



FÍSICA MODERNA

La física moderna está más enfocada al microscópico mundo de las partículas. Estudiada desde la primera parte del siglo XX, cuando el alemán Max Planck investiga sobre el «cuanto» de energía, hasta la actualidad. la física moderna incluye la mecánica cuántica, la física molecular, la física nuclear, la física de las partículas, la física atómica, la relatividad, la física de la materia condensada, la nanofísica y la cosmología.

Planck decía que los «cuantos» eran partículas de energía indivisibles, y que éstas no eran continuas como decía la física clásica. Por ello nace esta nueva rama ya que los temas anteriormente tratados de la física clásica no servían para resolver los problemas presentados, ya que estos se basan en certezas y la física moderna en probabilidades, lo que provocó dificultades para adaptarse a las nuevas ideas.

En 1905, Albert Einstein publicó una serie de trabajos que revolucionaron la física, principalmente representados por «La dualidad onda-partícula de la luz» y «La teoría de la relatividad» entre otros. Estos y los avances científicos como el descubrimiento de la existencia de otras galaxias, la superconductividad, el estudio del núcleo del átomo, y otros, permitieron lograr que años más tarde surgieran avances tecnológicos, como la invención del televisor, los rayos x, el radar, fibra óptica, el computador, etc.

La misión final de la física actual es comprender la relación que existe entre las fuerzas que rigen la naturaleza, la gravedad, el electromagnetismo, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil. Comprender y lograr una teoría de unificación, para así poder entender el universo y sus partículas.

Efecto fotoeléctrico

Una placa de zinc recién pulida, cargada negativamente, pierde su carga si se la expone a la luz ultravioleta. Este fenómeno se llama efecto fotoeléctrico.

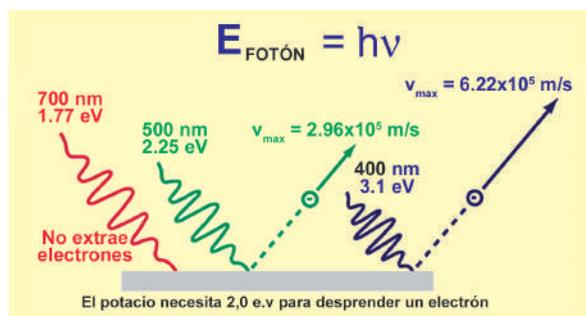
El efecto fotoeléctrico es el fenómeno en el que las partículas de luz llamadas fotón, impactan con los electrones de un metal arrancando sus átomos. El electrón se mueve durante el proceso, dado origen a una corriente eléctrica.

- Investigaciones cuidadosas, hacia finales del siglo diecinueve, prueban que el efecto fotoeléctrico sucede también con otros materiales, pero sólo si la longitud de onda es suficientemente pequeña. Para cada sustancia hay una frecuencia mínima o umbral de la radiación electromagnética por debajo de la cual no se producen fotoelectrones por más intensa que sea la radiación.

La emisión de electrones por metales iluminados con luz de determinada frecuencia fue observada a finales del siglo XIX (1887) por Hertz y Hallwachs.

Finalmente Albert Einstein publicó en 1905 varios artículos entre los cuales uno trataba del efecto fotoeléctrico y por el cual recibió el premio Nobel de Física en 1922. Mucho antes, en 1900, Max Planck había explicado el fenómeno de la radiación del cuerpo negro sugiriendo que la energía estaba cuantizada, pero Einstein llegó aún más lejos explicando -de acuerdo a los cuantos de Planck- que no solo la energía sino también la materia son discontinuas. La luz está constituida por partículas (fotones), y la energía de tales partículas es proporcional a la frecuencia de la luz. Existe una cierta cantidad mínima de energía (dependiendo del material) que es necesaria para extraer un electrón de la superficie de una placa de zinc u otro cuerpo sólido (energía umbral o función trabajo (Φ)). Si la energía del fotón ($E_{\text{fotón}}$) es mayor que este valor el electrón puede ser emitido. De esta explicación obtenemos la siguiente expresión:

$$E_{k_{\text{max}}} = E_{\text{fotón}} - \theta$$



ν, f = frecuencia de la radiación (Hz)

h : constante de Planck

$h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$h = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

La unidad usual de energía a escala atómica es el electrón-volt (eV), el cual se define como la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de un voltio:

$$1\text{eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Existe un potencial de corte (V_0) o potencial de frenado para el que $i=0$. Este potencial de corte es independiente de la intensidad de la radiación (I), pero depende de su frecuencia.

El producto del potencial por la carga es trabajo (por la definición de potencial $V=W/q$). El trabajo de frenado ($V_0 \cdot q$) debe ser suficiente para frenar a los electrones más rápidos, que son los que estaban menos ligados al metal.

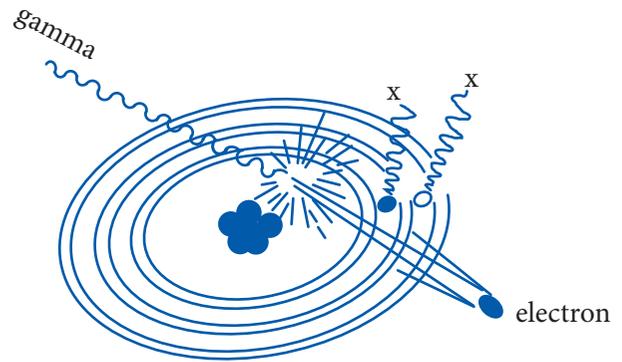
$$E_{k_{\max}} = V_0 \cdot qe$$

$q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ m : masa v : rapidez

La explicación de Einstein coincide con los hechos experimentales. Si se repartiese la energía de la onda entre los trillones de átomos en los que incide la radiación, tardarían años en acumular la energía necesaria para ser extraídos y todos los electrones superficiales de los átomos de la superficie abandonarían de golpe el metal, al cabo de ese tiempo. Por el contrario, se comprueba experimentalmente, que desde que incide la radiación hasta la extracción de los electrones transcurren solamente algunos nanosegundos y sólo son extraídos unos pocos electrones de los millones que componen las capas superficiales.

La energía emitida es discontinua, va en paquetes, tal como había enunciado Planck (que sin embargo creía que se propagaba repartida en la onda, como lo suponía la teoría clásica). La aportación original de Einstein es que la energía se transmite e impacta de manera discontinua o discreta, en paquetes.

La emisión de electrones es casi instantánea.



A la temperatura ambiente, los electrones más energéticos se encuentran cerca del nivel de Fermi (salvo en los semiconductores intrínsecos en los cuales no hay electrones cerca del nivel de Fermi). La energía que hay que dar a un electrón para llevarlo desde el nivel de Fermi hasta el exterior del material se llama función de trabajo. El valor de esa energía es muy variable y depende del material, estado cristalino y, sobre todo de las últimas capas atómicas que recubren la superficie del material. Los metales alcalinos (sodio, calcio, cesio, etc.) presentan las más bajas funciones de trabajo. Aun es necesario que las superficies estén limpias al nivel atómico. Una de la más grandes dificultades de las experiencias de Millikan era que había que fabricar las superficies de metal en el vacío.

La función de trabajo fotoeléctrica es:

$$\phi = hf_0$$

dónde h es la constante de Planck y f_0 es la frecuencia mínima (umbral) del fotón, requerida para producir la emisión fotoeléctrica.

Láser

Un láser (de la sigla inglesa Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente tanto espacial como temporalmente. La coherencia espacial se corresponde con la capacidad de un haz para permanecer con un pequeño tamaño al transmitirse por el vacío en largas distancias y la coherencia temporal se relaciona con la capacidad para concentrar la emisión en un rango espectral muy estrecho.



En 1916, Albert Einstein estableció los fundamentos para el desarrollo de los láseres y de sus predecesores, los máseres (que emiten microondas), utilizando la ley de radiación de Max Planck basada en los conceptos de emisión espontánea e inducida de radiación.

El 16 de mayo de 1980, un grupo de físicos de la Universidad de Hull liderados por Geoffrey Pert registran la primera emisión láser en el rango de los rayos X. Pocos meses después se comienza a comercializar el disco compacto, donde un haz láser de baja potencia «lee» los datos codificados en forma de pequeños orificios (puntos y rayas) sobre un disco óptico con una cara reflectante. Posteriormente esa secuencia de datos digital se transforma en una señal analógica permitiendo la escucha de los archivos musicales.

Ya en el siglo XXI, científicos de la Universidad de St. Andrews crean un láser que puede manipular objetos muy pequeños. Al mismo tiempo, científicos japoneses crean objetos del tamaño de un glóbulo rojo utilizando el láser. En 2002, científicos australianos «teletransportan» con éxito un haz de luz láser de un lugar a otro.[] Dos años después el escáner láser permite al Museo Británico efectuar exhibiciones virtuales.[] En 2006, científicos de la compañía Intel descubren la forma de trabajar con un chip láser hecho con silicio abriendo las puertas para el desarrollo de redes de comunicaciones mucho más rápidas y eficientes.

El rayo láser es luz monocromática, es decir, tiene una sola frecuencia o color.

Aplicaciones en la vida cotidiana

- Telecomunicaciones: comunicaciones ópticas (fibra óptica), Radio Over Fiber.
- Medicina: operaciones sin sangre, tratamientos quirúrgicos, ayudas a la cicatrización de heridas, tratamientos de piedras en el riñón, operaciones

de vista, operaciones odontológicas.

- Industria: cortado, guiado de maquinaria y robots de fabricación, mediciones de distancias precisas mediante láser.
- Defensa: Guiado de misiles balísticos, alternativa al radar, cegando a las tropas enemigas. En el caso del Tactical High Energy Laser se está empezando a usar el láser como destructor de blancos.
- Ingeniería civil: guiado de máquinas tuneladoras en túneles, diferentes aplicaciones en la topografía como mediciones de distancias en lugares inaccesibles o realización de un modelo digital del terreno (MDT).
- Arquitectura: catalogación de patrimonio.
- Arqueológico: documentación.
- Investigación: espectroscopia, interferometría láser, LIDAR, distanciametría.
- Desarrollos en productos comerciales: impresoras láser, CD, ratones ópticos, lectores de código de barras, punteros láser, termómetros, hologramas, aplicaciones en iluminación de espectáculos.
- Tratamientos cosméticos y cirugía estética: tratamientos de Acné, celulitis, tratamiento de las estrías, depilación.

Potencia de un haz de luz (P)

$$P = \frac{(n^\circ \text{ de fotones})}{(\text{intervalo de tiempo})} \times \text{Energía de un foton...}W$$

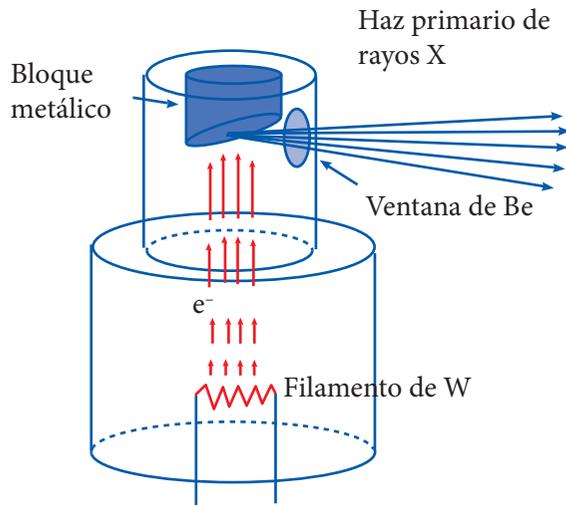
Análogamente, la intensidad (I) de una radiación se expresa como:

$$I = \frac{\text{Potencia}}{\text{área}} \dots w/m^2$$

Rayos X

Los rayos X son una radiación electromagnética, invisible, capaz de atravesar cuerpos opacos y de imprimir las películas fotográficas. Es de la misma naturaleza que las ondas de radio, las ondas de microondas, los rayos infrarrojos, la luz visible, los rayos ultravioleta y los rayos gamma. La diferencia fundamental con los rayos gamma es su origen: los rayos gamma son radiaciones de origen nuclear que se producen por la desexcitación de un nucleón de un nivel excitado a otro de menor energía y en la desintegración de isótopos radiactivos, mientras que los rayos X surgen de fenómenos extranucleares, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos por desaceleración de electrones. La

energía de los rayos X en general se encuentra entre la radiación ultravioleta y los rayos gamma producidos naturalmente. Los rayos X son una radiación ionizante porque al interactuar con la materia produce la ionización de los átomos de la misma, es decir, origina partículas con carga (iones).



La producción de rayos X es un proceso inverso al efecto fotoeléctrico. En el cual los electrones son acelerados por una fuerza de energía eléctrica viajando desde el cátodo hacia el ánodo. Si toda la energía cinética de un electrón (E_k) se transforma en un fotón de rayos X de frecuencia f_x , la conservación de la energía exige que:

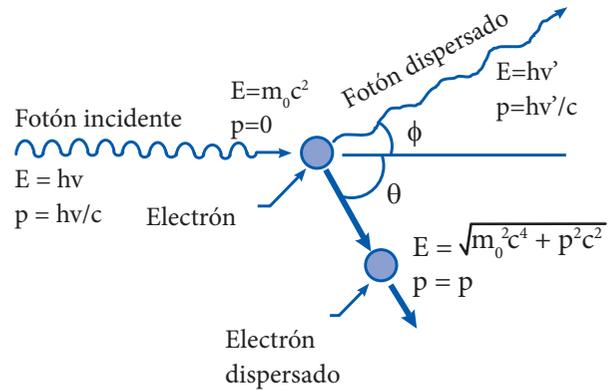
$$E_k = e \cdot V = h \cdot f_x$$

V: voltaje acelerador (V)

Efecto Compton

El efecto Compton es el cambio de longitud de onda de la radiación electromagnética de alta energía al ser difundida por los electrones. Descubierto por Arthur Compton, este físico recibió el Premio Nobel de Física en 1927 por la importancia de su descubrimiento, ya que el efecto Compton constituyó la demostración final de la naturaleza cuántica de la luz tras los estudios de Planck sobre el cuerpo negro y la explicación de Albert Einstein del efecto fotoeléctrico.

En el efecto fotoeléctrico consideramos que el electrón tenía una energía $E = hv$. Ahora, para explicar el efecto Compton, vamos a tener en cuenta también que el fotón tiene un momento lineal $p = E/c$. Suponemos que tenemos un fotón que golpea a un electrón, tal y como indica la siguiente figura:



Antes del choque tenemos que el fotón se encuentra con una energía $E = hv$ y con un momento lineal, $p = hv/c$. En cuanto al electrón, su energía es equivalente a $E = mc^2$, mientras que al estar inmóvil, su momento lineal es cero. El fotón colisiona con el electrón mediante un choque elástico. En física, se denomina choque elástico a una colisión entre dos o más cuerpos en la que éstos no sufren deformaciones permanentes durante el impacto. En una colisión elástica se conservan tanto el momento lineal como la energía cinética del sistema, y no hay intercambio de masa entre los cuerpos, que se separan después del choque.

Las colisiones en las que la energía no se conserva producen deformaciones permanentes de los cuerpos y se denominan inelásticas.

Tras el choque la situación de ambas partículas varía. El fotón dispersado varía su energía y su momento lineal en función del ángulo de dispersión. El electrón, al verse desplazado por el choque, adquiere momento lineal.

Teniendo en cuenta que en un choque elástico se conserva el momento lineal y la energía del sistema, es decir, que su valor es el mismo antes y después del choque, vamos a obtener las fórmulas del efecto Compton.

Principio de conservación del momento lineal

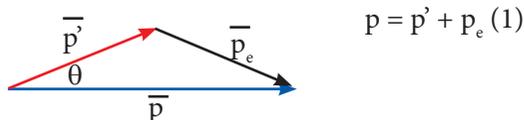
Sea p el momento lineal del fotón incidente:

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

Sea p' el momento lineal del fotón difundido:

$$p' = \frac{E'}{c} = \frac{hf'}{c} = \frac{h}{\lambda'}$$

Sea p_e es el momento lineal del electrón después del choque, se verificará que:



Principio de conservación de la energía

La energía del fotón incidente es:

$$E = hf$$

La energía del fotón dispersado es:

$$E' = hf'$$

La energía cinética del electrón después del choque no la podemos escribir como:

$$m_e v^2/2$$

Ya que el electrón de retroceso alcanza velocidades cercanas a la de la luz, tenemos que reemplazarla por la fórmula relativista equivalente:

$$E_k = c\sqrt{m_e^2 c^2 + p_e^2} - m_e c^2$$

Donde m_e es la masa en reposo del electrón: $9.1 \cdot 10^{-31}$ kg

El principio de conservación de la energía se escribe:

$$E = E' + c\sqrt{m_e^2 c^2 + p_e^2} - m_e c^2 \quad (2)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (1) y (2) llegamos a la siguiente expresión:

$$\frac{1}{E} - \frac{1}{E'} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)$$

Trabajando en clase

Integral

- Determina la energía en eV de un fotón cuya frecuencia es de 40 MHz ($h = 4.10^{-15}$ eV)
Resolución:
 $E = h \cdot f$
 $E = 4.10^{-15} \cdot 40 \cdot 10^6$
 $E = 160 \cdot 10^{-9}$
 $E = 1,6 \cdot 10^{-7}$ eV
- Determina la energía en eV de un fotón cuya frecuencia es de 80 MHz ($h = 4.10^{-15}$ eV)
- La energía de un fotón de luz es $3,31 \times 10^{-10}$ J. Halla la longitud de onda en (nm). ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J)
- Fotones iguales, en número de 10^{20} chocan con un sistema sucesivamente uno tras otro y le entregan toda su energía. Si han elevado la energía de dicho sistema en 6,6 J, determina la frecuencia de la radiación (en Hz) ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J).

UNMSM

- Un metal tiene como función trabajo 2 eV. ¿Cuál es la frecuencia mínima que deben tener los fotones incidentes para que puedan arrancar electrones. ($h = 4.10^{-15}$ eV)
Resolución:
 $\phi = hf_0$
 $2 = 4.10^{-15} f$
 $f = 5.10^{14}$ Hz
- Un metal tiene una función trabajo de 12 eV. ¿Cuál es la frecuencia mínima que deben tener los fotones incidentes para que puedan arrancar electrones?
- El umbral característico de cierto metal es 3000 \AA . ¿Qué valor mínimo tendrá la energía del fotoelectrón producido (en 10^{-19} J).

8. Calcula la energía de un fotón de rayos X, si su longitud de onda es 30 nm. ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s)

Resolución:

$$E = h \cdot \frac{C}{\lambda}$$

$$E = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{30 \cdot 10^{-9}}$$

9. Calcula la energía de un fotón de rayos X, si su longitud de onda es 80 nm ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s)
10. La función trabajo de un metal es $6,63 \cdot 10^{-20}$ J. ¿Cuál debe ser la máxima longitud (en m) de la luz para que se produzca la emisión de fotoelectrones?
11. Un electrón pasa de un estado de energía $E_2 = 4,95$ eV a otro $E_1 = 2,95$ eV emitiendo un fotón, la frecuencia (en Hz) asociada a este fotón será.
12. En el efecto Compton, un fotón de 600 keV choca con un electrón en reposo y este adquiere una energía de 500 keV. ¿Cuál es la energía del fotón después del choque?
13. ¿Cuál es la energía (en eV) de un fotón de luz de frecuencia $3,0 \cdot 10^{16}$ Hz?
14. ¿Cuál es la frecuencia umbral (en Hz) para el efecto fotoeléctrico, sobre una placa de Wolframio, si el trabajo de extracción es de 4,52 eV?

UNI

15. Una luz $\lambda = 3000 \text{ \AA}$ que incide sobre una superficie metálica genera efecto fotoeléctrico. Si el potencial de frenado es de 1 V. Calcula la frecuencia umbral (en términos de 10^{14} Hz)

Resolución:

$$E = E_{k_{\max}} + hf$$

$$4 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{3000 \cdot 10^{-10}} = 1 + 4 \cdot 10^{-15} \cdot f_0$$

$$f_0 = 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

16. Una luz $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ que incide sobre una superficie metálica genera efecto fotoeléctrico. Si el potencial de frenado es de 2 V. Calcula la frecuencia umbral (en términos de 10^{14} Hz)
17. El umbral de longitud de onda para la emisión fotoeléctrica en un cierto metal es 5000 \AA . ¿Qué longitud de onda debe usarse para expulsar a los electrones con una energía cinética máxima igual a la mitad de su función trabajo?
18. Se desea determinar la función de trabajo de cierta superficie metálica. Cuando usamos una lámpara de mercurio ($\lambda = 546,1$ nm) el potencial retardado de 1,72 V reduce la fotocorriente a cero. Basándose en esta medida, ¿cuál es la función de trabajo del metal?