

O Embate de Tradições no Eletromagnetismo

Questão: Como resolver o debate entre paradigmas científicos?

1. Duas Tradições de Pesquisa no Eletromagnetismo

Na seção XV.1, discutiu-se o conceito de “tradição de pesquisa” na ciência, com base nas ideias de Kuhn, Lakatos e Laudan. No Eletromagnetismo do séc. XIX, havia duas grandes tradições de pesquisa rivais: (1) a teoria das forças centrais elétricas de Ampère, desenvolvida por Weber ao introduzir um potencial dependente de velocidades relativas; (2) a teoria de campos de Faraday e Maxwell, associada às forças magnéticas não centrais de Biot-Savart e à teoria do elétron de Lorentz. No séc. XX, com a consolidação da Teoria da Relatividade Restrita, a segunda tradição passou a ser amplamente hegemônica, mas partidários da primeira (que incluem o brasileiro André Assis, da Unicamp) ainda desenvolvem um programa de pesquisa bastante ativo. Neste capítulo, exploraremos alguns pontos do debate, para entender se a controvérsia tem um claro vencedor ou se a discussão está para além dos testes experimentais factíveis.

A Fig. XXII.1 representa esquematicamente as duas tradições de pesquisa.

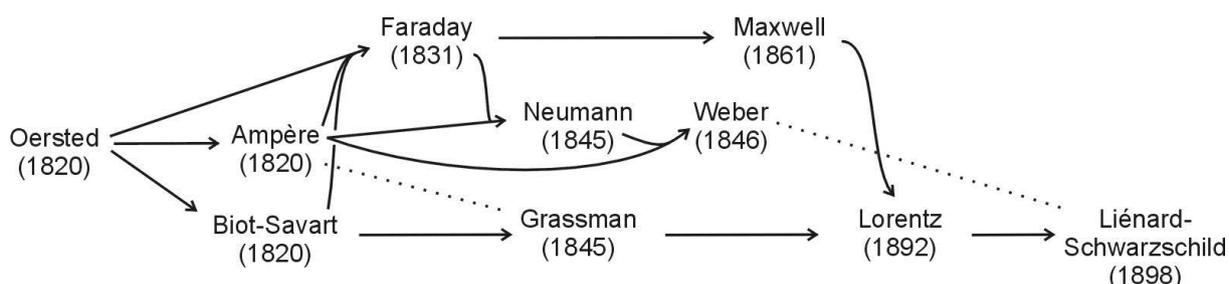


Figura XXII.1: As duas grandes tradições de pesquisa teórica do Eletromagnetismo. Setas indicam influência causal, e linhas pontilhadas indicam resultados teóricos comparáveis.

Após a descoberta da indução eletromagnética por Faraday e Joseph Henry, em 1831, tornou-se necessário formular uma teoria mais abrangente para o Eletromagnetismo. Isso foi feito por Franz Neumann, em 1845, por Wilhelm Weber, a partir de 1846, e por James Maxwell, a partir de 1856. Nesse período, a oposição entre as estratégias de Biot-Savart e Ampère se manteve. Biot-Savart e Grassmann influenciaram a abordagem de Lorentz, de 1892, que é apresentada na maioria dos textos didáticos, juntamente com a teoria de Maxwell.

Já a abordagem de Ampère foi retomada por Weber, que manteve a 3ª lei de Newton, e acabou formulando uma teoria empiricamente equivalente à de Maxwell. Uma comparação da lei de força de Lorentz, segundo a expansão aproximativa de Liénard-Schwarzschild, e a de Weber, é apresentada por Assis. Ambas as leis de força fornecem os mesmos resultados, quando integradas ao longo de circuitos, a menos de um termo proporcional ao quadrado da velocidade. Tentativas para testar esta diferença não têm levado a resultados conclusivos.¹⁷⁰

¹⁷⁰ ASSIS, A.K.T. (1995), *Eletrodinâmica de Weber*, Unicamp, Campinas. Uma interessante discussão didática envolve as diferentes explicações para o motor de Ampère; ver CHAIB, J.P.M.C. & ASSIS, A.K.T. (2013), “Motor de Ampère: elementos para um ensino crítico da física”, in Silva, C.C. & Prestes, M.E.B. (orgs.), *Aprendendo ciência e sobre sua natureza: abordagens históricas e filosóficas*, Tipographia Editora Expressa, São Carlos, pp. 55-70.

Em 1846, Wilhelm Weber apresentou uma lei de força entre cargas elétricas, a partir da qual se poderiam derivar as leis de Ampère e de Faraday. Lembremos que um campo de forças $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ pode ser obtido de um potencial $U(\mathbf{r})$ por meio do seu gradiente, $\mathbf{F} = -\nabla U$. O potencial associado à força de Weber, derivado em 1848, tem a característica de depender não só da distância r_{ij} entre as cargas, mas também das velocidades relativas \dot{r}_{ij} entre elas:

$$U(r_{ij}) = \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_{ij}} \left(1 - \frac{\dot{r}_{ij}^2}{2c^2} \right).$$

O primeiro termo fornece o potencial da lei de Coulomb. O segundo envolve uma mistura das energias cinética e potencial, já que depende tanto da distância quanto da velocidade relativas.

2. Forças Magnéticas violam o Princípio de Ação e Reação?

Vimos, na seção XX.1, a prioridade que Ampère dava à corrente elétrica, considerando que os efeitos magnéticos seriam meros epifenômenos da eletricidade. Ele buscou construir uma teoria eletromagnética que satisfizesse os princípios da mecânica de Newton, postulando que os elementos infinitesimais de corrente se atrairiam ou se repeliriam segundo uma força central, satisfazendo o princípio de ação e reação (3ª lei de Newton). Para exprimir a ação entre uma espira elétrica e um imã (ou entre dois imãs), Ampère substituiu o imã pela espira equivalente, aplicava sua lei de força para cada par de elementos de corrente, fazia a integração ao longo de cada circuito fechado, e obtinha a força resultante entre os dois sistemas.

Este, porém, era um método diferente daquele introduzido por Biot & Savart, que em outubro de 1820 obtiveram uma lei de força entre um elemento de corrente e um imã. Para este tipo de interação, a lei de Biot-Savart, ou sua reformulação por Grassmann (1845), foi adotada pela maioria dos físicos, mas ela tinha a característica peculiar de nem sempre satisfazer o princípio de ação e reação. A Fig. XXII.2 ilustra esta violação para dois elementos de corrente. Usando a regra da mão direita, vemos que o elemento 2 gera um campo magnético \vec{B}_{12} no elemento 1, o que resulta na força \vec{F}_{12} indicada, que não é central. Por outro lado, o campo magnético exercido por 1 em 2 é nulo, de forma que não haveria força resultante em 2. Temos assim uma clara violação do princípio de ação e reação!

O curioso é que os dois métodos, o de Ampère e o de Biot-Savart, quando aplicados para circuitos inteiros fechados (o que envolve a integração da contribuição de todos os elementos), dão sempre no mesmo resultado!



Figura XXII.2: Forças entre elementos de corrente segundo Biot & Savart (adaptado de TRICKER, 1965, op. cit., nota 152).

3. Linhas de Força são Reais?

No Cap. XXI, discutimos se os campos e potenciais eletromagnéticos devem ser considerados reais. Um outro conceito que teve importância na história do Eletromagnetismo foi o de “linhas de força”, desenvolvido por Faraday. Tais linhas de força, no caso magnético, são sugeridas pelo arranjo visual de limalha de ferro jogadas em torno de um ímã (Fig. XXII.3). No caso elétrico, Faraday imaginou cadeias de dipolos em um meio dielétrico. Maxwell retomou o conceito e postulou a existência de “tubos de força” descrevendo o escoamento de um fluido incompressível. Em 1893, J.J. Thomson desenvolveu uma teoria eletromagnética baseada em tubos elétricos em movimento, com a qual exprimiu o aspecto granular da radiação eletromagnética (seção XIX.1) em 1904.

Faraday considerou que as linhas de força eram reais, mas se deparou com um grande problema quando tentou explicar o funcionamento de uma invenção que ele próprio fizera em 1831, o chamado “disco de Faraday” (Fig. XXII.4). Neste dínamo, ou gerador elétrico, um disco de cobre (*D*) gira entre os polos de um ímã (*A*), e uma corrente elétrica é gerada no circuito envolvendo o contato *m* e um fio que liga *B'* a *B*, passando pelo interior do disco. Como explicar este efeito?

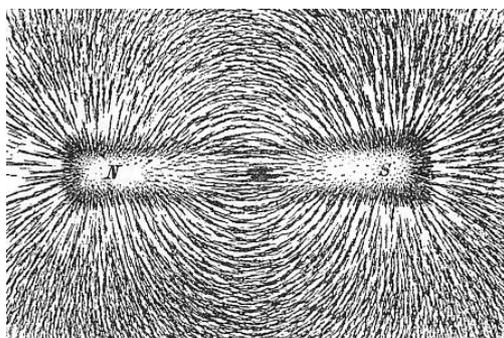


Figura XXII.3: Padrão de limalhas de ferro gerado por um ímã.

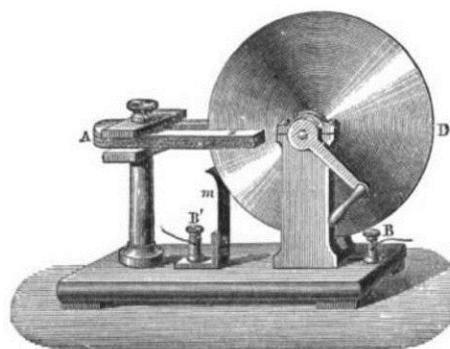


Figura XXII.4: Disco de Faraday, em versão de meados do séc. XIX.¹⁷¹

A explicação moderna utiliza a força de Lorentz $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$, que atua sobre os elétrons livres que se movem junto com a placa de cobre. Antes da teoria do elétron de Hendrik Lorentz, desenvolvida em 1892, Faraday utilizava uma abordagem conceitual semelhante, baseada no princípio de que um condutor, como uma haste metálica, ao *cortar* uma linha de força magnética, sofre um deslocamento em suas cargas. Na Fig. XXII.5, um setor fino (sombreado) do disco girante desempenha o papel da haste condutora que corta as linhas de força magnética. Consequentemente, surge uma corrente radial no sentido da borda do disco (ou seja, um elétron negativo acelera para o interior do disco), detectado pelo galvanômetro em repouso.

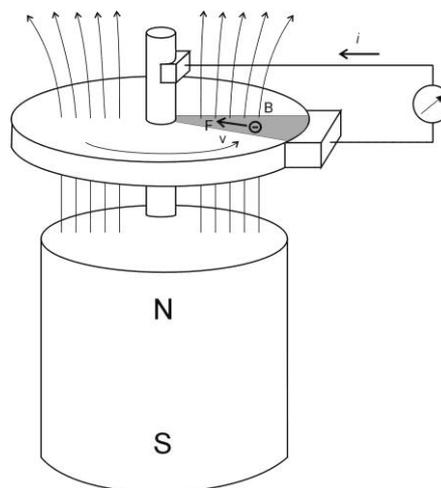


Figura XXII.5: Esquema do disco de Faraday, com o disco girando e o ímã parado.

¹⁷¹ As Figs. XXII.3 e 4 foram obtidas da Wikipédia. A primeira é originalmente do livro de BLACK, N.H. & DAVIS, H.N. (1914), *Practical physics*, e a segunda de ALGLAVE, É. & BOULARD, J. (1884), *The electric light*.

Agora uma outra situação: que acontece se o disco ficar parado e o ímã girar? Será que as linhas de força giram junto com o ímã? O movimento relativo é o mesmo, então esperaríamos que as linhas de força girariam também, e que uma corrente surgiria. Mas não é isso que se observa! Nenhuma corrente é medida no galvanômetro! Isso fez Faraday (1832) concluir que *as linhas de força não giram junto com o ímã*.

Há também um terceiro experimento feito por Faraday: tanto o disco quanto o ímã giram juntos, com a mesma velocidade angular. O que acontece neste caso? Surge corrente! Faraday então concluiu que o que importa é o movimento relativo do disco em relação ao circuito do galvanômetro – o movimento rotacional do ímã não muda nada.

Nos anos subsequentes, outros físicos analisaram a situação. Weber chamou o fenômeno de “indução unipolar” – depois veio a ser chamado “homopolar” – e defendeu a concepção contrária à de Faraday, segundo a qual as linhas de força giram com o ímã. No entanto, somente em 1885 foi apresentada uma explicação satisfatória do fenômeno do ponto de vista da teoria das linhas girantes. O engenheiro telegráfico S. Tolver Preston salientou que as linhas de força girantes não cortam apenas o setor do disco em repouso, *mas também os fios do circuito que levam ao galvanômetro!* No caso em que somente o ímã gira, a força elétrica induzida no disco seria cancelada pelo efeito oposto que ocorre no circuito.

No caso em que tanto o disco quanto o ímã giram com a mesma velocidade angular, as linhas de força cortam apenas o fio do circuito, gerando corrente. Esses experimentos corroboraram (ou seja, não falsearam) a tese da existência de linhas de força que giram junto com o ímã, como os espinhos de um ouriço.¹⁷²

No entanto, no início do séc. XX vários físicos, como S.J. Barnett (1912), desenvolveram uma versão do experimento sem a presença de um fio de corrente, onde o que era detectado era o acúmulo de cargas na borda do disco. A montagem do experimento foi modificada, segundo a Fig. XXII.6. Um ímã gira no interior de dois cilindros condutores parados, conectados por uma haste metálica *H*, que em um certo instante é quebrada. Conforme esperado, há acúmulo de cargas no cilindro externo. Porém, quando os cilindros giram juntos com o ímã, continua havendo acúmulo de cargas, apesar de a haste não estar cortando linhas de força!

Com isso, criou-se um certo consenso de que linhas de força não são reais. “Hoje em dia, a maioria dos físicos aceita que as linhas de força são uma valiosa maneira de descrever um campo, mas que elas não são reais em si mesmas; um campo magnético é definido apenas pelo valor do vetor magnético em cada ponto do espaço.”¹⁷³

No entanto, o ponto é ainda bastante controverso, como aquele visto na seção XXII.2, e diversos físicos, em especial os partidários da Eletrodinâmica de Weber, têm dado

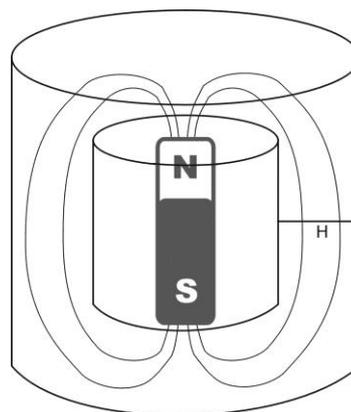


Figura XXII.6: Esquema do experimento do ímã girante dentro de duas cascas cilíndricas condutoras (adaptado de LANGE, p. 59).

¹⁷² Nesta seção simplificamos o relato de LANGE (2002), op.cit. (nota 161), pp. 47-61. A imagem das linhas de força como *quills on a porcupine* (espinhos de um ouriço) foi sugerida por G.W. Carter (1954).

¹⁷³ MONTGOMERY, H. (2004), “Current flow patterns in a Faraday disc”, *European Journal of Physics* 25: 171-83. Citação da p. 172. A explicação weberiana é desenvolvida, entre outros, por ASSIS, A. & THOBER, D. (1994), in Barone, M. & Selleri, F. (orgs.), *Frontiers of fundamental physics*, Plenum, Nova Iorque, pp. 409-14.

explicações para esses experimentos que conservam a noção de que o que importa é o movimento relativo das partes dos equipamentos.

4. O Eletromagnetismo Clássico seria uma Teoria Inconsistente?

O filósofo da física alemão Mathias Frisch vem argumentando que a teoria eletromagnética clássica com a presença de elétrons, descrita pelas equações de Maxwell-Lorentz, é *inconsistente*.¹⁷⁴

Esta surpreendente afirmação está relacionada à exigência de que elétrons acelerados por um campo magnético emitam radiação eletromagnética. Considere um elétron livre de carga q com velocidade \mathbf{v} que se move em um sentido ortogonal a um campo magnético constante \mathbf{B} . A aplicação da lei de Lorentz $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ a este elétron indica que ele acelerará em um sentido ortogonal a \mathbf{v} e \mathbf{B} , descrevendo uma trajetória circular. Por outro lado, a teoria de Maxwell permite calcular os campos eletromagnéticos associados às cargas em movimento, e ela prevê que uma carga que acelera emite radiação eletromagnética. No caso em questão, o elétron emitirá a chamada “radiação síncrotron”. Porém, a lei de Lorentz não contempla uma aceleração diferente daquela radial, que mantém o elétron em órbita circular: se o elétron perde energia, isso deveria ser causado por uma força externa, mas não há tal força. Nisso consiste a contradição mencionada.

Uma maneira de lidar com este problema é considerar que o elétron gera um campo que age sobre si mesmo, um “campo próprio” (*self-field*). Assim, ao irradiar energia, o campo próprio levaria a uma *força de reação* na própria partícula, que perderia velocidade. Frisch argumenta que as tentativas de implementar tal força de reação são problemáticas. Uma teoria consistente só é obtida (sem a necessidade de forças de reação da radiação) para casos em que a carga está distribuída continuamente no espaço (teoria de “poeira carregada”). Não haveria, no entanto, uma teoria clássica de campos eletromagnéticos que envolvesse cargas discretas que fosse consistente.

Tal conclusão tem recebido críticas, como a de Gordon Belot (2007), que argumenta que o uso de uma força de Lorentz para o “campo total”, ou seja, que inclua o campo próprio, leva a uma teoria consistente, desde que não se trabalhe com cargas pontuais. Já F.A. Muller (2007) fornece uma crítica mais forte, argumentando que os físicos teóricos têm tido sucesso em atacar três problemas bem conhecidos, dentro do Eletromagnetismo Clássico: (I) A energia potencial eletromagnética de uma carga pontual diverge. (II) A ocorrência de “pré-acelerações”, quando uma carga acelera antes de a força começar a agir. (III) A ocorrência de “acelerações próprias”, quando uma carga continua acelerando após a força cessou de agir. Muller descreve dois programas de pesquisa que atacam esses problemas, e que chama de Programa de Extensão (iniciado com os modelos esféricos dos elétrons de Abraham e Lorentz) e Programa de Renormalização (iniciado por Dirac para caras pontuais). Por fim, Peter Vickers (2008) fez um balanço do debate, buscando reformular a crítica de Frisch de maneira mais adequada.

¹⁷⁴ FRISCH, M. (2005), *Inconsistency, asymmetry, and non-locality*, Oxford U. Press. A discussão sobre inconsistência começa na seção 2.3; sobre o modelo de distribuição contínua de cargas, ver seção 3.2. Seu trabalho é criticado por BELOT, G. (2007), “Is classical electrodynamics an inconsistent theory?”, *Canadian Journal of Philosophy* 37, pp. 263-82, e por MULLER, F.A. (2007), “Inconsistency in classical electrodynamics”, *Philosophy of Science* 74: 253-77. Ver também VICKERS, P. (2008), “Frisch, Muller and Belot on an inconsistency in classical electrodynamics”, *British Journal for the Philosophy of Science* 59, pp. 767-92.