



## SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### O Monopolo Magnético de Dirac.

O fato de não se poder isolar um pólo ou carga magnética (monopolo magnético), isto é, não se poder dividir um ímã magnético em dois pólos, norte e sul, observado em 1269, pelo erudito francês Petrus Peregrinus de Maricourt (n.c.1240), em carta que escreveu a um amigo, relatando suas experiências com a agulha magnética. Entediado por estar tomando conta de um sítio de uma cidade italiana pelo exército de Luís IX (1214-1270), do qual era engenheiro, Peregrinus começou a realizar experiências com a agulha magnética, já que, por volta de 1200, os europeus começaram a usá-la na orientação de suas viagens. Nessas experiências, observou também que os pólos de mesmo sinal se repelem e de sinais contrários se atraem, e, mais ainda, que quando limalhas de ferro eram colocadas em um pedaço de papel sob o qual se encontrava um ímã, tais limalhas se orientavam em direções determinadas e em linhas que se dirigiam de um pólo a outro do ímã. Observe-se que, somente em 1838, as experiências de Peregrinus com limalhas de ferro foram retomadas pelo físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867). Assim, para explicar a figura formada pelas limalhas, Faraday passou a visualizar as forças magnéticas e elétricas como uma espécie de “tubos de borracha” que se estendiam a partir de fios condutores, ou de ímãs, ou de corpos eletrizados, “tubos” esses que receberam dele a denominação de *linhas de força*.

Até a demonstração matemática da não existência do monopolo magnético realizada pela Eletrodinâmica Maxwelliana, conforme veremos mais adiante, vários passos teóricos e experimentais foram dados no sentido de entender as experiências de Peregrinus sobre o não isolamento de pólos magnéticos. Com efeito, desde 1807, o farmacêutico e físico dinamarquês Hans Christiaan Oersted (1777-1851) tentou, sem êxito, realizar experiências com as quais procurava descobrir relações entre a eletricidade e o magnetismo. Contudo, essa relação só foi descoberta por Oersted, em 1820. Antes de descrever como ele chegou a essa descoberta, vejamos como ocorreram as primeiras observações sobre os efeitos elétricos e magnéticos.

Foi o filósofo grego Tales de Mileto (624-546) quem fez, provavelmente, por volta de 600 a.C., a primeira observação sobre um fenômeno elétrico ao atritar um bastão de âmbar (*elektron*, em grego) com um pedaço de lã, e notar que o mesmo atraía corpos leves em sua proximidade. Foi também de Tales a observação de que certas pedras encontradas na Tessália, uma província ao norte da Grécia antiga (mais tarde conhecida como Magnésia), apresentavam a propriedade de atrair pedaços de ferro. Essas pedras, que passaram a ser conhecidas como magnetita ou ímã natural, são hoje reconhecidas quimicamente como óxido de ferro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Observe-se que, segundo o enciclopedista romano Plínio, O Velho (23-79), o nome Magnésia decorreu de uma descoberta feita por um pastor de ovelhas, o grego de nome Magnes. Este, em seu pastoreio pela Tessália, observou que a ponta de ferro de seu cajado era atraída por pedras que se encontravam ao longo do caminho que percorria ao conduzir suas ovelhas.

Agora, voltemos aos trabalhos de Oersted. No inverno europeu de 1819-1820, Oersted ministrou, na *Universidade de Copenhague*, um curso sobre *Eletricidade, Galvanismo e Magnetismo*. Durante esse curso, Oersted realizou uma série de experiências. Por exemplo, em de fevereiro de 1820, observou que um condutor se esquentava quando era percorrido por uma corrente elétrica. Também, nessas experiências, Oersted procurou encontrar uma relação entre eletricidade e magnetismo, examinando o que acontecia com uma agulha magnética ao ser colocada perpendicularmente ao fio condutor do circuito galvânico utilizado. No entanto, não registrou nenhum movimento perceptível da agulha. Porém, ao término de uma aula noturna daquele curso, no começo de abril de 1820, ocorreu-lhe a idéia de colocar o fio condutor paralelamente à direção da agulha magnética; aí, então, percebeu uma razoável deflexão dessa agulha, e a procurada relação entre o magnetismo e o “Galvanismo” estava então descoberta. É oportuno registrar que

no início do Século XIX, era hábito distinguir o estudo da “eletricidade estática” do estudo das correntes elétricas (“Galvanismo”), cujas primeiras pesquisas destas foram feitas pelo fisiologista italiano Luigi Galvani (1737-1798), em 1786, e pelo físico italiano Alessandro Giuseppe Volta (1745-1827), em 1794. (Aliás, foi por essa ocasião que Volta cunhou o termo “Galvanismo”.) Ainda em 1820, Oersted publicou o livro intitulado **Experimenta circa effectum Conflictus Electrici in Acum Magnetican**, no qual registrou suas experiências sobre o efeito magnético da corrente elétrica. Nessas experiências, analisou, de modo apenas qualitativo, que a **lei da ação e reação Newtoniana** permanecia válida para explicar a força entre o fio condutor e o ímã.

Entre 4 e 25 setembro de 1820, o físico francês Dominique François Jean Arago (1786-1853) realizou experiências sobre os efeitos magnéticos da corrente elétrica que haviam sido observados por Oersted. Registre-se que Arago teve conhecimento das experiências de Oersted quando se encontrava em Genebra, e lá presenciou experiências análogas realizadas pelos físicos suíços Marc Auguste Pictet (1752-1825) e Auguste de la Rive (1801-1873). Nas experiências realizadas em França, Arago constatou que um fio de cobre, no qual circulava uma corrente galvânica (voltaica), atuava em um ímã, já que era capaz de atrair limalhas de ferro imantadas. Além disso, notou que esse mesmo tipo de corrente podia imantar uma agulha de aço, bem como amortecer as oscilações de uma agulha imantada quando esta se situava sob um fio de cobre no qual circulava uma corrente galvânica.

Por sua vez, entre 18 e 25 de setembro de 1820, o físico francês André Marie Ampère (1775-1836) também realizou experiências sobre os efeitos magnéticos da corrente elétrica que haviam sido observados por Oersted. Nessas experiências, Ampère percebeu a distinção entre tensão elétrica, responsável pelos efeitos eletrostáticos, e **corrente elétrica**, responsável pelos efeitos magnéticos observados por Oersted. No prosseguimento de suas experiências, em 1822, Ampère mostrou que quando pequenos circuitos circulares (espiras) são percorridos por correntes, elas interagem como se fossem pólos de um ímã. Em vista disso, apresentou a idéia de que o magnetismo natural era consequência de ser a substância magnética, no seu interior, composta de uma infinidade de espiras. Afirmou ainda Ampère que as substâncias não-magnéticas tinham essas espiras orientadas ao acaso, de modo que seu efeito líquido era nulo. Tais correntes foram mais tarde conhecidas como *correntes amperianas*. Era a primeira tentativa no sentido de mostrar a inseparabilidade dos pólos magnéticos de um ímã, uma vez que uma *espira amperiana* contém intrinsecamente a referida inseparabilidade. Note-se que, por essa ocasião, o físico francês Augustin Jean Fresnel (1788-1827), em carta escrita a Ampère, sugeriu que essas “correntes” deveriam ser de dimensões moleculares e não macroscópicas. É oportuno registrar que as experiências conduzidas por Ampère sobre os fenômenos eletrodinâmicos foram reunidas em um livro intitulado *Théorie Mathématique des Phénomènes Électrodynamiques Uniquement Dédit de l’Expérience*, publicado em 1827.

A inseparabilidade dos pólos magnéticos foi finalmente demonstrada pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) em seu célebre livro intitulado *A Treatise on Electricity & Magnetism* (Dover, 1954), publicado em 1873. Essa inseparabilidade é traduzida pelas equações diferenciais homogêneas envolvendo o vetor indução magnética  $\vec{B}$  ( $\nabla \cdot \vec{B} = 0$  e  $\nabla \times \vec{E} + \partial \vec{B} / \partial t = 0$ ). Nessas equações, a ausência do segundo membro revela a inexistência de carga magnética isolada (monopolo magnético). A primeira delas, significa que as linhas de força de  $\vec{B}$  são fechadas; a segunda, representa a lei da indução magnética de Faraday-Henry. Aliás, no começo de seu estudo sobre a formulação matemática dos fenômenos eletromagnéticos, Maxwell aventou a hipótese da existência de cargas magnéticas isoladas (monopolos magnéticos), porém, a falta de evidência experimental de tais monopolos, fez com que ele não os considerasse na formulação final apresentada no *Treatise*. Ainda nesse livro, Maxwell apresenta mais duas equações diferenciais não-homogêneas:  $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$  e  $\nabla \times \vec{H} - \partial \vec{D} / \partial t = \vec{J}$ , sendo que a primeira representa a lei de Coulomb para meios dielétricos, enquanto a segunda, significa a lei de Ampère-Maxwell. O termo não-homogêneo em cada uma delas indica, respectivamente: a densidade ( $\rho$ ) da carga (monopolo) elétrica e a corrente de condução ( $\vec{J}$ ). Para detalhes dessas quatro equações de Maxwell, ver verbete nesta série.

Em virtude da assimetria apresentada pelas **equações de Maxwell**, o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), em 1931 (*Proceedings of the Royal Society of London A133*, p. 60), usou o argumento da simetrização dessas equações para propor a existência do **monopolo magnético**. Assim, segundo Dirac, para contemplar esse monopolo, essas equações deveriam tomar a seguinte forma, hoje conhecida como **equações de Maxwell-Dirac** (Sistema CGS):

$$\text{Lei de Coulomb (1785)} : \nabla \cdot \vec{D} = 4 \pi \rho_e$$

$$\text{Lei de Ampère (1820)-Maxwell (1865)} : \nabla \times \vec{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{4 \pi}{c} \vec{J}_e$$

$$\text{Lei de Peregrinus (1269)-Dirac (1931)} : \nabla \cdot \vec{B} = 4 \pi \rho_m$$

$$\text{Lei de Faraday-Henry (1831)-Dirac (1931)} : \nabla \times \vec{E} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{4 \pi}{c} \vec{J}_m$$

onde  $\rho_e$  é a **densidade de carga elétrica**,  $\rho_m$  é a **densidade de carga magnética**,  $\vec{J}_e$  é a **densidade de corrente elétrica** e  $\vec{J}_m$  **densidade de corrente magnética**. Para calcular o valor da **carga magnética**  $g$ , Dirac usou a Mecânica Quântica que havia sido desenvolvida a partir de 1926. Segundo essa Mecânica, a evolução de uma partícula é traduzida por uma **função de onda**  $\psi(\vec{r}, t)$  afetada por um **fator de fase imaginária multiplicativo** que não intervém nas medidas das grandezas observáveis daquela partícula. Assim, quando esta se desloca de um lugar para o outro, a diferença nos fatores de fase entre a partícula e a chegada de um lugar para o outro, a diferença nos fatores de fase entre a partida e a chegada da partícula serão idênticas. Com esse argumento simples, Dirac obteve as **equações de Maxwell-Dirac** (vistas acima) como consequência da restrição impostas àquelas variações de fatores de fase, bem como fez a predição do valor de  $g$  por meio da relação:  $g e / (\hbar c) = n / 2$  ( $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) onde  $e$  é a **carga do elétron** e  $\hbar = h / 2 \pi$ , sendo  $h$  a **constante de Planck**. É oportuno salientar que o físico norte-americano John David Jackson (n.1925) em seu famoso livro **Classical Electrodynamics** (John Wiley & Sons, 1992) apresenta um argumento semiclássico para encontrar a condição de quantização Diraciana indicada acima, considerando o movimento de um elétron em um campo de um monopolo magnético constante.

Apesar da “estética simetria matemática” das **equações de Maxwell-Dirac**, elas apresentavam uma grande dificuldade, uma vez que não eram compatíveis com a observação experimental de que as linhas de força de  $\vec{B}$  são fechadas, fato esse traduzido pela expressão integral:  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$  (ou, equivalentemente,  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ ). Para contornar essa dificuldade, ainda no artigo de 1931, Dirac propôs que o monopolo magnético encontra-se no fim de uma “linha” - linha de Dirac – formada de dipolos magnéticos (ou, equivalentemente, de um solenóide delgado de espiras bem próximas), que se estende até o infinito e que, no entanto, ainda segundo Dirac, um elétron não a poderia cruzar. Tal “linha”, cuja orientação *a priori* não pode ser definida, não tem efeito detectável. Registre-se que, em 1948 (*Physical Review* **74**, p. 817), Dirac tratou da não-observabilidade de suas “linhas”.

Note-se que uma interpretação topológica para essa “linha Diraciana” foi apresentada pelos físicos chineses Tai Tsu Wu (n.1933) e Chen Ning Yang (n.1922; PNF, 1957) em um artigo publicado em 1975 (*Physical Review* **D12**, p. 3845). Nesse artigo, no qual trataram a Eletrodinâmica Quântica como um invariante “gauge” de um fator de fase não-integrável, eles mostraram que não são os campos elétrico ( $\vec{E}$ ) e magnético ( $\vec{B}$ ), e nem os potenciais elétrico ( $\Phi$ ) ou vetor ( $\vec{A}$ ) que descrevem os meios eletromagnéticos, mas sim um **fator de fase** como sendo responsável pelos fenômenos eletromagnéticos e de maneira unívoca. Assim, ao escolherem um sistema de coordenadas conveniente, comprovaram que a **linha de Dirac** nada mais é do que a “projeção” de um monopolo magnético do mesmo modo que, em Cartografia, o **planisfério** tem os pólos terrestres representados por linhas e não por pontos. Nessa situação, muito embora as “calotas esféricas” que envolvem o monopolo magnético tenham os potenciais eletromagnéticos com valores diferentes, existe, no entanto, uma função que transforma esses potenciais, passando de um para o outro sem mudar o **fator de fase**.

A proposta do monopolo magnético levou a seguinte questão: como ele poderá ser detectado? Segundo nos fala o físico brasileiro Iosif Frenkel (n.1944) em seu livro **Princípios de Eletrodinâmica Clássica** (EDUSP, 1996), um dos métodos básicos para a detecção de um monopolo magnético será por intermédio do estudo dos traços de ionização que ele deixa quando interage com a matéria. Contudo, como sua massa é muito alta (

$m_M \approx 10^{14} m_p \approx 10^{14} \text{ GeV}/c^2 (\approx 10^{14} \text{ GeV})$  a sua detecção envolve altas energias que só são conseguidas em experiências com os raios cósmicos remanescentes da formação de nosso Universo, por ocasião do **Big-Bang**. É oportuno destacar que a estimativa dessa alta massa do monopolo magnético foi apresentada, em trabalhos independentes realizados em 1974, pelos físicos, o holandês Gerardus 't Hooft (n.1946; PNF, 1999) (*Nuclear Physics B79*, p. 276) e o russo Alexander Polyakov (*Journal of Experimental and Theoretical Physics: Letters* **20**, p. 194), ao estudarem a unificação entre as forças eletromagnética, fraca e forte, a hoje conhecida Teoria da Grande Unificação (TGU), formulada em 1974. Destaque-se também que, nessa Teoria, o próton (p) é uma partícula instável, com uma vida média da ordem de  $10^{31}$  anos (lembrar que a idade do Universo, até o presente momento, é considerada ser da ordem de  $10^{10}$  anos), podendo decair, segundo artigos independentes publicados em 1982, por Vladimir Rubakov (*Nuclear Physics B203*, p. 311) e Curtis G. Callan (*Physical Review D25*, p. 2141), em um monopolo magnético (M), pósitron ( $e^+$ ) e neutrino do pósitron ( $\nu_{e^+}$ ), isto é:  $p \rightarrow M + e^+ + \nu_{e^+}$ .

Uma primeira experiência realizada para detectar o monopolo magnético foi realizada, em 1975 (*Physical Review Letters* **35**, p. 487), pelos físicos norte-americanos P. B. Price, E. K. Shirk, W. Z. Osborne e L. S. Pinsky, na qual examinaram o traçado deixado por uma partícula cósmica em um arranjo experimental constituído de um **detector de Cherenkov** (que mede a velocidades das partículas) e de placas com emulsões nucleares, colocados em um balão a grandes altitudes. O exame desse evento levou Price e colaboradores a aventarem a hipótese de que haviam detectado um monopolo magnético com a carga  $g = 175e$ . Porém, nesse mesmo ano de 1975 (*Lawrence Radiation Laboratory, Physics, Note 4260*), o físico norte-americano Luís Walter Alvarez (1911-1988; PNF, 1968) descartou a hipótese de que a equipe de Price havia detectado um monopolo magnético, uma vez que o traço deixado na emulsão era semelhante ao de um núcleo pesado. Em 1982, o físico norte-americano Blas Cabrera idealizou um outro tipo de experiência para detectar monopolos magnéticos fósseis, usando a seguinte idéia. Segundo Cabrera, quando um monopolo magnético atravessa um detector superconductor há o estabelecimento de uma supercorrente e as **equações de Maxwell-Dirac** prevêm uma variação do fluxo magnético devido a essa travessia, fluxo esse cujo valor é bem determinado e é igual a duas vezes a carga magnética do monopolo magnético (em unidades convenientes para esse fluxo). Contudo, como esse fluxo é pequeno demais, da ordem de  $10^{-6}$  do campo magnético terrestre por  $\text{cm}^2$ , acrescido do fato de que o fluxo de monopolos magnéticos incidentes sobre a Terra é da ordem de  $10^{-10}$  / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ , a detecção de um monopolo magnético é extremamente sensível. Em vista disso, Cabrera projetou uma experiência, que levou 150 dias para ser realizada, envolvendo um SQUID (“Superconductive Quantum Interference Device”) que mede a carga magnética do monopolo magnético independentemente de sua velocidade, massa, carga elétrica, ou mesmo momento de dipolo elétrico. Assim, em artigo publicado ainda em 1982 (*Physical Review Letters* **48**, p. 1378), Cabrera anunciou que havia detectado um monopolo magnético com a carga  $g$  prevista por Dirac. Para outros detalhes sobre os monopolos magnéticos, ver os seguintes artigos: Paul Musset, *La Recherche* **146**, p. 946, Juillet-Aôut (1983); Richard A. Carrigan Jr. and W. Peter Trower, *Nature* **305**, p. 673.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)