spin

spin do electrão

$\frac{1}{2}\hbar$

simplicadamente : $\frac{1}{2}$

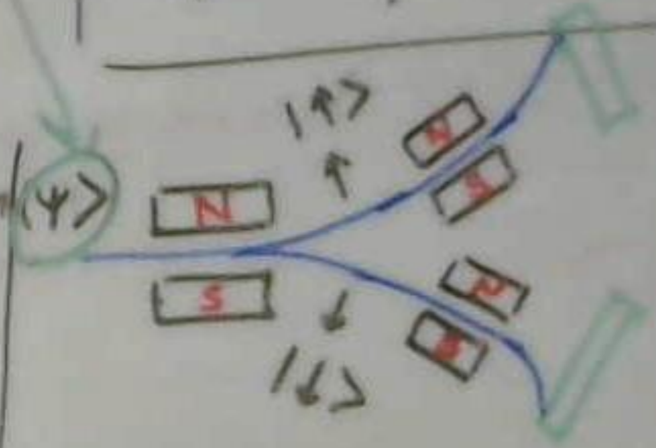
Unidades S.I. : Js

são também as unidades do momento angular

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

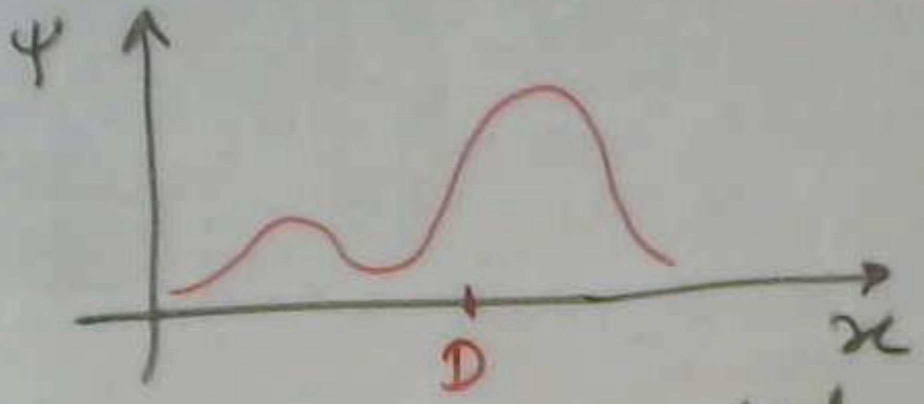
$|\uparrow\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$; $|\downarrow\rangle = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$

"spin up" "spin down"



Duas medidas seguidas em aparelho de Stern-Gerlach

As interpretações da mecânica quântica



Ao realizar a medida encontramos a partícula na posição D.

Qual era a posição da partícula imediatamente antes da medida?

1. Interpretação realista

A partícula estava em D.

2. Interpretação ortodoxa

Não podemos responder. Foi o acto de medir que forçou a partícula a tomar uma posição. (Bohr)

O paradoxo EPR e entrelaçamento

$$\pi^0 \longrightarrow e^- + e^+$$

π^0: carga nula, spin zero

e^-: carga $\ominus$, spin $\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$

e^+: carga $\oplus$, spin $\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$

$$\underset{\substack{\uparrow \\ \downarrow}}{e^-} \longleftarrow \underset{\pi^0}{\bullet} \longrightarrow \underset{\substack{\downarrow \\ \uparrow}}{e^+}$$

$$|\psi_1\rangle = a_{\uparrow}^{(1)}|\uparrow\rangle + a_{\downarrow}^{(1)}|\downarrow\rangle$$

$$|\psi_2\rangle = a_{\uparrow}^{(2)}|\uparrow\rangle + a_{\downarrow}^{(2)}|\downarrow\rangle$$

spin e^-	spin e^+
$\uparrow$	$\downarrow$
$\downarrow$	$\uparrow$
$\downarrow$	$\uparrow$
$\uparrow$	$\downarrow$
$\downarrow$	$\uparrow$

e^- e e^+ estão num <u>estado entrelaçado</u>

Estados entrelaçados e não entrelaçados de dois fotões

Estados de polarização: $|H\rangle$, $|V\rangle$

$|H\rangle \otimes |H\rangle$ ambos os fotões c/ polarização H

$|V\rangle \otimes |V\rangle$ ambos c/ polarização V

$|H\rangle \otimes |V\rangle$ 1º fotão c/ polariz. H
2º " c/ " V

$|V\rangle \otimes |H\rangle$ 1º fotão c/ polariz. V
2º " " " H

$\otimes$ representa o produto tensorial

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

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

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

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

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

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

Estados entrelaçados e não entrelaçados de dois fótons

$$|H\rangle \otimes |H\rangle \equiv |H,H\rangle \equiv |HH\rangle$$

$$|V\rangle \otimes |V\rangle \equiv |VV\rangle$$

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

$$|V\rangle \otimes |H\rangle \equiv |VH\rangle$$

simplificação da notação

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

estado de polarização de 2 fótons

Estados entrelaçados e não entrelaçados de dois fotões

Exemplo 1

$$|\Psi_1\rangle = c|HH\rangle + s|HV\rangle$$
$$= |H\rangle\left[c|H\rangle + s|V\rangle\right]$$
$$= \underbrace{|H\rangle}_{\text{estado do 1º fotão}} \otimes \underbrace{\left[c|H\rangle + s|V\rangle\right]}_{\text{estado do 2º fotão}}$$

Conseguimos descrever de forma independente os estados dos 2 fotões

Estado não entrelaçado

Exemplo 2

$$|\Psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|HH\rangle + |VV\rangle\right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|HH\rangle + |VV\rangle\right) \overset{?}{=}$$ ($\overset{?}{=}$ a igualdade será possível)

$$= \left(a|H\rangle + b|V\rangle\right) \otimes \left(c|H\rangle + d|V\rangle\right)$$
$$= \left(ac|HH\rangle + ad|HV\rangle + bc|VH\rangle + bd|VV\rangle\right)$$

$$\left.\begin{aligned} ac &= 1/\sqrt{2} \\ bd &= 1/\sqrt{2} \\ ad &= 0 \\ bc &= 0 \end{aligned}\right\}$$ impossível

A igualdade não se verifica

Não é possível descrever $|\Psi_2\rangle$ como dois estados independentes

Estado entrelaçado