

# O Gato de Schrödinger

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{gato vivo}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{gato morto}\rangle$$

João Vitor B. S. Merenda - 8522827  
SFI5814 - Física Atômica e Molecular  
Prof. Philippe Wilhelm Courteille

# Reino clássico Vs. Reino quântico

Considere um carro cujo movimento é descrito pela equação abaixo. Qual será sua posição no instante  $t=10s$ ?

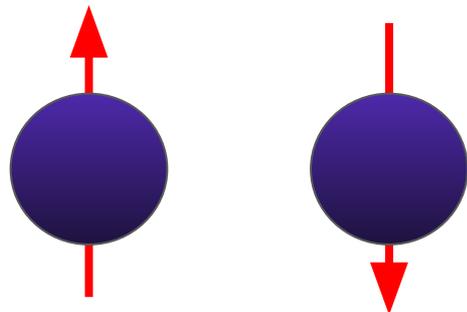
$$x(t) = x_0 + v_0t + \frac{at^2}{2}$$



$$x_0 = 0m, v_0 = 0m/s, a = 4m/s^2$$

Resposta:  $x(t = 10) = 200m$

**Determinístico!**



$$|\chi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

$$|\langle\uparrow|\chi\rangle|^2 = |a|^2$$

$$|\langle\downarrow|\chi\rangle|^2 = |b|^2$$

**Probabilístico!**

# Evolução temporal

$$\hat{H}|\Psi\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle$$

Equação de Schrödinger

## Princípio da superposição

$$|\Psi(x, t)\rangle = \sum_n c_n |\psi(x)\rangle e^{-iE_n t/\hbar}$$

Todos os estados possíveis evoluem simultaneamente ao longo do tempo.

# Interpretação probabilística (Born's rule)

A função de onda carrega a informação de todos os estados possíveis.

$$\langle \Psi | \Psi \rangle = \sum_n c_n^* c_n = 1$$



Estados ortonormais

O módulo ao quadrado da função de onda representa a densidade de probabilidade!

A mecânica quântica é **inerentemente probabilística**, não por limitações de medição ou falta de informações, mas como uma característica fundamental de sua natureza.

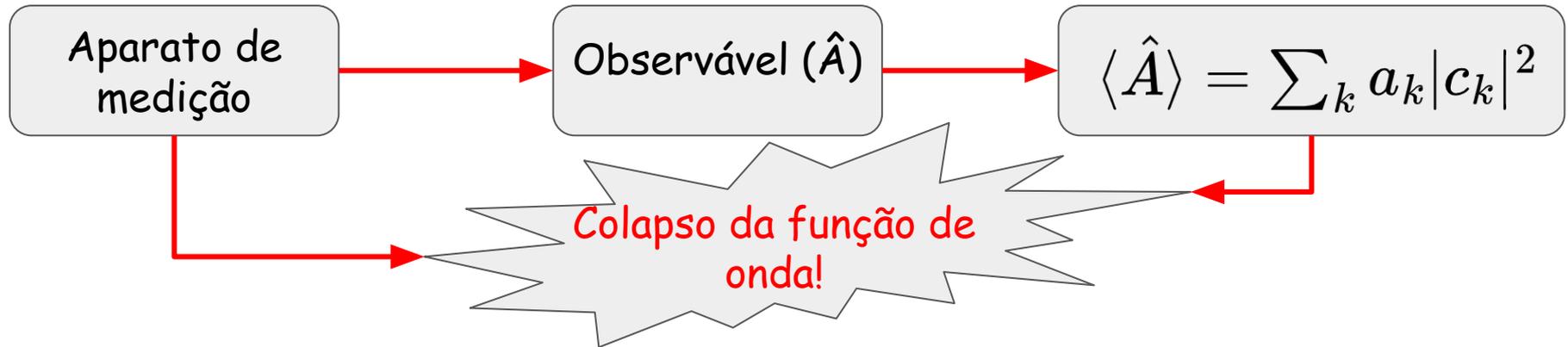
# Medição na Mecânica Quântica

Operadores hermitianos  $\rightarrow$  observáveis

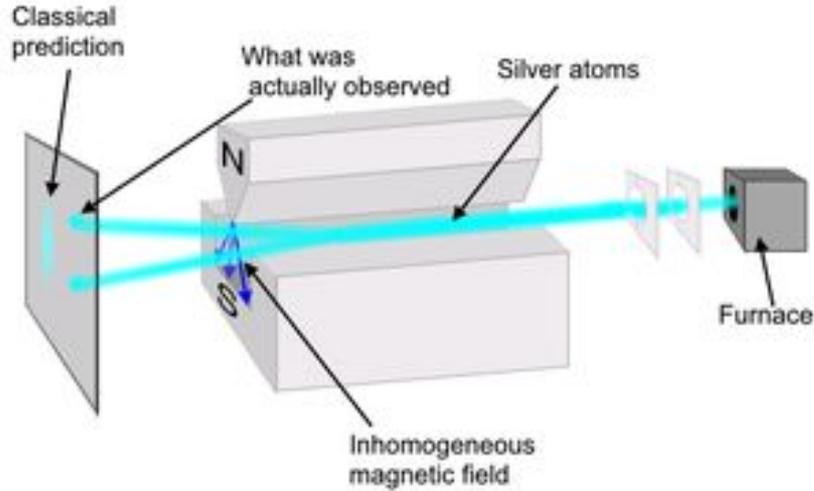
$$\hat{A} : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H} \Rightarrow \hat{A}|\psi\rangle = a_n|\psi\rangle$$

$$a_n = \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle \in \mathbb{R}$$

Processo de medição como proposto por **John Von Neumann**:



# Exemplo: Experimento de Stern-Gerlach



$$|\chi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

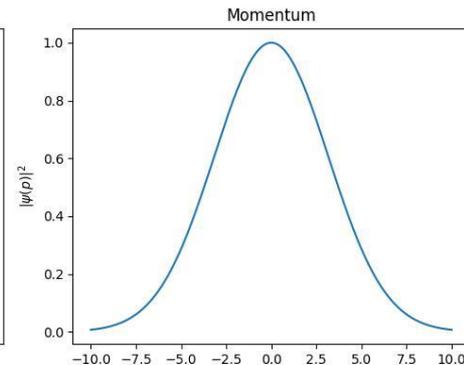
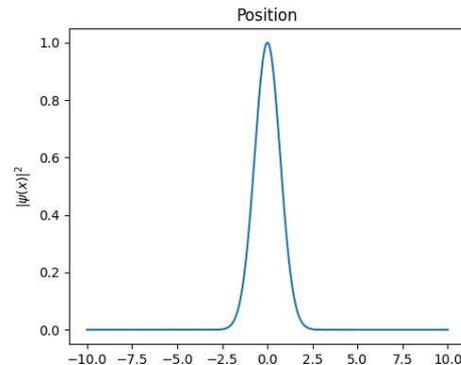
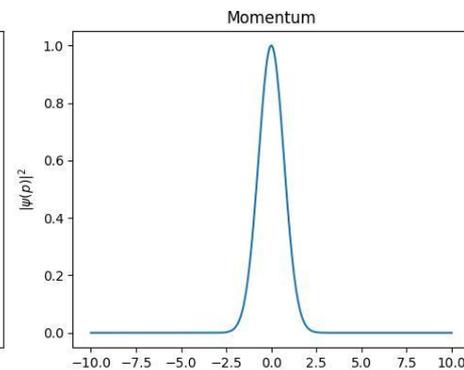
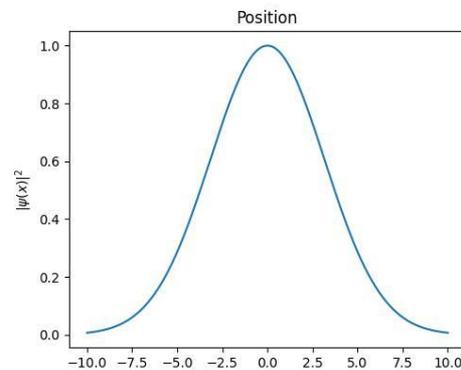
$$\begin{cases} \hat{S}_z|\uparrow\rangle = +\frac{\hbar}{2}|\uparrow\rangle \\ \hat{S}_z|\downarrow\rangle = -\frac{\hbar}{2}|\downarrow\rangle \end{cases}$$

# O princípio da incerteza

Alguns observáveis, como momento e posição, são complementares, isto é, não compartilham a mesma base de autoestados.

$$[\hat{X}, \hat{P}] = i\hbar$$

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi)^{2/3}} \int \tilde{\phi}(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{r}\cdot\mathbf{k}} d^3k$$



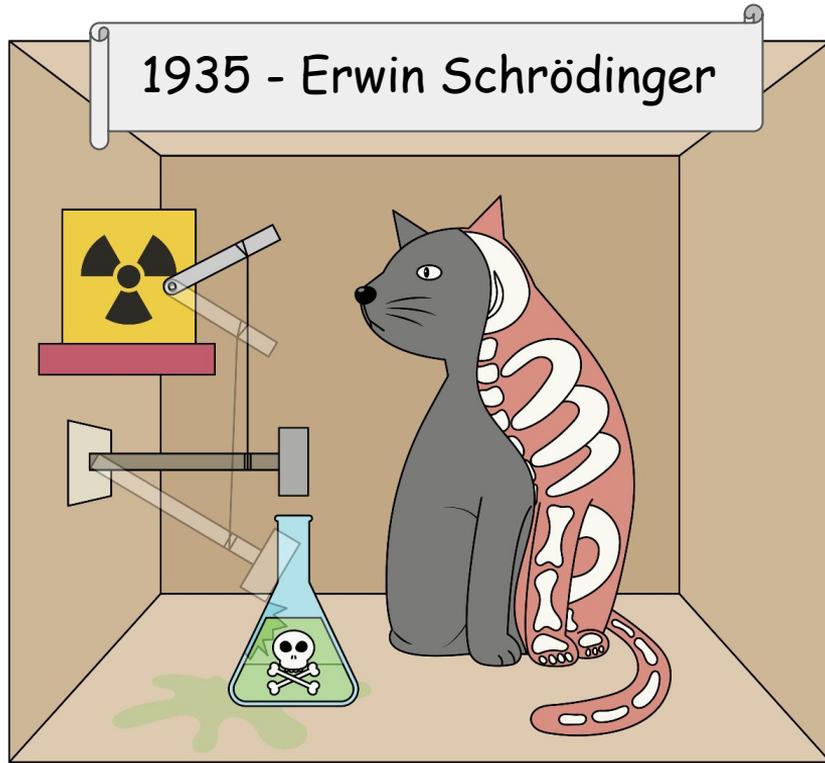
# Interpretações

Realismo: Interpretação defendida por Einstein. A natureza é objetiva e local. Não há incertezas. A incerteza quântica se deve a **variáveis ocultas** sendo, portanto, a mecânica quântica uma teoria incompleta. (**Paradoxo EPR**)

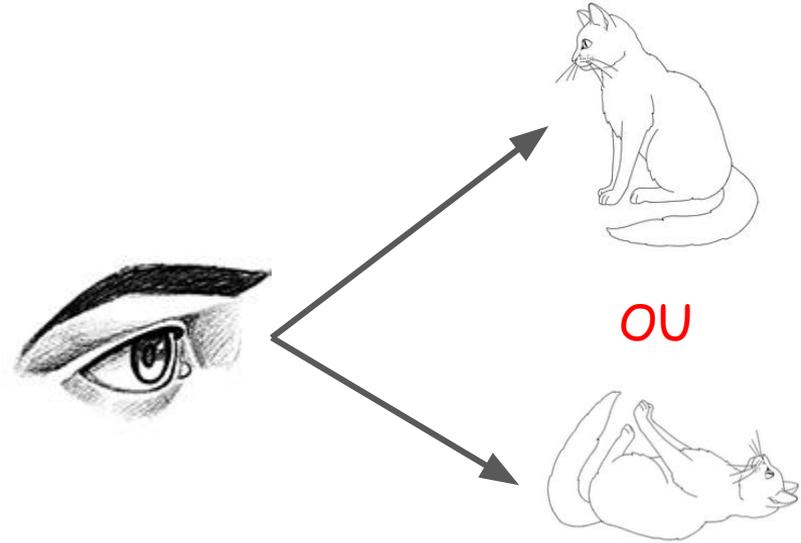
Ortodoxa: Também chamada de **interpretação de Copenhagen**. Liderada por Bohr, essa interpretação admite a natureza inerentemente probabilística da mecânica quântica, bem como a não localidade da mesma.

Agnóstica: Se recusa a responder. Consideram que o sistema antes da medição não pode ser testado e conseqüentemente não há nada a se fazer sobre tal questão.

# O gato de Schrödinger

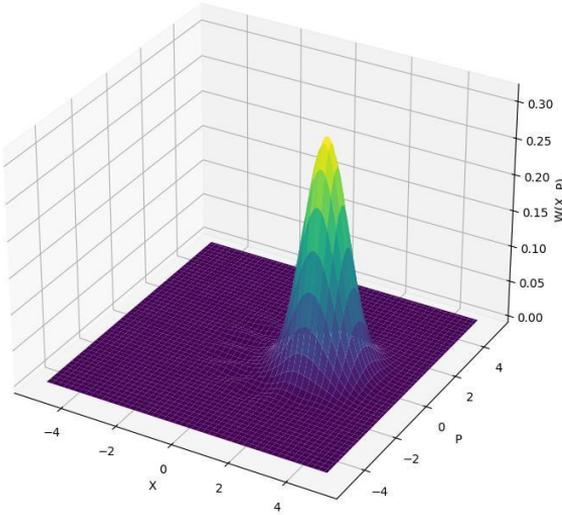


$$|\Psi_{cat}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\Psi_{alive}\rangle + |\Psi_{dead}\rangle)$$



# Cat state

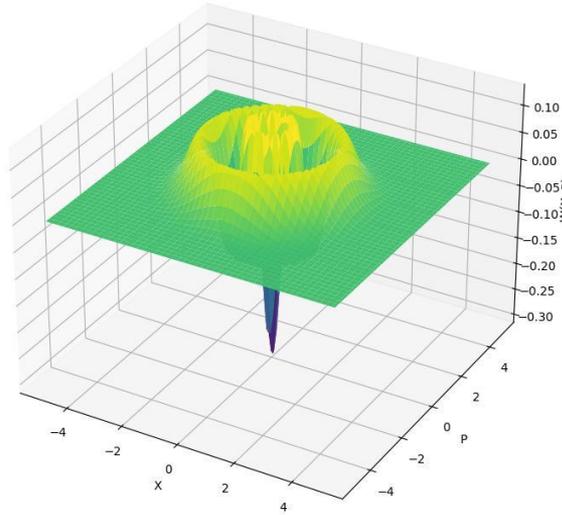
Wigner Distribution of a Coherent State



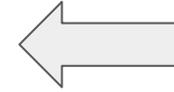
Estado coerente

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

Wigner Distribution of a Fock State



Estado de Fock

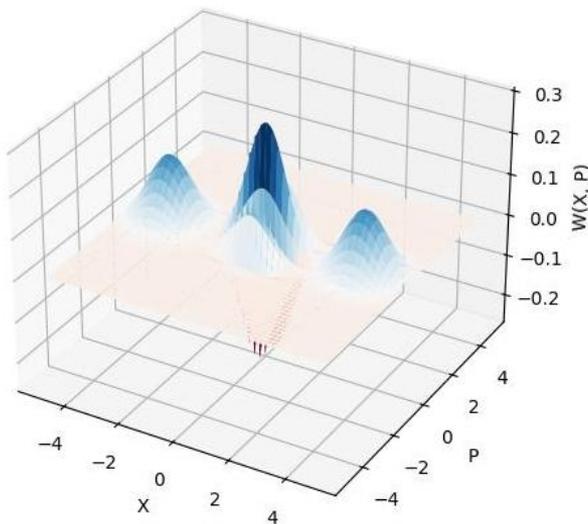
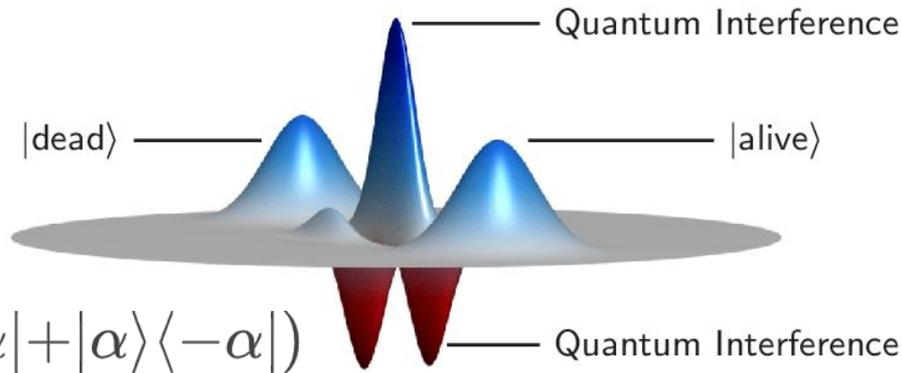


Função de Wigner

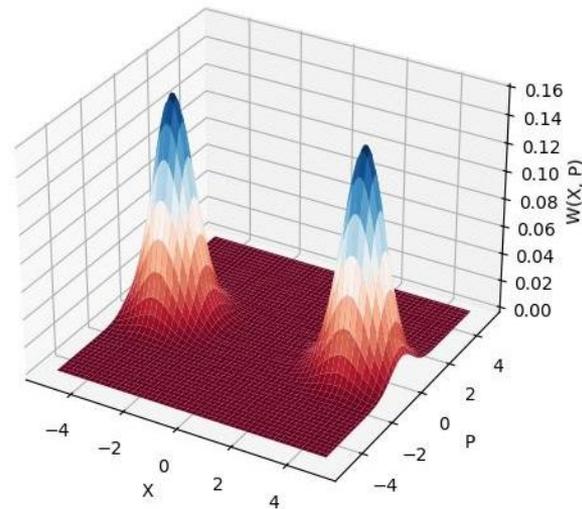
# Cat state

$$|\Psi_{cat}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\alpha\rangle + |-\alpha\rangle)$$

$$\rho_{cat} = \frac{|\alpha\rangle\langle\alpha| + |-\alpha\rangle\langle-\alpha| + |-\alpha\rangle\langle\alpha| + |\alpha\rangle\langle-\alpha|}{2}$$

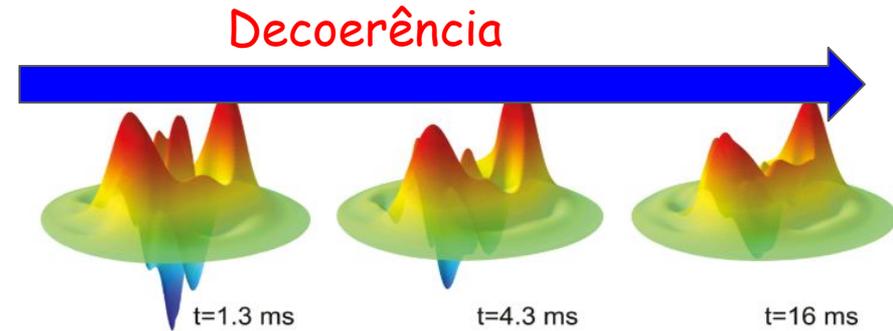
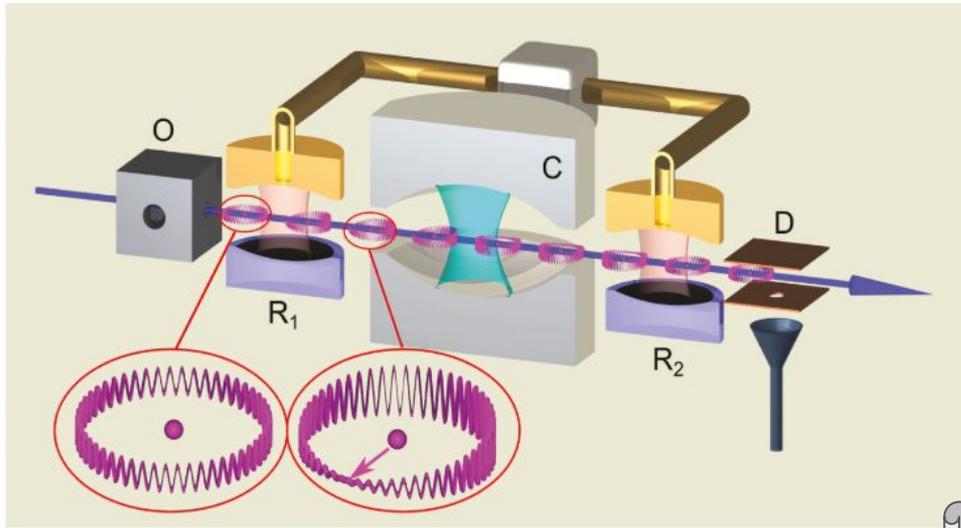


Decoerência



# O gato de Schrödinger em laboratório

1996 - Serge Haroche



$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|e, \alpha e^{i\phi}\rangle + |g, \alpha e^{-i\phi}\rangle)$$

# Implicações na computação quântica

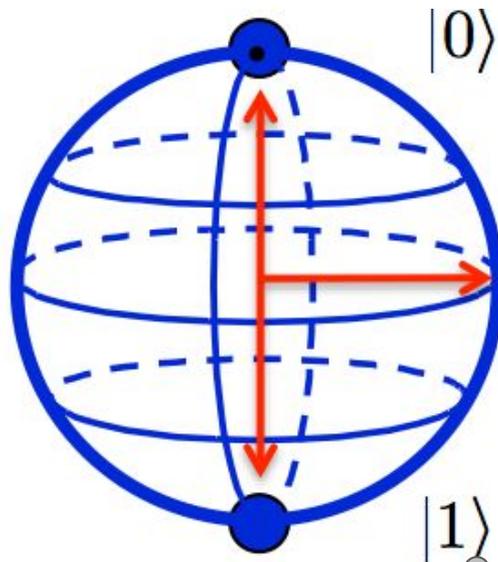


0



1

Bit Clássico

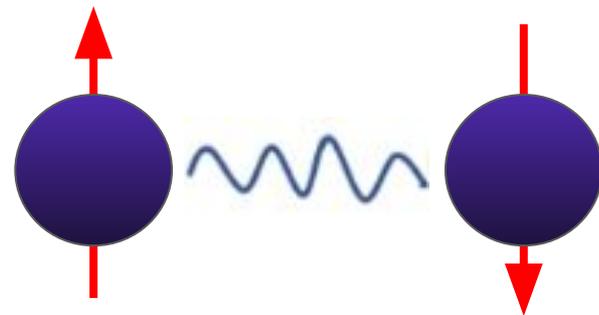


$|0\rangle$

$|1\rangle$

Qubit  
(Superposição)

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$



Qubit  
(Entrelaçamento)

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle)$$

Bell's state

# Conclusão

- A mecânica quântica é **inerentemente probabilística**.
- A função de onda descreve todos os possíveis estados do sistema.
- A medição causa o **colapso da função de onda**, reduzindo a superposição a um único estado.
- Alguns observáveis não podem ser medidos simultaneamente.

- Erwin Schrödinger propôs o experimento "O gato de Schrödinger" para explorar a estranheza da mecânica quântica.
- Os cat states foram visualizados em laboratório em 1996 por Serge Haroche.

# Referências

- [1] GRIFFITHS, David J.; SCHROETER, Darrell F. **Introduction to quantum mechanics**. Cambridge university press, 2018.
- [2] COURTEILLE, P. W. Quantum Mechanics Applied to Atoms and Light. **University of São Paulo**, v. 216, p. 139-142, 2023.
- [3] HUGHES, Richard Ieuan Garth. **The structure and interpretation of quantum mechanics**. Harvard university press, 1989.
- [4] OMNÈS, Roland. Interpretation of quantum mechanics. **Physics Letters A**, v. 125, n. 4, p. 169-172, 1987.
- [5] VON NEUMANN, John. **Mathematical foundations of quantum mechanics: New edition**. Princeton university press, 2018.
- [6] SCHR, E. et al. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. **Die Naturwissenschaften**, v. 23, n. 48, p. 807-812, 1935.
- [7] BRUNE, Michel et al. Observing the progressive decoherence of the “meter” in a quantum measurement. **Physical review letters**, v. 77, n. 24, p. 4887, 1996.
- [8] HAROCHE, Serge. Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary. **Annalen der Physik**, v. 525, n. 10-11, p. 753-776, 2013.
- [9] Decoherence and the transition from quantum to classical