



Introdução a “Sobre as linhas de força de Faraday” (1855)

James Clerk Maxwell (1831-1879)

Seção introdutória do artigo “On Faraday’s lines of force”, lido em 10 de dezembro de 1855 e 11 de fevereiro de 1856, e publicado nos *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 10 (1864) 27-65. Republicado em *Scientific papers of James Clerk Maxwell*, vol. I, ed. W.D. Niven, Cambridge University Press, 1890, cap. VIII, pp. 155-229. Tradução para o português feita por Osvaldo Pessoa Jr., para a disciplina Filosofia e História da Ciência Moderna (FLF0449), 1º semestre de 2017.

James C. Maxwell, em 1855, com um pião de cores primárias (no raio externo; no interno, geração de tons de cinza), usado (quando girado) para gerar todas as cores, variando as proporções das três primárias. (Fonte: James Clerk Maxwell Foundation.)

[155] O estado presente da ciência elétrica parece peculiarmente desfavorável à especulação. As leis de distribuição de eletricidade na superfície de condutores foram deduzidas [inferidas] analiticamente a partir dos experimentos; algumas partes da teoria matemática do magnetismo estão estabelecidas, enquanto que em outras partes os dados experimentais estão faltando; a teoria da condução do galvanismo e a da atração mútua entre condutores foram reduzidas a fórmulas matemáticas, mas não foram postas em relação com as outras partes da ciência. Nenhuma teoria elétrica pode hoje ser proposta, a não ser que mostre a conexão não só entre a eletricidade em repouso e a eletricidade corrente, mas também entre as atrações e os efeitos indutivos da eletricidade em ambos os estados. Tal teoria deve satisfazer [englobar] acuradamente essas leis, cujas formas matemáticas são conhecidas, e deve fornecer os meios para calcular os efeitos nos casos limites onde as fórmulas conhecidas não são aplicáveis. Assim, para apreciar os requisitos da ciência, o aluno deve se familiarizar com um considerável corpo da mais intrincada matemática, cuja mera retenção na memória interfere materialmente com posterior progresso. Portanto, o primeiro processo para um efetivo estudo da ciência deve ser um de simplificação e redução dos resultados das investigações prévias para uma forma na qual a mente possa capturá-los. Os resultados dessa simplificação podem tomar a forma de uma fórmula puramente matemática ou de uma hipótese física. No primeiro caso, perdemos completamente de vista os fenômenos a serem explicados; e apesar de podermos traçar as consequências de dadas leis, nunca podemos obter visões mais estendidas das conexões do objeto. Se, por outro lado, adotarmos uma hipótese física, vemos os fenômenos só através de um meio, e ficamos sujeitos àquela cegueira aos fatos e precipitação [156] de suposição que uma explicação parcial encoraja. Devemos portanto descobrir algum método de investigação que permita à mente, a cada passo, agarrar-se a uma concepção física clara, sem se comprometer com qualquer teoria fundada na ciência física da qual a concepção é emprestada, de forma que ela não seja nem distraída do assunto pesquisado por sutilezas analíticas, nem levada para além da verdade por uma hipótese favorita.

Para que possamos obter ideias físicas sem adotar uma teoria física, devemos nos familiarizar com a existência de analogias físicas. Por uma analogia física entendo aquela semelhança parcial entre leis de uma ciência e aquelas de outra, que faz com que cada uma delas ilustre a outra. Assim, todas as ciências matemáticas são fundadas em relações entre leis físicas e leis dos números, de maneira que o objetivo da ciência exata é reduzir os problemas da natureza à determinação de quantidades por meio de operações com números. Passando da mais universal de todas as analogias para uma bem parcial, encontramos a mesma semelhança em forma matemática entre dois fenômenos diferentes que dão origem a uma teoria física da luz.

As alterações de direção que a luz sofre, ao passar de um meio para outro, são idênticas aos desvios da trajetória de uma partícula ao passar através de um espaço estreito em que agem forças intensas. Acreditou-se por muito tempo que esta analogia, que se estende só para a direção e não para a velocidade do movimento, fosse a verdadeira explicação para a refração da luz; e ainda a achamos útil para a solução de certos problemas, nos quais a empregamos sem perigo, como um método artificial. A outra analogia, entre a luz e as vibrações de um meio elástico, estende-se muito mais, mas apesar de sua importância e fertilidade não poderem ser exageradas, devemos recordar que ela é fundada apenas em uma semelhança *de forma* entre as leis da luz e as das vibrações. Despindo-a de sua roupagem física e reduzindo-a a uma teoria de “alternações transversais”, podemos obter um sistema de verdade fundado estritamente na observação, mas provavelmente deficiente tanto na vividez de suas concepções quanto na fertilidade de seu método. Falei tudo isso sobre as disputadas questões da Óptica como uma preparação para a discussão da quase universalmente admitida teoria da atração à distância.

Todos nós adquirimos a concepção matemática dessas atrações. Podemos raciocinar a respeito deles e determinar suas formas e fórmulas apropriadas. Essas fórmulas têm uma significância matemática distinta, e encontra-se que seus resultados estão de acordo com fenômenos naturais. Não há fórmula alguma na matemática aplicada [157] que seja mais consistente com a natureza do que a fórmula das atrações, e não há teoria mais bem estabelecida nas mentes dos homens do que a da ação dos corpos entre si à distância. As leis da condução do calor em meios uniformes parecem estar, à primeira vista, entre as mais diferentes em suas relações físicas, quando comparados às atrações [gravitacional, elétrica ou magnética]. As grandezas que aparecem nelas são *temperatura*, *fluxo de calor* [*flow of heat*], *condutividade*. A palavra *força* é estranha ao assunto. Mesmo assim, encontramos que as leis matemáticas do movimento uniforme do calor em meios homogêneo são idênticas em forma àsquelas das atrações que variam com o inverso do quadrado da distância. Só precisamos substituir *centro de atração* por *fonte de calor*, *efeito acelerador da atração* por *fluxo de calor* em qualquer ponto, e *potencial* por *temperatura*, e a solução de um problema em atrações é transformado em uma de um problema de calor.

Creio que esta analogia entre as fórmulas de calor e de atração foi apontada pela primeira vez pelo Prof. William Thomson no *Cambridge Mathematical Journal*, vol. III.*

Agora, supõe-se que a condução de calor proceda por uma ação entre as partes contíguas de um meio, ao passo que a força de atração é uma relação entre corpos distantes; porém, se não soubéssemos nada a mais do que é expresso nas fórmulas matemáticas, não haveria nada para distinguir entre um conjunto de fenômenos e o outro.

* (N. do T.) “On the uniform motion of heat in homogeneous solid bodies, and its connection to the mathematical theory of electricity”, publicado anonimamente em fevereiro de 1842.

É verdade que se introduzirmos outras considerações e observarmos fatos adicionais, os dois objetos assumirão aspectos muito diferentes, mas a semelhança matemática de algumas de suas leis permanece, e pode ainda ser frutífera para excitar ideias matemáticas apropriadas.

Foi através do uso de analogias dessa espécie que tentei trazer diante da mente, de uma forma conveniente e manejável, aquelas ideias matemáticas que são necessárias para o estudo dos fenômenos da eletricidade. Os métodos são geralmente aqueles sugeridos pelos processos de raciocínio que são encontrados nas pesquisas de Faraday[†], e que, apesar de terem sido interpretados matematicamente pelo Prof. Thomson e outros, supõe-se muito amplamente que sejam de caráter indefinido e não matemático, quando comparados àqueles empregados pelos matemáticos profissionais. Pelo método que adoto, espero tornar evidente que não estou tentando estabelecer qualquer teoria física de uma ciência na qual eu mal fiz um único experimento, e que o limite do meu projeto é mostrar como, por meio de uma aplicação estrita das ideias e [158] métodos de Faraday, a conexão entre as ordens de fenômenos muito diferentes que ele descobriu pode ser claramente colocada diante de uma mente matemática. Tentarei portanto evitar, o quanto que eu puder, a introdução de qualquer coisa que não sirva como ilustração direta dos métodos de Faraday, ou das deduções matemáticas que possam ser feitas a partir delas. Ao tratar das partes mais simples do assunto, usarei tanto os métodos matemáticos de Faraday quanto suas ideias. Quando a complexidade do assunto exigir, usarei notação analítica, mas me restringirei ao desenvolvimento das ideias originadas pelo mesmo filósofo.

Devo em primeiro lugar explicar e ilustrar a ideia de “linhas de força”.

Quando um corpo é eletrificado de qualquer maneira, um pequeno corpo carregado com eletricidade positiva, e colocado em qualquer posição dada, sofrerá uma força impelindo-o em certa direção [e sentido]. Se o corpo pequeno for agora eletrificado negativamente, ele será impelido com igual força na direção exatamente oposta.

As mesmas relações valem entre um corpo magnético e os polos norte e sul de um pequeno ímã. Se o polo norte é impelido em uma direção, o polo sul será impelido na direção oposta.

Desta maneira, podemos encontrar uma linha passando através de qualquer ponto do espaço, tal que ela represente a direção da força agindo em uma partícula eletrificada positivamente, ou em um polo norte elementar, e a direção reversa da força em uma partícula eletrificada negativamente ou em um polo sul elementar. Dado que em qualquer ponto do espaço tal direção pode ser encontrada, se começarmos em qualquer ponto e traçarmos uma linha tal que, à medida que a acompanharmos, sua direção em qualquer ponto sempre coincida com aquela da força resultante naquele ponto, essa curva indicará a direção daquela força para cada ponto através do qual passar, e pode por conta disso ser chamada *linha de força*. Podemos da mesma maneira traçar outras linhas de forças, até preenchermos todo o espaço com curvas que indicam, por sua direção, a da força em qualquer ponto designado.

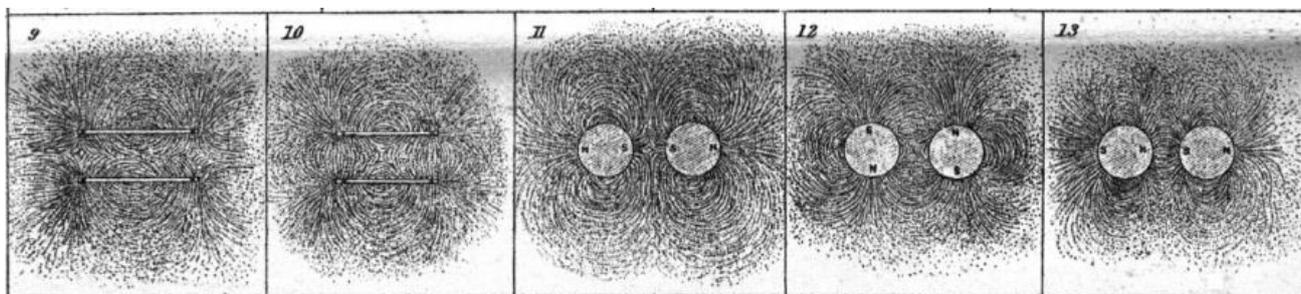
Devemos obter assim um modelo geométrico dos fenômenos físicos, que nos dirá a *direção* da força, mas devemos também exigir um método para indicar a *intensidade* da força em cada ponto. Se considerarmos tais curvas não como meras linhas, mas como finos tubos de seção variável que carregam um fluido incompressível, então, dado que a velocidade do fluido é inversamente proporcional à seção do tubo, podemos fazer a velocidade variar de acordo com qualquer lei dada, regulando a seção do tubo, e desta maneira poderemos

[†] Ver especialmente a Série XXVIII, dos *Experimental researches*, e *Philosophical Magazine*, 1852.

representar a [159] intensidade da força, assim como sua direção, através do movimento do fluido nesses tubos. Este método de representar a intensidade de uma força, pela velocidade de um fluido imaginário no tubo, é aplicável para qualquer sistema concebível de forças, mas ele é passível de grande simplificação no caso em que as forças são tais que possam ser explicadas pela hipótese das atrações que variam inversamente com o quadrado da distância, como aquelas observadas em fenômenos elétricos e magnéticos. No caso de um sistema perfeitamente arbitrário de forças, geralmente haverá interstícios entre os tubos; mas no caso de forças elétricas e magnéticas, é possível arrumar os tubos de maneira a não deixar interstícios. Os tubos serão então meras superfícies, direcionando o movimento de um fluido que preenche todo o espaço. Tem sido comum começar a investigação das leis dessas forças supondo de uma só vez que os fenômenos são devidos a forças atrativas ou repulsivas agindo entre certos pontos. Podemos porém obter uma visão diferente do assunto – e uma mais adequada às nossas difíceis investigações – adotando, para a definição das forças que tratamos, que elas podem ser representadas em magnitude e direção pelo movimento uniforme de um fluido incompressível.

Proponho então, em primeiro lugar, descrever um método pelo qual o movimento de tal fluido possa ser claramente concebido; em segundo lugar, traçar as consequências de se suporem certas condições de movimento, apontando a aplicação do método para alguns dos fenômenos menos complicados da eletricidade, magnetismo e galvanismo; e por fim, mostrar como, através de uma extensão desses métodos e da introdução de outra ideia devida a Faraday [a distinção entre *quantidades* ou fluxos, e *intensidades* ou forças], as leis das atrações e ações indutivas de imãs e correntes podem ser claramente concebidas, sem fazer qualquer suposição sobre a natureza física da eletricidade, ou adicionar qualquer coisa àquilo que já foi provado por experimentos.

Referindo tudo à ideia puramente geométrica do movimento de um fluido imaginário, espero atingir generalidade e precisão, e evitar os perigos que surgem de uma teoria prematura que alega explicar a causa de um fenômeno. Se os resultados da mera especulação que colecionei forem de qualquer uso para os filósofos experimentais, no arranjo e interpretação de seus resultados, eles terão servido o seu propósito, e uma teoria madura, em que os fatos físicos serão explicados fisicamente, será formada por aqueles que, ao interrogarem a própria Natureza, possam obter a única solução verdadeira para as questões que a teoria matemática sugere.



Linhas de força magnética obtidas por Faraday com limalha de ferro. *Experimental researches in electricity*, Série XXIX, § 37, 1851.