

UNIDAD VII: FISICA CUANTICA

Radiación del cuerpo negro y teoría de Planck Efecto fotoeléctrico.
Cuantización de la radiación: fotón. Dualidad onda – partícula.

Índice

Introducción	2
Radiación – Conceptos generales	4
Radiación luminosa.....	5
Cuerpo negro	6
Cuerpo real	7
Ley de Stefan Boltzman	7
Ley de Wien.....	8
Teoría clásica de la radiación	10
Ley de la radiación de Planck	11
El efecto fotoeléctrico.....	13
Teoría corpuscular del efecto fotoeléctrico	17
Efecto “Compton”	21
Dualidad onda-partícula	23
Propiedades Ondulatorias de las partículas.....	24
Principio de incertidumbre de Heisemberg	27

Introducción

La evolución histórica de la física es un ejemplo claro de la evolución del conocimiento científico y nos permite ver como las teorías que se desarrollan son propias cada época: no se puede hablar nunca de “ciencia cerrada” o definitivamente completa.

A finales del siglo XIX, la Mecánica Teórica y el Electromagnetismo eran las bases de lo que podríamos denominar ahora física clásica, los razonamientos eran construcciones mentales que parecían perfectas de sus razonamientos, y verificados mediante la experimentación.

La mentalidad positivista de la época en el mundo occidental, había llevado a creer que la ciencia en general y la física en particular, darían respuesta a todas las necesidades materiales de la Humanidad, y que el pensamiento racional sería la herramienta para poder construir un mundo más justo e igualitario.

La fe en la ciencia y en la física era tal que hubo físicos que se aventuraron a pensar que ya en el siglo XIX la ciencia había tocado su techo, que no quedaba más nada que descubrir y que sólo quedaba a la comunidad científica el afinar detalles en los modelos y teorías. Uno de los más importantes científicos de la época, William Thomson (Lord Kelvin) llegó a decir “ya está todo descubierto”

La realidad se mostraría muy diferente a todas estas creencias, y a ello contribuyó el descubrimiento de nuevos fenómenos como el de la radiactividad y el estudio de la radiación electromagnética, frente a los que la mecánica clásica de Newton era del todo incapaz de ofrecer una explicación.

El panorama se complicaría aún más con el descubrimiento e interpretación de los espectros atómicos y el renacer de toda una nueva manera de entender el mundo: la mecánica cuántica, aún hoy día no comprendida del todo en sus fundamentos conceptuales profundos.

Los nuevos hechos, tales como el concepto del electrón como unidad natural de carga componente de la materia, el conocimiento del efecto fotoeléctrico, el descubrimiento de los rayos X, las series espectrales observadas en los espectros de emisión de los átomos, la radiación de incandescencia y especialmente el estudio de la radiactividad, preparan la revolución científica que tendrá lugar a partir de 1900.

Uno de los hechos pendientes de explicación era la confirmación del éter. Se pensaba que las ondas electromagnéticas, explicadas a partir de ecuaciones de Maxwell, se transmitían en un medio material a semejanza de ondas materiales conocidas, ondas en cuerdas y líquidos, acústicas en el aire, etc. Se llamaba éter a este medio, y dado que las ondas se propagaban por todas partes el éter lo debía rodear todo, y en consecuencia parecía tener que ser un sistema de referencia absoluto

Por analogía ese éter debería llenar todo el espacio, pues las onda electromagnéticas llegaban de las estrellas, no tener masa, pues los cuerpos celestes no parecían frenarse, pero si tener propiedades elásticas adecuadas para la transmisión de las ondas, ser isotrópico pues no se observaban direcciones preferenciales en el espacio.

Si era un sistema de referencia absoluto se tendría que poder medir entre otras cosas la velocidad de la luz. Se sabía que la velocidad de luz en la Tierra, supuestamente en movimiento respecto al éter, era de medida $2.988 \cdot 10^8 \text{ m/seg}$, pero cual era la velocidad absoluta, era algo que preocupaba a la comunidad científica de la época. Se idearon una serie de experimentos que buscaban demostrar la existencia del eter y a su vez medir la velocidad de la luz. El más famoso fue el que llevaron a cabo Michelson y Morley, con resultado negativo

Estos experimentos y una nueva serie de descubrimientos hacían impensable una explicación en base a los parámetros clásicos. Algunos de esos otros hechos más reconocidos fueron, además del de de Michelson-Morley fueron:

- Constancia de la velocidad de la luz y la “interconversión” masa-energía
- La “catástrofe del ultravioleta”
- El efecto fotoeléctrico

¿Cómo explicar todo esto? Nada queda hoy día de esa mentalidad positivista. Hoy el mundo, el Universo, se nos muestra enigmático, no mucho menos a finales del siglo XIX, pero apasionante, estimulante y magnífico.

En los últimos capítulos vamos a realizar una visión de algunos de los mismos hechos y lo supusieron para el avance del conocimiento.

La Mecánica Cuántica y la Teoría de la Relatividad de Einstein significaron avances científicos con profundas implicaciones en el terreno no sólo de la física, sino también en el de la técnica o en el de la filosofía.

Radiación – Conceptos generales

Cuando la luz incide sobre un cuerpo cualquiera, una parte es absorbida por él y otra parte o bien se refleja en la superficie o bien atraviesa el cuerpo. Los detalles particulares de este proceso para cada cuerpo concreto se manifiestan por ejemplo en su color. Un objeto de color blanco refleja casi toda la radiación que recibe, mientras que uno de color negro absorbe casi toda ella. Esta interacción entre los cuerpos y la luz no se restringe a la luz visible, sino que se extiende a todo el espectro electromagnético

Por otra parte, los cuerpos no sólo responden a la radiación que les llega. También ellos emiten. Lo que sucede es que, a las temperaturas ordinarias, la mayor parte de la energía que radian se emite en longitudes de ondas propias del infrarrojo o más largas, no es visible.

La temperatura de un cuerpo que esta más caliente que su entorno tiende a decrecer con el tiempo, lo que equivale a decir que el cuerpo está desprendiendo energía. Esta pérdida de energía por parte del cuerpo se puede producir mediante los mecanismos de conducción y de convección, en los que la magnitud del intercambio energético es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el entorno. Además estas modalidades de transmisión necesitan de la presencia de algún medio que se encuentre en contacto con el cuerpo que se considera. No obstante, si aislamos completamente un cuerpo caliente de cualquier medio que pueda estar en contacto con él (es decir, hacemos el vacío) podemos comprobar que la temperatura también disminuye con el tiempo y que el cuerpo pierde energía. El tipo de transmisión de energía registrado en estos casos es completamente distinta al de los dos anteriores y se conoce con el nombre de "radiación térmica". Para que un cuerpo pierda energía por radiación no es necesario que se caliente. La radiación térmica forma parte de un fenómeno más general, conocido con el nombre de energía radiante.

Existen varias teorías para explicar la transmisión de energía por radiación. Una de ellas sostiene que el cuerpo emite "paquetes" o "cuantos" de energía y sirve para explicar el efecto fotoeléctrico, la radiación térmica, etc. Otra afirma que la radiación puede representarse por un movimiento electromagnético ondulatorio; con esta base explica los fenómenos de interferencia y polarización de la luz, etc. En la actualidad se acepta una teoría híbrida en la que se asignan a la vez, a la energía radiante, las características del movimiento ondulatorio y de la emisión discontinua.

A temperaturas ordinarias, los cuerpos se ven por la luz que reflejan, no por la que emiten. Sin embargo, a temperaturas altas los cuerpos son autoluminosos y es posible verlos brillar en cuartos oscuros. Si se eleva uniformemente la temperatura de un cuerpo caliente, se observa: A mayor temperatura, mayor radiación térmica emitida.

Con el término *radiosidad*, que normalmente se representa por J , indicamos la energía total radiante que abandona una superficie por unidad de tiempo y superficie. Esta radiación constará de la emitancia, original procedente de la superficie más la fracción de cualquier radiación que incida sobre ésta.

Con el término *irradiación* denominamos la energía radiante total que incide sobre una superficie por unidad de tiempo y de superficie. La designaremos con el símbolo G . La irradiación se define sencillamente como la radiación que llega a una superficie sin tener para nada en cuenta lo que luego suceda. Una parte se absorberá y otra, al reflejarse, formará parte de la radiosidad de la superficie.

De las anteriores definiciones de la emitancia, W ; radiosidad, J , e irradiación, G , vemos que:

$$J = W + rG \quad \text{Donde } r \text{ es el poder reflexivo}$$

Para el cuerpo opaco se cumple que $a + r = 1$ donde, a , es el poder absorbente será entonces

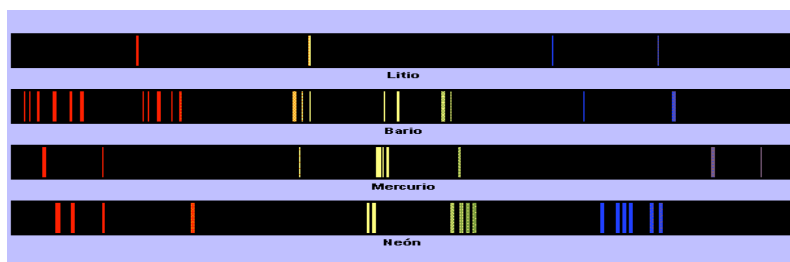
$$J = W + (1 - a)G$$

Radiación luminosa

Cuando la luz incide sobre un cuerpo cualquiera, una parte es absorbida por él y otra parte o bien se refleja en la superficie o bien atraviesa el cuerpo. Los detalles particulares de este proceso para cada cuerpo concreto se manifiestan por ejemplo en su **color**. Un objeto de color blanco refleja casi toda la radiación que recibe, mientras que uno de color negro absorbe casi toda ella.

Esta interacción entre los cuerpos y la luz NO se restringe a la luz visible, sino que se extiende a todo el espectro electromagnético.

Por otra parte, los cuerpos no sólo responden a la radiación que les llega. También ellos emiten. Lo que sucede es que, a las temperaturas ordinarias, la mayor parte de la energía que radian se emite en longitudes de onda propia del infrarrojo o más larga, es decir, no es visible



Para conseguir que un cuerpo emita luz visible es necesario elevar su temperatura por encima de los 600-700°C; es decir, llevarlo a incandescencia. Por ejemplo, un bloque de hierro de color negro adquiere un color rojizo a medida que aumenta su temperatura, pasando posteriormente a un rojo vivo, y para temperatura más alta, al llamado "rojo blanco".

También el color de la luz de las mayores fuentes de radiación conocidas, las estrellas, está relacionado con la temperatura.

Cuerpo negro

Hemos visto que la radiación que proviene de un cuerpo es la suma de la radiación propia y la que refleja. Si se desea estudiar únicamente la emisión propia es preciso aislar al cuerpo de algún modo. Esta dificultad desaparece si el cuerpo absorbe toda la radiación que recibe.

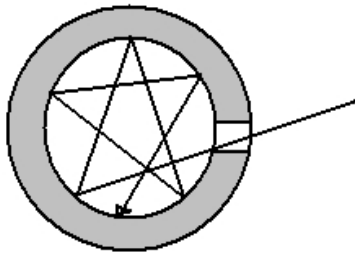
No todas las superficies emiten o absorben la misma cantidad de energía radiante cuando se calientan a la misma temperatura. Un cuerpo que absorba o emita a una temperatura determinada la máxima cantidad de energía se denomina superficie negra o simplemente cuerpo negro.

Éste es el modelo de cuerpo negro ideal: una cavidad de paredes muy absorbentes con una pequeña abertura en una de sus paredes. Cualquier radiación que entre en la cavidad será, casi con toda certeza, absorbida por las paredes antes de que pueda salir de ella. De este modo, se puede asegurar que la radiación que salga por la abertura tiene su origen en las paredes de la cavidad, esto es, se trata de emisión propia

Un cuerpo negro perfecto no existe en la realidad, sino que es un ente ideal que se utiliza como referencia respecto a otros radiadores. No obstante, existen numerosas superficies que son cuerpos negros casi perfectos, sobre todo para radiaciones de onda larga, por lo que para casos prácticos son considerados como tales con suficiente exactitud.

El cuerpo negro es entonces, un cuerpo imaginario que se supone con capacidad para absorber toda la radiación térmica incidente; es decir, aquel en el que $a = 1$ y $r = 0$. Este es el cuerpo "absolutamente negro", o, en otras palabras, un absorbente perfecto de la radiación. Se llaman "negros" porque las superficies pintadas de negro suelen presentar poderes absorbentes muy altos. En la práctica nos podemos acercar bastante a las propiedades de una superficie negra perfecta empleando un cuerpo negro, digamos esférico, ennegrecido en su superficie interior con una sustancia que sea muy absorbente para la radiación térmica (por ejemplo, negro de humo). Si practicamos un pequeño orificio, la radiación que él penetre se absorberá en parte y, en parte, se reflejará. La fracción reflejada incidirá sobre otra zona de la superficie interna y también se absorberá y reflejará en parte, y así sucesivamente. Por consiguiente, nada o prácticamente nada,

de la radiación incidente se escapará por el orificio por el que penetró, por lo que el plano del orificio se comporta como un cuerpo negro perfecto con respecto a la radiación que incide sobre él.



Cuerpo real

Los cuerpos reales son los que tienen unos niveles de distribución de energía complejos, hallamos habitualmente que la radiación no está distribuida como la del cuerpo negro, ya sea, con respecto a la longitud de onda o con la dirección de la emisión. Sin embargo, por razón de sencillez, empleamos a veces el cuerpo negro como un patrón para representar en relación con él, las propiedades generales de un cuerpo. De esta forma podemos asignar al cuerpo una emisividad global, e , de forma que a la temperatura T , emita una fracción e de la energía emitida por el cuerpo negro a esa temperatura.

Asignamos a un cuerpo las propiedades de *reflexión*, r , de *poder de absorción*, a , y *transmisión*, t , en tal forma que si una radiación de intensidad P incide sobre él, las proporciones en que se refleja la energía será rP , en que se absorbe aP y transmite tP , Todas las cuales varían entre cero y uno para los cuerpos reales.

Estas propiedades de radiación, varían mucho según los cuerpos y, lo que es más importante, varían con la longitud de onda de la radiación para un cuerpo dado. Esta dependencia de la longitud de onda, es por supuesto debida al carácter del proceso absorción-emisión. Esto se puede representar muy bien expresando las propiedades en términos de la temperatura del cuerpo (para la temperatura de la fuente de la radiación incidente, y por lo tanto de su longitud de onda (para las otras propiedades).

Ley de Stefan Boltzman

En 1879, Josef Stefan (1835-1893) propuso la dependencia de la potencia de radiación o ritmo de emisión de energía electromagnética con la temperatura elevada a la cuarta potencia a partir del análisis de los datos experimentales. Cinco años más tarde Ludwig Boltzmann obtuvo la ley

teóricamente partiendo de valores experimentales. Sugirió que la emitancia de una superficie, W , es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Más tarde, Boltzman aplicó los conceptos del ciclo de Carnot, considerando la energía radiante como medio operatorio, y obtuvo la misma relación por vía analítica.

Como el cuerpo negro perfecto, ya definido, tiene un comportamiento único y característico, es conveniente emplearlo como base para representar la proporcionalidad indicada en las observaciones de Stefan Boltzman.

Ley de Stefan Boltzman para la radiación del cuerpo negro es:

$W = e\sigma AT^4$ donde e es la emisividad del cuerpo, siempre será $0 \leq e \leq 1$, cuando $e = 1$, estamos en el caso del cuerpo negro

$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann

La radiación que emitiría un cuerpo negro puede aproximarse con la precisión deseada por la radiación emitida a través de un agujero pequeño practicado en una cavidad (que está a una temperatura inferior a la temperatura de fusión del material que forma las paredes de la cavidad).

En cada una de las reflexiones en su interior se absorbe una parte de la luz, y después de las múltiples reflexiones, toda la energía que penetró por el orificio ha sido virtualmente absorbida, de esta forma, el orificio de la cavidad se comporta como un cuerpo negro ideal. Por tanto, la luz que sale por el agujero de la cavidad es una radiación de cuerpo negro.

La emisividad y la potencia irradiada por un cuerpo negro, o por el agujero de la cavidad, son independientes del material que forma sus paredes interiores

Ley de Wien

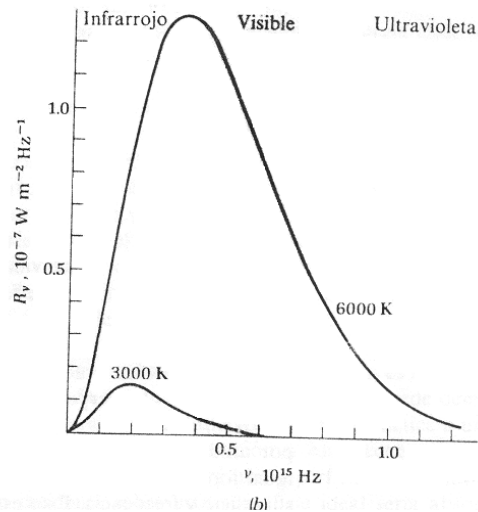
La forma de describir la radiación emitida por un cuerpo es una función llamada distribución espectral. Esta función, para un valor fijo de la temperatura nos informa de cómo se reparte la intensidad de energía procedente del cuerpo entre las distintas longitudes de onda

El área encerrada por la curva y el eje de abscisas es igual a la intensidad total de energía emitida por el cuerpo a esa temperatura. Variando la temperatura del cuerpo cambia la forma de distribución espectral, desplazándose el máximo, longitud de onda en la que se emite la

mayor cantidad de energía, hacia longitudes de onda más cortas.

La ley del desplazamiento de Wien afirma que el máximo de la intensidad de la radiación térmica emitida por un cuerpo negro ideal se desplaza, con el aumento de la temperatura, hacia la región de longitudes de onda más corta. La ley de Wien dice: " El producto de la temperatura absoluta de un cuerpo negro por la longitud de onda para la cual la radiación emitida es máxima, es igual a una constante". Tenemos:

$$\lambda_{\max} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m}^0 \text{ K}$$



La ley de Wien se utiliza para determinar las temperaturas de las estrellas, a partir de los análisis de su radiación. Se usa también en la termografía, que muestra variaciones de temperaturas en diferentes regiones de la superficie de un objeto, permitiendo detectar, por ejemplo, cáncer, ya que los tejidos cancerosos tienen una temperatura levemente mayor a los sanos de su alrededor.

En la figura siguiente se muestra la dependencia de la irradiancia con la frecuencia para dos temperaturas distintas.

Observar las siguientes características generales:

1. Para una temperatura dada, la irradiancia espectral posee un único máximo.
2. Si se aumenta la temperatura, la irradiancia espectral aumenta para todas las frecuencias o longitudes de onda.
3. La longitud de onda a la que se produce la máxima irradiancia espectral, disminuye (la frecuencia aumenta) al aumentar la temperatura.

Cualquier teoría que describa la interacción de la luz con la materia debe explicar adecuadamente tanto estas características generales, como la forma detallada de la dependencia de la irradiancia espectral con la frecuencia.

Teoría clásica de la radiación

A principios de 1900, Lord Rayleigh (1842-1919) y Sir James Jeans, (1877-1946), presentaron un modelo clásico de la densidad de energía de la radiación de cavidad (cuerpo negro). La teoría, iniciada por Lord Rayleigh y modificada posteriormente por Jeans usaba la equivalencia matemática entre una onda estacionaria y un oscilador armónico.

Suponga una pieza metálica que contiene una cavidad, calentada uniformemente a temperatura T . Los electrones de las paredes se agitan térmicamente y emiten radiación electromagnética dentro de la cavidad. En la cavidad se establece y se mantiene un equilibrio térmico mediante la absorción y re-radiación de la energía por las paredes.

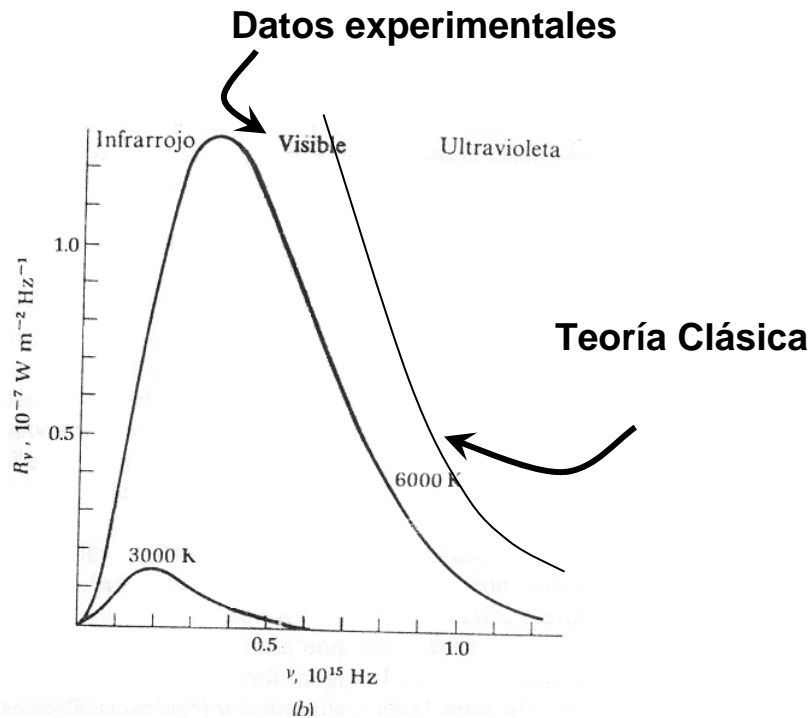
Rayleigh y Jeans demostraron que la radiación dentro de cada cavidad de volumen V consta de ondas estacionarias con nodos en las paredes: calcularon el número de ondas estacionarias para un intervalo de frecuencias

La irradiancia, que es proporcional a la energía por unidad de volumen en la cavidad, debe ser proporcional al producto del número de modos por unidad de volumen y la energía media por modo.

Este razonamiento nos conduce a la fórmula de Rayleigh-Jeans, $R_\nu = 2\pi\nu^2 kT / c^2$.

La fórmula de Rayleigh-Jeans está de acuerdo con la experiencia sólo a bajas frecuencias (o altas longitudes de onda) ; a frecuencias altas (o bajas longitudes de onda) claramente es errónea porque aumenta (como ν^2) sin alcanzar un máximo.

El aumento monótono con la frecuencia de la fórmula de Rayleigh-Jeans se denominó la «catástrofe ultravioleta». Al comparar la última ecuación con los resultados experimentales queda de manifiesto un error en la teoría clásica. Esta última predice una energía infinita, lo que difiere del resultado experimental.



Con esta hipótesis, se deduce una ley que se adapta bastante bien a la curva observada experimentalmente, como se ve en la, pero sólo en las zonas de bajas frecuencias es decir, valores altos de longitudes de onda, pero fracasa estrepitosamente en la zona de las altas frecuencias, donde prevé una emisión de energía infinita, lo que se llamó la **catástrofe ultravioleta**, ya que ningún cuerpo puede emitir infinita energía.

En definitiva, las leyes y teorías físicas de finales del siglo XIX eran incapaces de explicar de modo completo y satisfactorio, la emisión de energía por radiación.

Ley de la radiación de Planck

El problema de hallar qué mecanismo hace que los átomos radiantes produzcan la distribución de energía de la radiación del cuerpo negro lo resuelve en el año 1900 el físico alemán Max Planck (1858-1947) en un trabajo que presenta a la Sociedad Alemana de Física de Berlín, y en donde anuncia haber hallado una ecuación empírica que se ajusta a las curvas experimentales.

Sin embargo, Planck no estaba muy satisfecho con su trabajo, ya que para deducir su ecuación había tenido que hacer algunas hipótesis que chocaban frontalmente con la concepción física de la realidad en vigor en esos momentos, se inicia aquí la física moderna.

Planck presentó una fórmula que describía la distribución en frecuencias de la radiación de un cuerpo negro, desarrollo un modelo estructural para la radiación de cuerpo negro que conduce a una ecuación teórica para la distribución de longitudes de onda que coincide con los datos experimentales. Para conseguir las bases físicas de su fórmula, Planck hizo algunas

propuestas que en su momento fueron calificadas de infundadas y extremadamente radicales. Estas propuestas pueden resumirse en los siguientes puntos:

1. Un oscilador (incluido un modo de vibración estacionario) de frecuencia ν , sólo puede cambiar su energía en múltiplos de una cantidad discreta denominada cuanto de energía, $\Delta E = h\nu$ donde h es la constante de Planck.
2. La energía de un oscilador está cuantizada, esto es, su energía está restringida a uno de los valores $E_n = n * h\nu$ donde el número cuántico n es un entero. Planck fue capaz de demostrar que aceptando los principios anteriores de cuantización, la energía promedio por oscilador de un conjunto de osciladores de frecuencia ν a la temperatura T está dada por:

$$[E] = \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1}$$

La constante h que relaciona la energía y la frecuencia, constante de Planck, está considerada como una constante fundamental de igual forma que lo son la velocidad de la luz, c o la carga del electrón, e . El valor más reciente de la constante de Planck es:

$$h = 6.626076 * 10^{-34} \text{ J} * \text{seg}$$

Usando la ecuación anterior para la energía promedio de un modo de vibración estacionario de la cavidad e incorporando el número de modos de vibración por unidad de volumen anterior, obtenemos la *ley de la radiación de Planck* para la irradiancia espectral de la radiación de un cuerpo negro:

$$R_\nu = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2 \left(e^{h\nu/KT} - 1 \right)}$$

Esta expresión explica todas las características de la radiación de un cuerpo negro, incluyendo la ley de Stefan-Boltzmann.

Lo radical en la hipótesis de Planck es que la energía de un oscilador está cuantizada, y que la energía sólo puede poseer valores discretos y no un valor intermedio. Para un oscilador mecánico o eléctrico clásico, la energía es una variable continua. Es decir, si la energía está cuantizada, la amplitud sólo podría tener valores discretos. Nadie había observado esta cuantificación de la amplitud de un oscilador. La energía y la amplitud de los osciladores de tamaño ordinario parecen comportarse como una variable continua. Esto es debido a que los valores cuantizados son muy próximos unos a otros debido al valor tan pequeño de la constante de Planck.

Cuando Plank presento su teoría, la mayor parte de los científicos no considero realista el concepto del cuanto, era más bien considerado un concepto matemático que por alguna razón coincidía con los resultados experimentales. Se continua buscando una explicación mas racional de la radiación del cuerpo negro. Pero los desarrollos posteriores mostraron que se necesitaba una teoría basada en el concepto del cuanto, en vez de conceptos clásicos, para poder explicar muchos otros fenómenos a nivel atómico.

El efecto fotoeléctrico

La hipótesis de Planck respecto a la cuantización de la energía no supuso de momento un cambio respecto al concepto que se tenía naturaleza de la luz. Se pensaba que los osciladores discutidos por Planck los osciladores atómicos que formaban el interior de las paredes de la cavidad, no las ondas estacionarias de su interior.

La radiación del cuerpo negro fue históricamente el primer fenómeno en ser explicado con un modelo cuántico.

A fines del siglo XIX al mismo tiempo que se recopilaban datos acerca de la radiación térmica, otros experimentos demostraban que la luz incidente sobre ciertas superficies metálicas hace que dichas superficies emitan electrones, a los cuales llamamos “fotoelectrones”

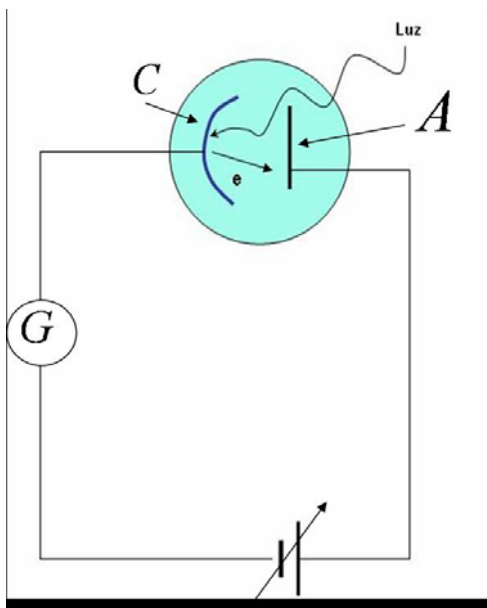
Este efecto fue descubierto por Hertz en 1887, cuando observó que una descarga eléctrica entre dos electrodos se produce más fácilmente si sobre uno de ellos incide luz ultravioleta.

Poco después, los trabajos de Wilhelm Hallwachs (1888), J. J. Thomson (1899) y Philipp L. A. Lenard (1900) demostraron que la luz ultravioleta facilita la descarga porque provoca la emisión de electrones desde la superficie del cátodo y determinaron las características de dicha emisión.

La luz más eficaz era la luz ultravioleta. A este efecto se le llamó efecto Hertz o fotoeléctrico. Este efecto de interpretó como una emisión de electrones que son arrancados de un metal gracias a la energía de la luz incidente.

En 1905, Einstein extendió los conceptos cuánticos a la luz, para describir su propagación en el vacío y su interacción con la materia. Esta nueva teoría de la luz respondió algunas de las preguntas los aspectos incomprendidos del efecto fotoeléctrico.

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones de un material cuando incide luz sobre su superficie. Normalmente, un electrón está ligado al material y no puede escapar a menos que se le proporcione energía. Para que el electrón escape de la superficie, la luz le debe suministrar energía suficiente.



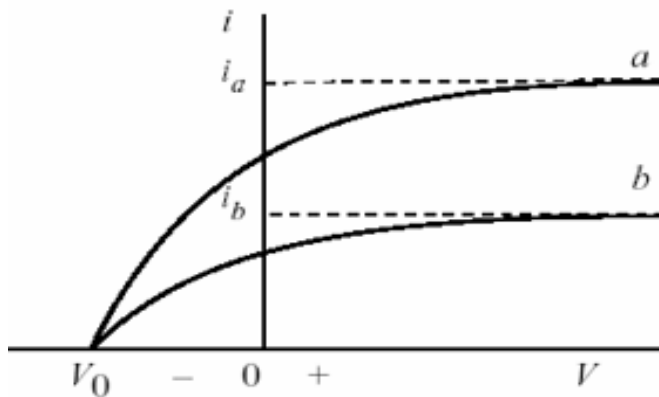
Para escapar de la superficie, un electrón, al menos debe recibir una cantidad de

energía ϕ , llamada función de trabajo de la superficie.

El valor de la función trabajo depende del material y es sensible al estado de la superficie. Por ejemplo la función de trabajo del aluminio (para una superficie limpia de óxido) es $4,2 \text{ eV}$

Los estudios cuantitativos del efecto fotoeléctrico se realizan con un dispositivo experimental como el de la figura. La luz incide sobre la superficie fotosensible, que es el cátodo C de la fotocélula. Los electrones emitidos por el cátodo son recogidos en el ánodo A a un ritmo que determina la corriente i en el galvanómetro, G .

La diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo puede variarse. Si el ánodo está a un potencial mayor que el cátodo, el ánodo atrae a los electrones emitidos. Si se invierte la polaridad, de forma tal que el ánodo esté a un potencial menor que el cátodo, el ánodo repele a los electrones.



La figura muestra la corriente fotoeléctrica como función de la diferencia de potencial entre cátodo y ánodo, para dos intensidades de luz. Se observa que para una diferencia de potencial V suficientemente grande, la corriente i alcanza un valor límite o de saturación

para el cual todos los electrones emitidos por el cátodo son colectados por el ánodo. La corriente de saturación es proporcional a la intensidad del haz de luz que incide sobre el cátodo.

Si V se hace negativo, la corriente no cae de inmediato a cero, lo que sugiere que los electrones son emitidos con cierta energía cinética, solo electrones que salen del metal con energía mayor a $e\Delta V$ alcanzan el cátodo a pesar que el campo eléctrico se opone a su movimiento. Sin embargo para cierto valor negativo llamado potencial de frenado la corriente eléctrica se anula

Imaginemos que sobre la fotocélula incide luz monocromática de frecuencia f . Vemos algunas características del efecto fotoeléctrico que no tienen explicación si se usa un esquema clásico para describir la interacción de la onda electromagnética incidente con los electrones del material

1 - Dependencia de la emisión de electrones respecto a la frecuencia de la luz

Existe una **frecuencia umbral**, f_0 , por debajo de la cual no se emiten electrones de la superficie. La corriente en el circuito es cero si el cátodo es iluminado con luz cuya frecuencia f sea inferior a un cierto valor umbral, $f < f_0$. La frecuencia umbral es característica del material y de las condiciones de su superficie y es independiente de la intensidad de luz. Por ejemplo, para una superficie limpia de sodio, $f_0 = 5,6 * 10^{14} \text{ Hz}$.

La teoría clásica de la luz no puede explicar la presencia de un valor umbral para la emisión de los electrones, ya que para la teoría clásica los electrones deberían emitirse para cualquier frecuencia de la radiación incidente, mientras la intensidad de la luz sea lo suficientemente fuerte, porque la energía se transmite al meta independientemente de la frecuencia.

2. Dependencia de la energía cinética de los fotoelectrones respecto a la intensidad de la luz

Según la teoría clásica los electrones deberían absorber energía en forma continua de las ondas electromagnéticas. Una luz más intensa debería transmitir energía al metal más rápido, de modo que los electrones deberían salir con mayor energía cinética, pero se comprueba que la energía cinética alcanza un valor máximo que es independiente de la intensidad de la luz

Cuando la frecuencia de la luz incidente es mayor al valor umbral, $f > f_0$, los electrones emitidos presentan una distribución de energía cinética. Existe un valor máximo de la energía cinética de los electrones emitidos, $K_{máx}$, que es independiente de la intensidad. Este valor máximo de la energía cinética se mide manteniendo el ánodo a un potencial inferior al cátodo; de esta forma, los electrones emitidos transforman su energía cinética en energía potencial eléctrica, y los electrones que son frenados antes de alcanzar el ánodo no contribuyen a la corriente. Un electrón que se mueva hacia el ánodo con la energía cinética máxima será frenado justo antes de llegar al ánodo si la diferencia de potencial se ajusta a un determinado valor, V_f , denominado **potencial de frenado**, capaz de parar todos los electrones emitidos. El valor del potencial de frenado corresponde a la conversión de la energía cinética máxima, $K_{máx}$, en energía potencial eléctrica: $K_{máx} = e * V_f$

La teoría clásica ondulatoria concluiría que la distribución de energía cinética depende de la intensidad, no debería existir ninguna relación entre la frecuencia de la luz y la energía cinética de los electrones, la evidencia experimental dice otra cosa.

3 - Dependencia de la energía cinética de los fotoelectrones respecto a la frecuencia de la luz

No debería existir ninguna relación entre la frecuencia de la luz y la energía cinética de los electrones. La energía cinética tendría que estar relacionada con la intensidad de la luz, pero la energía cinética máxima de los electrones aumenta con la frecuencia de la luz.

El valor de la energía cinética máxima depende linealmente de la frecuencia de la luz incidente. La teoría ondulatoria no es capaz de explicar estos hechos.

4. Tiempo transcurrido entre la incidencia de la luz y la emisión de fotoelectrones

Los experimentos muestran que no existe un retraso apreciable entre la incidencia de la luz sobre la superficie y la emisión de los electrones. La teoría ondulatoria requiere que la energía de la onda se absorba continuamente en un electrón. Si la intensidad es pequeña, existirá un lapso de tiempo antes de que el electrón consiga energía suficiente para escapar de la superficie.

Así pues, para una luz débil debería transcurrir un periodo perceptible entre la incidencia de la luz y la emisión de un electrón. Este tiempo sería el necesario para que el electrón absorba la radiación incidente suficiente para adquirir la energía necesaria para escapar del metal. La teoría ondulatoria clásica está reñida con la observación de que los electrones se emiten inmediatamente.

Teoría corpuscular del efecto fotoeléctrico

Einstein propuso una teoría corpuscular o de partículas para la luz. La luz monocromática de frecuencia f que se propaga en el vacío, consiste en un flujo de partículas o cuantos, que en la actualidad llamamos fotones. Todos los fotones viajan a la misma velocidad, cuyo módulo es c y cada uno posee un valor discreto de energía

$$E = hf \quad \text{Donde } h \text{ es la constante de Planck. Cuando un fotón interactúa con un electrón, el electrón adquiere toda su energía, en consecuencia el fotón deja de existir.}$$

Usando el concepto de fotón todas las características del efecto fotoeléctrico pueden explicarse:

1. Para que el electrón escape de la superficie de un material debe tener al menos una energía igual a la función de trabajo ϕ . Si la energía $E = hf$, adquirida al absorber el fotón es menor a la función de trabajo, el electrón no será emitido: Por lo tanto existe una frecuencia umbral f_0 , para la cual se cumple que $hf_0 = \phi$. El electrón solo podrá escapar de la superficie cuando absorba un fotón de frecuencia mayor a la umbral $f > f_0$.

2. Al absorber el fotón el electrón adquiere una cantidad definida de energía. Para escapar de la superficie debe perder una parte de esta igual a ϕ : Por lo tanto los electrones emitidos poseen una energía cinética máxima.

3. De acuerdo a la ley de conservación de la energía, la energía cinética máxima $K_{m\acute{a}x}$, es igual a la energía absorbida del fotón, $E = hf$, menos la mínima energía necesaria para escaparse, ϕ . Por lo tanto queda:

$$K_{m\acute{a}x} = hf - \phi \quad \text{que se conoce como ecuación de Einstein del}$$

efecto fotoeléctrico.

Cómo sabemos que: $K_{m\acute{a}x} = eV_f$ podemos obtener la ecuación para

el potencial de frenado como:

$$K_{m\acute{a}x} = eV_f = hf - \phi \Rightarrow V_f = \frac{hf - \phi}{e} \Rightarrow$$

Como $hf_0 = \phi$ reemplazamos y nos queda

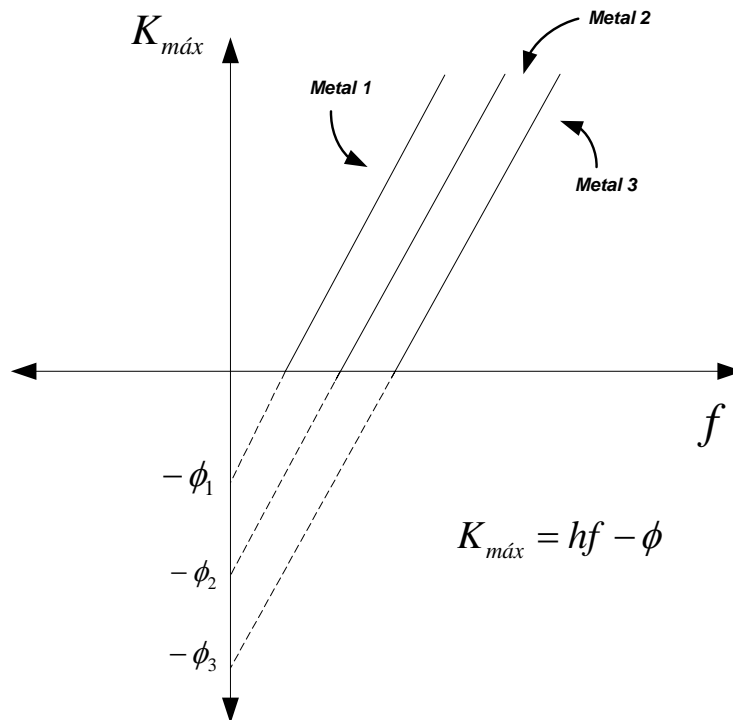
$$V_f = \frac{hf - hf_0}{e} \Rightarrow V_f = \frac{h}{e}(f - f_0)$$

Este resultado está de acuerdo con la dependencia lineal vista para el potencial de frenado en función de la frecuencia.

4. Ya que el electrón absorbe un fotón y adquiere su energía en un solo acto, no existe retardo apreciable entre la absorción de la luz y la emisión del electrón, por eso los electrones son emitidos inmediatamente.

El resultado de Einstein $K_{m\acute{a}x} = hf - \phi$, predice una relación lineal entre la energía cinética máxima de los electrones $K_{m\acute{a}x}$ y la frecuencia de la luz f .

La observación experimental comprueba este hecho, confirmando la teoría de Einstein



Vemos en la figura que la pendiente de cualquier curva es h , el valor donde se corta el eje de ordenadas es ϕ , que varía de un metal a otro, el corte de la abscisa es la frecuencia umbral f_0

$$hf_0 = \phi \Rightarrow f_0 = \frac{\phi}{h}$$

Esta frecuencia corresponde a una **longitud de onda umbral**

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{c}{\phi/h} = \frac{ch}{\phi}$$

Donde c es la velocidad de la luz. La luz con longitud

de onda mayor que λ_0 que incida sobre un material con una función de trabajo ϕ no produce emisión de fotoelectrones.

Cuando Einstein propuso su modelo en 1905, las características experimentales del efecto fotoeléctrico no estaban establecidas. La dependencia lineal del potencial de frenado con la frecuencia fue confirmada en 1916, por Millikan. Este trabajo ayudó a la aceptación general de la imagen de la luz como un flujo de fotones y proporcionó una medida de la combinación de dos constantes fundamentales, $\frac{h}{e}$. Einstein recibió el premio Nobel en 1921 por su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico.

El fotón, la cuasipartícula cuántica que constituye la radiación electromagnética, transporta cantidad de movimiento y energía. Ya que el fotón viaja a la velocidad de la luz, su masa en reposo es cero. De las consideraciones que veremos más adelante se puede afirmar que la energía de un fotón vendrá dada por:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

como la masa del fotón es $m = 0$ nos queda

$E = pc$, podemos encontrar el módulo de la cantidad de movimiento de un fotón que estará dado por:

$$p = \frac{E}{c} \quad \text{como} \quad E = hf \Rightarrow p = \frac{hf}{c} \quad \text{siendo} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad \text{nos queda la}$$

cantidad de movimiento de un fotón como:

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

La explicación del efecto fotoeléctrico con un modelo cuántico, junto con el modelo cuántico de Planck para la radiación del cuerpo negro establecieron una base sólida para el desarrollo de la física cuántica, un tercer experimento, el efecto Compton, proporciona mayor evidencia de la naturaleza cuántica de la luz. El efecto Compton se refiere al hecho que la teoría clásica no puede explicar la dispersión de los rayos X por los electrones. En 1919, Einstein enunció la hipótesis de que un fotón de energía E tiene un momento lineal. Más tarde en 1923 Arthur Compton llevó la idea de Einstein del momento del fotón aún más lejos. Antes de 1922, Compton y su equipo de trabajo habían acumulado pruebas de que la teoría ondulatoria de la luz no podía explicar la dispersión de rayos X por los electrones. De acuerdo con la teoría clásica, las ondas electromagnéticas incidentes de frecuencia f_0 deberían producir dos efectos:

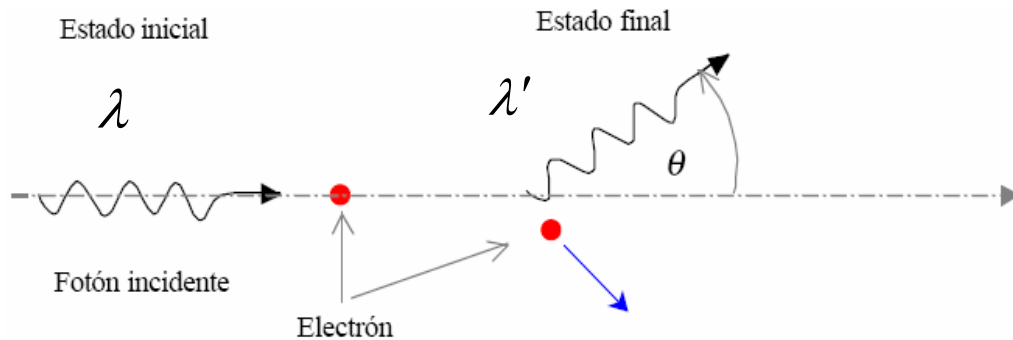
1. Los electrones deberían acelerarse en la dirección de propagación de los rayos X por la presión de radiación.
2. El campo eléctrico oscilante debería hacer que los electrones oscilasen con la frecuencia aparente de la radiación detectada por el electrón en el movimiento.

Cuando la fuente de ondas y el observador están en movimiento relativo con respecto al medio material en el cual la onda se propaga, la frecuencia de las ondas observadas es diferente de la frecuencia de las ondas emitidas por la fuente. Este fenómeno recibe el nombre de efecto Doppler en honor a su descubridor.

Efecto “Compton”

En el año 1923, el físico norteamericano A. H. Compton (1892- 1962; foto) descubrió que un haz de rayos X de $0,71\text{Å}$ de longitud de onda era dispersado al cruzar una región en donde existían electrones. Este descubrimiento desencadenó nuevos conocimientos sobre los fotones,

Los rayos X, son radiación electromagnética cuya frecuencia es más elevada que la de la radiación visible. La experiencia de Compton sólo se explica suponiendo que los fotones pueden “chocar” con los electrones, siendo dispersados por éstos. La particularidad de este fenómeno está en que la frecuencia de la radiación dispersada es menor que la de la radiación incidente.



Si llamamos λ a la longitud de onda incidente y λ' la de la dispersada, Compton encontró experimentalmente que la diferencia $\lambda' - \lambda$ sólo depende del ángulo de dispersión θ formado por la dirección de la radiación incidente y la dirección en la que se observan las ondas dispersadas según vemos en la figura, según la expresión

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$
 donde λ_c es una constante calculada experimentalmente, llamada *longitud de onda de Compton* electrones y tiene un valor de $\lambda_c = 2,42 * 10^{-12} m$

Por las características de las partículas que intervienen, está claro que el estudio de esta colisión ha de hacerse utilizando la mecánica relativista. A partir de esto, la dispersión de una onda electromagnética por un electrón se puede interpretar como el "choque" entre la onda y el electrón en donde se conservaran tanto la energía como el momento lineal.

Se puede explicar la dispersión de la radiación electromagnética por un electrón libre si se identifica el proceso con un choque entre un electrón libre y una partícula de masa en reposo nula, el fotón, que posee una energía $E = hf$ y un momento lineal dado por $P = E/c = h/\lambda$ antes de la colisión y una energía $E' = hf'$ y un momento $P' = h/\lambda'$ después de la colisión.

Como se ha visto, las explicaciones del efecto Compton han requerido, las siguientes suposiciones:

1. La radiación electromagnética hace las veces de una partícula de masa en reposo nula, que denominamos fotón.
2. La dispersión de la radiación electromagnética por un electrón libre se puede considerar como un choque entre el electrón y un fotón.

3. La energía y el momento lineal del fotón están relacionados con la frecuencia y la longitud de onda de la radiación electromagnética o sea asociamos al fotón a una onda electromagnética.

Dualidad onda-partícula

La coincidencia entre las mediciones experimentales y las predicciones teóricas basadas en el modelo cuántico de fenómenos como el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton proporcionan pruebas de que, cuando la luz y la materia interactúan, la luz se comporta como si estuviera

compuesta de partículas de energía hf y momento lineal $\frac{h}{\lambda}$.

Una pregunta obvia al llegar a este punto es, "¿Cómo puede considerarse que la luz está compuesta de fotones cuando muestra propiedades ondulatorias?".

Describimos a la luz en términos de fotones que tienen energía y momento: esto es el modelo corpuscular.

Sin embargo, reconocemos que la luz y otras ondas electromagnéticas exhiben efectos de interferencia y difracción, que son consistentes únicamente con el modelo ondulatorio,

¿Cuál de los dos modelos es correcto? ¿Es la luz una onda o un corpúsculo?

La respuesta depende del fenómeno que se observe. Algunos experimentos pueden explicarse mejor, o únicamente, con el modelo de fotones, mientras que otros se describen mejor, o únicamente, con el modelo ondulatorio.

El resultado final es que debemos aceptar ambos modelos y admitir que la verdadera naturaleza de la luz no es descriptible en términos de una imagen clásica única.

Por tanto, la luz tiene una naturaleza dual: muestra características de onda y de corpúsculo.

Debemos entender, sin embargo, que el mismo haz de luz que arranca electrones de un metal puede además ser difractado por una rejilla. En otras palabras, el modelo ondulatorio y el corpuscular se complementan.

El éxito del modelo corpuscular al explicar el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton plantea muchas otras preguntas. Si el fotón es una partícula:

¿qué significa hablar de su "frecuencia" o de su "longitud de onda", y cuál de ellas determina su energía y su momento?

¿Es la luz, de alguna manera, una onda y un corpúsculo simultáneamente?

Aunque los fotones no tienen energía en reposo, ¿puede alguna expresión sencilla describir la masa efectiva de un fotón "en movimiento"?

Si un fotón "en movimiento" tiene masa, ¿experimenta atracción gravitacional?

¿Cuál es el tamaño físico de un fotón, y cómo absorben o dispersan un fotón los electrones? Algunas de estas preguntas pueden responderse, pero otras exigen una visión de los procesos atómicos que es demasiado gráfica y literal.

Además, muchas de estas preguntas surgen de analogías clásicas como las bolas de billar que chocan o las olas del mar rompiendo en la costa. La mecánica cuántica considera que la luz tiene una naturaleza más fluida y flexible, tratando al modelo corpuscular y al ondulatorio como necesario y complementario.

Ninguno de los dos modelos pueden utilizarse aisladamente para describir todas las propiedades de la luz. Una comprensión completa del comportamiento observado de la luz sólo puede obtenerse si se utilizan ambos modelos de manera complementaria. Antes de describir esta combinación en más detalle, trasladaremos nuestra atención de las ondas electromagnéticas al comportamiento de las entidades que hasta ahora hemos llamado "partículas".

Propiedades Ondulatorias de las partículas

Cuando se expone la naturaleza dual de la luz, el concepto les resulta muy difícil de aceptar.

Reconsideremos ahora nuestra concepción de la materia. Nos sentimos muy cómodos al aceptar un modelo corpuscular de la materia, porque hemos estudiado conceptos como la conservación de la energía o del momento de las partículas, así como de los sólidos.

Por tanto, puede resultar aún más difícil aceptar que la materia también tiene una naturaleza dual, es decir que la materia pueda tener comportamiento ondulatorio

En 1923, en su tesis doctoral, Louis Víctor de Broglie postuló que puesto que los fotones tienen características de onda y de partícula, tal vez todas las formas de materia tienen características ondulatorias y corpusculares. Esta idea era revolucionaria, pues no poseía confirmación experimental en ese momento. De acuerdo con De Broglie, un electrón en movimiento muestra características de onda y de partícula.

Luis de Broglie se licenció en historia en la Universidad de París. Sin embargo, mantenía con su hermano (que era físico) profundas discusiones sobre problemas científicos. Esto le hizo plantearse adentrarse en la física, y en su tesis doctoral plantea ya que al igual que los fotones presentan un comportamiento dual, como ondas y como partículas, la materia debía presentar también el mismo comportamiento. De Broglie estableció la hipótesis de que las partículas materiales tienen asociadas una onda; y no sólo eso, sino que como pura especulación asignó una longitud de onda a estas ondas hipotéticas. Supuso que la longitud de onda de las ondas

materiales debería venir dada por la misma relación aplicable a la luz, es decir, $\lambda = \frac{h}{p}$, que relaciona la longitud de onda de una onda luminosa con el momento de los fotones asociados a ella.

De Broglie explicó la razón de esa afirmación en su discurso de recepción del premio Nobel de 1929:

“Por un lado, no puede considerarse como satisfactoria la teoría cuántica de la luz, puesto que define la energía de un corpúsculo de luz como $E = hf$ que contiene la frecuencia f

Una teoría puramente corpuscular no contiene nada que nos permita definir una frecuencia, simplemente por esa razón, en el caso de la luz debemos introducir las ideas simultáneas de corpúsculo y de periodicidad.

Por otro lado, la determinación del movimiento estable de los electrones en el átomo introduce números enteros, y hasta ahora los únicos fenómenos que involucraban números enteros en física eran los de interferencia y modos normales de vibración. Este hecho me sugirió la idea de que los electrones podían considerarse no sólo como corpúsculos, sino que debería asignarse a ellos una periodicidad”.

Hemos visto que la relación entre energía y momento de un fotón es $p = \frac{E}{c}$.

Sabemos también, que la energía de un fotón es

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Por tanto, el momento de un fotón puede expresarse como

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hc}{c\lambda} = \frac{h}{\lambda}$$

A partir de esta ecuación, vemos que la longitud de onda del fotón puede especificarse a partir de su momento lineal:

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

De Broglie sugirió que las partículas materiales de momento lineal P también deberían tener propiedades ondulatorias y una longitud de onda correspondiente.

Puesto que el valor del momento lineal de una partícula no relativista de masa m y velocidad v es $p = mv$

La longitud de onda de De Broglie de la partícula es:

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

Además, en analogía con los fotones, De Broglie propuso que las partículas obedecen la relación de Einstein, $E = hf$, de modo que la frecuencia de una partícula es:

$$E = hf \Rightarrow f = \frac{E}{h}$$

La naturaleza dual de la materia es evidente en estas dos últimas ecuaciones, puesto que ambas contienen magnitudes corpusculares p y E , y magnitudes ondulatorias λ y f .

El hecho de que estas relaciones se hayan establecido experimentalmente para los fotones hace a la hipótesis de De Broglie mucho más fácil de aceptar.

La naturaleza ondulatoria de la materia se pone de manifiesto cuando la longitud de onda de las partículas es un poco mayor que las dimensiones de los obstáculos con los que tropieza, ya que entonces las ondas asociadas a esas partículas se difractan en ellos con facilidad. Los electrones revelan su naturaleza ondulatoria si su longitud de onda es del orden de las dimensiones atómicas y los neutrones cuando es del orden del tamaño del núcleo.

Podemos comprender, por tanto, por qué tardó tanto tiempo en descubrirse la naturaleza ondulatoria de la materia. Se precisaban las masas más pequeñas que existen, como las partículas atómicas, para que su longitud de onda asociada sea lo suficiente grande para que se puedan observar en la materia fenómenos derivados de su naturaleza ondulatoria.

Principio de incertidumbre de Heisenberg

Los resultados obtenidos por De Broglie dieron un rotundo vuelco a la concepción física de la realidad. En 1926, el físico austriaco Erwin Schrödinger desarrolló una teoría matemática de las propiedades atómicas, en la que la cuantización que corresponde a los niveles de energía está relacionada con los valores permitidos que corresponden a las longitudes de onda del electrón. Esta teoría, conocida como “Mecánica Ondulatoria”, era en realidad, una generalización de los postulados de N. Bohr. Schrödinger establecía en su teoría una serie de postulados, de los que era posible deducir una ecuación que explicaba el comportamiento de los electrones en cualquier átomo o molécula. Sin embargo, esa ecuación es extremadamente compleja de resolver, y sólo se ha hecho con cierto éxito en el caso de átomos con pocos electrones.

La principal dificultad, tanto de esta teoría como de los postulados de De Broglie, estriba precisamente en determinar qué es lo que vibra. No se trata del electrón, concebido como una partícula puntual, sino que hay que pensar en que el electrón se dispersa por la órbita, moviéndose simultáneamente con velocidades muy diferentes.

Compatibilizar esto con un electrón puntual, cuya carga y masa es posible medir experimentalmente, resulta verdaderamente complicado. Fue Werner Heisenberg quien desarrolló una nueva teoría, conocida como “Mecánica de Matrices”, en la que ofrecía una serie de reglas para

calcular las frecuencias y las intensidades de las líneas espectrales en las que sólo utilizaba relaciones entre magnitudes observables. Esa teoría era capaz de ofrecer los mismos resultados que la mecánica de Schrödinger. Sin embargo, pronto se vio que ambas teorías eran matemáticamente equivalentes. Actualmente, se consideran como dos formas alternativas de una única teoría: “La Mecánica Cuántica”.

Un modo de caracterizar las consecuencias que la mecánica cuántica introduce en la física es el denominado “*principio de incertidumbre de Heisemberg*”. “En el año 1927, Heisemberg postuló que ciertas propiedades de las partículas no pueden ser medidas simultáneamente de forma exacta. Cuanto mayor sea la precisión en la medida de una de esas magnitudes, con menor precisión se medirá la otra, y viceversa.

De hecho, es imposible medir con precisión simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento de una partícula, ya que el producto de sus imprecisiones es siempre mayor que una cantidad constante, función de la constante de Planck:

$$\delta x * \delta p \geq \frac{h}{2\pi}$$

Esta indeterminación es inherente a la propia realidad, por lo que en el mundo macroscópico también existe. Sin embargo, el pequeño valor de la constante de Planck explica que sólo deba ser tenido en cuenta en el mundo microscópico.

A veces, se ha interpretado erróneamente que el principio de incertidumbre es “una limitación experimental”, es decir, que debido a la parquedad de los instrumentos de medida, es imposible obtener datos con “exactitud”, libre de incertidumbre. Nada de eso: la indeterminación es algo propio, inherente, a la propia Naturaleza. Esto ha tenido profundas repercusiones en el terreno de la filosofía, y de hecho, hoy en día, “la filosofía se hace en los laboratorios y despachos de los físicos teóricos”.

El principio de indeterminación también se aplica a la energía y al tiempo; es imposible determinar ambas magnitudes simultáneamente con precisión, debido a la restricción:

$$\delta E * \delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

Ello hace de la física una ciencia mucho menos determinista de lo que cabría esperar, habituados a las “precisiones” del mundo macroscópico. Podríamos decir, en principio, que no existiría el determinismo científico.

Sin embargo, tal como puntualiza Stephen Hawking, la mecánica cuántica es determinista en sí misma, y es posible que el error consista en que tal vez no existan posiciones y velocidades de partículas, sino sólo ondas. El problema es que intentamos ajustar las ondas a nuestras ideas preconcebidas de posiciones y velocidades. Y el no poder hacerlo en forma tajante es la causa de la aparente impredecibilidad

Por lo mismo, es la física una ciencia mucho más sugestiva y mucho más hermosa.