

FÍSICA CUÁNTICA

En los últimos años del siglo XIX y primeros del siglo XX se pusieron de manifiesto diversos hechos que no podían explicarse con las leyes de la física entonces conocida y que abrían nuevos interrogantes, demostrando que la física no era una ciencia terminada.

Algunos de estos hechos fueron:

➤ La forma de emitir radiación electromagnética en función de la temperatura que tienen los cuerpos.

Los cuerpos emiten radiación electromagnética a cualquier temperatura. Si la temperatura aumenta, la radiación emitida se hace más intensa y los cuerpos llegan a hacerse luminosos.

A partir de ahí, si la temperatura sigue aumentando, su color varía hacia tonos más blancos y azulados, debido a que la radiación emitida es más rica en longitudes de onda cortas.

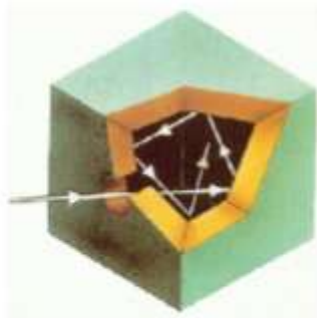
A finales del siglo XIX se propuso un modelo que se denominó modelo del cuerpo negro, para estudiar la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura.

De este modelo surgieron dos leyes:

- La Ley de Stefan Boltzman
- La Ley de Wien

¿QUÉ ES EL CUERPO NEGRO?

Es un objeto teórico que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro.



Ley de Stefan – Boltzman

“La cantidad total, por unidad de tiempo y superficie, de energía emitida por un cuerpo negro es proporcional a la potencia cuarta de su temperatura absoluta”

$$E = \sigma \cdot T^4$$

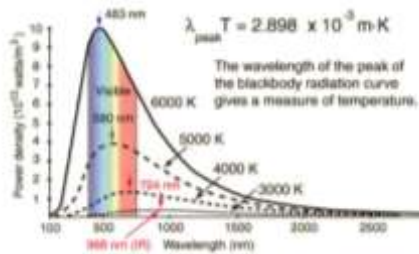
$$P = \sigma \cdot S \cdot T^4$$

Siendo $\sigma = \text{cte.} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J}/(\text{sm}^2\text{K}^4)$

Ley del desplazamiento de Wien

“El producto de la longitud de onda a la que se presenta un máximo de energía radiada λ_m , por la temperatura absoluta es constante”

$$\lambda_m \cdot T = 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$$



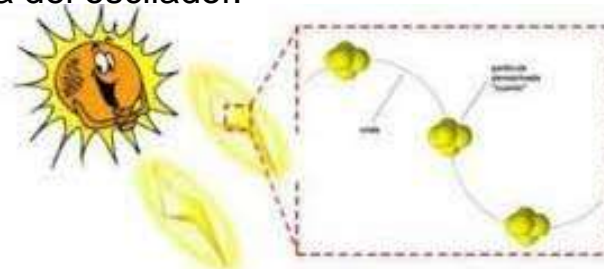
Otros hechos fueron:

- El comportamiento de la radiación electromagnética en el efecto fotoeléctrico.
- El comportamiento de la materia cuando interacciona consigo misma, como en los choques de electrones con átomos.
- El comportamiento ondulatorio de partículas materiales como los electrones.

Entre 1925 y 1927 , Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Born y otros desarrollaron y formalizaron una nueva teoría denominada mecánica cuántica, que permitió interpretar los espectros de los átomos polielectrónicos y dar solución a muchos otros problemas de la física.

Hipótesis de Planck:

Para explicar la radiación del cuerpo negro, Planck introdujo la hipótesis de que un oscilador de frecuencia natural, puede tomar o ceder energía únicamente en cantidades discretas o cuantos de energía, proporcionales a la frecuencia del oscilador.



Hipótesis de Planck:

Los cuerpos emiten energía de forma discreta en forma de “paquetes” o “cuantos” de energía (posteriormente llamados fotones), de frecuencia determinada.

Esta energía viene dada por:

$$E = hf$$

donde f es la frecuencia y h es la constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$).

(Recordemos que $f \cdot \lambda = c$)

Según la teoría de Planck, la energía que puede absorber o emitir un oscilador es:

$$E = n \cdot h \cdot f$$

- n es un número cuyo valor puede ser 1, 2, 3, etc.
- h es la constante de Planck; una constante universal. Su valor en unidades del SI es:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

- f es la frecuencia natural del oscilador.

La expresión de Planck permite relacionar la energía de una radiación electromagnética con su frecuencia. Teniendo en cuenta la relación entre la frecuencia y la longitud de onda, también se puede expresar la energía de la radiación en función de su longitud de onda.

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \left. \begin{array}{l} E = h \cdot f \\ \end{array} \right\} \rightarrow E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Para la luz visible la longitud de onda de la radiación está comprendida entre 380 nm (violeta) y 780 nm (rojo).

- a) Según la hipótesis de Planck, calcula la energía correspondiente a los fotones cuyas longitudes de onda se indican.
- b) Calcula cuántos fotones de luz roja se necesitan para acumular 10 J de energía.

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

- a) La hipótesis de Planck establece que los cuerpos absorben o emiten energía de forma cuantizada. La energía de la radiación coincide con la energía de los fotones o cuantos, y viene dada por la expresión:

$E = h \cdot f$, donde f es la frecuencia de la radiación.

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

- $E_{\text{violeta}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{3,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 5,2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

- $E_{\text{roja}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{7,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 2,5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

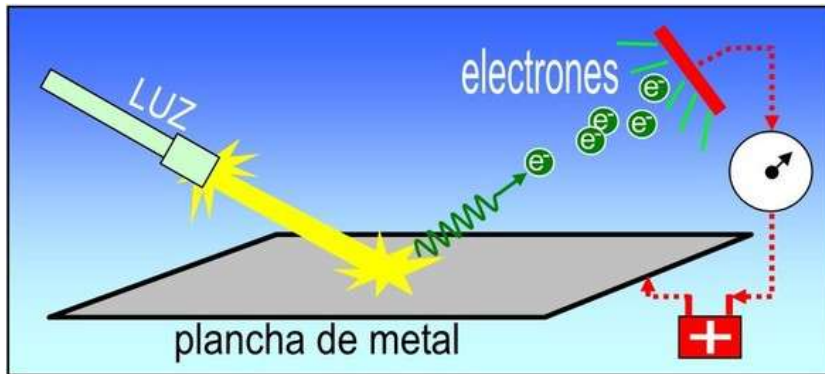
b) $E_{\text{Total}} = n \cdot E_{\text{fotón}} \rightarrow n = \frac{E_{\text{Total}}}{E_{\text{fotón}}} = \frac{10 \text{ J}}{2,5 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 4 \cdot 10^{19} \text{ fotones}$

Efecto fotoeléctrico. Interpretación de Einstein

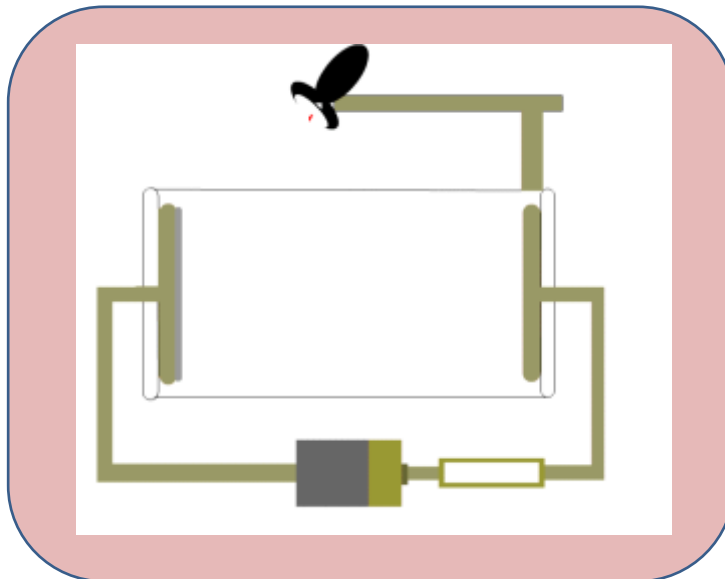
Se llama efecto fotoeléctrico al fenómeno mediante el cual la luz, al incidir sobre un metal, le arranca electrones.

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de las superficies metálicas, cuando se iluminan con luz de frecuencia adecuada.

Para cada metal existe una frecuencia mínima llamada **frecuencia umbral**, por debajo de la cual no se produce efecto fotoeléctrico.



La luz de determinada frecuencia incide en la placa metálica y es capaz de arrancar electrones de dicha placa.



Cuando la placa metálica es iluminada con luz de la frecuencia adecuada, se produce la emisión de electrones y se cierra el circuito.

Einstein explicó el efecto fotoeléctrico: la luz se propaga por el espacio transportando la energía en forma de cuantos de luz, llamados fotones, cuya energía viene dada por la ecuación

$$E = h \cdot f$$

Según Einstein, toda la energía de un fotón se transmite a un electrón del metal, y cuando éste salta de la superficie metálica posee una energía cinética dada por

$$h \cdot f = E_c + W_e$$

$$h \cdot f = \frac{1}{2} m v^2 + W_e$$

W_e es la energía mínima que el electrón necesita para escapar de la superficie del metal. Se suele denominar **trabajo de extracción**.

Si la energía del fotón es igual al trabajo de extracción, estamos en la **frecuencia umbral f_0** , frecuencia mínima necesaria para arrancar el electrón, entonces

$$W_e = h \cdot f_0$$

Tendremos:
$$\frac{1}{2}mv^2 = h \cdot f - h \cdot f_0$$

$$E_c = h \cdot (f - f_0)$$

Si la energía del fotón es mayor que el trabajo de extracción, el electrón escapa del metal con una determinada velocidad y por tanto con energía cinética.

ENERGÍA DEL FOTÓN = TRABAJO DE EXTRACCIÓN + ENERGÍA CINÉTICA DEL ELECTRÓN

Potencial de Retardo o Potencial de Frenado

El potencial inverso que anula la corriente se denomina potencial inverso o retardador V_r

Si en un circuito donde se está produciendo efecto fotoeléctrico, se invierte poco a poco la polaridad de la pila, el potencial inverso creado disminuye el número de electrones que alcanza el ánodo. La corriente llega a anularse para un potencial inverso denominado potencial retardador.

Es muy habitual que la energía cinética de los electrones por efecto fotoeléctrico venga determinada por un potencial retardador V_r de estos (que nos está dando su energía potencial)

Teniendo en cuenta que el campo eléctrico es conservativo

$$\Delta E_c = -\Delta E_p = q \cdot V_r$$

Es decir, la energía cinética máxima (E_{cmax}) de los electrones emitidos se puede medir determinando el potencial de retardo de dichos electrones.

$$E_{c \max} = q \cdot V_r$$

Resumiendo, las ecuaciones de Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico, siguiendo su balance energético serán:

E fotón incidente = W extracción del electrón + EC electrón arrancado

$$h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2} m_e v_e^2$$

Expresado en función del potencial de frenado:

$$\underbrace{h \cdot f}_{\text{Energía del fotón incidente}} = \underbrace{h \cdot f_0}_{\text{Energía umbral}} + \underbrace{q_e \cdot V_{\text{frenado}}}_{\text{Energía cinética del electrón arrancado}}$$

MECÁNICA CUÁNTICA

En la evolución de los distintos modelos atómicos, el de Bohr alcanzó un gran éxito al explicar el espectro del hidrógeno, pero no era aplicable a átomos con varios electrones.

¡Recuerda! Postulados de Bohr:

- ✓ Los electrones en los átomos se mueven en órbitas circulares alrededor del núcleo debido a la atracción coulombiana entre los electrones y el núcleo.
- ✓ El electrón solo puede moverse en órbitas para las cuales el momento angular L es un múltiplo entero de la constante de Planck.
- ✓ A pesar de que el electrón está acelerado constantemente, cuando se mueve en una órbita permitida no radia energía y entonces la energía total permanece constante.
- ✓ El electrón solo emite energía cuando salta de una órbita permitida de energía E_i a otra también permitida de energía menor E_f . La frecuencia de la radiación emitida viene dada por

$$f = \frac{E_i - E_f}{h}$$

MODELO DE NEILS BOHR



Estos postulados están a medio camino entre la Física Clásica y la Física Cuántica. Los físicos teóricos intentaron encontrar nuevas fórmulas que explicasen la estructura de los átomos. Esto se consiguió con la llamada mecánica cuántica.

La mecánica cuántica tiene un carácter estadístico, es esencialmente probabilística y utiliza un aparato matemático más complejo.

Tiene tres principios fundamentales:

- La hipótesis de De Broglie
- El principio de incertidumbre de Heisenberg
- La ecuación de onda de Schrödinger

Hipótesis de De Broglie. Dualidad onda – corpúsculo

Louis De Broglie propuso la existencia de “ondas de materia”. Su hipótesis consistía en suponer para la materia el comportamiento dual de la radiación, es decir, el comportamiento onda – partícula.

Así como el fotón tiene asociada una onda que gobierna su movimiento, una partícula de materia (por ejemplo un electrón) debe tener asociada una onda que gobierne su movimiento.

Tanto en la materia como en la radiación, la energía total está relacionada con la frecuencia de la onda asociada a su movimiento por la ecuación de Planck

$$E = h \cdot f$$

y la cantidad de movimiento (momento lineal) está relacionada con la longitud de onda de la onda asociada por la ecuación

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

¡Recuerda! $p = m \cdot v$

La relación anterior se llama relación de De Broglie, y predice la longitud de onda de materia asociada con el movimiento de la partícula.

Toda partícula que se mueva lleva asociada una onda cuya longitud de onda viene dada por la expresión

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

Solo partículas de tamaño muy pequeño como los electrones, pueden tener un comportamiento ondulatorio apreciable.

Principio de incertidumbre de Heisenberg

El hecho de que un cuerpo en movimiento pueda considerarse como un grupo de ondas de De Broglie, en vez de una entidad localizada, sugiere un límite fundamental para la precisión con que podemos medir sus propiedades corpusculares.

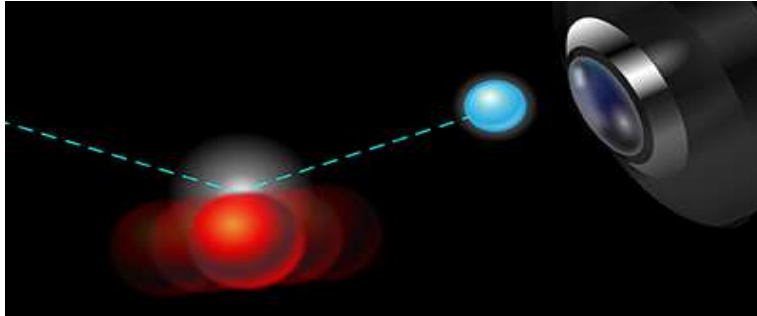
Heisenberg enunció su principio de incertidumbre, el cual establece que es imposible determinar la posición y el momento lineal de una partícula simultáneamente.

Esto expresado matemáticamente es:

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{h}{4\pi}$$

Veamos una aplicación: tratemos de determinar la posición y el momento lineal en un instante dado de un electrón mediante la observación con un microscopio.

Dicha partícula será observada por los fotones de luz que dispersa al ser iluminada.



En este proceso, cada fotón posee un momento lineal h/λ , y al entrar en colisión con el electrón, este sufre una variación de su momento lineal p , por lo que la realización de la medida introduce una incertidumbre en la determinación del momento lineal del electrón Δp

Cuanto mayor sea la longitud de onda de la luz empleada para “ver” al electrón, menor será su momento lineal.

*No es posible conocer simultáneamente y con toda precisión la velocidad y la posición de un electrón, y por tanto, la trayectoria exacta del electrón.
Esto implica la imposibilidad de conocer con exactitud las órbitas de los electrones.*

Principio de indeterminación para la posición y el momento

No es posible determinar a la vez el valor exacto de la posición y el momento lineal de un objeto cuántico. Ambas indeterminaciones guardan la siguiente relación:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

- Δx : indeterminación en la posición.
- Δp : indeterminación en el momento lineal.

Principio de indeterminación para la energía y el tiempo

No es posible determinar a la vez el valor exacto de la energía de un objeto cuántico y el tiempo durante el cual el objeto permanece en ese estado de energía. Ambas indeterminaciones guardan la siguiente relación:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

- ΔE : indeterminación en la energía.
- Δt : indeterminación en el tiempo.

Ecuación de Onda de Schrodinger

- Schrodinger planteó una serie de ecuaciones para explicar el comportamiento del electrón.
- Son ecuaciones muy complejas, de las que obtenemos funciones de probabilidad.
- Usamos unas matemáticas diferentes, la llamada "Mecánica Cuántica"

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$



Erwin Schrödinger
(1887-1961)

FÍSICA NUCLEAR

Reacciones Nucleares

Se denominan reacciones nucleares a los procesos en los que se producen cambios en el núcleo de los átomos.

Estos cambios pueden ser en el número de protones, en el número de neutrones o en el estado energético.

En las reacciones nucleares se conserva la energía, el momento lineal, el momento angular y la carga eléctrica.

Las reacciones nucleares se clasifican en cuatro grupos:

- ✓ Radiactividad o desintegración espontánea de un isótopo radiactivo, bien sea natural o artificial.
- ✓ Reacciones de bombardeo: captura de una partícula por parte de un isótopo y la posterior desintegración de éste, emitiendo alguna partícula.
- ✓ Fisión de un isótopo inestable pesado.
- ✓ Fusión de isótopos ligeros.

Modos de desintegración

Las reacciones más importantes son:

- Emisión α
- Emisión β^-
- Emisión β^+
- Captura electrónica
- Emisión γ

Emisión α

Este tipo de desintegración nuclear es la fuente natural de radiactividad más importante. Se produce en átomos con más de 82 electrones. Las partículas alfa ${}^2_4\text{He}$ emitidas tienen valores discretos de energía.

Estas reacciones se representan así:

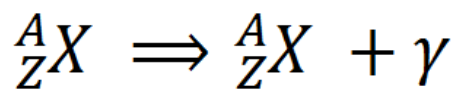
**Emisión β**

Este tipo de desintegración nuclear se produce por la emisión de electrones desde el núcleo de un elemento radiactivo. Estos electrones provienen de la desintegración de un neutrón.

Son de la forma: ${}^A_ZX \Rightarrow {}^A_{Z+1}Y + \beta$

Emisión γ

Son de la forma:



Ley de la Desintegración Radiactiva

En una muestra de material radiactivo compuesta inicialmente por N_0 núcleos, la cantidad de núcleos va disminuyendo con el tiempo, debido a que parte de ellos se va desintegrando.

En un instante posterior la cantidad que queda sin desintegrar es N , y se demuestra que en el intervalo de tiempo Δt , se desintegra un número de núcleos ΔN cuyo valor es proporcional al número de núcleos existentes.

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

La constante de proporcionalidad λ se llama constante de desintegración o constante radiactiva. Representa la probabilidad por unidad de tiempo de que se desintegre un núcleo, y tiene un valor característico para cada núcleo radiactivo.

El signo (-) indica que la variación es siempre negativa, es decir, N disminuye.

Si extendemos las variaciones a diferenciales e integramos, obtenemos las siguientes expresiones:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Ley de desintegración radiactiva

“El número de núcleos de una muestra disminuye exponencialmente con el tiempo”

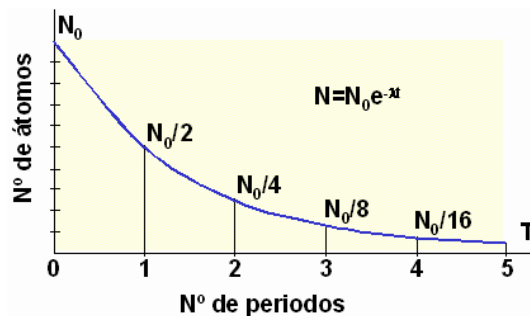
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

En ocasiones es muy útil cambiar el número de núcleos por la masa puesto que es proporcional, y nos queda:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Algunas magnitudes importantes son:

- El periodo de semidesintegración o semivida $t_{1/2}$, es el tiempo que tarda una muestra radiactiva de N_0 núcleos en reducirse a la mitad, es decir $N = N_0 / 2$



El periodo de semidesintegración se puede calcular fácilmente:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{si} \quad N = \frac{N_0}{2}$$

$$\cancel{\frac{N_0}{2}} = \cancel{N_0} e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t}$$

$$\ln 1 - \ln 2 = \ln e^{-\lambda t} \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda t$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

➤ La vida media τ de una muestra radiactiva es el tiempo promedio de vida de los núcleos presentes.

Se cumple que

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

➤ La actividad o velocidad de desintegración de una muestra radiactiva que contiene N núcleos es el número de desintegraciones por unidad de tiempo

$$\begin{aligned} A &= -\frac{dN}{dt} = -\frac{d}{dt}(N_0 e^{-\lambda t}) \\ &= \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N \end{aligned}$$

En el sistema internacional se mide en Becquerel (Bq)

1 Bq equivale a una desintegración por segundo.

Energía de Enlace

La experiencia indica que los núcleos estables poseen masas más pequeñas que la suma de las masas de las partículas que los constituyen. La diferencia entre la masa experimental de un núcleo y la teórica se llama defecto de masa Δm

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{exp}}$$

Donde M_{exp} es la masa experimental del núcleo considerado, m_p es la masa del protón y m_n es la masa del neutrón.

Energía de Enlace

Se llama energía de enlace, o energía de ligadura del núcleo, a la energía que corresponde al defecto de masa, por tanto

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Es la energía que se desprende en el proceso de formación del núcleo a partir de sus constituyentes.

Esta es la energía que da la estabilidad al núcleo.

Se denomina **energía de enlace por nucleón** al cociente entre la energía de enlace y el número de nucleones.

Representa la energía necesaria para extraer un nucleón del núcleo que lo contiene y es una medida de la estabilidad del núcleo: los más estables son los que tienen mayor energía de enlace por nucleón.

Un nucleón es cada una de las partículas que contiene el núcleo, bien sea un protón o un neutrón.

La energía de enlace que mantiene los nucleones unidos es la energía equivalente al defecto de masa experimental del núcleo.