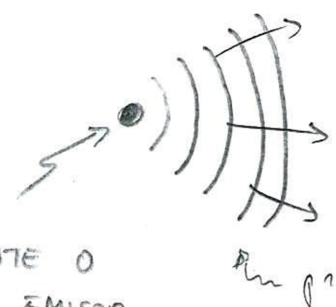
1 FÍSICA CUÁNTICA

1.1. DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA

▶ ONDAS Y PARTÍCULAS en FÍSICA CLÁSICA

- PARTÍCULAS: objetos que en cada instante t están en un único punto del espacio (posición), y evolucionan describiendo una curva en el espacio (una sucesión continua de posiciones que llamamos trayectoria).

- ONDAS: fenómenos de transmisión de energía a través de la vibración de un medio material (o la vibración de los campos $\vec{E}$ y $\vec{B}$ si las ondas son electromagnéticas). Una onda se origina en la perturbación del medio (o el campo) por parte de la fuente emisora, y luego se propaga de modo que en el mismo instante t muchos puntos del medio vibran a la vez, y no se puede decir que la onda esté en un único punto, sino más bien se extiende por toda una región del espacio.

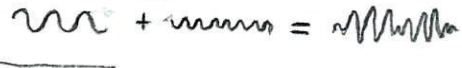


FUENTE O FOCO EMISOR

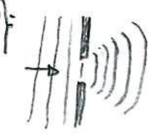
la propagación de la onda en distintas direcciones.

• DOS FENÓMENOS ASOCIADOS A LAS ONDAS que no existen para las partículas:

→ INTERFERENCIA:



→ DIFRACCIÓN:



▷ PARTICULAS en FISICA CUÁNTICA:

«Dualidad onda - partícula» & «λ de de Broglie».

La Física Cuántica nació para explicar fenómenos que no se entendían con la Física Clásica del S. XIX (por ejemplo, los átomos), y supone renunciar a los conceptos de partícula y trayectoria:

- DUALIDAD ONDA-PARTICULA: los objetos que llamamos partículas tienen un comportamiento alternante, de modo que
  - en el instante en que hacemos una medición para detectarlos, presentan un comportamiento "tipo partícula clásica": la hallamos en un único punto del espacio (posición).
  - en el tiempo que pasa hasta que realizamos otra medición, presentan un comportamiento "tipo onda clásica": su presencia se va extendiendo por una región del espacio y puede verse sujeta a fenómenos de difracción e interferencia:

1ª MEDICIÓN: Encontramos al electrón en el punto P

INTERVALO de TIEMPO en QUE NO MEDIMOS: El electrón ya no está en ninguna posición determinada, sino que se propaga desde P como una onda.

2ª MEDICIÓN: Volvemos a encontrar al electrón en un punto.

- ONDAS "de PROBABILIDAD": el significado de esta onda es probabilístico. Donde es más intensa en un instante dado, habrá más probabilidad de encontrar a la partícula si en ese instante hacemos una medición. Pero no es posible conocer con certeza dónde la vamos a encontrar cuando midamos. La visión de la naturaleza de la Física Cuántica ya no es "determinista", sino "probabilista" (Einstein describía este hecho sorprendente diciendo que es como si "Dios jugara a los dados").

1.2.- λ de DE BROGLIE

Nunca nos habíamos dado cuenta del comportamiento ondulatorio de las partículas hasta el S. XX porque si estudiamos objetos grandes —como balas, planetas, camiones— sus ondas de probabilidad se parecen mucho a una trayectoria:

en cambio para objetos pequeños —como los electrones— nos recuerdan, más bien, a las olas en la superficie del mar. El físico Louis de Broglie propuso una ecuación para saber si los aspectos ondulatorios asociados a una partícula serán apreciables o no:

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{mv}} \quad (1)$$

« Longitud de onda de DE BROGLIE »

(a una partícula de masa m que se mueve con velocidad v, le asociamos una onda de longitud de onda λ).

$$\boxed{h = 6{,}626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} \quad (2)$$

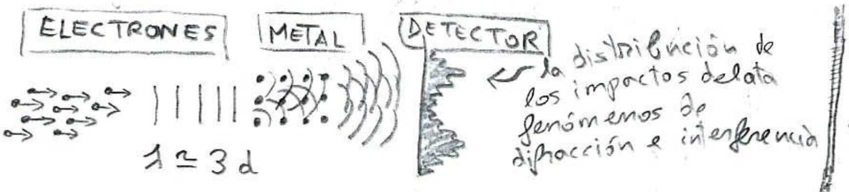
"constante de Planck"

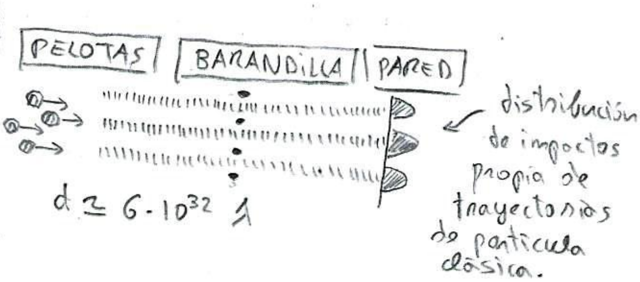
a veces se escribe así: $\lambda = \frac{h}{p}$, donde $p = mv$ es la "cantidad de movimiento".

- Los fenómenos típicos de las ondas (difracción, interferencia, etc.) son inapreciables para λ demasiado pequeños, y por eso no se perciben para objetos como la pelota de tenis:

$$\begin{cases} \lambda(\text{pelota de tenis}) = \dfrac{6{,}6 \cdot 10^{-34}\,(J \cdot s)}{0{,}2\,(kg) \cdot 5\,(m/s)} = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ m \\ \lambda(\text{electrón}) = \dfrac{6{,}6 \cdot 10^{-34}\,(J \cdot s)}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\,(kg) \cdot 2 \cdot 10^{6}\,(m/s)} = 3{,}3 \cdot 10^{-10}\ m \end{cases}$$

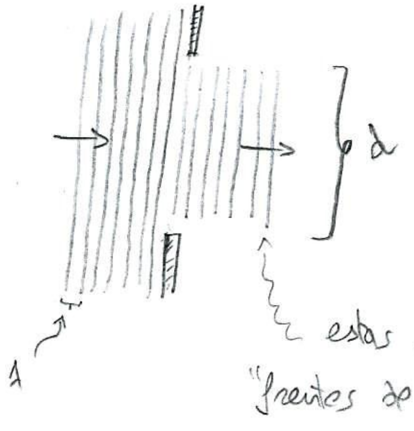
Por ejemplo, para que se manifiesten fenómenos característicos de la difracción de ondas, las aperturas entre los obstáculos que la onda encuentra tienen que ser menores o, a lo sumo, de tamaño parecido a la longitud de onda, $\boxed{\lambda \geq d}$ (ver punto siguiente, 1.3). Imaginemos que lanzamos electrones contra una fina lámina de metal, cuya estructura sea en forma de red con unas distancias interatómicas del orden de $d = 10^{-10}$ m. A su vez, imaginemos que lanzamos pelotas de tenis contra una barandilla cuyos barrotes están separados entre sí unos $d = 4 \cdot 10^{-1}$ m:





1.3.- DIFRACCIÓN de ELECTRONES

La difracción de una onda clásica se podría definir como su comportamiento al encontrar <u>obstáculos</u> en el medio de propagación. Su manifestación más conocida es la de la "rendija": imaginemos una onda plana de longitud de onda λ que llega a un obstáculo que tiene una <u>apertura</u> ("rendija") de <u>tamaño d</u>. Pueden suceder tres cosas:



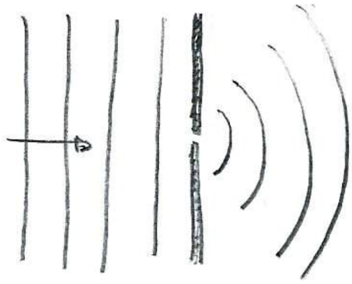
estas líneas representan los "frentes de onda" (las crestas).

Si $\boxed{d \gg \lambda}$: el obstáculo sólo "corta" la onda, y se suele decir que "<u>NO HAY DIFRACCIÓN</u>".

(apertura mucho mayor que λ)

Si $\boxed{d \ll \lambda}$:

(apertura mucho menor que λ)



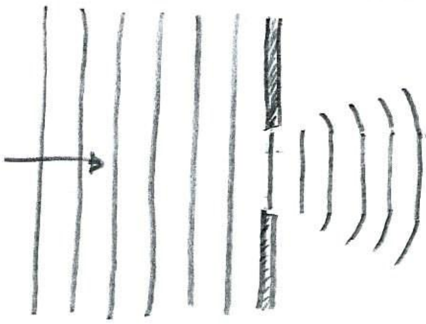
la rendija se convierte en un nuevo foco emisor de una onda de tipo esférico (o circular, en 2D).

EN ESTOS dos CASOS se suele decir que «SÍ HAY DIFRACCIÓN»

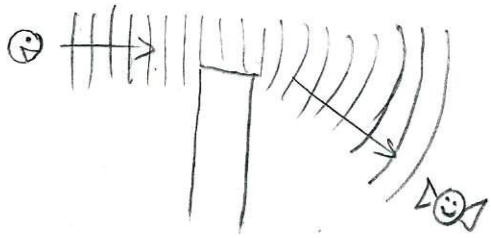
Si $\boxed{d \sim \lambda}$:

(apertura comparable a λ; por ejemplo, que una no sea más de 10 veces mayor que la otra).

el obstáculo corta la onda, que en el centro sigue pareciéndose a una plana y en los lados se ensancha y se curva:



POR EJEMPLO, el fenómeno de difracción del sonido es el que nos permite oír a una persona al otro lado de una pared aunque no la veamos:



▷ DIFRACCIÓN de ELECTRONES: si lanzamos un haz de electrones contra un sólido cuyos átomos están distribuidos en forma de red ("cristal"), si la λ de de Broglie de los electrones es comparable (o mayor) a la distancia d entre los átomos de la red, observaremos un fenómeno de difracción de partículas.

1.4.- EL FOTÓN

: la idea cuántica de la dualidad onda-partícula también ha sido aplicada para estudiar la luz, que en Física Clásica se considera una onda electromagnética. De nuevo, mientras "no estamos midiendo", la luz viajará en forma de onda, igual que en la teoría clásica; pero al "medir" aparece un comportamiento de tipo partícula: la energía que la luz transporta no la absorbemos (con nuestro detector de luz, digamos) de manera continua, sino que la vamos absorbiendo en forma de "paquetes" indivisibles de energía, como si un haz de luz estuviera constituido por una serie de pequeñas partículas que impactaran en nuestro detector. Estas partículas se llaman <u>fotones</u>, y Einstein propuso su existencia, asociando a un fotón de un haz de luz de frecuencia f la siguiente energía:

$$\boxed{E = hf} \quad (3)$$

NOTA: recordemos que $v_p = \lambda \cdot f$, y para los fotones $v_p = c$ (luz en el vacío) $\Rightarrow$ $\boxed{f = \frac{c}{\lambda}}$ (3.bis)

2 ÁTOMO de BOHR

Bohr hizo un modelo aplicando ideas cuánticas (basadas en un comportamiento ondulatorio del electrón) para el átomo de hidrógeno.

2.1.- DESCRIPCIÓN CLÁSICA del ÁTOMO de H

Suponemos un electrón en órbita circular (MCU) alrededor de un protón por acción de la fuerza eléctrica (ley de Coulomb):

$$\boxed{E_M = \frac{1}{2}mv^2 - k\frac{q^2}{R}} \quad (4)$$

MCU: $\frac{v^2}{R} = a_N = \frac{F_e}{m} = \frac{1}{m}k\frac{q^2}{R^2}$ (*) ← (hemos usado 2ª NEW y ley de COULOMB) substituyendo con [X] en la $E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k\frac{q^2}{R}$,

y por tanto en [4]:

$$\boxed{E_M = -\frac{1}{2}k\frac{q^2}{R} = -E_c = \frac{1}{2}E_p} \quad (5)$$

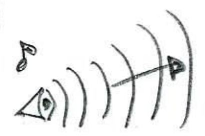
$$\left(\begin{array}{l} q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C \\ k = 9 \cdot 10^{9}\ N \cdot m^2/C^2 \end{array} \right)$$

ENERGÍA "CLÁSICA" del e^- en ÓRBITA CIRCULAR alrededor del p.

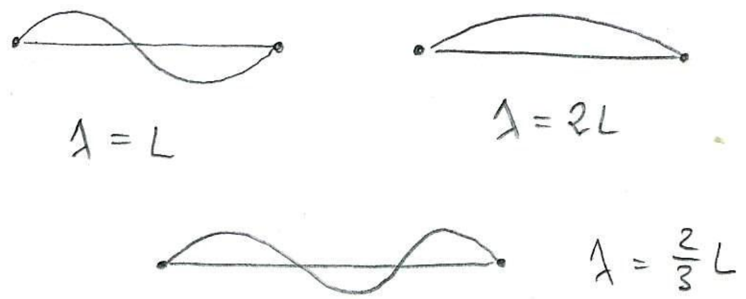
NOTA: esta energía depende del radio de la órbita, $E_M(R)$, y no hay motivos para suponer que éste no pueda tomar todos los valores posibles.

2.2.- MODELO DE BOHR:

la versión ondulatoria cuántica de una trayectoria rectilínea es tipo "onda viajera" (como el sonido). La versión de las órbitas circulares estacionarias es una "onda estacionaria", como las de la cuerda de guitarra o la membrana de un tambor: sólo algunas longitudes de onda son posibles ("están permitidos"):



ONDA VIAJERA



ONDAS ESTACIONARIAS en una cuerda de guitarra de longitud L (los extremos están fijos).

Bohr hizo la hipótesis de que sólo existían las órbitas electrónicas circulares cuya energía [5] cumpliese la siguiente condición:

$$\boxed{E(n) = -\frac{E_0}{n^2}} \quad (6) \qquad n = 1, 2, 3, 4 \ldots ; \quad E_0 = 13{,}6\ eV$$

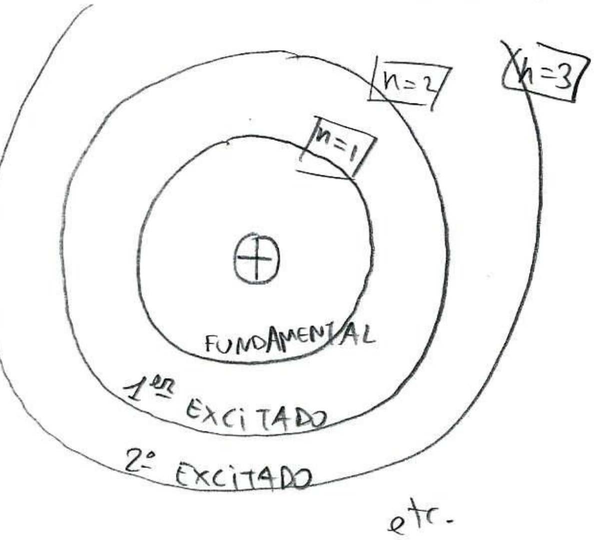
$$(1\ eV = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ J)$$

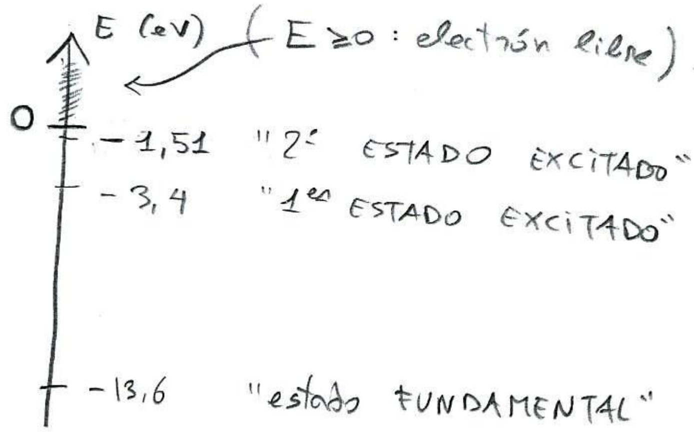
n se llama "número cuántico principal".

Con este modelo, Bohr pudo explicar el carácter discreto de los llamados espectros atómicos.

2.3.- ELECTRONES LIGADOS y ELECTRONES LIBRES

▶ NIVELES ENERGÉTICOS: los estados cuánticos posibles, o "niveles energéticos", del electrón en el átomo de hidrógeno según la fórmula [6] del modelo de Bohr reciben el nombre de:





Estos estados, "dentro del átomo", se llaman LIGADOS.

▶ ESTADOS de ELECTRÓN LIBRE: para distancias muy grandes al núcleo (el protón), la $\vec{F}_e$ es muy débil y la $E_p \simeq 0$: consideramos que el e^- está libre, es decir: no está describiendo ninguna órbita circular. Si está quieto, $v=0 \Rightarrow E_c = 0$, y $E_{TOTAL} = 0$ también. Esto se corresponde con el límite $n \to \infty$ en [6] (y con la "energía mínima de escape" del tema de GRAVITACIÓN). Si no está quieto, $v \neq 0 \Rightarrow$ toda la energía del e^- será cinética, $E = E_c = \frac{1}{2} m v^2$.

24.- TRANSICIONES ELECTRÓNICAS: EXCITACIONES Y RELAJACIONES.

▶ EXCITACIONES: paso de un estado electrónico n_I a otro n_F, de modo que $n_F > n_I \Rightarrow E(n_F) > E(n_I)$. Es necesario suministrar esta energía ganada,

$$\boxed{\Delta E = E_0 \left(\frac{1}{n_I^2} - \frac{1}{n_F^2} \right)} \quad (7)$$

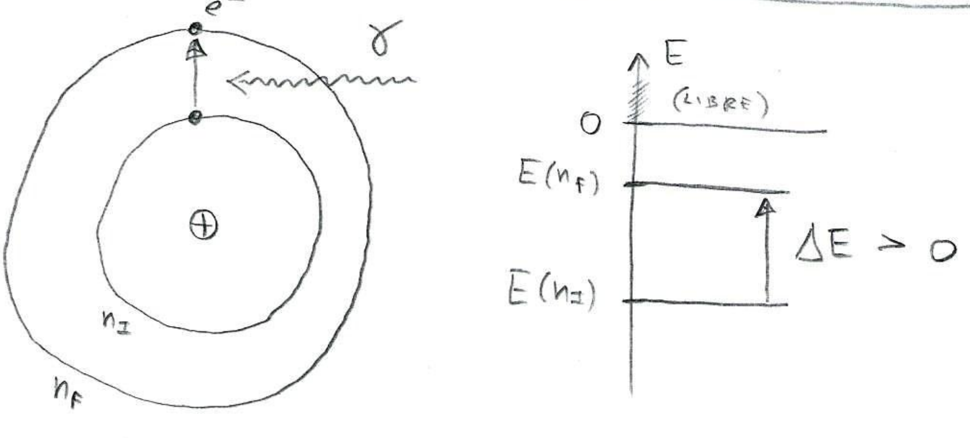
lo cual normalmente se hace iluminando el átomo con una luz de longitud de onda $\lambda \Leftrightarrow f = \frac{c}{\lambda}$ ($c = 3\cdot 10^8$ m/s). Cada uno de sus fotones tendrá, de acuerdo con [3], energía $E_\gamma = hf = \frac{hc}{\lambda}$. Como consecuencia de las características cuánticas de la luz, el e sólo podrá absorber la energía del haz con el que iluminamos de fotón en fotón —es decir: o absorbe cada vez la cantidad $E_\gamma = hc/\lambda$, o no absorbe nada—. Por otro lado, como dentro del átomo sólo las energías [6] son posibles, sólo podrá absorber las cantidades de energía que puedan calcularse con [7] —dando ciertos valores a n_I y n_F—.

Esta "cuantización" de las longitudes de onda absorbidas permitió explicar el carácter discreto de los espectros de absorción.

Aplicando el principio de conservación de la energía, «la energía del fotón absorbido se tiene que convertir en la que gana el electrón en la transición»:

$$E_\gamma = \Delta E \Rightarrow \quad (8) \quad \boxed{\lambda = \frac{hc}{E_0} \frac{1}{\left(\frac{1}{n_I^2} - \frac{1}{n_F^2} \right)}}$$

LONGITUD de ONDA del FOTÓN NECESARIO para provocar una excitación $n_I \rightarrow n_F$.

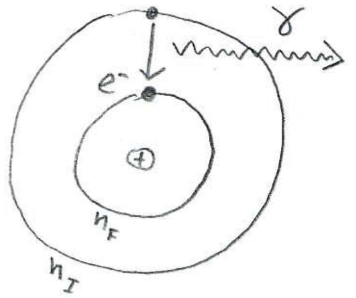


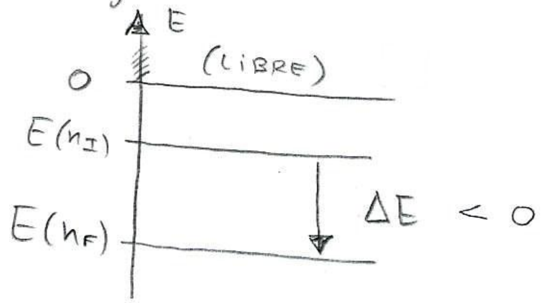
▶ RELAJACIONES (o "DESEXCITACIONES"): proceso contrario a la excitación: $n_I \rightarrow n_F < n_I \Rightarrow E(n_F) < E(n_I)$: el e^- pierde energía, y la emite en forma de fotón. Por conservación, la energía del fotón emitido será la que pierde el e^-: $E_\gamma = -\Delta E \Rightarrow$

$$\boxed{\lambda = \frac{hc}{E_0}\,\frac{1}{\left(\frac{1}{n_F^2} - \frac{1}{n_I^2}\right)}} \quad (9)$$

LONGITUD de ONDA del fotón emitido en una relajación $n_I \rightarrow n_F$.

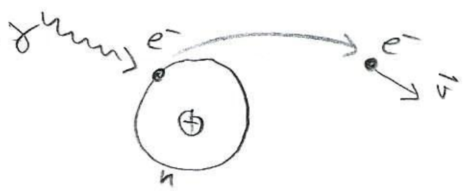
Con este modelo se logró explicar el carácter discreto del llamado "espectro de emisión" del átomo de hidrógeno.

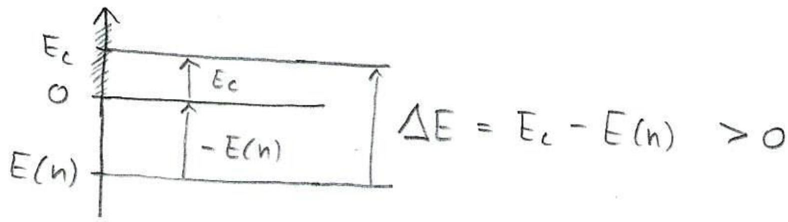




2.5.- IONIZACIONES:

se dice que "ionizamos" un átomo cuando le arrancamos un electrón, es decir: cuando le damos la energía necesaria para liberarse de la atracción del núcleo del átomo, o lo que es lo mismo: para llegar a un estado final de energía mecánica total nula (electrón libre y quieto, $v=0$) o positiva (electrón libre y en movimiento, $E_{TOTAL} = E_c$):





Por conservación de la energía, el fotón que absorbe el e^- en el proceso tiene la energía que este gana,

$$(10) \quad \boxed{\underbrace{E_\gamma}_{\text{energía absorbida}} = \underbrace{E_c}_{} - \underbrace{E(n)}_{\text{energía mínima necesaria para liberarse.}}}$$

la energía sobrante se convierte en energía cinética (velocidad).

$\Rightarrow$ la E_γ mínima para ionizar el átomo, si el e^- está en estado n, será con $E_c = 0$, $\Rightarrow$

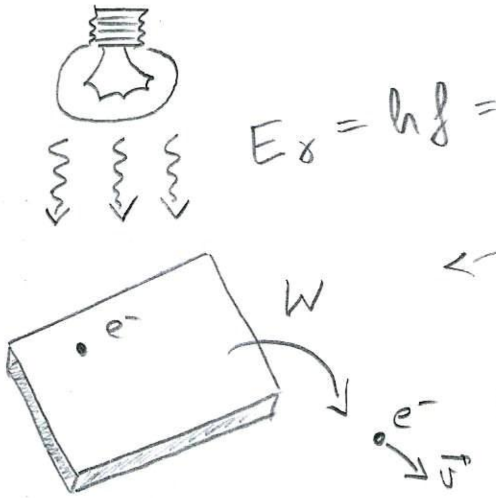
$$\Rightarrow \frac{hc}{\lambda} = E_\gamma = -E(n).$$

longitud de onda del fotón.

Pepe Ródenas Borja
mayo 2015

3 EFECTO FOTOELÉCTRICO

El efecto fotoeléctrico consiste en <u>arrancar electrones</u> de una <u>placa metálica</u> (llamada a veces "célula fotoeléctrica") <u>al iluminarla</u> con luz:



$$E_\gamma = hf = h\frac{c}{\lambda}$$ ← [ENERGÍA de los FOTONES INCIDENTES]

W ← [ENERGÍA de ENLACE del electrón en la placa ("TRABAJO de EXTRACCIÓN")]

e^- E_c ← [ENERGÍA del ELECTRÓN LIBRE].

▶ El efecto fotoeléctrico se rige por las siguientes dos REGLAS CUÁNTICAS:

1.- El electrón sólo puede absorber energía de la luz de fotón en fotón. (No puede absorber dos a la vez, ni uno y medio o un tercio de fotón)

2.- La mínima energía que el electrón puede absorber es la "energía de enlace" de la placa, W, también conocida como "trabajo de extracción".

(W: es la energía necesaria para arrancar al electrón y dejarlo libre con $v=0 \Rightarrow E_c=0$. Sólo depende de la placa).

▶ <u>BALANCE ENERGÉTICO</u> (conservación de la energía) del efecto fotoeléctrico:

$$\boxed{E_\gamma = W + E_c} \quad (11)$$

... es decir: la energía E_γ del fotón absorbido se reparte entre la necesaria para escapar de la placa, W, y la energía cinética E_c que tiene el e^- cuando está libre. Podemos reescribir [11] así:

$$(12)\quad \boxed{\underbrace{hf}_{E_\gamma} = W + \underbrace{\tfrac{1}{2}mv^2}_{E_c}}$$

, o también con longitudes de onda: $E_\gamma = \dfrac{hc}{\lambda}$.

▶ **FRECUENCIA UMBRAL**, f_0: se define como la f mínima que puede tener un fotón para provocar efecto fotoeléctrico (arrancar un electrón), correspondiente al caso en que toda su energía E_γ se invierte en la energía de enlace W, y el electrón se arranca pero queda quieto, $v=0 \Rightarrow E_c=0$.

- Según [12], $hf_0 = W \Rightarrow \boxed{f_0 = \dfrac{W}{h}}$ (13)
- Análogamente se define la λ_0, "longitud de onda umbral", como la λ máxima para provocar efecto fotoeléctrico, $\boxed{\lambda_0 = \dfrac{hc}{W}}$ (14)
- CASOS POSIBLES:
  - $\boxed{f < f_0}$ (ó: $\lambda > \lambda_0$) $\rightsquigarrow$ no se arrancan e^- (no hay efecto fot.)
  - $\boxed{f = f_0}$ (ó: $\lambda = \lambda_0$) $\rightsquigarrow$ se arrancan e^-, y quedan con $v=0$
  - $\boxed{f > f_0}$ (ó: $\lambda < \lambda_0$) $\rightsquigarrow$ se arrancan e^-, y quedan con $v \neq 0$

  (sí hay ef. fotoelec.)

▶ **POTENCIA EMITIDA** y **NÚMERO de FOTONES**:

$$(15)\quad \boxed{P = i \cdot E_\gamma}$$

← esta ecuación relaciona los fotones por segundo que emite la fuente con su potencia.

$$\underbrace{\left(\frac{\text{energía emitida}}{s}\right)}_{\substack{\text{POTENCIA} \\ (W = J/s)}} = \underbrace{\left(\frac{\text{nº de fotones emitidos}}{s}\right)}_{\substack{\text{INTENSIDAD} \\ (\text{fotones}/s)}} \cdot \underbrace{\left(\begin{matrix}\text{energía} \\ \text{de cada} \\ \text{fotón}\end{matrix}\right)}_{\substack{\text{ENERGÍA} \\ (J)}}$$

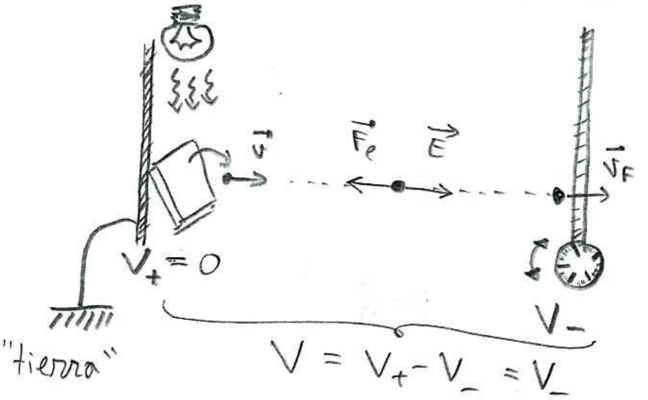
- Si doblamos P sin cambiar f, $E_\gamma = hf$ se mantiene, y lo único que hemos hecho es doblar i, o sea: enviar más fotones por segundo. Si f era $f < f_0$, los e^- no podrán absorberlos (aunque enviemos más), y seguirá sin producirse efecto fotoeléctrico. En general, puede decirse que:

«La producción (o no) de efecto fotoeléctrico no depende de la P de la fuente, sino de la f de la luz incidente». (16)

▷ METÁFORA del PRESIDIARIO: (1) «el electrón es como un preso en la cárcel, al cual le puede visitar una única persona por vez (el fotón), y no le puede dar dinero salvo que la cantidad llegue al valor de la fianza (el W), en cuyo caso el preso sale a la calle, libre, pero sin dinero en el bolsillo ($E_c = 0$)». (2) «Si el visitante lleva más dinero que sólo la fianza ($f > f_0 \Rightarrow E_\gamma > W$), entonces no sólo puede liberar al preso, sino que éste saldrá a la calle con el dinero sobrante en el bolsillo ($E_c = E_\gamma - W \neq 0$)». (3) «Además, por más visitantes que lleguen a la cárcel por segundo ($i\uparrow \Rightarrow P\uparrow$), si llevan el mismo dinero ($f \Rightarrow E_\gamma$) y este no llega a la fianza ($f < f_0 \Rightarrow E_\gamma < W$), como sólo pueden hacer las visitas de uno en uno, no podrán liberar al preso (aunque $P\uparrow$, si f no cambió y $f < f_0$, no hay efecto fotoeléctrico)».
(4) «La liberación no depende del número de visitantes que lleguen por unidad de tiempo, sino del valor de la fianza, que sólo depende de la cárcel (de la placa: no por $i\uparrow$ se produce efec. fot. si la $f \Rightarrow hf < W$)».

(1) ⇝ [el W de enlace (o extracción)]
(2) ⇝ [BALANCE ENERGÉTICO]
(3) ⇝ [que haya efecto fot. no depende de P]
(4) ⇝ [W no depende de P, sino de la placa]
(17)

▷ EL POTENCIAL de FRENADO: la forma de estudiar experimentalmente el efecto fotoeléctrico consiste en situar la placa metálica junto a la armadura de potencial alto de un condensador, V_+, de modo que a una cierta distancia está la otra armadura, de potencial bajo V_-, y pudiendo variarse a voluntad la diferencia de potencial entre ambos; (18) $\boxed{V = (V_+ - V_-) > 0}$. (Típicamente, $V_+ = 0$ – está "conectado a tierra" – y V_- se controla a voluntad con una ruedecita, de modo que $V_- = -V$):



La ruedecita se mueve haciendo aumentar V hasta lograr que a la placa ⊖ no lleguen electrones. ≪El valor V_f del V a partir del cual dejan de llegar es el que ha logrado frenarlos a lo largo de la trayectoria de modo tal que $v_F = 0$≫, es decir: $\boxed{\underbrace{\frac{1}{2}mv^2}_{} = qV_f}$ (19)

E_c de la ecuación [11].

velocidad inicial.

$q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C (carga del electrón sin signo menos).

... por eso V_f se llama "POTENCIAL de FRENADO", y con él podemos escribir el balance energético [11] de la siguiente manera:

$$\boxed{E_\gamma = W + qV_f} \quad (20)$$

JUSTIFICACIÓN: por conservación de la energía, toda la E_c inicial, al perderse, se transforma en la E_p ganada en el desplazamiento.

↳ o también: $hf = W + qV_f$; $hf = hf_0 + qV_f$; etc.

NOTA: a veces, a la E_c de la ecuación [11] se la llama "energía cinética máxima" de los electrones arrancados, queriendo decir que aunque, teóricamente, todos ellos deberían tener la misma $E_c = E_\gamma - W$, en la práctica pueden haber habido otros "procesos no deseados" (como choques, etc.) en los cuales algunos de los e^- hayan perdido parte de esta energía.

4 ENERGÍA EN RELATIVIDAD

En Relatividad, los balances energéticos se suelen hacer considerando tres tipos de energía: cinética, másica y fotónica. (No habrá energías de tipo potencial). Las dos primeras están asociadas a las partículas con masa, que a veces llamaremos "partículas" a secas (electrones, protones, partículas α ...), y la última a las partículas sin masa, que son los fotones ("partículas de luz"):

$$E_{\text{TOTAL RELATIVISTA}} = \begin{cases} \text{fotones:} & (21)\ \boxed{E_\gamma = hf} \quad (m=0) \\ \text{partículas:} & (22)\ \boxed{E = \underbrace{E_c}_{\text{ENERGÍA CINÉTICA}} + \underbrace{E_m}_{\text{ENERGÍA MÁSICA}}} \quad (m \neq 0) \end{cases}$$

$c = 3 \cdot 10^8$ m/s velocidad de la luz en el vacío.

ENERGÍA CINÉTICA:

(23) $\boxed{E_c \simeq \frac{1}{2} m v^2}$

SÓLO A BAJAS VELOCIDADES !! $(v < 0{,}1c)$

ENERGÍA MÁSICA:

$\boxed{E_m = mc^2}$ (24)

también se llama "energía en reposo".

▷ FÓRMULA GENERAL (para VELOCIDADES tanto ALTAS como BAJAS):

- Si $v \geq 0{,}1 \cdot c$ (altas velocidades) la aproximación newtoniana [23] no sirve para la E_c y hay que usar la fórmula general de la RELATIVIDAD:

(24) $$\boxed{E = E_c + E_m = m_R c^2}$$ ENERGÍA TOTAL RELATIVISTA de UNA PARTÍCULA.

donde

(25) $$m_R = m \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

es la "masa relativista" de la partícula, que en reposo $(v=0)$ es $m_R = m$, y si $v\uparrow$, $m_R\uparrow$.

▶ USO y COMENTARIOS de [24]:

- "AUMENTOS de m_R": a veces se dice cuánto aumenta la masa relativista m_R respecto a la masa "en reposo" m, por ejemplo:

$$\begin{cases} \text{INICIALMENTE} & m_R(1) = 6 \cdot m \\ \text{FINALMENTE} & m_R(2) = 11 \cdot m \end{cases}$$

¿ΔE? ⇒ $\boxed{\Delta E = \Delta m_R \cdot c^2}$ [24] $= (11-6) \cdot mc^2 = 5mc^2$

(relación de ΔE con Δm_R) → (26)

... y así calculamos la energía que ha ganado la partícula (que será, a la vez, ΔE_c, puesto que la energía másica E_m es constante).

- "E_c RELATIVISTA": estrictamente, [24] ⇒

⇒ $E_c = E - E_m = (m_R - m)c^2$, y m_R se calcula con la velocidad y [25]. Pero en la práctica usaremos $E_c \simeq \frac{1}{2}mv^2$ para v bajos, o directamente calcularemos E TOTAL con [24] (o [26] para su incremento).

5 BALANCES ENERGÉTICOS para reacciones de partículas.

Consideraremos procesos de interacción entre partículas que conducirán de un conjunto inicial de partículas (y eventuales fotones "incidentes", que serán absorbidos) a un conjunto final de otras partículas (y fotones "emitidos"). Las partículas y fotones iniciales se llaman "reactivos" y las finales "productos":

$$\underbrace{\text{partículas} + \text{fotones}}_{\text{REACTIVOS}} \xrightarrow{\text{REACCIÓN}} \underbrace{\text{partículas}' + \text{fotones}'}_{\text{PRODUCTOS}}$$

El proceso se llama "reacción" (por ejemplo, las reacciones nucleares son un tipo particular de reacciones de partículas que incluyen núcleos en los reactivos y/o productos):

- EJEMPLO:

$$\boxed{{}^{210}Po \rightarrow {}^{206}Pb + \alpha} \quad (27)$$

(Desintegración α del polonio-210).

BALANCES GENERALES

: el balance energético general se hace exigiendo que se cumpla la CONSERVACIÓN de la ENERGÍA (TOTAL):

$$\boxed{\underbrace{E_{TOT}}_{\text{energía total inicial (la } E_{TOT} \text{ de los reactivos)}} = \underbrace{E'_{TOT}}_{\text{energía total final (la } E_{TOT} \text{ de los productos)}}} \quad (28)$$

Para calcular esta energía total consideraremos la suma de todas las energías de los fotones incidentes (E_γ^{TOT}), la suma de todas las energías másicas de los reactivos (E_m^{TOT}) y la suma de todas las energías cinéticas de los reactivos (E_c^{TOT}).

$$(29) \begin{cases} E_{TOT} = E_\gamma^{TOT} + E_m^{TOT} + E_c^{TOT} \\ E'_{TOT} = E_\gamma^{TOT'} + E_m^{TOT'} + E_c^{TOT'} \end{cases}$$

← análogamente para la energía final.

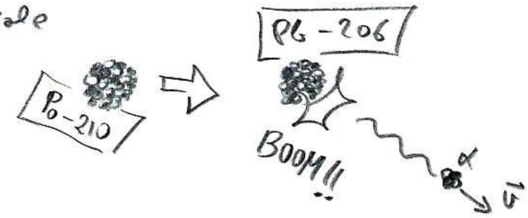
(NOTA: igual que en Relatividad, en reacciones de partículas normalmente no se tienen en cuenta energías potenciales. Un argumento posible para justificar esto —pero no el único— sería decir que las partículas y fotones están en el estado inicial y en el final tan alejadas entre sí que las posibles energías potenciales de sus respectivas interacciones mutuas son aproximadamente cero).

• EJEMPLO: si en la desintegración α del polonio de [27] suponemos que el núcleo inicial está en reposo y el núcleo residuo queda aproximadamente también en reposo, entonces el balance nos dice:

$$\underbrace{E_m(Po)}_{E_m^{TOT}} + \underbrace{\cancel{E_c(Po)}^{\,0}}_{E_c^{TOT}} = \underbrace{E_m(Pb) + E_m(\alpha)}_{E_m^{TOT'}} + \underbrace{\cancel{E_c(Pb)}^{\,0} + E_c(\alpha)}_{E_c^{TOT'}}$$

$$\Rightarrow \quad (30) \quad \boxed{E_c(\alpha) = \underbrace{E_m(Po)}_{m_{Po}c^2} - \big(\underbrace{E_m(Pb)}_{m_{Pb}c^2} + \underbrace{E_m(\alpha)}_{m_\alpha c^2}\big) = \underbrace{(m_T - m_T')\cdot c^2}_{E_{liberada}}}$$

Es decir, en este caso vemos que lo que en Física Nuclear se conoce como "energía liberada" en la reacción consiste en la energía cinética con la que sale despedida la partícula α:

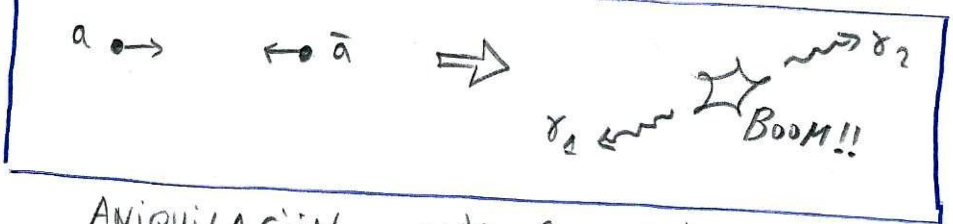


▷ ANIQUILACIÓN de PARTÍCULA - ANTIPARTÍCULA:

• Para cada partícula a existe una "antipartícula", $\bar{a}$, que tiene la misma masa, $\boxed{m_a = m_{\bar{a}}}$, pero carga eléctrica opuesta: $\boxed{q_a = -q_{\bar{a}}}$. EJEMPLO: el positrón, e^+, es la antipartícula del electrón e^- (e^+ también se puede llamar "antielectrón").

• Muy a menudo cuando una partícula se encuentra con su antipartícula se aniquilan entre sí: desaparecen a y $\bar{a}$ y en su lugar aparecen dos fotones, γ_1 y γ_2:

(31)



ANIQUILACIÓN partícula - antipartícula

PEPE RÓDENAS BORJA
mayo 2015

ECUACIÓN de la REAC.: $a + \bar{a} \longrightarrow \gamma_1 + \gamma_2$

CONSERVACIÓN de la E TOT: $$\boxed{2 m_a c^2 + E_c^{TOT} = h f_1 + h f_2} \quad (32)$$

BALANCE ENERGÉTICO de la ANIQUILACIÓN a-$\bar{a}$.

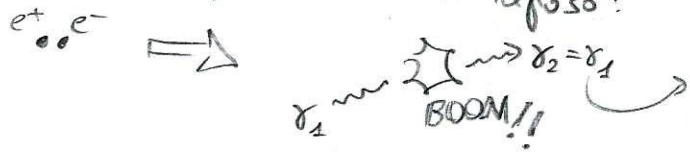
- CASOS PARTICULARES:

1.- a menudo, $f_1 = f_2 = f \Longrightarrow$ [32] $$\boxed{f = \frac{m_a c^2 + E_c^{TOT}/2}{h}} \quad (33)$$

(frecuencia de los fotones emitidos)

2.- también a veces, nos dirán que además $E_c^{TOT} = 0$ (a y $\bar{a}$ en reposo): $$\boxed{f = \frac{m_a c^2}{h}} \quad (34)$$

3.- por ejemplo, en la aniquilación e^+-e^-, si $f_1 = f_2$, e inicialmente e^+ y e^- están en reposo:

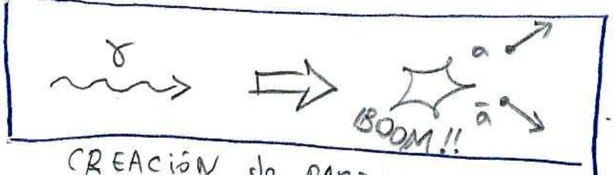


$$\boxed{f = \frac{m_e c^2}{h}} = 1{,}2 \cdot 10^{20}\ Hz \quad (35)$$

[frecuencia de los fotones emitidos].

CREACIÓN de PARES

CREACIÓN de PARES: es un proceso contrario a la aniquilación. Ahora es un único fotón γ quien, en ciertas circunstancias, puede desaparecer y dejar en su lugar un par "partícula - antipartícula", a y $\bar{a}$:

(36)


CREACIÓN de PARES

- ECUACIÓN: $\gamma \longrightarrow a + \bar{a}$
- BALANCE: $$\boxed{h f = 2 m_a c^2 + E_c^{TOT'}} \quad (37)$$

- CASOS PARTICULARES:

1.- A menudo nos piden la f mínima del fotón para crear el par. Eso significa que a y $\bar{a}$ quedan en reposo, $E_c^{TOT'} = 0 \Longrightarrow$

[37] $\Longrightarrow$ (38) $$\boxed{f_{min} = 2\,\frac{m_a c^2}{h}}$$

$\Longrightarrow$ 2.- $$\boxed{f_{min}(e^+ - e) = 2\,\frac{m_e c^2}{h}} = 2{,}4 \cdot 10^{20}\ Hz \quad (39)$$