



## SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### Efeito Aharonov-Bohm.

As primeiras idéias sobre o potencial vetor  $\vec{A}$  foram apresentadas pelo físico alemão Franz Ernst Neumann (1798-1895), entre 1845 e 1847, quando analisou o processo de indução magnética em um circuito devido ao movimento relativo de magnetos ou circuitos próximos. A idéia da existência desse potencial também foi trabalhada pelos físicos alemães Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), em 1848, e Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), em 1857. Apesar desses físicos apresentarem expressões analíticas para representar  $\vec{A}$ , foi o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) quem o conceituou, em 1865. Trabalhos formais com esse potencial também foram realizados pelos físicos, o dinamarquês Ludwig Valentin Lorenz (1829-1891), em 1863, e o holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902), em 1895. Muito embora esses físicos hajam trabalhado formalmente com  $\vec{A}$ , não existia uma interpretação física para ele. Foi o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), em 1931, o primeiro a vislumbrar a importância física de  $\vec{A}$  fazendo previsões sobre monopolos magnéticos, usando, contudo, a Mecânica Quântica. Mais tarde, em 1949, W. Eherenberg e R. S. Siday discutiram os efeitos dos potenciais eletromagnéticos na Mecânica Quântica (sobre este parágrafo, vide verbete nesta série).

Foi somente em 1959 (Physical Review 115, p. 485) que os físicos, o israelense Yakir Aharonov (n.1932) e o norte-americano David Joseph Bohm (1917-1992), publicaram um artigo no qual apresentaram claramente a importância física de  $\vec{A}$  por intermédio de um fenômeno quântico de interferência, depois conhecido como efeito Aharonov-Bohm (EA-B). Nesse artigo, eles mostraram que a figura de interferência decorrente da difração de um feixe de elétrons que atravessa um anteparo com duas fendas [experiência "tipo Young" (vide verbete nesta série)] pode ser deslocada desde que, entre as fendas e por trás delas, se possa concentrar um campo magnético, de tal modo que este seja nulo na região da "trajetória" do feixe de elétrons depois de difratado pelas duas fendas. Isto pode ser conseguido, segundo esses físicos, com um solenóide longo de dimensões transversais microscópicas. Assim, uma corrente estacionária no solenóide gera um

fluxo  $\Phi$  dado pela expressão:  $\Phi = \int_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint_C \vec{A} \cdot d\vec{\ell}$ , onde  $C$  é qualquer circuito envolvendo o solenóide. Embora o campo de indução magnética  $\vec{B}$  seja nulo fora do solenóide, o potencial vetor  $\vec{A}$ , que satisfaz a expressão acima, deve permanecer finito em algum lugar ao longo do circuito  $C$ , qualquer que seja o 'gauge' escolhido, isto é:  $\vec{A}' = \vec{A} + \nabla\psi$ , onde  $\psi$  é uma função escalar. Vê-se que, com essa transformação, o fluxo  $\Phi$  definido acima fica invariante.

O experimento proposto por Aharonov e Bohm mostra que, embora o campo  $\vec{B}$  seja nulo [e, portanto, também será nula a parte magnética da força de Lorentz ( $\vec{F}_L \equiv \vec{F}_{Lorentz}$ ) correspondente, pois:  $\vec{F}_L = (q/c) \vec{v} \times \vec{B}$ ] ao longo da trajetória do feixe de elétrons (de carga  $q$  e velocidade  $\vec{v}$ ), ele implica um significado quântico especial para o potencial  $\vec{A}$  que transcende seu "papel clássico" como mero artifício matemático para o cálculo desse potencial, conforme Maxwell considerou. Registre-se que esse tipo de experimento foi realizado por R. G. Chambers, em 1960 (Physical Review Letters 5, p. 3), e por H. A. Fowler, L. Marton, J. A. Simpson e J. A. Suddeth, em 1961

(Journal of Applied Physics 32, p. 1153), usando “whiskers”, isto é, cristais de ferro que crescem na forma de microscópicos finos filamentos, e que, quando magnetizados, comportam-se como solenóides. [Richard Phillips Feynman, Robert Benjamin Leighton e M. Sands, The Feynman: Lectures on Physics, Volume II (Addison-Wesley, 1965).] É oportuno destacar que, antes, em 1956 (Zeitschrift für Physik 145, p. 377), G. Mollenstedt e H. Dücher realizaram experiências com um biprisma eletrostático (uma fina fibra metálica mantida em um potencial positivo com respeito a um par de condutores simétricos aterrados), com o que observaram o deslocamento do padrão de interferência de um feixe de elétrons. [Alexandre G. Rodrigues, Efeito Aharonov-Bohm para Partículas Relativísticas sem Spin. Tese de Mestrado, IFUSP (1999).]

Esses resultados experimentais motivaram estudos teóricos no sentido de explicá-los. Assim, ainda em 1960 (Physical Review 118, p. 623), os físicos norte-americanos Wendell Hinkle Furry (1907-1984) e Norman Foster Ramsey (n.1915; PNF, 1989) analisaram o EA-B com base no princípio da complementariedade e concluíram que ele é de origem puramente quântica. Ainda em 1960 (Zeitschrift für Physik 159, p. 243), H. Weneger estudou a aplicabilidade do EA-B em fases ópticas com elétrons. Por sua vez, em 1961 (Physical Review 124, p. 940), H. E. Mitler investigou o efeito de flutuações de vácuo na mensurabilidade do EA-B.

Em 1962 (Il Nuovo Cimento 23, p. 158), P. D. Noerdlinger introduziu uma nova questão para o entendimento do EA-B. Com efeito, considerando que o campo  $\vec{B}$  é nulo na região do feixe de elétrons, estes só podem interagir com esse campo se uma teoria não-local for considerada. Antes de prosseguir, cremos ser oportuno fazer uma pequena discussão sobre teorias locais e não-locais. A localidade ou separabilidade de uma dada teoria significa que uma ação realizada em um certo local não tem efeito instantâneo em sistemas separados, ou seja, que todas as interações entre objetos materiais que se fazem sentir no espaço-tempo são mediadas por sinais locais que viajam através do espaço e, portanto, são limitadas pela velocidade da luz no vácuo ( $c = 300.000 \text{ km/s}$ ), segundo a Relatividade Restrita Einsteiniana. Exemplos típicos de teorias locais, isto é, envolvendo somente interações locais, são: 1) Teoria Quântica Não-Relativista traduzida pela equação de Schrödinger, com a interpretação Borniana da função de onda Schrödingeriana  $\psi(\vec{r}, t)$  (vide verbete nesta série); 2) Teoria Relativista do Elétron traduzida pela equação de Dirac (vide verbete nesta série); 3) Teoria Quântica de Campos.

Por sua vez, a não-localidade ou inseparabilidade quântica significa que uma ação realizada em um certo local tem efeito instantâneo, sem sinal local, em sistemas separados; por isso, a não-localidade é traduzida como uma “ação à distância”. Há dois exemplos típicos de teorias não-locais. Uma clássica, a Teoria da Gravitação Newtoniana dada pela equação de Newton-Euler-Laplace:

$\vec{F}_{NEL}(\vec{r}, t) = (d/dt)(m\vec{v}_c) = -\nabla V_c(\vec{r}, t)$ , onde  $\vec{v}_c$  e  $V_c$  significam, respectivamente, velocidade e potenciais clássico; e a quântica, estudada na Mecânica Quântica de de Broglie-Bohm (MQBB), traduzida

pela equação de Bohm  $[\vec{F}_B(\vec{r}, t) = (d/dt)(m\vec{v}_q) = -\nabla[V_c(\vec{r}, t) + V_q(\vec{r}, t)]$ , com  $d/dt = \partial/\partial t + \vec{v}_q \cdot \nabla$ , onde  $\vec{v}_q$  e  $V_q$  significam, respectivamente, velocidade e potenciais quântico. [Peter R. Holland, The Quantum Theory of Motion: An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics (Cambridge University Press, 1993); José Maria Filardo Bassalo, Paulo de Tarso Santos Alencar, Mauro Sérgio Dorsa Cattani e Antonio Boulhosa Nassar, Tópicos de Mecânica Quântica de de Broglie Bohm (EDUFPA, 2002).]

É oportuno ressaltar que a inseparabilidade quântica foi, durante quase trinta anos, apenas objeto de especulações acadêmicas, até o físico irlandês John S. Bell (1928-1990) demonstrar, em 1964 (Physics 1, p. 195), um teorema – a famosa desigualdade de Bell – que permitia testar experimentalmente aquela inseparabilidade. Registre que, desde 1975, o físico francês Alain Aspect e colaboradores vêm realizando experiências sobre aquela inseparabilidade, com resultados favoráveis à interpretação de Copenhague da Mecânica Quântica Ondulatória de Schrödinger (vide verbete nesta série). Para uma análise sobre esses resultados, veja-se: John Gribbin, À Procura do Gato de Schrödinger, (Editorial Presença, 1984); Holland (1993), op. cit; S. Gamboa-Eastman, Physics Essays 7, p. 3 (1994); Amit Goswami, Maggie Goswami e Richard E. Reed, O Universo Autoconsciente (Editora Rosa dos Tempos, 2000); e Gennaro Auletta, Foundations and

Interpretation of Quantum Mechanics (World Scientific, 2001).

Voltemos ao EA-B. Ainda em 1962 (Physical Review 125, p. 2189), o físico norte-americano Bryce Seligman DeWitt (1923-2004) desenvolveu uma formulação não-local da Eletrodinâmica Quântica dependendo apenas dos campos eletromagnéticos e, com ela, concluiu ser falsa a afirmação da interpretação física do potencial vetor  $\vec{A}$  proposta pelo EA-B. Esse resultado foi imediatamente contestado por Aharonov e Bohm, em 1962 (Physical Review 125, p. 2192) e 1963 (Physical Review 130, p. 1625), e por F. J. Belinfante, em 1962 (Physical Review 128, p. 2382). Este físico norte-americano mostrou que a função de onda utilizada por DeWitt, considerada como invariante 'gauge', na verdade dependia do caminho de integração.

Logo depois, em 1965, Feynman, Leighton e Sands (op. cit.) mostraram que o EA-B poderia ser explicado por uma teoria não-local considerando que o campo de indução  $\vec{B}$  "atua à distância" no elétron que circula fora do solenóide. Aliás, essa é uma explicação análoga à dada pela gravitação Newtoniana quando uma mudança infinitesimal do Sol reflete "instantaneamente" sobre a Terra. A discussão sobre a interpretação física do EA-B prosseguiu, agora com a participação dos físicos norte-americanos (ambos de origem chinesa) Tai Tsu Wu (n.1933) e Chen Ning Yang (n.1922; PNF, 1957). Com efeito, em 1975 (Physical Review D12, p. 3845), eles introduziram uma outra entidade física, que nem é  $\vec{B}$  e nem  $\vec{A}$ , mas sim um fator de fase não-integrável, representado por um número complexo e que carrega a informação topológica de cada caminho  $\mathcal{C}$  considerado na expressão que define o fluxo  $\Phi$ , vista anteriormente. Desse modo, eles mostraram que a Eletrodinâmica é um invariante de 'gauge' desse fator e que, portanto, o EA-B é de natureza topológica. (Auletta, op. cit.)

Contudo, esses resultados foram objeto de discussão por parte de P. Bocchieri e A. Loinger que, em artigos publicados em 1978 (Il Nuovo Cimento A47, p. 475), em 1980 (Il Nuovo Cimento A59, p. 121), e em 1981 (Lettere al Nuovo Cimento 30, p. 449), criticaram o resultado fundamental de Aharonov-Bohm, qual seja, o de que "o eletromagnetismo não é completamente descrito pelos campos elétrico e magnético e sim pelos potenciais eletromagnéticos". Para Bocchieri e Loinger, uma escolha adequada de um potencial vetor por uma transformação de 'gauge' anulava o E-AB. No entanto, como esse potencial não obedece ao Teorema de Stokes, a discussão sobre esse efeito continuou, principalmente pela ocorrência de uma nova evidência experimental desse efeito, ocorrida em 1982 (A. Tonomura, T. Matsuda, R. Suzuki, A. Fukuhara, N. Osakabe, H. Umezaki, J. Endo, K. Shinagawa, Y. Sujita e H. Fujiwara, Physical Review Letters 48, p. 1443) e confirmada em 1986 (Osakabe, Matsuda, T. Kawasaki, Endo, Tonomura, S. Yano e H. Yamada, Physical Review A34, p. 815), em experiências nas quais foi usada uma técnica de holografia eletrônica. Esse resultado experimental levou o próprio Bohm, com a colaboração de C. Philippidis e R. D. Kaye, em 1982 (Il Nuovo Cimento B71, p. 75), a explicá-lo usando o potencial quântico Bohmiano ( $\mathcal{V}_Q$ ). É oportuno registrar que M. Peskin e Tonomura publicaram o livro intitulado The Aharonov-Bohm Effect (Springer, 1989), no qual há um excelente estudo de revisão sobre o EA-B, inclusive a forma elétrica desse efeito, ou seja, o deslocamento da figura de interferência decorrente da difração de um feixe de elétrons que atravessa um anteparo com duas fendas (experiência "tipo Young"), deslocamento esse provocado por um potencial elétrico.

Na década de 1990, novos trabalhos (experimentais e teóricos) mostraram que o EA-B pode ser explicado sem usar o vetor potencial. Por exemplo, em 1992 (Physical Review Letters 68, p. 2409), B. E. Allman, A. Cimmino, A. G. Klein, G. I. Opat, H. Kaiser e S. A. Werner realizaram um experimento sobre o efeito escalar do EA-B envolvendo nêutrons, e no qual observaram que o campo eletromagnético interage com o momento magnético do nêutron. Por outro lado, em 1996 (Modern Physics Letters A11, p. 2825), os físicos brasileiros Marcelo Otávio Caminha Gomes (n.1941), Jorge Mario Carvalho Malbouisson (n.1959) e Adilson José da Silva (n.1947), e em 1997 (Physical Review D56, p. 3623), Horacio Oscar Girotti (n.1939), Gomes, Malbouisson e Silva estudaram o E-AB para partículas de spin  $\frac{1}{2}$ , usando a Teoria de Campos que é uma teoria local, conforme salientamos. Em 2004 (Physical Review D70, Art. No. 129905), os físicos brasileiros Marcos Antonio Anacleto (n.1974), Gomes e Silva e a física francesa Dominique Spehler apresentaram, no contexto de uma Teoria de Campos, uma correção não-comutativa ao E-AB. É

oportuno registrar que Bohm e Basil J. Hiley reuniram em um livro intitulado *The Undivided Universe. An Ontological Interpretation of Quantum Theory* (Routledge and Kegan Paul, 1993), os trabalhos que haviam realizado na década de 1980 sobre o caráter não-local da Mecânica Quântica.

---



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)