



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br



Razão Giromagnética do Elétron.

Conforme vimos em verbete desta série, em 1822, o físico francês André Marie Ampère (1775-1836) apresentou a ideia de que o magnetismo natural era consequência de a substância magnética, que apresenta tal propriedade, ter em seu interior uma infinidade de espiras que são percorridas por correntes elétricas; tais correntes foram mais tarde chamadas de *correntes amperianas*. Em 1826 (*Annales de Chimie et de Physique* 32, p. 213), o físico francês Dominique François Jean Arago (1786-1853) mostrou que um disco de cobre (Cu) em rotação era capaz de afetar uma agulha magnética colocada em sua proximidade. Uma primeira explicação desse *magnetismo de rotação* foi dada pelo físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867) ao afirmar que esse magnetismo decorria de correntes elétricas (“amperianas”) surgidas no disco girante. Essa explicação foi apresentada por ele em seu célebre tratado intitulado *Experimental Researches in Electricity* (“Pesquisas Experimentais em Eletricidade”) [Michael Faraday, *Great Books* 42 (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1993)], que começou a escrever, em 1831, e no qual registrou os resultados de suas experiências sobre eletricidade. Note que ele levou 24 anos até considerá-lo como concluído, pois, esse tratado composto de três livros, teve a sua publicação somente iniciada em 1839 e concluída em 1855. O *magnetismo de rotação* também foi tratado pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) em seu célebre livro, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (“Um Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo”), publicado em 1873 (existe uma edição da Dover Publications Inc., de 1954), no qual há a descrição de um dispositivo experimental, idealizado por Maxwell, em 1861, para comprovar a conjectura de Arago. Por sua vez, em 1890, no livro intitulado *Spinnings Tops* (“Piões Girantes”), o engenheiro irlandês John Perry (1850-1920) supôs que o movimento periódico rápido de uma grande massa de ferro (Fe), poderia deslocar uma agulha magnética suspensa em seus arredores. [Sir Edward Taylor Whittaker, *A History of the Theory of Aether and Electricity. The Modern Theories: 1900-1926* (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1953); Jagdish Mehra and Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1 (Parts 1,2)* (Springer-Verlag, 1982)].

Uma nova visão da “corrente amperiana” começou a ser discutida nas primeiras décadas do Século 20, em decorrência do modelo atômico proposto, em 1904, pelo físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950), segundo o qual o átomo era formado por uma parte central carregada positivamente e rodeada de elétrons girando em torno da mesma. Tal giro indicava que a “corrente amperiana” possuía um momento angular \vec{L} . Logo depois, em 1905, para poder explicar as propriedades magnéticas da matéria, o dia e o paramagnetismo (vide verbete nesta série), o físico francês Paul Langevin (1872-1946) admitiu que os átomos também possuíssem um momento magnético intrínseco ($\vec{\mu}$), decorrente do movimento orbital do elétron. A questão agora era a de comprovar experimentalmente essa hipótese.

Em 1908 (*Physical Review* 26, p. 248), o físico inglês Sir Owen Williams Richardson (1879-1959; PNF, 1928) sugeriu um tipo de experiência que pudesse comprovar a “corrente amperiana”, medindo, por intermédio da mesma, a relação entre os módulos de $\vec{\mu}$ e de \vec{L} , isto é: μ/L , relação essa mais tarde conhecida como a razão giromagnética do elétron (rge). [Note que a relação inversa (L/μ) relativamente aos materiais magnéticos era também chamada de razão giromagnética (Whittaker, op. cit.)]. Desse modo, Richardson imaginou então um longo cilindro fino de ferro (Fe) suspenso por uma fibra. Quando o mesmo estivesse desmagnetizado, as “correntes amperianas” apresentavam $L = 0$, segundo Richardson. Contudo, ao ser aplicado um campo magnético vertical, os elétrons seriam orientados para o mesmo, e o cilindro, como um todo, sofreria um torque ($\vec{N} = d\vec{L}/dt$) que, ao ser medido, permitiria determinar aquela relação. Apesar de sua engenhosidade, Richardson não conseguiu medir N . Logo depois, em 1909 (*Science* 30, p. 413), o físico norte-americano Samuel Jackson Barnett (1873-1956) propôs um outro tipo de experiência para medir a rge. Sua proposta consistia em considerar cilindros de Fe, inicialmente com $\mu = 0$, e que se tornavam magnetizados após serem submetidos a uma aceleração angular. Muito embora as primeiras experiências hajam confirmado o então *efeito Barnett*, o mesmo não aconteceu em experiências subsequentes. Em 1911/1912 (*Proceedings of the Physical Society* 24, p. 121), o físico germano-inglês Sir Arthur Schuster (1851-1934) estudou o *magnetismo de rotação* no contexto do magnetismo terrestre. (Whittaker, op. cit.).

Em 1915 (*Physical Review* 6, p. 239), Barnett voltou a realizar experiências para medir a rge, encontrando o valor de $\sim 2 \times 10^7$, em unidades gaussianas (nas quais a relação entre unidades mecânicas e eletromagnéticas envolve a velocidade da luz no vácuo $c = 3 \times 10^{10}$ cm/s, conforme vimos em verbete nesta série). Ele então o comparou com o resultado teórico que é calculado da seguinte forma. Segundo o Eletromagnetismo Clássico, um elétron de carga elétrica ($e = 4,8 \times 10^{-10}$ unidades gaussianas) e de massa ($m = 9,1 \times 10^{-28}$ g), girando em uma órbita circular de raio (r) (e de área $A = \pi r^2$), com frequência (ν) (e período $T = 1/\nu$) e com velocidade linear (\vec{v}) e angular ($\vec{\omega}$) constantes, gera uma corrente elétrica (“amperiana”) ($i = e/T = e\nu$) e, portanto, o módulo do momento magnético (μ) associado a essa “corrente”, vale o produto dela pela área correspondente, ou seja: $\mu = e \nu A$. Por outro lado, segundo a Mecânica Clássica, o momento angular [$\vec{L} = \vec{r} \times (m\vec{v})$], será dado por (lembrar que, nessa situação, \vec{r} é perpendicular a \vec{v} e \vec{L} é paralelo a $\vec{\mu}$):

$$L = r m v = r m \omega r = m r^2 \omega = 2 \pi r^2 m \nu = 2 m \nu A = 2 m c \mu / e.$$

Desse modo, tem-se para a rge:

$$\mu/L = e/2 m c = 4,8 \times 10^{-10} / (2 \times 9,1 \times 10^{-28} \times 3 \times 10^{10}) \sim 0,88 \times 10^7.$$

Ainda em 1915 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 17, p. 152), os físicos, o germano-norte-americano Albert Einstein (1874-1955; PNF, 1921) e o holandês Wander Johannes de Haas (1878-1960) realizaram uma experiência objetivando determinar rge. Assim, ao estudarem a magnetização e a desmagnetização periódica de um cilindro suspenso e girando periodicamente, encontraram, em unidades gaussianas, o seguinte valor para rge: $\sim 0,9 \times 10^7$, muito próximo do valor teórico calculado acima. Como o então *efeito Einstein-de Haas* era cerca do dobro do *efeito Barnett*, esses cientistas (assim como outros) procuraram

então entender a razão desse fator 2. Em 1916, em trabalhos independentes, Einstein (*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 18, p. 173) e de Haas (*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 18, p. 423) e, em 1917 (*Physical Review* 10, p. 7), Barnett voltaram a realizar experiências no sentido de determinar o valor da rge, usando a magnetização e a desmagnetização de cilindros de vários metais [p.e.: Fe, níquel (Ni) e cobalto (Co)]. Para maiores detalhes dessas experiências e de outras realizadas com o mesmo objetivo, ver: Abraham Pais, ‘Subtle is the Lord...’: The Science and the Life of Albert Einstein (Oxford University Press, 1982); Whittaker, op. cit.; Mehra and Rechenberg, op. cit.).

Na década de 1920, a anomalia da rge vista acima continuou a ser pesquisada. Com efeito, no *modelo vetorial do átomo* proposto pelo físico Alfred Landé (1888-1975), em 1921 e 1923, para estudar o *efeito Zeeman anômalo* (vide verbete nesta série), ele mostrou que o momento magnético (\vec{M}) de um corpo é devido à circulação de “correntes elétricas escondidas” que apresentavam um momento angular (\vec{J}), é dado pela expressão:

$$\vec{M} = -(e/2mc)g\vec{J},$$

onde g é o famoso *fator de Landé*. Enquanto os valores teóricos indicavam $g = 1$, os valores experimentais mostravam que $g \sim 2$, conforme as experiências realizadas por J. Q. Stewart, em 1918 (*Physical Review* 11, p. 100), por Emil Beck, em 1919 (*Annalen der Physik* 60, p. 109), e por G. Arvidson, em 1920 (*Physikalische Zeitschrift* 21, p. 88). (Pais, op. cit.).

A hipótese do spin do elétron, proposta em 1925 [pelos físicos holandeses George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Abraham Goudsmith (1902-1978) (vide verbete nesta série)] teve um grande sucesso, pois ela esclareceu uma série de resultados experimentais da Espectroscopia Atômica. No entanto, ela não conseguiu resolver o mistério da presença do fator 2, entre os valores teórico ($e/2mc$) e experimental (e/mc) da rge. Muito embora Einstein haja sugerido a Uhlenbeck que, em seus cálculos da rge, considerasse um sistema de coordenadas no qual o elétron permanecia em repouso, enquanto o núcleo girava em torno do elétron, o fator 2 permaneceu naqueles cálculos. Por fim, a explicação desse fator foi apresentada pelo físico inglês Llewellyn Hilleth Thomas (1903-1992), em 1926 (*Nature* 117, p. 514), ao tratar relativisticamente o elétron em sua órbita em torno do núcleo. Em seu cálculo, Thomas observou que, de acordo com a Relatividade Einsteiniana, havia um erro ao se passar simplesmente de um sistema atômico formado pelo núcleo em repouso e o elétron em movimento, para um outro sistema atômico constituído do elétron em repouso e do núcleo em movimento. Para Thomas, o erro consistia em não se considerar a aceleração do elétron (ao se fazer a troca de referenciais indicada acima) no cálculo da frequência (ν) do elétron em sua órbita. Ao considerar essa aceleração, Thomas obteve um fator $1/2$ na expressão da frequência do elétron – que passou a ser conhecida como a famosa *freqüência (precessão) de Thomas* – que compensava o inoportuno fator 2 e, conseqüentemente, explicando o resultado experimental. Em seu cálculo, Thomas considerou a razão giromagnética do elétron como sendo a observada experimentalmente (e/mc), por Einstein e de Haas, em 1915, conforme registramos acima. É interessante notar que, basicamente, a *precessão de Thomas* pode ser atribuída à diferença de tempo entre os referenciais de repouso do elétron e do núcleo, isto é, o tempo que um observador vê o elétron girando em torno do núcleo fixo, é diferente do tempo em que um outro observador vê o núcleo girando em torno do elétron fixo, devido à correção relativística temporal. [Robert



ANTERIOR

SEGUINTE