
SEMINÁRIO

Física Atômica e Molecular

O efeito Zeno quântico

Noel Araujo Moreira^{1*}

¹Instituto de Física de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil

Efeito Zeno Quântico é comumente associado ao "congelamento" de um estado quântico, quando observado repetidamente. Será apresentado seus aspectos conceituais, alguns resultados matemáticos de interesse e um resultado experimental recente.

1 | INTRODUÇÃO

O nome *Zeno effect* em tradução para o português é encontrado como *Efeito Zeno* ou *Efeito Zenão*. É enigmático e curioso que em sites de busca, a primeira tradução é normalmente referida ao efeito *físico* e um contexto correto é apresentado. A segunda tradução esta associada a uma literatura de cunho pseudo-científica, com conclusões no mínimo cômicas, como em [7] que argumenta o Efeito Zenão e sua relação para "conseguir materializar seus desejos e sonhos".

O efeito Zeno recebeu seu nome no artigo de Misra e Sudarshan [6], no qual sua exata descrição e contexto são citados abaixo:

"An unstable particle observed continuously whether it has decayed or not will never be found to decay! Since this evokes the famous paradox of Zeno denying the possibility of motion to a flying arrow, we call this result the Zeno's paradox in quantum theory"

Existem muitas maneiras de escrever o Paradoxo da Flecha de Zenão¹ mencionado na citação. Uma maneira mais contemporânea de se propor o paradoxo é: ao filmar uma flecha em movimento com uma câmera de altíssima velocidade, em cada *frame* da gravação a flecha esta parada. Poderia-se concluir que se em todas os *frames* a flecha esta parada, então a flecha sempre esteve parada, portanto não deveria existir movimento.

No contexto de mecânica quântica, imaginemos um sistema radiativo com tempo de decaimento Γ . Ao efetuar um processo contínuo de medição sobre o sistema, o valor de $\Gamma \rightarrow \infty$. Esse fenômeno não possui análogo clássico na literatura, contudo o autor propõe uma analogia clássica seguindo a mesma temática do gato de Schrödinger.

Supomos que um gato acabe de sair do veterinário após uma cirurgia, mas não possui seu colar elizabetano, que o impede de lamber e retirar a pomada de cicatrização sobre sua ferida. Chamaremos o gato com a pomada sobre a ferida de *Estado 1*. Com o passar do tempo o gato fica incomodado com o remédio e deseja lambe-ló. O estado no qual o gato

¹O nome do filósofo será mencionado na tradução em português, enquanto o efeito será chamado pelo nome em inglês

remove a pomada é chamado de *Estado 2*. O dono do felino é muito responsável e deseja sua recuperação o mais rápido possível, portanto ele encontra o gato e chama sua atenção com algum sinal visual-sonoro de forma que ele pare de lambe a ferida. Esse processo é chamado de *medição*.

O gato sem vigilância se mantém no estado *Estado 1*, e passa para o *Estado 2*, com uma probabilidade que depende do tempo. O ato de fazer uma medição constante impede a transição entre os estados. Podemos dizer que o gato sempre estivesse congelado no *Estado 1*.

Chamaremos de $P(t)$ a probabilidade do gato se manter no *Estado 1*, e como o gato é clássico, não é absurdo supor sua dependência temporal como uma exponencial, que para tempos curtos é aproximada como :

$$P(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \sim 1 - \frac{t}{\tau} + O(t^2) \quad (1)$$

Vamos supor agora que o gato seja quântico, e denotando *Estado 1* = $|\Psi(0)\rangle$, sua evolução temporal é dada por:

$$|\Psi(t)\rangle = e^{-iH/\hbar} |\Psi(0)\rangle \quad (2)$$

Probabilidades são obtidas pelo quadrado da função de onda, então se queremos saber a probabilidade do gato permanecer no estado 1 é [5]:

$$P(t) = |\langle \Psi(0) | e^{-iH/\hbar} | \Psi(0) \rangle|^2 \sim 1 - \frac{t^2}{\tau^2} + O(t^4) \quad (3)$$

O tempo τ^2 é chamado de *tempo Zeno*. Comparando (1) com (3) percebemos uma diferença quadrática, e isso significa que ao efetuar medidas repetidas, em um tempo curto, é mais provável manter o gato quântico no estado inicial, do que o gato clássico.

Para tempos não curtos, outros regimes são encontrados. Uma ilustração é vista na figura abaixo [8].

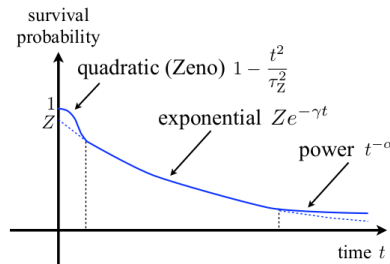


FIG. 1 O regime quadrático é seguido por um decaimento exponencial, como no caso clássico, e para tempos longos pode ser aproximado como um regime de potência

2 | ÁTOMO DE 2 NÍVEIS

A analogia da seção anterior não é uma alegoria sem correspondente físico. É de interesse prático em computação quântica que um qubit mantenha seu estado por um longo período de tempo sem perder coerência - da mesma forma que desejamos que o gato mantenha o remédio na ferida. Experimentos nessa direção já foram realizados como em [4],

no qual foi construído um circuito supercondutor, que funciona como um sistema artificial de 2 níveis e oscilações de Rabi podem ser observadas.

Sistemas de 2 níveis são os mais simples de trabalhar, e pode-se estimar qual o tempo de vida **efetivo** do decaimento do sistema. Dado um sistema com frequência de Rabi Ω , a probabilidade da transição entre *Estado 1* e *Estado 2* é γ [2] [8]:

$$\gamma = \frac{\Omega^2}{4f_m} \quad (4)$$

onde f_m é a frequência no qual as medições são realizadas. Perceba que a expressão 4 é independente do tempo. E como depende do inverso da frequência de medição, o valor de γ tende a zero para infinitas medições. Contudo, esse limite não é fisicamente possível devido a relação de incerteza em energia-tempo, no qual implicaria que um qubit teria energia infinita se o tempo de medida fosse para zero. Uma demonstração mais geral permite que essa conclusão seja válida para sistemas com mais estados [1]. Supondo um sistema com n possíveis estados. Denominando o maior e o menor autovalor como E_1 e E_0 , no qual são realizadas medições em um tempo τ , é válida a desigualdade:

$$E_1 - E_0 \geq \frac{1}{\tau} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (5)$$

Caso $\tau \rightarrow 0$, a diferença de energia tende ao infinito, quebrando nossa hipótese que o sistema possui um conjunto finito de energias.

3 | EXPERIMENTO

O experimento mais famoso sobre Efeito Zeno é de Itano et al [3], e que permite compreender em mais detalhes como funciona um sistema de 2 níveis da seção anterior. Contudo, nesse texto será trabalhado um experimento mais recente, no qual são utilizados átomos ultra frios.

Em um artigo de Y.Patil, S.Chakram e M.Vengalattore [9], átomos frios de ^{87}Rb foram armazenados em uma armadilha óptica 3D. Os átomos são resfriados até o estado fundamental, $|D\rangle = |F = 1, m_f = +1\rangle$, denominado por "Estado Escuro" (Dark State).

Com o auxílio de um feixe laser é possível excitar os átomos para um estado $|B\rangle$ (Estado Claro - Bright State). Ao decair para o estado $|D\rangle$, há emissão de fluorescência, que é registrada em um detector e então é uma medida de posição sobre os átomos. O processo de medição fornece energia para os átomos, porém o método de resfriamento utilizado é capaz de levar os átomos para o estado fundamental novamente. Como temos um ciclo fechado, é possível extrair fluorescência dos átomos mantendo eles ainda no estado original. A frequência no qual as medições foram feitas é denominada Γ_m

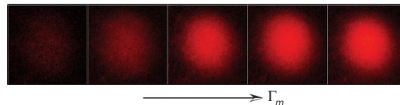


FIG. 2 Imagem formada pela fluorescência dos átomos quando decaem do estado $|B\rangle$ para $|D\rangle$. Com o aumento da frequência das medições, mais átomos permanecem na armadilha, como indicado pelo maior brilho das figuras. O campo de visão é de $250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$.

Os átomos podem tunelar através dos sítios em uma taxa J , e quando vários átomos estão no mesmo sítio, ao interagir com o laser que induz fluorescência, os átomos são fotoassociados, e conseqüentemente são removidos da armadilha, em uma taxa κ . Em suma, ao saber quantos átomos foram perdidos, podemos saber a taxa de tunelamento. Dependendo das taxas Γ_m e J é possível identificar 2 regimes. O regime *fraco*, no qual $\Gamma_m \ll J$, no qual as medições não influenciam o tunelamento. O regime *forte*, $\Gamma_m \gg J$, no qual as medições espaciais projetam os átomos para o mesmo sítio. A figura 3 exibe o resultado comparando os dois regimes.

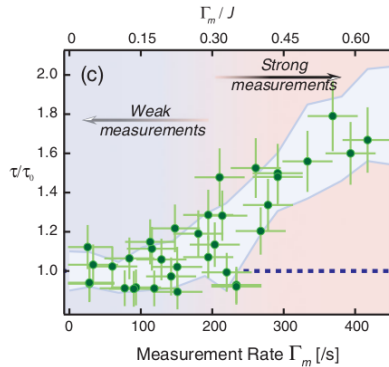


FIG. 3 Na ausência de feixe que causa fluorescência, o tempo de vida característico é $\tau_0 = \kappa^{-1}$. Ao aumentar a taxa de medição, o tempo de vida de um átomo em seu sítio aumenta. O valor de $\tau_0 = 31(3)ms$

É observado na figura 3 que o tempo de vida aumenta com a frequência das medições, e isso ocorre através de uma transição suave entre os 2 regimes.

REFERENCES

- [1] Binder D, The Quantum Zeno Effect; 2016. <http://djbinder.com/documents/QuantumZeno.pdf>.
- [2] Cook RJ. What are Quantum Jumps? *Physica Scripta* 1988;1988(T21):49. <http://stacks.iop.org/1402-4896/1988/i=T21/a=009>.
- [3] Itano WM, Heinzen DJ, Bollinger JJ, Wineland DJ. Quantum Zeno effect. *Phys Rev A* 1990 Mar;41:2295-2300. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.41.2295>.
- [4] Kakuyanagi K, Baba T, Matsuzaki Y, Nakano H, Saito S, Semba K. Observation of quantum Zeno effect in a superconducting flux qubit. *New Journal of Physics* 2015;17(6):063035. <http://stacks.iop.org/1367-2630/17/i=6/a=063035>.
- [5] Kilian E, The Quantum Zeno Effect and Interaction-free Measurements; 2014. http://homepage.univie.ac.at/Reinhold.Bertlmann/pdfs/dipl_diss/EvaKilian_BA_QuantumZenoEffect_Interaction-freeMeasurements.pdf.
- [6] Misra ECG B; Sudarshan. The Zeno's paradox in quantum theory. *Journal of Mathematical Physics* 1977;18.
- [7] Ourives E, Efeito Zenão: Soltar ou Segurar meu Sonho!; <http://www.elainneourives.com/single-post/Efeito-Zenao-Soltar-ou-Segurar-meu-Sonho>.
- [8] Pascazio S. All you ever wanted to know about the quantum Zeno effect in 70 minutes. *ArXiv e-prints* 2013 Nov;.
- [9] Patil YS, Chakram S, Vengalattore M. Measurement-Induced Localization of an Ultracold Lattice Gas. *Phys Rev Lett* 2015 Oct;115:140402. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.115.140402>.