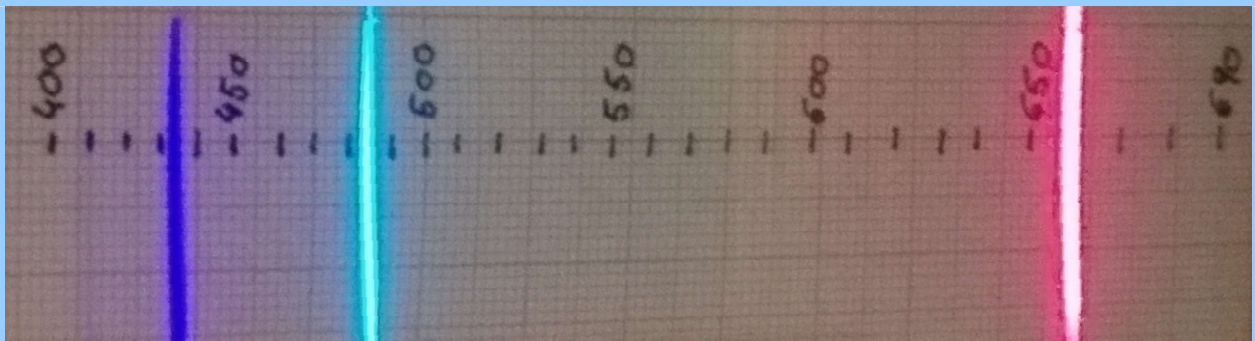


# ¿CÓMO SE EMITE Y ABSORBE RADIACIÓN?

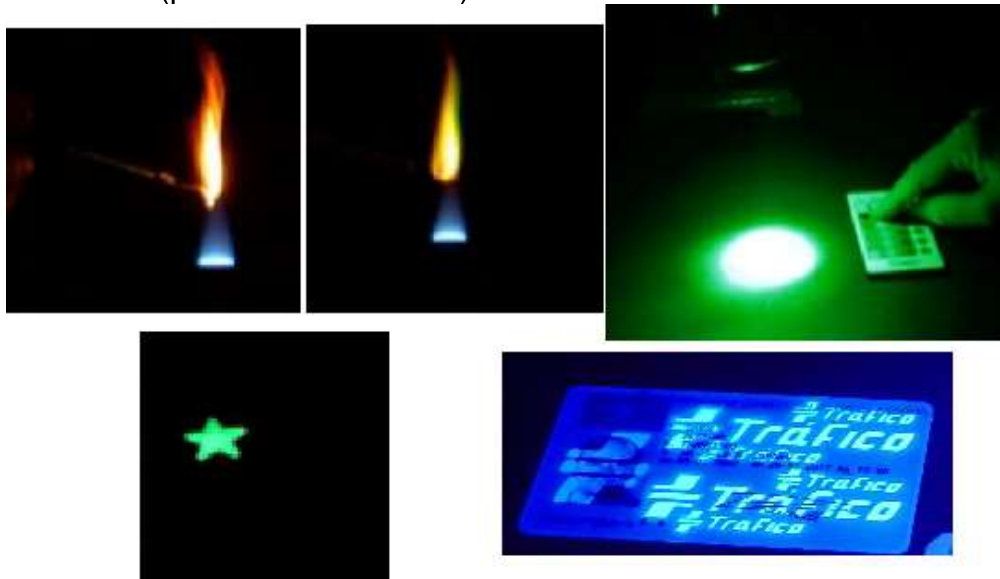
## Introducción a la física cuántica



**Francisco Savall Alemany**  
**Josep Lluís Domènech Blanco**  
**Joaquín Martínez Torregrosa**

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Desde muy antiguo, las personas hemos usado aparatos y materiales muy diversos para obtener luz. Sabemos que podemos obtener luz de muchas formas y que la materia reacciona de formas muy diversas al captar luz: puede calentarse, reflejarla, permitir su paso (transparencia), “almacenarla” durante un rato (fosforescencia) o producir corrientes eléctricas (placas fotoeléctricas).



Se muestran varias formas de producir luz o efectos que produce la luz al incidir sobre determinados objetos. En la parte superior izquierda se observan dos llamas de colores obtenidas al poner a la llama diferentes sales. La imagen superior derecha muestra la luz emitida por una luz led de bajo consumo. La estrella de la parte inferior izquierda luce durante varios minutos una vez se ha apagado la fuente que la iluminaba. A la derecha y abajo se muestra un carné de conducir iluminado con luz ultravioleta, se observan perfectamente los elementos de seguridad anti-copia.

Durante este curso hemos estudiado qué es la luz y hemos explicado varios fenómenos luminosos, pero en ningún momento hemos analizado cómo se genera o se absorbe, y en general como interacciona con la materia. Sabemos que la materia está formada por átomos, y que estos están formados por un núcleo positivo y electrones, y que la luz es una onda, un campo electromagnético que vibra con una determinada frecuencia y amplitud. Sin embargo, no sabemos qué ocurre en los átomos cuando se emite o absorbe luz. Encontrar un mecanismo que permita explicar la emisión y absorción de radiación parece que solo puede aportar matices a todo lo que hemos estudiado hasta ahora. Sin embargo, ¿es realmente así?

*A1.- Indicad qué podemos hacer para emitir luz.*

*A2.- Observad la luz emitida por algunos de los objetos indicados antes con un espectroscopio<sup>5</sup>. Este instrumento os permitirá conocer con detalle las frecuencias que integran la radiación. Describid lo que veis y pensad cómo podemos cambiar sus características (la distribución de frecuencias o colores y la intensidad).*

5. Al final de la unidad, en el Anexo 1, se encuentran las instrucciones para construir y calibrar un espectroscopio.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

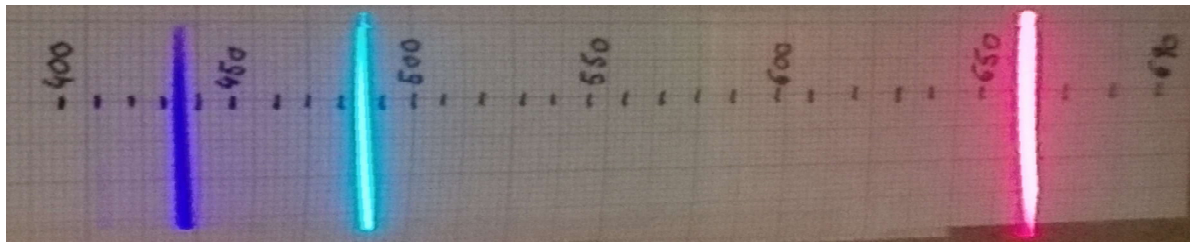
Cuando se observa la luz del exterior del aula con el espectroscopio se comprueba que está formada por todos los colores del arco iris. Eso indica que todas las frecuencias están presentes en la luz blanca. Nos referimos a este espectro con el nombre de espectro continuo. Algunas veces un color es más brillante que otro, lo que indica que dichas frecuencias tienen mayor intensidad. En dichos casos la luz no es completamente blanca, sino que presenta matices.

Al observar la luz emitida por una bombilla de filamento de tungsteno se observa un espectro continuo, con todos los colores, pero la zona correspondiente al amarillo presenta colores más brillantes, lo que nos indica que esas frecuencias tienen mayor intensidad (la luz adquiere una tonalidad amarillenta). Lo mismo ocurre al calentar cualquier sólido (o líquido), con la diferencia de que la luz se ve más amarilla cuanto más se calienta el material, llegando a ser blanca para materiales muy calientes y roja para materiales más fríos. Además, se puede comprobar calentando cualquier material que la luz se vuelve menos intensa a medida que la temperatura disminuye.

Al calentar sales con un bunsen se observan llamas de colores. Los colores están en relación con la composición de la sal, la temperatura de la llama solo afecta a la intensidad de la radiación, pero no a su color. Esto pone de manifiesto que el comportamiento de los gases es diferente al de los sólidos y líquidos. Para profundizar en este aspecto vamos a usar gases aislados.

Cuando se hace la descomposición de la luz emitida por los gases de los tubos espectrales se observa que el espectro presenta solo unas pocas líneas de color separadas por bandas negras, como se ve en la figura. Este es un espectro discreto (no continuo). Se comprueba, además, que el color de las líneas que emite un gas es siempre igual, independientemente de su temperatura y del método empleado para obtenerlo. Al cambiar la temperatura solo se observa un cambio en la intensidad de las líneas, a mayor temperatura las líneas son más intensas. La emisión del espectro dura todo el tiempo que el tubo está conectado, y durante ese tiempo se emite radiación "continuamente" (siempre se está emitiendo).

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



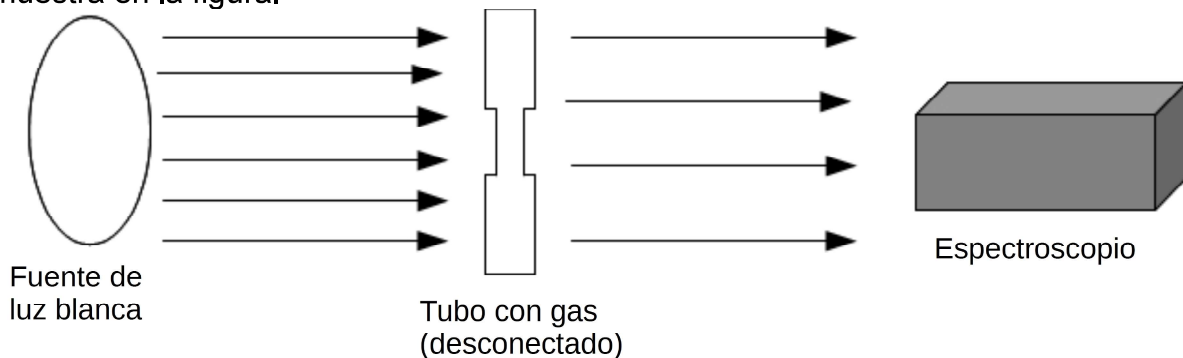
656nm  $4,57 \cdot 10^{14}$ Hz      486nm  $6,17 \cdot 10^{14}$ Hz      434nm  $6,91 \cdot 10^{14}$ Hz      410nm  $7,31 \cdot 10^{14}$ Hz

Espectro de emisión del hidrógeno. La parte superior corresponde a una fotografía tomada en el MUDIC – Museo Didáctico de Orihuela. La parte inferior es un dibujo al que se han añadido los valores de la longitud de onda y la frecuencia de cada línea. Dependiendo de la estructura del espectroscopio se obtiene la imagen superior o su simétrica especular (imagen inferior). Se observa que la intensidad de las frecuencias más altas es menor que la de las más bajas.

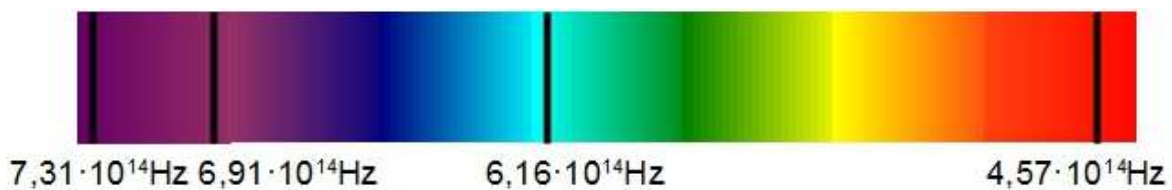
Teniendo en cuenta lo que sabemos, podemos decir que:

- Cada gas origina una distribución de líneas de color diferentes, en las cuales solo aparecen unos pocos colores (solo hay unas pocas frecuencias).
- Las líneas son diferentes en intensidad, lo que implica que hay una amplitud de onda diferente para cada frecuencia.
- 

Estas “huellas de color” también se pueden obtener si se hace pasar luz blanca a través de un recipiente que contiene el gas o a través de una disolución. Ahora bien, en este caso hay una diferencia fundamental: se observaba el arco iris completo (como corresponde a la luz blanca) pero con un conjunto de líneas negras superpuestas, como se muestra en la figura.



Esquema del montaje para obtener un espectro de absorción



Espectro de absorción del hidrógeno.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

No se observa esto cuando se realiza el montaje con nuestros tubos espectrales. La cantidad de gas que contiene el tubo es muy baja, eso hace que pase casi toda la luz. Con un tubo que contuviera una mayor cantidad de gas sí que se podrían ver las líneas negras del espectro de absorción, o por lo menos unas líneas más oscuras.

*A2b.- ¿Observáis alguna relación entre el espectro de emisión y absorción? ¿Como serán los espectros de absorción del resto de los gases que hemos usado?*

Como el espectro de cada gas es siempre el mismo y además es único, se pueden usar técnicas espectroscópicas para determinar la composición de muestras materiales. De hecho, la introducción del espectroscopio permitió la determinación de la composición del Sol.

Resulta absurdo pensar que los fenómenos de emisión y absorción de radiación son solo interesantes para obtener llamas de colores o identificar sustancias. Nuestra vida cotidiana está completamente inundada de objetos que aprovechan la emisión y absorción de radiación para su funcionamiento, muchos de ellos pasan desapercibidos pero son instrumentos fundamentales en nuestras vidas.

*A3.- Indica innovaciones y aplicaciones tecnológicas relacionadas con la emisión y absorción de luz que hayan supuesto un avance científico o una mejora de la calidad de vida.*

La gran cantidad de aplicaciones mencionadas justifican la importancia del tema que tenemos entre manos: Establecer un mecanismo que permita explicar la emisión y absorción de radiación. Una vez hemos marcado el objetivo, debemos plantearnos una estrategia que nos permita avanzar.

*A4.- Plantead cuestiones que consideráis importante abordar para establecer un mecanismo de emisión y absorción de radiación.*

El índice que, como estrategia, seguiremos será:

*1.- Elaboración de un primer modelo que explique el caso más sencillo de emisión y absorción de radiación: los espectros de los gases.*

*2.- Puesta a prueba del modelo elaborado.*

*2.1.- ¿La cuantización de la energía en los átomos es independiente de como se interacciona con ellos?*

*2.1.1.- El experimento de Franck y Hertz.*

*2.1.2.- Iluminación de un gas con luz monocromática.*

*2.2.- ¿Está cuantizada la energía en la radiación?*

*2.2.1.- El efecto fotoeléctrico.*

*2.2.2.- El efecto Compton.*

*3.- Posibles aplicaciones del modelo elaborado.*

*4.- Búsqueda de un cuerpo de conocimientos coherente.*

*5.- Limitaciones de los nuevos conocimientos y problemas abiertos.*

Empezaremos estudiando el caso más sencillo: el espectro de los gases. Es el más sencillo porque podemos considerar que los gases están formados por átomos o moléculas aislados, con poca interacción entre ellos, es la materia que presenta una composición más sencilla. Los espectros de los gases también son los más sencillos, los

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

que contienen menos frecuencias. De todos los gases, el más sencillo es el hidrógeno, cuyos átomos tienen un núcleo positivo con un electrón orbitando a su alrededor.

Teniendo esto en cuenta, siempre que abordemos un problema referente a la emisión y absorción de radiación nos hemos de preguntar:

- ¿Qué estructura tiene la materia responsable de esta emisión o absorción?
- ¿Qué estructura tiene la luz que se emite o absorbe?
- ¿Qué ocurre para que tenga lugar esa emisión o absorción?

Una vez tengamos un modelo que explique la formación de los espectros lo pondremos a prueba, y lo modificaremos si es necesario, para dar cuenta de otros fenómenos de emisión y absorción de radiación: el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.

Seguidamente usaremos el nuevo modelo para explicar el funcionamiento de aparatos tecnológicos y fenómenos cotidianos de emisión y absorción de radiación, muchos de los cuales ya han sido observados durante nuestro estudio.

Finalmente, buscaremos una forma de integrar nuestros avances con la física conocida hasta el momento, para ello será necesario encontrar unas leyes con carácter universal.

## **1.- Elaboración de un primer modelo que explique el caso más sencillo de emisión y absorción de radiación: los espectros de los gases.**

Entre todos los espectros de los gases, el más sencillo es el del hidrógeno, que solo contiene cuatro frecuencias. Este átomo, además, es el más sencillo de todos, y solo consta de un núcleo positivo formado por un solo protón y un electrón orbitando a su alrededor. Siendo así que es el átomo y el espectro más sencillos, buscamos un mecanismo que permita explicar como un tubo con millones de átomos como este emite ondas electromagnéticas de cuatro frecuencias.

*A5.- Proponed un mecanismo que permita explicar qué les ocurre a los átomos cuando se emite luz al calentar hidrógeno.*

*A6.- Situada en un diagrama de energía, de forma cualitativa, los átomos que están emitiendo radiación. Usad el diagrama de energía para interpretar qué le ocurre al electrón a medida que emite radiación, de acuerdo con el mecanismo que habéis propuesto antes.*

*A7.- Como los átomos son estables, el mecanismo de emisión de luz no puede ser el propuesto. Estableced un posible mecanismo que permita superar las dificultades a las que nos enfrentamos. Concretamente, que permita explicar que:*

- *Los átomos son estables.*
- *La radiación emitida por el gas siempre tiene las mismas frecuencias.*
- *Unas líneas son más intensas que otras.*

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

A7b.- El físico Niels Bohr propuso un modelo para explicar la emisión y absorción de radiación por los átomos. Tomad en consideración y valorad si suponen un avance en nuestro problema:

- Los electrones de los átomos solo pueden orbitar en unos pocos estados estacionarios, caracterizados por una energía fija. En ellos orbitan alrededor del núcleo de acuerdo con las leyes de la mecánica pero sin emitir energía.
- Cualquier cambio en el átomo implica el paso del electrón de una órbita estacionaria a otra.
- La frecuencia de la radiación emitida o absorbida en una transición depende de las energías iniciales y finales, de acuerdo con la expresión

$$|E_f - E_i| = h \cdot \nu$$

donde  $E_i$  y  $E_f$  son la energía del átomo en el estado final e inicial,  $\nu$  es la frecuencia y  $h$  es una constante.

A8.- Estableced formas de poner a prueba las hipótesis establecidas.

No hemos de conformarnos con una interpretación cualitativa de los resultados para aceptar las hipótesis avanzadas, y menos cuando contradicen lo establecido en la física conocida hasta el momento. Las hipótesis atrevidas deben ser potencialmente fructíferas y, además de explicar fenómenos conocidos, deben predecir resultados desconocidos. Profundizamos en el aspecto cuantitativo para ponerla a prueba más en serio: ¿Cómo podemos ionizar los átomos? ¿La frecuencia de las radiaciones medidas en el espectro coincide con la establecida en nuestra hipótesis? ¿Existen otras radiaciones en el espectro que no han sido observadas?

A8a.- En el laboratorio se comprueba experimentalmente que al iluminar un recipiente que contiene gas hidrógeno con radiación de frecuencia superior a  $3,28 \cdot 10^{15}$  Hz se produce la ionización de los átomos del gas. Además, esta ionización se consigue siempre que se ilumine el gas con cualquier radiación de frecuencia superior a la indicada. Usad las hipótesis bajo estudio por dar cuenta de este hecho.

A8b.- ¿El átomo de hidrógeno puede emitir radiación de otras frecuencias además de las 4 observadas? Razonad, usando los modelos establecidos como hipótesis, si pueden producirse otras radiaciones de frecuencias no visibles.

El uso de técnicas adecuadas permite medir frecuencias de líneas espectrales situadas más allá del rango visible de radiación. Las radiaciones no visibles pueden ser detectadas por sistemas fotográficos (pueden marcar films de fotografía). Empleando estas técnicas, se puede comprobar que el hidrógeno no solo emite las 4 líneas del espectro visible, sino que emite gran cantidad de radiación con frecuencias pertenecientes al espectro infrarrojo y al ultravioleta. Las frecuencias de dichas líneas son las que aparecen en la tabla inferior.

En UV	$2,47 \cdot 10^{15}$ Hz	$2,93 \cdot 10^{15}$ Hz	$3,09 \cdot 10^{15}$ Hz	$3,16 \cdot 10^{15}$ Hz	$3,20 \cdot 10^{15}$ Hz
En IR	$1,6 \cdot 10^{14}$ Hz	$2,34 \cdot 10^{14}$ Hz	$2,74 \cdot 10^{14}$ Hz	$2,99 \cdot 10^{14}$ Hz	$3,25 \cdot 10^{14}$ Hz

Frecuencias de radiaciones emitidas por el átomo de hidrógeno en el espectro no visible.

Para profundizar en el aspecto cuantitativo nos es necesario atribuir un valor a la energía de los átomos en cada estado estacionario, además de un valor para la constante  $h$  que

### ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

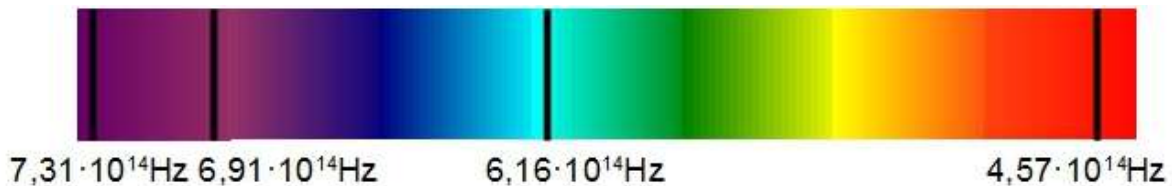
relaciona la transición energética con la frecuencia de la radiación emitida. El físico danés Niels Bohr, que propuso por primera vez estas hipótesis, propuso un valor de la energía de

$$E_n = \frac{-13,6(eV)}{n^2} \quad 6$$

para cada estado estacionario. Este valor es coherente con la medida experimental de la energía de ionización del hidrógeno: si se considera que el electrón del átomo de hidrógeno está en el estado fundamental, el de menor energía y más cercano al núcleo, la energía que tiene el sistema coincidirá en valor absoluto con la energía que hay que aportar para ionizar el átomo. Experimentalmente se necesitan 13,6 eV para ionizar un átomo, por tanto la energía del estado fundamental será -13,6 eV ( $E_1 = -13,6$  eV). La constante  $h$  había sido introducida años antes por el físico alemán Max Planck y su valor es  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Js.

*A8c.- Calculad la energía de los 5 primeros estados estacionarios del hidrógeno y usad un diagrama de energía para relacionar las posibles transiciones entre estados estacionarios con cada línea del espectro del hidrógeno. Comprobad si podemos dar cuenta de las líneas espectrales visibles y no visibles.*

*A9.- Como habíamos visto al empezar nuestra investigación, al iluminar un recipiente que contiene gas hidrógeno con luz blanca y analizar el espectro de la luz que lo atraviesa se observa la imagen inferior. Dad cuenta de este hecho usando el modelo elaborado.*



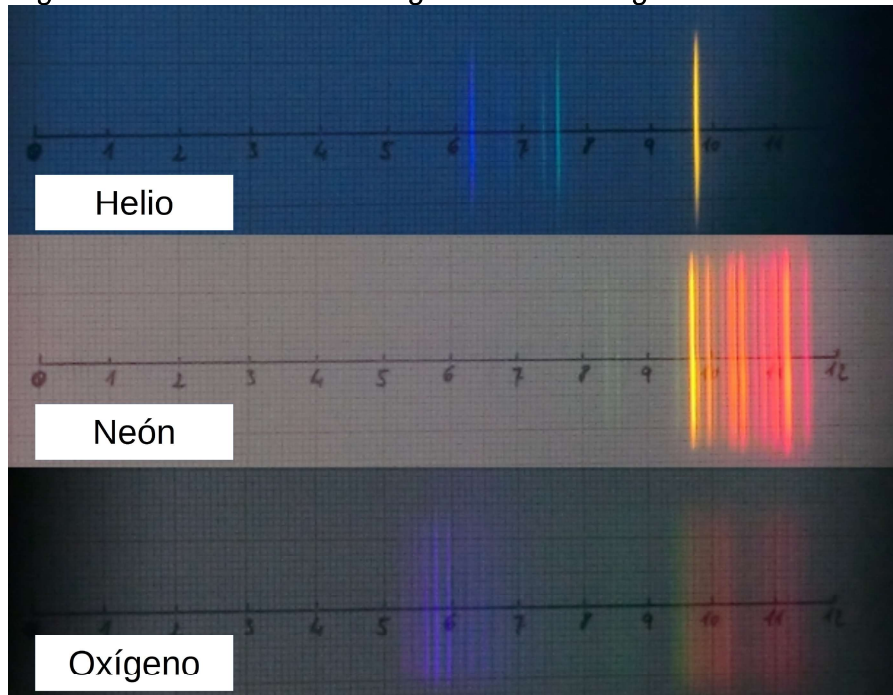
Espectro de absorción del hidrógeno.

6.- Para medir la energía de los átomos se suele usar una unidad llamada electrón-voltio (eV). La equivalencia con el sistema internacional es  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  J.



## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

A10.- *Dad una interpretación cualitativa de los espectros de otros gases. Usad como ejemplo las imágenes inferiores. Usad diagramas de energía con carácter cualitativo.*



*Espectros del helio, neón y oxígeno.*

El éxito conseguido hasta el momento nos da indicios de que el modelo elaborado es correcto. Este modelo de átomo recibe el nombre de modelo de Bohr en honor al físico danés Niels Bohr, que fue quien lo introdujo. Los niveles de energía estacionarios también reciben el nombre de niveles cuánticos, término que hace referencia al hecho de que el átomo no puede tener cualquier energía, sino solo unas cantidades determinadas que varían de forma discreta, “a saltos”. Ahora bien, no debemos olvidar que el modelo elaborado solo ha sido empleado para interpretar la emisión y absorción de radiación para el átomo de hidrógeno, y de forma meramente cualitativa para la resto de los átomos. Recordemos que, para explicar las frecuencias de la luz que forman los espectros, ha sido necesario aceptar que se producen cambios bruscos en las órbitas atómicas. Eso está en contradicción con la emisión de una onda, que requiere que el sistema que la emite vibre durante un cierto tiempo, por breve que este sea. ¿Quiere decir eso que la onda se emite “de golpe”? ¿Cómo es posible que una energía se emita instantáneamente y se alargue para formar una onda monocromática? No podemos aceptar un modelo con una base experimental tan pobre, y menos aún tratándose de unos avances que introducen un ruptura radical con las ideas físicas aceptadas hasta el momento. Hay que buscar más evidencias del comportamiento cuántico, cosa que haremos analizando más experiencias de interacción entre radiación y materia.

## 2.- Puesta a prueba del modelo elaborado

El modelo que hemos construido para explicar el espectro del hidrógeno (y de manera cualitativa los espectros de los gases) nos obliga a considerar que cuando el átomo emite o absorbe radiación se producen cambios súbitos en la energía que llevan al átomo de un estado energético a otro. De acuerdo con nuestros avances, la frecuencia de las líneas espectrales del hidrógeno se puede explicar si consideramos que los únicos estados

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

posibles para el átomo son aquellos que responden a la ecuación  $E_n = \frac{-13,6 eV}{n^2}$  y que la frecuencia de la radiación emitida está relacionada con la diferencia de energía de los estados entre los que tiene lugar la transición. Al poner estas condiciones conseguimos un resultado satisfactorio a la hora de explicar la emisión y absorción de radiación, pero si la energía está cuantizada esta característica se debería poner de manifiesto no solo cuando los átomos interactúan con la radiación, sino en cualquier otro tipo de interacción

Para poner a prueba el modelo que hemos establecido primero analizaremos cómo interactúan los átomos con electrones acelerados, valorando si el intercambio de energía entre electrones y átomos tiene lugar en unas cantidades fijas (como corresponde a la transición entre estados cuánticos) o si por el contrario, puede adquirir cualquier valor. Cuando comparemos los resultados obtenidos al interactuar con los electrones con los obtenidos al interactuar con la radiación podremos establecer conclusiones sobre la existencia de estados cuánticos en el átomo y descartar que esta sea una característica exclusiva de los fenómenos luminosos.

Posteriormente estudiaremos el problema de la distribución de energía en la radiación. Hasta el momento hemos usado un modelo ondulatorio para la radiación, según el cual la energía se distribuye de manera continua por el espacio, haciendo posible el intercambio de cualquier cantidad de energía. En cambio, de acuerdo con el modelo que hemos establecido, el átomo sólo puede emitir y absorber unas cantidades fijas de energía y, además, parece que lo haga de manera instantánea. ¿Tiene este modelo alguna repercusión sobre el modelo de radiación? ¿Es que esas cantidades definidas de energía que absorbe el átomo ya están presentes en la radiación? Para avanzar en esto aplicaremos el modelo elaborado en el estudio del efecto fotoeléctrico, un proceso en el que radiación de elevada frecuencia arranca electrones en un metal. También trataremos de explicar el efecto Compton, en el que la radiación intercambia energía con electrones libres (y que por tanto ya no están sometidos a las condiciones de cuantización del átomo).

Con todo, tenemos que conseguir un modelo de interacción entre radiación y materia que tenga validez general, que no se limite únicamente a la explicación de los espectros atómicos, y que sirva de base para explicar otras interacciones atómicas o para diseñar y construir aparatos tecnológicos.

### **2.1.- ¿La cuantización de la energía en los átomos es independiente de como se interacciona con ellos?**

#### **2.1.1.- El experimento de Franck y Hertz**

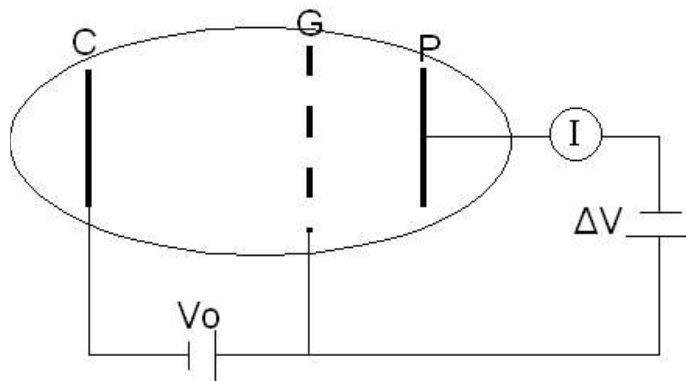
Para constatar si los átomos pueden absorber cualquier cantidad de energía o sólo unas cantidades fijas podemos bombardear un gas a baja presión con electrones acelerados y analizar la transferencia de energía que tiene lugar de los electrones hacia los átomos. Ahora bien, debemos tener en cuenta que si un electrón choca con un átomo puede transferirle energía para producir cambios en la estructura interna o para cambiar la velocidad del átomo. A nosotros nos interesa el intercambio de energía que se produce por los cambios en la estructura interna, por lo que tenemos

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

que minimizar la energía que se intercambia entre los electrones y los átomos y que sólo contribuye a cambiar la velocidad de los átomos .

Si se usa gas de mercurio en lugar de usar gas de hidrógeno (como hemos hecho en la interacción con luz) se consigue que la transferencia de energía se reduzca casi sólo a la que produce cambios en la estructura interna del mercurio. Un átomo de mercurio tiene una masa muy superior a la de un electrón de modo que cuando un electrón choca con uno de estos átomos el choque es completamente elástico y el electrón sólo cambia la dirección en que se propaga, pero no la velocidad, quedando el átomo de mercurio prácticamente inalterado. Es un caso similar al choque de una pelota contra una pared, la pelota sale rebotada mientras que la pared permanece inmóvil. Si se produjera una disminución de la energía de los electrones sólo podría ser debida a un cambio en la estructura interna del átomo de mercurio; a que el átomo de mercurio ha absorbido una parte de la energía del electrón y ha quedado en estado excitado, con una mayor energía interna pero con la misma energía cinética. Si usamos de nuevo la analogía del choque entre la pared y la pelota, sería el equivalente a que el balón produjera una fractura en el interior de la pared, y esto haría que perdiera energía cinética.

Por tanto, podemos bombardear un gas de mercurio con un haz de electrones de energía conocida y medir la transferencia de energía que se produce. Si los electrones no pierden energía al atravesar el gas (y chocar con los átomos de mercurio) es porque no producen ningún cambio en la estructura interna de los átomos de mercurio. En cambio, una disminución de la energía cinética de los electrones nos indicaría cuánta energía están absorbiendo los átomos de mercurio para excitarse. Para hacer esta experiencia se puede usar un montaje como el de la figura.

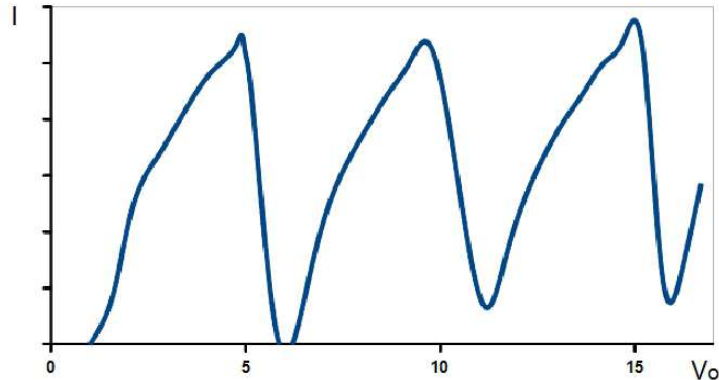


Montaje usado por Franck y Hertz para bombardear átomos de mercurio con electrones acelerados.

El montaje consta de un recipiente que contiene gas de mercurio a baja presión. En su interior los electrones son acelerados entre la placa C y G por la acción del campo eléctrico creado por la diferencia de potencial  $V_0$ . Variando esta diferencia de potencial es como seleccionamos la energía cinética que damos a los electrones. Los electrones, durante toda la trayectoria, colisionan con átomos de mercurio. Al atravesar G aplicamos un campo eléctrico que se opone al movimiento de los electrones y que permite medir la energía cinética que tienen antes de llegar a la placa P. Cuando llegan a P son recogidos y contados a través del amperímetro I.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Cuando se hace la experiencia se obtiene que el número de electrones que llega a la placa P aumenta a medida que aumenta  $V_0$  y que los electrones atraviesan el tubo casi sin perder energía cinética. Pero cuando la diferencia de potencial entre C y G supera ligeramente los 4,9 V se produce una caída repentina en el número de electrones que llegan a P, y ocurre lo mismo cada vez que se alcanza un múltiplo de esta cantidad, como muestra la gráfica inferior.



Gráfica obtenida en el experimento de Franck y Hertz. En el eje vertical se representa la intensidad detectada por el amperímetro I en función de la diferencia de potencial aplicada en  $V_0$ .

El resultado pone de manifiesto que si la energía de los electrones es un poco superior a 4,9 eV los electrones no consiguen llegar a P, y esto sólo puede ser debido a que han transferido la energía que tenían a los átomos de mercurio. A medida que los electrones adquieren una energía cinética cada vez mayor que 4,9 V se vuelve a registrar un aumento en la cantidad de electrones que llegan a P, pero la energía con la que llegan es 4,9 eV inferior a la que han recibido al atravesar el campo eléctrico de C a G. Estos electrones han perdido aproximadamente 4,9 eV al atravesar el gas. Cuando la diferencia de potencial se acerca a 9,8 eV se vuelve a registrar una caída repentina en el número de electrones que llegan a P, y nuevamente un aumento progresivo a medida que la diferencia de potencial entre C y G sigue aumentando. Esto ocurre cada vez que se supera un múltiplo de 4,9 eV.

*A11.- Interpretad los resultados de la experiencia de Franck y Hertz. ¿Evidencian que la energía interna de los átomos está cuantizada y que sólo pueden emitir o absorber unas cantidades de energía fijas?*

Los resultados evidencian que los electrones sólo pueden transferir 4,9 eV a los átomos de mercurio, como predice nuestro modelo, y no cualquier cantidad de energía. Cuando se da a los electrones una energía inferior a 4,9 eV estos atraviesan el gas colisionando con los átomos de mercurio pero sin transferirles energía. Las desviaciones que sufren en los choques hacen que los electrones no lleguen a P, pero a medida que sube la diferencia de potencial y los electrones son atraídos con mayor fuerza hacia P se observa un aumento en la cantidad de electrones que llegan. Cuando la energía de los electrones supera los 4,9 eV consiguen transferir esta energía a los átomos de mercurio, que se excitan. Así, los electrones quedan sin energía y no llegan a P. Si se da a los electrones una energía sensiblemente superior a 4,9 eV (por ejemplo 6 eV) podrán seguir hacia P tras colisionar cada uno con un átomo de mercurio y transferirle 4,9 eV (los electrones quedan con una energía de 1,1 eV, de acuerdo con el ejemplo anterior). Es por ello que se detecta un nuevo aumento en la cantidad de electrones que llegan a P así como una

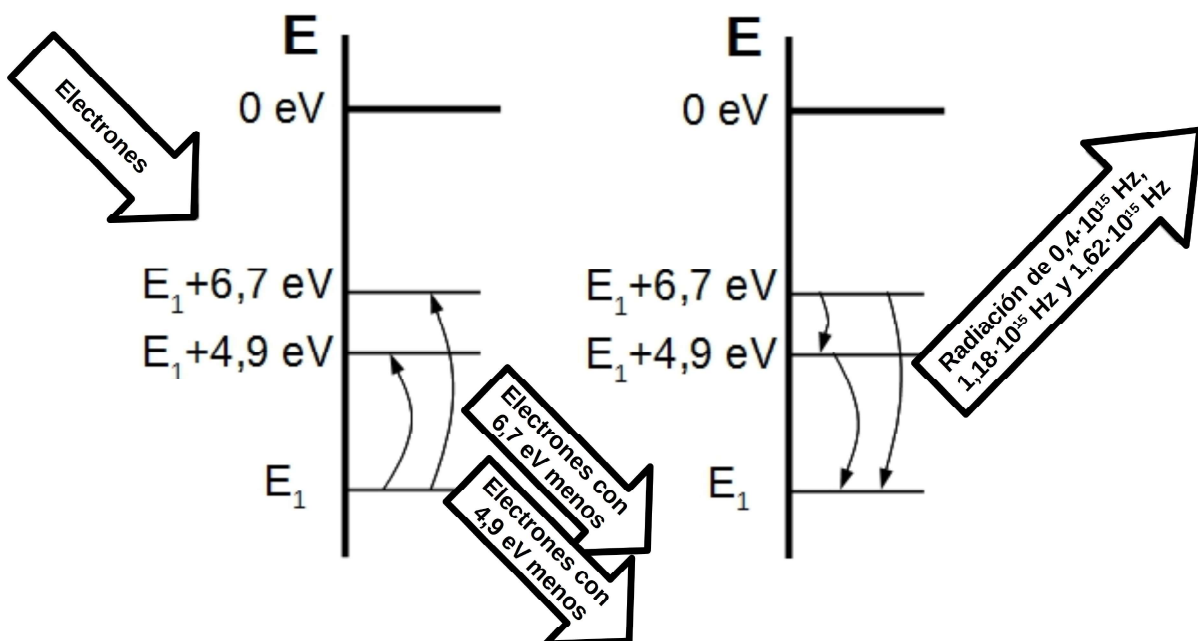
## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

disminución de 4,9 eV en la energía de los electrones. Cuando la diferencia de potencial supera los 9,8 eV los electrones pueden transferir 4,9 eV en dos colisiones, quedando con una energía tan baja que les impide llegar a P. Esto es lo que ocurre cada vez que la energía supera un múltiplo de 4,9 eV.

Si se reduce mucho la presión de mercurio del interior del tubo se puede observar que los átomos de mercurio, además de absorber 4,9 eV de energía, también pueden absorber 6,7 eV o 10,4 eV. Cuando la experiencia se lleva a cabo con otros gases se obtienen resultados similares, si bien los valores de la energía absorbida son diferentes: en el caso del potasio la energía mínima absorbida es de 1,63 eV, para el sodio de 2,12 eV y para el helio de 21 eV. Todo ello pone de manifiesto que la energía de los átomos está cuantizada, al tiempo que permite conocer la diferencia de energía entre los estados estacionarios del mercurio.

A12.- Cuando se hace el experimento y se da a los electrones una energía superior a 4,9 eV se observa que el gas de mercurio emite una radiación monocromática de  $1,18 \cdot 10^{15}$  Hz. Asimismo, al superar los 6,7 eV se observa la emisión de una radiación formada por tres frecuencias, una de  $1,18 \cdot 10^{15}$  Hz (igual al anterior) y dos más de  $1,62 \cdot 10^{15}$  Hz y  $0,4 \cdot 10^{15}$  Hz. Usad el modelo elaborado y los datos experimentales obtenidos en el experimento para explicar la existencia de estas radiaciones.

De acuerdo con el modelo elaborado y con los datos experimentales podemos establecer un diagrama de energía para el átomo de mercurio. Sabemos que la diferencia de energía entre el estado fundamental y el primer estado excitado será de 4,9 eV y que la diferencia entre el estado fundamental y el segundo estado excitado es de 6,7 eV. No sabemos cuál es la energía del estado fundamental porque la experiencia no nos permite conocerla, pero podemos afirmar que el diagrama de energía del mercurio es como el que se muestra en la figura.



## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Los átomos de mercurio reciben 4,9 eV y 6,7 eV cuando interaccionan con los electrones y posteriormente emiten radiaciones de  $0,4 \cdot 10^{15}$  Hz;  $1,18 \cdot 10^{15}$  Hz y  $1,62 \cdot 10^{15}$  Hz. Esto es lo que se prevé de acuerdo con el modelo de emisión y absorción de radiación que hemos establecido.

Los choques producidos por los electrones provocan transiciones del estado fundamental al primer y al segundo estado excitado. Cuando los átomos retornan del segundo estado estacionario al estado fundamental, de acuerdo con nuestro modelo, emitirán radiación cuya frecuencia viene dada por la expresión  $E=h\nu$ . Del mismo modo, cuando se dan transiciones del tercer estado estacionario al segundo y del tercer estado estacionario al primero se emiten radiaciones de las respectivas longitudes de onda. Si hacemos los cálculos pertinentes, constatamos que estas son las radiaciones que emite el tubo.

Al establecer el modelo atómico de Bohr relacionamos las frecuencias de la radiación emitida o absorbida con las transiciones energéticas de los átomos, pero en ningún momento habíamos podido medir la energía que absorben los átomos en una transición. Con el experimento de Franck y Hertz hemos comprobado que los átomos sólo pueden absorber unas cantidades fijas de energía, y que posteriormente emiten radiación característica del espectro de emisión del gas. Además, la frecuencia de la radiación está relacionada con la energía emitida por el átomo de acuerdo con la expresión  $E=h\nu$ , no tiene ninguna influencia la frecuencia a la que orbitan los electrones en el átomo, sólo las transiciones energéticas.

Para consolidar este modelo de emisión y absorción de radiación debemos probar que el gas de mercurio a baja presión sólo puede absorber radiación de unas determinadas longitudes de onda, que son las que producen transiciones del estado fundamental a los estados excitados.

### 2.1.2.- Iluminación del gas con luz monocromática.

Si ponemos gas mercurio a baja presión dentro de un tubo espectral y la iluminamos con luz monocromática la radiación sólo será absorbida si produce en los átomos de mercurio una transición del estado fundamental a alguno de los estados excitados. Los átomos excitados por este mecanismo no permanecerán excitados mucho tiempo y volverán al estado fundamental emitiendo radiación de la frecuencia correspondiente a cada una de las posibles transiciones que los llevan hasta el estado fundamental.

*A13.- De acuerdo con el modelo de Bohr y teniendo en cuenta el diagrama de energía del átomo de mercurio que hemos establecido antes, ¿Qué radiaciones monocromáticas podrán absorber los átomos de mercurio? ¿Qué radiaciones se observarán posteriormente en los espectros de emisión?*

De entre todas las frecuencias que puede absorber el gas, la menor de ellas será la que producirá la transición del estado fundamental al segundo estado estacionario y, posteriormente, la radiación emitida tendrá la misma frecuencia que la incidente, ya que la única transición posible para volver al estado fundamental es la transición directa. Así, si iluminamos gas mercurio con radiación de  $1,18 \cdot 10^{15}$  Hz se debería producir una transición de 4,9 eV en los átomos y posteriormente se debería observar que el mercurio emite esta radiación.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Los resultados experimentales constatan que esto es precisamente lo que ocurre. Al iluminar el gas mercurio con radiación monocromática de  $1,18 \cdot 10^{15}$  Hz sólo se observa la emisión de esta frecuencia por parte del gas, como corresponde a una transición directa. Asimismo, al iluminar con radiación de  $1,62 \cdot 10^{15}$  Hz se observan tres frecuencias en el espectro de emisión, que coinciden con las que se observan cuando se excita el gas con electrones acelerados. Cuando se repite la experiencia para otros gases se obtienen resultados equivalentes. A modo de ejemplo podemos decir que al excitar el magnesio con electrones acelerados por una diferencia de potencial de 3,2 V se emite la misma radiación que cuando se ilumina con radiación monocromática de  $0,6 \cdot 10^{15}$  Hz.

*A14.- Representad en un diagrama de energía lo que les ocurre a los átomos de magnesio al absorber energía de los electrones acelerados por una diferencia de potencial de 3,2 V. Comprobad que posteriormente emiten radiación de  $0,6 \cdot 10^{15}$  Hz.*

Los experimentos llevados a cabo con radiación monocromática y el experimento de Franck y Hertz sugieren una curiosa analogía: los electrones de una determinada energía producen sobre los átomos el mismo efecto que la radiación de una determinada frecuencia. Hasta el momento habíamos considerado que la radiación es una onda, y en una onda la energía está distribuida continuamente por el espacio. Pero los átomos de mercurio sólo pueden absorber 4,9 eV de la radiación de  $1,18 \cdot 10^{15}$  Hz y de ninguna otra. Es más, cuando los átomos emiten 4,9 eV lo hacen en forma de radiación de esta frecuencia. Esto hace pensar que esta radiación tiene la energía *concentrada* en *paquetes* de 4,9 eV y que, al interaccionar con átomos de mercurio, se absorben o emiten estos paquetes.

La posibilidad de que la energía se emitiera y absorberá *de golpe* por parte de los átomos ya nos había surgido al estudiar el espectro del hidrógeno. Vamos a profundizar en esta hipótesis a través del estudio de otros fenómenos de interacción entre radiación y materia.

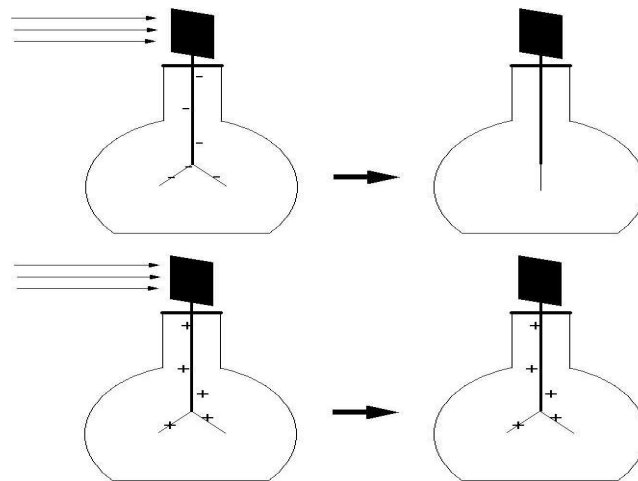
## 2.2.- ¿Está cuantizada la energía en la radiación?

### 2.2.1.- El efecto fotoeléctrico.

Como sabemos, una placa solar (llamada técnicamente placa fotoeléctrica) genera una corriente eléctrica cuando es iluminada. ¿Qué está ocurriendo en la placa que da lugar a esa corriente? Sabemos que todo flujo de corriente eléctrica está formado por partículas cargadas en movimiento pero, por su complejidad, se hace difícil estudiar de forma directa lo que ocurre en el interior de la placa. Sin embargo, podemos realizar algunas experiencias sencillas que ponen de manifiesto que la luz puede afectar a la carga eléctrica de un objeto.

Una de estas experiencias consiste en iluminar con radiación ultravioleta una lámina metálica conectada a un electroscopio cargado. Si la carga del electroscopio es negativa este se descarga rápidamente, en cambio, la descarga no se produce si la carga del electroscopio es positiva. Estos resultados aparecen ilustrados en la imagen inferior.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?



En la parte superior izquierda tenemos un electroscopio cargado negativamente conectado a una placa metálica. Cuando incide radiación ultravioleta sobre la placa del electroscopio se descarga, como se muestra en la parte superior derecha. En cambio, si el electroscopio está cargado positivamente (figura inferior izquierda) la radiación no logra descargarlo (abajo a la derecha).

*A15.- Explicad, de una manera cualitativa y como hipótesis, estos hechos.*

Para dar una descripción completa de la acción que realiza la luz sobre el metal es necesario ir más allá, no es suficiente con indicar que las partículas arrancadas son electrones. Hay que encontrar un mecanismo que permita describir cómo interacciona la radiación con el metal y cómo se arrancan los electrones tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo.

*A16.- ¿Cómo explicar, de acuerdo con la física clásica, la emisión de electrones por parte del metal? ¿Cómo se puede explicar atendiendo al modelo cuántico que hemos establecido? Usad diagramas de energía para poner a prueba ambos modelos.*

*A17.- ¿Cómo podemos poner a prueba los modelos propuestos?*

En tanto que no es posible observar el electrón de forma directa, tendremos que poner a prueba las hipótesis propuestas analizando las evidencias experimentales que se pueden prever. Es de esperar que al modificar las características de la luz incidente se produzcan cambios en las magnitudes características de los electrones emitidos. El acuerdo o discrepancia entre las previsiones realizadas y las medidas que podemos efectuar experimentalmente nos darán indicios de la validez de los modelos de emisión propuestos.

*A17a.- Indicad qué características de los electrones emitidos se verán afectadas al variar la intensidad o el color de la luz incidente.*



## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

De acuerdo con cada hipótesis, podemos hacer las predicciones que recogemos en la tabla siguiente:

	Hipótesis A (modelo clásico)	Hipótesis B (modelo cuántico)
Aumento de la frecuencia de la radiación	No tendrá ningún efecto.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Producirá transiciones más energéticas en los electrones, que tendrán más energía cuanto más elevada sea la frecuencia.</li> <li>• Si no se alcanza una frecuencia mínima, no se liberarán electrones.</li> </ul>
Aumento de la intensidad de la radiación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se liberarán más electrones porque la onda transporta más energía.</li> <li>• Los electrones liberados tendrán más energía porque la onda les puede transferir más energía.</li> </ul>	Se liberarán más electrones porque hay más energía disponible en la onda, siempre que la frecuencia sea superior a la frecuencia mínima necesaria para liberar electrones. Es similar a lo que pasaba con las líneas espectrales más intensas del espectro, que se correspondían con una mayor cantidad de transiciones.
	Habrà que esperar un cierto tiempo hasta que se empiecen a liberar electrones, porque la energía llega de manera continua con la onda.	Si consideramos que la luz es una onda, tendremos que esperar un cierto tiempo para detectar electrones emitidos. Si consideramos que la energía llega «de golpe», no hará falta esperar para observar electrones emitidos, aunque la luz tenga una intensidad muy baja.

Una vez tenemos las evidencias observables que se desprenden del mecanismo de emisión propuesto es necesario que las busquemos experimentalmente.

*A18.- ¿Qué podemos hacer para contrastar nuestras predicciones? Diseñad un montaje experimental.*

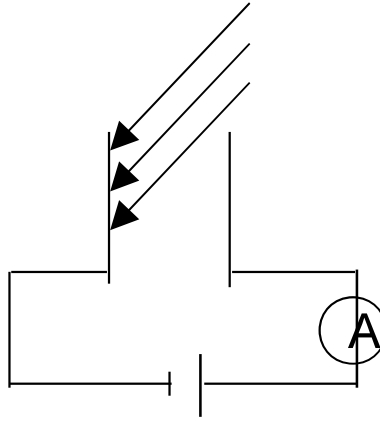
*A18a.- ¿Cómo podemos medir la cantidad de electrones emitidos?*

Lo primero que habrá que hacer para conseguir contar los electrones emitidos es recogerlos y hacerlos pasarla a través de un cable, de forma que midiendo la intensidad que lo recorre seremos capaces de determinar la cantidad de electrones que se emiten en un segundo (n).

$$n = \frac{I}{e}$$

Esto lo podemos hacer de varias maneras pero la más sencilla desde el punto de vista experimental consiste en poner una placa conductora cerca de la placa emisora, como se muestra en la figura. Podemos, además, usar una pila que cargue positivamente la placa conectada al amperímetro. Así, los electrones serán atraídos hacia la placa y se favorecerá la detección de todos los electrones.

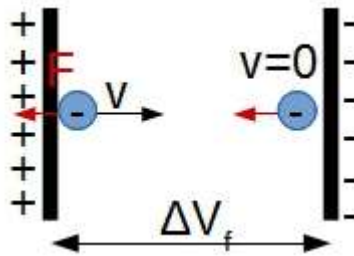
### ¿Cómo se emite y absorbe radiación?



Montaje experimental para contar los electrones emitidos.

### A18b.- ¿Cómo podemos medir la energía de los electrones emitidos?

Para medir la energía con que son emitidos los electrones aplicamos un campo que se oponga a su avance. Esto se consigue invirtiendo la polaridad de la pila. A medida que aumentamos la diferencia de potencial entre las placas serán más los electrones que no logren llegar a la otra placa ya que no tienen energía suficiente para pasar de un lugar de mayor potencial a otro menor, de forma que cuando la diferencia de potencial sea suficientemente elevada ningún electrón será detectado, habremos alcanzado lo que llamamos potencial de frenado ( $V_f$ ).



Al aplicar una diferencia de potencial que se opone al avance de los electrones conseguimos que no alcancen la placa conectada al amperímetro, en este caso con carga negativa.

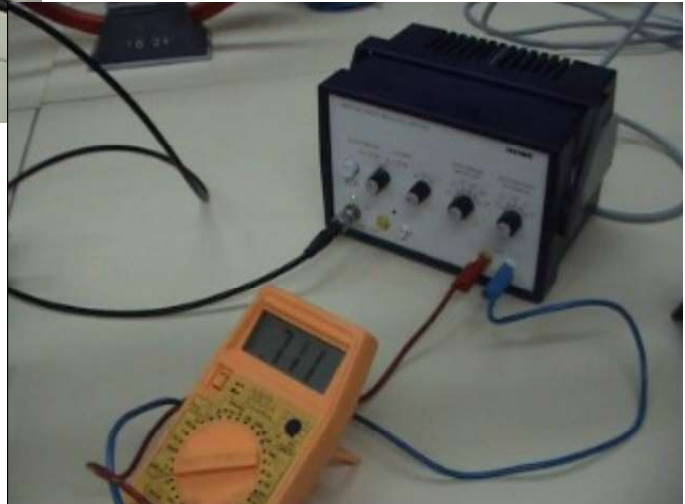
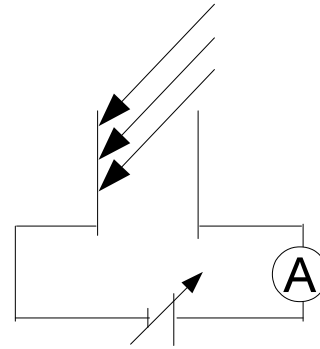
En este caso podremos medir la energía cinética máxima de los electrones emitidos.

$$E_{c \max} = e \cdot \Delta V_f$$

### A18c.- ¿Cómo podemos cambiar las características de la luz incidente?

Con una fuente luminosa adecuada podremos seleccionar la intensidad y la frecuencia de la radiación incidente. Podemos cambiar la intensidad de la radiación incidente cambiando la bombilla por una de diferente potencia o acercando y alejando la fuente luminosa a la placa. Respecto a la frecuencia, podemos usar fuentes luminosas de colores o podemos usar una fuente de luz blanca y seleccionar las frecuencias deseadas usando filtros luminosos. El montaje experimental final es el que se muestra en la figura.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



Esquema del montaje experimental final e imagen del montaje real.

Una vez realizado el experimento se han obtenido los siguientes resultados:

- R1.- Existe una frecuencia mínima de la luz por debajo de la cual no se produce emisión de electrones, cualquiera que sea el tiempo de espera.
- R2.- Cuando aumenta la intensidad de la luz aumenta la cantidad de electrones emitidos pero no su energía.
- R3.- Cuando aumenta la frecuencia de la luz aumenta la energía de los electrones emitidos pero no la cantidad.
- R4.- No se observa un tiempo de retraso, por muy débil que sea la intensidad de la luz incidente la emisión de electrones es siempre inmediata, siempre que la frecuencia sea superior a la frecuencia mínima comentada en R1.

Las medidas cuantitativas se resumen en la siguiente tabla:

$\lambda$ (nm)	578 (naranja)	546 (amarillo)	436 (violeta)	405 (violeta)	366 (UV)
$\nu$ (Hz)	$5,19 \cdot 10^{14}$	$5,49 \cdot 10^{14}$	$6,88 \cdot 10^{14}$	$7,41 \cdot 10^{14}$	$8,20 \cdot 10^{14}$
$V_f$ (V)	0,585	0,716	1,265	1,420	1,701

Medidas cuantitativas

A19.- Analizad las hipótesis establecidas con anterioridad a la luz de los resultados.

Acabamos de dar por válido que la luz se absorbe "de golpe", ya que es la única manera de explicar que no haya un tiempo de retraso. También propusimos, al estudiar los espectros, que la luz se emitía "de golpe", cuando un electrón cambiaba de un estado

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

estacionario a otro sin contemplar la posibilidad de que estuviera en estados intermedios. Si esto es así, ¿podemos seguir manteniendo una imagen ondulatoria para la luz? ¿No deberíamos admitir que la luz no se propaga como ondas sino como "trozos" o "paquetes" de energía que emiten o absorben en unidades completas?

Históricamente, esta hipótesis fue propuesta por Einstein. En sus palabras:

*"De acuerdo con la hipótesis aquí considerada, en la propagación de un rayo de luz emitido desde una fuente puntual la energía no está distribuida de manera continua sobre volúmenes de espacio cada vez mayores, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía localizados en puntos del espacio que se mueven sin dividirse, y que sólo pueden ser absorbidos o generados en unidades completas".*

A20.-Representad las siguientes radiaciones haciendo uso del modelo electromagnético y del modelo cuántico introducido como hipótesis. ¿Cómo damos cuenta con cada modelo de la intensidad y la frecuencia?

- Una luz azul de 450nm de longitud de onda.
- Una luz azul de la misma frecuencia que el anterior pero más intensa.
- Una luz verde poco intensa .

Atendiendo sólo al aspecto cualitativo se hace difícil aceptar una hipótesis fuertemente contradictoria con la física conocida hasta el momento. Algunas experiencias, como la interferencia, demuestran claramente que la luz es una onda. Al menos debemos profundizar en el análisis de resultados incluyendo el aspecto cuantitativo.

A21.- Determinad cuantitativamente, de acuerdo con la hipótesis bajo estudio, la energía del electrón liberado. Usad los datos experimentales para probar la validez de las hipótesis.

De acuerdo con la hipótesis del cuanto de radiación y teniendo en cuenta que la energía debe conservarse para cada proceso individual, la energía final del electrón será igual a la energía inicial más la energía que ha adquirido al absorber el cuanto.

$$E_{final} = E_{inicial} + E_{cuanto} \rightarrow E_{final} = E_{inicial} + h \cdot \nu$$

Si tenemos en cuenta que  $E_{cuanto} = h\nu$  y designamos con  $W$  la energía mínima que hay que aportar para arrancar el electrón (que es igual a la energía mínima del electrón dentro del metal  $E_i = -W$ ), llegamos a la expresión

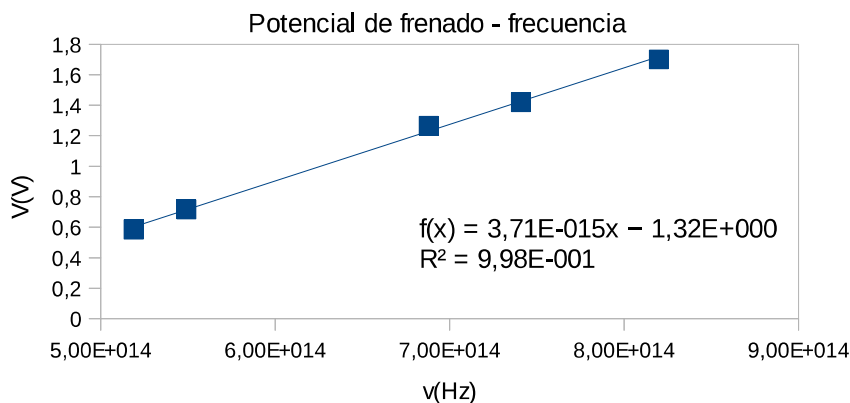
$$E_{final} = h\nu - W$$

En nuestro montaje experimental la energía final del electrón se mide aplicando una diferencia de potencial. Introduciendo en la ecuación anterior la relación entre la energía del electrón y el potencial de frenado llegamos a:

$$e \cdot \Delta V_{frenado} = h\nu - W$$

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

A21b (enunciado alternativo).- En la gráfica están representados los resultados experimentales y la ecuación de la recta que mejor se ajusta a ellos. Discutid la validez de la ecuación propuesta.



A pesar de la validez de la hipótesis del cuanto de radiación para explicar el efecto fotoeléctrico somos conscientes de que no la podemos aceptar sin más. Hasta ahora hemos usado el modelo ondulatorio de la radiación para explicar todos los fenómenos luminosos. En esas explicaciones, los conceptos de frecuencia y longitud de onda eran fundamentales, pero pierden el sentido al introducir el cuanto de radiación. Tendríamos que revisar todo lo que hemos hecho hasta aquí para ver en qué medida el cuanto de radiación puede dar cuenta de los hechos experimentales conocidos, y hacer todo lo posible para llegar a un modelo de radiación coherente y único. No podemos aceptar, sin más, dos modelos radicalmente diferentes, y más cuando uno de ellos sólo puede dar cuenta de un hecho experimental.

A22.- Como hemos comentado, no es sencillo que la comunidad científica acepte ideas que contradicen el conocimiento establecido por el simple hecho de explicar un único resultado experimental. El texto que sigue a continuación explica claramente el rechazo que sufrió la hipótesis de los cuantos de radiación, que fue introducida por Einstein en 1905. Léedlo y responded a las actividades que se proponen.

El rechazo a la hipótesis de Einstein todavía era manifiesto en 1913. Así, al proponer a Einstein para la Academia Prusiana de Ciencias, Planck, Nerst, Rubens y Warburg indicaban:

*"Los firmantes miembros de la Academia tienen el honor de proponer al Dr. Albert Einstein, profesor ordinario de física teórica del Instituto Politécnico Federal de Zurich, para su elección como miembro regular de la Academia. [...] En suma, puede afirmarse que, entre los problemas importantes que tanto abundan en la física moderna, es difícil encontrar alguno del cual Einstein no adopte una posición notoria. El hecho de que alguna vez no dé en el blanco en sus especulaciones, como por ejemplo, la hipótesis sobre los cuantos de luz, no ha de ser esgrimido en su contra. Dado que sin asumir de vez en cuando un riesgo resulta imposible, hasta en la ciencia natural más exacta, introducir verdaderas innovaciones."*

Esta falta de consideración al cuanto de Einstein se constata también en el modelo atómico que en 1913 propuso Bohr. Para explicar el espectro del hidrógeno Bohr hacía uso de la teoría electromagnética cuando afirmaba que el electrón gana o pierde energía cuando pasa de un estado estacionario a otro absorbiendo o emitiendo radiación homogénea de carácter ondulatorio, evitando de esta forma recurrir al cuanto de radiación.

Los primeros resultados experimentales sólidos sobre el efecto fotoeléctrico aparecen en 1915 cuando Millikan, después de 10 años de un trabajo riguroso y meticuloso encaminado a reafirmar la naturaleza ondulatoria de la luz, demuestra la validez de la ecuación propuesta

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

por Einstein ( $E = h\nu - W$ ). Pero, a pesar de la adecuación de los resultados experimentales a la ley einsteniana del efecto fotoeléctrico, Millikan afirmaba: *"La ecuación fotoeléctrica de Einstein [...] parece predecir exactamente en todos los casos los resultados observados [...] Pero la teoría semicorpuscular mediante la cual Einstein llegó a su ecuación parece hoy completamente insostenible"*.

En 1921, más de 15 años después de la hipótesis de los cuantos, cuando se le entrega el premio Nobel de 1921 a Einstein se afirma que el premio era *"por los servicios a la física teórica y especialmente por el descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico"*, pero nada se decía del cuanto de luz.

- *¿Por qué motivo la comunidad científica era tan reticente a aceptar la hipótesis del cuanto de radiación?*
- *¿Qué evidencias experimentales tenían para continuar aceptando como válido el modelo ondulatorio de radiación?*

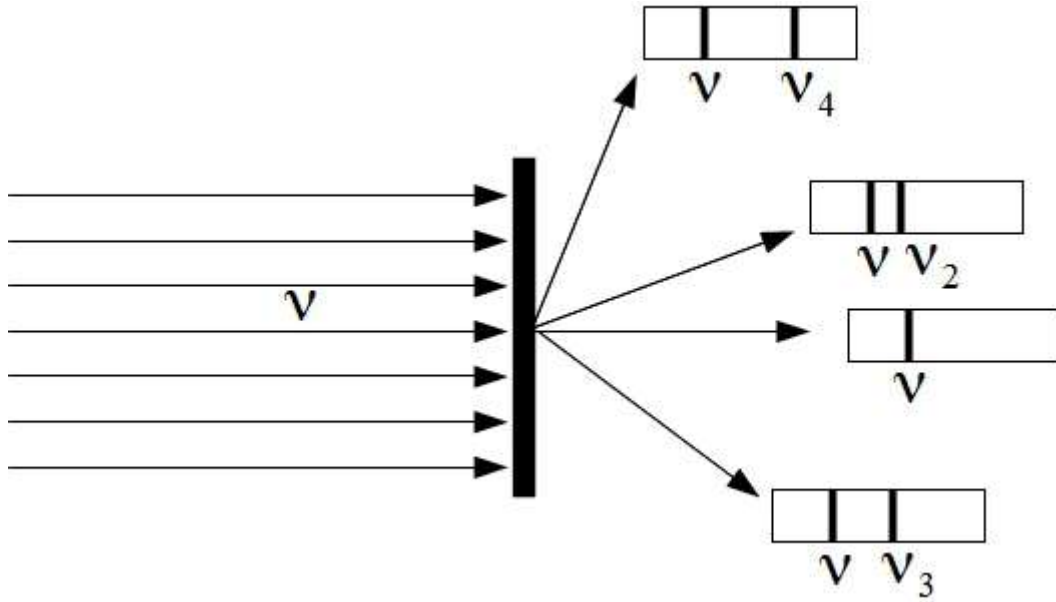
### 2.2.2.- El efecto Compton

Hasta el momento hemos estudiado los efectos de la radiación sobre electrones ligados. Al dar cuenta de los espectros consideramos que los electrones están ligados a los átomos y al explicar el efecto fotoeléctrico consideramos que los electrones están ligados al metal. En estas condiciones, y siempre de acuerdo con nuestros avances, los electrones no pueden tener cualquier energía y es necesaria radiación de unas frecuencias determinadas para conseguir transformaciones. Eso limita la cuantización de la energía a los electrones y nos impide determinar si la energía de la radiación está cuantizada. Para superar esta barrera deberemos usar electrones libres (cuya energía no está cuantizada) y analizar si hay indicios de cuantización en la radiación.

Cuando se hacen incidir rayos X sobre electrones libres<sup>7</sup> se observa que en la radiación difusa hay dos frecuencias, una coincidente con la de los rayos X incidentes y otra de menor frecuencia (a la que llamaremos radiación secundaria). La diferencia de frecuencias depende del ángulo con que se realiza la medida. Si se mide en la misma dirección en que se produce la incidencia no se observa la radiación secundaria de menor frecuencia, pero a medida que aumentaba el ángulo en que se realiza la medida con respecto a la radiación incidente aumenta la diferencia de frecuencias entre las radiaciones detectadas, como se muestra en la figura.

7.- En tanto que no se pueden poner electrones libres estáticos por hacer incidir rayo X sobre ellos se usan láminas de grafito u otros materiales. El grafito es un buen conductor de forma que se puede aceptar que los electrones a su interior están prácticamente libres, que la energía de enlace en la red es 0.

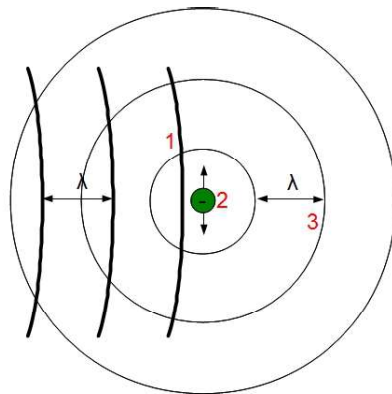
## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?



Al hacer incidir rayos X sobre una lámina de grafito<sup>7</sup> se observa radiación dispersada en todas direcciones. Dicha radiación está formada por dos frecuencias, una igual a la de la radiación incidente y otra menor. Además, la diferencia entre las frecuencias no es constante, sino que depende del ángulo de dispersión.

*A23.- Dad una interpretación de estos hechos experimentales. Tomad en consideración que la radiación puede estar formada por ondas o por cuantos de energía.*

Con la teoría ondulatoria de la radiación hay que considerar los rayos X como una onda de elevada frecuencia y una determinada amplitud. Al interactuar con los electrones libres esta onda les transfiere energía y los lleva a realizar oscilaciones forzadas. Esto da lugar sólo a una radiación secundaria de la misma frecuencia que la incidente y uniformemente distribuida por el espacio, no hay lugar para una radiación secundaria de menor frecuencia.

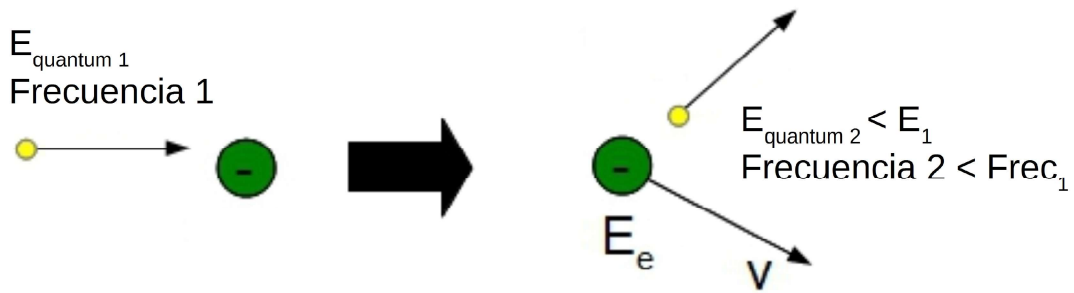


**1:** Los rayos X (ondas de elevada frecuencia) llegan a los electrones y les transmiten energía. **2:** los electrones adquieren un movimiento vibratorio por estar sometidos a la acción de una onda y oscilan con la misma frecuencia que la onda. **3:** debido al movimiento vibratorio, los electrones, por ser partículas cargadas, emiten radiación de frecuencia coincidente con la de vibración, en todas direcciones.

Una explicación muy diferente es la que proporciona la hipótesis del cuanto de radiación. Si la luz está formada por paquetes energéticos se puede interpretar la dispersión de radiación como un proceso individual de colisión entre un cuanto de radiación y un electrón del medio. Al producirse la colisión el electrón absorbe la energía del cuanto y

**¿Cómo se emite y absorbe radiación?**

libera un segundo cuanto de menor energía. Esto explicaría la formación de radiación de menor frecuencia.

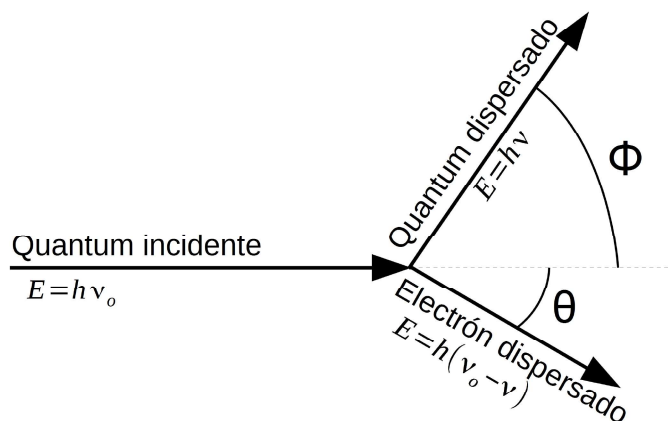


Al incidir sobre el electrón el fotón es absorbido y el electrón adquiere su energía. Seguidamente el electrón libera un segundo fotón de menor energía que el anterior perdiendo parte de la energía que había adquirido. El segundo fotón tiene menos energía que el primero, y por tanto menor frecuencia.

La diferencia de energía del cuanto incidente y del segundo cuanto debe ser absorbida por el electrón, que saldrá dispersado. La detección de estos electrones dispersados, que no prevé la teoría clásica, permitiría poner a prueba dos hipótesis.

*A23b.- Indica cuáles deberían ser las características de los electrones dispersados: ¿En qué dirección saldrán dispersados?*

De acuerdo con la teoría clásica no debe haber dispersión de electrones, la existencia de electrones dispersados supondría un problema grave para el modelo ondulatorio de radiación. De acuerdo con la hipótesis cuántica de la radiación deberíamos detectar electrones dispersados, con energía igual a la diferencia de energías entre el cuanto incidente y el dispersado. La hipótesis no nos habla de una dirección preferente para la dispersión de los electrones.



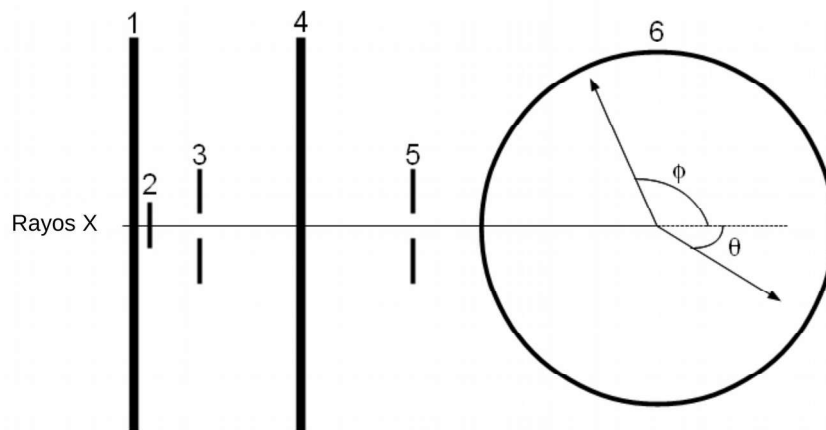
Posible mecanismo de interacción entre el cuanto de rayos X y el electrón. El electrón absorbe el cuanto y emite un segundo cuanto de menor energía, dando lugar a una radiación dispersada de menor frecuencia. En la interacción se satisface el principio de conservación de la energía y del momento lineal.

Para detectar la existencia de electrones dispersados podemos realizar la experiencia de dispersión de radiación en el interior de una cámara de niebla. La cámara de niebla permite visualizar las trayectorias de las partículas cargadas que se mueven en su



## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

interior: los electrones dispersados. El montaje que podemos utilizar es el que aparece en la imagen siguiente.



- 1.- Caja de plomo alrededor de la fuente de rayos X.
- 2.- Filtro.
- 3.- Diafragma.
- 4.- Caja de plomo alrededor de la cámara de niebla.
- 5.- Diafragma.
- 6.- Cámara de niebla.

Montaje experimental para el estudio de la dispersión de rayos X en la cámara de niebla. Los rayos X inciden en el gas de la cámara de niebla y se observa un electrón dispersado en la dirección  $\theta$  vez que se puede medir radiación X dispersada en la dirección  $\Phi$ . Ambos ángulos guardan una relación matemática bien definida. Además, la energía de los electrones dispersados aumenta con el ángulo de dispersión a la vez que la radiación detectada contiene dos frecuencias, la diferencia de las cuales crece con el ángulo de dispersión.

Los resultados experimentales ponen de manifiesto que sí hay electrones dispersados. Es más, demuestran que por cada quantum de radiación detectado en una dirección  $\phi$  se detecta un electrón en la dirección  $\theta$  y que los dos ángulos guardan una relación matemática estricta.

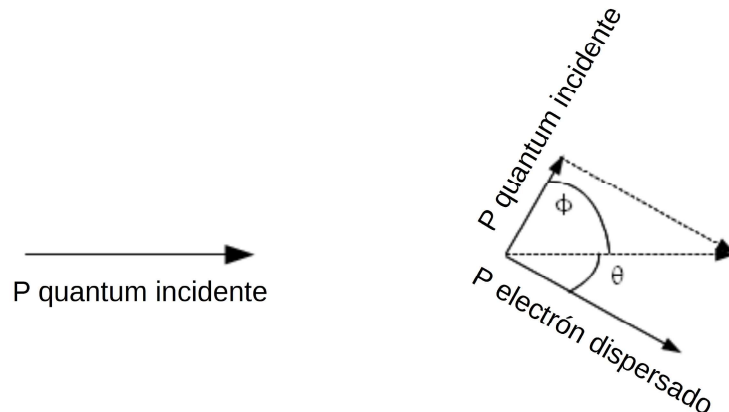
*A23c.- Dad una interpretación de estos hechos. ¿Cómo podemos explicar que haya una relación bien definida entre la dirección en que sale dispersado cada electrón y quantum de radiación?*

El principio de conservación de la energía no impone una relación entre las direcciones en las que salen dispersados cada electrón y cada cuanto. Para relacionar ángulos de dispersión hay que recurrir al principio de conservación del momento lineal. Analizaremos la interacción entre el cuanto incidente y el electrón de manera similar a como analizábamos el choque entre bolas de billar en cursos anteriores (pero teniendo en cuenta las diferencias existentes entre una bola de billar, que puede transferir cualquier energía en un choque, y un cuanto de radiación, que debe ser absorbido y emitido en unidades completas).

Ahora bien, aplicar el principio de conservación del momento lineal supone admitir que los cuantos de radiación tienen momento lineal, como las partículas materiales. Hasta el momento habíamos considerado los cuantos como paquetes de energía sin masa, y no habíamos tomado en consideración la posibilidad de que tuvieran momento lineal. Si atribuimos momento lineal a los cuantos, y de acuerdo con el esquema del montaje experimental que hemos introducido para estudiar el efecto Compton, podemos hacer la siguiente representación de vectores  $\vec{p}$  antes y después de la interacción. Se evidencia

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

que la relación existente entre la dirección de dispersión de electrones y cuantos es una consecuencia del principio de conservación del momento lineal.



El electrón y el cuanto no pueden salir dispersados en cualquier dirección, sólo en aquella que satisface el principio de conservación del momento lineal. Esto pone de manifiesto que la radiación es portadora de momento lineal y que éste debe conservarse en cada proceso individual, como se muestra en el diagrama siguiente, donde se observa que la suma de momentos lineales del cuanto y del electrón dispersados es igual al momento lineal del cuanto incidente.

La interpretación de este fenómeno nos lleva a considerar la radiación como un flujo de entes que tienen energía y momento lineal, al igual que cualquier otro flujo de partículas. Debemos aceptar la existencia de partículas de luz sin masa, que en la actualidad se llaman fotones.

En todos los fenómenos analizados hasta el momento que han apoyado las hipótesis cuánticas se ha puesto de manifiesto que en las interacciones individuales de la radiación con la materia siempre que hablamos de una transferencia de energía entre la radiación y la materia tenemos que hablar de una frecuencia. Ahora bien, a pesar del reconocimiento de la existencia del cuanto de radiación el problema de la naturaleza de la luz dista mucho de encontrarse cerrado. No podemos aceptar dos modelos para la luz que son contradictorios aunque los dos tengan resultados experimentales que los avalan, debemos recuperar la coherencia del conocimiento científico y establecer un modelo único que tenga la capacidad de explicar todos los hechos experimentales.

### Recapitulación:

- ¿Qué problema nos habíamos planteado?
- ¿Como explicábamos la emisión y absorción de radiación con nuestros conocimientos iniciales? ¿Qué hechos experimentales no conseguíamos explicar?
- ¿Qué mecanismo hemos introducido, como hipótesis, para explicar la emisión y absorción de radiación? Aporta argumentos que apoyen a ese mecanismo. Da cuenta de todas las características de la luz.
- ¿Qué problemas tenemos que abordar como consecuencia de los modelos introducidos?

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

## RECAPITULACIÓN

**¿Qué problema nos habíamos planteado?**

El problema que nos planteamos fue encontrar un mecanismo que permitiera explicar la emisión y absorción de radiación que fuera capaz de explicar fenómenos como los espectros, la fluorescencia y la fosforescencia y el funcionamiento de aparatos tecnológicos como las bombillas, los láseres, los leds o las placas fotoeléctricas.

**¿Cómo explicábamos la emisión y absorción de radiación por los átomos con nuestros conocimientos iniciales?**

De acuerdo con la física clásica el átomo contiene electrones que giran alrededor del núcleo de forma continua emitiendo radiación de la misma frecuencia que la frecuencia orbital del electrón. Esta radiación se propaga por todo el espacio en forma de ondas. Ahora bien, al emitir radiación el átomo debe perder energía y esto lleva a los electrones a caer sobre el núcleo. Además, a medida que los electrones caen van girando más rápido cambiando la frecuencia de rotación y originando radiación de frecuencia diferente. De acuerdo con este modelo, el espectro de emisión de los gases debería ser continuo.

**¿Qué mecanismo hemos introducido, como hipótesis, para explicar la emisión y absorción de radiación? Aporta argumentos que apoyan a ese mecanismo. Da cuenta de todas las características de la luz.**

De acuerdo con las ideas cuánticas que hemos introducido la luz está formada por cuantos de energía que emiten o absorben en cantidades completas, llamados fotones, que transportan una energía  $E = h\nu$ . La energía de los átomos también está cuantizada: los electrones sólo pueden moverse en unas pocas órbitas alrededor del núcleo, y lo hacen sin emitir energía. Estos modelos de radiación y materia nos ayudan a explicar la emisión y absorción:

- Cuando el átomo emite radiación un electrón pasa de una órbita estacionaria a otra órbita estacionaria de menor energía dando lugar a un fotón con una frecuencia que satisface la relación  $E_f - E_i = h\nu$ . Este fotón se propaga en todo momento en una dirección determinada y no en todas las direcciones del espacio.
- Un átomo sólo puede absorber un fotón si al adquirir toda la energía que transporta se produce una transición de un estado estacionario a otro estado estacionario de más energía, de acuerdo con misma la expresión que rige la emisión.

De esta manera se ponen límites a los cambios que pueden tener lugar en el interior del átomo de hidrógeno y se impide que se destruya. Cada transición da lugar a radiación de una determinada frecuencia y a una línea de color en el espectro, como las transiciones son limitadas también lo son las frecuencias que se pueden emitir y sólo se verán unas pocas líneas en el espectro.

De acuerdo con este modelo, dos radiaciones que tienen la misma frecuencia están formadas por fotones de la misma energía, siendo más intensa la radiación que esté formada por una mayor cantidad de fotones. Cuando un átomo emite radiación de diferentes frecuencias (un espectro de varias líneas) es más intensa aquella que está producida por una mayor cantidad de transiciones entre estados cuánticos dentro del

### **¿Cómo se emite y absorbe radiación?**

átomo. Cuando un átomo absorbe radiación, si la frecuencia es suficiente para arrancar electrones, se arrancarán más electrones cuanto mayor sea la intensidad de la radiación porque estará formada por más cuantos, como se observa en el efecto fotoeléctrico.

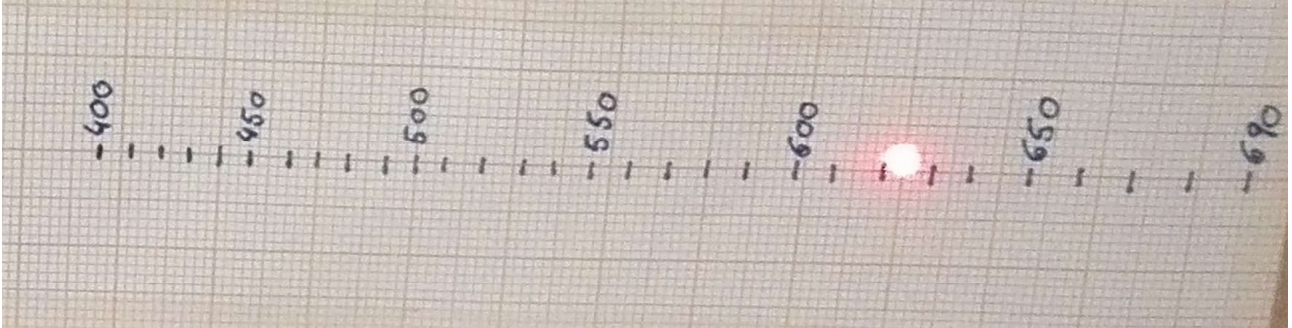
### **¿Qué problemas tenemos abordar como consecuencia de los modelos introducidos?**

Como resultado de nuestros avances tenemos dos modelos contradictorios para explicar el comportamiento de la radiación: un modelo ondulatorio y un modelo de paquetes de energía. Tenemos que buscar un modelo coherente que nos permita explicar a la vez los fenómenos que requieren un modelo ondulatorio (como la interferencia, la difracción o la existencia de frecuencia y longitud de onda en la radiación) y los que requieren un modelo corpuscular (como el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y los espectros).

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

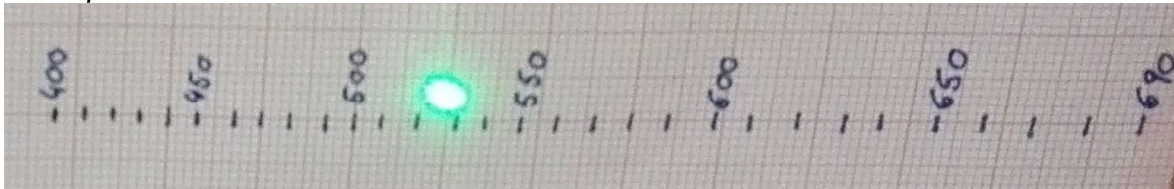
### 3.- Posibles aplicaciones del modelo elaborado

A24.- Al observar el espectro de un láser se ve que está formada únicamente por una frecuencia. Explicad, usando el modelo elaborado, el proceso por el que los átomos que forman el aparato emiten la luz del láser. En la imagen siguiente se muestra el espectro de ese láser.



Espectro del láser rojo. La escala indica la longitud de onda de la radiación en nanómetros.

A24b.- Explicad cómo funciona un láser verde.



Espectro del láser verde. La escala indica la longitud de onda en nanómetros.

A25.- Observad la luz emitida por una bombilla de bajo consumo y explicad su funcionamiento. Usad el modelo elaborado durante el desarrollo de esta unidad.



Espectro de la bombilla de bajo consumo.

### ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

A26.- Al iluminar con luz roja un adhesivo fosforescente (1) este no emite luz (2). Al hacerlo con luz verde tampoco se produce ningún efecto (3 y 4). Pero cuando se ilumina con luz azul se puede observar que emite luz (5 y 6). Proponed un mecanismo que permita explicar este comportamiento. Usad los modelos cuánticos.

Si las luces empleadas hubieran sido más intensas, ¿en qué cambiarían los resultados?



Los adhesivos fosforescentes solo brillan cuando se han iluminado con luz azul. En el primer fotograma se observa la estrella iluminada con luz roja, en el segundo fotograma se puede ver que al apagar la luz la estrella no luce. Lo mismo ocurre al iluminarla con luz verde (fotogramas 3 y 4). Pero al iluminarla con luz azul la estrella sí que luce.

A26b.- ¿Cómo podemos explicar que esté luciendo durante una rato?

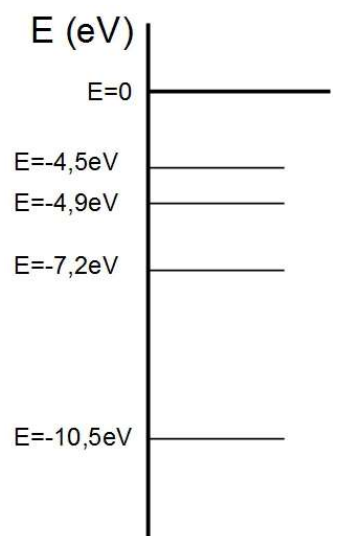
A27.- Sabemos que los Rayos X, y especialmente los rayos gama, son altamente peligrosos para la salud. Estas radiaciones son conocidas como radiaciones ionizantes ya que tienen la capacidad de ionizar moléculas biológicas vitales para las funciones celulares, como el ADN. Las células así afectadas pueden morir o sufrir cambios importantes en sus funciones, reproducirse de forma descontrolada y producir un tumor.

Pero pese a su carácter nocivo, ambos tipos de radiación tienen aplicaciones médicas importantes. Concretamente, los rayos gama son usados en radioterapias. Para acabar con un tumor, la zona afectada es irradiada de forma controlada con rayos gama, y eso provoca la muerte de las células irradiadas.

¿Por qué las radiaciones de alta frecuencia son ionizantes y las de baja frecuencia no lo son? ¿Por qué no hacemos referencia a la intensidad al discutir la peligrosidad de una radiación? Discutid el carácter nocivo de las radiaciones más comunes en nuestro entorno.

A28.- El diagrama lateral muestra los estados estacionarios del cristal de una piedra preciosa. A causa de la luz ambiental, sus electrones se pueden encontrar en cualquiera de los estados estacionarios que aparecen representados al diagrama.

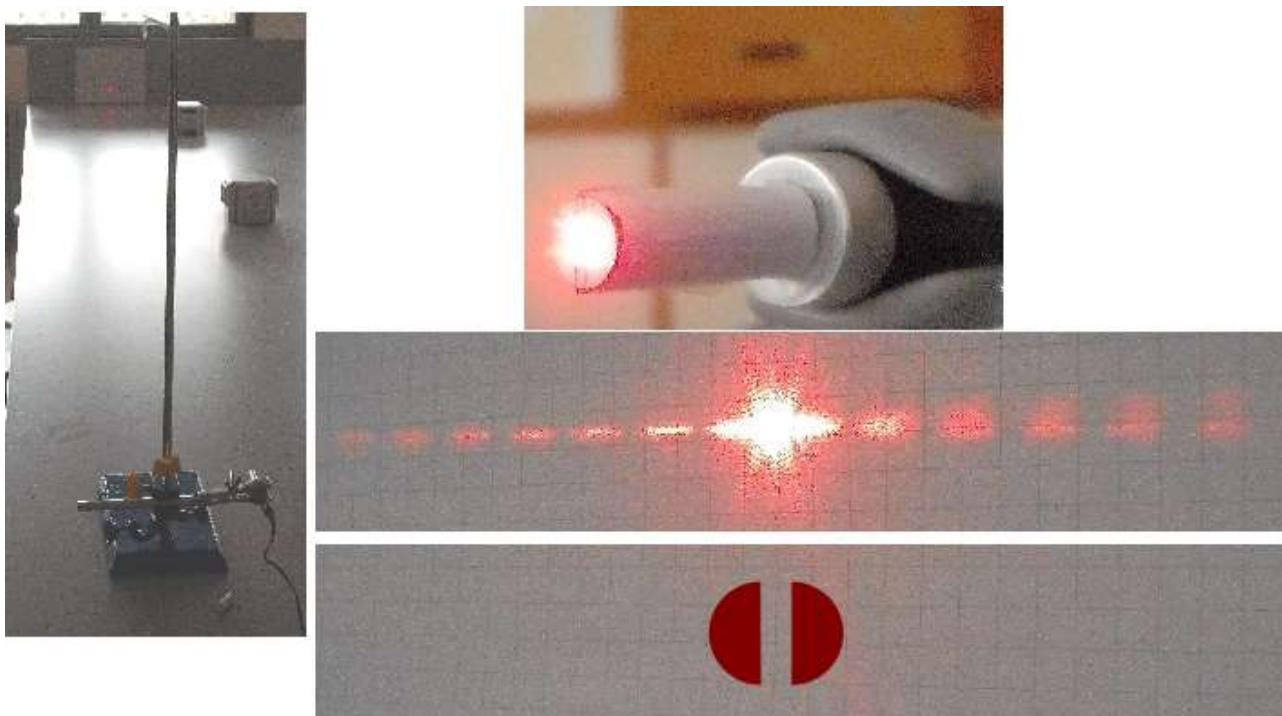
- ¿Qué pasa si la iluminamos con luz verde formada por fotones de  $2,3\text{eV}$ ?
- ¿Qué pasa si la iluminamos con luz violeta formada por fotones de  $3\text{eV}$ ?
- ¿Y si la iluminamos con las luces anteriores pero con un haz que tiene el doble de fotones?
- Explica cómo será el espectro luminoso que emite la piedra.



#### 4.- Búsqueda de un cuerpo de conocimientos coherente

Hemos comprobado la capacidad del modelo cuántico para dar cuenta de los procesos individuales de emisión, absorción o dispersión de radiación, así como de otros fenómenos en los que no interviene la radiación (como el experimento de Franck y Hertz). Sin embargo, también hemos advertido que este modelo es insuficiente para explicar:

- La formación de figuras de interferencia y difracción (imagen inferior), que requieren de una concepción ondulatoria de la radiación. Ya habíamos comentado que esta fue la causa principal del rechazo que recibió la hipótesis del cuanto de radiación de Einstein. Incluso una vez aceptado el fotón, la existencia de dos modelos para dar cuenta del comportamiento de la radiación suponía un problema de coherencia dentro de la física. Así lo manifestaban investigadores como William Lawrence Bragg, que hacían referencia a esta situación indicando que "*los físicos usan la teoría ondulatoria lunes, miércoles y viernes y la teoría corpuscular martes, jueves y sábado*".



En la imagen izquierda se ve un láser montado sobre un pie de laboratorio apuntando hacia una pantalla situada al fondo. La pantalla consiste en una hoja de papel cuadriculado donde cada cuadradito tiene 0,5 cm de lado. Como se observa en la imagen superior, hay situado un hilo de alambre delante del láser. Sobre la pantalla se forma la imagen de la fotografía central: una secuencia de zonas iluminadas y oscuras. Este patrón corresponde a un fenómeno de interferencia, las zonas de mayor intensidad luminosa se corresponden con las regiones donde la interferencia es constructiva mientras que las zonas oscuras corresponden a los puntos donde la interferencia es destructiva. Si la luz consistiera en un flujo de partículas esperaríamos obtener una figura como la que aparece en el dibujo inferior: un círculo que reproduce la forma de la apertura del láser con una zona central no iluminada que se corresponde con la sombra del alambre.

- El modelo establecido no permite prever la estructura de los niveles energéticos de los átomos, moléculas o cristales. Sólo se pueden deducir *ad hoc*, analizando su espectro e induciendo la estructura energética que lo ha generado. Además, aunque podemos dar una interpretación cualitativa de los espectros de gases

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

distintos al hidrógeno, el modelo cuántico de emisión y absorción de radiación que hemos establecido no permite obtener un resultado cuantitativo satisfactorio.

- El significado de las magnitudes que aparecen en la ecuación  $E = h\nu$ . Esta ecuación mezcla una magnitud típicamente corpuscular (E, energía del cuanto de radiación como corpúsculo, magnitud que no tiene sentido bajo el modelo ondulatorio de radiación) y una magnitud ondulatoria ( $\nu$ , frecuencia de la radiación, magnitud sin sentido bajo un modelo corpuscular de la radiación). No podemos aceptar sin más una ecuación que requiere de dos modelos contradictorios para ser interpretada.
- El carácter probabilístico de las transiciones electrónicas. Desde un primer momento fueron muchos los físicos que advirtieron que la cuantización de la energía suponía una ruptura importante con la física anterior, y no sólo en cuanto a las ideas sobre la estructura de la materia sino también respecto al carácter determinista de las leyes de la física. La física clásica permitía prever cualquier cambio en los sistemas, avanzar qué iba a pasar y cuando iba a pasar. La nueva física sólo permite establecer un catálogo de posibles eventos, pero no permite saber cuál de ellos es el que ocurrirá ni cuándo ocurrirá. ¿Nos tenemos que conformar con ello? ¿Podemos mejorar nuestros modelos para recuperar ese carácter predictivo?
- Que el efecto producido por una radiación no dependa de su intensidad. El hecho de que una radiación poco intensa pueda producir un efecto que no puede producir una radiación muy intensa de menor frecuencia supone una ruptura de la relación causa-efecto. Una luz intensa implica la existencia de un campo electromagnético intenso, mucho más capaz de conseguir un efecto determinado que no un campo electromagnético débil, correspondiente a una luz poco intensa. En cambio, la frecuencia sólo indica a qué ritmo varía el campo, no la fuerza que puede ejercer sobre las partículas cargadas como los electrones.

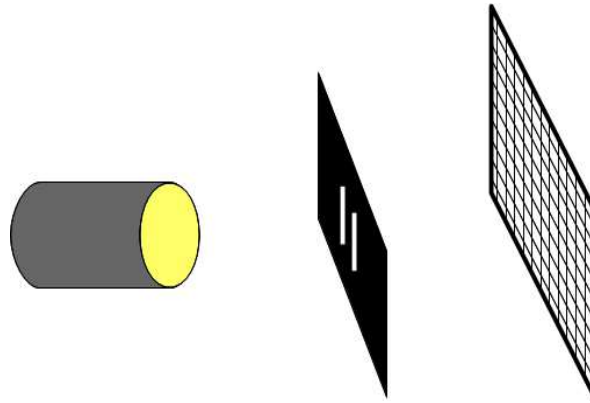
A pesar del éxito conseguido, no nos podemos conformar sin más con unos modelos que contradicen el conocimiento acumulado hasta el momento, aunque consigan explicar resultados experimentales muy diversos. Esta situación de crisis que vivió la física durante las primeras décadas del siglo XX sólo se pudo superar en la medida en que se encontró un modelo que permitió explicar “los fenómenos clásicos” y “los fenómenos cuánticos”. La búsqueda de ese modelo es ahora nuestro objetivo. Comenzaremos buscando un modelo para la radiación que pueda dar cuenta de los fenómenos de emisión y absorción y de los fenómenos ondulatorios (como la interferencia y la difracción). Posteriormente revisaremos el modelo atómico tratando de encontrar un modelo que permita predecir la estructura de estados energéticos sin recurrir a la estrategia inductivista empleada hasta el momento.

### 4.1.- ¿Cuál es la naturaleza de los fotones?

Para avanzar en la resolución de este problema vamos a combinar en una misma experiencia dos de los fenómenos que requieren modelos contradictorios: la interferencia y el efecto fotoeléctrico. Imaginemos el siguiente montaje en el que hemos puesto una fuente de luz, una doble rendija y una pantalla detectora recubierta por pequeñas células fotoeléctricas.



## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

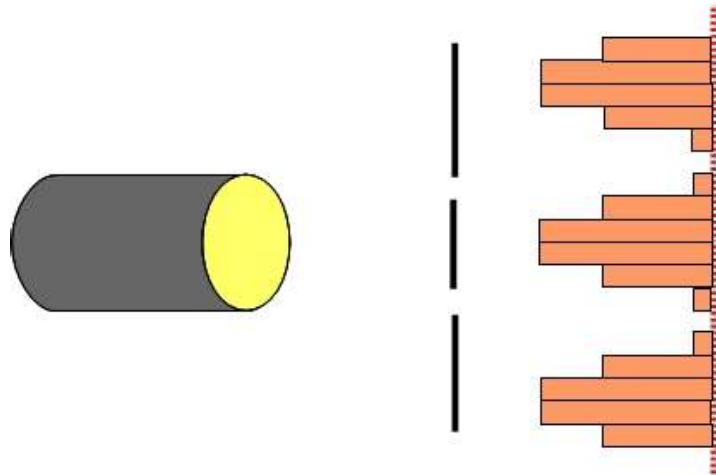


Ponemos una fuente de luz frente a una doble rendija. Más atrás y como sistema de detección situamos una pantalla recubierta de células fotoeléctricas (cada cuadro de la pantalla representa una célula fotoeléctrica).

*A29.- Al llevar a cabo la experiencia y contar la cantidad de cuantos que se detectan en cada una de las placas fotoeléctricas obtenemos los diagramas de barras que se muestran en la imagen inferior (cada barra representa la cantidad de fotones detectados en la placa fotoeléctrica correspondiente).*

- Cada placa registra un número entero de fotones.
- Un mismo fotón no se registra nunca en dos placas.
- Hay detectores que registran una gran cantidad de fotones, mientras que otros detectores no detectan ninguno.
- Se obtienen los mismos resultados tanto si lanzamos muchos fotones a la vez como si lanzamos los fotones de uno en uno<sup>8</sup>.

*Analizad el resultado y discutid si la luz se comporta como una onda o como una partícula.*



Resultado que se obtiene al llevar a cabo la experiencia. Las barras que aparecen representadas sobre la pantalla detectora indican la cantidad de fotones detectados en cada placa fotoeléctrica. Hay unas zonas donde las placas detectan gran cantidad de fotones y otras donde no detectan ninguno.

Para dar cuenta de lo que registran los detectores debemos admitir que:

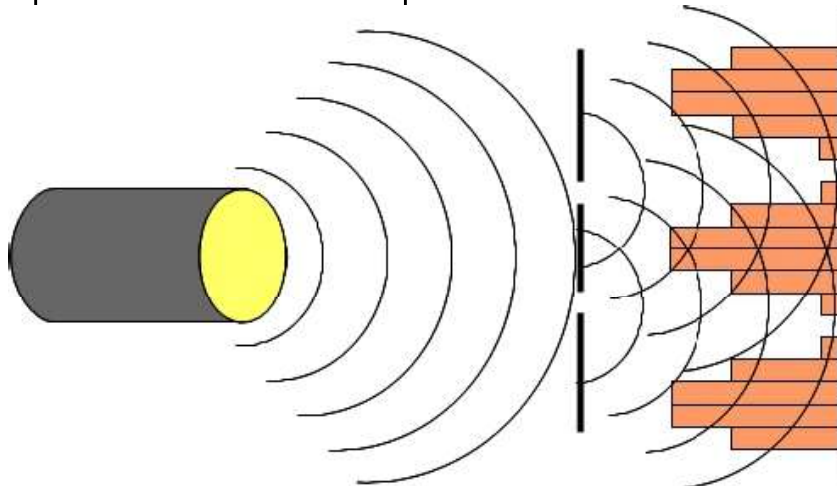
- Los fotones se detectan como partículas, cada uno en una placa.
- Los fotones se distribuyen en la pantalla de la misma manera que la intensidad de una onda que sufre interferencias al atravesar la doble rendija.

8. Existen células fotoeléctricas que detectan un único fotón. De 3 a 4 fotones son suficientes para excitar las células de la retina humana.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Profundizando en el análisis, para cada fotón individual hay lugares donde es más probable que impacte y lugares donde la probabilidad de impacto es cero. Los puntos de máxima probabilidad de impacto coinciden con los lugares donde la onda que tiene la misma frecuencia que la radiación sufre una interferencia constructiva, mientras que los lugares de probabilidad nula son aquellos que se corresponden con los puntos de interferencia destructiva.

Debemos concluir entonces que los fotones son diferentes a las ondas y las partículas. No hay nada en nuestro entorno cotidiano que se comporte como lo hacen los fotones. Mientras un fotón no es detectado se propaga como un ente deslocalizado que sufre los fenómenos propios de las ondas (interferencia, difracción, polarización, etc.), es decir, como una onda. Sin embargo, en el momento en que se detecta se absorbe como una unidad completa, como una partícula, y en un único punto. Cuando llevamos a cabo una medida de posición, la amplitud de la onda en cada punto está relacionada con la probabilidad de detectar al fotón en dicho punto. Esta debe ser una onda de probabilidad y no una onda que pueda ser detectada simultáneamente en una amplia región del espacio, puesto que no ocurre así sobre la pantalla.



Mientras no se detecta el fotón hemos de aceptar que se propaga como una onda de probabilidad. Al llegar a la pantalla y es detectado como una partícula, con una mayor probabilidad allí donde la onda tiene una mayor cuadrado de la amplitud.

*A30.- Al mirar a través del cristal de una ventana podemos observar lo que hay al otro lado. Sin embargo, si observamos con detalle, también vemos lo que se encuentra en el mismo lado de la ventana en el que estamos nosotros (es decir, el vidrio permite que la luz atraviese pero también refleja una parte de la luz que le llega). De hecho, el vidrio no es completamente transparente. Si un fabricante nos indica que el vidrio de una ventana tiene una transparencia del 90%, ¿al lanzar contra él un fotón, en qué lado lo detectaremos? ¿Qué ocurrirá si lanzamos un haz luminoso?*

### 4.2.- ¿Qué podemos saber de la trayectoria de los cuantos?

En la escuela nos decían que la luz se propaga en línea recta y para demostrarlo podíamos alinear varias cartulinas agujereadas. Sólo si los agujeros y nuestro ojo estaban formando una línea recta podíamos ver la fuente luminosa. Quizás utilizando agujeros muy pequeños y/o pantallas con detectores podríamos conocer dónde está un fotón y cuál es su velocidad (y por tanto saber la trayectoria que seguirá). Vamos a hacer todo lo

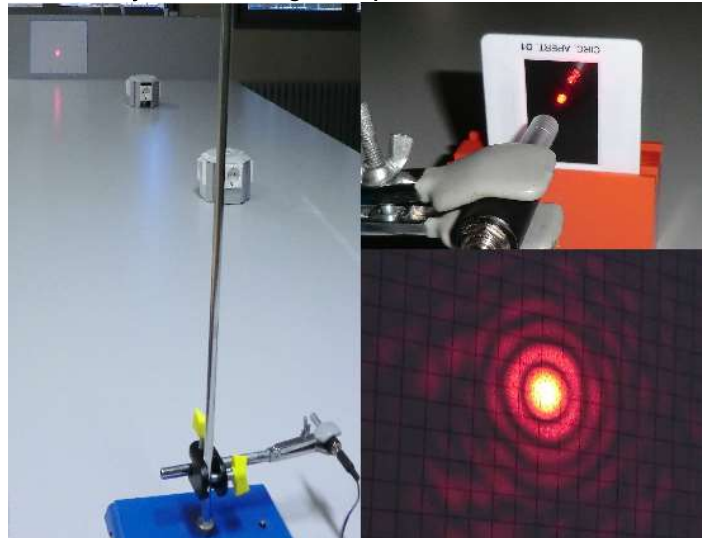
## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

posible para conocer con el máximo detalle la trayectoria de un fotón con el fin de establecer hasta qué punto nos hemos de conformar con un conocimiento probabilístico.

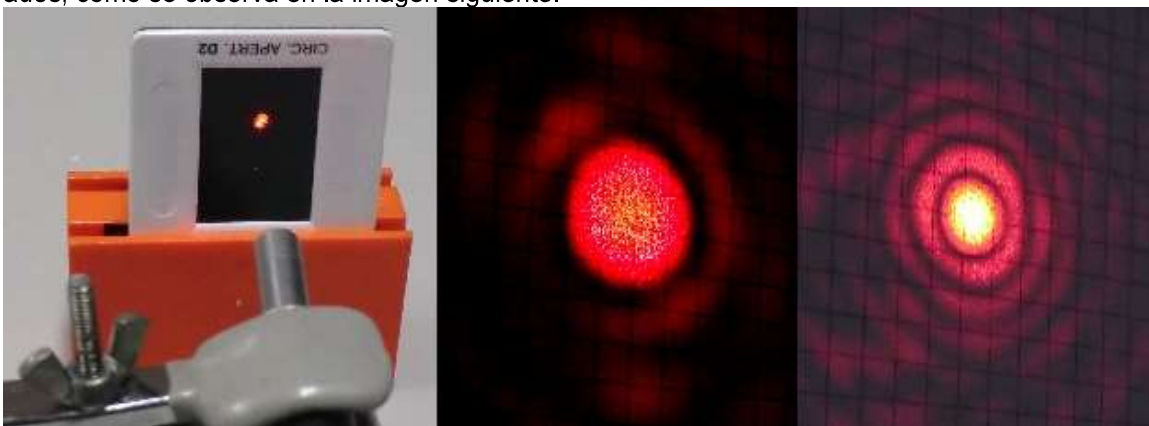
A31.- Lanzamos un haz de luz hacia un orificio pequeño para saber con la precisión máxima la posición de los cuantos que lo atraviesan. El montaje se muestra en la fotografía inferior. Sobre la pantalla se forma la figura que aparece más abajo en la parte derecha.

- Analiza la figura y determina qué podemos decir de la posición y el momento lineal de los fotones que atraviesan la abertura.
- Si repetimos el experimento con un agujero más ancho se observa la imagen que aparece más abajo a la derecha. Analizad nuevamente qué sabemos de la posición y velocidad de los fotones que atraviesan el orificio.

¿Qué podemos decir de la trayectoria seguida por los fotones?



Montamos un láser y apuntamos a una pantalla (una hoja de papel cuadriculado) que se encuentra a varios metros de distancia. Observamos que el láser da lugar a un punto de luz sobre el papel. Al poner delante del láser un orificio pequeño no se forma el punto que se ha observado antes sino una figura de interferencia, como se puede ver en la parte inferior de la imagen. Si hacemos uso de un orificio más pequeño la figura que se obtiene sobre la pantalla cambia, el círculo central es más grande y los anillos luminosos están más separados, como se observa en la imagen siguiente.

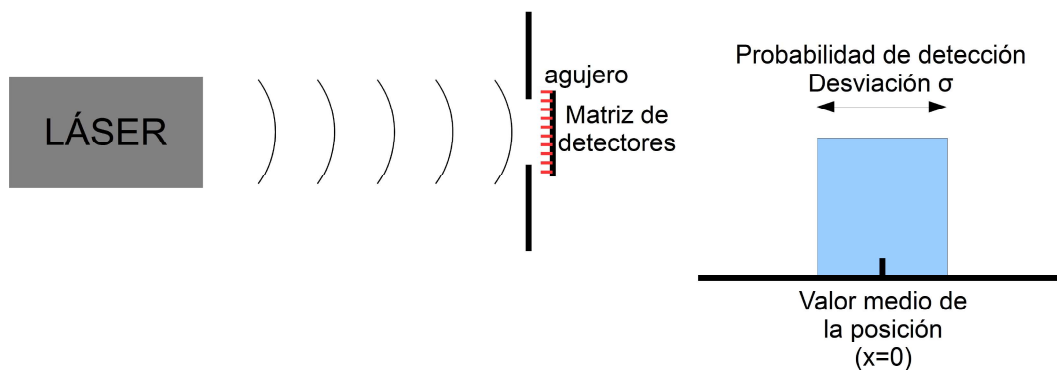


En la parte izquierda de la imagen se observa el orificio que se ha utilizado en esta ocasión, es más pequeño que el de la primera experiencia. La imagen central corresponde a la figura observada sobre la pantalla: un punto central muy luminoso que ocupa una superficie aproximada de 9 cuadritos y unos anillos poco intensos más alejados. En la figura de la derecha se reproduce, de nuevo, el resultado de la experiencia con el orificio grande: el punto central ocupa menos de 4 cuadros y hay una mayor dispersión de luz en anillos.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Podríamos reflexionar de la siguiente manera: sabemos que cualquier fotón que llegue a la pantalla ha pasado antes por el agujero. Una vez superado, avanzará hacia la pantalla para impactar en una de las zonas iluminadas. Analicemos los posibles valores de posición y momento lineal para profundizar en el problema de qué podemos saber sobre la "trayectoria" de los cuantos.

Si ponemos una matriz de detectores detrás del orificio para medir la posición de cada fotón que llega al agujero obtendremos una distribución de probabilidades de detección, como la que se muestra en la imagen inferior. Esta distribución tiene un valor medio, que coincide con el centro del agujero ( $x=0$ ), y una desviación respecto a dicho valor medio, que representa la dispersión de las medidas. Tenemos así una indeterminación estadística en el valor de la posición de un fotón antes de ser medida.

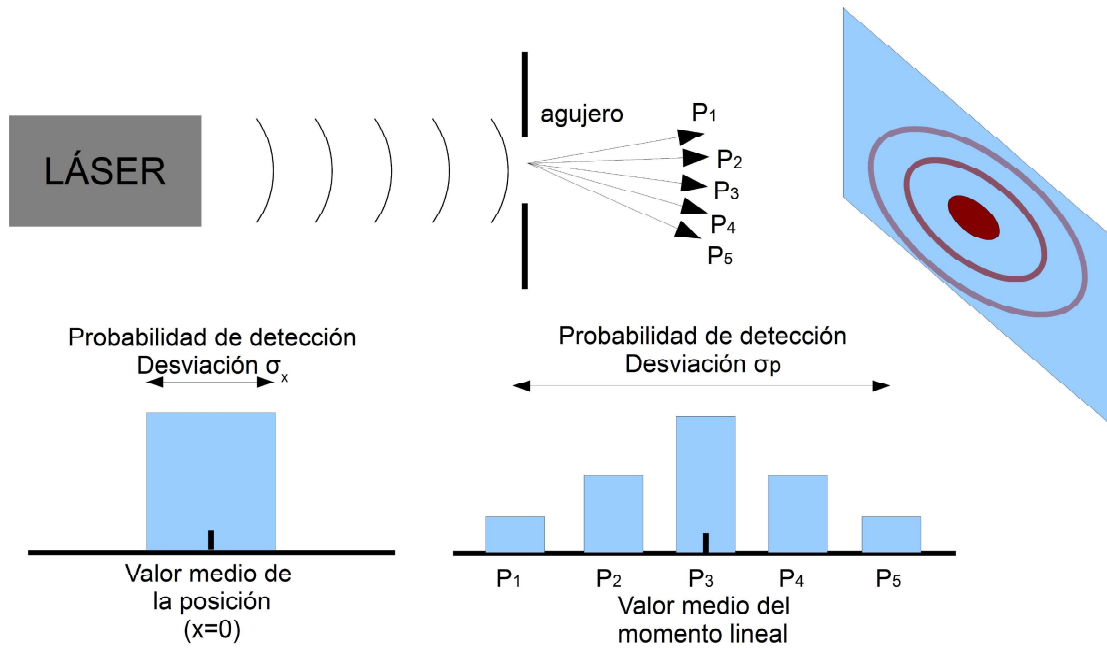


Al representar la probabilidad de detectar un fotón en cada una de las posiciones posibles (en cada detector) obtenemos una distribución de probabilidades, caracterizadas por un valor medio (el centro del agujero) y una desviación a su alrededor (relacionada con el radio del agujero).

La incertidumbre no se puede reducir utilizando instrumentos de medición más precisos. Con detectores más sensibles (más pequeños, por ejemplo) podríamos distinguir con mayor precisión la posición de un fotón en el agujero, pero siempre tenemos la misma dispersión respecto al valor medio antes de llevar a cabo la medida, ya que el fotón se puede detectar en cualquier punto del frente de onda.

Centrémonos ahora en el análisis del vector momento lineal de los fotones (proporcional al vector velocidad). Una vez alcanzado el agujero cada fotón se mueve hacia una de las zonas iluminadas de la pantalla. Los fotones tienen una mayor probabilidad de incidir en el centro de la pantalla (punto más brillante) pero también tienen cierta probabilidad de incidir en otros puntos, menos luminosos, y ninguna en otros. Por tanto, la medida del momento lineal de un fotón que atraviesa el agujero puede tener un valor entre diferentes posibles, cada uno de ellos con una determinada probabilidad de ser medido (como muestra la imagen inferior). Tenemos, nuevamente, un conjunto de posibles medidas que se distribuye alrededor de un valor medio y presenta una determinada incertidumbre estadística.

**¿Cómo se emite y absorbe radiación?**



En la parte superior se representan (de forma esquemática) los posibles valores del momento lineal que puede tener un fotón que se encuentra en el agujero. Los valores más probables del momento lineal son los que llevan al fotón al centro de la pantalla, puesto que es la zona en la que se detecta una mayor intensidad luminosa. De manera similar a lo ocurrido al medir la posición de los fotones (gráfica izquierda), las posibles medidas del vector momento lineal se distribuyen alrededor de un valor medio, con una determinada incertidumbre.

Si usamos un agujero más pequeño los posibles valores de la posición de los fotones se separan menos del valor medio (que se corresponde con el centro del agujero) y la incertidumbre de la posición de cada fotón es menor. Sin embargo, observamos que la zona luminosa sobre la pantalla es más extensa, lo que indica que los puntos de impacto de los fotones sobre la pantalla están más separados. Esto significa que el momento lineal de cada fotón tiene un mayor rango de valores posibles, una mayor dispersión respecto al valor medio y por tanto una mayor incertidumbre, como se muestra en la imagen siguiente.

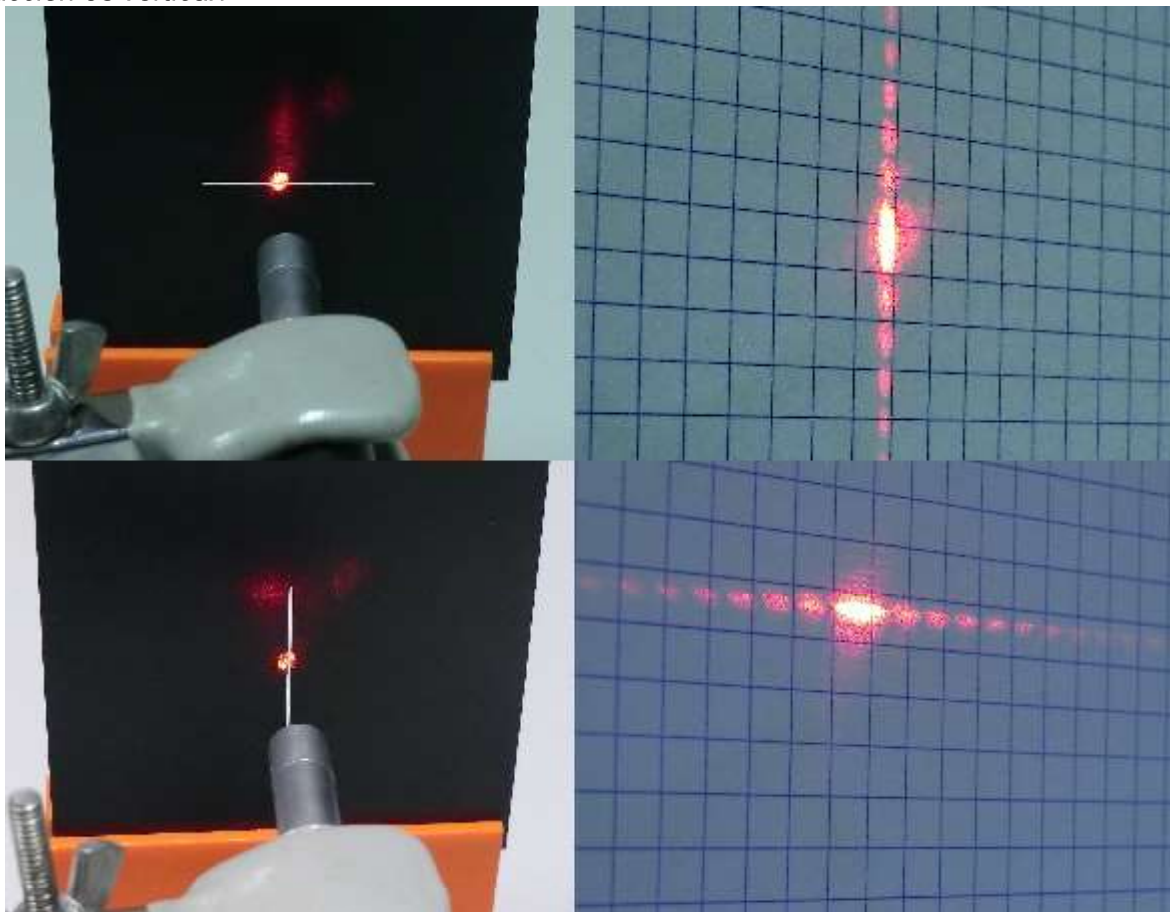
Podríamos poner más obstáculos o restricciones destinadas a conocer, con el mayor detalle posible, la posición y el momento lineal de los fotones y obtendríamos como resultado que siempre que reducimos la incertidumbre en el conocimiento de la posición aumentamos la incertidumbre en el momento lineal y viceversa. Esta relación entre ambas magnitudes fue introducida por primera vez por el físico alemán Werner Heisenberg y se conoce con el nombre de principio de incertidumbre. Matemáticamente se expresa de la forma:

$$\sigma_x \sigma_p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Donde  $\sigma_x$  representa la incertidumbre en la posición y  $\sigma_p$  representa la incertidumbre en el momento lineal.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

A31b.- Analizad, usando el modelo de fotón que hemos establecido y el principio de incertidumbre, la experiencia de difracción a través de una rendija lineal. ¿Por qué al poner la rendija en vertical la figura de interferencia es horizontal y al poner la rendija horizontal la figura de difracción es vertical?



En la parte superior izquierda se ve la rendija lineal, situada en horizontal, y a su derecha la figura de difracción que se observa sobre la pantalla. En la parte inferior se observa la misma rendija, situada en posición vertical, y la correspondiente figura de difracción a su derecha. La figura de difracción siempre es perpendicular a la rendija.

Para determinar qué podemos saber en cada caso sobre la posición y momento lineal de los fotones debemos repetir el análisis de la actividad anterior para los fotones que atraviesan la rendija. Cuando la rendija está en horizontal la incertidumbre en la posición vertical de los fotones es muy pequeña, por lo tanto la incertidumbre en la componente vertical del momento lineal será grande, por este motivo se produce una figura de difracción vertical correspondiente a una dispersión grande del momento lineal en dirección vertical. No ocurre lo mismo en la dirección horizontal, la incertidumbre en la posición horizontal de los fotones es elevada porque la rendija en esta dirección es ancha, por lo tanto la incertidumbre en la componente horizontal del momento lineal es pequeña, los fotones no se dispersan en dirección horizontal. Un razonamiento parecido permite explicar porque la figura de difracción es horizontal cuando la rendija se pone en posición vertical.

Tenemos, por tanto, que el principio de incertidumbre se aplica a cada componente de la posición y el momento, quedando como:

$$\sigma_x \sigma_{p_x} \geq \frac{h}{4\pi}$$

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

La misma expresión es válida para las demás componentes de los vectores posición y momento lineal.

Hay que destacar que esta incertidumbre es fruto de la naturaleza cuántica de los fotones. De hecho, ha sido a través del uso del modelo de cuanto que hemos llegado hasta ella. La incertidumbre no debe ser entendida, por tanto, como una consecuencia del uso de instrumentos de medida poco precisos. El uso de instrumentos de medición de gran precisión contribuye a determinar con mayor precisión la posición o el momento lineal de cada fotón, pero no permite eliminar la distribución de valores de la posición y del momento lineal alrededor del valor medio en tanto que estos son inherentes al comportamiento del cuanto.

El modelo de cuanto que acabamos de construir para los fotones permite dar cuenta de los procesos de emisión y absorción de radiación y de los fenómenos ondulatorios como la interferencia y la difracción. Disponemos ahora de un modelo de radiación único con el cual explicar todos los fenómenos planteados hasta el momento. Hemos superado así uno de los problemas que se habían generado al establecer el modelo cuántico de emisión y absorción de radiación.

### Recapitulación:

- **Dibuja una fuente de luz y la luz que esta emite justo en el momento de ser emitida, cuando se está propagando y al incidir sobre una pantalla.**
- **Explica el modelo que has usado para representar la propagación de la luz y el impacto con la pantalla.**
- **Da argumentos que justifiquen ese modelo.**
- **Plantea nuevos problemas que aún debemos abordar para resolver los problemas de coherencia entre el modelo cuántico de emisión y absorción de radiación y la física clásica.**

### 4.3.- ¿Por qué hay estados estacionarios en los átomos?

Aunque nuestros avances nos han permitido establecer un modelo para la luz que da cuenta de todos los fenómenos luminosos nos queda, sin embargo, dar cuenta de la cuantización de la energía en el interior de los átomos. ¿Por qué los átomos sólo pueden tener unos valores determinados de la energía?

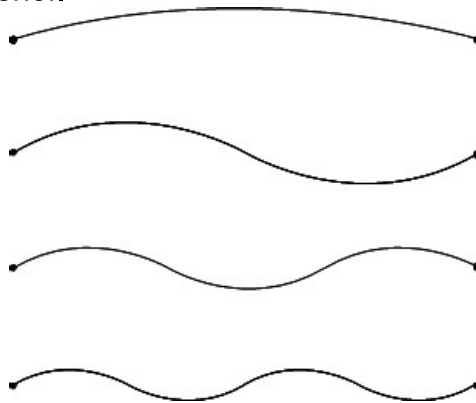
La energía del átomo de hidrógeno, de acuerdo con el modelo que introducimos para explicar la emisión y absorción de radiación, depende de un número entero de acuerdo con la expresión  $E(eV) = \frac{-13,6}{n^2}$ . En física clásica, la energía de las ondas estacionarias

que se pueden formar, por ejemplo, en una cuerda sujeta por ambos extremos, también depende de un número entero. Esto analogía sugiere una posible estrategia para explicar la existencia de estados estacionarios: ¿el electrón se puede considerar una onda?

Si así fuese, podríamos explicar la existencia de los estados estacionarios de los átomos a través de una analogía entre el movimiento orbital del electrón y el movimiento de una onda estacionaria. Cuando una cuerda está fija por los extremos y se hace vibrar se observa que no es posible hacerlo de manera estacionaria con cualquier frecuencia (y por

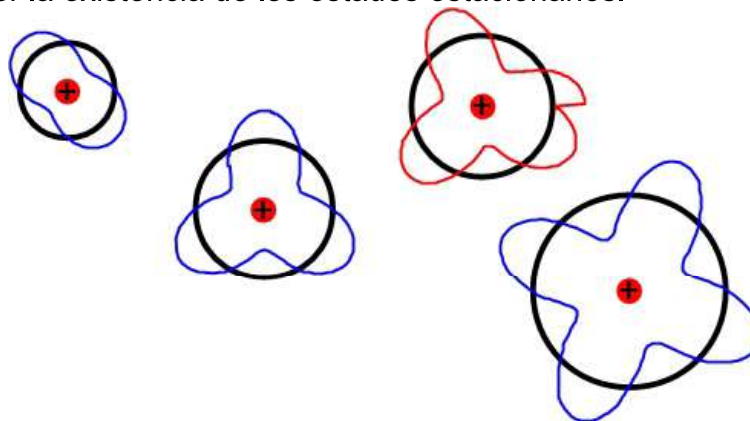
## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

tanto con cualquier energía), sólo puede oscilar con unas frecuencias determinadas, como se muestra en la imagen inferior.



En una cuerda que está fija por los extremos no se puede formar cualquier onda estacionaria sino sólo aquellas que tienen una longitud de onda determinada, y por tanto una frecuencia y energía determinadas.

De manera similar, el electrón no puede orbitar a cualquier distancia del núcleo, sino que sólo puede hacerlo en unas pocas órbitas. Estableciendo una analogía entre los dos fenómenos, se puede dar una explicación de la existencia de los niveles energéticos del átomo si se imagina el electrón como una onda en lugar de una partícula. Dicha onda se encuentra confinada en el espacio, vibrando alrededor del núcleo atómico. En estas condiciones la onda sólo puede vibrar de manera estacionaria si en el espacio en que vibra cabe un número entero de ciclos completos, como se muestra en la imagen. En caso contrario la vibración no es estable. Esto permitiría identificar las órbitas electrónicas con los modos de vibración estables y el comportamiento propio de las ondas impediría la vibración del electrón allí donde la onda no es estacionaria. Así conseguimos una forma de explicar y prever la existencia de los estados estacionarios.



Las imágenes muestran en color negro la órbita de un electrón alrededor de un protón en el átomo de hidrógeno. Si consideramos el electrón como una onda, de acuerdo con la hipótesis establecida, sólo serían estables aquellas "órbitas" en que se puede formar una onda estacionaria (representadas en azul), si la onda no es estacionaria porque no caben un número entero de ciclos la órbita no puede existir (en rojo).

Louis de Broglie fue quien avanzó la hipótesis de considerar el electrón, y en general cualquier otra partícula, como una onda. Además, propuso una ecuación que permitía calcular su longitud de onda:

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

donde  $h$  es la constante de Planck,  $m$  la masa y  $v$  la velocidad del electrón.



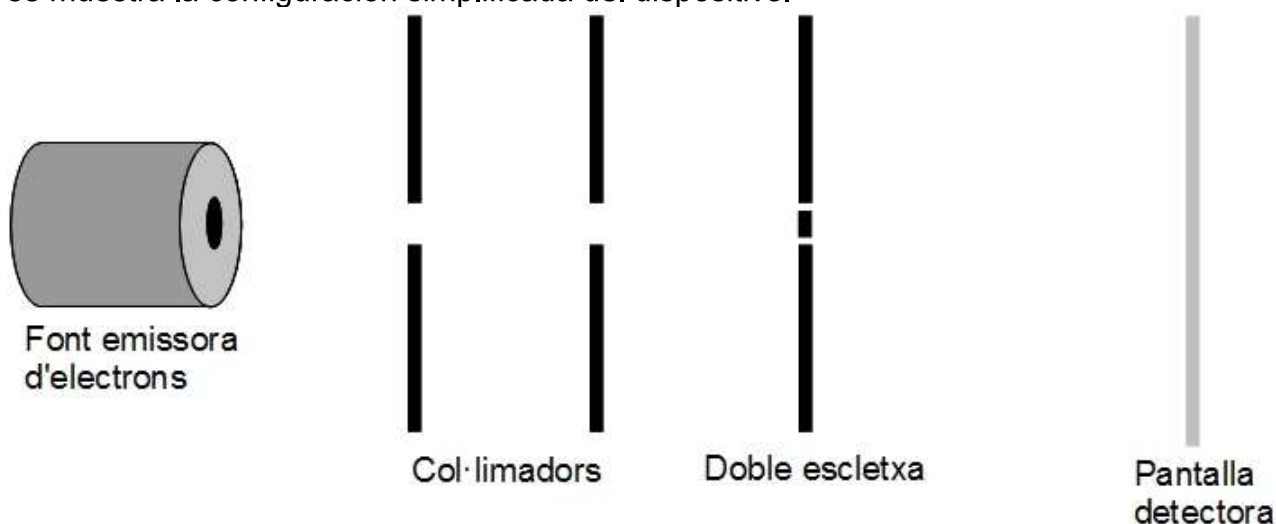
## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

A32.- *Proponed un experimento que permita poner a prueba la hipótesis de que los electrones, y en general cualquier partícula, tienen carácter de onda.*

A32b.- *Valorad qué partículas son las más adecuadas para hacer una experiencia de interferencia a través de una doble rendija. Usad la relación de de Broglie para determinar la longitud de onda de: a) la Tierra en su órbita alrededor del Sol, b) un coche de 700kg que circula a 90 km / h, c) una piedra de 20g que se lanza a 10m / s, d) un electrón que tiene una velocidad de  $3 \cdot 10^6$  m / s.*

*Datos:  $M_T = 5,98 \cdot 10^{24}$  kg,  $v_T = 29,79$  km/s,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg.*

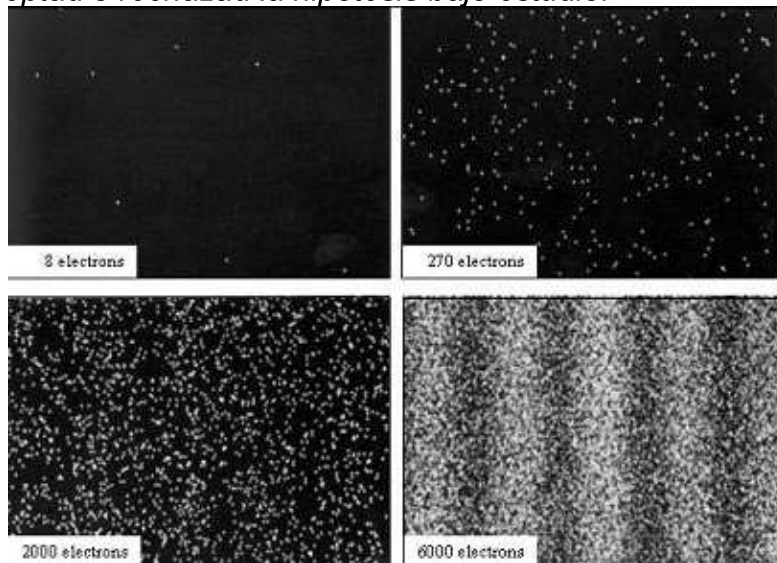
Los resultados obtenidos al calcular la longitud de onda de varias partículas pone de manifiesto que la experiencia sólo se puede llevar a cabo con electrones, ya que no es posible encontrar rendijas de dimensiones similares al resto de las longitudes de onda calculadas. Es más, incluso con electrones la experiencia no resulta fácil, y ello por las reducidas dimensiones de las rendijas necesarias. La longitud de onda del electrón a una velocidad de  $10^6$  m/s es del orden de  $10^{-10}$  m y coincide aproximadamente con la distancia que separa a los átomos en las estructuras cristalinas. Por tanto, será necesario un cristal el que hará el papel de la doble rendija en el experimento de interferencia. En la imagen se muestra la configuración simplificada del dispositivo.



Montaje experimental para poner a prueba la hipótesis de de Broglie con los electrones. En el montaje real un material cristalino hace el papel de la doble rendija.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

A32c.- La figura inferior muestra la imagen obtenida al realizar la experiencia. A la luz de los resultados, aceptad o rechazad la hipótesis bajo estudio.



Resultados obtenidos al lanzar electrones a través de una doble rendija. Los electrones han sido recogidos sobre una pantalla en la que dejan una marca puntual. En cada caso ha sido lanzada la cantidad de electrones indicada en la parte inferior izquierda.

Constatamos que cada electrón deja un punto sobre la pantalla, lo que evidencia que en el momento de su detección se comportan como partículas. Pero los puntos de impacto se distribuyen sobre la pantalla mostrando un patrón de interferencia, que coincide con el esperado para una onda que tiene la longitud de onda que predice la ecuación de de Broglie.

Como pasaba con los fotones, la posición de impacto con la pantalla está determinada por la amplitud de una onda de probabilidad. Esta onda no se detecta en ningún lugar del espacio (puesto que el electrón siempre se detecta en un único punto, como partícula), pero determina en qué posiciones hay mayor probabilidad de detectar cada electrón. Al llevar a cabo esta misma experiencia con protones, neutrones, iones o incluso moléculas grandes como los fullerenos (C60) se obtienen siempre resultados similares: los impactos sobre la pantalla siguen el patrón de interferencia esperado para una onda que tiene la longitud de onda predicha por de Broglie. Debemos concluir, por tanto, que las partículas se comportan como los fotones. Nos referiremos a estos entes (fotones y electrones, y por extensión todas las "partículas") con el término *quántums*. Consideramos así que su comportamiento no se ajusta al de las partículas clásicas y que exigen el uso del modelo que acabamos de construir para interpretar los fenómenos en los que se ven implicados.

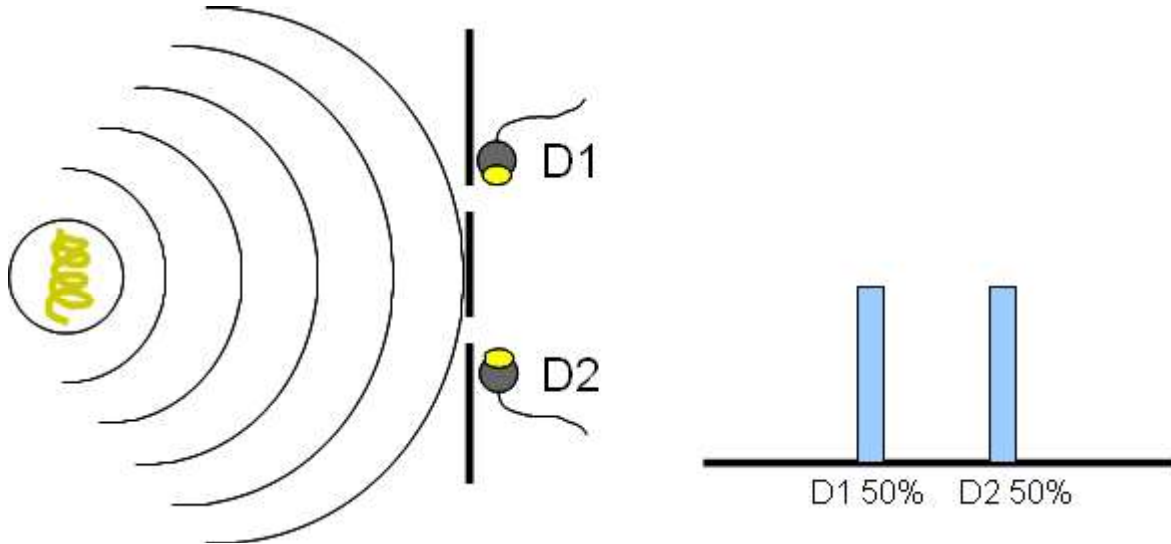
Podemos preguntarnos, de nuevo, cuál es la trayectoria que sigue un electrón para llegar a la pantalla, y hacer experiencias para tratar de determinarla.

A33.- Preved, usando el modelo de cuántum, qué ocurrirá si al hacer la experiencia de interferencia de electrones colocamos un detector detrás de cada orificio, que detecta el agujero por el que ha pasado pero no detiene al electrón, y mantenemos los detectores de la pared final.

- ¿Qué registrará cada uno de los detectores que están detrás de los agujeros?
- ¿Qué se registrará en la pantalla?
- ¿Cuál es la trayectoria seguida por un electrón?

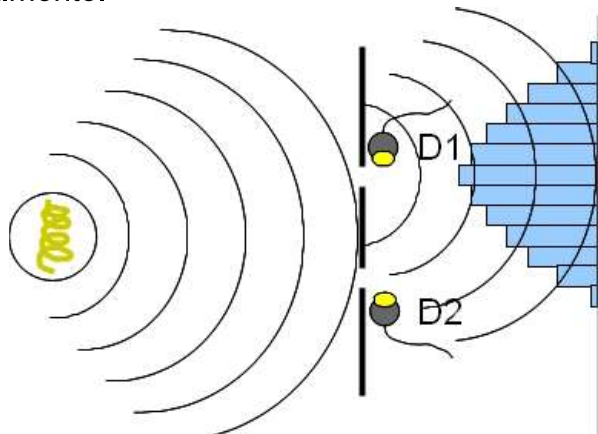
## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

El electrón, como cuántum, debemos considerar que se propaga como una onda de probabilidad. Al llegar a las rendijas, la amplitud de la onda en ambas rendijas es la misma, por tanto tendremos un 50% de probabilidad de detectar a cada electrón en cada agujero, como se muestra en la imagen.



Los electrones se propagan como ondas. Al alcanzar la barrera la amplitud de la onda en cada agujero es la misma. Tenemos, por tanto, un 50% de probabilidad de detectar al electrón en cada agujero.

Pero cuando se detecta el electrón sabemos cuál es su posición, y la onda de probabilidad desaparece. Si el electrón sigue propagándose lo hace a partir del punto en que ha sido detectado, vuelve a estar deslocalizado y sólo podemos hablar de una nueva onda de probabilidad, como muestra la imagen siguiente. Cuando esta onda llega a la pantalla no hay figura de interferencia en tanto que el otro agujero no es ahora una fuente de ondas (porque es seguro que el electrón no ha pasado por él). Esto es lo que ocurre experimentalmente.



Si el electrón ha sido detectado por D1, en el orificio de arriba, continuará propagándose a partir de ese agujero. Al llegar a la pantalla ya no hay una interferencia en tanto que no hay onda procedente del agujero de abajo. Al añadir los detectores de detrás de los agujeros ha cambiado el resultado final.

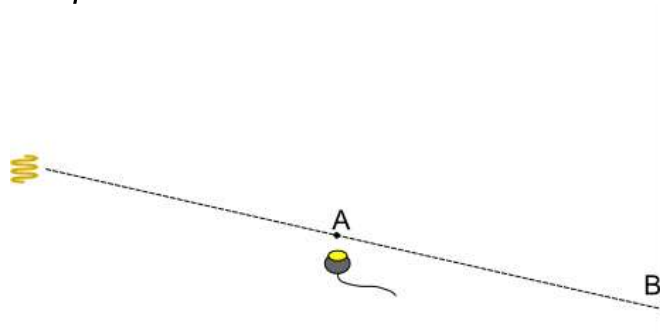
Sorprendentemente, al añadir detectores detrás de los agujeros cambia el resultado del experimento y la figura de interferencia desaparece. El hecho de determinar la posición del electrón impide la formación de la figura de interferencia. Para que se forme la figura

### ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

de interferencia es necesario que haya dos ondas, que el electrón "pase" por las dos rendijas. Sin embargo, nunca se detecta el mismo electrón en los dos orificios al mismo tiempo, puesto que el electrón es una partícula indivisible.

Debemos concluir, entonces, que el electrón no tiene una posición hasta que no es medida, no está en un agujero o en otro hasta que medimos en qué agujero se encuentra, y si dicha medida no se lleva a cabo la onda de probabilidad atraviesa ambos agujeros. Si el electrón pasase por un agujero en concreto no habría figura de interferencia. Antes de la medida sólo podemos hablar de una onda de probabilidad, de los posibles resultados de la medida y de la probabilidad de obtener cada resultado. Nuevamente, y como ocurría con los fotones, nos damos cuenta que no podemos hablar de trayectorias al considerar el movimiento de los cuantos.

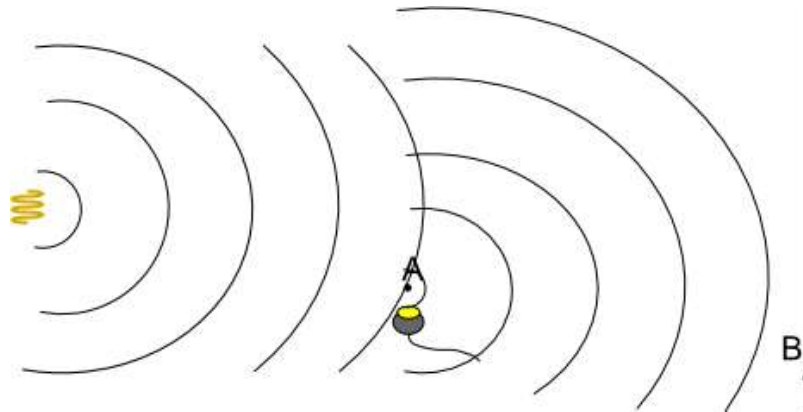
*A34.- Se lanzan electrones desde un arco eléctrico y se sitúa en un punto del espacio un detector que permite detectar el paso de los electrones sin detenerlos. Más atrás hay una pantalla contra la que impactan los electrones dejando una señal puntual. ¿Siempre que el detector registra un electrón en A se producirá un impacto en B? Usa el modelo de cuántum y el principio de incertidumbre para analizar el movimiento del electrón y su punto de impacto sobre la pantalla.*



A la izquierda tenemos un arco eléctrico que libera electrones. El detector registra un electrón cuando pasa próximo a él, en el punto A. ¿Se producirá el impacto del electrón con la pantalla en B?

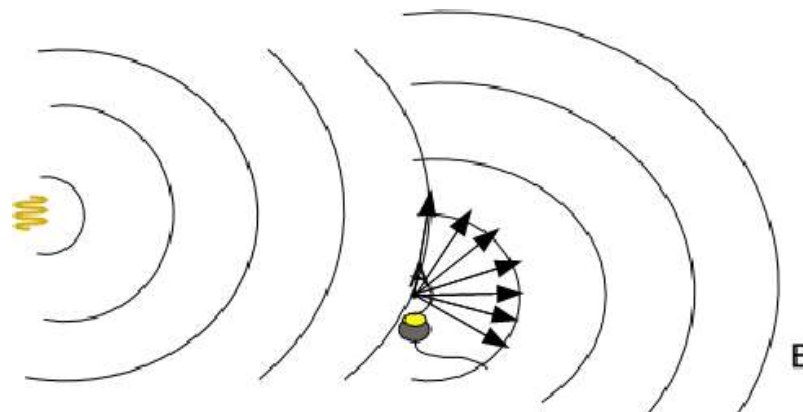
El cuántum se propaga como una onda y existe una cierta probabilidad de que sea detectado por el detector, ya que la onda de probabilidad alcanza al detector. Al hacer la detección el cuántum sigue propagándose desde el punto en el que ha sido detectado como onda nueva onda de probabilidad, se forma un nuevo frente de onda. Puede ser detectado en cualquier punto de la pantalla, con mayor o menor probabilidad en función de la amplitud de la onda, no necesariamente en B.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?



El electrón se propaga como una onda de probabilidad. Tras ser detectado en A sigue propagándose a partir de dicho punto, pero de nuevo como onda. Así, puede ser detectado en cualquier lugar de la pantalla puesto que el frente de onda llega a toda ella.

Si analizamos la situación atendiendo al principio de incertidumbre podemos decir que al detectar la electrón en A la incertidumbre en la posición será baja (conocemos bien qué posición ocupa) y le corresponderá una incertidumbre elevada en el momento lineal, para satisfacer la expresión matemática del principio de incertidumbre. Por lo tanto, el electrón podría ser detectado en cualquier punto de la pantalla, como se muestra en la figura inferior.



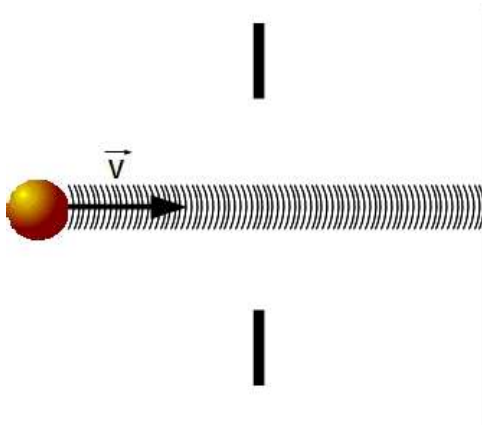
Al detectar el cuántum conocemos bien su posición, la incertidumbre en el valor de la posición es pequeña. En virtud del principio de incertidumbre, la incertidumbre en el momento lineal será grande, el rango de posibles valores del momento lineal para el electrón es amplio. Por tanto, el electrón puede impactar en una amplia región de la pantalla. En la figura se muestran de manera esquemática algunos valores posibles del momento lineal. No podemos afirmar, por tanto, que impactará en B.

*A35.- Si el modelo de cuántum que hemos establecido es válido y todas las partículas materiales se comportan como cuántums, ¿por qué no observamos el comportamiento cuántico en la vida diaria? Por poner un ejemplo: ¿Por qué una bola de billar, al atravesar una puerta y colisionar con una pared que se encuentra tras ella, no impacta en cualquier lugar y sigue una trayectoria bien definida?*

Los objetos de nuestro entorno cuando se mueven a velocidades ordinarias tienen longitudes de onda muy reducidas, de acuerdo con los cálculos que hemos hecho anteriormente usando la ecuación de de Broglie. Cuando una bola de billar pasa a través de una puerta (o cuando lo hace una persona) no se puede observar ningún fenómeno ondulatorio ya que las dimensiones de la puerta son, en muchos órdenes de magnitud, mayores que la longitud de onda. Es así que, en ausencia de fenómenos ondulatorios, la

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

bola de billar se comporta como una partícula clásica, y lo mismo ocurre con cualquier otro objeto de nuestro entorno cotidiano. Sólo en aquellas condiciones en las que las longitudes de onda de los entes estudiados sean similares a las rendijas u obstáculos con que interactúan se podrán observar los fenómenos cuánticos y se hará imprescindible un análisis cuántico.



La bola de billar se mueve hacia la puerta de la derecha y tiene una longitud de onda muy pequeña. Al llegar a la puerta (que hace de agujero) no se producirá ningún fenómeno ondulatorio, puesto que la longitud de onda es muchos órdenes de magnitud inferior a las dimensiones de la puerta. Impactará en la pantalla siguiendo una trayectoria recta, como prevé la física clásica. En ausencia de fenómenos ondulatorios, no es necesaria la física cuántica para analizar el fenómeno.

## 5.- Limitaciones de los nuevos conocimientos y problemas abiertos

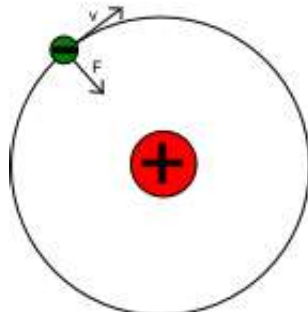
El trabajo realizado hasta aquí nos ha permitido establecer un modelo para interpretar el comportamiento de los cuántums. De acuerdo con ese modelo los cuántums:

- Se propagan como ondas de probabilidad.
- Se detectan como partículas, en un punto y con una determinada energía y momento lineal.
- Es más probable detectarlos en aquellos lugares en los que el cuadrado de la amplitud de la onda es mayor.
- Como consecuencia de su propia naturaleza, no se puede conocer de manera simultánea y con absoluta precisión su posición y momento lineal (y, por tanto, su trayectoria).

Ahora bien, nuestro estudio se ha limitado al aspecto cualitativo. Para contrastar rigurosamente nuestras hipótesis es necesario profundizar en el aspecto cuantitativo y esto implica encontrar una expresión matemática para la “onda de probabilidad”, una función que nos permita determinar en qué regiones del espacio es más probable detectar los cuantos y con qué momento lineal. Dicha función, que recibe del nombre de “función de onda”, nos aporta toda la información del sistema físico bajo estudio, de una forma parecida a la ecuación del movimiento de la física clásica. Sin embargo, la función de onda no establece los valores de la posición, momento lineal o energía de los cuantos, sino solo un catálogo de los posibles valores que se pueden obtener al hacer una medida y la probabilidad con la que se obtiene cada uno de ellos. Desgraciadamente, las matemáticas que hay que usar para determinar la expresión de la función de onda y para resolverla son muy complicadas, y superan con creces los objetivos de este curso.

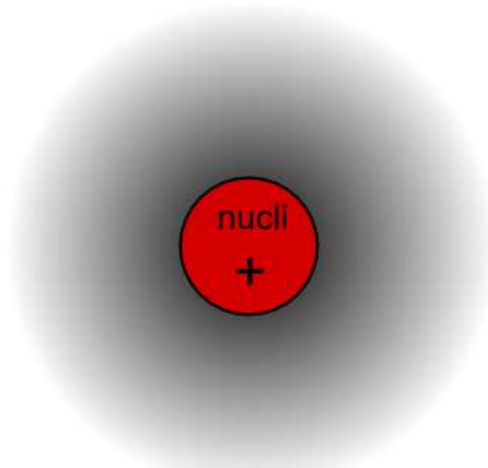
## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Otro problema que queda abierto es el modelo de átomo. Nosotros hemos usado un modelo de átomo como el que se muestra en la figura. En él, los electrones son partículas que siguen una trayectoria definida, una órbita alrededor del átomo. Pero de acuerdo con nuestros avances, mientras el electrón no es detectado no tiene una posición ni una velocidad, sino que se comporta como una onda de probabilidad. Hay que cambiar, por tanto, la imagen que tenemos del átomo.



Este es el modelo de átomo que hemos usado. El electrón se mueve en órbitas bien definidas, como una partícula. Esto contradice nuestros avances sobre la naturaleza de los cuántums.

La física actual no habla de átomos con electrones que describen trayectorias circulares, sino de orbitales: regiones del espacio en las cuales hay una determinada probabilidad de encontrar un electrón al hacer una medida de posición. Para conocer la forma de los orbitales es necesario resolver la función de onda. Los orbitales se pueden representar como regiones sombreadas en las cuales la intensidad de la sombra está relacionada con la probabilidad de detectar el electrón (a una región más oscura le corresponde una mayor probabilidad de detectar el electrón al hacer una medida de posición). La imagen inferior representa el orbital correspondiente al electrón del átomo de hidrógeno en su estado fundamental, los orbitales correspondientes a los estados excitados del átomo tienen dimensiones y formas diferentes.



Representación del átomo de hidrógeno en el estado estacionario de menor energía de acuerdo con la física cuántica. La zona sombreada representa la región del espacio en que es más probable encontrar el electrón cuando se hace una medida de posición. La probabilidad es mayor allí donde la sombra es más oscura.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

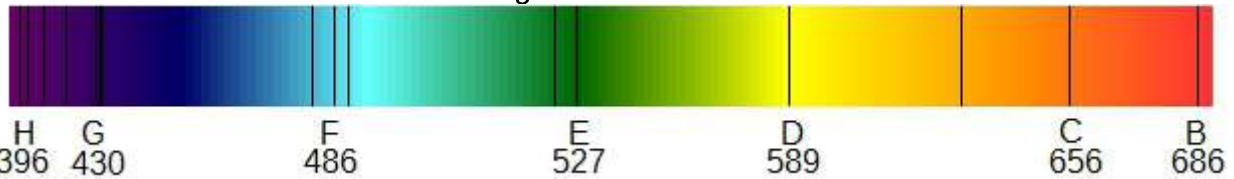
Si fuésemos capaces de resolver la ecuación de ondas y determinar la función de onda podríamos constatar, además, que las predicciones que hace la física cuántica sobre el comportamiento de los objetos cotidianos macroscópicos y las predicciones que hace la física clásica son equivalentes. La aceptación de la física cuántica no implica el rechazo de todos los conocimientos anteriores, sino sólo el reconocimiento de sus limitaciones. Cuando las ondas cuánticas de los objetos que estamos estudiando son comparables a las dimensiones del espacio en que se mueven tenemos que recurrir necesariamente a la física cuántica para explicar los fenómenos observados. Sin embargo, cuando las longitudes de onda son muy pequeñas podemos analizar fenómenos usando la teoría clásica con la tranquilidad de que las predicciones cuánticas llevarían a los mismos resultados.



¿Cómo se emite y absorbe radiación?

## ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

AC1.- Indica cuál de las sustancias siguientes se encuentra en el Sol.



Espectro del Sol (en la parte inferior aparecen las longitudes de onda correspondientes a cada línea en nanómetros).

Longitudes de onda de las líneas principales (además de las de la imagen)

Línea	$\lambda(\text{nm})$	Línea	$\lambda(\text{nm})$	Línea	$\lambda(\text{nm})$	Línea	$\lambda(\text{nm})$
A	759-762	D	589	F	486	G	430
B	686	E	527	d	466	g	422
C	656	b	518	e	438	h	410
a	627-628	c	495	f	434	H	396
						K	393

### Hidrógeno



### Mercurio

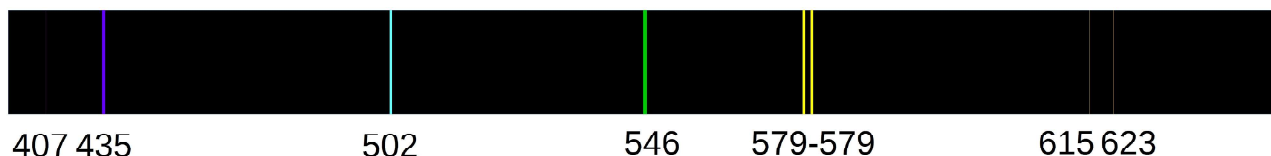


Imagen: Espectros del mercurio y del hidrógeno. Se muestran las longitudes de onda de las líneas espectrales, en nm.

AC2.- Dibujad el diagrama de energía del helio a partir de su espectro (página 7, Actividad 10). Sus líneas espectrales corresponden a longitudes de onda de 449 nm, 493 nm, 501 nm y 593 nm.

- Identificad cada línea con su respectiva longitud de onda.
- Explicad, usando el modelo, por qué la línea amarilla es la más intensa.
- ¿Qué otras frecuencias puede emitir el átomo de helio?

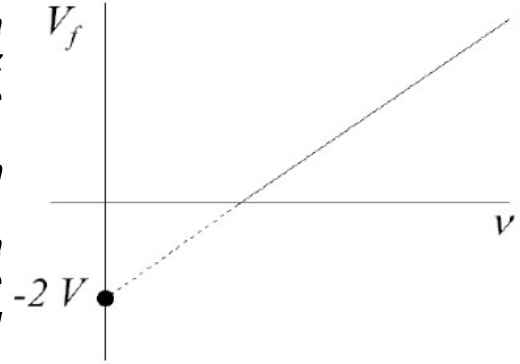
AC3.- ¿Cómo será la gráfica que se obtiene al hacer la experiencia del efecto fotoeléctrico para diferentes metales?

**¿Cómo se emite y absorbe radiación?**

AC4.- El trabajo de extracción para el sodio vale  $3,65 \cdot 10^{-19} \text{J}$ . Calculad la energía cinética máxima de un electrón emitido por una superficie de sodio cuando es iluminada con luz de longitud de onda: a)  $4,1 \cdot 10^{-7} \text{m}$ ; b)  $5,5 \cdot 10^{-7} \text{m}$ .

AC5.- El trabajo de extracción de un determinado metal es de  $3,5 \text{eV}$ , determinad la frecuencia umbral y la energía de los electrones emitidos cuando sobre él incide luz de  $500 \text{nm}$ .

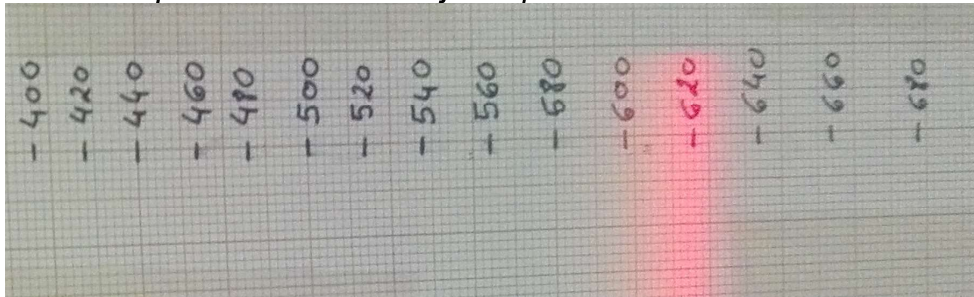
AC6.- La gráfica de la figura adjunta representa el potencial de frenado,  $V_f$ , de una célula fotoeléctrica en función de la frecuencia,  $\nu$ , de la luz incidente. La ordenada en el origen tiene un valor de  $-2 \text{V}$ .



- Deducid la expresión teórica de  $V_f$  en función de  $\nu$ .
- ¿Qué parámetro característico de la célula fotoeléctrica podemos determinar a partir de la ordenada en el origen? Determinad su valor y razonad la respuesta.
- ¿Qué valor tendrá la pendiente de la recta de la figura? Deducidlo.

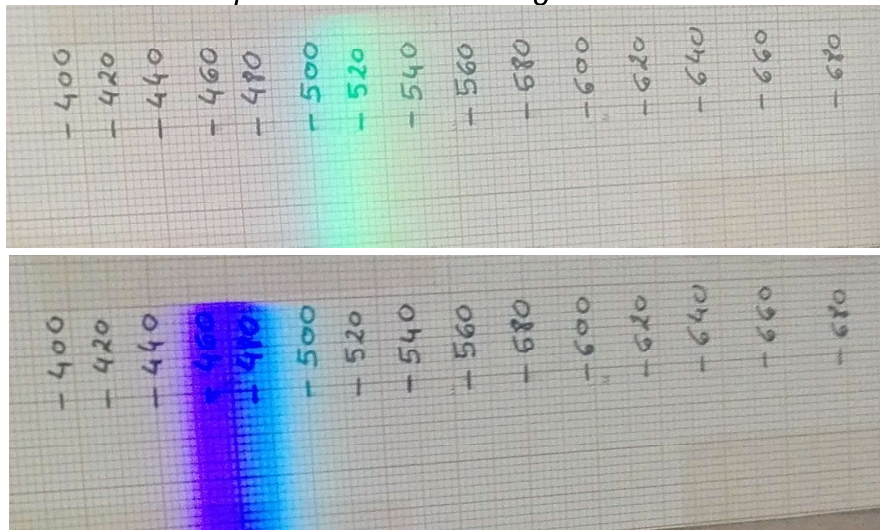
Datos:  $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ,  $h=6,6 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ .

AC7.- Observad el espectro de un LED rojo. Explicad su formación.



Espectro de un led rojo. La escala indica los nanómetros.

AC8.- ¿Cómo funciona el led que emite luz verde? ¿Y luz azul?



Espectro del led verde y del led azul. Las escalas indican la longitud de onda en nanómetros.

**¿Cómo se emite y absorbe radiación?**

AC9.- Nuestro compañero Pepe Pedro montó en la Casa del Cable de Xàbia una exposición de sellos en diciembre de 2011 por conmemorar el año internacional de la química. Entre esos sellos se podía observar el que se ve más abajo. Interpretad lo que se observa en el sello.



Sello que formaba parte de la exposición para conmemorar el año internacional de la química.

AC10.- Las siguientes imágenes muestran carnés y billetes iluminados con luz ultravioleta y con luz ordinaria. Explicad por qué con la luz ultravioleta se observan detalles que no se ven con la luz ordinaria.



Carnés y billetes iluminados con luz ultravioleta y con luz ordinaria procedente de una bombilla de bajo consumo.

AC11.- En la imagen inferior se observa un vaso con clorofila<sup>9</sup> iluminada con luz ordinaria procedente de una bombilla de bajo consumo. A la derecha se observa el mismo vaso iluminado con luz ultravioleta. Como se puede observar, al ser iluminada con luz ultravioleta la clorofila emite luz roja. ¿Cómo podemos interpretar este fenómeno?



9.- La clorofila se ha obtenido picando espinacas en alcohol 96°.

**¿Cómo se emite y absorbe radiación?**

AC12.- Al realizar la experiencia de difracción a través de una rendija cuadrada se observa la figura que aparece en la imagen. Interpretad la formación de la figura obtenida.

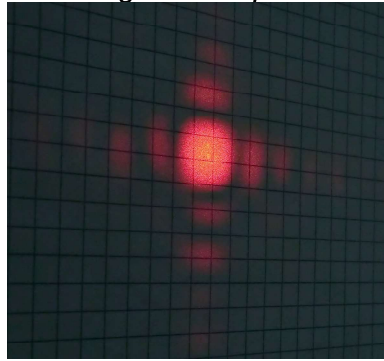
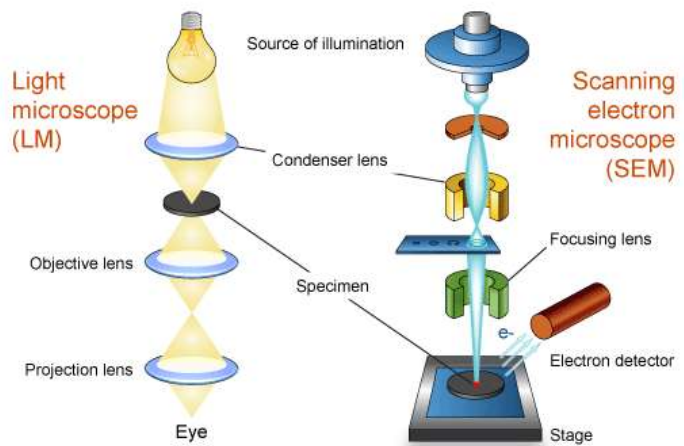


Figura de difracción a través de una rendija cuadrada.

AC13.- Sabéis que la luz visible tiene una longitud de onda que está comprendida entre 400nm y 700nm. Con las lentes adecuadas se puede actuar sobre la luz procedente de un objeto para verlo aumentado, conseguimos así un instrumento conocido con el nombre de microscopio. Con el desarrollo de la física cuántica se abrió la posibilidad de usar haces de electrones para aumentar aún más los objetos pequeños. En un microscopio electrónico se envía un haz de electrones de muy elevada velocidad (en un microscopio electrónico típico la velocidad de los electrones es de  $6 \cdot 10^7$  m/s) hacia un objeto que se desea “observar”. Dichos electrones interactúan con el objeto y son recogidos por un sensor que, unido a un ordenador, interpreta la información que le llega y da una imagen ampliada del objeto.

¿Qué ventaja supone el uso de electrones frente a luz visible en la observación de objetos pequeños?

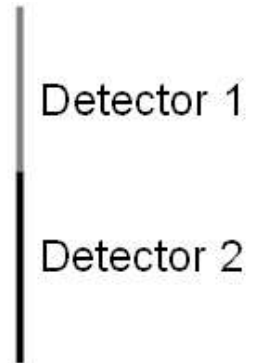
AC14. El microscopio electrónico es uno de los instrumentos más importantes que se han construido a partir de la física cuántica. Un microscopio electrónico utiliza electrones en lugar de luz para “observar” objetos pequeños. Si queremos observar objetos muy pequeños debemos usar lentes (en un microscopio óptico) o condensadores (en un microscopio electrónico) con orificios muy pequeños. Pero si reducimos mucho el agujero del condensador o las dimensiones de la lente la imagen que da el microscopio ya no es una imagen nítida, sino una imagen borrosa. ¿Por qué ocurre esto? Ayudaos de dibujos más sencillos que estos si lo consideras necesario. (Imagen extraída de la web de la Australian Microscopy and Microanalysis Research Facility)



### ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

AC15.- Lanzamos dos fotones exactamente en las mismas condiciones hacia una zona en la que hay dos detectores, como se muestra en la imagen. Indicad vuestro acuerdo o desacuerdo con las siguientes afirmaciones:

- Un fotón se detectará en la parte superior y otro en la parte inferior porque la probabilidad de incidir en cada lugar es del 50%.
- Los dos fotones son iguales y se detectarán en la misma zona.
- Cada fotón se detectará en los dos detectores porque la luz se propaga en todas direcciones.



*El objeto de la izquierda representa una fuente de fotones. A la derecha se sitúa una pantalla con dos detectores, cada uno de ellos tan extenso como media pantalla.*

## ANEXO: CONSTRUCCIÓN DEL ESPECTROSCOPIO CUANTITATIVO

### Construcción del espectroscopio

Para montar el espectroscopio usamos una caja de cartón. En uno de los laterales de la caja abrimos un agujero rectangular, de aproximadamente 4 cm de alto y 2 cm de ancho. En la cara opuesta, y alineado con el agujero anterior, abrimos un agujero idéntico. Recortamos un rectángulo de cartulina negra con el cual se ha de poder cubrir por completo cualquiera de los agujeros anteriores. Con un cutex cortamos sobre el rectángulo de cartulina negra una rendija vertical tan estrecha como sea posible. Seguidamente, pegamos con cinta adhesiva el rectángulo de cartulina con la rendija sobre uno de los agujeros abiertos en la caja. Esta rendija constituye el objetivo del espectroscopio, por donde entrará la luz. En el extremo opuesto pegamos una red de difracción. La red de difracción es el ocular del espectroscopio. En la parte interior de la caja, y justo a partir de la rendija, pegamos una tira de papel milimetrado. Sobre esta tira de papel construimos una escala que nos permitirá medir la longitud de onda de las líneas espectrales. El montaje queda como se muestra en la figura.



Interior del espectroscopio: 1) Agujero sobre el que se ha pegado la red de difracción. 2) Rectángulo de cartulina con la rendija. 3) Escala de papel milimetrado.

### Calibración de la escala

Cuando una onda llega a la red de difracción cada una de las rendijas actúa como un foco emisor de nuevos frentes de onda. Sobre cada punto de la pantalla se produce una superposición de todos estos frentes de ondas secundarios. Así, en aquellos puntos de la pantalla en los que las ondas llegan en fase se producirá una interferencia constructiva y se detectará un máximo de intensidad. Si pasamos un haz láser (luz monocromática) por la red de difracción observamos que sobre la pantalla (escala milimetrada) se forman una serie de puntos luminosos allí donde la interferencia es constructiva. Si cambiamos el color del láser los puntos luminosos cambian de posición, y eso porque su longitud de onda es diferente.

Tenemos, por tanto, que cada longitud de onda presentará un máximo en una posición determinada sobre la pantalla. Si conseguimos encontrar una relación entre la longitud de onda y la posición de la pantalla podremos medir longitudes de onda.

## ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Consideramos las ondas que llegan a un punto x de la pantalla (situada a una distancia L de la red de difracción) desde dos rendijas consecutivas de la red. La diferencia de caminos de las ondas que llegan a x (figura inferior) se corresponde con la longitud del segmento  $\Delta$ .

Usando diversos triángulos rectángulos podemos escribir las relaciones:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta}{d} \quad \text{y} \quad \sin \alpha = \frac{x}{\sqrt{x^2 + L^2}}$$

Igualando ambas expresiones llegamos a la siguiente ecuación, que relaciona la diferencia de longitud de los caminos seguidos por cada onda con la posición x de la pantalla:

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + L^2}}$$

La interferencia será constructiva allí donde la diferencia de caminos sea un múltiplo de la longitud de onda  $\Delta = n\lambda$ . En nuestro caso, vamos a trabajar solo con  $n=1$ , es decir, no tomaremos en consideración los máximos que se observan en posiciones x más alejadas. Por tanto, las posiciones de los máximos serán:

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{x_{\max}}{\sqrt{x_{\max}^2 + L^2}} \rightarrow x_{\max} = \frac{\lambda L}{\sqrt{d^2 - \lambda^2}}$$

Esta expresión nos permite calcular la posición en la cual se observan los máximos de interferencia para cada una de las longitudes de onda que integran la radiación, es decir, para cada línea espectral.

Como ejemplo, si usamos una caja en la cual el ocular y el objetivo se encuentran a 22,5 cm ( $L=0,225$  m) y una red de difracción de 1000 rendijas/mm ( $d=10^{-6}$  m rendijas/m), sustituyendo en la ecuación estos valores y las longitudes de onda de la luz visible a intervalos de 20 nm, obtenemos los resultados de la siguiente tabla.

$\lambda$ (nm)	x (cm)	$\lambda$ (nm)	x (cm)	$\lambda$ (nm)	x (cm)
400	9,82	500	12,99	600	16,88
420	10,41	520	13,70	620	17,78
440	11,02	540	14,44	640	18,74
460	11,66	560	15,21	660	19,77
480	12,31	580	16,02	680	20,87

Procedemos ahora a marcar estos valores sobre el papel milimetrado. A 9,82 cm de la rendija hacemos una pequeña marca y le asignamos el valor 400 nm, a 10,41 cm hacemos otra marca y le asignamos el valor 420 nm... De este modo conseguimos una escala con la cual medir la longitud de onda de las líneas espectrales.

### ¿Cómo se emite y absorbe radiación?

La imagen inferior muestra cómo queda la escala. En este caso se muestra también el espectro de una bombilla de bajo consumo. Se puede observar que, usando la escala, se obtiene directamente la longitud de onda de las líneas espectrales.

