

Uma tradução comentada de um texto de Maxwell sobre a ação a distância

(A commented Portuguese translation of a paper by Maxwell on action at a distance)

Alexandre C. Tort¹, Alexander M. Cunha² e A.K.T. Assis²

¹Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade Universitária, Ilha do Fundão,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Instituto de Física 'Gleb Wataghin', Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil

Recebido em 17/05/04; Aceito em 22/07/04

Apresentamos uma tradução comentada de um importante texto de James Clerk Maxwell publicado em 1873. Neste artigo, Maxwell discute argumentos a favor e contra a ação a distância.

Palavras-chave: James Clerk Maxwell, ação a distância, Isaac Newton, Michael Faraday.

A commented Portuguese translation of a text by James Clerk Maxwell published in 1873 is offered. In this important paper, Maxwell discusses arguments in favour and against the concept of action at a distance.

Keywords: James Clerk Maxwell, action at a distance, Isaac Newton, Michael Faraday.

1. Introdução

Apresentamos uma tradução comentada de um texto de James Clerk Maxwell (1831-1879) intitulado *On Action at a Distance* [1]. Este trabalho foi publicado em 1873, sendo baseado numa palestra que Maxwell proferiu na Royal Institution (Londres), onde Faraday havia trabalhado durante toda sua vida.

Maxwell discute aqui os dois mecanismos principais já propostos para a interação entre corpos, a saber, ação por contato e ação a distância. É uma questão fundamental da Ciência tentar entender como os corpos agem uns sobre os outros, e Maxwell sempre deu grande importância a esse tema. Dedicou o último capítulo de seu principal livro, *Tratado de Eletricidade e Magnetismo*, a discutir esse tema de um ponto de vista mais técnico e matemático [2, v. 2, cap. 23, *Theories of Action at a Distance*]. Neste capítulo discutiu as teorias de Gauss, Weber, Riemann, C. Neumann e E. Betti. Este capítulo já foi traduzido para o português [3]. No artigo que está sendo traduzido agora, Maxwell

volta a este tema de um ponto de vista mais abrangente e filosófico, sem entrar em detalhes matemáticos. É um texto fascinante pela clareza e profundidade, assim como pela forma equilibrada e ponderada com que apresenta os dois pontos de vista.

2. Dados biográficos de Maxwell

Nascido no dia 13 de junho de 1831 em Edimburgo, na Escócia, Maxwell mostra desde a sua adolescência uma tendência para as Ciências Naturais. Logo aos 14 anos publica o seu primeiro artigo científico, *On the Description of Oval Curves* [Descrição das Curvas Ovais]. Não era este um trabalho inédito, tendo sido realizado anteriormente por René Descartes. Entretanto, era um trabalho notável para um jovem de somente 14 anos.

Em 1847, então com 16 anos, Maxwell ingressa na Universidade de Edimburgo, onde permanece por três anos. Posteriormente, em 1850, começa a estudar matemática no Trinity College, em Cambridge, alegando

¹Enviar correspondência para Alexandre C. Tort. E-mail: tort@if.uff.br.

que seria mais fácil de conseguir uma bolsa de estudos nesta faculdade. Em 1854 termina sua graduação e um ano depois escreve o artigo *On Faraday's Lines of Force* [Sobre as Linhas de Força de Faraday], desenvolvendo trabalhos anteriores de Faraday sobre eletricidade e magnetismo [4].

Casa-se com Katherine Dewar em 1858 e dois anos depois assume o cargo de professor do King's College, na Universidade de Londres. Lá é o primeiro cientista a utilizar a teoria das probabilidades no estudo das propriedades dos gases. É neste período que desenvolve sua teoria eletromagnética da luz. Com o falecimento de seu pai em 1865, resolve voltar para a Escócia, assumindo assim uma cátedra de professor de Filosofia Natural na Universidade de Aberdeen. Nesta função, desenvolve trabalhos sobre fotografia colorida e se empenha na padronização das unidades de medidas, trabalho iniciado por Gauss e Weber. O trabalho original de Gauss em que cria o sistema absoluto de unidades eletromagnéticas já se encontra traduzido para o português [5]. Neste período Maxwell realiza constantes viagens à Universidade de Cambridge, da qual se torna professor em 1871, a fim de ajudar na construção do laboratório Cavendish. Em 1873 publica seu livro principal [2]. A partir de 1874, Maxwell se dedica quase que exclusivamente a editar os artigos de Henry Cavendish. Permanece na Universidade de Cambridge até a sua morte, em 5 de novembro de 1879.

3. A tradução

Após a breve introdução acima apresentamos a seguir a tradução comentada deste importante texto de Maxwell. As notas dos tradutores são indicadas pelas letras N. T. Os trechos entre colchetes, [], foram acrescentados pelos tradutores.

Sobre a ação a distância **James Clerk Maxwell**

Não tenho nenhuma descoberta nova esta noite para apresentar-lhes. Devo convidá-los a reexaminar o passado e voltar sua atenção para uma questão que tem sido trazida à baila de tempos em tempos desde que os homens começaram a pensar.

A questão refere-se 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, um agente de transmissão que ocupa o espaço entre os corpos, ou será que estes agem uns sobre os outros imediatamente, sem a intervenção de nada mais?

O modo pelo qual Faraday² estava acostumado a observar fenômenos deste tipo difere daquele adotado por muitos pesquisadores modernos, e meu principal objetivo será capacitá-los a entender o ponto de vista de Faraday e fazer com que percebam o valor científico do conceito de linhas de força³, que nas mãos dele tornou-se a chave da ciência da eletricidade.

Quando observamos um corpo atuando a distância sobre outro, antes de supormos que esta ação é direta e imediata, geralmente nos perguntamos se há qualquer conexão material entre os dois corpos. Se encontramos cordas ou hastes, ou um mecanismo de qualquer tipo, capazes de explicar a ação observada entre os corpos, preferimos explicar a ação por meio destas conexões intermediárias antes de admitir a noção de ação a distância.

Assim, quando tocamos uma sineta por meio de um fio, as sucessivas partes do mesmo inicialmente se retesam e, em seguida, entram em movimento, até que a sineta toca a distância, por meio de um processo no qual todas as partículas intermediárias do fio tomaram parte, uma após a outra. Podemos fazer a sineta soar a distância por outros meios; por exemplo: forçando o ar através de um tubo longo no qual, na outra extremidade, existe um cilindro com um pistão que bate a sineta. Podemos também usar um fio, mas em lugar de puxá-lo, amarramos uma de suas extremidades a uma célula voltaica e a outra extremidade a uma bobina elétrica, e assim fazemos soar a sineta por meio da eletricidade.

Temos aqui três modos diferentes de fazer soar uma sineta. No entanto, todas concordam em um ponto: que entre a pessoa que faz soar a sineta e a sineta propriamente dita existe uma linha ininterrupta de comunicação e que, em todos os pontos desta linha, acontece algum processo físico por meio do qual a ação é transmitida de uma extremidade do fio até à outra. O processo de transmissão não é instantâneo, mas gradual, de modo que há um intervalo de tempo após o impulso ter sido dado em uma das extremidades da

²N. T. Michael Faraday (1791-1867), físico experimental e químico inglês. Não possuía conhecimentos avançados em matemática. Descobriu a indução eletromagnética de correntes em 1831. Utilizou amplamente o conceito de linhas de campo magnético, as quais visualizava com o auxílio de limalhas de ferro.

³N. T. O que Faraday e Maxwell chamavam de *linhas de força* é entendido hoje em dia como linhas de campo elétrico e magnético.

linha de comunicação, durante o qual o mesmo viaja ao longo da linha, até atingir a outra extremidade.

Portanto, fica claro que, em muitos casos, a ação entre corpos a distância pode ser explicada por uma série de ações entre cada par sucessivo de um conjunto de corpos que ocupam o espaço intermediário entre as duas extremidades; assim, os defensores da ação mediadora perguntam-se nestes casos, e também naqueles em que não podemos perceber o agente intermediário, se não seria mais razoável admitir a existência de um meio, que no presente momento não podemos perceber, em lugar de afirmar que um corpo pode agir em um lugar em que não está presente.

Mesmo para uma pessoa que ignora as propriedades do ar, a transmissão da força através de um agente invisível parece tão absurda quanto qualquer outro exemplo de ação a distância, mas ainda assim podemos explicar todo o processo e determinar a taxa pela qual a ação é transmitida de uma parte do meio para outra.

Por que então não deveríamos admitir que a maneira familiar de transmitir o movimento, empurrando e puxando com as nossas mãos, é a maneira e o exemplo de todas as ações entre corpos, mesmo nos casos nos quais não observamos nada entre eles que pareça tomar parte da ação?

Eis aqui um tipo de atração com a qual o professor Guthrie⁴ tornou-nos familiares: um disco é posto em vibração e, então, é levado para perto de um corpo leve suspenso que imediatamente começa a mover-se em direção ao disco, como se estivesse sendo atraído por este por meio de um cordão invisível. Mas que cordão? Sir W. Thomson⁵ observou que em um fluído em movimento, a pressão é menor onde a velocidade é maior. A velocidade do movimento vibratório do ar

é maior próximo ao disco. Portanto, como a pressão do ar sobre o corpo suspenso é menor sobre o lado que está mais próximo do disco do que sobre o lado oposto, o corpo cede frente à pressão maior e move-se em direção ao disco.

Portanto, o disco não age onde não está. O disco põe o ar próximo a ele em movimento aos empurrões, este movimento é transmitido para partes do ar cada vez mais distantes e assim as pressões nos dois lados do corpo suspenso tornam-se desiguais e, em consequência da diferença de pressão, o mesmo move-se em direção ao disco. A força é, portanto, uma força da velha escola - um caso de *vis a tergo*⁶ -, um empurrão por trás.

Entretanto, os defensores da doutrina de ação a distância não foram calados por tais argumentos. Que direito, dizem eles, temos nós de afirmar que um corpo não pode atuar onde não está? Não vemos nós um exemplo de ação a distância no caso de um ímã que atua sobre outro ímã não somente a distância, mas também com absoluta indiferença à natureza da matéria que ocupa o espaço entre eles? Se a ação depende de algo que ocupa o espaço entre os dois ímãs certamente ela não pode ser indiferente ao fato deste espaço estar preenchido com ar ou não, ou se madeira, vidro ou mesmo cobre está presente entre os ímãs.

Além disto, a lei da gravitação universal⁷ de Newton⁸, que todas as observações astronômicas comprovam firmemente, afirma não apenas que os corpos celestes atuam uns sobre os outros a grandes distâncias através do espaço, mas também que duas porções de matéria, uma enterrada a milhas de profundidade no interior da Terra e a outra a centenas de milhares de milhas bem no interior do Sol, atuam uma sobre a outra com precisamente a mesma força que existiria se não

⁴N. T. Peter Guthrie Tait (1831-1901), matemático e físico escocês. Contemporâneo e amigo de Maxwell, estudou com ele na universidade de Edimburgo. Contribuiu bastante para o trabalho de Hamilton (1805-1865), *Lectures on Quaternions* (1853), expressando a velocidade de um fluído (trabalho de Helmholtz (1821-1894)) como uma função vetorial. Utilizou para isto um formalismo matemático que posteriormente gerou grandes discussões com Heaviside (1850-1925) e Gibbs (1839-1903). Trabalhou com Maxwell e Thomson (1824-1907), sendo que com este último escreveu o livro *Treatise on Natural Philosophy* (1867).

⁵N. T. William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907), matemático e físico irlandês. Desde cedo envolveu-se com matemática avançada, sendo muito influenciado pelos trabalhos de Fourier (1768-1830) e Green (1793-1841). Tentou unir as idéias de Faraday, Coulomb (1736-1806) e Poisson (1781-1840), porém idéias de ação a distância e de campo eram difíceis de ser unidas. Colaborou com Stokes (1819-1903) em estudos de hidrodinâmica. Também contribuiu para a termodinâmica com o estudo sobre calor que lhe rendeu o nome na escala absoluta de temperatura. Suas idéias sobre eletricidade e magnetismo auxiliaram Maxwell em sua teoria eletromagnética da luz.

⁶N. T. *vis* = força, violência; *a tergo* = atrás, na parte posterior; *vis a tergo* = força por trás.

⁷N. T. A força gravitacional atrativa entre dois corpos de massas m_1 e m_2 separados por uma distância r é proporcional a $m_1 m_2 / r^2$, apontando ao longo da reta que une os dois corpos.

⁸N. T. Isaac Newton (1643-1727), físico e matemático inglês. Desenvolveu o cálculo diferencial e integral. Em 1687 publicou sua obra principal, *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, conhecida por seu primeiro nome em latim, *Principia* [6]. A primeira parte deste livro já se encontra traduzida para o português, [7]. Neste livro apresenta as três leis fundamentais da mecânica clássica e sua famosa lei da gravitação universal. Realizou trabalhos fundamentais sobre óptica ligados com a decomposição da luz branca, formação do arco-íris, anéis de Newton e difração da luz. Em 1704 publicou seu livro *Óptica*, que já se encontra totalmente traduzido para o português [8].

houvesse as camadas de matéria sob as quais ambas estão escondidas. Se há um agente que toma parte na transmissão desta ação, certamente deve fazer alguma diferença se o espaço entre os corpos contém apenas este agente ou se ele é ocupado pela matéria densa da Terra ou do Sol.

Todavia, os defensores da ação direta a distância não se contentam com exemplos deste tipo, nos quais os fenômenos, já à primeira vista, parecem favorecer sua doutrina. Eles levam suas operações ao campo do inimigo e sustentam que mesmo quando a ação é aparentemente o resultado do contato entre porções contíguas de matéria, a contigüidade é apenas aparente, porque sempre existe um espaço entre corpos que atuam um sobre o outro. Em suma, eles afirmam que, longe de ser impossível, a ação a distância é o único tipo de ação que ocorre sempre, e que o velho favorito das escolas, a *vis a tergo*, não tem existência na natureza, existindo apenas na imaginação dos estudiosos.

A melhor maneira de provar que quando um corpo pressiona outro os mesmos não estão em contato é medir a distância entre eles. Eis aqui duas lentes de vidro, uma das quais é pressionada contra a outra por meio de um peso. Por meio da luz elétrica podemos obter sobre uma tela a imagem do ponto onde uma das lentes faz pressão sobre a outra. Uma série de anéis coloridos forma-se sobre a tela. Estes anéis foram primeiramente observados e explicados por Newton. A coloração particular de qualquer anel depende da distância entre as superfícies das lentes. Newton construiu uma tabela de cores correspondente às diferentes distâncias, de modo que, comparando a coloração de qualquer anel com a tabela de Newton podemos estimar a distância entre as superfícies que corresponde àquele anel. As cores estão dispostas em anéis porque as superfícies são esféricas, e, portanto, o intervalo entre as superfícies depende da distância à reta que une os centros das esferas. O ponto central dos anéis indica o ponto em que as superfícies das lentes estão mais próximas uma da outra e cada anel que vem a seguir corresponde a um aumento de cerca de 1/4000 de milímetro na distância entre as superfícies.

Em seguida, as lentes são pressionadas uma contra a outra com uma força igual ao peso de uma onça [28,35 gramas], mas ainda há uma distância mensurável entre elas, mesmo no ponto onde as lentes estão mais próximas entre si. Elas não estão em contato óptico. Para provar isto aplicamos uma força maior. Uma cor nova aparece no ponto central e os diâmetros de todos os anéis aumentam. Isto mostra que as su-

perfícies estão mais próximas uma da outra do que antes, mas não estão ainda em contato óptico, pois se estivessem, o ponto central seria preto. Portanto, aumentemos a força de modo a fazer com que as lentes entrem em contato óptico.

Mas o que denominamos contato óptico não é um contato real. O contato óptico indica apenas que a distância entre as superfícies é muito menor do que o comprimento de onda da luz [visível]. Para mostrar que as superfícies não estão em contato real removemos os pesos. Os anéis contraem-se e diversos deles desaparecem no ponto central. Entretanto, sabemos que é possível fazer com que dois pedaços de vidro fiquem tão próximos entre si que eles tenderão a não se separar de modo algum; ao contrário, eles aderem tão firmemente um ao outro que, quando separados, o vidro quebra. Nesta experiência os vidros estão muito mais próximos do que quando estavam em mero contato óptico.

Assim mostramos que dois corpos começam a pressionar-se mutuamente quando ainda estão a uma distância mensurável um do outro, e que mesmo pressionado um contra o outro por meio de uma força de grande magnitude, eles não estão em contato absoluto, embora possam ser postos mais perto um do outro com um grau muito grande de precisão.

Por que então, dizem os defensores da ação direta, deveríamos continuar a sustentar a doutrina, baseada apenas na experiência rudimentar de uma era pré-científica, de que a matéria não pode agir onde não está ao invés de admitir que todos os fatos, a partir dos quais nossos ancestrais concluíram que o contato é essencial à ação, eram, na verdade, casos de ação a distância, sendo a distância muito pequena para ser medida por meio de seus instrumentos de observação imperfeitos?

Se quisermos descobrir algum dia as leis da natureza, devemos fazê-lo adquirindo a mais precisa familiaridade com os fatos da natureza, e não encobrir com linguagem filosófica as opiniões incoerentes de homens que não tenham o conhecimento dos fatos que esclarecem essas leis. Quanto àqueles que introduzem o éter, ou outros meios quaisquer para explicar estas ações sem qualquer evidência direta da existência de tais meios, ou qualquer entendimento claro da maneira pela qual estes meios realizam seu trabalho, e que preenchem o espaço três ou quatro vezes com éteres de diferentes tipos, quanto menos falarem sobre seus escrúpulos filosóficos em admitir a ação a distância, melhor será.

Se o progresso da Ciência fosse regulado pela primeira lei do movimento de Newton, seria fácil sustentar opiniões antes da época. Teríamos apenas que comparar a Ciência de hoje com a de 50 anos atrás, e projetando, no sentido geométrico, a reta do progresso, obteríamos a Ciência dos próximos 50 anos.

O progresso da Ciência no tempo de Newton consistia em livrar-nos da maquinaria celestial com a qual gerações de astrônomos entulharam os céus e deste modo “varrer as teias de aranha para fora dos céus”⁹.

Embora os planetas já estivessem livres de suas esferas de cristal, eles ainda nadavam nos vórtices de Descartes¹⁰. Ímãs eram rodeados por eflúvios e corpos eletrificados rodeados por atmosferas cujas propriedades não se pareciam em nada com aquelas dos eflúvios e atmosferas normais.

Quando Newton demonstrou que a força que atua sobre cada um dos corpos celestes depende da sua posição relativa aos outros corpos, a nova teoria encontrou violenta oposição dos filósofos mais avançados da época, que descreveram a doutrina da gravitação como um retorno ao método já bastante surrado de explicar todas as coisas por meio de causas ocultas, virtudes atrativas e coisas desse tipo.

Newton, ele próprio, com aquela sobriedade que é a característica de todas as suas especulações, respondeu que não tinha a pretensão de explicar o mecanismo pelo qual os corpos celestes atuam uns sobre os outros. Determinar o modo pelo qual essa ação mútua depende das posições relativas foi um grande passo para a

Ciência, e esse passo Newton afirmou que tinha dado. Explicar o processo pelo qual esta ação se dá era um passo bastante diferente e este passo Newton, em seus *Principia*, não tentou dar.

Mas Newton estava tão longe de afirmar que os corpos realmente agem uns sobre os outros a distância, independentemente de qualquer coisa entre eles, que em uma carta a Bentley¹¹, citada aqui por Faraday, afirma:

“É inconcebível que a matéria bruta inanimada possa, sem a intermediação de algo que não seja material, agir e afetar outra porção de matéria sem contato mútuo, como deve ser se a gravitação, no sentido de Epicuro¹², for essencial e inerente a ela... Que a gravidade deva ser inata, inerente, e essencial à matéria de tal modo que um corpo possa agir sobre um outro a distância, através de um vácuo, sem a intermediação de qualquer coisa por meio da qual as suas ações e forças possam ser transmitidas, é para mim um absurdo tão grande que acredito que nenhum homem que tenha competência em questões filosóficas possa aceitar.”

Coerentemente, encontramos em seu *Optical Queries*¹³, e em suas cartas para Boyle¹⁴, que Newton havia desde bem cedo feito uma tentativa de explicar a gravitação por meio de pressões em um meio, e que a razão pela qual não publicou estas investigações “procederam apenas do fato que ele pensava não ser capaz, a partir da experiência e da observação, de dar uma explicação satisfatória deste meio e do modo pelo qual operava ao produzir os principais fenômenos da natureza^{15 16}”.

⁹N. T. Aqui Maxwell refere-se às idéias aristotélicas e ptolomaicas segundo as quais a Terra era o centro do universo e todos os corpos celestes (inclusive o Sol e os planetas conhecidos até então) giravam em torno dela nas chamadas esferas celestes.

¹⁰N. T. René Descartes (1596-1650), matemático e filósofo francês. Entre seus trabalhos desenvolveu a geometria analítica, possibilitando um tratamento geométrico para a álgebra e vice-versa. Em seu livro *Princípios da Filosofia*, de 1644, defende a existência de uma matéria preenchendo todo o universo (não haveria o vácuo, ou seja, não haveria espaço vazio de matéria). Esta idéia de um espaço cheio de matéria leva ao conceito de vórtice. Isto é, quando um corpo se movimenta em relação a outro corpo, deve haver uma série contínua de outros corpos movendo-se juntamente com o primeiro corpo. Descartes defendeu também que as ações ditas a distância eram devidas a movimentos provenientes dessa matéria que preenchia todo o espaço. Desenvolveu trabalhos também na filosofia e discutiu o método científico.

¹¹N. T. Richard Bentley (1662-1742), clérigo inglês. Correspondeu-se por diversas vezes com Newton, chegando inclusive a discutir com ele partes do *Principia*. Por aceitar idéias questionáveis à Igreja de sua época, Bentley foi bastante criticado por outros clérigos, o que o levou a ser prejudicado em sua carreira religiosa.

¹²N. T. Epicuro (341-270 a. C.), filósofo atomista grego.

¹³N. T. Questões ao final do livro *Óptica*.

¹⁴N. T. Robert Boyle (1627-1691), físico e químico irlandês. Desenvolveu estudos sobre os gases ideais e refutou as idéias de Aristóteles (384-322 a. C.) de que a matéria era composta de quatro elementos básicos (fogo, água, terra e ar). Pesquisou também a óptica física juntamente com seu assistente Hooke (1635-1703), trabalhos estes posteriormente complementados por Newton.

¹⁵*Account of Newton's Discoveries*, de Maclaurin.

¹⁶N. T. Colin Maclaurin (1698-1746), matemático e físico escocês. Graduou-se em matemática com 14 anos defendendo uma tese na qual em um dos tópicos desenvolveu especificamente as teorias de Newton. Posteriormente desenvolveu vários trabalhos ligados à geometria e à álgebra. Morreu antes de terminar seu último trabalho sobre Newton, *An Account of Sir Isaac Newton's Philosophical Discoveries* (1748), publicado somente dois anos após sua morte.

¹⁷N. T. Roger Cotes (1627-1691), matemático e físico inglês. Escreveu o prefácio à segunda edição (1713) do *Principia* de Newton. Desenvolveu trabalhos sobre a teoria dos logaritmos. Contribuiu também para o cálculo integral e para o cálculo numérico, em particular

A doutrina da ação direta não pode reclamar como seu autor o descobridor da gravitação universal. Foi Roger Cotes¹⁷ quem primeiro a afirmou, em seu prefácio aos *Principia*, que ele editou durante a vida de Newton. De acordo com Cotes, é pela experiência que aprendemos que todos os corpos gravitam. Não é de nenhum outro modo que aprendemos que eles têm extensão, que são capazes de mover-se, ou que são sólidos. Portanto, a gravitação tem tanto direito de ser considerada uma propriedade essencial da matéria quanto a extensão, a mobilidade, ou a impenetrabilidade.

E quando a filosofia newtoniana ganhou terreno na Europa, foi a opinião de Cotes e não a de Newton que prevaleceu, até que por fim Boscovich¹⁸ propôs sua teoria, de que a matéria era um conjunto de pontos matemáticos, cada um deles dotado do poder de atrair ou de repelir os outros de acordo com leis imutáveis. Em seu mundo, a matéria não tem extensão, e o contato é impossível. Todavia, Boscovich não esqueceu de dotar seus pontos matemáticos de inércia. Nesse aspecto, alguns dos representantes modernos de sua escola de pensamento acharam que ele “não tinha verdadeiramente ido tão longe quanto à estrita visão moderna de ‘matéria’ como sendo somente uma expressão para os modos ou manifestações de ‘força’^{19 20}”.

Mas se deixarmos de lado por um instante o relato do desenvolvimento das idéias da Ciência, e limitarmos nossa atenção à extensão de suas fronteiras, veremos que foi essencial que o método de Newton tivesse

com técnicas de interpolação.

¹⁸N. T. Ruggero Giuseppe Boscovich (1711-1787), matemático, físico, filósofo e poeta croata. Foi um dos primeiros na Europa continental a aceitar as idéias de Newton sobre a gravitação universal. Escreveu mais de 70 trabalhos sobre óptica, astronomia, gravitação, meteorologia e trigonometria.

¹⁹Revisão da Sra. Somerville, *Saturday Review*, 13/02/1869.

²⁰N. T. Mary Fairfax Greig Somerville (1780-1872), matemática e física escocesa. Estudou por conta própria textos de grandes cientistas como o *Principia* de Newton e o *Traité de Mécanique Celeste* (1799) de Laplace (1749-1827). Teve de superar muitas barreiras para conseguir estudar Ciências Naturais sendo mulher. A partir de 1814 passa a conhecer pessoalmente alguns dos cientistas que mais se destacavam na época, como Poisson e o próprio Laplace, além de se corresponder com vários outros pesquisadores. Escreveu diversos artigos em física e matemática. Alguns de seus trabalhos influenciaram Maxwell.

²¹N. T. Henry Cavendish (1731-1810), físico e químico inglês. Verificou que a água poderia ser sintetizada a partir da queima do hidrogênio com a presença do oxigênio. Utilizou uma balança de torsão construída por ele para determinar a densidade média da terra com grande precisão. Mostrou que nenhuma carga permanece no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático. Publicou muito pouco durante sua vida, sendo sua obra completa editada por Maxwell.

²²N. T. Charles Augustin Coulomb (1736-1806), engenheiro e físico francês. Desenvolveu vários trabalhos de mecânica aplicada. Sua maior contribuição para a Ciência foram seus estudos sobre eletricidade e magnetismo. Desenvolveu, em particular, a lei de atração e repulsão entre cargas elétricas e entre pólos magnéticos. Concluiu que estas forças também caíam com o quadrado da distância entre os corpos, como acontecia com a lei da gravitação de Newton.

²³N. T. Siméon Denis Poisson (1781-1840), matemático e físico francês. Estudou problemas relacionados com as equações diferenciais. Em particular, lidou com a situação de um pêndulo oscilando num meio resistivo, a teoria do som, além de avançar no estudo das séries de Fourier. Desenvolveu vários trabalhos sobre o movimento e a forma terrestres.

²⁴N. T. Hans Christian Oersted (1777-1851), físico e químico dinamarquês. Obteve experimentalmente em 1820 que uma corrente elétrica exerce torque em um ímã colocado em suas vizinhanças. Este trabalho fundamental, que mostra uma conexão entre eletricidade e magnetismo, já se encontra traduzido para o português [9]. Ver também uma discussão detalhada deste trabalho em [10].

sido estendido a todos os ramos da Ciência aos quais era aplicável - devemos em primeiro lugar investigar a força com a qual os corpos agem uns sobre os outros antes de tentar explicar como a força é transmitida. Ninguém pode ser considerado como mais apto a dedicar-se à primeira parte do problema do aquele que julga a segunda parte desnecessária.

De fato, Cavendish²¹, Coulomb²² e Poisson²³, fundadores das ciências exatas da eletricidade e do magnetismo, não deram nenhuma atenção àquelas noções antigas de “eflúvios magnéticos” e “atmosfera elétricas”, que tinham sido propostas no século anterior, ao invés disso voltaram decididamente suas atenções para a determinação da lei de força pela qual os corpos eletrificados e magnetizados atraem-se ou repelem-se uns aos outros. Dessa maneira, as verdadeiras leis destas ações foram descobertas, e isso foi feito por homens que nunca duvidaram que a ação se dá a distância, sem a intervenção de qualquer meio, e que teriam considerado a descoberta de tal meio mais como um fato complicador do que uma explicação dos fenômenos estabelecidos da atração.

Chegamos então à grande descoberta de Oersted²⁴ da conexão entre a eletricidade e o magnetismo. Oersted descobriu que uma corrente elétrica atua sobre um pólo magnético, mas que não o atrai ou repele, mas faz com que este se mova em torno da corrente. Oersted expressou isso dizendo que “o conflito elétrico atua de modo circulante”.

A dedução mais óbvia deste fato novo é que a ação da corrente sobre o ímã não ocorre por meio de uma força do tipo “puxa-empurra”, mas sim por meio de uma força rotatória, e, conseqüentemente, muitas mentes começaram a imaginar vórtices e correntes de éter circulando em torno da corrente.

Mas Ampère²⁵, com uma combinação de habilidade matemática e engenhosidade experimental, primeiro provou que duas correntes elétricas atuam uma sobre a outra, depois estudou esta ação em termos da resultante de um sistema de forças do tipo “puxa-empurra” entre as partes elementares destas correntes.

A fórmula de Ampère, todavia, é de extrema complexidade quando comparada com a lei da gravitação de Newton, e muitas tentativas foram feitas para transformá-la em algo mais simples.

Não desejo conduzi-los a uma discussão sobre quaisquer dessas tentativas de aperfeiçoar uma fórmula matemática. Voltemos nossa atenção para o método independente de investigação empregado por Faraday naquelas pesquisas em eletricidade e magnetismo que tornaram esta instituição um dos mais veneráveis templos da Ciência.

Nenhum homem jamais trabalhou de forma mais consciente e sistematicamente para aperfeiçoar os poderes de seu intelecto do que Faraday o fez logo no começo de sua carreira científica. Mas, enquanto na época a tendência geral do método científico era a aplicação das idéias da matemática e da astronomia a cada nova investigação em andamento, Faraday parece não ter tido a oportunidade de adquirir conhecimento técnico de matemática, e seu conhecimento de astronomia foi tirado principalmente de livros.

Portanto, embora Faraday tivesse um profundo respeito pela grande descoberta de Newton, ele considerava a atração gravitacional uma espécie de mistério sagrado, o qual, já que ele não era astrônomo, não tinha o direito de contradizer ou duvidar, sendo seu dever acreditar na forma exata em que esta lei lhe tinha sido transmitida. Não era provável que uma fé tão cega o levasse à explicação de novos fenômenos por meio de atrações diretas.

Além disso, os tratados de Poisson e de Ampère são tão técnicos que, para obter qualquer ajuda deles, o estudante deve ter um treinamento completo em matemática, e é de se duvidar que tal treinamento possa

iniciar-se com proveito em uma idade madura.

Assim, Faraday, com seu intelecto penetrante, sua devoção à Ciência, e suas oportunidades de realizar experimentos, ficou proibido de seguir a linha de pensamento que tinha levado às descobertas dos filósofos franceses e, ao invés de adotar o que até aqui tinha sido a linguagem dos estudiosos, foi obrigado a explicar os fenômenos para si mesmo por meio de um simbolismo que podia entender.

Este novo simbolismo consistiu nas linhas de força que se estendem em todas as direções a partir dos corpos eletrificados e magnetizados, e que Faraday em sua imaginação via tão distintamente quanto os corpos sólidos dos quais emanavam.

A idéia de linha de força e sua demonstração por meio de limalha de ferro não eram novas. Elas tinham sido repetidamente observadas e investigadas matematicamente como uma curiosidade interessante da Ciência. Mas vamos ouvir o próprio Faraday, na ocasião em que ele introduz ao seu leitor o método que em suas mãos se tornou tão poderoso^{26 27}:

“Seria um abandono desnecessário e caprichoso da ajuda mais valiosa se um experimentalista, que escolhe representar a intensidade magnética por meio de linhas de força, negasse a si mesmo o uso de limalha de ferro. Por meio de sua utilização ele pode tornar muitas condições de intensidade, mesmo em casos complicados, imediatamente visíveis aos olhos, pode acompanhar em que direção esta intensidade está crescendo ou diminuindo, e em sistemas complexos pode determinar os pontos neutros, lugares nos quais não há nem polaridade nem intensidade, mesmo que eles estejam localizados no meio de ímãs muito poderosos. Por meio de seu emprego, resultados prováveis podem ser vistos imediatamente, e muitas sugestões valiosas para conduzir futuros experimentos podem ser obtidas”.

Experimentos com Linhas de Força

Neste experimento cada pedacinho de limalha torna-se um pequeno ímã. Os pólos de sinais opostos pertencentes a cada pedacinho atraem-se uns aos outros e ficam juntos, e mais partes de limalha juntam-se aos pólos ainda expostos, isto é, às extremidades da fileira formada por pedacinhos de limalha. Desta maneira os pedacinhos de limalha, ao invés de formar um sistema

²⁵N. T. André-Marie Ampère (1775-1836), matemático, físico e químico francês. Estudou a refração da luz. Continuou o estudo de Oersted sobre a influência de correntes elétricas em ímãs e obteve uma lei de força descrevendo a interação entre elementos de corrente. Para uma descrição detalhada desta força, ver [11].

²⁶Exp. Res. 3284.

²⁷N. T. Ver referência [12].

confuso de pontos, juntam-se, pedacinho a pedacinho, para formar longos filamentos de limalha de ferro que indicam a direção das linhas de força em todas as partes do campo.

Os matemáticos nada viram neste experimento a não ser um método de mostrar de uma vez só a direção e o sentido da resultante de duas forças em pontos diferentes, cada uma delas dirigida para um pólo diferente do ímã; um exemplo de certa maneira complicado da lei simples de adição de forças.

Mas Faraday, por meio de uma série de passos notáveis pela sua precisão geométrica, assim como pela sua engenhosidade especulativa, deu à sua concepção de linhas de força uma clareza e uma precisão bem maior do que aquela que os matemáticos de então poderiam extrair de suas próprias fórmulas.

Em primeiro lugar, as linhas de força de Faraday não devem ser consideradas isoladamente, mas sim como um sistema traçado no espaço de uma maneira definida, de tal forma que o número de linhas que atravessa uma área, digamos de uma polegada quadrada, indica a intensidade da força através da mesma. Assim as linhas de força tornam-se definidas em número. A intensidade de um pólo magnético é medida pelo número de linhas que procedem dele; a força eletromotriz de um circuito é medida pelo número de linhas de força que passam através dele.

Em segundo lugar, cada linha individual tem uma existência contínua no espaço e no tempo. Quando um pedaço de aço torna-se um ímã, ou quando uma corrente elétrica começa a fluir, as linhas de força não passam a existir cada uma delas em seu próprio lugar, mas à medida que a intensidade aumenta novas linhas são geradas dentro do ímã ou corrente e gradualmente crescem em direção ao exterior, de maneira que todo o sistema se expande de dentro para fora, como os anéis de Newton da nossa experiência anterior. Assim, cada linha preserva sua identidade durante o curso inteiro de sua existência, embora sua forma e tamanho possam ser alterados à vontade.

Não tenho tempo de descrever os métodos pelos quais todas as questões relacionadas com estas forças que atuam sobre ímãs ou sobre correntes, ou relacionadas com a indução de corrente em circuitos condutores, podem ser resolvidas considerando-se as linhas de força de Faraday. Aqui, neste lugar [*i.e.*: nesta instituição], elas não devem ser esquecidas nunca. Por meio deste novo simbolismo, Faraday definiu com precisão matemática toda a teoria do eletromagnetismo em uma linguagem livre de tecnicismos matemáticos,

e aplicável aos casos mais complicados bem como aos mais simples. Mas Faraday não parou aqui. Ele prosseguiu da concepção geométrica de linhas de força para a concepção física. Ele observou que o movimento que a força elétrica ou a magnética tendem a gerar é invariavelmente tal como para encurtar as linhas de força ao mesmo tempo em que permite que se afastem lateralmente umas das outras. Assim, ele percebeu no meio um estado de tensão que consiste em uma tração como a que existe em uma corda esticada, na direção das linhas de força, combinada com uma pressão em todas as direções mas formando um ângulo reto com essas linhas.

Essa é uma concepção bastante diferente de ação a distância, reduzindo-a a um fenômeno do mesmo tipo que aquela ação a distância que é exercida por meio de tensão de cordas e pressão de bastões. Quando os músculos de nossos corpos são excitados por um estímulo ao qual somos capazes de uma maneira desconhecida de responder, as fibras tendem a encurtar-se e ao mesmo tempo expandir lateralmente. Um estado de tração se produz no músculo e o membro se move. Esta explicação da ação muscular não é de nenhuma maneira completa. Ela não dá nenhuma explicação da causa da excitação do estado de tração muscular nem mesmo investiga as forças de coesão que permitem aos músculos suportar esta tração. De qualquer maneira, o simples fato de que ela substitua um tipo de ação, que se estende continuamente ao longo de uma substância material, por uma ação da qual conhecemos apenas uma causa e um efeito distantes um do outro, induz-nos aceitá-la como um acréscimo real ao nosso conhecimento da mecânica dos animais.

Por razões similares podemos considerar a concepção de Faraday de estado de tensão de um campo eletromagnético como um método de explicar a ação a distância por meio de uma transmissão contínua de força, mesmo que não saibamos como este estado de tensão se produz.

Mas uma das descobertas mais frutíferas de Faraday, a da rotação magnética da luz polarizada, permite-nos dar um passo mais adiante. O fenômeno, quando decomposto em seus elementos mais simples, pode ser descrito da maneira que se segue: de dois raios de luz circularmente polarizados, precisamente similares em sua configuração, mas girando em sentidos opostos, o raio que se propaga com maior velocidade é aquele que gira no mesmo sentido da eletricidade da corrente magnetizante.

Disto segue, como o demonstrou *Sir W. Thomson* por meio de um raciocínio estritamente dinâmico, que o meio sob a ação de uma força magnética deve estar em estado de rotação - quer dizer, que pequenas porções do meio, as quais podemos chamar de vórtices moleculares, estão girando, cada porção em torno de seu próprio eixo, sendo que a direção deste eixo é determinada pela direção da força magnética.

Aqui, então, temos a explicação para a tendência que as linhas de força magnética têm de espalharem-se lateralmente ao mesmo tempo em que ficam mais curtas. Esta tendência nasce da força centrífuga dos vórtices moleculares.

O modo pelo qual a força eletromotriz atua ao dar início ou interromper estes vórtices é mais obscura, embora, é claro, consistente com os princípios dinâmicos.

Vimos, portanto, que há diversos tipos de trabalho a serem realizados pelo meio eletromagnético, se este meio existe. Vimos também que o magnetismo tem uma relação íntima com a luz, e sabemos que existe uma teoria da luz que supõe que esta consiste em vibrações de um meio. Qual é a relação deste meio luminífero com o meio eletromagnético?

Afortunadamente, medidas eletromagnéticas foram realizadas e a partir delas podemos calcular com princípios dinâmicos a velocidade de propagação de pequenas perturbações magnéticas neste meio magnético hipotético.

Essa velocidade é muito grande, de 288 a 314 milhões de metros por segundo, de acordo com diferentes experimentos. Agora, a velocidade da luz, de acordo com as experiências de Foucault²⁸, é de 298 milhões de metros por segundo. De fato, as diferentes determinações de quaisquer destas velocidades diferem entre si não mais que a velocidade estimada de propagação da luz difere da velocidade estimada de propagação das pequenas perturbações eletromagnéticas. Mas se os meios luminíferos e eletromagnéticos ocupam o mesmo lugar e trans-

mitem perturbações com a mesma velocidade, que razão temos nós de distinguir um meio do outro? Considerando-os como sendo o mesmo meio, pelo menos evitamos a acusação de estarmos preenchendo o espaço duas vezes com diferentes tipos de éter.

Além disto, o único tipo de perturbação eletromagnética que pode propagar-se em um meio não condutor é uma perturbação transversal à direção de propagação, o que está de acordo com o que sabemos sobre a perturbação que chamamos luz. Portanto, até onde sabemos, a luz pode também ser uma perturbação eletromagnética em um meio não condutor. Se admitirmos isso, a teoria eletromagnética da luz, acrescida da teoria de Cavendish e Coulomb, estará em acordo em todos os aspectos, por meio do ponto chave das ciências combinadas da luz e da eletricidade - a grande descoberta de Faraday da rotação eletromagnética da luz - com a teoria ondulatória, e o trabalho de Thomas Young²⁹ e o de Fresnel³⁰ ficará estabelecido sobre bases mais firmes do que nunca.

As vastas regiões interplanetárias e interestelares não serão mais consideradas como regiões desoladas, as quais o Criador não achou apropriado preencher com os símbolos da múltipla ordem de seu Reino. Deveremos encontrá-las já preenchidas com este meio maravilhoso, tão pleno, que nenhum poder humano poderá removê-lo da menor porção do espaço, ou produzir a mais leve falha em sua infinita continuidade. Ele se estende ininterrupto de estrela a estrela, e quando uma molécula de hidrogênio vibra em uma estrela da constelação do Cão, o meio recebe os impulsos destas vibrações, e depois de transportá-los em seu imenso regaço por três anos, entrega-os no devido tempo, de maneira regular, ao espectroscópio do Sr. Huggins³¹, em Tulse Hill.

Mas o meio tem outras funções e atividades além de transportar a luz de homem para homem, de mundos para mundos e de dar evidências da absoluta unidade do sistema métrico do universo. Suas diminutas partes podem ter movimento rotatório assim como movi-

²⁸N. T. Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), físico francês. Desenvolveu pesquisas em todas as áreas da física. Ficou famoso com sua experiência de 1851 em que provou a rotação da terra utilizando um pêndulo. Verificou as correntes induzidas em condutores metálicos. Também conseguiu medir em 1850, com boa precisão, a velocidade da luz no ar e na água, verificando que era maior no ar.

²⁹N. T. Thomas Young (1773-1829), físico, médico e egiptólogo inglês. Começou a estudar a fisiologia do olho humano, desenvolvendo assim a óptica fisiológica. Trabalhou com reflexão, refração e difração da luz. Desenvolveu a teoria ondulatória da luz ao pesquisar fenômenos de interferência. Seus trabalhos em egiptologia auxiliaram na decifração dos hieróglifos depois de achada a pedra de Rosetta.

³⁰N. T. Augustin Jean Fresnel (1788-1827), engenheiro e físico francês. Desenvolveu quase todo seu trabalho no estudo da luz e dos fenômenos ópticos. Seus estudos o levaram a ser um grande defensor da teoria ondulatória da luz. A conclusão experimental de Foucault em 1850 que a luz propaga-se mais rapidamente no ar do que na água levou a que os trabalhos de Young e de Fresnel fossem mais respeitados e aceitos pela comunidade científica.

³¹N. T. William Huggins (1824-1910), astrônomo inglês. Foi um dos pioneiros na espectroscopia estelar verificando que as estrelas possuem composição química parecida com a do Sol. Mostrou também que algumas nebulosas eram nuvens de gás espalhadas pelo espaço.

mento de vibração, e os eixos de rotação formam aquelas linhas de força magnética que se estendem continuamente em direção a regiões que os nossos olhos ainda não viram, e que pela sua ação sobre nossos ímãs nos dizem em linguagem ainda não interpretada o que acontece no submundo oculto de minuto a minuto e de século para século.

Essas linhas não devem ser consideradas como meras abstrações matemáticas. Elas são as direções ao longo das quais o meio está exercendo tensão, como aquela em uma corda, ou melhor, como aquela em nossos músculos. A tensão do meio na direção da força magnética da Terra é, neste país, um grão de peso sobre oito pés quadrados. Em algumas das experiências do Dr. Joule³², o meio exerceu uma tensão de 200 libras-peso por polegada quadrada.

Mas o meio, em virtude da mesma elasticidade que o torna capaz de transmitir as ondulações da luz, é também capaz de agir como uma mola. Quando apropriadamente comprimido ou esticado, exerce uma tensão, diferente da tensão magnética, por meio da qual atrai corpos de eletrização oposta, também produz efeitos ao longo das linhas telegráficas, e se for suficientemente intenso, conduz à ruptura e a explosão que chamamos de relâmpago.

Estas são algumas das propriedades já descobertas daquilo que muitas vezes tem sido chamado de vácuo, ou o nada. Elas permitem-nos decompor diversos tipos de ação a distância em ações entre partes contíguas de uma substância contínua. Se esta decomposição é de natureza explanatória ou uma complicação, deixo aos metafísicos a tarefa de responder.

Agradecimentos

A.K.T.A. e A.M.C. desejam agradecer à FAEP/Unicamp pelo suporte financeiro e ao Dr. J.J. Lunazzi pelo apoio. A.C.T., A.M.C. e A.K.T.A. agradecem a Daniele Gualtieri pela leitura atenta e revisão gramatical.

Referências

- [1] J.C. Maxwell, *On Action at a Distance. Proceedings of the Royal Institution of Great Britain*, 7:44-54, 1873. Reprinted in W.D. Niven (ed.), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell* (Cambridge University Press, Cambridge, 1890), v. 2, p. 311-323.
- [2] J.C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Dover, New York, 1954).
- [3] A.K.T. Assis, *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 7, 53 (1992).
- [4] J.C. Maxwell, *On Faraday's Lines of Force*, edited by W.D. Niven, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, (Dover, New York, 1965), p. 155-229, v. 1. Article originally published in 1855.
- [5] A.K.T. Assis, *Revista Brasileira de Ensino de Física* 25, 226 (2003).
- [6] I. Newton, *Mathematical Principles of Natural Philosophy* (University of California Press, Berkeley, 1934), Cajori edition.
- [7] I. Newton, *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural* (Nova Stella/Edusp, São Paulo, 1990), v. 1, Tradução de T. Ricci, L.G. Brunet, S.T. Gehring e M.H.C. Célia.
- [8] I. Newton, *Óptica* (Edusp, São Paulo, 1996), Tradução, introdução e notas de A.K.T. Assis.
- [9] H.C. Oersted, *Experiências Sobre o Efeito do Conflito Elétrico Sobre a Agulha Magnética*, 1820. in *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 10, 115 (1986). Tradução de Roberto de A. Martins do artigo original de 1820.
- [10] R. de A. Martins, *Oersted e a Descoberta do Eletromagnetismo*, in *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 10, 89 (1986).
- [11] M. Bueno e A.K.T. Assis, *Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos* (Editora da UFSC/Editora da UEM, Florianópolis/Maringá, 1998).
- [12] M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity* (Encyclopaedia Britannica, *Great Books of the Western World*, Chicago, 1952), v. 45, p. 257-866.

³²N. T. James Prescott Joule (1818-1889), físico inglês. Desenvolveu trabalhos ligados à termodinâmica. Constatou que as energias elétrica, mecânica e térmica podem ser transformadas uma nas outras e também que, em um sistema fechado, essas energias se conservam.