1 LA FÍSICA CUÁNTICA, TEORÍA DEL MUNDO ATÓMICO

IDEAS PRINCIPALES

- Radiación cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Espectros atómicos
- Hipótesis de Planck
- Explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico
- Trabajo de extracción
- Potencial de corte
- Átomo de Bohr
- Hipótesis de De Broglie: dualidad onda-corpúsculo
- Principio de incertidumbre
- El átomo mecanocuántico

Al explicar la interacción de la radiación con la materia así como las propiedades de ésta al nivel atómico se comprueba que no son válidas las teorías físicas establecidas en el siglo XIX. Es necesaria una nueva teoría, la física cuántica, que parte del carácter discontinuo de la radiación y explica el comportamiento dual de la materia mediante nuevas hipótesis diferentes a las utilizadas en el nivel macroscópico.

Todo esto ocurre de manera simultánea al desarrollo del conocimiento de la estructura del átomo, el conocimiento de la radiactividad, el descubrimiento de las partículas elementales, etc. La fotografía de esta página muestra a un ramillete de los más importantes físicos de comienzos del siglo XX, reunidos en una Conferencia patrocinada por la casa Solvay, y se trata de un documento histórico pues se llevó a cabo en el año 1927, cuando ya se habían puesto las bases de la nueva física.

0 TEORÍAS SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ

Las hipótesis sobre la naturaleza de la luz son muy antiguas, aunque las primeras tenían un carácter meramente especulativo. Con un carácter más científico, como intento de explicar los fenómenos observados, arrancan del siglo XVII, y casi desde ese momento han coexistido dos modelos fundamentales para explicar el comportamiento de la luz: el modelo corpuscular y el modelo ondulatorio.

a) **El modelo corpuscular**, defendido por Newton y sus seguidores, considera la luz formada por pequeñísimos corpúsculos emitidos por los cuerpos luminosos; estos corpúsculos son emitidos por las «fuentes de luz» y, al reflejarse sobre los objetos e incidir sobre nuestros ojos permite que los veamos.

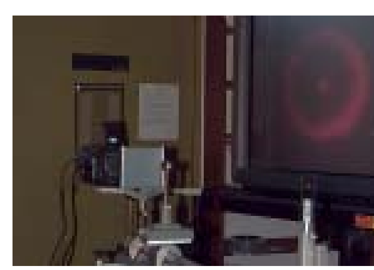
Este modelo explica fácilmente la propagación rectilínea de la luz, y fenómenos como la formación de sombras y la reflexión.

Para explicar la refracción Newton tenía que suponer que la velocidad de la luz era mayor en los medios de mayor densidad lo cual parecía un poco extraño. Además, los fenómenos de difracción e interferencias, de los cuales tenía conocimiento el propio Newton, eran muy difíciles de explicar con un modelo corpuscular.

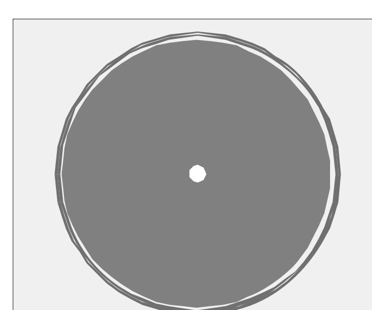
b) **El modelo ondulatorio** consideraba a la luz como una onda longitudinal similar a la del sonido. Era defendido por Huygens y por Hooke y también explicaba la propagación, la reflexión y la refracción de la luz, aunque inicialmente era un modelo poco desarrollado desde el punto de vista matemático. Por otro lado, era más complicado explicar las sombras y la propagación rectilínea mediante las ondas que con el modelo corpuscular.

Para explicar la refracción el modelo ondulatorio tenía que suponer que la velocidad de la onda debía ser menor en el medio más denso. Sin embargo, el prestigio que tenía Newton, la influencia de la mecánica que había alcanzado logros muy importantes y la escasa habilidad de Huygens para el desarrollo matemático hicieron que la balanza se inclinara durante cerca de un siglo, desde 1700 hasta 1800, del lado del modelo corpuscular.

Alrededor de 1800, se desarrolló el modelo ondulatorio por parte de Thomas Young, físico inglés, que basándose en los fenómenos de interferencia consiguió establecer las longitudes de onda de luces de diferente color, y del francés Augustin Fresnel que consiguió explicar fenómenos de interferencia como los famosos anillos de Newton. Hubo un cambio sustancial y es que la luz pasó a considerarse una onda de tipo transversal, en lugar de longitudinal como lo había sido al comienzo del modelo ondulatorio.



Cuando Fresnel propuso la teoría ondulatoria para explicar los fenómenos de difracción e interferencia no fue inmediatamente aceptada por todos. Por ejemplo, Poisson un científico relevante de la época que era seguidor de la teoría corpuscular, la ridiculizó diciendo que si fuese correcta debería aparecer una mancha brillante en el centro de la sombra de un objeto circular, lo cual parecía absurdo.



La figura representa la sombra de una moneda circular cuando es iluminada por un haz de luz monocromática. Lo relevante de la misma es el punto brillante central, que según el modelo corpuscular no debería aparecer nunca. Fíjate que está justo en el centro de la sombra y no tiene sentido que aparezca ahí una mancha brillante, suponiendo que la luz fuesen corpúsculos emitidos por el foco luminoso.

Realizada la experiencia y comprobado el hecho de que aparecía la mancha brillante, la teoría ondulatoria ganó una importantísima batalla en su controversia con la teoría corpuscular.

El modelo ondulatorio fue ganando adeptos y su aceptación culminó cuando en el año 1849 Armand H. L. Fizeau midió la velocidad de la luz en diversos medios, encontrando que era menor en los medios más densos, tal como había sido predicho por el modelo ondulatorio y en contra de lo que se suponía en el modelo corpuscular.

c) **La teoría electromagnética de la luz**. En realidad puede ser incluida dentro del modelo ondulatorio, pues como hemos visto en el tema anterior, considera a la luz como la propagación de ondas electromagnéticas de frecuencias comprendidas entre unos determinados límites. La teoría de Maxwell tuvo, y tiene aún, una importancia capital, pues es capaz de explicar con un mismo aparato formal fenómenos muy diversos. Además, como sabemos, colocó los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo de las ondas hertzianas, es las que están basados numerosos avances de tipo técnico, lo que ha llevado a decir a algunos historiadores que la teoría electromagnética de Maxwell es la teoría que ha tenido un mayor impacto en la forma de vida de la humanidad.

Las principales características de la teoría electromagnética de la luz son las siguientes:

* La luz y las demás O.E.M. consisten en la propagación de campos eléctricos y magnéticos variables, perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de la propagación. Los valores máximos de esos campos eléctricos y magnéticos están relacionados:

$$B_0 = \frac{E_0}{c}$$

* La luz y las demás O.E.M. poseen y transportan cantidad de movimiento y energía. La cantidad de movimiento y la energía están relacionadas:

$$p = \frac{E}{c}$$

* Las O.E.M. son emitidas por partículas con carga eléctrica que tengan movimiento acelerado. La amplitud del campo eléctrico y magnético variable depende de la aceleración de la partícula con carga eléctrica. Esa aceleración puede tener, en principio, cualquier valor. Eso significa que E_o y B_o pueden tener, en principio, cualquier valor.

* La O.E.M. emitida tiene la misma frecuencia que la de oscilación de la partícula cargada que la emite.

* En general, la luz emitida por un sólido está compuesta por muchas frecuencias diferentes, pues las partículas cargadas que la emiten vibran con frecuencias diferentes.

* La intensidad media de una O.E.M. depende del cuadrado de la amplitud, es decir del cuadrado del valor máximo de los campos eléctricos y magnéticos que se propagan.

$$I = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c}$$

* La energía asociada a una onda depende además de la superficie y del tiempo.

$$\text{Energía} = \text{Intensidad} \cdot \text{Superficie} \cdot \text{tiempo}$$

Una vez establecida la teoría electromagnética parecía que se había llegado al final de la historia, ¡vana ilusión! Había dos fenómenos que la teoría electromagnética no podía explicar: **la radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico**. La teoría electromagnética no podía explicar las características de la radiación emitida por un cuerpo cuando se aumenta su temperatura, y tampoco podía explicar las características de los electrones emitidos por un metal cuando sobre el metal inciden luces de diferentes longitudes de onda y de diferentes intensidades. A continuación estudiaremos ambos fenómenos y las consecuencias sobre las teorías relacionadas con la naturaleza de la luz y, en general, sobre la concepción de la naturaleza de la materia y radiación.

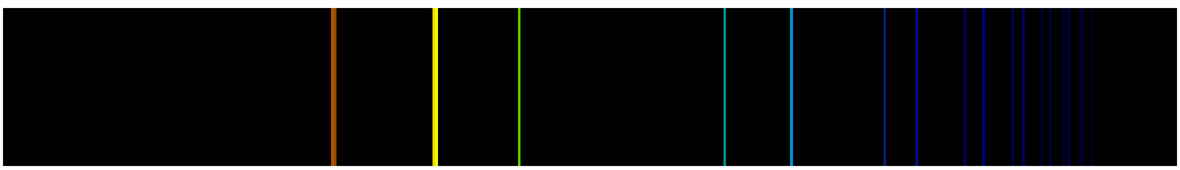
1 ESPECTROS ATÓMICOS

Si excitamos a los átomos y moléculas emiten radiación. La radiación emitida por cada sustancia, cuando se encuentra en estado gaseoso, está compuesta de frecuencias, o longitudes de onda, bien definidas que son características de cada sustancia.

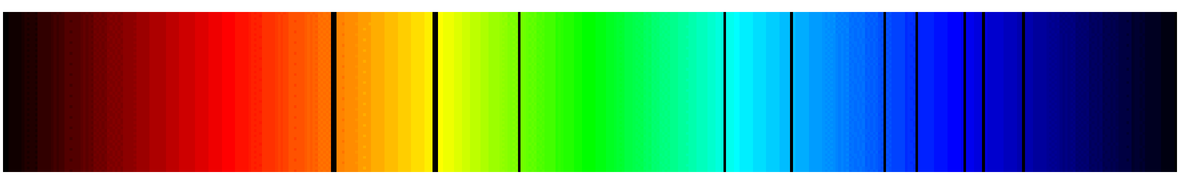
Al conjunto de frecuencias característico de cada sustancia se le llama **espectro de emisión** de la sustancia.

Para poder distinguir las diferentes radiaciones que constituyen el espectro de una sustancia gaseosa se utiliza un espectroscopio. Al pasar la luz emitida por los átomos a través de un prisma de cuarzo, o de una red de difracción, se produce la separación de la radiación en función de su longitud de onda.

El gráfico siguiente corresponde con el **espectro de emisión del sodio**.



El espectro de absorción del mismo elemento se obtiene cuando iluminamos el elemento en cuestión con luz blanca y analizamos la luz que deja pasar. Se observa una serie de rayas negras, que corresponden exactamente a las longitudes de onda en la que antes se habían observados las líneas de emisión. Así el **espectro de absorción del sodio** sería semejante al gráfico siguiente:



A mediados del siglo XIX ya se habían medido con bastante precisión las longitudes de onda que correspondían a cada línea. En 1885, J.J. Balmer encontró una relación entre las longitudes de onda de las cuatros rayas que tenía el espectro del hidrógeno en la región visible del espectro. La relación era:

$$\lambda = 3{,}65 \cdot 10^{-7} \frac{n^2}{n^2 - 4} \text{ metros} \quad (n = 3, 4, 5, 6)$$

En los años siguientes otros científicos, como Lymann, Paschen, Brackett o Pfund encontraron otras expresiones* que permitían relacionar las longitudes de onda de las líneas del espectro de hidrógeno que correspondían a otras zonas del espectro, desde el infrarrojo al ultravioleta.

* Una expresión más general que incluye las obtenidas por los diferentes científicos es:

$$\frac{1}{\lambda} = 1096{,}77 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ m}^{-1}$$

donde *m* y *n* son números enteros: *m* puede valer 1, 2, 3, 4 o 5 mientras que *n* > *m*.

Las observaciones de los espectros se hicieron en la segunda mitad del siglo XIX, cuando todavía no se tenía ninguna idea de la estructura interna de los átomos. En esa época, no se podía dar ninguna explicación a la estructura discontinua de los espectros atómicos de las sustancias en estado gaseoso. Es más, con la teoría electromagnética de Maxwell no se podía dar explicación a esos espectros.

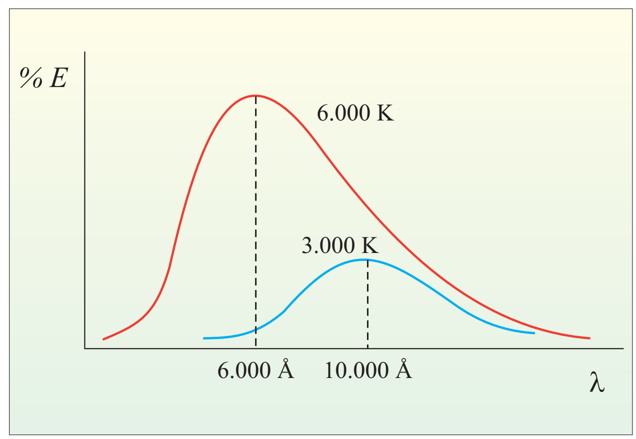
Pospondremos la explicación de los espectros hasta que estudiemos las hipótesis y conceptos que hicieron posible que se propusiera esa explicación.

2 LA RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO

De forma experimental sabemos que los cuerpos emiten más energía por radiación cuanto mayor es la temperatura a la que se encuentran: una estufa eléctrica no es más que un trozo de metal a una temperatura elevada. Además, la energía radiada depende también de la naturaleza de la superficie emisora: una superficie clara y brillante emite menos energía que una superficie oscura y mate. Además, el poder absorbente de una superficie, que se define como la fracción de energía incidente que es absorbida, es proporcional al poder emisor, es decir aquellas superficies que son buenas emisoras de radiación son también buenas receptoras.

La importancia del color de la superficie es algo que todos tenemos en cuenta cuando utilizamos ropas oscuras en invierno, que captan bien la energía que nos llega, y ropas claras en verano, que absorben una fracción pequeña de la energía radiante que recibimos.

Por **cuerpo negro** se entiende aquel que tiene el máximo poder emisor y el máximo poder absorbente. La radiación emitida por un cuerpo negro (en general por cualquier cuerpo), está formada por radiaciones de diferentes longitudes de onda. Si se analiza la energía emitida por un cuerpo negro a diferentes temperaturas se obtienen gráficas como la de la figura. En ordenadas se representa la energía emitida por segundo por un metro cuadrado de cuerpo negro que corresponde a la longitud de onda representada en la abscisa, llamaremos a esa magnitud intensidad espectral.



Gráfica de la radiación emitida por un cuerpo negro a dos temperaturas diferentes.

Se puede observar que:

a) La intensidad espectral es mayor cuando aumenta la temperatura a la que está emitiendo el cuerpo negro.

b) La intensidad espectral presenta un máximo a cada temperatura.

c) La longitud de onda a la que corresponde la máxima intensidad espectral es menor cuanto mayor es la temperatura a la que está emitiendo el cuerpo negro. Hay una relación matemática, conocida como ley de desplazamiento de Wien, que relaciona la longitud de onda a la que corresponde el mayor porcentaje de radiación emitida y la temperatura a la que se encuentra el cuerpo:

$$\lambda_{max}\, T = 0{,}29 \text{ cm K}$$

A.1.- ¿Cómo podemos medir la temperatura de una estrella?

a) Si la longitud de onda de la radiación más intensa de la estrella Vega es de 2 071 Å calcula la temperatura aproximada de dicha estrella.

b) Si el Sol tiene una temperatura aproximada de 6 000 K, ¿cuál será la longitud de onda de la radiación emitida en mayor proporción?

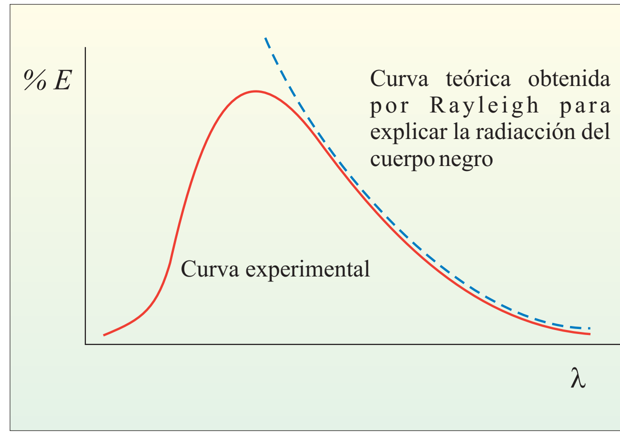
a) $T \approx 14\,000$ K; b) $\lambda = 4\,833$ Å

La catástrofe ultravioleta

Aplicando la teoría de la radiación electromagnética de Maxwel no fue posible obtener una ecuación que representase adecuadamente las curvas de la radiación del cuerpo negro, obtenidas de forma experimental.

Rayleigh obtuvo una expresión matemática que era válida para la zona de la curva que se corresponde con las longitudes de ondas más largas, pero que para las longitudes de onda pequeñas, la que corresponde a la zona de las radiaciones ultravioletas, no se ajustaba para nada con la curva experimental.

En su época, este problema teórico llegó a preocupar bastante a la comunidad científica internacional, de tal forma que un eminente científico llegó a llamarlo «la catástrofe ultravioleta», y de alguna forma suponía un pequeño fracaso de la teoría electromagnética clásica de Maxwell, aunque en los últimos años del s. XIX lo que se pensaba era que los que habían intentado resolver el problema aún no «habían tenido éxito» en su trabajo.



Hipótesis de Planck

Estudiando el mismo problema, Max Planck obtuvo, en 1900, una ecuación que sí representaba adecuadamente los datos obtenidos de forma experimental. En ella aparece una constante ***h*** que no existía en la teoría electromagnética clásica. Para llegar a esa ecuación Planck tuvo que introducir la siguiente hipótesis que no tenía justificación a partir de la teoría clásica:

Ecuación de Planck

$$E(\lambda,T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5\left(e^{hc/\lambda kT}-1\right)}$$

> El contenido energético de una carga en movimiento armónico simple, de frecuencia *f*, sólo puede ser múltiplo de la magnitud *h f*.

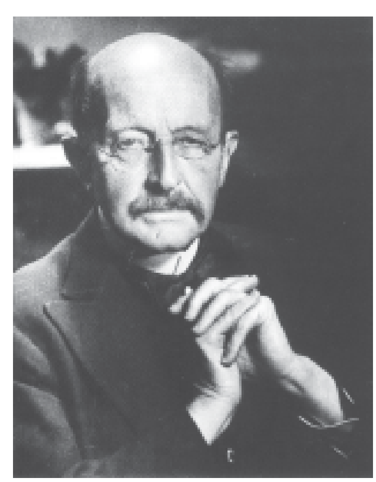
h es la constante de Planck cuyo valor es $6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J s

Como la energía emitida en la radiación electromagnética corresponde a las vibraciones de las cargas en los átomos, debemos pensar que la energía de la radiación electromagnética también será múltipo de la magnitud *h f*. Decimos que la energía emitida por radiación está «cuantizada». Al valor mínimo posible de energía emitida, *h f*, se le llama **cuanto de energía***. Cualquier energía emitida será múltiplo entero de esa cantidad:

$$Energía = n\,h\,f$$

* Los cuantos de energía también reciben el nombre de **fotones**, aunque ese nombre no fue propuesto hasta el año 1926 por G.N. Lewis

Debemos señalar que la hipótesis de Planck tuvo al principio un carácter matemático, sin un significado físico muy preciso. Solamente después de que Einstein lo aplicara para la explicación del efecto fotoeléctrico y que Bohr lo tuviera en cuenta cuando hablaba de la cuantización de las órbitas electrónicas, fue cuando se le concedió una importancia como teoría física. De hecho, a Max Planck no se le concedió el premio Nobel hasta el año 1918, cuando se comprobó la importancia de su hipótesis de los cuantos en la explicación de diversos fenómenos. La hipótesis de Planck suponía una ruptura con el electromagnetismo clásico al suponer que la energía de una partícula cargada con MAS no podía tomar cualquier valor sino que sólo podía ser múltiplo de unos determinados valores. En la teoría electromagnética clásica, la energía de una partícula cargada podía tomar cualquier valor dentro de un intervalo continuo de valores.



Max Planck

Dado el valor tan pequeño que tienen los distintos cuantos de energía, conviene utilizar una unidad de acuerdo con dicho valor. Esa unidad es el electronvoltio (eV), que es la energía que tiene una carga igual a la del electrón cuando pasa de un punto a otro entre los que la *ddp* es de 1 voltio, 1 eV = $1{,}6\ 10^{-19}$ J.

EJEMPLO

Calcula el cuanto de energía de cada uno de los siguientes tipos de radiación:

a) Una onda de radio cuya longitud de onda es de 100 m.

b) Una radiación infrarroja cuya longitud de onda es de 0,01 mm.

c) Luz visible de color naranja cuya longitud de onda es 6000 Å.

d) Radiación ultravioleta cuya longitud de onda es 500 Å.

e) Rayos X cuya longitud de onda es 1 Å.

El cuanto de energía depende de su frecuencia: $E = h\,f$. La frecuencia está relacionada con la velocidad y con la longitud de onda. Como todas las radiaciones tienen la misma velocidad, que en el vacío es 300 000 km/s, la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda.

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad f = \frac{c}{\lambda}$$

Para calcular el cuanto de energía:

$$E = h\frac{c}{\lambda} = \frac{6{,}63\cdot 10^{-34}\cdot 3\cdot 10^{8}}{\lambda} = \frac{19{,}89\cdot 10^{-26}}{\lambda}\ \text{J}$$

Para expresar la energía en electronvoltios se debe tener en cuenta que 1 eV = $1{,}6\cdot 10^{-19}$ J, lo que lleva a:

$$E = \frac{19{,}89\cdot 10^{-26}}{\lambda}\text{J}\ \frac{1\,\text{eV}}{1{,}6\cdot 10^{-19}\,\text{J}} = \frac{12{,}4\cdot 10^{-7}}{\lambda}\text{eV}$$

a) onda radio	$\lambda = 100$ m	$E = 1{,}99\cdot 10^{-27}$ J	$E = 1{,}2\cdot 10^{-8}$ eV
b) infrarrojo	$\lambda = 10^{-5}$ m	$E = 1{,}99\cdot 10^{-20}$ J	$E = 0{,}12$ eV
c) luz naranja	$\lambda = 6\cdot 10^{-7}$ m	$E = 3{,}32\cdot 10^{-19}$ J	$E = 2{,}1$ eV
d) ultravioleta	$\lambda = 5\cdot 10^{-8}$ m	$E = 3{,}98\cdot 10^{-18}$ J	$E = 25$ eV
e) rayos X	$\lambda = 10^{-10}$ m	$E = 1{,}99\cdot 10^{-15}$ J	$E = 12\,431$ eV

A.2.- Un oscilador emite una radiación, en el visible, de 6 000 Å. Otro emite en el ultravioleta con una longitud de onda de 3 000 Å. Calcula el cuanto de energía para ambas radiaciones.

$E_1 = 3{,}32\cdot 10^{-19}$ J; $E_2 = 6{,}63\cdot 10^{-19}$ J

A.3.- Las longitudes de onda del espectro visible van de 4 000 a 7 200 Å. ¿Entre qué valores varía la energía de los fotones del espectro visible?

de 1,73 eV a 3,11 eV

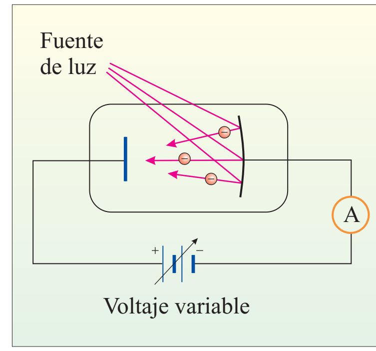
A.4.- Calcula cuántos fotones por segundo componen una radiación luminosa de 5500 Å de potencia $2\cdot 10^{-10}$ W emitida por un cuerpo negro.

$5{,}53\cdot 10^{8}$ fotones/segundo

3 EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por una lámina metálica, cuando sobre ésta incide la luz. Fue descubierto por Hertz en el año 1887 cuando estaba estudiando la producción y propagación de ondas electromagnéticas.

Un estudio experimental detallado lo realizó P. Lenard en el año 1902. Las experiencias consistieron en iluminar diferentes metales con luces de diferente intensidad y diferente frecuencia. Con ayuda de un amperímetro muy sensible se medía la intensidad de corriente que circulaba por un circuito como el de la figura adjunta. La fuente de voltaje variable la utilizaba para medir la energía cinética de los electrones emitidos.



Las observaciones más destacadas de Lenard fueron:

1. El que exista o no emisión de electrones no depende de la intensidad* luminosa pero sí depende de la frecuencia de la luz con la que se ilumina el metal.

2. La luz de una determinada frecuencia que es capaz de extraer electrones de un metal puede que no los extraiga de otro metal diferente.

3. En aquellos casos en los que existe emisión de electrones, el número de electrones emitidos por segundo depende de la intensidad de la luz que ilumina el metal.

4. La energía cinética máxima de los electrones emitidos por un metal depende de la frecuencia de la radiación incidente y del tipo de metal que emita los electrones. Esa energía cinética no depende de la intensidad de la luz que ilumina el metal.

* La intensidad luminosa es la energía luminosa que llega a cada unidad de superficie del electrodo cada segundo.

Para medir la energía cinética máxima de los electrones, Lenard hacía que el potencial del electrodo P fuese más negativo que el del electrodo M, hasta que ninguno de los electrones emitidos por M llegase a P. Al valor de la diferencia de potencial para el que la $I = 0$ se le llama potencial de corte.

Lenard se sorprendió bastante de los resultados experimentales que había obtenido. Incluso señaló que para él era imposible explicar el fenómeno fotoeléctrico utilizando para ello la teoría electromagnética de Maxwell.

A.5.- En la teoría electromagnética una mayor intensidad luminosa significa más energía por unidad de tiempo y de superficie, lo que supone un valor mayor del campo eléctrico y magnético. Según esta teoría:

a) ¿Debería afectar la intensidad luminosa a la emisión o no de electrones en el efecto fotoeléctrico? Explica por qué.

b) ¿Debería afectar la intensidad luminosa al potencial de corte, o lo que es lo mismo a la energía cinética de los electrones emitidos? Explica por qué.

c) ¿Debería afectar la intensidad luminosa al tiempo que tardasen en emitirse los electrones? Explica por qué.

d) ¿Cómo se explicaría que una clase de luz pudiese «arrancar» electrones de un tipo de metal y no de otro?

Según hemos visto en la actividad anterior, los datos experimentales no podían ser explicados con la teoría electromagnética. La solución al problema la proporcionó Einstein en 1905, utilizando la hipótesis cuántica de Planck. Einstein no consideró como un artificio matemático la hipótesis de Planck sino que supuso que la energía está realmente cuantizada, que se emite en pequeños paquetes o corpúsculos, llamados **cuantos**, cuyo valor depende de la frecuencia de vibración, que se transmite formando esos pequeños cuantos y que, cuando interacciona de nuevo con la materia, se comporta como si fueran pequeños paquetes de energía siendo absorbidos uno a uno.

Foto de Einstein joven

Admitiendo la naturaleza cuántica de la radiación, la interpretación de los datos experimentales referidos al efecto fotoeléctrico es relativamente fácil, si tenemos en cuenta las siguientes consideraciones:

a) Un electrón «absorbe» los fotones de uno en uno en un proceso casi instantáneo. El electrón reemite la energía que haya absorbido muy rápidamente, de forma que cuando vuelve a recibir un fotón ya ha emitido la energía que le hubiera dado el fotón anterior.

b) La energía necesaria para arrancar un electrón la llamamos función trabajo o potencial de extracción (W_0) y depende del metal que se ilumine.

c) Sólo habrá emisión de electrones cuando la energía del fotón incidente supere la energía (W_0) necesaria para arrancar al electrón del metal. Si hf es la energía del fotón y hf_0 es la energía mínima que tiene que tener para arrancar el electrón, se debe cumplir que $hf \geq hf_0$, es decir que $f \geq f_0$.

A la frecuencia f_0 se le llama frecuencia umbral.

d) Una parte de la energía del fotón incidente se emplea en arrancar al electrón y el resto se transforma en la energía cinética del electrón emitido.

$$\text{energía del fotón} = \text{trabajo de extracción} + \text{E}_{\text{cinética}} \text{ del electrón}$$

$$hf = hf_0 + E_c$$

En la tabla siguiente se recogen los principales hechos experimentales observados en el efecto fotoeléctrico y la explicación con la teoría cuántica.

Metal iluminado	Función trabajo (eV)	
Pt	5,65	UV
Au	5,1	UV
Be	4,98	UV
Cu	4,65	UV
Fe	4,5	UV
Zn	4,33	UV
Al	4,28	UV
Ag	4,26	UV
Mg	3,66	UV
Li	2,9	azul
Ca	2,87	azul
Na	2,75	azul
Ba	2,7	azul
K	2,3	verde
Rb	2,16	verde
Cs	2,14	amarillo

HECHOS EXPERIMENTALES OBSERVADOS	***INTERPRETACIÓN CON LA TEORÍA CUÁNTICA***
a) La intensidad luminosa NO influye en que exista o no emisión de electrones.	a) Una intensidad luminosa mayor supone que hay un mayor número de fotones, pero no que un fotón tenga mayor energía. Si la energía de un fotón no supera la energía necesaria para arrancar al electrón, no podremos arrancar al electrón.
b) La frecuencia de la luz SÍ influye en que exista o no emisión de electrones.	b) Mayor frecuencia significa que el fotón tiene mayor energía. Si su energía es mayor que la del trabajo de extracción habrá emisión de electrones, si su energía es menor no habrá emisión.
c) La luz de una determinada frecuencia que es capaz de extraer electrones de un metal puede que no los extraiga de otro metal diferente.	c) Es posible que el trabajo de extracción del otro metal sea mayor que la energía de los fotones que tienen esa frecuencia.
d) El número de electrones emitidos depende de la intensidad de la luz incidente.	d) Cada fotón extrae un solo electrón, y como la intensidad luminosa depende del número de fotones, habrá relación directa entre la intensidad luminosa y el número de electrones emitidos.
e) El potencial de corte no depende de la intensidad luminosa pero sí depende de la frecuencia de la radiación incidente y del tipo de metal que emita los electrones.	e) El potencial de corte depende de la energía cinética de los electrones emitidos. La energía cinética de cada electrón emitido depende de la frecuencia de la luz incidente y del trabajo de extracción, que es diferente para cada metal.

EJEMPLO

La función trabajo, (o potencial de extracción) del níquel es de 5,01 eV.

a) ¿Para cuáles de las radiaciones analizadas en el ejemplo de la página 194 mostrará efecto fotoeléctrico el níquel?

b) Si utilizamos UV de 1000 Å, ¿cuál será la energía cinética de los electrones extraídos?

c) ¿Cuál será la diferencia de potencial que habrá que aplicar a esos electrones para pararlos?

a) Dado que la función trabajo es la energía necesaria para extraer al electrón, sólo aquellas radiaciones compuestas por fotones que tengan una energía mayor que la función trabajo podrán extraer los electrones del níquel. De la radiaciones anteriores, sólo la radiación ultravioleta y los rayos X podrían extraer electrones del níquel.

b) Los fotones de la radiación UV de 1000 Å tienen una energía 12,43 eV (haz el cálculo oportuno). Cuando un fotón incide sobre un electrón, la energía del fotón se utiliza para extraer el electrón y, el resto, como energía cinética del electrón.

$$12{,}43 \text{ eV} = 5{,}01 + E_c; \quad E_c = 7{,}42 \text{ eV}$$

c) Los electrones serán detenidos al aplicarles un campo eléctrico que ejerza sobre los mismos una fuerza en sentido contrario al movimiento. Dicho de otra forma, se detendrán cuando se ejerza sobre ellos una diferencia de potencial suficiente para contrarrestar la energía cinética:

$$E_c = 7{,}42 \text{ eV} \leq q\,(V_A - V_B) = e\,(V_A - V_B)$$

$$(V_A - V_B) \geq 7{,}42 \text{ V}$$

A.6.- Una superficie metálica tiene una función trabajo de 2,0 eV. a) Calcula la frecuencia umbral. b) Calcula la energía cinética de los electrones emitidos cuando sobre el metal incide una luz de 4500 Å.

$f_0 = 4{,}83 \cdot 10^{14}$ Hz; $E_c = 0{,}76$ eV

A.7.- a) La longitud de onda máxima para producir efecto fotoeléctrico en el wolframio es de 2730 Å. Calcula la energía cinética máxima que pueden presentar los electrones desprendidos en dicho metal por los rayos ultravioletas de 1840 Å.

b) Calcula la diferencia de potencial necesaria para detener los electrones emitidos por una superficie de níquel bajo la luz UV de 2000 Å, sabiendo que la función trabajo para el níquel es de 5,01 eV.

a) $E_c = 2{,}20$ eV b) $V_{PM} = -1{,}2$ voltios

Aplicaciones del efecto fotoeléctrico

Ya hemos visto que el efecto fotoeléctrico fue muy importante en el establecimiento de una nueva concepción de la naturaleza de la luz, lo que contribuyó al establecimiento de la mecánica cuántica, pero además tiene muchas aplicaciones prácticas. Los dispositivos antirrobos, apertura automática de puertas, mecanismos automáticos de control de incendios, etc., utilizan una célula fotorresistiva (LDR) que no es más que una resistencia cuyo valor depende de la iluminación, lo cual sucede debido al efecto fotoeléctrico.

Cuando la LDR está iluminada, su resistencia es muy pequeña y entonces circula un determinado valor de intensidad de corriente. Si por cualquier circunstancia se dificulta la llegada de luz a la LDR, aumenta la resistencia de la misma y disminuye la intensidad de corriente. Las variaciones de intensidad pueden ser detectadas y provocar la actuación de un interruptor que ponga en marcha el mecanismo que se quiera poner en movimiento.

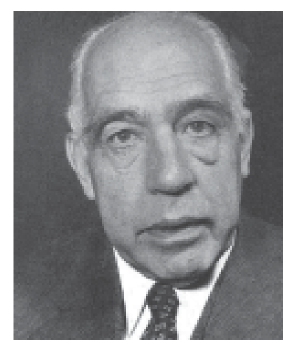
Una aplicación importante y que ha tenido un gran desarrollo en los últimos años es la producción de energía eléctrica utilizando células fotoeléctricas. En este mecanismo se produce directamente la energía eléctrica utilizando la iluminación solar. Los fotones procedentes del Sol inciden sobre la célula y arranca los electrones dándoles un exceso de energía que se puede utilizar en el circuito eléctrico.

A.8.- La producción de corriente fotovoltaica se basa en el fenómeno fotoeléctrico. En este caso, la luz que se utiliza no es monocromática sino que es la radiación que procede del Sol y que por lo tanto está formada por un espectro de muchas longitudes de onda. De acuerdo con esto:

a) ¿Tendrían la misma energía todos los electrones extraídos al ser iluminada la célula fotovoltaica? Explica por qué.

b) El aprovechamiento energético es mayor cuando esas células se montan en los satélites espaciales que cuando se utilizan en la superficie de la Tierra. Explica cuál puede ser la razón.

4 PRIMERA EXPLICACIÓN DE LOS ESPECTROS: EL ÁTOMO SEMICUÁNTICO DE BOHR



Niels Bohr

En la primera década del siglo XX, el equipo de Rutherford había llevado a cabo las experiencias que permitieron establecer un modelo de átomo, formado por un núcleo positivo a cuyo alrededor giraban los electrones, de forma similar a como lo hacen los planetas alrededor del Sol.

Sin embargo, ese modelo tenía un problema fundamental de acuerdo con la teoría electromagnética clásica. Un electrón girando debe emitir energía, ya que se trata de una carga eléctrica acelerada. Al perder energía, el electrón se iría acercando al núcleo, terminando por caer en él. Así, los átomos no serían estables, al contrario de lo que se observa.

Bohr, conocedor de las propuestas de Planck y Einstein para explicar la radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico, aplicó esas ideas para intentar explicar el átomo de hidrógeno. En 1913 propuso su modelo atómico, que se basaba en los siguientes postulados:

1: El electrón gira alrededor del núcleo, describiendo una órbita circular perfectamente definida. Cuando el electrón está en una de esas órbitas, a las que llamó estacionarias, no emite ni absorbe energía.

2: El momento angular del electrón, $L = mvr$, sólo puede tener valores que sean múltiplos de la constante reducida de Planck. Es decir, el momento angular del electrón está cuantizado.

$$L = n\,\hbar \qquad m_e\, v\, r = n\frac{h}{2\pi} \qquad n = 1,2,3...$$

3: El electrón sólo emite energía cuando pasa de una órbita de mayor energía a otra en la que tiene menor energía. Sólo absorbe energía cuando pasa de una órbita de menor energía a otra en la que tiene mayor energía. La diferencia de energía será igual a la energía del fotón emitido o absorbido.

$$\Delta E = E_{\mathrm{f}} - E_{\mathrm{i}} = h\,f$$

A partir del segundo postulado y teniendo en cuenta que la fuerza que permite el giro del electrón es la de atracción electrostática entre el núcleo y el electrón se llega a la conclusión de que sólo son posibles unas determinadas órbitas. Si ahora calculamos la energía que debe tener el electrón en esas órbitas como la suma de su energía cinética más su energía potencial electrostática, encontraremos que la energía que tiene el electrón en cada órbita se puede calcular por una expresión del tipo*:

$$E = - k \frac{1}{n^2}$$

La energía del electrón está cuantizada. Al número n se le llama **número cuántico principal**, y sólo puede tomar valores de números enteros a partir de 1.

* La energía del electrón es negativa ya que se ha supuesto que la energía potencial electrostática del electrón libre, desligado del núcleo es 0. Puesto que la fuerza electrón-núcleo es de atracción, la energía potencial electrostática de un electrón ligado a un núcleo es negativa.

A.9.- a) Si aumenta el valor de n, ¿aumenta o disminuye la energía del electrón? Explica la respuesta.

b) Calcula una expresión que permita calcular la diferencia de energía del electrón correspondientes a dos niveles diferentes de energía.

c) Demuestra que las longitudes de onda que corresponden a un salto de un electrón de un nivel a otro está cuantizada y se puede calcular por una expresión similar a la que vimos en la infocolumna de la página 191.

A.10.- El modelo de Bohr se basa en un conjunto de hipótesis. Indica en qué sentido podemos decir que esas hipótesis eran arbitrarias a la luz de la teoría electromagnética clásica. Explica también en qué sentido, la ampliación de las hipótesis cuánticas de Planck y de Einstein, «apoyaban» el que Bohr pudiera proponer sus hipótesis, (o al menos pueden explicar que Bohr se atreviera a proponerlas).

5 DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

El efecto fotoeléctrico o la radiación del cuerpo negro han dado una base firme a la teoría corpuscular de la luz. Pero, ¿qué pasa con la teoría electromagnética de la luz? No podemos olvidar que la teoría de Maxwell explicaba bien los fenómenos de interferencia, la difracción, etc., fenómenos que claramente nos sugieren que la luz tiene un carácter ondulatorio ya que esos procesos no se pueden explicar suponiendo un carácter corpuscular.

Parece que nos encontramos ante un dilema. Unos experimentos indican que la luz se comporta como una onda; otros experimentos indican que se comporta como un chorro de corpúsculos. Estas dos teorías parecen ser incompatibles pero ambas han demostrado tener validez. Los físicos han llegado a la conclusión de que esta dualidad de la luz debe aceptarse como un hecho real. A esto se le da el nombre de **dualidad onda-corpúsculo.**

Para aclarar la situación, el gran físico danés Niels Bohr propuso su famoso **principio de complementaridad.** Dice que para comprender un experimento cualquiera debemos utilizar o la teoría ondulatoria o la teoría del fotón, pero no ambas. Con todo, debemos conocer tanto el aspecto ondulatorio como el corpuscular de la luz si queremos comprenderla del todo. Por tanto, estos dos aspectos de la luz son complementarios.

No es posible visualizar esta dualidad. No podemos imaginar una combinación de onda y corpúsculo. En realidad, debemos darnos cuenta de que se trata de dos aspectos diferentes que presenta la luz a los experimentadores.

Parte de la dificultad estriba en la forma de pensar que tenemos. Las imágenes visuales (o modelos) en nuestra mente se basan en lo que vemos en nuestro mundo cotidiano. Utilizamos los conceptos de ondas y corpúsculos porque en el mundo macroscópico vemos que la energía pasa de un lugar a otro por medio de estos dos procedimientos. No podemos ver directamente si la luz es una onda o un corpúsculo, por eso hacemos experimentos indirectos. Y para explicar los experimentos aplicamos los conceptos de onda y corpúsculo a la naturaleza de la luz. Pero esto no es sino una abstracción de la mente humana. Cuando intentamos concebir **«qué es»** realmente la luz, insistimos en una imagen visual. Aun así, no hay razón que obligue a la luz a adaptarse a estas imágenes visuales del mundo macroscópico. La naturaleza «verdadera» de la luz, si es que esto tiene sentido, no se puede visualizar. Lo mejor que podemos hacer es darnos cuenta de que nuestro conocimiento está limitado a los experimentos indirectos y que, en función del lenguaje e imágenes de cada día, la luz revela propiedades ondulatorias y corpusculares.

Es interesante señalar que la propia ecuación de Einstein $E = h\,f$, enlaza las propiedades corpusculares y ondulatorias de un haz luminoso. En esta ecuación, E es la energía de un corpúsculo; y el segundo miembro de la ecuación contiene la frecuencia f de la onda correspondiente.

Louis de Broglie

Hipótesis de De Broglie

En 1923, el francés Louis de Broglie amplió la idea de la dualidad onda-corpúsculo. Pensó que si la luz se comporta a veces como onda y a veces como corpúsculo, tal vez las cosas que se consideran corpúsculos, como los electrones, protones, bolas de tenis, etc., puedan tener propiedades ondulatorias.

De Broglie vio que al combinar la ecuación de Planck que permite calcular la energía de un fotón en función de su frecuencia con la ecuación de Einstein de la equivalencia masa-energía se obtenía la siguiente relación entre la longitud de onda del fotón (magnitud que puede simbolizar su carácter ondulatorio) y su cantidad de movimiento (producto de la masa por la velocidad, que puede simbolizar su carácter corpuscular):

$$\left.\begin{array}{l} E = h\,f \\ E = m\,c^2 \end{array}\right\} \quad h\,f = m\,c^2 \qquad \frac{c}{f} = \frac{h}{m\,c} \qquad \lambda = \frac{h}{m\,c}$$

La idea de De Broglie fue generalizar esa idea a los entes que se le llaman corpúsculos. En ese caso, la velocidad de la partícula sustituye a la velocidad de la luz, siendo la longitud de onda de esa partícula igual a:

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

EJEMPLO

¿Cuál es la longitud de onda de De Broglie de un electrón cuya energía cinética es 100 eV?

Para calcular la longitud de onda necesitamos conocer la constante de Planck y el valor del momento lineal del electrón, es decir el valor del producto de su masa por su velocidad ($m \cdot v$)

El valor del momento lineal se puede obtener a partir de la energía cinética como sigue:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \qquad v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} \qquad m v = \sqrt{2\,m\,E_c}$$

$$mv = \sqrt{2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 100 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 5{,}4 \cdot 10^{-24}\,\text{kg m/s}$$

A partir de ese dato se obtiene fácilmente la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{5{,}4 \cdot 10^{-24}} = 1{,}23 \cdot 10^{-10}\,\text{m} = 1{,}23\,\text{Å}$$

A.11.- a) Calcula la longitud de onda de una pelota de 1 kg de masa que se mueve con una velocidad de 1 m/s. ¿Crees que esa longitud de onda se podrá apreciar experimentalmente?

b) Calcula la longitud de onda de un electrón cuya velocidad es 2000 km/s. ¿Conoces algunas distancias que sean del mismo orden de magnitud que esa longitud de onda?

c) ¿Se puede aplicar la relación de De Broglie a un núcleo atómico? ¿Y a un planeta? ¿Tiene sentido aplicarla a un planeta? ¿Por qué?

a) $\lambda = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ m; b) $\lambda = 3{,}6 \cdot 10^{-10}$ m

Como se puede observar en los cálculos anteriores, la longitud de onda de un objeto ordinario es demasiado pequeña para ser medida y detectada. La dificultad está en que las propiedades de las ondas, tales como la interferencia y la difracción, sólo son apreciables cuando el tamaño de los objetos o rendijas no es mucho mayor que la longitud de onda. Y no se conocen objetos o rendijas que puedan difractar longitudes de onda tan pequeñas como la de los objetos ordinarios; por lo tanto, las propiedades ondulatorias de los objetos ordinarios no se detectan.

Sin embargo, para los electrones y otras partículas del mundo atómico, la longitud de onda de De Broglie, aunque muy pequeña, es del orden de distancias que sí conocemos en la naturaleza. Las longitudes de onda de los electrones son del orden de la distancia que existe entre los átomos de un cristal. Así pues, utilizando un cristal como red de difracción podríamos observar las propiedades ondulatorias de los electrones. Esa experiencia se realizó hace ya mucho tiempo, y luego se ha repetido en diversas ocasiones y circunstancias. En el año 1927, C. J. Davisson y L.H. Germer realizaron el experimento de difractar electrones, y comprobaron que, la longitud de onda de esos electrones según las figuras de difracción obtenidas, coincidían con las que se obtienen a partir de la ecuación de De Broglie. Esta concordancia de los resultados experimentales con los previstos en la teoría de De Broglie dio una gran impulso a la misma. De Broglie obtuvo el premio Nobel en el año 1929. Posteriormente se han logrado difractar otras partículas como protones y neutrones, concordando siempre los valores experimentales con los teóricos previstos por la ecuación de De Broglie.

El microscopio electrónico, aplicación del carácter ondulatorio de los electrones

Poco después de producirse la confirmación experimental de las propiedades ondulatorias de los electrones, se pensó que éstos podrían utilizarse para ampliar objetos con un detalle mucho mayor que con el microscopio óptico ordinario. La resolución de un microscopio está limitada por la longitud de onda de la radiación utilizada (un objeto que sea más pequeño que la longitud de onda de la radiación que utilicemos para iluminarlo, producirá difracción de esa radiación y no dará imágenes en el microscopio).

Dado que la longitud de onda de la luz visible, la que se utiliza en un microscopio óptico viene a ser de 4000 Å, mientras que la longitud de onda* de los electrones puede ser de alrededor de 1 Å, la resolución que puede alcanzarse con un microscopio que utilice electrones en lugar de luz visible es bastante mayor. La contrapartida está en que el microscopio electrónico es un aparato bastante más complejo que un microscopio óptico, aunque en la actualidad es un aparato de uso bastante generalizado en los laboratorios de investigación.

* Se debe entender que hablamos de valores indicativos, ya que la longitud de onda de la luz visible varía en el rango de 4000 a 8000 Å, mientras que la longitud de onda de un electrón depende de su velocidad, a mayor velocidad menor longitud de onda.

EJEMPLO

Calcula la diferencia de potencial necesaria para que en un microscopio electrónico se obtengan electrones con una longitud de onda de 0,5 Å.

En el microscopio electrónico lo que se hace es utilizar electrones para poder «ver» a los objetos. Mientras mayor sea la diferencia de potencial que se utilice, mayor será la velocidad que alcanzarán los electrones y, por lo tanto, menor será la longitud de onda.

En primer lugar, se debe calcular la velocidad que corresponde a electrones cuya longitud de onda es de 0,5 Å.

$$\lambda = \frac{h}{mv}; \qquad v = \frac{h}{m\lambda} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-10}} = 1{,}46 \cdot 10^{7} \text{ m/s}$$

La energía cinética de los electrones que tienen esa velocidad es:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot \left(1{,}45 \cdot 10^{7}\right)^2 = 9{,}66 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

La energía cinética la adquieren acelerados por una diferencia de potencial

$$1{,}6 \cdot 10^{-19}\, (V_A - V_B) = 9{,}66 \cdot 10^{-17}$$

$$V_A - V_B = 604 \text{ V}$$

6 PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG

La forma de entender el mundo por parte de los físicos actuales es muy diferente a la forma que tenían de entender el mundo los físicos de principios de siglo. La mecánica cuántica así como la teoría de la relatividad han cambiado la concepción del mundo físico.

El principio de incertidumbre es un aspecto esencial de la mecánica cuántica. En 1927, Heisenberg formuló la primera versión refiriéndose a las magnitudes momento lineal y posición. Podemos escribirlo así:

> Es imposible conocer simultáneamente y con total exactitud la posición y el momento lineal de una partícula ya que el producto de sus imprecisiones es mayor que una cantidad constante.
>
> $$\Delta p_x \, \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

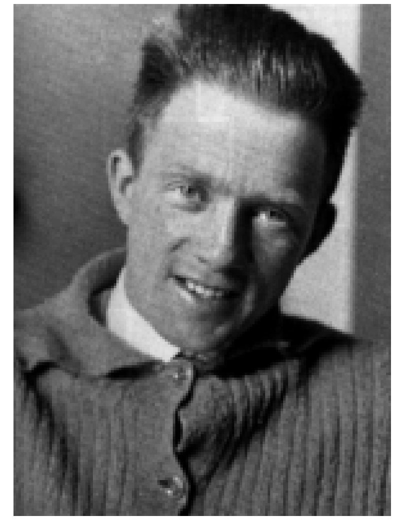
* En su forma más general el principio se refiere a la imposibilidad de conocer simultáneamente y con total exactitud los valores de dos magnitudes conjugadas de una misma «partícula-onda». Por magnitudes conjugadas se entienden aquellas cuyo producto tenga unidades de energía · tiempo.

Cuanto mayor sea la exactitud con la que se conozca la componente x de la cantidad de movimiento* ($m\, v_x$) de una partícula, mayor indeterminación tendremos en el conocimiento **simultáneo** de la posición (x) de dicha partícula.

* Puesto que la cantidad de movimiento es una magnitud vectorial, podríamos escribir otras ecuaciones similares para las componentes según los ejes Y y Z, relacionadas con la imprecisión de la posición en esos ejes.

Dos precisiones conviene hacer. La primera, es que el principio de incertidumbre no dice que sea imposible conocer con total exactitud el valor del momento lineal o de la posición para una partícula determinada; se refiere que no es posible conocerlos simultáneamente.

La segunda observación es aclarar que el origen de estas indeterminaciones nada tiene que ver con los «errores de medida» que se cometen cada vez que queremos determinar experimentalmente cualquier magnitud. La incertidumbre no depende de la imprecisión de los aparatos, sino que deriva de las ideas fundamentales que hemos estudiado: de la dualidad onda-corpúsculo, de la naturaleza ondulatoria de las partículas y de la necesidad de la interacción entre el observador y lo observado. Ha tenido profundas consecuencias filosóficas, que se siguen discutiendo en la actualidad. Sin embargo, la Mecánica Cuántica, la teoría que acoge todas estas ideas como principios fundamentales, está hoy profundamente aceptada y ella ha hecho posible avances tan importantes como los ordenadores, láseres, etc.



Werner Heisenberg

Al no poderse determinar con precisión simultáneamente la posición y velocidad de una partícula como el electrón, no puede conocerse su órbita alrededor del núcleo, tal como postulaba la Física Clásica. En la Mecánica Cuántica no se habla de trayectorias de las partículas, como podría ser la órbita circular del electrón, desapareciendo el concepto de partícula tal como podemos imaginarla, como un objeto localizado en una determinada posición con una velocidad cuyo valor se conoce con exactitud. Un electrón se describe mediante una función matemática compleja, que recibe el equívoco nombre de «función de onda» y se representa por ψ, a partir de la cuál pueden conocerse las magnitudes que describen el estado de ese electrón. Por ejemplo, a partir del cuadrado de esa función de onda podremos calcular la probabilidad de encontrar la partícula en una zona determinada del espacio.

A.12.- a) Si podemos medir la posición de un electrón con una incertidumbre de 10^{-9} m, ¿con qué incertidumbre podremos conocer su rapidez?

b) Un automóvil de 700 kg se mueve a 60 km/h. Suponiendo una incertidumbre para la rapidez de 1 m/s, determina la incertidumbre para la posición del coche.

c) A la vista de estos resultados analiza los posibles campos de validez para la Física Clásica y la Física Cuántica.

a) $\Delta v \geq 1{,}16 \cdot 10^{5}$ m/s; b) $\Delta x \geq 1{,}5 \cdot 10^{-37}$ m

Principio de incertidumbre referido a la pareja de magnitudes energía-tiempo

Bohr extendió el principio de incertidumbre a la energía y el tiempo. De de forma similar al de Heisenberg dice:

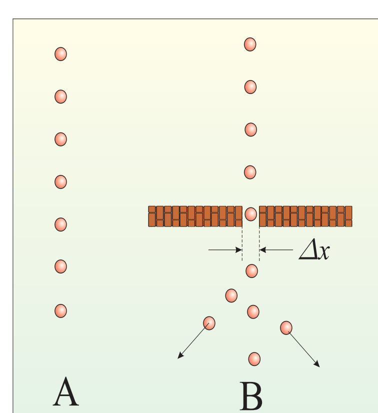
Es imposible conocer simultáneamente y con total exactitud la energía de una partícula en un instante determinado ya que el producto de sus imprecisiones es mayor que una cantidad constante.

$$\Delta E \;\; \Delta t \;\geq \frac{h}{2\pi}$$

De nuevo insistimos en que no se trata de un problema de medidas, de aparatos o de procesos de medición. También en que sí es posible conocer con exactitud la energía de una partícula, siempre que no queramos conocer simultáneamente en qué instante se esté considerando.

Ilustración del principio de incertidumbre

Supongamos que tenemos fotones cuya componente x del momento lineal es nula (p_x=0). Es posible conocer ese valor, mientras que no sepamos nada sobre la componente x de su posición (situación A de la figura)



Si queremos conocer algo sobre su posición podríamos hacerlos pasar a través de un orificio de anchura Δx, (situación B), lo cual supondría que la indeterminación de su posición sería exactamente esa anchura. Pero si hacemos eso, observaremos que ahora ya no podemos asegurar que $p_x = 0$, sino que los valores de la componente x del momento lineal estarán comprendidos dentro de un intervalo cuyo valor será:

$$\Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi \; \Delta x}$$

Algunas consecuencias del principio de indeterminación.

Podemos conocer con total exactitud la energía de un electrón en su estado fundamental, puesto que al estar el electrón un tiempo infinito en ese estado, $\Delta t \to \infty$ por lo que $\Delta E \to 0$. Sin embargo, no podemos conocer con total exactitud la energía de un electrón en un estado excitado, ya que el electrón está en ese estado un tiempo finito, que es del orden de 10^{-8} segundos. Si suponemos que esa es la indeterminación del tiempo, $\Delta t = 10^{-8}$ s, los cálculos correspondientes nos llevan a que la indeterminación de la energía, $\Delta E \geq 10^{-27}$ J. ¿Cómo podemos comprobar experimentalmente a que eso es así? Lo que podemos observar es la frecuencia de la energía emitida cuando el electrón vuelva a su estado fundamental. Si la energía del estado excitado tuviese un valor exacto, la frecuencia de los fotones emitidos debería ser también exacta, pero experimentalmente se observa que la frecuencia de los fotones emitidos está siempre dentro de un intervalo, nunca es una frecuencia totalmente exacta. En el espectro de emisión, siempre se observa que las líneas tienen una cierta anchura, que es imposible eliminar por bueno que sea el espectroscopio utilizado.

Otro ejemplo: Al estudiar la equivalencia masa-energía dijimos que se habían observado procesos de aniquilación electrón-positrón en el que ambos dan lugar a dos fotones. ¿Pero podría dar lugar a un solo fotón? Supongamos un electrón y un positrón, ambos en reposo, que se aniquilan. El momento lineal antes del proceso es nulo, por lo que también debe serlo después de la aniquilación. Sin embargo, un fotón tiene siempre un momento lineal $p = E/c$ diferente de cero. De ahí se concluye que, para que se conserve el momento lineal, no es posible que se produzca un sólo fotón.

Sin embargo, el principio de indeterminación permite que se produzca un sólo fotón, siempre que el tiempo que exista, o la distancia que recorra, sea menor de un determinado valor. Veamos los cálculos:

La energía del fotón la podemos calcular usando la ecuación $E = mc^2$. Ya que la masa es la del electrón más la del positrón, $E = 16{,}4 \cdot 10^{-14}$ J. Eso supone que el momento lineal del fotón será $p = 5{,}46 \cdot 10^{-22}$ kgm/s. Eso supondría que la incertidumbre mínima del momento lineal debe ser $\Delta p \geq 5{,}46 \cdot 10^{-22}$ kg m/s, por lo que la incertidumbre de la posición del fotón, $\Delta x \leq 1{,}98 \cdot 10^{-13}$ metros, que es la máxima distancia que podrá recorrer ese fotón. Como la velocidad del fotón es la de la luz, la duración del fotón será menor de $\Delta t \leq 6{,}6 \cdot 10^{-22}$ segundos.

Este tipo de procesos que tienen lugar en tiempos infinitesimales, se les llama «procesos virtuales».

Los ejemplos que acabamos de exponer no suponen la negación del principio de conservación de la energía ni del principio de conservación del momento lineal. La mecánica cuántica no niega esos principios, sino que podemos decir que añade otros nuevos, como es el principio de incertidumbre de Heisenberg. Por cierto que el principio de incertidumbre no se deduce de leyes de la física clásica, puesto que en la física clásica no hay nada que impida el conocimiento simultáneo de posición-momento lineal o de energía-tiempo de una partícula. El principio de incertidumbre es parte fundamental de la mecánica cuántica y su origen se encuentra en la imposibilidad de describir el comportamiento del mundo microscópico con los modelos y teorías que se utilizan al describir el mundo macroscópico.

EXPERIENCIAS SOBRE EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

Las principales experiencias las realizó Philipp Lenard en 1902. Utilizó un aparato como el reproducido en la figura.

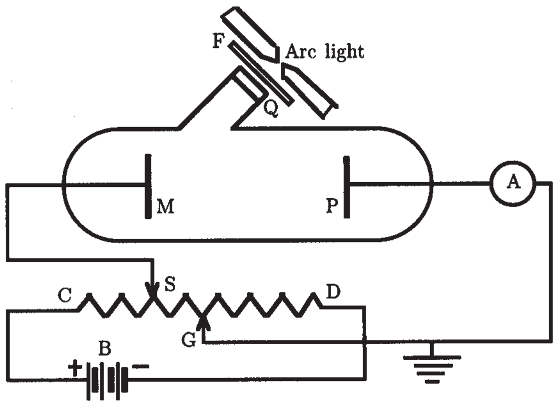


Figure 10.9.1 Schematic diagram of Lenard's apparatus for measuring photoelectric current.

Descripción del aparato:

La luz se producía mediante un arco voltaico con electrodos de carbón, (también usaba electrodos de cinc o una lámpara de chispas) y mediante los filtros F se aseguraba que fuese «monocromática»; la luz entraba en la célula a través de la «ventana» Q.

El electrodo M podía ser de diferentes metales y era el que emitía o no los electrones una vez iluminado.

El electrodo P puede recoger (o no) los electrones que emite M. Si recoge electrones se sabrá porque el microamperímetro A medira una corriente eléctrica.

G está conectado al punto medio de la resistencia CD. Si S está a la izquierda de G, el electrodo M es positivo respecto a P por lo que los electrones que pueda emitir M es posible que retrocedan y, si la diferencia de potencial es suficiente, no lleguen a P. Si el contacto S está a la derecha de G, entonces M es negativo respecto a P y los electrones emitidos por M llegarían siempre a P. Es decir:

Si $V_P – V_M > 0$ los electrones llegan.

Si $V_P – V_M < 0$ los electrones pueden llegar o no.

A.1.- a) Supongamos que P está a 2 cm de M y que $V_P – V_M < 0$. Dibuja las posibles trayectorias que seguirán los electrones emitidos por M.

b) Supongamos que P está a 2 cm de M y que $V_P – V_M > 0$. Dibuja las posibles trayectorias que seguirán los electrones emitidos por M.

c) Supongamos que P está a 0,5 cm de M y que $V_P – V_M < 0$. Dibuja las posibles trayectorias que seguirán los electrones emitidos por M.

d) Supongamos que P está a 0,5 cm de M y que $V_P – V_M > 0$. Dibuja las posibles trayectorias que seguirán los electrones emitidos por M.

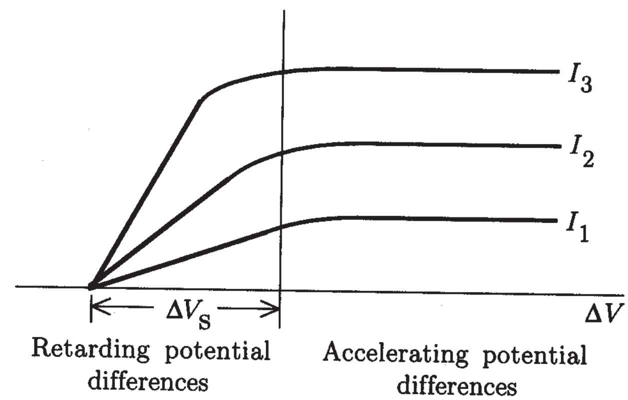
El electrodo M emite los electrones en todas las direcciones. Si el electrodo P está a 0,5 cm de M y $V_P – V_M > 0$ el electrodo P recoge prácticamente todos los electrones que emite M. En esas condiciones, el microamperímetro A mide lo máximo posible. En lo que sigue supondremos que la separación entre M y P es siempre de 0,5 cm.

Las observaciones más destacadas de Lenard fueron:

1. Si hay emisión de electrones y $V_P – V_M > 0$, la intensidad de corriente medida por A depende de la intensidad de la luz que llega al electrodo M. Lenard conseguía variar la intensidad luminosa alejando la fuente de la ventana o haciendo que la fuente brillase menos.

2. La intensidad de corriente era proporcional a la intensidad luminosa aunque ésta fuese muy pequeña, sin que pareciese existir una intensidad luminosa mínima por debajo de la cual no se emitiesen electrones. Si la luz incidente es capaz de emitir electrones de M, lo hará siempre.

3. Para una intensidad luminosa constante, si hacíamos disminuir ΔV hasta hacer que fuese negativo (lo que suponía que la placa P repelía a los electrones y la placa M los atraía), se observaba que la intensidad de corriente disminuía linealmente con el valor de esa diferencia de potencial. Existía un valor para el cual la intensidad se hacía nula. A ese valor de la diferencia de potencial se le llamó potencial de corte.



El potencial de corte no dependía de la intensidad luminosa, sólo dependía del tipo de metal del que estaba hecho el electrodo y del tipo de luz.

A.2.- Supongamos que el potencial de corte es de –2 voltios. ¿Cuál sería la energía cinética máxima de los electrones emitidos por el electrodo M? ¿Qué ocurriría si los electrones emitidos por M tuviesen una energía cinética mayor?

4. A partir de la observación de que el potencial de corte no dependía de la intensidad luminosa, y teniendo en cuenta que podemos utilizar el potencial de corte como una medida de la energía cinética de los electrones, Lenard dedujo que la energía cinética de los electrones emitidos depende del tipo de metal del que estaba hecho el electrodo y del tipo de luz pero no de la intensidad luminosa.

Determinación experimental de la constante de Planck

Las teorías científicas en la física dan explicaciones cualitativas y cuantitativas. Cuando los valores obtenidos por diferentes métodos coinciden las teorías aumentan su verosimilitud. A partir de las experiencias realizadas sobre el efecto fotoeléctrico puede medirse la constante de Planck cuyo valor coincide con el obtenido por otros métodos.

A partir de la ecuación en la que Einstein aplica la conservación de la energía entre el fotón y el electrón que emite el metal, podemos despejar la energía cinética obteniendo:

$$h f = h f_0 + E_c \quad \Rightarrow \quad E_c = h(f - f_0)$$

Ahora bien, la energía cinética de los electrones es muy difícil medirla directamente. Pero sabemos que si sometemos a esos electrones a una ddp negativa, sólo superarán el obstáculo aquellos cuya energía cinética sea superior a la energía potencial que han de superar. Si llamamos ΔV_S a la ddp a partir de la cual ningún electrón llega al electrodo P, podemos considerar que la energía cinética de los electrones sería igual a $e\,\Delta V_S$, siendo e la carga de un electrón. Por lo tanto, podremos escribir que:

$$\left.\begin{array}{l} E_c = h\,(f - f_0) \\ E_c = e\,\Delta V_S \end{array}\right\} \Rightarrow \quad e\,\Delta V_S = h\,(f - f_0) \quad \Rightarrow \quad \Delta V_S = \frac{h}{e}(f - f_0)$$

f

Si representamos en ordenadas ΔV_S y en abcisas la diferencia entre la frecuencia de la luz que estemos utilizando y la frecuencia umbral que corresponde a ese metal debería salir una línea recta, a partir de cuya pendiente podría calcularse la constante de Planck.

A.8.- Millikan dedicó varios años a comprobar si la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico era correcta. Para eso, midió el potencial de retardo ΔV_S y los representó en función de la frecuencia. Aunque el repitió la experiencia para diferentes metales reproduciremos los resultados que obtuvo para un metal concreto. Los valores obtenidos están recogidos en la tabla adjunta.

a) Representa en ordenadas el potencial de frenado y en abcisas la frecuencia. Dibuja una recta que se adapte a los puntos experimentales.

b) Calcula la pendiente de esa recta. A partir de ese dato, calcula la constante de Planck.

c) Prolonga la línea que hayas dibujado hasta que corte el eje de abcisas. ¿Qué representa ese punto? A partir de ese dato calcula la función trabajo del metal utilizado por Millikan en ese experimento. ¿Qué metal pudo ser?

ΔV_S	Frecuencia (s^{-1})
–2,07	$55 \cdot 10^{13}$
–1,50	$69 \cdot 10^{13}$
–1,30	$74 \cdot 10^{13}$
–0,90	$82 \cdot 10^{13}$
–0,40	$96 \cdot 10^{13}$

1. a) Explique brevemente en qué consiste el efecto fotoeléctrico.

b) ¿Tienen la misma energía cinética todos los fotoelectrones emitidos?

c) La energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos por un metal depende de:

i) la intensidad de la luz incidente;

ii) la frecuencia de la luz incidente;

iii) la velocidad de la luz.

2. Un haz de luz de longitud de onda $546 \cdot 10^{-9}$ m penetra en una célula fotoeléctrica de cátodo de cesio, cuyo trabajo de extracción es 2 eV.

a) Explique las transformaciones energéticas en el proceso de fotoemisión y calcule la energía cinética máxima de los electrones emitidos.

b) ¿Qué ocurriría si la longitud de onda incidente en la célula fotoeléctrica fuera el doble de la anterior?

$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ J.s; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m/s

a) $E_{c\ máxima} = 0{,}27$ eV; b) No habría emisión

3. En un estudio del efecto fotoeléctrico, se realiza la experiencia con dos fuentes luminosas: una de intensidad I y frecuencia n y otra de intensidad I/2 y frecuencia 2 n. Si la frecuencia n es mayor que la frecuencia umbral, razone:

a) ¿Con qué fuente se emiten electrones con mayor velocidad?

b) ¿Con qué fuente la intensidad de la corriente fotoeléctrica es mayor?

4. Razone si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones relativas al efecto fotoeléctrico:

a) La emisión de electrones se produce un cierto tiempo después de incidir los fotones, porque necesitan acumular energía suficiente para abandonar el metal.

b) Si se triplica la frecuencia de la radiación incidente sobre un metal, se triplicará la energía cinética de los fotoelectrones.

c) Los fotones con frecuencia menor que la frecuencia umbral no pueden arrancar electrones del metal.

d) La energía de los electrones emitidos por efecto fotoeléctrico no depende de la intensidad de la luz para una frecuencia dada.

e) El efecto fotoeléctrico no tiene lugar en un cierto material al incidir sobre él luz azul, y sí al incidir luz naranja.

5. Al incidir luz de longitud de onda $\lambda = 620 \cdot 10^{-9}$ m sobre una fotocélula se emiten electrones con una energía cinética máxima de 0,14 eV.

a) Calcule el trabajo de extracción y la frecuencia umbral de la fotocélula.

b) ¿Qué diferencia cabría esperar en los resultados del apartado a) si la longitud de onda incidente fuera doble?

$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C ; $c = 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}

a) $W_0 = 1{,}86$ eV; $\lambda_0 = 6{,}67 \cdot 10^{-17}$m

6. Un haz de luz de longitud de onda $477 \cdot 10^{-9}$ m incide sobre una célula fotoeléctrica de cátodo de potasio, cuya frecuencia umbral es $5{,}5 \cdot 10^{14}$ s^{-1}.

a) Explique las transformaciones energéticas en el proceso de fotoemisión y calcule la energía cinética máxima de los electrones emitidos.

b) Razone si se produciría efecto fotoeléctrico al incidir radiación infrarroja sobre la célula anterior. La región infrarroja comprende longitudes de onda entre 10^{-3} m y $7{,}8 \cdot 10^{-7}$ m.

$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J s ; c $= 3 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}

a) $E_{c\ máxima} = 0{,}33$ eV; b) No habría emisión

7. Al absorber un fotón se produce en un átomo una transición electrónica entre dos niveles separados por una energía de $12 \cdot 10^{-19}$ J.

a) Explique, energéticamente, el proceso de absorción del fotón por el átomo ¿Volverá espontáneamente el átomo a su estado inicial?

b) Si el mismo fotón incidiera en la superficie de un metal cuyo trabajo de extracción es de 3 eV, ¿se produciría emisión fotoeléctrica?

$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ J.s; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg

b) Sí

8. a) Enuncia la hipótesis de De Broglie e indique de qué depende la longitud de onda asociada a una partícula.

b) Un protón y un electrón tienen la misma velocidad. ¿Serán iguales las longitudes de onda de De Broglie de ambas partículas? Razone la respuesta.

c) Si la energía cinética de una partícula aumenta, ¿aumenta o disminuye su longitud de onda asociada?

d) Explique por qué no suele utilizarse habitualmente la idea de dualidad al tratar con objetos macroscópicos.

9. Un átomo de plomo se mueve con una energía cinética de 10^7 eV.

a) Determine el valor de la longitud de onda asociada a dicho átomo.

b) Compare dicha longitud de onda con las que corresponderían, respectivamente, a una partícula de igual masa y diferente energía cinética y a una partícula de igual energía cinética y masa diferente.

$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ J.s; 1 u = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg; m(Pb) = 207 u

a) $\lambda = 6{,}3 \cdot 10^{-16}$ m;

b) a igual m es menor la λ de la partícula que tenga más E_c;
a igual Ec es menor la λ de la partícula que tenga más masa

10. Un electrón se acelera mediante una diferencia de potencial de $5 \cdot 10^3$ V.

a) Haga un análisis energético del proceso y calcule la velocidad y la longitud de onda de los electrones, una vez acelerados.

b) Explique, sin necesidad de hacer cálculos, los cambios respecto del apartado anterior si la partícula acelerada fuera un protón.

$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ J.s; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C;

a) $v = 4{,}2 \cdot 10^7$ m/s; $\lambda = 1{,}73 \cdot 10^{-11}$ m; b) Su longitud de onda sería menor

11. Razone las respuestas a las siguientes cuestiones:

a) ¿Puede conocerse con precisión la posición y la velocidad de un electrón?

b) ¿Por qué el principio de incertidumbre carece de interés en el mundo macroscópico?