

Contexto da Descoberta do Eletromagnetismo

Questão: Qual é o papel das imagens e das analogias na ciência?

1. Ampère e o Magnetismo como Epifenômeno

Neste capítulo exploraremos alguns aspectos do “contexto da descoberta” (seção XVI.1) da teoria eletromagnética, especificamente o papel das imagens e das analogias nas descobertas de Faraday e Maxwell.

Em julho de 1820, o dinamarquês Hans Christian Ørsted descobriu que, ao colocar um fio de platina, condutor de corrente galvânica, próximo e paralelamente a uma agulha de bússola, esta tendia a girar para uma posição quase perpendicular ao fio (o efeito não era completo devido ao campo magnético da Terra). Com isso, enunciou sua lei fundamental do eletromagnetismo: “o efeito magnético da corrente elétrica tem um movimento circular em torno dela”.¹⁵¹ Concebeu uma imagem para representar a “força magnética” gerada pela corrente elétrica, que está representada na Fig. XX.1. (Antes de 1860, o termo “força” não era usado de maneira muito precisa, e englobava tanto a força newtoniana quanto o conceito de energia.)

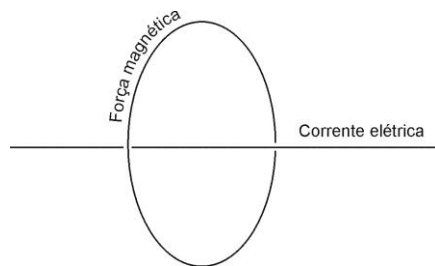


Figura XX.1: Imagem concebida por Ørsted para a força magnética ao redor de uma corrente elétrica.

Em Paris, em setembro do mesmo ano, André-Marie Ampère construiu o primeiro galvanômetro e mostrou que dois fios paralelos, carregando corrente no mesmo sentido, se atraem. Em outubro, François Arago construiu os primeiros solenoides e Jean Baptiste Biot & Félix Savart anunciaram a lei de força entre uma corrente e um ímã. Em 1821, em Londres, Michael Faraday conseguiu produzir um movimento circular constante de um ímã em torno de uma corrente (e vice-versa).

A maioria dos cientistas dava igual importância aos efeitos elétricos, de um lado, e aos efeitos magnéticos, de outro. Podemos dizer que eletricidade e magnetismo tinham o mesmo “estatuto ontológico”, ou seja, considerava-se que ambos existiam na realidade. Ampère, porém, impressionou-se com a equivalência da ação de um ímã e de uma espira de corrente elétrica. A Fig. XX.2 apresenta as forças que surgem entre dois ímãs, em diferentes disposições, e as análogas forças entre duas espiras de corrente. Ampère, então, lançou a hipótese de que a ação magnética nada mais é do que a ação de espiras elétricas de dimensões atômicas! Em outras palavras, os efeitos magnéticos seriam apenas “epifenômenos” dos elétricos, ou seja, no fundo nada mais seriam do que consequências de correntes elétricas fechadas.

Como explicar, porém, o fato de que uma agulha de ferro pode não estar imantada, mas que ao entrar em contato com um ímã, torna-se magnética? Ampère postulou que cada átomo de uma barra de ferro, nas condições normais em que não está magnetizada, teria correntes dispostas de acordo com a superfície de uma maçã (um solenoide toroidal, Fig. XX.3a). O

¹⁵¹ MARTINS, R.A. (1986), “Ørsted e a descoberta do eletromagnetismo”, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 10, pp. 89-114. Este artigo é seguido pela tradução do texto original de Ørsted.

resultando desta disposição seria um campo magnético interno ao átomo (na forma de um círculo passando por dentro das espiras), mas um campo nulo no exterior do átomo. No entanto, se o ferro fosse aproximado de um ímã e se magnetizasse, o que ocorreria, segundo Ampère, seria uma deformação como a da Fig. XX.3b, gerando um campo magnético fora do átomo, perpendicular ao plano do desenho.¹⁵²

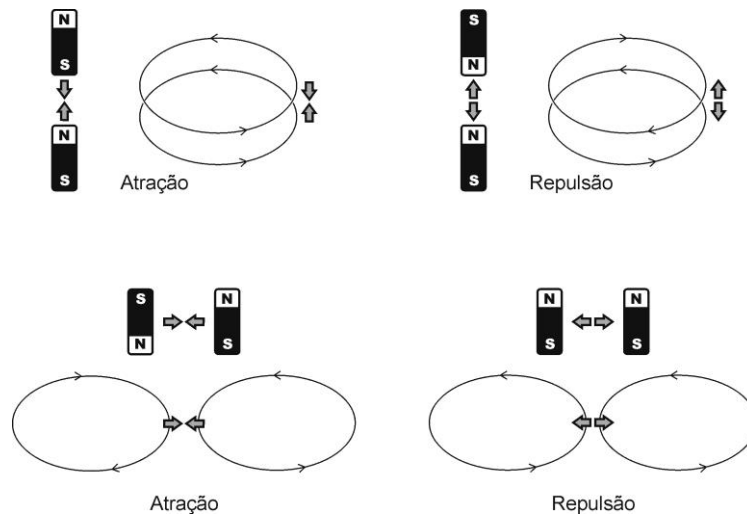


Figura XX.2: Forças entre ímãs e entre espiras de corrente equivalentes.

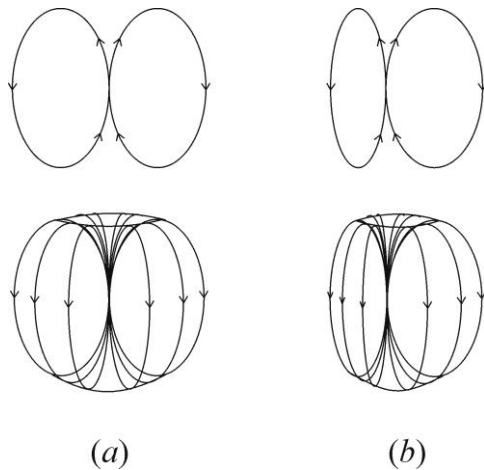


Figura XX.3: Modelo pictórico de um átomo de ferro, segundo Ampère. As linhas referem-se a correntes elétricas nos átomos. O caso (a) representa a situação sem magnetização, e o caso (b) o átomo magnetizado. Neste último caso o campo magnético é perpendicular ao plano do desenho.

Hoje em dia, a tese de que o magnetismo dos materiais é devido a correntes atômicas pode ser sustentada, mas a explicação é estatística. A circulação de elétrons em um átomo de ferro pode ser vista como gerando um campo magnético, mas se tais átomos estiverem orientados ao acaso, o efeito magnético global será nulo. Com a aproximação de um ímã, o que ocorre é um alinhamento dos átomos, de tal forma que seus campos magnéticos apontam mais ou menos na mesma direção e sentido, gerando uma magnetização do material como um todo.

Um problema para a tese de Ampère é o fenômeno do momento magnético intrínseco de elétrons, chamado de “spin”. É como se um elétron fosse um minúsculo ímã. Para tentar explicar esse magnetismo a partir do movimento de cargas elétricas, pensou-se no elétron

¹⁵² A Fig. XX.3 foi adaptada de TRICKER, R.A.R. (1965), *Early electrodynamics*, Pergamon, Oxford, pp. 29-30.

como uma esfera elétrica em rotação, mas os cálculos mostraram que a velocidade de rotação necessária para gerar o spin do elétron violaria a teoria da relatividade restrita. É possível, porém, elaborar outros modelos para o spin do elétron¹⁵³, de maneira a salvar a tese de Ampère do primado ontológico da eletricidade.

Mais recentemente, André Assis apresentou um argumento contra a realidade do campo magnético¹⁵⁴, baseado no princípio de razão suficiente de Leibniz (ver seção XII.3). Se considerarmos uma espira circular em um plano, qualquer força gerada por este sistema em alguma carga localizada no plano estará direcionada *paralela* ao plano (nunca para fora do plano). Que razão teríamos, então, para postular a existência de um vetor de indução magnética apontada para fora do plano? Que razão teríamos para estipular que este vetor está apontado “para cima” do plano e não “para baixo”? Não haveria razão para quebrar essa simetria. Logo, o campo magnético não existiria.

2. Faraday e a Analogia entre Circuitos e Linhas de Força

Faraday assimilou as analogias entre as ações elétricas e magnéticas da Fig. XX.2, e as levou adiante, mesmo não gostando da ideia amperiana de ação à distância entre elementos de corrente. O inglês buscava entender os fenômenos eletromagnéticos em termos de “forças e poderes naturais” que associava a imagens de linhas de força.¹⁵⁵ Sua intuição imagética permanecia mais próxima dos fenômenos que podia observar em seus experimentos, ao contrário de Ampère, cuja imaginação de físico teórico o levava a construir modelos geométricos para os átomos. A imagem que Faraday formou das linhas de força magnética e elétrica era a de um “enlace mútuo” entre dois circuitos (Fig. XX.4).

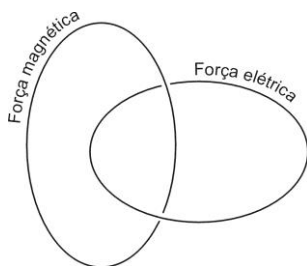


Figura XIX.4: Enlace mútuo entre linhas de força elétrica e magnética. Comparar com a Fig. XX.1.

Ao invés de considerar a abstração de elementos de corrente (ver seção XXII.2), Faraday (1852) trabalhava conceitualmente apenas com linhas de força elétrica, que apareciam nos experimentos como espiras de corrente. Para elas, aceitou a “atração lateral” (ALt) entre espiras paralelas (ou seja, espiras colocadas uma em cima da outra e com a corrente no mesmo sentido). Introduziu também a “extensão longitudinal” (ELg) ou repulsão

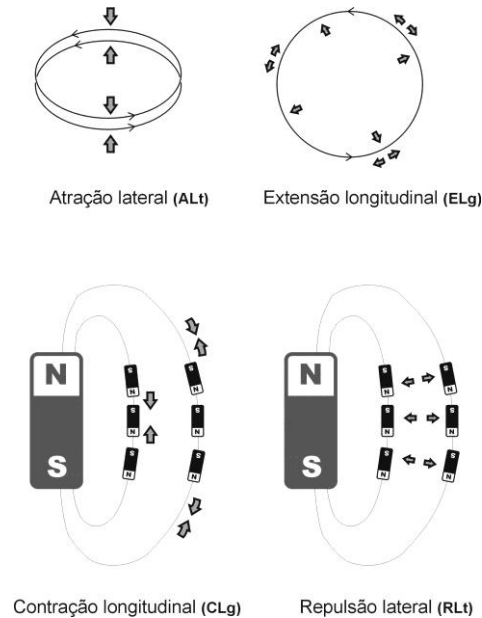
¹⁵³ Uma discussão geral sobre o conceito de spin está em: LÉVY-LEBLOND, J.-M. (1974): “The pedagogical role and epistemological significance of group theory in quantum mechanics”, *Rivista del Nuovo Cimento* 4, 99-143. Para uma interpretação do spin como rotação do campo elétrico, ver: OHANIAN, H.C. (1986), “What is spin?”, *American Journal of Physics* 54, 500-5. Para uma interpretação corpuscular, em que o spin surge de uma trajetória helicoidal do elétron, ver: BARUT, A.O. & ZANGHÌ, N. (1984): “Classical model of the Dirac electron”, *Physical Review Letters* 52, 2009-12.

¹⁵⁴ ASSIS, A.K.T. (1999), “Arguments in favour of action at a distance”, in Chubykalo, A.E.; Pope, V. & Smirnov-Rueda, R. (orgs.), *Instantaneous action at a distance in modern physics – “pro” and “contra”*, Nova Science, Commack (NY), pp. 45-56; ver p. 54.

¹⁵⁵ Nosso estudo das imagens e analogias usadas por Faraday e Maxwell se baseia no artigo de NORTON WISE, M. (1979), “The mutual embrace of electricity and magnetism”, *Science* 203, pp. 1310-8. As Figs. XX.1,2,4,5 e 6 foram adaptadas a partir daquelas deste artigo.

entre as partes de uma mesma espira, uma tendência de ela se esticar e aumentar, pois as correntes em lados opostos se repelem (Fig. XX.5). No caso magnético, Faraday identificou as linhas de força de um grande ímã com a orientação de pequenos ímãs no meio circundante. Percebeu que esses pequenos ímãs teriam também dois tipos de interação. Eles se atraem ao longo de uma mesma linha de força, resultando em uma “contração longitudinal” (CLg). Já os ímãs em linhas paralelas tendem a se repelir, em uma “repulsão lateral” (RLt) (Fig. XX.5).

Figura XX.5: Dinâmica de linhas de força elétrica e magnética, segundo Faraday. A atração lateral (ALt) ocorre entre espiras paralelas. A extensão longitudinal (ELg) é uma repulsão mútua entre partes de uma mesma espira. A contração longitudinal (CLg) envolve a atração entre os pequenos ímãs que se alinhariam em uma linha de força magnética. A repulsão lateral (RLt) é a tendência ao afastamento entre os ímãs em linhas magnéticas adjacentes.



O passo seguinte era relacionar esses conjuntos de atrações e repulsões. A solução deste problema estava na constatação (derivada de Ampère) de que o grande ímã é equivalente a uma pilha de espiras paralelas. A Fig. XX.6 apresenta as linhas de força magnética geradas por uma pilha de espiras. Imagine que essas linhas magnéticas sejam elásticas, e considere sua contração longitudinal (CLg): que efeito isso teria sobre a pilha de espiras? A contração tende a apertar as espiras uma sobre as outras, ou seja, está associada à atração lateral (ALt) entre as espiras! Considere agora a repulsão lateral (RLt) entre as linhas magnéticas, especificamente dentro das espiras: se as linhas se repelem, haveria uma tendência de esticar ou aumentar a circunferência das espiras, ou seja, isso está associado à extensão longitudinal (ELg)!

Podemos exprimir essas relações da seguinte forma:

Figura XX.6: Linhas de força magnética geradas por uma pilha de espiras elétricas, e as quatro interações identificadas por Faraday.

$$\begin{aligned} \text{CLg} &\leftrightarrow \text{ALt} \\ \text{RLt} &\leftrightarrow \text{ELg} \end{aligned}$$

Em 1861, Maxwell apresentaria sua versão matemática para essas duas relações, como veremos a seguir.

3. O Método das Analogias segundo Maxwell

Em 1856, o jovem James Clerk Maxwell escreveu um texto intitulado “Analogias na Natureza”, no qual desenvolveu as concepções de um filósofo chamado Sir William Hamilton (que não deve ser confundido com o matemático de mesmo nome). Hamilton fora influenciado pela filosofia de Kant (ver seção XI.5), que partia da tese fenomenista de que não podemos conhecer as coisas em si, mas apenas os “fenômenos” que aparecem para nós através da observação. Hamilton concordava que não temos acesso às coisas em si, mas concluiu que podemos conhecer as *relações* entre as coisas. Para Maxwell, isso significava que poderíamos conhecer as leis matemáticas que regem um certo objeto, sem saber ao certo qual seria a natureza última deste objeto. A concepção de Hamilton é um exemplo pioneiro do que hoje é denominado “realismo estrutural” (ou “estruturalismo na física”) (seção IV.4), associado posteriormente às visões de Poincaré e Russell.

Por exemplo, sabia-se desde o trabalho de Fourier (1822) que o fluxo de calor h através de uma unidade de área, por unidade de tempo, é proporcional ao gradiente da temperatura: $h = -k \nabla T$. William Thomson (1842), futuro Lorde Kelvin, estendeu essa teoria para a eletrostática, onde o campo elétrico é proporcional ao gradiente de uma função potencial escalar $E = -\nabla\phi$. Uma equação equivalente rege a velocidade de escoamento de um fluido irrotacional: $v = -\nabla\psi$, onde ψ é o potencial da velocidade. Temos assim sistemas com relações idênticas, sugerindo que são sistemas *análogos*. Isso indica que relações que valem para um sistema devem valer para o outro, desde que a analogia se estenda para o domínio em questão. Mas isso pode não valer, como observou Maxwell, pois analogias são geralmente parciais. O exemplo da analogia tripla entre eletricidade, calor e escoamento de um fluido é ilustrativo: ele mostra que não estamos autorizados a concluir que a eletricidade é um fluido material como a água, pois ela poderia igualmente ser um estado de agitação, como o calor. A analogia é entre relações, não entre as coisas relacionadas.¹⁵⁶

Maxwell melhorou a apresentação da analogia entre electricidade e hidrodinâmica considerando um meio resistivo através do qual o fluido escoar, como uma rocha porosa. Quando um fluido incompressível flui entre dois meios de porosidade diferente, o escoamento é contínuo mas surge uma diferença de pressão entre os dois lados da fronteira. Tal analogia ajudou a descrever vários processos que ocorrem em materiais dielétricos e magnéticos. Outro passo foi considerar um meio cuja porosidade varia com a direção. George Stokes havia obtido as equações que descrevem esse fenômeno em um estudo de condução de *calor* em cristais. Elas levavam à conclusão notável de que o vetor que define a direção do movimento do fluido em geral *não* é paralelo à direção do gradiente máximo de pressão. Aplicando a analogia para o magnetismo, Maxwell distinguiu o vetor de indução magnética B do vetor de força magnética H , que podem *não* ser paralelos.

Em um capítulo bastante filosófico de seus *Lições*, Feynman notou que além desses três campos, há equações de escoamento e potencial em outros sistemas, como uma membrana elástica, a difusão de nêutrons e a iluminação uniforme de um plano. Por que essas equações são tão semelhantes? Seria o reflexo de alguma unidade ontológica fundamental da natureza? A conclusão de Feynman é que não: o que ocorre é que tais equações são *aproximações* de distribuições suaves no espaço. Assim, esta semelhança envolveria um fator

¹⁵⁶ Essa discussão é apresentada na p. 1868 da excelente biografia escrita por: EVERITT, C.W.F. (2007), “Maxwell, James Clerk”, in Gillispie, C.C. (org.), *Dicionário de biografias científicas*, trad. C.A. Pereira, Contraponto, Rio de Janeiro, pp. 1860-93 (no original, vol. 9, 1970, pp. 198-230). Em classe, lemos MAXWELL ([1855] 1890), op. cit. (nota 143). Em português, ver também o estudo de BEZERRA, V.A. (2006), “Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física”, *Scientiae Studia* 4, pp. 177-220. Por fim: FEYNMAN et al. (1963 [2008]), op. cit. (nota 128), vol. II, 12-1.

epistêmico: a tendência de o cientista fazer aproximações em suas descrições de sistemas naturais.

4. Analogias com Quantidades e Intensidades

Maxwell definiu duas classes de funções vetoriais, que chamou de *quantidades* Q (fluxos) e *intensidades* I (forças). Fluxos seguem a equação de continuidade e são calculados por uma integral de superfície, como a densidade de corrente \mathbf{J} (Q_e), ao passo que forças são obtidas a partir de uma função potencial, e calculadas por uma integral de linha, como o campo elétrico \mathbf{E} (I_e). Para grandezas magnéticas, o fluxo seria \mathbf{B} (Q_m) e a força seria \mathbf{H} (I_m). Além das relações $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ e $\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$, que são exemplos da relação genérica $Q = kI$ entre quantidades e intensidades, Maxwell se debruçou sobre as relações obtidas por Faraday, Clg \leftrightarrow ALt, e RLt \leftrightarrow ELg, que vimos na seção XX.2. A atração lateral ALt entre espiras de corrente, medida pela densidade de corrente Q_e , tem o mesmo efeito que a contração longitudinal Clg entre as linhas de força magnética, medida por I_m :

$$\oint I_m \cdot d\ell \propto \iint Q_e \cdot dS, \text{ que é a equação de Ampère: } \oint \mathbf{H} \cdot d\ell = 4\pi \iint \mathbf{J} \cdot dS.$$

Na outra relação de Faraday, a extensão longitudinal ELg, medida aparentemente por I_e , tem o mesmo efeito que a repulsão lateral RLt entre linhas magnéticas, medida por Q_m :

$\oint I_e(?) \cdot d\ell \propto \iint Q_m \cdot dS$. Neste caso, porém, Maxwell concluiu que a intensidade elétrica I_e , ou seja, \mathbf{E} , não poderia constar da equação, pois a equação obtida seria falsa. A analogia entre os sistemas magnético e elétrico quebra neste ponto, mas Maxwell encontrou uma maneira de preservar as simetrias entre as relações de Faraday, introduzindo uma outra grandeza no lugar de I_e , que seria o “estado eletrotônico” I_0 , proposto por Faraday, e posteriormente chamado de potencial vetor \mathbf{A} :

$$\oint I_0 \cdot d\ell \propto \iint Q_m \cdot dS, \text{ que é a equação relacionando } \mathbf{A} \text{ e } \mathbf{B}: \oint \mathbf{A} \cdot d\ell = \iint \mathbf{B} \cdot dS,$$

ou seja, a circulação de \mathbf{A} ao longo de qualquer circuito é igual ao fluxo de \mathbf{B} através do circuito. Esta segunda lei equivale à ausência de cargas magnéticas ($\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$).

Este foi o resultado do primeiro trabalho sobre eletromagnetismo de Maxwell, publicado em 1856, e mostra a força heurística do método de analogias.

5. O Uso de Modelos Mecânicos

No seu trabalho seguinte sobre o assunto, em 1861, Maxwell derivaria a equação de Faraday para a indução eletromagnética.

O historiador Daniel Siegel salienta que, nesse novo trabalho, Maxwell abandonou o “método da analogia física”, herança recebida da “ênfase escocesa na analogia, enraizada em uma combinação de empirismo baconiano e sofisticação filosófica do senso comum, e transmitida através de James D. Forbes, William Hamilton e William Thomson”. Ganhando confiança nos resultados de seu primeiro trabalho, “Maxwell abraçou o método hipotético de John Herschel, William Whewell e a escola de Cambridge”.¹⁵⁷ Assim, formulou a hipótese

¹⁵⁷ SIEGEL, D.M. (1991), *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory*, Cambridge U. Press, p. 54.

física da existência de vórtices moleculares, em um sentido realista, e apresentou um modelo mecânico para o fenômeno eletromagnético, descrito na Fig. XX.7.

Porém, no final dos anos 1860, Maxwell perdeu o entusiasmo por sua hipótese, e passou a adotar uma postura mais instrumentalista. “Nesta fase final do trabalho de Maxwell, uma confiança contínua mas limitada e nuançada em certos aspectos da teoria dos vórtices moleculares coexistiu com uma ênfase predominante em uma variedade mais abstrata de teoria mecânica – baseada no formalismo lagrangiano – que renunciava completamente ao uso de imagens mecânicas concretas”. Segundo Siegel (pp. 54-55), “o afastamento de Maxwell dos modelos mecânicos foi um dos eventos que precipitou o declínio da visão de mundo mecânica e a transição para os formalismos físicos mais abstratos do século XX.”

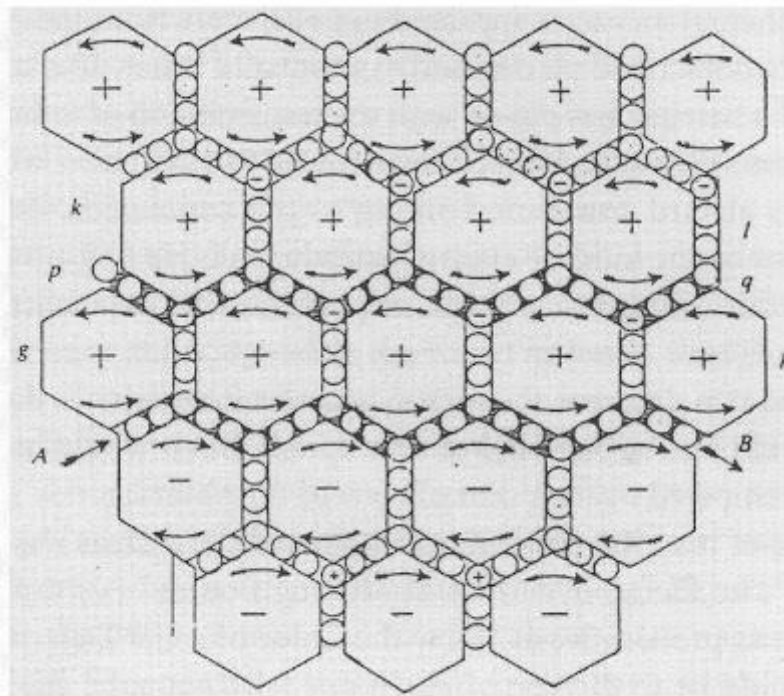


Figura XX.7: Modelo de vórtices moleculares e partículas elétricas em um condutor (Maxwell, 1861). Uma corrente que passa de A até B, envolvendo bolinhas elétricas, põe os vórtices magnéticos adjacentes em movimento circular, e esse movimento é transmitido sucessivamente para os outros vórtices por intermédio das partículas elétricas que giram sobre seu próprio eixo, sem se deslocar. Nota-se que o sentido de rotação dos vórtices é diferente em cada lado da corrente. Por outro lado, se o movimento entre A e B é acelerado (correspondendo a uma variação na corrente elétrica), um impulso se comunica por meio dos vórtices, e uma corrente em sentido oposto é gerada entre q e p, até se dissipar por atrito. Essa seria a indução eletromagnética (alguns erros no desenho original de Maxwell estão aqui corrigidos).