

Andre Koch Torres Assis



**Os Fundamentos
Experimentais e
Históricos da
Eletricidade**

Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade

Andre Koch Torres Assis



**Apeiron
Montreal**

Published by C. Roy Keys Inc.
4405, rue St-Dominique
Montreal, Quebec H2W 2B2 Canada
<http://redshift.vif.com>

© Andre Koch Torres Assis, 2010.
First Published 2010

Library and Archives Canada Cataloguing in Publication

Assis, André Koch Torres, 1962-

Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade / André Koch Torres Assis.

Translation of: The experimental and historical foundations of electricity.
Includes bibliographical references.
ISBN 978-0-9864926-1-7

1. Electricity--Experiments. 2. Electricity--History. I. Title.

QC533.A88167 2010

537'.078

C2010-900626-7

Capa da frente: Experiência de Guericke (1602-1686) publicada em seu livro de 1672. Uma esfera de enxofre é atritada com a mão. Uma penugem é solta sobre a esfera, entra em contato com ela e passa a ser repelida. Ela fica então flutuando sobre a esfera.

Capa de trás: Fotografias de alguns instrumentos descritos neste livro. Um versório metálico. Um versório de Du Fay feito de plástico e tendo em uma das pontas papel de alumínio. Um pêndulo elétrico com um disco de papel suspenso por um fio de seda, com o fio preso em um canudo plástico. Um eletroscópio eletrizado com sua tirinha de papel afastada da cartolina, sendo que a cartolina está presa a um canudo plástico.

Sumário

Apresentação e Agradecimentos	7
1 Introdução	11
2 Eletrização por Atrito	15
2.1 O Início do Estudo da Eletricidade	15
2.2 O Efeito Âmbar	17
2.3 Explorando a Atração Exercida pelos Corpos Atritados	22
2.4 Quais Substâncias São Atraídas pelo Plástico Atritado?	22
2.5 É Possível Atrair Líquidos?	24
2.6 Gilbert e Algumas de Suas Experiências Elétricas	27
2.7 Quais São as Substâncias que Atraem Corpos Leves ao Serem Atritadas?	29
2.8 Nomenclatura de Gilbert: Corpos Elétricos e Não-Elétricos	31
3 O Versório	35
3.1 O Perpendículo de Fracastoro e o Versório de Gilbert	35
3.2 Construção de um Versório	38
3.2.1 Versório do Primeiro Tipo	38
3.2.2 Versório do Segundo Tipo	39
3.2.3 Versório do Terceiro Tipo	42
3.3 Experiências com o Versório	43
3.4 É Possível Mapear a Força Elétrica?	46
3.5 Existe Ação e Reação em Eletrostática?	49
3.6 Fabri e Boyle Descobrem as Ações Elétricas Mútuas	54
3.7 Newton e a Eletricidade	58
4 Atrações e Repulsões Elétricas	63
4.1 Existe Repulsão Elétrica?	63
4.2 A Experiência de Guericke da Penugem Flutuante	66
4.3 Du Fay Reconhece a Repulsão Elétrica como um Fenômeno Real	73
4.4 O Pêndulo Elétrico	75
4.5 O Aterramento Elétrico	80
4.6 O Pêndulo Elétrico de Gray	82

4.7	O Versório de Du Fay	83
4.8	O Mecanismo <i>ACR</i>	87
4.9	A Linha Pendular de Gray	90
4.10	Mapeamento da Força Elétrica	92
4.11	Hauksbee e o Mapeamento da Força Elétrica	97
5	Cargas Positivas e Negativas	99
5.1	Existe Só Um Tipo de Carga?	99
5.2	Du Fay Descobre Dois Tipos Diferentes de Eletricidade	110
5.3	Qual Tipo de Carga Adquire um Corpo ao Ser Atritado?	114
5.4	A Série Triboelétrica	123
5.5	A Atração e a Repulsão São Igualmente Frequentes?	128
5.6	Variação da Força Elétrica com a Distância	129
5.7	Variação da Força Elétrica com a Quantidade de Carga	131
6	Condutores e Isolantes	137
6.1	O Eletroscópio	137
6.2	Experiências com o Eletroscópio	140
6.3	Quais Corpos Descarregam um Eletroscópio por Contato?	147
6.3.1	Definições de Condutores e Isolantes	147
6.3.2	Corpos que se Comportam como Condutores e Isolantes nas Experiências Usuais de Eletrostática	151
6.4	Quais Corpos Carregam um Eletroscópio por Contato?	152
6.5	Componentes Fundamentais de um Versório, de um Pêndulo Elétrico e de um Eletroscópio	155
6.6	Influência da Diferença de Potencial Elétrico sobre o Comportamento Condutor ou Isolante de um Corpo	156
6.6.1	Corpos que se Comportam como Condutores e Isolantes para Baixas Diferenças de Potencial	160
6.7	Outros Aspectos que Influenciam no Comportamento Condutor ou Isolante de um Corpo	161
6.7.1	O Tempo Necessário para Descarregar um Eletroscópio Eletrizado	161
6.7.2	O Comprimento do Corpo que Entra em Contato com um Eletroscópio Eletrizado	162
6.7.3	A Área de Seção Reta do Corpo que Entra em Contato com um Eletroscópio Eletrizado	162
6.8	Eletrizando um Condutor por Atrito	163
6.9	Conservação da Carga Elétrica	164
6.10	Gray e a Conservação da Carga Elétrica	169
6.11	Uma Breve História do Eletroscópio e do Eletrômetro	170
7	Diferenças entre Condutores e Isolantes	177
7.1	Mobilidade de Cargas em Condutores e Isolantes	177
7.2	Coletores de Carga	179
7.3	A Polarização Elétrica de Condutores	181

7.3.1	Aepinus e a Polarização Elétrica	186
7.4	Atrações e Repulsões Exercidas por um Corpo Polarizado	187
7.5	Carregando um Eletroscópio Utilizando a Polarização	191
7.5.1	Primeiro Procedimento de Eletrização por Indução	191
7.5.2	Segundo Procedimento de Eletrização por Indução	193
7.5.3	Terceiro Procedimento de Eletrização por Indução	195
7.6	A Polarização Elétrica de Isolantes	196
7.7	Um Corpo Eletrizado Atrai com Mais Força um Condutor ou um Isolante?	198
7.7.1	Comentários sobre o Pêndulo Elétrico de Gray	201
7.8	Forças de Origem Não-Eletrostática	202
7.9	Modelos Microscópicos de Condutores e de Isolantes	203
7.10	Pode Haver Atração entre Dois Corpos Eletrizados com Cargas de Mesmo Sinal?	205
7.11	A Condutividade da Água	210
7.12	É Possível Eletrizar a Água?	212
7.12.1	O Gerador Eletrostático Gotejante de Kelvin	213
7.13	A Condutividade do Ar	216
7.14	Como Descarregar um Isolante Eletrizado?	217
7.15	Um Papelzinho é Atraído com Mais Força quando está sobre um Isolante ou sobre um Condutor?	220
8	Considerações Finais	225
8.1	Mudança de Nomenclatura e de Significado: De Corpos Elétricos e Não-Elétricos para Isolantes e Condutores	225
8.2	Fatos Simples e Primitivos sobre a Eletricidade	226
8.3	Descrição do Efeito Âmbar	229
	Apêndices	237
A	Definições	237
B	Stephen Gray e a Descoberta da Condução Elétrica	239
B.1	O Gerador Elétrico de Gray	240
B.2	A Descoberta da Eletrização por Comunicação	242
B.3	Explorando a Descoberta e Despertando a Eletricidade Escondida dos Metais	246
B.4	Gray Descobre os Condutores e Isolantes	247
B.5	Descoberta de que São as Propriedades Intrínsecas de um Corpo que Fazem com que Ele se Comporte como um Condutor ou como um Isolante	253
B.6	Descoberta de que a Eletrização por Comunicação Acontece à Distância	254
B.7	A Experiência do Garoto Suspenso	258
B.8	Descoberta de que as Cargas Livres se Distribuem apenas sobre a Superfície dos Condutores	261

B.9 Descoberta do Efeito das Pontas	262
B.10 Conclusão	264

Referências Bibliográficas	265
-----------------------------------	------------

Apresentação e Agradecimentos

No início da década de 1990 conheci o trabalho de Norberto Cardoso Ferreira, do Instituto de Física da Universidade Estadual de São Paulo, USP. Ele conseguia mostrar os aspectos mais importantes da eletricidade utilizando experiências feitas com materiais muito simples e facilmente acessíveis. Tive a oportunidade de visitá-lo pessoalmente na USP em 1993. Durante esta visita ele me apresentou com um pequeno conjunto de materiais experimentais feitos de cartolina, canudo de plástico de refresco, papel de seda, colchete, etc. Mostrou-me como realizar as experiências principais, assim como seu livro *Plus et Moins: Les Charges Électriques*.¹ Fiquei fascinado com o que aprendi, percebendo como se podem ver experimentalmente coisas bem profundas de física trabalhando com materiais facilmente acessíveis. Guardei este material como um tesouro durante 10 anos, embora não o tenha utilizado nem desenvolvido durante este período. Fico extremamente grato ao Norberto Ferreira pelo que aprendi com ele. Recentemente vim a conhecer outras obras suas, como sempre ricas e criativas.² Aprendi também pela discussão com seus estudantes, como Rui Manoel de Bastos Vieira e Emerson Izidoro dos Santos.

Em 2005 conheci Alberto Gaspar e seu livro *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*,³ com o qual muito aprendi. O mesmo pode ser dito de outras obras suas que conheci depois.⁴

Entre 2004 e 2007 ministrei aulas em cursos de aperfeiçoamento para professores da rede pública do ensino fundamental e médio dentro do projeto Teia do

¹[FM91].

²[Fer78], [Fera], [Ferb], [Ferc], [Ferd], [Fer06], [Fer01c], [Fer01d], [Fer01b] e [Fer01a].

³[Gas03].

⁴[Gas91] e [Gas96].

Saber da Secretaria de Educação do Governo do Estado de São Paulo. Foi um privilégio muito grande ter sido convidado a atuar neste programa. O apoio que recebi por parte da Secretaria de Educação e do Grupo Gestor de Projetos Educacionais da UNICAMP, assim como o contato com os alunos que participaram de minhas aulas, foram extremamente enriquecedores para mim. Também foram muito proveitosas as trocas de experiências com os professores da UNICAMP que participaram deste projeto. Como parte do meu envolvimento neste projeto resolvi ensinar aos professores de ensino fundamental e médio aquilo que havia aprendido com o Norberto Ferreira. Com isto retomei aquelas atividades e tive uma motivação adicional para escrever este livro, no sentido de compartilhar com o maior número possível de pessoas todas estas coisas.

A inspiração para a maior parte das experiências descritas neste livro foi tirada das obras originais, assim como dos trabalhos de Norberto Ferreira e de Alberto Gaspar. Desde então descobri diversas outras obras impressas e na internet que têm sido fundamentais para o meu aprendizado, como o site *Feira de Ciências*, de Luiz Ferraz Netto.⁵

John L. Heilbron sugeriu mudanças importantes em relação à primeira versão deste livro. Sua grande obra, *Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study in Early Modern Physics*,⁶ forneceu a maior parte das informações históricas citadas aqui. Muitas sugestões relevantes para melhorar uma versão anterior desta obra também foram dadas por Sérgio Luiz Bragatto Boss, John Eichler, Steve Hutcheon, Fabio Miguel de Matos Ravanelli e Bertrand Wolff.

As Figuras foram feitas por Daniel Robson Pinto, através de uma Bolsa Trabalho concedida pelo Serviço de Apoio ao Estudante da UNICAMP, ao qual agradecemos. O Daniel auxiliou também na obtenção de imagens e referências.

Agradeço ainda a diversas outras pessoas por sugestões, discussões, correções e referências: Christine Blondel, Paolo Brenni, João José Caluzi, Juliano Camillo, Hugo Bonette de Carvalho, João Paulo Martins de Castro Chaib, Asit Choudhuri, Roberto Clemente, Junichiro Fukai, Hans Gaab, Robert Harry van Gent, Harald Goldbeck-Löwe, Jürgen Gottschalk, Peter Heering, Elizabeth Ihrig, John Jenkins, Siegfried Kett, Ellen Kuhfeld, Wolfgang Lange, Lin Liu, José Joaquín Lunazzi, Ceno Pietro Magnaghi, Eduardo Meirelles, Mahmoud Melehy, Dennis Nawrath, Marcos Cesar Danhoni Neves, Horst Nowacki, Martin Panusch, José Rafael Boesso Perez, Karin Reich, Edson Eduardo Reinehr, Ricardo Rodrigues, Waldyr Alves Rodrigues Jr., Torsten Rüting, Dirceu Tadeu do Espírito Santo, Wayne M. Saslow, Fernando Lang da Silveira, Moacir Pereira de Souza Filho, Christian Ucke, Alvaro Vannucci, Geraldo Magela Severino Vasconcelos, Greg Volk, Karl-Heinrich Wiederkehr, Bernd Wolfram e Gudrun Wolfschmidt.

Ao Instituto de Física, ao Instituto de Matemática, ao Grupo Gestor de Projetos Educacionais e ao Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão da UNICAMP, que forneceram as condições necessárias para a realização deste trabalho. Agradeço também ao Instituto de História das Ciências Naturais da Universidade de Hamburgo, Alemanha, e à Fundação Alexander von Humboldt,

⁵[Net].

⁶[Hei99].

da Alemanha, por uma Bolsa Pesquisa no ano de 2009 durante a qual coletamos uma grande quantidade de material bibliográfico relacionado com este livro.

Roy Keys, o Editor de Apeiron, tem me apoiado por muitos anos. Sem o seu encorajamento alguns de meus livros talvez não tivessem sido publicados. Ele fez um trabalho editorial excelente para esta obra.

André Koch Torres Assis
Instituto de Física
Universidade Estadual de Campinas—UNICAMP
13083-970 Campinas, SP, Brasil
E-mail: assis@ifi.unicamp.br
Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

Capítulo 1

Introdução

Um dos objetivos deste livro é o de apresentar os fenômenos básicos da eletricidade através de experiências simples realizadas com materiais facilmente acessíveis em casa ou no comércio. Mostramos experiências sobre atração e repulsão, indicamos como obter corpos carregados por atrito/contato/indução, analisamos as diferenças entre condutores e isolantes, etc. Além disso, mostramos como os conceitos teóricos vão sendo formados e modificados neste processo, o mesmo ocorrendo com a formulação das leis fundamentais descrevendo estes fenômenos.

Em seguida se ilustra como fenômenos mais complexos podem ser esclarecidos em termos das experiências elementares. São apresentadas também experiências lúdicas e curiosas que estimulam a criatividade, o pensamento crítico e o senso de brincadeira na ciência. Elas também buscam relacionar fenômenos do dia a dia das pessoas com as leis básicas da física.

A ênfase é colocada em atividades experimentais. A partir delas se formulam as definições, os conceitos, postulados, princípios e leis que descrevem os fenômenos. Os materiais utilizados são bem simples, facilmente encontráveis em casa ou nas lojas. Apesar disto, são realizadas experiências bem precisas e construídos equipamentos científicos muito sensíveis. Com isto o leitor não vai depender de qualquer laboratório escolar ou de pesquisa, já que ele próprio construirá seus instrumentos e realizará as medidas. Para que este objetivo seja alcançado, apresentam-se várias montagens diferentes para cada aparelho e mais de uma maneira para serem realizadas as medidas.

Outra motivação importante que nos fez escrever este livro foi a de fornecer aos professores e alunos de todos os níveis de ensino as ferramentas principais para que obtenham uma autonomia científica. Citamos alguns dos trechos mais importantes escritos pelos principais cientistas que fizeram as grandes descobertas em eletricidade, mostramos como realizar experiências ilustrando estes fatos e ensinamos como construir com materiais facilmente acessíveis os instrumentos de pesquisa mais relevantes. Com isto espera-se que os leitores passem a ter uma autonomia na construção dos equipamentos, na realização das experiências, assim como na formulação das teorias e conceitos para esclarecer os fenômenos

observados.

Caso as experiências apresentadas aqui sejam feitas em sala de aula ou em cursos de aperfeiçoamento de professores, o ideal é que sejam realizadas individualmente por cada aluno, mesmo que as atividades sejam em grupo. Isto é, na medida do possível cada aluno deve construir seus próprios equipamentos (eletroscópio, versório,¹ pêndulo elétrico, etc.) e depois levar o material para casa. Este procedimento é bem mais enriquecedor do que a simples demonstração das experiências pelo professor, quando então o aluno apenas assiste aos fenômenos sem colocar a mão na massa.

Além da parte experimental, este livro é rico em informações históricas que fornecem o contexto do surgimento de alguns fenômenos e leis, assim como os diferentes enfoques ou interpretações relacionados a estes fenômenos. Toma-se um cuidado especial sobre a formação dos conceitos e princípios físicos. Presta-se atenção nas palavras que devem ser utilizadas para descrever os fenômenos e para definir os conceitos. Distinguem-se claramente o que são definições, postulados e resultados experimentais. São enfatizadas as diferenças entre a explicação e a descrição de um fenômeno. Estes aspectos ilustram os ingredientes humanos e sociológicos embutidos nas formulações das leis da física. Não seguimos a sequência histórica das descobertas, mas sempre que possível tentamos mostrar o contexto da época relacionado com cada fenômeno, ou então mencionamos os principais cientistas envolvidos com este problema. Boa parte das informações históricas aqui apresentadas foram tiradas das obras originais citadas ao longo do texto e dos excelentes livros de Heilbron.² Também não vamos discutir aqui os diferentes conceitos e modelos teóricos que foram propostos ao longo dos séculos para explicar os fenômenos elétricos. Para quem tiver interesse nestes aspectos, os livros de Heilbron estão entre as melhores referências sobre o tema.

Para manter este livro com um tamanho razoável, escolhemos apenas alguns tópicos principais para serem discutidos. Esperamos tratar em uma obra posterior de diversos outros assuntos e temas importantes da eletricidade. Alguns destes temas adicionais: Descargas elétricas e faíscas, efeito das pontas, vento elétrico, gaiola de Faraday, eletrização por contato/rolamento/separação, lei de Ohm, Gray e a preservação das cargas elétricas (como fazer para aumentar o tempo durante o qual um corpo permanece eletrizado), eletróforo de Volta, garrafa de Leiden, geradores de carga, eletretos, capacitância e distribuição de cargas entre condutores, eletricidade atmosférica, figuras de Lichtenberg, etc.

Queremos mostrar com este livro que existem muitas questões fundamentais da ciência que podem ser exploradas com experiências feitas com materiais bem simples mas que possuem grande importância histórica ou conceitual. Ao longo do texto mostramos que alguns dos maiores cientistas do passado estiveram envolvidos com estes fenômenos que hoje em dia parecem tão simples ou triviais, mas que na verdade ainda escondem alguns mistérios muito profundos.

Este livro é voltado para professores e alunos dos cursos de física, de ma-

¹Discutido no Capítulo 3.

²[Hei79], [Hei82] e [Hei99].

temática, de ciências e de engenharia. Ele não é um livro de experiências para crianças. É escrito de tal forma a poder ser utilizado no ensino médio e no ensino universitário, dependendo do grau de aprofundamento com que se vê cada fenômeno ou lei da natureza. Ele tem material experimental e teórico que pode ser desenvolvido em todos os níveis de ensino. Cada professor deve escolher o material contido aqui para adaptá-lo à sua realidade escolar. Várias das atividades podem ser utilizadas em cursos de formação ou de aperfeiçoamento de professores. Devido ao aprofundamento que este livro apresenta de diversos conceitos e princípios físicos, ele pode também ser utilizado com proveito em cursos de história e filosofia da ciência. Partes deste livro podem ser utilizadas até mesmo a nível de pós-graduação ou de pesquisas adicionais.

A melhor maneira de trabalhar com este livro é ir realizando em paralelo a maior parte das experiências aqui descritas. Não se deve simplesmente ler o relato destas montagens e atividades, mas sim tentar reproduzi-las e aperfeiçoá-las. Apesar da física conter aspectos filosóficos, teóricos e matemáticos, ela é essencialmente uma ciência experimental. É a junção de todos estes aspectos que a torna tão fascinante. Esperamos que o leitor, ao realizar as experiências aqui descritas, sinta o mesmo prazer que nós próprios tivemos ao implementá-las.

Gostaria de receber um retorno por parte dos leitores que tentaram reproduzir e aperfeiçoar as experiências descritas aqui, ou que adotaram em sala de aula os procedimentos que apresentamos, me informando quais resultados e reações obtiveram, sugestões para melhorias, etc. Eu próprio, particularmente, gostaria de ter aprendido física desta maneira. Ou seja, em vez de decorar diversas fórmulas e ficar apenas resolvendo exercícios matemáticos, gostaria de ter tido a oportunidade de construir instrumentos e realizar diversas experiências, de aprender e de visualizar como foram feitas as grandes descobertas, além de reproduzir na prática alguns dos fatos empíricos mais importantes, explorando ainda diferentes modelos e concepções para explicá-los. Esta obra é uma contribuição que estamos oferecendo para a melhoria do ensino de física, análogo ao que fizemos com o livro *Arquimedes, o Centro de Gravidade e a Lei da Alavanca*.³ Esperamos assim que esta ciência seja apresentada de maneira mais palpável, rica em contextos históricos, tal que a criatividade e o espírito crítico dos leitores sejam estimulados.

Ficaria contente se este livro fosse traduzido para outros idiomas. Seria muito legal se os professores de física indicassem este material aos seus colegas e alunos. Espero também que ele sirva de inspiração para que outros tentem fazer algo análogo em outras áreas da ciência, utilizando experiências realizadas com material acessível combinadas com informações históricas sobre o tema.

Chamamos a atenção para alguns fatos antes que sejam iniciadas as experiências. Elas em geral funcionam bem em dias secos e frios. Já em dias quentes e úmidos, ou quando está chovendo, muitos efeitos aqui descritos podem não ser observados ou então os fenômenos podem apresentar baixa intensidade, não sendo tão visíveis. Muitas vezes nos referimos aos tipos genéricos de substâncias, tais como plástico, vidro, madeira ou borracha. Mas deve-se

³[Ass08b] e [Ass08a].

levar em consideração que existem diversas variedades de plástico, de vidro, de madeira, de borracha e de quase todas as substâncias. Estas variedades diferem intrinsecamente entre si por suas composições, processos de fabricação, idade, etc. Logo, quando algum efeito não for observado com uma certa substância (com um tipo específico de plástico, por exemplo), deve-se tentar variar esta substância para ver o que ocorre. Por exemplo, deve-se pegar uma outra variedade de plástico e tentar reproduzir a experiência.

Uma versão em inglês deste livro será publicada com o seguinte título: *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*.

Todas as traduções para o português são nossas, a menos que seja indicada uma referência específica de onde foi obtida. Os trechos entre colchetes no meio das citações de algumas obras originais são nossos para facilitar a compreensão de algumas frases e expressões.

Capítulo 2

Eletrização por Atrito

2.1 O Início do Estudo da Eletricidade

Experiência 2.1

Na primeira experiência cortamos vários pedacinhos de papel e os deixamos sobre a mesa. Pegamos também um canudo plástico que pode ser de refresco ou então uma régua plástica. Também pode ser utilizado o corpo rígido de uma caneta, desde que feito de um único material para evitar a ocorrência de efeitos mais complicados (isto é, a caneta não deve ter partes metálicas, etc.) Então aproximamos o canudo de plástico dos papeizinhos, sem tocar neles. Nada acontece nos papeizinhos, Figura 2.1.

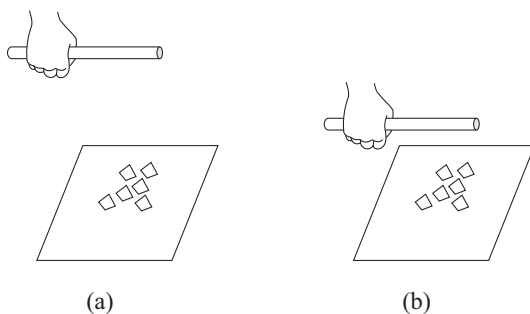


Figura 2.1: (a) Canudo plástico longe de papeizinhos. (b) Ao aproximar o canudo dos papeizinhos, nada acontece a eles.

Agora atritamos o canudo no cabelo ou em uma folha de papel (como o papel toalha, papel higiênico ou guardanapo de mesa), esfregando-o rapidamente para frente e para trás. Vamos representar pelas letras F a região do canudo que foi friccionada, Figura 2.2.

Em seguida aproximamos o canudo atritado dos papeizinhos, novamente sem tocá-los, apenas chegando bem perto. Observa-se que a partir de uma certa

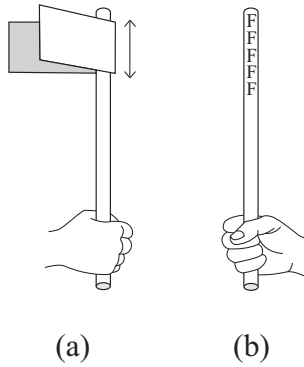


Figura 2.2: (a) Canudo plástico sendo atritado no papel. (b) A região friccio-nada do canudo é representada pelas letras F .

distância eles pulam para o canudo atritado e alguns papeizinhos ficam grudados nele, Figura 2.3. Podemos afastar o canudo da mesa que eles continuam grudados nele.

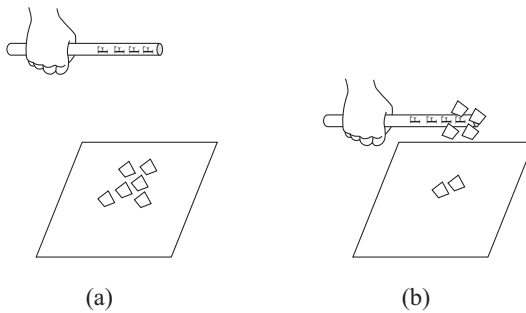


Figura 2.3: (a) Um canudo atritado longe de papeizinhos. (b) O canudo atritado atrai os papeizinhos ao se aproximar deles.

Nem todos os papeizinhos ficam grudados no canudo atritado. Alguns deles batem no canudo e caem, ou são refletidos de volta à mesa. Isto será discutido nas Seções 4.4 e 4.8.

Uma experiência análoga utiliza uma régua de plástico (ou um pente de plástico) que não foi atritada. Ela é aproximada dos papeizinhos e nada acontece. Agora a régua é atritada no cabelo ou em uma folha de papel e aproximada dos papeizinhos, sem tocá-los. Novamente eles são atraídos pela régua atritada, ficando grudados nela. Cada pessoa deve encontrar um material plástico apropriado que consiga atrair facilmente pedacinhos de papel ao ser atritado. Em geral vamos nos referir e desenhar canudos plásticos, mas em vez deles pode-se utilizar réguas ou pentes de plástico, dependendo do que tiver o maior efeito.

Definições: Em geral se diz que o corpo de plástico que não foi atritado e que não atrai os pedacinhos de papel está *eletricamente neutro* ou, simplesmente, *neutro*. Também se diz que o corpo de plástico, ao ser atritado, *adquiriu uma carga elétrica* ou que ficou *eletrizado*, *eletrificado*, *carregado eletricamente* ou, simplesmente, *carregado*. O processo é chamado de *carga por atrito*, *eletrização por atrito* ou de *eletrificação por atrito*. A atração entre estes corpos é chamada algumas vezes de *atração elétrica* ou de *atração eletrostática*.

Nesta e em outras experiências deste livro vamos nos referir ao atrito entre um corpo de plástico e o cabelo (ou entre o plástico e um pedaço de papel, ou entre o plástico e um tecido). Para que as experiências tenham sucesso é bom que se envolva o corpo de plástico com um pedaço de papel, segurando o corpo com firmeza. Estes dois materiais (plástico e papel) são então deslocados em direções opostas enquanto se pressionam firmemente. Muitas vezes é útil realizar este movimento em apenas um sentido, em vez de um movimento de ida e volta. Por exemplo, pode-se puxar o plástico para o corpo, ao mesmo tempo em que o papel é afastado do corpo. Também ajuda repetir mais de uma vez este procedimento de atritar o plástico antes de começar qualquer uma das experiências, já que assim os efeitos ficam mais visíveis ou mais intensos. Deve-se também evitar que o plástico fique impregnado de suor e de gordura. É bom trocar os materiais de vez em quando. A prática logo mostra os materiais e procedimentos mais adequados para se obter sucesso nestas experiências.

2.2 O Efeito Âmbar

A maioria de nós já realizou esta experiência como brincadeira enquanto adolescente, seja com colegas ou na escola. E foi com uma experiência do mesmo tipo que teve início toda a ciência da eletricidade! Desde Platão (aproximadamente 428-348 a.C.), pelo menos, já é conhecido que o âmbar atritado atrai corpos leves colocados em suas redondezas. A citação mais antiga sobre este fato, algumas vezes conhecido como “o efeito âmbar,” aparece em seu diálogo *Timeu*.¹

Consideremos ainda uma vez as propriedades da respiração, a fim de vermos em virtude de que causas esse fenômeno se tornou o que atualmente é. Senão, vejamos: não existe nenhum vazio no qual poderia penetrar um corpo qualquer em movimento e, em nós, o sopro respiratório se move de dentro para fora. O que se segue é então evidente para todos. Este sopro não pode ir para o vazio, mas deve deslocar de seu lugar o ar que o rodeia. Por seu turno, a camada de ar deslocada também desloca a camada vizinha, e o todo se encontra deslocado desta maneira circularmente para o lugar de onde saiu o sopro respiratório: penetra aí, preenche e segue imediatamente o sopro respiratório. E todo esse movimento tem lugar sem

¹[Pla, Seções 79 a 80, págs. 163-165].

interrupção, à maneira da roda que gira, por não existir nenhum vazio. [...] O mesmo vale para os cursos d'água, para a queda do raio, para os fenômenos maravilhosos de atração, produzidos pelo âmbar e pelas pedras d'Heracléia. Em nenhum desses efeitos jamais, em verdade, existe virtude atrativa. Mas como nada é vazio, como todos esses corpos impelem-se em círculo uns aos outros, espaçando-se e aproximando-se, todos trocam simplesmente de lugar, para voltar cada um finalmente a seu lugar próprio. É pelo efeito de todas essas ações combinadas umas com as outras que se produzem todos esses fenômenos misteriosos, como o verá, evidentemente, quem quer que os estude na ordem adequada. Mas retornando à respiração, que foi ocasião deste discurso, ela se produz nas condições e pelas causas que dissemos naquilo que precede.

Platão não menciona quem descobriu este fato, mas por sua descrição casual parece que o efeito âmbar já era conhecido de seus leitores. Ele conecta o efeito âmbar com aquele das pedras d'Heracléia, ou seja, dos ímãs naturais. Platão rejeita a ideia de que exista uma atração real entre o âmbar atritado e os corpos leves próximos a ele. Todos estes fenômenos são explicados por Platão com base nos mesmos princípios que na respiração, a saber, pela não existência do vazio.

Definição de âmbar:²

É uma resina fóssil, proveniente de uma espécie extinta de pinheiro do período terciário, sólida, amarelo-pálida ou acastanhada, transparente ou opaca, utilizada na fabricação de vários objetos; âmbar amarelo, alambre, sucino: *um colar de âmbar; uma piteira de âmbar*. [Plural: *âmbares*.]

O fato de que ele é uma resina fóssil proveniente de uma espécie de pinheiro extinta a vários milhões de anos foi estabelecido no século XIX.³ Algumas lojas vendem o âmbar contendo insetos fossilizados dentro dele, tais como formigas, mosquitos ou aranhas. Na Figura 2.4 temos uma ilustração de dois pedaços de âmbar.

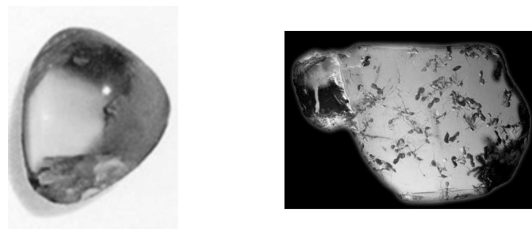


Figura 2.4: Dois pedaços de âmbar.

²[Fer75, pág. 82].

³[RR53].

Aristóteles (384-322 a.C.) apresentou evidências de que o âmbar ocorria originalmente na forma líquida, sendo posteriormente solidificado, em seu trabalho *Meteorologia*.⁴

O âmbar, também, parece pertencer a esta classe de coisas: os animais [insetos] dentro dele mostram que ele é formado pela solidificação.

De acordo com alguns autores modernos, a experiência do âmbar foi realizada pela primeira vez por Tales de Mileto, que viveu aproximadamente de 625 a 546 a.C. Tales foi considerado por Platão como sendo um dos sete sábios da antiga Grécia. Platão colocou-o em primeiro lugar da lista em seu diálogo *Protágoras*.⁵ Mas Platão não atribuiu o efeito âmbar a Tales. Aristóteles e alguns outros escritores antigos consideraram Tales como tendo sido o primeiro filósofo natural, ou como o primeiro físico. Em seu livro *Metafísica*, Aristóteles disse o seguinte sobre ele (nossa ênfase em itálico):⁶

A maior parte dos primeiros filósofos considerava como os únicos princípios de todas as coisas os que são da natureza da matéria. Aquilo de que todos os seres são constituídos, e de que primeiro são gerados e em que por fim se dissolvem, enquanto a substância subsiste mudando-se apenas as afecções, tal é, para eles, o elemento (stokheion), tal é o princípio dos seres; e por isso julgam que nada se gera nem se destrói, como se tal natureza subsistisse sempre... Pois deve haver uma natureza qualquer, ou mais do que uma, donde as outras coisas se engendram, mas continuando ela a mesma. Quanto ao número e à natureza destes princípios, nem todos dizem o mesmo. *Tales, o fundador de tal filosofia*, diz ser a água [o princípio] (é por este motivo também que ele declarou que a terra está sobre água), levado sem dúvida a esta concepção por ver que o alimento de todas as coisas é úmido, e que o próprio quente dele procede e dele vive (ora, aquilo de que as coisas vêm é, para todos, o seu princípio). Por tal observar adotou esta concepção, e pelo fato de as sementes de todas as coisas terem a natureza úmida; e a água é o princípio da natureza para as coisas úmidas.

Outra tradução deste trecho:⁷

A maior parte dos primeiros filósofos considerou como princípios de todas as coisas unicamente os que são da natureza da matéria. E aquilo de que todos os seres são constituídos, e de que primeiro se geram, e em que por fim se dissolvem, enquanto a substância subsiste, mudando-se unicamente as suas determinações, tal é, para eles, o

⁴[Ari52, pág. 492].

⁵[Pla52, págs. 54-55].

⁶[Sou96, A 3, 983 b 6, pág. 40].

⁷[Ari84, Livro I, Capítulo III, págs. 16-17].

elemento e princípio dos seres. Por isso, opinam que nada se gera e nada se destrói, como se tal natureza subsistisse indefinidamente, da mesma maneira que não afirmamos que Sócrates é gerado, em sentido absoluto, quando ele se torna belo ou músico, nem que ele morre quando perde estas qualidades, porque o sujeito, o próprio Sócrates, permanece; e assim quanto às outras coisas, porque deve haver uma natureza qualquer, ou mais do que uma, donde as outras derivem, mas conservando-se ela inalterada. Quanto ao número e à natureza destes princípios, nem todos pensam da mesma maneira. *Tales, o fundador de tal filosofia*, diz ser a água (é por isso que ele declarou também que a terra assenta sobre a água), levado sem dúvida a esta concepção por observar que o alimento de todas as coisas, é úmido e que o próprio quente dele procede e dele vive (ora, aquilo donde as coisas vêm é, para todas, o seu princípio). Foi desta observação, portanto, que ele derivou tal concepção, como ainda do fato de todas as sementes terem uma natureza úmida e ser a água, para as coisas úmidas, o princípio de sua natureza.

Existe também uma outra tradução deste trecho publicada em 2002.⁸

Contudo, nenhum dos trabalhos de Tales chegou até nós. Todas as citações relacionando Tales com o efeito âmbar têm sua origem em um trabalho de Diógenes Laércio, que viveu por volta do terceiro século d.C. e foi um biógrafo dos filósofos gregos. Seu trabalho mais importante é chamado *Vidas dos Filósofos Eminentes*, em 10 volumes. Ele disse o seguinte sobre Tales:⁹

[...] Ele foi o primeiro a dar ao último dia do mês o nome de Trigésimo, e o primeiro, alguns dizem, a discutir problemas físicos.

Aristóteles e Hípias afirmam que Tales atribuiu uma alma ou vida mesmo aos corpos inanimados, argumentando a partir do ímã e do âmbar.

Uma outra tradução deste trecho:¹⁰ “Aristóteles e Hípias dizem que, julgando a partir do comportamento do ímã e do âmbar, ele [Tales] também atribuiu almas para corpos inanimados.” A tradução de Kirk, Raven e Schofield deste trecho crucial é a seguinte:¹¹

Aristóteles e Hípias afirmam que ele partilhou a alma até pelos objetos inanimados [à letra: sem alma], servindo-se da pedra de Magnésia e do âmbar como indício desse conceito.

Muitos atribuem uma alma a alguma coisa que é viva ou que pode mover-se por sua própria vontade. Algumas vezes também atribui-se uma alma para alguma coisa que pode crescer, como um homem, uma planta ou um animal.

⁸[Ari02, Livro I, Capítulo 3, 983b, págs. 15-17].

⁹[Lae91, pág. 25].

¹⁰[The56, pág. 117].

¹¹[KRS83, págs. 92 e 93].

Estes seriam os corpos vivos ou com alma. Os corpos inanimados, ou corpos sem alma, seriam aqueles sem vida. Embora um ímã ou um pedaço de âmbar não cresçam nem se desloquem por si próprios, eles possuem a propriedade de gerar movimento nos corpos próximos (como um ímã atraindo um pedaço de ferro ou sendo atraído por ele, ou um âmbar atritado atraindo corpos leves em suas proximidades). Devido a esta propriedade, pode ser que Tales tenha atribuído uma alma a um ímã ou a um pedaço de âmbar.

Apesar desta citação de Diógenes Laércio, não é certo que Tales de fato tenha sido o primeiro a realizar a experiência com o âmbar.¹² Ele é considerado por autores recentes como o iniciador ou descobridor de um número muito grande de coisas em física e em matemática, o que torna duvidosa a realidade de todos estes feitos. No que diz respeito à afirmação de Diógenes Laércio, em particular, é difícil verificar suas fontes. Os escritos de Hípias não chegaram até nós. No que diz respeito a Aristóteles, não encontramos em seus trabalhos existentes nenhuma citação atribuindo o efeito âmbar a Tales. Em seu trabalho *Sobre a Alma*, Aristóteles mencionou que Tales atribuiu uma alma apenas ao ímã, já que ele pode mover o ferro, mas não mencionou explicitamente o efeito âmbar. E o próprio Aristóteles fica em dúvida se Tales realmente disse algo assim:¹³

Parece que também Tales, a avaliar pelo que se conta, considerava a alma como algo de cinético, se é que ele disse que a pedra [de Magnésia] possui alma pelo facto de deslocar o ferro.

Por *pedra* aqui Aristóteles deve estar se referindo à pedra-ímã (magnetita, um ímã natural). O aspecto *cinético* aplicado à alma seria sua capacidade de mover os corpos a que está ligada, ou a capacidade de mover outros corpos, como no caso do ímã atraindo o ferro. Outra tradução deste trecho crucial:¹⁴

E também Tales, segundo o que dele se lembra, parecia supor que a alma é algo capaz de mover, se é que disse que o magneto tem alma porque move o ferro.

Escavações arqueológicas mostraram que o âmbar já era conhecido pelo homem muitos séculos antes de Platão e mesmo de Tales.¹⁵ Ele era usado como joia ou ornamento. É bem provável que muitas pessoas que trabalhavam com âmbar, o comercializavam ou que simplesmente o manipulavam, tivessem observado bem antes de Platão e de Tales que ele tinha a propriedade de atrair corpos leves ao ser atritado, embora não existam relatos históricos comprovando esta suposição.

De qualquer forma, com certeza sabe-se que pelo menos deste a época de Platão, século IV a.C., o efeito âmbar já era conhecido na Grécia antiga. Por esta época o âmbar provavelmente era atritado no cabelo, em um tecido, na pele de uma pessoa ou de um animal. E era observado que ele atraía corpos leves como plumas, palha seca, fiapos de tecido, pelo de animais ou farinha.

¹²[The56, págs. 117-118] e [RR53].

¹³[KRS83, A 2, 405 a 19, págs. 92-93].

¹⁴[Ari06, Livro I, Capítulo 2, 405a13, pág. 53].

¹⁵[Gui05, pág. 59].

2.3 Explorando a Atração Exercida pelos Corpos Atritados

Para que se tenha um bom padrão de neutralidade elétrica nas próximas experiências, é bom que se utilizem pelo menos dois canudos (ou duas réguas) de plástico. Um deles é o que nunca foi atritado e que, além disso, se observa que não atrai pedacinhos de papel nem outras substâncias. Este será o nosso canudo neutro. O outro canudo é o que será atritado uma ou mais vezes durante as experiências. Mesmo que ele tenha aparentemente perdido sua carga elétrica entre uma experiência e outra, não se deve utilizá-lo como canudo neutro, pois pode acontecer de sobrar alguma carga residual sobre ele. Às vezes a simples manipulação do canudo, ou a retirada com as mãos do pó que se acumula sobre ele, já carrega o canudo por atrito. Por este motivo o critério para um canudo ser considerado neutro tem de incluir o fato de ele não atrair substâncias leves ao chegar perto delas.

Experiência 2.2

Repetimos agora a Experiência 2.1 atritando o canudo de plástico em outros materiais como um pedaço de papel, a pele, um tecido, ou um saco plástico. Ao aproximarmos o canudo plástico atritado de papeizinhos, observa-se que eles são atraídos como no caso em que atritamos o canudo plástico no cabelo, embora nem sempre com a mesma intensidade. Um canudo plástico fica bem eletrizado ao ser atritado no cabelo, no papel ou em um tecido de algodão. Nem sempre a eletrização é tão boa quando ele é atritado em um saco plástico.

2.4 Quais Substâncias São Atraídas pelo Plástico Atritado?

Experiência 2.3

Nesta Seção queremos responder à seguinte questão: Quais substâncias são atraídas pelo plástico atritado? Questões como esta, ou então “existe repulsão?” “existe ação e reação?” ou “quantos tipos de carga são observadas na natureza?” e outras questões semelhantes são, obviamente, baseadas em nosso conhecimento atual. Normalmente os pesquisadores antigos não perguntavam coisas assim, ao menos desta maneira. Estas questões representam o resultado de suas pesquisas mas não indicam, necessariamente, a origem de suas investigações. De qualquer forma, colocamos estas questões neste livro para chamar atenção das principais propriedades das ações elétricas.

Vamos agora ver quais outras substâncias são atraídas por um plástico atritado. Para isto colocamos sobre a mesa em lugares separados diversas substâncias leves que estejam picadas, em fio ou em pó: palha, fiapos de algodão, pedacinhos de plástico, papel de alumínio, pó de giz, farinha de trigo,

fubá, limalha de ferro, fios de palha de aço, bolinhas de isopor, plumas, fios de cabelo, serragem, açúcar, sal, pedacinhos de cortiça, etc.

Ao realizar esta experiência é importante que o corpo atritado não toque nas substâncias que estão sobre a mesa, apenas chegue perto delas. Caso o corpo atritado toque nestas substâncias, elas podem ficar grudados nele por causa da umidade ou de coisas grudentas que estejam nas superfícies das substâncias ou do corpo atritado, mas não por causa de uma atração eletrostática entre eles.

Ao aproximar um plástico neutro destas substâncias nada acontece. Ao atritar o plástico (ou o âmbar) e aproximá-lo destas substâncias, mas sem tocá-las, o que em geral se observa é que quase todas elas são atraídas pelo plástico atritado. Apenas os pedacinhos de plástico não são atraídos, ou são bem pouco atraídos. Isto é, eles são visivelmente menos atraídos do que todas as outras substâncias.

Experiência 2.4

Uma experiência parecida pode ser feita com pedaços de fios ou de linhas de várias substâncias: seda, algodão, poliéster (um tipo de resina sintética), náilon ou poliamida sintética (um tipo de polímero), cabelo e cobre. Em lojas de materiais de costura são vendidos carretéis de fios de muitas destas substâncias tais como seda, algodão, poliéster ou poliamida sintética. O fio de seda, em particular, vai ser utilizado em diversas experiências e é útil que seja adquirido um carretel deste material. No caso do cobre pode-se desencapar um destes fios vendidos em lojas de materiais elétricos que contêm vários fios de cobre bem finos lado a lado. Nesta experiência vai-se utilizar apenas um destes fios bem finos de cobre.

Recortam-se vários pedaços de todas estas substâncias com o mesmo comprimento, por exemplo, com 1 ou 2 cm. São colocados sobre a mesa em um lugar os pedaços de poliamida sintética, em outro lugar os pedaços de seda e assim por diante. Aproxima-se um plástico neutro destas substâncias e nada acontece. Atrita-se o plástico e ele é aproximado novamente destas substâncias, sem tocá-las. Observa-se que os fios de algodão e de cobre são bem atraídos. Já as outras substâncias não são atraídas ou então são bem menos atraídas do que o algodão ou o cobre.

Neste caso temos fios de mesmo comprimento e pesos diferentes. É fácil ver que os mais pesados são os fios de algodão e de cobre, ou por serem mais densos que as outras substâncias, ou por serem fios mais grossos. Apesar disto, foram mais atraídos pelo plástico atritado que as substâncias mais leves.

Ou seja, para várias substâncias que possuem aproximadamente o mesmo peso, observa-se destas experiências que embora a grande maioria seja atraída pelo plástico atritado, algumas não são atraídas, ou então são bem menos atraídas do que outras.

Experiência 2.5

Uma experiência interessante para mostrar a atração que o plástico atritado exerce sobre o metal utiliza latas de refrigerante ou de cerveja vazias. Coloca-se uma destas latas deitada sobre uma superfície lisa. Atrita-se um canudo

de plástico e ele é aproximado da lata, de preferência com o canudo deitado, paralelo à lata, na altura de seu eixo de simetria. Quando o canudo atritado chega bem próximo da lata, sem tocá-la, esta começa a se deslocar no sentido do canudo, Figura 2.5. Podemos até mesmo fazê-la andar para frente e para trás ao variar a posição do canudo atritado, alternando seu lugar na frente e atrás da lata.

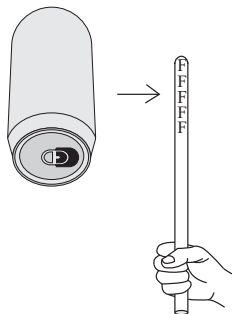


Figura 2.5: Um canudo atritado atrai uma lata metálica.

Experiência 2.6

Aproxima-se um ímã natural, como os ímãs de geladeira ou de alto-falante, das substâncias sobre a mesa descritas nas Experiências 2.3 e 2.4. Observa-se que o ímã só atrai a limalha de ferro e a palha de aço. Ele já não afeta as outras substâncias, nem mesmo os pedacinhos de fio de cobre ou o papel de alumínio.

Esta é uma das distinções principais entre as forças elétricas e magnéticas. O âmbar ou o plástico atritados atraem praticamente todas as substâncias leves. Já um ímã permanente atrai bem poucas substâncias, em geral apenas as compostas de ferro ou de aço.

As palavras magnetismo, magnético, magneto, magnetita, etc. derivam do nome de uma região chamada Magnésia. Era nesta região que os gregos antigos encontravam a magnetita, um minério natural que tinha a propriedade de atrair o ferro. O ímã natural é também chamado de pedra-ímã ou de magneto.

Experiência 2.7

Tenta-se grudar o ímã em uma panela de alumínio ou então fazer com que ele atraia a latinha de alumínio da Experiência 2.5, sem sucesso. Isto mostra mais uma vez a distinção entre as forças elétricas e magnéticas. Esta experiência mostra também que não são todos os metais que são atraídos pelo ímã, mas apenas alguns tipos, em geral os que possuem ferro em suas composições.

2.5 É Possível Atrair Líquidos?

Experiência 2.8

Na experiência 2.1 trabalhamos com substâncias sólidas. Agora vamos ver o efeito do âmbar ou do plástico atritado sobre líquidos. Novamente o ideal é aproximar um canudo (estando ou não atritado) do líquido, mas sem que exista o toque entre ambos.

Abre-se uma torneira e deixa-se escorrer de forma contínua um fino filete de água, Figura 2.6 (a). Aproxima-se um canudo de plástico neutro do filete e nada acontece.

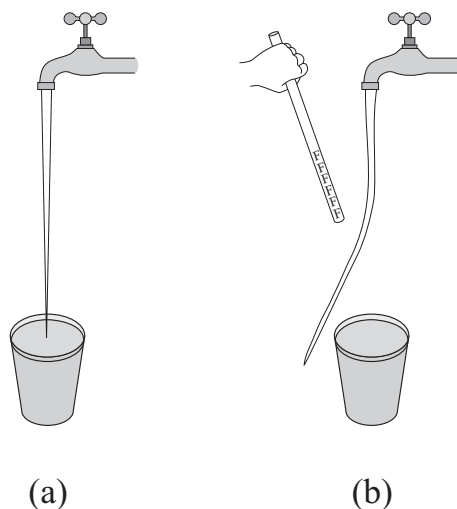


Figura 2.6: Um canudo atritado atraindo um filete de água.

Agora atrita-se o canudo e repete-se a experiência. Neste caso observa-se que o filete de água curva-se visivelmente no sentido do canudo, Figura 2.6 (b)! Isto é mais facilmente observado quando aproximamos o canudo atritado da parte superior do filete, onde a água tem uma velocidade menor. Às vezes a atração é tão grande que o filete de água encosta no canudo. A experiência também funciona com a água caindo em gotas, sendo o efeito mais facilmente observado com o canudo próximo das gotas mais lentas.

Experiência 2.9

Algo análogo acontece ao aproximarmos um plástico atritado de um filete de leite, de detergente, de álcool, de querosene, de xampu ou de óleo de soja de cozinha. Ou seja, todos estes filetes são atraídos pelo plástico atritado, mas não sofrem atração por um plástico que não tenha sido previamente atritado. No caso do óleo o efeito, ou seja, a curvatura do líquido, não é tão grande quanto no caso dos outros líquidos.

Uma experiência análoga a estas parece ter sido realizada pela primeira vez por Jean Théophile Desaguliers (1683-1744) em 1741.¹⁶ Ao final de seu artigo

¹⁶[Desb] e [Pri66, pág. 85].

Desaguliers afirmou o seguinte:

Tendo suspenso apropriadamente (isto é, suspenso por algum corpo elétrico,¹⁷ no caso categute) uma fonte de cobre com o bico para baixo, abri a torneira, e deixei a água verter dentro de um recipiente abaixo dela. Então, tendo excitado um grande tubo com eletricidade [isto é, ao carregar eletricamente um tubo de vidro pelo atrito], mantive-o acima da fonte de cobre, enquanto um assistente mantinha a linha de teste (isto é, uma linha [de algodão] suspensa por uma vareta) próxima de várias partes do filete de água, o qual atrai sensivelmente a linha de teste. Então coloquei o tubo atritado próximo do filete de água, sendo que o tubo atraiu o filete fortemente, de maneira a curvá-lo, e algumas vezes fez com que ele caísse fora do recipiente que estava abaixo dele.

Esta é uma experiência divertida e interessante. Ela será discutida com mais detalhes na Seção 7.11.

Experiência 2.10

Uma experiência similar pode ser feita colocando algumas gotas ou pequenas poças de água sobre uma superfície seca. Ao aproximar um plástico neutro delas nada acontece. Por outro lado, ao aproximar o plástico atritado da água, observa-se que esta se deforma, com a parte da gota mais próxima do plástico atritado tendendo a se aproximar dele, Figura 2.7. Algumas vezes ela até escorre sobre a superfície seca, indo no sentido do plástico atritado. O mesmo ocorre com os outros líquidos descritos anteriormente, em maior ou menor intensidade.

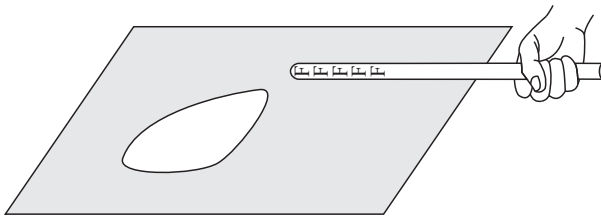


Figura 2.7: Um canudo atritado atraindo uma gota de água.

¹⁷ Ou seja, por um corpo que tem a capacidade de atrair substâncias leves ao ser atritado. Os corpos que eram classificados como elétricos antigamente são chamados hoje em dia de isolantes. Como corpo elétrico Desaguliers vai utilizar, em particular, categute, que é um fio de origem animal. Ver o Apêndice A.

2.6 Gilbert e Algumas de Suas Experiências Elétricas

Um dos cientistas que deu início às pesquisas modernas sobre o magnetismo e sobre a eletricidade foi William Gilbert (1544-1603), um médico inglês.¹⁸



Figura 2.8: William Gilbert (1544-1603).

Em 1600 ele publicou um livro muito importante na história da ciência, *Sobre os Ímãs e Corpos Magnéticos e sobre o Grande Ímã, a Terra*.¹⁹ Nesta obra relata muitas descobertas relevantes sobre magnetismo. Na sua época a orientação da bússola era explicada por um alinhamento dos polos magnéticos da bússola com os polos da esfera celeste. Gilbert propôs pela primeira vez a ideia de que a Terra é um grande ímã, fornecendo assim um modelo para a orientação da bússola explicada por sua interação magnética com a Terra.²⁰ No segundo capítulo de seu livro ele descreve diversas experiências de eletrostática com o intuito de distinguir os fenômenos associados ao ímã dos fenômenos associados ao âmbar:²¹

Sobre esta substância [o âmbar] precisam ser ditas algumas coisas, para mostrar a natureza [origem] da ligação dos corpos a ela, e para mostrar a grande diferença entre esta [ação] e as ações magnéticas.

Ele denomina de *elétricos* os corpos que têm a mesma propriedade do âmbar. Isto é, os corpos que ao serem atritados passam a atrair corpos leves. Afirma

¹⁸[Kel81].

¹⁹[Gil78].

²⁰[Kel81].

²¹[Gil78, pág. 27].

então:²²

Os gregos chamam esta substância *ηλεκτρον* [elétron ou âmbar], pois, quando aquecida pelo atrito, ela atrai para si debulho [cascas de sementes, grãos triturados]; [...] Estes vários corpos (*elétricos*) atraem para si não apenas palhas e debulho, mas todos os metais, madeira, folhas, pedras, terras, até mesmo água e óleo; em resumo, todas as coisas que afetam os nossos sentidos e são sólidas: contudo, somos informados [por vários autores antigos] que ele [o âmbar] não atrai nada, exceto palha e gravetos.

Ou então:²³

E semelhança não é a causa da atração do âmbar, pois todas as coisas que vemos sobre o globo, sejam semelhantes ou dessemelhantes [ao âmbar], são atraídas pelo âmbar e por outras [substâncias] do mesmo tipo; portanto, nenhuma analogia forte pode ser tirada seja da semelhança ou da identidade de substância.

Ou ainda:²⁴ “Um ímã atrai apenas corpos magnéticos; elétricos atraem tudo.” Por corpos magnéticos ele está se referindo aqui ao ferro e a compostos de ferro. Já por elétricos ele está se referindo ao âmbar e a substâncias que apresentam o mesmo comportamento do âmbar ao serem atritadas.

Gilbert parece ter sido o primeiro a observar um líquido sendo atraído pelo âmbar atritado em uma experiência análoga à que foi representada na Figura 2.7. No caso da água ele afirma o seguinte:²⁵

[O âmbar] atrai claramente o próprio corpo no caso de uma gota esférica de água parada sobre uma superfície seca; pois um pedaço de âmbar mantido a uma distância considerável [da gota] atrai em direção a ele as partículas [da gota de água] mais próximas e faz com que a gota fique com a forma de um cone; se elas [as partículas da gota de água] fossem puxadas pelo ar, toda a gota viria em direção ao âmbar.

As únicas exceções apontadas por Gilbert foram os corpos em chamas ou o ar:²⁶ “[...] pois todos os corpos são atraídos para todos os elétricos, exceto os corpos em chamas ou muito rarefeitos, como o ar que é o eflúvio universal do globo.” Ele provou da seguinte maneira que o âmbar atritado não atrai o ar:²⁷

E é provado assim que o âmbar não atrai o ar: considere uma vela de cera muito delgada produzindo uma chama clara e muito pequena;

²² [Gil78, pág. 27, nossa ênfase em itálico].

²³ [Gil78, pág. 28].

²⁴ [Gil78, pág. 30].

²⁵ [Gil78, pág. 31].

²⁶ [Gil78, pág. 29].

²⁷ [Gil78, pág. 31].

traga um pedaço grande e plano de âmbar ou de azeviche,²⁸ preparado cuidadosamente e atritado por toda parte, até uma distância de alguns dedos da chama; ora um âmbar que atrai corpos de um raio considerável [isto é, de uma grande distância] não causa nenhum movimento na chama, embora este movimento fosse inevitável se o ar estivesse em movimento, pois a chama seguiria a corrente de ar.

Já um pouco adiante afirmou:²⁹

Os [corpos] elétricos atraem todas as coisas exceto a chama, corpos incandescentes e o ar mais rarefeito. E da mesma forma que eles não atraem a chama para si, eles não exercem efeito sobre um versório³⁰ se ele tem perto de si, de qualquer lado, a chama de um candieiro ou de qualquer substância incandescente; pois é claro que os eflúvios são consumidos pela chama e pelo calor ígneo. Portanto, os elétricos não atraem a chama nem corpos próximos de uma chama; pois tais eflúvios têm a virtude e a analogia de um humor rarefeito, e eles vão produzir seus efeitos, trazendo a união e a continuidade, não através da ação externa dos humores, ou através do calor, ou através da atenuação dos corpos aquecidos, mas através da atenuação da substância úmida dentro de seus próprios eflúvios específicos. Contudo, eles [os corpos elétricos atritados] atraem para si a fumaça de uma vela apagada; e quanto mais leve torna-se a fumaça na medida em que sobe, menos fortemente é ela atraída, pois as substâncias que são muito rarefeitas não sofrem atração.

Mas pelo que se observa de nossas experiências anteriores, nem todas as substâncias são afetadas pelo âmbar atritado (ou, pelo menos, nem todas as substâncias são afetadas com a mesma intensidade). Mesmo para substâncias de mesmo peso e formato, algumas são claramente mais atraídas por um plástico atritado do que outras. Ou seja, algumas substâncias são atraídas pelo plástico atritado com uma força de maior intensidade do que outras substâncias. Por exemplo, fios de algodão ou de cobre são mais atraídos do que fios de seda ou de náilon, embora os pedaços de cobre ou de algodão possam ser mais pesados do que os pedaços de seda ou de náilon.

2.7 Quais São as Substâncias que Atraem Corpos Leves ao Serem Atritadas?

Experiência 2.11

Vamos agora tentar atrair os pedacinhos de papel colocados sobre a mesa, aproximando deles várias substâncias atritadas. Vamos atritar estes corpos no

²⁸Ver o Apêndice A.

²⁹[Gil78, págs. 33 e 34].

³⁰Discutido no Capítulo 3.

cabelo, no papel ou em um tecido de algodão. É importante que as substâncias sejam homogêneas, isto é, feitas de um único material, para evitar resultados contraditórios. Não se deve atritar, por exemplo, uma caneta de plástico que contenha partes metálicas. Neste caso o ideal é atritar separadamente um canudo feito apenas de plástico e depois uma colher feita apenas de metal.

Listamos aqui algumas destas substâncias: plástico, âmbar, vidro, madeira, metal, acrílico, ímã, cartolina, papelão, borracha, entre outras.

Quando se toma este cuidado o que se observa em geral é que os materiais de plástico, de âmbar e de acrílico, ao serem atritados, atraem os papeizinhos, como visto na Experiência 2.1, Figura 2.3. No caso do âmbar, esta atração depende muito de sua qualidade. O motivo para isto é que às vezes são vendidas no comércio algumas pedras que se diz serem âmbar, quando na verdade são feitas de outras substâncias.

Já todos os outros materiais não atraem os papeizinhos, por mais que sejam atritados. Na Figura 2.9 apresentamos esta experiência no caso de um palito de churrasco de madeira. Apesar dele ter sido atritado, não atrai papeizinhos.

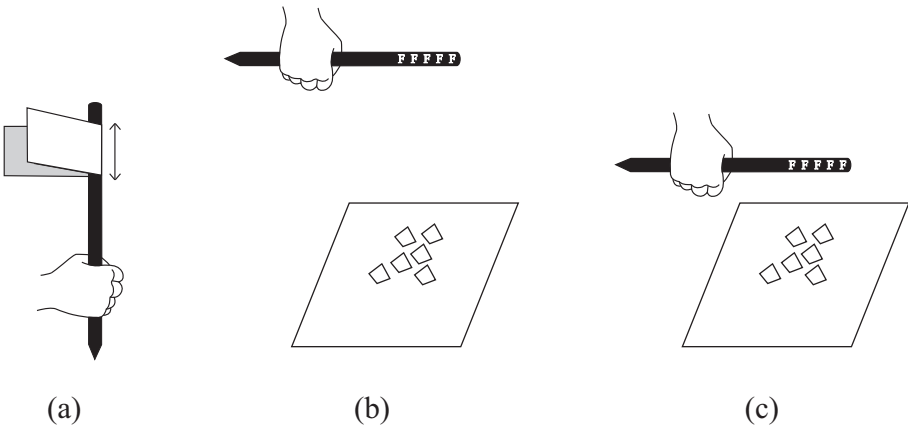


Figura 2.9: (a) Atrita-se um palito de madeira em uma tira de papel ou no cabelo. (b) Palito atritado longe dos papeizinhos. (c) Observa-se que ele não atrai papeizinhos ao chegar perto deles.

No caso do vidro também existem exceções, pois existem diversas variedades de vidro com composições ou processos de fabricação diferentes. Mas em geral os vidros mais comuns, quando atritados, não atraem os papeizinhos. O mesmo pode ser dito em relação à borracha, pois existem diversos tipos diferentes. Ou seja, na maioria dos casos as borrachas atritadas não atraem os papeizinhos.

2.8 Nomenclatura de Gilbert: Corpos Elétricos e Não-Elétricos

Até a época de Gilbert só se conheciam poucas substâncias que, ao serem atritadas, atraíam corpos leves para si. Entre estas substâncias podemos citar o âmbar, o azeviche e o diamante. Foi na época medieval que se descobriu que o azeviche, uma forma compactada e dura de carvão, também atrai como o âmbar.³¹ O ímã, por outro lado, atraía o ferro e compostos de ferro, mas ao ser atritado não atraía palhas, plumas, nem quaisquer outras substâncias leves que não contivessem ferro ou seus compostos. O mesmo ocorria com todas as outras substâncias. A maior contribuição de Gilbert para a ciência da eletricidade foi a descoberta de uma série de substâncias que se comportavam como o âmbar ao serem atritadas. Entre estas substâncias citou: azeviche, diamante, safira, carbúnculo, opala, ametista, gema inglesa, berilo, cristal de rocha, vidro (chamou atenção especialmente para o vidro claro e brilhante), enxofre, laca,³² etc.

Gilbert introduziu o termo *elétrico* para se referir a estes corpos. Este termo vem de *elektron*, que em grego significa *âmbar*. Algumas citações suas a este respeito:³³

Os gregos chamam esta substância [o âmbar] de *ηλεκτρον*, pois, quando aquecida pelo atrito, ela atrai palha para si.

Os antigos e os modernos afirmam (e o relato que eles apresentam é limitado pela experiência) que o âmbar atrai palhas e debulho. O mesmo é feito pelo azeviche, uma pedra retirada da terra na Bretanha, na Alemanha, e em muitas outras regiões: ela é uma concreção dura de betume preto, - uma espécie de transformação do betume em pedra.

Pois não apenas o âmbar e (gágatos ou) azeviche, como eles supõem, atrai corpúsculos (substâncias) leves: o mesmo é feito pelo diamante, safira, carbúnculo, quartzo irisado, opala, ametista, vinctina, gema inglesa (pedra de Bristol, *bristola*), berilo, cristal de rocha. Os mesmos poderes de atração são possuídos pelo vidro, especialmente o vidro claro e brilhante; por gemas artificiais feitas de (pasta de) vidro ou cristal de rocha, vidro de antimônio, muitas fluoritas, e belemnites. Enxofre também atrai, e da mesma forma mástique, e cera de lacre [de laca], resina dura, ouro-pigmento (fracamente). Também possui poderes fracos de atração em atmosfera seca favorável o sal-gema [cloreto de sódio natural], mica, pedra-ume.

As substâncias atritadas que não atraíam corpos leves foram denominadas de *não-elétricas*. Entre estas substâncias Gilbert citou as seguintes: metais,

³¹[RR57, pág. 546].

³²Ver o Apêndice A.

³³[Gil78, pág. 27, palavras de Mottelay entre colchetes].

diversos tipos de madeira, o ímã natural, diversas gemas, etc. Uma citação sua a este respeito:³⁴

Ao ar livre, corpos aquecidos não podem atrair, nem mesmo os metais ou as pedras que atingem uma temperatura muito alta pelo fogo. Pois uma barra de ferro em calor branco, uma chama, uma vela, uma tocha, ou um carvão em brasa quando trazidos para perto de palhas ou de uma agulha giratória (*versório*) não atraem.

É muito importante a seguinte lista:³⁵

Mas muitos corpos elétricos (como pedras preciosas, etc.) não atraem de forma alguma a não ser que sejam inicialmente atritados; enquanto que diversos outros corpos, e entre eles algumas gemas, não possuem o poder de atração, e não conseguem atrair, mesmo pelo atrito; tais corpos são esmeralda, ágata, cornalina, pérolas, jaspe, calcedônia, alabastro, pórfito, coral, os mármore, lidita (pedra de toque, basanita), pederneira, jaspe sanguíneo, esmeril ou corindon, osso, marfim; as madeiras mais duras, como ébano; algumas outras madeiras, como cedro, junípero, cipreste; metais, como prata, ouro, cobre, ferro. A pedra-ímã, embora seja suscetível a um polimento muito bom, não possui a atração elétrica.

Da mesma forma:³⁶

É por este motivo que nem os metais, mármore, pederneiras, madeiras, grammas, carne, nem várias outras substâncias podem atrair ou perturbar um corpo, seja magneticamente ou eletricamente (pois nos agrada chamar de força elétrica à força que tem sua origem nos humores). Mas os corpos que são construídos na maior parte de humor e que não são muito compactados pela natureza tal que não possam suportar o atrito, mas ou esfurelam ou ficam macios, ou são pegajosos, como piche, resina macia, cânfora, gálbano, goma amoníaca, estoraque, asa, goma benjamin, asfalto (especialmente em clima morno), não atraem corpúsculos. Pois sem atrito poucos corpos emitem sua verdadeira *emanação* e eflúvio elétrico natural. A resina de terebentina no estado líquido não atrai, pois não pode ser atritada; mas quando endurece em um mástique ela passa a atrair.

Várias palavras utilizadas atualmente têm suas origens relacionadas com a palavra âmbar (ou *elektron* em grego): elétrico, eletricidade, elétron, eletreto, eletrônico, eletricista, eletroímã, eletrodo, eletrodoméstico, etc. Originalmente a palavra *eletricidade* significava a propriedade ou o poder de atrair corpos leves, assim como faz o âmbar ao ser atritado.³⁷ Esta palavra surgiu pela primeira vez

³⁴[Gil78, pág. 28].

³⁵[Gil78, pág. 29].

³⁶[Gil78, pág. 30].

³⁷[RR57, pág. 558], [Hea67] e [Hei99, pág. 169].

em 1646 em um trabalho impresso de Thomas Browne (1605-1682). Em 1820 Ørsted introduziu os termos *eletromagnetismo* e *eletromagnético*, enquanto que Ampère introduziu em 1822 os termos *eletrostático* e *eletrodinâmico*.³⁸

Hoje em dia não se usa mais a denominação dada por Gilbert de chamar de elétricos às substâncias que atraem como o âmbar ao serem atritadas. Os motivos para isto serão dados nos Capítulos 6 e 8, assim como no Apêndice B. Mas para facilitar o entendimento do leitor de várias citações históricas apresentadas ao longo deste livro, mencionamos que atualmente os materiais são classificados como *condutores* e *isolantes*. Os isolantes também são chamados de materiais *não-condutores de eletricidade* ou de *dielétricos*. As substâncias que Gilbert classificava como elétricas são chamadas hoje em dia de isolantes. Já as substâncias classificadas antigamente como não-elétricas são chamadas atualmente de condutoras de eletricidade ou, simplesmente, de condutoras.

³⁸[Amp22, pág. 60], [Ørs98a, pág. 421], [Ørs98b, pág. 426], [Blo82, pág. 78], [GG90, pág. 920], [GG91, pág. 116] e [Cha, págs. 24-26].

Capítulo 3

O Versório

3.1 O Perpendículo de Fracastoro e o Versório de Gilbert

Apresentamos agora o instrumento elétrico mais antigo inventado pelo homem. Ele foi criado por Girolamo Fracastoro (1478-1553), Figura 3.1. Alguns apresentam seu nome como Fracastoro, outros como Fracastorio.¹ Ele foi um poeta, médico e filósofo de Verona.² Fracastoro é mais conhecido por seus trabalhos de medicina, especialmente epidemiologia, sendo dele a denominação de *sífilis* para uma conhecida doença venérea.



Figura 3.1: Girolamo Fracastoro (1478-1553).

¹[Ben98, pág. 241].

²[Zan81].

Fracastoro apresentou este instrumento em um livro que publicou em 1546.³ Ele o utilizou para mostrar que o âmbar atritado atrai não apenas palha e gravetos, mas também um outro pedaço de âmbar e até mesmo um metal como a prata. Foi ele também quem descobriu que o diamante tem a capacidade de atrair corpos leves ao ser atritado, assim como o faz o âmbar atritado. Fracastoro descreve seu instrumento com as seguintes palavras:⁴

De fato nós, na presença de muitos de nossos médicos, fizemos muitas experiências com um perpendicular bem convenientemente adaptado como ocorre na bússola para navegar, e temos observado que o magneto atrai outro magneto, o ferro [imantado atrai] o ferro, dado que o magneto atrai o ferro e o ferro [atrai] o magneto; e também o âmbar [atritado] captura pedacinhos de âmbar... e da mesma maneira o âmbar [atritado] não somente aproxima dele mesmo os galhos pequenos e as palhas, mas também a prata.

Por *perpendicular* Fracastoro pode estar se referindo a uma linha vertical presa em sua extremidade superior a um suporte fixo e tendo em sua extremidade inferior um corpo qualquer, como se fosse um fio de prumo ou um pêndulo.⁵ A linha teria liberdade para se deslocar para todos os lados ao redor do ponto de fixação no suporte. A palavra “perpendicular” está relacionada com a palavra “perpendicular.” A perpendicular é um dos nomes que se utiliza para uma reta ortogonal ao horizonte, ou ortogonal à horizontal. A linha de prumo é um dos instrumentos que se utiliza para indicar a direção vertical. Por este motivo, é natural supor que o perpendicular de Fracastoro fosse como um fio de prumo, sendo este, inclusive, um dos significados desta palavra.⁶

Pela descrição anterior vem que Fracastoro deveria prender na parte inferior de seu perpendicular um pequeno pedaço de âmbar ou de prata. Ao aproximar um âmbar atritado do perpendicular, teria observado que este pedaço de âmbar ou de prata se afastava da vertical, aproximando-se do âmbar atritado, Figura 3.2. A vantagem do perpendicular é que a tração do fio contrabalança o peso do corpo. Isto é, a atração gravitacional da Terra é equilibrada pela tração do fio. Isto facilita a observação do movimento horizontal do pequeno corpo que está suspenso na parte inferior do fio. Suponha que, em vez disto, o pedacinho

³[Gli33] e [Hei99, pág. 175].

⁴Original em latim: “Nos enim praesentibus multis è nostris medicis experientiam multorum secimus, perpendicularo bene & concinne aptato, quale est in nauigatoria pyxide, ac manifeste vidimus magnete trahere magnete, ferrum ferrũ, tum magnetem trahere ferrum, ferrum magnetem porro electrum parua electri frustula rapere, argentum attrahere argentum, &, quod valde inirati fui mus, magnetem vidimus argentum trahere: item Electrum non solum furculos & paleas mouere ad se, sed & argentum,” [Fra55, pág. 85 verso]. Em italiano: “Noi infatti alla presenza di molti dei nostri medici facemmo esperienza di molte cose con un perpendicularo bene e convenientemente adattato come è nella bussola da navigare e vedemmo manifestamente che il magnete attrae il magnete, il ferro il ferro, poi che il magnete attrae il ferro e il ferro il magnete; e ancora, l’ambra rapisce pissettini d’ambra... e parimenti l’ambra non avvicina solamente a sè i fuscelli e le pagliuzze, ma anche l’argento,” [Gli33].

⁵[Sas02].

⁶[Fer75].

de âmbar ou de prata estivesse solto sobre uma mesa. Neste caso seria difícil, devido ao peso e à densidade destes corpos, observar este pedacinho de âmbar ou de prata sendo suspenso no ar e sendo atraído por um âmbar atritado que se aproximasse por cima dele.

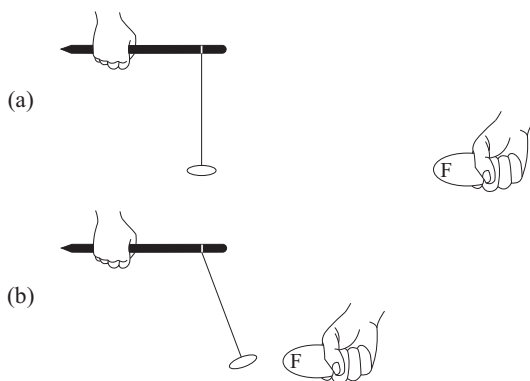


Figura 3.2: Possível representação do perpendicular de Fracastoro e da experiência que pode ter sido realizada com ele. (a) Um grande âmbar é segurado pela mão. A parte atritada deste âmbar está representada pela letra *F*. Na extremidade inferior do perpendicular há um outro pedacinho de âmbar não atritado, ou então um pedacinho de prata. Quando o âmbar da mão está afastado do perpendicular, o fio fica parado na vertical. (b) O pedacinho de âmbar no perpendicular é atraído pelo grande âmbar atritado quando eles ficam próximos entre si.

Gilbert conhecia este livro de Fracastoro e o cita diversas vezes em sua obra. Apresentamos aqui apenas uma destas citações:⁷

Fracastorio pensa que todos os corpos que se atraem mutuamente são semelhantes, ou da mesma espécie, e isto, seja em suas ações ou em seus *subjectum* próprios: “agora o *subjectum* próprio,” diz ele [Fracastoro], “é aquilo a partir do qual é emitido aquela coisa emanante que atrai, e, em substâncias mistas, isto não é percebido devido à deformação, por meio da qual elas são por um lado *actu*, por outro *potentia*. Logo, talvez, pelos [de animais] e palhas sejam atraídos para o âmbar e para o diamante não devido ao fato de serem pelos, mas por possuírem presos dentro deles ou o ar ou algum outro princípio que é atraído inicialmente e que tem referência e analogia com aquilo que atrai por si mesmo; e assim o âmbar e o diamante são como que uma coisa só, em virtude de um princípio comum a ambos.” Isto é o suficiente sobre Fracastorio.

Gilbert provavelmente começou a investigar as propriedades atrativas de outras pedras preciosas a partir deste trabalho de Fracastoro. Gilbert também

⁷[Gil78, págs. 28-29].

descreveu um instrumento que denominou de *versório*.⁸ Porém Gilbert não mencionou que um instrumento similar, o *perpendicular*, havia sido inventado por Fracastoro. A gravura original de Gilbert representando seu versório é apresentada na Figura 3.3.



Figura 3.3: Versório de Gilbert.

O termo *versório* vem de uma palavra latina, *versorium*, que tem o significado de instrumento girador ou aparato girante. O versório é um instrumento que normalmente consiste de duas partes: um membro vertical, que age como um suporte fixo em relação à Terra, e um membro horizontal capaz de girar livremente sobre o eixo vertical definido pelo suporte. Ele é similar a uma bússola magnética em sua construção, exceto pelo fato do membro horizontal não ser magnetizado como ocorre na bússola. Conceitualmente, a habilidade do membro horizontal poder girar livremente significa que este instrumento é muito sensível a torques externos muito pequenos. Portanto, pode ser usado para detectar estes torques da mesma forma como uma bússola detecta o torque magnético exercido pela Terra.

Quando em repouso, o versório vai apontar para uma direção horizontal arbitrária (ele pode apontar ao longo da direção Leste-Oeste, por exemplo, ou pode apontar para uma árvore específica).

3.2 Construção de um Versório

Existem três maneiras principais de fazer um versório.

3.2.1 Versório do Primeiro Tipo

A primeira é como o versório de Gilbert. Por exemplo, fixando em um suporte um alfinete, um palito de dentes ou um prego com a ponta livre para cima. O suporte deve ser pesado ou então deve ser fixado a uma mesa, para evitar de tombar junto com o versório. O suporte pode ser uma rolha com um alfinete fincado nela, um palito fincado em uma massa de modelar, ou uma tábua fina com um prego fincado nela com sua ponta livre para cima. A única exigência é que o suporte e seu alfinete/palito/prego fiquem fixos em relação à Terra enquanto o versório é livre para girar em cima dele. O versório é uma agulha horizontal que vai ser apoiada no seu centro pela ponta do alfinete vertical.

⁸[Gil78, págs. 27-28].

Observação importante: *Para que a agulha horizontal do versório não caia ao ser apoiada, é fundamental que seu centro de gravidade fique abaixo do ponto de contato com o alfinete.* Uma discussão detalhada sobre o conceito do centro de gravidade (CG) e sobre os procedimentos práticos para encontrar este ponto encontram-se no livro *Arquimedes, o Centro de Gravidade e a Lei da Alavanca*.⁹

Existem vários procedimentos possíveis para deixar o CG do versório abaixo do ponto de contato com o alfinete. Para isto o versório pode ter a forma da letra V invertida, ou então pode ser plano mas com a parte central (que vai ficar em contato com o alfinete) curvada para cima, tal que quando o versório fique apoiado sobre o alfinete, a ponta do alfinete fique acima do plano do versório. Um versório simples pode ser feito com colchete de aço tipo bailarina. Neste caso o ideal é deformar um pouco o centro da base circular do colchete, que vai ficar apoiado sobre o alfinete. Para isto utiliza-se um prego e um martelo, mas sem chegar a furar o colchete (neste sentido é melhor utilizar um prego cego, não pontudo). A ponta do alfinete ficará sob esta pequena deformação, sendo que assim o colchete não ficará escorregando no alfinete. Depois de dobrar um pouco suas pernas para baixo, tal que o colchete fique na forma da letra V invertida, pode-se apoiá-lo sobre a ponta do alfinete.

Um procedimento análogo pode ser feito com uma haste de alumínio, que pode ser obtida cortando-se uma latinha de refrigerante ou de cerveja. Também pode ser feito um versório de palha seca, madeira, cartolina, ou de plástico (com uma tira de plástico duro obtida de um pote de margarina, ou com um canudo de refresco, por exemplo). Basta que o plástico fique dobrado como a letra V invertida, ou que uma tira de plástico duro fique dobrada na forma de um perfil de chapéu de aba longa, com as pontas para baixo. Depois que o versório estiver apoiado sobre o alfinete, é importante ver se ele tem liberdade para girar nos dois sentidos, sem tombar e sem ficar agarrando devido ao atrito com o alfinete. Ele está então pronto para as experiências.

Na Figura 3.4 apresenta-se o versório do primeiro tipo. Em (a) temos a base do versório, que neste caso é um alfinete fixado em uma rolha. Em (b) temos a parte móvel do versório, que neste caso é um colchete de aço visto de cima e de perfil, com o centro de sua cabeça um pouco deformado e com suas pernas inclinadas para baixo. Em (c) temos o versório montado, com o centro do colchete apoiado sobre a ponta do alfinete.

3.2.2 Versório do Segundo Tipo

A segunda maneira de se fazer um versório é fixando o alfinete na parte móvel horizontal do versório. Vamos chamar de “chapéu” à parte horizontal do versório na qual é fixada o alfinete. O chapéu pode ser, por exemplo, uma tira de plástico ou de metal. O alfinete deve furar o chapéu, atravessando-o em seu ponto médio, com a ponta do alfinete apontando para baixo. O alfinete fica preso ao versório e gira junto com ele. Este sistema é então apoiado sobre uma pequena superfície

⁹[Ass08b] e [Ass08a].

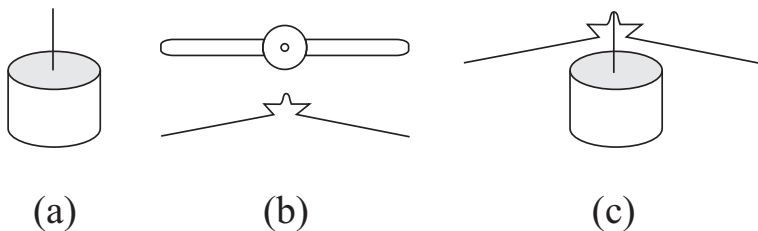


Figura 3.4: Versório do primeiro tipo. (a) Alfinete preso na base. (b) Colchete visto de cima e de perfil. (c) O versório montado.

horizontal plana, como a cabeça de um prego fixado em uma tábua ou fincado em uma rolha. Na Figura 3.5 temos uma representação deste tipo de versório. Em (a) temos sua base, neste caso um prego preso a uma tábua, com a ponta para baixo. Em (b) aparece a parte móvel do versório, neste caso uma tira de plástico ou de metal com um alfinete preso no centro com a ponta para baixo. O chapéu tem suas abas voltadas para baixo. Em (c) temos o versório montado, com a ponta do alfinete apoiada sobre a cabeça horizontal do prego.

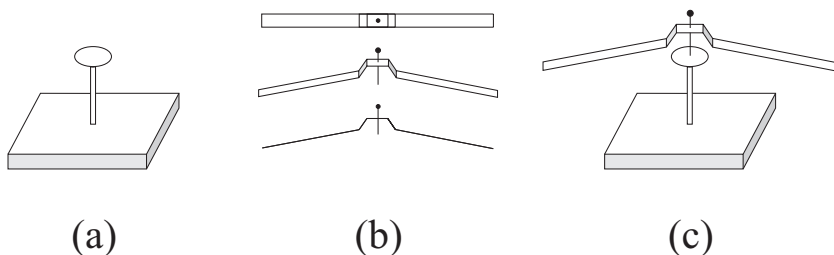


Figura 3.5: Versório do segundo tipo, com o alfinete fixado na parte móvel horizontal do versório. (a) Base fixa do versório. (b) Chapéu do versório (tira de plástico ou de metal) com o alfinete preso nele. (c) Versório montado.

Para que o versório não tombe, é crucial que o centro de gravidade da parte móvel do sistema (composta pelo chapéu e pelo alfinete preso nele) esteja abaixo da ponta do alfinete. O centro de gravidade do alfinete está localizado em um ponto A entre a cabeça e a ponta P do alfinete, Figura 3.6 (a). Normalmente este ponto A vai estar mais próximo da cabeça do alfinete do que de P , embora estejamos representando-o aqui próximo ao centro do alfinete. O centro de gravidade do chapéu está localizado em um ponto B ao longo de seu eixo vertical de simetria, entre as partes superior e inferior do chapéu, Figura 3.6 (b).

O centro de gravidade de toda a parte móvel deste tipo de versório (composta do alfinete juntamente com o chapéu) está localizado em um ponto C entre A e B . Se o alfinete tem o mesmo peso que o chapéu, então C estará no ponto médio entre A (o centro de gravidade do alfinete) e B (o centro de gravidade do chapéu), Figura 3.7 (a). Se o alfinete for mais pesado do que o chapéu, C

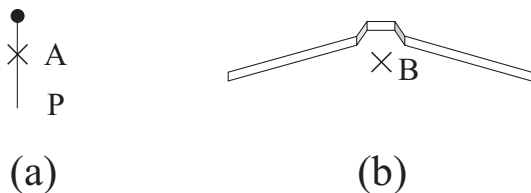


Figura 3.6: (a) O centro de gravidade do alfinete está em A . (b) O ponto B é o centro de gravidade do chapéu.

estará mais próximo de A , Figura 3.7 (b). Se o alfinete for mais leve do que o chapéu, C estará mais próximo de B , Figura 3.7 (c).

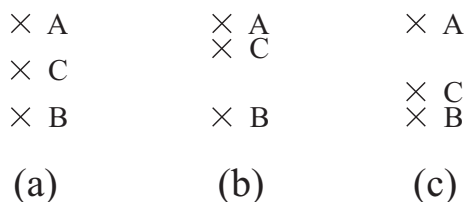


Figura 3.7: Localização do centro de gravidade C de toda a parte móvel do versório (composta do alfinete juntamente com o chapéu). (a) Alfinete e chapéu com mesmo peso. (b) Alfinete mais pesado do que o chapéu. (c) Alfinete mais leve do que o chapéu.

Caso o ponto C esteja mais alto do que a ponta P do alfinete, o versório vai cair, não sendo possível equilibrá-lo acima do prego. O motivo é que neste caso a parte móvel do versório estará em equilíbrio instável. Na Figura 3.8 (a) ilustramos esta situação de equilíbrio instável, com o ponto C representado pelo símbolo \times . Nesta situação o ponto \times está em sua posição mais alta, verticalmente acima da ponta P do alfinete. Vamos supor que o versório se afaste ligeiramente desta situação de equilíbrio instável, isto é, que ele gire um pouco no sentido horário ou no sentido anti-horário ao redor da ponta P do alfinete, abaixando uma de suas pernas e levantando a outra. Neste caso o centro de gravidade \times da parte móvel vai abaixar em relação a sua posição quando estava verticalmente acima de P . Como a tendência do centro de gravidade de qualquer sistema é deslocar-se em direção à Terra quando há possibilidade para isto, o versório vai continuar girando no sentido horário ou no sentido anti-horário. Com isto o versório acaba tombando.

A única maneira de equilibrar a parte móvel do versório acima do prego é fazer com que o ponto C fique abaixo da ponta P do alfinete. Isto está representado na Figura 3.8 (b) com o símbolo \times significando a posição do centro de gravidade da parte móvel (composta pelo alfinete juntamente com o chapéu). Esta é a configuração de equilíbrio estável, com \times em sua posição mais baixa possível, a saber, verticalmente abaixo da ponta P do alfinete. Neste caso

qualquer movimento do versório no sentido horário ou anti-horário ao redor da ponta P do alfinete, subindo uma das pernas do versório e abaixando a outra perna, vai subir o centro de gravidade \times em relação à sua posição quando estava verticalmente abaixo da ponta P . O sistema vai então retornar para sua posição de equilíbrio estável devido ao torque gravitacional restaurador exercido sobre ele pela Terra.

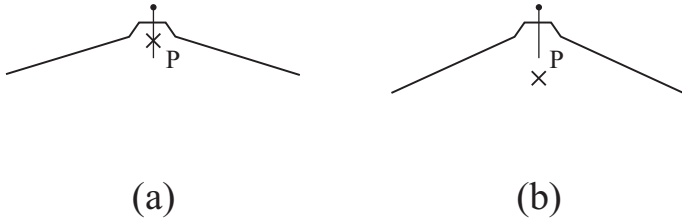


Figura 3.8: O símbolo \times representa o centro de gravidade C da parte móvel do versório (composta pelo alfinete juntamente com o chapéu). (a) Versório em equilíbrio instável, com \times acima da ponta P do alfinete. (b) Versório em equilíbrio estável, com \times abaixo da ponta P .

Às vezes é difícil obter esta configuração de equilíbrio estável com um versório muito leve, como um versório feito de canudo de plástico. Nestes casos pode-se utilizar um canudo dentro do outro, ou então uma tira de plástico mais densa e pesada, para contrabalançar o peso do alfinete. Outra alternativa é cortar a parte superior do alfinete com um alicate, deixando apenas sua parte inferior, incluindo a ponta. Também é importante inclinar as pernas do versório para baixo, pois isto abaixa a localização do seu centro de gravidade. Pode-se também utilizar um versório mais comprido, com abas mais longas. Em vez do alfinete pode-se utilizar também um preguinho ou uma tachinha (percevejo) atravessando o versório ou colado nele pela cabeça do preguinho ou da tachinha. Depois que o sistema está pronto, deve-se observar que ele é livre para girar nos dois sentidos ao redor do eixo vertical, sem tombar. Se estiver tombando para um dos lados, pode-se tentar equilibrá-lo abaixando uma das pernas do versório ou aumentando o comprimento de uma de suas pernas. Pode-se então começar as experiências com ele.

3.2.3 Versório do Terceiro Tipo

A terceira maneira de se fazer um versório talvez seja a mais simples. Escolhe-se uma haste feita de metal, de madeira ou de outro material apropriado e a amarramos em seu centro com um fio de algodão ou de seda. A haste deve permanecer horizontal quando amarrada por seu centro. Em seguida amarra-se a ponta superior do fio a um suporte horizontal fixo em relação à Terra. O versório preso ao fio é então livre para girar nos dois sentidos ao redor do fio. A Figura 3.9 ilustra este tipo de versório suspenso em seu centro por um fio preso a um lápis colocado acima dele. O *perpendículo* de Fracastoro era provavelmente

um versório deste tipo.

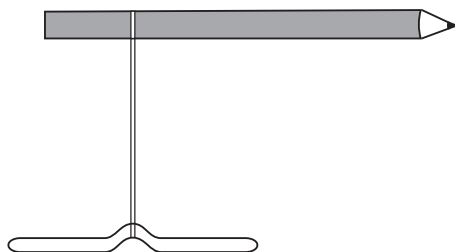


Figura 3.9: Versório do terceiro tipo.

O versório do terceiro tipo tem uma característica que o diferencia dos outros dois tipos. Aqueles do primeiro e segundo tipo podem apenas inclinar-se ou girar ao redor de seus centros, sendo que o centro do versório ou a ponta do alfinete vertical ficam sempre fixos em relação à Terra. Já o versório do terceiro tipo pode não apenas girar ao redor do eixo vertical, mas também mover-se como um todo quando é atraído por um corpo externo, funcionando como um pêndulo. Isto é uma vantagem pela versatilidade dos movimentos que permite observar. Por outro lado, isto às vezes complica a análise dos fenômenos que se quer observar ou descrever. Nas próximas experiências utilizamos inicialmente apenas as duas primeiras modalidades de versório.

Quanto mais leve for o versório, mais facilmente ele vai girar devido à aplicação de um mesmo torque externo. Ou seja, mais sensível será o instrumento.

Embora Gilbert tenha construído apenas um versório de metal, estes instrumentos podem ser feitos de vários materiais: metal, plástico, papelão, palha, madeira, etc. Vamos trabalhar inicialmente apenas com um versório metálico, muitas vezes chamado simplesmente de versório. Quando a agulha giratória for feita de plástico, de papelão, de palha ou de algum material não metálico, vamos chamar explicitamente o instrumento de versório de plástico, de papelão ou de palha, para distinguí-lo do versório utilizado por Gilbert.

3.3 Experiências com o Versório

Experiência 3.1

Aproxima-se um plástico (canudo, régua, ...) neutro de um versório metálico, sem tocá-lo. Observa-se que nada acontece, Figura 3.10.

Atrita-se o plástico e repete-se a experiência com o plástico atritado. Neste caso observa-se que os versórios feitos de todos os metais são orientados pelo plástico atritado, tendendo a ficar apontando para o plástico, Figura 3.11. O mesmo ocorre se o versório for feito de papelão ou de madeira.

Esta experiência mostra que o plástico atritado influencia corpos próximos,

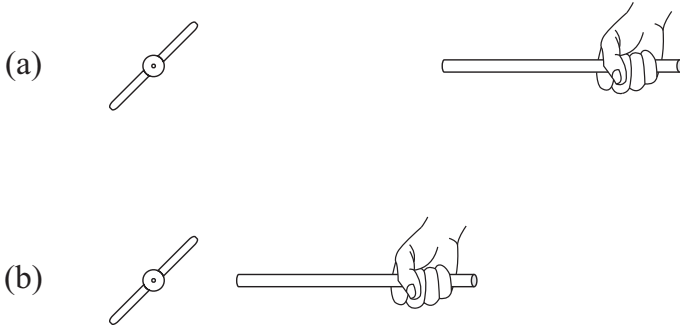


Figura 3.10: (a) O versório aponta em uma direção arbitrária quando está longe de um plástico neutro. (b) O versório continua em repouso ao aproximar o plástico neutro.

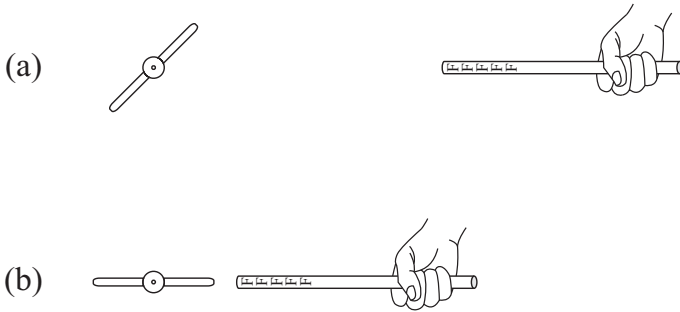


Figura 3.11: (a) O versório aponta em uma direção arbitrária quando está longe de um plástico atritado. (b) Ao aproximar o plástico observa-se que o versório passa a apontar para ele, sendo orientado pelo plástico atritado.

assim como havíamos visto na Experiência 2.1. Existem duas diferenças principais entre estas duas experiências. A primeira diferença é que na experiência em que o plástico atritado atraiu um pedacinho de papel, havia um deslocamento de todo o corpo do papelzinho, enquanto que aqui ocorre apenas uma orientação do versório, sendo que seu centro permanece o tempo todo sobre o alfinete. A segunda diferença é que a orientação do versório ocorre mais facilmente do que o movimento do papelzinho. Isto é, existem alguns corpos atritados que não conseguem atrair para si corpos leves (ou que apenas os deslocam sobre a mesa, sem conseguir levá-los no ar), mas que conseguem orientar os versórios. E foi utilizando esta grande sensibilidade do instrumento que Gilbert conseguiu descobrir vários outros corpos (além do âmbar, do azeviche e do diamante que já eram conhecidos em sua época) que tinham a propriedade de afetar os corpos próximos ao serem atritados.

Gilbert descreveu o versório nas seguintes palavras:¹⁰

¹⁰[Gil78, págs. 27-28].

Agora para entender claramente através da experiência como ocorre esta atração [dos corpos leves pelo âmbar atritado], e quais podem ser as substâncias que atraem da mesma forma outros corpos (e no caso de muitas destas substâncias elétricas, embora os corpos influenciados por elas se inclinem em suas direções, contudo, devido à pouca intensidade da atração, eles não são claramente puxados para elas, mas são facilmente levantados), faça você mesmo uma agulha girante (eletroscópio—*versório*) de qualquer tipo de metal, com um comprimento de três ou quatro dedos [4 a 6 cm], longa, bem leve, e equilibrada sobre uma ponta aguda da mesma maneira que um ponteiro magnético [ou seja, similar a uma bússola]. Aproxime de uma extremidade dela um pedaço de âmbar ou uma gema, levemente atritada, polida e brilhante: na mesma hora o instrumento gira.

A palavra *eletroscópio* nesta citação foi introduzida por Mottelay em sua tradução para o inglês da obra de Gilbert. Ela não aparece no texto original em latim, no qual só consta a palavra *versório*.¹¹ A palavra *eletroscópio* também não aparece na outra tradução para o inglês desta obra de Gilbert.¹² Mottelay utilizou a palavra “eletroscópio” no sentido de o versório ser um indicador, através de seu giro, de substâncias que se comportam como o âmbar (isto é, substâncias que atraem corpos leves ao serem atritadas). O termo genérico *eletroscópio* é utilizado para qualquer instrumento que seja sensível para detectar uma força (ou torque) de origem elétrica. Neste livro, contudo, vamos reservar este termo para o instrumento descrito na Seção 6.1.

Temos agora um segundo critério para chamar um plástico, ou outro material, de *eletricamente neutro*. O primeiro critério foi apresentado na Experiência 2.1, isto é, não atrair corpos leves. O segundo critério é o de não orientar versórios metálicos ao chegar perto deles. Nas experiências seguintes é bom que se separe algum canudo de plástico neutro e também alguma régua de plástico neutra, isto é, que não atraiam corpos leves nem orientem versórios metálicos. Este canudo e esta régua não devem ser atritados em nenhum caso, pois vão ser utilizados como critério de neutralidade. Devem ser escolhidas outras régua ou canudos de plástico para serem atritados. Com isto teremos sempre à mão um corpo neutro para os testes que forem necessários.

Fracastoro não descreveu como chegou à invenção do perpendículo (antecessor do versório de Gilbert). Só podemos então especular, sem garantia de estarmos certos. Um dos objetivos do seu livro era o estudo do magnetismo. Queria também distinguir a atração do âmbar da atração exercida pelo ímã. Pode ser que em algum momento tenha atritado o âmbar para fazer alguma experiência elétrica e tenha percebido casualmente que ele era capaz de girar a agulha de uma bússola. Como o âmbar não é magnético, estando ou não atritado, deve ter concluído que esta orientação da bússola era devido a uma atração elétrica, análoga à atração dos corpos leves pelo âmbar atritado. Então pode ter resolvido fazer agulhas metálicas análogas aos ímãs, só que não imantadas.

¹¹[Gil00, págs. 48-49 e Glossário] e [Hea67].

¹²[Gil00, págs. vj e 48-49] e [Hea67].

Elas girariam até apontarem para o âmbar atritado. Por outro lado, as agulhas metálicas não apontariam para um ímã que se aproximasse delas (supondo que fossem feitas de cobre ou de prata, mas não de ferro nem de aço). Pode ter criado assim o primeiro instrumento artificial para o estudo da eletricidade.

Experiência 3.2

Aproxima-se agora um ímã destes versórios. Observa-se que apenas aqueles feitos de aço, ferro, níquel ou de outros materiais ferromagnéticos giram até apontarem para o ímã. Os versórios feitos de outros materiais não são afetados pelo ímã. Observa-se que vários metais, como o cobre e o alumínio, não são afetados pelo ímã. O mesmo ocorre com a maior parte das outras substâncias (papel, plástico, palha, madeira, etc.)

Com esta experiência podemos distinguir a interação magnética da interação elétrica, assim como havíamos feito nas experiências 2.6 e 2.7, só que agora com uma precisão maior.

3.4 É Possível Mapear a Força Elétrica?

Será que é possível mapear a força elétrica exercida por um corpo de plástico atritado? Podemos visualizar em que direção um longo canudo atritado vai atrair um pequeno pedaço de papel colocado em suas redondezas? Nesta Seção veremos a resposta a esta pergunta.

Nas próximas experiências podem ser utilizados vários versórios simultaneamente, ou então um único versório que será colocado alternadamente em várias posições durante cada experiência. Nas próximas Figuras são representados os vários versórios simultaneamente. O ideal é que se utilizem versórios pequenos, como aqueles feitos por pequenos colchetes apoiados sobre a ponta de alfinetes. Estes alfinetes podem estar espetados em várias rolhas, ou então podem estar todos espetados em uma lâmina de isopor. Inicialmente trabalhamos apenas com versórios metálicos.

Experiência 3.3

Aproxima-se um canudo neutro dos versórios, nada acontece. Atrita-se a ponta de um canudo de plástico. Coloca-se esta ponta atritada na mesma altura do plano formado por alguns versórios sobre a mesa. Observa-se que eles giram e passam a apontar para a ponta atritada do canudo, Figura 3.12. Nesta Figura o círculo central com a letra F indica a ponta atritada do canudo plástico que está no mesmo plano que os versórios. A influência do canudo atritado alcança até uns 10 cm de distância. Os versórios mais distantes não são visivelmente afetados pelo canudo atritado, a menos que ele chegue perto deles.

A direção indicada pelos versórios é a direção da força elétrica exercida pelo canudo atritado. Isto é, caso existam papezinhos soltos nas posições dos versórios e caso a força atrativa do canudo atritado seja suficientemente forte, a direção indicada pelos versórios é a direção do movimento que seria produzido

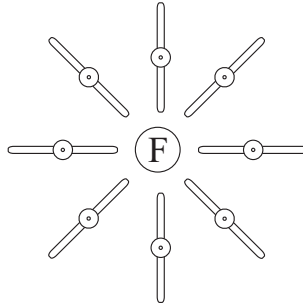


Figura 3.12: Os versórios próximos se orientam, apontando para a parte atritada do plástico.

nos papeizinhos devido à presença do canudo atritado. Ou seja, eles seriam atraídos radialmente pela ponta do canudo.

Os versórios desta experiência estão funcionando como a limalha de ferro espalhada ao redor de um ímã, que indica a direção da força magnética exercida pelo ímã sobre os polos magnéticos.

Experiência 3.4

Podem ser feitas experiências análogas à anterior para diversas configurações diferentes. Por exemplo, atritando-se um canudo de plástico ao longo de todo o seu comprimento, colocando-o em seguida verticalmente em uma base apropriada, como um palito de dentes espetado em uma massa de modelar. Depois colocam-se os versórios ao seu redor. Os versórios próximos do canudo carregado vão girar e ficarão apontando para ele.

Em vez de deixar o canudo atritado na vertical, pode-se apoiá-lo horizontalmente através de suas extremidades. A configuração obtida pelos versórios neste caso é mostrada na Figura 3.13. Ou seja, vemos que a maioria dos versórios apontam para o eixo do canudo atritado, sendo que os versórios próximos das extremidades do canudo apontam para estas extremidades. Ou seja, o torque elétrico que atua sobre cada versório faz com que ele aponte no sentido do canudo atritado.

Experiência 3.5

Ao repetirmos a experiência com dois canudos atritados espetados verticalmente, a configuração dos versórios é a indicada na Figura 3.14. Os círculos com as letras F representam as pontas atritadas dos dois canudos que estão no mesmo plano que os versórios. Ou seja, esta configuração é como se fosse devida a uma soma vetorial entre os torques exercidos por cada canudo sobre os versórios. A soma vetorial entre dois vetores é obtida pela regra do paralelogramo.

Gilbert não chegou a utilizar o versório para mapear a força elétrica como estamos fazendo aqui, mas utilizou agulhas imantadas de bússolas pra mapear

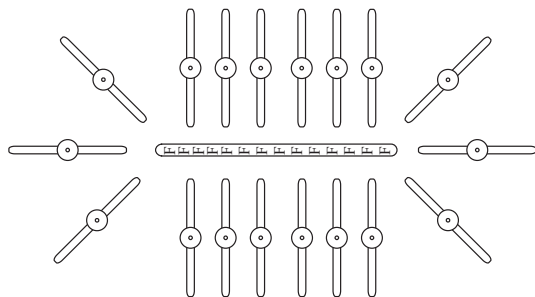


Figura 3.13: Orientação dos versórios por um canudo plástico atritado ao longo de todo o seu comprimento.

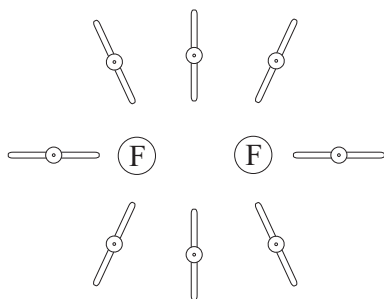


Figura 3.14: Orientação dos versórios por dois canudos plásticos atritados em suas pontas.

a força magnética de um ímã. Na Figura 3.15 temos os resultados que obtive no caso de um ímã cilíndrico e no caso de um ímã esférico.¹³ Este ímã esférico orienta as bússolas de maneira análoga à orientação das bússolas sobre a Terra, que apontam na direção Norte-Sul. Ou seja, é como se o ímã esférico também tivesse dois polos, que são os pontos sobre a superfície da esfera tal que as bússolas colocadas perto deles e livres para girar ao redor de seus centros, acabam se orientando apontando para o centro da esfera. Pode-se então traçar os meridianos magnéticos sobre esta esfera, que são os círculos sobre a esfera ligando os dois polos, círculos estes contidos em qualquer plano que passa pelo centro da esfera. O equador magnético é o círculo sobre a esfera perpendicular à reta unindo os dois polos, com o centro do equador magnético sendo o centro da esfera. Gilbert utilizou esta analogia entre o comportamento das pequenas bússolas perto de uma pequena esfera imantada e o comportamento das bússolas usuais sobre a superfície da Terra para defender a ideia de que a Terra é um grande ímã. Com isto conseguia justificar a orientação das bússolas terrestres usuais.

¹³[Gil78, págs. 10 e 82].

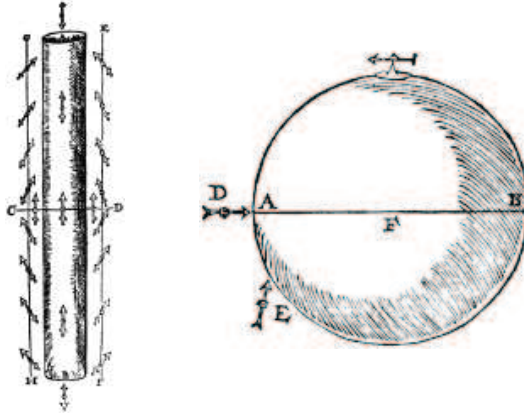


Figura 3.15: Mapeamentos da força magnética feitos por Gilbert utilizando agulhas imantadas perto de um ímã cilíndrico e perto de um ímã esférico. Os polos deste ímã esférico estão localizados em A e B .

3.5 Existe Ação e Reação em Eletrostática?

Até agora vimos o âmbar atritado, ou o plástico atritado, atraindo ou orientando corpos leves ao seu redor. Vamos agora analisar o processo inverso.

Experiência 3.6

Um canudo de refresco de plástico neutro é encostado em uma parede e solto do repouso. Observa-se que ele cai ao solo, Figura 3.16 (a). Atrita-se agora um canudo de plástico ao longo de todo o seu comprimento com um guardanapo de papel. Este canudo atritado é encostado de leve em uma parede e solto do repouso. Observa-se que ele fica grudado na parede, apesar da gravidade terrestre, Figura 3.16 (b)! O mesmo pode ser conseguido encostando-o em uma janela de vidro, em um arquivo de metal, ou em uma lousa de escola. Às vezes é possível grudá-lo até mesmo no teto!

Esta experiência serve também para indicar quando um canudo está bem eletrizado. Caso ele grude na parede ao ser atritado, tem-se uma boa eletrização do canudo. Caso ele comece logo a escorregar pela parede, ou caso não fique grudado, estará pouco carregado. A maior parte das experiências deste livro funcionam bem com canudos de plástico bem eletrizados. Pode-se utilizar este teste da parede para descobrir os materiais que se eletrizam mais intensamente, ou as maneiras de atritar que são as mais eficientes, ou com quais substâncias devemos atritar um mesmo material para eletrizá-lo mais fortemente. Pode-se, por exemplo, analisar se um canudo plástico atritado no cabelo fica mais ou menos eletrizado do que um canudo plástico atritado em um guardanapo de papel. Este é um método bem útil, prático e simples de se verificar se o canudo está bem carregado.

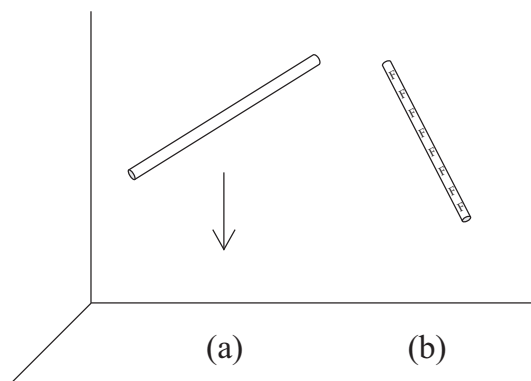


Figura 3.16: (a) Observa-se que um canudo plástico não atritado cai ao solo após ser solto encostado em uma parede. (b) Um canudo plástico atritado ao longo de todo o seu comprimento fica grudado na parede depois de solto.

Às vezes não se consegue fazer com que o canudo fique grudado na parede mesmo depois de bem atritado. Em alguns casos isto pode ocorrer devido ao canudo ser feito de um plástico muito denso e pesado. Nestes casos a força gravitacional será maior do que a força elétrica e do que o atrito entre o canudo atritado e a parede, tal que o canudo não ficará em repouso. Nestes casos o ideal é trocar o canudo por algum outro tipo menos denso e menos pesado.

Se encostarmos um pedaço de plástico ou um saco plástico neutro na parede e os soltarmos em repouso eles tombam. Atrita-se agora um pedaço de plástico e ele é encostado levemente na parede. Observa-se que o plástico fica grudado na parede durante algum tempo, caso esteja bem eletrizado.

Experiência 3.7

Uma experiência análoga pode ser feita com uma bexiga de borracha, como as de aniversário de criança. Ela é inicialmente cheia de ar e tem seu bico amarrado. É então encostada na parede ou no teto e solta do repouso. Ela cai ao solo. Atrita-se agora a bexiga no cabelo. Novamente a bexiga é encostada de leve na parede ou no teto, tocando a parede em algum ponto no qual a bexiga tenha sido atritada. Ao ser solta do repouso, ela permanece grudada na superfície. No caso da bexiga nem sempre a experiência funciona. Para isto às vezes ajuda friccioná-la mais rapidamente, em uma área maior, ou então em alguma outra substância que não o cabelo.

Estas são experiências bem simples mas com um efeito bem marcante. É comum este efeito de um canudo atritado ficar grudado na parede ou no metal durar vários minutos ou até mesmo algumas horas. Estas experiências indicam que o canudo ou bexiga atritados são atraídos pela parede ou pelo teto. O canudo atritado é atraído por várias substâncias diferentes: parede, vidro, metal, madeira, etc.

Experiência 3.8

Agora vamos fazer algumas experiências com um versório de plástico, como o versório de segundo tipo. Inicialmente vamos trabalhar com um versório neutro. Apoiamos seu centro sobre o suporte tal que seja livre para girar ao redor de um eixo vertical. Aproximamos agora o dedo, uma chapa metálica, um fio metálico, um espeto de churrasco de madeira, uma folha de papel ou um tecido. Nada acontece com o versório quando estas substâncias são aproximadas dele. Sua direção original arbitrária não é afetada. Ou seja, ele não se orienta apontando para o palito de madeira nem para as outras substâncias, Figura 3.17.

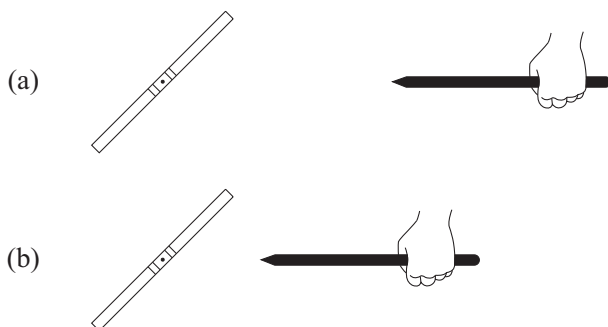


Figura 3.17: Um versório de plástico neutro não se orienta quando aproximamos dele um fio metálico, um dedo ou um espeto de churrasco de madeira.

Atramos uma das pernas do versório de plástico em uma folha de papel ou em um tecido. Aproximamos novamente o dedo, uma chapa metálica, um fio metálico ou uma madeira desta parte atritada do versório. Observa-se agora que ele gira e se orienta, apontando para qualquer um destes corpos, Figura 3.18.

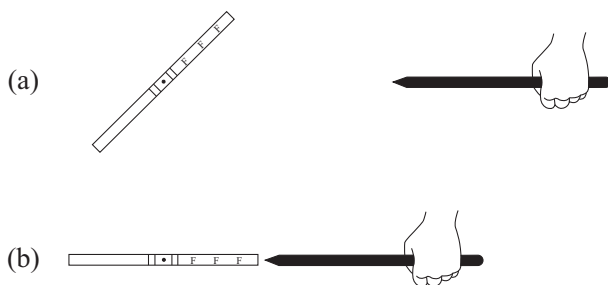


Figura 3.18: (a) Um versório de plástico atritado aponta em uma direção arbitrária quando está afastado de um espeto de madeira. (b) O lado atritado de um versório de plástico se orienta, apontando para um espeto de madeira que se aproxime dele. O mesmo ocorre se aproximarmos do versório atritado um dedo ou um fio metálico.

Esta experiência mostra o oposto da Experiência 3.1. Isto é, antes um plástico atritado orientava um versório metálico. Agora temos um dedo, uma

madeira ou um metal orientando um versório de plástico atritado.

Algumas vezes o versório de plástico é atraído por um dedo, por uma folha de papel ou por um espeto de madeira mesmo sem que o plástico tenha sido atritado. Mas como já mencionamos anteriormente, isto ocorre devido ao fato de que a própria manipulação do versório de plástico o carrega eletricamente em alguns casos. Com isto ele não está de fato neutro, tendo adquirido uma pequena carga residual. Aqueles versórios que são realmente neutros não são atraídos por estes corpos.

Experiência 3.9

Na Experiência 3.8 observou-se apenas a orientação do versório de plástico, mas seu centro continuou sobre o suporte. Para ver um corpo de plástico atritado sendo atraído por um metal, o ideal é trabalhar com o terceiro tipo de versório, ver a Seção 3.1, mas agora feito de plástico. Isto é, uma haste plástica suspensa em seu centro por um fio de seda ou de náilon. Quanto mais leve for a haste, mais fácil conseguiremos ver seu movimento. Por outro lado, ela não deve ser muito curta, pois temos de conseguir atritá-la em um tecido ou no papel. Um canudo plástico funciona bem como haste. Nada acontece ao aproximarmos a mão, uma folha de papel, um espeto de madeira ou uma chapa metálica de um versório de plástico neutro.

Atritamos então metade do canudo e o deixamos suspenso pelo fio de seda ou de náilon. Aproximamos agora uma chapa metálica, uma folha de papel, um fio metálico ou um espeto de madeira. Observa-se que o versório de plástico atritado não apenas se orienta em relação ao metal, mas é atraído por ele, deslocando-se como um todo em sua direção. Ele também é atraído pelas outras substâncias.

Esta experiência é o oposto das Experiências 2.1, 2.3 e 2.4. Agora temos um papel, uma madeira ou um metal atraindo um plástico atritado. No caso das Experiências 2.1, 2.3 e 2.4, não era possível perceber esta ação mútua porque o canudo, a régua ou o pente eram muito mais pesados do que os pedacinhos de papel e de outras substâncias. Além disso, nossa mão não tem sensibilidade suficiente para perceber a pequena força exercida pelo papelzinho sobre o canudo ou sobre o pente. Já nas Experiências 3.8 e 3.9 temos um instrumento muito mais sensível. O corpo de prova nestes casos é o versório de plástico. O peso do corpo de prova é contrabalançado pelo apoio abaixo ou acima do versório de plástico. Por isto fica mais fácil ver o giro ou o deslocamento lateral de todo o versório de plástico.

Experiência 3.10

O fato de que um corpo carregado eletricamente é atraído por outros corpos ao seu redor, como pelo dedo, pela madeira ou pelo metal, foi utilizado por Stephen Gray (1666-1736) para descobrir em 1720 novos materiais que se comportavam como o âmbar.¹⁴

Ele atritou os seguintes materiais passando-os entre seus dedos: penugem (ou seja, penas que primeiro nascem), fios de cabelo, de seda, de linho e de algodão,

¹⁴[Grab].

papel, aparas de madeira, pergaminho e tripa de gado. Depois observou que todos estes materiais eram atraídos por um dedo ou por algum outro material sólido que se aproximava deles. No caso de alguns destes fios e do papel, eles tinham de ser aquecidos ao fogo antes de serem atritados para que pudessem exibir o efeito de serem atraídos. Citamos aqui trechos do trabalho de Gray contendo algumas experiências que podem ser facilmente reproduzidas:¹⁵

Tendo observado muitas vezes nas experiências elétricas feitas com um tubo de vidro [atritado] e uma penugem presa à extremidade de uma vareta, que após suas fibras terem sido atraídas em direção ao tubo, quando este [o tubo] havia sido retirado, a maior parte delas [das fibras] eram atraídas pela vareta, como se ela [a penugem] fosse um corpo elétrico, ou como se tivesse sido comunicada alguma eletricidade para a vareta ou para a pena; isto me pôs a pensar, que se uma pena fosse puxada entre meus dedos, se ela não poderia produzir o mesmo efeito, ao adquirir algum grau de eletricidade. Em conformidade com isto tive sucesso na minha primeira experiência, com as pequenas fibras da penugem próximas à haste da pena sendo atraídas pelo meu dedo quando mantido próximo dela [da penugem]: [...] Então prossegui para verificar se o cabelo não poderia ter a mesma propriedade, pegando um [fio] da minha peruca e puxando-o 3 ou 4 vezes entre meus dedos ou, de preferência, entre meu polegar e indicador, logo descobrindo que ele era atraído para o meu dedo à distância de meia polegada [1,3 cm]; [...].

Tendo sucedido tão bem nestas [experiências], prossegui para quantidades maiores dos mesmos materiais, como tiras de seda vulgar ou fina de várias cores, e descobri que ao pegar um pedaço de qualquer uma destas [sedas] de aproximadamente meia jarda [45 cm] de comprimento, e ao manter a extremidade [da seda] em uma mão, e puxando-a através da minha outra mão entre o polegar e os dedos, ela [a seda] adquiria uma eletricidade, de tal forma que se a mão fosse mantida próxima de sua extremidade inferior [da seda], ela [a seda] seria atraída por ela [pela mão] à distância de 5 ou 6 polegadas [13 ou 15 cm]; mas algumas vezes a eletricidade era muito mais fraca do que em outras [oportunidades], conjecturei que o motivo para isto era que a tira pudesse ter absorvido algumas partículas aquosas do ar úmido, o que descobri ser [verdade] quando tive oportunidade de experimentar isto; pois quando tinha aquecido bem a tira junto ao fogo, ela nunca deixou de ficar fortemente elétrica.

¹⁵[Grab].

3.6 Fabri e Boyle Descobrem as Ações Elétricas Mútuas

As experiências 3.6 a 3.10 são bem importantes. Elas mostram que existe uma ação mútua entre o plástico atritado e os corpos ao seu redor. Isto é, não apenas o plástico atritado atrai corpos ao seu redor, mas também estes corpos atraem o plástico atritado. Gilbert não chegou a fazer experiências com versórios atritados (feitos de âmbar ou de outros materiais que chamou de elétricos). Talvez por isto tenha concluído, erroneamente, que não havia ação mútua entre o âmbar atritado e os corpos leves ao seu redor. A mesma conclusão havia sido obtida por Girolamo Cardano (1501-1576) antes de Gilbert, sendo mencionada também por N. Cabeo (1596-1650) depois de Gilbert. Por outro lado, eles sabiam da ação mútua entre dois ímãs, ou entre um ímã e um pedaço de ferro. Para caracterizar esta interação magnética mútua, Gilbert deu-lhe o nome de *coito* ou de *copulação*. Já para a ação elétrica utilizou o nome de *atração*.¹⁶

Hoje em dia já se sabe que a ação elétrica também é mútua, podendo então ser caracterizada pela expressão *interação elétrica*. Esta interação elétrica se refere não apenas à força resultante que um corpo exerce sobre o outro (fazendo com que se desloquem em relação ao solo), mas também ao torque resultante que um faz sobre o outro (fazendo com que girem em relação ao solo). Quando se fala da força elétrica, deve se ter em mente que não apenas o corpo *A* atrai o corpo *B*, mas que também o corpo *B* atrai o corpo *A* em sentido contrário. Da mesma forma, assim como o corpo *A* pode exercer um torque elétrico sobre o corpo *B*, vem que *B* vai exercer um torque em sentido oposto sobre *A*. Isto é, se *A* faz com que *B* tenda a girar no sentido horário, *B* faz com que *A* tenda a girar no sentido anti-horário.

Ou seja, a ação elétrica entre o âmbar atritado e os corpos ao seu redor ocorre de forma mútua. Os primeiros a descobrir este fato foram Honoré Fabri (1607-1688) em 1660, Figura 3.19, e Robert Boyle (1627-1691) em 1675, Figura 3.20.¹⁷

Fabri tornou-se um correspondente da Accademia del Cimento (Academia da Experiência) em 1660. Entre os membros desta Academia estavam G. A. Borelli (1608-1671), Vincenzo Viviani (1622-1703) – discípulo de Galileu (1564-1642) – e F. Redi (1626-1697/8). Ela foi fundada em 1657 e durou por dez anos. Os trabalhos desta Academia, chamados de *Saggi* ou *Ensaaios*, foram publicados em 1667. Os trabalhos sobre eletricidade feitos por esta Academia começaram em 1660. Entre os relatos das experiências encontra-se o seguinte:¹⁸

Acredita-se comumente que o *âmbar* atrai os corpos pequenos para si; mas a ação é na verdade *mútua*, não pertencendo mais apropriadamente ao *âmbar* do que aos corpos movidos, pelos quais ele também é atraído.

¹⁶[Gil78, págs. 26 e 34] e [Hei99, págs. 174-182].

¹⁷[Hei99, págs. 195-205].

¹⁸De acordo com Heilbron, [Hei99, pág. 201].



Figura 3.19: Honoré Fabri (1607-1688).



Figura 3.20: Robert Boyle (1627-1691).

De acordo com Heilbron,¹⁹ os acadêmicos verificaram isto suspendendo um pedaço de âmbar atritado por um fio, ou apoiando-o sobre um pivô. Aproximaram em seguida certos corpos deste âmbar atritado. Então o âmbar, de acordo com os acadêmicos, “inclinou-se um pouco em direção a estes corpos, que da mesma forma se apresentavam *proporcionalmente* ao âmbar, e prontamente obedeceu sua chamada.” No mesmo ano Magalotti (1637-1712) refuta os pontos de vista de Cabeo, que negava a mutualidade das interações elétricas, dizendo:²⁰

Seus pontos de vista são refutados pela experiência, pois a *ambra versoria* segue [se orienta para] todos os corpos apresentados a ela.

De acordo com Heilbron, Magalotti obteve esta informação de Fabri, sendo dele também que se originaria o relato anterior nos Ensaios da Academia. Existe

¹⁹[Hei99, pág. 201].

²⁰[Hei99, pág. 201].

um manuscrito contendo os rascunhos da seção de eletricidade dos Ensaios, com a letra de Fabri, no qual se afirma:²¹ “Um pedaço de lacre suspenso livremente e então friccionado se aproxima de outros corpos.” Observa-se então que estas experiências foram similares às apresentadas na Seção 3.5. A única diferença é que em nossas experiências utilizamos um plástico atritado, em vez de empregar um âmbar atritado ou um lacre atritado.

Boyle apresentou seus resultados sobre a ação mútua entre o âmbar atritado e os outros corpos em 1675. Ele pode ter aprendido sobre isto com os relatos das experiências de Fabri, ou pode ter descoberto o fenômeno independentemente. Ele acreditava que o âmbar atritado emitiria um eflúvio material que causaria a atração dos corpos leves, talvez pelo fato deste eflúvio ser grudento e também elástico.

No que diz respeito à atração exercida pelo âmbar, disse o seguinte:²²

Parece mais provável que a atração elétrica não opera por qualquer simpatia particular entre um elétrico [corpo que atrai substâncias leves ao ser atritado] e um corpo, pois o âmbar, por exemplo, não atrai apenas uma determinada espécie de corpos, assim como a pedra-ímã [atrai] o ferro e aqueles corpos nos quais [o ferro] é abundante; mas pelo que já experimentei, [o âmbar] atrai indiferentemente todos os corpos de qualquer espécie, [desde que] sendo colocados dentro de uma distância devida do âmbar, (como o meu pedaço preferido de âmbar atrai não apenas areia e pós minerais, mas limalha de aço e de cobre, e o próprio ouro laminado), desde que estes corpos sejam suficientemente pequenos ou leves, exceto talvez o fogo.

Em outra passagem vem o trecho crucial:²³

Encontramos pela experiência que um pedaço de âmbar vigoroso e bem excitado vai atrair não apenas o pó do âmbar mas também fragmentos pequenos de âmbar. E como em muitos casos um contrário leva a outro, assim esta experiência sugeriu outra que, no caso de ser bem sucedida, indicaria provavelmente que na atração elétrica não apenas são emitidos eflúvios pelo corpo elétrico, mas estes eflúvios se prenderiam ao corpo a ser atraído e isto de uma maneira tal que os fios viscosos estendendo-se entre eles, que podem ser supostos como constituídos destes eflúvios aderentes, seriam, quando cessa sua agitação, contraídos ou encolhidos para dentro pelas duas extremidades, quase da mesma forma que cordas de alaúde fazem quando é permitido que retrocedam para dimensões menores. Mas foi muito mais fácil fazer a própria conjectura do que a experiência necessária para testá-la. Pois descobrimos que não era fácil suspender um elétrico [como o âmbar], suficientemente grande e vigoroso, de tal

²¹ [Hei99, pág. 202].

²² [Boy00, pág. 515].

²³ [Boy00, pág. 516].

maneira que pudesse, enquanto suspenso, ser excitado [pelo atrito], e ficar tão bem equilibrado, que uma força tão pequena como aquela com a qual ele atrai corpos leves pudesse ser capaz de produzir um movimento local [isto é, um deslocamento] a todo o corpo [ou seja, capaz de deslocar o âmbar atritado]. Mas após algumas tentativas infrutíferas com outros [corpos] elétricos, recorri ao pedaço de âmbar polido muito vigoroso mencionado acima, e quando o suspendemos por um fio de seda com o auxílio de um pouco de cera, atritamos muito bem uma das bordas obtusas do âmbar com uma espécie de alfineteira coberta com um material de lã filamentosos e preto, e então, tão logo quanto possível, fizemos o elétrico [o âmbar] ficar em repouso, apesar de estar dependurado livremente na extremidade do fio [de seda]. Escolhemos este procedimento de atritar na borda do âmbar por mais de um motivo; pois se tivéssemos atritado a face plana, o âmbar não poderia se aproximar do corpo com o qual havia sido atritado sem ocasionar uma mudança de posição de todo o elétrico [isto é, sem deslocar todo o âmbar] e, o que é pior, sem ter de movimentá-lo (contrariamente à natureza dos corpos pesados) um pouco para cima; enquanto que o âmbar possuía, devido à sua suspensão [pelo fio de seda], suas partes contrabalanzando-se mutuamente; [já] para fazer com que a borda excitada se aproximasse de um outro corpo, esta borda não necessitaria de subir nem um pouco, mas [poderia] apenas mover-se horizontalmente [isto é, o âmbar poderia simplesmente girar em um plano horizontal ao redor do fio de seda], sendo que neste tipo de movimento o peso do elétrico (que o fio evitava de descer) causaria pouco ou nenhum impedimento. E em conformidade com isto encontramos que, tão logo o elétrico bem atritado e suspenso ficava livremente em repouso, se aproximássemos da borda atritada, mas sem tocá-la, a alfineteira mencionada acima que, devido à sua superfície áspera e porosa, era apropriada para que os eflúvios elétricos se grudassem nela, a borda [do âmbar] era manifestamente puxada para o lado pela alfineteira mantida em repouso, e se esta [alfineteira] fosse afastada lentamente, [o lado atritado do âmbar] iria segui-la durante um bom percurso; e quando este corpo [a alfineteira] não mais o detinha, [o âmbar] retornava para a posição onde havia assentado antes. E este poder de se aproximar da alfineteira em virtude da operação de seus próprios vapores [efflúvios] era tão durável em nosso pedaço vigoroso de âmbar, que atritando-o uma única vez, era capaz de fazê-lo seguir a alfineteira não menos do que dez ou onze vezes.

As experiências de Fabri e de Boyle mostraram então que não apenas o âmbar atritado orientava e atraía corpos leves para si, mas que também o âmbar e o lacre atritados eram orientados e atraídos por outros corpos. Suas experiências são similares e inversas às observações de Fracastoro descritas na Seção 3.1. Fracastoro dependurou pedacinhos de âmbar e de prata em seu perpendicular e

observou-os sendo atraídos por um outro âmbar atritado que era aproximado deles, como na Figura 3.2. Fabri e Boyle, ao contrário, observaram um âmbar atritado suspenso por um fio ser atraído e orientado por um outro corpo que se aproximava dele, como na Figura 3.21.

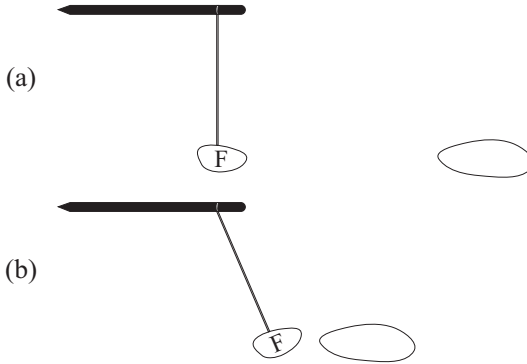


Figura 3.21: (a) O âmbar atritado, representado por F , pende verticalmente quando está afastado de outros corpos neutros. (b) Quando um corpo neutro é aproximado do âmbar atritado, este se desloca no sentido do corpo.

Esta é uma descoberta muito importante do ponto de vista físico, mostrando que há uma ação e reação na eletrostática. Ou seja, esta descoberta indica que a força elétrica age mutuamente entre os corpos interagentes. Também o torque elétrico é caracterizado por uma ação e reação mútua entre os corpos que estão interagindo. Ou seja, o que temos de fato é uma interação elétrica entre o corpo atritado e os corpos neutros ao seu redor. O corpo atritado exerce uma força e um torque sobre um corpo neutro. E este corpo neutro, por sua vez, exerce uma força contrária e um torque contrário sobre o corpo atritado.

Fabri e Boyle chegaram à conclusão em 1660 e em 1675 de que havia ação e reação na eletricidade de forma experimental. Esta foi uma prova qualitativa, assim como as experiências que realizamos nesta Seção. Isto é, mostraram que não apenas o âmbar atritado atraía corpos leves para si, mas que também o âmbar atritado podia ser atraído por outros corpos. Apesar disto, não chegaram a medir a força que o âmbar exercia sobre os corpos leves, nem a força exercida pelos corpos leves sobre o âmbar.

3.7 Newton e a Eletricidade

Como visto na Seção 3.6, Fabri e Boyle descobriram que as ações elétricas são mútuas entre 1660 e 1675. Poucos anos depois, em 1687, Isaac Newton (1642-1727), Figura 3.22, incluiu a ação e reação como um dos fundamentos de toda a física.

Este é o terceiro axioma ou lei de movimento que colocou em seu famoso livro *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Este livro também é conhecido

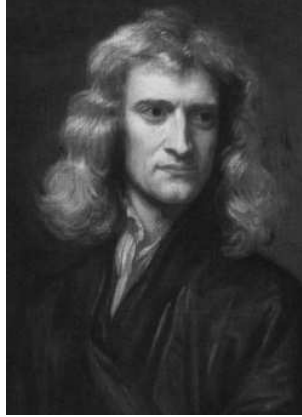


Figura 3.22: Isaac Newton (1642-1727). Esta é a pintura mais famosa de Newton, feita por Godfrey Kneller (1646-1723) em 1689. Newton aparece com seu cabelo natural, no auge de sua carreira científica, dois anos após a publicação do *Principia*.

por *Principia*, que é a primeira palavra do título no original em latim. Apresentamos aqui suas palavras descrevendo seu terceiro axioma, ou sua terceira lei do movimento:²⁴

A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.

Um ponto importante é que Newton acreditava que este axioma devia ser aplicado a todas as interações conhecidas, sejam elas gravitacionais, elétricas, magnéticas, elásticas, de contato, de atrito, de colisão, etc. Além disso, para Newton este passa a ser um princípio não apenas qualitativo mas também quantitativo. Ou seja, para cada ação existe uma reação de igual intensidade, sendo elas dirigidas ao longo da reta que une os corpos, atuando em sentidos contrários. Por ação e reação Newton entende aqui as forças mútuas entre os corpos, sendo a força medida quantitativamente pela variação do momento linear em relação ao tempo. O que chamamos de momento linear era chamado por Newton de quantidade de movimento do corpo, sendo proporcional ao produto de sua massa por sua velocidade em relação ao espaço absoluto. Este livro fundamental de Newton marca uma nova etapa na física, com ela atingindo um alto nível de precisão e se estendendo a novos domínios.

No *Principia* Newton apresenta as colisões e as forças de contato como exemplos de interações satisfazendo ao princípio de ação e reação. Para interações à distância ele discute a gravidade e o magnetismo. Neste último caso suas palavras são as seguintes:²⁵

²⁴[New90, pág. 16].

²⁵[New90, pág. 28].

Em atrações demonstro isso brevemente de acordo com o que segue. Suponha que um obstáculo é colocado de modo a evitar o encontro de quaisquer dois corpos A , B , que se atraem. Então, se qualquer dos corpos, tal como A , é mais atraído na direção do outro corpo B do que o outro corpo B o é na direção do primeiro corpo A , o obstáculo será mais fortemente empurrado pela pressão do corpo A do que pela pressão do corpo B , e, portanto, não permanecerá em equilíbrio; mas a pressão mais intensa prevalecerá e fará o sistema dos dois corpos, juntamente com o obstáculo, mover-se diretamente para as partes onde se encontra; e em espaços livres, os fará ir para a frente *in infinitum* com um movimento continuamente acelerado, o que é absurdo e contrário à primeira Lei. Pois, pela primeira Lei, o sistema deve continuar em seu estado de repouso, ou movimento uniforme em linha reta; e assim conclui-se que os corpos devem pressionar igualmente o obstáculo, e ser igualmente atraídos um pelo outro. Fiz a experiência com magnetita e ferro. Se esses, colocados separadamente em recipientes adequados, flutuam, um próximo ao outro, em água parada, nenhum deles propelerá o outro; mas, por serem igualmente atraídos, sustentarão a pressão um do outro, e finalmente repousarão em equilíbrio.

Na Questão 8 de seu livro *Óptica*, Newton descreve algumas experiências relacionadas com eletricidade:²⁶

Questão 8. Todos os corpos fixos não emitem luz e brilham quando são aquecidos além de um certo grau? E essa emissão não é efetuada pelos movimentos vibratórios de suas partes? E todos os corpos que abundam em partes terrestres, e especialmente em partes sulfúreas, não emitem luz tão frequentemente quanto essas partes são suficientemente agitadas, seja essa agitação produzida por calor, por fricção, percussão, putrefação ou por qualquer movimento vital ou outra causa qualquer? [...] Assim também um globo de vidro com cerca de 8 ou 10 polegadas de diâmetro [20 a 25 cm], colocado em uma armação onde se possa girá-lo rapidamente ao redor de seu eixo, brilhará ao girar nas partes onde é friccionado contra a palma da mão aplicada a ele. E se, ao mesmo tempo, um pedaço de papel branco ou de pano branco, ou a ponta do dedo, for mantido à distância de aproximadamente 1/4 de polegada ou 1/2 de polegada [0,6 ou 1,2 cm] da parte do vidro onde ele está em maior movimento, o vapor elétrico excitado pela fricção do vidro contra a mão será (ao ser lançado com força contra o papel branco, o pano ou o dedo) agitado de tal modo que emitirá luz e tornará o papel branco, o pano ou o dedo lúcidos como um vaga-lume; e, arremessado para fora do vidro, empurrará o dedo de forma sensível. E as mesmas coisas têm sido verificadas friccionando-se um cilindro longo e largo de vidro

²⁶[New96, págs. 252-253].

ou âmbar com um papel e prosseguindo-se a fricção até o vidro se aquecer.

Na Questão 31 ele também menciona a eletricidade, neste caso enfatizando as interações mútuas à distância entre os corpos:²⁷

Questão 31. Não têm as pequenas partículas dos corpos certos poderes, virtudes ou forças por meio dos quais elas agem à distância não apenas sobre os raios de luz, refletindo-os, refratando-os e inflectindo-os, mas também umas sobre as outras, produzindo grande parte dos fenômenos da natureza? Pois sabe-se que os corpos agem uns sobre os outros pelas ações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade; e esses exemplos mostram o teor e o curso da natureza, e não tornam improvável que possa haver mais poderes atrativos além desses. Porque a natureza é muito consonante e conforme a si mesma. Não examino aqui o modo como essas atrações podem ser efetuadas. O que chamo de atração pode-se dar por impulso ou por algum outro meio que desconheço. Uso esta palavra aqui apenas para expressar qualquer força pela qual os corpos tendem um para o outro, seja qual for a causa. Pois devemos aprender, pelo exame dos fenômenos da natureza, quais corpos se atraem e quais são as leis e propriedades da atração, antes de investigar a causa pela qual a atração se efetua. As atrações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade alcançam distâncias bem perceptíveis, e assim têm sido observadas pelos olhos comuns, podendo haver outras que alcançam distâncias tão pequenas que escaparam à observação até aqui; e talvez a atração elétrica possa alcançar essas distâncias mínimas mesmo sem ser excitada pela fricção.

Também no *Principia* ele mencionou as atrações elétricas. Citamos aqui algumas partes. No Livro III, Proposição VII, Teorema VII:²⁸

Proposição VII. Teorema VII

Que há um poder da gravidade pertencente a todos os corpos, proporcional às várias quantidades de matéria que eles contêm.

[...]

Corolário I - Portanto, a força da gravidade em direção a qualquer planeta inteiro surge de, e é composta de, forças de gravidade em direção a todas as suas partes. Atrações magnéticas e elétricas nos dão exemplos disto, pois toda atração em direção ao todo surge das atrações em direção às várias partes. [...]

No Escólio Geral ao final do livro ele volta a mencionar a eletricidade, mais uma vez enfatizando as atrações elétricas mútuas entre os corpos:²⁹

²⁷[New96, págs. 274-275].

²⁸[New08, págs. 203-204].

²⁹[New08, págs. 331].

E agora poderíamos acrescentar alguma coisa concernente a um certo espírito muito sutil que penetra e fica escondido em todos os corpos grandes, por cuja força e ação as partículas dos corpos atraem-se umas às outras quando se encontram a distâncias próximas e se unem se estão contíguas; e os corpos elétricos operam a distâncias maiores, tanto repelindo quanto atraindo os corpúsculos vizinhos; e a luz é emitida, refletida, refratada, infletida e aquece os corpos; e toda sensação é excitada e os membros dos corpos animais movem-se ao comando da vontade, propagada pelas vibrações deste espírito ao longo dos filamentos sólidos dos nervos, a partir dos órgãos sensoriais externos até o cérebro e do cérebro aos músculos. Mas estas são coisas que não podem ser explicadas em poucas palavras. Também não dispomos de uma quantidade suficiente de experiências que é necessária para determinar com precisão e demonstrar mediante que leis opera este espírito elétrico e elástico.

De tudo isto pode-se concluir que para Newton a eletricidade tinha um papel fundamental nos principais fenômenos naturais.

Capítulo 4

Atrações e Repulsões Elétricas

4.1 Existe Repulsão Elétrica?

Até o momento todas as experiências descritas neste livro foram de atração entre corpos. Mas os fenômenos elétricos são caracterizados também pela repulsão.

Experiência 4.1

Uma forma bem prática de se observar a repulsão é com uma simples tira de plástico com 10 ou 20 cm de comprimento por 2 cm de largura, por exemplo. Ela fica dependurada ao meio por um espeto de churrasco horizontal, lápis, ou dedo indicador, Figura 4.1 (a). Agora atritamos as duas partes da tira com o mesmo material (passando cada uma delas entre os dedos, atritando-as com lenço de papel ou com guardanapo de papel, etc.) Observa-se então que elas se repelem mutuamente, com as duas partes se afastando lateralmente da vertical, Figura 4.1 (b).

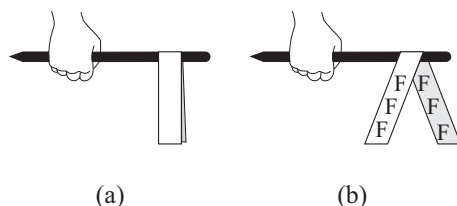


Figura 4.1: (a) Uma tira de plástico neutra pende verticalmente dos dois lados de um espeto de madeira. (b) Repulsão entre as duas metades atritadas da tira de plástico.

Pode-se também pegar dois pedaços de canudo de plástico com uns 5 cm de comprimento cada um. Amarra-se a extremidade de um dos canudos em uma

ponta de um fio de seda ou de náilon com uns 10 ou 20 cm de comprimento, amarrando-se a outra ponta do fio em uma das extremidades do outro canudo. Dependura-se a parte central do fio de seda em um suporte horizontal tal que os dois canudos fiquem lado a lado verticalmente, com suas extremidades livres apontando para baixo. Atrita-se agora os dois canudos com o mesmo material (por exemplo, com papel). Observa-se que eles se repelem. Quanto mais fino for o suporte horizontal, melhor se visualiza o fenômeno.

Uma terceira alternativa é com bexigas de borracha utilizadas em aniversários de crianças. Enche-se duas ou três destas bexigas e elas são dependuradas por fios que se unem na extremidade superior. No estado normal elas ficam encostadas umas às outras. Atrita-se todas as bexigas no cabelo e elas são dependuradas no mesmo suporte. Observa-se que agora elas passam a se repelir, ficando afastadas umas das outras.

Em todos estes casos estamos observando a repulsão entre corpos feitos da mesma substância (duas tiras de plástico, dois canudos ou duas bexigas) que ficaram carregados por atrito com materiais do mesmo tipo (os dois corpos foram atritados com papel, por exemplo). Este é um fenômeno novo, que não havia aparecido nas experiências anteriores.

Experiência 4.2

Com a utilização de dois versórios feitos de tiras rígidas obtidas do mesmo plástico pode-se observar a orientação elétrica devida a uma repulsão entre corpos. Atrita-se uma das pernas de cada um destes versórios de plástico com o mesmo material, por exemplo, com um guardanapo de papel. Coloca-se os versórios de plástico lado a lado, paralelos entre si, com as partes atritadas apontando para o mesmo lado. Eles são então liberados em repouso mas podendo girar ao redor de seus eixos verticais. Observa-se que as pernas atritadas se repelem mutuamente, fazendo com que os versórios de plástico girem até pararem alinhados entre si, com as pernas atritadas ficando o mais afastadas possível entre si, Figura 4.2.

O efeito é mais visível se os dois versórios estiverem bem próximos. Para evitar que as pernas não atritadas toquem uma na outra quando eles começam a girar, pode-se colocar um dos versórios em uma altura um pouco menor do que a altura do outro em relação ao solo, tal que ao ficarem alinhados a perna de um deles possa ficar sobre a perna do outro.

Também deve ser observado que cada versório de plástico gira em um sentido após serem soltos em repouso. Ou seja, o torque exercido pelo versório de plástico A sobre o versório de plástico B ocorre no sentido oposto ao torque exercido pelo versório de plástico B sobre o versório de plástico A . Se um deles gira no sentido horário ao ser solto do repouso, o outro gira no sentido anti-horário.

Para lembrar mais facilmente qual perna foi atritada, pode-se distinguir entre as duas pernas de um mesmo versório de plástico marcando-se uma delas com uma gota de tinta, com uma caneta ou com um pequeno corte.

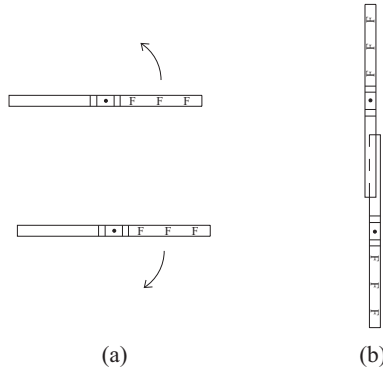


Figura 4.2: (a) Repulsão entre as partes atritadas de dois versórios de plástico, como vistos de cima, colocados paralelamente lado a lado. (b) Posição final de equilíbrio dos dois versórios.

Experiência 4.3

Uma outra variação da Experiência 4.2 é a de atritar as duas pernas de cada versório. Os versórios são colocados próximos entre si, quase que apontando um para o outro. Ao serem liberados do repouso, eles giram em sentidos opostos, até pararem paralelos entre si, Figura 4.3.

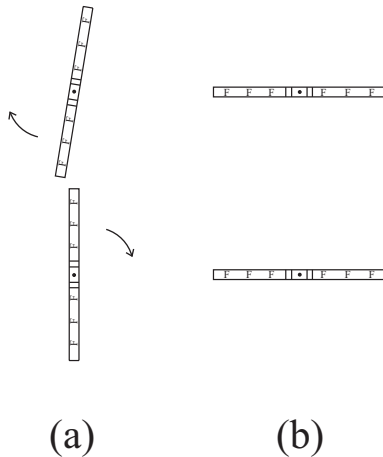


Figura 4.3: (a) Repulsão entre dois versórios de plástico totalmente atritados, como vistos de cima. (b) Posição final de equilíbrio.

4.2 A Experiência de Guericke da Penugem Flutuante

Experiência 4.4

Vamos agora fazer uma experiência análoga a uma observação experimental que teve grande importância histórica. Inicialmente pegamos uma penugem ou um pedaço bem pequeno de algodão, tipo alguns fiapos. O importante é que seja escolhida uma quantidade bem pequena que demore um longo tempo para cair no ar, da ordem de uns 10 segundos para descer de uma distância de 2 metros quando o algodão é solto do repouso. Se ele cair mais lentamente é ainda melhor. Por outro lado, se ele cair muito rápido, não se consegue realizar a experiência que vamos descrever agora. Logo a quantidade apropriada de algodão deve ser escolhida de antemão. Esta experiência também funciona muito bem com uma semente da planta dente-de-leão, que termina em cerdas bem finas, dando ao conjunto um aspecto de paraquedas.

Em seguida atrita-se bem um canudo de plástico no cabelo. Para saber se o canudo está bem atritado pode-se utilizar o teste da parede, como descrito na Experiência 3.6. Depois que o canudo foi bem atritado, ele é mantido na horizontal preso por uma das pontas entre o dedão e o indicador. Então solta-se com a outra mão o pequeno pedaço de algodão um pouco acima do canudo. O algodão é atraído pelo canudo e fica grudado nele. Se observarmos atentamente, o algodão começa a se esticar, como se quisesse pular para fora do canudo. Às vezes ele de fato se solta. Quando isto não acontece, podem ser dados alguns petelecos no canudo para soltar o algodão, ou então soprar de leve o algodão. Depois que o algodão se soltou do canudo e começou a cair, pode-se aproximar o canudo atritado por baixo do algodão que ele vai começar a ser repellido pelo canudo. Às vezes isto não acontece da primeira vez, sendo necessário que o algodão seja atraído mais uma ou duas vezes pelo canudo, sendo solto a cada vez com um sopro ou peteleco, antes de passar a ser repellido por ele. Quanto mais eletrizado estiver o canudo, mais rapidamente o algodão passará a ser repellido por ele. Daqui por diante vamos supor que o algodão já esteja flutuando no ar, sendo repellido pelo canudo atritado embaixo dele, como na Figura 4.4.

Na Figura 4.5 apresentamos a mesma experiência feita com uma semente de dente-de-leão. A vantagem do dente-de-leão em relação ao algodão é que a semente já cai com uma velocidade bem lenta, apropriada para esta experiência. É fácil fazê-la flutuar acima de um canudo plástico atritado no cabelo, após tocar o canudo.

Ao movermos o canudo lentamente embaixo do algodão flutuante, podemos levá-lo para onde quisermos dentro da sala. Caso o algodão se aproxime do nosso corpo, da parede ou de algum outro corpo, ele acaba sendo atraído por este corpo e gruda nele. Se não deixarmos o algodão se aproximar do nosso corpo nem de outros objetos, podemos facilmente mantê-lo flutuando a 10 ou a 20 cm do canudo, dependendo da eletrização do canudo. Só que para isto o canudo não pode ficar imóvel, caso contrário o algodão acaba se afastando dele e indo ao

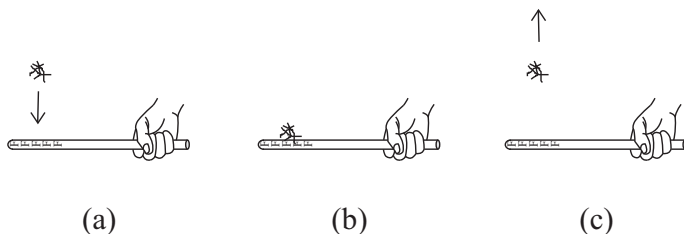


Figura 4.4: (a) Uma penugem ou fiapo de algodão é inicialmente atraída por um canudo atritado. (b) A penugem toca na parte atritada do canudo. (c) Depois disto a penugem passa a ser repelida pelo canudo atritado, podendo ser mantida flutuando sobre ele, apesar da atração gravitacional da Terra!

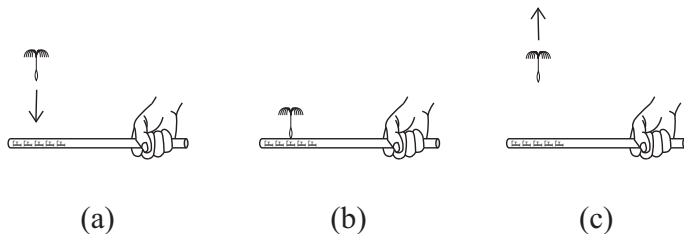


Figura 4.5: A Experiência 4.4 pode feita facilmente com uma semente de dente-de-leão sendo mantida no ar por um canudo atritado no cabelo.

solo. Para que se mantenha o algodão no ar é necessário ir mexendo aos poucos com o canudo atritado embaixo do algodão, acompanhando seu movimento, ao mesmo tempo em que o direcionamos para onde quisermos. Quando se utiliza a semente do dente-de-leão muitas vezes o procedimento é mais simples. Isto é, ao ser solta no ar ela é atraída pelo canudo atritado abaixo dela, vai em sua direção, toca no canudo e imediatamente passa a ser repelida por ele. Esta é uma experiência muito simples de ser realizada, mas extremamente curiosa e que chama muito a atenção. Ela teve também uma grande relevância histórica.

Uma experiência como esta foi realizada pela primeira vez por Otto von Guericke (1602-1686),¹ Figura 4.6.

Ela apareceu em seu livro *Novas Experiências (assim chamadas) de Magdeburgo sobre o Espaço Vazio*, publicado em 1672, em latim. De acordo com o que Guericke escreveu no prefácio da obra, este livro estava terminado desde 1663. Guericke foi prefeito da cidade de Magdeburgo. Neste livro ele descreve a bomba de ar (também chamada de bomba a vácuo) que havia inventado e com a qual demonstrou a capacidade de bombeamento do ar. Foi com esta bomba de ar que realizou em 1657 a famosa experiência pública de Magdeburgo,² mostrando as grandes forças devidas à pressão atmosférica. Ele tinha uma esfera oca cons-

¹[Hei99, págs. 215-218].

²[Kra81].



Figura 4.6: Otto von Guericke (1602-1686).

tituída de dois hemisférios de bronze que estavam simplesmente justapostos. O ar era retirado de dentro da esfera com a bomba e dois grupos com oito cavalos de cada lado tinham uma enorme dificuldade para separar os hemisférios. Por outro lado, ao ser introduzido novamente o ar na esfera, os dois hemisférios eram facilmente separados por qualquer pessoa.

Mas o que nos interessa aqui é uma outra experiência realizada por Guericke. Sua representação desta experiência está na Figura 4.7.



Figura 4.7: Experiência na qual Guericke manteve uma penugem flutuando acima de uma esfera de enxofre atritada.

As citações são de seu livro famoso:³

A Experiência com a Qual podem ser Excitadas Através do Atrito sobre um Globo de Enxofre as Virtudes Importantes Mencionadas Anteriormente.

³[Gue94, Livro 4, Capítulo 15, págs. 227-231].

Caso a pessoa tenha interesse, ela deve pegar uma esfera de vidro, um pequeno frasco do tamanho de uma cabeça de bebê e enchê-la com enxofre moído em um pilão. Então, aquecendo-a, deve derreter o pó. Depois de esfriá-la deve quebrar a esfera [de vidro], extrair a bola [de enxofre] que sobrou e guardá-la em um lugar seco de baixa umidade.

[...]

Seção 2.

Para demonstrar a virtude conservadora presente neste globo, deve-se colocar um eixo através de seu centro com dois suportes, *ab*, apoiado sobre uma base, *abcd*. Deve ter uma altura de um palmo desde a base [até a parte inferior do globo] e devem ser colocados abaixo [do globo] todos os tipos de pedacinhos de folhas, ouro, prata, papel, plantas e outras partículas pequenas. Devemos então tocar a esfera [de enxofre] com a mão seca e friccioná-la ou bater nela duas ou três vezes, etc. Neste momento ela vai atrair para si os fragmentos já mencionados. Podemos agora perceber visualmente como a esfera da nossa Terra mantém todos os animais e outros corpos em sua superfície e os leva consigo em seu movimento diário de vinte e quatro horas.

[...]

Seção 3.

Pode-se demonstrar claramente a presença da virtude expulsiva neste globo quando ele é removido da base mencionada acima e, sendo segurado na mão [pelo eixo], é friccionado ou batido na maneira já descrita. Então ele não apenas atrai, mas também repele de si pequenos corpos do tipo daqueles mencionados anteriormente (dependendo do clima local). Uma vez que [este globo] tenha tocado estes corpos, ele não os atrairá novamente até que eles tenham subsequentemente tocado algum outro corpo. Esta virtude pode ser claramente vista, em particular, em seu efeito sobre penas muito leves e macias, *a*, (pois elas caem para o solo muito mais lentamente do que outros pedacinhos e fragmentos [de outras substâncias]). Assim, quando as penas são impelidas para cima e permanecem na esfera de ação deste globo, elas podem flutuar por um tempo bem longo [acima da esfera de enxofre], e podem ser levadas [flutuando] por toda a sala com o globo para qualquer lugar.

[...]

A Experiência 4.4 é análoga a esta experiência do Guericke, mas feita com um canudo de plástico em vez do globo de enxofre. Contudo, deve-se enfatizar que o próprio Guericke não considerava a repulsão da pena ou, como dizia, a virtude expulsiva do globo, como sendo um fenômeno intrinsecamente elétrico.

Para ele a virtude expulsiva da esfera de enxofre era análoga à virtude expulsiva demonstrada algumas vezes pelo planeta Terra. Por este motivo não se considera atualmente que Guericke tenha descoberto ou reconhecido a repulsão elétrica.

Esta montagem de Guericke é considerada por alguns autores como sendo a primeira máquina elétrica da história. Ou seja, é um equipamento artificial com o qual se consegue produzir a eletrificação de corpos. Mas o próprio Guericke provavelmente não concordaria com isto. A bola de enxofre funcionava para ele como sendo uma réplica em miniatura da Terra. As várias “virtudes” exibidas por ela, tanto atrativas quanto repulsivas, seriam então uma exibição das virtudes análogas possuídas pela Terra. Portanto, para Guericke estas virtudes não seriam algo genuinamente elétrico. Uma análise detalhada deste aspecto encontra-se, por exemplo, nos trabalhos de Roller e Roller, Krafft e Heilbron.⁴

O primeiro instrumento construído intencionalmente para produzir a eletrificação de corpos é devido a Hauksbee (nasceu ao redor de 1666, falecendo em 1713), Figura 4.8.⁵ A manivela era movida manualmente e o globo de vidro girava rapidamente, sendo então atritado colocando-se a mão em contato com ele. Um instrumento como este é chamado de *máquina elétrica*, *máquina eletrostática*, *gerador triboelétrico*, ou de *gerador elétrico por atrito*.

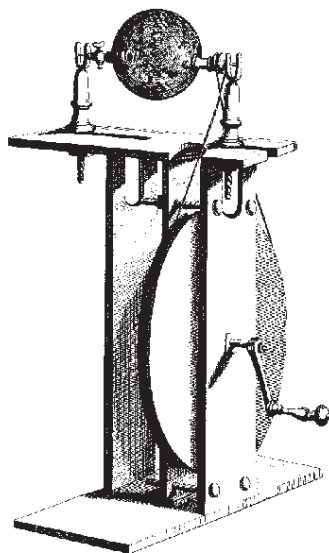


Figura 4.8: Máquina elétrica de Hauksbee.

Experiências análogas à de Guericke foram feitas por Gray e por Francis Hauksbee em 1708. Eles utilizaram uma penugem sendo atraída e depois re-

⁴[RR57, págs. 565-568], [Kra81] e [Hei99, págs. 215-216].

⁵[Hau09, Gravura VII], [RR57, págs. 565-568], [Hom67], [Hom81, págs. xiv-xv, 14, 42, 77 e 78n], [Que], [Hei81d] e [Hei99, págs. 230-234].

pelida por um tubo atritado de flint-glass (vidro composto de chumbo).⁶ Mais tarde veremos que ela teve um papel crucial em uma grande descoberta de Du Fay. O artigo de Gray de 1708 só foi publicado em 1954.⁷ Gray não cita o trabalho de Guericke, mas é possível que tenha tido conhecimento de seu livro, embora não haja certeza quanto a isto. Hauksbee viu o artigo original de Gray e teve um papel importante para impedir a publicação deste artigo.⁸ Hauksbee publicou experiências análogas de penugens flutuando sem mencionar os nomes de Gray e de Guericke.

Em seu artigo de 1708 Gray descreve doze experiências utilizando um tubo de vidro que atritava com a mão. Este tubo tinha 2 ou 3 cm de diâmetro, com um comprimento de 70 ou 80 cm. Citamos aqui apenas as quatro primeiras experiências:⁹

Primeira experiência. Sendo solta uma penugem dos dedos, ela veio até o [tubo de] vidro [atritado] distante mais de 30 polegadas [76 cm], algumas das fibras menores respondiam ao movimento da mão enquanto o vidro estava sendo atritado à distância de mais do que 50 polegadas [1,3 m]. [Uma ilustração desta experiência aparece nas Figuras 4.9 e 4.10.]

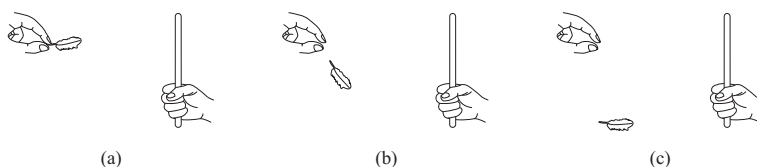


Figura 4.9: Solta-se uma penugem perto de um bastão de vidro não atritado e ela cai ao solo.

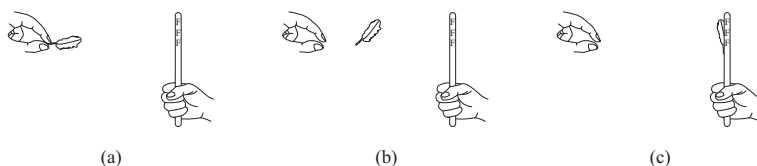


Figura 4.10: Experiência de Gray mostrando uma penugem sendo atraída por um vidro atritado.

Segunda experiência. Se, quando a pena tiver vindo ao vidro, ela for mantida [junto com o vidro] ao redor de 6 ou 8 polegadas [15 ou

⁶[Chi54], [Haub], [RR57, págs. 570 e 584-585], [Hom81, pág. 13] e [Hei99, págs. 235-236].

⁷[Chi54].

⁸[Hei81c] e [Hei99, pág. 236].

⁹[Chi54, págs. 34-35].

20 cm] distante de uma parede, de uma borda de mesa, do braço de uma cadeira, ou de algo semelhante, ela será atraída para este corpo, e dele para o vidro novamente, ocorrendo isto por 10 ou 15 vezes seguidas sem cessar; ela voa para um corpo a uma distância maior mas então não retorna tão frequentemente. [Uma ilustração desta experiência aparece na Figura 4.11.]

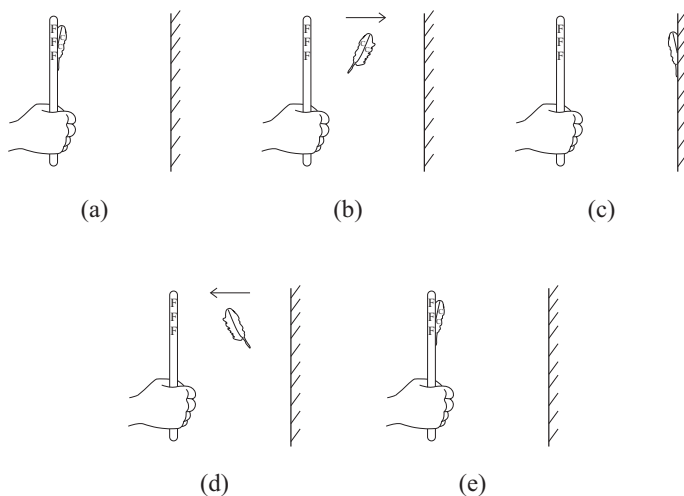


Figura 4.11: Experiência de Gray mostrando uma penugem oscilando entre um vidro atritado e uma parede.

Terceira experiência. Quando a pena está sobre o vidro e metade de suas fibras estão estendidas em direção a ele, com a outra [metade] divergindo dele em dois cones, [a parte das fibras] mais afastada do vidro é muito mais obtusa do que a outra [parte]; se, quando a pena estiver nesta posição, você apertar suas fibras entre seu dedão e seu dedo [afastando-a um pouco do vidro], elas voltarão [ao vidro] tão logo sejam soltas e se dividirão imediatamente no vidro e, como se tivessem preservado alguma memória do dano sofrido, dificilmente elas serão persuadidas a tocar seus dedos novamente, mas isto não ocorre sempre assim.

Quarta experiência. Quando a pena veio para o vidro e foi refletida por ele [isto é, depois que a penugem foi solta no ar, atraída pelo vidro atritado, tocou nele e então passou a ser repelida por ele], se você seguiu-a com o vidro [atritado] ela fugirá dele e não será possível de maneira alguma tocá-la [com a parte atritada do vidro], até que ela seja levada para próximo de uma parede na sala ou de algum outro corpo sólido pelo qual será atraída e então retornará livremente para o vidro [atritado], repetindo de novo suas reflexões como na

segunda experiência. Desta forma algumas vezes transportei a pena ao redor da sala à distância de 5 ou 6 polegadas [13 ou 15 cm] sem tocá-la e pude movê-la para cima e para baixo, de maneira inclinada ou horizontalmente, em uma linha [reta] ou em círculo, de acordo com o movimento do vidro [atritado]. E se, quando a pena estava flutuando no ar, eu atritasse o vidro, a pena se afastaria mais dele, contudo, responderia ao movimento da minha mão com um movimento vibratório que não pode ser explicado pelo movimento do ar.

4.3 Du Fay Reconhece a Repulsão Elétrica como um Fenômeno Real

As experiências que descrevemos nestas Seções trazem algo novo e extremamente importante. Até o momento só havíamos observado a atração ou a falta de atração entre um corpo atritado e várias substâncias leves. Agora estamos observando que existe também uma *repulsão* elétrica.

Embora algumas vezes a repulsão elétrica tivesse sido observada ao longo da história, ela era em geral interpretada como um efeito colateral. Às vezes o fenômeno observado era interpretado apenas como uma repulsão *aparente*. Citamos aqui algumas interpretações alternativas: (a) Algumas pessoas acreditavam que a aparente repulsão fosse de fato devida a um fluxo de ar que afastasse os corpos leves do âmbar atritado. (b) Ou então a aparente repulsão era interpretada como sendo de fato uma atração causada por outros corpos vizinhos. Ou seja, de acordo com esta interpretação, não era o âmbar atritado que tivesse passado a repelir o corpo leve, mas o corpo leve é que estaria sendo atraído por outros corpos vizinhos que tivessem ficado carregados de alguma maneira. Conseqüentemente, o corpo leve se afastaria do âmbar atritado, sendo que o âmbar atritado estaria atraindo este corpo leve mais fracamente do que os corpos vizinhos. (c) Uma outra interpretação que às vezes se dava à aparente repulsão era que o corpo era inicialmente atraído pelo âmbar, colidia com ele, sendo então refletido de volta para longe dele. Ou seja, teria havido um rebote ou uma colisão mecânica e não uma repulsão elétrica real.

O reconhecimento da repulsão como um fenômeno legítimo e característico das interações elétricas só ocorreu com a publicação dos trabalhos de Charles François de Cisternay Du Fay (1698-1739) em 1733 e 1734,¹⁰ Figura 4.12. Uma biografia muito bem escrita de Du Fay é a de Heilbron.¹¹ Ao dar prosseguimento aos trabalhos iniciais de Stephen Gray, Du Fay publicou alguns trabalhos notáveis contendo descobertas fundamentais relacionadas com a eletricidade.¹²

Citamos aqui as palavras do Du Fay mencionando como concluiu que a

¹⁰[Hei99, págs. 5 e 255-258].

¹¹[Hei81b].

¹²[DF33a], [DF33c], [DF33d], [DF33b], [DF] (com tradução para o português em [BC07]), [DF34a], [DF34b], [DF37b] e [DF37a].



Figura 4.12: Du Fay (1698-1739).

repulsão que observou era um fenômeno genuinamente elétrico.¹³ As ênfases em itálico são nossas. É interessante observar que o próprio Du Fay inicialmente não considerava a repulsão observada como sendo um fenômeno real, tendo mudado de opinião devido às evidências experimentais.

Sobre a Atração e Repulsão dos Corpos Elétricos.

Até hoje sempre consideramos a virtude elétrica de forma geral, e sobre esta palavra entende-se não apenas a virtude que os corpos elétricos possuem de atrair [corpos leves colocados perto deles, como uma penugem ou uma pequena folha de ouro], mas também a virtude de repelir os corpos que eles atraíram. Esta repulsão não é sempre constante, e ela está sujeita a variedades que me fizeram com que a examinasse com cuidado, e creio ter descoberto alguns princípios muito simples que ainda não haviam sido suspeitados, e que dão sentido a todas estas variedades, de maneira que não conheço até o momento nenhuma experiência que não esteja de acordo [com estes princípios] de forma muito natural.

Observei que os corpos leves somente são normalmente repelidos pelo tubo [de vidro eletrizado] quando se aproximam [destes corpos leves] quaisquer [outros] corpos de um volume um pouco considerável, e isto me fez pensar que estes últimos corpos [grandes] haviam se eletrizado pela aproximação do tubo e que, portanto, eles atraíram por sua vez a penugem, ou a folha de ouro, e que desta forma ele [o corpo leve] era sempre atraído, seja pelo tubo, seja pelos corpos vizinhos [grandes], *mas que não haveria jamais uma repulsão real.*

¹³[DF33b, págs. 457-458].

Uma experiência que o Sr. de Reaumur [René Antoine Ferchault de Réaumur, (1683-1757)] me indicou, se opôs a esta explicação; ela consiste em colocar na borda de uma carta um pequeno monte de pólvora sobre a escrita, aproxima-se deste monte um bastão de cera da Espanha eletrizada, e vemos muito claramente que ela expulsa para além da carta as partículas de pólvora, sem que se possa suspeitar que elas sejam atraídas por algum corpo vizinho.

Um outra experiência tão simples, e ainda mais sensível, *terminou de me provar que minha conjectura era falsa*. Se colocamos folhas de ouro sobre um cristal, ao aproximarmos o tubo [de vidro eletrizado] por baixo [do cristal], as folhas de ouro são expelidas para o alto sem recair sobre o cristal, e certamente não podemos explicar este movimento pela atração de algum corpo vizinho. A mesma coisa ocorre através da gaze colorida e dos outros corpos que deixam passar os escoamentos elétricos, de forma que não podemos duvidar que não exista uma repulsão real na ação dos corpos elétricos.

4.4 O Pêndulo Elétrico

Para observar alguns outros fenômenos elétricos importantes de maneira clara, precisamos de alguns instrumentos específicos. Vamos construir agora um *pêndulo elétrico*, também chamado de *pêndulo eletrostático*. A maneira mais simples é amarrando um fio de seda em um suporte horizontal, como um canudo plástico. O mais fácil é comprar um rolo de seda em lojas de material de costura. Também é possível utilizar um fio fino de náilon (poliamida sintética) ou um fio de poliéster. *É importante que este fio não seja de linho nem de algodão (não deve ser uma linha de costura, nem barbante)*. A ponta livre do fio é amarrada a um pedacinho de papel de caderno ou de papel de alumínio. Este papel pode ser um círculo com 1 ou 2 cm de diâmetro, um quadrado, um triângulo, etc. Por hora a forma do papel não é tão relevante, mas seu diâmetro ou dimensão máxima não deve passar de 2 cm. O papel não deve ser amassado e nem se deve utilizar fita adesiva para prendê-lo. A fita adesiva pode atrapalhar ou impedir a observação de alguns fenômenos descritos a seguir. O ideal é fazer um pequeno furo no papel com um alfinete e amarrá-lo ao fio de seda, Figura 4.13. Em vez disto, pode-se utilizar também um pingo de cola sobre uma parte saliente do papel, passando-se o fio sobre esta parte, que é então dobrada sobre a parte restante do papel. Em geral o papel de alumínio funciona melhor do que o papel de caderno na ponta do fio de seda, mas ambos dão bons resultados. Na Seção 6.5 apresentaremos as componentes fundamentais de um pêndulo elétrico como este, após ter realizado várias experiências com ele.

Uma outra maneira bem prática é utilizando canudos plásticos de refresco. Inicialmente faz-se um suporte para todo o sistema. Ele pode ser um pedaço de massa de modelar com um prego ou colchete atravessando-o. O prego ou colchete vão ficar dentro de um canudo, para deixá-lo na vertical. Para isto tem-se de escolher a espessura do prego ou o número do colchete tal que sejam

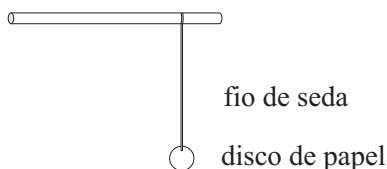


Figura 4.13: Maneira mais simples de fazer um pêndulo elétrico.

da mesma espessura que o canudo.

Outra alternativa muito prática é utilizar um copinho de plástico de café. Inicialmente faz-se um pequeno furo no fundo e atravessa-se as duas pernas de um colchete por ele. Coloca-se o copo com a boca para cima e despeja-se uma massa mole de gesso com água, ou de cimento branco com água, até a borda. Espera-se secar nesta posição e está pronto o suporte. Ele será utilizado com a boca do copo para baixo e o colchete ou prego para cima, Figura 4.14. Este último modelo é bem estável e durável. Este suporte será utilizado depois em outros instrumentos elétricos. É útil que sejam feitos vários destes suportes de uma única vez. Algumas experiências podem chegar a usar 10 suportes simultaneamente.

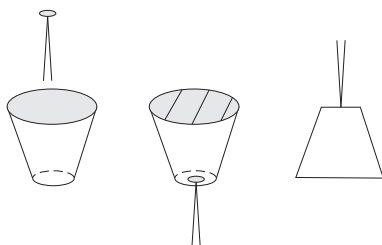


Figura 4.14: Suporte para o pêndulo elétrico feito de copinho de café, colchete e gesso.

Em seguida coloca-se um canudo dobrável no suporte tal que o canudo forme a letra L de cabeça para baixo. Outra alternativa é colocar um único canudo verticalmente no suporte. Depois coloca-se na parte superior do canudo uma das pernas de um colchete aberto em 90° , tal que a outra perna do colchete fique na horizontal. O ideal é até que ela fique inclinada um pouco acima da horizontal, para que o outro canudo não escorregue da perna do colchete. Feito isto coloca-se um segundo canudo na outra perna do colchete, tal que ele fique na horizontal ou inclinado com sua extremidade livre um pouco acima da extremidade que está presa no colchete.

Por último amarra-se na ponta livre horizontal do L de cabeça para baixo, ou na ponta livre do canudo que está na horizontal, o fio de seda que tem o disco de papel de alumínio em sua ponta. Com isto está pronto o pêndulo elétrico, Figura 4.15.

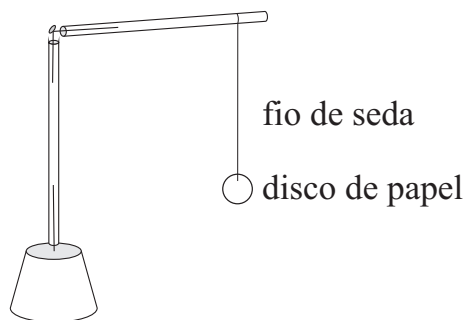


Figura 4.15: Pêndulo elétrico com suporte.

Experiência 4.5

Monta-se um pêndulo elétrico com um disco de papel de alumínio na ponta e deixa-se ele em repouso suspenso na vertical. Pega-se um plástico (canudo, régua, ...) que esteja eletricamente neutro, isto é, que não atraia pedacinhos de papel espalhados sobre a mesa, ver a Experiência 2.1, Figura 2.1. Aproxima-se este plástico lentamente do pêndulo e nada acontece. Isto é, o pêndulo continua parado na vertical.

Atrita-se agora um outro plástico com um guardanapo de papel, com um tecido ou no cabelo. Ele é aproximado lentamente do pêndulo. Observa-se que o disco de papel do pêndulo começa a se deslocar no sentido da região atritada do plástico. Por hora não se deve deixar o pêndulo tocar no plástico. Observa-se que o fio de seda do pêndulo fica inclinado em relação à vertical, com o disco de papel aproximando-se da parte atritada do canudo atritado, Figura 4.16.

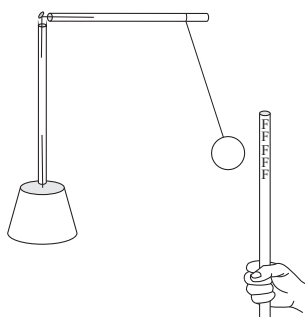


Figura 4.16: Plástico atritado atraindo o disco de papel de um pêndulo elétrico.

Esta experiência é análoga à Experiência 2.1, mostrando uma atração entre o canudo atritado e o pêndulo. Temos agora um terceiro critério para chamar um corpo de *eletricamente neutro*. O primeiro critério foi apresentado na Experiência 2.1, isto é, não atrair corpos leves. O segundo critério é o da Experiência 3.1, ou seja, não orientar um versório metálico ao chegar perto dele.

O terceiro critério é o de não atrair um pêndulo elétrico. Já um corpo *carregado* é aquele que atrai corpos leves, orienta versórios metálicos e atrai os discos de pêndulos elétricos.

Experiência 4.6

Pode-se fazer com que o pêndulo acompanhe o movimento do plástico atritado ao se aproximar e afastar lentamente o plástico atritado do disco de papel, não deixando que se toquem, Figura 4.17. Isto é, quando o plástico se aproxima do pêndulo, o disco desloca-se para o plástico. Ao afastar o plástico, o pêndulo volta à vertical. E assim sucessivamente.

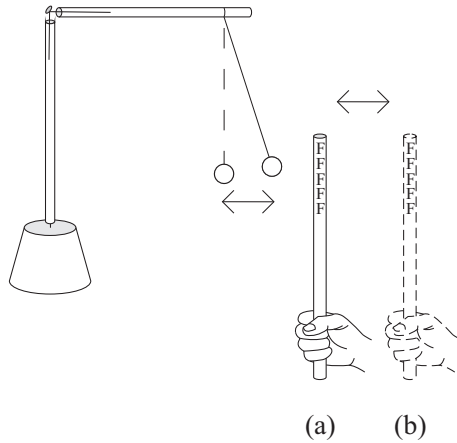


Figura 4.17: Pêndulo elétrico acompanhando o movimento de um plástico atritado. (a) Ao aproximar o canudo atritado, o disco de papel desloca-se no sentido do canudo. (b) Ao afastar o canudo, o pêndulo volta à vertical.

Experiência 4.7

Repete-se a Experiência 4.5. Mas agora se aproxima um pouco mais o plástico atritado do disco do pêndulo, até que se toquem. O corpo plástico pode ser um canudo, um pente ou uma régua. Observa-se que o pêndulo é inicialmente atraído e logo em seguida passa a ser repellido pelo plástico atritado! Entre a atração e a repulsão ocorre algo crucial, que é o *contato* entre o pêndulo e o plástico atritado. Pode-se tentar agora encostar no disco com o plástico atritado mas o que se observa é que o papel sempre foge do plástico atritado, Figura 4.18.

Algumas vezes o disco de papel do pêndulo não passa a ser repellido pelo plástico atritado imediatamente após o toque, mas fica grudado nele durante algum tempo. Nestes casos é possível observar a repulsão dando uns pequenos toques, petelecos ou batidas no plástico para que o papelzinho se desgrude dele, passando então a ser repellido pelo plástico. Em vez de se bater no plástico, pode-se também levantá-lo e abaixá-lo seguidamente, até que o papel se desgrude dele,

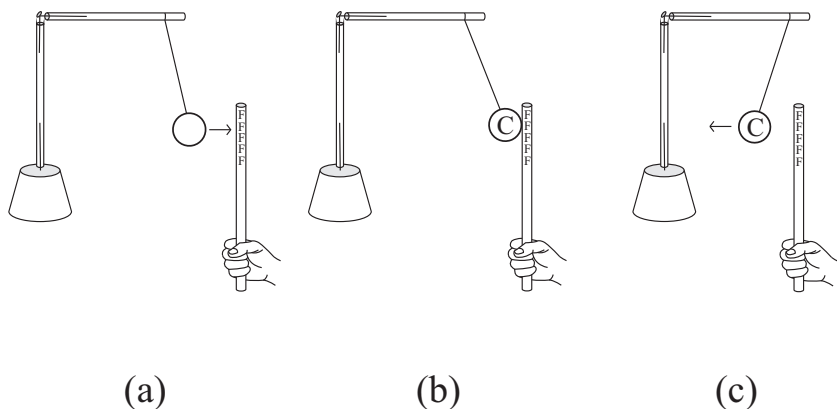


Figura 4.18: (a) O disco do pêndulo é atraído por um plástico atritado, (b) toca no plástico e (c) passa a ser repellido por ele.

passando então a ser repellido pelo plástico. Em alguns casos é necessário que o canudo atritado atraia 2 ou 3 vezes o disco do pêndulo, sempre deixando que se toquem em cada atração, até que finalmente o disco do pêndulo passe a ser repellido pelo canudo.

É possível que algumas das substâncias das Experiências 2.1, 2.3 e 2.4 tenham sido repelidas pelo pente atritado depois de tocarem nele. Mas neste caso elas caíram na Terra devido à atração gravitacional. E não é fácil distinguir a repulsão do papel pelo corpo plástico atritado depois que se tocaram, em relação à atração gravitacional causada pela Terra e atuando sobre o papel. A vantagem do pêndulo elétrico é que o fio de seda já equilibra a força gravitacional exercida pela Terra sobre o papel. Mesmo que o papel passe a ser repellido pelo plástico atritado depois do toque, ele não vai cair no chão devido ao fio que o suspende. Só sobram então as forças horizontais exercidas pelo plástico atritado, que agora passam a ser vistas facilmente devido à inclinação do pêndulo em relação à vertical.

De qualquer forma, se as Experiências 2.1, 2.3 e 2.4 forem novamente realizadas e observadas com cuidado, é possível que se consiga observar a repulsão que ocorre algumas vezes depois do toque entre os papeizinhos e o plástico atritado. Ou seja, pode-se distinguir esta repulsão em relação à simples queda gravitacional dos papeizinhos.

Experiência 4.8

Repete-se a Experiência 4.7. Depois que o pêndulo elétrico foi atraído pelo corpo plástico atritado, tocou nele e passou a ser repellido pelo plástico, afasta-se o plástico atritado. Agora aproxima-se lentamente do disco de papel de alumínio uma folha de papel, um espeto de madeira ou o dedo, sem deixar que o pêndulo toque na folha, no espeto ou no dedo. Observa-se que o pêndulo é atraído pelo papel, pelo espeto ou pelo dedo, Figura 4.19.

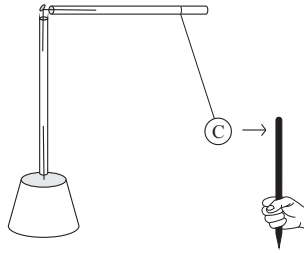


Figura 4.19: O pêndulo elétrico que estava sendo repelido por um canudo atritado depois de tocar nele, é agora atraído por um espeto de madeira neutro.

Como foi visto na Seção 3.5, isto indica que o pêndulo elétrico ficou carregado eletricamente na Experiência 4.7. Quando um plástico neutro havia ficado carregado eletricamente ao ser *friccionado*, estávamos representando isto pela letra *F*. Agora estamos observando que um disco de papel ou de papel de alumínio fica carregado simplesmente pelo *contato* com um plástico atritado. Vamos representar este processo de carregamento elétrico pela letra *C*. Este é o significado da letra que aparece no centro do disco de papel das Figuras 4.19 e 4.18.

Definições: Diz-se que na Experiência 4.7 o papel de alumínio do pêndulo *adquiriu uma carga elétrica devido ao toque ou contato com um outro corpo já carregado*, ou que ficou *carregado por contato, eletrizado por contato ou eletrificado por contato*. Isto é, que ele passou a ficar carregado eletricamente ao tocar no corpo plástico atritado, que já estava carregado eletricamente devido ao atrito. O processo é chamado de *carga por contato, transferência de cargas por contato, eletrização por contato ou eletrificação por contato*.

Em vez das palavras *contato* ou *toque*, às vezes são utilizadas expressões mais genéricas como *eletrificação pela comunicação* ou pela *transferência de cargas*. O motivo para isto é que nem sempre é necessário o contato físico entre o canudo atritado e o pequeno disco do pêndulo para que este último passe a adquirir uma carga elétrica. Quando o plástico atritado e o disco de papel estão muito próximos, algumas vezes ocorre uma descarga elétrica no ar, uma faísca. Nestes casos há uma comunicação ou transferência de cargas entre o canudo atritado e o disco de papel que estava inicialmente neutro. Depois desta transferência de cargas o disco passa a ser repelido pelo plástico atritado. Neste livro não trataremos destes fenômenos de descargas elétricas pelo ar.

4.5 O Aterramento Elétrico

Experiência 4.9

Para que se possa repetir a Experiência 4.8 com o mesmo pêndulo, é necessário que se encoste de leve o dedo no papel de alumínio, ver a Figura 4.20. Não se deve apertar nem amassar o papel de alumínio, basta que o lado do dedo

indicador toque de leve no papel de alumínio. Depois disso, ao se aproximar o dedo ou uma folha de papel do pêndulo elétrico, se observa que ele não se desloca, não sendo mais atraído pelo dedo como ocorria na Experiência 4.8.

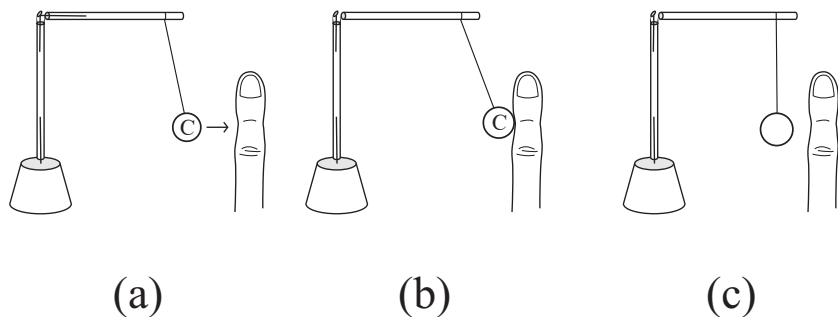


Figura 4.20: (a) O pêndulo elétrico carregado é atraído pelo dedo. (b) Ele se descarrega ao tocar no dedo. (c) Depois disto não é mais atraído nem repellido pelo dedo.

Definições: Diz-se que o papel de alumínio *perdeu sua carga elétrica pelo contato* com o dedo, ou que foi *descarregado pelo contato*, ficando *descarregado eletricamente* ou, simplesmente, *descarregado*. O processo é chamado de *descarga por contato ou por aterramento*. O processo também é chamado de *aterrar* ou de *aterramento elétrico*. A origem para estes nomes é que o corpo carregado está sendo descarregado pelo corpo humano, que está em contato com a Terra.

Em seguida, ao aproximar-se o corpo plástico atritado do pêndulo descarregado, vem que o pêndulo não é mais repellido como ocorria ao final da Experiência 4.7. O que se observa agora é o mesmo comportamento do início desta Experiência 4.7. Ou seja, o pêndulo elétrico é inicialmente atraído pelo plástico, toca nele e só então passa a ser novamente repellido por ele.

Sempre que tocamos com o dedo no papel de alumínio, podemos começar todo o procedimento novamente. Ou seja, o pêndulo volta ao estado inicial.

Vamos chamar o plástico atritado das Experiências 4.7 e 4.9 de corpo *A*. Já o disco de papel do pêndulo elétrico será chamado de corpo *B*. E a mão que toca no disco será chamada de corpo *C*. Foi Gray quem descobriu que um corpo *B*, carregado por contato com uma substância atritada *A*, se descarrega pelo contato com a mão *C*. Uma de suas descrições do aterramento elétrico encontra-se em seu trabalho publicado em 1731. Gray carregava por atrito um longo tubo de vidro e depois utilizava este tubo para eletrizar um outro corpo. Citamos aqui um trecho deste trabalho, nossa ênfase em itálico:¹⁴

[...] pois a partir de várias experiências parece que se qualquer outro corpo [*C*] *toca* aquele [corpo *B* eletrizado por contato com o corpo *A*] que atrai, sua atração cessa até que este corpo [*C*, que tocou o corpo eletrizado *B*] tenha sido removido, e o outro [corpo *B*, que estava

¹⁴[Grah, pág. 35].

inicialmente eletrizado e que foi descarregado pelo toque] tenha sido novamente excitado pelo tubo [de vidro *A* que era carregado pelo atrito].

Em 1733 Du Fay já utilizava este procedimento de descarga de forma sistemática.¹⁵ Ele carregava por atrito um tubo de vidro e depois utilizava o tubo para eletrizar uma bola de madeira. Citamos aqui um trecho deste trabalho:¹⁶

Além disso tinha o cuidado de tocar a bola [eletrizada] com a mão após cada experiência que havíamos feito com o tubo [isto é, após cada eletrização da bola utilizando o tubo de vidro que havia sido carregado por atrito], a fim de lhe retirar [da bola] toda a virtude [elétrica, ou seja, capacidade de atrair corpos leves colocados perto da bola] que ela pudesse ter conservado pela aproximação do tubo; com efeito, isto a roubava de toda sua eletricidade, assim como o mencionou o Sr. Gray; [...]

Experiência 4.10

Estas últimas experiências podem ser feitas de modo um pouco mais sistemático. Inicialmente se aproxima lentamente o dedo do papel de alumínio de um pêndulo elétrico descarregado. O pêndulo não se mexe. Depois se carrega um canudo por atrito e o canudo é aproximado do pêndulo. O papel de alumínio é atraído pelo canudo, toca nele e passa a ser repellido pelo canudo, como na Figura 4.18. Afastamos o canudo atritado e o pêndulo volta para a vertical.

Neste momento aproximamos lentamente o dedo do pêndulo, sem deixar que se toquem. Observa-se que o papel de alumínio é atraído pelo dedo, vindo em sua direção e ficando apontando para o dedo.

Se deixarmos que o papel de alumínio toque no dedo, o pêndulo volta imediatamente à posição vertical. Se agora aproximarmos lentamente o dedo do papel de alumínio, o pêndulo não se mexe, não sendo mais atraído pelo dedo. O pêndulo voltou então à sua situação inicial.

Pode-se então aproximar novamente o canudo carregado do pêndulo que todos os fenômenos anteriores se repetem.

4.6 O Pêndulo Elétrico de Gray

A descrição mais antiga que conhecemos do pêndulo elétrico foi dada por Gray em 1720. Ele realizou uma experiência análoga à Experiência 4.5, só que utilizando uma penugem em vez do papel de alumínio:¹⁷

Uma penugem foi presa à extremidade de um fio fino de seda não trabalhada e a outra extremidade [do fio foi presa] a uma vareta,

¹⁵[DF33d].

¹⁶[DF33d, pág. 247].

¹⁷[Grab].

que foi fixada a um suporte tal que ela [a vareta] pudesse ficar de pé sobre a mesa. Foi aproximado [deste instrumento] um pedaço de papel pardo que havia se tornado fortemente elétrico pelo método mencionado acima [isto é, o papel foi inicialmente aquecido junto ao fogo e depois atritado ao ser puxado entre os dedos]. Quando [o papel atritado] foi mantido próximo da pena, ela [a pena] veio em direção ao papel, e transportei-a com o mesmo [papel] até que ela ficou quase perpendicular à vareta. Então, levantando minha mão até que o papel fosse levado para [cima] além da pena, o fio esticado ficou de pé no ar, como se fosse um pedaço [rígido] de fio, embora a pena estivesse aproximadamente uma polegada [2,54 cm] distante do papel.

Ilustramos esta experiência na Figura 4.21.

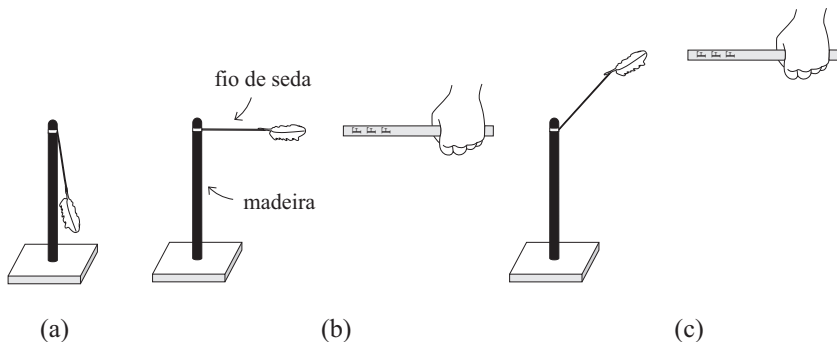


Figura 4.21: O pêndulo elétrico de Gray.

4.7 O Versório de Du Fay

Uma outra maneira interessante de se observar a repulsão é utilizando um tipo de versório proposto por Du Fay.¹⁸ No caso dele era um versório de vidro com uma esfera metálica oca em uma das pontas. Vamos utilizar aqui um versório análogo feito de plástico, como descrito na Seção 3.1. Ou seja, uma tira de plástico duro dobrada na forma de um perfil de chapéu de aba longa, com as duas pontas para baixo. No centro da tira espeta-se um alfinete com a ponta para baixo. A ponta do alfinete vai ficar apoiada sobre a cabeça de um prego fincado em uma rolha. O que caracteriza o versório de Du Fay é que uma das pontas do versório de plástico está envolvida por um pequeno pedaço de papel de alumínio. Caso o versório comece a tombar para este lado devido ao peso do papel de alumínio, pode-se adotar duas alternativas para voltar a equilibrar o versório na horizontal. A primeira é a de colar um pequeno pedaço de plástico

¹⁸[DF33b, págs. 473-474].

na outra ponta do versório. A segunda é a de cortar um pequeno pedaço da ponta do versório onde vai ser envolvido o papel de alumínio, antes de envolver esta ponta com o papel de alumínio. O importante é que no final o versório fique equilibrado na horizontal tendo em uma das pontas o papel de alumínio, Figura 4.22.

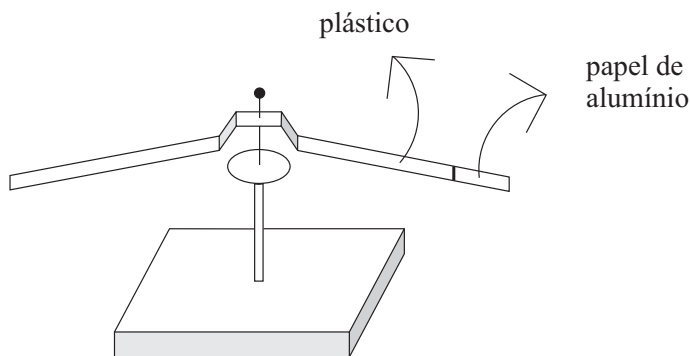


Figura 4.22: O versório de Du Fay é feito de plástico com um pedaço de papel de alumínio em uma das pontas.

Para se realizar as experiências com o versório de Du Fay deve-se inicialmente garantir que ele esteja neutro. Esta é a parte mais difícil, principalmente no que se refere ao plástico. Para isto encosta-se de leve o dedo no papel de alumínio para descarregá-lo. Em seguida coloca-se o dedo perto de várias partes do versório de plástico, sem tocá-lo. Caso o versório continue em repouso, sem se orientar em relação ao dedo, diz-se que ele está neutro. Caso contrário ele estará carregado. Às vezes a própria manipulação do versório durante sua construção ou durante a colocação do papel de alumínio em sua ponta já o carrega por atrito com a mão. Deve-se então esperar algum tempo para que ele descarregue, ou então passar de leve um guardanapo de papel umedecido com um pouco de água sobre o versório, aguardando depois que seque. Em seguida testa-se novamente se o plástico está descarregado aproximando o dedo do versório e verificando se ele não é mais orientado pelo dedo. Vamos supor aqui que ele esteja neutro antes da realização das experiências.

Experiência 4.11

Atrita-se um canudo de plástico no cabelo e o aproximamos lentamente da ponta de papel de alumínio do versório de Du Fay, sem deixar que se toquem. Observa-se que o versório gira até ter a ponta de papel de alumínio apontando para o canudo atritado, Figura 4.23. Pode-se fazer com que o versório acompanhe a posição ou o movimento do canudo atritado. Esta experiência é análoga à Experiência 3.1.

Experiência 4.12

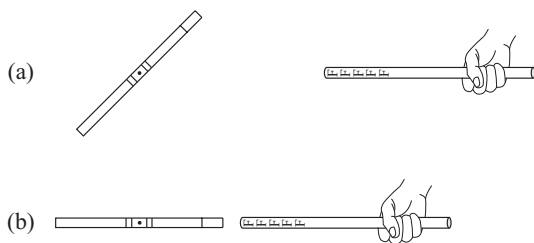


Figura 4.23: Papel de alumínio de um versório de Du Fay sendo atraído por um plástico atritado que se aproxima dele.

Repete-se a Experiência 4.11 mas agora aproximando mais o canudo atritado da ponta do versório de Du Fay que tem o papel de alumínio. Observa-se que a ponta de papel de alumínio é atraída pelo canudo, o toca e depois é repelida por ele, passando a apontar no sentido oposto ao canudo! Entre a atração e a repulsão ocorreu algo crucial, que foi o *toque* entre o papel de alumínio e o canudo atritado. Ao movimentarmos o canudo depois que houve este toque, observa-se que o papel de alumínio sempre foge dele, ficando o mais afastado possível do canudo, Figura 4.24.

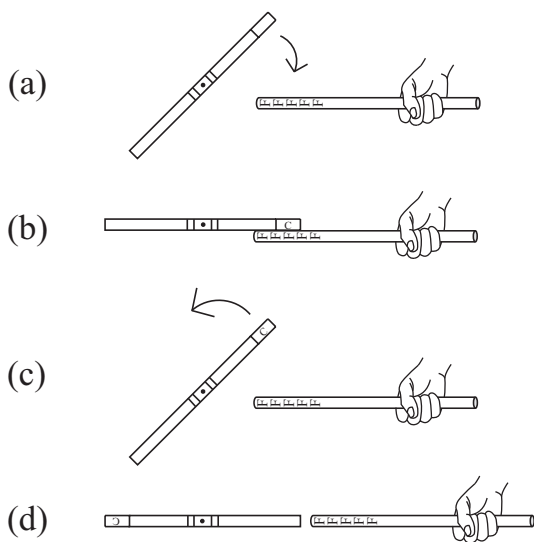


Figura 4.24: (a) O papel de alumínio de um versório de Du Fay sendo atraído por um plástico atritado. (b) Papel de alumínio tocando no canudo atritado. (c) Depois do contato, o papel de alumínio passa a ser repelido pelo plástico atritado. (d) Posição final de equilíbrio do papel de alumínio.

Nem sempre o papel de alumínio do versório passa a ser repelido depois que toca no canudo. Às vezes é necessário deslocar lentamente o canudo atritado

na direção vertical, para cima e para baixo, enquanto o papel de alumínio está grudado nele. Em um certo momento o papel de alumínio se solta do canudo. Depois de solto, o papel de alumínio passa a ser repelido pelo canudo atritado, afastando-se dele.

Experiência 4.13

Repete-se a Experiência 4.12. Depois que o papel de alumínio foi atraído pelo canudo atritado, tocou nele e passou a ser repelido pelo canudo, afastou-se o canudo atritado. Aproxima-se então lentamente o dedo ou uma folha de papel do papel de alumínio do versório de Du Fay, sem deixar que se toquem. Observa-se que o papel de alumínio é atraído pelo dedo ou pela folha de papel, apontando para eles e acompanhando seus movimentos, Figura 4.25!

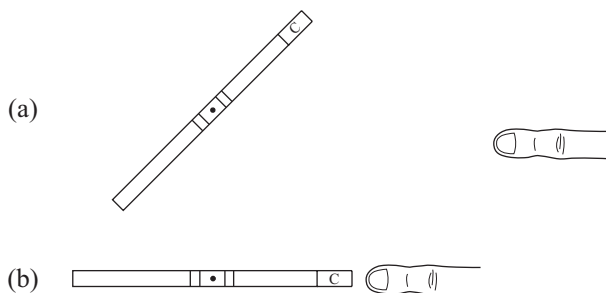


Figura 4.25: O papel de alumínio de um versório de Du Fay que havia encostado em um plástico atritado é agora atraído por um dedo que se aproxima dele.

Como visto na Seção 3.5, esta experiência mostra que o papel de alumínio do versório de Du Fay passou a ficar carregado eletricamente ao tocar no canudo atritado.

Lembramos aqui mais uma vez que tanto esta experiência quanto várias outras descritas neste livro podem não funcionar perfeitamente caso tenha chovido recentemente ou se o dia estiver muito úmido. A umidade do ar dificulta o acúmulo de cargas e, portanto, diminui a intensidade dos efeitos a serem observados. As experiências de eletrostática funcionam bem em dias secos.

Experiência 4.14

Para que se possa repetir todo este conjunto de experiências com o mesmo versório de Du Fay, é necessário que se encoste de leve o dedo no papel de alumínio. Em seguida a isto, ao se aproximar novamente o dedo ou uma folha de papel do versório, se observa que ele não se desloca. Ou seja, o papel de alumínio não é mais atraído pelo dedo, como ocorria na Experiência 4.13.

Ao aproximar-se agora o canudo atritado, observa-se o mesmo comportamento de antes realizado pelo papel de alumínio do versório de Du Fay. Ou seja, atração, contato e repulsão.

Sempre que tocamos com o dedo no papel de alumínio, podemos começar todo o procedimento novamente. Ou seja, o versório volta ao estado inicial.

4.8 O Mecanismo *ACR*

É a Du Fay em 1733 que se deve o reconhecimento do mecanismo fundamental de atração, contato e repulsão descrito na Experiência 4.10. Heilbron denominou de regularidade *ACR* a esta regra simples de atração, comunicação da eletricidade, e repulsão (isto é, Atrai, Comunica e Repele).¹⁹ Este comportamento regular foi considerado por Du Fay como uma grande descoberta. E isto com razão, já que a partir deste princípio é possível compreender uma grande quantidade de fenômenos elétricos.

Citamos aqui algumas palavras de Du Fay descrevendo seu princípio. Ele já havia feito algumas pesquisas anteriores e observou um comportamento relevante que distingue os corpos. Quando atritamos um corpo e o aproximamos de corpos leves, observa-se que alguns corpos leves são mais facilmente atraídos pelo corpo atritado do que outros corpos leves (supondo todos com o mesmo peso). Du Fay observou que os corpos leves que são mais facilmente atraídos são exatamente os corpos que adquirem uma menor carga elétrica ao serem atritados. Um exemplo disto foi visto nas Seções 2.4 e 2.7. Os pedaços de plástico e de seda, por exemplo, são bem menos atraídos pelo plástico atritado do que os pedaços de metal ou de papel. Por outro lado, é fácil eletrizar por atrito o plástico e a seda, mas muito difícil eletrizar por atrito o papel ou o metal.

De acordo com a nomenclatura da época, um corpo era chamado de elétrico se tinha a propriedade de atrair corpos leves ao ser atritado. Um corpo elétrico era considerado melhor ou pior dependendo se atraía com uma intensidade maior ou menor os corpos leves (após o corpo elétrico ter sido atritado). Vamos então às palavras de Du Fay:²⁰

Enfim, tendo refletido sobre o fato de que os corpos que são menos elétricos por eles mesmos eram mais vivamente atraídos [pelos corpos eletrizados] do que os outros [corpos que se eletrizam mais facilmente por atrito], imaginei que talvez os corpos elétricos atrairiam todos os corpos que não são [elétricos, isto é, imaginou que os corpos eletrizados por atrito atrairiam todos os corpos que não se consegue eletrizar pelo atrito], e repeliriam todos os corpos que se tornam [eletrizados] pela sua aproximação [isto é, que se tornam eletrizados pela aproximação ou contato com o corpo que havia sido eletrizado pelo atrito], e pela comunicação da virtude [elétrica].

[...]

Du Fay descreve então experiências que realizou análogas às de Guericke, Gray e Hauksbee, ver a Experiência 4.4. Ou seja, de manter flutuando no ar um pedaço de folha de ouro que foi solto sobre um tubo de vidro atritado. A folha de ouro foi inicialmente atraída pelo tubo atritado, tocou nele e depois passou a ser repelida pelo tubo, podendo ser mantida flutuando acima dele. Depois prossegue, nossa ênfase em itálico:²¹

¹⁹[Hei99, págs. 5 e 255-258].

²⁰[DF33b, pág. 458].

²¹[DF33b, págs. 459-460].

A explicação de todos estes fatos é bem simples, ao supor o *princípio* que acabo de mencionar; pois, na primeira experiência, quando se solta a folha [de ouro] sobre o tubo [de vidro eletrizado], ele atrai fortemente esta folha que não é elétrica de forma alguma, mas depois que ela tenha tocado no tubo, ou que ela tenha simplesmente se aproximado dele, ela própria se torna elétrica e, conseqüentemente, ela é repelida por ele [pelo vidro atritado], e se mantém sempre afastada [do tubo], até que o pequeno turbilhão elétrico que ela tenha adquirido seja dissipado, ou ao menos consideravelmente diminuído; não sendo então mais repelida, ela recai sobre o tubo, onde ela reobtem um novo turbilhão [uma nova carga elétrica] e, conseqüentemente, novas forças para evitar o tubo, [processo este] que continua enquanto o tubo conserva sua virtude [elétrica].

Em outro trabalho ele descreveu este novo *princípio* da seguinte forma:²²

Sexto, realizando o Experimento relatado por *Otto de Gueric* na sua Coleção de Experimentos de *Spatio Vácuo* [1672], que consiste em eletrizar uma Bola de Enxofre [pelo atrito] para repelir uma Pena, percebi que o mesmo efeito foi produzido não somente pelo Tubo [de vidro atritado], mas por todos os corpos elétricos [isto é, por todos os corpos que são carregados eletricamente pelo atrito]. Descobri um Princípio muito simples, que explica grande parte das irregularidades e dos Caprichos, se é que posso usar este Termo, que parecem acompanhar a maioria dos Experimentos em Eletricidade. Este princípio é: Corpos Elétricos atraem todos aqueles que não estão desta forma,²³ e os repelem assim que eles tornam-se elétricos, pela Proximidade ou pelo Contato com o Corpo Elétrico. Desta forma, a Lâmina de Ouro é primeiro atraída pelo Tubo [de vidro atritado], adquire Eletricidade por aproximar-se dele e, conseqüentemente, é imediatamente repelida. A lâmina não é atraída novamente enquanto reter a Qualidade elétrica. Mas, se enquanto ela estiver suspensa no Ar, eventualmente tocar em algum outro Corpo, ela imediatamente perde sua Eletricidade e é atraída novamente pelo Tubo, que, após dar a ela uma nova Eletricidade, a repele pela segunda vez. Isto ocorre enquanto o Tubo mantiver sua Eletricidade. Aplicando este Princípio em vários Experimentos sobre Eletricidade fiquei surpreso com o Número de fatos obscuros e confusos que clareou.

Experiência 4.15

Podemos ver o pêndulo elétrico oscilando ao fazer uma experiência curiosa. Colocamos a mão esquerda com seus quatro dedos ao lado do disco de papel ou

²²[DF, págs. 262-263] e [BC07].

²³[Outra maneira de descrever este princípio: os corpos elétricos atraem todos os corpos que não são elétricos. Isto é, os corpos eletrizados pelo atrito atraem todos os corpos que não podem ser carregados pelo atrito.]

de papel de alumínio do pêndulo. A mão deve ficar próxima do disco, mas sem tocá-lo. A mão vai ficar sempre parada nesta posição durante toda a experiência. Atramos agora um canudo de plástico e o aproximamos lentamente do papel de alumínio. Ele deve ficar parado nesta posição próxima ao pêndulo durante toda a experiência.

Observa-se que o pêndulo é inicialmente atraído pelo canudo atritado, toca nele e passa a ser repellido pelo canudo. Depois disto o pêndulo desloca-se no sentido da mão, toca nela e então passa a ser atraído novamente pelo canudo. Todo o processo se repete por algumas oscilações rápidas do papel de alumínio que toca alternadamente no canudo atritado e na mão que está do outro lado. Estas oscilações podem ter seu número ampliado se durante as idas e vindas do pêndulo formos girando o canudo ao redor de seu eixo, ou se formos movendo o canudo ao longo de seu comprimento durante as oscilações, Figura 4.26.

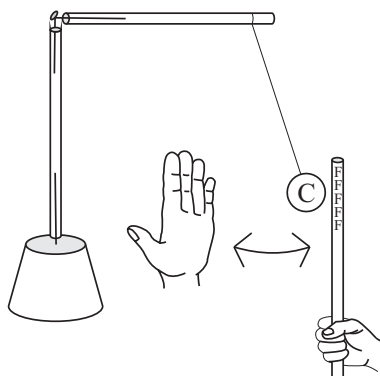


Figura 4.26: Pêndulo oscilando entre um plástico atritado e a mão, tocando alternadamente em cada um.

Pode-se compreender e descrever o que está ocorrendo nesta experiência utilizando o mecanismo *ACR*. Esta experiência é análoga à penugem flutuante de Gray oscilando no ar entre seu tubo de vidro atritado e um corpo sólido como uma parede ou a quina de uma mesa, ver a Seção 4.1.

Experiência 4.16

Agora colocamos dois pêndulos elétricos feitos de círculos de alumínio lado a lado, iguais ao pêndulo da Experiência 4.7. Estando os pêndulos neutros vem que eles ficam verticais. Isto pode ser garantido tocando com o dedo de leve nos dois papéis de alumínio. Em vez de trabalhar com dois pêndulos separados, podemos também dependurar os dois fios de seda lado a lado em um mesmo suporte, no mesmo canudo horizontal por exemplo, com os papéis de alumínio nas pontas dos dois fios de seda se tocando, tal como na Experiência 4.1.

Atramos um canudo de plástico e o aproximamos de cada um dos pêndulos, até que tenham tocado o canudo e tenham passado a ser repellidos pelo canudo. Agora retiramos o canudo atritado para longe e aproximamos os dois pêndulos

que foram carregados por contato. Observa-se que eles se repelem, ficando um pouco afastados lateralmente um do outro, com os fios de seda formando um ângulo entre si diferente de zero, Figura 4.27.

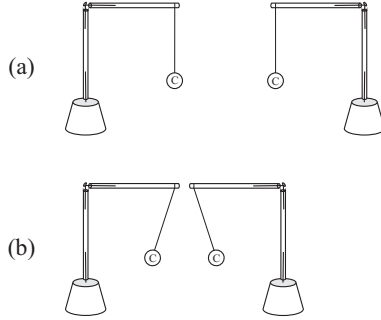


Figura 4.27: (a) Dois pêndulos carregados pendem verticalmente quando estão afastados entre si. (b) Dois pêndulos carregados se repelem quando se aproximam.

Às vezes é necessário usar um fio de seda bem fino para que se possa observar este afastamento lateral, sendo útil então a utilização de fios de uma meia-calça feminina. Caso os fios sejam muito densos ou pesados, isto pode impedir que se perceba este afastamento lateral. Quanto menor for o comprimento do fio, maior será o ângulo de afastamento para uma mesma distância final entre os discos de papel. Logo, é melhor trabalhar com fios curtos.

Ou seja, estamos observando a repulsão entre dois pêndulos que foram carregados igualmente pelo contato com um mesmo corpo eletrizado.

Esta experiência ilustra também a ação e reação entre corpos eletrizados, tema discutido anteriormente na Seção 3.5.

Experiência 4.17

Uma experiência análoga pode ser feita amassando duas bolinhas de papel de alumínio, feitas com quadrados ou círculos tendo 2 ou 3 cm de lado ou de diâmetro, na ponta de dois fios de seda ou de náilon com mesmo comprimento dependurados na forma de pêndulos. As bolinhas de alumínio são então carregadas por contato, aproximando de cada uma delas um corpo plástico atritado até que se toquem e passem a ser repelidas. Ao afastar o corpo plástico e aproximar os dois pêndulos entre si, observa-se que eles se repelem, ficando um pouco afastados lateralmente. Quanto menor for o comprimento do fio, maior será este afastamento.

4.9 A Linha Pendular de Gray

Além do pêndulo elétrico pode-se construir um outro instrumento chamado de “linha pendular.” Este instrumento foi construído intencionalmente por Stephen

Gray em 1729 e chamado por ele de *a pendulous thread*. Gray o utilizava para testar se os corpos estavam ou não carregados eletricamente.²⁴

Ele é simplesmente uma linha fina de linho ou de algodão presa a uma vareta de madeira, Figura 4.28. Ao contrário do pêndulo elétrico que utilizava um fio de seda ou de náilon, agora é importante que o fio seja de algodão ou de linho. A vareta de madeira é segurada com a mão e mantida na horizontal.

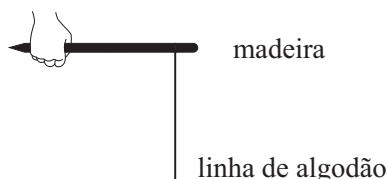


Figura 4.28: Linha pendular de Gray.

Experiência 4.18

Aproxima-se um plástico neutro de uma linha pendular e observa-se que nada acontece com ela, que continua na vertical. Aproxima-se agora um plástico atritado de uma linha pendular e observa-se que a linha se inclina em direção a ele, Figura 4.29.

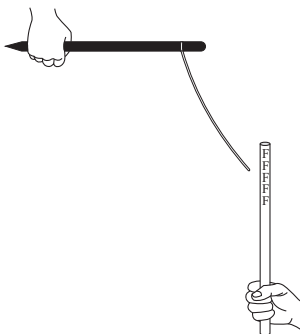


Figura 4.29: Linha pendular sendo atraída por um plástico carregado.

Esta é a principal função da linha pendular. Ou seja, indicar se um corpo está ou não carregado. A linha pendular de Gray era apenas uma linha vertical presa na sua parte superior a um suporte, com a parte inferior da linha livre para se deslocar para qualquer lado. Nestes casos a linha era provavelmente de algodão ou de linho, sem ter nenhuma pena ou qualquer outro corpo na ponta. Para testar se os corpos estavam ou não carregados eletricamente, ele colocava a linha pendular próxima a um corpo. Caso a linha pendular fosse atraída pelo corpo, inclinando-se no sentido do corpo, isto indicava que o corpo

²⁴[Grad], [Graf] e [Grai].

estava eletrizado. E ele mencionou explicitamente que um instrumento como este era mais sensível para detectar se um corpo estava ou não carregado, do que a capacidade deste corpo de atrair corpos leves.²⁵

A melhor maneira de observar estas atrações é a de manter o corpo que está atraindo em uma mão e na outra mão uma linha branca fina presa à extremidade de uma vareta; desta maneira são percebidos graus bem menores de atração do que utilizando [pequenas] folhas de latão.

Experiência 4.19

Deixa-se agora a linha pendular tocar no plástico atritado. O que se observa é que ela fica grudada nele, Figura 4.30.

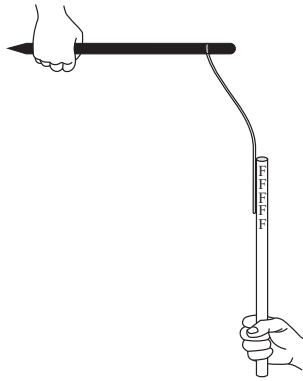


Figura 4.30: A linha pendular fica grudada em um plástico atritado e não é repelida por ele após o contato.

Isto é diferente do que ocorria na Experiência 4.7, já que o pêndulo elétrico passava a ser repelido pelo plástico atritado depois do contato. Ou seja, o pêndulo elétrico e a linha pendular são instrumentos diferentes, que apresentam comportamentos distintos em situações parecidas. A linha pendular não é simplesmente um pêndulo elétrico sem o disco de papel.

4.10 Mapeamento da Força Elétrica

Pode-se utilizar um pêndulo elétrico adaptado para fazer um mapeamento da força elétrica, em analogia ao que foi feito com o versório na Seção 3.4. Para isto é necessário construir um indicador de força elétrica. Este nada mais é do que um pêndulo elétrico no qual se substitui o disco de papel de alumínio por uma pequena seta feita de papel, de papel de alumínio ou de cartolina. A seta deve ficar suspensa na horizontal por um fio de seda ou de náilon. Seu comprimento

²⁵[Graf, pág. 289].

pode ser de 2 a 5 cm, a espessura vertical de seu corpo pode ser de 0,2 a 0,5 cm, sendo a espessura vertical máxima da seta da ordem de 0,5 a 0,7 cm. Estas são apenas dimensões aproximadas, não sendo tão essenciais assim.

Uma maneira interessante de fazer e prender a seta utiliza um canudo plástico.²⁶ A seta de cartolina pode ter inicialmente de 4 a 6 cm de comprimento, com a largura de seu corpo sendo de 0,2 a 0,5 cm, sendo a largura da seta de 0,5 a 0,7 cm, por exemplo. Corta-se um canudo de plástico tal que fique com 3 a 5 cm de comprimento. Passa-se cola em um dos lados da parte traseira da seta, coloca-se o canudo e a ponta inferior do fio de seda sobre a cola, e dobra-se a parte com cola da seta ao redor do canudo e do fio de seda, prendendo todo o conjunto. Caso a seta esteja apontando para cima devido ao peso do canudo, pode-se cortar a ponta do canudo para que a seta fique horizontal quando suspensa pelo fio de seda, que será amarrado em um suporte horizontal, o pêndulo elétrico. O ideal é que sejam feitos vários destes pêndulos indicadores da força elétrica, Figura 4.31.

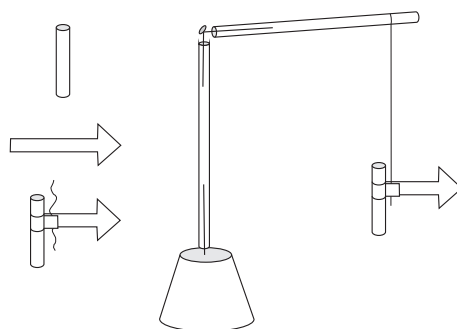


Figura 4.31: Pêndulo elétrico com seta para indicar o sentido da força elétrica.

Experiência 4.20

Feito isto repete-se o procedimento da Experiência 4.5. Isto é, atrita-se um canudo de plástico e ele é colocado verticalmente em um suporte apropriado. Em seguida, ele é aproximado lentamente do pêndulo, sem deixar a seta tocar o canudo. A parte atritada do canudo deve estar na mesma altura que a seta. Observa-se que o pêndulo é atraído pelo plástico atritado, ficando inclinado no sentido do plástico. Além disso, a seta fica apontando para o canudo atritado, em qualquer posição que seja colocada ao redor do canudo. Isto mostra que a força elétrica exercida pelo canudo atritado aponta para ele, como já havia sido visto na Experiência 3.4.

Experiência 4.21

Repete-se agora a Experiência 4.20, só que desta vez deixando a seta tocar no canudo atritado. O que se observa é que, após o contato, a seta passa a

²⁶[FM91].

ser repelida pelo canudo, afastando-se dele. Além disso, a seta passa a apontar radialmente para fora do canudo, Figura 4.32.

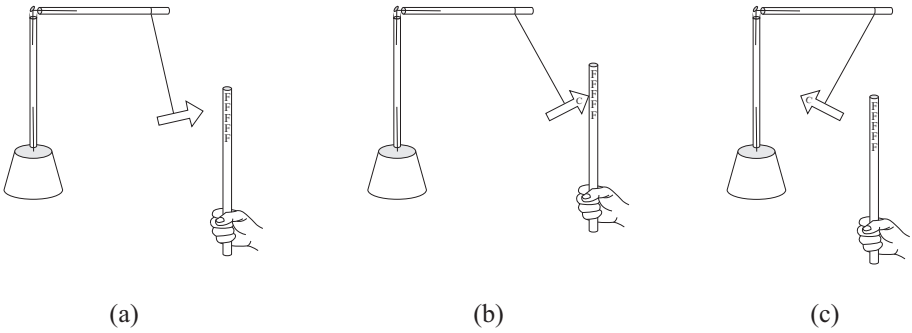


Figura 4.32: (a) Ao aproximar um plástico atritado do pêndulo, a seta passa a apontar para ele, além de ser atraída. (b) Quando se aproximam muito, ocorre o contato. (c) Após o contato, a seta passa a ser repelida por ele. Além disso, a seta passa agora a apontar no sentido oposto ao plástico atritado.

Experiência 4.22

Agora utilizamos vários pêndulos com setas colocados ao redor de um canudo atritado. Inicialmente fazemos como na Experiência 4.20, ou seja, tal que as setas não cheguem a tocar no canudo. Observa-se então que todas elas apontarão para o plástico atritado, Figura 4.33. Agora deixamos que as setas se aproximem e toquem na parte atritada de um dos plásticos. Observa-se que depois do contato todas elas apontam radialmente para fora, afastando-se do plástico, Figura 4.33.

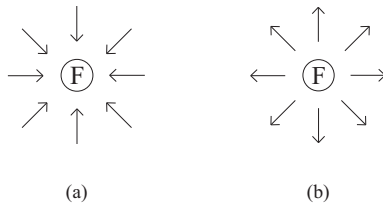


Figura 4.33: (a) As setas que não tocam no plástico atritado são atraídas por ele, além de apontarem para o plástico atritado. (b) Já as que entraram em contato com a parte atritada do plástico passam a ser repelidas por ele, além de apontarem em sentido oposto a ele.

A diferença principal das Experiências 4.20, 4.21 e 4.22 em relação à Experiência 3.4 é que agora as setas indicam não apenas a direção da força (neste caso uma direção radial), mas também o sentido da força. Isto é, se a força é atrativa, apontando para o corpo eletrizado, ou repulsiva, apontando para fora do corpo eletrizado.

Experiência 4.23

A mesma experiência pode ser repetida colocando o canudo atritado na horizontal e atritando-o em todo o seu comprimento. As setas que não tocaram no plástico são atraídas por ele, já as que entraram em contato passam a ser repelidas por ele, Figura 4.34.

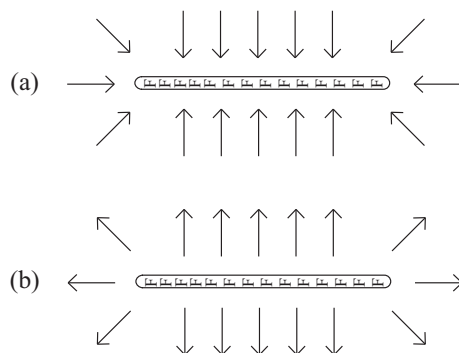


Figura 4.34: (a) As setas que não tocaram no plástico atritado são atraídas por ele. (b) Já as que entraram em contato com a parte atritada do plástico passam a ser repelidas por ele.

Experiência 4.24

Atritam-se dois canudos ao longo de seus comprimentos com um mesmo material, como um guardanapo de papel, por exemplo. Estes canudos são colocados verticalmente em dois suportes apropriados. Eles são então aproximados lentamente do pêndulo, sem deixar que a seta os toque. Observa-se que ela é atraída pelos dois canudos, inclinando-se em relação a eles. Além disso, ela se orienta em uma direção intermediária, apontando para uma região entre os canudos. Ela só aponta para os dois canudos quando o pêndulo está alinhado com eles. Ou seja, o sentido indicado pela seta é devido à soma vetorial dos torques elétricos exercidos pelos dois canudos atritados. Isto é visto mais facilmente utilizando vários pêndulos com setas, Figura 4.35 (a). Esta experiência é análoga à Experiência 3.5.

Repete-se agora esta experiência, só que desta vez deixando a seta tocar em um dos canudos atritados. Observa-se que agora a seta é repelida pelos canudos, afastando-se deles. Além disso, ela se orienta em uma direção intermediária, apontando para longe dos canudos. Isto é visto mais facilmente utilizando-se vários pêndulos com setas e deixando que todas as setas toquem em um dos canudos atritados, Figura 4.35 (b).

Estas experiências indicam o caráter vetorial das forças elétricas, sejam elas de atração ou de repulsão. Elas também indicam o caráter vetorial dos torques elétricos. A vantagem destes mapeamentos com pêndulos de setas em relação aos mapeamentos com os versórios metálicos é que estes últimos mapeamentos

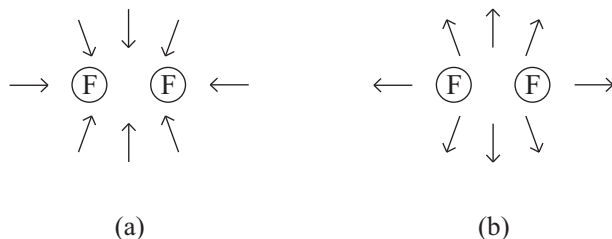


Figura 4.35: (a) Dois plásticos atritados atraindo setas que não tocam neles. (b) Plásticos atritados repelindo as setas que tocam neles.

indicam não apenas as direções das forças mas também seus sentidos. Isto é, se elas são de atração (setas apontando para os plásticos atritados) ou de repulsão (setas apontando em sentidos opostos aos plásticos atritados).

Experiência 4.25

O mesmo efeito pode ser obtido fazendo experiências com vários versórios de Du Fay, em vez de utilizar vários versórios metálicos. Atritosamos um plástico (canudo) e colocamos a parte atritada no mesmo plano dos versórios. Aproximamos o plástico de vários versórios, sem deixar que eles toquem no plástico. Os versórios começam a girar. Aguarda-se que eles atinjam o equilíbrio, ou seja, que parem de girar. Observa-se que as pernas com papel de alumínio dos versórios apontam para o canudo, Figura 4.36 (a).

Agora deixamos que o papel de alumínio de cada um dos versórios toque na parte atritada do plástico e passe a ser repellido por ele. Os versórios começam a girar com as partes com papel de alumínio se afastando do plástico. Aguarda-se que eles atinjam o equilíbrio. Observa-se que as pernas com papel de alumínio dos versórios apontam em sentidos contrários aos anteriores. Isto é, apontam para fora do canudo, Figura 4.36 (b).

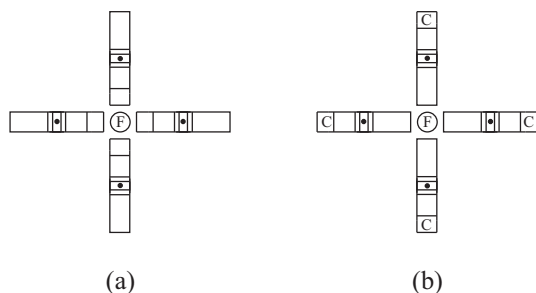


Figura 4.36: (a) Os papéis de alumínio dos versórios de Du Fay são atraídos por um plástico atritado antes de tocarem nele. (b) Depois do contato, passam a ser repellidos pelo plástico carregado.

Com os versórios de Du Fay podem ser obtidos também mapeamentos análogos aos das Experiências 4.23 e 4.24.

4.11 Hauksbee e o Mapeamento da Força Elétrica

Provavelmente o primeiro a fazer mapeamentos da força elétrica tenha sido Hauksbee em 1706.²⁷ Ele utilizou a máquina elétrica descrita na Seção 4.2, Figura 4.8. Substituiu o globo de vidro por um cilindro de vidro apoiado na horizontal ou na vertical e que podia girar ao redor de seu eixo. O vidro era girado rapidamente, sendo então atritado contra um papel ou contra sua mão raspando nele. Vamos à descrição da sua experiência:

Uma continuação das experiências sobre o atrito do vidro.

Obtive um vidro aproximadamente cilíndrico, tendo comprimento e diâmetro ao redor de sete polegadas [18 cm] cada um, cujo movimento [rotatório ao redor do eixo de simetria] foi fornecido por uma máquina que tinha um novo dispositivo; seu eixo permanecendo paralelo ao horizonte, o qual nas experiências feitas anteriormente, estava diametralmente oposto a ele. [...]

Agora o que tenho além disto a adicionar, ocorreu ao observar que os corpos leves sempre se aproximavam de qualquer parte do cilindro friccionado, sendo aparentemente igualmente atraídos, ou [parecendo] gravitar. Assim obtive um fio semi-circular, o qual podia prender a uma distância constante [do eixo do cilindro], envolvendo a superfície superior do vidro a 4 ou 5 polegadas dele [10 ou 13 cm]. Este fio tinha uma corda de saco enrolada nele, por meio da qual podia facilmente dependurar as linhas [de linho, de algodão ou de lã] a distâncias aproximadamente iguais [entre si]; as extremidades inferiores das linhas chegavam a menos de uma polegada [2,54 cm] do vidro, quando mantidas aproximando-se de seu centro, mas apareciam, quando livres, como na Figura 1 [da Figura 4.37].

E quando o cilindro girava rapidamente ao redor de seu eixo, estas linhas ficavam como na Figura 2 devido à agitação do ar [isto é, devido ao vento produzido pela rotação do cilindro não atritado]. Mas quando minha mão era aplicada na parte inferior do vidro [em rotação, carregando eletricamente o vidro por atrito], as linhas representariam então a forma da Figura 3. E pareciam gravitar de todas as partes, ou eram atraídas em linha reta ao centro do corpo em movimento [em direção ao cilindro girante], não sofrendo inconveniência ou desordem de posição devidas ao vento ocasionado pela rapidez do movimento; e podia alterando [a posição] do atrito [para

²⁷[Haua].

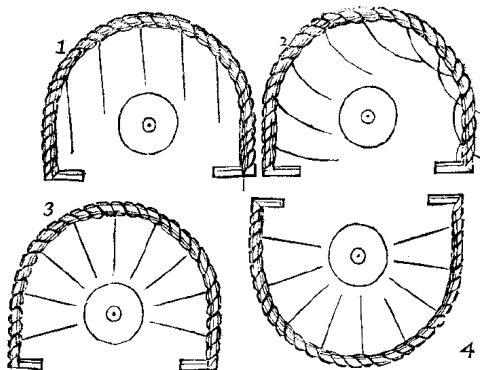


Figura 4.37: Mapeamento da força elétrica realizado por Hauksbee. Vista frontal do cilindro de vidro horizontal mostrando as posições das linhas de linho ou de algodão quando o cilindro está: (1) parado e não eletrizado; (2) girando e não eletrizado, com as correntes de ar ao seu redor levando todas as linhas para o mesmo lado; (3) e (4), girando e eletrizado. Nestes dois últimos casos, apesar da presença das correntes de ar, cada linha fica esticada apontando para o eixo do cilindro.

mais perto de uma ou de outra extremidade do vidro], fazer com que apontassem em direção a qualquer extremidade do cilindro; embora ainda apontando para seu eixo. E se o fio [semi-circular] com as linhas for revertido, como experimentei desde então, isto é, ficando ao redor da parte inferior do cilindro, assim como antes estava ao redor da parte superior, ele respondia exatamente como o outro; as linhas apontando para seu eixo: Ver a quarta Figura [Figura 4.37]. Da mesma forma dei um movimento [giratório ao redor do eixo] ao mesmo vidro em uma posição perpendicular [isto é, com o eixo do cilindro na vertical], por meio do qual tinha a oportunidade de colocar um fio horizontalmente na forma de um aro, tendo os fios como antes [caindo verticalmente do aro circular], e deixando apenas uma pequena parte [do vidro] exposta para o toque de meus dedos entre eles. Mesmo neste caso quando havia o movimento [giratório] e o atrito dado ao cilindro [raspando nos dedos], as linhas se elevaram de suas posições dependuradas, fazendo ao redor [do cilindro vertical] um plano horizontal, direcionando suas extremidades livres para o eixo [do cilindro] como na outra [experiência]. Está além do meu campo de trabalho determinar o quanto esta experiência pode servir para explicar a natureza da eletricidade, do magnetismo, ou da gravitação dos corpos; mas com toda humildade submeto este trabalho aos eruditos Senhores desta ilustre Sociedade que já lidaram com estes assuntos.

Capítulo 5

Cargas Positivas e Negativas

5.1 Existe Só Um Tipo de Carga?

Vamos agora fazer algumas experiências análogas à Experiência 4.7. Instrumentos a serem utilizados: Dois pêndulos elétricos chamados de *I* e de *II*, além de um versório metálico. Na Figura 5.1 mostramos como serão representados nas próximas experiências os seguintes materiais: Dois canudos plásticos, duas régua de acrílico, dois copos de vidro, duas meias-calças de seda, e dois panos feitos de fios de acrílico. Em vez de duas meias-calças de seda, podem ser usados também dois tecidos de poliamida sintética. Na Figura 5.1 e nas próximas experiências vamos representar uma destas meias-calças de seda ou um destes tecidos de poliamida apenas como uma “meia de seda”

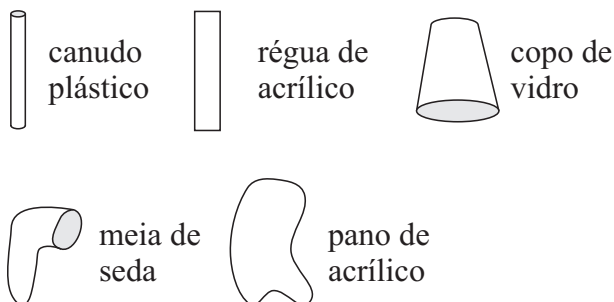


Figura 5.1: Materiais utilizados nas próximas experiências.

Os novos ditos de “lã” que são vendidos nas lojas hoje em dia são na verdade compostos em sua maioria de 100% de fios de acrílico sintético. Vamos supor então que estamos usando um pano ou blusa feitos com estes fios de acrílico, chamado aqui de pano de acrílico. Em relação às meias-calças, é im-

portante que elas sejam realmente de seda, ou então que se utilize algum tecido que seja feito de poliamida sintética. Nas próximas figuras esta meia-calça ou este tecido será representado como a “meia de seda” da Figura 5.1.

Antes de se começar cada uma das experiências deve-se tocar de leve com o dedo no versório e no papel de alumínio de cada pêndulo, para descarregá-los. Isto deve ser repetido antes de se aproximar cada um dos corpos atritados dos pêndulos. O versório servirá para testar se os corpos estão neutros ou carregados. Um canudo, um copo, uma meia e uma régua devem estar neutros, sem afetar o versório ao se aproximarem dele, não sendo atritados durante toda a experiência.

Para que se possa eletrizar o vidro em geral é necessário que ele esteja seco e, além disso, é preciso aquecê-lo antes de atritá-lo, caso contrário ele descarrega pela mão. A própria manipulação transmite um suor para o vidro, o que deve ser evitado. Ele deve ser aquecido ao fogo ou no micro-ondas. Nas experiências aqui descritas ele foi aquecido em um micro-ondas. Caso não se consiga bons resultados com um certo copo de vidro, pode-se tentar copos de vidro de outras marcas ou de qualidades diferentes, até que se consiga encontrar algum adequado que adquira e mantenha uma eletrização ao ser atritado.

Os panos de acrílico vão ser usados para atritar todos estes corpos: prendendo o canudo no pano de acrílico e o puxando, movendo rapidamente o pano de acrílico sobre o vidro nos dois sentidos, prendendo a meia de seda no pano de acrílico e puxando a meia, ou prendendo a régua de acrílico no pano de acrílico e o puxando.

Quando atritarmos um corpo com a meia de seda, isto será representado pela letra *S* sobre o corpo. Caso este corpo seja atritado com um pano de acrílico, isto será representado pela letra *A*. Vamos usar duas letras nos discos dos pêndulos elétricos que tocarem inicialmente nos corpos atritados com estes materiais e passarem a ser repelidos por eles. A primeira é para representar o material do corpo que tocou no disco e a segunda letra o material com o qual o corpo foi atritado. Os materiais dos corpos serão representados pelas letras *P*, *V*, *A* e *S* indicando, respectivamente, plástico, vidro, acrílico e seda. Por exemplo, as letras *PA* em um disco de pêndulo indica que ele tocou em um Plástico que foi atritado com Acrílico, sendo então repelido por ele.

Inicialmente toca-se com o dedo no versório e nos dois pêndulos. Aproximam-se os canudos, copos, meias, régua e panos que não foram atritados do versório, verificando que todos estão inicialmente neutros. Caso algum deles não esteja neutro, deve ser substituído por um outro corpo análogo que esteja de fato neutro. Durante a experiência vamos atritar um canudo, um copo, uma meia e uma régua. As próximas experiências só funcionam se estes corpos tiverem de fato ficado carregados pelo atrito. Para ter certeza disto pode-se aproximá-los do versório descarregado depois que estes corpos foram atritados, antes de aproximá-los dos pêndulos. Caso o versório se oriente em direção aos corpos atritados, isto significa que estes corpos de fato se carregaram pelo atrito. Esta precaução é especialmente importante no caso do vidro, pois como mencionamos anteriormente, nem sempre ele se mantém carregado pelo atrito, devido ao contato com a mão. Daqui para a frente vamos supor que todos os corpos

atritados ficaram de fato carregados eletricamente.

Experiência 5.1

Atrita-se um canudo de plástico no pano de acrílico e ele é aproximado de um dos pêndulos descarregados, o *I*. O pêndulo é atraído, toca no canudo e passa a ser repellido por ele, Figura 5.2 (a). Afastamos o canudo do pêndulo e o pêndulo volta à posição vertical. Então atritamos uma meia de seda em um outro pedaço de pano de acrílico. Aproximamos a seda atritada do outro pêndulo elétrico descarregado, o *II*. O pêndulo é atraído, toca na seda e passa a ser repellido por ela, Figura 5.2 (b). Afastamos a seda do pêndulo e o pêndulo volta à posição vertical.

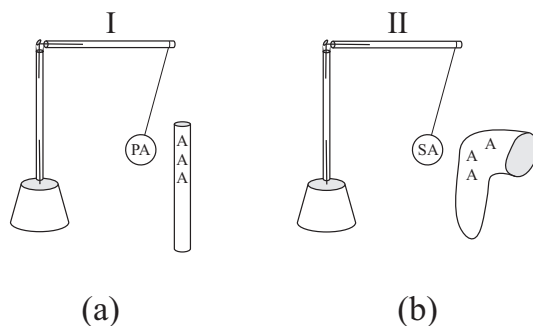


Figura 5.2: Os pêndulos que tocam em corpos atritados passam a ser repellidos por eles.

Aproximamos agora lentamente a seda atritada do pêndulo *I*, sem deixar que o pêndulo toque na seda. Observa-se que eles se atraem fortemente, Figura 5.3 (a)! Se aproximarmos lentamente o canudo atritado do pêndulo *II*, sem deixar que o pêndulo toque no canudo, veremos que eles também se atraem fortemente, Figura 5.3 (b)!

Experiência 5.2

O copo de vidro é então aquecido e atritado no pano de acrílico. A parte atritada do copo é aproximada lentamente do pêndulo *I*, que havia sido carregado pelo canudo na Experiência 5.1, sem deixar que o pêndulo toque no copo. Observa-se que há uma atração forte entre o copo e o pêndulo carregado, Figura 5.4 (a). Por outro lado, quando a parte atritada do copo é aproximada lentamente do pêndulo *II*, que havia sido carregado pela seda na Experiência 5.1, sem deixar que o pêndulo toque no copo, observa-se que eles se repelem, Figura 5.4 (b). Concluimos assim que o vidro atritado com um pano de acrílico age da mesma forma que a seda atritada com um pano de acrílico, não agindo da mesma maneira que o plástico atritado com um pano de acrílico.

Experiência 5.3

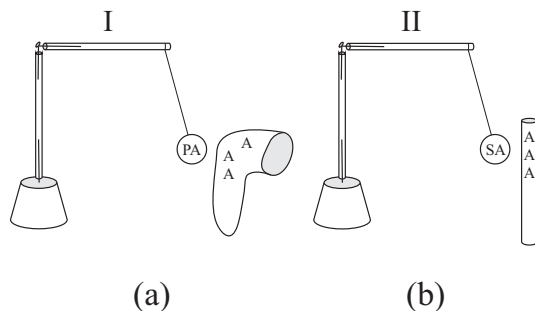


Figura 5.3: (a) O pêndulo *I*, que havia sido carregado pelo toque com um canudo plástico atritado com acrílico, passa a ser atraído por uma meia de seda atritada com acrílico. (b) Da mesma forma o pêndulo *II*, que havia sido carregado pelo toque com uma meia de seda atritada com acrílico, passa a ser atraído por um canudo plástico atritado com acrílico.

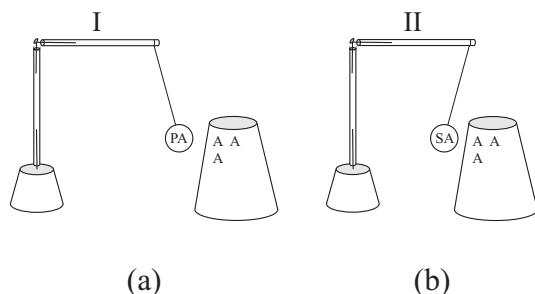


Figura 5.4: (a) O pêndulo *I*, que havia sido carregado pelo toque com um canudo plástico atritado com um pano de acrílico, passa a ser atraído por um copo de vidro atritado com um pano de acrílico. (b) Já o pêndulo *II*, que havia sido carregado pelo toque com uma meia de seda atritada com acrílico, é repelido por um copo de vidro atritado com acrílico.

Atrita-se a régua de acrílico no pano de acrílico e ela é aproximado lentamente do pêndulo *I*, que havia sido carregado pelo canudo atritado no acrílico, sem deixar que o pêndulo toque na régua. Observa-se que se repelem, Figura 5.5 (a). Por outro lado, quando a régua atritada é aproximada lentamente do pêndulo *II*, que havia sido carregado pela seda atritada em acrílico, sem deixar que o pêndulo toque na régua, observa-se que eles se atraem fortemente, Figura 5.5 (b). Concluímos que a régua de acrílico atritada no plano de acrílico age da mesma maneira que o plástico atritado no pano de acrílico, não agindo da mesma maneira que a seda atritada no pano de acrílico nem da mesma maneira que o vidro atritado no pano de acrílico.

A ordem desta experiência pode ser invertida que o resultado é sempre o mesmo. Por exemplo, descarrega-se os pêndulos, atrita-se a régua de acrílico

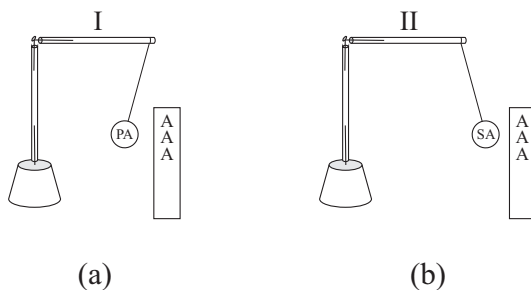


Figura 5.5: (a) O pêndulo I , que havia sido carregado pelo toque com um canudo plástico atritado com um pano de acrílico, passa a ser repelido por uma régua de acrílico atritada com um pano de acrílico. (b) Já o pêndulo II , que havia sido carregado pelo toque com uma meia de seda atritada com acrílico, é atraído por uma régua de acrílico atritada com um pano de acrílico.

no pano de acrílico e ela carrega o pêndulo I por contato. O copo de vidro é aquecido, atritado no pano de acrílico e ele carrega o pêndulo II por contato. Ao aproximar lentamente do pêndulo carregado I a régua atritada ou o canudo atritado no pano de acrílico, sem deixar que o pêndulo toque neles, observa-se que há uma repulsão. Quando eles são aproximados lentamente do pêndulo carregado II , sem deixar que o pêndulo toque neles, observa-se uma atração. Por outro lado, aproximando lentamente do pêndulo carregado I o copo atritado ou a seda atritada no acrílico, sem deixar que o pêndulo toque neles, observa-se uma atração forte. Quando se aproxima lentamente do pêndulo carregado II o copo atritado ou a seda atritada no acrílico, sem deixar que o pêndulo toque neles, observa-se que se repelem.

Estas experiências podem ser repetidas com outros materiais e os resultados são sempre os mesmos. Ocorrem sempre atrações ou repulsões entre corpos carregados por atrito e pêndulos carregados por contato. E os corpos carregados podem ser divididos em dois grupos distintos. O primeiro grupo é composto no nosso exemplo pelo canudo de plástico atritado com um pano de acrílico, pela régua de acrílico atritada com um pano de acrílico e pelo pêndulo elétrico carregado por contato com o canudo atritado ou com a régua atritada no acrílico. O segundo grupo é composto no nosso exemplo pelo copo de vidro atritado com o pano de acrílico, pela meia de seda atritada com um pano de acrílico e pelo pêndulo elétrico carregado por contato com o copo atritado ou com a meia atritada no acrílico.

Observações experimentais: O que se observa é o seguinte, corpos do primeiro grupo se repelem, corpos do segundo grupo se repelem, e corpos de grupos diferentes se atraem mutuamente.

Definições: Hoje em dia adota-se a convenção de que os corpos do primeiro grupo ficaram *negativamente carregados*, *negativos*, ou que adquiriram *carga negativa*. Também se diz que os corpos do segundo grupo ficaram *positivamente carregados*, *positivos*, ou que adquiriram *carga positiva*. Nas Figuras vamos

representar isto utilizando os símbolos “-” e “+”, respectivamente.

Temos então repulsões entre corpos carregados com cargas de mesmo sinal nas Figuras 5.2 (a) e (b), 5.4 (b) e 5.5 (a). Por outro lado temos atrações entre corpos carregados com cargas opostas nas Figuras 5.3 (a) e (b), 5.4 (a) e 5.5 (b).

Experiência 5.4

As atrações descritas na Experiência 5.1 são diferentes das atrações que ocorrem entre um pêndulo carregado e um corpo neutro. Para verificar isto repetimos a parte inicial da experiência, carregando negativamente o pêndulo *I* por contato com um canudo de plástico negativo (atritado com um pano de acrílico), e carregando positivamente o pêndulo *II* por contato com uma meia de seda positiva (atritada com um pano de acrílico). Ao aproximar o canudo atritado lentamente do pêndulo *II*, sem deixar que o pêndulo toque o canudo, observa-se que o canudo atrai o pêndulo com uma força bem mais forte do que se aproximarmos um canudo neutro do pêndulo.

Esta intensidade da força pode ser indicada por três aspectos, a saber, (a) distância mínima, (b) ângulo de inclinação para uma distância fixa entre o canudo e a vertical passando pelo ponto de suspensão do fio do pêndulo, e (c) ângulo de inclinação para uma distância fixa entre o canudo e o disco do pêndulo.

(a) O primeiro critério que indica a intensidade da força é a menor distância em que a atração começa a ser percebida. Esta distância mínima é indicada pelo início do movimento do pêndulo ao aproximarmos o canudo. Esta distância é maior para a atração entre corpos carregados com cargas opostas do que entre um corpo carregado e um corpo neutro. (b) O segundo aspecto é o ângulo de inclinação do pêndulo em relação à vertical, para uma mesma distância entre o corpo e a vertical passando pelo ponto de fixação do fio do pêndulo. Novamente observa-se que este ângulo é maior para a atração entre corpos com cargas opostas, do que o ângulo para a atração entre um corpo carregado e um corpo neutro. (c) O terceiro aspecto é quando consideramos uma mesma distância entre o disco e o canudo e analisamos o ângulo de inclinação do pêndulo em relação à vertical. Este ângulo é maior para a atração entre corpos carregados com cargas opostas do que para a atração entre um corpo neutro e um corpo carregado, Figura 5.6. Estes três aspectos mostram que esta força é claramente muito maior no caso de corpos carregados com cargas de sinais opostas, do que no caso da atração entre um corpo carregado e um corpo neutro.

Da mesma forma, ao aproximar a meia atritada lentamente do pêndulo *I*, sem deixar que o pêndulo toque a meia, observa-se que a meia atrai o pêndulo com uma força bem mais forte do que se aproximarmos uma meia neutra do pêndulo, Figura 5.7.

Experiência 5.5

Uma outra distinção que pode ser vista entre corpos neutros e carregados é a seguinte. Vamos supor que temos o pêndulo *I* carregado negativamente e um

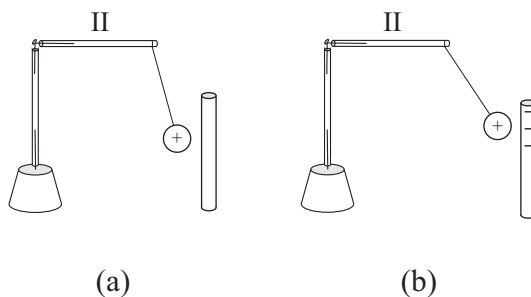


Figura 5.6: (a) A atração entre um canudo neutro e um pêndulo positivo é menor do que a atração entre um canudo negativo e um pêndulo positivo, (b).

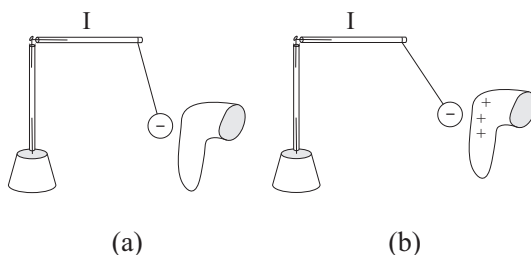


Figura 5.7: (a) A atração entre uma seda neutra e um pêndulo negativo é menor do que a atração entre uma seda positiva e um pêndulo negativo, (b).

pêndulo *II* carregado positivamente, como na Experiência 5.1. Ao aproximarmos lentamente um corpo carregado negativamente do pêndulo *I*, observa-se uma repulsão, enquanto que ao ser aproximado do pêndulo *II*, observa-se uma atração, como na Figura 5.8 (a). O inverso acontece ao aproximarmos dos dois pêndulos um corpo carregado positivamente. Por outro lado, se aproximarmos lentamente um corpo neutro dos dois pêndulos carregados, sem deixar que os pêndulos toquem no corpo, observa-se uma leve atração tanto no caso em que ele é aproximado do pêndulo positivo, quanto no caso em que é aproximado do pêndulo negativo, como na Figura 5.8 (b). Às vezes esta atração é tão pequena que nem é percebida.

Experiência 5.6

Vamos fazer agora algumas experiências análogas à Experiência 4.4. Esta experiência é mais fácil de ser realizada se duas pessoas atuarem juntas. Vão ser necessários apenas dois canudos plásticos, dois panos de acrílico (ver a Experiência 5.1) e dois pedaços ou fiapos bem pequenos de algodão, tal que levem uns 10 segundos para cair de uma altura de 2 metros ao serem soltos do repouso. Em vez dos fiapos de algodão pode-se utilizar também uma semente da planta dente-de-leão, que termina em cerdas bem finas, dando ao conjunto um aspecto de paraquedas. Atrita-se bem os dois canudos com o pano de acrílico. Com isto

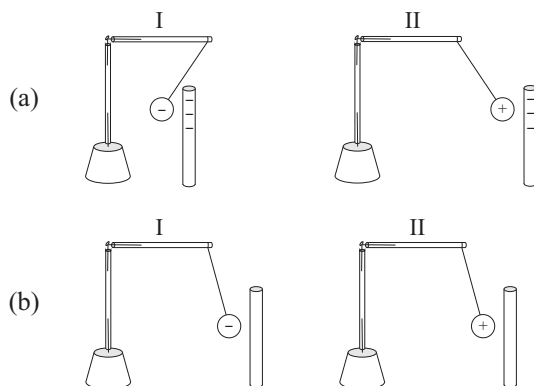


Figura 5.8: (a) Um corpo negativo (o canudo atritado) repele fortemente outro corpo negativo (o disco do pêndulo *I*) e atrai fortemente outro corpo positivo (o disco do pêndulo *II*). (b) Já um corpo neutro (o canudo que não foi atritado) atrai tanto um corpo negativo quanto um positivo (os discos dos pêndulos *I* e *II*). Além disto, as intensidades das forças nos casos (a) são maiores do que as intensidades das forças nos casos (b).

eles ficam negativamente carregados. Cada pessoa mantém um canudo atritado na horizontal, segurando-o por uma das pontas. Com a outra mão cada pessoa solta o pequeno pedaço de algodão um pouco acima do canudo. O algodão é atraído pelo canudo e gruda nele. Depois começa a esticar seus fios, sendo repellido pelo canudo. Às vezes o algodão pula sozinho para o ar e começa a cair. Quando isto não acontece, pode-se dar alguns petelecos no canudo ou então soprar de leve o algodão até que se solte do canudo. Depois que o algodão saiu do canudo e começou a cair, pode-se mantê-lo flutuando no ar aproximando e movimentando o canudo atritado por baixo do algodão, já que o algodão vai ser repellido pelo canudo. Quando isto ocorre, o algodão e o canudo possuem carga negativa.

Uma nova experiência consiste então no seguinte. Depois que cada uma das pessoas está mantendo seu algodão flutuando no ar com seu canudo atritado embaixo do algodão, elas devem tentar direcionar seus algodões para que se toquem no ar. Por mais que se tente, observa-se que isto não é possível. Eles nunca se aproximam o suficiente a ponto de se tocar. É fácil de entender isto lembrando do princípio *ACR* do Du Fay. Isto é, cada algodão que está flutuando está sendo repellido pelo canudo embaixo dele por ter adquirido uma carga elétrica do mesmo tipo da carga do canudo, neste caso negativa. Como os dois algodões flutuantes possuem cargas de mesmo sinal, repelem-se mutuamente e não chegam a se tocar, por mais que se tente, Figura 5.9.

Experiência 5.7

Utilizamos agora os dois canudos plásticos carregados negativamente (atritados com um pano de acrílico da Experiência 5.6), mas com apenas um pequeno

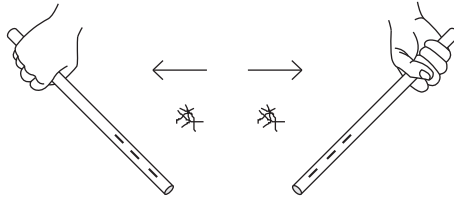


Figura 5.9: Não se consegue unir dois fiapos de algodão negativamente carregados.

pedaço de algodão. Inicialmente deixamos o algodão flutuando em cima do canudo atritado no pano de acrílico devido ao mecanismo *ACR*, como descrito na Experiência 4.4. Neste momento aproximamos do algodão flutuante, com a outra mão ou então por uma segunda pessoa, o segundo canudo negativo. Observa-se que o algodão foge deste segundo canudo, sendo repelido pelos dois canudos. Isto se deve ao fato de que tanto o fiapo de algodão quanto os dois canudos estão negativamente carregados, Figura 5.10.

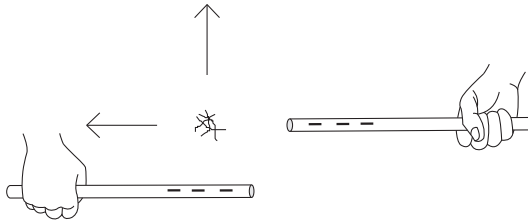


Figura 5.10: Forças elétricas sobre um fiapo de algodão negativamente carregado.

Experiência 5.8

Repetimos a Experiência 5.7 mantendo inicialmente um fiapo de algodão negativamente carregado pelo mecanismo *ACR* flutuando acima de um canudo plástico negativamente carregado. Só que desta vez aproximamos lateralmente do fiapo flutuante um copo de vidro positivamente carregado (isto é, tendo sido previamente aquecido e atritado em um pano de acrílico). Neste caso observa-se que o fiapo é atraído pelo vidro, deslocando-se no sentido do vidro, Figura 5.11. O ideal é que esta aproximação seja lenta e que se evite o fiapo de tocar no vidro, para que o fiapo não fique carregado novamente pelo mecanismo *ACR*, só que agora positivamente.

Experiência 5.9

Utilizamos agora um pequeno pedaço de algodão, dois panos de acrílico, um canudo plástico e um copo de vidro. O ideal é que esta experiência seja feita

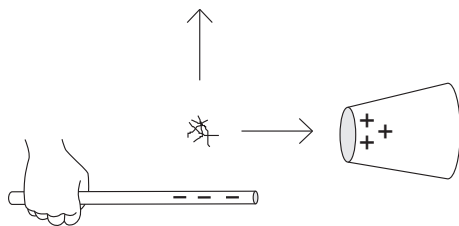


Figura 5.11: Um fiapo de algodão negativamente carregado é atraído por um copo de vidro positivamente carregado.

por duas pessoas, mas depois de uma certa prática uma única pessoa consegue realizá-la. Tanto o canudo quanto o copo vão ser atritados com os panos de acrílico. Já vimos que neste caso o canudo vai ficar negativamente carregado e o copo positivamente carregado. Para que o vidro adquira uma boa carga elétrica é necessário aquecê-lo antes do atrito, como descrito na Experiência 5.1.

O começo desta atividade é idêntico à Experiência 4.4. Ou seja, atrita-se bem o copo no pano de acrílico e ele é segurado pela parte não atritada. Solta-se então o pequeno pedaço de algodão acima dele. O algodão é atraído pela parte atritada do copo, estica suas fibras e às vezes se solta sozinho. Caso isto não ocorra, pode-se soprar de leve o algodão até que se solte. Se aproximarmos o vidro por baixo do algodão que está caindo, ele passa a ser repellido pelo vidro e pode ser mantido flutuando no ar. Algumas vezes isto não ocorre de imediato, sendo que ele ainda é atraído uma ou mais vezes pelo vidro antes de começar a ser repellido por ele. Quanto mais eletrizado estiver o vidro, mais rapidamente ele vai conseguir manter o algodão flutuando no ar acima dele. Daqui para a frente vamos supor que esta parte da experiência já foi bem sucedida. Quando isto ocorre, tanto o vidro quanto o algodão flutuando acima dele estão positivamente carregados, Figura 5.12 (a).

Enquanto o algodão está sendo mantido flutuando no ar com o vidro atritado embaixo dele, aproxima-se lentamente por cima do algodão o canudo de plástico negativamente carregado. O que se observa neste caso é que o algodão é atraído por este canudo, ao contrário do que aconteceu na Experiência 5.7. O ideal é que não se deixe o algodão tocar no canudo, afastando rapidamente o canudo sempre que o algodão começar a se deslocar no sentido do canudo. Quando se tem uma boa prática é possível manter o algodão flutuando entre o copo abaixo dele e o canudo acima dele, Figura 5.12 (b).

Nesta situação é até mesmo possível retirar o copo, fazendo com que o algodão fique flutuando no ar apenas devido à atração do canudo acima dele! Nesta situação temos o oposto da Experiência 4.4. Naquele caso o algodão negativo era mantido no ar pela repulsão do canudo abaixo dele. Já na experiência atual o algodão positivo é mantido no ar pela atração do canudo acima dele, Figura 5.12 (c). Para que se mantenha o fiapo de algodão flutuando abaixo do canudo, é importante que o canudo não fique parado e fixo em relação à Terra, já que o equilíbrio do algodão é instável. Se o canudo se aproximar muito do fiapo,

este segue rápido no sentido do canudo e gruda nele, estragando a experiência. Se o canudo ficar muito acima do fiapo, este começa a cair para a Terra. O fiapo também tende a se afastar para um lado ou outro do plano vertical que passa pelo canudo. O ideal é então que se movimente o canudo o tempo todo, fazendo com que o fiapo o acompanhe abaixo dele, mas sem tocá-lo.

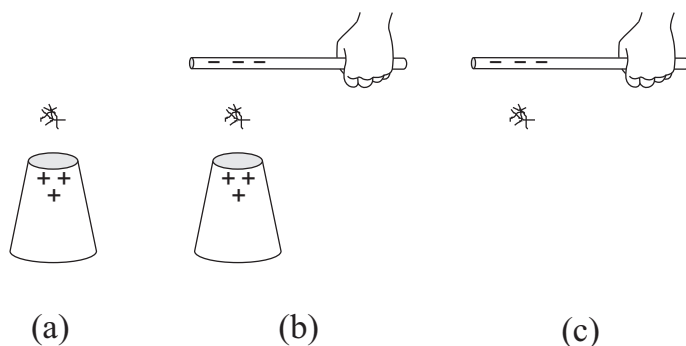


Figura 5.12: (a) Um fiapo positivo de algodão pode ficar flutuando acima de um vidro positivo, ou entre um plástico negativo e um vidro positivo, (b). O vidro pode ser retirado e o fiapo fica flutuando ao ser atraído por um plástico negativo acima dele, (c).

Caso o algodão chegue a tocar no canudo, ele fica grudado nele. Algumas vezes ele se solta sozinho, podendo então ser mantido flutuando acima do canudo atritado, já que também vai passar a ficar negativamente carregado. Outras vezes ele só vai se soltar se o soprarmos um pouco. Caso se consiga mantê-lo flutuando no ar acima do canudo, pode-se inverter a situação. Isto é, aproxima-se lentamente o copo positivo por cima do algodão negativo e ele vai ficar flutuando entre os dois corpos atritados que possuem cargas opostas, o plástico negativo abaixo do algodão negativo e o vidro positivo acima dele.

Na Experiência 5.16 será mostrado como realizar esta experiência de um modo mais fácil utilizando dois canudos eletrizados.

Experiência 5.10

Neste caso são necessárias duas pessoas, um canudo plástico, um copo de vidro, dois panos de acrílico e dois pedaços pequenos de algodão. Uma pessoa atrita o copo no pano de acrílico e depois mantém um algodão flutuando no ar acima do copo. Neste caso os dois estão positivamente carregados, Figura 5.13 (a). A outra pessoa atrita o canudo no pano de acrílico e depois mantém o outro algodão flutuando no ar acima do canudo. Neste caso os dois estão negativamente carregados, Figura 5.13 (b).

Quando isto tiver sido obtido, as duas pessoas tentam dirigir os dois algodões flutuantes no ar tal que se aproximem. O que se observa é que eles agora se atraem e se juntam, caindo colados em seguida para o solo, Figura 5.14. Isto é o contrário do que ocorreu na Experiência 5.6.

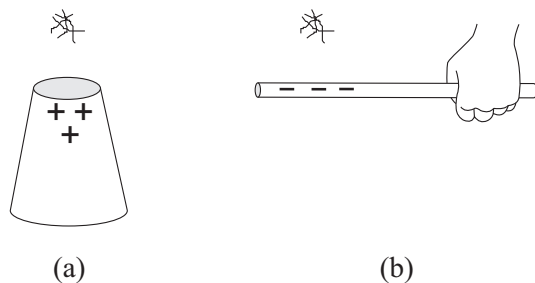


Figura 5.13: (a) Um fiapo positivo de algodão flutuando acima de um vidro positivo. (b) Um fiapo negativo flutuando acima de um plástico negativo.

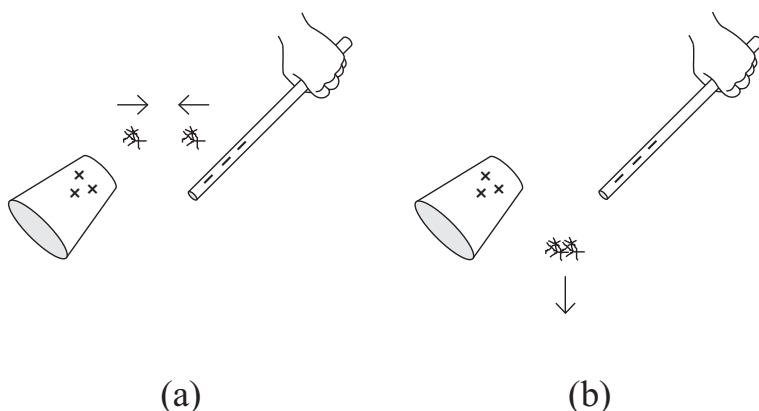


Figura 5.14: (a) Um fiapo positivo é atraído por um negativo. (b) Os dois fiapos caem juntos ao solo depois de se encontrarem.

5.2 Du Fay Descobre Dois Tipos Diferentes de Eletricidade

O primeiro a propor a existência de dois tipos de eletricidade foi Du Fay em 1733, fazendo experiências do mesmo tipo que descrevemos anteriormente. Até então se sabia que corpos eletrizados atraíam corpos leves e que eram atraídos por corpos neutros. Du Fay já havia concluído que a repulsão entre corpos eletrizados também era uma realidade. Esta repulsão passou a ser considerada uma nova propriedade dos corpos carregados eletricamente, como vimos na Seção 4.1. Ele também já havia descoberto o mecanismo de atração-contato-repulsão, ou *ACR*, como vimos anteriormente. Sua descoberta de que existem duas espécies de eletricidade foi totalmente inesperada, tendo surgido de um resultado experimental curioso que foi totalmente contra as suas expectativas. Ele começou reproduzindo as experiências de Guericke, de Gray e de Hauksbee, ver a Experiência 4.4. Inicialmente ele eletrizou um tubo de vidro por atrito. Depois

soltava pequenas folhas de ouro bem finas sobre o tubo. Elas eram atraídas pelo tubo, tocavam nele e passavam a ser repelidas por ele, flutuando no ar acima do tubo. Citamos aqui suas palavras descrevendo o momento crucial da grande descoberta, nossas ênfases em itálico:¹

[...] Vem então como [um comportamento] constante, que os corpos que se tornaram elétricos por comunicação [isto é, pelo mecanismo *ACR*], são repelidos pelos corpos que os tornaram elétricos; mas são eles do mesmo [tipo] em relação aos outros corpos elétricos de todos os tipos? E os corpos elétricos não diferem entre eles mesmos a não ser pelos vários graus [ou intensidades] de eletricidade? O exame desta questão me conduziu a uma outra verdade que não tinha jamais suspeitado, e que creio que ninguém havia ainda tido a menor ideia [sobre esta nova verdade].

Comecei sustentando no ar com o mesmo tubo [de vidro eletrizado], duas folhas de ouro [que haviam sido eletrizadas pelo tubo por meio do mecanismo *ACR*], e elas ficavam sempre afastadas uma da outra, quaisquer que fossem meus esforços para tentar aproximá-las, e isto devia ocorrer assim devido ao fato de que elas duas eram elétricas [isto é, as duas estavam eletrizadas]; mas tão logo uma das duas [folhas] tivesse tocado a mão ou qualquer outro corpo, elas se ajuntavam uma à outra de imediato, pois a folha [que havia tocado na mão] tendo perdido sua eletricidade, a outra [folha eletrizada] a atraía e tendia em direção a ela. [Uma ilustração desta experiência aparece na Figura 5.15.] Tudo isto estava perfeitamente de acordo com a minha hipótese, *mas o que me desconcertou prodigiosamente*, foi a experiência seguinte.

Tendo elevado ao ar uma folha de ouro por meio do tubo [de vidro eletrizado], aproximei da folha um pedaço atritado e eletrizado de goma-copal,² a folha se aplicou nele de imediato [isto é, foi atraída pelo pedaço atritado de goma-copal], e aí permaneceu. [Uma ilustração desta experiência aparece na Figura 5.16.] *Confesso que esperava um efeito totalmente contrário*, pois de acordo com meu raciocínio, o copal que era elétrico [e estava eletrizado ou carregado eletricamente] deveria repelir a folha que também estava [eletrizada; isto é, Du Fay esperava observar uma repulsão entre dois corpos carregados eletricamente, como sempre havia observado até então]; repeti a experiência um grande número de vezes, acreditando que não havia apresentado à folha a região [da goma-copal] que havia sido atritada, e que assim ela [a folha] teria se portado da mesma forma que ela teria feito em relação ao meu dedo, ou em relação a todos os outros corpos [não eletrizados], mas tendo tomado minhas precauções em relação a isto, de maneira a não deixar qualquer

¹[DF33b, págs. 464-465].

²Ver o Apêndice A.

dúvida, fiquei bem convencido de que o copal atraía a folha de ouro, embora ela [a folha] fosse repelida pelo tubo [eletrizado]. A mesma coisa acontecia ao aproximar da folha de ouro um pedaço de âmbar ou de cera da Espanha atritados.

Depois de várias outras tentativas que não me satisfizeram de forma alguma, aproximei da folha de ouro repelida pelo tubo, uma bola de cristal de rocha atritada e eletrizada, ela [a bola] repelia esta folha da mesma forma que o tubo. Um outro tubo [de vidro eletrizado] que apresentei à mesma folha a repelia da mesma maneira, enfim, não pude duvidar que o vidro e o cristal de rocha faziam precisamente o contrário da goma-copal, do âmbar e da cera da Espanha, de maneira que a folha repelida pelos primeiros, devido à eletricidade que ela havia adquirido, era atraída pelos segundos; *isto me fez pensar que haveria talvez dois tipos de eletricidade diferentes*, e fui bem certificado desta ideia pelas experiências seguintes.

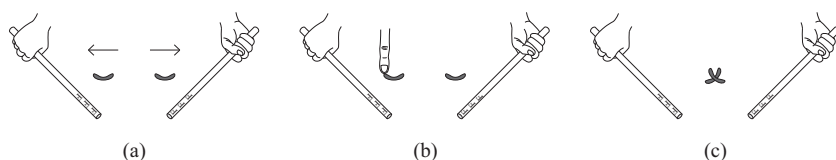


Figura 5.15: (a) Duas folhas de ouro eletrizadas sendo repelidas entre si e pelos vidros eletrizados. (b) Toca-se com o dedo em uma das folhas. (c) Após este toque as duas folhas de ouro se atraem.

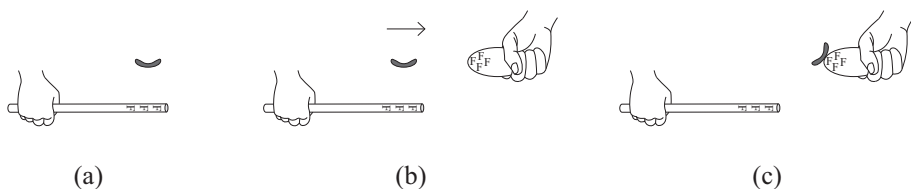


Figura 5.16: (a) Uma folha de ouro eletrizada flutua sobre um vidro atritado. (b) Aproxima-se um pedaço atritado de goma-copal. A folha de ouro é atraída pelo pedaço atritado de goma-copal, com a seta indicando o sentido desta nova força atuando sobre a folha de ouro. (c) A folha de ouro segue em direção à goma-copal!

Como a maior parte das substâncias do primeiro grupo que encontrou eram sólidas e transparentes como o vidro, ele denominou de *eletricidade vítrea* ao primeiro tipo de eletricidade. E como a maior parte das substâncias do segundo grupo que encontrou eram betuminosas ou resinosas, ele denominou de *eletricidade resinosa* ao segundo tipo de eletricidade:³

³[DF33b, págs. 467 e 469].

Aí estão constantemente duas eletricidades de uma natureza totalmente diferente, a saber, a eletricidade dos corpos transparentes e sólidos, como o vidro, o cristal, etc. e a eletricidade dos corpos betuminosos e resinosos, como o âmbar, a goma-copal, a cera da Espanha, etc. Uns e outros repelem os corpos que adquiriram uma eletricidade da mesma natureza que a deles, e atraem, ao contrário, os corpos cuja eletricidade é de uma natureza diferente da deles.

[...]

Portanto aí estão duas eletricidades bem demonstradas, e não posso me dispensar de lhes dar nomes diferentes para evitar a confusão dos termos, ou o embaraço de definir a cada momento a eletricidade de que desejo falar; portanto, chamarei uma de *eletricidade vítrea*, e a outra de *eletricidade resinosa*, não que eu pense que somente existam os corpos da natureza do vidro que sejam dotados de uma [espécie de eletricidade], e as matérias resinosas da outra, pois já tenho fortes provas ao contrário, mas [escolho esta denominação] porque o vidro e o copal foram as duas matérias que me deram os vínculos para descobrir as duas eletricidades diferentes.

Du Fay não especificou com que material atritava o tubo de vidro e as outras substâncias, mas provavelmente deve ter sido com um tecido de lã, seda ou algodão.

Sua descoberta veio de uma experiência que lhe apresentou um resultado totalmente inesperado para ele. Em um trabalho um pouco posterior ele descreveu esta descoberta casual nos seguintes termos:⁴

Sétimo, por acaso lançou-se em meu caminho outro Princípio, mais universal e extraordinário que o anterior [o mecanismo *ACR*, ver a Seção 4.8], que lança uma nova luz sobre o tema Eletricidade. Este Princípio é: existem duas Eletricidades distintas, muito diferentes uma da outra, uma que eu chamo de *Eletricidade vítrea* e a outra de *Eletricidade resinosa*. A primeira [eletricidade] é aquela do Vidro, Pedra-Cristal, Pedra Preciosa, Pelo de Animais, Lã e muitos outros corpos. A segunda [eletricidade] é aquela do Âmbar, [resina] Copal, Goma-Laca, Seda, Linha⁵, Papel, e um vasto número de outros Materiais. A característica dessas duas eletricidades é que um Corpo de *Eletricidade Vítrea*, por Exemplo, repele todos aqueles que possuem a mesma Eletricidade, e ao contrário, atrai todos aqueles de *Eletricidade resinosa*. Desta forma, o Tubo [de vidro] eletrizado [pelo atrito] repelirá Vidro, Cristal, Pelo de Animal, etc., [quando estas substâncias estão eletrizadas pelo atrito ou pelo mecanismo *ACR*

⁴[DF, págs. 263-264] e [BC07, pág. 643].

⁵No original aparece a palavra *thread*. Provavelmente Du Fay está se referindo a uma linha, fio ou tecido de linho, já que no artigo anterior em francês ele menciona que eletrizou uma *bande de toile*, uma tira de tecido de linho, ao aquecê-la e depois passá-la entre os dedos, encontrando então que ela tinha adquirido o mesmo tipo de eletricidade que uma tira de seda.

ao entrarem em contato com o vidro eletrizado] e [o tubo de vidro eletrizado] atrairá seda, linha [tecido de linho], papel, etc., embora eletrizado da mesma forma [pelo atrito ou pelo mecanismo *ACR* ao entrarem em contato com a goma-copal eletrizada]. O âmbar [atritado], ao contrário, atrairá vidros eletrizados [pelo atrito] e outros materiais [eletrizados] da mesma classe, e repelirá Goma-Laca, [resina] Copal, Seda, linha, etc. [eletrizados]. Duas Fitas de Seda eletrizadas [pelo atrito] repelirão uma a outra, duas Linhas de Lã [eletrizadas pelo atrito] farão o mesmo, mas uma Linha de Lã e uma Linha de Seda [eletrizadas pelo atrito] vão se atrair mutuamente. Este Princípio explica muito naturalmente porque as Extremidades das Linhas de Seda ou de Lã [eletrizadas] afastam-se uma da outra em forma de Pincel ou Vassoura [com as pontas das cerdas se abrindo na forma de um cone] quando elas adquirem a Qualidade Elétrica [ao serem atritadas ou pelo mecanismo *ACR*]. Deste Princípio podemos, com a mesma Facilidade, deduzir a Explicação de um grande Número de outros *Fenômenos*. É provável que esta Verdade nos levará a descobertas adicionais em muitas outras coisas.

Como veremos adiante, hoje em dia não se adota mais esta denominação de Du Fay. Em vez de eletricidade vítrea e resinosa se utilizam as expressões *eletricidade positiva e negativa*, respectivamente. Outras expressões análogas utilizadas hoje em dia são as de *carga elétrica positiva e negativa*, ou *corpos carregados positivamente e negativamente*. Mas ainda é aceita hoje em dia a suposição fundamental de Du Fay sobre a existência de dois tipos distintos de eletricidade, assim como se aceita que cargas de mesmo sinal se repelem, enquanto que cargas de sinais opostos se atraem.

Um vídeo muito interessante mostrando uma reprodução moderna desta experiência crucial de Du Fay foi feito por Blondel e Wolff,⁶ “La danse des feuilles d’or.”

5.3 Qual Tipo de Carga Adquire um Corpo ao Ser Atritado?

Nas experiências do Capítulo 2 analisamos quais as substâncias eram ou não atraídas por um corpo atritado, assim como pesquisamos quais eram as substâncias que ao serem atritadas possuíam ou não o poder de atrair corpos leves. Agora vamos variar o material com o qual atritamos os corpos.

Um instrumento bem prático que vamos utilizar em algumas experiências é composto simplesmente de uma tira de plástico presa a um lápis, caneta, palito de churrasco ou canudo. O plástico pode ter, por exemplo, 5 cm de largura e 15 cm de comprimento. Uma de suas extremidades com a largura de 5 cm é presa ao lápis com uma fita adesiva. Mantemos o lápis na horizontal e o lado

⁶[BWa] e [BWb].

mais comprido do plástico fica suspenso verticalmente abaixo dele. Na Figura 5.17 apresentamos este instrumento de lado e de costas. Em analogia à linha pendular do Gray descrita na Seção 4.9, podemos chamar este instrumento de *tira plástica pendular*.

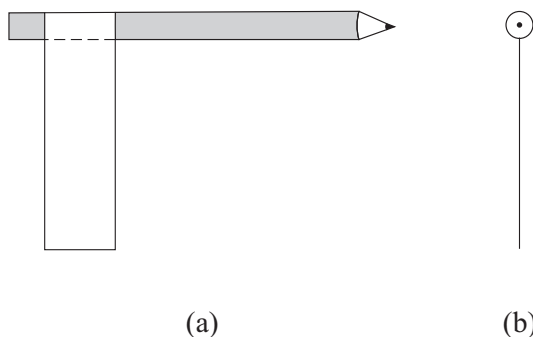


Figura 5.17: Uma tira fina de plástico flexível presa a um lápis. (a) Vista de perfil. (b) Vista de costas.

Devem ser feitos vários destes instrumentos com um plástico retirado do mesmo material. Deve-se evitar de manipular muito os plásticos com as mãos para que não se carreguem eletricamente com este atrito. Antes de começar as experiências com cada um destes instrumentos deve-se verificar que os plásticos estão eletricamente neutros. Para isto descarrega-se um versório metálico tocando-o de leve com o dedo. Em seguida aproxima-se lentamente o plástico do versório, sem deixar que se toquem. Caso o versório não gire, pode-se considerar que o plástico está descarregado. Caso ele se oriente em relação ao plástico, deve-se descartar este plástico e montar outro instrumento.

Experiência 5.11

Atritamos dois destes plásticos neutros com os nossos dedos, pressionando o plástico entre o dedo indicador e o dedo médio, e movendo os dedos rapidamente de cima para baixo ao longo do plástico. Em seguida aproximamos os dois lápis horizontais lateralmente até que quase se toquem. Observa-se que os plásticos se afastam lateralmente devido a uma repulsão mútua, em vez de permanecerem verticais como se esperaria se não houvesse a repulsão. Isto é análogo à Experiência 4.1.

Pegamos agora outros dois destes instrumentos com plásticos neutros pendendo dos lápis. Atritamos dois destes plásticos neutros, um de cada vez, entre dois tubos neutros de PVC, como os canos marrons de água. Para isto deve-se inicialmente observar se os tubos de PVC estão de fato neutros, aproximando-os lentamente de um versório metálico e vendo que este não se orienta em relação aos tubos. Para eletrizar a tira de plástico, sua parte superior é então presa entre dois tubos que são então bem pressionados um contra o outro. Em seguida puxa-se o lápis com a tira rapidamente para cima. Verifica-se que a tira ficou

carregada aproximando-a do versório. O procedimento é repetido com uma segunda tira neutra de plástico. Agora aproximamos estas duas tiras que foram atritadas com tubos de PVC. Novamente elas se repelem.

Também ocorre repulsão entre duas tiras de plástico inicialmente neutras que foram atritadas no cabelo, ou entre duas tiras de plástico inicialmente neutras que foram atritadas entre dois tubos duros de borracha, obtidos da mangueira de chuveiro.

Estes quatro casos estão representados na Figura 5.18.

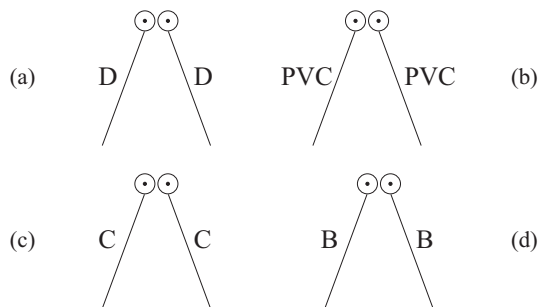


Figura 5.18: Repulsões entre dois plásticos atritados entre os dedos (D), entre dois tubos de PVC, no cabelo (C), ou entre duas mangueiras de borracha (B).

Experiência 5.12

Agora pegamos um destes plásticos que tenha sido atritado com os dedos e o aproximamos de um dos plásticos que tenha sido atritado com os tubos de PVC. Observa-se que eles se atraem!

Também ocorre uma atração se aproximarmos um dos plásticos que tenha sido atritado com os dedos de um outro plástico que tenha sido atritado entre os tubos duros de borracha. O mesmo ocorre se aproximarmos um plástico que tenha sido atritado no cabelo tanto de um plástico que tenha sido atritado entre tubos de PVC, quanto de um plástico que tenha sido atritado entre tubos duros de borracha.

Estes quatro casos estão representados na Figura 5.19.

Experiência 5.13

Por outro lado, ocorre repulsão entre um plástico que tenha sido atritado entre os dedos e um plástico que tenha sido atritado no cabelo. Também ocorre repulsão entre um plástico que tenha sido atritado entre dois tubos de PVC e um plástico que tenha sido atritado entre dois tubos duros de borracha, Figura 5.20.

Estas experiências mostram que uma mesma substância, no caso uma tira de plástico, pode ficar carregada tanto com cargas negativas, quanto com cargas

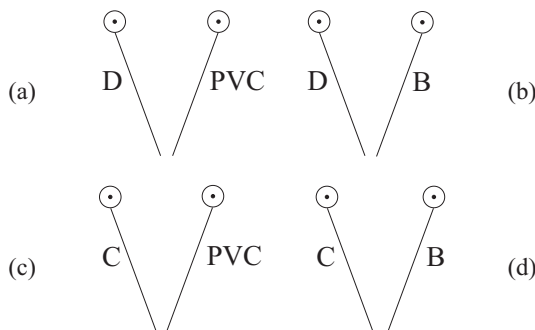


Figura 5.19: Quatro casos de atração entre dois plásticos atritados com substâncias diferentes. (a) Dedo e PVC. (b) Dedo e borracha. (c) Cabelo e PVC. (d) Cabelo e borracha.

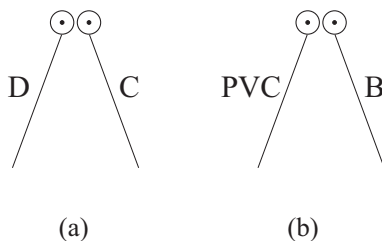


Figura 5.20: (a) Há repulsão entre um plástico atritado entre os dedos e um outro plástico atritado no cabelo; (b) assim como entre um plástico atritado entre dois tubos de PVC e um outro atritado entre dois tubos de borracha.

positivas, dependendo do material com que é atritada. Logo a ideia de Du Fay de termos dois tipos de carga parece adequada. Por outro lado, sua suposição de que cada tipo de carga está associada a um grupo de substâncias específicas não é verdadeira. Em vez de falar de cargas vítreas e resinosas, como se expressava Du Fay, vamos adotar a denominação de *cargas positivas* e de *cargas negativas*. Na Experiência 5.1 havíamos separado os corpos carregados em dois grupos. O primeiro grupo era composto no nosso exemplo pelo canudo de plástico atritado com um pano de acrílico, pela régua de acrílico atritada com um pano de acrílico e pelo pêndulo elétrico carregado por contato com o canudo atritado ou com a régua atritada no acrílico. O segundo grupo era composto no nosso exemplo pelo copo de vidro atritado com um pano de acrílico, pela meia de seda atritada com um pano de acrílico e pelo pêndulo elétrico carregado por contato com o copo atritado ou com a meia atritada no acrílico. E o que se observava era o seguinte: corpos do primeiro grupo se repeliam entre si, corpos do segundo grupo se repeliam entre si, e corpos de grupos separados se atraíam mutuamente.

Convenção: Hoje em dia adota-se a convenção de que os corpos do primeiro grupo ficaram *negativamente carregados*, ou que adquiriram *carga negativa*. Também se diz que os corpos do segundo grupo ficaram *positivamente*

carregados, ou que adquiriram *carga positiva*.

O próprio Du Fay chegou a se perguntar se a carga adquirida por um certo corpo não dependeria do material com que é atritado.⁷ Para verificar isto inicialmente atritou seda com a mão e depois atritou um segundo pedaço de seda com outra seda. Contudo, observou que a seda atritada adquiria eletricidade resinosa nestes dois casos. Atritou também lã e penas tanto com a mão quanto com seda. Nestes casos encontrou que a lã e as penas adquiriam eletricidade vítrea. Diante destes testes concluiu que o material que atrita a substância pode alterar apenas o grau de eletrização conferido à substância, mas não o tipo de eletricidade que ela adquire. Embora esta conclusão estivesse de acordo com suas experiências, ele não fez uma grande variação de corpos e de materiais com que eram atritados. Mais tarde sua conclusão teve de ser alterada quando se descobriu que um mesmo corpo pode adquirir carga elétrica de tipo diferente, dependendo do material com que é atritado. Por este motivo não faz sentido falar de uma eletricidade *vítrea* ou *resinosa*, já que o próprio vidro, por exemplo, pode se carregar com carga dos dois tipos, dependendo do material com que é atritado.

Definições: Hoje em dia se adota a nomenclatura de *eletricidade positiva e negativa*, ou de *carga positiva e negativa*. Convenciona-se ainda de chamar de negativa à carga adquirida por um canudo plástico atritado contra o cabelo, pele, seda, ou algodão. Já a carga adquirida pelo canudo plástico atritado contra a borracha dura, tubo de acrílico e de PVC é chamada de positiva.

Experiência 5.14

Para saber qual foi a carga adquirida pelos plásticos atritados da Experiência 5.11 começamos como na Experiência 5.1. Um pêndulo elétrico *I* é carregado negativamente pelo contato com um canudo que foi atritado com um pano de acrílico. Um pêndulo elétrico *II* é carregado positivamente pelo contato com uma meia de seda que foi atritada com um pano de acrílico. Estes dois pêndulos ficam afastados entre si. O canudo atritado e a meia atritada são retirados da mesa e os pêndulos carregados ficam parados na vertical. Atritamos uma tira de plástico presa ao lápis com nosso dedo. Aproximamos lentamente o plástico do pêndulo *I*, sem deixar que se toquem. Observa-se que o pêndulo é repelido pelo plástico, Figura 5.21 (a). Depois se aproxima lentamente o plástico do pêndulo *II*, sem deixar que se toquem. Observa-se que o pêndulo é atraído pelo plástico, Figura 5.21 (b). Com isto conclui-se que o plástico atritado com o dedo ficou negativamente carregado.

Ao repetir esta experiência com outras tiras de plástico atritadas em outras substâncias, observa-se que o plástico fica carregado da seguinte maneira: entre os dedos (negativamente), entre tubos de PVC (positivamente), no cabelo (negativamente), entre tubos duros de borracha (positivamente).

Esta é a técnica que se adota para saber qual tipo de carga um corpo adquire ao ser atritado com uma certa substância. Essencialmente é necessário que se

⁷[DF33b, págs. 472-473].

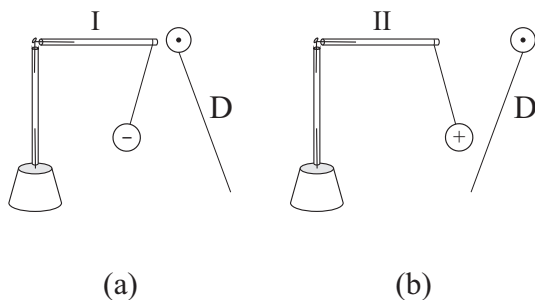


Figura 5.21: Técnica de Du Fay para saber o sinal da carga de um corpo eletrizado. Neste exemplo o plástico atritado está sendo repelido por um pêndulo negativamente carregado, (a), e atraído por um pêndulo positivamente carregado, (b). Logo conclui-se que o plástico está negativamente carregado.

saiba de antemão que um certo corpo I está carregado negativamente e que um outro corpo II está carregado positivamente. Então aproximamos nosso corpo de prova carregado tanto de I quanto de II . Quando ele é repelido por I e atraído por II , diz-se que possui carga negativa. Quando é atraído por I e repelido por II , diz-se que possui carga positiva. Esta técnica é devida a Du Fay,⁸ embora utilizando a denominação de cargas vítrea e resinosa, em vez de cargas positiva e negativa:

Para julgar então qual é a espécie de eletricidade de um corpo qualquer, basta eletrizá-lo e apresentar a ele em sequência um pedaço de vidro e um pedaço de âmbar [eletrizados]; ele [o corpo] será constantemente atraído por um [dos pedaços] e repelido pelo outro; [...]

Na Seção 5.4 isto é feito de maneira sistemática.

Experiência 5.15

Agora que já vimos que uma mesma substância pode ficar carregada positivamente ou negativamente, pode-se repetir a Experiência 5.1 de uma maneira mais prática e que exhibe resultados mais visíveis.

Um canudo plástico fica bem carregado negativamente ao ser atritado no cabelo, na pele ou no algodão. Vem por tentativas práticas que um canudo plástico adquire uma boa quantidade de carga positiva ao ser atritado entre duas borrachas duras, como as usadas em mangueira de chuveiro. Para isto cortam-se dois pedaços desta borracha. Coloca-se uma extremidade do canudo entre elas e puxa-se rapidamente o canudo enquanto elas são pressionadas uma contra a outra. Um canudo também adquire uma boa quantidade de carga positiva ao ser atritado desta forma entre dois tubos de PVC.

Carrega-se então o papel de alumínio de um pêndulo I pelo princípio ACR através do contato com um canudo plástico atritado contra o cabelo. Depois do

⁸[DF33b, págs. 469-470].

contato, este pêndulo passa a ser repelido por este canudo. Carrega-se o papel de alumínio de um pêndulo *II* através do contato com um canudo de plástico atritado entre dois pedaços de borracha dura. Depois do contato, este pêndulo *II* passa a ser repelido por este último canudo.

Porém, se aproximarmos lentamente este último canudo positivamente carregado do pêndulo *I*, sem deixar que se toquem, será observada uma atração entre eles. Também se aproximarmos lentamente do pêndulo *II* o canudo atritado no cabelo, sem deixar que se toquem, será observada uma atração entre eles.

A vantagem deste procedimento em relação ao adotado na Experiência 5.1 é que fica mais fácil e prático adquirir uma boa quantidade de carga positiva com o canudo atritado entre duas borrachas duras, do que pelo vidro ou pela seda atritados contra um pano de fios acrílico. Em particular, nem sempre se consegue eletrizar os vidros de hoje em dia pelo atrito quando eles são segurados pela mão.

Experiência 5.16

A Experiência 5.9 pode ser repetida mais facilmente utilizando dois canudos plásticos atritados em materiais diferentes, em vez de utilizar um canudo e um copo atritados no mesmo material. Pode ser utilizada uma semente de dente-de-leão, ou então um pedaço bem pequeno de algodão, tal que leve uns 10 segundos para cair de uma altura de dois metros. Atrita-se um canudo no cabelo para que adquira uma carga negativa. Puxa-se rapidamente o outro canudo entre dois pedaços de borracha dura que estão pressionados entre si, para que o canudo adquira uma boa quantidade de carga positiva, como na Experiência 5.15. Mantêm-se estes dois canudos afastados entre si, na posição horizontal.

Solta-se a semente de dente-de-leão sobre o canudo negativo atritado no cabelo. A semente é atraída pelo canudo, toca nele e depois se solta (ou então podemos soltá-la do canudo soprando-a de leve). Pelo mecanismo *ACR*, a semente fica carregada negativamente. Ela então passa a ser repelida pelo canudo e fica flutuando no ar acima do canudo, como na Experiência 4.4, Figura 5.22 (a).

Se agora aproximarmos lentamente o canudo positivo acima da semente negativa que está flutuando sobre o canudo negativo, sem deixar que a semente toque no canudo positivo, veremos que a semente é atraída por ele. É possível manter a semente negativa entre os 2 canudos, como na Figura 5.22 (b). A tendência da semente é de ir rapidamente em direção ao canudo positivo acima dela, mas este toque deve ser evitado.

É possível até mesmo retirar o canudo debaixo. Com isto a semente negativa pode ficar flutuando devido apenas à atração do canudo positivo acima dela, Figura 5.22 (c). Para que isto ocorra não se pode deixar a semente tocar no canudo positivo. Sempre que ela se dirigir para o canudo, este deve ser afastado rapidamente. Com a prática consegue-se um bom controle. Com isto a semente negativa fica subindo e descendo pela sala, mas sempre flutuando abaixo do canudo positivo.

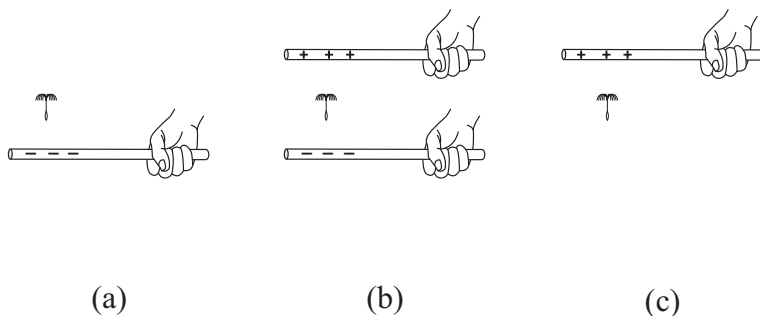


Figura 5.22: (a) Uma semente de dente-de-leão carregada negativamente flutuando acima de um canudo negativo. (b) A semente negativa entre um canudo negativo e um positivo. (c) A semente negativa sendo mantida abaixo de um canudo positivo.

Experiência 5.17

A Experiência 5.15 pode ser feita de maneira análoga utilizando o versório de Du Fay, Seção 4.7. Existe um papel de alumínio em uma das extremidades de cada versório de Du Fay. Constroem-se dois destes versórios, *I* e *II*, verificando se estão descarregados. Para isto toca-se com o dedo no papel de alumínio. Depois aproxima-se o dedo das partes plásticas do versório, sem tocá-las. É necessário que os versórios não reajam. Caso algum deles se direcione para o dedo, significa que está carregado. Pode-se então aguardar alguns minutos sem tocá-lo, até que se descarregue, ou então passar um guardanapo de papel umedecido no versório e aguardar que ele seque. Antes de começar a experiência é fundamental que todo o versório esteja descarregado.

Inicialmente atrita-se um canudo plástico no cabelo para que fique negativamente carregado. Em seguida carrega-se o versório *I* pelo método *ACR*, como mostrado na Experiência 4.12. Depois que o papel de alumínio se soltou do canudo negativo, ele passa a ser repelido por este canudo. Atrita-se um outro canudo plástico entre duas borrachas duras para que fique positivamente carregado. Em seguida carrega-se o versório *II* pelo método *ACR*. Depois que o papel de alumínio se soltou do canudo positivo, ele passa a ser repelido por este canudo.

Aproxima-se agora lentamente o canudo negativo do versório *II*, sem deixar que se toquem. Observa-se que o papel de alumínio é atraído pelo canudo. Aproxima-se lentamente o canudo positivo do versório *I*, sem deixar que se toquem. Observa-se que o papel de alumínio é atraído pelo canudo.

Experiência 5.18

A Experiência 5.14 também pode ser realizada com dois versórios de Du Fay. Carrega-se o papel de alumínio do versório *I* negativamente pelo método *ACR*, como na Experiência 5.17. Pelo mesmo procedimento carrega-se o papel de alumínio do versório *II* positivamente. Carrega-se um canudo plástico

atritando-o contra uma certa substância. Feito isto aproxima-se o canudo atritado do versório negativo *I*, sem deixar que se toquem. Vamos supor que eles se repelem, como na Figura 5.23.

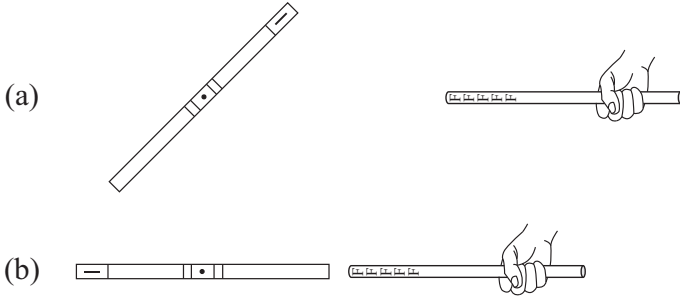


Figura 5.23: Papel de alumínio negativamente carregado de um versório de Du Fay sendo repelido por um corpo eletrizado que se aproxima dele.

Agora aproxima-se a parte atritada deste canudo do versório positivo *II*, sem deixar que se toquem. Vamos supor que eles se atraem, como na Figura 5.24. Como cargas de mesmo sinal se repelem e cargas de sinais opostos se atraem, conclui-se neste caso que o canudo ficou carregado negativamente. O mesmo procedimento pode ser utilizado para descobrir o sinal da carga de outros materiais eletrizados com substâncias diversas.

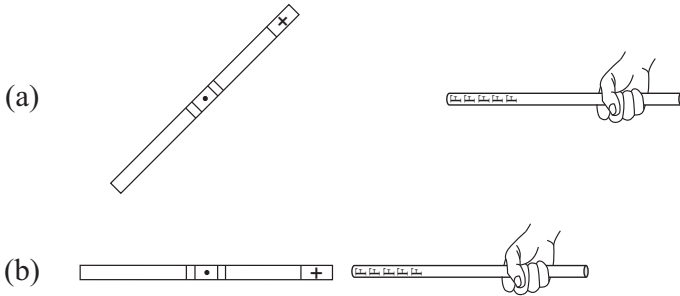


Figura 5.24: Papel de alumínio positivamente carregado de um versório de Du Fay sendo atraído por um corpo eletrizado que se aproxima dele.

Du Fay criou este tipo de versório como um instrumento prático e sensível para distinguir o tipo de carga de um certo corpo pouco eletrizado. Inicialmente construiu um versório metálico, depois percebeu que ele funcionava melhor para seus propósitos se fosse feito de vidro ou de cera. Ele então descreve uma experiência análoga à Experiência 5.18. Vamos aqui ao trecho relevante de Du Fay:⁹

⁹[DF33b, págs. 473-474].

Existe ainda uma maneira bem simples para conhecer o tipo de eletricidade de um corpo no qual esta virtude é muito fraca [...] Enquanto isto evitarei [de apresentar] ao leitor os detalhes aborrecidos e desanimadores das experiências falhas ou imperfeitas, e direi apenas que para ter sucesso, é necessário utilizar uma agulha de vidro colocada sobre um pivô de vidro muito longo, que esta agulha possua em uma de suas extremidades uma bola metálica oca, e na outra [extremidade] um contra-peso de vidro, é necessário secar bem todas as suas partes, e então é necessário comunicar a eletricidade à bola de metal com o tubo [de vidro atritado], ou de qualquer outra matéria análoga, a bola [carregada] será então atraída pelos corpos cuja eletricidade é resinosa, e repelida pelos corpos que possuem a eletricidade vítrea.

5.4 A Série Triboelétrica

Nesta experiência ilustramos como o procedimento prático adotado na Experiência 5.14 pode ser utilizado com uma grande variedade de substâncias atritadas com diversos materiais. Um versório metálico vai ser utilizado para testar se o corpo está neutro ou carregado. Inicialmente encosta-se o dedo no versório para descarregá-lo. Em seguida se aproxima o corpo lentamente do versório, sem tocá-lo. Caso este fique parado, diz-se que o corpo está neutro, caso se oriente em relação ao corpo, diz-se que o corpo está carregado.

Para testar a carga dos corpos atritados, vão ser utilizados dois pêndulos elétricos carregados com cargas opostas, que ficam afastados sobre a mesa. Inicialmente toca-se com o dedo de leve no papel de alumínio de cada pêndulo, para descarregá-los. Em seguida eles são carregados por contato. Uma maneira simples e eficiente de fazer isto é atritando um canudo plástico e aproximando-o do pêndulo. O pêndulo é atraído pelo canudo, toca nele e passa a ser repelido pelo canudo ao adquirir uma carga elétrica do mesmo tipo que a carga do canudo.

De nossa vivência com este tipo de experiência vem que é fácil carregar um pêndulo negativamente, já que o canudo adquire uma grande carga negativa ao ser atritado com diversos materiais, tais como: cabelo, algodão, guardanapo de papel, etc. Outros corpos que também adquirem uma boa carga negativa e que podem ser utilizados para carregar o pêndulo são os seguintes, com as substâncias com que foram atritados entre parênteses: tubo de acrílico (guardanapo de papel, algodão, pano de acrílico, cabelo, poliamida sintética), tubo de borracha dura como a mangueira de chuveiro (saco plástico, pano de acrílico, poliamida sintética, cabelo, vidro), tubo de PVC como o cano de água (pele humana, pano de acrílico, poliamida sintética, cabelo), isopor (cabelo), saco plástico (cabelo) e seda (cabelo).

Por outro lado, para conseguirmos carregar um canudo de plástico com uma grande quantidade de carga positiva tivemos de atritá-lo entre dois tubos duros de borracha, feitos de mangueira de chuveiro, ou entre dois tubos de PVC. Para

isto a ponta do canudo é presa entre dois tubos inicialmente neutros que são pressionados entre si. Então a ponta do canudo é puxada rapidamente entre os tubos. Alguns outros corpos que adquiriram uma grande quantidade de carga positiva ao serem atritados e que podem ser utilizados para carregar o pêndulo positivamente foram os seguintes, com as substâncias com que foram atritados entre parênteses: vidro (pano de acrílico), poliamida sintética (pano de acrílico) e seda (pano de acrílico, tubos duros de borracha de mangueira de chuveiro, tubos de acrílico e tubos de PVC como os canos de água).

No caso de algumas substâncias na forma de fios ou de linhas (fio de cabelo, linha de algodão, fio de poliamida sintética e linha de poliéster), elas eram inicialmente amarradas a um canudo plástico para evitar de serem descarregadas pela mão depois de serem atritadas, Figura 5.25 (a). Para testar a carga destes fios ou linhas não foram utilizados os pêndulos carregados descritos anteriormente. Em vez disto, os canudos carregados negativamente (ao serem atritados no cabelo) e positivamente (ao serem atritados entre dois tubos duros de borracha obtida de mangueira de chuveiro) eram presos verticalmente por suas extremidades inferiores em um suporte apropriado, como a base do pêndulo elétrico, Figura 5.25 (b).

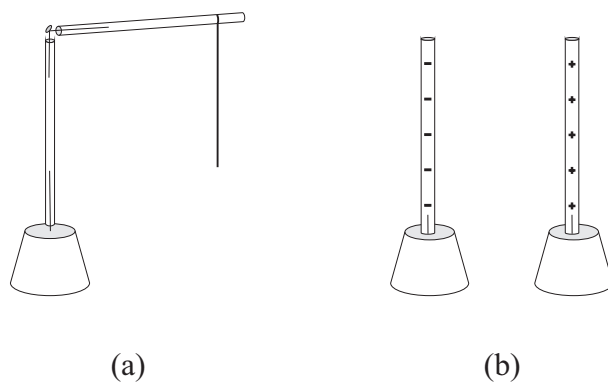


Figura 5.25: (a) Fio amarrado em um canudo plástico. (b) Canudos plásticos eletrizados com cargas opostas.

Depois de atritar o fio ou a linha amarrada a um canudo de plástico mantido na horizontal, ele era aproximado lentamente de um canudo vertical carregado negativamente e depois de um canudo vertical carregado positivamente. Ao observar a atração ou repulsão destes fios carregados em relação a estes canudos verticais, foi possível determinar a carga gerada no fio pelo atrito.

As substâncias que testamos foram as seguintes: pele humana seca, saco plástico, guardanapo de papel, isopor, papel de alumínio, algodão, pano de acrílico (ver a Experiência 5.1), poliamida sintética, cabelo, couro de gado, palha de aço, rolha, vidro liso, borracha dura obtida de mangueira de chuveiro, canudo plástico de refrigerante, porcelana, tubo de acrílico, tubo de PVC obtido de cano marrom de água, papelão, madeira e seda. Foi utilizado algodão hidrófilo para

atritar algumas substâncias ou então uma linha de algodão para ser atritada por outros corpos. No caso da poliamida sintética, ela foi utilizada na forma de uma meia-calça feminina para atritar outros corpos. Algumas meias que se diz usualmente serem de “seda,” na verdade são de poliamida sintética. A poliamida sintética também é facilmente encontrada no forro de roupas de banho. Isto deve ser verificado na embalagem do produto. Também se utilizou fio de poliamida sintética para ser atritado por outras substâncias. Vários corpos foram atritados contra o cabelo friccionando-os na cabeça, mas também se utilizou fios de cabelo presos em canudos plásticos para serem atritados contra outras substâncias. A madeira que utilizamos foi obtida de palitos de churrasco vendidos no comércio, não sabemos exatamente de que tipo de árvore tiveram origem. Usamos um pano de seda para atritar algumas substâncias e também um fio de seda para ser atritado por outros corpos. O vidro foi um copo bem liso. Como pano de acrílico utilizamos uma blusa feita com fios deste material. Como couro foi utilizado um cinto. Como porcelana empregamos uma xícara deste material.

O procedimento que adotamos consistiu inicialmente em carregar um pêndulo negativamente por contato com um canudo atritado no cabelo e o outro pêndulo positivamente por contato com um outro canudo atritado entre dois tubos duros de borracha obtida de mangueira de chuveiro. Estes pêndulos carregados foram mantidos afastados entre si tal que seus fios pendessem verticalmente. Os canudos carregados também foram mantidos afastados entre si e longe dos dois pêndulos carregados. Estes canudos carregados foram mantidos apoiados na vertical para testar a carga de alguns fios carregados.

Inicialmente era verificado se tanto um certo corpo *I* quanto um outro corpo *II* estavam inicialmente descarregados, aproximando cada um deles do versório. Caso estivessem neutros, o corpo *I* era então atritado contra o corpo *II*. A motivação da experiência foi a de variar tanto o corpo *I* quanto o corpo *II* para verificar o tipo de carga que adquiriam.

Depois disto era observado se o corpo *I* tinha ficado carregado, aproximando-o lentamente do versório. Caso ele estivesse carregado, ele era aproximado lentamente do pêndulo carregado negativamente, sem deixar que se tocassem, e era observado se o pêndulo era atraído ou repellido pelo corpo carregado. Em seguida, o corpo *I* carregado era aproximado lentamente do pêndulo carregado positivamente, sem deixar que se tocassem, sendo então observado se o pêndulo era atraído ou repellido pelo corpo carregado. Caso houvesse atração (repulsão) do pêndulo carregado negativamente e também repulsão (atração) do pêndulo carregado positivamente, era concluído que o corpo *I* ficou carregado positivamente (negativamente) ao ser atritado contra o corpo *II*.

Nos parece importante verificar não apenas a atração ou repulsão de um dos pêndulos em relação ao corpo carregado, mas também a repulsão ou atração do outro pêndulo em relação ao corpo carregado, para que não exista dúvida em relação à carga adquirida pelo corpo. O motivo desta precaução é que muitas vezes a carga adquirida no atrito pode ser pequena, o que faz com que as atrações e repulsões dos pêndulos carregados sejam de pequena intensidade, dificultando a observação.

Ao longo da experiência deve-se de vez em quando tocar com o dedo no

versório para descarregá-lo, assim como é importante fornecer uma carga extra a cada pêndulo, já que aos poucos eles vão se descarregando. No caso de corpos plásticos ou resinosos, não se deve atritar o mesmo corpo em mais de uma substância, já que às vezes a carga adquirida no atrito com a primeira substância permanece no corpo e pode dificultar a observação de qual carga foi adquirida pelo corpo ao ser atritado com a segunda substância. Para testar a carga adquirida pelos canudos de plástico, por exemplo, deve-se utilizar um canudo novo para cada substância contra a qual vai ser atritado. Além disso, antes de ser atritado deve-se tomar a precaução de verificar se ele está inicialmente neutro.

Para atritar o canudo plástico com substâncias sólidas utilizou-se o procedimento de prendê-lo entre duas substâncias iguais (entre dois pedaços de isopor, entre duas rolhas, entre dois copos de vidro, etc.) Em seguida, o canudo era puxado rapidamente para fora das substâncias que o pressionavam, tal que seu comprimento deslizesse entre as substâncias. No caso do cabelo bastava segurar as duas pontas do canudo e deslizar o canudo para frente e para trás no cabelo.

No caso do vidro, do couro, da porcelana, da madeira e do papelão, tem que se tomar um cuidado especial antes de manuseá-los com a mão. Para que eles possam adquirir e manter uma certa carga ao serem atritados, é necessário que antes da fricção estejam bem secos e que, de preferência, tenham sido um pouco aquecidos. No nosso caso os aquecemos em um forno de micro-ondas, mas também pode ser utilizado um aquecimento com fogo ou com secador de cabelo.

Em geral atritamos o corpo *I* contra o corpo *II*. Quando possível testávamos a carga tanto de *I* quanto de *II*. Mas nem sempre isso era possível. Em alguns casos um destes corpos não mantinha nenhuma carga pois mesmo que tenha sido gerada uma carga por atrito, este corpo se descarregava pelo contato com a mão, como é o caso da palha de aço, do algodão ou do guardanapo de papel. Nestes casos testávamos apenas a carga mantida pelo outro corpo.

Depois de serem seguidos estes procedimentos e de serem feitas estas experiências, obtivemos o resultado mostrado na Tabela 5.1.

Definição: Uma sequência como a da Tabela 5.1 é chamada de *série triboelétrica*. O prefixo “tribo” vem do grego, significando atrito ou a ação de esfregar. Logo a série triboelétrica indica os tipos de eletrização obtidos na fricção.

A maneira de se ler esta Tabela é a seguinte. Se atritamos um corpo *I* contra um corpo *II*, vai ficar positivamente carregado aquele que estiver mais acima na Tabela, isto é, mais próximo do símbolo +. Por exemplo, ao atritarmos a seda contra o canudo de plástico, a seda fica com carga positiva e o canudo com carga negativa.

Não incluímos a palha de aço na Tabela 5.1 pois era difícil que algum corpo adquirisse uma carga elétrica considerável ao ser atritado com ela. Os que ficaram negativos foram o canudo plástico, o tubo de acrílico, a borracha dura, o tubo de PVC, o isopor e o saco plástico. Já o fio de cabelo ficou positivo. O vidro, a madeira, a porcelana, o pano de acrílico, a poliamida sintética e a seda não adquiriram uma carga perceptível.

A série triboelétrica que obtivemos difere de algumas séries encontradas na

+
cabelo
vidro liso
pele humana
poliamida sintética
algodão
seda
papel ou papelão
couro
porcelana
papel de alumínio
madeira
rolha
pano de acrílico
isopor
saco plástico
canudo plástico
acrílico rígido
tubo de PVC
borracha dura
—

Tabela 5.1: Série triboelétrica.

literatura, que também diferem entre si. Alguns motivos contribuem para esta divergência. Existem vários tipos de vidro, feitos de diferentes materiais e com procedimentos de fabricação diferentes. Tudo isto afeta sua capacidade de adquirir carga positiva ou negativa. Por exemplo, alguns tipos de vidro ficaram positivos ao serem atritados na mão, enquanto que outros tipos de vidro ficaram negativos. A mesma variedade de substâncias e de processos de fabricação ocorre também para os outros materiais (plástico, papelão, borracha, etc.) O corante usado na seda e nos outros tecidos e fios também pode alterar suas propriedades. Madeiras vindas de árvores diferentes possuem propriedades distintas. Tanto o cabelo quanto a pele podem ser mais ou menos oleosos, assim como podem estar impregnados de xampus, de cremes e de outras substâncias.

Cada pessoa deve tentar construir sua própria série triboelétrica, utilizando os materiais disponíveis.

Na Seção 5.3 vimos que Du Fay em 1733 havia experimentado atritar a seda, penas e lã tanto com seda quanto com a mão. Ele encontrou que cada um destes corpos sempre se carregava com eletricidade do mesmo tipo, não importando o material com o qual era atritado. Mas algumas anomalias começaram a surgir desde então. John Canton (1712-1772), em particular, encontrou que o vidro áspero, não polido, podia ser eletrizado positivamente ao ser atritado com flanela, ou negativamente ao ser atritado com seda oleosa.¹⁰ Estas pesquisas

¹⁰[Can54].

foram continuadas por Johan Carl Wilcke (1732-1796) que em 1757 publicou a primeira série triboelétrica, a saber:¹¹ vidro polido, lã, penas, madeira, papel, lacre, cera branca, vidro áspero, chumbo, enxofre, metais diferentes do chumbo. Em 1759 Benjamin Wilson (1721-1788) publicou uma outra série, obtida talvez independentemente de Wilcke, a saber:¹² diamante, turmalina, vidro, âmbar. Estas foram as primeiras séries triboelétricas da história.

5.5 A Atração e a Repulsão São Igualmente Frequentes?

Experiência 5.19

Já foi visto na Seção 5.4 como carregar um canudo de plástico positivamente (puxando-o entre duas borrachas duras) ou negativamente (atritando-o no cabelo, na pele ou no algodão). Carrega-se um canudo negativamente pelo atrito e repete-se a Experiência 4.10. Isto é, inicialmente toca-se com o dedo no papel de alumínio de um pêndulo elétrico. Aproxima-se o canudo negativo do pêndulo. O papel de alumínio é atraído pelo canudo, toca nele e passa a ser repellido por ele. Ao tocarmos com a mão no papel de alumínio ele descarrega. Pode-se então recomençar todo o processo e tudo se repete.

Agora faz-se a mesma experiência com o canudo carregado positivamente. Inicialmente descarrega-se o pêndulo tocando no papel de alumínio com o dedo. Ao se aproximar o canudo atritado vem que o pêndulo é atraído, toca nele e passa a ser repellido. Ao tocarmos com a mão no papel de alumínio ele descarrega. Pode-se então recomençar todo o processo e tudo se repete.

Experiência 5.20

São feitas agora experiências similares às Experiências 5.1 e 5.15. Carrega-se pelo método *ACR* um pêndulo *I* negativamente, assim como nas Experiências 4.7 e 5.19. Carrega-se pelo método *ACR* um outro pêndulo *II* positivamente, como na Experiência 5.20. Aproxima-se lentamente o canudo negativo do pêndulo *I* carregado negativamente, observando-se uma repulsão entre eles. Aproxima-se agora o canudo negativo do pêndulo *II* carregado positivamente, sem deixar que se toquem. Observa-se uma atração entre eles. Aproxima-se lentamente o canudo positivo do pêndulo *II* carregado positivamente, observando-se uma repulsão entre eles. Aproxima-se agora o canudo positivo do pêndulo *I* carregado negativamente, sem deixar que se toquem. Observa-se uma atração entre eles.

Experiência 5.21

São feitas agora experiências análogas à Experiência 4.8. Carrega-se um pêndulo elétrico negativamente pelo método *ACR* ao aproximar um canudo

¹¹[Hei99, págs. 387-388].

¹²[Wil59] e [Hei99, págs. 387-388].

atritado no cabelo, como nas Experiências 5.1 e 5.15. Depois que o papel de alumínio passou a ser repelido pelo canudo atritado, afasta-se o canudo. Agora aproxima-se lentamente o dedo do papel de alumínio, sem deixar que se toquem. Observa-se que o pêndulo é atraído pelo dedo.

Faz-se o mesmo procedimento mas agora com um pêndulo carregado positivamente, ao se aproximar um canudo atritado entre duas borrachas duras. Depois que o papel de alumínio passou a ser repelido pelo canudo atritado, afasta-se o canudo. Agora aproxima-se lentamente o dedo do papel de alumínio, sem deixar que se toquem. Observa-se que o pêndulo é atraído pelo dedo.

A Experiência 5.20 mostra mais uma vez que se um corpo I está carregado negativamente, ele repele um outro corpo II carregado negativamente. O mesmo ocorre se os dois corpos estiverem carregados positivamente. Por outro lado, se o corpo I estiver carregado negativamente e o corpo II positivamente, eles se atraem. O mesmo ocorre se I for positivo e II negativo.

Vemos então duas atrações e duas repulsões, o que poderia dar a impressão que estes dois fenômenos são igualmente frequentes. Mas como foi visto nas Experiências 5.19 e 5.21, um corpo carregado em geral atrai um corpo neutro, quer o corpo carregado seja positivo ou negativo. Por outro lado um corpo neutro como nosso dedo atrai um corpo carregado positivamente e também um corpo carregado negativamente. Com isto se conclui que a atração é bem mais frequente do que a repulsão, já que a maior parte dos corpos é macroscopicamente neutra. Quando se carrega um certo corpo, ele vai então tender a atrair quase todos os outros corpos que estão ao seu redor, mesmo que esta força seja muito pequena na maioria dos casos e pouco observável. Ele só vai tender a repelir aqueles que possuem uma carga resultante do mesmo sinal que a sua. Se o outro corpo tiver uma carga contrária à do primeiro, ou se for eletricamente neutro, vai haver uma atração entre eles.

Em conclusão podemos dizer que estas experiências ilustram o fato de que as atrações elétricas são muito mais frequentes na natureza do que as repulsões elétricas. E o motivo é muito simples. As repulsões ocorrem apenas entre corpos eletrizados com cargas do mesmo tipo. Já as atrações ocorrem não apenas entre corpos eletrizados com cargas de tipos opostos, mas também entre corpos neutros e corpos eletrizados (tanto positivamente quanto negativamente).

Na Seção 7.10 discutiremos a força de interação entre dois corpos eletrizados com cargas de mesmo sinal.

5.6 Variação da Força Elétrica com a Distância

Desde a experiência do efeito âmbar, análoga à Experiência 2.1, já se sabe que a atração exercida por um corpo carregado sobre um pequeno corpo neutro depende da distância. Afinal de contas, os corpos leves só são visivelmente atraídos pelo corpo atritado quando a distância entre eles é pequena. Caso a distância seja muito grande, não se percebe facilmente esta atração. O mesmo ocorre nas experiências com o versório, como a Experiência 3.1. Ou seja, só

quando o corpo plástico atritado é aproximado do versório é que se observa a sua orientação apontando para o plástico. O mesmo ocorre em todas as outras experiências realizadas até aqui, já que os efeitos só ocorrem ou só se tornam perceptíveis quando a distância entre os corpos interagentes é pequena.

Também podem ser observados estes efeitos nas atrações e repulsões entre corpos carregados. Vamos ilustrar isto utilizando um pêndulo elétrico.

Experiência 5.22

Carrega-se um pêndulo *I* negativamente pelo método *ACR* pela aproximação de um canudo de plástico atritado no cabelo, como nas Experiências 5.1 e 5.15. Depois que o papel de alumínio foi atraído pelo canudo negativo, tocou nele e passou a ser repelido por ele, afasta-se o canudo. Nesta situação o pêndulo volta à posição vertical. Carrega-se um canudo plástico positivamente ao atritá-lo entre duas borrachas duras. Aproxima-se lentamente este canudo positivo do pêndulo carregado negativamente, sem deixar que se toquem, até a distância em que começa a ser visível a atração entre eles, indicada pela inclinação do pêndulo em relação à vertical. O canudo deve estar na mesma altura do papel de alumínio, aproximando-se dele horizontalmente. Em seguida diminui-se aos poucos a distância entre o pêndulo e o canudo. Observa-se que quanto menor for esta distância, maior será a inclinação do pêndulo em relação à vertical, Figura 5.26. Isto mostra que a força de atração entre corpos eletrizados com cargas opostas aumenta com a diminuição da distância entre eles, sendo esta força indicada pelo ângulo de inclinação do pêndulo em relação à vertical.

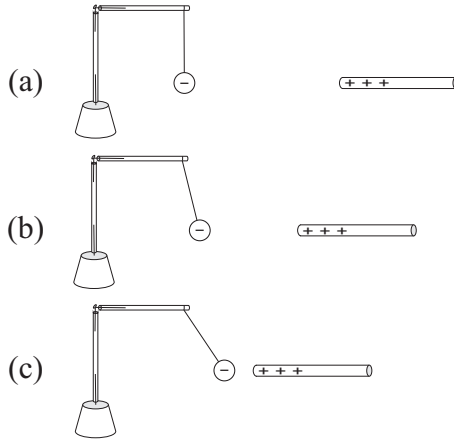


Figura 5.26: Quanto menor é a distância entre dois corpos eletrizados com cargas opostas, maior é a força de atração entre eles.

Experiência 5.23

Carrega-se um pêndulo *I* negativamente pelo método *ACR* pela aproximação de um canudo de plástico atritado no cabelo, como nas Experiências 5.1 e 5.15.

Depois que o papel de alumínio foi atraído pelo canudo, tocou nele e passou a ser repellido por ele, afasta-se o canudo. Nesta situação o pêndulo volta à posição vertical. Aproxima-se agora lentamente o canudo negativo do pêndulo carregado até uma distância em que comece a ser visível a repulsão, indicada pela inclinação do pêndulo em relação à vertical. O canudo deve estar na mesma altura do papel de alumínio, aproximando-se dele horizontalmente. Em seguida diminui-se aos poucos a distância entre o papel de alumínio e o canudo atritado. Observa-se então que quanto menor for esta distância, maior será o ângulo de inclinação do pêndulo em relação à vertical, como mostrado na Figura 5.27. E isto indica uma maior força de repulsão entre os corpos carregados.

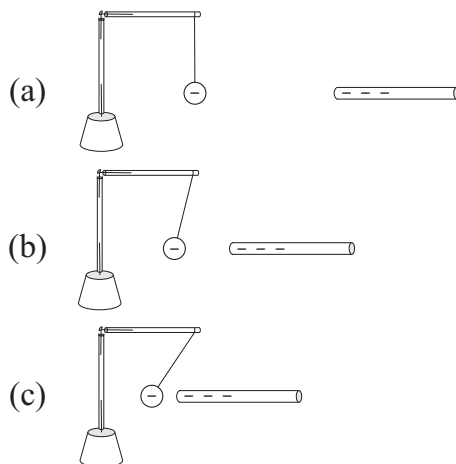


Figura 5.27: Quanto menor é a distância entre dois corpos eletrizados com cargas de mesmo sinal, maior é a intensidade da força de repulsão entre eles.

Caso o canudo eletrizado se aproxime demais do pêndulo eletrizado nesta experiência, pode ocorrer em algumas situações que eles passem a se atrair para distâncias mútuas muito pequenas. Isto será discutido na Seção 7.10.

5.7 Variação da Força Elétrica com a Quantidade de Carga

Até o momento não nos preocupamos em quantificar a noção de quantidade de eletricidade (ou de quantidade de carga elétrica, ou de magnitude de carga elétrica). Isto em geral é feito através da noção de força elétrica.

Sejam A , B e C três corpos cujos tamanhos (ou diâmetros máximos) sejam pequenos comparados com as distâncias entre eles. Vamos considerar que os corpos A e B estão eletrizados, seja por atrito ou pelo método ACR . Seja F_{AC} a força entre A e C quando estes dois corpos estão separados pela distância d , com o corpo B longe deste conjunto. Seja F_{BC} a força entre B e C quando

estes dois corpos estão separados pela distância d , com o corpo A longe deste conjunto.

Definições: Diz-se que a quantidade de carga de A é igual à quantidade de carga de B caso $F_{AC} = F_{BC}$. Caso F_{AC} seja maior do que F_{BC} , então diz-se que a quantidade de carga de A é maior do que a quantidade de carga de B . Caso F_{AC} seja menor do que F_{BC} , então diz-se que a quantidade de carga de A é menor do que a quantidade de carga de B .

A intensidade da força pode ser indicada de várias maneiras. Vamos considerar aqui situações nas quais as distâncias são sempre as mesmas. Na Experiência 2.1, por exemplo, quanto maior é a quantidade de papeizinhos que um canudo atrai, maior é a força que ele está exercendo. Na Experiência 2.8 a intensidade da força é indicada pela curvatura do líquido que cai. Na Experiência 4.1 a intensidade da força é indicada pelo ângulo de abertura entre os plásticos eletrizados. Nas experiências com o pêndulo elétrico, como na Experiência 4.5, a intensidade da força também é indicada pelo ângulo entre o fio do pêndulo e a vertical. Também nas experiências com a tira plástica pendular a intensidade da força é indicada pelo ângulo de abertura entre as tiras, como no caso da Experiência 5.11.

Ou seja, dados dois canudos eletrizados A e B , define-se que estará mais eletrizado aquele que, estando à mesma distância da mesa ou do filete de água, atrair uma maior quantidade de papeizinhos ou que ocasionar uma maior curvatura da água, Figura 5.28. O corpo C neste caso seria o papelzinho ou o filete de água. Também estará mais eletrizado aquele que, estando à mesma distância de um pêndulo elétrico, ocasionar uma maior inclinação do pêndulo. Pode-se aplicar esta definição às outras experiências descritas até aqui.

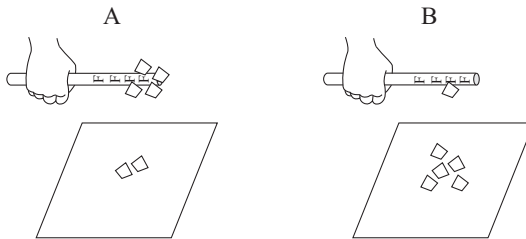


Figura 5.28: O canudo A está mais eletrizado do que B já que, estando os dois à mesma distância da mesa, A atrai mais papeizinhos do que B .

Na Seção 5.6 viu-se que a força aumenta de intensidade com a diminuição da distância entre os corpos que estão interagindo. Isto sugere uma outra maneira de se indicar a eletrização de um corpo. Define-se que quanto maior for a distância para a qual uma força elétrica comece a ser visível, mais eletrizado estará este corpo. Por exemplo, sejam dados dois canudos eletrizados A e B de mesmo comprimento. Vamos supor que A comece a atrair papeizinhos a uma distância de 15 cm da mesa, enquanto que no caso de B esta atração só comece a ser perceptível quando ele estiver a uma distância de 5 cm da mesa. Neste caso define-se que A está mais eletrizado do que B , ou seja, que A possui uma

quantidade de carga maior do que a de B , Figura 5.29.

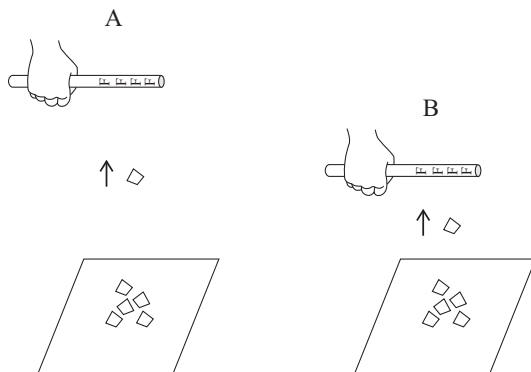


Figura 5.29: O canudo A está mais eletrizado do que B , já que começa a atrair papeizinhos a uma maior distância da mesa.

Os outros efeitos também começarão a ser observados a uma distância maior para A do que para B . Por exemplo, o corpo A vai causar uma curvatura do filete de água (ou do pêndulo elétrico) estando a uma distância d_1 do filete (ou do pêndulo), enquanto que o corpo B vai causar as mesmas curvaturas estando a uma distância d_2 do filete (ou do pêndulo). Quando A está mais eletrizado do que B , vem que $d_1 > d_2$.

Logo, é por definição que a força elétrica aumenta com a quantidade de carga.

Apresentamos agora algumas experiências simples mas não triviais.

Experiência 5.24

Escolhem-se dois canudos plásticos eletrizados por atrito. Colocamos vários papeizinhos sobre uma mesa. Vamos supor que um dos canudos atraia aproximadamente N papeizinhos sobre a mesa quando está na horizontal a uma distância d da mesa. Vamos supor que o segundo canudo eletrizado também atraia aproximadamente N papeizinhos quando esteja à mesma distância d da mesa. Pela definição anterior da Seção 5.7, conclui-se que possuem a mesma quantidade de carga.

Afastam-se os canudos da mesa. Juntam-se os dois canudos lado a lado e eles são novamente aproximados da mesma até a mesma distância d anterior. Observa-se que eles juntos atraem uma quantidade de papeizinhos maior do que a quantidade atraída por qualquer um deles separadamente.

Se juntarmos três ou quatro canudos igualmente eletrizados, a quantidade de papeizinhos atraída aumenta ainda mais quando estão na mesma distância da mesa.

Experiência 5.25

Vamos supor que temos dois canudos que foram uniformemente eletrizados por atrito ao longo de seus comprimentos. Vamos supor que eles possuam aproximadamente a mesma carga elétrica, como indicado pela definição anterior. Carregamos um pêndulo elétrico ao entrar em contato com um dos canudos pelo método *ACR*. O pêndulo passa a ser repellido pelo canudo atritado. Afastamos o canudo e o pêndulo volta à vertical. Colocamos o canudo na horizontal, na mesma altura do disco de papel de alumínio do pêndulo. Vamos supor que o pêndulo se incline de um ângulo θ em relação à vertical quando a ponta mais próxima do canudo está à distância d da projeção vertical que passa pelo ponto de apoio do fio do pêndulo, como na Figura 5.30 (a).

Juntamos os dois canudos atritados e os aproximamos de uma mesma distância d do pêndulo elétrico carregado pelo procedimento *ACR*. Observa-se que o pêndulo se desvia de um ângulo maior do que θ em relação à vertical, Figura 5.30 (b). Deste fato conclui-se, a partir da definição anterior, que dois canudos igualmente carregados, ao se juntarem, passam a ter uma carga maior do que a carga de qualquer um deles separadamente.

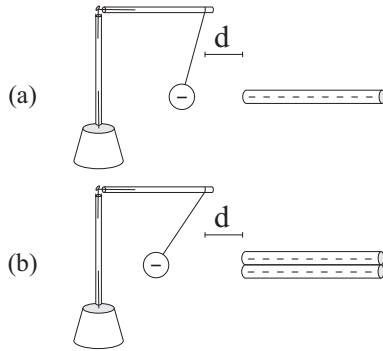


Figura 5.30: (a) A força sobre um pêndulo carregado exercida por um canudo carregado é menor do que (b) a força sobre o mesmo pêndulo exercida por dois canudos igualmente carregados, à mesma distância do pêndulo.

Ao juntarmos três canudos igualmente carregados, será observado que o ângulo de afastamento do pêndulo elétrico aumentará ainda mais, indicando um crescimento da força.

Definição: Estas observações permitem que se faça uma nova definição. Sejam N corpos igualmente eletrizados com cargas de mesmo sinal. Ao juntarmos estes N corpos, dizemos que a carga elétrica do conjunto valerá N vezes a carga elétrica de um destes corpos.

Embora esta seja uma definição muito simples, ela não é trivial. O nível de um termômetro de mercúrio pode ser definido como indicando a temperatura de um corpo. Por exemplo, podemos definir que dois corpos A e B possuem a mesma temperatura caso um termômetro ligado ao corpo A indique o mesmo nível do que aquele indicado por este termômetro ao ser ligado ao corpo B .

Caso o termômetro indique um nível maior (menor) para A do que para B , define-se que A possui uma temperatura maior (menor) do que a temperatura de B . Porém, vem da experiência que ao juntarmos ou ao encostarmos os corpos A e B , não é alterado o nível indicado pelo termômetro. Por este motivo não se define que a temperatura do conjunto AB (ou seja, com A e B juntos ou encostados) será duas vezes a temperatura de A .

No caso dos pesos e das cargas elétricas a experiência mostra que ao juntarmos os corpos que possuem a mesma propriedade, os efeitos gravitacionais ou elétricos produzidos por eles serão maiores do que o efeito produzido por um único destes corpos. É isto que permite a definição anterior, ou que a torna razoável.

Experiência 5.26

Amarram-se com um pequeno fio de seda as extremidades de dois pedaços de canudos plásticos de mesmo comprimento e de mesmo peso, tal que possam ficar dependurados em um lápis horizontal pela pequena linha entre eles. Podem ser feitos três ou quatro destes conjuntos. Cada conjunto é atritado no cabelo, mas alguns conjuntos de maneira mais rápida e intensa do que outros. Ao aproximar cada um destes conjuntos de um pêndulo elétrico carregado pelo método ACR , será observado que cada conjunto o afasta de um ângulo diferente em relação à vertical, indicando que possuem cargas elétricas em quantidades diferentes, Figura 5.31.

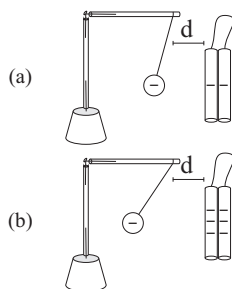


Figura 5.31: Corpos com cargas diferentes. A carga elétrica dos plásticos em (b) é maior do que em (a).

Dependura-se cada um destes conjuntos no lápis e presta-se atenção no ângulo de afastamento entre os canudos. Observa-se que quanto maior era o ângulo de afastamento do pêndulo, maior é o ângulo de afastamento entre os canudos. Como todos os canudos possuem o mesmo peso, isto mostra mais uma vez que quanto maior é a carga elétrica que possuem, maior é a força elétrica entre eles, Figura 5.32.

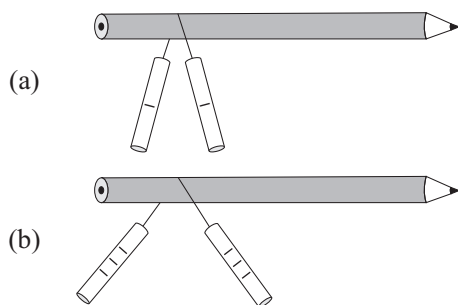


Figura 5.32: Quanto maior é a quantidade de carga nos corpos, maior é a força entre eles.

Capítulo 6

Condutores e Isolantes

6.1 O Eletroscópio

Já construímos o versório e o pêndulo elétrico. Vamos agora construir um outro instrumento elétrico, o *eletroscópio*. Existem vários modelos de eletroscópio, vamos aqui apresentar alguns deles. Embora o versório e o pêndulo elétrico sejam chamados algumas vezes de eletroscópios, no sentido de indicarem a presença de corpos carregados em suas proximidades, vamos reservar neste livro o nome de eletroscópio aos instrumentos que serão descritos a seguir, para distinguí-los do versório e do pêndulo elétrico.

Talvez o modelo mais simples seja o de cartolina ou de papel-cartão. Recortamos um retângulo de 7 por 10 cm, sendo que o lado maior vai ficar na vertical (Figuras 6.1 e 6.2). Prende-se o retângulo a um canudo de plástico com duas fitas adesivas que devem ficar apenas do lado de trás do retângulo, sem ultrapassar as bordas laterais ou a borda superior do retângulo. A ponta superior do canudo também não deve ultrapassar a borda superior do retângulo.

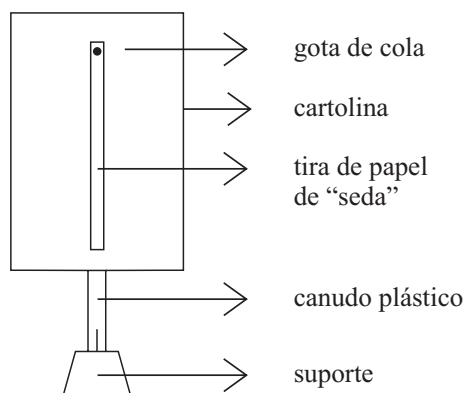


Figura 6.1: Eletroscópio visto de frente.

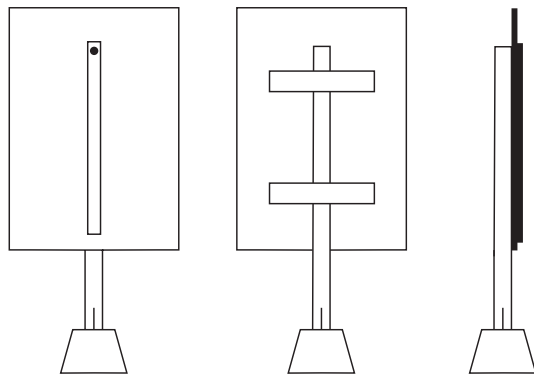


Figura 6.2: (a) Eletroscópio visto de frente. (b) De costas. (c) De perfil.

Recorta-se uma tirinha de papel de “seda” bem fina, tendo de 1 a 3 mm de largura, com 6 a 9 cm de comprimento. Quanto mais finas e leves forem as tirinhas, melhor será este eletroscópio, já que os efeitos descritos a seguir ficarão mais visíveis ou terão uma intensidade maior. A tira pode ser feita de papel de “seda” utilizado para construir pipas ou papagaios, ou então para cobrir balas de coco. Estamos colocando a palavra “seda” entre aspas pois, na verdade, estes papéis não são feitos de seda. Só recebem este nome por terem uma espessura muito pequena, sendo quase transparentes. Pinga-se uma gota de cola na ponta da tira e ela é colada no retângulo. A tira não deve ter dobras, nem deve ultrapassar a extremidade inferior do retângulo. Em vez da gota de cola pode-se usar também um pedaço de fita adesiva, desde que esta não ultrapasse a borda superior da cartolina.

Prepara-se um suporte para o eletroscópio como aquele utilizado na Seção 4.4. *O aspecto crucial do eletroscópio é que a cartolina tem de ser fixada em um canudo plástico.* Isto é, ela não deve ser presa a um espeto de madeira, por exemplo. Utiliza-se um copinho de plástico usado para tomar café, com um colchete atravessando a base do copinho, que é depois preenchido com gesso. Este copinho fica sobre a mesa com a boca para baixo e com o colchete apontando verticalmente para cima, saindo da base do copinho. O canudo plástico com a cartolina presa nele é então enfiado no colchete, ficando na vertical. Caso o canudo fique tombando para algum lado, pode-se colocar um canudo dentro do outro antes de fincá-los no colchete, para dar mais firmeza ao conjunto. Na Seção 6.5 apresentaremos as componentes fundamentais de um eletroscópio como este, após ter realizado várias experiências com ele.

Existem vários modelos alternativos de eletroscópio. Pode-se cobrir com papel de alumínio a face da cartolina retangular onde vai ficar presa a tirinha de papel de “seda.” Em vez da tira de papel de “seda” pode-se utilizar uma tira de papel de alumínio (como o que se usa na cozinha), ou de papel aluminizado de cigarro. Além disso, em vez de prender a tirinha com cola ou com fita adesiva, é possível utilizar um pequeno gancho metálico preso à cartolina. Faz-se um furo

na parte superior da tirinha com uma agulha ou prego e ela é presa ao gancho por este furo. O furo deve ter um diâmetro um pouco maior do que o diâmetro do gancho para que a tira tenha liberdade de se deslocar pelo gancho. Em vez do gancho pode-se utilizar também um pedaço fino de arame ou de fio de cobre preso na parte superior da cartolina. A tirinha é então presa a este arame enrolando-a em torno dele. As dimensões da cartolina não são tão importantes. Podem ser feitos eletroscópios com dimensões de, por exemplo, 2 por 8 cm, ou com outras medidas. A medida de 7 por 10 cm é apropriada para algumas das experiências que realizaremos a seguir, sendo mais largas do que o diâmetro do copinho de café usado como suporte.

Alguns eletroscópios possuem uma tampa, embora isto não seja essencial na maioria das experiências. Em geral esta tampa é um disco tendo o mesmo diâmetro que a largura do retângulo, sendo feita do mesmo material, no nosso caso de cartolina.¹ Ela pode ser coberta de papel de alumínio, mas isto não é essencial. Para prender a tampa ao eletroscópio pode-se fazer uma dobra na parte superior do retângulo com largura de 0,5 a 1 cm, sendo a tampa circular colada sobre a dobra. Outra alternativa para prender a tampa é furá-la no centro, passando verticalmente uma das pernas de um colchete. A outra perna do colchete deve ser colocada horizontalmente e deve ser dobrada ao redor da borda da tampa, caso o disco tenha um diâmetro de 2 ou 3 cm. Se o disco tiver um diâmetro maior do que a perna do colchete, deve ser feito um furo no disco a uma distância de uns 2 cm do centro. Atravessa-se a perna horizontal do colchete por este buraco e ela volta horizontalmente abaixo do buraco e apontando para o centro do disco, prendendo assim o disco ao colchete. A perna vertical que atravessou o centro do disco é presa ao canudo vertical do eletroscópio. Para que o colchete não fique muito frouxo dentro do canudo, pode ser útil dobrá-lo uma ou mais vezes antes que ele penetre no canudo.

O tipo de eletroscópio descrito na Figura 6.2 é composto de uma única tira móvel, sendo que a cartolina fica fixa. Um outro modelo comum de eletroscópio é o que possui duas tiras móveis, ou duas folhas móveis. O modelo mais simples é quando colamos duas tirinhas de papel de “seda” na borda de algum corpo, ou quando simplesmente dobramos uma longa tira de papel de “seda” em duas metades e a dependuramos em algum corpo fino. Na Figura 6.3 apresentamos um eletroscópio deste tipo visto de frente, de costas e de perfil. A cartolina é novamente presa a um canudo plástico com duas fitas adesivas na parte de trás do eletroscópio. Na ponta inferior esquerda do eletroscópio são presas com gotas de cola as extremidades superiores de duas tirinhas de papel de “seda” (ou tirinhas de papel de alumínio), uma de frente para a outra, com suas extremidades inferiores livres para se afastarem entre si. Vamos chamar este modelo de *eletroscópio clássico*, já que é o mais comum de ser representado nos livros didáticos. Caso se queira, é possível colocar mais pares de tirinhas de frente uma para a outra ao longo da extremidade inferior da cartolina retangular.

Também pode-se construir um eletroscópio clássico dobrando ao meio uma única tirinha de papel de “seda.” Apoiamos então esta tirinha por sua parte

¹[Ferb], [Ferc] e [Gas03, págs. 221-243].

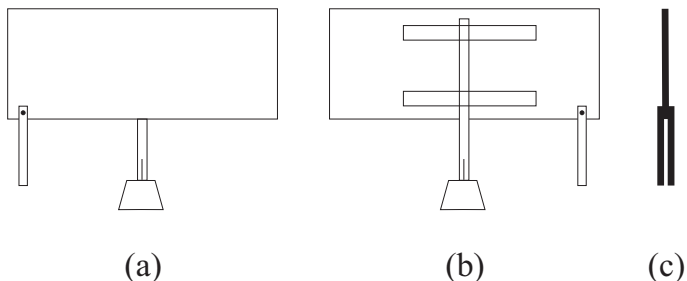


Figura 6.3: (a) Eletroscópio clássico visto de frente. (b) De costas. (c) De perfil, mostrando apenas a cartolina e as duas tirinhas.

central através de um suporte rígido, como um fio metálico. As duas metades da tirinha ficam lado a lado verticalmente, com suas extremidades inferiores livres para se afastar uma da outra. O fio metálico deve então ser apoiado por canudos plásticos ou dependurado por fios de seda.

O modelo clássico mais refinado é o eletroscópio de folhas de ouro. Em geral ele é coberto por um recipiente de vidro para evitar perturbações devidas a correntes de ar.

6.2 Experiências com o Eletroscópio

Experiência 6.1

Atrita-se um canudo de plástico no cabelo e ele é aproximado lentamente da parte superior do eletroscópio, sem tocá-lo. Observa-se que a tirinha se afasta do eletroscópio, levantando-se um pouco. Ao se afastar o canudo, a tira volta à sua posição vertical original junto à cartolina, Figura 6.4.

Experiência 6.2

Repete-se a Experiência 6.1, mas agora raspando o canudo atritado na borda superior do eletroscópio. O ideal é encostar na cartolina com uma parte do canudo atritado que esteja perto do dedo que segura o canudo, raspando então o canudo no sentido de sua extremidade livre. O canudo deve ser raspado movendo-o da parte dianteira para a parte traseira da cartolina. Ou seja, não deve ser raspado no sentido da tirinha. Isto pode ser feito uma ou mais vezes, se possível girando o canudo enquanto ele é raspado. Para facilitar a raspagem pode-se segurar o eletroscópio pelo seu canudo de suporte, mas sem tocar com a mão na cartolina. A tirinha se afasta do eletroscópio durante a raspagem.

Observa-se agora que ao afastar o canudo do eletroscópio a tirinha permanece levantada, Figura 6.5!

Experiência 6.3

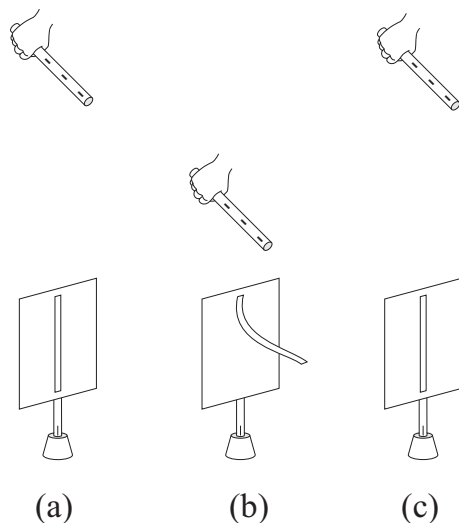


Figura 6.4: (a) e (b): Ao aproximar um plástico carregado do eletroscópio, sem tocá-lo, a tirinha levanta. (c) Ao afastar o plástico eletrizado, a tirinha abaixa.

Depois que foi realizada a Experiência 6.2 e que se afastou o canudo atritado, vem que a tirinha fica levantada. Ao se aproximar lentamente um dedo esticado horizontalmente da extremidade inferior da tirinha, sem deixar que se toquem, observa-se que ela se orienta apontando para o dedo, indo em sua direção. Ao afastarmos o dedo vem que a tirinha continua afastada do eletroscópio.

Pelo que foi visto na Seção 3.5, isto significa que o eletroscópio ficou carregado eletricamente na Experiência 6.2. Ele foi carregado por um processo de raspagem do plástico atritado. Esta experiência é de certa forma análoga à Experiência 4.7.

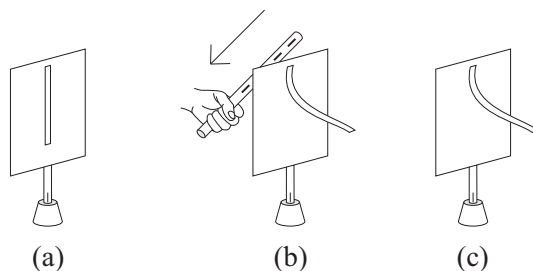


Figura 6.5: (a) Eletroscópio com a tirinha inicialmente abaixada. (b) Raspa-se a parte superior da cartolina com um plástico atritado. (c) Ao afastar o plástico observa-se que a tirinha fica levantada.

Só que agora temos um aspecto novo. Quando carregávamos um pêndulo elétrico por contato pelo método *ACR*, o pêndulo era repelido pelo canudo atritado quando este canudo se aproximava do pêndulo. Ao afastar o canudo atritado, o pêndulo voltava à posição vertical. Se alguém que não tivesse visto a experiência observasse este pêndulo na vertical, não saberia se ele estava ou não carregado. Para testar isto teria inicialmente de aproximar o dedo do pêndulo, sem que se tocassem. Caso o pêndulo não se movesse, isto significaria que estava neutro. Caso o pêndulo se orientasse no sentido do dedo, a pessoa saberia que o pêndulo estava carregado. Para saber o sinal desta carga deveria aproximar então um corpo carregado com uma carga de sinal conhecido, por exemplo, com uma carga positiva. Se observasse uma repulsão, saberia que o pêndulo estaria carregado positivamente. Se observasse uma atração, concluiria que ele estaria carregado negativamente.

Já o eletroscópio apresenta um comportamento diferente. Depois que ele foi carregado ao ser raspado com um canudo eletrizado, vem que a tirinha fica afastada da cartolina mesmo quando o canudo atritado foi levado para longe do eletroscópio. Ou seja, simplesmente olhando para a tirinha de um eletroscópio que está afastado de outros corpos, já podemos saber se ele está ou não carregado. Quando o eletroscópio está neutro esta tirinha fica abaixada junto à cartolina, já quando o eletroscópio está carregado esta tirinha fica levantada. É a repulsão elétrica entre a carga que está na cartolina e a carga que está na tirinha que impede a tirinha de encostar na cartolina, como deveria fazer se apenas a força da gravidade terrestre estivesse atuando sobre ela.

Experiência 6.4

Inicialmente carrega-se o eletroscópio como na Experiência 6.2. Afasta-se o canudo atritado e a tirinha fica levantada da cartolina. Aproxima-se o dedo lentamente do eletroscópio e se toca na cartolina ou na tirinha. Observa-se que a tirinha cai imediatamente, voltando à posição vertical. Ao se afastar o dedo, a tirinha continua abaixada, Figura 6.6.

Ao aproximar novamente um dedo esticado horizontalmente da extremidade inferior da tirinha, vem que a tirinha não mais se movimenta nem se orienta em relação ao dedo, como fazia na Experiência 6.3. Concluímos então que o eletroscópio ficou descarregado quando o dedo toca na tirinha ou na cartolina. O dedo está descarregando o eletroscópio, como fazia na Experiência 4.9. Este é o efeito do aterramento elétrico, Seção 4.5.

Experiência 6.5

Depois que o eletroscópio foi carregado raspando-o com um canudo eletrizado como na Experiência 6.2, aproxima-se lentamente da tirinha levantada o mesmo canudo atritado que carregou o eletroscópio. De preferência o canudo deve estar na horizontal, na mesma altura que a ponta inferior da tirinha. A aproximação deve ser lenta e o canudo não deve aproximar-se demais da tirinha, evitando que se toquem. Deve-se observar atentamente em que sentido a tirinha tende a se mover, isto é, se no sentido do canudo ou se no sentido da cartolina. Ao

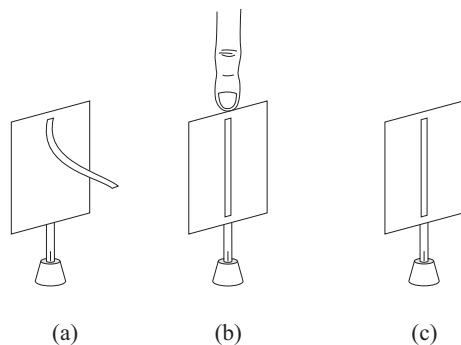


Figura 6.6: Descarregando um eletroscópio pelo contato com o dedo. (a) Eletroscópio inicialmente carregado. (b) Toca-se na cartolina com o dedo e a tirinha abaixa. (c) Afasta-se o dedo e a tirinha permanece abaixada.

fazer a experiência com cuidado, observa-se que a tirinha se desloca no sentido da cartolina, tendendo a afastar-se do canudo atritado.

Pode-se fazer um movimento alternado para frente e para trás com o canudo, aproximando-o e afastando-o da tirinha, que ela faz um movimento coordenado com este, indo no sentido da cartolina e afastando-se dela. Para que se observe este movimento alternado, é necessário que o movimento do canudo seja de baixa amplitude. Isto é, com pequenos deslocamentos espaciais, sem se aproximar demais da tirinha, Figura 6.7.

Isto mostra que o eletroscópio foi carregado com carga de mesmo sinal que o canudo atritado na Experiência 6.2, já que há uma repulsão entre ambos. Podemos então representar as cargas no eletroscópio como tendo o mesmo sinal que as cargas do canudo atritado que foi raspado na cartolina, Figura 6.8.

Experiência 6.6

Repete-se a Experiência 6.2 carregando um eletroscópio negativamente ao raspá-lo com um canudo que havia sido atritado contra o cabelo. Afasta-se este canudo e a tirinha fica levantada da cartolina. Carrega-se agora um outro canudo plástico positivamente, ao puxá-lo rapidamente entre duas borrachas duras, como na Experiência 5.15. Aproxima-se agora este canudo lentamente do eletroscópio carregado, sem deixar que a tirinha toque no canudo. Neste caso observa-se uma atração entre eles. A atração é tão intensa que é possível levar a tirinha para cima do eletroscópio, acompanhando o canudo atritado, Figura 6.9!

Experiência 6.7

Carregam-se dois eletroscópios raspando-os com canudos atritados no cabelo, como na Experiência 6.2. Afastam-se os canudos e as duas tirinhas ficam levantadas. Colocam-se os dois eletroscópios de frente um para o outro, em planos

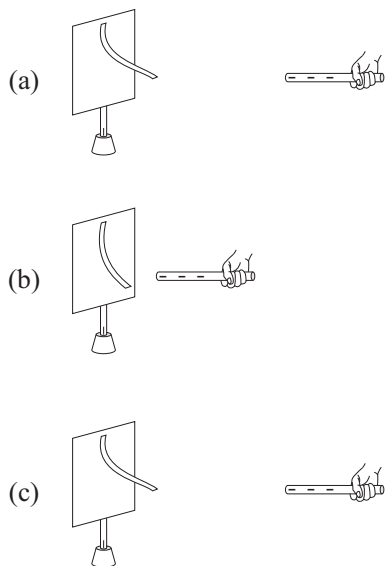


Figura 6.7: Repulsão entre o plástico carregado e o eletroscópio carregado com este plástico. (b) Quando se aproxima o plástico do eletroscópio, a tirinha abaixa. Quando se afasta o plástico, a tirinha levanta, (a) e (c).

paralelos, com as tirinhas voltadas uma para a outra. Aproximam-se lentamente os dois eletroscópios, sem deixar que as tirinhas se toquem. Observa-se que elas tendem a se afastar uma da outra, com cada uma se aproximando da sua cartolina.

Isto mostra mais uma vez a repulsão entre cargas de mesmo sinal.

Experiência 6.8

Carrega-se um eletroscópio negativamente raspando nele um canudo de plástico atritado no cabelo. Carrega-se um outro eletroscópio positivamente raspando nele um outro canudo de plástico atritado entre duas borrachas duras.

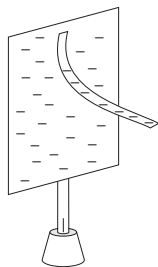


Figura 6.8: Cargas sobre um eletroscópio carregado com um canudo negativo.

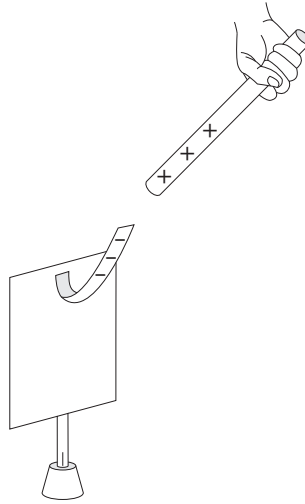


Figura 6.9: Atração entre um plástico positivo e um eletroscópio negativo.

Afastam-se os canudos e as duas tirinhas ficam levantadas. Colocam-se os dois eletroscópios de frente um para o outro, em planos paralelos, com as tirinhas voltadas uma para a outra. Aproximam-se lentamente os dois eletroscópios, sem deixar que as tirinhas se toquem. Observa-se que elas se atraem e se aproximam uma da outra, com cada uma se afastando da sua cartolina, Figura 6.10.

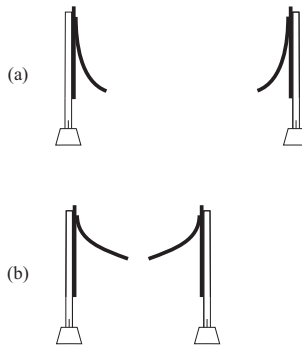


Figura 6.10: Atração entre as tirinhas de dois eletroscópios eletrizados com cargas opostas.

Experiência 6.9

Começa-se a experiência com um eletroscópio inicialmente descarregado. Atrita-se um canudo no cabelo e toca-se com uma pequena parte do canudo no eletroscópio, talvez deslizando-o um pouco sobre a cartolina, como na Ex-

periência 6.2. Observa-se que a tirinha levanta-se em relação à cartolina de um ângulo θ_1 .

Sem tocar com a mão na cartolina nem na tirinha, desliza-se mais um pouco o canudo negativamente atritado sobre a cartolina. Ao se afastar o canudo, vem que a tirinha estará levantada de um ângulo θ_2 maior do que θ_1 , isto é, $\theta_2 > \theta_1$. Isto está ilustrado na Figura 6.11.

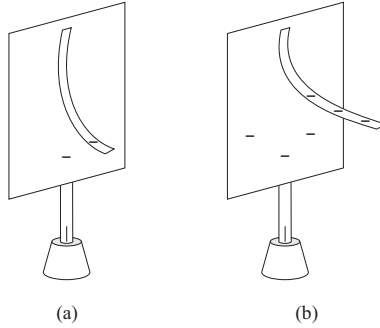


Figura 6.11: O ângulo de afastamento da tirinha em relação à cartolina pode ser usado como um indicador da quantidade de carga no eletroscópio.

Este procedimento pode ser repetido algumas vezes. Durante o processo pode-se atritar uma ou mais vezes o canudo no cabelo.

Esta experiência ilustra que o eletroscópio pode ser utilizado como um indicador qualitativo da quantidade de carga elétrica. Isto é, quanto mais carga ele tiver armazenado, maior será o ângulo indicado pela tirinha, de acordo com as definições da Seção 5.7.

Outra maneira de ilustrar isto é com o eletroscópio clássico. Quanto mais carregado ele estiver, mais afastadas entre si estarão as duas tirinhas de papel de “seda,” Figura 6.12.

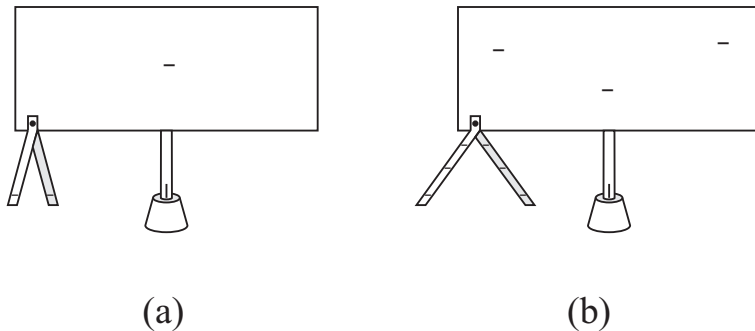


Figura 6.12: O ângulo de afastamento das tirinhas entre si pode ser usado como um indicador da quantidade de carga no eletroscópio.

6.3 Quais Corpos Descarregam um Eletroscópio por Contato?

Experiência 6.10

Vimos na Experiência 6.4 que ao tocarmos com o dedo em um eletroscópio carregado ele é imediatamente descarregado. Carregamos então novamente o eletroscópio como na Experiência 6.2. Agora seguramos com a mão a ponta de um canudo plástico neutro e tocamos com a outra ponta do canudo na parte superior da cartolina de um eletroscópio carregado. O canudo deve apenas tocar na parte superior da cartolina, não é necessário raspá-lo na cartolina. Observa-se que nada acontece com a tirinha, ou seja, ela continua levantada, Figura 6.13! Ao retirar o canudo ela permanece levantada. Concluimos que um canudo plástico neutro não remove a carga de um eletroscópio eletrizado.

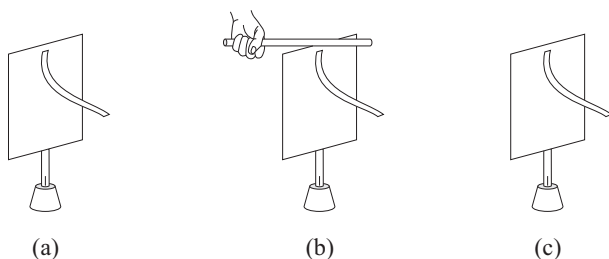


Figura 6.13: (a) Eletroscópio inicialmente carregado. (b) Toca-se em sua cartolina com a ponta de um canudo plástico neutro preso à mão. Nada ocorre com a tirinha. (c) Afasta-se o canudo e a tirinha continua levantada. Ou seja, o eletroscópio não é descarregado ao tocá-lo com um plástico preso à mão.

Experiência 6.11

Carregamos mais uma vez o eletroscópio. Desta vez seguramos com a mão a ponta de um palito de madeira e tocamos com a outra ponta do palito na parte superior do eletroscópio carregado. Observa-se que a tirinha abaixa imediatamente, Figura 6.14! Ao retirar o palito, ela permanece abaixada. Concluimos que o palito de madeira descarregou o eletroscópio.

6.3.1 Definições de Condutores e Isolantes

As Experiências 6.10 e 6.11, Figuras 6.13 e 6.14, apresentam uma distinção fundamental entre os corpos. Devido à importância destas características, foram criados nomes especiais para classificar os corpos em dois grupos.

Definições: Chama-se de *condutores* aos corpos que descarregam um eletroscópio carregado simplesmente quando entram em contato com ele. Já os corpos que não descarregam um eletroscópio eletrizado quando entram em contato com ele são chamados de *isolantes*, de *não-condutores*, ou de *dielétricos*.

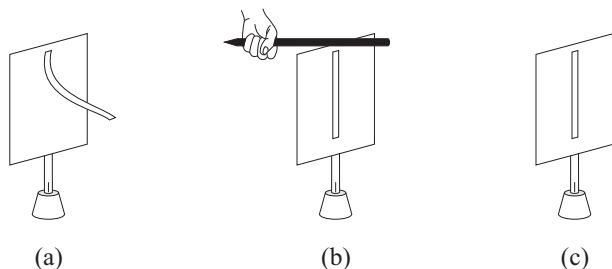


Figura 6.14: (a) Eletroscópio inicialmente carregado. (b) Toca-se em sua cartolina com a ponta de um palito de madeira preso à mão. A tirinha abaixa imediatamente. (c) Afasta-se o palito e a tirinha continua abaixada. Ou seja, o eletroscópio é descarregado ao tocá-lo com uma madeira presa à mão.

A descoberta extremamente importante destes dois tipos de corpos foi feita por Gray em 1729. Ele também descobriu algumas das principais propriedades destes materiais e publicou seus resultados em um trabalho fundamental de 1731 que discutiremos no Apêndice B.² As expressões *condutores* e *isolantes* parecem ser devidas a Jean Théophile Desaguliers (1683-1744).³ Em um de seus artigos Desaguliers expressou-se da seguinte maneira:⁴

No seguinte relato, que é uma sequência das experiências anteriores, chamo de *condutoras* às cordas nas quais se aplica em uma extremidade o tubo [de vidro] atritado; e [chamo de] *suportes* aos corpos horizontais sobre os quais se apoia o *condutor*.

Du Fay, antes de Desaguliers, já havia usado a expressão *isolado* para se referir a um condutor apoiado ou sustentado por corpos que não deixassem a eletricidade escapar por eles. Em 1733 ele discutiu a transmissão da eletricidade através de cordas suspensas por fios de seda, fato este descoberto por Gray anteriormente. Du Fay então afirmou, nossa ênfase em itálico:⁵

Esta experiência prova como é necessário que a corda que se utiliza para transmitir ao longe a eletricidade, seja *isolada*, ou seja suspensa apenas por corpos que sejam os menos apropriados possíveis a se carregarem eles próprios de eletricidade.

Em 1737 Du Fay afirmou o seguinte, nossa ênfase em itálico:⁶

Portanto, estando seguro desta igualdade para as experiências que desejava realizar, me servi de uma barra de ferro com uma polegada

²[Grah].

³[Desa] (se referindo a [Desc]), [Pri66, pág. 82] e [Hei99, págs. 292-293, nota 12].

⁴[Desa, pág. 193].

⁵[DF33d, pág. 249].

⁶[DF37b, pág. 94].

quadrada [2,54 por 2,54 cm] e com um comprimento de quatro pés [122 cm]. Ela estava, como disse, suspensa sobre cordões de seda e *isolada*, com a finalidade de que nada pudesse desviar o turbilhão elétrico que lhe seria comunicado [pelo tubo de vidro atritado].

É provável que a expressão *isolante* tenha se originado destas citações de Du Fay. No Apêndice B apresentaremos o trabalho de Gray em mais detalhes.

Experiência 6.12

Vamos agora repetir as Experiências 6.10 e 6.11 para descobrir quais corpos são condutores e quais são isolantes. O procedimento a ser adotado é sempre o mesmo. Carrega-se um eletroscópio raspando-o com um canudo eletrizado, como na Experiência 6.2. Afasta-se o canudo. Segura-se um certo corpo com a mão e se toca na cartolina com alguma parte deste corpo. Caso o corpo descarregue o eletroscópio, ele será chamado de condutor. Caso o corpo não descarregue o eletroscópio, ele será chamado de isolante.

Esta experiência pode ser feita com fios de várias substâncias, sempre encostando apenas um fio de cada vez no eletroscópio eletrizado: algodão, seda, poliéster, poliamida sintética, cabelo, fio de cobre, etc. Pode também ser feita com substâncias sólidas como metais, madeira, vidro, borracha, plástico, papel, papel de “seda,” etc.

Em alguns casos é mais fácil segurar no eletroscópio carregado pelo canudo plástico que prende a cartolina e então tocar com uma quina da cartolina em alguma substância, como a parede, a lousa, um arquivo de metal, etc. O cuidado que se deve ter nestes casos é o de não tocar com nosso corpo na tirinha nem na cartolina, para evitar de descarregar o eletroscópio por aterramento através do nosso corpo.

Experiência 6.13

O procedimento descrito no parágrafo final da Experiência 6.12 também é adequado para verificar quais líquidos são condutores ou isolantes. Antes de começar a experiência, pega-se um copo ou um pote vazio que depois será preenchido com o líquido a ser testado. É melhor que o recipiente seja condutor. Para verificar isto, carrega-se um eletroscópio e toca-se o copo ou pote na cartolina do eletroscópio. Caso a tirinha abaixe, isto vai significar que o copo ou pote é de fato condutor. Exemplos de condutores são copos de metal ou de madeira. A maioria dos copos de vidro também são condutores. Pode-se então prosseguir a experiência.

Inicialmente o copo é cheio até a borda com o líquido que se quer testar. Vamos ilustrar o que ocorre no caso de um líquido condutor como a água. Isto está ilustrado na Figura 6.15. Neste caso temos na Figura 6.15 (a) um eletroscópio carregado, seguro apenas por seu canudo, sem tocarmos em sua cartolina ou na tirinha de papel de “seda”. Afunda-se uma quina do eletroscópio eletrizado em um copo cheio de água até a borda. Deve-se evitar de tocar com a cartolina no copo. No caso da água, observa-se que a tirinha se abaixa,

Figura 6.15 (b). Ao retirarmos o eletroscópio da água, observa-se que a tirinha permanece abaixada, Figura 6.15 (c).

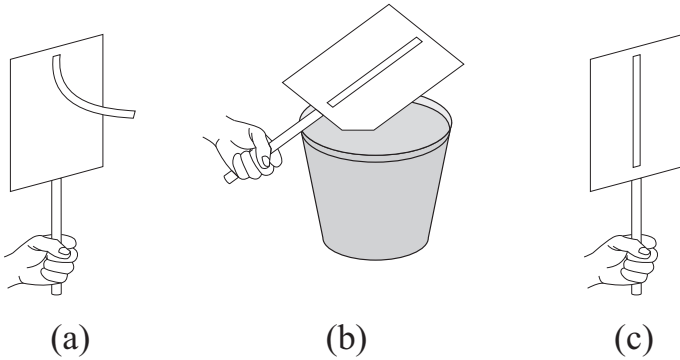


Figura 6.15: (a) Eletroscópio inicialmente carregado. (b) Afunda-se uma quina da cartolina em um copo cheio de água, observando-se que a tirinha abaixa. (c) Ao retirar o eletroscópio da água, a tirinha continua abaixada.

Na Figura 6.16 ilustramos o que ocorre no caso de um líquido isolante como o óleo vegetal de cozinha. Na Figura 6.16 (a) temos um eletroscópio carregado, seguro apenas por seu canudo, sem tocarmos em sua cartolina ou na tirinha de papel de “seda”. Afunda-se uma quina do eletroscópio eletrizado no recipiente cheio de óleo até a borda. Deve-se evitar de tocar com a cartolina no recipiente. Neste caso observa-se que a tirinha permanece afastada da cartolina, Figura 6.16 (b). Ao retirarmos o eletroscópio do óleo observa-se que a tirinha permanece levantada, Figura 6.16 (c).

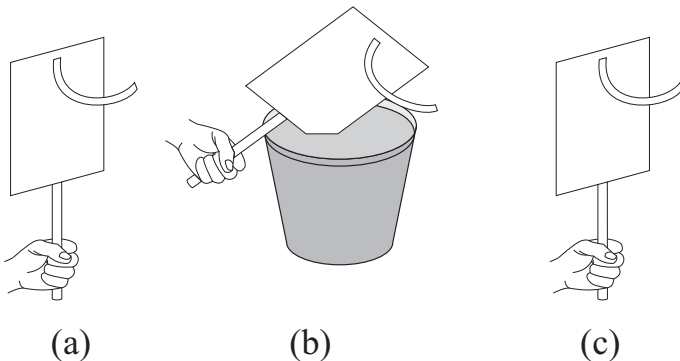


Figura 6.16: (a) Eletroscópio inicialmente carregado. (b) Afunda-se uma quina da cartolina em um copo cheio de óleo vegetal até a borda, observando-se que a tirinha permanece levantada. (c) Ao retirar o eletroscópio do óleo, a tirinha permanece levantada.

O mesmo procedimento usado para testar quais líquidos são condutores ou

isolantes, pode ser usado para testar a condutividade das farinhas. Ou seja, um recipiente condutor é cheio com a farinha a ser testada. Afunda-se uma quina do eletroscópio carregado na farinha e é observado se sua tirinha abaixa ou não. Os cuidados principais são o de evitar que a quina do eletroscópio toque no recipiente condutor e no nosso corpo.

6.3.2 Corpos que se Comportam como Condutores e Isolantes nas Experiências Usuais de Eletrostática

Para que a distinção entre condutores e isolantes seja mais precisa, o ideal seria que todos os corpos a serem testados tivessem a mesma forma e o mesmo tamanho. Por exemplo, poderíamos tocar o eletroscópio carregado com cilindros de mesmo diâmetro e comprimento. Por hora vamos deixar este cuidado de lado.

O resultado das Experiências 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 realizadas com diversas substâncias é o seguinte:

- **Condutores para experiências comuns de eletrostática:**
ar úmido, corpo humano, todos os metais, papel, cartolina, papel de alumínio, papel de “seda,” papelão, madeira, algodão, giz, a maior parte dos vidros à temperatura ambiente, porcelana, água de torneira, álcool, xampu, querosene, leite, refrigerante, detergente, parede, lousa, rolha, farinha de trigo, fubá, fio de acrílico, sal, açúcar, serragem, couro, terra, tijolo, a maior parte dos tipos de borracha, etc.
- **Isolantes para experiências comuns de eletrostática:**
ar seco, âmbar, plástico, PVC, seda, náilon ou poliamida sintética, vidro aquecido, poliéster, lã, cabelo, tubo de acrílico, isopor, barra de chocolate, óleo de soja de cozinha, café em pó e alguns poucos tipos de borracha.

Experimentalmente verifica-se que existe um número muito maior de substâncias condutoras do que de substâncias isolantes. A partir destas duas listas conclui-se que a maior parte dos materiais são condutores, bem poucos são isolantes. Entre os condutores alguns são muito bons, descarregando o eletroscópio quase que instantaneamente, como é o caso do corpo humano, dos metais, do algodão ou do papel. Embora a madeira seja condutora, ela não conduz tão bem quanto os metais ou o corpo humano. Isto é indicado pelo maior tempo necessário para descarregar o eletroscópio quando o tocamos com a madeira, comparado com o tempo muito curto quando o tocamos com nosso corpo ou com algum metal.

O vidro é um caso à parte. Boa parte deles descarrega o eletroscópio, embora mais lentamente do que os metais. Por outro lado, se eles forem aquecidos no fogo ou em um micro-ondas, eles podem se comportar como isolantes. Ou seja, depois de aquecidos eles não descarregam o eletroscópio, ou então o descarregam muito mais lentamente do que se não tiverem sido aquecidos. Em geral eles se comportam como condutores devido à umidade ou vapor de água que se acumula sobre sua superfície. Ao aquecer o vidro, esta umidade é evaporada e ele se comporta como um isolante. Boa parte dos pesquisadores antigos como Gray e

Du Fay utilizavam o vidro atritado em suas experiências, segurando-o pela mão. Ele se comportava como um isolante. Muitas vezes mencionavam a necessidade de aquecê-lo antes de atritá-lo, já que isto aumentava a carga que adquiriam, além de tornar mais permanente e duradoura esta carga gerada por atrito. O outro motivo para este comportamento como isolante do vidro que utilizavam, deve ter vindo de sua composição. Em geral utilizavam o flint-glass, que é um tipo de vidro com base de chumbo. Este tipo de vidro é mais isolante do que a maioria dos vidros que se encontram hoje em dia no comércio. Não é fácil de encontrar este tipo de vidro nos dias atuais, a não ser em lojas especializadas.

Quando o dia está seco e frio, vem que o eletroscópio fica vários minutos carregado. O ar ao redor do eletroscópio se comporta então como um isolante. Por outro lado, em dias quentes e úmidos, e especialmente em dias chuvosos, vem que é difícil mantê-lo carregado, já que se descarrega logo que terminou de ser raspado com um canudo atritado. O ar ao seu redor se comporta então como um condutor. É por este motivo que boa parte das experiências funciona muito bem em dias secos, quando as cargas geradas por atrito são facilmente mantidas em isolantes ou em condutores que estejam isolados eletricamente do solo. Estas experiências já não funcionam tão bem em dias úmidos.

Diversas borrachas também se comportam como condutoras, seja pela umidade que acumulam na superfície, seja pelo tipo de composição da borracha ou pelo processo de fabricação. Outras já se comportam como isolantes. O ideal é testar todos os materiais disponíveis, classificando-os então de acordo com seu comportamento.

Esta distinção das substâncias entre condutores e isolantes é um dos aspectos mais importantes de toda a eletricidade. Juntamente com a existência das cargas positivas e negativas, com suas atrações e repulsões, ela permite que se compreenda uma imensa série de fenômenos.

6.4 Quais Corpos Carregam um Eletroscópio por Contato?

Experiência 6.14

Colocam-se dois eletroscópios descarregados em planos paralelos, de costas um para o outro, separados de uns 15 cm, tal que as tirinhas fiquem do lado de fora. Coloca-se um canudo plástico neutro apoiado sobre as bordas superiores das cartolinas dos dois eletroscópios, com na Figura 6.17. Em seguida pega-se um segundo canudo plástico que foi eletrizado raspando-o no cabelo.

Raspa-se este segundo canudo sobre a parte superior da cartolina de um único eletroscópio, o *I* da Figura 6.17. Observa-se que apenas a tirinha do eletroscópio raspado *I* levanta, com a tirinha do eletroscópio *II* permanecendo abaixada. Esta sequência de procedimentos está ilustrada na Figura 6.18.

Experiência 6.15

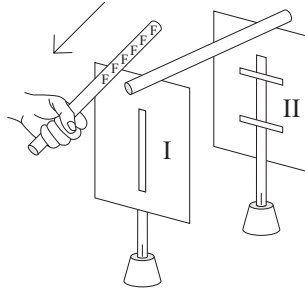


Figura 6.17: Dois eletroscópios de costas, inicialmente descarregados, ligados por um canudo plástico neutro. Raspa-se um segundo canudo eletrizado sobre a cartolina de um único eletroscópio, o *I*.

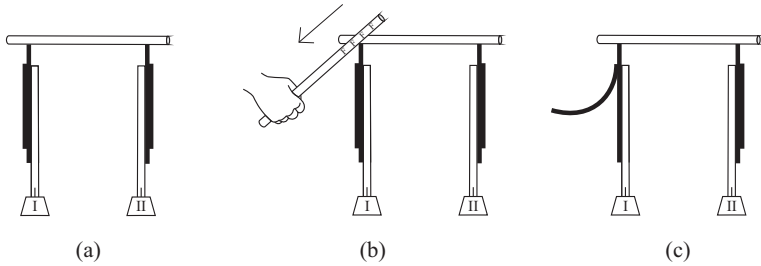


Figura 6.18: (a) Dois eletroscópios de costas, inicialmente descarregados, ligados por um canudo neutro. (b) Raspa-se um outro canudo eletrizado apenas sobre a borda superior da cartolina do eletroscópio *I*. (c) Afasta-se o canudo eletrizado e observa-se que apenas o eletroscópio raspado *I* ficou carregado.

Repete-se o procedimento da Experiência 6.14, mas agora com os dois eletroscópios inicialmente neutros ligados por um espeto de madeira, Figura 6.19.

Raspa-se um canudo eletrizado sobre a parte superior da cartolina de um único eletroscópio, o *I* da Figura 6.19. Neste caso observa-se que as tirinhas dos dois eletroscópio se levantam. Esta sequência de procedimentos está ilustrada na Figura 6.20.

As Experiências 6.14 e 6.15 são os opostos das Experiências 6.4, 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13. Nos casos das Experiências 6.4, 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 havíamos visto quais substâncias descarregavam ou não um eletroscópio carregado, ao tocar no eletroscópio com esta substância ligada à mão. Agora estamos vendo quais substâncias carregam ou não um segundo eletroscópio descarregado, o *II*, ao ligá-lo por meio desta substância com um outro eletroscópio, o *I*, que está sendo carregado ao ser raspado por um canudo eletrizado. O resultado é o mesmo. Ou seja, um canudo plástico neutro não descarrega um eletroscópio carregado ao tocá-lo, Experiência 6.10. Ele também não carrega o eletroscópio *II* ao ser o elo de ligação entre ele e o eletroscópio *I* que está sendo carregado ao ser

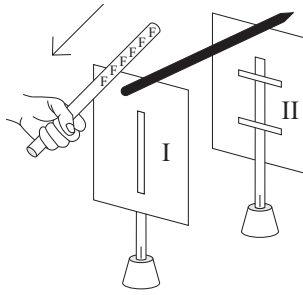


Figura 6.19: Dois eletroscópios de costas, inicialmente descarregados, ligados por um espeto de madeira. Raspa-se um canudo eletrizado sobre a cartolina de um único eletroscópio, o *I*.

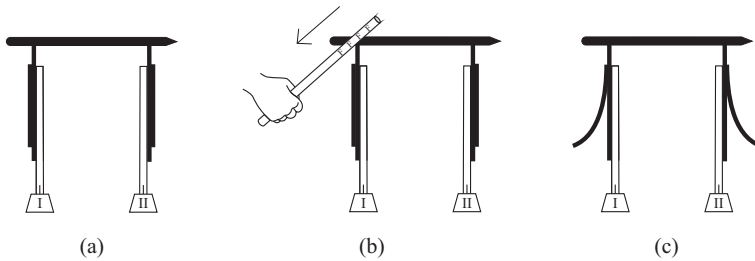


Figura 6.20: (a) Dois eletroscópios de costas, inicialmente descarregados, ligados por um espeto de madeira. (b) Raspa-se um canudo eletrizado sobre a borda superior da cartolina de um único eletroscópio, o *I*. (c) Afasta-se o canudo eletrizado e observa-se que os dois eletroscópios ficaram carregados.

raspado por um canudo eletrizado, Experiência 6.14. Já um palito de madeira descarrega um eletroscópio eletrizá-lo ao tocá-lo, como na Experiência 6.11. Ele também permite a eletrização do eletroscópio *II* ao ser o elo de ligação entre ele e o eletroscópio *I* que está sendo carregado ao ser raspado por um canudo eletrizado, Experiência 6.15.

Experiência 6.16

As Experiências 6.14 e 6.15 podem ser aplicadas facilmente a outras substâncias. Pode-se, por exemplo, ligá-los por um fio (de algodão, de poliéster, ...), por uma vareta (de madeira, de metal, de plástico, de PVC, ...), por uma tira (de papel, de papel de alumínio, de papel de “seda,” de tecido, ...), etc. Em seguida carrega-se um canudo de plástico por atrito. Depois utiliza-se este canudo atritado para carregar o primeiro eletroscópio raspando o canudo contra ele, como na Experiência 6.2. Observa-se então o comportamento do segundo eletroscópio. Caso a tirinha do segundo eletroscópio permaneça abaixada junto à cartolina, isto significa que a substância ligando os dois eletroscópios não permitiu a passagem de carga elétrica entre eles. Por outro lado, caso a tirinha do segundo

eletroscópio se levante e permaneça levantada, isto significa que houve passagem de carga elétrica do primeiro eletroscópio para o segundo através da substância que os une. Ao ser feita esta experiência, o que se observa é que as substâncias consideradas isolantes na Experiência 6.12 não permitem que o segundo eletroscópio se carregue. Já as substâncias consideradas condutoras permitem que o segundo eletroscópio seja carregado eletricamente.

6.5 Componentes Fundamentais de um Versório, de um Pêndulo Elétrico e de um Eletroscópio

Agora que já sabemos da distinção entre condutores e isolantes, assim como suas propriedades fundamentais, pode-se compreender melhor a estrutura dos aparelhos construídos até o momento.

No caso do versório usual, temos uma agulha condutora horizontal (como o colchete metálico), Figuras 3.4 e 6.21 (a). Normalmente a agulha condutora horizontal é apoiada por um alfinete metálico vertical fincado na madeira ou na rolha. Ou seja, todos os elementos deste versório são condutores. O versório de plástico é feito com um chapéu horizontal isolante, Figuras 3.5 e 6.21 (b). Já o versório de Du Fay é feito com um material isolante na horizontal (o plástico), possuindo um condutor em uma única ponta (o papel de alumínio), Figuras 4.22 e 6.21 (c).

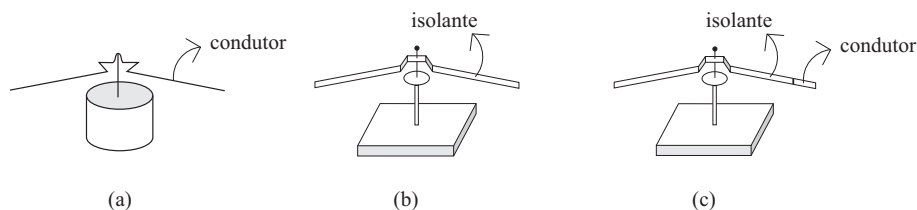


Figura 6.21: Composição de um versório. (a) Versório metálico. (b) Versório de plástico. (c) Versório de Du Fay.

O pêndulo elétrico é composto de um fio de seda isolante e de um condutor em sua ponta, feito de papel de alumínio ou de papel comum, Figura 6.22. O fio de seda é crucial. É ele, juntamente com os canudos de plástico que compõem o pêndulo, que impede a carga adquirida pelo método *ACR* de descarregar para a Terra. Se não fosse pelo fio de seda e pelos canudos de plástico, o papel de alumínio não poderia permanecer carregado depois do contato com um isolante atritado. Se o disco de papel estivesse suspenso por um fio de algodão preso a um espeto de madeira, não ocorreria o mecanismo de atração, contato e repulsão.

Como os fios de náilon (poliamida sintética) e de poliéster também se comportam como isolantes, é possível utilizá-los para construir um pêndulo elétrico. O mesmo já não ocorre com fios de algodão, que se comportam como condutores.

Já o eletroscópio é constituído de dois condutores, a cartolina e a tirinha

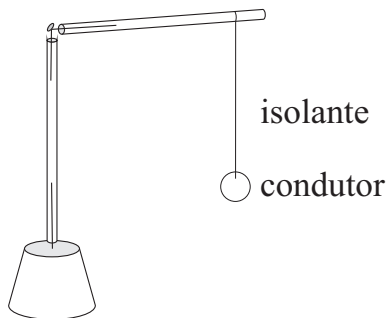


Figura 6.22: Composição de um pêndulo elétrico.

de papel de “seda,” sustentados por um isolante, o canudo de plástico, Figura 6.23. Este canudo de plástico é crucial. É ele que previne a descarga de um eletroscópio eletrizado para a Terra.

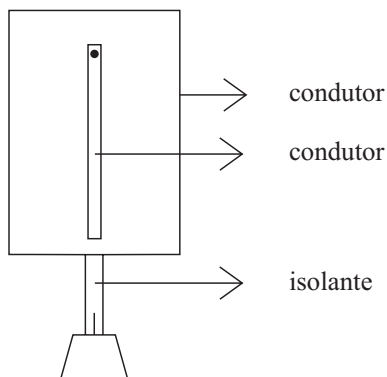


Figura 6.23: Composição de um eletroscópio.

Se em vez do canudo de plástico tivéssemos um palito de madeira de churrasco, o eletroscópio eletrizado se descarregaria para a Terra através do palito. Isto é, não seria possível manter o eletroscópio carregado depois de ter sido raspado com um plástico previamente atritado.

6.6 Influência da Diferença de Potencial Elétrico sobre o Comportamento Condutor ou Isolante de um Corpo

Nas Experiências 6.4, 6.10 e 6.12 classificamos os materiais em condutores e isolantes dependendo se descarregavam ou não um eletroscópio carregado. Uma outra possibilidade de fazer esta classificação é observando se descarregam ou

não uma pilha elétrica.

Definições: São chamados de *condutores* aqueles materiais que descarregam a pilha ao serem o elo de ligação entre o terminal positivo e o terminal negativo da pilha. Já os materiais que não descarregam a pilha ao serem o elo de ligação entre seus terminais são chamados de *isolantes*. Vamos agora analisar como se faz esta nova classificação.

Experiência 6.17

Os materiais utilizados nesta experiência estão representados na Figura 6.24. Pegam-se três pedaços encapados de fio de cobre e suas pontas são desencapadas, Figura 6.24 (a). Utiliza-se uma pilha nova alcalina, tamanho grande, que gera entre seus polos uma diferença de potencial de $1,5 \text{ volt} = 1,5 \text{ V}$, como na Figura 6.24 (b). Esta é a pilha tipo *D*. É útil utilizar também um suporte para pilha, que vai facilitar sua ligação elétrica com os fios. Utiliza-se também uma pequena lâmpada de lanterna que acenda com $1,5 \text{ volt}$. A lâmpada deve ser enroscada em um bocal ou soquete apropriado, Figura 6.24 (c). Isto facilita os contatos elétricos. Uma chave para fechar ou abrir o circuito também é útil, embora isto não seja essencial. Todas estas coisas podem ser encontradas em lojas de material elétrico ou eletrônico.

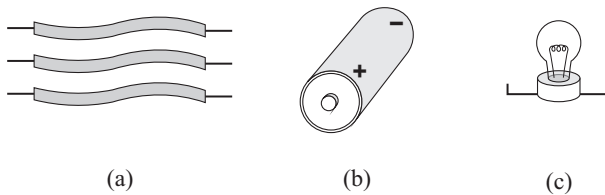


Figura 6.24: (a) Três fios desencapados nas pontas. (b) Uma pilha. (c) Uma lâmpada.

Uma das extremidades desencapadas do primeiro fio é ligada ao terminal negativo da pilha, com a outra extremidade desencapada ficando livre no ar. Esta parte livre está representada pela letra *A* na Figura 6.25. Uma das extremidades do segundo fio é ligada ao terminal positivo da pilha, com a outra extremidade ligada a um dos contatos do bocal da lâmpada. Uma das extremidades do terceiro fio é ligada ao outro contato do bocal da lâmpada, com a outra extremidade do fio ficando livre no ar (vamos chamá-la de *B*). A distância entre as extremidades *A* e *B* deve ser da ordem de uns 10 cm , Figura 6.25.

Quando tudo estiver pronto, deve-se pegar um quarto pedaço de fio de cobre desencapado nas duas pontas. Uma de suas extremidades deve ser ligada ao ponto *A* e a outra ao ponto *B*. Neste caso a lâmpada deve acender, indicando que os contatos elétricos estão bem feitos. Isto também indicará que está passando corrente elétrica pelo fio, Figura 6.26.

Definição: Diz-se que o fio de cobre é condutor quando está sob a ação de uma diferença de potencial de $1,5 \text{ volt}$. O motivo para esta definição é que, ao colocá-lo entre *A* e *B*, fechando o circuito, a lâmpada acende.

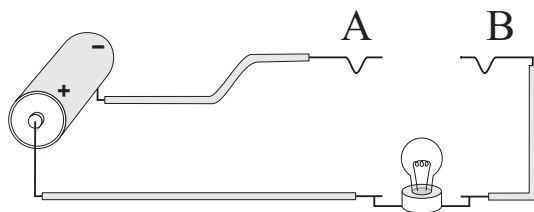


Figura 6.25: Montagem para testar se uma certa substância é condutora ou isolante.

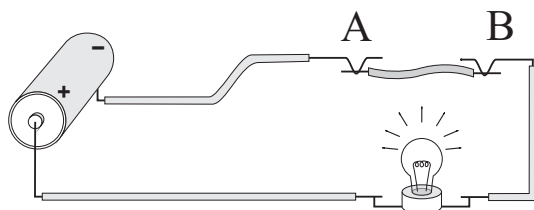


Figura 6.26: Ao ligar um fio de cobre desencapado nas duas pontas entre *A* e *B*, observa-se que a lâmpada acende.

Caso se deixe a lâmpada ligada por vários minutos, a pilha vai ficando cada vez mais fraca. Isto é indicado pelo brilho da lâmpada, que vai diminuindo até apagar. Neste caso a pilha foi descarregada. Para evitar que a pilha se gaste, o ideal é abrir o contato tão logo se percebe que a lâmpada acendeu.

Experiência 6.18

Antes de realizar o procedimento descrito a seguir, é fundamental que a Experiência 6.17 tenha dado certo, acendendo a lâmpada. Isto vai indicar que todos os contatos elétricos estão bem feitos. Vamos supor que a pilha continue forte e bem carregada depois que o quarto fio de cobre foi retirado.

Liga-se agora os pontos *A* e *B* com um canudo plástico. Neste caso a lâmpada não acende, indicando que não há passagem de corrente elétrica pelos fios, Figura 6.27 (a).

Definição: Diz-se que o plástico é um material isolante quando está sob a ação de uma diferença de potencial de 1,5 volt. O motivo para esta definição é que ele não permite o descarregamento da pilha quando é o elo de ligação entre seus terminais positivo e negativo. Isto é indicado pelo fato da lâmpada não acender quando o plástico é colocado entre *A* e *B*.

Experiência 6.19

Repete-se a Experiência 6.17, mas agora ligando outras substâncias entre os pontos *A* e *B*.

Para que tudo fique mais prático, pode-se também colocar uma chave no meio do primeiro ou do segundo fio. Com esta chave pode-se fechar e abrir o contato

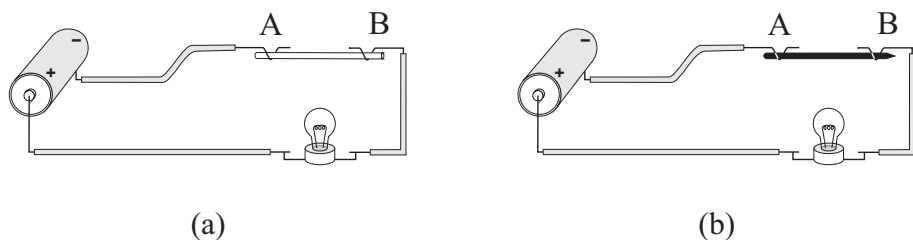


Figura 6.27: (a) Ao ligar um canudo plástico nas duas pontas entre A e B , observa-se que a lâmpada não acende. (b) A lâmpada permanece desligada ao ligar A e B através de um palito de madeira.

elétrico à vontade. Abre-se esta chave e coloca-se entre A e B a substância a ser testada. Fecha-se então a chave e observa-se o brilho da lâmpada.

Definições: Caso a lâmpada acenda, diz-se que a substância é condutora. Caso a lâmpada permaneça apagada, diz-se que a substância é isolante. Podem ser testadas todas as substâncias listadas na Experiência 6.12.

Na Figura 6.27 (b) ilustramos o resultado da experiência para o caso de ligarmos A e B por um espeto de churrasco de madeira. Como a lâmpada não se acende neste caso, conclui-se que um espeto de madeira é isolante quando está sob a ação de uma diferença de potencial de 1,5 volt embora ela se comporte como um condutor para diferenças de potencial bem maiores do que esta.

Experiência 6.20

Para testar líquidos, o ideal é obter um recipiente isolante (como um copo plástico, por exemplo), vazio, que vai ser depois preenchido com o líquido a ser testado. Para verificar se o recipiente é realmente isolante, o ideal é ligar os pontos A e B na borda superior deste recipiente vazio. Ele será isolante caso a lâmpada não acenda.

O recipiente plástico é então preenchido com o líquido que se quer testar. Após o recipiente ter sido preenchido, afundam-se os terminais A e B neste líquido. Na Figura 6.28 ilustramos o que ocorre no caso da água.

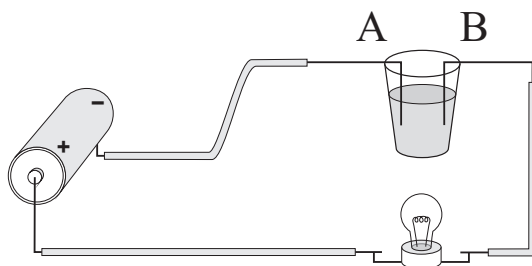


Figura 6.28: Ao ligar as duas pontas A e B através da água, observa-se que a lâmpada não acende.

Como a lâmpada não acende, conclui-se que a água é uma substância isolante quando está sob a ação de uma diferença de potencial de 1,5 volt.

6.6.1 Corpos que se Comportam como Condutores e Isolantes para Baixas Diferenças de Potencial

Realizam-se testes com vários materiais utilizando procedimentos análogos às Experiências 6.17 até 6.20. O resultado que se obtém é o seguinte:

- **Corpos que se comportam como condutores quando estão sob a ação de uma diferença de potencial de 1,5 V:**

Todos os metais.

- **Corpos que se comportam como isolantes quando estão sob a ação de uma diferença de potencial de 1,5 V:**

Ar seco, ar úmido, âmbar, plástico, seda, madeira, vidro aquecido, vidro à temperatura ambiente, náilon ou poliamida sintética, PVC, poliéster, lã, cabelo humano, tubo de acrílico, pano de acrílico, isopor, barra de chocolate, café em pó, papel, cartolina, papel de “seda,” giz, porcelana, água de torneira ou de chuva, xampu, querosene, leite, refrigerante, detergente, óleo vegetal, parede, lousa, rolha, couro, farinha de trigo, fubá, fio de acrílico, sal, açúcar, serragem, solo ou barro, tijolo, borracha, etc.

Comparando-se o resultado desta experiência com as Experiências 6.12 e 6.13, o que se observa é que os conceitos de *condutores* e *isolantes* são relativos. Isto é, substâncias como a madeira e o vidro que se comportam como condutores nas experiências usuais de eletrostática, passam a se comportar como isolantes quando estão sob a ação de uma diferença de potencial de 1,5 V. Não vamos entrar em detalhes aqui, mas é comum gerar-se nas experiências de eletrostática uma diferença de potencial da ordem de 1.000 V até 10.000 V entre um canudo plástico atritado e a Terra, entre um eletroscópio carregado e a Terra, ou entre as extremidades de um corpo (quando se quer testar se este corpo se comporta como um condutor ou como um isolante). Para estas altas diferenças de potencial, vem da experiência que a madeira e o vidro comum se comportam como condutores. Por outro lado, para baixas diferenças de potencial como aquelas geradas pelas pilhas, de 1 V até 10 V, vem que estes materiais se comportam como isolantes. Isto indica que deve se tomar cuidado ao classificar os materiais em isolantes e condutores. Afinal de contas, o comportamento das substâncias depende não apenas de suas propriedades intrínsecas, mas também da diferença de potencial externa a que estão submetidas. Este é um aspecto muito importante que não deve ser esquecido.

Existe uma gradação entre as experiências usuais de eletrostática e as experiências nas quais existem diferenças de potencial de poucos volts. Em outras palavras, há uma gradação entre os comportamentos dos corpos como condutores ou como isolantes, quando passamos de uma diferença de potencial de milhares de volts para uma diferença de potencial de poucos volts.

Devido a isto, talvez fosse mais apropriado uma mudança de linguagem. Normalmente dizemos que um certo corpo A é um condutor e que um outro corpo B é um isolante. Porém, o mais correto seria dizer que sob um conjunto de condições o corpo A *se comporta* como um condutor, enquanto que sob um outro conjunto de condições ele *passa a se comportar* como um isolante. O mesmo valeria para o corpo B . Mas como isto tornaria as frases muito longas e complicadas, vamos manter as expressões de que os corpos *são* condutores ou isolantes, mas sempre tendo em mente que estes são conceitos relativos, que dependem não apenas das propriedades intrínsecas destes corpos, mas também das condições externas a que estão submetidos.

6.7 Outros Aspectos que Influenciam no Comportamento Condutor ou Isolante de um Corpo

Na Subseção 6.3.1 os condutores foram definidos como sendo os corpos que descarregam um eletroscópio eletrizado ao entrarem em contato com ele. Já os isolantes foram definidos como sendo os corpos que não descarregam um eletroscópio eletrizado ao entrarem em contato com ele. Na Seção 6.6 viu-se que estas definições são relativas, já que dependendo da diferença de potencial elétrico que existe entre as extremidades de um corpo, ele pode se comportar como um condutor ou como um isolante. Nesta Seção mencionaremos brevemente outros três aspectos que influenciam nestas definições.

6.7.1 O Tempo Necessário para Descarregar um Eletroscópio Eletrizado

Experiência 6.21

Carregamos um eletroscópio e o deixamos sobre a mesa em um dia seco. Observa-se que a tirinha permanece levantada por vários segundos ou até mesmo por alguns minutos. Porém, se esperarmos por um tempo suficientemente longo, como por exemplo uma hora, veremos que o eletroscópio se descarrega.

Isto significa que a definição de condutor ou de isolante da Subseção 6.3.1 depende do tempo de observação. Para um intervalo de tempo de alguns segundos vem que o ar seco é um bom isolante. Já para um intervalo de tempo de uma hora vem que o ar seco pode ser classificado como um condutor por permitir a descarga do eletroscópio.

Definições: Vamos nos referir aqui aos procedimentos experimentais descritos na Seção 6.3. Para os objetivos deste livro, podemos definir os *bons condutores* como sendo as substâncias que, ao entrarem em contato com um eletroscópio eletrizado, o descarregam em um intervalo de tempo menor do que 5 segundos. Os *maus condutores* ou *maus isolantes* são as substâncias que o descarregam durante um intervalo de tempo que vai de uns 5 segundos até uns

30 segundos. Estes corpos também são chamados de *condutores imperfeitos* ou de *isolantes imperfeitos*. Já os *bons isolantes* são as substâncias que necessitam de um intervalo de tempo maior do que 30 segundos para descarregar um eletroscópio eletrizado. Neste livro vamos em geral nos referir aos bons condutores simplesmente como condutores, enquanto que os bons isolantes serão chamados normalmente de isolantes.

6.7.2 O Comprimento do Corpo que Entra em Contato com um Eletroscópio Eletrizado

Experiência 6.22

Recortam-se várias tiras de papel com larguras de 2 cm e comprimentos indo de 10 cm até 1 m. Carregamos um eletroscópio e o deixamos sobre a mesa em um dia seco. Segura-se uma extremidade da tira de 10 cm entre os dedos e encosta-se a outra extremidade na cartolina do eletroscópio carregado. Observa-se que o eletroscópio descarrega rapidamente. Pela definição da Subseção 6.7.1, vem que esta tira de papel pode ser considerada como boa condutora.

Carregamos novamente o eletroscópio e repete-se a experiência com uma tira de 30 cm. Segura-se uma extremidade da tira entre os dedos e encosta-se a outra extremidade na cartolina do eletroscópio carregado. Agora já se percebe claramente o intervalo de tempo de alguns segundos que são necessários até que ele descarregue. Dependendo do tipo de papel, vem que esta tira de 30 cm por 2 cm pode ser considerada como mau condutora.

Esta experiência mostra também visivelmente que, com a passagem do tempo, vai aumentando a quantidade de carga que o eletroscópio eletrizado vai perdendo, ver a Subseção 6.7.1. Neste caso a perda principal é pela tira de papel e não pelo ar.

Carrega-se novamente o eletroscópio e repete-se a experiência com a tira de 1 m por 2 cm. Observa-se que o eletroscópio permanece carregado por vários segundos. Pela definição da Subseção 6.7.1, vem que esta longa tira de papel pode ser considerada como um bom isolante.

Esta experiência mostra que o comprimento de um corpo influencia em seu comportamento como condutor ou isolante. Quanto maior for o comprimento do corpo entre a mão que o segura e o eletroscópio eletrizado, vem que maior será o tempo necessário para descarregar o eletroscópio.

6.7.3 A Área de Seção Reta do Corpo que Entra em Contato com um Eletroscópio Eletrizado

Experiência 6.23

Carrega-se um eletroscópio e o deixamos sobre a mesa em um dia seco. Segura-se uma extremidade de um único fio de cabelo na mão e encosta-se a outra extremidade do fio de cabelo na cartolina do eletroscópio carregado.

Observa-se que o eletroscópio permanece carregado por vários segundos, indicando que podemos classificá-lo como um bom isolante.

Carrega-se um eletroscópio e repete-se a experiência aumentando o número de fios de cabelo que seguramos pela mão e cujas extremidades livres encostamos simultaneamente na cartolina do eletroscópio. Observa-se que quanto maior for este número, mais rapidamente o eletroscópio será descarregado. Por exemplo, quando temos algumas dezenas de fios de cabelo observa-se que ele descarrega em poucos segundos. Isto indica que podemos classificar este conjunto de fios de cabelo como um bom condutor.

Experiências como esta mostram que a área de seção reta de um corpo influencia em seu comportamento como condutor ou isolante. Quando maior for a área de seção reta entre a mão que o segura e o eletroscópio eletrizado, vem que menor será o tempo necessário para descarregar o eletroscópio.

Neste livro não nos aprofundaremos nos aspectos discutidos nas Seções 6.6 e 6.7.

6.8 Eletrizando um Condutor por Atrito

Experiência 6.24

Vimos na Experiência 2.11 que não conseguimos carregar um metal por atrito enquanto o segurávamos pela mão. Mas agora que já descobrimos a distinção entre condutores e isolantes, mais o fato de que o corpo humano é condutor, torna-se possível uma variação desta experiência. É possível que ao atritar o metal ele tivesse adquirido uma carga elétrica, sendo que esta carga era logo descarregada para a Terra pelo contato do metal com a nossa mão. Veremos agora que de fato foi isto o que ocorreu.

Vamos então fazer uma nova experiência. Desta vez suportamos um metal como uma chaleira de alumínio, por exemplo, na extremidade de um tubo de PVC com uns 30 cm de comprimento. A chaleira fica invertida, com sua boca para baixo ao redor do PVC. Carrega-se um pêndulo elétrico negativamente e outro positivamente, ver a Seção 5.4. Eles ficam afastados entre si.

Seguramos o tubo de PVC com uma mão, sem tocar no metal. Envolvermos a outra mão com um saco plástico e atritamos o plástico contra uma região do alumínio da chaleira. Ainda sem tocar na chaleira, mas segurando apenas o tubo de PVC, aproximamos o lado atritado do alumínio de cada um dos dois pêndulos carregados, um positivamente e o outro negativamente, sem deixar que se toquem. Depois disto aproxima-se a parte atritada do plástico de cada um dos pêndulos carregados, novamente sem deixar que se toquem. Pelas atrações e repulsões observadas entre estas substâncias e os pêndulos, conclui-se que o plástico ficou carregado negativamente e que a chaleira ficou carregada positivamente.

Experiência 6.25

Repetimos os procedimentos da Experiência 6.24. Se agora aproximarmos dos pêndulos alguma parte do plástico que não foi atritada no metal e que esteja afastada da parte atritada do plástico, os pêndulos não indicarão a presença de uma carga neste pedaço do plástico. Porém, ao aproximar uma parte não atritada da chaleira de alumínio lentamente de cada um dos dois pêndulos, sem deixar que se toquem, observa-se que esta parte também ficou carregado positivamente. Ou seja, qualquer parte do alumínio que se aproximar dos pêndulos indicará uma presença de carga positiva no metal.

Experiências como esta mostram que é possível eletrizar um condutor através do atrito. Para isto é crucial que o condutor esteja isolado eletricamente do solo. Ou seja, ele não pode estar aterrado durante o atrito e deve continuar isolado após ter sido atritado.

A descoberta de que os metais também podem ser carregados pelo atrito, desde que estejam isolados, foi feita apenas na década de 1770.⁷

6.9 Conservação da Carga Elétrica

Experiência 6.26

Pega-se um tubo de PVC neutro, juntamente com um pedaço de saco plástico igualmente neutro, ver as Experiências 2.1, 3.1 e 4.5. Carrega-se um pêndulo elétrico negativamente e outro positivamente, ver a Seção 5.4. Em seguida atrita-se o tubo de PVC no saco plástico. Ao aproximar lentamente a parte atritada do tubo de cada um dos pêndulos carregados, sem deixar que o tubo toque nos pêndulos, observa-se que o tubo ficou carregado negativamente, já que repele o pêndulo negativo e atrai o positivo. Ao aproximar o lado atritado do saco plástico lentamente de cada um dos pêndulos carregados, sem deixar que se toquem, observa-se que o plástico ficou carregado positivamente.

Vamos agora analisar as experiências da Seção 5.4, juntamente com as Experiências 6.24 até 6.26. Elas indicam que quando atritamos entre si dois corpos inicialmente neutros, um corpo adquire uma carga positiva, enquanto o outro adquire uma carga negativa. Isto só é facilmente observado se os dois corpos forem isolantes. Caso um deles seja isolante e o outro condutor, a carga adquirida por este último durante o atrito é rapidamente descarregada pela mão para a Terra. Com isto parece que surgiu carga do nada no corpo isolante, já que o condutor fica descarregado depois do atrito. Para que se observe a carga adquirida por um corpo condutor devido ao atrito com outro corpo, é necessário isolar eletricamente o corpo condutor. Ou seja, ele não pode estar aterrado durante o atrito e deve continuar isolado após o atrito. Com isto a carga que ele tiver adquirido pelo atrito não será descarregada para a Terra.

A Experiência 6.25 também mostra mais uma vez que a carga adquirida por atrito por um corpo isolante não se distribui por todo este corpo, já que fica

⁷[Hem80] e [Hei99, pág. 252, nota 10].

presa à região que foi atritada. Já a carga adquirida por um condutor durante o atrito distribui-se rapidamente por todo o condutor, não ficando restrita à região atritada.

Nas próximas experiências vamos usar dois eletroscópios de mesmo tamanho. Vamos supor que eles possuem tirinhas de mesmo formato, tamanho e espessura, sendo igualmente sensíveis (isto é, com a mesma facilidade de deslocamento angular em relação às cartolinas). Em geral vamos supor que estão igualmente carregados, sendo isto indicado pelos ângulos de inclinação das tirinhas em relação às cartolinas. Quando eles estiverem carregados, não se deve tocar com as mãos na cartolina nem na tirinha de papel de “seda,” para evitar o aterramento dos eletroscópios. Quando eles tiverem de ser deslocados, o ideal é que sejam movimentados segurando-os pelos canudos de plástico que sustentam as cartolinas dos eletroscópios.

Experiência 6.27

Carregam-se igualmente dois eletroscópios negativamente como na Experiência 6.2. Depois que as duas tirinhas estiverem levantadas e que se afastou o canudo atritado, encostam-se as duas cartolinas uma na outra. Observa-se que as duas tirinhas continuam levantadas, Figura 6.29. Se afastarmos os dois eletroscópios, as duas tirinhas vão continuar levantadas. O mesmo ocorre se carregarmos igualmente dois eletroscópios positivamente e as duas cartolinas se tocarem.

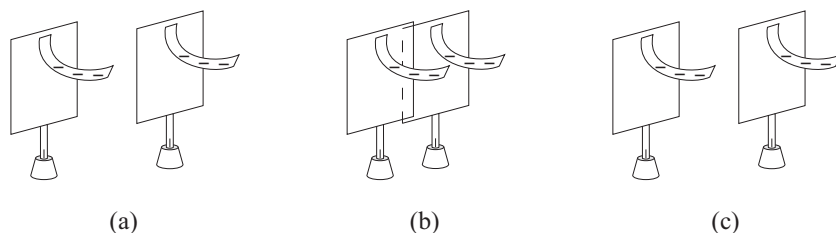


Figura 6.29: (a) Dois eletroscópios igualmente eletrizados com cargas de mesmo sinal. (b) Encostam-se as cartolinas dos dois eletroscópios e nada acontece. (c) Afastam-se os dois eletroscópios e as tirinhas continuam levantadas.

Experiência 6.28

Carrega-se um eletroscópio negativamente como na Experiência 6.2 e outro positivamente como na Experiência 6.8. Depois que as tirinhas estiverem levantadas, os dois canudos atritados devem ser afastados. Agora encostam-se as duas cartolinas uma na outra. Observa-se que as duas tirinhas se abaixam, Figura 6.30 (b)! Os eletroscópios podem ser afastados que as duas tirinhas permanecem abaixadas. Isto indica que os dois eletroscópios que estavam eletrizados com cargas opostas foram descarregados pelo contato mútuo. Esta experiência

é como se fosse o oposto das Experiências 6.24 e 6.26. Isto é, nestas últimas experiências tínhamos dois corpos inicialmente neutros que ao final do processo ficaram eletrizados com cargas opostas. Já na experiência atual temos dois eletroscópios inicialmente eletrizados com cargas opostas, sendo que ao final do processo eles ficam neutralizados.

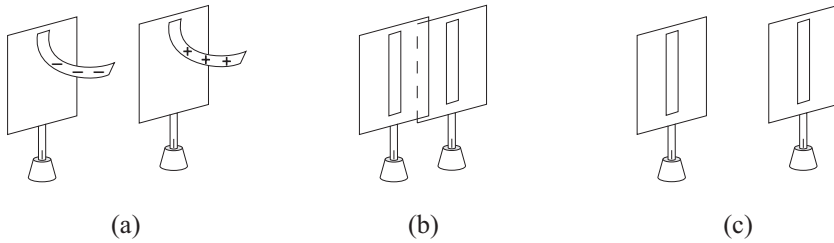


Figura 6.30: (a) Um eletroscópio positivo e outro negativo. (b) Ao se tocarem, as tirinhas abaixam. (c) Após a separação as tirinhas permanecem abaixadas, indicando que os eletroscópios se descarregaram.

Experiência 6.29

Carrega-se um único eletroscópio negativamente como na Experiência 6.2, tal que fique bem eletrizado. Isto é indicado pela grande inclinação da tirinha em relação à vertical, Figura 6.31 (a). Em seguida toca-se a cartolina deste eletroscópio carregado na cartolina de um outro eletroscópio que estava inicialmente descarregado. Observa-se que a tirinha do primeiro eletroscópio se abaixa um pouco em relação à inclinação inicial, mas continua levantada em relação à sua cartolina. Já a tirinha do segundo eletroscópio passa a ficar um pouco levantada, Figura 6.31 (b). Após a separação, as duas tirinhas permanecem levantadas, Figura 6.31 (c). Isto indica que os dois eletroscópios estão carregados. Mas o primeiro eletroscópio ficou com menos carga no final do processo, do que a carga que possuía no início. Esta quantidade de carga é indicado pela inclinação da tirinha em relação à vertical. Ou seja, um eletroscópio carregado perde um pouco de sua carga ao transferí-la para um segundo eletroscópio inicialmente descarregado.

Se eles forem afastados ao final do processo, as duas tirinhas vão permanecer um pouco levantadas. Ao aproximar lentamente um canudo negativamente atritado das duas tirinhas, pode-se perceber que as duas serão repelidas pelo canudo, indicando que os dois eletroscópios ficaram negativamente carregados. Como a inclinação do primeiro eletroscópio diminuiu em relação ao seu estado inicial, enquanto que surgiu uma inclinação na tirinha do segundo eletroscópio, isto sugere, pela Experiência 6.9, que saiu carga negativa do primeiro eletroscópio, sendo ela transferida para o segundo eletroscópio.

O mesmo efeito ocorre ao fazer o contato entre um eletroscópio positivamente carregado e outro eletroscópio inicialmente descarregado.

Experiência 6.30

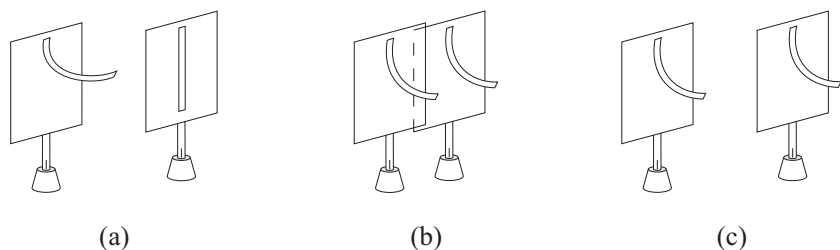


Figura 6.31: (a) Um eletroscópio carregado e outro descarregado. (b) Contato entre as cartolinas (c) Separação após o contato. As duas tirinhas ficam levantadas, mas com inclinação menor do que no caso (a).

Pode-se fazer uma variação das Experiências 6.14 e 6.15. Mantêm-se os eletroscópios *I* e *II* de costas um para o outro, separados de uns 15 cm, com as tirinhas para o lado de fora. Eles devem estar inicialmente descarregados e não deve haver nenhuma ligação entre eles nesta experiência. Após esta preparação, carrega-se apenas o eletroscópio *I* ao raspá-lo com um canudo plástico previamente eletrizado no cabelo, Experiência 6.2. A tirinha deste eletroscópio vai ficar levantada e a do *II* vai permanecer abaixada, Figura 6.32 (a). Em seguida, afasta-se o canudo eletrizado. Pega-se agora um segundo canudo, neutro, que deve então ser apoiado sobre os dois eletroscópios. Depois que isto ocorre, observa-se que a tirinha do eletroscópio *I* permanece levantada do mesmo jeito, e a tirinha do *II* permanece abaixada, Figura 6.32 (b).

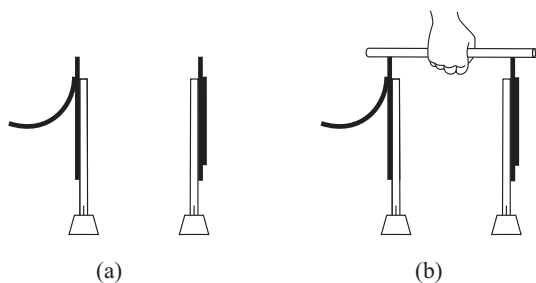


Figura 6.32: (a) Carrega-se apenas o eletroscópio *I*. (b) Coloca-se um canudo neutro ligando os dois eletroscópios, observando que nada se altera.

Experiência 6.31

Repete-se a Experiência 6.30 carregando apenas um dos eletroscópios, sendo que inicialmente não há ligação alguma entre os dois eletroscópios, Figura 6.33 (a).

Só que agora os dois eletroscópios não mais vão ser ligados por um canudo neutro. Em vez disto, corta-se um canudo neutro pela metade tal que fique com uns 10 cm de comprimento, sendo ele atravessado por um espeto de madeira ou

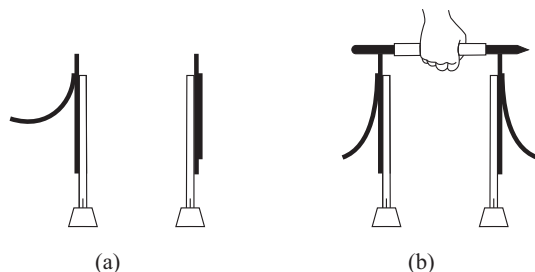


Figura 6.33: (a) Carrega-se apenas o eletroscópio *I*. (b) Coloca-se um espeto recoberto por um canudo ligando os dois eletroscópios, tomando-se o cuidado para tocar apenas no canudo que o envolve. Observa-se que a tirinha do *I* abaixa um pouco e a tirinha do *II* se levanta um pouco.

por um fio de cobre desencapado tendo uns 20 cm de comprimento. As bordas do espeto ou do fio devem sair para fora das duas extremidades do canudo. Depois disto, sem tocar mais no espeto ou no fio, segura-se o canudo pelo centro e apoia-se o sistema sobre as cartolinas dos dois eletroscópios, Figura 6.33 (b). Isto deve ser feito tal que apenas o espeto ou o fio fiquem apoiados sobre as cartolinas. Quando ocorre este contato, o que se observa é que a tirinha do eletroscópio *I* abaixa um pouco, com a tirinha do eletroscópio *II* levantando um pouco. No final as duas tirinhas vão ficar igualmente levantadas, sendo que elas ficam menos levantadas do que a tirinha do eletroscópio *I* na Figura 6.33 (a).

Deve-se prestar atenção especial em dois aspectos nesta experiência. O primeiro é o de não tocar com as mãos nas cartolinas dos eletroscópios, nem no espeto ou no fio dentro do canudo. O segundo cuidado é que, por precaução, deve-se envolver o espeto ou o fio metálico com dois ou três canudos. O motivo para isto é que nem sempre os canudos são perfeitamente isolantes. Logo, pode ocorrer uma descarga parcial ou total pela mão ao apoiar o espeto sobre os dois eletroscópios, sendo que a carga do eletroscópio passaria pela mão atravessando a espessura do canudo plástico, sendo descarregada para a Terra. Quando se colocam dois ou três canudos ao redor do espeto, garante-se um isolamento maior do canudo.

Na Experiência 6.30 não houve transferência de carga elétrica entre o eletroscópio *I* e o *II* ligados por um canudo plástico. Já na Experiência 6.31 observa-se que quando o eletroscópio *I* perde um pouco de carga, o eletroscópio *II* ganha um pouco de carga.

Estas experiências ilustram de forma qualitativa a conservação de carga elétrica. Quando dois corpos condutores de mesmo formato e tamanho estão igualmente carregados com cargas de mesmo sinal, eles não se descarregam ao entrarem em contato. Por outro lado, caso as cargas sejam de sinais opostos e de mesma intensidade, os dois condutores vão se descarregar simultaneamente

após o toque, ficando neutros eletricamente. Caso apenas um deles esteja inicialmente carregado, então com o toque entre eles vai ocorrer uma transferência parcial de carga do corpo eletrizado para o corpo neutro. Ao final do processo os dois corpos vão ficar eletrizados com carga de mesmo sinal.

6.10 Gray e a Conservação da Carga Elétrica

Talvez o primeiro a fazer uma experiência mostrando qualitativamente a conservação de cargas tenha sido Gray em 1735.⁸ Ele dependurou um garoto por fios de seda tal que o garoto ficasse deitado no ar, suspenso por estes isolantes. Ao lado do garoto ficava um homem em pé sobre um suporte isolante feito de laca e resina. Do outro lado do garoto ficava um segundo homem segurando uma “linha pendular.” Este era um tipo de eletroscópio inventado por Gray e que provavelmente era apenas uma linha de algodão ou de linho presa a uma vareta de madeira. Como a linha é condutora, ao se aproximar de um corpo carregado ela é atraída por ele. O ângulo de inclinação da linha pendular seria um indicador da quantidade de eletrização do corpo. Gray menciona este tipo de eletroscópio em 1731,⁹ ver a Seção 4.9. O segundo homem na experiência de Gray, aquele que segurava a linha pendular, estava provavelmente em contato direto com o solo, aterrado, não estando isolado. Gray atritava um tubo de vidro com a mão e o aproximava do pé do garoto. O garoto passava então a atrair a linha pendular. O garoto aproximava seu dedo do homem sobre a resina. Havia uma descarga elétrica através do ar e o menino perdia uma parte de sua atração, ao mesmo tempo em que o homem passava a atrair a linha pendular, tendo ficado carregado pela transferência de carga do menino.

Aqui vai a citação desta experiência crucial:¹⁰

No dia 6 de maio [de 1735], fizemos a seguinte experiência. O garoto sendo suspenso por linhas de seda, e o tubo [de vidro atritado] sendo colocado próximo de seus pés como da maneira usual, quando [o garoto] colocava a extremidade do seu dedo [da mão] próximo da mão de um homem, que estava de pé sobre um bloco feito de camada de laca e de resina preta; [enquanto que] ao mesmo tempo um outro homem estava de pé do outro lado do garoto com a linha pendular; então solicitou-se ao garoto que colocasse seu dedo próximo da mão do primeiro homem, com isto houve uma picada [pequeno choque] e ouviu-se um estalido; e no mesmo instante, a linha [do eletroscópio] que estava direcionada ao menino devido à sua atração, retrocedeu [diminuiu seu ângulo de inclinação em relação à vertical], [com] o garoto tendo perdido uma grande parte da sua atração, com uma segunda aproximação do dedo [do garoto] em relação à mão do [primeiro] homem, cessou a atração [do fio pelo menino]; então,

⁸[Grai].

⁹[Grad, pág. 228], [Graf, pág. 289] e [Grai, págs. 167-168].

¹⁰[Grai, pág. 168].

mantendo a linha [do eletroscópio] próxima do [primeiro] homem, encontrou-se que ele atraía bem fortemente; mas tendo desde então repetido esta experiência, encontrei que embora a atração do garoto seja muito diminuída, contudo ele não perde esta [atração], até que ocorram 2, 3, e algumas vezes 4 aplicações de seu dedo para [próximo] da mão daquele que está sobre o corpo elétrico [isto é, sobre o suporte isolante], mas sem tocá-lo.

A ideia da conservação de carga estava presente implicitamente nas concepções de diversos cientistas que trabalhavam com eletricidade. Com Gray temos a primeira experiência indicando este fato. Um dos primeiros a explorar com proveito o conceito de conservação de carga foi Benjamin Franklin (1706-1790) entre 1745 e 1747.¹¹

6.11 Uma Breve História do Eletroscópio e do Eletrômetro

A maneira mais antiga para saber se um corpo estava ou não carregado eletricamente era aproximá-lo de substâncias leves, como na experiência do efeito âmbar. Depois foram criados instrumentos mais sensíveis para detectar esta propriedade dos corpos: o perpendicular de Fracastoro, o versório de Gilbert e a linha pendular de Gray. Em todos estes casos, era necessário aproximar o corpo atritado destes instrumentos para ver se os instrumentos reagiam à presença do corpo. Este corpo atritado poderia ser um pedaço de âmbar, de vidro, de resina ou, atualmente, um pedaço de plástico.

Usualmente não se observa nenhuma mudança aparente em um corpo ao carregá-lo eletricamente. Por exemplo, um âmbar ou um canudo de plástico não mudam de cor nem se deformam macroscopicamente ao serem atritados e ficarem carregados eletricamente. Em geral, só se detecta se eles estão ou não eletrizados pelos efeitos que eles causam em substâncias próximas (como atrair papeizinhos) ou em algum instrumento sensível colocado em suas proximidades (como orientar um versório). Se um pêndulo elétrico estiver afastado de outros corpos, ele vai permanecer na vertical, estando ou não carregado eletricamente. Apenas ao aproximarmos outros corpos do pêndulo é que iremos descobrir, pela inclinação de seu fio em relação à vertical, se ele está ou não carregado.

Neste livro estamos chamando de eletroscópio ao instrumento que, estando ligado a um corpo, indica automaticamente se este corpo está ou não carregado eletricamente, sem que tenhamos que mexer no instrumento ou no corpo, e sem que hajam outras substâncias próximas ao corpo para indicar sua carga. Mesmo se este instrumento não estiver ligado a nenhum corpo, é possível saber se o próprio eletroscópio está ou não eletrizado sem que tenhamos que mexer nele e sem que hajam outras substâncias em suas proximidades. Neste sentido, um eletroscópio é diferente do versório ou do pêndulo elétrico.

¹¹[Hei99, págs. 327-333].

Um instrumento precisa possuir duas características principais para ser caracterizado como um eletroscópio. (I) A primeira é que o próprio eletroscópio precisa estar isolado eletricamente da Terra. Uma outra alternativa é que o corpo ao qual o eletroscópio está ligado é que precisa estar isolado eletricamente da Terra. Estes isolamentos são cruciais para que o eletroscópio possa armazenar uma carga elétrica. No caso dos eletroscópios usados neste livro, este isolamento elétrico é garantido pelo canudo plástico neutro que suporta a cartolina. (II) A segunda característica é que o próprio eletroscópio precisa ter alguma propriedade visível que possua estados diferentes quando o eletroscópio está neutro ou quando está carregado eletricamente. Nos eletroscópios usados neste livro esta propriedade é o ângulo de afastamento entre a tirinha e a cartolina na qual está presa. Nos eletroscópios clássicos esta propriedade é indicada pela inclinação entre duas tirinhas.

Talvez o primeiro eletroscópio da história tenha sido construído por Du Fay em 1737.¹² Gray, antes de Du Fay, já usava um fio de algodão ou de linho preso em uma vareta para indicar se um corpo estava ou não carregado. Mas para isto era necessário aproximar a vareta do corpo e ver se o fio era ou não atraído pelo corpo. Du Fay, por outro lado, passou a dependurar fios dobrados em duas partes iguais sobre o corpo. Ao carregar o corpo, estas duas partes se afastavam, com o fio ficando na forma da letra *V* invertida. Quanto maior fosse o ângulo de abertura, mais carga continha o corpo. Na primeira experiência que descreveu,¹³ Du Fay tinha uma barra de ferro suspensa horizontalmente por cordões de seda. Estes cordões garantiam o isolamento elétrico do conjunto, evitando que ele se descarregasse para a Terra. Então colocou sobre a barra comprimentos iguais de fios de diversos tipos: linho, algodão, seda e lã. Cada fio era dobrado ao meio, com suas partes centrais apoiadas sobre a barra. Ao eletrizar a barra, observou que se afastavam mais os fios de linho, depois os de algodão, em seguida os de seda e, por último, os de lã, que eram os que menos se afastavam entre si. Atribuiu isto a uma capacidade maior do linho de acumular a matéria elétrica, quando comparado com as outras substâncias.

Em seguida apresentou a seguinte descrição, extremamente interessante:¹⁴

Um fio [de linho ou de algodão] colocado sobre uma barra de ferro suspensa por cordões de seda apresenta a ideia da experiência mais simples de todas, embora ela possa fornecer o assunto de meditações profundas, e ela serve para confirmar a maior parte dos princípios que estabeleci nos trabalhos precedentes, tanto sobre a comunicação da eletricidade e de seus efeitos de atração e de repulsão, quanto sobre a realidade dos dois tipos de eletricidade, a saber, a vítrea e a resinosa. Ela também serve para que se saiba se a força da eletricidade é maior ou menor, o que é muito cômodo na prática de todas as experiências. Como já dissemos, para isto basta colocar sobre a barra um pedaço de fio e se verá as duas extremidades que pendem

¹²[DF37b, págs. 94-98].

¹³[DF37b, págs. 95-96].

¹⁴[DF37b, pág. 98].

livremente de um lado e do outro da barra se afastarem entre si com uma força maior ou menor, formando um ângulo maior ou menor, dependendo se a barra recebeu do tubo [de vidro atritado] uma virtude elétrica maior ou menor. [Uma ilustração de uma experiência deste tipo aparece na Figura 6.34.] E isto tornará conhecido de uma maneira bem exata o grau da força da eletricidade, de maneira que poderemos escolher o momento e as circunstâncias mais favoráveis para as experiências que necessitam da eletricidade mais forte, tais como são as experiências relacionadas à luz, ou à comunicação ao longo de uma corda ou ao longo de um outro corpo contínuo.

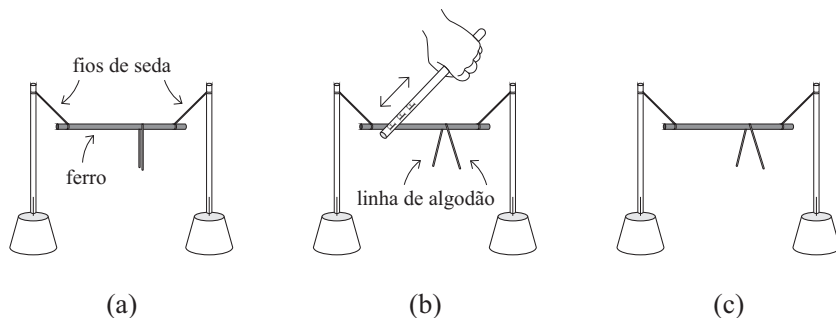


Figura 6.34: Eletroscópio de Du Fay. (a) Barra de ferro suspensa por linhas de seda. Uma linha de algodão está pendurada na barra. (b) Um tubo de vidro eletrizado é raspado na barra. (c) Ao afastar o tubo, as duas metades da linha de algodão ficam afastadas entre si.

Esta experiência de Du Fay é análoga à Experiência 6.9, representada pela Figura 6.12. Quanto mais carregado estiver o eletroscópio, mais as duas tirinhas estarão afastadas entre si.

Du Fay também usou seu eletroscópio, entre outras coisas, para descobrir quais são os melhores isolantes. Para isto dependurou uma barra de ferro por cordões de diferentes materiais, ou a apoiou sobre corpos sólidos compostos de materiais diferentes. Depois carregou a barra com o tubo de vidro previamente atritado. Em seguida observou, através do ângulo de afastamento do seu eletroscópio preso à barra, qual substância permitia que a barra ficasse carregada por mais tempo. Esta substância (o cordão dependendo a barra ou o corpo sólido a apoiando) seria então o melhor isolante.¹⁵

Jean Antoine Nollet (1700-1770), Figura 6.35, foi aprendiz de Du Fay durante alguns anos, de 1731 ou 1732 até ao redor de 1735.¹⁶

Em 1747 Nollet apresentou um aperfeiçoamento do eletroscópio de Du Fay. Os fios abertos na forma de um V invertido estavam ligados diretamente ao corpo carregado. Uma lâmpada iluminava os fios e projetava suas sombras

¹⁵[DF37b, pág. 99].

¹⁶[Hei81e] e [Hei99, págs. 279-289].



Figura 6.35: Jean Antoine Nollet (1700-1770).

sobre uma tela graduada na qual se podia ler o ângulo de abertura dos fios. Isto permitiu uma grande precisão na determinação destes ângulos, já que a tela e o observador poderiam ficar distantes do eletroscópio, sem afetá-lo durante a leitura, Figura 6.36.¹⁷

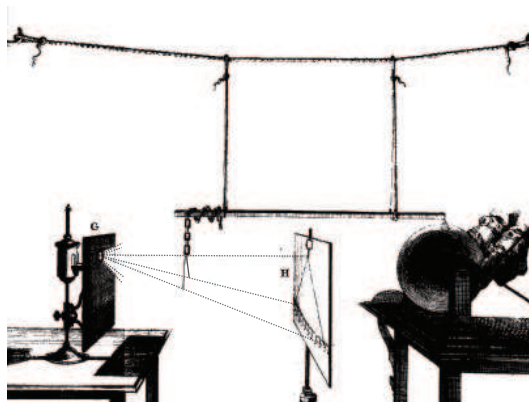


Figura 6.36: Eletroômetro de Nollet.

Nollet criou um nome para este instrumento, *eletrômetro*:¹⁸

Utilizei em várias ocasiões de um meio bem simples para conhecer a progressão da eletricidade, o qual mereceria o nome de *eletrômetro*, caso fosse geralmente aplicável, e se pudesse servir para medir por quantidades bem conhecidas e que não pudéssemos duvidar, os aumentos ou diminuições que ele indica.

Este é um nome apropriado, já que este instrumento permite a medida quantitativa de um ângulo cuja abertura está relacionada com a eletricidade do corpo

¹⁷[Nol47, pág. 129] e [Hei99, pág. 353].

¹⁸[Nol47, p. 129].

ao qual está ligado. Um eletrômetro é um eletroscópio que permite uma medida quantitativa precisa de alguma propriedade, como um ângulo neste caso, associada à eletricidade.

Um outro exemplo de um de seus eletrômetro aparece na Figura 6.37.¹⁹

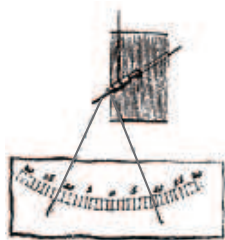


Figura 6.37: Outro eletrômetro de Nollet.

Para evitar as perdas elétricas que ocorriam nas pontas dos fios do eletroscópio, passou-se a prender mais tarde nas pontas destes fios bolinhas da medula envelhecida de plantas como o sabugueiro, ou bolinhas de cortiça. Um dos cientistas responsáveis por isto foi John Canton em 1752-4.²⁰ A Figura 6.38 apresenta o eletroscópio de Canton.

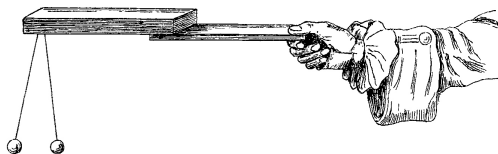


Figura 6.38: Eletroscópio de Canton.

Depois as linhas de linho ou de algodão foram substituídas por palhas rígidas ou por lâminas metálicas. Estas lâminas eram mais duráveis do que as linhas de algodão. Além disso, elas permitiam uma leitura mais precisa do ângulo de afastamento entre as lâminas, do que no caso do ângulo de afastamento entre duas linhas flexíveis. Entre os cientistas importantes que contribuíram com estes desenvolvimentos estão Abraham Bennet (1750-1799) e Alessandro Volta (1745-1827). O eletrômetro de Bennet com suas duas lâminas de ouro está representado na Figura 6.39.²¹

Georg Wilhelm Richmann (1711-1753) criou entre 1744 e 1753 um eletrômetro no qual uma das lâminas é fixa em relação à Terra e no qual apenas uma lâmina ou tira se afasta da vertical quando o eletroscópio está carregado, Figura 6.40.²²

¹⁹[Nol67, Gravura 4, Figura 15].

²⁰[Can53], [Can54] e [Wal36].

²¹[Ben86] e [Hei99, pág. 450].

²²[Hei99, pág. 392].

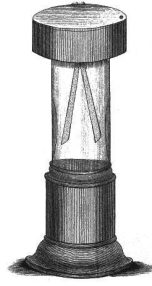


Figura 6.39: Eletrômetro de Bennet.

De certa forma ele é análogo ao eletroscópio da Figura 6.1 que estamos usando na maioria das experiências deste livro.

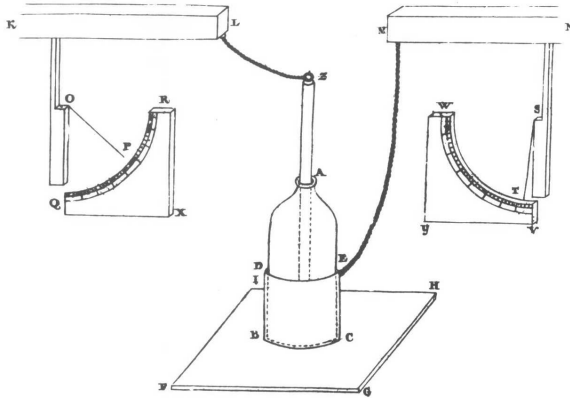


Figura 6.40: Dois eletrômetro de Richmann. Cada um deles possui apenas uma lâmina móvel.

Este tipo de eletrômetro foi depois desenvolvido por William Henley (data de nascimento desconhecida, falecido em 1779) em 1772, Figura 6.41.²³ Ele possui uma única haste móvel e leve, representada pela letra *A* na Figura 6.41. Esta haste móvel *A* pode girar ao redor de *B*. Na extremidade desta haste móvel existe uma pequena rolha. Quando o eletrometro está carregado, há uma repulsão entre a haste móvel *A* e a haste fixa *C*, fazendo com que a haste *A* fique afastada da haste *C*. O ângulo de abertura pode ser lido precisamente no transferidor preso ao instrumento.

Para maiores detalhes sobre a história do eletroscópio e do eletrometro, ver os artigos de Medeiros e Walker, assim como o livro de Heilbron.²⁴

²³[Pri72].

²⁴[Wal36], [Hei99, págs. xvi, xx, 82, 259, 327, 331, 353, 367, 373-376, 390-392, 418, 421-422,

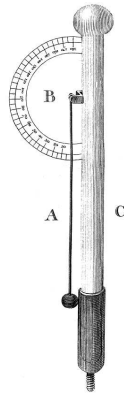


Figura 6.41: Eletrômetro de Henley.

Capítulo 7

Diferenças entre Condutores e Isolantes

Já vimos que a propriedade fundamental que caracteriza um isolante como o plástico é a de não permitir a passagem das cargas elétricas através dele. Portanto, o canudo plástico ligando a cartolina ao solo não descarrega um eletroscópio carregado. Por outro lado, a propriedade fundamental que caracteriza um condutor é a de permitir a passagem das cargas elétricas por eles. Exemplos de condutores são o corpo humano, o solo, os metais, o papel e a cartolina de um eletroscópio. Portanto, quando a cartolina de um eletroscópio carregado é ligada ao solo através de um condutor, o eletroscópio é descarregado. Vamos agora ver outras propriedades que distinguem condutores e isolantes.

7.1 Mobilidade de Cargas em Condutores e Isolantes

Experiência 7.1

Recorta-se uma tira de cartolina com 30 cm de comprimento e 2 cm de largura. O plano desta tira vai ficar na vertical, com seu lado mais longo na horizontal. Ela vai ficar presa no centro por um canudo plástico na vertical, formando a letra *T*. Prende-se a parte inferior do canudo em um suporte apropriado, como uma massa de modelar ou um copo de café cheio com gesso e com um colchete virado para cima, como o suporte do pêndulo elétrico, ver a Seção 4.4. Em seguida, colocam-se quatro tirinhas finas de papel de “seda” com 10 cm de comprimento dobradas ao meio ao longo da cartolina. Deve-se apertar as metades das tirinhas uma contra a outra para que fiquem bem próximas ao serem soltas, ou até mesmo se tocando. Após esta preparação, carrega-se um canudo plástico por atrito. Raspa-se o canudo atritado em um único ponto da cartolina. Repete-se este procedimento algumas vezes e se afasta o canudo.

Observa-se que todas as tirinhas se abrem, com as metades ficando afastadas entre si.

A mesma experiência pode ser repetida com uma cartolina maior, de 60 cm por exemplo. Para isto podem ser prendidos dois canudos verticais, um a 20 cm de uma extremidade, e outro a 40 cm da mesma extremidade. Espalham-se tirinhas de papel de “seda” ao longo de seu comprimento. Observa-se que todas elas se abrem quando um canudo atritado é raspado em uma das pontas da cartolina. Em vez da cartolina, pode-se utilizar também um fio de cobre encapado ao longo de todo o seu comprimento, exceto em uma pequena região (que não precisa ser sua extremidade) na qual será raspado o canudo atritado. Todas as tirinhas espalhadas ao longo do fio se abrirão quando se carrega o fio.

Construímos agora um T com as partes horizontal e vertical sendo de plástico. A borda superior horizontal pode ser uma régua plástica (com seu plano na vertical), ou uma seqüência de canudos plásticos presos pelas extremidades. Na parte horizontal do T se penduram as tirinhas de papel de “seda.” Carrega-se um canudo plástico por atrito. Ele é então raspado em uma pequena região da parte horizontal do T de plástico. Observa-se que as tirinhas não se abrem, a não ser aquelas bem próximas da região raspada.

Experiência 7.2

Recorta-se um círculo de papel com 20 cm de diâmetro. O plano do círculo vai ficar na horizontal, suportado por alguns canudos plásticos verticais debaixo dele. Faz-se com uma tesoura ou com uma furadeira de papel pares de furos lado a lado, ao longo do diâmetro do círculo. Entre cada par de furos dependura-se uma tirinha de papel de “seda” dobrada ao meio. Outra possibilidade é não furar o disco, mas colocar várias tirinhas lado a lado, cada uma no formato da letra L invertida, colada pelo lado menor. Duas tirinhas lado a lado vão ficar como a letra T , com a parte comprida da letra T sendo composta por 2 tirinhas lado a lado, penduradas verticalmente. Carrega-se um outro canudo plástico por atrito e ele é raspado em alguma borda do círculo. Observa-se que todas as tirinhas se abrem, mesmo as que estão afastadas do ponto onde o canudo atritado raspou no círculo.

O mesmo efeito já não ocorre com um disco plástico ou de isopor. Neste caso só se abrem as tirinhas próximas à região da raspagem. As tirinhas distantes desta região não se abrem.

Estas experiências mostram que quando se carrega um condutor, as cargas tendem a se espalhar por toda sua superfície, não ficando presas ao local onde houve o contato do condutor com o corpo carregado. Já em um isolante as cargas não se deslocam livremente por ele. Elas ficam presas ao local onde foram geradas ou transferidas para o isolante. O mesmo havia sido observado na Experiência 6.25.

7.2 Coletores de Carga

Nosso próximo instrumento elétrico é um *coletor de carga*. Ele é usado para obter um pouco da carga de um corpo eletrizado. Depois de coletada, é possível saber o sinal desta carga. Para isto basta aproximá-la de pêndulos elétricos previamente carregados positivamente e negativamente, ou de eletroscópios previamente carregados positivamente e negativamente. Os efeitos de atração ou repulsão gerados sobre os pêndulos ou sobre os eletroscópios podem também indicar se esta carga coletada é grande ou pequena. Embora o próprio pêndulo e eletroscópio já sirvam para a coleta de carga, vamos chamar de coletores a alguns instrumentos feitos especificamente para esta finalidade. Outra possível utilidade do coletor é a de servir como um transportador de carga entre dois condutores separados espacialmente.

O coletor mais simples é uma bola feita de papel de alumínio e presa na extremidade de um fio de seda ou de náilon, com a outra extremidade presa a um canudo plástico, Figura 7.1. Em vez do papel de alumínio, pode-se usar também qualquer esfera metálica apropriada. Como o fio de seda é isolante, ele impede a fuga da carga coletada. Quanto maior for o diâmetro da esfera, mais carga ela coletará.

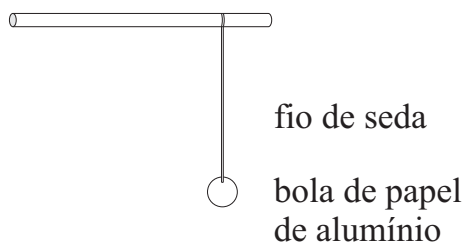


Figura 7.1: Um coletor de carga elétrica.

Um segundo modelo análogo ao anterior é feito com uma bola de papel de alumínio presa à extremidade de um canudo de plástico, Figura 7.2. A diferença em relação ao modelo anterior é que agora podemos coletar cargas nas partes superior ou lateral de um condutor carregado, segurando o canudo por baixo ou de lado. Isto é, temos um controle melhor de onde levá-lo.

Outro modelo é uma tira de papel de alumínio presa na ponta de um canudo de plástico. Esta tira pode ter, por exemplo, um comprimento de 5 cm e uma largura de 2 mm. Passa-se cola na ponta do canudo ou na extremidade da tira e ela é colada no canudo, Figura 7.3.

Talvez o coletor de cargas mais antigo construído exclusivamente com este objetivo tenha sido feito por F. U. T. Aepinus (1724-1802). Não existe nenhuma pintura ou imagem conhecida de Aepinus.¹ Seu coletor de cargas era simplesmente uma pequena peça metálica com cerca de 4 cm de comprimento, tendo um pequeno gancho em sua parte central, no qual era amarrado um fio de seda

¹[Aep79, pág. 62].

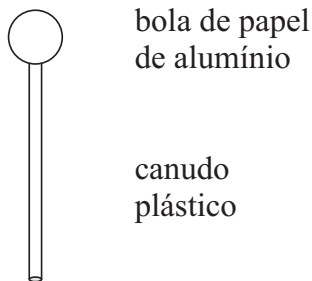


Figura 7.2: Outro coletor de cargas.

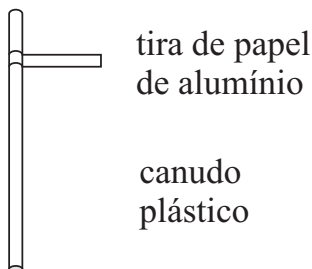


Figura 7.3: Um terceiro tipo de coletor de cargas.

bem seco, para torná-lo bem isolante. Descreveu este instrumento e várias experiências interessantes realizadas com ele em um livro em latim publicado em 1759, *Ensaio sobre a Teoria da Eletricidade e do Magnetismo*.²

Um outro modelo é chamado de plano de prova, tendo sido inventado por Charles-Augustin Coulomb (1736-1806) em 1787, Figura 7.4.³ Coulomb conhecia a obra de Aepinus e a cita em seu trabalho.

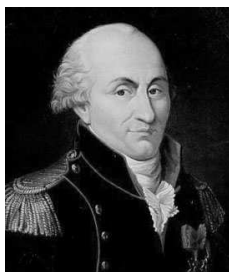


Figura 7.4: Charles-Augustin Coulomb (1736-1806).

O plano de prova nada mais é do que um disco condutor preso no centro de um dos lados por um suporte isolante. Coulomb o utilizou para determinar a

²[Aep79, págs. 312-314].

³[Hei99, pág. 495].

distribuição de carga ao longo das superfícies de dois ou mais condutores eletrizados que estavam em contato (esferas metálicas se tocando, por exemplo). A quantidade de carga armazenada pelo plano de prova é proporcional à densidade superficial de carga no local do condutor que ele toca. O modelo que vamos utilizar aqui é um disco de cartolina com 3 cm de diâmetro. Pode-se colar papel de alumínio sobre uma das faces, mas isto não é essencial. Corta-se um pedaço de um canudo de plástico tendo 5 cm de comprimento. O canudo vai ficar ortogonal ao disco, como se fosse seu eixo de simetria. Uma das extremidades do canudo é presa no centro do disco com cola ou com um pedaço de massa de modelar, Figura 7.5. Quando se manipula o plano de prova, deve-se tocar apenas no canudo, mas não na massa de modelar nem no disco de cartolina.

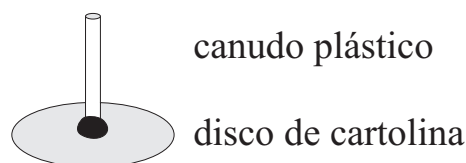


Figura 7.5: Plano de prova de Coulomb.

Estes coletores vão ser utilizados em algumas experiências descritas a seguir.

7.3 A Polarização Elétrica de Condutores

Experiência 7.3

Vimos na Experiência 6.12 que a cartolina é condutora e que o plástico é isolante. Vamos então utilizar este fato para construir um disco condutor isolado e então estudar seu comportamento na presença de corpos carregados. Vamos utilizar dois eletroscópios carregados, um positivamente e outro negativamente, além de um terceiro eletroscópio descarregado. Recorta-se um disco de cartolina com 15 cm de diâmetro. Colocam-se quatro canudos neutros na vertical apoiados sobre suportes análogos aos dos pêndulos elétricos. Estes canudos vão apoiar o disco de cartolina para que o disco fique na horizontal. Em cima do disco colocam-se três planos de prova de Coulomb, construídos como explicado na Seção 7.2. Eles devem estar alinhados ao longo de um diâmetro do disco. Um plano de prova fica no centro do disco, enquanto que os outros dois ficam próximos das bordas opostas. Vamos chamá-los de 1, 2 e 3, com o coletor 2 estando no centro do disco. Inicialmente toca-se com o dedo no disco para garantir que ele esteja descarregado.

Atrita-se agora um canudo no cabelo para que fique carregado negativamente. Ele fica apoiado verticalmente sobre um suporte apropriado e é aproximado do disco, ficando parado próximo ao coletor 1, sem tocar no disco. O plano horizontal do disco deve estar aproximadamente na metade da altura do canudo, Figura 7.6. Retira-se o coletor 2 e o aproximamos do eletroscópio

descarregado, nada ocorre, indicando que este coletor 2 está descarregado. Podemos colocá-lo de volta no centro do disco. Retiramos agora o coletor 1 e o aproximamos lentamente do eletroscópio descarregado, sem deixar que se toquem. Como a tira do eletroscópio se levanta, isto indica que o coletor está carregado. Aproximando então lentamente o plano de prova 1 dos outros dois eletroscópios carregados, sem deixar que se toquem, observa-se que ele atrai a tirinha do eletroscópio negativo e repele a tirinha do eletroscópio positivo, indicando que ele está carregado positivamente. Ele é então colocado de volta em seu lugar original. Retira-se agora o coletor 3 e repete-se o procedimento, concluindo-se que ele ficou carregado negativamente.

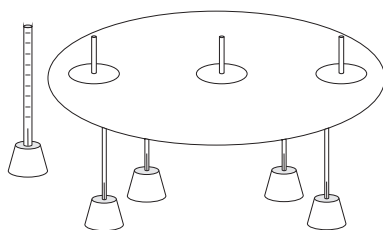


Figura 7.6: Experiência sobre a distribuição das cargas em um condutor.

Experiência 7.4

Repetimos a Experiência 7.3, mas agora colocando o canudo negativo a uns 5 cm da borda mais próxima do disco. Mais uma vez este canudo negativo fica alinhado com os planos de prova de Coulomb na seguinte ordem: canudo negativo, coletores de carga 1, 2 e 3, respectivamente. Ao repetir o procedimento anterior, não se encontra carga no coletor 2. Encontra-se que o primeiro coletor fica novamente positivo, mas com uma quantidade de carga menor do que a carga acumulada pelo coletor 1 na Experiência 7.3. Isto é indicado pelas forças atrativa e repulsiva exercidas pelo coletor 1 da presente experiência sobre os eletroscópios negativo e positivo. As intensidades destas forças são menores do que as intensidades das forças análogas exercidas pelo coletor 1 na Experiência 7.3. Após retornar o primeiro coletor para sua posição original sobre o disco, removemos o terceiro coletor e testamos se ele está ou não carregado. Mais uma vez encontra-se que ele ficou carregado negativamente, mas também com uma menor quantidade de carga do que o terceiro plano de prova da Experiência 7.3. Isto é indicado pelas forças repulsiva e atrativa de menor intensidade que ele exerce sobre os eletroscópios negativo e positivo, respectivamente.

Repetimos a Experiência 7.3, mas colocando o canudo negativo cada vez mais afastado do disco. Quanto mais distante ele está, menor é a quantidade de cargas opostas coletadas pelos planos de prova 1 e 3. Quando o canudo negativo está distante 20 cm da borda mais próxima do disco, ou ainda mais afastado, não se consegue coletar uma carga com estes planos de prova que seja detectável nesta experiência. Ou seja, os eletroscópios negativo e positivo não reagem mais à presença dos planos de prova.

Experiência 7.5

Repetimos a Experiência 7.3. Devemos observar as forças exercidas pelos planos de prova carregados sobre as tirinhas dos três eletroscópios (o neutro, o positivo e o negativo) quando o canudo negativo está a uns 2 cm da borda do disco.

Colocamos então 2 ou 3 canudos negativos juntos, um ao lado do outro. Mais uma vez eles devem ficar a uns 2 cm da borda do disco. Eles devem estar igualmente eletrizados, sendo atritados da mesma forma no cabelo. Repetimos a Experiência 7.3 e observamos que mais uma vez o coletor 1 ficou carregado positivamente, como antes. Mas agora ele exerce uma força de atração bem maior sobre a tirinha do eletroscópio neutro do que a força atrativa exercida pelo primeiro coletor da Experiência 7.3. Ele também exerce uma força atrativa maior sobre a tirinha do eletroscópio negativo e uma força repulsiva maior sobre a tirinha do eletroscópio positivo. Por este motivo, concluímos que este plano de prova possui uma maior quantidade de carga do que a quantidade de carga coletada pelo primeiro plano de prova da Experiência 7.3. As intensidades das forças exercidas pelo terceiro coletor sobre as tirinhas dos eletroscópios nesta experiência também são maiores do que as forças análogas exercidas pelo terceiro coletor de cargas na Experiência 7.3. De acordo com isto, concluímos que ele adquiriu uma maior quantidade de carga negativa do que o terceiro coletor da Experiência 7.3.

Experiência 7.6

Recortamos uma placa de cartolina com dimensões de 10 por 7 cm. O lado maior vai ficar na horizontal e o menor na vertical. Prende-se um canudo plástico na vertical no centro de uma das faces da cartolina. A parte inferior do canudo é presa a um suporte conveniente, como uma massa de modelar ou o copo de café com gesso e colchete do pêndulo elétrico. Depois que a placa está pronta, toca-se na cartolina com o dedo para que ela fique descarregada. Carregam-se dois eletroscópios por atrito, um positivamente e outro negativamente. Vai-se utilizar aqui um coletor de carga feito de uma tira de papel de alumínio presa na ponta de um canudo plástico, ver a Seção 7.2 (Figura 7.3). Carrega-se um canudo por atrito negativamente e ele é fixado verticalmente em um suporte igual ao do pêndulo elétrico. Colocam-se afastados na mesa os dois eletroscópios carregados, a placa descarregada e o canudo atritado na vertical.

Aproxima-se o canudo atritado de uma borda lateral da placa, sem deixar que se toquem. Deixando-os próximos um do outro, separados por 1 ou 2 cm, raspa-se a tira de papel de alumínio do coletor de carga pela outra borda lateral da placa, Figura 7.7. Aproxima-se então a tira lentamente dos dois eletroscópios carregados, sem deixar que ela os toque. Pelo comportamento dos eletroscópios, conclui-se que a tira do coletor ficou carregada negativamente.

Descarrega-se a tira do coletor tocando-a com o dedo. Agora raspa-se esta tira na borda da placa que está próxima do canudo atritado, tomando o cuidado para não deixar a tira tocar no canudo atritado. Em seguida aproxima-se a tira

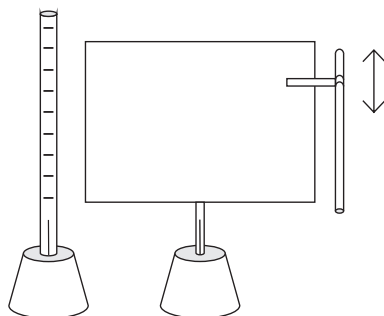


Figura 7.7: Experiência sobre a distribuição das cargas em um condutor.

lentamente dos dois eletroscópios e descobre-se que neste caso ela ficou carregada positivamente.

Experiência 7.7

Repetimos a Experiência 7.6, mas colocando agora o canudo negativo a cerca de 5 cm da borda mais próxima do retângulo. Ao repetir o procedimento anterior, encontra-se mais uma vez que o lado mais afastado do retângulo ficou negativamente carregado, enquanto que o lado menos afastado do retângulo ficou positivamente carregado. Mas as quantidades destas cargas coletadas são menores do que as cargas análogas coletadas na Experiência 7.6. Pode-se estimar estas quantidades coletadas de carga pelas forças exercidas pela tira eletrizada sobre os eletroscópios positivo e negativo.

Quando o canudo negativo está afastado 20 cm da borda mais próxima do retângulo, ou quando está ainda mais afastado, não se coleta uma quantidade apreciável de carga pela tira de papel de alumínio.

Experiência 7.8

Repetimos a Experiência 7.6 mas agora colocando 2 ou 3 canudos juntos, como na Experiência 7.5. Eles devem estar igualmente eletrizados negativamente como o canudo original, sendo atritados no cabelo da mesma forma. Eles devem ficar a 1 ou 2 cm de um lado do retângulo. Após repetir o mesmo procedimento de antes, encontra-se que a tirinha de papel de alumínio do coletor adquiriu quantidades maiores de carga positiva e negativa do que aquelas coletadas na Experiência 7.6.

Estas experiências mostram que a presença do canudo atritado causa uma separação de cargas no corpo condutor que está perto do canudo. A parte do condutor mais próxima do canudo fica com uma carga de sinal oposto à carga do canudo atritado, enquanto que a parte do condutor mais afastada do canudo atritado fica com uma carga de mesmo sinal que o canudo atritado.

Definições: Este fenômeno e este processo são chamados de *polarização elétrica* ou *eletrostática*, *indução*, *influência*, *polarização por indução*, *polarização por influência*, *eletrização ou eletrificação por influência*, *eletrização por indução* ou *eletrização por comunicação*. Neste trabalho utilizamos preferencialmente a primeira expressão, *polarização elétrica*.

As Experiências 7.4 e 7.7 mostram algo mais. Em particular, elas indicam que aumenta-se a quantidade de carga induzida nos dois lados do condutor, ao diminuir a distância entre o condutor e o canudo atritado. Isto está representado na Figura 7.8.

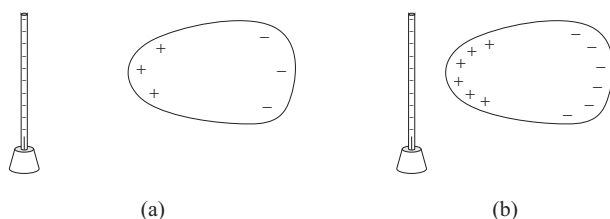


Figura 7.8: (a) Polarização de um condutor devida à presença de um isolante eletrizado próximo a ele. (b) Ao diminuir a distância entre os corpos, aumenta-se as quantidades de cargas positiva e negativa induzidas sobre o condutor.

Vamos considerar mais uma vez a Experiência 4.5. A inclinação do fio do pêndulo em relação à vertical aumenta ao diminuirmos a distância entre o pêndulo e o canudo atritado. Isto indica que há uma força maior entre eles. Pelo que acabou de ser visto, a polarização das cargas sobre o disco condutor deve aumentar ao diminuir a distância entre o pêndulo e o canudo eletrizado, Figura 7.9.

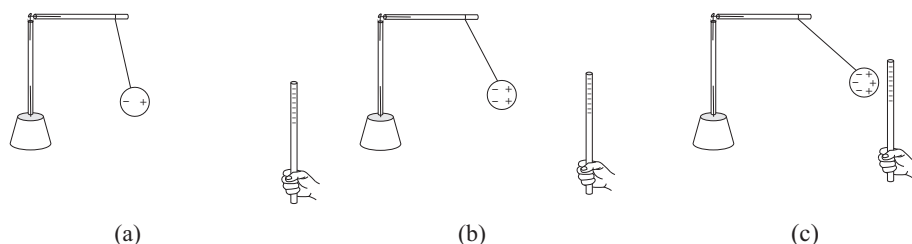


Figura 7.9: Ao diminuir a distância entre um canudo atritado e um pêndulo, aumentamos a polarização das cargas induzidas sobre o disco condutor.

As Experiências 7.5 e 7.8 também mostram algo relevante. Ou seja, podemos aumentar a quantidade de cargas induzidas nos dois lados do condutor, ao aumentar a quantidade de carga no isolante eletrizado que está próximo ao condutor, Figura 7.10.

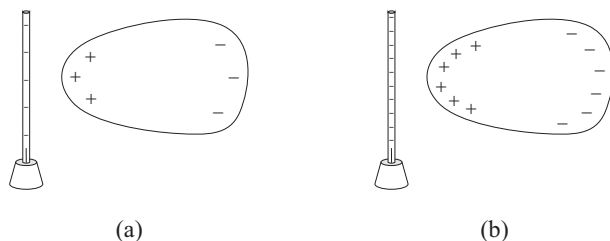


Figura 7.10: (a) Polarização de um condutor devida à presença de um isolante eletrizado próximo a ele. (b) Ao aumentar a eletrização do isolante, aumenta-se a quantidade de cargas positiva e negativa induzidas sobre o condutor.

7.3.1 Aepinus e a Polarização Elétrica

Um dos principais cientistas que lidou com este tópico foi Aepinus no período de 1755 a 1759.⁴ Foi ele quem realizou pela primeira vez uma experiência análoga à Experiência 7.3, descrevendo-a em seu livro de 1759.⁵ Uma representação de uma de suas experiências aparece na Figura 7.11.

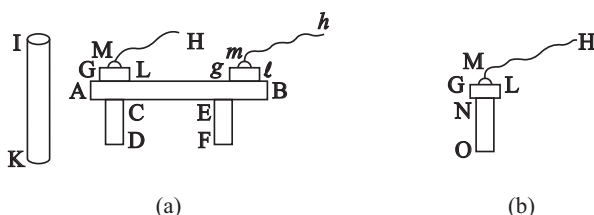


Figura 7.11: Experiência de Aepinus para provar a polarização de condutores na presença de corpos carregados próximos a ele.

Em vez de um disco de cartolina apoiado por canudos plásticos, utilizou uma barra de metal AB com aproximadamente 30 cm de comprimento apoiada por suportes isolantes de vidro CD e EF , Figura 7.11 (a). Seus coletores de carga foram descritos na Seção 7.2. Eles são as pequena peças metálicas GL e gl , com cerca de 4 cm de comprimento, tendo pequenos ganchos em suas partes centrais nos quais eram amarrados os fios de seda MH e mh . Utilizou como corpos eletrizados, em vez de nosso canudo atritado no cabelo, um cilindro representado por IK na Figura 7.11 (a). Ele podia ser de vidro, eletrizado positivamente pelo atrito, ou então um cilindro de enxofre, eletrizado negativamente pelo atrito.

Aepinus provou a polarização da barra metálica AB devido à presença de cada um dos cilindros eletrizados. Para mostrar isto, testou as cargas induzidas nas extremidades A e B da barra. Inicialmente aproximava o cilindro eletrizado da extremidade A da barra metálica e o deixava parado. A distância entre o

⁴[Aep79], [Hei81a] e [Hei99, págs. 384-402].

⁵[Aep79, págs. 312-314].

cilindro e a extremidade da barra era de 2 a 3 cm. Ele retirava um dos coletores de prova que estava sobre a barra, tocando apenas no seu fio de seda. Depois o colocava afastado da barra sobre um outro suporte isolante, representado por *NO* na Figura 7.11 (b). Ao aproximar corpos negativos e positivos de seus coletores de prova colocados sobre *NO*, conseguia determinar os sinais das cargas acumuladas nos coletores. Com isto comprovou que a extremidade *A* da barra condutora ficava com uma carga de sinal oposto à carga do cilindro em suas proximidades, enquanto que a extremidade *B* ficava com uma carga de mesmo sinal que a do cilindro atritado.

7.4 Atrações e Repulsões Exercidas por um Corpo Polarizado

Experiência 7.9

Nesta experiência utilizamos o retângulo de cartolina da Experiência 7.6, um pêndulo elétrico e um canudo plástico. Descarregamos o retângulo e o pêndulo ao tocá-los com o dedo. Depois os colocamos lado a lado no mesmo plano, com o pêndulo próximo à borda direita *B* da placa. A parte do disco do pêndulo mais próxima da cartolina deve estar afastada dela de 2 a 5 cm, Figura 7.12 (a).

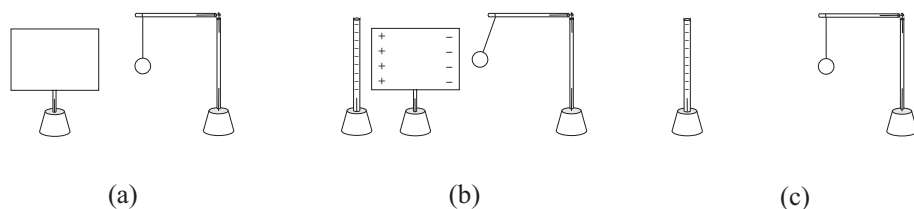


Figura 7.12: (a) Um pêndulo neutro pende verticalmente próximo a uma placa neutra condutora (borda esquerda *A* e borda direita *B*). (b) Quando um canudo atritado é aproximado de uma borda da placa, o pêndulo é atraído pela outra borda. (c) Ao remover a placa, o pêndulo retorna à orientação vertical.

Eletrizamos negativamente um canudo plástico ao atritar todo o seu comprimento em nosso cabelo. Depois o fixamos verticalmente em um suporte apropriado. O colocamos então no mesmo plano da cartolina, no lado oposto ao do pêndulo, e afastado de ambos. Então aproximamos lentamente o canudo atritado da borda esquerda *A* da cartolina. Quando ele está suficientemente próximo, o pêndulo inclina-se para o retângulo, Figura 7.12 (b). Não devemos mover o canudo muito próximo para evitar que o disco entre em contato com a cartolina. Ao remover o canudo, observa-se que o pêndulo volta à orientação vertical.

Vamos supor agora que o canudo esteja suficientemente próximo da cartolina para que o pêndulo esteja inclinado em direção a ela, como na Figura 7.12 (b). Removemos agora a cartolina, sem tocar no canudo nem no pêndulo. O

retângulo deve ser removido ortogonalmente ao seu plano. Após o retângulo ter sido removido, observa-se que o pêndulo retorna à posição vertical, Figura 7.12 (c).

Esta experiência mostra que o pêndulo está sendo atraído pela placa polarizada e não pelo canudo atritado, que está muito distante do pêndulo. O canudo eletrizado é responsável pela polarização da placa condutora, mas está muito afastado para afetar o pêndulo de maneira perceptível.

Experiência 7.10

Nesta experiência utilizamos o retângulo de cartolina da Experiência 7.6, um pêndulo elétrico e um canudo plástico. O canudo é carregado negativamente ao atritar todo o seu comprimento no cabelo, sendo então fixado verticalmente sobre um suporte. Quando aproximamos um pêndulo neutro do canudo, observamos uma atração quando estão muito próximos. Isto é indicado pelo disco do pêndulo se inclinando para o canudo. Por outro lado, quando a distância entre o canudo vertical e o disco é igual ou superior a uns 15 cm, o fio do pêndulo permanece vertical. Embora o canudo atritado possa estar atraindo-o, esta força é tão pequena que quase não é perceptível, Figura 7.13 (a).

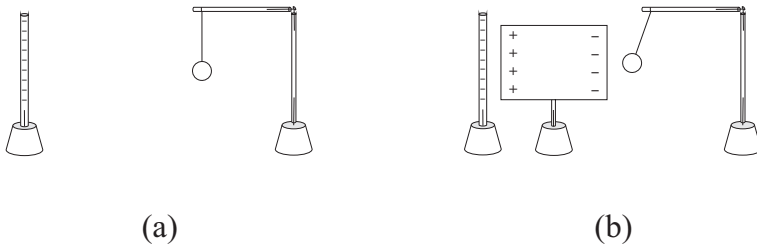


Figura 7.13: (a) Um canudo negativo a uma distância de 15 cm de um pêndulo neutro. (b) Ao mover uma placa condutora entre eles, observa-se que o pêndulo é atraído pela placa.

Supomos agora que o canudo atritado na vertical e o fio vertical do pêndulo neutro estão separados de uns 15 cm, com a placa de cartolina afastada deles, como na Figura 7.13 (a). Colocamos então o plano da placa com dimensões de 10 por 7 cm paralelo ao plano contendo o canudo e o fio do pêndulo, mas com estes dois planos separados entre si. Após isto, movemos a placa ao longo de uma direção ortogonal ao seu plano, de tal maneira que ela fique entre o canudo e o pêndulo, com todos eles no mesmo plano, Figura 7.13 (b). Observa-se que o pêndulo é atraído pela placa, inclinando-se para ela. Por hora não se deve deixar que o disco toque na placa.

As Experiências 7.9 e 7.10 mostram um novo tipo de atração. Até o momento só havíamos visto um corpo carregado (condutor ou isolante) atraindo corpos neutros. Nestes novos casos, por outro lado, o canudo atritado está muito distante do disco do pêndulo e não consegue atraí-lo com força suficiente para inclinar o fio do pêndulo para ele. Mas na Seção 7.3 foi visto que uma placa

condutora fica polarizada quando está próxima de um canudo eletrizado. Esta separação de cargas sobre a placa está mostrada na Figura 7.13 (b). A placa não possui uma carga resultante. A soma de suas cargas positivas (próximas do canudo atritado) com suas cargas negativas (no lado mais afastado do canudo) é nula. Apesar disto, a placa atrai um pêndulo neutro que está próximo de seu lado negativo. Isto é indicado pela inclinação do pêndulo na Figura 7.13 (b). Como as cargas negativas da placa estão mais próximas do disco do que as cargas positivas da placa, o pêndulo é atraído pela placa. Isto é, a influência das cargas negativas sobre o pêndulo é maior do que a influência oposta das cargas positivas.

Como será visto no Apêndice B, este novo tipo de atração foi reconhecido e descoberto como sendo um fenômeno tipicamente elétrico por Stephen Gray em 1729. Embora ele tenha feito esta nova descoberta, ainda não sabia sobre a polarização dos condutores e não tinha a nossa interpretação moderna sobre o que estava ocorrendo nesta experiência. Nossa interpretação atual é devida essencialmente a Aepinus. O importante é observar que embora a placa condutora não possua uma carga resultante, ela pode atrair um outro corpo *II* que esteja próximo a um de seus lados, caso ela esteja polarizada por um corpo eletrizado *I* que esteja próximo do outro lado da placa.

Experiência 7.11

Nesta experiência vai-se utilizar a placa de cartolina da Experiência 7.6, um pêndulo elétrico e um canudo plástico.

Atrita-se o canudo no cabelo e ele carrega o papel de alumínio do pêndulo elétrico pelo método *ACR*, ver a Seção 4.8. Quando aproximamos o canudo atritado do pêndulo carregado, vem que se repelem, sendo isto indicado pela inclinação do pêndulo em relação à vertical. Por outro lado, se a distância entre o canudo atritado e o pêndulo carregado for de 15 cm ou mais do que isto, vem que o pêndulo volta à vertical, já que a repulsão é pequena para ser percebida, Figura 7.14 (a).

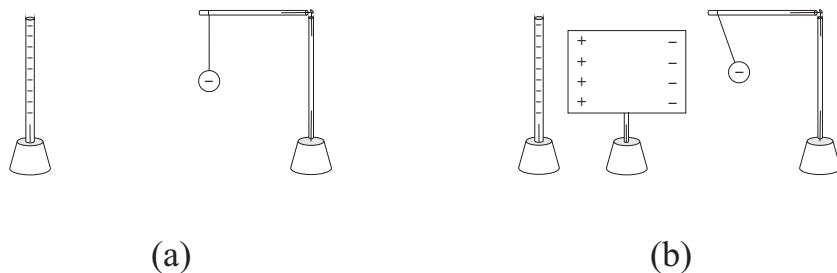


Figura 7.14: (a) Um canudo negativamente carregado não afeta sensivelmente um pêndulo negativo que está afastado dele. (b) Ao colocar um condutor retangular inicialmente neutro entre eles, surge uma repulsão.

Em seguida aproxima-se o canudo atritado vertical de uma borda da placa de cartolina, sem deixar que se toquem. Alinhamos em um mesmo plano o

canudo atritado vertical, a placa de cartolina e o pêndulo carregado. O canudo fica próximo de uma borda da cartolina e o pêndulo fica inicialmente afastado da outra borda da cartolina. Segura-se o suporte da cartolina, tomando cuidado para não tocar na cartolina. Agora são aproximados do pêndulo elétrico carregado, de forma lenta e conjunta, tanto o canudo atritado quanto a placa de cartolina. Observa-se que o pêndulo carregado é repelido pela placa, com esta repulsão aumentando à medida em que diminui a distância entre eles. Quando houver uma distância de 15 cm entre o canudo atritado e a projeção vertical da parte do pêndulo elétrico por onde o fio de seda é preso ao canudo, vem que o pêndulo vai estar visivelmente afastado da vertical, sendo repelido pela placa entre ele e o canudo atritado, Figura 7.14 (b).

Se neste instante mantivermos o canudo atritado e o suporte do pêndulo elétrico em repouso em relação ao solo, ao mesmo tempo em que afastarmos a placa de cartolina, movendo-a em uma direção perpendicular ao seu plano vertical, vem que o pêndulo vai voltar à vertical após a placa ter sido afastada, estando o pêndulo a 15 cm do canudo atritado.

Esta experiência é uma outra prova da polarização da placa condutora na presença do canudo carregado.

Experiência 7.12

Pode-se fazer uma experiência análoga à Experiência 7.11 utilizando uma placa de cartolina como a da Experiência 7.6, um canudo de plástico atritado e um pêndulo elétrico descarregado. O canudo atritado é colocado na vertical próximo de uma borda da placa (a borda esquerda, por exemplo), com o pêndulo descarregado afastado da outra borda da placa, Figura 7.15 (a).

Aproxima-se agora lentamente o pêndulo da outra borda da placa. A partir de uma certa distância, observa-se que ele começa a ser atraído pela borda da placa, como na Figura 7.15 (b).

Caso a distância diminua ainda mais, vem que o pêndulo é mais atraído, toca na placa e passa a ser repelido por ela, pelo método *ACR*. Chegamos então a uma situação análoga à Figura 7.14, como em Figura 7.15 (c).

Se agora retirarmos a placa, vem que o pêndulo voltará à vertical, Figura 7.15 (d). Ao aproximarmos o canudo atritado do pêndulo, será observada uma repulsão entre eles, indicando que estão carregados com carga de mesmo sinal.

Experiência 7.13

Uma experiência análoga à Experiência 7.12 é deixar um pêndulo elétrico descarregado ao lado da borda da cartolina descarregada, próximo dela mas sem tocá-la. O pêndulo fica na vertical. Aproxima-se agora lentamente um canudo atritado na vertical da outra borda da cartolina. A partir de uma certa distância vem que o pêndulo passa a ser atraído pela cartolina, toca nela e depois passa a ser repelido por ela. Se a cartolina for retirada e o canudo atritado for aproximado do pêndulo, será observada uma repulsão entre eles, indicando que possuem carga de mesmo sinal.

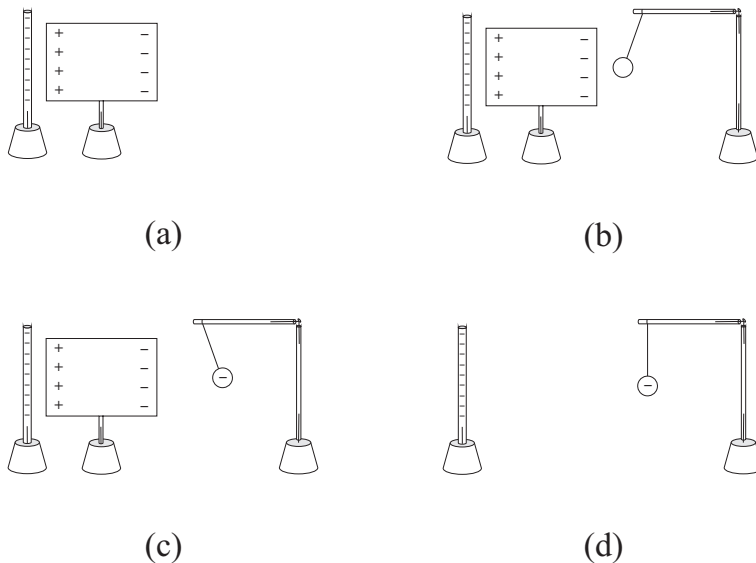


Figura 7.15: (a) Placa condutora próxima a um canudo eletrizado. (b) Um pêndulo neutro é atraído pela placa. (c) Após haver contato com a placa, o pêndulo passa a ser repellido por ela. (d) Ao remover a placa, observa-se que o pêndulo negativo fica na vertical, já que está muito afastado do canudo negativo.

7.5 Carregando um Eletroscópio Utilizando a Polarização

Até o momento já vimos como carregar um corpo positivamente ou negativamente através do atrito. Além disso, vimos que utilizando o mecanismo *ACR*, podemos carregar um condutor com uma carga de mesmo sinal que a carga de um corpo previamente atritado. Vamos agora utilizar o fenômeno da polarização elétrica de condutores, juntamente com o fato de as cargas se moverem livremente pela superfície dos condutores, para descrever um terceiro mecanismo de eletrização.

Definições: Seguindo as definições apresentadas na Seção 7.3, os processos para carregar o eletroscópio descritos nesta Seção são chamados de *eletrização por indução*, *carga por indução*, *eletrização por influência*, ou *carga por influência*.

7.5.1 Primeiro Procedimento de Eletrização por Indução

Experiência 7.14

Constroem-se dois eletroscópios com placas de cartolina tendo dimensões de 10 por 7 cm, *A* e *B*, como na Seção 6.1. O lado maior vai ficar na vertical, com uma tirinha de papel de “seda” presa no centro do lado menor superior.

Colocam-se os dois eletroscópios lado a lado em um mesmo plano vertical, com seus lados mais próximos se tocando, como na Figura 7.16 (a). Descarregam-se os eletroscópios tocando na cartolina com o dedo. As duas tirinhas ficam abaixadas. Atrita-se um canudo de plástico no cabelo tal que fique bem carregado, como indicado pelo teste da parede, Experiência 3.6. O canudo atritado é apoiado verticalmente sobre um suporte apropriado, longe dos eletroscópios.

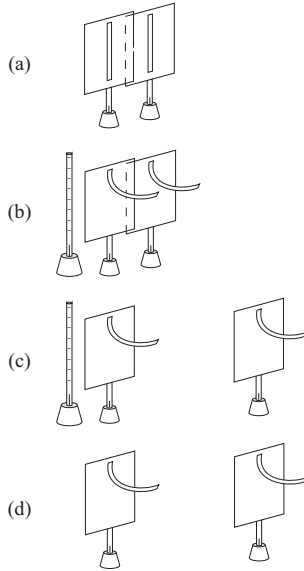


Figura 7.16: Primeiro procedimento para carregar por indução.

Aproxima-se lentamente o canudo atritado da borda lateral do eletroscópio *A*, sem deixar que se toquem. Ele deve ficar parado próximo desta borda. Observa-se que as duas tirinhas se levantam, como na Figura 7.16 (b).

Mantendo-se o canudo próximo da borda do eletroscópio *A*, afasta-se o eletroscópio *B* do primeiro eletroscópio, tomando o cuidado para segurar apenas em sua base ou no canudo de plástico, mas sem tocar na cartolina ou na tirinha. Observa-se que as duas tirinhas permanecem levantadas, como na Figura 7.16 (c).

Em seguida afasta-se o canudo atritado dos dois eletroscópios. Observa-se que as duas tirinhas ficam levantadas, indicando que os dois eletroscópios ficaram carregados, como na Figura 7.16 (d).

Ao aproximar o canudo atritado na horizontal lentamente da tirinha do eletroscópio *B*, sem deixar que se toquem, observa-se que a tirinha é repelida pelo canudo, aproximando-se da cartolina. Isto indica que este eletroscópio ficou carregado com carga de mesmo sinal que o canudo.

Ao aproximar o canudo atritado na horizontal lentamente da tirinha do eletroscópio *A*, sem deixar que se toquem, observa-se que a tirinha é atraída pelo canudo, afastando-se da cartolina e indo no sentido do canudo. Isto indica

que este eletroscópio ficou carregado com carga oposta à carga do canudo.

Agora afastamos o canudo atritado e colocamos os dois eletroscópios carregados em planos paralelos, com as tirinhas de frente uma para a outra. Quando aproximamos os dois eletroscópios, sem deixar que as tirinhas se toquem, podemos observar que elas se atraem. Isto mostra mais uma vez que os eletroscópios ficaram carregados com cargas opostas, Figura 7.17.

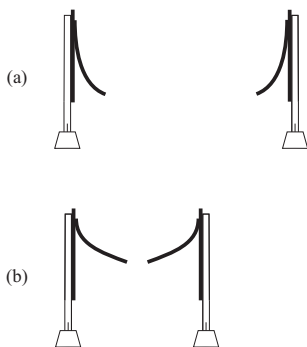


Figura 7.17: Os eletroscópios eletrizados por indução ficam com cargas opostas.

Esta experiência fornece uma prova adicional da polarização elétrica dos condutores. Neste caso, quando as cartolinas dos eletroscópios *A* e *B* estavam em contato, isto funcionava como um único condutor. Ao aproximar o canudo atritado do eletroscópio *A*, este ficou carregado com uma carga oposta ao do canudo, enquanto que o eletroscópio *B* ficou carregado com uma carga de mesmo sinal que o canudo. Ao afastar o eletroscópio *B*, ele manteve sua carga. O mesmo ocorreu com o eletroscópio *A* quando o canudo foi afastado.

Esta experiência mostra também a conservação de carga elétrica, já que ao carregarmos dois condutores inicialmente neutros, um ficou positivo e o outro negativo. Ela também mostra que as cargas se deslocam livremente pela superfície dos condutores.

7.5.2 Segundo Procedimento de Eletrização por Indução

Experiência 7.15

Apresentamos agora um segundo procedimento para eletrizar por indução.

Um eletroscópio inicialmente descarregado tem sua tirinha próxima à cartolina. Atrita-se um canudo de plástico no cabelo tal que fique bem carregado, como indicado pelo teste da parede, Experiência 3.6. O canudo atritado é apoiado verticalmente sobre um suporte apropriado, longe do eletroscópio.

Aproxima-se o canudo atritado lentamente de uma borda do eletroscópio, sem deixar que se toquem. Observa-se que a tira do eletroscópio se levanta.

Mantendo o canudo perto da borda do eletroscópio, toca-se com o dedo na borda oposta do eletroscópio. Observa-se que a tirinha se abaixa.

Mantendo o canudo perto da borda do eletroscópio, afasta-se o dedo da outra borda. Observa-se que a tirinha continua abaixada.

Afasta-se agora o canudo atritado do eletroscópio. Observa-se que a tirinha se levanta, indicando que o eletroscópio ficou carregado!

Estes cinco passos estão ilustrados na Figura 7.18.

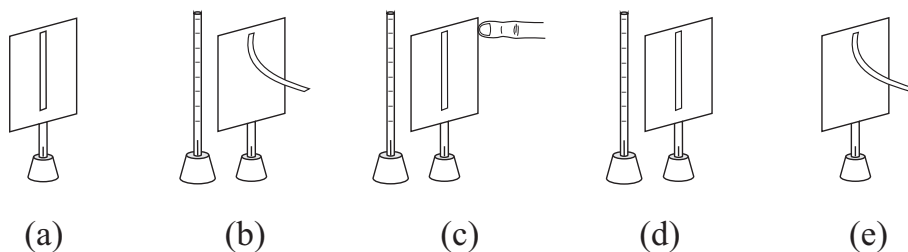


Figura 7.18: Segundo procedimento para eletrizar um eletroscópio por indução.

Aproxima-se agora lentamente o canudo atritado na horizontal da tirinha do eletroscópio, sem deixar que se toquem. Observa-se que eles se atraem, com a tirinha se afastando da cartolina e indo no sentido do canudo atritado. Pode-se até mesmo levantar a tirinha acima da borda superior do eletroscópio, Figura 7.19!

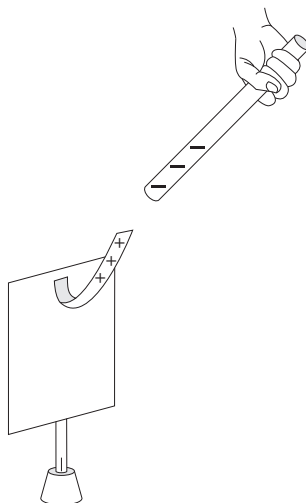


Figura 7.19: Atração entre o canudo atritado e a tirinha do eletroscópio após sua eletrização por indução como na Figura 7.18.

Isto indica que o eletroscópio ficou carregado com uma carga oposta à carga do canudo atritado.

Podemos descrever o que aconteceu neste caso utilizando os resultados anteriores. Quando o canudo atritado ficou próximo de uma borda do eletroscópio,

este se polarizou eletricamente. A borda próxima ao canudo ficou com uma carga oposta à do canudo, enquanto que a outra borda do eletroscópio ficou com uma carga de mesmo sinal que o canudo. Ao tocarmos com o dedo nesta segunda borda, as cargas aí acumuladas foram descarregadas. Como o canudo atritado ficou perto da primeira borda, as cargas desta borda continuaram opostas às cargas do canudo. Ao tirarmos o dedo da segunda borda, nada foi afetado na primeira borda. Quando finalmente afastamos o canudo atritado, as cargas que estavam concentradas na primeira borda se espalharam por todo o eletroscópio, fazendo com que a tirinha se levantasse. Esta distribuição qualitativa de cargas está ilustrada na Figura 7.20.

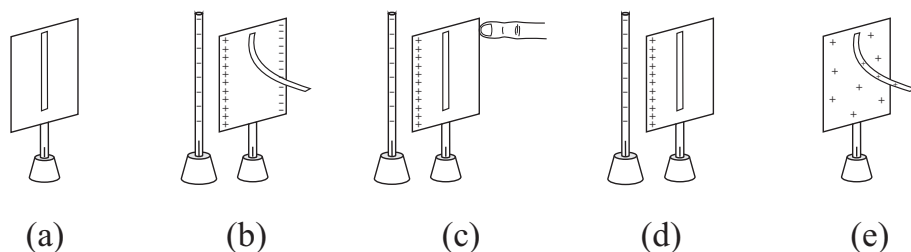


Figura 7.20: Distribuição qualitativa de cargas da Figura 7.18.

Com esta experiência obtém-se um efeito oposto às Experiências 6.2 e 6.5. Quando carregamos um eletroscópio por contato ou por atrito, vem que ele fica carregado com carga de mesmo sinal que a carga do corpo que o carrega. Por outro lado, quando o carregamos por indução, ele fica carregado com uma carga de sinal oposto ao corpo carregado que ficou próximo a ele.

Neste caso a cartolina estava inicialmente neutra e no final do processo ficou carregada. Para isto foi necessário inicialmente polarizá-la com a presença de um corpo carregado, aterrar uma de suas extremidades, retirar o aterramento e depois afastar o corpo carregado. O aterramento serviu para neutralizar a carga de uma de suas extremidades. Como o resultado final foi que a cartolina ficou carregada, o aterramento neste caso serviu para carregar a cartolina. Ou seja, nem sempre o aterramento tem a função de descarregar um corpo, como havia ocorrido na Experiência 4.9.

7.5.3 Terceiro Procedimento de Eletrização por Indução

Experiência 7.16

A Experiência 7.15 pode ser feita de outra maneira utilizando novamente a cartolina do eletroscópio. Inicialmente aterra-se uma borda da cartolina tocando-a com a mão ou ligando-a por um fio à Terra. Enquanto esta borda está aterrada, aproxima-se um canudo carregado da outra borda da cartolina, sem tocá-la. Mantendo o canudo próximo desta borda, retira-se o aterramento da outra borda. Agora afasta-se o canudo atritado. Observa-se que o eletroscópio

fica carregado, já que sua tirinha fica levantada, Figura 7.21. Ao testarmos o sinal da carga elétrica adquirida pelo eletroscópio, conclui-se que ela tem sinal oposto à carga do canudo atritado.

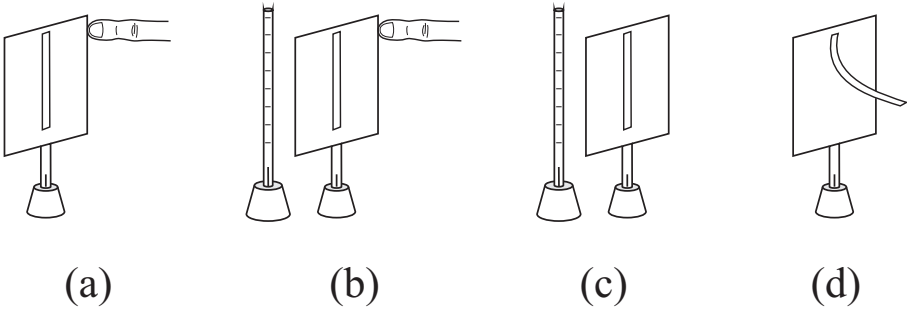


Figura 7.21: Outra maneira de eletrizar um eletroscópio por indução.

A distribuição de cargas desta experiência está ilustrada na Figura 7.22.

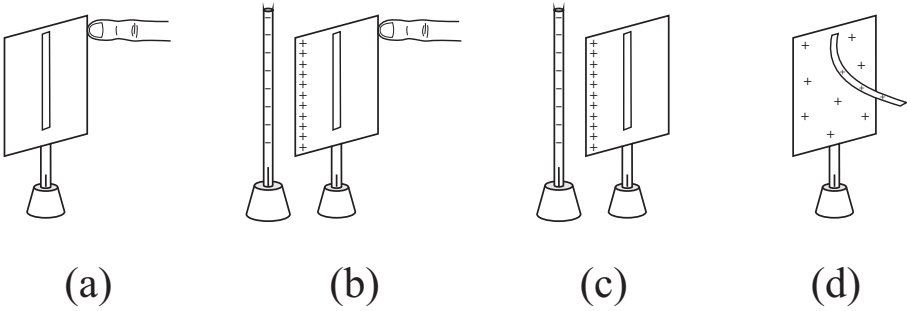


Figura 7.22: Distribuição de cargas da Figura 7.21.

7.6 A Polarização Elétrica de Isolantes

Vamos agora ver algumas diferenças entre condutores e isolantes.

Experiência 7.17

Repete-se agora a Experiência 7.11 com uma placa de isopor neutra tendo dimensões de 10 por 7 cm. O isopor é um material isolante, sendo utilizado aqui em vez de uma placa de cartolina, que é um material condutor. Um canudo de plástico é atritado no cabelo e carrega um pêndulo elétrico pelo método *ACR*, que também fica carregado negativamente.

Quando o canudo atritado está a uma distância igual ou maior do que 15 cm do pêndulo carregado, observa-se que este fica na vertical, já que a repulsão entre ambos não é observável. Por outro lado, quando a distância entre eles é

de 15 cm e quando é colocada uma placa de isopor entre ambos, observa-se que o pêndulo carregado é repellido pela placa.

Como esta repulsão não pode ser devida ao canudo atritado, já que sua distância ao pêndulo é grande, o motivo da repulsão deve ser atribuído à polarização do isopor. Isto é, a borda do isopor mais próxima do canudo atritado fica carregada positivamente, enquanto que a borda mais afastada fica carregada negativamente. Esta borda repele então o pêndulo carregado negativamente com uma força maior do que a atração exercida sobre o pêndulo negativo pela borda positiva.

Experiência 7.18

Construímos agora um *pêndulo elétrico de plástico*, Figura 7.23.

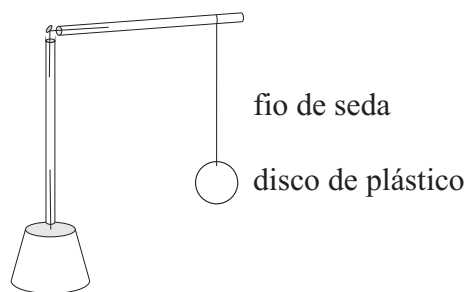


Figura 7.23: Pêndulo elétrico de plástico.

No pêndulo elétrico usual da Seção 4.4, temos na ponta inferior do fio de seda um pequeno pedaço de papel ou de papel de alumínio, que são materiais condutores. Já no pêndulo elétrico de plástico, substituímos o papel de alumínio por um isolante.

Porém, nem todos os plásticos se comportam como isolantes. Alguns plásticos comportam-se como condutores pela umidade armazenada em sua superfície ou então por sua composição química. Devido a isto, deve-se inicialmente escolher um saco plástico que não descarregue um eletroscópio eletrificado ao entrar em contato com ele (com o plástico sendo segurado pela mão). Este plástico é então isolante e será utilizado para se construir o pêndulo elétrico de plástico.

Recortamos então de um saco plástico fino um pequeno pedaço circular com 1 ou 2 cm de diâmetro. Fazemos um furo neste disco com uma agulha e o amarramos na parte inferior do fio de seda ou de náilon preso ao pêndulo.

Antes de começar a experiência, é importante averiguar se o pêndulo está neutro. Para isto, temos de aproximar o dedo do pêndulo e ver que o pêndulo não é atraído pelo dedo. Caso ele seja atraído, isto significa que o pêndulo está carregado. Muitas vezes isto ocorre devido ao atrito durante a manipulação do plástico e do fio de seda, quando cortamos o plástico ou o amarramos, etc.

Atritamos um canudo no cabelo e o aproximamos do pêndulo de plástico neutro. Observa-se que o disco de plástico é atraído pelo canudo, embora bem

menos do que um pêndulo elétrico usual com um disco de papel ou de papel de alumínio. Esta força é indicada pelo ângulo de inclinação do fio em relação à vertical quando o canudo atritado está à mesma distância dos dois pêndulos.

Se deixarmos que o canudo eletrizado e o disco de plástico se toquem, observamos que vão permanecer grudados. Ou seja, não ocorre o fenômeno *ACR* que havíamos visto na Experiência 4.10 e na Seção 4.8. Para que ocorra a sequência de atração, contato e repulsão, é necessário que o corpo atraído seja um condutor. Caso ele seja um isolante, ele vai ser atraído pelo corpo carregado que se aproxima dele. E pode até chegar a tocar nele, mas não vai adquirir uma carga significativa de mesmo sinal que este corpo. Por este motivo, não vai ser em seguida repellido por ele. Se o isolante chegar a adquirir alguma carga pelo simples toque com um corpo eletrizado, sem que seja raspado no corpo, esta carga será de pequena intensidade, dificilmente sendo perceptível. O mecanismo *ACR* só vai ocorrer com um isolante depois de vários toques, ou quando raspamos o canudo atritado no plástico.

Esta é uma diferença importante entre condutores e isolantes. Para carregarmos um isolante como o plástico, temos de atritá-lo, como vimos na Experiência 2.1. Já um condutor pode ser carregado não apenas pelo atrito, como vimos nas Experiências 6.2 e 6.24, mas também pelo método *ACR*. Neste último caso, basta o contato com um corpo previamente carregado para que uma parte desta carga seja transferida para o condutor.

Experiência 7.19

Repete-se agora a Experiência 7.3 com um disco neutro de plástico duro ou de isopor, em vez de um disco de cartolina. Neste caso, ao se retirar os planos de prova de Coulomb, é observado que nenhum deles ficou carregado eletricamente.

Por outro lado, vimos na Experiência 7.17 que o isopor fica polarizado na presença de um canudo atritado. Isto indica que a polarização que ocorre em um isolante é diferente da polarização de um condutor.

7.7 Um Corpo Eletrizado Atrai com Mais Força um Condutor ou um Isolante?

Nesta Seção iremos discutir uma questão interessante. Vamos supor que eletrizamos um canudo plástico ao atritá-lo no cabelo. Sobre a mesa colocamos um pequeno condutor leve e um pequeno isolante leve, afastados entre si. Vamos supor que este condutor e este isolante possuam o mesmo peso e o mesmo formato. Se aproximarmos o canudo eletrizado de cada um deles, qual vai ser mais atraído? Isto é, qual deles vai sofrer uma força maior exercida pelo canudo eletrizado?

Vimos na Experiências 2.3 e 2.4 que um plástico atritado atrai com mais força substâncias condutoras (como o papel ou o metal) do que substâncias isolantes de mesmo peso e formato (como o plástico ou a seda). Aprofundamos agora esta questão.

Experiência 7.20

Nesta experiência vamos ilustrar a propriedade de que um corpo carregado exerce uma força maior sobre um condutor do que sobre um isolante. Não vamos precisar pesar o condutor nem o isolante. Vamos usar o pêndulo de plástico, ver a Figura 7.23. Constroem-se dois destes pêndulos de mesmo tamanho e usando os mesmos materiais. No pêndulo *II* cola-se um disco de papel ou de papel de alumínio no disco de plástico. O pêndulo *II* é claramente mais pesado do que o pêndulo *I*, ao qual nada foi acrescentado.

Antes de começar a experiência, aproxima-se um dedo dos dois pêndulos. O ideal é que eles não sejam atraídos pelo dedo. Isto vai mostrar que eles estão neutros e que não foram eletrizados pelo atrito com a mão durante a construção dos pêndulos. Nem sempre isto é fácil de se conseguir. É comum um pêndulo de plástico ficar eletrizado durante sua construção. Muitas vezes isto ocorre pelo atrito do plástico com nossa mão enquanto cortamos o plástico ou enquanto amarramos o disco de plástico no fio de seda. Caso o plástico fique eletrizado, existe uma maneira simples de descarregá-lo. Basta que se espere um longo tempo (algumas horas), que ele naturalmente perde sua eletrização para o ar ao seu redor. Na Seção 7.14 aprofundaremos a discussão deste tópico.

Daqui para a frente vamos supor que os dois pêndulos estejam neutros.

Após esta preparação, aproxima-se um outro canudo atritado dos dois pêndulos, sem deixar que ele toque nos pêndulos. O pêndulo de plástico é pouco atraído, Figura 7.24 (a). Já o pêndulo com o disco de papel é bem mais atraído do que o pêndulo de plástico, Figura 7.24 (b). O valor destas forças de atração é indicado pelo ângulo de inclinação de cada pêndulo em relação à vertical (supondo o canudo atritado à mesma distância do disco atraído). O segundo pêndulo fica mais inclinado do que o primeiro, estando o canudo atritado à mesma distância do disco nos dois casos, como mostrado na Figura 7.24. E isto ocorre apesar do segundo pêndulo ser mais pesado do que o primeiro.

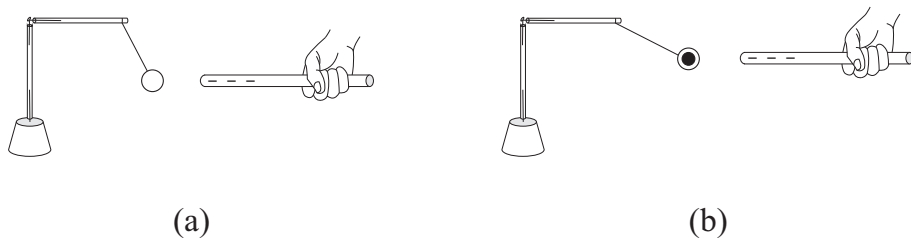


Figura 7.24: (a) Um pêndulo de plástico é pouco atraído por um canudo atritado. (b) Já um pêndulo de plástico ao qual foi adicionado um disco condutor sofre uma força de atração bem maior, apesar de ser mais pesado.

Experiência 7.21

Uma experiência análoga pode ser feita com dois pêndulos nos quais substitui-se o disco de plástico por uma bolinha de isopor, que é um material isolante.

Deve-se colocar bolinhas de mesmo tamanho nos dois pêndulos. Depois cobre-se a bolinha do pêndulo *II* com um pequeno papel de alumínio. Ao aproximar o canudo atritado dos dois pêndulos, observa-se que o pêndulo com papel de alumínio é mais atraído do que o pêndulo *I*, ao qual nada foi acrescentado.

Experiência 7.22

Construímos agora duas “linhas pendulares isolantes,” Figura 7.25. Elas são análogas à linha pendular de Gray, Figura 4.28. Mas agora substituímos o espeto de madeira por um canudo plástico, e a linha de algodão por uma tira flexível de plástico. As duas linhas pendulares isolantes devem ter o mesmo comprimento e formato, sendo feitas do mesmo material. Enrolamos então na tira de plástico do pêndulo *II* uma linha leve de algodão fazendo uma hélice ao redor da tira. Quando tudo estiver pronto, testamos para ver se as duas linhas pendulares estão neutras antes de iniciar a experiência.

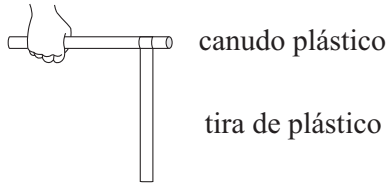


Figura 7.25: Uma linha pendular isolante.

Aproximamos um canudo atritado das duas linhas pendulares. Observa-se que a linha pendular *II* com a linha condutora é mais atraído pelo canudo do que a linha pendular *I*, na qual nada foi acrescentado, Figura 7.26. Embora a linha pendular *I* seja mais leve do que a linha pendular *II*, ela é menos atraída pelo canudo do que esta segunda linha pendular.

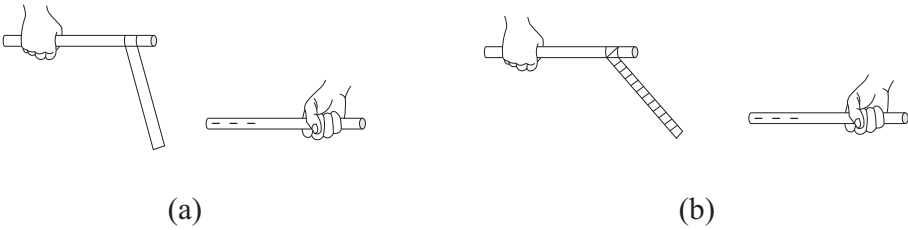


Figura 7.26: (a) Uma linha pendular isolante é menos atraída por um corpo eletrizado do que uma outra linha pendular à qual foi enrolada uma linha condutora, (b).

Estas experiências mostram que um condutor sofre uma força maior do que um isolante, sendo estas forças exercidas por um mesmo corpo eletrizado. En-

tre os autores que descobriram isto experimentalmente encontram-se Du Fay e Aepinus.⁶

7.7.1 Comentários sobre o Pêndulo Elétrico de Gray

Como mencionamos na Seção 4.6, Gray descreveu um pêndulo elétrico em 1720 quando amarrou uma penugem em um fio de seda preso a uma vareta. Naquela época ainda não se conhecia a diferença entre isolantes e condutores, logo a utilização da seda neste caso foi casual. A seda é um material isolante. Naquela época Gray poderia ter dependurado a penugem em um fio de algodão ou de linho, materiais condutores. Gray aqueceu um pedaço de papelão (fazendo com que se comportasse como um isolante) e o carregou por atrito. Ao aproximar este papelão da penugem presa ao fio de seda, conseguiu levantá-la até que o fio ficasse na horizontal, ou seja, perpendicular à vareta de madeira vertical. Ao subir ainda mais o papelão, conseguiu com que a penugem ficasse levantada no ar com o fio inclinado acima da horizontal, como na Figura 4.21 (c). Na sequência desta experiência afirmou o seguinte:⁷

Repeti então esta experiência sem a penugem, a saber, com apenas um fio de seda com um comprimento aproximado de 5 ou de 6 polegadas [13 ou 15 cm], o qual foi feito ficar levantado esticado como mencionado anteriormente, sem tocar o papel [atritado].

Uma ilustração desta experiência aparece na Figura 7.27.

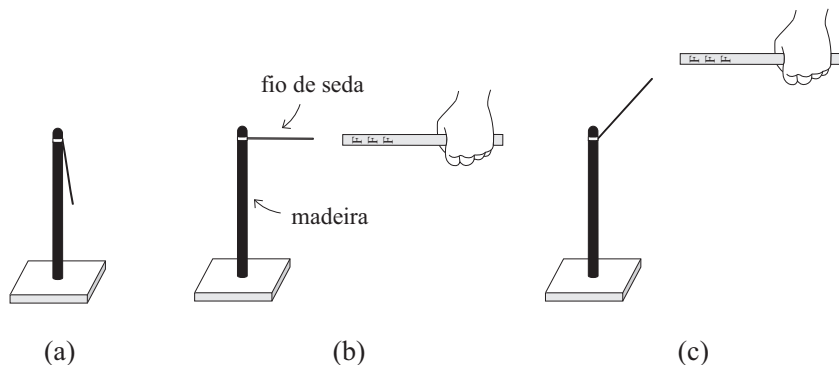


Figura 7.27: Gray atraindo uma linha de seda ao aproximar um papel atritado.

Vê-se então que a função da penugem é secundária neste caso, já que Gray conseguiu levantar o fio mesmo sem ela. Existem duas possibilidades para ocorrer este efeito curioso. A primeira é que, ao amarrar e depois desamarrear a penugem no fio de seda, a seda tenha se comportado como um isolante e tenha ficado carregada eletricamente na ponta inferior devido ao seu atrito com a

⁶[DF33d, págs. 233-234] e [Aep79, págs. 261, 274 e 309-315].

⁷[Grab, pág. 107].

mão. O papel aquecido pode ter ficado carregado com uma carga oposta à da seda. Quando estes dois corpos se aproximaram, eles se atraíram. Gray teria conseguido então levantar acima da vareta o fio de seda esticado. A segunda possibilidade é que, ao amarrar e desamarrar a penugem, o fio de seda tenha ficado umedecido, talvez pelo suor das mãos de Gray. O fio se comportaria então como um condutor. Ao aproximar o papelão carregado, o fio condutor teria se polarizado, tendo em sua extremidade inferior uma carga oposta à do papelão. Com a forte atração entre ambos, Gray teria podido levantar o fio de seda acima da vareta. Esta atração seria de uma certa forma análoga à que ocorreu na Experiência 6.6.

Caso o fio de seda estivesse seco e descarregado, comportando-se como um isolante neutro usual, não teria sido possível levantá-lo acima da vareta mesmo com a aproximação do papelão carregado, já que em geral a atração entre um isolante neutro e um corpo carregado é muito menor do que a atração entre dois corpos de cargas opostas.

7.8 Forças de Origem Não-Eletrostática

Como visto no Capítulo 5, dois corpos positivamente carregados se repelem, dois corpos negativamente carregados se repelem, enquanto que um corpo positivo e um corpo negativo se atraem. Às vezes isto é expresso dizendo que cargas de mesmo sinal se repelem, enquanto que cargas opostas se atraem. As forças elétricas que estes corpos exercem um no outro quando estão em repouso são chamadas de forças eletrostáticas.

Em todas as situações em que temos duas ou mais cargas paradas entre si, em uma configuração de equilíbrio estável, é necessária a existência de forças de origem não-eletrostática para contrabalançar as forças eletrostáticas exercidas entre elas.⁸ Vamos ilustrar isto aqui no caso de um condutor esférico carregado negativamente. Ele pode ter sido carregado, por exemplo, pelo método *ACR*, ao entrar em contato com um canudo que foi atritado no cabelo. As cargas sobre o condutor se repelem mutuamente e no equilíbrio elas se distribuem uniformemente sobre sua superfície, Figura 7.28.

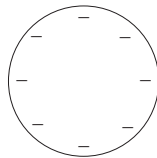


Figura 7.28: Uma esfera uniformemente eletrizada.

Vamos considerar a carga negativa no topo da esfera. Ela é repelida por todas as outras cargas negativas e, portanto, sofre uma força eletrostática vertical para fora da esfera. Para que permaneça em repouso, é necessária uma força

⁸Ver [AH07, Seção 5.3] e [AH09, Seção 5.3], e as referências lá citadas.

de origem não-eletrostática apontando para baixo, de mesma intensidade que a força eletrostática apontando para cima. Nesta situação específica, esta força de origem não-eletrostática é às vezes chamada de força de contato. Mas não se entende claramente sua origem, como ela é produzida, etc.

A mesma situação ocorre quando a esfera condutora está carregada positivamente. E o mesmo acontece para uma esfera isolante uniformemente eletrizada, tanto negativamente quanto positivamente.

7.9 Modelos Microscópicos de Condutores e de Isolantes

Para entender este conjunto de experiências que mostram as diferenças e semelhanças entre condutores e isolantes, são feitos alguns modelos microscópicos destes corpos. Estes modelos facilitam na compreensão e na visualização dos processos envolvidos que estamos descrevendo aqui. Os modelos foram criados utilizando os resultados de experiências como as descritas neste livro. Depois inverte-se o procedimento. Isto é, postulam-se os modelos para ilustrar ou para descrever o que está ocorrendo nas experiências.

O modelo que se faz de um condutor e de sua polarização é baseado na ideia de cargas livres. Isto é, supõe-se que existem nos condutores cargas que não estão presas às moléculas do material, sendo que estas cargas podem se deslocar ao longo de todo o condutor. Quando o condutor é neutro, estas cargas livres não se manifestam. Ou seja, não produzem efeitos nos corpos externos. Porém, quando se aproxima um corpo carregado de um condutor, este condutor se polariza. Em particular, a parte do condutor mais afastada deste corpo carregado fica eletrizada com cargas de mesmo sinal que este corpo. Já a parte do condutor mais próxima deste corpo carregado fica eletrizada com cargas de sinal oposto à carga deste corpo, Figura 7.29. Estas cargas livres podem ser transferidas a outros condutores caso estes outros condutores entrem em contato com este condutor polarizado.

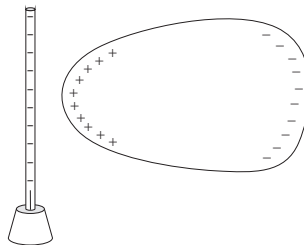


Figura 7.29: Modelo ideal de um condutor polarizado na presença de um outro corpo carregado.

É necessária uma força de origem não-eletrostática para impedir que estas cargas deixem a superfície do condutor polarizado.

O aterramento de um condutor na presença de um corpo eletrizado em suas proximidades, como mostrado nas Experiências 7.15 e 7.16, está ilustrado na Figura 7.30.

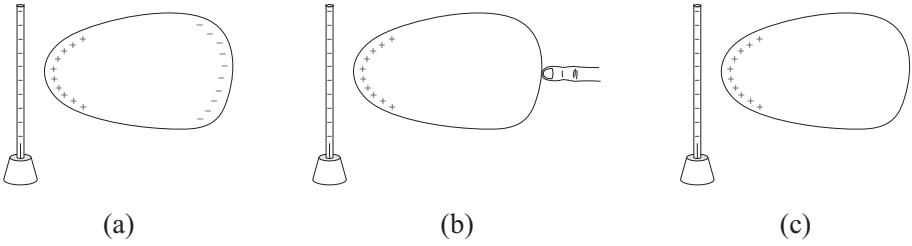


Figura 7.30: Aterramento de um condutor na presença de um corpo eletrizado em suas proximidades.

Vamos analisar agora o modelo de um isolante nas proximidades de um corpo carregado. Neste caso supõe-se uma polarização localizada em cada molécula do isolante. Isto é, as partes das moléculas do isolante que estão mais próximas do corpo carregado ficam com cargas de sinal oposto à deste corpo. Já as partes das moléculas do isolante que estão mais afastadas do corpo carregado ficam com cargas de mesmo sinal que a carga deste corpo. Mas não haveria um deslocamento macroscópico de cargas livres ao longo de todo o isolante, Figura 7.31 (a). Ou seja, as polarizações reais ficam limitadas a cada molécula do isolante.

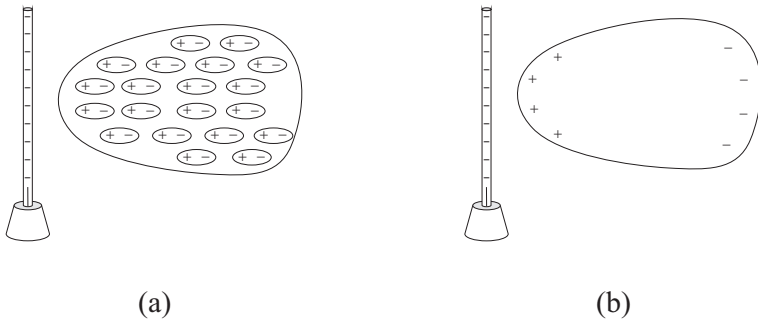


Figura 7.31: (a) Modelo ideal de um isolante polarizado na presença de um outro corpo carregado. (b) Polarização efetiva do isolante na situação (a).

No interior do isolante polarizado teríamos um número igual de cargas positivas e negativas muito próximas entre si. Se considerarmos um volume pequeno no interior do isolante polarizado, volume este que contenha um grande número de moléculas, teríamos que a carga resultante deste volume seria aproximadamente zero. Ou seja, o interior de um isolante polarizado pode ser considerado como sendo neutro de um ponto de vista macroscópico. Mas isto não vai acontecer para a superfície do isolante. O efeito resultante destas polarizações molecu-

lares seria que a parte da superfície do isolante mais próxima do corpo carregado se comportaria como se estivesse carregada com cargas de sinal oposto a este corpo carregado. Já a parte da superfície do isolante mais afastada do corpo carregado se comportaria como se estivesse carregada com cargas de mesmo sinal que a carga do corpo carregado. Esta polarização efetiva da superfície de um isolante é ilustrada na Figura 7.31 (b).

Novamente é necessária alguma força de origem não-eletrostática para impedir que estas cargas polarizadas deixem as moléculas às quais estão presas.

A polarização representada na Figura 7.29 é maior ou mais intensa do que a polarização representada na Figura 7.31 (b). Isto foi feito de propósito. Estamos supondo que o condutor e o isolante tenham a mesma forma e o mesmo tamanho. Além disso, estamos supondo que o canudo está igualmente eletrizado nestas duas situações, estando também à mesma distância do condutor e do isolante. A justificativa para as quantidades de carga nestas Figuras foi apresentada na Seção 7.7. Ou seja, como as experiências mostram que a força de um corpo eletrizado sobre um condutor é maior do que a força deste corpo eletrizado sobre um isolante, isto indica que a polarização do condutor é maior do que a polarização efetiva do isolante. A intensidade da polarização destes corpos pode ser representada pelo número de cargas opostas que estão sobre sua superfície. Uma maior polarização é indicada por um maior número de cargas opostas. Logo, a quantidade de cargas polarizadas no condutor da Figura 7.29 é maior do que a quantidade das cargas efetivas polarizadas sobre a superfície do isolante da Figura 7.31 (b).

Além disso, aumenta a quantidade de cargas polarizadas, tanto em condutores quanto em isolantes, ao diminuir a distância entre estes corpos e o corpo eletrizado que está ocasionando estas polarizações. Esta quantidade de cargas polarizadas também é aumentada quando se aumenta a quantidade de carga no corpo eletrizado que está polarizando o condutor e o isolante.

Na realidade nenhum corpo é perfeitamente condutor nem perfeitamente isolante. Por este motivo estes modelos são idealizações. Os corpos reais apresentam características tanto de condutores quanto de isolantes, embora com intensidades maiores ou menores. Existe uma gradação entre bons condutores e bons isolantes.

De qualquer forma, estes modelos idealizados são extremamente úteis para nos ajudar a entender e a visualizar o que ocorre em boa parte dos fenômenos elétricos.

7.10 Pode Haver Atração entre Dois Corpos Eletrizados com Cargas de Mesmo Sinal?

Experiência 7.23

Repete-se a Experiência 6.5, Figura 6.7. Só que agora aproxima-se ainda mais o canudo negativo da tirinha do eletroscópio negativamente carregado. Observa-se que para distâncias menores ou iguais a um certo valor, da ordem

de 2 a 4 cm, a tirinha deixa de ser repelida e passa a ser atraída pelo canudo. Ela até mesmo toca no canudo e fica grudada nele.

Experiência 7.24

Repetem-se as Experiências 4.7 e 5.23, Figuras 4.18 e 5.27. Só que agora aproxima-se ainda mais o canudo negativo do disco negativo do pêndulo. Observa-se que a inclinação do pêndulo em relação à vertical vai aumentando na medida em que a distância entre o canudo negativo e o disco negativo vai diminuindo entre 15 e 5 cm, aproximadamente. Isto mostra que a intensidade da força repulsiva aumenta com a diminuição da distância dentro deste intervalo.

Porém, para distâncias menores ou iguais a um certo valor, da ordem de grandeza de 5 cm, deixa de haver repulsão entre o canudo negativo e o disco negativo. Eles passam a se atrair até que o disco toque novamente no canudo negativo e seja mais uma vez repelido por ele.

Depois de uns 2 ou 3 toques entre o canudo negativo e o disco do pêndulo, os mesmos fenômenos ocorrem, mas agora com distâncias um pouco diferentes. Quando o disco fica mais intensamente carregado, a repulsão entre ele e o canudo negativo começa a ser perceptível a uma distância maior do que antes, da ordem de 20 cm. A intensidade da força repulsiva aumenta com a diminuição da distância, até que esta alcance 2 ou 3 cm. Quando a distância entre o canudo e o disco tem valores desta ordem de grandeza ou ainda menores, ocorre novamente uma atração entre eles. E mais uma vez vai ocorrer o mecanismo *ACR*.

Pode-se entender estas experiências utilizando os princípios já descobertos até o momento.

Vamos supor que um corpo *I*, isolante, tenha sido carregado negativamente por atrito. Ele está próximo de um corpo *II*, um condutor, que não possui uma carga resultante. Vai haver uma força atrativa entre eles. Esta força de atração é devida à polarização do corpo *II* na presença do corpo *I*, como na Figura 7.29. Representamos esta força atrativa por $F_A > 0$, Figura 7.32 (a). Eletrizamos agora o corpo *II* negativamente. Isto pode ser feito, por exemplo, pelo mecanismo *ACR*. Isto vai gerar uma nova força entre eles. Ela é repulsiva e será representada aqui por $F_R < 0$. Apresentamos na Figura 7.32 (b) esta nova força de repulsão sem considerar a força atrativa anterior devida à polarização do condutor. A nova carga negativa sobre o condutor está representadas no meio do corpo *II* apenas para distingui-la das cargas polarizadas. Esta nova carga no corpo *II* vai tentar polarizar o corpo *I*, gerando uma força atrativa entre eles, mas vamos desprezar esta pequena componente da força nesta análise. De qualquer forma, a atração anterior que estava ocorrendo entre estes dois corpos vai continuar existindo. A força resultante vai ser dada aproximadamente por $F_N = F_A + F_R$. Caso $F_A > |F_R|$, a força resultante será atrativa. Caso $F_A < |F_R|$, a força resultante será repulsiva. Apresentamos na Figura 7.32 (c) um exemplo para o qual $F_A < |F_R|$.

A partir do que já foi visto até o momento, apresentamos aqui três condições

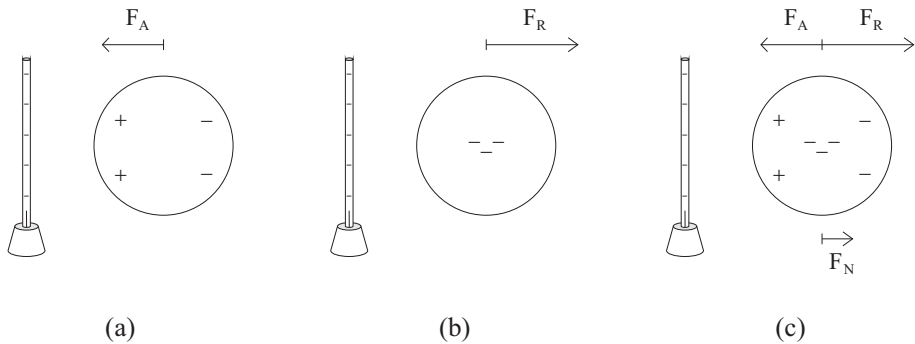


Figura 7.32: (a) Força atrativa devida à polarização de um condutor neutro nas proximidades de um isolante eletrizado. (b) Força repulsiva ideal entre um isolante negativo e um condutor negativo, supondo que o condutor não tenha sido polarizado pelo canudo negativo. (c) Força resultante $F_N = F_A + F_R$ entre um isolante eletrizado e um condutor, supondo o condutor eletrizado e polarizado. Situação para a qual $F_A < |F_R|$.

com as quais podemos ter uma força atrativa resultante entre dois corpos eletrizados com cargas de mesmo sinal.

- A força original de atração é independente do valor da nova carga dada ao corpo II que estava neutro inicialmente. Já a nova força de repulsão depende do valor desta nova carga. Se esta nova carga for muito grande, $|F_R|$ será usualmente maior do que F_A , Figura 7.33 (a). Ao diminuir a intensidade desta nova carga do corpo II , podemos diminuir a intensidade da nova força repulsiva, de tal forma que sobre uma força atrativa resultante entre estes dois corpos que possuem cargas líquidas de mesmo sinal, Figura 7.33 (b).
- Suponha que o condutor e que o isolante sejam ambos negativos e que $|F_R| > F_A$, de tal forma que haja uma repulsão resultante entre eles, Figura 7.34 (a). Quando aumentamos a quantidade de carga no isolante, aumentamos a intensidade da força repulsiva $|F_R|$. A intensidade da força atrativa F_A também é aumentada. Só que ela aumenta mais rapidamente do que o aumento de $|F_R|$. O motivo é que também aumentamos a quantidade de cargas polarizadas sobre o condutor, como foi visto na Seção 7.3, Figura 7.10. Como um exemplo, se a carga do isolante triplicar, $|F_R|$ também será aproximadamente triplicada. Por outro lado, F_A aumentará umas nove vezes. Ao aumentar a quantidade de carga no isolante, chegará um ponto para o qual F_A será maior do que $|F_R|$, gerando com isto uma força atrativa resultante entre estes corpos, Figura 7.34 (b).
- Existe uma outra situação que pode produzir uma força atrativa resultante entre estes dois corpos que possuem carga de mesmo sinal. Suponha que o condutor e o isolante sejam negativos e que $|F_R| > F_A$, tal que haja uma

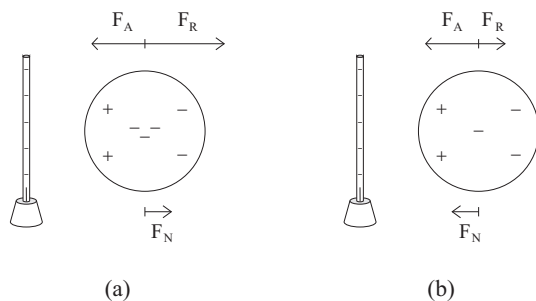


Figura 7.33: (a) Quando é grande a intensidade de carga líquida no condutor, vai haver uma força repulsiva resultante entre ele e um isolante negativo. (b) Quando o condutor possui apenas uma carga resultante de pequena intensidade, a força atrativa devida à sua polarização será maior do que a força repulsiva devida à sua carga líquida, gerando uma força atrativa resultante.

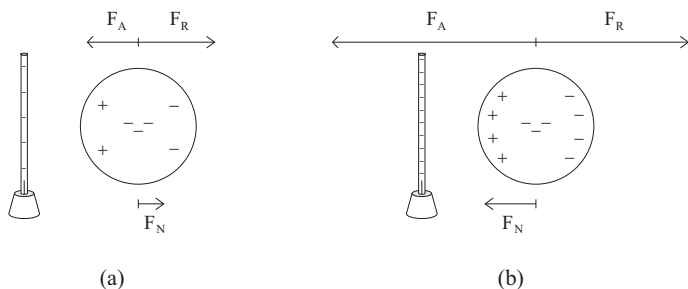


Figura 7.34: (a) Força repulsiva $|F_R|$ maior do que a força atrativa F_A . (b) A atração F_A cresce mais do que $|F_R|$ com um aumento na eletrização do isolante próximo. Apresentamos aqui a situação na qual a força atrativa tornou-se maior do que a força repulsiva.

repulsão resultante entre eles quando estão separados por uma distância d , Figura 7.35 (a). As intensidades destas duas forças de atração e de repulsão se comportam de maneira diferente no que diz respeito à distância entre os corpos. Ao diminuir a distância entre eles, aumentamos a magnitude de F_R apenas devido à aproximação entre a carga negativa de I e a carga líquida negativa de II . Por outro lado, a força atrativa F_A é aumentada por dois motivos diferentes ao diminuir a distância entre I e II . (a) O primeiro motivo é a diminuição das distâncias entre a carga negativa de I e as cargas polarizadas de II . (b) O segundo motivo é que a quantidade de cargas polarizadas sobre II também aumenta ao diminuir a distância entre I e II , como foi visto na Seção 7.3, Figura 7.8. Como a força depende não apenas da distância, mas também da quantidade de carga nos corpos, esta polarização mais intensa vai produzir uma força atrativa maior. Isto significa que se os corpos I e II estão muito próximos, pode sobrar uma

força atrativa resultante entre eles, mesmo quando ambos possuem cargas líquidas de mesmo sinal, Figura 7.35 (b).

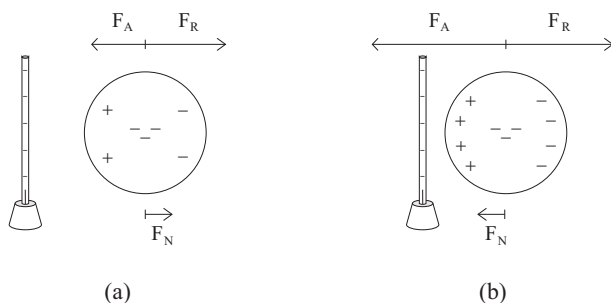


Figura 7.35: (a) Força repulsiva $|F_R|$ maior do que a força atrativa F_A . (b) Ao diminuir a distância entre os dois corpos, F_A aumenta mais do que $|F_R|$. Apresentamos aqui a situação para uma distância pequena entre eles para a qual a força atrativa seja mais intensa do que a força repulsiva, gerando uma atração resultante.

Ou seja, o sinal desta força resultante entre dois corpos eletrizados, isto é, se ela será atrativa ou repulsiva, vai depender de várias coisas: Dos valores das cargas líquidas nos dois corpos, da distância entre os corpos, de suas formas e de seus tamanhos. O valor desta força resultante também vai depender das propriedades intrínsecas destes dois corpos, isto é, se eles são condutores ou isolantes, já que isto vai afetar seus graus de polarização.

O próprio Du Fay sabia que em algumas condições dois corpos eletrizados com cargas do mesmo tipo poderiam se atrair:⁹

Para realizar estes Experimentos [especialmente os de repulsão entre corpos carregados com eletricidade de mesmo tipo] é requisito que os dois Corpos, que são colocados próximos um ao outro para encontrar a Natureza de suas Eletricidades, estejam tão eletrizados quanto possível [isto é, precisam estar bem carregados]. Se um deles não estiver eletrizado, ou estiver apenas fracamente eletrizado [isto é, se estiver pouco carregado], ele será atraído pelo outro [corpo carregado], embora seja da classe [de eletricidade] que deveria naturalmente ser repelida. Porém, o Experimento sempre ocorrerá perfeitamente se ambos os Corpos estiverem suficientemente eletrizados.

Aepinus forneceu um primeiro esboço de uma explicação matemática da possível atração entre dois corpos que possuem cargas de mesmo sinal. Ele mostrou teoricamente e experimentalmente que se dois corpos eletrizados com cargas de mesmo sinal são colocados muito próximos entre si, ou se uma das duas cargas envolvidas tiver uma intensidade muito menor do que a outra carga, os

⁹[DF, pág. 265] e [BC07].

efeitos das polarizações mútuas podem ser suficientes para transformar a força repulsiva usual em uma força atrativa.¹⁰

Não vamos entrar em detalhes aqui, mas uma discussão matemática moderna mostrando sob quais condições corpos eletrizados com cargas de mesmo sinal podem se atrair encontra-se, por exemplo, no trabalho de Maxwell,¹¹ em um artigo de Melehy,¹² e no livro de Jackson.¹³

7.11 A Condutividade da Água

Foi visto na Seção 6.3 que a água descarrega um eletroscópio eletrizado. Isto significa que ela comporta-se como um condutor para as experiências usuais de eletrostática como as que estão sendo descritas neste livro. Por outro lado, quando sujeita a baixas diferenças de potencial, de alguns volts até algumas centenas de volts, a água de torneira ou de chuva comporta-se como um isolante, como visto na Seção 6.6. Nas experiências da Seção 2.5 estávamos lidando com diferenças de potencial de milhares de volts, para as quais a água comporta-se como um condutor. Existem alguns motivos para este comportamento condutor da água. Um deles é que em seu estado natural ela contém íons positivos, H_3O^+ , e negativos, OH^- , além de moléculas de H_2O . Além disso, a água encanada ou a água de chuva contém muitos sais, minerais e impurezas que possuem muitas partículas carregadas eletricamente, também chamadas de íons. Quando na presença de altas diferenças de potencial, estes íons carregados deslocam-se na água, fazendo com que ela se comporte como um condutor.

Vamos analisar agora as experiências da Seção 2.5. Vamos supor que a gota de água da experiência de Gilbert, Experiência 2.10, esteja sobre uma superfície seca condutora, como é o caso da madeira, dos metais e da maior parte dos sólidos. Quando se aproxima da gota um âmbar atritado ou um canudo atritado, observa-se que a gota se deforma, com sua parte pontuda apontando para a região atritada do plástico ou do âmbar. Se houver um atrito pequeno entre a água e a superfície seca sobre a qual está apoiada, ela pode até mesmo deslocar-se no sentido do corpo atritado. Com os resultados vistos neste Capítulo, pode-se ilustrar o que está ocorrendo. Isto é feito na Figura 7.36. Vamos supor que o canudo plástico tenha sido atritado no cabelo, ficando negativamente carregado. Ao aproximá-lo da gota de água, a água inicialmente polariza-se como um todo eletricamente, de forma análoga ao que foi apresentado na Figura 7.29. Isto é, ficando positiva na parte mais próxima do canudo e negativa na região mais afastada do canudo, região esta que está em contato com a superfície seca. Como estamos supondo que a superfície sobre a qual a gota está apoiada é condutora, ocorre uma neutralização da parte da gota em contato com esta superfície. Isto é análogo ao aterramento das Figuras 7.20, 7.22 e 7.30. Consequentemente, a gota

¹⁰[Aep79, págs. 126 e 315-325], [BWc] e [Hei99, págs. 396-398].

¹¹[Max81, Capítulo VII: Theory of electrical images, págs. 80-88], com tradução para o português em [AB05].

¹²[Mel98].

¹³[Jac99, Seção 2.3].

fica carregada eletricamente com uma carga de sinal oposto à carga do canudo. Como cargas de sinais opostos se atraem, a gota fica deformada no sentido do canudo atritado, podendo até mesmo deslocar-se no sentido do canudo.

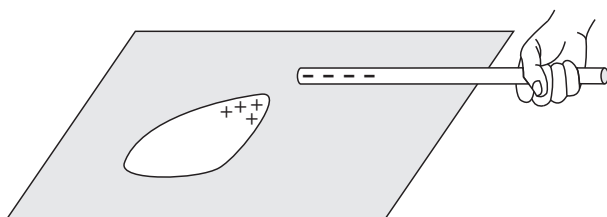


Figura 7.36: Cargas elétricas sobre uma gota de água sendo atraída por um canudo atritado.

Ou seja, acreditamos que este comportamento não seja devido simplesmente a uma orientação ou organização das moléculas polares que compõem a água (embora uma molécula de H_2O não tenha uma carga resultante, ela é naturalmente polarizada, constituindo-se em um dipolo elétrico). Caso houvesse apenas esta organização ou alinhamento das moléculas polares que compõem a água, devido à presença do canudo eletrizado, teríamos algo análogo ao que está representado na Figura 7.31 (a). Em vez disto, nos parece mais razoável que a gota de água como um todo, apoiada sobre uma superfície condutora e estando próxima do canudo atritado, tenha ficado eletrizada com uma carga resultante de sinal oposto à carga do canudo atritado, assim como está representado na Figura 7.30 (c).

Algo análogo ocorre na experiência de Desaguliers, Experiência 2.8. Temos um filete de água de torneira que comporta-se como um condutor nestas altas diferenças de potencial. Além disso, supondo um filete contínuo de água, vem que a água está aterrada por estar em contato com a torneira metálica, que está ligada fisicamente à Terra. Vamos supor que aproximamos do filete um canudo plástico negativamente eletrizado. O filete de água inicialmente fica polarizado (devido ao movimento e à separação dos íons presentes na água, como H_3O^+ , OH^- , etc.), de maneira análoga à Figura 7.29. A parte do filete mais próxima da região atritada do canudo fica eletrizada com uma carga de sinal oposto à carga do canudo, ou seja, fica positiva. Já as cargas negativas que iriam para a região de trás do filete, ou seja, para a parte mais afastada do canudo, acabam sendo neutralizadas pelo aterramento do filete. Isto é análogo ao aterramento das Figuras 7.20, 7.22 e 7.30. Com isto o filete como um todo deve ficar eletrizado positivamente, principalmente na região mais próxima ao canudo. Ocorre então uma atração entre as cargas negativas do canudo e as cargas positivas do filete de água, fazendo com que o filete curve-se no sentido do canudo atritado, Figura 7.37.

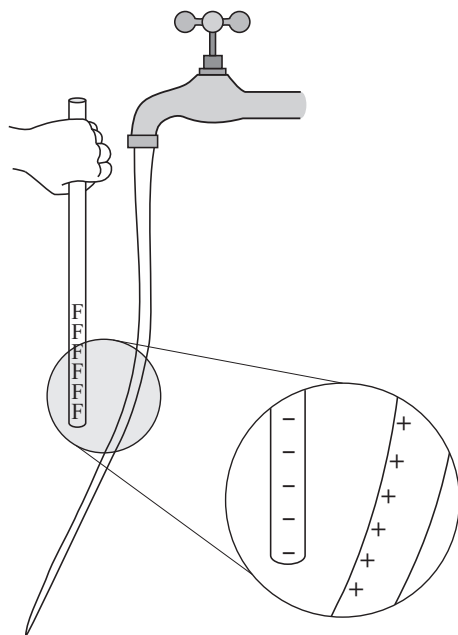


Figura 7.37: Cargas elétricas em um filete de água sendo atraído por um canudo atritado.

7.12 É Possível Eletrizar a Água?

O fato de a água comportar-se como uma substância condutora para as experiências usuais de eletrostática permite com que ela seja eletrizada de forma análoga a um condutor sólido usual. Para isto o aspecto mais importante é deixar a água em um recipiente isolante feito de plástico. Com isto se consegue evitar que a carga adquirida por ela seja descarregada para a Terra.

Como discutido na Seção 7.11, na experiência de Gilbert na qual uma gota de água era atraída por um âmbar atritado, provavelmente já ocorria uma eletrização da água como um todo. Mas Gilbert não chegou a analisar se a água havia ou não ficado eletrizada, observando apenas que ela era atraída pelo âmbar. Talvez o primeiro a eletrizar a água e confirmar que ela ficou carregada eletricamente tenha sido Gray em 1731.¹⁴ Ele colocou um recipiente de água sobre um suporte isolante de resina ou de vidro. Em seguida aproximou umas 3 ou 4 vezes um bastão eletrizado da superfície da água. Depois disto afastou o bastão eletrizado. Ao aproximar sua linha pendular, observou que ela era atraída pela água, indicando que esta havia sido eletrizada pela aproximação do bastão. A eletrização neste caso ocorreu devido a pequenas faíscas elétricas ocorrendo entre o bastão e a água, transferindo cargas do bastão eletrizado para a água

¹⁴[Grad] e [Hei99, pág. 253].

condutora. Esta experiência foi depois repetida por Du Fay.¹⁵

Fazendo adaptações apropriadas, é possível reproduzir boa parte das experiências do Capítulo 7 utilizando a água em um recipiente de plástico isolante, em vez da cartolina apoiada por um canudo plástico. O aspecto condutor da cartolina é assumido pela água. O recipiente de plástico vai evitar que a água seja descarregada para a Terra, assim como o canudo plástico isolava eletricamente o eletroscópio do solo.

7.12.1 O Gerador Eletrostático Gotejante de Kelvin

Uma das experiências mais fascinantes mostrando que a água se comporta como um condutor nas experiências usuais de eletrostática foi realizada em 1867 por W. Thomson (Lorde Kelvin), Figura 7.38.

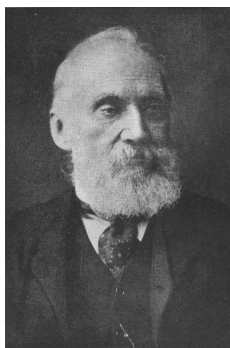


Figura 7.38: W. Thomson (Lorde Kelvin) (1824-1907).

Ele construiu um instrumento que é conhecido como gerador eletrostático gotejante, máquina elétrica gotejante, ou como chuva elétrica de Kelvin.¹⁶ Apresentamos aqui os aspectos principais desta montagem. Inicialmente coloca-se água em um recipiente isolante, como um copo plástico. Na parte central do fundo do copo deve haver um pequeno furo ou gotejador, sendo que inicialmente o furo ou gotejador ficam fechados. Liga-se uma arruela metálica a este copo plástico através de um suporte isolante. A arruela deve ficar bem próxima do fundo do copo, a poucos centímetros de distância. Atrita-se um canudo plástico no cabelo tal que fique negativamente carregado. Raspa-se este canudo algumas vezes na arruela metálica para que ela também fique carregada negativamente. Afasta-se o canudo plástico. Como a água comporta-se como um condutor, ela fica polarizada eletricamente devido à presença do anel negativo logo abaixo dela. Isto é, a parte inferior da água fica carregada positivamente, enquanto que sua superfície livre em contato com o ar fica carregada negativamente, Figura 7.39 (a). Isto é análogo à polarização descrita na Figura 7.29.

¹⁵[DF33a, pág. 34] e [DF33c, pág. 84].

¹⁶[Tho], [Llo07] e [CA08].

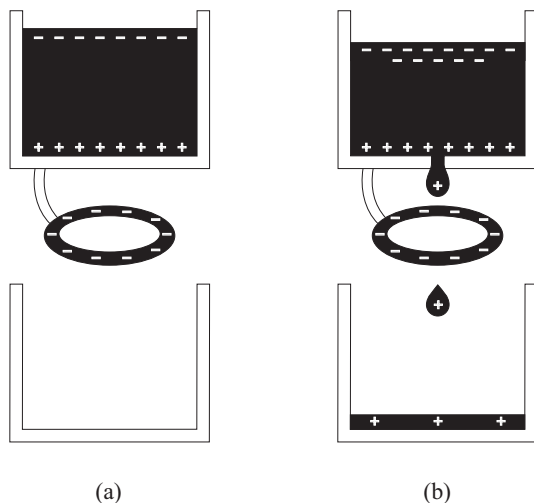


Figura 7.39: (a) Polarização da água devido à presença de um anel negativamente carregado colocado abaixo dela. (b) As gotas caem eletrizadas com cargas de sinal oposto à do anel.

Em seguida abre-se o furo ou o gotejador no fundo do copo. As gotas devem passar pelo centro da arruela eletrizada, sem tocar nela. Devido à polarização do volume de água no recipiente superior, Figura 7.39 (a), vem que as gotas que passam pelo anel estão eletrizadas com uma carga de sinal oposto à carga do anel. Estas gotas são recolhidas em um segundo recipiente isolante colocado abaixo da arruela, Figura 7.39 (b). Na medida em que as gotas vão caindo, vai aumentando a quantidade de carga acumulada no recipiente inferior. Este é o princípio de funcionamento do gerador gotejante de Kelvin.

Para visualizar este gerador funcionando, utilizam-se usualmente dois gotejadores, cujos anéis são carregados com cargas opostas, Figura 7.40. Dentro de cada recipiente isolante inferior há um fio metálico com uma esfera de metal em sua extremidade superior. As duas esferas metálicas ficam bem próximas entre si, com uma distância típica da ordem de alguns milímetros. As gotas que caem abaixo do anel negativo estão carregadas positivamente, enquanto que as gotas que caem abaixo do anel positivo estão carregadas negativamente.

Na medida em que as gotas vão caindo, vai aumentando a quantidade de cargas em cada recipiente inferior. Com isto vai aumentando também a diferença de potencial entre as duas esferas carregadas com cargas opostas. O ar seco comporta-se normalmente como um bom isolante, enquanto está sob a ação de uma força elétrica por unidade de carga menor do que um certo limite. Este limite é chamado de rigidez dielétrica do ar. Na pressão atmosférica ele vale aproximadamente 3×10^6 V/m. Quando a força por unidade de carga na região entre as duas esferas ultrapassa este limite, o ar passa a se comportar como um bom condutor, ocorrendo uma faísca ou descarga elétrica entre as esferas, como

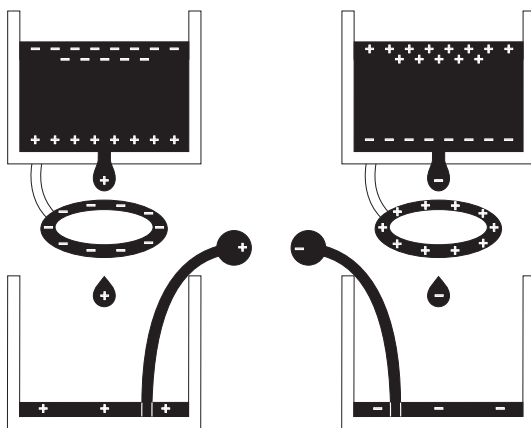


Figura 7.40: Início de funcionamento do gerador gotejante com dois anéis eletrizados com cargas opostas.

ilustrado na Figura 7.41.

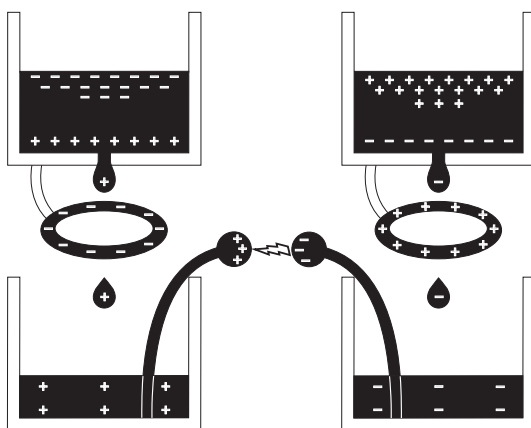


Figura 7.41: Descarga elétrica entre as esferas condutoras quando a força por unidade de carga entre elas ultrapassa o valor da rigidez dielétrica do ar.

Com esta descarga elétrica ocorre uma neutralização das cargas opostas que se encontravam nos recipientes inferiores. Se o gotejamento continuar, o processo vai se repetir como nas Figuras 7.40 e 7.41. O intervalo de tempo entre as faíscas vai depender da rapidez do gotejamento, da distância entre as esferas, da carga elétrica nos anéis, assim como de suas distâncias até os copos superiores. Um período típico é que ocorra uma faísca a cada 10 segundos. Elas vão continuar ocorrendo enquanto as gotas continuarem caindo.

Nesta experiência são mostradas duas coisas muito importantes. A primeira é que a água se comporta como condutora nas experiências usuais de

eletrostática, como visto nas Seções 6.3 e 7.11. A segunda é que se houver um corpo eletrizado bem próximo de onde a água estiver gotejando, as gotas ficarão eletrizadas com uma carga de sinal oposto ao do corpo eletrizado.

7.13 A Condutividade do Ar

Experiência 7.25

É fácil carregar um eletroscópio em um dia seco. Basta raspar em sua cartolina um canudo atritado no cabelo, como mostrado na Experiência 6.2, Figura 6.5. Como o eletroscópio permanece eletrizado por vários segundos ou por alguns minutos após a raspagem, isto significa que o ar seco comporta-se como um bom isolante elétrico.

O ar seco não é um isolante perfeito, já que o eletroscópio acaba sendo descarregado depois de vários minutos, como visto na Experiência 6.21. Apesar disto, ele pode ser considerado como um bom isolante, de acordo com a definição da Subseção 6.7.1.

Experiência 7.26

Repete-se a Experiência 7.25 em um dia úmido e chuvoso. Enquanto o canudo atritado no cabelo está sendo raspado na cartolina, observa-se que a tirinha do eletroscópio fica levantada, como na Figura 6.5 (b).

Porém, logo que o canudo atritado é afastado do eletroscópio, observa-se que a tirinha não permanece levantada por muito tempo. Ela vai abaixando rapidamente, voltando logo à orientação vertical encostada na cartolina, como na Figura 6.5 (a). Quanto maior for a umidade do dia, mais rapidamente a tirinha abaixa. Dependendo do valor desta umidade, o ar pode se comportar como um mau condutor ou como um bom condutor. É a presença da água no ar úmido que faz com que o ar se comporte como um condutor, já que a própria água se comporta como condutora nas experiências usuais da eletrostática, como discutido na Seção 7.11.

Experiência 7.27

Existe uma outra maneira fácil de afetar a propriedade isolante do ar. As Experiências 6.2 e 7.25 são repetidas em um dia seco. O canudo atritado é inicialmente raspado na cartolina do eletroscópio e afastado para longe. A tirinha do eletroscópio permanece levantada da cartolina, como na Figura 7.42 (a).

Acende-se um fósforo ou um isqueiro nas proximidades do eletroscópio carregado. Observa-se que a tirinha abaixa rapidamente, em poucos segundos, Figura 7.42 (b). Ao afastar o fogo do eletroscópio, observa-se que a tirinha permanece abaixada, Figura 7.42 (c).

Esta experiência mostra que o fogo ocasiona o descarregamento do eletroscópio.

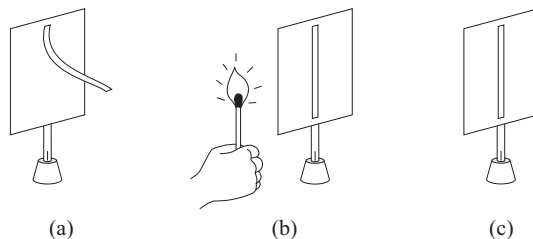


Figura 7.42: (a) Eletroscópio carregado. (b) A tirinha abaixa em poucos segundos ao acendermos um fósforo ao lado do eletroscópio. (c) A tirinha permanece abaixada após o fósforo ser afastado.

A interpretação que se dá atualmente para este fenômeno é que o fogo aumenta bastante a ionização do ar. Ele fica com uma quantidade enorme de íons móveis, tanto positivos quanto negativos. Com isto o ar é transformado em um bom condutor de eletricidade. Com o aumento do número de cargas móveis no ar ao redor do eletroscópio, ele acaba sendo rapidamente neutralizado por estes íons. Além disso, ao aumentar a condutividade do ar, isto também permite com que o eletroscópio seja descarregado pela mão e pela Terra.

7.14 Como Descarregar um Isolante Eletrizado?

O aterramento é a maneira mais fácil de descarregar um condutor eletrizado, como visto nas Seções 4.5, 6.2 e 6.3. Para isto basta encostá-lo no solo, ou ligá-lo à Terra através de um outro condutor, como o corpo humano ou um fio metálico.

Só que este procedimento não funciona para descarregar um isolante eletrizado. Isto fica evidente na própria experiência que deu origem ao estudo da eletricidade, o efeito âmbar, Seções 2.1 e 2.2. Na Figura 2.3 temos um canudo atritado sendo segurado pela mão e atraindo papezinhos. Ou seja, embora o canudo esteja aterrado pelo contato com a mão condutora, ele não é descarregado. Esta é uma das principais distinções entre condutores e isolantes, como visto na Seção 7.1.

Experiência 7.28

Atrita-se um canudo plástico no cabelo e observa-se que ele atrai papezinhos, como na Experiência 2.1. Pode-se tentar aterrar o canudo encostando um fio metálico entre o solo e uma parte atritada do canudo. Em seguida retira-se o fio. Aproxima-se novamente o canudo atritado dos papezinhos e observa-se que ele continua os atraindo.

O que ocorre nesta experiência é que apenas o local específico de contato entre o fio metálico e o plástico é descarregado. Ou seja, as outras partes atritadas do canudo não são descarregadas por este aterramento. O motivo para

isto é que as cargas que estão nestas outras partes não conseguem se deslocar pelo canudo pelo fato dele ser um bom isolante.

Na próxima experiência veremos três procedimentos para descarregar um isolante eletrizado.

Experiência 7.29

Atritam-se igualmente três canudos plásticos no cabelo. Vamos chamá-los de canudos *I*, *II* e *III*. Os canudos *II* e *III* são deixados na vertical sobre suportes apropriados. Por exemplo, suas extremidades inferiores podem ficar apoiadas ao redor dos colchetes fincados nos copinhos de café, como na Figura 5.25 (b). Com o canudo *I* repete-se a Experiência 2.1 e observa-se que ele atrai papeizinhos ao se aproximar deles.

Espera-se alguns minutos ou até mesmo algumas horas e repete-se esta experiência com o canudo *II* que ficou na vertical depois de ter sido atritado. Ele somente foi atritado no início da experiência juntamente com os canudos *I* e *III*. Em geral ele atrairá uma quantidade bem menor de papeizinhos do que o canudo *I*. A quantidade de papeizinhos que ele atrairá dependerá do tempo de espera entre o atrito inicial e sua aproximação dos papeizinhos, do tipo de atrito que foi realizado, do material de que é feito o canudo e também do clima local (isto é, se é um dia seco ou úmido).

No dia seguinte repete-se esta experiência utilizando o canudo *III*. Este canudo não havia sido tocado depois que foi atritado e colocado na vertical sobre o suporte. O que se observa é que ele não mais atrai papeizinhos, Figura 7.43.

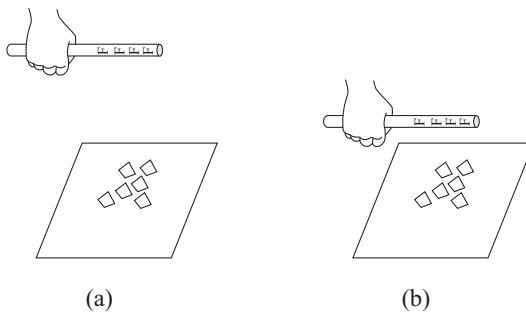


Figura 7.43: Um canudo que foi atritado perde sua eletrização depois de várias horas, não atraindo papeizinhos ao se aproximar deles.

O símbolo *F* na Figura 7.43 indica apenas que ele foi atritado algumas horas antes, sendo que nada foi feito com ele depois disto. Apesar dele ter sido atritado, o que se observa é que, passadas várias horas depois deste atrito, ele não mais consegue atrair papeizinhos ao se aproximar deles. Pela definição da Seção 2.1, isto significa que ele voltou a ser neutro eletricamente. Ou seja, ele perdeu sua eletricidade ou as cargas que havia adquirido pelo atrito. Estas

cargas são perdidas para o ar ao seu redor. Embora o ar seco seja um bom isolante, ele não é um isolante perfeito, como discutido na Subseção 6.7.1.

Experiência 7.30

Apresentamos agora o segundo procedimento para descarregar um isolante eletrizado.

Inicialmente atrita-se um canudo plástico no cabelo e observa-se que ele atrai papeizinhos que estão sobre a mesa, como na Experiência 2.1. Em seguida afunda-se este canudo em um recipiente cheio de água. Retira-se o canudo da água e ele é novamente aproximado dos papeizinhos sobre a mesa. Desta vez ele não atrai mais os papeizinhos, como na Figura 7.43. Novamente deve-se evitar que ele toque nos papeizinhos, para evitar que eles grudem no canudo devido à sua umidade. Pode-se também dar uns petelecos ou soprar levemente o canudo após ele ser retirado da água para eliminar o excesso de umidade em sua superfície.

Esta experiência indica que embora o canudo tenha sido inicialmente atritado, ele deixa de atrair papeizinhos depois de afundar em um recipiente com água. Ou seja, a água descarrega o canudo atritado. Novamente isto ocorre devido ao comportamento condutor da água, que possui uma grande quantidade de íons móveis, tanto positivos quanto negativos. Como ela entra em contato íntimo com todas as partes do canudo que estavam eletrizadas devido ao atrito, ela acaba neutralizando estas cargas superficiais devido à grande quantidade de íons móveis que ela possui. A diferença deste caso em relação à Experiência 7.28 é que agora temos um aterramento de todas as partes do canudo que foram atritadas. Com isto há uma neutralização simultânea de todas estas partes através da água condutora.

Experiência 7.31

O terceiro procedimento para descarregar um isolante eletrizado também é muito simples.

Inicialmente atrita-se um canudo plástico no cabelo e observa-se que ele atrai papeizinhos que estão sobre a mesa, como na Experiência 2.1. Afasta-se o canudo atritado dos papeizinhos. Em seguida acende-se um fósforo ou um isqueiro nas proximidades do canudo. A chama deve ser aproximada de todas partes atritadas do canudo, Figura 7.44.

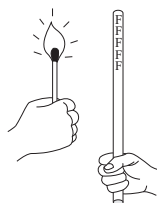


Figura 7.44: Acende-se um fósforo perto de um canudo atritado.

Depois disto aproxima-se novamente este canudo dos papeizinhos sobre a mesa. Observa-se que ele não mais atrai os papeizinhos, como na Figura 7.43. Ou seja, a chama fez com que o canudo fosse descarregado.

Como visto na Seção 2.6, Gilbert foi o primeiro a descrever este fato. Ele havia observado que as chamas impediam as atrações exercidas por corpos eletrizados. Em vez de analisar se a substância atritada atraía ou não papeizinhos, o que ele observou foi se esta substância atritada orientava ou não um versório em suas proximidades. Como ele disse, “[os corpos elétricos atritados] não exercem efeito sobre um versório se ele tem perto de si, de qualquer lado, a chama de um candieiro ou de qualquer substância incandescente.” Ele interpretava isto dizendo que as chamas consumiam os supostos eflúvios ou emanações emitidas pelos corpos eletrizados, eflúvios estes que seriam responsáveis pelas atrações elétricas usuais.

Hoje em dia temos uma interpretação diferente. O que ocorre neste caso é análogo ao que foi descrito na Experiência 7.27. Ou seja, a chama aumenta bastante a ionização das moléculas do ar, que passa a ter uma grande quantidade de íons móveis, tanto positivos quanto negativos. Com isto ele passa a se comportar como um bom condutor. O contato íntimo deste ar condutor com as partes atritadas do canudo acaba por neutralizar as cargas superficiais que estavam sobre o canudo. Com isto o canudo perde as cargas que havia adquirido pelo atrito e deixa de atrair os papeizinhos.

7.15 Um Papelzinho é Atraído com Mais Força quando está sobre um Isolante ou sobre um Condutor?

Experiência 7.32

Escolhe-se um saco plástico que se comporte como um isolante, isto é, que não descarregue um eletroscópio carregado ao entrar em contato com ele. Recortam-se vários pedacinhos deste plástico e vários pedacinhos de uma folha de papel. Preparamos também duas superfícies, a saber, uma superfície isolante composta de uma chapa de isopor e uma superfície condutora composta de uma folha de papel, de uma mesa de madeira, ou de uma lâmina metálica. Os pedacinhos de plástico são colocados sobre uma chapa de isopor, este será o grupo *I*. Sobre esta mesma chapa, mas separado do primeiro grupo, coloca-se um grupo de papeizinhos, o grupo *II*. Outros pedacinhos deste plástico são colocados sobre a superfície condutora. Este será o grupo *III*. Sobre esta mesma superfície condutora, mas separado do terceiro grupo, coloca-se um quarto grupo de papeizinhos.

Antes de começar a experiência é importante verificar que os pedacinhos de plástico sobre a chapa de isopor e sobre o papel estão realmente neutros, já que às vezes eles ficam carregados durante sua manipulação ou enquanto são cortados. Para isto deve-se aproximar um canudo plástico neutro destes

pedacinhos e observar que eles não são atraídos. Caso haja alguma atração, deve-se esperar algumas horas até que se descarreguem para então começar a experiência.

Agora-se atrita-se um canudo plástico no cabelo e ele é aproximado na horizontal destes quatro grupos. Observa-se que a maior força é exercida sobre o grupo *IV*, pedacinhos de papel sobre uma superfície condutora, seguida pelo grupo *II*, pedacinhos de papel sobre uma superfície isolante. Os grupos *I* e *III*, pedacinhos de plástico sobre os dois tipos de superfície, são muito pouco atraídos, sendo difícil distinguir qual deles sofreu a maior atração. A intensidade da força pode ser estimada de duas maneiras. A primeira é observando a distância em que a força começa a ser percebida, sendo isto indicado pelo movimento dos pedacinhos de papel ou de plástico. Quanto maior for esta distância, mais intensa é a força, Figura 7.45. A segunda maneira é observando a quantidade de pedacinhos de papel ou de plástico que são atraídos pelo canudo quando este está a uma distância fixa da mesa (como a 5 ou 10 cm).

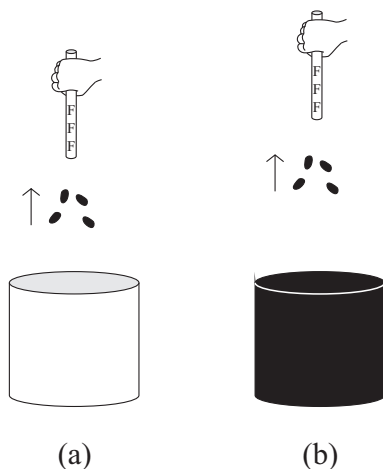


Figura 7.45: (a) Papeizinhos apoiados sobre uma superfície isolante sendo atraídos por um canudo atritado. (b) Papeizinhos apoiados sobre uma superfície condutora sendo atraídos por um canudo atritado. A distância mínima em que o canudo consegue atraí-los é maior no caso (b) do que no caso (a). As setas indicam o sentido do movimento.

Experiência 7.33

Utiliza-se agora um pêndulo elétrico composto por um fio de seda ou de náilon com um pequeno disco de papel na ponta. Atrita-se um canudo *I* no cabelo para que fique negativo, sendo ele apoiado na vertical por um suporte apropriado, longe do pêndulo. Atrita-se um segundo canudo entre duas borrachas duras para que fique positivo, sendo apoiado na vertical sobre um segundo suporte, longe do pêndulo e do primeiro canudo.

Encosta-se com o dedo no disco do pêndulo e em seguida aproxima-se dele na horizontal, lentamente, o canudo *I*. Observa-se que o pêndulo é atraído em direção ao canudo. Não se deve deixar que ele toque no canudo. Afasta-se o canudo *I* e aproxima-se do pêndulo o canudo *II*. Observa-se que ele também é atraído por este canudo.

Agora pega-se uma folha de papel (ou uma chapa metálica) e segura-se esta folha inclinada abaixo do disco do pêndulo, tocando nele de leve. O disco do pêndulo deve ficar entre a folha e o canudo, Figura 7.46.

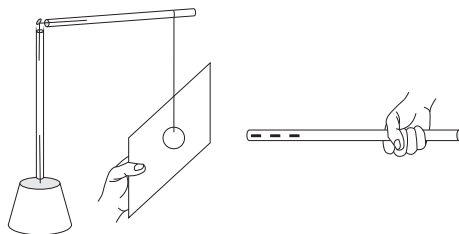


Figura 7.46: O disco do pêndulo elétrico fica inicialmente tocando em uma folha de papel ou em uma chapa metálica.

Aproxima-se lentamente o canudo *I* do pêndulo, tal que o disco fique entre o papel e o canudo. A uma certa distância, o disco se afasta do papel e começa a se deslocar em direção ao canudo. Quando isto ocorrer, mas antes que o disco toque no canudo, o papel deve ser afastado. Em nenhum momento o disco deve tocar o canudo. Em seguida afasta-se o canudo *I* e o pêndulo volta à vertical. Se aproximarmos novamente o canudo *I* do pêndulo, será observada uma nova atração. Como sempre deve-se evitar o contato entre o disco e o canudo.

Feito isto, afasta-se o canudo *I* e aproxima-se lentamente do pêndulo o canudo *II*. Ele não deve se aproximar muito do disco e deve-se observar atentamente para que lado o disco tende a se mover. Quando a experiência é feita com cuidado, o que se encontra é que o disco tende a se afastar do canudo *II*, sendo repelido por ele! Isto indica que eles possuem carga de mesmo sinal, positivo. Caso o canudo *II* se aproxime demais do pêndulo, vai haver uma atração entre eles, como visto na Seção 7.10. Isto deve ser evitado.

Experiência 7.34

A Experiência 7.33 pode ser repetida invertendo a ordem na qual os canudos são apresentados ao pêndulo. Ou seja, inicialmente aproxima-se do pêndulo encostado na folha de papel o canudo *II* positivo. Quando o disco estiver sendo atraído em direção a este canudo, afasta-se o papel e depois o canudo. Se agora aproximarmos lentamente o canudo *I* em direção ao pêndulo, será observada uma repulsão entre o disco e o canudo *I*, indicando que o pêndulo ficou negativamente carregado, com carga oposta à do canudo *II*.

Experiência 7.35

Repete-se as Experiências 7.34 e 7.35, mas agora apoiando-se o disco do pêndulo sobre uma chapa de isopor. Ao final desta experiência observa-se que o disco do pêndulo é atraído tanto pelo canudo *I* quanto pelo canudo *II*, não importando qual deles tenha sido o primeiro a se aproximar do pêndulo.

As Experiências 7.33 e 7.34 mostram que quando um pedacinho de papel (neste caso o disco do pêndulo), apoiado sobre uma lâmina condutora de papel ou de metal, é atraído por um canudo eletrizado, ocorre uma eletrização do papelzinho. Além disso, a carga adquirida pelo papelzinho ao deixar o contato com a lâmina condutora que o apoiava, tem sinal oposto à carga do canudo eletrizado. Já a Experiência 7.35 mostra que um pedacinho de papel, ao ser apoiado por uma lâmina isolante de isopor, não fica eletrizado ao ser atraído por um canudo eletrizado. Ou seja, a carga resultante do papelzinho é nula depois dele se afastar do isopor.

Capítulo 8

Considerações Finais

8.1 Mudança de Nomenclatura e de Significado: De Corpos Elétricos e Não-Elétricos para Isolantes e Condutores

Em 1600 Gilbert havia classificado os corpos entre materiais elétricos e não-elétricos, Seções 2.7 e 2.8. Os materiais elétricos eram aqueles que, após serem atritados, adquiriam a propriedade de atrair corpos leves em suas proximidades, como ocorria com o âmbar atritado. Os não-elétricos eram os materiais que não adquiriam esta propriedade com o atrito. Entre os não-elétricos estavam incluídos, em particular, todos os metais.

Em 1729 Gray descobriu que, colocando corpos eletrizados em contato com metais ou apenas próximos deles, os metais podiam atrair corpos leves. Algumas experiências deste tipo foram vistas na Seção 7.4. Os procedimentos de Gray serão detalhados no Apêndice B. O mesmo comportamento atrativo ocorria com diversos outros corpos que até então eram considerados não-elétricos. Du Fay descobriu o mecanismo *ACR* e mostrou que uma lâmina metálica podia ser eletrizada ao entrar em contato com uma substância previamente atritada, Seção 4.8. Em seguida aprendeu-se a carregar eletricamente um metal utilizando a polarização elétrica e o aterramento, Seção 7.5. Na década de 1770 descobriu-se como eletrizar um metal por atrito, desde que ele estivesse isolado do solo, Seção 6.8. Com isto abandonou-se a nomenclatura de Gilbert de separar os corpos entre materiais elétricos e não-elétricos.

Passou-se a adotar então a classificação de acordo com a qual os corpos eram divididos entre *condutores* e *isolantes*. Estes termos são devidos a Du Fay e a Desaguliers, Subseção 6.3.1. As substâncias que Gilbert classificava como elétricas são chamadas hoje em dia de isolantes. Já as substâncias que eram chamadas de não-elétricas são denominadas hoje em dia de condutoras. A mudança não é apenas de termos ou de palavras. Afinal de contas, desde que isolados eletricamente, é possível fazer com que os metais e os outros materiais

atraiam corpos leves após serem atritados. A distinção de Gilbert é que não mais fazia sentido. O que caracteriza os condutores ideais é o fato de possuírem cargas móveis e o de permitirem a passagem ou o fluxo de cargas através deles. Já os isolantes ideais não possuem cargas móveis, a não ser no interior de suas moléculas. Além disso, os isolantes ideais não permitem a passagem ou o fluxo de cargas através deles.

Existe toda uma gradação entre os bons condutores e os bons isolantes. Além disso, estas propriedades não dependem apenas de propriedades intrínsecas aos próprios corpos, mas também das condições externas a que estão sujeitos. De qualquer forma, a distinção entre corpos condutores e isolantes é uma das mais importantes de toda a ciência da eletricidade.

8.2 Fatos Simples e Primitivos sobre a Eletricidade

Depois de realizar todas as experiências descritas neste livro, obtemos um bom conhecimento básico sobre a eletricidade. Obviamente não esgotamos o que se conhece hoje em dia sobre um tema tão vasto, mas ficamos com uma noção precisa dos principais fatos relacionados ao assunto. Nesta Seção apresentamos, para usar as palavras de Du Fay, os princípios ou fatos simples e primitivos sobre a eletricidade.¹ Estamos aqui apenas descrevendo os fatos observados, eles não serão explicados. Por este motivo eles são considerados como primitivos. Isto é, pode-se utilizar estes princípios simples para explicar outros fenômenos e também experiências mais complicadas, mas os próprios princípios fundamentais não são explicados. Nunca é possível explicar tudo, sempre é necessário partir de algumas coisas que são consideradas como verdadeiras, para então explicar com estas coisas primitivas outras observações da natureza. Há sempre a necessidade de se assumir alguns princípios ou postulados para depois deduzir teoremas e outros resultados a partir das coisas que são consideradas como mais básicas. Vamos então aos princípios primitivos:

1. Os corpos na natureza podem se encontrar em três estados diferentes que são chamados de eletricamente neutro, carregado positivamente e carregado negativamente. Também se diz que estes corpos possuem, respectivamente, carga nula, carga positiva e carga negativa. Outra maneira de se expressar é dizendo que os corpos não estão eletrizados, que estão eletrizados positivamente ou negativamente, respectivamente.
2. Estes estados são caracterizados pelos comportamentos observados dos corpos. Dois corpos neutros não se atraem nem se repelem. Há uma atração entre um corpo positivo e um corpo inicialmente neutro, assim como há uma atração entre um corpo negativo e um corpo inicialmente neutro. Corpos com cargas opostas se atraem. Corpos com cargas de

¹[DF34b, pág. 525].

mesmo sinal normalmente se repelem, mas em algumas situações eles podem se atrair.

3. Estas forças de atração e de repulsão aumentam de intensidade com a diminuição da distância entre os corpos. Elas também aumentam de intensidade com o aumento da quantidade de carga nos corpos. Elas são mútuas, atuando com igual intensidade nos dois corpos que estão interagindo. Elas atuam ao longo da linha reta que une os dois corpos, mas agem em sentidos opostos sobre cada corpo.
4. Os corpos podem ser divididos em dois grupos, chamados de condutores e isolantes. A diferença principal é que os condutores possuem cargas móveis e permitem a passagem ou o fluxo de cargas elétricas através deles. Os isolantes, ao contrário, não possuem cargas móveis, a não ser no interior de suas moléculas. Os isolantes não permitem a passagem ou o fluxo de cargas elétricas através deles.
5. Tanto os condutores quanto os isolantes podem estar eletricamente neutros, positivos ou negativos. Quando um condutor eletrizado entra em contato com a Terra, ele se descarrega, sendo este processo chamado de descarga por aterramento. O mesmo já não ocorre com um isolante eletrizado. Outra maneira de fazer esta classificação é ligando a cartolina de um eletroscópio eletrizado à Terra através destes corpos. Os corpos que descarregam o eletroscópio são chamados de condutores e os que não descarregam o eletroscópio são chamados de isolantes.
6. Um corpo que se comporta como um isolante quando suas extremidades estão sob a ação de uma pequena diferença de potencial elétrico pode passar a se comportar como um condutor quando esta diferença de potencial ultrapassa um certo limite. A maior parte dos corpos sólidos e líquidos se comporta como condutores para as experiências usuais de eletrostática, poucos são os isolantes. Entre estes se destacam o ar seco, o âmbar, a seda e a maior parte dos plásticos e resinas.
7. Se um corpo vai se comportar como condutor ou como isolante também depende de outros fatores. Vamos supor que uma extremidade do corpo esteja em contato com a cartolina de um eletroscópio eletrizado e a outra extremidade do corpo esteja em contato com o solo. Os fatores que influenciam nas propriedades do corpo são as seguintes: (a) O tempo necessário para descarregar o eletroscópio (quanto maior o tempo de contato, maior é a descarga). (b) O comprimento do corpo entre a Terra e o eletroscópio (quanto maior este comprimento, mais lentamente ocorre a descarga). (c) A área de seção reta do corpo entre a Terra e o eletroscópio (quanto maior é esta área, mais rapidamente ocorre a descarga).
8. Os corpos neutros podem ser carregados de diversas maneiras. A mais comum é o atrito entre dois corpos neutros. Após o atrito, um dos corpos fica positivo e o outro negativo. Os isolantes ficam carregados no local

onde foram atritados. Já a carga adquirida pelos condutores no atrito vai se espalhar por toda sua superfície externa se estiverem cercados por isolantes, ou irá para a Terra caso entrem em contato com ela.

9. Um condutor neutro também adquire uma carga de um isolante carregado ao entrar em contato com ele, sem atrito. Esta carga é de mesmo sinal que a do isolante. Neste processo o isolante perde uma quantidade de carga igual à adquirida pelo condutor. Por outro lado, é desprezível a carga adquirida por um isolante neutro ao entrar em contato com um outro isolante carregado, quando não há atrito entre eles.
10. Os condutores se polarizam eletricamente na presença de um corpo carregado próximo a eles. A parte do condutor mais próxima do corpo fica com uma carga de sinal oposto à do corpo. A parte mais afastada do condutor fica com uma carga de mesmo sinal que a do corpo carregado. Se o condutor estiver isolado e se for separado nestas duas partes enquanto o corpo carregado estiver próximo a ele, as duas partes ficarão eletrizadas com cargas de sinais opostos.
11. Se o condutor for aterrado enquanto o corpo carregado estiver próximo a ele, serão neutralizadas as cargas do condutor que estão na parte mais afastada do corpo. Este fato permite que se carregue um condutor com uma carga de sinal oposto à do corpo próximo.
12. As moléculas de um isolante se polarizam na presença de um corpo carregado próximo ao isolante. A parte de qualquer molécula mais próxima do corpo fica com uma carga de sinal oposto à do corpo, enquanto que a parte mais afastada da molécula fica com uma carga de mesmo sinal que a carga do corpo. Estas cargas ficam restritas às moléculas e não se deslocam ao longo do isolante. Estas cargas polarizadas também não fluem para um condutor que entre em contato com o isolante.
13. A quantidade de cargas polarizadas em condutores próximos de um corpo eletrizado aumentam ao diminuir a distância entre eles. O mesmo ocorre com a polarização efetiva dos isolantes próximos de um corpo carregado.
14. A quantidade de cargas polarizadas em condutores e isolantes também aumenta quando cresce a eletrização do corpo próximo.
15. Alguma força de origem não-eletrostática mantém em repouso as cargas sobre a superfície de condutores e de isolantes carregados ou polarizados. É também uma força de origem não-eletrostática a responsável pela geração de cargas durante o atrito entre dois corpos.

Ao descrever os fatos simples deve-se ter em conta que estamos falando em linhas gerais, nos referindo implicitamente às experiências descritas neste livro. Tudo depende das ordens de grandeza envolvidas, sempre existem exceções em todas as descrições experimentais. Por exemplo, quando dizemos que dois corpos

neutros não interagem, estamos desconsiderando a atração gravitacional entre eles, que não é observável usualmente com os nossos sentidos no caso de corpos pequenos e leves, mas apenas quando possuem dimensões astronômicas. Quando dizemos que um corpo carregado atrai um corpo inicialmente neutro, estamos supondo corpos leves ou apoiados em suportes, tal que possuam pouco atrito para se deslocarem lateralmente, podendo aproximar-se mutuamente. Além disso, para que seja observado este efeito de atração, a distância entre eles não pode ser muito grande e a carga do corpo atritado não pode ser muito pequena, senão estes efeitos não serão perceptíveis. O mesmo vale para os outros princípios.

8.3 Descrição do Efeito Âmbar

Estes princípios primitivos podem ser utilizados para explicar ou para descrever fenômenos mais complexos. Mas aqui vamos utilizá-los para descrever o que ocorreu na Experiência 2.1, que é análoga à experiência do efeito âmbar, a primeira experiência na história da eletricidade. Nesta experiência um canudo de plástico que não havia sido atritado não atraiu pedacinhos de papel, enquanto que um canudo de plástico atritado no cabelo atraiu para si pedacinhos de papel quando se aproximou deles, Figuras 2.1 e 2.3. Uma experiência que deu um resultado diferente foi mostrada na Experiência 2.11, quando um espeto de madeira, estando ou não atritado, não atraiu pedacinhos de papel, Figura 2.9. Já nas Experiências 2.3, 7.18 e 7.20, o que se observou é que o canudo atritado exerce uma força maior sobre um pedacinho de papel do que sobre um pedacinho de plástico de mesmo peso e de mesmo tamanho. Nas Experiências 7.32 a 7.35 observou-se que quando o papelzinho está sobre uma superfície condutora, ele sofre uma atração maior pelo canudo atritado do que quando está sobre uma superfície isolante. Além disso, o papelzinho normalmente fica carregado quando é atraído estando sobre uma superfície condutora. A carga adquirida por ele tem sinal oposto à carga do canudo eletrizado que o está atraindo.

Nestas experiências os corpos que se comportaram como isolantes foram o ar, o canudo plástico atritado, o fio de seda do pêndulo elétrico, a lâmina de isopor e os pedacinhos de plástico sendo atraídos. O canudo de plástico foi carregado por atrito no cabelo. Pelo que foi visto na Seção 5.4, o canudo ficou então negativamente carregado. Embora a mão segurasse o canudo de plástico, este não se descarregou por ser isolante.

Os corpos que se comportaram como condutores nestas experiências foram o solo, o corpo humano, o espeto de madeira, o disco de papel do pêndulo elétrico, a folha de papel sobre a qual este disco se apoiava e os pedacinhos de papel sendo atraídos. Não foi possível atrair os pedacinhos de papel ao atritar o espeto de madeira. Ao ser atritado ele pode ter ficado momentaneamente carregado. Mas como ele é um condutor que estava seguro pela mão em contato com o solo, na prática ele estava aterrado. Por este motivo qualquer carga surgindo do atrito seria imediatamente neutralizada. Devido a este aterramento, ele não atraía papezinhos mesmo depois de atritado. Para que um condutor possa ficar

eletrizado pelo atrito e manter estas cargas que adquiriu, é necessário segurá-lo através de um isolante, como visto na Seção 6.8.

As substâncias com as quais o canudo plástico foi atritado podem ser isolantes (como o cabelo, um tecido de seda ou um saco plástico) ou condutoras (como a nossa mão, uma folha de papel ou um pano de algodão). Ou seja, não é crucial saber se elas são isolantes ou condutoras. Mas o sinal da carga adquirida pelo canudo plástico vai depender do tipo de material com o qual foi atritado, seja ele um isolante ou um condutor.

A atração que o canudo atritado exercia sobre um pedacinho de plástico pode ser ilustrada microscopicamente utilizando um pêndulo de plástico. Como sempre deve-se tomar o cuidado de utilizar um disco de plástico recortado de um saco plástico que se comporte como um isolante. Além disso, este disco tem de estar neutro quando está longe de outros corpos carregados. Neste caso, ao aproximar o canudo atritado do disco de plástico, observa-se uma leve atração entre eles. O que se supõe é que as moléculas do plástico se polarizaram na presença do canudo atritado. A parte de cada molécula mais próxima do corpo atritado ficaria carregada com uma carga de sinal oposto à deste corpo. Já a parte de cada molécula mais afastada do corpo atritado ficaria carregada com uma carga de mesmo sinal que a do corpo atritado. Isto está ilustrado na Figura 8.1 (a). O interior do plástico polarizado se comportaria macroscopicamente como se fosse neutro devido ao cancelamento das cargas próximas de sinais opostos que existem em suas moléculas polarizadas. Mas a superfície do plástico polarizado se comportaria como estando com uma carga efetiva, sendo isto ilustrado na Figura 8.1 (b).

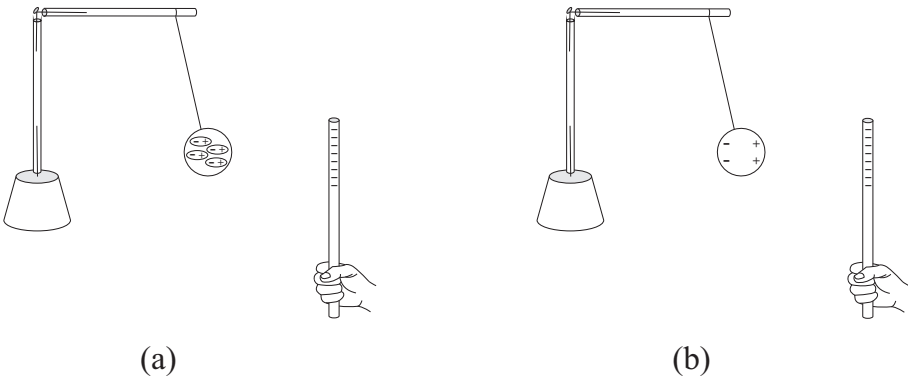


Figura 8.1: (a) Um canudo atritado polarizando e atraindo um disco de plástico. (b) Polarização efetiva do disco de plástico.

Para que ocorra esta polarização das moléculas do plástico devido à presença do canudo atritado, é necessária a existência de cargas positivas e negativas nestas moléculas. Supõe-se que estas cargas podem se deslocar no interior das moléculas, mas não ao longo de todo o plástico. A polarização das moléculas seria devida ao fato da força entre cargas de mesmo sinal ser repulsiva, en-

quanto que a força entre cargas de sinais opostas é atrativa. Alguma força de origem não-eletrostática impede estas cargas polarizadas de se afastarem indefinidamente entre si. Quanto maior for a quantidade de carga no canudo plástico eletrizado, maior será a polarização do disco de plástico. Esta polarização também aumenta com a diminuição da distância entre o canudo e o disco. E quanto maior for a polarização efetiva do disco de plástico, maior será a força resultante sobre ele.

A polarização do plástico não é muito alterada se ele está apoiado sobre uma lâmina isolante de isopor ou sobre uma lâmina condutora (de metal ou de papel). O plástico não recebe uma carga resultante em nenhum destes casos.

Já a atração observada entre o canudo atritado e o plástico polarizado seria uma consequência de um fato adicional: Tanto a força atrativa quanto a repulsiva aumentam de intensidade quando a distância entre as cargas diminui. Portanto, a força atrativa entre o canudo e as cargas efetivas na superfície mais próxima do disco de plástico é mais intensa do que a força repulsiva entre o canudo e as cargas efetivas na superfície mais afastada do disco de plástico. Isto gera então uma força resultante atrativa sobre o plástico polarizado.

Vamos agora analisar a atração que o plástico atritado exerce sobre um condutor, como é o caso de um pedacinho de papel. Vamos considerar inicialmente este papelzinho como sendo o disco de papel de um pêndulo elétrico suspenso por um fio de seda ou de náilon (materiais isolantes). Neste caso existem duas diferenças em relação a um disco de plástico isolante. A primeira é que a polarização de um condutor é devida a um deslocamento de cargas livres por todo o volume do condutor, não ocorrendo apenas uma polarização de suas moléculas. Portanto, há uma polarização macroscópica real do condutor na presença do canudo eletrizado próximo a ele, Figura 8.2.

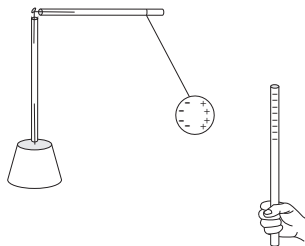


Figura 8.2: Canudo atritado polarizando e atraindo um disco de papel.

A segunda diferença é que esta polarização é bem mais intensa do que a polarização efetiva de um isolante na presença deste canudo eletrizado. Isto faz com que a força sobre um disco de papel devida a um canudo eletrizado seja muito maior do que a força sobre um disco de plástico tendo o mesmo peso e o mesmo tamanho que o disco de papel, estando à mesma distância do canudo eletrizado. Esta segunda diferença pode ser percebida comparando as Figuras 8.1 e 8.2. O fio de seda do pêndulo de papel está mais inclinado em relação à vertical do que o fio de seda do pêndulo de plástico. Nos dois casos existe

a mesma distância entre o canudo atritado e os pêndulos. Isto indica que a força sobre o papel condutor é maior do que a força sobre o plástico isolante. Novamente, há alguma força de origem não-eletrostática que impede que estas cargas polarizadas se afastem ainda mais entre si, ou seja, indo para o ar além do disco do papel. Esta força de origem não-eletrostática é que mantém as cargas polarizadas presas ao papel.

Se o disco de papel for aterrado enquanto estiver polarizado, as cargas do disco que estão mais afastadas do canudo eletrizado acabam sendo neutralizadas pelas cargas da Terra, de maneira análoga ao que foi visto na Figura 7.30. Este disco passa a ter uma carga elétrica resultante não nula, de sinal oposto à carga do canudo eletrizado. Ele sofre então uma força maior do canudo eletrizado do que a força exercida sobre o disco de papel polarizado, já que não há mais a repulsão que havia entre o canudo e as cargas de mesmo sinal que estavam na superfície do disco de papel mais afastada do canudo, Figura 8.3.

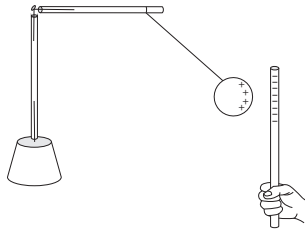


Figura 8.3: Disco de papel eletrizado sendo atraído por um canudo atritado.

Na Figura 8.4 comparamos estes três casos. Estamos supondo que em todas estas situações o canudo atritado está à mesma distância dos pêndulos elétricos. Em (a) temos a pequena atração sobre um disco de plástico polarizado exercida por um canudo eletrizado. Em (b) temos uma atração mais forte exercida sobre um disco condutor polarizado mais intensamente. Em (c) temos uma força ainda maior exercida sobre um disco condutor eletrizado.

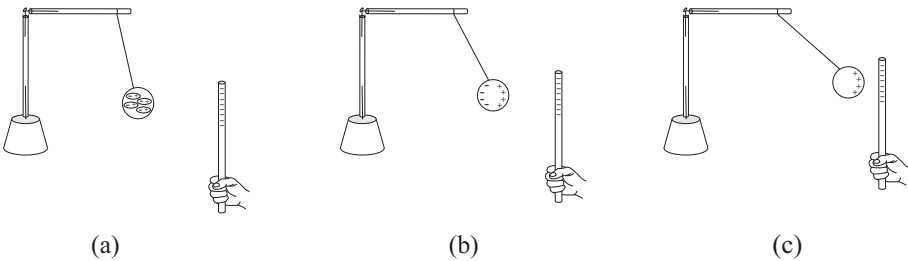


Figura 8.4: (a) Atração de isolante polarizado. (b) Atração de condutor polarizado. (c) Atração de condutor eletrizado. A força resultante cresce de (a) para (c), estando o canudo à mesma distância dos pêndulos elétricos.

A descrição microscópica do que ocorre com o pedacinho de papel (condutor)

apoiado sobre uma lâmina de isopor (isolante) quando aproximamos um canudo eletrizado na Experiência 7.32 está ilustrado na Figura 8.5.

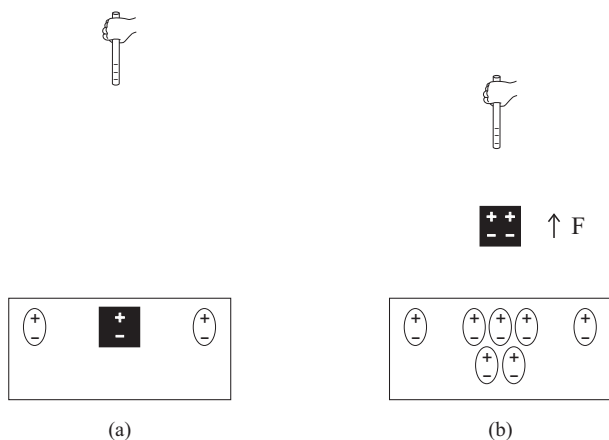


Figura 8.5: (a) Um papelzinho polarizado apoiado sobre uma lâmina de isopor polarizada na presença de um canudo eletrizado longe da superfície. (b) Quando o canudo se aproxima, aumentam as polarizações do papelzinho e da superfície. Isto pode gerar uma força eletrostática apontando para cima sobre o papelzinho, que é superior ao seu peso. Isto faz com que ele se desloque em direção ao canudo.

O papel condutor está representado pelo retângulo preto. O isopor isolante está representado pelo grande retângulo branco. Quando se coloca um canudo eletrizado acima do papelzinho, mas afastado dele, tanto o papelzinho quanto o isopor se polarizam, Figura 8.5 (a). Passa a haver uma força eletrostática de atração entre o canudo e o papelzinho. Mas como a força eletrostática é menor do que o peso do papelzinho, ele ainda não se desloca em direção ao canudo. Quando o canudo é mais aproximado do papelzinho, aumentam as polarizações do papelzinho e do isopor. Com isto aumenta a força eletrostática de atração. Quando a distância entre o canudo e o papelzinho é igual ou menor a um certo valor d_1 , a força eletrostática passa a superar o peso do papelzinho e ele se desloca em direção ao canudo, Figura 8.5 (b). A intensidade da força é indicada pelo tamanho da seta ao lado do papelzinho.

Já quando o papelzinho condutor está inicialmente apoiado sobre uma lâmina condutora (de metal ou de papel), os processos que ocorrem são diferentes. Isto está representado na Figura 8.6.

O papelzinho condutor está representado pelo pequeno retângulo preto, enquanto que a folha de papel condutora está representada pelo grande retângulo preto. Quando se coloca um canudo eletrizado acima do papelzinho, mas afastado dele, ocorre um deslocamento de cargas pelo solo. Com isto, tanto a superfície do papelzinho quanto a superfície da folha de papel ficam eletrizados com cargas de sinal oposto ao do canudo, Figura 8.6 (a). Passa a haver uma força de atração eletrostática entre o papelzinho e o canudo. Mas como a força

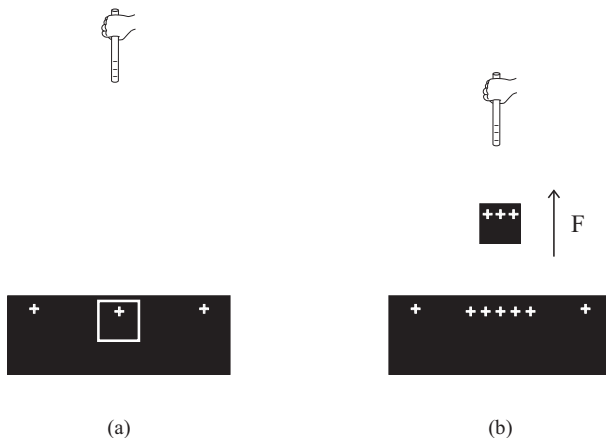


Figura 8.6: (a) Um papelzinho eletrizado apoiado sobre uma folha de papel eletrizada na presença de um canudo eletrizado longe da superfície. (b) Quando o canudo se aproxima, aumentam as eletrizações do papelzinho e da superfície, gerando uma força eletrostática superior ao peso do papelzinho. Isto faz com que ele se desloque em direção ao canudo.

eletrostática é menor do que o peso do papelzinho, ele ainda não se desloca em direção ao canudo. Quando o canudo é mais aproximado do papelzinho, aumentam as eletrizações do papelzinho e da folha de papel. Quando a distância entre o canudo e o papelzinho é igual ou menor a um certo valor d_2 , a força eletrostática passa a superar o peso do papelzinho e ele se desloca em direção ao canudo, Figura 8.6 (b). Esta distância d_2 é maior do que a distância d_1 do caso anterior, Figura 7.45.

Vamos agora supor que os papezinhos estejam se deslocando no ar, sendo atraídos pelo canudo atritado. Vamos comparar os casos em que um deles estava sobre uma superfície isolante e o outro estava sobre uma superfície condutora. Vamos supor que o canudo está à mesma distância das duas superfícies e que os papezinhos estejam à meio caminho entre as superfícies e o canudo. As intensidades das forças de atração são indicadas pelos tamanhos das setas ao lado dos papezinhos. Ela é menor no caso do papelzinho que estava sobre a superfície isolante do que no caso do papelzinho que estava sobre a superfície condutora. Isto pode ser visualizado comparando as Figuras 8.5 e 8.6, ver a Figura 8.7. A força do canudo sobre o papelzinho é maior no segundo caso do que no primeiro pelo fato de haver uma carga resultante no papelzinho de sinal oposto à do canudo, o que não havia primeiro caso. No segundo caso há também uma força de repulsão sobre o papelzinho exercida pela lâmina condutora eletrizada, já que tanto esta lâmina quanto o papelzinho possuem cargas de mesmo sinal.

Embora não se perceba facilmente na Experiência 2.1 que o papelzinho tenha ficado eletrizado ao deixar o contato com a mesa ou com o solo, isto pode ser

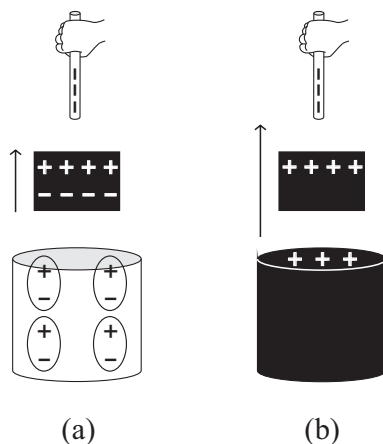


Figura 8.7: (a) Papelzinho polarizado que estava apoiado sobre uma superfície isolante sendo atraído por um canudo atritado. (b) Papelzinho eletrizado que estava apoiado sobre uma superfície condutora sendo atraído por um canudo atritado. Os tamanhos das setas indicam as intensidades das forças, supondo as mesmas distâncias nos dois casos.

comprovado com observações do tipo das Experiências 7.33 e 7.34. A ilustração do que está ocorrendo microscopicamente na Figura 7.45 aparece na Figura 8.7.

Não deixa de ser surpreendente para muitas pessoas o fato do papelzinho e da mesa na experiência mais antiga da eletricidade, algo do tipo da Experiência 2.1, se comportarem como condutores. Ainda mais surpreendente é o fato de em geral o papelzinho estar eletrizado enquanto se desloca em direção ao plástico ou âmbar atritados. Apesar destas surpresas, esta é a situação mais comum em que se observam as atrações eletrostáticas. Isto é, em geral se uma substância sólida ou líquida está sendo visivelmente atraída por um corpo eletrizado, deslocando-se em direção a ele, esta substância será um condutor. Caso a substância seja um isolante, a força resultante sobre ela será pequena usualmente, fazendo com que seja difícil observar seu deslocamento espacial. Além disso, como em geral esta substância condutora que está sendo atraída estava normalmente apoiada sobre uma outra substância condutora (como o solo, o corpo humano, uma mesa de madeira, uma folha de papel ou uma lâmina metálica), ela vai possuir uma carga resultante de sinal oposto à do corpo eletrizado enquanto estiver se deslocando em direção a ele.

O gerador eletrostático gotejante de Kelvin, Subseção 7.12.1, de certa forma é análogo às Experiências 7.32 a 7.34. A diferença é que se utilizam gotas de água em vez dos papezinhos.

Não estamos levando em conta aqui a influência de outros corpos próximos na experiência do efeito âmbar. Além disso, não estamos considerando o que aconteceria caso colocássemos uma placa condutora ou isolante entre o canudo atritado e os pequenos corpos leves abaixo dele. Também não estamos levando

em conta a influência do formato do suporte na força resultante atuando sobre o pedacinho de papel que está sendo atraído.

Estes fenômenos podem não ocorrer, ou podem acontecer apenas com uma intensidade bem reduzida, caso o canudo atritado seja umedecido pelo atrito com a mão, ou caso o ambiente esteja úmido. Como a água se comporta como condutora nestas experiências, ela pode ajudar a descarregar o canudo atritado tanto pela mão quanto pelo ar ambiente.

Ao entrar em contato com o canudo eletrizado, o pequeno corpo condutor pode receber uma carga de mesmo sinal que o canudo pelo mecanismo *ACR*. Ele então cairá depois de algum tempo não apenas por seu peso, mas também por ter adquirido uma carga resultante de mesmo sinal que o canudo, sendo então repellido eletricamente por ele. Este mecanismo não funciona tão bem para um corpo isolante que entra em contato com o canudo atritado. Após ser atraído e entrar em contato com o canudo atritado, o plástico acaba caindo depois de alguns segundos apenas devido ao seu peso e à perda de eletrização que ocorre naturalmente no canudo com a passagem do tempo. Esta perda de carga do canudo é devida a um pequeno poder condutor do ar seco.

Como vemos, é muito grande a quantidade de fenômenos e processos envolvidos na experiência do efeito âmbar, análoga à Experiência 2.1. Não é à toa que se levou tanto tempo para que se pudesse descrever em detalhes o que ocorria. E não estamos falando aqui de explicação. Afinal de contas, não explicamos o motivo de cargas de sinais opostos se atraírem, nem o de cargas iguais se repelirem, não explicamos os mecanismos responsáveis pela eletrização por atrito, não explicamos o motivo de alguns corpos se comportarem como condutores e outros como isolantes, não explicamos a origem das forças não-eletrostáticas que mantêm as cargas presas a condutores e isolantes carregados ou polarizados, não explicamos o motivo da força elétrica depender da distância, não explicamos o ordenamento da série triboelétrica ou os motivos pelos quais um corpo *A* fica negativo ao ser atritado contra um corpo *B* (em vez de ficar positivo ou de continuar neutro), etc.

De qualquer forma, temos hoje em dia um conhecimento razoável do que está ocorrendo nos fenômenos elétricos e um controle sobre os mecanismos envolvidos nestes processos. Isto representa um grande avanço no nosso domínio sobre a natureza e na nossa compreensão de grande parte dos fenômenos físicos.

A história da eletricidade é relativamente nova quando comparada com a astronomia, geometria ou mecânica. Por este motivo, ainda temos acesso aos textos de alguns dos principais cientistas envolvidos na descoberta dos fenômenos elétricos mais relevantes. É fascinante reproduzir suas experiências com materiais simples e baratos. Também é muito instrutivo ler os relatos de seus trabalhos, como eles reagiram às suas descobertas, o que os guiou, etc.

Nosso objetivo foi mostrar como certos fenômenos espetaculares da natureza foram descobertos por alguns dos cientistas mais importantes na história inicial da eletricidade. Também tentamos mostrar como reproduzir algumas de suas experiências mais relevantes utilizando materiais facilmente acessíveis. Com este livro esperamos auxiliar outras pessoas a seguir os caminhos fascinantes da ciência. Mãos à obra!

Apêndice A

Definições

Apresentamos aqui as definições de alguns termos como usados neste livro:¹

Âmbar - [Do árabe *anbar*.] Resina fóssil, proveniente de uma espécie extinta de pinheiro do período terciário, sólida, amarelo-pálida ou acastanhada, transparente ou opaca, utilizada na fabricação de vários objetos; âmbar amarelo, alambre, sucino: *um colar de âmbar; uma piteira de âmbar*. [Plural: *âmbares*.]

Azeviche - [Do árabe *az-zabij*.] 1. Variedade compacta de linhito, usada em joalheria; gagata. 2. *Figuradamente*: Coisa muito negra.

Categute - [Do inglês *catgut*.] Fio de origem animal, feito em geral de tripa de carneiro, empregado em cirurgia, para suturas.

Copal - [Do náuatle *kopalli*, 'resina'.] Diz-se de várias resinas duras e vítreas que se extraem de certas árvores das regiões tropicais e se empregam na preparação de vernizes e lacas.

Flint-glass - [Inglês] Vidro com base de chumbo, de poder fortemente dispersivo e refrigerante.

Laca - [Do sânscrito *lakxa*, 'cem mil', através do árabe *lakk*.] Resina vermelha extraída de várias plantas; goma-laca.

Náilon - [Do inglês *nylon*, nome comercial.] Fibra têxtil sintética, derivada de resina poliamida, e que se caracteriza por ser imputrescível, elástica, e de notável resistência aos agentes atmosféricos.

Poliamida - Polímero que entra na produção de fibras sintéticas muito úteis em suturas cirúrgicas, na indústria têxtil, em objetos domésticos, etc.

Poliéster - Grupo de resinas sintéticas contendo ésteres em sua cadeia principal, usado em tintas e vernizes, cobertura de superfícies e como fibra têxtil.

Resina - [Do grego *rhetíne*, pelo latim *resina*.] Secreção viscosa que exsuda do caule e dos outros órgãos de certas plantas, e que contém substâncias odoríferas anti-sépticas, etc., as quais cicatrizam rapidamente qualquer ferida em tais órgãos assumindo aspecto vítreo.

¹Obtidas de [Fer75] e de algumas outras fontes.

Apêndice B

Stephen Gray e a Descoberta da Condução Elétrica

Um dos aspectos mais importantes de toda a eletricidade é o fato de que existem dois conjuntos de materiais com propriedades bem distintas, os *isolantes* e os *condutores*. No caso dos isolantes, as cargas geradas por atrito ficam restritas à região da fricção, não se deslocando ao longo do material. Um isolante carregado não é descarregado ao entrar em contato com a Terra. Nos condutores, por outro lado, as cargas geradas por atrito tendem a se espalhar por toda sua superfície. Caso um condutor carregado entre em contato com a Terra, ele se descarrega, perdendo sua carga elétrica para a Terra.

A descoberta destes dois tipos de materiais e de suas propriedades principais ocorreu bem tardiamente na história da eletricidade. Stephen Gray (1666-1736) fez esta grande descoberta em 1729, publicando um trabalho fundamental sobre o tema em 1731.¹ Apresentamos aqui alguns aspectos de sua vida e obra.² Ele publicou alguns dos trabalhos mais importantes na história inicial da eletricidade.³

Gray nasceu em 1666 em Canterbury, Inglaterra. Não existe nenhuma pintura ou imagem conhecida de Gray. Seu pai e irmão eram tintureiros e ele seguiu esta profissão, como foi estabelecido por Heilbron em sua biografia de Gray.⁴ Não chegou a cursar uma universidade. Foi um cientista amador dando contribuições principalmente na astronomia e na eletricidade. Provavelmente nunca se casou. Aos 53 anos ele passou a viver como pensionista na Charterhouse, uma instituição de caridade mantida por alguns aristocratas para atender a alguns capitães do mar aposentados e a algumas outras pessoas indicadas pelos

¹[Grah].

²[CM79], [Hei81c], [Hei99, págs. 242-249], [CC00] e [BC09].

³[Chi54], [Grab], [Grah], [Grad], [Graf], [Grag], [Grae], [Grai], [Grac] e [Graa].

⁴[Hei81c].

aristocratas. As pessoas que lá viviam tinham uma vida simples, com pouco conforto e sem luxos, embora não precisassem temer morrer de fome. Viveu lá até falecer aos 70 anos.

Ele pode ter estudado com seu amigo John Flamsteed (1646-1719), o astrônomo real. Em 1707 ele foi trazido a Cambridge por Roger Cotes (1682-1716). Foi eleito um membro da *Royal Society* em 1732 e foi o primeiro a receber a medalha Copley desta Sociedade por mérito científico, devido às suas pesquisas em eletricidade.

Seu interesse inicial pela eletricidade foi despertado por alguns artigos de Francis Hauksbee (nascido ao redor de 1666 e morto em 1713) publicados no periódico *Philosophical Transactions* de 1704 a 1707. Nestes trabalhos eram descritas experiências com um tubo de vidro atritado que, além de atrair corpos leves, produzia luzes. Em 1708 Gray envia uma carta ao secretário da *Royal Society*, Hans Sloane (1660-1753), descrevendo diversas experiências sobre eletricidade. Esta carta só foi publicada em 1954.⁵ Entre outras coisas, Gray realiza experiências análogas à de Guericke nas quais uma penugem solta no ar é atraída por um tubo de vidro atritado, toca nele e passa a ser repelida por ele, ver a Experiência 4.4. Embora Gray não cite Guericke em seus trabalhos, ele pode ter conhecido suas experiências, mas não há certeza quanto a isto.⁶ Em 1720 ele publicou um artigo descrevendo novas experiências sobre eletricidade.⁷ Neste trabalho ele descreve um tipo de pêndulo elétrico e descobre novos materiais elétricos, isto é, que atraem corpos leves ao serem atritados ou que, ao serem atritados, são atraídos pela madeira ou pelo dedo, ver a Experiência 3.10.

B.1 O Gerador Elétrico de Gray

Suas principais descobertas ocorreram entre 1729 e 1736, com a idade entre 63 e 70 anos. Seu artigo principal contendo sua descoberta dos condutores e isolantes foi publicado em 1731.⁸ Até então ninguém tinha conseguido com que os metais atraíssem corpos leves, seja atritando-os, aquecendo-os ou lhes dando pancadas. Este foi o feito inicial de Gray, ou seja, conseguir comunicar a eletricidade (capacidade de atrair corpos leves) a uma grande variedade de corpos que até então ninguém tinha conseguido eletrizar. Embora Gray não tenha conseguido fazer com que os metais passassem a atrair corpos leves por atrito, mostrou que é possível fazer com que os metais atraíam corpos leves ao ligar os metais a tubos de flint-glass atritados, ou apenas aproximando estes tubos dos metais.

Seu artigo começa com as seguintes palavras:⁹

No ano de 1729 comuniquei ao Dr. Desaguliers e a alguns outros senhores uma descoberta que havia feito recentemente mostrando que

⁵[Chi54].

⁶[Chi54, pág. 38, Nota 6].

⁷[Grab].

⁸[Grah].

⁹[Grah, págs. 18-19].

a virtude elétrica do tubo de vidro pode ser transmitida a quaisquer outros corpos, de forma a dar-lhes a mesma propriedade de atrair e repelir corpos leves, assim como faz o tubo quando excitado pelo atrito; [mostrando ainda] que esta virtude atrativa podia ser transmitida a corpos que estavam muitos pés distantes do tubo.

O tubo oco de vidro que ele usou era de flint-glass, isto é, vidro à base de chumbo. Ele o atritava com a mão, como menciona em seu artigo de 1707-1708:¹⁰

O tubo de vidro utilizado tinha aproximadamente o tamanho daquele utilizado pelo Sr. Hauksbee, mas em vez de atritá-lo com papel, como aconselhado por ele, encontrei que funciona melhor comigo quando o atritei apenas com minha mão nua.

Suas mãos também seguravam o tubo atritado durante as experiências. Como seu tubo de vidro não era descarregado durante seu contato com a mão, isto significa que ele funcionava como um isolante muito bom, contrariamente ao que acontece com a maioria dos vidros que se encontra em casa ou no comércio nos dias de hoje.

É normal que nossas mãos fiquem suadas com o calor produzido durante o atrito. Com isto o vidro pode ficar úmido neste processo, diminuindo suas propriedades isolantes. O vidro do Gray era um longo tubo com 1 m de comprimento. Este grande tamanho pode ter sido útil para manter suas propriedades isolantes. Talvez ela tenha atritado o tubo apenas em uma extremidade, segurando-o pela outra extremidade. Com isto haveria uma grande quantidade de vidro seco entre estas duas regiões, fazendo com que ele pudesse ter um grau satisfatório de isolamento elétrico.

Mas seu tubo não era apenas um excelente isolante. Veremos que ele foi bem sucedido em transmitir a propriedade atrativa para cordas que tinham um comprimento enorme, de dezenas ou centenas de metros. O vidro tocava ou ficava próximo de uma extremidade da corda, com a outra extremidade da corda atraindo lâminas metálicas. Isto significa que ele foi capaz de gerar uma grande polarização da corda devido a uma grande quantidade de carga acumulada em seu tubo de vidro. Ou seja, seu tubo de vidro tinha a capacidade de adquirir uma quantidade muito grande de carga durante o atrito com sua mão, sendo ainda capaz de preservá-la durante um longo tempo sem que fosse descarregado para a Terra apesar de estar sendo seguro por sua mão.

No artigo de 1731 ele descreveu as dimensões de seu tubo de vidro:¹¹

Antes de passar para as experiências, pode ser necessário dar uma descrição do tubo [de flint-glass]: Seu comprimento é de três pés e cinco polegadas [1 m], e de diâmetro [externo possui] aproximadamente uma polegada e dois décimos [3 cm]. Apresento as dimensões

¹⁰[Chi54, págs. 34 e 37].

¹¹[Grah, pág. 20].

médias, sendo o tubo mais largo em cada extremidade do que no meio, o furo sendo de aproximadamente uma polegada [2,54 cm]. Em cada extremidade encaixei uma rolha para deixar a poeira de fora quando o tubo não estava sendo usado.

Esta última precaução deve ter sido motivada por algumas experiências de Hauksbee que haviam mostrado que alguns contaminantes dentro do tubo podiam reduzir sua eletricidade.¹²

Este tudo de vidro oco atritado em sua mão foi seu gerador elétrico padrão em todas as suas experiências.

B.2 A Descoberta da Eletrização por Comunicação

Vem então a grande descoberta de Gray, realizada em fevereiro de 1729, nossa ênfase em itálico:¹³

A primeira experiência que fiz, foi ver se podia encontrar qualquer diferença na sua atração, quando o tubo [atritado] estava vedado nas duas extremidades pelas rolhas, ou quando deixado aberto, mas não pude perceber qualquer diferença sensível. Mas ao manter uma penugem defronte da extremidade superior do tubo, descobri que ela ia para a rolha, sendo atraída e repelida por ela, assim como era [atraída e repelida] pelo tubo quando ele havia sido excitado pelo atrito. Mantive então a pena defronte da extremidade plana da rolha, que atraía e repelia muitas vezes; *fiquei muito surpreso com isto, e concluí que certamente uma virtude atrativa havia sido comunicada à rolha pelo tubo excitado.*

Ou seja, ele havia atritado apenas o tubo de vidro, mas não a rolha. Por outro lado, observou que a pena era atraída e repelida pela rolha que estava em contato com o tubo. Fez um teste e observou que de fato era isto que acontecia, já que a rolha atraía não apenas pela sua superfície lateral, mas também por sua face plana que não havia sido atritada e nem tocava no vidro.

Como Gray não apresenta nenhuma figura em seus artigos, não é claro saber exatamente qual tipo de experiência realizou aqui. Vemos três possibilidades.

(a) O cabo da penugem pode ter sido segurado pela sua mão, funcionando como um isolante. Ele então teria observado a penugem se curvando e sendo

¹²[Haub] e [Hei99, pág. 245].

¹³Apresentamos aqui o original em inglês, [Grah, pág. 20]: “The first experiment I made, was to see if I could find any difference in its attraction, when the tube was stopped at both ends by the corks, or when left open, but could perceive no sensible difference; but upon holding a down-feather over against the upper end of the tube, I found that it would go to the cork, being attracted and repelled by it, as by the tube when it had been excited by rubbing. I then held the feather over against the flat end of the cork, which attracted and repelled many times together; at which I was much surprized, and concluded that there was certainly an attractive vertue communicated to the cork by the excited tube.”

atraída e repelida pela rolha, tocando alternadamente nela e em sua mão. A penugem funcionaria como um condutor, sendo carregada pelo método *ACR* e descarregada ao tocar em sua mão, sendo este processo repetido algumas vezes, Figura B.1.

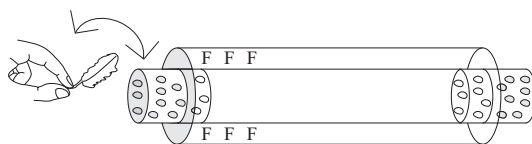


Figura B.1: Primeira possibilidade de como Gray fez sua observação crucial.

(b) Pode ser que a penugem estivesse amarrada em um fio de seda isolante, se deslocando como um todo de maneira oscilante em relação à rolha. Isto é, ela seria carregada na rolha e descarregada ao tocar em algum condutor próximo da rolha, como sua mão, algum objeto de madeira ou a parede, Figura B.2. O verbo que ele usa é *hold*, que pode ser traduzido por segurar, pegar ou agarrar, dando a impressão que ele segurava a pena diretamente com a mão. Por outro lado, como ele diz que a penugem era atraída e repelida diversas vezes, isto dá a impressão que a penugem estava entre a rolha e um condutor do outro lado (talvez uma das mãos do Gray, uma parede ou algum outro corpo). Quando a rolha adquiriu eletricidade ou se polarizou eletricamente, ela passou a atrair a penugem e, depois da penugem tocar nela, passou a repelí-la pelo método *ACR*. A penugem seria então descarregada no outro condutor (ou seja, em uma das mãos do Gray, em uma parede ou em algum outro corpo), voltando a ser atraída pela rolha e assim sucessivamente. Algo análogo como a Experiência 4.15. Como vimos na Seção 4.6, o próprio Gray já havia usado em 1720 um pêndulo elétrico com uma penugem amarrada na ponta de um fio de seda.¹⁴

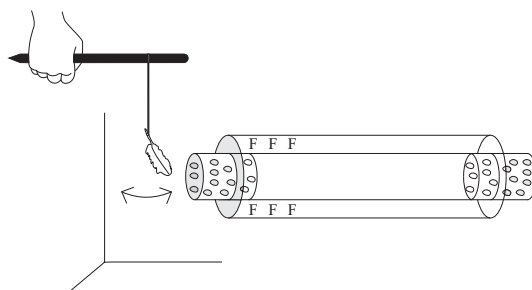


Figura B.2: Segunda possibilidade de como Gray fez sua observação crucial. A penugem estaria neste caso presa a um fio de seda isolante.

(c) A terceira possibilidade é que esta experiência tenha sido análoga à que realizou em 1708 e que descrevemos na Seção 4.2. Isto é, ele teria solto uma

¹⁴[Grab].

penugem no ar, ela teria sido então atraída pela rolha em sua ponta, teria sido eletrizada pelo método *ACR*, passando então a ser repelida pela rolha. Se a penugem se aproximasse de algum outro condutor que estivesse próximo (uma das mãos de Gray, uma parede ou algum outro corpo), ela seria atraída por este corpo, perderia sua carga ao entrar em contato com este corpo, sendo então novamente atraída pela rolha. Este processo poderia continuar por várias vezes, Figura B.3.

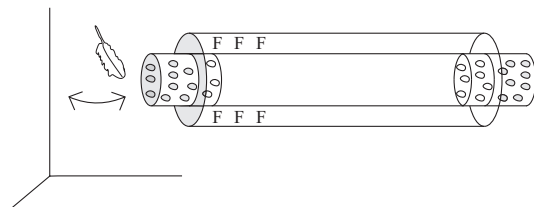


Figura B.3: Terceira possibilidade de como Gray fez sua observação crucial. A penugem solta no ar ficaria oscilando entre a rolha e um outro corpo em suas proximidades.

Dentre estas três possibilidades, a terceira opção nos parece a mais provável. No trecho do trabalho de Gray que citamos anteriormente, “mas ao manter uma penugem (but upon holding a down-feather),” o verbo *hold* foi traduzido por *manter*, para permitir as três interpretações. Este verbo já havia sido utilizado por Gray na sua segunda experiência de 1708 discutida na Seção 4.2, pág. 71. Naquele caso, depois que a penugem havia sido solta no ar e foi atraída pelo tubo de vidro atritado, se ela fosse “mantida” (if it be held) próxima de uma parede, de uma borda de mesa ou de algo semelhante, ela ficaria oscilando por algum tempo entre o vidro e este objeto próximo. Acreditamos que esta experiência de 1729 tenha sido análoga àquela descrita pela Figura 4.11. A diferença é que agora a penugem estaria oscilando entre a rolha e um corpo próximo, estando a rolha presa a um tubo atritado de vidro, embora a própria rolha não tenha sido atritada.

Também não é claro se o tubo de vidro está na vertical ou na horizontal, já que mesmo neste último caso se pode falar da parte superior (mais afastada da Terra) e inferior (mais próxima da Terra) do tubo. Pode ser também que em uma parte da experiência o tubo estivesse na vertical, enquanto que em outra parte estivesse na horizontal.

Embora esta descoberta tenha sido casual (palavras do Gray: “*fiquei muito surpreso com isto*”), Gray já esperava que a eletricidade pudesse ser transmitida a outros corpos de alguma maneira. Ele havia feito experiências em que observara luzes saindo de corpos atritados e indo no sentido de outros corpos que não haviam sido atritados, no momento em que estes corpos não atritados eram aproximados dos corpos atritados. Logo antes de descrever a experiência mencionada anteriormente, Gray afirmou o seguinte neste artigo de 1731:¹⁵

¹⁵[Grah, págs. 19-20].

Então resolvi obter um grande tubo de flint-glass, para ver se podia fazer qualquer descoberta adicional com ele, tendo me lembrado de uma suspeita que havia tido há vários anos, de que da mesma forma que o tubo comunicava uma luz para corpos, quando ele havia sido atritado no escuro, se ele não poderia ao mesmo tempo comunicar uma eletricidade para eles, embora até agora nunca tivesse tentado a experiência, não imaginando que o tubo pudesse ter uma influência tão grande e maravilhosa, de modo a fazê-los atrair com tanta força, ou que a atração pudesse ser levada para distâncias tão vastas, como será visto na sequência deste discurso.

Esta é a primeira grande descoberta descrita neste artigo de 1731, a saber, como comunicar a eletricidade a um outro corpo (neste caso a rolha) sem ter de atritá-lo. A importância desta descoberta é que a rolha, assim como os metais, se comporta como um condutor, como vimos nas Subseções 6.3.1 e 6.3.2. Logo, não é possível eletrizá-la ao segurá-la com a mão e friccioná-la contra algum outro corpo, já que qualquer carga que ela adquirisse pelo atrito seria perdida ao solo pela condução da mão e do corpo humano. Foi por este motivo que ninguém havia conseguido até então fazer com que rolhas, metais e diversas outras substâncias atritadas tivessem o poder de atrair corpos leves, como é feito facilmente por um pedaço de âmbar atritado. Foi o detalhe da penugem ser atraída pela rolha que chamou a atenção de Gray, indicando-lhe que de alguma maneira havia conseguido transmitir a virtude elétrica para a rolha. Ou seja, Gray conseguiu transmitir a virtude elétrica para materiais condutores.

A interpretação moderna ou a descrição microscópica da “virtude atrativa” que Gray conseguiu transmitir à rolha, é a de que ela ficou polarizada, assim como na Experiência 7.9. Isto está ilustrado na Figura B.4.

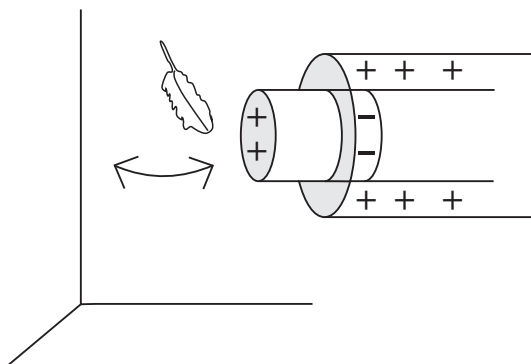


Figura B.4: Polarização da rolha condutora devida ao vidro atritado. A pena condutora é atraída pelas cargas espalhadas pela superfície externa da rolha.

Isto é, o tubo de vidro isolante ficou carregado por atrito. A rolha condutora fixada ao tubo atritado ficou polarizada. Sua superfície interna ficou com uma carga de sinal oposto ao do tubo de vidro. Sua superfície externa adquiriu uma

carga de mesmo sinal que a do vidro atritado. Foram estas cargas espalhadas pela superfície externa da rolha que atraíram uma penugem próxima.

B.3 Explorando a Descoberta e Despertando a Eletricidade Escondida dos Metais

Depois desta descoberta casual, Gray continua suas experiências.¹⁶ Ele começa a analisar sistematicamente para quais corpos consegue comunicar a “virtude elétrica,” e até que distância consegue alcançar. Ele pega uma bola furada de marfim com 3,3 cm de diâmetro e a espeta em uma vareta de madeira com 10 cm de comprimento, com a outra extremidade da vareta presa na rolha. Ao atritar o tubo de vidro observou que a bola atraía e repelia a pena com mais vigor do que a rolha havia feito, Figura B.5. Ampliou o comprimento das varetas entre 20 e 60 cm, com o efeito da atração continuando o mesmo. Substituiu a vareta de madeira por fios ou arames de ferro e de latão, observando os mesmos efeitos.

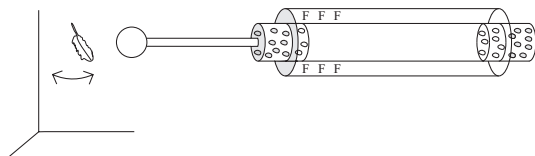


Figura B.5: Início das experiências sistemáticas de Gray.

Usou depois arames de até 90 cm. Mas aí começaram a surgir muitas vibrações que dificultavam as observações. Suspendeu então uma corda amarrada no tubo, dessas usadas para enfardar ou para costurar sacos,¹⁷ com a bola de marfim na extremidade inferior da corda. Ao atritar o tubo observava que a bola atraía e repelia uma pequena lâmina ou folha de latão [*leaf-brass* no original] colocada abaixo dela sobre a mesa. O mesmo ocorria com uma bola de cortiça e com outra de chumbo de 570 g presas à corda, Figura B.6 (a). Na Figura B.6 (b) apresentamos uma representação qualitativa das cargas no tubo de vidro isolante, e da polarização da corda juntamente com a bola de marfim, de cortiça ou de chumbo. Tanto a corda quanto estas bolas são materiais condutores.

Prosseguindo desta maneira, conseguiu comunicar a eletricidade do tubo atritado para diversos corpos ligados ao tubo por fios, por arames ou por cordas. Alguns dos corpos que conseguiu eletrizar: Moedas, atizadores de ferro, chaleiras de cobre vazias ou cheias de água, uma caneca de prata, etc. Em suas palavras,¹⁸ todos estes metais “ficaram altamente elétricos, atraindo a lâmina de latão até a altura de várias polegadas.” Ou seja, finalmente alguém teve sucesso em fazer com que metais atraíssem corpos leves, coisa que ninguém havia conseguido

¹⁶[Grah].

¹⁷*Packthread* no original, que também pode significar barbante de cânhamo.

¹⁸[Grah, pág. 22].

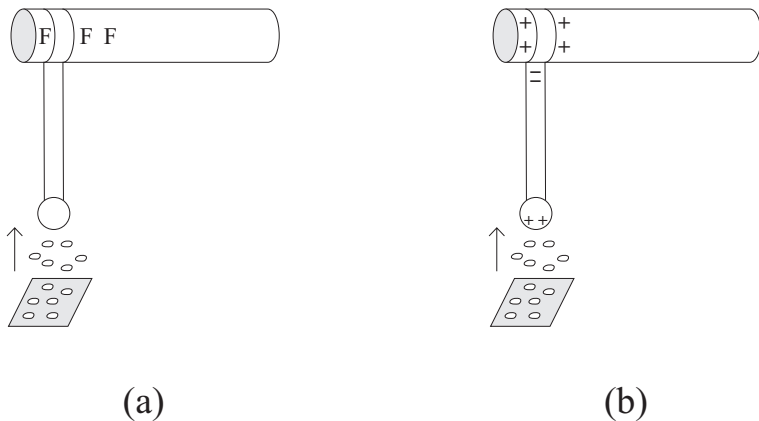


Figura B.6: (a) Ao atritar o tubo de vidro, Gray observava que corpos presos à extremidade de uma corda ligada ao tubo atraíam corpos leves. (b) Representação das cargas no tubo de vidro e da polarização elétrica da corda juntamente com a bola presa a ela.

em 2.000 anos! Como afirmou Heilbron:¹⁹ “[...] e desta forma Gray conseguiu finalmente despertar a eletricidade escondida [nos metais].”

B.4 Gray Descobre os Condutores e Isolantes

Gray continuou suas experiências conseguindo eletrizar pederneira, pedra-ímã, várias substâncias vegetais, etc. A lâmina de latão chegava a ser atraída até por 10 cm de distância. Depois voltou a trabalhar com varetas horizontais presas ao tubo de vidro. Fincou varas de pescar com 80 cm no tubo e elas também transmitiram a eletricidade, fossem elas ocas ou maciças. Usando varetas e varas de pescar, com uma bola de cortiça na ponta, chegou a 5,5 m de comprimento, incluindo o tubo, ainda assim obtendo sucesso. Em maio de 1729 continuou suas experiências, chegando agora a um comprimento de 7,3 m de madeira enfiada no tubo. Ainda assim a bola de cortiça na ponta da madeira atraía a lâmina de latão que estava abaixo dela quando o tubo de vidro era atritado. Chegou a 9,7 m, incluindo o tubo. Mas aí novamente ocorriam muitas vibrações quando atritava o tubo. Passou então a usar de novo uma bola de marfim ou de cortiça presa na extremidade inferior de uma corda presa ao tubo. Ao atritar o vidro, a bola atraía uma lâmina de latão mesmo com uma corda de 8 m, com Gray no alto de uma sacada ou de um balcão. Passou então a combinar uma longa madeira horizontal presa ao tubo, com uma corda vertical na ponta da madeira, tendo a corda uma bola de marfim na ponta. Era como se fosse uma grande vara de pescar. Inicialmente usou uma madeira de 5,5 m e uma corda de 10,3 m. Ao atritar o vidro, observava-se que a bola atraía uma lâmina de latão colocada

¹⁹[Hei99, pág. 246].

abaixo dela.

Em seguida tentou ampliar o alcance horizontal usando apenas corda. Para isto pegou uma corda com um laço em cada extremidade. Esta primeira corda ficou na vertical, com sua extremidade superior presa a um gancho que estava fincado em uma viga no teto. Uma segunda corda passou dentro do laço inferior da primeira corda e foi amarrada ao tubo. Na outra extremidade desta segunda corda estava fixada a bola de marfim. Se seguimos esta segunda corda da bola até o tubo, vem que ela fica na vertical entre a bola e o laço inferior da primeira corda, e fica na horizontal entre este laço e o tubo de vidro. Abaixo da bola ficava a lâmina de latão. Neste caso, ao atritar o tubo, Gray não conseguiu observar o menor sinal de atração da lâmina de latão pela bola, Figura B.7 (a).

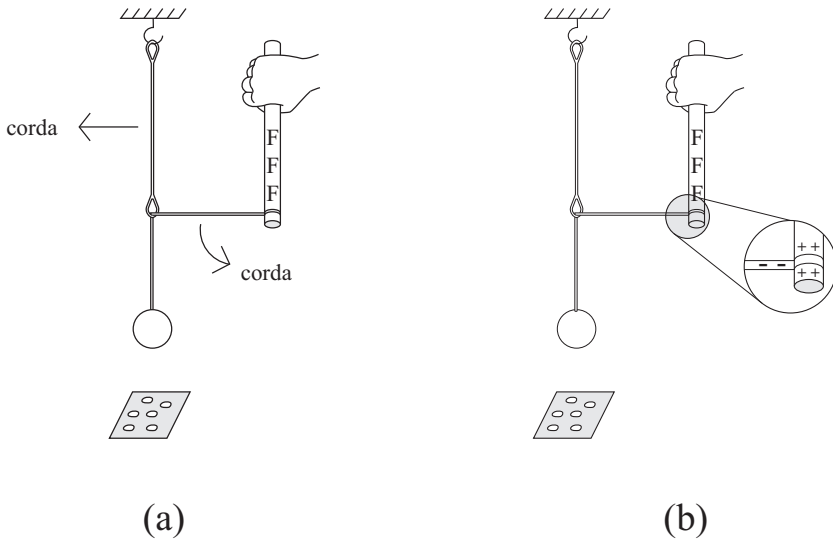


Figura B.7: (a) Quando o tubo de vidro foi atritado, a bola de marfim não atraiu lâminas metálicas. A bola estava presa ao tubo através de uma corda, sendo que esta corda estava apoiada por uma outra corda presa ao teto. (b) Representação qualitativa das cargas da letra (a).

Ele então afirma:²⁰

A partir disto concluí, que quando a virtude elétrica veio [do tubo] até o laço que estava suspenso na viga, ela [a virtude elétrica] subiu para esta mesma viga; de tal forma que nenhuma parte dela, ou ao menos muito pouco dela, desceu até a bola, sendo que isto foi confirmado depois, como aparecerá pelas experiências que serão mencionadas a seguir.

De acordo com a interpretação moderna desta experiência, inicialmente o tubo de vidro eletrizado ocasiona uma polarização da corda condutora presa ao

²⁰[Grah, pág. 25].

tubo. Só que neste caso a corda presa ao vidro está ligada à Terra por uma outra corda condutora. A corda vertical ligada ao teto funciona como um aterramento da corda presa ao vidro, de forma análoga ao que foi visto na Figura 7.30. Ou seja, a extremidade da corda em contato com o vidro fica com uma carga de sinal oposto à carga do vidro atritado. As cargas opostas que ficaram na extremidade da bola na Figura B.6 (b), são agora espalhadas por toda a superfície da Terra devido ao aterramento da corda pelo condutor vertical ligando-a ao teto. Na Figura B.7 (b) temos uma descrição qualitativa desta experiência em termos das cargas distribuídas no vidro e na corda. Como neste caso não há uma carga elétrica resultante na bola, sendo que a bola também não fica polarizada, vem que a bola não atrai as lâminas metálicas abaixo dela.

Em junho de 1729 Gray foi mostrar suas experiências para seu amigo Granville Wheler (1701-1770). Gray estava com um tubo de vidro de 28 cm de comprimento e 2 cm de diâmetro. Amarraram a corda no tubo e de uma janela a dependuraram verticalmente com uma bola na ponta. Abaixo da bola ficava a lâmina de latão. Ao atritar o tubo, conseguiam com que a bola atraísse a lâmina de latão com cordas de 4,9 até 10,4 m de comprimento.

Gray continua seu relato e então descreve a grande descoberta:²¹

Como não tínhamos aqui alturas maiores, o Sr. Wheler quis verificar se não poderíamos transportar a virtude elétrica horizontalmente. Contei-lhe então da tentativa que havia feito com este objetivo, mas sem sucesso, informando-lhe do método e dos materiais usados, como mencionado acima. Ele [Wheler] propôs uma linha de seda para suportar a linha [de comunicação], através da qual passaria a virtude elétrica. Eu lhe disse que assim poderia funcionar melhor devido ao seu tamanho pequeno [isto é, devido à pouca espessura do fio de seda em comparação com a espessura maior da corda]; de tal forma que haveria menos virtude [elétrica] levada da linha de comunicação, com o que, juntamente com o método apropriado planejado pelo Sr. Wheler, e com o grande esforço que ele próprio empregou, e o auxílio de seus empregados, tivemos sucesso muito além de nossa expectativa.

A primeira experiência foi feita em 2 de julho de 1729 na galeria atapetada, ao redor das dez horas da manhã. Aproximadamente a quatro pés [1,20 m] da extremidade da galeria havia uma linha cruzada que foi fixada por suas extremidades em cada lado da galeria por dois pregos; a parte central da linha era de seda, e o restante nas extremidades era de corda. Então a linha na qual foi dependurada a bola de marfim, e pela qual a virtude elétrica seria transportada até ela a partir do tubo, tendo um comprimento de oitenta pés e meio [24,5 m], foi colocada sobre a linha de seda cruzada, de tal maneira que a bola ficasse dependurada aproximadamente a nove pés [2,7 m] abaixo dela. Então a outra extremidade da linha [de

²¹[Grah, págs. 26-27].

comunicação] foi suspensa por um laço no tubo de vidro, e a lâmina de latão colocada sob a bola em cima de um pedaço de papel branco. Ao atritar o tubo, a bola atraía a lâmina de latão, e a mantinha suspensa nela por algum tempo.

Um esquema desta experiência encontra-se na Figura B.8 (a). Temos uma corda presa por uma extremidade a um tubo de vidro e com uma bola de marfim na outra extremidade. Abaixo da bola estão as lâminas de latão. Esta corda tem uma parte horizontal e uma parte vertical, sendo que na junção destas duas partes ela está apoiada sobre uma linha de seda esticada. Ao atritar o vidro, Gray observou que a bola de marfim atraía a lâmina de latão sob ela, ao contrário do que aconteceu na Figura B.7 quando a corda presa ao vidro era sustentada por uma outra corda presa ao teto.

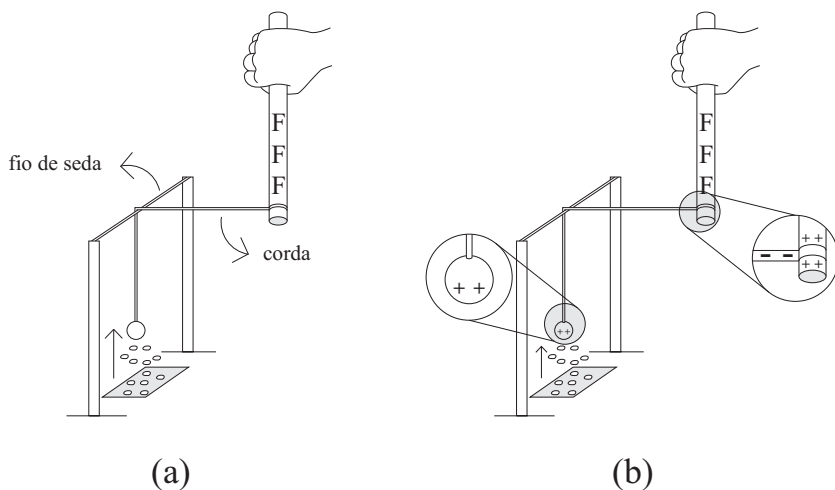


Figura B.8: (a) Quando a corda presa ao tubo de vidro atritado estava apoiada por uma linha de seda, Gray conseguia atrair corpos leves. (b) Representação qualitativa das cargas na letra (a).

Na Figura B.8 (b) temos uma representação qualitativa das cargas nesta experiência. Agora a corda está apoiada por um isolante, o fio de seda. Não há aterramento neste caso. A situação é como aquela da Figura B.6 (b). Ou seja, o material condutor (composto pela corda e pela bola de marfim) fica polarizado devido à influência das cargas do tubo de vidro eletrizado. As cargas negativas na extremidade da corda presa ao tubo são contrabalançadas pelas cargas positivas na bola. Estas cargas da bola de marfim atraem as lâminas metálicas abaixo dela.

Esta é a descoberta fundamental de condutores (como a rocha, a bola de marfim, a madeira, a corda, os fios metálicos) e isolantes (o fio de seda neste caso). Gray podia comunicar a virtude elétrica aos condutores através do contato com um tubo atritado, enquanto que o fio de seda não permitia a passagem

e dissipação da virtude elétrica para a Terra. Ao longo do artigo Gray vai descrever outro isolante, isto é, material que se comporta como o fio de seda. Este outro isolante é a crina de cavalo.²² Em artigos publicados no mesmo ano Gray menciona ainda outros isolantes que utilizou, a saber, resina endurecida e vidro aquecido previamente.²³ Ele fazia bolachas ou tabletes de resina para neles apoiar os corpos aos quais queria comunicar o eflúvio elétrico. Em um artigo de 1735 ele descreve também bolachas ou tabletes de cera de abelha, de enxofre e de goma-laca que usava como isolantes (ou, como dizia, *corpos elétricos*).²⁴

Antes de continuar este relato, é importante lembrar da questão de nomenclatura discutida na Seção 8.1. Isto é, a maior parte das substâncias que Gilbert classificava como *elétricas* são chamadas hoje em dia de *isolantes*. Já as substâncias chamadas de *não-elétricas* são denominadas hoje em dia de *condutoras*.

Uma representação descrevendo uma experiência como esta de Gray aparece na Figura B.9.²⁵



Figura B.9: Gray atritando com a mão seu tubo de vidro com 1 m de comprimento. A corda presa ao tubo está apoiada por fios de seda isolantes. Uma bola de marfim presa na outra extremidade da corda e suspensa no ar atrai pequenas lâminas de latão que estão no solo abaixo da bola. Se a corda presa ao tubo estiver apoiada por outras cordas, a bola de marfim deixará de atrair as lâminas.

Esta Figura mostra Gray e seu amigo Wheeler. Gray está com seu tubo de vidro de aproximadamente 1 m de comprimento, segurando e atritando com a mão. Preso ao tubo está uma corda com uma bola de marfim na outra extremidade, bola esta próxima ao solo. Abaixo da bola estariam lâminas metálicas. A corda presa ao tubo de vidro está apoiada sobre outras cordas

²²[Grah, pág. 36].

²³[Grad, pág. 228] e [Grag, págs. 399 e 406].

²⁴[Grae, págs. 18 e 20].

²⁵[Fig67, Vol. 1, Figura 227, pág. 441], [Fig85, pág. 321], [Bor] e [FM91, pág. 88].

cruzadas. Quando estas cordas cruzadas são condutoras, a bola não atrai as lâminas. Por outro lado, quando estas cordas cruzadas são feitas de material isolante como fios de seda, a bola atrai as lâminas metálicas quando Gray atrita o tubo de vidro.

Uma representação da época descrevendo uma experiência como esta de Gray aparece na Figura B.10.²⁶

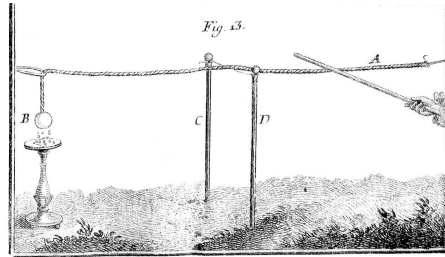


Figura B.10: Um tubo de vidro atritado ao tocar ou se aproximar da corda horizontal faz com que a bola de marfim atraia pequenas lâminas de latão. A corda está apoiada ou presa por fios de seda isolantes.

Uma representação interessante da experiência de Gray aparece no livro de Doppelmayr,²⁷ Figura B.11.

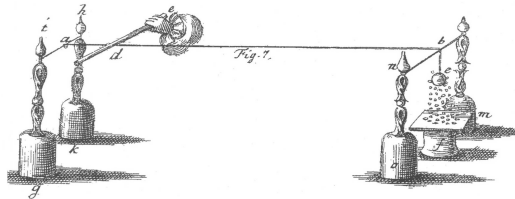


Figura B.11: Um tubo de vidro atritado ao tocar ou se aproximar da corda horizontal faz com que a bola de marfim atraia pequenas lâminas de latão. A corda está apoiada ou presa por fios de seda isolantes.

Esta é a segunda descoberta fundamental de Gray neste artigo, ou seja, a existência de materiais condutores e isolantes.

²⁶ [No153].

²⁷ [Dop74].

B.5 Descoberta de que São as Propriedades Intrínsecas de um Corpo que Fazem com que Ele se Comporte como um Condutor ou como um Isolante

Em seguida, Gray e Wheler chegaram a transmitir a virtude elétrica horizontalmente até 45 m fazendo algumas curvas na linha de comunicação (ou seja, na corda). Depois chegaram a 34 m em linha reta horizontal, mais 4 m na vertical. Em outro dia chegaram a 89 m com a corda horizontal dando algumas curvas, sempre apoiada por linhas de seda. Ao tentarem ampliar ainda mais este comprimento, a linha de seda acabou se rompendo devido ao peso da corda e ao movimento vibratório surgindo do atrito no tubo de vidro.

Veio então a terceira descoberta fundamental de Gray neste artigo, nossa ênfase em itálico:²⁸

Devido a isto, tendo trazido comigo fios [ou arames] de latão e de ferro, utilizamos um fino fio de ferro em vez da seda; mas este era muito fraco para aguentar o peso da linha [de comunicação]. Colocamos então um fio de latão um pouco mais grosso do que o fio de ferro. Este suportou nossa linha de comunicação. Contudo, embora o tubo tenha sido bem atritado, não houve o menor movimento ou atração [da lâmina de latão] dada pela bola, nem mesmo com o grande tubo [de vidro com 1 m de comprimento], que utilizamos quando descobrimos que o pequeno tubo maciço [de vidro com 28 cm de comprimento] era ineficaz. *Devido a isto, ficamos agora convencidos de que o sucesso que havíamos obtido anteriormente dependia das linhas que sustentavam a linha de comunicação, que eram de seda, e não devido ao fato de serem finas, como havia imaginado antes da experiência.* O mesmo efeito que ocorreu aqui havia acontecido quando a linha que era para transportar a virtude elétrica é apoiada por corda [*packthread* no original]; a saber, que quando o eflúvio [elétrico] chega ao fio ou corda que apoia a linha [de comunicação], ele passa por elas indo até a viga de madeira à qual estão fixadas as extremidades do fio ou da corda, assim [o eflúvio elétrico] não vai adiante ao longo da linha [de comunicação] que devia levá-lo até a bola de marfim.

Gray já havia descoberto como comunicar a virtude elétrica à madeira, aos metais, à corda e a diversas substâncias. Também já havia descoberto que um fio de seda impedia a fuga ou a passagem da eletricidade, acreditando que isto era devido à sua pequena espessura quando comparada com a espessura de uma corda condutora que sustentava a linha de comunicação entre a bola de marfim e o tubo de vidro atritado. Com esta última experiência realizada com dois fios

²⁸[Grah, págs. 28-29].

de mesma espessura, um metálico e um de seda, ele descobre que o primeiro permite a passagem da virtude elétrica para a Terra, enquanto que o fio de seda não permite esta fuga do “eflúvio elétrico.” Ou seja, nas suas experiências era principalmente o tipo de material que definia ou que caracterizava sua propriedade. O diâmetro do fio de sustentação não era um fator relevante para saber se ele iria conduzir ou isolar eletricamente, contrariamente ao que havia pensado originalmente. Esta é sua terceira descoberta fundamental.

B.6 Descoberta de que a Eletrização por Comunicação Acontece à Distância

Prosseguindo com as experiências, conseguiram transmitir a eletricidade até 203 m, sempre apoiando a corda sobre fios de seda, com a corda fazendo algumas voltas. Representações destas experiências aparecem nas Figuras B.12 e B.13.²⁹

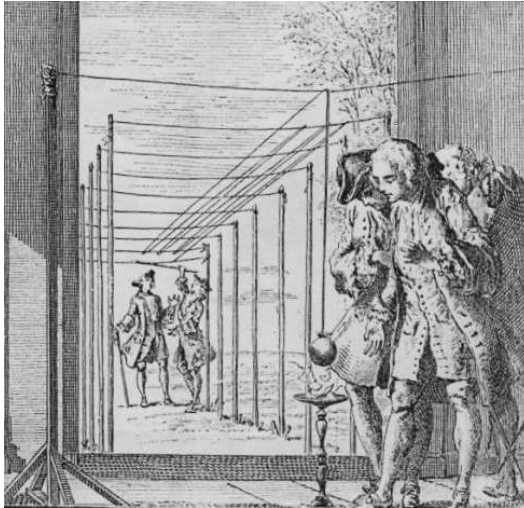


Figura B.12: Gray conseguiu fazer com que uma bola atraísse finas lâminas metálicas estando presa a uma corda de 203 m que dava várias voltas apoiada sobre fios de seda. A atração ocorria quando colocava um tubo de vidro atritado junto da outra extremidade da corda.

Em linha reta chegaram a 198 m. Depois chegaram a 233 m. Em seguida variaram o que colocavam na ponta da corda. Em vez da bola de marfim utilizaram um mapa com 8 m², uma toalha de mesa com 18 m², um guarda chuva dependurado pelo cabo e um ímã com uma chave grudada na ponta. Todos atraíam como a bola de marfim quando o tubo de vidro era atritado. Depois dependuraram três corpos em pontos diferentes ao longo da corda de comunicação. Todos

²⁹[GS89], [BWb] e [Dop74].

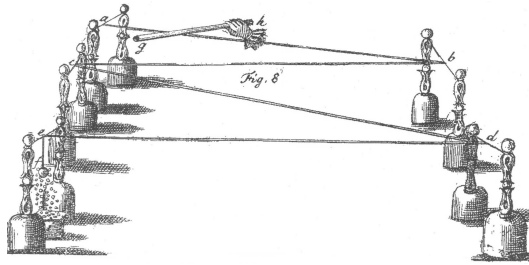


Figura B.13: Uma bola atraindo pequenos objetos quando está apoiada por fios isolantes e quando um vidro atritado está junto da outra extremidade da corda.

atraíam ao mesmo tempo quando se atritava o vidro. Dependuraram também um pintinho vivo pelos pés e viram que seu peito atraía bastante.

No final do artigo ainda descreve outras experiências mostrando que conseguiu transmitir a virtude elétrica até uma distância de 270 m.

A quarta descoberta importante de Gray neste artigo vem a seguir. Ele conseguiu transmitir a virtude elétrica para um corpo preso na extremidade da linha de comunicação apenas pela *aproximação* do tubo de vidro atritado da outra extremidade da linha de comunicação. Ou seja, bastava colocar o vidro atritado próximo da linha de comunicação, não era necessário que ele tocasse na linha:³⁰

Na casa do Sr. Godfrey fiz as experiências seguintes; mostrando que a virtude elétrica pode ser transportada a partir do tubo, sem tocar a linha de comunicação, apenas segurando o tubo próximo dela.

A primeira destas experiências foi feita em 5 de agosto e 1729. [...]

Peguei um pedaço de uma linha fina [*hair-line* no original], como aquelas onde se secam roupas de linho, de aproximadamente 11 pés [3,3 m] de comprimento; a qual, por um laço em sua extremidade superior, foi suspensa em um prego que estava fixado em uma das vigas do sótão, e que possuía em sua extremidade inferior um peso de chumbo de quatorze libras [6,4 kg] dependurado nela por um anel de ferro. A lâmina de latão foi então colocada debaixo do peso, o tubo foi atritado e, sendo [o tubo] mantido próximo da linha mas sem tocá-la, o peso de chumbo atraiu e repeliu a lâmina de latão diversas vezes seguidas, até a altura de no mínimo três polegadas, se não quatro polegadas [10 cm]. Se o tubo fosse segurado três ou quatro pés [1,2 m] acima do peso, haveria uma atração; mas se ele fosse segurado mais acima, de tal forma a ficar próximo da viga onde o peso estava dependurado pela linha fina, não haveria atração.

Uma representação desta experiência encontra-se na Figura B.14 (a).

³⁰[Grah, págs. 33-34].

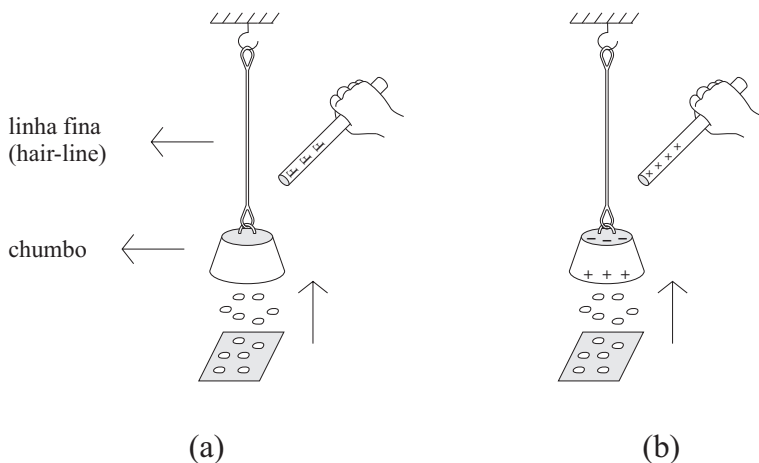


Figura B.14: (a) Gray conseguia atrair corpos leves apenas aproximando o vidro atritado do peso de chumbo, sem tocar nele ou na linha que o sustentava. (b) Representação qualitativa das cargas no caso (a).

De acordo com a visão que se tem hoje em dia, o que estaria ocorrendo nesta experiência seria a polarização elétrica do peso de chumbo devido à influência a distância do tubo de vidro atritado. A parte do chumbo mais próxima do vidro ficaria carregada com uma carga de sinal oposto à carga do vidro, enquanto que a parte do chumbo mais distante do vidro ficaria carregada com uma carga de mesmo sinal que a do vidro. A lâmina de latão seria então atraída pela parte inferior do chumbo polarizado. De certa forma isto seria análogo à Experiência 7.9.

Uma representação qualitativa das cargas nesta experiência aparece na Figura B.14 (b).

A parte que traduzimos por “Peguei um pedaço de uma linha fina, como aquelas onde se secam roupas de linho,” tem a seguinte forma no original: *I took a piece of a hair-line, such as linnen cloaths are dried on.* Gray utilizava *hair-lines* para sustentar corpos em outras experiências. Não é claro de que material eram feitas estas linhas finas. Mas elas funcionavam como isolantes. Em outra experiência famosa descrita neste artigo de 1731, ele suspendeu um garoto com 21 kg na horizontal por duas destas linhas finas, como as que se usam para secar roupas (*by two hair-lines, such as cloaths are dried on*). Em seguida aproximou um tubo atritado dos pés do menino, sem tocá-los, e observou que o rosto do menino atraía lâminas de latão colocadas abaixo dele.

Du Fay repetiu esta experiência do menino em 1733. Quando usou cordas comuns para sustentá-lo, não obteve nenhum efeito, o menino não atraía os corpos leves próximos a ele. Porém, ao substituir as cordas comuns por cordões de seda, obteve as mesmas atrações que as descritas por Gray.³¹ Como as cordas

³¹[DF33d, págs. 250-251].

comuns são condutoras, isto prova que as *hair lines* do Gray são isolantes, já que só assim a experiência com o menino dependurado é bem sucedida.

Em um artigo de 1735 Gray vai repetir algumas experiências do Du Fay e começa dizendo o seguinte:³²

Como não tinha comigo quaisquer linhas de seda fortes o suficiente para suportar o menino, fiz com que ele ficasse apoiado sobre algum dos corpos elétricos.

Isto é, o menino ficou sobre algum isolante, como diríamos hoje em dia. Na página seguinte deste artigo, Gray descreve outras experiências que realizou na casa do Sr. Wheler: “O Sr. Wheler, logo após minha chegada, obteve linhas de seda suficientemente fortes para suportar o peso de seu pajem, um bom jovem robusto; então, tendo suspenso-o nas linhas, [...]” Conclui-se de tudo isto que provavelmente as *hair-lines* do Gray tenham sido cordões finos de seda.

Gray continua descrevendo em seu artigo fundamental de 1731 outras experiências nas quais transmite a virtude elétrica a condutores sem que haja o contato com o tubo de vidro atritado, bastando sua aproximação. Usando aros de madeira com diâmetros de 66 ou 91 cm, suspensos por fios isolantes, observou que o eflúvio elétrico podia ser transportado ao longo da circunferência destes aros, assim como passar de um aro para outro que se tocavam, Figura B.15.³³ Conseguiu também transmitir a virtude elétrica a muitas frutas e vegetais.

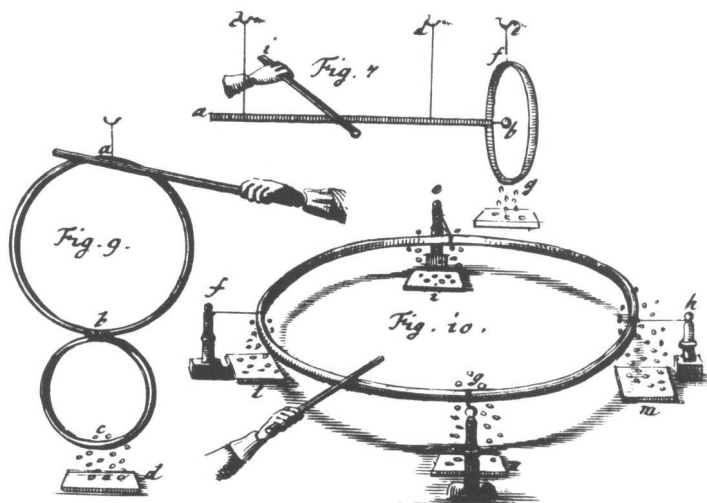


Figura B.15: Representação das experiências de Gray com aros de madeira suspensos por fios isolantes.

Gray conseguiu até mesmo fazer uma bolha de sabão atrair corpos leves:³⁴

³²[Grae, pág. 17].

³³[Dop74] e [Hei99, pág. 249].

³⁴[Grah, págs. 38-39].

Em 23 de março [de 1730] dissolvi sabão na água do [rio] Tâmissa, então suspendi um cachimbo por uma linha fina [*hair-line*, provavelmente de seda ou de crina de cavalo], de tal forma que ficasse quase na horizontal, com a boca da cabeça do cachimbo para baixo. Então, tendo mergulhado o cachimbo na solução de sabão, e assoprado uma bolha, a lâmina de latão estando sobre um suporte abaixo da bolha, sendo o tubo atritado, o latão foi atraído pela bolha, quando o tubo foi mantido próximo da linha fina. Repeti então a experiência com uma outra bolha, segurando o tubo próximo da ponta pequena do cachimbo, e a atração foi agora muito maior [do que antes], a lâmina de latão foi atraída até a altura de aproximadamente duas polegadas [5 cm].

Esta experiência, representada na Figura B.16 (a), ilustra mais uma vez que a água se comporta como um condutor. Gray havia conseguido transmitir a capacidade de atrair a diversos condutores tais como metais, madeira, etc. Já os materiais isolantes não conseguem atrair com tanta força. Os isolantes ficam bem menos polarizados na presença de um corpo eletrizado do que os condutores na presença deste mesmo corpo eletrizado.

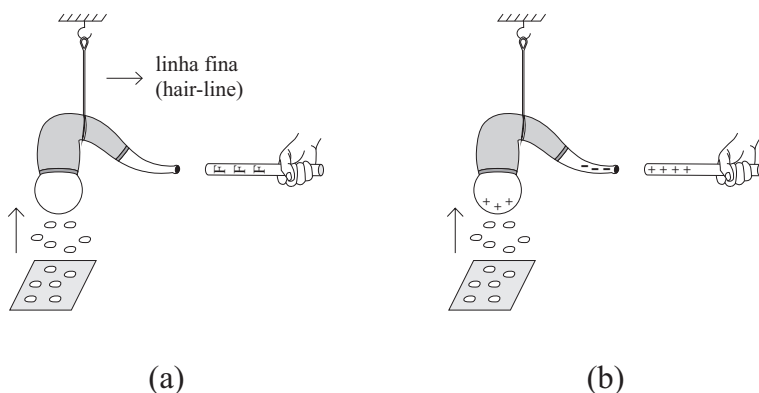


Figura B.16: (a) Uma bolha de sabão atraindo lâminas leves de latão quando o tubo de vidro atritado está próximo da outra extremidade do cachimbo suspenso por uma linha fina isolante. (b) Representação qualitativa das cargas do caso (a).

Na Figura B.16 (b) apresentamos a distribuição qualitativa de cargas nesta experiência.

B.7 A Experiência do Garoto Suspenso

Gray descreve ainda neste artigo de 1731 diversas experiências que realizou ao dependurar um menino na horizontal por fios finos, *hair-lines*, feitos provavel-

mente de seda.³⁵ Por exemplo, com a face do menino para baixo, segurava o tubo de vidro atritado perto da sola dos seus pés, sem tocá-las, e então observava que lâminas de latão eram atraídas pela face do garoto, chegando a subir até 30 cm. Uma representação de uma destas experiências encontra-se na Figura B.17.³⁶

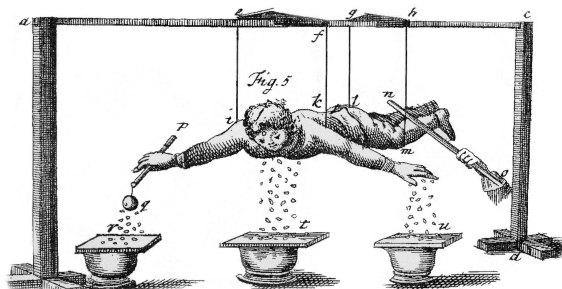


Figura B.17: Um menino é dependurado por fios de seda. Um tubo de vidro atritado é aproximado de suas pernas. As mãos e o rosto do menino atraem pequenas lâminas de latão.

Esta experiência de Gray ficou muito famosa na época. Ela foi utilizada por Nollet no frontispício de seu livro *Essai sur l'Électricité des Corps*, Figura B.18.³⁷

Algumas destas experiências de Gray foram repetidas e ampliadas por Du Fay. Por exemplo, em sua terceira Memória ele tem uma experiência apresentada na Figura B.19.³⁸

Du Fay descreveu esta experiência nas seguintes palavras:³⁹

Peguei dois pedaços de um fio [condutor], com a espessura de um dedo, dos quais o primeiro [pedaço] *SA* tinha um comprimento de 6 pés [1,80 m], e o outro *CB* tinha 8 [pés, ou seja, 2,40 m], fixei cada um deles por uma extremidade a dois cordões de seda, *DE* e *FG*, ortogonais a eles, e que estavam dispostos de modo que podíamos aproximar ou afastar paralelamente estes cordões entre si, de tal forma que poderíamos fixá-los à distância desejada [entre si]. Na extremidade *B* do fio de 8 pés foi suspensa uma bola de madeira, e a extremidade mais afastada da linha de 6 pés foi fixada a um terceiro cordão de seda em *S* para suspendê-la no ar. Então, apresentando um tubo [de vidro] atritado para a extremidade *S* do fio *SA*, após

³⁵[Grah, págs. 39-41].

³⁶[Dop74].

³⁷[Nol53].

³⁸[DF33d, págs. 248-249] e [RR57, pág. 584].

³⁹[DF33d, págs. 248-249].



Figura B.18: Representação da famosa experiência de Gray no livro de Nollet. Nesta figura pode-se ver que o tubo de vidro não precisa tocar no garoto.

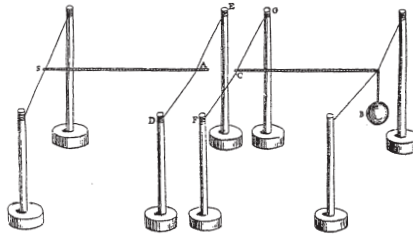


Figura B.19: Ilustração de uma experiência de Du Fay análoga a algumas experiências anteriores de Gray.

ter separado os dois fios de uma polegada [2,54 cm], a eletricidade na bola era tão perceptível como se a linha tivesse sido contínua [observando que a bola atraía pequenas lâminas metálicas colocadas próximas a ela], com [uma separação entre as linhas] de 3 polegadas [7,5 cm] ela [a eletricidade] era ainda mais [perceptível], com 6 polegadas [15 cm] um pouco menos, e com 1 pé [30 cm] muito menos, aproximadamente como a uma distância de 1256 pés de uma linha contínua [377 m, como Du Fay havia experimentado anteriormente]. Portanto, a matéria elétrica flui livremente no ar, sem ser fixada por qualquer corpo. Esta experiência prova a necessidade de isolar a linha [condutora] utilizada para transmitir a eletricidade a uma grande distância, ou de suspender [a linha condutora] apenas pelos corpos que são menos aptos a se carregar de eletricidade.

A descrição moderna desta experiência não é em termos da matéria elétrica fluir livremente no ar, como expresso por Du Fay. Em vez disto, considera-se que o efeito principal nesta experiência é a polarização elétrica dos condutores, como na Figura B.20. Ou seja, o vidro eletrizado colocado perto da corda condutora SA a polariza eletricamente. As cargas na extremidade A desta corda acabam polarizando um outro condutor CB , a saber, a segunda corda presa à bola. E isto apesar de haver uma separação entre as extremidades A e C que podia variar entre 2,5 cm e 30 cm. Esta região AC estava cheia de ar, um meio isolante. As cargas acumuladas na extremidade inferior da bola de madeira, de mesmo sinal que as cargas sobre o tubo de vidro atritado, atraíam para si corpos leves que estivessem em suas proximidades.

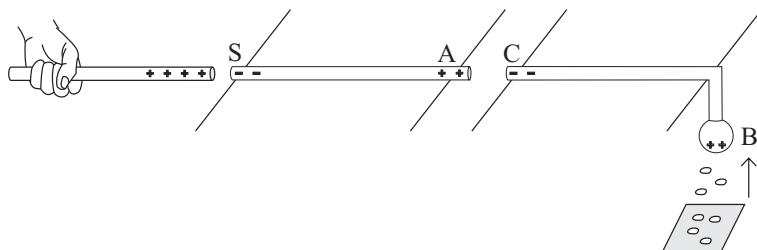


Figura B.20: Visualização das polarizações na experiência de Du Fay, Figura B.19. Os condutores SA e CB estão apoiados por fios de seda isolantes.

B.8 Descoberta de que as Cargas Livres se Distribuem apenas sobre a Superfície dos Condutores

Na sequência de seu artigo de 1731, Gray descreve outra descoberta fundamental, a saber (nossa ênfase em itálico):⁴⁰

Algum tempo depois, na casa do Sr. Wheeler, fizemos a seguinte experiência, para testar se a atração elétrica é proporcional à quantidade de matéria nos corpos.

Foram feitos dois cubos de carvalho, com aproximadamente seis polegadas quadradas [15 cm²], um maciço e o outro oco. Estes cubos foram suspensos por duas linhas finas [hair-lines], aproximadamente da mesma maneira que na experiência mencionada acima. A distância entre os cubos era, por estimativa, ao redor de quatorze ou quinze pés [4,6 m]. A linha de comunicação foi ligada a cada linha fina, e as lâminas de latão foram colocadas abaixo dos cubos. O tubo foi atritado e segurado acima da parte central da linha [de

⁴⁰[Grah, pág. 35].

comunicação] e, tão próximo quanto se possa imaginar, a distâncias iguais dos cubos, os quais atraíram e repeliram as lâminas de latão ao mesmo tempo e à mesma altura. *De forma que pareceu não haver mais atração no cubo sólido do que no oco.* Contudo, estou inclinado a pensar que o eflúvio elétrico atravessa todas as partes interiores do cubo sólido, *embora nenhuma parte, exceto a superfície, atraia.* Pois a partir de várias experiências parece que se qualquer outro corpo toca aquele que atrai, sua atração cessa até que este corpo tenha sido removido, e o outro tenha sido novamente excitado pelo tubo.

Uma representação desta experiência encontra-se na Figura B.21.

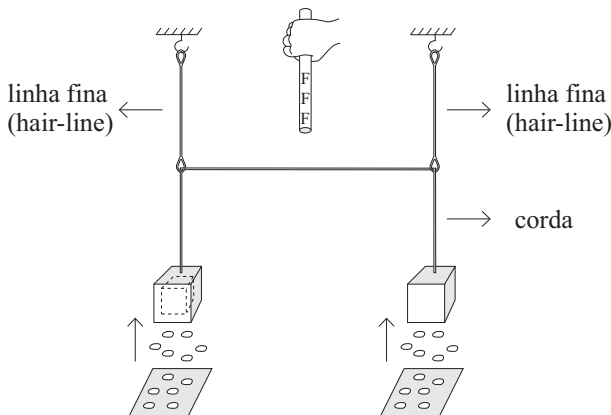


Figura B.21: Um cubo oco e um cubo maciço atraem com a mesma força.

Esta experiência descreve duas descobertas extremamente importantes. A primeira é a de que na eletrostática as cargas livres ou em excesso nos condutores (como os cubos de madeira desta experiência) se distribuem em suas superfícies, e não ao longo de seus volumes. Embora esta propriedade elétrica fundamental de condutores em equilíbrio eletrostático seja atribuída a Michael Faraday (1791-1867), sua descoberta é na verdade devida a Gray.⁴¹

A segunda descoberta, descrita na última frase do trecho citado anteriormente, é o fato de que um condutor eletrizado é descarregado ao ser tocado por um outro condutor ligado à Terra, ou seja, ao ser aterrado. Gray parece estar se referindo aqui às suas experiências de 1708, ver as Seções 4.2 e 4.5.

B.9 Descoberta do Efeito das Pontas

As lâminas de latão utilizadas por Gray eram colocadas sobre um suporte. Normalmente este suporte era uma tábua redonda com um diâmetro de um pé [30 cm], com papel branco colado sobre ela, apoiada em um pedestal cilíndrico

⁴¹[CM79, pág. 396] e [Hei99, págs. 248-249].

com 30 cm de altura. Na sequência de seu artigo de 1731, Gray escreve ainda outra descoberta muito importante, a saber:⁴²

Nestas experiências, além do grande suporte mencionado anteriormente [uma tábua com 30 cm de diâmetro apoiada sobre um pedestal com 30 cm de altura], usei dois suportes pequenos, os quais, como achei-os muito úteis, não deve ser inapropriado descrevê-los. As extremidades superiores dos suportes possuíam três polegadas de diâmetro [7,6 cm]. Eles eram apoiados por uma coluna com cerca de um pé de altura [30 cm], com suas bases tendo ao redor de quatro polegadas e meia [11,4 cm]. Eles eram feitos de *lignum vitae* [um tipo de madeira]. Suas extremidades superiores e suas bases eram feitas de maneira a serem parafusados para facilitar o transporte. Sobre as extremidades superiores era colado papel branco. Quando a lâmina de latão era colocada sobre qualquer destes suportes, descobri que ela era atraída até uma altura muito maior do que quando era colocada sobre uma mesa, e [era atraída] pelo menos três vezes mais alto do que quando estava colocada sobre o chão de uma sala.

Uma representação desta experiência encontra-se na Figura B.22.

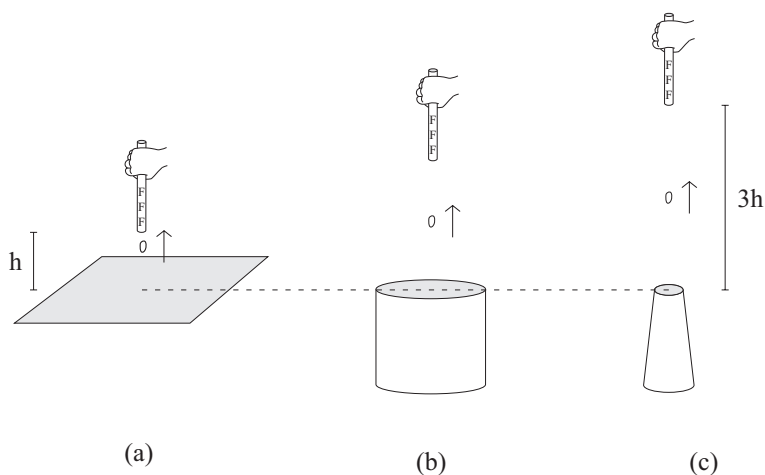


Figura B.22: (a) Uma lâmina de latão é atraída até uma altura h quando está apoiada sobre o solo. (b) Ao ser apoiada sobre uma mesa ou sobre um cilindro condutor com 30 cm de diâmetro, sobe ainda mais. (c) Se estiver apoiada sobre um cone pontudo condutor, chega a subir três vezes mais do que se estiver sobre o solo.

Esta é uma das primeiras descrições conhecidas sobre o efeito das pontas. Isto é, a força elétrica atua mais fortemente ao redor das pontas dos condutores do que ao redor de suas partes mais planas.

⁴²[Grah, pág. 42].

Na Seção 4.10 analisou-se o comportamento das setas de cartolina dependuras no pêndulo elétrico. Elas apontavam para o canudo eletrizado antes de tocarem nele. Depois do toque, apontavam para fora do canudo eletrizado. Este comportamento está relacionado com o efeito das pontas descoberto por Gray.

B.10 Conclusão

Sem dúvida alguma este é um dos trabalhos mais importantes de toda a história da eletricidade. É impressionante a quantidade de descobertas fundamentais feitas por um simples tintureiro aposentado, sem qualquer formação universitária. Tinha na época 63 anos. Consideramos que a maior contribuição de Gray tenha sido a descoberta dos materiais condutores e isolantes, descrevendo ainda algumas de suas principais propriedades. Isto permitiu um controle dos fenômenos elétricos, abrindo o caminho para uma série de novas descobertas feitas logo em seguida pelo próprio Gray e por outros pesquisadores da época. Gray descreveu ainda algumas novas descobertas extremamente importantes relacionadas com a eletricidade em seus outros trabalhos, mas não entraremos em maiores detalhes aqui.

Du Fay seguiu de perto os trabalhos de Gray, sendo fortemente influenciado por ele. Suas descobertas da repulsão elétrica, do mecanismo *ACR* e dos dois tipos de eletricidade, vieram ao reproduzir e explorar o que Gray havia descoberto pouco antes. Por exemplo, em um de seus trabalhos mais importantes, Du Fay fez a seguinte afirmação:⁴³

Imploro a Vossa Alteza para comunicá-la [esta carta] a *Royal Society* e, em particular para o Senhor *Gray*, que trabalha neste Tema com muita Aplicação e Sucesso, para quem reconheço minha dívida pelas Descobertas que fiz e também por aquelas que poderei fazer futuramente, visto que é dos escritos dele que eu tomei a Decisão de dedicar-me a este tipo de Experimento.

Começamos este livro descrevendo o efeito âmbar, uma experiência conhecida pelo menos desde Platão, no século IV a.C. E concluímos com os trabalhos de um tintureiro aposentado cujas descobertas permitiram um avanço sem precedentes no nosso conhecimento da natureza e no domínio técnico da eletricidade. Os caminhos da ciência são realmente fascinantes!

⁴³[DF, págs. 265-266] e [BC07, pág. 643].

Referências Bibliográficas

- [AB05] A. K. T. Assis and W. Bagni Jr. Tradução de um texto de James Clerk Maxwell sobre a teoria das cargas-imagem. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 22:95–104, 2005.
- [Aep79] F. U. T. Aepinus. *Aepinus’s Essay on the Theory of Electricity and Magnetism*. Princeton University Press, Princeton, 1979. Translation by P. J. Connor. Introductory monograph and notes by R. W. Home.
- [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. ISBN: 978-0-9732911-5-5. Available at: 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*, volume 73 of *Acadêmica*. Edusp and Edufal, São Paulo and Maceió, 2009. ISBNs: 978-85-314-1123-6 and 978-85-7177-431-5.
- [Amp22] A.-M. Ampère. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques. *Annales de Chimie et de Physique*, 20:60–74, 1822.
- [Ari52] Aristotle. *Meteorology*, In: The Works of Aristotle, Vol. 1. In *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins, Editor in Chief, Vol. 8, pages 443–494, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Translated by E. W. Webster.
- [Ari84] Aristóteles. *Metafísica*. Volume “Aristóteles (II)” da Coleção “Os Pensadores”. Abril Cultural, 1984. Tradução direta do grego por V. Cocco e notas de J. d. Carvalho.
- [Ari02] Aristóteles. *Metafísica*. Loyola, São Paulo, 2002. Ensaio introdutório, texto grego com tradução para o italiano e comentário de G. Reale. Tradução do italiano para o português por M. Perine.
- [Ari06] Aristóteles. *De Anima*. Editora 34, São Paulo, 2006. Apresentação, tradução e notas de M. C. G. d. Reis.

- [Ass08a] A. K. T. Assis. *Archimedes, the Center of Gravity, and the First Law of Mechanics*. Apeiron, Montreal, 2008. ISBN: 978-0-9732911-6-2. Available at: www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Ass08b] A. K. T. Assis. *Arquimedes, o Centro de Gravidade e a Lei da Alavanca*. Apeiron, Montreal, 2008. ISBN: 978-0-9732911-7-9. Disponível em: www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [BC07] S. L. B. Boss and J. J. Caluzi. Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa segundo Du Fay. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:635–644, 2007.
- [BC09] S. L. B. Boss and J. J. Caluzi. Uma breve biografia de Stephen Gray (1666-1736). Accepted for publication in *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2009.
- [Ben86] A. Bennet. Description of a new electrometer. *Philosophical Transactions*, 76:26–34, 1786.
- [Ben98] P. Benjamin. *A History of Electricity (The Intellectual Rise in Electricity) from Antiquity to the Days of Benjamin Franklin*. Wiley, New York, 1898.
- [Blo82] C. Blondel. *A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820-1827)*. Bibliothèque Nationale, Paris, 1982.
- [Bor] G. Borvon. Pourquoi deux espèces d'électricité? Pourquoi deux sens du courant électrique? L'histoire de l'électricité nous aide à comprendre. Available at: www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique.
- [Boy00] R. Boyle. Experiments and notes about the mechanical origine or production of electricity. In M. Hunter and E. B. Davis, editors, *The Works of Robert Boyle*, Vol. 8, pages 509–523. Pickering & Chatto, London, 2000. Work originally published in 1675.
- [BWa] C. Blondel and B. Wolff. Que dit l'article ELECTRICITE de l'Encyclopédie? Available at: www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique.
- [BWb] C. Blondel and B. Wolff. Teinturiers et tubes de verre: Gray et Dufay. Available at: www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique.
- [BWc] C. Blondel and B. Wolff. Un tournant dans l'histoire de l'électricité: la mathématisation. Available at: www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique.
- [CA08] J. Camillo and A. K. T. Assis. Construção de um gerador eletrostático gotejante: chuva elétrica de Kelvin. *A Física na Escola*, 9:29–32, 2008.

- [Can53] J. Canton. Electrical experiments, with an attempt to account for their several phaenomena; together with observations on thunder-clouds. *Philosophical Transactions*, 48:350–358, 1753.
- [Can54] J. Canton. A letter to the Right Honourable the Earl of Macclesfield, President of the Royal Society, concerning some new electrical experiments. *Philosophical Transactions*, 54:780–785, 1754.
- [CC00] D. H. Clark and S. P. H. Clark. *Newton's Tyranny: The Suppressed Scientific Discoveries of Stephen Gray and John Flamsteed*. Freeman, New York, 2000.
- [Cha] J. P. M. d. C. Chaib, 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, 2009). Orientador: A. K. T. Assis. Disponível em: <http://webbif.ifi.unicamp.br/teses/> e em www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [Chi54] R. A. Chipman. An unpublished letter of Stephen Gray on electrical experiments, 1707-1708. *Isis*, 45:33–40, 1954.
- [CM79] D. H. Clark and L. Mordin. The enigma of Stephen Gray astronomer and scientist (1666-1736). *Vistas in Astronomy*, 23:351–404, 1979.
- [Desa] J. T. Desaguliers. Experiments made before the Royal Society, Feb. 2. 1737-8. *Philosophical Transactions*, 41:193–199, 1739–1741.
- [Desb] J. T. Desaguliers. Several electrical experiments, made at various times, before the Royal Society. *Philosophical Transactions*, 41:661–667, 1739–1741.
- [Desc] J. T. Desaguliers. Some thoughts and experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 41:186–193, 1739–1741.
- [DF] C. F. d. C. Du Fay. A letter from Mons. Du Fay, F. R. S. and of the Royal Academy of Sciences at Paris, to His Grace Charles Duke of Richmond and Lenox, concerning electricity. Translated from the French by T. S. M D. *Philosophical Transactions*, 38:258–266, 1733–4.
- [DF33a] C. F. d. C. Du Fay. Premier mémoire sur l'électricité. Histoire de l'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 23–35, 1733.
- [DF33b] C. F. d. C. Du Fay. Quatrième mémoire sur l'électricité. De l'attraction et répulsion des corps électriques. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 457–476, 1733.
- [DF33c] C. F. d. C. Du Fay. Second mémoire sur l'électricité. Quels sont les corps qui sont susceptibles d'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 73–84, 1733.

- [DF33d] C. F. d. C. Du Fay. Troisième mémoire sur l'électricité. Des corps qui sont le plus vivement attirés par les matières électriques, et de ceux qui sont les plus propres à transmettre l'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 233–254, 1733.
- [DF34a] C. F. d. C. Du Fay. Cinquième mémoire sur l'électricité. Oú l'on rend compte des nouvelles découvertes sur cette matière, faites depuis peu par M. Gray; et où l'on examine quelles sont les circonstances qui peuvent apporter quelque changement à l'électricité pour l'augmentation ou la diminution de la force, comme la température de l'air, le vuide, l'air comprimé, etc. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 341–361, 1734.
- [DF34b] C. F. d. C. Du Fay. Sixième mémoire sur l'électricité. Oú l'on examine quel rapport il y a entre l'électricité, et la faculté de rendre de la lumière, qui est commune à la plûpart des corps électriques, et ce qu'on peut inférer de ce rapport. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 503–526, 1734.
- [DF37a] C. F. d. C. Du Fay. Huitième mémoire sur l'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 307–325, 1737.
- [DF37b] C. F. d. C. Du Fay. Septième mémoire sur l'électricité. Contenant quelques additions aux mémoires précédents. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pages 86–100, 1737.
- [Dop74] J. G. Doppelmayr. *Neu-entdeckte Phaenomena von bewunderswürdigen Wirkungen der Natur*. Nurenburg, 1774.
- [Fera] N. Ferreira. *Mecânica*. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino.
- [Ferb] N. Ferreira. *Eletrostática*, Vol. 1. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino.
- [Ferc] N. Ferreira. *Eletrostática*, Vol. 2. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino.
- [Ferd] N. C. Ferreira. Construa sua própria bússola! Disponível em: cienciahoje.uol.com.br/controlPanel/materia/view/2888.
- [Fer75] A. B. d. H. Ferreira. *Novo Dicionário da Língua Portuguesa*. Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1975.
- [Fer78] N. C. Ferreira. Proposta de Laboratório para a Escola Brasileira—Um Ensaio sobre a Instrumentalização no Ensino Médio de Física. Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.
- [Fer01a] N. C. Ferreira. Acende aqui, apaga ali. *Ciência Hoje na Escola*, 12:65–67, 2001.

- [Fer01b] N. C. Ferreira. Faça como Gilbert: construa uma bússola de declinação. *Ciência Hoje na Escola*, 12:21–22, 2001.
- [Fer01c] N. C. Ferreira. Magnetismo e eletricidade. *Ciência Hoje na Escola*, 12:14–17, 2001.
- [Fer01d] N. C. Ferreira. O versorium. *Ciência Hoje na Escola*, 12:18–20, 2001.
- [Fer06] N. Ferreira. *Equilíbrio*. Projeto RIPE, Instituto de Física, USP, São Paulo, 2006. Disponível em: www.ludoteca.if.usp.br.
- [Fig67] L. Figuier. *Ler Merveilles de la Science ou Description Populaire des Inventions Modernes*, volume 1. Jouvett et Cie., Paris, 1867.
- [Fig85] L. G. Figuier. *Les Merveilles de l'Électricité*. Association pour l'Histoire de l'Électricité en France, Paris, 1985. Textes choisis présentés par Fabienne Cardot.
- [FM91] N. Ferreira and J.-P. Maury. *Plus et Moins, les Charges Électriques. Qu'est-ce que c'est?* Ophrys, Paris, 1991.
- [Fra55] G. Fracastoro. *De sympathia & antipathia rerum*. In: *Opera omnia in unum proxime post ilius mortem collecta*. Apud Iuntas, Venice, 1555.
- [Gas91] A. Gaspar. Motor de ímã móvel. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 8:188–193, 1991.
- [Gas96] A. Gaspar. *História da Eletricidade*. Ática, São Paulo, 1996.
- [Gas03] A. Gaspar. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. Ática, São Paulo, 2003.
- [GG90] I. Grattan-Guinness. *Convolutions in French Mathematics, 1800-1840*, volume 2. Birkhäuser, Basel, 1990.
- [GG91] I. Grattan-Guinness. Lines of mathematical thought in the electrodyamics of Ampère. *Physis*, 28:115–129, 1991.
- [Gil00] W. Gilbert. *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure; physiologia nova*. London, 1600.
- [Gil00] W. Gilbert. *On the Magnet, Magnetick Bodies also, and on the Great Magnet the Earth; a New Physiology, Demonstrated by Many Arguments & Experiments*. Chiswick Press, London, 1900. Translated by S. P. Thompson.
- [Gil78] W. Gilbert. *On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth*, volume 28, pp. 1-121 of *Great Books of the Western World*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1978. Translated by P. F. Mottelay.

- [Gli33] M. Gliozzi. L'elettrologia nel secolo XVII. *Periodico di Matematiche*, 13:1–14, 1933.
- [Graa] S. Gray. An account of some electrical experiments intended to be communicated to the Royal Society by Mr. Stephen Gray, F. R. S. taken from his mouth by Cromwell Mortimer, M. D. R. S. Secr. on Feb. 14, 1735–6. Being the day before he died. *Philosophical Transactions*, 39:400–403, 1735–1736.
- [Grab] S. Gray. An account of some new electrical experiments. *Philosophical Transactions*, 31:104–107, 1720–1.
- [Grac] S. Gray. Concerning the revolutions which small pendulous bodies will, by electricity, make round larger ones from West to East as the planets do round the Sun. *Philosophical Transactions*, 39:220, 1735–1736.
- [Grad] S. Gray. The electricity of water. *Philosophical Transactions*, 37:227–230 (addenda in page 260), 1731–2.
- [Grae] S. Gray. Experiments and observations upon the light that is produced by communicating electrical attraction to animate or inanimate bodies, together with some of its most surprising effects. *Philosophical Transactions*, 39:16–24, 1735–6.
- [Graf] S. Gray. Farther account of his experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:285–291, 1731–2.
- [Grag] S. Gray. Farther accounts of his experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:397–407, 1731–2.
- [Grah] S. Gray. Several experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:18–44, 1731–2.
- [Grai] S. Gray. Some experiments relating to electricity. *Philosophical Transactions*, 39:166–170, 1735–6.
- [GS89] G. Gaudenzi and R. Satolli. *Jean-Paul Marat: Scienziato e Rivoluzionario*. Mursia, Milano, 1989.
- [Gue94] O. v. Guericke. *The New (So-Called) Magdeburg Experiments of Otto von Guericke*, volume 137 of *Archives Internationales d'Histoire des Idées*. Kluwer, Dordrecht, 1994. Translation and preface by M. G. F. Ames.
- [Gui05] A. P. Guimarães. *From Lodestone to Supermagnets*. Wiley, Berlin, 2005.
- [Haua] F. Hauksbee. An account of an experiment made before the Royal Society at Gresham-College, touching the extraordinary elistricty of glass, produceable on a smart attrition of it; with a continuation of experiments on the same subject, and other phenomena. *Philosophical Transactions*, 25:2327–2335, 1706–1707.

- [Hau] F. Hauksbee. An account of the repetition of an experiment touching motion given bodies included in a glass, by the approach of a finger near its outside: With other experiments on the effluvia of glass. *Philosophical Transactions*, 26:82–86, 1708–1709.
- [Hau09] F. Hauksbee. *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects, containing an Account of Several Surprising Phenomena touching Light and Electricity, producible on the Attrition of Bodies. With many other Remarkable Appearances, not before observ'd*. R. Brugis, London, 1709.
- [Hea67] N. H. d. V. Heathcote. The early meaning of electricity: Some Pseudoxia Epidemica—I. *Annals of Science*, 23:261–275, 1967.
- [Hei79] J. L. Heilbron. *Electricity in the 17th & 18th Centuries*. University of California Press, Berkeley, 1979.
- [Hei81a] J. L. Heilbron. Aepinus, Franz Ulrich Theodosius. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 1, pages 66–68. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Hei81b] J. L. Heilbron. Dufay (Du Fay), Charles-François de Cisternay. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 4, pages 214–217. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Hei81c] J. L. Heilbron. Gray, Stephen. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 5, pages 515–517. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Hei81d] J. L. Heilbron. Hauksbee, Francis. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 6, pages 169–175. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Hei81e] J. L. Heilbron. Nollet, Jean-Antoine. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 10, pages 145–148. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [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.
- [Hem80] l'abbé Hemmer. Sur l'électricité des métaux. *Journal de Physique*, 16:50–52, 1780.
- [Hom67] R. W. Home. Francis Hauksbee's theory of electricity. *Archive for the History of Exact Sciences*, 4:203–217, 1967. Reprinted in R. W. Home, *Electricity and Experimental Physics in 18th-Century Europe* (Variorum, Hampshire, 1992), Chapter III.

- [Hom81] R. W. Home. *The Effluvial Theory of Electricity*. Arno Press, New York, 1981.
- [Jac99] J. D. Jackson. *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons, New York, third edition, 1999.
- [Kel81] S. Kelly. Gilbert, William. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 5, pages 396–401. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.
- [Kra81] F. Krafft. Guericke, (Gericke), Otto von. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 5, pages 574–576. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.
- [KRS83] G. S. Kirk, J. E. Raven, and M. Schofield. *Os Filósofos Pré-Socráticos*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 4th edition, 1983.
- [Lae91] D. Laertius. *Lives of Eminent Philosophers*, volume 1. Harvard University Press, Cambridge, 1991. Translated by R. D. Hicks.
- [Llo07] J. T. Lloyd. Lorde Kelvin demonstrado. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:499–508, 2007. Traduzido por A. K. T. Assis.
- [Max81] J. C. Maxwell. *An Elementary Treatise on Electricity*. Clarendon Press, Oxford, 1881.
- [Med02] A. Medeiros. As origens históricas do eletroscópio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 24:353–361, 2002.
- [Mel98] M. A. Melehy. Thermal momentum in thermodynamics, part 2. Interfacial electrification: a new consequence of the first and second laws. *Physics Essays*, 11:430–433, 1998.
- [Net] L. F. Netto. Feira de ciências. Disponível em: www.feiradeciencias.com.br.
- [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. ISBN: 85-314-0340-5.
- [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. ISBN: 978-85-314-1089-5.
- [Nol47] l’Abbé Nollet. Éclaircissemens sur plusieurs faits concernant l’électricité. *Mémoires de l’Académie royale des Sciences*, pages 102–131, 1747.

- [Nol53] J. A. Nollet. *Essai sur l'Électricité des Corps*. Freres Guerin, Paris, 3rd edition, 1753.
- [Nol67] J. A. Nollet. *Lettres sur l'électricité, dans lesquelles on trouvera les principaux phénomènes qui ont été découverts depuis 1760, avec des discussions sur les conséquences qu'on en peut tirer*. Durand, Neveu, Libraire, Paris, 1767. Troisième partie.
- [Ørs98a] H. C. Ørsted. New electro-magnetic experiments. In K. Jelved, A. D. Jackson, and O. Knudsen, editors, *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, pages 421–424. Princeton University Press, Princeton, 1998. Paper originally published in German in 1820.
- [Ørs98b] H. C. Ørsted. Observations on electro-magnetism. In K. Jelved, A. D. Jackson, and O. Knudsen, editors, *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, pages 430–445. Princeton University Press, Princeton, 1998. Reprinted from Thomson's *Annals of Philosophy*, Vol. 2, pp. 321–337 (1821).
- [Pla] Platao. *Timeu e Crítias ou A Atlântida*. Hemus, São Paulo. Tradução, Introdução e Notas de N. d. P. Lima.
- [Pla52] Plato. *Protagoras*. In *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins, Editor in Chief, Vol. 7, pages 38–64, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Translated by B. Jowett.
- [Pri72] J. Priestley. An account of a new electrometer, contrived by Mr. William Henly, and of several electrical experiments made by him, in a letter from Dr. Priestley, F.R.S. to Dr. Franklin, F.R.S. *Philosophical Transactions*, 62:359–364, 1772.
- [Pri66] J. Priestley. *The History and Present State of Electricity*, volume 1. Johnson Reprint Corporation, New York, 1966. The Sources of Science, Number 18. Reprinted from the third edition, London, 1755.
- [Que] A. C. M. d. Queiroz. Electrostatic machines. Available at: www.coe.ufrj.br/~acmq/.
- [RR53] D. Roller and D. H. D. Roller. The prenatal history of electrical science. *American Journal of Physics*, 21:343–356, 1953.
- [RR57] D. Roller and D. H. D. Roller. The Development of the Concept of Electric Charge. In J. B. Conant, editor, *Harvard Case Studies in Experimental Science*, chapter 8, pages 541–639. Harvard University Press, Cambridge, 1957.
- [Sas02] W. M. Saslow. *Electricity, Magnetism, and Light*. Academic Press, New York, 2002.

- [Sou96] J. C. d. Souza (seleção de textos e supervisão), 1996. *Pré-Socráticos*, Nova Cultural, São Paulo. Coleção Os Pensadores.
- [The56] Theophrastus. *Theophrastus on Stones*. The Ohio State University, Columbus, 1956. Introduction, Greek text, English translation, and commentary by E. R. Caley and J. F. C. Richards.
- [Tho] W. Thomson. On a self-acting apparatus for multiplying and maintaining electric charges, with applications to illustrate the voltaic theory. *Proceedings of the Royal Society of London*, 16:67–72, 1867–1868.
- [Wal36] W. C. Walker. The detection and estimation of electric charges in the eighteenth century. *Annals of Science*, 1:66–100, 1936.
- [Wil59] B. Wilson. Experiments on the tourmalin. *Philosophical Transactions*, 51:308–339, 1759.
- [Zan81] B. Zanobio. Fracastoro, Girolamo. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 5, pages 104–107. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.

Errata do livro de A. K. T. Assis, “Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade” (Apeiron, Montreal, 2010), ISBN: 9780986492617, disponível em <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>

Agradeço a Pietro Cerreta por uma dessas correções.

- Página 67, a primeira linha da legenda da Figura 4.5 deve ser:

Figura 4.5: A experiência 4.4 pode ser feita facilmente com uma semente de dente-

- Página 89, a última linha antes da Experiência 4.16 deve ser:

uma parede ou a quina de uma mesa, ver a Seção 4.2.

- Páginas 116, 118, 127 etc. Descobri que o material que chamo de “mangueira de borracha” ou “borracha dura” nesse livro (aquelas mangueiras flexíveis brancas conectadas aos chuveiros elétricos) é feito de PVC.

Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade é um livro que lida com os aspectos fundamentais da física. Descreve as principais experiências e descobertas da história da eletricidade. Começa com o efeito âmbar, que é análogo à experiência usual de atrair papeizinhos com um plástico atritado no cabelo. Mostra-se como construir e utilizar diversos instrumentos elétricos: versório, pêndulo elétrico, eletroscópio e coletores de carga. Discute-se a atração e a repulsão elétrica, o mecanismo ACR (atração, contato e repulsão), assim como as cargas positivas e negativas. Analisa-se detalhadamente os conceitos de condutores e de isolantes, assim como as principais diferenças nos comportamentos destes dois tipos de substâncias. Parte-se sempre das observações experimentais para então ir construindo os conceitos, as definições e as leis que descrevem estes fenômenos.



Todas as experiências são descritas com clareza e realizadas com materiais simples, baratos e facilmente acessíveis. Sempre que possível são apresentados aspectos históricos relacionados com os fenômenos que estão sendo analisados, juntamente com citações relevantes dos principais cientistas que trabalharam com estes assuntos. É feita uma análise detalhada das obras de Stephen Gray (1666-1736), o grande cientista inglês que descobriu os condutores e isolantes, assim como algumas de suas principais propriedades. Uma ampla bibliografia é incluída no final da obra.

Sobre o Autor

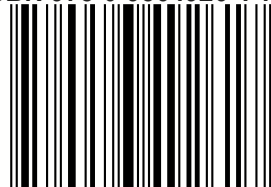
André Koch Torres Assis nasceu no Brasil em 1962. Formou-se no Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, obtendo o bacharelado em 1983 e o doutorado em 1987. Passou o ano de 1988 na Inglaterra realizando um pós-doutorado no Culham Laboratory (United Kingdom Atomic Energy Authority). Passou um ano entre 1991-92 como Visiting Scholar no Center for Electromagnetics Research da Northeastern University (Boston, EUA).

De Agosto de 2001 a Novembro de 2002, assim como de Fevereiro a Maio de 2009, trabalhou no Institut für Geschichte der Naturwissenschaften da Universidade de Hamburg, Alemanha, com uma bolsa de pesquisa concedida pela Fundação Alexander von Humboldt da Alemanha. É autor de diversos livros em português e inglês, dentro os quais se destacam *Eletrodinâmica de Weber* (1995), *Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos* (juntamente com M. Bueno, 1998), *Mecânica Relacional* (1998), *Uma Nova Física* (1999), *Arquimedes, o Centro de Gravidade e a Lei da Alavanca* (2008) e *A Força Elétrica de uma Corrente*

(juntamente com J. A. Hernandez, 2009). Traduziu para o português o livro *Óptica*, de Isaac Newton (1996), *O Universo Vermelho*, de Halton Arp (juntamente com D. Soares, 2001), assim como os livros II e III da obra *Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, de Isaac Newton (2009). É professor do Instituto de Física da UNICAMP desde 1989 trabalhando com os fundamentos do eletromagnetismo, da gravitação e da cosmologia.



ISBN 978-0-9864926-1-7



9 780986 492617