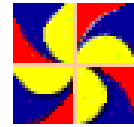




# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)



---

## **Born, Oppenheim, a Criação da Mecânica Quântica e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1954.**

Em verbetes desta série, vimos que a Mecânica Quântica Matricial (MQM) foi desenvolvida a partir dos trabalhos realizados pelos físicos alemães Max Born (1882-1970; PNF, 1954), Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) e Ernst Pascual Jordan (1902-1980). Com efeito, no dia 13 de junho de 1924, a *Zeitschrift für Physik* recebia para publicação um trabalho de Born, intitulado **Über Quantenmechanik** (“Sobre a Mecânica Quântica”) onde, pela primeira vez, o nome dessa nova parte de Física [tantas vezes falada nos célebres “seminários sobre a matéria” que aconteciam na *Universidade de Göttingen*, no começo da década de 1920, e organizados por Born, e pelos alemães, o físico James Franck (1882-1964; PNF, 1925) e o matemático David Hilbert (1862-1943). Tais seminários se se iniciavam, via de regra, com Hilbert fazendo a seguinte alocação: - *Senhores, como vós, desejaria que alguém pudesse dizer-me o que é, exatamente, um átomo?*], recebia letra de forma, sendo ele publicado no volume **26**, p. 379, daquela Revista. Neste artigo, Born apresentou um novo tratamento para as “quantidades de transição” da Teoria Quântica apresentada pelo físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918), em 1900 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalisch Gesellschaft* **2**, p. 237). Por sua vez, em 1925 (*Zeitschrift für Physik* **33**, p. 879), Heisenberg mostrou que as “quantidades de transição bornianas” satisfaziam a uma álgebra não-comutativa, álgebra essa que foi identificada por Born como sendo a Álgebra Matricial desenvolvida pelo matemático inglês Arthur Cayley (1821-1895), em 1858. Ainda em 1925 (*Zeitschrift für Physik* **34**, p. 858), Born e Jordan mostraram que as “quantidades de transição” correspondiam aos quadrados das amplitudes de vibração dos “osciladores harmônicos planckianos”. Nesse mesmo trabalho, Born e Jordan demonstraram, pela primeira vez, a famosa relação de comutação  $[p, q] = (pq - qp)$  entre as matrizes  $p$  e  $q$ , correspondentes ao momento linear e a posição de uma partícula quântica, relação essa dada por:  $[p, q] = (2 \pi i/h) \hat{I}$ , onde  $\hat{I}$  é a matriz unitária.

É interessante destacar que essa MQM foi também desenvolvida de duas maneiras distintas. Vejamos como. Em novembro de 1925 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A109**, p. 642), o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) encontrou uma nova formulação para a MQM por intermédio de uma relação entre a **Mecânica Quântica de Born** (1924) e a **Mecânica Clássica de Laplace (1782)-Hamilton (1835)-Jacobi (1837)** (MCL-H-J), usando o conceito de *bracket* (“parêntesis” –  $\{p, q\}$ ) definido pelo matemático francês Siméon Denis Poisson (1781-1840), em 1809 (*Journal de l’Ecole Polytechnique* **8**, p. 266). Dirac substituiu o *bracket*  $\{p, q\}$  pelo *comutador*  $[p, q]$  multiplicado por  $(2 \pi i/h) \hat{I}$ . (ver verbebe nesta série).

Logo em 1926 (*Annalen der Physik* **79**, p. 361; 489; 734; 747; **80**, p. 437; **81**, p. 109; *Physical Review* **28**, p. 1049), o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933) desenvolveu a Mecânica Quântica Ondulatória (MQO) por intermédio da Teoria dos

Operadores Hilbertianos, traduzida pela hoje célebre **Equação de Schrödinger**:  $H\psi(\vec{r},t) = i\hbar \partial\psi(\vec{r},t)/\partial t = E\psi(\vec{r},t)$ , onde  $H$  é o **operador hamiltoniano** [soma do **operador energia cinética** ( $T$ ) com o **operador energia potencial** ( $V$ )] e  $i\hbar\partial/\partial t$  é o **operador energia total** ( $E$ ) de um sistema físico qualquer. É interessante destacar que o isomorfismo entre a MQM e a MQO – hoje apenas Mecânica Quântica (MQ) - foi demonstrado nesse mesmo ano de 1926, pelo próprio Schrödinger (*Annalen der Physik* **79**, p. 734) e, independentemente, pelo físico norte-americano Carl Eckart (1902-1973) (*Physical Review* **28**, p. 711). Aliás, o físico austro-suíço Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945), ainda em 1926, escreveu uma carta a Jordan na qual dizia haver demonstrado esse formalismo.

Apesar do grande sucesso da MOS, pois explicava vários resultados experimentais, a função de onda [ $\psi(\vec{r},t)$ ] ou **campo escalar** dessa equação carecia de uma interpretação física. Nos artigos de Schrödinger referidos acima, vemos que a primeira tentativa fora feita pelo próprio Schrödinger, ao interpretar os elétrons como **pacotes de onda** deslocando-se no espaço como se fossem partículas clássicas. Essa interpretação malogrou, pois logo depois ficou demonstrado que o “pacote” dissipava-se com o decorrer do tempo. De outra feita, ainda Schrödinger propôs que seu **campo escalar** poderia medir a espessura da camada formada pelo elétron “derramado”, sem, no entanto, conseguir grande êxito.

A interpretação que hoje é aceita para  $\psi(\vec{r},t)$  foi a formulada por Born, também em 1926 (*Zeitschrift für Physik* **37**, p. 863; **38**, p. 803), que a considerou como uma **amplitude de probabilidade**. Vejamos como ele chegou a essa interpretação. Nessa época, Born discutiu essa ideia com seu aluno de doutorado, o jovem físico norte-americano Julius Robert Oppenheimer (1904-1967), explicando-lhe que baseou sua hipótese nos fenômenos físicos de dispersão, pois, ao estudar a dispersão de elétrons [representado por uma **onda debrogliana**, proposta pelo físico francês, o Príncipe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987; PNF, 1929), em 1924] por um átomo, verificou que o número de elétrons difundidos poderia ser calculado por intermédio de certa expressão quadrática  $|\psi(\vec{r},t)|^2$ , construída a partir da amplitude da onda esférica secundária, onda essa gerada pelo átomo espalhador do feixe eletrônico incidente. É interessante ressaltar que o valor de qualquer observável físico (posição, velocidade, energia momento linear etc.) de uma partícula pode ser determinado multiplicando-se aquele valor pela **amplitude de probabilidade** e integrando-se no espaço inteiro. [Bassalo & Caruso, **Schrödinger** (Editora da Física, 2014)].

Quando Oppenheimer estava realizando sua graduação em Química na *Universidade de Harvard* (UH), entre 1922-1925, foi aluno do físico experimental, o norte-americano Percival Williams Bridgman (1882-1961; PNF, 1946), com qual discutia sobre Física e Filosofia e, nessa discussão, percebeu que deveria aprender Física. Contudo, como ele havia concluído o Bacharelado em Química (*Suma Cum Laude*), em 1925, e tendo em mente a importância da Física, começou a estudar alguns livros de Física e, então, peticionou ao *Departamento de Física* da UH para realizar alguns cursos de pós-graduação, tendo em vista essa leitura. É interessante destacar que, segundo depoimento de Oppenheimer, alguém que examinou seu pedido, teria respondido: - *Obviamente ele é um mentiroso, mas ele deverá obter antes um doutorado, para conhecer seus títulos*. Em vista disso, como a UH, naquela época, ainda não estava muito ligada à “Nova Mecânica” que fora criada na Alemanha e

considerando também seu interesse em Física Experimental, então decidiu, em setembro de 1925, ir para o *Chris College*, da *Universidade de Cambridge* (UC), na Inglaterra, e apresentou-se ao físico e químico neozelandês-inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908), que trabalhava lá. Depois de ouvi-lo, o descobridor do núcleo atômico, o encaminhou ao físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), que trabalhava no famoso *Laboratório Cavendish* da UC. Ele trabalhou lá até setembro de 1926, quando então teve oportunidade de conhecer a “Nova Mecânica” de Born-Heisenberg-Jordan (MQM) e, então, publicar dois artigos, ainda em 1926 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **23**, p. 327; 422), nos quais usou a MQM para estudar, respectivamente, o espectro de banda molecular e o átomo de hidrogênio. Registre-se que, ainda em 1926 (*Nature* **118**, p. 711; *Naturwissenschaften* **14**, p. 1282), Oppenheimer usou a MQM para estudar o espectro contínuo de sistemas físicos, que era um “território até então inexplorado”.

Quando Born teve conhecimento dos dois primeiros trabalhos de Oppenheimer sobre a MQM, o convidou para ir à UG. Oppenheimer então partiu para Göttingen, em setembro de 1926 e ficou lá, trabalhando com Born, até a metade de julho de 1927. Foi por essa ocasião que Born orientou a Tese de Doutorado de Oppenheimer, defendida na primavera de 1927 (e publicada em: *Zeitschrift für Physik* **41**, p. 268), na qual voltou a tratar quanticamente dos “inexplorados” espectros contínuos. Essa Tese mereceu o grau: *Com Distinção*. Ainda como decorrência dessa orientação, e também em 1927 [*Annalen der Physik* **389** (*Annales de Physique Leipzig* **84**), p. 457], Born e Oppenheimer desenvolveram o hoje célebre **Método de Born-Oppenheimer** ao investigarem os cristais iônicos usando a aproximação (série) adiabática no cálculo quântico dos níveis de energia moleculares (que dependiam apenas das coordenadas atômicas), em seus três tipos: eletrônico, rotacional e vibracional. Esse método se baseia fundamentalmente no fato de que os elétrons se movem muito mais rapidamente do que os núcleos. Note-se que essa série, hoje conhecida como **Série de Oppenheimer-Born**, é o principal ingrediente para estudar o interior estelar. [Abraham Pais and Robert P. Crease, **J. Robert Oppenheimer: A Life** (Oxford University Press, 2006)].

Na metade de julho de 1927, Oppenheimer voltou para os Estados Unidos, e lá publicou alguns trabalhos pioneiros nos quais aplicou a agora MQO em alguns problemas físicos. Com efeito, em 1928, estudou a ionização espontânea de átomos na presença de campos elétricos (*Physical Review* **31**, p. 66); examinou o papel do tunelamento quântico na emissão de elétrons de superfícies metálicas, aplicando um campo elétrico (*Physical Review* **31**, p. 914) [Note-se que ideia semelhante a essa foi apresentada, também em 1928 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A119**, p. 173), pelos físicos, o inglês Ralph Howard Fowler (1889-1944) e o alemão Lothar Wolfgang Nordheim (1899-1985)]; e propôs o termo de interferência no cálculo quântico da secção de choque de espalhamento entre elétrons (*Physical Review* **32**, p. 361). A radiação de elétrons em um campo coulombiano foi tratada por Oppenheimer, em 1929 (*Zeitschrift für Physik* **55**, p. 725). É interessante observar que Oppenheimer foi o primeiro a encontrar dificuldades com a auto-energia do elétron ao tratar, em 1930 (*Physical Review* **35**, p. 461), da interação da radiação eletromagnética com a matéria. Essa dificuldade levou a hoje famosa **Quantum Electrodynamics** (QED) (“Eletrodinâmica Quântica”), já tratada em outros verbetes desta série.

Como o objetivo deste verbete é o de destacar certo constrangimento científico entre Born e Oppenheimer sobre a criação da MQ, deixaremos ao leitor ver a vida científico-política [com destaque para a teoria do colapso gravitacional (1938-

1939) e a direção científica do *Projeto Manhattan* (1942-1945) (ver verbete nesta série)] de Oppenheimer a partir da década de 1930, no livro de Pais e Crase, acima citado. Vejamos agora a origem daquele constrangimento. Desde quando Oppenheimer esteve na UG, ele sempre se mostrou muito arrogante e quase sempre interrompia algum seminário, mesmo ministrado por Born, indo ao quadro-negro e dizia: - *Isso pode ser feito muito melhor e da seguinte maneira...* . Em seu livro **My Life and Views** (Charles Scribner's Sons, New York, 1968), Born conta que havia terminado de escrever um artigo e deu para Oppenheimer checar os cálculos. Depois de lê-lo, ele foi a Born e disse: - *Não encontrei nenhum erro: você fez isso sozinho?* (Pais e Crease, op. cit.). O constrangimento entre os dois foi tratado pela economista e escritora norte-americana Nancy Thorndike Greenspace em seu livro intitulado **The End of the Certain World: The Life and Science of Max Born** (Basic Books, 2005). Oppenheimer havia sido convidado pela *British Broadcasting Corporation* (BBC), em novembro e dezembro de 1953, para ministrar as *Reith Lecture Series*, composta de seis conferências. Na noite do domingo 06 de dezembro, Born ouviu-o falar sua quarta conferência sobre o tema: *Atom and Void in the Third Millennium* (“Átomo e Vazio no Terceiro Milênio”), no qual dissertou sobre a Física Quântica e de seus principais atores, com destaque para o *quanta de luz* de Einstein (1905), a *equação de Schrödinger* (1926) e o *princípio da incerteza* de Heisenberg (1927). Sobre a interpretação da função de onda de Schrödinger ( $\Psi$ ), ele explicou sua natureza estatística, da qual derivou a Física Estatística, sem dizer que ela fora dada por Born. Por ocasião de seus 71 anos de idade, em 11 de dezembro de 1953, Born escreveu uma carta para Oppenheimer falando-lhe da omissão de seu nome naquela conferência, mas que já estava conformado com essa omissão desde quando Heisenberg havia recebido o *Prêmio Nobel de Física* (PNF), em 1932, em decorrência do trabalho sobre a MQM. Uma semana depois, Oppenheimer respondeu-lhe dizendo que havia mantido um mínimo de nomes para evitar confusão nos ouvintes e, procurando minimizar esse incidente, disse-lhe que ele próprio apreendera a Física Quântica devido às descobertas de Born. (Greenspace, op. cit.).

Para concluir este verbete é interessante registrar que Born compartilhou com o físico alemão Walther Wilhelm Georg Bothe (1891-1957), o PNF/1954. Born pela sua interpretação estatística da MQ, conforme ele próprio a denominou em sua *Nobel Lecture [The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics* (“A Interpretação Estatística da Mecânica Quântica”)] e que foi apresentada no dia 11 de dezembro de 1954, no dia em que completava 72 anos de idade. Note-se que quando recebeu a notícia que receberia o PNF/1954, disse a seu filho Gustav [farmacologista germano-inglês Gustav Victor Rudolf Born (n.1921)]: - *Assim desapareceu a vaidade!* (Greenspace, op. cit.).

Creemos ser oportuno falar um pouco sobre o trabalho de Bothe que o levou ao Nobelato. Em 1923, em trabalhos independentes, o físico norte-americano Arthur Holly Compton (1892-1962; PNF, 1927) (*Physical Review* **21**, p. 207; 483; 715; **22**, p. 409; *Philosophical Magazine* **46**, p. 897) e o físico e químico holandês Petrus Joseph Wilhelm Debye (1884-1966; PNF, 1936) (*Physikalische Zeitschrift* **24**, p. 161), descobriram o hoje conhecido **Efeito Compton-Debye**, no qual um feixe de raios-X é espalhado por elétrons, com a conservação do momento linear e da energia do sistema: raio-X + elétron. Contudo, em 1924 (*Philosophical Magazine* **47**, p. 785), os físicos, o dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922), o holandês Hendrik Anthony Kramers (1894-1952) e o norte-americano John Clarke Slater (1900-1976) formularam a hipótese (BKS) de que os princípios de conservação

da energia e do momento linear não valiam para processos microscópicos. Assim, para examinar ou não a validade daquela hipótese, ainda em 1924 (*Zeitschrift für Physik* **26**, p. 44), Bothe e o físico alemão Hans (Johannes) Wilhelm Geiger (1882-1945) realizaram experiências mais refinadas, desenvolvendo uma nova técnica experimental, conhecida como **Método da Coincidência** (MC), na qual usaram dois **contadores Geiger** [inventado por Geiger, em 1908 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A81**, p. 174)] com o objetivo de estudarem as coincidências entre os raios-X espalhados e os elétrons que recuavam nesse tipo de colisão. Com isso, essa experiência mostrou a inconsistência da BKS, resultado esse que foi ratificado ainda por eles, em 1925 (*Naturwissenschaften* **13**, p. 440; *Zeitschrift für Physik* **32**, p. 639).

Segundo vimos em verbete desta série, de posse desse novo método experimental, Bothe passou a se interessar pela **transmutação nuclear**, tipo de **reação nuclear** iniciada por Rutherford quando descobriu o **próton** ( ${}^1_1\text{H}^1$ ), em 1919 (*Philosophical Magazine* **37**, p. 357; 571; 581), ao bombardear o núcleo de nitrogênio ( ${}^1_7\text{N}^{14}$ ) com partículas  $\alpha$  ( ${}^2_2\text{He}^4$ ) e obtendo o oxigênio ( ${}^8_8\text{O}^{17}$ ) e o ( ${}^1_1\text{H}^1$ ). A partir de 1926, Bothe começou a realizar esse tipo de transmutação, bombardeando os elementos leves [lítio ( ${}^3_3\text{Li}$ ), berílio ( ${}^4_2\text{Be}$ ), boro ( ${}^5_5\text{B}$ ), carbono ( ${}^6_6\text{C}$ ) etc.] com partículas  $\alpha$ . emitidas pelo polônio ( ${}^{84}_{84}\text{Po}$ ). O primeiro resultado foi apresentado por Bothe e o físico alemão Herbert Becker (1887-1955), em 1930 (*Naturwissenschaften* **18**, p. 705; *Zeitschrift für Physik* **66**, p. 289), no qual observaram uma “radiação penetrante” decorrente da colisão entre  $\alpha$  e  ${}^4_2\text{Be}$ , e interpretaram-na como **raios gama** ( $\gamma$ ). Essa mesma interpretação foi dada pelo casal Joliot-Curie [Jean Frédéric (1900-1958; PNQ, 1935) e Irene (1897-1956; PNQ, 1935)], em 1932 (*Comptes Rendues de l’Académie de Sciences de Paris* **194**, p. 273; 708; 876), Contudo, ele foi corretamente interpretada como sendo o **nêutron** ( $n$ ) pelo físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935), ainda em 1932 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A136**, p. 696; 735; *Nature* **129**, p. 312), ao estudar a colisão de partículas  $\alpha$  com  ${}^5_5\text{B}^{11}$ . Note-se que, em 1929 (*Zeitschrift für Physik* **56**, p. 75), Bothe e o físico austríaco Werner Kolhörster (1887-1945) usaram o MC e demonstraram que os **raios cósmicos** [nome cunhado pelo físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953; PNF, 1923), em 1926 (*Proceedings of the National Sciences USA* **12**, p. 48)] eram partículas esse tipo de “radiação extraterrestre” que havia sido descoberta pelo físico austro-norte-americano Victor Franz (Francis) Hess (1883-1964; PNF, 1936), em 1911 (*Physikalische Zeitschrift* **12**, p. 998) e confirmada em 1912 (*Physikalische Zeitschrift* **13**, p. 1084).



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)