spin

Tem as dimensões duma
grandeza
clássica designada por
momento angular

constante de Panck
$\hbar$ tem dimensões de
um momento angular
unidades S.I de $\hbar$: J s

o electrão tem spin
$\frac{1}{2}\hbar$ $\downarrow$ $\uparrow$
spin down   spin up

spin do electrão : $\frac{1}{2}$

Manifestado na experiência
de Stern-Gerlach

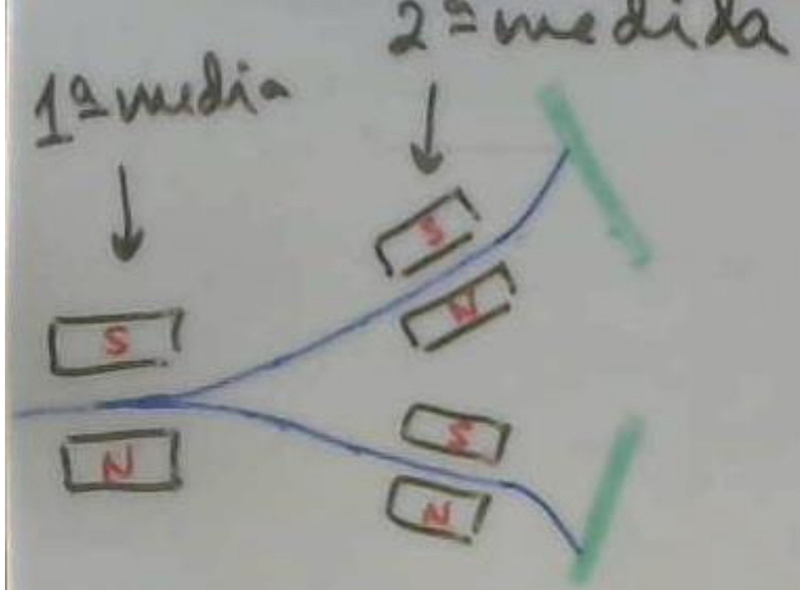
$$\boxed{|\psi\rangle = a_\uparrow |\uparrow\rangle + a_\downarrow |\downarrow\rangle}$$ sobreposição de estados

$$|\psi\rangle = a_1 |\phi_1\rangle + a_2 |\phi_2\rangle$$

$$|\uparrow\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad , \quad |\downarrow\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} a_\uparrow \\ a_\downarrow \end{pmatrix}$$

Probabilidade de, ao fazer uma medida obter spin $\uparrow$: $|a_\uparrow|^2$



- se na 1ª medida se detectar spin ↑, na segunda medida detecta-se sempre spin ↑
- analogamente em relação ao spin ↓

$$\boxed{\text{colapso da função de onda}}$$

$$\boxed{|\psi\rangle = a_\uparrow|\uparrow\rangle + a_\downarrow|\downarrow\rangle}$$ sobreposição de estados

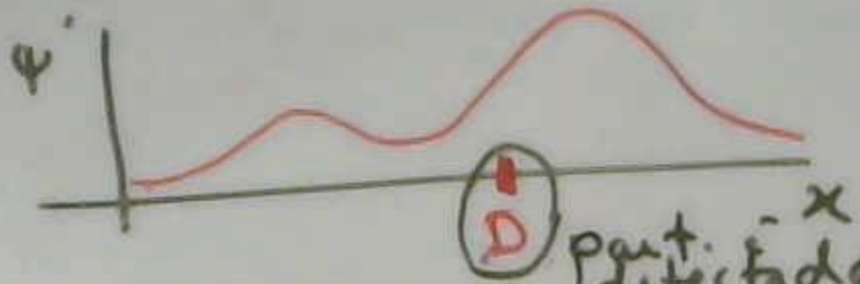
- Depois da 1ª medida suponhamos que detectamos ↑

$$|\psi\rangle = |\uparrow\rangle$$

As interpretações da mecânica quântica

(Griffiths, pág. 89 - 92)

Função de onda



part. detectada em D

Qual era a posição da partícula imediatamente antes da medida?

Interpretação realista

A partícula estava em D.

Interpretação ortodoxa

Não podemos responder. Foi o acto de medir que a forçou a tomar uma posição.

O paradoxo EPR e entrelaçamento

$$\underset{\substack{\downarrow \\ \text{neutra} \\ \text{spin zero}}}{\pi^0} \longrightarrow \underbrace{\underset{\substack{\downarrow \\ \text{carga } \ominus}}{e^-} + \underset{\substack{\downarrow \\ \text{carga } \oplus}}{e^+}}_{\text{spin } 1/2}$$

$$\underset{\text{spin } \uparrow}{e^-} \longleftarrow \pi^0 \longrightarrow \underset{\text{spin } \downarrow}{e^+}$$

"spooky action at distance"

$\boxed{\text{Duas partículas estão entrelaçadas}}$

Não localidade

Estados entrelaçados e não entrelaçados de dois fotões

(Scarani, pág. 13-16)

considerar todas as possibilidades do estado de polarização de 2 fotões

$|H\rangle \otimes |H\rangle$ ambos têm pol. H

$|V\rangle \otimes |V\rangle$ " " " V

$|H\rangle \otimes |V\rangle$ 1º fotão : pol. H
2º " : " V

$|V\rangle \otimes |H\rangle$ 1º fotão : pol. V
2º " : " H

$\otimes$ representa o produto tensorial

$|H\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $|V\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

$$|H\rangle \otimes |H\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ 0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|H\rangle \otimes |V\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ 0 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|V\rangle \otimes |H\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Estados entrelaçados e não entrelaçados de dois fotões

$$|H\rangle \otimes |V\rangle \neq |V\rangle \otimes |H\rangle$$

$$|H\rangle \otimes |V\rangle \equiv |H,V\rangle \equiv |HV\rangle$$

Em geral

$$|\psi\rangle = a|HH\rangle + b|HV\rangle + c|VH\rangle + d|VV\rangle$$

Exemplo 1:

$$|\psi_1\rangle = c|HH\rangle + s|HV\rangle$$

$$|\psi\rangle = |H\rangle(c|H\rangle + s|V\rangle)$$

$$\underbrace{|H\rangle}\otimes\underbrace{(c|H\rangle + s|V\rangle)}$$

Não entrelaçado

cada fotão tem uma polarização

Exemplo 2

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle + |VV\rangle)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle + |VV\rangle) \overset{?}{=}$$

→ não é possível

$$= (a|H\rangle + b|V\rangle)\otimes(c|H\rangle + d|V\rangle)$$

$$= ac|HH\rangle + ad|HV\rangle + bc|VH\rangle + bd|VV\rangle$$

$$\boxed{\begin{array}{ll} ac = 1/\sqrt{2} & ad = 0 \\ bd = 1/\sqrt{2} & bc = 0 \end{array}}$$

impossível

Estados entrelaçados