

## FÍSICA CUÁNTICA

### HIPÓTESIS DE PLANCK

Max Planck formuló una hipótesis con la que resolvía y daba explicación a algunos experimentos (radiación del cuerpo negro, espectros y efecto fotoeléctrico) que traían de cabeza a los científicos.

**Planck supuso que la materia emitía energía en pequeños paquetes o granos a los que llamó cuantos.**

La energía de un cuanto dependía de la frecuencia de la radiación emitida:

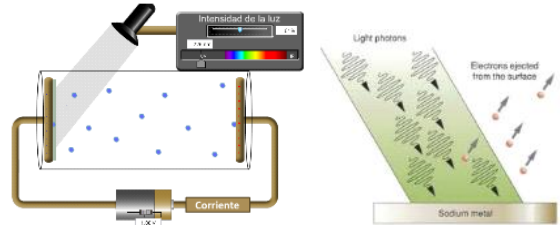
$$E = h \cdot f$$

h=constante de Planck= $6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s

### EFECTO FOTOELÉCTRICO

Cuando una luz de una determinada frecuencia iluminaba un metal, éste emitía electrones (fotoelectrones).

Einstein lo explicó diciendo que la luz estaba compuesta por fotones con una energía que sólo dependía de la frecuencia de esa luz (Hipótesis de Planck) y no de la intensidad de la radiación. Cuando estos fotones llegaban al metal, transmitían su energía a los electrones que la utilizaban para abandonar la red metálica con una energía cinética.



El Efecto Fotoeléctrico explicado por **Einstein** explica también el comportamiento dual (**onda-corpúsculo**) de la luz ya que considera a la luz como una partícula que choca con los electrones y poseen una energía que depende de la frecuencia.

El balance energético que Einstein propuso fue el siguiente:

$$h \cdot f = h \cdot f_{\text{umbral}} + E_c$$

h·f=Energía del fotón  
h·f<sub>umbral</sub>=Trabajo de extracción del electrón  
E<sub>c</sub>=Energía cinética del fotoelectrón.

Cuando se producía el efecto fotoeléctrico y se aumentaba la intensidad (número de fotones) de la radiación aumentaba el número de fotoelectrones emitidos.

Cuando con un tipo de luz de una frecuencia determinada no se producía efecto fotoeléctrico tampoco se producía si aumentaba la intensidad de esa luz (aunque hubiese más fotones cada uno de ellos no posee la energía suficiente).

### EJERCICIOS EFECTO FOTOELÉCTRICO

**Ejercicio:** Los fotoelectrones expulsados de la superficie de un metal por una luz de  $4 \cdot 10^{-7}$  m de longitud de onda en el vacío son frenados por una diferencia de potencial de 0,8 V. ¿Qué diferencia de potencial se requiere para frenar los electrones expulsados de dicho metal por otra luz de  $3 \cdot 10^{-7}$  m de longitud de onda en el vacío? Justifique todas sus respuestas.  $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C;  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J s

**Solución:** Esa diferencia de potencial se utiliza para anular la E<sub>c</sub> con la que saldrían despedidos los fotoelectrones:  
 $E_c = E_p = q \cdot \Delta V = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,8 = 1,28 \cdot 10^{-19}$  C  
 Con lo que podremos calcular el trabajo de extracción que es independiente del tipo de radiación que utilizemos.

$$h \cdot f = W_{\text{extracción}} + E_c$$

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = W_{\text{extr}} + E_c;$$

$$6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{-7}} = W_{\text{extr}} + 1,28 \cdot 10^{-19}$$

$$W_{\text{extr}} = 3,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Ahora, con la otra luz:

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = W_{\text{extr}} + q \cdot \Delta V;$$

$$6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-7}} = 3,7 \cdot 10^{-19} + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \Delta V$$

$$\Delta V = 1,83 \text{ voltios}$$

**Ejercicio:** Se ilumina la superficie de un metal con dos haces de longitudes de onda  $\lambda_1 = 1,96 \cdot 10^{-7}$  m y  $\lambda_2 = 2,65 \cdot 10^{-7}$  m. Se observa que la energía cinética de los electrones emitidos con la luz de longitud de onda  $\lambda_1$  es el doble que la de los emitidos con la de  $\lambda_2$ . Obtenga la energía cinética con que salen los electrones en ambos casos y la función trabajo del metal.  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J s;  $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>

**Solución:**

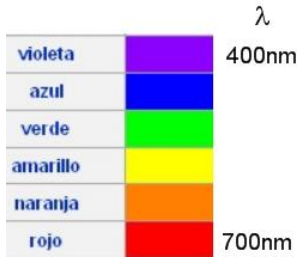
$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = W_{\text{extr}} + E_c$$

$$h \cdot \frac{c}{1,96 \cdot 10^{-7}} = W_{\text{extr}} + 2 \cdot E_c$$

$$h \cdot \frac{c}{2,65 \cdot 10^{-7}} = W_{\text{extr}} + E_c$$

Resolviendo el sistema:  $E_c = 2,64 \cdot 10^{-19}$  J;  $W_{\text{extr}} = 4,86 \cdot 10^{-19}$  J

## FÍSICA CUÁNTICA

<p><b>Ejercicio:</b> Se ilumina la superficie de un metal con dos fuentes de luz distintas observándose lo siguiente: con la primera de frecuencia <math>f_1</math> e intensidad <math>I_1</math> no se produce efecto fotoeléctrico mientras que si la iluminamos con la segunda de frecuencia <math>f_2</math> e intensidad <math>I_2</math> se emiten electrones. (i) ¿Qué ocurre si se duplica la intensidad de la fuente 1?; (ii) ¿y si se duplica la intensidad de la luz de la fuente 2?; (iii) ¿y si se incrementa la frecuencia de la fuente 2? Razone sus respuestas.</p>	<p><b>Solución:</b> (i) nada ya que los fotones no tienen energía suficiente; (ii) aumentarían los fotoelectrones emitidos; (iii) aumentaría la <math>E_c</math> de los fotoelectrones emitidos.</p>																		
<p><b>Ejercicio:</b> Para poder determinar la constante de Planck de forma experimental se ilumina una superficie de cobre con una luz de <math>1,2 \cdot 10^{15}</math> Hz observándose que los electrones se emiten con una velocidad de <math>3,164 \cdot 10^5</math> m s<sup>-1</sup>. A continuación se ilumina la misma superficie con otra luz de <math>1,4 \cdot 10^{15}</math> Hz y se observa que los electrones se emiten con una velocidad de <math>6,255 \cdot 10^5</math> m s<sup>-1</sup>. Determine el valor de la constante de Planck y la función trabajo del cobre. <math>c = 3 \cdot 10^8</math> m s<sup>-1</sup>; <math>e = 1,6 \cdot 10^{-19}</math> C; <math>m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}</math> kg</p>	<p><b>Solución:</b></p> $h \cdot 1,2 \cdot 10^{15} = W_{\text{extr}} + \frac{1}{2} 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3,164 \cdot 10^5)^2$ $h \cdot 1,4 \cdot 10^{15} = W_{\text{extr}} + \frac{1}{2} 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (6,255 \cdot 10^5)^2$ $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}; W_{\text{extr}} = 7,49 \cdot 10^{-19} \text{ J}$																		
<p><b>Ejercicio:</b> Cuando se ilumina un metal con un haz de luz monocromática se observa que se produce emisión fotoeléctrica. Si se varía la intensidad del haz de luz que incide en el metal, manteniéndose constante su longitud de onda, ¿variará la velocidad máxima de los electrones emitidos? ¿Y el número de electrones emitidos en un segundo? Razone las respuestas.</p>	<p><b>Solución:</b> La velocidad máxima (<math>E_c</math>) no variará; sí variará.</p>																		
<p><b>Ejercicio:</b> Una superficie metálica emite fotoelectrones cuando se ilumina con luz verde pero no emite con luz amarilla. Explique razonadamente qué ocurrirá cuando se ilumine con luz violeta y cuando se ilumine con luz roja.</p>	<p><b>Solución:</b> La radiación visible va desde el violeta (la más energética) hasta el rojo (de menor frecuencia y por tanto menos energética)</p> <div style="text-align: center;">  <p style="text-align: center;"><math>\lambda</math></p> <table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px 5px;">violeta</td><td style="width: 15px; height: 15px; background-color: purple;"></td><td style="padding: 2px 5px;">400nm</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 5px;">azul</td><td style="width: 15px; height: 15px; background-color: blue;"></td><td></td></tr> <tr><td style="padding: 2px 5px;">verde</td><td style="width: 15px; height: 15px; background-color: green;"></td><td></td></tr> <tr><td style="padding: 2px 5px;">amarillo</td><td style="width: 15px; height: 15px; background-color: yellow;"></td><td></td></tr> <tr><td style="padding: 2px 5px;">naranja</td><td style="width: 15px; height: 15px; background-color: orange;"></td><td></td></tr> <tr><td style="padding: 2px 5px;">rojo</td><td style="width: 15px; height: 15px; background-color: red;"></td><td style="padding: 2px 5px;">700nm</td></tr> </table> </div> <p>Con luz violeta sí se producirá efecto fotoeléctrico con una <math>E_c</math> de los fotoelectrones mayor que con el verde. Con luz roja no se producirá efecto fotoeléctrico ya que los fotones no poseen energía suficiente.</p>	violeta		400nm	azul			verde			amarillo			naranja			rojo		700nm
violeta		400nm																	
azul																			
verde																			
amarillo																			
naranja																			
rojo		700nm																	
<p><b>Ejercicio:</b> Una radiación de <math>1,8 \cdot 10^{-7}</math> m de longitud de onda incide sobre una superficie de rubidio, cuyo trabajo de extracción es 2,26 eV. Explique razonadamente si se produce efecto fotoeléctrico y, en caso afirmativo, calcule la frecuencia umbral del material y la velocidad de los electrones emitidos. <math>h = 6,63 \cdot 10^{-34}</math> J s; <math>c = 3 \cdot 10^8</math> m s<sup>-1</sup>; <math>e = 1,6 \cdot 10^{-19}</math> C; <math>m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}</math> kg</p>	<p><b>Solución:</b></p> $E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{1,8 \cdot 10^{-7}} = 1,105 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ $W_{\text{extr}} = 2,26 \text{ eV} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 3,616 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ <p>Como la energía de los fotones es superior al <math>W_{\text{extr}}</math>, entonces sí se producirá efecto fotoeléctrico.</p> $W_{\text{extr}} = h \cdot f_{\text{umbral}}; 3,616 \cdot 10^{-19} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot f_{\text{umbral}}$ $f_{\text{umbral}} = 5,45 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ $1,105 \cdot 10^{-18} = 3,616 \cdot 10^{-19} + \frac{1}{2} 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot v^2$ $v = 1,28 \cdot 10^6 \text{ m/s}$																		
<p><b>Ejercicio:</b> Una lámina metálica comienza a emitir electrones al incidir sobre ella radiación de longitud de onda <math>2,5 \cdot 10^{-7}</math> m. Calcule la velocidad máxima de los fotoelectrones emitidos si la radiación que incide sobre la lámina tiene una longitud de onda de <math>5 \cdot 10^{-8}</math> m. Datos: <math>h = 6,63 \cdot 10^{-34}</math> J s; <math>c = 3 \cdot 10^8</math> m s<sup>-1</sup>; <math>m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}</math> kg</p>																			

## FÍSICA CUÁNTICA

### HIPÓTESIS DE DE BROGLIE DUALIDAD ONDA CORPÚSCULO

Si el fotón, una partícula que se mueve, se comporta como una onda, ¿por qué no podía pasar igual con el electrón que también es una partícula y se mueve?

$$E = h \cdot \nu \rightarrow \text{Planck}$$

$$E = m \cdot c^2 \rightarrow \text{Einstein}$$

Igualando ambas expresiones:

$$h \cdot \nu = m \cdot c^2; \text{ como } \lambda = c/\nu, \text{ entonces}$$

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot c} \quad (\text{longitud de onda del fotón})$$

Para el electrón sería: 
$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$
  
(longitud de onda del electrón)

Según De Broglie, todo lo que se movía tenía asociada una longitud de onda cuyo valor venía dado por la expresión anterior.

**Ejercicio:** Explique la hipótesis de De Broglie de dualidad onda-corpúsculo y por qué no se considera dicha dualidad al estudiar los fenómenos macroscópicos.

Solución:

Un coche de 2000 kg circulando a 20 m/s tendría la siguiente  $\lambda$  asociada:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{2000 \cdot 20} = 1,6 \cdot 10^{-38} \text{ m}$$

Es un valor extremadamente pequeño y no podemos observarlo.

**Ejercicio:** Determine la relación entre las longitudes de onda asociadas a electrones y protones acelerados con una diferencia de potencial de  $2 \cdot 10^4$  V.

Datos:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J s;  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  C;  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg;  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg

Solución:

$$E_p = q \cdot \Delta V = Ec = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Electrón:  $1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^4 = \frac{1}{2} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot v_e^2$ ;

$$v_e = 8,4 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

Para el protón:

$$v_p = 2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

$\lambda_e = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 8,4 \cdot 10^7} = 8,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}$	$\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = 44$
$\lambda_p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 2 \cdot 10^6} = 1,98 \cdot 10^{-13} \text{ m}$	

**Ejercicio:** Si un electrón y un neutrón se mueven con la misma velocidad, ¿cuál de los dos tiene asociada una longitud de onda menor?

Solución: Será el neutrón ya que según la expresión de De Broglie el neutrón tiene mayor masa y por tanto menor  $\lambda$

### PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG

Heisenberg decía que no se podía conocer al mismo tiempo y de forma certera la posición y la velocidad de una partícula, por lo que no se podía conocer su trayectoria.

$$\Delta x \cdot \Delta(m \cdot v) \geq \frac{h}{4 \cdot \pi}$$

El modelo atómico que se basaba en "trayectorias" u órbitas del electrón quedaba anulado.

$\Delta x$  = error cometido en la determinación de la posición del electrón.

$\Delta v$  = error cometido en la determinación de la velocidad del electrón.

Si se conocía muy bien la posición del electrón (error pequeño) se debía conocer mal su velocidad y a la inversa.

A partir de este momento nace la Física Cuántica que trabaja con probabilidades, o sea, se deja de hablar de órbitas y se empieza a hablar de **orbitales** (zonas en el espacio de máxima probabilidad de que se encuentre el electrón).

**Ejercicio:** Halla la indeterminación cuando se desea fijar la posición de un protón, si su velocidad es de  $10^4$  m/s con una imprecisión del 0,0005%.

Dato: masa del protón =  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg;  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J s

Solución:

Datos:  $v = 10^4$  m/s  $\rightarrow$  0,0005%;  $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg;  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J s

La imprecisión en la velocidad es el 0,0005% de su valor es decir: 0,05 m/s.

Relación de Heisenberg:

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

$$\Delta x \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 0,05 \geq \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{4 \cdot \pi}$$

$$\Delta x \geq 6,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Esta imprecisión es enorme en el caso del estudio del electrón.