Este arquivo contém o texto completo do seguinte trabalho:

MARTINS, Roberto de Andrade. Contribuição do conhecimento histórico ao ensino do eletromagnetismo. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **5**: 49-57, 1988.

Este arquivo foi copiado da biblioteca eletrônica do Grupo de História e Teoria da Ciência <http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/> da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), do seguinte endereço eletrônico (URL):

<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-31.pdf>

Esta cópia eletrônica do trabalho acima mencionado está sendo fornecida para uso individual, para fins de pesquisa. É proibida a reprodução e fornecimento de cópias a outras pessoas. Os direitos autorais permanecem sob propriedade dos autores e das editoras das publicações originais.

---

This file contains the full text of the following paper:

MARTINS, Roberto de Andrade. Contribuição do conhecimento histórico ao ensino do eletromagnetismo. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **5**: 49-57, 1988.

This file was downloaded from the electronic library of the Group of History and Theory of Science <http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/> of the State University of Campinas (UNICAMP), Brazil, from following electronic address (URL):

<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-31.pdf>

This electronic copy of the aforementioned work is hereby provided for exclusive individual research use. The reproduction and forwarding of copies to third parties is hereby forbidden. Copyright of this work belongs to the authors and publishers of the original publication.

# CONTRIBUIÇÃO DO CONHECIMENTO HISTÓRICO AO ENSINO DO ELETROMAGNETISMO*

ROBERTO DE A. MARTINS
INSTITUTO DE FÍSICA - UNICAMP
CAMPINAS - SP

## 1. Introdução

O objetivo deste curto artigo é explorar, através de um exemplo, o modo pelo qual a História da Física pode contribuir para o esclarecimento conceitual de certos pontos básicos da Física. O exemplo estudado é um fenômeno muito simples - a produção de um campo magnético em torno de um fio percorrido por uma corrente elétrica. Como é bem sabido, este efeito, descoberto por Oersted em 1820, foi o que desencadeou todo o estudo do eletromagnetismo - e é usualmente descrito em todos os livros-textos de 2º e 3º graus (Física Geral). O artigo procurará mostrar que esse fenômeno apresenta certos problemas não banais para sua compreensão e que esses problemas podem ser esclarecidos recorrendo-se à História da Física.

## 2. O problema

Quando se coloca um fio condutor retilíneo sobre a agulha de uma bússola, paralelamente à mesma (direção norte-sul) e se passa pelo fio uma intensa corrente elétrica, a agulha se desvia de sua posição e adquire uma direção muito próxima à leste-oeste (perpendicular à direção do fio). Invertendo-se o sentido da corrente, inverte-se o sentido da agulha magnética. Colocando-se o fio sob a bússola, o efeito também se inverte.

Os livros-textos costumam explicar esse fenômeno afirmando que a corrente elétrica produz, em torno do fio condutor, um campo magnético cujas linhas de força formam circunferências concêntricas ao fio - ou seja, o campo não é nem paralelo ao fio, nem

*Esta versão da palestra apresentada em Florianópolis, por ocasião do I Ciclo de Seminários sobre História da Ciência, em outubro de 1987, difere bastante da apresentação oral. Por um lado, o artigo é muito mais condensado e por isso mesmo menos fácil de seguir do que a palestra; embora seja um artigo sobre ensino, não é um artigo didático. Por outro lado, o artigo é mais completo, por esclarecer alguns pontos que preferi deixar em aberto na exposição oral.

se irradia dele, mas sim circula em torno dele. O sentido de circulação do campo magnético é dado pela regra da mão direita: estendendo-se o polegar da mão direita e dobrando os outros dedos, então, se o polegar indica o sentido da corrente elétrica, os outros dedos indicam o sentido de circulação do campo magnético.

A regra da mão direita é um recurso mnemônico que, é claro, não explica nada: por que motivo o campo magnético tem um sentido e não o oposto? A resposta usual dos professores é: "por convenção". Algum professor poderá também responder, de modo mais adequado: "porque assim é possível explicar os fenômenos". Mas isso não esclarece um problema que, usualmente, é percebido pelos estudantes: como é que uma corrente elétrica, que tem direção paralela ao fio, pode criar algo que gira em certo sentido em torno dele?

Lembro-me que eu próprio, enquanto estudante, tive esta dúvida. Meu professor considerou minha dúvida estúpida, pois havia se acostumado com a idéia do campo magnético circulando em torno do fio. Eu próprio acabei por me acostumar à idéia e apenas muitos anos depois, ao desenvolver certos estudos de História da Física, percebi que a dúvida não era idiota e compreendi sua resposta.

Antes de mais nada, é preciso entender que há de fato aqui um problema conceitual. O modo mais simples de expô-lo é utilizando a noção "intuitiva" de simetria.

Suponhamos que, antes da passagem da corrente elétrica, o fio e a bússola estão exatamente na direção norte-sul, com o fio exatamente acima da bússola. O plano vertical que contém o fio e a bússola é, aparentemente, um plano de simetria do sistema: não parece haver nada que diferencie um lado do plano do outro. Da mesma forma, quando a corrente elétrica percorre o fio, a simetria deveria se manter a mesma: não haveria, aparentemente, nenhum motivo para a agulha se desviar para um lado ou para o outro do plano. Pelas condições de simetria, apenas poderíamos esperar que a corrente produzisse algum efeito sobre a agulha magnética que a fizesse mover-se nesse mesmo plano (por exemplo, sendo atraída ou repelida pelo fio, ou tendo um de seus pólos atraído e o outro repelido). A experiência contraria a espectativa. Como entender isso?

Como se verá ao final deste artigo, o problema, do modo como foi exposto, é insolúvel. Uma quebra de simetria desse tipo é incompreensível. O problema só poderá ser resolvido, ao final, por uma alteração da nossa conceituação, da própria descrição do problema.

## 3. A dificuldade histórica

É impossível, neste artigo, descrever em detalhe as circunstâncias que envolveram a descoberta do eletromagnetismo (os

interessados poderão consultar MARTINS, 1986). Sem apresentar a documentação comprovatória, citarei no entanto alguns aspectos importantes do trabalho de Oersted.

A busca de uma relação entre eletricidade e magnetismo era consciente para Oersted e muitos de seus coetâneos. Muitas experiências haviam sido feitas buscando observar uma interação, por exemplo, entre um ímã e uma pilha de Volta, sem resultado. Oersted tentara, várias vezes, observar algum efeito da corrente elétrica em uma bússola, infrutiferamente. A longa busca pela relação entre a eletricidade e o magnetismo foi retardada, principalmente, porque ninguém podia esperar, "a priori", a produção de um campo magnético circulando em torno do fio. Quando, por fim, Oersted observou a interação entre a corrente e a bússola, o fenômeno lhe pareceu inicialmente irregular. Apenas a repetição controlada e cuidadosa do experimento acabou por conduzi-lo à idéia de um campo circular (OERSTED, 1986).

Após a divulgação do trabalho de Oersted, a reação mais comum dos físicos foi de incredulidade perante o fenômeno. Não porque fosse incrível uma relação entre eletricidade e magnetismo - pelo contrário, isso era perfeitamente aceitável. O que não se podia conceber era aquele campo magnético circulando em torno do fio.

Dentre os vários efeitos que essa reação produziu, pode-se citar a própria direção tomada pelos trabalhos de Ampère. Achando absurda a teoria de Oersted, Ampère procurou reduzir o eletromagnetismo à eletrodinâmica, tomando como fenômeno básico a interação entre correntes elétricas e explicando o magnetismo como efeito secundário de correntes circulares. Na opinião de Ampère, a grande vantagem dessa abordagem é que as forças entre correntes elétricas são de simples atração e repulsão, desaparecendo a quebra de simetria, pois o próprio ímã se torna sede de um fenômeno de rotação que permite explicar o sentido do deslocamento da bússola. Ampère procurou banir da Física o conceito de campo magnético (o que, em geral, não é conhecido). Mas não foi bem sucedido. Esse conceito reaparece com Maxwell, que o adotou de Faraday, que, por sua vez, era ardoroso admirador e defensor de Oersted (para detalhes sobre todas as afirmações desta seção, ver MARTINS, 1986).

É importante perceber que, do ponto de vista da eletrodinâmica de Ampère, não existe o problema exposto na seção anterior. Eliminemos os conceitos de campo magnético e pólos magnéticos. Consideremos o plano vertical que contém a agulha magnética e o fio condutor. Este plano vertical é um plano de simetria para o fio percorrido pela corrente elétrica; mas não o é em relação à agulha imantada, que é correspondente a um solenóide percorrido por uma corrente elétrica que circula em um sentido e não no outro.

Na visão de Ampère, é exatamente esta a fonte da aparente quebra de simetria: havia uma rotação oculta (dentro da agulha imantada) que vai permitir explicar porque a bússola gira em um sentido e não para o outro. Se não houvesse essa rotação, não poderiam surgir efeitos perpendiculares ao plano. Note-se, aliás, que se vários condutores coplanares, de formas quaisquer, interagirem eletrodinamicamente, jamais surgirão efeitos físicos (forças) perpendiculares a esse plano comum, que é um plano de simetria. Esse resultado geral não é óbvio, se pensarmos que em torno desses condutores existem campos magnéticos perpendiculares ao plano.

## 4. Simetria das grandezas físicas

Para nós, que fomos educados na tradição de Maxwell, seria doloroso exigir o abandono do conceito de campo magnético. Pessoalmente, debati-me com o problema das quebras de simetria do eletromagnetismo durante muito tempo, sem chegar ao fundo (ver MARTINS, 1971)*. Foi o estudo dos trabalhos de Pierre Curie a respeito das simetrias que me permitiu compreender toda a questão.

Curie foi o primeiro físico a formular claramente as noções de simetria aplicadas às grandezas físicas (CHALMERS, 1970) e a enunciar em sua forma completa o "princípio da simetria": "A simetria das causas subsiste nos efeitos" (ver CURIE 1884b, 1894a).

O trabalho de Curie é pouco conhecido e mereceria um estudo detalhado. Será necessário aqui, no entanto, citar apenas os pontos fundamentais relevantes para a discussão do problema colocado acima.

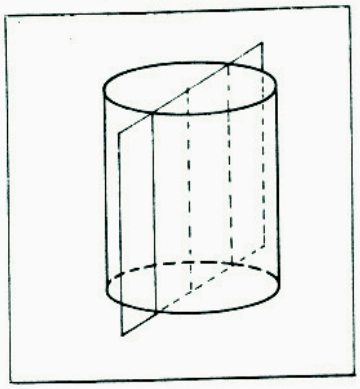
Propriedades de simetria são essencialmente propriedades de objetos geométricos e originaram-se de seu estado (BRAVAIS, 1849; CURIE 1884a). Elas são aplicáveis a grandezas físicas (forças, velocidades, campo elétrico, etc.) exatamente porque associamos uma estrutura geométrica a essas grandezas. A análise de Curie parte de objetos geométricos e, posteriormente, aplica os resultados a grandezas físicas.

Os dois tipos de simetria básicos que precisamos discutir são os exemplificados por um cone e por um cilindro em rotação em torno de seu eixo. É conveniente, no entanto, partir da análise de um cilindro sem rotação.

Um cilindro finito parado tem dois elementos de simetria: ele é simétrico em relação a seu eixo e em relação a um plano transveral a esse eixo, que passe por seu centro. Ou seja: a cada ponto pertencente ao cilindro corresponde um outro diretamen

*Esse artigo não me parece, ainda hoje, errado. Apenas não levou à solução geral do problema, pois não utilizava os conceitos de grandeza axial e pseudo-escalar.

te oposto em relação a esse eixo e a esse plano. O eixo de simetria pode ser considerado como a intersecção de um número infinito de planos de simetria: qualquer plano que contenha o eixo do cilindro é um desses planos de simetria; a imagem do semicilindro é idêntica ao outro semicilindro. Outras figuras geométricas que possuem os mesmos elementos de simetria de um cilindro são: um disco circular; uma reta; um anel; um toróide gerado pela revolução excêntrica de um círculo; etc..



No caso de um cone, seu eixo é também um elemento de simetria; porém, um plano perpendicular ao eixo do cone, em seu centro, não é, é claro, um plano de simetria. Outras figuras que possuem os mesmos elementos de simetria do cone são: um segmento de reta orientada; o conjunto de dois pontos qualitativamente diferentes; etc. O tipo de simetria do cone é denominado "polar".

No caso de um cilindro em rotação, surge algo de novo: os planos que passam por seu eixo não são elementos de simetria, pois a imagem do semicilindro girando não é idêntica ao outro semicilindro (giram em sentidos opostos). O cilindro girando é simétrico apenas em relação ao plano perpendicular ao seu eixo, que passa por seu centro. O tipo de simetria do cilindro girante é denominado "axial".

É fácil encontrar, na mecânica, exemplos de grandezas físicas com simetrias polar e axial. A velocidade, a aceleração, a força, o momentum - são representados por segmentos de retas orientadas, possuindo simetria polar. São vetores propriamente ditos. É neste caso que nossa "intuição" de simetria se aplica mais facilmente (PAINLEVÉ, 1905). Por outro lado, a velocidade angular, o torque e o momentum angular são grandezas com simetria axial. O "produto vetorial" de dois vetores produz uma grandeza axial. O rotacional de um campo vetorial também é uma grandeza axial - e vi-

ce-versa. São pseudovetores, às vezes chamados (por abuso de linguagem) de "vetores axiais". É importante mencionar que, algebricamente, suas representações são bem diferentes: os vetores(polares) são tensores de primeira ordem; as grandezas axiais são tensores antisimétricos de segunda ordem.

5. Simetria dos campos elétrico e magnético

Voltemos ao eletromagnetismo. Costumamos fazer uma analogia completa entre as grandezas eletrostáticas e as magnetostáticas: os pólos magnéticos são análogos às cargas elétricas (os iguais se repelem e opostos se atraem) e por isso os campos elétrico e magnético também são pensados como análogos (aliás, ambos obedecem a leis semelhantes). Pólos magnéticos e cargas elétricas são escalares; campos magnéticos e elétricos são vetores; etc..

Ora, é exatamente isto que gera todo o problema! Imaginamos a corrente elétrica em um fio retilíneo como um vetor; sua simetria é polar; o efeito gerado pela corrente só pode ter simetria polar, de acordo com o princípio da simetria de Curie. Mas, se o campo magnético é um vetor, então um campo magnético circulando em torno do fio tem simetria axial. Ocorreria então uma quebra de simetria.

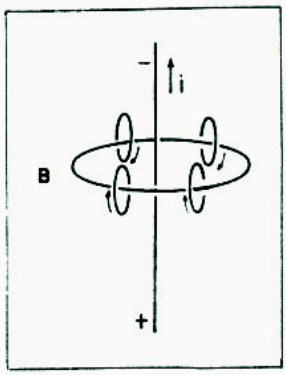
Sem estudar este caso particular, mas através de argumentos muito mais gerais, Curie estabeleceu de forma definitiva o seguinte resultado: é impossível que tanto o campo elétrico quanto o campo magnético sejam vetores, ao mesmo tempo. Uma teoria eletromagnética coerente só pode ser formulada se um deles for um vetor (polar) e o outro um pseudovetor (axial).

Imaginemos, por exemplo, que o campo elétrico seja um pseudovetor. Neste caso, a corrente elétrica (um efeito produzido pelo campo elétrico em um material isotrópico) deve ter a mesma simetria e será um pseudovetor. O efeito dessa corrente elétrica, nas proximidades do fio, terá a mesma simetria, igual a de um cilindro girando. Neste caso, isso seria compatível com um campo magnético (vetorial) circulando em torno do fio, que também corresponde, no seu conjunto, a uma simetria axial.

Normalmente, adota-se a escolha oposta: escolhe-se o campo elétrico como um vetor e o campo magnético como um pseudovetor. Neste caso, a corrente elétrica e seus efeitos em torno do fio possuem simetria polar. O campo magnético pode formar linhas circulares em torno do fio - pois essas linhas são compatíveis com a simetria polar - mas não pode ser representado por circunferências orientadas, como algo que gira em torno do fio.

Se adotamos a natureza vetorial do campo elétrico, este pode ser representado por setas; o campo magnético, pelo contrário, deverá ser imaginado como tubos girando em torno de seu ei

xo (ou outra imagem geométrica com igual simetria axial). Note-se que não se trata aqui de propor um modelo mecânico para o magnetismo. Trata-se apenas de associar alguma imagem geométrica às grandezas físicas.




Assim, a imagem do campo magnético em torno do fio é de um tubo fechado, que tem um movimento giratório local em torno de si próprio - e não em torno do fio. Esse tubo, girando desta forma, possui, evidentemente, simetria polar, quando considerado como um todo. Assim, a simetria das causas se mantém nos efeitos e nada gira em torno do fio.

Há um último problema a discutir: se o campo magnético não circula em torno do fio, por que motivo o pólo magnético da bússola vai se mover em um sentido e não para o outro?

Este é talvez o aspecto mais estranho de todos. Não podemos resolvê-lo apenas dizendo que não existem pólos magnéticos livres - isso é apenas fugir ao problema (veja-se, curiosamente, a discussão de CURIE 1894b sobre monopólos livres). A solução é a seguinte: os pólos magnéticos, se forem admitidos na teoria, terão que ser pensados como pseudo-escalares. Os pseudo-escalares podem ser pensados, geometricamente, como entes quase dotados de simetria esférica, com uma diferença: em relação a qualquer plano que passe pelo seu centro, a imagem do semi-pseudo-escalar é, de certa forma, inversa à do outro semi-pseudo-escalar. Um exemplo é uma superfície esférica sobre a qual todos os pontos, vistos do centro da esfera, possuem uma rotação no sentido horário.

Se o campo magnético é uma grandeza axial, os pólos magnéticos (hipotéticos) devem ser pseudo-escalares que, de certa forma, possuem algo análogo a rotações internas que podem gerar, em torno de si, coisas análogas aos tubos girantes. É a natureza pseudo-escalar do pólo magnético que explica a aparente quebra de simetria do fenômeno descoberto por Oersted.

Apenas para não ser compreendido erroneamente, permitam-me enfatizar isto: o raciocínio acima não é a sugestão de um modelo mecânico para o eletromagnetismo. A imagem de um tubo em rotação é uma imagem geométrica simples para qualquer coisa com simetria axial. Não estou afirmando que exista algo girando no campo magnético; estou estabelecendo condições gerais e exemplos de imagens possíveis para uma descrição do eletromagnetismo.

## 6. Conclusão

Imagino que a 5ª seção deste artigo será recebida com espanto e estranheza. Por isto, quero formular aqui algumas conclusões que independem dos detalhes apresentados nessa parte do trabalho.

O artigo mostrou que um ponto fundamental da teoria eletromagnética (a geração de um campo magnético que circula em torno de um fio) oculta problemas conceituais profundos; que, dentro da descrição usual dos livros-textos, é impossível compreender as propriedades de simetria do fenômeno; que a aparente quebra de simetria foi notada, historicamente, desde a descoberta de Oersted e que gerou oposição e reação à sua descoberta. O estudo histórico poderia permitir aos professores, portanto,compreender melhor o assunto, entender as dúvidas de seus estudantes, respeitar as dificuldades do assunto e tentar abordar o problema com cuidado. Não tenho dúvidas de que a solução de Curie, aqui descrita muito suscintamente, resolve totalmente o problema, no domínio geométrico (ao qual pertence o estudo da simetria). Independentemente disso, no entanto, espero ter mostrado que o estudo histórico pode dar uma grande contribuição ao ensino conceitual, mais profundo da Física*.

## Agradecimento

Sou grato ao apoio permanentemente recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para minhas pesquisas.

## Referências Bibliográficas

1. BRAVAIS, M.A. Mêmoire sur les polyèdres de forme symétrique. J. Math. Pures Appl., 14.

2. CHALMERS, A.F. Curie's principle. Brit. J. Phil. Sci., 21: 133-48, 1970.

*Note-se que não estou afirmando que esta é a única utilidade da História da Física. Dentre as muitas possíveis aplicações da História da Ciência ao ensino escolhi apenas uma, para discuti-la em detalhe.

3. CURIE, P. Sur les questions d'ordre: répétitions. Bull. Soc. Minéral. France, 7: 89-111, 1884. (a)

4. ———. Sur la symétrie. Ibidem, 7: 418-57, 1884. (b)

5. ———. Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ éléctrique et d'un champ magnétiques. J. Phys. Théor. Appl., 3(3): 393-415, 1894. (a)

6. ———. Sur la possibilité d'existence de la condutibilité magnétique et magnétisme libre. Ibidem, 3(3): 415-7, 1894. (b)

7. MARTINS, R.A. Causas locais. Protofísica, (4): 20-5, 1971.

8. ——— . Oersted e a descoberta do eletromagnetismo. Cad. Hist. Fil. Ciê., (10): 89-114, 1986.

9. OERSTED, H.C. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. Trad. e com. de Roberto de A. Martins. Cad. Hist. Fil. Ciê., (10): 115-22, 1986.

10. PAINLEVÉ, P. Les axiones de la mécanique et le principe de causalité. Bull. Soc. Fr. Phil., 5: 27-72, 1905.