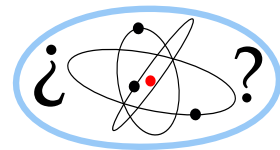


¿Dónde están los electrones?

Alejandro Jiménez Cano

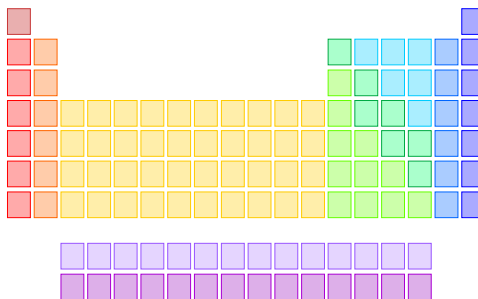


Universidad de Granada
Dpto. de Física Teórica y del Cosmos

✉ alejandroj@ugr.es

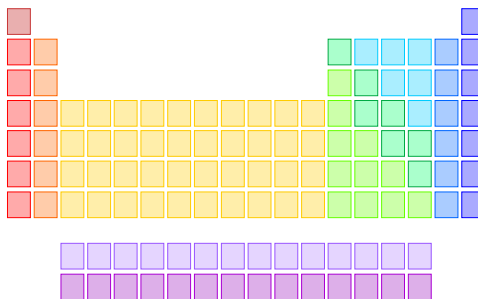
¿Dónde están los electrones?

Los elementos

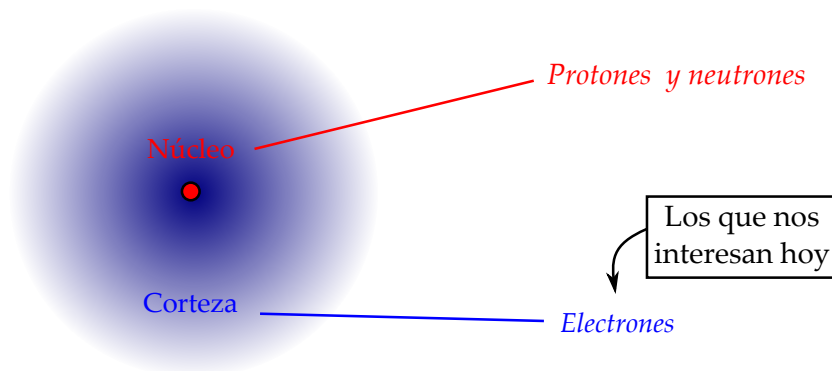


¿Dónde están los electrones?

Los elementos



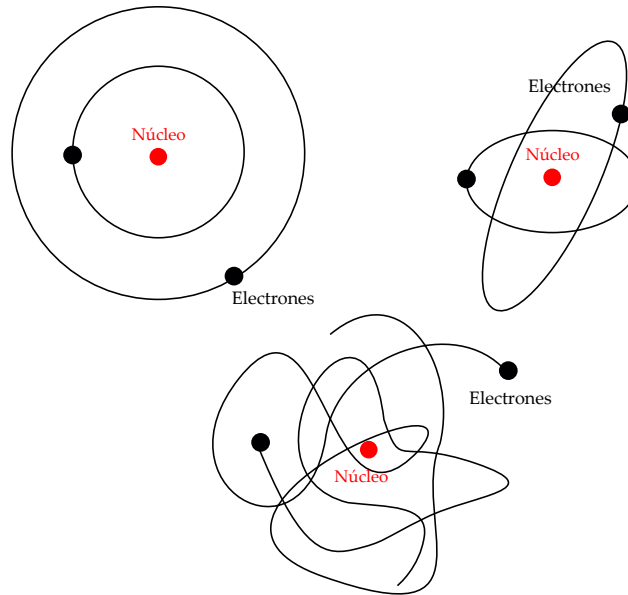
Átomos



- Bueno, ¿y los electrones DÓNDE están? Quiero decir: ¿qué hacen? ¿dan vueltas? ¿van a lo loco?

¿Dónde están los electrones?

□ Bueno, ¿y los electrones DÓNDE están? Quiero decir: ¿qué hacen? ¿dan vueltas? ¿van a lo loco?



...pues nada...

GRACIAS POR VUESTRA ATENCIÓN

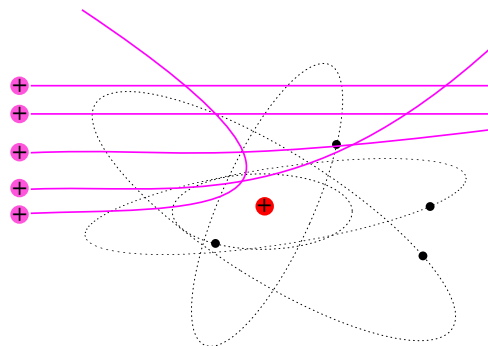
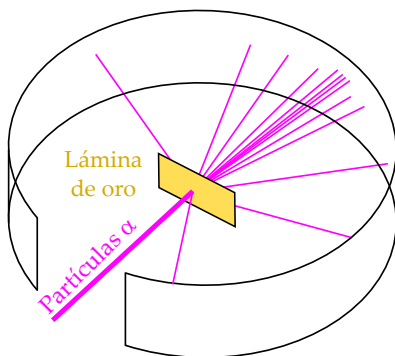
(Chuleta: improvisa... habla de Juego de Tronos o algo).

- 1 De Rutherford a la Mecánica Cuántica
- 2 Estados de un sistema
- 3 La función de onda de la Mecánica Cuántica
- 4 El gato de Schrödinger
- 5 Orbitales atómicos y su significado
- 6 Extra: Video del experimento de la doble rendija

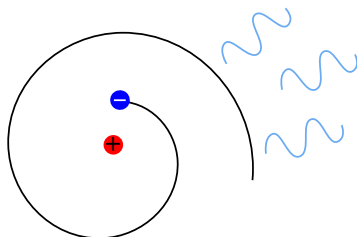
NOTA *clásico* significa no-cuántico.

Para las cosas que veremos en esta charla, clásico es como decir "que puede explicarse con la física anterior al siglo XX (mecánica de Newton, electromagnetismo de Maxwell, etc.)".

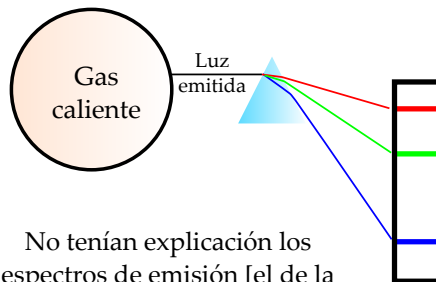
Experimento y modelo de Rutherford 1911-1913.



Problemas: las órbitas no son estables y no reproduce los espectros.

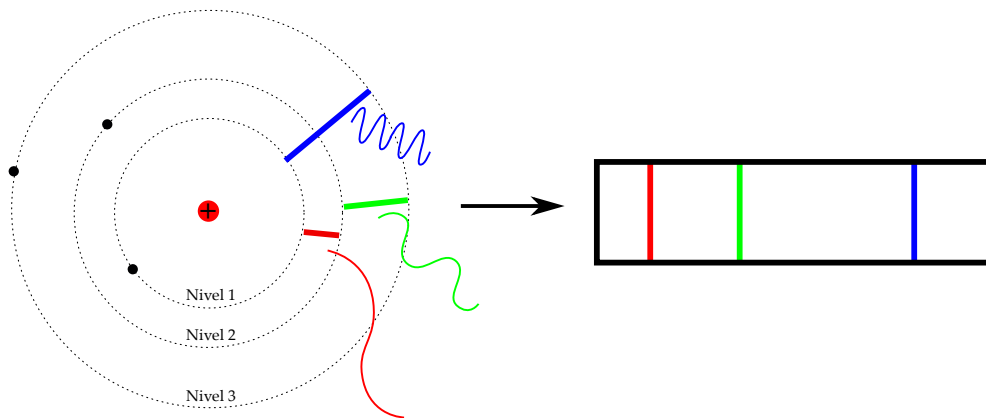


Cargas aceleradas en un campo eléctrico irradian. Los electrones perderían energía y caerían al núcleo



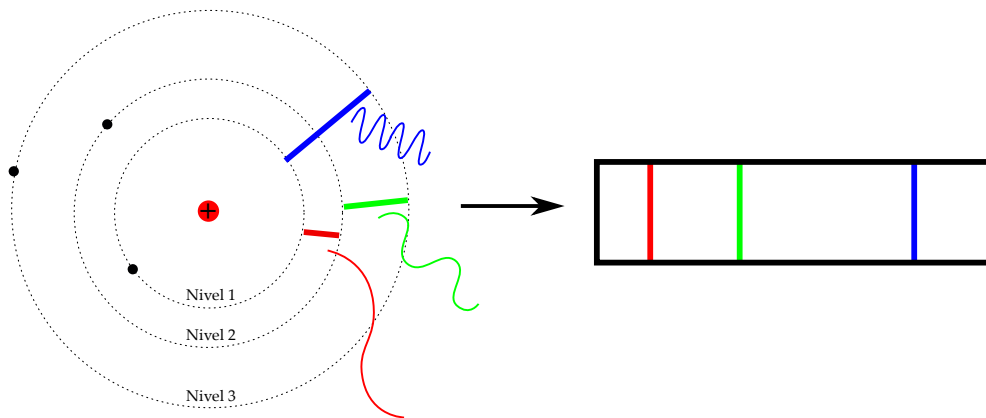
No tenían explicación los espectros de emisión [el de la figura] y de absorción

- ❑ Los electrones solo pueden ocupar ciertos niveles de energía (y no el resto). Solo las transiciones entre esos niveles están permitidas. \Rightarrow ¡espectros!
- ❑ Los electrones no irradian al moverse a lo largo de sus órbitas. \Rightarrow No hay problemas de inestabilidad.



- ❑ Pero... ¿y la física clásica qué?

- ❑ Los electrones solo pueden ocupar ciertos niveles de energía (y no el resto). Solo las transiciones entre esos niveles están permitidas. \Rightarrow ¡espectros!
- ❑ Los electrones no irradian al moverse a lo largo de sus órbitas. \Rightarrow No hay problemas de inestabilidad.



- ❑ Pero... ¿y la física clásica qué? Hizo falta construir una nueva física para explicar de una fiel y elegante este y otros fenómenos:

Mecánica Cuántica (años 20) \Rightarrow Modelo atómico de Schrödinger (1926)

Extra. Si incluimos los efectos de la relatividad en el modelo de Bohr obtenemos el modelo de Sommerfeld (años antes de la Mec. Cuántica). Y si los incluimos en el de Schrödinger llegamos al átomo de Dirac (1928).



En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

Viene caracterizado por diferentes parámetros.

En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 1: **Movimiento rectilíneo de un disco vertical.**



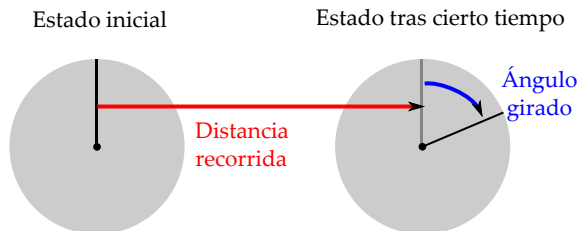
En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 1: **Movimiento rectilíneo de un disco vertical.**



Tenemos básicamente dos parámetros (cada uno con ∞ valores):



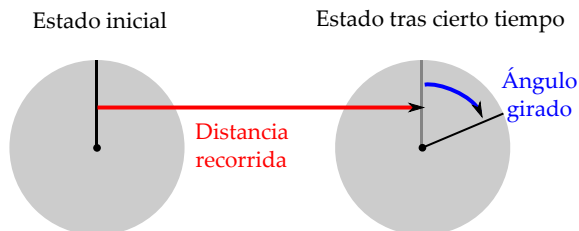
En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 1: **Movimiento rectilíneo de un disco vertical.**



Tenemos básicamente dos parámetros (cada uno con ∞ valores):



Cuestión. ¿Cuántos estados tiene este sistema?

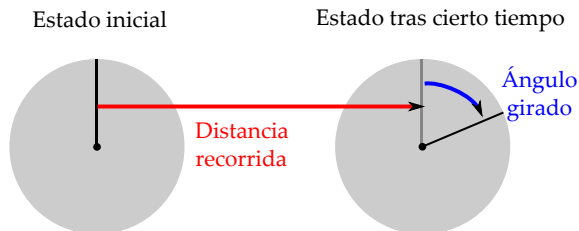
En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 1: **Movimiento rectilíneo de un disco vertical.**



Tenemos básicamente dos parámetros (cada uno con ∞ valores):



Cuestión. ¿Cuántos estados tiene este sistema? ¡Infinitos!

En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 2: Flecha vertical moviéndose por una línea recta.



En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 2: Flecha vertical moviéndose por una línea recta.



De nuevo dos parámetros (uno con ∞ valores y otro con 2 valores):



En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 2: Flecha vertical moviéndose por una línea recta.



De nuevo dos parámetros (uno con ∞ valores y otro con 2 valores):



Cuestión. ¿Cuántos estados tiene este sistema?

En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 2: Flecha vertical moviéndose por una línea recta.



De nuevo dos parámetros (uno con ∞ valores y otro con 2 valores):



Cuestión. ¿Cuántos estados tiene este sistema? ¡Infinitos!

En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

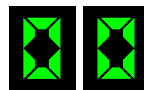
Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 3: **Dos bits.**

Estado inicial



Estado tras cierto tiempo



En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

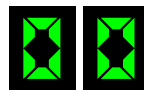
Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 3: **Dos bits.**

Estado inicial



Estado tras cierto tiempo



Una vez más dos parámetros (cada uno con 2 valores).

En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

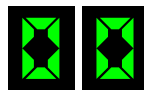
Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 3: Dos bits.

Estado inicial



Estado tras cierto tiempo



Una vez más dos parámetros (cada uno con 2 valores).

Cuestión. ¿Cuántos estados tiene este sistema?

En principio (clásicamente) vamos a llamar *estado* de un sistema en un momento dado simplemente a la configuración con que se presenta.

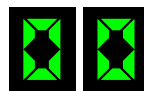
Viene caracterizado por diferentes parámetros.

□ Ejemplo 3: Dos bits.

Estado inicial

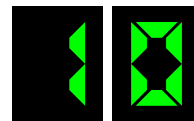
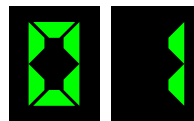
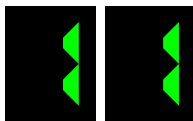
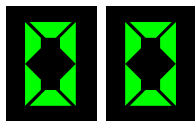


Estado tras cierto tiempo



Una vez más dos parámetros (cada uno con 2 valores).

Cuestión. ¿Cuántos estados tiene este sistema? Cuatro estados:



A cada estado de un sistema, le podemos asignar una *función de onda*, la cual es un objeto que contiene toda la información sobre las probabilidades de que los parámetros tomen un cierto valor al medirlos.

Cada estado tiene su función de onda, y cada función de onda representa un estado.

A cada estado de un sistema, le podemos asignar una *función de onda*, la cual es un objeto que contiene toda la información sobre las probabilidades de que los parámetros tomen un cierto valor al medirlos.

Cada estado tiene su función de onda, y cada función de onda representa un estado.

□ El sistema más sencillo: un solo bit. La función de onda es:

$$\Psi = a \cdot \boxed{0} + b \cdot \boxed{1},$$

donde las letras rojas (coeficientes) indican las probabilidades correspondientes.

A cada estado de un sistema, le podemos asignar una *función de onda*, la cual es un objeto que contiene toda la información sobre las probabilidades de que los parámetros tomen un cierto valor al medirlos.

Cada estado tiene su función de onda, y cada función de onda representa un estado.

- El sistema más sencillo: un solo bit. La función de onda es:

$$\Psi = a \cdot \boxed{0} + b \cdot \boxed{1},$$

donde las letras rojas (coeficientes) indican las probabilidades correspondientes.

- Solo hay dos estados:



y sus funciones de onda son, respectivamente:

$$1 \cdot \boxed{0} + 0 \cdot \boxed{1},$$

$$0 \cdot \boxed{0} + 1 \cdot \boxed{1}.$$

A cada estado de un sistema, le podemos asignar una *función de onda*, la cual es un objeto que contiene toda la información sobre las probabilidades de que los parámetros tomen un cierto valor al medirlos.

Cada estado tiene su función de onda, y cada función de onda representa un estado.

A cada estado de un sistema, le podemos asignar una *función de onda*, la cual es un objeto que contiene toda la información sobre las probabilidades de que los parámetros tomen un cierto valor al medirlos.

Cada estado tiene su función de onda, y cada función de onda representa un estado.

□ Consideremos dos bits. La función de onda tiene esta pinta:

$$\Psi = a \cdot \boxed{0} \boxed{0} + b \cdot \boxed{0} \boxed{1} + c \cdot \boxed{1} \boxed{0} + d \cdot \boxed{1} \boxed{1},$$

donde las letras rojas (coeficientes) indican las probabilidades correspondientes.

A cada estado de un sistema, le podemos asignar una *función de onda*, la cual es un objeto que contiene toda la información sobre las probabilidades de que los parámetros tomen un cierto valor al medirlos.

Cada estado tiene su función de onda, y cada función de onda representa un estado.

□ Consideremos dos bits. La función de onda tiene esta pinta:

$$\Psi = a \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + b \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + c \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + d \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

donde las letras rojas (coeficientes) indican las probabilidades correspondientes.

□ Solo hay cuatro estados:



y sus funciones de onda son, respectivamente:

$$1 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + 0 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + 0 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + 0 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + 1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 1 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + 0 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + 0 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + 1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + 0 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Sistema clásico

- ❑ Función de onda poco interesante: las probabilidades siempre son una del 100 % y el resto cero.
- ❑ En un estado, cada parámetro tiene SEGURO un valor y no los demás posibles.

Sistema clásico

- ❑ Función de onda poco interesante: las probabilidades siempre son una del 100 % y el resto cero.
- ❑ En un estado, cada parámetro tiene SEGURO un valor y no los demás posibles.

Sistema cuántico

- ❑ Los coeficientes de la función de onda **se vuelven interesantes**.
- ❑ En un estado, los parámetros **no tienen por qué** tener un valor bien definido.

- El *qubit* (bit cuántico) es un sistema cuyo estado viene dado por la función de onda:

$$\Psi = a \cdot \boxed{0} + b \cdot \boxed{1},$$

donde a y b indican las probabilidades correspondientes (números entre 0 y 1).

- El *qubit* (bit cuántico) es un sistema cuyo estado viene dado por la función de onda:

$$\Psi = a \cdot \boxed{0} + b \cdot \boxed{1},$$

donde a y b indican las probabilidades correspondientes (números entre 0 y 1).

- Si solo pudiera tener los dos estados:

$$1 \cdot \boxed{0} + 0 \cdot \boxed{1},$$

$$0 \cdot \boxed{0} + 1 \cdot \boxed{1},$$

entonces no es nada especial, es un BIT de toda la vida (clásico)

- El *qubit* (bit cuántico) es un sistema cuyo estado viene dado por la función de onda:

$$\Psi = a \cdot \boxed{0} + b \cdot \boxed{1},$$

donde a y b indican las probabilidades correspondientes (números entre 0 y 1).

- Si solo pudiera tener los dos estados:

$$1 \cdot \boxed{0} + 0 \cdot \boxed{1},$$

$$0 \cdot \boxed{0} + 1 \cdot \boxed{1},$$

entonces no es nada especial, es un BIT de toda la vida (clásico)

- En cambio, el qubit no tiene dos sino infinitos estados.

- El *qubit* (bit cuántico) es un sistema cuyo estado viene dado por la función de onda:

$$\Psi = a \cdot \boxed{0} + b \cdot \boxed{1},$$

donde a y b indican las probabilidades correspondientes (números entre 0 y 1).

- Si solo pudiera tener los dos estados:

$$1 \cdot \boxed{0} + 0 \cdot \boxed{1},$$

$$0 \cdot \boxed{0} + 1 \cdot \boxed{1},$$

entonces no es nada especial, es un BIT de toda la vida (clásico)

- En cambio, el qubit no tiene dos sino infinitos estados.

Los dos anteriores más sus infinitas **superposiciones**:

$$\frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1},$$

$$\frac{2}{3} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{3} \cdot \boxed{1},$$

$$\frac{21}{100} \cdot \boxed{0} + \frac{79}{100} \cdot \boxed{1},$$

...

- El *qubit* (bit cuántico) es un sistema cuyo estado viene dado por la función de onda:

$$\Psi = a \cdot \boxed{0} + b \cdot \boxed{1},$$

donde a y b indican las probabilidades correspondientes (números entre 0 y 1).

- Si solo pudiera tener los dos estados:

$$1 \cdot \boxed{0} + 0 \cdot \boxed{1},$$

$$0 \cdot \boxed{0} + 1 \cdot \boxed{1},$$

entonces no es nada especial, es un BIT de toda la vida (clásico)

- En cambio, el qubit no tiene dos sino infinitos estados.

Los dos anteriores más sus infinitas **superposiciones**:

$$\frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1},$$

$$\frac{2}{3} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{3} \cdot \boxed{1},$$

$$\frac{21}{100} \cdot \boxed{0} + \frac{79}{100} \cdot \boxed{1},$$

...

- ¿PERO QUÉ significan estas funciones de onda que no se corresponden con estados clásicos?

- Tomemos por ejemplo el estado con función de onda

$$\frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1],$$

- Tomemos por ejemplo el estado con función de onda

$$\frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1},$$

- Esto significa que si tuviésemos infinitas copias del sistema:

$$\begin{array}{cccc} \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, \\ \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, \\ \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, \\ \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, \\ \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, & \frac{1}{2} \cdot \boxed{0} + \frac{1}{2} \cdot \boxed{1}, \end{array}$$

...

- Tomemos por ejemplo el estado con función de onda

$$\frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1],$$

- Esto significa que si tuviésemos infinitas copias del sistema:

$$\begin{array}{cccc} \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \end{array}$$

...

- Y mirásemos a ver si el qubit es un 1 o un 0, en el 50 % de las copias veríamos 1 y en la otra mitad 0.

- Tomemos por ejemplo el estado con función de onda

$$\frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1],$$

- Esto significa que si tuviésemos infinitas copias del sistema:

$$\begin{array}{cccc} \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \end{array}$$

...

- Y mirásemos a ver si el qubit es un 1 o un 0, en el 50 % de las copias veríamos 1 y en la otra mitad 0.
- ¿Pero no eran copias idénticas?

- Tomemos por ejemplo el estado con función de onda

$$\frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1],$$

- Esto significa que si tuviésemos infinitas copias del sistema:

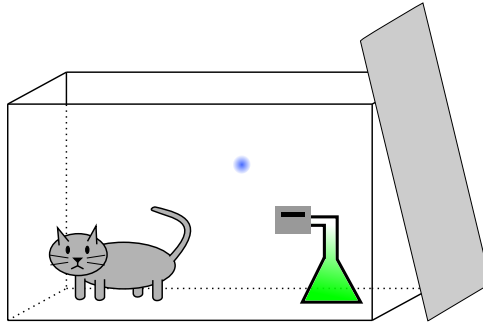
$$\begin{array}{cccc} \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \\ \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], & \frac{1}{2} \cdot [0] + \frac{1}{2} \cdot [1], \end{array}$$

...

- Y mirásemos a ver si el qubit es un 1 o un 0, en el 50 % de las copias veríamos 1 y en la otra mitad 0.
- ¿Pero no eran copias idénticas?

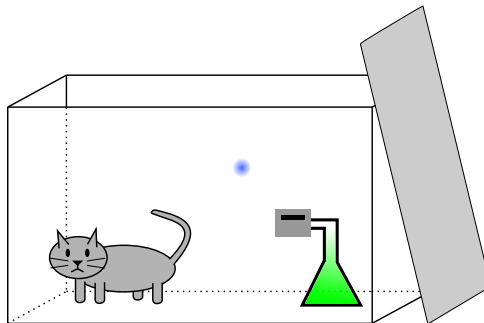
BIENVENIDOS AL MUNDO CUÁNTICO

□ Planteamiento



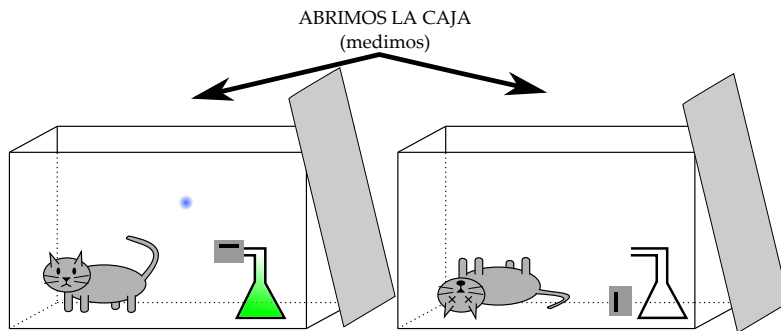
y cerramos la caja (herméticamente).

□ Planteamiento

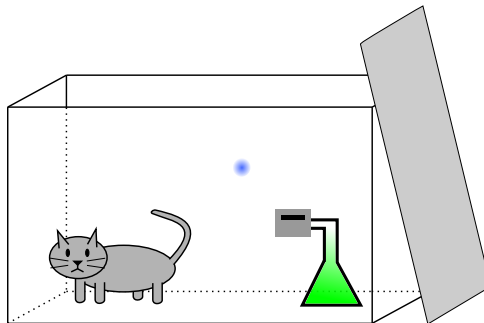


y cerramos la caja (herméticamente).

□ Resultados

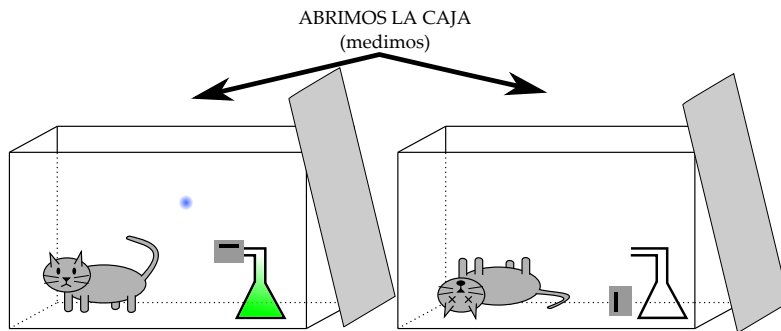


□ Planteamiento



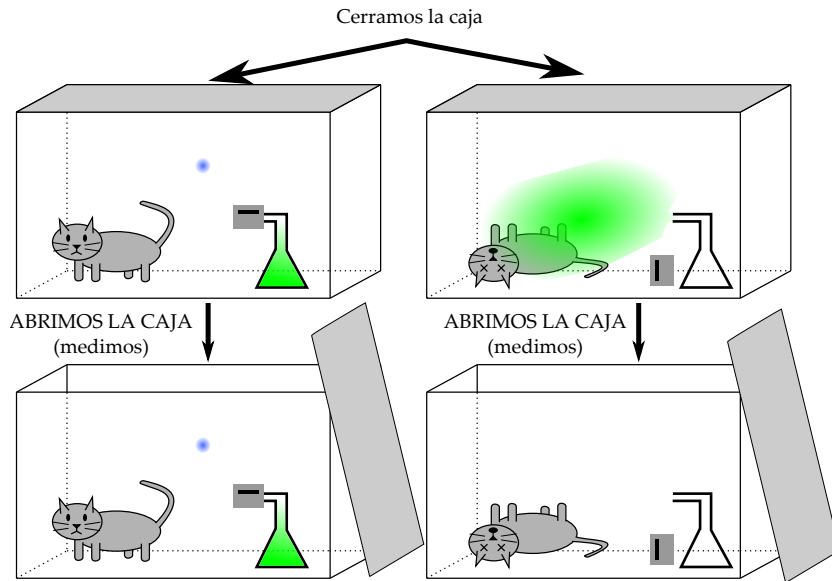
y cerramos la caja (herméticamente).

□ Resultados



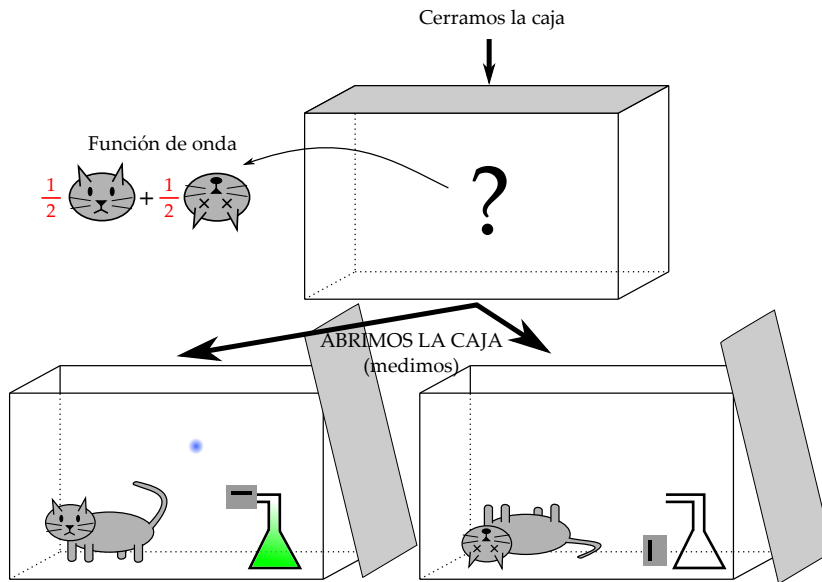
□ No podemos saber lo que ha ocurrido en la caja. Pero, ¿qué nos dice nuestra intuición?

□ ¿Qué ha pasado dentro de la caja? (Intuición clásica)

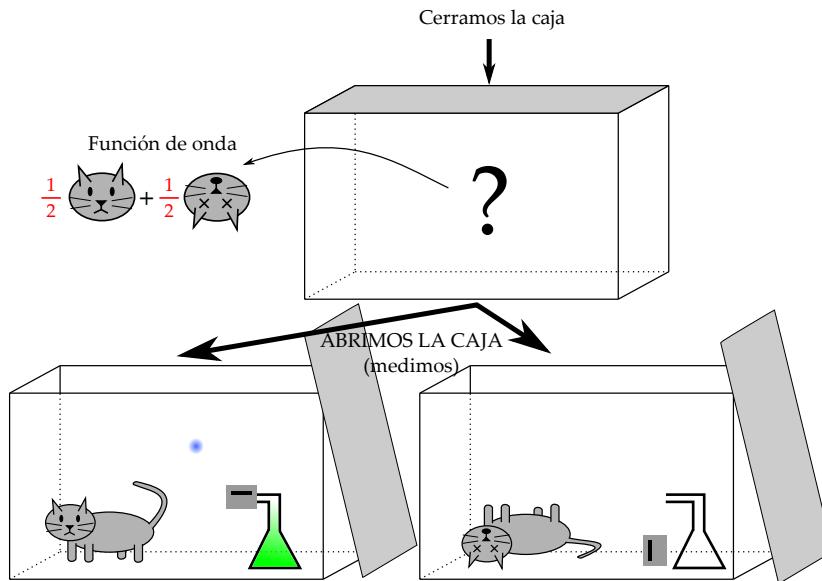


¡Sentido común! Pero, ¿qué dice la Mecánica Cuántica?

□ ¿Qué ha pasado dentro de la caja? (Descripción cuántica)

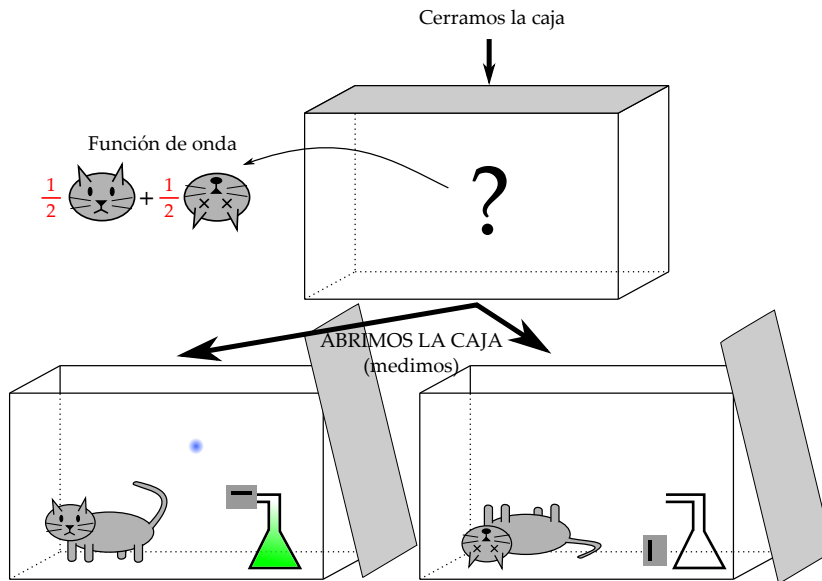


- ¿Qué ha pasado dentro de la caja? (Descripción cuántica)



- A la Mec. Cuántica le da igual lo que pasaba mientras la caja estaba cerrada.
¡La teoría solo entiende de funciones de onda!

□ ¿Qué ha pasado dentro de la caja? (Descripción cuántica)

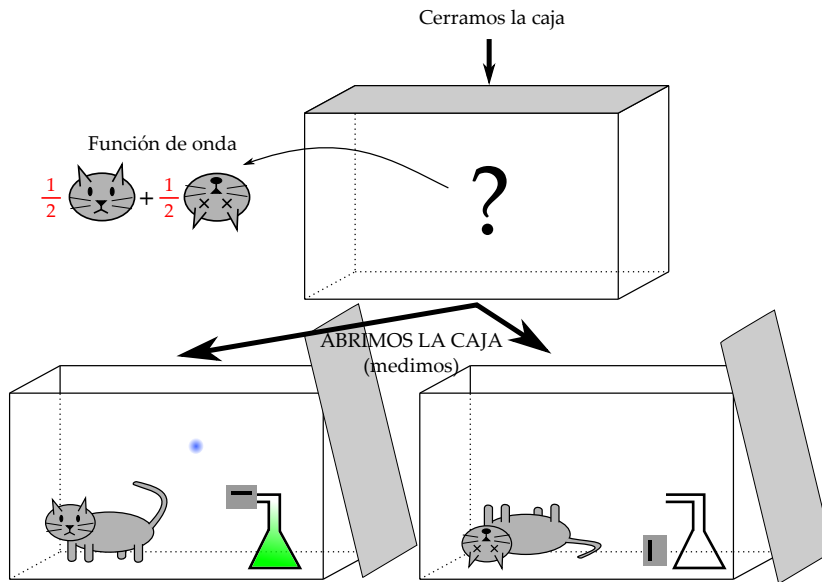


□ Es al medir cuando se manifiesta una posibilidad.

Esto es profundísimo filosóficamente, es como si la realidad se "construyera" al medir. Aquí entran en juego las interpretaciones de la Mecánica Cuántica. Una afirma que la función de onda ha colapsado, es decir, que si lo vemos vivo toda la información sobre la otra posibilidad se ha destruido irreversiblemente [interpretación de Copenhague]. Otra afirma que cuando observas una posibilidad, existe otro "yo" (¡que existe pero que es inaccesible cuánticamente!) que ha visto la otra [interpretación de Everett del multiverso].

¡Investiga sobre estas interpretaciones y debate con tus colegas!

- ¿Qué ha pasado dentro de la caja? (Descripción cuántica)



- El gato NO está vivo y muerto a la vez como se dice en todas partes.
- Simplemente ese aspecto del gato **no está bien definido**. No tiene sentido la pregunta:

¿estaba vivo el gato mientras la caja estaba cerrada?

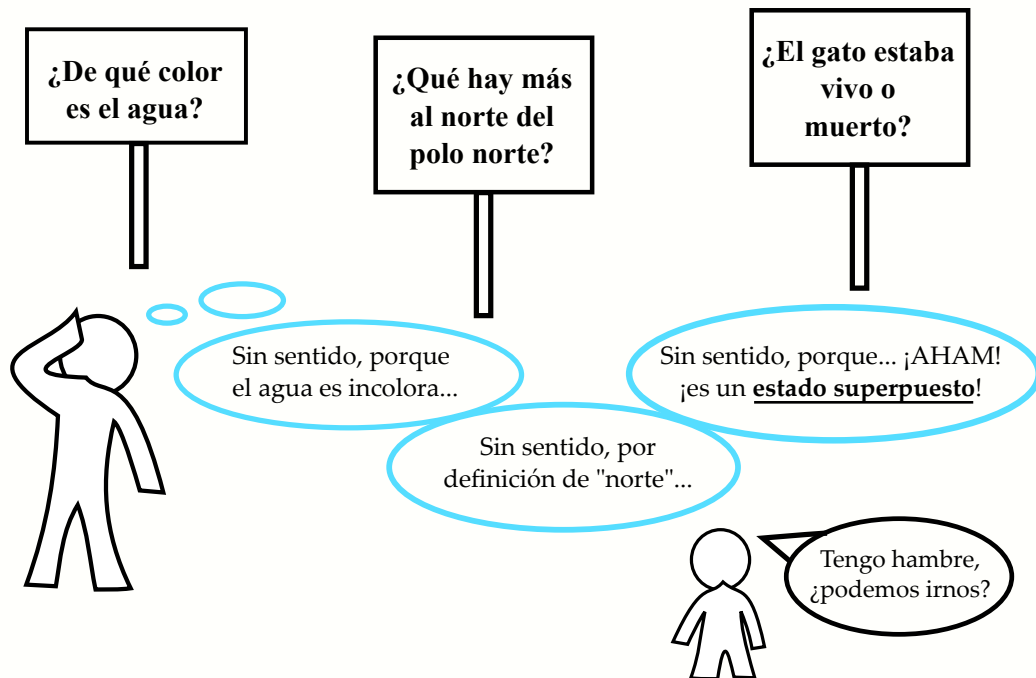
Que no cunda el pánico, es que ¡hay preguntas que no tienen sentido!

**¿De qué color
es el agua?**

**¿Qué hay más
al norte del
polo norte?**

**¿El gato estaba
vivo o
muerto?**

Que no cunda el pánico, es que ¡hay preguntas que no tienen sentido!



Considera un átomo con cualquier núcleo y UN solo electrón (*átomo hidrogenoide*).

Considera un átomo con cualquier núcleo y UN solo electrón (*átomo hidrogenoide*).

Hechos

- Existen niveles de energía permitidos (el resto no lo están).
A los estados correspondientes se les llama *orbitales*.

Considera un átomo con cualquier núcleo y UN solo electrón (*átomo hidrogenoide*).

Hechos

- ❑ Existen niveles de energía permitidos (el resto no lo están).

A los estados correspondientes se les llama *orbitales*.

- ❑ El electrón, mientras no sea excitado, tenderá a ocupar el nivel de menor energía.

No siempre se llenan los niveles en el orden lógico. Por ejemplo en el potasio antes de completarse la capa 3 empiezan a entrar electrones en la capa 4. Esto se debe a que los electrones lo que buscan es estabilidad. Y aquí entra en juego la repulsión del resto de electrones que ya están en la capa 3 (y que se distribuyen de forma muy compacta) que impusa a los nuevos electrones a capas más exteriores que las que les correspondería, según el sentido común.

Considera un átomo con cualquier núcleo y UN solo electrón (*átomo hidrogenoide*).

Hechos

- ❑ Existen niveles de energía permitidos (el resto no lo están).

A los estados correspondientes se les llama *orbitales*.

- ❑ El electrón, mientras no sea excitado, tenderá a ocupar el nivel de menor energía.

No siempre se llenan los niveles en el orden lógico. Por ejemplo en el potasio antes de completarse la capa 3 empiezan a entrar electrones en la capa 4. Esto se debe a que los electrones lo que buscan es estabilidad. Y aquí entra en juego la repulsión del resto de electrones que ya están en la capa 3 (y que se distribuyen de forma muy compacta) que impusa a los nuevos electrones a capas más exteriores que las que les correspondería, según el sentido común.

Estamos casi. Faltan dos pasos:

- ❑ Paso 1. ¿Cuáles son las funciones de onda de los estados de los diferentes orbitales?

Considera un átomo con cualquier núcleo y UN solo electrón (*átomo hidrogenoide*).

Hechos

- ❑ Existen niveles de energía permitidos (el resto no lo están).

A los estados correspondientes se les llama *orbitales*.

- ❑ El electrón, mientras no sea excitado, tenderá a ocupar el nivel de menor energía.

No siempre se llenan los niveles en el orden lógico. Por ejemplo en el potasio antes de completarse la capa 3 empiezan a entrar electrones en la capa 4. Esto se debe a que los electrones lo que buscan es estabilidad. Y aquí entra en juego la repulsión del resto de electrones que ya están en la capa 3 (y que se distribuyen de forma muy compacta) que impusa a los nuevos electrones a capas más exteriores que las que les correspondería, según el sentido común.

Estamos casi. Faltan dos pasos:

- ❑ Paso 1. ¿Cuáles son las funciones de onda de los estados de los diferentes orbitales?
- ❑ Paso 2. Una vez tengamos la función de onda, podemos “preguntarle”, ¿dónde están?

Estás tentado a pensar que solo puede haber un electrón con el estado correspondiente a un orbital, pero no, puede haber dos. Uno con espín hacia arriba y otro con espín hacia abajo. El espín es una característica de las partículas que tiene las propiedades de un giro intrínseco (sobre sí mismos, como la Tierra en su movimiento de rotación), pero que no lo es. Piénsalo, los electrones son partículas puntuales (tienen tamaño cero) por lo que no tiene sentido hablar de “girar sobre sí mismo”. El espín es una propiedad compleja y un tanto exótica (si no estás familiarizado con ella) de las partículas que emerge de una forma muy elegante de la teoría de la Relatividad Especial de Einstein.

Funciones de onda del primer nivel (1 orbitales)

$$\Psi_{1s}(r, \theta, \varphi) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^3} L_0^1\left(\frac{2Zr}{a}\right) e^{-\frac{Zr}{a}}$$

Funciones de onda del segundo nivel (4 orbitales)

$$\Psi_{2s}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{8} \sqrt{\frac{2}{\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^3} L_1^1\left(\frac{Zr}{a}\right) e^{-\frac{Zr}{2a}}$$

$$\Psi_{2p_z}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{8} \sqrt{\frac{2}{\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^5} L_0^3\left(\frac{Zr}{a}\right) e^{-\frac{Zr}{a}} r \cos \theta$$

$$\Psi_{2p_x}(r, \theta, \varphi) = \frac{-1}{4} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^5} L_0^3\left(\frac{Zr}{a}\right) e^{-\frac{Zr}{a}} r \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Psi_{2p_y}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^5} L_0^3\left(\frac{Zr}{a}\right) e^{-\frac{Zr}{a}} r \sin \theta \sin \varphi$$

Funciones de onda del tercer nivel (9 orbitales)

$$\Psi_{3s}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{27} \sqrt{\frac{3}{\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^3} L_2^1 \left(\frac{2Zr}{3a}\right) e^{-\frac{Zr}{3a}}$$

$$\Psi_{3p_z}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{54} \sqrt{\frac{2}{\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^5} L_1^3 \left(\frac{2Zr}{3a}\right) e^{-\frac{Zr}{3a}} r \cos \theta$$

$$\Psi_{3p_x}(r, \theta, \varphi) = -\frac{1}{27} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^5} L_1^3 \left(\frac{2Zr}{3a}\right) e^{-\frac{Zr}{3a}} r \sin \theta \cos \varphi$$

$$\Psi_{3p_y}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{27} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^5} L_1^3 \left(\frac{2Zr}{3a}\right) e^{-\frac{Zr}{3a}} r \sin \theta \sin \varphi$$

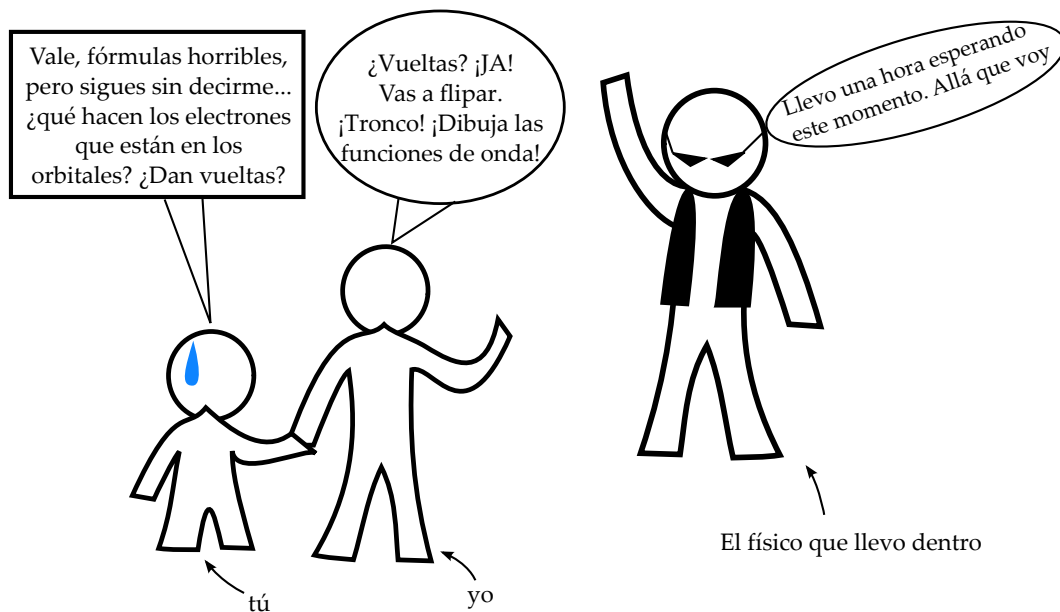
$$\Psi_{3d_{z^2}}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{486} \sqrt{\frac{6}{\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^7} L_0^5 \left(\frac{2Zr}{3a}\right) e^{-\frac{Zr}{3a}} r^2 (3 \cos^2 \theta - 1)$$

$$\Psi_{3d_{xz}}(r, \theta, \varphi) = -\frac{2}{81} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^7} L_0^5 \left(\frac{2Zr}{3a}\right) e^{-\frac{Zr}{3a}} r^2 \sin \theta \cos \theta \cos \varphi$$

$$\Psi_{3d_{yz}}(r, \theta, \varphi) = \frac{2}{81} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^7} L_0^5 \left(\frac{2Zr}{3a}\right) e^{-\frac{Zr}{3a}} r^2 \sin \theta \cos \theta \sin \varphi$$

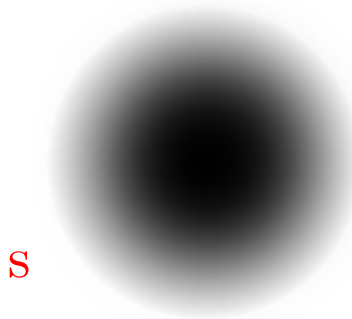
$$\Psi_{3d_{x^2-y^2}}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{81} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^7} L_0^5 \left(\frac{2Zr}{3a}\right) e^{-\frac{Zr}{3a}} r^2 \sin^2 \theta \cos 2\varphi$$

$$\Psi_{3d_{xy}}(r, \theta, \varphi) = -\frac{1}{81} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{Z}{a}\right)^7} L_0^5 \left(\frac{2Zr}{3a}\right) e^{-\frac{Zr}{3a}} r^2 \sin^2 \theta \sin 2\varphi$$



Funciones de onda del primer nivel (1 orbitales)

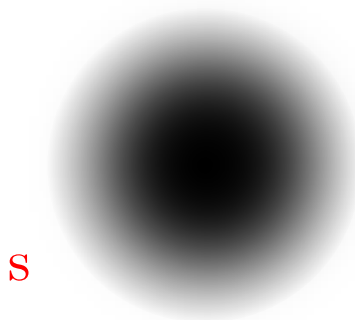
(las zonas más oscuras representan donde es más probable encontrarlo).



- ☐ Dado un electrón en el orbital de la figura, preguntarse *¿dónde está?* no tiene sentido.
- ☐ Curiosidad de regalo:

Funciones de onda del primer nivel (1 orbitales)

(las zonas más oscuras representan donde es más probable encontrarlo).



- ❑ Dado un electrón en el orbital de la figura, preguntarse *¿dónde está?* no tiene sentido.
- ❑ Curiosidad de regalo: Un electrón en este orbital...

¡NO GIRA!

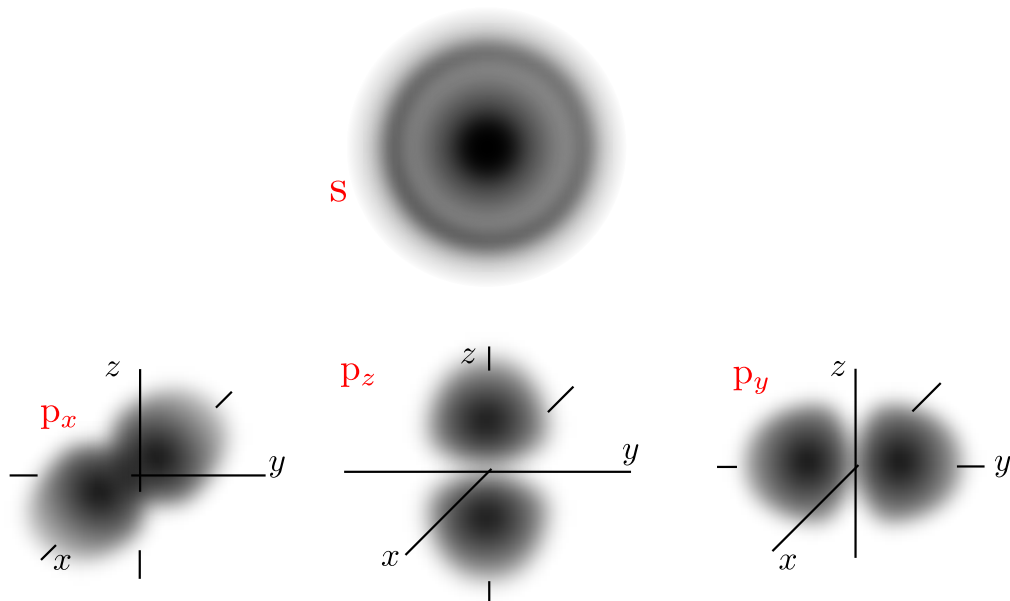
¡La imagen de los electrones dando vueltas que nos enseñan en la escuela se desmorona!

La cantidad de giro es lo que llamamos 'momento angular'. Es cierto que los electrones no giran como lo hace un planeta en su órbita, sino 'cuánticamente' (podrían estar por ejemplo en una superposición de velocidades de giro). Si uno se calcula el momento angular cuántico de un electrón en el orbital de la figura sale cero; de hecho, es cero para todos los orbitales "tipo s" (atento en el resto de diapositivas).

El átomo hidrogenoide. Imágenes de los orbitales

Funciones de onda del segundo nivel (4 orbitales)

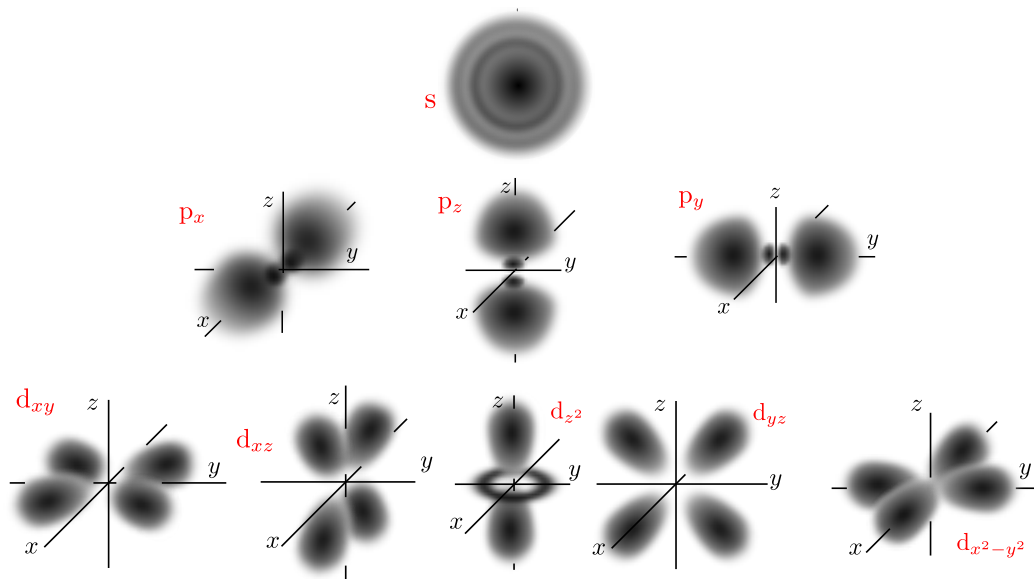
(las zonas más oscuras representan donde es más probable encontrarlo).



❑ Tampoco tiene sentido la pregunta, ¿dónde está? para un electrón en ninguno de estos orbitales.

Funciones de onda del tercer nivel (9 orbitales)

(las zonas más oscuras representan donde es más probable encontrarlo).



❑ ¡Ni para uno en un orbital del tercer nivel, ni de ningún otro nivel!

Mientras no observemos los electrones están DESLOCALIZADOS.

Juega con los orbitales en la web: <https://www.falstad.com/qmatom/>

- El mundo cuántico es sorprendente.

¿Entonces? ¿Qué hemos aprendido?

- ☐ El mundo cuántico es sorprendente.
- ☐ Los sistemas cuánticos pueden tener propiedades cuyos valores no están definidos.

¿Entonces? ¿Qué hemos aprendido?

- ❑ El mundo cuántico es sorprendente.
- ❑ Los sistemas cuánticos pueden tener propiedades cuyos valores no están definidos.
- ❑ No le preguntes a la Mecánica Cuántica cómo estaba el gato antes de observarlo, ¡no te lo dirá!
Solo te dirá su función de onda.

¿Entonces? ¿Qué hemos aprendido?

- ☐ El mundo cuántico es sorprendente.
- ☐ Los sistemas cuánticos pueden tener propiedades cuyos valores no están definidos.
- ☐ No le preguntes a la Mecánica Cuántica cómo estaba el gato antes de observarlo, ¡no te lo dirá!
Solo te dirá su función de onda.

Y recuerda, si alguien te pregunta por los electrones de la corteza de un átomo:

¿Entonces? ¿Qué hemos aprendido?

- ☐ El mundo cuántico es sorprendente.
- ☐ Los sistemas cuánticos pueden tener propiedades cuyos valores no están definidos.
- ☐ No le preguntes a la Mecánica Cuántica cómo estaba el gato antes de observarlo, ¡no te lo dirá! Solo te dirá su función de onda.

Y recuerda, si alguien te pregunta por los electrones de la corteza de un átomo:

- ☐ No dan vueltas alrededor del núcleo (¡hay algunos que no giran!). Se encuentran en orbitales.

¿Entonces? ¿Qué hemos aprendido?

- ❑ El mundo cuántico es sorprendente.
- ❑ Los sistemas cuánticos pueden tener propiedades cuyos valores no están definidos.
- ❑ No le preguntes a la Mecánica Cuántica cómo estaba el gato antes de observarlo, ¡no te lo dirá! Solo te dirá su función de onda.

Y recuerda, si alguien te pregunta por los electrones de la corteza de un átomo:

- ❑ No dan vueltas alrededor del núcleo (¡hay algunos que no giran!). Se encuentran en orbitales.
- ❑ Las imágenes anteriores no son el electrón “desparramado” por el espacio, sino nubes de probabilidad (indican dónde es más probable encontrarlo).

¿Entonces? ¿Qué hemos aprendido?

- ❑ El mundo cuántico es sorprendente.
- ❑ Los sistemas cuánticos pueden tener propiedades cuyos valores no están definidos.
- ❑ No le preguntes a la Mecánica Cuántica cómo estaba el gato antes de observarlo, ¡no te lo dirá! Solo te dirá su función de onda.

Y recuerda, si alguien te pregunta por los electrones de la corteza de un átomo:

- ❑ No dan vueltas alrededor del núcleo (¡hay algunos que no giran!). Se encuentran en orbitales.
- ❑ Las imágenes anteriores no son el electrón “desparramado” por el espacio, sino nubes de probabilidad (indican dónde es más probable encontrarlo).
- ❑ Cuando observemos al electrón lo veremos localizado en una posición *seleccionada por la naturaleza AL AZAR* (con cierta probabilidad, la que indique la función de onda).

¿Entonces? ¿Qué hemos aprendido?

- ❑ El mundo cuántico es sorprendente.
- ❑ Los sistemas cuánticos pueden tener propiedades cuyos valores no están definidos.
- ❑ No le preguntes a la Mecánica Cuántica cómo estaba el gato antes de observarlo, ¡no te lo dirá! Solo te dirá su función de onda.

Y recuerda, si alguien te pregunta por los electrones de la corteza de un átomo:

- ❑ No dan vueltas alrededor del núcleo (¡hay algunos que no giran!). Se encuentran en orbitales.
- ❑ Las imágenes anteriores no son el electrón “desparramado” por el espacio, sino nubes de probabilidad (indican dónde es más probable encontrarlo).
- ❑ Cuando observemos al electrón lo veremos localizado en una posición *seleccionada por la naturaleza AL AZAR* (con cierta probabilidad, la que indique la función de onda).
- ❑ Y lo apasionante es que mientras no miremos

¿Dónde están los electrones?

¿Entonces? ¿Qué hemos aprendido?

- ❑ El mundo cuántico es sorprendente.
- ❑ Los sistemas cuánticos pueden tener propiedades cuyos valores no están definidos.
- ❑ No le preguntes a la Mecánica Cuántica cómo estaba el gato antes de observarlo, ¡no te lo dirá! Solo te dirá su función de onda.

Y recuerda, si alguien te pregunta por los electrones de la corteza de un átomo:

- ❑ No dan vueltas alrededor del núcleo (¡hay algunos que no giran!). Se encuentran en orbitales.
- ❑ Las imágenes anteriores no son el electrón “desparramado” por el espacio, sino nubes de probabilidad (indican dónde es más probable encontrarlo).
- ❑ Cuando observemos al electrón lo veremos localizado en una posición *seleccionada por la naturaleza AL AZAR* (con cierta probabilidad, la que indique la función de onda).
- ❑ Y lo apasionante es que mientras no miremos

¿Dónde están los electrones?

es una pregunta que *no tiene sentido*.

¡Gracias por vuestra atención!



