

Nota sobre a questão: Pode o campo magnético realizar trabalho?

(A comment on the question: Can the magnetic field perform work?)

G.F. Leal Ferreira

Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.

Recebido em 4/8/03; Aceito em 12/3/04

A nota mostra que modificações devem ser cuidadosamente introduzidas na base conceitual do Magnetismo para que a resposta à questão exposta no título seja um sim sem sobressaltos.

Palavras-chave: trabalho magnético, indução magnética, campo magnético, magnetismo da matéria.

The comment shows what changes must be carefully introduced in the conceptual basis of the Magnetism in order to calmly answer yes to the question raised in the title.

Keywords: magnetic work, magnetic induction, magnetic field, matter magnetism.

É bem conhecido que nos motores elétricos uma componente do campo magnético executa trabalho mecânico enquanto a componente a ela normal recebe trabalho elétrico, de tal forma que o trabalho total do campo magnético de indução é nulo. Estamos nos referindo ao campo magnético constante no tempo, já que o variável, pelo campo elétrico que cria, pode, naturalmente, realizar trabalho. Tomemos agora dois ímãs permanentes livres. A experiência mostra que um pode acelerar o outro de uma variedade de maneiras e, portanto, temos que aceitar que nesse caso o campo magnético realiza trabalho, apesar do desconforto que a afirmativa nos causa, apegados que estamos à máxima pela qual o campo magnético de indução não realiza trabalho. Como resolver esse impasse?

Ouçamos primeiro o que afirma o tantas vezes clarevidente Feynman [1]: 'Esta pura correspondência algébrica (entre H e E) levou a alguma confusão no passado. As pessoas tenderam a pensar que H era 'o campo magnético', mas como temos visto, B e E são fisicamente os campos fundamentais e H é uma idéia derivada'. E o conhecido especialista em susceptibilidades elétrica e magnética, Van Vleck, diz que embora B seja o vetor fundamental, ele manterá uma certa notação '...para nos conformar mais de perto à literatura existente que considera H como o vetor magnético fundamental' [2]. O fato é que o ensino do magnetismo da matéria sofre de dubiedades, bem ao contrário do da eletrostática dos dielétricos. Neste assume-se francamente que a polarização induzida é criada pelo campo elétrico, mas no magnetismo, embora o campo fundamental seja o B , 'campo de indução', a magnetização aparece como dependente de H , chamado de 'campo magnético' (!). Em [3], o autor diz que a magnetização induzida é bem descrita por $M = \chi H$, o que está certo, mas não explica por que a magnetização não é relacionada a B . Acreditamos ter resolvido este problema em [4], juntamente com o angustiante paradoxo do campo desmagnetizante. Brevemente,

em [4] mostra-se que no magnetismo de orientação - como o para e o ferromagnetismo -, o campo eficaz na orientação dos dipolos magnéticos é o H enquanto que no diamagnetismo o campo atuante é o B . Isto é, lembrando que $B = H + 4\pi M$, M não tem ação orientadora sobre os próprios dipolos magnéticos da matéria, e só a parte H de B o tem. O paradoxo do campo desmagnetizante é imediatamente resolvido por ser H o campo atuante e não B . Resulta, então, que não é certo dizer como Feynman e Van Vleck, que o campo físico é o B , se na orientação dos dipolos magnéticos da matéria só a parte H de B opera. É claro que no que tange ao campo magnético criado por esses dipolos magnéticos, ele é tão bom como o criado pelas correntes.

Vê-se, então, que, ao contrário da eletrostática em que só há um campo agente para cargas e dipolos, pode-se dizer que no magnetismo há dois campos agentes, conforme as entidades agidas, B nas cargas 'livres' e H nos dipolos magnéticos da matéria. Esses dipolos magnéticos, diferentemente dos dipolos magnéticos do tipo de corrente elétrica em bobinas, não estão sujeitos a efeitos de indução [4], e comportam-se essencialmente da mesma forma que os dipolos elétricos e, como estes, podem realizar trabalho. Portanto, as chamadas 'massas magnéticas fictícias' ligadas às variações da magnetização, são tão reais como as cargas de polarização.

A existência de entidade magnética alternativa à carga livre em movimento está mesmo prevista pela Mecânica Estatística. Como comentado em [5-7], pelo Teorema de Madame J.H. van Leeuwen, a matéria não poderia apresentar magnetização induzida sob a ação de um campo magnético pelo fato deste ser incapaz de modificar a energia do sistema, não realizando trabalho sobre seus componentes (pensa-se aqui no B perpendicular à velocidade). O magnetismo da matéria deve ser atribuído ao fato dos componentes do sistema, elétrons, átomos, íons e moléculas, terem de obedecer a certas regras - os estados quantizados -, de propriedades bem definidas. Por exemplo, o elétron no estado $2p$ do átomo de hidrogênio, com $m = \pm 1$, adquire energias definidas num campo magnético e há trabalho

Enviar correspondência para G.F. Leal Ferreira. Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, DFCM, C.P. 369, 13.560-970 São Carlos, SP, Brasil. E-mail: guilherm@if.sc.usp.br.

envolvido de acordo com o valor de m . Note-se que até mesmo na experiência de Stern-Gerlach, pela qual descobriu-se o ‘spin’ do elétron [7], o campo magnético não homogêneo realiza trabalho sobre os feixes que se separam porque agem sobre dois estados quantizados de orientação do ‘spin’ eletrônico, que não se alteram no processo.

Portanto, podemos responder com toda a naturalidade à pergunta contida no título: Sim, o campo magnético estático pode realizar trabalho, em materiais magnéticos através de H , parte de B .

Agradecimento

Agradeço à Profa. Rosana Hernandez por ter me chamado a atenção para o problema.

Referências

- [1] R. Feynman, R. Leighton e M. Sands, *The Feynman Lectures* (Addison-Wesley, 1964), v. II, cap. 36.
- [2] J.H. Van Vleck, *The Theory of Electric and Magnetic Susceptibilities* (Oxford Un. Press, 1952), p. 3.
- [3] E. Durand, *Électrostatique et Magnétostatique* (Masson, 1953), cap. XV.
- [4] G.F. Leal Ferreira, *Rev. Bras. Ens. Física*, **23**, 252 (2001).
- [5] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica, Eletromagnetismo* (Ed. Edgard Blücher), cap. 11.
- [6] R. Feynman, R. Leighton e M. Sands, *The Feynman Lectures* (Addison-Wesley, 1964), v. II, cap. 34.
- [7] Alaor Chaves, *Física- Eletromagnetismo*, v. II, cap. 25, Reichmann & Affonso Editores, 2001.
- [8] R. Feynman, R. Leighton e M. Sands, *The Feynman Lectures* (Addison-Wesley, 1964), v. II, cap. 35.