

Efeito Zeno Quântico

Pedro Henrique Pinheiro Cintra^{1,*}

¹ Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade de Campinas

Correspondence*:

Autor correspondente

pedrohpc@ifi.unicamp.br

ABSTRACT

Neste trabalho apresento a ideia por trás do efeito Zeno quântico e discuto experimentos que mostram a existência deste efeito em sistemas quânticos. Afim de enriquecer a discussão sobre o que este efeito implica na mecânica quântica, uma seção sobre as interpretações de "medida" em mecânica quântica é apresentada de forma a mostrar ao leitor diversas interpretações para o que acontece durante o efeito Zeno. Sua interpretação está profundamente ligada com a interpretação de "medida" e "colapso da função de onda" e este trabalho tem como objetivo utilizar o efeito para contextualizar o leitor nestes problemas em aberto dentro da formulação da teoria quântica.

Keywords: Quantum Zeno Effect, Measurement, Interaction, Perturbation, Measurement Problem

1 INTRODUÇÃO

"Se tudo ocupa o mesmo espaço enquanto em repouso e durante um instante de tempo, e tudo aquilo que está em movimento está sempre ocupando este espaço a todo instante, então uma flecha voando está em repouso em um instante de tempo e no instante seguinte também. Mas se ambos os instantes forem tomados como o mesmo instante, ou como um instante contínuo de tempo, então a flecha está em movimento."

— Zeno de Eleia (495 A.C - 430 A.C)

Este é o paradoxo de Zeno, sua conclusão absurda é que se o movimento de um objeto é dado como uma sequência de fotos do objeto em instantes de tempo infinitamente próximos, então em cada foto o objeto está em repouso, logo uma flecha em movimento, está em repouso [12]. Na verdade podemos resolver este paradoxo pensando em intervalos de tempo Δt que são finitos, e fazendo o limite $\Delta t \rightarrow 0$, onde chegaremos à definição de velocidade instantânea. Mas será possível de alguma forma, congelar a dinâmica de um objeto em movimento? Será possível que um objeto em movimento, fique em repouso?

Em mecânica quântica, o estado de um sistema é caracterizado por um vetor de estado $|\alpha\rangle$ que pode ser um estado puro ou uma sobreposição de estados. Um estado puro, corresponde matematicamente ao estado que já faz parte da base de vetores que descrevem um observável. Digamos que estamos interessados em medir a energia do sistema. Há então um conjunto de vetores $|n\rangle$ que diagonalizam o operador Hamiltoniano e possuem as auto energias do sistema ($H|n\rangle = E_n|n\rangle$). Nesta situação, uma medida da energia do sistema só pode retornar um único valor E_n .

Por outro lado, $|\alpha\rangle$ pode ser uma sobreposição de vetores da base $|\alpha\rangle = c_1 |n_0\rangle + c_2 |n_1\rangle + \dots$, isto é, uma sobreposição de estados. Neste caso, ao se medir a energia do sistema em sobreposição, pode-se obter vários valores de energia, conforme a sobreposição permitir, com probabilidades de medição diferentes.

O ato de medição faz a função de onda colapsar instantaneamente em um auto estado (autovetor) de H . Suponha então que temos um sistema quântico inicialmente em um estado descrito por uma função de onda no espaço das posições (como um oscilador harmônico, por exemplo)

$$\psi_n(x, 0) = \langle x|n\rangle. \quad (1)$$

Este sistema irá evoluir temporalmente de acordo com

$$\psi_n(x, t) = \int K(x, y; t) \psi_n(y, 0) dy, \quad (2)$$

sendo

$$K(x, y; t) = \langle x|U(t)|y\rangle = \langle x|e^{-iHt/\hbar}|y\rangle, \quad (3)$$

supondo que a Hamiltoniana do sistema não dependa do tempo. Entretanto, para que o sistema evolua no tempo, de acordo com a atuação do propagador, este deve entrar em uma sobreposição entre os estados iniciais e finais, desta forma o propagador pode ser interpretado como uma amplitude de probabilidade de se iniciar o sistema em um estado $\psi(y)$ e encontrar o sistema em um estado $\psi(x, t)$, um tempo t depois ¹.

Porém, note que se realizarmos uma medição do sistema no estado inicial $\psi(y)$ e continuarmos medindo o sistema após esta medição inicial, estaremos impedindo que o sistema entre em uma sobreposição e portanto evolua no tempo. Estaremos continuamente colapsando a função de onda no estado inicial. Conforme os intervalos entre as medições tende a 0, menos permitiremos a evolução do sistema quântico. Este fato foi primeiramente descrito por Alan Turing [16], e foi mais tarde formalmente descrito por Misra e Sudarshan (ref[14]), que sugeriram o termo efeito Zeno para esta aparente contradição.

Misra e Sudarshan mostraram que de fato, ao se realizar medições contínuas do estado "decaído" ou "não decaído" de um sistema instável inicialmente preparado no estado "não decaído" (como um átomo radioativo, por exemplo), durante um intervalo de tempo Δt , a probabilidade de que se observe o sistema no estado "decaído" é zero.

2 TRANSIÇÃO ENTRE NÍVEIS DE ENERGIA

11 anos após a formulação matemática de Misra e Sudarshan, Cook (ref[4]) propôs um cenário passível de medição experimental para se verificar o efeito Zeno.

Suponha um átomo com níveis de energia organizados como a figura 1. O nível de energia 1 possui energia E_0 e é o estado fundamental, o nível 2 possui energia E_1 e o nível 3 possui energia E_2 . Se o

¹ Aqui vale lembrar que x e y são apenas posições diferentes, não coordenadas diferentes em um plano 2D.

átomo está inicialmente no nível 1, uma perturbação de frequência $(E_1 - E_0)/\hbar$ é capaz de criar uma sobreposição coerente entre os estados 1 e 2 do átomo. Sendo P_1 a probabilidade do elétron neste átomo estar no nível 1 e P_2 a probabilidade de que ele esteja no nível 2, temos que

$$\begin{aligned} P_1 &= \sin^2 \left(\frac{\Omega t}{2} \right) \\ P_2 &= \cos^2 \left(\frac{\Omega t}{2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

onde Ω é a frequência de Rabi, que é proporcional à amplitude do campo de perturbação.

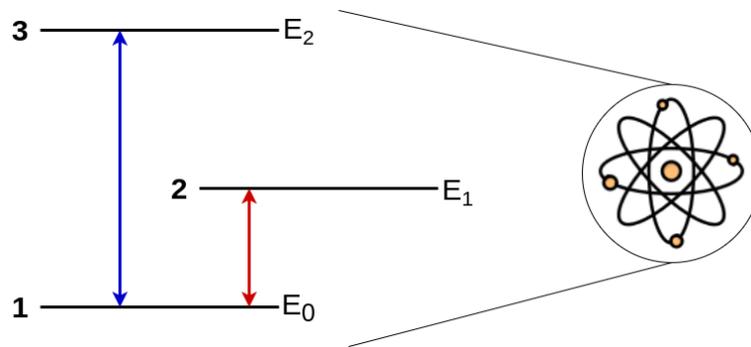


Figura 1. Representação esquemática do sistema de 3 níveis eletrônicos em um átomo.

Assuma que neste átomo, o nível 3 de energia só pode decair diretamente para o nível 1. Dessa forma, a medição do nível inicial da partícula (1 ou 2) pode ser conduzida pela excitação de um pulso de laser com energia $E = E_2 - E_0$. Caso o elétron esteja no estado 1, ele irá transitar para o nível 3, logo em seguida retornando para 1 através da emissão de um fóton de de-excitação. Já se o elétron estiver em 2, o pulso não irá induzir uma transição eletrônica e nenhum fóton de de-excitação será emitido após o pulso inicial. Se a medida inicial é imediatamente seguida de uma outra medida, o resultado será o mesmo pois a medida inicial colapsa a função de onda do elétron no estado 1 ou 2, e a medida seguinte mantém este colapso impedindo a evolução da função de onda para uma sobreposição de 1 e 2.

No experimento proposto por Cook (ref[4]), um pulso de laser quadrado π de duração $T = \pi/\Omega$ induz transições $1 \rightarrow 2$ enquanto um pulso de medição (que promove a transição $1 \rightarrow 3$) mede o estado do elétron (1 ou 2). Suponha que o elétron está inicialmente no estado 1, após o tempo T do pulso, a probabilidade P_2 de se encontrar o elétron no estado 2 é 1, sem nenhum pulso de medição. Agora imagine que n pulsos de medição são aplicados em intervalos $\tau = kT/n$, $k = 1, 2, \dots, n$, podemos calcular a probabilidade final de se obter o elétron no nível 2 em termos das n medições feitas durante o intervalo T usando a representação vetorial do sistema de dois níveis.

O sistema é descrito pelo vetor $\vec{R} = (R_1, R_2, R_3)$, cujas componentes podem ser determinadas em termos da matriz de densidade ρ

$$\begin{aligned}
R_1 &= \rho_{12} + \rho_{21} \\
R_2 &= i(\rho_{12} - \rho_{21}) \\
R_3 &= \rho_{22} - \rho_{11} = P_2 - P_1
\end{aligned} \tag{5}$$

A equação de movimento neste caso é

$$\frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{R}, \tag{6}$$

sendo $\vec{\omega} = (\Omega, 0, 0)$. No instante $t = 0$, $\vec{R} = (0, 0, -1)$, pois o sistema está no estado 1. Logo antes do primeiro pulso de medição $\tau = \pi/n\Omega$,

$$\vec{R} = (0, \sin(\Omega/\tau), -\cos(\Omega/\tau)) = (0, \sin(\pi/n), -\cos(\pi/n)), \tag{7}$$

o sistema se encontra em uma sobreposição do nível 1 com o nível 2. Isso faz com que a coerência do nosso sistema seja nula, impactando a matriz de densidade de forma que $\rho_{12} = \rho_{21} = 0$. Logo, $R_1 = R_2 = 0$.

$$\vec{R} = (0, 0, -\cos(\pi/n)) \tag{8}$$

Portanto, logo antes da medição, \vec{R} é o mesmo de antes da medição, porém sua amplitude foi diminuída por um fator de $\cos(\pi/n)$. Após uma segunda medida, sua amplitude é novamente diminuída em um fator $\cos(\pi/n)$, de forma que, após n medidas

$$\vec{R}(T) = (0, 0, -\cos^n(\pi/n)). \tag{9}$$

Com isso calculamos a probabilidade P_2 de se observar o estado no nível 2.

$$P_2 = R_3 + P_1 = \frac{1}{2}(1 + R_3) = \frac{1}{2}[1 - \cos^n(\pi/n)] \tag{10}$$

Conforme n se torna maior, a expressão para P_2 se torna

$$P_2 = \frac{1}{2}(1 - e^{-\pi^2/2n}) \tag{11}$$

Portanto, experimentalmente, podemos esperar que a quantidade de elétrons observados no estado 2 diminua conforme aumentamos a frequência n de medições feitas no sistema no intervalo de tempo T .

Em 1990, Itano (ref[8]) preparou um experimento de acordo com o descrito acima, utilizando íons de B_e^+ , cujos níveis 1 e 2 eram dados pelos subníveis de estrutura hiperfina do estado $2s^2$, enquanto o nível 3 era dado pelo nível $2p^2$, que apenas decaía para o nível 1, devido à conservação do momento angular. Como resultado, o experimento verificou com concordância extremamente boa a previsão teórica dada pelo efeito Zeno (Figura 2).

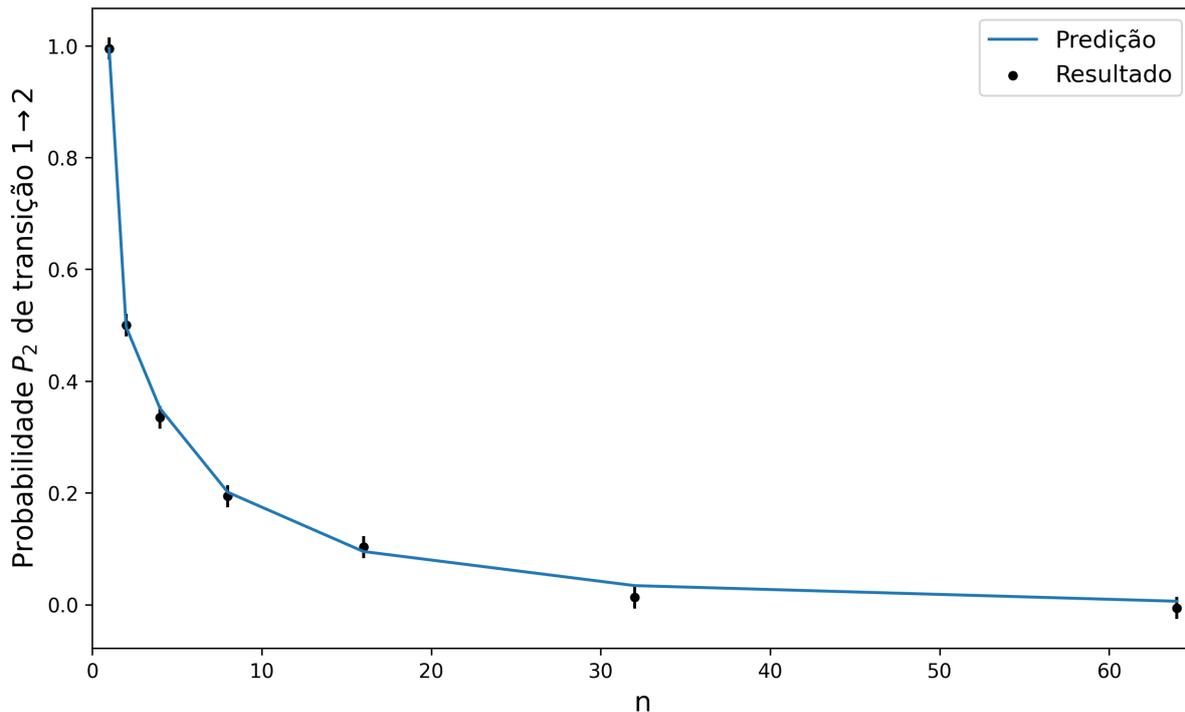


Figura 2. Resultado do experimento de efeito Zeno na transição eletrônica em átomos de B_e^+ [8].

Diversos experimentos de armadilhas de íons e transições eletrônicas mais tarde replicaram os resultados de Itano (ref[8]), mostrando que quanto mais frequente a medição feita no sistema, menos e evolução do estado para a sobreposição ocorria [13]. Mais tarde, em 2001, o efeito Zeno ainda foi verificado em um sistema instável, como originalmente proposto por Misra e Sudarshan [5].

3 TUNELAMENTO QUÂNTICO

Em 2015, a existência do efeito Zeno foi investigada em outro fenômeno único da mecânica quântica, o tunelamento quântico. Resumidamente, uma partícula de energia E que incide sobre uma barreira de energia $V > E$, tem probabilidade não nula de atravessar a barreira e ser encontrada do outro lado. O tunelamento de átomos já foi observado experimentalmente em sistemas de redes cristalinas de átomos de Rubídio resfriadas até temperaturas de alguns μK (micro-Kelvin). Quando estes átomos estão no nível de energia mais baixa possível, podem tunelar de um sítio para outro da rede, mesmo não possuindo energia o suficiente para se mover livremente.

Um grupo de pesquisadores liderados por Patil utilizou um esquema descrito na figura 3 para medir a posição de átomos em uma rede através da fluorescência emitida pelos átomos ao absorverem fótons de um pulso da laser. A intensidade do laser estava relacionada à quantidade de fótons emitidos e por consequência, era relacionado à taxa de medição Γ_m [15].

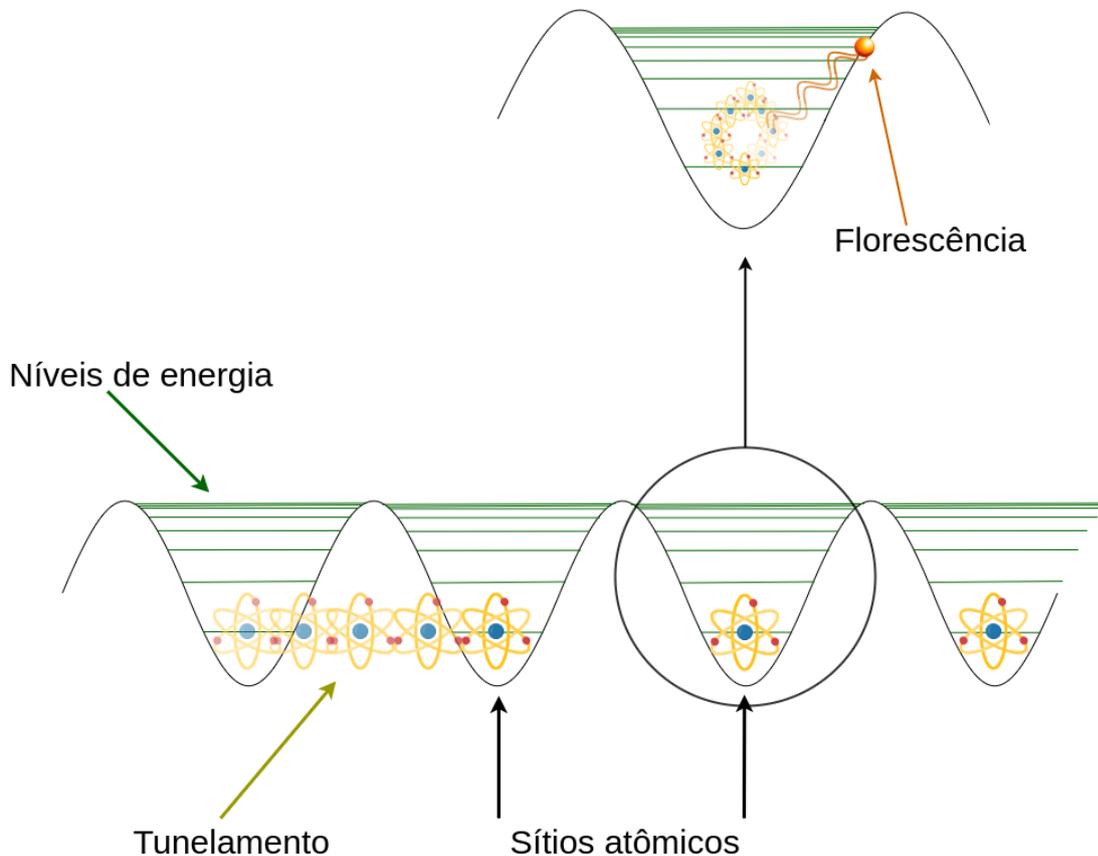


Figura 3. Representação esquemática do experimento. Átomos em uma rede eram mantidos em seu estado fundamental devido à baixíssima temperatura do sistema. A posição dos átomos poderia ser medida através de um pulso de laser que induzia uma transição do átomo para um nível excitado, que rapidamente decaía para o estado fundamental novamente, emitindo um fóton de fluorescência (parte superior da imagem). Enquanto isso, o tunelamento entre sítios ocorria na rede, com átomos transitando entre sítios sem necessariamente mudar seu nível de energia para um nível alto o suficiente para que o átomo se movesse livremente pela rede.

Os átomos tunelavam entre sítios a uma taxa J proporcional à profundidade do potencial do sítio. Ocasionalmente, o tunelamento levava a uma ocupação múltipla de um sítio, isto é, dois ou mais átomos acabavam ocupando o mesmo sítio. Esta ocupação múltipla ocorria com taxa $\Gamma_2 = 4qJf$, onde q era o número de vizinhos próximos ao sítio na rede (6 no experimento em questão) e f é uma constante de proporcionalidade aproximadamente igual a 0.25. Quando esta ocupação múltipla acontecia, ocorria uma foto-associação² [3]. Portanto, a taxa de foto-associações se torna uma forma de se medir Γ_2 e por consequência J .

² Foto-associação é o fenômeno no qual dois átomos colidem e absorvem fótons formando uma molécula excitada.

Definindo a meia vida de tunelamento τ como sendo o inverso da taxa de foto-associações κ , os pesquisadores puderam verificar que, conforme Γ_m aumentava, τ aumentava, quando comparado à meia vida sem o efeito das medições τ_0 . Mostrando que a maior frequência de medições na posição inibia a ocorrência do tunelamento quântico (Figura 4).

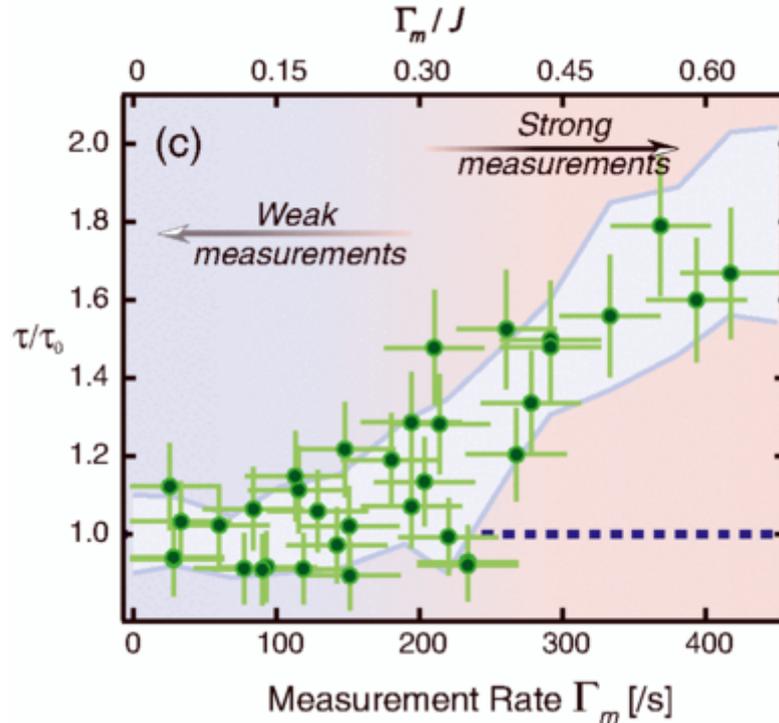


Figura 4. Resultado do experimento na ref[15]. Para medições fracas (definido no experimento como sendo uma taxa de medição baixa), o tempo de meia vida de tunelamento se mantinha em torno do valor observado na ausência de medição τ_0 . Entretanto, a partir de um limiar (por volta de 200 medições por segundo), o aumento da medição aumentava consideravelmente a meia vida de tunelamento, demonstrando uma inibição do tunelamento quântico dentro da rede.

O experimento de Patil solidificou ainda mais a ocorrência do efeito Zeno na mecânica quântica. Juntando a verificação do efeito em decaimento de sistemas instáveis, transições eletrônicas e tunelamento é inegável a ocorrência do efeito. Entretanto, ainda há debate sobre sua real natureza. Debate este que envolve um dos problemas mais discutidos desde a formulação da mecânica quântica, o problema da medida.

4 O PROBLEMA DA MEDIDA

O efeito Zeno parece, a princípio, um coringa na mão da interpretação de Copenhagem. Críticos da interpretação de "colapso da função de onda", como Leslie Ballentine, usavam a hipótese do efeito Zeno para argumentar que pensar na função de onda colapsando em consequência de uma medição era um absurdo [2]. Entretanto, uma vez verificado experimentalmente diversas vezes independentemente, parece que temos em mãos um experimento capaz de "comprovar" que o colapso da função de onda é real. Ou talvez não?

Pouco após o experimento descrito aqui por Itano [8], comentários contra a interpretação de "colapso da função de onda" argumentaram que o efeito Zeno experimental não é na verdade fruto da medição contínua

do sistema, mas sim da perturbação forte do sistema pelo pulso de laser, que muda a dinâmica da função de onda independente de se constituir uma medição ou não [1]. A objeção proposta por Ballentine leva à uma discussão tão antiga na mecânica quântica quanto a própria mecânica quântica. O que é uma medição? O que é "colapso da função de onda"?

Pense no seguinte, é fácil aceitar que um aparato experimental extraindo informação sobre um observável é uma medição, certo? Mas um átomo de hidrogênio que troca um fóton virtual com outro átomo de hidrogênio, afim de determinar a posição um do outro e formar uma molécula de H_2 é uma medição? Um núcleo atômico que constantemente envia fótons para o elétron que o orbita está constantemente "medindo" a posição e a energia do elétron? Isso significa que o elétron deveria estar sempre em um estado estacionário por estar sempre sendo "medido" pelo núcleo?

É claro que nunca é possível se fazer uma medição sem interagir com o sistema. Mas isso significa que toda interação é uma medição? Caso não seja, a partir de que ponto uma interação passa a ser considerada uma medição do sistema?

De acordo com a interpretação de Copenhagem, uma medição e uma interação são coisas de fato diferentes. Uma interação altera a função de onda de um sistema, enquanto uma medição colapsa essa função de onda. Pensando no caso do elétron e do núcleo atômico. Um elétron livre a uma distância $R \rightarrow \infty$ do núcleo atômico tem sua função de onda descrita por uma onda senoidal. Ao interagir com o átomo, "sentindo o potencial eletromagnético" através de fótons virtuais, sua função de onda é alterada

$$\Psi(R, \theta, \phi, t_0) \rightarrow \Psi(r, \theta, \phi, t) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n(n+l)!}} e^{-\frac{r}{na_0}} \left(\frac{2r}{na_0}\right)^l \times \quad (12)$$

$$\times L_{n-l-1}^{2l+1}(2r/na_0) Y_l^m(\theta, \phi) e^{\frac{iE_n t}{\hbar}},$$

sendo $r \ll R$, $t > t_0$ e a_0 o raio de Bohr, $L_{n-l-1}^{2l+1}(2r/na_0)$ os polinômios de Laguerre e $Y_l^m(\theta, \phi)$ os harmônicos esféricos [17]. Podemos pensar que, na interpretação de Copenhagem, a interação altera os possíveis estados do sistema, isto é, uma interação altera a informação contida em um sistema quântico. Já uma medição, colapsa o sistema em um único estado, isto é, uma medição extrai informação do sistema. Esta forma de se encarar uma medição pode nos levar a uma nova pergunta "O que é informação?". A resposta para essa pergunta está intimamente ligada ao estudo de informação quântica [9].

Pode-se pensar também que a sobreposição ocorre porque pedaços diferentes da função de onda estão conectados, significando que a função de onda de vários possíveis estados do sistema estão correlacionadas de forma coerente. A medição causa então uma de-coerência, levando as diferentes componentes da função de onda a se descorrelacionarem [10].

Este pensamento nos leva a crer que, uma medição e uma interação são perturbações em um sistema que diferem em intensidade. Uma perturbação fraca (como a presença de um campo eletromagnético gerado por um átomo) modifica os estados do sistema, enquanto que uma perturbação forte (uma colisão com um fóton de energia alta o suficiente para causar uma transição eletrônica) causa o colapso da função de onda. Porém, como Ballentine argumenta, a medição pode ser definida sem invocar a necessidade do colapso da função de onda. Para entender esta interpretação sem colapso da função de onda, voltemos a analisar o experimento de transições eletrônicas feito por [8].

Inicialmente, o nosso sistema composto pelo átomo de 3 níveis e o campo de radiação dos fótons que serão medidos se encontram no estado

$$|\psi_0\rangle = |E_0\rangle \otimes |0\rangle \quad (13)$$

isto é, o átomo está em seu estado fundamental $|E_0\rangle$ e o campo de radiação possui 0 fótons $|0\rangle$. O produto tensorial indica que o espaço de Hilbert que descreve o estado completo do sistema $|\psi\rangle$ é constituído pela junção todos os estados que podem ser obtidos a partir da combinação dos estados constituintes do espaço de Hilbert de $|E_0\rangle$ e $|0\rangle$. No intervalo $0 < t < T$, um campo de radiação externo induz a sobreposição entre os níveis 1 e 2 do átomo, mudando o estado $|\psi\rangle$ para

$$|\psi(t)\rangle = \left[\cos\left(\frac{\Omega t}{2}\right) |E_0\rangle + \sin\left(\frac{\Omega t}{2}\right) |E_1\rangle \right] \otimes |0\rangle. \quad (14)$$

Aqui $|0\rangle$ indica que ainda nenhum pulso de medição foi aplicado. No instante $\tau < T$, o pulso de medição π é aplicado e induz a transição de E_0 para E_2 . Isso faz com que o primeiro termo de $|\psi(t)\rangle$ mude de $|E_0\rangle$ para $|E_2\rangle$. Após a emissão espontânea do nível 3 para 1 leva a uma correlação entre o estado do átomo e o campo de radiação de medição

$$|\psi(t > \tau)\rangle = \cos\left(\frac{\Omega \tau}{2}\right) |E_0\rangle \otimes |1\rangle + \sin\left(\frac{\Omega \tau}{2}\right) |E_1\rangle \otimes |0\rangle \quad (15)$$

Isto é, o estado do sistema é composto pela composição dos estados correlacionados onde o átomo volta para o nível 1 e o campo de radiação possui 1 fóton e os estados onde o átomo estava no nível 2, e portanto não absorveu nenhum fóton e não houve emissão espontânea, e o campo de radiação possui 0 fótons. Dessa forma, a perturbação forte do pulso de laser leva a uma correlação entre o estado do átomo e o campo de radiação em si.

Durante o tempo $\tau < t < 2\tau$, o campo externo leva o sistema ao estado

$$\begin{aligned} |\psi(\tau < t < 2\tau)\rangle &= \cos\left(\frac{\Omega \tau}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{\Omega \tau}{2}\right) |E_0\rangle + \sin\left(\frac{\Omega \tau}{2}\right) |E_1\rangle \right] \otimes |1\rangle + \\ &+ \sin\left(\frac{\Omega \tau}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{\Omega \tau}{2}\right) |E_1\rangle - \sin\left(\frac{\Omega \tau}{2}\right) |E_0\rangle \right] \otimes |0\rangle. \end{aligned} \quad (16)$$

Após um segundo pulso de medição em $t = 2\tau$, o sistema novamente se correlaciona com o campo de radiação (dessa vez com a possibilidade da emissão de 2 fótons caso o átomo estivesse no estado 1 ambas as vezes, a possibilidade de emissão de 1 fóton caso o átomo estivesse no estado 1 e depois em 2 ou 2 e depois em 1, e a possibilidade de 0 fótons).

$$\begin{aligned}
|\psi(t > 2\tau)\rangle = & \left[\cos\left(\frac{\Omega\tau}{2}\right) \right]^2 |E_0\rangle \otimes |2\rangle + \cos\left(\frac{\Omega\tau}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega\tau}{2}\right) |E_1\rangle \otimes |1\rangle - \\
& - \left[\sin\left(\frac{\Omega\tau}{2}\right) \right]^2 |E_0\rangle \otimes |1\rangle + \sin\left(\frac{\Omega\tau}{2}\right) \cos\left(\frac{\Omega\tau}{2}\right) |E_1\rangle \otimes |0\rangle
\end{aligned} \quad (17)$$

Vemos aqui que a probabilidade do fóton ser emitido ambas as vezes e o átomo retornar para o estado fundamental é $[\cos(\Omega\tau/2)]^4$. No caso de n pulsos, a probabilidade de que fótons sejam emitidos a cada um dos pulsos é $[\cos(\Omega\tau/2)]^{2n}$, que tende a 0 conforme n se aproxima de infinito. Portanto, neste cenário o efeito Zeno está ocorrendo não pelo contínuo colapso da função de onda, mas sim pela perturbação forte do pulso de medição e a correlação com o campo de radiação. Conforme o pulso induz correlações cada vez mais fortes entre o estado do átomo e o campo de radiação, a chance de se manter esta correlação em todos os n pulsos vai para zero. Portanto, a causa do efeito Zeno passa a ser a perturbação do laser impedindo a transição eletrônica, não o fato de se medir e colapsar a função de onda em si.

Na verdade, em 2017, Patrick Harrington afirmou em um experimento que é a perturbação, não a medição, que provoca o efeito Zeno [7]. No experimento, o time mostrou que dependendo da perturbação utilizada para se medir o sistema, é possível acelerar a transição eletrônica. Este efeito é conhecido como **Efeito Anti-Zeno**. Entretanto, o experimento não trás argumentos definitivos que medições são apenas perturbações.

Ainda algumas outras interpretações não discutidas aqui consideram que o efeito Zeno ocorre devido à interação de um sistema com um ambiente ao redor [6]. Esta forma de interpretar o efeito Zeno foi em 2020 verificada em simulações de sistemas quânticos de dois níveis, através do acoplamento de um ruído na Hamiltoniana representando a interação com o banho térmico (ambiente) [11]. No mesmo trabalho, Parveen Kumar, Alessandro Romito e Kyrlyo Snizhko mostraram que não apenas a frequência de medições alterava as probabilidades de decaimento de um sistema, como também a força da perturbação causada pela medição. Além disso, os pesquisadores mostraram que as condições para o efeito Zeno devido à interação da Hamiltoniana com o banho térmico eram diferentes das condições do efeito Zeno provocado pela medição.

5 CONCLUSÃO

O efeito Zeno é sem dúvida um efeito real e um experimento que busca medir muito frequentemente um sistema pode vir a impedir que este sistema evolua no tempo. Porém, sua real causa parece ainda não estar totalmente resolvida e possivelmente só estará quando uma interpretação final e definitiva da mecânica quântica for elaborada. Possivelmente, em relação ao efeito Zeno, várias contribuições possam causar o mesmo efeito, isto é, pode ser que o efeito Zeno hora ocorra devido às perturbações da medição, hora ocorra devido à correlação do sistema com o ruído ambiente ou algum outro fenômeno.

Há físicos que argumentam que perguntas relacionadas à interpretação da mecânica quântica não são importantes, a não ser que elas levem a diferentes resultados experimentais, embora acredito que este tipo de pensamento vá contra a fundamento principal da física de "entender a natureza". De fato, enquanto não se houver experimentos capazes de diferir interpretações concorrentes, há pouca esperança de se resolver o problema de o que realmente acontece no efeito Zeno, e o que é realmente uma medição.

Podemos argumentar que a existência do efeito Zeno mostra um profundo poder de controle a respeito de um sistema através do simples ato de observação. De fato, a ocorrência deste efeito torna tangível o controle a respeito da estabilidade sistemas quânticos apenas pela constante observação, capacidade crucial em áreas que lidem com sistemas sensíveis e que necessitem ser mantidos em estados específicos como a super condução.

INDICAÇÕES

Youtube: Zeno's Paradox & The Quantum Zeno Effect. PBS Spacetime

REFERÊNCIAS

- [1] Ballentine, L. (1991). Comment on “quantum zeno effect”. *Physical Review A* 43, 5165
- [2] Ballentine, L. E. (2014). *Quantum mechanics: a modern development* (World Scientific Publishing Company)
- [3] Burnett, K., Julienne, P. S., Lett, P. D., Tiesinga, E., and Williams, C. J. (2002). Quantum encounters of the cold kind. *Nature* 416, 225–232
- [4] Cook, R. J. (1988). What are quantum jumps? *Physica Scripta* 1988, 49
- [5] Fischer, M., Gutiérrez-Medina, B., and Raizen, M. (2001). Observation of the quantum zeno and anti-zeno effects in an unstable system. *Physical review letters* 87, 040402
- [6] Ghasemi, F. and Shafiee, A. (2019). A new approach to study the zeno effect for a macroscopic quantum system under frequent interactions with a harmonic environment. *Scientific reports* 9, 1–10
- [7] Harrington, P., Monroe, J., and Murch, K. (2017). Quantum zeno effects from measurement controlled qubit-bath interactions. *Physical review letters* 118, 240401
- [8] Itano, W. M., Heinzen, D. J., Bollinger, J., and Wineland, D. (1990). Quantum zeno effect. *Physical Review A* 41, 2295
- [9] Jaeger, G. (2007). *Quantum information* (Springer)
- [10] Joos, E. and Zeh, H. D. (1985). The emergence of classical properties through interaction with the environment. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* 59, 223–243
- [11] Kumar, P., Romito, A., and Snizhko, K. (2020). Quantum zeno effect with partial measurement and noisy dynamics. *Physical Review Research* 2, 043420
- [12] Laertius, D. (1901). *The lives and opinions of eminent philosophers* (G. Bell & sons)
- [13] Leibfried, D., Blatt, R., Monroe, C., and Wineland, D. (2003). Quantum dynamics of single trapped ions. *Reviews of Modern Physics* 75, 281
- [14] Misra, B. and Sudarshan, E. G. (1977). The zeno's paradox in quantum theory. *Journal of Mathematical Physics* 18, 756–763
- [15] Patil, Y., Chakram, S., and Vengalattore, M. (2015). Measurement-induced localization of an ultracold lattice gas. *Physical review letters* 115, 140402
- [16] Teuscher, C. (2004). *Alan Turing: Life and legacy of a great thinker* (Springer Science & Business Media)
- [17] Zettili, N. (2003). *Quantum mechanics: concepts and applications* (American Association of Physics Teachers)