno de um monopolo magnético. Ver ainda a Nota de rodapé 390 na página 156.

⁴⁵⁹Em alemão: *Drehungsmoment*. Essa expressão pode ser traduzida como torque, torque de rotação, momento de torção, par de forças, binário de rotação ou binário.

de onde segue imediatamente

$$\alpha : \beta : \gamma = X : Y : Z ,$$

isto é

$$\cos(M, x) : \cos(M, y) : \cos(M, z) = \cos(\mathfrak{H}, x) : \cos(\mathfrak{H}, y) : \cos(\mathfrak{H}, z) .$$

Assim, o eixo magnético deve estar na direção do campo magnético.

Se esta condição não for satisfeita, surge um torque resultante

$$\sqrt{(\beta Z - \gamma Y)^2 + (\gamma X - \alpha Z)^2 + (\alpha Y - \beta X)^2} = M\mathfrak{H} \sin(M, \mathfrak{H}) ,$$

ao redor de um eixo cujo cosseno diretor comporta-se como

$$\beta Z - \gamma Y : \gamma X - \alpha Z : \alpha Y - \beta X .$$

Este eixo é portanto perpendicular às direções de M e de $\mathfrak{H}$.

Como neste caso é nula a força translacional, vem de acordo com um teorema bem conhecido, que este torque é o mesmo em relação a todos os eixos paralelos.

As discussões adicionais da Seção 12.6 tornam-se facilmente entendidas, quando substitui-se o torque por duas forças $\frac{M\mathfrak{H}}{r}$ direcionadas para $\mathfrak{H}$ e para a direção oposta, cujos pontos de atuação estão situados nas extremidades de uma linha de comprimento r paralela ao eixo magnético.

13.2.2 Sobre a Seção 12.7

2) O ímã agora pode girar em torno de um ponto C , o campo magnético homogêneo é o da Terra e o efeito da gravidade sobre a massa do ímã também é levado em consideração.

Transferimos a origem do nosso sistema de coordenadas para C , tomamos x horizontal no meridiano magnético apontando em direção ao Norte, y perpendicular a este [eixo] apontando em direção ao Leste, z vertical apontando para cima, e temos, quando pensamos na massa m do ímã concentrada em seu centro de gravidade x_1, y_1, z_1 , e assumimos um torque nulo ao redor dos eixos coordenados

$$\beta Z - y_1 mg = 0 ,$$

$$\gamma X - \alpha Z + x_1 mg = 0 ,$$

$$-\beta X = 0 .$$

Aqui g significa a aceleração da gravidade; a componente Y se anula para o sistema de coordenadas escolhido.

Da última equação segue-se que $\beta = 0$, isto é, o eixo magnético tem de estar perpendicular a y , portanto situado no meridiano magnético. Levando em consideração que $\beta = 0$, resulta da primeira equação que $y_1 = 0$, isto é, o centro de gravidade do ímã tem de encontrar-se no plano meridiano magnético através de C .

Para interpretar finalmente a segunda equação, notamos que se $\mathfrak{H}$ representar a intensidade total [da força magnética terrestre] e i sua inclinação, então:

$$X = \mathfrak{H} \cos i, \quad Z = -\mathfrak{H} \sin i ,$$

e

$$\alpha = M \cos \vartheta, \quad \gamma = -M \sin \vartheta ,$$

onde ϑ é a inclinação do eixo magnético em relação à horizontal.

Seja além disto S o centro de gravidade, $CS = s$, e σ o ângulo entre CS e o eixo x , assim a segunda equação transforma-se em

$$-M\mathfrak{H} \sin (\vartheta - i) + mgs \cos \sigma = 0 ,$$

isto é, o torque do magnetismo terrestre e do centro de gravidade ao redor do eixo y têm de se anular.

A forma modificada que Gauss deu a esta condição, resulta assim:

O efeito da componente vertical do magnetismo terrestre é substituído por Gauss (comparar a Seção 12.6) por uma transferência do centro de gravidade na direção do eixo magnético, que na nossa designação é

$$r' = \frac{M\mathfrak{H} \sin i}{mg} .$$

Com a introdução de r' , a segunda equação assume a [seguinte] forma:

$$-MX \sin \vartheta + mg [r' \cos \vartheta + x_1] = 0 ,$$

mas $r' \cos \vartheta + x_1$ é a distância do centro de gravidade substituído até a vertical situada através de C (o eixo z), e $MX \sin \vartheta$ é a grandeza representada por Gauss por $MT \sin i$.

Deseja-se agora realizar as oscilações do ímã ao redor da vertical z .

Girando-se de um ângulo u o plano vertical situado através do eixo magnético para fora do meridiano magnético, então

$$\beta = M \cos \vartheta \sin u ,$$

de onde, se K significa o momento de inércia, a equação de movimento torna-se

$$K \frac{d^2 u}{dt^2} = -MX \cos \vartheta \sin u .$$

Seja t o período de oscilação reduzido a amplitudes infinitesimalmente pequenas, então como se sabe

$$MX = \frac{\pi^2 K}{t^2 \cos \vartheta} ,$$

ou na representação de Gauss:

$$MT = \frac{\pi^2 K}{t^2 \cos i} .$$

13.2.3 Sobre a Seção 12.8

3) Atualmente é habitual designar a grandeza $\frac{\Theta}{TM} = \frac{1}{n}$ por “coeficiente de torção”.⁴⁶⁰

O fundamento das experiências para a determinação de n é simples.

A influência da torção no período de oscilação resulta nas seguintes medidas. Tomando a diferença das equações para o equilíbrio e movimento

$$0 = -TM \sin u^o + \Theta(v - u^o) ,$$

$$K \frac{d^2 u}{dt^2} = -TM \sin u + \Theta(v - u) ,$$

segue-se (pois u^o é constante):

$$K \frac{d^2(u - u^o)}{dt^2} = -TM(\sin u - \sin u^o) - \Theta(u - u^o) .$$

Porém temos

$$\begin{aligned} \sin u - \sin u^o &= \sin(u - u^o) \cos u^o - \sin u^o [1 - \cos(u - u^o)] \\ &= \sin(u - u^o) \cos u^o \left[1 - \tan u^o \tan \frac{u - u^o}{2} \right] . \end{aligned}$$

Se os experimentos forem realizados com apenas um grau moderado de cuidado,

$$\cos u^o \left[1 - \tan u^o \tan \frac{u - u^o}{2} \right]$$

não difere significativamente de 1; substituindo além disto $\Theta(u - u^o)$ por $\Theta \sin(u - u^o)$ vem:

$$K \frac{d^2(u - u^o)}{dt^2} = -(TM + \Theta) \sin(u - u^o) = -TM \left(\frac{n+1}{n} \right) \sin(u - u^o) ,$$

de onde se deduz imediatamente, que através da torção o período de oscilação para amplitudes infinitamente pequenas diminui na razão de

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{n}{n+1}}} .$$

13.2.4 Sobre a Seção 12.10

4) A maneira escolhida por Gauss de colocação do peso traz inconvenientes de fixação, pois mesmo pelas oscilações pode ocorrer um movimento giratório ao redor das pontas, pelo qual conforme as circunstâncias as oscilações podem ser aceleradas ou retardadas. Seria melhor suspendê-lo pelas bordas de corte em vez de pelas pontas; atualmente, de acordo com W. Weber, os cilindros são geralmente perfurados e presos a pinos verticais no suporte do ímã, de modo que o movimento relativo seja excluído.^{461,462}

⁴⁶⁰Em alemão: *Torsionsverhältniss*. Essa expressão pode ser traduzida como coeficiente, constante, relação, razão, taxa ou índice de torção.

⁴⁶¹[Nota de Dorn:] Ver também Dorn, *Annalen* de Wiedemann, Vol. 17, pág. 788, 1882. Kreichgauer, *Annalen* de Wiedemann, Vol. 25, pág. 273, 1885.

⁴⁶²[Dor82] e [Kre85].

Fechner apontou primeiro uma outra correção não secundária.^{463,464} A saber, o ímã principal situa-se nas observações de oscilações com sua direção mais longa próxima do meridiano magnético, nas observações de desvio perpendicular ao mesmo. Na primeira situação seu momento [magnético] sofre um aumento devido à força magnetizante da intensidade horizontal [do magnetismo terrestre], o qual desaparece imediatamente se o ímã é colocado perpendicularmente ao meridiano magnético. W. Weber^{465,466} indicou um procedimento para verificar esta redução e realizar os cálculos.

Como os coeficientes de temperatura do momento magnético até para bons ímãs mostram diferenças não insignificantes (0,001 – 0,0003 para 1 grau Celsius), para se atingir a precisão mais elevada deve-se determinar os coeficientes de temperatura do ímã principal e deduzir as variações da componente horizontal das oscilações de um segundo ímã com coeficientes de temperatura igualmente conhecidos ou das indicações de um “variômetro especial para a intensidade horizontal”.⁴⁶⁷ Tal variômetro de intensidade foi construído pela primeira vez pelo próprio Gauss;^{468,469} para o uso portátil há os instrumentos de F. Kohlrausch.^{470,471}

Um método preciso para a determinação dos coeficientes de temperatura do momento magnético foi fornecido por W. Weber.^{472,473}

13.2.5 Sobre as Seções 12.17 e 12.18

5) Também para um iniciante não trarão dificuldades consideráveis os desenvolvimentos da Seção 12.16 para a teoria das observações de desvio; as sugestões seguintes podem facilitar a compreensão da Seção 12.17.

Por causa da equação

$$mT \operatorname{sen} u^o + \Theta \operatorname{sen} (u^o - N) = 0 ,$$

tem-se

$$mT \operatorname{sen} u + \Theta \operatorname{sen} (u - N) = mT (\operatorname{sen} u - \operatorname{sen} u^o) + \Theta [\operatorname{sen} (u - N) - \operatorname{sen} (u^o - N)] .$$

Substituindo aqui

$$\operatorname{sen} u - \operatorname{sen} u^o = \operatorname{sen} (u - u^o) \cos u^o - \operatorname{sen} u^o [1 - \cos(u - u^o)] ,$$

⁴⁶³[Nota de Dorn:] Fechner, *Annalen* de Poggendorff, Vol. 55, pág. 189, 1842.

⁴⁶⁴[Fec42].

⁴⁶⁵[Nota de Dorn:] W. Weber, *Obras*, Vol. II, pág. 336. (*Abh. der Gött. Ges. d. Wiss.*, Vol. 6, 1855.) Comparar além disto Dorn, *Annalen* de Wiedemann, Vol. 17, pág. 776, 1882; igualmente Vol. 35, págs. 270 e 275, 1888.

⁴⁶⁶[Web56], [Dor82], [Dor88b] e [Dor88a].

⁴⁶⁷Instrumento para medir a variação da componente horizontal da força magnética terrestre.

⁴⁶⁸[Nota de Dorn:] Gauss, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1837*, pág. 1.

⁴⁶⁹[Gau38b]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 17.

⁴⁷⁰[Nota de Dorn:] F. Kohlrausch, *Annalen* de Wiedemann, Vol. 19, pág. 132, 1883.

⁴⁷¹[Koh83b].

⁴⁷²[Nota de Dorn:] W. Weber, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Verein im Jahre 1837*, pág. 38. (*Werke*, Vol. II, pág. 58.)

⁴⁷³[Web38e].

desprezando a segunda parte e transformando a outra diferença de seno em conformidade com isso, obtém-se

$$[mT \cos u^o + \Theta \cos(u^o - N)] \sin(u - u^o) .$$

A forma da série para $\tan(u - u^o)$ resulta assim:

Em primeiro lugar nota-se que $f, f', f'' \dots$ não contêm termos livres de $\cos(\psi - u)$ e $\sin(\psi - u)$. Na equação

$$(mT + \Theta) \sin(u - u^o) = fR^{-(n+1)} + f'R^{-(n+2)} + \dots$$

introduz-se

$$\sin(\psi - u) = \sin(\psi - u^o) \cos(u - u^o) - \cos(\psi - u^o) \sin(u - u^o) ,$$

e

$$\cos(\psi - u) = \cos(\psi - u^o) \cos(u - u^o) + \sin(\psi - u^o) \sin(u - u^o) ,$$

assim surgem no desenvolvimento de $f, f', f'' \dots$ em primeiro lugar as mesmas funções de u^o (em vez de u) multiplicadas em uma potência de $\cos(u - u^o)$, após isto termos com $\sin(u - u^o)$ e assim por diante.

Como agora $\sin(u - u^o)$ é da ordem de grandeza de $R^{-(n+1)}$ e $\cos(u - u^o)$ só se diferencia de 1 com termos da ordem $R^{-(2n+2)}$, então, se ainda para abreviar for colocado

$$\begin{aligned} f &= mM \times \{ [n \cos(\psi - U) \sin(\psi - u^o) + \sin(\psi - U) \cos(\psi - u^o)] \cos(u - u^o) \\ &\quad - [n \cos(\psi - U) \cos(\psi - u^o) - \sin(\psi - U) \sin(\psi - u^o)] \sin(u - u^o) \} \\ &= mM \{ C \cos(u - u^o) - S \sin(u - u^o) \} , \end{aligned}$$

teremos:

$$\begin{aligned} (mT + \Theta) \sin(u - u^o) &= mM \{ C \cos(u - u^o) - S \sin(u - u^o) \} R^{-(n+1)} \\ &\quad + f'_o R^{-(n+2)} + f''_o R^{-(n+3)} + \dots + f_o^{(n+1)} R^{-(2n+2)} + \Phi , \end{aligned}$$

onde Φ reúne os termos seguintes, os quais não são constituídos tão facilmente e o índice o significa a substituição de u^o em vez de u .

Agora, mova o termo com $S \sin(u - u^o)$ para o lado esquerdo, divida por

$$\{ (mT + \Theta) + mMSR^{-(n+1)} \} \cos(u - u^o) ,$$

e desenvolva em potências de R .

Levando em consideração a observação anterior feita sobre $\cos(u - u^o)$ obtém-se então

$$\tan(u - u^o) = \frac{mMC}{mT + \Theta} R^{-(n+1)} + \frac{f'_o}{mT + \Theta} R^{-(n+2)} + \dots$$

$$+ \frac{f_o^{(n)}}{mT + \Theta} R^{-(2n+1)} + \left\{ \frac{f_o^{(n+1)}}{mT + \Theta} - \frac{m^2 M^2 SC}{(mT + \Theta)^2} \right\} R^{-(2n+2)} + \Phi' ,$$

na qual Φ' reúne os termos seguintes.

Esta fórmula contém em primeiro lugar o resultado de Gauss para $\tan(u - u^o)$ e leva facilmente ao desenvolvimento da Seção 12.18.

Como $\arctan \alpha = \alpha - \frac{1}{3}\alpha^3 + \dots$, a série a ser deduzida para $u - u^o$ difere da anterior apenas por termos da ordem $-(3n + 3)$.

Ao mudar-se o ângulo ψ de π , as grandezas f' , $f''' \dots$ mudam seus sinais, enquanto que S e C mantêm os mesmos valores. Do valor médio de $\frac{1}{2}(u' + u''')$ e $\frac{1}{2}(u'' + u''')$ caem fora portanto f' , $f''' \dots$

Por outro lado, se U for aumentado em π , então S e C transformam-se em seus opostos. No caso da natureza ($n = 2$), portanto, na combinação $\frac{1}{4}(u' - u'' + u''' - u''')$, os termos com R^{-4} e R^{-6} se cancelarão e, portanto, também $\tan \frac{1}{4}(u' - u'' + u''' - u''')$, que tem a forma especificada por Gauss:^{474,475}

$$\tan \frac{1}{4}(u' - u'' + u''' - u''') = LR^{-3} + L'R^{-5} + L''R^{-7} + \dots$$

Halle a. S., 22 de setembro de 1893.

E. Dorn.

⁴⁷⁴[Nota de Dorn:] Comparar também Riecke, *Annalen* de Poggendorff, Vol. 149, pág. 62, 1873, e *Annalen* de Wiedemann, Vol. 8, pág. 299, 1879.

⁴⁷⁵[Rie73] e [Rie79].

Capítulo 14

[Gauss, 1837] Introdução aos Resultados das Observações Feitas pela Associação Magnética no Ano de 1836

Carl Friedrich Gauss⁴⁷⁶

Primeiro Relatório Anual da Associação Magnética

Entre os vários fenômenos do magnetismo terrestre com os quais só podemos ter conhecimento por meio de observações contínuas, realizadas precisamente em vários pontos da superfície da Terra, nenhum necessita de uma maior cooperação rigorosamente sistematizada de observadores, do que as *variações irregulares* às quais essa força está sujeita. Já é suficientemente bem conhecido que o desvio [declinação], a inclinação, e sem dúvida também a intensidade (embora, em relação a essa última grandeza, que só recentemente passou a ser pesquisada, ainda faltam observações suficientes) sofrem mudanças continuamente — mudanças seculares, que só atraem nossa atenção depois de longos intervalos de tempo, mas que eventualmente tornam-se muito grandes, — e mudanças periódicas, variando de acordo com os períodos anuais e diários. Contudo, para essas mudanças regulares, não é essencialmente necessário uma cooperação de observadores rigorosamente sistematizados, em várias estações, embora isso seja altamente desejável com o intuito de acelerar a extensão de nosso conhecimento; nesses aspectos, cada observador, mesmo independentemente de outros, pode trazer contribuições úteis.

Este, contudo, não é o caso no que diz respeito às variações irregulares para as quais apenas nos últimos anos tem sido devotada uma atenção maior. Hiorter e Celsius observaram, aproximadamente um século atrás, que durante o aparecimento de uma *aurora boreal*, a agulha magnética sofre oscilações irregulares e, frequentemente, muito grandes;⁴⁷⁷ e isso foi

⁴⁷⁶[Gau37c] com tradução em inglês em [Gau41c], [GW66] e [Gau21b]; e tradução para o francês em [Gau38a]. Todas as Notas são de minha autoria.

⁴⁷⁷Olof Hiorter (1696-1750) foi um astrônomo sueco. Anders Celsius (1701-1744) foi um astrônomo, físico e geofísico sueco que propôs em 1742 a escala de temperatura que leva seu nome.

posteriormente confirmado por inúmeras observações feitas por outros. Portanto, pode ser concluído que as mesmas forças que produzem os fenômenos das auroras boreais também atuam ao mesmo tempo na agulha magnética; e, além disso, que essa ação se estende a distâncias bem consideráveis, já que as auroras boreais são geralmente visíveis em uma ampla região. Obtemos uma noção ainda maior da ampla extensão de atividades dessas forças a partir da observação do Sr. Arago de que frequentemente nos mesmos dias em que observou em Paris perturbações violentas do movimento regular da agulha magnética, auroras boreais que não eram visíveis acima do horizonte de Paris tinham sido vistas em locais distantes.⁴⁷⁸

As irregularidades nos fenômenos do magnetismo terrestre, cuja ocorrência frequente também havia sido observada, especialmente por Humboldt em suas várias observações das oscilações diurnas e horárias da agulha magnética, obtiveram assim um interesse peculiar.⁴⁷⁹ Embora os fatos mencionados não provem que todas as oscilações irregulares da agulha são simultâneas com as auroras boreais, nem excluem a possibilidade de que muitas, talvez a maioria delas, tenham apenas causas locais, no entanto, dificilmente era possível confundir a evidência da ação não rara, em larga escala, de grandes forças naturais, que, se ainda não podiam ser investigadas em suas fontes, ofereciam pelo menos um objeto digno de investigação natural, a respeito das relações de sua atividade e extensão.

Reconhecimentos superficiais e meramente acidentais de tais relações podem nos aproximar desse objetivo. Para alcançá-lo, muitos fenômenos similares têm de ser seguidos precisamente em vários locais, sendo a época em que ocorrem e as intensidades observadas e medidas com atenção. Contudo, para esse objetivo são necessários planos organizados previamente entre aqueles observadores que possuem os meios apropriados ao seu alcance.

O célebre filósofo natural a quem devemos tantas contribuições ao nosso conhecimento do magnetismo terrestre também foi o pioneiro nesse aspecto. O Sr. von Humboldt fez com que fosse construída em Berlim, no final do ano de 1828, uma pequena casa, livre de ferro, — colocou nela uma bússola de variação construída por Gambey,⁴⁸⁰ — e combinou com possuidores de instrumentos similares em vários locais, alguns muito distantes, observações regulares da variação magnética em dias fixos. Foram acordados oito períodos por ano, cada um com duração de 44 horas, durante os quais a variação tinha de ser observada de hora em hora; em alguns locais as observações foram feitas dentro de prazos ainda menores de tempo, a saber, a cada meia hora, ou a cada vinte minutos. Os detalhes podem ser encontrados no décimo-nono volume do *Annalen der Physik* de Poggendorff, pág. 361,⁴⁸¹ e no mesmo periódico encontram-se também as observações que, seguindo esse acordo, foram feitas nos períodos acordados nos anos de 1829 e 1830 em Berlim, Freiberg, São Petersburgo, Kasan e Nicolaijef, juntamente com as representações gráficas de três dessas observações.

No Observatório Magnético de Göttingen, que foi construído no ano de 1833, e no qual o instrumento magnético tem uma construção totalmente diferente de qualquer um utilizado anteriormente, esses períodos de observação foram feitos pela primeira vez em 20 e 21 de março de 1834; observações correspondentes foram feitas em Berlim; mas as observações de Göttingen foram feitas a cada dez minutos, em Berlim apenas a cada hora. As observações de Berlim exibiram vários movimentos consideráveis, que também foram encontrados nas observações de Göttingen; enquanto que as observações de Göttingen exibiram nos tempos

⁴⁷⁸Ver a Nota de rodapé 200 na página 70.

⁴⁷⁹Ver a Nota de rodapé 337 na página 138.

⁴⁸⁰H.-P. Gambey (1787-1847) foi um mecânico e fabricante de instrumentos francês.

⁴⁸¹[DH30].

intermediários um grande número de movimentos que, obviamente, faltaram inteiramente nas observações feitas em Berlim. Portanto, não pôde ser decidido se as flutuações observadas em Göttingen foram apenas locais.

A decisão foi obtida no período seguinte de 4 e 5 de maio de 1834. Os tempos intermediários foram ainda menores, as observações foram feitas a cada cinco minutos, o que forneceu aos resultados um caráter bem mais definido. Não foram publicadas observações correspondentes com o aparelho de Gambey durante esse período ou em quaisquer períodos subsequentes. Por outro lado, o Sr. Sartorius,⁴⁸² que tomou parte ativa nas observações do período de março em Göttingen e que, como estava para realizar uma jornada de vários anos para a Itália, obteve para si mesmo um instrumento similar àquele de Göttingen, mas com dimensões menores, fez com ele observações completas e cuidadosas, em intervalos curtos, durante o período de maio, em Waltershausen, na Bavária, localizado ao redor de 20 milhas alemãs de Göttingen. Foi observada uma concordância surpreendente grande, não apenas em relação às maiores oscilações, mas até mesmo em quase todas as oscilações menores, que variaram em curtos períodos de tempo, de tal forma que não sobrou nada que pudesse ser justamente atribuído a causas locais.

Durante os três períodos seguintes, isto é, em junho, agosto e setembro de 1834, as observações foram continuadas em Göttingen exatamente da mesma forma; e o número de observadores em outros locais, com instrumentos de mesma construção ou similares, aumentou continuamente. O Prof. Encke,⁴⁸³ tendo conhecido, por inspeção pessoal, as instalações de Göttingen, ordenou provisoriamente um instrumento similar de menores dimensões para Berlim. O Sr. Sartorius observou com esse instrumento durante todos os períodos quando as circunstâncias permitiram, a saber, em junho em Frankfurt e em setembro em Bramberg, na província de Salzburg. Também foram feitas observações em Leipzig, Copenhague e Brunsvique,⁴⁸⁴ com instrumentos exatamente similares aos de Göttingen. O resultado das observações correspondentes foi bem similar àqueles mencionados anteriormente para o período de maio. Quase todos os numerosos movimentos observados em Göttingen ocorreram nas observações dos outros locais, embora com magnitudes relativas variadas, mas com uma concordância inconfundível.

Para obter uma prova adicional irrefutável em relação a esse resultado notável, o Prof. Weber, estando então em Leipzig, organizou para que observações correspondentes especiais fossem combinadas e feitas com esse objetivo naquele local e em Göttingen, em certos horários da manhã, tarde e noite nos dias 1 e 2 de outubro. Essas observações, realizadas por observadores altamente experientes e com o maior cuidado, foram totalmente publicadas no *Annalen der Physik* de Poggendorff, Vol. XXXIII, pág. 426,⁴⁸⁵ sendo [os resultados] visualizados por meio de representações gráficas.

Tornou-se agora evidente a necessidade de observar os fenômenos em intervalos de tempo muito menores do que aqueles escolhidos por Humboldt. Observamos durante alguns dos períodos acordados em intervalos de três minutos e alguns outros observadores fizeram o mesmo. Contudo, como vários dos colaboradores aderiram a intervalos de cinco minutos, e como esses intervalos são totalmente suficientes nos casos normais, subsequentemente adotamos, por questão de uniformidade, esse intervalo como uma regra geral. Contudo, como esses intervalos pequenos tornam o esforço incomparavelmente mais trabalhoso do que observar

⁴⁸²Wolfgang Sartorius von Waltershausen (1809-1876) foi um geólogo alemão.

⁴⁸³Johann Franz Encke (1791-1865) foi um astrônomo alemão.

⁴⁸⁴Em alemão: *Braunschweig*.

⁴⁸⁵[Gau34b].

de hora em hora, especialmente nos casos em que apenas poucas pessoas tomam parte, foi necessário, para manter a estabilidade da Associação, diminuir tanto o número quanto a duração dos períodos. Desde então foi fixado o número de seis [períodos] em um ano, sendo a duração de cada período de 24 horas. Foram adicionados dois períodos subordinados para cada período principal. Outros detalhes serão encontrados na sequência.

As observações têm continuado ininterruptamente, de acordo com esse planejamento, em Göttingen, e também em um número constantemente crescente de outros locais. Instrumentos de mesma construção ou similares aos de Göttingen, são utilizados em Altona, Augsburg, Berlim, Bonn, Brunsvique, Breda, Breslau, Cassel, Copenhage, Dublin, Freiberg, Göttingen, Greenwich, Halle, Kassan, Cracóvia, Leipzig, Milão, Marburg, Munique, Nápoles, São Petersburgo e Upsala. Até o momento não chegaram ao nosso conhecimento observações em oito desses lugares; e, em alguns outros, a participação nas observações ainda não se tornou ininterruptamente regular devido a circunstâncias externas.

Alguns períodos da época inicial da Associação foram publicados com representação gráfica no *Astronomische Nachrichten* de Schumacker e no *Annalen der Physik* de Poggen-dorff.⁴⁸⁶ Como aumentou muito a participação, chegou o momento de levar em consideração uma publicação regular, para que a coleção abundante de fatos úteis possa tornar-se uma propriedade comum daquela porção do público interessada nessas pesquisas. O que oferecemos agora pode ser considerado como o primeiro relatório anual desde que a Associação atingiu um certo tamanho.⁴⁸⁷ A partir do ano de 1837, os resultados de cada período serão publicados tão logo eles possam ser coletados de uma maneira suficientemente perfeita.

As observações e suas representações gráficas não serão apenas acompanhadas por aquelas explicações e observações relacionadas imediatamente a elas próprias; mas também acrescentaremos outras Memórias, nas quais encontrarão espaço vários assuntos relacionados com o amplo campo do magnetismo terrestre — os instrumentos, suas utilizações, manipulações e várias aplicações.

Em relação ao assunto imediato do trabalho da nossa Associação, as mudanças na declinação magnética, vou adicionar mais uma observação. Se, como não pode ser duvidado, os dois outros elementos da força magnética terrestre, a inclinação e a intensidade, estiverem sujeitas a mudanças similares, pode ser levantada a questão, por qual motivo tem sido dedicado preferencialmente, e até o momento exclusivamente, um trabalho tão cuidadoso ao primeiro elemento?

De fato, o conhecimento das variações e perturbações da declinação magnética possuem um interesse prático muito grande. Para o marinheiro, agrimensor e geodesta, é de considerável importância conhecer a frequência e magnitude das perturbações sofridas pela bússola, mesmo se fosse apenas para saber o grau de confiança que ele pode dar às suas indicações. Para os objetivos geodésicos o progresso dessas pesquisas pode fazer muito mais. Se for estabelecido que as perturbações irregulares nunca, ou apenas raramente, são apenas locais, — mas que elas ocorrem constantemente, ou quase sempre, simultaneamente, e com quase a mesma intensidade, em grandes regiões, assim, serão fornecidos os meios para torná-las quase completamente inofensivas. O agrimensor e o geodesta só precisarão fazer

⁴⁸⁶Heinrich Christian Schumacher (1780-1850) foi um astrônomo alemão que fundou o periódico *Astronomische Nachrichten* em 1821. Já o periódico *Annalen der Physik und Chemie*, atualmente conhecido como *Annalen der Physik*, foi editado por Poggen-dorff, ver a Nota de rodapé 199 na página 69.

⁴⁸⁷Gauss está se referindo ao primeiro volume da publicação *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins* (Resultados das Observações da Associação Magnética), [GW37], [GW38], [GW39b], [GW40b], [GW41], [GW43] e [GW40a].

todas as suas operações com a bússola de maneira precisa de acordo com o horário, fazendo com que observações simultâneas sejam feitas em algum outro lugar não muito distante; e será fácil eliminar os efeitos dessas perturbações por observações, assim como os viajantes tornam suas determinações barométricas de altura independentes das variações irregulares do barômetro, ao comparar observações feitas em estações fixas. Não é preciso dizer que não estamos falando aqui do tipo de distúrbios que a bússola sofre em minas de ferro.

Contudo, a preferência dada à declinação em relação aos outros elementos do magnetismo terrestre deve ser menos atribuída a esses motivos do que ao estado atual de nossos instrumentos. Para o naturalista, a busca por leis nos fenômenos naturais tem seu propósito e seu valor em si mesma, e uma magia peculiar envolve o reconhecimento da medida e da harmonia no que parece ser completamente irregular. Ao seguir o maravilhoso jogo das constantes mudanças na declinação, o aparelho agora em uso não deixa nada a desejar em termos de certeza, nitidez e facilidade de observação; no entanto, o mesmo não pode ser dito dos meios anteriores de observação para os outros dois elementos. Portanto, ainda não chegou a época de incluí-los no escopo da pesquisa conjunta. Contudo, tão logo os meios de observação tenham sido tão aperfeiçoados, tal que possamos reconhecer com certeza, seguir com facilidade, e medir com precisão as variações, e principalmente as mudanças que ocorrem rapidamente nos outros dois elementos do magnetismo terrestre, essas mudanças terão as mesmas prioridades sobre a atividade combinada dos naturalistas que as mudanças na declinação. Esperamos que esse dia não esteja muito distante.

Capítulo 15

[Weber, 1837a] Observações sobre a Instalação dos Observatórios Magnéticos e Descrição dos Instrumentos a Serem Colocados Neles

Wilhelm Weber^{488,489}

Os instrumentos com os quais foram feitas as observações que serão mencionadas nessas páginas diferem em muitos aspectos de todos aqueles utilizados previamente, sendo indispensável um conhecimento mais preciso de suas construções, para julgar os resultados obtidos com eles. É verdade que pode ser suficiente o que já foi informado ao público sobre esse assunto nas Memórias e Notícias anteriores;^{490,491,492} contudo, a descrição acurada e perfeita desses instrumentos que vai ser dada aqui, vai torná-los facilmente compreendidos e, além disso, terá a vantagem de que qualquer artesão esperto pode trabalhar com certeza a partir dessa descrição. Para a ilustração aqui apresentada, foram selecionados aqueles instrumentos que foram executados exatamente da mesma forma para Bonn, Freiberg, Greenwich, Kasan, Milão, Munique, Nápoles e Upsala, pelo fabricante de instrumentos Meyerstein de Göttingen;⁴⁹³ aqueles para Göttingen feitos pelo mecânico Apel, e para Cracóvia, Leipzig e Margurg feitos pelo mecânico Breithaupt de Cassel, são quase que perfeitamente similares. A descrição dos instrumentos menores que foram utilizados em alguns lugares será omitida

⁴⁸⁸[Web37a] com traduções para o inglês em [Web41e], [GW66], [GW39a] e [Web21r]; e tradução para o francês em [Web38d].

⁴⁸⁹As Notas de Wilhelm Weber são representadas por [Nota de Wilhelm Weber:]; as Notas de E. Riecke, o editor do segundo volume das *Obras* de Weber, são representadas por [Nota de Riecke:]; as Notas de W. Francis, o tradutor da versão em inglês do artigo de Weber, são representadas por [Nota de Francis:]; todas as outras Notas são de minha autoria.

⁴⁹⁰[Nota de Wilhelm Weber:] Na Memória, *Intensitas vis magnetica terrestres ad mensuram absolutam revocata; auctore, C. F. Gauss, Gottingae*, 1833; além disso na *Göttingischen gelehrten Anzeigen*, 1832, pág. 2011, 1835, pág. 345, e no *Jahrbuche* de Schumacher, 1836, pág. 1.

⁴⁹¹[Nota de Riecke:] *Obras* de Gauss, Vol. V, págs. 79, 293, 528 e 315.

⁴⁹²Ver os Capítulos 10, 11 e 12. Ver também [Gau35b], [Gau35a], [Gau36b] e [RR13, pág. 238].

⁴⁹³Moritz Meyerstein (1808-1882). Ver [Hen04], [Hen05], [Hen07] e [Hen20b].

aqui, já que a utilização deles provou-se ser menos apropriada, apenas sendo justificada quando circunstâncias locais impedem a construção de instrumentos maiores. Também não será feita qualquer menção dos instrumentos maiores, já que se eles devem servir a todos os propósitos, eles necessitam de um local de recepção proporcionalmente maior do que já foi designado até o momento em qualquer lugar para esse fim.

Uma longa *sala*^{(1),494,495} quadrangular, que se estende ao redor de 11 metros na direção do meridiano magnético, está bem preparada para receber os instrumentos magnéticos. Não é necessário que as paredes laterais sejam paralelas a esse meridiano; elas podem formar um ângulo com ele, como é o caso, por exemplo, em Göttingen, no qual elas estão na direção do meridiano astronômico, que forma atualmente com o meridiano magnético um ângulo de $18\frac{1}{2}$ graus. A sala tem de ser bem iluminada, principalmente de Leste e Oeste, e mais particularmente na extremidade onde serão colocados para observação o teodolito ou o telescópio, juntamente com a escala.⁴⁹⁶ A sala deve ser protegida de correntes de ar, sendo que para esse fim são necessários uma porta dupla, e algumas vezes até mesmo uma janela dupla; e tem de haver uma fundação sólida, sobre a qual serão colocados um *teodolito*^{(2),497} e um *relógio*.^{(3),498} Também é necessário que, a partir do local do teodolito-telescópio, um objeto distante, do qual seja conhecido ou possa ser determinado com precisão o azimuth, possa ser visto através de uma das janelas. O chão nas proximidades dos instrumentos, isto é, próximo ao centro da sala, não deve conter qualquer ferro, nem deve ser trazido qualquer objeto contendo esse metal nas proximidades desses instrumentos. É até mesmo desejável que todo o prédio, até mesmo suas paredes laterais e teto, não contenha ferro; mas não é necessário ser tão cauteloso quanto a reear colocar um relógio, ou um teodolito com pivôs de aço, a uma distância de 5 a 6 metros do instrumento. A influência das partes com aço, caso elas sejam magnéticas, pode ser determinada aproximadamente pelo cálculo, encontrando-se ser muito pequena para que seja perceptível a essas distâncias. Pequenas peças de ferro do lado de fora da sala têm influência ainda menor. Contudo, caso existam nas proximidades grandes massas de ferro, especialmente barras de ferro muito longas, (tais como corrimões de ferro), embora suas influências sejam muito pequenas, contudo elas não devem ser totalmente desprezadas. Caso elas estejam a uma distância de 100 pés ou ainda mais distantes do Observatório Magnético, elas não oferecem impedimentos importantes, pelo menos se estiverem fixas. Tal local é suficiente para medir a declinação e a intensidade, e também para observar suas mudanças. Medições da inclinação podem ser realizadas no mesmo local, porém não sem interromper as outras observações. Portanto, parece conveniente, quando as circunstâncias permitem, designar um local separado para medições da inclinação, que pode estar a uma distância não muito grande da primeira sala. Onde não são feitas medições absolutas, mas apenas observadas mudanças na declinação em períodos fixos, tal sala é suficiente, mesmo que ela contenha muito ferro dentro e fora de suas paredes, desde que todo o ferro permaneça imóvel durante as observações. A sala do Observatório Magnético de Göttingen

⁴⁹⁴[Nota de Wilhelm Weber:] Os números [entre parênteses] que aparecem aqui referem-se às observações seguintes sobre as partes individuais do Observatório Magnético e dos instrumentos magnéticos.

⁴⁹⁵Ver a página 207 para uma explicação do item (1).

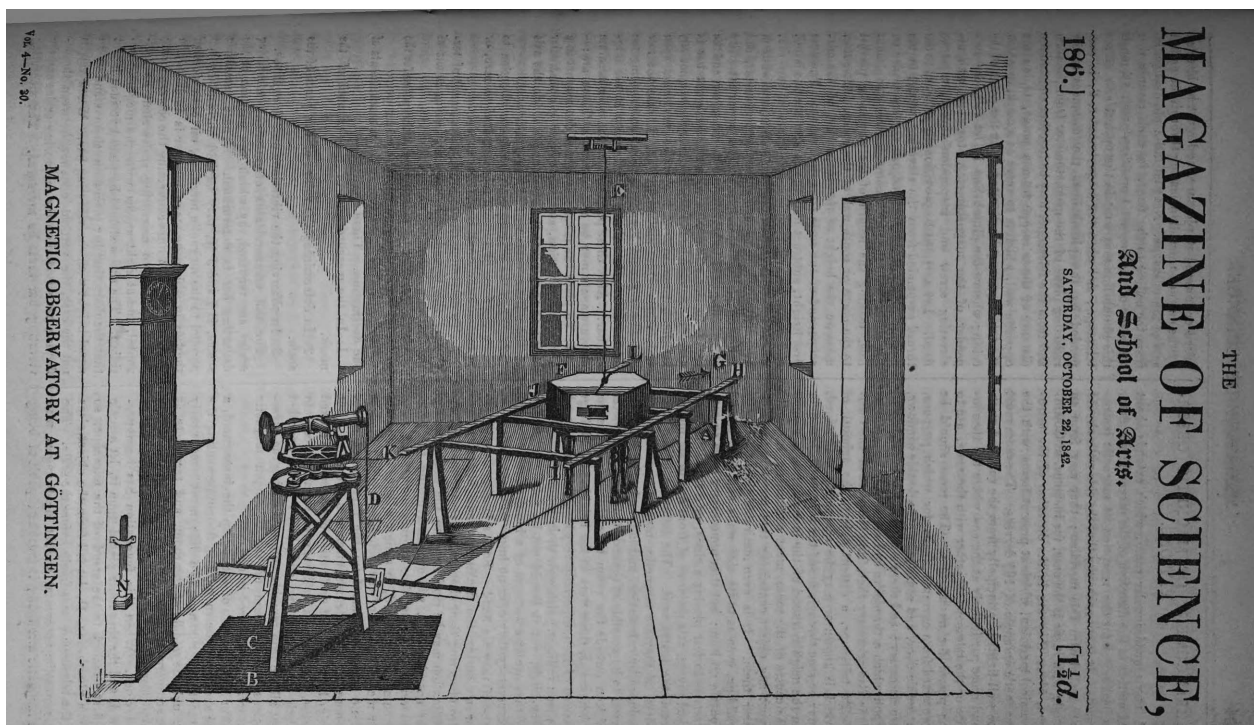
⁴⁹⁶Em alemão: *Skale*. Essa palavra pode ser traduzida como régua ou escala. Ver ainda a Nota de rodapé 351 na página 142.

⁴⁹⁷Ver a página 208 para uma explicação do item (2).

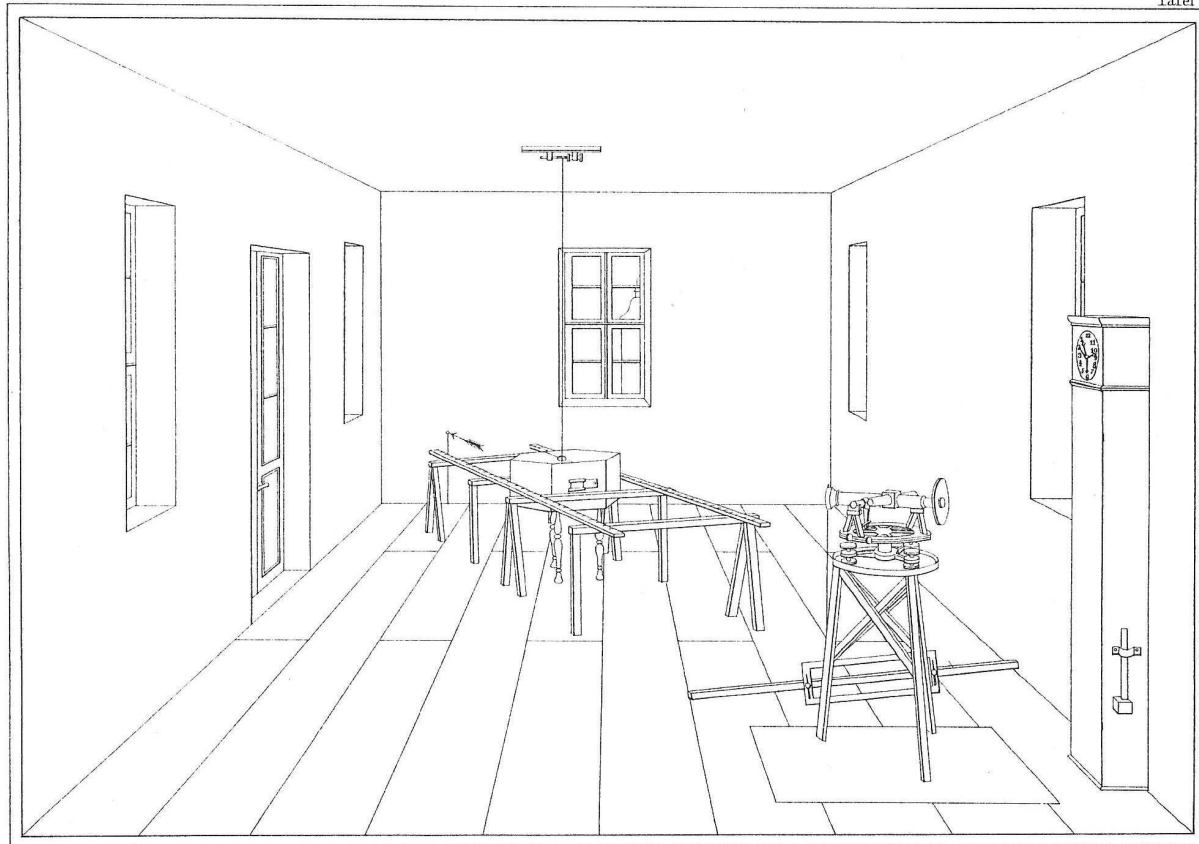
⁴⁹⁸Ver a página 208 para uma explicação do item (3).

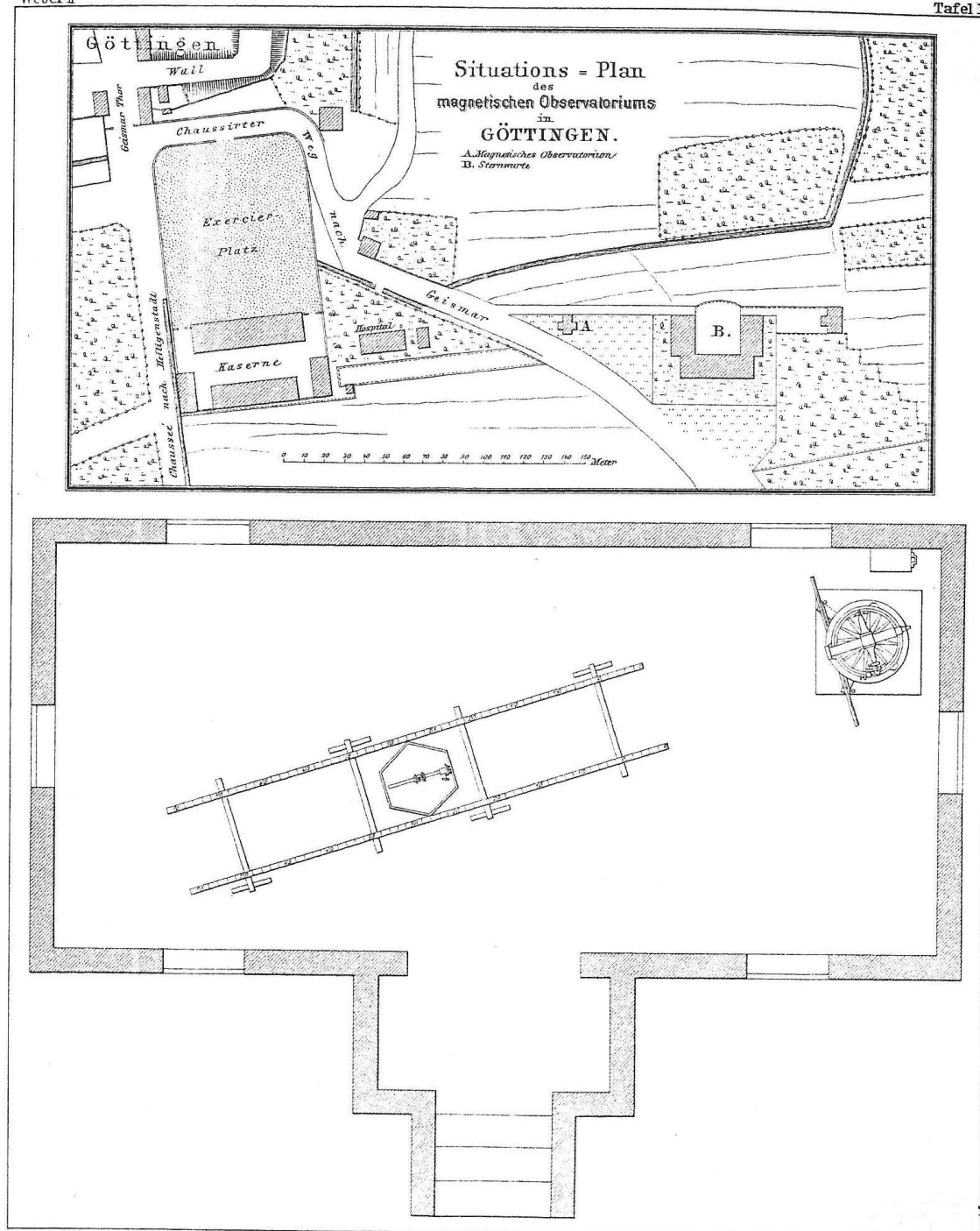
está ilustrada na Gravura I;⁴⁹⁹ e a planta baixa na Figura 2 da Gravura II.⁵⁰⁰

⁴⁹⁹A imagem dessa Nota de rodapé apareceu na capa da *Magazine of Science, and School of Arts* de 22 de outubro de 1842, Vol. 4, Número 30. Essa publicação também incluiu uma descrição do Observatório Magnético de Göttingen, [Ano42]:



⁵⁰⁰Na Gravura II, Figura 2, ver a página 205, a letra A indica o Observatório Magnético, enquanto que a letra B indica o Observatório Astronômico.





Para alinhar os instrumentos, uma linha deve ser traçada no solo representando o meridiano magnético, sendo que essa linha deve passar aproximadamente através do centro da sala, terminando na extremidade Sul ou Norte dela, onde deve ser feita uma sólida fundação para o teodolito e relógio. Quando essa fundação tiver sido preparada, e o teodolito colocado sobre ela, inicialmente é fixada uma *escala*⁽⁵⁾,⁵⁰¹ ao suporte do telescópio, de tal forma que um fio de prumo que desce da objetiva do telescópio passa livremente diante dela. A escala deve ser horizontal e ortogonal ao meridiano magnético; ela tem de poder ser levantada e

⁵⁰¹Ver a Nota de rodapé 351 na página 142. Ver também a página 208 para uma explicação do item (5).

abaixada à vontade, e deve ser dividida ao meio pelo meridiano magnético passando através do eixo óptico do telescópio. Em seguida deve ser colocada um fio de prumo do teto até o chão, de tal maneira que o plano do meridiano magnético passando através desse fio de prumo contenha o eixo óptico do telescópio; e quando o *magnetômetro*⁽⁴⁾,^{502,503} é suspenso pelo fio de prumo, a distância do plano refletor do magnetômetro (ver *espelho* e *suporte do espelho*)⁽⁷⁾,⁵⁰⁴ em relação à escala e em relação ao telescópio são, juntas, tão grandes quanto a distância do telescópio em relação a um ponto (que serve de marca) indicado na parede oposta para o qual o telescópio pode ser ajustado. Deve ser fixado no ponto do teto de onde está preso o fio de prumo, o *suporte*⁽⁸⁾ do magnetômetro, juntamente com o *parafuso de elevação* e o *fio de suspensão*.⁽⁸⁾,⁵⁰⁵ Um peso deve ser fixado provisoriamente ao fio de suspensão a partir do parafuso de elevação, na maneira de um fio de prumo; o suporte deve ser ajustado no teto até que o fio coincida com a vertical do fio de prumo, fazendo o comprimento do suporte paralelo à parede Norte ou Sul da sala. Em seguida, meça a altura do suporte, do telescópio, e da escala a partir do solo. A partir da primeira altura, subtraia a metade da soma das duas últimas alturas, e forme um fio de fibras paralelas de linhas de seda,⁵⁰⁶ cujo comprimento seja igual a essa diferença, e que seja suficientemente forte para suportar o magnetômetro, além de 1 quilograma de peso adicional. A extremidade superior desse fio deve ser presa a um parafuso, e a extremidade inferior ao *estribo*,⁽⁹⁾,^{507,508} no qual é colocada a barra imantada. Uma grande *caixa*⁽¹⁰⁾,⁵⁰⁹ é colocada abaixo da barra imantada, no fundo da qual estão duas almofadas, sobre as quais cairia a barra imantada, no caso de rompimento das fibras de seda, sem danificar o espelho fixado na extremidade frontal da barra imantada.

Após essas preparações podem começar as medidas mais precisas. Essas são:

1. Colocar o eixo magnético do ímã em uma direção horizontal e o espelho perpendicular a ela, ou medir o pequeno ângulo que o eixo do espelho forma com o eixo magnético.
2. Quando o ímã está em sua direção média, anular a força de torção do fio, ou então medir a pequena torção remanescente. (Ver a seguir a *barra de torção*).⁽¹¹⁾,⁵¹⁰
3. Determinar a razão entre o torque do fio e o torque magnético da barra [imantada] durante uma deflexão. (Ver a seguir o *estribo* e o *círculo de torção*).⁽⁹⁾,⁵¹¹
4. Determinar por medição o local para a marca na parede oposta ao telescópio.

O aparelho está então pronto para as medições de declinação. Essas medidas consistem em:

1. Medir o azimute da marca.
2. Determinar os valores das partes da escala.
3. Observar as vibrações e elongações. (Ver a seguir a *barra amortecedora*).⁽¹³⁾,^{512,513}

⁵⁰²Ver a página 208 para uma explicação do item (4).

⁵⁰³O nome *magnetômetro* foi cunhado por Gauss, [Gau36b, pág. 332 das *Obras* de Gauss]. O trecho da obra de Gauss com essa definição aparece na página 240 dessa tradução em português.

⁵⁰⁴Ver a página 208 para uma explicação do item (7).

⁵⁰⁵Ver a página 209 para uma explicação do item (8).

⁵⁰⁶Em alemão: *Kokonfäden*.

⁵⁰⁷Ver a página 210 para uma explicação do item (9).

⁵⁰⁸Em alemão: *Shiffchen*.

⁵⁰⁹Ver a página 210 para uma explicação do item (10).

⁵¹⁰Ver a página 211 para uma explicação do item (11).

⁵¹¹Ver a página 210 para uma explicação do item (9).

⁵¹²Ver a página 211 para uma explicação do item (13).

⁵¹³Em alemão: *Beruhigungsstab*.

Na sequência serão dadas instruções mais precisas para a execução de todas as medições mencionadas aqui.

Para medições de intensidade são necessárias *hastes de medição*^{(10),514,515} por meio das quais é determinada a posição da *barra de deflexão*.^{(11),516} Essas hastes de medição podem ser colocadas horizontalmente e paralelas ao meridiano magnético, nos dois lados da caixa onde está o magnetômetro, de tal maneira que as linhas conectando os pontos correspondentes das duas hastes de medição possa ser horizontal e ortogonal ao meridiano magnético. As hastes devem ser colocadas em uma certa altura tal que a barra de deflexão colocada sobre elas esteja na mesma altura que a barra oscilante. Quando esse não for o caso, deve ser medida a distância vertical entre a barra de deflexão situada sobre as hastes de medição e a barra oscilante. As hastes de medição devem ter de 5 a 6 metros de comprimento, e devem projetar-se a uma distância igual ao Norte e ao Sul do magnetômetro. Se a largura da sala permitir, é vantajoso adicionar uma terceira haste de medição horizontalmente e ortogonal às outras duas hastes. Ela pode passar sob a caixa do magnetômetro, de tal forma que ela encontraria um fio de prumo descendo do ponto médio entre os centros de suspensão e de gravidade da barra oscilante. As hastes de medição devem ser arranjadas de tal forma a permitir que sejam deslocadas longitudinalmente, para que sejam colocadas de maneira que a barra de deflexão, situada nos pontos correspondentes, na frente e atrás, possa produzir o mesmo valor de desvio. Após essas preparações, a medida da intensidade consiste em:

1. Determinar o momento de inércia da barra de deflexão. (Ver a seguir *pesos e suporte de peso*).^{(12),517}

2. Medir o período de oscilação da barra de deflexão.⁵¹⁸

3. Medir a deflexão da barra auxiliar suspensa produzida pela barra de deflexão, em duas distâncias diferentes dessa última barra, em uma direção Sul e Norte, ou Leste e Oeste, em relação ao magnetômetro.

A essa visão geral da instalação do Observatório Magnético e dos aparelhos contidos nele, podem ser acrescentadas as observações seguintes relacionadas às partes separadas de ambos.

15.1 Observações sobre as Partes Separadas do Observatório Magnético e dos Instrumentos Magnéticos

(1) *A sala.* — As Gravuras I e II mostram uma visão em perspectiva e a planta baixa da sala. Na primeira Gravura supõe-se que foi removida a parede Sul; na frente, à direita, é visto, *a*, a fundação do teodolito; *b*, o suporte do teodolito; *c*, o teodolito; *d*, a escala fixada ao suporte; *e*, o fio de prumo suspenso a partir do centro da objetiva. Próximo a ele encontra-se o relógio, *f*; uma linha traçada do telescópio-teodolito até a marca designada por uma flecha na parede oposta, representaria o meridiano magnético. Perto do centro [da sala] é fixado no teto o suporte do magnetômetro; a partir dele é suspenso o fio com o estribo, no qual é colocada a barra imantada, na qual o espelho é fixado verticalmente na extremidade dianteira. A distância do espelho até o telescópio e sua distância até o centro da escala (diante da qual passa um fio de prumo descendo do teodolito-telescópio) são, juntas,

⁵¹⁴Ver a página 210 para uma explicação do item (10).

⁵¹⁵Em alemão: *Messstangen*.

⁵¹⁶Ver a página 211 para uma explicação do item (11).

⁵¹⁷Ver a página 211 para uma explicação do item (12).

⁵¹⁸Ver a Nota de rodapé 339 na página 139.

tão grandes quanto a distância do telescópio até a marca [na parede oposta].

(2) *O teodolito.* — Para observar as mudanças na declinação é suficiente um telescópio que tenha movimento em um plano vertical, de tal forma que possa de tempos em tempos ser direcionado para o espelho ou então para a marca. Esse movimento serve para verificar a estabilidade do telescópio. Utiliza-se um teodolito em vez do telescópio para medições absolutas da declinação. Como as divisões da escala dividida em milímetros têm de ser não apenas vistas, mas até mesmo suas subdivisões devem ser estimadas, é necessário que, à distância de 5 metros da escala e do telescópio até o espelho, o telescópio possua um poder de ampliação de pelo menos 30 vezes.

(3) *O relógio.* — Todas as observações têm de ser feitas precisamente no que diz respeito ao tempo, sendo que para essa finalidade um relógio batendo os segundos deve estar próximo ao observador, com sua face voltada para ele. Um cronômetro pode servir para esse fim.

(4) *O magnetômetro.* — Além de um relógio e um teodolito, que têm de estar presentes em todos os locais nos quais as observações magnéticas vão ser realizadas da maneira mais precisa, o magnetômetro é constituído das seguintes partes, que são necessárias para medições da declinação: — a barra imantada, o estribo junto com o círculo de torção, o suporte com parafuso e fio de suspensão, o espelho e o suporte do espelho, a barra de torção, a escala e a barra amortecedora; além dessas partes, deve ser adicionado, para medições de intensidade, as hastes de medição, a barra de deflexão, os pesos e o suporte de peso. A Gravura III, Figuras 3 e 5,⁵¹⁹ ilustra a barra imantada em sua conexão com o estribo e círculo de torção, (que novamente é conectado pelo fio de suspensão com o suporte,) [juntamente com a conexão da barra imantada] com o espelho e com o suporte do espelho.

(5) *A escala.* — A Figura 10 fornece uma amostra das escalas utilizadas até o momento, que deve ter ao menos 1 metro de comprimento.⁵²⁰ O Sr. Rittmüller de Göttingen litografou uma escala dessas e a imprimiu em papel cartão branco.

(6) *O fio de prumo na objetiva do telescópio.* — Um fio fino de cor escura com um peso em sua extremidade inferior é preso de tal maneira à borda superior da objetiva, tal que ele fique dependurado corretamente sobre seu centro. Para fixar esse fio, podem ser usados os pequenos entalhes da moldura ranhurada; ou um anel, construído especialmente para esse fim, pode deslizar sobre a moldura, tendo duas fendas diametralmente opostas entre si. A fenda superior serve para prender o fio, e o anel é arranjado de tal forma que o fio passe livremente através da fenda inferior. Se agora visualizarmos a imagem da escala no espelho através do telescópio, veremos ao mesmo tempo a imagem desse fio projetada na superfície branca da escala, e assim poderemos encontrar aquele ponto da escala que está no plano vertical do eixo óptico do telescópio. O ponto onde o prolongamento do fio de prumo toca o solo é marcado cuidadosamente, e serve como uma maneira de testar a imobilidade do suporte do teodolito.

(7) *O espelho e seu suporte.* — O espelho e o magnetômetro têm de ser perfeitamente planos já que, de outra forma, com um poder de aumento de 30 vezes, a imagem da escala seria indistinta. Os espelhos planos da fábrica óptica de Utzschneider em Munique provaram ser os melhores até o momento. O espelho deve ser um pouco mais largo do que alto já que, pela vibração da barra imantada, o lado direito e esquerdo do espelho entram alternadamente

⁵¹⁹A Gravura III aparece na página 219. A Figure 3 aparece separadamente na página 214 e a Figura 5 na página 216.

⁵²⁰Ver a página 217. Essa régua ou escala com pelo menos 1 metro de comprimento é fixada abaixo do teodolito-telescópio. A imagem dela refletida no espelho preso à extremidade da barra magnetizada é observada com o telescópio, ver a Seção 9.3.

no campo de visão do telescópio. As melhores dimensões de espelho são de 50 a 70 milímetros de altura e de 70 a 100 milímetros de largura. Ao medir a distância do espelho até a escala e até a marca, deve ser considerada a refração dos raios de luz na superfície anterior do vidro. Da lei de refração conhecida do vidro resulta que o plano que está a meia distância da superfície traseira do vidro do espelho em relação à superfície dianteira deve ser considerado como o plano refletor. O espelho é fixado naquela extremidade da barra imantada que é virada para o telescópio, e deve formar com essa barra um sistema rígido de tal forma que não pode ser temido um desarranjo de qualquer um deles durante a experiência, embora a barra imantada possa ser removida do estribo e recolocada em uma posição invertida. Além disso, o espelho deve ter tal posição em relação à barra, que a normal do espelho seja bem, ou muito aproximadamente, paralela ao eixo magnético da barra. O suporte do espelho representado na Figura 4 pode servir para esses dois propósitos;⁵²¹ sua moldura é fixada à barra por parafusos. A moldura suportando o espelho pode ser girada pelo movimento de parafusos ao redor de dois eixos retangulares, por meio do qual ele pode ser colocado na posição desejada.

(8) *O suporte, parafuso de elevação e fio de suspensão.* — É muito vantajoso fixar no teto o fio que vai suportar a barra imantada, já que dessa forma ela fica suficientemente isolada do solo e protegida de quaisquer perturbações, e também devido ao fato que dessa maneira pode ser dado um comprimento apropriado ao fio. Se você não escolher um fio metálico (cuja elasticidade para uma mesma capacidade de carga é quase 10 vezes maior do que aquela de um fio formado de fibras de seda), mas um fio composto de fibras paralelas de seda crua para suportar a barra imantada; ele se alongará consideravelmente, especialmente no início, e, portanto, será necessário, de tempos em tempos, puxar o fio para cima para que a haste magnética e o espelho preso a ela recuperem sua altura original. Ao subir o fio, é necessário que ele não seja deslocado lateralmente. Pode ser utilizado um parafuso com esse propósito, em cujas ranhuras se encontra o fio, no qual ele pode ser enrolado ainda mais, enquanto uma porção mais distante do parafuso engata em uma porca fixa. A ranhura na qual o fio é colocado, pelo giro do parafuso, assume então, por si própria (a partir do avanço de todo o parafuso), o lugar que a linha suspensa verticalmente ocupava anteriormente. A porca fixa, com apoio sólido, através da qual o pino do parafuso passa livremente, é encaixada em uma corrediça de madeira que é presa em uma grande prancha fixada ao teto, e pode deslizar nela em direção paralela à parede Norte ou Sul da sala. Caso a orientação do meridiano magnético seja modificada com a passagem do tempo em qualquer grau considerável, essa corrediça servirá para manter o magnetômetro no meridiano do telescópio. Após tal deslizamento do suporte no teto, que só necessita ser feito raramente, é necessário colocar na parede oposta uma nova marca, para a qual o telescópio possa ser direcionado sem sair do meridiano. O fio no qual é suspensa a barra imantada consiste em 200 fibras paralelas de seda crua, sendo que cada uma delas suportaria 30 gramas sem se romper. O peso que esse fio tem de sustentar usualmente chega a aproximadamente 2000 gramas, ao qual, nas medidas da intensidade, dois pesos de 500 gramas têm de ser adicionados ao determinar o momento de inércia da barra imantada. O fio, portanto, nunca suporta mais do que a metade do peso com o qual ele romperia. Ele tem aproximadamente dois metros de comprimento, e tem uma força de torção tal que seu torque, para pequenos desvios, é ao redor da milésima parte do torque magnético.⁵²² O fio pode ser preparado ao enrolar uma única fibra 25 vezes ao redor de

⁵²¹A Figura 4 aparece na página 215.

⁵²²Isto é, ao girar a barra imantada de um pequeno ângulo em relação ao meridiano magnético, o torque exercido pelo fio de suspensão é aproximadamente 1000 vezes menor que o torque magnético exercido pela

dois tubos de vidro, distantes entre si ao redor de quatro vezes o comprimento desejado do fio; as duas extremidades do fio foram então firmemente amarradas e o anel⁵²³ de 25 dobras formado por ele foi esticado afastando os dois tubos de vidro entre si. Um pequeno gancho, suportando um peso, é então ligado ao anel, no meio entre os dois tubos, que são então levantados e juntados, e as duas voltas são unidas em uma única volta. Isso criou um fio cem vezes maior que formava um laço na parte superior e inferior e que, sendo novamente reunido de maneira semelhante, constitui o fio no qual a barra imantada é suspensa.

(9) *O estribo e o círculo de torção.* — A força de torção do fio no qual é suspensa a barra imantada não deve ser totalmente desprezada nas medições absolutas da declinação e intensidade, mesmo que esse fio seja muito longo e fino. Para medir a magnitude dessa força, e diminuir sua influência, de tal forma que o fio na posição intermediária da barra imantada possa ser trazido à sua orientação natural na qual seu torque é nulo, é necessário ser capaz de girar o fio, em uma de suas extremidades, ao redor de si mesmo, de tal forma que o ângulo de torção possa ser medido. Para ter os meios de efetuar isso em mãos, o aparelho com esse propósito deve estar localizado na extremidade inferior do fio; contudo, para que a barra imantada não seja girada junto com o fio, o estribo é composto de duas partes, uma alidade e um círculo,⁵²⁴ que giram apenas ao redor de um eixo vertical comum. A alidade suporta a barra imantada, sendo ela própria suportada pelo círculo. O círculo vem com um pivô que atravessa a alidade e tem, na sua extremidade superior, dois ganchos sob os quais engata o gancho preso ao fio com duas pontas. Com esse arranjo do estribo, é importante que a alidade na qual localiza-se a barra imantada fique sobre a borda do círculo; já que, de outra forma, o atrito ocorrendo próximo ao eixo de rotação, produziria um deslocamento das partes entre si, devido ao impulso surgindo da barra oscilante. Além disso, o estribo é construído de tal forma que a barra imantada se ajuste tanto no seu lado largo quanto no lado estreito. Isso é feito com o objetivo de determinar acuradamente, por meio de observações da declinação em quaisquer das várias posições da barra imantada no estribo, a posição do espelho em relação ao eixo magnético da barra.

(10) *A caixa e as hastes de medição.* — A caixa que protege o magnetômetro da influência das correntes de ar é construída de tal forma que permita um livre acesso ao instrumento interno. Ela forma um cilindro de 800 milímetros de diâmetro e 300 milímetros de altura. A forma cilíndrica é dada a ela pelo seguinte motivo: na medição da intensidade, para determinar o momento de inércia, uma haste de madeira de 700 milímetros de comprimento é colocada ortogonalmente à barra imantada de 600 milímetros de comprimento e essa vara, na qual são suspensos alguns pesos, tem de ser colocada na caixa com a barra imantada, e precisa vibrar livremente.⁵²⁵ Para realizar convenientemente essas experiências, também é necessário que a caixa possa ser aberta completamente na parte de cima, podendo ser bem fechada novamente, de tal forma que sobre apenas uma abertura superior para o fio de suspensão, e uma outra abertura lateral para o espelho. Essa última abertura pode ser fechada com uma pequena porta de madeira deslizante, que evite as correntes de ar quando não são feitas observações. A caixa é fechada em cima por duas tampas semicirculares, que precisam se ajustar exatamente, sendo que uma delas tem uma pequena abertura para o fio.

Terra.

⁵²³Em alemão: *Ring*. Essa palavra também pode ser traduzida aqui como “meada”.

⁵²⁴Alidade é um dispositivo destinado a medir ângulos mediante o alinhamento óptico. Ela pode ser uma régua de madeira ou metal que gira em torno de um de seus pontos e da qual uma das extremidades se move sobre uma escala.

⁵²⁵Ver a Figura 9.1 na página 135.

Esta abertura para o fio não está no centro do círculo formado pelas duas tampas, mas é colocada de tal forma que, à medida que o fio passa livremente por ela, o espelho da barra imantada que pende do fio vem a pairar exatamente em frente da abertura na parede lateral da caixa. Esse arranjo é necessário para que a pequena abertura seja suficiente para deixar a luz passar da escala até o espelho, e de lá para o telescópio. Ao redor da caixa são colocadas hastes de medição, que servem para colocar outra haste magnética ao Sul e ao Norte ou a Leste e Oeste do magnetômetro a distâncias e posições prescritas, com o objetivo de desviar a haste suspensa do meridiano magnético.

(11) *A barra de torção e a barra de deflexão.* — Reconhecemos da seguinte maneira que o fio no qual é suspensa a barra imantada fica distorcido na posição média da barra: uma barra de latão tendo o mesmo comprimento e largura, e aproximadamente o mesmo peso, que a barra imantada suspensa, tendo um pequeno ímã inserido nela (para diminuir um pouco a duração da vibração devido à elasticidade do fio) é colocada no estribo no lugar da barra imantada. Caso o fio esteja sem torção, o eixo magnético do pequeno ímã estará na mesma linha na qual estava a barra maior. Para testar isso com precisão, a barra auxiliar tem de possuir um espelho e suporte de espelho, assim como a barra principal. Para medições de intensidade é necessária uma segunda barra imantada com dimensões similares à da barra principal, que também pode ser colocada no estribo no lugar da barra principal, para observar suas vibrações e medir seu momento de inércia. Contudo, a mesma barra também tem de servir como uma barra de deflexão, e com esse propósito ela é colocada dentro de uma pequena caixa de madeira, que é limitada externamente por superfícies uniformes e bordas retas paralelas ao seu eixo magnético, a fim de atribuir-lhe rápida e precisamente seu lugar nas hastes de medição.

(12) *Os pesos e o suporte de peso.* — Para medições da intensidade é necessário que a barra de deflexão possa oscilar, sendo seu momento de inércia deduzido dessa forma. Para esta última finalidade, uma fina haste de madeira é colocada [ortogonalmente] sobre a barra imantada oscilante e dois pesos iguais são fixados a ela em ambos os lados da barra imantada, sucessivamente a diferentes distâncias um do outro.⁵²⁶ Para marcar os pontos de suspensão e determinar precisamente suas distâncias mútuas, os dois pesos, cada um chegando a 500 gramas, estão equipados com alças. A alça é colocada em uma ponta fina que se projeta da haste de madeira. É necessário que hajam várias dessas pontas a 50 milímetros entre si, com exceção das duas pontas centrais, que estão situadas a 100 milímetros entre si. Essas distâncias precisam ser medidas com precisão microscópica.

(13) *A barra amortecedora.* — Para realizar as observações de maneira rápida e precisa, é importante ser capaz de controlar à vontade as vibrações da barra imantada; por exemplo, ao medir a duração das vibrações, fazer com que o arco inicial não seja maior do que 2 ou 3 graus, e ao observar mudanças na direção, tornar o arco tão pequeno quanto possível, nunca permitindo que ele ultrapasse 2 ou 3 minutos de arco. Esse objetivo é alcançado com a barra amortecedora, com o uso da qual todo observador tem de se familiarizar. Ela é uma barra imantada tendo a metade do comprimento e da largura da barra principal, sendo quatro vezes mais leve. Quando essa barra é mantida pelo observador atrás do teodolito em uma posição horizontal, e ortogonal ao meridiano magnético, ela ocasionará à distância (ao redor de $5\frac{1}{2}$ metros), caso seja fortemente magnetizada, um desvio [da barra imantada principal] de aproximadamente 1 minuto de arco, para Oeste caso seu polo Norte seja mantido a Leste, e *vice-versa*. Esse desvio torna-se menor na medida em que a barra é afastada da posição horizontal, desaparecendo completamente com sua aproximação da posição vertical.

⁵²⁶Os pesos iguais são fixados em lados opostos da haste de madeira, ver a Figura 9.1 na página 135.

Portanto, não são ocasionados inconvenientes quando essa barra fica em pé na parede ou próximo da caixa do relógio (como nas Gravuras I e II), até que seja necessária. É múltipla a utilização da barra amortecedora nas medições magnéticas; e é importante, a fim de atingir a facilidade perfeita e hábil na realização desses experimentos, tornar-se bem familiarizado com seu modo de operação. Portanto, um artigo separado será devotado subsequentemente para a explicação das regras e leis de seus vários usos e modos de operação.

Finalmente, o prédio pode estar situado nas proximidades de outros prédios sem qualquer prejuízo para as observações. O Observatório Magnético em Göttingen, por exemplo, não podia ser movido para longe do *Observatório Astronômico* para não causar grandes inconvenientes aos observadores, e o local que ele ocupa agora era o mais adequado de todos os disponíveis nas imediações. O centro deste local, onde o magnetômetro está instalado, fica, como pode ser visto na planta do local apresentada na Gravura II, Figura 2, cerca de 60 metros a Oeste do Observatório Astronômico.⁵²⁷ A essa distância forças magnéticas moderadas exercem uma influência tão pequena no magnetômetro, que foi considerado bastante seguro erguer em uma sala do Observatório Astronômico um instrumento magnético auxiliar, que fornece serviços essenciais para medições absolutas a fim de tornar as várias observações necessárias para um resultado absoluto comparáveis uma após a outra, apesar da variabilidade do magnetismo da Terra.

Subsequentemente serão fornecidas orientações mais precisas para determinar a influência de um ímã distante, de acordo com sua intensidade e posição em relação ao magnetômetro; e servirá especialmente a esse propósito observar que, quando vários instrumentos magnéticos (por exemplo, um magnetômetro principal, um magnetômetro auxiliar e uma bússola de inclinação) estão localizados nos prédios vizinhos, pode ser adquirida uma certa convicção de que suas influências mútuas são inofensivas ou, caso esse não seja o caso, tal que seus efeitos possam ser reduzidos ao cálculo.

15.2 Explicação da Gravura III

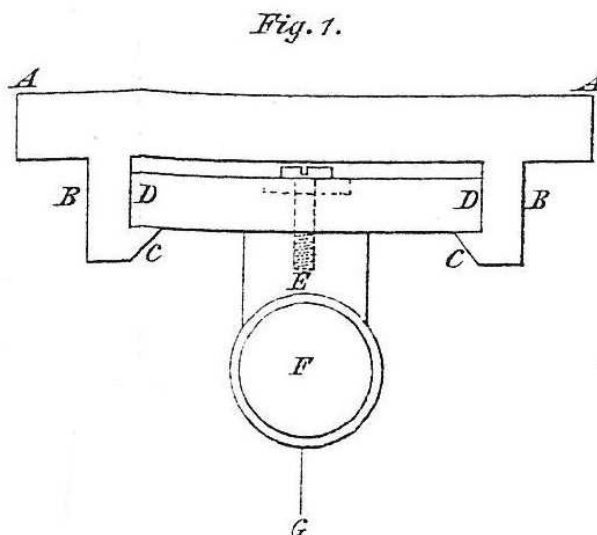
Nessa Gravura⁵²⁸ estão representadas diversas partes do magnetômetro, com exceção do relógio, teodolito, hastes de medição, a caixa, a barra de torção e a barra amortecedora, que em parte não necessitam de representação particular, e em parte já foram mostrados em uma escala menor, nas Gravuras I e II. Por outro lado, o arranjo do suporte com o parafuso de elevação, o estribo com o círculo de torção, o suporte do espelho, com suas correções, os pesos e o suporte de peso, necessitam de uma representação mais precisa, que é fornecida de vários lados nessa Gravura, em uma escala da metade de seus tamanhos reais. O estribo, o círculo de torção e a barra imantada em seu lugar, foram representados em três posições diferentes — do Oeste, do Sul e de cima; o suporte do espelho e o suporte com o parafuso de elevação, foram representados de dois lados — do Oeste e do Sul. Na visão Sul do estribo, com o círculo de torção e a barra imantada em seu lugar, é mostrada a maneira pela qual o suporte de peso pode ser colocado sobre a barra imantada em uma orientação Oeste-leste, e os dois pesos, cada um com meio quilograma, suspensos pelas pontas com as quais ele é equipado, com o objetivo de determinar, nas medidas absolutas de intensidade, o momento de inércia da parte oscilante do magnetômetro. Para poupar espaço na Gravura, as duas

⁵²⁷Ver a Figura 15 na página 205. O Observatório Magnético é representado pela letra *A*, enquanto que o Observatório Astronômico é representado pela letra *B* nessa Figura.

⁵²⁸A Gravura III aparece na página 219.

visões do suporte, com o parafuso de elevação, foram colocadas na linha superior [da Gravura III], próximas entre si, mas isso evitou com que as duas visões fossem colocadas na posição correta em relação à porção oscilante do magnetômetro suspenso por elas. No entanto, é fácil ver como a visão do suporte com o parafuso de elevação na Figura 1⁵²⁹ se encaixa na visão do suporte do estribo, círculo de torção, barra imantada e suporte do espelho na Figura 3, se prestarmos atenção ao início indicado na Figura 1 e ao fim indicado na Figura 3 da linha vertical que os conecta. Essas duas Figuras representam as partes principais do magnetômetro em uma visão Oeste. As Figuras 2 e 6 se encaixam da mesma maneira,⁵³⁰ e representam o instrumento como observado da orientação Sul. Na Figura 6 o suporte do espelho foi removido da extremidade Sul da barra imantada, de tal forma que ele não escondesse o estribo situado atrás dele, sendo representado sozinho na Figura 4. Na visão Oeste, Figura 3, é apenas indicado o pequeno entalhe no estribo no qual é ajustado o suporte de peso; enquanto que na visão Sul, Figura 6, ele é mostrado estando ajustado no entalhe, e colocado sobre a barra imantada, e os dois pesos de meio quilograma que ele deve suportar estão suspensos por suas pontas.

A Figura 1 apresenta uma visão Oeste do suporte, com o parafuso e fio de suspensão.



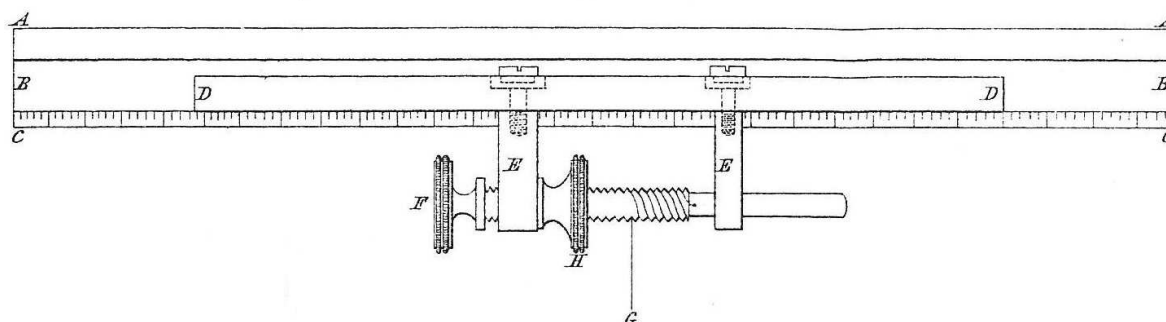
AA é um quadro fixo ao teto; *BB* são duas hastes de madeira coladas nele, entre as quais um controle deslizante, *DD*, pode ser movido do Leste para Oeste; ele é apoiado por duas partes projetadas para dentro, *CC*; a porca de latão, *E*, pela qual passa o parafuso de elevação em uma direção de Leste para Oeste, é fixada com parafusos ao controle deslizante; *F* é a cabeça de um parafuso na extremidade Oeste, que nessa Figura esconde o parafuso; *G* é o fio de suspensão ligado ao parafuso.

A Figura 2 representa uma visão do Sul do mesmo suporte com o parafuso e fio.

⁵²⁹Ver a página 213.

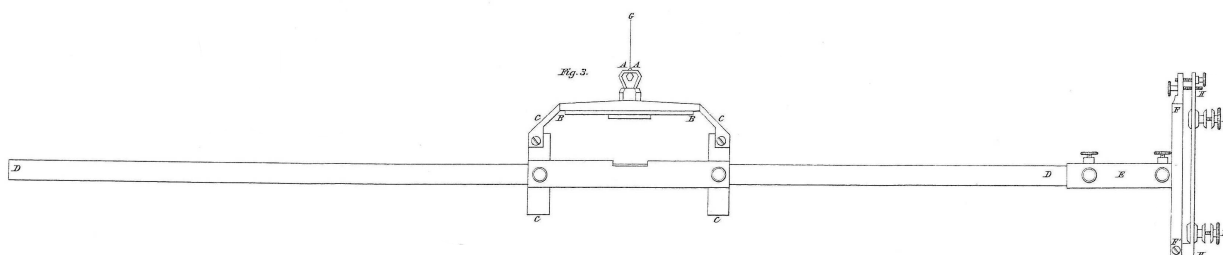
⁵³⁰Ver as páginas 214 e 216.

Fig. 2.



AA aqui é a seção longitudinal do quadro fixo ao teto; BB é a haste colada nesse quadro no lado Norte; CC o suporte do controle deslizante; ele está guarnecido na borda com uma régua, para o ajuste do controle deslizante; DD representa a visão longitudinal do controle deslizante, no qual são fixadas as porcas E e E'.⁵³¹ Através dessas porcas passa o parafuso de elevação, a cabeça do qual é representada por F. Esse parafuso atravessa a porca E e é mantido em seu lugar pela porca H. Próximo à segunda porca E' o parafuso é modificado em um cilindro liso que atravessa uma abertura lisa da porca E'. O fio de suspensão G é preso na extremidade do fio do parafuso, e fica apoiado nas ranhuras, nas quais continua até o centro, e lá desce perpendicularmente, suportando em sua extremidade inferior o estribo do magnetômetro. Quando o fio é para ser levantado, a porca H é solta, e o parafuso é girado pela cabeça de parafuso F até a posição desejada.

A Figura 3 apresenta uma visão Oeste da porção oscilante do magnetômetro.



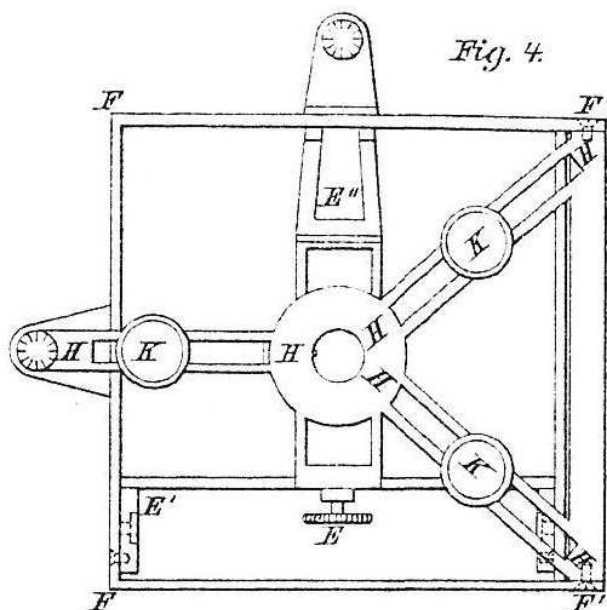
Ela consiste em dois ganchos AA, dos quais o posterior é escondido nessa Figura pelo anterior. A extremidade inferior do fio G é presa a um alfinete fixado abaixo dos ganchos. Também pertence a essa parte do magnetômetro o círculo de torção BB, sobre o qual é apoiado o estribo CCCC; a barra imantada DD, e o suporte de espelho E, com duas molduras FF e HH, e dois grampos KK, que servem para receber o espelho.⁵³² Com exceção da barra imantada, que sozinha pela 1700 gramas, e do espelho, que tem de ter tal espessura que não se curve, todas as outras partes são construídas de latão fino, de tal forma a aumentar tão pouco quanto possível o momento de inércia do magnetômetro. O fio que apoia o estribo não é preso imediatamente a ele, mas a um pino que se encaixa abaixo dos grampos AA, de tal forma que possa ser desengatado do estribo sem soltá-lo. O pino vem com duas pequenas pontas, a uma distância de aproximadamente 40 milímetros entre si, que se ajustam a duas depressões nos grampos AA. O círculo de torção BB vem com um pivô vertical, sendo que a extremidade superior dele suporta os grampos AA, e é cercado pelo

⁵³¹Na Figura 2 as duas porcas foram indicadas pela mesma letra E. A porca da direita deveria ter sido representada por E'.

⁵³²Na parte superior direita da Figura 3 estão indicadas as letras F, H e K, enquanto que na parte inferior direita estão indicadas as letras F', H e K'.

estribo giratório. O próprio estribo é apoiado sobre a periferia do círculo de torção, mas é impedido de girar por seu atrito contra ele. Observa-se na extremidade da barra imantada DD o suporte do espelho, que forma em E uma capa cercando a barra imantada, à qual ela pode ser bem presa por parafusos. A essa capa é ligada uma moldura FF' que gira ao redor de um eixo vertical. Pequenos parafusos de pressão, que servem para a colocação e fixação dessa moldura, estão atrás dela nessa visão e, portanto, não são vistos. Com essa primeira moldura FF' , girando ao redor de um eixo vertical, está conectada uma segunda moldura HH , que gira ao redor de um eixo horizontal em F' , que pode ser ajustado ao primeiro eixo por meio dos parafusos mostrados anteriormente. Existem três desses grampos; mas nessa Figura só são visíveis dois deles, K e K' , enquanto que o terceiro é coberto pelo segundo em K' .

A Figura 4 serve para dar uma visão mais clara de todas as partes do suporte do espelho que, vistas aqui do Sul, são muito melhor vistas do que na visão anterior do Oeste.

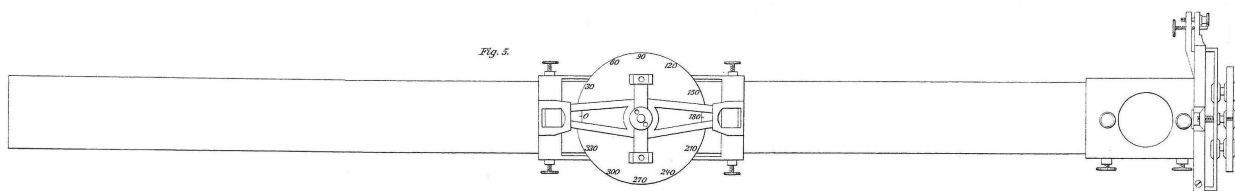


Cada parte é designada pela mesma letra. O retângulo visto entre E e E'' é a seção transversal da capa envolvendo a barra imantada, à qual está firmemente aparafusado. Essa capa possui em um de seus dois lados duas projeções, $E'E'$, que formam o eixo vertical (horizontal na Figura) da moldura $FFF'F'$. Em frente, próximo a E'' , há uma terceira projeção, contra a qual atuam parafusos, que servem para colocar e manter firme essa primeira moldura. Um eixo horizontal (em nossa Figura vertical) é fixado a essa moldura em $F'F'$, ao redor do qual pode girar a segunda moldura $HHHH$. Em frente a esse eixo as duas molduras possuem pequenas projeções, cuja distância relativa pode ser ajustada por parafusos de pressão. São mostradas três pequenas incisões, HH , HH , HH , nas quais podem ser inseridos e presos três pequenos controles deslizantes. Esse arranjo tem como propósito ajustar o espaço necessário para a recepção do espelho. Esses três pequenos controles deslizantes terminam em suas extremidades Sul em três pequenas superfícies circulares verticais, nas quais são colocadas as bordas do espelho; enquanto que a cabeça de um parafuso, cujas ranhuras se ajustam nos controles deslizantes abaixo da borda do espelho, pressiona sua superfície frontal. Nessa Figura não são vistos os próprios controles deslizantes, mas apenas as cabeças dos

três parafusos, que se ajustam neles e os escondem.

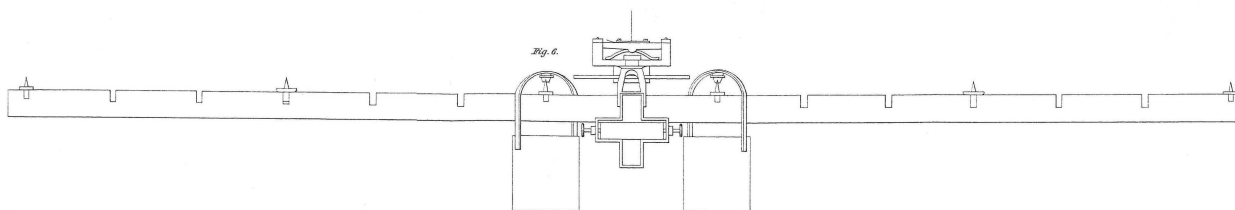
Após essas explicações das primeiras Figuras, serão suficientes algumas poucas observações sobre as outras Figuras.

Figura 5. Nessa visão do estribo, círculo de torção, barra imantada e suporte do espelho, vista de cima, o círculo de torção é mostrado mais distintamente, assim como a forma do estribo.



No centro do círculo também é visível a extremidade do pivô passando através da alidade, e o grampo duplo ligado a ele, com seus dois orifícios de pivô. O pino de latão, cujas pontas se ajustam a esses orifícios, foi removido, por questão de clareza. Além disso, nessa Figura é visto como o espelho é preso ao suporte do espelho.

Figura 6. Nessa Figura, que já foi mencionada diversas vezes anteriormente, vê-se principalmente de que maneira as pontas do alfinete, às quais é preso o fio de suspensão, se ajustam nos orifícios dos grampos, sendo que estes últimos estão ligados por uma peça central dotada de uma abertura quadrada no seu próprio centro, na qual é inserido o pino de 4 lados do círculo de torção, sendo ele fixado por um parafuso.



Como o estribo, juntamente com a barra imantada, precisa ser levantado quando a barra tem de ser invertida com o propósito de encontrar seu eixo magnético, o pino ao qual é preso o fio cairia então, exceto por uma pequena mola abaixo, que é visível nesta Figura, e que então retém o pino em sua posição. A haste de madeira, com cerca de 700 milímetros de comprimento, que nessa Figura é colocada através do centro da barra imantada, e que serve para suportar os dois pesos de meio quilograma que são utilizados para aumentar o momento de inércia da barra imantada, vem com 6 pontas, nas quais podem ser colocados os dois pesos em distâncias diferentes. As duas pontas centrais estão a uma distância de 100 [mm], as outras duas a uma distância de 400 [mm], e as pontas extremas a uma distância de 700 milímetros entre si. A primeira e a última são fixas; as duas pontas intermediárias podem ser removidas e colocadas em outros entalhes, situados a distâncias de 50 a 50 milímetros. As distâncias de todos esses pontos têm de ser medidas com precisão microscópica.

As Figuras 7, 8 e 9 representam o pino ao qual é preso o fio, visto de um lado, de cima e de baixo.

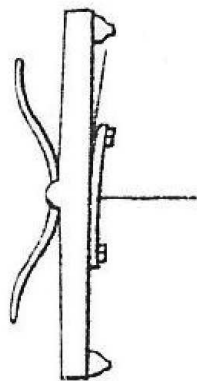


Fig. 7.

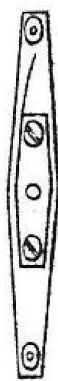


Fig. 8.

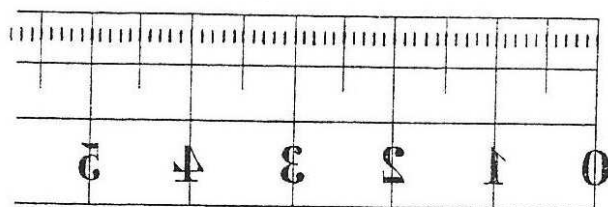


Fig. 9.

A primeira visualização exhibe as duas pontas com as quais esse pino se ajusta nos orifícios dos grampos do círculo de torção, assim como a mola que o retém quando o estribo é levantado, e o fio é solto. A segunda visualização mostra a abertura redonda e estreita através da qual o fio passa e é preso. A terceira visualização exhibe uma abertura oval, que é dividida ao meio por um pino transversal redondo. O fio é enrolado ao redor desse pino e apertado, após passar seu comprimento através do laço formado por sua extremidade inferior.

A Figura 10 é uma representação da escala que é fixada abaixo do teodolito, e a imagem refletida dela é observada com o teodolito-telescópio.⁵³³

Fig. 10.



Ao utilizar um telescópio astronômico (o qual, com uma objetiva similar, é preferível, em termos de clareza e definição, a um telescópio terrestre,) a escala é invertida, de tal forma que os números ficam acima das divisões, enquanto que em nossa Figura, eles estão situados abaixo dela.

15.3 Despesa de Construção e Mobiliário de um Observatório Magnético

As despesas consistem no custo da *construção* e dos *instrumentos*.

O custo da *construção* não é o mesmo em todo lugar. Por exemplo, em Göttingen, ele chegou a

797 táleres 19 groschen 6 pfennig em moeda prussiana.^{534,535}

⁵³³Ver a Nota de rodapé 520.

⁵³⁴[Nota de Francis:] O táler atual Prussiano é igual a três xelins.

⁵³⁵Em alemão: 797 Thlrn. 19 Ggr. 6 Pf. Preuss. Kourant. O táler foi uma moeda de prata usada na Europa por quase quatrocentos anos. Seu nome sobreviveu em várias moedas contemporâneas, tais como o

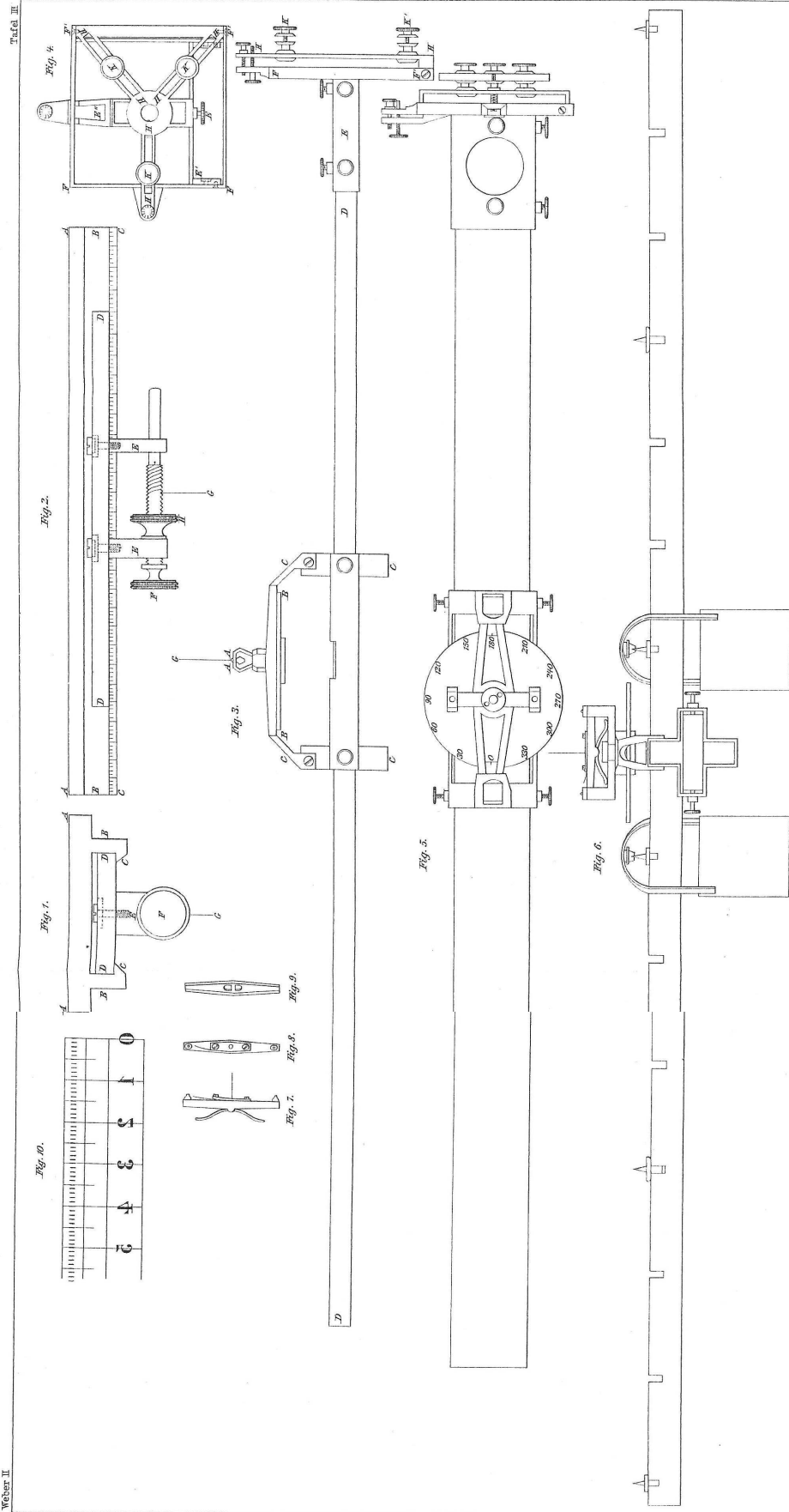
Uma parte dos custos foi ocasionada pela exclusão do ferro nos pregos, fechaduras, dobradiças e fechos de todos os tipos, sendo todos de cobre.

Os custos dos *instrumentos*, como fornecidos pelo fabricante de instrumentos Meyerstein de Göttingen,⁵³⁶ que até o momento fez o maior número de tais instrumentos, são como segue:

1. Um teodolito de 8 polegadas: 150 táleres.
2. Um relógio de segundos: —
3. Um suporte para o teodolito: 7 táleres.
4. Uma escala, com suporte: 1 táler.
5. O instrumento de iluminação: 11 táleres.
6. Um suporte, com controle deslizante e parafuso: 8 táleres.
7. O estribo, com círculo de torção: 15 táleres.
8. A barra principal de 4 libras, com sua caixa; uma barra auxiliar de 4 libras, e uma barra amortecedora de 1 libra: 7 táleres.
9. Uma barra de torção de latão, com ímãs embutidos: 9 táleres.
10. Dois suportes de espelho, com ajustes e espelhos: 43 táleres.
11. Um suporte de peso, com dois pesos de meio quilograma com ganchos: 7 táleres.
12. Uma caixa com tampa de vidro: 16 táleres.
13. Três hastes de medição com 6 metros de comprimento e tripés: 4 táleres.

dólar. Ele era dividido em 24 groschen, cada um de 12 pfennig.

⁵³⁶Ver a Nota de rodapé 493.



Capítulo 16

[Weber, 1837b] Descrição de um Pequeno Aparelho Portátil para a Medição da Intensidade Absoluta do Magnetismo Terrestre para Viajantes

Wilhelm Weber^{537,538}

Entre as numerosas aplicações do magnetômetro,⁵³⁹ a mais importante é aquela da medição absoluta da intensidade da força magnética terrestre, como descrito na Memória intitulada *Intensitas vis magnetica terrestris ad mensuram absolutam revocata; Auctore Carolo Friderico Gauss: Göttingen, 1833.*^{540,541} No presente trabalho vai ser feita menção frequente a uma aplicação do magnetômetro, que nos permite comparar numericamente entre si os resultados de experiências feitas nas partes mais distantes do globo terrestre, em épocas diferentes, e com instrumentos que não tenham sido comparados previamente. Tudo o que é necessário conhecer sobre essas experiências, assim como tudo que pode servir para facilitá-las, será comunicado de tempos em tempos. Também serão apresentados os resultados de tais medições absolutas, assim como o valor dessas medidas para estabelecer, em uma base científica, a ciência do galvanismo.

Essas importantes medições absolutas só podem ser realizadas com a precisão que elas merecem utilizando o magnetômetro e, de fato, apenas em um observatório [magnético] completamente equipado.

No entanto, como existem atualmente apenas alguns observatórios deste tipo e que só são acessíveis a alguns cientistas naturais, enquanto muitos estão interessados nessas medições e gostariam de obter uma visão geral e um julgamento sobre o assunto, o que é difícil de

⁵³⁷[Web37b] com tradução para o inglês em [Web41a] e [Web21b]; e tradução para o francês em [Web38c].

⁵³⁸As Notas de Wilhelm Weber são representadas por [Nota de Wilhelm Weber:]; as Notas de E. Riecke, o editor do segundo volume das *Obras* de Weber, são representadas por [Nota de Riecke:]; as Notas de Carl Friedrich Gauss (mencionadas por Weber nesse artigo) são representadas por [Nota de Gauss:]; todas as outras Notas são de minha autoria.

⁵³⁹Uma descrição detalhada do magnetômetro pode ser encontrada em [Web37a], com tradução para o português no Capítulo 15. Ver ainda a Nota de rodapé 503 na página 206 e a página 240.

⁵⁴⁰[Nota de Riecke:] *Obras* de Gauss, Vol. V, pág. 79.

⁵⁴¹Ver os Capítulos 10, 11 e 12.

obter, sem tomar parte de fato nas observações e cálculos, embora de forma menos refinada e precisa, esse trabalho tem o objetivo de descrever métodos simples que possam ser seguidos por todos. São apresentadas aqui com mais propriedade a descrição e a maneira de utilizá-los, já que essas páginas são direcionadas não apenas para o número limitado daqueles que participam nas observações simultâneas, mas para todos aqueles envolvidos na pesquisa das leis dos fenômenos magnéticos.

Aqueles instrumentos menos delicados que foram utilizados para as medições magnéticas antes da invenção do magnetômetro, podem ser utilizados não apenas para os mesmos propósitos que antes, mas também para as medições absolutas da intensidade, medidas essas que devem sua origem à invenção do magnetômetro. É verdade que esses instrumentos estão longe de fornecer resultados tão precisos quanto o magnetômetro; mas os resultados que eles fornecem são obtidos mais facilmente. Nesse sentido eles não perderam todo seu valor por essa última invenção; eles ainda podem ser utilmente empregados, embora em uma esfera de ação mais limitada. Sempre que, por falta de recursos ou de tempo, ou por quaisquer outras circunstâncias, os magnetômetros não puderem ser utilizados, esses instrumentos ainda podem ser usados com proveito. Esse será o caso mais frequentemente nas viagens e jornadas às partes remotas do mundo. É verdade que magnetômetros podem ser levados em viagens, como foi feito pelo Sr. von Waltershausen e pelo Dr. Listing em suas jornadas italianas;⁵⁴² mas isso só é possível para aqueles que são altamente favorecidos por circunstâncias externas; e, portanto, não é para ser esperado que muitos seguirão esse exemplo louvável. Se, portanto, quisermos coletar observações de toda a superfície da Terra, temos de nos satisfazer com aquelas observações que não são feitas com magnetômetros; e é importante estender a aplicação dos instrumentos portáteis às medições absolutas da intensidade, que até o momento só puderam ser feitas com o magnetômetro. A diferença no que diz respeito à precisão entre as medições absolutas com tais instrumentos e aquelas feitas com o magnetômetro, é aproximadamente a mesma que aquela entre as medições da declinação utilizando os dois tipos de instrumento. Uma pessoa habilidosa será capaz de obter resultados úteis mesmo com o aparelho menor; e, portanto, parece desejável que ele seja utilizado amplamente.

Vamos considerar sucessivamente:

1. As partes do pequeno aparelho.
2. As observações a serem feitas com ele.
3. A aplicação das observações.
4. Os cálculos necessários.
5. O resultado dos cálculos.
6. As vantagens, em termos de precisão, das dimensões adotadas para o instrumento.

16.1 As Partes do Pequeno Instrumento

Além de um relógio ou cronômetro, esse instrumento consiste em três partes:

1. Uma pequena agulha de bússola.
2. Uma pequena barra imantada, que pode ser suspensa por uma linha de seda, e colocada em oscilação.
3. Uma régua com 1 metro de comprimento.

A agulha de bússola da qual foi obtida essa descrição tinha 60 milímetros de comprimento, e o arco circular era dividido apenas em graus. Para que uma bússola tão pequena pudesse

⁵⁴²Wolfgang Sartorius von Waltershausen (1809-1876) e Johann Benedict Listing (1808-1882).

levar a resultados úteis, é necessário que o observador seja capaz de estimar com precisão a décima parte de 1 grau.⁵⁴³ A agulha pode ser uma pouco maior; mas os motivos que tornam recomendável que ela nunca deva exceder 100 milímetros, serão dados na conclusão desse trabalho.

A pequena barra imantada tinha 101 milímetros de comprimento, $17\frac{1}{2}$ milímetros de largura, e 142 gramas de peso; ela pode oscilar suspendendo-a em uma linha de seda amarrada transversalmente ao redor do meio da barra. É vantajoso que ela tenha o formato exato de um paralelepípedo, para que, sendo conhecido seu peso e suas dimensões, possa ser calculado seu momento de inércia. Ela também pode ter um pequeno furo no centro, através do qual possa ser presa uma agulha de costura, sendo que nesse caso só é necessário passar o fio de suspensão pelo orifício da agulha; é melhor que a pequena barra tenha precisamente 100 milímetros de comprimento.

A régua deve ser larga o suficiente para que a bússola seja colocado no meio e só precisa ser dividido de 50 em 50 milímetros.

Esse simples instrumento é suficiente para a medição absoluta da intensidade magnética. Ele é fornecido pelo fabricante de instrumentos Sr. Meyerstein,⁵⁴⁴ de Göttingen, por $9\frac{1}{2}$ táleres⁵⁴⁵ (obviamente sem o relógio), de tal forma que a medição da intensidade dessa maneira requer menos custos do que qualquer outra determinação magnética. Ele é também bem portátil e conveniente para viajantes. O instrumento é para ser colocado sobre uma mesa no centro de uma sala, evitando todo o ferro nas redondezas; grandes trilhos de ferro, mesmo a certa distância, têm de ser cuidadosamente evitados. Também podem ser feitos arranjos para utilizá-lo a céu aberto.

16.2 Observações a Serem Realizadas com Esse Instrumento

Essas observações são de dois tipos: 1. As experiências de deflexão. 2. As experiências de oscilação.

16.2.1 Experiências de Deflexão

A régua é colocada horizontalmente e ortogonalmente ao meridiano magnético, com seu ponto zero voltado para Leste,⁵⁴⁶ e a agulha no centro. A pequena barra imantada é para ser colocada sucessivamente como segue:

1. Com sua extremidade Norte voltada para Leste, no ponto zero da régua. Caso o comprimento da pequena barra imantada seja de 100 milímetros, seu centro estará então na divisão de 50 milímetros da régua. A agulha será desviada para Leste, e é observada sua

⁵⁴³[Nota de Wilhelm Weber:] Essa estimativa, que é fácil de realizar em outras circunstâncias, apresenta nesse caso uma certa dificuldade, que surge da ponta da agulha magnética estar usualmente um pouco distante do arco dividido. Para superar este obstáculo, utilizou-se o procedimento de colocar um espelho horizontalmente sobre a mesa em frente à agulha magnética e, antes de ler a posição da bússola, observar o reflexo do olho com o qual se está lendo e julgar pelo olho se a agulha magnética alongada corta ao meio a imagem espelhada do olho.

⁵⁴⁴Ver a Nota de rodapé 493 na página 201.

⁵⁴⁵Ver a Nota de rodapé 535 na página 217.

⁵⁴⁶Isto é, o início da marcação da régua está a Leste do meridiano magnético local.

orientação, u_0 .⁵⁴⁷

2. A extremidade Sul [da barra imantada] é então substituída pela extremidade Norte. A agulha é desviada para Oeste, e é observada sua posição, u'_0 .

3. A extremidade Norte da barra imantada é colocada voltada para Leste, na divisão de 100 milímetros. A agulha é desviada para Leste, e é observada sua posição, u_1 .

4. A barra é novamente invertida, de extremidade a extremidade. A agulha é desviada para Oeste, e é observada sua posição u'_1 .

5. A extremidade Norte da barra imantada é colocada voltada para Leste, na divisão de 150 milímetros. A agulha é desviada para Leste, e é observada sua posição u_2 .

6. A barra é novamente invertida, e a agulha desviada para Oeste, e é observada sua posição u'_2 .

7. A extremidade Norte da barra imantada é colocada voltada para Leste, na divisão de 750 milímetros. A agulha é desviada para Leste, e é observada sua posição u''_2 .

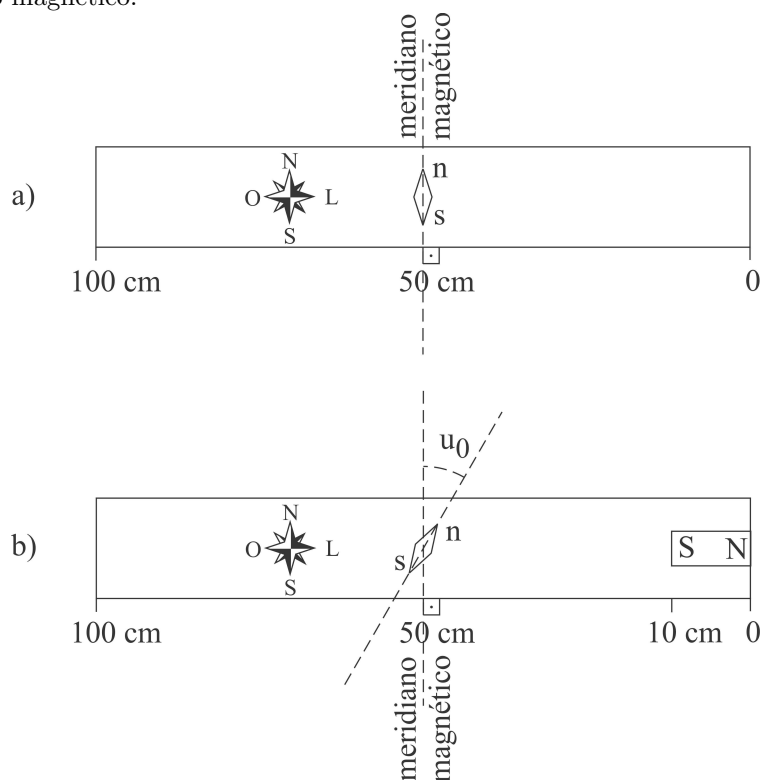
8. A barra é invertida. A agulha é desviada para Oeste, e é observada sua posição u''_2 .

9. A extremidade Norte da barra imantada é colocada voltada para o Leste, na divisão de 800 milímetros. A agulha é desviada para Leste, e é observada sua posição u''_1 .

10. A barra é invertida. A agulha é desviada para Oeste, e é observada sua posição u'''_1 .

11. A extremidade Norte da barra imantada é colocada voltada para Leste, sobre a

⁵⁴⁷Essa posição ou orientação u_0 representa o desvio angular da agulha imantada em relação ao meridiano magnético local. A Figura dessa Nota de rodapé ilustra essa experiência. Em (a) temos uma régua de 1 m de comprimento, horizontal e orientada ortogonalmente ao meridiano magnético local, com seu ponto 0 no lado Leste do meridiano magnético. No centro da régua é colocada uma bússola. Sem a presença da pequena barra imantada vem que a agulha da bússola vai se orientar ao longo do meridiano magnético local, perpendicularmente à régua, com sua extremidade n apontando para o Norte. Em (b) foi colocada a pequena barra imantada de 10 cm sobre a régua, com sua extremidade N no ponto zero da régua. A extremidade n da agulha da bússola é então desviada para Leste. Mede-se então o ângulo u_0 de desvio da agulha em relação ao meridiano magnético:



divisão de 900 milímetros. A agulha é desviada para Leste, e é observada sua posição u_0'' .

12. A barra é invertida. A agulha é desviada para Oeste, e é observada sua posição u_0''' .

Todas essas doze observações podem ser completadas em meia hora.

16.2.2 Experiências de Oscilação

A pequena barra imantada deve ser suspensa horizontalmente por uma linha de seda, colocada em vibração e seu período de oscilação observado da maneira usual, o que não necessita de uma descrição adicional aqui. O período de oscilação pode ser determinado por essas experiências, com precisão suficiente, em um quarto de hora.

Levando em conta todas as observações que são necessárias para uma medição completa da intensidade absoluta, e considerando um quarto de hora para preparar o instrumento e suspender a barra imantada, a parte experimental da determinação pode ser completada em uma hora. Por meio de repetições o observador pode fornecer à sua determinação uma maior certeza e precisão.

As observações seguintes feitas com esse instrumento em Göttingen são dadas como um exemplo.

Göttingen, 18 de janeiro de 1837.

1. Experiências de Deflexão.

1.	$u_0 - u_0' = 23^\circ 9'$
2.	$u_1 - u_1' = 47^\circ 42'$
3.	$u_2 - u_2' = 71^\circ 48'$
4.	$u_2'' - u_2''' = 69^\circ 21'$
5.	$u_1'' - u_1''' = 46^\circ 12'$
6.	$u_0'' - u_0''' = 22^\circ 27'$

Nessas experiências a distância R do centro da pequena barra imantada até o centro da bússola estava na seguinte ordem:

1.	$R_0 = 450 \text{ mm}$
2.	$R_1 = 350 \text{ mm}$
3.	$R_2 = 300 \text{ mm}$
4.	$R_2 = 300 \text{ mm}$
5.	$R_1 = 350 \text{ mm}$
6.	$R_0 = 450 \text{ mm}$

2. Experiências de Oscilação.

Número	Indicação do relógio	Número de oscilações	Sua duração
0.	0' 3, 25"		
1.	9, 90"	1	6, 65"
2.	16, 65"	2	13, 40"
3.	23, 35"	3	20, 10"
4.	30, 00"	4	26, 75"
5.	36, 65"	5	33, 40"
6.	43, 30"	6	40, 05"
7.	50, 00"	7	46, 75"
8.	56, 70"	8	53, 45"
9.	1' 3, 30"	9	60, 05"
10.	9, 80"	10	66, 55"
11.	16, 55"	11	73, 30"
12.	23, 30"	12	80, 05"
13.	29, 90"	13	86, 65"
14.	36, 65"	14	93, 40"
15.	43, 15"	15	99, 90"
16.	49, 80"	16	106, 55"
17.	56, 65"	17	113, 40"
18.	2' 3, 25"	18	120, 00"
19.	9, 95"	19	126, 70"
20.	16, 70"	20	133, 45"
21.	23, 35"	21	140, 10"
22.	30, 00"	22	146, 75"
		Soma 253	1687, 40"

Consequentemente, o tempo t para uma oscilação:⁵⁴⁸

$$t = 6,67'' .$$

16.3 Aplicação das Observações

Uma visão geral e inteligível dessas observações, sem entrar em considerações teóricas, pode ser melhor apresentada ao extrair certas passagens [escritas por Gauss e retiradas] do *Jahrbuch* de Schumacher para o ano de 1836 intituladas “*Ueber Erdmagnetismus und Magnetometer — Sobre o Magnetismo Terrestre e o Magnetômetro*,”^{549,550} e acrescentando as expressões matemáticas que lá foram apresentadas verbalmente:

O quadrado do número de vibrações feitas por uma agulha magnética em um certo tempo é uma medida da intensidade do magnetismo terrestre que depende da agulha utilizada. As propriedades individuais da agulha têm uma influência dupla: — em primeiro lugar, pela maior ou menor intensidade magnética que ela possui; e em segundo lugar, pelo efeito de sua forma e peso no período de oscilação. A eliminação do último efeito não apresenta dificuldade. A influência do magnetismo terrestre no

⁵⁴⁸Ver a Nota de rodapé 339 na página 139.

⁵⁴⁹[Nota de Riecke:] *Obras de Gauss*, Vol. V, pág. 315.

⁵⁵⁰[Gau36b].

magnetismo da agulha produz uma força ou torque quando a agulha não está no meridiano magnético. Esse torque é maior quanto mais a agulha se desvia do meridiano magnético; sendo máximo quando a agulha é ortogonal a esse meridiano. Deve ser entendido esse efeito máximo sempre que nos referirmos ao torque de rotação; ele pode ser representado por um certo peso atuando em uma alavanca de um certo comprimento e, conseqüentemente, por um número, caso os pesos e comprimentos sejam expressos em números, de acordo com unidades arbitrárias. Agora esse torque e período de oscilação estão relacionados muito simplesmente por meio de uma grandeza intermediária, que depende da forma e peso da agulha, chamada seu momento de inércia, e que pode ser calculado de acordo com regras conhecidas. Caso a agulha não seja um corpo regular, ou caso ela carregue consigo qualquer acessório enquanto está vibrando, são necessárias outras maneiras para a determinação de seu momento de inércia, cuja descrição nos levaria muito longe; sendo suficiente dizer aqui, que essa determinação é sempre possível. Se esse momento de inércia for conhecido, pode-se deduzir do período de oscilação observado da agulha o torque que o magnetismo da Terra produz através de sua ação sobre os fluidos magnéticos na agulha.

Se designarmos pela letra C ao momento de inércia, após ele ter sido multiplicado por π^2 , isto é, por 9,8696..., e dividido por duas vezes a altura de queda [livre] de um corpo pesado na unidade de tempo, podemos obter, a partir de C e do observado período de oscilação t ,⁵⁵¹ o torque máximo causado pela Terra; ele é dado por:

$$= \frac{C}{t^2} .$$

[Segue outro trecho da obra de Gauss:]

É possível determinar o torque por experiência direta, sem observar o período de oscilação. Recentemente foi colocado no Observatório Astronômico de Göttingen um instrumento adaptado expressamente para essa finalidade que é suscetível de grande precisão; mas, para o presente propósito, é desnecessário insistir neste ponto.

Esse torque produzido pelo magnetismo terrestre em uma dada agulha [imantada] oferece uma nova maneira de medir a força do magnetismo terrestre ou, falando mais precisamente, uma nova forma do modo anterior de medida, em relação ao qual ela tem a vantagem de que uma parte da individualidade da agulha é removida por esse novo procedimento. A medição ainda depende da peculiaridade remanescente da agulha, a saber, um magnetismo mais forte ou mais fraco pode ser desenvolvido na agulha; e tão logo possamos reduzir *esse magnetismo da agulha* a uma unidade absoluta, a própria intensidade do magnetismo terrestre também poderá ser reduzida a uma unidade absoluta; pois teremos apenas que dividir o número que expressa o torque pelo número que expressa o magnetismo da agulha. De fato, uma unidade de medida do magnetismo terrestre é atribuída a uma força que seja similar a ela, cuja ação sobre a unidade de magnetismo da agulha consiste em um torque que é medido pela força que a unidade de peso exerce sobre uma alavanca com a unidade de comprimento.⁵⁵²

⁵⁵¹Em alemão: *Schwingungsdauer*. Ver a Nota de rodapé 339 na página 139.

⁵⁵²Uma agulha com uma unidade de magnetismo possui uma unidade de momento magnético, isto é, o momento magnético = 1.

Se, então, T denota o magnetismo da Terra depois de acordo com essa unidade e M o magnetismo da agulha ou da haste vibratória,⁵⁵³ então

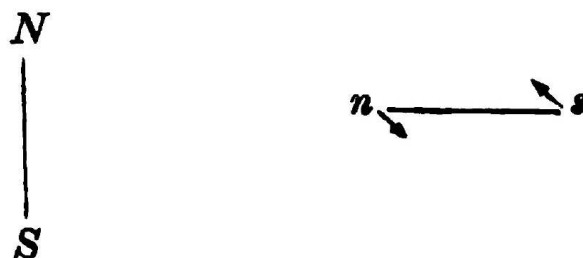
$$T = \frac{C}{t^2 \cdot M} . \quad (I)$$

[Gauss continua:]

Poderíamos ficar inclinados a supor que o peso que uma agulha imantada pode suportar ofereceria um padrão pelo qual poderia ser estimada a intensidade do magnetismo desenvolvido na agulha; contudo, um exame mais detalhado mostrará que esse método é bastante inútil para o nosso propósito.⁵⁵⁴ A própria determinação é incapaz de muita precisão, já que experiências repetidas fornecem resultados bem diferentes; mas há uma objeção ainda mais importante: a capacidade de sustentar um peso não tem conexão necessária com a magnitude do magnetismo desenvolvido na agulha, no sentido no qual ele tem de ser compreendido aqui. O torque é devido ao magnetismo de todas as partes da agulha, sobre os quais o magnetismo terrestre atua igualmente, e em direções paralelas. No caso do poder de sustentação, no entanto, é principalmente o magnetismo na extremidade mais próxima ao peso que é instantaneamente modificado pela interação da haste magnética e do ferro conectado.

Uma agulha imantada, em um certo local, atua em todo ponto do espaço, com um certo valor e direção determinado por sua distância e posição. Na redondeza imediata sua ação é intensa, mas muito desigual em partes diferentes; a grandes distâncias a ação é fraca, mas quase uniforme em intensidade e direção dentro de um espaço moderado. Quanto maior for a distância, mais próxima estará a lei de força de uma regra, que é muito simples, e é dada completamente pela teoria: podemos nos limitar aqui à consideração de um único caso, que é suficiente para os nossos propósitos.

Seja NS uma agulha imantada fixa em uma posição horizontal; é necessário encontrar sua influência sobre uma segunda agulha, ns , suspensa por um fio; sendo a posição relativa das duas agulhas mostrada na Figura a seguir:



A ação da primeira agulha sobre a segunda consistirá em fornecer a ela uma tendência a girar na direção indicada pelas setas, as letras N e n indicando os polos Norte, enquanto que as letras S e s indicam os polos Sul. O torque é expresso por um

⁵⁵³Ou seja, T representa a componente horizontal da força magnética terrestre, enquanto que M representa o momento magnético da agulha imantada.

⁵⁵⁴Gauss está se referindo aqui a uma experiência na qual uma agulha imantada vertical sustenta um peso de ferro acoplado à sua extremidade inferior. Quanto mais intenso for o magnetismo da agulha, maior será o peso de ferro que ela pode sustentar. Porém, como indicado por Gauss a seguir, o próprio peso de ferro altera a magnetização da agulha.

número, exatamente da mesma forma que a ação do magnetismo terrestre sobre uma agulha oscilando livremente foi indicada anteriormente. Contudo, a intensidade do torque depende da distância e da intensidade magnética nas *duas* agulhas.⁵⁵⁵ Assim, por exemplo (supondo que a distância é suficientemente grande), à mesma distância o torque aumentaria seis vezes ao dobrar o magnetismo de uma das agulhas e triplicar o da outra.

A ação depende da distância de tal maneira que, no dobro da distância a ação será $\frac{1}{8}$, e a três vezes a distância, a ação será $\frac{1}{27}$ da ação produzida na distância inicial; tendo em mente, contudo, que essa lei só é correta para distâncias muito grandes, não podendo ser estendida para distâncias pequenas. Como todas as distâncias, quando referidas a uma unidade selecionada, podem ser expressas por números, essa lei pode ser expressa assim: 'o produto do torque pelo cubo da distância é constante para grandes distâncias.' Esse produto pode ser apropriadamente denominado de torque *reduzido* à unidade de distância; lembrando que, de acordo com a observação feita anteriormente, o torque real na unidade de distância, quando a distância é pequena, pode diferir consideravelmente do torque reduzido. Isso, contudo, não nos impede de utilizar o torque reduzido como uma medida padrão do magnetismo das agulhas, *e de considerar como unitário o magnetismo daquela agulha que fornece a outra agulha (que possui o mesmo magnetismo e está na posição dada), um torque reduzido igual à ação da unidade de peso ao atuar sobre o braço de uma alavanca cujo comprimento é a unidade de distância.*⁵⁵⁶

Se, de acordo com essa unidade estabelecida para o magnetismo da agulha ou da barra, o magnetismo da agulha for denotado por m , o magnetismo da barra por M ,⁵⁵⁷ a distância (que se supõe muito grande) entre elas por R , e o torque exercido pela barra sobre a agulha por f , o torque reduzido é dado por

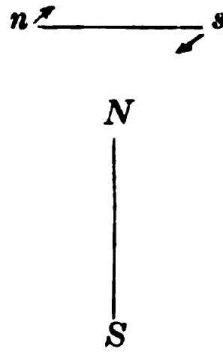
$$mM = fR^3 .$$

A orientação da barra em relação à agulha que foi assumida nesse caso não existiu de fato nas experiências de Göttingen, mas sim uma orientação diferente representada pela próxima Figura.

⁵⁵⁵Em alemão: *von der Stärke des Magnetismus in beiden Nadeln*. Ou seja, o torque depende não apenas da distância entre as agulhas, mas também de seus momentos magnéticos (ou da intensidade do magnetismo das duas agulhas). O torque está sendo calculado aqui em relação ao centro da agulha giratória.

⁵⁵⁶Uma agulha com uma unidade de magnetismo é aquela que possui uma unidade de momento magnético, isto é, momento magnético = 1. Gauss está definindo aqui que duas agulhas iguais terão cada uma um momento magnético = 1, quando estão orientadas de acordo com a Figura anterior, e quando o torque que exercem entre si multiplicado pelo cubo da distância entre seus centros é igual ao torque exercido por um peso = 1 ao atuar sobre o braço de uma alavanca com braço = 1, sendo todas essas grandezas estipuladas em unidades absolutas.

⁵⁵⁷Ou seja, m e M são os momentos magnéticos da agulha e da barra, respectivamente, de acordo com a definição de quando o momento magnético tem intensidade = 1.



Contudo, vale a mesma coisa nas duas orientações, com essa única diferença, que f tem um valor diferente, que vamos designar por F . Na Memória “*Intensitas*,” etc.,⁵⁵⁸ está provado que

$$F = 2f ,$$

de tal forma que,

$$mM = \frac{FR^3}{2} . \quad (II)$$

As observações de Göttingen vão se referir a esse segundo caso nas fórmulas que serão mencionadas a seguir.

[Gauss continua:]

Portanto, dessa forma temos uma ideia completa e precisa da medida da força magnética de uma agulha imantada. Uma agulha com o dobro da intensidade fornecerá a uma agulha igualmente magnetizada um torque reduzido = 4,⁵⁵⁹ e em geral quando conhecemos o número do torque reduzido que uma agulha fornece a uma outra agulha igualmente imantada, temos a medida absoluta da intensidade do magnetismo em cada agulha; sendo essa medida a raiz quadrada daquele número.

Portanto, para ser capaz de reduzir a força do magnetismo terrestre a unidades absolutas, só é necessário fornecer algum método pelo qual o torque que uma agulha produz em uma agulha similar a uma grande distância (e na orientação representada na Figura) possa ser determinado com precisão. Uma grande dificuldade poderia surgir inicialmente de uma circunstância que foi omitida de propósito no que já foi dito, a saber, a impossibilidade de observar essa ação muito pequena da agulha NS sobre a agulha ns (a qual, por hora, vamos supor que esteja tão fortemente magnetizada quanto NS); já que essa ação não pode escapar da ação onipresente e muito mais poderosa do magnetismo terrestre. Porém, essa própria circunstância oferece a maneira de uma fácil solução. Vamos supor que na nossa Figura a linha reta do centro do ímã NS através da agulha ns coincide com o meridiano magnético (de Norte a Sul); nessa orientação a força magnética terrestre não vai atuar sobre a agulha ns .⁵⁶⁰ Contudo, tão logo comece a atuar o torque que NS exerce em ns , a

⁵⁵⁸Ver os Capítulos 10, 11 e 12.

⁵⁵⁹Ou seja, se duas agulhas com momento magnético = 1 produzem entre si um torque reduzido = 1, então duas agulhas, cada uma com momento magnético = 2, na mesma distância mútua e nas mesmas orientações anteriores, vão produzir entre si um torque reduzido = 4.

⁵⁶⁰Gauss está se referindo à Figura que aparece na página 228.

agulha ns será desviada de sua orientação original e colocada em movimento; porém, quanto mais ela desvia de sua orientação original devido a esse movimento, mais fortemente o magnetismo terrestre tenderá a trazê-la de volta à sua posição inicial. Consequentemente a agulha vai realizar vibrações ao redor de uma linha que não está mais na direção do próprio meridiano magnético, estando mais ou menos inclinada em relação a ele. Esta linha está ao longo da orientação de equilíbrio da agulha ns , a qual ela assume quando cessam as oscilações. Essa orientação é evidentemente aquela da resultante de duas forças, a saber, o magnetismo terrestre e o magnetismo da agulha NS . De acordo com a bem conhecida lei da estática, a razão entre as intensidades dessas forças, que também é a razão entre os dois torques produzidos por elas, pode consequentemente ser determinada pelo ângulo de desvio, isto é, pela diferença entre as duas orientações de repouso de ns : em primeiro lugar quando ela está sujeita à ação das duas forças, e em segundo lugar quando NS for removida. Surge então aqui uma outra observação importante; a saber, que o ângulo de desvio da agulha ns é totalmente independente de seu magnetismo; já que qualquer aumento nesse aspecto faz com que, evidentemente, aumentem na mesma proporção os *dois* torques. Estamos assim liberados da necessidade de preencher a difícil condição de igualdade no magnetismo das duas agulhas.

Se representarmos o [ângulo de] desvio por v , o maior torque exercido pela Terra sobre a agulha (de acordo com a unidade estabelecida para o magnetismo terrestre) por mT , e por F ao torque exercido pelo magnetismo da barra (M) sobre o magnetismo da agulha (m) na distância R ; as forças exercidas pela Terra e pela barra sobre a agulha estarão na proporção do cosseno para o seno do desvio v ; e os torques de rotação, mT e F , estarão também na mesma razão entre si, a saber

$$mT : F = \cos v : \sin v ,$$

isto é,

$$mT = \frac{F}{\tan v} . \quad (III)$$

Se dividirmos a Equação (II) pela (III) obteremos

$$\frac{mM}{mT} = \frac{FR^3 \cdot \tan v}{2F} ,$$

fica portanto evidente a independência do desvio v tanto em relação ao magnetismo m da agulha, quando em relação ao torque F , e obtemos o seguinte resultado:

$$\frac{M}{T} = \frac{R^3 \cdot \tan v}{2} . \quad (IV)$$

[Gauss continua:]

Portanto, a determinação da intensidade do magnetismo terrestre fica reduzida a duas operações principais.

I. Observar o período de oscilação de uma agulha NS , e deduzir a partir daí o torque que o magnetismo terrestre exerce na agulha.

Esse torque será expresso, de acordo com a unidade estabelecida, pelo produto MT e calculado pela Equação (I), [a saber:]

$$T = \frac{C}{M \cdot t^2} , \quad \text{ou} \quad MT = \frac{C}{t^2} ,$$

na qual C representa o momento de inércia da barra, multiplicado pelo número π^2 , isto é, 9,8696..., e dividido pelo dobro do espaço percorrido em queda [livre] por um corpo pesado na unidade de tempo.

[Gauss continua:]

II. Suspendemos uma segunda agulha, ns , e observamos sua orientação; em primeiro lugar, quando sujeita apenas à influência do magnetismo terrestre; em segundo lugar, após NS ter sido colocada a uma grande distância, como representado na Figura.⁵⁶¹ Calculamos então, a partir da diferença entre as duas orientações, ou a partir do desvio, a qual fração do magnetismo terrestre corresponde a força magnética da agulha NS na distância selecionada. Uma fração igual do torque encontrado em (I) fornecerá o torque que a agulha NS , naquela distância, ocasionaria em uma agulha similar. Esse resultado, multiplicado pelo cubo da distância, fornece o torque reduzido; a raiz quadrada desse número fornece a força da agulha NS em unidade absoluta;⁵⁶² e, finalmente, o número encontrado em (I) dividido por essa raiz quadrada, fornece a expressão para a unidade absoluta do magnetismo terrestre.⁵⁶³

A razão que a força da barra sobre a agulha (na distância dada R até a agulha) tem para a força magnética terrestre sobre a agulha é expressa pelo quociente

$$\frac{F}{mT} ,$$

e, calculada de acordo com a Equação (III),

$$mT = \frac{F}{\tan v} , \quad \text{ou} \quad \frac{F}{mT} = \tan v .$$

Porém, de acordo com a Equação (II),

$$mM = \frac{FR^3}{2} , \quad \text{ou} \quad \frac{F}{mT} = \frac{2M}{R^3T} .$$

Essa fração obtida do torque calculado de acordo com a Equação (I)

$$MT = \frac{C}{t^2} ,$$

isto é,

$$\frac{2M}{R^3T} \cdot MT = \frac{C}{t^2} \cdot \tan v ,$$

⁵⁶¹Gauss está se referindo à Figura que aparece na página 228.

⁵⁶²Isto é, fornece o momento magnético da agulha NS expresso em unidade absoluta.

⁵⁶³Ou seja, fornece a expressão para a intensidade da componente horizontal da força magnética terrestre expressa em unidade absoluta.

torna conhecido para nós o torque máximo que a barra com magnetismo M exerceria em uma barra similar na distância R ; já que esse valor máximo, de acordo com as leis fundamentais do magnetismo, tem de ser $\frac{2M^2}{R^3}$; e a equação anterior fornece

$$\frac{2M^2}{R^3} = \frac{C}{t^2} \cdot \tan v .$$

Esse resultado, multiplicado pelo cubo da distância R , fornece o dobro do torque reduzido

$$2M^2 = \frac{CR^3 \tan v}{t^2} .$$

A raiz quadrada da metade desse valor fornece a força da barra em unidade absoluta:⁵⁶⁴

$$M = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{CR^3 \cdot \tan v}{2}} . \quad (V)$$

Se, finalmente, dividirmos com isso o torque exercido pela Terra na agulha, calculado de acordo com a Equação (I)

$$MT = \frac{C}{t^2} ,$$

obteremos:

$$T = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{2C}{R^3 \tan v}} , \quad (VI)$$

isto é, o número para a unidade absoluta do magnetismo terrestre.⁵⁶⁵

[Gauss continua:]

Essa é a exposição mais facilmente entendida que pode ser dada, sem o uso de fórmulas matemáticas, da possibilidade de expressar a força do magnetismo terrestre por um número que será perfeitamente independente da individualidade das barras magnéticas utilizadas. Na aplicação real alguns pontos aparecerão em um formato um pouco diferente sem, contudo, afetar em nada a natureza do método; e, além disso, será necessário levar em consideração várias circunstâncias colaterais. Vamos adicionar algumas poucas observações sobre uma ou duas circunstâncias.

Ao falar das unidades a serem utilizadas nas medições, foram mencionadas apenas uma unidade de distância e uma unidade de peso. Mas não deve ser esquecido que um certo peso (uma grama, por exemplo), não significa, nesse caso, a quantidade de matéria ponderável que possui esse nome, e que é a mesma em todo lugar, — mas a força que essa quantidade de matéria exerce no lugar da observação, sob a influência da gravidade. É bem conhecido que a força da gravidade não é exatamente a mesma em locais diferentes; e se escolhermos a força de uma grama como nossa unidade de peso, a intensidade do magnetismo terrestre não seria medida acuradamente por um mesmo padrão em vários locais. A precisão com a qual essas medidas podem ser feitas hoje em dia é tal que essa diferença não pode ser negligenciada. A maneira mais simples de resolver essa dificuldade é a de reduzir a própria força da gravidade

⁵⁶⁴Isto é, fornece o momento magnético M da barra imantada expresso em unidade absoluta.

⁵⁶⁵Ou seja, esse valor representará o valor da componente horizontal da força magnética terrestre expressa em unidade absoluta.

a uma unidade absoluta, ao adotar como sua medida o dobro da altura de queda [livre] na unidade de tempo (por exemplo, um segundo), e ao expressar a força pelo produto da massa pelo número que mede a força da gravidade. Dessa maneira outros números são obtidos, tanto para a força da agulha imantada utilizada, quanto para a força do magnetismo terrestre;⁵⁶⁶ sendo que esses números estão baseados em três unidades, a saber, uma unidade de distância, uma unidade de tempo, e uma unidade de massa — em vez de se apoiar sobre as duas unidades mencionadas anteriormente.

Ao calcular os números M e T de acordo com as Equações (V) e (VI)

$$M = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{CR^3 \cdot \tan v}{2}} ,$$

e

$$T = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{2C}{R^3 \tan v}} ,$$

o valor atribuído à constante C era

$$C = \frac{\pi^2}{g} \cdot K ,$$

na qual π representava o número conhecido 3,14159...; g representava o dobro do espaço de queda [livre] na unidade de tempo; e K o momento de inércia da barra oscilante. Os novos números são obtidos pelas mesmas equações, ao atribuir a C o valor

$$C = \pi^2 K .$$

[Gauss continua:]

Uma dificuldade importante na aplicação desse método consiste no fato de que a lei mencionada anteriormente, a saber, que a ação de uma agulha imantada varia inversamente como o cubo da distância, só vale com precisão suficiente para distâncias muito grandes, nas quais as ações são muito pequenas para serem determinadas com precisão por observação direta. Em distâncias moderadas as variações da lei tornam-se bem perceptíveis; mas a teoria nos ensina que essas próprias diferenças estão sujeitas a uma regra; e a matemática nos fornece os meios de reconhecê-las e eliminá-las quase completamente, pela combinação de experiências realizadas a *várias* distâncias moderadas.

Com o objetivo de mostrar a aplicação do pequeno aparelho de medida em relação a essas observações, daremos finalmente, em poucas palavras, os procedimentos necessários de correção. Essa correção é feita em três partes:

1. Em vez dos valores dados pela observação direta para os desvios v_0, v_1, v_2 , etc., devem ser considerados os seguintes valores combinados:

⁵⁶⁶[Nota de Gauss:] Elas estão para os números anteriores na proporção da raiz quadrada do número que mede a força da gravidade para o número 1.

$$\begin{aligned}
v_0 &= \frac{1}{4} (u_0 - u'_0 + u''_0 - u'''_0) \\
v_1 &= \frac{1}{4} (u_1 - u'_1 + u''_1 - u'''_1) \\
v_2 &= \frac{1}{4} (u_2 - u'_2 + u''_2 - u'''_2) \\
&\text{etc.}
\end{aligned}$$

2. Em relação aos valores aproximados de M/T , que foram obtidos pela Equação (IV)

$$\frac{M}{T} = \frac{R^3 \tan v}{2} ,$$

são adicionadas as seguintes correções:

Valor aproximado de M/T	Correção
$\frac{R_0^3 \tan v_0}{2}$	$-\frac{L}{R_0^2}$
$\frac{R_1^3 \tan v_1}{2}$	$-\frac{L}{R_1^2}$
$\frac{R_2^3 \tan v_2}{2}$ etc.	$-\frac{L}{R_2^2}$ etc.

3. Como o número de grandezas medidas R_0, R_1, R_2 , etc. e v_0, v_1, v_2 , etc., é maior do que o necessário para a determinação das grandezas desconhecidas L e M/T , as regras do cálculo das probabilidades são empregadas para obter os valores mais prováveis dessas grandezas. Essas regras são como segue.

A partir das grandezas R_0, R_1, R_2 , etc., v_0, v_1, v_2 , etc., temos de calcular as seguintes expressões:

$$\frac{\tan v_0}{R_0^3} + \frac{\tan v_1}{R_1^3} + \frac{\tan v_2}{R_2^3} + \text{etc.} = A ,$$

$$\frac{\tan v_0}{R_0^5} + \frac{\tan v_1}{R_1^5} + \frac{\tan v_2}{R_2^5} + \text{etc.} = A' ,$$

$$\frac{1}{R_0^6} + \frac{1}{R_1^6} + \frac{1}{R_2^6} + \text{etc.} = B ,$$

$$\frac{1}{R_0^8} + \frac{1}{R_1^8} + \frac{1}{R_2^8} + \text{etc.} = B' ,$$

$$\frac{1}{R_0^{10}} + \frac{1}{R_1^{10}} + \frac{1}{R_2^{10}} + \text{etc.} = B'' ;$$

teremos portanto o valor mais provável de

$$L = \frac{1}{2} \cdot \frac{AB' - A'B}{B'^2 - BB''} ,$$

$$\frac{M}{T} = \frac{1}{2} \cdot \frac{A'B' - AB''}{B'^2 - BB''} = r .$$

A partir disso e da Equação (I)

$$MT = \frac{C}{t^2} ,$$

obtemos

$$M = \frac{1}{t} \sqrt{rC} , \quad (VII)$$

e

$$T = \frac{1}{t} \sqrt{\frac{C}{r}} . \quad (VIII)$$

As experiências com o pequeno instrumento de medida podem ser calculadas de acordo com essas leis e fórmulas, e assim determinadas, em unidade absoluta, as intensidades da barra imantada e do magnetismo terrestre.

16.4 O Cálculo das Observações Feitas com o Aparelho de Medição Descrito, de Acordo com as Regras que Acabamos de Mencionar

As experiências foram, em primeiro lugar, aquelas de deflexão, que forneceram os valores de $u_0 - u'_0, u_1 - u'_1, u_2 - u'_2, u''_2 - u'''_2, u''_1 - u'''_1, u''_0 - u'''_0$, e os valores correspondentes de R , a saber, $R_0, R_1, R_2, R_2, R_1, R_0$. Calculamos a partir disso os valores de v_0, v_1, v_2 , correspondendo a R_0, R_1, R_2 ; e, portanto, os valores de A, A', B, B', B'' , que são funções simples de seis grandezas, $v_0, v_1, v_2; R_0, R_1, R_2$. E, finalmente, o valor de r é deduzido das grandezas A, A', B, B', B'' , das quais ele é uma função. Assim, o valor de r é obtido pelo cálculo a partir das experiências de deflexão.

Em segundo lugar, a partir das experiências de vibração, é encontrado o valor do período de oscilação t . Tendo assim os valores de r e t , só é necessário, para as finalidades do observador que viaja, calcular

$$\frac{1}{t\sqrt{r}} ;$$

já que esse valor é proporcional ao número que expressa o magnetismo terrestre em unidade absoluta e, conseqüentemente, é suficiente para a *comparação* da intensidade absoluta em todos os locais onde tais experiências podem ser realizadas. Tal *comparação* é usualmente o único objetivo procurado pelo observador viajante. Contudo, algumas vezes pode ser desejável obter não apenas comparações de intensidade absoluta em vários locais, mas a própria intensidade absoluta. O instrumento pode ser perdido em uma viagem e ser substituído por outro; logo torna-se necessário, para comparar as duas séries de observações obtidas com instrumentos que não podem ser comparados, calcular o momento de inércia da barra imantada, sendo que havia sido observado seu período de oscilação, e então extrair sua raiz quadrada. O produto da grandeza $\frac{1}{t\sqrt{r}}$ com essa raiz quadrada e com o número $\pi = 3,14159...$, fornece um número que expressa o magnetismo terrestre em unidade absoluta.

Nesse sentido é vantajoso que a barra seja um paralelepípedo preciso, já que nesse caso o momento de inércia pode ser deduzido para o propósito atual diretamente do peso p ,

comprimento a e largura b da barra. Pois é bem conhecido que o quadrado $a^2 + b^2$ da diagonal dos lados do paralelepípedo, multiplicado pela massa do peso p , e dividido por 12, fornece o procurado momento de inércia, no caso em que a barra foi suspensa pelo centro dessas superfícies. Consequentemente, nas Equações (VII) e (VIII), temos

$$C = 9,8696 \cdot \frac{a^2 + b^2}{12} \cdot p .$$

Se compararmos as observações mencionadas anteriormente com essas fórmulas, será visto que as seguintes grandezas foram medidas diretamente e os seguintes valores encontrados para elas:

$$\begin{aligned} u_0 - u'_0 &= 23^\circ 9' \\ u_1 - u'_1 &= 47^\circ 42' \\ u_2 - u'_2 &= 71^\circ 48' \\ u''_2 - u'''_2 &= 69^\circ 21' \\ u''_1 - u'''_1 &= 46^\circ 12' \\ u''_0 - u'''_0 &= 22^\circ 27' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_0 &= 450 \text{ mm} \\ R_1 &= 350 \text{ mm} \\ R_2 &= 300 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$t = 6,67''$$

$$\begin{aligned} a &= 101,0 \text{ mm} \\ b &= 17,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$p = 142000 \text{ miligramas.}$$

Em seguida a partir dessas grandezas pode ser calculado o seguinte:

$$\begin{aligned} v_0 &= \frac{1}{4} (23^\circ 9' + 22^\circ 27') = 11^\circ 24,00' \\ v_1 &= \frac{1}{4} (47^\circ 42' + 46^\circ 12') = 23^\circ 28,50' \\ v_2 &= \frac{1}{4} (71^\circ 48' + 69^\circ 21') = 35^\circ 17,25' . \end{aligned}$$

Se agora considerarmos o segundo e o milímetro como as unidades fundamentais de tempo e espaço em nossos cálculos, poderemos deduzir dos valores apurados de R_0 , R_1 , R_2 , v_0 , v_1 , v_2 , os seguintes valores de A , A' , B , B' , B'' , a saber,

$$A = \frac{\tan 11^\circ 24'}{450^3} + \frac{\tan 23^\circ 28,5'}{350^3} + \frac{\tan 35^\circ 17,25'}{300^3} = \frac{385,54}{10^{10}} ;$$

$$A' = \frac{\tan 11^\circ 24'}{450^5} + \frac{\tan 23^\circ 28,5'}{350^5} + \frac{\tan 35^\circ 17,25'}{300^5} = \frac{384,86}{10^{15}} ;$$

$$B = \frac{1}{450^6} + \frac{1}{350^6} + \frac{1}{300^6} = \frac{2,0362}{10^{15}} ;$$

$$B' = \frac{1}{450^8} + \frac{1}{350^8} + \frac{1}{300^8} = \frac{2,0277}{10^{20}} ;$$

$$B'' = \frac{1}{450^{10}} + \frac{1}{350^{10}} + \frac{1}{300^{10}} = \frac{2,0855}{10^{25}} .$$

A partir desses valores pode ser calculado r :

$$r = \frac{1}{2} \cdot \frac{385,54 \cdot 2,0855 - 384,86 \cdot 2,0277}{2,0362 \cdot 2,0855 - (2,0277)^2} \cdot 10^5$$

ou

$$r = 8765000 .$$

Finalmente, a partir desse valor de r , e do valor de t , determinado pela observação, pode ser deduzido o valor:

$$\frac{1}{t\sqrt{r}} = \frac{1}{6,67 \cdot \sqrt{8765000}} = \frac{5,0641}{10^5} .$$

Esse número é suficiente para a comparação de todas as intensidades medidas com o mesmo instrumento, não importando como a condição magnética do instrumento possa ter variado.

Além disso, o número T , que expressa em unidade absoluta a intensidade resultante do magnetismo terrestre, pode ser obtido ao deduzir das observações o valor de C e ao multiplicar sua raiz quadrada pelo número anterior. C é calculado a partir dos valores observados de a , b e p , sendo considerada como unidade de massa o miligrama:

$$C = 9,8696 \cdot \frac{101^2 + 17,5^2}{12} \cdot 142000 = 0,12272 \cdot 10^{10} ,$$

portanto, a partir disso T é deduzido como:

$$T = 5,0641 \cdot \sqrt{0,12272} = 1,774 .^{567}$$

⁵⁶⁷Ver a Seção 9.2.

16.5 Exame do Resultado Encontrado

Esse número 1,774 expressando a intensidade do magnetismo terrestre em 18 de janeiro de 1837 possui, como uma medição absoluta, a vantagem de ser diretamente comparável com os resultados obtidos em julho de 1834 com o magnetômetro do Observatório Magnético de Göttingen, publicado nos *Göttingen gelehrten Anzeigen* daquele ano. Eles são encontrados no volume 128^{568,569} (juntamente com o relato do novo prédio, dos instrumentos, assim como das experiências realizadas lá). Eles são como segue:

17 de julho	1,7743
20 de julho	1,7740
21 de julho	1,7761.

Dois instrumentos destinados para o mesmo propósito dificilmente podem ser mais diferentes do que o pequeno instrumento descrito aqui e o magnetômetro. Resulta dessa comparação que a intensidade do magnetismo terrestre em Göttingen quase não sofreu qualquer alteração de 1834 a 1837.

Temos também uma comparação direta desse número obtido em Göttingen com o resultado das observações feitas em Munique com um terceiro instrumento, diferindo bastante com os outros dois, em 1 de abril de 1836, a saber, 1,905, e com o número encontrado em Milão, obtido com o magnetômetro daquele lugar, em outubro de 1836, a saber, 2,01839.

Para ter uma ideia clara da importância desses números, da determinação e da aplicação que foi feita até agora, imagine um número de pequenas barras de aço, perfeitamente similares, cada uma pesando ao redor de $2\frac{1}{2}$ gramas, ou $\frac{1}{6}$ de uma onça. Imagine além disso uma balança, na qual o comprimento dos braços esteja para 1 metro na mesma proporção que 1 metro tem para o espaço de queda [livre] em 1 segundo (aproximadamente 204 milímetros); suponha que uma dessas barras de aço esteja ligada em uma direção paralela ao travessão da balança de tal maneira que o equilíbrio não seja perturbado dessa maneira. Torne então todas as barras de aço (incluindo aquela ligada à balança) *igualmente magnéticas*,⁵⁷⁰ até uma magnitude tal que quando um outro número igual for colocado verticalmente abaixo da balança a uma distância de 1 metro da barra imantada ligada a ela, tenha de ser colocado na balança 1 milésimo de 1 miligrama para preservar o equilíbrio. Quando o magnetismo de todas as barras tiver sido regulado dessa maneira, coloque uma das barras horizontalmente, e ortogonal a uma pequena agulha de bússola, a 1 metro abaixo do centro da bússola, tomando o cuidado que na medida em que a agulha de bússola é desviada do meridiano magnético, a barra também seja girada de tal forma que elas possam preservar sua orientação mútua perpendicular. Por último, calcule quantas dessas barras são necessárias para que a força conjunta delas possa desviar a agulha de bússola de 90°; o número de barras fornece o magnetismo terrestre em milésimos de sua unidade de medida absoluta.

Por outro lado, o número que representa o magnetismo da Terra em sua unidade absoluta pode ser pensado como o número de barras, contadas em milhares, cujas forças devem estar unidas para causar uma deflexão da bússola de 90° a partir de uma distância de um metro. Isso necessitaria em

⁵⁶⁸[Nota de Riecke:] *Obras* de Gauss, Vol. V, pág. 524.

⁵⁶⁹Weber está se referindo ao volume 128 do periódico *Göttingische gelehrte Anzeigen* de 1834, ver [Gau34a, pág. 524 das *Obras* de Gauss].

⁵⁷⁰Em alemão: *gleich stark magnetisch*. Isto é, tal que todas as barras tenham sido magnetizadas com a mesma intensidade.

Göttingen a força de 1775 barras,
Munique a força de 1905 barras,
Milão a força de 2018 barras.

16.6 Vantagens das Dimensões Escolhidas para o Pequeno Instrumento de Medida

Antes de concluir este artigo, é necessário discutir a precisão de que é suscetível a medição absoluta de intensidade com o aparelho descrito, e em que ela se fundamenta. Já foi observado que a intensidade absoluta só pode ser medida com a precisão que ela merece com o magnetômetro. Portanto, é desnecessário afirmar que tal precisão extrema não pode ser obtida com o pequeno instrumento. Entretanto, para obter apenas um resultado aproximado, todas as vantagens associadas a ele devem ser utilizadas. O tratado “*Ueber Erdmagnetismus und Magnetometer — Sobre o Magnetismo Terrestre e o Magnetômetro*”^{571,572} apresenta nas seguintes palavras a dificuldade de se obter uma medida precisa de intensidade utilizando instrumentos diferentes do magnetômetro:

Em todos os casos, se é para a eliminação ser satisfatória, as experiências não devem ser realizadas em distâncias muito pequenas; conseqüentemente, as ações são sempre comparativamente pequenas, e os procedimentos utilizados anteriormente são inadequados para medir essas ações com a precisão necessária. É esta dificuldade que exigiu e deu origem à construção de um novo aparelho, que pode com propriedade receber o nome de *magnetômetro*, já que ele serve para executar, com uma precisão igual àquela das determinações astronômicas mais delicadas, todas as medições — da força magnética das agulhas e também da intensidade do magnetismo terrestre (ao menos sua componente horizontal). — A componente (horizontal) da força magnética terrestre é determinada com ele com uma precisão de um ou dois segundos de arco; o início e o fim do período de uma oscilação é observada com ele com uma precisão de poucos centésimos de segundo e, conseqüentemente, mais precisamente do que a passagem das estrelas atrás dos fios em um instrumento de passagem.⁵⁷³

Existem duas circunstâncias principais das quais depende a precisão de uma medição absoluta de intensidade; *em primeiro lugar*, a magnitude da deflexão produzida; *em segundo lugar*, a delicadeza do instrumento ao medir esse desvio. Portanto, ao construir o instrumento com essa finalidade podemos seguir dois caminhos diferentes: podemos tornar o valor da deflexão como o objetivo principal, dando apenas tanta atenção aos procedimentos de medida que seriam consistentes com isso; — ou então podemos nos atentar principalmente na precisão dos meios de medida, deixando o valor do desvio como um objetivo secundário. O último procedimento leva a uma precisão muito maior do que o primeiro devido ao seguinte motivo: o valor da deflexão logo chega a um limite, devido à condição necessária de uma grande distância entre a barra defletora e a agulha, de tal forma que o desvio produzido sempre será pequeno. Se, no entanto, todas as pretensões de grande precisão de medida forem abandonadas no início, fazendo a agulha magnética girar em um pivô, em vez de suspendê-la

⁵⁷¹[Nota de Riecke:] *Obras de Gauss*, Vol. V, pág. 332.

⁵⁷²[[Gau36b](#), pág. 332 das *Obras de Gauss*].

⁵⁷³Em alemão: *als die Antritte der Sterne an den Fäden eines Passagen-Instruments*. Gauss está se referindo ao trânsito astronômico das estrelas medido com um telescópio.

por uma linha de seda, o atrito da ponta [do pivô] torna bastante ilusória a exatidão da medição, e a o plano anterior muito menos vantajoso é o único que permanece em aberto; o esforço deve ser então adotar os arranjos e proporções mais adequados para produzir a maior deflexão possível.

Esse é o objetivo expresso do pequeno tamanho do instrumento descrito, e não meramente torná-lo leve e conveniente ao transporte.

Que o pequeno tamanho do aparelho permite de fato um grande valor de deflexão é evidente pelo resultado; pois nas experiências mencionadas anteriormente, todos os ângulos medidos passaram de 22° : é fácil explicar o motivo disso.

1. A distância da barra defletora até a agulha tem de ser *relativamente* grande, mas não precisa ser *absolutamente* grande: ela tem de ser ao menos três ou quatro vezes maior do que o comprimento da barra defletora ou da agulha magnética.

2. Ao diminuir proporcionalmente *todas* as dimensões lineares do instrumento (a saber, as dimensões dos ímãs e as distâncias entre eles), as magnitudes angulares, sendo que a deflexão é uma delas, permanecem inalteradas; portanto, tal redução proporcional no tamanho do aparelho não causa perda no valor do desvio a ser medido.

3. Contudo, se em vez de diminuir proporcionalmente *todas* as dimensões lineares do instrumento, diminuirmos apenas o comprimento dos ímãs e as distâncias entre eles, sendo a largura e espessura da barra defletora pouco ou nada diminuída, ganharemos então um aumento nas magnitudes angulares, só restando saber até onde pode ser efetuado esse aumento.

O limite depende de uma única circunstância, a saber, a largura e espessura da barra defletora, com um dado comprimento. A experiência mostrou que nem a largura nem a espessura da barra devem exceder a oitava parte do seu comprimento. Segue-se que a maior deflexão que pode ser produzida por uma barra imantada, da qual a largura e espessura são iguais, e da qual o comprimento é oito vezes maior do que qualquer uma delas, ao atuar sobre uma agulha magnética, colocada a uma distância igual a três ou quatro vezes o comprimento da barra; é tal que o comprimento da agulha não deve ultrapassar aquele da barra.

A partir dessa regra obtemos então as dimensões mais vantajosas de um tal pequeno instrumento de medida, assim que for acrescentado o limite de espessura estabelecido pela *natureza do aço*.

A espessura da barra não pode chegar a muito mais do que $12\frac{1}{2}$ milímetros, já que de outra forma o aço não pode ser apropriadamente endurecido e magnetizado em todo seu volume. Portanto, obtemos as seguintes dimensões da barra defletora como sendo aquelas que combinam as maiores vantagens, a saber, para sua largura e espessura $12\frac{1}{2}$ milímetros e para seu comprimento 100 milímetros. Temos também o comprimento da agulha imantada de 100 milímetros, sendo de 300 milímetros a menor distância permitida entre elas.

Ao seguir essas regras obtemos um instrumento com o qual, nas latitudes médias, as menores deflexões a serem medidas excedem 22° , como nas experiências já relatadas. A distâncias maiores dos polos magnéticos da Terra esse desvio torna-se um pouco menor; próximo aos polos magnéticos ele é muito maior. Portanto, caso essas deflexões possam ser medidas com uma precisão de um décimo de grau, um resultado final pode ser obtido com uma precisão da 200ª parte da própria força; já que todas as outras medições necessárias na determinação da intensidade absoluta podem ser feitas com uma precisão maior. É verdade que esse resultado é bem inferior ao que pode ser alcançado com o magnetômetro; mas tais resultados ainda podem ser de grande utilidade na ausência de determinações mais precisas.

Capítulo 17

[Gauss, 1838] Sobre um Novo Instrumento para a Observação Direta das Mudanças na Intensidade da Componente Horizontal da Força Magnética Terrestre

Carl Friedrich Gauss^{574,575,576}

É bem conhecido que para a determinação completa da força magnética terrestre em um dado local são necessários *três* elementos; e, em geral, são selecionados para esse propósito a declinação, inclinação e intensidade. Embora essa escolha seja conceitualmente a mais simples, é não apenas permitido, mas em muitos aspectos recomendável, adotar uma combinação diferente. Tanto por aspectos práticos quanto teóricos, é bem mais vantajoso considerar separadamente a componente horizontal da força terrestre, e imaginar nela dois elementos, a direção (declinação) e a intensidade. Se adicionarmos a esses dois elementos, como um terceiro elemento, — a intensidade da força vertical, ou então a inclinação, — poderá ser obtida diretamente, caso desejado, a intensidade da força total.

Com relação aos dois elementos da [componente] horizontal do magnetismo terrestre, sendo que só estamos preocupados com eles aqui, todos os aspectos relacionados com a *declinação* estão completamente cobertos pelo magnetômetro que tem sido utilizado desde 1833.^{577,578} Esse instrumento pode ser utilizado com uma certeza, conveniência e precisão que não deixa nada a desejar; não apenas para a determinação do valor absoluto da declinação,

⁵⁷⁴[Gau38b] com traduções para o inglês em [Gau41d] e [Gau21c].

⁵⁷⁵As Notas de C. F. Gauss estão representadas por [Nota de Gauss:]; as Notas de Richard Taylor, o editor das *Scientific Memoirs* onde foi publicada a tradução em inglês dessa obra, estão representadas por [Nota de Taylor:]; todas as outras Notas são de minha autoria.

⁵⁷⁶[Nota de Gauss:] Esse trabalho contém a parte essencial de uma palestra que apresentei no encontro da *Königlichen Societät der Wissenschaften* (Sociedade Real de Ciências [de Göttingen]) em 19 de setembro de 1837.

⁵⁷⁷[Nota de Taylor:] *Scientific Memoirs*, part V, págs. 25 e seguintes

⁵⁷⁸[Web37a] com tradução para o inglês em [Web41e], [GW66], [GW39a] e [Web21r]; e tradução para o francês em [Web38d].

mas também para acompanhar suas mudanças regulares e acidentais, de ano para ano, de mês para mês, e de hora para hora, — até mesmo de um minuto para outro.

Esse mesmo instrumento também determina, em unidade absoluta, a *intensidade* da componente horizontal da força magnética terrestre, — o que foi, de fato, o motivo que deu origem à sua construção; contudo, ele não resolve, de forma alguma, *perfeitamente* esse problema em *todos* os aspectos.

A aplicação do magnetômetro para determinar a intensidade magnética é baseada em uma combinação de *várias* operações, uma das quais consiste em observar o período de oscilação de uma agulha.⁵⁷⁹ Mas essa operação, por sua própria natureza, requer um tempo considerável, já que o número de vibrações a partir do qual deduzimos a duração de uma única oscilação não pode ser muito pequeno. Agora, supondo que a intensidade magnética seja constante durante o intervalo de tempo utilizado na observação, o período de oscilação resultante corresponderá *verdadeiramente à intensidade*; porém, caso a intensidade magnética tenha variado nesse intervalo de tempo, o período de oscilação só corresponderá ao *seu valor médio*. Quaisquer mudanças que tenham ocorrido *durante* o intervalo de medida ficam completamente escondidas de nós, fornecendo o instrumento apenas seu valor médio. Se, para nos aproximarmos mais do valor real, quiséssemos escolher intervalos de tempo mais curtos, ou basear os resultados em um número menor de oscilações, [nesse caso] sacrificaríamos a precisão e certeza, e correríamos o perigo de considerar erros de observação como anomalias da intensidade.

Contudo, quanto mais interessantes se tornaram as perturbações magnéticas em intervalos curtos de tempo, — como mostradas nas experiências do último ano no que diz respeito apenas à declinação, — mais importante era obter uma maneira pela qual as ações de perturbações similares na intensidade pudessem ser seguidas e medidas com a mesma facilidade, certeza e precisão.

Já vimos que a inadequação do método até agora empregado para *esse* fim consiste na circunstância de que ele é baseado nas observações dos períodos de oscilação os quais, por sua própria natureza, sempre necessitam de um grande intervalo de tempo. Agora o período de oscilação serve nesse caso apenas para determinar indiretamente o torque⁵⁸⁰ que o magnetismo terrestre fornece à agulha quando ela não está situada ao longo do meridiano magnético. Logo, se pudermos determinar precisamente esse torque de uma maneira direta sem usar observações de oscilação, e se pudermos medir sua variação com precisão, rapidez e certeza, teremos alcançado nosso objetivo. O método a ser descrito com essa finalidade é baseado no que segue.

As condições necessárias de equilíbrio para um corpo que está suspenso de qualquer maneira por *dois fios*, — supondo-se que suas partes,⁵⁸¹ por enquanto, estejam sujeitas apenas à gravidade, e que estejam conectadas firmemente entre si, — podem ser descritas brevemente da seguinte maneira: a vertical passando pelo centro de gravidade do corpo, e as linhas retas coincidindo com os fios, estão em um plano, e são paralelas entre si, ou então se intersectam em um ponto fixo. Portanto, em todos os casos, na situação de equilíbrio, os dois fios e o centro de gravidade estão em um plano vertical. Para tornar precisas nossas ideias, pode ser suposto que os dois fios possuem o mesmo comprimento; que os dois pontos superiores de conexão estão na mesma altura, e que a distância entre eles é a mesma que a distância entre seus pontos inferiores; e, finalmente, que os dois pontos inferiores formam

⁵⁷⁹Ver a Nota de rodapé 339 na página 139.

⁵⁸⁰Em alemão: *Drehungsmoment*. Ver a Nota de rodapé 459 na página 187.

⁵⁸¹Isto é, que as partes do corpo.

com o centro de gravidade um triângulo equilátero. Com essas suposições, no estado de equilíbrio, os dois fios vão ficar pendurados verticalmente, e uma terceira linha vertical, no centro entre os dois fios, vai passar pelo centro de gravidade do corpo. Se removermos o corpo dessa posição por meio de uma rotação ao redor da última linha, os dois fios não mais estarão na vertical, nem vão estar em um plano, e ao mesmo tempo o corpo terá subido um pouco. Consequentemente, surge uma tendência de retornar à posição inicial, com um torque que pode, com precisão suficiente, ser considerado como proporcional ao seno da deflexão da posição de repouso e que, portanto, é máximo quando o desvio alcança 90 graus. Deve sempre ser entendido esse valor máximo quando falarmos do torque; ele também pode ser considerado como a força pela qual o corpo é mantido em equilíbrio por essa maneira de suspensão e que, por brevidade, designarei de força diretriz decorrente do modo de suspensão.⁵⁸² A magnitude dessa força depende, em primeiro lugar, do comprimento dos fios de suspensão; em segundo lugar, da distância entre esses fios; em terceiro lugar, do peso do corpo; sendo inversamente proporcional ao comprimento dos fios, e diretamente proporcional ao quadrado da distância entre eles e ao peso do corpo. Caso as suposições anteriores não sejam satisfeitas, a expressão para a força diretriz é mais complicada, e a reação dos fios em relação à torção também vai tornar necessário uma pequena modificação. Contudo, não nos faltam maneiras de determinar pela experiência, com a maior precisão, a magnitude da força diretriz. Se o corpo for solto em repouso, após ter sido desviado de sua posição de equilíbrio, ele vai oscilar com a maior regularidade, o centro das vibrações coincidindo com essa posição [de equilíbrio], e a duração dependendo da magnitude da força diretriz e do momento de inércia do corpo.

Se supormos adicionalmente que uma barra imantada horizontal é uma parte do corpo suspenso, vai ser exercida [no corpo] uma segunda força diretriz, e os fenômenos vão depender das combinações de duas forças, de acordo com as leis conhecidas da estática. Há três casos a serem distinguidos a este respeito, em que as duas posições do corpo, em que estaria em estado de equilíbrio em virtude de cada uma das duas forças sozinhas, ou coincidem, ou são opostas, ou podem formar um ângulo entre si. É visto facilmente que a diferença entre esses três casos reside na relação de dois ângulos, por um lado, aquele que a linha reta ligando os dois pontos inferiores de conexão do fio forma com a barra imantada; e, por outro lado, aquele que a linha reta ligando os dois pontos de suspensão superiores forma com o meridiano magnético. Se imaginarmos o corpo naquela posição de equilíbrio que é devida apenas ao modo de suspensão, a barra imantada tem de estar, no primeiro dos três casos, no meridiano magnético, e em sua orientação natural (isto é, com o polo Norte virado para o Norte); no segundo caso, ela tem de estar no meridiano magnético, mas em uma posição invertida; e no terceiro caso ela tem de formar um ângulo com o meridiano magnético. Por questão de brevidade, denominarei essas três posições da barra imantada de orientação direta, inversa e transversal.

Na orientação direta, a ação do magnetismo terrestre na barra imantada não muda a posição de equilíbrio correspondente ao modo de suspensão; mas o instrumento é mantido na mesma posição por uma força aumentada, que é a soma das duas forças diretrizes.

Na orientação inversa, o equilíbrio não cessa, porém ele só é estável quando a força diretriz

⁵⁸²Em alemão: *Man kann dasselbe auch als das Maass einer Kraft ansehen, mit welcher der Körper vermöge der Aufhängungsart in seiner Gleichgewichtsstellung zurückgehalten wird, und die ich der Kürze wegen die aus der Aufhängungsart entspringende Directions-kraft nennen will.* A expressão *Directions-kraft* que está sendo cunhada aqui por Gauss pode ser traduzida como “força diretriz”, “força direcional”, “força diretiva” ou “força de direção”.

magnética é menor do que a força diretriz que surge do modo de suspensão; e então o corpo só é mantido em sua posição por uma força que é a diferença entre as duas forças diretrizes. Se a força diretriz magnética for a maior, o equilíbrio seria instável, e uma vez que o corpo fosse perturbado dessa posição ele não voltaria a ela, mas se afastaria cada vez mais, e só pararia na orientação oposta, na qual a barra está em sua orientação natural no espaço, mas na qual os fios se cruzam.

Finalmente, no terceiro caso, no qual as duas forças diretrizes formam um ângulo entre si, o conflito dessas forças terminará em uma orientação intermediária, na qual, por um lado, a barra não estará no meridiano [magnético] e, por outro lado, uma linha reta passando através dos pontos inferiores de conexão dos fios não será paralela a uma linha reta passando através dos pontos superiores. Essa posição intermediária, e a força pela qual o instrumento é mantido nela, obedece às leis estáticas da composição de duas forças. Ao mesmo tempo, no entanto, não se leva em conta o fato de que, se o aparelho fornecer meios de medir os ângulos entre as três posições em questão, a proporção das duas forças diretrizes componentes poderá ser calculada e, conseqüentemente, a força diretriz magnética também poderá ser conhecida em unidades absolutas se a força diretriz for conhecida em unidades absolutas por meio do método de suspensão. Assim nosso problema estará resolvido. É mais vantajoso colocar a barra imantada em relação às outras partes do instrumento, de tal forma que ela forme, na posição intermediária de equilíbrio, aproximadamente um ângulo reto com o meridiano magnético, sendo que nesse caso a designação de orientação *transversal* é preferencialmente apropriada. Dessa maneira, é maior o desvio dos fios em relação às suas posições em um plano e, portanto, o resultado é mais preciso; e uma pequena modificação na declinação magnética, surgindo de flutuações horárias ou acidentais, não tem influência perceptível na posição. Por outro lado, qualquer mudança na intensidade do magnetismo terrestre afeta diretamente a direção, podendo ser reconhecida e medida imediatamente com a mesma facilidade, rapidez e precisão que as mudanças na declinação são medidas pelo magnetômetro comum.

Já havia confirmado a aplicabilidade prática dessa ideia há vários anos por meio de experiências preliminares realizadas com um instrumento (bem grosseiro é verdade) que mencionei na página 327 de meu trabalho sobre o *Magnetismo Terrestre e o Magnetômetro*.⁵⁸³ Contudo, recentemente foi construído um instrumento mais perfeito e o suspendi no Observatório Astronômico, no mesmo lugar que havia sido ocupado anteriormente pelo magnetômetro com a barra de 25 libras de peso. Após o que foi dito serão suficientes algumas palavras para a descrição desse instrumento.

Ele é suspenso por dois fios de aço com 17 pés de comprimento ou, para falar mais precisamente, por um único fio, cujas extremidades são ligadas ao instrumento na parte inferior, enquanto que o centro do fio passa sobre dois cilindros na parte superior, que mantêm [as duas metades do fio] separadas por uma distância apropriada (aproximadamente $1\frac{1}{2}$ polegada); dessa maneira os dois fios, por si próprios, ficam igualmente tensionados. A suspensão fica acima do teto da sala, e os fios ficam livremente dependurados através de uma abertura circular (com $3\frac{1}{2}$ polegadas de largura) no teto. A separação dos fios, tanto acima quanto abaixo, pode ser aumentada ou diminuída à vontade. O instrumento suspenso aos fios consiste em quatro partes principais. A primeira parte, à qual os fios estão presos, é um disco circular horizontal de prata, com 4 polegadas de diâmetro, dividido em quartos de grau. A segunda parte consiste em uma alidade,⁵⁸⁴ concêntrica com o círculo, girando em

⁵⁸³[Gau36b, pág. 19 do *Jahrbuch für 1836* de Schumacher e pág. 327 das *Obras* de Gauss].

⁵⁸⁴Ver a Nota de rodapé 524 na página 210.

sua periferia, e tendo dois verniers indicando os minutos;⁵⁸⁵ uma haste rígida, perpendicular ao plano do círculo, é conectada firmemente com a alidade, sendo fixado nela um espelho perfeitamente circular com $1\frac{1}{2}$ polegada de diâmetro, no qual pode ser visto, através de um telescópio colocado à distância de 16 pés, a imagem de uma porção horizontal da escala, dividida em milímetros, fixada abaixo do telescópio.⁵⁸⁶ Dessa maneira qualquer mudança na posição do círculo pode ser vista e medida; pequenas mudanças diretamente e com grande precisão pelas divisões da escala vista no telescópio; e grandes mudanças ao combinar um movimento da alidade e a leitura dos verniers. A terceira parte do instrumento é um estribo situado abaixo do círculo,⁵⁸⁷ tendo uma moldura dupla, na qual é inserida a quarta parte do instrumento, uma barra imantada de 25 polegadas. Esse estribo também possui um movimento circular ao redor do centro do círculo e vem com dois ponteiros indo até a borda do círculo, por meio dos quais o valor da rotação pode ser medido até um minuto [de arco].

Se colocarmos agora o estribo de tal forma que o instrumento preserve a mesma posição de equilíbrio, quer a barra imantada esteja no estribo, ou então um corpo não imantado de mesmo peso, teremos a primeira ou segunda das orientações distinguidas anteriormente, caso a barra imantada esteja na orientação direta ou inversa. A primeira orientação não permite qualquer aplicação prática particularmente importante; e a vantagem da segunda orientação está ligada com a condição de que a força diretriz magnética possa ser um pouco menor do que a força diretriz devida ao modo de suspensão. Com o nosso instrumento a proporção dessas forças está hoje em dia aproximadamente assim como 10 está para 11: consequentemente, a força diretriz resultante é apenas a décima parte da força diretriz magnética. Logo, nesse caso temos um arranjo análogo à agulha magnética astática,⁵⁸⁸ e qualquer força alheia que perturbe a orientação da agulha [imantada] comum é indicada aqui por um efeito dez vezes maior do que o efeito que ocorreria no caso da suspensão por um único fio; e, como será facilmente percebido, [esse efeito ocorre] na direção oposta. Isso permite então, entre outras coisas, a solução de um problema que foi tentada frequentemente sem sucesso, a saber, aquele de indicar de forma ampliada as mudanças diárias e horárias da declinação magnética. Várias observações simultâneas desse tipo, feitas com esse instrumento e com o magnetômetro do Observatório Magnético, permitiram os resultados mais satisfatórios. Contudo, essa aplicação perdeu muito de sua importância com a introdução do magnetômetro de declinação, que fornece as menores mudanças com toda a precisão desejada.

Contudo, essa e outras aplicações do instrumento, com a barra na orientação inversa, às quais retornarei em seguida, têm de ser consideradas de menor importância; sendo muito mais relevante a utilização do aparelho para observações da intensidade na terceira orientação, transversal. Se, ao proceder da orientação direta a barra imantada for desviada do meridiano magnético ao girar o estribo, todo o instrumento, para reobter seu equilíbrio, tem de girar de volta de um certo ângulo correspondendo à proporção entre as duas forças diretrizes; a diferença desses dois ângulos será o desvio da barra imantada em relação ao meridiano magnético quando na posição de equilíbrio; e ele pode ser facilmente arranjado de tal forma que esse desvio chegue a aproximadamente 90 graus, sendo assim obtidas as

⁵⁸⁵O nônio ou vernier é um instrumento de medição angular usado na navegação e astronomia. Ele pode ser instalado em um astrolábio náutico ou em um quadrante graduado de 0 a 90 graus, sendo possível efetuar medições de alguns minutos de grau. Ele foi inventado pelo cientista português Pedro Nunes (1502-1578), escrito em latim como Petrus Nonius. Ele foi adaptado na escala vernier pelo cientista francês Pierre Vernier (1580-1637).

⁵⁸⁶Ver a Nota de rodapé 351 na página 142.

⁵⁸⁷Ver a Nota de rodapé 508 na página 206.

⁵⁸⁸Ver a Nota de rodapé 356 na página 144.

vantagens mencionadas anteriormente. Nessa orientação o instrumento está peculiarmente bem adaptado para observar as *mudanças* na intensidade, que são indicadas imediatamente pelas mudanças na orientação. Em relação às mudanças que só ocorrem em longos intervalos [de tempo], deve-se prestar atenção a várias circunstâncias; por exemplo, é necessário que de tempos em tempos examinemos, por meios conhecidos e apropriados, se mudou a intensidade do magnetismo da barra e até que grau isso ocorreu; também devem ser consideradas as variações de temperatura, tanto no que diz respeito a seu efeito sobre o estado magnético da barra, assim como na separação e comprimento dos fios de suspensão e, conseqüentemente, na força diretriz que surge do modo de suspensão. Porém, no que diz respeito às mudanças irregulares de intensidade que ocorrem em curtos intervalos [de tempo], esse instrumento presta o mesmo serviço feito pelo magnetômetro em relação às mudanças similares de declinação; e o modo de observação com os dois instrumentos é o mesmo. As mudanças de intensidade são obtidas em termos de partes da escala as quais, contudo, podem ser facilmente reduzidas a frações da própria intensidade. Nas condições atuais do instrumento, a 22000^a parte de toda a intensidade corresponde a uma divisão da escala.

As experiências feitas até o momento com esse instrumento, compreendendo ainda apenas um curto intervalo de tempo, já indicaram alguns resultados importantes.

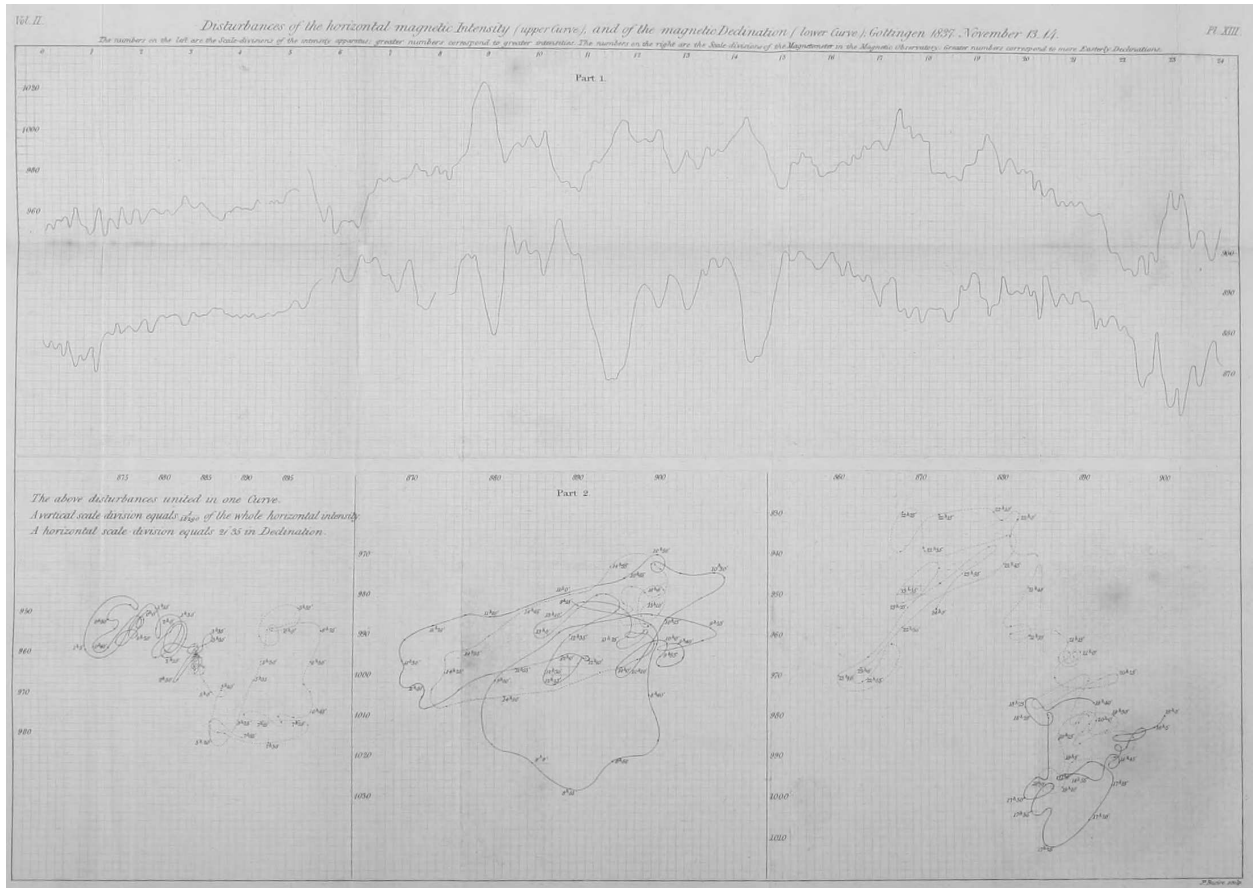
Em primeiro lugar, as observações indicam as mudanças regulares dependendo da hora do dia que, é verdade, estão frequentemente misturadas com as mudanças irregulares assim como no caso da declinação; para discriminá-las com certeza serão necessárias observações continuadas por anos. Se me aventurar, a partir da experiência muito pequena ganha até o momento, a expressar uma suposição em vez de um resultado, a mudança regular parece consistir no seguinte, — que a intensidade diminui nas horas da manhã, de tal forma que ela atinge seu mínimo uma ou duas horas antes do meio-dia, e então aumenta novamente. Contudo, para obter provisoriamente a razão quantitativa, observei a posição às 10 horas da manhã, e às 3 horas da tarde, durante trinta dias em agosto de 1837. O resultado foi que, em 26 dias, a intensidade foi maior à tarde do que de manhã, e menor apenas em 4 dias; a diferença média chegando a 39 partes da escala, ou algo um pouco maior do que a 600^a parta de toda a intensidade. Na maioria desses dias o instrumento também foi observado às 9 horas da manhã; em 28 dias, houveram 23 nos quais a intensidade ainda era nesse horário maior do que 1 hora mais tarde, encontrando-se o contrário apenas em 5 dias; contudo, a diferença média chegou nesse caso apenas a $11\frac{1}{2}$ divisões da escala, ou um pouco mais do que a 2000^a parte da intensidade total.

Em segundo lugar, várias séries bem grandes de observações provam que perturbações irregulares e, algumas vezes, bem consideráveis, e ocorrendo em curtos intervalos de tempo, ocorrem não menos frequentemente na intensidade do que na declinação, como a analogia nos levaria a esperar. Séries contínuas foram feitas três vezes durante um período de tempo considerável neste aparelho de [medida de] intensidade e simultaneamente no magnetômetro do Observatório Magnético; a primeira vez, em 15 de julho de 1837, de 6 horas da manhã às 6 horas da tarde; a segunda vez, no combinado período usual de observação de 29 e 30 de julho; e a terceira vez, durante um período extra de 31 de agosto e 1 de setembro; as observações foram sempre feitas a cada 5 minutos. Ao comparar essas duas últimas séries, é observável que quando a declinação foi violentamente perturbada, em geral também ocorreram grandes perturbações na intensidade⁵⁸⁹

Ao utilizar a representação das mudanças da declinação e intensidade em duas curvas

⁵⁸⁹[Nota de Gauss:] De forma semelhante, e com o mesmo resultado, também foram feitas observações subsequentes com os dois instrumentos no intervalo combinado de 13 e 14 de novembro.

separadas, como foi feito na data combinada de novembro na primeira parte da Gravura,⁵⁹⁰ estamos longe de obter uma imagem tão perfeita do curso dos distúrbios como por sua combinação em uma única curva.⁵⁹¹



⁵⁹⁰[Nota de Taylor, [Gau41d], incluída no final da tradução em inglês:] As representações gráficas nas mudanças na direção e intensidade da força horizontal em Göttingen nos períodos combinados de 29 a 30 de julho, 31 de agosto a 1 de setembro, e de 13 a 14 de novembro, 1837, mencionadas na Memória anterior, página 259 [do Volume 2 das *Scientific Memoirs* de Taylor na qual foi publicada a tradução em inglês do trabalho de Gauss], estão contidas no *Resultate aus den Beob.* de 1837 [[GW38]]. Como nosso objetivo é mais de ilustração do que de registro, nos pareceu suficiente apresentar apenas uma dessas Gravuras; e selecionamos com essa finalidade aquela do período combinado de 13 a 14 de novembro, fixada expressamente para esses dias, devido ao grande número de *estrelas cadentes* que foram observadas nesses dias nos anos anteriores. A Parte 1 da Gravura representa as mudanças da intensidade na linha superior e as mudanças da declinação na linha inferior. A justificativa da observação feita na página 259 [de [Gau41d]] é reconhecida imediatamente, a saber, que quando ocorrem mudanças consideráveis em um elemento, [como a intensidade ou declinação, por exemplo,] elas são usualmente acompanhadas por mudanças consideráveis no outro elemento [como a declinação ou intensidade, respectivamente]. A Parte 2 [da Gravura] representa as mudanças dos dois elementos combinadas em uma curva, e permite uma delineação ilustrativa da variação da componente horizontal da força magnética terrestre. Para evitar a confusão que surge das involuções bem repetidas da curva, ela está dividida em três partes separadas, e em cada uma dessas partes, metade da curva é traçada com uma linha contínua e metade com uma linha pontilhada.

O Sr. Gauss observou, que “as observações durante o período combinado de 13 a 14 de novembro não apresentam perturbações maiores do que aquelas que haviam sido observadas em muitos dos períodos combinados em outras épocas do ano. Nas noites anterior e posterior, ocorreram mudanças muito grandes na declinação que variavam rapidamente; mas essas [mudanças] são conhecidas por serem os acompanhamentos gerais da aurora boreal, que estava extremamente brilhante nessas duas noites.” — Editor.

⁵⁹¹Uma versão ampliada dessa imagem aparece na Figura da página 255.

Uma representação completa da força magnética terrestre (isto é, de sua componente horizontal) em cada instante, é dada por uma única linha reta, da qual o comprimento é proporcional à intensidade, e o ângulo que ela forma com uma linha fixa é igual à declinação. Para representar a força em vários instantes sucessivos, é preservado o mesmo ponto de início das diferentes linhas retas, e apenas são exibidos os pontos finais; esses são anotados com os horários correspondentes, e são unidos por uma linha (Parte 2 da Gravura). Os próprios raios não são traçados, e até mesmo o ponto comum de início tem de sempre ser situado bem além do desenho, para obter algo como uma escala conveniente. Isso nos leva a um novo ponto de vista, a partir do qual podemos considerar tais mudanças dos dois elementos magnéticos. De fato, eles são as duas componentes horizontais da força perturbadora que é sempre comparativamente pequena, à qual está sujeita em cada instante a força magnética terrestre média. A segunda componente é dada diretamente pelo magnetômetro, a primeira pelo novo instrumento; devido a isso, as duas componentes têm de ser reduzidas a uma medida comum antes de ser feito o desenho.

Ao aplicar esse modo de representação muito ilustrativo, tem de ser lembrado que o curso das mudanças durante um dia inteiro não pode ser representado em um desenho sem ocasionar confusões, caso ocorram mudanças frequentes e que variam rapidamente, já que a curva apresentaria muitas convoluções: portanto, nesse caso é necessário fazer desenhos separados para intervalos de tempo mais curtos.

Juntando os desempenhos do novo aparelho e do magnetômetro, conclui-se que os dois devem ser mutuamente complementares em relação a *alguns propósitos*, mas ter igual aplicabilidade em relação a outros. Para a determinação da declinação absoluta, apenas o magnetômetro é aplicável, e não o novo aparelho. As mudanças de declinação, e especialmente as mudanças que variam rapidamente, pode ser seguidas com ambos. Para determinar a intensidade absoluta, os dois instrumentos podem ser empregados, embora a utilização do magnetômetro seja de certa forma menos complicada do que seria o uso apenas do novo instrumento; mas o primeiro instrumento só pode fornecer por si próprio o valor médio da intensidade para um certo intervalo, e as mudanças que variam rapidamente são totalmente ignoradas com esse instrumento, enquanto que o novo aparelho as indica de forma bem satisfatória. Para todos os outros fins — por exemplo, para comparar entre si barras imantadas em relação às suas intensidades magnéticas, — para fins galvanométricos e telegráficos, em conexão com um multiplicador — ambos são igualmente úteis.⁵⁹² Em relação às duas últimas aplicações, o novo instrumento tem uma vantagem importante, estando em nosso poder, como mencionado anteriormente, torná-lo tão astático quanto seja desejável.⁵⁹³

Podemos mencionar aqui alguns exemplos da sensibilidade do instrumento quando utilizado como um galvanômetro. O multiplicador ao redor da barra imantada possui 610 voltas de fio de cobre coberto com seda, e a corrente galvânica tem de atravessar um comprimento de fio de mais de 6000 pés. Esse comprimento aumenta para 13000 pés se a corrente for trazida ao mesmo tempo até o Laboratório de Física. Contudo, outros instrumentos ficam ligados ao circuito,⁵⁹⁴ de tal forma que em muitas experiências o comprimento total do fio chega a 40.000 pés, ou aproximadamente duas milhas alemãs. A maior parte desse fio é muito fina; e este comprimento, na medida em que a intensidade da corrente é afetada por ele, é equivalente a um fio de cerca de oito milhas alemãs de comprimento, da espessura do fio de conexão entre o Observatório Astronômico e o Laboratório de Física. Apesar desse

⁵⁹²Ver a Nota de rodapé 91 na página 38.

⁵⁹³Ver a Nota de rodapé 356 na página 144.

⁵⁹⁴Em alemão: *Kette*. Gauss está se referindo ao circuito elétrico no qual estão ligados esses instrumentos.

longo circuito elétrico, até as menores intensidades galvânicas fornecem à pesada barra imantada um desvio que não é apenas perceptível, mas suficiente para medições precisas. Isso se aplica à [corrente] termo-galvânica, em relação à qual muitos filósofos naturais possuem a noção errônea de que ela não pode atravessar um circuito elétrico muito longo. Com os dispositivos de Göttingen, e usando um aparelho termo-galvânico de construção peculiar, o efeito é produzido simplesmente ao tocar os pontos de junção com o dedo.

A aplicação para a eletricidade comum de atrito dá origem a uma outra observação interessante. É conhecido que Colladon⁵⁹⁵ descobriu, por experiências que foram inicialmente duvidadas, mas subsequentemente confirmadas por Faraday,⁵⁹⁶ que a eletricidade comum de atrito, ao ser conduzida por um multiplicador, desvia a agulha [imantada] da mesma maneira que uma corrente hidro-galvânica. Faraday foi o primeiro a mostrar que em uma bateria elétrica muito potente não é produzida mais eletricidade do que aquela que excitações hidrogalvânicas muito pequenas podem conduzir em poucos segundos através de um fio condutor de comprimento moderado. Tanto a realidade quanto a pequena quantidade de ação eletromagnética da eletricidade da máquina [eletrostática] foram confirmadas experimentalmente vários anos atrás com esse instrumento; contudo, pareceu valer à pena repetir essas experiências com a ajuda do instrumento novo e bem mais sensível. Em vez de descarregar uma garrafa de Leiden,⁵⁹⁷ ou uma bateria de garrafas por um fio do circuito elétrico (como foi feito por Colladon e Faraday), apenas o material condutor e de atrito de uma máquina eletrostática⁵⁹⁸ no Laboratório de Física foram conectadas com o fio do circuito elétrico indo até o Observatório Astronômico, que tinha 13000 pés de comprimento, incluindo o multiplicador. A máquina eletrostática foi então girada com velocidade constante; quando isso foi feito com a velocidade de 1 revolução por segundo, a barra imantada de 25 libras do novo instrumento no Observatório Astronômico foi mantida por esse meio em um desvio correspondente a 144 partes da escala (um pouco mais do que 50 minutos [de arco]), — sendo a deflexão positiva ou negativa de acordo com a direção na qual a corrente atravessava o multiplicador. As experiências mostraram tanta regularidade quanto poderia ser desejado. Porém, a circunstância especialmente notável é que a ação eletromagnética permaneceu a mesma, inclusive quando o comprimento do circuito elétrico foi aumentado acima de uma milha alemã com a introdução de outros aparelhos. Isso poderia ser uma diferença essencial em relação a outras correntes [elétricas] produzidas hidro-galvanicamente, termo-galvanicamente ou por indução; cuja intensidade, indicada pela magnitude das ações eletromagnéticas, sempre se torna menor quanto mais alongado é o fio condutor. Contudo, encontro aqui uma confirmação notável da teoria, de acordo com a qual a intensidade desigual, indicada pela ação eletromagnética desigual de duas correntes galvânicas, é nada mais do que a quantidade diferente de eletricidade atravessando cada seção [reta] do fio condutor em um certo tempo. Com outros modos de excitação, uma dada força eletromotriz desenvolve menos eletricidade em um dado tempo, quanto maior for a oposição à corrente passando pelo circuito mais longo. Em nossa experiência, ao contrário, a quantidade de eletricidade em movimento depende apenas do desempenho da máquina eletrostática, e *toda* eletricidade que salta para o condutor na forma de faíscas tem de atravessar todo o circuito, seja ele longo ou curto, para

⁵⁹⁵J.-D. Colladon (1802-1893) foi um físico suíço.

⁵⁹⁶Michael Faraday (1791-1867).

⁵⁹⁷Ver o Capítulo 12, A Garrafa de Leiden e os Capacitores, de [Ass18b], [Ass18a] e [Ass19b].

⁵⁹⁸Em alemão: *Elektrisirmaschine*. Essa expressão pode ser traduzida como máquina eletrostática ou gerador eletrostático. É um gerador eletromecânico que produz eletricidade estática, ou eletricidade em alta tensão, por meio do atrito, ou seja, pela ação triboelétrica.

se equalizar com a eletricidade oposta da máquina eletrostática de atrito.

Para demonstrar a preferência do novo instrumento em relação ao magnetômetro no que diz respeito à telegrafia eletromagnética, devemos inicialmente considerar mais detalhadamente a *maneira de produzir* sinais telegráficos por meio de correntes galvânicas.

Tão logo ficou conhecida a ação de uma pilha voltaica de se propagar através de um circuito elétrico muito longo, pareceu óbvia a inferência de que essas forças naturais poderiam ser utilizadas para fins telegráficos; e, trinta anos atrás,⁵⁹⁹ Sömmering propôs a produção de gás com essa finalidade.⁶⁰⁰ As ações magnéticas das correntes galvânicas, que foram descobertas subsequentemente, são muito melhor adaptadas para sinais [telegráficos] complicados; contudo é surpreendente que desde a descoberta de Oersted,⁶⁰¹ muitos anos tenham transcorrido antes que qualquer pessoa tivesse pensado em utilizá-la para esse propósito. É verdade que não era possível formar uma opinião bem fundamentada sobre a sua aplicação em grande escala sem que houvesse um conhecimento quantitativo preciso da diminuição de potência das correntes galvânicas, resultante do comprimento e da qualidade dos fios condutores; sendo que em relação a esse assunto foram mantidas noções muito imperfeitas e errôneas antes de Ohm e Fechner.⁶⁰² Visando principalmente a realização, em larga escala, de experimentos semelhantes sobre a lei relacionando a intensidade das correntes galvânicas em diferentes circunstâncias, foi estabelecido em 1833 um fio de ligação entre o Observatório Astronômico e o Laboratório de Física [da Universidade de Göttingen]; o mérito da execução deste difícil projeto se deve apenas ao Prof. Weber.⁶⁰³ Esse circuito elétrico era frequentemente utilizado desde o início para a transmissão de sinais telegráficos; não apenas para os sinais simples na comparação diária de relógios, mas também provisoriamente para [sinais] compostos; e a possibilidade de sinalizar letras, palavras e frases inteiras tornou-se um fato evidente já naquela época.^{604,605} Nessas experiências era utilizada uma corrente hidro-galvânica, excitada apenas por meios muito fracos, a saber, um único par de placas ou dois pares de placas, juntamente com água não acidulada; contudo, não vou parar aqui para descrever o método que foi então empregado, já que desde então ele foi substituído por um outro completamente diferente. No primeiro método havia esse inconveniente; que com nosso circuito simples e o arranjo do instrumento então adotado, (tais experiências sendo meramente um assunto subordinado,) não mais do que duas letras podiam ser sinalizadas em um minuto. Mesmo com o novo instrumento formado expressamente para esse propósito, essa velocidade (que obviamente não está relacionada ao comprimento do circuito elétrico, ou à distância entre suas extremidades,) não podia ser aumentada consideravelmente enquanto era empregado apenas um circuito simples, embora ela fosse aumentada a um grau muito elevado utilizando

⁵⁹⁹[Nota de Gauss:] Aprendi por uma nota que me foi comunicada por von Humboldt que Bétancourt havia, dez anos antes, instalado um fio de Aranjuez a Madri, por meio do qual sinais telegráficos poderiam ser produzidos pela descarga de uma garrafa de Leiden. Embora não seja conhecida uma descrição detalhada do resultado, não pode haver dúvida sobre o sucesso de tal experiência, caso tenha sido realizada apropriadamente; mas tal método deve ter sempre sido limitado a enviar uma resposta afirmativa ou negativa a algumas questões previamente combinadas.

⁶⁰⁰Samuel Thomas von Sömmering (1755-1830) foi um médico e inventor alemão.

⁶⁰¹Ver a Nota de rodapé 109 na página 41.

⁶⁰²Georg Simon Ohm (1789-1854). A lei de Ohm é de 1826: [Ohm26a], [Ohm26c], [Ohm26d], [Ohm26b] e [Ohm27] com tradução para o francês em [Ohm60] e para o inglês em [Ohm66]. Gustav Theodor Fechner (1801-1887) foi um dos primeiros a confirmar a lei de Ohm, [Fec29a] e [Fec32].

⁶⁰³Ver a Nota de rodapé 227 na página 77.

⁶⁰⁴[Nota de Gauss:] A primeira publicação dessas experiências apareceu na *Gött. gelehrten Anzeige*, 9 de agosto de 1834, pág. 1273. Ver o *Jahrbuch* de Schumacher para 1836, pág. 38.

⁶⁰⁵[Gau34a] e [Gau36b, pág. 38 do *Jahrbuch* de Schumacher e a pág. 339 das *Obras* de Gauss].

um circuito composto; mas não havia razão suficiente para estabelecer um circuito elétrico desse último tipo, já que não havia dúvida em relação ao resultado, e seu valor científico real não teria nenhuma proporção com a despesa.

Contudo, a lei de indução levou-me a um método bem diferente, no qual um circuito simples tem sido utilizado por mais de dois anos, com sucesso completo, para uma maneira bem mais rápida de telegrafar. Me permito discorrer um pouco mais sobre esse assunto, já que até o momento não publiquei detalhes relacionados a ele. Descrevi em outro lugar,^{606,607} há muitos anos, o aparelho que denomino de indutor. Contudo, devo observar que em vez do indutor de 1050 voltas descrito na primeira publicação, e o ampliado subsequentemente para 3537 voltas, o atual consiste em 7000 voltas, — apenas o comprimento do fio chegando a mais de 7000 pés. Através de uma manipulação muito simples do indutor, (a saber, ao removê-lo rapidamente de uma barra imantada dupla, sobre a qual foi colocado inicialmente, e então trazendo-o de volta à sua posição inicial, sem invertê-lo), duas poderosas correntes galvânicas opostas atravessam o fio condutor, uma seguindo rapidamente à outra, e cada uma durando apenas um intervalo de tempo extremamente curto. O efeito dessas duas correntes sobre uma agulha imantada cercada por um multiplicador, e situada em qualquer lugar do circuito elétrico, consiste no seguinte: ela produz por um instante uma velocidade muito rápida, que é destruída imediatamente. A agulha, portanto, realiza um movimento muito rápido, mas pequeno, para a direita ou para a esquerda, como quiser, ficando então imediatamente em repouso.

É evidente que as mudanças de tais movimentos rápidos podem ser combinadas de várias formas, podendo ser utilizadas para sinalizar letras. Obviamente será necessário certo grau de prática para transmitir os sinais rapidamente e com precisão de um lado, e para lê-los com facilidade e certeza do outro lado; mas mesmos pessoas sem prática conseguem sinalizar sete letras em um minuto, como mostraram muitas experiências. Se, em vez da manipulação, forem adotados procedimentos *mecânicos* apropriados, a velocidade e precisão serão sem dúvida alguma consideravelmente aumentadas.

É precisamente nesse tipo de telegrafia que o novo instrumento possui uma vantagem considerável sobre o magnetômetro; e pelas seguintes razões. Embora os dois impulsos opostos, no qual consiste um sinal simples, sejam *exatamente iguais* em *intensidade*, — e, conseqüentemente, o segundo impulso destrói o mesmo tanto de velocidade que o primeiro havia produzido, — apesar disso a agulha não pode estar em perfeito repouso entre os sinais, já que esse repouso perfeito só é possível quando a agulha está em sua posição natural de equilíbrio. Mesmo que ela esteja nessa posição *antes* de um sinal, ela é de alguma maneira perturbada de lá *pelo próprio* sinal, e a força diretriz atuando sobre a agulha faz com que ela tenda a retornar. Embora um sinal único cause apenas um ligeiro movimento, vai surgir contudo uma perturbação considerável na posição natural de equilíbrio devido ao acúmulo de um grande número de sinais; e o resultado será uma tal quantidade de movimento entre os sinais, tal que eles perderão um pouco de sua nitidez de expressão. Ao considerar tudo isso, será facilmente visto que sob circunstâncias que são de outra forma similares, essa desvantagem será maior quando a agulha empregada possui um curto período de oscilação, do que quando ela possui um longo período de oscilação. Portanto, seu efeito é maior no magnetômetro do Observatório Magnético, do que na agulha de 25 libras suspensa no Observatório Astronômico; e é o menor de todos no novo instrumento, quando sua barra imantada, ao ser colocada no orientação inversa, é quase convertida em uma agulha astática. Assim,

⁶⁰⁶[Nota de Gauss:] *Gött. gelehrten Anzeige*, 1835, pág. 351; *Jahrbuch* de Schumacher para 1836, pág. 41.

⁶⁰⁷[[Gau35b](#), pág. 351] e [[Gau36b](#), pág. 41 do *Jahrbuch* de Schumacher e pág. 341 das *Obras* de Gauss].

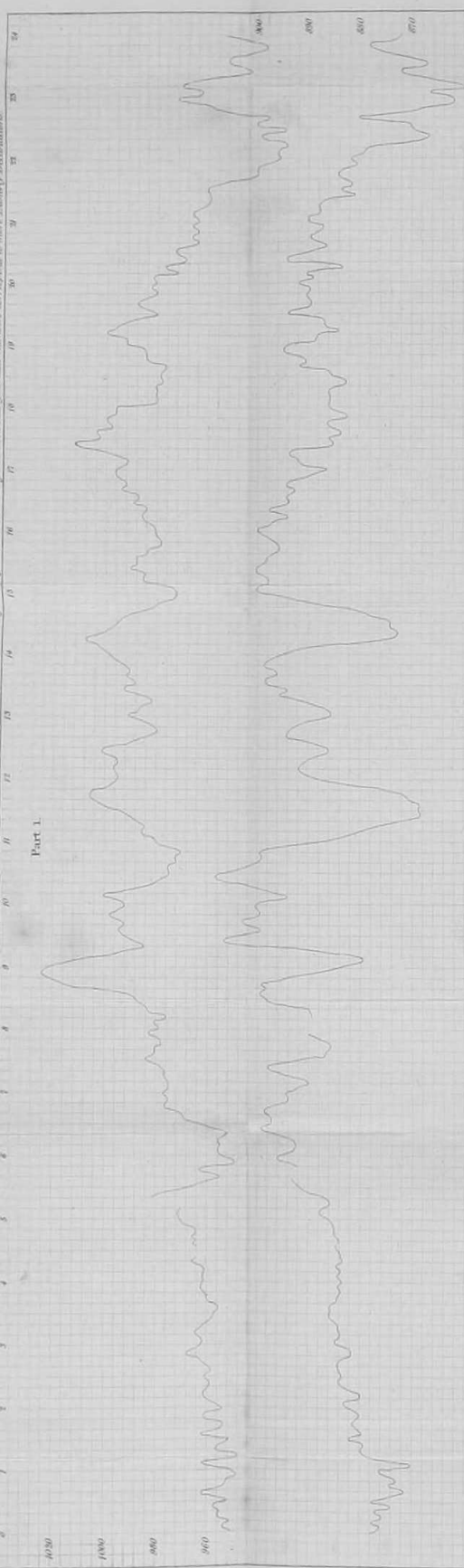
mesmo quando a agulha está a uma distância considerável de sua posição de equilíbrio, a força diretriz comparativamente fraca com a qual ela tende a retornar a essa posição, não produz nela quaisquer movimentos que possam perturbar materialmente os sinais, enquanto que a corrente elétrica no multiplicador atua tão fortemente sobre a agulha e, consequentemente, produz movimentos tão rápidos, quanto se ela pertencesse a um magnetômetro comum.

Um instrumento peculiar, que foi construído ultimamente, é muito útil em prevenir as desvantagens e inconveniências que surgem de movimentos vibratórios intempestivos, tanto nesse tipo de telegrafia, quanto em muitas outras aplicações do instrumento magnético. Eu lhe dei o nome de *amortecedor*, já que sua ação consiste em destruir completamente, em um intervalo de tempo muito curto, os movimentos vibratórios, que de outra forma continuariam a existir por horas. O amortecedor construído inicialmente para o magnetômetro no Observatório Magnético produziu esse efeito em alto grau, de tal forma que os maiores movimentos vibratórios desapareciam completamente em poucos minutos. Um arranjo similar pode ser aplicado a qualquer agulha vibratória, ao magnetômetro, e ao novo instrumento que está sendo tratado aqui; e certamente formará uma parte essencial de qualquer instrumento que será utilizado para telegrafar pelo método descrito anteriormente. Contudo, uma explicação mais completa desse instrumento nos levaria muito longe de nosso assunto atual.

Até o momento não foi dado qualquer nome particular para o novo instrumento. Devido à sua aplicação principal ele poderia ser chamado de *Medidor de Intensidade* ou *Intensitômetro*. Porém, como ele é aplicável para tantas e tão precisas medições magnéticas quanto o magnetômetro, ele poderia receber o *mesmo* nome. A diferença essencial é que o novo instrumento é suspenso por *dois* fios, sendo que por esse meio é obtida uma *nova* força diretriz com a qual a força magnética é comensurável. As outras diferenças, a saber, na maneira de conectar o espelho, e nas formas de medir a quantidade relativa de rotação das várias partes do instrumento, são condições que surgem necessariamente dos objetivos a serem alcançados. Portanto, o novo instrumento pode ser chamado de *Magnetômetro Bifilar* ou *Bipensil*, para distingui-lo do instrumento mais velho, o magnetômetro simples ou *unifilar*. Posso expressar minha convicção de que seu uso mais extenso, e especialmente seu emprego, juntamente com o magnetômetro de declinação, nos períodos combinados de observação, em estações muito distantes umas das outras, logo será seguido por um importante progresso em nosso conhecimento das perturbações do magnetismo terrestre.

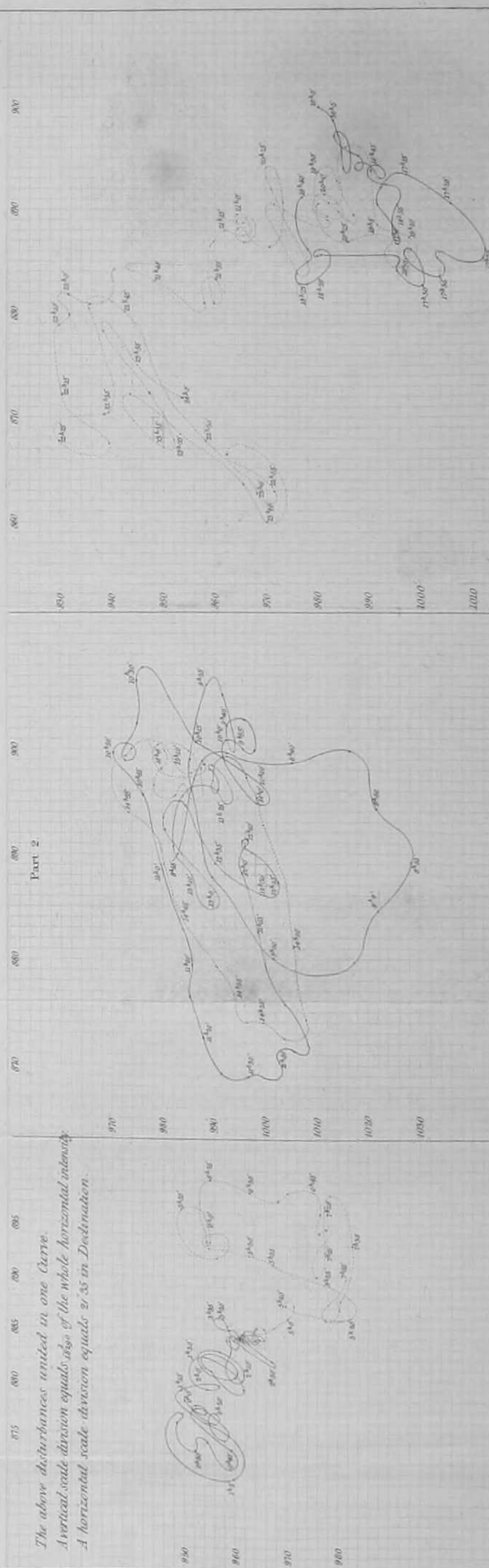
Disturbances of the horizontal magnetic intensity (upper curve), and of the magnetic declination (lower curve) at Göttingen 1887, November 13-14.

The numbers on the left are the scale-distance of the intensity; greater numbers correspond to greater intensities. The numbers on the right are the scale-distance of the declination; greater numbers correspond to more easterly declinations.



875 880 885 890 895

The above disturbances united in one curve.
A vertical scale division equals $1/10$ of the whole horizontal intensity.
A horizontal scale division equals $2/35$ in declination.



Capítulo 18

[Weber, 1838] Observações sobre a Instalação e Uso do Magnetômetro Bifilar

Wilhelm Weber^{608,609}

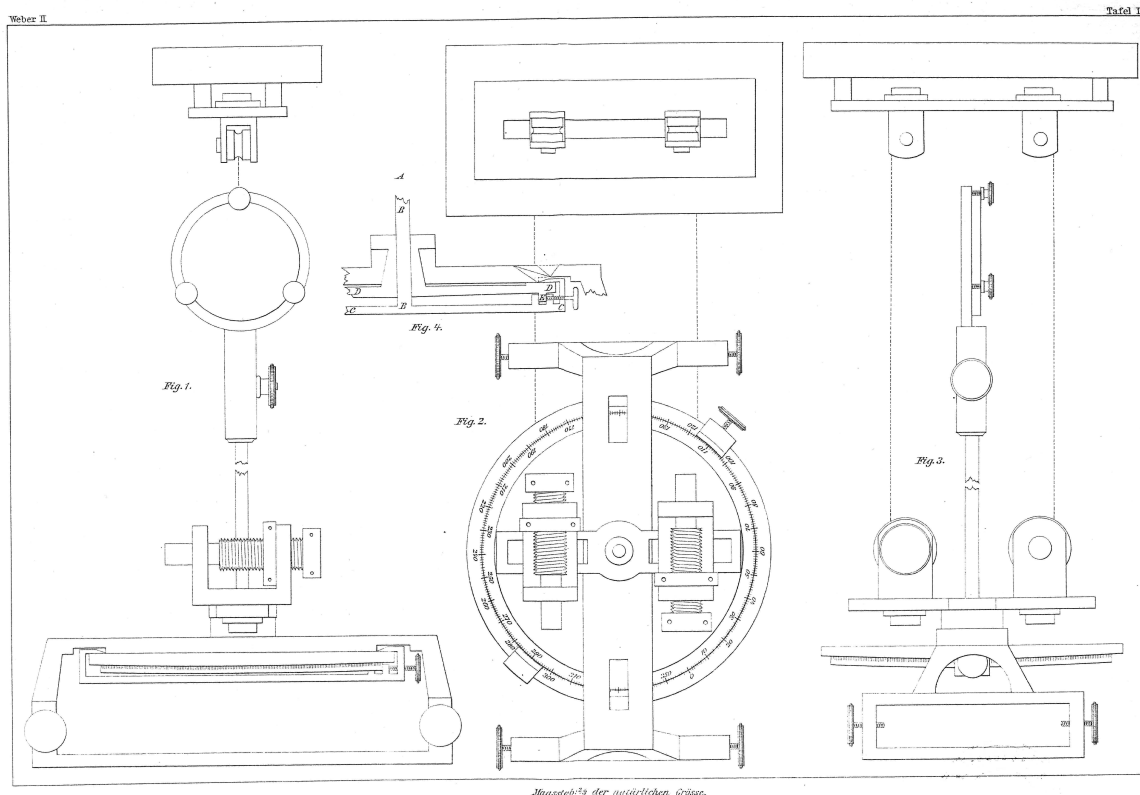
Após o desenvolvimento completo do artigo anterior^{610,611} sobre os princípios do *magnetômetro bifilar*, e sobre tudo que é essencialmente necessário para sua construção e aplicação, será particularmente interessante uma descrição exata do instrumento. A Figura (Gravura nas páginas 258 e 272) é tão precisa que qualquer artesão habilidoso pode trabalhar a partir dela. As observações seguintes são adicionadas com o intuito de tornar o desenho ainda mais inteligível, e de facilitar o ajustamento do instrumento por outros observadores, tanto quanto é possível fazer por essas instruções.

⁶⁰⁸[Web38a] com traduções para o inglês em [Web41c], [Web66a] e [Web21m].

⁶⁰⁹As Notas de Wilhelm Weber são representadas por [Nota de Wilhelm Weber:]; as Notas de E. Riecke, o editor do segundo volume das *Obras* de Weber, são representadas por [Nota de Riecke:]; todas as outras Notas são de minha autoria.

⁶¹⁰[Nota de Riecke:] Ueber ein neues, zunächst zur unmittelbaren Beobachtung der Veränderungen in der Intensität des horizontalen Theiles des Erdmagnetismus bestimmtes Instrument. *Resultate*, 1837, I, pág. 1. *Obras* de Gauss, Vol. V, pág. 357.

⁶¹¹[Gau38b] com traduções para o inglês em [Gau41d] e [Gau21c]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 17.



18.1 Observações Gerais

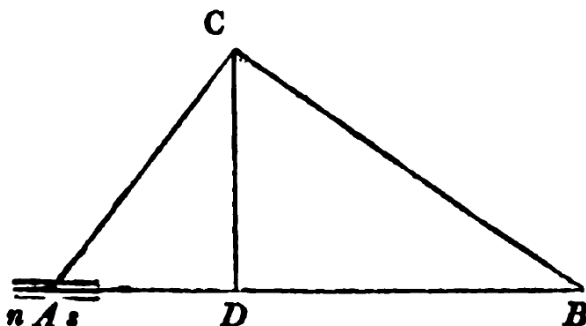
A altura e as outras dimensões do Observatório Astronômico de Göttingen, onde está instalado o instrumento representado por essas Figuras, permitiram o grande tamanho do instrumento e, portanto, foi utilizada uma barra de 25 libras fortemente magnetizada. Em outros locais talvez seja necessário utilizar dimensões menores, e observaremos na Conclusão a diferença no custo ocasionada pela diminuição de tamanho. Contudo, dimensões grandes são mais recomendadas para o magnetômetro bifilar do que para o unifilar, pelos seguintes motivos: em primeiro lugar, porque o aumento das dimensões não provoca um aumento proporcional no custo do instrumento, pois a despesa principal vem do espelho e da divisão precisa do círculo; e como o espelho não é ligado à extremidade da barra imantada, não é necessário que seu tamanho seja aumentado junto com as dimensões da barra; em segundo lugar, já que o aumento do tamanho do instrumento não necessita qualquer aumento considerável da sala [onde está localizado]; o que aconteceria com o magnetômetro unifilar, devido às experiências de deflexão nas medidas de intensidade absoluta; em terceiro lugar, já que raramente a barra imantada precisa ser removida do estribo⁶¹² e, portanto, o tamanho da barra não ocasiona inconvenientes em sua utilização, o que seria o caso até certo ponto com o outro magnetômetro. Disso não segue que tenha de ser utilizada uma barra com exatamente 25 libras de peso, tal como a que utilizamos; será suficiente para as medidas mais delicadas uma barra com 10 libras; e até mesmo uma com 4 libras pode corresponder. As barras pequenas possuem apenas uma vantagem em relação às grandes, a saber, na maior facilidade em fornecer a elas um alto grau de magnetismo; e isso só é importante na falta de meios potentes de produzir o magnetismo por atrito.

⁶¹²Ver a Nota de rodapé 508 na página 206.

Em relação a um local apropriado, tudo que é necessário é uma sala similar àquela empregada para o magnetômetro unifilar, mesmo se for utilizada uma barra de 25 libras. A largura da sala pode até mesmo ser menor, e seu comprimento pode formar um ângulo qualquer com o meridiano magnético, já que o espelho nesse caso não está ligado à extremidade da barra imantada, mas ao estribo no centro da barra, e ele pode ser girado em qualquer direção. É necessária uma altura considerável, de tal forma que a distância entre os dois fios aos quais o instrumento está suspenso possa ser suficiente para uma medida conveniente sem tornar a força diretriz⁶¹³ muito grande. Como é raro que uma sala seja suficientemente alta, é aconselhável furar o teto e levar os fios tão alto quanto o telhado permitir. Em relação à altura, tem pouca importância se é colocada no estribo uma barra pesada ou leve, supondo apenas que essas duas barras sejam proporcionalmente magnetizadas, e que as duas sejam bem mais pesadas do que o estribo. Não é necessário construir um prédio separado que seja livre de ferro para o magnetômetro bifilar, como é feito para o outro magnetômetro; ele pode ser colocado, como é o caso em Göttingen, no meio de uma sala em um prédio no qual o ferro não tenha sido excluído: é suficiente remover todo o ferro na vizinhança imediata do instrumento. Contudo, é melhor colocá-lo no Observatório Magnético que contém o outro magnetômetro, caso a sala seja grande o suficiente e adaptada para esse propósito. Se, por exemplo, as mudanças de declinação e intensidade devem ser observadas *simultaneamente* nas datas combinadas, será necessário o dobro de observadores se os instrumentos estiverem em prédios separados. Porém, se eles estiverem em *uma* grande sala, e arranjados de tal forma que, enquanto os magnetômetros estão separados a uma distância suficiente, estiverem próximos entre si os teodolitos com os quais são feitas as observações, um relógio pode servir para os dois observadores, e um observador com prática pode observar alternadamente os dois instrumentos, permitindo um intervalo de dois minutos. Os dois magnetômetros podem ser colocados relativamente entre si em uma sala grande de tal forma que a declinação média possa permanecer inalterada, e as mudanças de declinação e intensidade só sejam afetadas de maneira que a determinação do valor das divisões da escala seja um pouco diferente do que ela seria de outra forma. Esse é o caso quando o pilar que suporta os teodolitos forma um triângulo com os dois magnetômetros, dos quais um dos lados (a saber, aquele entre o pilar e o magnetômetro de declinação) está situado no meridiano magnético, enquanto que o outro lado, a saber, a linha que conecta os pontos centrais dos dois magnetômetros, forma um ângulo de $35^{\circ}15'52''$ com o meridiano magnético.⁶¹⁴

⁶¹³Ver a Nota de rodapé 582 na página 245.

⁶¹⁴[Nota de Wilhelm Weber:] O Prof. Gauss forneceu em uma construção geométrica muito simples, a solução completa do problema da ação recíproca entre dois ímãs a uma grande distância mútua, em qualquer orientação relativa entre eles. Essa solução é como segue:



Seja A o centro do pequeno ímã, ns; AB o prolongamento de ns; C uma partícula de magnetismo livre

A altura da suspensão, que é tão importante para os objetivos desse instrumento, torna muito desejável que o acesso aos pontos de suspensão sejam raramente, ou nunca, necessários. Mesmo na construção do magnetômetro unifilar foi observado que seria conveniente que o círculo de torção, ao qual é feito um uso frequente, fosse fixado ao estribo do magnetômetro em vez de ser preso ao teto. O mesmo objetivo foi considerado na construção do magnetômetro bifilar, onde, devido à maior altura de suspensão, isso tinha uma importância

da outra barra; ACB um ângulo reto; $AD = \frac{1}{3}AB$; nesse caso CD é a *direção da força* que atua em C , quando C é uma partícula magnética Norte; (quando C é uma partícula magnética Sul, a direção da força é, ao contrário, no prolongamento de DC além de C ;) $\frac{CD}{AD} \cdot \frac{Mm}{AC^3}$ é a *intensidade da força*, M designando o magnetismo de ns [isto é, seu momento magnético,] e m o magnetismo em C . Essa proposição simples, que é útil em inúmeros casos, é especialmente aplicável a esse caso, na qual é necessária a orientação recíproca mais vantajosa dos magnetômetros a serem colocados na mesma sala; isto é, a posição na qual eles menos se perturbam, e na qual pode ser facilmente calculada como uma correção, qualquer pequena perturbação que possa ser produzida. A aplicação da proposição de Gauss ao nosso caso mostra que na posição descrita acima, em primeiro lugar, a declinação *média* permanece inalterada; em segundo lugar, o valor das divisões da escala, não apenas para as *variações* da declinação, mas também da intensidade, só são alteradas quando ocorre uma mudança na *força diretriz* dos dois instrumentos. Tudo isso pode ser visto da construção geométrica da ação mútua entre dois ímãs a uma grande distância, sem que seja necessário apresentar um desenvolvimento completo da *teoria* dos dois magnetômetros.

A *primeira* afirmação é evidente da consideração da Figura anterior, na qual A é o ponto central da barra de intensidade ns , C é o ponto central da barra de declinação situada na linha CD , sendo CD o meridiano magnético, e na qual a linha reta AC , que conecta os centros das duas barras, forma o ângulo $ACD = 35^\circ 15' 52''$ com o meridiano magnético CD , — ou, mais precisamente, forma um ângulo ACD tal que

$$\text{sen } ACD = \sqrt{\frac{1}{3}},$$

$$\cot ACD = \sqrt{2},$$

$$\text{csc } ACD = \sqrt{3}.$$

De acordo com a proposição anterior, CD é a *direção* da força que atua na barra de declinação C , pois se $ACB = 90^\circ$, $AD = \frac{1}{3}AB$. Esse último caso é aquele real, já que CD é perpendicular a AB (o eixo magnético da barra de declinação tem de estar situado no meridiano magnético, e o eixo magnético AB da barra de intensidade tem de estar situado perpendicularmente a ele); então sendo AC o raio, AD é o seno de ACD , AB a secante de BAC , ou a cossecante de ACD ; consequentemente,

$$AD : AB = \text{sen } ACD : \text{csc } ACD = \sqrt{\frac{1}{3}} : \sqrt{3} = 1 : 3.$$

A direção da força com a qual a barra de intensidade atua sobre a barra de declinação é, portanto, aquela do meridiano magnético CD : consequentemente ela pode ter alguma influência no período de oscilação da barra de declinação, sendo a força diretriz dela modificada um pouco por isso; mas ela não vai influir em sua orientação, desde que essa direção coincida com o assumido meridiano *médio* CD : portanto, os *desvios* dele serão um pouco diminuídos ou aumentados por essa força, caso ela atue conjuntamente ou em oposição à força magnética terrestre; mas mesmo isso está previsto se alterarmos o valor em arco das divisões da escala, na qual os *desvios em relação ao meridiano médio* são expressos proporcionalmente à força diretriz, isto é, por

$$\frac{\sqrt{2}}{AC^3} \cdot \frac{Mm}{Tm},$$

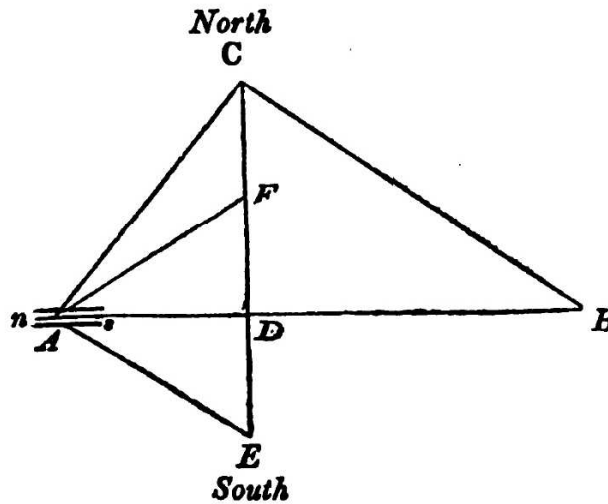
onde, de acordo com a proposição acima,

$$\frac{Mm}{AC^3} \cdot \sqrt{2} = \frac{Mm}{AC^3} \cdot \cot ACD = \frac{CD}{AD} \cdot \frac{Mm}{AC^3},$$

muito maior. Para tornar bem desnecessário ir ao teto no caso do magnetômetro bifilar, vários outros arranjos são necessários no estribo. Os parafusos, por exemplo, que servem para aumentar ou encurtar os fios, têm de ser fixados ao estribo ao invés do teto. Eles estão marcados claramente nas Figuras 1, 2 e 3 da Gravura, onde é visto como eles estão conectados ao círculo onde é colocado o estribo, e arranjados da mesma forma que o parafuso de elevação do magnetômetro unifilar, de tal forma que os fios possam ser aumentados ou encurtados sem qualquer deslocamento lateral.

representa a *magnitude* da força diretriz produzida pela barra de intensidade, e Tm designa a força diretriz da Terra.

Essa *última* afirmação, desde que ela se relacione às mudanças de intensidade, é provada ao traçar uma perpendicular em CA no ponto C , que cruza o prolongamento da linha CD em E .



Resulta então da semelhança dos triângulos ACD , ABC , EAD e ECA , que $ED = \frac{1}{3}EC$, pois AD era igual a $\frac{1}{3}AB$; conseqüentemente, se CD é dividida ao meio em F , $CF = \frac{1}{3}CE$. Agora como tudo que foi dito de A , AB , C , ABC , AD , e CD , também é verdadeiro de C , CE , A , CAE , CF , e AF , resulta que AF é a *direção*, e $\frac{AF}{CF} \cdot \frac{Mm}{AC^3}$ é a *magnitude* da força com a qual a barra de declinação atua na barra de intensidade. Se decompormos agora essa força em uma força atuando ao longo de seu eixo magnético, ao multiplicar a força total pela razão AD/AF , e em uma força perpendicular a ela (em direção ao meridiano magnético) ao multiplicar a força total pela razão DF/AF , obteremos para a *primeira componente* o valor

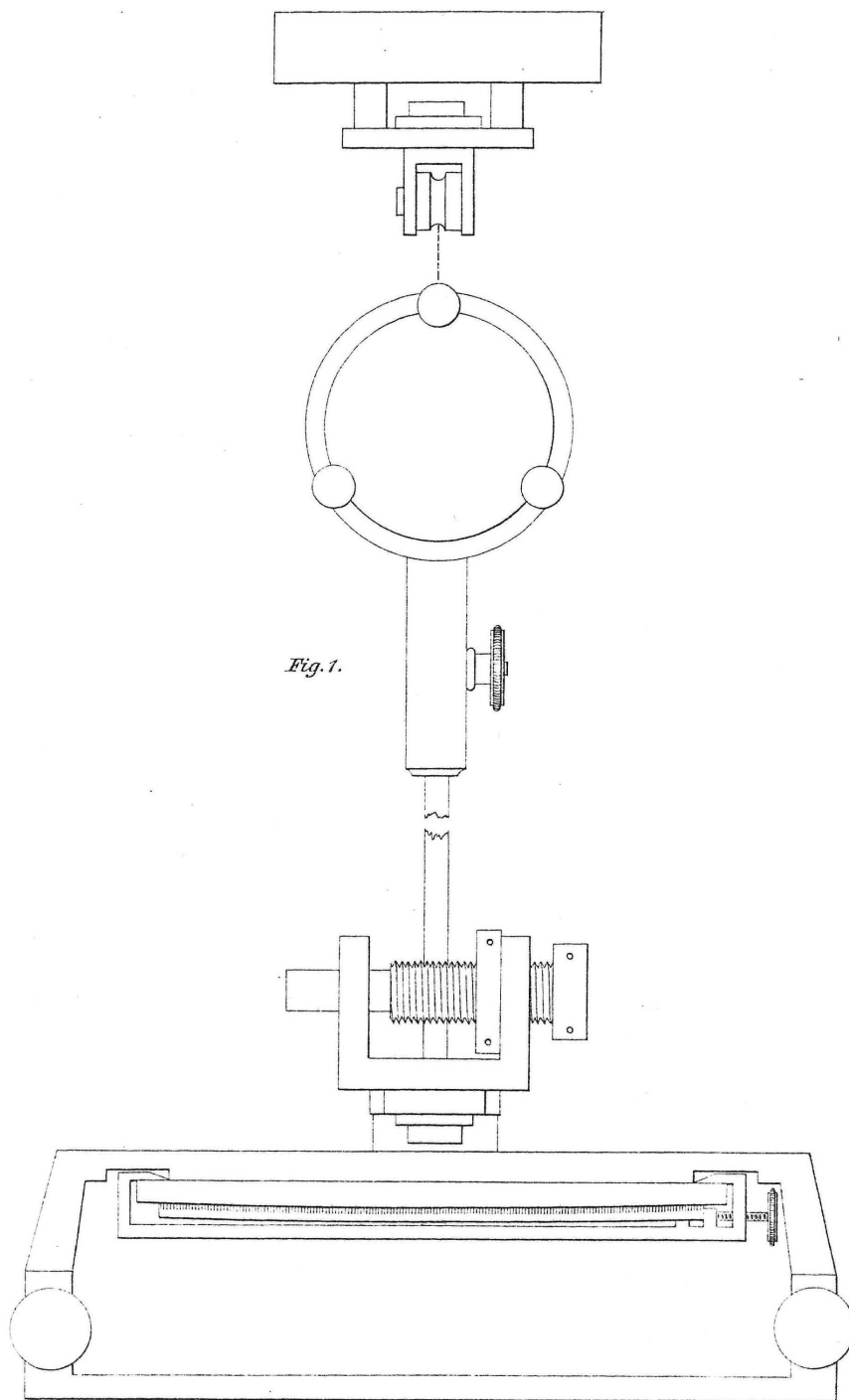
$$\frac{AD}{AF} \cdot \frac{AF}{CF} \cdot \frac{Mm}{AC^3} = \frac{AD}{CF} \cdot \frac{Mm}{AC^3} = \frac{Mm}{AC^3} \cdot \sqrt{2};$$

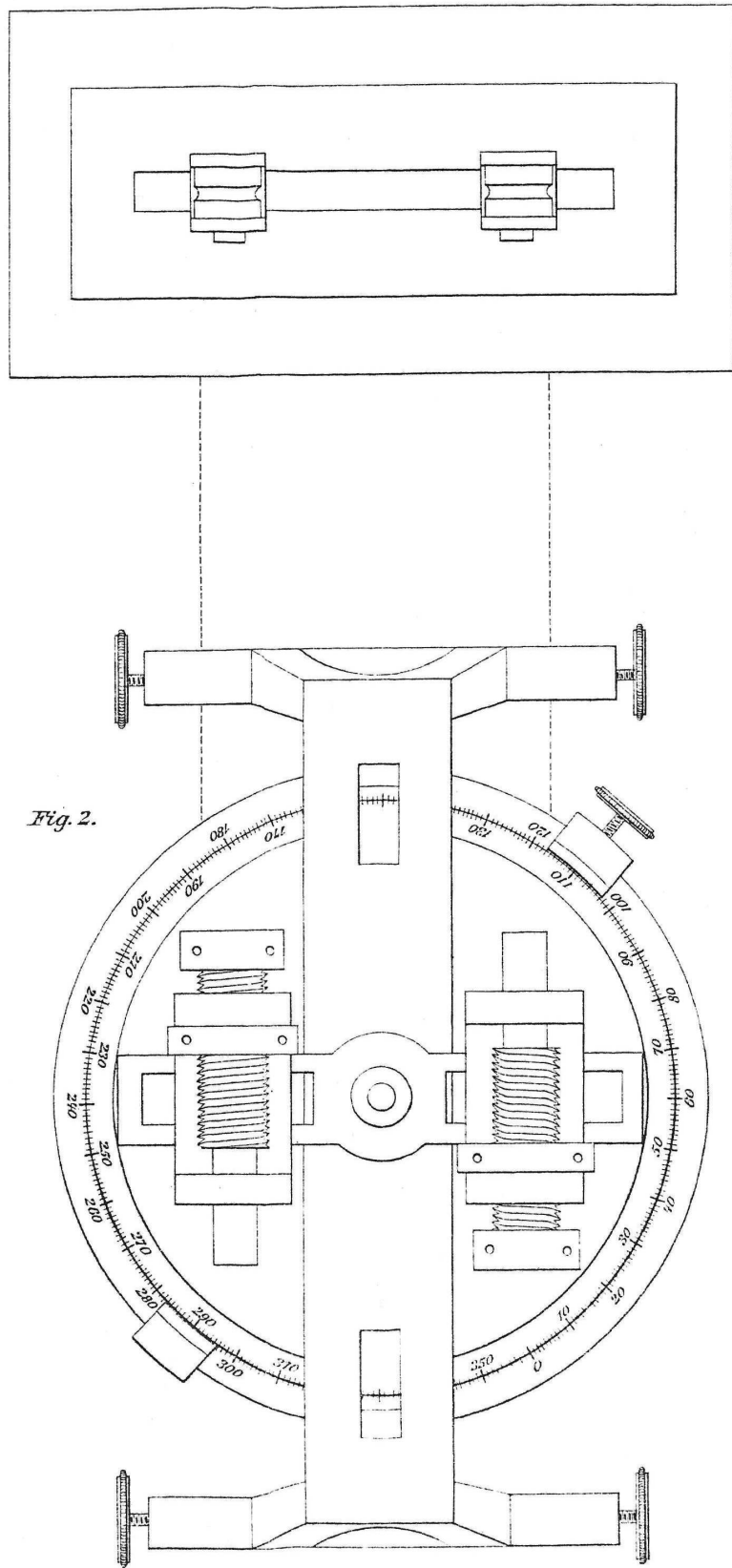
e para a *última componente* o valor

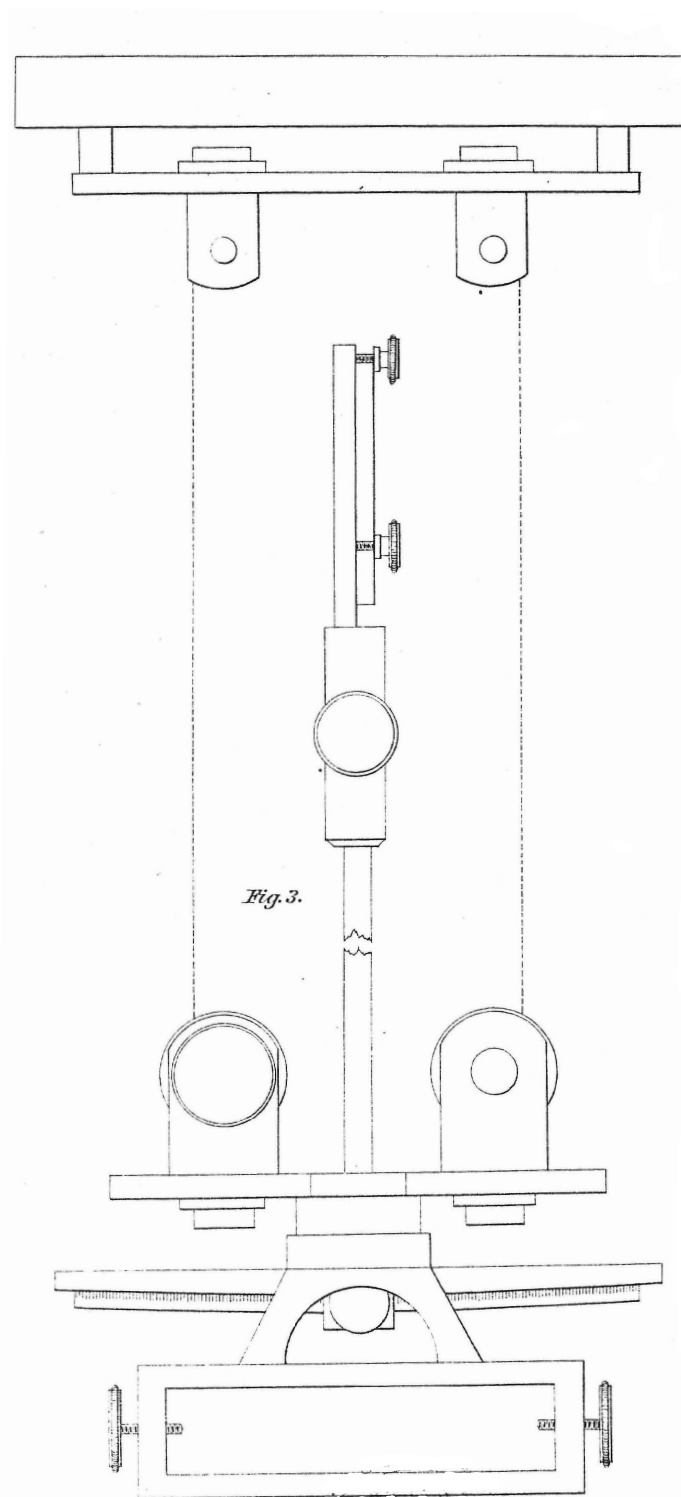
$$\frac{DF}{AF} \cdot \frac{AF}{CF} \cdot \frac{Mm}{AC^3} = \frac{DF}{CF} \cdot \frac{Mm}{AC^3} = \frac{Mm}{AC^3},$$

pois $2CF = CD = AD\sqrt{2}$, ou $AD/CF = \sqrt{2}$, e $CF = DF$.

A força $\frac{Mm}{AC^3}\sqrt{2}$ altera diretamente a *força diretriz* da barra de intensidade em sua orientação transversal. Essa força Mm/AC^3 alteraria sua *orientação* se o efeito não fosse contrabalançado por uma mudança conveniente na suspensão, de tal forma que a barra deva permanecer imóvel em sua orientação transversal. No último caso é verdade que a força Mm/AC^3 não é mais considerada; porém, a suspensão modificada certamente tem alguma influência na força diretriz e, conseqüentemente, no valor das divisões da escala. Contudo, isso não requer qualquer cálculo separado, estando incluído no cálculo da força diretriz a partir da suspensão dada, — um problema que pertence à *Teoria do Magnetômetro Bifilar*, que será desenvolvida subsequentemente.







Também foi necessário ser capaz de aproximar os dois fios, ou separá-los, no estribo, de tal maneira a aumentar ou diminuir à vontade a força diretriz. Embora seja mais simples que os dois fios que suportam o instrumento estejam sempre equidistantes acima e abaixo, e que sempre que for desejado aumentar ou diminuir a força diretriz, eles devam ser movidos uma quantidade igual nas duas extremidades, isso não é de maneira alguma necessário. A mudança na separação entre os fios pode ser feita apenas embaixo, mas em tal caso em maior grau. O aparelho que foi representado é, de fato, arranjado de tal forma que com uma

distância média entre as extremidades superiores, qualquer aumento ou diminuição necessária da força diretriz pode ser produzida por um deslocamento dos parafusos de suspensão do estribo; contudo, para completude, o instrumento vem com um arranjo no topo para um deslocamento igual dos dois cilindros, sobre os quais o fio é conduzido, e pelo qual suas duas extremidades suspensas verticalmente sejam mantidas separadas entre si; de tal forma que, caso seja desejado, a distância superior sempre possa ser mantida igual à distância inferior. Caso este ajuste superior não seja necessário, esses *dois cilindros* podem ser unidos em *um rolo* de um diâmetro conveniente, de tal forma a diminuir o atrito, e fazer com que os dois fios fiquem igualmente tensionados; — um aspecto de grande importância nas medições absolutas.

18.2 As Partes Separadas do Magnetômetro Bifilar

A descrição das partes individuais do magnetômetro bifilar é reduzida quase totalmente a uma descrição do estribo, já que ele conecta quase todas as partes que no magnetômetro unifilar estão distribuídas entre o estribo, teto e extremidade da barra. Também é desnecessário falar do teodolito e seu suporte, do relógio, da escala, ou da marca [na parede], já que todas essas partes foram tratadas na descrição do instrumento anterior nos *Resultaten* etc. do último ano, págs. 14-19.^{615,616} Contudo, como tantas partes estão ligadas ao estribo, sua construção tem de ser particularmente explicada. A Gravura apresenta três visões diferentes do instrumento, em tamanho natural, e preparado para a barra de 25 libras; as partes pequenas e compostas foram representadas em uma Seção separada, de tal forma a exibir seu mecanismo interno.

É necessária uma atenção considerável devido às muitas partes importantes comprimidas em um espaço tão pequeno do estribo: uma compreensão clara de seu mecanismo será obtida quando conhecermos as várias rotações concêntricas que são feitas no estribo, — a maneira de conferir e medir essas rotações, — e seus objetivos. Essas rotações são as seguintes:

1. Do espelho sobre seu pivô; — todas as outras partes do instrumento permanecendo imutáveis.
2. Do espelho, com seu pivô e alidade, no círculo ao qual estão fixados os parafusos de suspensão dos fios, e no qual se apoiam o estribo e sua alidade.
3. Do estribo com sua alidade, sobre o círculo no qual ele está apoiado.

Para completar as visões de todas as rotações, podemos adicionar:

4. A rotação das duas extremidades superiores do fio uma ao redor da outra, isto é, ao redor do mesmo eixo em relação ao qual ocorrem as outras rotações.

A *primeira* rotação será suficientemente inteligível a partir das Figuras 1 e 3 da Gravura. O arranjo é simples, já que seu valor não precisa ser medido. Seu objetivo é simplesmente de permitir uma liberdade perfeita ao fixar o teodolito; o eixo do espelho sempre pode ser feito girar, de acordo com a posição do telescópio e da escala, onde quer que sejam colocados.

⁶¹⁵[Nota de Riecke:] *Obras* de W. Weber, Vol. II, págs. 2-6.

⁶¹⁶[[Web37a](#), págs. 14-19 dos *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1836* e págs. 2-6 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [[Web41e](#)], [[GW39a](#)] e [[Web21r](#)]; e tradução para o francês em [[Web38d](#)]. Esse trabalho está traduzido para o português no Capítulo [15](#).

A imagem da escala que aparece no espelho serve ela própria para regular a rotação, e não é necessário um arranjo adicional para medir a rotação. Um parafuso, como mostrado nas Figuras 1 e 3, fixa o espelho em sua posição.

A *segunda* rotação é a rotação do espelho juntamente com seu pivô e a alidade deste último na caixa do círculo ao qual estão fixados os parafusos de suspensão dos fios, e sobre o qual repousa o estribo com sua alidade. Para deixar claro como essas três peças, a saber, o espelho, o pino e sua alidade, firmemente conectadas como uma peça, giram juntas na caixa do círculo, elas foram mostradas em seção transversal junto com a caixa do círculo na Figura 4.

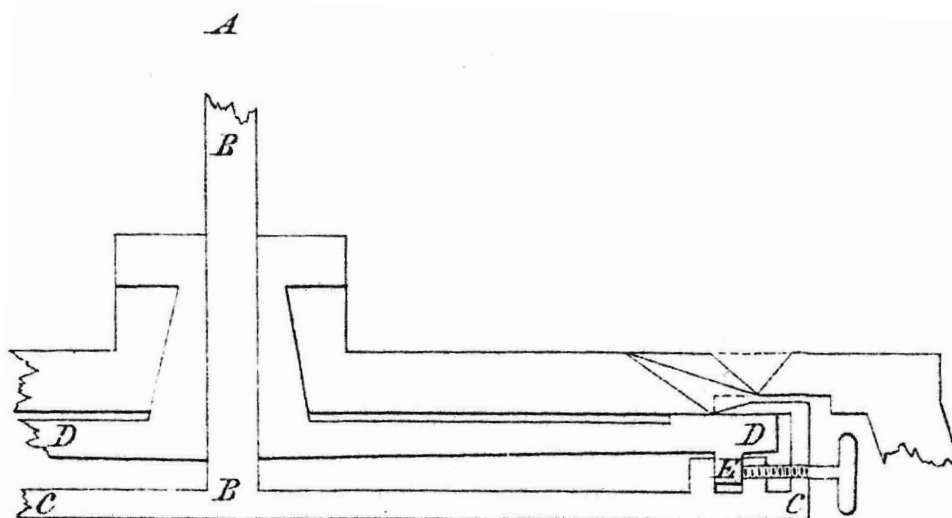


Fig. 4.

O espelho é colocado na extremidade superior do pivô *B* em *A*; *C* é a alidade do pivô; *D* é o círculo. A única diferença essencial entre a segunda rotação e a primeira é que na segunda o deslocamento angular pode ser medido. Como a alidade girante do pivô, situada abaixo do círculo, abraça em suas duas extremidades a borda do círculo, ela forma dois nônios⁶¹⁷ em sua superfície superior e graduada, sendo que as margens interiores deles estão próximas à margem externa do círculo graduado. Uma braçadeira, pela qual a alidade do pivô pode ser pressionada firmemente contra o círculo, é vista em *E* em seção transversal.

Dada a identidade quase completa dessas duas primeiras rotações, alguém poderia perguntar: por que ambas? O que pode ser alcançado através delas que ainda não possa ser alcançado através de uma? Apenas a segunda rotação seria suficiente se não houvesse em qualquer instante um impedimento para seu uso. Em certos casos, os nônios na alidade do pivô ficam sob a alidade do estribo e são escondidos por ela. No instrumento representado na Gravura foi tomado muito cuidado para restringir isso dentro de limites muito curtos, como será percebido claramente na Figura 2; contudo, para alcançar os raros casos em que isso não ocorre, sem ter de alterar a posição do teodolito, as duas rotações podem ser empregadas ao mesmo tempo, de tal maneira a liberar os nônios sem girar o espelho da escala.

A *terceira* rotação é aquela do estribo com sua alidade, no círculo sobre o qual ele está apoiado. A força diretriz dos fios atua imediatamente no círculo ao qual estão fixos os parafusos de suspensão: a força diretriz do magnetismo atua imediatamente no estribo sobre

⁶¹⁷Em alemão: *Nonien*. Ver a Nota de rodapé 585 na página 247.

o qual está colocada a barra imantada. Portanto, quando essas duas forças diretrizes formam um ângulo entre si, as duas partes sobre as quais elas atuam terão uma tendência em se deslocar em direções opostas. Para que não ocorra tal deslocamento, elas deslizam uma sobre a outra com tanto atrito, que as duas forças diretrizes, quando formam um grande ângulo entre si, não possam ser capazes de superar esse atrito. Por um motivo similar foi providenciado no magnetômetro unifilar que a alidade do estribo devesse ser colocada na borda *exterior* do círculo, de tal forma que o atrito produzido por sua pressão pudesse atuar com a maior alavancagem. Foi feita a mesma coisa com o magnetômetro bifilar, no qual essa providência é muito mais essencial e importante, pois as forças que tendem a deslocar as duas partes são muito mais poderosas. Além disso, temos de ser capazes de medir com grande exatidão essa rotação, da qual depende o ângulo que as duas forças diretrizes formam entre si. A simplicidade de construção do magnetômetro bifilar consiste principalmente nessa circunstância, a saber, que o mesmo círculo e escala graduada servem para medir tanto a segunda quanto a terceira rotação. Por esse motivo a alidade do estribo também vem com dois nônios. Portanto, o instrumento consiste em um círculo com duas alidades, que podem ser utilizadas independentemente entre si. Para que esse uso independente não faça com que as duas alidades interfiram, uma é situada abaixo do círculo e a outra acima dele. Mas como cada alidade tem dois nônios e todos os quatro nônios devem correr em uma divisão circular que está no lado superior do círculo, a alidade inferior envolve a borda do círculo e forma nônios que encostam na borda externa da divisão circular, como já foi indicado acima. Segue-se naturalmente que os nônios da alidade superior, a fim de não entrar em conflito com os nônios da alidade inferior, encostam na margem interna. Assim os nônios da alidade superior podem então passar por aqueles da alidade inferior, e pode existir até mesmo um intervalo entre eles, que, contudo, tem de ser menor do que as divisões sobre o círculo. Logo a divisão circular tem dois propósitos, um deles não interferindo com o outro, apenas não pode servir aos dois propósitos simultaneamente, já que os números são cobertos pelos nônios de uma alidade ou da outra, conforme estão dentro ou fora da graduação. Por esse motivo os números são colocados alternadamente no lado interno e no lado externo, como exibido na Figura 2 da Gravura.

A *quarta* rotação é aquela das duas extremidades superiores dos fios. Nenhum dispositivo artificial é necessário para essa rotação; em vez disso, o suporte no teto, sobre o qual os fios são guiados, é girado e posicionado à mão livre. Como o suporte tem de ser fixado ao teto, nenhuma utilização é feita usualmente dessa rotação; mas ela é arranjada de tal forma no primeiro exemplo tal que esteja na posição mais conveniente para todos os propósitos. Pode ser considerada como mais conveniente aquela posição na qual as extremidades inferiores do fio menos interferem com o espelho que está situado entre eles. Será evidente que, nos vários usos a que esse instrumento é empregado, se o suporte não se move, as extremidades inferiores do fio são colocadas em várias posições, enquanto que o espelho mantém sua posição entre eles aproximadamente inalterada, estando sempre direcionado em direção à escala. Por exemplo, os dois fios vão estar algumas vezes em um plano vertical por todo o seu comprimento; algumas vezes eles vão fazer parte de uma revolução um ao redor do outro, e um plano vertical traçado através deles vai formar com o plano anterior um ângulo, que é, contudo, sempre menor do que 90 graus. Se ele for agora arranjado de tal forma que no primeiro caso o plano dos fios coincida com o plano vertical do eixo óptico do telescópio, um fio vai passar tão longe do espelho na frente quanto o outro atrás, e os dois fios estarão tão afastados do espelho quanto possível. Se o instrumento for então preparado para o outro uso, os dois fios serão aproximados do espelho, mas não tanto quanto a tocá-lo, mesmo se o

espelho fosse maior do que o espaço intermediário, já que a rotação não chegará a 90 graus. Ela é sempre menor do que 90°, já que a força diretriz que surge da suspensão tem de ser maior do que a força diretriz magnética.^{618,619} Portanto, os torques surgindo das duas forças só vão se equilibrar quando os fios sofrerem uma rotação menor do que o eixo magnético. Como esse eixo magnético, na orientação transversal, tem de estar a 90° de sua orientação natural, segue-se que a rotação dos fios tem de ser menor do que 90°.

18.3 Sobre a Utilização do Magnetômetro Bifilar

Em conclusão observarei brevemente as séries de experiências que precisam ser realizadas para fixar e ajustar o instrumento.

1. O relógio, o teodolito e a escala são fixados, e um fio de prumo desce do centro da objetiva através da escala. O teodolito deve ser nivelado.

2. O telescópio é direcionado para a parede oposta, na qual tem uma marca, que serve para designar o ponto final do eixo óptico. A escala é colocada perpendicularmente ao plano vertical do eixo óptico.

3. É procurado um lugar para o espelho no plano vertical do eixo óptico, sendo que a distância dele até o centro da objetiva, juntamente com sua distância até a divisão da escala através da qual é suspenso o fio de prumo, é igual à distância da marca [na parede] até o centro da objetiva. O plano horizontal desse ponto tem de dividir ao meio o fio de prumo até o centro da objetiva. Um fio de prumo deve descer do teto através desse ponto.

4. Um suporte é fixado ao teto, ou então perpendicularmente acima de um buraco feito no teto tendo de 80 a 100 milímetros de largura; de tal forma que as extremidades de uma linha passada sobre ele, e estendidas por pequenos pesos, atravesse livremente a abertura, estando as duas no plano vertical do eixo óptico do telescópio.

5. É selecionado um fio de aço forte o suficiente para suportar metade do peso do instrumento sem risco de romper. Uma ponta é presa a uma extremidade da linha e é puxada até o suporte puxando a outra ponta da linha para baixo (certificando-se de que o fio e a linha permaneçam sempre retos), deixe-o passar sobre os dois cilindros do suporte e abaixe-o novamente, quando a linha pode ser desamarrada e as duas pontas do fio podem ser carregadas com pesos e deixadas para girar livremente até que assumam sua posição natural.

6. As duas extremidades do fio são cortadas ao redor de 100 ou 150 milímetros abaixo do local onde o magnetômetro será suspenso, e são fixadas por parafusos de suspensão. O estribo assim suportado é então, com a ajuda dos parafusos, levantado até sua posição apropriada.

7. Uma caixa, suficientemente grande para conter a barra imantada, é colocada abaixo para proteger o instrumento no caso de rompimento dos fios, e para prevenir correntes de ar. Essa caixa é fechada em todos os lados. Sua tampa consiste em duas metades, que se ajustam bem, e deixam apenas *uma* abertura circular, sendo que através do centro dessa abertura passa o pivô; a extremidade superior do pivô suporta o espelho, que tem de estar acima da caixa. Os dois fios que têm o espelho entre eles atravessam a mesma abertura. Essa abertura circular é usualmente fechada por duas abas semicirculares, nas quais existem pequenas fendas para o pivô e para os fios.

⁶¹⁸[Nota de Wilhelm Weber:] *Resultate*, 1837, I, pág. 8. *Obras* de Gauss, Vol. V, pág. 363.

⁶¹⁹[[Gau38b](#), pág. 8 do *Resultate* e pág. 363 das *Obras* de Gauss]. Esse trabalho está traduzido para o português no Capítulo 17.

8. Antes que a barra imantada seja colocada no estribo, um peso do mesmo tamanho, mas não imantado, é colocado lá, e os fios são forçados a se arranjar em suas posições naturais, nas quais os dois fios ficam em um plano vertical ao longo de todo o seu comprimento. A alidade do estribo é então trazida tão exatamente quanto possível no meridiano magnético médio a partir do qual vão ser medidas as mudanças de declinação. A outra alidade no pivô do espelho deve ser fixada de maneira a formar um ângulo reto com a alidade do estribo, de tal forma que os nônios possam estar bem afastados. O peso do estribo é deslocado até que o espelho esteja situado exatamente entre os dois fios, quando o eixo do espelho deve estar bem aproximadamente horizontal. Utilize a primeira rotação para direcionar o espelho em direção à escala, sem perturbar a alidade. Se a escala não aparecer no telescópio, ela será vista pelo olho um pouco acima ou abaixo, e pode ser trazida ao campo de visão [do telescópio] com a ajuda de um pequeno peso colocado no estribo. É então realizada a primeira observação e determinada a posição da escala.

9. O período de oscilação para determinar a força diretriz dos fios pode ser observada antes que a barra imantada seja inserida, sendo então observado mais uma vez com um aumento conhecido do momento de inércia. Contudo, é melhor realizar essa experiência um pouco mais tarde, quando a distância entre os fios tiver sido cuidadosamente ajustada, no caso em que essa distância não tenha sido determinada previamente pelo cálculo e ajustada de acordo com isso.

10. A barra imantada é então colocada na orientação inversa, (com o Norte [da barra] em direção ao Sul,) e a posição da escala é novamente observada; isso tem de concordar com a observação (8). Caso as duas leituras não coincidam, o acordo entre elas tem de ser alcançado simplesmente girando o estribo com sua alidade. A coincidência das duas leituras prova que o eixo magnético da barra está situado ao longo do meridiano magnético. Quanto menos a força diretriz decorrente do modo de suspensão exceder a força diretriz magnética, ver o item (8), mais delicado é esse teste, de tal forma que pode ser impossível obter uma concordância *perfeita* das duas leituras; podendo então ser considerado sem importância uma diferença de algumas poucas divisões da escala. Nem é preciso dizer que a influência das variações horárias [do magnetismo terrestre] também deve ser levada em consideração ao fazer observações contínuas em um segundo aparelho do mesmo tipo ou ao fazer observações contínuas do período de oscilação em um magnetômetro comum.

11. O período de oscilação, t , é observado nessa orientação inversa.

12. A barra imantada é então colocada em sua posição natural, (o Norte [da barra] em direção ao Norte,) ao girar o estribo com sua alidade exatamente 180 graus; o período de oscilação, τ , é novamente observado. Nesse caso a força diretriz magnética, M , estará para a força diretriz que surge do modo de suspensão, S , na razão⁶²⁰

$$M : S = t^2 - \tau^2 : t^2 + \tau^2 .$$

Quando essa proporção desvia muito da unidade, os fios devem ser aproximados ou afastados, até que a força diretriz alterada dos fios exceda um pouco a força diretriz magnética; por exemplo, aproximadamente ao redor da décima parte dessa última força, assim como ocorria

⁶²⁰Isto é,

$$\frac{M}{S} = \frac{t^2 - \tau^2}{t^2 + \tau^2} .$$

na Memória anterior.^{621,622} Esse é o caso do magnetômetro de Göttingen.

13. Procure o ângulo z , cujo seno é dado por

$$\text{sen } z = \frac{t^2 - \tau^2}{t^2 + \tau^2} .$$

Gire a alidade do estribo (digamos na direção do movimento diário do Sol) de $90^\circ - z$, e gire a alidade do pivô do espelho na direção oposta de um ângulo z . O equilíbrio é então perturbado: os fios não podem mais permanecer em suas posições naturais, mas o círculo ao qual estão fixados (e assim todo o instrumento) tem de ser girado exatamente de um ângulo z , na direção da revolução diária do Sol. Nessa nova posição o equilíbrio pode ser restabelecido, já que a barra forma com sua posição anterior um ângulo $(90^\circ - z) + z = 90^\circ$, enquanto que os fios só foram girados de um ângulo z em suas extremidades inferiores. Portanto, segue-se que se os fios estavam anteriormente em sua posição natural, e se o eixo magnético da barra estava situado no meridiano magnético, os torques opostos que surgem das duas forças M e S estarão entre si na proporção

$$M \text{ sen } 90^\circ : S \text{ sen } z .$$

Contudo, como

$$M : S = t^2 - \tau^2 : t^2 + \tau^2 ,$$

$$\text{sen } z = \frac{t^2 - \tau^2}{t^2 + \tau^2} ,$$

e

$$\text{sen } 90^\circ = 1 ,$$

o resultado é a igualdade desses torques opostos, ou o equilíbrio do instrumento nessa posição. Se a posição verdadeira de equilíbrio coincide ou não com a calculada, é provado imediatamente por uma observação da escala, que tem de ser a mesma que antes. Pois o espelho foi girado (juntamente com todo o instrumento) do ângulo z na direção do movimento diário do Sol; mas tendo sido girado por seu movimento independente pelo mesmo ângulo z na direção oposta, ele mantém consequentemente sua posição inicial, e o ponto da escala não é modificado.

14. Contudo, se a observação mostrar uma alteração da escala, segue-se que a suposição na primeira experiência — a de que o eixo magnético da barra estava ao longo do meridiano magnético — não foi cumprida com precisão. O valor do desvio pode ser calculado, e as experiências repetidas. Esse cálculo será ainda mais preciso e acurado, se um experimento correspondente tiver sido feito previamente, procedendo precisamente como descrito no item (13), fazendo apenas todas as rotações na direção oposta.

15. Quando tiver sido obtida a coincidência necessária, o magnetômetro permanece em sua orientação transversal. Seu período de oscilação é então, de acordo com um teorema simples, a média geométrica entre os períodos de oscilação t e τ , e as observações das variações de intensidade podem então ser arrançadas como aquelas das variações de declinação. As

⁶²¹[Nota de Riecke:] *Resultate*. 1837. I, pág. 8. *Obras de Gauss*, Vol. V, pág. 363.

⁶²²[[Gau38b](#), pág. 8 do *Resultate* e pág. 363 das *Obras de Gauss*] com traduções para o inglês em [[Gau41d](#)] e [[Gau21c](#)]. Esse trabalho está traduzido para o português no Capítulo 17.

mudanças de intensidade são obtidas em divisões da escala. Se quisermos convertê-las em frações da intensidade total, essas frações são obtidas ao multiplicar o valor do arco das divisões da escala (expresso em partes do raio) por

$$\cot z = \frac{2t\tau}{t^2 - \tau^2} ;$$

já que o valor do arco em partes da escala, expresso em partes do raio, fornece imediatamente as variações de intensidade em partes da força diretriz que, nas condições prescritas, é $S \cos z$. Se dividirmos essa força diretriz $S \cos z$ pela intensidade total, isto é, nas condições descritas por $S \sin z$, obteremos ao multiplicar o valor do arco por esse quociente, $\cot z$, as variações de intensidade em frações da intensidade total.

18.4 Custo dos Magnetômetros Bifilares de Vários Tamanhos, de Acordo com o Preço do Fabricante de Instrumentos, Sr. Meyerstein de Göttingen

O único magnetômetro bifilar existente instalado no Observatório Astronômico local foi feito pela mão habilidosa do fabricante de instrumentos Sr. Meyerstein.⁶²³ Será de interesse conhecer o preço deste instrumento e de outros de tamanho semelhante.

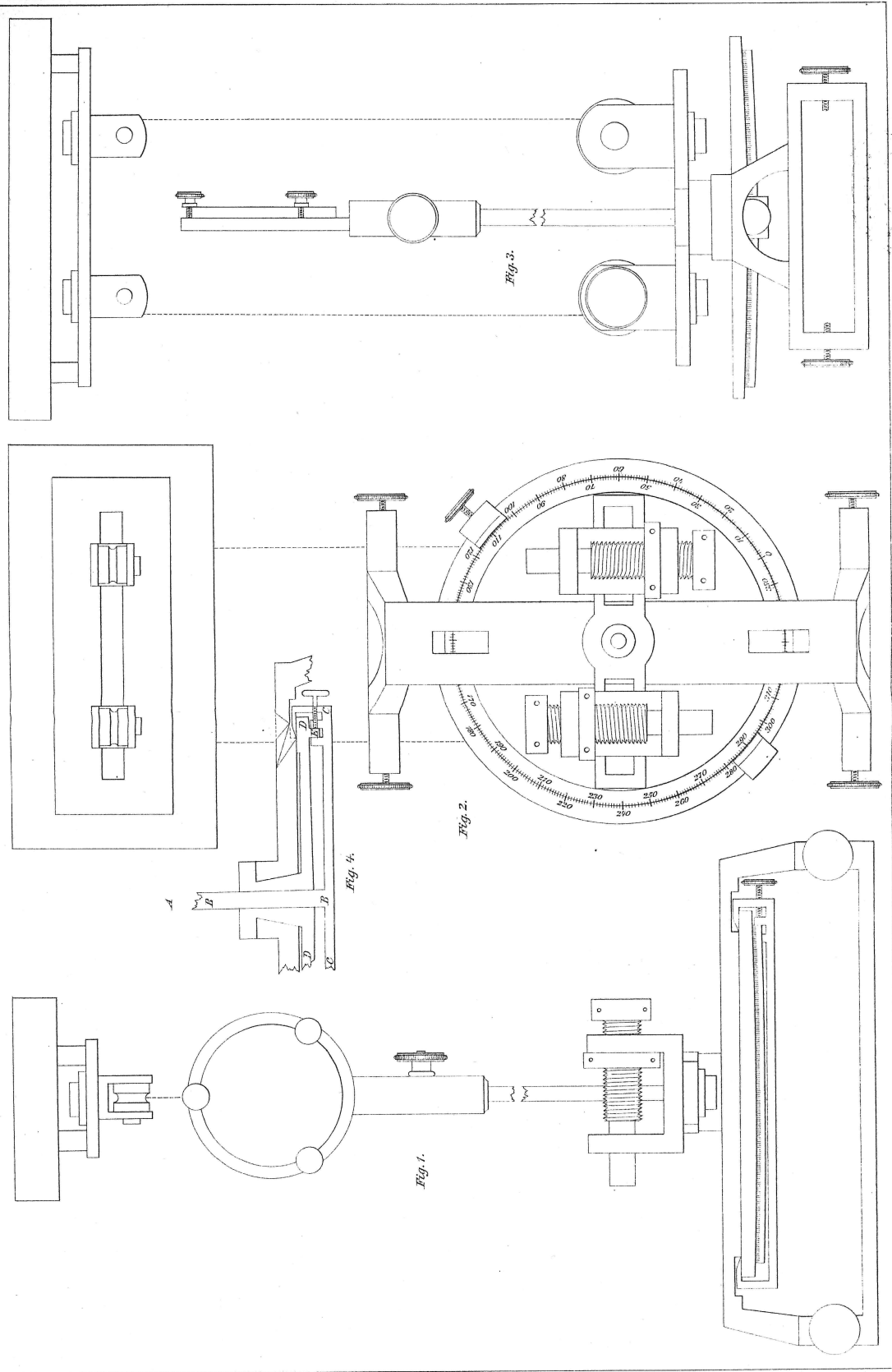
1. Um magnetômetro bifilar com uma barra imantada de 25 libras custa 60 táleres.⁶²⁴
2. Um magnetômetro bifilar com uma barra imantada de 10 libras custa 51 táleres.
3. Um magnetômetro bifilar com uma barra imantada de 4 libras custa 45 táleres.

A fim de levar em consideração as variações horárias em algumas das medidas a serem feitas com o magnetômetro bifilar, poderia parecer desejável ter um aparelho auxiliar de tipo similar, que, no entanto, seria mais simples de construir porque não se destina a ser usado para medições absolutas. Por exemplo, a segunda rotação descrita anteriormente (página 266), os parafusos de suspensão e as lâminas para regular os fios podem ser omitidos e somente uma divisão circular em graus inteiros pode ser usada. Uma vez que é muito desejável que as variações de intensidade sejam observadas em vários outros lugares nas datas acordadas, nota-se que tal instrumento auxiliar também pode ser suficiente para este propósito por enquanto.

4. Um magnetômetro bifilar tão simplificado com uma barra de 10 libras custa 30 táleres.

⁶²³Ver a Nota de rodapé 493 na página 201.

⁶²⁴Ver a Nota de rodapé 535 na página 217.



Maassstab der natürlichen Grösse.

Capítulo 19

[Weber, 1839] O Magnetômetro Transportável

Wilhelm Weber^{625,626}

[Esse artigo foi traduzido parcialmente dos *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jare 1838*, e parcialmente de comunicações manuscritas do Sr. Weber para o Major Sabine.]⁶²⁷

Foi descrito nos *Resultate*^{628,629} de 1836 um pequeno instrumento transportável utilizado para a medição absoluta da força magnética terrestre. Aquele aparelho não era um *magnetômetro*, mas serviu como uma ilustração do modo em que esta medição, que antes era executada apenas com um magnetômetro, poderia ser feita com uma *agulha de bússola* comum.

Foram examinados nesse artigo já citado o grau de precisão alcançável com um desses instrumentos pequenos e as ocasiões em que poderia ser utilizado. Exceto por uma limitação imposta pela falta de tempo, ou por outras circunstâncias externas, seria obviamente sempre preferível usar o magnetômetro; o pequeno instrumento destinando-se apenas a servir como um substituto, nas ocasiões em que seja impraticável a utilização do instrumento mais perfeito. É muito desejável reduzir o número de tais ocasiões tanto quanto possível, ao conceber meios para eliminar as dificuldades que muitas vezes se opõem ao uso do magnetômetro; e isso será tão mais desejável, quanto mais considerarmos a grande diferença em grau de precisão alcançada com os dois instrumentos; e quanto mais refletirmos sobre a importância que seria dada a uma classe de observações nas quais os magnetômetros ainda não foram utilizados, (a saber, aquelas feitas nas jornadas e viagens distantes e prolongadas,) caso eles possam ser capazes de um maior grau de precisão, certeza e completude.

⁶²⁵[Web39a] com traduções para o inglês em [Web41d], [Web66b] e [Web21n].

⁶²⁶As Notas de Wilhelm Weber são representadas por [Nota de Wilhelm Weber:]; as Notas de Eduard Riecke, o editor do segundo volume das *Obras* de Weber são representadas por [Nota de Riecke:]; as Notas de Richard Taylor, o editor da tradução em inglês desse artigo de Weber, são representadas por [Nota de Taylor:]; todas as outras Notas são de minha autoria.

⁶²⁷Esse texto apareceu na página 565 de [Web41d], com referência a Edward Sabine (1788-1883).

⁶²⁸[Nota de Taylor:] Traduzido nas *Scientific Memoirs*, Parte V.

⁶²⁹[Web37b] com tradução para o inglês em [Web41a] e [Web21b] e tradução para o francês em [Web38c]. Esse trabalho está traduzido para o português no Capítulo 16.

Se o objetivo final de tais observações fosse simplesmente aquele de fazer mapas magnéticos nos quais não seria baseada qualquer investigação posterior, o grau de exatidão ao qual tais mapas devesse ser levados poderia ser determinado arbitrariamente; e possivelmente poderia ser considerado suficiente aquele grau de precisão que pode ser obtido sem o uso de magnetômetros. Mas se esses mapas não são eles próprios o objetivo final que está sendo procurado, — se eles vão formar a base de uma nova investigação, — se quisermos conhecer regras e leis determinadas, — se os mapas devem servir como uma maneira de comparar a experiência com a teoria geral do magnetismo terrestre, — e se os elementos da teoria são para ser deduzidos desses mapas, — nesse caso a grau de precisão e ser exigido não é mais arbitrário, sendo determinado pela natureza do assunto que está sendo investigado. Um grau *menor* de precisão, tal como aquele que esses mapas possuem *atualmente*, tem servido, é verdade, como uma primeira tentativa para tal comparação; mas para que eles possam permitir uma base adequada de um cálculo melhorado, eles precisam receber um *maior* grau de precisão. Esse é agora o *grande propósito* das observações magnéticas a serem feitas em expedições distantes, sendo isso que fornece agora a tais viagens uma importância e valor peculiar.

Contudo, quanto maior for a importância que se liga dessa forma a tais viagens e observações, em consequência das demandas teóricas, torna-se mais essencial examinar o que elas são capazes de oferecer.

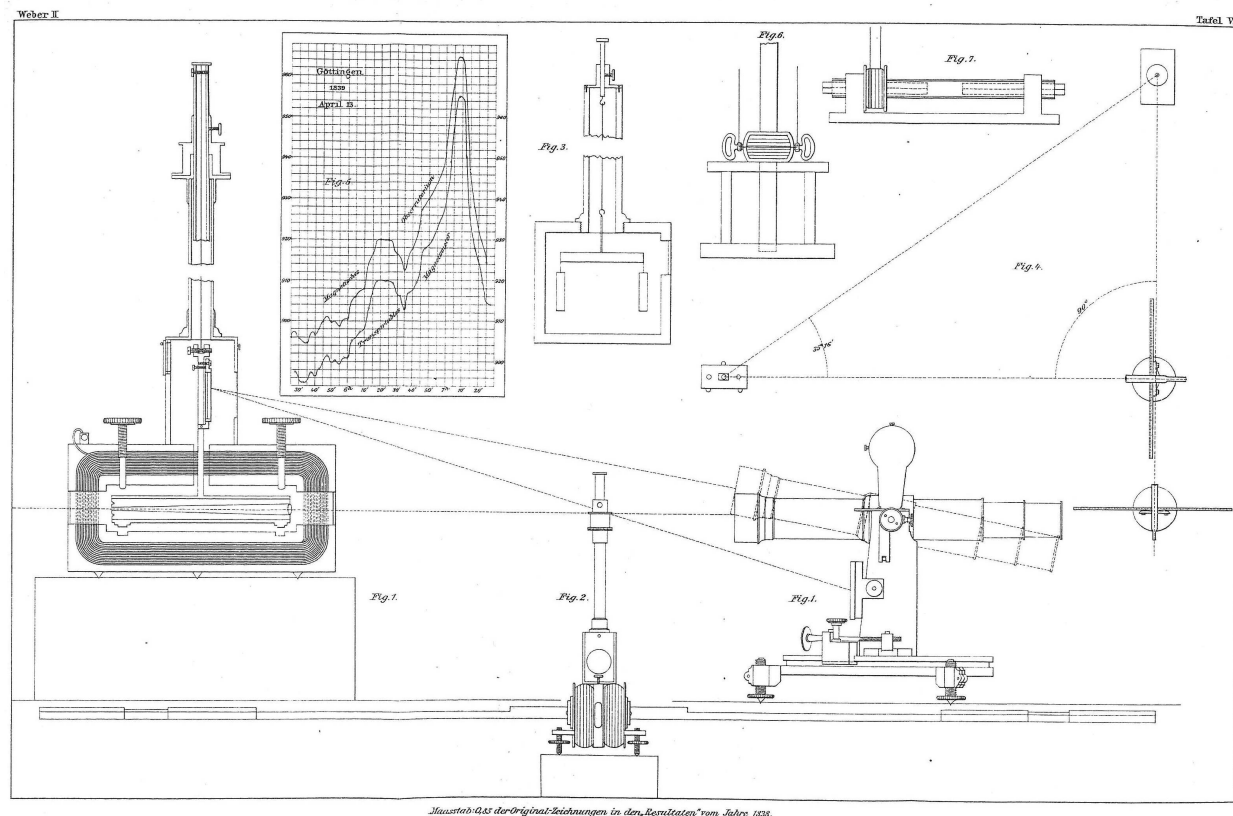
As observações magnéticas podem ser feitas em locais amplamente distantes entre si, seja ao mesmo tempo ou aproximadamente assim, ou alternadamente, de tal forma a diminuir os erros ocasionados por considerá-las simultâneas. Em todas as estações de observação, ou pelo menos nas mais importantes, as observações podem ser continuadas com regularidade por ao menos uma ou duas semanas, de maneira a permitir valores médios que estejam livres até certa medida das influências perturbadoras. Porém, é ainda mais desejável dar a tais expedições a vantagem das melhorias recentes, fazendo com que sejam equipadas com *magnetômetros*. Isso provavelmente seria melhor realizado pelas pessoas que empreendem expedições magnéticas se familiarizando a fundo, tanto teoricamente quanto na prática, com todo o assunto das medidas magnetométricas, pois elas seriam então capazes de conceber por si próprias os melhores arranjos de viagem. Contudo, como não há muitas oportunidades para adquirir esse conhecimento, a Memória aqui apresentada pode ser interessante e útil para as pessoas que não podem estudar o assunto mais completamente de outras formas.

Procedo para descrever um *magnetômetro transportável*, o qual, como ele une todas as vantagens próprias aos magnetômetros, com instalações mais compactas e de fácil manuseio, parece bem adaptado para expedições e jornadas magnéticas, e não é muito inferior aos magnetômetros dos observatórios fixos, do que bons instrumentos astronômicos portáteis o são em relação aos instrumentos maiores localizados nos observatórios astronômicos fixos. *Em primeiro lugar* apresento algumas observações gerais sobre o instrumento; *então* uma descrição de suas várias partes; e *por último*, observações da declinação e de suas variações feitas simultaneamente com o magnetômetro transportável e com aquele do Observatório Magnético de Göttingen, juntamente com uma medida da intensidade feita com o objetivo de exibir sua capacidade nesse aspecto.

19.1 Observações Gerais

O magnetômetro transportável, representado na metade do tamanho na Figura 1 da Gravura requer em geral poucas explicações, já que só é diferenciado essencialmente dos outros

magnetômetros por seu tamanho pequeno, e por sua construção mais compacta.⁶³⁰



Todas as observações que são feitas com os magnetômetros maiores também podem ser feitas com esse que está sendo considerado aqui; de tal forma que a *declinação absoluta*, as *variações de declinação*, e a *intensidade horizontal absoluta*, podem todas ser medidas com ele. Como ele também vem com um multiplicador,⁶³¹ assim como os magnetômetros maiores, todas as experiências galvânicas podem ser feitas com ele, até mesmo a *medição da inclinação absoluta*, se for utilizado um pequeno indutor de rotação e se for induzido o magnetismo terrestre.⁶³² As *variações da intensidade horizontal* também podem ser observadas, ao suspender a barra utilizada nas experiências de deflexão, como uma espécie de magnetômetro bifilar. A exatidão com a qual essas várias medições podem ser feitas é muito maior do que a que já foi alcançada até agora nas observações de viagem; ela é suficiente para todos os propósitos dos viajantes que pesquisam o magnetismo; e ela permite tanta precisão e certeza, em relação a seu tamanho, assim como os maiores magnetômetros.

Com magnetômetros maiores, como no Observatório Magnético de Göttingen, a confiabilidade dos resultados é quase tão boa quanto a das leituras diretas, que vão até a décima divisão de uma escala, ou 2 segundos de arco. Isso supõe que a escala esteja ao menos a 5 metros do espelho do magnetômetro, já que de outra forma o valor do arco das divisões da escala (que têm o comprimento de 1 milímetro), seria maior.⁶³³ Uma tal distância não funcionaria nas viagens, já que muito tempo seria perdido ao colocar todas as partes do instrumento em suas posições apropriadas. Para os propósitos de uma viagem, as distâncias

⁶³⁰ Uma Gravura maior aparece na página 304.

⁶³¹ Ver a Nota de rodapé 91 na página 38.

⁶³² Essa última sentença não foi traduzida em [Web41d].

⁶³³ Ver a Nota de rodapé 351 na página 142.

têm de ser limitadas de forma a permitir que todo o instrumento seja colocado sobre uma mesa e, portanto, elas devem ser ao redor de quatro vezes menores. Consequentemente, no lugar de um teodolito de 8 polegadas, o qual é necessário para fazer justiça aos grandes magnetômetros, pode ser utilizado sem desvantagem um teodolito com aproximadamente 3 ou 4 polegadas, sendo imediatamente mais conveniente e mais econômico, e ainda permitindo medições confiáveis dentro de 10 a 20 segundos de arco. Ao analisar com mais profundidade esse assunto, será visto que ao admitir a necessidade nos instrumentos de viagem em diminuir a distância de observação, uma diminuição em tamanho do magnetômetro (que não seria admissível em outras circunstâncias), em nada prejudica a precisão das observações. Pois com uma distância quatro vezes menor, o grau com que a leitura pode ser confiável (e que é desejado preservar,) não é afetado, embora a proporção da força magnética do magnetômetro⁶³⁴ em relação às influências perturbadoras externas seja diminuída na mesma proporção. Agora, sob condições de outra forma iguais, pode-se supor que a força magnética diminui proporcionalmente ao cubo das dimensões lineares da barra, e as influências perturbadoras externas diminuem proporcionalmente ao quadrado [das dimensões lineares da barra], do que se segue que a barra magnética em nosso caso, sem afetar a confiabilidade das leituras (que são suficientes até a décima parte de uma divisão de escala) podem ser 4 vezes menores. Se, com essa diminuição, forem adotadas outras providências para se proteger contra influências perturbadoras externas mais cuidadosamente do que foi necessário até o momento com os magnetômetros maiores, não haverá desvantagem material em forçar um pouco mais a diminuição de tamanho, tendo nesse caso apenas de preservar o grau de dependência que pode ser colocado nas leituras. De fato, o comprimento da barra de 600 milímetros foi reduzido a 100 milímetros; e a observação mostrou que ainda se pode confiar nas leituras; com apenas essa diferença, a saber, que as divisões, da forma como são lidas, têm um valor quatro vezes maior de arco do que no caso dos grandes magnetômetros, de tal forma que uma divisão da escala é equivalente a 80 segundos de arco, em vez de 20 segundos de arco.

Portanto, parece que, por meio de arranjos adequados, todas as vantagens do *magnetômetro* podem ser garantidas às *expedições magnéticas*; é claro, sem o mais alto grau de precisão atingível apenas em observatórios fixos, onde nada falta em termos de construção e arranjo. O instrumento descrito apresenta as vantagens mencionadas inicialmente ao medir a *declinação absoluta* e suas *variações*.

O instrumento a ser descrito permite essas vantagens no que diz respeito à *declinação absoluta* e suas *variações*, e ainda mais em relação à *medição absoluta da intensidade horizontal*; pois foi mostrado nos *Resultate* de 1836, pág. 88,^{635,636} que se as duas barras são seis vezes menores, a barra de deflexão pode ser trazida seis vezes mais próxima do magnetômetro, sem que seja necessário levar em conta mais exatamente a distribuição do magnetismo livre nas barras. Se, então, o comprimento e a largura forem diminuídos, e a espessura permanecer inalterada, (as barras grandes possuem 600 *mm* de comprimento, 36 *mm* de largura, e 9 *mm* de espessura; e as barras pequenas 100 *mm* de comprimento, 9 *mm* de largura, e 9 *mm* de espessura,) segue-se que o mesmo tanto pode ser ganho no magnetômetro pequeno, ao aumentar a deflexão magnética, quanto é perdido ao diminuir a distância de observação. De

⁶³⁴Em alemão: *Der magnetischen Kraft des Magnetometers*. Isto é, o valor do momento magnético da barra imantada do magnetômetro.

⁶³⁵[Nota de Riecke:] *Obras* de Wilhelm Weber, Vol. II, pág. 41.

⁶³⁶[[Web37b](#), pág. 88 do *Resultate* e pág. 41 das *Obras* de Weber] com traduções para o inglês em [[Web41a](#), pág. 86] e [[Web21b](#)]; e tradução para o francês em [[Web38c](#)]. Esse artigo está traduzido no Capítulo 16.

fato, as *experiências de deflexão* permitem uma precisão que não deixa nada a desejar, e que se harmoniza perfeitamente com o grau de precisão que se sabe que pode ser facilmente alcançado em *experiências de oscilação*.

Obviamente o magnetômetro pequeno precisa ser construído de tal maneira que todas as suas partes formem um conjunto rígido, de tal forma que suas posições relativas não possam ser desorganizadas ao embalar, desembalar ou arrumar. Deve ser possível tanto liberar a barra imantada quanto prendê-la novamente enquanto estiver empacotada, assim como é feito na bússola comum, e a torção do fio não pode ser alterada ao fazer isso; a entrada de ar tem de ser evitada mesmo para o espelho, que pode ser observado através de uma placa fina de mica, se não for obtido um vidro plano polido paralelo. É muito vantajoso fazer toda a caixa de cobre, e até mesmo de fortes placas de cobre, não apenas para aumentar a solidez dada a todo o instrumento, mas também porque a caixa vai atuar assim no ímã interno como um amortecedor, e todas as medições podem ser feitas com uma rapidez muito maior. O instrumento tem de ser tão forte e rígido, mesmo quando usado ao ar livre, tal que ele possa suportar dois braços, que servem para colocar a barra defletora em distâncias iguais a Leste e Oeste. Sendo esses braços colocados corretamente, não precisarão ser feitas todas as preparações para as experiências de deflexão que seriam necessárias de outra maneira, — a saber, colocar as barras de medição horizontalmente e em uma direção perpendicular ao meridiano magnético, e encontrar os pontos correspondentes nos dois lados do magnetômetro, — e as experiências ficam muito mais simples e necessitam de menos tempo.

19.2 Descrição das Várias Partes

A Figura 1 representa a seção vertical do magnetômetro na direção do meridiano magnético.⁶³⁷

A barra imantada que forma a agulha é perfurada ao longo de todo o seu comprimento, e a abertura que é voltada em direção ao telescópio vem com uma lente, sendo que no foco dela, na outra extremidade, há um cruzamento de linhas.⁶³⁸ Esse cruzamento de linhas é visto no telescópio, quando ele é focalizado em objetos distantes, e então direcionado para a lente (como é necessário ao determinar o azimute verdadeiro na medição da declinação absoluta). Esse arranjo foi proposto por Airy,⁶³⁹ para tornar possível dispensar o espelho, e para ser capaz de fazer, com o mesmo telescópio, e sem deslocar a objetiva, as observações astronômicas, geodésicas e magnéticas necessárias na medição *absoluta* da declinação. Ao fazer essa medição a agulha precisa ser *invertida*; porém, na inversão o eixo óptico não pode alterar sua posição relativa com relação à agulha; isso é feito na caixa fechada por meio de uma chave, que é girada do lado de fora, fazendo com que a agulha interna realize meia revolução ao redor do seu eixo longitudinal. Porém esse arranjo é inaplicável para as observações que necessitam *grandes mudanças* na posição da agulha, como é o caso nas experiências de oscilação e deflexão na medida absoluta da intensidade. Portanto, pareceu vantajoso também utilizar um espelho, colocado da mesma maneira que no magnetômetro bifilar, próximo ao eixo de rotação da agulha, e acima da caixa de cobre, estando disponível não importando quão grandes pudessem ser as deflexões.

A caixa de cobre possui três aberturas: a primeira leva a um espaço contendo o espelho, e fechada em direção ao teodolito por uma placa de vidro, através do qual a luz pode atravessar,

⁶³⁷Essa Figura 1 aparece na página 275 e, de forma ampliada, na página 304.

⁶³⁸Em alemão: *Fadenkreuz*. Essa expressão pode ser traduzida como “cruzamento de linhas”, “mira”, “cruz” ou “cruzeta”.

⁶³⁹George Biddell Airy (1801-1892).

na direção mostrada na Gravura a partir da escala, até o espelho, e de lá de volta até o telescópio do teodolito. As outras duas aberturas estão quase na mesma altura que a agulha magnética e o telescópio do teodolito. A luz entrando através de uma dessas aberturas ilumina o cruzamento das linhas que estão esticadas através da extremidade traseira da agulha perfurada, vai até a lente na outra extremidade e, de lá, paralela à direção horizontal marcada na Figura, até o telescópio do teodolito com o qual é observado o cruzamento das linhas. A agulha, perfurada através de todo o seu comprimento, é feita perfeitamente cilíndrica, e é fechada dentro de uma caixa cilíndrica de latão, sendo que em sua superfície inferior estão duas pequenas projeções que se ajustam em duas cavidades na caixa de cobre quando o fio de suspensão da agulha é abaixado. A caixa de latão pode ser fixada em sua posição por dois parafusos que atravessam a parte superior da caixa de cobre: sendo a caixa presa dessa forma, a agulha pode *em primeiro lugar* ser removida através da abertura na parte traseira da caixa, e um cilindro de latão do mesmo formato que a agulha, incluindo um fraco ímã, pode ser colocado em seu lugar, para avaliar a torção do fio. *Em segundo lugar*, com o objetivo de medir o erro de colimação, a agulha pode ser girada na caixa ao redor de seu eixo longitudinal, por meio de uma chave introduzida através da abertura na parte de trás da caixa. Durante as observações as aberturas na frente e atrás da caixa são fechadas com uma placa de mica para proteger das correntes de ar.

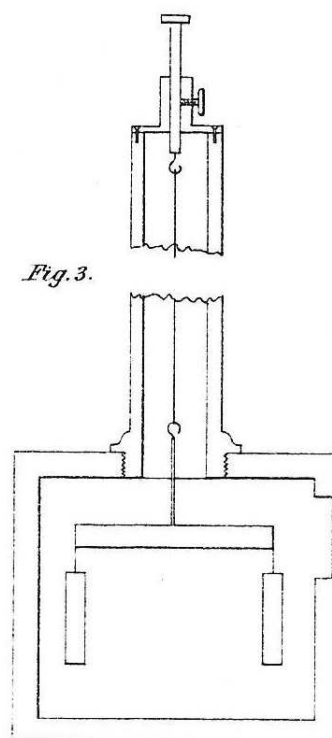
A Figura 2 representa uma seção vertical reduzida do magnetômetro perpendicular ao meridiano magnético.⁶⁴⁰ Aqui pode-se ver a seção transversal do multiplicador que envolve a caixa de cobre, e em ambos os lados os braços que carregam a barra [magnética] de deflexão. A haste de deflexão é empurrada contra duas saliências verticais fixadas em ambos os braços, que são equidistantes da agulha e cuja distância mútua é de 1 metro, o que pode ser verificado com exatidão empurrando uma haste de 1 metro de comprimento pelo meio da caixa e tocando ambas as saliências ao mesmo tempo. Se o comprimento da haste de deflexão for conhecido, a distância entre seu centro e a agulha, que deve ser conhecida, poderá ser determinada com precisão.⁶⁴¹

A Figura 3 representa o lado de fora da caixa, na qual o instrumento é guardado para as viagens, e que também serve para suspender a barra defletora quando ele é para ser usado para experiências de oscilação.

⁶⁴⁰Essa Figura 2 aparece na página 275 e, de forma ampliada, na página 304.

⁶⁴¹Esse parágrafo foi colocado da seguinte forma na tradução em inglês desse artigo, [Web41d, pág. 571]:

A Figura 2 representa uma construção de certa forma diferente e mais simples do mesmo instrumento; a agulha não é oca, não está fechada em uma caixa de latão, e não pode ser invertida. É possível essa simplificação quando o uso do instrumento é para ser restrito às experiências que são para ser feitas *ao ar livre*, como detalhado na sequência. Nesse caso o espelho é incluído na caixa de cobre, e sua normal forma um ângulo reto com o eixo magnético da agulha. A abertura envidraçada na lateral da caixa não afeta sua ação como um amortecedor, e a abertura pode ser feita de qualquer tamanho conveniente.

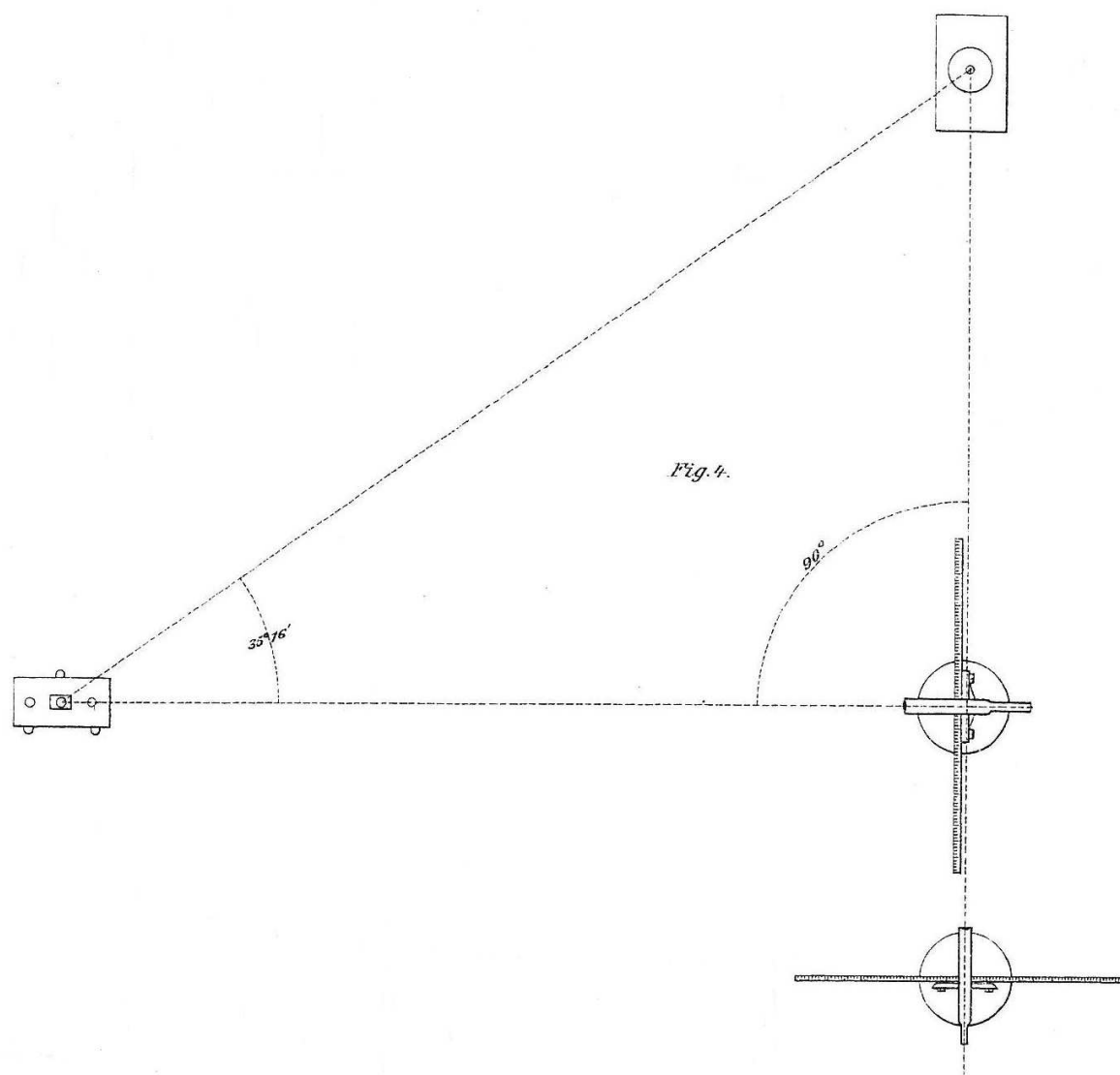


Um espelho é fixado na extremidade da barra, de tal forma que ele possa ser observado à distância com um telescópio e escala. A caixa tem uma pequena abertura que pode ser fechada com uma placa de mica que permite a entrada da luz. A Figura mostra a barra suspensa na caixa, e carregada com dois pesos cilíndricos, feitos de latão, e conectados por uma linha de seda passando sobre uma barra paralela à agulha, para manter os centros de gravidade dos dois pesos longe um do outro exatamente exatamente pelo comprimento da barra. Os pesos servem para determinar o momento de inércia [da barra imantada].

A suspensão unifilar da barra pode ser modificada por uma suspensão bifilar, se quisermos observar as variações de intensidade. Nesse caso a caixa tem de ser colocada em relação ao teodolito e ao magnetômetro da maneira representada na planta baixa, Figura 4, a saber, de tal forma que, de acordo com a regra apresentada nos *Resultate* de 1837, pág. 22,^{642,643} a linha conectando o centro da barra com o centro da agulha do magnetômetro possa formar com o meridiano magnético um ângulo de $35^{\circ}16'$. Assim observações das variações da declinação e da intensidade podem ser combinadas convenientemente dessa maneira pelos observadores viajantes.

⁶⁴²[Nota de Riecke:] *Obras* de Wilhelm Weber, Vol. II, pág. 45.

⁶⁴³[[Web38a](#), pág. 22 dos *Resultate* e pág. 45 das *Obras* de Weber] com traduções para o inglês em [[Web41c](#), pág. 270], [[Web66a](#)] e [[Web21m](#)]. Esse artigo está traduzido no Capítulo 18.



19.3 Exemplos de Observações e Medidas

19.3.1 Medição da Declinação Absoluta

Essa medição é dividida em três partes: 1. A determinação da torção. 2. A determinação azimutal do eixo magnético. 3. A determinação azimutal do Norte verdadeiro.⁶⁴⁴ Entendo aqui por *azimute de uma direção* ao ângulo formado por dois planos verticais, um deles ao longo dessa direção, e o outro na direção do eixo óptico do telescópio do teodolito, a alidade sendo colocada no ponto nulo do círculo.

⁶⁴⁴Em alemão: *Die Azimuthalbestimmung des wahren Nordens* — A determinação azimutal do Norte verdadeiro. Na tradução em inglês desse artigo essa frase apareceu da seguinte forma: *The azimuthal determination of the true meridian* — A determinação azimutal do meridiano verdadeiro. Ou seja, a determinação do meridiano geográfico, que é o plano vertical passando pelo observador e pelo eixo de rotação da Terra em relação ao plano de fundo das estrelas fixas.

1. Determinação da Torção

Essa determinação consiste na medição da *força de torção* e do *ângulo de torção*.

Força de Torção

Duas agulhas pertencem ao magnetômetro, a agulha magnética e a de torção, que podem ser suspensas ao mesmo fio, e que diferem na proporção de seus momentos magnéticos (M , m). Se T denota a força geomagnética horizontal, a força de torção deve ser comparada tanto com a força MT quanto com a força mT .

Comparação com a Força MT

Para reduzir as observações a tempos iguais, a declinação foi observada simultaneamente no Observatório Magnético.

Leitura do Círculo de Torção	Observação da Posição do Magnetômetro pela Escala	Observação no Observatório Magnético	Raio em Divisões da Escala	Observação Reduzida
355°6'	275,67	18°29'49"	2174	275,67
175°6'	237,06	18°30'42"		237,31

Portanto, a força de torção é dada em partes de MT

$$= \frac{57,295}{180^\circ} \cdot \frac{38,36}{2174} = \frac{1}{178}.$$

Comparação com a Força mT

Leitura do Círculo de Torção	Observação da Posição do Magnetômetro pela Escala	Diferenças	Média	Raio em Divisões da Escala
269°15'	270,77	160,98	167,69	2243,5
329°54'	109,79	171,12		
269°15'	280,91	168,73		
329°54'	112,18	169,94		
269°15'	282,12			

Portanto, a força de torção é dada em partes de mT

$$= \frac{57,295}{60,65} \cdot \frac{167,69}{2243} = \frac{12,563}{178}.$$

Ângulo de Torção

	Observação da Posição do Magnetômetro pela Escala	Raio em Divisões da Escala
Agulha magnética	292,90	2174
Agulha de torção	328,67	

Designando por x e y as distâncias das divisões observadas da escala em relação ao ponto nulo de torção, então x é o ângulo de torção procurado, expresso em divisões da escala; e para determinar x temos as seguintes equações:

$$\begin{aligned} 292,90 - x &= 328,67 - y \\ 12,563x &= y. \end{aligned}$$

Portanto, o ângulo de torção em divisões da escala é encontrado como sendo:

$$x = 3,09,$$

ou em segundos de arco:

$$x = \frac{3,09}{2174} \cdot 206265'' = 293''.$$

A partir desta determinação da força de torção e do ângulo de torção, obtém-se a correção a ser aplicada na declinação a ser medida em função dos resultados de torção

$$= \frac{1}{178} \cdot 293'' = 1,65''.$$

Essa correção é tão pequena que pode ser completamente desprezada; ainda mais que, durante o intervalo de tempo gasto na medição, a própria declinação foi alterada em duas divisões da escala, de tal forma que o ângulo de torção para o tempo dessa medição desapareceu quase completamente.

2. Determinação Azimutal do Eixo Magnético

Para reduzir as observações ao mesmo instante de tempo, a declinação foi observada simultaneamente no Observatório Magnético.

	Horário: 11 de abril de 1839	Azimute da Linha de Colimação	Observação no Observatório Magnético	Azimute Reduzido	Azimute do Eixo Magnético
Antes da inversão	11h 0m	131°22'43''	18°26'26''	131°20'0''	131°41'29,5''
Após a inversão	11h 37,5m	132°2'59''	18°29'9''	132°2'59''	

3. Determinação Azimutal do Norte Verdadeiro

Foram observados três objetos visíveis, cujas posições, em relação ao Observatório Astronômico de Göttingen, são dadas por medições geodésicas.

Designação dos Objetos	Distância do Observatório Astronômico		Azimute Observado	Azimute do Norte verdadeiro
	Oeste	Sul		
Hohehagen	+6060,00	+12447,70	33°58'50''	150°6'14''
Gartenhaus	+289,28	−27,54	315°17'5''	
Jacobithurm	−710,70	+500,49	117°15'15''	

Uma vez que nenhuma correção deve ser feita para a torção, a *declinação ocidental* resulta diretamente disso, ao deduzir o azimute do eixo magnético do azimute do Norte verdadeiro:

$$150°6'14'' - 131°41'29,5'' = 18°24'44,5''.$$

Esse resultado é válido para 11 de abril de 1839 às 11h 37,5m. A declinação observada no mesmo instante no Observatório Magnético foi

$$18°29'9'',$$

mostrando uma diferença de $-4'24,5''$, que provavelmente é apenas em parte devida a erro de observação, e é em parte causada pela influência da caixa de cobre ao redor do magnetômetro, que pode não estar totalmente livre de ferro. Medições repetidas, e comparações com as observações no Observatório Magnético, podem servir para deduzir tal influência se ela existir, de tal forma que ela possa ser levada em conta nas medições futuras. De fato uma segunda medição forneceu um resultado similar, a saber,

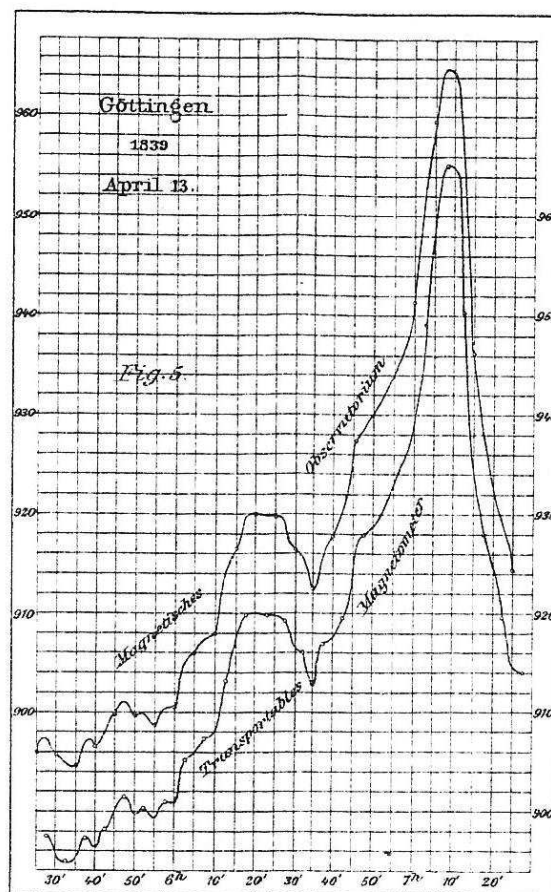
13 de abril de 1839	Ao ar livre	No Observatório Magnético
10h 31'	18°18'0''	18°23'36''

mostrando uma diferença de $-5'36''$. Portanto, a influência média da caixa de cobre nesse instrumento pode ser considerada $= -5'$.

19.3.2 Observação das Variações de Declinação

Em 15 de abril de 1839, das 5h 25m até as 7h 27,5m, foram observadas alternadamente as variações de declinação com o magnetômetro do Observatório de Göttingen e com o pequeno magnetômetro. Na próxima Tabela as quatro primeiras colunas mostram os resultados imediatos da observação com os dois instrumentos. Na coluna final as observações com o pequeno magnetômetro são reduzidas de acordo com a proporção do valor das divisões da escala. As duas séries de observações são mostradas graficamente na Figura 5, com o objetivo de comparação. Pode ser visto desse exemplo que as observações das variações de declinação pode ser feitas com um magnetômetro portátil com grande precisão.

13 de abril de 1839	Observatório Magnético A	13 de abril de 1839	Magnetômetro Transportável	
			Leitura x	Valor Reduzido $B = 895 + 3,25(x - 244,2)$
5h 25m	896,00	5h 27,5m	244,95	897,44
5h 30m	895,56	5h 32,5m	244,20	895,00
5h 35m	894,66	5h 37,5m	244,97	897,50
5h 40m	896,47	5h 42,5m	245,20	898,25
5h 45m	899,56	5h 47,5m	246,18	901,44
5h 50m	899,52	5h 52,5m	245,78	900,14
5h 55m	898,78	5h 57,5m	246,02	900,91
6h 0m	900,57	6h 2,5m	247,35	905,24
6h 5m	905,95	6h 7,5m	248,04	907,48
6h 10m	908,00	6h 12,5m	249,77	913,10
6h 15m	916,77	6h 17,5m	251,77	919,60
6h 20m	920,00	6h 22,5m	251,77	919,60
6h 25m	919,66	6h 27,5m	251,56	918,92
6h 30m	916,63	6h 32,5m	250,70	916,12
6h 35m	912,72	6h 37,5m	250,96	916,97
6h 40m	917,66	6h 42,5m	251,74	919,51
6h 45m	927,35	6h 47,5m	254,32	927,89
7h 0m	941,27	7h 2,5m	260,79	948,92
7h 5m	959,33	7h 7,5m	265,71	964,91
7h 10m	964,53	7h 12,5m	261,27	950,48
7h 15m	936,38	7h 17,5m	254,34	927,95
7h 20m	922,80	7h 22,5m	251,75	919,54
7h 25m	914,42	7h 27,5m	250,09	914,14



19.3.3 Medição da Intensidade Absoluta do Magnetismo Terrestre

A medição da intensidade é dividida em quatro partes.⁶⁴⁵ 1. A determinação da torção. 2. A determinação do momento de inércia da barra de deflexão. 3. As experiências de deflexão. 4. As experiências de oscilação. Vou me limitar aqui, por brevidade, a duas partes, a saber, a determinação do momento de inércia, e as experiências de deflexão, que são especialmente instrutivas no que diz respeito a um conhecimento do instrumento. A determinação da torção já foi mencionada na medição da declinação, e as experiências de oscilação são tão simples e bem conhecidas, que é suficiente apresentar seus resultados.

1. Determinação do Momento de Inércia

A barra de deflexão é suspensa por uma linha ou fio, sendo então colocada em oscilação: 1) sem um peso; 2) com uma carga cujo momento de inércia é conhecido.⁶⁴⁶

⁶⁴⁵Friedrich Kohlrausch discutiu um exemplo da medição da intensidade horizontal do magnetismo terrestre com o magnetômetro portátil de Weber, [Koh83a, págs. 172-173].

⁶⁴⁶Isto é, colocam-se dois pesos iguais a distâncias iguais do eixo de oscilação da barra de deflexão, sendo esses pesos e distâncias conhecidos com precisão.

Oscilações sem carga			
Número de Oscilações	Horário	Arco de Oscilação	Período de Oscilação Reduzido
0	7h 20m 51,27s	8°56'	
26	7h 23m 45,49s	8°40'	6,698''
61	7h 27m 39,92s	8°8'	6,695''
115	7h 33m 41,64s	7°22'	6,696''
151	7h 37m 42,80s	6°56'	6,695''
186	7h 41m 37,19s	6°32'	
Oscilações com carga			
0	2h 18m 35,57s	8°16'	
			12,058''
46	2h 27m 50,45s	6°58'	
			12,039''
125	2h 43m 41,76s	5°4'	
			12,019''
200	2h 58m 43,31s	3°20'	

Portanto, o período médio de oscilação sem carga é $= 6,696''$, e com carga é $= 12,039''$. Para a determinação do momento de inércia da carga temos os seguintes dados: 1) o comprimento l da barra de deflexão, ou a distância entre os fios dependurados de suas duas extremidades e suportando dois pesos cilíndricos iguais; 2) a massa $2p$; 3) o raio r desses dois cilindros.⁶⁴⁷

$$\begin{aligned} l &= 93,42 \text{ mm} , \\ 2p &= 50000,00 \text{ mg} , \\ r &= 4,60 \text{ mm} . \end{aligned}$$

Caso a massa dos cilindros estivesse concentrada em seus eixos, seu momento de inércia seria⁶⁴⁸

$$\frac{1}{2}l^2p = 109091000 .$$

Se os cilindros girassem apenas em torno de seus próprios eixos, seu momento de inércia seria⁶⁴⁹

$$r^2p = 529000 .$$

Seu momento de inércia nas experiências anteriores é para ser considerado igual à soma

$$\frac{1}{2}l^2p + r^2p = 109620000 .$$

⁶⁴⁷Ver a Figura 3 na página 275 e, de forma ampliada, na página 304.

⁶⁴⁸Isto é, o momento de inércia do conjunto composto pelos dois cilindros, cada um deles de massa p distante $l/2$ do eixo de rotação, é dado por $2 \cdot p(l/2)^2 = l^2p/2$.

⁶⁴⁹Isto é, o momento de inércia do conjunto composto pelos dois cilindros, cada um deles de massa p e raio r , com cada um deles girando em torno de seu próprio eixo de simetria, é dado por $2 \cdot pr^2/2 = r^2p$.

Portanto, o momento de inércia da barra oscilante pode ser obtido da equação

$$MT = \frac{\pi^2 K}{t^2} = \frac{\pi^2 (K + K')}{t'^2} ,$$

na qual K' significa o momento de inércia conhecido, K o momento de inércia procurado, t' o período de oscilação com carga, e t o período de oscilação sem carga, consequentemente:

$$K = 49103000 .$$

Nessas experiências a agulha foi suspensa por uma linha cuja força de torção era extremamente pequena. A mesma série de experimentos foi repetida com a agulha suspensa por um fio cuja força de torção era muito maior; o resultado foi quase o mesmo de antes, a saber,

$$K = 49044000 .$$

Finalmente, para checar o resultado, a barra de deflexão foi pesada, e seu comprimento e raio foram medidos exatamente:

$$\begin{aligned} \text{Peso } p' &= 66670 \text{ mg} , \\ \text{Comprimento } l &= 93,42 \text{ mm} , \\ \text{Raio } r' &= 5,45 \text{ mm} , \end{aligned}$$

logo seu momento de inércia pode ser calculado ao supor homogeneidade interna perfeita, a saber:

$$K = \frac{1}{12} l^2 p' + \frac{1}{4} r'^2 p' = 48982000 .$$

A concordância de todas essas experiências mostra suficientemente que o momento de inércia até mesmo de barras tão pequenas pode ser determinado com grande precisão.

2. Experiências de Deflexão

13 de fevereiro de 1839		Leituras	Deflexão Dupla		
Distância em Milímetros	Polo Norte direcionado para		Em divisões da escala		Em valores de arco
−556,75	Leste	372,95	240,62	241,03	5°30,3'
	Oeste	132,33	241,45		
	Leste	373,78			
−453,25	Leste	475,91	447,55	447,89	10°9,3'
	Oeste	28,36	448,22		
	Leste	476,58			
+453,25	Leste	480,04	448,21	448,32	10°11,2'
	Oeste	31,83	448,44		
	Leste	480,27			
+556,75	Leste	375,93	240,87	240,82	5°30,0'
	Oeste	135,06	240,76		
	Leste	375,82			

Portanto, as deflexões simples v_0 e v_1 são obtidas para as distâncias R_0 e R_1 (sem levar em conta os sinais)

$$\begin{aligned} v_0 &= 2^\circ 45' 4,5'' , & \text{para} & R_0 = 556,75 , \\ v_1 &= 5^\circ 5' 7,5'' , & \text{para} & R_1 = 453,25 . \end{aligned}$$

consequentemente, se $\tan v$ for desenvolvido em potências de R ,

$$\tan v = 8305800R^{-3} - 4081300000R^{-5} ,$$

de onde (ver *Intensitas Vis Magneticae*, Seções 21 e 22),⁶⁵⁰

$$\frac{M}{T} = 4152900 .$$

Com a distância comparativamente grande da barra de deflexão até a agulha (de 5 a 6 vezes o comprimento da agulha), é incerta a determinação do coeficiente do segundo membro dessa equação (que é para ser dividido pela quinta potência da distância), portanto, é melhor desprezá-lo. Obtém-se então dois valores para M/T dos quais se pode tirar a média:

⁶⁵⁰Ver os Capítulos 10, 11 e 12, especialmente as Seções 12.21 e 12.22.

$$R_0^3 \tan v_0 = 4146600 ,$$

e

$$R_1^3 \tan v_1 = 4143200 ,$$

consequentemente,

$$\frac{M}{T} = 4144900 ,$$

que aliás pouco difere dos valores anteriores.

Se em relação aos resultados obtidos adicionarmos finalmente o período de oscilação t , que foi encontrado como sendo⁶⁵¹

$$t = 6,0586'' , \text{ }^{652}$$

e se assumirmos $K = 49073500$, obteremos

$$MT = \frac{\pi^2 K}{t^2} = 13195000 ,$$

consequentemente

$$T = 1,7842 . \text{ }^{653}$$

Este resultado não pode ser submetido a qualquer outro exame e comparação, já que não pôde ser feita na época uma medição simultânea com o grande magnetômetro. Quando for feita uma nova medição da força magnética terrestre no Observatório Magnético de Göttingen, a oportunidade de comparação assim permitida não será desprezada.

O preço do instrumento acima, como construído pelo fabricante de instrumentos Sr. Meyerstein em Göttingen, é de 50 táleres sem teodolito, o teodolito (construído sem aço e ferro) sem círculo vertical⁶⁵⁴ custa 50 táleres, com círculo vertical 67 táleres, com pivôs de vidro (que o Sr. Meyerstein conseguiu fazer tão redondos quanto pivôs de aço: o vidro então merece preferência, como cobre ou latão, em relação ao aço ou ferro, não apenas por causa do perigo de efeitos magnéticos a serem evitados quando o teodolito se aproxima do magnetômetro, mas também sobre o próprio cobre ou latão, devido ao atrito dos pivôs a ser evitado) 80 táleres, finalmente um indutor para a medição da inclinação absoluta (que será relatado no futuro) 30 táleres. Um cronômetro também teria que ser incluído no equipamento completo de uma expedição magnética, mas isso não precisa ser especialmente mencionado,

⁶⁵¹Estou colocando aqui, em vez do valor do período de oscilação t que apareceu na versão original em alemão, $t = 60,586''$, o valor que apareceu na tradução em inglês desse artigo, [Web41d], a saber:

$$t = 6,0586'' .$$

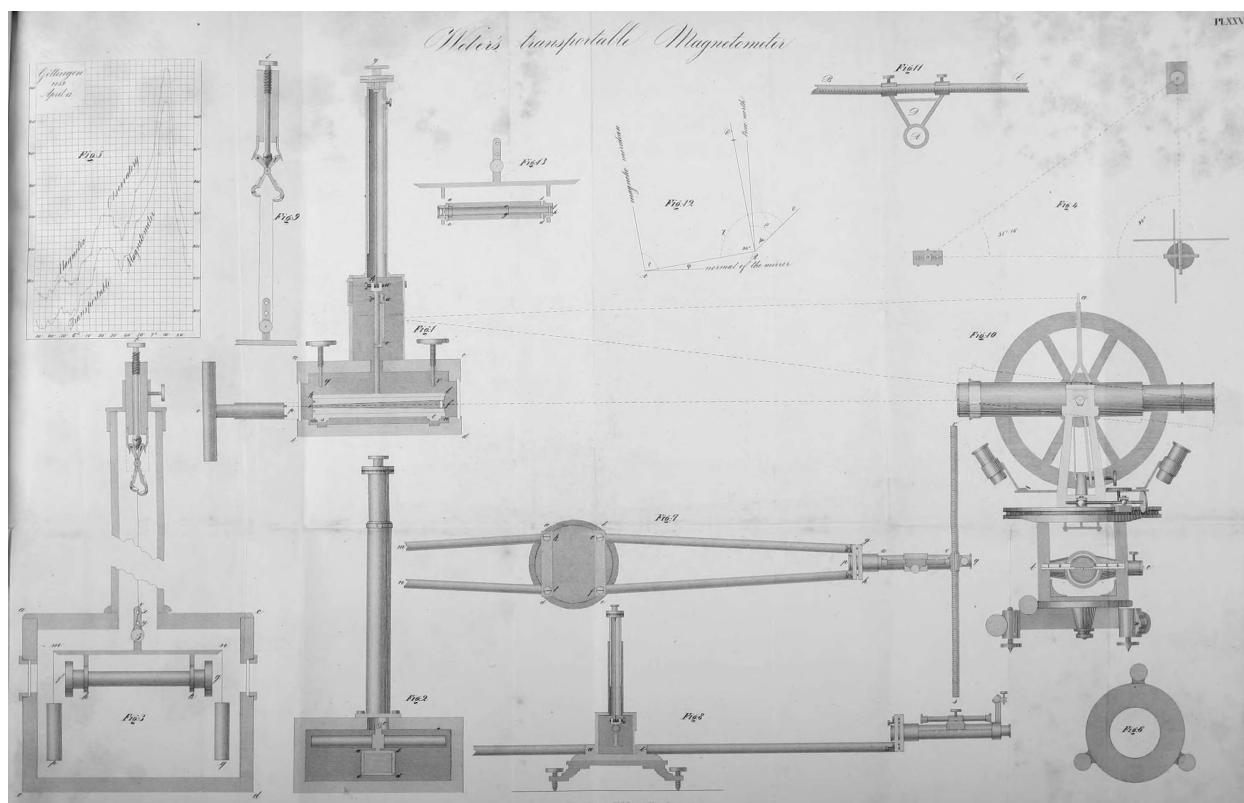
⁶⁵²[Nota de Wilhelm Weber:] A barra, tendo sido magnetizada de novo para as experiências de oscilação e deflexão, tinha um período de oscilação mais curto do que nas experiências anteriores sobre o momento de inércia.

⁶⁵³Ver a Seção 9.2.

⁶⁵⁴Em alemão: *Höhenkreis*, também chamado de *Vertikalkreis*. O “círculo vertical” ou “círculo de elevação” é um instrumento óptico usado para medir ângulos.

pois, além das observações magnéticas, também é necessário em tal expedição para outros fins.⁶⁵⁵

As melhorias (representadas nas Figuras 2, 6, 7 e 8) feitas no magnetômetro transportável desde que o texto anterior foi escrito, foram projetadas para facilitar o uso do instrumento ao ar livre, já que nas viagens vai ser raro encontrar um prédio conveniente livre de ferro para a realização das medições absolutas. Não é totalmente necessário que o conjunto das observações para esses propósitos sejam feitas ao ar livre; e devido à possibilidade de interrupção pelo clima, é desejável reduzir tanto quanto possível o número que requer essa exposição. Na construção melhorada prestei muita atenção e dei grande consideração a essa parte do assunto, e encontrei ser possível arranjar as observações de tal maneira que a maior parte possa ser feita em uma sala, incluindo aquelas que seriam mais desvantajosas se estivessem ao ar livre.⁶⁵⁶



A Figura 6 representa o suporte do tripé, sobre o qual devem ser colocados e nivelados o instrumento de medição, Figura 7, e o magnetômetro, Figura 2, como mostrado na Figura 8.⁶⁵⁷

O instrumento de medição, Figura 7, necessário para as experiências de deflexão, consiste

⁶⁵⁵Esse é o último parágrafo do artigo de Weber de 1839, [Web39a]. Ele não foi incluído na tradução em inglês desse artigo, [Web41d] e [Web66b]. O texto a seguir vem de comunicações manuscritas de Wilhelm Weber para Edward Sabine (1788-1883), aparecendo apenas nas traduções em inglês desse artigo, [Web41d], [Web66b] e [Web21n, págs. 166-182]. Ver ainda as Notas de rodapé 493 e 535 nas páginas 201 e 217, respectivamente.

⁶⁵⁶Uma gravura maior aparece na página 305.

⁶⁵⁷Essas Figuras aparecem na página 296 e nas páginas seguintes.

em uma placa de cobre ajustada ao tripé, e suportando os suportes da barra de deflexão; cada um dos suportes é formado de dois tubos convergentes conectados em suas extremidades, de lá procede um terceiro tubo equipado com uma graduação, sobre a qual é para ser colocada a barra de deflexão: esse tubo também forma o telescópio de leitura, e tem a escala de leitura ligada a ele.⁶⁵⁸

A Figura 8 representa o magnetômetro colocado sobre o instrumento de medida, o qual é apoiado sobre o tripé: a agulha é suspensa em uma caixa de cobre, que atua como um amortecedor no controle das vibrações. O espelho logo abaixo da agulha é direcionada para o Leste. Todo o lado Leste da caixa de cobre pode ser removido, para dar acesso ao parafuso no qual é presa a suspensão, e pelo qual pode ser corrigida a inclinação do espelho. No meio desse lado há uma abertura fechada por um pedaço plano de vidro, fazendo um pequeno ângulo com a vertical, para que o telescópio de leitura, que é direcionado ao espelho atrás do vidro, não veja uma imagem dupla da escala.

Para a *medição da intensidade absoluta* apenas as experiências de deflexão precisam ser feitas ao ar livre; as outras experiências podem ser feitas em uma sala caso seja mais conveniente; pois se for conhecido o magnetismo da agulha,⁶⁵⁹ que pode ser estimado em uma sala, a intensidade do magnetismo terrestre pode ser calculada a partir da intensidade do magnetismo da agulha e das experiências de deflexão feitas ao ar livre.⁶⁶⁰ Contudo, deve ser notado que a determinação do magnetismo da agulha em tais casos requer que seja realizada uma medição completa da intensidade, incluindo tanto as experiências de deflexão quanto aquelas de oscilação, com e sem os pesos. O magnetismo da agulha também deve ser determinado logo antes ou logo após as experiências de deflexão ao ar livre, já que ele pode sofrer alteração: e a temperatura na sala e ao ar livre deve ser a mesma tanto quanto possível.

As experiências de deflexão ao ar livre necessitam apenas uma fundação sólida, sobre a qual o tripé possa ser colocado e nivelado; o instrumento de medida, apoiado sobre ele, suporta a barra de deflexão, o telescópio e a escala, cada um deles em sua posição relativamente aos outros; e todo o sistema pode ser girado sobre o tripé sem deslocamento mútuo. A caixa de cobre do magnetômetro se ajusta na depressão *ab* da Figura 8, por meio da qual sua posição é fixada em relação a todas as outras partes. Todo o instrumento é então girado sobre o tripé até que o meio da escala seja visto no telescópio de leitura, estando então pronto para as experiências de deflexão.

O vernier⁶⁶¹ da barra de deflexão sendo colocado no ponto nulo da graduação do instrumento de medida, é observada a deflexão da agulha. A barra de deflexão é então invertida, e a observação repetida. A barra é então removida para a extremidade do instrumento de medida, e o vernier ajustado para 1000 mm da escala graduada, quando a posição desviada da agulha é novamente observada antes e após a inversão da barra. Vamos chamar as quatro deflexões observadas de m , m' , n , n' , — a intensidade absoluta do magnetismo da agulha, observada anteriormente em uma sala, será designada por M , — e o valor em arco de uma divisão da escala, também determinado em uma sala (sendo levada em consideração a torção), será chamado de α , — nesse caso a intensidade horizontal absoluta do magnetismo

⁶⁵⁸Um telescópio de leitura é usado para ler uma escala ou régua colocada à distância ou refletida em um espelho, ver a Nota de rodapé 351 na página 142.

⁶⁵⁹Ou seja, o momento magnético da agulha imantada.

⁶⁶⁰[Nota de Wilhelm Weber:] As experiências de oscilação podem ser feitas ao ar livre ao invés das experiências de deflexão; mas nesse caso o instrumento proporcionaria menos certeza e menos conveniência.

⁶⁶¹Ver a Nota de rodapé 585 na página 247.

terrestre será

$$I = \frac{2}{500^3} \cdot \frac{M}{\tan v} ,$$

onde

$$v = \frac{1}{2} \arctan \frac{1}{2} (m - m' + n - n') \alpha .$$

Essa fórmula simples pode ser empregada, já que as pequenas dimensões da agulha e da barra, em relação à distância entre elas, torna desprezível o próximo termo da série (que possui a quinta potência da distância no denominador).

A Figura 10 representa o teodolito utilizado ao observar a declinação e suas variações;⁶⁶² ele vem com um telescópio de verificação que possui uma pequena escala na extremidade: uma escala maior é colocada acima do teodolito, perpendicular ao eixo óptico do telescópio principal.

A observação da declinação absoluta pode ser dividida naquelas partes que precisam ser feitas ao ar livre, e naquelas que podem ser feitas em uma sala. A Figura 11 representa em *A* a seção reta do tubo do telescópio magnetômetro, e em *BC* a escala; entre *A* e *BC* há um espaço transparente; o teodolito tem de ser colocado de tal forma que o observador possa olhar com o telescópio de verificação através do espaço *D* em direção ao espelho da agulha do magnetômetro, e perceber a imagem da escala ligada àquele telescópio; inicialmente ele precisa observar a posição da agulha por essa escala, e a partir daí determinar o ângulo ϕ (Figura 12), que o eixo óptico do telescópio de verificação faz com a normal ao espelho do magnetômetro; ele deve, então, dividir ao meio objetos de azimuth conhecido com o telescópio principal do teodolito e, a partir daí, encontrar o ângulo ψ , que corresponde, no ramo dividido, à direção do telescópio principal em relação ao Norte.⁶⁶³

Essas são todas as observações que precisam ser feitas ao ar livre para determinar a declinação. O ângulo χ na Figura 12 que corresponde, na borda graduada, à posição paralela dos eixos ópticos dos dois telescópios do teodolito, pode ser estimado em uma sala; assim como também pode ser estimado o ângulo ρ que o meridiano magnético faz com a normal ao espelho que pertence à agulha. Portanto obtemos:

$(\chi - \psi)$ o ângulo que o eixo óptico do telescópio de verificação faz com o meridiano verdadeiro.⁶⁶⁴

$(\chi - \psi) - \phi$, o ângulo que a normal ao espelho da agulha faz com o meridiano verdadeiro.

$\rho - \{(\chi - \psi) - \phi\}$ o ângulo que o meridiano magnético faz com o meridiano verdadeiro.

O ângulo χ é encontrado ao colocar um espelho plano antes do telescópio de verificação, e vendo no telescópio a imagem refletida de uma linha vertical suspensa sobre o centro da objetiva; uma linha vertical também é suspensa sobre o centro do telescópio principal, e o telescópio ajustado para sua imagem refletida; a leitura no círculo fornece o ângulo χ , supondo que o erro de colimação do telescópio principal permaneça inalterado quando a ocular é ajustada para objetos distantes; caso contrário, a alteração deve ser procurada invertendo o telescópio e aplicada como uma correção à leitura no círculo.

O ângulo ρ é determinado ao direcionar o telescópio principal do teodolito de *B* (Figura 12) para *C*, uma segunda agulha suspensa na caixa de madeira, como representada na Figura

⁶⁶²Essa Figura 10 aparece na página 302.

⁶⁶³Essas Figuras aparecem na página 302 e nas páginas seguintes.

⁶⁶⁴Ver a Nota de rodapé 644.

3; o telescópio de verificação é direcionado para a primeira agulha A , tanto na caixa de cobre quanto ao ar livre.

A agulha C vem com um colimador ou com um espelho, e pode ser invertida. A direção de seu eixo magnético deve ser encontrada a seguir, isto é, o ângulo μ , ao qual o teodolito deve ser ajustado, para que o eixo óptico do telescópio principal possa ser paralelo com a direção do eixo magnético da agulha C , de onde é obtido o ângulo $\rho (= \pi - (\chi - \phi) + \mu)$, caso as duas agulhas A e C estejam suficientemente separadas para não exercer qualquer influência mútua perceptível, de tal forma que seus eixos magnéticos possam ser considerados paralelos. Porém, caso esse não seja o caso, é fácil determinar o ângulo ν formado pelos eixos magnéticos das duas agulhas,^{665,666} e então adicioná-lo como uma correção ao valor de ρ encontrado anteriormente, isto é

$$\rho = \pi - (\chi - \phi) + \mu + \nu .$$

A suspensão da agulha na caixa de madeira é feita de tal modo que ela possa ser usada como um magnetômetro unifilar ou bifilar. Esse instrumento é representado na Figura 9.⁶⁶⁷ As variações da declinação e da intensidade horizontal podem assim ser observadas ao mesmo tempo; a declinação com o magnetômetro na caixa de cobre, e a intensidade horizontal com o magnetômetro na caixa de madeira. Ao preparar as últimas observações, o telescópio do teodolito deve ser direcionado perpendicularmente ao meridiano magnético, e o magnetômetro na caixa de madeira é para ser colocado na mesma direção. O período de oscilação t da agulha, com a suspensão unifilar, tem de ser determinado, caso já não seja conhecido, o que em geral será o caso, a partir de experiências de oscilação pertencendo à medição da intensidade absoluta. A suspensão unifilar tem de então ser modificada para a suspensão bifilar sem alterar a direção do eixo magnético, e o período de oscilação tem de ser observado de novo, aumentando a distância entre os fios de suspensão até que t' seja aproximadamente $= 0,6871t$. O círculo de torção precisa então ser girado até que o centro da escala apareça no campo de visão do telescópio, e o período de oscilação t'' observado. O magnetômetro estará então na orientação inversa apropriada para observar as variações de intensidade, e o valor das divisões da escala pode ser facilmente calculado a partir dos períodos de oscilação t, t', t'' ; a saber, se σ denotar o valor em arco de uma divisão da escala em partes do raio, o valor de uma divisão da escala, em partes da intensidade horizontal total, será

$$\frac{t^2}{t''^2} \cdot \sigma = \sqrt{\left(1 - 2\frac{t'^2}{t^2}\right)} \cdot \frac{t^2}{t'^2} \cdot \sigma .$$

⁶⁶⁵[Nota de Wilhelm Weber:] A partir das proposições contidas nos *Resultate* de 1837, página 22 e seguintes, vem que se $ABC = 90^\circ$, $ACB = \alpha$, $AC = \nu$, e se m e m' denotam respectivamente o magnetismo das agulhas A e C ,

$$\nu = \frac{3}{2} \sin 2\alpha \cdot \frac{m - m'}{r^3 T} .$$

O valor de m e m' pode ser determinado pelas deflexões δ e δ' de uma agulha de bússola colocada sucessivamente a Leste e Oeste na distância d , a saber,

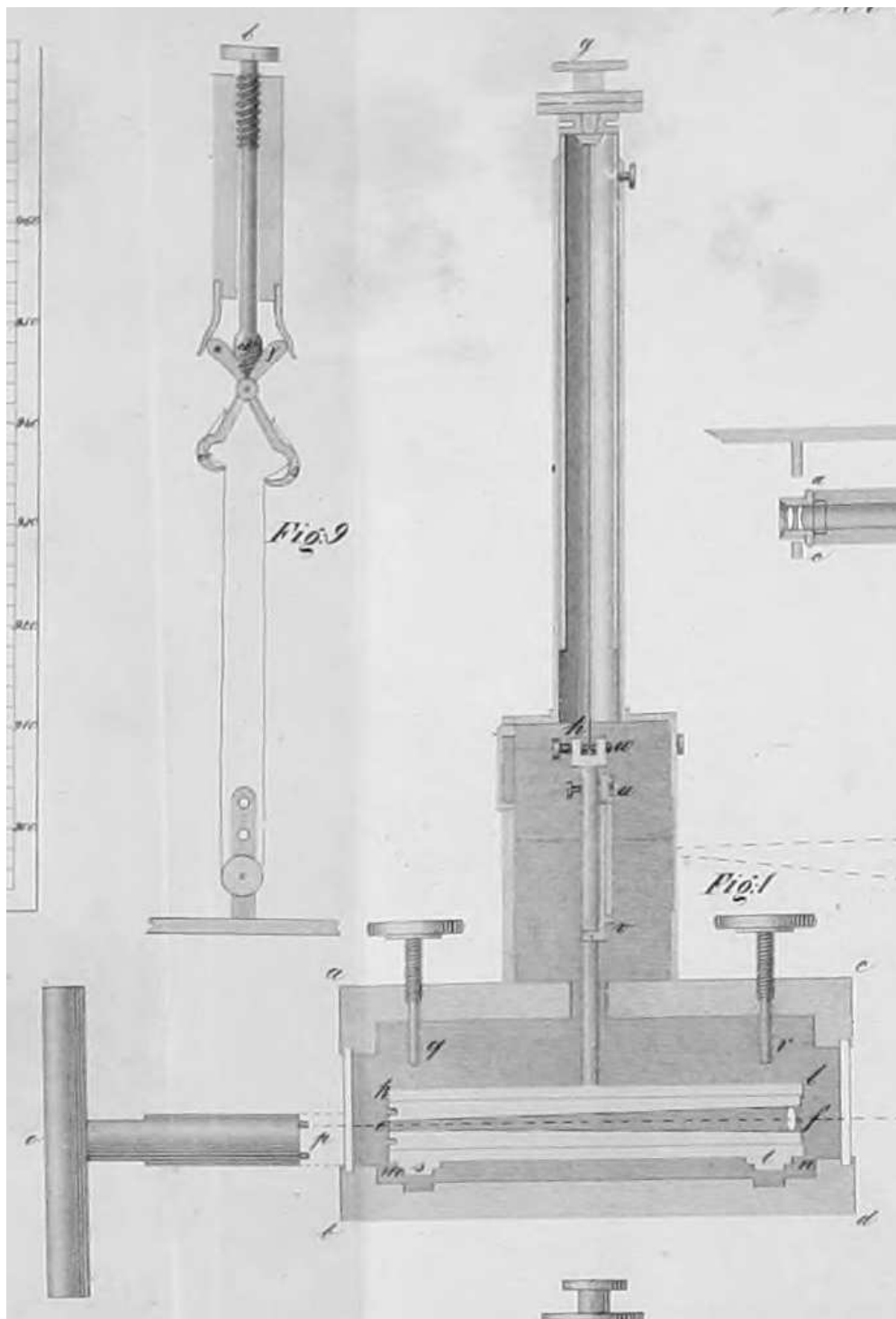
$$\frac{m}{T} = \frac{\delta d^3}{2} , \quad \frac{m'}{T} = \frac{\delta' d^3}{2} .$$

⁶⁶⁶[Web38a, pág. 22 dos *Resultate* de 1837 e pág. 45 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [Web41c, pág. 270], [Web66a] e [Web21m]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 18.

⁶⁶⁷Essa Figura 9 aparece na página 301.

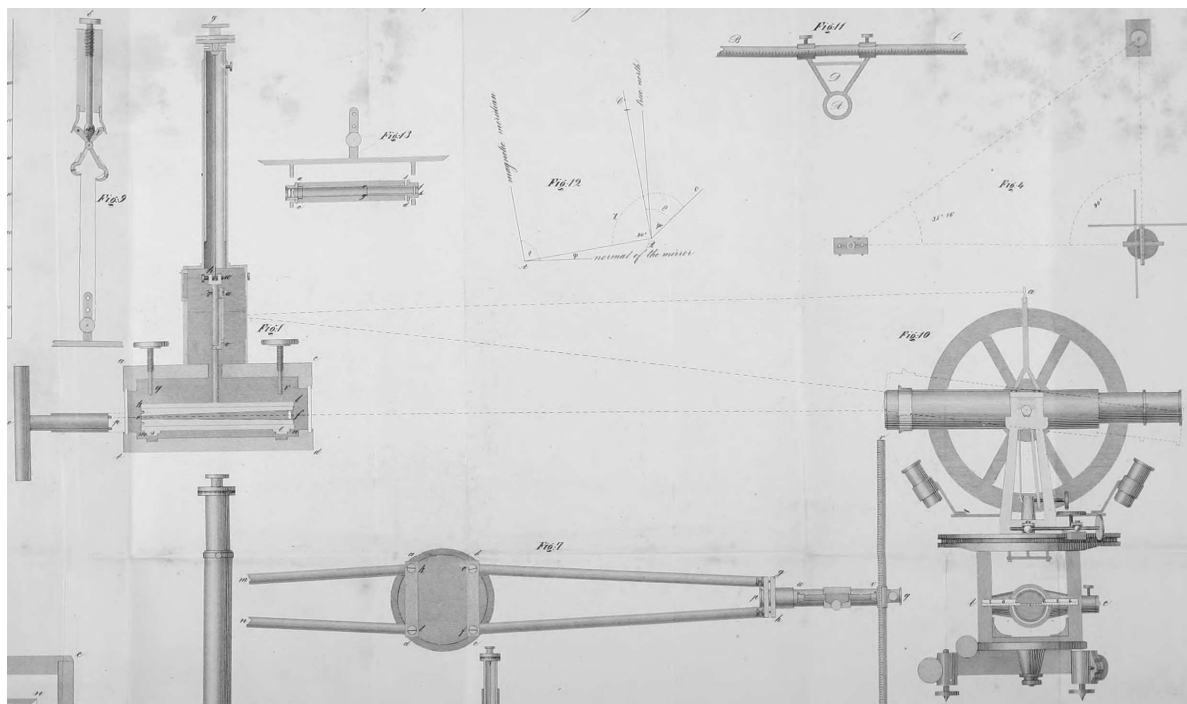
Explicação das Figuras

Figura 1. *a, b, c, d* é uma seção longitudinal vertical da caixa de cobre do magnetômetro, com a agulha *e, f* suspensa por uma linha de seda *g, h*.



A agulha é vista como sendo perfurada ao longo de todo o seu comprimento, e tem na extremidade *f* uma lente; ela está dentro de um tubo de cobre *k, l, m, n*, e pode ser girada

por meio de uma chave o , p , que é acessada por uma abertura na caixa de cobre. Ao fazer isso o tubo de cobre é segurado por dois parafusos q , r , e duas projeções s , t . O espelho u , v é visto acima da caixa de cobre, próximo ao eixo de rotação da agulha. Uma linha pontilhada indica como o telescópio do teodolito, Figura 10, está direcionado, tanto para a agulha e para a lente em sua extremidade f , quanto também para o espelho u , v .



Também é visto como a inclinação do espelho pode ser ajustada pelo parafuso w , de tal forma que a escala colocada acima do telescópio em a , Figura 10, possa aparecer no campo de visão. Essa Figura tem a metade do tamanho do próprio instrumento.

A Figura 2 representa um magnetômetro, que difere daquele que acabou de ser descrito, ao não ser adaptado para medições *completas* da declinação. O colimador é omitido, e a agulha não pode ser invertida. O espelho a , b , c , d é fechado em uma caixa de cobre, e é paralelo ao plano do meridiano magnético; a inclinação do espelho é regulada pelo parafuso em e ; a caixa de cobre forma um amortecedor contínuo ao redor da agulha, exceto na abertura para o fio de suspensão; o espelho é observado através de uma placa de vidro colocada em um dos lados da caixa de cobre. Essa Figura também tem a metade do tamanho [do instrumento real].

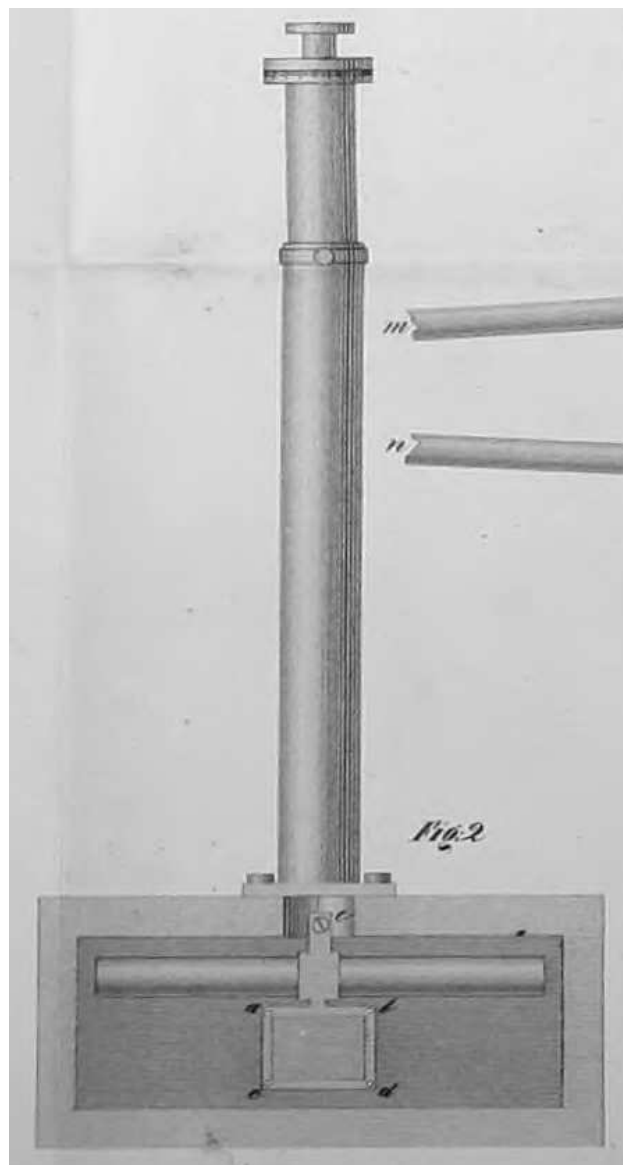
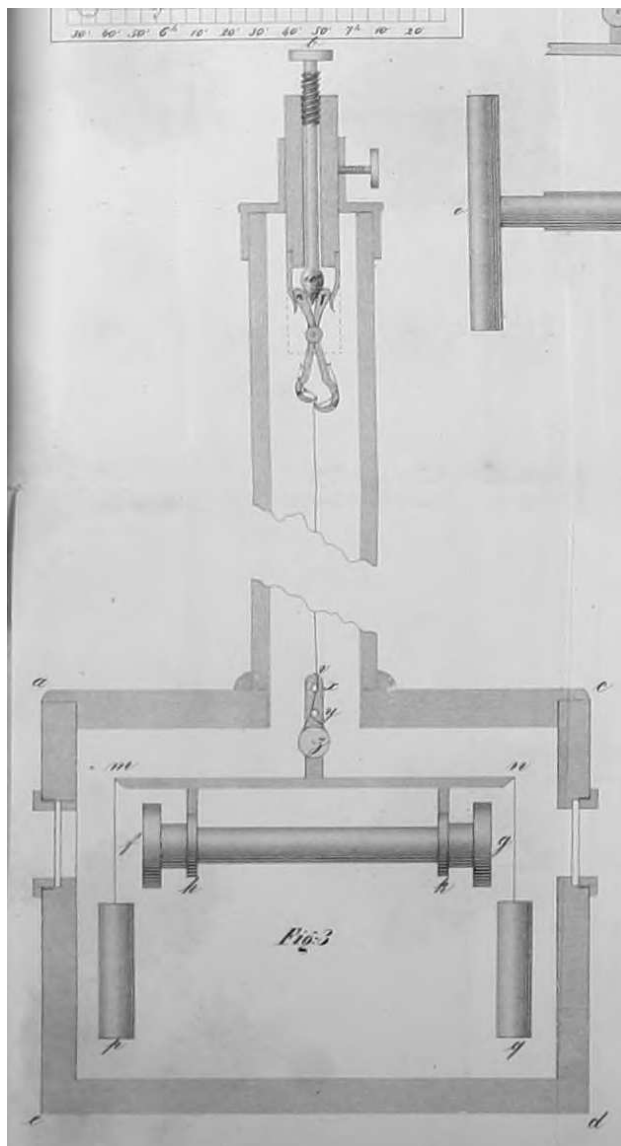


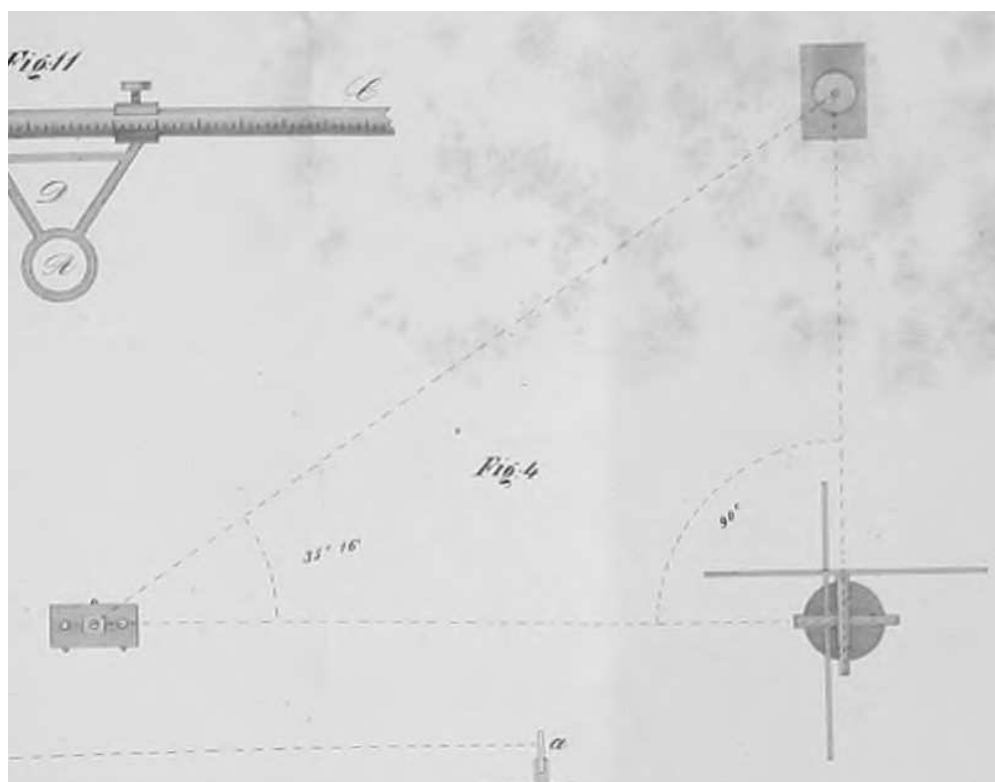
Figura 3. *a, b, c, d, e* representa a caixa de madeira, na qual qualquer um dos instrumentos mostrados nas Figuras 1 e 2 são embalados para viagem.



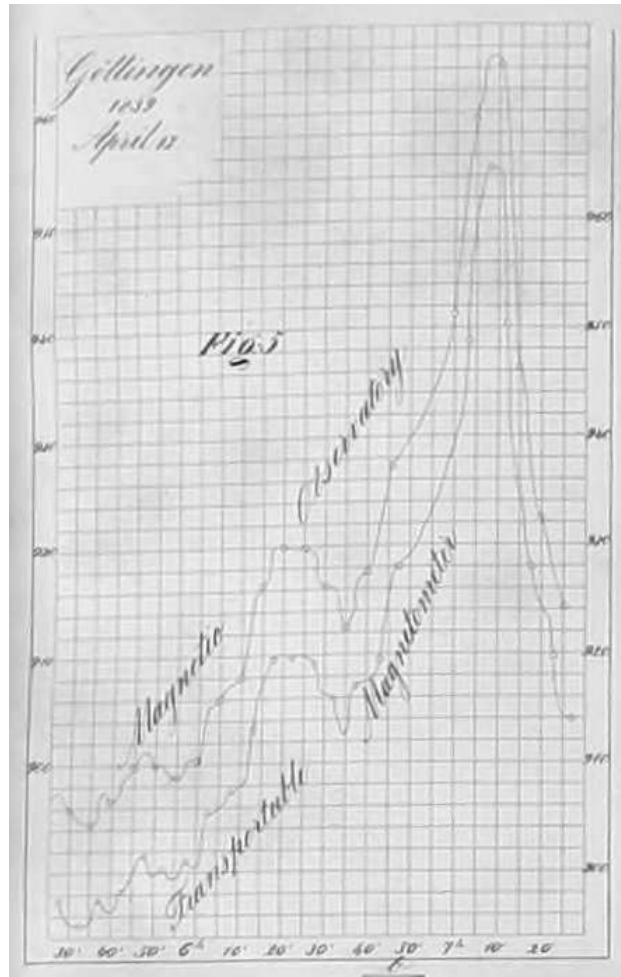
A tampa, com o tubo *a, b, c* que é preso a ela, é removida, o instrumento colocado dentro dela, e a caixa fechada novamente. Quando são feitas observações, essa caixa serve para suspender uma segunda agulha, sendo seu período de oscilação necessário para a medição da intensidade absoluta; essa segunda agulha *f, g* tem espelhos nas duas extremidades, sendo que um deles serve para observar a escala. A agulha fica apoiada sobre dois suportes *h, k*, ligados a uma pequena barra de medição *m, n*, sobre a qual passa uma linha carregando os pesos *p, q*, que servem para aumentar o momento de inércia da agulha oscilante. A agulha pode ser girada nos suportes *h, k*, e pode ser invertida; tornando-a disponível, nas medições absolutas de declinação, como uma agulha auxiliar, quando é usado o instrumento representado na Figura 2, sendo que sua agulha não é reversível. Para esse propósito pode ser colocado em *h, k*, uma agulha com um colimador, Figura 13, ao invés de uma agulha com um espelho. Ela consiste de um tubo de aço magnético *a, b, c, d*, que possui em sua extremidade *a, c*, uma objetiva acromática; e em sua outra extremidade um tubo deslizante de latão *e, f, g, h*, equipado com um micrômetro de vidro no foco da objetiva. Também será visto pela Figura 3 que essa agulha é suspensa por duas linhas, sendo que seus pontos superiores de fixação são *r* e *s*. As linhas são conduzidas sobre um rolo *z* para que fiquem igualmente tensionadas, sendo unidas em uma única linha de *u* para *v*, formando uma suspensão unifilar,

que pode ser convertida em uma suspensão bifilar ao abrir o instrumento α , β , γ , δ , o que é feito ao pressionar para baixo o botão w pelo parafuso t , e soltando as linhas dos alfinetes x , y , como representado na Figura 9. A Figura 3 também possui a metade do tamanho [do instrumento real].

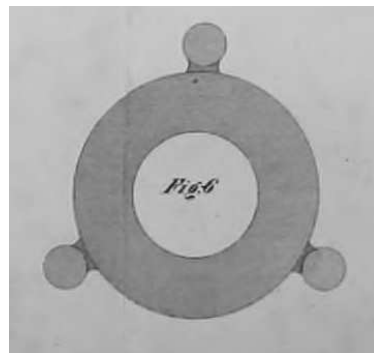
Figura 4. A é o teodolito com dois telescópios e duas escalas; um telescópio e uma escala servem para observar o magnetômetro unifilar B , e o outro telescópio e escala servem para observar o magnetômetro bifilar C . A Figura fornece os ângulos que os instrumentos precisam formar entre si.



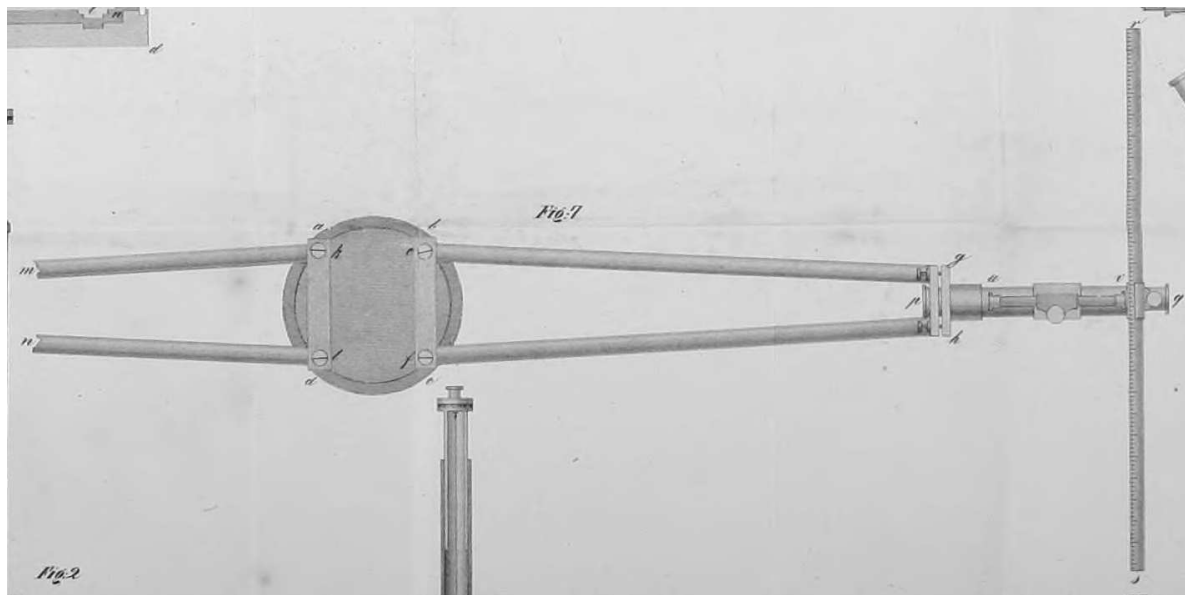
A Figura 5 é uma representação gráfica das variações da declinação observadas em 13 de abril de 1839 em Göttingen simultaneamente no Observatório Magnético e com o magnetômetro transportável.



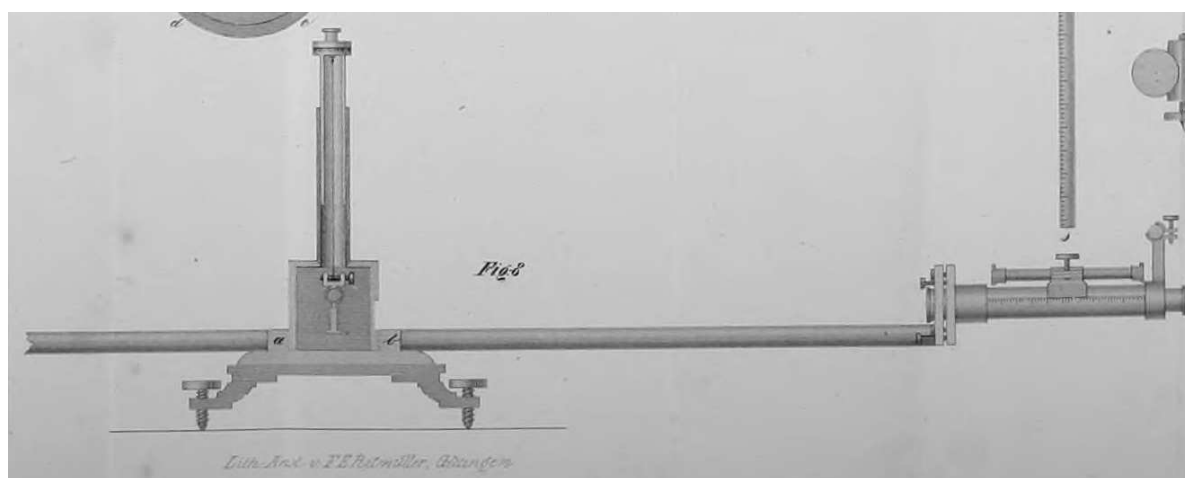
A Figura 6 é o tripé sobre o qual é colocado e nivelado o magnetômetro, Figura 2.



A Figura 7 é o instrumento necessário para as experiências de deflexão. *a, b, c, d* é um disco de cobre encaixado sobre o tripé, Figura 6; *e, f, g, h, e k, l, m, n*, são braços aparafusados ao disco de cobre em *e, f, e k, l*; um braço carrega o telescópio *p, q*, ao qual é fixada a escala *r, s*, e sobre o qual é para ser colocada a barra de deflexão *u, v*; o outro braço carrega um tubo sobre o qual também é colocada a barra de deflexão, mas que não pôde ser representada convenientemente na Figura. Entre *e, f, e k, l* é colocado o magnetômetro (Figura 2).



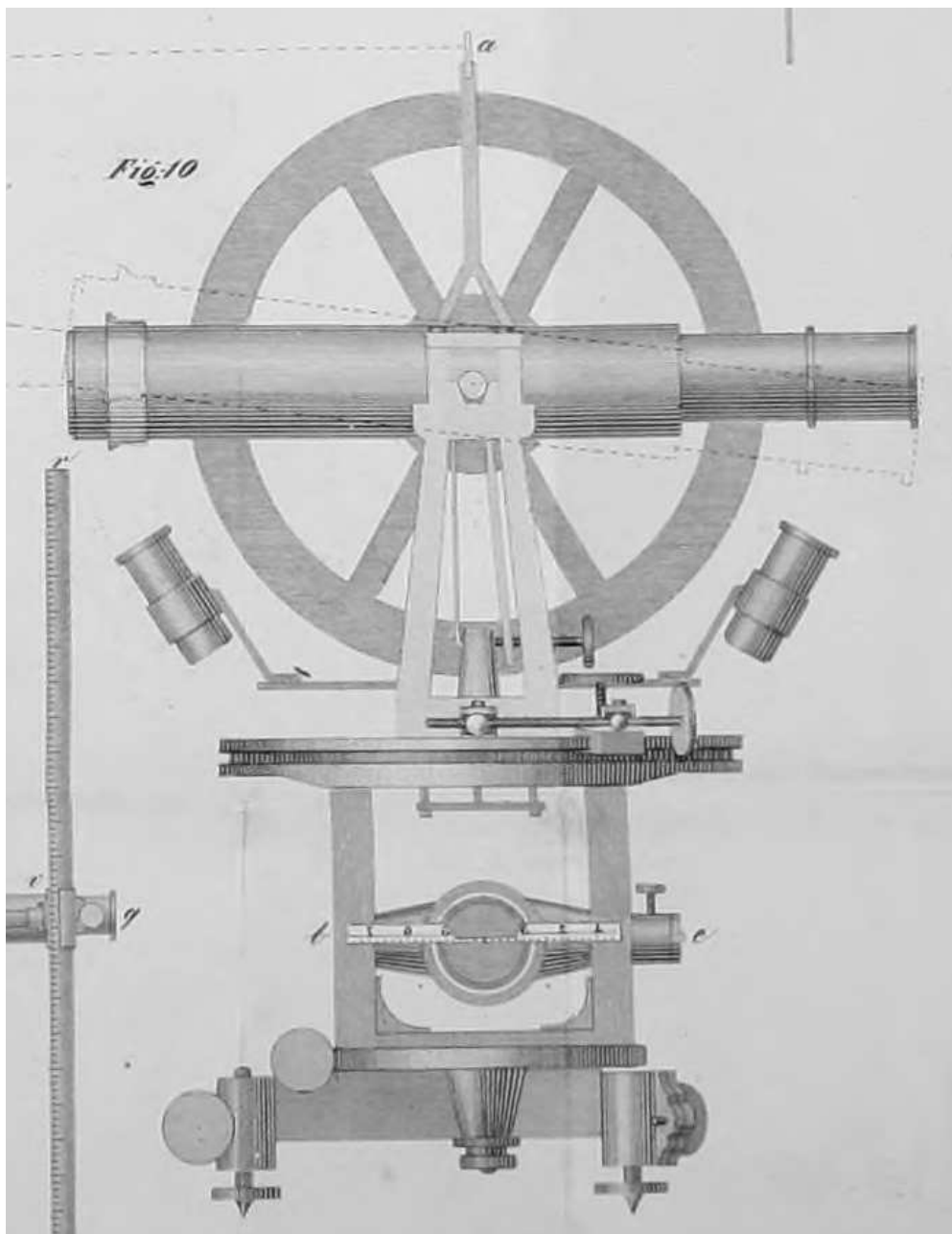
A Figura 8 é uma visão lateral menor do magnetômetro representado na Figura 2, em sua posição relativa apropriada em relação ao instrumento de medida, Figura 7, e apoiado sobre o tripé, Figura 6. Nessa visão a agulha é vista apenas por sua seção reta circular, e é mostrada a placa de vidro, na lateral da caixa que permite com que a imagem da escala, refletida do espelho, seja observada com o telescópio.



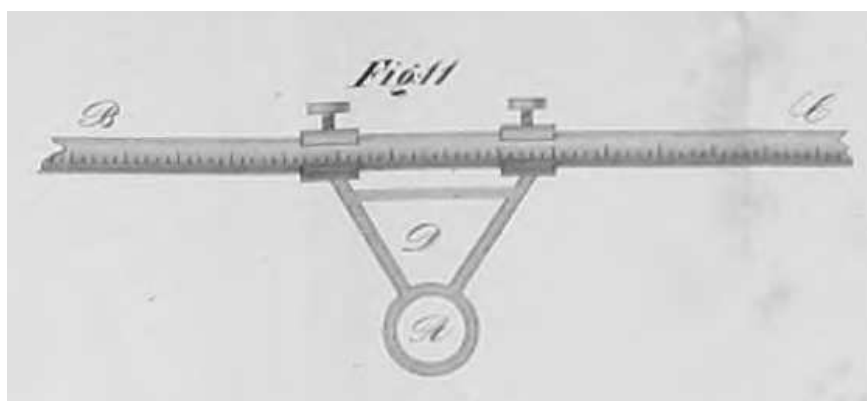
A Figura 9 é explicada na descrição da Figura 3.

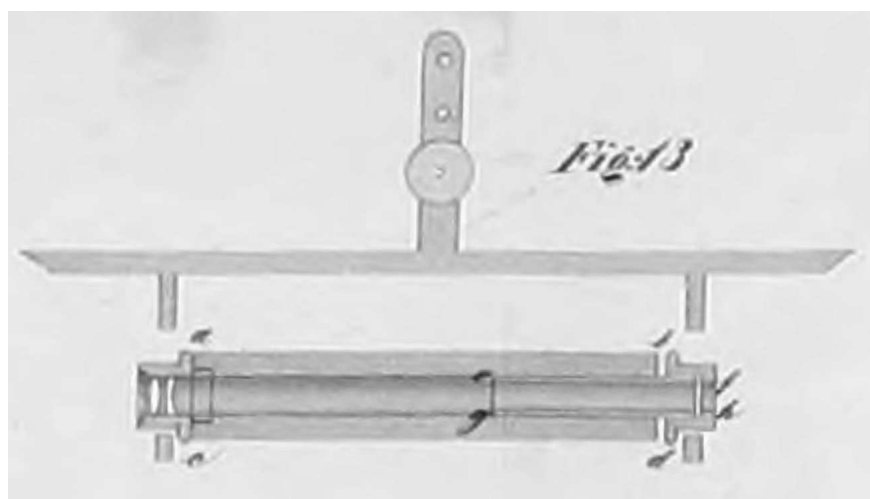
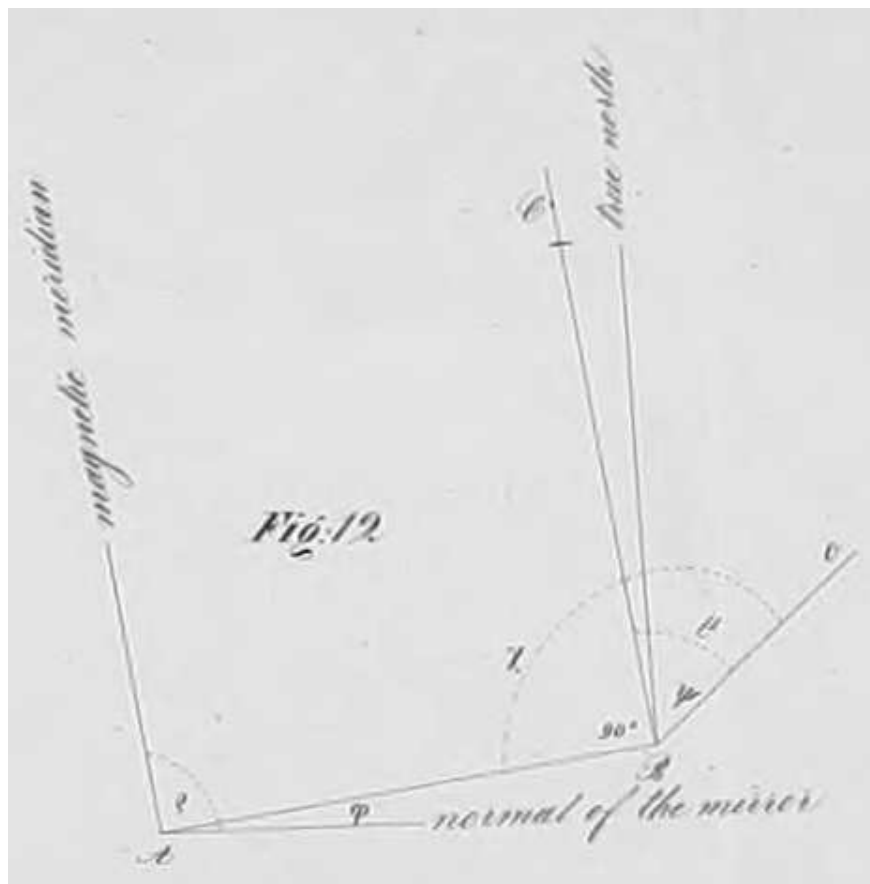


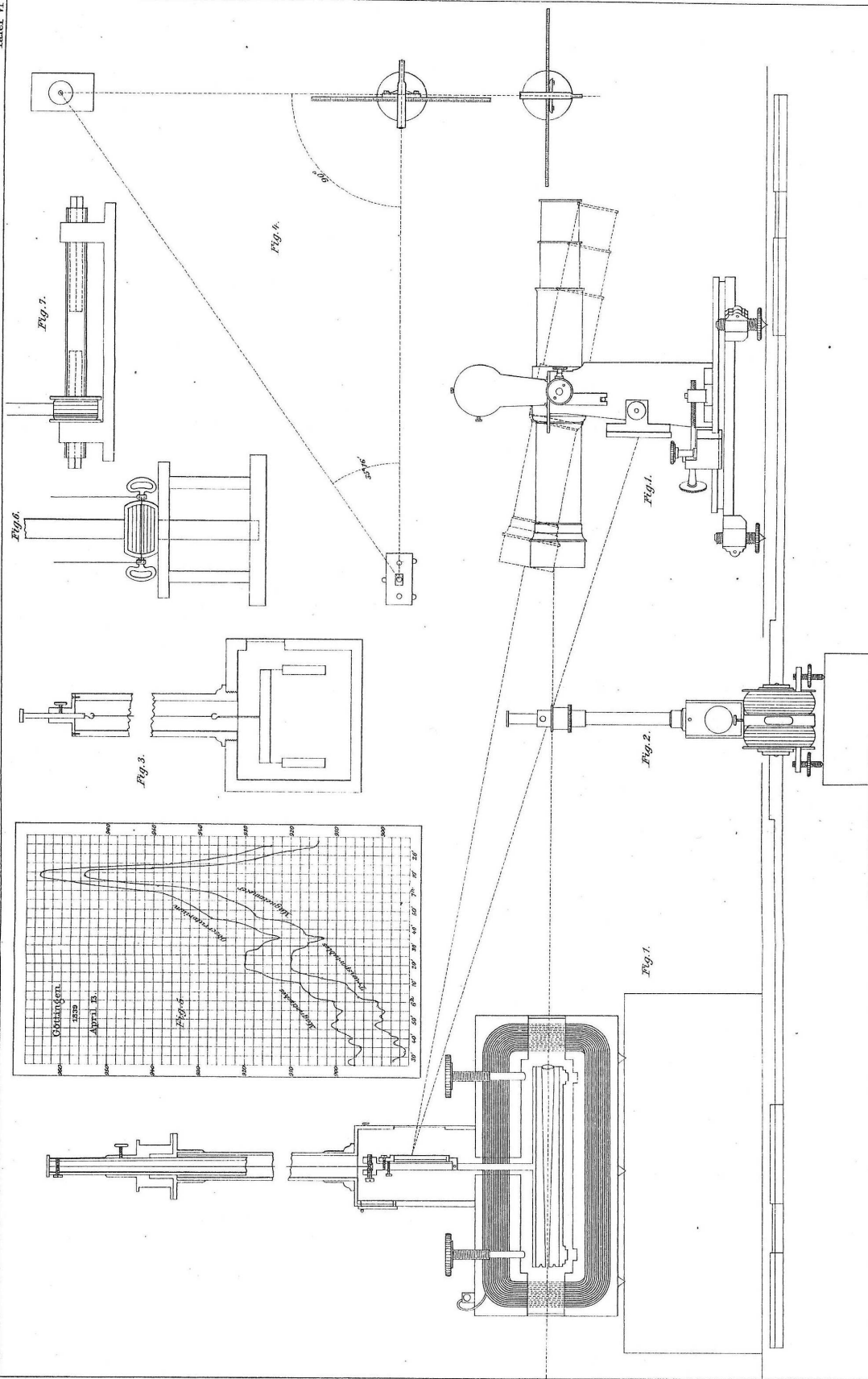
A Figura 10 representa o teodolito com o telescópio de verificação; são vistas duas escalas, uma das quais, *a*, é colocada de tal forma que seu centro corresponda à prolongação do eixo vertical de rotação do teodolito; a outra escala, *b*, *c*, é fixada em frente à objetiva do telescópio de verificação. Ela é bem estreita, para interceptar pouca luz.



As Figuras 11, 12 e 13 são explicadas no texto.







Manuskript 645 der Original-Zeichnungen in den Kernknoten vom Jahre 1879.

Capítulo 20

[Gauss, 1840] Teoremas Gerais Relativos às Forças de Atração e Repulsão que Atuam na Razão Inversa do Quadrado da Distância

C. F. Gauss⁶⁶⁸

A natureza nos apresenta muitos fenômenos que explicamos com a suposição de forças exercidas entre si pelas menores partículas das substâncias,⁶⁶⁹ atuando na proporção inversa do quadrado da distância entre elas.

Entre essas forças, a primeira a ser observada é aquela da gravitação universal, em virtude da qual cada molécula ponderável μ exerce sobre uma outra molécula μ' desse tipo uma força motriz que é expressa por $\mu\mu'/r^2$ quando a distância [entre elas] é r , que tende a produzir a aproximação das moléculas na direção da linha reta que as conecta.⁶⁷⁰

Quando supomos a existência de dois fluidos magnéticos para explicar os fenômenos magnéticos, um dos quais sendo considerado uma grandeza positiva e o outro uma grandeza negativa, então dois elementos magnéticos μ e μ' também vão exercer entre si uma força motriz $\mu\mu'/r^2$ atuando ao longo da linha reta que une os dois elementos, força essa repulsiva se μ e μ' são fluidos do mesmo tipo, ou atrativa se eles são de tipos diferentes.⁶⁷¹

⁶⁶⁸Apresento aqui uma tradução da Introdução do artigo de 1840 de C. F. Gauss, “Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im Verkehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstoßungs-Kräfte”, [Gau40] com tradução para o inglês em [Gau43]. Todas as Notas são de minha autoria.

⁶⁶⁹Em alemão: *die von den kleinsten Theilen der Substanzen*. Isto é, pelas menores partes das substâncias, ou pelas menores partículas das substâncias.

⁶⁷⁰Essa lei é devida a Isaac Newton (1642-1727) em 1687. Ver a Nota de rodapé 28 na página 22. Ver ainda a Nota de rodapé 394 na página 157 para uma discussão de como Gauss e Weber usavam as palavras “molécula” e “molecular”, e a Nota de rodapé 104 na página 40 para uma discussão sobre a palavra “ponderável”. Ou seja, cada “molécula ponderável μ ” (em alemão: *jedes ponderable Molecül μ*) se refere aqui a uma partícula de massa μ .

⁶⁷¹Essa lei é devida a Charles Augustin de Coulomb (1736-1806). Ver a Nota de rodapé 107 na página 41. Cada elemento de fluido magnético μ é uma suposta partícula que tem um valor resultante μ de fluido magnético. Ela é, portanto, o análogo moderno de um monopolo magnético, ver a Nota de rodapé 390 na página 156.

O mesmo ocorre com a ação mútua entre as partículas dos fluidos elétricos.⁶⁷²

O elemento linear ds de uma corrente galvânica exerce de maneira semelhante uma força motriz sobre um elemento de fluido magnético μ (se admitirmos esse último), que é inversamente proporcional ao quadrado da distância r ; contudo, é agora introduzida uma circunstância completamente diferente de que a força não está na linha reta de conexão, mas é perpendicular ao plano definido por μ e a direção de ds , e que, além disso, a intensidade da força não depende apenas da distância, mas também do ângulo que r faz com a direção de ds . Se esse ângulo for denominado θ , então $\sin \theta \cdot \mu ds / r^2$ é a medida da força motriz que ds exerce sobre μ , e que é tão grande quanto a força que μ exerce sobre ds ou sobre o portador ponderável desse elemento,⁶⁷³ cuja direção é opostamente paralela à primeira força.⁶⁷⁴

Se assumirmos com Ampère que os elementos ds e ds' de duas correntes galvânicas atuam atrativamente ou repulsivamente entre si ao longo da linha reta que os une, então os fenômenos exigem que consideremos essa força inversamente proporcional ao quadrado da distância, mas, ao mesmo tempo, exigem uma dependência um pouco mais complicada em relação à direção dos elementos de corrente.⁶⁷⁵

Vamos nos restringir nesse Tratado aos três primeiros casos, ou àquelas forças que são exercidas entre dois elementos ao longo da linha reta que os une, e que geralmente são inversamente proporcionais ao quadrado da distância, embora vários teoremas também sejam aplicáveis, com pequenas modificações, aos outros casos, cujo desenvolvimento detalhado deve ser reservado para outro trabalho.

[...]

⁶⁷²Essa lei também é devida a Coulomb.

⁶⁷³Isto é, sobre o condutor material que contém o elemento de corrente ds .

⁶⁷⁴Essa lei é devida a Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841). Ver [BS20] com tradução para o inglês em [BS65b] e para o português em [AC06]; [Bio21a]; [BS24] e [BS85] com traduções para o inglês em [Far26] e [BS65a]. Ver também os Capítulos 6, 16 e 17 de [AC11] e [AC15].

⁶⁷⁵Ver a Nota de rodapé 110 na página 41.

Capítulo 21

Introdução ao Primeiro Artigo de Weber sobre Indução Unipolar

A. K. T. Assis⁶⁷⁶

21.1 A Experiência de Faraday

Wilhelm Weber apresentou em 1839 um artigo sobre indução unipolar que foi publicado em 1840.⁶⁷⁷ Apresento aqui a tradução desse trabalho.

Michael Faraday (1791-1867) foi o primeiro cientista a realizar essa experiência em 1832.⁶⁷⁸ Ele colocou um disco de cobre sobre um ímã cilíndrico NS e conectou um galvanômetro G entre o centro e a periferia do disco utilizando contatos deslizantes. O ímã e o disco podiam girar em relação ao solo, enquanto que o galvanômetro e os fios de conexão sempre ficavam parados em relação à Terra. O disco de cobre e o ímã tinham os mesmos raios e estavam orientados ao longo do mesmo eixo de simetria, Figura 21.1.

Faraday observou a mesma corrente elétrica fluindo através do galvanômetro em duas situações, a saber, (a) quando apenas o disco girava em relação ao solo com uma certa velocidade angular ω , e (b) quando o disco e o ímã giravam juntos em relação ao solo com a mesma velocidade angular ω . A direção da corrente depende da direção de giro e também da orientação do ímã, ou seja, se o polo Norte está acima ou abaixo do polo Sul.

Em algumas experiências Faraday removeu o disco e considerou apenas um ímã cilíndrico, com um galvanômetro conectado por contatos deslizantes no centro da face superior do ímã e em um ponto ao longo da borda lateral do ímã. Quando girou o ímã condutor em relação ao solo, foi indicada uma corrente no galvanômetro.

Esse fenômeno ficou conhecido como indução unipolar, um nome cunhado por Weber no artigo que está sendo traduzido aqui. Outros nomes comuns para essa experiência são gerador unipolar, indução homopolar, gerador homopolar e gerador de Faraday.

⁶⁷⁶Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

⁶⁷⁷[Web40] com tradução para o inglês em [Web24d].

⁶⁷⁸[Far32a, parágrafos 217 até 230] com tradução para o português em [Far11] e tradução para o alemão em [Far32b] e [Far89].

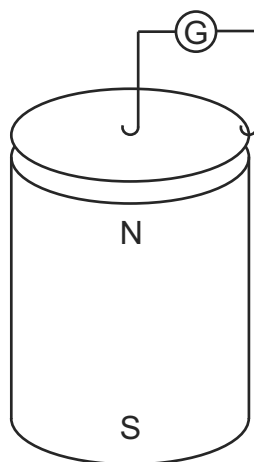


Figura 21.1: Experiência de indução unipolar.

21.2 Conhecimento de Weber sobre a Experiência de Faraday

Weber parece ter desenvolvido a ideia dessa experiência de forma totalmente independente do trabalho anterior de Faraday de 1832. Ele realizou a experiência e enviou seu trabalho para publicação sem estar ciente do texto de Faraday, como foi apontado por Wiederkehr:⁶⁷⁹

Ao escrever o artigo, Wilhelm Weber parece não ter tido conhecimento das experiências de Faraday sobre indução unipolar. O fato inicialmente estranho de Weber falar repentinamente de Faraday e de seus experimentos anteriores no final do seu tratado é explicado por uma carta de Weber para Gauss.

Wiederkehr citou então essa carta, classificada como número 15, datada de 6 de setembro de 1839:⁶⁸⁰

Vi Ettingshausen⁶⁸¹ em Leipzig quando estava viajando para Göttingen. Ele me chamou a atenção para o fato de que o fenômeno que eu havia considerado sob o título de indução unipolar também havia sido observado por Faraday. Encontrei a passagem facilmente e ainda pude me referir a ela, pois Reimer⁶⁸² estava disposto a reimprimir a última página desse ensaio...

21.3 A Experiência de Weber

Um dos instrumentos originais de Weber relacionado com a indução unipolar, seu indutor unipolar de 1840, ainda existe nas Coleções Científicas da Universidade de Göttingen na Alemanha.⁶⁸³ Ele aparece na Figura 21.2.

⁶⁷⁹[Wie60, págs. 41-42, Nota 6].

⁶⁸⁰[Wie60, págs. 41-42, Nota 6]. Ver também [Gau d].

⁶⁸¹Andreas von Ettingshausen (1796-1878), físico austríaco.

⁶⁸²Karl August Reimer era o proprietário da Weidmannsche Buchhandlung onde o trabalho de Weber foi publicado.

⁶⁸³https://sammlungen.uni-goettingen.de/sammlung/slg_1020/

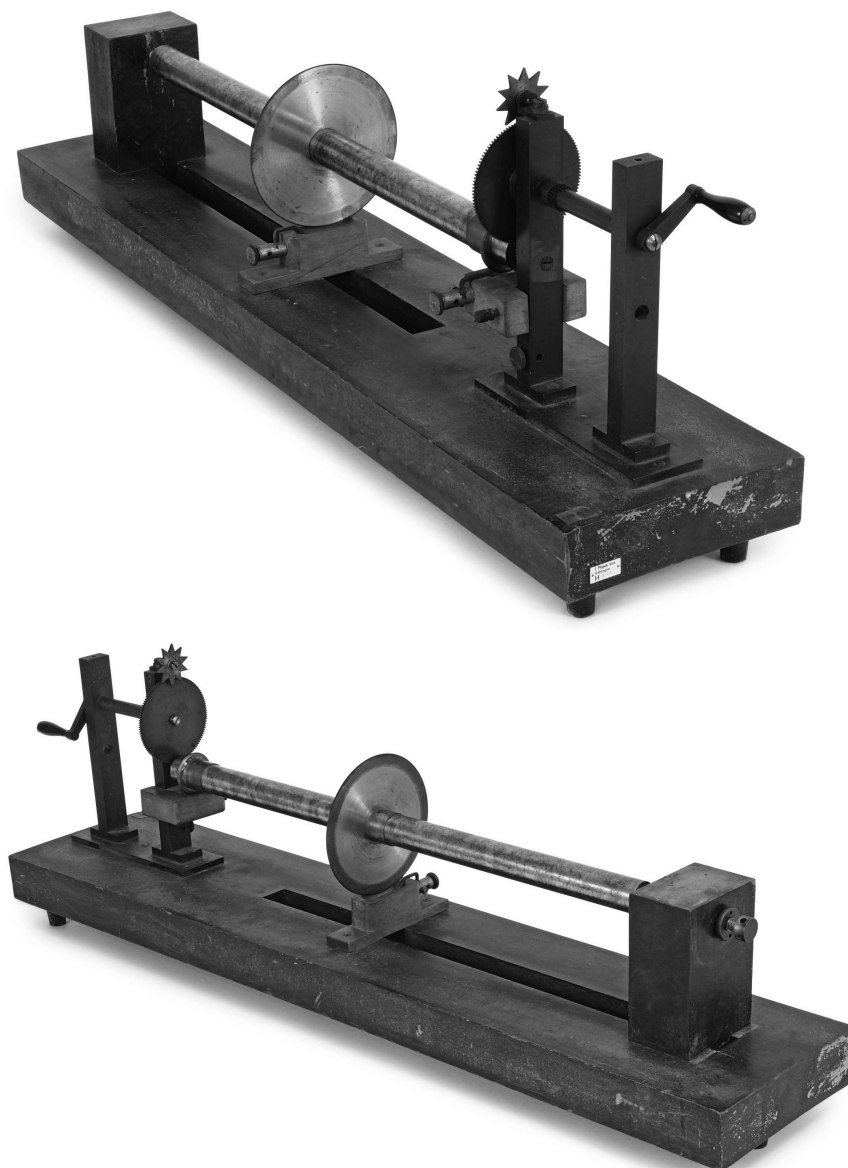


Figura 21.2: Instrumento original de Weber. Fonte: Physicalisches Cabinet, Georg-August-Universität Göttingen / CC BY-SA 4.0; Fotografia: Sauer Marketing, Gerhard e Maren Sauer.

A Figura 21.3 apresenta as principais componentes desse instrumento. Um disco de latão pode ser fixado em pontos diferentes ao longo do eixo de um cilindro de aço magnetizado NS . A porção inferior do disco toca um recipiente com mercúrio. Uma manivela permite a rotação do ímã ao redor de seu eixo NS horizontal em uma taxa conhecida. Um galvanômetro G está conectado através de fios condutores ao recipiente com mercúrio e ao centro de uma extremidade do ímã. Quando o disco e o ímã giram juntos em relação ao solo, enquanto o galvanômetro e os fios de condução permanecem em repouso, flui uma corrente através do galvanômetro. Um de seus cilindros magnetizados tinha 26,9 cm de comprimento com um diâmetro de 2,3 cm, enquanto que o outro cilindro tinha 50,2 cm de comprimento com um diâmetro de 2,05 cm. Essa experiência é análoga ao experimento de indução unipolar de Faraday quando o disco e o ímã giram juntos em relação ao solo. Ela também é equivalente ao experimento de Faraday no qual havia apenas um ímã que podia girar em relação ao solo.

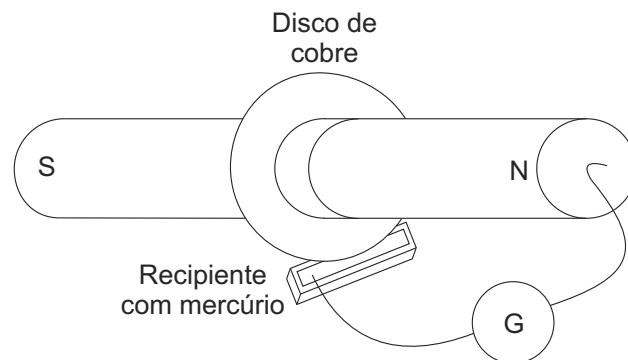


Figura 21.3: Representação do indutor unipolar de Weber.

21.4 Sobre a Existência dos Fluidos Magnéticos

Nesse artigo de 1839 Weber baseou sua explicação do fenômeno na existência dos fluidos magnéticos, a saber, os fluidos austral e boreal (também chamados de fluidos Norte e fluido Sul, respectivamente). Em anos posteriores ele vai mudar completamente de ponto de vista, rejeitando a existência de fluidos magnéticos. Essa mudança de ponto de vista foi devida às suas experiências sobre diamagnetismo publicadas em 1852 em sua Terceira Memória principal sobre *Medições Eletrodinâmicas*. Em particular, ele discutiu esse assunto importante na Seção 22, Sobre a Existência dos Fluidos Magnéticos, de seu artigo de 1852.⁶⁸⁴ André-Marie Ampère (1775-1826) já havia argumentado contra a existência de fluidos magnéticos em sua obra-prima de 1826.⁶⁸⁵ Em 1852 Weber concluiu que a hipótese da existência dos fluidos magnéticos no interior dos corpos havia sido refutada, enquanto que a hipótese da existência de correntes elétricas moleculares no interior dos corpos havia sido corroborada através das experiências sobre o diamagnetismo. Sua conclusão:⁶⁸⁶

Os fenômenos *diamagnéticos* descobertos por Faraday⁶⁸⁷ decidem entre essas duas teorias da mesma maneira que os fenômenos de interferência decidiram entre a teoria de emissão e a teoria ondulatória na óptica. Esse é o significado mais essencial e importante associado a essa descoberta. Graças à descoberta do diamagnetismo, a hipótese das *correntes elétricas moleculares no interior dos materiais* é confirmada e a hipótese dos *fluidos magnéticos no interior dos materiais* é refutada.

21.5 Sobre a Existência das Correntes Moleculares

Um outro aspecto que deve ser enfatizado aqui é que nesse artigo de 1839 Weber, baseado no fenômeno da indução unipolar, argumentou contra a existência das correntes moleculares de Ampère, ver a Subseção 22.4.1. Em anos posteriores ele mudou completamente seu ponto de vista a esse respeito. Por exemplo, em seu artigo de 1852 sobre diamagnetismo fez o seguinte comentário:⁶⁸⁸

⁶⁸⁴[Web52a, Seção 22] com tradução para o inglês em [Web21i, Seção 2.22].

⁶⁸⁵Ver a Seção 19 (Os Polos Magnéticos São Hipóteses Descartáveis) de [AC11] e [AC15].

⁶⁸⁶[Web52a] com tradução para o inglês em [Web21i, Seção 2.22, págs. 66-68]. Ver também [Web52d] com traduções para o inglês em [Web53], [Web66c] e [Web21o, Seção 3.1.6].

⁶⁸⁷[Far46b] e [Far46c] com tradução para o alemão em [Far46d] e [Far47].

⁶⁸⁸[Web52a, Nota de rodapé 1, pág. 536 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [Web21i, Nota de rodapé 59, pág. 67].

Tentei anteriormente, nos “Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1839”,⁶⁸⁹ justificar a conjectura de que os fenômenos denominados de “polaridade unipolar” poderiam levar a tal decisão.⁶⁹⁰ Contudo, esse não é o caso, pois pode ser dada uma explicação diferente para os fenômenos que são descritos lá, tão logo ocorra uma conexão entre os fluidos elétricos deslocando-se no interior do condutor e as partes ponderáveis do condutor, de tal forma que cada força atuando sobre os fluidos elétricos seja completamente ou quase completamente transferida para as partes ponderáveis, como expliquei mais detalhadamente nas “Medições Eletrodinâmicas” (*Abhandlungen bei Begründung der Königlichen Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften*, editado pela F. Jabl. Ges., Artigo 19, pág. 309).⁶⁹¹

Essas correntes moleculares propostas por Ampère tornaram-se a base de muitas pesquisas que Weber desenvolveu nos anos seguintes.

21.6 Indução Unipolar Explicada com a Eletrodinâmica de Weber

Normalmente quando os cientistas consideraram o fenômeno da indução unipolar nos últimos 200 anos eles concentraram sua atenção apenas nas rotações do disco e do ímã ao redor de seu eixo de simetria comum. Seja ω a velocidade angular no sentido horário do disco e/ou do ímã em relação ao solo quando vistos de cima para baixo, enquanto que $-\omega$ representa a rotação no sentido anti-horário. Quando giramos apenas o disco em relação ao solo, podemos medir uma corrente I fluindo através do galvanômetro conectado por contatos deslizantes entre o centro e a periferia do disco, como representado na Figura 21.1. Essa corrente é linearmente proporcional a ω e à intensidade do ímã. Esses fatos sugerem que a corrente induzida depende da interação entre o disco e o ímã, sendo originada pela rotação relativa entre eles.

Se deixarmos o disco parado no solo e girarmos o ímã no sentido oposto com uma velocidade angular $-\omega$, a maioria das pessoas supõe que a mesma corrente I será medida no galvanômetro. Contudo, o galvanômetro não mede qualquer corrente, como mostrado na Tabela 21.1

Velocidade Angular do Disco	Velocidade Angular do Ímã	Corrente no Galvanômetro
ω	0	I
0	$-\omega$	0

Tabela 21.1: Primeiro aparente paradoxo.

Há um aparente paradoxo aqui. O movimento relativo entre o disco e o ímã é o mesmo

⁶⁸⁹Ver [Web40, pág. 171 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [Web24d], e a Subseção 22.4.1 com a tradução da discussão de Weber.

⁶⁹⁰Em seu artigo de 1839 sobre indução unipolar Weber havia decidido em favor da existência dos fluidos magnéticos e contra a existência das correntes elétricas moleculares.

⁶⁹¹[Web46, Seção 19, pág. 134 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [Web21e, Seção 5.19, págs. 130-141].

nos dois casos. Contudo, o efeito medido indicado pela corrente no galvanômetro é completamente diferente para os dois casos.

Um outro aparente paradoxo se origina quando o disco e o ímã ficam parados em relação ao solo, ou quando ambos giram juntos em relação ao solo. O resultado dessa experiência é indicado na Tabela 21.2.

Velocidade Angular do Disco	Velocidade Angular do Ímã	Corrente no Galvanômetro
0	0	0
ω	ω	I

Tabela 21.2: Segundo aparente paradoxo.

Nesses dois casos não há movimento relativo entre o disco e o ímã. Contudo, a corrente medida no galvanômetro é muito diferente para esses dois casos.

A solução desses aparentes paradoxos é que na indução unipolar precisamos considerar não apenas o disco e o ímã, mas também o restante do circuito (composto pelo galvanômetro e pelos fios condutores conectados ao centro e periferia do disco). Estamos supondo aqui que o magnetismo do ímã tem uma intensidade muito maior do que o magnetismo da Terra, de tal forma que possamos desprezar a influência magnética da Terra em relação ao resultado dessa experiência.

Em 1994 foi feita uma previsão teórica, baseada na eletrodinâmica de Weber, sobre o que aconteceria nessa experiência se fosse possível girar o restante do circuito em relação ao solo.⁶⁹² Temos agora 8 casos a considerar, como indicado na Tabela 21.3.

	Velocidade Angular do Disco	Velocidade Angular do Ímã	Velocidade Angular do Restante do circuito	Corrente no Galvanômetro
1	0	0	0	0
2	ω	0	0	I
3	0	$-\omega$	0	0
4	0	0	$-\omega$	I
5	ω	0	ω	0
6	0	$-\omega$	$-\omega$	I
7	ω	ω	0	I
8	ω	ω	ω	0

Tabela 21.3: Previsão baseada na eletrodinâmica de Weber.

A partir da Tabela 21.3 podemos ver que o oposto de girar apenas o disco no sentido horário não é girar o ímã no sentido anti-horário, mas sim girar o ímã juntamente com o restante do circuito no sentido anti-horário, casos 2 e 6. Nesses dois casos a mesma corrente I deveria ser medida no galvanômetro.

Da mesma forma, a situação na qual todos os elementos então parados no solo não é equivalente a girar conjuntamente o disco e o ímã, mas sim girar conjuntamente o disco, o ímã e o restante do circuito, casos 1 e 8. Nenhuma corrente deve ser medida no galvanômetro nesses dois casos.

⁶⁹²[AT94].

Além disso, a situação quando giramos apenas o ímã não é equivalente a girar apenas o disco no sentido oposto, mas sim girar conjuntamente o disco e o restante do circuito na direção oposta, casos 3 e 5.

Finalmente, a situação na qual giramos conjuntamente o disco e o ímã, deve ser equivalente a girar apenas o restante do circuito na direção oposta, casos 7 e 4.

Essas previsões da eletrodinâmica de Weber foram confirmadas por uma experiência realizada em 2022:⁶⁹³ Baumgärtel, C., Maher, S. Resolving the paradox of unipolar induction: new experimental evidence on the influence of the test circuit. Sci Rep 12, 16791 (2022). Disponível em <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21155-x> e também em <https://www.nature.com/articles/s41598-022-21155-x>.

⁶⁹³[BM22] e [Bau22].

Capítulo 22

[Weber, 1840] Indução Unipolar

Wilhelm Weber^{694,695,696,697}

Existem duas fontes responsáveis pelos fenômenos magnéticos, a saber, o *magnetismo terrestre* e o *magnetismo em barra*,⁶⁹⁸ que se distinguem entre si, não porque haja uma diferença específica no próprio magnetismo, mas porque as condições sob as quais atuam são diferentes e as questões que necessitam ser respondidas são diferentes. Essa diferença é particularmente evidente no fato de que as conhecidas lei magnéticas gerais (que foram descobertas por meio de experimentos com ímãs em barra) são, muitas vezes, *diretamente* aplicáveis às ações do magnetismo em barra e fornecem uma explicação muito simples da maioria dos fenômenos decorrentes dele; elas são apenas *indiretamente* aplicáveis às ações do magnetismo terrestre, pois formam a base da teoria geral do magnetismo terrestre, que compreende os princípios para explicar todos os fenômenos geomagnéticos. A última teoria foi desenvolvida *pela primeira vez* pelo Senhor Conselheiro Gauss⁶⁹⁹ no Volume anterior dos *Resultate*,⁷⁰⁰ a teoria do magnetismo em barra é mais antiga⁷⁰¹ e, por estar essencialmente incluída na teoria geral do magnetismo, pode, como a última, ser considerada, em alguns aspectos, como tendo sido concluída e aperfeiçoada há muito tempo, o que não impede que ainda ocorram problemas individuais que exijam uma solução especial e por meio dos quais ainda seja possível lançar uma nova luz sobre a natureza do magnetismo. Uma dessas tarefas está na essência do presente artigo. Os fenômenos a serem considerados aqui são os *fenômenos de indução* que consistem em geral na produção de correntes galvânicas através do magnetismo em movimento. Esses fenômenos de indução são divididos em duas categorias, sendo que aqueles na *primeira* categoria, que serão chamados de indução *bipolar*, são suficientemente conhecidos e foram mostrados com magnetismo em barra e magnetismo terrestre; aqueles da *outra* categoria, ao contrário, que serão denominados de indução *unipolar*, eram

⁶⁹⁴[Web40] com tradução para o inglês em [Web24d].

⁶⁹⁵As Notas de E. Riecke, o editor do Volume 2 das *Obras* de Weber, são representadas por [Nota de Riecke]; todas as outras Notas são de minha autoria.

⁶⁹⁶[Nota de Riecke:] Ver a Tabela VIII, Figuras 1-4 [das *Obras* de Weber].

⁶⁹⁷[Nota de Riecke:] *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins*, 1839, III, págs. 63-90.

⁶⁹⁸Em alemão: *Stabmagnetismus*. Normalmente esses fenômenos se referem ao ferromagnetismo de ímãs permanentes.

⁶⁹⁹Ver a Nota de rodapé 189 na página 68.

⁷⁰⁰[Gau39a] com traduções para o inglês em [Gau41a] e [GT14], e tradução para o espanhol em [Gau21d].

⁷⁰¹Ela é devida a Coulomb. Ver a Nota de rodapé 107 na página 41.

desconhecidos anteriormente e só podem ser produzidos com magnetismo em barra. Além de tantos exemplos em que essencialmente os mesmos fenômenos do magnetismo em barra também são produzidos pelo geomagnetismo (por exemplo, quase todos os fenômenos eletromagnéticos e magnetoelétricos), é interessante conhecer um caso em que isso não é possível. Pode ser facilmente previsto de antemão e confirmado por um exame mais detalhado que a causa dessa impossibilidade não está no magnetismo em si, mas em outras condições (por exemplo, que a Terra não é um condutor tão bom quanto o aço de uma barra magnética e que não é magnética em todas as suas partes, além do fato de que a própria Terra impede a realização de muitos experimentos devido ao seu tamanho). — Antes de prosseguirmos para as próprias experiências que levaram à investigação da indução unipolar, serão feitos alguns comentários gerais sobre a natureza, o método e as leis da indução unipolar, já que isso ajuda a compreender as experiências e encurta suas descrições.

22.1 Comentários Gerais

22.1.1 Indução Bipolar e Unipolar

Assume-se a existência de dois fluidos magnéticos, um Norte e outro Sul, que estão presentes nas moléculas de um ímã em quantidades iguais, mas separados um do outro. Se tal ímã for colocado em movimento, será induzida de acordo com leis conhecidas uma corrente galvânica em um condutor próximo.⁷⁰² Essa corrente é tal que pode ser dividida em duas correntes, uma das quais surge do movimento do fluido *Norte*, a outra através do movimento do fluido *Sul*. Essa indução de duas correntes através do movimento dos *dois* fluidos magnéticos será chamada de indução *bipolar*. Contudo, também é concebível um tipo de indução por meio da qual apenas um dos fluidos magnéticos se desloca e a corrente induzida do outro fluido é sempre nula, de tal forma que a única corrente remanescente é aquela induzida pelo primeiro fluido. Essa indução de uma corrente causada pelo movimento de um fluido magnético será denominada de indução *unipolar*.

22.1.2 Método

Se imaginarmos um condutor que tenha a forma de um círculo ou anel horizontal e movermos para baixo, no eixo vertical desse anel, um corpo contendo apenas fluido Norte, uma corrente galvânica aparecerá no anel, cuja direção é oposta ao movimento diário.⁷⁰³ Para uma velocidade constante [do fluido Norte], a corrente aumenta a partir do valor nulo durante o movimento desde uma altura infinita até o plano do anel, e diminui similarmente de volta a zero para o movimento desde o plano do anel até uma profundidade infinita. Durante esse movimento muda a intensidade da corrente, mas nunca a direção da corrente no condutor. Por fim, se o corpo com o fluido Norte contido nele for movido de baixo para cima, não em linha reta, mas em uma linha circular cujo ponto central esteja no anel, de modo que ele sempre permaneça infinitamente distante do anel, tal que não tenha efeito algum sobre ele, o primeiro movimento pode começar novamente e a mesma corrente pode ser produzida no anel uma segunda vez. Dessa maneira o corpo contendo apenas fluido Norte pode continuar

⁷⁰²Weber está se referindo aqui à lei de indução de 1831 de Faraday. Ver [Far32a] com tradução para o alemão em [Far32b] e [Far89], e tradução para o português em [Far11].

⁷⁰³Em alemão: *dessen Richtung der täglichen Bewegung entgegengesetzt ist*. Isto é, a corrente fluirá no sentido anti-horário quando vista de cima para baixo.

arbitrariamente a mesma indução, por meio da qual muda a intensidade da corrente no condutor, mas nunca a direção [da corrente]. O mesmo aconteceria para um corpo contendo apenas fluido Sul, mas a direção da corrente seria oposta. Nos dois casos a trajetória do ímã pode ser drasticamente encurtada, já que a indução é a mesma em todas as trajetórias nas quais o ímã desce através do anel e sobe ao redor do anel para retornar à sua posição inicial. O critério essencial para uma indução homogênea contínua com um ímã contendo apenas *um* fluido magnético é que esse ímã desça através do anel e suba ao redor dele, ou vice-versa. Ao contrário, se ele for deslocado através do anel tanto no movimento para cima quanto no movimento para baixo, ou caso se desloque ao redor dele para os dois movimentos, vai mudar a direção da corrente e o efeito total será nulo.

É fácil aplicar essas leis ao *segundo* caso, em que um ímã induz, ímã esse que contém os *dois* fluidos magnéticos em quantidades iguais e que, portanto, ambos se movem simultaneamente com o ímã. A corrente induzida pelos dois fluidos simultaneamente em cada instante é a soma das correntes induzidas por cada fluido individual para esse momento, o que leva às seguintes conclusões:

1. se o ímã for movido para frente e para trás a partir de seu local e posição originais, de tal forma que ele não atravesse o anel de forma alguma (nem para baixo nem para cima), ou o atravesse nas duas vezes (tanto para baixo quanto para cima), o efeito como um todo é zero, porque ele já desaparece em suas partes;

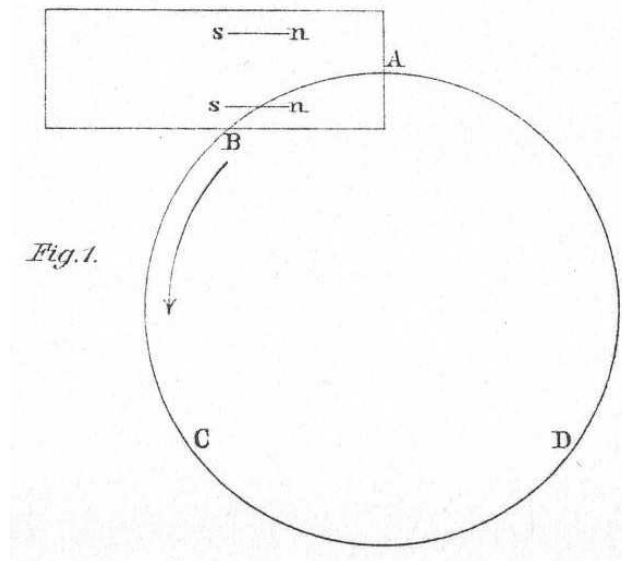
2. se o ímã atravessar o anel apenas uma vez durante seu movimento (para baixo ou para cima), o efeito total também é nulo, já que o fluido Sul induz uma corrente igual e oposta àquela induzida pelo fluido Norte.

Do que foi dito, no entanto, não se deduz de forma alguma que uma indução contínua do mesmo tipo que a indução devida a um ímã contendo apenas *um* fluido pode produzir, seja impossível no caso de um ímã contendo os *dois* fluidos em quantidades iguais; pelo contrário, ainda há um *terceiro* caso a ser considerado, que ainda não está contido nos dois anteriores, e é possível quando os fluidos magnéticos *realmente existem* e estão realmente *separados espacialmente* uns dos outros nas moléculas do ímã, a saber:

3. uma molécula magnética⁷⁰⁴ é movida de tal forma que não passa pelo anel nem completamente, nem de forma alguma, mas *metade* passa através dele, [enquanto] *metade* permanece fora dele, por exemplo, a metade que contém o fluido *Norte* passa para baixo através do anel, para cima ao redor dele, ou vice-versa; a outra metade, no entanto, que contém o fluido *Sul*, sempre permanece do lado de fora. O efeito como um todo *não* é zero, porque um fluido (que passou pelo anel) induziu uma corrente que *não* é cancelada, porque o outro fluido (que não passou pelo anel) não induziu nenhuma corrente ou induziu uma corrente não homogênea, cujo efeito desaparece como um todo. Contudo, como tanto o anel quanto a molécula magnética são corpos *rígidos*, parece que esse terceiro caso só é possível se um deles for *quebrado*. Porém, uma molécula magnética não pode ser quebrada de tal forma que cada parte contenha apenas *um* fluido, o que seria necessário para mover *um* único fluido através do anel; assim o *anel* tem de ser quebrado, o que pode ser facilmente feito: contudo, tem de ser observado que o circuito galvânico não pode ser interrompido enquanto o anel está sendo quebrado. O anel pode ser quebrado sem interromper a corrente caso a molécula magnética indivisível for tal que a corrente galvânica possa passar *entre os dois fluidos*; pois essa molécula pode, então, *conectar condutivamente as duas partes entre si* enquanto o anel estiver sendo quebrado.

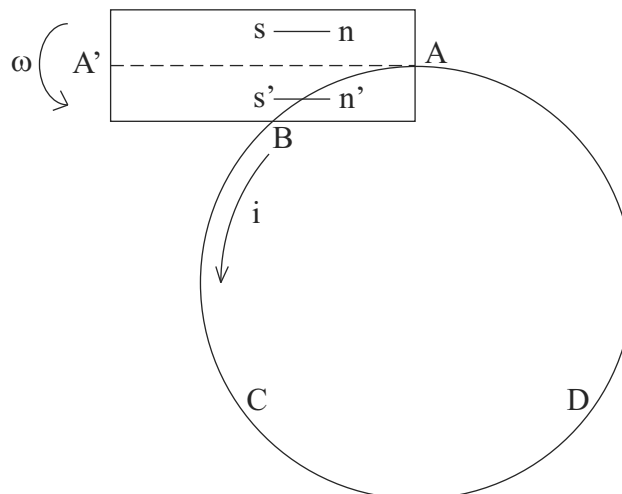
⁷⁰⁴Cada molécula magnética é composta por um fluido Norte e um fluido Sul de mesma intensidade, separados por uma pequena distância, sendo então um dipolo magnético.

É fácil criar um arranjo que preencha as condições do terceiro caso. É suficiente magnetizar um cilindro de aço de tal forma que seu eixo magnético coincida com seu eixo geométrico, e girá-lo ao redor desse eixo. Se as duas extremidades de um fio condutor entrarem então em contato com o cilindro, uma extremidade [conectada] ao eixo rotacional em A , Figura 1, a outra [extremidade conectada] à periferia em B , o fio vai formar um circuito condutor $ABCD$, que vai sempre permanecer fechado durante a rotação do cilindro.⁷⁰⁵



Seja ns uma molécula magnética no cilindro, onde o fluido Norte está situado na extremidade n e o fluido Sul em s . A molécula é tal que uma corrente galvânica pode passar através dela. Se imaginarmos o circuito condutor $ABCD$ em formato de anel contendo o ponto onde está localizado o centro dessa molécula, é fácil perceber que o fluido Norte n é

⁷⁰⁵Na Figura 1 o cilindro magnetizado é representado pelo retângulo horizontal. A seta indica a direção da corrente no fio $BCDA$. Weber considerou a rotação do ímã ao redor de seu eixo horizontal de simetria. Uma experiência como essa foi realizada pela primeira vez por Faraday em 1832, ver o Capítulo 21. Na Figura dessa Nota de rodapé incluí o eixo horizontal AA' do ímã, sua velocidade angular ω ao redor desse eixo, juntamente com a corrente elétrica i induzida no fio $BCDA$ devida à rotação do ímã. Também substituí as letras inferiores sn por $s'n'$.



guiado para baixo através do anel do circuito condutor a cada rotação do cilindro e para cima em torno desse anel, se presumirmos que, na Figura, ns se move para baixo durante a rotação e, depois de meia revolução, chega a $n's'$, para então subir novamente.⁷⁰⁶ Em contraste com isso, o fluido Sul s sempre permanece fora do circuito durante a rotação. Sob tais condições, pode-se assumir que uma corrente homogênea contínua será produzida, cuja direção é indicada pela seta marcada. Essa suposição foi confirmada pela experiência, como provarão os experimentos que serão relatados posteriormente.

Após explicar a ideia subjacente das experiências a serem descritas, serão desenvolvidos alguns teoremas que guiaram o projeto dos experimentos individuais.

22.1.3 Leis

1. A indução em todas as trajetórias desde o ponto de contato da superfície cilíndrica até o ponto de contato do eixo de rotação é igual, se os fluidos magnéticos estiverem igualmente separados em todos os lugares.

Supõe-se que todas as moléculas magnéticas no cilindro giratório têm a mesma intensidade e estão igualmente espaçadas, como se o cilindro fosse, por exemplo, dividido em cubos pequenos e iguais com as moléculas magnéticas nos cantos. As moléculas podem formar então linhas paralelas ao eixo rotacional. Qualquer que seja o caminho da corrente, ela deve passar por todas as fileiras de moléculas da superfície até o eixo, e o número provável de moléculas magnéticas que ela cruza em seu caminho é proporcional ao número n dessas fileiras; além disso, é diretamente proporcional ao comprimento l dessas moléculas e inversamente proporcional à distância a entre elas, ou $= nl/a$. Como se assume que todas as moléculas são iguais e estão igualmente espaçadas (isto é, l e a são constantes), segue-se que o número de cortes deve ser o mesmo em todos os caminhos. Esse teorema se aplica até mesmo a caminhos que vão além do eixo de rotação e cortam várias outras fileiras de moléculas do outro lado até que finalmente cheguem ao final do eixo; pois é óbvio que esse caminho corta cada fileira além do eixo duas vezes, uma vez se afastando, outra vez se aproximando do eixo novamente, ambas as vezes com a mesma probabilidade de atingir uma partícula magnética. Entretanto, a indução causada pelo corte de uma partícula no caminho de ida é cancelada pela indução no caminho de volta, de modo que a probabilidade de indução em tal desvio é zero no total.

2. Se a corrente galvânica passar simultaneamente por vários caminhos da superfície do cilindro até o eixo, em todos os quais a indução é a mesma, a indução será tão forte quanto se passasse por apenas um caminho.

Sabe-se que, se *várias* pilhas galvânicas idênticas forem construídas e seus polos de mesmo nome forem conectados uns aos outros e às extremidades de um longo circuito de condutores (ou seja, se todas as correntes que emanam dessas pilhas se unirem imediatamente atrás das pilhas, passarem pelo longo circuito de condutores e, por fim, se dividirem novamente imediatamente na frente das pilhas para completar o circuito),⁷⁰⁷ a corrente no circuito de condutores será tão forte quanto se as extremidades do circuito tocassem os polos de *uma* pilha, desde que a resistência das pilhas seja desprezível em comparação com a resistência do circuito. Aplicando esse teorema ao nosso caso, cada caminho através do cilindro pode ser comparado ao caminho através de uma pilha, do que decorre o teorema anterior, porque a resistência no cilindro desaparece em relação à resistência no restante do circuito. Disso

⁷⁰⁶Na Figura 1 deveríamos ter na parte inferior do ímã $n's'$ em vez de ns , como indicado na Figura da Nota de rodapé 705.

⁷⁰⁷Ou seja, as pilhas estão conectadas em paralelo.

resulta:

3. A indução é independente do número de pontos tocados na superfície do cilindro.
4. A indução é independente do comprimento do cilindro, cujas moléculas possuem todas a mesma intensidade magnética.
5. Sob condições idênticas, a indução é proporcional à [área de] seção reta do cilindro.
6. Se, entre os vários caminhos que passam pelo cilindro, houver alguns para os quais a indução é maior e outros para os quais é menor, a corrente será tão forte como se tivesse passado pelo cilindro apenas neste último caminho.

Esse último teorema resulta da comparação do nosso caso com o de um fio condutor que é dividido na extremidade e conduzido a várias pilhas desiguais. Pois se ocorre uma tal divisão de corrente tal que algumas partes atravessam pilhas mais fracas e algumas partes atravessam pilhas mais fortes, a corrente no restante do circuito será tão intensa como se não houvesse divisão e a corrente só atravessasse a pilha mais fraca, supondo que a resistência das pilhas seja desprezível em comparação com a resistência do circuito. Se uma parte, em vez de passar por uma pilha, passasse simplesmente por um condutor, no qual a resistência também desaparece comparada à resistência de todo o circuito; a corrente galvânica cessaria então completamente na cadeia indivisa restante. Toda a indução desapareceria se a superfície cilíndrica fosse conectada ao eixo do ímã por uma luva de cobre.

7. Se o cilindro tiver a mesma intensidade magnética em todas as partes, duas rotações vão induzir uma corrente que é igual à corrente criada pelo mesmo cilindro através de *uma alternância* em uma bobina indutora que consiste em uma única espira,⁷⁰⁸ supondo que o diâmetro dessa espira seja muito pequeno comparada com o comprimento do cilindro.

Se M é o momento magnético do cilindro e L é o seu comprimento, e se imaginarmos que os fluidos magnéticos estão distribuídos pelas duas faces finais do cilindro, o que é permitido sob a suposição anterior de que todas as partículas do cilindro são igualmente magnéticas; então $\pm \frac{M}{L}$ é a quantidade de fluido Norte ou Sul localizado em uma ou outra face da extremidade. A corrente S induzida por *uma única alternância* é então igual à corrente induzida por *um* fluido $\pm \frac{M}{L}$ se ele passasse duas vezes pelo anel indutor no mesmo caminho e na mesma direção (assumindo que o diâmetro do anel seja muito pequeno comparado ao comprimento do cilindro), de acordo com o que se pode escrever

$$S = 2c \cdot \frac{M}{L} ,$$

onde c é uma constante que depende apenas da resistência do circuito. Se o indutor consiste em múltiplas espiras, c teria de ser multiplicada pelo número de espiras.

Se o cilindro consiste em moléculas iguais e paralelas, cada uma delas tendo um momento magnético $= m$, um comprimento $= l$ e cuja distância [entre elas] é $= a$, então o número de moléculas é igual ao volume do cilindro dividido pela distância a elevada ao cubo, ou $= \frac{\pi R^2 L}{a^3}$, onde R é o raio do cilindro. A soma dos momentos [magnéticos] de todas as moléculas é igual ao momento [magnético] M , ou

⁷⁰⁸Em alemão: *der von demselben Cylinder durch einen Wechsel in einer aus einer Umwindung bestehenden Induktorrolle hervorgebracht wird.* A palavra *Wechsel* pode ser traduzida como alternância, alternação, mudança ou rotação. A palavra *Umwindung* pode ser traduzida como espira, enrolamento ou volta. A palavra *Rolle* pode ser traduzida como bobina, rolo, polia, roldana ou carretel. Normalmente uma bobina consiste em um enrolamento de várias espiras. A expressão *Induktorrolle* pode ser traduzida como bobina indutora ou bobina de indução. Gauss definiu o significado da palavra “Wechsel” em seu trabalho de 1836, “Erdmagnetismus und Magnetometer — Geomagnetismo e magnetômetro”, [Gau36b, págs. 39-43 do *Jahrbuch* e págs. 340-341 das *Obras* de Gauss]. Ver ainda [Web39b, págs. 108 e 112 das *Obras* de Weber].

$$\frac{\pi R^2 L}{a^3} \cdot m = M .$$

Se houver agora [a quantidade] $+m/l$ de fluido (Norte) em uma extremidade de cada molécula e $-m/l$ de fluido (Sul) na outra extremidade, então a quantidade de fluido Norte (ou Sul) que passa pelo anel do circuito condutor a cada revolução do cilindro e induz uma corrente contínua do mesmo tipo, é obtida ao multiplicar $\pm \frac{m}{l}$ pelo número de fileiras de moléculas no cilindro e pela razão l/a (que é a probabilidade de a corrente cruzar uma molécula ao passar por uma fileira de moléculas). A quantidade de fluido indutor que passa pelo anel do circuito condutor a cada revolução do cilindro é, portanto

$$= \frac{m}{l} \cdot \frac{\pi R^2}{a^2} \cdot \frac{l}{a} = \frac{\pi R^2 m}{a^3} ,$$

pois o número de linhas moleculares no cilindro é igual à seção reta πR^2 do cilindro, dividida pelo quadrado da distância a entre as moléculas. De acordo com isso, a corrente induzida por cada rotação é

$$s = c \cdot \frac{\pi R^2 m}{a^3} ,$$

onde c tem o mesmo significado que antes. Ao comparar as duas correntes, encontramos

$$S = 2s ,$$

isto é, a corrente induzida por duas rotações do cilindro é igual à corrente induzida por *uma única alternância*, supondo que o fio da bobina forma apenas *uma única* espira.

8. Se algumas partes do cilindro são mais fortemente magnetizadas, algumas mais fracamente, a corrente induzida por duas rotações do cilindro é mais fraca do que aquela induzida por *uma única alternância*, supondo que o fio da bobina forme uma única espira que seja muito pequena comparada com o comprimento do cilindro.

Entre os caminhos que a corrente galvânica percorre através do cilindro, há um que passa pela maioria das partes fracamente magnetizadas. De acordo com [o teorema] (6),⁷⁰⁹ a corrente induzida pela rotação do cilindro não é mais forte do que se o cilindro fosse fracamente magnetizado em todas as suas partes. A corrente induzida por uma alternância, por outro lado, é reforçada, mesmo que o magnetismo do cilindro não seja reforçado em todas as partes, mas apenas em partes individuais, o que torna evidente o teorema anterior.

22.2 Instrumentos

Os instrumentos utilizados para produzir e observar a indução unipolar possuem as seguintes partes: *em primeiro lugar*, dois cilindros de aço magnetizados axialmente; *em segundo lugar*, uma engrenagem com a qual esses cilindros podem ser girados em torno de seus eixos com uma velocidade mensurável; *em terceiro lugar*, um magnetômetro equipado com um multiplicador para medir as correntes induzidas;⁷¹⁰ *em quarto lugar*, um dispositivo para conectar condutivamente uma extremidade do fio multiplicador à extremidade do eixo rotativo e a outra [extremidade do fio multiplicador] à superfície cilíndrica do ímã sem inibir sua rotação;

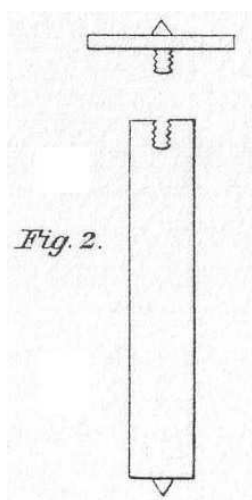
⁷⁰⁹Ver a página 322.

⁷¹⁰Ver a Nota de rodapé 91 na página 38.

em quinto lugar, uma bobina indutora para realizar os experimentos de indução descritos no Volume anterior dos *Resultate* nas páginas 98 e seguintes,^{711,712} com o mesmo ímã.

22.2.1 Os Ímãs Cilíndricos

Dois cilindros de aço endurecido, um com 269 mm de comprimento e 23 mm de espessura, e outro com 502 mm de comprimento e 20,5 mm de espessura, foram equipados com uma ponta em uma extremidade (extremidade Norte) e uma porca de rosca na outra. Uma roda dentada (com 40 dentes) foi acoplada a essa última, cujo eixo terminava em uma ponta, conforme mostrado na Figura 2. O primeiro cilindro de aço foi magnetizado duas vezes, a primeira vez mais fracamente e a segunda vez mais fortemente, de modo que seu momento magnético era de 65 milhões na primeira vez, e 108 milhões na segunda, de acordo com a unidade absoluta.⁷¹³ O segundo cilindro recebeu um momento magnético de 450 milhões.



22.2.2 A Engrenagem

A engrenagem foi a mesma descrita no segundo Volume dos *Resultate* (para 1837) em conexão com o inclinômetro de indução.^{714,715} No entanto, foi adicionada uma roda com 60 dentes, que se encaixou com a roda de 40 dentes presa aos ímãs. A cada rotação da manivela, o cilindro de aço fazia $8\frac{4}{7}$ rotações. A caixa de engrenagens era conectada ao ímã por uma armação, Figura 3, que consistia em um suporte de ferro⁷¹⁶ no qual a caixa de engrenagens era aparafusada e na extremidade do qual havia um pequeno recesso no qual a ponta da pequena roda presa ao ímã era inserida, enquanto a ponta na extremidade Norte do ímã se encaixava em um recesso semelhante em um segundo suporte.

⁷¹¹[Nota de Riecke:] *Obras* de Wilhelm Weber, Vol. II, pág. 115.

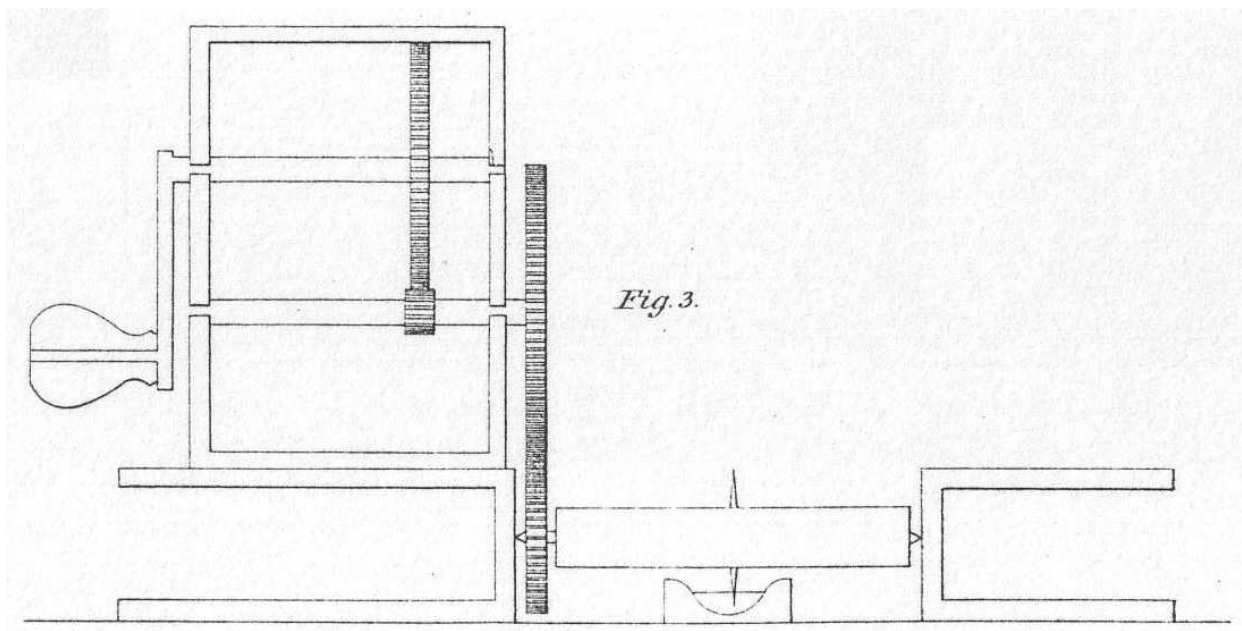
⁷¹²[Web39b, pág. 115 das *Obras* de Weber].

⁷¹³Gauss introduziu o sistema absoluto de unidades para o magnetismo em barra em 1832, ver os Capítulos 10, 11 e 12. Ver ainda [Ass21f].

⁷¹⁴[Nota de Riecke:] Ibidem, pág. 77.

⁷¹⁵[Web38b, pág. 77 das *Obras* de Weber].

⁷¹⁶Em alemão: *welches aus einer eisernen Klammer bestand*. A palavra *Klammer* pode ser traduzida como suporte, grampo ou pinça.



O formato do suporte foi usado para permitir que as extremidades de dois ímãs grandes se aproximassem do ímã giratório por lados opostos, o que aconteceu em alguns experimentos.⁷¹⁷ Os suportes foram então mantidos no lugar pelo peso desses ímãs. Quando os ímãs eram removidos, os suportes eram firmemente aparafusados no tampo da mesa em que o aparelho estava.

22.2.3 Magnetômetro e Multiplicador

O magnetômetro usado para esses experimentos foi o magnetômetro transportável descrito no Volume anterior dos *Resultate*.⁷¹⁸ Esse pequeno magnetômetro foi preferido a um maior nesses experimentos porque o fio multiplicador tinha um número maior de espiras (2.000) com um comprimento menor (de cerca de 600 metros). Devido ao comprimento mais curto do fio, a resistência foi reduzida, aumentando assim a corrente induzida, enquanto que o maior número de espiras multiplicou a intensidade da corrente: ambos aumentaram a deflexão da agulha do magnetômetro. Para aumentar ainda mais essa ampliação, uma haste magnética de 25 libras foi instalada cerca de 2 metros ao Sul do magnetômetro, com sua extremidade Sul voltada para o Norte. O magnetismo dessa haste equilibrou uma grande parte da força magnética da Terra na agulha e, assim, aumentou a sensibilidade do magnetômetro, atingindo o mesmo objetivo de um dispositivo astático.⁷¹⁹ O período de oscilação⁷²⁰ da agulha do magnetômetro era anteriormente de cerca de 10 segundos e, portanto, foi assim aumentado para cerca de 20 segundos.

⁷¹⁷O perfil dos dois suportes, um de cada lado do ímã giratório, tem o formato da letra U de lado, como pode ser visto na Figura 3.

⁷¹⁸[Web39a] com traduções para o inglês em [Web41d], [Web66b] e [Web21n]. Esse trabalho está traduzido para o português no Capítulo 19.

⁷¹⁹Ver a Nota de rodapé 356 na página 144.

⁷²⁰Ver a Nota de rodapé 339 da página 139.

22.2.4 Conexão das Extremidades do Fio com o Ímã Giratório

Uma extremidade do fio do multiplicador que deveria ser conectada condutivamente à extremidade do eixo de rotação, foi preso ao suporte de ferro no qual a engrenagem era aparafusada e por onde passava a ponta, que formava a extremidade do eixo de rotação. A outra extremidade do fio do multiplicador era submersa em um recipiente com mercúrio que foi colocado abaixo do ímã giratório. O centro do ímã era cercado por um disco de latão, que girava com ele e mergulhava sua borda inferior no mercúrio.⁷²¹ Dessa forma a rotação do ímã não era prejudicada ao ser conectado com as duas extremidades do fio do multiplicador.

22.2.5 A Bobina Indutora

Um pedaço do mesmo tipo de fio de cobre trançado⁷²² com o qual foi feito o multiplicador foi enrolado 20 vezes em torno de um anel de madeira com 44 mm de diâmetro. Esse anel foi usado como uma bobina indutora. A resistência era tão pequena que podia ser desprezada em relação à grande resistência do multiplicador; portanto, as correntes induzidas com o mesmo ímã, seja pela rotação ou pela alternância dessa bobina, determinavam diretamente a magnitude da indução.

22.3 Experiências

Os ímãs usados nos experimentos a seguir eram, como todos os ímãs, não igualmente magnetizados em todas as suas partes, mas mais fortes no meio e mais fracos nas extremidades. Portanto, eles não atendem à condição que foi presumida nos teoremas anteriores. Também não é possível produzir um ímã que atenda exatamente a essa condição. Portanto, se tivermos que nos contentar com hastes nesses experimentos que muitas vezes estão muito distantes de uma magnetização completamente uniforme, não podemos esperar que os teoremas apresentados anteriormente encontrem uma aplicação direta e exata a esses experimentos e que a intensidade das correntes induzidas possa ser determinada correta e precisamente com antecedência. Sob tais condições, os teoremas acima podem e devem servir apenas para dar uma ideia aproximada da intensidade das correntes esperadas ou para determinar a ordem de magnitude das mesmas. Apenas um *limite* da intensidade da corrente é então dado pelos teoremas anteriores, do qual as correntes induzidas se aproximam, mas que não alcançam enquanto o cilindro estiver magnetizado de forma não uniforme. O próximo objetivo dos experimentos a seguir é, portanto, verificar se uma corrente realmente surge da maneira descrita, também se a intensidade da corrente é da mesma ordem de grandeza que a intensidade de uma corrente induzida pela alternância descrita e, finalmente, se, como esperado de acordo com [o teorema] (8),⁷²³ aquela corrente é superada por esta. Se essas perguntas forem respondidas afirmativamente pelos experimentos a seguir, finalmente será feita uma tentativa de alterar as outras condições da *primeira* indução de modo que a corrente produzida se aproxime mais do limite indicado e até mesmo ultrapasse a outra corrente, até então mais forte. O motivo pelo qual a corrente induzida não atinge o limite estabelecido anteriormente, ou seja, o fato de o ímã ser mais fraco nas extremidades do que no *centro*, pode ser parcial ou totalmente eliminado aproximando-se ímãs maiores, o que fortalece o magnetismo nas

⁷²¹Ver a Figura 21.3.

⁷²²Em alemão: *übersponnenen Kupferdrahtes*. Esse fio possui um revestimento isolante de seda ou algodão.

⁷²³Ver o teorema 8 na página 323.

extremidades, enquanto o magnetismo no *centro* permanece quase inalterado. Se for possível supor que o magnetismo no *centro* permaneceria totalmente inalterado, mas que, em vez de ser anteriormente o maior em toda a barra, ele agora se tornaria o menor, isso significaria que a corrente induzida nunca poderia ser mais fraca do que o limite fixado anteriormente, que, portanto, após essa modificação, teria sido alterado de um limite superior para um inferior. Entretanto, é fácil perceber que muito depende do comprimento, do magnetismo original e da maciez do aço do cilindro. No caso de cilindros curtos, o magnetismo não só será reforçado nas extremidades, mas também próximo ao centro, quanto mais fraco for o ímã originalmente. No caso de cilindros longos, o magnetismo mudará pouco ou nada mudará a alguma distância das extremidades ao centro. De acordo com isso, pode-se esperar (1) que, quando um cilindro curto e fracamente magnetizado for girado e colocado entre duas barras magnéticas fixas para fortalecer suas extremidades, será induzida uma corrente que *excede* o limite definido anteriormente, mas (2) *se aproxima mais dele* quanto *mais intensamente* o cilindro estiver magnetizado; (3) se o mesmo cilindro for girado livremente, *sem* a presença de outros ímãs, a corrente induzida *não atingirá* o limite estabelecido, mas se aproximará dele quanto mais fortemente o cilindro for magnetizado; mas ainda permanecerá distante dele, mesmo no mais alto grau de saturação, porque a não uniformidade do magnetismo no centro e nas extremidades pode ser reduzida por uma magnetização mais forte, mas nunca pode desaparecer. (4) Por outro lado, quando um cilindro muito *longo* é girado, mesmo que esteja fortemente magnetizado, é de se esperar que a corrente induzida *nunca atinja* o limite fixado anteriormente, e que só possa ser levada um pouco mais perto dele fortalecendo levemente as extremidades das barras por meio de ímãs colocados na frente delas; pois é de se esperar que o efeito dos últimos [ímãs externos] não se estenda a nenhuma grande distância das extremidades e não seja capaz de fortalecer o magnetismo de todas as partes de modo a torná-lo igual ao das partes centrais. As Séries de experimentos a seguir servirão para confirmar isso.

22.3.1 Primeira Série

Rotação de um cilindro curto e fracamente magnetizado. Suas extremidades foram reforçadas através da presença de ímãs externos.⁷²⁴

O cilindro tinha 269 mm de comprimento e 23 mm de espessura; seu momento magnético de acordo com a unidade absoluta era = 65 milhões.

⁷²⁴Em alemão: *durch magnetische Vorlagen*. Essa expressão pode ser traduzida como “através da presença de ímãs externos”, “através de placas magnéticas” ou “através de dispositivos magnéticos”.

60 rotações em 7 segundos					
Rotação para frente			Rotação para trás		
616,3			743,0		
	623,3			736,0	
626,8			732,5		
	622,1			737,0	
619,7			739,2		
	621,9	622,56		736,3	736,54
623,0			734,8		
	623,1			737,5	
623,2			738,8		
	622,4			735,9	
622,0			734,5		
617,0			734,2		
	623,1			736,7	
626,2			738,0		
	622,5			737,0	
620,7			736,5		
	622,2	622,02		737,2	737,12
623,0			737,5		
	621,0			737,2	
620,0			737,0		
	621,3			737,5	
622,0			737,8		

A *primeira* coluna mostra as observações dos valores máximo e mínimo das leituras do magnetômetro durante a rotação; a *segunda* coluna mostra o valor real calculado consistindo em duas observações incluindo considerações de amortecimento; a segunda observação é aproximada da primeira por um terço da diferença; a *terceira* coluna é a média de 5 leituras na coluna anterior. Se os valores da terceira coluna forem combinados, as diferenças das leituras, alternando entre rotação para frente e para trás, fornecerão o dobro da deflexão causada pela corrente induzida

para frente	622,56		
		113,98	
para trás	736,54		
		114,52	114,53
para frente	622,02		
		115,10	
para trás	737,12		

Da mesma forma, a deflexão dupla foi encontrada para 30 rotações em 7 segundos

$$= 56,52 ,$$

que é quase a metade do valor anterior. Em média, 57,02 pode ser considerada como a deflexão simples em 60 rotações ou como a deflexão dupla em 30 rotações em 7 segundos, ou seja, 6,652 como a deflexão simples em 1 rotação em 1 segundo, ou 13,304 em 2 rotações em 1

segundo. Para fins de comparação, o mesmo ímã também foi usado para os experimentos de indução descritos no volume anterior dos *Resultate* nas páginas 98 e seguintes.^{725,726} Deve-se observar que o período de oscilação da agulha do magnetômetro foi de 20,5 segundos e que a bobina indutora tinha 20 espiras. Os ímãs externos tiveram de ser removidos durante esses experimentos. Será suficiente resumir as observações das elongações sem incluir a disposição das alternâncias, que são descritas no local indicado.

Elongações	<i>a</i>	<i>b</i>
643,0		
637,0	8,2	
651,2	...	17,0
654,0	9,2	
642,0	...	16,0
638,0	9,0	
651,0	...	15,2
653,2	8,0	
643,0	...	15,7
637,5	7,8	
650,8	...	16,7
654,2	8,6	
642,2	...	15,2

Elongações	<i>a</i>	<i>b</i>
639,0	8,5	
650,7	...	16,5
655,5	8,7	
642,0	...	17,7
637,8	8,5	
650,5	...	16,7
654,5	8,7	
641,8	...	16,3
638,2	8,2	
650,0	...	15,3
653,5	8,0	
642,0	...	15,5
638,0		

Isso fornece na média

$$\begin{aligned}
 a &= 8,5 , \\
 b &= 16,15 , \\
 \frac{a^2 + b^2}{\sqrt{ab}} &= 28,44 .
 \end{aligned}$$

⁷²⁵[Nota de Riecke:] *Obras* de Wilhelm Weber, Vol. II, pág. 115

⁷²⁶[[Web39b](#), pág. 115 das *Obras* de Weber].

Se o último valor for multiplicado por $\frac{t}{\pi n}$, onde t é o período de oscilação da agulha do magnetômetro ($= 20,5$ s), n o número de espiras da bobina indutora ($= 20$), encontramos a deflexão simples $= 9,279$ que corresponderia a 1 espira e 1 alternância em 1 segundo. Se compararmos a deflexão obtida anteriormente para 2 rotações em 1 segundo $= 13,304$; é aparente que a corrente induzida responsável pela deflexão é mais forte do que aquela causando a primeira deflexão, de acordo com a expectativa (ver o item (1) anterior).⁷²⁷

22.3.2 Segunda Série

Rotação de um cilindro curto fortemente magnetizado.

Suas extremidades foram reforçadas através da presença de ímãs externos.

O cilindro tinha 269 mm de comprimento e 23 mm de espessura; seu momento magnético $= 108$ milhões de acordo com unidades absolutas. Como as experiências foram realizadas da mesma forma que as anteriores, é suficiente apresentar os resultados. A deflexão dupla de 60 rotações em 7 segundos foi encontrada como sendo

$$= 152,50 ,$$

e de 30 rotações em 7 segundos

$$= 76,61 .$$

Em média, 76,37 pode ser considerada como a deflexão simples em 60 rotações ou como a deflexão dupla em 30 rotações em 7 segundos, ou seja, 8,91 como a deflexão simples em 1 rotação em 1 segundo, ou 17,82 em 2 rotações em 1 segundo.

Para comparação foram repetidas as experiências com a bobina indutora de 20 espiras, onde o período de oscilação da agulha foi $t = 21,44$ s. Isso forneceu

$$\begin{aligned} a &= 14,22 , \\ b &= 26,94 , \\ \frac{a^2 + b^2}{\sqrt{ab}} &= 47,412 . \end{aligned}$$

Se o último valor for dividido por $\frac{n}{t}\pi = \frac{20}{21,44} \cdot 3,14159..$, a deflexão correspondendo a 1 espira e 1 alternância em 1 segundo será encontrada como

$$= 16,178 .$$

Comparando isso com a deflexão encontrada anteriormente para 2 rotações em 1 segundo

$$= 17,82 ,$$

é aparente que a corrente induzida causando a última deflexão é, de acordo com a expectativa, (ver o item (2) anterior),⁷²⁸ apenas ligeiramente mais forte do que aquela que provocou a primeira deflexão.

⁷²⁷Item (1) na página 327.

⁷²⁸Ver o item (2) na página 327.

22.3.3 Terceira Série

Rotação de um cilindro curto fortemente magnetizado sem a presença de ímãs adicionais.

O cilindro permaneceu inalterado como na Segunda Série.

A deflexão dupla para 60 rotações em 7 segundos foi encontrada como

$$= 64,33 ,$$

para 30 rotações em 7 segundos

$$= 31,83 .$$

Em média, pode-se, portanto, assumir 32,05 como a deflexão simples para 60 revoluções ou como a deflexão dupla para 30 revoluções em 7 segundos, ou seja, 3,74 como a deflexão simples para 1 revolução em 1 segundo, ou 7,48 para 2 revoluções em 1 segundo.

Se compararmos esse resultado com a deflexão que, de acordo com a Série anterior para o mesmo ímã correspondia a 1 espira da bobina indutora e 1 alternância em 1 segundo

$$= 16,178 ,$$

pode-se ver que a corrente induzida que produziu a deflexão de 7,48 é, como esperado, mais fraca do que a que causou essa deflexão = 16,178 (veja o item (3) anterior),⁷²⁹ mas ainda é da mesma ordem de grandeza, de modo que parece justificado deduzir a diferença de acordo com o [teorema] número (8)⁷³⁰ da considerável diferença que ocorre entre o magnetismo das partes intermediárias e finais em tal haste, cujas extremidades não são reforçadas por nenhum ímã externo.

22.3.4 Quarta Série

Rotação de um cilindro longo fortemente magnetizado.

O cilindro tinha 502 mm de comprimento e 20,5 mm de espessura, seu momento magnético = 450 milhões de acordo com as unidades absolutas. A deflexão dupla para 60 rotações em 7 segundos foi encontrada como

$$= 194,22 ,$$

para 30 rotações em 7 segundos

$$= 97,85 .$$

Em média, 97,36 pode ser considerada como a deflexão simples em 60 rotações ou como a deflexão dupla em 30 rotações em 7 segundos, ou seja, 11,36 como a deflexão simples em 1 rotação em 1 segundo, ou 22,72 para 2 rotações em 1 segundo.

Para comparação também foram repetidos com esse ímã os testes de indução com a bobina de 20 espiras. O período de oscilação da agulha era $t = 22,34$ s. Isso forneceu

⁷²⁹Ver o item (3) na página 327.

⁷³⁰Ver o teorema 8 na página 323.

$$\begin{aligned}
 a &= 28,76 , \\
 b &= 57,69 , \\
 \frac{a^2 + b^2}{\sqrt{ab}} &= 102,01 .
 \end{aligned}$$

Se o último valor for dividido por $\frac{n}{t}\pi = \frac{20}{23,34} \cdot 3,14159\dots$, a deflexão correspondendo a 1 espira e 1 alternância em 1 segundo é encontrada como

$$= 36,27 .$$

Comparando esse valor com a deflexão encontrada anteriormente para 2 rotações do cilindro em 1 segundo

$$= 22,72 ,$$

pode-se observar que a corrente induzida que produz essa última deflexão não é, nesse cilindro longo, igual à corrente induzida da primeira maneira, que causou a deflexão $= 36,27$, apesar da amplificação de suas extremidades, como já foi sugerido (veja o item (4) anterior).⁷³¹

22.3.5 Quinta Série

Nos experimentos descritos até agora, o disco de latão imerso em mercúrio sempre esteve no *centro* do cilindro; nos experimentos a seguir, ele foi movido para a *extremidade* do cilindro para confirmar que o comprimento do caminho que a corrente induzida no ímã tem de percorrer paralelamente ao eixo de rotação não influencia a intensidade da corrente. A corrente foi conduzida primeiro na extremidade do eixo de rotação mais distante do disco de latão e, em seguida, na extremidade do eixo de rotação mais próxima do disco de latão.

O cilindro e os ímãs extras permaneceram os mesmos que na Série anterior.

1. Condução na extremidade *mais distante* do eixo de rotação.

A deflexão dupla para 30 rotações em 7 segundos foi encontrada como

$$= 57,12 .$$

2. Condução na extremidade *mais próxima* do eixo de rotação.

A deflexão dupla para 30 rotações em 7 segundos foi encontrada como

$$= 59,08 .$$

A partir da comparação desses dois resultados, é óbvio que a corrente induzida, pelo menos, *não* foi amplificada pelo longo caminho que teve de percorrer paralelamente ao eixo de rotação do cilindro no primeiro caso. A diferença entre os dois resultados é muito pequena para concluir o contrário.

⁷³¹Ver o item (4) na página 327.

22.3.6 Sexta Série

Rotação de um longo cilindro fortemente magnetizado, sem ímãs externos.

O cilindro é o mesmo que nas duas Séries anteriores; o disco de latão mergulhado em mercúrio estava no meio do cilindro. A dupla deflexão em 30 rotações em 7 segundos foi encontrada como

$$= 61,70 ,$$

fornecendo 7,20 como deflexão simples para 1 rotação em 1 segundo, ou 14,40 para 2 rotações em 1 segundo.

Comparando esse resultado com a deflexão que, de acordo com a Quarta Série para o mesmo ímã correspondia a 1 espira da bobina indutora e 1 alternância em 1 segundo,

$$= 36,27 ,$$

podemos ver que a corrente induzida, que corresponde a essa deflexão de 14,40, é muito mais fraca do que aquela causando a deflexão de 36,27, como também foi assumido nas condições prevalecentes (ver anteriormente em (4)).⁷³²

22.3.7 Sétima Série

As experiências da Série anterior foram repetidas movendo o disco de latão mergulhado em mercúrio para a extremidade do cilindro, para confirmar o resultado da Quinta Série, onde não foram usados ímãs externos.

1. Condução através da extremidade *distante* do eixo rotacional.

A deflexão dupla para 30 rotações em 7 segundos foi encontrada como sendo

$$= 20,44 .$$

2. Condução através da extremidade *próxima* do eixo rotacional.

A deflexão dupla para 30 rotações em 7 segundos foi encontrada como sendo

$$= 21,66 .$$

A comparação destes dois resultados também mostra que a corrente induzida *não* foi reforçada pelo caminho mais longo que teve de percorrer paralelamente ao eixo de rotação do cilindro no primeiro caso.

22.4 Aplicações

22.4.1 Aplicação à Teoria Eletrodinâmica de Ampère dos Fenômenos Magnéticos

Os fenômenos de indução unipolar inicialmente encontram uma aplicação interessante na teoria eletrodinâmica de Ampère dos fenômenos magnéticos,⁷³³ ou na questão se a existência física deve ser atribuída aos dois fluidos magnéticos, ou se a suposição de correntes galvânicas

⁷³²Ver o item (4) na página 327.

⁷³³Ver a Nota de rodapé 110 na página 41.

contínuas dentro dos ímãs é suficiente para explicar os fenômenos. A última suposição não parece ser suficiente para explicar a indução unipolar, enquanto que a suposição da existência física de dois fluidos magnéticos não só parece fornecer essa explicação, mas também levou à consideração desses fenômenos pela primeira vez.

Se alguém tentasse deduzir uma explicação dos fenômenos designados pelo nome de indução unipolar da teoria eletrodinâmica dos fenômenos magnéticos de Ampère, essa tentativa fracassaria porque, de acordo com Ampère, as correntes galvânicas só podem ser decompostas naqueles elementos que têm uma ação de atração ou repulsão entre si ao longo da linha reta que os conecta. Pois é fácil ver que um elemento de corrente no plano do anel não pode ser movido perpendicularmente em relação ao anel por uma corrente no anel e, inversamente, que tal movimento do elemento de corrente não pode induzir uma corrente no anel. A questão vital da indução unipolar, no entanto, parece consistir no fato de que a indução ocorre no momento em que o elemento indutor está no plano do anel, pois se nesse momento a indução for zero, ocorrerá uma transição de positivo para negativo ou vice-versa. A característica da indução unipolar, entretanto, é que essa transição nunca ocorre. Portanto, parece inútil buscar uma explicação para a indução unipolar na teoria eletrodinâmica de Ampère, pelo menos enquanto permanecermos com a decomposição das correntes galvânicas em elementos que se atraem ou se repelem ao longo da linha reta que os conecta.

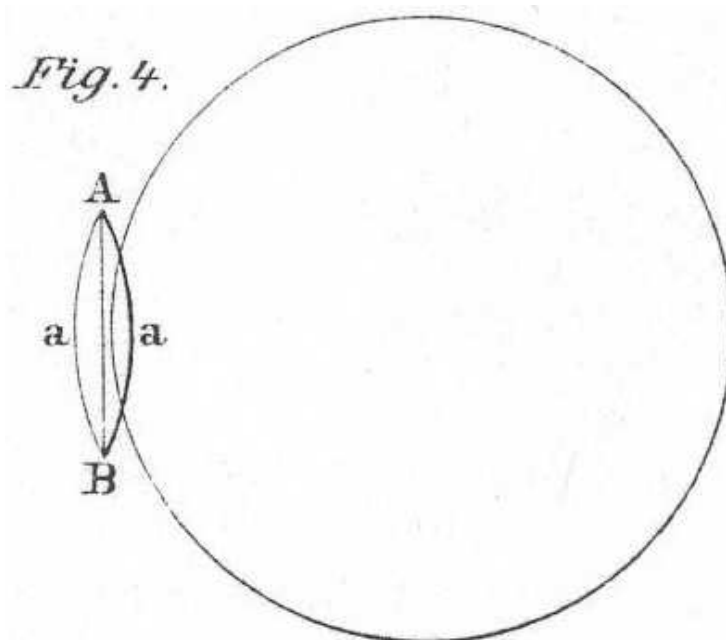
A futilidade desse esforço pode ser ainda mais ilustrada considerando-se, a esse respeito, o belo teorema provado pela primeira vez por Ampère, apresentado no Volume anterior dos *Resultate*, página 51,^{734,735} pelo qual as ações magnéticas das correntes galvânicas podem ser definidas. Com esse teorema — a saber, que no lugar de qualquer corrente linear que limite uma superfície *arbitrária*, pode ser substituída com a ação pretendida uma distribuição de fluidos magnéticos em ambos os lados dessa superfície, a distâncias incomensuravelmente pequenas, — observe, *em primeiro lugar*, que se for dada uma corrente linear fechada, um número infinito de superfícies limitadas por ela pode ser concebido; *em segundo lugar*, que somente o que é verdadeiro para as ações dos fluidos magnéticos distribuídos em todas essas superfícies pode ser verdadeiro para a ação da corrente: em outras palavras, que nessa representação nada pode ser inferido da distribuição dos fluidos magnéticos em uma dessas superfícies que não seja também decorrente da distribuição em cada uma das outras superfícies. Agora imagine o plano de um pequeno condutor circular, através do qual uma corrente galvânica passa continuamente, que, de acordo com a hipótese de Ampère, é substituído por um elemento magnético, perpendicular ao plano da Figura 4 e onde AB é o diâmetro do círculo; em ambos os lados, a distâncias incomensuravelmente pequenas do plano do círculo, imaginemos os fluidos Norte e Sul distribuídos em AaB e $Aa'B$; assim, esse condutor pode ser movido de tal forma que o magnetismo em a atravesse o anel indutor, enquanto a' permanece sempre do lado de fora.⁷³⁶ É fácil ver, entretanto, que algo foi deduzido da distribuição dos fluidos magnéticos no plano do círculo que não se seguiria da

⁷³⁴[Nota de Riecke:] *Obras de Gauss*, Vol. V, pág. 169.

⁷³⁵Ver [Gau39a, Seção 37, página 51 dos *Resultate* e página 169 do Vol. V das *Obras de Gauss*] com traduções para o inglês em [Gau41a, Seção 37, págs. 229-230] e [GT14, Seção 37, pág. 39], e tradução para o espanhol em [Gau21d]. Ver ainda a Seção 10.7, Equivalência entre uma folha magnética e um circuito com corrente, de [AC11] e [AC15].

⁷³⁶Na Figura 4 a letra a do lado esquerdo deve ser substituída por a' . O fluido Norte estaria distribuído em AaB , enquanto que o fluido Sul estaria distribuído em $Aa'B$. O anel indutor é representado pelo círculo no plano da Figura 4. Esse anel é ortogonal ao círculo que tem AB como seu diâmetro e no qual flui uma corrente constante.

distribuição dos mesmos [fluidos] em qualquer outra superfície delimitada pelo mesmo círculo e que, conseqüentemente, não pode valer para a ação da corrente galvânica nesse círculo.



22.4.2 Aplicação à Distribuição do Magnetismo no Interior de Ímãs Permanentes

Todas as ações dos ímãs normalmente observadas são ações no espaço exterior, dos quais, como se sabe, não se pode tirar nenhuma conclusão definitiva quanto à distribuição do magnetismo no interior [dos ímãs]. Pelo contrário, há inúmeras maneiras de distribuir o magnetismo no interior, todas elas idênticas em relação a essas ações. Existe até mesmo uma dessas maneiras diferentes em que nenhum magnetismo é distribuído internamente, mas todo o magnetismo é distribuído na superfície. Houve apenas *um* experimento em que se aprendeu algo sobre a distribuição no interior e, em particular, reconheceu-se que o último tipo de distribuição, ou seja, na superfície, não ocorre na natureza; esse é o experimento em que um ímã é quebrado.

No entanto, aprendemos agora através da *indução unipolar* sobre as ações de um ímã que ele exerce sobre os fluidos elétricos em seu *interior*, os quais ele coloca em movimento. A aplicação que pode ser feita da indução unipolar é, portanto, muito óbvia, ou seja, investigar a verdadeira distribuição de seu magnetismo sem quebrar o ímã. Mesmo que não seja possível conhecer essa distribuição completamente, ainda é muito importante obter algumas novas informações sobre ela.

Do ponto em que o fio condutor toca a superfície cilíndrica do ímã até a extremidade do eixo de rotação tocada pelo fio condutor, há um caminho para a corrente galvânica dentro do ímã, onde a indução é *mais fraca*. Se o cilindro for girado, esse caminho geralmente muda e descreve uma superfície curva durante uma rotação completa, que divide o cilindro em duas partes, como uma seção transversal. O magnetismo livre nessa superfície está para o valor médio do magnetismo livre em qualquer seção transversal no caso do primeiro cilindro examinado, de acordo com o resultado da *Terceira Série*, assim como 7,48 : 16,178; no caso do segundo cilindro, de acordo com o resultado da *Sexta Série*, assim como 14,40 : 36,27. Pois

a corrente induzida pela *alternância* de um indutor (consistindo de 1 espira) (que, no caso do ímã *mais curto*, quando repetido a cada segundo, produziu uma deflexão = 16,178 divisões de escala, no caso do ímã *mais longo* = 36,27 [divisões da escala]) fornece uma medida do valor médio do magnetismo livre de todas as seções transversais do cilindro, enquanto a corrente induzida por 2 *rotações* do cilindro (que, com o ímã *mais curto*, quando 2 rotações eram feitas a cada segundo, produzia uma deflexão = 7,48 partes da escala, com o *mais longo* = 14,40) fornece, de acordo com o sexto teorema da página 322,⁷³⁷ uma medida do mínimo de magnetismo livre contido nas áreas curvas da seção transversal que são descritas pelos diferentes caminhos da corrente galvânica no cilindro durante sua rotação.

Se observarmos os resultados da *Quinta* ou *Sétima* Série de experimentos, em que a corrente foi conduzida a partir da superfície do cilindro não no meio, como nas outras Séries de experimentos, mas no final, encontraremos (como já apontado anteriormente) quase o mesmo resultado, tanto no caso em que a corrente galvânica precisa passar por todo o comprimento do cilindro para ir do ponto em que entra até o ponto em que sai, quanto no caso em que ela não precisa passar por todo o comprimento do cilindro, — ou seja, em outras palavras, os dois mínimos de magnetismo livre contidos nas áreas curvas da seção transversal que, durante a rotação do cilindro, são descritas pelos diferentes caminhos que a corrente galvânica percorre desde o ponto de contato da superfície até o ponto final que está *próximo* ou *distante* do eixo de rotação, são quase iguais, o que permite supor que a corrente galvânica só passa da superfície para o eixo de rotação em sua *entrada* e *saída* (ou seja, nas extremidades do cilindro que estão magnetizadas com quase a mesma intensidade).

Se compararmos os resultados da *Quinta* e *Sétima* Séries entre si e observarmos que, na [Série] anterior, o magnetismo nas extremidades (por onde passa a corrente galvânica) foi bastante aumentado pela introdução de ímãs externos, mas não na [Série] posterior, a diferença encontrada não será perceptível, ou seja, a deflexão medida no primeiro caso é quase três vezes maior do que no segundo, ou se comporta exatamente como 58,10 : 21,05. É interessante notar, no entanto, que o primeiro resultado, 58,10, é próximo, mas não igual, ao obtido na Sexta Série de experimentos, 61,70, apesar de as extremidades do cilindro (por onde a corrente galvânica passou) terem sido reforçadas pela introdução de ímãs externos, — uma prova de que esse reforço está longe de tornar o magnetismo dessas extremidades igual ao magnetismo do *centro* de onde a corrente galvânica foi conduzida na Sexta Série de experimentos.

A implementação adicional dessa aplicação deve ser reservada para uma oportunidade futura.

22.4.3 Aplicação à Distribuição do Magnetismo no Ferro Doce

Investigar a distribuição do magnetismo no ferro doce tem sido particularmente difícil. O ferro só assume um magnetismo mais forte quando toca um ímã ou, pelo menos, se aproxima muito dele, onde faltam meios para separar as ações que emanam do ferro das ações que surgem diretamente do ímã, ainda mais porque este último não pode ser considerado constante, já que o ímã sofre uma mudança por meio da reação do ferro. A indução unipolar fornece esse meio. Pois se deixarmos o ímã em repouso e simplesmente girarmos o ferro, obteremos uma indução que é meramente devida ao magnetismo do ferro e, inversamente, se deixarmos o ferro em repouso e simplesmente girarmos o ímã, obteremos uma indução

⁷³⁷Pág. 70 dos *Resultate* ou pág. 158 das *Obras* de Weber, [Web40] com tradução para o inglês em [Web24d]. Essa página contendo o teorema 6 é equivalente à pág. 322 dessa tradução.

que é meramente devida ao ímã. Por fim, mesmo que se permita que ambos girem juntos, o magnetismo ainda pode ser determinado na seção transversal do ferro onde ele é mais fraco (na extremidade voltada para longe do ímã).

22.5 Conclusão

É bem sabido que quase todos os experimentos magnetoelétricos têm contra-experimentos eletromagnéticos. Portanto, pode-se supor que também haverá um contra-experimento para o nosso experimento, que foi feito pela primeira vez por Faraday.⁷³⁸ Esse é de fato o caso. Esse contra-experimento nem precisa ser realizado, pois já foi feito e é conhecido há muito tempo. Esse contra-experimento obviamente consiste no fato de que, em vez de girar o cilindro magnético e, assim, induzir uma corrente galvânica no condutor, uma corrente galvânica é passada pelo circuito na direção oposta, após o que o ímã começa a girar por conta própria na mesma direção em que foi girado anteriormente.⁷³⁹ Se esse fenômeno, que é conhecido há muito tempo, tivesse sido investigado mais de perto, seria fácil chegar à *indução unipolar* considerada aqui, mas, até onde sei, isso não aconteceu. Esse experimento conhecido há muito tempo também parece contradizer a hipótese de Ampère de que não há fluidos magnéticos, mas sim correntes galvânicas contínuas dentro dos ímãs; ao contrário, esse fenômeno também parece ser explicado apenas pela existência real de dois fluidos magnéticos separados espacialmente.

⁷³⁸Ver a Nota de rodapé 678 na página 309, e a Seção 21.2.

⁷³⁹Essa experiência foi realizada pela primeira vez por Ampère em 1822 e será discutida no Capítulo 23.

Capítulo 23

Introdução ao Segundo Artigo de Weber sobre Indução Unipolar

A. K. T. Assis⁷⁴⁰

Em seu segundo trabalho sobre indução unipolar Weber fez alguns acréscimos e alterações relacionados à sua publicação anterior.⁷⁴¹

Em 1821 Faraday mostrou que uma extremidade de um pedaço retilíneo de fio conduzindo uma corrente constante podia girar ao redor do eixo vertical de um ímã cilíndrico, enquanto a outra extremidade do pedaço de fio permanecia parada ao longo do eixo do ímã. Ele também mostrou que uma extremidade de um ímã cilíndrico podia girar ao redor do eixo vertical de um pedaço retilíneo de fio conduzindo uma corrente constante, enquanto a outra extremidade do ímã permanecia parada ao longo do eixo do fio, Figura 23.1.⁷⁴² Esse fenômeno é usualmente conhecido como motor de Faraday e não deve ser confundido com a experiência de 1832 de Faraday sobre indução unipolar.

Em 1822 Ampère mostrou experimentalmente e teoricamente que era possível girar um ímã cilíndrico ao redor de seu eixo utilizando correntes elétricas. Para essa finalidade ele conectou uma bateria entre o centro da face superior do ímã vertical e um ponto ao longo da lateral do ímã utilizando contatos condutores. Quando uma corrente elétrica foi passada através do ímã, ele começou a girar ao redor de seu eixo. Esse fenômeno é conhecido como motor de Ampère. Nomes alternativos para esse instrumento são motor unipolar, motor homopolar ou o motor mais simples do mundo.⁷⁴³ Hoje em dia esse motor pode ser facilmente reproduzido utilizando um ímã de neodímio, um prego, um pedaço de fio e uma pilha comum, Figura 23.2. Quando o circuito é fechado, o ímã e o prego giram juntos em alta velocidade

⁷⁴⁰Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

⁷⁴¹[Web40] com tradução para o inglês em [Web24d], e [Web41h] com tradução para o inglês em [Web24e]. Esses dois trabalhos são traduzidos aqui.

⁷⁴²[Far22b] e [Far52b] com tradução para o francês em [Far21], [Far22a] e [Far52a].

⁷⁴³[Amp22a] com tradução parcial para o inglês em [Amp69a], [Amp22b], [Amp22c] e [Amp22b]. Ver também [Blo82, págs. 114-115], [GVM01], [GVMA02], [GV02], [SU04a] com tradução para o inglês em [SU04b] e tradução para o espanhol em [SU04c], [Fea06], [AGV07], [Mun07], [Won09a], [Won09b], [Cha09], [MGMG10], [AC11, Seção 7.2.3: Rotação de um ímã ao redor de seu eixo], [AC12], [CA13], [AC15, Seção 7.2.3], [MV17] e [Cha25].

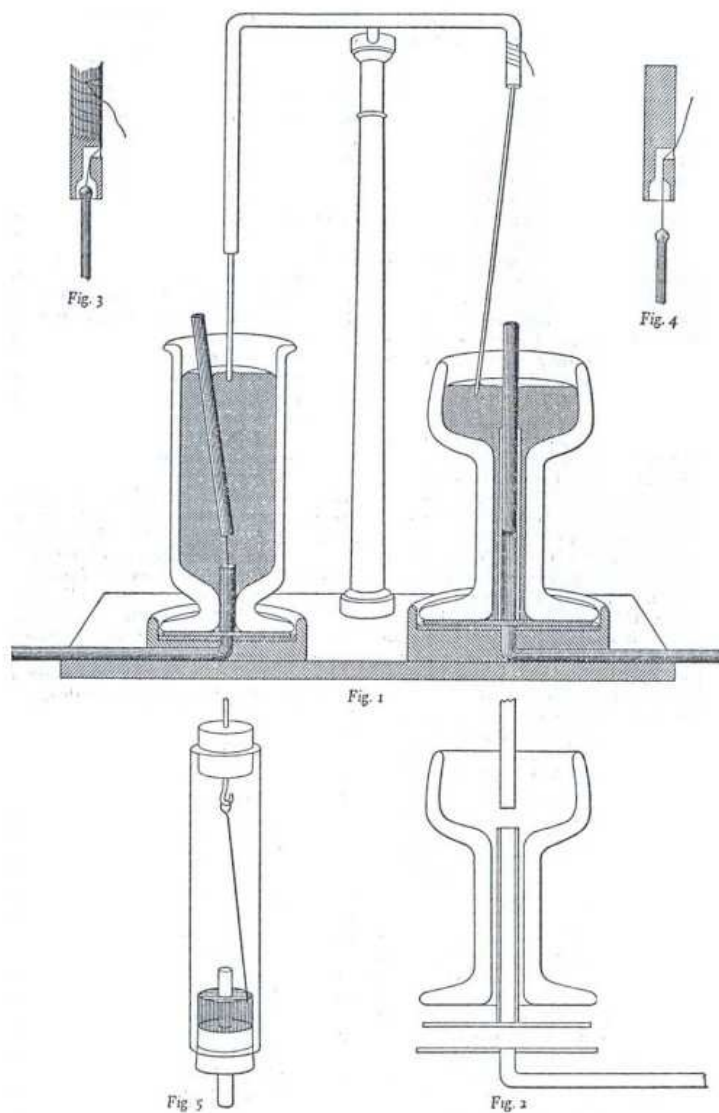


Figura 23.1: O motor de Faraday.

ao redor do eixo do sistema.

Em seu artigo de 1841 Weber comparou o motor de Ampère com a experiência de indução unipolar de Faraday. Em particular, ele considerou a experiência de Faraday na qual um ímã cilíndrico era girado em relação ao solo, sendo que isso produzia uma corrente elétrica indicada por um galvanômetro conectado através de contatos deslizantes entre o centro da face superior do ímã vertical e um ponto na borda do disco.

Boa parte do artigo de 1841 de Weber é idêntica à sua publicação anterior de 1840. Quando o segundo artigo de Weber foi reimpresso em suas *Obras*, as partes idênticas não foram incluídas.

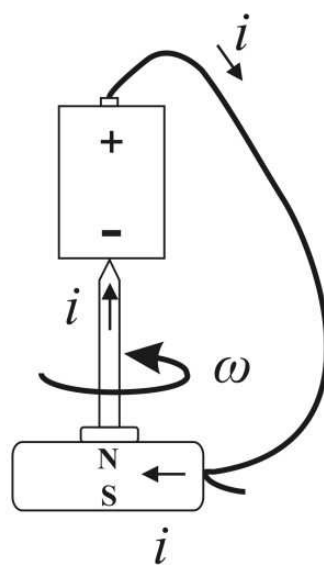


Figura 23.2: Motor de Ampère.

Capítulo 24

[Weber, 1841] Indução Unipolar

Wilhelm Weber^{744,745,746}

[Extratos.]^{747,748}

Em uma “Nota sobre a interação entre um ímã e um condutor galvânico” publicada no Volume 37 dos *Annales de Chimie et de Physique*,⁷⁴⁹ Ampère apresentou um relato da rotação do condutor galvânico em torno do eixo do ímã descoberto por Faraday e também procurou vincular esse fato à explicação da rotação de um ímã em torno de seu próprio eixo descoberta por Ampère quando uma corrente galvânica passa por ele.⁷⁵⁰

Ampère mostra primeiro que, de acordo com as leis gerais estabelecidas por ele, uma corrente fechada que *não esteja em conexão rígida* com o ímã, não pode girar o ímã em torno de seu eixo, nem, inversamente (se todas as partes do condutor estiverem firmemente conectadas entre si), pode ser posta em rotação pela influência do ímã.⁷⁵¹ Se, no entanto, uma parte da corrente fechada estiver no ímã, essa parte, diz ele, forma com o ímã um *sistema rígido* no qual a ação e a reação devem necessariamente se cancelar. Somente a ação da parte da corrente galvânica que não está em uma conexão fixa com o ímã permanece e, como ela *não é fechada*, em geral, fará o ímã girar em torno de seu eixo. Ele observa que não faz diferença se a corrente galvânica é conduzida *através do ímã* ou se apenas uma parte do condutor de corrente está firmemente conectada ao ímã.

⁷⁴⁴[Web41h] com tradução para o inglês em [Web24e].

⁷⁴⁵As Notas de Johann Christian Poggendorff, o Editor dos *Annalen der Physik und Chemie*, são representadas por [Nota de Poggendorff]; as Notas de E. Riecke, o Editor do Volume 2 das *Obras* de Weber, são representadas por [Nota de Riecke]; todas as outras Notas são de minha autoria.

⁷⁴⁶[Nota de Poggendorff:] Texto dos *Resultate des magnetischen Vereins* (Volume 4), com acréscimos e alterações pelo autor [isto é, por W. Weber].

⁷⁴⁷[Nota de Riecke:] *Annalen der Physik und Chemie*, Vol. 52, págs. 353-386.

⁷⁴⁸[Web41h] com tradução para o inglês em [Web24e].

⁷⁴⁹[Amp28].

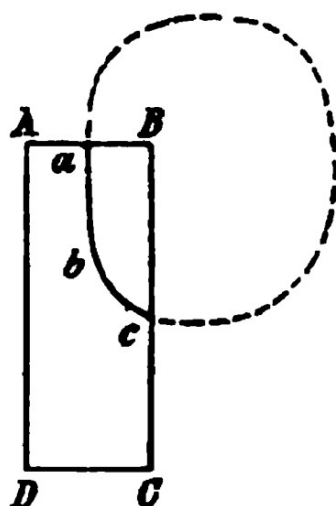
⁷⁵⁰Em 1828 Ampère estava comparando seu próprio motor de 1822, cuja versão moderna está representada na Figura 23.2, com o motor de Faraday de 1821 mostrado na Figura 23.1. Ampère obviamente não estava discutindo a experiência de 1832 de Faraday sobre indução unipolar descrita na Figura 21.1.

⁷⁵¹Isto é, sob essas condições, o circuito fechado não pode girar o ímã ao redor do eixo do ímã. Da mesma forma, nessas condições o ímã também não pode girar o circuito fechado ao redor de um eixo do circuito fechado.

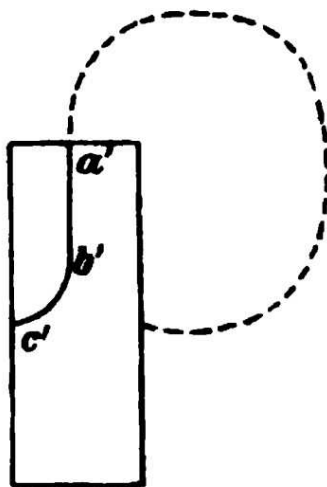
No entanto, os dois fenômenos que Ampère procura explicar aqui pelas *mesmas* razões são, na verdade, de natureza diferente, e cada um requer sua própria explicação. A explicação que ele fornece se aplica apenas à rotação descoberta por Faraday, mas não é de forma alguma válida para a rotação descoberta por ele mesmo.

A diferença entre os dois fenômenos é facilmente explicada com o seguinte.

Seja $ABCD$, Figura 1, a seção longitudinal de um ímã, abc um condutor galvânico isolado passando pelo ímã, cuja continuação na parte externa do ímã é indicada por linhas tracejadas.



Nessa Figura, como Ampère supõe, (1) todo o condutor galvânico realmente forma uma linha fechada, (2) a parte abc forma um sistema fixo com o ímã. Entretanto, essas duas condições, que são atendidas na Figura 1, não se aplicam mais se o ímã for girado em torno de seu eixo. Embora o condutor isolado abc permaneça em sua conexão fixa com o ímã, o ponto final c descreverá um círculo em torno do eixo de rotação e, portanto, será separado do restante da corrente, como mostra a Figura 2, pelo menos se o ímã inteiro não estiver cercado por uma correia condutora, que a extremidade c sempre toca durante seu movimento circular. Se esse contato contínuo ocorrer, então, além das duas partes do condutor distinguidas anteriormente, há uma terceira, ou seja, a parte da correia que estabelece a conexão entre c e o ponto condutor, que difere essencialmente das outras duas [partes] por seu comprimento variável. Esse cinturão condutor foi formado por Faraday usando mercúrio.



Figur 2.

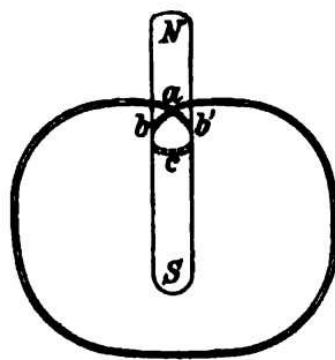
No experimento de Ampère, no entanto, em que *nenhum condutor isolado abc* atravessa o ímã, mas a corrente passa *livremente* pelo ímã de *a* para *c*, não é admissível a premissa de Ampère de que a parte da corrente que passa pelo ímã se comporta da mesma forma que a corrente que passa pelo condutor isolado *abc* quando o ímã gira, ou seja, que ela forma um *sistema fixo* com o ímã e, conseqüentemente, deve participar da rotação em si, mas não pode produzi-la. O magnetismo e a corrente galvânica, embora estejam contidos no mesmo suporte (um cilindro de aço), não formam um *sistema rígido*; pois somente o magnetismo adere às moléculas de aço e só pode ser movido *junto* com elas. A corrente galvânica, por outro lado, não adere às moléculas de aço, mas pode se mover livre e independentemente delas *em todas as direções* dentro do ímã. A partir disso, é evidente que essa corrente e esse magnetismo não devem de forma alguma ser considerados, como faz Ampère, como *corpos firmemente conectados* que giram juntos com o cilindro de aço e cuja interação deve ser sempre cancelada. Porém, se o magnetismo está firmemente ligado às moléculas de aço, mas não a corrente galvânica que as atravessa, segue-se que essa corrente pode mover o cilindro de aço através desse magnetismo, mas não vice-versa. Isso, no entanto, elimina a razão pela qual Ampère explicou a rotação de um ímã através do qual uma corrente galvânica passa *livremente*, e esse fenômeno, que foi colocado fora de dúvida por experimentos, poderia até parecer *impossível* de acordo com Ampère, o que não é o caso, no entanto, se permitirmos que seja assumida na explicação a *existência física de fluidos magnéticos* nas moléculas de aço, em vez das correntes hipotéticas de Ampère, como será mostrado na investigação a seguir. Os fenômenos em consideração são os *fenômenos de indução* descobertos por Faraday, que formam o análogo dos fenômenos eletromagnéticos anteriores, e que podem ser facilmente aplicados a esses últimos.⁷⁵²

Do que foi dito, no entanto, não se conclui de forma alguma que uma indução contínua do

⁷⁵²O artigo nos *Annalen der Physik und Chemie* continua aqui da mesma forma que na publicação original nos *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins*. Contudo, quando esse artigo dos *Annalen der Physik und Chemie* foi reimpresso no Volume 2 das *Obras* de Weber, a parte comum aos dois trabalhos não foi reproduzida, pois ela já havia aparecido na reimpressão anterior do artigo publicado nos *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins*. Estou seguindo aqui esse enfoque adotado nas *Obras* de Weber. Os próximos três parágrafos deve ser comparados com os parágrafos correspondentes da página 319.

mesmo tipo, que um ímã contendo apenas *um* fluido pode produzir, seja impossível com um ímã contendo os *dois* fluidos em quantidades iguais; pelo contrário, ainda há um *terceiro* caso a ser considerado, que ainda não está contido nos dois anteriores, e que é possível quando os fluidos magnéticos *realmente existem* e estão realmente *separados espacialmente* uns dos outros nas moléculas do ímã, a saber:

3. uma molécula magnética é movida de tal forma que não atravessa o anel completamente, nem de forma alguma, mas *metade* passa através dele, *metade* permanece fora dele, por exemplo, a metade que contém o fluido *Norte* se move para baixo através do anel, e para cima do lado de fora, ou vice-versa; mas a outra metade, que contém o fluido *Sul*, sempre permanece do lado de fora. O efeito então *não* é zero como um todo, porque um fluido (que passou pelo anel) induziu uma corrente que *não* é cancelada, porque o outro fluido (que não passou pelo anel) não induziu nenhuma corrente ou induziu uma corrente não homogênea, cujo efeito desaparece como um todo. Mas como tanto o anel quanto a molécula magnética são *corpos rígidos*, é óbvio que esse terceiro caso só é possível se um deles for *quebrado*. Uma molécula magnética, no entanto, não pode ser quebrada de modo que cada parte contenha apenas *um* fluido, o que seria necessário para que *um* fluido sozinho passasse pelo anel intacto; conseqüentemente, o *anel* deve ser quebrado, o que pode ser feito facilmente: deve-se observar apenas que, durante a quebra do anel, não pode ocorrer nenhuma interrupção do circuito galvânico. O anel pode (1) ser quebrado sem interromper esse circuito se a molécula magnética indivisível for tal que a corrente galvânica possa passar *entre os dois fluidos*; pois essa molécula pode então, enquanto o anel está sendo quebrado, *conectar condutivamente* as duas partes uma à outra; (2) o anel pode ser rompido sem interromper esse circuito se o fio de cobre do qual o anel é feito for enrolado uma vez ao redor do centro do ímã antes de ser rompido e, depois de rompido, atrás do ímã em *c*, a conexão em *a* for mantida, Figura 3. Durante essa conexão em *a*, as extremidades cortadas dos fios *abc* e *ab'c* podem ser puxadas através de *a* e, finalmente, suas extremidades podem ser conectadas novamente.



Figur 3.

Destes dois métodos, o primeiro será examinado com mais detalhes aqui. É fácil encontrar um arranjo que atenda aos requisitos estabelecidos.

No final deste artigo, algumas palavras podem ser acrescentadas para explicar o fenômeno descoberto pela primeira vez por Ampère, mencionado na Introdução.⁷⁵³ É bem sabido que

⁷⁵³Esse parágrafo final do artigo nos *Annalen der Physik und Chemie* deve ser comparado com o parágrafo final do artigo nos *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins*, ver a Seção 22.5.

quase todos os experimentos magnetoelétricos correspondem a contra-experimentos eletromagnéticos. O fenômeno da indução unipolar que acabamos de examinar pertence ao domínio dos experimentos magnetoelétricos, enquanto o fenômeno descoberto por Ampère, discutido na Introdução, pertence ao domínio dos experimentos eletromagnéticos, e um exame mais detalhado mostra que ele deve ser considerado como o contra-experimento do primeiro e, portanto, pode ser explicado da mesma forma, de modo que o contra-experimento também pode ser citado como prova da existência e da separação física dos fluidos magnéticos. De acordo com a conhecida inversão, segundo a qual as leis de indução são deduzidas das leis eletromagnéticas, as considerações anteriores podem ser facilmente aplicadas a esse contra-experimento, e parece supérfluo explicar isso mais detalhadamente aqui.

Capítulo 25

[Wöhler e Weber, 1841] Composição das Pilhas Galvânicas

[Friedrich Wöhler e Wilhelm Weber]^{754,755,756}

Os Professores Wöhler⁷⁵⁷ e Weber informaram a *Königl. Gesellschaft der Wissenschaften* (*Sociedade Real de Ciências [de Göttingen]*) sobre uma descoberta feita pelo Professor Poggendorff⁷⁵⁸ na composição de pilhas galvânicas⁷⁵⁹ e apresentada à *Königl. Akademie der Wissenschaften zu Berlin* (*Academia Real de Ciências de Berlim*) no dia 29 de abril deste ano, juntamente com alguns comentários.⁷⁶⁰

É conhecido que para produzir os maiores efeitos galvânicos, não é mais necessário utilizar instrumentos gigantescos que são tão inconvenientes quanto costumavam ser, mas que nos tempos modernos aprendemos a alcançar os mesmos efeitos com instrumentos pequenos e convenientes. A melhor performance é mostrada por uma pilha, descrita pelo Sr. Grove,⁷⁶¹ na qual pequenas células de cerâmica, cujas paredes são permeadas de líquido, são preenchidas com ácido nítrico comum e cercadas externamente com ácido sulfúrico diluído. Placas de platina são mergulhadas no primeiro líquido e placas de zinco amalgamadas no segundo líquido, e as conexões necessárias são feitas com fortes fios de cobre (ver os *Annalen* de Poggendorff, 1839, Vol. 48, pág. 300; 1840, Vol. 49, pág. 511).⁷⁶² Até o momento o custo das placas de platina tem limitado o uso dessas pilhas poderosas e convenientes; portanto, aqueles que não conseguiram obter essas pilhas por esse motivo ficarão satisfeitos em saber que o Prof. Poggendorff tem usado placas de ferro em vez de placas de platina com praticamente

⁷⁵⁴[WW41c] com tradução para o inglês em [WW21]. Ver ainda [WW41a] e [WW41b].

⁷⁵⁵Todas as Notas de rodapé são de minha autoria.

⁷⁵⁶Os nomes dos autores aparecem apenas no primeiro parágrafo desse artigo.

⁷⁵⁷Ver a Nota de rodapé 71 na página 34.

⁷⁵⁸Johann Christian Poggendorff (1796-1877) editou o periódico *Annalen der Physik und Chemie* de 1824 a 1876. Muitos artigos de Weber foram publicados nesse jornal. O *Annalen der Physik* moderno é o sucessor desse periódico.

⁷⁵⁹Em alemão: *galvanischer Säulen*. Essa expressão pode ser traduzida como pilhas ou baterias galvânicas.

⁷⁶⁰Ver também [Pog40].

⁷⁶¹A célula voltaica de Grove, também chamada de elemento, bateria ou pilha de Grove, recebeu esse nome em homenagem ao seu inventor, William Robert Grove (1811-1896), [Gro39]. Essa bateria elétrica consistia em um ânodo de zinco no ácido sulfúrico diluído e um cátodo de platina no ácido nítrico concentrado. Os dois líquidos eram separados por um pote de cerâmica poroso.

⁷⁶²[Gro39] e [Sch40].

o mesmo sucesso. O Prof. Poggendorff escreveu o seguinte em primeiro de maio desse ano:

Tenho me ocupado agora com as células de dois líquidos que parecem merecer a maior atenção e que ainda não foram muito examinadas. Fiz aproximadamente 50 dessas células e encontrei que quase todas elas possuem a inestimável vantagem de produzir uma corrente [elétrica] constante, de tal forma que você pode fazer medições precisas... Quero dizer apenas uma coisa de uso prático, a saber, que nas células de Grove você pode substituir a cara platina por ferro, aço ou ferro fundido assim que o *ácido fumegante concentrado* (*acidum nitricum fumans*) é usado em vez do ácido nítrico usual. Você pode até mesmo diluir esse ácido fumegante com $1\frac{1}{4}$ parte do ácido nítrico comum, ou até que o ferro ainda não seja atacado. Esse último aspecto é necessário; se você pegar o ácido muito fraco, o ferro é atacado com grande violência. Com o ácido da concentração especificada, o ferro permanece tão brilhante quanto a platina. Aqui vão os elementos dessas células para ácido nítrico concentrado fumegante e ácido sulfúrico com 4 partes de água. O zinco foi amalgamado.

	Força eletromotriz	Resistência
zinco e platina	100,00	13,120
zinco e ferro	78,62	11,275
zinco e aço	86,99	12,927
zinco e ferro fundido	89,63	12,913.

Da resistência, 4,36 polegadas de fio de alpaca, com $1/6$ de linha de diâmetro, vão para o fio que fecha [o circuito elétrico].⁷⁶³

Como se pode ver, com o *mesmo* tamanho de placa é possível obter $9/10$ da ação da célula de Grove com ferro. O décimo que está faltando pode ser substituído facilmente aumentando as placas. A propósito, a *corrente* é tão *constante* quanto em uma célula de Grove.

Em resposta a essa notificação, os Srs. Wöhler e Weber fizeram imediatamente várias tentativas de confirmar a informação fornecida, as quais forneceram ao mesmo tempo o resultado curioso de que uma corrente muito forte é produzida se o ferro puro for imerso em *ambos* os líquidos, trocando também a chapa de zinco amalgamada, que foi imersa em ácido sulfúrico diluído, por uma chapa de ferro. Essa última placa, como ela não pode ser amalgamada, foi atacada pelo ácido sulfúrico com um fraco desenvolvimento de gás hidrogênio. Isso, contudo, não afeta a ação; em vez disso, aconteceu que a ação dessa célula era tão constante quanto na célula de Grove. Esta célula, composta *só de ferro* e dos dois líquidos, que produz ações tão poderosas, é de interesse para a teoria da pilha em geral e para o estudo das propriedades galvânicas do ferro em particular. Já foram construídas muitas vezes células nas quais dois metais idênticos são combinados com dois líquidos diferentes, por exemplo, por Becquerel e De la Rive, das quais Fechner forneceu uma lista no *Repertorium der Experimentalphysik* (*Repertório de Física Experimental*), pág. 454 e seguintes;⁷⁶⁴ mas parece que apenas a existência e direção da corrente atraíram o interesse, sendo que o uso e a

⁷⁶³Em alemão: *Vom Widerstand kommen hier 4,36 (Zoll Neusilberdraht von 1/6 Linie Durchmesser) auf den Schliessungsdraht*. A expressão *Neusilber* pode ser traduzida como alpaca, prata alemã, metal branco, prata nova ou argentan. Ela refere-se a uma liga de cobre, níquel e zinco.

⁷⁶⁴[Bec29, págs. 14-18], [dIR29, pág. 102] e [Fec32, págs. 454-455].

investigação adicional foram dificultados pela fraqueza e inconstância da ação. Uma ação tão forte e constante como a descrita [aqui], que torna estes tipos de correntes realmente úteis e passíveis de estudo minucioso, é nova e merece atenção especial. Dois pares, nos quais cada placa tinha apenas cerca de 3 polegadas quadradas de área superficial, fizeram com que finos fios de platina brilhassem e eram suficientes para decompor violentamente a água. Certamente esse assunto merece ser melhor investigado, a menos que o Prof. Poggendorff já tenha talvez ampliado sua investigação muito mais extensa sobre esse assunto.

O fraco desenvolvimento de gás hidrogênio nas placas de ferro imersas em ácido sulfúrico diluído pode ser facilmente evitado ao usar *chapas de ferro estanhado*, as quais nesse aspecto fazem o mesmo serviço que o zinco amalgamado; elas parecem até mesmo ser preferíveis a essas últimas já que são finas e duráveis, enquanto o zinco torna-se quebradiço devido ao mercúrio e perde facilmente parte de seu amálgama, que, como um pó cinza, cobre a superfície da placa ou se deposita no ácido, enfraquecendo assim a ação da pilha.

Capítulo 26

[Weber, 1841a] Medição de Intensas Correntes Galvânicas com Baixa Resistência de Acordo com Unidades Absolutas

Wilhelm Weber^{765,766,767}

Aconteceu várias vezes no artigo sobre atrito magnético^{768,769} ser importante determinar a intensidade de uma corrente galvânica em unidades absolutas para ser capaz de compará-la com a intensidade de outras correntes em quaisquer condições. Por exemplo, quando uma roda de ferro foi magnetizada por uma corrente galvânica para medir seu atrito magnético, havia o interesse de medir mais exatamente a corrente que havia produzido essa ação. Com esse propósito, o procedimento que Faraday havia indicado na Sétima Série de suas pesquisas experimentais em eletricidade (*Philosophical Transactions* de 1834 e os *Annalen* de Poggen-dorff de 1834, Vol. 33, págs. 316 e seguintes),⁷⁷⁰ poderia facilmente ter sido utilizado. Nesse procedimento a intensidade da corrente é medida pela quantidade de água que ela decompõe em um dado tempo. Contudo, caso a corrente tivesse atravessado um instrumento para a decomposição da água, ela teria sido bem enfraquecida, o que não deveria acontecer naquelas experiências que exigiam uma corrente não enfraquecida.

Acontece frequentemente que não é permitida a medição absoluta da intensidade da corrente pela quantidade de água decomposta devido à condução necessária da corrente através de um aparelho de decomposição da água. Esse é especialmente o caso quando são utilizados circuitos simples, nos quais uma corrente muito forte através desse aparelho é tão enfraquecida que não ocorre decomposição de água e, portanto, não há como medir a decomposição da água. Em tais casos é necessário utilizar um método diferente no qual a

⁷⁶⁵[Web41b] com tradução para o inglês em [Web21].

⁷⁶⁶As Notas de Wilhelm Weber são representadas por [Nota de Wilhelm Weber:]; as Notas de Heinrich Weber, o editor do Volume 3 das *Obras* de Wilhelm Weber, são representadas por [Nota de Heinrich Weber:]; todas as outras Notas são de minha autoria.

⁷⁶⁷F. Kohlrausch e K. H. Wiederkehr discutiram a importância desse artigo, [WK68].

⁷⁶⁸[Nota de Heinrich Weber:] *Obras* de Wilhelm Weber, Vol. II, pág. 200.

⁷⁶⁹[Web41f].

⁷⁷⁰[Far34a] com tradução para o alemão em [Far34c].

corrente passa apenas através de fios de cobre curtos e espessos,⁷⁷¹ que não aumentam de modo perceptível a resistência.

Portanto, nos experimentos anteriores, em vez do método dado por Faraday, foi usado o seguinte procedimento muito simples: um certo pedaço do fio condutor grosso foi colocado em linha reta a alguma distância de uma agulha magnética de tal forma que ela se desviou consideravelmente do meridiano magnético, enquanto todo o restante do circuito foi posicionado a uma distância tão grande que sua ação na agulha não precisava ser levada em consideração. A partir da deflexão medida da agulha e levando em conta o comprimento e posição do fio condutor ativo, assim como a intensidade absoluta do magnetismo terrestre no ponto de observação, tornou-se possível uma determinação absoluta da intensidade da corrente galvânica — como foi apresentado na pág. 49 dos *Resultaten des magnetischen Vereins im Jahre 1840*.^{772,773} Incidentalmente, esse método tem a vantagem que ele permite a determinação absoluta da intensidade de corrente em cada instante, enquanto que ao usar o método de Faraday só são obtidos resultados médios para períodos de tempo mais longos. Também podem ser realizadas experiências nas quais a intensidade de uma mesma corrente é medida simultaneamente de acordo com esse método e com aquele de Faraday e, portanto, seria possível uma comparação das unidades⁷⁷⁴ em que são baseadas esses dois métodos; contudo, essa comparação não é necessária para a determinação absoluta da intensidade de corrente. Tal comparação só é necessária com o galvanômetro comum, que consiste em uma agulha magnética provida de um multiplicador,⁷⁷⁵ se com ele se pretende obter determinações absolutas, para as quais não é diretamente adequado, como fez Jacobi nos *Annalen* de Poggendorff, Vol. 48.⁷⁷⁶

Dada a frequente necessidade de determinar a intensidade absoluta de correntes galvânicas em circuitos simples, onde o método de Faraday falha, pode ser de muita utilidade um instrumento que é construído de acordo com os princípios mencionados anteriormente e que leva diretamente ao nosso objetivo, sendo esse o motivo pelo qual são dadas aqui algumas explicações sobre seu arranjo mais vantajoso e sobre as medições feitas com ele.

O instrumento⁷⁷⁷ é construído tanto mais convenientemente, quanto maior for a distância do fio com corrente comparada com o comprimento da agulha, já que nesse caso não é necessária muita consideração sobre a distribuição do magnetismo na agulha; tudo isso supondo que essa distância maior leva a uma deflexão da agulha que pode ser observada com precisão suficiente. É óbvia vantagem de conduzir o fio em um amplo círculo vertical ao redor da agulha em vez de em uma linha reta (o que foi feito nas tentativas mencionadas anteriormente na ausência de um instrumento adequado e apenas para facilitar a execução). Com a mesma deflexão, a distância de todas as partes do fio com corrente pode então ser muito maior.⁷⁷⁸ Além disso, se o condutor forma exatamente um círculo vertical ao redor do centro da agulha, fica muito simples e fácil calcular a intensidade absoluta da corrente galvânica a partir da deflexão observada da agulha. Esse formato circular do condutor tem finalmente a

⁷⁷¹Em alemão: *durch starke und kurze Kupferdrähte*.

⁷⁷²[Nota de Heinrich Weber:] *Obras* de Wilhelm Weber, Vol. II, págs. 202 e 203.

⁷⁷³[Web41f, págs. 202-203 das *Obras* de Weber].

⁷⁷⁴Em alemão: *Maasse*.

⁷⁷⁵Ver a Nota de rodapé 91 na página 38.

⁷⁷⁶Moritz Hermann von Jacobi (1801-1874). Ver [Jac39].

⁷⁷⁷A Prof. Karin Reich chamou minha atenção para um artigo de Weber lidando com esse instrumento que não está contido nas *Obras* de Weber: [Web42c].

⁷⁷⁸Isto é, a distância de qualquer parte do fio circular até a agulha pode ser muito maior do que a distância do fio reto até a agulha no caso anterior.

vantagem especial de que o restante do condutor pode ser posicionado muito facilmente de tal forma que ele não tenha uma influência perceptível sobre a agulha. Para este [propósito], é necessário apenas colocar os dois condutores, que alimentam a corrente que entra e sai, muito próximos um do outro, sendo que nesse caso suas ações sobre a agulha se cancelam mutuamente. Na primeira parte a partir do anel, a corrente é melhor conduzida por dois tubos de cobre, um dos quais envolve o outro, mas é mantido isolado dele, conforme mostrado nas Figuras 1 a 4.⁷⁷⁹ A seção transversal do condutor circular deve ser grande o suficiente para que sua resistência seja desprezível.

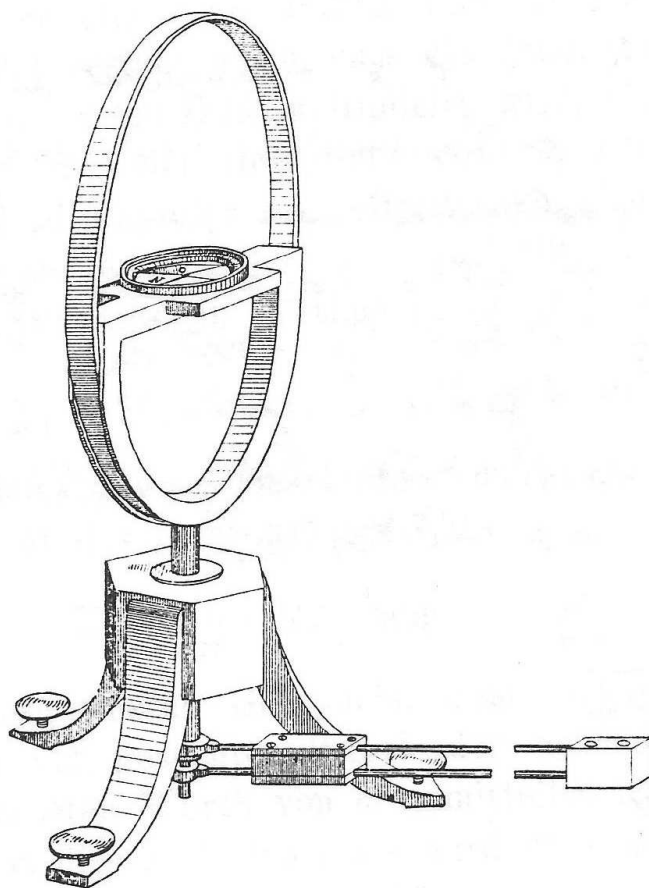


Fig. 1.

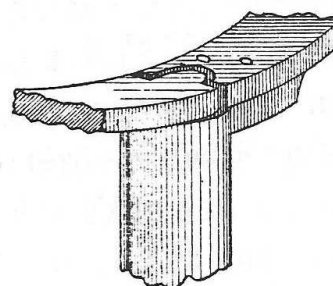


Fig. 2.

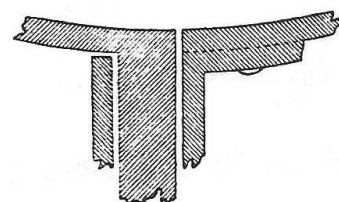


Fig. 3.

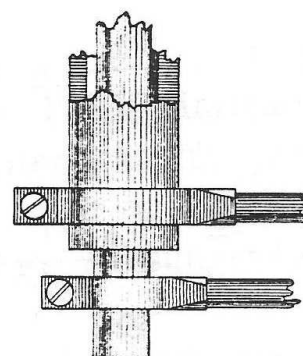


Fig. 4.

Tive um instrumento montado de acordo com isto no qual o anel de cobre tinha $198\frac{1}{2}$ milímetros de diâmetro e sua seção reta era de 30 milímetros quadrados. Esse anel era cortado na parte de baixo e uma extremidade era soldada ao condutor por onde entrava a corrente e a outra extremidade ao condutor por onde a corrente saía. Esses condutores, encaixados em tubos, um dentro do outro mas isolados, conduziam a corrente 100 milímetros para baixo até dois fios condutores com 4 milímetros de espessura e 1 metro de comprimento, que seguem próximos entre si até duas taças de mercúrio, que podiam ser conectadas às duas placas do circuito galvânico.⁷⁸⁰ A agulha magnética ficava no meio do círculo sobre uma placa de

⁷⁷⁹Ou seja, a alimentação da corrente do anel é feita por um cabo coaxial.

⁷⁸⁰Ou seja, conectadas às duas placas de metal ligadas aos terminais da bateria elétrica.

madeira presa ao círculo. O próprio círculo ficava sobre um tripé de madeira com parafusos de fixação. O comprimento da agulha era de 50 milímetros e ela se deslocava sobre um arco circular dividido em graus. A utilização do instrumento não requer explicação. O cálculo da intensidade absoluta [da corrente elétrica] a partir da deflexão observada da agulha consiste em multiplicar a tangente do ângulo de deflexão por um número constante que é deduzido do tamanho do anel de cobre e da intensidade absoluta do magnetismo da Terra no local de observação.⁷⁸¹ Se R ($= 99,125\text{ mm}$) denota o raio do anel, T ($= 1,7833$) a intensidade horizontal do magnetismo terrestre (em Göttingen),⁷⁸² então esse fator constante é dado por:

$$\frac{1}{\pi} \cdot RT = 56,2675 .$$

Se φ denotar a deflexão observada, então a desejada intensidade absoluta da corrente medida será:

$$\frac{1}{\pi} \cdot RT \cdot \tan \varphi = 56,2675 \cdot \tan \varphi .$$

Para uma utilização mais conveniente, pode ser estabelecida uma Tabela que mostra diretamente o valor desejado da intensidade absoluta da corrente para cada valor observado de φ . Nenhum outro instrumento pode realizar essas medições absolutas de forma tão fácil e rápida quanto este.

Ainda deve ser dito algo sobre a unidade de medida da intensidade de corrente sobre a qual esse cálculo está baseado. Define-se como unidade de medida da corrente aquela corrente que, fluindo ao redor da unidade de área, atua à distância da mesma forma que a unidade de magnetismo livre que é definida na *Intensitatis vis magneticae*.^{783,784,785,786}

Também deve ser observado que todas as observações serão bem facilitadas se a bússola vier com um amortecedor, que faz com que ela entre em repouso rapidamente. Para medições mais precisas seria necessário trocar a bússola por um pequeno magnetômetro, mas nesse

⁷⁸¹O experimento é realizado com o plano do anel paralelo ao meridiano magnético local.

⁷⁸²Como medido pela primeira vez por Gauss, com a ajuda de Weber, em seu trabalho sobre a medição absoluta da força magnética terrestre, ver os Capítulos 9, 10, 11 e 12. Ver, em particular, a Seção 9.2 na página 134.

⁷⁸³Ver os Capítulos 9, 10, 11 e 12. Um ímã com a unidade de magnetismo livre é aquele que possui momento magnético $= 1$ em unidades absolutas. O eixo desse ímã deve ser considerado ortogonal à área unitária ao redor da qual flui a corrente unitária que exerce a mesma ação à distância que esse ímã. A ação igual exercida por essa unidade de corrente ou por esse ímã de momento magnético unitário a que Weber se refere aqui, é a força ou torque exercidos sobre outro circuito com corrente ou sobre outro ímã.

⁷⁸⁴[Nota de Wilhelm Weber:] Observe que essa corrente tem a metade da intensidade daquela corrente que, dada a unidade de comprimento do condutor e [a unidade] de distância até a agulha imantada, exerce a unidade de torque sobre a agulha imantada contendo a unidade de magnetismo livre, à qual as intensidades de corrente medidas foram relacionadas anteriormente (ver a página 49 anterior [*Obras* de Wilhelm Weber, Vol. II, págs. 202 e 203]). Isso vem facilmente da lei fundamental do galvanismo, como apresentada na Seção 1 do *Allgemeine Lehrsätze* no volume anterior dos *Resultate* [*Obras* de Gauss, Vol. V, pág. 198] e já foi mencionado aqui na pág. 48 [*Obras* de Wilhelm Weber, Vol. II, pág. 202].

⁷⁸⁵[Nota de Heinrich Weber:] Ver as *Obras* de Wilhelm Weber, Vol. II, págs. 202 e 203; e as *Obras* de Gauss, Vol. V, pág. 198.

⁷⁸⁶[Web41f, págs. 48-49 dos *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1840* e págs. 202-203 das *Obras* de Weber]. A obra *Allgemeine Lehrsätze* mencionada por Weber refere-se ao seguinte trabalho de Gauss: “Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im Verkehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstossungs-Kräfte — Proposições gerais relacionadas às forças atrativas e repulsivas que atuam na razão inversa do quadrado da distância”, [Gau40, pág. 198 das *Obras* de Gauss], com tradução para o inglês em [Gau43].

caso teria de ser utilizado um círculo de cobre muito maior, mesmo se a agulha fosse muito curta e tivesse, por exemplo, de 60 a 80 milímetros de comprimento. A deflexão da agulha ao medir correntes intensas ainda seria mensurável caso o anel de cobre também tivesse 600 milímetros de diâmetro.

Algumas medições feitas com esse instrumento podem ser citadas agora. Para avaliar as maiores ações que podem ser produzidas com as correntes galvânicas, é importante medir as intensidades de corrente de circuitos simples sem aumentar perceptivelmente a resistência que possuem devido aos fios de condução. Essa medição fornece então diretamente o máximo da intensidade de corrente, o que pode ser aproximado ao aumentar o número de pares de placas no caso de a corrente ter de superar uma resistência maior. A Tabela a seguir mostra os resultados dessas medições para 5 circuitos simples de vários tamanhos e composições:

Designação do circuito	Deflexão observada	Intensidade absoluta calculada
<i>A</i>	72°2'	173,52
<i>B</i>	78°15'	270,52
<i>C</i>	66°40'	130,44
<i>D</i>	54°2'	77,54
<i>E</i>	73°2, 5'	184,52

Deve ser observado o seguinte sobre o tamanho e composição desses circuitos:

A era uma célula de Daniell,⁷⁸⁷ na qual a área de cobre tocada pela solução de vitríolo de cobre era de 9 decímetros quadrados. A solução de vitríolo de cobre, assim como a água que circundava a barra de zinco amalgamada, foi misturada com ácido sulfúrico a 10 por cento.

B era uma célula de Grove.⁷⁸⁸ Um béquer de platina com uma área superficial de 1,9 decímetros quadrados foi preenchido com ácido nítrico comum, enquanto um pequeno pote de barro poroso cheio de ácido sulfúrico diluído ficava no meio e um bastão de zinco amalgamado era imerso no último. O ácido sulfúrico foi misturado com 80 por cento de água.

C era uma célula seguindo as indicações do Prof. Poggendorff⁷⁸⁹ com uma placa de ferro em ácido nítrico fumegante, ao invés da placa de platina no ácido nítrico comum da célula de Grove. O ácido nítrico tocava os dois lados da placa de ferro, mas a área total de contato era de apenas 3/4 decímetros [quadrados]. O ácido sulfúrico ao redor da célula de argila e na qual era imerso um cilindro de zinco amalgamado era diluído com 90 por cento de água.

D era uma célula do mesmo tamanho e composição que a anterior, com a única diferença que a placa de zinco da célula anterior imersa em ácido sulfúrico diluído também foi substituída por uma placa de ferro. Já foi chamada a atenção ao fato de que apenas um metal é necessário para que surjam aqui fortes correntes (*Göttinger gel. Anz.* 1841, 81º exemplar).^{790,791}

Finalmente, *E* era uma célula de acordo com as recomendações do Prof. Bunsen em Marburg.⁷⁹² Um cilindro de carvão feito de hulha e coques, que foi permeado com ácido

⁷⁸⁷A célula voltaica, pilha ou elemento de Daniell recebeu esse nome em homenagem a seu inventor, John Frederic Daniell (1790-1845).

⁷⁸⁸Ver a Nota de rodapé 761 na página 349.

⁷⁸⁹Ver a Nota de rodapé 758 na página 349 e também [Pog40].

⁷⁹⁰[Nota de Heinrich Weber:] *Obras* de Wilhelm Weber, Vol. III, pág. 4.

⁷⁹¹[WW41c, pág. 4 das *Obras* de Weber]. Ver também [WW41a] e [WW41b]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 25.

⁷⁹²A célula voltaica, pilha ou elemento de Bunsen recebeu esse nome em homenagem a seu inventor,

nítrico, foi imerso em ácido sulfúrico diluído com uma área de superfície de $1\frac{7}{10}$ decímetros quadrados e cercado por um cilindro de zinco a uma curta distância. O ácido sulfúrico foi diluído com 90 por cento de água.

Os resultados anteriores são os maiores que foram obtidos ao testar várias células da mesma construção. Quatro exemplos foram testados do primeiro, quarto e quinto tipo, dois exemplos do terceiro tipo e apenas um exemplo do segundo tipo. A maior diferença nessas repetições ocorreu com o quinto tipo e provavelmente foi devido à condução frequentemente imperfeita da eletricidade do carvão para o fio de cobre. As outras três células produziram apenas cerca da metade de uma corrente tão forte quanto a mencionada anteriormente.

A corrente mais intensa entre aquelas medidas aqui foi obtida nas experiências anteriores com o circuito de Grove, cuja intensidade foi encontrada = 270,52. Tal corrente, se passasse sem diminuir pela água, iria decompor 2,536 miligramas de água por segundo, ou produziria aproximadamente $4\frac{3}{4}$ centímetros cúbicos de gás detonante,⁷⁹³ como será mostrado no próximo artigo.⁷⁹⁴ Se tal corrente abrange um metro quadrado de área, ela exerce forças magnéticas tão grandes à distância quanto um ímã de aço muito forte pesando 676,3 gramas (onde você pode contar 400 unidades [absolutas] de medida de magnetismo em 1 miligrama de aço) .

Finos fios de platina são utilizados frequentemente para estimar por seu brilho a intensidade da corrente. Uma medição mostrou que um brilho claro visível durante o dia de um fio de platina com $2/15$ milímetros de espessura foi produzido por uma corrente cuja intensidade absoluta era = 20. Para estimar a quantidade de calor liberada em tal fio, um pedaço com $28\frac{1}{2}$ milímetros de comprimento desse fio de platina com $2/15$ milímetros de espessura atravessou 114 gramas de água destilada. O calor liberado na água por uma corrente galvânica que foi conduzida através desse fio foi compartilhado com a água ao seu redor e podia ser medido pelo aumento de temperatura na água onde foi imerso um termômetro. A mesma corrente, que causou o aquecimento do fio e da água, foi conduzida através do círculo de cobre do galvanômetro e desviou do meridiano magnético a agulha magnética colocada no centro. A seguinte Tabela mostra os resultados de uma série dessas medições, nas quais a temperatura inicial da água era de 15° centígrados.

Robert Wilhelm Eberhard Bunsen (1811-1899). Essa bateria elétrica consistia em um ânodo de zinco no ácido sulfúrico diluído e um cátodo de carbono no ácido nítrico concentrado. Os dois líquidos eram separados por um pote de cerâmica poroso.

⁷⁹³Em alemão: *Knallluft*. Ver [Pat17, pág. 142]. A expressão *Knallgas* é traduzida como gás detonante ou oxi-hidrogênio (HHO). Ela é uma mistura de hidrogênio atômico e oxigênio atômico em uma proporção assumida como 2:1, a mesma proporção que a água. Quando esta mistura é inflamada, sua combustão produz água e 142,35 kJ (34,022 calorias) de calor para cada grama de hidrogênio queimado. O oxi-hidrogênio geralmente é produzido a partir da eletrólise da água.

⁷⁹⁴[Web41g] com tradução para o inglês em [Web21p], ver também [Web42d]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 27.

[Intervalo de] tempo	Deflexão	Temperatura da água
11'0"	52°30'	21,5
11'30"	52°30'	22,0
13'30"	51°30'	23,0
15'0"	51°30'	24,0
17'0"	52°0'	25,0
19'50"	51°50'	26,0
20'30"	51°20'	27,0
22'30"	51°0'	28,0
24'30"	50°30'	28,5
26'0"	50°10'	29,0
29'0"	49°20'	30,0

A diferença x entre a temperatura inicial da água e a temperatura após t minutos pode então ser determinada por

$$x = 0,95 \cdot t - 0,015 \cdot t^2 ,$$

a partir da qual vem que se o calor desenvolvido no fio for proporcional à intensidade da corrente,⁷⁹⁵ uma corrente cuja intensidade fosse = 1 aqueceria o fio de platina descrito durante 1 minuto de tal maneira que a temperatura de 1 grama de água subiria de 1,4° centígrado. Se o fio fosse cortado dentro da água, a deflexão da agulha seria nula, provando que nenhuma parte mensurável da corrente estava fluindo através da água.

É desejável que em experimentos com fortes correntes galvânicas sua intensidade absoluta seja sempre medida e relatada de maneira semelhante à descrita aqui, a fim de que os resultados obtidos em diferentes condições por vários observadores possam ser comparados entre si e sua concordância verificada.

⁷⁹⁵James Prescott Joule (1818-1889) descobriu nesse mesmo ano de 1841 que o calor produzido é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente, multiplicado pela resistência do fio. Ver [Jou41b]; [Jou41a] com tradução para o francês em [Jou42]. Ver também [MS20] e [Mar22].

Capítulo 27

[Weber, 1841b] Sobre o Equivalente Eletroquímico da Água

Wilhelm Weber^{796,797,798,799}

De acordo com os numerosos experimentos de Faraday,⁸⁰⁰ parece não haver dúvida de que, nas decomposições químicas pela corrente galvânica, a massa decomposta de cada corpo está em uma proporção constante em relação à quantidade de corrente utilizada, isto é, com a quantidade de eletricidade que passou pela seção transversal do circuito durante a decomposição, não importando como a corrente galvânica é produzida e em que condições possa estar o corpo decomposto. O outro resultado igualmente relevante encontrado por Faraday tem de ser acrescentado a essa lei importante, afirmando que massas quimicamente equivalentes de diferentes corpos necessitam a mesma quantidade de corrente (ou seja, iguais quantidades de eletricidade) para decompô-las. Por exemplo, 9 gramas de água e 36,5 gramas de ácido clorídrico são massas quimicamente equivalentes e, de acordo com Faraday, necessitam iguais quantidades de eletricidade para serem decompostas em oxigênio e hidrogênio gasosos, e em cloro e hidrogênio gasosos, respectivamente. Se falarmos então da eletricidade como um corpo que se combina com outros corpos (com os constituintes do corpo decomposto) de acordo com suas proporções equivalentes quimicamente determinadas, e se assumirmos uma certa quantidade (positiva ou negativa) de eletricidade como uma unidade de medida, e se então determinarmos as massas dos outros corpos que se combinam com ela, então Faraday denomina esses últimos de equivalentes eletroquímicos para distingui-los dos equivalentes químicos aos quais eles são proporcionais. Os equivalentes químicos e eletroquímicos diferem apenas nas várias unidades em que são baseados, a saber, na unidade de massa⁸⁰¹ do oxigênio (ou hidrogênio) para aqueles, e na unidade de massa da eletricidade para estes. O próprio

⁷⁹⁶[Web41g] com tradução para o inglês em [Web21p]. Ver também [Web42d].

⁷⁹⁷As Notas de Heinrich Weber, o editor do Volume 3 das *Obras* de Wilhelm Weber, são representadas por [Nota de Heinrich Weber:]; todas as outras Notas são de minha autoria.

⁷⁹⁸[Nota de Heinrich Weber:] *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1840* (*Resultados das Observações da Associação Magnética no Ano de 1840*), editado por Karl Friedrich Gauss e Wilhelm Weber, Leipzig, 1841, pág. 91-98 e *Annalen der Physik und Chemie*, editado por J. C. Poggendorff, Volume 55, Leipzig, 1842, págs. 181-189.

⁷⁹⁹F. Kohlrausch e K. H. Wiederkehr discutiram a importância desse artigo, [WK68].

⁸⁰⁰[Far33] e [Far34a], com traduções para o alemão em [Far34d] e [Far34c], respectivamente.

⁸⁰¹Em alemão: *Masseneinheit*.

Faraday não especificou a massa de eletricidade que ele aceita como uma unidade. Contudo, se quiséssemos assumir a massa que se combina com a unidade de massa de oxigênio (ou hidrogênio) na água para formar o gás oxigênio (ou o gás hidrogênio), os dois tipos de massas equivalentes seriam completamente idênticos. Portanto, massas eletroquimicamente equivalentes devem significar alguma coisa diferente de massas quimicamente equivalentes, elas precisam ser medidas de acordo com uma outra unidade fundamental⁸⁰² da eletricidade, a qual é deduzida de uma outra classe de ações elétricas. A classe das ações magnéticas da eletricidade nas correntes galvânicas é a categoria mais conveniente para esse propósito, já que essas ações foram reduzidas às unidades absolutas na teoria do magnetismo e foram desenvolvidas para elas métodos precisos de medição.

A unidade absoluta de eletricidade (positiva ou negativa ou ambas juntas) é então considerada a quantidade de eletricidade que deve passar pela seção transversal de um condutor em uma unidade de tempo (segundo) que em um plano delimita a área unitária, a fim de produzir ações à distância idênticas às ações produzidos pela unidade fundamental absoluta do magnetismo livre.⁸⁰³

Agora será de particular interesse, baseado nessa unidade absoluta da eletricidade, determinar o equivalente eletroquímico de qualquer corpo, por exemplo, como aquele da água, a partir do qual será então fácil deduzir os equivalentes eletroquímicos dos outros corpos de acordo com as leis descobertas por Faraday com a ajuda de seus equivalentes determinados quimicamente em relação aos quais eles são proporcionais. A determinação do equivalente eletroquímico da água com base na unidade de eletricidade especificada aqui é então o assunto desse artigo.

Com esse propósito, é necessário observar qualquer ação magnética mensurável da corrente galvânica enquanto uma certa quantidade de água está sendo decomposta. Para isso, nem a ação da corrente no galvanômetro senoidal de Pouillet, nem no galvanômetro tangencial de Nervander, podem ser usadas, pois esses instrumentos, embora possam fornecer comparações corretas das intensidades de corrente, não podem fornecer determinações absolutas.⁸⁰⁴ Portanto, o instrumento descrito no artigo anterior^{805,806} parece ser o único aparelho apropriado para essa tarefa. De fato, ele é o método mais fácil e mais conveniente, se não estiverem envolvidas medições mais refinadas, e mesmo estas poderiam ser realizadas se o próprio instrumento fosse feito da maneira mais precisa indicada acima,^{807,808} ou seja, com

⁸⁰²Em alemão: *Grundmaasse*. Essa expressão pode ser traduzida como “unidade fundamental”, “unidade básica” ou “dimensão básica”.

⁸⁰³Isto é, esse circuito com corrente unitária, fluindo ao redor de uma área unitária, deve produzir ações idênticas àquelas ações geradas por um dipolo magnético que possui uma unidade de momento magnético (momento magnético = 1 em unidades absolutas). O eixo desse dipolo tem de ser considerado ortogonal ao plano do pequeno circuito conduzindo uma corrente constante de intensidade igual a uma unidade de corrente (intensidade de corrente = 1), fluindo ao redor de uma área com uma unidade de área (área = 1). As ações a que Weber se refere aqui, são uma força ou torque exercidos sobre outros circuitos com corrente, ou exercidos sobre outros ímãs.

⁸⁰⁴Em alemão: *Sinus-Boussole* e *Tangenten-Boussole*. O galvanômetro tangencial (também denominado de galvanômetro tangente ou galvanômetro de tangente), foi inventado por Johan Jakob Nervander (1805-1848). Já o galvanômetro senoidal (também denominado de galvanômetro seno ou galvanômetro de seno) foi inventado por Claude Servais Mathias Pouillet (1790-1868), [Ner33], [Pou37], [VS08] e [Sih21]. Friedrich Kohlrausch discutiu a medição de correntes usando os galvanômetros tangencial e senoidal, [Koh83a, Capítulos 64 e 65, págs. 188-192].

⁸⁰⁵[Nota de Heinrich Weber:] *Obras* de Wilhelm Weber, Vol. III, pág. 8.

⁸⁰⁶[Web41b, pág. 8 das *Obras* de Weber]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 26.

⁸⁰⁷[Nota de Heinrich Weber:] Nesse mesmo trabalho, pág. 10.

⁸⁰⁸[Web41b, pág. 10 das *Obras* de Weber]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 26.

um círculo de cobre muito grande e uma agulha muito pequena, suspensa por um fio, como em um magnetômetro, e equipada com um espelho para que pudesse ser observada com telescópio e uma escala.

Na ausência da versão mais refinada de tal instrumento, tenho usado um aparelho baseado em outros princípios e direcionado a outros fins, sobre o qual devo mencionar brevemente o que é necessário para o presente propósito. Ao utilizar esse instrumento, nenhuma agulha magnética é necessária, mas apenas o próprio condutor da corrente galvânica.

Um fio de cobre revestido de seda e de comprimento conhecido é enrolado cuidadosamente em uma bobina cilíndrica⁸⁰⁹ de um certo diâmetro, de tal forma que todas as voltas ficam bem próximas de círculos concêntricos. A área desses círculos pode ser igualada à área coberta pelo fio, que é baseada no comprimento do fio, no diâmetro da bobina e no número de voltas. Ela pode ser facilmente calculada e será representada por S .

As duas extremidades do fio levam a dois ganchos de metal na bobina, isolados um do outro, aos quais dois outros fios finos, não revestidos,⁸¹⁰ são amarrados, dos quais toda a bobina de fio é suspensa de maneira *bifilar*.

A suspensão *bifilar* da bobina nos últimos dois fios tem um propósito duplo: *em primeiro lugar*, assim como ocorre com o magnetômetro bifilar,⁸¹¹ para obter uma certa força diretriz⁸¹² D e então determinar todas as forças atuando na bobina para fazê-la girar. Embora essa força diretriz possa ser calculada a partir do comprimento dos fios de suspensão, da distância entre eles e do peso que suportam (na medida em que suas próprias elasticidades não precisem ser levadas em consideração), ela pode ser encontrada de forma mais precisa através das experiências especificadas no *Intensitas*⁸¹³ para a determinação do momento de inércia, às quais se pode fazer referência aqui.

Em segundo lugar, esses dois fios de suspensão têm a finalidade especial de formar a ponte através da qual a corrente é conduzida do exterior para o fio e vice-versa, sem prejudicar em nada a mobilidade da bobina, como ocorreria se fossem necessárias pontas de metal ligadas à bobina e mergulhando em taças de mercúrio, onde o atrito inevitável não permite medições.

A suspensão bifilar garante que mesmo quando a corrente atravessa a bobina, sua orientação e suas oscilações podem ser observadas com a mesma liberdade quanto a orientação e as oscilações do magnetômetro bifilar. Portanto, é permitido usar as mesmas ferramentas refinadas para suas observações, a saber, prender um espelho à bobina e observar a imagem de uma escala distante com o telescópio.⁸¹⁴ Desta forma, é pavimentado o caminho para as mais refinadas medições galvânicas sem o uso de agulhas magnéticas.

É fácil ajustar primeiro o suporte no qual a bobina está suspensa, de modo que ela mantenha a mesma orientação quando uma corrente de qualquer intensidade passa pela bobina, seja para frente ou para trás e, em seguida, girar todo o sistema em torno de um eixo vertical de 90° . Então o instrumento está pronto para realizar nossa medição.⁸¹⁵

⁸⁰⁹Em alemão: *Einer cylindrischen Rolle*. Ver a Nota de rodapé 708 na página 322.

⁸¹⁰Isto é, fios não revestidos de seda.

⁸¹¹Ver [Web38a] com tradução para o inglês em [Web41c], [Web66a] e [Web21m]. Esse artigo está traduzido no Capítulo 18. Ver também [Web94c].

⁸¹²Ver a Nota de rodapé 582 na página 245.

⁸¹³Ver os Capítulos 9, 10, 11 e 12.

⁸¹⁴Ver as Notas de rodapé 351 e 658 nas páginas 142 e 291, respectivamente.

⁸¹⁵Ou seja, inicialmente procura-se orientar o sistema tal que a Terra não exerça qualquer torque magnético sobre a bobina, qualquer que seja a corrente elétrica que esteja fluindo por ela. Essa orientação é aquela na qual o plano vertical da bobina é ortogonal à direção da componente horizontal da força magnética terrestre. Após encontrar essa orientação inicial, gira-se todo o sistema de 90° ao redor de um eixo vertical passando

A medição consiste então no fato que a mesma corrente que decompõe a água no aparelho de decomposição da água, atravessa nosso instrumento, no qual a força da componente horizontal do magnetismo terrestre causa uma deflexão [da bobina]. Essa deflexão precisa ser observada atentamente em curtos intervalos de tempo enquanto durar a decomposição da água. É então facilmente compreendido que a intensidade absoluta G da corrente galvânica para qualquer instante de tempo, enquanto é observada a deflexão φ , é dada pela seguinte equação:

$$STG = D \tan \varphi ,$$

na qual T denota a intensidade horizontal absoluta do magnetismo terrestre no local de observação. Se T for conhecida, e S e D forem determinadas exatamente, como indicado anteriormente, a intensidade G poderá ser calculada a partir da deflexão φ observada. A partir de todos os seus valores durante o intervalo de tempo t no qual ocorreu a decomposição da água, poderá ser determinada com grande precisão a quantidade de eletricidade E que atravessou a bobina e que foi usada para a decomposição da água a partir de:

$$E = \int G dt ,$$

de acordo com as unidades absolutas especificadas anteriormente. Se dividirmos a quantidade W de água decomposta expressa em miligramas por isso, o quociente W/E fornecerá aquela quantidade de água que é decomposta pela especificada unidade absoluta de eletricidade, ou seja, o procurado equivalente eletroquímico da água.

Após essa descrição do método de medição utilizado, podem ser resumidos brevemente os resultados das medições realizadas.

O fio enrolado na bobina tinha 1130 voltas; a periferia da bobina tinha 164 milímetros; o comprimento do fio 253 600 milímetros. A partir disso obtém-se S :

$$S = 4\,638\,330 \text{ milímetros quadrados.}$$

O momento de inércia K da bobina foi encontrado de acordo com as regras conhecidas:

$$K = 779\,400\,000 .$$

O período de oscilação t ,⁸¹⁶ que modificou-se um pouco com a temperatura, era

para a primeira e a segunda medição, $t = 8,0702''$	118 111 000 ,
para a terceira e a segunda medição, $t = 8,0803''$	117 817 000 ,
para a quarta e a quinta medição, $t = 8,0904''$	117 523 000 ,

a partir dos quais obtém-se os valores da força diretriz $\pi^2 K/t^2$ dada na última coluna.⁸¹⁷

pelo centro da bobina. O instrumento estará então pronto para realizar as medições, com o plano da bobina ao longo do meridiano magnético. Nesse instante inicial nenhuma corrente flui pela bobina. Quando uma corrente flui pela bobina, a Terra vai exercer um torque magnético sobre ela proporcional à intensidade da corrente. Esse torque vai tender girar a bobina ao redor de um eixo vertical passando por seu centro. Ao inverter a direção da corrente que flui pela bobina, inverte-se simultaneamente o torque exercido pela Terra sobre ela.

⁸¹⁶Em alemão: *Die Schwingungsdauer t*. Ver a Nota de rodapé 339 na página 139.

⁸¹⁷Weber está utilizando aqui a equação de movimento de um corpo rígido como dada por $\tau = -D\varphi = K\ddot{\varphi}$, na qual K é o momento de inércia do corpo, $\tau = -D\varphi$ é o torque ou momento rotacional atuando sobre ele quando gira de um ângulo φ , enquanto que D é uma constante denominada por Gauss de força diretriz decorrente do modo de suspensão, ver a Nota de rodapé 582 na página 245.

Na época dessas experiências em Göttingen, a intensidade horizontal absoluta T do magnetismo terrestre podia ser assumida como

$$T = 1,7833 ;$$

após uma medição quase que simultânea feita no Observatório Magnético.⁸¹⁸ Contudo, essas observações não foram feitas em um local livre de ferro, mas em uma sala do Observatório Astronômico⁸¹⁹ na qual havia uma grande quantidade de ferro a distâncias moderadas. Portanto, a intensidade horizontal nesse ponto de observação foi comparada com aquela no Observatório Magnético por meio de medições comparativas, e a intensidade absoluta do magnetismo terrestre para o local onde as experiências foram feitas resultou em:

$$T = 1,7026 .$$

Por fim, a observação simultânea do aparelho de decomposição de água e do galvanômetro nas cinco medições deu os seguintes resultados:

	Água decomposta em miligramas	Intervalo de tempo para a decomposição	Quantidade de eletricidade em unidades absolutas
1.	14,2346	1168"	1522,44
2.	14,2026	1280"	1504,92
3.	14,0872	1137,5"	1506,46
4.	14,0812	1154"	1501,43
5.	13,9625	1263"	1484,90

A partir dessa Tabela seguem-se os seguintes cinco resultados para o equivalente eletroquímico da água:

0,009 350	−0,000 026
0,009 437	+0,000 061
0,009 351	−0,000 025
0,009 337	−0,000 039
0,009 403	+0,000 027

portanto, como um valor médio [obtem-se o seguinte valor:]

$$0,009\,376 .^{820}$$

As diferenças entre as medições individuais e esse valor médio estão na última coluna.

Pode-se acrescentar que a quantidade de água decomposta foi, como de costume, determinada a partir do volume de gases liberados, sendo os dois gases coletados e medidos. A

⁸¹⁸Como estimado pela primeira vez por Gauss, com a ajuda de Weber, em 1832, ver os Capítulos 9, 10, 11 e 12. Ver em particular a Seção 9.2.

⁸¹⁹Em alemão: *Sternwarte*.

⁸²⁰A partir desse valor médio obtemos $1/0,009376 = 106,655 \approx 106\frac{2}{3}$. Em trabalhos posteriores Weber vai utilizar esse valor $106\frac{2}{3}$ sempre que se referir à unidade eletrolítica de corrente. Ver, por exemplo, [WK56, pág. 600 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [WK21, pág. 134] e tradução para o português em [WK08, pág. 96]; [KW57, págs. 614, 649 e 650 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [KW21, pág. 144]; [Web62, pág. 88 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [Web24b, pág. 117]; e [Web64, pág. 165 das *Obras* de Weber] com tradução para o inglês em [Web21d, pág. 319].

fim de evitar a absorção dos gases pela água, a coleta dos gases foi feita sobre uma cuba de mercúrio, que o Professor Wöhler teve a gentileza de emprestar.⁸²¹ A água a ser decomposta consistia de poucas gotas que, misturadas com ácido sulfúrico, ocupavam a extremidade selada de um tubo curvo em forma de *S* e que atuava como uma retorta.⁸²² O ar atmosférico era completamente excluído. Para conduzir a corrente galvânica através da água, foram utilizados dois fios de platina, que foram fundidos no tubo e passaram através da água sem se tocarem um ao outro. A decomposição da água começou bem antes do início da medição. O gás foi medido [enquanto estava] úmido. As paredes do tubo na qual ele foi coletado haviam sido umedecidas com água destilada antes de serem preenchidas com mercúrio. A influência da temperatura e das leituras do barômetro também foram levadas em conta apropriadamente. As observações foram todas realizadas conjuntamente com o Prof. Ulrich⁸²³ e por mim.

Em relação ao próprio resultado, a consistência entre as cinco medições pode ser considerada como uma nova confirmação do teorema de Faraday de que é sempre necessária a mesma quantidade de eletricidade para decompor a mesma quantidade de água. Se as circunstâncias permitirem no futuro, essas medições serão repetidas em condições ainda mais modificadas para tornar essa confirmação ainda mais conclusiva. Medidas semelhantes também serão feitas para outros corpos em vez de água, por exemplo, serão realizadas com ácido clorídrico.

Se compararmos finalmente o resultado dessas medições com aquelas do artigo anterior^{824,825} sobre a intensidade máxima de corrente de diferentes células [voltaicas], encontraremos, com já mencionado lá, um conhecimento sobre a taxa de decomposição da água que pode ser obtida com a corrente galvânica sob condições particularmente favoráveis. A partir disso pode ser julgado se a corrente galvânica é uma ferramenta prática para a produção do gás oxigênio e do gás hidrogênio. Finalmente, não requer uma discussão adicional o fato que o resultado obtido encontra uma aplicação útil nas experiências feitas com o Volta-eletrômetro de Faraday,⁸²⁶ a fim de determinar com maior precisão as quantidades absolutas de eletricidade e deduzir as ações magnéticas que poderiam ser produzidas por ele.

⁸²¹Ver a Nota de rodapé 71 na página 34.

⁸²²Vaso de gargalo estreito e curvo, para destilação.

⁸²³Georg Karl Justus Ulrich (1798-1879).

⁸²⁴[Nota de Heinrich Weber:] *Obras* de Wilhelm Weber, Vol. III, pág. 10.

⁸²⁵[Web41b, pág. 10 das *Obras* de Weber]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 26.

⁸²⁶O voltâmetro, também chamado de Volta-eletrômetro ou coulombímetro, é um instrumento de medida usado para medir a carga elétrica através da ação eletrolítica. Faraday utilizou um instrumento que denominou de Volta-eletrômetro, [Far34b, Artigo 565, Nota 1] e [Far34a, artigo 704] com tradução para o alemão em [Far34c]. Mais tarde essa expressão foi simplificada para voltâmetro. Hoje em dia também se usa a expressão coulombímetro. O voltâmetro não deve ser confundido com um voltímetro, que mede a voltagem ou diferença de potencial elétrico.

Capítulo 28

[Weber, 1842] Medição de Intensas Correntes Galvânicas de Acordo com Unidades Absolutas

Wilhelm Weber^{827,828,829}

O instrumento⁸³⁰ a ser usado para esta medição é montado de tal forma que a corrente permanece visivelmente a mesma quer seja passada através do instrumento para fins de medição ou não. Esse aspecto importante de medir a corrente sem diminuí-la, como deve ser usado nas aplicações, é alcançado ao tornar a resistência do instrumento de medida desprezível comparada com a resistência restante do circuito.

Portanto, o instrumento consiste, como mostra a Figura 1, de um único espesso anel de cobre,⁸³¹ que é colocado no plano do meridiano magnético, sendo que em seu eixo está localizada uma pequena agulha magnética (sendo seu comprimento apenas cerca da quarta parte do diâmetro do anel). A entrada e saída da corrente⁸³² é feita de tal forma que apenas a corrente que atravessa o anel pode atuar na agulha, como pode ser facilmente compreendido a partir da ilustração nas Figuras 1, 2, 3 e 4.⁸³³

⁸²⁷[Web42b] com tradução para o inglês em [Web21k].

⁸²⁸As Notas de Wilhelm Weber são representadas por [Nota de Wilhelm Weber:]; as Notas de Heinrich Weber, o editor do Volume 3 das *Obras* de Wilhelm Weber, são representadas por [Nota de Heinrich Weber:]; todas as outras Notas são de minha autoria.

⁸²⁹F. Kohlrausch e K. H. Wiederkehr discutiram a importância desse artigo, [WK68].

⁸³⁰Ver a Nota de rodapé 777 na página 354.

⁸³¹Em alemão: *aus einem einzigen starken Kupferringe*.

⁸³²Em alemão: *Die Zuleitung und Ableitung des Stroms*.

⁸³³Detalhes adicionais desse instrumento e de sua utilização podem ser encontrados em [Web41b]. Esse trabalho está traduzido no Capítulo 26.

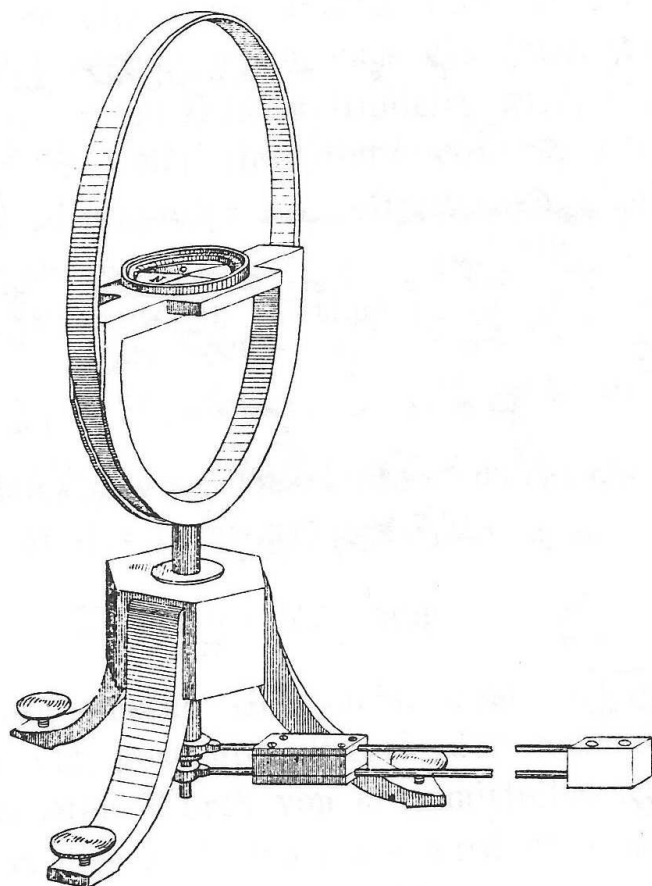


Fig. 1.

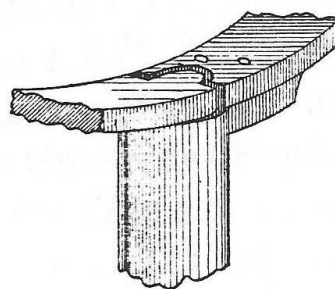


Fig. 2.

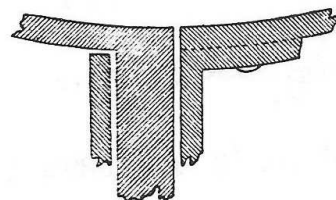


Fig. 3.

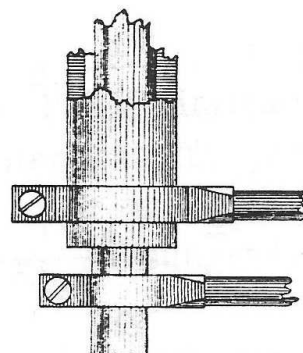


Fig. 4.

Esse arranjo do instrumento não necessita de qualquer explicação adicional, já que ele corresponde essencialmente ao arranjo de um *galvanômetro tangencial*,⁸³⁴ como ele já tem sido usado frequentemente. Portanto, só precisa ser mostrado mais detalhadamente como podemos utilizá-lo para determinar a intensidade de uma corrente galvânica de acordo com a *unidade absoluta*, o que é facilmente alcançado se assumirmos como conhecido o método Gaussiano de medição do magnetismo de acordo com a unidade absoluta (ver *Ann.*, Vol. 28, págs. 241 e 591).⁸³⁵

Assim como o *momento [magnético] de um ímã*, também o *momento [magnético] de um circuito galvânico fechado* pode ser medido em *unidades absolutas* (caso seja conhecida [a componente horizontal da força] magnética terrestre) a partir da deflexão, causada pela corrente, de uma agulha magnética em relação ao meridiano magnético. Essencialmente, as mesmas regras devem ser observadas tanto num caso quanto no outro para se obter um resultado seguro e preciso.

Se é para ser medido o *momento [magnético] de um ímã*, a deflexão de uma agulha [ímantada] é observada em duas distâncias diferentes do ímã. Assume-se que o ímã está sempre orientado no plano horizontal da agulha e perpendicular ao meridiano magnético, e

⁸³⁴Ver a Nota de rodapé 804 na página 362.

⁸³⁵Weber está se referindo aqui ao trabalho de Gauss, *Medição Absoluta da Força Magnética Terrestre*, [Gau33b]. Ver os Capítulos 9, 10, 11 e 12.

que seu eixo estendido encontra o centro da agulha. A deflexão deve ser observada quatro vezes em cada distância, colocando o ímã ora a Leste e ora a Oeste da agulha, e girando seu polo Norte ora para Leste e ora para Oeste. Sejam v e v' os valores médios das deflexões encontradas para as distâncias R e R' . Coloque agora⁸³⁶

$$\tan v = \frac{L}{R^3} + \frac{L'}{R^5} ,$$

e

$$\tan v' = \frac{L}{R'^3} + \frac{L'}{R'^5} .$$

Isso pode ser feito caso R e R' sejam tão grandes comparadas com o comprimento do ímã e da agulha, que possam ser desprezados os termos da série que contêm a sétima potência ou potências superiores de R e R' . Ao eliminarmos L' obtemos disso:

$$L = \frac{R^5 \tan v - R'^5 \tan v'}{R^2 - R'^2} ,$$

na qual v , v' , R e R' são conhecidos pelas medições. A teoria provou que existe a seguinte relação entre o valor calculado de L e o momento [magnético] M procurado do ímã:

$$L = \frac{2M}{T} \quad \text{ou} \quad M = \frac{1}{2}LT ,$$

na qual T denota a intensidade horizontal do magnetismo terrestre em unidade absoluta.

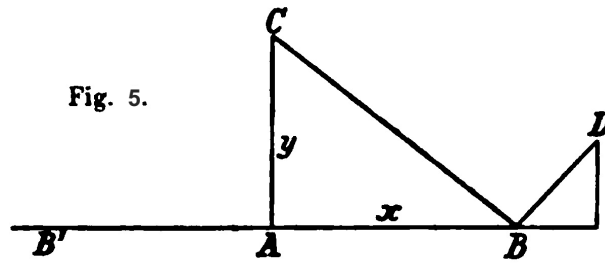
Esse método, que se assume ser conhecido, de medir o *momento [magnético] de uma barra magnetizada* de acordo com a unidade absoluta, pode ser aplicado diretamente para a medição do *momento [magnético] de um circuito galvânico fechado*, se todo esse circuito não ocupasse um espaço maior do que aquele ímã, e ao mesmo tempo produzisse uma deflexão igualmente grande da agulha a partir da mesma distância. Porém, como essas duas condições não podem ser satisfeitas ao mesmo tempo, a seguinte modificação do método pode ser aceita quando é aplicada a circuitos galvânicos.

A corrente galvânica passa através de um anel grande e espesso de cobre posicionado no plano do meridiano magnético. A entrada da corrente no anel é feita através de uma haste longa e espessa de cobre, a saída da corrente ocorre através de um tubo de cobre circundando a haste sem tocá-la.⁸³⁷ A agulha magnética é colocada de tal forma que esteja a uma distância igual de todas as partes do anel; o centro da agulha fica no eixo do anel, seja no próprio centro ou próximo a ele, de modo que a corrente circule quase inteiramente ao redor da agulha.

Seja o ponto A na Figura 5 o centro do anel, AB seu eixo, $AC = y$ seu raio; a intensidade da corrente é denominada de g .

⁸³⁶Nas próximas equações v e v' são os ângulos de deflexão da agulha imantada em relação ao meridiano magnético em duas distâncias diferentes R e R' entre o centro do ímã e o centro da agulha imantada. Além disso, L e L' são os comprimentos do ímã e da agulha imantada.

⁸³⁷Ou seja, a alimentação da corrente do anel vertical é feita por um cabo coaxial colocado abaixo dele, como mostrado nas Figuras 1 a 4.



Seja μ um elemento magnético Norte⁸³⁸ localizado sobre o eixo na distância $AB = x$ do centro. Se a corrente g atravessa o elemento $yd\varphi$ do anel no ponto C (de trás para a frente na Figura), então μ será movido de B para D perpendicular ao plano que passa por B e pelo elemento [do anel] em C . A intensidade dessa força motriz é diretamente proporcional ao produto $g\mu y d\varphi$ e inversamente proporcional ao quadrado $(x^2 + y^2)$ da distância CB ,⁸³⁹ ou ela pode ser expressa por:

$$\frac{fg\mu y d\varphi}{x^2 + y^2},$$

na qual f denota um fator constante. Se decomposmos essa força BD ao longo do eixo do anel ao multiplicar esse valor por $y/\sqrt{x^2 + y^2}$, o que fornece $fg\mu y^2 d\varphi/(x^2 + y^2)^{3/2}$, será obtida a resultante da força com a qual todos os elementos $yd\varphi$ da corrente circular tentam mover o elemento μ na direção do eixo, [a saber:]

$$= \frac{2\pi fg\mu y^2}{(x^2 + y^2)^{3/2}}.$$

As forças perpendiculares à direção do eixo se cancelam mutuamente.

Se compararmos essa força com aquela que um *ímã* infinitamente pequeno, cujo eixo coincide com a direção AB e cujo momento [magnético] é M , [localizado] na distância $CB = \sqrt{x^2 + y^2}$ do elemento μ localizado em B , exerceria, [a saber:]

$$= \frac{2M\mu}{(x^2 + y^2)^{3/2}},$$

(ver Gauss nos *Resultaten des magnetischen Vereins für das Jahr 1840*, pág. 26 e seguintes, e o artigo: “Bemerkungen über die Wirkungen eines Magnetes in die Ferne — Observações sobre as ações à distância de um ímã”),^{840,841} veremos que as duas expressões tornam-se idênticas quando for definido

$$M = \pi fg y^2.$$

Se, em analogia com o momento magnético, chamarmos $\pi fg y^2$ de *momento [magnético] da corrente circular galvânica* e denotarmos esse momento por G , então G poderá ser determinado por experiências de deflexão de acordo com a unidade absoluta, assim como ocorre

⁸³⁸Em alemão: *ein nordmagnetisches Element* μ . Nesse caso μ seria uma partícula contendo apenas o fluido magnético Norte, com intensidade μ . Essa partícula seria análoga ao conceito moderno de um monopolo magnético. Ver ainda as Notas de rodapé 390 e 458 nas páginas 156 e 187, respectivamente.

⁸³⁹[Nota de Wilhelm Weber:] O seno do ângulo que CB forma com a direção do elemento do anel em C deve entrar como um fator, o qual no nosso caso é igual a 1 já que o ângulo é reto.

⁸⁴⁰[Nota de Heinrich Weber:] *Obras de Gauss*, Vol. V, pág. 427 e as *Obras de Weber*, Vol. II, págs. 242.

⁸⁴¹[Gau41e, pág. 26 e as páginas seguintes dos *Resultate* e as págs. 427 e seguintes das *Obras de Gauss*] e [Web42a].

com M . Se denotarmos por u à deflexão observada⁸⁴² de uma agulha magnética [localizada] em A , por u' à deflexão média observada da mesma [agulha localizada] em B e B' (onde $B'A = BA$), e se colocarmos $y = R$, $\sqrt{x^2 + y^2} = R'$, então obteremos de maneira similar:

$$\tan u = \frac{L}{R^3} + \frac{L'}{R'^5} ,$$

e

$$\tan u' = \frac{L}{R'^3} + \frac{L'}{R'^5} .$$

Segue-se pela eliminação de L' :

$$L = \frac{R^5 \tan u - R'^5 \tan u'}{R^2 - R'^2} = \frac{2G}{T} ,$$

ou

$$G = \frac{1}{2} \frac{R^5 \tan u - R'^5 \tan u'}{R^2 - R'^2} \cdot T = \pi f g R^2 .$$

A partir disso obtemos finalmente a procurada *intensidade* g da corrente se determinarmos a unidade⁸⁴³ que deve ser usada como base para sua determinação. Se tomarmos como uma unidade aquela intensidade de corrente,⁸⁴⁴ *na qual a corrente, quando circula a unidade de área no plano, exerce a mesma ação à distância que a unidade de magnetismo livre*,⁸⁴⁵ então o fator indeterminado f é determinado, porque temos nesse caso ao mesmo tempo a intensidade $g = 1$, o momento [magnético] $G = 1$ e a área $\pi R^2 = 1$, de onde resulta o valor de f :

$$f = 1 ;$$

segue-se então

$$g = \frac{LT}{2\pi R^2} ,$$

na qual L pode ser calculado a partir das grandezas medidas u , u' , R e R' .

Essa determinação da intensidade absoluta da corrente galvânica torna-se ainda mais fácil se o comprimento da agulha puder ser desprezado comparado com o diâmetro do círculo, já que então poderemos nos restringir ao primeiro termo na expansão em série para $\tan u$:

$$\tan u = \frac{L}{R^3} \quad \text{ou} \quad L = R^3 \tan u .$$

Precisaremos então apenas medir a deflexão u quando a agulha estiver no centro do círculo, obtendo então

⁸⁴²[Nota de Wilhelm Weber:] Assume-se aqui que cada observação de deflexão é repetida após a corrente no anel ter sido invertida.

⁸⁴³Em alemão: *die Einheit*.

⁸⁴⁴Isto é, $g = 1$.

⁸⁴⁵Nesse caso Weber está comparando a ação à distância exercida por essa espira com corrente ao atuar sobre um outro circuito com corrente, com a ação à distância exercida nesse outro circuito por um ímã colocado no lugar da espira. O eixo desse ímã deve ser ortogonal ao plano da espira. Esse ímã com uma unidade de magnetismo livre é aquele no qual seu momento magnético $G = 1$ em unidades absolutas.

$$g = \frac{1}{2\pi} RT \tan u .$$

Essa fórmula de aproximação ainda pode ser considerada como suficiente mesmo para medições de alta qualidade, se o comprimento da agulha não exceder a quarta ou quinta parte do diâmetro, como podemos nos convencer se realizarmos as observações completamente, como mencionado anteriormente, e então compararmos os resultados da fórmula de aproximação com o resultado do cálculo mais preciso.

A precisão do resultado depende finalmente da precisão com que é medida a deflexão u . Se for feito o erro du nessa medição, um erro será causado na intensidade de corrente calculada a partir dessa medição, o qual é dado em partes da intensidade total $= 2du/\text{sen } 2u$. Esse erro possui um mínimo para $u = 45^\circ$. Disso segue a regra para a construção do instrumento de que o anel de cobre tem o tamanho mais vantajoso quando a corrente a ser medida produz uma deflexão de 45° , o que só ocorre com correntes intensas.

Parte IV

O Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber

Capítulo 29

O Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber, Juntamente com Sua Diferença em Relação ao Moderno Sistema “Gaussiano” de Unidades

A. K. T. Assis⁸⁴⁶

29.1 O Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber

Carl Friedrich Gauss anunciou em dezembro de 1832 um artigo sobre a medição absoluta da força magnética terrestre para a Sociedade Real de Ciências de Göttingen. O artigo original em latim só foi publicado em 1841, embora uma versão não publicada tenha circulado em pequena edição já em 1833. Várias traduções foram publicadas a partir de 1833, ver os Capítulos 9, 10, 11 e 12.

Nesse trabalho Gauss introduziu o assim chamado sistema absoluto de unidades. Wilhelm Weber começou a trabalhar com Gauss em 1831 quando foi contratado como Professor de física da Universidade de Göttingen. Gauss mencionou em seu artigo de 1833 que foi auxiliado por Weber de diversas formas em suas experiências.

É difícil manter inalteradas por longos períodos de tempo as propriedades de qualquer ímã tais como seu grau de magnetização. O mesmo pode ser dito sobre as propriedades magnéticas de qualquer padrão e até mesmo da própria Terra. Fica então difícil estabelecer unidades de medida magnéticas escolhendo a Terra ou qualquer ímã em particular como um padrão para as medições. Para superar esse problema, Gauss propôs basear a definição e a medição das propriedades magnéticas dos ímãs e da própria Terra em termos de padrões mecânicos e utilizando apenas unidades de medida de comprimento, massa e tempo. Esse enfoque está na essência do sistema absoluto de unidades. Vamos ver como esse sistema funciona no caso de polos magnéticos e cargas elétricas.

Para Gauss as unidades mecânicas fundamentais de comprimento, massa e tempo eram milímetro (mm), miligrama (mg) e segundo (s):⁸⁴⁷

⁸⁴⁶Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

⁸⁴⁷Ver as páginas 145, 164 e 177.

Foram adotadas como unidades o milímetro, o miligrama e o segundo.

[...]

Se tomarmos o segundo, o milímetro e o miligrama como unidades de tempo, distância e massa, [...]

[...]

milímetros, miligramas e os segundos do tempo solar médio foram tomados como unidades, [...]

Nesse artigo de 1833 Gauss também discutiu como converter essas unidades para outras unidades.

Weber também utilizou em seus trabalhos essas três unidades mecânicas básicas, a saber, milímetro, miligrama e segundo.⁸⁴⁸

No que diz respeito à lei de força, Gauss⁸⁴⁹ e Weber⁸⁵⁰ utilizaram a segunda lei de movimento de Newton⁸⁵¹ na forma

$$f = \frac{d(mv)}{dt} = ma . \quad (29.1)$$

Aqui f é a força resultante atuando sobre uma partícula de massa m deslocando-se com velocidade v em relação a um sistema de referência inercial, t é o tempo e $a = dv/dt$ é a aceleração da massa m em relação a esse sistema de referência inercial.

Portanto, uma unidade de força ($f = 1 \text{ mg} \cdot \text{mm}/\text{s}^2$) atuando de forma constante sobre um corpo com uma unidade de massa ($m = 1 \text{ mg}$) produz nesse corpo uma unidade de aceleração ($a = 1 \text{ mm}/\text{s}^2$), isto é, a velocidade do corpo é alterada de uma unidade em uma unidade de tempo:

$$f = 1 \text{ mg} \times 1 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2} = 1 \frac{\text{mg} \cdot \text{mm}}{\text{s}^2} . \quad (29.2)$$

No Sistema Internacional de Unidades moderno MKSA (baseado nas unidades de metro (m), quilograma (kg), segundo (s) e ampère (A)), essa unidade absoluta de força pode ser expressa como:

$$f = 1 \frac{\text{mg} \cdot \text{mm}}{\text{s}^2} = 1 \times 10^{-9} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = 1 \times 10^{-9} \text{ N} . \quad (29.3)$$

Isto é, uma unidade absoluta de força é equivalente a 10^{-9} newtons.

Isaac Newton⁸⁵² apresentou em 1687 sua força gravitacional entre duas partículas com massas m_1 e m_2 separadas pela distância r afirmando em palavras que ela era proporcional a $m_1 m_2 / r^2$. Em 1785 Coulomb obteve sua força elétrica entre duas partículas eletrizadas com cargas q_1 e q_2 separadas pela distância r afirmando que ela era proporcional a $q_1 q_2 / r^2$. Coulomb também realizou experiências estudando a interação entre dois ímãs longos e finos uniformemente magnetizados. Mostrou que os centros de força ou polos magnéticos desses ímãs estavam localizados bem próximos de suas extremidades. Expressou sua força entre

⁸⁴⁸Ver, por exemplo, as páginas 65, 297, 593, 600, 607, 618, 648, 650, 653, 656 e 662 do Volume 3 das *Obras* de Weber, [Web93b].

⁸⁴⁹Ver as Seções 12.1 e 12.26.

⁸⁵⁰[Web93b, págs. 297, 600, 607, 618, 648, 650, 653, 656 e 662].

⁸⁵¹Ver a Nota de rodapé 28 na página 22.

⁸⁵²Ver as Notas de rodapé 28 e 29.

dois centros de força magnéticos (com intensidades de polo magnético p_1 e p_2) separados pela distância r afirmando que ela era proporcional a $p_1 p_2 / r^2$.⁸⁵³

Gauss e Weber modificaram esse procedimento e utilizaram igualdades no lugar das proporções. As forças gravitacionais, elétricas e magnéticas foram então igualadas à força f , sendo escritas como, respectivamente:⁸⁵⁴

$$f = \frac{m_1 m_2}{r^2} , \quad (29.4)$$

$$f = \frac{q_1 q_2}{r^2} , \quad (29.5)$$

e

$$f = \frac{p_1 p_2}{r^2} . \quad (29.6)$$

Vou considerar aqui especificamente a carga elétrica, embora um raciocínio similar possa ser aplicado ao polo magnético. Uma unidade absoluta de carga elétrica é aquela quantidade concentrada em uma partícula que exerce uma unidade absoluta de força ($f = 1 \text{ mg} \cdot \text{mm} / \text{s}^2$) em uma quantidade igual de carga elétrica concentrada em uma outra partícula que está separada da primeira partícula por uma unidade absoluta de distância ($r = 1 \text{ mm}$). Vou expressar cada uma dessas unidades absolutas de carga elétrica por $q_1 = q_2 = q$. A partir da Equação (29.5) obtém-se:

$$q = r \sqrt{f} = 1 \text{ mm} \sqrt{1 \frac{\text{mg} \cdot \text{mm}}{\text{s}^2}} = 1 \frac{\text{mm}^{3/2} \text{mg}^{1/2}}{\text{s}} . \quad (29.7)$$

Ou seja, duas partículas separadas pela unidade absoluta de distância ($r = 1 \text{ mm}$), cada uma eletrizada com uma unidade absoluta de carga ($q_1 = q_2 = 1 \text{ mm}^{3/2} \text{mg}^{1/2} \text{s}^{-1}$), exercem entre si uma unidade absoluta de força ($f = 1 \text{ mg} \cdot \text{mm} / \text{s}^2$) de acordo com a Equação (29.5).

Weber e R. Kohlrausch, por exemplo, expressaram em palavras as Equações (29.5) e (29.7) da seguinte maneira:⁸⁵⁵

A unidade de fluido elétrico é determinada na eletrostática por meio da *força* com a qual as eletricidades livres atuam entre si à distância. Se imaginarmos duas quantidades iguais de eletricidade do mesmo tipo concentradas em dois pontos, cuja distância é a unidade de comprimento, e se a força com que atuam entre si repulsivamente for igual à *unidade de força*, então a quantidade de eletricidade encontrada em cada um desses pontos é a *medida* ou a *unidade* de eletricidade livre.

A força de Coulomb é escrita no Sistema Internacional de Unidades MKSA como:

$$f = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} . \quad (29.8)$$

Aqui a força f está expressa em newtons, $N = \text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$, as cargas q_1 e q_2 estão expressas em coulombs, $C = \text{As}$, a distância r está expressa em metros, m , enquanto que

⁸⁵³Ver a Nota de rodapé 107 na página 41.

⁸⁵⁴Ver as Seções 12.1 e 12.26, assim como o Capítulo 20. Ver ainda [Web93b, págs. 157, 237, 244, 366 e 667-668]. Ver também [Tom98].

⁸⁵⁵[WK56, pág. 11] e [WK03, pág. 288].

$$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} = 8,85 \times 10^{-12} \frac{A^2 s^4}{m^3 kg}, \quad (29.9)$$

é chamada de constante de permissividade do vácuo (ou constante de permissividade elétrica do vácuo).

Quantos coulombs estão contidos em 1 unidade absoluta de carga? A maneira mais simples de responder a essa questão é a de considerar duas cargas iguais, cada uma delas com 1 unidade absoluta de carga ($q_1 = q_2 = 1 \text{ mm}^{3/2} \text{ mg}^{1/2} \text{ s}^{-1}$), separadas por 1 unidade absoluta de distância ($r = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$), exercendo 1 unidade absoluta de força entre si ($f = 1 \text{ mg} \cdot \text{mm}/\text{s}^2 = 1 \times 10^{-9} \text{ N}$). A Equação (29.8) fornece então para esse caso:

$$q_1 = q_2 = 3,3 \times 10^{-13} \text{ C} = 3,3 \times 10^{-13} \text{ As}. \quad (29.10)$$

Isto é, uma carga de $3,3 \times 10^{-13}$ coulombs é equivalente a 1 unidade absoluta de carga dada por $q = 1 \text{ mm}^{3/2} \text{ mg}^{1/2} \text{ s}^{-1}$, ou seja

$$1 \frac{\text{mm}^{3/2} \text{ mg}^{1/2}}{\text{s}} \iff 3,3 \times 10^{-13} \text{ C}. \quad (29.11)$$

29.2 O Sistema CGS de Unidades

Em 1873 o comitê apontado pela Associação Britânica de Ciências para a Seleção e Nomenclatura das Unidades Dinâmicas e Elétricas decidiu adotar o sistema absoluto de unidades criado por Gauss e Weber. Esse comitê era composto por William Thomson (1824-1907), também conhecido como Lorde Kelvin, George Carey Foster (1835-1919), James Clerk Maxwell (1831-1879), George Johnstone Stoney (1826-1911), Henri Charles Fleeming Jenkin (1833-1885), Carl Wilhelm Siemens (1823-1883), Frederick Joseph Bramwell (1818-1903) e Joseph David Everett (1831-1904).

Contudo, devido a uma sugestão de W. Thomson, esse comitê mudou as unidades fundamentais de massa, comprimento e tempo. Em vez do milímetro, miligrama e segundo adotados por Gauss e Weber, esse comitê adotou o centímetro, grama e segundo. As letras iniciais dessas unidades deram origem ao assim chamado sistema CGS de Unidades.⁸⁵⁶

Assim, recomendamos a adoção geral do *centímetro*, *grama* e *segundo* como as três unidades fundamentais; e até que nomes especiais sejam apropriados às unidades de magnitude elétrica e magnética daí derivadas, recomendamos que sejam distinguidas das unidades “absolutas” derivadas de outra forma, pelas letras “C.G.S.” prefixados, sendo estas as letras iniciais dos nomes das três unidades fundamentais.

Em relação à unidade de força, eles introduziram o *dina*.⁸⁵⁷

Em relação ao nome dado à *unidade de força* C.G.S., recomendamos que seja derivado da palavra grega *δύναμις*. A forma *dynamy* (*dínami*) parece ser a mais satisfatória para os etimologistas. *Dynam* (*Dinam*) é igualmente inteligível, mas não soa bem para os ouvidos ingleses. A forma mais curta, *dyne* (*dina*), embora não esteja formada de acordo com as regras estritas da etimologia, será provavelmente preferida

⁸⁵⁶[Tho74].

⁸⁵⁷[Tho74].

de maneira geral nesse país. Tendo em mente que é desejável construir um sistema que possa se tornar internacional, pensamos que por hora deve ser deixada como uma questão em aberto a terminação da palavra. Mas gostaríamos sinceramente de pedir que, qualquer que seja a forma da palavra empregada, seu significado esteja estritamente limitado à unidade de força do sistema C.G.S. — isto é, *a força que, agindo sobre um grama de matéria durante um segundo, produz uma velocidade de um centímetro por segundo.*

Portanto, ao expressar uma unidade de força do sistema CGS no Sistema Internacional de Unidades MKSA chega-se ao seguinte resultado:

$$f = 1 \text{ dina} = 1g \times 1 \frac{cm}{s^2} = 1 \times 10^{-5} \frac{kg \cdot m}{s^2} = 1 \times 10^{-5} N . \quad (29.12)$$

Isto é, enquanto que uma unidade de força no sistema absoluto de Gauss e Weber é equivalente a $10^{-9} N$, uma unidade de força no sistema CGS é equivalente a $10^{-5} N$, como pode ser visto pelas Equações (29.3) e (29.12).

Em 1881 o Primeiro Congresso Elétrico Internacional que ocorreu em Paris resolveu adotar essas três unidades fundamentais do sistema CGS. Entre os participantes desse Congresso estavam Rudolf Clausius (1822-1888), Hermann L. F. von Helmholtz (1821-1894), William Thomson (Kelvin) e John Tyndall (1820-1893). Primeira resolução dessa Congresso:⁸⁵⁸

1ª Adotaremos para as medições elétricas as seguintes unidades fundamentais: centímetro, massa de grama, segundo (C.G.S.).

29.3 A Confusão Criada pelo Assim Chamado Sistema “Gaussiano” de Unidades

Atualmente os sistemas de unidades mais comuns são o Sistema Internacional de Unidades MKSA e o assim chamado Sistema “Gaussiano” de Unidades, que é baseado nas unidades do sistema CGS. Esse sistema de unidades denominado de “Gaussiano” aparece em muitos livros didáticos modernos de eletromagnetismo, estando sempre associado com as unidades CGS básicas de comprimento, massa e tempo dadas pelo centímetro, grama e segundo.⁸⁵⁹ A denominação de sistema “Gaussiano” de unidades parece ser devida a Helmholtz e a seu estudante Heinrich R. Hertz (1857-1894). Eles utilizaram essa expressão na década de 1880 ao falar das “unidades de Gauss”, “unidades Gaussianas”, “sistema de unidades de Gauss” ou “medição absoluta de Gauss”.⁸⁶⁰ Algumas vezes esse sistema de unidades também é chamado de “unidades CGS-Gaussianas”.

A força eletrostática entre duas cargas nesse sistema “Gaussiano” também é dada pela Equação (29.5). Portanto, uma unidade “Gaussiana” de carga elétrica é aquela quantidade concentrada em uma partícula que exerce uma unidade “Gaussiana” de força ($f = 1 g \cdot cm/s^2$) em uma quantidade igual de carga elétrica concentrada em uma outra partícula que está separada da primeira partícula por uma unidade “Gaussiana” de distância ($r = 1 cm$). Vou expressar cada uma dessas unidades “Gaussianas” de carga elétrica por $q_1 = q_2 = q$. A partir da Equação (29.5) obtém-se:

⁸⁵⁸[Con82, pág. 42].

⁸⁵⁹[Jac75, pág. 820, Tabela 4], [Gri89, pág. 518, Tabela B.1], [HM95, pág. 2] e [PM13, pág. 764].

⁸⁶⁰[Hel82], [Her00, págs. 138 e 199] e [Car15, pág. 18].

$$q = r\sqrt{f} = 1 \text{ cm} \sqrt{1 \frac{g \cdot \text{cm}}{s^2}} = 1 \frac{\text{cm}^{3/2} g^{1/2}}{s} . \quad (29.13)$$

Ou seja, duas partículas separadas pela unidade “Gaussiana” de distância ($r = 1 \text{ cm}$), cada uma eletrizada com uma unidade “Gaussiana” de carga ($q_1 = q_2 = 1 \text{ cm}^{3/2} g^{1/2} s^{-1}$), exercem entre si uma unidade “Gaussiana” de força ($f = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}/s^2$) de acordo com a Equação (29.5).

Quantos coulombs estão contidos em 1 unidade “Gaussiana” de carga? A maneira mais simples de responder a essa questão é a de considerar duas cargas iguais, cada uma delas com 1 unidade “Gaussiana” de carga ($q_1 = q_2 = 1 \text{ cm}^{3/2} g^{1/2} s^{-1}$), separadas por 1 unidade “Gaussiana” de distância ($r = 1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$), exercendo 1 unidade “Gaussiana” de força entre si ($f = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}/s^2 = 1 \times 10^{-5} \text{ N}$). A Equação (29.8) fornece então para esse caso:

$$q = 3,3 \times 10^{-10} \text{ C} = 3,3 \times 10^{-10} \text{ As} . \quad (29.14)$$

Isto é, uma carga de $3,3 \times 10^{-10} \text{ C}$ é equivalente a 1 unidade “Gaussiana” de carga dada por $q = 1 \text{ cm}^{3/2} g^{1/2} s^{-1}$, ou seja

$$1 \frac{\text{cm}^{3/2} g^{1/2}}{s} \Longleftrightarrow 3,3 \times 10^{-10} \text{ C} . \quad (29.15)$$

Portanto, enquanto que uma unidade de carga no sistema absoluto de unidades de Gauss e Weber corresponde a $3,3 \times 10^{-13} \text{ C}$, uma unidade de carga no sistema “Gaussiano” de unidades corresponde a $3,3 \times 10^{-10} \text{ C}$, como pode ser visto pelas Equações (29.11) e (29.15).

Há três aspectos principais que devem ser enfatizados aqui, discutidos a seguir nos itens (I), (II) e (III):

(I) Embora Gauss tenha iniciado a medição da força magnética terrestre e do momento magnético de uma barra imantada utilizando apenas unidades de comprimento, massa e tempo, todo esse projeto de pesquisa de medições absolutas foi levado à frente por Wilhelm Weber. Além de utilizar essas unidades de comprimento, massa e tempo para medir a força magnética terrestre e o momento magnético de barras imantadas, Weber também as utilizou para medir de fato com grande precisão cargas elétricas, correntes elétricas, resistências elétricas e forças eletromotrizes. Ele publicou suas medidas absolutas em sua célebre série de oito Memórias principais intitulada *Medições Eletrodinâmicas* (*Elektrodynamische Maassbestimmungen*).⁸⁶¹

Maxwell, por exemplo, em seu *Tratado de Eletricidade e Magnetismo* descreveu as contribuições de Weber nas seguintes palavras:⁸⁶²

A introdução, por W. Weber, de um sistema absoluto de unidades para a medição de grandezas elétricas é um dos passos mais importantes no progresso da ciência. Tendo já, em conjunto com Gauss, colocado a medição de grandezas magnéticas no primeiro lugar dos métodos de precisão, Weber procedeu em suas *Medições Eletrodinâmicas*⁸⁶³ não apenas para estabelecer princípios sólidos para a fixação das

⁸⁶¹[Web46], [Web52b], [Web52a], [KW57], [Web64], [Web71], [Web78] e [Web94b]; com traduções para o inglês em [Web07] e [Web21e]; [Web21f]; [Web21i], [KW21]; [Web21d]; [Web72] e [Web21h]; [Web21g]; [Web08] e [Web21c], respectivamente.

⁸⁶²[Max54a, Vol. 2, Artigo 545, págs. 193-194].

⁸⁶³Maxwell está se referindo aqui às Memórias escritas por Weber com o título geral de *Elektrodynamische Maassbestimmungen*. O título da Sexta Memória publicada em 1871, [Web71], recebeu essa tradução de *Electrodynamic Measurements* quando foi publicada em 1872, [Web72].

unidades a serem empregadas, mas para fazer determinações de grandezas elétricas particulares em termos dessas unidades, com um grau de precisão nunca antes tentado. Tanto os sistemas eletromagnéticos quanto os sistemas eletrostáticos das unidades devem seu desenvolvimento e aplicações práticas a essas pesquisas.

Portanto, seria mais apropriado utilizar os nomes conjuntos de Gauss e Weber sempre que nos referimos ao sistema absoluto de unidades.

(II) O sistema CGS de unidades adotou essencialmente o sistema absoluto de unidades introduzido por Gauss e Weber. Ou seja, todas as grandezas elétricas e magnéticas podem ser medidas e determinadas numericamente utilizando apenas as unidades mecânicas de comprimento, massa e tempo. Infelizmente o sistema CGS não adotou as unidades fundamentais escolhidas por Gauss e Weber, a saber, milímetro, miligrama e segundo. Em vez disso o sistema CGS adotou como unidades fundamentais o centímetro, grama e segundo. Isso começou a gerar confusão já que uma mesma grandeza medida nesses dois sistemas de unidades apresenta valores numéricos diferentes.

(III) O assim chamado sistema “Gaussiano” de unidades é baseado no sistema CGS de unidades. Portanto, suas unidades fundamentais de comprimento, massa e tempo são o centímetro, grama e segundo. Esse fato gera muita confusão já que Gauss e Weber sempre consideraram o milímetro, miligrama e segundo como as unidades fundamentais de comprimento, massa e tempo no sistema absoluto de unidades que criaram. Por exemplo, enquanto que uma unidade de carga no sistema absoluto de unidades de Gauss e Weber é equivalente a $q = 3,3 \times 10^{-13} C$, uma unidade de carga no sistema “Gaussiano” de unidades é equivalente a $q = 3,3 \times 10^{-10} C$.

Apresento aqui três sugestões para evitar essa confusão e clarear a situação:

- As expressões “sistema absoluto de unidades” e “sistema de unidades absolutas” devem ser reservadas ao sistema de medições introduzido por Gauss e Weber. Nesse sistema todas as propriedades elétricas e magnéticas dos corpos são reduzidas a medições de comprimento, massa e tempo. Em particular, as unidades fundamentais de comprimento, massa e tempo nesse sistema absoluto de unidades têm de ser aquelas definidas por eles, a saber, milímetro, miligrama e segundo.
- Os nomes *Gauss*, *Weber*, *Gaussiano* ou *Weberiano* não devem ser utilizados quando nos referirmos a qualquer sistema de unidades baseado nas unidades do sistema CGS.
- Além disso, os nomes conjuntos de Gauss e Weber devem sempre ser utilizados quando nos referirmos ao sistema absoluto de unidades.

Capítulo 30

O *Weber* como uma Unidade de Medida Elétrica

A. K. T. Assis⁸⁶⁴

O primeiro Congresso Elétrico Internacional ocorreu em Paris em 1881. Ele estabeleceu as unidades de medidas elétricas internacionais. Ele endossou a proposta de 1873 da Associação Britânica para o Avanço da Ciência de definir o *Ohm* e o *Volt* como unidades práticas de medida e também definiu o *Ampère*, *Coulomb* e *Farad* como unidades de medida de corrente elétrica, quantidade de carga e capacitância, respectivamente. Esses nomes foram uma homenagem aos trabalhos de Georg Simon Ohm (1789-1854), Alessandro Volta (1745-1827), André-Marie Ampère (1775-1826), Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) e Michael Faraday (1791-1867). O presidente do congresso foi Adolphe Cocheray (1819-1900), ministro dos correios e telégrafos do governo francês. Os vice-presidentes estrangeiros foram o britânico William Thomson (1824-1907), também conhecido como Lorde Kelvin, o alemão Hermann von Helmholtz (1821-1894) e o italiano Gilbert Govi.

Foi uma grande surpresa que os nomes de Carl Friedrich Gauss (1777-1855) e Wilhelm Weber (1804-1891) não tivessem sido incluídos nessa lista de unidades de medida. Afinal de contas, foram eles os criadores do sistema absoluto de unidades. Nesse sistema as unidades elétricas e magnéticas podem ser definidas apenas em termos das unidades absolutas de comprimento, massa e tempo. Em particular, a proposta original de Gauss e Weber utilizava um sistema de unidades baseado no milímetro, miligrama, e segundo. O sistema CGS de unidades seguiu as ideias fundamentais de Gauss e Weber, embora fosse baseado no centímetro, grama, e segundo.⁸⁶⁵

Naquela época o termo *Weber* era usado como unidade de medida de corrente elétrica, especialmente na Inglaterra e na Alemanha.⁸⁶⁶

Dois dos principais oponentes de Weber foram Helmholtz e William Thomson.⁸⁶⁷ A decisão de suprimir o termo *Weber* como unidade de corrente elétrica foi tomada proposital-

⁸⁶⁴Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

⁸⁶⁵[Ass21c].

⁸⁶⁶[Con82, págs. 44-45], [Wie60, Cap. 2, Seção 7: Die praktischen absoluten elektrischen Einheiten und ihre Namengebung — As unidades elétricas absolutas práticas e seus nomes, págs. 102-107], [Wie67, Die internationalen elektrischen Einheiten und ihre Namensgebung — As unidades elétricas internacionais e seus nomes, págs. 135-137], [Woo68, Nota de rodapé 20, pág. 305] e [Woo81, pág. 205].

⁸⁶⁷Ver [Ass21b].

mente por Helmholtz e Thomson nesse congresso de 1881. Naquela época havia uma disputa amarga entre Weber e Helmholtz sobre os fundamentos da eletrodinâmica. Em 1881, Kelvin e Helmholtz sugeriram substituir o termo *Weber* por *Ampère* como unidade de corrente elétrica. Esse fato foi registrado por Éleuthère Mascart (1837-1908), que era o secretário da seção lidando com as unidades elétricas. Ele contou como foi finalmente alcançado o acordo em relação aos nomes das unidades elétricas internacionais.⁸⁶⁸

Como ainda tínhamos apenas duas unidades, o *Ohm* e o *Volt*, e como era necessário completar o sistema, perguntei ao presidente, Sr. Cochery, se os comitês poderiam pelo menos se reunir.

Tive de me curvar à sua resposta negativa, e von Helmholtz e eu ficamos com Lorde Kelvin e sua esposa que, por não terem tomado o café da manhã, estavam tomando um chocolate no restaurante Chiboust, localizado próximo ao salão do Congresso. Foi nesse pequeno comitê, em torno de uma vulgar mesa de mármore branco, que as três unidades a seguir foram acordadas: *Ampère* (em vez de *Weber*), *Coulomb* e *Farad*.

Fui responsável por ler o texto no dia seguinte, 21 de setembro, na reunião geral. Muitos membros do comitê, que só sabiam da sessão de sábado, ficaram um pouco surpresos, mas os comentários de Lorde Kelvin e von Helmholtz não deixaram margem para hesitação. O sistema prático de unidades havia sido fundado.

Foi apenas na década de 1930 que os termos *Gauss* e *Weber* foram oficialmente introduzidos como unidades de densidade de fluxo magnético pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC). Por um lado, essa foi uma homenagem tardia a Gauss e Weber por tudo aquilo que eles fizeram de forma pioneira em relação à introdução das dimensões das grandezas eletromagnéticas. Por outro lado, deve ser enfatizado que Gauss e Weber nunca trabalharam com o conceito de campo magnético, nem com o conceito de fluxo magnético.

⁸⁶⁸Ver: [Lan09], [Jan09], [Woo68, Nota de rodapé 20, pág. 305], [Fri82, pág. 209], [Tun92, pág. 35], [Bor08], [Bor09] com tradução para o inglês em [Bor12] e [Bor13].

Referências Bibliográficas

- [AB95] A. K. T. Assis and M. Bueno. Longitudinal forces in Weber's electrodynamics. *International Journal of Modern Physics B*, 9:3689–3696, 1995.
- [AB96] A. K. T. Assis and M. A. Bueno. Equivalence between Ampère and Grassmann's forces. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32:431–436, 1996.
- [AB00] A. K. T. Assis and M. Bueno. Bootstrap effect in classical electrodynamics. *Revista Facultad de Ingenieria de la Universidad de Tarapaca (Chile)*, 7:49–55, 2000.
- [AB23] A. K. T. Assis and L. L. Bucciarelli. *Coulomb's Memoirs on Torsion, Electricity, and Magnetism Translated into English*. Apeiron, Montreal, 2023. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [AC06] A. K. T. Assis and J. P. M. C. Chaib. Nota sobre o magnetismo da pilha de Volta — tradução comentada do primeiro artigo de Biot e Savart sobre eletromagnetismo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 16:303–309, 2006.
- [AC11] A. K. T. Assis and J. P. M. d. C. Chaib. *Eletrodinâmica de Ampère: Análise do Significado e da Evolução da Força de Ampère, Juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica*. Editora da Unicamp, Campinas, 2011.
- [AC12] A. K. T. Assis and J. P. M. C. Chaib. Ampère's motor: its history and the controversies surrounding its working mechanism. *American Journal of Physics*, 80:990–995, 2012. Doi: 10.1119/1.4746698.
- [AC15] A. K. T. Assis and J. P. M. C. Chaib. *Ampère's Electrodynamics — Analysis of the Meaning and Evolution of Ampère's Force between Current Elements, together with a Complete Translation of His Masterpiece: Theory of Electrodynamic Phenomena, Uniquely Deduced from Experience*. Apeiron, Montreal, 2015. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [AG95] A. K. T. Assis and P. Graneau. The reality of Newtonian forces of inertia. *Hadronic Journal*, 18:271–289, 1995.
- [AG96] A. K. T. Assis and P. Graneau. Nonlocal forces of inertia in cosmology. *Foundations of Physics*, 26:271–283, 1996.
- [AGV07] R. Achilles and J. Guala-Valverde. Action at a distance: a key to homopolar induction. *Apeiron*, 14:169–183, 2007.

- [AH07] A. K. T. Assis and J. A. Hernandez. *The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents*. Apeiron, Montreal, 2007. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [AH09] A. K. T. Assis and J. A. Hernandez. *A Força Elétrica de uma Corrente: Weber e as Cargas Superficiais de Condutores Resistivos com Correntes Constantes*. Edusp e Edufal, São Paulo e Maceió, 2009. Volume 73 da Coleção Acadêmica.
- [AH13] A. K. T. Assis and J. A. Hernandez. *Elektrischer Strom und Oberflächenladungen: was Wilhelm Weber schon vor mehr als 150 Jahre wußte*. Apeiron, Montreal, 2013. Tradução de H. Härtel. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Amp20a] A.-M. Ampère. Analyse des mémoires lus par M. Ampère a l'Académie des Sciences, dans les séances des 18 et 25 septembre, des 9 et 30 octobre 1820. *Annales Générales des Sciences Physiques*, 6:238–257, 1820.
- [Amp20b] A.-M. Ampère. Analyse des mémoires lus par M. Ampère a l'Académie des Sciences, dans les séances des 18 et 25 septembre, des 9 et 30 octobre 1820. 20 páginas. Reimpressão de *Annales Générales des Sciences Physiques*, Vol. 6, págs. 238-257 (1820), 1820.
- [Amp20c] A.-M. Ampère. Suite du mémoire sur l'action mutuelle entre deux courans électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimans. *Annales de Chimie et de Physique*, 15:170–218, 1820.
- [Amp21] A.-M. Ampère. Suite de la note sur un appareil à l'aide duquel on peut vérifier toutes les propriétés des conducteurs de l'électricité voltaïque, découvertes par M. Ampère. *Annales de Chimie et de Physique*, 18:313–333, 1821.
- [Amp22a] A.-M. Ampère. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électrodynamiques. *Annales de Chimie et de Physique*, 20:60–74, 1822.
- [Amp22b] A.-M. Ampère. Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électrodynamiques que j'ai obtenus au mois de décembre 1821. In A.-M. Ampère, editor, *Recueil d'Observations Électro-dynamiques*, pages 237–250. Crochard, Paris, 1822. Apesar da data, este volume foi publicado apenas em 1823.
- [Amp22c] A.-M. Ampère. Nouvelles expériences électro-magnétiques de MM. Faraday, Ampère, H. Davy, et De La Rive. *Bulletin des Sciences de la Société Philomatique de Paris*, 9:21–23, 1822.
- [Amp23] A.-M. Ampère. Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience, dans lequel se trouvent réunis les Mémoires que M. Ampère a communiqués à l'Académie royale des Sciences, dans les séances des 4 et 26 décembre 1820, 10 juin 1822, 22 décembre 1823, 12 septembre et 21 novembre 1825. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, 6:175–387, 1823. Apesar da data, este volume foi publicado apenas em 1827.

- [Amp26] A.-M. Ampère. *Théorie des Phénomènes Électro-dynamiques, Uniquement Déduite de l'Expérience*. Méquignon-Marvis, Paris, 1826.
- [Amp28] A.-M. Ampère. Note sur l'action mutuelle d'un aimant et d'un conducteur voltaïque. *Annales de Chimie et de Physique*, 37:113–139, 1828.
- [Amp65] A.-M. Ampère. On the Mathematical Theory of Electrodynamical Phenomena, Experimentally Deduced. In R. A. R. Tricker, *Early Electrodynamics — The First Law of Circulation*, pages 155–200, New York, 1965. Pergamon. Partial English translation by O. M. Blunn of Ampère's work "Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience", *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, Vol. 6, pp. 175–387 (1823), issued 1827.
- [Amp69a] A. M. Ampère. New names. In W. F. Magie, editor, *A Source Book in Physics*, page 447, New York, 1969. McGraw-Hill. Extract from a paper entitled "Experiments on the new electrodynamical phenomena," in the *Annales de Chimie et de Physique*, Series II, Vol. 20, p. 60, 1822.
- [Amp69b] A. M. Ampère. The solenoid. Circuits and magnetic shells. In W. F. Magie, editor, *A Source Book in Physics*, pages 456–460, New York, 1969. McGraw-Hill. Extracts from "Théorie des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience," Paris, 1826.
- [Amp12] A.-M. Ampère. Mathematical Theory of Electrodynamical Phenomena, Uniquely Derived from Experiments. Traduzido por M. D. Godfrey. Disponível em <https://archive.org/details/AmpereTheorieEn> e <https://sites.google.com/site/michaeldgodfrey/physics-information-and-communication>, 2012.
- [Ano42] Anonymous. Arrangement of magnetic observations. *Magazine of Science, and School of Arts*, 4(30):234–235, 1842. Issue of October 22, 1842.
- [Ano89] Anonymous. Gauss and the electric telegraph. *Popular Science Monthly*, 34:396–399, 1889. Disponível em https://en.wikisource.org/wiki/Popular_Science_Monthly/Volume_34/January_1889/Gauss_and_the_Electric_Telegraph.
- [Ano91] Anonymous. Obituary. Professor Wilhelm Weber. *The Electrician*, 27:245–246, 1891.
- [Ano92] Anonymous. Sketch of William Edward Weber. *Popular Science Monthly*, 40:548–553, 1892. Disponível em https://en.wikisource.org/wiki/Popular_Science_Monthly/Volume_40/February_1892/Sketch_of_William_Edward_Weber.
- [Ara24] F. J. D. Arago. Untitled. *Annales de Chimie et de Physique*, 27:363, 1824.
- [Ara25] F. J. D. Arago. Untitled. *Annales de Chimie et de Physique*, 28:325–326, 1825.
- [Ara26] F. J. D. Arago. Note concernant les phénomènes magnétiques auxquels le mouvement donne naissance. *Annales de Chimie et de Physique*, 32:213–223, 1826.

- [Ara54] F. J. D. Arago. Du magnétisme de rotation. In J.-A. Barral, editor, *Oeuvres Complètes de François Arago*, volume 4, pages 424–448. Gide et J. Baudry, Paris, 1854.
- [Arc89] T. Archibald. Energy and the mathematization of electrodynamics in Germany, 1845-1875. *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, 39:276–308, 1989.
- [ARW02] A. K. T. Assis, K. Reich, and K. H. Wiederkehr. Gauss and Weber's creation of the absolute system of units in physics. *21st Century Science & Technology*, Vol. 15, No. 3:40–48, 2002.
- [ARW04] A. K. T. Assis, K. Reich, and K. H. Wiederkehr. On the electromagnetic and electrostatic units of current and the meaning of the absolute system of units — For the 200th anniversary of Wilhelm Weber's birth. *Sudhoffs Archiv*, 88:10–31, 2004.
- [ASCC07] A. K. T. Assis, M. P. Souza Filho, J. J. Caluzi, and J. P. M. C. Chaib. From electromagnetism to electrodynamics: Ampère's demonstration of the interaction between current carrying wires. In M. F. Costa, B. V. Dorrio, and R. Reis, editors, *Proceedings of the 4th International Conference on Hands-on Science*, pages 9–16. University of Azores, Ponta Delgada, 2007.
- [Asp86] H. Aspden. Anomalous electrodynamic explosions in liquids. *Transactions on Plasma Science*, PS-14:282–285, 1986.
- [Asp87] H. Aspden. The exploding wire phenomenon as an inductive effect. *Physics Letters A*, 120:80, 1987.
- [Ass89] A. K. T. Assis. On Mach's principle. *Foundations of Physics Letters*, 2:301–318, 1989.
- [Ass91] A. K. T. Assis. Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) — Sua vida e sua obra. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 5:53–59, 1991.
- [Ass92a] A. K. T. Assis. *Curso de Eletrodinâmica de Weber*. Setor de Publicações do Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP, Campinas, 1992. Notas de Física IFGW Número 5. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis e www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?down=60362.
- [Ass92b] A. K. T. Assis. Teorias de ação a distância — uma tradução comentada de um texto de James Clerk Maxwell. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 7:53–76, 1992.
- [Ass94] A. K. T. Assis. *Weber's Electrodynamics*. Kluwer, Dordrecht, 1994. Hoje em dia esse livro está disponível pela Springer. Doi: 10.1007/978-94-017-3670-1 e www.springer.com/gp/book/9780792331377.
- [Ass98] A. K. T. Assis. *Mecânica Relacional*. Editora do Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência da UNICAMP/FAPESP, Campinas, 1998. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.

- [Ass99a] A. K. T. Assis. Arguments in favour of action at a distance. In A. E. Chubykalo, V. Pope, and R. Smirnov-Rueda, editors, *Instantaneous Action at a Distance in Modern Physics — “Pro” and “Contra”*, pages 45–56, Commack, 1999. Nova Science Publishers.
- [Ass99b] A. K. T. Assis. *Relational Mechanics*. Apeiron, Montreal, 1999. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass99c] A. K. T. Assis. *Uma Nova Física*. Editora Perspectiva, São Paulo, 1999.
- [Ass03a] A. K. T. Assis. On the first electromagnetic measurement of the velocity of light by Wilhelm Weber and Rudolf Kohlrausch. In F. Bevilacqua and E. A. Giannetto, editors, *Volta and the History of Electricity*, pages 267–286. Università degli Studi di Pavia and Editore Ulrico Hoepli, Milano, 2003. Disponível em <http://ppp.unipv.it/PagesIT/VoltaHistElecSec3Frame.htm>.
- [Ass03b] A. K. T. Assis. Tradução de uma obra de Gauss. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 25:226–249, 2003.
- [Ass06] A. K. T. Assis. Interações na física — ação à distância versus ação por contato. In C. C. Silva, editor, *Estudos de História e Filosofia das Ciências: Subsídios para Aplicação no Ensino*, pages 87–102. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006.
- [Ass10a] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*. Apeiron, Montreal, 2010. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass10b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Apeiron, Montreal, 2010. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass13] A. K. T. Assis. *Mecânica Relacional e Implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber Gravitacional*. Apeiron, Montreal, 2013. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass14a] A. K. T. Assis. Argumente zugunsten der Fernwirkung. Traduzido em 2014 a partir do inglês por M. Pohl. Artigo original: A. K. T. Assis, “Arguments in favour of action at a distance,” in: *Instantaneous Action at a Distance in Modern Physics — “Pro” and “Contra”*, Editado por A. E. Chubykalo, V. Pope e R. Smirnov-Rueda (Nova Science Publishers, Commack, 1999), págs. 45-56. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis, 2014.
- [Ass14b] A. K. T. Assis. *Relational Mechanics and Implementation of Mach’s Principle with Weber’s Gravitational Force*. Apeiron, Montreal, 2014. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass14c] A. K. T. Assis. Text in memory of Peter Graneau (1921-2014). *Infinite Energy*, 114:14–15, 2014.
- [Ass15a] A. K. T. Assis. *Eletrodinâmica de Weber: Teoria, Aplicações e Exercícios*. Editora da Unicamp, Campinas, 2015. Segunda edição. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis e <https://editoraunicamp.com.br/catalogo/?id=1718>.

- [Ass15b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Apeiron, Montreal, 2015. Livro em russo traduzido da versão em inglês por A. Baraov. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass17] A. K. T. Assis. *I Fondamenti Sperimentali e Storici dell'Elettricità*. Associazione per l'Insegnamento della Fisica, Parma, 2017. La Fisica nella Scuola, Anno L, n. 2 Supplemento, Quaderno 26. Traduzido por P. Cerreta, A. Cerreta e R. Cerreta. Editado por P. Cerreta, R. Serafini e R. Urigu. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass18a] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*, volume 2. Apeiron, Montreal, 2018. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass18b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*, volume 2. Apeiron, Montreal, 2018. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass19a] A. K. T. Assis. Argumentos a favor da ação a distância. *Revista Educar Mais*, 3:202–218, 2019. Doi: 10.15536/reducarmais.3.2019.202-218.1505.
- [Ass19b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*, volume 2. Apeiron, Montreal, 2019. Livro em russo traduzido do volume 2 da versão em inglês por A. Baraov. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass21a] A. K. T. Assis. Editor's comments on Poggendorff's 1857 paper. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, pages 227–228, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass21b] A. K. T. Assis. Editor's introduction to Weber's sixth memoir on electrodynamic measurements. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume IV: Conservation of Energy, Weber's Planetary Model of the Atom and the Unification of Electromagnetism and Gravitation, pages 59–65, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass21c] A. K. T. Assis. Gauss and Weber's absolute system of units and its difference to the modern "Gaussian" system of units. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 207–212, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass21d] A. K. T. Assis. The origins and meanings of Weber's constant c , of Maxwell's constant c and the relation of these two different constants with light velocity in vacuum. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, pages 385–396, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.

- [Ass21e] A. K. T. Assis. Overview and future developments of Weber’s law applied to electromagnetism and gravitation. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume IV: Conservation of Energy, Weber’s Planetary Model of the Atom and the Unification of Electromagnetism and Gravitation, pages 215–238, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass21f] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume 1: Gauss and Weber’s Absolute System of Units. Apeiron, Montreal, 2021. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass21g] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume 2: Weber’s Fundamental Force and the Unification of the Laws of Coulomb, Ampère and Faraday. Apeiron, Montreal, 2021. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass21h] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume 3: Measurement of Weber’s Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity. Apeiron, Montreal, 2021. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass21i] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume 4: Conservation of Energy, Weber’s Planetary Model of the Atom and the Unification of Electromagnetism and Gravitation. Apeiron, Montreal, 2021. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass22] A. K. T. Assis. *Tradução Comentada das Principais Obras de Coulomb sobre Eletricidade e Magnetismo*. Apeiron, Montreal, 2022. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass24a] A. K. T. Assis. The velocity in Weber’s electrodynamics versus the velocities in different field theories. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume V: Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber’s Electrodynamics Versus Different Field Theories, pages 311–338, Montreal, 2024. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass24b] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume 5: Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber’s Electrodynamics Versus Different Field Theories. Apeiron, Montreal, 2024. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [AT94] A. K. T. Assis and D. S. Thober. Unipolar induction and Weber’s electrodynamics. In M. Barone and F. Selleri, editors, *Frontiers of Fundamental Physics*, pages 409–414, New York, 1994. Plenum Press.
- [AT17] A. K. T. Assis and M. Tajmar. Superconductivity with Weber’s electrodynamics: the London moment and the Meissner effect. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 42:307–350, 2017.

- [AT19] A. K. T. Assis and M. Tajmar. Rotation of a superconductor due to electromagnetic induction using Weber’s electrodynamics. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 44:111–123, 2019.
- [Ath89] W. A. Atherton. Gauss and Weber: An unlikely partnership. *Electronics and Wireless World*, 95:521–522, 1989.
- [AW03] A. K. T. Assis and K. H. Wiederkehr. Weber quoting Maxwell. *Mitteilungen der Gauss-Gesellschaft*, 40:53–74, 2003.
- [AWW11] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr, and G. Wolfschmidt. *Weber’s Planetary Model of the Atom*, volume 19 of *Nuncius Hamburgensis — Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften*. Tredition Science, Hamburg, 2011. Edited by G. Wolfschmidt.
- [AWW14] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr, and G. Wolfschmidt. *O Modelo Planetário de Weber para o Átomo*. Apeiron, Montreal, 2014. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [AWW18] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr, and G. Wolfschmidt. *Webers Planeten-Modell des Atoms*. Apeiron, Montreal, 2018. Traduzido por H. Härtel. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Aze86] R. Azevedo *et al.* Powerful water-plasma explosions. *Physics Letters A*, 117:101–105, 1986.
- [BA95] M. A. Bueno and A. K. T. Assis. A new method for inductance calculations. *Journal of Physics D*, 28:1802–1806, 1995.
- [BA97a] M. Bueno and A. K. T. Assis. Equivalence between the formulas for inductance calculation. *Canadian Journal of Physics*, 75:357–362, 1997.
- [BA97b] Marcelo Bueno and A. K. T. Assis. Proof of the identity between Ampère and Grassmann’s forces. *Physica Scripta*, 56:554–559, 1997.
- [BA97c] Marcelo Bueno and A. K. T. Assis. Self-inductance of solenoids, bi-dimensional rings and coaxial cables. *Helvetica Physica Acta*, 70:813–821, 1997.
- [BA01] M. d. A. Bueno and A. K. T. Assis. *Inductance and Force Calculations in Electrical Circuits*. Nova Science Publishers, Huntington, New York, 2001.
- [BA15] M. Bueno and A. K. T. Assis. *Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos*. Apeiron, Montreal, 2015. 2ª edição. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Bau22] C. Baumgärtel. *Aspects of Weber Electrodynamics*. PhD thesis, Faculty of Science and Engineering, The University of Liverpool, UK, Liverpool, 2022. Disponível em <https://livrepository.liverpool.ac.uk/3165052>.
- [BC95] C. Blondel and P. Chairopoulos. La pile ou l’autre face de l’électricité. *Les Cahiers de Science & Vie*, 26:88–92, 1995.

- [BE90] D. F. Bartlett and W. F. Edwards. Invariance of charge to Lorentz transformation. *Physics Letters A*, 151:259–262, 1990.
- [Bec29] Becquerel. Mémoire sur l'électro-chimie et l'emploi de l'électricité pour opérer des combinaisons. *Annales de Chimie et de Physique*, 41:5–45, 1829.
- [Ber56] W. Bernhardt. *Dr. Ernst Chladni, der Akustiker. Eine Biographie und geschichtliche Darstellung seiner Entdeckungen zur Erinnerung an seinen hundertjährigen Geburtstag den 30. November 1856*. Franz Mohr's Buchhandlung, Wittenberg, 1856.
- [Beu97] G. Beuermann. Greetings from Göttingen on Gauss-Weber article. *21st Century Science & Technology*, 10(1):5, 1997.
- [Beu d] G. Beuermann, s. d. Die Sammlung historischer physikalischer Apparate. Disponível em <https://www.uni-goettingen.de/en/47114.html>.
- [Bev83] F. Bevilacqua. *The Principle of Conservation of Energy and the History of Classical Electromagnetic Theory*. La Goliardica Pavese, Pavia, 1983.
- [Bev84] F. Bevilacqua. History of electrodynamics: W. Weber and R. Clausius on the principle of conservation of energy. In Rend. Accad. Naz. Sci. XL Mem. Sci. Fis. Natur., editor, *Proceedings of the Fifth National Congress on the History of Physics*, pages 217–225, Rome, 1984. Disponível em <https://media.accademiaxl.it/memorie/S5-VIX-P1-2-1985/Bevilacqua217-225.pdf>.
- [Bev93] F. Bevilacqua. Helmholtz's Ueber die Erhaltung der Kraft: the emergence of a theoretical physicist. In D. Cahan, editor, *Hermann von Helmholtz and the Foundations of Nineteenth-Century Science*, pages 291–333, Berkeley, 1993. University of California Press.
- [Bev94] F. Bevilacqua. Theoretical and mathematical interpretations of energy conservation: the Helmholtz-Clausius debate on central forces 1852-5. In L. Krüger, editor, *Universalgenie Helmholtz: Rückblick nach 100 Jahren*, pages 89–106, Berlin, 1994. Akademie Verlag.
- [Bev95] F. Bevilacqua. The emergence of theoretical physics in the second half of the 19th century. In R. Zwilling, editor, *Natural Sciences and Human Thought*, pages 13–36, Berlin, 1995. Springer.
- [Bev14] F. Bevilacqua. Energy: learning from the past. *Science & Education*, 23:1231–1243, 2014. Doi: 10.1007/s11191-014-9690-1.
- [Bie71] K. -R. Biermann. Der Brief Alexander von Humboldts an Wilhelm Weber von Ende 1831 — ein bedeutendes Dokument zur Geschichte der Erforschung des Geomagnetismus. *Monatsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (DDR)*, 13, Heft 3:234–242, 1971.
- [Bio21a] J. B. Biot. *Précis élémentaire de Physique expérimentale*, volume II. Deterville, Paris, 1821. 2^a edição.

- [Bio21b] J. B. Biot. Sur l'Aimantation imprimée aux métaux par l'électricité en mouvement: lu à la séance publique de l'Académie des sciences, le 2 avril 1821. *Journal des Savants*, Avril:221–235, 1821.
- [Blo78] C. Blondel. Sur les premières recherches de formule électrodynamique par Ampère (octobre 1820). *Revue d'Histoire des Sciences*, 31:53–65, 1978.
- [Blo82] C. Blondel. *A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820-1827)*. Bibliothèque Nationale, Paris, 1982.
- [Blo89] C. Blondel. Vision physique “éthérienne”, mathématisation “laplacienne”: l'électrodynamique d'Ampère. *Revue d'Histoire des Sciences*, 42:123–137, 1989.
- [Blo95] C. Blondel. De la boussole à la balance. *Les Cahiers de Science & Vie*, 26:46–62, 1995.
- [Blo04] C. Blondel. Ampère, le “Newton de l'électricité”. *Bulletin de la Sabix*, 37:56–64, 2004.
- [Blo05] C. Blondel, 2005. Ampère et l'Histoire de l'Électricité. Homepage do CNRS que foi criada e coordenada por Christine Blondel. Disponível em www.ampere.cnrs.fr.
- [BM90] D. F. Bartlett and S. Maglic. Test of an anomalous electromagnetic effect. *Review of Scientific Instruments*, 61:2637–2639, 1990.
- [BM22] C. Baumgärtel and S. Maher. Resolving the paradox of unipolar induction: new experimental evidence on the influence of the test circuit. *Scientific Reports*, 12:16791, 2022. Doi: 10.1038/s41598-022-21155-x. Disponível em <https://www.nature.com/articles/s41598-022-21155-x>.
- [Bor08] G. Borvon. Dans les coulisses du congrès international des électriciens de 1881. Disponível em <http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique>, 2008.
- [Bor09] G. Borvon. Histoire de l'électricité: l'histoire des unités électriques. Disponível em <http://seaus.free.fr/spip.php?article324>, 2009.
- [Bor12] G. Borvon. History of the electrical units. Disponível em <http://seaus.free.fr/spip.php?article964>, 2012.
- [Bor13] G. Borvon. Histoire des unités électriques. Le premier congrès international des électriciens à Paris en 1881. Disponível em <http://histoires-de-sciences.over-blog.fr/2013/11/histoire-des-unit%C3%A9s-%C3%A9lectriques.html>, 2013.
- [BS20] J. B. Biot and F. Savart. Note sur le magnétisme de la pile de Volta. *Annales de Chimie et de Physique*, 15:222–223, 1820.
- [BS24] J. B. Biot and F. Savart. Sur l'aimantation imposée aux métaux par l'électricité en mouvement. In J. B. Biot, *Précis Élémentaire de Physique Expérimentale*, vol. II, troisième édition, pages 704–774. Gauthier-Villars, Paris, 1824.

- [BS85] J. B. Biot and F. Savart. Sur l'aimantation imprimée aux métaux par l'électricité en mouvement, in: *Précis élémentaire de Physique expérimentale*, troisième édition (Paris: Deterville, 1824), Vol. II, pp. 704-774. In J. Joubert, editor, *Collection de Mémoires relatifs a la Physique — Tome II: Mémoires sur l'Électrodynamique*, pages 80–127, Paris, 1885. Gauthier-Villars.
- [BS65a] J. B. Biot and F. Savart. Magnetization of metals by electricity in motion. In R. A. R. Tricker, *Early Electrodynamics — The First Law of Circulation*, pages 119–139, New York, 1965. Pergamon. Extracts from Biot's *Précis élémentaire de Physique expérimentale*, Vol. II, 3rd edition, pp. 707-723 and 740-746, 1824 (Translated by O. M. Blunn).
- [BS65b] J. B. Biot and F. Savart. Note on the magnetism of Volta's battery. In R. A. R. Tricker, *Early Electrodynamics — The First Law of Circulation*, pages 118–119, New York, 1965. Pergamon. Translated by O. M. Blunn.
- [Buc84] J. Z. Buchwald. *The Creation of Scientific Effects: Heinrich Hertz and Electric Waves*. The University of Chicago Press, Chicago, 1984.
- [Buc85] J. Z. Buchwald. *From Maxwell to Microphysics — Aspects of Electromagnetic Theory in the Last Quarter of the Nineteenth Century*. The University of Chicago Press, Chicago, 1985.
- [Buc20] O. M. Bucci. Electromagnetism without fields: from Ørsted through Ampère to Weber. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 62:128–137, 2020. Doi: 10.1109/MAP.2020.2998847.
- [BW] C. Blondel and B. Wolff. Un tournant dans l'histoire de l'électricité: la mathématisation. Disponible en www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique.
- [BW11a] C. Blondel and B. Wolff. Créer de l'électricité avec le magnétisme? La découverte de l'induction. Disponible en www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2011.
- [BW11b] C. Blondel and B. Wolff. Faraday, Ampère, et le mystère des rotations continues. Disponible en www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2011.
- [BW11c] C. Blondel and B. Wolff. Les lois fondamentales de l'électricité et du magnétisme. Disponible en www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2011.
- [BW12] C. Blondel and B. Wolff. A la recherche d'une loi newtonienne pour l'électrodynamique (1820-1826). Disponible en www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2012.
- [BW13a] C. Blondel and B. Wolff. Ampère jette les bases de l'électrodynamique (septembre 1820-janvier 1821). Disponible en www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2013.
- [BW13b] C. Blondel and B. Wolff. Ampère lays the foundations of electrodynamics (september 1820-january 1821). Disponible en www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique. Traduzido por A. Butrica, 2013.

- [BW13c] C. Blondel and B. Wolff. In search of a newtonian law of electrodynamics (1820-1826). Disponível em www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2013.
- [BW15] C. Blondel and B. Wolff. Faraday, Ampère, and the mystery of continuous rotations. Traduzido por A. Butrica. Disponível em www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2015.
- [BW21a] C. Blondel and B. Wolff. Ampère’s force law: an obsolete formula? Traduzido por A. Butrica. Disponível em www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2021.
- [BW21b] C. Blondel and B. Wolff. La force d’Ampère, une formule obsolète? Disponível em www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2021.
- [CA06] J. P. M. C. Chaib and A. K. T. Assis, 2006. Apresentação distorcida da obra de Ampère nos livros didáticos. Anais do X Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Londrina, PR, 15 a 19/08/2006. Disponível em: www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/x/sys/resumos/T0023-1.pdf.
- [CA07a] J. P. M. C. Chaib and A. K. T. Assis. Ampère e a origem do magnetismo terrestre. In P. W. Gonçalves *et al.*, editor, *Anais do I Simpósio de Pesquisa em Ensino e História de Ciências da Terra e do III Simpósio Nacional sobre Ensino de Geologia no Brasil*, pages 315–320. Instituto de Geociências da Unicamp, Campinas, 2007.
- [CA07b] J. P. M. C. Chaib and A. K. T. Assis. Distorção da obra eletromagnética de Ampère nos livros didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:65–70, 2007.
- [CA07c] J. P. M. d. C. Chaib and A. K. T. Assis. Sobre os efeitos das correntes elétricas — Tradução comentada da primeira obra de Ampère sobre eletrodinâmica. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 5:85–102, 2007.
- [CA09a] J. P. M. C. Chaib and A. K. T. Assis. A concepção dos elementos de corrente e da intensidade de corrente em Ampère. In M. H. R. Beltran, F. Saito, R. N. d. Santos, and W. Wuo, editors, *História da Ciência e Ensino: tendências e construção de interfaces*, pages 30–34. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2009.
- [CA09b] J. P. M. d. C. Chaib and A. K. T. Assis. Sobre os efeitos das correntes elétricas (segunda parte) — Tradução da primeira obra de Ampère sobre eletrodinâmica. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 2:118–145, 2009.
- [CA13] J. P. M. d. C. Chaib and A. K. T. Assis. Motor de Ampère: elementos para um ensino crítico de física. In C. C. Silva and M. E. B. Prestes, editors, *Aprendendo Ciência e sobre Sua Natureza: abordagens históricas e filosóficas*, pages 55–70. Tipographia Editora Expressa, São Carlos, 2013.
- [Cah18] D. Cahan. *Helmholtz: A Life in Science*. The University of Chicago Press, Chicago, 2018.

- [Can78] K. L. Caneva. From galvanism to electrodynamics: the transformation of German physics and its social context. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 9:63–159, 1978.
- [Car15] N. Carron, 2015. Babel of units. The evolution of units systems in classical electromagnetism. Disponível em <https://arxiv.org/abs/1506.01951>.
- [Cha09] J. P. M. d. C. Chaib, 2009. Tese de Doutorado: “Análise do Significado e da Evolução do Conceito de Força de Ampère, juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica.” Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP (Campinas, SP). Orientador: A. K. T. Assis. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis e <http://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/435449>.
- [Cha18] J. P. M. C. Chaib. Deduzindo $dF = idl \times B$ da eletrodinâmica de Ampère. *Physicae Organum*, 4(1):59–67, 2018.
- [Cha19] J. P. M. d. C. Chaib. Contextualização e tradução do artigo “Demonstração dos teoremas relativos às ações eletrodinâmicas”, escrito por J. Bertrand. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 36:99–134, 2019. Doi: 10.5007/2175-7941.2019v36n1p99.
- [Cha25] J. P. M. C. Chaib. Applying the method of cases of equilibrium: from the unprecedented ‘case of equilibrium of Ampère’s motor’ to a contemporary deduction of Ampère’s electrodynamic force. *European Journal of Physics*, 46:025202, 2025. Doi: 10.1088/1361-6404/ada742.
- [Chi64] R. A. Chipman. Contributions from the museum of history and technology: Science and technology paper 38: The earliest electromagnetic instruments. *Bulletin of the United States National Museum*, pages 121–136, 1964. Disponível em <https://www.gutenberg.org/ebooks/34061>.
- [Chr33] S. H. Christie. Experimental determination of the laws of magneto-electric induction in different masses of the same metal, and its intensity in different metals. *Philosophical Transactions*, 123:95–142, 1833.
- [Chr87] C. Christodoulides. Equivalence of the Ampère and Biot-Savart force laws in magnetostatics. *Journal of Physics A*, 20:2037–2042, 1987.
- [Chr88] C. Christodoulides. Comparison of the Ampère and Biot-Savart magnetostatic force laws in their line-current element forms. *American Journal of Physics*, 56:357–362, 1988.
- [Chr89] C. Christodoulides. On Ampère’s magnetostatic force law and the nature of the forces it predicts. *Physics Letters A*, 141:383–385, 1989.
- [CL20] J. P. M. C. Chaib and F. M. S. Lima. Resuming Ampère’s experimental investigation of the validity of Newton’s third law in electrodynamics. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 45:19–51, 2020.
- [Cla76] P. Clark. Elkana on Helmholtz and the conservation of energy. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 27:165–176, 1976.

- [Col00] E. S. d. Colombo. Traducción de la carta de Alessandro Volta: sobre la electricidad excitada por el simple contacto de substancias conductoras de distintas especies. *Llull: Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, 23:763–784, 2000. Disponível em Dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2961105.pdf.
- [Con82] Congrès International des Électriciens, 1882. G. Masson. Paris. Disponível em <https://archive.org/details/congrsinternati38unkngoog/page/n6/mode/2up>.
- [Cor89] P. Cornille. On the difference between the Lorentz and Ampère force laws in magnetostatics. *Journal of Physics A*, 22:4075–4081, 1989.
- [Cor90] P. Cornille. Review of the application of Newton’s third law in physics. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25:161–210, 1990.
- [CS17] J. P. M. d. C. Chaib and C. H. M. Santos. A “prova experimental das correntes moleculares de Ampère” de A. Einstein e W. J. de Haas. *Physicae Organum*, 3:15–51, 2017.
- [D’A81] S. D’Agostino. Weber and Maxwell on the discovery of the velocity of light in nineteenth century electrodynamics. In M. D. Grmek, R. S. Cohen, and G. Cimino, editors, *On Scientific Discovery*, pages 281–294, Dordrecht, 1981. Springer. Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 34. Translated by J. A. Boffa. Doi: 10.1007/978-94-010-1284-3_14.
- [D’A96] S. D’Agostino. Absolute systems of units and dimensions of physical quantities: a link between Weber’s electrodynamics and Maxwell’s electromagnetic theory of light. *Physis*, 33:5–51, 1996.
- [D’A00] S. D’Agostino. *A History of the Ideas of Theoretical Physics: Essays on the Nineteenth and Twentieth Century Physics*. Kluwer, Dordrecht, 2000. Volume 213 of the Boston Studies in the Philosophy of Science.
- [Dar93a] O. Darrigol. The electrodynamic revolution in Germany as documented by early German expositions. *Archive for the History of Exact Sciences*, 45:190–280, 1993.
- [Dar93b] O. Darrigol. The electrodynamics of moving bodies from Faraday to Hertz. *Centaurus*, 36:245–260, 1993.
- [Dar96] O. Darrigol. The electrodynamic origin of relativity theory. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 26:241–312, 1996.
- [Dar00] O. Darrigol. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford University Press, Oxford, 2000.
- [Des47] R. Descartes. *Les Principes de la Philosophie*. Henry le Gras, Paris, 1647. Traduzido por C. Picot. Reimpresso em R. Descartes, *Oeuvres*, D. Adam e P. Tannery (editores), Volume IX.

- [Des52] R. Descartes. Discourse on the method of rightly conducting the reason. In *Great Books of the Western World*, vol. 31, pages 41–67, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica.
- [Des54] R. Descartes. *The Geometry of René Descartes with a Facsimile of the First Edition*. Dover, New York, 1954. Translated from the French and Latin by D. E. Smith and M. L. Latham.
- [Des65] R. Descartes. Discours de la Méthode & Essays. In C. Adam and P. Tannery, editors, *Oeuvres de Descartes*, vol. VI, pages 1–78: *Discours de la Méthode*, 79–228: *La Dioptrique*, 229–366: *Les Meteores*, 367–485: *La Geometrie*, Paris, 1965. Librairie Philosophique J. Vrin.
- [Des83] R. Descartes. Discurso do Método. In Victor Civita, editor, Volume “Descartes” da Coleção *Os Pensadores*, pages 25–71, São Paulo, 3ª edição, 1983. Abril Cultural. Tradução de J. Guinsburg e B. Prado Júnior.
- [Des97] R. Descartes. *Princípios da Filosofia*. Edições 70, Lisboa, 1997. Traduzido por J. Gama.
- [Des02] R. Descartes. *Princípios da Filosofia*. Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 2002. Tradução de G. A. d. Almeida (coordenador), R. Landim Filho, E. M. Rocha, M. Gleizer e U. Pinheiro.
- [Des09] R. Descartes. A Geometria - Primeiro Livro. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 19:221–249, 2009. Tradução de J. P. d. S. Ramos. Disponível em <https://www.cle.unicamp.br/eprints/index.php/cadernos/article/view/556/436>.
- [Des10] R. Descartes. A Dióptrica - Discursos I, II, III, IV e VIII. *Scientiae Studia*, 8(3):451–486, 2010. Tradução de J. P. d. S. Ramos, revisão técnica de P. R. Mariconda.
- [DH30] H. W. Dove and A. v. Humboldt. Correspondirende Beobachtungen über die regelmäßigen stündlichen Veränderungen und über die Perturbationen der magnetischen Abweichung im mittleren und östlichen Europa; gesammelt und verglichen von H. W. Dove, mit einem Vorwort von Alexander von Humboldt. *Annalen der Physik und Chemie*, 19:357–391, 1830.
- [dlR29] A. de la Rive. Untersuchungen über die Ursachen der sogenannten Contactelektricität. *Annalen der Physik und Chemie*, 15:98–121, 1829.
- [Dor82] E. Dorn. Die reduction des Siemens’schen Einheit auf absolutes Maass. *Annalen der Physik und Chemie*, 17:773–816, 1882.
- [Dor88a] E. Dorn. Beiträge zum Verhalten harter, stark magnetisirter Stahlstäbe gegen schwache magnetisirende Kräfte. *Annalen der Physik und Chemie*, 35:275–290, 1888.
- [Dor88b] E. Dorn. Ueber den Einfluss des in Stahlmagneten inducirten Magnetismus auf einige Beobachtungsmethoden. *Annalen der Physik und Chemie*, 35:270–275, 1888.

- [Dor07] N. E. Dorsey. Biographical sketch of Wilhelm Eduard Weber. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 12:125–128, 1907. Doi: 10.1029/TE012i003p00125.
- [Eke01] S. Ekelöf. The genesis of the Wheatstone bridge. *Engineering Science and Education Journal*, 10:37–40, 2001.
- [Euc09] Euclides. *Os Elementos*. Editora da Unesp, São Paulo, 2009. Tradução e introdução de I. Bicudo.
- [F.91] G. C. F. Wilhelm Eduard Weber. *Nature*, 44:229–230, 1891. Doi: 10.1038/044229b0. O autor desse obituário foi George Carey Foster (1835-1919).
- [Far21] M. Faraday. Sur les mouvemens électro-magnétiques et la théorie du magnétisme. *Annales de Chimie et de Physique*, 18:337–370, 1821.
- [Far22a] M. Faraday. Description of an electro-magnetical apparatus for the exhibition of rotatory motion. *The Quarterly Journal of Science, Literature, and the Arts*, 12:283–285, 1822.
- [Far22b] M. Faraday. On some new electro-magnetical motions, and on the theory of magnetism. *The Quarterly Journal of Science, Literature, and the Arts*, 12:74–96, 1822.
- [Far26] J. Farrar. *Elements of Electricity, Magnetism, and Electro-magnetism, embracing the Late Discoveries and Improvements, digested into the Form of a Treatise; being the Second Part of a Course of Natural Philosophy*. Cambridge University Press, Cambridge, 1826. This volume, with the exception of the notes, is selected from Biot’s *Précis Élémentaire de Physique*, third edition, printed at Paris in 1824, and translated with such alterations as were found necessary in order to adapt it to the English reader.
- [Far32a] M. Faraday. Experimental researches in electricity. *Philosophical Transactions*, 122:125–162, 1832. Lido em 24 de novembro de 1831. Reimpresso em *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday. Págs. 265-285, parágrafos 1-139.
- [Far32b] M. Faraday. Experimental-Untersuchungen über Elektrizität. *Annalen der Physik und Chemie*, 25:91–142, 1832.
- [Far33] M. Faraday. Experimental researches in electricity. Fifth series. *Philosophical Transactions*, 123:675–710, 1833. Lido em 20 de junho de 1833. Reimpresso em *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday. Págs. 327-346, parágrafos 450-563.
- [Far34a] M. Faraday. Experimental researches in electricity. Seventh series. *Philosophical Transactions*, 124:77–122, 1834. Lido em 23 de janeiro, 6 e 13 de fevereiro de 1834. Reimpresso em *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday. Págs. 361-390, parágrafos 661-874.

- [Far34b] M. Faraday. Experimental researches in electricity. Sixth series. *Philosophical Transactions*, 124:55–76, 1834. Lido em 11 de janeiro de 1834. Reimpresso em *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday. Págs. 347-360, parágrafos 564-660.
- [Far34c] M. Faraday. Von der elektro-chemischen Zersetzung — Fortsetzung. *Annalen der Physik und Chemie*, 33:301–331 and 433–451, 1834.
- [Far34d] M. Faraday. Von der elektrochemischen Zersetzung. *Annalen der Physik und Chemie*, 32:401–453, 1834.
- [Far46a] M. Faraday. Experimental researches in electricity. Nineteenth series. *Philosophical Transactions*, 136:1–20, 1846. Lido em 20 de novembro de 1845. Reimpresso em *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday. Págs. 595-607, parágrafos 2146-2242.
- [Far46b] M. Faraday. Experimental researches in electricity. Twentieth series. *Philosophical Transactions*, 136:21–40, 1846. Lido em 18 de dezembro de 1845. Reimpresso em *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday. Págs. 607-619, parágrafos 2243-2342.
- [Far46c] M. Faraday. Experimental researches in electricity. Twenty-first series. *Philosophical Transactions*, 136:41–62, 1846. Lido em 8 de janeiro de 1846. Reimpresso em *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday. Págs. 619-632, parágrafos 2343-2453.
- [Far46d] M. Faraday. Zwanzigste Reihe von Experimental-Untersuchungen über Elektrizität. *Annalen der Physik und Chemie*, 69:289–320, 1846.
- [Far47] M. Faraday. Ein und zwanzigste Reihe von Experimental-Untersuchungen über Elektrizität. *Annalen der Physik und Chemie*, 70:24–59, 1847.
- [Far89] M. Faraday. *Experimental-Untersuchungen über Elektrizität*, volume I. Springer, Berlin, 1889. Deutsche Uebersetzung von S. Kalischer.
- [Far52a] M. Faraday. Description of an electro-magnetical apparatus for the exhibition of rotary motion. In R. M. Hutchins, editor, *Great Books of the Western World*, Vol. 45: *Lavoisier, Fourier, Faraday*, pages 807–809. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952. Reprint of the Quarterly Journal of Science, Vol. 12, pp. 283-285 (1822).
- [Far52b] M. Faraday. On some new electro-magnetical motions and on the theory of magnetism. In R. M. Hutchins, editor, *Great Books of the Western World*, Vol. 45: *Lavoisier, Fourier, Faraday*, pages 795–807. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952. Reprint of the Quarterly Journal of Science, Vol. 12, pp. 74-96 (1822).

- [Far11] M. Faraday. Pesquisas experimentais em eletricidade. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 28:152–204, 2011. Tradução de A. K. T. Assis e L. F. Haruna. Doi: 10.5007/2175-7941.2011v28n1p152.
- [Fea06] D. Featonby. Inspiring experiments exploit strong attraction of magnets. *Physics Education*, 41:292–295, 2006.
- [Fec29a] G. T. Fechner. Drei Versuchsreihen, welche die elektromotorische Kraft und die einzelnen Elemente des Leitungswiderstandes betreffen. In J. B. Biot, editor, *Lehrbuch des Galvanismus und der Elektrochemie*, pages 553–564. Leopold Voß, Leipzig, 2nd edition, 1829. Nachträge. Reimpresso em *Ostwald’s Klassiker der exakten Wissenschaften*, Nr. 244, C. Piel (ed.), (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938), págs. 30-38.
- [Fec29b] G. T. Fechner. *Lehrbuch des Galvanismus und der Elektrochemie*, volume 3. Leopold Voß, Leipzig, 2nd edition, 1829.
- [Fec32] G. T. Fechner. *Repertorium der Experimentalphysik: enthaltend eine vollständige Zusammenstellung der neuern Fortschritte dieser Wissenschaft; Als Supplement zu neuern Lehr- und Wörterbüchern der Physik*, volume 1. Leopold Voss, Leipzig, 1832.
- [Fec42] G. T. Fechner. Vom vorübergehenden Magnetismus, welcher durch galvanisch Wirkung im Stahl erregt wird. *Annalen der Physik und Chemie*, 55:189–208, 1842.
- [Fec60] G. T. Fechner. *Elemente der Psychophysik*, volume I. Breitkopf und Härtel, Leipzig, 1860.
- [Fer07] J. Ferreirós. The rise of pure mathematics as arithmetic with Gauss. In C. Goldstein, N. Schappacher, and J. Schwermer, editors, *The Shaping of Arithmetic after C. F. Gauss’s Disquisitiones Arithmeticae*, pages 207–240. Springer, Berlin, 2007.
- [Fer20] J. Ferreirós. Gauss and the mathematical background to standardisation. *Journal of History of Science and Technology*, 14:32–51, 2020.
- [Fey33a] E. Feyerabend. Der erste praktisch verwendete elektrische Telegraph. *Technikgeschichte*, 22:83–87, 1933.
- [Fey33b] E. Feyerabend. *Der Telegraph von Gauss und Weber im Werden der elektrischen Telegraphie*. Reichsportministerium, Berlin, 1933.
- [Fou22] J. B. J. Fourier. *Théorie Analytique de la Chaleur*. Firmin Didot, Paris, 1822.
- [Fou52] J. B. J. Fourier. Analytical Theory of Heat. In *Great Books of the Western World*, Vol. 45, pages 161–251, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Translated by A. Freeman.
- [Fra81] O. I. Franksen. *H. C. Ørsted — A Man of the Two Cultures*. Strandbergs Forlag, Birkerød, 1981.

- [Fri82] H. Fricke. *Two rival programmes in 19th. century classical electrodynamics: action-at-a-distance versus field theories*. PhD thesis, The London School of Economics and Political Science, London, 1982. Disponível em <http://etheses.lse.ac.uk/3430/>.
- [FS16] É. J. B. Ferreira and A. P. B. Silva. Termomagnetismo ou termoeletricidade? Um estudo do trabalho de Thomas Johan Seebeck. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33:861–878, 2016. Doi: 10.5007/2175-7941.2016v33n3p861.
- [GA94] P. Graneau and A. K. T. Assis. Kirchhoff on the motion of electricity in conductors. *Apeiron*, 19:19–25, 1994.
- [Gal85] Galileu Galilei. *Dois Novas Ciências*. Ched Editorial, Instituto Italiano di Cultura e Nova Stella, São Paulo, 1985. Tradução e Notas: L. Mariconda e P. R. Mariconda.
- [Gar01] E. Garber. *The Language of Physics: The Calculus and the Development of Theoretical Physics in Europe, 1750-1914*. Springer Science, New York, 2001.
- [Gau09] C. F. Gauss. *Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis solem Ambientium*. Friedrich Perthes & Johann Heinrich Besser, Hamburg, 1809.
- [Gau32] C. F. Gauss. Anzeige der “Intensitas Vis Magneticae Terrestris ad Mensuram Absolutam Revocata”. *Göttingische gelehrte Anzeigen*, 205-207:2041–2058, 1832. Vol. 205 de 24 de dezembro, 1832, págs. 2041-2048; Vols. 206 e 207 de 27 de dezembro, 1832, págs. 2049-2058. Reimpresso em C. F. Gauss’ *Werke*, Vol. 5, págs. 293-304 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867). Versão corrigida em: *Astronomische Nachrichten* 10, 1833, Nr. 238, págs. 349-360: Anzeige der Abhandlung des Herrn Hofraths Gauß: Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata.
- [Gau33a] C. F. Gauss. [abstract of the paper:] Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata. *Philosophical Magazine*, 2:291–299, 1833.
- [Gau33b] C. F. Gauss. Die Intensität der erdmagnetischen Kraft, zurückgeführt auf absolutes Maass. *Annalen der Physik und Chemie*, 28:241–273 and 591–615, 1833. Traduzido por J. C. Poggendorff.
- [Gau34a] C. F. Gauss. 128. Stuck. Den 9. August 1834. *Göttingische gelehrte Anzeigen*, 2:1265–1274, 1834. Reimpresso em C. F. Gauss’ *Werke*, Vol. 5, págs. 519-525 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).
- [Gau34b] C. F. Gauss. Beobachtungen der magnetischen Variation in Göttingen und Leipzig, am 1. und 2. October 1834. *Annalen der Physik und Chemie*, 33:426–433, 1834. Reimpresso em C. F. Gauss’ *Werke*, Vol. 5, págs. 525-528 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).
- [Gau34c] C. F. Gauss. Mesure absolue de l’intensité du magnétisme terrestre. *Annales de Chimie et de Physique*, 57:5–69, 1834.
- [Gau35a] C. F. Gauss. Bericht von neuerlich in Göttingen angestellten magnetischen Beobachtungen. *Annalen der Physik und Chemie*, 34:546–556, 1835.

- [Gau35b] C. F. Gauss. Berichte über die in dem magnetischen Observatorium, und in Verbindung damit anderwärts gemachten Beobachtungen. *Göttingische gelehrte Anzeigen*, 1:345–357, 1835. 36. Stuck der *Göttingische gelehrte Anzeigen*, den 7. März 1835. Reimpresso em C. F. Gauss’ *Werke*, Vol. 5, págs. 528–536 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).
- [Gau36a] C. F. Gauss, 1836. Ob isměrenii zemnago magnitizma. (Soč[inenie] Karl[a] Frid[richa] Gaussa). Per[evël] A. Drašusov. Učenyja zapiski Imperatorskago universiteta čast 11, 1836, Nr. 7 (Januar), str. 3–22; Nr. 8 (Februar), str. 246–271; Nr. 9 (März), str. 341–381.
- [Gau36b] C. F. Gauss. Erdmagnetismus und Magnetometer. In H. C. Schumacher, editor, *Jahrbuch für 1836*, pages 1–47. J. G. Cotta’schen, Stuttgart, 1836. Reimpresso em C. F. Gauss’ *Werke*, Vol. 5, págs. 315–344 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).
- [Gau37a] C. F. Gauss. [abstract of the paper:] Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata. *Abstracts of the Papers Printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London, from 1830 to 1837 inclusive*, 3:166–174, 1837.
- [Gau37b] C. F. Gauss. Ein neues Hülfsmittel für die magnetischen Beobachtungen. *Göttingische gelehrte Anzeigen*, 3:1721–1728, 1837. 173. Stuck. Den 30. October 1837. Reimpresso em C. F. Gauss’ *Werke*, Vol. 5, págs. 352–356 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).
- [Gau37c] C. F. Gauss. Einleitung. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1836*, volume I, pages 3–12. Dieterichschen Buchhandlung, Göttingen, 1837. Reimpresso em C. F. Gauss’ *Werke*, Vol. 5, págs. 345–351 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).
- [Gau38a] C. F. Gauss. Sur le magnétisme terrestre et sur l’association pour les observations magnétiques — Préface. In A. Quetelet, editor, *Correspondance Mathématique et Physique*, pages 41–49. Société Belge de Librairie, Bruxelles, 1838. Tome X et Tome Second de la Troisième Série.
- [Gau38b] C. F. Gauss. Ueber ein neues, zunächst zur unmittelbaren Beobachtung der Veränderungen in der Intensität des horizontalen Theils des Erdmagnetismus bestimmtes Instrument. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1837*, volume II, chapter I, pages 1–19. Dieterichschen Buchhandlung, Göttingen, 1838. Reimpresso em Carl Friedrich Gauss’ *Werke*, Vol. 5, págs. 357–373 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).
- [Gau39a] C. F. Gauss. Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1838*, volume III, chapter I, pages 1–57. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1839. Reimpresso em Carl Friedrich Gauss’ *Werke*, Vol. 5, págs. 119–194 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).

- [Gau39b] C. F. Gauss. Misura assoluta dell' intensità della forza magnetica terrestre. *Effemeridi astronomiche di Milano*, primo supplemento:3–132, 1839. Tradotta e commentata da P. Frisiani.
- [Gau40] C. F. Gauss. Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im Verkehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstossungskräfte. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1839*, volume IV, chapter I, pages 1–51. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1840. Reimpresso em Carl Friedrich Gauss' *Werke*, Vol. 5, págs. 195–242 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).
- [Gau41a] C. F. Gauss. General theory of terrestrial magnetism. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 2, pages 184–251, London, 1841. Richard and John E. Taylor. Translated by Mrs. Sabine, and revised by Sir John Herschel, Bart.
- [Gau41b] C. F. Gauss. Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata. *Commentationes Societatis Regiae Scientiarum Goettingensis Recentiores*, 8:3–44, 1841. Apresentado na Sociedade Real de Ciências de Göttingen em 15 de dezembro de 1832. Reimpresso em Carl Friedrich Gauss' *Werke*, Vol. 5, págs. 79–118 (Königliche Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).
- [Gau41c] C. F. Gauss. Introduction. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 2, pages 20–25, London, 1841. Richard and John E. Taylor. Translated by Mr. W. Francis. The translation has been revised by Professor Lloyd and Major Sabine.
- [Gau41d] C. F. Gauss. On a new instrument for the direct observation of the changes in the intensity of the horizontal portion of the terrestrial magnetic force. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 2, pages 252–267, London, 1841. Richard and John E. Taylor. From the *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1837*, Volume II, Chapter I, pp. 1–19. — Herausgegeben von Carl Friederich Gauss und Wilhelm Weber. Göttingen, 1838. Translated by Mr. William Francis, and revised by Major Sabine and Professor Lloyd.
- [Gau41e] C. F. Gauss. Vorschriften zur Berechnung der magnetischen Wirkung, welche ein Magnetstab in der Ferne ausübt. In *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1840*, volume V, chapter II, pages 26–34. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1841. Reimpresso em Carl Friedrich Gauss' *Werke*, Vol. 5, págs. 427–435 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1867).
- [Gau43] C. F. Gauss. General propositions relating to attractive and repulsive forces acting in the inverse ratio of the square of the distance. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 3, pages 153–196, London, 1843. Richard and John E. Taylor.
- [Gau57] C. F. Gauss. *Theory of the Motion of Heavenly Bodies Moving about the Sun in Conic Sections*. Little, Brown & Co., Boston, 1857. Translated by C. H. Davis.

- [Gau94] C. F. Gauss. Die Intensität der erdmagnetischen Kraft auf absolutes Maass zurückgeführt. In E. Dorn, editor, *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, Vol. 53. Wilhelm Engelmann Verlag, Leipzig, 1894. Tradução de A. Kiel, Notas de E. Dorn. Reimpresso em *Carl Friedrich Gauss' — Werke — Supplement* — Volume 3: Varia: 15 Abhandlungen in deutscher Übersetzung. Mit einer Einleitung, einer Bibliographie und Registern herausgegeben von Karin Reich. Hrsg. von der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, Universitätsverlag Göttingen 2019, págs. 533-594.
- [Gau35] C. F. Gauss. The absolute measure of magnetic force. In W. F. Magie, editor, *A Source Book in Physics*, pages 519–524, New York, 1935. McGraw-Hill.
- [Gau52] C. F. Gauss, 1952. Intensivnost semnoj magnitnoj sily, privedennaja k absolutnoj mere. In: B. M. Janovskij (Hrsg): Karl Fridrich Gauss. Izbrannye trudy po zemnomu magnetizmu. Perevod A. N. Krylova. Moskau 1952, str. 23-75.
- [Gau75] C. F. Gauss. Letter from Gauss to Schumacher, April 29, 1845. In *Carl Friedrich Gauss, Werke, Ergänzungsreihe, Vol. V, Briefwechsel C. F. Gauss — H. C. Schumacher, Part 2*, pages 436–440. Georg Olms Verlag, Hildesheim, 1975.
- [Gau03] C. F. Gauss. The intensity of the earth's magnetic force reduced to absolute measurement. Traduzido em 1995 por Susan P. Johnson, editado por L. Hecht. Disponível desde 2003 em <http://21sci-tech.com/translation.html>, 2003.
- [Gau21a] C. F. Gauss. [Gauss, 1832, Abstract of the paper:] Intensitas vis magneticae terrestres ad mensuram absolutam revocata. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 37–45, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Gau21b] C. F. Gauss. Introduction to the results of the observations made by the magnetic association in the year 1836. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 81–84, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Gau21c] C. F. Gauss. On a new instrument for the direct observation of the changes in the intensity of the horizontal portion of the terrestrial magnetic force. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 123–134, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Gau21d] C. F. Gauss. *Teoría General del Magnetismo Terrestre*. Catarata, Madrid, 2021. Introducción, traducción y notas de J. M. Vaquero.
- [Gau21e] C. F. Gauss. The absolute measure of the earth's magnetic force. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 49–80, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.

- [Gau24] C. F. Gauss, 2024. Gauss-Gesellschaft e. V. [Sociedade Gauss] Göttingen. Fundada em 17 de maio de 1962. Homepage: <http://www.gauss-gesellschaft-goettingen.de/gauss-e.htm>.
- [Gau d] C. F. Gauss, [s. d.]. The complete correspondence of Carl Friedrich Gauß. Site of the Department “Digital Library” of the State and University Library in Göttingen on behalf of the Academy of Sciences in Göttingen. The metadata of the letters have been made available by Prof. Dr. Menso Folkerts. Disponível em <https://gauss.adw-goe.de>.
- [GG85] P. Graneau and P. N. Graneau. Electrodynamic explosions in liquids. *Applied Physics Letters*, 46:468–470, 1985.
- [GG86] P. Graneau and P. N. Graneau. The electromagnetic impulse pendulum and momentum conservation. *Il Nuovo Cimento D*, 7:31–45, 1986.
- [GG92] P. Graneau and P. N. Graneau. The role of Ampère forces in nuclear fusion. *Physics Letters A*, 165:1–13, 1992.
- [GG93] P. Graneau and N. Graneau. *Newton Versus Einstein — How Matter Interacts with Matter*. Carlton Press, New York, 1993.
- [GG96] P. Graneau and N. Graneau. *Newtonian Electrodynamics*. World Scientific, Singapore, 1996.
- [Gib97] P. Gibbs, 1997. Why is c the symbol for the speed of light? Disponível em <http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/c.html> e <http://vixra.org/abs/1901.0004>.
- [Gil71a] C. S. Gillmor. *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France*. Princeton University Press, Princeton, 1971.
- [Gil71b] C. S. Gillmor. Coulomb, Charles Augustin. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 3, pages 439–447. Charles Scribner’s Sons, New York, 1971.
- [Glu99] A. G. Gluckman. On W. E. Weber’s “Grundprincip der Elektrodynamik” and related earlier and contemporary studies. *Physics Essays*, 12:682–698, 1999.
- [GPR01] N. Graneau, T. Phipps Jr., and D. Roscoe. An experimental confirmation of longitudinal electrodynamic forces. *European Journal of Physics D*, 15:87–97, 2001.
- [Gra82a] P. Graneau. Application of Ampere’s force law to railgun accelerators. *Journal of Applied Physics*, 53:6648–6654, 1982.
- [Gra82b] P. Graneau. Electromagnetic jet-propulsion in the direction of current flow. *Nature*, 295:311–312, 1982.
- [Gra83a] P. Graneau. Compatibility of the Ampère and Lorentz force laws with the virtual-work concept. *Il Nuovo Cimento B*, 78:213–234, 1983.

- [Gra83b] P. Graneau. First indication of Ampere tension in solid electric conductors. *Physics Letters A*, 97:253–255, 1983.
- [Gra84a] P. Graneau. Ampere tension in electric conductors. *IEEE Transactions on Magnetism*, 20:444–455, 1984.
- [Gra84b] P. Graneau. Longitudinal magnetic forces. *Journal of Applied Physics*, 55:2598–2600, 1984.
- [Gra85a] P. Graneau. Ampère and Lorentz forces. *Physics Letters A*, 107:235–237, 1985.
- [Gra85b] P. Graneau. Comments on ‘Equivalence of the Lorentz and Ampere force laws in magnetostatics’ [J. Appl. Phys. 57, 1743 (1985)]. *Journal of Applied Physics*, 58:3638, 1985.
- [Gra86] P. Graneau. The Ampere-Neumann electrodynamics of metallic conductors. *Fortschritte der Physik*, 34:457–503, 1986.
- [Gra87a] P. Graneau. Amperian recoil and the efficiency of railguns. *Journal of Applied Physics*, 62:3006–3009, 1987.
- [Gra87b] P. Graneau. Railgun recoil and relativity. *Journal of Physics D*, 20:391–393, 1987.
- [Gra87c] P. Graneau. Wire explosions. *Physics Letters A*, 120:77–79, 1987.
- [Gra90] N. Graneau. The finite size of the metallic current element. *Physics Letters A*, 147:92–96, 1990.
- [Gra93] P. Graneau. The difference between Newtonian and relativistic forces. *Foundations of Physics Letters*, 6:491–500, 1993.
- [Gra94] P. Graneau. *Ampere-Neumann Electrodynamics of Metals*. Hadronic Press, Palm Harbor, 2nd edition, 1994.
- [Gra00] P. Graneau *et al.* Arc-liberated chemical energy exceeds electrical input energy. *Journal of Plasma Physics*, 63:115–128, 2000.
- [Gra24] N. Graneau. Fundamental longitudinal electromagnetic (EM) force investigation using DC current. *2024 10th Euro-Asian Pulsed Power Conference, 25th International Conference on High-Power Particle Beams and 20th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology (EAPPC/BEAMS/EML)*, pages 1–2, 2024.
- [Gri89] D. J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 2nd edition, 1989.
- [Gro39] W. R. Grove. Volta’sche Säule von grösser elektro-chemischer Kraft. *Annalen der Physik und Chemie*, 48:300–304, 1839.
- [GT14] K. H. Glassmeier and B. T. Tsurutani. Carl Friedrich Gauss — General theory of terrestrial magnetism — a revised translation of the German text. *History of Geo- and Space Sciences*, 5:11–62, 2014. Doi: 10.5194/hgss-5-11-2014.

- [GTM90] P. Graneau, D. Thompson, and S. Morril. The motionally induced back-emf in railguns. *Physics Letters A*, 145:396–400, 1990.
- [GV02] J. Guala-Valverde. Why homopolar devices cannot be additive? *Spacetime & Substance*, 3:186–187, 2002.
- [GVM01] J. Guala-Valverde and P. Mazzoni. The unipolar dynamotor: a genuine relational engine. *Apeiron*, 8:41–52, 2001.
- [GVMA02] J. Guala-Valverde, P. Mazzoni, and R. Achilles. The homopolar motor: A true relativistic engine. *American Journal of Physics*, 70:1052–1055, 2002.
- [GW37] C. F. Gauss and W. Weber. *Resultate aus den Beobachtungen des magnetisches Vereins im Jahre 1836*, volume I. Dieterichschen Buchhandlung, Göttingen, 1837.
- [GW38] C. F. Gauss and W. Weber. *Resultate aus den Beobachtungen des magnetisches Vereins im Jahre 1837*, volume II. Dieterichschen Buchhandlung, Göttingen, 1838.
- [GW39a] Gauss and Weber. Remarks on the construction of magnetic observatories and the instruments which they should contain. *The Annals of Electricity, Magnetism, & Chemistry; and Guardian of Experimental Science*, 3:92–108, 1839.
- [GW39b] C. F. Gauss and W. Weber. *Resultate aus den Beobachtungen des magnetisches Vereins im Jahre 1838*, volume III. Dieterichschen Buchhandlung, Göttingen, 1839.
- [GW40a] C. F. Gauss and W. Weber. *Atlas des Erdmagnetismus nach den Elementen der Theorie Entworfen — Supplement zu den Resultaten aus den Beobachtungen des magnetisches Vereins unter Mitwirkung von C. W. B. Goldschmidt*. Weidmann’sche Buchhandlung, Leipzig, 1840. Reimpresso em Carl Friedrich Gauss’ *Werke*, Vol. 12, págs. 335-408 (Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 1929).
- [GW40b] C. F. Gauss and W. Weber. *Resultate aus den Beobachtungen des magnetisches Vereins im Jahre 1839*, volume IV. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1840.
- [GW41] C. F. Gauss and W. Weber. *Resultate aus den Beobachtungen des magnetisches Vereins im Jahre 1840*, volume V. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1841.
- [GW43] C. F. Gauss and W. Weber. *Resultate aus den Beobachtungen des magnetisches Vereins im Jahre 1841*, volume VI. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1843.
- [GW66] C. F. Gauss and W. Weber. Results of the observations made by the Magnetic Association in the year 1836. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 2, pages 20–97, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation. Translated by Mr. W. Francis. The translation has been revised by Professor Lloyd and Major Sabine.

- [Han19] C. Hansteen. *Untersuchungen über den Magnetismus der Erde*, volume I: Die mechanischen Erscheinungen des Magneten. Christiania, Kopenhagen, 1819. Traduzido por P. T. Hanson.
- [Han25] C. Hansteen. Beobachtungen über die Intensität des Magnetismus im nördlichen Europa. *Annalen der Physik und Chemie*, 79:225–270 and 353–428, 1825.
- [Han27] C. Hansteen. Isodynamische Linien für die ganze magnetische Kraft. *Annalen der Physik und Chemie*, 85:49–66 and 229–244, 1827.
- [Har82] P. M. Harman. *Energy, Force, and Matter — The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- [HB04] A. v. Humboldt and J. B. Biot. Sur les variations du magnétisme terrestre a différentes latitudes. *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts*, 59:429–450, 1804.
- [HB05] A. v. Humboldt and J. B. Biot. Ueber die Variationen des Magnetismus der Erde in verschiedenen Breite. *Annalen der Physik und Chemie*, 20:257–298, 1805.
- [Hec96a] L. Hecht. Experimental apparatus and instrumentation. *21st Century Science & Technology*, 9(3):35–40, 1996.
- [Hec96b] L. Hecht. The significance of the 1845 Gauss-Weber correspondence. *21st Century Science & Technology*, 9(3):22–34, 1996. Disponível em https://21sci-tech.com/articles/Atomic_Science.pdf e <https://archive.org/details/WeberAmpereElectrodynamicsHistory>.
- [Hec97] L. Hecht. Wilhelm Weber: giant of 19th century physics. *21st Century Science & Technology*, 10(2):53–54, 1997.
- [Hec00] L. Hecht. Science: to be, or not to be — or, how I discovered the swindle of special relativity. *21st Century Science & Technology*, 12(4):2–4 and 7, 1999–2000.
- [Hec01] L. Hecht. Should the law of gravity be repealed? The suppressed electrodynamics of Ampère-Gauss-Weber. *21st Century Science & Technology*, 14(1):2–7, 2001. Disponível em <https://21sci-tech.com/articles/spring01/Electrodynamics.html>.
- [Hec07a] L. Hecht. The Ampère angular force and the Newton hoax. *21st Century Science & Technology*, 20(1-2):53–55 and 71, 2007. Esse artigo também foi publicado no *Executive Intelligence Review*, vol. 34, No. 15, 13 de abril, 2007. Disponível em http://21sci-tech.com/Subscriptions/Spring%202007%20ONLINE/Spring-Summer_2007.pdf.
- [Hec07b] L. Hecht. Wilhelm Weber defended. *21st Century Science & Technology*, 20(3):72, 2007. Disponível em <https://21sci-tech.com/Subscriptions/Fall%202007%20online/Books.pdf>.

- [Hee11] P. Heering. Tools for investigation, tools for instruction: potential transformations of instruments in the transfer from research to teaching. In P. Heering and R. Wittje, editors, *Learning by Doing, Experiments and Instruments in the History of Science Teaching*, pages 15–30, Stuttgart, 2011. Franz Steiner.
- [Hei82] J. L. Heilbron. *Elements of Early Modern Physics*. University of California Press, Berkeley, 1982.
- [Hei99] J. L. Heilbron. *Electricity in the 17th and 18th Centuries — A Study in Early Modern Physics*. Dover, New York, 1999.
- [Hel47] H. von Helmholtz. *Über die Erhaltung der Kraft*. Engelmann, Leipzig, 1847. Reimpresso em H. Helmholtz, *Wissenschaftliche Abhandlungen* (Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1882), Vol. 1, Artigo 2, págs. 12-75.
- [Hel53] H. Helmholtz. On the conservation of force; a physical memoir. In J. Tyndall and W. Francis, editors, *Scientific Memoirs*, Volume on Natural Philosophy, pages 114–162, London, 1853. Taylor and Francis. Translated by J. Tyndall. Disponível em https://books.google.com.br/books?id=C1i4AAAAIAAJ&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s.
- [Hel72a] H. Helmholtz. Ueber die Theorie der Elektrodynamik. *Monatsberichte der Berliner Akademie der Wissenschaften*, pages 247–256, 1872. Reimpresso em H. Helmholtz, *Wissenschaftliche Abhandlungen* (Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1882), Vol. 1, Artigo 34, págs. 636-646.
- [Hel72b] H. von Helmholtz. On the theory of electrodynamics. *Philosophical Magazine*, 44:530–537, 1872.
- [Hel82] H. Helmholtz. Ueber absolute Maasssysteme für electrische und magnetische Grössen. *Annalen der Physik und Chemie*, 17:42–54, 1882.
- [Hel66] H. von Helmholtz. On the conservation of force; a physical memoir. In J. Tyndall and W. Francis, editors, *Scientific Memoirs*, Volume on Natural Philosophy, pages 114–162, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation. Translated by J. Tyndall.
- [Hen04] K. Hentschel. Leben und Werke des Instrumentmachers Moritz Meyerstein (1808-82). *Einbecker Jahrbuch*, 49:157–184, 2004.
- [Hen05] K. Hentschel. *Gaußens unsichtbare Hand: Der Universitätsmechanicus und Maschineninspector Moritz Meyerstein — Ein Instrumentbauer im 19. Jahrhundert*. Abhandlungen der Göttinger Akademie der Wissenschaften, Göttingen, 2005. Mathem.-Physik. Klasse, Reihe 3, Nr. 52.
- [Hen07] K. Hentschel. Gauß, Meyerstein and Hanoverian metrology. *Annals of Science*, 64:41–72, 2007.
- [Hen11] J. Henry. Gravity and *de gravitatione*: the development of Newton’s ideas on action at a distance. *Studies in History and Philosophy of Science*, 42:11–27, 2011. Doi: 10.1016/j.shpsa.2010.11.025.

- [Hen14] J. Henry. Newton and action at a distance between bodies—A response to Andrew Janiak’s “Three concepts of causation in Newton”. *Studies in History and Philosophy of Science*, 47:91–97, 2014. Doi: 10.1016/j.shpsa.2014.03.001.
- [Hen19] J. Henry. Newton and action at a distance. In E. Schliesser and C. Smeenk, editors, *The Oxford Handbook of Newton*, pages 1–34, Oxford, 2019. Oxford University Press. Doi: 10.1093/oxfordhb/9780199930418.013.17.
- [Hen20a] J. Henry. Primary and secondary causation in Samuel Clarke’s and Isaac Newton’s theories of gravity. *Isis*, 111:542–561, 2020.
- [Hen20b] K. Hentschel. The ‘invisible hand’ of Carl Friedrich Gauß — retracing the life of Moritz Meyerstein, a 19th century instrument maker and Universitäts-Mechanicus. In C. Forstner and M. Walker, editors, *Biographies in the History of Physics: Actors, Objects, Institutions*, chapter 2, pages 13–36. Springer, Berlin, 2020. Translated by A. M. Hentschel.
- [Hen23] J. Henry. Newton’s ‘De Aere et Aethere’ and the introduction of interparticulate forces into his physics. *Annals of Science*, 80:3:232–267, 2023. DOI: 10.1080/00033790.2023.2192721.
- [Her85] H. Hertz. Ueber die Dimensionen des magnetischen Pols in verschiedenen Masssystemen. *Annalen der Physik und Chemie*, 260:114–118, 1885.
- [Her94] H. Hertz. *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*. Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 2nd edition, 1894. Reimpresso em H. Hertz, *Gesammelte Werke*, Volume 2 (Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1894).
- [Her00] H. Hertz. *Electric Waves: Being Researches on the Propagation of Electric Action With Finite Velocity Through Space*. Macmillan, London, 2nd edition, 1900. Translated by D. E. Jones.
- [Hes55] M. B. Hesse. Action at a distance in classical physics. *Isis*, 46:337–353, 1955.
- [Hes61] M. B. Hesse. *Forces and Fields: A Study of Action at a Distance in the History of Physics*. Thomas Nelson and Sons, London, 1961.
- [HM95] M. A. Heald and J. B. Marion. *Classical Electromagnetic Radiation*. Saunders, Fort Worth, 3rd edition, 1995.
- [Hum01] A. v. Humboldt. Neue physikalische Beobachtungen im spanischen Amerika. Aus Briefen an Fourcroy und Lalande. *Annalen der Physik und Chemie*, 7:329–347, 1801.
- [Hum29a] A. v. Humboldt. Beobachtungen der Intensität magnetischer Kräfte und der magnetischen Neigung, angestellt in den Jahren 1798 bis 1803, von 48° 50’ N.B. bis 12° S.B. und 3° 2’ O.L. bis 106° 22’ W.L., in Frankreich, Spanien, den canarischen Inseln, dem atlantischen Ocean, America und der Südsee. *Annalen der Physik und Chemie*, 15:336–355, 1829.

- [Hum29b] A. v. Humboldt. Ueber die Mittel, die Ergründung einiger Phänomene des tellurischen Magnetismus zu erleichtern. *Annalen der Physik und Chemie*, 15:319–336, 1829.
- [Hun21] B. J. Hunt. *Imperial Science: Cable Telegraphy and Electrical Physics in the Victorian British Empire*. Cambridge University Press, Cambridge, 2021.
- [Ive90] T. Ivesić. The relativistic electric fields arising from steady conduction currents. *Physics Letters A*, 144:427–431, 1990.
- [Ive91] T. Ivezić. Electric fields from steady currents and unexplained electromagnetic experiments. *Physical Review A*, 44:2682–2685, 1991.
- [Ive92] T. Ivezić. The definitions of charge and the invariance of charge. *Physics Letters A*, 162:96–102, 1992.
- [Ive93] T. Ivezić. Reply to “Comments on ‘Electric fields from steady currents and unexplained electromagnetic experiments’ ”. *Physical Review E*, 44:4140–4142, 1993.
- [Jac39] M. Jacobi. Ueber das chemische und das magnetische Galvanometer. *Annalen der Physik und Chemie*, 48:26–57, 1839. Mitgetheilt vom Hen. Verfasser aus den Bullet. scient. der Petersburger Academie, T. V.
- [Jac75] J. D. Jackson. *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons, New York, second edition, 1975.
- [Jac06] M. W. Jackson. *Harmonious Triads: Physicists, Musicians, and Instrument Makers in Nineteenth-Century Germany*. The MIT Press, Cambridge, 2006.
- [Jan09] P. Janet. La vie et les oeuvres d’Eleuthère Mascart. *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées*, 20:574–593, 1909.
- [JM86] C. Jungnickel and R. McCormmach. *Intellectual Mastery of Nature — Theoretical Physics from Ohm to Einstein*, volume 1-2. University of Chicago Press, Chicago, 1986.
- [JM17] C. Jungnickel and R. McCormmach. *The Second Physicist: On the History of Theoretical Physics in Germany*. Springer, Cham, 2017.
- [Joh97] L. Johnson. In memoriam: Susan P. Johnson. *Executive Intelligence Review*, 24:58, 1997.
- [Jol85] D. C. Jolly. Identity of the Ampere and Biot-Savart electromagnetic force laws. *Physics Letters A*, 107:231–234, 1985.
- [Jou41a] J. P. Joule. On the heat evolved by metallic conductors of electricity, and in the cells of a battery during electrolysis. *Philosophical Magazine*, 19:260–277, 1841. Reimpresso em *The Annals of Electricity, Magnetism, and Chemistry; and Guardian of Experimental Science*, Vol. 8, págs. 287-301 (1842).

- [Jou41b] J. P. Joule. On the production of heat by voltaic electricity. *Proceedings of the Royal Society of London*, 4:280–281, 1841. Reimpresso em *Athenaeum*, Vol. 697, 192 (1841) e *Philosophical Magazine*, Vol. 18, págs. 308-309 (1841).
- [Jou42] J. P. Joule. Sur la chaleur développée dans les conducteurs métalliques et dans les auges d’une pile sous l’influence de l’électricité. *Archives de l’Électricité. Supplément a la Bibliothèque Universelle de Genève*, 2:54–79, 1842.
- [Jou43] J. P. Joule. On the caloric effects of magneto-electricity and on the mechanical value of heat. *Philosophical Magazine*, 23:263–276, 347–355 and 435–443, 1843.
- [Kär02] M. Kärn. Das erdmagnetische Observatorium in der Scheune: Messungen mit dem originalgetreuen Nachbau eines Magnetometers vom Gauß und Weber. *Mitteilungen der Gauss-Gesellschaft*, 39:23–52, 2002.
- [Ker13] M. Kersting, 2013. Der Gauss-Weber-Telegraph. In: Sammlung und Physikalisches Museum. Universität Goettingen - Fakultät für Physik, pág. 7. Disponível em https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/0188fd8f56a96739a307f28545ed41d2.pdf/Gauss_Weber_Telegraf_Magdalena%20Kersting.pdf.
- [Kir49] G. Kirchhoff. Ueber eine Ableitung der Ohm’schen Gesetze, welche sich an die Theorie der Elektrostatik anschliesst. *Annalen der Physik und Chemie*, 78:506–513, 1849. Reimpresso em G. Kirchhoff’s *Gesammelte Abhandlungen* (Barth, Leipzig, 1882), págs. 49-55.
- [Kir50] G. Kirchhoff. On a deduction of Ohm’s law, in connexion with the theory of electrostatics. *Philosophical Magazine*, 37:463–468, 1850.
- [Kir54] G. Kirchhoff. Démonstration des lois de Ohm fondée sur les principes ordinaires de l’électricité statique. *Annales de Chimie et de Physique*, 41:496–500, 1854.
- [Kir57a] G. Kirchhoff. On the motion of electricity in wires. *Philosophical Magazine*, 13:393–412, 1857. Disponível em <https://archive.org/stream/londonedinburghp13maga#page/392/mode/2up>.
- [Kir57b] G. Kirchhoff. Ueber die Bewegung der Elektrizität in Drähten. *Annalen der Physik und Chemie*, 100:193–217, 1857. Reimpresso em G. Kirchhoff’s *Gesammelte Abhandlungen* (Barth, Leipzig, 1882), págs. 131-154.
- [Kir57c] G. Kirchhoff. Ueber die Bewegung der Elektrizität in Leitern. *Annalen der Physik und Chemie*, 102:529–544, 1857. Reimpresso em G. Kirchhoff’s *Gesammelte Abhandlungen* (Barth, Leipzig, 1882), págs. 154-168.
- [Kir56] F. Kirchner. Über die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aus elektromagnetischen Messungen nach W. Weber und R. Kohlrausch. *Die Naturwissenschaften*, 43:529–533, 1956.
- [Kir57] F. Kirchner. Determination of the velocity of light from electromagnetic measurements according to W. Weber and R. Kohlrausch. *American Journal of Physics*, 25:623–629, 1957. Translated by A. Akeley.

- [Kir21a] G. Kirchhoff. On a deduction of Ohm's laws, in connexion with the theory of electrostatics. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume II: Weber's Fundamental Force and the Unification of the Laws of Coulomb, Ampère and Faraday, pages 261–265, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Kir21b] G. Kirchhoff. On the motion of electricity in conductors. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, pages 229–241, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Kir21c] G. Kirchhoff. On the motion of electricity in wires. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, pages 201–220, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Koe89] A. Koestler. *O Homem e o Universo*. Ibrasa, São Paulo, 1989. Tradução de A. Denis.
- [Koh70] F. Kohlrausch. *Leitfaden der praktischen Physik: zunächst für das physikalische Practicum in Göttingen*. B. G. Teubner, Leipzig, 1870.
- [Koh83a] F. Kohlrausch. *An Introduction to Physical Measurements — with appendices on absolute electrical measurement, etc.* J. & A. Churchill, London, 2nd edition, 1883. Translated from the fourth German edition by T. H. Waller and H. R. Procter.
- [Koh83b] F. Kohlrausch. Ueber die Messung localer Variationen der erdmagnetischen Horizontalintensität. *Annalen der Physik und Chemie*, 19:130–143, 1883.
- [Koh10] F. Kohlrausch. *Lehrbuch der praktischen Physik*. B. G. Teubner, Leipzig, 1910. Elfte, stark vermehrte Auflage des Leitfadens der praktischen Physik.
- [Kra10] H. Kragh, 2010. Before Bohr: Theories of atomic structure 1850-1913. RePoSS: Research Publications on Science Studies # 10. Aarhus: Centre for Science Studies, University of Aarhus, Denmark. Research group: History and philosophy of science.
- [Kra12] H. Kragh. Zöllner's universe. *Physics in Perspective*, 14:392–420, 2012.
- [Kre85] D. Kreichgauer. Zur Bestimmung von Trägheitsmomenten durch Schwingungsversuche. *Annalen der Physik und Chemie*, 25:273–308, 1885.
- [KW57] R. Kohlrausch and W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Zurückführung der Stromintensitäts-Messungen auf mechanisches Maass. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 3:221–292, 1857. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 609-676.

- [KW21] R. Kohlrausch and W. Weber. Electrodynamic measurements, fourth memoir, specially attributing mechanical units to measures of current intensity. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, pages 141–199, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [LA98] E. K. Lauridsen and N. Abrahamsen. The history of astatic magnet systems and suspensions. *Centaurus*, 40:135–169, 1998.
- [Lan09] P. Langevin. L'Oeuvre de E. Mascart. *La Revue du Mois*, pages 385–406, 1909. Disponível em <https://www.annales.org/archives/x/mascart.html>.
- [LB67] D. Lardner and E. B. Bright. *The Electric Telegraph*. James Walton, London, 3rd edition, 1867. A new edition revised and re-written by E. B. Bright.
- [Len34] E. Lenz. Ueber die Bestimmung der Richtung der durch elektrodynamische Vertheilung erregten galvanischen Ströme. *Annalen der Physik und Chemie*, 31:483–494, 1834.
- [Len69] H. F. E. Lenz. Lenz' law. In W. F. Magie, editor, *A Source Book in Physics*, pages 511–513, New York, 1969. McGraw-Hill. Extract from a paper published in the *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 31, p. 483, 1834, entitled “Ueber die Bestimmung der Richtung der durch elektrodynamische Vertheilung erregten galvanischen Ströme.”.
- [Lin05] I. V. Lindell. Evolution of electromagnetics in the 19th century. *Advances in Radio Science*, 3:23–25, 2005.
- [Lin06] I. V. Lindell. Evolution of electromagnetics in the 19th century. In T. K. Sarkar et al., editor, *History of Wireless*, pages 165–188, New York, 2006. Wiley.
- [Llo80] J. T. Lloyd. Lord Kelvin demonstrated. *The Physics Teacher*, 18:16–24, 1980.
- [Llo07] J. T. Lloyd. Lorde Kelvin demonstrado. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:499–508, 2007. Traduzido por A. K. T. Assis.
- [LSN21] A. R. d. S. Lima, A. P. B. d. Silva, and L. F. d. Nascimento. Uma proposta histórica e experimental para o estudo dos multiplicadores do efeito magnético. *Experiências em Ensino de Ciências*, 16:185–206, 2021.
- [MA08] C. P. Magnaghi and A. K. T. Assis. Sobre a eletricidade excitada pelo simples contato entre substâncias condutoras de tipos diferentes — Uma tradução comentada do artigo de Volta de 1800 descrevendo sua invenção da pilha elétrica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25:118–140, 2008.
- [Mal82] S. R. C. Malin. Sesquicentenary of Gauss's first measurement of the absolute value of magnetic intensity. *Philosophical Transactions*, 306:5–8, 1982.

- [Mal07] S. R. C. Malin. Gauss' determination of absolute intensity. In D. Gubbins and E. Herrero-Bervera, editors, *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, pages 278–279. Springer, Dordrecht, 2007. Doi: 10.1007/978-1-4020-4423-6_104.
- [Mar84] R. d. A. Martins. Mayer e a conservação da energia. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 6:63–84, 1984.
- [Mar86] R. d. A. Martins. Ørsted e a descoberta do eletromagnetismo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 10:89–114, 1986.
- [Mar90] M. Marshall. The theme of quantification and the hidden Weber in the early work of Gustav Theodor Fechner. *Canadian Psychology*, 31:45–53, 1990.
- [Mar22] R. d. A. Martins. Joule's 1840 manuscript on the production of heat by voltaic electricity. *Notes and Records*, 76:117–153, 2022. Doi: 10.1098/rsnr.2020.0027.
- [Max58] J. C. Maxwell. On Faraday's lines of force. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 10:27–83, 1858. Lido em 10 de dezembro de 1855 e 11 de fevereiro de 1856. Reimpresso em W. D. Niven (ed.), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (Cambridge University Press, Cambridge, 1890), Vol. 1, págs. 155–229.
- [Max67] J. C. Maxwell. On the dynamical theory of gases. *Philosophical Transactions*, 157:49–88, 1867. Reimpresso em W. D. Niven (ed.), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (Cambridge University Press, Cambridge, 1890), Vol. 2, págs. 26–78.
- [Max73a] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, volume I. Clarendon Press, Oxford, 1873.
- [Max73b] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, volume II. Clarendon Press, Oxford, 1873.
- [Max54a] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, New York, 1954. Two volumes. Unabridged republication of the third edition of 1891.
- [Max54b] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, volume II. Dover, New York, 1954. Unabridged republication of the third edition of 1891.
- [May42] J. R. Mayer. Bermerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, 42:233–240, 1842.
- [May62] J. R. Mayer. Remarks on the forces of inorganic nature. *Philosophical Magazine*, 24:371–377, 1862. Translated by G. C. Foster.
- [May72] T. Mayer. *The Unpublished Writings of Tobias Mayer*, volume III: The Theory of the Magnet and its Application to Terrestrial Magnetism. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1972. Edited and translated with introductions by E. G. Forbes.

- [May84] J. R. Mayer. Observações sobre as forças da natureza inanimada. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 6:85–95, 1984. Tradução de R. d. A. Martins.
- [MB82] S. R. C. Malin and D. R. Barraclough. 150th anniversary of Gauss’s first absolute magnetic measurement. *Nature*, 297:285, 1982.
- [MB91] S. R. C. Malin and D. R. Barraclough. Humboldt and the Earth’s magnetic field. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 32:279–293, 1991.
- [Men06] K. S. Mendelson. The story of c. *American Journal of Physics*, 74:995–997, 2006. Doi: 10.1119/1.2238887.
- [Men15] K. S. Mendelson. On an early proposal for a unified system of units. *American Journal of Physics*, 83:183–185, 2015. Doi: 10.1119/1.4896353.
- [Mer84] U. C. Merzbach. *Carl Friedrich Gauss: A Bibliography*. Scholarly Resources Inc., Wilmington, Delaware, 1984.
- [Mey54] A. M. Meyner. *Geschichte der Stadt Wittenberg: aus archivalischen und andern zuverlässigen Quellen geschöpft und bearbeitet*. Hermann Reubürger, Dessau, 1854.
- [Mey90] J. Meya. *Elektrodynamik im 19. Jahrhundert: Rekonstruktion ihrer Entwicklung als Konzept einer redlichen Vermittlung*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 1990.
- [MGMG10] M. A. A. Monteiro, J. S. E. Germano, I. C. d. C. Monteiro, and A. Gaspar. As atividades de demonstração e a teoria de Vigotski: um motor elétrico de fácil construção e de baixo custo. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27:371–384, 2010.
- [Mil72] J. D. Miller. Rowland and the nature of electric currents. *Isis*, 63:4–27, 1972.
- [MKSG10] M. Manda, M. Korte, M. Soloviev, and A. Gvishiani. Alexander von Humboldt’s charts of the Earth’s magnetic field: an assessment based on modern models. *History of Geo- and Space Sciences*, 1:63–76, 2010. Doi: <https://www.hist-geo-space-sci.net/1/63/2010/>.
- [Mol72] A. P. Molella. *Philosophy and nineteenth-century German electrodynamics: the problem of atomic action at a distance*. PhD thesis, Cornell University, 1972.
- [Moy89a] P. G. Moyssides. Calculation of the sixfold integrals of the Ampere force law in a closed circuit. *IEEE Transactions on Magnetism*, 25:4307–4312, 1989.
- [Moy89b] P. G. Moyssides. Calculation of the sixfold integrals of the Biot-Savart-Lorentz force law in a closed circuit. *IEEE Transactions on Magnetism*, 25:4298–4306, 1989.
- [Moy89c] P. G. Moyssides. Experimental verification of the Biot-Savart-Lorentz and Ampere force laws in a closed circuit, revisited. *IEEE Transactions on Magnetism*, 25:4313–4321, 1989.

- [MP86] P. G. Moyssides and P. T. Pappas. Rigorous quantitative test of Biot-Savart-Lorentz forces. *Journal of Applied Physics*, 59:19–27, 1986.
- [MRGL10] F. Martin-Rodriguez, G. B. Garcia, and M. A. Lires. Technological archaeology: technical description of the Gauss-Weber telegraph. In IEEE, editor, *2010 Second Region 8 IEEE Conference on the History of Communications*, Madrid, 2010. Histelcon. Doi: 10.1109/HISTELCON.2010.5735309.
- [MS20] R. A. Martins and A. P. B. Silva. Joule’s experiments on the heat evolved by metallic conductors of electricity. *Foundations of Science*, pages 1–77, 2020. Doi: 10.1007/s10699-020-09681-1.
- [Mun07] A. M. Munoz. Motor homopolar. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 4:352–354, 2007.
- [MV17] V. V. Mayer and E. I. Varaksina. Unipolar motor and angular momentum conservation law. *Physics Education*, 52:043004, 2017. Doi: 10.1088/1361-6552/aa6f98.
- [Nas85] J. Nasilowski. A note on longitudinal Ampere forces in gaseous conductors. *Physics Letters A*, 111:315–316, 1985.
- [Ner33] J. J. Nervander. Mémoire sur un galvanomètre à châssis cylindrique par lequel on obtient immédiatement et sans calcul la mesure de l’intensité du courant électrique qui produit la déviation de l’aiguille aimantée. *Annales de Chimie et de Physique*, 55:156–184, 1833.
- [Neu46] F. E. Neumann. Allgemeine Gesetze der inducirten elektrischen Ströme. *Annalen der Physik und Chemie*, 67:31–43, 1846.
- [Neu47] F. E. Neumann. Allgemeine Gesetze der inducirten elektrischen Ströme. *Abhandlungen der Königlichten Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, pages 1–87, 1847. Gelesen in der Akademie der Wissenschaften am 27. October 1845.
- [Neu48] F.-E. Neumann. Essai d’une théorie mathématique de l’induction. *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 13:113–178, 1848. Traduit par M. A. Bravais.
- [Neu72] C. Neumann. Ueber die Elementargesetze der Kräfte elektrodynamischen Ursprungs. *Mathematische Annalen*, 5:602–624, 1872.
- [New34] I. Newton. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press, Berkeley, 1934. Cajori edition.
- [New90] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Nova Stella/Edusp, São Paulo, 1990. Livro I: O Movimento dos Corpos. Tradução de T. Ricci, L. G. Brunet, S. T. Gehring e M. H. C. Célia.
- [New96] I. Newton. *Óptica*. Edusp, São Paulo, 1996. Tradução, introdução e notas de A. K. T. Assis.

- [New99] I. Newton. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press, Berkeley, 1999. A new translation by I. B. Cohen and A. Whitman, assisted by J. Budenz.
- [New08] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Edusp, São Paulo, 2008. Livro II: O Movimento dos Corpos (em Meios com Resistência). Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Tradução de A. K. T. Assis.
- [New10] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Folha de São Paulo, São Paulo, 2010. Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Tradução de A. K. T. Assis. Coleção Folha de São Paulo: Livros que Mudaram o Mundo, Volume 9.
- [Oer20a] H. C. Oersted. Expériences sur l’effet du conflict électrique sur l’aiguille aimantée. *Annales de Chimie et de Physique*, 14:417–425, 1820.
- [Oer20b] H. C. Oersted. Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle. *Annals of Philosophy*, 16:273–277, 1820. Traduzido a partir de uma versão impressa escrita em latim pelo autor e transmitida por ele ao Editor dos *Annals of Philosophy*. Reimpresso em *Selected Works of Hans Christian Ørsted* (Princeton, Princeton University Press, 1998), traduzido e editado por K. Jelved, A. D. Jackson e O. Knudsen.
- [Oer20c] J. C. Oersted. Versuche über die Wirkung des electrischen Conflicts auf die Magnetnadel. *Annalen der Physik und Chemie*, 6:295–304, 1820. Traduzido por Gilbert.
- [Oer65] H. C. Oersted. Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle. In R. A. R. Tricker, *Early Electrodynamics — The First Law of Circulation*, pages 113–117, New York, 1965. Pergamon. Translation from Thomson’s *Annals of Philosophy*, October 1820. Translated from a printed account drawn up in Latin by the author and transmitted by him to the Editor of the *Annals of Philosophy*.
- [Ohm26a] G. S. Ohm. Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaschen Apparates und des Schweiggerschen Multiplikators. *Journal für Chemie und Physik*, 46:137–166, 1826. Reimpresso em *Ostwald’s Klassiker der exakten Wissenschaften*, Número 244, C. Piel (ed.), (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938), págs. 8-29.
- [Ohm26b] G. S. Ohm. Ein Nachtrag zu dem vorstehenden Aufsatz. *Annalen der Physik und Chemie*, 7:117–118, 1826.
- [Ohm26c] G. S. Ohm. Versuch einer Theorie der durch galvanische Kräfte hervorgebrachten elektroskopischen Erscheinungen. *Annalen der Physik und Chemie*, 6:459–469, 1826.

- [Ohm26d] G. S. Ohm. Versuch einer Theorie der durch galvanische Kräfte hervorgebrachten elektroskopischen Erscheinungen (Beschluss). *Annalen der Physik und Chemie*, 7:45–54, 1826.
- [Ohm27] G. S. Ohm. *Die Galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*. T. H. Riemann, Berlin, 1827.
- [Ohm60] G. S. Ohm. *Théorie Mathématique des Courants Électriques*. L. Hachette et Co., Paris, 1860. Traduction, préface et notes de J.-M. Gauguain.
- [Ohm66] G. S. Ohm. The galvanic circuit investigated mathematically. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 2, pages 401–506, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation. English translation by W. Francis.
- [Ole96] K. M. Olesko. Precision, tolerance, and consensus: local cultures in German and British resistance standards. In J. Z. Buchwald, editor, *Scientific Credibility and Technical Standards in 19th and Early 20th Century Germany and Britain*, pages 117–156. Springer, Dordrecht, 1996.
- [O’R65] A. O’Rahilly. *Electromagnetic Theory — A Critical Examination of Fundamentals*. Dover, New York, 1965.
- [Ørs86] H. C. Ørsted. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 10:115–122, 1986. Tradução de R. d. A. Martins.
- [Ørs98] H. C. Ørsted. Experiments on the effect of the electric conflict on the magnetic needle. In K. Jelved, A. D. Jackson, and O. Knudsen, editors, *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, pages 413–416. Princeton University Press, Princeton, 1998. Article originally written in Latin in 1820.
- [Ost91] W. Ostwald. Studien zur Energetik I. *Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig*, 43:271–288, 1891. Reimpresso em *Zeitschrift für physikalische Chemie*, Vol. 9, págs. 563–578, 1892.
- [Ost92] W. Ostwald. Studien zur Energetik II. Grundlinien in der allgemeinen Energetik. *Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig*, 44:211–237, 1892. Reimpresso em *Zeitschrift für physikalische Chemie*, Vol. 10, págs. 363–386, 1892.
- [Pap83] P. T. Pappas. The original Ampère force and Biot-Savart and Lorentz forces. *Il Nuovo Cimento B*, 76:189–197, 1983.
- [Pap90] P. T. Pappas. The nonequivalence of the Ampère and Lorentz/Grassmann force laws and longitudinal contact interactions. *Physics Essays*, 3:15–23, 1990.
- [Pap93] P. T. Pappas. Electrodynamics from Ampere to now: future perspective. In A. Lakhtakia, editor, *Essays on the Formal Aspects of Electromagnetic Theory*, pages 287–309, Singapore, 1993. World Scientific.

- [Pat17] A. M. Patterson. *A German-English Dictionary for Chemists*. John Wiley & Sons, New York, 1917.
- [Peo88] V. Peoglos. Measurement of the magnetostatic force of a current circuit on a part of itself. *Journal of Physics D*, 21:1055–1061, 1988.
- [PG98] T. E. Phipps, Jr. and J. Guala Valverde. Simulation of Ampèrian current elements by magnetic toroids. *21st Century Science & Technology*, 11:55–65, 1998.
- [Phi90] T. E. Phipps Jr. New evidence for Ampère longitudinal forces. *Physics Essays*, 3:198–206, 1990.
- [Phi93] T. E. Phipps Jr. Ampere tension and Newton’s laws. *Apeiron*, 17:1–5, 1993.
- [Phi96] T. E. Phipps, Jr. Monte Carlo electrodynamic calculations using the filamentary approximation. *Hadronic Journal*, 19:273–301, 1996.
- [Pic06] F. Pichler. Das Grundgesetz der Elektrodynamik von Weber: eine übersicht zur historischen Entwicklung. In F. Pichler and M. v. Renteln, editors, *Von Newton to Gauss*, pages 203–212. Trauner, Linz, 2006. Peuerbach Symposium 2006.
- [PM85] P. T. Pappas and P. G. Moyssides. On the fundamental laws of electrodynamics. *Physics Letters A*, 111:193–198, 1985.
- [PM13] E. M. Purcell and D. J. Morin. *Electricity and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, 3rd edition, 2013.
- [Pog40] J. C. Poggendorff. Ueber die galvanischen Ketten aus zwei Flüssigkeiten und zwei einander nicht berührenden Metallen. *Annalen der Physik und Chemie*, 49:31–72, 1840.
- [Pog57] J. C. Poggendorff. Bemerkung zu dem Aufsatz des Herrn Prof. Kirchhoff. *Annalen der Physik und Chemie*, 100:351–352, 1857. Reimpresso em *Wilhelm Weber’s Werke*, Vol. 4, pág. 242, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894).
- [Pog21] J. C. Poggendorff. Comment on the paper by Prof. Kirchhoff. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber’s Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, page 225, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Poi12a] Poisson. Extrait d’un mémoire sur la distribution de l’électricité à la surface des corps conducteurs. *Journal de Physique, de Chimie, d’Histoire Naturelle et des Arts*, 75:229–237, 1812.
- [Poi12b] Poisson. Mémoire sur la distribution de l’électricité à la surface des corps conducteurs. *Mémoires de la Classe des Sciences Mathématiques et Physiques*, pages 1–92, 1812. Année 1811. Première partie. Lu les 9 mai et 3 août 1812.
- [Poi13] Poisson. Second mémoire sur la distribution de l’électricité a la surface des corps conducteurs. *Journal de Physique, de Chimie, d’Histoire Naturelle et des Arts*, 77:380–386, 1813. Lu à l’Institut, le 6 septembre 1813.

- [Poi22a] S. D. Poisson. Mémoire sur la théorie du magnétisme. Lu à l'Académie royale des Sciences le 2 Février 1824. *Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France*, 5:247–338, 1821-1822. Histoire de l'Académie. Analyse des travaux de l'Académie royale des sciences pendant l'année 1821, partie mathématique; par M. le chevalier Delambre, secrétaire perpétuel. Apesar da data, este volume foi publicado apenas em 1826.
- [Poi22b] S. D. Poisson. Second Mémoire sur la théorie du magnétisme. Lu à l'Académie royale des Sciences le 27 Décembre 1824. *Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France*, 5:488–533, 1821-1822. Histoire de l'Académie. Analyse des travaux de l'Académie royale des sciences pendant l'année 1821, partie mathématique; par M. le chevalier Delambre, secrétaire perpétuel. Apesar da data, este volume foi publicado apenas em 1826.
- [Poi25a] Poisson. Solution d'un problème relatif au magnétisme terrestre. *Annales de Chimie et de Physique*, 30:257–263, 1825.
- [Poi25b] Poisson. Solution d'un problème relatif au magnétisme terrestre. *Connaissance des Temps, ou des Mouvements Célestes, à l'usage des Astronomes et des Navigateurs, por l'An 1828*, pages 322–330, 1825. Paris.
- [Poi19] Poisson. Essay on the distribution of electricity on the surface of conducting bodies. Traduzido por S. Gallagher. Disponível em <https://histomathsci.blogspot.com>, 2019.
- [Pot84] A. Potier. *Collection de Mémoires relatifs à la Physique*, volume 1: *Mémoires de Coulomb*. Gauthiers-Villars, Paris, 1884.
- [Pou37] Pouillet. Mémoire sur la pile de Volta et sur la loi générale de l'intensité que prennent les courants, soit qu'ils proviennent d'un seul élément, soit qu'ils proviennent d'une pile à grande ou à petite tension. *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences de Paris*, 4:267–279, 1837.
- [PP90] T. E. Phipps and T. E. Phipps Jr. Observation of Ampère forces in mercury. *Physics Letters A*, 146:6–14, 1990.
- [Pri83] W. Pricha. *Von Ampère zu Maxwell. Wilhelm Webers Briefe an Carl August v. Steinheil und die Elektrodynamik Ihres Zeit*. PhD thesis, Universität Bremen, 1983.
- [PV90] P. T. Pappas and T. Vaughan. Forces on a stigma antenna. *Physics Essays*, 3:211–216, 1990.
- [Rei77] K. Reich. *Carl Friedrich Gauß — 1777/1977*. Heinz Moos Verlag, München, 1977.
- [Rei02] K. Reich. *Gauß' Werke in Kurzfassung*. Erwin Rauner, Augsburg, 2002. Algorismus, Studien zur Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften, Vol. 39.

- [Rei11] K. Reich. Alexander von Humboldt und Carl Friedrich Gauß als Wegbereiter der neuen Disziplin Erdmagnetismus. *International Review for Humboldtian Studies*, 12:35–55, 2011.
- [Rei13] K. Reich. Die Beziehungen zwischen Kopenhagen und Göttingen auf dem Gebiet des Erdmagnetismus: Ergebnisse einer Analyse der Briefe, die “Hans Christian Oersted” mit “Carl Friedrich Gauß” und “Wilhelm Weber” wechselte. *Sudhoffs Archiv*, 97:21–38, 2013.
- [Rei19] K. Reich, 2019. Die Intensität der erdmagnetischen Kraft: Nr. 15, pp. xxxix–xlii. In *Carl Friedrich Gauss’ — Werke — Supplement — Band 3: Varia: 15 Abhandlungen in deutscher Übersetzung. Mit einer Einleitung, einer Bibliographie und Registern herausgegeben von Karin Reich. Hrsg. von der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, Universitätsverlag Göttingen 2019*, pp. 533–594.
- [Rib14] D. Ribeiro. Wilhelm Eduard Weber. *Revista de Ciência Elementar*, 2:136, 2014. Doi: 10.24927/rce2014.136.
- [Rie67a] B. Riemann. A contribution to electrodynamics. *Philosophical Magazine*, 34:368–372, 1867. Esse texto foi escrito em 1858.
- [Rie67b] B. Riemann. Ein Beitrag zur Elektrodynamik. *Annalen der Physik und Chemie*, 131:237–243, 1867. Esse texto foi escrito em 1858.
- [Rie73] E. Riecke. Bemerkungen über die Polpunkte eines Magnets. *Annalen der Physik und Chemie*, 149:62–73, 1873.
- [Rie79] E. Riecke. Zur Lehre von den Polen eines Stabmagnetes. *Annalen der Physik und Chemie*, 8:299–325, 1879.
- [Rie92] E. Riecke. *Wilhelm Weber (geb. 24. October 1804, gest. 23. Juni 1891)*. Dieterichsche Verlags-Buchhandlung, Göttingen, 1892. Rede gehalten in der öffentlichen Sitzung der K. Gesellschaft der Wissenschaften am 5. December 1891. Reimpresso em *Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, Vol. 38, págs. 1–44 (1892).
- [Rie77] B. Riemann. A contribution to electrodynamics. In C. White, *Energy Potential: Toward a New Electromagnetic Field Theory*, pages 295–300, New York, 1977. Campaigner. Translated by J. J. Cleary Jr.
- [Rie24] E. Riecke. Memorial speech. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume V: Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber’s Electrodynamics Versus Different Field Theories, pages 179–202, Montreal, 2024. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ros56] L. Rosenfeld. The velocity of light and the evolution of electrodynamics. *Il Nuovo Cimento*, Supplement to vol. 4:1630–1669, 1956. Reimpresso em Cohen, R. S. e Stachel, J. J. (eds.), *Selected Papers of Léon Rosenfeld*. Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 21. Springer, Dordrecht, Cap. 14, págs. 134–177.

- [Ros81] L. Rosenfeld. Kirchhoff, Gustav Robert. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 7, pages 379–383, New York, 1981. Charles Scribner’s Sons.
- [RR12] K. Reich and E. Roussanova. *Carl Friedrich Gauß und Russland: Sein Briefwechsel mit in Russland wirkenden Wissenschaftlern*. de Gruyter, Berlin, 2012. In: Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen. Neue Folge, 16.
- [RR13] K. Reich and K. Roussanova. Eine kritische Bestandsaufnahme der Werkausgabe von Carl Friedrich Gauß. *Math Semesterber*, 60:217–247, 2013. Doi: 10.1007/s00591-012-0116-3.
- [RR14] K. Reich and E. Roussanova. Gauss’ and Weber’s “Atlas of Geomagnetism” (1840) was not the first: the history of the geomagnetic atlases. *Handbook of Geomathematics*, pages 1–32, 2014. Doi: 10.1007/978-3-642-27793-1_94-1.
- [RR15] K. Reich and E. Roussanova. *Carl Friedrich Gauss und Christopher Hansteen: Der Briefwechsel beider Gelehrten im historischen Kontext*. De Gruyter, Berlin, 2015.
- [RR17] K. Reich and E. Roussanova. Krakau und Göttingen: Maximilian Weisses Beziehungen zu Carl Friedrich Gauß und Wilhelm Weber. *Mitteilungen der Gauss-Gesellschaft*, 54:37–60, 2017.
- [Sab26] E. Sabine. Versuche zur Bestimmung der Intensitäten des Magnetismus der Erde, nebst Beobachtungen über die täglichen Oscillationen der horizontalen Magnetnadel zu Hammersfors und Spitzbergen. *Annalen der Physik und Chemie*, 6:88–124, 1826.
- [Sch20] J. S. Schweigger. Zusätze zu Oersted’s elektro-magnetische Versuchen. *Allgemeine Literatur-Zeitung*, 296:cols. 622–624, 1820.
- [Sch21a] Schweiger. Sur l’electro-magnétisme. *Bibliothèque Universelle des Sciences, Belles-Lettres, et Arts*, 16:197–200, 1821.
- [Sch21b] J. S. Schweigger. Noch einige Worte über diese neuen elektromagnetischen Phänomene. *Journal für Chemie und Physik*, 31:35–41, 1821.
- [Sch21c] J. S. Schweigger. Über Elektromagnetismus. *Journal für Chemie und Physik*, 31:7–17, 1821.
- [Sch21d] J. S. Schweigger. Zusätze zu Oersted’s elektromagnetische Versuchen. *Journal für Chemie und Physik*, 31:1–6, 1821.
- [Sch40] C. F. Schönbein. Notizen über eine Volta’sche Säule von ungewöhnlicher Kraft. *Annalen der Physik und Chemie*, 49:511–514, 1840.
- [Sch36] H. Schimank. Carl Friedrich Gauß und Wilhelm Weber. In W. Andreas and W. von Scholz, editors, *Die Großen Deutschen*, volume 3, pages 266–279. Neue Deutsche Biographie, 1936.

- [Sch88] U. Schmucker. The Wingst geomagnetic observatory and the development of geomagnetism during the past fifty years. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 41:93–107, 1988. Doi: 10.1007/BF02225920.
- [Sch93a] W. Schreier. Die drei Brüder Weber und Gustav Theodor Fechner — Untersuchungen zur medizinischen, Psycho- und technischen Physik. *International Journal of History and Ethics of Natural Sciences, Technology and Medicine*, New Serie, Vol. 2:111–116, 1993.
- [Sch93b] W. Schreier. Die Stellung der Gebrüder Weber in der Geschichte der Medizin, Naturwissenschaften und Technik. In G. Berg, W. Eisenberg, W. Hergert, and W. Schreier, editors, *II. Weber — Symposium Die Gebrüder Weber — Wegbereiter interdisziplinärer Forschung in Halle und Leipzig am 16. Oktober und 18. November 1993*, pages 1–9. Fachbereich Physik der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und Wilhelm-Weber-Gesellschaft e. V., 1993.
- [See25] Seebeck. Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz. *Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin — Aus den Jahren 1822 und 1823*, pages 265–373, 1825. Auszug aus vier Vorlesungen, welche in der Akademie der Wissenschaften am 16. August, am 18. und 25. Oktober 1821 und am 11. Februar 1822 gehalten worden.
- [See26] T. J. Seebeck. Ueber die Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz. *Annalen der Physik und Chemie*, 6:1–10, 133–160 and 253–286, 1826. Ausgezogen aus den so eben erschienen Denkschriften für 1822 und 1823.
- [See69] T. J. Seebeck. Thermoelectric currents. In W. F. Magie, editor, *A Source Book in Physics*, pages 461–464, New York, 1969. McGraw-Hill.
- [Sih21] A. Sihvola. Johan Jacob Nervander and the quantification of electric current. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 63:123–128, 2021. Doi: 10.1109/MAP.2020.3039803.
- [Sin92] A. K. Singal. On the charge invariance and relativistic electric fields from a steady conduction current. *Physics Letters A*, 162:91–95, 1992.
- [Sin93a] A. K. Singal. The charge neutrality of a conductor carrying a steady current. *Physics Letters A*, 175:261–264, 1993.
- [Sin93b] A. K. Singal. Comment on ‘Electric fields from steady currents and unexplained electromagnetic experiments’. *Physical Review E*, 44:4138–4139, 1993.
- [Str89a] J. Strnad. On forms of the force law for current elements. *Physics Letters A*, 137:11–12, 1989.
- [Str89b] J. Strnad. Stefan’s equations of electrodynamics. *European Journal of Physics*, 10:276–280, 1989.
- [SU04a] H. J. Schlichting and C. Ucke. Der einfachste Elektromotor der Welt. *Physik in Unserer Zeit*, 35:272–273, 2004.

- [SU04b] H. J. Schlichting and C. Ucke. A fast, high-tech, low cost electric motor construction. Este artigo é uma versão modificada do trabalho original publicado em alemão no periódico: *Physik in unserer Zeit*, Vol. **35**, pp. 272-273 (2004). Tradução para o inglês de J. Williams. Disponível em: users.physik.tu-muenchen.de/cucke/english.htm, 2004.
- [SU04c] H. J. Schlichting and C. Ucke. Un motor eléctrico de construcción sencilla, bajo coste y alta tecnología. Este artigo é uma versão modificada do trabalho original publicado em alemão no periódico: *Physik in unserer Zeit*, Vol. **35**, pp. 272-273 (2004). Disponível em: users.physik.tu-muenchen.de/cucke/english.htm, 2004.
- [TA15a] M. Tajmar and A. K. T. Assis. Gravitational induction with Weber’s force. *Canadian Journal of Physics*, 93:1571–1573, 2015. Doi: 10.1139/cjp-2015-0285.
- [TA15b] M. Tajmar and A. K. T. Assis. Particles with negative mass: production, properties and applications for nuclear fusion and self-acceleration. *Journal of Advanced Physics*, 4:77–82, 2015. Doi: 10.1166/jap.2015.1159.
- [TA15c] M. Tajmar and A. K. T. Assis. Teilchen mit negativer Masse: Produktion, Eigenschaften und Anwendungen für die Kernfusion und die Selbst-Beschleunigung. Artigo traduzido para o alemão em 2015 por M. Pohl a partir do artigo original em inglês: M. Tajmar and A. K. T. Assis, “Particles with negative mass: production, properties and applications for nuclear fusion and self-acceleration,” *Journal of Advanced Physics*, Vol. 4, pp. 77-82 (2015). Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis, 2015.
- [TA16] M. Tajmar and A. K. T. Assis. Influence of rotation on the weight of gyroscopes as an explanation for flyby anomalies. *Journal of Advanced Physics*, 5:176–179, 2016. Doi: 10.1166/jap.2016.1233.
- [TCA04] A. C. Tort, A. M. Cunha, and A. K. T. Assis. Uma tradução comentada de um texto de Maxwell sobre a ação a distância. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 26:273–282, 2004.
- [Ten96] J. Tennenbaum. An introduction to ‘The significance of the 1845 Gauss-Weber correspondence’. *21st Century Science & Technology*, 9(3):2–5, 1996.
- [Ten97a] J. Tennenbaum. Demonstrating Gauss and Weber’s magnetometer. *21st Century Science & Technology*, 10(1):61–62, 1997.
- [Ten97b] J. Tennenbaum. Wilhelm Weber’s ‘Aphorisms’ — On the hypotheses of temporal ordering. *21st Century Science & Technology*, 10(2):50–51, 1997.
- [Ter85a] J. G. Ternan. Equivalence of the Lorentz and Ampere force laws in magnetostatics. *Journal of Applied Physics*, 57:1743–1745, 1985.
- [Ter85b] J. G. Ternan. Reply to “Comments on ‘Equivalence of the Lorentz and Ampere laws in magnetostatics’ ” [J. Appl. Phys. 57, 1743 (1985)]. *Journal of Applied Physics*, 58:3639, 1985.

- [Ter86] J. G. Ternan. Stresses in rapidly heated wires. *Physics Letters A*, 115:230–232, 1986.
- [Tho74] W. Thomson *et al.* First report of the committee for the selection and nomenclature of dynamical and electrical units. *Report of the British Association for the Advancement of Science (B. A. Report)*, pages 222–225, 1874.
- [Tim05] A. Timm. Der elektromagnetische Telegraph von Gauß und Weber. *Göttinger Bibliothekschriften*, 30:169–187, 2005.
- [Tom98] K. A. Tomilin. Natural system of units. To the centenary anniversary of the Planck system. In I. V. Filiminova and V. A. Petrov, editors, *Proceedings, 21st International Workshop on the Fundamental Problems of High-Energy Physics and Field Theory*, pages 287–296, Protvino, 1998. IHEP. Protvino, Russia, June 23–25, 1998.
- [Tom20] F. D. Tombe. The 1855 Weber-Kohlrausch experiment (the speed of light). *The General Science Journal*, 2020. Disponível em www.gsjournal.net/Science-Journals/Research%20Papers/View/7711.
- [Tri62] R. A. R. Tricker. Ampère as a contemporary physicist. *Contemporary Physics*, 3:453–468, 1962.
- [Tri65] R. A. R. Tricker. *Early Electrodynamics — The First Law of Circulation*. Pergamon, Oxford, 1965.
- [Tun92] P. Tunbridge. *Lord Kelvin: His Influence on Electrical Measurements and Units*. Peter Peregrinus Ltd., London, 1992. IEE History of Technology Series 18.
- [Voi99] W. Voigt. Untitled. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 43:824–825, 1899.
- [Voi24] W. Voigt. Gauss-Weber monument. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume V: Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber’s Electrodynamics Versus Different Field Theories, pages 303–308, Montreal, 2024. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Vol00a] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Transactions*, 90:403–431, 1800. Carta em francês, contendo apenas o título em inglês, de A. Volta para J. Banks, datada de 20 de março de 1800. Ela foi lida perante a *Royal Society* em 26 de junho de 1800.
- [Vol00b] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Magazine*, 7:289–311, 1800.
- [Vol23] A. Volta. Sull’elettricità eccitata dal semplice contatto di sostanze conduttrici di diversa natura in una lettera di Alessandro Volta a Sir Joseph Banks. In *Le Opere di Alessandro Volta*, Vol. 1. Ulrico Hoepli, Milano, 1923. Disponível em echo.mpiwg-berlin.mpg.de/content/electricity.

- [Vol64] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. In B. Dibner, *Alessandro Volta and the Electric Battery*, pages 111–131. Franklin Watts, New York, 1964. Translated from the author’s paper published in French in the Philosophical Transactions for 1800, Part 2.
- [VS08] J. Venermo and A. Sihvola. The tangent galvanometer of Johan Jacob Nervander. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 11:16–23, 2008.
- [Web25a] W. Weber. Auszug aus den die Theorie des Schalles und Klanges betreffenden Aufsätzen von Felix Savart. Mit einigen Bemerkungen über scheinbare Widersprüche zwischen Savart’s Entdeckungen und Chladni’s früheren Arbeiten und andere Zusätzen. *Journal für Chemie und Physik*, 14:385–428, 1825. Reimpresso em Wilhelm Weber’s *Werke*, Vol. 1, págs. 3-28, W. Vogt (ed.), (Springer, Berlin, 1892).
- [Web25b] W. Weber. Ueber Savart’s Klangversuche. *Journal für Chemie und Physik*, 15:257–310, 1825. Reimpresso em Wilhelm Weber’s *Werke*, Vol. 1, págs. 29-50, W. Vogt (ed.), (Springer, Berlin, 1892).
- [Web27] W. Weber, 1827. Leges oscillationis oriundae si duo corpora diversa celeritate oscillantia ita conjunguntur ut oscillare non possint nisi simul et synchronice exemplo illustratae tuborum linguatorum. Reimpresso em Wilhelm Weber’s *Werke*, Vol. 1, págs. 207-256, W. Vogt (ed.), (Springer, Berlin, 1892).
- [Web28] W. Weber. Kompensation der Orgelpfeifen. *Annalen der Physik und Chemie*, 14:397–408, 1828. Reimpresso em *Wilhelm Weber’s Werke*, Vol. 1, W. Voigt (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 257-265.
- [Web37a] W. Weber. Bemerkungen über die Einrichtung magnetischer Observatorien und Beschreibung der darin aufzustellenden Instrumente. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1836*, volume I, chapter I, pages 13–33. Dieterichschen Buchhandlung, Göttingen, 1837. Reimpresso em *Wilhelm Weber’s Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 3-19.
- [Web37b] W. Weber. Beschreibung eines kleinen Apparats zur Messung des Erdmagnetismus nach absolutem Maass für Reisende. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1836*, volume I, chapter IV, pages 63–89. Dieterichschen Buchhandlung, Göttingen, 1837. Reimpresso em *Wilhelm Weber’s Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 20-42.
- [Web38a] W. Weber. Bemerkungen über die Einrichtung und den Gebrauch des Bifilar-Magnetometers. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1837*, volume II, chapter II, pages 20–37. Dieterichschen Buchhandlung, Göttingen, 1838. Reimpresso em *Wilhelm Weber’s Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 43-57.

- [Web38b] W. Weber. Das Induktions-Inklinatorium. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1837*, volume II, chapter V, pages 81–96. Dieterichschen Buchhandlung, Göttingen, 1838. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 75-88.
- [Web38c] W. Weber. Description d'un petit appareil portatif pour les voyageurs, et destiné aux mesures absolues du magnétisme terrestre. In A. Quetelet, editor, *Correspondance Mathématique et Physique*, pages 308–338. Société Belge de Librairie, Bruxelles, 1838. Tome X et Tome Second de la Troisième Série.
- [Web38d] W. Weber. Remarques sur l'établissement des observatoires magnétiques, et description des instrumens à y placer. In A. Quetelet, editor, *Correspondance Mathématique et Physique*, pages 49–71. Société Belge de Librairie, Bruxelles, 1838. Tome X et Tome Second de la Troisième Série.
- [Web38e] W. Weber. Ueber den Einfluss der Temperatur auf den Stabmagnetismus. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1837*, volume II, chapter III, pages 38–57. Dieterichschen Buchhandlung, Göttingen, 1838. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 58-74.
- [Web39a] W. Weber. Das transportable Magnetometer. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1838*, volume III, chapter III, pages 68–85. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1839. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 89-104.
- [Web39b] W. Weber. Der Induktor zum Magnetometer. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1838*, volume III, chapter IV, pages 86–101. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1839. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 105-118.
- [Web39c] W. Weber. Der Rotationsinductor. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1838*, volume III, chapter V, pages 102–117. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1839. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 119-131.
- [Web40] W. Weber. Unipolare Induction. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1839*, volume IV, chapter III, pages 63–90. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1840. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 153-175, resumo com algumas alterações e modificações feitas por Weber em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 176-179.
- [Web41a] W. Weber. Description of a small portable apparatus for measuring the absolute intensity of terrestrial magnetism. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol.

2, pages 65–87, London, 1841. Taylor and Francis. From the *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1836*, Volume I, Chapter IV, pp. 63–89. Translated by Mr. William Francis, and revised by Professor Lloyd and Major Sabine. Disponível em <https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/2501#/summary>.

- [Web41b] W. Weber. Messung starker galvanischer Ströme bei geringem Widerstande nach absolutem Maasse. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1840*, volume V, chapter VIII, pages 83–90. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1841. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 6–12.
- [Web41c] W. Weber. Observations on the arrangement and use of the bifilar magnetometer. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 2, pages 268–280, London, 1841. Taylor and Francis. From the *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1837*, Volume II, Chapter II, pp. 20–37. — Herausgegeben von Carl Friedrich Gauss und Wilhelm Weber. Göttingen, 1838. Translated by Mr. William Francis, and revised by Professor Lloyd and Major Sabine. Disponível em <https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/2501#/summary>.
- [Web41d] W. Weber. On a transportable magnetometer. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 2, pages 565–586, London, 1841. Taylor and Francis. This article is translated partly from the *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1838*, Volume III, Chapter III, pp. 68–85, and partly from manuscript communications from M. Weber to Major Sabine. Translation presented by Major Sabine. Disponível em <https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/2501#/summary>.
- [Web41e] W. Weber. Remarks on the arrangement of magnetical observatories, and description of the instruments to be placed in them. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 2, pages 25–42, London, 1841. Taylor and Francis. From the *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1836*, Volume I, Chapter I, pp. 13–33. Translated by Mr. William Francis, and revised by Professor Lloyd and Major Sabine. Disponível em <https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/2501#/summary>.
- [Web41f] W. Weber. Über magnetische Friction. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1840*, volume V, chapter IV, pages 46–58. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1841. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 200–211.
- [Web41g] W. Weber. Ueber das elektrochemische Aequivalent des Wassers. In C. F. Gauss and W. Weber, editors, *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1840*, volume V, chapter IX, pages 91–98. Weidmannschen Buchhandlung, Leipzig, 1841. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 13–18.

- [Web41h] W. Weber. Unipolare Induction. *Annalen der Physik und Chemie*, 52:353–386, 1841. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 153-175, resumo em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 176-179.
- [Web42a] W. Weber. Bemerkungen über die Wirkungen eines Magnetes in die Ferne. *Annalen der Physik und Chemie*, 55:33–42, 1842. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 242-249.
- [Web42b] W. Weber. Messung starker galvanischer Ströme nach absolutem Maasse. *Annalen der Physik und Chemie*, 55:27–32, 1842. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 19-23.
- [Web42c] W. Weber. Über ein neues Instrument zur Beobachtung galvanischer Ströme. *Amtlicher Bericht über die neunzehnte Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte zu Braunschweig im September 1841*, pages 154–158, 1842. Disponível em <https://opacplus.bsb-muenchen.de/title/11134128>.
- [Web42d] W. Weber. Ueber das elektrochemische Aequivalent des Wassers. *Annalen der Physik und Chemie*, 55:181–189, 1842. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 13-18.
- [Web46] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen — Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung. *Abhandlungen bei Begründung der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften am Tage der zweihundert-jährigen Geburtstagfeier Leibnizens herausgegeben von der Fürstlich Jablonowskischen Gesellschaft (Leipzig)*, pages 211–378, 1846. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 25-214.
- [Web48] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen. *Annalen der Physik und Chemie*, 73:193–240, 1848. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 215-254.
- [Web51] W. Weber. Messungen galvanischer Leitungswiderstände nach einem absolutem Maasse. *Annalen der Physik und Chemie*, 82:337–369, 1851. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 276-300.
- [Web52a] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über Diamagnetismus. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 1:485–577, 1852. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 473-554.
- [Web52b] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 1:199–381, 1852. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 301-471.

- [Web52c] W. Weber. On the measurement of electro-dynamic forces. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 5, pages 489–529, London, 1852. Taylor and Francis. Disponível em <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.212784> e <https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/2501#/summary>.
- [Web52d] W. Weber. Ueber den Zusammenhang der Lehre vom Diamagnetismus mit der Lehre von dem Magnetismus und der Elektrizität. *Annalen der Physik und Chemie*, 87:145–189, 1852. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 555-590.
- [Web53] W. Weber. On the connexion of diamagnetism with magnetism and electricity. In J. Tyndall and W. Francis, editors, *Scientific Memoirs*, Volume on Natural Philosophy, pages 163–199, London, 1853. Taylor and Francis. Translated by J. Tyndall. Disponível em https://books.google.com.br/books?id=C1i4AAAAIAAJ&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s.
- [Web55] W. Weber. Vorwort bei der Übergabe der Abhandlung: Elektrodynamische maassbestimmungen, insbesondere zurückführung der stromintensitäts-messungen auf mechanisches maass. *Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physische Klasse*, 17:55–61, 1855. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 591-596.
- [Web56] W. Weber. Bestimmung der rechtwinkeligen Komponenten der erdmagnetischen Kraft in Göttingen in dem Zeitraume von 1834-1853. *Abhandlungen der Königlischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 6:3–46, 1856. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 2, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1892), págs. 333-373.
- [Web61] W. Weber. On the measurement of electric resistance according to an absolute standard. *Philosophical Magazine*, 22:226–240 and 261–269, 1861. Traduzido pelo Dr. E. Atkinson.
- [Web62] W. Weber. Zur Galvanometrie. *Abhandlungen der Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mathematische Klasse*, 10:3–96, 1862. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), págs. 17-96.
- [Web64] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über elektrische Schwingungen. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 6:571–716, 1864. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), págs. 105-241.
- [Web71] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über das Princip der Erhaltung der Energie. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 10:1–61, 1871. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), págs. 247-299.

- [Web72] W. Weber. Electrodynamic measurements — Sixth memoir, relating specially to the principle of the conservation of energy. *Philosophical Magazine*, 43:1–20 and 119–149, 1872. Translated by Professor G. C. Foster, F.R.S., from the *Abhandlungen der mathem.-phys. Classe der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften*, Vol. X (January 1871).
- [Web75] W. Weber. Ueber die Bewegung der Elektrizität in Körpern von molekularer Konstitution. *Annalen der Physik und Chemie*, 156:1–61, 1875. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), págs. 312–357.
- [Web78] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über die Energie der Wechselwirkung. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 11:641–696, 1878. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), págs. 361–412.
- [Web87] W. Weber. Mesures électrodynamiques. In J. Joubert, editor, *Collection de Mémoires relatifs a la Physique*, Vol. III: *Mémoires sur l'Électrodynamique*, pages 289–402. Gauthier-Villars, Paris, 1887.
- [Web92a] H. Weber. Wilhelm Weber — Eine Lebensskizze. *Deutsche Revue*, 3:183–202, 1892.
- [Web92b] H. Weber. Wilhelm Weber — Eine Lebensskizze (Fortsetzung). *Deutsche Revue*, 3:324–345, 1892.
- [Web92c] H. Weber. Wilhelm Weber — Eine Lebensskizze (Schluß). *Deutsche Revue*, 4:99–118, 1892.
- [Web92d] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, E. Riecke (ed.), volume 2, *Magnetismus*. Springer, Berlin, 1892. Disponível em <http://archive.org/details/wilhelmweberswe01fiscgoog>.
- [Web92e] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, W. Voigt, (ed.), volume 1, *Akustik, Mechanik, Optik und Wärmelehre*. Springer, Berlin, 1892.
- [Web93a] H. Weber. *Wilhelm Weber — Eine Lebensskizze*. Eduard Trewendt, Breslau, 1893. Disponível em https://books.google.de/books/about/Wilhelm_Weber.html?id=pu3mpnrYpuUC&redir_esc=y.
- [Web93b] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, H. Weber (ed.), volume 3, *Galvanismus und Elektrodynamik*, primeira parte. Springer, Berlin, 1893. Disponível em <http://archive.org/details/wilhelmweberswe02fiscgoog>.
- [Web94a] W. Weber. Aphorismen. In H. Weber, editor, *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 4, pages 630–632, Berlin, 1894. Springer.
- [Web94b] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über den Zusammenhang des elektrischen Grundgesetzes mit dem Gravitationsgesetze. In H. Weber, editor, *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 4, pages 479–525, Berlin, 1894. Springer.

- [Web94c] W. Weber. Ueber die Einrichtung des Bifilargalvanometers. In H. Weber, editor, Wilhelm Weber's *Werke*, Vol. 4, pages 584–615, Berlin, 1894. Springer.
- [Web94d] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, H. Weber, (ed.), volume 4, *Galvanismus und Elektrodynamik*, segunda parte. Springer, Berlin, 1894.
- [Web66a] W. Weber. Observations on the arrangement and use of the bifilar magnetometer. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 2, pages 268–280, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation.
- [Web66b] W. Weber. On a transportable magnetometer. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 2, pages 565–586, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation.
- [Web66c] W. Weber. On the connexion of diamagnetism with magnetism and electricity. In J. Tyndall and W. Francis, editors, *Scientific Memoirs*, Volume on Natural Philosophy, pages 163–199, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation. Translated by J. Tyndall.
- [Web66d] W. Weber. On the measurement of electro-dynamic forces. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, Vol. 5, pages 489–529, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation.
- [Web97] W. Weber. Aphorisms. *21st Century Science & Technology*, 10(2):52–53, 1997. English translation by J. Tennenbaum.
- [Web07] W. Weber, 2007. Determinations of electrodynamic measure: concerning a universal law of electrical action, *21st Century Science & Technology*, traduzido para o inglês por S. P. Johnson, editado por L. Hecht e A. K. T. Assis. Disponível desde março de 2007 em <http://21sci-tech.com/translation.html> e www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web08] W. Weber, 2008. Determinations of electrodynamic measure: particularly in respect to the connection of the fundamental laws of electricity with the law of gravitation, *21st Century Science & Technology*, traduzido para o inglês por G. Gregory, editado por L. Hecht e A. K. T. Assis. Disponível desde novembro de 2008 em <http://21sci-tech.com/translation.html> e www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web19] W. Weber, 2019. On the measurement of electro-dynamic forces. Classics of Measure no. 1. Second edition. Version of 21 February 2019. This English translation appeared originally in R. Taylor (editor), *Scientific Memoirs, selected from the Transactions of Foreign Academies of Science and Learned Societies*, Volume V, part 20, article 14 (London: Taylor and Francis, 1852). Disponível em www.sizes.com/library/classics/Weber1.pdf.
- [Web21a] W. Weber. Aphorisms. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume IV: Conservation of Energy, Weber's Planetary Model of the Atom and the Unification of Electromagnetism and Gravitation, pages 211–213, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.

- [Web21b] W. Weber. Description of a small portable apparatus for measuring the absolute intensity of terrestrial magnetism. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 103–122, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21c] W. Weber. Electrodynamic measurements, eighth memoir, relating specially to the connection of the fundamental law of electricity with the law of gravitation. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume IV: Conservation of Energy, Weber's Planetary Model of the Atom and the Unification of Electromagnetism and Gravitation, pages 173–210, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21d] W. Weber. Electrodynamic measurements, fifth memoir, relating specially to electric oscillations. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, pages 267–383, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21e] W. Weber. Electrodynamic measurements, first memoir, relating specially to a general fundamental law of electric action. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume II: Weber's Fundamental Force and the Unification of the Laws of Coulomb, Ampère and Faraday, pages 33–203, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21f] W. Weber. Electrodynamic measurements, second memoir, relating specially to measures of resistance. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume II: Weber's Fundamental Force and the Unification of the Laws of Coulomb, Ampère and Faraday, pages 291–441, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21g] W. Weber. Electrodynamic measurements, seventh memoir, relating specially to the energy of interaction. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume IV: Conservation of Energy, Weber's Planetary Model of the Atom and the Unification of Electromagnetism and Gravitation, pages 123–164, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21h] W. Weber. Electrodynamic measurements, sixth memoir, relating specially to the principle of the conservation of energy. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume IV: Conservation of Energy, Weber's Planetary Model of the Atom and the Unification of Electromagnetism and Gravitation, pages 67–111, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.

- [Web21i] W. Weber. Electrodynamic measurements, third memoir, relating specially to diamagnetism. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, pages 11–83, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21j] W. Weber. Foreword to the submission of the treatise: electrodynamic measurements, specially attributing mechanical units to measures of current intensity. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, pages 125–129, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21k] W. Weber. Measurement of strong galvanic currents according to absolute measure. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 201–205, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21l] W. Weber. Measurement of strong galvanic currents with low resistance according to absolute measure. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 187–193, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21m] W. Weber. Observations on the arrangement and use of the bifilar magnetometer. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 135–149, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21n] W. Weber. On a transportable magnetometer. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 151–182, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21o] W. Weber. On the connexion of diamagnetism with magnetism and electricity. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, pages 85–120, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21p] W. Weber. On the electrochemical equivalent of water. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 195–200, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.

- [Web21q] W. Weber. On the measurement of electric resistance according to an absolute standard. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume II: Weber's Fundamental Force and the Unification of the Laws of Coulomb, Ampère and Faraday, pages 267–286, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web21r] W. Weber. Remarks on the arrangement of magnetical observatories, and description of the instruments to be placed in them. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber's Absolute System of Units, pages 85–101, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web24a] H. Weber. Wilhelm Weber: a biographical sketch. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume V: Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber's Electrodynamics Versus Different Field Theories, pages 203–255, Montreal, 2024. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web24b] W. Weber. On galvanometry. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume V: Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber's Electrodynamics Versus Different Field Theories, pages 59–123, Montreal, 2024. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web24c] W. Weber. On the motion of electricity in bodies of molecular constitution. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume V: Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber's Electrodynamics Versus Different Field Theories, pages 139–175, Montreal, 2024. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web24d] W. Weber. Unipolar induction. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume V: Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber's Electrodynamics Versus Different Field Theories, pages 27–47, Montreal, 2024. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Web24e] W. Weber. Unipolar induction. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume V: Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber's Electrodynamics Versus Different Field Theories, pages 53–57, Montreal, 2024. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Wes87] J. P. Wesley. Ampere's original force law compared with the Moyssides-Pappas results. In J. P. Wesley, editor, *Progress in Space-Time Physics 1987*, pages 170–180, Blumberg, 1987. Benjamin Wesley Publisher.
- [Wes89] J. P. Wesley. On Peoglos' measurement of the force on a portion of a current loop due to the remainder of the loop. *Journal of Physics D*, 22:849–850, 1989.

- [Wes90a] J. P. Wesley. Evidence for Weber-Wesley electrodynamics. In U. Bartocci and J. P. Wesley, editors, *Proceedings of the Conference on Foundations of Mathematics and Physics*, pages 289–343, Blumberg, 1990. Benjamin Wesley Publisher.
- [Wes90b] J. P. Wesley. Weber electrodynamics, Part I. General theory, steady current effects. *Foundations of Physics Letters*, 3:443–469, 1990.
- [Wes91] J. P. Wesley. *Selected Topics in Advanced Fundamental Physics*. Benjamin Wesley Publisher, Blumberg, 1991.
- [Whe43] C. Wheatstone. An account of several new instruments and processes for determining the constants of a voltaic circuit. *Philosophical Transactions*, 133:303–327, 1843.
- [Whe44a] C. Wheatstone. Beschreibung verschiedener neuen Instrumente und Methoden zur Bestimmung der Constanten einer Volta’schen Kette. *Annalen der Physik und Chemie*, 62:499–543, 1844.
- [Whe44b] C. Wheatstone. Description de plusieurs instruments et procédés nouveaux pour déterminer les constantes d’un circuit voltaïque. *Annales de Chimie et de Physique*, 10:257–293, 1844. Traduzido por M. J.-V. Fayeux.
- [Whi73] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1: *The Classical Theories*. Humanities Press, New York, 1973.
- [Wie60] K. H. Wiederkehr. Wilhelm Webers Stellung in der Entwicklung der Elektrizitätslehre. Dissertation, Universität Hamburg, 1960.
- [Wie64] K. H. Wiederkehr. Aus der Geschichte des Göttinger Magnetischen Vereins und seiner Resultate. *Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, II. Mathematisch-Physikalische Klasse*, 14:165–205, 1964.
- [Wie67] K. H. Wiederkehr. *Wilhelm Eduard Weber — Erforscher der Wellenbewegung und der Elektrizität (1804-1891)*, volume 32 of *Grosse Naturforscher*, H. Degen (ed.). Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1967.
- [Wie73] K. H. Wiederkehr. Das bisher unbekannte Gauß-Gutachten zur Wiederbesetzung des Göttinger Physiklehrstuhls 1831. *Gauß-Gesellschaft, Mitteilungen*, 10:32–47, 1973.
- [Wie82] K. H. Wiederkehr. Über die Verleihung der Copley-Medaille an Gauß und die Mitarbeit Englands im Göttinger Magnetischen Verein. *Gauß-Gesellschaft, Mitteilungen*, 19:15–35, 1982.
- [Wie88] K. H. Wiederkehr. Zur Deutung magnetischer Phänomene im 19. Jahrhundert. *Physikalische Blätter*, 44:129–134, 1988.
- [Wie90] K. H. Wiederkehr. Freunde und Förderer Bernhard Riemanns, Zwei Briefe aus seinen letzten Lebensjahren. *Gauß-Gesellschaft, Mitteilungen*, 27:75–85, 1990.
- [Wie91] K. H. Wiederkehr. Faradays Feldkonzept und Hans Christian Oersted. *Physikalische Blätter*, 47:825–830, 1991.

- [Wie92] K. H. Wiederkehr. Wilhelm Weber und die Entwicklung in der Geomagnetik und Elektrodynamik. *Gauß-Gesellschaft, Mitteilungen*, 29:63–72, 1992.
- [Wie93a] K. H. Wiederkehr. Das Experiment von Wilhelm Weber und Rudolf Kohlrausch 1855 und Maxwells elektromagnetische Lichttheorie. In W. Schröder, editor, *The Earth and the Universe (A Festschrift in honour of Hans-Jürgen Treder)*, pages 452–463. Interdivisional Commission on History of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Bremen-Rönnebeck, 1993.
- [Wie93b] K. H. Wiederkehr. W. Weber und die Entwicklung der Elektrodynamik. In G. Berg, W. Eisenberg, W. Hergert, and W. Schreier, editors, *II. Weber — Symposium Die Gebrüder Weber — Wegbereiter interdisziplinärer Forschung in Halle und Leipzig am 16. Oktober und 18. November 1993*, pages 39–54. Fachbereich Physik der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und Wilhelm-Weber-Gesellschaft e. V., 1993.
- [Wie93c] K. H. Wiederkehr. Wilhelm Weber und die Entwicklung in der Geomagnetik und Elektrodynamik. In G. Berg, W. Eisenberg, W. Hergert, and H. Thieme, editors, *I. Weber — Symposium anlässlich des 100. Todestages W. Webers in Halle und Wittenberg am 20. und 21. Juni 1991*, pages 1–14. Fachbereich Physik der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und Wilhelm-Weber-Gesellschaft e. V., 1993.
- [Wie94] K. H. Wiederkehr. Wilhelm Weber und Maxwells elektromagnetische Lichttheorie. *Gesnerus, Part. 3/4*, 51:256–267, 1994.
- [Wie97] K. H. Wiederkehr. Carl Friedrich Gauss (1777-1855) und Wilhelm Weber (1804-1891). In K. v. Meÿenn, editor, *Die Grossen Physiker*, Vol. 1, pages 357–370 and 522–524. Verlag C. H. Beck, München, 1997.
- [Wie04] K. H. Wiederkehr. Ein bisher unveröffentlichter Brief von Rudolf Kohlrausch an Andreas v. Ettingshausen von 1854, das Kohlrausch-Weber-Experiment von 1854/55 und die Lichtgeschwindigkeit in Wilhelm Webers Elektrodynamik. *NTM International Journal of History and Ethics of Natural Sciences, Technology and Medicine*, 12:129–145, 2004.
- [Wie07] K. H. Wiederkehr. Über Vorstellungen vom Wesen des elektrischen Stromes bis zum Beginn der Elektronentheorie der Metalle. In G. Wolfschmidt, editor, *“Es gibt für Könige keinen besonderen Weg zur Geometrie” — Festschrift für Karin Reich*, pages 299–308. Dr. Erwin Rauner Verlag, Augsburg, 2007.
- [Wie08] K. H. Wiederkehr. Heinrich Hertz between the old electrodynamics and Maxwell’s theory. In G. Wolfschmidt, editor, *Heinrich Hertz (1857-1894) and the Development of Communication*, pages 151–159. Schwerpunkt Geschichte der Naturwissenschaften, Mathematik und Technik, Hamburg, 2008. Nuncius Hamburgensis: Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften, Vol. 10.
- [Wis81] M. N. Wise. German concepts of force, energy, and the electromagnetic ether: 1845–1880. In G. N. Cantor and M. J. S. Hodge, editors, *Conceptions of Ether — Studies in the History of Ether Theories 1740–1900*, pages 269–307, Cambridge, 1981. Cambridge University Press.

- [Wis21] M. N. Wise. Does narrative matter? Engendering belief in electromagnetic theory. In M. Carrier, R. Mertens, and C. Reinhardt, editors, *Narratives and Comparisons: Adversaries or Allies in Understanding Science?*, pages 29–62. Bielefeld University Press, Bielefeld, 2021.
- [WK56] W. Weber and R. Kohlrausch. Über die Elektrizitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fließt. *Annalen der Physik und Chemie*, J. C. Poggendorff (ed.), 99:10–25, 1856. Reimpresso em *Wilhelm Weber's Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 597–608.
- [WK68] W. Weber and R. Kohlrausch. Über die Einführung absoluter elektrischer Maße. In S. Balke, H. Gericke, W. Hartner, G. Kerstein, F. Klemm, A. Portmann, H. Schimank, and K. Vogel, editors, *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*, new series, Vol. 5. Friedrich-Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1968. Comentado por F. Kohlrausch e K. H. Wiederkehr.
- [WK03] W. Weber and R. Kohlrausch. On the amount of electricity which flows through the cross-section of the circuit in galvanic currents. In F. Bevilacqua and E. A. Giannetto, editors, *Volta and the History of Electricity*, pages 287–297. Università degli Studi di Pavia and Editore Ulrico Hoepli, Milano, 2003. Traduzido por S. P. Johnson e editado por L. Hecht. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [WK08] W. Weber and R. Kohlrausch. Sobre a quantidade de eletricidade que flui através da seção reta do circuito em correntes galvânicas. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 1:94–102, 2008. Traduzido por A. K. T. Assis.
- [WK21] W. Weber and R. Kohlrausch. On the amount of electricity which flows through the cross-section of the circuit in galvanic currents. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume III: Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity, pages 131–140, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Wol05] G. Wolfschmidt (ed.). *Vom Magnetismus zur Elektrodynamik: anlässlich des 200. Geburtstags von Wilhelm Weber (1804-1891) und des 150. Todestages von Carl Friedrich Gauss (1777-1855)*. Schwerpunkt Geschichte der Naturwissenschaften, Mathematik und Technik, Hamburg, 2005.
- [Won09a] H. K. Wong. Levitated homopolar motor. *The Physics Teacher*, 47:124, 2009.
- [Won09b] H. K. Wong. Motional mechanisms of homopolar motors & rollers. *The Physics Teacher*, 47:463–465, 2009.
- [Woo62] A. E. Woodruff. Action at a distance in nineteenth century electrodynamics. *Isis*, 53:439–459, 1962.
- [Woo68] A. E. Woodruff. The contributions of Hermann von Helmholtz to electrodynamics. *Isis*, 59:300–311, 1968.

- [Woo81] A. E. Woodruff. Weber, Wilhelm Eduard. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 14, pages 203–209, New York, 1981. Charles Scribner’s Sons.
- [WW25] E. H. Weber and W. Weber. *Wellenlehre auf Experimente gegründet oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen*. Gerhard Fleischer, Leipzig, 1825. Reimpresso em *Wilhelm Weber’s Werke*, Vol. 5, E. Riecke (ed.), (Springer, Berlin, 1893). Disponível em <http://archive.org/details/wilhelmweberswe00fiscgoog>.
- [WW41a] F. Wöhler and W. Weber. Neue galvanische Säule. *Journal für praktische Chemie*, 23:313–316, 1841.
- [WW41b] F. Wöhler and W. Weber. Ueber eine neue Construction der Grove’schen Säulen. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, 38:307–311, 1841. Reimpresso em *Polytechnisches Journal*, Vol. 81, págs. 273–275 (1841).
- [WW41c] F. Wöhler and W. Weber. Zusammensetzung galvanischer Säulen. *Göttingische gelehrte Anzeigen*, 1:801–804, 1841. 81. Stuck der *Göttingische gelehrte Anzeigen*, den 24. May 1841. Reimpresso em *Wilhelm Weber’s Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), págs. 3–5.
- [WW93] E. H. Weber and W. Weber. *Wilhelm Weber’s Werke*, E. Riecke (ed.), volume 5, *Wellenlehre auf Experimente gegründet oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen*. Springer, Berlin, 1893. Publicado originalmente em 1825. Disponível em <http://archive.org/details/wilhelmweberswe00fiscgoog>.
- [WW94] W. Weber and E. Weber. *Wilhelm Weber’s Werke*, F. Merkel and O. Fischer (editors), volume 6, *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge. Eine anatomisch-physiologische Untersuchung*. Springer, Berlin, 1894. Publicado originalmente em 1836. Disponível em <http://archive.org/details/wilhelmweberswe03fiscgoog>.
- [WW92] W. Weber and E. Weber. *Mechanics of the Human Walking Apparatus*. Springer, Berlin, 1992. Translated by P. Maquet and R. Furlong.
- [WW21] F. Wöhler and W. Weber. Composition of galvanic piles. In A. K. T. Assis, editor, *Wilhelm Weber’s Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume I: Gauss and Weber’s Absolute System of Units, pages 183–185, Montreal, 2021. Apeiron. Disponível em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [WZ80] W. Weber and F. Zöllner. Ueber Einrichtungen zum Gebrauch absoluter Maasse in der Elektrodynamik mit praktischer Anwendung. *Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physische Klasse*, 32:77–143, 1880. Reimpresso em *Wilhelm Weber’s Werke*, Vol. 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), págs. 420–476.
- [Zet77] K. E. Zetzsche. *Handbuch der elektrischen Telegraphie*, volume 1: Geschichte der elektrischen Telegraphie. Julius Springer, Berlin, 1877.

[Zöl78] F. Zöllner. *Wissenschaftliche Abhandlungen*, volume 2, Part I. L. Staackmann, Leipzig, 1878.

Esse é o primeiro de 4 volumes do livro “Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas”.

Ele começa apresentando alguns estudos biográficos sobre Wilhelm Weber escritos por Eduard Riecke, Heinrich Weber e Woldemar Voigt. Em seguida vem a tradução comentada do trabalho de Gauss sobre a medição absoluta da força magnética terrestre. Nesse trabalho Gauss introduziu o sistema absoluto de unidades no qual as grandezas eletromagnéticas são medidas com base apenas nas dimensões de comprimento, massa e tempo (em particular, milímetro, miligrama e segundo). Ele obteve medidas absolutas da força magnética terrestre e do momento magnético de uma barra imantada. Como Gauss reconheceu nesse artigo, ele foi auxiliado por Weber de muitas maneiras.

Esse volume também contém traduções de outros artigos de Gauss, Weber e Wöhler até 1842. Eles lidam com a Associação Magnética criada por Gauss e Weber, os instrumentos que construíram para realizar medições magnéticas de alta precisão incluindo os magnetômetros unifilares e bifilares, a composição de pilhas galvânicas e o equivalente eletroquímico da água. Além disso, esse livro contém traduções dos dois trabalhos de Weber de 1840 sobre indução unipolar. Uma grande parte dos trabalhos de Weber na física foi dedicado a implementar e estender o sistema absoluto de unidades. Em particular, ele criou métodos para obter com eficácia medidas absolutas de alta precisão da carga elétrica, corrente elétrica, força eletromotriz e resistência.

Sobre o Autor: O Prof. André Koch Torres Assis nasceu em 1962. Concluiu o bacharelado e o doutorado no Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (1983 e 1987, respectivamente). Realizou um pós-doutorado no Laboratório Culham (Oxfordshire, Inglaterra, United Kingdom Atomic Energy Authority, 1988) e outro no Centro de Pesquisas Eletromagnéticas da Northeastern University (Boston, EUA, 1991-1992). Trabalhou por quatro períodos na Alemanha: (a) de agosto de 2001 até novembro de 2002, assim como (b) de fevereiro a maio de 2009, nessas duas vezes no Instituto para a História das Ciências Naturais da Universidade de Hamburgo; (c) de abril a junho de 2014 na Universidade Técnica de Dresden; e (d) de setembro a dezembro de 2023 na Universidade de Augsburg. Essas quatro estadias foram apoiadas por bolsas de pesquisa concedidas pela Fundação Alexander von Humboldt, da Alemanha. Suas obras “*Eletrodinâmica de Weber*” e “*Eletrodinâmica de Ampère*” receberam os Prêmios Jabuti 1996 e 2012 concedidos pela Câmara Brasileira do Livro como livros do ano na área de ciências exatas. É professor do Instituto de Física da UNICAMP desde 1989, onde orienta estudantes de graduação e de pós-graduação, realizando pesquisas sobre os fundamentos do eletromagnetismo, da gravitação e da cosmologia. Em particular trabalha sobre a Mecânica Relacional, o princípio de Mach, a origem da inércia, a força de Ampère entre elementos de corrente, e a eletrodinâmica de Weber. É o autor de diversos livros de física e de várias traduções de trabalhos científicos clássicos (obras de Arquimedes, Newton, Coulomb, Ampère, Weber etc.) disponíveis gratuitamente em sua homepage: <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>

9781987980370



9 781987 980370