O Tempo na Mecânica Quântica.

Em verbetes desta série, vimos que em 1900, o físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918) demonstrou que a energia dos osciladores moleculares (de frequência ν), não variava continuamente e, sim, discretamente, como múltiplos da quantidade hν (onde h foi posteriormente chamado de ***constante de Planck***), denominada por ele de ***quantum de energia***. Mais tarde, em 1913, o físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922) formulou o ***modelo atômico quântico***, segundo o qual os elétrons giravam em determinadas órbitas circulares em torno do núcleo atômico, com o módulo do momento angular (L) quantizado ($L = nh/2\pi$), bem como as suas energias (E) também quantizadas [$E = -(13{,}6/n^2)$ eV (elétron-Volt), com n = 1, 2, ... , e o sinal menos (-) indicando que as órbitas são presas (ligadas) ao núcleo]. Esse modelo, no entanto, foi substituído pela Mecânica Quântica, desenvolvida entre 1925 e 1927, cuja formulação motivou uma discussão entre Bohr e o físico alemão Werner Karl Hiesenberg (1901-1976; PNF, 1932), qual seja, a de se explicar (por intermédio de uma *experiência de pensamento*) as órbitas eletrônicas bohrianas numa ***câmara de névoa*** ou ***câmara de Wilson*** (sobre esse dispositivo, ver verbete nesta série), usando o formalismo matemático dessa Mecânica. Para explicá-las, Heisenberg foi levado, em 1927, à apresentação do famoso ***Princípio da Incerteza***: - *É impossível obter exatamente os valores simultâneos de duas variáveis, a não ser dentro de um limite mínimo de exatidão* [Werner Karl Heisenberg, **The Physical Principles of the Quantum Theory**, (Dover Publications, Inc., em 1949); **Physics and Beyond: Encounters and Conversations**, (Harper and Row, Publishers, em 1971)]. Para o caso das variáveis momento linear (p) e posição (x), esse princípio é traduzido por uma expressão envolvendo os erros (Δ) em suas medidas, ou seja: $\Delta p_x \, \Delta x \approx h$, conhecida como ***Relação*** (***Princípio***) ***de Incerteza de Heisenberg*** [RI(P)H], segundo sua proposição inicial.

Essa RIH conduziu a um resultado revolucionário em Física. Vejamos qual. Na Mecânica Newtoniana, o movimento de uma partícula é regido pela *Segunda Lei de Newton*, que é dada por $F_x = m\, d^2x/dt^2$ (movimento unidimensional). Pois bem, para resolvê-la, isto é, calcular a trajetória [x(t)] seguida pela partícula, é necessário conhecer a velocidade v (e, consequentemente, o p, uma vez que p = mv) e x da mesma em um determinado instante (t). Contudo, segundo a RIH, posição e velocidade (ou momento) não podem ser conhecidas simultaneamente, pois sabendo a posição de uma partícula com precisão absoluta ($\Delta x = 0$), perdemos completamente a informação sobre a velocidade da mesma, visto que, segundo a RIH, temos: $\Delta(m\, v_x)\, \Delta x \approx h$, então, para $\Delta x = 0$ teremos $\Delta v_x \to \infty$. Deste modo, do ponto de vista da Mecânica Quântica, dizemos que a trajetória de uma partícula é <u>indeterminada</u>. É oportuno destacar que, em 1952, o físico norte-americano David Joseph Bohm (1917-1992) desenvolveu uma formulação determinista causal para a Mecânica Quântica. Para detalhes dessa Mecânica, ver verbetes nesta série.

Agora, aplicando a RIH ao par de variáveis energia (E) e **tempo** (t), resultará na ***relação de incerteza*** $\Delta E \; \Delta t \approx h$, que permite mostrar ser ***estacionário*** o estado de um sistema com E bem definida, pois, neste caso, tem-se: $\Delta E = 0$ e, portanto, teremos $\Delta t \rightarrow \infty$, limite esse que caracteriza as órbitas estacionárias do ***modelo de Bohr*** de 1913 (vide verbete nesta série). Observe-se que, como ainda não se conseguiu atribuir um operador para o **tempo** (t), essa relação é denominada de ***relação de dispersão*** (RD). Essa RD caracteriza o que denominamos o aspecto do **tempo quântico**, já que ela nos permitirá saber se o **tempo** é *discreto* ou *contínuo*. Vejamos de que maneira. A variável energia (E) envolvida na expressão acima é uma grandeza física que varia discretamente, conforme postulou Planck, em 1900, segundo vimos acima. Mais tarde, em 1926, quando o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933) propôs sua famosa equação – $H \, \Psi = E \, \Psi$ - para explicar as órbitas estacionárias do elétron no átomo de hidrogênio (H), ele demonstrou o aspecto discreto da energia bohriana. Destaque-se que, como a ***equação de Schrödinger*** (ES) é não-relativista e não considera o ***spin*** do elétron, o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), em 1928, deduziu uma equação para estudar a dinâmica do elétron – a célebre ***equação de Dirac*** (ED) – que é relativista e spinorial; a partir daí surgiu a Mecânica Quântica Relativística, bem como a Eletrodinâmica Quântica (vide verbete nesta série).

O desenvolvimento posterior da Mecânica Quântica mostrou que seu formalismo matemático permite demonstrar a RIH para um dado par de variáveis físicas, desde que se possa atribuir a cada uma delas um operador, e que não comutem entre si, isto é, dados dois operadores A e B, eles anticomutam quando: $AB \neq BA$. Contudo, enquanto se pode atribuir à variável E o operador hamiltoniano ($H = T + V$, sendo T a energia cinética e V o potencial), até o presente momento não se encontrou um operador para t. Por essa razão, sob o ***aspecto quântico***, o **tempo** é considerado, portanto, uma grandeza que varia continuamente. Registre-se que a ideia de ser o **tempo** considerado como uma ***variável dinâmica discreta*** foi discutida pelo físico sino-norte-americano Tsung-Dao Lee (n.1926; PNF, 1957), em 1983 (*Physics Letters* **B122**, p. 217), tanto na Mecânica Clássica quanto na Mecânica Quântica Não-Relativística e Relativística.

Ainda na Mecânica Quântica [Relativística (ED) e Não Relativística (ES)], na Mecânica Estatística Quântica (MEQ) e na Teoria Quântica de Campos (TCQ), é interessante destacar alguns aspectos do uso do **tempo**. Quando fazia o doutoramento em Física (concluído em 1942) na *Universidade de Princeton*, nos Estados Unidos, o físico norte-americano Richard Philips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) começou a questionar o determinismo das equações diferenciais ordinárias da Mecânica: Clássica (EN-E), Quântica Não-Relativística (ES) e Relativística (ED). Esse determinismo, conforme vimos anteriormente, significava dizer que conhecida a posição de uma partícula (p.e.: o elétron) em um dado instante, saberemos o que ela (ele) fez ou fará posteriormente. Pois bem, a partir desse questionamento, Feynman partiu do princípio de que a partícula poderia fazer o que quisesse, podendo, inclusive, voltar no **tempo**. É oportuno ressaltar que essa possibilidade da ***inversão temporal***, já havia sido usada, em 1934 (*Annalen der Physik* **21**, p. 367), pelo físico suíço Ernst Carl Gerlach Stückelberg (1905-1984) ao explicar que o ***pósitron*** (vide verbete nesta série) poderia ser tratado como um elétron viajando do futuro para o passado. Assim, continuava Feynman, partindo-se do estado de um elétron em certo instante (t_0), saberemos calcular um outro estado do mesmo em um outro tempo (t), se somarmos as contribuições de todos os infinitos possíveis ***históricos*** do elétron que o levam de um estado a um outro possível. Para Feynman, o ***histórico*** de um elétron era qualquer ***caminho*** (***trajetória***) possível no espaço e no **tempo**, podendo inclusive voltar no **tempo**, conforme havia afirmado antes. Esses infinitos ***históricos*** (por causa da RIH, que não permite que sejam definidas ***trajetórias*** para partículas) eram representados por figuras, mais tarde conhecidas como ***diagramas de Feynman***, que são calculados por intermédio de uma integral (***integral de caminho*** – *path integral*), e o resultado recebe o nome de ***propagador de Feynman***, segundo sua formulação apresentada em 1948 (*Review of Modern Physics* **20**, p. 367). Esses ***propagadores***, assim como a ***inversão temporal***, foram utilizados por Feynman, para desenvolver a Teoria dos Pósitrons, em 1949 (*Physical Review* **76**, p. 749; 769). [Richard Philips Feynman, **Quantum Electrodynamics** (W. A. Benjamin, Inc., 1962)].

Na MEQ, outro ***aspecto quântico*** do **tempo** foi apresentado pelo físico suíço-norte-americano Felix Bloch (1905-1983; PNF, 1952), em 1932 (*Zeitschrift für Physik* **74**, p. 295), ao estudar a dinâmica do ferromagnetismo e considerar que havia uma correlação entre temperatura (T) e **tempo imaginário** definido pela expressão dada por: t = - i (h/2 k T), onde k é a ***constante de Boltzmann*** e i = $\sqrt{-1}$. Com essa extensão analítica do **tempo**, ele transformou sua equação – ***equação de Bloch*** - numa ES. [José Maria Filardo Bassalo, Mauro Sérgio Dorsa Cattani e Antonio Boulhosa Nassar, **Aspectos Contemporâneos da Física**, (EdUFPA, 1999)]. Na TQC, em 1981 (*Nuclear Physics* **B188**, p. 9; 513), o físico-matemático norte-americano Edward Witten (n.1951) introduziu a supersimetria na TQC em (0 + 1) dimensões, que ficou conhecida como Mecânica Quântica Supersimétrica (MQS), na qual o ***tempo é a coordenada*** e a posição é o próprio campo. [Elso Drigo Filho, **Supersimetria Aplicada à Mecânica Quântica** (EdUNESP, 2009)].

Para concluir este verbete sobre o **tempo** na Mecânica Quântica, analisemos o seu comportamento no famoso ***Paradoxo EPR***. Segundo registramos em verbetes desta série, quando Schrödinger propôs sua famosa ES, em 1926, segundo registramos acima (H Ψ = E Ψ), surgiu uma questão intrigante: qual o significado físico da ***função de onda*** (Ψ)?. Uma das respostas que tem mais adeptos até hoje foi apresentada pelo físico alemão Max Born (1882-1970; PNF, 1954), ainda em 1926, que a considerou como uma ***amplitude de probabilidade***. A essa interpretação sobrepôs-se uma outra relevante questão. Será sempre possível observar uma grandeza física? A resposta a essa pergunta foi dada por Heisenberg, em 1927, por intermédio da RIH, comentada anteriormente. A partir dela, desenvolveu-se a Mecânica Quântica Probabilística (Indeterminista) (MQI) – conhecida como ***Interpretação de Copenhague*** (IC) – por ser adotada por Bohr que liderava um grupo de pesquisa em Copenhague. Essa interpretação foi questionada por Einstein, no célebre *Congresso de Solvay*, realizado na cidade de Bruxelas, na Bélgica, em 1927. [Sobre essa discussão entre Einstein e Bohr, ver: Paul Arthur Schilpp (Editor), **Albert Einstein: Philosopher-Scientist**, (Open Court, 1970)]. Para dar mais consistência ao argumento que Einstein apresentou naquele Congresso (e, posteriormente, no de 1930, ainda em Bruxelas) contra a IC, ele e os físicos, o russo Boris Podolsky (1896-1966) e o norte-americano Nathan Rose (1909-1955) apresentaram, em 1935 (*Physical Review* **47**, p. 777), o hoje conhecido ***Paradoxo de Einstein-Podolsky-Rosen*** ou ***Paradoxo EPR***: - *Se, sem perturbar um sistema físico, for possível predizer, com certeza* (*isto é, com a probabilidade igual a um*) *o valor de uma quantidade* *física, então existe um elemento da realidade física correspondente a essa quantidade física*.

Para chegar a essa afirmação, esses três físicos examinaram a situação de dois sistemas, I e II, que interagem entre t=0 e t=T, e depois desse intervalo de tempo deixam de interagir. Supuseram, também, que os estados dos dois sistemas eram conhecidos antes de t=0. Desse modo, com auxílio da MQI, afirmaram que pode ser calculada a Ψ do sistema I + II, para qualquer t > T. Os resultados dos cálculos quanto-mecânicos que realizaram com a Ψ para a situação que haviam considerado [também conhecida como *experiência de pensamento* (*gedankenexperimente*)], podem ser descritos de outra maneira. Vejamos qual. Sejam duas partículas (1, 2) (p.e.: elétrons), com os respectivos, momento linear ($\vec{p}_1, \vec{p}_2$) e posição ($\vec{q}_1, \vec{q}_2$), que estão em um estado com momento linear $\vec{P} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$ e posição relativa $\vec{Q} = \vec{q}_1 - \vec{q}_2$. Então, elas interagem entre si durante algum tempo, e em seguida deixam de fazê-lo. Assim, conhecidos os valores de $\vec{P}$ e $\vec{Q}$ (que podem ser nulos, bastando para isso considerar que elas estão paradas e juntas), então, medidas simultâneas de $\vec{p}_1$ e $\vec{q}_2$ nos darão, respectivamente, os valores de $\vec{p}_2$, sem perturbar a partícula 2 e de $\vec{q}_1$, sem perturbar a partícula 1. Desse modo, afirmaram os três físicos, teremos obtido simultaneamente os valores de $\vec{p}_2$ e $\vec{q}_2$, da partícula 2, que são elementos da realidade física. Contudo, a MQI proíbe que se conheçam, simultaneamente, momento linear e posição de uma partícula. Daí a razão desse artigo ser conhecido como o *Paradoxo EPR* (P-EPR), nome esse cunhado pelo físico norte-americano David Joseph Bohm (1917-1992) em seu livro intitulado Quantum Theory (Prentice-Hall, 1951). Portanto, segundo o P-EPR, a medição da posição (ou momento linear) de uma partícula poderia ser feita sem perturbar a outra, porque elas estavam *separadas* no espaço e não interagindo por intermédio de sinais locais (com a velocidade da luz que, no entanto, é finita) no momento das medições e, portanto, estariam sob uma interação (ação) a distância (p.e.: como na gravitação newtoniana). Portanto, tal interação ocorria em um tempo nulo, uma vez que essas medidas apresentavam resultados simultâneos.

O P-EPR recebeu a imediata contestação de Bohr, primeiro por intermédio de uma carta que escreveu à Revista *Nature* dois meses depois da publicação do artigo EPR, na qual dizia que não concordava com as conclusões desse artigo, prometendo escrever um outro mais detalhado, o que realmente ocorreu, ainda em 1935 (*Nature* 136, p. 65; *Physical Review* 48, p. 696). Com efeito, Bohr usou a MQI e deu uma explicação para o P-EPR dizendo que a medição de um de dois objetos quânticos (p.e.: elétrons) correlacionados afeta o parceiro correlacionado. Assim, quando um objeto de um par correlacionado sofre uma medida da *função de onda* Ψ [na linguagem da MQI, essa medida chama-se de *colapso da função de onda* (vide verbete nesta série)] em um estado de momento linear (p.e., $\vec{p}_1$), a função de onda do outro também entra em colapso (no estado de momento linear), $\vec{P}$ - $\vec{p}_1$ e nada se pode dizer sobre a posição ($\vec{q}_2$) do outro objeto correlacionado. O mesmo ocorre se for medida a posição ($\vec{q}_1$ou $\vec{q}_2$). Portanto, segundo Bohr, o *colapso da função de onda* do mesmo modo que a correlação (*entanglement*) são objetos que apresentam uma *Inseparabilidade Quântica* (vide verbete nesta serei).