



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Efeito Zenão Quântico.

O desenvolvimento da Mecânica Quântica, a partir de 1926 e traduzida pela célebre **Equação de Schrödinger** (vide verbete nesta série), mostrou que a função de onda (ψ) do elétron de um átomo que se encontra *isolado* do ambiente é representada pela superposição de auto-estados com energia bem definida e denominados de **estados estacionários**. Contudo, se o átomo considerado sofre a influência do ambiente através de campos externos, mas seus auto-estados não afetam as fontes desse campo, se diz que tal átomo representa um sistema **fechado**, porém não mais isolado. Um exemplo simples deste tipo de sistema é um átomo no qual incide um campo eletromagnético (um feixe de “quantum” de luz ou de radiofrequência). Neste caso, um auto-estado desse átomo não é mais estacionário pois pode absorver um desses “quantum” e saltar (transitar) para um outro auto-estado energético, com uma determinada probabilidade. A Mecânica Quântica mostra que essa probabilidade de transição aumenta com o tempo. [Osvaldo Pessoa Junior, **Conceitos de Física Quântica** (Editora Livraria da Física, 2003).]

Em 1957/1958 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **33**, p. 1371; *Soviet Physics JETP* **6**, p. 1053), o físico russo Leonid A. Khalfin discutiu a ideia de que as transições entre auto-estados de um átomo referidas acima poderiam ser inibidas se fossem observadas por medidas frequentes. No entanto, somente em 1977 (*Journal of Mathematical Physics* **18**, p. 756), um estudo teórico sobre essa inibição foi desenvolvido pelos físicos indianos Baidyanath Misra e Ennackel Chandy George Sudarshan (n.1931) (naturalizado norte-americano) em um artigo intitulado **The Zeno's Paradox in Quantum Theory**, eles mostraram que as transições espontâneas ou induzidas entre estados quânticos de um dado sistema devido a frequentes medidas permanecem inibidas por um dado intervalo de tempo, isto é, o sistema permanece “congelado” no estado inicial. A partir daí, essa inibição passou a ser conhecida como **Efeito (Paradoxo) Zenão Quântico** (EZQ). Ainda em 1977 (*Physical Review D* **16**, p. 520) e, posteriormente, em 1982 (*Physics Letters* **B117**, p. 34), Misra e Sudarshan, agora com a colaboração de C. B. Chiu, voltaram a discutir esse efeito, desta vez, examinando a evolução de um sistema instável, como o decaimento do próton. Esse mesmo estudo foi realizado por Khalfin, também em 1982 (*Physics Letters* **B112**, p. 223).

Vejamos como acontece o “congelamento” previsto pelo EZQ [I. Singh and M. A. B. Whitaker, *American Journal of Physics* **50**, p. 882 (1982); Gennaro Auletta, **Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics** (World Scientific, 2001)]. Seja o observável (energia) representado pelo **operador Hamiltoniano** (\hat{H}) de um sistema S sendo monitorado continuamente a partir do n-auto-estado de $\hat{H}: |\psi_n\rangle$. Considerando-se as medidas contínuas do sistema S

como casos limites de medidas discretas separadas por um intervalo de tempo τ , a função de onda desse sistema no instante imediatamente anterior à primeira medida, em $t = \tau$, será dada por:

$$|\psi_n(\vec{r}, t = \tau)\rangle = \exp\left(\frac{\hat{H}\tau}{i\hbar}\right)|\psi_n(\vec{r}, 0)\rangle \approx \left[1 + \frac{\hat{H}\tau}{i\hbar} + \frac{1}{2}\left(\frac{\hat{H}\tau}{i\hbar}\right)^2 + \dots\right]|\psi_n(\vec{r}, 0)\rangle.$$

Usando-se a expressão acima, a probabilidade (P) para o sistema S permanecer no mesmo n-auto-estado terá o seguinte aspecto:

$$P_{nn} = \left|\langle\psi_n(\vec{r}, 0)|\psi_n(\vec{r}, \tau)\rangle\right|^2 \approx 1 - \frac{\tau^2}{\hbar^2} (\Delta\hat{H})^2,$$

onde $(\Delta\hat{H})^2 = [(\hat{H}^2)_{nn} - (\hat{H}_{nn})^2 = (\Delta E)^2]$ representa a *variância* da energia E do n-auto-estado.

Depois de k medidas, ocorridas no tempo total $t = k\tau$, a expressão de P_{nn} tomará a forma:

$$P_{nn}^k(\tau) = \left[1 - \frac{(k\tau)\tau}{\hbar^2 k} (\Delta E)^2\right]^k = \left[1 - \frac{t_T \tau}{\hbar^2 k} (\Delta E)^2\right]^k.$$

Como estamos considerando a observação contínua (por um longo tempo) do sistema S no n-auto-estado, considerando também que essa observação é o caso limite de uma sucessão de medidas instantâneas, a probabilidade de esse sistema permanecer “congelado” naquele auto-estado será obtida calculando-se, primeiramente, o limite da expressão acima quando $k \rightarrow \infty$ [lembrar que $\lim_{n \rightarrow \infty} (1 + x/n)^n = \exp(x)$] e, depois o limite quando $\tau \rightarrow 0$. Desse modo, virá:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P_{nn}^k(\tau) = \exp\left[-\frac{t_T \tau}{\hbar^2} (\Delta E)^2\right] \rightarrow \lim_{\tau \rightarrow 0} P_{nn}^k(t_T) = 1.$$

O resultado acima indica que quando um observável relativo a um sistema S com espectro discreto é monitorado com uma precisão infinita ele permanece “congelado” em seu estado inicial.

É interessante que esse efeito de “congelamento no tempo” do estado inicial de um sistema físico examinado por Misra e Sudarshan, sob o ponto de vista quântico, foi denominado por eles de **Efeito (paradoxo) Zenão Quântico (EZQ)**, em analogia com o “paradoxo da flecha” discutido pelo filósofo grego Zenão de Eléia (c.500-f.c.450), para demonstrar que o movimento não existia. Com efeito, Zenão raciocinou que uma flecha em movimento ocupa sempre um lugar igual a si própria. Ora, se ela ocupa sempre um espaço igual ao seu tamanho, ela está sempre parada (“congelada”) e, portanto, o seu movimento é uma ilusão. Registre-se que Zenão ainda discutiu a impossibilidade do movimento em outros três paradoxos: dicotomia, Aquiles e a tartaruga e estádio (vide verbete nesta série). Observe-se que esse efeito foi também denominado de **watched-pot effect** (“efeito da panela observada”), em analogia com o que ocorre quando uma panela fechada que está fervendo deixa de ferver quando

ela é destampada. Isso ocorre em virtude de haver diminuição de vapor de pressão. Observe-se ainda que existe um caso particular do EZQ, conhecido como **watchdog effect** (“efeito do cachorro observado”), mas que se aplica a uma inibição que ocorre na interação (unitária) entre o objeto que está sendo observado e o aparelho que faz a observação, isto é, ele representa a supressão da resposta de um objeto quântico quando a observação é monitorada continuamente. (Pessoa Junior, op. cit.; Auletta op. cit.)

Muito embora o EZQ possa ocorrer envolvendo transições espontâneas ou induzidas, nestas, contudo, tal efeito poderia ser mais facilmente observado experimentalmente, conforme Richard J. Cook propôs, em 1988 (*Physica Scripta* **T21**, p. 49). Vejamos a sua proposta (Cook, op. cit.; Auletta, op. cit.). Considere um íon preso o qual pode realizar somente transições, ou do estado fundamental ($|1\rangle$) a um estado excitado metaestável ($|2\rangle$) (onde o decaimento espontâneo $|2\rangle \rightarrow |1\rangle$ é desprezível), ou do estado fundamental ao estado excitado por pulso óptico ($|3\rangle$). A função de onda é projetada pela medida da diferença de energia entre os dois primeiros estados (níveis) por intermédio de um pulso ressonante π de duração $\tau = \pi/\Omega$ [onde Ω é a **frequência de Rabi** (vide verbete nesta série), proporcional ao quadrado da amplitude do campo aplicado]. Se no começo dessa medida o íon é projetado no nível $|1\rangle$, um ciclo ocorre entre os níveis $|1\rangle$ e $|3\rangle$, e ele emite uma série de fótons até que a medida seja encerrada; por outro lado, se ele for projetado no nível $|2\rangle$, ele não emite fótons. Nesse caso, se diz que o pulso óptico causa o “colapso da função de onda” neste nível. Em resumo: se uma medida encontra o íon no nível $|1\rangle$, ele retorna a esse nível depois do término dessa medida, dentro de um intervalo de tempo aproximadamente igual à vida média do nível $|3\rangle$. Se, no entanto, a medida encontra o íon no nível $|2\rangle$, o íon nunca deixa esse nível durante a medida, ou seja, ele fica “congelado” nesse nível.

É oportuno destacar que, em 1987 (*Physical Review* **A36**, p. 929), os físicos norte-americanos M. Porrati e Seth J. Putterman mostraram que a não-emissão de um fóton durante (ou imediatamente depois de) um pulso óptico devido ao colapso da função de onda está correlacionada com um estado metaestável de um átomo. Nessa ocasião, eles afirmaram que esse colapso é o resultado de uma “experiência de medida nula”. Registre-se que esse tipo de experiência já havia sido estudado por Mauritius Renninger, em 1960 (*Zeitschrift für Physik* **158**, p. 417), ocasião em que afirmou não haver nenhuma interação entre o fóton do pulso e o átomo, isto é, que o ato de medir não provocava nenhum distúrbio no objeto que está sendo observado. Registre-se, também, que T. Erber, P. Hammerling, G. Hockney, Porrati e Putterman, em 1989, (*Annals of Physics* **190**, p. 254) mostraram que, para decaimentos estritamente exponenciais, não ocorre o EZQ. (Pessoa Junior, op. cit. e informação particular.)

Conforme a sugestão de Cook vista acima, ele acreditava que, se fosse realizada uma experiência do tipo proposto por ele, o EZQ seria comprovado. Essa experiência foi realizada, em 1990 (*Physical Review* **A41**, p. 2295), pelos físicos Wayne M. Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger e David J. Wineland, usando aproximadamente 5000 íons de berílio ($^9\text{Be}^+$), armazenados em uma **armadilha Penning** [nome dado devido as primeiras experiências de aprisionamento de

elétrons com campos magnéticos realizadas por F. M. Penning, em 1936 (*Physica* **3**, p. 873)] e resfriados por um laser abaixo de 250 mK. É oportuno destacar que a interpretação do “colapso da função de onda” dada por esses físicos para explicar essa experiência sofreu uma série de críticas, comentadas e respondidas por eles, em 1991 (*Physical Review* **A43**, p. 5168). Como o EZQ relaciona-se com o problema da “medida na Mecânica Quântica”, ele foi (e ainda é) objeto de muita discussão (Auletta, op. cit.).

Por outro lado, o EZQ tem sido previsto e observado em outras situações físicas das consideradas por Misra e Sudarshan, como, por exemplo, em sistemas quânticos instáveis que apresentam um pequeno desvio temporal na lei do **decaimento exponencial**. Nesses períodos não-exponenciais, há uma inibição (“congelamento”) do decaimento do sistema. Quando nesses períodos há uma intensificação do decaimento, diz-se que ocorreu um **efeito anti-Zenão** (EA-Z). Por exemplo, em 2001 (*Physical Review Letters* **87**, p. 040402), M. C. Fischer, B. Gutiérrez-Medina e Mark G. Raizen, na *Universidade do Texas*, em Austin, observaram os efeitos EZQ e EA-Z em um sistema quântico instável, de acordo com o que foi inicialmente proposto por Misra e Sudarshan. Eles prenderam átomos de cálcio (Ca) ultrafrios em uma rede opticamente acelerante e mediram a perda devido ao processo de tunelamento, desacelerando o sistema e, portanto, parando o tunelamento. Em 2006 (*Physical Review Letters* **97**, p. 260402), Erik W. Tred, Jongchul Man, Micah Boyd, Gretchen K. Campbell, Patrick Medley, Wolfgang Ketterle (n.1957; PNF, 2001) e David E. Pritchard, no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), observaram a dependência do EZQ sobre a medida de pulsos eletromagnéticos.

Concluindo este verbete, é interessante destacar que o EZQ tem sido usado para explicar a **dicotomia mente-corpo** como foi proposto pelo físico Henry P. Stapp, em seu livro intitulado **Mindful Universe: Quantum Mechanics and the Participating Observer**, editado em 2007, pela Springer Verlag. Neste livro, Stapp defende a ideia de que ondas quânticas entram em colapso ao interagirem com a consciência. Ainda segundo ele, o colapso da função de onda (vide verbete nesta série) *referente à mente* utiliza certos aspectos do EZQ. Mais detalhes sobre o EZQ, ver: [en.wikipedia.org/wiki/Quantum_Zeno_effect; Henri_Stapp](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_Zeno_effect;Henri_Stapp) (acesso em 25/3/2011), e os textos citados neste verbete.



ANTERIOR

SEGUINTE