

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA

**CONCEPÇÕES DE INTERAÇÃO FÍSICA:
SUBSÍDIOS PARA UMA ABORDAGEM HISTÓRICA
DO ASSUNTO NO ENSINO MÉDIO**

DANIEL GARDELLI

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Física para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências – Modalidade Física.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alberto Villani (IFUSP)

Prof. Dr. João José Caluzi (UNESP-BAURU)

Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins (IFGW-UNICAMP)

São Paulo
2004

FICHA CATALOGRÁFICA INTERUNIDADES
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Gardelli, Daniel

Concepções de Interação Física: Subsídios para uma
Abordagem Histórica do Assunto no Ensino Médio.
São Paulo, 2004.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo
Instituto de Física - Faculdade de Educação

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins
Área de Concentração: Ensino de Ciências
Modalidade Física

Unitermos

1. Ação a distância entre corpos;
2. Campo eletromagnético;
3. Interações eletromagnéticas;
4. Eletromagnetismo;
5. Ensino de Física.

USP/IF/SBI-047/2004

Aos meus pais,
que sempre apoiaram minhas decisões.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Roberto de Andrade Martins, pela orientação, paciência e transmissão de raros conhecimentos.

Ao professor André Koch Torres de Assis, pelo incentivo e por suas idéias originais e estimulantes.

Aos amigos da república G-1, que durante muitos anos de convivência suscitaram fervorosas discussões científicas, que ajudaram a elucidar os conceitos mais complexos.

À Juliana, pela sua compreensão e companheirismo.

E finalmente, ao CNPQ, pelo apoio financeiro necessário para a realização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo histórico sobre algumas concepções de interação física que foram propostas por eminentes filósofos e cientistas ao longo dos séculos XVII, XVIII e XIX, com o intuito de fornecer subsídios para ajudar a esclarecer um problema que aparece na maioria dos livros didáticos de Física ao definir-se os tipos de força existentes na natureza. Em particular, pretende-se enfatizar o contraste existente entre a idéia de ação a distância e a idéia de um campo como mediador da interação física entre os corpos materiais, procurando mostrar a origem e o desenvolvimento desses conceitos.

Palavras-chave: interações físicas, campo, ação a distância, eletromagnetismo, ensino de física.

ABSTRACT

The aim of this work is to present a historical study on some conceptions of physical interaction that had been proposed by eminent philosophers and scientists during the 17th, 18th and 19th centuries, in order to help clarifying a difficulty that appears in most high-school physic textbooks when they attempt to describe the several kinds of force in nature. In particular, this work emphasizes the contrast between the concepts of action at a distance and field interaction as a mediated physical interaction between material bodies, by elucidating the origin and the development of these concepts.

Keywords: physical interactions, field, action at a distance, electromagnetism, physics education.

SUMÁRIO

Introdução	1
Capítulo 1 – Análise dos Livros Didáticos de Física do Ensino Médio	7
1.1 A Abordagem do Conceito de Interação Física	7
1.2 A Abordagem do Conceito de Campo Gravitacional	8
1.3 A Abordagem do Conceito de Campo Elétrico	10
1.4 A Abordagem do Conceito de Campo Magnético	11
Capítulo 2 – Eflúvios, Turbilhões e Éteres	13
2.1 Gilbert, o Célebre Investigador dos Poderes do Ímã	13
2.2 Os Turbilhões de Descartes	16
2.3 A Impossibilidade de Ação a Distância em Newton	23
Capítulo 3 – O Legado Newtoniano	33
3.1 A Crítica de Leibniz à Ação a Distância	33
3.2 A Concepção de Força em Boscovich	35
3.3 O Éter “Cartesiano” de Lesage	36
3.4 Kant e as Forças Fundamentais	39
3.5 A Concepção de Fluido Elétrico	42
3.6 As Eletricidades Vítrea e Resinosa de Dufay	43
3.7 A Teoria do Fluido Único de Watson e Franklin	44
3.8 A Ação a Distância em Aepinus	45
3.9 Coulomb e a Impossibilidade de Interação entre os Fluidos Elétricos e Magnéticos	47
Capítulo 4 – A Descoberta do Eletromagnetismo	50
4.1 A Eletricidade Animal de Galvani	50
4.2 A Pilha de Alessandro Volta	51
4.3 O Conflito Elétrico de Oersted	54
4.4 Os Elementos de Corrente de Ampère	58
4.5 As Linhas de Força de Faraday	64
4.6 A Síntese Realizada por Weber	70
4.7 O Campo Eletromagnético de Maxwell	73
Capítulo 5 – A Teoria Eletromagnética após Maxwell	84
5.1 O papel decisivo de Helmholtz para a mudança de paradigma na década de 1870	84
5.2 A Detecção das Ondas Eletromagnéticas por Hertz	87
5.3 O Problema do Movimento Através do Éter	90
5.4 A Interpretação de Lorentz da Experiência de Michelson-Morley	95
5.5 O Éter e a Teoria da Relatividade de Einstein	97
Conclusão – Sugestões para o Estudo do Conceito de Interação Física no Ensino Médio Baseado em seu Estudo Histórico	106
Bibliografia	111

Devo pedir-lhes que se dirijam para um território muito antigo e que voltem sua atenção para uma questão que tem sido levantada de tempos em tempos desde que os homens começaram a pensar. A questão é aquela referente à transmissão da força. Sabemos que dois corpos separados por uma certa distância exercem influência mútua sobre os movimentos um do outro. Dependerá esta ação da existência de uma terceira coisa, algum meio de comunicação ocupando o espaço entre os corpos ou será que os corpos agem uns sobre os outros imediatamente, sem a intervenção de nada? (Maxwell, *Scientific Papers*, v. 2, *On Action at a Distance*, p. 311)

INTRODUÇÃO

Ensinar Física nos dias de hoje tornou-se um grande desafio para o professor que sinceramente deseja algo mais do que a mera manipulação de fórmulas por parte de seus alunos que leve à resolução de exercícios padronizados e muitas vezes, sem vínculo com a realidade vivida por eles.

O ensino de Física baseado nos livros didáticos comuns apenas ratifica esta prática, pois não permite que as grandes questões levantadas pelo ser humano ao longo da história sejam discutidas em sala de aula, já que o conhecimento é apresentado como um produto acabado, fruto da genialidade de algumas mentes privilegiadas, levando os alunos a concluir que são incapazes de fazer ciência ou que nada mais existe a ser descoberto ou inventado. Isto contribui para a elevação dos índices de analfabetismo científico dos alunos, mesmo que freqüentemente normalmente as aulas de ciências, já que não conseguem se interessar pelo que estão estudando.

No entanto, eminentes pensadores comentaram sobre a importância de uma educação conformista em ciências. Thomas Kuhn, por exemplo, afirma que a história da ciência é distorcida numa sala de aula para que os cientistas do passado sejam retratados como se trabalhassem o mesmo conjunto de problemas trabalhados pelos cientistas modernos, de modo a fazer com que o cientista em formação sinta-se parte integrante de uma tradição bem sucedida na busca da verdade (Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas*, pp. 175-6). Assim, a ciência exposta nos livros didáticos deveria mostrar um todo harmonioso, onde os capítulos se encaixassem em ordem, sem apresentarem quaisquer contradições, dúvidas ou hesitações (Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas*, pp. 207-8).

Stephen Brush sugere que a história da ciência poderia influenciar negativamente o pesquisador em início de carreira, pois minaria as certezas do dogma científico que mantêm seu entusiasmo (Brush, 1974).

Não concordamos com os pontos de vista de Kuhn e Brush, pois acreditamos que a ciência deve ser vista da forma como foi sendo elaborada, como um organismo vivo, impregnado de condição humana, com as suas forças e as suas fraquezas e subordinados às grandes necessidades do homem na sua luta pelo entendimento e pela libertação (Caraça, 1970).

Com o auxílio da história e da filosofia da ciência, as aulas de ciências poderiam se tornar mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; poderiam permitir um entendimento mais integral da matéria científica, contribuindo para

superar a falta de significado dos conceitos ensinados e poderiam ajudar o professor na compreensão da estrutura e evolução da disciplina que leciona (Matthews, 1995, p. 165).

De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais, é essencial que o conhecimento científico seja explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação e associado às outras formas de expressão e produção humanas. Para isso, o estudante egresso do Ensino Médio deveria ser capaz de, entre outras habilidades e competências, reconhecer o sentido histórico da ciência e da tecnologia, percebendo suas relações com o contexto cultural, social, político e econômico em diferentes épocas e compreender as ciências como construções humanas, entendendo como elas se desenvolveram por acumulação, continuidade ou ruptura de paradigmas, relacionando o desenvolvimento científico com a transformação da sociedade (Brasil, PCN – Ensino Médio, 1999, p. 217).

Esta preocupação com o processo histórico já havia sido apontada pelo filósofo alemão Ernst Mach no final do século XIX, ao comentar que:

A investigação histórica do desenvolvimento da ciência é extremamente necessária a fim de que os princípios que guarda como tesouros não se tornem um sistema de preceitos apenas parcialmente compreendidos ou, o que é pior, um sistema de pré-conceitos. A investigação histórica não somente promove a compreensão daquilo que existe agora, mas também nos apresenta novas possibilidades (Mach, *The Science of Mechanics*, p. 316-7)

O caso de Albert Einstein fornece uma confirmação inequívoca da importância da investigação histórica no desenvolvimento de “novas possibilidades”. Em seu ensaio autobiográfico, ele comenta como, em fins do século XIX, os físicos jamais tinham desistido de tentar fundamentar a teoria do eletromagnetismo de Maxwell em princípios mecânicos e como a leitura do livro *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung Historisch-Kritisch Dargestellt (A Ciência da Mecânica – Uma Descrição Histórica e Crítica de seu Desenvolvimento)*, de Ernst Mach, ajudou-o a atacar o problema sob outro ângulo:

Foi Ernst Mach quem, com sua *História da Mecânica*, revolucionou essa crença dogmática. Esse livro exerceu em mim uma influência profunda quando era ainda estudante. Vejo a grandeza de Mach no seu ceticismo e incorruptível independência (Einstein, *Notas Autobiográficas*, p. 29).

O estudo da História da Ciência pode ajudar o professor a complementar os aspectos puramente técnicos de uma aula com aspectos sociais, humanos e culturais de uma época; pode fornecer informações sobre a vida dos cientistas e seus eventuais êxitos e fracassos; pode abordar as concepções alternativas de um certo período e as controvérsias e dificuldades de aceitação de

novas idéias; pode facilitar a compreensão do real significado dos resultados científicos atualmente aceitos, que em geral, são pouco intuitivos e difíceis de serem ensinados; e também pode permitir uma visão crítica da origem e evolução dos conceitos científicos (Martins, 1990, p. 4).

Ainda sobre a utilização da História da Ciência no ensino, citemos uma passagem do importante livro de Michael R. Matthews:

Os estudantes de ciências deveriam adquirir uma idéia sobre questões metodológicas, de como as teorias científicas são avaliadas e de como teorias rivais são consideradas, terem uma idéia da relação entre o papel do experimento, da matemática, da religião e do compromisso filosófico no desenvolvimento da ciência. Todos os estudantes deveriam ter algum conhecimento dos grandes episódios que surgiram durante o desenvolvimento da ciência e conseqüentemente da cultura: a antiga desmitificação da visão de mundo; a revolução copernicana ao retirar a Terra do centro do universo; o desenvolvimento da ciência experimental e matemática associada a Galileu e Newton; a demonstração newtoniana de que as leis terrestres de atração também operam em domínios celestes [...]. E para que os fatores sociais, intelectuais, técnicos e pessoais que contribuíram para essas grandes realizações pudessem ser discutidos adequadamente com os alunos, os professores de ciência deveriam ter um certo conhecimento sobre a história e a natureza da disciplina que ensinam (Matthews, 1994, pp. 2-3).

Assim, uma abordagem histórica e filosófica da ciência poderia contribuir fortemente para um maior entendimento de sua dinâmica evolutiva e sua estrutura teórica. Questões acerca do *status* ontológico de conceitos como campo eletromagnético ou éter luminífero ou sobre o papel das hipóteses e modelos na investigação científica ou até mesmo sobre a veracidade de teorias são questões que surgiriam normalmente no enfoque dinâmico e evolutivo de ciência, não podendo ser omitidos ou muito menos, respondidos de forma simplista.

Atuando como professor de Física do Ensino Médio, comecei a me preocupar com tais questões quando percebi que a perguntas do tipo “por que os corpos caem?” ou “por que o ímã atrai o prego?”, meus alunos respondiam prontamente que era por causa da gravidade e por causa do campo magnético, respectivamente; mas quando eu perguntava o que eles entendiam por gravidade ou por campo magnético, a confiança demonstrada anteriormente em suas respostas desaparecia, e o que se via era um silêncio estarrecedor. Comecei a pensar que talvez isso ocorresse devido a eles não absorverem as definições de campo que lhes eram apresentadas, por serem anti-intuitivas e estarem em desacordo com suas pré-concepções.

Estudos realizados na área de ensino de ciências (Bar and Zinn, 1998; Garcia and Piaget, 1989; Matthews, 1992) mostram que as idéias dos alunos sobre interação física são muito parecidas com as idéias que surgiram ao longo da história, sugerindo que a compreensão de conceitos abstratos mais elaborados se dá através de um processo de amadurecimento lento e que exige um esforço muito grande.

Estes estudos também mostram que o aprendizado das ciências é, às vezes, dificultado por concepções de “senso comum” que, de um modo geral, coincidem com as concepções abandonadas ao longo da história. Conhecendo essas concepções antigas e que não são descritas nos manuais científicos, o professor terá maior facilidade em compreender as dificuldades e resistências de seus alunos e poderá mais facilmente respeitar suas concepções e fazer uma transição destas para as doutrinas atuais (Martins, 1990, p. 4).

Ao aprender como os problemas foram resolvidos no passado, os professores de ciências freqüentemente adquirem alguma idéia de como lidar com as idéias alternativas dos alunos, já que muitas vezes elas são as mesmas que foram encontradas pelos cientistas de outras épocas. Alguns desses cientistas desenvolveram conceitos usando metodologias de pesquisa baseados em materiais tecnológicos com um baixo nível de sofisticação ou com um reduzido ou diferente conhecimento em comparação com o presente, e as concepções alternativas dos alunos podem ser devido a limitações do mesmo tipo (Bar and Zinn, 1998, p. 472). Assim, dificuldades sentidas pelos alunos em entender o conceito de campo podem ser devido a eles associarem idéias concretas, similares às desenvolvidas no passado, a conceitos físicos abstratos do presente.

Citemos, por exemplo, o caso em que o professor apresente a seus alunos o conceito de onda eletromagnética, desvinculado de seu contexto histórico:

Onda eletromagnética é uma perturbação eletromagnética, através do espaço, constituída pelos campos elétrico e magnético variáveis com o decurso do tempo, gerando um ao outro em induções recíprocas (Yamamoto, Fuke e Shigekiyo, v. 3, p. 322).

Definições como esta não podem ser consideradas satisfatórias. Como convencer os estudantes e mesmo a si próprio de que se trata de uma perturbação que se propaga através do espaço vazio? E os campos elétricos e magnéticos, seriam materiais ou estariam representando apenas funções matemáticas? Como e por qual motivo essa idéia surgiu num determinado momento?

Um campo, em linguagem matemática, é geralmente entendido como estando em uma região do espaço quando cada ponto dessa região pode ser caracterizado por uma ou várias quantidades que sejam funções das coordenadas do espaço e do tempo.

Em Hidrodinâmica, por exemplo, o campo de movimento de um fluido pode ser caracterizado por sua velocidade em cada ponto e o movimento pode ser descrito através de equações diferenciais envolvendo as componentes da velocidade no ponto considerado em um certo instante de tempo. Mas com a crescente valorização de modelos matemáticos ao longo do século XIX e a partir do momento em que a idéia de função potencial, desenvolvida principalmente por Joseph Louis Lagrange (1736-1813), Pierre Simon de Laplace (1749-1827) e Siméon Denis Poisson (1781-1840), passou a ser utilizada para descrever certas propriedades do meio no qual os corpos materiais estariam inseridos, a compreensão da natureza tornou-se algo de importância menor, obrigando as pessoas a terem um nível de abstração nunca visto antes (Hesse, 1961, p. 196).

Com o decorrer da leitura do presente trabalho, veremos que por muito tempo, a hipótese de um éter preenchendo todo o espaço foi pensada como sendo necessária porque indiretamente era sustentada pela evidência da existência de ondas luminosas propagando-se através dele. No entanto, quando Einstein sugeriu que a noção de que os campos físicos poderiam existir no espaço vazio sem associação imediata com qualquer meio, tornou-se mais plausível pensar que as ondas eletromagnéticas fossem meramente campos elétricos e magnéticos variando periodicamente e que nenhuma vibração material precisaria ser postulada para sustentá-los:

O campo foi no começo qualquer coisa que mais tarde tinha de receber interpretação mecânica com o auxílio do éter. Isso, porém, tornou-se impossível; os resultados da teoria de campo já se tinham mostrado muito sérios e vastos para caberem no velho molde. Além disso, o problema de prefigurar o modelo mecânico do éter ia aos poucos se afastando de qualquer solução, em vista do caráter forçado e artificial desse meio.

A nossa única saída é tomarmos como assente que o espaço tem a propriedade física de transmitir ondas eletromagnéticas – e não nos incomodarmos com a significação deste princípio (Einstein & Infeld, *A Evolução da Física*, p. 119).

O abandono do éter como um conceito físico útil foi então uma consequência da dificuldade em encontrar modelos mecânicos aceitáveis para ele e da percepção de que somente modelos matemáticos fossem requeridos, e deste ponto de vista, a impossibilidade de medir a velocidade relativa ao éter foi meramente uma confirmação de que o éter não cumpria função em uma teoria física (Hesse, 1962, p. 228-9). No entanto, veremos também (cap. 5) que o abandono do éter não

era algo necessário, mas que se apresentava como uma saída alternativa para resolver os problemas científicos existentes no início do século XX.

Iniciaremos nosso estudo apresentando no capítulo 1 a maneira como os livros didáticos lidam com as concepções de interação física e as idéias relacionadas com os conceitos de força de campo e de ação a distância.

Acreditando que o estudo histórico das concepções de interação física possa contribuir grandemente ao ensino desse assunto no Ensino Médio, procuraremos mostrar no capítulo 2 do presente trabalho, a visão mecanicista de mundo que vigorou durante todo o século XVII, estudando em detalhes as concepções de interação física concebidas por Gilbert, Descartes e Newton.

No capítulo 3, falaremos sobre os desdobramentos do pensamento newtoniano ocorridos no século XVIII e as idéias seminais que acabaram culminando posteriormente na descoberta do eletromagnetismo.

As primeiras tentativas de explicar a incrível e inesperada maneira de ocorrer a relação existente entre eletricidade e magnetismo e a fase madura do desenvolvimento da teoria eletromagnética serão apresentadas no capítulo 4.

O capítulo 5 será dedicado ao estudo da teoria eletromagnética após os trabalhos de Maxwell e os prováveis motivos que levaram Einstein, no início do século XX, a abandonar o conceito de éter e edificar sua Teoria da Relatividade Especial.

Finalmente, na conclusão deste trabalho, procuraremos apresentar algumas sugestões que possam ajudar os professores de Física do Ensino Médio a abordarem este assunto tão importante como o da interação física de maneira adequada e mais fiel ao processo histórico de desenvolvimento das idéias.

CAPÍTULO 1 – ANÁLISE DOS LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO

1.1 A Abordagem do Conceito de Interação Física

Como despertar em nossos alunos o gosto pelas ciências? Acredito que uma das maneiras de se fazer isso é discutindo com eles as grandes questões com as quais eminentes filósofos, pensadores e cientistas dedicaram boa parte de suas vidas e de que maneira eles tentaram responder racionalmente a elas.

Uma dessas questões pelas quais a humanidade anseia por uma resposta desde a Antigüidade é, seguramente, a seguinte: de que maneira ocorrem as interações físicas na natureza? Um corpo pode agir onde ele não se encontra? Por exemplo, como um ímã consegue atrair um prego que se encontra em suas proximidades? Por que os corpos caem em direção à Terra? Se considerarmos que as forças agem através de um campo, podemos perguntar: esse campo pelo qual a força é transmitida de um corpo para outro apresenta quais propriedades? É material ou imaterial? É detectável ou não?

Embora essas preocupações sempre estiveram presentes nas mentes dos grandes cientistas, os livros didáticos consultados não levam em consideração esses questionamentos ao apresentarem seus conceitos. O que se vê são concepções prontas e que devem ser aceitas sem nenhuma discussão, tornando o ensino da física doutrinário.

Ao iniciarem o estudo da mecânica newtoniana, a idéia predominante que encontramos nos livros didáticos de Física do Ensino Médio é a de que força é o resultado da interação entre dois corpos e que, portanto, só podem surgir aos pares, já que se um corpo sofre a ação de uma força é porque outro corpo a aplica. Em seguida, afirma-se que dois corpos podem interagir, ou seja, trocar forças, basicamente de duas formas:

1^a) Através do contato direto entre eles, caso em que as forças são denominadas *forças de contato*.

2^a) Sem que haja contato entre eles, caso em que um corpo sofre a influência de outro através de um agente transmissor das forças trocadas entre eles chamado de campo. E por essa razão, *as forças de ação a distância são chamadas de forças de campo*, sendo apresentadas como exemplos desse caso, as forças gravitacionais, elétricas e magnéticas. Vejamos alguns exemplos de como essa idéia equivocada é apresentada:

Força de campo: interação que ocorre mesmo quando os corpos estão distanciados entre si; a região do espaço onde isso é verificado recebe o nome de campo de força. Exemplos: campo gravitacional, campo elétrico e campo magnético (Yamamoto, Fuke e Shigekiyo, 1998, v. 1, p.181).

Forças que ocorrem mesmo os corpos estando distanciados um do outro são chamadas *forças de campo* (Bonjorno e col., 1997, v. 1, p. 182).

Existe um outro tipo de força, que não necessita do contato físico entre os corpos: a *força de ação a distância* ou *força de campo*. A força gravitacional é uma força de ação a distância (força de campo) (Anjos e Arruda, 1993, v. 1, p. 129).

Uma força de interação entre os corpos é de campo quando os corpos se encontram separados e de contato quando se encontram juntos (Nunes, 1995, v. 1, p. 164).

Quanto à idéia de força como resultado da interação entre os corpos, não há problemas, mas ao apresentarem força de campo como sinônimo de força de ação a distância, pode-se notar o total desconhecimento sobre o debate histórico a respeito desse assunto existente entre cientistas e filósofos. Isto impede que o estudante tenha o prazer de entrar em contato com as grandes questões levantadas por esses pensadores, além de não fornecer a eles qualquer tipo de visão sobre a construção do conhecimento ou de como a ciência se desenvolve.

Costuma-se dizer que uma partícula age diretamente a distância sobre outra quando a comunicação é direta, ou seja, quando não existe meio de transmissão preenchendo o espaço entre elas ou quando esse meio, se existir, não participa da interação. Por outro lado, na física de campos, como originalmente concebido, entende-se que uma partícula só pode agir sobre outra se houver um meio físico entre elas que, ao sofrer uma perturbação, consegue transmiti-la contínua e sucessivamente para as regiões mais remotas, de modo que a outra partícula seja afetada somente quando este distúrbio alcançar suas próprias vizinhanças. Ou seja, campo e ação a distância são duas idéias antagônicas e não similares, como aparece nos livros didáticos.

O estudo histórico que nos propusemos a realizar apresenta um pouco desse debate em torno das concepções de interação física, procurando mostrar de que maneira elas foram interpretadas em várias épocas.

1.2 A Abordagem do Conceito de Campo Gravitacional

A idéia predominante para o conceito de campo gravitacional encontrada nos livros didáticos de Ensino Médio que foram consultados é a de que se trata de uma região do espaço onde atuam forças entre corpos a distância (Ramalho e col., 1986, v. 1, p. 116; Calçada e Sampaio, 1998, v. 1, p. 398; Luz e Álvares, 2000, v. 3, pp. 55-6; Gonçalves e Toscano, 1997, v. 1, p. 134). Como exemplo, podemos citar:

Dizemos que em torno da Terra (ou em torno de qualquer corpo material) existe um *campo gravitacional*, pois uma massa m , colocada em qualquer ponto do

espaço em torno da Terra, fica submetida à ação de uma força exercida por ela (Luz e Álvares, 2000, v. 3, pp. 55-6).

Parece existir uma idéia generalizada de que campo é apenas uma região do espaço em que são detectadas forças com o auxílio de um corpo de prova. Ou seja, assume-se (em geral, de forma implícita e sempre sem discussão) que não é possível conceber um corpo agindo sobre outro a distância, e define-se uma grandeza física denominada *campo de forças* capaz de exercer essa função, de modo que sua existência em uma certa região do espaço fique vinculada ao aparecimento de uma força exercida sobre um corpo ao ser colocado nessa região, sem que haja qualquer menção sobre o modo pelo qual o corpo percebe a presença desse campo. Quer dizer, concebe-se o campo como sendo destituído de qualquer substancialidade física.

Além disso, não se pode afirmar que um determinado conceito físico seja equivalente a uma região do espaço (Ramalho e col., 1986, v. 1, p. 116; Bonjorno e col., 1997, v. 1, p. 349). Se acreditarmos na existência do campo, então só poderemos afirmar que ele *está no espaço* e não que *ele é o espaço*. O espaço é um ente geométrico e, portanto, só pode apresentar propriedades geométricas, como tamanho e forma, não podendo apresentar propriedades físicas como cor, peso, elasticidade etc. Confundir o campo com a região do espaço onde ele atua é como identificar a atmosfera ou o oceano com o lugar que ocupam no espaço.

Outros livros chegam a mencionar o papel do campo nas interações físicas:

Em torno da Terra há uma região denominada campo gravitacional. Todos os corpos lá colocados sofrem sua influência, que se apresenta em forma de uma força (Bonjorno e col. 1997, v. 1, p. 349).

A Terra cria em torno de si um campo de forças, denominado *campo gravitacional*. Qualquer corpo situado nesse campo recebe da Terra uma força atrativa, dirigida para o centro do planeta. É devido a essa força que o corpo, uma vez abandonado à ação do campo, é acelerado durante sua descida (Doca, Biscuola e Bôas, 2001, v. 1, p. 171).

Note, por exemplo, como na segunda citação acima, não fica claro se é a Terra ou o campo gravitacional criado pela Terra que exerce a força sobre o corpo.

A confusão apresentada por esses livros está em associar a idéia de campo a uma região do espaço em que são detectadas forças e não discutir a natureza física desse campo. Ora, se o campo serve apenas para indicar a presença de forças, sendo ele próprio indetectável, então qual está sendo sua utilidade? Para os estudantes, a introdução desse tipo de conceituação parece abstrata, forçada e inútil, pois não parece adicionar nada de interessante ao que ele já sabia. Mede-se a força e divide-se pela massa (ou carga) e obtém-se o valor do campo. E daí?

Conceitualmente, o que é importante não é essa divisão, e sim explicar que, de acordo com o conceito de campo, a Terra não atrai qualquer objeto, e uma carga elétrica não atrai (ou repele) qualquer outra. A causa da aceleração do objeto pesado (ou da carga) é uma coisa invisível que está em torno dela: o *campo*, cuja natureza física tem se modificado ao longo do tempo, de acordo com a concepção de interação física que cada cientista tem em mente.

Embora o livro *Física I – Mecânica*, escrito pelo *Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (GREF)*, não comente sobre a possibilidade de interpretar as interações físicas baseando-se em forças agindo diretamente a distância, a idéia de campo como mediador dessas interações é explicada de maneira adequada, ou seja, enfatizando-se que a força que aparece resulta da interação entre o campo e a massa do objeto. Além disso, toma-se o cuidado de distinguir o campo da região onde ele se encontra:

Em uma região onde um objeto é atraído por uma força gravitacional dizemos que existe um *campo de forças gravitacionais* ou simplesmente, um *campo gravitacional*. Assim, a força de atração entre a Terra e um objeto, por exemplo, é o resultado da interação entre o campo gravitacional criado pela Terra e a massa do objeto. Simultaneamente a Terra sofre a força de interação entre o campo gerado pelo objeto e a massa da Terra (GREF, 2000, p. 155).

Novamente, no entanto, a natureza física do campo não é discutida, contrariamente ao que tem acontecido ao longo da história.

1.3 A Abordagem do Conceito de Campo Elétrico

Em geral, os livros analisados passam a idéia de que campo elétrico é uma região do espaço ao redor de uma carga elétrica onde qualquer corpo eletrizado fica sujeito à ação de uma força de origem elétrica (Yamamoto, Fuke e Shigekiyo, 1998, v. 3, p. 47; Anjos e Arruda, 1993, v. 3, p. 31; Chiquetto, Valentim e Pagliari, 1996). Ou que existe uma região de influência da carga geradora do campo elétrico, onde qualquer carga de prova inserida nesta região estará sob a ação de uma força de origem elétrica (Bonjorno e col., 1997).

Deve-se notar, no entanto que, além dos problemas apontados anteriormente, expressões do tipo *região do espaço ao redor de uma carga* ou *região de influência* passam uma idéia de algo limitado, sendo que na verdade, a idéia aceita atualmente é a de que os campos estejam presentes em todos os lugares.

A maioria dos livros faz uma comparação entre campo gravitacional e campo elétrico. A analogia é a seguinte: sabe-se que a Terra cria um campo gravitacional a sua volta e que um corpo colocado num ponto qualquer desse campo fica sujeito à força gravitacional. Da mesma forma, um corpo eletrizado cria um campo elétrico no espaço que o circunda e um corpo eletrizado colocado num ponto qualquer desse campo fica sujeito à ação da força elétrica

(Nunes, 1995; Yamamoto, Fuke e Shigekiyo, 1998; Ramalho e col., 1986; Calçada e Sampaio, 1998; Bonjorno e col., 1997). Mas, se o ensino do conceito de campo gravitacional está equivocado, então esta analogia não pode ser considerada válida.

Afirma-se que para detectar a existência de um campo elétrico numa região, basta usar uma carga de prova. Como exemplo, podemos citar:

Em uma região há um campo elétrico quando uma carga de prova aí colocada, em repouso, fica sujeita à ação de uma força elétrica (Calçada e Sampaio, 1998, v. 3, p. 219).

Uma carga elétrica puntiforme ou uma distribuição de cargas modifica, de alguma forma, a região que a envolve, de modo que, ao colocarmos uma carga puntiforme de prova, será constatada a existência de uma força de origem elétrica.

O campo elétrico desempenha o papel de transmissor de interações elétricas (Ramalho e col., 1986, v. 3, p. 24).

Não se pode afirmar que o campo elétrico existe porque aparece uma força sobre a carga. Como saber se a força a que a carga teste ficou submetida é de natureza elétrica, gravitacional, magnética ou de qualquer outra natureza desconhecida? A única coisa que se pode afirmar é que, uma carga de prova fica sujeita a um deslocamento na presença de outra carga e não que exista um campo elétrico naquele local onde foi colocada a carga de prova. Afirmar que um campo existe ou não, é simplesmente uma questão de escolha, pois pode-se muito bem querer entender o movimento de uma carga sem mencionar a idéia de campo, adotando-se a idéia de ação a distância.

É interessante ressaltar que, embora o livro de Ramalho e col. afirme que o campo elétrico desempenha o papel de transmissor de interações elétricas, nada é mencionado a respeito de como essa transmissão é feita, qual o meio pelo qual ela ocorre, se é instantânea ou não, ou quanto tempo demora para isso ocorrer.

1.4 A Abordagem do Conceito de Campo Magnético

A idéia geral apresentada pelos livros para o conceito de campo magnético é a de se tratar de uma região do espaço na qual um ímã ou um fio condutor de corrente elétrica manifesta sua ação (Ramalho e col., 1986, v. 3, p. 237; Calçada e Sampaio, 1998, v. 3, p. 410 e 455; Anjos e Arruda, 1993, v. 3, p. 217 e 220; Yamamoto, Fuke e Shigekiyo, 1998, v. 1, p. 262)

Alguns livros afirmam que a prova da existência de um campo numa certa região do espaço é o fato de se verificar um deslocamento de uma agulha magnética naquela região:

A agulha magnética serve como elemento de prova da existência do campo magnético num ponto (Ramalho e col., 1986, v. 3, p. 237).

No entanto, novamente só podemos afirmar que a agulha magnética sofreu um deslocamento e não que existe algo naquele lugar. É possível interpretar o movimento da agulha como sendo devido a uma força a distância. Apenas se for rejeitada a possibilidade de forças diretas a distância (o que os livros didáticos não discutem) é que as afirmações desse tipo poderiam fazer algum sentido.

Em alguns livros aparecem explicações tão obscuras que são até mesmo difíceis de serem interpretadas:

Atualmente, sabe-se que o fenômeno magnético observado por Oersted é devido às forças entre *cargas elétricas em movimento*, que geram ao seu redor um campo de forças denominado *campo magnético* (Yamamoto, Fuke e Shigekiyo, 1998, v. 1, p. 262).

O texto não esclarece para o leitor o que isso significa, não deixando claro se a força é realmente *entre as cargas elétricas* (ação direta a distância) ou qual função está sendo atribuída ao campo. Este e outros problemas citados anteriormente mostram a grande confusão existente sobre o assunto nos livros didáticos.

Para evitar que os estudantes adquiram uma visão deturpada da ciência, para evitar que eles aprendam conceitos desconexos, com pouca ou nenhuma relação entre si, faremos um estudo histórico das concepções de interação física que foram imaginadas por pessoas que buscavam entender melhor o funcionamento da natureza, pensadores que acreditavam ser possível encontrar uma certa harmonia em um universo aparentemente caótico.

CAPÍTULO 2 – EFLÚVIOS, TURBILHÕES E ÉTERES

2.1 Gilbert, O Célebre Investigador dos Poderes do Ímã

William Gilbert (1540-1603) nasceu na cidade de Colchester, Inglaterra. Ele estudou no St. John's College, em Cambridge, e por volta de 1575, mudou-se para Londres, onde estudou medicina e tornou-se membro do *Royal College of Physicians*. Em 1581, Gilbert já era um médico famoso, sendo frequentemente consultado por membros influentes da nobreza inglesa, chegando a ser nomeado médico da rainha Elizabeth e passando a viver na corte a partir de 1600 (Kelly, 1981, p. 396).

Pouco se sabe sobre a vida de Gilbert em Londres, pois após sua morte, em novembro de 1603, provavelmente vítima da peste, sua biblioteca científica e seus pertences, como instrumentos, globos e minerais, ficaram aos cuidados do *Royal College of Physicians*, que foi totalmente destruído no Grande Incêndio de 1666 (Kelly, 1981, p. 397).

Como muitos médicos de seu tempo, Gilbert demonstrava um grande interesse pelo estudo do magnetismo, pois pensava-se que do mesmo modo que um ímã podia produzir efeitos sobre alguns objetos, ele também poderia apresentar certos poderes curativos para o corpo humano (Leon, 1983, p. 8)

Sua reputação como cientista veio somente em 1600, com a publicação do seu livro *De Magnete Magneticisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure (Sobre o Ímã, os Corpos Magnéticos e o Grande Ímã, a Terra)*, em que ele descreve as propriedades dos ímãs e apresenta a sua teoria de que a Terra se comporta como um grande ímã. Nele, também são descritos experimentos em que aparece a eletricidade estática. Gilbert ainda escreveu *De Mundo Nostro Sublunari Philosophia Nova (Nova Filosofia Sobre Nosso Mundo Sublunar)*, que só foi editado postumamente por seu irmão em 1651.

Gilbert dividiu sua obra *De Magnete* em seis livros. O primeiro tratou da história do magnetismo ao apresentar várias opiniões dos antigos e de seus contemporâneos sobre a natureza, as propriedades e o comportamento dos ímãs. Cada um dos outros cinco livros foi dedicado a um dos movimentos magnéticos conhecidos: atração¹, direção, variação, declinação e revolução.

Antes de começar a discutir a atração magnética, no entanto, Gilbert diferenciou a atração devido ao efeito do âmbar daquela causada pelos ímãs. Substâncias formadas a partir de um fluido ou de uma matéria úmida proveniente da Terra, após tornarem-se sólidas, iriam se comportar como o âmbar ao serem atritadas. A explicação de Gilbert era a de que a fluidez

¹ Gilbert utilizava o termo *magnetic coition* para se referir a uma atração magnética. Ele foi cuidadoso ao distingui-la das outras atrações. Para ele, a atração magnética era uma ação mútua entre o ímã e o ferro, e não apenas de um deles isoladamente (Gilbert, *On the Loadstone*, livro 2, cap. 4, p. 38).

nunca seria completamente perdida, e então tais substâncias emitiriam um eflúvio que capturaria pequenas partículas e tenderiam a atraí-las para o interior delas (Kelly, 1981, p. 398).

Para ele, corpos elétricos nunca exerciam forças repulsivas. A tendência natural para a união de todas as coisas era um princípio que Gilbert atribuía a Pitágoras (c. 580/78-497/6 a.C.) e ele parece ter pensado que isto representasse uma explicação suficiente para a coesão dos corpos e o movimento em direção ao corpo que exerce a atração, desde que a influência de seus eflúvios fosse sentida. Portanto, deveria haver um contato real com os eflúvios:

Pois, como nenhuma ação pode ocorrer sobre a matéria, a não ser por contato, e estes corpos elétricos parecem não se tocarem, faz-se necessário que alguma coisa seja enviada de um corpo para outro, algo que possa tocar precisamente e provocar o início do estímulo (Gilbert, *On the Loadstone*, livro 2, cap. 2, p. 32).

Gilbert também discutiu detalhadamente a possibilidade de o movimento do ar estar envolvido no fenômeno da eletrização por atrito, empurrando pequenos corpos em direção ao corpo atritado, mas negou-a através de diversos experimentos. Ele atribuiu os efeitos elétricos a eflúvios semelhantes a filamentos materiais, que saíam dos corpos atritados e se prenderiam aos corpos próximos, até que sua força se esgotasse (Gilbert, *On the Loadstone*, livro 2, cap. 2, p. 34). Assim, Gilbert parecia acreditar que o fenômeno elétrico era devido a algo de natureza material, que sob influência do atrito, era liberado do vidro ou do âmbar, mas sob condições normais, permanecia aprisionado dentro dos corpos.

Como médico, Gilbert estava bem familiarizado com a doutrina que dizia que o corpo humano continha quatro humores ou líquidos fundamentais: a fleuma, o sangue, a bÍlis ou humor colérico e a bÍlis negra ou humor melancólico. Analogamente, Gilbert imaginou que os corpos eletrizáveis também deveriam conter um tipo de “humor” especial que, ao ser despertado pela ação do atrito, promovesse seu aquecimento, excitação ou até mesmo, sua liberação do corpo como um eflúvio, formando uma atmosfera ao redor do corpo de origem. É possível que, ao perceber que os corpos eletrizáveis eram quase todos duros e transparentes, e portanto, de acordo com as idéias daquela época, eram formados a partir da solidificação de líquidos aquosos, ele tenha concluído que o substrato comum a esses líquidos representasse um tipo especial de humor, através do qual, as propriedades elétricas dos corpos pudessem se manifestar. Este eflúvio deveria ser muito tênue, pois sua emissão não podia ser detectada pela visão. A existência de uma atmosfera ou eflúvio ao redor de todo corpo eletrizado podia, na verdade, ter sido inferida, de acordo com as idéias de Gilbert, do simples fato de existir a atração elétrica. Como ele acreditava que a matéria não podia agir aonde ela não está, e como

os corpos eletrizados podiam agir sobre objetos ao seu redor sem parecer tocá-los, alguma coisa invisível devia estar vindo de dentro deles (Whittaker, 1951, p. 36).

Outra preocupação de Gilbert era a de entender como um ímã podia atrair um pedaço de ferro a distância. Se existissem eflúvios magnéticos similares aos eflúvios elétricos, eles deveriam ser capazes de penetrar no ferro, já que o poder magnético podia ser transferido do ímã para o ferro. Mas sabia-se que o ferro também era afetado pelo ímã mesmo através de espessas camadas de matéria densa existentes entre eles, através das quais a ação elétrica não podia penetrar. Desse modo, Gilbert concluiu que o magnetismo não podia ser transmitido por meio de partículas materiais, como ele imaginava que fosse a transmissão da atração elétrica.

De fato, a analogia mais apropriada para a ação magnética parecia ser, para ele, a de os ímãs serem dotados de almas ativas e capazes de se movimentarem por si próprias, como Tales de Mileto (c. 625/4-558/6 a.C.) e Aristóteles (384-322 a.C.), entre outros, já haviam afirmado no passado (Hesse, 1962, p. 90). Em essência, a resposta por ele dada foi a mesma que tivera aceitação na Antigüidade: o magnetismo era interpretado animisticamente. A força magnética era algo “animado”, que “imita uma alma”.

Os materiais magnéticos seriam aquelas substâncias que compartilhavam a *forma primária* da Terra. Esta forma, implantada na Terra pelo Criador, dava a ela o poder do magnetismo. Todas as partes da Terra que mantivessem essa forma primária, isto é, os ímãs e o ferro, representariam os corpos magnéticos (Kelly, 1981, p. 398). E com essa idéia, ele apresentou a seguinte explicação para a atração magnética:

Portanto, aquilo que emana do ímã, ou entra no ferro, ou que sai novamente do ferro despertado, não é corpóreo; mas um ímã envia sua influência sobre um outro ímã por sua forma primária (Gilbert, *On the Loadstone*, livro 2, cap. 4, p. 38).

Através de várias experiências, ele rejeitou qualquer tipo de explicação mecânica para a ação magnética, negando a possibilidade de que ela pudesse ser produzida por algum tipo de eflúvio de átomos, pelo ar, ou por qualquer outro meio físico entre o ímã e o ferro, pois os efeitos do ímã não eram afetados quando se colocava uma placa de mármore ou uma chama entre ele e um pedaço de ferro (Gilbert, *On the Loadstone*, livro 2, cap. 4, p. 38).

Assim como os ímãs, a Terra (entendida como sendo um grande ímã), também seria dotada de uma alma, cujo poder de agir a distância seria explicado por Gilbert analogamente à sua concepção de um eflúvio magnético emitido pelo ímã. Ele supunha que esse eflúvio envolvesse o corpo atraído, como um braço, e o puxasse para o ímã (Gilbert, *On the Loadstone*, livro 2, cap. 2, p. 33). Contudo, não se tratava, de modo algum, de algo corpóreo. Devia ser algo leve e espiritual, de modo a penetrar no ferro.

No livro 6 do *De Magnete*, Gilbert fala um pouco sobre suas idéias cosmológicas. Sem entrar no mérito de acreditar em um universo heliocêntrico ou geocêntrico, ele aceitou e

apresentou uma possível explicação para a rotação diária da Terra. Desde a *Carta sobre o Ímã*, de Peter Peregrinus, escrita no século XIII, a rotação tinha sido considerada como um dos movimentos magnéticos. A hipótese era a de que um ímã perfeitamente esférico e totalmente alinhado com os pólos celestes, giraria sobre seu próprio eixo em 24 horas. Como a Terra funcionava como um ímã, ela também deveria girar da mesma forma. A teoria foi emprestada de Peregrinus e aplicada por Gilbert no caso da Terra (Kelly, 1981, p. 399).

Em seu trabalho póstumo, *De Mundo Nostro Sublunari Philosophia Nova*, Gilbert discutiu a interação existente entre a Terra e a Lua em termos magnéticos. Como a Lua se encontrava dentro da esfera de influência da Terra, havia uma ação mútua entre os dois corpos, cabendo à Terra exercer o efeito maior entre ambas devido a sua maior massa (Burt, 1991, p. 133). Embora ele tivesse imaginado que as forças magnéticas pudessem explicar o movimento dos planetas, ele não foi capaz de explicitar os princípios que impediam os corpos celestes de se juntarem.

O importante é que sua concepção de esfera de influência magnética para explicar os efeitos magnéticos e a explicação do efeito do âmbar em termos de eflúvios elétricos forneceram explicações possíveis para esses fenômenos sem a utilização da idéia de ação a distância e serviram como um ponto de partida para o estudo da eletricidade e do magnetismo nos séculos seguintes.

2.2 Os Turbilhões de Descartes

René Descartes (1596-1650) foi o primeiro pensador moderno a tentar uma reconstrução geral das idéias a respeito do universo físico desde a sua formação, ou seja, a tentar edificar uma cosmogonia completa.

Ao tentar essa grande empreitada, como não podia deixar de ser, ele acabou se deparando com uma das maiores questões da filosofia natural, a de entender como as ações físicas entre corpos que não se encontram em contato mútuo são transmitidas, tal como indica o comportamento dos ímãs ou uma possível influência da Lua sobre as marés.

Aceitar influências ocultas que explicassem essas interações estaria em completo desacordo com os princípios cartesianos de apenas admitir idéias claras e distintas e de se basear apenas nas propriedades mais simples da matéria. Sustentando, então, que os efeitos produzidos por meio dos contatos e colisões constituíam os fenômenos mais simples e mais inteligíveis no mundo exterior, Descartes iniciou a descrição de sua visão de mundo.

Assim, em sua obra *Principiorum Philosophiae (Princípios da Filosofia)*, de 1644, Descartes imaginou inicialmente um universo preenchido totalmente por uma matéria homogênea que teria sido dotada de um movimento devido a ação de Deus:

Depois de ter examinado a natureza do movimento, é necessário considerar a sua causa. E porque pode ser dupla, começaremos pela primeira e mais universal, a que produz geralmente todos os movimentos do mundo. [...] parece-me evidente que só pode ser Deus, cuja onipotência deu origem à matéria com o seu movimento e o repouso das suas partes, conservando agora no universo, pelo seu concurso ordinário, tanto movimento e repouso como quando o criou (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 2ª parte, § 36).

Este movimento teria dado início a um processo de formação de pequenas partes arredondadas executando movimentos de rotação:

[...] consideraremos que toda a matéria que compõe todo o mundo foi inicialmente dividida em muitas partes iguais que não poderiam ter sido redondas, pois muitas esferas juntas não compõem um corpo inteiramente sólido e contínuo como o universo é, e no qual, como acima demonstrei, não pode haver o vazio. Mas, fosse qual fosse a forma que estas partes tiveram, com o decorrer do tempo tornaram-se redondas, na medida em que executaram diversos movimentos circulares (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 3ª parte, § 48).

Esses movimentos circulares teriam dado origem a imensos turbilhões e redemoinhos espalhados por todo o espaço. Ao longo do tempo, essas partes foram se desgastando e preenchendo todos os espaços:

Mas como não pode haver espaço vazio em recanto algum do universo, e porque as partículas da matéria são redondas, só poderão unir-se estreitamente se não deixarem pequenos intervalos entre elas, e por isso, é necessário que estes pequenos intervalos sejam preenchidos por quaisquer outras partes desta matéria, que devem ser extremamente pequenas para mudarem continuamente de figura a fim de se adaptarem à dos locais onde entraram. Assim, devemos pensar que aquilo que sobressai dos ângulos das partes da matéria à medida que se arredondam, friccionando-se umas contra as outras, é tão diminuto e adquire uma tão grande velocidade que a impetuosidade do seu movimento o pode dividir em partes incontáveis, as quais, por não terem espessura nem figura determinadas, preenchem facilmente todos os pequenos intervalos por onde as outras partes da matéria não podem passar (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 3ª parte, § 49).

Neste processo, Descartes descreve a formação de três elementos principais no mundo visível, com os quais ele procurará explicar os mais variados fenômenos existentes na natureza:

Deste modo, já podemos considerar que encontramos na matéria duas formas diferentes, e que podem ser consideradas como as formas dos dois primeiros elementos do mundo visível. A primeira é que [esta fricção obrigou-a a separar-se das outras partículas da matéria quando se arredondaram e], movendo-se com tanta velocidade que ao encontrar-se com outros corpos, a simples força da sua agitação é suficiente para ser friccionada e dividida por eles numa infinidade de partículas,

adquirindo tal figura que preenchem sempre e de forma exata todos os espaços ou pequenos intervalos à volta dos seus poros. A segunda é a restante matéria, cujas partículas são redondas e pequeníssimas comparadas com os corpos [que vemos na Terra]; apesar de tudo [tem alguma quantidade determinada, de modo que] podem dividir-se noutras menores. E haverá uma terceira forma nalgumas partes da matéria, isto é, naquelas que devido à sua espessura e figuras não podem mover-se tão facilmente como as precedentes. [Procurarei demonstrar que] todos os corpos deste mundo visível se formam de três formas [presentes na matéria] como três elementos diversos, a saber: o Sol e as estrelas fixas têm a forma do primeiro destes elementos, os céus a do segundo, e a Terra, os planetas e os cometas a do terceiro (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 3ª parte, § 52).

Nessa teoria imaginada por Descartes, a rotação da matéria nos turbilhões e redemoinhos acabou produzindo uma separação das partículas de diferentes tamanhos, de modo que as menores se concentraram no centro. Assim, o centro de cada vórtice só poderia ser ocupado pelas partículas do primeiro elemento, que seriam as menores e mais rápidas de todas, o que fez com que Descartes as comparasse com as partículas constituintes do fogo.

Esse seria o processo de formação das estrelas. Cada grande turbilhão estaria ocupando uma região semelhante ao nosso Sistema Solar, cujo centro estaria sendo ocupado por uma estrela.

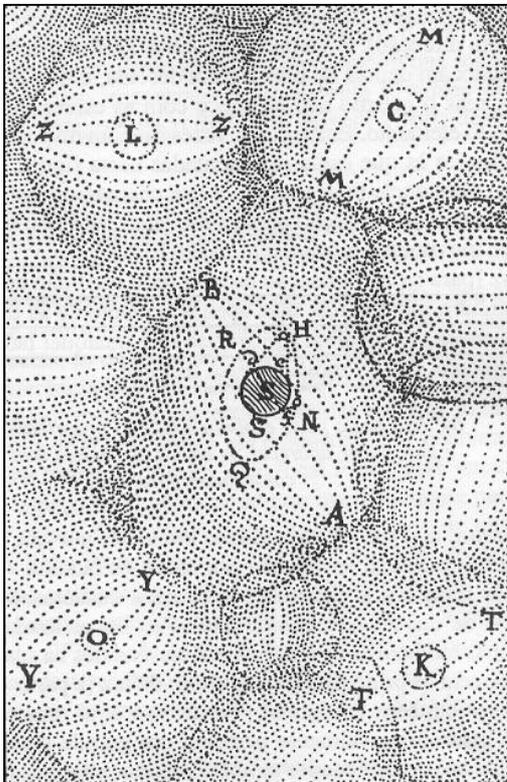


Figura 1. Os vórtices de Descartes, conforme representados em sua obra *Princípios da Filosofia*, de 1644.

O segundo elemento, que estaria ocupando quase todo o volume do turbilhão, foi descrito por Descartes como um tipo de líquido, pois suas partículas redondas escorregavam com facilidade umas sobre as outras, sem resistência. Este segundo elemento era constituído por partículas de vários tamanhos, sendo que as menores e mais rápidas estariam localizadas mais próximas do centro.

Havia toda uma dinâmica de movimentação, imaginada por Descartes, desses elementos entre os turbilhões:

Podemos inferir que a matéria do primeiro elemento sai continuamente de cada um dos turbilhões pelas zonas mais afastadas dos seus pólos e que também aí entra continuamente pelas zonas mais próximas. Se supusermos, por exemplo, que o primeiro céu AYBM, no centro do qual está o Sol, gira sobre os seus pólos (sendo eles, A o austral, e B o setentrional) e que os

quatro turbilhões KOLC que estão à sua volta giram sobre os eixos TT, YY, ZZ, MM e que toca os dois assinalados K e L nas proximidades das zonas mais distantes, é evidente, pelo que se disse [§§ 54, 60 e 64], que toda a matéria de que se compõe, tende a afastar-se do eixo AB e tende mais intensamente para os outros pontos Y e M do que para A e B; e porque perto de Y e M encontra os pólos dos turbilhões O e C, que têm pouca força para resistirem, e perto de A e B, os turbilhões K e L nos pontos mais afastados dos seus pólos e que têm mais força para se dirigir de K e de L para S do que as partes mais próximas dos pólos do céu S para se dirigirem na direção de L e de K, também é evidente que a matéria que está nos pontos K e L deve dirigir-se para S, assim como a do ponto S ao efetuar o seu percurso na direção de O e na de C (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 3ª parte, § 69).

Descartes ainda consegue conceber a forma das partículas que se encaminham em linha reta dos pólos de cada turbilhão para o seu centro, forma esta que se mostrará de fundamental importância para o entendimento da ação magnética apresentada pelos ímãs:

Antes de mais nada, devem ter a figura de um triângulo na sua largura e altura, dado que passam por estes pequenos espaços triangulares que se encontram no meio de três das partes do segundo elemento quando se tocam. Não é fácil determinar o seu comprimento, pois parece depender apenas da abundância da matéria que se encontra nos recantos em que estes pequenos corpos se formam. Mas basta concebê-las como pequenas colunas caneladas, com três sulcos ou canais, e curvas como a concha do caracol, de tal modo que elas podem passar, volteando pelos pequenos intervalos que têm a figura de um triângulo curvilíneo e que, infalivelmente, se encontram entre três esferas quando chocam entre elas. Uma vez que estas partes caneladas podem ser muito mais compridas do que largas, passando muito rapidamente por entre as partes do segundo elemento enquanto estas seguem a trajetória do turbilhão que as arrasta à volta do seu eixo, concebe-se facilmente que os três canais [que se encontram na superfície de cada uma] devem girar em parafuso ou como uma concha, estando mais ou menos afastados deste eixo porque as partes do segundo elemento giram mais depressa nos locais mais afastados do que nos mais próximos (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 3ª parte, § 90).

Dado que vêm para o meio do céu de dois lados opostos um ao outro, a saber, umas do pólo norte e outras do pólo sul, é evidente que, enquanto todo o céu gira no mesmo sentido sobre o seu eixo, aquelas que vêm do pólo norte devem estar encurvadas em concha num sentido diferente do daquelas que vêm do sul. Esta particularidade deve ser fortemente sublinhada porque é principalmente dela que depende a força ou a virtude do ímã (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 3ª parte, § 91).

Na 4ª parte de sua obra, nos artigos 133 ao 183, Descartes utiliza um modelo de turbilhões para explicar as várias propriedades apresentadas pelos ímãs. Inicialmente, ele procura explicar as propriedades magnéticas apresentadas pela Terra. Depois disso, ele explica de que modo os fragmentos de ferro, constituídos de vários poros com ramificações

cheias de pontinhas que podem dobrar-se para ambos os lados, se predispõem a receber as partículas caneladas dos dois lados:

Deve observar-se que enquanto os fragmentos do ferro sobem para as minas, não puderam manter sempre a mesma posição, porque tendo figuras irregulares e seguindo vias diferentes, rolaram ao subir, voltando-se ora para um lado ora para o outro; e a certa altura, as partículas caneladas saíram com grande velocidade da terra interior e procuraram no exterior passagem adequada à sua recepção, encontrando partículas – inteiras ou não – nestes fragmentos de ferro voltados ao contrário, fazendo virar para trás as pontinhas destas ramificações que, como disse [Parte III – Art. 106], se encontram nas suas dobras. Assim, gradualmente dobraram-se por completo de modo a entrarem pelo lado destes poros por onde saíam anteriormente. Quando a localização destes fragmentos de ferro se alterou, a ação das partículas caneladas imediatamente fez com que as ramificações se dobrassem muitas vezes alternadamente para ambos os lados, adquirindo então uma grande facilidade para se dobrarem imediatamente depois de ambos os lados (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 4ª parte, § 138).

E a partir dessa idéia, ele fala da diferença existente entre o ferro e o ímã:

Ora, a diferença entre o ímã e o ferro consiste em que os fragmentos que formam o ferro mudaram muitas vezes de posição por este processo após terem saído da terra interior, e por isso as suas pontinhas que seguem pelas dobras dos seus poros podem voltar-se facilmente de todos os lados. Pelo contrário, as do ímã mantiveram sempre, ou quase sempre, a mesma posição, e assim as pontas das ramificações nos seus poros só muito dificilmente podem voltar-se (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 4ª parte, § 139).

E a diferença entre os poros do ímã, do aço e do ferro:

Quanto aos canaizinhos apropriados à recepção das partículas caneladas, sabemos – pelo que se disse [Arts. 134/140] – que deve haver inúmeros tanto no aço como no ferro [e muito mais do que no ímã, em que há sempre muitas partículas que não são metálicas]. Também se sabe que estes canais devem ser muito mais completos e muito mais perfeitos no aço do que no ferro e que as pontinhas nas suas dobras não se voltam tão facilmente de um lado para o outro como acontece no ferro. Em primeiro lugar porque a mina donde o aço foi extraído é mais pura e os seus fragmentos alteraram-no menos após terem saído da terra interior; e depois porque são mais ordenadas e mais densas do que no ferro. Por fim, sabe-se que, quer no aço quer no ferro, os canais não estão todos voltados, como acontece no ímã; ou seja: quando todas as entradas dos canais por onde as partículas caneladas (que vêm do pólo austral) podem passar estão todas voltadas para o mesmo lado e todas as que podem receber as partículas caneladas (que vêm do pólo setentrional) estão voltadas para o lado contrário. Mas estes canais estão voltados de diversas maneiras e sem nenhuma ordem certa porque a ação do fogo lhes alterou a posição (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 4ª parte, § 144).

No artigo intitulado *Como as partículas caneladas se deslocam através e à volta da Terra*, Descartes apresenta seu modelo de turbilhões para a ação magnética, como mostra a figura ao lado, em que a esfera maior ABCD representa a Terra e as esferas menores representam cinco ímãs em várias posições mostrando o modo como eles se alinham com a Terra (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 4ª parte, § 146).

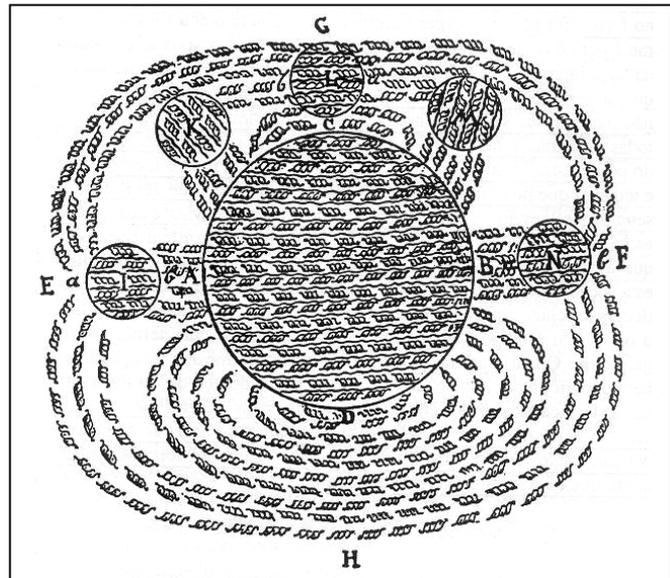


Figura 2. Representação cartesiana de um modelo de turbilhões para a ação magnética.

Em relação ao fato de haver dois pólos magnéticos, ele explica dizendo ser

devido ao fato de existirem dois tipos de partículas caneladas, aquelas que vêm do pólo norte sendo encurvadas em forma de parafuso num sentido e aquelas que vêm do sul, encurvadas da mesma forma no sentido oposto, de modo que os poros por onde passam as partículas provenientes do norte não permitem a passagem das partículas provenientes do sul e vice-versa.

Finalmente, num artigo intitulado *Por que razão dois ímãs se aproximam um do outro e qual a esfera de sua ação*, ele fornece a seguinte explicação para a ação magnética:

Dois ímãs próximos um do outro voltam-se até o pólo austral de um estar voltado para o pólo boreal do outro, aproximando-se e voltando-se; ou então, se nada impedir o seu movimento, voltam-se até se tocarem. Há que observar que as partículas caneladas passam muito mais depressa pelos canais do ímã do que pelo ar, no qual o seu curso fica travado pelo segundo e terceiro elementos, ao passo que nestes canais só se misturam com a matéria mais sutil do primeiro elemento, que aumenta de velocidade. É por isso que uma vez saídas do ímã, continuam um pouco mais em linha reta antes de a resistência do ar as poder desviar. E se no espaço por onde seguem em linha reta, os canais de outro ímã estão dispostos a recebê-los, entram neste ímã em vez de se desviarem e expulsam o ar existente entre estes dois ímãs, fazendo então com que se aproximem um do outro (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 4ª parte, § 153).

E logo em seguida, como esta força se comunica ao ferro pelo ímã:

E se um fragmento de ferro ou de aço for aproximado de uma pedra de ímã, não há que estranhar que adquira imediatamente a sua força. Com efeito, e de acordo com o que se disse, possui já poros adequados para a recepção das partículas caneladas, tal como o ímã, e até em maior número. É por isso que não lhe falta nada para terem a mesma força, a não ser que as pequenas extremidades que seguem pelas

dobras dos seus poros se voltem desordenadamente de maneiras diferentes, quando aquelas dos poros vindas do Norte deveriam encontrar-se do mesmo lado e as outras do lado oposto. Mas quando um ímã se aproxima dele, as partículas caneladas que saem deste ímã entram com tal impetuosidade nos seus poros que têm força suficiente para dispor estas pequenas extremidades da forma mais conveniente. É assim que proporcionam ao ferro o que lhe faltava para ter a força do ímã (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 4ª parte, § 158).

Descartes praticamente não se preocupou em explicar em detalhes a ação elétrica, talvez por acreditar que se tratasse de um fenômeno de menor importância. Para ele, a ação magnética precisava ser explicada minuciosamente, “porque toda a nossa Terra é um ímã e não podemos ir a qualquer lado sem que constatemos o seu efeito” (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 4ª parte, § 133), “e Gilbert foi o primeiro a descobrir que a Terra é um ímã [e, curiosamente, examinou as suas forças, assegurando que é assim mesmo]” (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 4ª parte, § 166)

No entanto, ele nos forneceu uma possível causa para a existência da gravidade apresentada pelos corpos ao redor da Terra, dizendo que se um líquido se move em círculos, todas as suas partículas tendem a se afastar do centro e mover-se em linha reta. Quanto mais rápido for esse movimento circular, maior será essa tendência de se afastar do centro. Se houver um líquido em rotação muito rápida, e dentro dele partículas com rotação mais lenta, essas partículas terão menor tendência a se afastar do centro, e serão empurradas pelo líquido em direção ao centro. Seria exatamente isso que ocorreria nas proximidades da Terra: enquanto o segundo elemento do vórtice terrestre estaria girando rapidamente, os corpos terrestres estariam girando lentamente em torno do eixo da Terra e por isso, seriam empurrados pelo material do vórtice em direção à Terra (Descartes, *Princípios da Filosofia*, 4ª parte, §§ 20-27).

A teoria de Descartes é muito mais complexa do que se possa imaginar ao ler esta rápida apresentação, mas já permite notar como ela é frutífera ao possibilitar, com seu modelo de vórtices, as mais diversas explicações para os fenômenos da natureza.

Apesar de todas as suas virtudes e do seu interesse, a teoria cosmogônica de Descartes tinha um grave defeito, que foi apontado por Isaac Newton (1642-1727) no final do século XVII. Ela não era uma teoria com base matemática, e toda a física estava, naquela época, passando por uma reformulação que exigia que as teorias permitissem fazer cálculos e previsões quantitativas. Embora o próprio Descartes fosse um importante matemático, sua física era praticamente qualitativa, o que acabou deixando muitos pontos vulneráveis em seu modelo dos turbilhões (Martins, 1994, p. 86). Ele não concebeu para seu esquema uma precisa concordância quantitativa com o experimento, pois ele acreditava mais na clareza e

distinção de uma especulação do que em sua consistência com o fato observado. Ele foi um dos fundadores da chamada *Filosofia Mecânica*, isto é, da doutrina de que o mundo externo inanimado pode ser considerado, para os propósitos científicos, como um mecanismo automático, e que é possível e desejável imaginar um modelo mecânico de todo fenômeno físico (Whittaker, 1951, p. 6).

2.3 A Impossibilidade de Ações a Distância em Newton

A filosofia mecanicista reinante durante o século XVII defendia que a realidade física e todas as explicações dos fenômenos naturais deveriam ser entendidas em termos de matéria em movimento. A filosofia natural cartesiana pode ser citada como um exemplo dessa filosofia mecanicista, pois procurava explicar todos os fenômenos apenas através do impacto e colisão entre os corpos.

Em geral, as filosofias mecanicistas recorriam a alguma forma de matéria invisível, como os eflúvios elétrico e magnético de Gilbert ou o segundo elemento imaginado por Descartes e que estaria preenchendo o espaço celeste.

É nesse contexto que o jovem estudante Newton está inserido quando ele começa a registrar, por volta de 1664, suas primeiras especulações sobre os fenômenos da natureza em um caderno de anotações que ele próprio denomina *Quaestiones quaedam philosophicae* (*Algumas questões filosóficas*). Trata-se de meras anotações rápidas, e por isso, é necessário um certo esforço para entender o que Newton estava querendo dizer. Dividido em 45 seções, sob as quais Newton pensou organizar o material absorvido em suas novas leituras, pode-se encontrar suas primeiras idéias a respeito da gravidade.

Como uma das exigências da filosofia mecanicista da época era a de que os movimentos dos corpos só poderiam ser causados por colisões, pode-se entender por que, no início de sua carreira científica, “Newton era um plenista. Ao postular um éter sutil, um meio imperceptível aos sentidos, mas capaz de transmitir efeitos por pressão e impacto, os filósofos mecanicistas elaboraram uma convenção que livrou a filosofia natural das incompreensíveis influências ocultas agindo a distância (por exemplo, a atração magnética e os efeitos lunares). Para Newton, somente tal éter mecânico, permeando o universo todo e fazendo-o pleno, tornara-se uma hipótese inquestionável. Através dele, ele podia explicar a gravidade e, até certo ponto, a coesão entre as partículas da matéria” (Dobbs, 1982, p. 512).

Na seção intitulada *Da gravidade e da leveza*, Newton conjectura que a gravidade poderia ser produzida por um tipo de corrente de éter que viria do espaço em direção à Terra, com grande velocidade, impulsionando os corpos para baixo. E para que não houvesse um

crescente acúmulo de éter no interior da Terra, era necessário supor que esse éter saísse, de alguma outra forma:

A matéria que causa a gravidade deve passar por todos os poros de um corpo. [...] ela deve descer muito rápida e prontamente, como se evidencia pela queda dos corpos e pela grande pressão em direção à Terra. Deve subir de uma forma diferente da que desce, ou então teria, para elevar os corpos, uma força igual à que tem para empurrá-los para baixo e, assim, não haveria gravidade. Ela deve ascender com uma consistência mais maciça do que quando desce... (Newton, *in* Cohen & Westfall, 2002, pp. 24-5)

O efeito dessa corrente ascendente seria menor, de tal forma que o efeito resultante seria um impulso dos corpos para baixo.

As hipóteses imaginadas por Newton não serviam apenas para dar conta dos fenômenos conhecidos, de modo que ele procurava tirar novas conseqüências delas. Supondo que a gravidade fosse produzida pelo éter, podia-se imaginar diversos efeitos novos. Se a velocidade da corrente de éter fosse constante, mas sua densidade aumentasse à medida em que ela se aproximasse da Terra (por estar confinada em um espaço menor), a pressão produzida por essa corrente deveria aumentar. Assim, o peso de um corpo próximo à superfície da Terra deveria ser maior do que o do mesmo corpo longe da superfície (Newton, *in* McGuire & Tamny, 1983, pp. 426-7, 67 121r). O peso poderia depender, por exemplo, da velocidade de queda do corpo, pois se um objeto estivesse caindo a uma grande velocidade, o efeito da corrente descendente de éter sobre ele deveria ser menor, e o efeito da corrente ascendente deveria ser maior. Assim, seu peso deveria diminuir com a velocidade de queda (Newton, *in* McGuire & Tamny, 1983, pp. 428-9, 68 121v).

O éter newtoniano do *Quaestiones* sofre várias transformações ao longo do tempo. Devido ao estudo aprofundado que Newton faz da alquimia por volta de 1670, lendo atentamente tudo o que encontrava sobre o assunto, seu éter passa a ter características de um éter vital, que nos séculos XVI e XVII, permeava a literatura neoplatônica e alquímica (Rodrigues, 1988, p. 105). Em seu tratado conhecido por *Das leis e processos óbvios da natureza na vegetação*, essas características ficam mais evidentes:

[...] o éter é pressionado e, com isso, é continuamente forçado a descer para a Terra, de onde veio o ar, e ali é gradativamente condensado e entremeado com os corpos que lá encontra, e promove as ações deles, sendo um fermento suave. Mas, em sua descida, ele se esforça por carregar os corpos que atravessa, isto é, torna-os pesados, e essa ação é promovida pela tenaz constituição elástica mediante a qual ele exerce maior controle sobre as coisas que estão em seu caminho; e também por sua imensa rapidez. Tem que descer tanto éter quanto ar e exalações sobem, e portanto, sendo o éter muitos graus mais fino e ralo do que o ar (como é o ar, comparado com a água), ele deve descer com muito mais rapidez e, por conseguinte, ter muito mais eficácia

para empurrar os corpos para baixo do que tem o ar para empurrá-los para cima. E isso é perfeitamente compatível com os métodos da natureza para produzir a circulação de todas as coisas. Assim, esta Terra assemelha-se a um grande animal, ou melhor, a um vegetal inanimado, que suga o sopro etéreo para seu revigoramento diário e seu fermento vital, e torna a transpirá-lo com grandes exalações. E, de acordo com a situação de todos os outros seres vivos, deve ter seus tempos de início, juventude, velhice e perecimento. Esse é o espírito sutil que vasculha os recônditos mais ocultos de toda a matéria mais espessa, que penetra em seus mais ínfimos poros e os separa mais sutilmente do que qualquer outra força material que exista. (não à maneira dos mênstruos comuns, separando-os violentamente etc.) [...] Esse é o agente universal da natureza, sua chama secreta, fermento e princípio único de toda a vegetação. É a alma material de toda a matéria, que, sendo constantemente inspirada de cima, permeia-a e se consolida com ela numa forma, e depois, se incitada por um calor suave, ativa-a e lhe dá vida...

[...] Portanto, a Terra precisa de um suprimento constante e renovado de éter. [...] Observe-se que é mais provável que o éter seja apenas um veículo de algum espírito mais ativo. [...] Esse espírito talvez seja o corpo da luz, porque... nenhuma substância permeia todas as coisas de maneira tão indiscriminada, sutil e veloz quanto a luz, e nenhum espírito esquadrinha os corpos de maneira tão sutil, penetrante e rápida quanto o espírito vegetal. (Newton, *in* Cohen & Westfall, 2002, pp. 369-70)

Cinco anos após ter apresentado suas idéias sobre um éter vital, Newton escreve um artigo intitulado *Uma hipótese explicativa das propriedades da luz sobre as quais discorrem meus diversos artigos*, e o remete em 7 de dezembro de 1675, sob a forma de carta, a Henry Oldenburg (1618-1677), secretário da Royal Society de Londres e fundador e editor do jornal *Philosophical Transactions*. Nesta carta, novas especulações sobre o éter são apresentadas. Após dizer que, “talvez todas as coisas possam ter-se originado do éter”, e logo em seguida, descrever com enorme riqueza de detalhes os movimentos produzidos por um bastão de vidro atritado sobre vários pedacinhos de papel ao seu redor, Newton escreve:

Ora, não posso imaginar de onde viriam todos esses movimentos irregulares, a menos que seja de algum tipo de matéria sutil que fique condensada no vidro e seja rarefeita pela fricção, tal como a água é rarefeita em vapor pelo calor, e que, nessa rarefação, seja difundida pelo espaço em torno do vidro a uma grande distância, e levada a se mover e a circular de várias maneiras e, por conseguinte, a acionar os papéis, até retornar novamente para o vidro e ser recondensada nele (Newton, *in* Cohen & Westfall, 2002, p. 33).

Desse modo, após sugerir que a atração e a repulsão elétrica podiam ser explicadas em termos de condensação e rarefação de um dos hipotéticos espíritos etéreos, Newton prossegue:

E, assim como essa matéria condensada, rarefazendo-se num vento etéreo (pois, por sua penetração e circulação fácil no vidro, estimo que seja etéreo), pode provocar esses movimentos estranhos e, ao se condensar novamente, pode fazer com que a atração elétrica, com seu retorno para o vidro, ocorra em lugar do que é continuamente recondensado ali, também a atração gravitacional da Terra pode ser causada pela condensação contínua de algum outro espírito etéreo semelhante, não do corpo principal do éter fleumático, mas de algo muito fino e sutilmente difundido através dele, talvez de natureza untuosa ou viscosa, tenaz e elástica, e que tenha com o éter a mesma relação que tem o ar o espírito aéreo vital² que é necessário à conservação da chama e dos movimentos vitais. Pois, se um tal espírito etéreo pode ser condensado nos corpos em fermentação ou em combustão, ou coagulado de alguma outra maneira nos poros da terra e da água, numa espécie de matéria ativa úmida para os usos contínuos da natureza, aderindo aos lados desses poros à maneira como os vapores se condensam dos lados de um recipiente sutilmente montado, o vasto corpo da Terra, que talvez esteja em perpétuo funcionamento por toda parte, até seu próprio centro, pode condensar continuamente uma quantidade tão grande desse espírito, que o faça descer do alto com grande celeridade para abastecê-la. Nessa descida, é possível que ele traga consigo para baixo os corpos que perpassa, com uma força proporcional às superfícies de todas as partes deles sobre as quais atua; a natureza promove uma circulação, pela ascensão lenta, de uma quantidade igual de matéria, saída das entranhas da Terra, sob uma forma aérea, a qual, durante algum tempo, constitui a atmosfera, mas, sendo mantida em contínua flutuação pelo novo ar, exalações e vapores que se elevam de baixo pra cima, acaba (com exceção de uma parte dos vapores, que retorna na chuva) tornando a desaparecer nos espaços etéreos, onde, com o tempo, talvez se abrande e se atenuem em seu primeiro princípio. Pois a natureza é um perpétuo trabalhador circular, gerando líquidos a partir dos sólidos e sólidos a partir dos líquidos, coisas fixas das voláteis e voláteis das fixas, tênues das espessas e espessas das tênues, algumas coisas para ascender e compor os sumos terrestres superiores, os rios e a atmosfera e, por conseguinte, outras para descer, para uma compensação das primeiras. E, assim como a Terra, talvez o Sol se impregne abundantemente desse espírito para conservar seu brilho e para impedir que os planetas se afastem mais dele. E que assim o desejar também poderá supor que esse espírito proporciona ou carrega consigo para lá o combustível solar e o princípio material da luz; e que os vastos espaços etéreos entre nós e as estrelas são um repositório suficiente desse alimento do Sol e dos planetas (Newton, *in* Cohen & Westfall, 2002, pp. 33-4)

Pouco tempo depois, em uma carta enviada a Robert Boyle (1627-1691) e datada a 28 de fevereiro de 1679, Newton apresenta um outro modelo de éter mais simples e menos

² Alguns experimentos, feitos aproximadamente nessa época, mostravam que havia algo no ar que mantinha a vida e a combustão, e que era chamado de diversas maneiras, inclusive “espírito aéreo vital”.

fantasioso, deixando traços de seu grande esforço em querer livrar-se de todos os possíveis elementos mágicos considerados até aquele momento:

...suponho que há, difundida por toda parte, uma substância etérea, capaz de contração e dilatação, fortemente elástica e, em uma palavra, muito parecida com o ar em todos os aspectos, mas muito mais tênue. Suponho que esse éter permeie todos os corpos volumosos, mas de modo a permanecer, entretanto, mais rarefeito em seus poros do que em espaços livres, e tanto mais rarefeito quanto menos poros houver. [...] Suponho o éter dentro dos corpos mais rarefeito, e mais denso fora deles, não para terminarem em superfícies matemáticas, mas para se misturarem gradualmente um com o outro, passando o éter externo a ficar mais rarefeito, e o interno mais denso, a pouca distância das superfícies do corpo, e passando por todos os graus intermediários de densidade nos espaços intermediários (Newton, *in* Thayer, 1953, pp. 112-3).

Ao aproximar-se do fim da carta, a noção de éter como algo graduado em densidade de acordo com a sua distância dos poros centrais dos corpos sólidos sugeriu a Newton uma explicação simples para a existência da gravidade:

Vou apresentar mais uma conjectura, que veio à minha mente enquanto estava escrevendo esta carta; é sobre a causa da gravidade. Para isso, suporei que o éter consiste em partes que diferem uma da outra em sutileza, por graus indefinidos; que nos poros dos corpos há menos do éter grosseiro, em proporção ao mais fino, do que nos espaços abertos; e conseqüentemente que no grande corpo da Terra há muito menos do éter grosseiro, em proporção ao mais fino, do que nas regiões do ar; e que o éter mais grosseiro no ar afeta as regiões superiores da Terra, e o éter mais fino na Terra as regiões mais baixas do ar, de tal modo que do topo do ar até a superfície da Terra, e da superfície da Terra até o seu centro, o éter é insensivelmente cada vez mais fino. Imagine agora qualquer corpo suspenso no ar ou jazendo sobre a Terra, e o éter sendo por hipótese mais grosso nos poros que estão nas partes superiores do corpo do que naqueles [poros] que estão em suas partes inferiores, e esse éter mais grosseiro sendo menos apto a se alojar naqueles poros do que o éter inferior mais fino, ele tentará sair e dar lugar ao éter mais fino de baixo, o que não pode ocorrer sem que os corpos desçam para dar lugar acima deles para que ele [o éter mais grosseiro] saia (Newton, *in* Thayer, 1953, pp. 115-6)

Todos esses exemplos mostram a grande e constante preocupação de Newton em encontrar explicações mecânicas para os fenômenos naturais. Cada modelo considerado por ele trazia consigo um conjunto de problemas que ele não era capaz de resolver (e que talvez sejam de fato insolúveis). Em qualquer hipótese mecânica da gravitação, o éter deveria preencher o espaço entre os planetas e deveria resistir ao movimento dos astros. No entanto, o movimento periódico e regular dos planetas, de seus satélites e dos cometas não mostrava nenhum sinal dessa resistência. Além disso, a gravidade deveria poder ser influenciada por diversos fatores, mas esses efeitos pareciam não existir (Martins, 1997, p. 84).

Então, na década de 1680, Newton abandona o projeto de construir modelos mecânicos de éter e inicia a construção de uma nova realidade física baseada no conceito de força de interação a distância entre as partículas de matéria.

Ele escreve sua obra máxima intitulada *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*), cuja 1ª edição é de 1687, e lança os fundamentos de toda a física que reinará soberana durante pouco mais de duzentos anos. No livro I desta obra, Newton discorre sobre os fundamentos da mecânica, no livro II, ele faz um estudo do movimento dos corpos em meios resistentes, procurando mostrar as deficiências do modelo de vórtices de Descartes³, e no livro III, fornece ao mundo uma lei de força gravitacional agindo a distância entre corpos materiais que permite unificar a física terrestre com a física celeste, sem fazer qualquer hipótese a respeito da causa da atração gravitacional.

Para a mentalidade científica da época, dominada pela filosofia mecanicista, Newton havia realizado um trabalho pela metade, pois um fenômeno só poderia ser considerado explicado e compreendido se conhecêssemos a sua causa mecânica, não bastando, portanto, apenas conhecer a lei matemática que regesse o fenômeno físico. Para seus críticos contemporâneos, Newton teria dado uma contribuição muito importante para o entendimento da natureza, porém parcial, já que estaria admitindo a ação a distância e considerando a gravidade como uma “qualidade oculta” da matéria. Tais críticas, porém, revelam uma incompreensão profunda do seu pensamento.

À primeira vista, realmente pode parecer que Newton aceitasse a ação a distância de uma forma natural, se levarmos em conta principalmente o *Principia* de 1687⁴ ou alguns de

³ É importante observar que, desde o início, Newton havia descartado a concepção cartesiana de um meio etéreo fluido dotado de movimentos rotacionais preenchendo todo o espaço, pois ele havia desenvolvido um estudo matemático dos turbilhões gerados pela rotação de um líquido e chegado à conclusão de que uma esfera em rotação no interior de um líquido produziria uma rotação neste líquido, que iria diminuindo com o quadrado da distância ao seu centro, o que era incompatível com a já conhecida terceira lei de Kepler que previa muito bem os períodos de rotação dos planetas ao redor do Sol (Martins, 1994, p. 87). Para Newton, “*um fluido denso pode ser incapaz de explicar os fenômenos da natureza, e sem ele se explicam melhor os movimentos dos planetas e cometas. Ele serve apenas para perturbar e retardar os movimentos desses grandes corpos e para fazer definhar a estrutura da natureza; e, nos poros dos corpos, serve apenas para deter os movimentos vibratórios de suas partes, nos quais consistem seu calor e sua atividade. E, sendo inútil, impedindo as operações da natureza e fazendo-a definhar, não há evidência de sua existência; portanto, deve-se rejeitá-lo*” (Newton, *Óptica*, Livro III, Questão 28).

⁴ Na 1ª edição do *Principia*, de 1687, ainda não aparece o Escólio Geral, incluído na 2ª edição de 1713 e na 3ª edição de 1726, ao final do livro III. Neste Escólio, Newton discute uma série de questões filosóficas e mesmo teológicas. Ele rejeita mais uma vez a teoria dos vórtices cartesianos e reafirma que o mundo foi criado e é governado por um ser supremo. Em seguida, defende uma metodologia indutivista, rejeitando o uso de hipóteses na filosofia experimental, postura que já havia tomado na Questão 28, do *Óptica* de 1706. No entanto, após esse enfático *hypothesis non fingo*, Newton permite-se especular sobre uma estranha causa, responsável pelos mais variados fenômenos: “*E agora poderíamos acrescentar algo concernente a um certo espírito mais sutil que penetra e jaz escondido em todos os corpos volumosos; um espírito através de cuja força e ação as partículas dos corpos se atraem entre si a distâncias próximas, e se unem, se contínuas; e os corpos elétricos operam a distâncias maiores, tanto repelindo como atraindo os corpúsculos vizinhos; e a luz é emitida, refletida, refratada, infletida, e esquentada os corpos; e toda sensação é excitada e os membros dos corpos animais movem-se ao comando da vontade, isto é, pelas vibrações desse espírito, mutuamente propagadas ao longo dos*

seus pensamentos isoladamente, fora do contexto em que estão inseridos, como o seguinte trecho que se encontra no *Óptica*, de 1706⁵:

Não têm as pequenas partículas dos corpos certos poderes, virtudes ou forças por meio dos quais elas agem a distância não apenas sobre os raios de luz, refletindo-os, refratando-os e inpletindo-os, mas também umas sobre as outras, produzindo grande parte dos fenômenos da natureza? (Newton, *Óptica*, Livro III, Questão 3)

Entretanto, logo em seguida, Newton escreve:

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 (Newton, *Óptica*, Livro III, Questão 3).

Para dirimir quaisquer dúvidas sobre o seu posicionamento a respeito do assunto, Newton deixou duas passagens interessantíssimas, que aparecem em suas cartas enviadas a Richard Bentley (1662-1742) em 17 de janeiro e 25 de fevereiro de 1693, mostrando sua convicção de que a ação a distância era impossível:

[...] O Sr. algumas vezes fala da gravidade como sendo essencial e inerente à matéria. Peço-lhe não atribuir esta noção a mim, pois a causa da gravidade é o que eu não pretendo saber, e portanto levaria mais tempo para considerá-la (Newton, carta a Bentley, 17 de janeiro de 1693; *in* Thayer, 1953, p. 53).

[...] É inconcebível que a matéria bruta, inanimada, opere sem a mediação de alguma outra coisa, não-material, sobre outra matéria e a afete sem contato mútuo, como deve ocorrer se a gravitação, no sentido de Epicuro, for essencial e inerente a ela. E é por essa razão que desejei que você não atribuísse a gravidade inata a mim. Que a gravidade devesse ser inata, inerente e essencial à matéria, de modo que um corpo pudesse atuar sobre outro a distância, através de um vácuo, sem a mediação de qualquer outra coisa, por cujo intermédio sua ação e força pudesse ser transmitida de um corpo a outro, é para mim um absurdo tão grande que eu acredito que nenhum homem dotado de uma faculdade de pensamento competente em questões filosóficas

filamentos sólidos dos nervos, dos órgãos exteriores dos sentidos até o cérebro, e do cérebro até os músculos. Mas essas são coisas que não podem ser explicadas em poucas palavras, nem estamos providos daquela suficiência de experimentos que é requerida para uma determinação precisa e para uma demonstração das leis pelas quais esses espíritos elétricos e elásticos operam” (Newton, *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, General Scholium, p. 372).

⁵ As 31 Questões, tal como estão numeradas a partir da 4ª edição em inglês do *Óptica*, de 1730, apareceram publicadas pela primeira vez da seguinte forma: Questões 1 a 16: 1ª edição em inglês, de 1704; Questões 25 a 31: 1ª edição em latim, de 1706; Questões 17 a 24: 2ª edição em inglês, de 1717. A 3ª edição em inglês do *Óptica*, é de 1721.

jamais possa cair nele. A gravidade deve ser causada por um agente que atua constantemente de acordo com certas leis; mas se esse agente é material ou imaterial é uma consideração que deixo para os meus leitores (Newton, carta a Bentley, 25 de fevereiro de 1693; *in* Thayer, 1953, p. 54)

Poderíamos dizer que, para o Newton maduro, seria desejável dispor de uma explicação mecânica da gravitação, porém não havia qualquer modelo aceitável matematicamente. No entanto, utilizando-se a força de interação gravitacional entre dois corpos, mesmo sem entender de que maneira essa força se propagava de um corpo para outro, era possível explicar diversos fenômenos que não poderiam ser entendidos sem ela. Por esse motivo, tornava-se conveniente aceitar a “ação a distância” na filosofia natural.

No Escólio Geral que aparece na 2^a edição do *Principia*, de 1713, ainda podemos encontrar a seguinte passagem notória:

Até aqui explicamos os fenômenos dos céus e de nosso mar pelo poder da gravidade, mas ainda não designamos a causa desse poder. É certo que ele deve provir de uma causa que penetra nos centros exatos do sol e planetas, sem sofrer a menor diminuição de sua força; que opera não de acordo com a quantidade das superfícies das partículas sobre as quais ela age (como as causas mecânicas costumam fazer), mas de acordo com a quantidade da matéria sólida que elas contêm, e propaga sua virtude em todos os lados a imensas distâncias, decrescendo sempre com o inverso do quadrado da distância. [...] Mas até aqui não fui capaz de descobrir a causa dessas propriedades da gravidade a partir dos fenômenos, e não invento nenhuma hipótese; pois tudo que não é deduzido dos fenômenos deve ser chamado uma hipótese; e as hipóteses, quer metafísicas ou físicas, quer de qualidades ocultas ou mecânicas, não têm lugar na filosofia experimental. Nessa filosofia, as proposições particulares são inferidas dos fenômenos, e depois tornadas gerais pela indução. [...] E para nós é suficiente que a gravidade realmente exista e atue de acordo com as leis que explicamos e que são suficientes para dar conta de todos os movimentos dos corpos celestes e de nosso mar (Newton, *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, General Scholium, pp. 371-2).

Na 2^a edição em inglês do *Óptica*, de 1717, Newton retoma suas primeiras tentativas, de 1679, de explicar a gravidade utilizando um éter de densidade variável, que por causa dessa variação estaria gerando um tipo de empuxo, que empurraria os corpos em direção à Terra:

Não é esse meio muito mais rarefeito dentro dos corpos densos do sol, das estrelas, dos planetas e cometas, do que nos espaços celestiais vazios entre eles? E, ao passar por eles a grandes distâncias, não se torna ele cada vez mais denso, causando assim a gravidade desses grandes corpos um em direção ao outro, e de suas partes em direção aos corpos, esforçando-se todo corpo para ir das partes mais densas do meio para as mais rarefeitas? (Newton, *Óptica*, Livro III, Questão 21)

Portanto, mesmo no final de sua carreira científica e após ter escrito os *Principia*, Newton ainda não havia desistido de encontrar explicações mecânicas para as interações

físicas. Pode-se afirmar que durante toda a sua vida, a idéia de interação a distância entre corpos materiais era inconcebível para ele.

É curioso constatar, em três passagens, como Newton chega até mesmo a sugerir como mediador das ações físicas o próprio sensório infinito de Deus, na ausência de algum éter material substancial:

O que há em lugares quase desprovidos de matéria, e por que motivo o Sol e os planetas gravitam em direção um ao outro, sem matéria densa entre eles? Por que a natureza não faz nada em vão, e por que razão surge toda essa ordem e beleza que vemos no mundo? Para que servem os cometas, e por que motivo os planetas se movem todos de uma mesma maneira em órbitas concêntricas, enquanto os cometas se movem de todas as maneiras em órbitas muito excêntricas? E o que impede as estrelas fixas de caírem umas sobre as outras? [...] E, sendo essas coisas tratadas corretamente, não se segue do exame dos fenômenos que há um Ser incorpóreo, vivo, inteligente, onipresente, que no espaço infinito (como se fosse em seu sensório) vê as coisas em si mesmas, intimamente, e as percebe completamente, e as compreende inteiramente pela presença imediata delas? [...] E, embora todo passo verdadeiro dado nessa filosofia não nos conduza imediatamente ao conhecimento da causa primeira, ele nos aproxima dela, e por esta razão deve ser tido em alta conta (Newton, *Óptica*, Livro III, Questão 28).

Essa uniformidade maravilhosa no sistema planetário deve ser concedida ao efeito da escolha. [...] [Ela] não pode ser senão o efeito da sabedoria e habilidade de um agente poderoso, sempre vivo, que, estando em todos os lugares, é mais capaz por Sua vontade de mover os corpos dentro de Seu sensório ilimitado, uniforme e assim formar e reformar as partes do Universo, do que nós somos capazes por nossa vontade de mover as partes do nossos próprios corpos. E todavia não devemos considerar o mundo como o corpo de Deus, ou as várias partes dele como as partes de Deus. Ele é um Ser uniforme, destituído de órgãos, membros ou partes, e elas são suas criaturas, subordinadas a Ele e subservientes à Sua vontade (Newton, *Óptica*, Livro III, Questão 31).

Pois dois planetas separados um do outro por uma longa distância que está vazia não se atraem mutuamente por qualquer força de gravidade, nem atuam um sobre o outro de modo nenhum, exceto pela mediação de algum princípio ativo que intercede entre eles, pelo qual a força é transmitida de um para o outro. E, assim aqueles Antigos que compreenderam corretamente a filosofia mística ensinaram que um certo espírito infinito permeia todo o espaço e contém e vivifica o mundo universal; [...] nele nós vivemos e movemos e temos nosso ser. Portanto o Deus onipresente é reconhecido e chamado pelos Judeus de Lugar. [...] Por este Símbolo os Filósofos ensinaram que a matéria é movida naquele espírito e é influenciada por ele, não de um modo irregular, mas harmonicamente e de acordo com as razões

harmônicas como eu expliquei (Newton, manuscrito Cul. Add. 3965.6, f. 269; *apud* Westfall, 1980, pp. 510-1).

Seja como for, o newtonianismo desenvolvido a partir do século XVIII, adotou como certa a existência de forças agindo a distância, acreditando que tentar explicar essas forças através de modelos mecânicos seria inútil e até mesmo, indesejável.

No entanto, essa nunca foi a visão de Newton. Ele acreditava que o movimento no mundo estaria continuamente desaparecendo e que, portanto, deveriam existir princípios ativos que restabelecessem esse movimento:

Como, pois, a variedade do movimento que encontramos no mundo está sempre diminuindo, há uma necessidade de conservá-lo e restabelecê-lo por princípios ativos, como a causa da gravidade, em virtude da qual os planetas e os cometas mantêm seus movimentos em suas órbitas e os corpos em queda adquirem um grande movimento. [...] Pois encontramos no mundo muito pouco movimento além do que é devido a esses princípios ativos. E, não fossem esses princípios, os corpos da Terra, dos planetas, dos cometas, do Sol e de todas as coisas que neles existem ficariam frios, congelariam e se converteriam em massas inativas; e toda a putrefação, geração, vegetação e vida cessariam, e os planetas e cometas não se manteriam em suas órbitas (Newton, *Óptica*, Livro III, Questão 31).

E que as causas desses princípios ativos poderiam ser descobertas por aqueles que anseiam saber, sugerindo uma importante lição metodológica a ser seguida:

Considero esses princípios, não como qualidades ocultas, que se supõe resultar das formas específicas das coisas, mas como leis gerais da natureza, em virtude das quais as coisas são formadas, a verdade deles aparecendo para nós pelos fenômenos, embora suas causas ainda não estejam descobertas. Pois estas são qualidades manifestas, e apenas suas causas estão ocultas. E o aristotélicos deram o nome de qualidades ocultas não às qualidades manifestas, mas apenas às que eles supunham estar escondidas nos corpos e que seriam as causas desconhecidas dos efeitos manifestos. Tais como seriam as causas da gravidade, das atrações elétricas e magnéticas e das fermentações se supuséssemos que essas forças ou ações resultam de qualidades desconhecidas para nós e impossíveis de descobrir e de tornar manifestas. Essas qualidades ocultas põem fim ao aperfeiçoamento da filosofia natural e por isso têm sido rejeitadas nos últimos anos. Dizer que toda espécie de coisas é dotada de uma qualidade oculta específica pela qual ela age e produz efeitos manifestos é não dizer nada; mas derivar dos fenômenos dois ou três princípios gerais do movimento e depois dizer como as propriedades e ações de todas as coisas corpóreas decorrem desses princípios manifestos seria um grande passo em filosofia, embora as causas desses princípios ainda não tenham sido descobertas. Não hesito, pois, em propor os princípios do movimento acima mencionados, sendo eles de uma extensão muito geral, deixando suas causas para serem descobertas (Newton, *Óptica*, Livro III, Questão 31).

CAPÍTULO 3 – O LEGADO NEWTONIANO

3.1 A Crítica de Leibniz à Ação a Distância

A teoria da gravitação newtoniana ganhou aceitação imediata na Inglaterra, onde ela era exposta e defendida por um grande número de discípulos e admiradores de Newton, mas no Continente a situação era muito diferente. Lá, os cartesianos consideraram a noção de atração como uma qualidade oculta, uma rendição ao aristotelismo e um retrocesso às influências imateriais e simpatias que tinham sido banidas da física tão recentemente e com tanta dificuldade (Hesse, 1962, p. 157).

Uma das críticas mais severas dirigidas às idéias newtonianas foi elaborada por Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716). Ele achava que a utilização de forças agindo a distância para explicar a atração não era uma atitude científica, que somente com a ajuda de algum poder oculto poder-se-ia representar tal ação, caso negássemos a idéia de um fluido preenchendo todo o espaço.

Leibniz entendia a matéria como algo intrinsecamente ativo. Para ele, a matéria era internamente permeada por forças, tanto ativas como passivas. As forças ativas seriam as causadoras dos movimentos dos corpos e as forças passivas seriam responsáveis pela resistência à mudança de movimento manifestada pelos corpos. Toda ação se daria através do contato entre os corpos, de modo que quando um corpo atingisse outro, as forças internas ao corpo atingido seriam despertadas, o que o faria entrar em movimento (McMullin, 1978, p. 31). Pelo fato de toda força ser transferida de um corpo para outro por contato, então todas as coisas estariam conectadas formando dessa forma, um único pleno. Para Leibniz:

[...] como tudo é pleno (o que torna toda a matéria unida) e como no pleno qualquer movimento exerce algum efeito sobre os corpos distantes proporcional à distância, de modo a ser cada corpo afetado não só pelos que o tocam e a ressentir-se de certo modo de tudo quanto lhes acontece, mas também por intermédio deles se ressona dos que tocam os primeiros pelos quais é imediatamente tocado, segue-se que esta comunicação pode atingir qualquer distância. E, por conseguinte, todo corpo se ressona de quanto se faz no universo, de modo que o onividente poderia ler em cada um o que se faz em toda parte, e até mesmo quanto se faz ou fará, observando no presente o que está afastado tanto nos tempos como nos lugares (Leibniz, *A Monadologia*, § 61).

Ele pensava que qualquer matéria possuísse suas próprias forças e fosse a fonte de toda mudança, que todo corpo fosse realmente movido, não por outros corpos, mas por estas forças internas. Estas forças, pensava Leibniz, seriam análogas à alma que constitui a individualidade dos objetos. Assim, a doutrina da ação a distância não era necessária para Leibniz, já que a

mudança e o movimento em seu sistema ocorriam de acordo com uma harmonia pré-estabelecida por Deus dentro dos corpos, o responsável por todas as mudanças que ocorriam espontaneamente (Snow, 1975, p. 123). Assim, a ação entre mônadas representaria uma alternativa à idéia de ação a distância, já que cada mônada conteria em seu interior o universo todo e por isso, “saberia” quais influências estaria sofrendo em qualquer instante.

O sistema metafísico de Leibniz baseava-se em princípios de conhecimento, dos quais ele deduzia toda sua concepção de mundo. O primeiro desses princípios diz respeito ao caráter não-contraditório daquilo que é explicado ou demonstrado. É a razão necessária ou *Princípio da Não-Contradição*. Além disso, uma coisa só pode existir necessariamente se, além de não ser contraditória, houver uma causa que a faça existir. Trata-se do *Princípio da Razão Suficiente*.

Para Leibniz, além da *causa eficiente* que produz as coisas segundo os *Princípios da Não-Contradição e da Razão Suficiente*, intervém também nessa produção a *causa final*. O finalismo é que sustenta o *Princípio do Melhor*: Deus calcula vários mundos possíveis, mas faz existir o melhor desses mundos.

Além desses, ainda são concebidos mais dois, o *Princípio da Continuidade*, que afirma que na natureza não existe nada que seja descontínuo, e o *Princípio dos Indiscerníveis*, que assegura a individualidade das coisas existentes. Leibniz afirma que não há no universo dois seres idênticos e que a diferença entre eles não é numérica nem espacial ou temporal, mas intrínseca. A diferença é de essência e manifesta-se no plano visível das próprias coisas (Chauí, 1983, p. 98)

De acordo com o filósofo alemão:

Estes princípios permitiram-me explicar naturalmente a união, ou melhor, a conformidade da alma e do corpo orgânico. A alma segue as suas próprias leis, e o corpo também as suas, e ambos se ajustam devido à harmonia pré-estabelecida entre todas as substâncias, pois todas elas são representações de um só universo (Leibniz, *A Monadologia*, § 78).

Utilizando seus princípios do conhecimento, Leibniz conseguiu formular críticas consistentes contra o atomismo epicurista ressuscitado principalmente por Pierre Gassendi (1592-1655) e Robert Boyle (1627-1691) em meados do século XVII. Ele argumentou que as verdadeiras unidades de matéria não podiam ser formadas por átomos duros, dotados de extensão e indivisíveis, pois isto implicaria em uma fenda na continuidade da natureza e não haveria razão suficiente para terminar o processo de subdivisão em um certo ponto ao invés de outro qualquer. Sendo os átomos indistinguíveis, também não haveria razão suficiente para Deus criá-los originalmente em uma determinada ordem espacial ao invés de outra. Além disso, se todas as

substâncias fossem formadas de átomos, de que substância os próprios átomos seriam formados? Contra a idéia do vácuo, Leibniz argumentava que se houvesse matéria e vazio, não haveria razão para a existência de qualquer proporção particular entre eles.

Leibniz, assim como Descartes, não acreditava na existência do vazio. Entretanto, o filósofo francês formulou uma concepção geométrica e mecânica dos corpos, enquanto Leibniz construiu uma concepção dinâmica. Nesse sentido, ele explicou os seres não como máquinas que se movem, mas como forças vivas: “Os corpos materiais, por sua resistência e impenetrabilidade, revelam-se não como extensão, mas como forças; por outro lado, a experiência indica que o que se conserva num ciclo de movimento não é – como pensava Descartes – a quantidade de movimento, mas a quantidade de força viva”. A partir da noção de matéria como essencialmente atividade, Leibniz chegou à idéia de que o universo era composto por unidades de força, as mônadas, noção fundamental de sua metafísica (Chauí, 1983, p. 99).

3.2 A Concepção de Força em Boscovich

A dinâmica leibniziana foi aprimorada por Roger Joseph Boscovich (1711-1787) em meados do século XVIII. Sua teoria baseia-se na idéia de que toda a matéria constitui-se de pontos materiais indivisíveis e pontuais, dotados de massa e cuja interação se dá através de uma ação a distância (Martins, 1997, p. 111).

Os pontos materiais seriam inextensíveis como as mônadas, as quais Boscovich se refere como análogas (Snow, 1975, p. 119). Uma combinação desses átomos-pontuais formaria os elementos químicos, que por sua vez combinados, forneceriam os compostos químicos e assim por diante. Desse modo, podia-se imaginar toda a “matéria” como sendo única e as complexidades observadas seriam o resultado de níveis sucessivos de complexidade de arranjos especiais.

Uma representação moderna dessa força pode ser vista no gráfico ao lado, em que o eixo vertical representa a intensidade da força e o eixo horizontal a distância entre as partículas pontuais, de modo que forças positivas estariam representando repulsões e

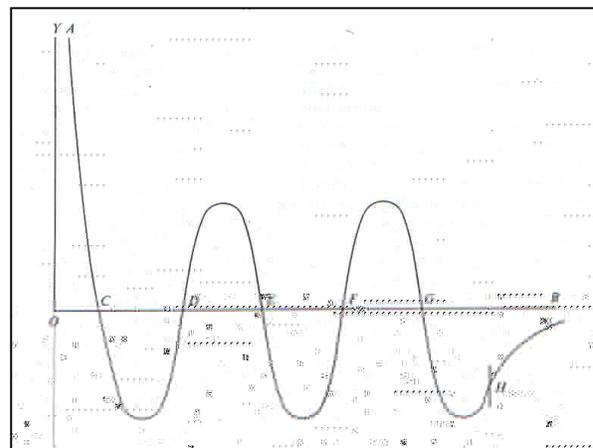


Figura 3. Gráfico esquemático representando um modelo de forças de um átomo de Boscovich.

forças negativas, atrações. Na origem O dos eixos coordenados, estaria localizado o centro das forças constituintes do átomo-pontual. Para além do ponto H, a força seria sempre atrativa, decrescendo inversamente com o quadrado da distância, satisfazendo desta forma, o princípio newtoniano da atração universal. Entre H e A, a força seria atrativa ou repulsiva, dependendo da distância ao ponto O, tal que o número de alternâncias poderia ser ajustado à vontade para descrever os fenômenos. De A até O, a força se tornaria cada vez mais repulsiva, tendendo a infinito no ponto O, e portanto, preservando a impenetrabilidade como uma característica fundamental da matéria. Ou seja, essas partículas nunca poderiam se tocar, de forma que o aparente contato de dois corpos seria apenas uma ilusão (Williams, 1981c, p. 529).

Boscovich dedicou grande parte de sua argumentação para mostrar que as teorias de impulso por contato entre partículas rígidas exigiriam uma descontinuidade do movimento, o que parecia ser inaceitável (Martins, 1997, p. 111). Rejeitando o contato, Boscovich defendeu forças de interação a distância propriamente ditas, e não-explicáveis por qualquer mecanismo oculto (Martins, 1997, p. 111).

3.3 O Éter “Cartesiano” de Lesage

George Louis Lesage (1724-1803) foi um dos cientistas que tentaram fornecer uma explicação mecânica para a gravitação, procurando desenvolver uma teoria baseada na existência de um meio etéreo não-observável agindo como intermediário das ações físicas.

Inspirado pela obra *De Rerum Natura (Da Natureza das Coisas)*, de Lucrécio (c.98-c.55 a.C.) e pelo clima cartesiano predominante da época, Lesage incumbiu-se da formidável tarefa de explicar a lei de atração gravitacional de Newton em termos da filosofia mecânica. Embora essa lei finalmente havia sido bem aceita pelos cientistas continentais, ela continuava apresentando sérias dificuldades de entendimento. Muitos achavam inconcebível que um simples pedaço de matéria inanimada pudesse de algum modo adivinhar a presença de outras matérias ao seu redor, medir a distância entre elas e suas próprias massas e por fim atraírem-se através do espaço interveniente obedecendo a uma lei muito bem determinada (Gough, 1981, p. 259).

Em seu trabalho *Essai de chimie mécanique (Ensaio sobre Química Mecânica)*, de 1758, Lesage apresentou uma seqüência de argumentos com as características centrais de sua teoria (Evans, 2002, p. 24-5):

1^o) Sempre que descobrimos a verdadeira causa de alguma mudança no estado de um corpo, nós vemos que *isto ocorre devido a um impulso*. Por exemplo, a elevação de uma coluna de água em

uma bomba deve-se à pressão do ar. Portanto, é razoável supor que a aproximação entre dois corpos é realmente devida à impulsão de algum tipo de matéria invisível. Este argumento tem sua validade reforçada por causa do seguinte axioma: “efeitos similares são provenientes de causas similares”. Ou, se nós preferirmos, poderemos considerá-lo como uma prova por analogia, o qual, de acordo com Lesage, é o tipo mais forte de prova em raciocínio físico.

2º) Como a matéria que produz as atrações dos corpos não oferece uma resistência sensível ao movimento deles, suas partes devem deixar livre passagem a eles. Portanto, *a matéria invisível deve ser fluida.*

3º) Este fluido deve se locomover mais rápido do que os corpos sobre os quais ele produz uma aceleração. Como a aceleração dos corpos em queda não cessa mesmo quando o corpo move-se rapidamente, *a velocidade do fluido deve ser muito grande.* Lesage utilizou um argumento tirado do movimento planetário para mostrar que a velocidade do fluido deve ser no mínimo dez trilhões (10^{13}) de vezes maior do que a velocidade da luz. E neste ponto, ele novamente cita algumas palavras de Lucrécio: “Certamente, elas devem ser de uma rapidez excessiva e devem ser transportadas muito mais rapidamente do que a luz do Sol.”

4º) Como todos os corpos caem em direção ao centro da Terra, o fluido deve ser capaz de se movimentar através de um único espaço simultaneamente em todas as direções. Assim, as partes do fluido devem estar isoladas umas das outras. *Este fluido, portanto, consiste de corpúsculos discretos,* que não interferem uns nos outros, por pouco que seja.

5º) O movimento curvilíneo é forçado. Uma vez que o agente causador da força é removido, os movimento curvilíneos imediatamente tornam-se retilíneos. Como os corpúsculos do fluido não interferem uns nos outros, mas movem-se com total liberdade, *suas trajetórias devem ser retilíneas.*

6º) Os pesos dos objetos não decrescem sensivelmente no interior dos corpos. Assim, os corpúsculos devem ser muito pequenos, ou penetrantes, e os corpos devem ser porosos. Na verdade, os poros dos corpos devem estar em grande proporção em relação ao próprio corpo, de modo que os corpúsculos tenham passagem quase livre pelos corpos. Pois a atração dos corpos celestes é muito pequena em proporção à quantidade de suas matérias, e este não seria o caso se as camadas externas de um corpo absorvessem uma fração sensível dos corpúsculos incidentes.

Ou seja, Lesage postulou um meio envolvendo todos os corpos, de modo que os corpúsculos que constituíam esse meio, os chamados corpúsculos *ultramundanos*, por serem provenientes de fora do mundo conhecido, moviam-se a altas velocidades em todas as direções¹ e ocasionalmente colidiam com as partículas que formavam os corpos físicos observáveis. O diâmetro dos corpúsculos seria tão pequeno, em comparação com as distâncias entre eles, que as colisões entre eles seriam muito raras. Os objetos seriam semipermeáveis a essas partículas etéreas, e muitas delas os atravessariam sem interagir com eles. Mas aquelas que se chocassem com um corpo, transfeririam movimento a ele, com o que as partículas teriam o sentido de seu movimento invertido, e o corpo experimentaria uma força resultante. Num universo que possuísse um único corpo, inicialmente em repouso, a densidade de colisões seria igual em todos os lados do corpo e assim, as forças exercidas sobre ele se cancelariam, e não haveria movimento. Mas assim que se introduzisse um segundo objeto nesse universo, cada um bloquearia parcialmente o fluxo de corpúsculos que estaria incidindo sobre o outro, o que geraria uma diferença de pressão, pois cada corpo sofreria menos colisões de um lado do que no outro. Em consequência, cada corpo começaria a se mover um em direção ao outro, dando a impressão de uma atração entre eles.

Quanto maior a distância entre os corpos, menor seria o efeito da “sombra gravitacional” exercida mutuamente. Similarmente, quanto maior a massa dos objetos, mais partículas gravitacionais seriam interceptadas, e maior seria o desequilíbrio de força (Gough, 1981a, p. 259). Lesage explicou assim, qualitativamente, a atração gravitacional através de uma ação por contato, e não a distância.

Uma descrição mais sistemática de sua teoria encontra-se em seu trabalho *Traité de physique mécanique (Tratado de Física Mecânica)*, publicado postumamente em 1818, e que foi

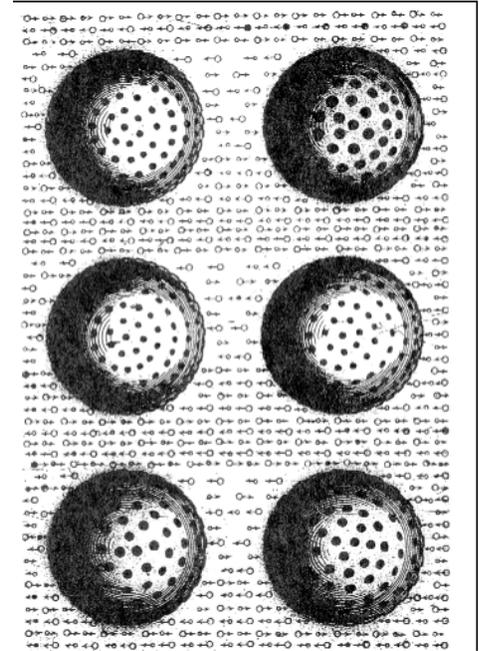


Figura 4. Pares de corpos macroscópicos atravessados por correntes de corpúsculos ultramundanos imaginados por Lesage.

¹ Lesage acreditava que a causa eficiente dos corpúsculos que produziam os efeitos da gravitação era um ser incorpóreo, que os lançava a grandes velocidades ao serem criados (Evans, 2002, p. 25).

compilado juntamente com suas notas e rascunhos por Pierre Prévost (1751-1839), pupilo e discípulo de Lesage (Evans, 2002, p. 27).

O pesquisador Sir Edmund Whittaker descreve a teoria de Lesage como “uma curiosa tentativa de ‘cartesianisar’ o newtonianismo” (Whittaker, 1951, vol. I, p. 31).

Lesage encontrou forte oposição de seus contemporâneos. Por isso, tratou de empreender uma reflexão metodológica destinada a enfrentar a ortodoxia da época e legitimar a sua própria teoria. Ele defendeu o método hipotético-dedutivo, sustentando que nada poderia ser inferido além da própria existência dos fatos se nos limitássemos estritamente àquilo que é observável.

Embora outras pessoas tivessem procurado explicações mecânicas para a atração gravitacional, as de Lesage foram as únicas a emergirem do século XVIII como um modelo, à primeira vista, fisicamente adequado para a interação gravitacional. A esse respeito, James Clerk Maxwell (1831-1879) fez o seguinte comentário:

Aqui, então, parece ser um caminho que leva diretamente à explicação da lei da gravitação, a qual, se sob outros aspectos também se mostrar consistente com os fatos, poderá vir a se constituir no caminho real para a revelação do grande mistério da ciência (Maxwell, *Scientific Papers, Atom*, v. 2, p. 474).

3.4 Kant e as Forças Fundamentais

Não existem dúvidas sobre a aceitação da teoria newtoniana por parte do filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804), pois fez referência favorável a ela em várias de suas obras como *Pensamentos sobre a verdadeira estimativa das forças vivas*, de 1747, e *História Natural Universal e Teoria dos Céus – Um ensaio sobre a constituição e a origem mecânica de todo o universo tratado de acordo com os Princípios de Newton*, de 1755.

Mas é em sua obra intitulada *Metaphysische Anfangsgrunde der Naturwissenschaft (Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza)*, de 1786, que Kant explicitamente aceita a possibilidade da existência de forças agindo a distância. O objetivo desta obra é aplicar os princípios apresentados em seu trabalho *Crítica da Razão Pura* (de 1781) à física. Ele começa distinguindo a metafísica e a ciência natural propriamente dita dos estudos meramente empíricos. A Metafísica contém somente aqueles princípios *a priori* discutidos na *Crítica* – aquelas formas de percepção tais como o espaço e o tempo, substância e causalidade, sem as quais não poderia haver conhecimento, e que são portanto, de acordo com Kant, independentes da experiência e absolutamente certos. Outras propriedades do mundo devem ser descobertas empiricamente e não fazem parte da ciência *a priori* (Hesse, 1962, p. 172).

Em sua obra de 1786, ele afirma ser necessário assumir a existência de forças a distância ao perceber que a idéia de forças de contato era problemática. Para ele, todas as teorias mecânicas precisam admitir a impenetrabilidade da matéria. Por isso, faz-se necessário a existência de uma força repulsiva que resista à penetração, pois se não houver essa força, quando dois corpos se moverem um em direção ao outro, não haverá mudança no sentido do movimento, e sim uma justaposição de corpos. Essa força não pode ser infinita, pois algo infinito é impensável, e portanto, pode haver uma penetração parcial, por compressão. A existência dessa força é a causa primária que torna possível a matéria (Martins, 1997, p. 111).

Encher um espaço significa resistir a todo o móvel que se esforça, graças ao seu movimento, por penetrar num certo espaço (Kant, *Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*, p. 43).

A matéria enche um espaço unicamente graças a uma força motriz e, decerto, uma força tal que se opõe à invasão de outras matérias, isto é, à sua aproximação. É esta, pois, uma força repulsiva. Por conseguinte, a matéria enche o seu espaço apenas graças às forças repulsivas e, claro está, em todas as suas partes, porque de outro modo uma parte do seu espaço não seria enchida, mas simplesmente incluída. Mas *a força de um corpo extenso, em virtude da repulsão de todas as suas partes, é uma força de expansão*. Portanto, a matéria enche o seu espaço unicamente graças a uma força de expansão que lhe é peculiar (Kant, *Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*, p. 46).

A força expansiva de uma matéria chama-se também *elasticidade*. Visto que esta força é o fundamento em que se baseia o enchimento do espaço, enquanto propriedade essencial de toda a matéria, semelhante elasticidade deve chamar-se *originária*, porque não se pode derivar de nenhuma outra propriedade da matéria. Toda a matéria é, pois, originariamente elástica (Kant, *Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*, p. 47).

Além de forças repulsivas para explicar a impenetrabilidade da matéria, era preciso, de acordo com Kant, atribuir também certas forças atrativas à matéria, para explicar sua coesão – o motivo pelo qual as partes das partículas se mantêm unidas.

A possibilidade da matéria exige, como sua segunda força fundamental, uma força de atração (Kant, *Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*, p. 56).

[...] A matéria, graças apenas à sua força repulsiva, não se conteria em fronteira alguma da sua expansão, isto é, dispersar-se-ia até ao infinito, e em nenhum espaço determinável se encontraria uma quantidade determinável de matéria. Portanto, se existissem simplesmente forças repulsivas na matéria, todos os espaços estariam vazios e assim, a rigor, não haveria matéria alguma. Toda matéria exige, pois, para a sua existência forças opostas às forças de expansão, isto é, forças compressivas. [...] Por isso

a toda a matéria cabe uma atração primordial, enquanto força fundamental inerente à sua essência (Kant, *Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*, p. 56-7).

Ele ainda salienta uma distinção no modo de atuação dos dois tipos de forças: as repulsivas agem por contato enquanto que as atrativas agem a distância:

O contato, na acepção física, é a ação e a reação imediatas da impenetrabilidade. A ação de uma matéria sobre outra, fora do contato, é a ação a distância. Esta ação a distância, que também é possível sem a mediação de uma matéria intermediária, chama-se ação imediata a distância, ou também ação das matérias entre si através do espaço vazio.

[...] O contato físico é a ação recíproca das forças repulsivas no limite comum de duas matérias.

[...] A ação de uma força motriz, independente de todo o contato, é também independente da repleção do espaço entre o motor e o móvel, isto é, deve igualmente ocorrer sem que o espaço entre os dois elementos se encha, portanto, como ação através do espaço vazio. Pelo que a atração originária e essencial de toda a matéria é uma ação imediata desta mesma matéria sobre outras, através do espaço vazio (Kant, *Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*, p. 60-1).

Kant considera que tanto as forças atrativas agindo a distância como as forças repulsivas agindo por contato são primitivas à matéria, ou seja, não se pode conceber a matéria sem essas forças, e elas não podem ser explicadas de um modo mais fundamental. E como é preciso admitir a existência dos dois tipos de forças, nada impede, então, que se aceite que a gravitação seja uma ação imediata de uma parte de matéria sobre outra, através do espaço.

É impossível exigir que a possibilidade de forças fundamentais seja tornada compreensível; elas são chamadas fundamentais porque não podem ser derivadas de qualquer outra, ou seja, não podem ser compreendidas.

A objeção mais comum contra uma ação imediata a distância é que a matéria não pode agir imediatamente *onde ela não está* [...]. No entanto, em vez de ser contraditório, podemos dizer que sempre que algo age no espaço sobre outra coisa, esse algo atua em um lugar onde o fator ativo não está. Se agisse onde está, a coisa sobre a qual ele age não poderia ser externa a ele (Kant, *Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza*, p. 61).

Essas idéias kantianas influenciarão fortemente o pensamento de Oersted e também ajudará Ampère a desenvolver sua própria teoria eletrodinâmica.

3.5 A Concepção de Fluido Elétrico

A idéia de Gilbert da existência de humores dentro dos corpos que pudessem ser exalados ao serem atritados foi tão bem aceita durante o século XVII, que em seu tratado sobre a luz, de 1704, Newton fez a seguinte alusão a esse respeito:

Como um corpo elétrico pode emitir por fricção uma exalação tão rarefeita e sutil, e todavia tão potente, sem causar, por sua emissão, nenhuma diminuição perceptível do peso do corpo elétrico e ser expandida através de uma esfera cujo diâmetro é de mais de dois pés, e todavia ser capaz de agitar e levantar uma folha de cobre, ou uma folha de ouro, à distância de mais de um pé do corpo elétrico? E como podem os eflúvios de um ímã ser tão rarefeitos e sutis a ponto de atravessar uma lâmina de vidro sem nenhuma resistência ou diminuição de sua força, sendo todavia tão potentes a ponto de girar uma agulha magnética para além do vidro? (Newton, *Óptica*, livro III, questão 22).

Pouco tempo depois, em 1729, Stephen Gray (1666-1736) realizou um experimento, ‘mostrando que a virtude elétrica de um tubo de vidro podia ser transferido a outros corpos de tal modo a dotá-los da mesma propriedade de atração e repulsão de corpos leves como o tubo faz, quando excitado por fricção; e que essa virtude atrativa podia ser levada a corpos que estivessem a muitos pés de distância do tubo.’ (Whittaker, 1951, p. 42).

Após essa descoberta de Gray, não era mais possível acreditar que o eflúvio elétrico estivesse inseparavelmente conectado aos corpos dos quais eles eram exalados por fricção. E tornou-se necessário admitir que essas emanções tivessem uma existência independente, e pudessem ser transferidas de um corpo para outro. Dessa forma, elas passaram a ser conhecidas pelo nome de *fluido elétrico*, como uma das substâncias das quais o mundo era constituído.

A questão de saber se o fluido elétrico era um elemento peculiar ou, como alguns suspeitavam, uma manifestação de um princípio cuja operação era vista no fenômeno do calor, estava sendo ativamente debatida. Aqueles que defendiam esta última idéia, diziam que tanto o fluido elétrico como o calor podiam ser induzidos por fricção, ambos podiam induzir a combustão e ambos podiam ser transferidos de um corpo para o outro por mero contato. Além disso, indicavam que os melhores condutores de calor também eram, em geral, os melhores condutores de eletricidade. Por outro lado, sustentava-se que a eletrização de um corpo não causava elevação apreciável de temperatura, e um experimento de Gray mostrou uma diferença ainda mais incrível. Ao eletrizar da mesma maneira dois cubos de madeira, um oco e outro maciço, ele mostrou que eles produziam exatamente os mesmos efeitos, o que o levou a concluir que somente as superfícies dos cubos eram relevantes no fenômeno. Então, enquanto o calor era

disseminado por toda a substância do corpo, o fluido elétrico residia em sua superfície ou perto dela (Whittaker, 1951, p. 42-3).

3.6 As Eletricidades Vítreas e Resinosas de Dufay

Em meados do século XVIII, o fluido elétrico era geralmente comparado a uma atmosfera envolvendo os corpos. Um relato da Academia Francesa em 1733 diz: “Ao redor de um corpo eletrizado, existe um vórtice formado de matéria extremamente fina em estado de agitação, que é impelido em direção ao corpo assim como substâncias leves encontram-se dentro de sua esfera de atividade. A existência deste vórtice é mais do que uma mera conjectura, pois quando um corpo eletrizado é trazido para perto do rosto, ele causa uma sensação parecida com aquela ao encostar-se numa teia de aranha” (*apud* Whittaker, 1951, p. 43).

Na mesma época, Charles-François de Cisternay Dufay (1698-1739) procurava entender o comportamento de uma folha de ouro quando era trazida próximo de um tubo de vidro eletrizado supondo que em princípio o vórtice do tubo envolvia a folha de ouro e então, a atraía em direção ao tubo. Mas quando o contato ocorria, a folha de ouro adquiria a virtude elétrica, e então tornava-se envolta por um vórtice próprio. Então, os dois vórtices “iniciavam uma luta” para estenderem-se em sentidos contrários, repelindo-se mutuamente, e o vórtice do tubo, sendo o mais forte, afastava o vórtice da folha de ouro. Dufay dizia:

Então, é certo que os corpos que se eletrizaram por contato, são repelidos por aqueles que transmitiram a eles a eletricidade; mas serão eles repelidos por outros corpos eletrizados de todos os tipos? E os corpos eletrizados realmente não diferem entre si, exceto pela intensidade de eletrização? Um exame deste assunto levou-me a descobrir o que eu nunca teria previsto e o que eu acredito que ninguém até agora tem a menor idéia (*apud* Whittaker, 1951, p. 43-4).

Ele descobriu, de fato, que quando uma folha de ouro eletrizada, por ter entrado em contato com um pedaço de vidro eletrizado, era trazida para perto de um pedaço eletrizado de *copal*², uma atração era observada entre eles. “Eu esperava exatamente o contrário, pois, de acordo com o meu raciocínio, a resina e a folha de ouro, que estavam ambas eletrizadas, deveriam ter se repellido mutuamente”, escreveu Dufay. Prosseguindo com seus experimentos, ele descobriu que a folha de ouro, quando eletrizada e repelida pelo vidro, era atraída por todas as substâncias resinosas eletrizadas, e que quando repelida por estas últimas, era atraída pelo vidro. “Nós vemos, portanto, que existem duas eletricidades de natureza totalmente diferentes, isto é, aquela dos

sólidos transparentes, tais como vidro, cristal etc., e aquela dos corpos betuminosos ou resinosos, tais como âmbar, lacre etc. Cada um deles repele os corpos que apresentem eletricidade de mesma natureza que a sua, e atrai aqueles cuja eletricidade é de natureza contrária. Nós também vemos que os corpos que ainda não foram eletrizados podem adquirir qualquer uma dessas eletricidades, e que então seus efeitos passam a ser similares aos daqueles que a comunicaram.” (Whittaker, 1951, p. 44)

A estes dois tipos de eletricidade, cuja existência foi, então, demonstrada, Dufay chamou de *eletricidade vítrea* e *eletricidade resinosa*.

3.7 A Teoria do Fluido Único de Watson e Franklin

Se a eletricidade fosse entendida como um tipo de fluido, então seria possível armazená-la numa garrafa. As primeiras pesquisas que lograram êxito em “engarrafar” o fluido elétrico datam de 1745 e foram realizadas independentemente pelo polonês Ewald Georg von Kleist (1700-1748) e o holandês Pieter van Musschenbroek (1692-1761). Inicialmente, eles utilizaram em suas experiências um frasco de vidro apenas com água salgada em seu interior. Posteriormente, esse recipiente foi aperfeiçoado, sendo revestido externamente por folhas metálicas, com uma haste metálica ligando o exterior ao interior do frasco, preenchido com água (que depois foi substituída por finas lâminas de metal) e que ficou conhecido por *garrafa de Leyden*³. Encostando-se a extremidade da haste metálica a uma máquina eletrostática, a garrafa podia recolher e armazenar uma enorme quantidade de fluido. Para descarregá-la, bastava ligar a sua base metálica externa com a extremidade superior utilizando um arame condutor. Esse processo, quase sempre, era acompanhado do aparecimento de uma intensa faísca.

Um ano depois dos resultados serem apresentados por Kleist e Musschenbroek, o farmacêutico londrino William Watson (1715-1787) sugeriu que as ações elétricas apareciam devido à transferência de um “éter elétrico” durante o processo de carga ou descarga de uma garrafa de Leyden, e não devido à criação ou destruição de algo. Assim, a eletrização de um corpo não consistia em estimular algo a sair de dentro do corpo sem a devida compensação, mas no acúmulo de um excesso de éter elétrico pelo corpo às custas de algum outro corpo, cujo estoque estivesse, conseqüentemente, esvaziando-se. Entendia-se que todos os corpos possuíssem

² Um tipo de resina transparente dura utilizada para envernização de superfícies, obtida de vários tipos diferentes de árvores tropicais.

³ Leyden era a cidade onde Pieter van Musschenbroek lecionava.

uma certa quantidade natural de éter, que podia ser utilizada para este propósito (Whittaker, 1951, p. 46).

Na mesma época, na América, Benjamin Franklin (1706-1790), ao realizar experiências elétricas com tubos de vidro, propôs uma teoria baseada praticamente nas mesmas hipóteses empregadas por Watson, embora não conhecesse suas idéias. Franklin dizia que todos os corpos materiais deviam apresentar uma certa quantidade “normal” de eletricidade. Quando dois corpos fossem atritados, um dos corpos transferiria eletricidade para o outro, de modo que um deles ficaria com uma falta deste elemento, enquanto que o outro ficaria com um excesso do mesmo. Franklin chamou esses dois estados de negativo e positivo. Ele também disse que seria impossível criar ou produzir o fluido elétrico e que era possível apenas movê-lo ou transferi-lo de um lugar para outro, originando assim, os efeitos elétricos conhecidos.

Portanto, a eletricidade não era algo que pudesse ser criado ou destruído, mas somente transferido de um corpo para outro.

Franklin acreditava que a eletricidade fosse um fluido elástico, consistindo de partículas que se repeliam mutuamente e eram extremamente sutis, pois podiam penetrar a matéria comum, mesmo os mais densos metais, com tanta facilidade e liberdade que nenhuma resistência era perceptível. Para ele, alguns materiais como o vidro, eram impermeáveis ao fluido elétrico, de modo que em uma garrafa de Leyden, a falta de fluido em um dos lados da parede de vidro podia coexistir com o excesso do mesmo do outro lado, enquanto os dois lados não fossem conectados através de um meio condutor qualquer. Mas, se a conexão fosse estabelecida, por exemplo, pelas próprias mãos de uma pessoa, o fluido em excesso começaria a se movimentar em direção ao outro lado, passando pelo corpo da pessoa, que tomaria um choque.

Para entender a atração existente entre um corpo com excesso e outro com falta de fluido elétrico, Franklin assumiu que, embora as partículas do fluido elétrico estejam se repelindo mutuamente, elas são fortemente atraídas por todas as outras partículas da matéria ordinária, de tal modo que a matéria comum funcione como uma espécie de esponja para o fluido elétrico. Ela absorve eletricidade até saturar-se e depois disso, qualquer excesso adicional desse fluido deve permanecer sobre a superfície do corpo ou perto dela.

Apesar de sua crença no poder da eletricidade de agir a distância, Franklin não abandonou a doutrina dos eflúvios.

3.8 A Ação a Distância em Aepinus

A teoria dos eflúvios foi finalmente abandonada e substituída por uma teoria de ação a distância quando Franz Ulrich Theodor Aepinus (1724-1802) apresentou sua concepção sobre as interações físicas em sua grande obra intitulada *Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi*, de 1759, adotando a teoria do fluido único desenvolvida por Watson e Franklin.

A idéia de que o vidro era impermeável ao fluido elétrico, utilizada por Franklin para entender o funcionamento de uma garrafa de Leyden, foi generalizada por Aepinus ao afirmar que todos os materiais não-condutores deviam ser impermeáveis ao fluido elétrico. Como isso também se aplicava ao ar, ele construiu uma máquina análoga a uma garrafa de Leyden, em que o ar substituía o vidro como o meio entre as duas superfícies condutoras.

O sucesso desse experimento levou Aepinus a negar completamente a existência de um eflúvio elétrico envolvendo os corpos carregados. O fluido elétrico não devia, portanto, ser considerado como tendo sua extensão além do corpo carregado. O experimento dos dois cubos de madeira de Gray mostrava que esse fluido não penetrava muito para dentro da substância. Então, tornava-se necessário supor que o fluido elétrico, no seu estado de repouso, estivesse confinado a finas camadas da superfície dos corpos carregados. Isto sendo admitido, as atrações e repulsões observadas entre os corpos forçava-nos a acreditar que a eletricidade agia a distância através do ar interveniente.

Como dois corpos com excesso de fluido elétrico repeliam-se mutuamente, a força entre duas partículas desse fluido deveria ser repulsiva; e como havia uma atração entre um corpo com excesso e outro com falta de fluido, a força entre as partículas de eletricidade e as partículas da matéria ordinária deveria ser atrativa.

Essas hipóteses já haviam sido feitas por Franklin, mas para entender a repulsão entre dois corpos com falta de fluido elétrico, Aepinus introduziu uma nova suposição, isto é, a de que as partículas da matéria ordinária deveriam se repelir mutuamente. Isto, em princípio, surpreendeu seus contemporâneos, mas, como ele apontou, a matéria não-eletrizada, com a qual nós estamos familiarizados, é na verdade, matéria saturada com sua quantidade natural de fluido elétrico, e as forças devido à matéria e o fluido se contrabalançando. Ou talvez, como ele sugeriu, uma pequena diferença entre essas forças poderia dar origem à força da gravidade, como um efeito residual (Whittaker, 1951, p. 51-2).

O Tentamen é um importante livro sobre a história da eletricidade onde pode-se encontrar vários fenômenos elétricos baseados em ação a distância. Aepinus enfaticamente rejeita a noção corrente na época sobre as atmosferas elétricas. Não que ele acreditasse que os corpos agissem onde eles não estão: ele simplesmente aceitou literalmente os preceitos de Newton sobre filosofia

natural e procurou deduzir os fenômenos de certas forças assumidas, sem questionar de que maneira as próprias forças poderiam ser levadas em consideração. Três dessas forças, de acordo com ele, criariam todos os fenômenos da eletricidade: uma repulsão entre as partículas do fluido elétrico, uma atração entre elas e os corpúsculos de matéria comum, e uma repulsão entre os corpúsculos. Esta última seria necessária para evitar que corpos não-eletrizados (corpos com quantidade normal de fluido elétrico) se atraíssem mutuamente. Aepinus observou ainda que, embora a repulsão pudesse conflitar com a gravitação universal, não haveria razão para não supor vários tipos de forças entre os corpúsculos de matéria e que, de fato, os fenômenos requeriam isso. No que diz respeito à lei de força, ela seria proporcional ao excesso ou deficiência do fluido e o mesmo ocorreria para todos os pares de partículas. Aepinus não fingia saber a forma precisa da lei, Por analogia ele se mostrava a favor da lei do quadrado da distância, mas em geral, ele deixou o assunto em aberto, a grande questão sem resposta da teoria elétrica (Heilbron, 1981a, p. 67).

A aceitação da teoria do fluido único de eletricidade, em meados do século XVIII, levou naturalmente a tentativas de construir uma teoria similar para o magnetismo. Isto foi efetivado em 1759 por Aepinus, que supôs os “pólos” como sendo lugares em que o fluido magnético estivesse presente em excesso ou em falta, em relação à quantidade normal. O fato de os ímãs apresentarem propriedades magnéticas permanentes era entendido supondo-se que o fluido estivesse aprisionado em seus pólos, de tal modo a terem dificuldades de locomoção. Supunha-se que as partículas do fluido repeliam-se mutuamente e atraíam as partículas do ferro ou do aço. Mas, como Aepinus disse, para explicar satisfatoriamente o fenômeno magnético, era necessário assumir também uma repulsão mútua entre as partículas materiais constituintes do ímã (Whittaker, 1951, p. 57).

Subseqüentemente, dois fluidos magnéticos imponderáveis, denominados *boreal* e *austral*, foram concebidos pelo holandês Anton Brugmans (1732-1789). Estes fluidos apresentavam propriedades de atração e repulsão similares àquelas apresentadas pelas eletricidades vítrea e resinosa.

3.9 Coulomb e a Impossibilidade de Interação entre os Fluidos Elétricos e Magnéticos

O físico francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806), em 1785, conseguiu mostrar, com o auxílio de uma balança de torção inventada por ele mesmo, que tanto a força de repulsão entre

duas pequenas esferas carregadas com o mesmo tipo de eletricidade como a força de atração entre as mesmas esferas carregadas com eletricidades opostas eram inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre seus centros.

Diferentemente de Benjamin Franklin (1706-1790), Franz Ulrich Theodor Aepinus (1724-1802), Henry Cavendish (1731-1810), Martin van Marum (1750-1837) e Alessandro Volta (1745-1827), que acreditavam na existência de um único fluido elétrico, Coulomb preferia acreditar que a eletricidade fosse composta por dois fluidos diferentes, concepção que havia sido proposta em 1759 por Robert Symmer (1707-1763), como um aperfeiçoamento das idéias publicadas por Charles-François Dufay (1698-1739) em 1733. Symmer expressou suas idéias da seguinte forma:

Minha idéia é que as operações da eletricidade não dependem de um único poder positivo, de acordo com a opinião geralmente aceita, mas de dois poderes, distintos, positivos e ativos, que por contraste e, como que estando em contraposição mútua, acabam produzindo os vários fenômenos da eletricidade; e que, quando se diz que um corpo está positivamente eletrizado, não é porque ele contém uma quantidade adicional de matéria elétrica em relação ao seu estado natural; nem, quando se diz que ele está negativamente eletrizado, porque lhe falta uma certa quantidade dessa matéria. Mas que, no primeiro caso, ele possui uma grande quantidade de um daqueles poderes ativos, e no último, uma grande quantidade do outro; enquanto que um corpo em seu estado natural mantém-se não-eletrizado, devido ao balanço igual daqueles dois poderes dentro de si (Symmer, 1759, p. 371; *apud* Whittaker, 1951, p. 58).

Coulomb desenvolveu esta idéia, expressando-se da seguinte forma:

Qualquer que seja a causa da eletricidade, nós podemos explicar todos os fenômenos supondo que existam dois fluidos elétricos, as partes do mesmo fluido repelindo-se mutuamente de acordo com o inverso do quadrado da distância, e atraindo as partes do outro fluido de acordo com a mesma lei. (Coulomb, *Sixth Memoir*, p. 561; *apud* Whittaker, 1951, p. 58)

Coulomb ainda prestou grandes serviços para o avanço da teoria magnética. Em 1777, ele estabeleceu que as partículas dos fluidos magnéticos também se atraíam ou se repeliam mutuamente de acordo com forças proporcionais ao inverso do quadrado da distância.

No entanto, ele foi além em suas pesquisas, esforçando-se para entender por que os dois fluidos magnéticos, diferentemente dos dois fluidos elétricos, não podiam ser obtidos separadamente. Para Coulomb, o magnetismo e a eletricidade eram duas coisas fundamentalmente distintas, requerendo dois tipos diferentes de fluidos para serem entendidos. Os fluidos elétricos ocupavam os espaços intermoleculares dos corpos e podiam fluir de um

corpo para outro. Os fluidos magnéticos, por outro lado, estariam permanentemente aprisionados dentro das moléculas dos corpos magnéticos, estando, portanto, impossibilitados de se moverem de uma molécula para outra. Cada molécula sob tais circunstâncias deveria conter tanto fluido austral quanto fluido boreal, de modo que a magnetização consistia simplesmente numa separação dos dois fluidos para as extremidades opostas de cada molécula. Os fluidos elétricos positivo e negativo só poderiam agir entre si, o mesmo acontecendo com os fluidos magnéticos austral e boreal. Assim, os fluidos elétricos não interagiriam com os fluidos magnéticos e vice-versa (Williams, 1962, p. 114)

Portanto, a transformação de eletricidade em magnetismo não era um efeito a ser esperado de acordo com Coulomb, pois, embora ele tivesse mostrado que a eletricidade e o magnetismo apresentavam leis de ação matematicamente similares, os fluidos elétricos e os magnéticos eram substâncias de natureza fundamentalmente diferentes. Então, aqueles que aceitavam as idéias de Coulomb simplesmente não procuravam um efeito magnético proveniente da eletricidade, já que para eles, a conversão de uma na outra era impensável.

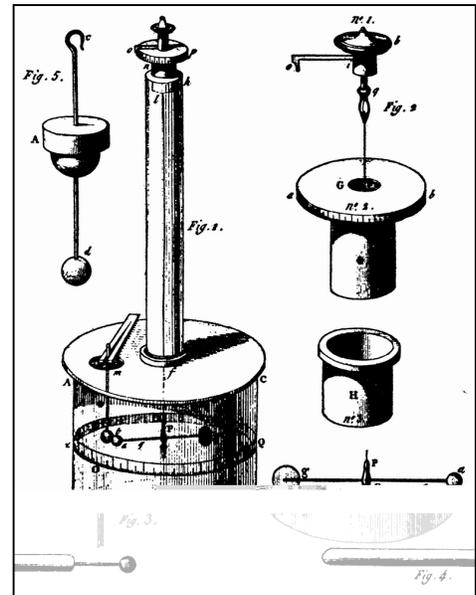


Figura 5. Balança de torção utilizada por Coulomb para medir a força eletrostática entre corpos eletrizados.

CAPÍTULO 4 – A DESCOBERTA DO ELETROMAGNETISMO

4.1 A Eletricidade Animal de Galvani

Em 1791, o anatomista e fisiologista italiano Luigi Galvani (1737-1798) publicou seu trabalho *De viribus electricitatis in motu musculari commentarius* (*Comentários a respeito dos efeitos da eletricidade sobre o movimento muscular*), em que relata um fenômeno inusitado sobre as contrações produzidas em pernas de rãs dissecadas em seu laboratório. Primeiramente, ele observou que ao encostar-se um bisturi na perna da rã dissecada, ela se contraía se, neste momento, uma máquina elétrica em funcionamento perto dela emitisse uma faísca:

A descoberta foi feita desta forma: eu tinha dissecado e preparado uma rã, como representado na figura ao lado, e enquanto eu estava fazendo outra coisa, deixei-a sobre uma mesa, na qual se encontrava uma máquina elétrica, a uma certa distância de seus condutores e separada dela por uma distância considerável. Então, quando uma das pessoas presentes tocou por acaso e levemente

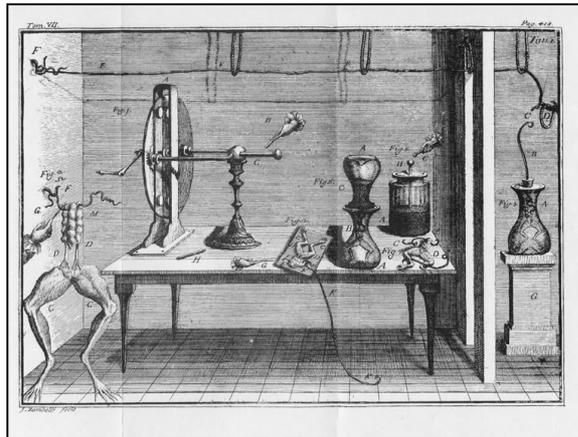


Figura 6. Mesa sobre a qual pode ser vista uma rã dissecada próxima a uma máquina geradora de eletricidade estática (Ilustração I da obra de Galvani, *De viribus electricitatis in motu musculari*, de 1791).

os nervos crurais internos da rã com a ponta de um bisturi, todos os músculos de suas pernas pareciam contrair-se muitas vezes como se estivessem sendo afetados por câimbras muito intensas. Uma outra pessoa que estava lá [...], percebeu que a ação ocorrera no momento em que uma faísca havia sido descarregada do condutor da máquina [...]. Assim, eu cheguei à conclusão de que talvez, para produzir o fenômeno, fossem necessários tanto o contato com o corpo como a faísca elétrica (Galvani, *De viribus electricitatis in motu musculari commentarius*; in Magie, 1935, pp. 421-2).

Galvani explicou que a distância entre a rã e a máquina elétrica permitia a livre propagação de “vibrações” formadas pela faísca na matéria elétrica do ar e que, ao atingirem o músculo, agitavam o fluido contido em seu interior, provocando sua contração. De acordo com a explicação atual, Galvani e seu bisturi funcionavam como uma antena para as ondas de rádio produzidas pela faísca (Heilbron, 1999, p. xxiii).

Ao dar continuidade às suas pesquisas, Galvani verificou que as pernas da rã eram contraídas mais fortemente sempre que era feita uma conexão entre os nervos e os músculos

por um arco metálico formado por dois metais diferentes. Tratava-se de um fenômeno semelhante ao produzido pelas descargas elétricas da máquina eletrostática, mas que ocorria aparentemente sem nenhuma fonte externa de eletricidade.

Pode parecer que Galvani tinha descoberto a essência do fenômeno do galvanismo: a produção de corrente elétrica devido ao contato de dois metais diferentes em um meio umedecido. Ele, no entanto, não interpretou sua própria descoberta dessa maneira. Na verdade, ele pensou finalmente ter obtido a confirmação de sua suspeita, alimentada de tempos em tempos durante o século XVIII, de que os animais possuíam em seus nervos e músculos um fluido parecido com a eletricidade produzida por atrito. Em seu trabalho de 1791, ele explica que um músculo podia ser comparado a uma pequena garrafa de Leyden carregada e o nervo comparado ao condutor da garrafa. A eletricidade animal seria gerada no

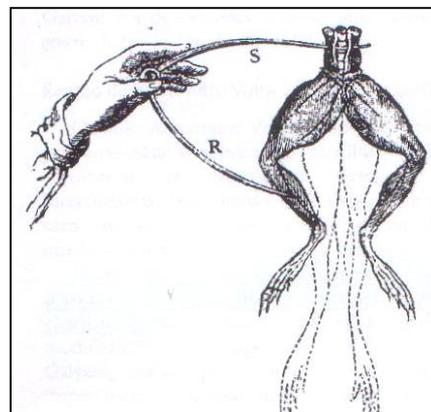


Figura 7. Representação esquemática para ilustrar a contração das pernas de uma rã dissecada pelo simples contato com duas hastes metálicas R e S ligando a medula vertebral das rãs com os músculos de suas pernas.

cérebro e através dos nervos passaria para os músculos, que então se tornariam carregados positivamente enquanto o lado de fora ficaria negativo. O equilíbrio elétrico no músculo seria desfeito ao ligar-se um arco entre o condutor e o músculo ou ao produzir-se uma faísca em uma máquina elétrica. Quando o músculo se descarregava em qualquer uma dessas maneiras, suas fibras eram contraídas violentamente (Brown, 1981, p. 268).

Assim, ele imaginou que as contrações fossem causadas pelo transporte de um fluido peculiar dos nervos para os músculos, e que a eletricidade fosse produzida pelo próprio animal. Este fluido logo ficou conhecido por *fluido galvânico* ou *eletricidade animal*.

4.2 A Pilha de Alessandro Volta

Muitos cientistas se interessaram pelo fenômeno descoberto por Galvani e começaram a estudá-lo, dando origem a uma acirrada controvérsia entre aqueles que diziam que a eletricidade animal era de natureza diferente da eletricidade estática e aqueles que defendiam a existência de um fluido animal de mesma natureza que o fluido elétrico.

Inicialmente, o físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) acreditou, assim como Galvani, na produção de um tipo especial de eletricidade pelo corpo dos animais. Mas, ao realizar suas próprias experiências, ele acabou se convencendo já em 1792, que os efeitos observados nos experimentos de Galvani apareciam, essencialmente, devido à conexão de dois metais diferentes por meio de um corpo umedecido, ao dizer que “os metais usados nos

experimentos, sendo aplicados aos corpos umedecidos dos animais, podem por si próprios, e por suas próprias virtudes, estimular o fluido elétrico e alterar seu estado de repouso, de modo que os órgãos dos animais participem somente de uma forma passiva” (Whittaker, 1951, p. 69).

Se os condutores metálicos funcionassem apenas como um meio pelo qual o fluido animal pudesse se locomover, o fenômeno da contração deveria ter aproximadamente a mesma intensidade, tanto no caso de o circuito ser fechado apenas com um metal como com dois metais diferentes. Como não era isso que acontecia, Volta pensou que o efeito fosse devido exclusivamente ao par de metais e que a rã funcionasse apenas como um sensível detetor de eletricidade. Volta continuou a realizar seus experimentos e em 1799, expôs sua teoria de uma forma mais consistente em uma carta ao editor de um importante jornal especializado da época:

O contato de diferentes condutores, particularmente os metálicos, incluindo a pirita e outros minerais, bem como o carvão vegetal, os quais eu chamo de condutores secos ou de *primeira classe*, com os condutores úmidos ou condutores de *segunda classe*, agita ou perturba o fluido elétrico, ou dá a ele um certo impulso. Não me pergunte como isso ocorre: é suficiente que isto seja um princípio, e um princípio geral. Este impulso, se produzido por atração ou qualquer outra força, é diferente ou distinto, ambos quanto aos diferentes metais e aos diferentes condutores úmidos; tal que a direção, ou no mínimo o poder, com o qual o fluido elétrico é impelido ou estimulado, é diferente quando o condutor *A* é aplicado ao condutor *B*, ou a outro *C*. Num círculo perfeito de condutores, onde qualquer um de segunda classe seja colocado entre dois diferentes entre si da primeira classe, ou contrariamente, um da primeira classe seja colocado entre dois da segunda classe diferentes entre si, um fluxo elétrico é produzido pela força predominante seja para a direita ou para a esquerda – uma circulação deste fluido, que cessa somente quando o circuito é rompido, e que é renovado quando o circuito é novamente fechado (*apud* Whittaker, 1951, p. 70).

Vale notar que em 1795 Volta já estava completamente convencido da inexistência da eletricidade animal, mas tinha que apresentar provas concretas de suas novas idéias. O resultado de suas investigações foram registradas em três cartas enviadas a Gren, em agosto e setembro de 1796 e março de 1797, ou seja, cerca de três anos antes de ele anunciar sua invenção. Embora Volta tenha se declarado vitorioso sobre Galvani, ele não estava completamente satisfeito. Para convencer o público em geral da veracidade de sua teoria, ele teve que pensar numa maneira de aumentar o efeito de seus discos metálicos sobre um eletrômetro (Mertens, 1998, pp 303-4).

Em 1800, em uma carta enviada a Joseph Banks (1743-1820) da *Royal Society of London*, Volta anunciou a invenção da sua pilha, ao descrever que se qualquer número de duplas forem tomadas, cada uma consistindo de um disco de zinco e um disco de prata colocados em contato, e se cada dupla estiver separada da próxima por um disco de papelão umedecido (tal que a ordem seja prata, zinco, papelão, prata, zinco, papelão, etc), o efeito desta pilha de duplas então formada será muito maior do que qualquer par galvânico anteriormente

construído. Quando a parte mais alta e a parte mais baixa da pilha forem simultaneamente tocadas pelos dedos de uma pessoa, um choque apreciável será sentido; e isto poderá ser repetido várias vezes, mostrando que a pilha

aparentemente possui dentro de si um ilimitado poder de recuperação, o que faz lembrar uma garrafa de Leyden¹ dotada com o poder de automaticamente restabelecer seu estado de tensão após cada descarga, como se houvesse “uma carga inesgotável, uma ação perpétua ou impulsão sobre o fluido elétrico” (Volta, *On the Electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds*; in Magie, 1935, pp. 427-8). Na verdade, Volta apresentou dois arranjos diferentes, um formado por uma série de copos interligados por fios aos quais estavam presas placas de prata e zinco e outro em que discos também de prata e zinco eram empilhados.

A carta de Volta endereçada a Banks não faz qualquer referência à controvérsia existente na época entre a eletricidade metálica e a eletricidade animal. Trata-se mais de um manual de instruções para a construção da pilha e uma descrição detalhada dos efeitos que ela pode produzir no corpo humano do que um tratado teórico sobre a eletricidade voltaica. O “aparato eletromotivo”, nome que o próprio Volta deu à sua invenção, era simplesmente um

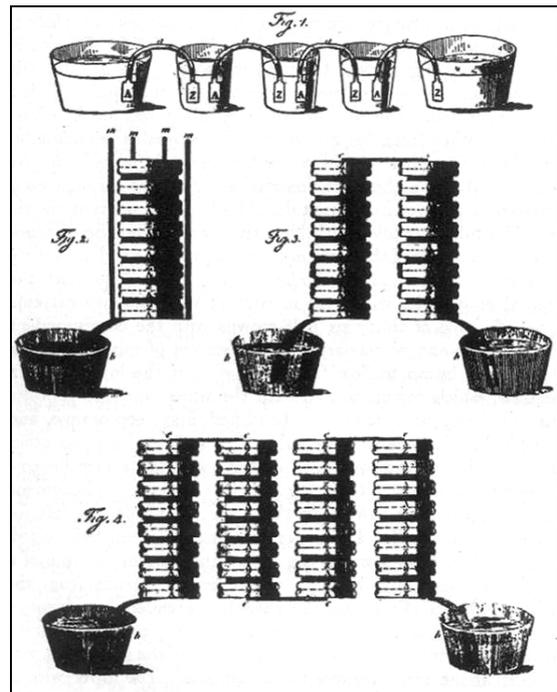


Figura 8. Ilustração mostrando dois tipos de aparelhos inventados por Volta. Acima, um dispositivo formado por uma série de copos interligados por fios aos quais eram conectadas placas de prata e zinco, e abaixo, um dispositivo formado por discos de prata e zinco empilhados, vindo daí o nome *pilha*.

¹ Diferentemente das garrafas de Leyden e das máquinas elétricas, as baterias ou pilhas voltaicas só conseguiam produzir faíscas fracas. No entanto, elas geravam grandes quantidades de calor e efeitos químicos intensos. Assim, como a eletricidade obtida pelos discos metálicos inventados por Volta parecia ser de natureza diferente

dispositivo de demonstração pública de sua teoria, pois permitia a amplificação dos fracos efeitos produzidos em 1797.

4.3 O Conflito Elétrico de Oersted

No início do século XIX, o mundo científico estava eufórico com a recente invenção da pilha voltaica e o dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) estava ciente da importância deste dispositivo para o melhor entendimento da relação existente entre o galvanismo e a química.

Em 1801, Oersted iniciou uma série de viagens à Alemanha e à França, no decurso das quais teve a oportunidade de conhecer Johann Wilhelm Ritter (1776-1810), com quem conseguiu demonstrar a existência de relações entre os fenômenos elétricos, o calor, a luz e os efeitos químicos. Depararam-se, no entanto, com algumas dificuldades na tentativa de estabelecer uma eventual relação entre a eletricidade e o magnetismo (Martins, 2002, p. 15).

Em consequência dos trabalhos de Coulomb, era aceita pela comunidade científica a independência dos comportamentos magnético e elétrico manifestados pela matéria, uma vez que os fluidos magnéticos jamais podiam abandonar uma barra magnética, enquanto os fluidos elétricos o podiam fazer. No entanto, a escola filosófica alemã *Naturphilosophie*, à qual pertenciam ilustres pensadores como Frederick Wilhelm Joseph Schelling (1775-1854) e Friedrich Schlegel (1772-1829), acreditava na unidade de todas as forças e procurava estabelecer uma relação entre aqueles dois tipos de fenômenos.

Em janeiro de 1804, Oersted regressou à Dinamarca e continuou a desenvolver suas pesquisas em Física e Química. Em seu trabalho *Pesquisa sobre a Identidade das Forças Elétricas e Químicas*, publicado em 1812, admitiu a hipótese de os fenômenos magnéticos serem produzidos pela eletricidade, mas somente no inverno de 1819-20, quando ministrava um conjunto de aulas sobre eletricidade, magnetismo e galvanismo, observou, perante a audiência, o efeito de uma corrente elétrica sobre uma agulha magnética. Ao contrário do que muitas vezes se afirma, este acontecimento não teria sido meramente acidental, pois há alguns anos a sua pesquisa já se orientava nesse sentido.

Existe uma unidade no trabalho científico de Oersted que é raramente encontrada nos resultados de alguém cujas pesquisas abrangem desde forças de afinidade química, eletromagnetismo, e compressibilidade de fluidos e gases até o recente fenômeno descoberto do diamagnetismo e esta unidade era fruto de sua filosofia, inspirada em suas leituras sobre Kant e sobre a *Naturphilosophie*. Como vimos no capítulo anterior, Kant afirmara que a força

da eletricidade extraída das máquinas elétricas, esta última ficou conhecida durante algum tempo pelo nome de *eletricidade comum* enquanto que a primeira foi chamada de *eletricidade voltaica* (Meyer, 1971, p. 42).

se manifesta na matéria basicamente de duas formas: como força de atração ao definir os limites de um corpo e como força de repulsão quando atribui ao corpo a propriedade de impenetrabilidade. Estas duas forças, Kant chamara de *Grundkräfte* (forças fundamentais) e outras forças, tais como eletricidade, magnetismo, calor e luz, ele sugeriu que fossem meramente modificações das forças básicas sob diferentes condições. Essas idéias kantianas a respeito da possibilidade de um tipo de força se transformar em outro tipo foram desenvolvidas pelos filósofos da *Naturphilosophie* e acabaram direcionando as investigações de Oersted.

No início do século XIX, grandes cientistas acreditavam na existência de uma relação entre eletricidade e magnetismo, mas não sabiam qual era exatamente essa relação. Eles se orientavam basicamente através das semelhanças e simetrias entre os fenômenos elétricos e magnéticos. Era natural estabelecer-se uma analogia entre os pólos norte e sul de um ímã e cargas elétricas positivas e negativas, o que lhes permitia associar um ímã a um dipolo elétrico e a procurar não só interações entre os mesmos, mas também gerar com um deles os efeitos produzidos pelo outro.

Oersted acreditava profundamente na unicidade e na possibilidade de conversão das forças naturais. Tudo o que era necessário fazer era descobrir as condições sob as quais a conversão deveria ocorrer.

As condições específicas para a conversão da eletricidade em magnetismo foram sugeridas a partir da concepção que Oersted tinha da eletricidade, que para ele, era gerada a partir de um conflito existente entre os dois fluidos elétricos em movimento dentro do fio, e que se manifestava em forma de onda que se difundia através do espaço. Quando o conflito elétrico era confinado em fios mais finos, o resultado era a geração de calor. Se o conflito fosse ainda mais confinado em fios de diâmetros cada vez menores, então luz era produzida. Assim, Oersted sugeriu, em seu tratado sobre a identidade das forças químicas e elétricas, que a força magnética deveria ser produzida quando o conflito elétrico fosse mais confinado dentro de fios ainda mais finos (Williams, 1981a, p. 184).

No início do século XIX, havia basicamente duas concepções a respeito da eletricidade. Os cientistas se dividiam entre aqueles que acreditavam que ela fosse constituída por apenas um tipo de fluido e aqueles que a imaginavam como sendo formada por dois fluidos distintos.

Oersted acreditava na existência de dois fluidos elétricos, um formado por cargas elétricas positivas e outro por cargas elétricas negativas, sendo transportados em sentidos opostos dentro do mesmo fio. Isso deveria gerar algum tipo de luta ou conflito entre as eletricidades e ao invés de um fluxo contínuo de eletricidade, deveria surgir um tipo de movimento oscilatório. Em cada parte do fio condutor, haveria sucessivas separações e

reuniões de cargas elétricas opostas, ou seja, contínuas rupturas e restabelecimentos do equilíbrio elétrico. De acordo com as palavras de Oersted que aparecem em seu livro de 1812, a eletricidade se propaga “por um tipo de contínua decomposição e recomposição, ou melhor, por uma ação que perturba o equilíbrio em cada momento, e o restabelece no instante seguinte. Pode-se exprimir essa sucessão de forças opostas que existe na transmissão da eletricidade, dizendo que a eletricidade sempre se propaga de modo ondulatório” (Martins, 1986, pp. 95-6).

Na época, os modelos ondulatórios para a luz e o calor estavam ganhando credibilidade e Oersted, como um simpatizante dessa concepção, utilizou sua idéia do *conflito elétrico* associado a esses modelos. O conflito elétrico seria o responsável pelo surgimento da luz e do calor, assim como do magnetismo. Essa estranha concepção aos olhos de um pesquisador do século XXI, era compartilhada por muitos outros cientistas da época.

Em 1813, portanto, ele já havia previsto a existência do efeito eletromagnético, mas estava equivocado quanto às condições necessárias para a ocorrência do fenômeno. E este engano, juntamente com seus crescentes deveres como professor nos anos seguintes, impediu-o de transformar sua previsão em realidade. A real descoberta foi feita somente em meados de 1820 e pode ser melhor contemplada através de suas próprias palavras, escritas na terceira pessoa:

Durante toda sua carreira, Oersted aderiu à opinião de que os efeitos magnéticos eram produzidos pelos mesmos poderes que os elétricos. Ele não foi levado a isso pelas razões comumente alegadas a favor dessa opinião, mas por um princípio filosófico, o de que todos os fenômenos eram produzidos pelo mesmo poder original [...]. Ao preparar a conferência na qual versaria sobre a analogia entre magnetismo e eletricidade, conjecturou que, se fosse possível produzir algum efeito magnético pela eletricidade, isso não poderia ocorrer na direção da corrente, pois tal havia sido freqüentemente tentado em vão; mas que deveria ser produzido por uma ação lateral. Isto estava estritamente conectado com suas outras idéias; pois ele não considerava a transmissão da eletricidade através de um condutor como uma corrente uniforme, mas como uma sucessão de interrupções e restabelecimentos do equilíbrio, de tal maneira que os poderes elétricos na corrente não estivessem em equilíbrio estável, mas em um estado de contínuo conflito.

Assim como os efeitos luminosos e caloríficos da corrente elétrica saem de um condutor em todas as direções quando este transmite uma grande quantidade de eletricidade, ele imaginou ser possível que o efeito magnético se irradiasse de forma semelhante [...], embora os efeitos fossem ainda fracos nas primeiras repetições do experimento, pois empregava apenas fios muito finos, supondo que o efeito magnético não ocorreria se a corrente galvânica não produzisse calor e luz; mas logo descobriu que condutores de um diâmetro maior proporcionavam um maior efeito; e

então descobriu, por experiências continuadas durante alguns dias, a lei fundamental do eletromagnetismo, a saber, que *o efeito magnético da corrente elétrica tem um movimento circular em torno dela* (apud Williams, 1981a, p. 185).

Note-se que Oersted, ao preparar sua aula, imaginou que o efeito magnético poderia *irradiar-se* do fio, como a luz e o calor. Ou seja, aparentemente ele imaginou o fio como um tipo de pólo magnético extenso.

Oersted procurou explicar o efeito do eletromagnetismo supondo que, em torno do fio condutor de corrente, o conflito elétrico se manifestava sob a forma de dois turbilhões que circulavam em torno do fio, em sentidos opostos, sendo que um deles agia sobre o pólo norte e o outro sobre o pólo sul da agulha imantada. E esse era o aspecto mais importante e revolucionário de seu trabalho, pois aparentemente violava a simetria envolvida no fenômeno, ou seja, o efeito magnético produzido pela corrente não era paralelo a ela. Embora a corrente elétrica fosse pensada como um fenômeno longitudinal no fio condutor, seu efeito apresentava um aspecto de rotação em torno do fio.

Os resultados das experiências realizadas por Oersted sobre o efeito eletromagnético foram apresentadas em um pequeno artigo escrito em latim e enviado para o maior jornal científico da Europa:

O conflito elétrico apenas atua sobre as partículas magnéticas da matéria. Todos os corpos não-magnéticos parecem ser permeáveis ao conflito elétrico; mas os [corpos] magnéticos, ou suas partículas magnéticas, resistem à passagem desse conflito magnético, o que faz com que possam ser movidas pelo ímpeto das forças em luta.

As observações expostas mostram que o conflito elétrico não está confinado ao fio condutor, mas está amplamente disperso no espaço circunjacente a ele.

Também se pode concluir das observações que esse conflito age por rotações, pois parece que essa é a condição sem a qual não se pode compreender que a mesma parte do fio de conexão, colocado abaixo do pólo magnético o leve para leste, e colocado acima dele o mova para oeste; pois tal é a natureza da rotação, que movimentos em partes opostas possuam direções opostas.

[...] Todos os efeitos aqui expostos, relativamente ao pólo norte, são facilmente compreendidos, supondo-se que a força ou matéria elétrica negativa percorre uma linha espiral dobrada para a direita, e empurra o pólo norte, mas não age sobre o [pólo] sul. Pode-se explicar de forma semelhante os efeitos sobre o pólo sul, se atribuímos à força ou matéria elétrica positiva um movimento contrário, e o poder de agir sobre o pólo sul, mas não sobre o norte (Ørsted, *Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética*).

O fato de a agulha da bússola tender a se posicionar sempre perpendicularmente ao plano contendo o fio condutor de corrente elétrica era tão surpreendente na época que foi suficiente para colocar em questão as crenças da época a respeito das forças naturais. A

natureza desta força magnética era distinta das forças conhecidas até então. Não se tratava, certamente, de uma força central, já que não estava orientada segundo uma linha reta unindo os corpos interagentes, como acontece no caso da força gravitacional, da força eletrostática ou da força entre os dois pólos de um ímã. Esta experiência deixou como herança, um enorme desafio à comunidade científica.

O *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam* (*Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética*), datado de 21 de julho de 1820, iniciou uma nova época na história da física. Dessa descoberta, seguiu-se a criação da eletrodinâmica por André-Marie Ampère (1775-1836) e o ponto de partida da revolucionária obra *Experimental Researches in Electricity* (*Pesquisas Experimentais em Eletricidade*) de Michael Faraday (1791-1867).

4.4 Os Elementos de Corrente de Ampère

Em setembro de 1820, Dominique François Jean Arago (1786-1853) comunicou a descoberta da interação entre eletricidade e magnetismo e refez a experiência realizada por Oersted diante de uma platéia extasiada e ao mesmo tempo cética, em um dos encontros da Academia de Ciências de Paris. Os espectadores simplesmente não podiam acreditar no que estavam vendo, não por não estarem esperando por uma relação entre eletricidade e magnetismo, mas sim pela total quebra de simetria demonstrada pela experiência. No entanto, este acontecimento constituiu o ponto de partida para as investigações em eletrodinâmica feitas por Ampère, que estava presente no encontro.

Ampère era um convicto discípulo de Coulomb e aceitava suas idéias sobre a impossibilidade da interação entre eletricidade e magnetismo. Em 1802, quando ainda lecionava na *École Centrale* de Bourg, ele anunciou na ementa de seu curso de física que “demonstraria que os fenômenos elétricos e magnéticos eram devidos a dois fluidos diferentes que agiam independentemente um do outro”. Ou seja, na própria mente de Ampère, a idéia da existência de dois fluidos diferentes para explicar os fenômenos elétricos e magnéticos estava firmemente estabelecida. De acordo com um antigo princípio, semelhantes deviam agir somente sobre semelhantes, e outras substâncias, independentemente de quão parecidas fossem, não poderiam ser afetadas (Williams, 1962, p. 114). Assim, quando o experimento de Oersted mostrou conclusivamente que a eletricidade realmente agia sobre o magnetismo, a posição de Ampère parecia insustentável.

Entretanto, havia um fato significativo que não era do conhecimento de Coulomb e que poderia fazer uma grande diferença. Coulomb tinha mostrado que nenhuma interação aparecia entre os fluidos magnéticos e os fluidos elétricos somente no caso em que estes últimos

estivessem em repouso. A pilha de Volta ainda não havia sido inventada na época de Coulomb, de modo que os possíveis efeitos gerados por uma eletricidade em movimento não tinham sido examinados. Dado o princípio de que somente coisas semelhantes afetam-se mutuamente, e a possibilidade de que os supostos efeitos da eletricidade sobre os corpos magnéticos podiam ser meramente devido a efeitos dinâmicos, ao invés de estáticos, Ampère pode ter sido levado a considerar a ação mútua entre duas correntes de eletricidade análoga à ação mútua entre dois ímãs.

Da experiência de Oersted, Ampère teve a idéia de utilizar a agulha magnética como um detector de corrente elétrica, e utilizou um aparelho denominado galvanômetro² para mapear a corrente elétrica de um circuito voltaico. Para sua grande surpresa, ele descobriu que uma corrente era detectada não só através do fio ligando os dois pólos da pilha, mas também através da pilha, um resultado inesperado pela teoria proposta originalmente por Jean Baptiste Biot (1774-1862). De acordo com esta teoria, o contato entre dois metais diferentes produzia uma separação dos fluidos elétricos que era manifestada através de uma tensão eletrostática em cada um dos pólos da pilha, e a “corrente” caracterizava-se como sendo uma descarga dessas tensões através do fio de ligação (Williams, 1983, p. 499).

A descoberta de que uma corrente elétrica também atravessava o interior de uma pilha deu origem a um experimento de fundamental importância para o desenvolvimento das idéias de Ampère sobre a natureza do magnetismo. O que aconteceria se fosse construída uma pilha circular de tal modo que o pólo positivo tocasse o pólo negativo? Parece que Ampère chegou a construir tal dispositivo e verificou sua influência sobre uma agulha magnética e a partir daí parece ter se convencido da idéia que ele defenderia para o resto de sua vida: a de que os efeitos magnéticos eram produzidos por correntes elétricas movimentando-se em círculos.

Os trabalhos de pesquisa que se seguiram tinham por objetivo mostrar que as correntes elétricas circulares produziam os mesmos efeitos que os ímãs permanentes. Em primeiro lugar, Ampère tentou demonstrar este efeito utilizando um fio de cobre enrolado em forma de hélice.

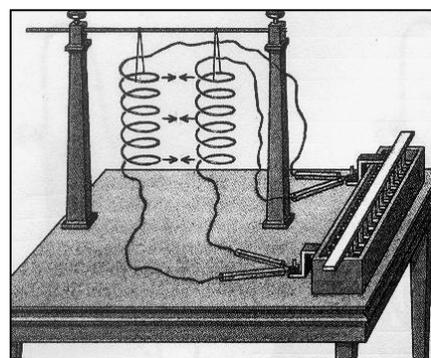


Figura 9. Se a hipótese de Ampère de que os efeitos magnéticos fossem produzidos por correntes elétricas em movimento circular, então duas hélices suspensas como na figura acima, conduzindo corrente elétrica no mesmo sentido, deveriam se repelir como dois ímãs permanentes, cujos pólos de mesma natureza estivessem apontando no mesmo sentido. No entanto, a experiência contrariou sua expectativa inicial.

² O galvanômetro tinha acabado de ser construído pelo cientista alemão Johann Salomo Christoph Schweigger (1779-1857), inspirado pela experiência de Oersted. Schweigger desenvolveu seu aparelho como uma ferramenta para medir a intensidade e a direção da corrente elétrica.

Quando duas hélices eram colocadas lado a lado conduzindo corrente elétrica, Ampère esperava que elas se comportassem como dois ímãs suspensos com seus pólos de mesma natureza apontando para o mesmo lado, ou seja, que elas deveriam se repelir. No entanto, elas se atraíam.

Então, Ampère elaborou um segundo experimento. Ele enrolou dois fios de cobre em forma de espirais achatadas e as colocou frente a frente, tal que em uma delas a corrente girava no sentido horário e na outra no sentido anti-horário, simulando dois pólos de mesma natureza. Desta vez, quando o circuito era fechado, elas agiam exatamente como dois ímãs, repelindo-se mutuamente.

Por que, então, as hélices agiam diferentemente dos ímãs? A resposta veio de uma observação casual. Os fios ligados às duas espiras achatadas estavam conectados ao mesmo pólo da bateria, de modo a se encontrarem próximos um do outro. Quando Ampère fechou o circuito, ele percebeu que os fios condutores de corrente no mesmo sentido se atraíam, mesmo não estando em formato circular. Esta interação entre fios retilíneos, nunca observada antes, forneceu a Ampère a resposta para o problema das hélices suspensas. Como as espiras constituintes da hélice estavam muito afastadas umas das outras, o movimento circular da corrente tornava-se insignificante comparado com o movimento longitudinal entre os extremos da hélice, de modo que o efeito predominante era equivalente a dois fios retilíneos condutores de corrente no mesmo sentido.

Para confirmar sua hipótese, Ampère enrolou as hélices ao redor de um tubo de vidro e passou o fio de volta por dentro do tubo para que o efeito longitudinal pudesse ser cancelado e o efeito circular da corrente finalmente se manifestasse. Para a enorme satisfação de Ampère, as hélices projetadas desta forma comportavam-se exatamente como ímãs permanentes, confirmando sua hipótese inicial de que magnetismo era o efeito advindo de correntes elétricas em movimento circular (Williams, 1989, pp. 95-6).

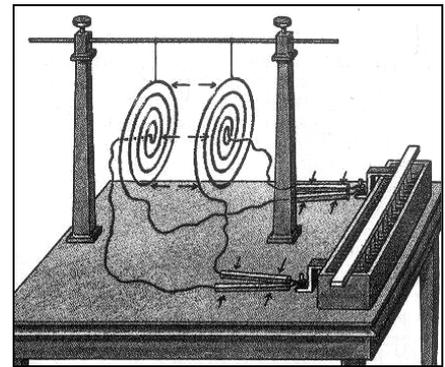


Figura 10. Quando Ampère repetiu o experimento utilizando duas espiras achatadas, verificou-se, desta vez, que elas se comportavam como dois ímãs permanentes, repelindo-se mutuamente.

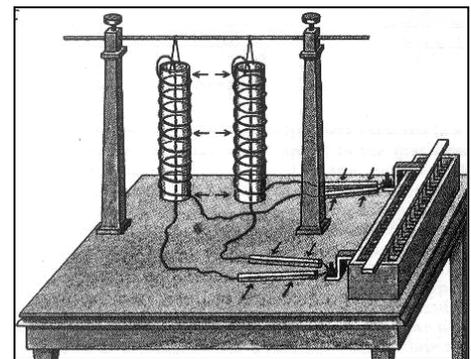


Figura 11. Repetição do experimento inicial com as hélices suspensas, desta vez incorporando alguns ajustes técnicos que permitiram que o efeito esperado se manifestasse.

Em seu modelo, Ampère basicamente transportou a rotação do campo magnético ao redor do fio condutor para as correntes invisíveis dentro do ímã. Portanto, ao relatar suas idéias para a Academia de Ciências, o que Ampère acabou fazendo foi apresentar uma nova teoria do magnetismo como sendo o resultado da eletricidade em movimento³.

Nas semanas que se seguiram à apresentação da experiência de Oersted por Arago, Ampère apresentou os experimentos descritos anteriormente e também mostrou a existência de uma atração entre dois fios condutores de corrente elétrica quando as correntes nos fios eram paralelas e de mesmo sentido e a existência de uma repulsão no caso de as correntes serem paralelas, mas em sentidos opostos.

Como a maioria dos físicos do continente europeu, Ampère percebeu que os fenômenos elétricos só podiam ser explicados supondo a existência de dois fluidos diferentes, e como ele apontou em seu trabalho, uma corrente elétrica devia consistir de um fluido positivo movimentando-se em um sentido e um fluido negativo movimentando-se no sentido oposto. Mas, como estender essa explicação para os ímãs permanentes? A resposta parecia ilusoriamente simples, já que se magnetismo fosse simplesmente eletricidade em movimento, então devia haver correntes de eletricidade em ímãs comuns em forma de barra.

Volta tinha sugerido que o contato entre dois metais diferentes daria origem a uma corrente se eles fossem conectados através de um fluido condutor. Ampère simplesmente assumiu que o contato das moléculas de ferro constituintes de um ímã daria origem a correntes similares. Um ímã poderia, portanto, ser visto como uma série de pilhas voltaicas, nas quais correntes elétricas estariam se movimentando em círculos concêntricos ao redor do eixo do ímã.

No entanto, o amigo de Ampère, Augustin Jean Fresnel (1788-1827) apontou que esta hipótese era insustentável, pois sendo o ferro um mau condutor de fluidos elétricos, este processo imaginado por Ampère deveria produzir uma certa quantidade de calor, o que não era observado, já que os ímãs não aparentavam ser mais quentes do que suas vizinhanças. Diante deste fato, Ampère teve que abandonar sua idéia inicial.

³ Nem todos aceitaram essa interpretação de Ampère do magnetismo. Na mesma época, duas semanas depois do pronunciamento de Arago, Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841) comunicaram à Academia o resultado de suas pesquisas sobre a experiência de Oersted. Medindo a taxa de oscilação de um ímã suspenso colocado em várias posições cada vez mais distantes de um fio condutor de corrente, eles demonstraram que a força magnética agia perpendicularmente à reta que ligava o ímã suspenso ao fio condutor e sua intensidade era inversamente proporcional à distância do fio. Biot e Savart imaginavam a interação física entre ímãs e correntes elétricas como um processo complicado. Para eles, a corrente elétrica provocaria uma mudança na matéria constituinte do fio de tal modo a estabelecer uma estrutura de pólos magnéticos que geraria um campo de forças com características rotacionais, que por sua vez, agiria sobre a agulha magnética do ímã. Para tornar plausível esta idéia, eles fizeram uma analogia com o fenômeno da polarização da luz, no qual observava-se uma rotação do plano da luz polarizada ao atravessar um meio aparentemente isotrópico, um fenômeno que já havia sido estudado por Biot anteriormente.

Entretanto, o próprio Fresnel sugeriu uma alternativa a Ampère, dizendo que como nada era conhecido sobre a física das moléculas, era possível postular que correntes elétricas estariam se movendo não na substância macroscópica do ímã, mas ao redor de cada molécula. Deste modo, se estas moléculas pudessem ser alinhadas, a soma das correntes moleculares seria precisamente as correntes concêntricas requeridas.

Ampère imediatamente adotou a sugestão de seu amigo e assim, acabou surgindo o conceito de *molécula eletrodinâmica*. Ela era, no entanto, um tipo peculiar de molécula. De alguma forma misteriosa, uma molécula de ferro decompunha o éter luminífero que permeava tanto o espaço como a matéria da qual eram feitos os dois fluidos elétricos. Esta decomposição ocorria dentro da molécula. Os dois fluidos elétricos emergiam do topo da molécula, fluíam ao seu redor e entravam novamente pela parte inferior. O efeito resultante era o de um fluido único circulando a molécula. Estas moléculas, quando alinhadas pela ação de outro ímã, formariam um ímã permanente, mas Ampère não disse por que estas moléculas deveriam agir desta maneira (Williams, 1981b, p. 145).

Ampère argumentou eloqüentemente a favor de seu modelo de interação entre elementos de corrente, insistindo que ele poderia ser usado para explicar não somente o magnetismo, mas também os fenômenos químicos. Em resumo, sua teoria deveria ser considerada o fundamento de uma nova teoria da matéria. Esta foi uma das razões para que a teoria eletrodinâmica de Ampère não fosse universalmente aceita, pois aceitá-la significaria concordar com uma visão da estrutura da matéria subjacente a ela. Um de seus oponentes foi Michael Faraday (1791-1867), que criticou o fato de toda a estrutura de pensamento amperiano basear-se em hipóteses *ad hoc*, para as quais não havia qualquer tipo de evidência. A parte fenomenológica foi aceita, mas, mesmo na França, a molécula eletrodinâmica não foi levada a sério.

Tendo estabelecido uma hipótese ousada para a origem do magnetismo, as próximas etapas de Ampère foram descobrir relações entre os fenômenos eletrodinâmicos e elaborar uma teoria da qual estas relações pudessem ser matematicamente deduzidas. Esta tarefa foi realizada entre os anos de 1821 a 1826, e seu sucesso foi relatado em sua grande obra *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamique, uniquement déduite de l'expérience* (*Memórias sobre a teoria matemática dos fenômenos eletrodinâmicos unicamente deduzidos da experiência*), de 1827. Neste trabalho, considerado o *Principia* da Eletrodinâmica, Ampère inicialmente estabeleceu as leis de ação das correntes elétricas a partir de quatro experimentos extremamente engenhosos.

As forças eletrodinâmicas eram fracas e muito difíceis de serem medidas. Ampère percebeu, no entanto, que uma precisão muito maior podia ser alcançada se os experimentos

fossem realizados utilizando-se a chamada *técnica dos experimentos nulos*, nos quais as forças envolvidas estivessem em equilíbrio.

Desses casos de equilíbrio, Ampère foi capaz de deduzir quatro conseqüências necessárias que lhe permitiram aplicar a matemática ao fenômeno:

1. Se a corrente em um dos dois condutores for revertida, a força exercida entre os condutores será a mesma em intensidade, mas terá o seu sentido invertido.

2. A mesma força é exercida sobre um fio condutor tanto por um fio retilíneo como por um fio encurvado de maneira arbitrária, formando pequenas sinuosidades, ou seja, um fio retilíneo ou sinuoso são equivalentes do ponto de vista da interação eletrodinâmica.

3. Um circuito fechado, de forma arbitrária, não exerce força tangencial sobre um elemento de corrente.

4. A força entre dois circuitos independe das dimensões absolutas dos circuitos, isto é, ela permanece a mesma se o tamanho dos circuitos e a distância entre eles forem alteradas proporcionalmente (Woodruff, 1962, p. 450; Tricker, 1962, p. 458; Assis, 1995, p. 70).

Estes experimentos tinham mostrado a ele as propriedades básicas da força entre circuitos percorridos por correntes. A partir daí, ele encontrou uma lei para descrever a força entre pequenos elementos de corrente. A força associada com os elementos é uma força central agindo a distância em ângulos retos com o sentido do fluxo do elemento. A ação mútua entre dois fios condutores de corrente compridos era proporcional aos seus comprimentos e às intensidades das correntes.

Ampère estava agora preparado para dar forma matemática precisa a esta ação e já em 1820, ele tinha inferido uma lei de força entre elementos de corrente, chegando a uma expressão, que pode ser representada por uma notação mais moderna como:

$$dF = \frac{i ds i' ds'}{r^2} (\text{sen}\theta \cdot \text{sen}\theta' \cdot \cos\omega + k \cos\theta \cdot \cos\theta')$$

sendo dF a força elementar; ids e $i'ds'$ os dois elementos de corrente; r a distância entre eles; θ e θ' os ângulos que cada um deles faz com a linha que os une; ω o ângulo entre os dois planos determinados pela linha que une os elementos e o sentido dos próprios elementos; e k uma constante a ser determinada. Naquela época, ele ainda não sabia o valor de k , mas em 1827, ele acabou encontrando o valor $-1/2$ para esta constante (Tricker, 1962, p. 459).

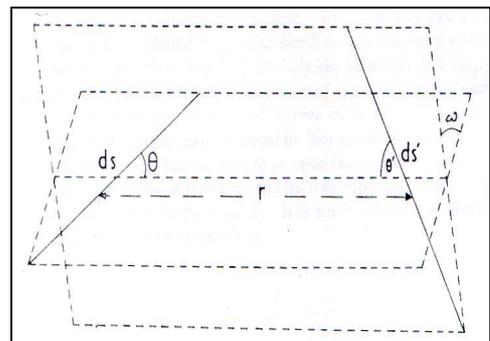


Figura 12. Esquema mostrando os vários elementos que aparecem na força de Ampère

O principal aspecto a ser ressaltado na força de Ampère é o fato de ela satisfazer ao princípio da ação e reação na forma forte⁴, qualquer que seja a posição e orientação relativa entre os dois elementos de corrente. Com esta expressão em mãos, Ampère estava preparado para tratar a teoria do magnetismo quantitativamente, levando-se em conta a existência de seus elementos hipotéticos.

Em todo seu trabalho científico, Ampère guiou-se por sua idéia de que o magnetismo era um efeito secundário que aparecia devido à interação física entre os elementos de corrente. Utilizando esse tipo de abordagem, era possível escapar da principal objeção feita à descoberta de Oersted, ou seja, a quebra de simetria devido à existência de um campo magnético circular associado a uma corrente elétrica retilínea. Sem a reinterpretção de Ampère, a descoberta de Oersted contrariava os cânones da física newtoniana, que supunha que todas as ações a distância fossem exercidas em linha reta, na direção que une os corpos interagentes. A força entre o condutor e o pólo magnético era *perpendicular* à reta que os unia. Porém, no caso das forças entre os elementos de corrente de Ampère, nada de estranho ocorria, pois as forças eram dirigidas paralelamente à reta que os unia, satisfazendo assim o padrão newtoniano de explicação. Ampère estava bem ciente desse aspecto de sua abordagem, ao comentar:

Guiado pela filosofia newtoniana, eu reduzi o fenômeno observado pelo Sr. Oersted, da forma como tem sido feito para todos os fenômenos naturais semelhantes, a forças agindo ao longo da linha reta que une as duas partículas entre as quais a ação é exercida (Ampère, *On the mathematical theory of electrodynamic phenomena, experimentally deduced*).

As idéias de Ampère foram aceitas e desenvolvidas posteriormente por Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) e se tornaram a base de sua teoria eletromagnética.

4.5 As Linhas de Força de Faraday

A educação formal de Faraday consistia apenas de rudimentos de leitura, escrita e cálculo quando sua paixão pela ciência foi despertada por causa de sua proximidade com os livros enquanto trabalhava como encadernador de uma livraria.

Após ler atentamente um livro sobre os princípios da química, Faraday entrou em contato com as idéias do químico Humphry Davy (1778-1829), que tratava a química como se ela fosse a chave para desvendar os mais intrigantes mistérios da natureza, assunto pelo qual o jovem Faraday havia começado a se interessar recentemente. Quando um dos clientes da livraria onde Faraday trabalhava ofereceu-lhe convites para assistir às aulas de Davy na *Royal*

⁴ O princípio de ação e reação na forma forte diz que as forças entre os corpos interagentes, além de terem a mesma intensidade e sentidos opostos, devem ter a mesma direção da reta que os liga.

Institution, ele ficou muito agradecido e, uma vez estando lá, anotou minuciosamente as palestras de Davy, a tal ponto de acabar sendo convidado a trabalhar com seu grande mestre e inspirador (Williams, 1981c, pp. 528-9).

O interesse de Faraday pelo estudo do eletromagnetismo surgiu em 1820, ao presenciar experimentos feitos por Davy e William Hyde Wollaston (1766-1828) e no ano seguinte, ele preparou um resumo histórico a respeito do que se conhecia até aquele momento sobre a conexão existente entre eletricidade e magnetismo (Thomas, 1991, p. 29). Em 1820, Oersted havia falado sobre uma espécie de “conflito elétrico” existente ao redor do fio e imaginara que este conflito estabelecia-se em círculos, mas esta descrição imprecisa não foi suficiente para convencer Faraday. Usando uma pequena agulha magnética para mapear a força magnética, ele inicialmente interpretou o fenômeno como devido a atrações e repulsões. Depois, confirmou o efeito circular ao redor do fio e logo imaginou que um único pólo magnético de um ímã deveria girar em torno do fio enquanto a corrente fluísse e, inversamente, que um fio livre para movimentar-se, deveria girar em torno de um dos pólos de um ímã. Assim, ele idealizou um instrumento para ilustrar este efeito e acabou construindo o primeiro motor elétrico.

Ninguém mais do que Faraday poderia ter considerado seriamente a “força circular”, pois ele não tinha os preconceitos que impediam a aceitação desse fato naturalmente, já que não tinha sido instruído dentro do paradigma newtoniano.

O cientista ortodoxo do início do século XIX tendia a pensar as interações físicas dentro dos padrões newtonianos, ou seja, em termos de forças centrais agindo sempre na direção da reta ligando as partículas interagentes.

Faraday aceitou a idéia de um efeito magnético giratório em torno do fio condutor, considerando que a ação entre correntes era na verdade um efeito composto e complexo. Posteriormente, Faraday desenvolveu sua idéia de linha de força, utilizando-a em toda a sua obra.

A conexão das partículas-pontuais feita através de linhas de força permitia que o efeito fosse transferido sem deslocamento efetivo de partículas. Bastaria que elas fossem submetidas a tensões por meio de vibrações das partículas.

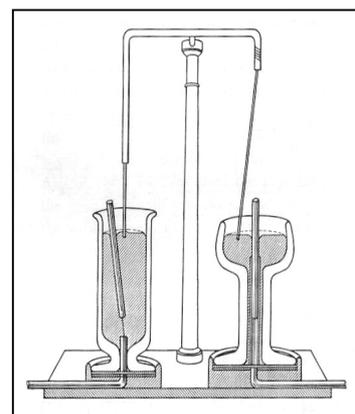


Figura 13. Dispositivo de Faraday para ilustrar a rotação eletromagnética. À esquerda, um ímã cilíndrico gira ao redor da extremidade de um fio condutor de corrente elétrica fixo. À direita, um fio projetado para mover-se livremente a partir de seu ponto de suspensão, gira ao redor de um dos pólos magnéticos de um ímã fixo. De ambos os lados, tanto o fio como o ímã encontram-se imersos em mercúrio, formando desta forma um circuito fechado.

Para Faraday, a base física para a transmissão das forças eletromagnéticas era constituída pelas linhas de força (um conjunto de “fibras”), e não de um meio contínuo e isotrópico como o éter.

Em 1831, Faraday aprendeu dos experimentos de Joseph Henry (1797-1878) realizados com poderosos eletroímãs que suas polaridades poderiam ser invertidas quase instantaneamente por uma simples inversão do sentido da corrente elétrica. Pouco depois, Faraday acabou descobrindo as condições sob as quais um ímã permanente poderia gerar uma corrente elétrica, após realizar experiências com espiras de corrente, demonstrando com isso o inverso do efeito descoberto por Oersted, a conversão de força magnética em força elétrica, ou seja, o *fenômeno da indução eletromagnética*.

Como resultado de sua descoberta da indução eletromagnética, Faraday foi levado a explicar a indução de uma corrente elétrica entre duas espiras de fio enrolado ao redor de um anel de ferro em termos da criação de uma “condição peculiar” no anel (Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, sér. 1, par. 61). Ele chamou esta “condição elétrica da matéria” de “estado eletrotônico” (Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, sér. 1, par. 60), considerando-o como um estado de tensão imposto sobre

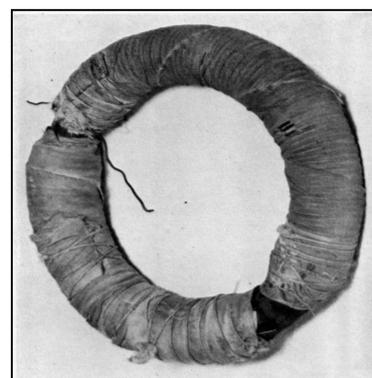


Figura 14. Foto do anel de ferro, utilizado nas experiências de 1831.

as partículas do fio condutor e do meio circundante pela passagem da “corrente” elétrica, sendo a criação e a dissolução desse estado a causa da indução da corrente (Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, sér. 1, par. 71, 73). Ou seja, a ação elétrica era vista como geradora de um “estado peculiar de tensão ou polaridade” (Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, sér. 8, par. 949) e definiu polaridade como um estado no qual “uma molécula adquire poderes opostos em diferentes partes” (Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, sér. 11, par. 1304) (Heimann, 1969, p. 176).

Investigações adicionais levaram-no à invenção do primeiro dínamo, por meio do qual o contrário de sua descoberta de 1821 sobre as rotações eletromagnéticas podia ser observado, ou seja, a força mecânica sendo convertida em força elétrica, por meio de uma máquina simples: um disco de cobre, girando entre os pólos de um ímã, produzia uma corrente elétrica estacionária em um circuito movendo-se do centro para a extremidade do disco conectado a um fio.

A condição para o surgimento de uma corrente induzida era a variação da corrente elétrica. Então, Faraday pensou que a própria corrente já deveria estar produzindo algum

efeito indetectável (o estado eletrotônico), embora não se verificasse que uma corrente elétrica constante gerasse outra corrente.

O estado eletrotônico, embora desafiasse toda tentativa de ser detectado, tinha que existir distribuído por todo o espaço, já que não poderia haver dúvidas sobre a realidade das linhas de força e foi sua tentativa de relacionar as duas coisas que lhe permitiu avançar através de séries brilhantes de experimentos.

Para Faraday, as linhas de força faziam parte do corpo, estendendo-se continuamente por todo o espaço, por meio de suas forças (Heimann, 1969, p. 211). Eram as linhas de força que unificavam todas as suas pesquisas sobre eletricidade e magnetismo. No entanto, era com alguma dificuldade que ele confessava no *Experimental Researches in Electricity (Pesquisas Experimentais em Eletricidade)*, que ele não sabia exatamente do que as linhas de força eram constituídas ou de que maneira se dava o mecanismo da transmissão das forças:

Nós não sabemos se a força magnética é transferida de corpo em corpo ou através do espaço, se o resultado é devido a uma ação a distância, como no caso da gravidade, ou a algum agente intermediário, como nos casos da luz, do calor, da corrente elétrica e (como eu acredito) da ação eletrostática. [...] De minha parte, considerando a relação do vácuo com a força magnética e a característica geral do fenômeno eletromagnético externo ao ímã, eu estou mais inclinado em aceitar a noção de que na transmissão da força, existe uma ação externa ao ímã, ao invés de os efeitos serem meramente de atração e repulsão a distância. Tal ação pode ser uma função do éter; pois não é de todo improvável que, se existe um éter, ele deva apresentar outras propriedades além de simplesmente transmitir radiações (Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, sér. 28, par. 3075, p. 759).

Os resultados experimentais de Faraday eram claramente relatados, mas os aspectos teóricos estavam cercados de uma linguagem vaga e imprecisa, sendo apresentados muitas vezes com hesitação e de forma confusa. Por isso, parece que na década de 1830, ninguém considerava a teoria de Faraday seriamente. Mesmo ele foi incapaz de defendê-la com o necessário vigor.

A tensão de oito anos de ininterrupto esforço intelectual para expandir ao máximo as fronteiras de sua teoria eletromagnética acabou afetando sua mente brilhante. Em 1839, ele sofreu um colapso nervoso, do qual nunca mais se recuperaria. Por cinco anos, ele não conseguiu mais se concentrar para resolver os problemas que lhe eram apresentados. Ele passou esse tempo se dedicando aos assuntos da *Royal Institution* e outras pesquisas que não requeressem seu total compromisso intelectual, continuando a usar seus talentosos dotes experimentais plenamente, sem, no entanto, forçar sua mente sobre as conseqüências.

No entanto, mesmo durante sua crise mental, ele manteve-se em contato com sua teoria elétrica e em 1844, publicou um pequeno artigo intitulado *Speculation Touching Electrical*

Conduction and the Nature of Matter (Especulações Acerca da Condução Elétrica e da Natureza da Matéria).

Em 1846, com a hipótese das vibrações transversais, ele foi levado a uma forma embrionária de teoria ondulatória da luz descrita em seu *Thoughts on Ray-Vibrations*.

A última e mais brilhante série de pesquisas de Faraday foi estimulada pelos comentários incisivos de uma das poucas pessoas que via um futuro promissor na teoria da eletricidade de Faraday. Em agosto de 1845, William Thomson (1824-1907) endereçou uma extensa carta a Faraday, descrevendo seus sucessos com o tratamento matemático do conceito de linhas de força. No final da carta, Thomson listou alguns experimentos para testar os resultados de seus raciocínios sobre a teoria de Faraday e foi isto que o impeliu mais uma vez para uma ativa investigação científica.

Uma das sugestões de Thomson foi que ele testasse o efeito da ação elétrica sobre a luz plano-polarizada ao passar por um dielétrico. E um mês depois, os esforços de Faraday novamente surtiram efeito. O plano de polarização de um raio de luz girou ao passar através de um pedaço de vidro de alto índice de refração inserido em um forte campo magnético. Ele verificou que o ângulo de rotação era diretamente proporcional à intensidade da força magnética e, para Faraday, isto indicava o efeito direto do magnetismo sobre a luz.

O fato de a força magnética agir através da mediação do vidro levou Faraday a suspeitar de que nenhum material deveria ser indiferente a um ímã, o que acabou sendo confirmado pela experiência. Nem todos os materiais reagem da mesma forma à força magnética. Alguns alinhavam-se ao longo das linhas da força magnética e eram puxados para as partes mais intensas do campo magnético. Outros, como o bismuto, colocavam-se cruzados com as linhas de força e se movimentavam em direção às regiões menos intensas da força magnética. O primeiro grupo, Faraday chamou de “paramagnéticos” e o segundo de “diamagnéticos”.

A descoberta do diamagnetismo estimulou a produção de teorias que levassem em conta esse novo fenômeno. Desde o trabalho de Coulomb de 1785, a maioria dos cientistas tinha assumido a existência de pólos magnéticos responsáveis pelos efeitos magnéticos. Mas, experimentos com corpos diamagnéticos convenceram-no de que não havia pólos neles, e sim “reações” às linhas da força magnética.

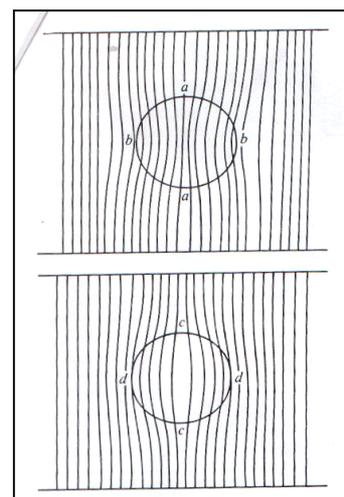


Figura 15. Representação esquemática mostrando as distorções sofridas pelas linhas de força de um campo magnético uniforme devido à presença de uma substância paramagnética (acima) e de uma substância diamagnética (abaixo).

Corpos paramagnéticos eram substâncias que conduziam bem a força magnética e concentravam as linhas de força; e corpos diamagnéticas eram substâncias fracamente condutoras de magnetismo e, portanto, separavam as linhas da força magnética que passassem através delas.

Faraday pensava em termos de uma “inundação de poder”, marcada pelas linhas de força. Ele comparava um ímã a um circuito galvânico, no qual o ímã era a fonte do poder e o meio circundante funcionava como transmissor da “corrente” magnética. Um ímã era descrito como o *habitat* natural das linhas de força.

Tais especulações eram manifestamente insatisfatórias, pois não ofereciam qualquer tipo de mecanismo que explicassem o fenômeno magnético. Elas expressavam metaforicamente o que Faraday achava que o fenômeno fosse, mas elas proporcionavam pouco discernimento para o entendimento de suas causas.

Somente um ponto emergia claramente e ele era de fundamental importância. Qualquer que fosse a causa do magnetismo, a manifestação da força magnética era percebida no meio ao redor do ímã. Esta manifestação era devida ao campo magnético e a energia do sistema deveria estar espalhada no campo e não confinada no ímã. Por extensão, o mesmo se poderia dizer (e foi dito por Faraday) dos sistemas elétrico e gravitacional. Esta idéia se tornou o axioma fundamental da teoria clássica dos campos e que resiste até os dias de hoje.

As origens do conceito de campo podem ser encontradas por toda a obra de Faraday, mas as especulações que o levaram aos experimentos e a coragem que permitiu a ele publicar “heresias científicas” deve-se muito à sua inquestionável crença na unidade e interconexão de todos os fenômenos da natureza. Como exemplo, podemos citar seu artigo de 1845 intitulado *On the magnetization of Light and the Illumination of Magnetic Lines of Force*, em que ele inicia dizendo:

Eu tenho mantido uma opinião há algum tempo, que já se tornou quase uma convicção, de acreditar, como muitos outros amantes do conhecimento da natureza, que as várias formas sob as quais as forças da matéria se manifestam têm uma origem em comum; ou, em outras palavras, estão tão diretamente relacionadas e mutuamente dependentes, que parece que podem se converter umas nas outras, e que possuem poderes equivalentes em suas ações (Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, sér. 19, par. 2146).

Faraday deixou como herança uma nova perspectiva para o entendimento da interação física na natureza: as linhas de força. Embora sua descrição dessas linhas fosse vaga e imprecisa, ela revelou-se suficientemente frutífera para James Clerk Maxwell (1831-1879), que nas décadas de 1850 e 1860, desenvolveu uma teoria matemática do campo eletromagnético sobre as sólidas fundações que Faraday havia construído.

4.6 A Síntese Elaborada por Weber

Weber começou a desenvolver suas principais pesquisas teóricas em eletricidade após sua ida a Leipzig, em 1843, onde a aproximação entre ele e o atomista convicto Gustav Theodor Fechner (1801-1887) contribuiu para que Weber elaborasse sua teoria corpuscular da eletricidade, das correntes elétricas e até mesmo do éter.

Na época, eram conhecidas a lei de força de Coulomb entre cargas elétricas em repouso, a lei de força de Ampère entre elementos de corrente e a lei de indução de Faraday, mas não se sabia qual era a natureza da corrente elétrica em metais.

Em 1845, Fechner publicou um trabalho onde mostrava que as leis de Ampère e de Faraday podiam ser deduzidas supondo-se que as correntes elétricas fossem formadas de cargas positivas se movendo em um sentido e negativas no outro, desde que se acrescentasse à lei de força de Coulomb termos dependentes da velocidade e da aceleração (Assis, 1991). No mesmo ano, Franz Ernest Neumann (1798-1895) deduziu a função potencial correspondente à força de Ampère e ampliou a teoria para incorporar a indução eletromagnética.

E apenas um ano mais tarde, em 1846, Weber publicou o primeiro dos seus trabalhos intitulados *Elektrodynamische Maassbestimmungen (Medições Eletrodinâmicas)*, no qual apresentou sua famosa lei de força entre cargas elétricas. Ao todo, ele publicou sete trabalhos com o título geral de *Medições Eletrodinâmicas*, além de deixar um volume manuscrito publicado após sua morte.

O trabalho de 1846 introduziu uma novidade em relação à força central tradicional das teorias sobre eletricidade. A lei de Weber para a força agindo a distância entre as partículas constituintes dos fluidos elétricos não era dependente apenas do inverso do quadrado da distância entre elas, como na lei de Coulomb para as forças eletrostáticas, mas também da velocidade e aceleração relativa entre elas.

Weber partiu da força entre elementos de corrente de Ampère e após considerar a corrente elétrica como dois fluxos de partículas carregadas movimentando-se em sentidos contrários com a mesma velocidade dentro de um condutor (Woodruff, 1968, p. 301), e realizar algumas manipulações matemáticas, conseguiu chegar a uma expressão para a força entre duas cargas e_1 e e_2 em movimento dentro de um fio, que pode ser escrita em linguagem moderna como:

$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2r}{c^2} \frac{d^2 r}{dt^2} \right],$$

sendo e_1 e e_2 uma certa quantidade de carga por unidade de comprimento do fio; r , dr/dt e d^2r/dt^2 a distância, a velocidade e a aceleração relativa entre elas, respectivamente; e c uma constante de proporcionalidade com dimensão de velocidade (Woodruff, 1962, pp. 456-7).

Neste mesmo trabalho de 1846, Weber conseguiu deduzir a lei de indução de Faraday e desse modo, explicar todo o eletromagnetismo conhecido na época, já que a força de Coulomb era um caso particular de sua lei de força e a força entre elementos de corrente de Ampère podia ser obtida a partir da interação entre as cargas positivas e negativas movimentando-se por um fio. Ou seja, Weber conseguiu incorporar em uma única equação, os fenômenos eletrostáticos, eletrodinâmicos e eletromagnéticos.

A força de Weber foi a primeira a surgir na física com dependência não apenas da distância entre os corpos, mas também de suas velocidades e acelerações mútuas. É importante salientar que essas velocidades e acelerações eram medidas em relação aos corpos interagentes e não em relação a um determinado meio, observador ou referencial.

Ainda em 1846, Weber construiu um aparelho chamado eletrodinamômetro, para fazer medidas precisas de forças elétricas, e que acabou sendo utilizado para testar e confirmar a validade da lei de força de Ampère. Devido ao grande sucesso de seu dispositivo, durante um bom tempo, a unidade de medida de corrente elétrica foi conhecida como *weber*, mas em 1881, durante um congresso sobre unidades elétricas, Hermann von Helmholtz (1821-1894), o líder da equipe alemã, sugeriu que se alterasse o nome para *ampère*, e o termo *weber* acabou sendo utilizado para unidade de fluxo magnético em 1935 (Woodruff, 1981, p. 205).

Os interesses científicos de Helmholtz divergiam dos de Weber em vários pontos e o relacionamento entre eles era tenso. Já em 1846, Helmholtz apresentou um argumento que parecia mostrar que as hipóteses de Weber eram inconsistentes com o princípio da conservação da energia e sua conclusão foi amplamente aceita, constituindo um dos argumentos que contribuíram para Maxwell se opor à teoria desenvolvida no continente. No entanto, em 1869, Weber conseguiu demonstrar que a crítica era infundada, apresentando uma energia potencial dependente da velocidade, mas Maxwell já havia desenvolvido sua própria teoria (Assis, 1991, p. 56).

Weber não gostava da idéia de um meio contínuo preenchendo todo o espaço vazio. Ele era um atomista que aceitava a existência de um éter, só que, também sendo composto por partículas em movimento preenchendo todo o espaço. Ele esperava explicar a teoria ondulatória da luz com base nas oscilações desse éter, governadas por sua lei de força. Também a polarização da luz seria explicada com base neste éter granulado. Com estas idéias, conseguiu explicar com sucesso o diamagnetismo, fenômeno que havia sido descoberto por Faraday em 1845 (Wise, 1981; Whittaker, 1951).

O cientista alemão desenvolveu uma teoria elétrica da natureza, submetendo a afinidade química, a teoria dos gases e o éter luminífero a uma única teoria das partículas elétricas fundamentais. A matéria ordinária seria formada de partículas negativas fortemente ligadas,

enquanto o éter seria constituído de pares positivos fracamente ligados. A combinação química seria explicada pela distribuição das partículas negativas e as propriedades da matéria dependeriam da natureza das conexões entre estas partículas e as do éter elétrico (Harman, 1982, p. 104-5).

A partir do final da década de 1840, Weber passou a trabalhar com Rudolph Kohlrausch (1809-1858), um antigo amigo, e em 1856, conseguiram medir pela primeira vez o valor da constante que aparecia na sua lei de força relacionando as unidades eletromagnéticas e eletrostáticas de carga, obtendo o valor de $3,1 \times 10^8$ m/s. Isso indicava que poderia haver uma profunda ligação entre o eletromagnetismo e a óptica. Esta medida foi posteriormente utilizada por Maxwell como um suporte crucial para a sua teoria eletromagnética da luz.

Weber estendeu a teoria do magnetismo de Ampère para explicar o fenômeno do diamagnetismo. Na teoria de Ampère, o magnetismo era visto como sendo constituído de microcorrentes elétricas circulando as moléculas das substâncias ferromagnéticas. Submetidas a um campo externo, essas moléculas se alinhavam, e produziam a magnetização. De acordo com Weber, o diamagnetismo aparecia quando correntes moleculares sem resistência eram induzidas em substâncias diamagnéticas. Essas substâncias eram caracterizadas por moléculas que não apresentavam correntes permanentes e que tinham orientação fixa na substância.

A partir de 1852, Weber tentou compreender a resistência elétrica como o resultado do movimento dos fluidos elétricos ou de partículas. Imaginava-se que a resistência elétrica fosse o resultado da constante separação e união das partículas dos dois fluidos elétricos que compunham a corrente elétrica, movimentando-se em sentidos contrários e a existência das correntes permanentes de Ampère levou Weber a assumir que os fluidos elétricos não interagiam diretamente com os átomos materiais que compunham a substância, e que nos átomos magnéticos, os dois tipos de fluido circulavam os átomos através de caminhos que nunca se cruzavam (Woodruff, 1981, p. 208).

Weber continuou trabalhando com eletrodinâmica e especulando sobre a estrutura da matéria até se aposentar, vindo a falecer aos 86 anos de idade, enquanto caminhava no jardim de sua casa em Göttingen.

O que deve ser enfatizado, no entanto, é que em meados do século XIX, as equações de Ampère e de Weber, juntamente com a teoria do potencial de Neumann, forneciam os pontos iniciais para quase todos os trabalhos realizados na Europa sobre a teoria eletromagnética baseadas na idéia de ação a distância.

4.7 A Teoria Eletromagnética de Maxwell

Visto em retrospectiva, o desenvolvimento da física até o ano de 1820 mostrava um triunfo do programa científico newtoniano. As “forças” da natureza, como calor, luz, eletricidade, magnetismo, ação química, acabaram sendo progressivamente reduzidas a atrações e repulsões instantâneas entre as partículas constituintes de uma série de fluidos e já se sabia que o magnetismo e a eletricidade estática obedeciam à lei do inverso do quadrado da distância analogamente à lei da gravitação.

Nos primeiros quarenta anos do século XIX, no entanto, iniciou-se uma reação crescente contra tal visão de mundo em favor de algum tipo de “correlação entre forças”.

Esta nova tendência culminou com a descoberta da relação entre eletricidade e magnetismo em 1820, que foi difícil de ser encontrada, pois aparentemente contrariava o princípio da ação e reação na forma forte.

Para um fenômeno tão estranho, era de se esperar reações muito diferentes e inusitadas por parte dos cientistas. Como vimos anteriormente, Faraday procurou interpretar o novo fenômeno descoberto por Oersted utilizando o conceito de linhas de força, uma espécie de extensão dos corpos ocupando todo o espaço e segundo as quais a interação física deveria ocorrer. Já, Ampère e seus seguidores procuraram conciliá-lo com as visões já existentes sobre ação a distância.

Maxwell começou suas pesquisas em eletricidade algumas semanas após ter-se graduado em Cambridge em 1854, e embora a teoria de Weber e Neumann dominasse o cenário científico da época, as influências determinantes sobre o seu trabalho vieram de Faraday e William Thomson – Lord Kelvin (1824-1907). Faraday contribuiu com sua revolucionária idéia de linhas de força e Thomson com suas analogias formais entre as equações da eletrostática e as equações para o fluxo de calor.

Ao estudar a seqüência de seus trabalhos sobre eletromagnetismo, pode-se vislumbrar uma variedade de concepções utilizadas por ele, chegando à formulação matemática definitiva somente depois de um interessante e imaginativo uso de analogias e modelos.

O primeiro artigo sobre eletromagnetismo de Maxwell intitulado *On Faraday's Lines of Force (Sobre as linhas de força de Faraday)*, de 1855, está dividido em duas partes e sua origem está associada a uma longa correspondência com Thomson.

Maxwell escreveu que “devido a um estudo cuidadoso das leis dos sólidos elásticos e dos movimentos dos fluidos viscosos, eu espero descobrir um método de formar uma concepção mecânica deste estado eletrotônico adaptado ao raciocínio geral” (Maxwell, *Scientific Papers*, I, 188), referindo-se ao artigo de Thomson, *On a Mechanical Representation of Electric, Magnetic, and Galvanic Force*. O fato de que Thomson tenha

tentado representar as forças elétricas e magnéticas por meio de um meio mecânico claramente teve um efeito sobre Maxwell em sua tentativa de representar a natureza das linhas de força (Heimann, 1969, p. 188).

A primeira parte do artigo apresenta uma analogia entre as linhas de força e as linhas de corrente em um fluido incompressível. Ela contém uma notável extensão do tratamento feito por Thomson sobre o assunto e também uma discussão filosófica sobre o significado de analogias entre diferentes ramos da física. Por exemplo, a analogia de uma corrente elétrica com dois fenômenos tão diferentes como a condução de calor ou o movimento de um fluido deveria evitar que os físicos concluíssem apressadamente que “eletricidade fosse também uma substância como a água ou um estado de agitação como calor” (Maxwell, *Treatise*, I, sec. 72). A analogia deveria ser apenas geométrica, uma semelhança entre relações e não entre coisas relacionadas. Ele afirmou cuidadosamente que o modelo não deveria ser confundido com o estado real das coisas, muito embora, assim como Faraday em seu último período, Maxwell tenha enfatizado que as linhas de força estariam representando um estado físico real e que não deviam ser entendidas como entidades fictícias, ainda que ele não tenha discutido a natureza física correspondente a essas linhas (Heimann, 1969, p. 171).

A segunda parte lida com o eletromagnetismo propriamente dito. Maxwell desenvolve uma nova teoria formal para os processos eletromagnéticos, fazendo uma importante distinção entre duas classes de funções vetoriais, que ele então chamou de “quantidades” e “intensidades”, e posteriormente, “fluxos” e “forças”. Com essas idéias, Maxwell chegou a uma função que dava origem a equações que podiam representar a ação magnética ordinária, a indução eletromagnética e as forças entre correntes fechadas. Maxwell a chamou de função eletrotônica, seguindo algumas especulações de Faraday sobre o estado hipotético de tensão da matéria, o estado eletrotônico. Posteriormente, ele a identificou como uma generalização do potencial eletrodinâmico de Neumann.

Seu primeiro artigo é concluído com uma brilhante expressão de fé nas virtudes do pluralismo metodológico. Maxwell confronta a sua abordagem teórica, ainda incipiente, com uma “teoria eletrodinâmica professadamente física” que é – continua – “inteiramente diferente de tudo o que se encontra nesse artigo”. Trata-se da eletrodinâmica de Weber, cujos axiomas Maxwell passa então a expor. Desses axiomas, pode-se deduzir as leis da eletrodinâmica e da indução eletromagnética. Tais características conferem à teoria de Weber - aos olhos de Maxwell - o *status* de uma “real teoria física”. Como então legitimar as tentativas ainda titubeantes de matematizar idéias tão pouco ortodoxas (e testáveis) quanto as de Faraday?

Qual a importância então de imaginar um estado eletrotônico do qual nós não temos nenhuma concepção física distinta, ao invés de usar uma fórmula de atração

que nós podemos compreender prontamente? Eu responderia – prossegue Maxwell – que é uma boa coisa ter duas maneiras de ver um assunto, e admitir que há duas maneiras de encará-lo. Além disso, eu não creio que nós temos no presente qualquer direito de compreender a ação da eletricidade, e eu sustento que o principal mérito de uma teoria nessa fase é que ela sirva para guiar a experimentação sem impedir o progresso de uma verdadeira teoria quando ela surgir (Maxwell, *Scientific Papers I*, p. 208).

Este primeiro artigo de 1855-56 foi eclipsado pelo trabalho posterior de Maxwell, mas sua originalidade e importância são maiores do que se costuma pensar. Além de interpretar o trabalho de Faraday e fornecer uma função eletrotônica, ele contém a origem de uma série de idéias que Maxwell retomou, seja para representar as equações do campo na forma integral em 1868, seja para tratar a ação elétrica como análoga ao movimento de um fluido incompressível, em 1869 e 1873, seja para classificar as funções vetoriais em forças e fluxos, em 1870, seja para encontrar uma interessante simetria formal das equações conectando fluxos e forças eletromagnéticas diferentes da simetria comumente encontrada nas equações do campo. O artigo termina com a solução de uma série de problemas, incluindo uma aplicação da função eletrotônica no cálculo da ação de um campo magnético sobre uma esfera condutora em rotação.

No artigo *On Physical Lines of Force (Sobre as Linhas Físicas de Força)*, de 1861-62, Maxwell elabora uma “verdadeira” teoria mecânica dos fenômenos eletromagnéticos. Ele diz:

Eu tenho grande dificuldade em conceber a existência de vórtices em um meio, lado a lado, girando no mesmo sentido ao redor de eixos paralelos. As porções contíguas de vórtices consecutivos devem ser movidas em sentidos opostos; e é difícil entender como o movimento de uma parte do meio pode coexistir com uma outra e mesmo assim produzir um movimento oposto da parte em contato com ela.

A única concepção que tem me ajudado a imaginar este tipo de movimento é aquele dos vórtices sendo separados por uma camada de partículas, girando em torno de si mesmas em sentido oposto àquele dos vórtices, tal que superfícies de contato entre partículas e vórtices adquiram movimento no mesmo sentido.

Em engrenagens, quando se pretende girar duas rodas no mesmo sentido, uma terceira roda é colocada entre elas para girar junto e é chamada de “idle wheel”. As hipóteses sobre os vórtices que eu tenho sugerido é que uma camada de partículas, atuando como as *idle wheels*, seja interposta entre cada vórtice e o próximo, tal que cada vórtice tenha uma tendência de fazer os vórtices vizinhos girarem no mesmo sentido que o seu (Maxwell, *Scientific Papers I*, p. 468).

Faraday havia sugerido a existência de uma tensão ao longo das linhas de força e de uma repulsão (ou pressão) lateral entre essas linhas. Maxwell traduzirá essa sugestão de Faraday em termos de uma “hipótese mecânica”: o meio se encontra em um estado de tensão interno, responsável pelos efeitos mecânicos sobre os corpos eletrizados, magnetizados ou que

conexão concebível mecanicamente e de fácil investigação, e ela serve para representar as conexões mecânicas reais entre os fenômenos eletromagnéticos conhecidos... (Maxwell, *Scientific Papers* I, p. 486).

O efeito resultante da ação da força eletromotriz nos dielétricos é de dois tipos: Primeiramente, o deslocamento inicial das partículas (“o qual, de acordo com nossa teoria, é um tipo de elasticidade produzida pela ação da força, similar àquelas que aparecem em estruturas e engrenagens devido à ausência de perfeita rigidez das conexões) constitui a corrente que passa através do dielétrico, uma corrente que Maxwell chamou de corrente de deslocamento para distingui-la das correntes de condução. Em segundo lugar, sempre que a pressão que desloca as partículas é retirada, em resposta brusca, elas excedem e oscilam rapidamente em torno de suas posições de equilíbrio. A oscilação é transmitida através do meio como uma onda. Maxwell encontrou a taxa de propagação das vibrações transversais através do meio elástico composto por células e comentou:

A velocidade das ondulações transversais em nosso meio transversal, calculado dos experimentos eletromagnéticos dos Srs. Kohlrausch e Weber, concorda tão exatamente com a velocidade da luz calculada dos experimentos ópticos do Sr. Fizeau que dificilmente podemos evitar a inferência de que *a luz consiste de ondulações transversais do mesmo meio que é causa dos fenômenos elétricos e magnéticos* (Maxwell, *Scientific Papers* I, p. 500).

Como Maxwell deixou claro, este modelo era “provisório” (*Scientific Papers*, I, 468) e “podia parecer um tanto embaraçoso. Eu não o proponho como um modo de conexão existente na natureza, ou mesmo como aquilo que eu poderia consentir como uma hipótese elétrica” (*Scientific Papers*, I, 486), mas ele o sugeriu meramente com propósitos heurísticos. Por outro lado, ele considerou que a teoria dos vórtices moleculares na primeira parte do artigo provavelmente era verdadeira (Heimann, 1969, p. 190).

A maneira pela qual o abandono da primazia das linhas de força e a substituição deste modelo por uma representação mecânica das linhas através dos vórtices moleculares afetou a estrutura conceitual de Maxwell, pode ser visto em seu tratamento do estado eletrotônico nesta parte do artigo, pois aqui ele definiu o estado eletrotônico em função do movimento dos vórtices. Tendo explicado a força eletromotriz em termos de forças exercidas por vórtices sobre as partículas entre elas, ele definiu a força eletromotriz como a taxa de variação no tempo do estado eletrotônico. A força magnética também era expressa em termos do estado eletrotônico.

A velocidade dos vórtices era dada por α , β e γ (a força magnética) e a força eletromotriz P, Q e R era definida pelas equações:

$$\frac{dQ}{dz} - \frac{dR}{dy} = \mu \frac{d\alpha}{dt} \quad \frac{dR}{dx} - \frac{dP}{dz} = \mu \frac{d\beta}{dt} \quad \frac{dP}{dy} - \frac{dQ}{dx} = \mu \frac{d\gamma}{dt}$$

sendo μ a capacidade indutiva magnética, definida no *Treatise* por $\vec{B} = \mu\vec{H}$ (§ 614), \vec{B} a indução magnética e \vec{H} a força magnética (em notação de componentes: α , β e γ). Em notação vetorial, Maxwell escreveu a relação $\dot{\vec{B}} = \text{rot}\vec{E}$, isto é, a “Lei de Faraday”, que relaciona a taxa de variação no tempo da indução magnética \vec{B} com a força eletromotriz \vec{E} . A força eletromotriz P, Q e R foi definida em termos das quantidades F, G e H como:

$$P = \frac{dF}{dt} \quad Q = \frac{dG}{dt} \quad R = \frac{dH}{dt}$$

Maxwell definiu as quantidades F, G e H para representar aquilo que Faraday tinha conjecturado existir e que ele chamou de estado eletrotônico.

Maxwell tomou emprestado estes símbolos do artigo de Thomson de 1851, e utilizou-os de uma maneira similar. Em notação vetorial, Maxwell escreveu $\vec{E} = \dot{\vec{A}}$, sendo \vec{A} o vetor potencial (estado eletrotônico) e definiu a força magnética α , β e γ pelas equações (Heimann, 1969, p. 190-191):

$$\frac{dG}{dz} - \frac{dH}{dy} = \mu\alpha \quad \frac{dH}{dx} - \frac{dF}{dz} = \mu\beta \quad \frac{dF}{dy} - \frac{dG}{dx} = \mu\gamma$$

Em notação vetorial, tem-se:

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} \quad , \quad \text{sendo } \vec{B} = \mu\vec{H}$$

Em sua dedução da equação de onda, o papel central foi a dupla interpretação da equação $\vec{E} = -4\pi E^2 \vec{D}$, como uma equação de elasticidade e uma equação elétrica. Então, \vec{E} é uma força eletromotriz no sentido do deslocamento e uma força elástica restaurado oposta a ele. Este duplo significado foi relacionado com seu modelo físico, e quando ele abandonou o modelo mecânico no *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, em 1864, a força elástica restauradora não mais apareceu e o sinal negativo na equação, o qual tinha sido mantido por um erro em uma de suas provas, desapareceu (Joan Bromberg, 1967).

Conforme suas idéias relatadas em partes sucessivas do *Physical Lines* foram se desenvolvendo, a visão de Maxwell sobre a natureza ontológica do éter também mudou. Na parte I, não havia uma indicação de que Maxwell necessariamente acreditava na realidade do éter, mas na parte III – como resultado da derivação da teoria da luz – ele argumentou que a inferência de que o éter luminífero e eletromagnético eram idênticos dificilmente poderia ser evitada, e começou a considerar o éter como uma entidade real. Esta nova posição em seu pensamento foi retida no artigo de 1864, onde ele sustentou que a rotação do plano de polarização da luz polarizada, os fenômenos da óptica e a polarização dos dielétricos levaram-no à conclusão de que havia “um meio etéreo permeando todos os corpos, e sendo modificado somente qualitativamente devido à presença deles” e que este complicado mecanismo estava

sujeito às leis gerais da Dinâmica (*Scientific Papers I*, 532). O éter permeava todos os corpos e não podia ser concebido como uma entidade ontologicamente separada da matéria. O artigo de 1864 oferecia um novo tratamento, pois Maxwell derivou suas equações básicas do eletromagnetismo de equações gerais de sistemas mecânicos sem empregar qualquer modelo físico. Apesar de sua crença na existência de um movimento complicado ocorrendo no meio, no *Dynamical Theory*, ele evitou qualquer consideração sobre a natureza deste movimento (Heimann, 1969, p. 195-196).

Em seu artigo de 1864, em que o modelo mecânico dos vórtices moleculares não mais aparece, Maxwell diz:

Nós temos, portanto, alguma razão em acreditar, dos fenômenos da luz e do calor, que existe um meio etéreo preenchendo o espaço e permeando os corpos, capaz de ser colocado em movimento e transmitir este movimento de uma parte para outra, e de comunicar este movimento à matéria bruta, assim como aquecê-la e afetá-la de várias maneiras. [...] O meio é, portanto, capaz de receber e armazenar dois tipos de energia, isto é, a energia “real” dependente dos movimentos de suas partes e a energia “potencial” consistindo do trabalho que o meio irá fazer para se restabelecer do deslocamento em virtude de sua elasticidade. A propagação das ondulações consiste em uma contínua transformação de uma dessas formas de energia em outra alternadamente, de modo que em qualquer instante a quantidade de energia no meio todo seja igualmente dividida, tal que metade seja energia de movimento e metade seja resistência elástica [energia potencial] (Maxwell, *Scientific Papers I*, pp. 528-529).

É neste artigo que Maxwell estabeleceu a proposição fundamental da teoria de campo clássica:

Ao falar da energia do campo, no entanto, eu desejaria ser entendido literalmente. Toda energia corresponde à energia mecânica, esteja ela na forma de movimento ou em forma de elasticidade, ou em qualquer outra forma. A energia dos fenômenos eletromagnéticos é energia mecânica. A única questão é, onde ela reside? Nas velhas teorias, ela reside nos corpos eletrizados, circuitos condutores e ímãs, na forma de uma qualidade desconhecida chamada energia potencial, ou no poder de gerar certos efeitos a distância. Em nossa teoria, ela reside no campo eletromagnético, no espaço ao redor dos corpos eletrizados e magnéticos, bem como nos próprios corpos, e se encontra de duas formas diferentes, que podem ser descritas sem o auxílio de hipóteses, na polarização magnética e elétrica, ou de acordo com uma hipótese muito provável, no movimento e tensão de um mesmo meio (Maxwell, *Scientific Papers I*, p. 564).

Maxwell abandonou seu modelo mecânico dos vórtices moleculares e o transformou em um éter que armazena energia, preenchendo todo o espaço e penetrando em condutores e dielétricos indiferentemente. Em ambos os casos, o éter é colocado em movimento que é

transmitido mecanicamente de um lugar para outro. Por todos esses refinamentos e sutilezas, o éter é tão “mecânico” quanto os cilindros e esferas que o precediam. Ele pode transmitir movimento, ser deformado elasticamente, armazenar energia potencial mecânica e “estar sujeito às leis gerais da Dinâmica” (Priestley, 1971).

A “teoria dinâmica do campo eletromagnético”, como Maxwell a denomina, constitui o resultado da aplicação ao eletromagnetismo dos métodos emprestados à Mecânica Analítica, particularmente o formalismo lagrangeano, e do uso preponderante do conceito de energia, ao invés do conceito de força.

Essa guinada metodológica não deve entretanto, ser vista como o abandono do projeto de obter uma “teoria mecânica completa”, dos fenômenos eletromagnéticos. Maxwell reafirmará esse objetivo até o seu grande *Tratado*.

Maxwell supõe que os fenômenos eletromagnéticos são essencialmente fenômenos mecânicos, mesmo não os conhecendo em seus detalhes, enquanto mecanismo.

Daí a importância heurística do formalismo lagrangeano, que dispensa o conhecimento dos vínculos mecânicos internos (Abrantes, 1988, p. 70).

A beleza do método lagrangeano está no fato de ele permitir que novos termos sejam incorporados na teoria automaticamente na medida em que surgem, com um mínimo de hipóteses físicas (Everitt, 1981, p. 211).

O ponto de partida da teoria é uma “hipótese dinâmica” bastante geral a respeito da “natureza” da corrente elétrica. Após apresentar diversos argumentos a favor da idéia de que a corrente elétrica é um “fenômeno cinético”, que não se restringe espacialmente ao que ocorre no interior do condutor, Maxwell formula sua hipótese:

O que eu me proponho agora a fazer é examinar as conseqüências do pressuposto de que os fenômenos da corrente elétrica são os de um sistema em movimento, o movimento sendo comunicado de uma parte do sistema a outra por forças, cuja natureza nós não tentamos ainda nem mesmo definir, porque nós podemos eliminar essas forças das equações de movimento pelo método desenvolvido por Lagrange para qualquer sistema com vínculos (Maxwell, *Treatise* II, p. 198).

A carga elétrica é, aliás, em Maxwell, um epifenômeno, ou seja, um efeito dos processos ocorrendo no campo (e não a causa desses efeitos) (Abrantes, 1988, p. 73).

Em 1865, Maxwell estava convencido de que a energia elétrica e magnética encontrava-se distribuída pelo espaço. Como uma “hipótese muito provável”, ele favoreceu a identificação de duas formas de energia com “o movimento e a tensão de um único meio” (Maxwell, *Scientific Papers* I, p. 564), mas o conhecimento definitivo sobre um determinado nível de realidade deve ser diferenciado de uma razoável especulação sobre o nível seguinte.

Isto representava o ponto filosófico do método lagrangeano. Na terminologia de William Rowan Hamilton (1805-1865), a melhor declaração da posição de Maxwell é aquela que diz que nós podemos acreditar na existência do éter sem o conhecimento direto de suas propriedades; nós conhecemos somente relações entre os fenômenos que ocorrem nele (Everitt, 1981, p. 213).

Em seu livro *A Treatise on Electricity & Magnetism (Um Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo)*, de 1873, ele observou que “o problema de determinar o mecanismo requerido para estabelecer certos tipos de conexão entre os movimentos das partes do sistema sempre admitia um número infinito de soluções (*Treatise*, § 831) e isto tinha implicações de longo alcance para a teoria do *Physical Lines*. Neste artigo, a dedução da equação de onda foi realizada como uma consequência do modelo de éter que ele tinha empregado. Se existisse um número infinito de tais modelos, uma dedução da equação de onda baseada tão firmemente em um dos tais modelos seria um tanto questionável (Heimann, 1969, p. 197).

Em seu tratamento do estado eletrotônico, Maxwell não retornou ao ponto de vista do *Faraday's Lines*, mas referiu-se ao estado eletrotônico como “a quantidade fundamental na teoria do eletromagnetismo” (*Treatise*, § 540) – a qual Faraday disse que poderia prescindir [dispensar], utilizando no lugar, as linhas de força. No entanto, embora ele tivesse deixado claro que o estado eletrotônico de uma certa região era equivalente ao número de linhas de força passando através dessa região, ele não substituiu o estado eletrotônico pelas linhas de força. Em contraste com o seu tratamento no *Faraday's Lines*, onde as linhas de força permaneciam como as entidades fundamentais, no *Treatise* ele mostrou que ao invés de se referir ao número de linhas de força para representar o estado eletrotônico, “nós podemos falar na indução magnética” (*Treatise*, § 541). [Veja também § 406 para uma definição do estado eletrotônico em termos da indução magnética. Em notação vetorial, $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$, sendo \vec{B} a indução magnética e \vec{A} o potencial vetor (o estado eletrotônico)]. No *Treatise*, a indução magnética e o estado eletrotônico eram quantidades fundamentais, e o significado deste comentário é que no *Treatise*, a indução magnética definia as linhas de força, enquanto que no *Faraday's Lines*, ele usava este conceito meramente para representar as linhas de força (Heimann, 1969, p. 200).

A equação para a força eletromotriz induzida $\vec{E} = \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ representa o equivalente elétrico generalizado da equação de Newton entre a força e a taxa de mudança do momento $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ (Everitt, 1981, p. 209).

Maxwell sugeriu que assim como toda mudança de momento envolvia a ação de uma força mecânica, então toda mudança do estado eletrotônico deveria envolver a ação de uma força eletromotriz, e por isso, ele então chamou o estado eletrotônico de momento eletromagnético (*Scientific Papers*, I, 542).

Maxwell afirmou que a teoria dinâmica do *Treatise* não representava uma explicação completa dos fenômenos do eletromagnetismo (Turner, 1956). A discussão de Maxwell deste problema é particularmente importante para entender como as dificuldades que ele discutiu podem ter contribuído para o seu abandono da explicação dinâmica do *Treatise* – e do *Dynamical Theory* – e seu retorno às linhas de força em sua obra *Elementary Treatise on Electricity*, de 1881. Maxwell enfatizou que de acordo com a teoria empregada no *Treatise* de 1873, a ação elétrica era “um fenômeno devido a uma causa desconhecida”, mas que em uma teoria completa do eletromagnetismo, uma corrente deveria ser representada como “o resultado de movimentos conhecidos de porções conhecidas da matéria, na qual... todo o mecanismo intermediário e os detalhes do movimento seriam tomados como objeto de estudo (*Treatise*, § 574). Ao dizer isto, Maxwell apontou que “um conhecimento dessas coisas levaria pelo menos ao início de uma completa teoria dinâmica da eletricidade.” (*Treatise*, § 574). Embora ele tivesse percebido que qualquer número de modelos mecânicos podia ser construído para representar os fenômenos, seu desejo de encontrar uma completa explicação dos fenômenos o levou a considerar a possibilidade de uma construção mecânica (Heimann, 1969, p. 210).

Maxwell argumentou que qualquer que seja a natureza destas forças, o formalismo lagrangeano da dinâmica permite que a natureza das forças internas de um sistema seja ignorada, pois ele estabeleceu que ele tinha assumido o meio como um sistema em “movimento, sendo comunicado de uma parte para outra do sistema por outras forças, a natureza e as leis que nós ainda não tínhamos tentado definir, porque nós podemos eliminar estas forças das equações do movimento pelo método dado por Lagrange para qualquer sistema com vínculos” (*Treatise*, § 552), pois o formalismo lagrangeano da dinâmica permite que suas “natureza e leis” sejam ignoradas. (Heimann, 1969, p. 211)

Durante alguns anos, houve uma acirrada disputa para ver qual dos pontos de vista – a ação a distância ou ação via linhas de força – era o mais correto para interpretar os fenômenos eletromagnéticos. Mas, com o desenvolvimento de ambas as teorias, percebeu-se que os dois tipos de abordagem eram igualmente possíveis e davam conta de todos os fenômenos, como pode ser verificado nas palavras de Maxwell, que aparecem no prefácio de sua obra máxima *A Treatise on Electricity and Magnetism*:

Grande progresso tem sido feito na ciência elétrica, principalmente na Alemanha, pelos cultivadores da teoria de ação a distância. As valiosas medições elétricas de W. Weber são interpretadas por ele de acordo com sua teoria, e a especulação eletromagnética, que foi originada por Gauss e continuada por Weber, Riemann, J. e C. Neumann, Lorenz⁵ etc., está baseada na teoria de ação a distância, mas dependendo ou diretamente da velocidade relativa das partículas ou da propagação gradual de alguma coisa, seja potencial ou força, de uma partícula à outra. O grande sucesso obtido por estes homens eminentes na aplicação da matemática aos fenômenos elétricos fornece, como é natural, peso adicional às suas especulações teóricas de tal forma que aqueles que, como estudantes da eletricidade, se voltam em direção a eles como as maiores autoridades na eletricidade matemática, provavelmente assimilariam, junto com seus métodos matemáticos, suas hipóteses físicas.

Estas hipóteses físicas, contudo, são completamente diferentes da maneira de olhar os fenômenos que adoto, e um dos objetivos que tenho em vista é que alguns daqueles que desejam estudar eletricidade podem, ao ler este tratado, ver que há uma outra maneira de tratar o assunto, que não é menos apta a explicar os fenômenos, e que, apesar de que em algumas partes ela possa parecer menos definida, corresponde, como penso, mais fielmente ao nosso conhecimento atual, tanto naquilo que afirma quanto naquilo que deixa indeciso.

De um ponto de vista filosófico, além disto, é extremamente importante que os dois métodos sejam comparados, ambos os quais tiveram sucesso na explicação dos principais fenômenos eletromagnéticos, e ambos os quais tentaram explicar a propagação da luz como um fenômeno eletromagnético e de fato calcularam sua velocidade, enquanto que ao mesmo tempo as concepções fundamentais sobre o que acontece, assim como a maioria das concepções secundárias das quantidades envolvidas, são radicalmente diferentes. (Maxwell, *A Treatise on Electricity & Magnetism*, v. 1, Preface, p. x)

⁵ Trata-se do físico alemão Ludwig Valentin Lorenz (1829-1891), que não deve ser confundido com o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), da força de Lorentz, $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$, de 1895. Lorenz foi um físico eminente, embora o conteúdo e a extensão de suas realizações não tenham sido totalmente reconhecidas por seus contemporâneos. Esta lacuna no reconhecimento de seu trabalho deveu-se principalmente à sua grande dificuldade em apresentar idéias e cálculos matemáticos de uma forma inteligível, e também devido ao fato de alguns de seus trabalhos mais importantes terem sido publicados somente em língua dinamarquesa. (Pihl, 1981, v. 8, p. 501)

CAPÍTULO 5 – A TEORIA ELETROMAGNÉTICA APÓS MAXWELL

5.1 O papel decisivo de Helmholtz para a mudança de paradigma na década de 1870

As pesquisas em eletrodinâmica realizadas por Hermann von Helmholtz (1821-1894) parecem ter sido motivadas principalmente por seu desejo em harmonizar a teoria eletrodinâmica com o princípio da conservação da energia. Concomitantemente com este propósito, Helmholtz almejava classificar as várias teorias eletrodinâmicas existentes em sua época, destacando os aspectos relevantes de cada uma delas. Ele realizou suas pesquisas tendo em mente três objetivos: testar a consistência de cada uma das teorias concorrentes com os princípios mecânicos e dinâmicos já consolidados, extrair previsões teóricas diferentes de cada teoria e realizar experimentos que pudessem decidir sobre a validade delas.

Em seu trabalho *Ueber die Erhaltung der Kraft (Sobre a Conservação da Força)*, de 1847, Helmholtz procurou mostrar que as forças fundamentais da natureza deviam ser conservativas, e que para que isso ocorresse, as leis matemáticas que as expressavam não podiam conter termos envolvendo a velocidade ou a aceleração das partículas interagentes. Este argumento invalidava prontamente a força eletrodinâmica de Weber entre duas partículas carregadas, já que esta depende não somente das distâncias entre as partículas interagentes como também da velocidade e aceleração relativa entre elas. Portanto, de acordo com Helmholtz, esta força violava o princípio da conservação da energia.

As provas sob as quais ele se baseou eram, no entanto, incorretas. Mais tarde, Helmholtz reconheceu que leis de força envolvendo derivadas temporais da distância podiam conservar energia, embora elas não pudessem ser centrais e obedecer a terceira lei de Newton. Quando Helmholtz retomou seu ataque à força de Weber, em 1870, ela era a mais importante equação aceita pelos físicos continentais para a predição dos efeitos eletrodinâmicos. Entretanto, ele continuou a acreditar que a lei de Weber gerava inconsistências físicas. De acordo com esta lei, Helmholtz demonstrou que a energia de pelo menos alguns sistemas de cargas em movimento era menor do que a energia dos mesmos sistemas em repouso. Além disso, podia-se mostrar que, sob certas condições, que as cargas interagentes podiam acelerar espontaneamente até que a energia cinética do sistema formado por elas se tornasse infinita (Turner, 1981, p. 250).

Em um artigo publicado em 1871, Weber tentou relacionar sua lei de força com a conservação da energia, exprimindo a interação entre duas partículas através da energia potencial do ‘par atômico’ formado por elas. Na verdade, ele estava respondendo às críticas à sua lei de

força levantadas por Helmholtz em 1847. Em resposta aos argumentos de Helmholtz, Weber sugeriu que o conceito de conservação da energia precisaria ser ajustado ao ser aplicado para a teoria eletrodinâmica (Harman, 1982, p. 104-5).

As duas décadas entre o ataque de Helmholtz e a resposta de Weber, foram suficientes para que Maxwell desenvolvesse suas próprias idéias, adotando um éter para mediar a interação física.

Ao estudar profundamente as teorias eletrodinâmicas em competição, Helmholtz desenvolveu sua própria teoria que ele acreditava abranger muitas outras como casos particulares. Em 1848, Franz Ernest Neumann (1798-1895) tinha sido bem-sucedido ao derivar todos os efeitos eletrodinâmicos produzidos por correntes fechadas a partir de uma função potencial. Em 1870, Helmholtz mostrou que a forma mais geral do potencial de Neumann podia ser escrito da seguinte forma:

$$p = -\frac{1}{2c^2} \frac{ii'}{r} \left[(1+k) d\vec{s} \cdot d\vec{s}' + (1-k) \frac{(\vec{r} \cdot d\vec{s})(\vec{r} \cdot d\vec{s}')}{r^2} \right]$$

em que p representa a função potencial entre os elementos de corrente $d\vec{s}$ e $d\vec{s}'$ conduzindo correntes elétricas i e i' , respectivamente; r representa a distância entre os elementos $d\vec{s}$ e $d\vec{s}'$; c é uma constante a ser determinada com dimensões de velocidade e k é uma constante adimensional, tal que se $k = -1$, tem-se o potencial de Weber, se $k = 1$, tem-se o potencial de Neumann e se $k = 0$, recai-se no formalismo de Maxwell.

As partes da expressão acima que são multiplicadas pelo fator k tornam-se zero quando integradas sobre circuitos fechados S e S' , de modo que para correntes fechadas, as três teorias concorrentes se tornam equivalentes. Assim, diferenças entre as previsões feitas pelas três teorias só poderiam ser detectadas no caso de aplicá-las para circuitos abertos.

Em 1870, a teoria de Maxwell era pouco conhecida no continente europeu, pois ela diferia radicalmente das teorias continentais. Estas assumiam que um corpo exercia sua ação eletrodinâmica sobre outro a distância, independentemente do meio interveniente. A teoria de campo de Maxwell rejeitava a ação a distância e, como Helmholtz a interpretou, assumia que toda a ação eletrodinâmica deveria se propagar através de uma contígua e progressiva polarização do meio. Com a hipótese de que o éter luminífero também fosse um dielétrico magnetizável, Helmholtz notou que a teoria de Maxwell fornecia o notável resultado de que os distúrbios eletrodinâmicos se propagavam na forma de ondas transversais com a velocidade da luz no espaço livre. Assim como os físicos ingleses, Helmholtz acreditava que a hipótese da existência

de um éter dielétrico fosse fortemente sustentada pelos experimentos de Faraday, especialmente aqueles sobre diamagnetismo (Turner, 1981, p. 251).

No influente artigo sobre a teoria eletrodinâmica publicada em 1870, Helmholtz procurou elaborar uma síntese entre as inovações implementadas pela teoria eletromagnética da luz construída por Maxwell e a consistência formal da teoria eletrodinâmica baseada na ação a distância desenvolvida pelos físicos continentais. Helmholtz continuava rejeitando a força de Weber, permanecendo convencido de que ela não poderia estar de acordo com o princípio de conservação de energia. Nem as alternativas à teoria de Weber propostas por Bernhard Riemann (1826-1866), pelo físico dinamarquês Ludwig Lorenz e por Franz Neumann eram aceitáveis para Helmholtz, pois ao suporem a propagação das forças, estas teorias admitiam leis de força dependentes do tempo. Helmholtz estava ciente de que o trabalho de Maxwell fornecia uma teoria unificada do fenômeno eletromagnético e que a teoria eletromagnética da luz de Maxwell era a maior inovação conceitual da física. Ele tentou formular uma teoria de ação a distância consistente com o princípio da conservação da energia, que incorporasse a teoria eletromagnética de propagação da luz sem introduzir uma lei de força com termos dependentes do tempo.

Ele assumiu que o meio eletromagnético estava sujeito à polarização elétrica e magnética de suas partes sob a influência das forças elétricas e magnéticas. A interação elétrica dos corpos era determinada parcialmente pela ação direta entre forças a distância e parcialmente pela polarização do meio. As forças dependentes da distância davam origem a forças agindo a distância entre as partes polarizadas do meio, e o meio polarizado transmitia as forças diretamente a distância entre as partes polarizadas contíguas. Nesta teoria, as forças elétricas e magnéticas eram propagadas instantaneamente entre as partículas polarizadas, e não com a velocidade da luz, como na teoria de Maxwell (Harman, 1982, p. 106).

Foi através da interpretação de Helmholtz dada à teoria eletromagnética da luz que os físicos continentais tomaram conhecimento do trabalho de Maxwell. O *Treatise* de Maxwell era considerado um trabalho difícil e ambíguo, mas com o tratamento dado por Helmholtz, as idéias maxwellianas tornaram-se inteligíveis, afastando sua aparente impenetrabilidade conceitual. Na década de 1870, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) e Lorentz tomaram conhecimento da teoria de Maxwell através dos trabalhos de Helmholtz.

Ao apresentar a teoria eletromagnética da luz como um caso particular de sua lei de força central de ação a distância generalizada, Helmholtz incorporou-a dentro da estrutura conceitual da teoria eletrodinâmica aceita até aquele momento pelos físicos continentais, embora ele tivesse transformado completamente a base física na qual se sustentava as idéias de Maxwell.

Embora Helmholtz, em 1875, dizia que as várias teorias eletrodinâmicas ainda precisariam ser submetidas às evidências experimentais para serem aceitas, na prática, ele já vinha considerando o éter dielétrico necessário ao entendimento de suas idéias e a teoria de Maxwell como sendo a mais adequada para descrever os fenômenos.

A crítica iniciada por Helmholtz minou a confiança que os físicos continentais depositavam na teoria de Weber e acabou facilitando a aceitação da teoria de Maxwell, que substituiu a de Weber após 1880 (Turner, 1981, p. 250).

5.2 A Detecção das Ondas Eletromagnéticas por Hertz

Quando Hertz iniciou seus estudos em física na década de 1870, a eletrodinâmica encontrava-se em um estado desorganizado. Teorias tinham se proliferado nos últimos cinquenta anos de seu desenvolvimento, e cada pesquisador tinha sua própria maneira de interpretar os fenômenos. Na Alemanha, as teorias de maior destaque eram as de Weber e de Franz Neumann. Embora ambas as teorias compartilhassem da hipótese física fundamental de que as ações eletrodinâmicas eram ações instantâneas a distância, elas diferiam em suas formulações e em suas hipóteses sobre a natureza da eletricidade. A teoria de Neumann era baseada em um potencial eletrodinâmico e em uma força entre elementos de corrente elétrica. A de Weber, ao contrário, era uma teoria atomística, de acordo com a qual a eletricidade consistia de fluidos de partículas de dois tipos dotados de inércia mecânica (McCormach, 1981b, p. 490). Qualquer par de partículas weberianas interagia através de uma força ou de um potencial modelado, em parte, pela atração gravitacional newtoniana. A interação weberiana diferia da de Newton pelo fato de ela não depender somente da distância entre as partículas, mas também do movimento relativo entre elas.

O pensamento eletrodinâmico na Inglaterra era baseado em hipóteses físicas sobre as ações eletrodinâmicas muito diferentes daquelas empregadas por Weber e Neumann. Inspirado pela concepção de Faraday de que a ação instantânea a distância era ilógica e que a origem das ações eletrodinâmicas não era devido aos fluidos elétricos moleculares, mas estava na condição do espaço ou meio interveniente entre os corpos ponderáveis, Maxwell construiu uma nova teoria matemática do campo eletromagnético.

Ele concebeu o campo como uma condição mecânica do meio dielétrico, sendo o éter do espaço livre um caso especial de tal meio. A idéia central da teoria de Maxwell era que a luz consistia de ondas eletromagnéticas no meio dielétrico. Deve ser observado que a teoria de

Maxwell não era a única a sugerir uma unificação de dois ramos separados da física – a eletricidade e a óptica. Pois como os contemporâneos de Maxwell, Riemann e Ludwig Lorenz mostraram, era possível modificar as teorias de ação a distância para fornecer ondas elétricas propagando-se com velocidade finita como as ondas luminosas.

Assim como a mecânica, a eletrodinâmica apresentava um desenvolvimento matemático elaborado, mas diferentemente da primeira, esta ainda não tinha encontrado seus princípios fundamentais.

Para estimular o trabalho experimental no difícil campo das correntes abertas, Helmholtz propôs, para premiação pela Faculdade de Filosofia de Berlin em 1878, a resolução de um problema sobre uma implicação da teoria de Weber: quando oscilações de eletricidade eram estabelecidas em circuitos abertos, a hipotética inércia elétrica de Weber deveria revelar um retardamento das oscilações. Através de experimentos que Helmholtz tinha sugerido sobre auto-indução de espirais duplas enroladas, Hertz ganhou o prêmio da Faculdade de Filosofia. Ele provou que a inércia de eletricidade era zero ou menor do que um valor muito pequeno, e portanto, dando suporte experimental para o julgamento teórico de Helmholtz sobre a improbabilidade da teoria de Weber.

Para promover ainda mais a decisão experimental entre as teorias eletrodinâmicas, Helmholtz propôs para premiação pela Academia de Ciências de Berlim em 1879 um segundo problema, desta vez em conexão com o comportamento dos circuitos abertos de acordo com a teoria de Maxwell. O ponto central da teoria maxwelliana era a hipótese de que mudanças na polarização dielétrica deveria produzir efeitos eletromagnéticos precisamente da mesma maneira que as correntes de condução produziam. Helmholtz buscava um teste experimental que comprovasse a existência desses efeitos, ou contrariamente, mostrasse que efeitos eletromagnéticos podiam produzir uma polarização dielétrica do meio (McCormach, 1981a, pp. 343-4).

Em novembro de 1886, Hertz iniciou os estudos experimentais que o tornaram famoso mundialmente. No equipado laboratório de que lhe permitiram atacar o problema por Berlim e no final de 1888, acabou confirmando com velocidade finita pelo ar. Hertz produziu ondas de indução e as detectou com um pequeno detector detectadas quando correntes eram induzidas

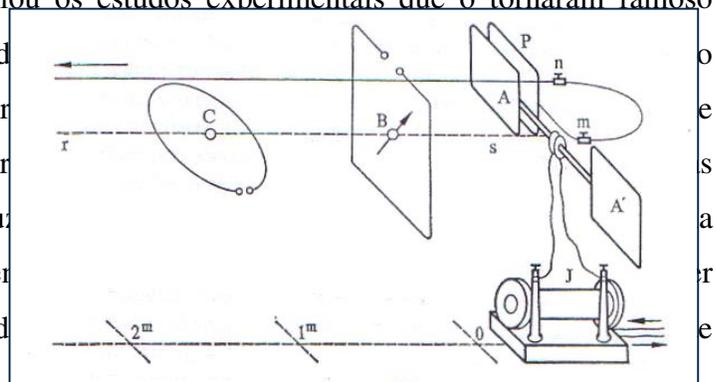


Figura 17. Aparato experimental utilizado por Hertz para detectar as ondas eletromagnéticas.

onda das ondas elétricas e com a frequência calculada do oscilador, determinar que a velocidade de propagação dessas ondas era igual à velocidade da luz (Harman, 1982, p. 107-8).

Em seu Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo (1873), Maxwell não havia desenvolvido uma teoria dos circuitos oscilatórios ou da conexão entre correntes e ondas eletromagnéticas. A possibilidade de ondas eletromagnéticas no ar era inerente em sua teoria, mas não era de modo algum óbvio e em nenhum lugar isto era explicado. A prova de Hertz da existência de tais ondas foi o resultado em parte de sua interpretação teórica das idéias de Maxwell.

Os experimentos de Hertz sobre a velocidade finita de propagação das ondas elétricas propiciaram uma rápida conversão dos físicos europeus que trabalhavam com a idéia de ação instantânea a distância em eletrodinâmica para a visão de Maxwell de que os processos eletromagnéticos ocorriam em dielétricos e que o éter eletromagnético realizava as funções do antigo éter luminífero.

De acordo com Hertz, as equações de Maxwell continham tudo que era seguro na teoria de Maxwell. Este era o sentido de sua frase que aparece na introdução do seu livro *Ondas Elétricas*: “A teoria de Maxwell é o sistema de equações de Maxwell”. [...] Coerentemente, em 1890, Hertz postulou as equações da teoria, ao invés de derivá-las de um modelo mecânico de éter. Ele propôs relações simétricas entre o campo elétrico e o campo magnético no éter (em que campos e polarizações eram idênticas), e escreveu as equações de Maxwell do modo como as conhecemos hoje em dia (McCormach, 1981a, p. 346).

Hertz apareceu num momento em que era evidente a condição desordenada em que se encontrava a eletrodinâmica. Com sua capacidade teórica de analisar as diversas teorias em disputa e suas habilidades experimentais incomuns, Hertz contribuiu para que a comunidade científica pudesse decidir por uma dentre as várias teorias que almejavam ser reconhecidas.

Os famosos experimentos de Hertz sobre a propagação das ondas eletromagnéticas foram concebidas em resposta ao problema que Helmholtz tinha proposto quando Hertz ainda era seu aluno, um teste experimental da relação entre polarização e efeitos eletromagnéticos. Hertz deixou duas contribuições fundamentais para o posterior desenvolvimento da teoria de campo: a verificação direta da propagação das ondas eletromagnéticas e uma crítica radical à estrutura conceitual das equações de campo no *Tratado* de Maxwell que o levaram a reformular as equações do eletromagnetismo de Maxwell. Em ambos os aspectos de seu trabalho, os problemas científicos que Hertz tentou resolver foram levantados por Helmholtz, por um lado buscando encontrar um teste experimental do trabalho de Maxwell e por outro lado, em esboçar as dificuldades conceituais da teoria eletromagnética de Maxwell.

Maxwell havia proposto um éter eletromagnético como um meio para a propagação da luz, e aparentemente não considerou a possibilidade de uma detecção experimental direta das ondas eletromagnéticas. Hertz, no entanto, recusou-se a adotar a hipótese física de um éter eletromagnético, como Maxwell tinha feito, preocupando-se meramente em precisar a coerência formal da concepção de Maxwell sobre a propagação das forças elétricas e magnéticas.

A formulação axiomática de Hertz das equações do campo descartou a necessidade de representações concretas dos conceitos eletromagnéticos empregados por Maxwell. Ao postular as equações de Maxwell, ao invés de derivá-las de modelos e princípios mecânicos, Hertz contribuiu enormemente para a aceitação da teoria de campo (Harman, 1982, p. 111).

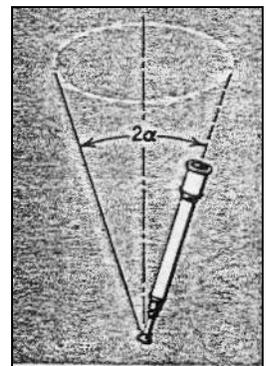
No entanto, Hertz nunca renunciou a uma visão mecânica da natureza. Ele manteve-se comprometido com a crença de que as ondas eletromagnéticas eram produzidas por um éter cujas partes eram conectadas por uma estrutura mecânica e baseou seu estudo no conceito de um éter completamente arrastado pelos corpos ponderáveis em movimento, mesmo sabendo que essa idéia contradizia alguns fenômenos ópticos.

5.3 O Problema do Movimento Através do Éter

Após a descoberta experimental das ondas eletromagnéticas, Hertz levantou o problema da relação entre os fenômenos ópticos e eletrodinâmicos, salientando que a preservação da unificação conseguida por Maxwell entre a óptica e o eletromagnetismo dentro de uma teoria do éter eletromagnético requereria a elaboração de uma representação coerente do movimento dos corpos através do éter, e que portanto, uma análise da relação entre éter e matéria deveria ser empreendida.

Hertz reconheceu que, para o desenvolvimento de uma eletrodinâmica dos corpos em movimento, era primeiramente necessário especificar se o éter era ou não arrastado junto com os corpos. De sua parte, ele assumiu que o éter era mecanicamente arrastado pelos corpos em movimento. A justificativa para a aceitação desta hipótese era que, para o restrito domínio dos fenômenos eletromagnéticos, não havia qualquer incompatibilidade com a idéia de um arrastamento do éter.

No entanto, ele reconheceu, ao mesmo tempo, que a idéia de um arrastamento do éter não era boa por outros motivos, pois era incapaz de explicar fenômenos ópticos, tais como a aberração estelar, que indicavam



uma independência entre os movimentos da matéria ponderável e o éter (McCormach, 1981a, p. 347).

O fenômeno da aberração – o aparente deslocamento de uma estrela como o resultado do movimento da Terra – apresentava dificuldades para a teoria do éter luminífero. Explicações da aberração estelar por meio da teoria ondulatória da luz parecia requerer a hipótese de um éter não perturbado pela passagem da Terra através dele, pois qualquer perturbação desviaria os raios de luz de seu caminho retilíneo. Para evitar as dificuldades que resultariam do fato de supor um éter perturbado pelo movimento da Terra, tanto Thomas Young (1773-1829) como Augustin Jean Fresnel (1788-1827), já no início do século XIX, aceitaram a hipótese de um éter permeando livremente as substâncias constituintes de todos os corpos materiais, não sendo perturbado pelo movimento da Terra através dele, ou seja, que ele deveria estar em repouso absoluto.

A aberração da luz foi relatada por James Bradley (1692-1762) em 1727. Ele observou que as estrelas pareciam se mover em círculos, formando um cone de aberração com diâmetro angular de cerca de 41 segundos de arco. Isso acontece porque a Terra se move através do éter com uma velocidade v . Se a Terra estivesse em repouso em relação ao éter, para observar uma estrela, bastaria apontarmos um telescópio em sua direção e os raios de luz vindos da estrela seguiriam diretamente para baixo no tubo telescópico. No caso em que a Terra se move com uma velocidade orbital v em torno do Sol, a fim de que os raios passem para baixo do tubo telescópico sem tocar nos lados, teríamos que inclinar o telescópio de tal modo que no instante em que o raio abandonasse o telescópio, a ocular deveria estar sobre a mesma linha vertical que a objetiva estava no instante em que o raio penetrou no telescópio. Neste caso, o ângulo de inclinação do telescópio α seria dado por:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v \Delta t}{c \Delta t} = \frac{v}{c}$$

Sabendo que a velocidade da Terra ao redor do Sol é de 40 km/s e que a velocidade da luz é de 300000 km/s, obtém-se um ângulo α igual a 20,5 segundos de arco, o que fornece um

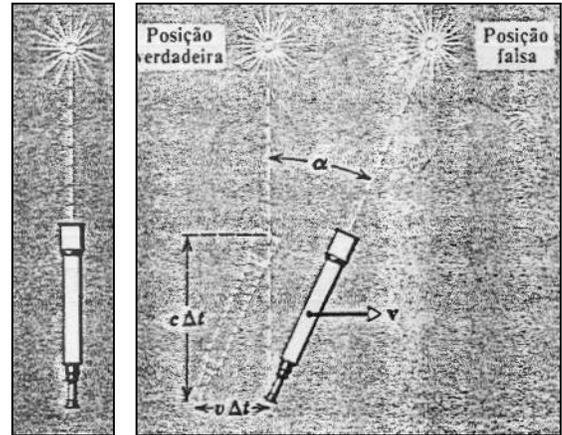


Figura 18. Desenho esquemático mostrando a posição de uma luneta para observar a luz enviada por uma estrela levando-se em conta o fenômeno da aberração.

diâmetro angular para o cone de aberração de 41 segundos de arco, em excelente concordância com as observações.

Portanto, levando-se em conta o fenômeno da aberração estelar, devemos concluir que o éter não é arrastado junto com a Terra. Se fosse arrastado, o éter estaria se movendo junto com a Terra para a direita com velocidade v e o telescópio não teria que ser inclinado, já que o raio de luz seria varrido junto com o éter, assim como o vento carrega a onda sonora consigo.

Em 1810, Dominique François Jean Arago (1786-1853) imaginou um experimento em que um prisma sobre a Terra estaria se aproximando de uma estrela numa situação e se afastando em outra. No primeiro caso, a velocidade da luz ao atravessar o prisma seria acrescida do valor da velocidade orbital da Terra e no segundo caso, a velocidade da luz ao atravessar o prisma teria sua velocidade diminuída, de modo que estas duas situações deveriam fornecer desvios angulares diferentes, sendo o ângulo medido na primeira situação maior do que aquele medido na segunda situação. No entanto, ao realizar a experiência, o que de fato Arago observou foi que os desvios nas duas situações eram exatamente iguais (Oliveira, 1993, pp. 162-3).

Aparentemente a explicação dos fenômenos de aberração e o resultado da experiência de Arago de 1810 necessitavam de suposições opostas sobre a relação entre éter e matéria: o resultado experimental de Arago parecia exigir um éter sendo arrastado junto com a Terra, enquanto que a interpretação da aberração das estrelas devia ser interpretada através da hipótese de um éter estacionário.

Numa carta enviada a Arago em 1818, Fresnel consegue interpretar os dois fenômenos pela teoria ondulatória da luz ao supor que apenas uma pequena parte do éter, considerado imóvel no espaço, é arrastado pelos corpos transparentes em movimento com a Terra. Ele expõe sua hipótese da seguinte maneira:

...até agora eu só pude conceber claramente este fenômeno supondo que o éter passa livremente através do globo e que a velocidade comunicada a este fluido é

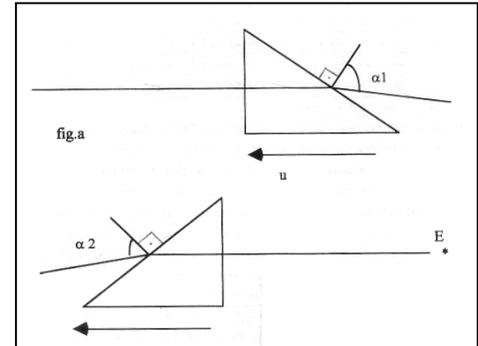


Figura 19. O prisma sobre a Terra da primeira situação aproxima-se de uma estrela. Nesse caso, a velocidade da luz dentro do meio que compõe o prisma é acrescida da velocidade da Terra. Na situação do prisma abaixo, considera-se uma estrela numa posição diametralmente oposta, de modo que nesse caso a velocidade deva ser subtraída da velocidade da Terra. O desvio sofrido pela luz na situação de cima deve ser maior que o desvio na situação de baixo.

somente uma pequena parte daquela da Terra; não excede o centésimo por exemplo (*apud* Oliveira, 1993, p. 165).

Esta proposição de Fresnel ficou conhecida por *hipótese de arrastamento parcial do éter luminoso*. Ele admitiu que o éter existente no espaço vazio, livre de qualquer corpo material, teria uma densidade constante e que os corpos refringentes teriam uma concentração maior de éter no seu interior, de modo que, ao se moverem, arrastariam consigo justamente o excesso de éter que possuiriam em relação ao mesmo volume no espaço sem a presença da matéria. Esse éter transportado seria o responsável pela variação na velocidade da luz dentro do corpo (Gough, 1981b, p. 20).

Ao assumir que o excesso de éter contido em um dado corpo material deveria ser proporcional ao seu índice de refração, Fresnel deduziu a seguinte expressão para a velocidade de propagação de uma onda luminosa no interior de tal corpo:

$$c' = c \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v$$

em que c é a velocidade da onda luminosa no espaço destituído de matéria, o sinal \pm representa a coincidência ou não dos sentidos dos movimentos do corpo e da onda, n é o índice de refração do líquido (que se supõe ser um meio não dispersivo) e v é a velocidade do corpo em relação ao éter.

Fresnel deduziu este resultado a partir da suposição de que a luz transmite vibrações elásticas ao éter que atravessa. De acordo com ele, a presença do fator $\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$, conhecido como *coeficiente de arrastamento parcial de Fresnel*, exprime o fato de a luz não poder adquirir a velocidade adicional completa v , visto que é parcialmente retida pelo excesso de éter existente dentro do corpo.

Em 1851, Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) enviou luz de uma fonte terrestre para o interior de um tubo cheio de um fluido em movimento, obtendo razoável concordância experimental com a equação calculada por Fresnel.

A teoria de Young e Fresnel a respeito da passagem desimpedida da Terra através do éter foi, no entanto, questionada por George Gabriel Stokes (1819-1903) em 1845. Stokes concebeu o éter como um sólido elástico viscoso, concluindo portanto, que deveria haver um atrito entre o éter e a Terra movendo-se através dele. A passagem livre da Terra através do éter, como imaginada por Young e Fresnel, foi portanto, firmemente rejeitada. No lugar da teoria de Fresnel do éter estacionário, Stokes considerou que a Terra e os planetas arrastassem junto com eles o

éter que estivesse próximo às suas superfícies, mas que além de um certo limite, o éter não mais seria perturbado pelo movimento da Terra (Harman, 1982, p. 112-3).

O problema do arrastamento do éter chamou a atenção de uma perspectiva diferente na década de 1880, seguindo a assimilação da demonstração de Maxwell de que o éter assumia um papel importante nos fenômenos eletromagnéticos. Os problemas da relação entre éter e matéria e a influência do movimento da Terra sobre os fenômenos eletromagnéticos foram levados para o foco do trabalho de Maxwell. Ele próprio tinha discutido a detecção experimental do movimento da Terra através do éter, sugerindo que ele poderia possivelmente ser detectado medindo-se a variação da velocidade da luz quando ela se propagasse em sentidos opostos.

Em seu artigo de 1878, intitulado *Ether*, Maxwell nos informa de sua opinião de que os efeitos de segunda ordem em v/c (v = velocidade da Terra em relação ao éter; c = velocidade da luz) são pequenos demais (da ordem de $(v/c)^2 = 10^{-8}$) para que possam ser detectados:

Se fosse possível determinar a velocidade da luz observando o tempo que ela leva para viajar entre uma estação e outra sobre a superfície da Terra, nós poderíamos, ao comparar as velocidades observadas em sentidos opostos, determinar a velocidade do éter em relação a estas estações terrestres. Todos os métodos, no entanto, através dos quais é possível determinar a velocidade da luz a partir de experimentos terrestres dependem da medida do tempo requerido para a viagem de ida e volta entre as duas estações, e o aumento deste tempo, devido à velocidade relativa do éter ser igual àquela da Terra em sua órbita, deveria ser somente cerca de cem milionésimos do tempo total de transmissão, e portanto seria praticamente insensível (Maxwell, *Scientific Papers, Ether*, v. 2, p. 768-9).

As sugestões de Maxwell estimularam o físico americano Albert Abraham Michelson (1852-1931) a realizar um teste experimental para detectar a variação da velocidade da luz sob as circunstâncias discutidas por Maxwell (Harman, 1982, p. 113).

Michelson supôs que dois raios de luz seriam diferentemente afetados devido a seus movimentos através do éter, como resultado de suas orientações diferentes ao sentido do movimento da Terra através do éter estacionário. O experimento foi realizado em 1881 e forneceu o resultado surpreendente de que o movimento relativo entre a Terra e o éter era indetectável. Michelson concluiu que a hipótese do éter estacionário estava incorreta, indicando que a teoria de Stokes de um éter que era arrastado pela passagem da Terra através dela seria preferível.

Em 1887, Michelson e Edward Williams Morley (1838-1923), ao refazerem a mesma experiência, tomando alguns cuidados adicionais e conseguindo uma precisão dez vezes maior, novamente não obtiveram o resultado esperado.

Para salvar o éter e ainda explicar o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley, os cientistas sugeriram algumas hipóteses alternativas, como a contração dos corpos sugerida por Fitzgerald e depois por Lorentz, independentemente um do outro. A hipótese do arrastamento do éter pela Terra não podia mais ser levada em consideração, devido à incompatibilidade dessa hipótese em explicar, por exemplo, o resultado bem estabelecido do arrastamento parcial do éter deduzido por Fresnel. Portanto, se existisse um éter, ele não poderia ser arrastado pela Terra, mas, pelo contrário, a Terra deveria mover-se livremente através dele. Ou seja, não se poderia explicar o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley por meio de uma hipótese de arrastamento do éter.

5.4 A Interpretação de Lorentz da Experiência de Michelson-Morley

Hertz trouxe uma clareza sem precedentes à teoria de Maxwell, organizando seus conceitos e formalismos de tal forma que outros pesquisadores rapidamente conseguiram ir além dele. Os cientistas que se seguiram, no entanto, rejeitaram a concepção de éter aceita por Hertz, devido à sua incapacidade de explicar ao mesmo tempo tanto fenômenos ópticos como eletrodinâmicos. Dentre estes, encontrava-se o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), que desenvolveu uma teoria para o comportamento das partículas carregadas¹ como uma extensão da teoria de Maxwell em seu livro *A Teoria Eletromagnética de Maxwell e sua Aplicação aos Corpos em Movimento*, de 1892, em resposta à insuficiência da eletrodinâmica dos corpos em movimento de Hertz em explicar os fenômenos ópticos. Ao contrário de Hertz, Lorentz diferenciou o campo eletromagnético da matéria ponderável ao considerar o éter estacionário ao invés de estar sendo arrastado pelos corpos. Isto e a outra hipótese crucial sobre a natureza molecular da eletricidade constituíram a mais frutífera base para o subsequente desenvolvimento da teoria de Maxwell na virada do século (McCormmach, 1981a, p. 347).

A versão amadurecida da teoria do éter eletromagnético de Lorentz propunha extrair dele todas as suas propriedades mecânicas, reduzindo as leis da natureza a propriedades definidas pelas equações do campo eletromagnético. Ao elaborar sua visão eletromagnética de mundo, Lorentz foi capaz de explicar a relação entre éter e matéria, separando completamente os dois

conceitos. Considerando a matéria formada por partículas carregadas, ele distinguiu a matéria do éter e explicou a conexão entre eles em função da relação entre essas partículas e o éter eletromagnético, e assim, separando o campo eletromagnético da matéria (Harman, 1982, p. 117).

Convencido de que a demonstração experimental da existência das ondas eletromagnéticas por Hertz constituía uma confirmação do conceito de campo de Maxwell, Lorentz declarou a sua aceitação pela teoria de Maxwell. Em seu trabalho sobre a teoria das partículas carregadas, de 1892, Lorentz criticou a afirmação puramente axiomática de Hertz sobre as equações do campo e a hipótese de um arrastamento total do éter na eletrodinâmica dos corpos em movimento.

Enfatizando seu comprometimento com a teoria do éter estacionário, Lorentz procurou estabelecer uma teoria eletromagnética com o auxílio da formulação lagrangeana da dinâmica que Maxwell tinha utilizado no seu *Tratado*. Lorentz argumentou que o éter era completamente separado da matéria ordinária, e que a teoria das partículas carregadas permitia-lhe estabelecer a conexão entre o éter e a matéria. Ele afirmou que as moléculas da matéria ordinária continham partículas eletricamente carregadas positiva e negativamente. O campo eletromagnético resultava dos movimentos destas partículas, de modo que ele pudesse agir sobre a matéria ordinária exercendo forças sobre as partículas constituintes da matéria.

Lorentz argumentou que o efeito de um corpo transparente em movimento sobre a luz passando através dele era devido a uma interferência entre a luz incidente e as ondas de luz produzidas pelas vibrações das partículas carregadas, estimuladas pela luz incidente sobre essas partículas.

Ele acreditava na hipótese do éter estacionário. No entanto, essa hipótese estava em conflito com o resultado ‘negativo’ da experiência de Michelson, e em um artigo escrito mais tarde em 1892, Lorentz fez uma sugestão [que também tinha sido proposta independentemente por George Francis Fitzgerald (1857-1901)] de que os braços do interferômetro contraíam-se na direção do movimento da Terra através do éter. Ele interpretou esse efeito de contração supondo que as forças moleculares que determinavam as dimensões dos corpos eram propagadas através do éter do mesmo modo que as forças elétricas. O efeito de contração e outras ações compensatórias eliminavam os efeitos esperados se o éter não fosse arrastado pelo movimento da Terra através dele, então explicando o resultado ‘negativo’ da experiência de Michelson.

Apesar da ênfase de Lorentz dada à fundamentação dinâmica de sua eletrodinâmica, sua teoria não apresentava uma conexão mecânica entre o éter e a matéria ordinária. As forças entre o

¹ Lorentz referia-se às partículas constituintes da matéria com o nome de *partículas carregadas* em 1892, *íons* em 1895 e *elétrons* somente após 1899.

éter e as partículas materiais eram de natureza elétrica e sua teoria implicava em uma visão de mundo eletromagnética ao invés de mecânica. Seu trabalho mais importante, *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern (Investigação acerca de uma teoria dos fenômenos ópticos e elétricos em corpos em movimento)*, de 1895, renunciou o apelo a princípios mecânicos para deduzir as equações básicas de uma teoria. Seguindo um método similar a Hertz, Lorentz estabeleceu as equações do campo eletromagnético e a equação conectando o campo aos elétrons como postulados fundamentais do eletromagnetismo. Diferentemente de Hertz, que se manteve comprometido com a teoria do éter mecânico, Lorentz abandonou a estrutura dos princípios dinâmicos em favor de uma explícita teoria eletromagnética da natureza, na qual a eletrodinâmica e não a mecânica era considerada como geradora dos fundamentos conceituais da física.

Por volta de 1900, a teoria de Lorentz exerceu uma profunda influência sobre o desenvolvimento da física teórica. Muitos físicos argumentavam que a eletrodinâmica e não a mecânica poderiam fornecer uma unificada fundamentação conceitual para a física. O conceito do éter, desprovido de qualquer propriedade mecânica, parecia a muitos físicos fornecer a base para toda teoria física. Ao reformular a teoria do campo eletromagnético, Lorentz introduziu a maior divergência em relação ao programa da explicação mecânica.

5.5 O Éter e a Teoria da Relatividade de Einstein

Na virada do século XIX para o século XX, Einstein estava nitidamente preocupado com o problema do movimento da matéria através do éter. Em uma carta enviada para sua noiva Mileva Marić (1875-1948) em agosto de 1899, ele escreveu:

Eu estou cada vez mais convencido de que a eletrodinâmica dos corpos em movimento, como geralmente é apresentada, não está correta, e que deveria ser possível apresentá-la de uma forma mais simples. A introdução do termo “éter” nas teorias de eletricidade leva à noção de um meio cujo movimento se pode falar, creio eu, sem sermos capazes de associá-lo a qualquer significado físico (Stachel, 1987, p. 45).

Pode-se ver que Einstein mostrava-se cético quanto ao conceito de um éter móvel, que era fundamental para a teoria eletromagnética desenvolvida por Hertz. No entanto, sua crença na existência de um éter em repouso, pode ser encontrada no seguinte relato²:

² Trata-se de uma conferência dirigida a estudantes da Universidade de Kyoto proferida em 14 de dezembro de 1922. O discurso foi pronunciado em alemão por Einstein, ao mesmo tempo que uma tradução simultânea era realizada pelo físico japonês Jun Ishiwara, que havia estudado com Arnold Sommerfeld (1868-1951) e o próprio Einstein de 1912 a 1914. Ishiwara tomou notas cuidadosas da palestra e as publicou em japonês no periódico mensal *Kaizo* no

Faz mais de dezessete anos que eu tive uma idéia para desenvolver a teoria da relatividade pela primeira vez. Embora eu não saiba exatamente de onde aqueles pensamentos vieram, eu estou certo de que ele estava contido no problema das propriedades ópticas dos corpos em movimento. A luz se propaga através do mar de éter, no qual a Terra está se movendo. Em outras palavras, o éter está se movendo em relação à Terra. Eu tentei encontrar claras evidências experimentais para o fluxo de éter na literatura da física, mas em vão.

Então eu mesmo quis verificar o fluxo do éter com respeito à Terra, em outras palavras, o movimento da Terra. Quando eu pensei pela primeira vez neste problema, eu não duvidava da existência do éter ou do movimento da Terra através dele. Eu pensei no seguinte experimento que utilizava dois termopares. Fixando espelhos tal que a luz proveniente de uma fonte seja refletida em duas direções diferentes, uma paralela ao movimento da Terra e a outra antiparalela e assumindo que existe uma diferença de energia entre os dois raios refletidos, nós podemos medir essa diferença de calor gerado usando os dois termopares. Embora a idéia deste experimento seja muito similar àquela de Michelson, eu não realizei este experimento³.

Enquanto eu estava pensando neste problema em meus anos de estudante, eu fiquei sabendo do estranho resultado do experimento de Michelson. Logo eu cheguei à conclusão de que nossa idéia sobre o movimento da Terra em relação ao éter estava incorreta, se admitíssemos o resultado nulo de Michelson como um fato. Este foi o primeiro caminho que me levou à teoria da relatividade especial. Desde então, eu acredito que o movimento da Terra não pode ser detectado por qualquer experimento óptico, embora a Terra esteja se movimentando ao redor do Sol (Einstein, *How I created the theory of relativity*, 1922).

A teoria de Lorentz era baseada no conceito de um éter estacionário, que permeava completamente a matéria ordinária, de modo que os corpos que se movimentavam através dele não sofriam qualquer tipo de resistência em seus movimentos e nem o arrastavam junto com eles.

As duas entidades físicas que apareciam na teoria de Lorentz eram o éter contínuo e os elétrons discretos. As propriedades do éter eram descritas precisamente pelas equações diferenciais parciais do campo eletromagnético de Maxwell e o movimento dos elétrons pelas equações diferenciais ordinárias da mecânica newtoniana. As duas entidades juntas constituíam o dualismo característico da teoria de Lorentz.

ano seguinte, sem, no entanto, tomar o cuidado de enviar uma cópia de seu artigo para a aprovação de Einstein antes de sua publicação (Miller, 1987, p. 10)

³ É curioso notar que em 1854 Fizeau já tinha proposto um experimento sobre uma possível diferença de energia existente entre raios de luz movendo-se em sentidos opostos, e que foi realmente realizado em 1902 por Nordmeyer (Stachel, 1987, p. 46).

Einstein considerou a diferença de tratamento dos conceitos do eletromagnetismo e da mecânica das partículas como a principal dificuldade a ser enfrentada por aqueles que procuram por uma teoria unificada da física. Assim, ele não aderiu ao programa eletromagnético, que predominava na época, mas desenvolveu novas estratégias para tentar unificar as duas visões de mundo (Balazs, 1981, p. 319). Einstein reconheceu que tanto o eletromagnetismo como a mecânica tinham que ser reformulados e para isso, introduziu o conceito mecânico de corpúsculo em seu estudo sobre o quantum de luz e eliminou completamente o conceito de éter, alegando que ele era desnecessário dentro de uma teoria eletromagnética consistente, além de constituir um sistema de referência especial, caracterizando a existência do repouso absoluto, caso fosse levado em consideração.

Em seu primeiro artigo sobre relatividade, publicado na revista *Annalen der Physik* em junho de 1905, com o título, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper (Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento)*, Einstein procurou estabelecer uma teoria simples e consistente sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento baseada na teoria de Maxwell para os corpos estacionários.

Como é sabido, a Eletrodinâmica de Maxwell – tal como atualmente se concebe – conduz, na sua aplicação a corpos em movimento, a assimetrias que não parecem ser inerentes aos fenômenos. Consideremos, por exemplo, as ações eletrodinâmicas entre um ímã e um condutor. O fenômeno observável depende aqui unicamente do movimento relativo do condutor e do ímã, ao passo que, segundo a concepção habitual, são nitidamente distintos os casos em que o móvel é um, ou o outro, destes corpos. Assim, se for móvel o ímã e estiver em repouso o condutor, estabelecer-se-á em volta do ímã um campo elétrico com um determinado conteúdo energético, que dará origem a uma corrente elétrica nas regiões onde estiverem colocadas porções do condutor. Mas se é o ímã que está em repouso e o condutor que está em movimento, então, embora não se estabeleça em volta do ímã nenhum campo elétrico, há no entanto uma força eletromotriz que não corresponde a nenhuma energia, mas que dá lugar a correntes elétricas de grandeza e comportamento iguais às que tinham no primeiro caso as produzidas por forças elétricas – desde que, nos dois casos considerados, haja identidade no movimento relativo.

Exemplos deste gênero, assim como o insucesso das experiências feitas para constatar um movimento da Terra em relação ao meio luminífero (“Lichtmedium”) levam à suposição de que, tal como na Mecânica, também na Eletrodinâmica, os fenômenos não apresentam nenhuma particularidade que possa fazer-se corresponder à idéia de um repouso absoluto. Pelo contrário, em todos os sistemas de coordenadas em que são válidas as equações da mecânica, também são igualmente válidas leis ópticas e

eletrodinâmicas da mesma forma – o que, até à primeira ordem de aproximação, já está demonstrado. Vamos erguer à categoria de postulado esta nossa suposição (a cujo conteúdo chamaremos daqui em diante “Princípio da Relatividade”); e, além disso, vamos introduzir o postulado – só aparentemente incompatível com o primeiro – de que a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada, independente do estado do movimento da fonte luminosa. Estes dois postulados são suficientes para chegar a uma eletrodinâmica de corpos em movimento, simples e livre de contradições, baseada na teoria de Maxwell para os corpos em repouso. A introdução de um “éter luminífero” revelar-se-á supérflua, visto que na teoria que vamos desenvolver não necessitaremos de introduzir um “espaço em repouso absoluto”, nem de atribuir um vetor velocidade a qualquer ponto do espaço vazio em que tenha lugar um processo eletromagnético (Einstein, *Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*, p. 48).

Assim, podemos ver que Einstein apresenta duas fortes razões para justificar a formulação de sua nova teoria: em primeiro lugar, a *existência de assimetrias na teoria que não parecem ser inerentes aos fenômenos*, e em segundo lugar, a *falta de evidência experimental de uma corrente de éter*.

Essa aparente assimetria, no entanto, só aparece na formulação de Lorentz para a eletrodinâmica de Maxwell. De acordo com o físico holandês, quando um ímã está em movimento em relação ao éter, ele produz nesse éter não apenas um campo magnético, mas também um campo elétrico circular à sua volta, que por sua vez, induz uma corrente elétrica no circuito que se encontra em repouso em relação ao éter. Quando o ímã está em repouso, ele gera apenas um campo magnético e não mais um campo elétrico, de modo que quando o circuito se mover com uma certa velocidade, as cargas constituintes do circuito ficarão submetidas a uma força magnética conhecida por força de Lorentz, que será a responsável pelo aparecimento da corrente elétrica induzida. Se a velocidade do ímã for de mesma intensidade e sentido oposto à velocidade do circuito, ambas em relação ao éter, então a corrente induzida será a mesma nos dois casos. Mas, de acordo com a teoria de Lorentz, a origem desta corrente será diferente para os dois casos. Na primeira situação, ela é devida à ação de um campo elétrico, enquanto que no segundo caso, ela é devida à ação de uma força magnética.

Vale lembrar, no entanto, que tanto Faraday como Maxwell não viam assimetrias no fenômeno da indução eletromagnética, citada logo no início do artigo de Einstein. Faraday, o descobridor do fenômeno em 1831, percebeu que podia induzir uma corrente elétrica num circuito secundário se ele variasse a corrente no circuito primário, mas que enquanto a corrente no circuito primário permanecesse constante, nenhuma indução podia ser produzida:

Quando o contato era feito, surgia um repentino e ligeiro efeito no galvanômetro, e também surgia um ligeiro efeito similar quando o contato com a bateria era interrompido. Mas enquanto a corrente voltaica estava continuamente passando através de uma das hélices, nenhum efeito galvanométrico nem qualquer efeito de indução sobre a outra hélice podia ser percebido, embora o poder ativo da bateria era comprovadamente grande (Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, sér. I, par. 10, p. 266).

Ele também descobriu que era possível induzir uma corrente no circuito secundário, mesmo havendo uma corrente constante no circuito primário, desde que ele movesse um ou outro em relação ao laboratório, de tal forma a estabelecer um movimento relativo entre ambos:

[...] Um desses fios era conectado ao galvanômetro e o outro com a bateria voltaica. O primeiro fio era então movido em direção ao segundo, e enquanto ele se aproximava, a agulha era defletida. Sendo então afastado, a agulha era defletida para o sentido oposto. [...] quando os fios deixavam de se aproximar ou de se afastar, a agulha do galvanômetro voltava à sua posição usual (Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, sér. I, par. 18, p. 267).

Ele também podia induzir uma corrente no circuito secundário aproximando ou afastando um ímã permanente, ou mantendo o ímã em repouso em relação à Terra e movendo o circuito secundário (Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, sér. I, par. 39-43, pp. 270-1 e par. 50-4, pp. 271-2). De acordo com Faraday, a explicação do fenômeno da indução eletromagnética era baseada na existência real de linhas de força magnéticas e no circuito elétrico cortando estas linhas. Faraday nunca duvidou do fato de estas linhas de força compartilharem totalmente do movimento translacional do ímã. Ou seja, para ele, se movemos um ímã (ou um fio com corrente) com uma velocidade linear constante em relação ao laboratório, as linhas de força do campo magnético também irão se mover com esta mesma velocidade constante em relação ao laboratório, acompanhando o movimento do ímã.

Maxwell tinha os mesmos pontos de vista de Faraday e também não via qualquer assimetria no fenômeno da indução eletromagnética. Para ele:

O conjunto destes fenômenos pode ser resumido em uma lei. Quando o número das linhas de indução magnética que atravessam um circuito secundário na direção positiva é alterado, uma força eletromotriz age ao redor do circuito, a qual é medida pela taxa de diminuição da indução magnética através do circuito (Maxwell, *A Treatise on Electricity & Magnetism*, v. 2, §531, p. 179)

Maxwell afirmou claramente que estas linhas de força de indução magnética movem-se quando o ímã está em movimento em relação ao laboratório:

A concepção que Faraday tinha da continuidade das linhas de força exclui a possibilidade de elas começarem a existir repentinamente num lugar onde não havia nenhuma antes. Se, portanto, o número de linhas que atravessam um circuito condutor começa a variar, só pode ser devido ao movimento do circuito através das linhas de força, ou, senão, pelas linhas de força movendo-se através do circuito. Em qualquer caso, uma corrente é gerada no circuito (Maxwell, *A Treatise on Electricity & Magnetism*, v. 2, §541, p. 189)

Quer dizer, de acordo com Maxwell, a explicação para o aparecimento da corrente elétrica induzida no circuito secundário é sempre a mesma: o movimento relativo entre este circuito secundário e as linhas de força do campo magnético geradas pelo ímã ou pelo circuito primário com corrente.

Com relação ao segundo ponto levantado por Einstein, ou seja, a falta de evidência experimental de uma corrente de éter, pode-se dizer que a teoria da relatividade especial representa o abandono da utilização de descrições mecânicas para interpretar os fenômenos eletromagnéticos e também o abandono de um sistema privilegiado de coordenadas em repouso absoluto ligado ao éter, o que acabou gerando um descontentamento entre os cientistas que continuavam acreditando na necessidade de um meio no qual as ondas eletromagnéticas pudessem se propagar.

Deve-se notar que, como para Lorentz as velocidades tanto do ímã como dos circuitos primário e secundário eram todas medidas em relação ao éter, ao tornar o éter desnecessário, Einstein tem de introduzir velocidades em relação a um determinado referencial e com isso, passa a introduzir grandezas físicas que dependem do observador.

Em 1938, na obra *A evolução da Física*, de autoria de Einstein e Leopold Infeld (1898-1968), aparece a seguinte recomendação para o abandono do éter:

Duas suposições foram experimentadas. A primeira, que os corpos em movimento conduzem consigo o éter. O fato de a velocidade da luz não depender do movimento da origem contradiz esta suposição. A segunda, que existe um sistema coordenado distinto e que os corpos em movimento não levam consigo o éter, mas caminham nele como num mar calmo. Mas, se é assim, então o princípio da relatividade de Galileu não é válido, e a velocidade da luz não pode ser a mesma em cada sistema coordenado. Novamente temos a experiência a contrariar a suposição.

Outras teorias ainda mais artificiais foram propostas, como a de que o éter só é conduzido parcialmente. Mas falharam. Todas tentaram explicar o fenômeno eletromagnético num sistema coordenado com o auxílio do movimento do éter, ou com o movimento através do éter, ou com ambos, e todas falharam.

E temos aqui uma das mais dramáticas situações reveladas pela história da ciência. Todas as suposições relativas ao éter não conduziam a nada! A experiência vetou-as todas! Olhando para trás vemos que o éter, logo depois de nascido, se tornou o “*enfant terrible*” do clã das substâncias físicas. Primeiramente, a construção de uma imagem mecânica do éter revelou-se impossível, sendo abandonada. Isto foi em grande parte a causa do desmoronamento da teoria mecanicista. Depois, tivemos de abandonar a esperança de que através ou por meio da presença do oceano-éter um sistema coordenado pudesse permanecer à parte e permitir a admissão do movimento absoluto, não apenas do relativo. Isto teria sido o único meio de o éter justificar a sua existência. Até este momento todas as nossas tentativas para tornar o éter uma realidade falharam. O éter não revelou a sua estrutura mecânica, nem revelou movimento absoluto. Nada ficou de todas as propriedades do éter, salvo aquela para qual fora inventado: a capacidade de transmitir as ondas eletromagnéticas. As nossas tentativas para descobrir as suas propriedades levaram-nos a dificuldades e contradições. Depois desta odisséia, claro que chegou o momento de esquecermos o éter, e de nem sequer lhe pronunciarmos mais o nome. Devemos dizer: o espaço tem a propriedade de transmitir ondas – evitando deste modo a enunciação de uma palavra morta (Einstein & Infeld, *A Evolução da Física*, p. 134-5).

Embora Einstein e Infeld afirmam que “todas as teorias que tentaram explicar o fenômeno eletromagnético num sistema coordenado com o auxílio do movimento do éter, ou com o movimento através do éter falharam”, a teoria eletromagnética de Lorentz parece mostrar o contrário, já que na sua versão definitiva, ela se apresenta de forma coerente e consistente com os dados experimentais, como por exemplo, o fato de a velocidade da luz apresentar sempre a mesma velocidade em todos os referenciais inerciais (Villani, 1981b, p. 65).

Apesar de algumas diferenças conceituais, do ponto de vista das medidas e dos efeitos observáveis, a Teoria dos Estados Correspondentes de Lorentz é equivalente à Relatividade Especial de Einstein. Portanto, logo após 1905, parece razoável que Lorentz tenha continuado em seu programa de pesquisa, apesar da Relatividade, pois abraçar esta teoria significaria abandonar vários pressupostos metafísicos, em particular a ação entre partículas através do éter. Pressupostos com os quais tinha conseguido até então incorporar todos os dados experimentais num conjunto coerente, apesar das muitas dificuldades (Villani, 1981b, p. 70)

É curioso notar, entretanto, que o próprio Einstein voltou a defender a existência de um éter em 1920, após desenvolver sua teoria da relatividade geral:

[...] Uma reflexão mais cuidadosa nos ensina, no entanto, que a teoria especial da relatividade não nos leva a negar o éter. Nós podemos assumir sua existência; somente devemos abandonar a idéia de atribuir um estado de movimento definido a ele, isto é,

nós devemos, por abstração, retirar dele as últimas características mecânicas que Lorentz ainda deixou.

[...] Existe um forte argumento a ser mencionado em favor da hipótese do éter. Negá-lo é assumir que o espaço vazio não possui qualidades físicas. Os fatos fundamentais da mecânica não se harmonizam com esta visão.

[...] O que é fundamentalmente novo no éter da Teoria da Relatividade Geral, em contraposição ao éter de Lorentz, consiste no fato de o estado do primeiro estar determinado em todo lugar por conexões com a matéria e o estado do éter nos lugares circunvizinhos, e ser tratável por leis na forma de equações diferenciais, enquanto o estado do éter lorentziano na ausência de campos eletromagnéticos não é condicionado por nada fora dele mesmo, e é o mesmo em todo lugar. O éter da Teoria da Relatividade Geral converte-se conceitualmente no éter de Lorentz se substituirmos constantes por funções de espaço que descrevem o primeiro, desconsiderando as causas que condicionam seu estado. Portanto, nós podemos dizer, eu penso, que o éter da Teoria da Relatividade Geral resulta do éter lorentziano por meio de uma relativização.

[...] Nós podemos dizer que de acordo com a Teoria da Relatividade Geral, o espaço é dotado de qualidades físicas; neste sentido, portanto, existe um éter. De acordo com a Teoria da Relatividade Geral, o espaço sem éter é impensável; pois em tal espaço não só não existiria a propagação da luz, mas também nenhuma possibilidade de existência de padrões de espaço e tempo (régua e relógios de medida), nem portanto quaisquer intervalos de espaço-tempo no sentido físico. Mas este éter não pode ser pensado como sendo dotado de qualidades características dos meios ponderáveis, como consistindo de partes que podem deixar traços através do tempo. A idéia de movimento não pode ser aplicada a ele (Einstein, *Ether and the Theory of Relativity*).

A resistência dos físicos em abandonar a idéia de um éter no século XX pode ser ilustrada pelo seguinte relato de Michelson, em 1927:

A existência de um éter surge como sendo incompatível com a teoria [...]. Mas, sem um meio, como se pode explicar a propagação das ondas? [...] Como explicar a constância de propagação, a suposição fundamental (pelo menos na teoria restrita), se não existe um meio? (*apud* Pais, “*Sutil é o Senhor...*”, p. 130).

Um segundo exemplo pode ser encontrado numa pequena carta enviada à revista *Nature* em 1951, por Dirac:

Foi visto que a existência de um éter não poderia se ajustar à relatividade, e como ela ficou bem estabelecida, o éter foi abandonado.

O conhecimento físico avançou muito desde 1905, notavelmente devido à chegada da mecânica quântica, e a situação mudou novamente. Se examinarmos a questão do ponto de vista do conhecimento atual, veremos que o éter não mais é

excluído pela relatividade, e boas razões podem agora avançarem para postularmos um éter (Dirac, 1951, p. 906).

Portanto, podemos dizer que a idéia de que o éter foi abandonado no século XX a partir do surgimento da Teoria da Relatividade Especial, não é verdadeira.

Com o passar do tempo, no entanto, sérias dificuldades de aprendizagem surgiram quando os conceitos associados à teoria eletromagnética, desenvolvida levando-se em conta o éter como mediador da interação física, passaram a ser transmitidos para estudantes de todos os níveis, sem considerar a riquíssima história desse conceito.

Em seguida, faremos algumas sugestões para a abordagem desse assunto, levando-se em conta o estudo histórico que foi realizado nesta pesquisa.

CONCLUSÃO – Sugestões para o Estudo do Conceito de Interação Física no Ensino Médio Baseado em seu Estudo Histórico

Após o estudo de várias concepções de interação física, desde as propostas por Gilbert no início do século XVII até as de Einstein, apresentadas trezentos anos mais tarde, é possível classificá-las basicamente em dois grupos: as interações baseadas na idéia de ação a distância e aquelas baseadas na idéia de transmissão da interação através de um meio existente entre os corpos.

A primeira maneira de entender os fenômenos da natureza foi adotada por seguidores de Newton e influenciou fortemente o desenvolvimento das idéias surgidas no século XVIII, atingindo seu apogeu com as pesquisas de Ampère e Weber no século XIX. A idéia de linhas de força como transmissoras da interação física desenvolveu-se no início do século XIX com Faraday e foi traduzida em linguagem matemática por Maxwell.

A visão de mundo baseada na ação a distância começou a enfraquecer inicialmente após as críticas lançadas por Helmholtz à teoria eletromagnética de Weber, e mais fortemente após Hertz ter detectado as ondas eletromagnéticas, fato que fortaleceu a credibilidade da comunidade científica na veracidade da teoria maxwelliana.

Acreditamos que seja muito útil para uma melhor compreensão dos fenômenos naturais comparar as duas principais maneiras de interpretar as interações físicas. Desta forma, acreditamos que se o processo de construção da ciência, com seus vários caminhos e percalços, for levado ao conhecimento das pessoas envolvidas na relação ensino-aprendizagem, os erros primários que aparecem nos livros didáticos a respeito desse assunto possam ser evitados.

Como já vimos ao final do capítulo 4, o próprio Maxwell já defendia o confronto de idéias em seu livro de 1873, ao afirmar que “de um ponto de vista filosófico, é extremamente importante que os dois métodos sejam comparados, ambos os quais tiveram sucesso na explicação dos principais fenômenos eletromagnéticos” (Maxwell, *A Treatise on Electricity & Magnetism*, v. 1, Preface, p. x).

Pesquisadores da área da Psicologia da Educação mostram que quando idéias antagônicas são contrastadas, seu aprendizado torna-se mais eficaz (Keller e Schoenfeld, 1971; Ausubel e col., 1980; Dorin, 1981, 1983). Eles afirmam que a aprendizagem de conceitos pode ser alcançada através da apresentação de séries de exemplos e não-exemplos, dispostos de forma a maximizar a atuação dos processos de generalização e discriminação. A comparação entre o exemplo e seu correspondente não-exemplo procura destacar o aspecto crucial em que eles diferem, facilitando a discriminação entre eles. Por outro lado, a comparação entre os vários exemplos, deve ajudar no processo de generalização. Por meio de

tal procedimento, acredita-se que o ensino de determinado conceito seja eficaz, mantendo-se bastante resistente ao esquecimento.

De acordo com pesquisas nessa área, os estudantes inicialmente aprendem determinados conceitos através do contato repetido com exemplos e não-exemplos, e gradualmente, vão abstraindo as propriedades definidoras ou os atributos relevantes do conceito. À medida que eles amadurecem, a maneira de operarem cognitivamente muda e a partir dos seis ou sete anos, eles já passam a aprender novos conceitos sem a necessidade de descobrir por si mesmos os atributos relevantes. Ao invés disso, estes lhes são apresentados, geralmente, através de uma afirmação verbal, de modo que agora, a aprendizagem significativa fica dependente dos pré-requisitos ou de conceitos mais gerais existentes em suas estruturas cognitivas (Ausubel e col., 1980).

O filósofo da ciência Gaston Bachelard (1884-1962) nos apresenta uma espécie de *lei dos três estados*, pelos quais necessariamente o espírito científico passou em sua formação individual:

1^o) O *estado concreto*, em que o espírito se entretém com as primeiras imagens do fenômeno e se apóia numa literatura filosófica que exalta a Natureza, louvando curiosamente ao mesmo tempo a unidade do mundo e sua rica diversidade.

2^o) O *estado concreto-abstrato*, em que o espírito acrescenta à experiência física esquemas geométricos e se apóia numa filosofia da simplicidade. O espírito ainda está numa situação paradoxal: sente-se tanto mais seguro de sua abstração, quanto mais claramente essa abstração for representada por uma intuição sensível.

3^o) O *estado abstrato*, em que o espírito adota informações voluntariamente subtraídas à intuição do espaço real, voluntariamente desligadas da experiência imediata e até em polêmica declarada com a realidade primeira, sempre impura, sempre informe (Bachelard, *A Formação do Espírito Científico*, pp. 11-2).

No entanto, o ensino de ciências que se pratica nos dias atuais e que se reflete nos livros didáticos não passa pelos dois primeiros estados bachelardianos, partindo diretamente do terceiro estado, em que conceitos são apresentados “desligados da experiência imediata e até em polêmica declarada com a realidade primeira”, deixando os alunos perplexos diante do professor.

Assim, acreditamos que, do mesmo modo que a humanidade teve de passar por estes três estados de amadurecimento do espírito científico, o estudante também deva passar por eles durante sua formação escolar, para que os conceitos a serem adquiridos sejam efetivamente assimilados. E uma maneira de facilitar a realização desta tarefa é utilizando a história e a filosofia da ciência no ensino.

Acreditamos ser de grande importância confrontar a idéia de um mundo cheio de matéria de Descartes com a visão newtoniana de partículas se movimentando pelo espaço vazio, o que permite realçar tanto uma visão quanto a outra.

Para mostrar como os pensadores do século XVIII procuravam explicar os fenômenos elétricos que estavam sendo estudados, podemos apresentar aos nossos alunos tanto as teorias baseadas na idéia da existência de um único fluido elétrico como as baseadas na existência de dois fluidos, procurando mostrar como elas conseguiam dar conta de explicar os fenômenos existentes na época, ressaltando, se possível, suas limitações e a controvérsia existente entre os defensores de cada teoria.

Com relação à descoberta do eletromagnetismo, se chamarmos a atenção para a quebra de simetria existente neste fenômeno e de que maneira ele foi interpretado por Oersted, Ampère, Biot e Faraday, acreditamos que seu aprendizado será mais eficaz e capaz de despertar a curiosidade em nossos alunos. O estudo histórico dos conceitos da Física permite ao professor compreender melhor o assunto para abordá-lo com o devido cuidado e contribui para o entendimento das dúvidas apresentadas por seus estudantes durante o processo de aprendizagem, de modo que ele passe a respeitá-los em suas dificuldades.

Também defendemos o resgate do ensino da força entre elementos de corrente de Ampère, e sua respectiva visão sobre magnetismo como sendo constituído por microcorrentes circulares, para que seja colocada em contraposição tanto às próprias idéias sobre os dois turbilhões ao redor do fio imaginados por Oersted como às linhas de força do campo magnético concebidas por Faraday.

Também podemos discutir com nossos alunos como as teorias de campo e do éter desenvolvidas pelos físicos britânicos no século XIX constituíram-se em uma radical divergência da forma como a teoria sobre a eletricidade era conduzida por Coulomb e Laplace, que postulavam uma teoria matemática das forças elétricas análogas à lei de força central da gravitação; como a utilização de um éter mediador ou campo para explicar os fenômenos eletromagnéticos e um sofisticado tratamento de modelos matemáticos e mecânicos do éter por parte dos físicos britânicos, transformaram os pressupostos teóricos da ciência da eletricidade; como a maneira diversa com que tanto a teoria eletrodinâmica de Weber como a teoria eletromagnética de Maxwell prevêm a propagação das ondas eletromagnéticas com a velocidade da luz.

O campo eletromagnético não era algo abstrato como é considerado hoje em dia, mas sim alterações mecânicas de um éter real e que, portanto, poderia ser possível determinar qual o verdadeiro caráter mecânico das grandezas eletromagnéticas. Com o surgimento da Teoria da Relatividade e conseqüente abandono de modelos baseados em um éter mecânico, essas

discussões tornaram-se sem sentido e foram abandonadas juntamente com as discussões sobre as propriedades do éter

Enfim, vários elementos devem ser fornecidas aos novos estudantes, pois a eles deve ser dada a incumbência de decidirem por um ou outro caminho. Os erros também devem ser valorizados. Na perspectiva de Gaston Bachelard, por exemplo, é o erro que conduz ao conhecimento. Não há conhecimento seguro, “o erro aguarda o seu momento na segurança que nunca foi atacada” (Bachelard, *Essais sur la connaissance approchée*, p. 249; *apud* Barbosa, 1985, p. 110). O erro é o propulsor do conhecimento. Para Bachelard, as certezas se constituem em “obstáculos epistemológicos”, elas impedem o progresso do conhecimento. É rompendo com o estabelecido que se pode ver o novo. É contrariando a lei, procurando nela o “por que não” que se pode inovar na ciência. Não existem verdades imutáveis, é preciso contrariar as verdades que permanecem.

Não só é salutar que teorias divergentes sejam comparadas, mas que, num primeiro momento, seja dado um crédito às concepções espontâneas dos alunos, evitando responder-lhes da seguinte forma: isso que você está pensando, a história já provou que estava errado.

O ensino que oferecemos hoje em nossas escolas, passa uma imagem de ciência acabada, uma idéia de que a verdade já foi descoberta. De uma perspectiva bachelardiana, poderíamos dizer que:

A preocupação da ciência não é mais a de descrever o mundo, mas a de construí-lo. O pensamento científico não pode ser contemplativo, ele é uma força que atua sobre o objeto, modificando-o; logo, a razão não permanece imutável, ela também se modifica em contato com a realidade, há aqui uma relação dialética. A função da razão é a de provocar crises. Não estamos mais diante de uma razão constituinte, trata-se de promover uma razão polêmica, que reformule a experiência primeira, que esqueça a simplicidade, que rompa com os conhecimentos já adquiridos e instaure a novidade (Barbosa, 1985).

Nós devemos ter em mente que o valor científico ou o valor da produção científica dos esforços feitos para responder antigas questões não é para ser medido da perspectiva que elas nos oferecem para a obtenção de uma solução final, mas pelos seus efeitos em estimular os homens em busca de uma investigação completa da natureza.

Propor uma questão científica pressupõe conhecimento científico, e as questões que exercitam as mentes dos homens no presente estado da ciência pode muito provavelmente ser tal que um pouco mais de conhecimento nos mostre que nenhuma resposta é possível. O valor científico da questão sobre como os corpos agem uns sobre os outros a distância encontra-se no estímulo que ela tem dado às investigações sobre as propriedades do meio intermediário (Maxwell, *Scientific Papers II, Attraction*, p. 486-7).

Também concordamos com Feyerabend, quando ele diz:

A idéia de que a ciência pode e deve ser elaborada com obediência a regras fixas e universais é, a um tempo, quimérica e perniciosa. É *quimérica* pois implica visão demasiado simplista das capacidades do homem e das circunstâncias que lhes estimulam ou provocam o desenvolvimento. E é *perniciosa* porque a tentativa de emprestar vigência às regras conduz a acentuar nossas qualificações profissionais em detrimento de nossa humanidade. Além disso, a idéia é prejudicial à ciência, pois leva a ignorar as complexas condições físicas e históricas que exercem influência sobre a evolução científica. Torna a ciência menos plástica e mais dogmática. (Feyerabend, *Contra o Método*, p. 449)

Pesquisas recentes mostram que a história e a filosofia da ciência, indo muito além da mera ilustração ou motivação para o estudo, podem contribuir significativamente para a construção conceitual e cultural da Física a ser trabalhada no Ensino Médio (Zanetic, 1989; Dion, 1997). O estudo histórico e o enfoque da compreensão de conceitos a partir da problematização de sua origem caracterizam uma perspectiva de formação de professores com visão crítica sobre o conhecimento científico.

Finalizando, gostaríamos de dizer que teorias do passado não devem ser apresentadas apenas como curiosidade histórica. A esse respeito, o historiador da ciência Alistair Cameron Crombie (1915-1996) nos alerta dizendo:

Um sistema obsoleto de pensamento científico, que pode parecer muito estranho a nós olhando para trás a partir do século XX, torna-se inteligível quando entendemos as questões a que ele foi designado para responder. As questões fazem sentido às respostas, e um sistema tem dado lugar a outro, não porque simplesmente novos fatos foram descobertos que falsearam o velho sistema, mas mais significativamente porque por alguma razão, algumas vezes o resultado de novas observações, cientistas começaram a repensar suas posições, a fazer novas hipóteses, a formular novos questionamentos, a olhar para uma evidência há muito familiar de uma nova maneira (Crombie, *Augustine to Galileo*, p. xiii)

Nosso objetivo terá sido alcançado se conseguirmos passar ao leitor uma idéia da luta sem fim em que o espírito humano se empenha para compreender as leis que regem os fenômenos físicos.

BIBLIOGRAFIA

- ABRANTES, Paulo César Coelho.** A Metodologia de J. C. Maxwell e o Desenvolvimento da Teoria Eletromagnética. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **5** (número especial): 58-75, jun. 1988.
- AMPÈRE, André-Marie.** On the mathematical theory of electrodynamic phenomena, experimentally deduced. In: Tricker, R. A. R. *Early Electrodynamics – The First Law of Circulation*. Oxford: Pergamon Press, 1965. Pp. 155-200.
- ANJOS, Ivan Gonçalves dos; ARRUDA, Miguel Augusto de Toledo.** *Física na Escola Atual*. São Paulo: Atual, 1993. 3 vols. Volume 1: Mecânica.
- ASSIS, André Koch Torres.** Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) – Sua vida e sua obra. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência* **5**: 53-9, 1991.
- . *Eletrodinâmica de Weber - Teoria, Aplicações e Exercícios*. Editora da UNICAMP, Campinas, 1995.
- AUSUBEL, David Paul; NOVAK, Joseph D.; HANESIAN, Helen.** *Psicologia Educacional*. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980. [Título original: *Educational Psychology*, cuja 1ª edição é de 1968].
- BACHELARD, Gaston.** *A formação do espírito científico – contribuição para uma psicanálise do conhecimento*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. Título original: *La Formation de l'esprit scientifique – contribution à une psychanalyse de la connaissance*. 1ª edição: 1938. Tradução de Estela dos Santos Abreu.
- BALAZS, Nandor L.** Einstein, Albert. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. V. 4, pp. 312-33.
- BAR, V; ZINN, B.** Similar Frameworks of Action-at-a-Distance: Early Scientists' and Pupils' Ideas. *Science & Education* **7** (5): 471-91, September 1998.
- BARBOSA, Elyana.** *O Secreto do Mundo (Uma leitura de Gaston Bachelard)*. São Paulo, 1985. Dissertação (Doutoramento) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.
- BONJORNIO, José Roberto; BONJORNIO, Regina Azenha; BONJORNIO, Valter; RAMOS, Clinton Márcico.** *Temas da Física*. São Paulo: FTD, 1997. 3 vols. Volume 1: Mecânica.

- BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica.** *Parâmetros Curriculares Nacionais – Ensino Médio.* Brasília: Ministério da Educação, 1999.
- BROMBERG, Joan.** Maxwell's Displacement Current and his Theory of Light. *Archive for History of Exact Sciences* **4**: 218-34, 1967.
- BROWN, Theodore M.** Galvani, Luigi. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography.* 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. V. 5, pp. 267-9.
- BRUSH, Stephen G.** Should the History of Science be Rated X? *Science* **18**: 1164-72, 1974.
- BURTT, Edwin Arthur.** *As Bases Metafísicas da Ciência Moderna.* Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1991. Título original: *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science.* Tradução de José Viegas Filho e Orlando Araújo Henriques.
- CALÇADA, Caio Sérgio; SAMPAIO, José Luiz.** *Física Clássica.* São Paulo: Atual, 1998. 5 vols. Volume 2: Dinâmica – Estática.
- CANTOR, G. N.; HODGE, M. J. S. (eds.)** *Conceptions of ether: Studies in the history of ether theories - 1740-1900.* Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
- CARAÇA, Bento de Jesus.** *Conceitos Fundamentais da Matemática.* Lisboa: Sá da Costa, 1989.
- CHAUÍ, Marilena de Souza.** Leibniz – Vida e Obra. In: *Coleção Os Pensadores.* São Paulo: Abril Cultural, 1983. Pp. 93-102.
- CHIQUETTO, Marcos; VALENTIM, Bárbara; PAGLIARI, Estéfano.** *Aprendendo Física.* São Paulo: Scipione, 1996. 3 vols. Volume 1: Mecânica.
- COHEN, I. Bernard e WESTFALL, Richard S. (orgs.)**. *Newton: Textos, Antecedentes, Comentários.* Rio de Janeiro: Contraponto: EDUERJ, 2002. Tradução: Vera Ribeiro.
- CROMBIE, Alistair Cameron.** *Augustine to Galileo – The History of Science A.D. 400-1650.* Melbourne: William Heinemann, 1957. 1ª edição: 1952.
- DESCARTES, René.** *Princípios da Filosofia.* Lisboa: Edições 70, 1997. Título original: *Principiorum Philosophiae.* Tradução de João Gama.
- DION, Sonia Maria.** *O Diálogo com Documentos Originais da Ciência em Sala de Aula: Uma Proposta.* São Paulo, 1997. Dissertação (Doutoramento) – Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo.

DIRAC, Paul Adrien Maurice. Is there an aether? *Nature* **168**: 906-7, 1951.

DOBBS, Betty Jo Teeter. *The Foundations of Newton's Alchemy or "The Hunting of the Greene Lyon"*. Cambridge: Cambridge University Press, 1975.

DOCA, Ricardo Helou; BISCUOLA, Gualter José; BÔAS, Newton Villas. *Tópicos de Física I: Mecânica*. São Paulo: Saraiva, 2001. [18^a edição reformulada e ampliada].

DORIN, Lannoy. *Variações de um procedimento metodológico para o ensino de conceitos: um estudo comparativo*. São Paulo, 1981. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo.

———. *Psicologia na Escola*. São Paulo: Editora do Brasil, 1983.

EINSTEIN, Albert. Sobre a Electrodinâmica dos Corpos em Movimento. In: LORENTZ, H. A.; EINSTEIN, A.; MINKOWSKI, H.; SOMMERFELD, A.; WEYL, H. *O Princípio da Relatividade*. Coimbra: Fundação Calouste Gulbenkian, 1971. Textos Fundamentais da Física Moderna. Volume I. 4^a edição. Prefácio de Manuel dos Reis. Tradução de Mário José Saraiva.

———. How I created the theory of relativity. *Physics Today* **35**: 45-7, August 1982. Palestra proferida em 14 de dezembro de 1922, na Universidade de Kyoto. Traduzida por Yoshimasa A. Ono.

———. *Notas Autobiográficas*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982. Título original: *Autobiographical Notes – Library of Living Philosophers*. 1^a edição: 1949. Tradução de Aulyde Soares Rodrigues. [escrito em 1946]

———. *Ether and the Theory of Relativity*. Conferência proferida em 5 de maio de 1920, na Universidade de Leyden. Disponível em: <<http://www.cfpf.org.uk/articles/scientists/einstein.html>>. Acesso em: 02 de abril de 2004.

EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold. *A Evolução da Física – O desenvolvimento das idéias desde os primitivos conceitos até à Relatividade e aos Quanta*. Lisboa: Enciclopédia LBL. Título original: *The Evolution of Physics – The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta*, 1^a edição: 1938. Tradução de Monteiro Lobato.

EVANS, James. Gravity in the Century of Light - Sources, Construction and Reception of Le Sage's Theory of Gravitation. In: EDWARDS, Matthew R. (ed.). *Pushing Gravity: new perspectives on Le Sage's theory of gravitation*. Montreal: Apeiron 2002.

- EVERITT, C. W. F.** Maxwell, James Clerk. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. V. 9, pp. 198-230.
- FARADAY, Michael.** Experimental Researches in Electricity. In: HUTCHINS, Robert Maynard (ed.). *Great Books of the Western World* 45. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952. Pp. 257-866.
- FEYERABEND, Paul.** *Contra o Método*. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1977. Tradução de Octanny S. da Mota e Leonidas Hegenberg. Do original em inglês: *Against method*.
- GARCIA, R.; PIAGET, J.** *Psychogenesis and the History of Science*. New York: Columbia University Press, 1989.
- GILBERT, William.** On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth. In: HUTCHINS, Robert Maynard (ed.). *Great Books of the Western World* 28. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952. Pp. 1-121. Título original: *De Magnete Magneticisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure Physiologia Nova*. Tradução de P. Fleury Mottelay.
- GONÇALVES Filho, Aurelio; TOSCANO, Carlos.** *Física e Realidade*. São Paulo: Scipione, 1997. Volume 1: Mecânica.
- GOUGH, J. B.** LeSage, George-Louis. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981a. V. 8, pp. 259-60.
- . Fizeau, Armand-Hippolyte-Louis. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981b. V. 5, pp. 18-21.
- GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA – GREF.** *Física 1: Mecânica*. 6ª edição. São Paulo: EDUSP, 2000.
- HARMAN, Peter Michael.** *Energy, Force, and Matter - The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- HEILBRON, John L.** Aepinus, Franz Ulrich Theodosius. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981a. V. 1, pp. 66-8.
- . *Electricity in the 17th and 18th Centuries – A Study of Early Modern Physics*. New York: Dover, 1999. [1ª edição: 1979]

- HEIMANN, Peter M.** Maxwell and the Modes of Consistent Representation. *Archive for History of Exact Sciences* **6**: 171-213, 1969.
- HESSE, Mary B.** *Forces and Fields, The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. New York: Philosophical Library, 1962.
- KANT, Immanuel.** Primeiros Princípios Metafísicos da Ciência da Natureza. Lisboa: Edições 70, 1990. Título original: *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*. Tradução de Artur Morão.
- KELLER, F. S.; SCHOENFELD, W. N.** *Princípios da Psicologia*. São Paulo: E. P. U., 1971.
- KELLY, Suzanne.** Gilbert, William. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. V. 5, pp. 396-401.
- KUHN, Thomas S.** *A Estrutura das Revoluções Científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1994. Título original: *The Structure of Scientific Revolutions*, 1ª edição: 1962.
- LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm.** A Monadologia. In: *Coleção Os Pensadores*. São Paulo: Abril Cultural, 1983. Pp. 103-15. Tradução de Marilena de Souza Chauí.
- LEON, George deLucenay.** *The Story of Electricity*. New York: Dover, 1988.
- LUZ, Antônio Máximo Ribeiro da; ÁLVARES, Beatriz Alvarenga.** *Curso de Física*. São Paulo: Scipione, 2000. 3 vols. Volume 3. [5ª edição].
- MACH, Ernst.** *The Science of Mechanics - A Critical and Historical Account of Its Development*. Open Court, La Salle, 1960. 1ª edição: 1883.
- MAGIE, William Francis.** *A Source Book in Physics*. New York: McGraw-Hill, 1935.
- MARTINS, Roberto de Andrade.** Ørsted e a Descoberta do Eletromagnetismo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* **10**: 89-114, 1986.
- . Sobre o Papel da História da Ciência no Ensino. *Boletim da Sociedade Brasileira de História da Ciência* (9): 3-5, 1990.
- . *O Universo – Teorias sobre sua Origem e Evolução*. São Paulo: Moderna, 1994. Coleção Polêmica.

———. Descartes e a Impossibilidade de Ações a Distância. In: FUKS, Saul (org.). *Descartes – Um Legado Científico e Filosófico*. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 1997. Pp. 79-126.

———. *Oersted, Ritter and magnetochemistry* – comunicação – International Symposium on H. C. Oersted and the Romantic Legacy, Harvard University, Cambridge, MA, U.S.A., realizado nos dias 10-11 de maio de 2002.

MATTHEWS, Michael R. History, Philosophy, and Science Teaching: The Present Rapprochement. *Science and Education* **1** (1): 11-47, 1992.

———. *Science Teaching – The Role of History and Philosophy of Science*. New York: Routledge, 1994.

———. História, Filosofia e Ensino de Ciências: a Tendência Atual de Reaproximação. Caderno *Catarinense de Ensino de Física* **12** (3): 164-214, Dezembro 1995. [Artigo publicado originalmente em *Science and Education* **1** (1): 11-47, 1992]

MAXWELL, James Clerk. On Faraday's lines of force. In: NIVEN, W. D. (ed.). *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover, 1965. V. 1, pp. 155-229.

———. On physical lines of force. In: NIVEN, W. D. (ed.). *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover, 1965. V. 1, pp. 451-513.

———. A dynamical theory of the electromagnetic field. In: NIVEN, W. D. (ed.). *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover, 1965. V. 1, pp. 526-97.

———. On action at a distance. In: NIVEN, W. D. (ed.). *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover, 1965. V. 2, pp. 311-23.

———. Atom. In: NIVEN, W. D. (ed.). *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover, 1965. V. 2, pp. 445-484.

———. Attraction. In: NIVEN, W. D. (ed.). *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover, 1965. V. 2, pp. 485-91.

———. Ether. In: NIVEN, W. D. (ed.). *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover, 1965. V. 2, pp. 763-75.

———. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. New York: Dover, 1954.

McCORMMACH, Russell. Hertz, Heinrich Rudolf. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981a. V. 6, pp. 340-50.

- . Lorentz, Hendrik Antoon. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981b. V. 8, pp. 487-500.
- McGUIRE, J. E.; TAMNY, Martin.** *Certain Philosophical Questions: Newton's Trinity Notebook*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- McMULLIN, Ernan.** *Newton on Matter and Activity*. Notre Dame: University of Notre Dame Press, 1978.
- MERTENS, Joost.** Shocks and Sparks – The Voltaic Pile as a Demonstration Device. *Isis* **89** (2): 300-11, June 1998.
- MEYER, Herbert W.** *A History of Electricity and Magnetism*. Cambridge: MIT Press, 1971.
- MILLER, Arthur I.** Einstein and Michelson-Morley. *Physics Today* **40**: 10-3, May 1987.
- NEWTON, Isaac.** Mathematical Principles of Natural Philosophy. In: HUTCHINS, Robert Maynard (ed.). *Great Books of the Western World* **34**. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952. Pp. 1-372. Título original: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Tradução de Andrew Motte. Revisão de Florian Cajori.
- . Óptica [Livro III, Parte I, referente às Questões]. In: *Coleção Os Pensadores*. São Paulo: Abril Cultural, 1983. Pp. 23-57. Título original: *Optics*. Tradução de Pablo Rubén Mariconda.
- NUNES, Djalma [Paraná].** *Física*. São Paulo: Ática, 1995. 3 vols. Volume 1: Mecânica. [4ª edição]
- OLIVEIRA, Maurício Pietrocola de.** Fresnel e o Arrastamento Parcial do Éter: A Influência do Movimento da Terra sobre a Propagação da Luz. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **10** (2): 157-72, agosto/1993.
- ØRSTED, Hans Christian.** Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. Título original: *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*. Tradução e comentários de Roberto de Andrade Martins do artigo original de 1820. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* **10**: 115-22, 1986.
- PAIS, Abraham.** “Sutil é o Senhor...”: *A Ciência e a Vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995. Tradução de Fernando Parente e Viriato Esteves. Título original: “Subtle is the Lord...”: *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 1982.

- PIHL, Mogens.** Lorenz, Ludwig Valentin. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. V. 8, pp. 501-02.
- PRIESTLEY, Herbert.** Maxwell – from Models to Mathematics. *The Physics Teacher* **9** (9): 497-500, December 1971.
- RAMALHO Junior, Francisco; SANTOS, José Ivan Cardoso dos; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo.** *Os Fundamentos da Física*. São Paulo: Moderna, 1986. 3 vols. Volume 1: Mecânica. [4^a edição]
- RODRIGUES, Idely Garcia.** *Aspectos Epistemológicos da Mecânica de Newton: Novas Formas de Compreensão dos Conceitos*. São Paulo, 1988. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física e Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo.
- SNOW, Adolph Judah.** *Matter & Gravity in Newton's Physical Philosophy*. New York: Arno Press, 1975.
- STACHEL, John.** Einstein and ether drift experiments. *Physics Today* **40**: 45-7, May 1987.
- THAYER, H. S. (ed.).** *Newton's Philosophy of Nature – Selections from his Writings*. New York: Hafner, 1953.
- THOMAS, John Meurig.** Michael Faraday and the Royal Institution – The Genius of Man and Place. Bristol: Adam Hilger, 1991.
- TRICKER, R. A. R.** Ampère as a Contemporary Physicist. *Contemporary Physics* **3** (6): 453-68, August 1962.
- TURNER, Joseph.** Maxwell on the Logic of Dynamical Explanation. *Philosophy of Science* **23**: 36-47, 1956.
- TURNER, R. Steven.** Helmholtz, Hermann von. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. V. 6, pp. 241-53.
- VILLANI, Alberto.** O confronto Lorentz-Einstein e suas interpretações. II – A Teoria de Lorentz e sua consistência. *Revista de Ensino de Física* **3** (2): 55-76, 1981b.
- WESTFALL, Richard S.** *Never at Rest – A Biography of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

WHITTAKER, Edmund T. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Vol. 1: The Classical Theories. Vol. 2: The Modern Theories. New York: Tomash Publishers, American Institute of Physics, 1951.

WILLIAMS, Leslie Pearce. Ampère's Electrodynamical Molecular Model. *Contemporary Physics* **4**: 113-23, 1962.

———. Oersted, Hans Christian. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981a. V. 10, pp. 182-86.

———. Ampère, André-Marie. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981b. V. 1, pp. 139-47.

———. Faraday, Michael. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981c. V. 4, pp. 527-40.

———. What were Ampère's earliest discoveries in electrodynamics? *Isis* **74**: 492-508, 1983.

———. André-Marie Ampère. *Scientific American* **260** (1): 90-7, January 1989.

WISE, M. Norton. German concepts of force, energy, and the electromagnetic ether: 1845-1880. In: CANTOR, G. N.; HODGE, M. J. S. (eds.). *Conceptions of ether: Studies in the history of ether theories - 1740-1900*. Cambridge: Cambridge University Press, 1981, p. 269-307.

WOODRUFF, A. E. Action at a Distance in Nineteenth Century Electrodynamics. *Isis* **53**: 439-59, 1962.

———. The Contributions of Hermann von Helmholtz to Electrodynamics. *Isis* **59**: 300-11, 1968.

———. Weber, Wilhelm Eduard. In: GILLISPIE, Charles Coulston (ed.). *Dictionary of Scientific Biography*. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, 1981. V. 14, pp. 203-09.

YAMAMOTO, Kazuhito; FUKE, Luiz Felipe; SHIGEKIYO, Carlos Tadashi. *Os Alicerces da Física*. São Paulo: Saraiva, 1998. 3 vols. Volume 1: Mecânica, 12^a edição reformulada; Volume 3: Eletricidade, 11^a edição reformulada.

ZANETIC, João. *Física Também é Cultura*. São Paulo, 1989. Dissertação (Doutoramento) – Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo.