

O Gato de Schrödinger

Pedro Luiz Mazo¹

¹*Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 13560-970 São Carlos, Brasil.**
(Dated: 19 de Novembro de 2018)

A transição do mundo microscópico para o mundo macroscópico não é nada trivial e até hoje grandes experimentos voltados à sistemas quânticos buscam um melhor entendimento do processo conhecido como decoerência. O gato de Schrodinger foi criado em 1935 e por muito tempo foi visto como um paradoxo quântico e a invalidade da interpretação de Copenhague devido a grande dificuldade de conciliar os efeitos quânticos para objetos macroscópicos. Esta monografia tem o objetivo de explicar melhor os conceitos do experimento mental feito por Schrodinger e mostrar como ele é utilizado na pesquisa contemporânea.

INTRODUÇÃO

Erwin Schrodinger em 1935[1] criou um experimento mental com o objetivo de invalidar por absurdo a interpretação de Copenhague da mecânica quântica. Tal experimento consistia de um gato dentro de uma caixa junto a um aparato contendo um átomo radioativo capaz de decair no periodo de uma hora e acionar um veneno com 50% de chance, que causaria a morte do pobre gato (Figura 1). Após a hora ter se passado, não se teria informação da sobrevivência do gato antes da caixa ser aberta e os estados do gato e do átomo estariam emaranhados. Caso o átomo decaia, o gato morrerá com probabilidade de 100%.

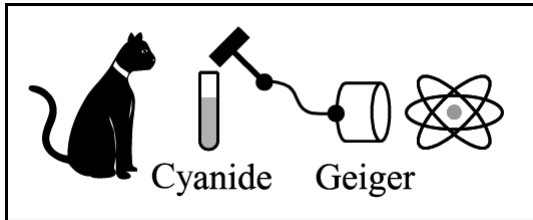


Figura 1. Ilustração do gato de Schrodinger na caixa. Fonte: Quantum Optics - An Introduction de Mark Fox

O sistema será descrito por uma função de onda onde ocorre a superposição de dois estados: O estado gato vivo e o estado gato morto (Figura 2). Ou seja, antes de abrir a caixa o gato não estará vivo ou morto, mas sim em uma superposição desses estados até a caixa ser aberta e a função de onda colapsar em um deles.

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{gato vivo}\rangle + |\text{gato morto}\rangle)$$

Figura 2. Superposição dos estados do gato de Schrodinger

Isso é o que diz a interpretação de Copenhague, desenvolvida por Niels Bohr e Werner Heisenberg em 1927[2].

Antes da medida ser realizada, o sistema não possui propriedades bem definidas, sendo a medida responsável pelo colapso da função de onda em um dos possíveis estados do sistema. Um sistema que ilustra este efeito é o experimento da fenda dupla onde elétrons são lançados um por vez através de uma fenda dupla e atingem um detector ao fundo. Após vários elétrons serem lançados, é observado um padrão de interferência característico de ondas onde não poderia haver interferência pois apenas um elétron está sendo lançado por vez. Isso é uma evidência de que os elétrons não passam por nenhuma fenda específica, mas pelas duas, interferindo consigo mesmo, exibindo sua característica ondulatória. Colocando detectores em cada fenda, não observamos este efeito, a medida destrói a dualidade antes obtida.

São diferenças entre o mundo macroscópico e microscópico que nem sempre é fácil de conciliar e podem gerar paradoxos. Um gato está longe de ser do tamanho de um elétron. É essa transição do microscópico do macroscópico que destroem as coerências quânticas através das interações com o meio ruidoso macroscópico[3] e voltamos ao mundo da física clássica. Porém, este processo está longe de ser trivial e até hoje existem vários laboratórios buscando criar os maiores sistemas quânticos possíveis de forma a estudar sua decoerência.

PROCESSO DE MEDIDA E A DECOERÊNCIA

A equação de Schrodinger fornece a mais completa descrição do sistema de acordo com a interpretação de Copenhague. Para um sistema não perturbado, a solução formal que permite calcular sua evolução temporal é dada por [4]:

$$|\Psi\rangle = e^{-\frac{iHt}{\hbar}} |\Psi_0\rangle$$

Assim temos a trajetória da função de onda que é coerente e reversível no tempo. Porém a equação de Schrodinger não permite descrever o processo de medida. John Von Neumann descreve o processo de medida, simplificando, em duas etapas. Na primeira, o aparelho que deseja medir a quantidade correspondente ao operador Q

o projeta em uma base de autovetores [4]:

$$Q \rightarrow \langle \Psi | Q | \Psi \rangle = \sum_k q_k |c_k|^2$$

onde $|c_k|^2$ pode ser entendido como a probabilidade do sistema estar no autoestado k e q_k são os autovalores correspondentes ao autoestado k e o operador Q . Assim teremos uma distribuição de probabilidades para serem medidas na segunda etapa, onde o medidor lerá um dos valores no aparelho de medida. Neumann diz que, ao medir o sistema, ocorre uma mudança abrupta no estado do sistema, passando de $|\Psi\rangle$ para o estado $|k\rangle$, fenômeno conhecido como "colapso da função de onda".

Para se obter o gato de Schrodinger é preciso a superposição de dois estados macroscópicos distintos. O estado coerente $|\alpha\rangle$ dado por

$$|\alpha\rangle = e^{-\frac{|\alpha|^2}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle$$

(onde α é um número complexo e definido como sendo autovalor do operador de aniquilação) podem ter qualquer amplitude pois $|\alpha|^2$ pode ser tão grande quanto se queira[5]. Olhando o espaço de fase para um estado par de gato de Schrodinger ($|\alpha\rangle + e^{i\phi} |-\alpha\rangle$) e considerando α grande, temos

$$P_{gato} \propto \exp[-2n(\theta - \theta_0)^2] + \exp[-2n(\theta - \theta_0 - \pi)^2] + \\ + 2\cos(n\pi - \phi)\exp[-n(\theta - \theta_0)^2 - n(\theta - \theta_0 - \pi)^2]$$

correspondendo a duas gaussianas e possui um termo de interferência. O jeito mais simples de se observar um gato de Schrodinger é observando as franjas de interferência no espaço de fase medido em detecção homódina, que veremos a seguir.

INTERFERÊNCIA ENTRE ESTADOS DE SCHRODINGER

Sistemas compostos pela superposição de dois ou mais estados coerentes tem recebido grande atenção para estudo da coerência e decoerência quântica. Em 1986[6], B. Yurke e D. Stoler criaram um sistema "Gato de Schrodinger" fazendo um estado coerente se propagar através de um meio amplitude-dispersivo. Sob certas condições, tal sistema evolui para uma superposição de dois estados coerentes fora de fase entre si por um fator de π . Um detector homódino onde o sinal é colocado para interferir com uma intensa luz local oscilante é usado para verificar se de fato ocorreu a superposição de dois estados coerentes, que seria evidenciado pela aparição de franjas na distribuição de probabilidade.

O sistema começa no estado coerente inicial na base de Fock $|\alpha\rangle$ e evolui para um estado de superposição de

$|\alpha\rangle$ e $|-\alpha\rangle$ em um meio onde o Hamiltoniano do sistema será dado pelo H de um oscilador não harmônico:

$$H = \omega \hat{n} + \Omega \hat{n}^k$$

onde ω é de a energia separação entre níveis do oscilador harmônico, Ω é a força do termo não harmônico e \hat{n} é o operador número. Na Figura 3 temos a distribuição de probabilidade do sistema.

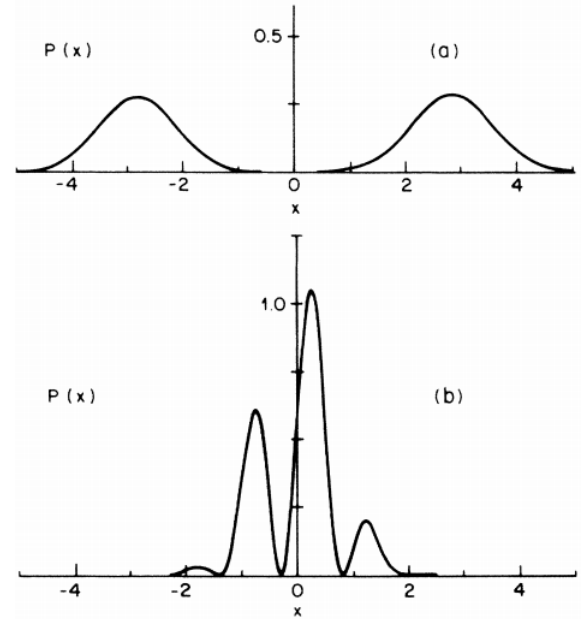


Figura 3. Distribuição das probabilidades para o detector homódino para $|\alpha| = 2$. Em (a) as fases são ajustadas para as gaussianas estarem separadas. Em (b) a fase é ajustada novamente para juntar as gaussianas, exibindo padrões de interferência. Retirado de: B. Yurke e D. Stoler - Physical Review Letters 1986 [6]

Ajustando a fase do oscilador local do é possível detectar as franjas de interferência (Figura 3-b) mostrando sua característica quântica.

CONCLUSÃO

Oitenta e três anos após a criação do gato de Schrodinger muita coisa mudou mas muitas dúvidas ainda permanecem. Hoje vemos que não existem paradoxos na natureza e consideramos o gato de Schrodinger um fenômeno conhecido mas muita coisa ainda falta para ser explicada. O processo da destruição da coerência quântica (decoerência) ainda não é bem conhecido, sendo uma área de pesquisa contemporânea e representa um dos maiores mistérios da mecânica quântica atualmente. O número de sistemas físicos macroscópicos sendo construídos tem crescido e ajudado a testar os limites do mundo quântico

e aumentar nosso entendimento dele que tem aumentado cada vez mais.

* pedro.mazo@usp.br

[1] E. Schrödinger, *Naturwissenschaften* **23**, 823 (1935).

[2] N. Bohr, “The quantum postulate and the recent development of atomic theory,” (1928).

[3] M. Fox, *Quantum optics: an introduction*, Vol. 15 (OUP Oxford, 2006).

[4] P. W. Courteille, Instituto de Física de São Carlos (2018).

[5] C. Gerry and P. Knight, *American Journal of Physics* **65**, 964 (1997).

[6] B. Yurke and D. Stoler, *Physical review letters* **57**, 13 (1986).