



**2º de Bachillerato**

**Física**

**Contenidos**

**Física Siglo XX:  
Física Cuántica**

# 1. Introducción

---

Para llegar aquí has estudiado el efecto fotoeléctrico y has podido comprobar que la luz está compuesta de fotones. En este tema vamos a utilizar de nuevo este carácter corpuscular de la luz y, si entonces te pareció extraño pensar en la luz como un chorro de partículas, espera y verás, quedarás alucinado. Aquí te invitamos a profundizar en esta rama de la física realmente sorprendente.

Te presentamos la **física cuántica**, que se podría definir como el conjunto de teorías que describen el comportamiento de las partículas muy pequeñas (más o menos del tamaño de los átomos) o si lo prefieres con una palabra más culta "el microcosmos".

Desde luego estas dimensiones de la naturaleza están fuera de nuestra experiencia cotidiana y, por ello, a veces te podrá parecer que hablamos de algo mágico, irreal o simplemente chino mandarín. Para que te hagas una idea, la física cuántica predice cosas como que una partícula puede atravesar una "pared", o estar en dos lugares a la vez. Sin embargo, al igual que ocurre con la Teoría de la Relatividad, la Física Cuántica no tiene nada de magia, está sólidamente fundamentada y sus resultados comprobados experimentalmente y, si no observamos estos fenómenos en nuestra experiencia diaria, es sencillamente porque sólo se hacen patentes en el dominio de las dimensiones muy pequeñas. Así que no es un problema de que la naturaleza se comporte de forma extraña, sino de que nuestros sentidos no están habituados a "ver" lo que ocurre en esas dimensiones.

Para abrir boca, te propongo que veas un vídeo en el que se simula el extraño comportamiento de un chorro de electrones cuando atraviesan una doble rendija. A lo largo del capítulo iremos justificando ese comportamiento.



[Vídeo](#) de Silthion alojado en Youtube

## 2. Hipótesis de De Broglie

En 1924, [Louis de Broglie](#) sugirió que, del mismo modo que la radiación puede presentar un comportamiento corpuscular (en el estudio del efecto fotoeléctrico, por ejemplo), la materia podría presentar características ondulatorias.

Esta sugerencia era muy atrevida ya que, desde luego, las propiedades ondulatorias de la materia no se observan a simple vista. Sin embargo, De Broglie asignó una frecuencia y una longitud de onda (magnitudes típicamente ondulatorias) a las partículas. Las relaciones asignadas fueron las siguientes:

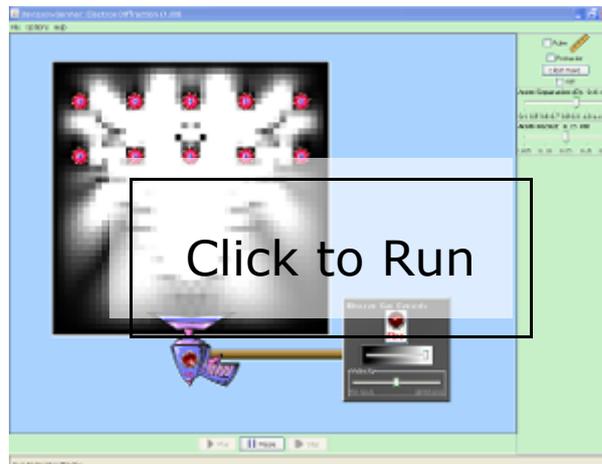
$$f = \frac{E}{h} \quad ; \quad \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

en estas fórmulas,  $h=6.63 \cdot 10^{-34}$  J.s es la constante de Planck,  $p$  es la cantidad de movimiento o momento lineal de la partícula,  $E$  su energía y  $v$  su velocidad.

Como toda teoría física, esta idea, conocida por Hipotesis de De Broglie, carece de valor si no se confirma experimentalmente, y llegó en 1927 de la mano de los físicos americanos Davisson y Germer, los cuales demostraron la naturaleza ondulatoria de los electrones obteniendo unas figuras de difracción (fenómeno típico ondulatorio) al hacer incidir un chorro de electrones contra una superficie de níquel. Los electrones procedían de un filamento caliente y, después de ser acelerados, se dirigían a la superficie de un cristal de níquel.

Puedes encontrar más detalles del experimento en [este enlace](#) pero la idea principal es que los electrones (que son partículas) se comportaron como ondas (difractándose). La hipótesis de De Broglie había sido confirmada, lo que le valió el premio Nobel de Física en 1929.

La siguiente simulación representa el experimento original que demostró que los electrones pueden comportarse como ondas. En ella los electrones se difractan en un cristal de átomos, interfiriéndose entre ellos para crear picos y valles de probabilidad.



Simulación alojada en [phet-Universidad de Colorado](#)  
bajo licencia [Creative Commons](#)

## 2.1. Principio de complementariedad

Si, después de estudiar el efecto fotoeléctrico, te preguntan de qué está hecha la luz, harás muy bien en responder que está formada por un conjunto de "partículas" muy especiales llamadas fotones.

Pero si te hacen la misma pregunta después de estudiar el fenómeno de interferencia o difracción, la respuesta correcta es que la luz es una onda, no un conjunto de partículas. Desde luego, esto vale para cualquier radiación electromagnética, no sólo para la luz.

Pero entonces, ¿qué es la radiación electromagnética?, ¿onda o materia? Visto lo visto no parece que la respuesta sea sencilla. Lo cierto es que la luz tiene un carácter dual, puede comportarse de las dos formas. Todo depende del experimento estudiado.

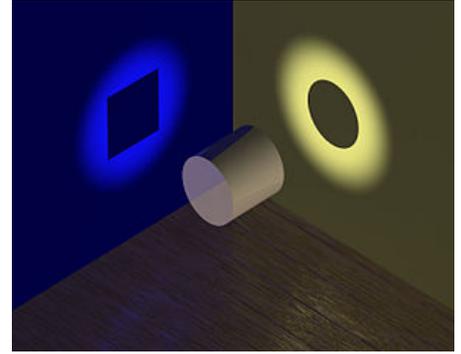


Imagen en Wikimedia Commons de [Jean-Christophe BENOIST](#). GNU

Pues bien, con la hipótesis de De Broglie hemos visto que la materia también tiene este comportamiento. De esta forma se cierra un esquema en el que, tanto la materia como la radiación, pueden comportarse como ondas o partículas, según sea el experimento observado.

El **Principio de complementariedad**, establecido por Bohr establece que un objeto cuántico (como, por ejemplo, un electrón o un fotón) actúa como onda o partícula, pero nunca presentará los dos aspectos en el mismo experimento. Son aspectos complementarios.

En la siguiente tabla te presentamos un esquema-resumen de la dualidad onda partícula, especificando algún ejemplo de experimento en el que cada modelo (materia o radiación) manifiesta un carácter u otro (onda o partícula).

	<b>Corpuscular</b>	<b>Ondulatorio</b>
<b>Materia</b>	Cualquier experiencia corriente entre objetos materiales (por ejemplo, el choque entre dos partículas)	Difracción de electrones (experimento de Davisson y Germer)
<b>Radiación</b>	Efecto fotoeléctrico, efecto Compton	Cualquier experiencia de difracción o interferencia

### 3. Principio de Incertidumbre

---

Una de las consecuencias más llamativas de la dualidad onda-partícula está relacionada con la imposibilidad de conocer con exactitud ciertos pares de magnitudes físicas.

Hoy es sabido que **es imposible medir simultáneamente la posición y velocidad de una partícula con total precisión**. Este resultado se conoce como **Principio de Incertidumbre** y fue enunciado por **Werner Heisenberg** en 1927.

El principio de indeterminación impone unos límites para la información que podemos extraer de un objeto cuántico, y suele expresarse en dos partes:

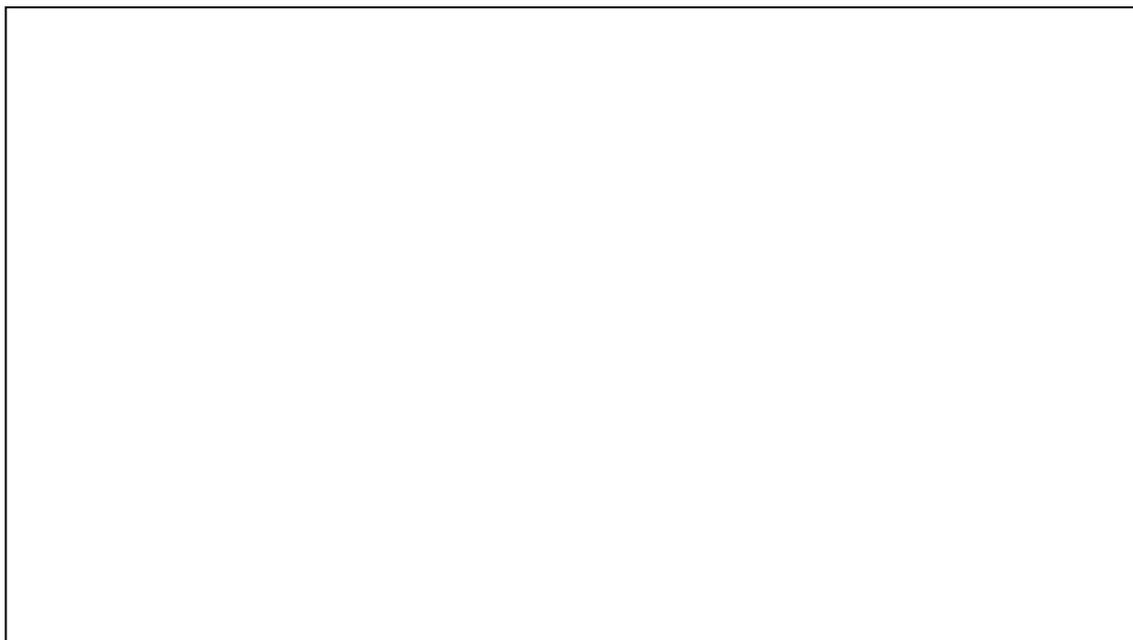
- No es posible determinar con exactitud la posición y el momento lineal de un objeto cuántico. Si llamamos  $\Delta x$  a la indeterminación en la posición, y  $\Delta p$  a la indeterminación en el momento lineal (recuerda que  $p=mv$ ), estas indeterminaciones cumplen la relación:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

- No es posible determinar con exactitud el valor medio de la energía de un objeto cuántico y el tiempo necesario para efectuar la medida. Si llamamos  $\Delta E$  a la indeterminación en la energía, y  $\Delta t$  a la indeterminación en el tiempo, estas indeterminaciones cumplen la relación:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Por extraño que te parezca el principio de incertidumbre debes saber que es una consecuencia lógica del carácter ondulatorio de la materia. Observa este vídeo de 1 minuto que te puede aclarar algo todo esto:



[Vídeo](#) de MinutoDeFisica alojado en Youtube

#### Curiosidad

---

Es importante que te des cuenta que la incertidumbre no se debe a los instrumentos de medida, sino al propio hecho de medir. En física cuántica se entiende que el proceso de medida influye en el resultado que se obtiene.

Si lo piensas un poco caerás en la cuenta de lo extraño de esta última afirmación. Por poner un ejemplo, se podría concluir que cuando observamos la posición de la Luna estamos cambiando su posición! ¿Es esto posible?

En este ejemplo una vez más te topas con un objeto macroscópico en el que los resultados cuánticos son despreciables pero imagina que, en lugar de la Luna, quieres observar la posición de un electrón (este es un experimento imaginario). Para ver el electrón es preciso enviar un fotón que lo "ilumine", el fotón dispersado nos dirá dónde se encontraba el electrón.

Pero el choque del fotón con el electrón modificará la velocidad de este por lo que se tiene que concluir que, si deseas saber dónde se encuentra el electrón y cuál es su velocidad debemos hacerlo "a ciegas". En estas condiciones se puede conocer su velocidad, pero no su posición.

En definitiva, si se ilumina conocerás la posición y no la velocidad, y si no lo haces sabrás la velocidad y no la posición. Esto es precisamente lo que nos dice el principio de incertidumbre.

## 4. Un modelo para las cosas pequeñas

---

Vaya lío, pero ¿realmente se sabe qué diferencias hay entre ondas y partículas? Venga reflexiona un poco. Piénsalo bien, mientras una partícula se puede situar en una región concreta del espacio, una onda está deslocalizada en la región en la que se desplaza, ¿dónde está una ola del mar?. Trasladar este aspecto de las ondas a los objetos materiales es ciertamente un ejercicio mental difícil, a fin de cuentas nadie ve una onda deslocalizada cuando tú o yo observamos un coche moviéndose, o una pelota de tenis, .. o cualquier cosa material que estemos observando.

Y sin embargo, todos estos objetos tienen una onda asociada, que no es captada debido a que su longitud de onda es pequeñísima. La cosa se hace "visible" de nuevo cuando tratamos objetos cuánticos (objetos de dimensiones pequeñísimas).

Verás que el tratamiento ondulatorio de la materia conduce a una interpretación probabilística de las magnitudes físicas que describen su comportamiento. ¿Qué quiere decir esto?, pues por ejemplo que resultará imposible precisar la posición de un objeto cuántico, sólo se tiene un acercamiento por medio de probabilidades de encontrarlo en algún sitio, de forma que se cumple bien el principio de indeterminación.



### Curiosidad

---

No todos los físicos estaban de acuerdo en esta visión probabilística de la naturaleza. Algunos, como Einstein, se oponían abiertamente a esta concepción de la física debatiendo abiertamente con sus colegas sobre esta cuestión.

En relación con esto, en la imagen de abajo se muestra una foto muy popular con todos los físicos más importantes de la época. La foto se tomó en Bruselas con motivo de la celebración de la llamada Conferencia de Solvay. La anécdota de aquel encuentro la protagonizaron las dos figuras de la época: Einstein y Bohr. Cuando ambos discutían sobre el principio de incertidumbre de Heisenberg, el primero hizo su famosa objeción: "Dios no juega a los dados", a lo que Bohr replicó, "Einstein, deja de decirle a Dios lo que debe hacer".

Con todo, debes saber que esta interpretación de la física cuántica funciona a las mil maravillas, y sus resultados se ajustan sorprendentemente bien a los resultados experimentales.



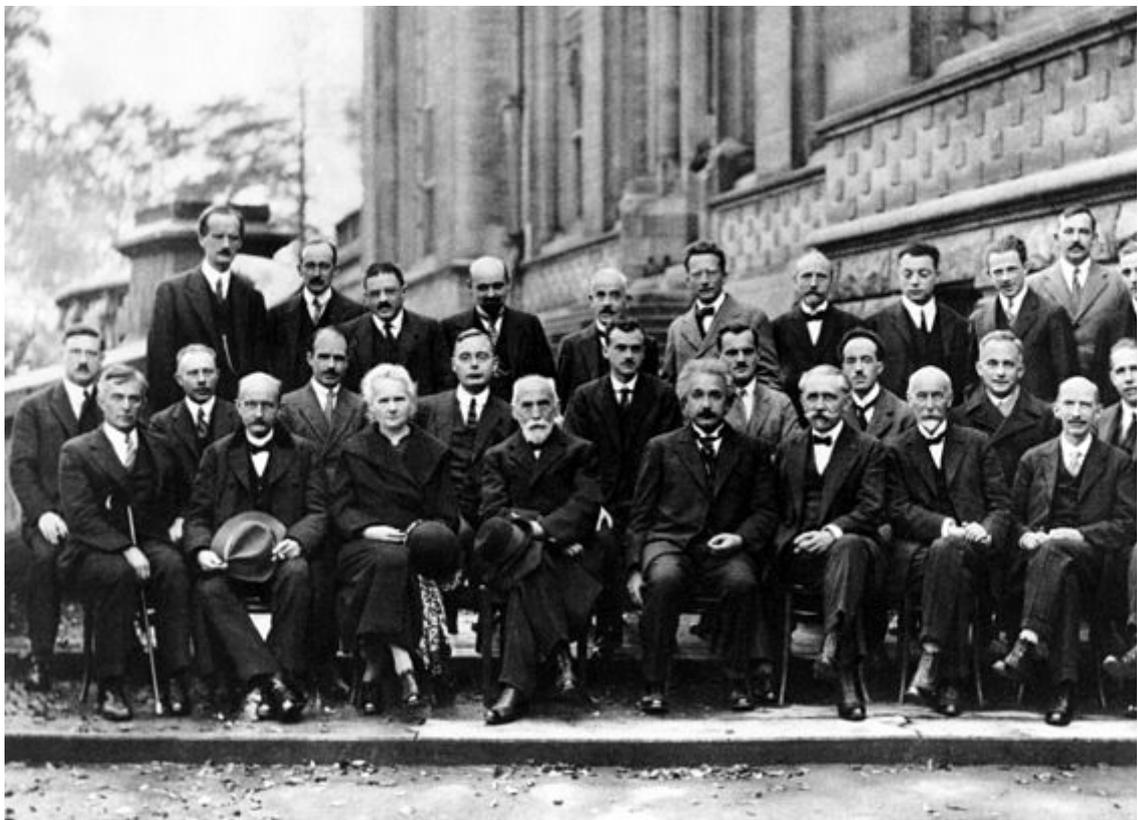


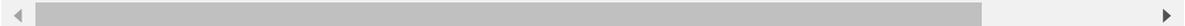
Imagen en Wikimedia Commons de [JdH](#) bajo licencia de [dominio público](#)

Por filas, de arriba abajo:

Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules-Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Howard Fowler, Léon Brillouin,

Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr,

Irving Langmuir, Max Planck, Marie Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles Eugène Guye, Charles Thomson Rees Wilson, Owen Willans Richardson



## 4.1. Ecuación de Schrödinger

En 1926, Schrödinger desarrolló la llamada mecánica cuántica ondulatoria, en la que se describe el comportamiento ondulatorio de la materia. La idea de Schrödinger era la siguiente: puesto que la materia puede comportarse como una onda, debe ser posible encontrar una ecuación que describa su comportamiento, al igual que ocurre con las ondas "convencionales", como la luz o el sonido.

En un trabajo impresionante Schrödinger construyó esta ecuación, cuya forma es:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x,t) \Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$$

Antes de que apagues el ordenador me apresuro a decirte que no es preciso que la aprendas. No estamos interesados en analizarla en profundidad y, mucho menos, en resolverla.

De esta ecuación lo único que deseo destacarte es que sus soluciones son funciones de onda que representamos por  $\Psi(x,t)$  y que, si se conoce  $\Psi(x,t)$ , entonces conocemos todas las características ondulatorias de la partícula que estemos estudiando.

Además, quédate con esto, **el cuadrado de la función de onda,  $|\Psi(x,t)|^2$  representa la probabilidad de encontrar la partícula en una posición  $x$  en un instante  $t$ .**

Bueno, la idea física que se esconde (no mucho) detrás de esta frase es que ya no es posible hablar de las posiciones que ocupa una partícula cualquiera, sino de las zonas del espacio donde hay una gran probabilidad de encontrarla.



Imagen en Wikimedia Commons de [Orgullo Moore](#) bajo licencia de [dominio público](#)

### Curiosidad

En 1927, Erwin Schrödinger diseñó un experimento mental para ilustrar las diferencias entre interacción y medida en el campo de la mecánica cuántica.

La idea consiste en imaginar a un gato metido dentro de una caja que contiene una ampolla de vidrio con un veneno muy volátil y un martillo sujeto sobre la ampolla de forma que, si cae sobre ella, la rompe y se escapa el veneno con lo que el gato moriría. El martillo está conectado a un mecanismo detector de partículas alfa; si llega una partícula alfa el martillo cae rompiendo la ampolla con lo que el gato muere, por el contrario, si no llega no ocurre nada y el gato continúa vivo. Además, la probabilidad de emisión de una partícula alfa es del 50%.

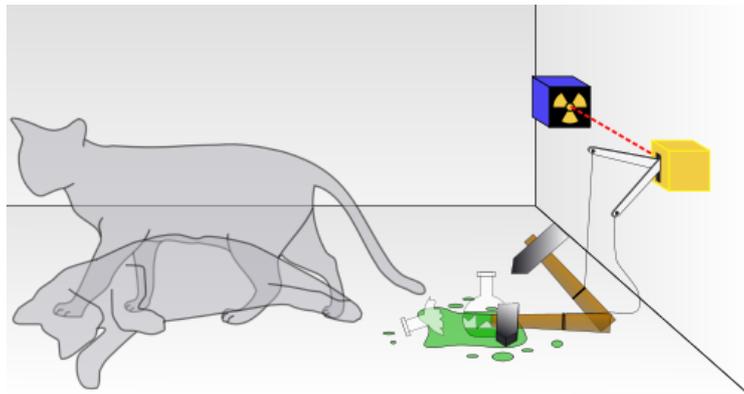


Imagen en Wikimedia Commons de [Dhatfield](#). CC

Aplicando la mecánica cuántica el gato vendrá descrito por una función de onda extremadamente compleja resultado de la superposición de dos estados combinados al cincuenta por ciento: "gato vivo" y "gato muerto". Es decir, formalmente, el gato estaría a la vez vivo y muerto.

La única forma de averiguar qué ha ocurrido con el gato es realizar una medida: abrir la caja y mirar dentro. En unos casos nos encontraremos al gato vivo y en otros muerto. Pero, ¿qué ha ocurrido? Al realizar la medida, el observador interactúa con el sistema y lo altera rompiendo la superposición de estados y el sistema se decanta por uno de sus dos

lo anterior, siempre la superposición de estados y el sistema se describe por uno de sus dos estados posibles.

El sentido común nos indica que el gato no puede estar vivo y muerto a la vez. Pero la mecánica cuántica dice que mientras nadie mire en el interior de la caja el gato se encuentra en una superposición de los dos estados: vivo y muerto.

Esta superposición de estados es una consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la materia y su aplicación a la descripción mecanocuántica de los sistemas físicos, lo que permite explicar el comportamiento de las partículas elementales y de los átomos. La aplicación a sistemas macroscópicos como el gato o, incluso, si así se prefiere, cualquier profesor de física, nos llevaría a la paradoja que nos propone Schrödinger.

Aquí te dejamos un fragmento de un capítulo de la popular serie Big Bang Theory donde se explica este hecho con un tinte de humor. Fíjate bien porque hay un pequeño error, en el fragmento Sheldon afirma que el gato puede estar vivo o muerto en la caja, cuando debería decir vivo **y** muerto a la vez.



[Vídeo](#) alojado por Jorge Sanz Sanfructuoso en Youtube

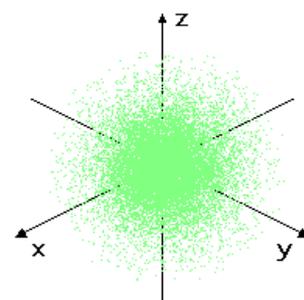
## 4.2. Orbitales atómicos

---

A partir de la ecuación de Schrödinger se obtienen una serie de soluciones para la función de onda  $\Psi(x,t)$  que permiten representar  $|\Psi(x,t)|^2$  y obtener algo parecido a la figura de la derecha, si el electrón se encuentra en su estado fundamental. Para que te hagas una idea, tú podrías obtener una imagen semejante si se pudiera "fotografiar" al electrón en muchos instantes diferentes y posteriormente superponer todas las imágenes obtenidas.

Lo que se ve representado es la región de máxima probabilidad de encontrar el electrón del átomo de hidrógeno en su estado fundamental. A esto se le llama **orbital** y este, en concreto, se llama orbital s.

Así que, básicamente, el modelo cuántico lo que hace es sustituir las órbitas del átomo de Bohr por orbitales atómicos. Todo un éxito, las órbitas permitidas que Bohr tuvo que postular en su modelo atómico aquí aparecen como soluciones de la ecuación de Schrödinger.



Orbital s ( $\ell=0, m_\ell=0$ )

Imagen en Wikimedia Commons de [Iradigalesc](#). CC

El resto de soluciones de la ecuación nos dan otras regiones de probabilidad y, por tanto, otros orbitales. En la siguiente simulación puedes ver las formas que adoptan los posibles orbitales atómicos que se corresponden con soluciones de la ecuación de Schrödinger.

Orbitales atómicos de Jesús Peñas bajo [CC BY NC ND](#)

## 4.3. Números cuánticos

Ya has visto en el apartado anterior que la forma de los orbitales puede ser bastante compleja. Cada uno de estos orbitales (que resultan de resolver la ecuación de Schrödinger) queda caracterizado por tres números, llamadas **números cuánticos**. En resumen, mientras el modelo de Bohr se bastaba con un sólo número ( $n$ ) para describir las órbitas que podía ocupar el electrón, ahora se requieren los siguientes tres números cuánticos:

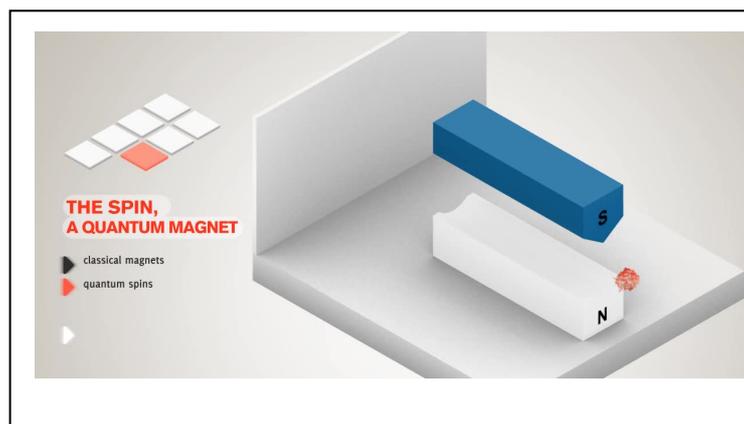
- **Nº cuántico principal ( $n$ ):** puede tomar valores enteros (1, 2, 3...) y coincide con el mismo nº cuántico introducido por Bohr. Está relacionado con la distancia promedio del electrón al núcleo en un determinado orbital y, por tanto, con el tamaño de este e indica el nivel de energía.
- **Nº cuántico secundario ( $\ell$ ):** puede tener todos los valores desde 0 hasta  $n - 1$ . Está relacionado con la forma del orbital e indica la energía dentro de cada nivel. Además debes saber que, según sea el valor de  $\ell$  los orbitales se representan con una letra diferente, esta es la relación

Valor de $\ell$	Orbital
0	s
1	p
2	d
3	f

- **Nº cuántico magnético ( $m_\ell$ ):** puede tener todos los valores desde  $-\ell$  hasta  $+\ell$  pasando por cero. Describe la orientación espacial del orbital e indica el número de orbitales presentes en un subnivel determinado.

Pero además de estos tres números cuánticos, existe un cuarto número que está relacionado con una propiedad de los electrones llamada momento angular intrínseco o **espín**. No vamos a profundizar mucho en él, pero sí te indico que la existencia del espín fue contrastada en un experimento realizado en 1922 por los físicos alemanes O. Stern y W. Gerlach.

En este experimento se hacía pasar átomos neutros por un campo magnético variable y se observaba que el haz de átomos se desdoblaba en dos, correspondientes con las dos posibles orientaciones del electrón debidas a su espín, paralela o antiparalela al campo magnético exterior. Gracias a esto se pueden realizar diagnósticos por medio de resonancias magnéticas nucleares. Lo siguiente es una simulación del experimento de Stern Gerlach.



Simulación de Jubobroff en Wikimedia Commons . CC

Esto hace que en cada uno de los orbitales anteriores puedan alojarse hasta dos electrones, cuya diferencia está en su valor del espín.

- **Nº cuántico de espín  $m_s$ ,** caracteriza este momento angular intrínseco y puede tener sólo los valores  $1/2$  ó  $-1/2$ .

En resumen, el estado de un electrón en el interior de un átomo queda completamente definido si son conocidos los cuatro números cuánticos ( $n$ ,  $\ell$ ,  $m_\ell$ ,  $m_s$ ) de tal forma que, en un átomo, no pueden existir dos electrones con los mismos valores de los cuatro números cuánticos. A este resultado se le conoce con el nombre de **principio de exclusión de Pauli**.

**UN REPASO GENERAL**

*Ejercicio resuelto*

Escribe todos los posibles números cuánticos correspondientes a los orbitales 4d.

**Mostrar retroalimentación**

En los orbitales 4d,  $n=4$  y  $\ell=2$ . La posibilidades para  $m_\ell$  son los números enteros comprendidos entre -2 y 2. Finalmente, cada uno de estos orbitales puede contener dos electrones con valores de  $m_s=1/2$  ó  $-1/2$ . Esto nos da el siguiente grupo de números:

- (4,2,-2,1/2) ; (4,2,-2,-1/2) ; (4,2,-1,1/2) ; (4,2,-1,-1/2) ; (4,2,0,1/2) ; (4,2,0,-1/2) ;  
 ;  
 (4,2,1,1/2) ; (4,2,1,-1/2) ; (4,2,2,1/2) ; (4,2,2,-1/2)

*Para saber más*

**UN ZOO DE PARTÍCULAS. EL MODELO ESTÁNDAR**

Electrones, protones y neutrones no bastan para explicar las interacciones nucleares.

Se debe a los protones y neutrones (el protón está formado por 2 quarks conocidos, el

Cuando se tratan

- Fermión de exclusión
- Bosón de exclusión

Esta clasificación

mass →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0	≈126 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	81.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	1/2	1/2	1/2	±1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

Protones y neutrones están formados a las ya

des grupos:

el principio

principio de

El modelo estándar es una teoría que describe las partículas elementales que componen la materia y las interacciones que se establecen entre ellas. La tabla anterior resume las 17 partículas conocidas de acuerdo con este modelo.

Doce de estas 17 partículas son los fermiones, casi se puede decir que son las partículas de materia y digo casi por si aparece alguna otra, recuerda siempre habrá algo que

descubrir. Esas partículas interaccionan entre sí dando lugar a los fenómenos conocidos del electromagnetismo, la gravedad o las interacciones nucleares fuerte y débil.

Según el modelo estándar cada una de esas interacciones se produce a través del

intercambio de partículas, los bosones. Por ejemplo, el fotón es el responsable de la interacción electromagnética, el gluón de de la interacción fuerte y los bosones Z y W de la interacción débil. Y esto sin mencionar el bosón de Higg (partícula capaz de explicar los orígenes de la masa de otras partículas elementales) o la dificultad de encontrar una explicación para el intercambio de bosones en la interacción gravitatoria.

En definitiva, como ves, todo un zoológico de partículas.

## 5. Aplicaciones de la física cuántica

La física cuántica está confirmada experimentalmente y, hasta el momento, es secundada. Si no fuera por esto, no pasaría de ser un pasatiempo mental o filosófico más o menos interesante.

Pero debes saber que la naturaleza se comporta realmente como predice la física cuántica, y buena prueba de esto es que existen fenómenos frecuentes que utilizan la física cuántica como base de su funcionamiento. En este apartado se te proponen algunas cositas basadas en ella para su conocimiento: la célula fotoeléctrica o la nanoelectrónica. En los siguientes te presentaremos el láser y el microscopio de efecto túnel.

### LA CÉLULA FOTOELÉCTRICA

¿Cuántas veces has pasado por una puerta que se abre o cierra automáticamente? Funcionan porque contienen una célula fotoeléctrica que, como ya imaginas, es un dispositivo basado en el efecto fotoeléctrico. Cuando una radiación alcanza la célula, provoca la emisión de electrones que da lugar a una corriente eléctrica. Esta corriente se utiliza para poner en funcionamiento un circuito más potente que permite realizar efectos mecánicos como, por ejemplo, la apertura de puertas automáticas, el disparo de alarmas etc..

Este mismo efecto se utiliza en la fabricación de **células fotovoltaicas**, su funcionamiento podemos describirlo en varias etapas:

1. Los fotones de luz solar inciden sobre la célula, formada por un semiconductor como el silicio, y son absorbidos por los electrones que se encuentran en la superficie de ésta.
2. La absorción de energía adicional permite a los electrones liberarse de sus átomos. Los electrones se empiezan a mover y el espacio que dejan libre lo ocupa otro electrón de una parte más profunda del semiconductor.
3. El resultado es una acumulación de electrones (negativos) en una parte del semiconductor y una acumulación de huecos (positivos) en la otra parte, lo que origina un voltaje entre ambos lados. Al unir ambos lados con un cable eléctrico se permite que los electrones fluyan de un lado al otro de la lámina, generando una corriente eléctrica.

El siguiente esquema representa este proceso:

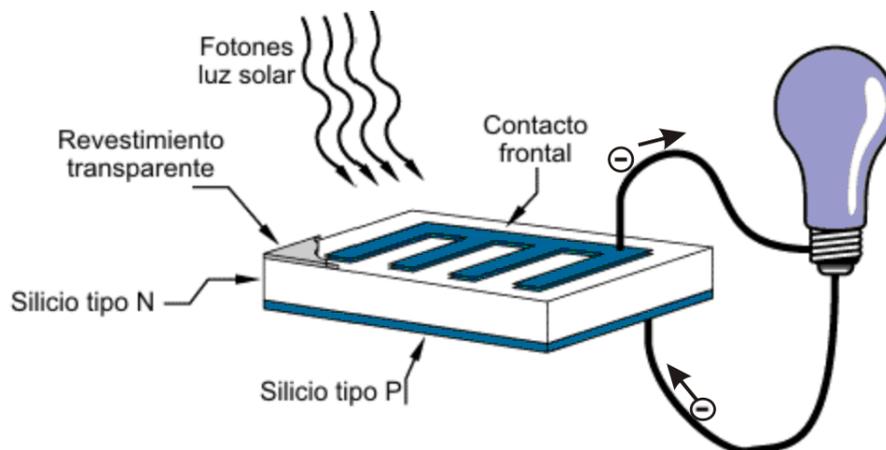


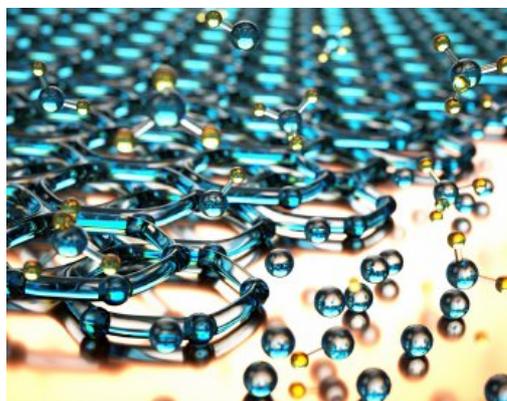
Imagen adaptada en Wikimedia Commons de [Gil Knier](#). Dominio público

### LA NANOELÉTRÓNICA

En la actualidad se está trabajando en componentes electrónicos extremadamente pequeños, cercanos al nivel atómico. ¿Cómo se pueden manipular estos componentes?, esta es la base de la nanoelectrónica (el término nanotecnología se usa normalmente para definir la tecnología de menos de 100 nm de tamaño). Como puedes imaginar, la reducción del tamaño de componentes electrónico hace que, progresivamente, comiencen a aparecer efectos cuánticos interesantes. La idea es sustituir el silicio por materiales como moléculas orgánicas

electroactivas o nanohilos/nanotubos (estructuras que permiten el paso de corriente sin apenas resistencia).

Las posibilidades son enormes, aunque aún están bajo desarrollo y no estarán disponibles en el mercado en un futuro próximo.



[Imagen](#) de Hniarsh en Wikimedia Commons . CC

*Para saber más*

Si estás interesado en la nanotecnología, [este enlace](#) te lleva a una publicación de la FECYT sobre nanociencia y nanotecnología. El documento, interesante y extenso, incluye un capítulo llamado nanoelectrónica: del silicio a las moléculas (página 149) donde puedes ampliar todo esto.

## 5.1. Láser

Seguro que has visto o has manejado alguna vez un láser. Se utiliza con frecuencia en casi todos los campos que se te ocurran: medicina, construcción, espectáculos, .. incluso habrás visto algunos desaprensivos utilizándolo para apuntar a deportistas en plena acción.

La palabra LASER proviene del inglés: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", es decir, luz amplificada por emisión de radiación estimulada. Sus propiedades fundamentales son:

- **Coherencia:** Normalmente, la luz que vemos a diario (procedente del Sol, de una bombilla, etc..) está producida por la emisión, desde los átomos, de fotones de muy diversas frecuencias. En cambio en un láser el conjunto de fotones son idénticos. Esto se consigue porque en el láser los átomos reciben la misma energía y la radiación de cada uno se sincroniza mediante un mecanismo llamado "emisión estimulada".
- **Gran intensidad energética:** La intensidad de un haz de luz se define como la energía que transporta por unidad de superficie y tiempo (potencia por unidad de superficie). En el láser la enorme potencia es muy alta por su direccionalidad. Esto ya lo habrás visto en los punteros láser, donde la energía se concentra en un haz muy estrecho, la energía se reparte en una superficie muy pequeña y esto hace que aumente la intensidad.

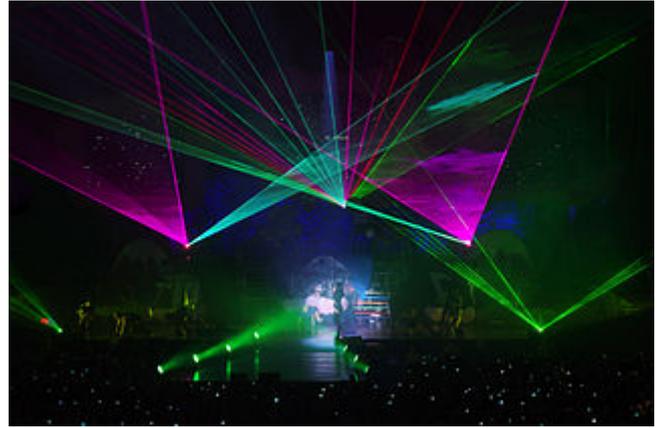
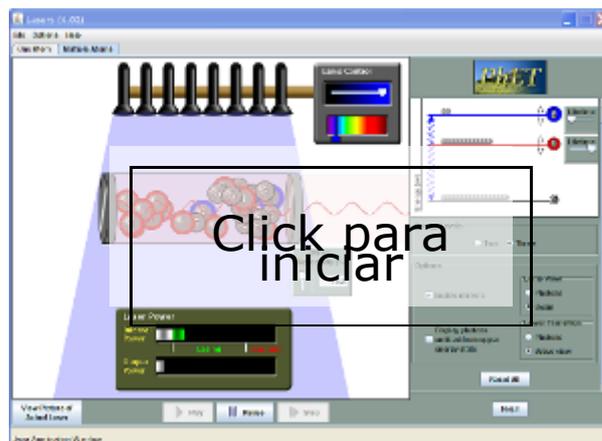


Imagen de mattbuck en Wikimedia Commons . CC

Traemos el láser a este apartado de aplicaciones cuánticas porque su funcionamiento se basa en el modelo corpuscular de la radiación al considerarla como un conjunto de fotones. El mecanismo por el que estos fotones emiten de forma idéntica es bastante complejo, aún así, te lo resumimos en las siguientes etapas:

1. Un conjunto de iones absorbe energía y se promocionan a estados de energía excitados.
2. Los iones pierden energía y pasan a un estado metaestable
3. La emisión de un fotón por un ión provoca una reacción en cadena, lo cual genera un pulso láser.
4. Los fotones se concentran y direccionan mediante un espejo y un semiespejo.

La siguiente simulación (puedes descargarla haciendo clic sobre la imagen) permite crear un láser mediante el bombeo de la cámara con un haz de fotones que podemos manipular. También es posible manejar los estados de energía de los átomos del láser para el control de su producción.



Simulación en [phet-Universidad de Colorado](#). CC

## 5.2. Viendo lo más pequeño. El efecto túnel

De seguro conocerás, si te gustan los cómics, a uno de los superhéroes es **Flash**, y una de sus habilidades es atravesar paredes. Hoy por hoy, se conoce la respuesta a este fenómeno. Pero, por sorprendente que te parezca, si se pudiera resolver la ecuación de Schrödinger para un objeto tan complejo como una persona, encontraríamos una probabilidad no nula (aunque pequeñísima) de encontrar partículas al otro lado.

Como ya habrás imaginado, este efecto sólo es "visible" para objetos cuánticos como, por ejemplo, un electrón. Aquí tienes un vídeo que lo explica en 1 minuto.



[Vídeo](#) de MinutoDeFisica alojado en Youtube

El microscopio de efecto túnel se basa precisamente en esta asombrosa predicción de la física cuántica.

La idea es establecer una elevada diferencia de potencial entre una punta y la superficie que se quiere estudiar. La punta se va desplazando sobre la superficie, sin tocarla, a una distancia de 1 nm (recuerda,  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ). Puesto que entre la punta y la superficie hay espacio vacío, ningún electrón debería pasar de la punta a la superficie. Sin embargo, algunos de ellos lo hacen por efecto túnel, estableciéndose una corriente cuya intensidad depende de la distancia entre la punta y la superficie.

El resultado es que el microscopio "dibuja" la superficie como consecuencia de las intensidades que va registrando. En el dibujo de la derecha puedes ver un esquema de este proceso, y abajo tienes una animación que simula el funcionamiento de este microscopio.

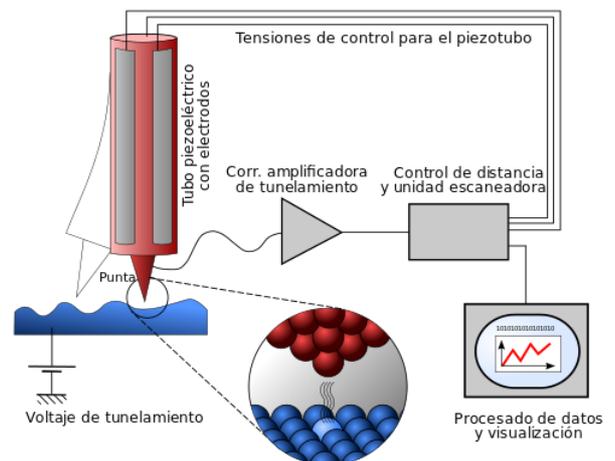
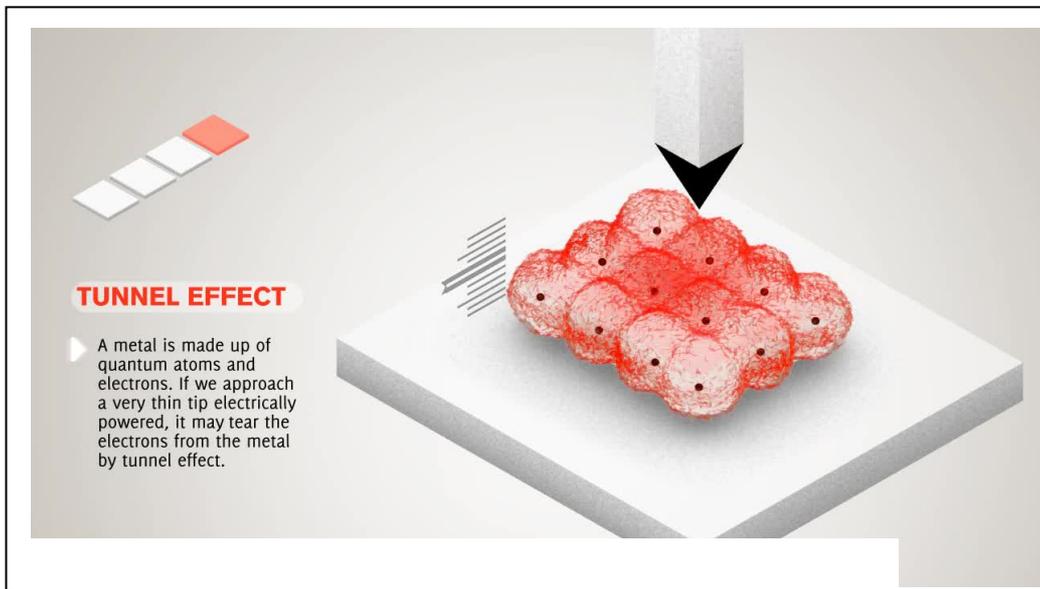


Imagen de Michael Schmid and Grzegorz Pietrzak en Wikimedia Commons. [cc](#)



[Simulación](#) de Jubobroff en Wikimedia Commons. [CC](#)

## 6. Especial PEvAU

### Ejercicio resuelto

Razone las respuestas a las siguientes cuestiones: a) ¿Puede conocerse con precisión la posición y la velocidad de un electrón? b) ¿Por qué el principio de incertidumbre carece de interés en el mundo macroscópico?

#### Mostrar retroalimentación

a) A la primera pregunta debemos contestar que no se pueden conocer ambas con precisión absoluta. Si tuviéramos la certeza absoluta en la posición ( $\Delta x=0$ ), desconoceríamos completamente su momento lineal ( $\Delta p \rightarrow \infty$ ) y viceversa. Esta es la única solución posible para que se cumpla la ecuación:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

b) La razón se encuentra en el valor pequeñísimo de la constante de Planck. Una incertidumbre del orden de  $10^{-34}$  es inapreciable en el mundo macroscópico.

La velocidad de un neutrón es de  $10^4$  m/s con una precisión del 0,0005 %. Hallar el error a la hora de determinar la posición de la partícula. Masa del neutrón =  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg ;  $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$  J·s

#### Mostrar retroalimentación

La precisión de la velocidad puede expresarse de la siguiente forma:

$$\Delta v = \frac{0.0005}{100} 10^4 = 0.05 \text{ m/s}$$

La incertidumbre en la medida de la posición vendrá dada por:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \rightarrow \Delta x \geq \frac{h}{4\pi \cdot m \Delta v} = \frac{6.6 \cdot 10^{-34}}{4\pi \cdot 1.67 \cdot 10^{-27} \cdot 0.05} = 6.29 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

### Ejercicio resuelto

Un protón se acelera desde el reposo mediante una diferencia de potencial de 50 KV.  
 $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J s ;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C ;  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg ;  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$  kg

a) Haga un análisis energético del problema y calcule la longitud de onda de De Broglie asociada a la partícula.

#### Mostrar retroalimentación

Puesto que la fuerza que actúa sobre el protón (la fuerza electrostática) es conservativa, podemos asegurar que su energía mecánica permanece constante. Esto quiere decir que la pérdida de energía potencial es igual al aumento de energía cinética:

$$-\Delta E_p = \Delta E_c$$

Teniendo en cuenta la definición de energía cinética y la relación entre energía cinética y la diferencia de potencial, podemos calcular la velocidad

$$-q\Delta V = \frac{1}{2}mv^2 \longrightarrow v = \sqrt{\frac{-2q\Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{-2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot (-5 \cdot 10^4)}{1.7 \cdot 10^{-27}}} = 3.1 \cdot 10^6 \text{ m/s} \quad (*)$$

La longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = 1.25 \cdot 10^{-13} \text{ m}$$

(\*): Es frecuente que en el enunciado del ejercicio aparezca la frase: una carga ... se acelera debido a una diferencia de potencial. Recuerda que un protón (o cualquier carga positiva) en reposo en un campo eléctrico se mueve siempre hacia potenciales decrecientes, por lo que la ddp que debemos escribir es -50 KV en lugar de 50 KV

b) ¿Qué diferencia cabría esperar si en lugar de un protón la partícula acelerada fuera un electrón?

#### **Mostrar retroalimentación**

En el caso de un electrón la velocidad sería:

$$-q\Delta V = \frac{1}{2}mv^2 \longrightarrow v = \sqrt{\frac{-2q\Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{-2 \cdot (-1.6) \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^4}{9.1 \cdot 10^{-31}}} = 1.3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Y la longitud de onda asociada:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = 5.58 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

# Resumen

---

## Importante

Louis de Broglie sugirió que, del mismo modo que la radiación puede presentar un comportamiento corpuscular (en el estudio del efecto fotoeléctrico, por ejemplo), la materia podría presentar características ondulatorias.

De Broglie asignó una frecuencia y una longitud de onda a las partículas

$$f = \frac{E}{h} ; \quad \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$h=6.63 \cdot 10^{-34}$  J.s es la constante de Planck,  $p$  es el momento lineal de la partícula,  $E$  su energía y  $v$  su velocidad.

## Importante

El **Principio de complementariedad**, establecido por Bohr, establece que un objeto cuántico (como, por ejemplo, un electrón o un fotón) actúa como onda o partícula, pero nunca presentará los dos aspectos en el mismo experimento. Son aspectos complementarios.

## Importante

**Es imposible medir simultáneamente la posición y velocidad de una partícula con total precisión.** Este resultado se conoce como **Principio de Incertidumbre**.

Suele expresarse en dos partes:

- No es posible determinar con exactitud la posición y el momento lineal de un objeto cuántico. Si llamamos  $\Delta x$  a la indeterminación en la posición, y  $\Delta p$  a la indeterminación en el momento lineal, estas indeterminaciones cumplen la relación:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

- No es posible determinar con exactitud la energía de un objeto cuántico y el tiempo necesario para efectuar la medida. Si llamamos  $\Delta E$  a la indeterminación en la energía, y  $\Delta t$  a la indeterminación en el tiempo, estas indeterminaciones cumplen la relación:

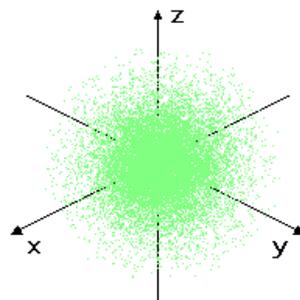
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

## Importante

Schrödinger desarrolló la llamada mecánica cuántica ondulatoria, en la que se describe el comportamiento ondulatorio de la materia. La idea de Schrödinger era la siguiente: puesto que la materia puede comportarse como una onda, debe ser posible encontrar una ecuación que describa su comportamiento, al igual que ocurre con las ondas "convencionales", como la luz o el sonido.

Llega a una ecuación para la que sus soluciones son funciones de onda que representamos por  $\Psi(x,t)$  y que, si se conoce  $\Psi(x,t)$ , entonces conocemos todas las características ondulatorias de la partícula que estemos estudiando.

Además, **el cuadrado de la función de onda,  $|\Psi(x,t)|^2$  representa la probabilidad de encontrar la partícula en una posición  $x$  en un instante  $t$ .** La representación de  $|\Psi(x,t)|^2$  es:



Orbital s ( $\ell=0, m_\ell=0$ )

Lo que se ve representado es la región de máxima probabilidad de encontrar el electrón del átomo de hidrógeno en su estado fundamental. A esto se le llama **orbital** y este, en concreto, se llama orbital s.

Así que, básicamente, el modelo cuántico lo que hace es sustituir las órbitas del átomo de Bohr por orbitales atómicos. Todo un éxito, las órbitas permitidas que Bohr tuvo que postular en su modelo atómico aquí aparecen como soluciones de la ecuación de Schrödinger.

## Importante

Cada uno de estos orbitales, resultados de la ecuación de Schrödinger, queda caracterizado por tres números, llamadas **números cuánticos**:

- **Nº cuántico principal (n)**: puede tomar valores enteros (1, 2, 3...). Está relacionado con la distancia promedio del electrón al núcleo en un determinado orbital y, por tanto, con el tamaño de este e indica el nivel de energía.
- **Nº cuántico secundario ( $\ell$ )**: puede tener todos los valores desde 0 hasta  $n - 1$ . Está relacionado con la forma del orbital e indica la energía dentro de cada nivel. Además, según sea el valor de  $\ell$  los orbitales se representan con una letra diferente

Además, según sea el valor de  $\ell$  los orbitales se representan con una letra diferente, esta es la relación

Valor de $\ell$	Orbital
0	s
1	p
2	d
3	f

● **Nº cuántico magnético ( $m_\ell$ ):** puede tener todos los valores desde  $-\ell$  hasta  $+\ell$  pasando por cero. Describe la orientación espacial del orbital e indica el número de orbitales presentes en un subnivel determinado.

Pero además de estos tres números cuánticos, existe un cuarto número que está relacionado con el momento angular intrínseco o **espín**.

## **AVISO DEL SERVIDOR**

**Por motivos de seguridad esta página web solo está accesible mediante acceso seguro (https):**

**[https://www.juntadeandalucia.es/Aviso\\_Legal\\_Andalucia\\_v04.htm](https://www.juntadeandalucia.es/Aviso_Legal_Andalucia_v04.htm)**

**Por favor, actualice sus marcadores. Gracias.**

# Imprimible

---

Descargar imprimible