

Seminário de Quântica Aplicada “Efeito Zeno Quântico”

Introdução:

O efeito Zeno quântico tem sido discutido por mais de 60 anos e foi chamado anteriormente de “Paradoxo de Turing”.

Zeno foi o filósofo grego que lançou vários paradoxos para mostrar que, racionalmente, o movimento não pode ser compreendido. Por exemplo, o corredor Aquiles nunca poderia atingir a linha de chegada, pois haveria infinitos pontos para ele passar antes de chegar.

No efeito Zeno quântico, nós não podemos ver uma mudança se olharmos intensamente para ela. O Efeito Zeno Quântico é essencialmente congelar o estado quântico de um sistema quanto ele é submetido a muitas sequências rápidas de medidas. Ou seja, medidas em sequência impedem o movimento.

A chave para entender o efeito Zeno quântico é que a cada observação ou medição de um sistema ocorre um colapso da onda quântica. Os sistemas em questão envolvem uma lenta transição de um estado para outro e, ao observar constantemente tal sistema, provocam-se colapsos constantes para o estado inicial, e ele nunca completa a transição para o outro estado.

Um exemplo para o efeito Zeno quântico seria um núcleo radioativo. Se após uma hora medíssemos quantos átomos decaíram em uma amostra, suponha que 50% deles o tenham feito, ao medir a cada minuto, no final (após uma hora) menos de 1% teria decaído! E no limite, se observássemos continuamente o núcleo radioativo, ele nunca decairia!

Em suma, se fizermos apenas uma medição após uma hora, 50% dos átomos terão feito a transição. Se medirmos a cada minuto, ao final de uma hora menos de 1% terão feito a transição. Se medirmos continuamente, nenhum átomo faz a transição. Eis então o efeito Zeno quântico!

Efeito Zeno Quântico: Como tudo começou...

Em 1957, o físico russo Leonid Khalfin discutiu a idéia de que as transições entre autoestados de um átomo poderiam ser inibidas se fossem observadas por medidas frequentes. No entanto, somente em 1977, um estudo teórico sobre essa inibição foi desenvolvido pelos físicos indianos Baidyanath Misra e Ennackel Chandy George Sudarshan 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) Zeno Quântico (EZQ). Ainda em 1977 e, posteriormente, em 1982, 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 de um próton. Esse mesmo estudo foi realizado por Khalfin, também em 1982.

Este efeito de “congelamento” se deve ao fato de que a probabilidade de que um estado decaia depois de um colapso aumenta quadraticamente com o tempo. Considerando-se medidas contínuas do sistema 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:

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

Usando-se a expressão acima, constrói-se a probabilidade para o sistema permanecer no mesmo n-autoestado, depois k medidas, ocorridas no tempo total $t = k\tau$:

$$P_{nn}^k = |\langle \Psi_n(r, 0) | \Psi_n(r, 0) \rangle|^2 \approx \left[1 - \frac{\tau^2}{\hbar^2} (\Delta H)^2\right]^k = \left[1 - \frac{t\tau}{\hbar^2 k} (\Delta E)^2\right]^k$$

Considerando a observação contínua (por um longo tempo) do sistema no n-autoestado, considerando também que essa observação é o caso limite de uma sucessão de medidas instantâneas, a probabilidade de esse sistema permanecer “congelado” naquele n-autoestado será obtida calculando-se o limite da expressão acima quando $k \rightarrow \infty$, e depois, o limite quando $\tau \rightarrow 0$:

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

Este resultado indica que quando um observável relativo a um sistema 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) Zeno Quântico (EZQ), em analogia com o “paradoxo da flecha” discutido pelo filósofo grego Zeno de Eléia (c.500-f.c.450), para demonstrar que o movimento não existia. Zeno 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. Zeno ainda discutiu a impossibilidade do movimento em outros dois paradoxos:

Dicotomia: O que este paradoxo diz que é que não há movimento porque aquilo que se move tem de chegar a meio do seu percurso antes de chegar ao fim. Se aquilo que se move de um lado para o outro tem de primeiro chegar ao meio do seu percurso, nada tem de extraordinário ou paradoxal, a conclusão de que isso implica que o movimento é impossível é que é estranha.

A explicação para esta conclusão baseia-se no seguinte raciocínio: antes de percorrer todo o percurso tem de percorrer metade do percurso; percorrido metade do percurso, antes de percorrer a outra metade, tem de percorrer metade dessa metade (um quarto do percurso inicial); percorridos três quartos do percurso, ainda tem de percorrer o restante quarto do percurso, mas antes disso, tem de percorrer metade desse quarto do percurso (um oitavo do percurso inicial); e assim sucessivamente, terá de percorrer um conjunto infinito de intervalos.

Aquiles e a tartaruga: O que este paradoxo diz é que numa corrida, o mais lento começa com vantagem. Enquanto o mais lento estiver correndo, nunca poderá ser ultrapassado pelo mais veloz, pois aquele que persegue tem primeiro de chegar ao ponto de onde o mais lento começou, e o mais lento necessariamente já deve estar a alguma distância à frente. Ou seja, antes de apanhar o mais lento, o mais veloz terá sempre de alcançar o ponto onde o mais lento estava anteriormente.

Na transmissão tradicional deste paradoxo temos uma corrida entre Aquiles, o herói grego da *Ilíada* de Homero, simbolizando a velocidade, e opostamente a tartaruga, símbolo da lentidão.

A conclusão parece ser um pouco estranha, mas é o resultado do seguinte raciocínio: a tartaruga começa a corrida com uma determinada vantagem sobre Aquiles; quando Aquiles chega ao ponto de

onde começou a tartaruga, esta já lá não está e apesar de não ter andado tanto como Aquiles, já está num segundo ponto mais à frente; prosseguindo a corrida, quando Aquiles chega a esse segundo ponto, a tartaruga estará mais à frente num terceiro ponto; quando Aquiles chegar a esse terceiro ponto, a tartaruga estará mais à frente num quarto ponto; e assim sucessivamente. Logo, apesar de Aquiles estar cada vez mais próximo da tartaruga nunca chega a alcançá-la, pois sempre que chega ao ponto onde estava a tartaruga num momento atrás, ela já está mais à frente. Portanto, desde que não pare, a tartaruga irá sempre à frente e ganhará a corrida, pois Aquiles poderia correr infinitamente que não a apanharia!!

Efeito Zeno Quântico: Experimento:

Muito embora o EZQ possa ocorrer envolvendo transições espontâneas ou induzidas, nestas, contudo, tal efeito poderia ser mais facilmente observado experimentalmente, conforme Richard Cook propôs em 1988. A proposta era considerar um íon preso no qual pode realizar somente transições, ou do estado fundamental ($|1\rangle$) a um estado excitado metaestável $|2\rangle$ (é aquele no qual um elétron excitado permanece muito mais tempo, antes de cair num nível inferior de energia, 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. Se no começo dessa medida o íon é projetado no nível fundamental ($|1\rangle$), 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 estado fundamental ($|1\rangle$), 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.

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, pelos físicos Wayne Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger e David 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), e fazendo-os mover vagarosamente de um estado para o outro expondo-os à microondas. Sem medição, os íons demoravam 256 milissegundos para completar a transição de um estado para o outro. Logo, no início, os átomos estavam 100% no estado 1 e no final, 100% no estado 2. (Probabilidade de estado 2 aumenta enquanto a do estado 1 decai).

Os estados dos íons foram medidos usando um laser ultravioleta com a frequência escolhida tal que o íon no estado 1 poderia absorver luz, enquanto o íon no estado 2 não absorveria nenhuma luz. (Íons absorviam fótons do laser e reemitiam, fazendo um ponto brilhante em uma câmera, e a quantidade de luz que chegava à câmera era a medida direta dos números de íons no estado 1).

Para mostrar o EZQ, eles fizeram o experimento com 2 pulsos de laser: 1 pulso depois de 128ms e outro depois de 256ms. Eles viram metade da quantidade de luz depois de 256ms, indicando que somente 50% da amostra se mudou para o estado 2. Isso se deve, pois o laser pulsou na metade da medida do estado dos íons. Muitos deles foram encontrados no estado 1 e a medição destruiu parte da função de onda do estado 2. Esses átomos estavam então 100% no estado 1 e a transição teve que começar de novo. A probabilidade de mudar do estado 1 para o estado 2 diminui em relação em que mais medidas são efetuadas.

Logo, foram dados mais pulsos de laser e mais medidas foram efetuadas, por exemplo, com 4 pulsos somente 35% dos átomos fizeram a transição, e assim sucessivamente.

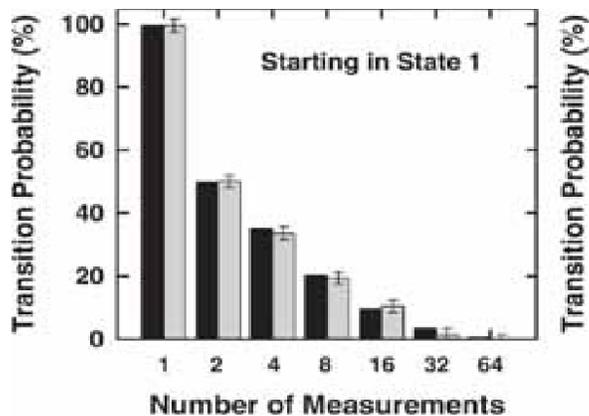


Figura 1: Medição da probabilidade de transição dos átomos entre os estados.

Conclusão:

Logo, a conclusão é a de que podemos usar o EZQ para reduzir a chance do sistema de mudar de estado simplesmente medindo o sistema varias vezes.

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. Como o EZQ relaciona-se com o problema da “medida na Mecânica Quântica”, ele foi (e ainda é) objeto de muita discussão.

Considerações Finais:

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-Zeno (EA-Z). Por exemplo, em 2001, 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, Erik W. Treed, Jongchul Man, Micah Boyd, Gretchen K. Campbell, Patrick Medley, Wolfgang Ketterle e David E. Pritchard, no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), observaram a dependência do EZQ sobre a medida de pulsos eletromagnéticos.

Para concluir, 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 referente à mente utiliza certos aspectos do EZQ.**

Frank and Ernest



Copyright (c) 1997 by Thaves. Distributed from www.thecomics.com.