

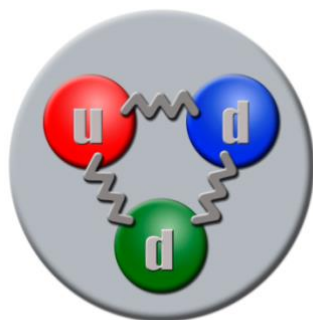
Bosones, fermiones y el espín:

En nuestra vida diaria, asumimos que cada objeto tiene una identidad propia y que podemos distinguirlos y observar su comportamiento individual dentro de un sistema. Pero esto no es así en el mundo subatómico, donde se aplican las reglas de la física cuántica.

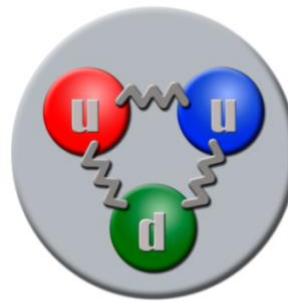
En el mundo cuántico, dos partículas idénticas son intrínsecamente indistinguibles; en la interacción de, por ejemplo, dos electrones, es imposible etiquetar o identificar a cada uno de ellos de modo que se pueda saber cuál es cuál antes y después de la interacción. Esto se debe a que las partículas cuánticas se describen a su vez con ondas, de manera que es imposible seguir con precisión la trayectoria de cada una por separado: las ondas se superponen y se mezclan en la interacción. Son los efectos del “principio de indeterminación de Heisenberg”, según el cual es imposible medir con precisión y simultáneamente la posición y el momento (o impulso) de una partícula.

Estos tipos de partículas cuánticas: fermiones y bosones presentan comportamientos estadísticos diferentes. Son fermiones los electrones, los quarks, los protones, los neutrones; son bosones los fotones de la luz, los átomos de helio-4.

mass →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0	≈126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS



Neutrón



Protón

Así como la estadística de Fermi-Dirac de los fermiones explica la impenetrabilidad de la materia y las propiedades electromagnéticas de los metales, el comportamiento de los bosones, que siguen la estadística de Bose-Einstein, explica las propiedades térmicas de la materia, el láser, los materiales superconductores. Antes de la formulación de la física cuántica, todos esos fenómenos eran inexplicables.

La función de onda Ψ no solo permite conocer el comportamiento de una partícula cuántica sino que además contiene toda la información sobre ella: energía, posición, velocidad. Sin embargo no permite conocer el valor concreto de algunas de sus propiedades, en lugar de eso, se obtiene una variedad de posibles valores, cada uno con diferente probabilidad de ocurrir al realizar una medición. Debido a esta peculiaridad existen diferencias entre los fermiones y bosones. Por ejemplo: si se tienen dos partículas cuánticas A y B, son indistinguibles, suponiendo que se colocan un par de cajas, la caja 1 y la caja 2. Dado que son indistinguibles, quiere decir que encontrar en una de ellas en la caja 1 y la otra en la caja 2 es igual de probable que una en la caja 2 y la otra en la caja 1.

La probabilidad de encontrar un resultado en Mecánica Cuántica se obtiene como el cuadrado del valor absoluto de la Ψ .

Si aplicamos a las partículas en las cajas y hacemos los cálculos convenientes nos queda:

$$|\Psi(A, B)|^2 = |\Psi(B, A)|^2$$

Llegamos a la conclusión que existe dos tipos de partículas que cumplen con esta igualdad:

$$\Psi(A, B) = \pm \Psi(B, A)$$

El tratamiento de las partículas indistinguibles se refiere a la SIMETRÍA DE LA FUNCIÓN DE ONDA.

En el caso de FERMIONES, la función de onda debe ser ANTISIMÉTRICA con respecto al intercambio de dos fermiones, es decir

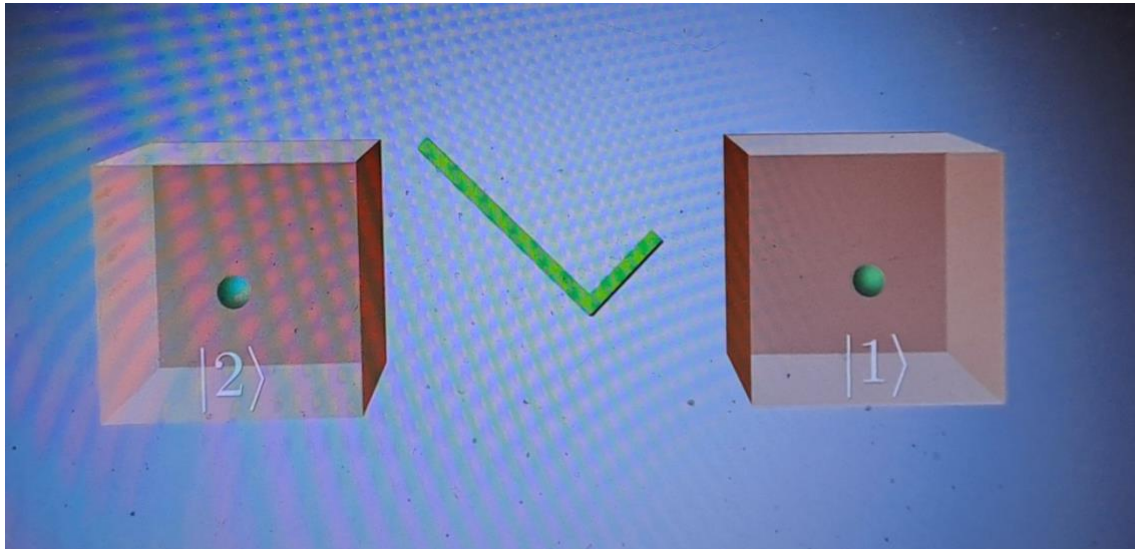
$$\Psi(A, B) = -\Psi(B, A)$$

Para BOSONES, en cambio, la función de onda debe ser SIMÉTRICA frente al intercambio de dos bosones,

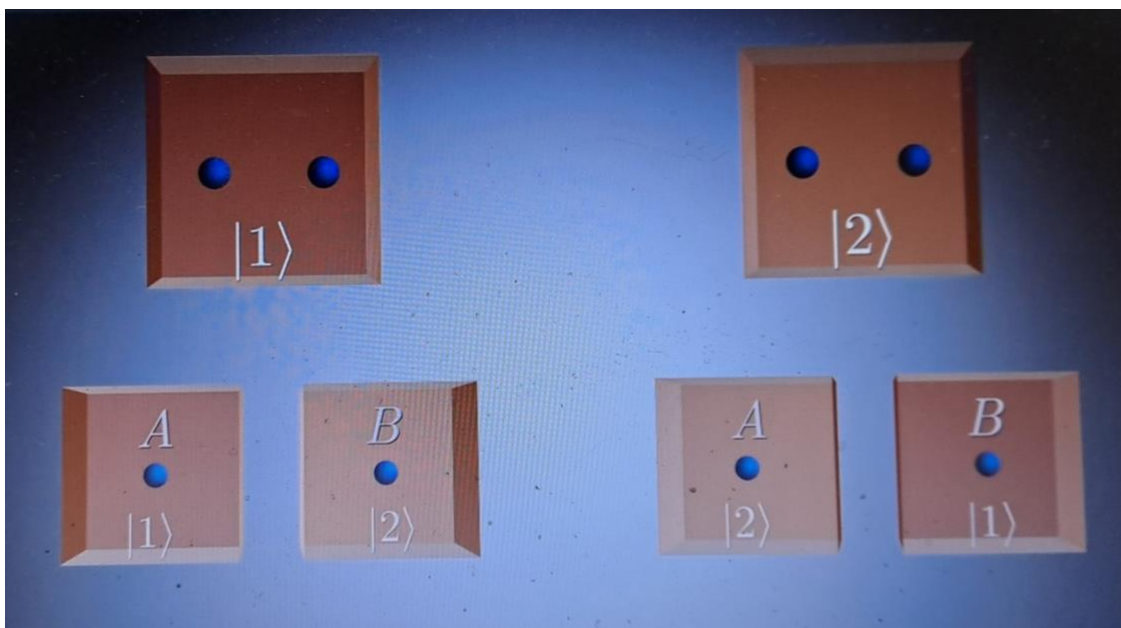
$$\Psi(A, B) = \Psi(B, A)$$

Fermiones: Si volvemos al ejemplo de las cajas: la única forma que se puede observar sería la partícula A en la caja 1 y B en la caja 2 o viceversa. Entonces ¿Qué ocurre ambas partículas están en la misma caja? ¿Podría ocurrir? La respuesta es no por el signo (-) debido a que la

función es antisimétrica y los únicos estados posibles son aquellos que al intercambiar el orden de la partículas preservan esta asimetría. Cuando tenemos las partículas en una misma caja y realizamos el intercambio la antisimetría no se cumple. Por lo tanto para dos fermiones estar en una misma caja o de manera mas técnica compartir el mismo estado cuantico es prohibido. Este hecho es elemental que tiene el nombre de Principio de Pauli. (figura 2)



Al ser bosones implicaría que su función de onda es simétrica lo cual nos permite tener a las partículas en cuatro configuraciones distintas: ambas partículas en la caja 1, o ambas partículas en la caja 2, o una partícula en la caja 1 y otra en la caja 2. A diferencia de los fermiones, los bosones no tienen prohibido compartir el mismo lugar que otro boson. (figura 3)



Los aspectos fundamentales que caracterizan al tratamiento de las partículas cuánticas surgen precisamente de la indistinguibilidad entre partículas de un MISMO tipo, ya sea FERMIONES (por ej. electrones, protones, etc.) que POSEEN ESPIN SEMIENTERO o BOSONES (por ej. fotones) que POSEEN ESPIN ENTERO.

EL PRINCIPIO DE EXCLUSION: para explicar las regularidades de la tabla periódica Pauli introdujo en 1925 el principio de exclusión, que permite explicar el comportamiento físico y

químico de los elementos de una forma simple. Este principio establece que dos electrones en un átomo no pueden ocupar el mismo estado cuántico, es decir, no pueden tener los mismos números cuánticos ya que la función de onda del sistema es antisimétrica frente al intercambio. ESTE PRINCIPIO SE APLICA A LAS PARTICULAS DENOMINADAS FERMIONES. LOS BOSONES NO OBEDECEN AL PRINCIPIO DE EXCLUSION. Esto significa que dos o más bosones pueden estar en el mismo estado cuántico.

En nuestra vida diaria, asumimos que cada objeto tiene una identidad propia y que podemos distinguirlos y observar su comportamiento individual dentro de un sistema. Si, por ejemplo, lanzamos dos monedas iguales, podemos pintar una marca en una de ellas y considerar como sucesos distintos el caso en el que la primera salga “cara” y la segunda “cruz” y el caso inverso. Así, tenemos cuatro resultados posibles, con una probabilidad de $1/4$ cada uno: cara-cara, cara-cruz, cruz-cara, cruz-cruz. Y es cierto, la probabilidad de que al lanzar las dos monedas salga una cara y una cruz es $1/2$, la suma de los dos resultados cara-cruz y cruz-cara, que, aunque no marquemos las monedas, son distintos. Pero esto no es así en el mundo subatómico, donde se aplican las reglas de la física cuántica.

En el mundo cuántico, dos partículas idénticas son intrínsecamente indistinguibles; en la interacción de, por ejemplo, dos electrones, es imposible etiquetar o identificar a cada uno de ellos de modo que se pueda saber cuál es cuál antes y después de la interacción. Esto se debe a que las partículas cuánticas se comportan a la vez como ondas, de manera que es imposible seguir con precisión la trayectoria de cada una por separado: las ondas se superponen y se mezclan en la interacción. Son los efectos del “principio de indeterminación de Heisenberg”, según el cual es imposible medir con precisión y simultáneamente la posición y el movimiento de una partícula. Esto tiene un efecto crucial en el comportamiento estadístico de las partículas, que es completamente diferente del comportamiento de las monedas y otros objetos macroscópicos.

Existen dos tipos de partículas cuánticas, que presentan comportamientos estadísticos diferentes: los fermiones y los bosones. Son fermiones los electrones, los quarks, los protones, los neutrones, los núcleos de carbono-14, etc; son bosones los fotones de la luz, los átomos de helio-4... El que una partícula sea bosón o fermión depende del valor de una propiedad cuántica llamada espín, una especie de rotación intrínseca (aunque no se puede interpretar como la rotación de un objeto material en el espacio tridimensional tal como estamos

acostumbrados a ver en el mundo macroscópico). Usando las unidades apropiadas, el espín de los bosones siempre es un número entero (0, +1, -1, +2, -2...), mientras que el de los fermiones es semientero (+1/2, -1/2, +3/2, -3/2...).

El lanzamiento de dos “monedas cuánticas” que se comportaran como bosones tendría solamente tres resultados posibles: cara-cara, cruz-cruz y cara-cruz, puesto que en este tercer caso sería imposible saber qué moneda ha caído en cara y cuál en cruz. Lo que resulta más curioso es que este último caso no tiene una probabilidad de 1/2, como en la estadística de las monedas macroscópicas, sino que cada uno de esos tres resultados posibles tendría la misma probabilidad de 1/3. Es la llamada estadística de Bose-Einstein.

Los fermiones son aún más extraños: Cumplen el llamado “principio de exclusión de Pauli”, que postula que dos fermiones idénticos no pueden ocupar a la vez el mismo estado cuántico. Así, el único resultado posible del lanzamiento de dos “monedas cuánticas” que se comportaran como fermiones sería cara-cruz. Esta estadística se denomina estadística de Fermi-Dirac.

El principio de exclusión de Pauli es el responsable de la distribución de los electrones en los átomos en distintos niveles de energía, y por tanto de la existencia de la tabla periódica, de las propiedades químicas de los elementos y de la propia estabilidad de la materia. La estadística de Fermi-Dirac de los fermiones explica la impenetrabilidad de la materia y las propiedades electromagnéticas de los metales. Por su parte, el comportamiento de los bosones, que siguen la estadística de Bose-Einstein, explica las propiedades térmicas de la materia, el láser, los materiales superconductores... Antes de la formulación de la física cuántica, todos esos fenómenos eran inexplicables.

En nuestra vida diaria, asumimos que cada objeto tiene una identidad propia y que podemos distinguirlos y observar su comportamiento individual dentro de un sistema. Pero esto no es así en el mundo subatómico, donde se aplican las reglas de la física cuántica.

En el mundo cuántico, dos partículas idénticas son intrínsecamente indistinguibles; en la interacción de, por ejemplo, dos electrones, es imposible etiquetar o identificar a cada uno de ellos de modo que se pueda saber cuál es cuál antes y después de la interacción. Esto se debe a que las partículas cuánticas se comportan a la vez como ondas, de manera que es imposible seguir con precisión la trayectoria de cada una por separado: las ondas se superponen y se mezclan en la interacción. Son los efectos del “principio de indeterminación de Heisenberg”, según el cual es imposible medir con precisión y simultáneamente la posición y el movimiento de una partícula.

Existen dos tipos de partículas cuánticas, que presentan comportamientos estadísticos diferentes: los fermiones y los bosones. Son fermiones los electrones, los quarks, los protones, los neutrones; son bosones los fotones de la luz, los átomos de helio-4... El que una partícula sea bosón o fermión depende del valor de una propiedad cuántica llamada espín, una especie de rotación intrínseca (aunque no se puede interpretar como la rotación de un objeto material en el espacio tridimensional tal como estamos acostumbrados a ver en el mundo macroscópico).

Los fermiones cumplen el llamado “principio de exclusión de Pauli”, que postula que dos fermiones idénticos no pueden ocupar a la vez el mismo estado cuántico. Así, el único resultado posible del lanzamiento de dos “monedas cuánticas” que se comportaran como fermiones sería cara-cruz. Esta estadística se denomina estadística de Fermi-Dirac.

El principio de exclusión de Pauli es el responsable de la distribución de los electrones en los átomos en distintos niveles de energía, y por tanto de la existencia de la tabla periódica, de las propiedades químicas de los elementos y de la propia estabilidad de la materia. La estadística de Fermi-Dirac de los fermiones explica la impenetrabilidad de la materia y las propiedades electromagnéticas de los metales. Por su parte, el comportamiento de los bosones, que siguen la estadística de Bose-Einstein, explica las propiedades térmicas de la materia, el láser, los materiales superconductores... Antes de la formulación de la física cuántica, todos esos fenómenos eran inexplicables.