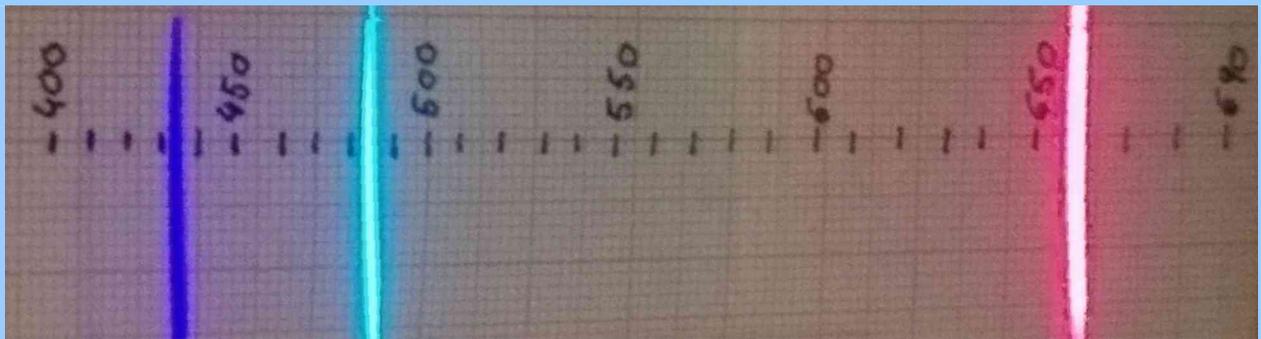


¿CÓMO SE EMITE Y ABSORBE RADIACIÓN?

Introducción a la física cuántica



Francisco Savall Alemany
Josep Lluís Domènech Blanco
Joaquín Martínez Torregrosa

Introducción

Los materiales que presentamos constituyen un programa de actividades para la enseñanza problematizada de la física cuántica en el bachillerato (16-18 años), y, por extensión, en cualquier curso de introducción a la física cuántica. Se caracteriza por presentar, al principio de la unidad, un problema que se encuentra en el origen de los conocimientos que pretendemos que los estudiantes adquieran. Por supuesto, es necesario que los alumnos se apropien de este problema, que sean conscientes de su interés y que se impliquen en la búsqueda de una solución.

El índice de la unidad se organiza de manera que responda a una posible estrategia para avanzar en la búsqueda de una solución, es decir, responde a un plan de investigación. La estructura de apartados está ligada de manera lógica e intencional. Así, los conceptos y los modelos son introducidos de manera funcional, como parte de un proceso de búsqueda de soluciones a los problemas planteados.

En este contexto de resolución de problemas, los conceptos y los modelos son introducidos por parte de los alumnos y del profesor como tentativas, como hipótesis fundamentadas que han de ser puestas a prueba a través de su capacidad predictiva en condiciones de laboratorio, de su capacidad para enfrentarse a situaciones problemáticas abiertas, de la coherencia con conocimientos ya establecidos y también a través de su capacidad para identificar o predecir nuevos problemas.

La evaluación se concibe como un instrumento de ayuda para avanzar en la resolución de los problemas planteados y como una oportunidad para “recapitular en la empresa científica”. La estructura problematizada favorece que se hagan recapitulaciones periódicas sobre el avance conseguido en la solución del problema planteado, los obstáculos superados y lo que todavía queda por hacer, prestando así especial atención a la regulación y orientación de los alumnos.

Concretamente, para la presente unidad de física cuántica, el recuadro siguiente presenta el objetivo clave, el problema estructurante y una estrategia lógica para avanzar en su resolución.

Las actividades que constituyen la secuencia están numeradas, precedidas de la letra A mayúscula y redactadas en letra cursiva, lo que permite diferenciarlas del resto del texto. Así mismo, se añaden comentarios para el profesor en letra más pequeña y dejando un margen adicional de 2 cm. La finalidad de dichos comentarios es orientar en el desarrollo de la secuencia. Es conveniente que los estudiantes no dispongan de dichos comentarios ya que suelen ofrecer estrategias de razonamiento para avanzar en la respuesta de las actividades, al tiempo que apuntan posibles dificultades que pueden encontrar los alumnos. Si los alumnos acceden a los comentarios no pensarán la respuesta a las actividades y se limitarán a seguir las estrategias propuestas en ellos.

Al final de la unidad hay una colección de actividades complementarias, numeradas con las letras AC en mayúscula seguidas del correspondiente número. Estas actividades tienen carácter opcional y no imprescindibles para el desarrollo de la unidad, aunque contribuyen a profundizar y consolidar diversos aspectos. Se recomienda hacerlas durante el desarrollo de la secuencia de investigación en lugar de reservas para el final.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Todas las imágenes de espectros han sido tomadas usando un espectroscopio cuantitativo que se construye siguiendo las instrucciones contenidas en el anexo del final de la unidad. Los materiales necesarios para ello son sencillos, económicos y fáciles de conseguir. Recomendamos que, durante el desarrollo de la unidad, los alumnos dispongan de diversos espectroscopios que permitan hacer las observaciones “en vivo” en lugar de recurrir únicamente a las imágenes.

Por último, es muy recomendable para el profesorado leer los siguientes trabajos (especialmente los dos primeros) antes de implementar la unidad en su práctica docente:

- “La introducción del concepto de fotón en bachillerato”¹ Artículo en el que se analizan numerosos aspectos incorrectos en los que incurren los libros de texto de Física de 2º de bachillerato, y por extensión la enseñanza habitual, al introducir el concepto de fotón.
- “Identificando las dificultades de los profesores y los estudiantes para interpretar los espectros atómicos usando un modelo cuántico de emisión y absorción de radiación”² Artículo en el que se analizan en detalle las principales dificultades que presentan alumnos y profesores al interpretar los espectros de los gases. Es fundamental tenerlas presentes para no incurrir en ellas como docentes y llevar a cabo las acciones necesarias para que los alumnos consigan superarlas.
- “El espectroscopio cuantitativo como instrumento para la construcción y uso de modelos de emisión y absorción de radiación en física cuántica”³ Artículo que presenta diversas actividades comentadas que están incluidas en esta unidad.
- “La enseñanza problematizada de la física cuántica en el nivel introductorio. Una propuesta fundamentada”⁴. Artículo que incluye una presentación de esta secuencia de actividades con dos secciones fundamentales: una de ellas con las ideas clave de los modelos objeto de estudio y otra con su desarrollo histórico.

Los autores

1https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/29143/1/Introduccion_del_concepto_de_foton_en_el_Bachillerato_RBEF_2013_35_2404.pdf

2<https://journals.aps.org/prper/pdf/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.010132>

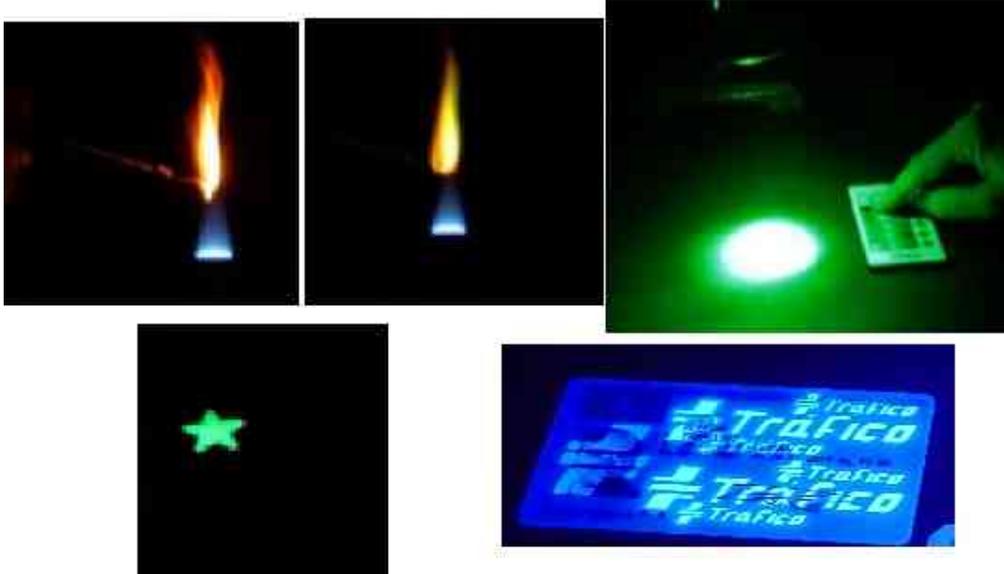
3https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/41082/1/2014_Savall_etal_RBEF.pdf

4<https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/issue/view/1345>

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

¿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.- Indica qué podemos hacer para emitir luz.

C. Se pueden ver algunos vídeos sobre la emisión de luz en http://www.youtube.com/user/pacosavall?ob=0&feature=results_main

Queremos poner de manifiesto que hay muchas formas de emitir luz, indicando aparatos y fenómenos cuyo funcionamiento estudiaremos más adelante. Vemos así que la materia emite luz en condiciones diversas y empezamos a hacernos preguntas sobre el mecanismo que permite dar cuenta de la emisión de luz: ¿es siempre el mismo? ¿Por qué a veces la materia se calienta y a veces no? ¿Qué podemos hacer para cambiar el color o la intensidad de la luz emitida en cada caso?

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Podemos obtener luz:

- Calentando o quemando objetos: poniendo un trozo de metal cerca de una llama, quemando un trozo de papel, etc.
 - Quemando sales, como se hace en las bengalas o fuegos artificiales para obtener luces de colores.
 - Calentando objetos con una corriente eléctrica: una bombilla ordinaria de filamento de tungsteno, los tubos de una estufa o de una tostadora de pan, etc.
- Haciendo pasar una corriente a través de un gas (en este caso el gas no se calienta): un tubo fluorescente, una bombilla de bajo consumo (si tocamos el tubo o la bombilla con la mano comprobamos que no se calienta, esto puede llevar a pensar que la producción de luz tiene lugar mediante un mecanismo diferente al de la bombilla de filamento).
- "Acumulando radiación por absorción": Los adhesivos fluorescentes que brillan durante unos minutos en la oscuridad.
- Por procedimientos químicos o biológicos: Animales que tienen la capacidad de producir luz, tubos que al romperse hacen luz durante unas horas, etc.

A2.- Observad la luz emitida por algunos de los objetos indicados antes con un espectroscopio⁵. 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).

C. El objetivo de esta actividad es introducir los espectros como instrumento de análisis de la luz. Los alumnos deben aprender que la luz que observan está formada por varias frecuencias (que nos permiten cuantificar la magnitud "color") y que cada frecuencia puede tener una intensidad diferente (trabajaremos la intensidad con carácter cualitativo durante toda la unidad). Encontraremos las siguientes ideas previas sobre los espectros en los alumnos:

- Que un espectro es un fantasma: no asocian el concepto espectro a la descomposición de radiación.
- Que todos los espectros son iguales, siempre están todos los colores: no reflexionan sobre la posición de las líneas, la cantidad de líneas, la presencia de "zonas negras" en el espectro ... como siempre ven colores dicen que todos los espectros son iguales. Otra posibilidad consiste en considerar que siempre están observando el arco iris porque ven muchos colores, tanto si observan un espectro discreto como continuo.
- Consideran que un espectro es continuo si se emite de forma continuada en el tiempo. El espectro del hidrógeno lo consideran continuo porque se puede ver continuamente, el del Sol también ... unos espectro sería discontinuo cuando sólo se ve temporalmente (posiblemente la idea viene de que el Sol siempre emite, no se apaga, mientras que una lámpara espectral sólo emite cuando está conectado).
- Consideran que las líneas del espectro son la luz, como si la fuente emitiera las líneas que se observan en el espectro. Hay que enfatizar la idea de que el espectro es la descomposición de la luz que emite la fuente y que la forma (líneas, círculos, etc.) depende de la sección del haz luminoso, es decir, si en lugar de una rendija vertical el espectroscopio tuviera un agujero circular se observarían agujeros circulares de colores.
- Al estudiar los espectros de absorción, consideran que el gas absorbe todas las radiaciones y emite de nuevo las que aparecen en el espectro de absorción, como si fuera una fluorescencia o fosforescencia.

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.

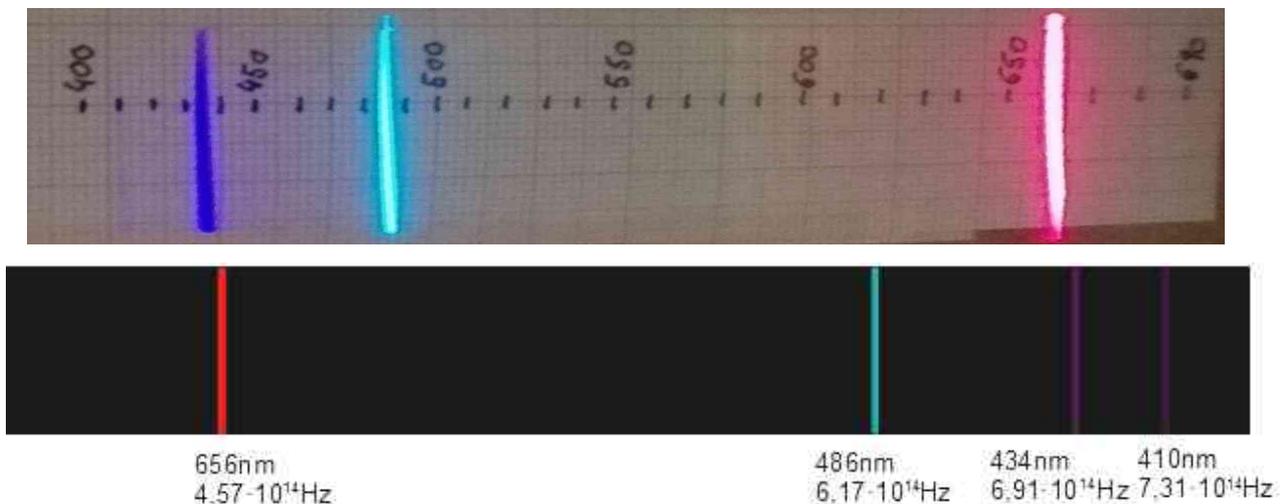
5. Al final de la unidad, en el Anexo 1, se encuentran las instrucciones para construir y calibrar un espectroscopio.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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).



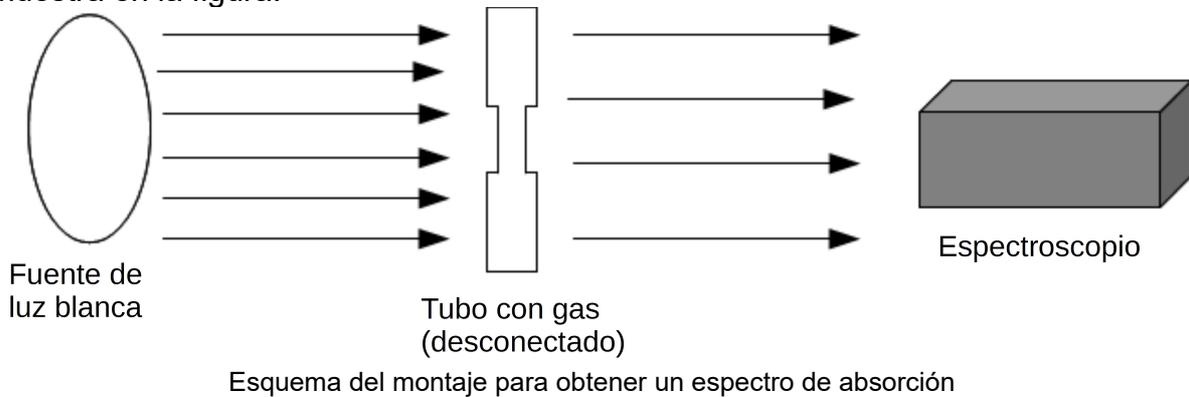
Espectro de emisión del hidrógeno. La parte superior corresponde a una fotografía tomada en el MUDIC – Museo Didáctico de Orihuela. La parte inferior es un dibujo al que se han añadido los valores de la longitud de onda y la frecuencia de cada línea. Dependiendo de la estructura del espectroscopio se 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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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.



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?

C. Se observa que las frecuencias de las líneas en los espectros de emisión y absorción son las mismas. Establecemos así una relación entre los espectros que refuerza la idea de que el espectro depende de la estructura interna de los átomos del gas.

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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

C. Esta actividad pretende generalizar e ir más allá de lo que es la emisión de luz visible, considerando otros tipos de radiaciones no visibles e introduciendo la absorción. Entre las posibles respuestas podemos encontrar:

- Emisión:
 - Conseguir luz de un color determinado (o radiación de una frecuencia determinada) que puede ser útil por varios motivos: señales de emergencia, rótulos publicitarios, fuegos artificiales, luces ultravioletas para identificación de billetes, bronceado, o Rayos X para radiografías, etc. ¿Qué mecanismo permite controlar la frecuencia de la luz que se emite (infrarrojo, visible, UV, etc.)?
 - Identificar la composición de los cuerpos, incluso objetos celestes. ¿Qué relación hay entre la composición de una llama y el color que emite? ¿Cómo sabemos qué composición tiene el sol y las estrellas más lejanas?
 - Conseguir luz con el mínimo consumo energético: el tubo fluorescente, el led y las bombillas de bajo consumo. ¿Cómo funcionan? ¿Qué mecanismo permite explicar que emitan radiación sin calentarse? ¿Qué hace el gas que hay en su interior? Observamos su espectro y vemos que la luz que emiten no es "blanca" como la del Sol.
 - Radiaciones con utilidad tecnológica: el láser y todas sus aplicaciones (médicas, CD, DVD, punteros, etc.), el microondas, la WIFI, el bluetooth ...
 - Materiales fluorescentes y fosforescentes que facilitan la visualización en condiciones de baja luminosidad. ¿Cómo pueden almacenar luz (o energía)?

Se trata de plantear el problema que afrontaremos durante la primera parte de la unidad: ¿Qué mecanismo permite dar cuenta de la emisión de luz? Todos los materiales están formados por átomos, pero, ¿qué ocurre para que emitan luz de una manera o de otra?

- Absorción:
 - Las placas solares: ¿Qué hace la luz en la placa que permite generar electricidad? ¿Por qué no es válido cualquier material para construirlas? ¿Vale cualquier radiación para hacerlas funcionar?
 - Los grabadores de imagen: cámaras de fotos, cámaras de vídeo, papel fotográfico para revelado de fotos, las antiguas películas sensibles a la luz, etc. ¿Qué hace la luz a los materiales para "marcarlos"? ¿Cómo se registra la información que transmite la luz?
 - Los detectores: células fotoeléctricas de puertas de entrada, de alarmas, de contadores, etc.
 - Los efectos biológicos de las radiaciones: ¿Qué hace la luz en nuestro ojo que nos permite ver? Y en nuestra piel para broncearnos? ¿Por qué se producen cánceres de piel?

Planteamos así el segundo de los problemas: ¿cómo interacciona la luz con la materia de forma que la materia "registra" esa interacción? ¿Por qué hace falta luz para conseguir esos efectos y no vale cualquier otro tipo de energía?

Hay que llevar varios de estos aparatos y observar el problema: negativos fotográficos y fotografías reveladas, placas fotoeléctricas, bombillas de bajo consumo, leds, objetos fluorescentes y fosforescentes, carteles de peligro por radiación ... Pretendemos plantear preguntas con dos finalidades: captar el interés del alumnado mostrando lo cotidiano del problema que vamos a trabajar y plantear preguntas relacionadas con la emisión y absorción de radiación para introducirlos en la investigación que realizaremos a continuación.

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.

¿Cómo se emite y absorbe 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 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.

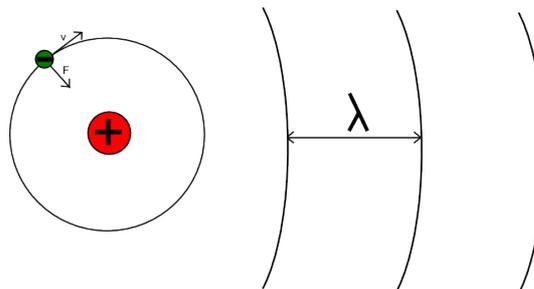
Entre todos los espectros de los gases, el más sencillo es el del hidrógeno, que solo contiene cuatro frecuencias. Este átomo, además, es el más sencillo de todos, y solo consta de un núcleo positivo formado por un solo protón y un electrón orbitando a su alrededor. Siendo así que es el átomo y el espectro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

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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

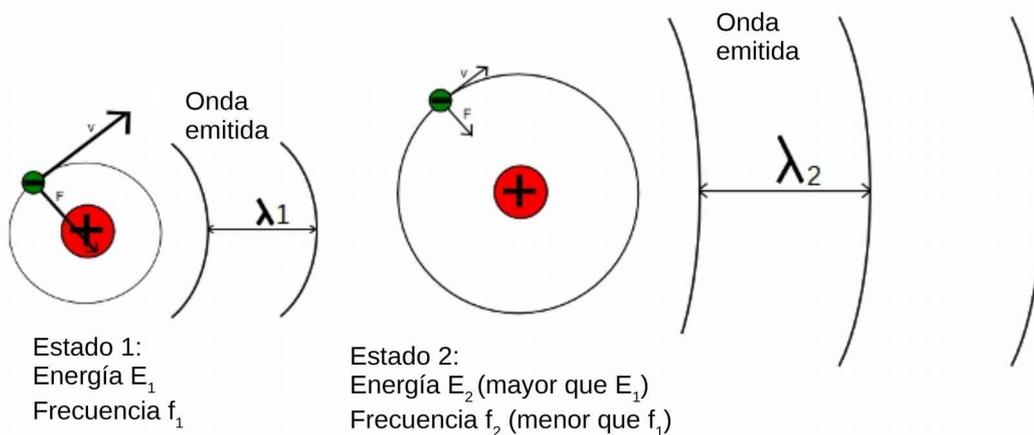
C. El objetivo de esta actividad y las siguientes es poner a prueba un mecanismo clásico de emisión de radiación basado en el modelo planetario del átomo y la concepción ondulatoria de la radiación. Del análisis detallado de este mecanismo se concluirá que no puede dar cuenta de forma satisfactoria de la formación de los espectros atómicos en tanto que hay aspectos que no puede explicar. Además de familiarizar al alumnado con los procesos clásicos de emisión de radiación debe permitir que tomen conciencia de las dificultades insuperables a que se enfrentaba la física clásica al intentar explicar los procesos de emisión de radiación.

Se puede establecer un modelo de emisión usando la teoría electromagnética. Teniendo en cuenta que el electrón es una partícula cargada que realiza un movimiento periódico, el movimiento orbital dará lugar a una onda electromagnética que se propaga a la velocidad de la luz y cuya frecuencia coincide con la frecuencia orbital del electrón.



El electrón, en movimiento orbital, realiza un movimiento oscilatorio que genera una onda electromagnética que se propaga por el espacio. La frecuencia de dicha onda coincide con la frecuencia de oscilación del electrón, es decir, con el número de vueltas por segundo. Se representa el frente de onda esférico y la longitud de onda.

La presencia de muchos átomos permite explicar la formación de radiación de diversas frecuencias al mismo tiempo, en tanto que el electrón de cada átomo puede vibrar de forma diferente. Si el espectro tiene 4 líneas hemos de concluir que cada átomo vibra en una de 4 órbitas posibles. Pero, ¿Por qué no hay más órbitas y más frecuencias en el espectro?



Dos posibles estados de vibración del átomo de hidrógeno. El primer electrón sufre una fuerza F de atracción hacia el protón y se mueve con una velocidad v . Esto lo hace girar con una frecuencia determinada, emitiendo radiación de esa frecuencia. En el otro estado del electrón se encuentra más cerca del núcleo, la fuerza de atracción es mayor y también lo es la velocidad orbital. En este caso la frecuencia de rotación es mayor, por lo que da lugar a radiación de mayor frecuencia. La presencia de 4 líneas espectrales se puede explicar si se considera que existen 4 posibles formas de vibración (4 estados).

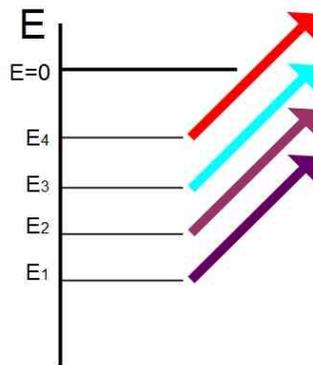
Si calentamos el gas a una temperatura mayor cabría esperar que todos los átomos vibrasen

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

con más energía, y por tanto en órbitas más lejanas al núcleo. Eso daría lugar a frecuencias diferentes y a un espectro con otras líneas espectrales. Pero eso no ocurre. La frecuencia de las líneas no depende de la temperatura. Otra dificultad se presenta cuando dejamos de aportar energía a los átomos. La abordamos en la actividad siguiente.

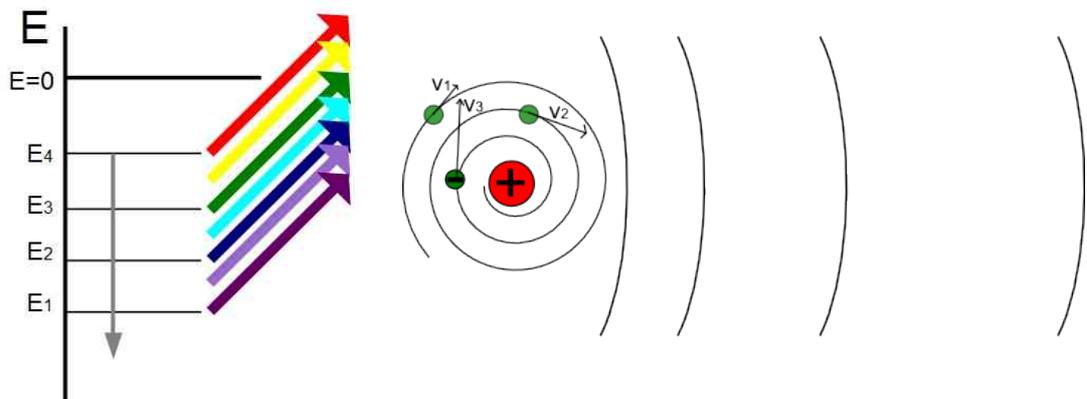
A6.- *Situad en un diagrama de energía, de forma cualitativa, los átomos que están emitiendo radiación. Usad el diagrama de energía para interpretar qué le ocurre al electrón a medida que emite radiación, de acuerdo con el mecanismo que habéis propuesto antes.*

C. Si el electrón está oscilando en una órbita fija alrededor del núcleo tiene una energía determinada y ocupa una posición fija en un diagrama de energía (en tanto que su energía es constante), así lo representamos en el diagrama de energía (representamos 4 energías posibles correspondientes a los valores de cada movimiento orbital). Teniendo en cuenta que la línea roja es la más intensa, podemos suponer que habrá más átomos vibrando con esa frecuencia y emitiendo más energía a esa frecuencia, esto explicaría la diferencia de intensidades de las líneas. Debemos tener en cuenta que la energía total del átomo es negativa ya que el electrón está ligado al núcleo y no puede escapar si no se le aporta la energía necesaria para hacerlo.



Energías con las que oscilan los átomos de hidrógeno y radiación que emiten, de acuerdo con el modelo propuesto. Los átomos que tienen más energía oscilarán con una frecuencia menor y emitirán luz de menor frecuencia.

En tanto que la onda electromagnética emitida por un átomo tiene energía, éste debe ir cediéndola para mantener la emisión, esto hará que cada vez oscile más cerca del núcleo hasta que finalmente choque con él, como se muestra en el diagrama inferior.



A medida que el electrón emite radiación pierde energía lo que le lleva a moverse cada vez en órbitas más cercanas al núcleo, desplazándose por el diagrama de energía hacia valores cada vez menores y emitiendo radiación de mayor frecuencia.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

Podemos suponer que la energía que aportamos ayuda a compensar la que se pierde por radiación. Pero, ¿qué pasaría si, de repente, aumenta o disminuye el aporte de energía? ¿No cabría esperar un cambio en el movimiento orbital del electrón y en la frecuencia de la radiación emitida? Esto llevaría a que el espectro emitido por los átomos fuese continuo, con todos los colores, ya que cualquier cambio en el movimiento orbital del electrón de una órbita a otra supone el paso por todas las órbitas intermedias y un cambio progresivo de la frecuencia, por lo que todas las frecuencias deberían reflejarse en el espectro.

Además, el movimiento continuo del electrón en la órbita implica que un átomo siempre emite radiación (porque los electrones siempre giran alrededor del núcleo), por tanto, cuando cese el aporte energético el átomo debería perder toda su energía y colapsar, emitiendo de nuevo un espectro continuo.

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.*

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, ν es la frecuencia y h es una constante.

C. Se plantea a los alumnos la necesidad de hacer hipótesis contrarias a la física clásica y que permitan superar el problema al que nos enfrentamos. Introducimos además las hipótesis de Bohr (actividad 7b) como una posibilidad adicional, tanto unas como otras serán analizadas para determinar en qué medida dan cuenta de los resultados experimentales.

La experiencia nos dice que una de las hipótesis que establecen el alumnos es que los electrones orbitan alrededor del núcleo sin emitir energía. Sólo emiten radiación cuando se les aporta energía (emiten radiación para no abandonar la órbita en que se encuentran, es como si expulsaran el exceso de energía para no cambiar su movimiento). Con esta hipótesis se resuelve el problema de la estabilidad del átomo y se puede dar cuenta de la existencia de 4 líneas en el espectro si se acepta que el electrón sólo puede orbitar en una de 4 órbitas posibles. El átomo sólo puede estar en 4 lugares en el diagrama de energía y no puede salir de ellos porque toda la energía que absorbe la emite. A esta la llamaremos Hipótesis de las órbitas constantes⁶.

Con este modelo, unas líneas espectrales son más intensas que otras porque hay más electrones en una determinada órbita que en otra, y por tanto emiten más energía de la frecuencia correspondiente a dicha órbita. En cuanto a la absorción, cada átomo absorberá sólo la radiación correspondiente a aquella frecuencia con que órbita del electrón. A nivel

6. No siempre lanzan esta hipótesis. Insistir en ella no lleva a resultados positivos, por lo que recomendamos no hacerlo en caso de que los alumnos no sigan esta estrategia por iniciativa propia.

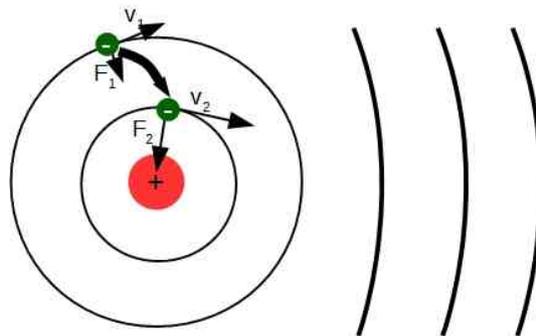
¿Cómo se emite y absorbe radiación?

cualitativo esta hipótesis resuelve los problemas planteados, aunque viola lo que sabemos sobre electromagnetismo: los electrones orbitan sin emitir energía.

Antes de usar la hipótesis de Bohr para dar cuenta de la formación de las líneas espectrales es necesario analizamos la imagen del átomo que se desprende de ella, enfatizando las características mecánicas y energéticas y las diferencias con la física clásica.

De acuerdo con la primera hipótesis (en el orden que están las de Bohr en la actividad 7b) el electrón no puede orbitar a cualquier distancia del núcleo, sino sólo a unas distancias fijas. Sin embargo, a diferencia de lo establecido en el electromagnetismo, el electrón no emite energía cuando se mueve en su órbita. Mientras el electrón se mantiene en órbita estable sí se cumplen las leyes de la mecánica: una fuerza centrípeta es la responsable del movimiento orbital del electrón de forma que para órbitas más alejadas la fuerza de atracción es menor, la velocidad de rotación es menor y la energía mecánica del sistema es mayor. El átomo sólo puede estar en unos pocos lugares del diagrama de energía.

La combinación de la segunda y tercera hipótesis permite explicar la formación de las líneas espectrales. Cuando se produce un cambio en el átomo el electrón pasa necesariamente a otro estado estacionario, no pueden haber cambios intermedios. La diferencia de energía entre los dos estados estacionarios se emite en forma de radiación electromagnética cuya frecuencia viene determinada por la expresión de la tercera hipótesis. Como podemos observar, la frecuencia de la radiación ya no es la frecuencia orbital del electrón, como prevé el electromagnetismo, sino que viene determinada por la diferencia de energías de los estados estacionarios entre los que se produce la transición.



Cuando el electrón cambia de una órbita a otra de menor energía emite radiación. La frecuencia de dicha radiación está relacionada con la diferencia de energía del átomo en el estado inicial y final.

La formación de diferentes líneas se debe a la existencia de diferentes transiciones en el colectivo de átomos. Como cada átomo puede realizar una transición diferente, la suma de todas las radiaciones emitidas da lugar a las diferentes líneas del espectro. La presencia de líneas de mayor intensidad se debe a que hay un mayor número de átomos que realizan la transición responsable de la emisión de radiación correspondiente a dicha frecuencia, dando lugar a una onda de mayor amplitud (y mayor intensidad) como consecuencia de la suma de todas las contribuciones individuales.

Este mecanismo de emisión es completamente diferente a lo que consideramos válido para las ondas: una onda representa la propagación de una vibración, una energía que se emite durante un cierto tiempo y que se propaga por el espacio, que ocupa un volumen. Ahora estamos proponiendo que el electrón hace un cambio de órbita y emite luz, con una determinada frecuencia. ¿Es que la luz se puede emitir "de golpe", sin necesidad de una vibración?

A pesar de ser contrarias a la física conocida hasta el momento, vamos a poner a prueba estas hipótesis, en tanto que parecen las únicas que evitan la destrucción de el átomo y que pueden dar cuenta de la existencia de unas pocas frecuencias en la luz emitida.

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

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

C. Podemos recurrir a hechos experimentales conocidos para descartar alguna de las hipótesis establecidas. Si los electrones no pueden abandonar su órbita, como establece la hipótesis de las órbitas constantes, no podemos dar cuenta de fenómenos eléctricos como la ionización o los procesos de carga y descarga de materiales por rozamiento u otros procedimientos. Asimismo, se hace difícil entender la conductividad como una corriente de electrones que fluye a través de un material. La posibilidad de arrancar electrones a un átomo con la correspondiente aportación energética sí está contemplada en las hipótesis de Bohr.

Otro detalle a tener en cuenta es que la presencia de 4 líneas en el espectro implica la existencia de 4 tipos de átomo de hidrógeno. El modelo propuesto por Bohr no implica la aceptación de átomos diferentes.

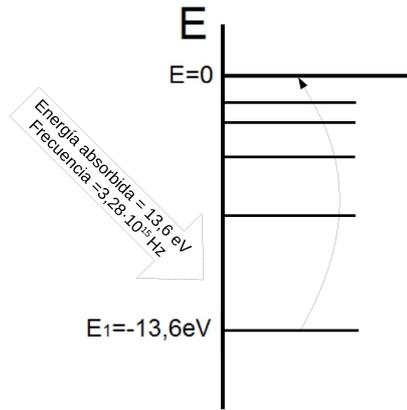
Además de las dificultades para explicar hechos ya conocidos se suman nuevas dificultades: la existencia sólo de 4 órbitas fijas no da cabida a ninguna otra línea espectral, en cambio, las hipótesis de Bohr permiten la emisión de más de 4 líneas espectrales. Si existen varios estados estacionarios y varias transiciones posibles debe haber más de 4 líneas espectrales. La detección de estas líneas espectrales sería un gran avance en cuanto a la aceptación o rechazo de este modelo. Este es el camino que seguiremos.

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.

C. La hipótesis de las órbitas constantes no permite explicar la ionización en tanto que impide que los electrones abandonen sus órbitas. Las hipótesis de Bohr sí contemplan esta posibilidad: un cambio de energía en el átomo requiere la absorción o emisión de radiación de una determinada frecuencia ($|E_f - E_i| = h\nu$). Por tanto, para que el electrón pase de estar ligado ($E < 0$) a estar libre ($E \geq 0$) se requerirá radiación de una frecuencia mínima, como se muestra en la figura. Esto nos permite, además, determinar la energía que tienen los átomos de hidrógeno cuando no están excitados, que resulta ser de -13,6 eV.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



La radiación de $3,28 \cdot 10^{15}$ Hz produce en el hidrógeno una transición electrónica de 13,6 eV, suficiente para ionizar el átomo según los resultados experimentales. La radiación de menor frecuencia o no es absorbida o produciría una transición menor, insuficiente para conseguir la ionización. Esto nos permite identificar el estado fundamental del átomo como aquel que tiene una energía de -13,6 eV.

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.

C. La hipótesis de las órbitas constantes sólo permite la formación de radiación de 4 frecuencias, a no ser que aceptemos que hay más órbitas posibles y más átomos de hidrógeno diferentes. En cambio, las hipótesis de Bohr permiten gran cantidad de transiciones, y por tanto gran cantidad de frecuencias.

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 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

$$E_n = \frac{-13,6(eV)}{n^2} \quad 7$$

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

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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.

C. En la realización de esta actividad hay que salir al paso de dos posibles errores conceptuales :

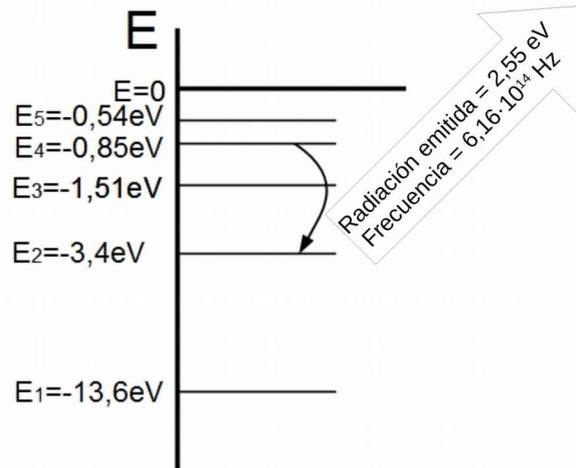
- Hay alumnos que atribuyen al electrón una frecuencia idéntica a la de la luz. Así, hablan de la frecuencia del electrón, de que el electrón está en una órbita con una frecuencia de X MHz y emite luz de X MHz, etc.
- Otros alumnos atribuyen a la luz la energía que tiene el electrón en su órbita. Un electrón que está en la órbita de -13,6eV emitirá 13,6eV de radiación, el que está en la órbita de -0,85 eV emitirá 0,85eV de energía, etc.

En gran medida, las dos ideas se deben a no diferenciar entre la fuente emisora y la onda emitida, hay alumnos que los consideran todo la misma cosa. Es fundamental seguir la estrategia indicada al inicio de la unidad: 1.- cómo es la materia (modelo atómico que estamos introduciendo), 2.- cómo es la radiación emitida (modelo ondulatorio, por el momento), 3.- qué mecanismo permite explicar la emisión.

Con la actividad se pretende introducir sobre el diagrama de energía las energías de los posibles estados estacionarios del hidrógeno y aplicar el modelo establecido como hipótesis. Cuando un electrón está en un estado determinado sólo puede realizar transiciones a otros estados, no son posibles los estados intermedios. Esto supone que sólo son posibles unas pocas frecuencias en la radiación emitida. Si calculamos las diferencias de energía entre los estados y las frecuencias correspondientes a las transiciones entre ellos veremos que la transición electrónica del estado 3 al 2 da lugar a la línea roja del espectro, la transición del estado 4 al 2 da lugar a la línea azul, y las transiciones de los estados 5 y 6 al 2 dan lugar a las líneas violadas. Hay que enfatizar la relación entre la frecuencia de la radiación y la diferencia de energía del átomo para superar las ideas alternativas indicadas al inicio.

Se observa, además, que el electrón puede hacer cualquier transición, no ha de ir necesariamente de un estado estacionario al inmediatamente inferior, puede pasar de un estado a otro sin pasar por los estados estacionarios intermedios. El cálculo de las frecuencias correspondientes a muchas de las transiciones posibles se corresponden con las frecuencias medidas fuera del espectro visible que hemos comentado antes.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



Al hacer una transición del 4º estado estacionario al 2º del átomo libera 2,55eV de energía. La radiación emitida tiene una frecuencia de $6,16 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. A cada transición le corresponde una energía y una frecuencia. Como hay muchos átomos en el gas, la radiación emitida transportará la totalidad de la energía emitida por los átomos y estará formada por todas las frecuencias emitidas por los átomos. Las líneas más intensas se corresponderán con las transiciones que tienen lugar más veces por unidad de tiempo.

No todos los átomos están realizando las mismas transiciones, las líneas más intensas se corresponden con las transiciones que ocurren más veces por unidad de tiempo, las transiciones más probables. Esto quiere decir que no sabemos qué transición hará el electrón desde el estado estacionario en el que se encuentra: dos átomos que están en el mismo estado estacionario pueden hacer una transición diferente, aunque los átomos son exactamente iguales. Conviene enfatizar este aspecto ya que más adelante se verá que la aleatoriedad es una característica del comportamiento cuántico, y esta aleatoriedad ya está presente en los espectros y otros fenómenos de emisión y absorción.

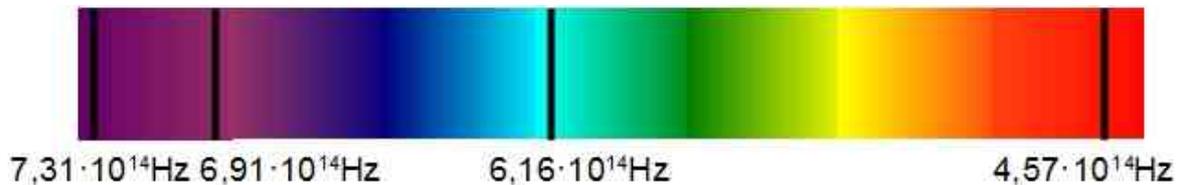
Aquí hay que tener cuidado y no dar la imagen que las órbitas o los estados estacionarios existen independientemente del electrón que las ocupa: el electrón se puede encontrar orbitando con unas energías determinadas, pero no hay energía (y por tanto no hay órbita) si no hay electrón: el diagrama representa los posibles estados energéticos.

Situar las energías correspondientes a los estados estacionarios en el diagrama de energía también nos permitirá ver que la "distancia energética" (o salto energético) entre órbitas adyacentes es cada vez menor. Cuando el átomo absorba energía suficiente el electrón se liberará y su energía volverá a ser continua. Para altas energías se recuperan los resultados clásicos que conocemos, la variación de energía vuelve a ser continua.

El modelo introducido explica de manera satisfactoria las frecuencias e intensidades de las líneas del espectro de emisión del hidrógeno. Sin embargo, este no es el único espectro que se puede obtener con el hidrógeno. Recordemos que cuando observamos el espectro de la blanca que ha atravesado un recipiente que contiene gas hidrógeno calentado se observa el correspondiente espectro de absorción. Valoremos si el modelo introducido puede explicar la formación de este espectro.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

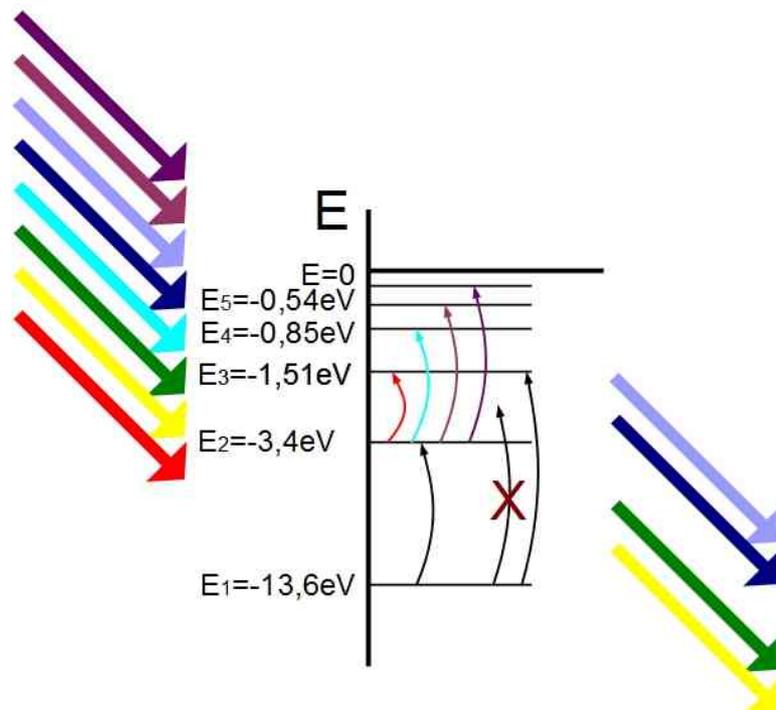
A9.- Como habíamos visto al empezar nuestra investigación, al iluminar un recipiente que contiene gas hidrógeno con luz blanca y analizar el espectro de la luz que lo atraviesa se observa la imagen inferior. Dad cuenta de este hecho usando el modelo elaborado.



Espectro de absorción del hidrógeno.

C. El espectro de absorción se interpreta de forma sencilla invirtiendo el mecanismo propuesto: si llega radiación de una determinada frecuencia al átomo éste la puede absorber y hacer una transición a un estado estacionario superior. Si la frecuencia no es la adecuada el salto energético no está permitido y la radiación no puede ser absorbida. Nuevamente tenemos que seguir la línea de razonamiento: establecer los modelos y el mecanismo, relacionar los aspectos microscópico y macroscópico.

Para ser coherentes con los resultados experimentales obtenidos en la ionización del hidrógeno, debemos descartar la posibilidad de transiciones múltiples por absorciones sucesivas. Si este tipo de procesos fuera habitual, los átomos se ionizarían fácilmente. En el caso concreto del hidrógeno, los átomos se podrían ionizar con un haz de radiación con frecuencias menores que $3,28 \cdot 10^{15}$ Hz, pero dicho fenómeno no se observa experimentalmente. El átomo solo puede hacer una única transición a un estado de mayor energía al absorber radiación, y posteriormente emitirá energía hasta regresar al estado fundamental. Las absorciones sucesivas son altamente improbables o imposibles. Solo si la temperatura del gas es suficientemente alta habrá una cantidad suficiente de átomos cuyos electrones estén en el segundo estado energético y se podrán producir las transiciones correspondientes a la absorción de las frecuencias visibles del espectro del hidrógeno.



De todas las frecuencias que llegan a los átomos de hidrógeno sólo se absorberán aquellas que permiten transiciones entre estados estacionarios. Para la parte visible del espectro, se

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

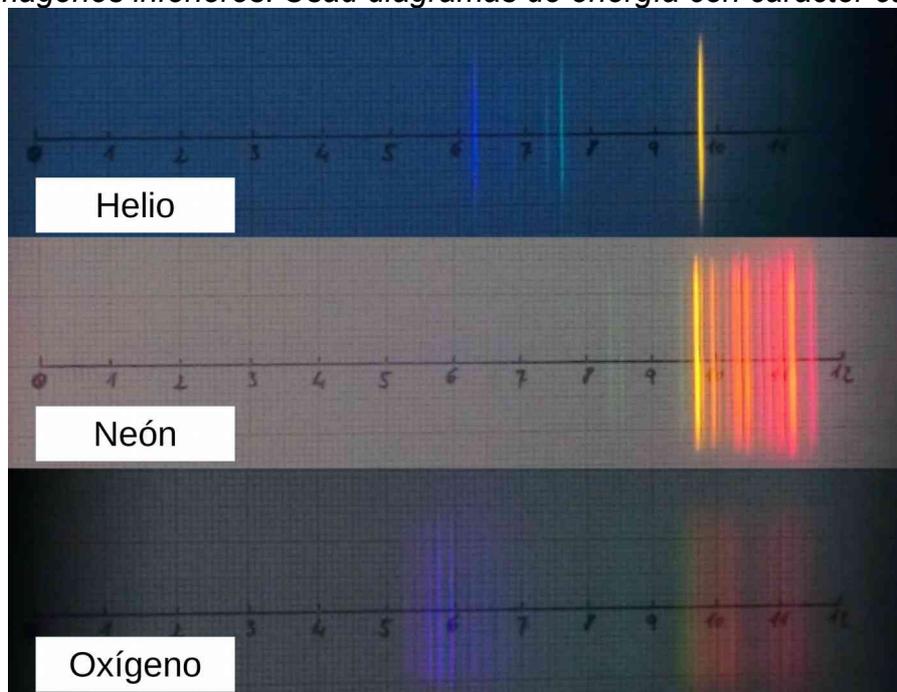
producirán transiciones atómicas del estado de energía E_2 a los estados de energía E_3 , E_4 , E_5 y E_6 . Otras radiaciones no visibles pueden producir transiciones entre otros estados, como se muestra con las líneas negras. Hay que tener en cuenta que si ningún átomo se encuentra en el estado estacionario E_2 no se absorberán líneas visibles ya que las transiciones que producen no son posibles, es necesario excitar el gas para poder observar el espectro de absorción. Asimismo, no se pueden producir transiciones que no lleven de un estado estacionario a otro, como refleja la línea negra tachada. Las frecuencias que no han producido transiciones no serán absorbidas y atravesarán el gas, dando lugar al espectro que se registra. Las líneas negras del espectro se corresponden con las frecuencias que han sido absorbidas.

Hay que enfatizar que los átomos no absorben las radiaciones que no se corresponden con transiciones entre estados estacionarios. Es un error común considerar que los átomos absorben cualquier radiación y que se quedan en el estado estacionario más próximo al que les corresponde al usar la relación $|E_f - E_i| = h \cdot \nu$.

Aquí podemos comentar que la energía adquirida por los átomos luego será re-emitida, ya sea en forma de radiación de la misma frecuencia o de la frecuencia correspondiente a otras transiciones posibles. Entonces, ¿por qué la frecuencia no aparece en el espectro? Esta emisión tendrá lugar en todas direcciones, no sólo en la dirección de la radiación incidente, por lo que aparece la línea negra en el espectro. Realmente la línea no es completamente negra, sino que es mucho más débil que las líneas que lo rodean, por eso se aprecia negra. Hay que hacer este análisis para no caer en una violación del principio de conservación de la energía, no podemos dar la imagen que los átomos sólo absorben energía durante todo el tiempo que estamos iluminándolos, por largo que sea este tiempo.

Una vez hemos contrastado la validez del modelo para explicar la radiación emitida y absorbida por el átomo de hidrógeno valoramos, aunque sea a nivel cualitativo, cómo se forman los espectros de otros átomos explicando porque son diferentes.

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.

C. Relacionamos aquí la frecuencia de la radiación con la diferencia de energía de los estados estacionarios entre los que se produce la transición y la intensidad de cada línea con la

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

cantidad de átomos que hacen una determinada transición. Recordemos que esta actividad la hacemos con carácter cualitativo y que hay que seguir la línea de análisis introducida: modelo para la materia (en tanto que el átomo está formado por más partículas subatómicas debemos considerar que su estructura es más compleja y su diagrama de niveles estacionarios también lo es), modelo para la radiación, mecanismo.

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 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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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?

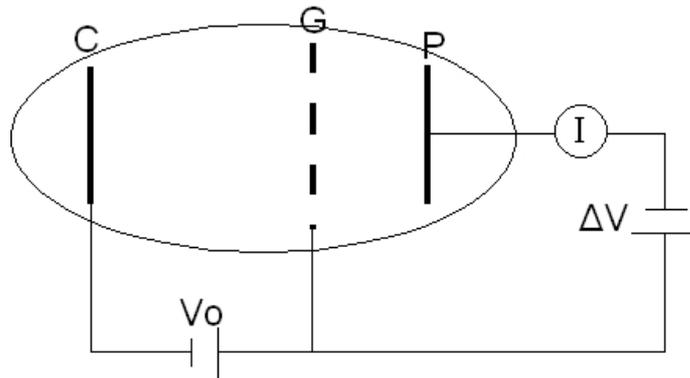
2.1.1.- El experimento de Franck y Hertz

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 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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

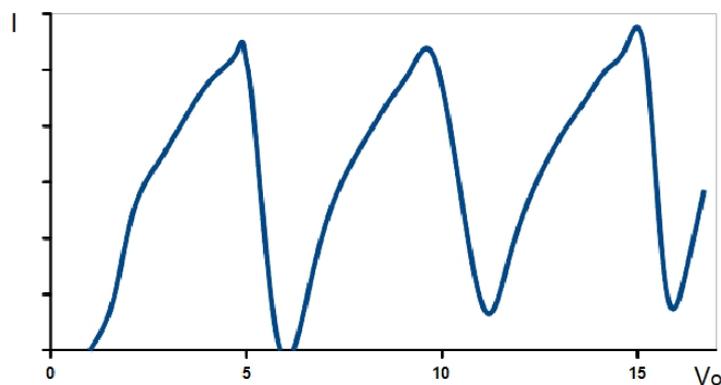
Por tanto, podemos bombardear un gas de mercurio con un haz de electrones de energía conocida y medir la transferencia de energía que se produce. Si los electrones no pierden energía al atravesar el gas (y chocar con los átomos de mercurio) es porque no producen ningún cambio en la estructura interna 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.

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 .

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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 eV 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?

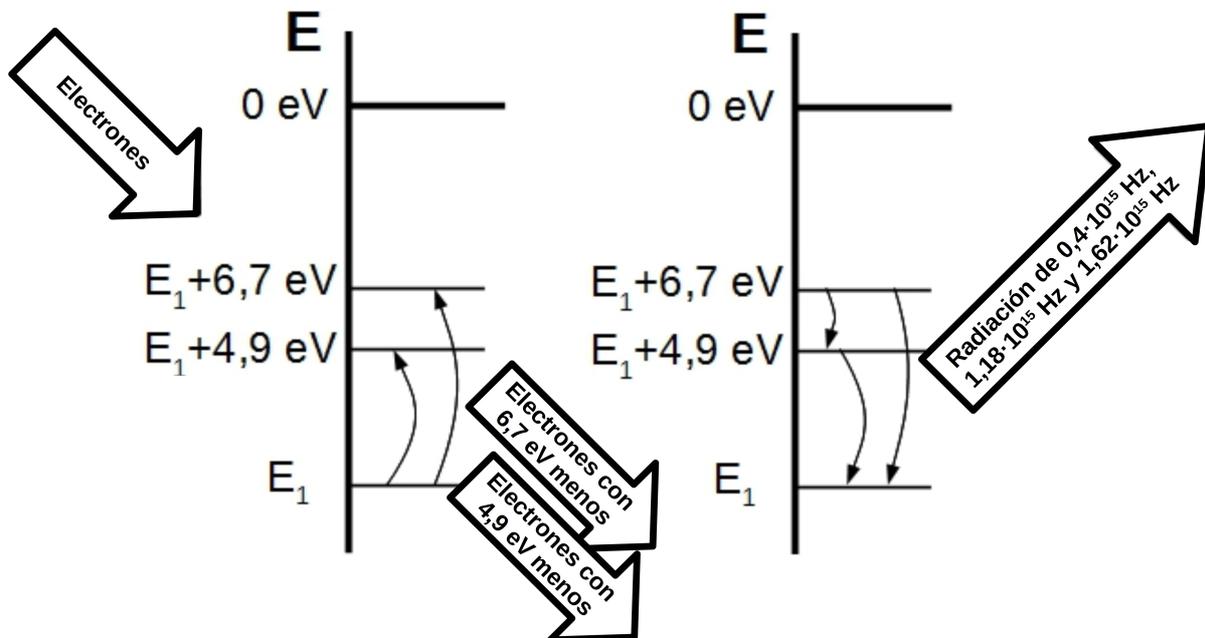
Los resultados evidencian que los electrones sólo pueden transferir 4,9 eV a los átomos de mercurio, como predice nuestro modelo, y no cualquier cantidad de energía. Cuando se da a los electrones una energía inferior a 4,9 eV estos atraviesan el gas colisionando con los átomos de mercurio pero sin transferirles 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 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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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.



Los átomos de mercurio reciben 4,9 eV y 6,7 eV cuando interactúan 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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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.

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

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

paquetes de 4,9 eV y que, al interactuar con átomos de mercurio, se absorben o emiten estos paquetes.

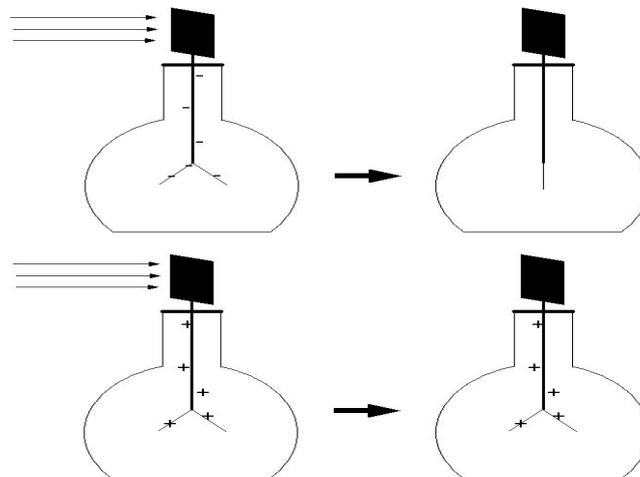
La posibilidad de que la energía se emitiera y absorberá *de golpe* por parte de los átomos ya nos había surgido al estudiar el espectro del hidrógeno. Vamos a profundizar en esta hipótesis a través del estudio de otros fenómenos de interacción entre radiación y materia.

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.



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.

C. Los hechos experimentales ponen de manifiesto que la luz consigue arrancar los electrones que tiene el electroscopio en exceso y que son responsables de la carga neta negativa. En cambio, si el electroscopio tiene carga positiva la luz no consigue arrancar electrones (Consideramos que los alumnos saben interpretar los procesos de carga de los objetos

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

considerando que el objeto tiene carga negativa si presenta un exceso de electrones y carga positiva si ha defecto de electrones, las cargas positivas no pueden transferirse por fricción y esta experiencia también pone de manifiesto que la luz tampoco puede arrancarlas. Además, al estudiar el modelo de átomo de Bohr se ha hecho patente que los electrones pueden ser extraídos de los átomos).

La hipótesis establecida anteriormente es la que consideraremos correcta antes de continuar. Sin embargo, no podemos descartar que los alumnos establezcan otras hipótesis que habrá que discutir y rechazar antes de seguir en tanto que son claramente incorrectos. Una hipótesis que pueden lanzar los alumnos es la posibilidad de que la luz transporte carga positiva. Un análisis detallado de esta posibilidad nos lleva inmediatamente al absurdo: la luz sería capaz de cargar positivamente el electroscopio y sería desviada por un campo eléctrico o por un campo magnético, hechos que no se observan. Los alumnos tardan muy poco en descartar, ellos solos, esta hipótesis.

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.

C. Aquí se plantean dos hipótesis que son producto de la aplicación de los modelos clásicos y de la introducción de la cuantización de la energía:

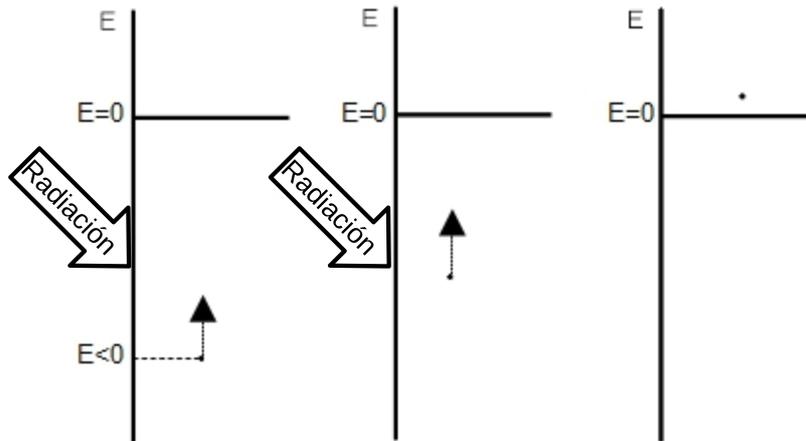
- Hipótesis A: Completamente clásica. Consideramos que la luz es una onda y que la energía dentro del metal no está cuantizada.
- Hipótesis B: Consideramos que la energía está cuantizada dentro del metal, con estados energéticos discretos. Consideramos que la luz produce transiciones energéticas que son proporcionales a la frecuencia. Dentro de esta hipótesis contemplamos dos casos: que la luz se absorbe continuamente, como corresponde a una onda, o que la luz se absorbe "de golpe".

Analizamos a continuación el mecanismo de emisión de acuerdo con los dos modelos:

Hipótesis A:

Teniendo en cuenta lo que hemos estudiado hasta ahora sobre la naturaleza de la luz, debemos considerar la luz como una onda electromagnética con la energía repartida de forma uniforme por todo el frente de onda. Por otra parte, sabemos que un metal está formado por electrones que se pueden mover en su interior con gran facilidad, de forma que son casi libres. Debemos enfatizar que en este caso los electrones pueden moverse con relativa facilidad por todo el metal, por eso es un conductor. No representaremos, por tanto, los electrones ligados a los átomos individuales sino al conjunto del metal. Con estos dos modelos, podemos considerar que la energía llega al metal y es absorbida por los electrones que, cuando adquieren energía suficiente, pueden abandonar el metal. Enfatizamos que, antes de proponer un mecanismo, hay que reflexionar sobre cómo es la materia y como es la radiación.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



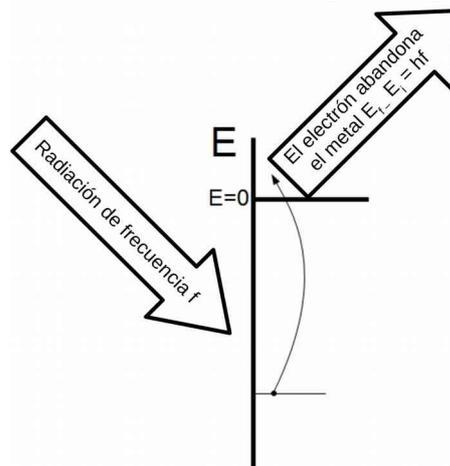
Usando el diagrama de energía representamos lo que le ocurre a un electrón. En un principio se encuentra en movimiento en el interior del metal (energía negativa, por tratarse de un sistema ligado), que no puede abandonar de forma espontánea. La radiación incidente aporta energía de forma constante. Esta energía es absorbida por los electrones, que aumentan su energía hasta que ésta toma un valor positivo y abandonan el metal.

Los electrones absorben energía de la radiación y aumentan progresivamente de energía. Permanecen ligados al metal mientras la energía que tienen es negativa (indicativo de que el sistema electrón-metal es un sistema ligado). Cuando se alcanzan valores positivos de la energía los electrones abandonan el metal.

Hay que tener en cuenta que los puntos del diagrama de energía no representan el electrón, sino su energía. Asimismo, la flecha sólo indica que la energía del electrón aumenta, no que el electrón realice un desplazamiento vertical.

Hipótesis B:

De acuerdo con la cuantización introducida por los átomos y otros sistemas, podemos considerar que los electrones se encuentran en un estado estacionario con energía negativa. La llegada de radiación producirá transiciones a un estado superior siempre que tenga la frecuencia adecuada y, si la frecuencia es suficientemente elevada, puede llegar a arrancar electrones del metal, como se observa en el diagrama siguiente.



Ahora bien, si la radiación llega de manera continua tenemos un problema con la cuantización de la energía del electrón en tanto que debería cambiar su energía de manera continua hasta liberarse, y esto entra en contradicción con la existencia de estados estacionarios discretos. En cambio, si la radiación puede ser absorbida "de golpe" la transición sería instantánea.

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

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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

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">• Producirá transiciones más energéticas en los electrones, que tendrán más energía cuanto más elevada sea la frecuencia.• Si no se alcanza una frecuencia mínima, no se liberarán electrones.
Aumento de la intensidad de la radiación	<ul style="list-style-type: none">• Se liberarán más electrones porque la onda transporta más energía.• Los electrones liberados tendrán más energía porque la onda les puede transferir más energía.	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.

C. Esta actividad se desarrollará de forma dialogada de forma que se dé respuesta a todas las cuestiones que siguen. Si no disponemos del tiempo suficiente el profesor puede explicar a los alumnos el montaje enfatizando las medidas que tomamos y la relación con las predicciones.

Sin introducir ninguna información adicional ni ningún comentario de ayuda los estudiantes llegan a aportar que para medir el tiempo que tarda en producirse la emisión se puede medir el tiempo que tarda en descargarse el electroscopio y ver si depende de la intensidad y la

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

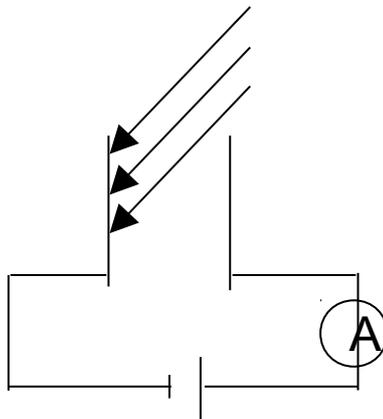
frecuencia. Para medir la cantidad de electrones emitidos sugieren que se puede usar un amperímetro, pero no saben cómo conectarlo. No son capaces de hacer ninguna aportación referente a la medida de la energía de los electrones. Tomando estas aportaciones como punto de partida, si se producen, pueden avanzar en el diseño 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.



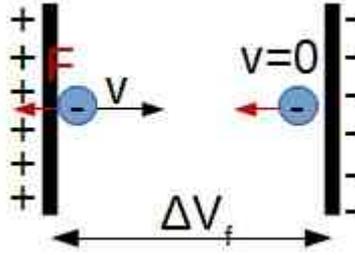
Montaje experimental para contar los electrones emitidos.

C. Es recomendable que dibujen la distribución de cargas que adquiere cada placa del condensador y el campo que se crea en su interior, tanto en cuanto a las líneas de campo como las superficies equipotenciales. Gran parte de las dificultades que tienen los alumnos para entender el efecto fotoeléctrico, y especialmente la detección experimental, están relacionadas con la incomprensión del comportamiento de las cargas eléctricas en el interior de campos electrostáticos. Así, tienen dificultades para entender el significado del potencial de frenado y el papel de los diferentes elementos que aparecen en el montaje experimental (condensador, amperímetro, pila, etc.)

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).

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



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.

C. De nuevo, es muy recomendable que se vuelva a representar mediante dibujos la carga que acumula cada placa del condensador, el campo que se genera en su interior, la fuerza y el movimiento que tendrán los electrones.

Los electrones abandonan el metal con una cierta velocidad, pero la diferencia de potencial aplicada por el condensador los frena, haciéndolos regresar hacia la placa positiva. A medida que aumentamos la diferencia de potencial cada vez se registrarán menos electrones en el amperímetro (ya que sólo los electrones que tienen más energía consiguen llegar a la placa negativa). Justo en el momento en que la lectura del amperímetro cae a cero podemos aprovechar el valor de la diferencia de potencial para calcular la energía cinética máxima con la que los electrones abandonan la placa.

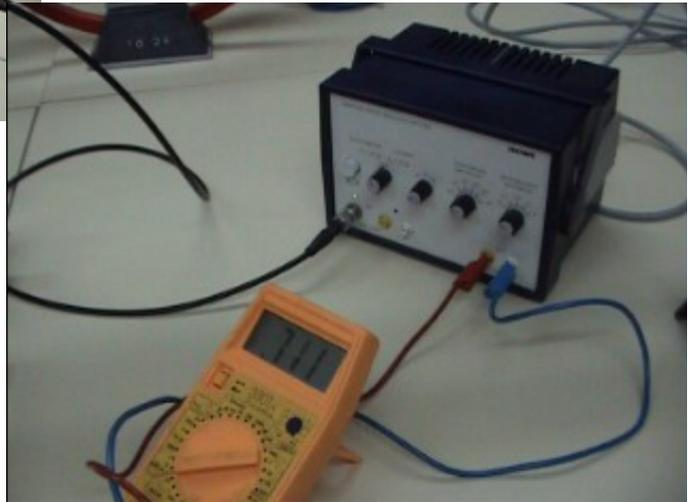
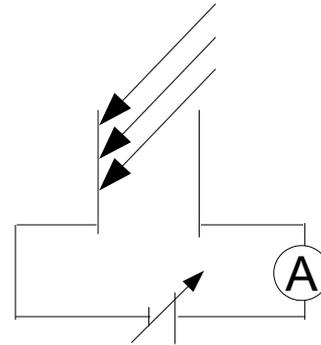
En este caso podremos medir la energía cinética máxima de los electrones emitidos.

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

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:

λ (nm)	578 (naranja)	546 (amarillo)	436 (violeta)	405 (violeta)	366 (UV)
ν (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.

C. Constataremos que sólo la hipótesis B con la consideración de que la energía se absorbe "de golpe" puede dar cuenta de todos los resultados experimentales. La hipótesis A (clásica) no puede explicar la existencia de una frecuencia mínima necesaria para que se detecten

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

electrones ni que no exista un tiempo de retraso. La hipótesis B con la consideración de que la luz es una onda sí explica que haya una frecuencia mínima, pero no explica que no haya un tiempo de retraso.

Ahora bien, si la luz se emite "de golpe" y absorbe "de golpe", como constatamos en no detectar un tiempo de retraso, ¿podemos seguir considerando que la luz es una onda?

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 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?

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

C. Esta actividad se hace como resumen de los dos modelos enfrentados para ilustrar las diferencias. Es imprescindible diferenciar entre la energía de la radiación y la del fotón, aspecto que presenta dificultades para los alumnos:

- La energía del quantum está relacionada con la frecuencia de la radiación.
- La energía de la radiación (intensidad) está relacionada, además, con la cantidad de cuantos que tiene.

Por lo tanto, la frecuencia está relacionada con la energía de cada quantum y la intensidad con la cantidad de cuantos. Este aspecto conviene recordar que ya se ha trabajado con los espectros:

- La frecuencia de la radiación emitida dependía de la diferencia de energía de la transición atómica individual. Podemos decir, entonces, que en cada transición se emitía un quantum y que éste tiene más energía cuanto más separados están los estados energéticos.
- La intensidad de la radiación dependía de la cantidad de transiciones individuales que tenían lugar. Cuantas más transiciones tienen lugar más cuantos emiten, y más energía hay en el conjunto de la radiación.

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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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.

C. Si la expresión se demuestra correcta deberemos aceptar esta interpretación, aunque sea de forma temporal. Los alumnos muestran sus reticencias a aceptar la hipótesis en tanto que viola claramente todo lo que se sabía sobre la radiación, especialmente impide que se pueda hablar de una frecuencia y de una longitud de onda, aspectos estos fundamentales para entender la formación los espectros (redes de difracción) y los procesos de interferencia. Habrá que buscar más evidencias o, al menos, encontrar una interpretación de los fenómenos ondulatorios a la luz de este nuevo modelo para devolver la coherencia a la física.

Hay varias formas de verificar la validez de la ecuación. Una posibilidad es comprobar la validez para cada par de resultados frecuencia-potencial de frenado. Otra posibilidad es hacer un análisis global representando gráficamente los resultados obtenidos. De acuerdo con la ecuación deducida la representación gráfica debería ser una recta que tenga por valor de la pendiente la constante de Planck dividida entre la carga del electrón. Al hacer esta representación se observa que así es (gráfica inferior). Una redacción alternativa de esta misma actividad es la que se ofrece más adelante (A21b).

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.

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

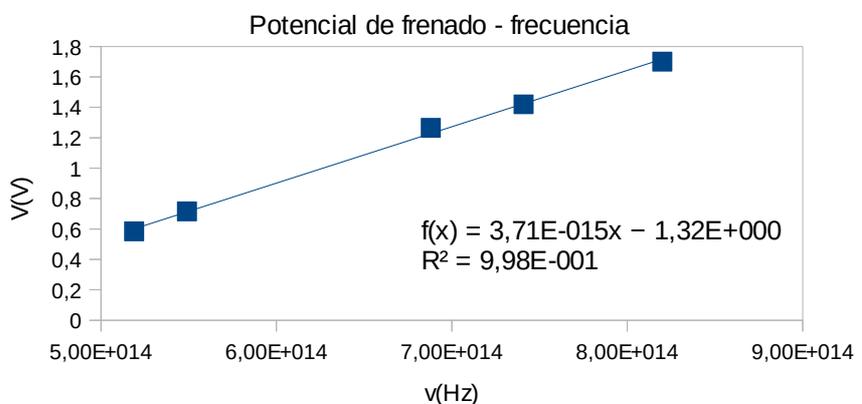
Si tenemos en cuenta que $E_{cuanto} = h\nu$ y designamos con W la energía mínima que hay que aportar para arrancar el electrón (que es igual a la energía mínima del electrón dentro del metal $E_i = -W$), llegamos a la expresión

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

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:

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

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.



¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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 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"*.

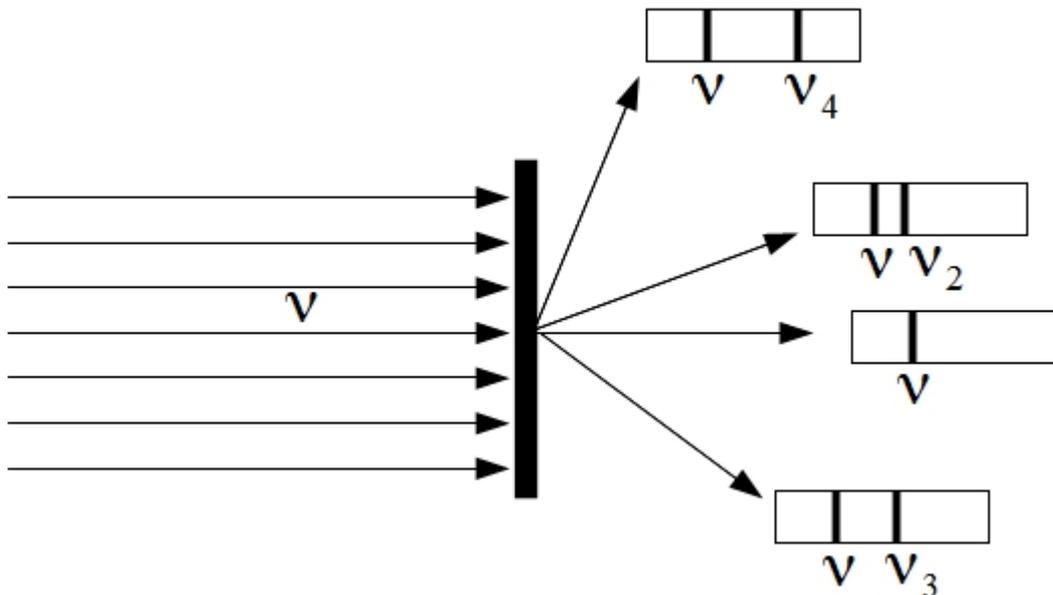
En 1921, más de 15 años después de la hipótesis de los cuantos, cuando se le entrega el premio Nobel de 1921 a Einstein se afirma que el premio era *"por los servicios a la física teórica y especialmente por el descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico"*, pero nada se decía del cuanto de luz.

- *¿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 libres⁸ 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.



Al hacer incidir rayos X sobre una lámina de grafito⁷ 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.

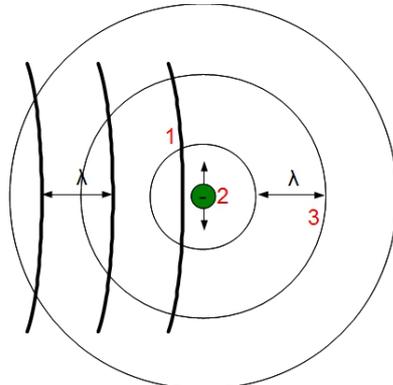
A23.- Dad una interpretación de estos hechos experimentales. Tomad en consideración que la radiación puede estar formada por ondas o por cuantos de energía.

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

8.- 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?

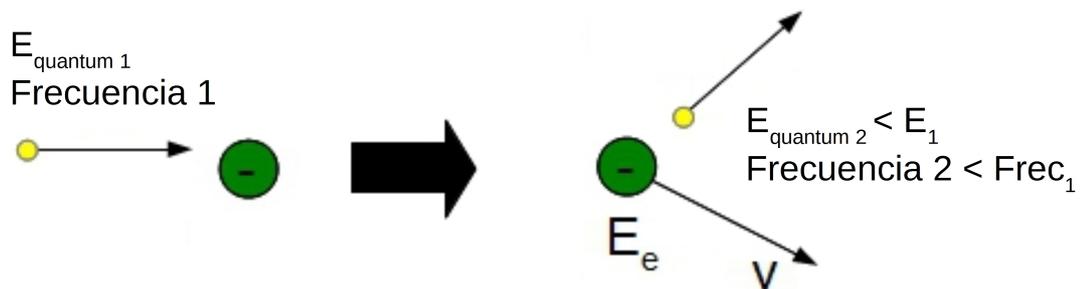
libres esta onda les transfiere energía y los lleva a realizar oscilaciones forzadas. Esto da lugar sólo a una radiación secundaria de la misma frecuencia que la incidente y uniformemente distribuida por el espacio, no hay lugar para una radiación secundaria de menor frecuencia.



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.

C. Una dificultad a la que nos podemos enfrentar es que los alumnos consideran que, al interaccionar la onda con el electrón, este "saldrá disparado". Una reflexión detallada debe llevarlos a reconsiderar la respuesta: una partícula sometida a un movimiento ondulatorio debe vibrar, de la misma forma que lo hace un corcho en la superficie del agua. Este movimiento oscilatorio del electrón, que tiene lugar con la misma frecuencia que la radiación incidente, debe llevarlo a emitir radiación de esa misma frecuencia, en este caso no hay estados estacionarios ya que se trata de un electrón libre o que podemos considerar libre.

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 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.

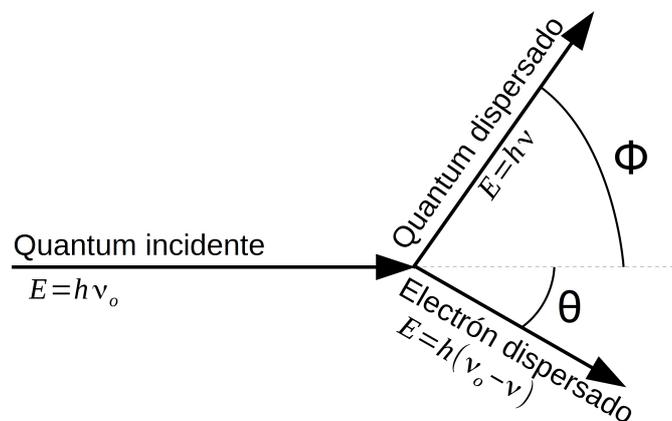
La diferencia de energía del cuanto incidente y del segundo cuanto debe ser absorbida por el electrón, que saldrá dispersado. La detección de estos electrones dispersados, que no prevé la teoría clásica, permitiría poner a prueba dos hipótesis.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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

C. Los alumnos relacionan las direcciones de dispersión del electrón y del quantum de radiación secundaria, haciendo un razonamiento por analogía con el choque entre bolas de billar. Hay que hacer la reflexión de lo que ello implica: si comparamos el fenómeno con el choque entre bolas de billar estaremos aceptando que los cuantos de radiación tienen momento lineal, al igual que cualquier otra partícula.

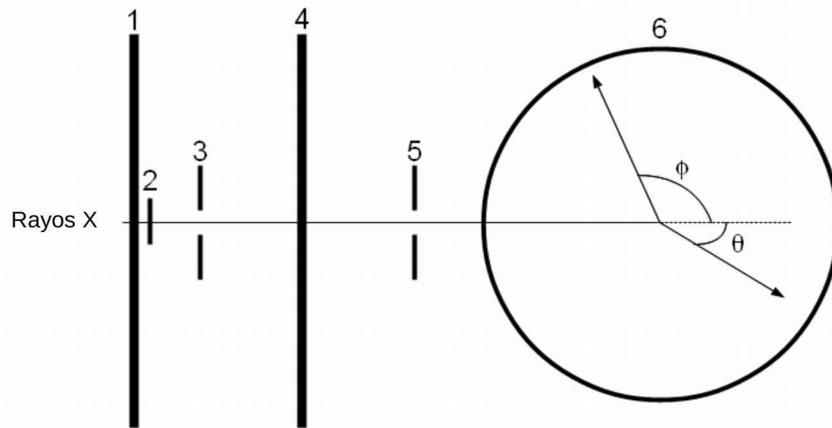
De acuerdo con la teoría clásica no debe haber dispersión de electrones, la existencia de electrones dispersados supondría un problema grave para el modelo ondulatorio de radiación. De acuerdo con la hipótesis cuántica de la radiación deberíamos detectar electrones dispersados, con energía igual a la 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 interior: los electrones dispersados. El montaje que podemos utilizar es el que aparece en la imagen siguiente.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



- 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 θ vez que se puede medir radiación X dispersada en la dirección Φ . 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.

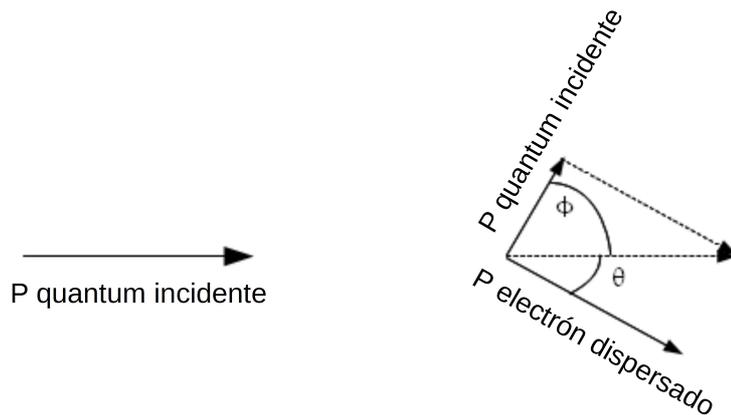
Los resultados experimentales ponen de manifiesto que sí hay electrones dispersados. Es más, demuestran que por cada quantum de radiación detectado en una dirección φ se detecta un electrón en la dirección θ y que los dos ángulos guardan una relación matemática estricta.

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

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



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?
- ¿Cómo 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

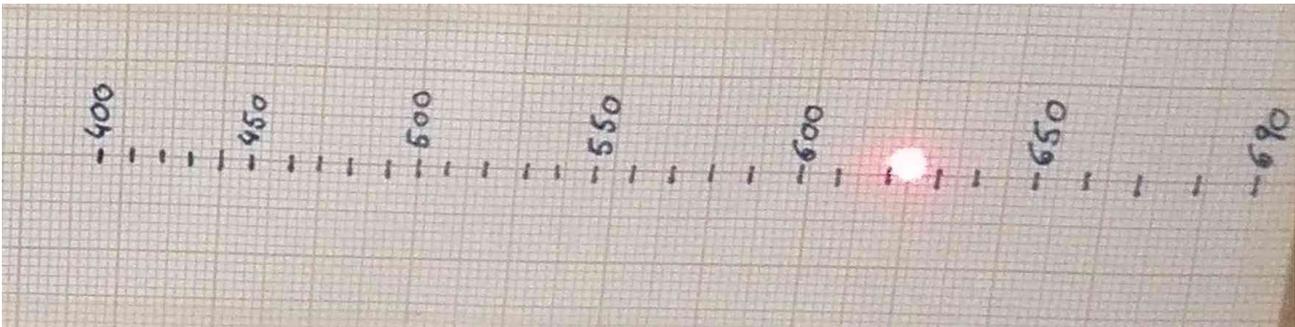
C. El objetivo de este apartado es proponer aplicaciones del modelo elaborado. Las actividades siguientes nos proponen que interpretemos fenómenos de emisión y absorción de radiación presentes en nuestro entorno más inmediato. Para ello se debe tener en cuenta el modelo de materia que vamos a utilizar (como se encuentran los electrones en la materia), el modelo de radiación (fotones u ondas) y el mecanismo que permite explicar la emisión de radiación.

La dificultad es secuencial, empezamos interpretando espectros sencillos y poco a poco vamos dando explicación de espectros más complejos, relacionando la complejidad del espectro con la complejidad en la estructura de la materia y en las interacciones que tienen lugar entre sus componentes básicos.

Hay que tener en cuenta que la respuesta a las actividades no es única. Como se verá al realizarlas, la presencia de determinadas frecuencias en el espectro de emisión de una fuente luminosa se corresponde con unas determinadas transiciones energéticas, lo que nos permite establecer hipótesis sobre la estructura de niveles energéticos del material o instrumento analizado. Sin embargo, necesitaríamos información adicional para conocer cuál es la estructura real de niveles energéticos. Nos conformaremos, por tanto, con establecer la estructura o estructuras de niveles energéticos que, a título de hipótesis, puede explicar el espectro indicando el mecanismo que tiene lugar.

En algunas actividades, especialmente las que hacen referencia a fenómenos de absorción, se han incluido cuestiones referentes a cambios de intensidad en la luz incidente. Es fundamental enfatizar esta parte del análisis para que los alumnos desarrollen un modelo correcto de la radiación como flujo de fotones y que interpreten correctamente la intensidad bajo el modelo cuántico. Existen carencias importantes en este aspecto del modelo, a modo de ejemplo: los alumnos consideran que un flujo de 1000 fotones de 1 eV produce el mismo efecto que un flujo de 500 fotones de 2 eV.

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.

C. La presencia de una única frecuencia en el espectro pone de manifiesto que la radiación emitida responde a la transición de los electrones entre dos niveles energéticos. A partir de la frecuencia de la radiación se puede obtener la diferencia de energía entre los niveles.

A partir de la imagen se puede determinar la longitud de onda de la radiación. Con dicho valor calculamos su frecuencia y la energía de los fotones emitidos por el láser. Obtenemos una energía de 1,84 eV. Por tanto, de acuerdo con el modelo atómico cuántico de emisión y absorción de radiación, en el láser se produce una transición electrónica entre niveles separados por 1,84 eV. Esto lo representamos usando un diagrama de energía de la forma que se muestra en la imagen inferior.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

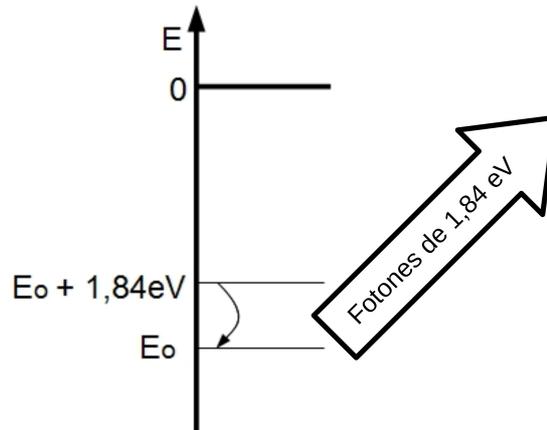


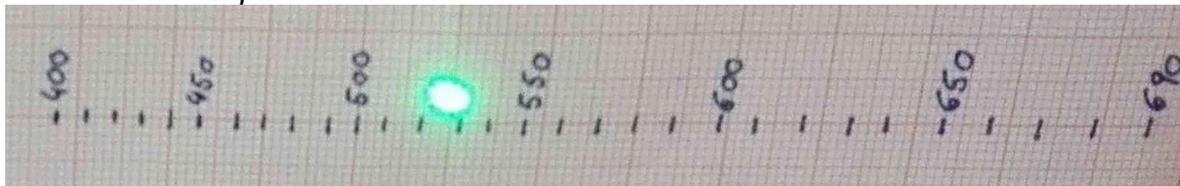
Diagrama de energía del láser. Los electrones realizan transiciones entre dos niveles separados por 1,84eV. Como no hay otras transiciones posibles la luz emitida es monocromática.

Una explicación completa del funcionamiento del láser implica dar cuenta del funcionamiento cíclico: los electrones adquieren energía de la corriente eléctrica que alimenta el láser, realizan una transición al nivel superior de energía y emiten esa energía descendiendo al nivel original, el exceso de energía se emite en forma de fotones de una frecuencia fija.

Hay que tener en cuenta que este es un láser de diodo, en un láser de gas, como los tradicionales de he-Ne el mecanismo es diferente. La cavidad en la que se encuentran los gases favorecen unas transiciones determinadas de toda una serie de transiciones posibles. Podemos comentar este aspecto para evitar que se formen una imagen ingenua de las aplicaciones de la física cuántica.

Si la luz que emite el láser es de color verde la frecuencia de la radiación emitida es mayor, lo que supone que la transición electrónica ha sido más energética, por tanto los niveles energéticos estarán más separados.

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?

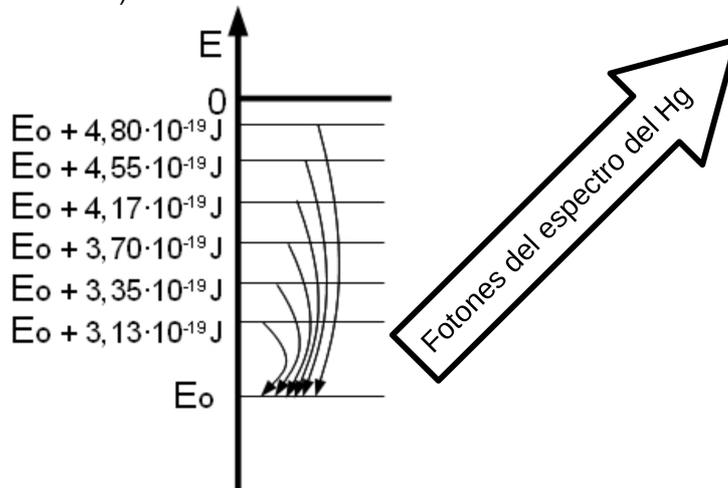
C. Para facilitar el cálculo de las frecuencias de la radiación podemos considerar en un principio sólo el valor medio de la posición de cada línea. Atribuiremos todas las líneas a la emisión del mercurio y despreciaremos la presencia de la sustancia fluorescente que cubre el tubo (trabajaremos la fluorescencia y la fosforescencia más adelante). El papel de esta sustancia es absorber parte de la radiación que emite el mercurio y emitir radiación de una mayor cantidad de frecuencias. De hecho, cuando se mira a través del espectroscopio se ven las líneas del mercurio superpuestas a un arco iris (correspondiente a la sustancia fluorescente que recubre el tubo).

El valor de la frecuencia de cada línea espectral, de acuerdo con la imagen, así como la energía de los fotones es la que se resume en la siguiente tabla.

Frecuencia ($\cdot 10^{14}\text{Hz}$)	Energía ($\cdot 10^{-19}\text{J}$)
7,26	4,80
6,88	4,55
6,31	4,17
5,60	3,70
5,07	3,35
4,74	3,13

Frecuencias y energías de los fotones registrados en el espectro de la bombilla de bajo consumo.

La presencia de fotones de 6 energías diferentes implica la existencia de 6 posibles transiciones energéticas. El diagrama de niveles energéticos del mercurio podría ser (entre otras posibilidades):



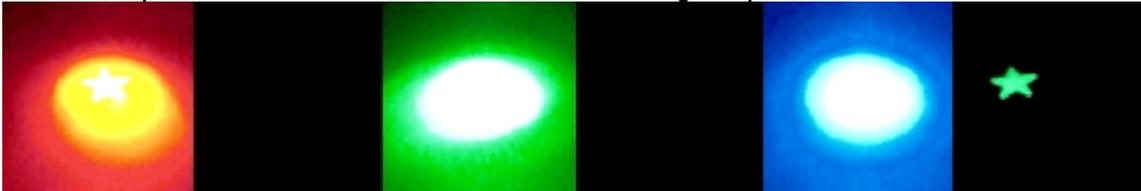
Posible estructura de niveles energéticos del átomo de mercurio.

Hay que hacer la reflexión correspondiente al mecanismo propuesto: los átomos son excitados por la corriente eléctrica que atraviesa el tubo, produciendo el salto de los electrones del nivel fundamental a niveles superiores. El retorno al nivel fundamental permite explicar la formación de las líneas espectrales. De nuevo, las transiciones tienen carácter aleatorio, no se sabe en qué momento ni entre qué niveles se producirán. Sólo se puede decir que las líneas más brillantes corresponden a aquellas transiciones que se producen un mayor número de veces por unidad de tiempo. Podemos considerar que cada electrón individual tiene una mayor probabilidad de realizar unas transiciones que otras.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

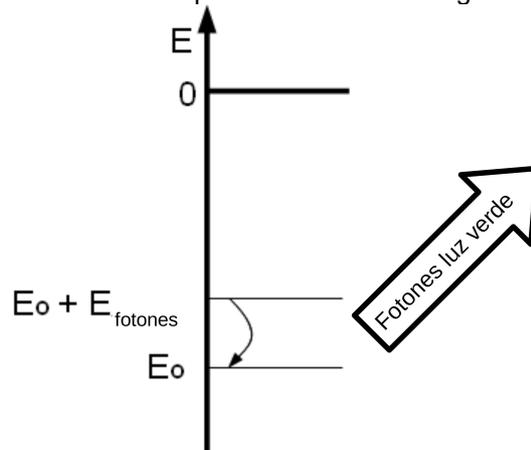
Un problema que se plantea es porqué no se observan las transiciones entre niveles intermedios. ¿Todas las transiciones tienen lugar en el nivel fundamental? Un análisis detallado permite observar que la frecuencia de las radiaciones intermedias no se corresponde con la de la luz visible. El uso de instrumentos adecuados pone de manifiesto que las frecuencias correspondientes a las radiaciones intermedias también se encuentran presentes.

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.

C. Hay que empezar explicando la emisión de radiación por el material que forma el adhesivo. De acuerdo con lo que se ve en la imagen 6 la sustancia que contiene el adhesivo emite sólo luz verde, y esto se puede atribuir (de forma simplificada) a la transición entre dos niveles estacionarios, de acuerdo con lo que se muestra en la figura inferior.



Estructura de niveles de la sustancia que forma el adhesivo. La transición entre los dos únicos niveles es la responsable de luz verde que emite.

Ahora bien, sólo se podrá emitir radiación en la medida que aportamos la energía necesaria para hacer subir los electrones desde el nivel de menor al de mayor energía. En esta ocasión la energía necesaria para dicha transición lo aporta la radiación incidente. Así, tanto la luz roja como la luz verde empleada tienen una frecuencia inferior a la necesaria para producir la transición, sus fotones no son suficientemente energéticos como para activar el mecanismo.

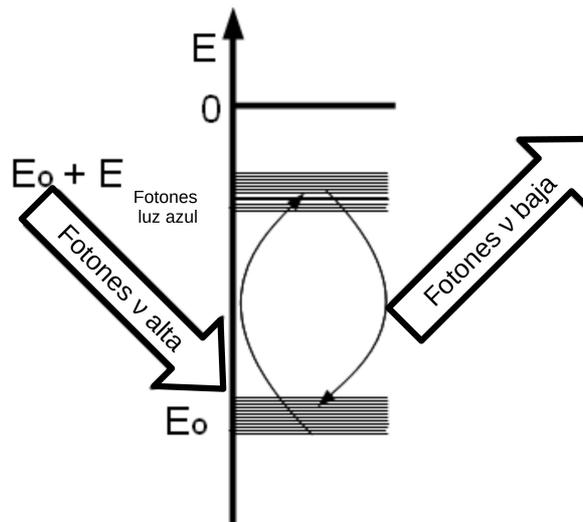
Hay que enfatizar que cada electrón absorbe un solo fotón, esta es una hipótesis cuántica adicional, un electrón no puede absorber a la vez varios fotones y hacer la transición, esto sería equivalente a recuperar la imagen continua de la radiación.

Si hubiéramos usado luces más intensas habríamos obtenido resultados similares. Una luz más intensa es portadora de un mayor número de fotones, pero la energía de cada fotón es la misma. Al incidir sobre el adhesivo, los fotones de la luz roja y verde no pueden producir la transición necesaria para que el adhesivo emita luz. En cambio, con la luz azul el resultado

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

hubiera sido ligeramente diferente: al haber más fotones se producen más transiciones hacia estados superiores, ya que cada fotón puede producir una transición. Posteriormente, al haber más electrones en estados superiores de energía hay también más transiciones hacia estados de menor energía y por lo tanto más fotones en la radiación emitida, el adhesivo luciría más pero con el mismo color.

Si queremos profundizar en los detalles podemos plantear el siguiente problema adicional: ¿Cómo es que absorbe luz azul y emite luz verde? El mecanismo que explica la fosforescencia y la fluorescencia es más complejo que lo que se ha considerado hasta el momento, ya que hay que considerar que las transiciones tienen lugar entre bandas energéticas, como se muestra en la imagen siguiente. Al absorber luz de alta frecuencia los electrones pueden hacer una transición a la banda superior de energía. Posteriormente retornan a la banda de menor energía emitiendo radiación, pero no lo hacen en la menor de las energías posibles. El resto de la energía termina liberándose mediante procesos no radiativos o a través de emisiones no visibles.



Otra explicación que da cuenta de la emisión de una frecuencia menor a la de absorción es la existencia de bandas de energía. La transición a la banda de más energía sólo se produce cuando se absorbe radiación de elevada frecuencia. Posteriormente los electrones pueden hacer transiciones a la banda de menor energía emitiendo fotones de menor energía que los fotones de la radiación incidente. La energía restante se libera a través de mecanismos no radiativos o de frecuencias no visibles.

Estos últimos mecanismos se deben presentar en tanto que son necesarios para mantener la coherencia de lo que hemos hecho hasta el momento, no podemos esperar que los alumnos lleguen a hacer deducciones de este tipo. Asimismo, nos sirven para ilustrar que nuestro modelo presenta limitaciones.

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

C. Este fenómeno aparentemente viola el principio de conservación de la energía, la interpretación requiere un mecanismo que permita al adhesivo almacenar energía y liberarla lentamente. La absorción de la radiación incidente permite a los electrones de la sustancia que forma el adhesivo acceder a niveles energéticos superiores. Posteriormente, la lenta desexcitación libera la energía acumulada durante un tiempo. Nuevamente, las transiciones son de carácter aleatorio, no sabemos cuándo van a producirse (por eso sigue luciendo durante un rato) ni a qué nivel tendrán lugar (no retornan al nivel fundamental de golpe, por eso la luz emitida no es azul).

Se puede comprobar, además, que aumentando la intensidad de la radiación el adhesivo sigue sin lucir si la luz es roja o verde. En cambio, si la luz es azul el adhesivo luce más y durante más tiempo cuando se ilumina con luz de mayor intensidad.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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.

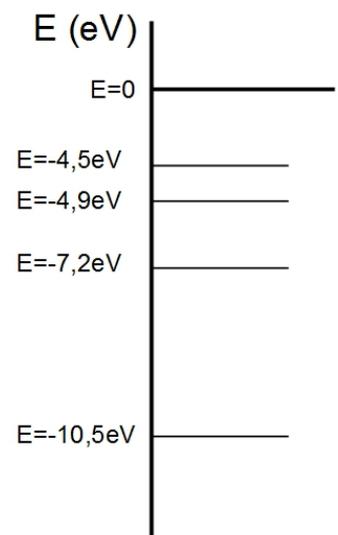
Pero pese a su carácter nocivo, ambos tipos de radiación tienen aplicaciones médicas importantes. Concretamente, los rayos gama son usados en radioterapias. Para acabar con un tumor, la zona afectada es irradiada de forma controlada con rayos gama, y eso provoca la muerte de las células irradiadas.

¿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.

C. Nuevamente relacionamos la frecuencia con la transición energética, aspecto que no tiene cabida en la física clásica. Hay que diferenciar entre los efectos producidos por una radiación de alta intensidad y los producidos por una radiación de alta frecuencia. Asimismo, aprovechamos para hacer un análisis de los efectos sobre la salud de las radiaciones más comunes de nuestro entorno: ondas de radio y TV, móviles, WIFI, *bluetooth*, rayos X, radiación visible, ultravioleta y discutir la capacidad de dichas radiaciones para provocar un cáncer. Debemos comentar con detalle el caso de las radiaciones ultravioleta: el UV A es el responsable del bronceado y es poco nocivo por su poder ionizante, no ocurre lo mismo con el UV B y el UV C. Podemos hacer notar, además, que la capa de ozono nos protege de dichas radiaciones y que las cremas solares también lo hacen, como se puede leer en las etiquetas.

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 3eV ?
- ¿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.



C. Esta actividad da cuenta, de forma simplificada, del color de las piedras preciosas. Las piedras preciosas tienen una estructura cristalina con estados energéticos estacionarios que recuerdan en gran medida a los estados energéticos de los átomos. Debido a la radiación y temperatura ambiental, todos los niveles estacionarios están ocupados. Esta es una diferencia respecto de las situaciones abordadas hasta aquí en las que considerábamos que los electrones de un átomo se encuentran en los estados de menor energía.

En esa situación, la piedra no dejará pasar la radiación verde, ya que sus fotones permiten la transición entre el estado de $-7,2\text{eV}$ y el de $-4,9\text{eV}$. No ocurre lo mismo con la luz violeta, que

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

sí atravesará la piedra. Podemos decir, por tanto, que la piedra no es transparente al verde pero sí al violero. Esto determina su color, aunque con este modelo sencillo es difícil decir cuál sería el color con el que veremos la piedra. Sin embargo, y a modo de ejemplo, podemos decir que la esmeralda no es transparente al rojo y sí al verde, mientras que el rubí es transparente al rojo al tiempo que absorbe todas las otras radiaciones. Nosotros solo podemos afirmar que la piedra que estamos estudiando no es verde.

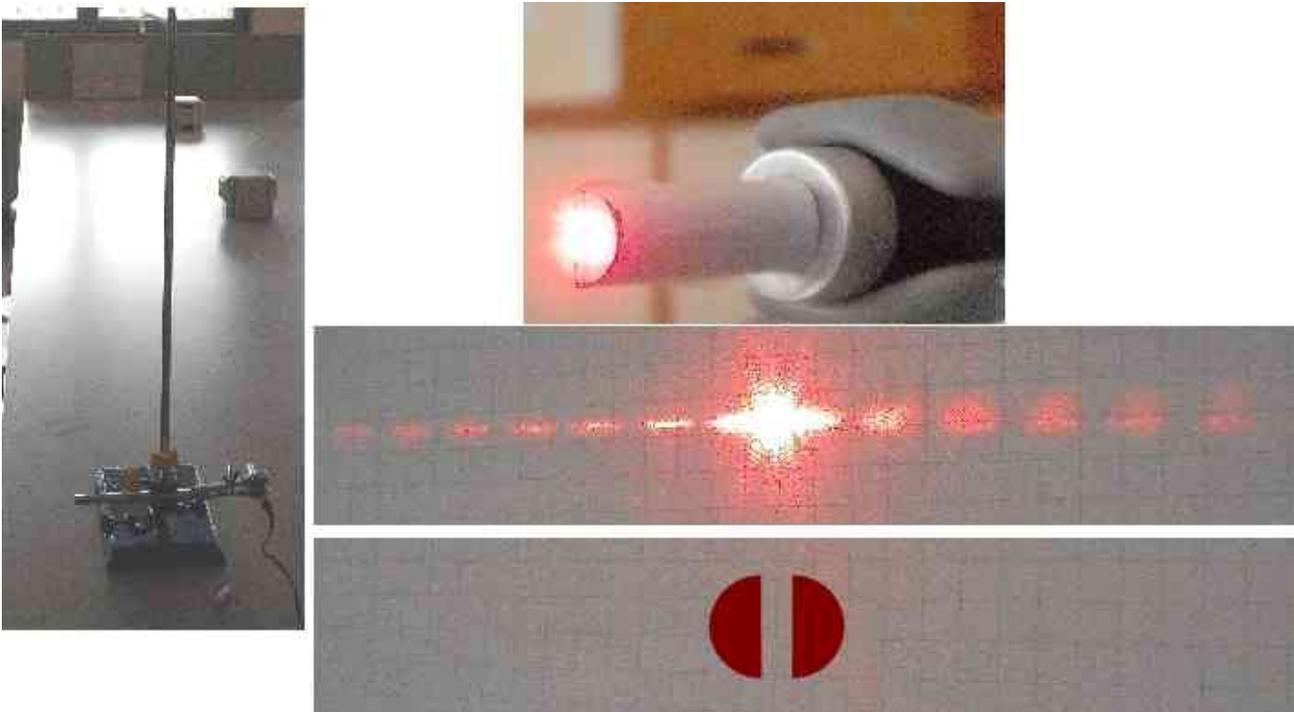
Al iluminar con un haz luminoso que contiene el doble de fotones se producen el doble de transiciones, pero no transiciones más energéticas.

En el espectro luminoso de la piedra tendremos una cantidad muy grande de líneas. Desde el estado estacionario de más energía se pueden producir tres transiciones que darán origen a tres líneas en el espectro. Desde el estado estacionario de $-4,9$ eV se pueden producir dos transiciones, lo que originará dos líneas más. Finalmente se puede producir una transición entre los estados estacionarios de menor energía, dando lugar a otra línea en el espectro. Las líneas más intensas se corresponden con las transiciones más probables.

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.

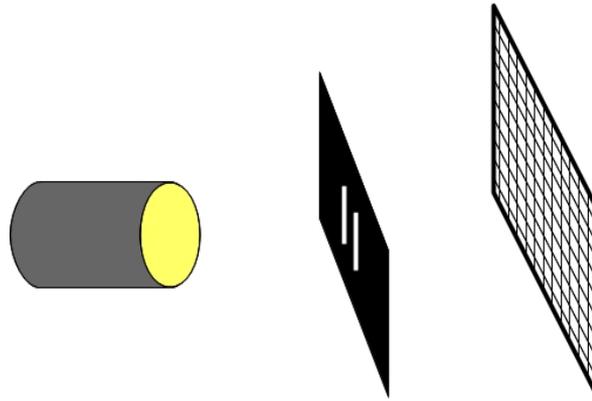
- El significado de las magnitudes que aparecen en la ecuación $E = h\nu$. Esta ecuación mezcla una magnitud típicamente corpuscular (E, energía del cuanto de radiación como corpúsculo, magnitud que no tiene sentido bajo el modelo ondulatorio de radiación) y una magnitud ondulatoria (ν , frecuencia de 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?

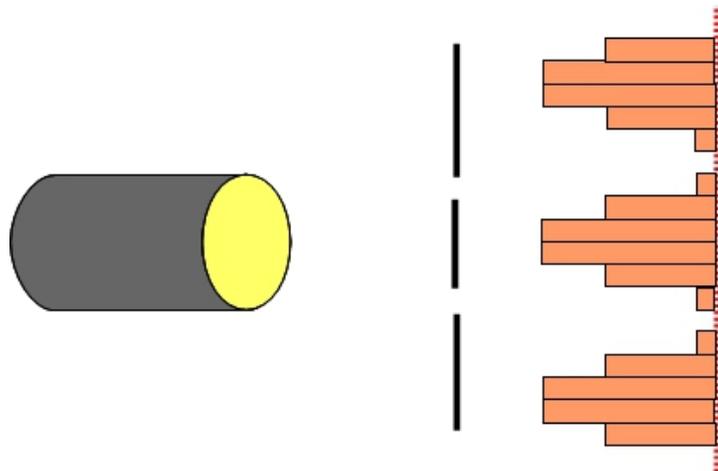


Ponemos una fuente de luz frente a una doble rendija. Más atrás y como sistema de detección situamos una pantalla recubierta de células fotoeléctricas (cada cuadro de la pantalla representa una célula fotoeléctrica).

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 uno⁹.

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.

C. Los alumnos pueden pensar que la figura de interferencia se produce porque lanzamos muchos fotones a la vez, produciéndose así interferencias de unos fotones con otros. Pero recordemos que cuando hacemos el experimento lanzando los fotones de uno en uno (primero

9. 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?

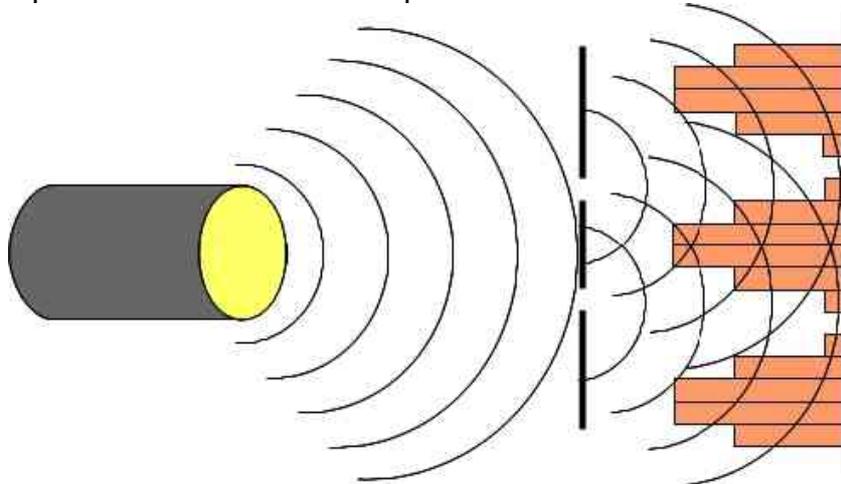
lanzamos un fotón, esperamos a que llegue a la pantalla, registramos el lugar donde ha impactado y posteriormente lanzamos otro fotón) obtenemos el mismo resultado.

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.

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.

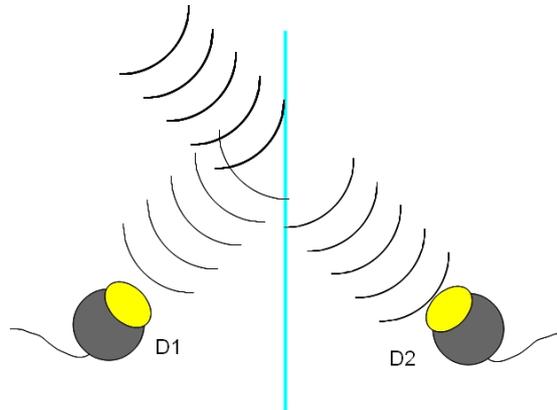


Mientras no se detecta el fotón hemos de aceptar que se propaga como una onda de probabilidad. Al llegar a la pantalla y es detectado como una partícula, con una mayor probabilidad allí donde la onda tiene una mayor cuadrado de la amplitud.

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?

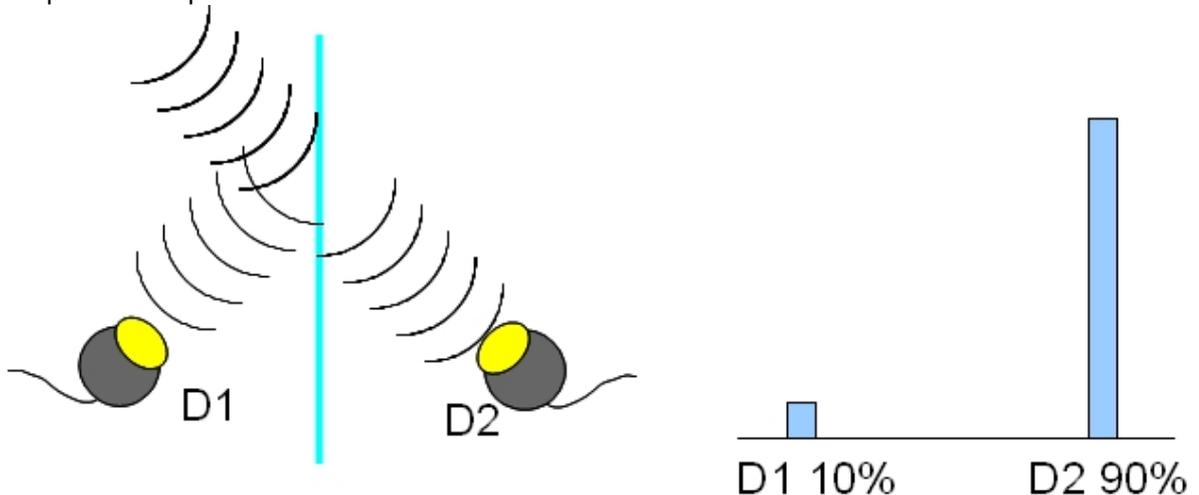
¿Cómo se emite y absorbe radiación?

C. De acuerdo con lo que hemos establecido, mientras el fotón se está propagando debemos considerar que lo hace como una onda. Si la transparencia del vidrio es del 90% habrá un 90% de probabilidad de que el fotón atraviese el vidrio y un 10% que no lo haga y se refleje. Al llegar al vidrio la onda se dividirá: una parte atravesará el vidrio y otra parte se reflejará en él. El fotón podrá ser detectado a uno u otro lado del vidrio, con las probabilidades indicadas, como se muestra en la imagen.



Consideremos que el fotón procede de la parte superior izquierda. Mientras se propaga, el fotón tiene comportamiento ondulatorio. Al llegar al vidrio una parte de la onda se reflejará y otra atravesará el vidrio. De acuerdo con el fabricante, el vidrio tiene una transparencia del 90%. Detectaremos el fotón con un 90% de probabilidad en D2 y con un 10% en D1.

Al lanzar un haz de luz pasamos a tener un elevado número de fotones. Cada uno de estos fotones se propaga como una onda, una parte de la cual se reflejará y otra atravesará el vidrio. Cada fotón será detectado con un 90% de probabilidad al otro lado del vidrio y con un 10% en el lado en el que ha sido lanzado. Si el número de fotones es suficientemente elevado podemos decir que el 90% se detectará a un lado y el 10% en el otro. Sin embargo, no es posible predecir lo que le ocurrirá a cada fotón individual.



El 10% de los fotones se detectarán en D1 y el 90% se detectarán en D2, de acuerdo con la amplitud de la función de onda que llega a cada detector.

No hay nada en nuestra realidad cotidiana que se comporte como lo hacen los fotones, y es por ello que debemos recurrir a analogías con el comportamiento de las partículas y de las ondas para entender como se comportan. Ahora bien, ¿Hemos de renunciar a cualquier conocimiento sobre la posición del fotón antes de llevar a cabo la detección? ¿Hemos de aceptar que su propagación es meramente probabilística?

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

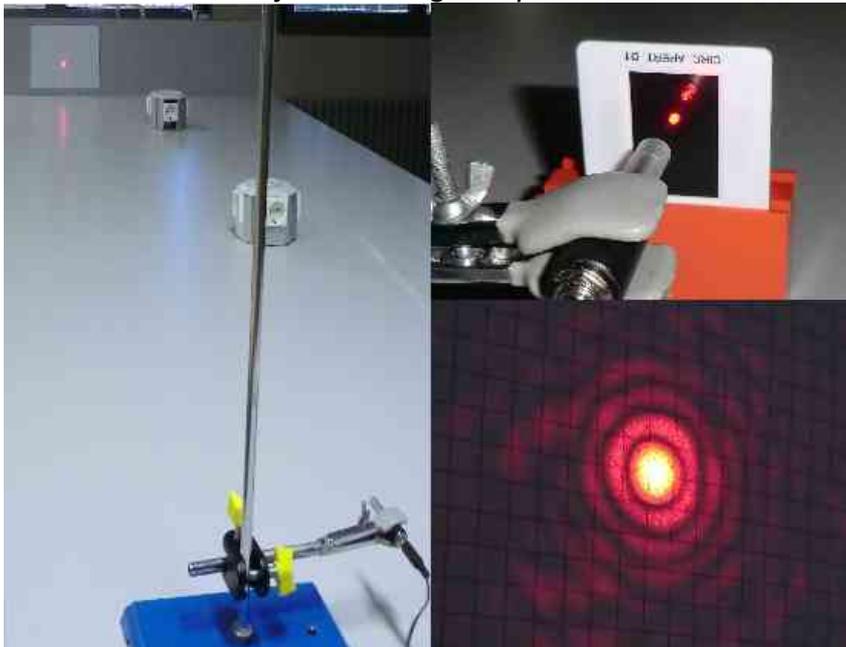
4.2.- ¿Qué podemos saber de la trayectoria de los cuantos?

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 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.

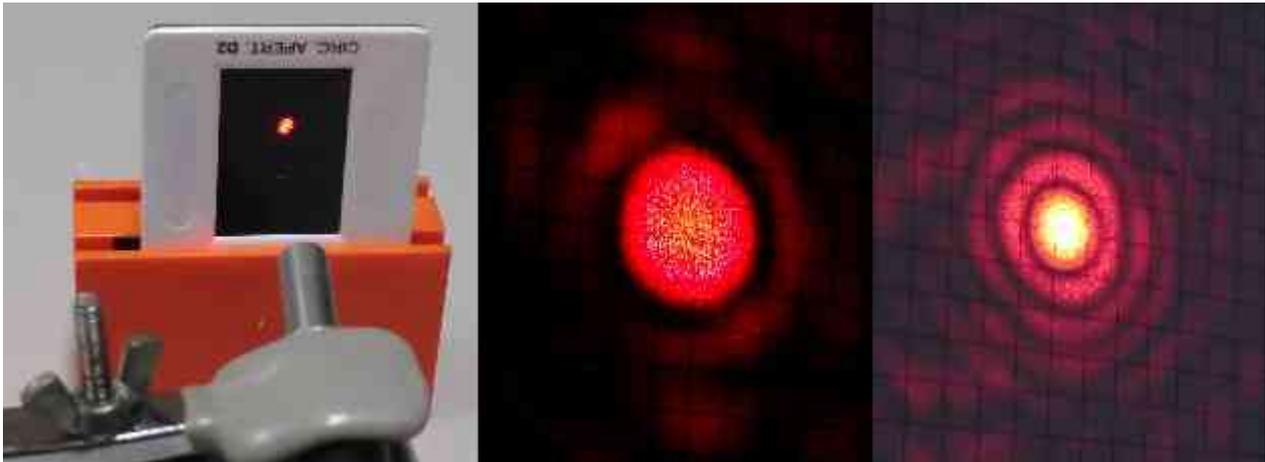
- *Analiza la figura y determina qué podemos decir de la posición y el momento lineal de los fotones que atraviesan la abertura.*
- *Si repetimos el experimento con un agujero más ancho se observa la imagen que aparece más abajo a la derecha. Analizad nuevamente qué sabemos de la posición y velocidad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

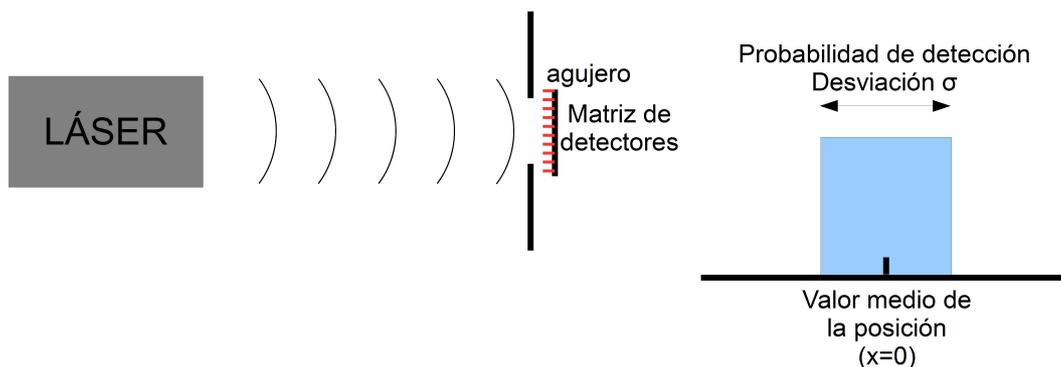
¿Cómo se emite y absorbe radiación?



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.

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.



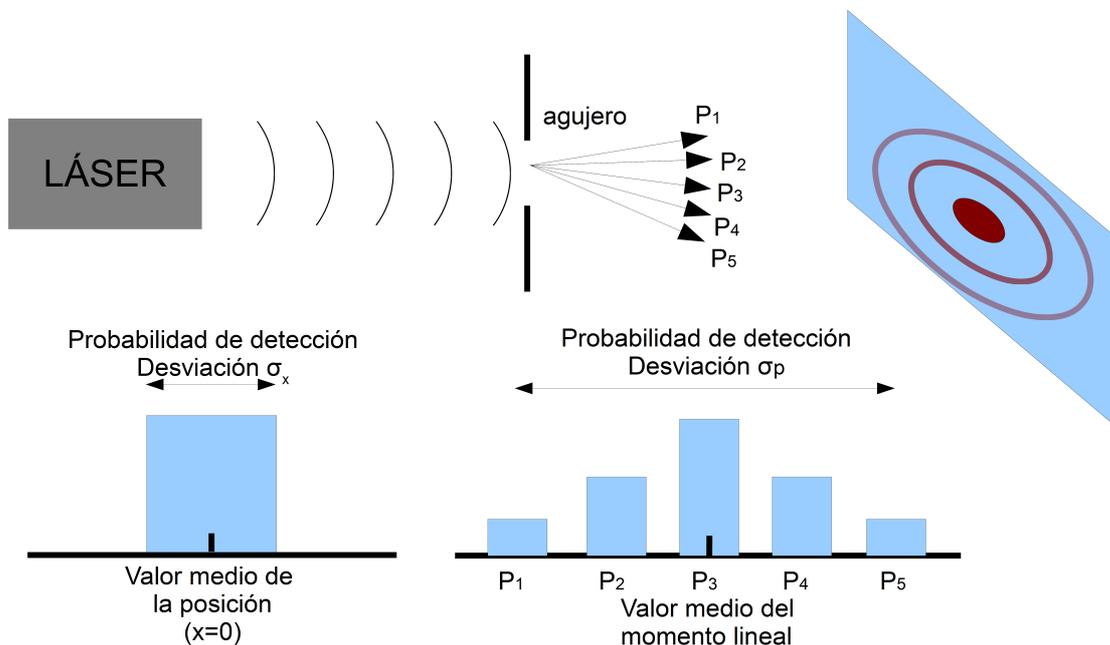
Al representar la probabilidad de detectar un fotón en cada una de las posiciones posibles (en cada detector) obtenemos una distribución de probabilidades, caracterizadas por un valor medio (el centro del agujero) y una desviación a su alrededor (relacionada con el radio del agujero).

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

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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.



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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



Al usar un agujero más pequeño la incertidumbre en la posición disminuye porque los fotones se distribuyen más próximos al valor medio (el centro del agujero). Sin embargo, la incertidumbre en el momento lineal aumenta: al estar los puntos de impacto en la pantalla están más alejados del centro los vectores momento lineal pueden estar más alejados del valor medio.

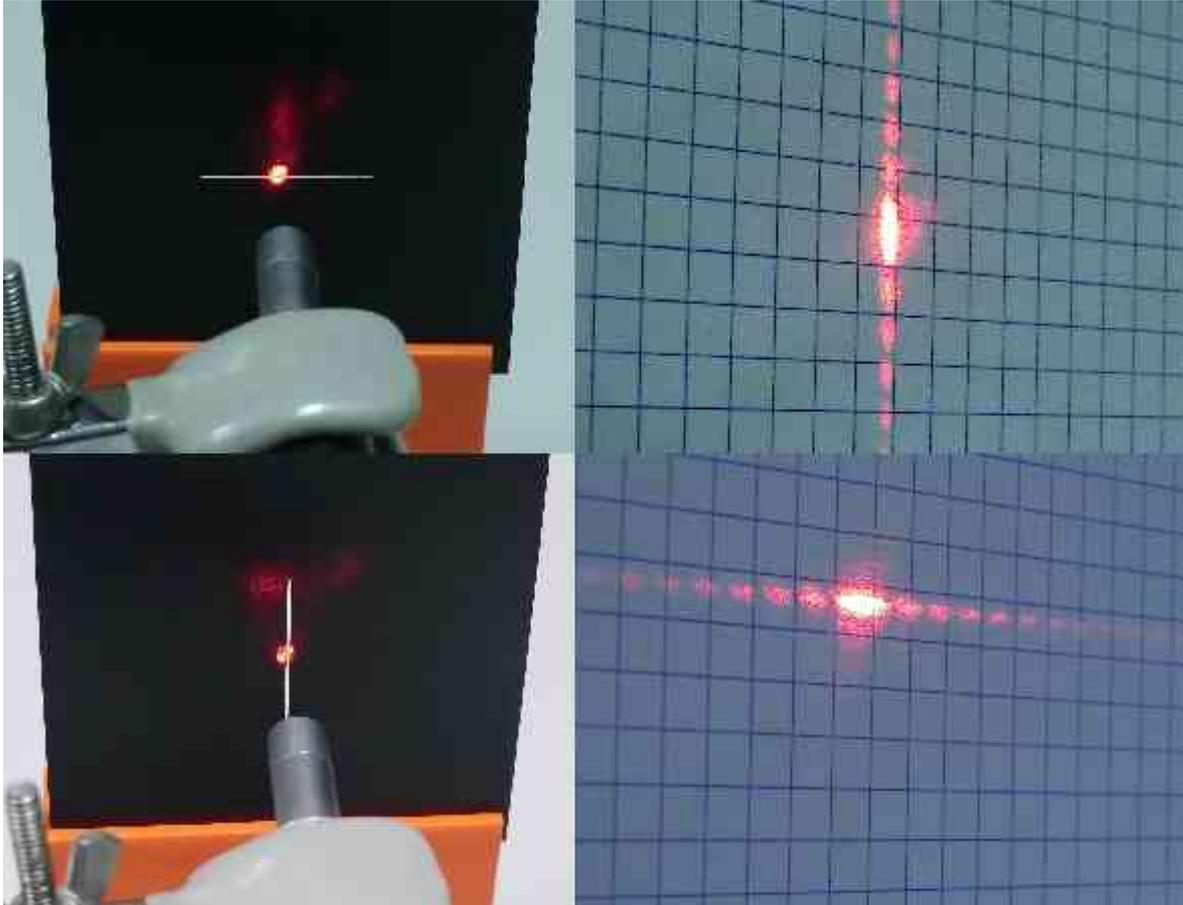
Podríamos poner más obstáculos o restricciones destinadas a conocer, con el mayor detalle posible, la posición y el momento lineal de los fotones y obtendríamos como resultado que siempre que reducimos la incertidumbre en el conocimiento de la posición aumentamos la incertidumbre en el momento lineal 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 σ_x representa la incertidumbre en la posición y σ_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?

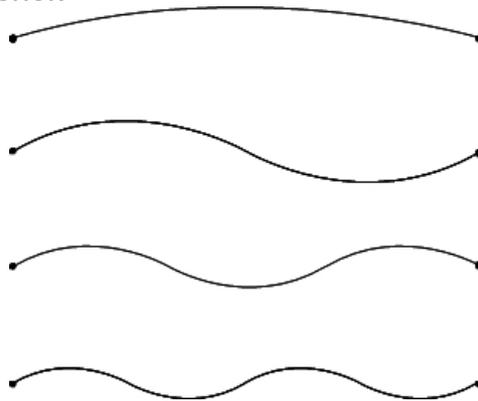
La energía del átomo de hidrógeno, de acuerdo con el modelo que introducimos para explicar la emisión y absorción de radiación, depende de un número entero de acuerdo con la expresión $E(eV) = \frac{-13,6}{n^2}$. En física clásica, la energía de las ondas estacionarias

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

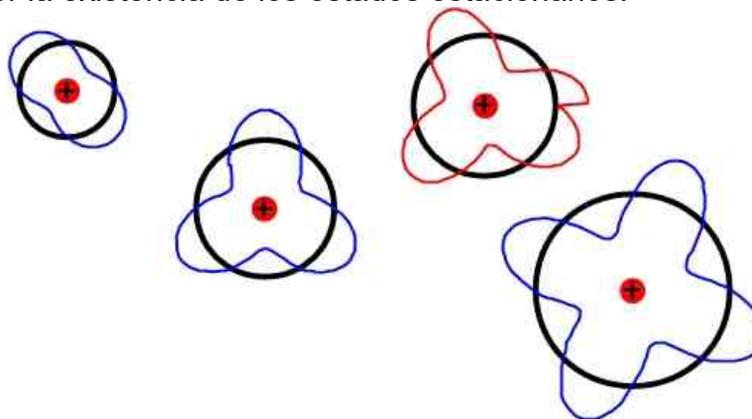
¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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.

C. Los alumnos deben tener en cuenta que esta situación de disyuntiva entre una visión ondulatoria y una corpuscular ya la hemos afrontado para el caso de la luz. Al someter a la luz a experiencias de interferencia hemos obtenido resultados que sólo pueden explicarse aceptando que la luz es una onda. Siguiendo la misma estrategia, podemos probar a someter algún tipo de partícula a una experiencia de interferencia y analizar los resultados. Por ejemplo, podemos apuntar un haz de electrones hacia una doble rendija y analizar la figura que se obtiene al hacerlos colisionar posteriormente sobre una pantalla. El problema se encuentra en el diseño real del experimento: ¿qué partículas emplear? ¿Qué podemos utilizar como rendija?

Una vez decidida la experiencia a realizar hay que recordar que la naturaleza ondulatoria sólo se pone de manifiesto cuando las ondas se encuentran en su trayectoria con obstáculos de dimensiones similares a la longitud de onda. Esto nos obliga a estudiar cuáles son las longitudes de onda de las ondas que queremos detectar ya buscar obstáculos o rendijas de dimensiones similares.

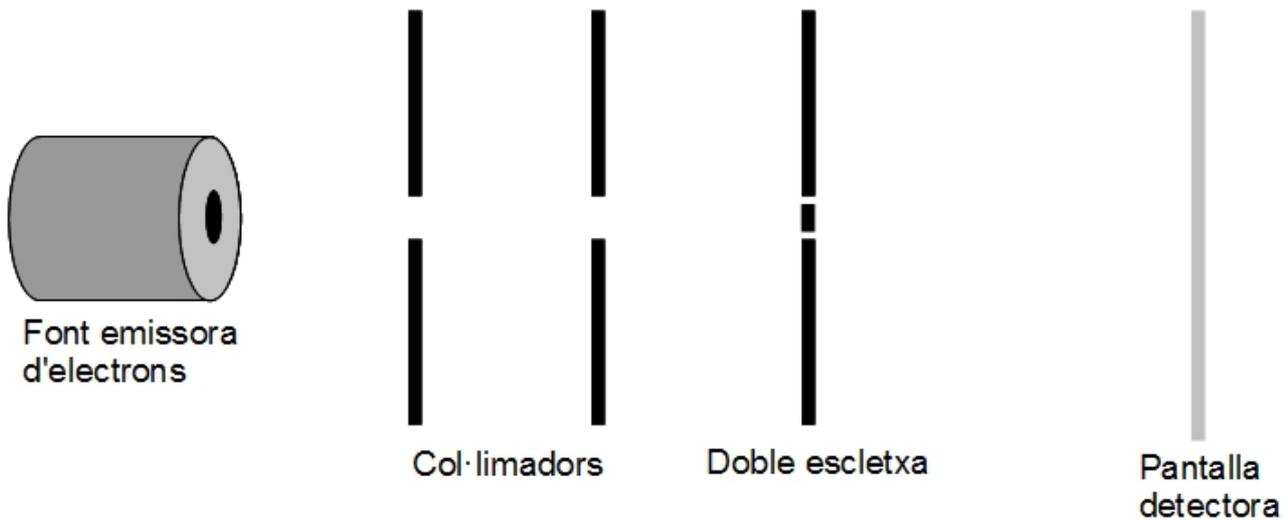
A32b.- Valorad qué partículas son las más adecuadas para hacer una experiencia de interferencia a través de una doble rendija. Usad la relación de de Broglie para determinar la longitud de onda de: a) la Tierra en su órbita alrededor del Sol, b) un coche de 700kg que circula a 90 km / h, c) una piedra 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.

C. Se deduce, a partir de los resultados, que la longitud de la onda predicha es muy pequeña para objetos cotidianos a velocidades ordinarias, mucho más pequeña que las dimensiones de cualquier objeto o rendija con el cual producir una interferencia (recordemos que un átomo tiene unas dimensiones de aproximadamente 10^{-10} m). Sólo los electrones tienen longitudes de onda mayores que las dimensiones atómicas. Concluimos, por tanto, que se debe realizar la experiencia de interferencia con electrones y que habrá que usar obstáculos o rendijas de dimensiones muy reducidas.

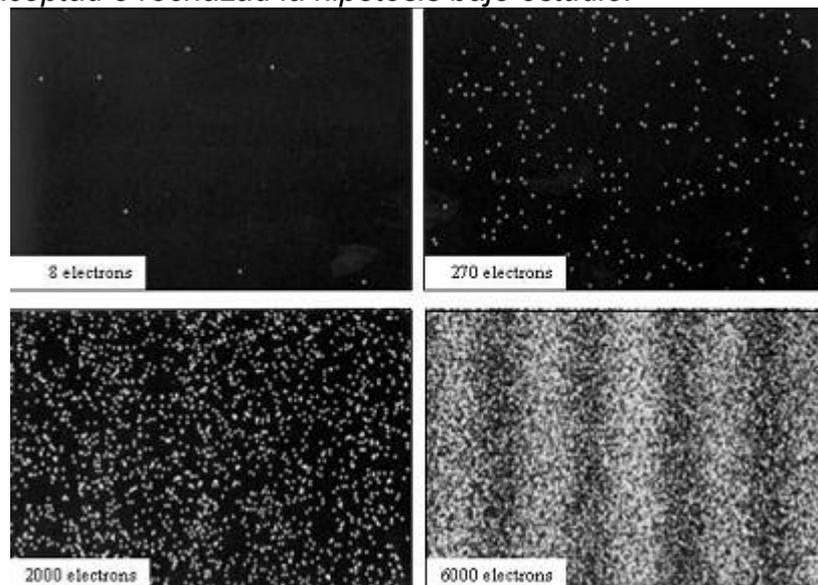
Los resultados obtenidos al calcular la longitud de onda de varias partículas pone de manifiesto que la experiencia sólo se puede llevar a cabo con electrones, ya que no es posible encontrar rendijas de dimensiones similares al resto de las longitudes de onda calculadas. Es más, incluso con electrones 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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



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.

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

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

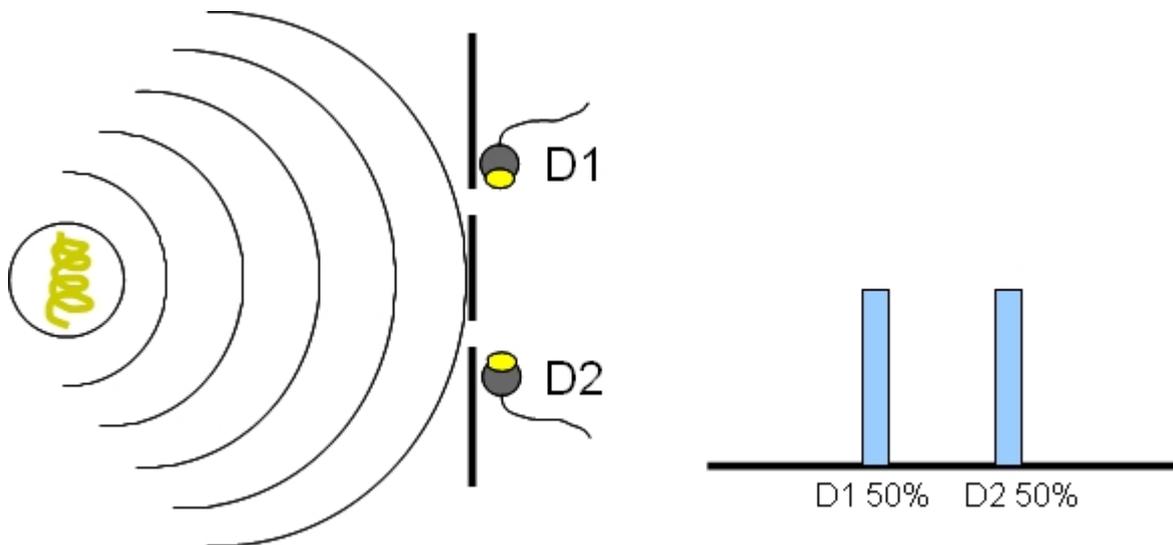
llevar a cabo esta misma experiencia con protones, neutrones, iones o incluso moléculas grandes como los fullerenos (C₆₀) se obtienen siempre resultados similares: los impactos sobre la pantalla siguen el patrón de interferencia esperado para una onda que tiene la longitud de onda predicha por de Broglie. 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 termino *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, cual 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?

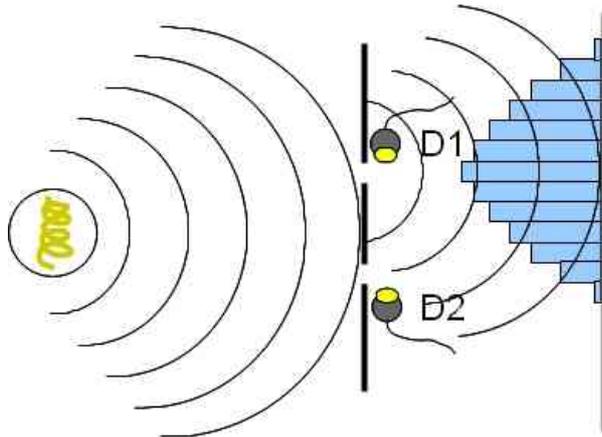
El electrón, como cuántum, debemos considerar que se propaga como una onda de probabilidad. Al llegar a las rendijas, la amplitud de la onda en ambas rendijas es la misma, por tanto tendremos un 50% de probabilidad de detectar a cada electrón en cada agujero, como se muestra en la imagen.



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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

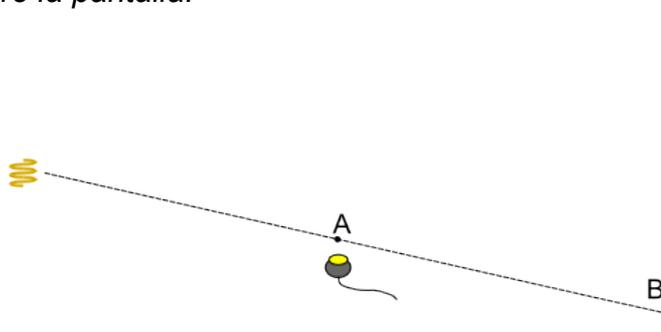


Si el electrón ha sido detectado por D1, en el orificio de arriba, continuará propagándose a partir de ese agujero. Al llegar a la pantalla ya no hay una interferencia en tanto que no hay onda procedente del agujero de abajo. Al añadir los detectores de detrás de los agujeros ha cambiado el resultado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

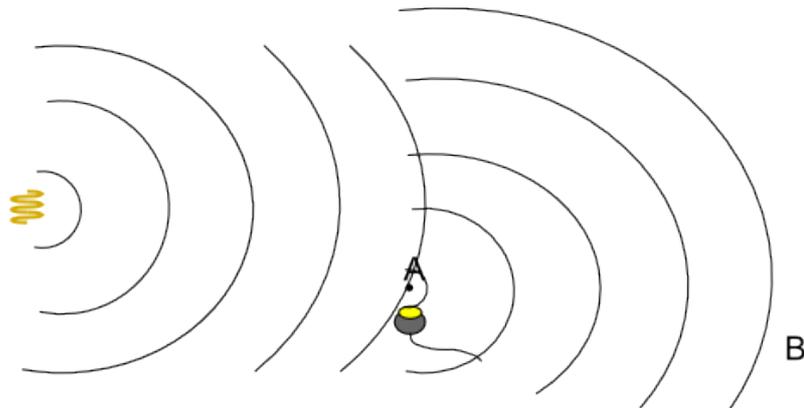


A la izquierda tenemos un arco eléctrico que libera electrones. El detector registra un electrón cuando pasa próximo a él, en el punto A. ¿Se producirá el impacto del electrón con la pantalla en B?

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

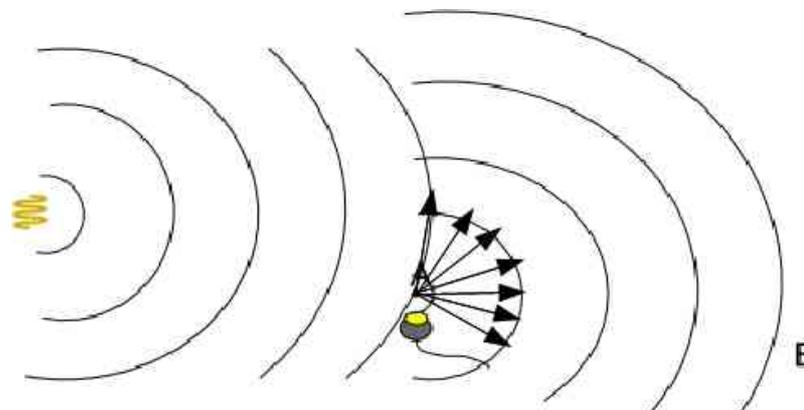
C. Debemos analizar la situación siguiendo el modelo de cuántum establecido. Cuando los electrones abandonan el filamento se propagan como ondas, pueden ser detectados en cualquier punto del espacio al que llegue el frente de onda. Nuestro detector sólo registrará el paso de algunos electrones, puesto que no abarca todo el frente de ondas. Al detectar un electrón, sabemos que su posición se encuentra frente al detector. A partir de ese instante el electrón seguirá propagándose como una onda de probabilidad y puede impactar en cualquier posición de la pantalla, como se muestra en la imagen.

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.



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.



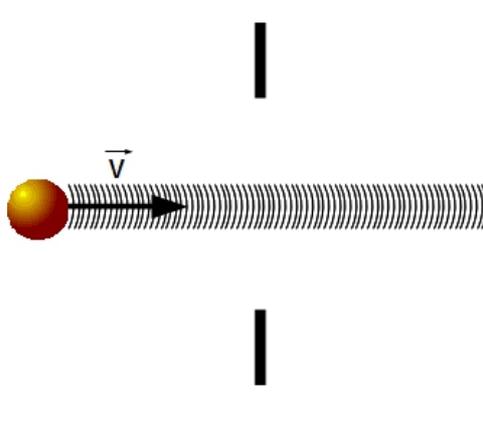
Al detectar el cuántum conocemos bien su posición, la incertidumbre en el valor de la posición es pequeña. En virtud del principio de incertidumbre, la incertidumbre en el momento lineal será grande, el rango de posibles valores del momento lineal para el electrón es amplio. Por tanto, el electrón puede 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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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?

C. El objetivo de esta actividad es reconciliar la física cuántica y la clásica justificando por qué el comportamiento de los cuantos no se observa en objetos cotidianos.

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 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:

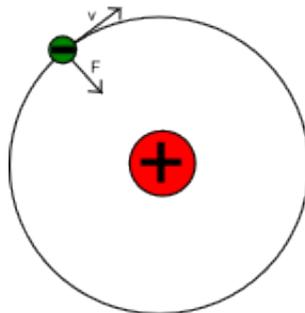
- Se propagan como ondas de probabilidad.
- Se detectan como partículas, en un punto y con una determinada energía y momento lineal.
- Es más probable detectarlos en aquellos lugares en los que el cuadrado de la amplitud de la onda es mayor.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

- 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.

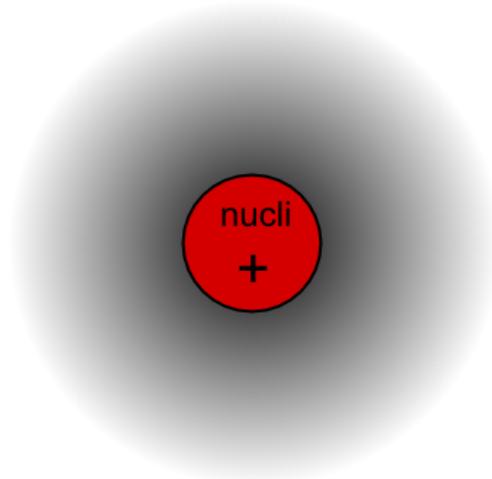
Otro problema que queda abierto es el modelo de átomo. Nosotros hemos usado un modelo de átomo como el que se muestra en la figura. En él, los electrones son partículas que siguen una trayectoria definida, una órbita alrededor del átomo. Pero de acuerdo con nuestros avances, mientras el electrón no es 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.

¿Cómo se emite y absorbe radiación?



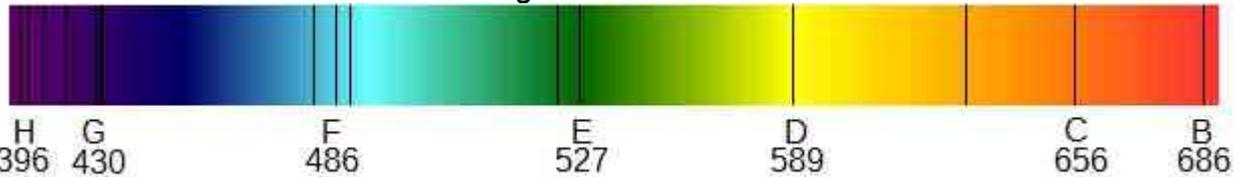
Representación del átomo de hidrógeno en el estado estacionario de menor energía de acuerdo con la física cuántica. La zona sombreada representa la región del espacio en que es más probable encontrar el electrón cuando se hace una medida de posición. La probabilidad es mayor allí donde la sombra es más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

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

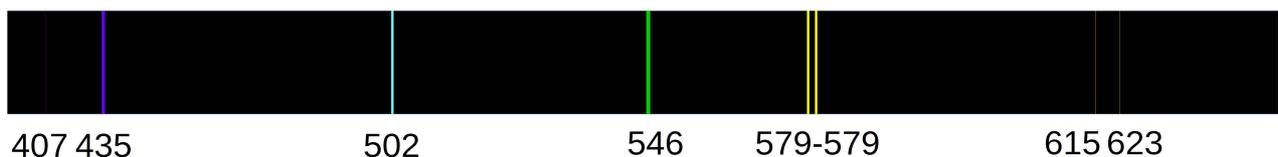


Imagen: Espectros del mercurio y del hidrógeno. Se muestran las longitudes de onda de las líneas espectrales, en nm.

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?

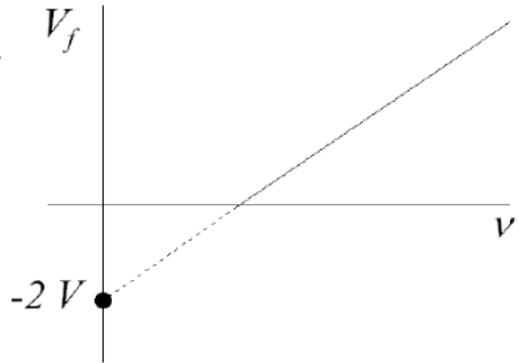
AC3.- ¿Cómo será la gráfica que se obtiene al hacer la experiencia del efecto fotoeléctrico para diferentes metales?

¿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 500nm .

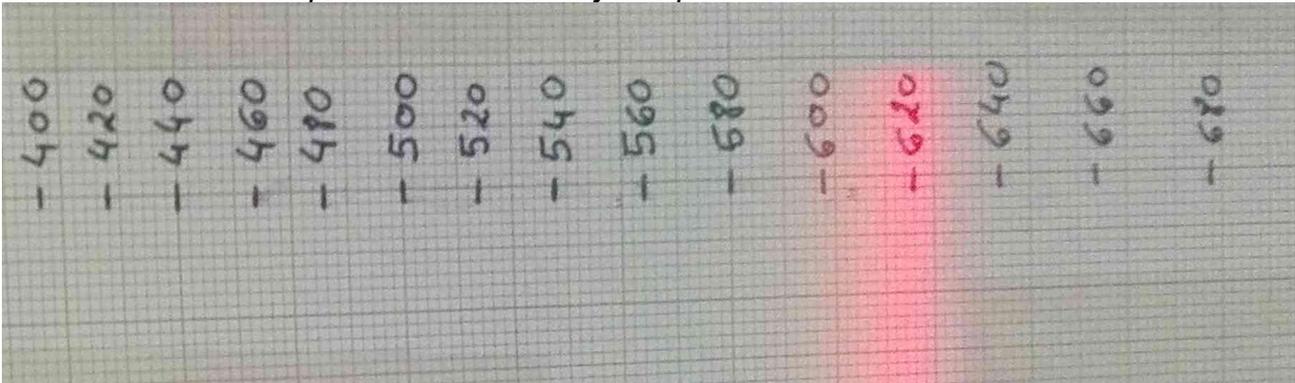
AC6.- La gráfica de la figura adjunta representa el potencial de frenado, V_f , de una célula fotoeléctrica en función de la frecuencia, ν , de la luz incidente. La ordenada en el origen tiene un valor de -2V .



- Deducid la expresión teórica de V_f en función de ν .
- ¿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.



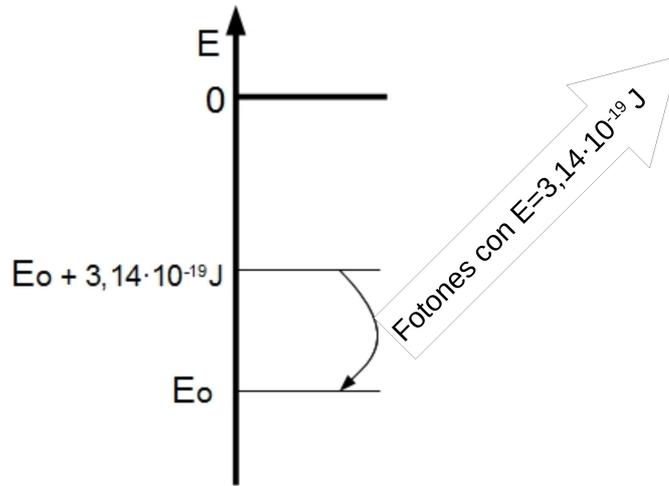
Espectro de un led rojo. La escala indica los nanómetros.

C. El espectro del LED consiste en una banda luminosa, como se muestra en la imagen. La banda, a diferencia de la línea espectral, contiene todo un intervalo de frecuencias, lo que exige un mecanismo de emisión más complejo. Sin embargo, para empezar a afrontar el problema, ¿Podemos hacer alguna simplificación que facilite el trabajo?

Algunos alumnos proponen que podemos, en primera aproximación, considerar la banda como una línea espectral que ocupa la posición central de la banda. Acordamos comenzar trabajando con este valor medio y posteriormente ya veremos qué modificaciones hay que introducir para dar cuenta de la formación de toda la banda.

De acuerdo con la aproximación planteada, el led emitirá fotones de $E=3,14 \cdot 10^{-19} \text{J}$. Esto implica que los electrones realizan transiciones entre estados estacionarios que se encuentran en esa diferencia de energías. Un posible diagrama de energías es el que se muestra en la figura.

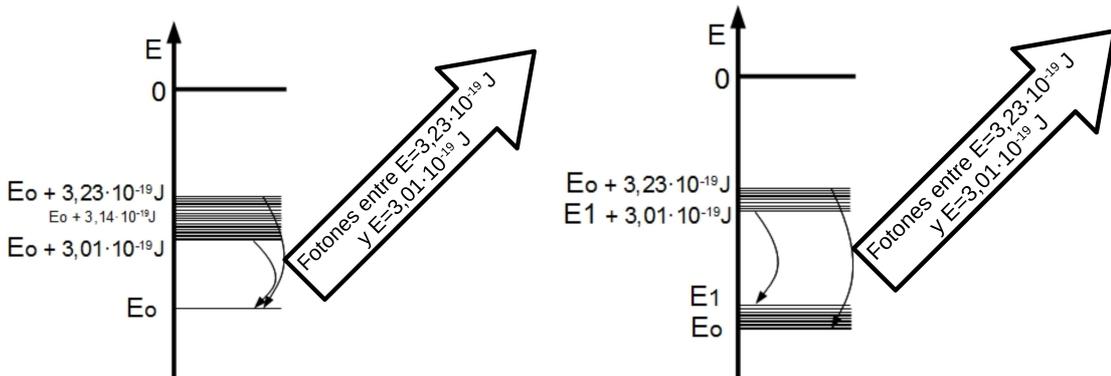
¿Cómo se emite y absorbe radiación?



Al pasar del nivel de energía de $E_0 + 3,14 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ al nivel de energía E_0 se emiten fotones de la energía y frecuencia indicadas. La corriente eléctrica a la que está conectado el LED permite aportar la energía necesaria para que los electrones puedan "subir" del nivel de menor energía al de mayor y mantener así la emisión de radiación.

El mecanismo que permite dar cuenta del proceso de emisión es el que sigue: los electrones están originalmente en un estado energético E_0 y, mediante la corriente eléctrica que atraviesa el LED, se les aporta la energía necesaria para ascender a un nivel energético superior. Al retornar al nivel energético original emiten un fotón luminoso cuya energía coincide con la diferencia de energía de los estados entre los que tiene lugar la transición. Si no hay más transiciones posibles todos los fotones tienen la misma energía y por lo tanto la misma frecuencia.

Ahora bien, el LED no emite luz de una sola frecuencia, sino de un conjunto de frecuencias en torno a este valor medio. ¿Qué modificaciones hemos de introducir en el modelo propuesto? De acuerdo con el espectro de emisión el led emite fotones cuyas energías se encuentran entre $3,23 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ y $3,01 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Debemos, por tanto, contemplar todo un conjunto de transiciones posibles alrededor del valor medio anterior. Podemos modificar el diagrama de energía propuesto.



Los dos diagramas de energía de la figura permiten dar cuenta de la radiación emitida. En el primero tenemos una banda de energía, mientras que en el segundo hay dos bandas. Hay más hipótesis posibles, como el caso en que el estado de mayor energía sea una línea y el de menor energía un lado.

Se pueden proponer varios diagramas de energía que dan cuenta de la radiación emitida. Con los datos de que disponemos no podemos establecer cuál de ellos es el correcto. En la imagen de la izquierda el electrón realiza transiciones desde una banda energética, en la que puede tener una energía cualquiera entre dos valores dados, a un nivel energético. El fotón emitido tendrá la energía correspondiente al salto energético del electrón y la frecuencia vendrá dada por la $E = h \nu$ expresión. En tanto que hay muchos electrones en el LED y cada uno de ellos

¿Cómo se emite y absorbe radiación?

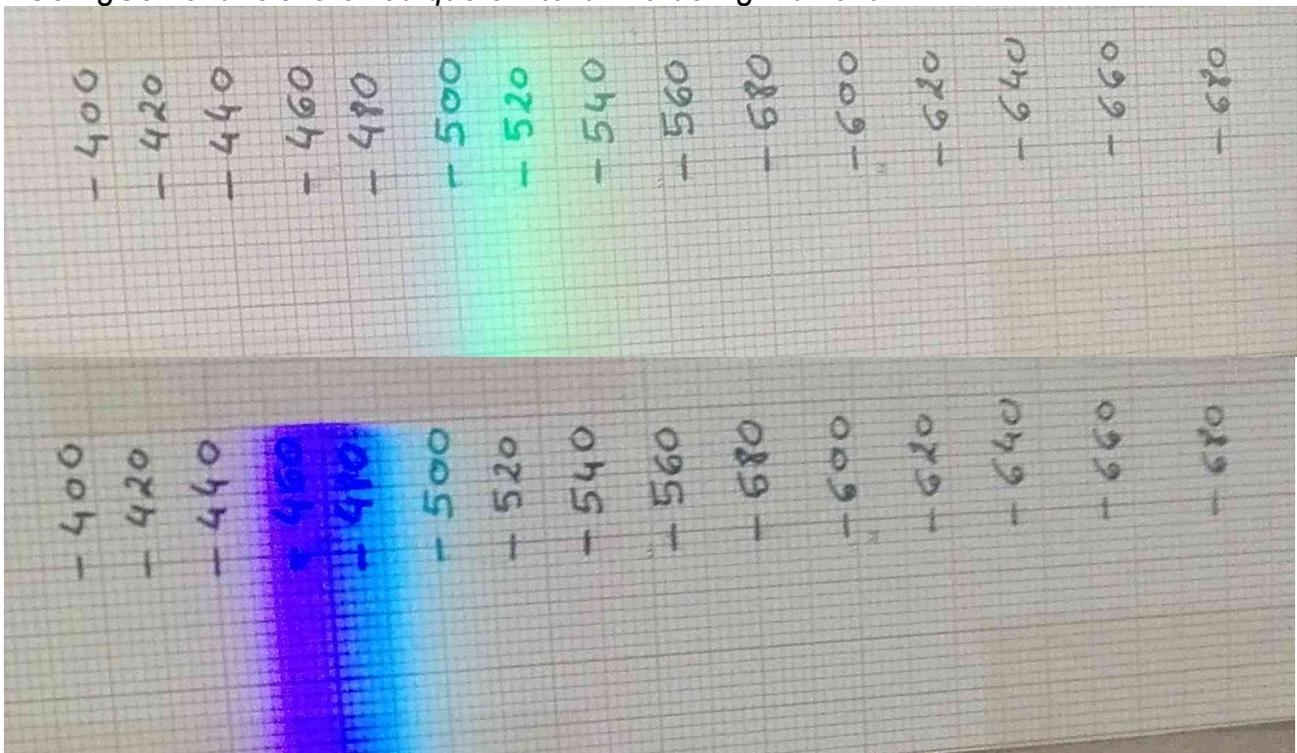
puede realizar una transición de entre todas las transiciones posibles, se puede explicar la formación de la banda luminosa del espectro. De acuerdo con el diagrama de la derecha las transiciones pueden tener lugar entre dos bandas energéticas. Nuevamente, corresponden a la emisión de fotones cuya frecuencia delimita la banda espectral. Se pueden proponer más estructuras que dan cuenta del espectro del LED, como la transición de un nivel energético de mayor energía a un lado de menor energía.

Los alumnos muestran tendencia a proponer la estructura de niveles que se representa en la imagen de la izquierda, tanto en esta actividad como en las siguientes, aunque al reflexionar reconocen que no es la única posible y que se requiere más información para poder determinar cuál es la estructura correcta.

Llegados aquí se plantea de nuevo el problema que había aparecido con los espectros. ¿Si todos los electrones son iguales y reciben la misma corriente eléctrica, cómo es posible que unos realicen una transición y otros realizan una transición diferente? Nuestro mecanismo constata que cada electrón puede realizar una transición de un conjunto de posibles transiciones, pero la transición que finalmente realiza es fruto del azar y diferente a la de otros electrones que se encuentran en el mismo estado. ¿Cómo es esto posible? Cuestionamos así el determinismo, nuevamente.

Se puede profundizar en el mecanismo de emisión y preguntar por qué algunos led tardan un tiempo en dejar de emitir radiación a pesar de haberlo desconectado. La respuesta inmediata es que los electrones aún están realizando transiciones desde el nivel de mayor energía al menor, hasta que todos los electrones no hayan bajado al nivel más bajo la emisión se mantendrá. Sin embargo, ¿Por qué unos electrones realizan la transición antes que los demás? ¿No se encuentran todos en las mismas condiciones? Esto nos permite cuestionar, nuevamente, otro de los pilares de la física clásica: la causalidad. A pesar de estar sometidos a las mismas condiciones físicas y ser todos idénticos, los electrones tienen un comportamiento diferente. ¿Cuál es la causa de ese comportamiento individual diferenciado? Nuestro mecanismo no la establece.

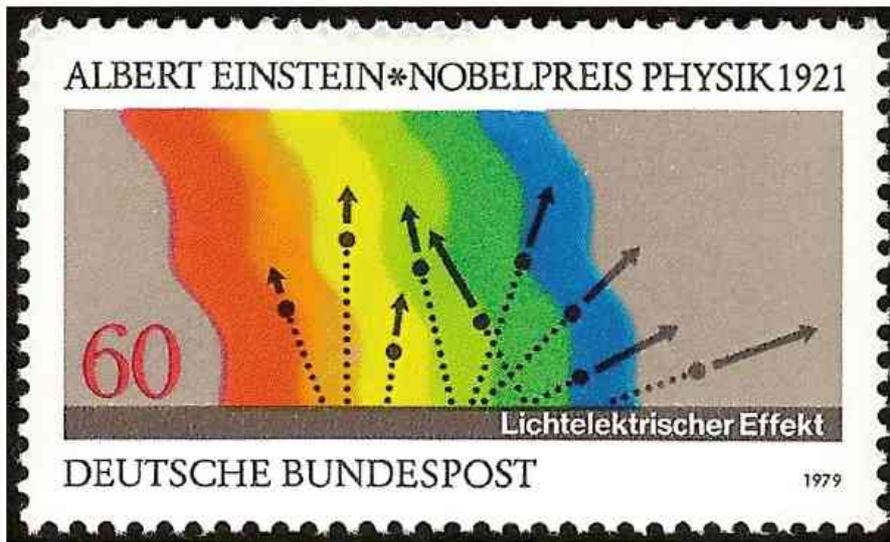
AC8.- ¿Cómo funciona el led que emite luz verde? ¿Y luz azul?



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 clorofila¹⁰ 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?



10.- 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.

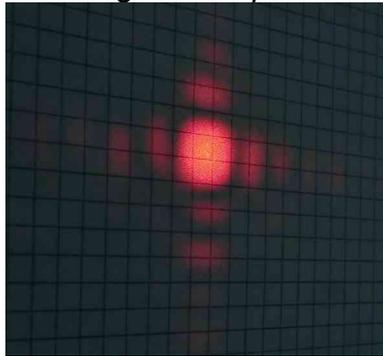


Figura de difracción a través de una rendija cuadrada.

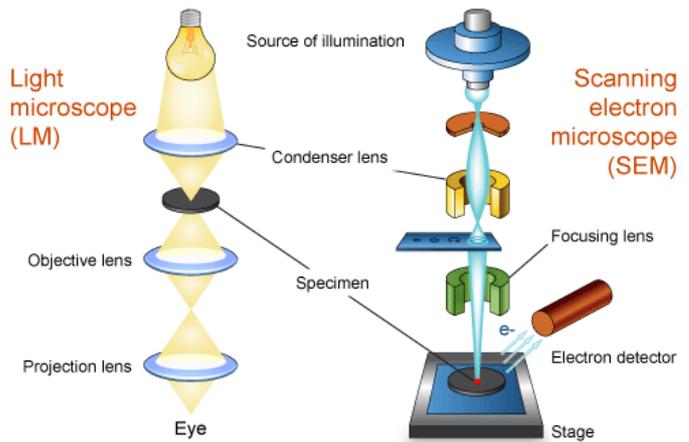
AC13.- Sabéis que la luz visible tiene una longitud de onda que está comprendida entre 400nm y 700nm. Con las lentes adecuadas se puede actuar sobre la luz procedente de un objeto para verlo aumentado, conseguimos así un instrumento conocido con el nombre de microscopio. Con el desarrollo de la física 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?

C. Podemos dar una respuesta atendiendo a la naturaleza cuántica de los cuántums que posibilitan la “observación” del objeto: cuando los cuántums interactúan con objetos que tienen dimensiones similares a su longitud de onda se pone de manifiesto los efectos ondulatorios y entonces se hacen patentes los efectos cuánticos. En estas condiciones no se pueden obtener imágenes nítidas de los objetos que se pretende visualizar, puesto que se producen fenómenos de interferencia y difracción característicos de las ondas. Si determinamos la longitud de onda de los electrones empleados en un microscopio electrónico observaremos que es mucho menor que la de la luz visible, lo que permite observar objetos de dimensiones reducidas sin que aparezcan los indeseados efectos cuánticos y sin que se distorsione la imagen. Se puede comentar, además, que en la actualidad existen microscopios electrónicos que aportan a los electrones un 70% de la velocidad de luz y permiten observar objetos aún más pequeños que los considerados en este problema, pero para la determinación de su longitud de onda hay que hacer consideraciones relativistas.

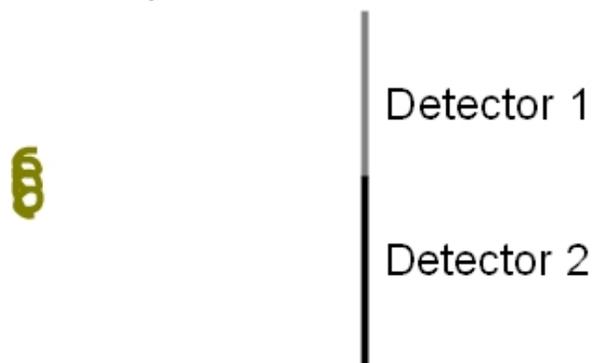
¿Cómo se emite y absorbe radiación?

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)



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 Δ .

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.

λ (nm)	x (cm)	λ (nm)	x (cm)	λ (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.

