

Mecánica cuántica

Presentación de la unidad

Afirma el premio Nóbel Murray-Gellman: ***"Hay una diferencia mayor entre un hombre que sabe Mecánica Cuántica y otro que no, que entre un ser humano que no sabe Mecánica Cuántica y los otros grandes simios"***.

Es posible que sentencia tan radical sea algo excesiva, sin embargo es muy ilustrativa sobre la importancia de esta teoría, base teórica de gran parte de los adelantos que nos rodean y auténtica revolución de la teoría del conocimiento.

En esta unidad nos proponemos que puedas intuir algo de su importancia para la teoría física y de su carácter innovador.

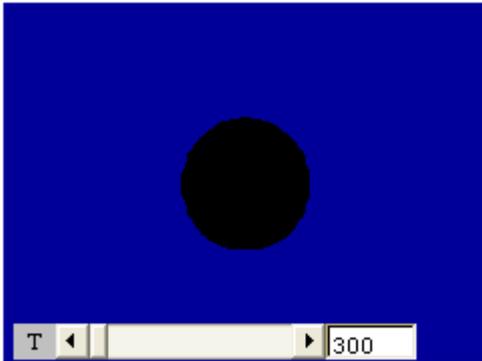
Si pulsas el botón avanzar podrás ver los objetivos concretos que nos proponemos.

Objetivos

- Comprender los fundamentos de la dualidad onda corpúsculo de la luz.
- Comprender la insuficiencia del modelo clásico del átomo.
- Comprender la dualidad onda corpúsculo de las partículas materiales y percibir la influencia de esta dualidad sobre nuestro concepto de partícula material
- Saber aplicar la hipótesis de **De Broglie** y el principio de indeterminación de **Heisenberg** en casos muy sencillos.
- Comprender el significado de medida en Mecánica Cuántica
- Describir el movimiento de los electrones en el átomo como partículas cuánticas.

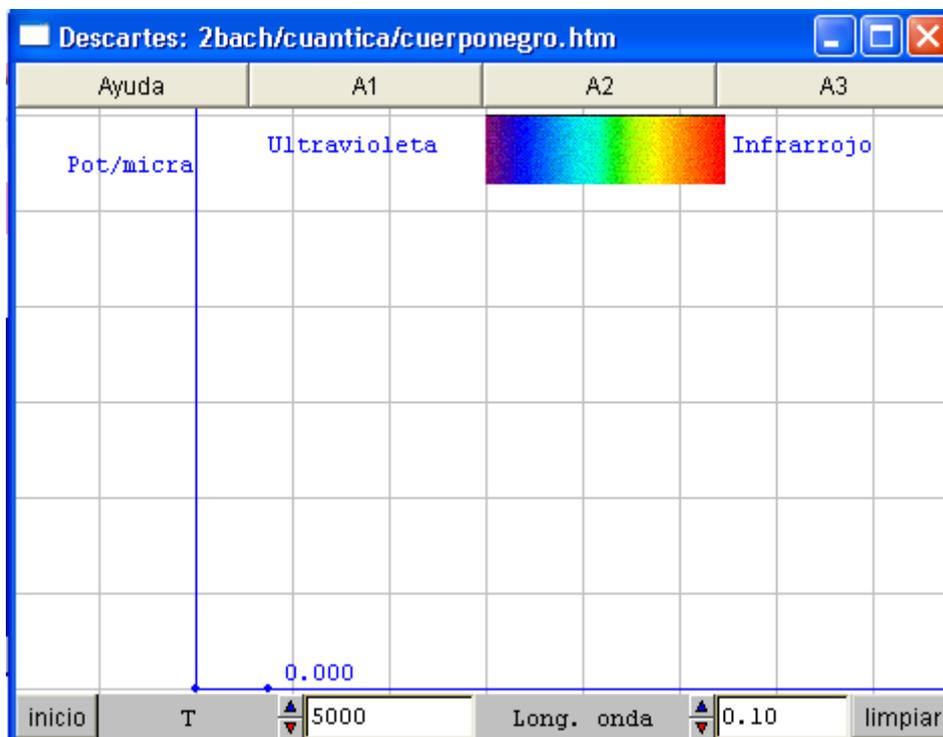
La luz como partícula

Radiación del cuerpo negro



En Física, un cuerpo negro es cualquier cuerpo capaz de absorber y emitir radiaciones electromagnéticas de todas las longitudes de onda. Esto no significa realmente que el cuerpo sea negro. En la figura adjunta, podemos comprobar cómo, al calentarlo, el cuerpo negro puede adquirir diferentes coloraciones.

Cuando Planck estudió la emisión de radiación del cuerpo negro, no tuvo más remedio para explicar estas leyes (estúdialas [aquí](#)), que admitir que la radiación estaba formada por paquetes discretos, cada uno con una energía $E=h \cdot f$ donde f es la frecuencia de la radiación y h es la llamada constante de Planck.



A1:

El área comprendida entre la representación gráfica y el eje X representa la energía total emitida en todas las ondas.

Haz la representación para $T=7000\text{ K}$ y $T=10000\text{ K}$.
¿Se puede decir que la energía radiada sea proporcional a la Temperatura?
Investiga en tu libro de texto la verdadera relación entre la energía total emitida y la temperatura del cuerpo negro.

A2:

Haz la representación completa para las temperaturas de 6000, 7000, 8000, 9000 y 10000 Kelvin.

En cada caso anota la longitud de onda a la que se emite más energía.

Divide en cada caso la temperatura por esa longitud de onda de máxima energía. ¿Qué observas?

Acabas de descubrir la ley de Wien.

A3:

Los cuerpos negros radian energía dependiendo de su temperatura.

Observa que un cuerpo negro a 6000 k como el Sol, ya emite luz en la zona visible del espectro.

Para hacerlo haz $T=6000$ y recorre toda la escala de longitudes de onda.

Comprueba como el máximo está en la zona azul.

El efecto fotoeléctrico

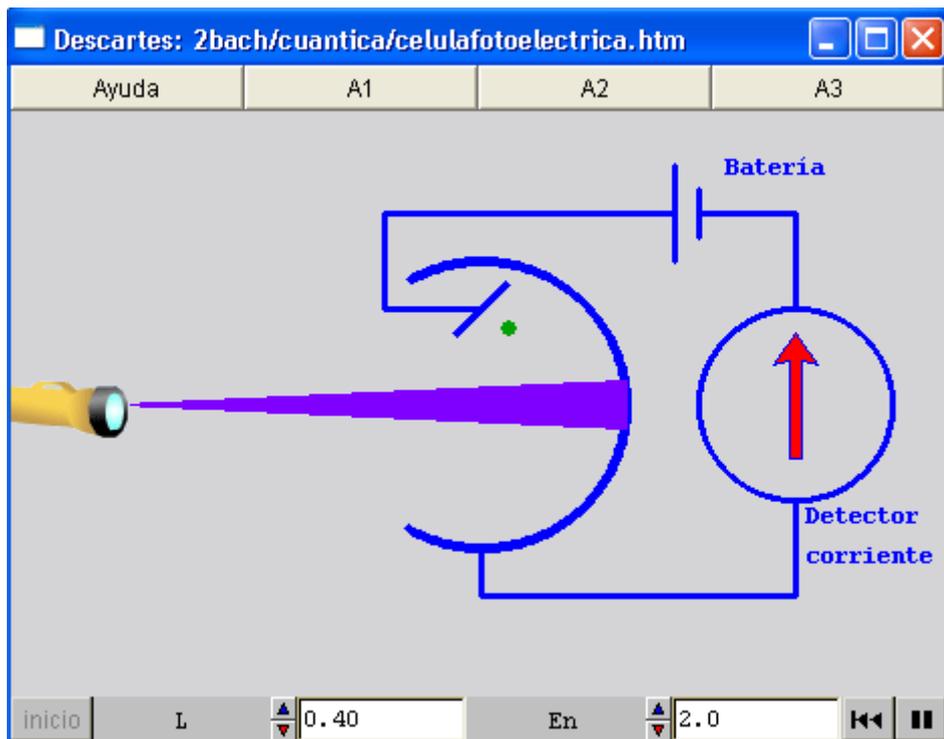


Al lado tienes una célula fotoeléctrica. Seguro que puedes citar multitud de aparatos que utilizan este convertidor de energía luminosa en energía eléctrica. Su descubrimiento reveló un comportamiento extraño que no podía explicarse con la teoría clásica de la luz.

Puedes estudiar este efecto pulsando [célula](#). Este fenómeno sólo pudo ser explicado por **Einstein** suponiendo que la luz no se portaba como una onda al ser absorbida por el metal sino como una partícula.

Esta partícula, el **fotón**, tiene una energía $E=h\cdot f$ donde h es la constante de **Planck** y f es la frecuencia de la luz empleada.

De esta forma una luz muy intensa significará una luz integrada por muchos fotones, en vez de una onda muy grande.



A1:

Pulsa el botón de animación.

Observa que después que llega el haz de luz al metal de la célula, salta un electrón.

Explica por qué el galvanómetro de la derecha registra después paso de la corriente.

A2:

Comprueba, variando la longitud de onda, si hay algún tipo de luz que no puede producir el efecto fotoeléctrico. ¿Qué consecuencia podrías extraer sobre ese tipo de luz?

A3:

Vete probando con todos los valores posibles de energía de ionización y anota en cada caso la longitud de onda máxima que produce el efecto fotoeléctrico. ¿Qué podrías deducir respecto a los fotones de cada longitud de onda?

Conclusiones sobre la naturaleza corpuscular de la luz

Radiación del cuerpo negro

Un cuerpo negro emite una cantidad de energía radiante que es función de su temperatura, como también lo es la frecuencia en la que se emite un máximo de energía.

Las leyes del cuerpo negro fueron interpretadas por **Planck** suponiendo que la luz, cuando es emitida por un cuerpo no se comporta como una onda sino como una **partícula, de energía $E=h\cdot f$**

Efecto fotoeléctrico

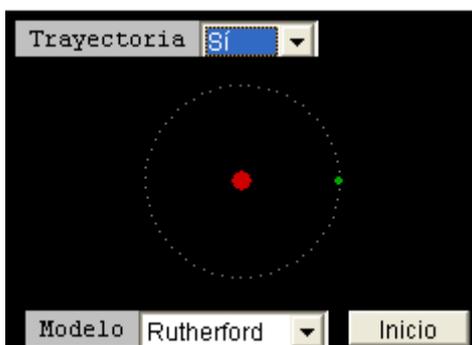
La luz es capaz de arrancar, a partir de determinada frecuencia propia de cada metal, electrones de éste, independientemente de la intensidad luminosa.

Einstein interpretó el efecto fotoeléctrico suponiendo también que la luz estaba integrada por **partículas (fotones) de energía $E=h\cdot f$**

Podemos concluir que **la luz se comporta como una onda en su propagación, pero como una partícula cuando es absorbida o emitida.**

Defectos del modelo clásico de átomo

La inestabilidad del átomo de Rutherford

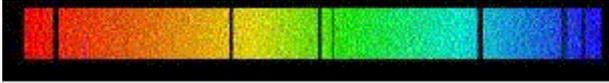


El modelo atómico de **Rutherford**, con los electrones moviéndose en órbitas alrededor del núcleo atómico no era satisfactorio desde el punto de vista electromagnético.

Según **Maxwell**, cualquier partícula cargada con movimiento acelerado emite energía en forma de radiación.

En la figura adjunta elige la opción Trayectoria-Sí y el modelo de Maxwell. Como ves **el electrón debería caer hacia el núcleo**. ¿Cómo es posible que esto no ocurra? Esta pregunta no tiene contestación en la física clásica.

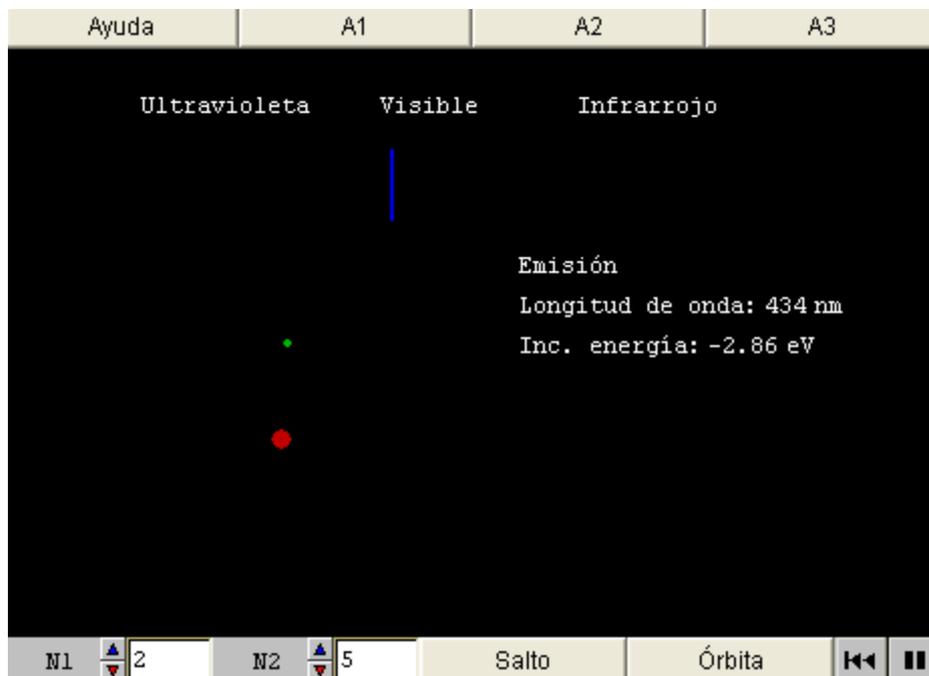
El enigma del átomo de Bohr



Al estudiar el espectro del átomo de hidrógeno, Bohr llegó a las siguientes conclusiones:

- **Cuando el electrón permanece en su órbita el electrón no emite energía.** (¿Por qué es así? Bohr no lo puede explicar)
- **Sólo son posibles órbitas en que el momento angular del electrón es múltiplo entero de h .** (¿Por qué? Otra pregunta sin respuesta)
- **Cuando el electrón salta de un nivel a otro emite o absorbe la diferencia de energía en forma de un fotón.**

Pulsa [avanzar](#) para simular el modelo atómico de Bohr.



A1:

Haz $N1=1$ y $N2=2$ y pulsa salto. Anota la longitud de onda y el incremento de energía del fotón absorbido./n. Vete haciendo $N2 = 2,3$.etc. Anotando siempre los datos de la luz correspondiente./n. Cuando un electrón salta hacia fuera lo hace a expensas de capturar un fotón con la energía del salto./n/n

A2:

Haz $N_2=6$ y $N_1=1$ y pulsa salto. Anota la longitud de onda y el incremento de energía del fotón emitido. Vete haciendo $N_1=5,4$..etc. Anotando siempre los datos de la luz correspondiente. Cuando un electrón salta hacia dentro lo hace emitiendo un fotón con la energía del salto. Compara los datos con los obtenidos en la actividad 1. ¿Qué conclusión obtienes?

A3:

Haz $N_1=2$ y $N_2=3$ y pulsa salto. ¿Qué obtienes de particular, comparando con los casos anteriores? Observa lo que pasa haciendo $N_2=4, 5$ y 6 . Prueba también los saltos al revés. Observarás que los saltos desde o hacia el nivel 2 son los únicos que, por casualidad, corresponden al espectro visible. Esta serie de rayas visibles se conoce como serie de Balmer.

Conclusiones sobre el modelo clásico del átomo

El problema del modelo de Rutherford

Si el electrón gira en órbitas alrededor del núcleo, debe, según la teoría electromagnética, perder energía y caer hacia el núcleo.

El problema del modelo de Bohr.

Los postulados de Bohr describen bien el átomo de hidrógeno:

- **Cuando el electrón permanece en su órbita el electrón no emite energía.**
- **Sólo son posibles órbitas en que el momento angular del electrón es múltiplo entero de h .**
- **Cuando el electrón salta de un nivel a otro emite o absorbe la diferencia de energía en forma de un fotón.**

Sin embargo, no responden al problema de la estabilidad del átomo y además introduce otra pregunta: ¿Por qué sólo son posibles ciertas órbitas?

Carácter ondulatorio de las partículas elementales

La idea de De Broglie



A De Broglie, aficionado a la música, que los electrones del átomo sólo pudieran tener órbitas relacionadas con un número entero, le recordaba la existencia de los armónicos en un instrumento de cuerda.

Conociendo también la doble naturaleza corpuscular-ondulatoria de la luz, postuló que las partículas atómicas poseen también esta doble naturaleza.

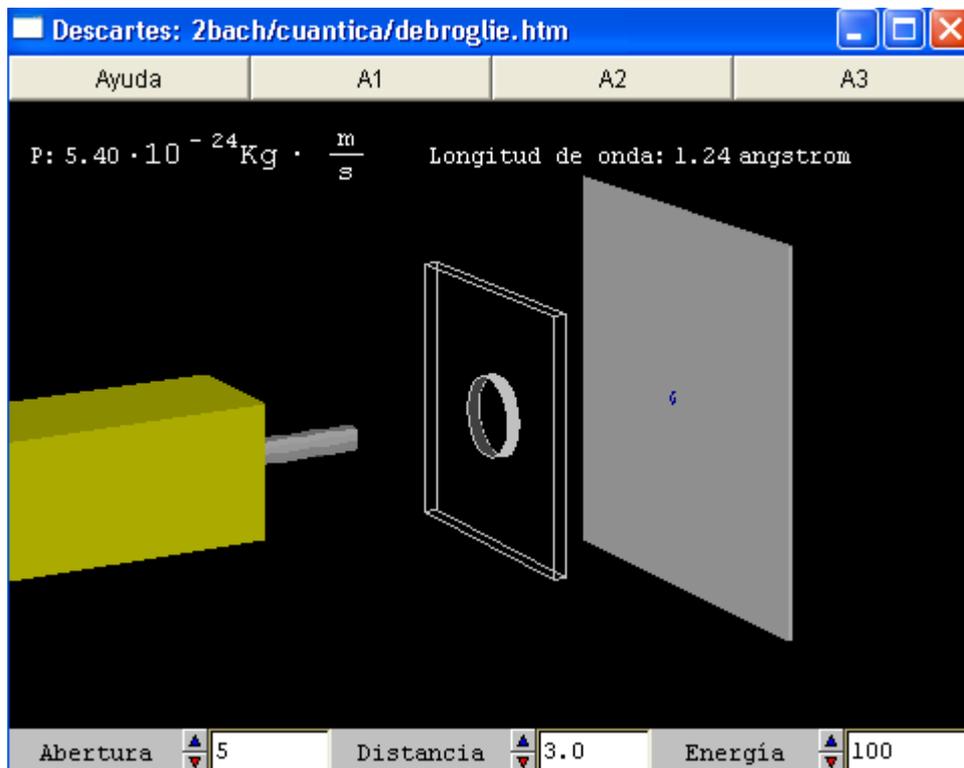
De esta forma, cada partícula tendría una longitud de onda dada

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

por: p Donde h es la constante de Planck y $p=m \cdot v$ es el momento lineal.

En [De Broglie](#) puedes repetir una de las célebres comprobaciones de esta hipótesis: la difracción de un haz de electrones al atravesar los intersticios atómicos de un cristal.

[De Broglie](#)



A1:

Varía la distancia y la abertura hasta obtener las mejores condiciones de visión.

Explica por que tales valores deben favorecer la visión de la difracción.

A2:

Con las mejores condiciones obtenidas en la actividad anterior varía ahora la energía de los electrones.

¿Cómo influye en la observación del fenómeno?

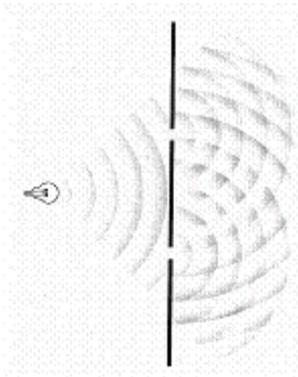
¿Cómo lo interpretas?

A3:

Toma cinco valores diferentes de la energía y anótalos en tu cuaderno, junto con los valores del momento y la longitud de onda.

Trata de buscar entre dos de estas magnitudes una relación de proporción inversa. ¿Con qué principio teórico concuerdan tus resultados?

Conducta peculiar de las partículas cuánticas

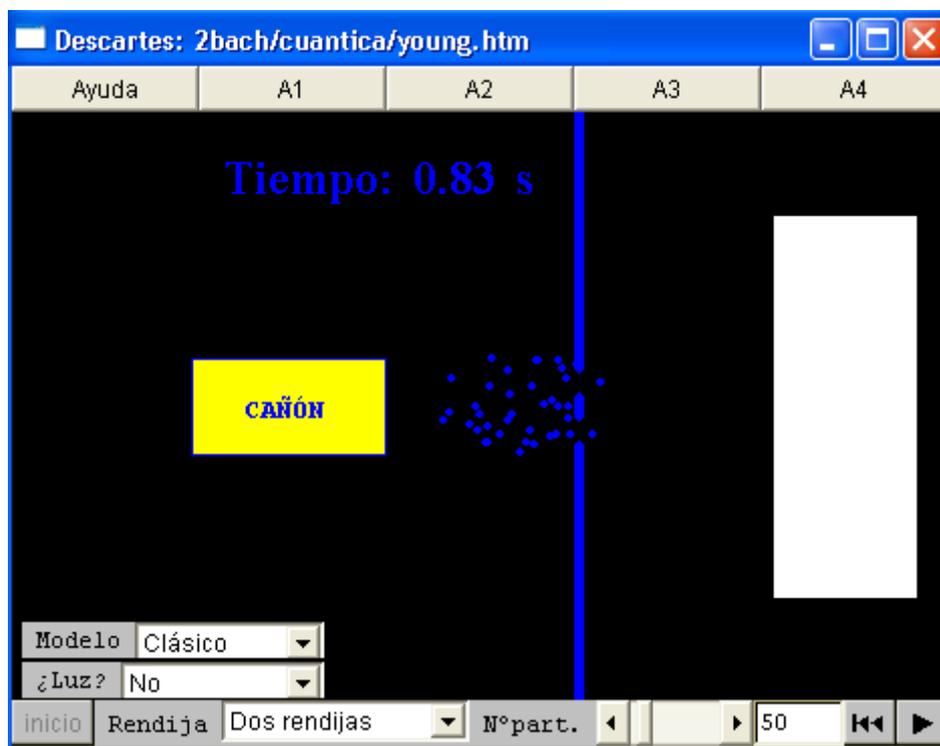


Es fácil recordar los fenómenos de difracción e interferencia que se producen cuando un fenómeno ondulatorio atraviesa un par de rendijas como en la figura.

Cuando el fenómeno ondulatorio es la onda asociada a una partícula subatómica ¿tiene sentido hablar de interferencia de la partícula consigo misma?

Para poder responder preguntas como esta es muy útil la simulación [Interferencia](#) donde puedes estudiar el comportamiento de un haz de partículas al pasar por dos rendijas.

Interferencia



A1:

Adopta el modelo clásico y dispara. Observa la distribución de las partículas en la pantalla. Prueba con otros valores del nº de partículas. Prueba también abriendo las rendijas una a una. ¿qué conclusiones obtienes?

A2:

Elige el modelo cuántico. Repite la experiencia anterior. Compara los resultados. ¿A qué se deben las diferencias?

A3:

Con el control Luz=Sí una luz intensa, de onda muy corta, inunda la escena. Los fotones, al reflejarse en el haz de partículas nos permiten verlas. ¿qué ocurre en este caso si elegimos el modelo cuántico? ¿Qué conclusiones obtienes?

A4:

Reduce el haz a una sola partícula y elige el modelo cuántico. Cierra una rendija.

Repite el lanzamiento varias veces (en algunas ocasiones no se acertará a la abertura). Abre ahora las dos rendijas y vuelve a efectuar varios lanzamientos. ¿Qué diferencia ves entre que existan una o dos aberturas? ¿Cómo es posible que, si la partícula la partícula pasa por una de las dos aberturas, se

La función de onda



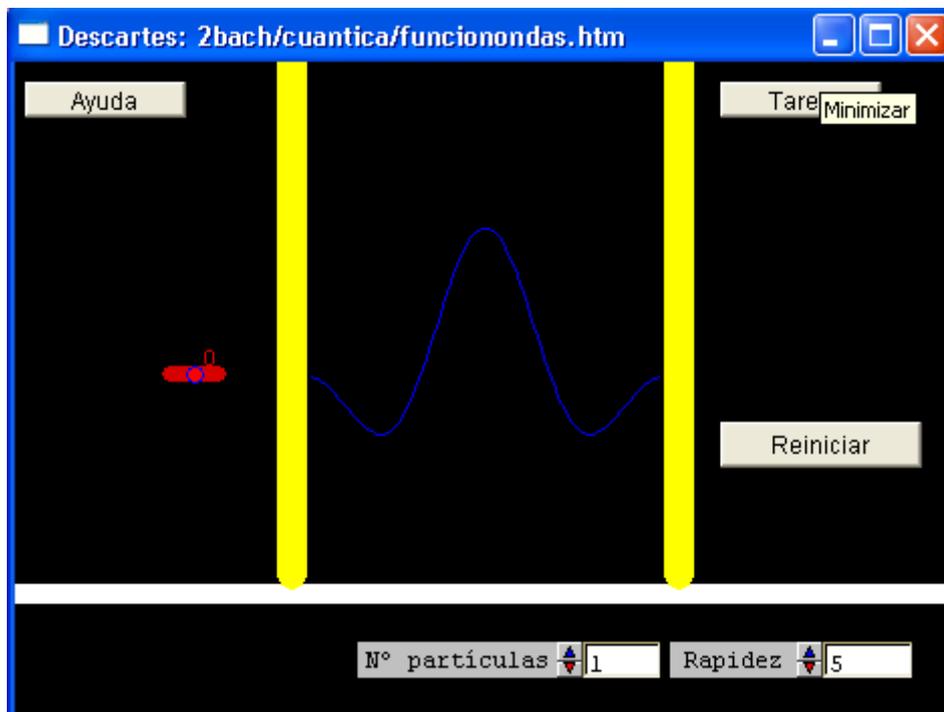
Las olas marinas transportan vibraciones de las partículas de agua, las ondas de sonido llevan variaciones de la presión del aire, las ondas electromagnéticas transportan variaciones de la intensidad eléctrica y magnética...Pero, **¿qué transportan las ondas asociadas a una partícula?**

La verdad es que no tenemos una respuesta clara a esta pregunta. Sólo sabemos que hay una función matemática asociada a la partícula que se porta como las funciones de los otros fenómenos ondulatorios.

La llamamos **función de onda** y de ella dependen los valores de todas las magnitudes que podemos medir en la partícula.

En la escena [Función de onda](#) puedes percibir un sentido físico de esta función. Su cuadrado nos da la probabilidad de encontrar una partícula en un punto dado, en cierto momento del tiempo.

[Función de onda](#)



Conclusiones sobre la naturaleza ondulatoria de las partículas

La hipótesis de De Broglie

Toda partícula se porta, en su propagación, como una onda de longitud:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

donde p es su momento lineal.

Las partículas ya no son pequeñas esferas

El lugar donde detectamos una partícula que pasa a través de una rendija depende de si hay otras abiertas alrededor o no. **La onda de las partículas subatómicas tiene una extensión espacial apreciable.**

La función de ondas

De la función de ondas dependen los resultados de las magnitudes de la partícula. En particular, su cuadrado mide la probabilidad de encontrar la partícula en un punto y momento dados.

El azar en la Mecánica cuántica

El principio de indeterminación de Heisenberg



En principio suponemos que cuando examinamos un objeto no lo alteramos. Así por ejemplo, pensamos que la vida de los microbios que vemos en el microscopio es independiente del hecho de que estemos observando o no.

En la Mecánica Cuántica no es tan sencillo. Ya vimos que al pretender iluminar las partículas que podían pasar por una de dos rendijas, para saber por dónde pasaban realmente, su comportamiento cuántico desaparecía.

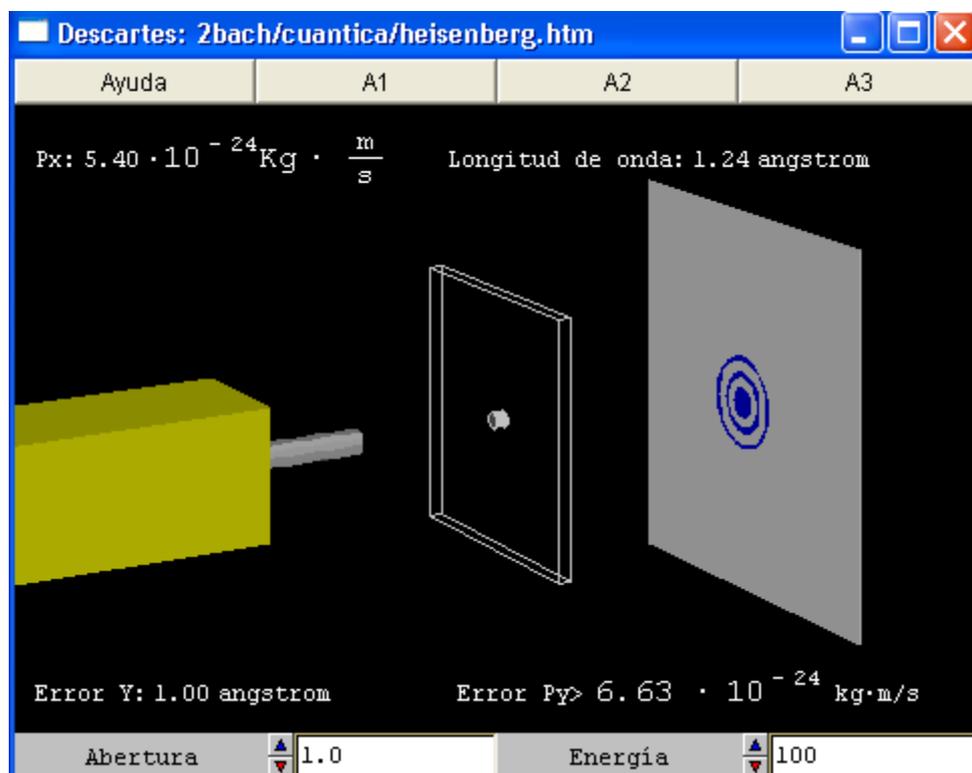
Heisenberg demostró que la medida de una magnitud de una partícula cuántica alteraba su estado, de forma que no se podía medir otra magnitud simultáneamente. La célebre fórmula de Heisenberg:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$$

nos dice que el margen de error con que medimos la posición de una partícula multiplicada por el margen de error con que medimos su momento lineal es siempre mayor que h.

Pulsa [Heisenberg](#) para entender el motivo de tal ley.

[Heisenberg](#)



A1:

La posición vertical del chorro de electrones viene determinada por el orificio a través del que pasan.

El margen de error de esta medida será el ancho de la ventana.

Comprueba los márgenes de error que te permite el experimento para la posición vertical de los electrones.

A2:

Antes de pasar por el orificio, el haz electrónico podía ser perfectamente horizontal.

Al pasar por el orificio se produce la difracción. Como consecuencia, los electrones no van a parar todos a un punto central, sino a los círculos de difracción que se aprecian en la pantalla.

Es decir, ha aparecido un momento vertical P_y que antes no existía. Los electrones pueden adquirir cualquier valor del mismo que los lleve a cualquiera de los puntos de la mancha de difracción.

El margen de error de P_y vendrá dado por todo el margen de valores posible para llegar a cualquier punto de la mancha.

El programa determina este margen a partir del ancho de los círculos, la distancia (4 cm) de la pantalla al orificio y las leyes de difracción para una onda.

Anota una serie de valores diferentes para el error en Y y el error de P_y .

Multiplica estos valores (recuerda que las distancias están en Angstrom).

¿Qué te recuerda el valor que obtienes?

Compara el error de P_y con el valor de P_x . ¿Te parece que el margen de error es despreciable?

A3:

Altera el valor de la energía de los electrones. ¿Se produce alguna variación en los errores obtenidos?

Estás comprobando que el error es algo consustancial con la medida; no depende del estado de los electrones en sí.

La medida de magnitudes en Mecánica Cuántica

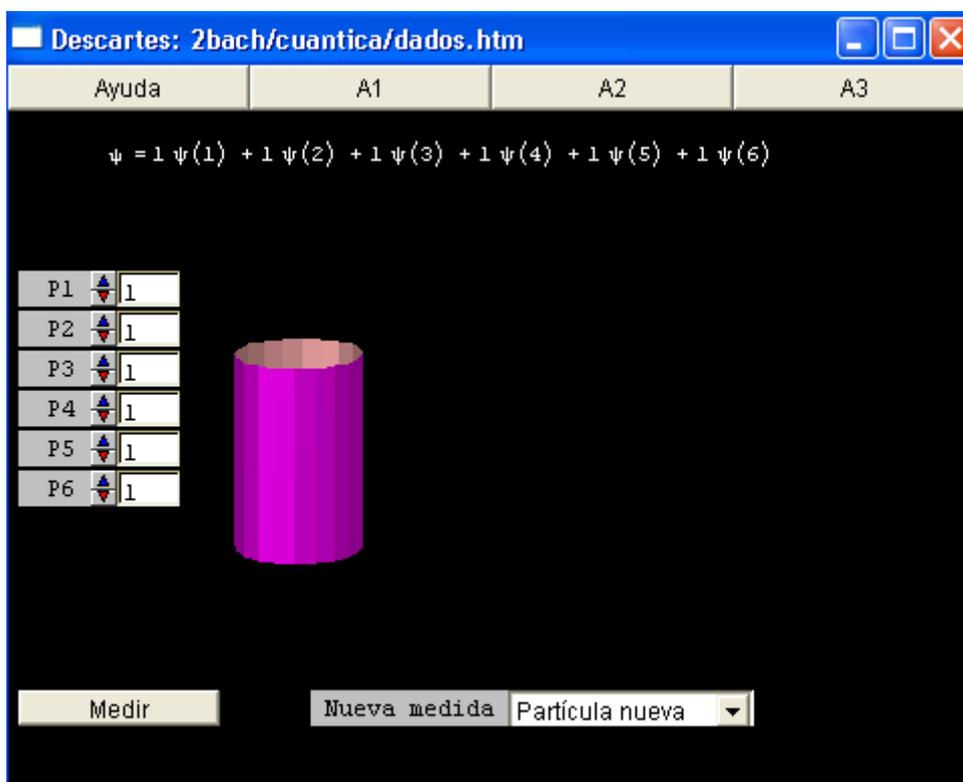


Decía **Einstein** "Dios no juega a los dados". Así expresaba su disgusto con la Mecánica Cuántica. Recordemos por ejemplo que la función de ondas nos indicaba la probabilidad de encontrar la partícula en un punto u otro; pero no tenemos forma de saber como esta probabilidad se convierte en una realidad. **Parece realmente que la Naturaleza juega a los dados.**

En la escena **medida** ilustramos este hecho con un ejemplo de medida de una magnitud. **Una partícula cuántica no medida tiene una función de onda dependiente de todos sus estados posibles.**

Cuando la medimos el azar (o el dado divino) elige uno de los estados, en el que, a partir de ese momento, sigue la partícula.

Medida



A1:

Manteniendo iguales las probabilidades de cada estado, mide (tira el dado) varias veces. Lógicamente tendrás una muestra al azar de todos los estados posibles.

Propiedades como el spin de los electrones (del que se hablará más tarde) siguen un reparto igualitario entre sus posibles valores.

A2:

Dejando casi todas las probabilidades a 1, asciendo un par de ellas hasta 10 y realiza varias medidas. ¿Qué ocurre ahora?

Una situación semejante ocurre cuando un electrón, por ejemplo, está en un campo eléctrico. Hay ciertos valores de su energía mucho más probables que otros.

A3:

Hay un aspecto en que la Naturaleza se aleja del juego de dados. Después de realizar una medida, en la ventana Nueva medida elige partícula anterior.

Manteniendo así esta opción repite varias medidas. ¿Qué ocurre?

Una vez que hemos hecho una medida, la función de onda ya es pura.

Conclusiones sobre el azar cuántico

Principio de indeterminación de Heisenberg

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$$

El producto de los errores con que podemos medir ciertos pares de magnitudes es siempre mayor que h. En la práctica, la medida de esos pares de magnitudes en partículas subatómicas resulta inviable.

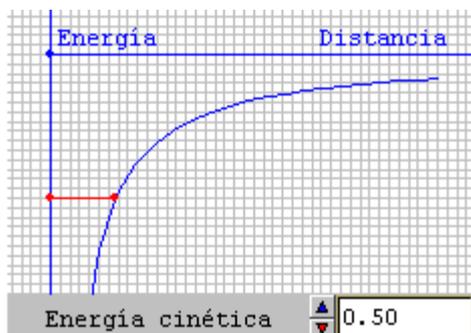
El azar en el mundo cuántico

Respecto a cualquier magnitud medible, una partícula cuántica tiene una función de onda dependiente de todos los estados posibles de esa magnitud.

Cuando hacemos una medida, el azar elige uno de los estados, en el que, a partir de ese momento, sigue la partícula.

El átomo cuántico

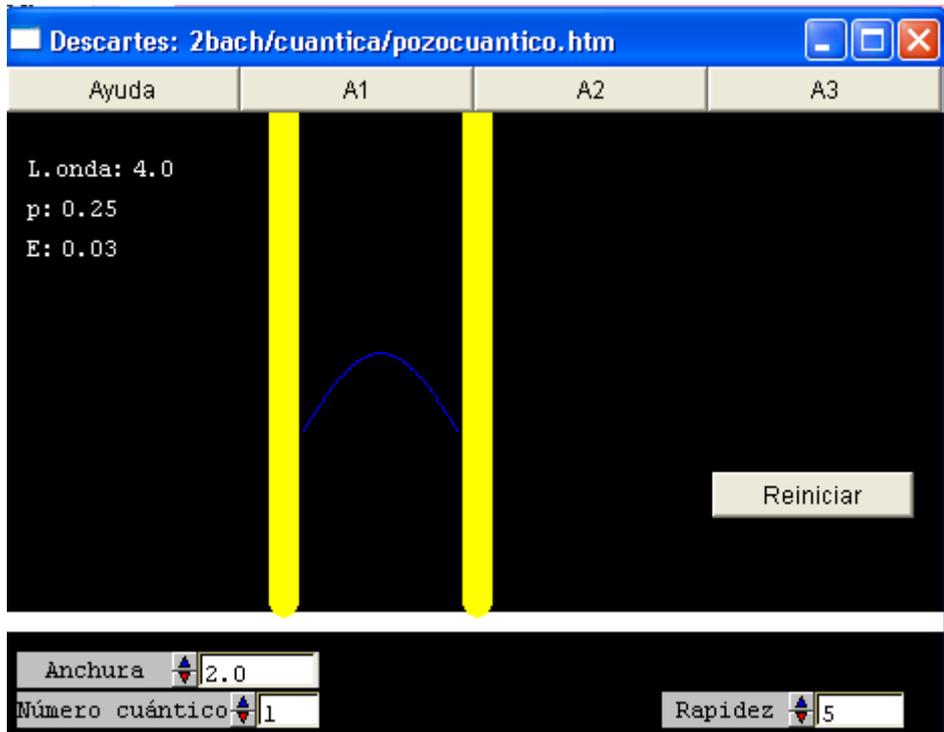
Partícula en un pozo infinito



En el modelo clásico del átomo de hidrógeno, el electrón está preso en un pozo de energía potencial. Podemos ir aumentando a voluntad la energía cinética hasta que el electrón pueda escapar. El modelo cuántico es más complejo. Como primera aproximación consideraremos la presencia de una partícula en un pozo de potencial de profundidad infinita y paredes rectas.

En la escena [pozo](#) estudiamos este caso. Ahí veremos que **no podemos dar cualquier valor a la energía de la partícula. Su onda debe "caber" en el pozo, igual que los armónicos de las notas musicales de una guitarra deben ajustarse a la longitud de sus cuerdas.**

Pozo



A1:

Variando el número cuántico se obtienen los diferentes estados energéticos posibles de las partículas en el pozo.

¿Qué característica común tienen estos estados?

¿Por qué no son posibles otros valores?

A2:

Observa cómo varía la longitud de onda con el número cuántico. ¿A qué se debe? Por qué varía también el momento lineal?

Es la energía proporcional al número cuántico?

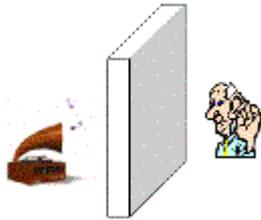
A3:

Repita las actividades anteriores variando la anchura del pozo.

¿Qué alteraciones observas?

¿Cómo influye la anchura del pozo en la energía?

El efecto túnel

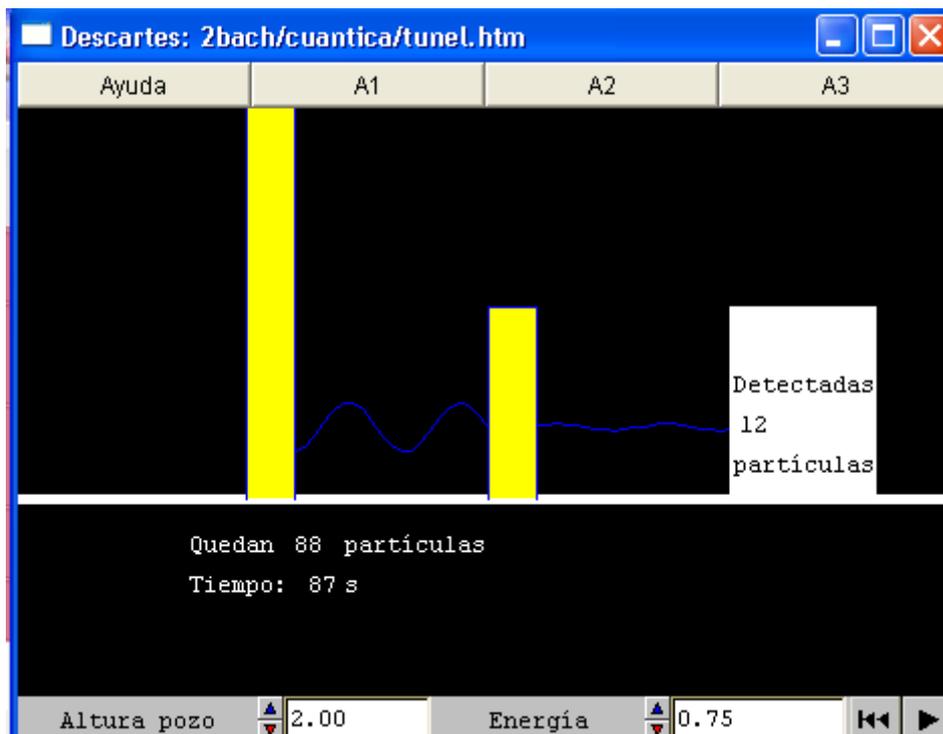


Aunque el muro de la figura sea grueso, es muy posible que aún se oiga el gramófono, porque el sonido se difracta por las esquinas.

Del mismo modo, si tuviéramos partículas entre barreras de potencial, pero de tamaño no infinito, se podría producir su difracción al otro lado de la barrera.

Este fenómeno se conoce como efecto túnel. Lo puedes analizar [aquí](#). Gracias a él sabemos que, cuando les falta poca energía para escapar del átomo, los electrones pueden escaparse de él sin adquirir más energía y contribuir, por ejemplo, a la nube electrónica característica del enlace metálico. También se producen por este efecto algunos fenómenos de desintegración radiactiva.

Túnel



A1:

Prueba a variar la altura de la barrera. ¿Cómo se altera el efecto túnel?

A2:

Prueba a variar la energía de las partículas. ¿Cómo se altera el efecto túnel? ¿De qué factores depende la rapidez con la que se vacía el pozo?

A3:

¿Es constante la rapidez con que se vacía el pozo?

Para la animación cuando han salido las primeras 20 partículas y anota el tiempo empleado.

Pon de nuevo en marcha la escena y repite la operación cada veintena de partículas escapadas. Así podrás contestar razonadamente la pregunta.

Un electrón en el átomo cuántico

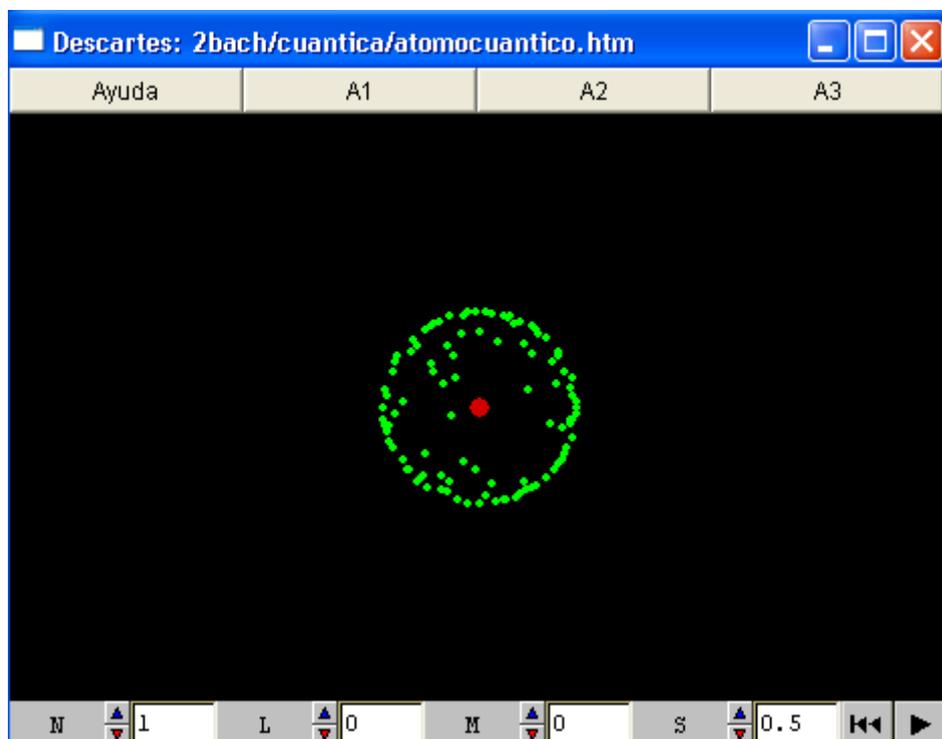


El átomo real es más complejo que un pozo de potencial, ya sea infinito o finito. Por ello no va a bastar con un único valor para caracterizar el movimiento de sus electrones.

Como puedes ver en [átomo](#) es posible medir cuatro magnitudes independientes de cada electrón:

- Su energía: caracterizada por el número cuántico natural N
- Su momento angular respecto al núcleo que depende del número cuántico natural L
- El valor de una de las componentes de ese momento angular, que depende del número entero M .
- El spin o momento angular propio del electrón, una magnitud de impreciso significado físico, que nos gusta interpretar como el sentido de giro del electrón alrededor de su eje, como si el electrón fuera una diminuta esfera.

Átomo



A1:

El número cuántico principal, N , es función de la energía del electrón. Comprueba qué influencia tiene sobre el orbital del electrón.

A2:

Da a N el valor 3 y ve variando después los valores de L , el número cuántico relacionado con el momento angular. ¿Qué influencia tiene el valor de L sobre el orbital?

Para cada valor de L , da los posibles valores de M (orientación del momento angular). ¿Qué influencia tiene sobre el orbital?

¿Qué relación hay entre los posibles valores de L y M ?

A3:

Varía ahora el spin (momento angular intrínseco del electrón). ¿Varía de alguna forma el orbital?

Conclusiones sobre el átomo cuántico

El átomo como pozo de potencial

- Cada electrón del átomo está en un pozo de potencial debido a la atracción del núcleo.
- Sólo puede llenar aquellos niveles de energía que hagan posible la cabida de la onda asociada al electrón en el pozo. Cada electrón del átomo está en un pozo de potencial debido a la atracción del núcleo.

El efecto túnel

- Cuando al electrón le falta poca energía para salir del átomo, la capacidad de difracción de las ondas le permite saltar la barrera.

Los números cuánticos del electrón en el átomo

Representan las magnitudes que podemos medir a la vez:

- **N: 1, 2,3...** Relacionado con la energía del electrón y el tamaño del orbital
- **L: 0,1,2..N-1** Relacionado con el momento angular del electrón y la forma del orbital
- **M: -L..0,1..+L** Relacionado con una componente del momento angular y la orientación del orbital.
- **S: -0.5 ó 0,5** Relacionado con el momento angular intrínseco del electrón.

EVALUACIÓN

Sobre la dualidad onda corpúsculo

1 La luz se comporta como partícula

- cuando es absorbida, pero no cuando es emitida
- nunca, la luz se porta siempre como una onda electromagnética
- mientras se propaga
- cuando es emitida, pero no cuando es absorbida
- cuando es absorbida o emitida

2 La función de onda de los electrones tiene una relación directa con

- el estado de vibración de los electrones a lo largo de su trayectoria
- el campo electromagnético de los electrones
- la luz que emiten los electrones mientras se desplazan con movimiento uniforme
- la probabilidad de encontrar la partícula en un punto e instante dados

3 El comportamiento de los electrones como ondas está demostrado en el estudio de

- difracción de un haz de electrones a través de una lámina de cristal
- Los electrones nunca se portan como ondas
- la teoría electromagnética de Maxwell
- el modelo atómico de Rutherford
- el modelo atómico de Bohr

4 Las partículas subatómicas se portan como ondas mientras

- cuando son absorbidas, pero no cuando son emitidas
- se propagan por el espacio
- cuando son emitidas, pero no cuando son absorbidas
- nunca, las partículas no deben ser confundidas nunca con ondas
- cuando son absorbidas o emitidas

5 El comportamiento de la luz como partícula tuvo que ser admitido después de estudiar

- la difracción de la luz por orificios muy estrechos
- el espectro discreto de los átomos
- la radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico
- la luz monocromática, como el láser

Llena los huecos y utiliza el botón comprobar para ver si lo has hecho correctamente

Sobre el átomo cuántico

De un electrón en un átomo sólo podemos medir magnitudes. El llamado de Heisenberg impide que se puedan calcular otras. Las magnitudes elegidas son: La del electrón, que viene representada por el número N.

Su momento angular, representado por el número , que debe ser siempre que N

Una componente del , dada por el número M, que oscila desde .

El momento angular intrínseco del electrón o , representado por S, que puede valer

Respecto a la región en que se mueve el electrón u , cada uno de los tres primeros números cuánticos regulan un aspecto:

N regula el del orbital

L regula la del orbital

M regula la del orbital