

Mecánica Cuántica (I): Radiación del cuerpo Negro

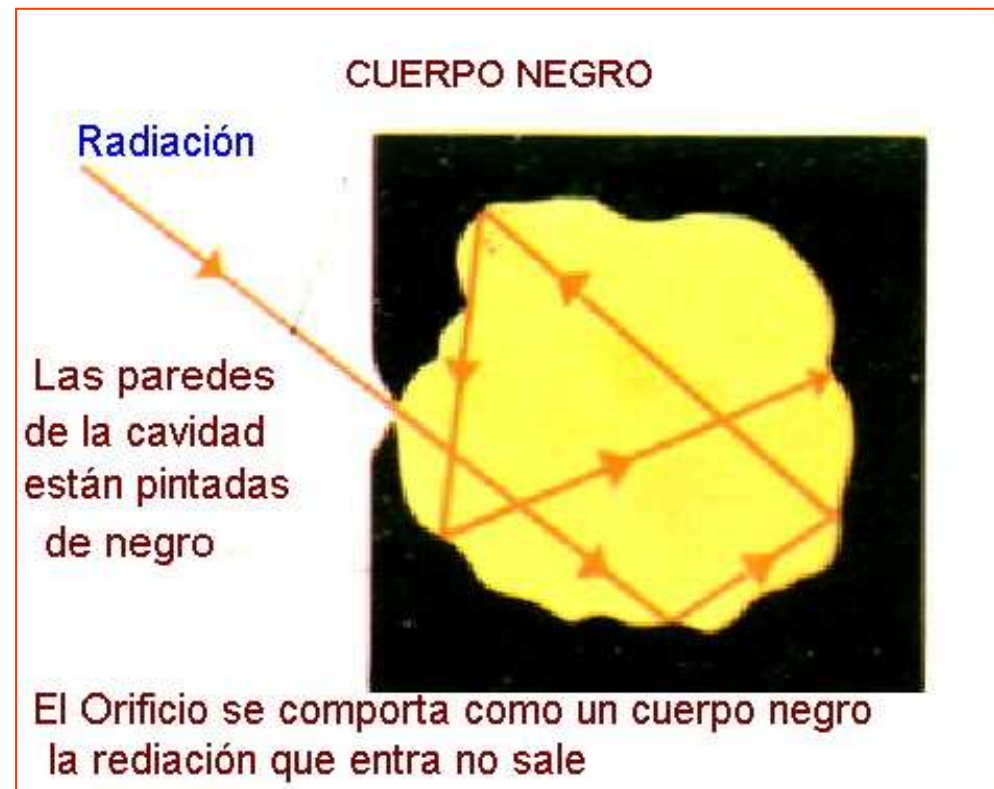
Del estudio de la radiación del cuerpo negro se dedujeron dos leyes experimentales:

La ley de Stefan-Boltzmann: La Potencia total P emitida a la temperatura T por una superficie S cumple $P = \sigma T^4 S$. También se puede escribir que La radiancia espectral; (energía emitida en forma de radiación por unidad de tiempo y de superficie, con frecuencias entre f y $f+df$): $R_T = \sigma T^4$ ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}^4$)

La Ley del Desplazamiento de Wien: La longitud de onda máxima (λ_{max}) para la que se produce mayor emisión de energía, es inversamente proporcional a la temperatura T :

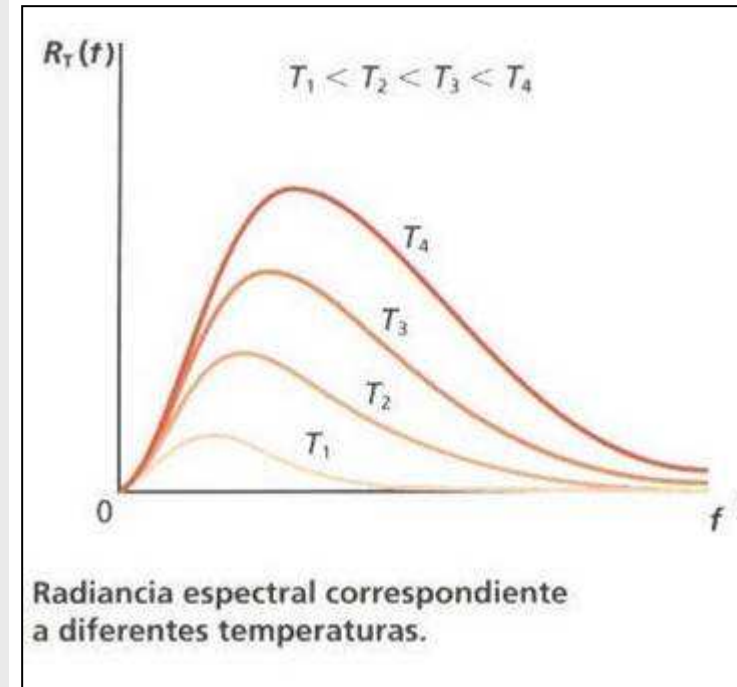
$$\lambda_{\text{max}} T = 2,89775 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}.$$

O bien: $\nu_{\text{max}} = T \cdot 1,035 \cdot 10^{11} \text{ Hz/°K}$ para la frecuencia máxima



Mecánica cuántica (II) Radiación del cuerpo negro (II)

- Las primeras mediciones realizadas de radiancia espectral muestran para un intervalo de frecuencias df :
- La potencia emitida es pequeña si lo es la frecuencia.
- La potencia radiada aumenta rápidamente al aumentar f en la región de frecuencias bajas .
- La potencia radiada alcanza un máximo para una determinada frecuencia que depende de la T . Para frecuencias mayores que esa f máxima la potencia radiada disminuye lenta pero continuamente, llegando a cero para frecuencias altas.
- La potencia total viene representada por el área encerrada entre la curva y el eje de abscisas

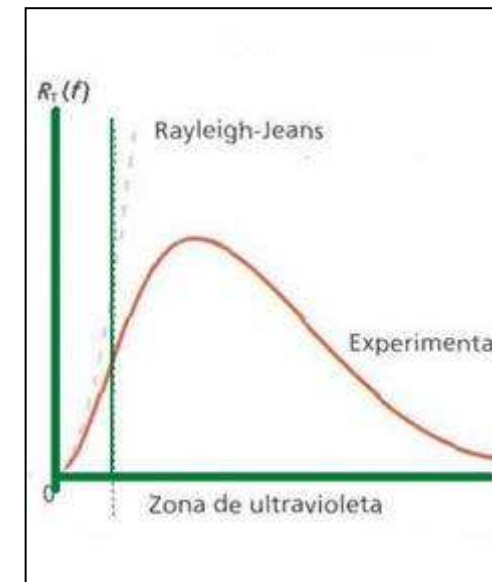
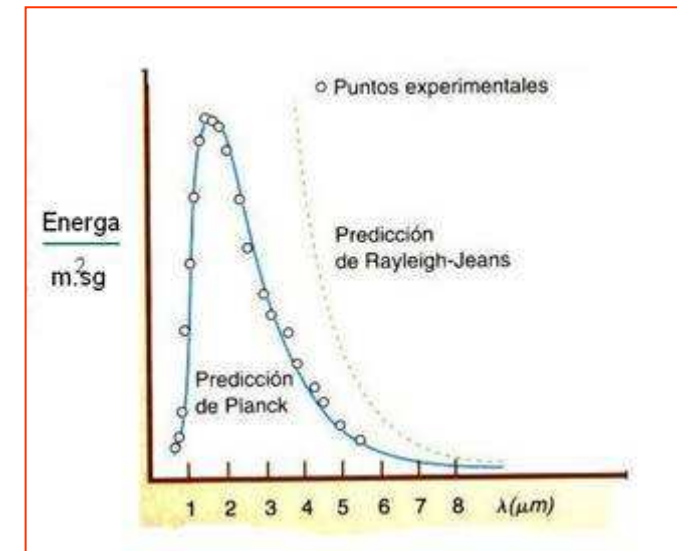


Matemáticamente la radiancia total se puede obtener: que coincide con la Ley de S-B

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(f) df = \sigma T^4$$

Cuántica (III) Catástrofe del ultravioleta (I)

- A Principio de 1900 lord John Rayleigh y sir James Jeans, calculan teóricamente por métodos basados en los principios del electromagnetismo y la termodinámica, clásicas, obtienen una expresión matemática (ley de Rayleigh-Jeans) en la que la energía de la radiación disminuye al aumentar la longitud de onda pero aumenta indefinidamente al disminuir esta.
- Este resultado está en contraposición con los resultados experimentales en los que la energía tiende a cero para longitudes de onda muy pequeñas.
- En términos de frecuencia se observa coincidencia teórico práctica para bajas frecuencias pero a medida que la f aumenta las previsiones de R-J $\rightarrow \infty$ mientras que los datos experimentales muestran que alcanza un máximo y luego tiende a cero para frecuencias muy elevadas.
- Este fracaso de la física clásica es lo que se llamó CATÁSTROFE DEL ULTRAVIOLETA



Cuántica (V) Catástrofe del ultravioleta (II)

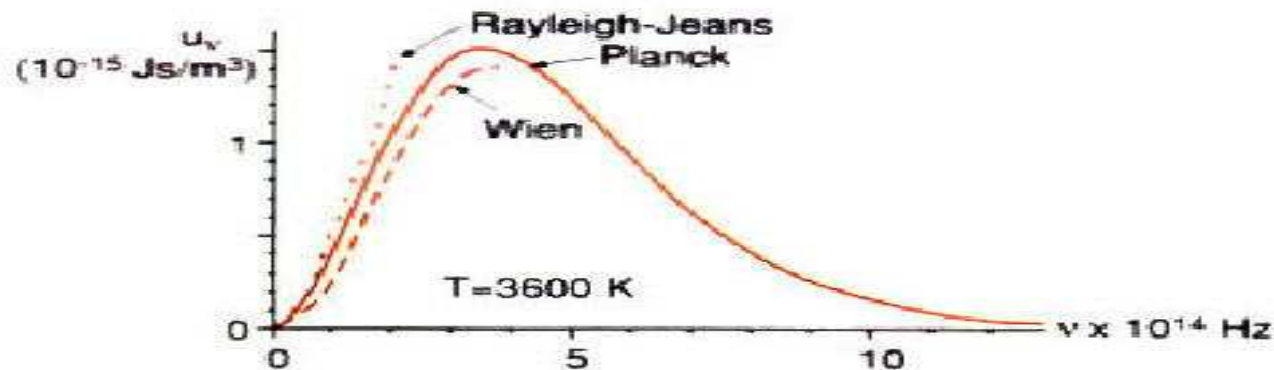
Si represento la densidad espectral de energía

se obtiene la línea experimental de trazo continuo

curva experimental.

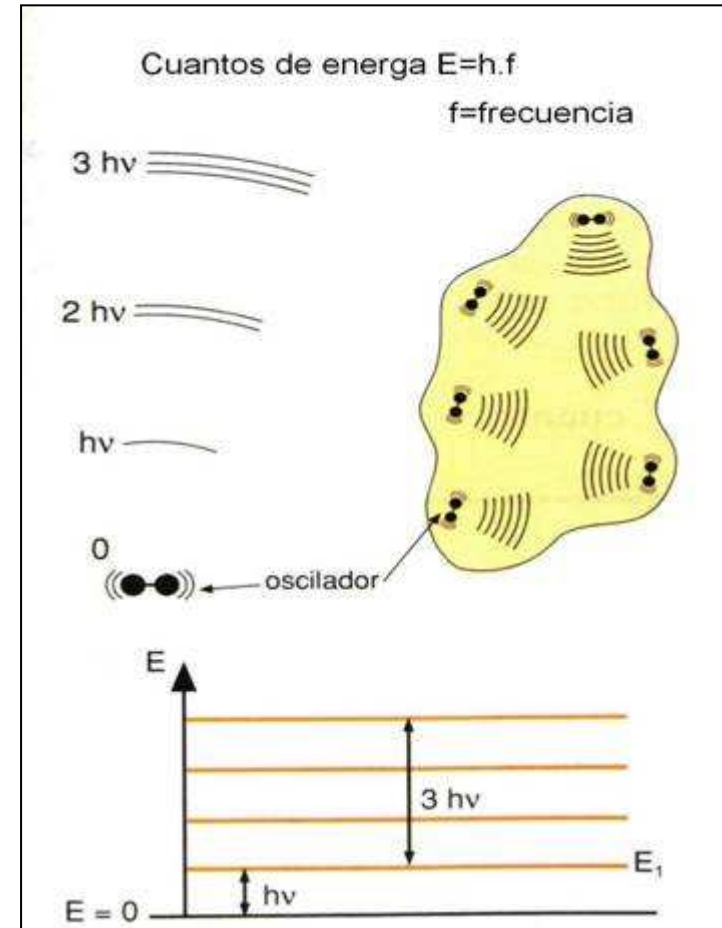
La ley de Rayleigh-Jeans prevé una emisión infinita de energía

Es la llamada "CATÁSTROFE DEL ULTRAVIOLETA"



Cuántica (IV) hipótesis de Plank

- Para intentar explicar la radiación del cuerpo negro, a finales de 1900 postula :
- Un átomo se comporta como un oscilador armónico, cuya frecuencia natural de vibración sea ν ; dicho oscilador solo puede variar su energía en cantidades múltiples de la cantidad E_0 , que es la energía de radiación proporcional a su frecuencia de oscilación; $E_0 = h\nu$.
- Por lo tanto cuando dicho oscilador emite o absorbe radiación, los cambios energéticos deberán obedecer a la ecuación.
- Como n , es un n° entero, la energía del oscilador solo podrá variar un n° entero de veces la cantidad $h\nu$. Se dice que la energía está cuantizada.
- $h = \text{cte. de Planck} = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$



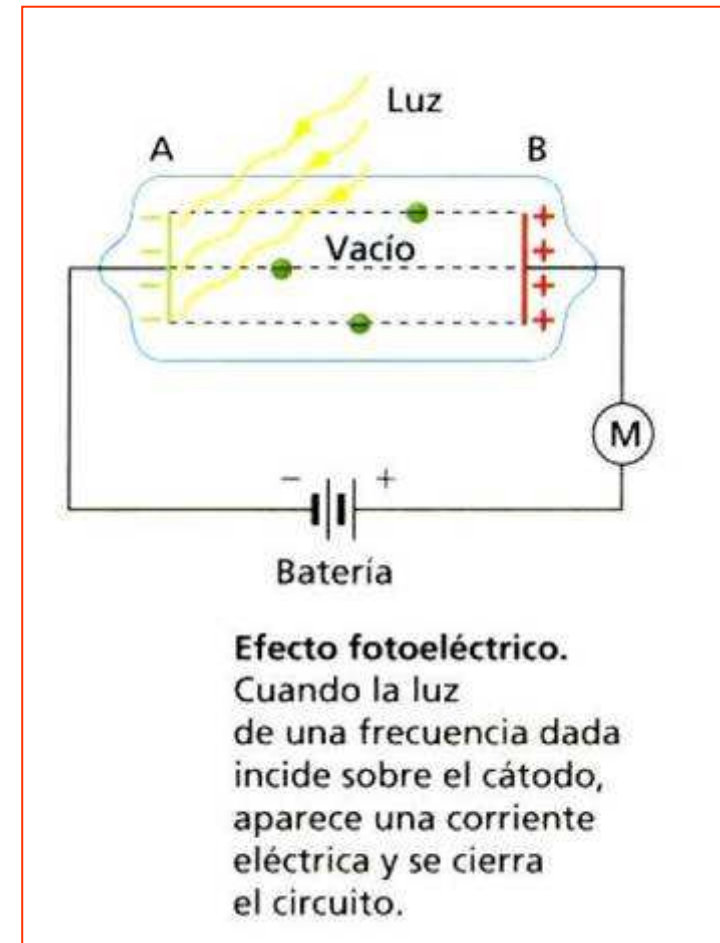
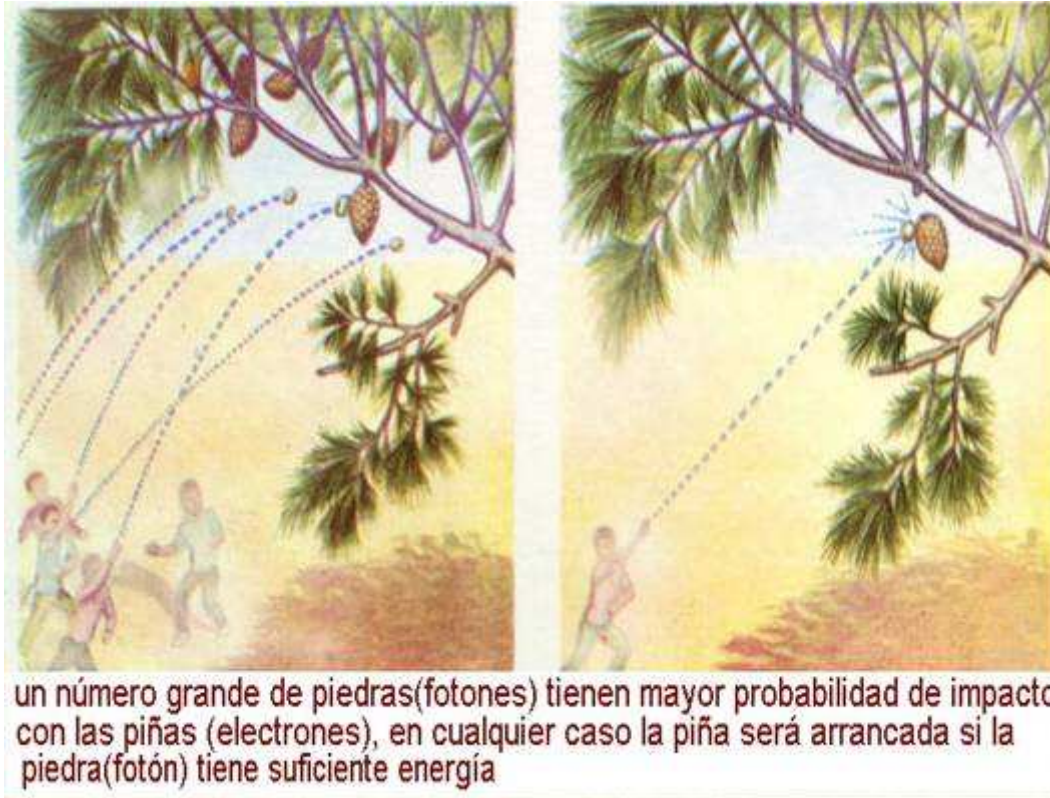
$$|\Delta E_{\text{Oscilador}}| = nh\nu$$

Cuántica (VI) Hipótesis cuántica de Einstein

- Con la Hipótesis de Planck se explican teóricamente las leyes de S-B y de Wien.
- Planck postuló, que solo estaban cuantizadas, las energías de los electrones en los átomos, creyendo que la energía se distribuía uniformemente por todo el frente durante la propagación según predice la física clásica.
- Einstein, sin embargo postula que la radiación se emite y se capta por CUANTOS (paquetes). Además debe imaginarse concentrada en gránulos, como si se tratase de un conjunto de paquetes de energía encerrados en la cavidad de un cuerpo negro.
- Por lo tanto la energía electromagnética que se propaga con la luz está distribuida de forma discontinua; o bien :
- **Un haz de luz consta de un número entero de paquetes de energía o cuantos que Lewis, llamó fotones.**



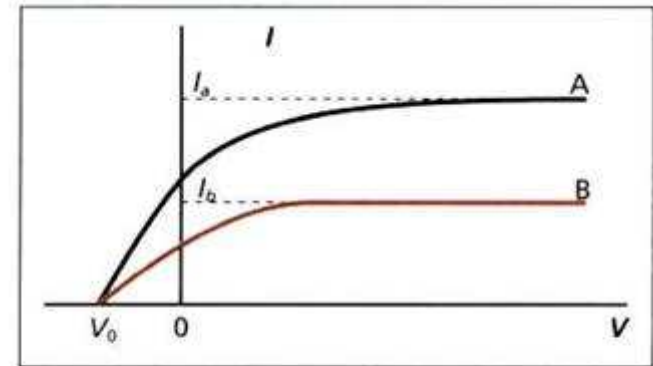
Cuántica VII El efecto fotoeléctrico (I)



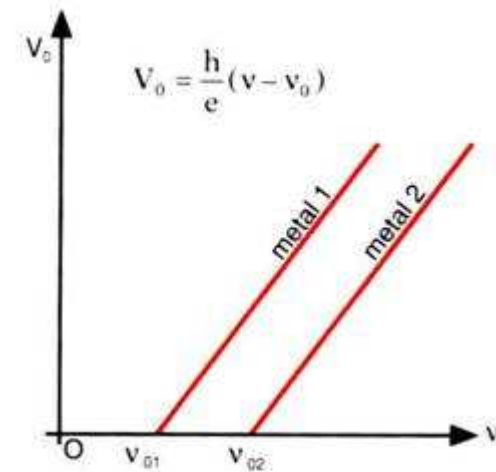
- Clásicamente en una onda la Energía es proporcional al cuadrado de la frecuencia y proporcional a la intensidad $E \propto \nu^2$ y la $E \propto I$, de modo que, aún siendo ν pequeña, la onda, con I , suficiente, debería tener suficiente energía para arrancar los electrones del cátodo y ser atraídos por el ánodo.
- Experimentalmente esto no ocurre así

Cuántica (VIII) efecto fotoeléctrico (II)

- La observación experimental nos dice que si iluminamos con **luz apropiada**, arrancamos electrones(-) del metal, que debido a la presencia de la batería son acelerados hacia el ánodo(+) y detectamos el paso de corriente en el amperímetro M:
- Si ilumino con luz monocromática los resultados son los siguientes:
- 1/Para un metal dado solo se produce efecto fotoeléctrico si la frecuencia de la luz es la adecuada (ν_0 , se llama frecuencia umbral).
- 2/Cuando se produce el efecto, lo hace instantáneamente, incluso para bajas intensidades luminosas.
- 3/La corriente depende de la tensión aplicada; si V crece lo hace i aunque no linealmente, hasta alcanzar una corriente de saturación.
- 4/Cuando V se hace negativo la corriente fotoeléctrica decrece bruscamente y se hace negativa para un mismo valor $V = -V_0$ llamado potencial de corte o de frenado, con la que los electrones no llegan al ánodo, aunque si aumenta la frecuencia aumenta el potencial de corte de forma lineal



Corriente I como función del voltaje V .
En B la intensidad de la luz incidente es la mitad de la de la curva A.
El potencial de frenado es independiente de la intensidad de la luz.

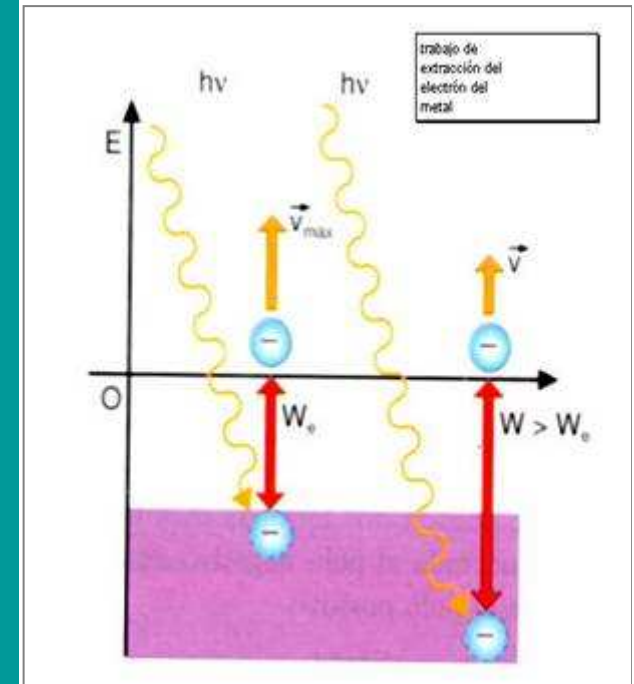


Variación de la tensión de corte con la frecuencia

“El efecto fotoeléctrico suministra, independientemente del cuerpo negro, una prueba de la validez de la hipótesis fundamental de la física cuántica: la emisión discontinua de energía”. (R. Millikan).

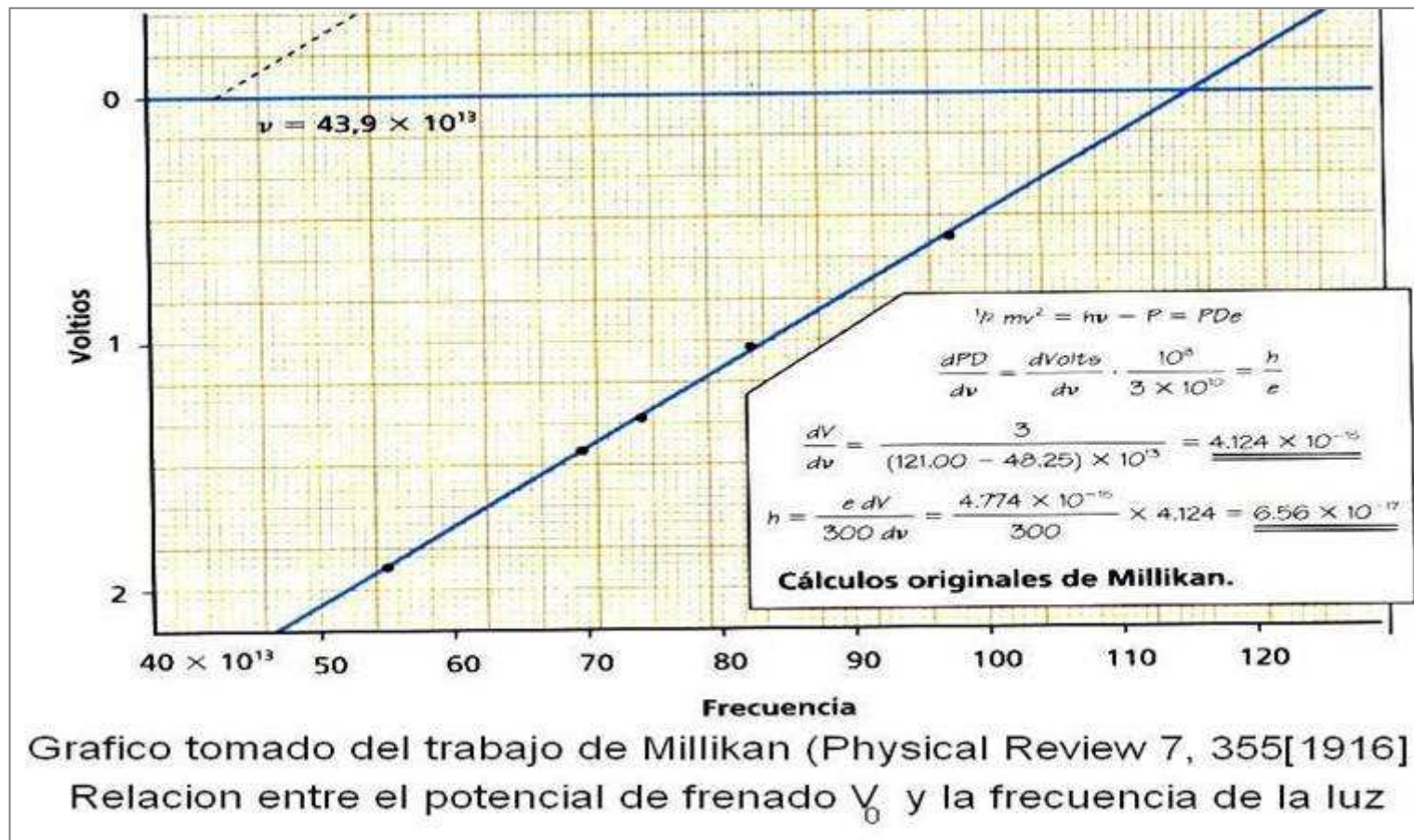
Cuántica IX Efecto fotoeléctrico (III) Interpretación de Einstein

- Einstein afirma que la luz se propaga en forma de cuantos llamados fotones de energía $E=h\nu$.
- Propuso que: En el proceso fotoeléctrico un fotón es completamente absorbido por un electrón, $h\nu$ es la energía absorbida por el e^- . Por tanto la energía cinética del fotoelectrón será $E_c=h\nu-W$
- W es el trabajo necesario para arrancar el electrón del metal, se invierte en compensar las atracciones del electrón por los iones del metal y la pérdida de energía cinética debida a las colisiones internas.
- La energía transportada por el fotón incidente se invierte en liberar electrones de los átomos del metal, energía que recibe el nombre de trabajo de extracción W y energía cinética con la que el electrón sale del metal.
- En el caso del electrón menos ligado, y no tenga pérdida de E_c por colisiones internas se producirán fotoelectrones con la máxima energía cinética. Por tanto para la frecuencia umbral ν_0 , tendré: $E_{Cmax}=h \cdot \nu_0 - W_0$. (W_0 = *mínimo trabajo de extracción*).
- Según lo expuesto se entiende que si aumentamos la intensidad de la luz, simplemente aumentamos el número de fotones y, en consecuencia el de fotoelectrones producido, pero no la energía de estos.
- En el cálculo de la frecuencia de corte ocurrirá que $E_{cmax}=0$ de donde $\nu_0=W_0/h$ por tanto si la frecuencia es inferior a la umbral no hay energía suficiente para arrancar e^- .



Cuántica X efecto fotoeléctrico (IV); experimento de Millikan

- El potencial de detención aumenta con la frecuencia, porque si los e^- se emiten a velocidad v ; $E_C = 1/2mv^2$. Al invertir el potencial los e^- están sometidos a una fuerza que los repele con una energía eV_0 (trabajo eléctrico). Su velocidad se anula cuando $eV_0 = 1/2mv^2 = E_C = hv - W$. con esto último se establece que depende de la frecuencia pero no de la intensidad de la luz

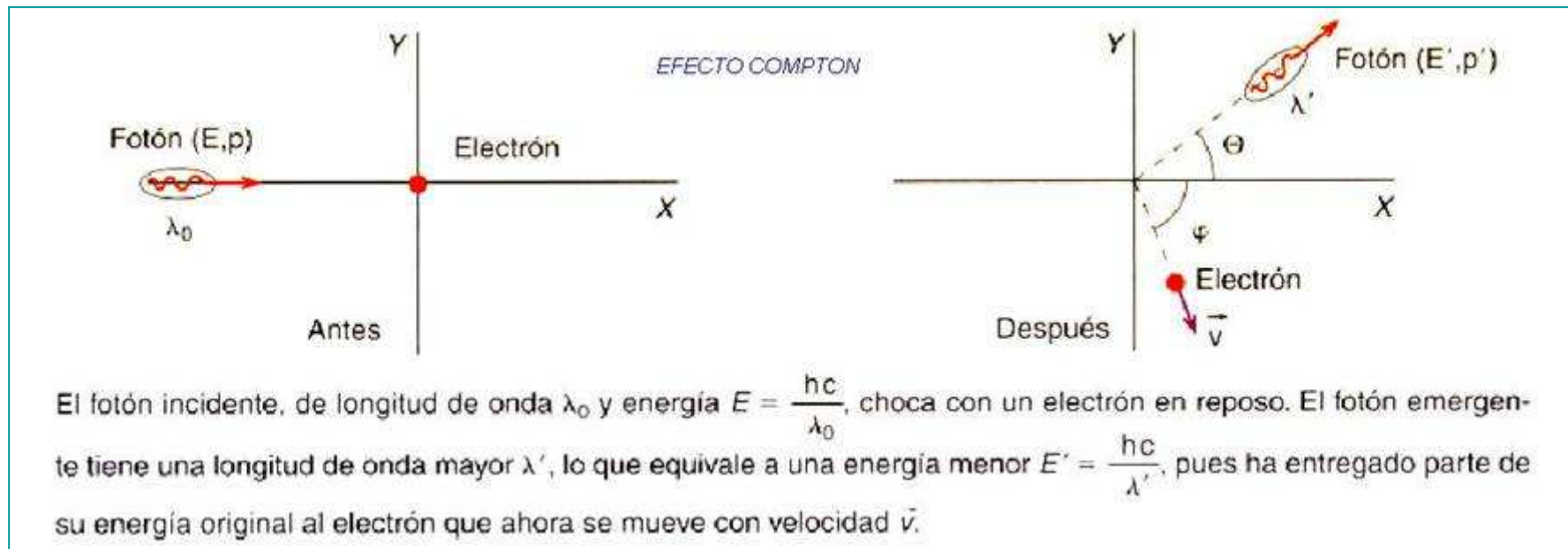


Cuántica XI. Efecto fotoeléctrico (V)

- “Todo pasa como si”queremos arrancar la piña del arbol y lanzamos muchas piedras, pero ninguna de ellas lleva suficiente energía; aunque se produzca el impacto con la piña; esta no se desprenderá del árbol. Pero si una sola, lleva suficiente energía la piña es arrancada.
- *Deben de existir choques, pero estos han de ser eficaces.*
- Además el ejemplo es válido porque en cuanto una, con energía suficiente impacte se produce la caída.
- No existe retraso entre la iluminación del metal y la emisión de fotoelectrones. Clásicamente la energía se encuentra redistribuida en el frente de ondas, por lo que con una luz suficientemente débil, se produciría el efecto, pero al cabo de un tiempo.
- Otro ejemplo válido sería intentar obtener bebidas, con monedas de cincuenta céntimos, de una máquina expendedora que funciona con monedas de un euro. Por muchas que introduzcamos de 0,50 euros no podremos obtener la bebida.

Cuántica XII efecto Compton

- Los experimentos de Millikan, de por sí, eran suficientes para corroborar la existencia del fotón. Pero la confirmación definitiva de la existencia del fotón se debe a A.H. Compton (1892-1962). Hizo incidir un haz de rayos X, de longitud de onda λ , sobre una lámina de grafito observando que la radiación dispersada tenía dos longitudes de onda; una igual a la incidente y otra mayor λ' . Según la teoría clásica la onda dispersada debería tener la misma long de onda que la incidente (reflexión de la onda).
- Para explicar estos hechos. Compton consideró la radiación electromagnética como un conjunto de partículas relativistas, los fotones, cada uno de ellos con masa en reposo nula, y energía $E=h\nu$. Y con un momento lineal $p=E/c=h\nu/c=h/\lambda$. El efecto Compton confirma tanto la validez de la mecánica relativista, como la existencia de fotones (*el fotón, Onda electromagnética, que como partícula al interaccionar con la materia obedece las leyes del choque elástico*)



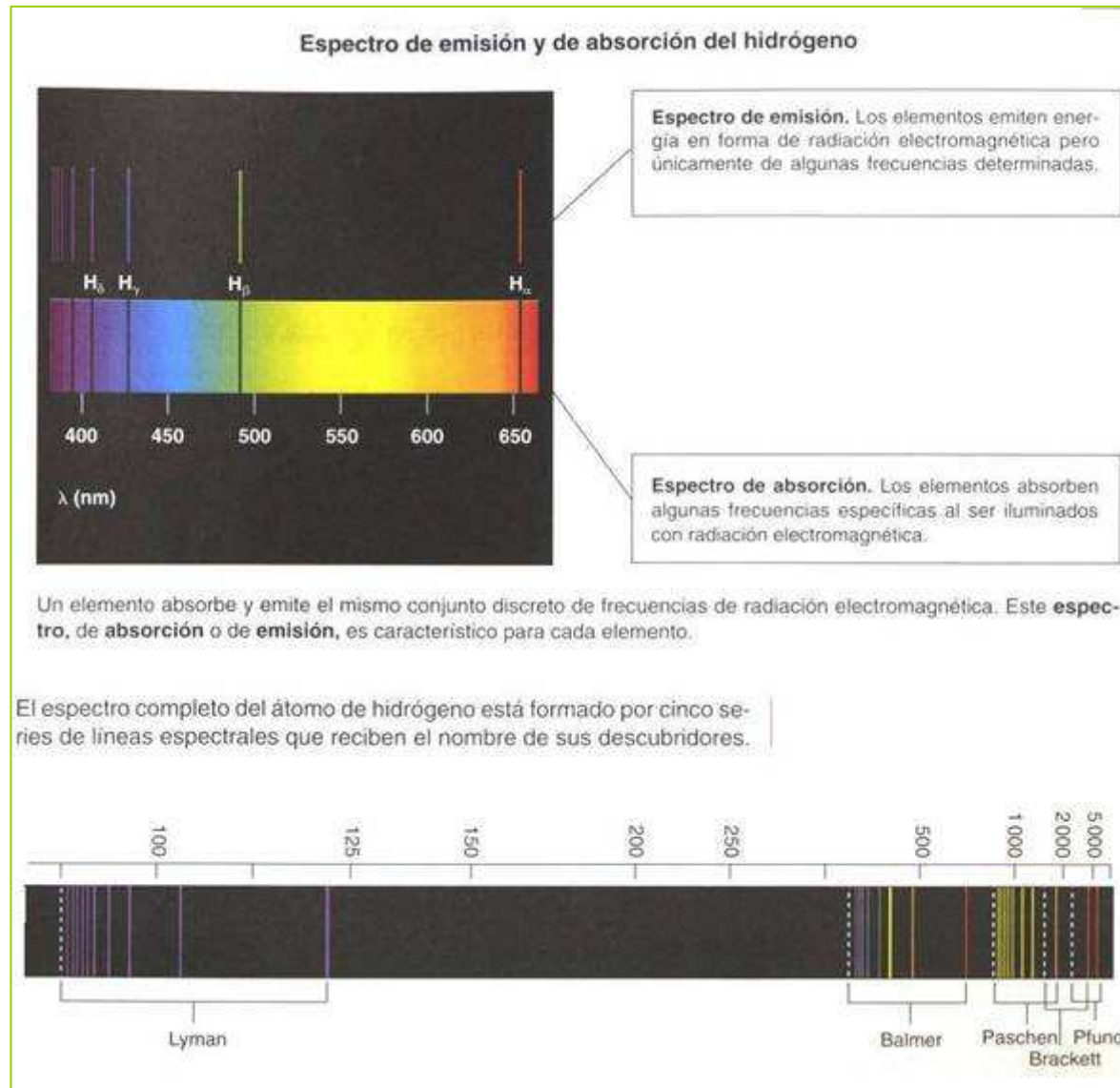
Cuántica (XIII) espectros atómicos

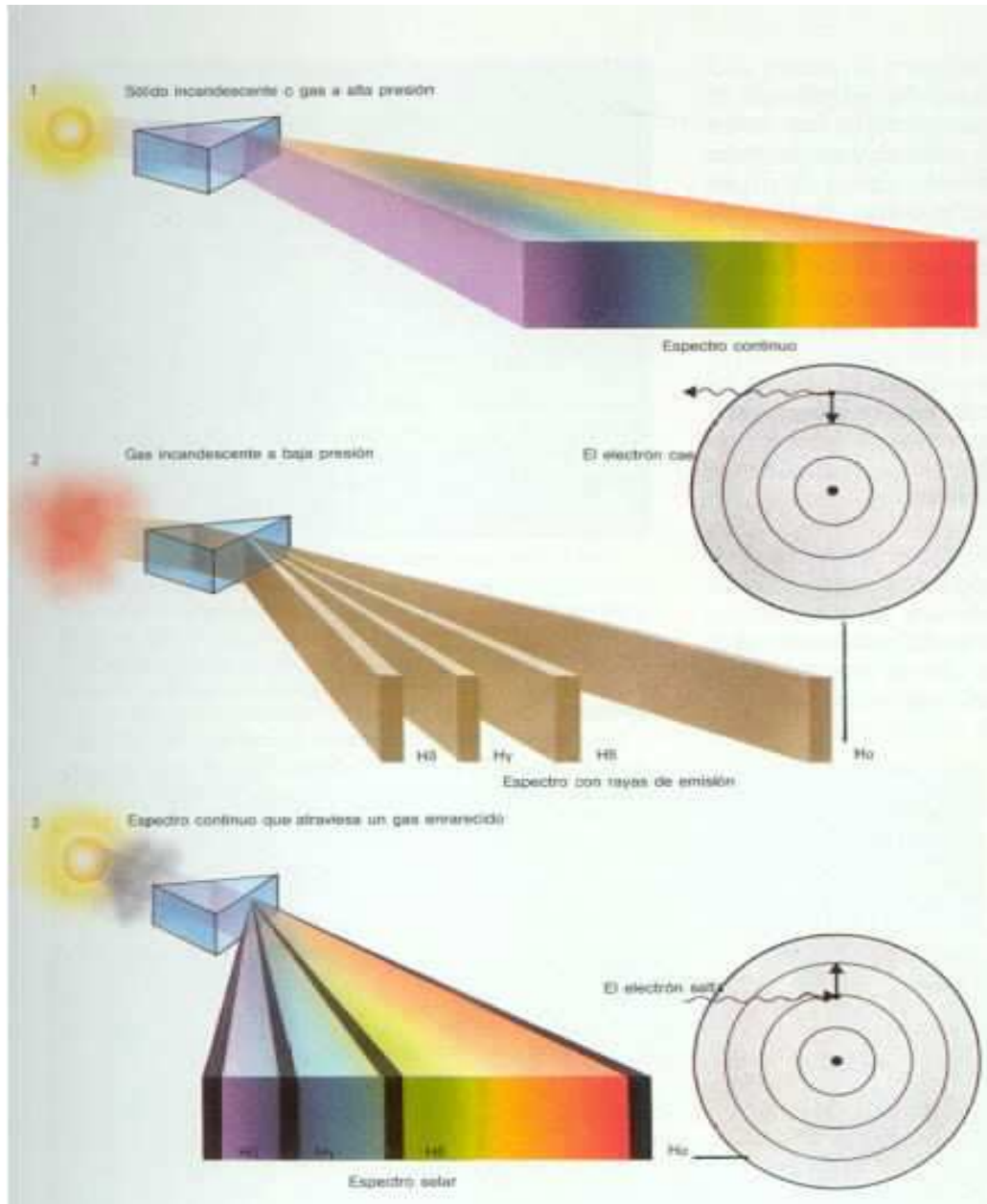
- Un espectro es, desde el punto de vista interacción radiación-materia, una representación gráfica o fotográfica, de la distribución de la intensidad de radiación EM emitida o absorbida por una muestra de una sustancia, en función de la longitud de onda o de la frecuencia de la radiación.
- La luz solar, atraviesa un prisma y se descompone en varios colores, es el espectro de la luz blanca, (el arco iris) este espectro contiene radiación de todas las longitudes de onda, por ello se dice que es un espectro **Continuo**.
- Si hacemos pasar por un prisma la luz que proviene de un arco (descarga eléctrica de gran intensidad que produce una luz muy blanca e intensa), después de atravesar los vapores de un elemento químico a baja presión se obtiene un ESPECTRO DE RAYAS; discontinuo o ESPECTRO DISCRETO; La espectroscopía se puede utilizar como método de análisis químico. Pues cada elemento químico tiene su propio espectro.
- Se encontró, (a partir de 1885) que las longitudes de onda de las rayas de la serie espectral, guardaban una relación, que RYDBERG dedujo de forma empírica

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_j^2} \right) \text{ donde } R_H = \text{Cte. de Rydberg} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

- Las diferentes longitudes de ondas de las rayas de las diferentes series, se obtienen haciendo $n_i=1$ serie de Lyman; $n_i=2$ para la serie de Balmer; $n_i=3$ para la serie de Paschen; $n_i=4$ para la serie de Brackett , y $n_i=5$ para la serie de Pfund. Y en cada serie $n_j=\{n_i+1, n_i+2, n_i+3+\dots\}$

Cuántica (XIV): Espectros discontinuos rayas espectrales



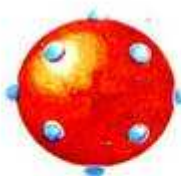


Cuántica XV: espectros discontinuos de emisión y absorción


- Cualquier modelo atómico, debe explicar la composición y estabilidad de la materia, así como los espectros.
- La fórmula de Rydberg fue interpretada teóricamente por Niels Bohr, postulando un modelo atómico que supone la existencia de niveles energéticos discretos (discontinuos) en la corteza de los átomos. Volveremos sobre este modelo más adelante.
- La caída de un electrón a un nivel de energía inferior, produce el espectro de emisión. Sin embargo, en el cambio de un e^- a un nivel de energía superior, sucede siempre que se absorbe energía. Es un espectro de absorción.

Cuántica XVI modelos atómicos

MODELOS ATÓMICOS

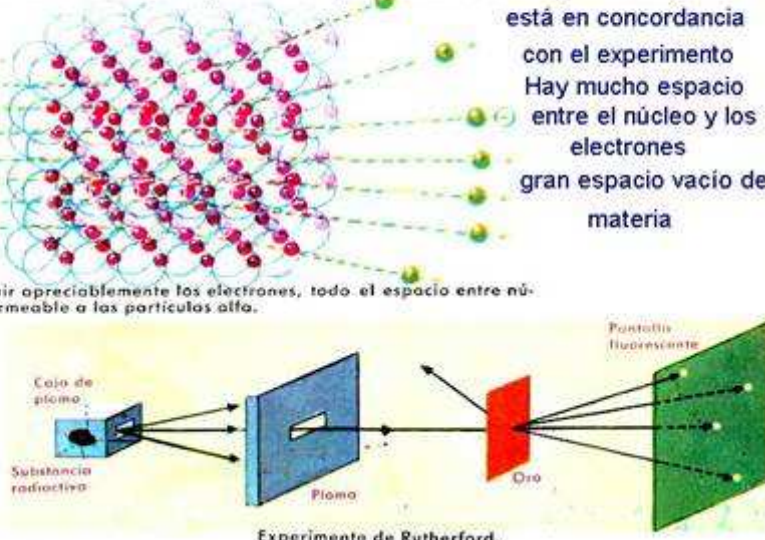


Modelo de Thomson esfera donde están embutidos los electrones es como un pastel de pasas



Pasarán muy pocas partículas alfa y apenas se desviarán

Este modelo de Rutherford explica el comportamiento de las partículas y está en concordancia con el experimento. Hay mucho espacio entre el núcleo y los electrones. gran espacio vacío de materia.



Por no influir apreciablemente los electrones, todo el espacio entre núcleos es permeable a las partículas alfa.

Experimento de Rutherford.

- En 1898 Thomson propone el modelo del “Pastel de pasas” electrones (negativos) embutidos en una esfera positiva. No explica los espectros
- La dificultad del modelo posterior de Rutherford, después de bombardear una lámina de oro muy fina con partículas alfa (α), que no son más que núcleos de helio, es que explica los grandes vacíos de la materia, pero al postular un modelo formado por un núcleo y los e^- girando alrededor, la teoría EM clásica, impone que una carga girando está radiando energía por estar sometida a una aceleración; (centrípeta) lo que obligaría al e^- a terminar el recorrido *precipitándose contra el núcleo recorriendo una trayectoria en espiral*. Se neutralizaría la carga positiva del núcleo cambiando el número atómico, y emitiría un espectro continuo, lo que equivaldría a decir que la materia es INESTABLE

Cuántica XVII: modelo atómico de Bohr

- Este modelo soluciona los problemas del modelo de Rutherford y explica el átomo de hidrógeno y sus espectros.
- Para Bohr: los e^- se mueven en órbitas circulares alrededor del núcleo.
- El e^- solo puede moverse en órbitas (permitidas) para las cuales el momento angular (L), es un múltiplo entero de la cte de Planck (h).
- A pesar de que el e^- está acelerado, cuando se mueve en una órbita permitida no radia energía.
- El e^- solo emite energía, cuando salta de una órbita permitida de energía E_i a otra E_f . La frecuencia de la radiación emitida es: $\nu = (E_i - E_f)/h$.
- Estos postulados están a medio camino entre física clásica y cuántica. El primero la confirma (ley de Coulomb), el tercero la invalida.
- Este modelo se vio confirmado al encontrar las series del espectro de hidrógeno que llevan los nombres de Lyman, Paschen, Brackett y Pfund. Según el modelo de Bohr, cada una de las series proviene de un conjunto de transiciones en las cuales el e^- llega a un estado cuántico final n_f .
- Si $n_f=1$ (Lyman), $n_f=2$ (Balmer) $n_f=3$ (Paschen), $n_f=4$ (Brackett); $n_f=5$ (Pfund)

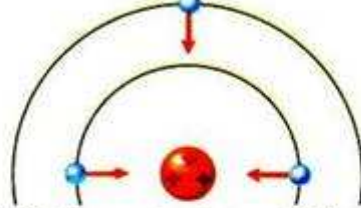
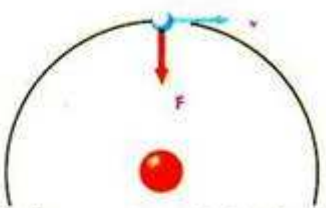


BHOR




Cuántica XVIII: Modelo de Bohr


ÁTOMO DE BHOR



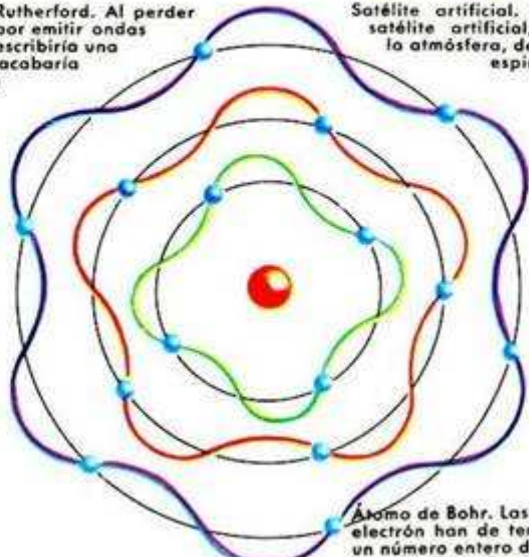
La fuerza centrípeta del electrón es la de atracción eléctrica que sobre él ejerce el núcleo.



Modelo atómico de Rutherford. Al perder energía el electrón, por emitir ondas electromagnéticas, describiría una trayectoria espiral y acabaría cayendo en el núcleo



Satélite artificial. Al perder energía un satélite artificial, por rozamiento con la atmósfera, describe una trayectoria espiral y acaba cayendo en la Tierra



Átomo de Bohr. Las trayectorias posibles del electrón han de tener una longitud igual a un número entero de longitudes de onda De Broglie. (En la fig., casos 4, 5 y 6).

Cuántica XIX: hipótesis de De Broglie, dualidad onda corpúsculo

- La hipótesis de De Broglie, forma parte, y es la piedra angular de la Física Cuántica actual, para hacer extensa la aplicación a átomos diferentes de los monoeléctricos (Problema del átomo de Bohr) y metales alcalinos.
- Propone la existencia de ondas de materia, lo que equivale a decir que suponemos para la materia un comportamiento dual análogo al de la radiación (fotón onda y partícula) .
- Presupone que el e^- , y en general toda la materia deben de tener una longitud de onda asociada.
- La H. de De Broglie, es , esencialmente una manifestación de la gran simetría de la naturaleza



Louis de Broglie (Nobel 29)

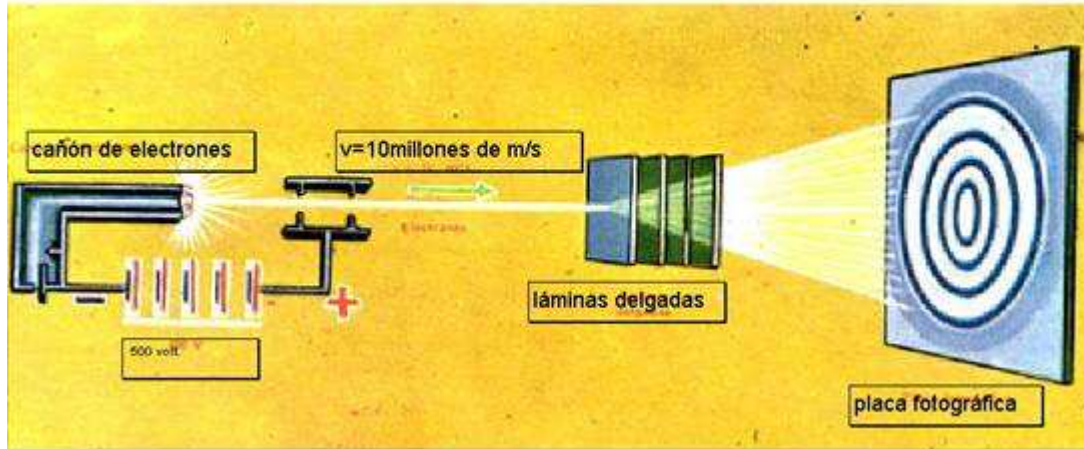
La reflexión, es la siguiente, si el fotón tiene un $p=E/c=h\nu/c=h/\lambda$. Esto mismo se puede hacer extensible a toda partícula con cantidad de movimiento p .

Dualidad Onda-corpúsculo: Todo sistema físico tiene un doble comportamiento; es simultáneamente ONDA y PARTÍCULA. Presenta un aspecto u otro dependiendo del montaje para su detección.

Ambas características están relacionadas por $p\lambda=h$ que es la llamada **relación de DE BROGLIE**

Cuántica XX: dualidad onda corpúsculo (II)

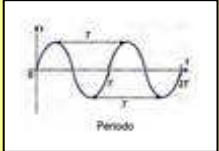
Experimento de Thomsom-Reid En este caso la long de onda es de 7.10^{-9} m.



Este comportamiento como onda se detectó experimentalmente al hacer incidir un haz de e^- sobre un sólido cristalino, de tal forma que los átomos de la red cristalina actuaron como red de difracción, y se obtuvieron como resultado, las figuras de difracción correspondientes



Cuántica XXI: hipótesis de De Broglie

Onda: 		Corpúsculo
Frecuencia: $\nu=c/\lambda$		Energía $E=mc^2$
	$E=h\nu$	
Longitud de onda λ		Momento lineal $p=mv$
	$P=h/\lambda$	

Cuántica XXII: principio de incertidumbre

- Este principio tira por tierra el determinismo de la física clásica (si conozco el estado actual de un sistema y las interacciones sobre este, puedo determinar su evolución futura). Puedo determinar, clásicamente, la posición y la velocidad de una partícula.
- Cuánticamente esto no es así. La dualidad Onda-corpúsculo, implica aceptar el principio de indeterminación, según el cual.
- ***NO SE PUEDE DETERMINAR SIMULTÁNEAMENTE LA POSICIÓN Y LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO DE UNA PARTÍCULA***

• Si $\Delta x =$ imprecisión absoluta de posición (Mov. Sobre el eje x).

$\Delta p =$ imprecisión absoluta de momento lineal (Cantidad de movimiento)
tendré:

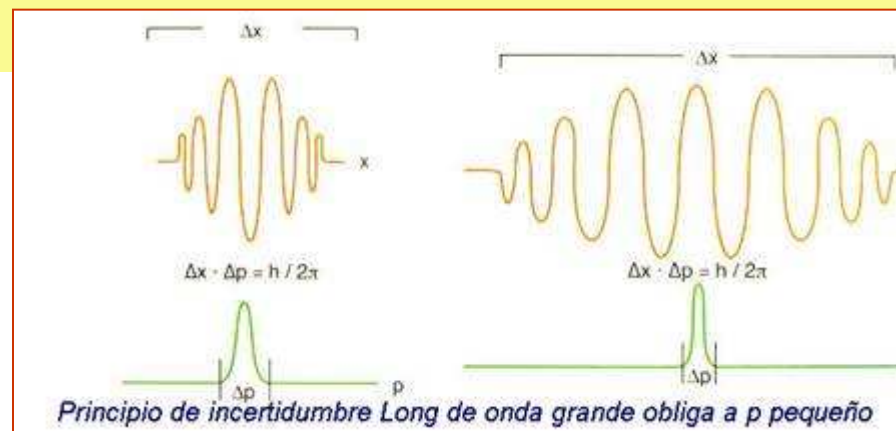
$$\Delta p \cdot \Delta x \geq h/2\pi; h/2\pi = \hbar.$$

- Tiempo y energía también verifican esta relación.

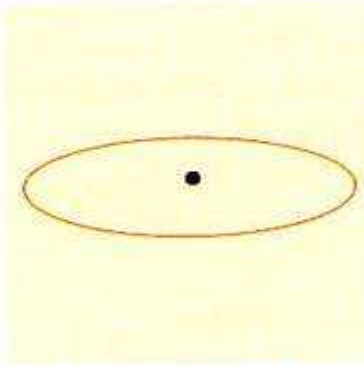
$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar.$$



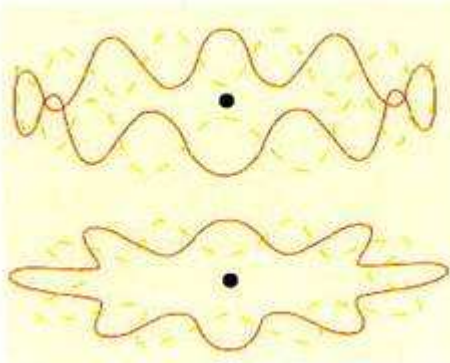
Werner Heisenberg
Nobel en el 32
mecanocuántico



Cuántica XXIII: la onda de probabilidad



Modelo de Bohr

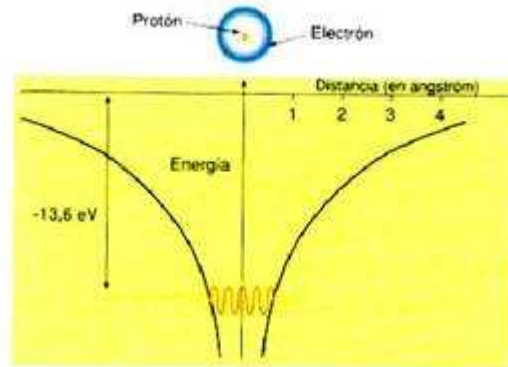


Modelo de De Broglie

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2} (E - E_p)\psi = 0$$

Modelo cuántico

Mecánica cuántica



El electrón en el átomo de H puede representarse
Por una onda en un pozo de potencial de 1,36 eV



Erwin Schrödinger

EFEECTO TÚNEL

Mecánica clásica



Clásicamente una bola dentro de la taza
con una energía de 5J no podrá superar
una barrera de 7J, no saldrá de la taza

Mecánica cuántica



Cuánticamente existe una probabilidad de que la
partícula atraviese la barrera de energía

M.Vázquez

23

Cuántica XXIV Formulario

Ley de Stephan	$R_T = \sigma T^4$
Ley de Wien	$\lambda_{\max} T = 2,89775 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$
Ley de Stephan; obtención matemática	$R_T = \int_0^{\infty} R_T(f) df = \sigma T^4$
Energía del fotón	$E = h\nu$
Efecto fotoeléctrico	$E_c = h\nu - W$
Potencial de frenado	$eV_0 = 1/2mv^2 = E_c = h\nu - W$
Momento lineal; Hipótesis de DeBroglie	$p = E/c = h\nu/c = h/\lambda.$
Principio de incertidumbre Heisemberg	$\Delta p. \Delta x \geq h/2\pi; h/2\pi = \hbar.$