



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br



De Broglie, Seus Primeiros Trabalhos e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1929.

O físico francês Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (*Príncipe e Sétimo Duque de Broglie*) nasceu no dia 15 de agosto de 1892, em Dieppe, Seine-Maritime, na França. Sua família era da nobreza francesa (aliás, nobreza essa que permitia usar os títulos de Duque Francês e de Príncipe Germânico), sendo o filho mais jovem do diplomata francês Louis Alphonse Victor de Broglie, *Quinto Duque de Broglie* (1846-1906) e de Pauline de Forest d'Armaillé (1851-1928). De Broglie realizou seu ensino secundário no *Lycée Janson de Sailly*, em Paris, formando-se em 1909. Como pretendia ser diplomata, ele entrou na *Universidade de Paris (Sorbonne)* (UP), também em Paris, para estudar História, obtendo logo em 1910, o *Bacharelado em Artes* (História). Porém, já nessa época ele começou a se interessar por Ciências, principalmente, por Física e Matemática. Assim, em 1913, ainda na UP, recebeu o *Bacharelado em Ciências* (Física). Com o início da *Primeira Guerra Mundial* (PGM), em 28 de julho de 1914, de Broglie se ofereceu como voluntário para servir o Exército Francês e, como se interessava pela telegrafia sem fio, ele foi trabalhar em uma estação telegráfica que se localizava na Torre Eiffel. Ele trabalhou lá até o final dessa guerra, em 11 de novembro de 1918 e, durante esse período, ele pensou muito em Física Experimental certamente influenciado por seu irmão mais velho, o também físico Louis César Victor Maurice de Broglie, *Sexto Duque de Broglie* (1875-1960), que havia obtido o título de Doutor em Física no *Collège de France*, no qual estudou o mecanismo de ionização, além de confirmar a fórmula deduzida pelo físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), em 1905 (*Annalen der Physik* **17**, p. 549) sobre o **movimento browniano**, usando partículas de ferro (Fe) suspensas em gases. Além disso, em 1914 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* **158**, p. 177), Maurice desenvolveu uma

nova técnica para medir os espectros de raios-X. Note-se que essa técnica eliminava as linhas espectrais espúrias (em virtude de imperfeições em cristais) observadas, independentemente, em 1913, pelos físicos ingleses, Sir William Henry Bragg (1862-1942; PNF, 1915) e seu filho Sir William Lawrence Bragg (1890-1971; PNF, 1915) (*Proceedings of the Royal Society of London* **A88**, p. 428; *Nature* **91**, p. 557), e Henry Gwyn-Jeffreys Moseley (1887-1915) (*Philosophical Magazine* **26**, p. 1024) (ver verbete nesta série).

O interesse de Louis de Broglie também pela Física Teórica aconteceu, em 1920, quando ele ficou fascinado pelos mistérios escondidos na estrutura quântica da matéria decorrente do estranho conceito do **quantum planckiano**, conforme ele escreveu na Introdução de sua *Lecture Nobel* intitulada **The Wave Nature of the Electron** (“A Natureza Ondulatória do Elétron”), apresentada no dia 12 de dezembro de 1929, por ocasião em que recebeu o *Prêmio Nobel de Física* de 1929 (PNF/1929).

Tendo em vista esse interesse sobre os fenômenos quânticos, de Broglie começou a desenvolver, a partir de 1923, seus primeiros trabalhos teóricos que o levaram à descoberta do caráter **onda-partícula do elétron** e, portanto, ao Nobelato, trabalhos esses reunidos em sua Tese de Doutorado e intitulada **Recherches sur la Théorie des Quanta** (“Pesquisas sobre a Teoria dos Quanta”), defendida na *Faculdade de Ciências* da UP, em 1924. Aliás, sobre essa Tese existe um fato bastante curioso. Quando de Broglie apresentou essa Tese àquela Faculdade, houve certo embaraço por parte dos professores que iriam julgá-la, uma vez que essa Tese fugia aos cânones tradicionais da Física. Assim, ela foi encaminhada ao físico francês Paul Langevin (1872-1946) para julgamento. De imediato, ele enviou uma cópia ao seu amigo Einstein que, por sua vez, pediu ao físico alemão Max Born (1882-1970; PNF, 1954) uma opinião séria sobre a mesma, escrevendo-lhe: - *Leia isto! Embora pareça ter sido escrito por um louco, está escrito corretamente*. Quando Einstein devolveu a Tese de de Broglie a Langevin, disse-lhe que podia aprová-la, já que a mesma continha muitas descobertas importantes. Desse modo, Langevin foi seu Orientador de Tese. Depois de obter o Doutorado na UP, em 1924, de Broglie foi designado Professor de Física da *Faculdade de Ciências* (Sorbonne) ficando nessa posição até 1928, quando

então foi criado o *Instituto Henry Poincaré* (IHP), em Paris, ocasião em que lhe foi oferecido a posição de Professor de Física Teórica no mesmo.

Vejam os trabalhos de de Broglie que o levaram ao PNF/1929. Nos primeiros vinte e cinco anos do Século 20, um dos problemas mais intrigantes da Física, era o **caráter dual da luz**, uma vez que em certos fenômenos ela se apresentava como onda, caráter esse observado nas experiências de difração e interferência, e em outros fenômenos se apresentava como corpúsculo, caráter esse observado, em 1923, no espalhamento da luz pela matéria, o conhecido **efeito Compton-Debye** (ver verbete nesta série). Aliás, é oportuno notar que a primeira evidência sobre o momento linear (p) (característica corpuscular) da luz havia sido observada pelo físico russo Pyotr Nikolayevich Lebedev (1866-1912), em 1899 (*Archives des Sciences Physique et Naturelles* **8**, p. 184), ao realizar experiências sobre a pressão exercida pela luz sobre os corpos, pressão essa prevista pela Teoria Eletromagnética Maxwelliana (1873). Por outro lado, uma primeira conjectura do caráter dual da luz foi apresentada, em 1909, em trabalhos independentes, de Einstein, ao estudar o equilíbrio termodinâmico da radiação eletromagnética (*Physikalische Zeitschrift* **10**, p. 185), e do físico alemão Johannes Stark (1874-1957; PNF, 1919), ao explicar o **bremstrahlung** (“radiação de frenagem”) (*Physikalische Zeitschrift* **10**, p. 902). Contudo, a primeira relação formal entre p e o comprimento de onda (λ) da luz, foi apresentada por Einstein, em 1916 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft* **18**, p. 318; *Mitteilungen der Physikalischen Gesellschaft zu Zürich* **16**, p. 47), quando estudou o caráter quântico da radiação eletromagnética do corpo negro ($h\nu$), que havia sido proposto pelo físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918), em 1900 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft* **2**, p. 237).

Com efeito, como Einstein demonstrou em 1905 (*Annalen der Physik* **17**, p. 132) que para explicar o **efeito foto elétrico** a luz (de frequência ν e comprimento de onda λ) se comporta como um pacote de energia ($E = h\nu$) e como, também em 1905 (*Annalen der Physik* **18**, p. 639), Einstein mostrou que $E = mc^2$, então, considerando que $\nu = c/\lambda$, resulta que: $h\nu = hc/\lambda = mc^2 = pc \rightarrow p = h/\lambda$, sendo h a **constante de Planck**. Aí

está, portanto, o caráter dual da luz, já que as características ondulatória (λ) e corpuscular (p) não são independentes.

O problema do caráter dual da luz referido acima fascinou de Broglie, que passou a estudá-lo com mais detalhes, conforme ele descreve em seu livro intitulado **La Physique Nouvelle et les Quanta** (“A Nova Física e os Quanta”) (Flammarion, 1937). Assim, usando a **Analogia Mecânico-Óptica** (ver verbete nesta série), ele estendeu o caráter dual da luz para o elétron e toda a matéria, conhecida como a Teoria da Onda-Matéria (TO-M). Vejamos como. Em setembro e outubro de 1923, de Broglie apresentou à *Academia Francesa de Ciências* três notas que representam os fundamentos daquela teoria e baseados na Teoria Quântica Planckiana de 1900 (op. cit.) ($E = h\nu$; $E_0 = h\nu_0$, sendo h a **constante de Planck**) e da Relatividade Restrita de Einstein, em 1905 (*Annalen der Physik* 17, p. 891; 18, p. 639) $\{E = mc^2 = m_0\gamma c^2$, sendo $\gamma = [1 - (v_p)^2/c^2]^{-1/2}$ e v_p é a velocidade da partícula; e $E_0 = m_0c^2$, quando temos $v_p = 0\}$. Então, segundo de Broglie, um observador (O) fixo em relação a uma partícula em repouso ($v_p = 0$) de massa (m_0), associa a essa partícula um fenômeno periódico de frequência interna ($\nu_0 = m_0c^2/h$), isto é, uma “onda estacionária” dada por: $\psi = A \sin(2\pi\nu_0 t_0)$, considerando uma escolha conveniente da origem dos tempos.

Agora, continua de Broglie, consideremos um observador O_1 em relação ao qual essa partícula possua um movimento retilíneo e uniforme com velocidade v_p e dirigida na direção do eixo Ox. Então, a “onda em movimento” (*onda fictícia*) associada a essa partícula no instante t e percebida por O, no instante t_0 , será obtida usando a relação relativística lorentziana: $t_0 = (t - v_p x/c^2)/\gamma$ (ver verbete nesta série). Desse modo, teremos que: $\psi = A \sin(2\pi\nu_0 (t - v_p x/c^2)/\gamma) = A \sin(2\pi\nu (t - x/v_F))$, sendo $\nu = \nu_0\gamma$ e $v_F = c^2/v_p$, a **velocidade de fase** daquela onda. Em vista do exposto acima, de Broglie concluiu que a v_F guia o movimento de uma partícula do mesmo modo que o quantum de luz einsteniano ($h\nu$) guia a luz e, concluiu afirmando que : - *Os raios das ondas de fase coincidem com as trajetórias que são dinamicamente possíveis*. Note-se que as três notas foram publicadas em 1923 (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* **177**, p. 507; 548; 630). No verão de 1924 (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* **179**, p. 39), de Broglie encontrou as relações fundamentais envolvendo a energia ($E = h\nu$), o momento linear ($p = h\nu/v_F$) e a **velocidade de grupo de Rayleigh** [$1/v_G = \partial(v/v_F)/\partial\nu$] de uma partícula relativística de massa (m) e velocidade v_p . Usando as expressões acima, ele também demonstrou que $v_G = v_p$, usando o fato de que $v(v_p)$. [John William Strutt (Lord Rayleigh), **The Theory of Sound I** (Macmillan, 1877/1894), **II** (Macmillan, 1878/1896)].

De posse desses resultados, de Broglie apresentou-os, ainda em 1924, como Tese de Doutorado, intitulada **Recherche sur la Théorie des Quanta**, à *Faculdade de Ciências da Universidade de Paris* (Sorbonne) o que causou certo embaraço por parte dos professores que iriam julgá-la, uma vez que essa Tese fugia as cânones tradicionais da Física, conforme registramos acima. Agora vejamos como de Broglie usou aqueles resultados para obter seu famoso **modelo onda-partícula** para o elétron. Ao observar as órbitas dos elétrons no **átomo bohriano** (ver verbete nesta série), de Broglie verificou que a estabilidade das mesmas envolvia números inteiros, fato esse que é característico, apenas, de fenômenos de interferência e de modos normais de vibração de uma corda fixa. Assim, em 1924 (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* **179**, p. 676), de Broglie estudou o átomo de Bohr e, em 1925 (*Annales de Physique* **3**, p. 22), ele apresentou a sua célebre expressão relacionando o comprimento de onda (λ) e a velocidade (v) de uma partícula não-relativística de massa (m_0) e momentum ($p = m_0v$): $\lambda = h/p$. É oportuno destacar que a ideia da “onda de matéria de broglieana” foi formalizada pelo físico austríaco Erwin (Rudolf Josef Alexander) Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933), em 1926, por intermédio da célebre **Equação de Schrödinger** [Bassalo & Caruso, **Schrödinger** (Livreria da Física, 2014)]. Logo depois, em 1927 (*Journal de Physique* **7**, p. 327), de Broglie mostrou que sua **onda-piloto** é uma onda estacionária, ou seja, que cada órbita circular do elétron [de raio a e momento angular M (ou L)] deve conter um número inteiro (n) de “ondas-piloto” e, desse modo, demonstrou a misteriosa **regra de quantização de Bohr**: $2 \pi a = n \lambda = n h/p \rightarrow p a = M = n h/2 \pi = n \hbar$. [Bassalo & Caruso, **Bohr/De Broglie** (a ser publicado pela Livreria da Física)].

Essa proposta de de Broglie colocava a seguinte questão: ora, se o elétron orbital se comporta como uma “onda”, portanto ele pode ser difratado. Com efeito, a primeira conjectura de que os elétrons poderiam ser difratados foi apresentada pelo físico alemão Walter Maurice Elsasser (1904-1991), em 1925 (*Naturwissenschaften* **13**, p. 711), ao examinar, com o conhecimento dos trabalhos de de Broglie, os resultados das experiências realizadas, em 1921 (*Science* **54**, p. 522), 1922 (*Physical Review* **19**, p. 253; 534) e 1923 (*Physical Review* **22**, p. 242), pelos físicos

norte-americanos Clinton Joseph Davisson (1881-1958; PNF, 1937) e Charles Henry Kunsman (1870-1970), sobre o espalhamento elástico de elétrons no níquel (Ni), no alumínio (Al) e em cristais policristalinos de platina (Pt) e magnésio (Mg). Em seu exame, Elsasser interpretou o espalhamento observado dos elétrons como decorrente de uma difração.

Uma segunda conjectura ocorreu da seguinte maneira. No verão de 1926, Davisson foi participar de uma *Conferência Internacional*, em Oxford, na Inglaterra, ocasião em que teve oportunidade de discutir seus resultados experimentais vistos acima e realizados nos *Bell Telephone Laboratories*, nos Estados Unidos, e, principalmente, sobre o acidente que ocorrera em um determinado dia de abril de 1925, em uma daquelas experiências. Com efeito, nesse dia de abril, explodiu um frasco de ar líquido no instante em que o alvo de Ni estava em uma temperatura alta. Desse modo, esse metal ficou fortemente oxidado pelo ar invasor e, para eliminar essa oxidação, o Ni foi submetido a um aquecimento prolongado. Quando as experiências de espalhamento eletrônico foram retomadas, a distribuição angular dos **elétrons espalhados** havia sido completamente mudada. De volta aos Estados Unidos, Davisson e o físico norte-americano Lester Halbert Germer (1896-1971), voltaram a realizar experiências de feixes de elétrons em Ni, porém, agora com a convicção de observarem difração e não mais simplesmente o espalhamento eletrônico. Assim, em abril de 1927 (*Nature* **119**, p. 558; *Physical Review* **30**, p. 705), Davisson e Germer publicaram o famoso artigo sobre a difração de elétrons em monocristais de Ni. Logo depois, em junho de 1927 (*Nature* **119**, p. 890), os físicos ingleses Sir George Paget Thomson (1892-1975; PNF, 1937) [filho de Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1922)] e Alexander Reid anunciaram que também haviam observado a difração de elétrons, porém, em finas lâminas de celulóide, ainda em 1927 (*Journal de Physique et le Radium* **7**, p. 327).

Esses resultados experimentais comprovaram a hipótese de de Broglie e, em 1929, foi-lhe atribuído o *Prêmio Nobel de Física*, cuja *Lecture Nobel* intitulada **The Wave Nature of the Electron** (“A Natureza Ondulatória do Elétron”), foi apresentada por de Broglie no dia 12 de dezembro de 1929.

De Broglie permaneceu no IHP até 1932, quando foi então finalmente indicado como Professor Titular de Física Teórica da UP, cargo que exerceu até a sua aposentadoria, em 1962, quando então teve a oportunidade de ser o orientador de Tese de Doutorado dos físicos franceses: Cécile Andrée Paule DeWitt-Morette (n.1922), Bernard d'Espagnat (n.1921), Jean-Pierre Vigié (1920-2004) e Alexandre Proca (1897-1955) (de origem romena). Entre 1930 e 1950, de Broglie realizou uma série de pesquisas sobre os mais variados campos da Física, dentre os quais se destacam: o spin do elétron, o elétron de Dirac, o neutrino de Pauli-Fermi e a nova teoria da luz, bem como a aplicação da MQOS à Física Nuclear. Esses trabalhos podem ser vistos no [site: Academie_des_Sciences_de_Paris/Louis_de_Broglie](http://www.academie-sciences.fr/Louis_de_Broglie).

Durante sua vida dedicada à pesquisa, ensino e divulgação da Física, de Broglie recebeu várias honrarias, tais como: *Primeira Medalha Henri Poincaré* (1929); *Premio Nobel de Física* (1929); *Primeiro Prêmio Alberto de Mônaco* (1932); *Medalha Max Planck* (1938); *Prêmio Kalinga da UNESCO pela Popularização da Ciência* (1952); *Medalha do Centro Nacional (Francês) de Investigação Científica* (1956); e *Ordem (Oficial) da Academia Francesa de Ciências* (1958). É oportuno destacar que os irmãos de Broglie (Louis e Maurice) foram homenageados pela cidade de Paris com um nome de rua, no 13^o. Distrito Parisienne [***Rue de Broglie (13e. Arrondissement)***].

De Broglie pertenceu a várias entidades promotoras e incentivadoras da Ciência. Em 1933, foi eleito para a *Academia Francesa de Ciências, Secção de Ciências Mecânicas*, sendo seu *Secretário Permanente da Divisão de Ciências Matemáticas*, entre 1942 e 1975; em 1944, foi eleito *Membro do Bureau des Longitudes* e ocupou a *Cadeira 1 da Academia Francesa*; em 1945, tornou-se conselheiro do *Comissariado Francês de Energia Atômica*. Ele também foi indicado como *Membro Estrangeiro* de diversas (18 ao todo) *Academias de Ciências*, com destaque para: *Sueca* (1938); *Norte-Americana* (1947); *Royal Society of London* (1953); *Russa* (1958); e *Indiana*. De Broglie foi *Membro International Academy of Quantum Molecular Science* (“Academia Internacional de Ciência Quântica Molecular”), criada em 1967, sob sua inspiração.

Sua atividade como pesquisador, professor e escritor o fez receber outras honrarias, tais como: *Grande Cruz da Legião de Honra Francesa* (1961) e *Ordem (Oficial) de Leopoldo da Bélgica*. Além disso, foi *Doutor Honoris Causa* de diversas Universidades: Atenas, Bruxelas, Bucareste, Lausanne, Lisboa, Quebec e Varsóvia.

Creemos ser oportuno destacar o papel representado por de Broglie na criação do então *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN). A Europa estava em crise econômica devido à *Segunda Guerra Mundial* (SGM: 1939-1945) e os Estados Unidos começavam a liderar o Mundo Capitalista, tendo como pano de fundo a *Guerra Fria* e com grandes investimentos na Ciência que, por seus altos custos, tornara-se uma *big science*. Assim, físicos europeus perceberam que a Europa deveria se unir e preparar um grande centro de pesquisa em Física e, com isso, impedir a ida de grandes físicos europeus para os Estados Unidos. Essa proposta foi apresentada por de Broglie por ocasião da *Conferência Cultural Européia*, ocorrida em Lausanne, na Suíça, em dezembro de 1949. Um reforço a essa proposta foi apresentada pelo físico austro-norte-americano Isidor Isaac Rabi (1898-1988; PNF, 1944) por ocasião da *Conferência Geral da UNESCO*, realizado em Florença, em junho de 1950. Assim, logo depois, um grupo de físicos europeus liderados pelo francês Pierre Victor Auger (1899-1993), começou a pensar na criação desse centro. Em dezembro de 1951, um encontro realizado pela UNESCO, em Paris, preparou uma resolução para a criação de um “Conselho de Representantes de Estados Europeus para Planejar um Laboratório Internacional e Organizar Outras Formas de Cooperação em Pesquisa Nuclear”. Em 15 de fevereiro de 1952, 12 países (Bélgica, Dinamarca, França, Grécia, Itália, Iugoslávia, Holanda, Noruega, Reino Unido, República Federal da Alemanha, Suécia e Suíça) assinaram um acordo estabelecendo o CERN. Em outubro de 1952, escolheu-se o Cantão Meyrin, em Genebra, para ser o local de sua instalação e, depois que essa escolha foi ratificada por um plebiscito popular em Genebra, realizado em junho de 1953, em 01 de julho de 1953, o CERN foi então formalizado, por representantes daqueles 12 países. Em maio de 1954, foi iniciada a construção de dois aceleradores de partículas: ***elétron sincrociclotron*** (SC) e um ***próton sincrociclotron*** (PS), com a participação de de Broglie. Registre-se que, em 1957, o SC começou a funcionar com energia de 0,6 GeV e, em 1959, o PS começou a operar com 28 GeV. Para detalhes inusitados (principalmente construtivos e jurídicos) sobre a construção do CERN, localizado na fronteira da Suíça com a França, ver: Lisa Randall, **Batendo à Porta do Céu** (Companhia das Letras, 2013).

Durante sua vida, de Broglie publicou quase uma centena de livros, isoladamente e, também, em parceria (alguns deles apenas com o seu prefácio) constituída, basicamente, de físicos, químicos, escritores, filósofos e historiadores da ciência, tanto franceses (em sua maioria) quanto de outras nacionalidades (ver verbete nesta série).

Com a morte de seu irmão Maurice, em 14 de julho de 1960, que era o *Sexto Duque de Broglie*, Louis passou a ser o *Sétimo Duque de Broglie*. Quando de Broglie morreu, em 1987, seu ducado foi sucedido por um primo distante, o aristocrata francês Victor-François Marie Léon (1949-2012) tornando-se, portanto, o *Oitavo Duque de Broglie*.



ANTERIOR