



2º de Bachillerato

Física

Contenidos

**Física Siglo XX:
Crisis de la Física Clásica**

1. Introducción

Desde muy pequeños intentamos explicar las cosas que nos rodean, la mayoría de las veces adoptamos ideas sobre la realidad que nos convencen a nosotros, pero no son válidas para explicar nuestro entorno.

Una historia muy parecida le ocurre casi continuamente a la ciencia. Uno de los puntos claves para derrocar las creencias newtonianas, que a su vez derribaron las aristotélicas, comenzaron a acontecer cuando nos acercábamos al siglo XX.

Hasta ese momento la gran mayoría de los fenómenos de la Naturaleza encontraba explicación en cualquiera de las dos teorías existentes.

- Por un lado estaban las **leyes de Newton** que explicaban a la perfección todos los fenómenos relacionados con los cuerpos en movimiento.
- Por otro lado las **ecuaciones de Maxwell** habían unificado el conocimiento de los fenómenos de electricidad y magnetismo.

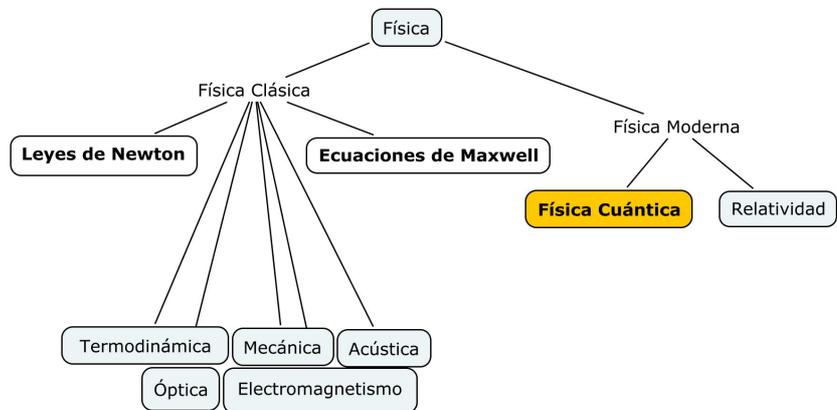


Imagen de Juancarcole en Wikimedia Commons. CC

Ambas teorías conformaban la llamada **Física Clásica**, y nada hacía pensar que pudieran aparecer fisuras en este edificio tan bien construido.

Sin embargo, cuando nadie lo esperaba, el estudio de un fenómeno muy corriente vino a cambiar esa idea.

Por ese tiempo, muchos físicos estaban interesados en la radiación emitida por un cuerpo calentado a cierta temperatura. Comprueban que **todos los cuerpos, por el hecho de estar a cierta temperatura, emiten radiación electromagnética**. Fíjate bien en esta afirmación, porque significa que cualquier cuerpo en el que pienses está radiando energía (las plantas, los animales, las paredes de tu habitación, el bolígrafo,...todo lo que se te ocurra). Esta radiación se emite en cualquier frecuencia pero, según sea la temperatura del cuerpo, se emitirá en unas más que en otras.

Por ejemplo un trozo de hierro, al ser calentado, obviamente aumenta su temperatura y se puede observar que pasa sucesivamente por distintos colores: rojo oscuro, rojo anaranjado, amarillo, blanco. El siguiente applet simula este proceso al ir desplazando el control inferior para cambiar la temperatura.

Creación propia

También puedes observar un fenómeno similar al que estamos describiendo [desde este enlace](#) a una página que contiene una simulación del cambio de color que se produce cuando modificamos la temperatura de una olla de hierro. Accede a la página y observa el fenómeno deslizando el cursor para modificar la temperatura.

En relación con este fenómeno veremos en este capítulo algunos experimentos que ponían en cuestión las leyes conocidas hasta el momento. Estos hechos experimentales junto con las teorías que los explicaban desembocaron en el nacimiento de una nueva teoría, la **Física Cuántica** que, como iremos viendo, supuso un cambio drástico en las leyes y los conceptos establecidos hasta ese momento.

Como verás, una buena parte de este tema consiste en observar la imposibilidad de la física clásica para explicar los resultados de estos experimentos como, por ejemplo, el efecto fotoeléctrico o el análisis de los espectros atómicos.

2. Radiación del cuerpo negro

Para estudiar el fenómeno descrito en el apartado anterior, los físicos se fijaron en un objeto muy particular: **el cuerpo negro**. Este es un cuerpo que tiene las siguientes características:

- 1.- Absorbe toda la radiación que incide sobre él.
- 2.- No refleja nada, en cambio sí es capaz de emitir radiación en las mismas frecuencias que absorbe.
- 3.- Su emisión de energía es independiente de la composición del cuerpo y sólo depende de la temperatura del mismo.

Aunque las características de un cuerpo negro constituyen una situación ideal, podemos aproximarnos a su estudio si observamos un sistema físico como el de la figura.

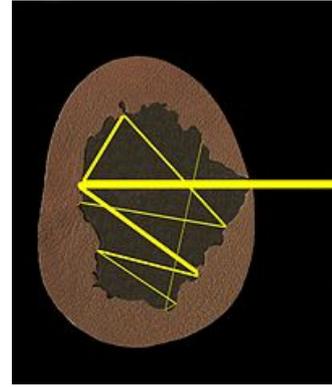


Imagen de Magnus en Wikimedia Commons. dominio público

Como puedes ver, se trata de una cavidad que tiene un pequeño agujerito. La radiación que entra por aquí es absorbida en cada una de las reflexiones que se producen en la pared interna de la cavidad. La radiación existente en el interior de un cuerpo negro se estudia analizando la radiación que sale por el agujerito.

Esta radiación se emitirá en todas las frecuencias, aunque en unas más que en otras. Llamamos **espectro de radiación del cuerpo negro** a la distribución de energía emitida por un cuerpo negro en función de la frecuencia (o de la longitud de onda). Es importante destacar que, en cualquier caso, **este espectro depende exclusivamente de la temperatura** a la que se encuentre el cuerpo.

Si dibujamos la energía que emite un cuerpo negro en función de la longitud de onda obtendremos una gráfica como la que se representa en la siguiente gráfica:

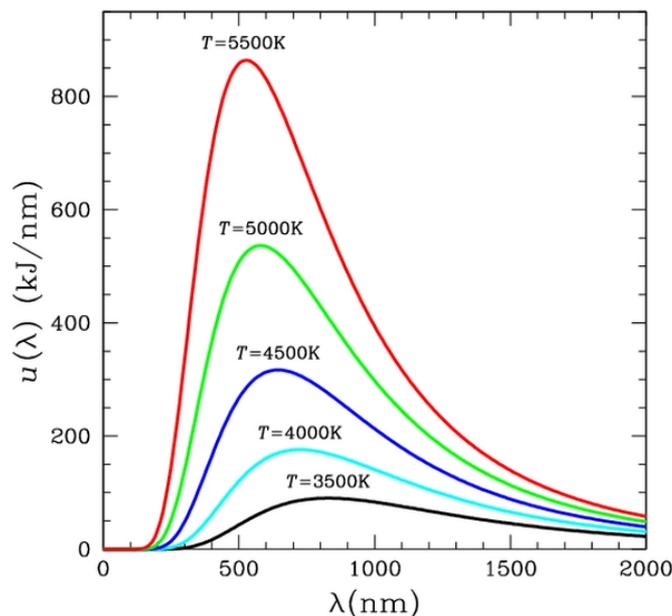
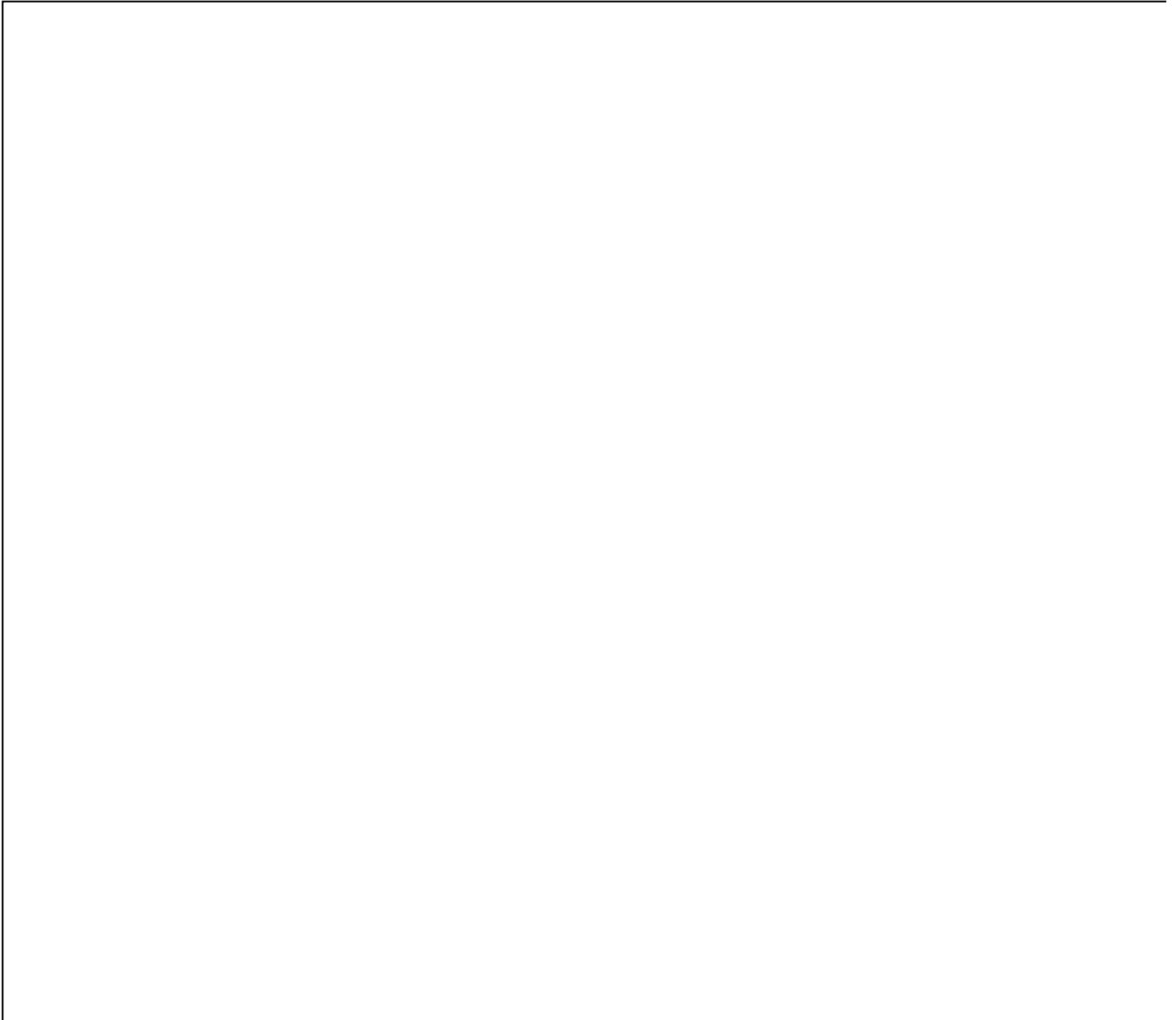


Imagen de Joonas en Wikimedia Commons. Dominio público

En los siguientes apartados comprobarás que el estudio de estas gráficas resultó crucial para el nacimiento de la física cuántica.

2.1. Leyes de Wien y de Stephan-Boltzmann

Observa la siguiente simulación en la que podemos manipular la temperatura a la que se encuentra el cuerpo negro.



Simulación en [PhET-Universidad de Colorado](#)
bajo licencia [Creative Commons](#)

Fíjate bien en dos cuestiones:

1) Cuando aumentamos la temperatura, la longitud de onda a la que se produce la máxima emisión disminuye (lo puedes comprobar observando que el máximo de la gráfica se desplaza hacia la izquierda). Este fenómeno es el que refleja la **ley de desplazamiento de Wien**, que nos proporciona una expresión matemática que permite calcular la temperatura del cuerpo negro si se conoce la longitud de onda de máxima emisión, o viceversa.

$$\lambda_{max} \cdot T = 0.0028976 \text{ m} \cdot K$$

Ojo, la $\lambda_{m\acute{a}x}$ no es la máxima longitud de onda, sino la longitud de onda de máxima emisión.

2) Del gráfico anterior se deduce que la cantidad de energía emitida por el cuerpo negro (representado geoméricamente por el área bajo la curva) aumenta al aumentar la temperatura.

La **ley de Stefan-Boltzman** establece que la potencia por unidad de superficie (energía por unidad de superficie y tiempo) emitida por un cuerpo negro (W/m^2) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Matemáticamente:

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

donde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ se denomina constante de Stefan-Boltzmann.

Ejercicio resuelto

Podemos utilizar la ley de Wien para hacer un cálculo aproximado de la temperatura de la superficie de las estrellas a partir de los siguientes datos de longitudes de onda:

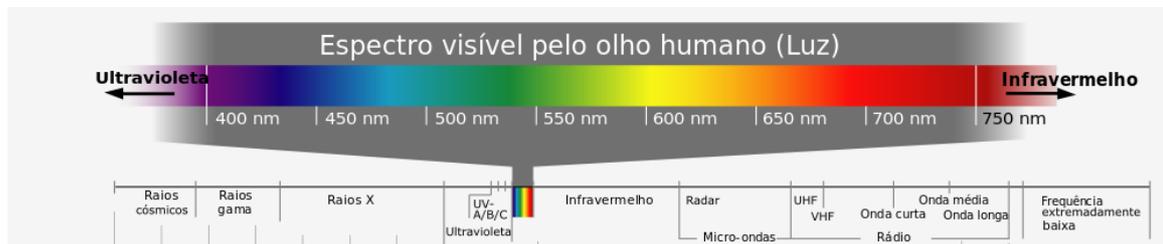


Imagen en Wikimedia Commons de [Suarez ruibal](#) bajo licencia [Creative Commons](#)

Haz una estimación de la temperatura a la que se encuentra la superficie del Sol y la superficie de la estrella supergigante roja Betelgueuse.

Mostrar retroalimentación

Para hacer el ejercicio vamos a hacer algunas suposiciones (recuerda que se nos pide una estimación, no un valor exacto).

En primer lugar vamos a considerar que la longitud de onda a la que se produce la máxima emisión desde el Sol es la correspondiente a la zona amarilla del espectro visible. Si te fijas en la imagen de la cabecera del ejercicio podemos tomar, aproximadamente, $\lambda_{\text{máx}} = 620 \text{ nm}$

Aplicando la ley de Wien, la temperatura resulta:

$$T = \frac{0.0028976}{620 \cdot 10^{-9}} = 4673.5 \text{ K}$$

En el caso de la estrella roja Betelgueuse, la longitud de onda de máxima emisión estará en la zona roja del espectro. Consideramos 730 nm como valor significativo y resulta una temperatura:

$$T = \frac{0.0028976}{730 \cdot 10^{-9}} = 3969.3 \text{ K}$$

2.2. Catástrofe ultravioleta

¿Cómo se podía explicar la gráfica del apartado anterior con la física conocida hasta entonces? La interpretación teórica de esta gráfica se convirtió en uno de los objetivos de los físicos de finales del siglo XIX. Lord Rayleigh y Sir James Jeans se pusieron manos a la obra y, utilizando los resultados de la física clásica, obtuvieron una expresión conocida como la **ley de Rayleigh-Jeans**.

Esta ley establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia (W/m^2) que es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda $\lambda(m)$, para una cierta temperatura $T(K)$. Matemáticamente:

$$R = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

El parámetro "k" es la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K).

De la fórmula anterior sólo nos interesa observar que la potencia depende inversamente de la cuarta potencia de la longitud de onda, lo cual es un desastre porque no se ajusta a la gráfica experimental. Más concretamente, esta ley falla estrepitosamente para longitudes de ondas cortas, a partir de la correspondiente al ultravioleta. Este fallo de la ley se conoce con el nombre de **catástrofe ultravioleta**. La gráfica siguiente muestra la discrepancia entre los resultados experimentales a 5000 K (azul) y los que predice la ley de Raileigh-Jeans (negro).

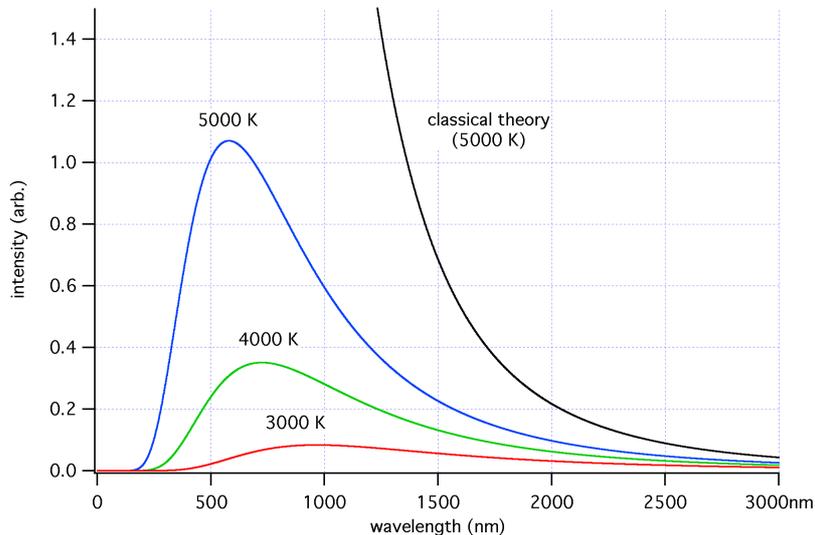


Imagen en Wikimedia Commons de [Drphysics](#). Dominio público

Los intentos por arreglar este desaguisado continuaron, Wien intentó encontrar un resultado mejor que valiera para longitudes de onda bajas, y encontró que al subir en longitudes de onda otra vez se producía una catástrofe y se encontraba una emisión infinita de energía de nuevo. A esta se la llamó **Catástrofe Infrarroja**.

2.3. Hipótesis de Planck. Teoría cuántica de la luz

A final de 1900, el físico alemán Max Planck (1858-1947), tratando de resolver el mismo enigma que Rayleigh-Jeans, descubrió (en un trabajo impresionante) que las leyes de la física clásica no funcionaban en este fenómeno. Obtuvo una expresión para la energía emitida por un cuerpo negro que obligaba a suponer:

- Los átomos que emiten la radiación se comportan como osciladores armónicos.
- **Cada oscilador absorbe o emite energía en una cantidad proporcional a su frecuencia de oscilación f .** Es decir:

$$E = hf$$

La constante de proporcionalidad h se llama constante de Planck y su valor es $h = 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

La hipótesis de Planck supone admitir que la radiación no se emite de forma continua, sino que lo hace de forma discreta en pequeños "paquetes", llamados **cuantos**, cada uno de ellos de energía hf . La energía total emitida o absorbida por cada oscilador armónico sólo puede ser un número entero de cuantos, es decir:

$$E(\text{total}) = nhf$$

El siguiente vídeo muestra este resultado en menos de 3 minutos



Vídeo de himeservices alojado en [Youtube](#)

La hipótesis de Planck supuso un cambio revolucionario ya que por primera vez se introduce la noción de discontinuidad en el fenómeno de emisión de radiación. Como veremos, la idea de los cuantos de energía se fue consolidando conforme pasaba el tiempo, dando lugar a la llamada teoría cuántica.

Curiosidad

A pesar de que la hipótesis de Planck era revolucionaria en su tiempo, Max Planck no fue un revolucionario sino un científico profundamente conservador, respetuoso de las leyes clásicas de la física. En una ocasión, Planck le dijo a su supervisor de investigación, que él sólo quería profundizar los conceptos de sus predecesores y que no deseaba hacer nuevos descubrimientos. Por años Planck luchó para hacer calzar sus



unos, Planck tenía que hacer suizas sus ideas con las ideas clásicas que estaban profundamente enraizadas en su corazón.

Por entonces, escribió con cautela: "no le doy mayor importancia a esto, excepto que quería obtener un resultado positivo para la fórmula, bajo cualquier circunstancia y a cualquier costo".

Cinco años después del descubrimiento de Planck, Einstein propuso que las ideas de la energía cuántica no sólo se aplicaban a los átomos en el horno cuerpo-negro. Postuló que también la energía luminosa se transfería en cantidades discretas, que más tarde fueron llamados fotones. Planck no apreció en su magnitud el significado de la energía cuántica, y él no creía que la energía cuántica venía en valores discretos. Fue más tarde, cuando ya muchas otras personas lo habían aceptado, que él llegó a convencerse de que los átomos no podían tener cualquier energía.



Imagen de Lobo en Wikimedia Commons. Dominio público

3. Espectro de absorción y emisión

Observa la imagen de la figura, representa un haz de luz solar que se hace pasar por un prisma.

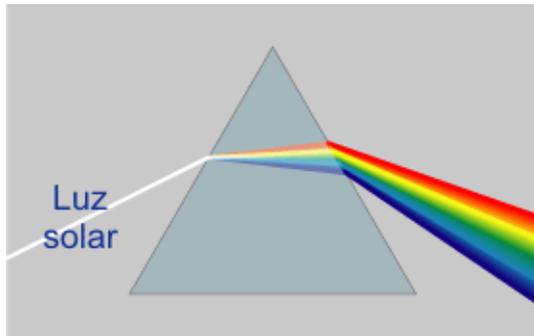


Imagen en Wikimedia Commons de [Joanjoc](#)
bajo licencia de [documentación libre GNU](#)

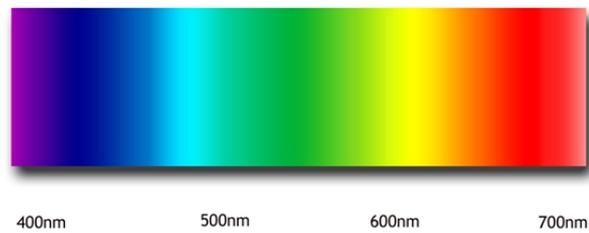


Imagen en Wikimedia Commons de [AirBa](#)
bajo licencia de [documentación libre GNU](#)

Échale un vistazo al tema de Óptica y podrás recordar que el índice de refracción del vidrio es diferente para cada uno de los colores que constituyen la luz solar. Cada color (radiación electromagnética de una sola frecuencia) sufre una desviación distinta en el prisma y, por tanto, el resultado es que el prisma separa cada una de las radiaciones que componen la luz solar. Al conjunto de todas las frecuencias (o longitudes de onda) que encontramos a la salida del prisma se le llama **espectro de radiación de la luz solar**.

Cambiamos ahora la fuente de luz sustituyendo la luz solar por una lámpara que contiene un gas incandescente, por ejemplo, hidrógeno. Si de nuevo hacemos pasar la radiación que emite esta lámpara por un prisma para observar su espectro, a la salida encontraremos un conjunto de rayas que es característico del hidrógeno. Este conjunto de rayas constituyen el **espectro de emisión** del hidrógeno.



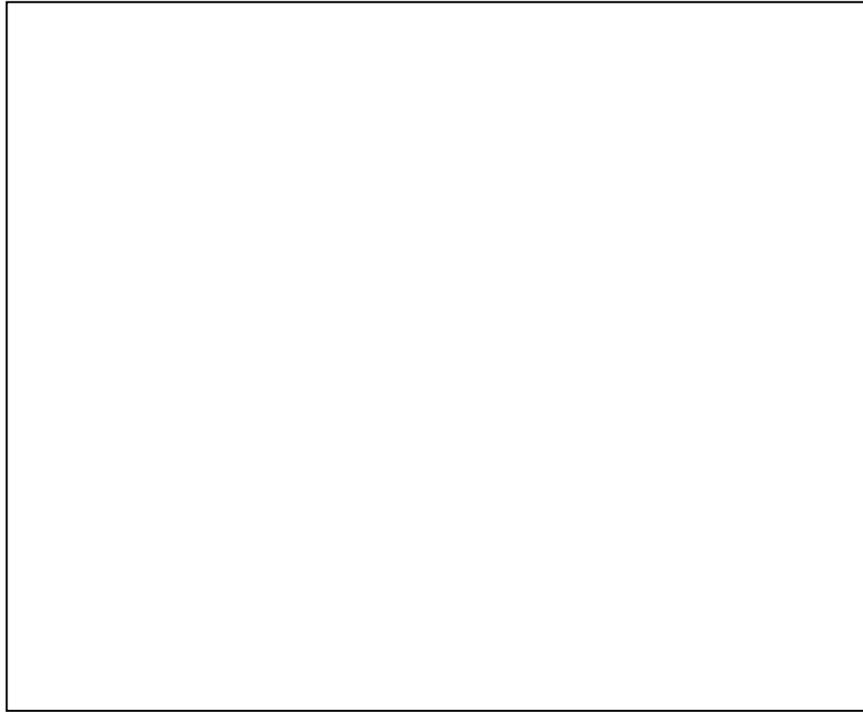
Imagen en Wikimedia Commons de [Merikanto, Adrignola](#). CC

Otra posibilidad es interponer gas hidrógeno entre el prisma y la fuente de luz. En este caso obtendremos una imagen como la de la figura, la misma pero invertida. Se trata del espectro de absorción del hidrógeno



Imagen en Wikimedia Commons de [Juancarcole](#). CC

En el siguiente vídeo puedes observar, en 56 s, una animación que representa cómo se producen los espectros de absorción del hidrógeno y oxígeno



[Vídeo](#) de alfonsocezezo alojado en Youtube

En relación con este fenómeno, el físico sueco Johannes Rydberg (1854-1919) fue capaz de encontrar una fórmula matemática que permitía calcular la frecuencia de cada una de las rayas observadas.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

en esta fórmula $R=1,096 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ es la constante de Rydberg. Si, por ejemplo, $n_1=2$ y $n_2=3,4,5..$ se obtiene una serie de longitudes de onda que se corresponden con las líneas que observamos en la parte visible del espectro, llamada serie de Balmer.

3.1. Modelo atómico de Bohr

Los espectros discontinuos ponen de manifiesto el carácter discreto de la radiación emitida por los gases incandescentes. ¿Qué es lo que ocurre en el interior de los átomos para que veamos los espectros a rayas?, ¿cómo se emite la radiación?. Esta pregunta vuelve a estar relacionada con el asunto que hemos tratado hasta ahora en este tema.

Para resolver esta cuestión, Niels Bohr (1885-1962) se dio cuenta que la teoría clásica era incapaz de dar una respuesta correcta, y optó por aplicar la idea de los cuantos de Planck para interpretar el espectro del hidrógeno proponiendo, en 1913, un nuevo modelo atómico que se resume en los siguientes postulados:

- Los electrones se mueven en ciertas órbitas permitidas alrededor del núcleo sin emitir radiación. Así Bohr asumió que el átomo de hidrógeno puede existir solo en ciertos estados discretos, los cuales son denominados estados estacionarios del átomo. En el átomo no hay emisión de radiación electromagnética mientras el electrón no cambia de órbita.
- El átomo radia cuando el electrón hace una transición ("salto") desde un estado estacionario a otro, es decir toda emisión o absorción de radiación entre un sistema atómico está generada por la transición entre dos estados estacionarios. La radiación emitida (o absorbida) durante la transición corresponde a un cuanto de energía (fotón) cuya frecuencia f está relacionada con las energías de las órbitas estacionarias por la ecuación de Planck ($E=hf$) y está determinada por la relación :

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

donde h es la **constante de Planck** ($6.626 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$), con E_i y E_f son las energías de los estados estacionarios iniciales y finales de la transición electrónica.

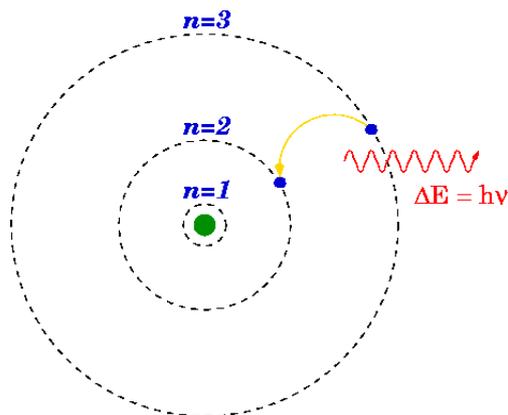


Imagen en Wikimedia Commons de [Willow](#)
bajo licencia de [documentación libre GNU](#)

- Las órbitas estacionarias admisibles son aquellas en las que el momento angular orbital L ($L=mvr$) del electrón está cuantizado, pudiendo este asumir solamente valores múltiplos enteros de $L=nh/2\pi$, donde h es la constante de Planck y n es un número natural (1,2,3,..), llamado número cuántico principal. Así,

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

En el siguiente vídeo puedes ver una simulación de las órbitas permitidas en el modelo de Bohr, así como el mecanismo de emisión y absorción de radiación que se produce cuando el electrón salta de unas órbitas a otras.



[VÍdeo](#) de jmroquin1956 alojado en Youtube

Para saber más

El **momento angular** de una partícula es una magnitud física que se define como el producto vectorial de su momento lineal ($\vec{p} = m \cdot \vec{v}$) y el vector de posición. Es decir:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

$$\vec{L} = \vec{r} \times m \cdot \vec{v}$$

4. Efecto fotoeléctrico

Llamamos efecto fotoeléctrico a la **emisión de electrones desde una superficie metálica** cuando sobre ella incide radiación electromagnética de determinada frecuencia.

Este fenómeno fue estudiado por Hertz utilizando un dispositivo cuyo esquema es similar al de la figura:

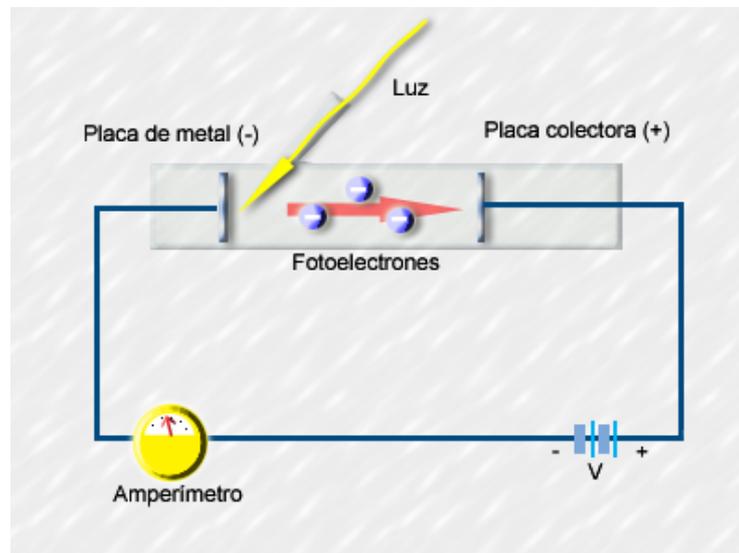


Imagen en Wikimedia Commons de [Dr Juzam](#). Dominio público

Como puedes ver en la imagen, la idea es iluminar una placa de metal y observar que, en determinadas condiciones, salen electrones del metal y se dirigen a la placa colectora positiva (recuerda que los electrones tienen carga negativa). Cuando esto ocurre se establece una corriente en el circuito que es medida por el amperímetro.

Los resultados observados del experimento son los siguientes:

1. Sólo se observa efecto fotoeléctrico a partir de una determinada frecuencia de la radiación incidente. A esta frecuencia se le llama **frecuencia umbral**, y su valor depende del metal que utilice como fotocátodo.
2. Cuando la radiación incidente tiene una frecuencia superior a la frecuencia umbral, el número de fotoelectrones emitidos es proporcional a la intensidad de la radiación incidente.
3. No se observa un tiempo de retraso entre la iluminación del fotocátodo y la emisión de fotoelectrones.

En los siguientes apartados analizaremos estos resultados experimentales y veremos si son o no compatibles con la teoría clásica de la radiación.

4.1. Resultados experimentales sin explicación

Llegados a este punto, podrás pensar "vaya montón de majaderías me han enseñado, si resulta que no se pueden explicar algunas cosas". Pues esta es una de las razones por las que la Física Clásica o Newtoniana está en plena crisis en esta época. Céntrate en el siguiente caso: los resultados experimentales del efecto fotoeléctrico.

En efecto, aquí te presentamos tres resultados:

1) No se puede explicar la existencia de una frecuencia umbral en el efecto fotoeléctrico.

La física clásica diría que los electrones del metal pueden absorber la energía suficiente para "saltar" del átomo sea cual sea la frecuencia de la radiación incidente, con tal de que sea lo suficientemente intensa.

2) No se puede explicar la no existencia de un tiempo de retraso entre la llegada de la radiación y la emisión de electrones.

La física clásica predice este tiempo, que se corresponde con el necesario para que el electrón absorba la energía necesaria para salir del metal.

Fíjate ahora en la siguiente gráfica experimental del efecto fotoeléctrico. En ella se representa la cantidad de electrones emitidos (intensidad de corriente fotoeléctrica i) en función de la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo. V_0 es el potencial de frenado que, como hemos visto, está relacionado con la energía cinética máxima de los electrones. La gráfica se realiza para dos valores diferentes de la intensidad de luz (recuerda que intensidad de luz = "cantidad" de luz).

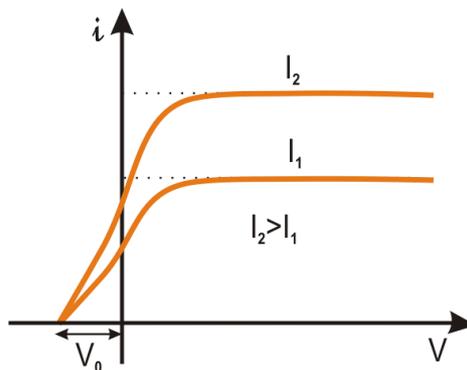


Imagen en Wikimedia Commons de [Juancarcole](#). CC

3) De la gráfica se deduce que la energía cinética máxima de los electrones emitidos es independiente de la intensidad de la luz.

La física clásica predice lo contrario, la energía cinética de los electrones debería aumentar de acuerdo con el aumento en la intensidad del haz luminoso.

4.2. La explicación de Einstein

La salida de este atasco la encontró **Albert Einstein** (1879-1955) en 1905 con su explicación del efecto fotoeléctrico.

Recuerda que Planck propuso que la radiación se emitía o absorbía en forma de pequeños paquetes de energía llamados cuantos. Einstein fue más lejos y postuló que la radiación viajaba en forma de paquetes a los que llamó fotones. La idea consistía en suponer el efecto fotoeléctrico como un conjunto de interacciones individuales entre un fotón (componente de la radiación) y un electrón (del metal).

Hagamos un balance de energía. El fotón tiene una energía que le cede al electrón. Parte de esta energía el electrón la usa para superar la energía potencial que lo mantiene ligado al metal y parte se transforma en energía cinética.

Energía del fotón = Trabajo de extracción + Energía cinética de los electrones

$$hf = W_0 + E_c \leftrightarrow \frac{hc}{\lambda} = W_0 + \frac{mv^2}{2}$$

Fíjate cómo podemos explicar ahora los resultados del experimento:

- Para que exista efecto fotoeléctrico los fotones de la radiación incidente deben tener, al menos, una energía igual al trabajo de extracción (W_0). La frecuencia f_0 de esta energía mínima necesaria es la frecuencia umbral. Se cumple entonces:

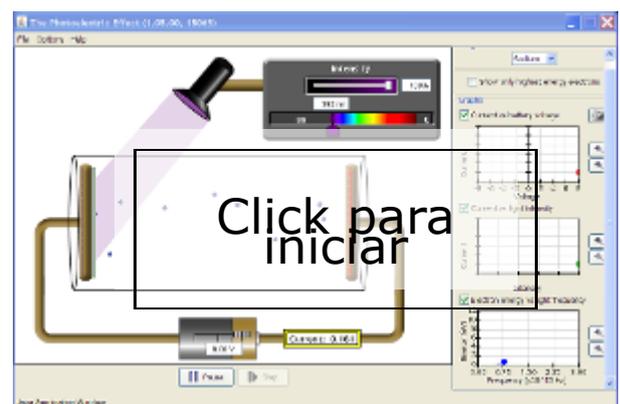
$$W_0 = hf_0$$

- Si los fotones tienen la energía suficiente, al interactuar con los electrones se produce el efecto fotoeléctrico sin tiempo de retraso.
- Una luz más intensa significa una luz con más fotones, no con fotones más energéticos. Por lo tanto, al aumentar la intensidad de la luz, aumentará el número de fotoelectrones emitidos (intensidad de la corriente fotoeléctrica), pero no aumentará la energía cinética de estos.

La siguiente simulación (imagen de la derecha) permite visualizar el efecto fotoeléctrico y modificar los valores de longitud de onda e intensidad de la radiación, el metal que constituye el fotocátodo o la diferencia de potencial entre los electrodos. También puedes ver un vídeo explicativo de esta simulación (imagen de la izquierda).



Vídeo de cybermatex alojado en Youtube



Simulación alojada en [phet-Universidad de Colorado](#) bajo licencia [Creative Commons](#)

Finalmente, una forma de calcular la energía cinética máxima de los fotoelectrones consiste en invertir la polaridad del dispositivo y, de esta manera, frenarlos. Cuando cesa la corriente fotoeléctrica (el amperímetro marca 0) habremos conseguido frenar los electrones más rápidos. La diferencia de potencial a la que ocurre esto se llama potencial de frenado V_0 y se cumple:

$$eV_0 = E_{cmax}$$

5. Especial PEvAU

Ejercicio resuelto

Se trata de medir el trabajo de extracción de un nuevo material. Para ello se provoca el efecto fotoeléctrico haciendo incidir una radiación monocromática sobre una muestra A de ese material y, al mismo tiempo, sobre otra muestra B de otro material cuyo trabajo de extracción es $\Phi_B = 5 \text{ eV}$. Los potenciales de frenado son $V_A = 8 \text{ V}$ y $V_B = 12 \text{ V}$, respectivamente.

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s} ; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Calcule:

La frecuencia de la radiación utilizada.

Mostrar retroalimentación

a) Fíjate en los datos que tenemos de la muestra B. Que el trabajo de extracción sea de 12 V significa que la energía cinética máxima de los electrones de la muestra B es $E_c = 12 \text{ eV}$. Como el trabajo de extracción es de 5 eV, la energía de los fotones incidentes debe ser:

$$E_{\text{fot}} = W_0 + E_c = 17 \text{ eV} = 2,72 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

la frecuencia de la radiación es:

$$f = \frac{E}{h} = 4,12 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

El trabajo de extracción Φ_A .

Mostrar retroalimentación

b) Conocida la energía de los fotones de la radiación incidente y la energía cinética máxima de los electrones de la muestra B (8 eV), el trabajo de extracción de A será:

$$W_0 = E_{\text{fot}} - E_c = 9 \text{ eV} = 1,44 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Ejercicio resuelto

Sobre una superficie de sodio metálico inciden simultáneamente dos radiaciones monocromáticas de longitudes de onda $\lambda_1 = 500 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 560 \text{ nm}$. El trabajo de extracción del sodio es 2,3 eV.

Determine la frecuencia umbral de efecto fotoeléctrico y razone si habría emisión fotoeléctrica para las dos radiaciones indicadas.

Mostrar retroalimentación

El trabajo de extracción puede igualarse con la energía que tendrían los fotones capaces de extraer fotoelectrones del metal sin comunicarle energía cinética. Podemos escribir entonces:

$$W_0 = hf_0 \rightarrow f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{2.3 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{6.6 \cdot 10^{-34}} = 5.6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

donde f_0 es la frecuencia umbral.

La longitud de onda correspondiente es:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = 5.35 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 535 \text{ nm}$$

Esta es la longitud de onda umbral, lo que significa que no se producirá efecto fotoeléctrico si iluminamos el metal con radiación de longitud de onda mayor que λ_0 . De las dos radiaciones monocromáticas con las que iluminamos la superficie de sodio, **sólo la primera ($\lambda_1 = 500 \text{ nm}$) provocará efecto fotoeléctrico.**

Explique las transformaciones energéticas en el proceso de fotoemisión y calcule la velocidad máxima de los electrones emitidos.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Mostrar retroalimentación

Los fotones que constituyen esta radiación tienen una energía:

$$E_{\text{fot}} = \frac{hc}{\lambda} = 3.96 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2.475 \text{ eV}$$

Puesto que el trabajo de extracción es de 2.3 eV, el excedente de energía (2.475 eV - 2.3 eV) se invierte en comunicar energía cinética a los fotoelectrones. Esto se expresa con la ecuación de Einstein:

$$E_{c\text{max}} = E_{\text{fot}} - W_0 = 2.475 \text{ eV} - 2.300 \text{ eV} = 0.175 \text{ eV} = 2.8 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

Finalmente la velocidad la calculamos así:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = 2.48 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Ejercicio resuelto

Al incidir luz de longitud de onda $\lambda = 620 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ sobre una fotocélula se emiten electrones con una energía cinética máxima de 0,14 eV.

$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

Calcule el trabajo de extracción y la frecuencia umbral de la fotocélula.

Mostrar retroalimentación

a) El trabajo de extracción lo obtenemos, de la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico, calculando la diferencia entre la energía de los fotones de la radiación incidente y la energía cinética máxima de los electrones.

$$W_0 = \frac{hc}{\lambda} - E_c = 2.97 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

para obtener este resultado no olvides expresar la energía cinética en Julios (

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

¿Qué diferencia cabría esperar en los resultados del apartado a) si la longitud de onda incidente fuera doble?

Mostrar retroalimentación

b) Si la longitud de onda de la radiación incidente es el doble, la energía de los fotones sería:

$$E_{\text{fot}} = \frac{hc}{\lambda} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

aquí hemos utilizado $\lambda = 1240 \cdot 10^{-9} \text{ m}$. Esta energía es menor que el trabajo de extracción del metal por lo que con esta radiación no se produciría efecto fotoeléctrico

Importante

La **ley de Rayleigh-Jeans** establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda λ , para una cierta temperatura:

$$R = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

esta ley falla estrepitosamente para longitudes de ondas cortas, a partir de la correspondiente al ultravioleta. Este fallo de la ley se conoce con el nombre de **catástrofe ultravioleta**. Wien intentó encontrar un resultado mejor que valiera para longitudes de onda bajas, y encontró que al subir en longitudes de onda otra vez se producía una catástrofe y se encontraba una emisión infinita de energía de nuevo. A esta se la llamó **Catástrofe Infrarroja**.

Resumen

Importante

El **cuerpo negro** tiene las siguientes características:

- 1.- Absorbe toda la radiación que incide sobre él.
- 2.- No refleja nada, en cambio sí es capaz de emitir radiación en las mismas frecuencias que absorbe.
- 3.- Su emisión de energía es independiente de la composición del cuerpo y sólo depende de la temperatura del mismo.

Esta radiación se emitirá en todas las frecuencias. Llamamos **espectro de radiación del cuerpo negro** a la distribución de energía emitida por un cuerpo negro en función de la frecuencia. Este espectro **depende exclusivamente de la temperatura** a la que se encuentre el cuerpo.

Importante

1) Cuando aumentamos la temperatura, la longitud de onda a la que se produce la máxima emisión disminuye. Este fenómeno es el que refleja la **ley de desplazamiento de Wien**:

$$\lambda_{max} \cdot T = 0.0028976 \text{ m} \cdot \text{K}$$

siendo $\lambda_{m\acute{a}x}$ la longitud de onda de máxima emisión.

2) La cantidad de energía emitida por el cuerpo negro aumenta al aumentar la temperatura. La **ley de Stefan-Boltzman** establece que la potencia por unidad de superficie (energía por unidad de superficie y tiempo) emitida por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta:

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

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann.

Importante

Max Planck obtuvo una expresión para la energía emitida por un cuerpo negro:

- Los átomos que emiten la radiación se comportan como osciladores armónicos.
- **Cada oscilador absorbe o emite energía en una cantidad proporcional a su frecuencia de oscilación f .** Es decir:

$$E = hf$$

La constante de proporcionalidad h se llama constante de Planck y su valor es

$$h = 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

La hipótesis de Planck supone admitir que la radiación no se emite de forma continua, sino que lo hace de forma discreta en pequeños "paquetes", llamados **cuantos**, cada uno de ellos de energía hf . La energía total emitida o absorbida por cada oscilador armónico sólo puede ser un número entero de cuantos, es decir:

$$E(\text{total}) = nhf$$

Importante

Llamamos efecto fotoeléctrico a la **emisión de electrones desde una superficie metálica** cuando sobre ella incide radiación electromagnética de determinada frecuencia.

Los resultados observados son los siguientes:

1. Sólo se observa efecto fotoeléctrico a partir de una determinada frecuencia de la radiación incidente. A esta frecuencia se le llama **frecuencia umbral**, y su valor depende del metal que utilice como fotocátodo.
2. Cuando la radiación incidente tiene una frecuencia superior a la frecuencia umbral, el número de fotoelectrones emitidos es proporcional a la intensidad de la radiación incidente.
3. No se observa un tiempo de retraso entre la iluminación del fotocátodo y la emisión de fotoelectrones.

AVISO DEL SERVIDOR

Por motivos de seguridad esta página web solo está accesible mediante acceso seguro (https):

https://www.juntadeandalucia.es/Aviso_Legal_Andalucia_v04.htm

Por favor, actualice sus marcadores. Gracias.