



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Matéria (Partícula), Antimatéria (Antipartícula) e a Natureza Humana.

Em 1927, por ocasião da *Quinta Conferência de Solvay* que aconteceu em Bruxelas, o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) encontrou-se com o físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922) que lhe perguntou em que estava trabalhando, Dirac então lhe respondeu que buscava uma teoria relativista do elétron. Bohr retrucou dizendo-lhe que o físico sueco Oskar Benjamin Klein (1894-1977), em 1926 (*Zeitschrift für Physik* **37**, p. 895), já havia realizado essa teoria. Dirac não concordou com essa afirmação, pois sabia que Klein fizera apenas uma versão relativística da **Equação de Schrödinger**, de 1926 (ver verbete nesta série). Dirac, contudo, buscava outro caminho e que foi encontrado por ele, em 1928 (*Proceedings of the Royal Society* **A117; A118**, p. 610; 351), deduzindo a hoje famosa **Equação de Dirac** (ED) - $(i \gamma^\mu \partial_\mu - m c) \Phi = 0$ -, onde γ^μ é a **matriz de Dirac** (matriz 4×4), $\partial_\mu = \partial/\partial x^\mu$ ($\mu = 1, 2, 3, 4$), Φ é o **spinor de Dirac** (matriz coluna), m é a massa do elétron, e c é a velocidade da luz no vácuo. Mais tarde, em 1930 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **26**, p. 361), Dirac considerou que o m que aparece em sua equação, era uma média entre a massa do próton e a massa do elétron. É interessante destacar que, em 1974, Dirac escreveu o livro denominado **Spinors in Hilbert Space** (Plenum), no qual ele estuda os spinores com o formalismo do Espaço de Hilbert.

Um resultado importante da ED foi o conceito de **antimatéria**. Vejamos como isso aconteceu. Ao resolver essa equação (baseada na expressão relativista da energia: $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$), Dirac encontrou que ela não só descrevia o elétron com momento p e energia positiva ($E > 0$), mas tinha outra solução que descrevia partículas idênticas a elétrons, porém com carga positiva e energia negativa ($E < 0$). Ele chamou essas partículas de “buracos” e afirmou que eles ocupavam todos os estados de energia negativa, o famoso “mar de Dirac”. Nessa época, Dirac não havia entendido bem essa outra solução. Assim, esse “buraco” foi interpretado como sendo um próton, em 1929 (*Zeitschrift für Physik* **56**, p. 330), pelo matemático alemão Hermann Weyl (1885-1955) e, ainda em 1929 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A126**, p. 360) e em 1930 (*Nature* **126**, p. 605), pelo próprio Dirac. Essa interpretação decorria do fato de que, naquela época, só se conheciam dois tipos de partículas elementares: elétrons e prótons. Por sua vez, o núcleo atômico era considerado formado de prótons e elétrons. Porém, Dirac não ficou muito satisfeito com essa proposta, uma vez que já se sabia que os prótons tinham massa cerca de 1.840 vezes maior do que à dos elétrons.

Ainda em 1930, em trabalhos independentes, os físicos, o norte-americano Julius Robert Oppenheimer (1904-1967) (*Physical Review* **35**, p. 562) e o russo Igor Yevgenyevich Tamm (1895-1971; PNF, 1958) (*Zeitschrift für Physik* **62**, p. 545), mostraram que o “buraco”

não poderia ser um próton, pois, desse modo, tornaria o átomo instável por causa do processo: próton + elétron → fótons. Em 1931 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A133**, p. 60), Dirac aceitou a ideia de que o “buraco” seria uma nova espécie de partícula, até então desconhecida pelos físicos experimentais, a qual chamou de **antielétron**. Destaque-se que essa “nova partícula” foi descoberta pelo físico norte-americano Carl David Anderson (1905-1991; PNF, 1935), em 1932 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A41**, p. 405; *Science* **76**, p. 238), e que recebeu o nome de **pósitron** (📄). É interessante destacar que, em 1929, os físicos, o russo Dmitry Vladimirovich Skobelzyn (1892-1992) (*Zeitschrift für Physik* **54**, p. 686) e, em 1930 (*Nature* **125**, p. 636), o italiano Bruno Benedetti Rossi (1905-1994), encontraram evidências experimentais da existência do “buraco” previsto por Dirac. Note-se que esse trabalho de Rossi foi rejeitado pela primeira revista científica para a qual ele o enviou.

Em 1933 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A139**, p. 699), os físicos, o inglês Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974; PNF, 1948) e o italiano Giuseppe Pablo Stanislao Occhialini (1907-1993) realizaram uma experiência na qual confirmaram a existência do **pósitron** (📄). Essa experiência, realizada no *Cavendish Laboratory*, na Inglaterra, hoje conhecida como **produção de pares** ($\gamma \rightarrow e^- + e^+$), foi confirmada, ainda em 1933 (*Zeitschrift für Physik* **84**, p. 144), pelo físico alemão Max Delbrück (1906-1981), ao estudar o espalhamento de fótons (γ) ($E > 1,02$ MeV) por campos eletrostáticos, como, por exemplo, o de um núcleo atômico que é carregado positivamente; esse processo é o conhecido **espalhamento de Delbrück**. É oportuno observar que, nesse tipo de espalhamento, a **produção de pares** é dita virtual, pois logo que o par é formado, ele desaparece produzindo um par de fótons ($e^- + e^+ \rightarrow 2 \gamma$), num processo conhecido como **aniquilamento**. Observe-se que a produção de 2γ é uma decorrência da lei de conservação de energia-momento [Robert Martin Eisberg and Robert Resnick, **Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles** (John Wiley and Sons, 1974)].

O desenvolvimento da Eletrodinâmica Quântica (QED- “Quantum Electrodynamics”), que aconteceu nas décadas de 1930 e 1940 (ver verbetes nesta série), fez com que o conceito de **antipartícula** fosse incorporado na Física, principalmente devido ao famoso **Teorema CPT**. Vejamos o seu significado. Segundo vimos em verbete desta série, foi o químico e físico francês Pierre Curie (1859-1906; PNF, 1903) o primeiro a introduzir a importância da **simetria** no estudo dos fenômenos físicos, ao afirmar que: - *São as assimetrias que possibilitam os fenômenos*. Para ele, uma exata simetria da Natureza não poderia ser detectada, já que todos os pontos do Universo seriam indistinguíveis, e a probabilidade da realização de experiências seria a mesma. Por outro lado, ao fazer a distinção clara entre vetores polares (que apresentam a direção independente do sistema de coordenadas) e axiais ou pseudo-vetores (cuja direção depende do sistema de coordenadas), Pierre Curie percebeu a importância da Teoria de Grupos [inventada pelo matemático francês Évariste Galois (1811-1832), em 1831] no estudo dos fenômenos físicos. É oportuno esclarecer que, em Física, chama-se de **simetria** a toda transformação que leva um sistema físico em outro que lhe seja equivalente, decorrendo daí, uma invariância desse sistema. O conjunto de transformações de simetria forma um **grupo**. Para conhecer esse tipo de estrutura matemática, ver: José Maria Filardo Bassalo e Mauro Sérgio Dorsa Cattani, **Teoria de Grupos** (EDUFPA, 2005; Livraria da Física, 2008).

A importância da simetria no estudo dos fenômenos físicos salientada por Pierre Curie teve um primeiro estudo formal com a matemática alemã Amalie Emmy Noether (1882-1935). Com efeito, em 1918 (*Königlich Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten*, p. 37; 235), ela demonstrou que as constantes de movimento de um sistema físico, isto é, os seus invariantes, estão associadas com os grupos de simetria das transformações equivalentes. Por exemplo, quando o Lagrangeano (L) [a diferença entre as energias cinética (T) e potencial (V) ($L = T - V$)], que determina as equações de movimento de um sistema físico [traduzidas pela Equação de Euler (1744)-Lagrange (1760-1761)-Poisson (1809)], apresentar simetria de translação no tempo, na posição, e apresentar, também, simetria de rotação no espaço, decorrem, respectivamente, as **Leis de Conservação da Energia, do Momento Linear e do Momento Angular**, o que significa dizer, portanto, que essas grandezas físicas são invariantes.

Por sua vez, o estudo dos princípios de simetria e a aplicação da Teoria de Grupos aos sistemas de muitos-elétrons foi iniciado pelo físico húngaro norte-americano Eugene Paul Wigner (1902-1995; PNF, 1963), em 1926 (*Zeitschrift für Physik* **40**, p. 492). Por outro lado, ao estudar as Leis de Conservação na Mecânica Quântica (traduzidas pelo **Teorema de Noether**, como vimos acima), Wigner observou, em 1927 (*Zeitschrift für Physik* **43**, p. 624), que tais leis são associadas com a existência de operadores unitários P [**operador paridade (reflexão)**], de autovalores ± 1 , que comutam com o operador Hamiltoniano H ($H = T + V$): $PH = HP$. Em 1931, no livro intitulado **Gruppentheorie und ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren**, Wigner propôs a **Lei de Conservação da Paridade P** , segundo a qual nenhuma experiência seria capaz de determinar, de maneira unívoca, a direita ou a esquerda. Logo depois, em 1932 (*Akademie der Wissenschaften zu Göttingen Nachrichten, Mathematisch-physikalische Klasse*, p. 546), Wigner estudou a reflexão no tempo (t) – o operador **inversão temporal** (T) – nos fenômenos físicos, que significa trocar t por $-t$. Na década de 1950, a esses dois operadores (P e T) foi incorporado um terceiro – o **operador troca de carga** (C) – que significa trocar uma **partícula** (p.e.: e^-) por sua **antipartícula** (e^+).

Agora, vejamos o **Teorema CPT**. Os primeiros estudos sobre a invariância desses três operadores (C , P , T) em Teoria dos Campos foram realizados pelo físico norte-americano Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965), em 1953 (*Physical Review* **91**, p. 713; **92**, p. 1238). No ano seguinte, em 1954, Schwinger (*Physical Review* **93**, p. 615; **94**, p. 1362) e, independentemente, o físico alemão Gerhart Lüders (1920-1995) (*Det Kønigelige Danske Videnskabernes Selskab Matematisk-Fysiske Meddelanden* **28**, p. 1), mostraram que a invariância desses operadores atuando no mesmo instante, a **invariância CPT**, decorre da **invariância de Lorentz** em uma Teoria dos Campos. Em 1957 (*Annals of Physics* **2**, p. 1), Lüders demonstrou o **Teorema CPT**, segundo o qual os observáveis em Física são invariantes por uma transformação combinada, em qualquer ordem, das operações C , P e T . Ainda segundo esse Teorema, toda **partícula** possui uma **antipartícula** (com carga elétrica de sinal contrário, se ela for carregada) associada de mesma massa (m), mesma vida-média (τ) e de mesmo momento magnético (μ) da partícula correspondente. Registre-se que a demonstração desse Teorema foi confirmada, ainda em 1957, em trabalhos independentes dos físicos, os sino-norte-americanos Tsung-Dao Lee (n.1926; PNF, 1957) e Chen Ning Yang (n.1922; PNF, 1957) e o germano-norte-americano Reinhard Oehme (1928-2010) (*Physical*

Review **106**, p. 340), e os russos Boris Lazarevich Ioffe (n.1926), Lev Borisovich Okun (n.1929) e Aleksei Petrovich Rudik (m.c.1993) (*Soviet Physics – JETP* **5**, p. 328).

Com a comprovação matemática da existência da **antipartícula**, começou a busca de outras além do **pósitron** (e^+ = ). Em 1955 (*Physical Review* **100**, p. 947), os físicos norte-americanos Emílio Gino Segré (1905-1989; PNF, PNF, 1959) (de origem italiana), Owen Chamberlain (1920-2006; PNF, 1959), Clyde E. Wiegand (1915-1996) e Thomas John Ypsilantis (1928-2000) anunciaram que haviam produzido os primeiros **antiprótons** (\bar{p}) com o **Bevatron** do *Laboratório Lawrence de Radiação da Universidade da Califórnia*, em Berkeley, construído em 1953, e que acelerava prótons a uma energia de 6,2 BeV (1 BeV = 1 GeV = 10^9 eV). Para isso, eles bombardearam prótons (p) altamente energéticos em átomos de cobre (Cu), em uma reação nuclear que apresenta o seguinte aspecto: . Em 1956 (*Nature* **177**, p. 11), Segré, Chamberlain, Wiegand e Ypsilantis sugeriram que o **antinêutron** (\bar{n}) poderia ser obtido em uma reação do tipo: .

É oportuno registrar que, ainda em 1956 (*Physical Review* **104**, p. 1193), os físicos norte-americanos Bruce Cork (? -1994), Glen R. Lambertson, William A. Wenzel e o físico italiano Oreste Piccioni (1915-2002) anunciaram que haviam produzido \bar{p} ao estudarem a colisão de \bar{p} com a matéria. Note-se que o \bar{p} foi previsto, em 1935, pelo físico ítalo-russo Gleb Wataghin (1899-1986), quando estava no Brasil formando o grupo de Física da *Universidade de São Paulo* (USP), que havia sido criada em 1934. A partir daí, novas **antipartículas** foram descobertas, bem como algumas delas foram reconhecidas como **antipartículas**. Por exemplo, quando o físico ítalo-italiano Enrico Fermi (1951-1954; PNF, 1938) propôs, em 1934, a explicação do **decaimento beta** por intermédio de uma nova força na Natureza, a **força fraca**, no qual o nêutron (n) se transforma em um próton (p), com a emissão de um elétron (e^-) e de seu companheiro neutrino (ν) [este havia sido previsto pelo físico austríaco Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945), em 1930], ninguém percebeu que essa partícula (ν) era realmente uma **antipartícula** (hoje, ). Da mesma maneira, quando foram descobertos os então **mésons mi** ($\mu^{+/-}$), em 1937, e os **mésons pi** ($\pi^{+/-}$), em 1947, e logo depois produzidos artificialmente por intermédio de aceleradores de partículas (vide verbete nesta série), em 1948 e 1949, também ninguém percebeu que  =  e . Somente em 1953, os físicos norte-americanos Emil John Konopinski (1911-1990) e Hormoz Massou Mahmoud (n.1918) mostraram que em uma reação envolvendo partículas elementares, ela deve conservar um novo número quântico, o **número leptônico** (L) que vale (+1) para as **partículas leptônicas** (e^-, μ^-, ν) e (-1) para as **antipartículas antileptônicas** ($e^+, \mu^+, \bar{\nu}$), e nula (0) para as demais (ver verbete nesta série), como se pode ver, p.e., no decaimento nuclear: $\mu^- (\mu^+) \rightarrow e^- (e^+) + \bar{\nu} (\nu)$. Também é interessante destacar que, por essa época (década de 1950), todas as partículas neutras eram previstas serem iguais às suas antipartículas (p.e.: ). Contudo, em 1964, foi observado que K^0 , por causa da não conservação do operador CP. Hoje, a violação da CP é uma realidade física e, portanto, objeto de pesquisa ativa, segundo vimos em verbete desta série.

A previsão teórica e sua confirmação experimental da **antipartícula (antimatéria)** colocou uma questão fundamental: - *Por que as antipartículas são apenas produzidas pelos processos físicos indicados acima e quase não existem normalmente da Natureza como as partículas?*. Ou, colocada de outra maneira: - *Por que existe uma assimetria matéria-*

antimatéria? A resposta a essa pergunta foi apresentada pelo físico russo Andrey Dmitriyevich Sakharov (1921-1989; PNPaz, 1975), em 1967 (*Pis'ma Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* 5, p. 32; *JETP Letters* 5, p. 24). Com efeito, segundo Sakharov, quando houve o Big Bang, há cerca de 13 bilhões de anos, deveria haver uma produção igual de **partículas (bárions, p.e.: prótons e nêutrons)** e de **antipartículas (antibárions, p.e.: antiprótons e antinêutrons)**, por causa da invariância do operador CP e, pelo processo do **aniquilamento** entre **matéria** e **antimatéria**, produzindo fótons, o Universo deveria ser apenas um mar de fótons o que, no entanto, não é a realidade que vemos. Portanto, ainda para Sakharov, imediatamente ao Big-Bang, por um processo até agora desconhecido, houve uma **quebra espontânea da simetria CP**, sobrando muito mais **matéria bariônica** do que **matéria antibariônica**.

Destaque-se que a produção artificial de **antipartículas** é fundamental no funcionamento dos **anéis de colisão** (vide verbete nesta série) nos quais um feixe de elétrons (prótons) se choca com um feixe de pósitrons (antiprótons) (a orientação contrária desses feixes no anel decorre da **força de Lorentz**) para a produção de novas partículas, como aconteceu, por exemplo, com a descoberta da **psi/jota** (ψ/J), em 1974; do **quark bottom** (b), em 1977; das partículas mediadoras da interação fraca ($W^{+/-}$, Z^0), em 1983; do **quark top** (t), em 1995; e na busca do **bóson de Higgs** (b_H), com evidências de sua existência anunciadas em 2012.

Na conclusão deste verbete, que tratou da **assimetria matéria-antimatéria**, gostaria de colocar uma questão que perpassou, perpassa e perpassará (!?) a Natureza Humana: - *Por que existem muito mais pessoas egoístas (que pensam só em si, colocando a razão antes da emoção) do que pessoas altruístas (que pensam também nos outros, colocando a emoção na frente da razão)? Que simetria foi violada (e qual o mecanismo de violação) quando surgiu o homo sapiens africanus, há cerca de 200.000 anos?.*



ANTERIOR

SEGUINTE