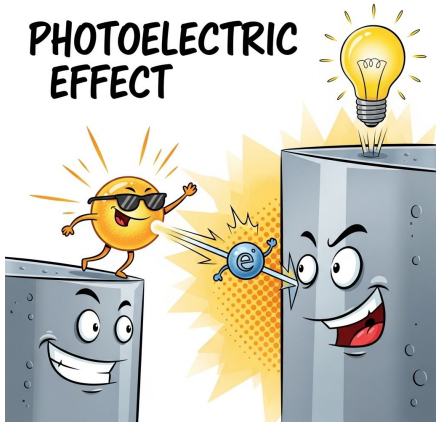
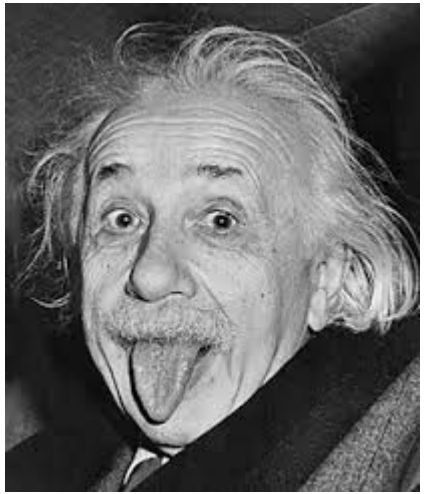
Fecha: Junio 2025

Física Cuántica y relativista



Jesús Ruiz



$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

Índice

1. Dualidad onda corpúsculo y cuantización.
2. Diferencias entre ondas y partículas. Hipótesis de De Broglie.
3. Radiación térmica, efecto fotoeléctrico y espectros atómicos.
4. Principio de incertidumbre.
5. Introducción a la Relatividad.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$

CC BY SA

1. Dualidad onda-corpúsculo

A lo largo de la historia se han ido realizando distintas interpretaciones de la luz y la radiación.

Los griegos daban interpretaciones místicas que poco podían estudiarse de manera científica.

Para los árabes, siglo XI, la luz se explicaba sólo con los fenómenos de reflexión y refracción.

A finales del siglo XVII surgen las primeras teorías científicas:

Huygens, 1690: la luz es una onda mecánica que se propaga a través del éter. Añade la explicación de los fenómenos de difracción e interferencia y específica que la velocidad de la luz es menor en medios más densos.

GsμS
CC BY SA

Newton, 1704: la luz está formada por partículas y no produce interferencias ni difracción. Su velocidad es mayor en medios más densos. Su hipótesis prevalecerá dada su reputación en otros campos de la física.

Young (1810) y Foucalt(1855) observan la difracción y que la velocidad de la luz disminuye en el agua. Se vuelve a la teoría ondulatoria.

Maxwell (1855) demuestra que la luz es la combinación de los campos $\vec{E}$ y $\vec{B}$, por tanto es una onda transversal que no necesita ningún medio para propagarse.

A finales del S. XIX queda asentada y demostrada la teoría de Maxwell aunque se quedarían por explicar algunos fenómenos: la radiación térmica, el efecto fotoeléctrico y los espectros atómicos.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

2. Diferencias entre ondas y partículas. Hipótesis de De Broglie.

En la física actual para diferencias las ondas y las partículas se tienen en cuenta las siguientes características:

- **Transporte de materia:** Las partículas transportan materia.
Las ondas no transportan materia, las partículas del medio sólo vibran alrededor de su posición de equilibrio, quedando al final en la misma posición que al principio.
- **Localización:** Una partícula está localizada en el espacio, ocupa un lugar concreto en un determinado instante.
Una onda está deslocalizada. La onda afecta a múltiples puntos del espacio al mismo tiempo.
- **Transmisión de energía:** Las partículas transmiten la energía de forma discreta (discontinua).
Las ondas transmiten la energía de forma continua.
- **Fenómenos ondulatorios:** las ondas sufren interferencias y difracción, mientras que las partículas no. Si observamos el típico patrón de interferencia,
con zonas de amplitudes máxima y mínima intercaladas (luz y oscuridad para la luz), es que estamos ante una onda.

Existen partículas que debido a la velocidad en la que se propagan podrán comportarse como ondas o como partículas, como por ejemplo el electrón. En cada caso se estudiarán con los fundamentos físicos correspondientes.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

Hipótesis de De Broglie

El físico francés, Luois de Broglie, supone quee cualquier partícula puede comportarse como una onda en determinados experimentos. A cada partícula corresponde una onda asociada. Por lo tanto toda la materia tiene la naturaleza dual onda-partícula.

LONGITUD DE ONDA ASOCIADA (λ): La longitud de onda que se pueda asociar a cada cuerpo material vendrá dada por la constante de Planck ($h=6{,}63\cdot 10^{-34}$ J· s).

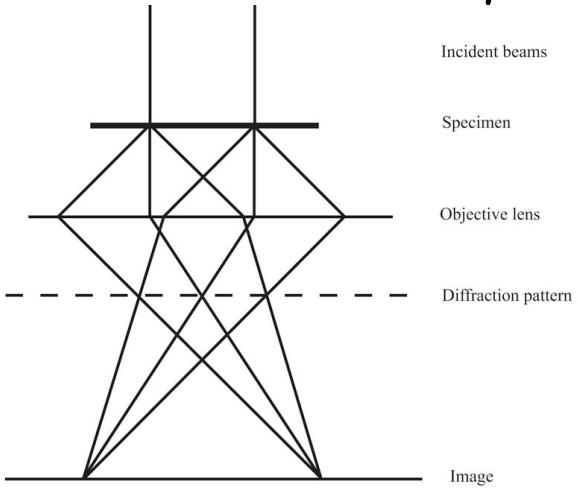
$$\boxed{\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}}$$

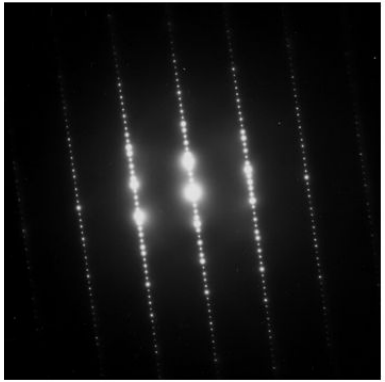
A la onda asociada a una partícula material se le denomina **onda de materia.**

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

Demostración práctica.

Este comportamiento pudo ser demostrado con la difracción de electrones con una lámina de Níquel por Davisson y Germer en 1927. Eso les valió el premio nobel.



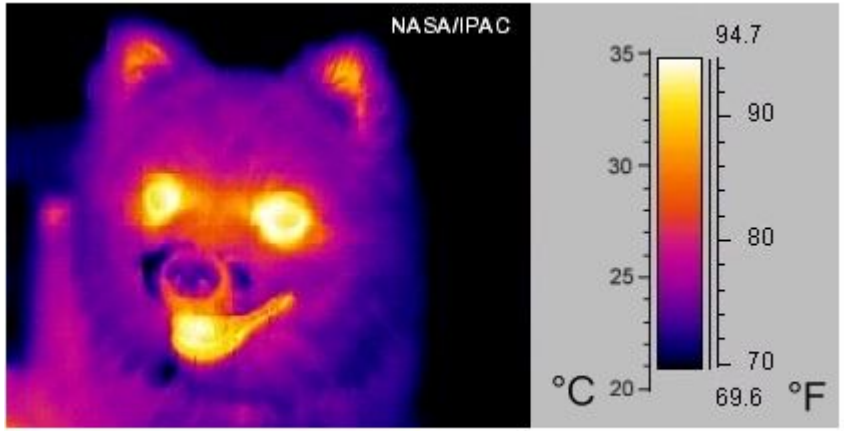


By Oysteinp at the English-language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, Link

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

3. Radiación térmica, efecto fotoeléctrico y espectros atómicos.

La radiación térmica es la radiación electromagnética (de cualquier parte del espectro) que surge debido a la temperatura del cuerpo.



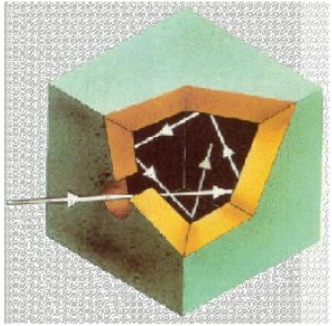
De NASA/IPAC . Dominio público. Enlace

En realidad cualquier cuerpo emite radiación a cualquier temperatura, lo que ocurre es que sólo somos capaces de observar los cambios de color que ocurren dentro del rango del espectro visible.

Para poder estudiar la radiación en cualquier cuerpo y a cualquier temperatura se parte de un modelo ideal que denominamos CUERPO NEGRO.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

CUERPO NEGRO



Cuerpo negro

Las características del cuerpo negro son:

Absorbe toda la radiación que incide sobre él por lo que no refleja nada.

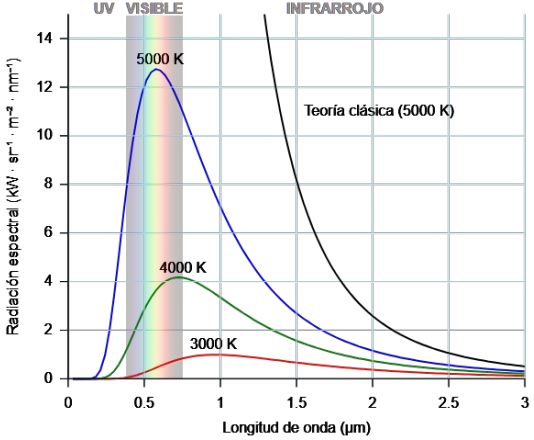
Emite siempre la máxima cantidad de radiación a cualquier temperatura.

Una cavidad parecida a la figura es una buena aproximación de cuerpo negro. Al entrar la radiación por el orificio sufre varias reflexiones y sus paredes absorbentes hacen posible que la radiación quede dentro. De igual manera al calentarlo por el orificio sale toda la radiación que puede emitir.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

LEY DE WIEN

Si representamos la intensidad de la onda que emite un cuerpo en función de la su longitud de onda y para varias temperaturas obtenemos una gráfica como la de la figura.



Observamos que para cada temperatura hay un máximo distinto, esto de conoce como Ley de Wien.

$$\boxed{\lambda = \frac{cte}{T}} \text{ donde } cte = 2,8976K \cdot m$$

Esta ley era válida hasta que se entraba en el rango de la radiación ultravioleta por lo que a este problema se le llamó catástrofe ultravioleta. Se le daría solución gracias a Planck.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

RADIACIÓN TÉRMICA DE MAX PLANCK(1900).

La energía de esta radiación no es continua sino que se emite en pequeños paquete denominados cuantos, como si fueran partículas.

La energía de un "cuanto" depende de la frecuencia a la que vibran los átomos del material.

$E=h\cdot f \longrightarrow$ donde $h=6{,}63\cdot 10^{-34}\,J\cdot s$ es la constante de Planck.

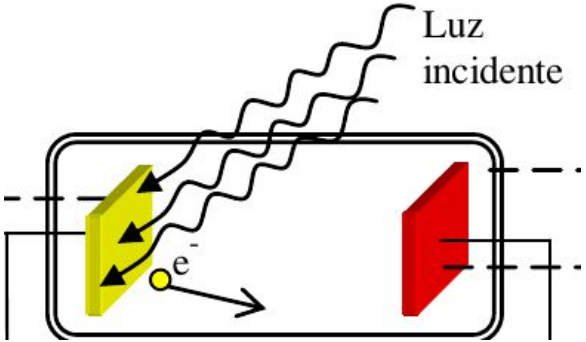
La energía está cuantizada, es decir, sólo se pueden emitir un número entero de cuantos de energía por lo que la energía total de cualquier cuerpo es: $E=n_T\cdot h\cdot f$

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

EFECTO FOTOELÉCTRICO.

Consiste en la emisión de electrones por un metal cuando se le incide con radiación electromagnética.

Descubierto por Hertz, al usar radiación ultravioleta sobre Zinc.



Explicación clásica:

Los e^- no se emiten de manera instantánea.

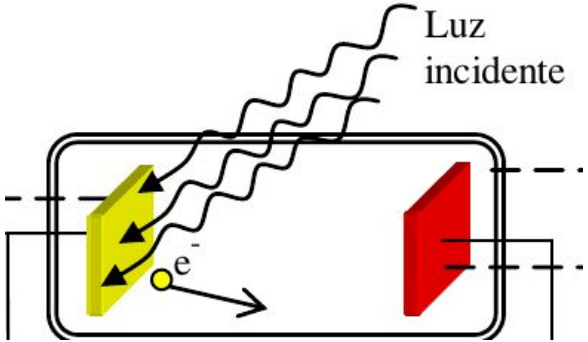
La emisión de se produce con cualquier frecuencia.

La energía cinética de los e^- emitidos depende de la cantidad de radiación (intensidad).

El número de e^- depende la intensidad de la luz.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

EFECTO FOTOELÉCTRICO.



Observación real:

La emisión no es instantánea.

La emisión no se produce hasta que no se supera una cierta frecuencia, la llamada frecuencia umbral.

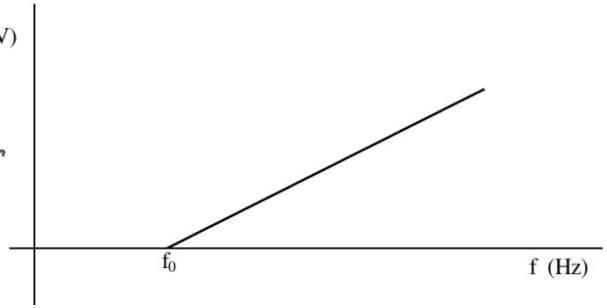
La frecuencia umbral depende del tipo de material.

La energía cinética depende de la frecuencia de la radiación, no de la cantidad de radiación (intensidad).

Los e^- emitidos si depende la intensidad de radiación (igual que en la explicación clásica).

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

EFECTO FOTOELÉCTRICO. - Explicación de Einstein (Premio nobel 1905)



- Aplica las hipótesis de Planck.
- Supone la que la radiación está cuantizada en partículas llamadas fotones, es decir la luz se puede comportar como una partícula.
- La energía de un fotón viene dada por: $E_f = h \cdot f$.
- El fotón al chocar con el electrón le traspasa su energía.
- El electrón, antes de ser emitido, debe vencer la atracción nuclear a esto se le llama trabajo de extracción(**Wext**) --> $W_{ext} = h \cdot f_0$ donde f_0 es la frecuencia umbral del metal. $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$

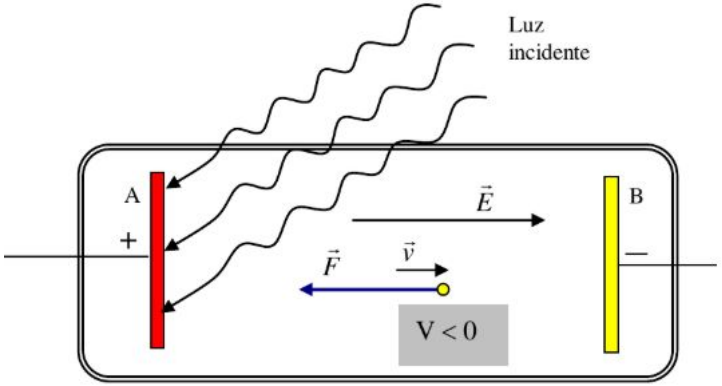
La pendiente es la constante de Planck (h)

Si la energía del fotón no supera al trabajo de extracción no se emite el electrón. Si es mayor, la energía sobrante se transformará en energía cinética para el electrón.

$$\boxed{E_{foton} = W_{extr} + E_c} \rightarrow h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2} m \cdot v^2 \rightarrow \boxed{E_c = h \cdot (f - f_0)}$$

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

EFECTO FOTOELÉCTRICO. - Potencial de frenado (V_r)



$$\Delta V = V_- - V_+$$

- Experimentalmente la velocidad de los electrones se puede calcular frenando los electrones con ayuda de un campo eléctrico. Esto es conectando una corriente eléctrica que controlamos mediante su diferencia de potencial. Cuando se dejan de emitir electrones se ha llegado al potencial de frenado.

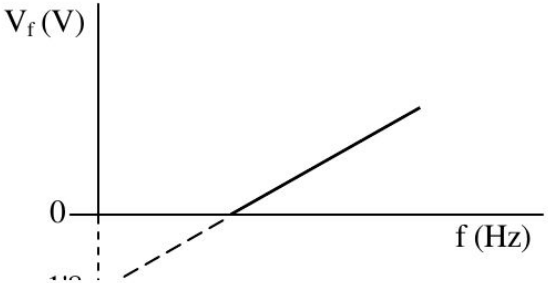
$$\Delta E_m = 0 \rightarrow \Delta E_c + \Delta E_p = 0$$

$$\Delta E_p = q\Delta V$$

$$0 - E_c + q\Delta V = 0$$

$$\boxed{\Delta V = V_r = \frac{E_c}{q}}$$

Dado que se emiten electrones (q<0) el potencial suele ser negativo.
En electricidad se suele usar la diferencia de potencial (ddp) que se define V_+-V_- , positivo

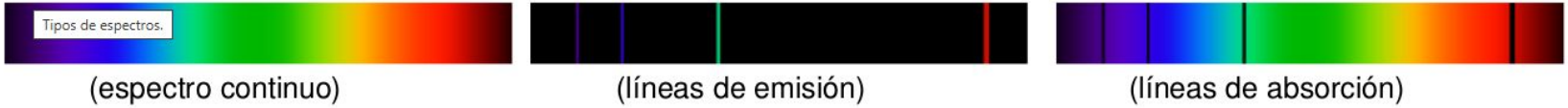


$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

ESPECTROS ATÓMICOS

La radiación térmica y el efecto fotoeléctrico se explicaban muchos fenómenos de radiaciones y emisiones pero no había explicación para los **espectros atómicos.**

Un **espectro** es un distribución de la radiación de luz en las distintas frecuencias que la componen. En física podemos distinguir tres tipos: **continuo, de absorción y de líneas emisión.**



(espectro continuo) (líneas de emisión) (líneas de absorción)

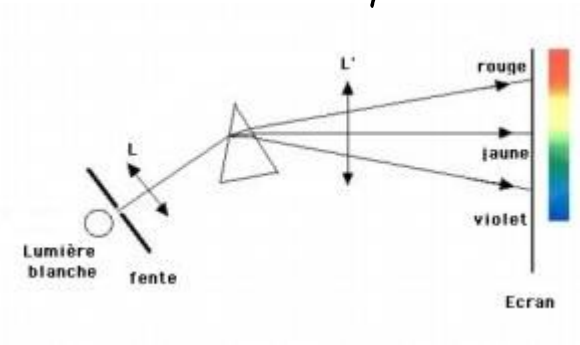
Universidad de Alicante (CC0)

$\vec{G}s\mu\vec{S}$ CC BY SA

ESPECTROS ATÓMICOS
TIPOS DE ESPECTROS:

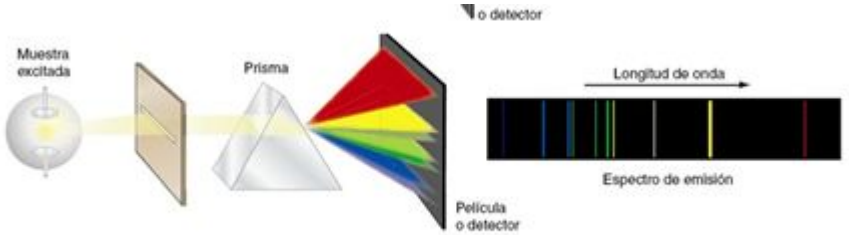
Espectro continuo:

Es la descomposición de la luz con la ayuda de un prisma y obtenemos una secuencia de colores sin interrupción.



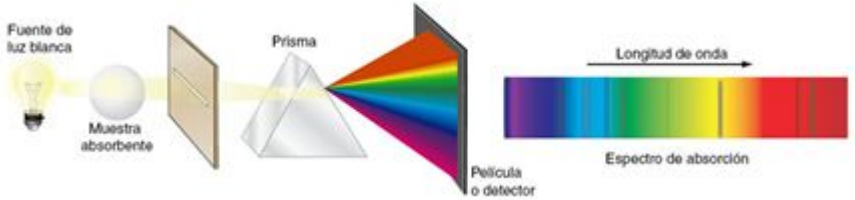
Espectro de emisión:

Es la radiación que produce un cuerpo al calentarlo. Usando algún sistema óptico podemos separar las frecuencias y obtener una imagen.



Espectro de absorción:

Es la radiación que puede absorber un cuerpo al que se le hace incidir dicha radiación. Las frecuencias que absorba el cuerpo aparecerán como zonas negras en una imagen.



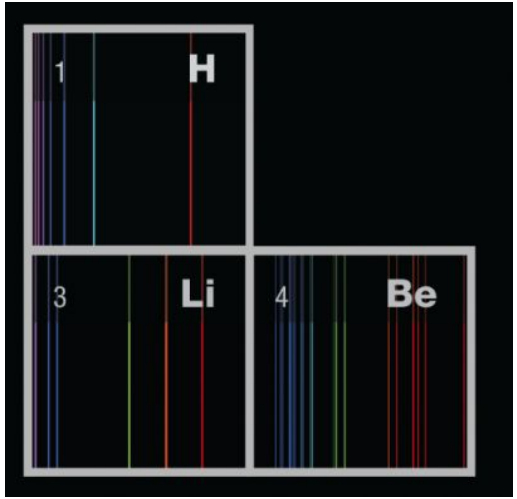
$\vec{G}s\mu\vec{S}$

CC BY SA

ESPECTROS ATÓMICOS- COMPROBACIÓN PRÁCTICA

La física clásica explicaba los espectros de forma continúa, es decir, no había zonas sin color en el espectro pero Bunsen y Kirchoff en el año 1859 comprueban que esto no es lo que ocurre en la realidad.

- Los espectros que se observan son discontinuos y solo se observan ciertas líneas.
- Descubren además que cada elemento químico tiene su propio espectro, lo cual ayuda a identificar los elementos químicos según la luz emitida.



$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

SERIES ESPECTRALES:

- Balmer, 1885, descubre la ley empírica que permitía calcular las energías de las radiaciones emitidas en el átomo de Hidrógeno

$$E = R_E \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

R_E=2,172· 10^{-18} J es la constante de Rydberg.

n=3,4,5,6,7 son las distintas líneas espectrales.

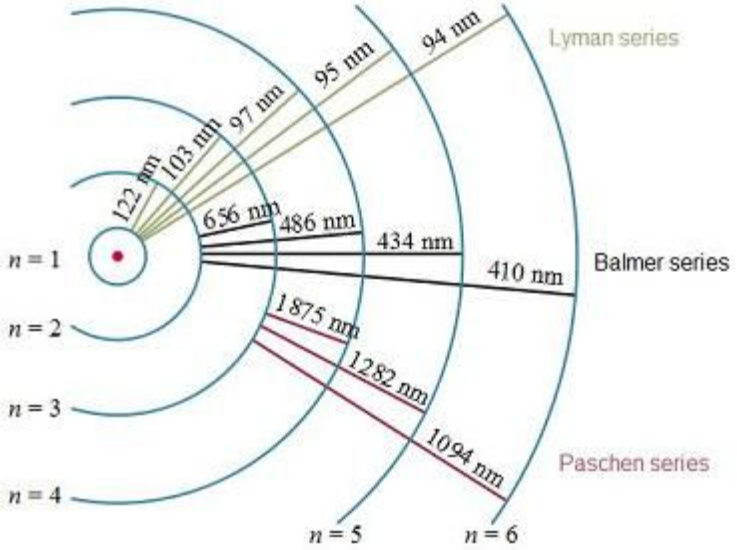
- Más adelante otros científicos como Lymann, Braquett, Paschen y Pfund descubrirán que esto se puede ampliar a todos los átomos llegando a la expresión para la energía de series espectrales:

$$E = R_E \cdot \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

donde n1 y n2 son números naturales y $n_2 > n_1$.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

MODELO ATÓMICO DE BOHR



Niels Bohr, 1913, gracias a estos estudios propondrá una serie de postulados que darían lugar a un nuevo modelo atómico.

Los electrones sólo pueden estar en órbitas que cumplan que su momento angular sea múltiplo de $\frac{h}{2\pi}$.

La energía del electrón en una órbita es $E = -\frac{R_E}{n^2}$ donde $R_E = 2,172 \cdot 10^{-18} J$ es la constante de Rydberg.

El átomo emite fotones cuando un electrón salta de un nivel a otro de energía.

La energía del fotón emitido se puede calcular por la expresión de energía de series espectrales.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

- En el año 1927, asumiendo ya el carácter dual de la materia, Heisenberg descubre que es imposible medir al mismo tiempo la posición y la velocidad de una partícula. Además, descubre que el hecho de medir modifica la medida.
- Si intentamos medir la posición y la velocidad de un electrón nos encontramos con varios problemas.
  - Para ver al electrón debemos hacerlo chocar con un fotón que nos permita verlo.
  - Al chocar el fotón con el electrón cambia el proceso de medida.
  - En el choque ya ha habido un cambio de velocidad.
- ES IMPOSIBLE FIJAR LA POSICIÓN DE UN ELECTRÓN PARA MEDIR SU POSICIÓN Y VELOCIDAD AL MISMO TIEMPO.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE. DEFINICIÓN.

Es imposible medir simultáneamente y con total exactitud la posición y la cantidad de movimiento (velocidad) de una partícula. Siempre la incertidumbre (error que podemos cometer) en la medida cumplirá

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

ENERGÍA-TIEMPO

El principio de incertidumbre no sólo se observa para las magnitudes posición y momento lineal. También se puede observar para las transiciones de los electrones(de un nivel a otro) dentro del átomo. En este caso se puede definir por:

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

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

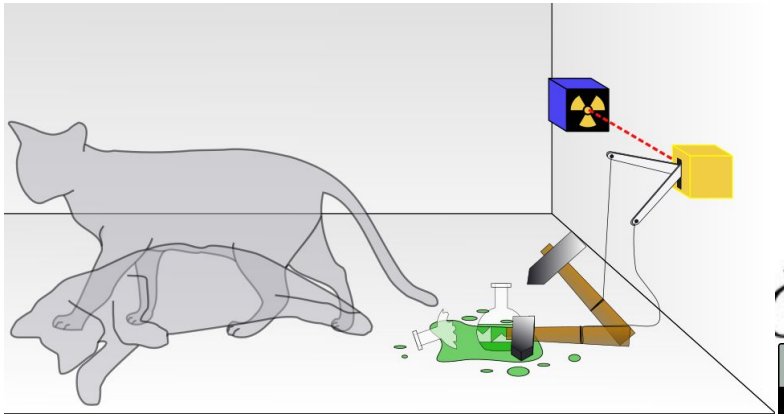
PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE. CONSECUENCIAS

Este nuevo descubrimiento acarreó varias consecuencias:

1. No se puede hablar de la posición o la velocidad de las partículas, en su lugar hablamos de la **probabilidad de encontrar** al electrón o que tenga una cierta velocidad. ⟶ Se debe definir un nuevo modelo atómico en sustitución del modelo de Bohr. (**Modelo mecano-cuántico**).
2. Heisenberg desarrolla la mecánica matricial para poder trabajar con incertidumbres y probabilidades.
3. Erwin Schrödinger desarrolla la mecánica ondulatoria para poder tratar cualquier cuerpo material como una onda.
4. Paul Dirac idea el álgebra cuántica para poder trabajar con los nuevos conceptos

Es muy conocido el experimento del gato de Schröndiger:

Este experimento consiste en disponer de una cerradura cuántica donde puede hay un gato junto con un frasco de veneno. Hasta que abramos la caja el gato tiene la misma posibilidad de estar vivo o muerto y el hecho de abrir la caja influye en lo que encontremos la abrirla.



$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

EJEMPLO DE PROBLEMA DE INCERTIDUMBRE

Calcular la incertidumbre en la determinación de la posición en los siguientes casos:

a) Electrón cuya velocidad, de 7000 km/s, se ha medido con una incertidumbre del 0,003%

b) Proyectil de 50 g que se desplaza a una velocidad de 300 m/s, medida con la misma incertidumbre que el caso anterior.

(datos: $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J·s , $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg)

a) Electrón: $v = 7000$ km/s $= 7 \cdot 10^6$ ms^{-1} $\quad \Delta v = 7 \cdot 10^6 \cdot \frac{0{,}003}{100} = 210\ m\,s^{-1}$

$$p = m \cdot v = 9{,}1 \cdot 10^{-31} kg \cdot 7 \cdot 10^6\ m\,s^{-1} = 6{,}37 \cdot 10^{-24} kg\ m\,s^{-1}$$
$$\Delta p = m \cdot \Delta v = 9{,}1 \cdot 10^{-31} kg \cdot 210\ m\,s^{-1} = 1{,}911 \cdot 10^{-28} kg\ m\,s^{-1}$$

Aplicando la relación de incertidumbre:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \rightarrow \Delta x \geq \frac{h}{4\pi \cdot \Delta p} \rightarrow \Delta x \geq 2{,}76 \cdot 10^{-7} m$$

Obtenemos una incertidumbre importante, pues es unas 3000 veces mayor que el tamaño de un átomo. Sería el equivalente a localizar una casa, y no sabemos si está en un pueblo, o en el de al lado.

a) Proyectil: $v = 300$ ms^{-1} $\quad \Delta v = 300 \cdot \frac{0{,}003}{100} = 0{,}009\ m\,s^{-1}$

$$p = m \cdot v = 0{,}05\ kg \cdot 300\ m\,s^{-1} = 15\ kg\ m\,s^{-1}$$
$$\Delta p = m \cdot \Delta v = 0{,}05\ kg \cdot 0{,}009\ m\,s^{-1} = 4{,}5 \cdot 10^{-4} kg\ m\,s^{-1}$$

Aplicando la relación de incertidumbre:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \rightarrow \Delta x \geq \frac{h}{4\pi \cdot \Delta p} \rightarrow \Delta x \geq 1{,}17 \cdot 10^{-31} m$$

Esta incertidumbre es despreciable

$\vec{G}s\mu\vec{S}$

CC BY SA

INTRODUCCIÓN A LA RELATIVIDAD

La Teoría de la Relatividad Especial, propuesta por Albert Einstein en 1905, revolucionó nuestra comprensión del espacio, el tiempo y la naturaleza del universo. Esta teoría surgió como respuesta a las inconsistencias entre la mecánica clásica y el electromagnetismo, especialmente en lo que respecta a la velocidad de la luz.

Play video

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

RELATIVIDAD. POSTULADOS FUNDAMENTALES.

La Teoría de la Relatividad Especial se basa en dos postulados principales:

1. Principio de relatividad: Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales.

2. Constancia de la velocidad de la luz: La velocidad de la luz en el vacío es constante y es la misma para todos los observadores, independientemente de su movimiento relativo.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

CONSECUENCIAS DE LOS POSTULADOS

1. Dilatación del tiempo:

El tiempo transcurre más lentamente para un objeto en movimiento en comparación con un objeto en reposo. Este efecto se describe mediante la fórmula:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Donde:

- $\Delta t'$ es el tiempo medido en el sistema en movimiento
- Δt es el tiempo medido en el sistema en reposo
- v es la velocidad relativa entre los sistemas
- c es la velocidad de la luz

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

2. Contracción de la longitud:

Los objetos en movimiento parecen más cortos en la dirección del movimiento. La contracción se describe mediante:

$$L' = L \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Donde:

- L' es la longitud medida en el sistema en movimiento

- L es la longitud en reposo

Ejemplos:

Dilatación temporal.

Un astronauta viaja en una nave espacial a 0,8c durante 1 año según su reloj. Para un observador en la Tierra, el viaje durará aproximadamente 1,67 años.

Contracción de longitud

Una vara de 1 metro de longitud que se mueve a 0,6c parecerá tener una longitud de 80 cm para un observador estacionario.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

EQUIVALENCIA MASA-ENERGÍA

La famosa ecuación $E = mc^2$ establece que la masa y la energía son equivalentes. Esto implica que:

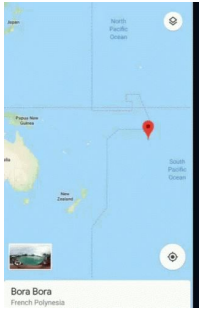
- La masa puede convertirse en energía y viceversa.

- La masa de un objeto aumenta con su velocidad.

La energía liberada en la explosión de una bomba atómica proviene de la conversión de una pequeña cantidad de masa en una enorme cantidad de energía.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA

RELATIVIDAD. APLICACIONES PRÁCTICAS.



La Teoría de la Relatividad Especial tiene numerosas aplicaciones prácticas, incluyendo:

1. GPS: Los satélites GPS deben tener en cuenta los efectos relativistas para proporcionar ubicaciones precisas.

2. Aceleradores de partículas: El diseño y funcionamiento de aceleradores como el LHC se basan en principios relativistas.

3. Astrofísica: La comprensión de fenómenos como los agujeros negros y la expansión del universo depende de la relatividad.

$\vec{G}s\mu\vec{S}$
CC BY SA