

Fisicoquímica IV

Teoría cuántica:

Introducción y principios.

Los orígenes de la mecánica cuántica.

“La teoría ... cuántica describe a la Naturaleza como absurda desde el punto de vista del sentido común. Y está completamente de acuerdo con el experimento. Así que espero que ustedes puedan aceptar a la Naturaleza tal como Ella es: absurda”

-Richard P. Feynman

Mecánica Clásica

“Se aprende a través de la experiencia”

Nuestra experiencia nos llega a través de los sentidos. Rápidamente nos familiarizamos con lo que vemos, oímos, olemos, probamos y tocamos. Rara vez dudamos de las cosas que percibimos de este modo. Pero el universo es mucho más de lo que nuestros limitados sentidos pueden apreciar directamente.

Mecánica Cuántica

La materia que nos rodea está compuesta por átomos, aunque no podemos verlos, oírlos, olerlos, probarlos o tocarlos. Y estos por entes aún más pequeños (electrones, protones y neutrones). La mecánica cuántica permite describir en detalles el comportamiento de la materia y de su interacción con la luz a escala atómica. Esa que escapa de nuestros sentidos, pero no por eso es menos importante.

Un poco de historia...

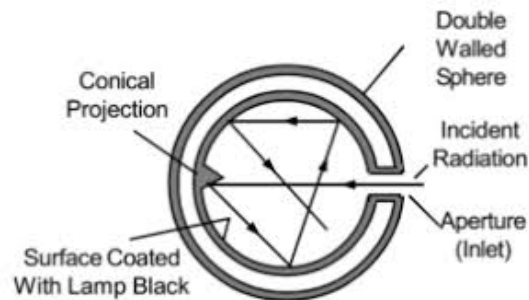
Los orígenes de la mecánica cuántica:

- Espectro de radiación del cuerpo negro
- Efecto fotoeléctrico
- Efecto Compton
- La relación de De´Broglie
- Difracción de electrones

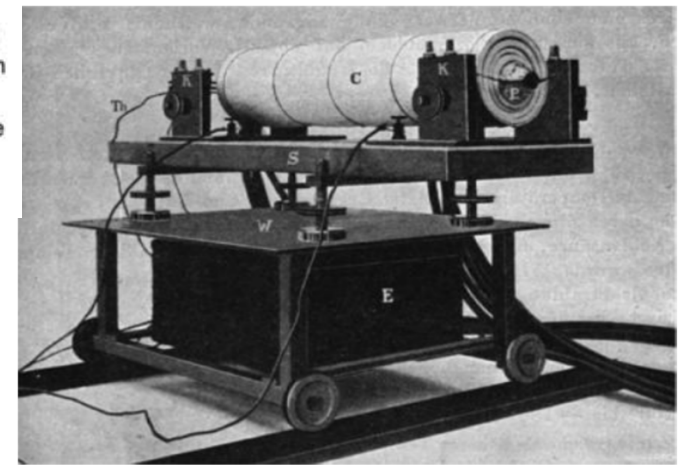
El cuerpo negro

Un cuerpo negro es un cuerpo físico ideal que se define como aquel capaz de absorber toda la radiación electromagnética que incide sobre él (independientemente de su dirección y longitud de onda) **sin que ninguna parte de esta radiación pase a través de él ni sea reflejada. Sin embargo, sí es capaz de emitir radiación.**

En la práctica se puede construir un objeto que se comporte como un cuerpo negro abriendo un pequeño orificio en las paredes de una cavidad que se mantiene a T constante.



El orificio se comporta como un cuerpo negro porque toda radiación que entre por él sufrirá incontables reflexiones y absorciones en las paredes del contenedor, de modo que la cantidad de la radiación absorbida que sale por él es muy pequeña. Al mismo tiempo, las paredes de la cavidad emitirán radiación que es también reflejada, absorbida y reemitida hasta alcanzarse un estado estacionario o de equilibrio. A temperaturas adecuadas parte de la radiación emitida por las paredes del cuerpo negro emerge por el orificio de éste y puede analizarse con técnicas experimentales.



Primer intento exitoso de construir un cuerpo negro. Lummer y Pringsheim, 1898. Cilindro de platino dentro de un tubo de cerámica.

El cuerpo negro

La radiación emitida por los cuerpos depende únicamente de la temperatura del cuerpo y no depende de la naturaleza de su material, así, si tenemos dos objetos a la misma temperatura estos deberán emitir radiación a la misma frecuencia y por ende del mismo color, incluso si están hechos de distintos materiales.



Colocar en horno y calentar a 1000°C por 30min



Enfriamiento



Blackbody Radiation Oven

<https://www.youtube.com/watch?v=Psvo XEc784>

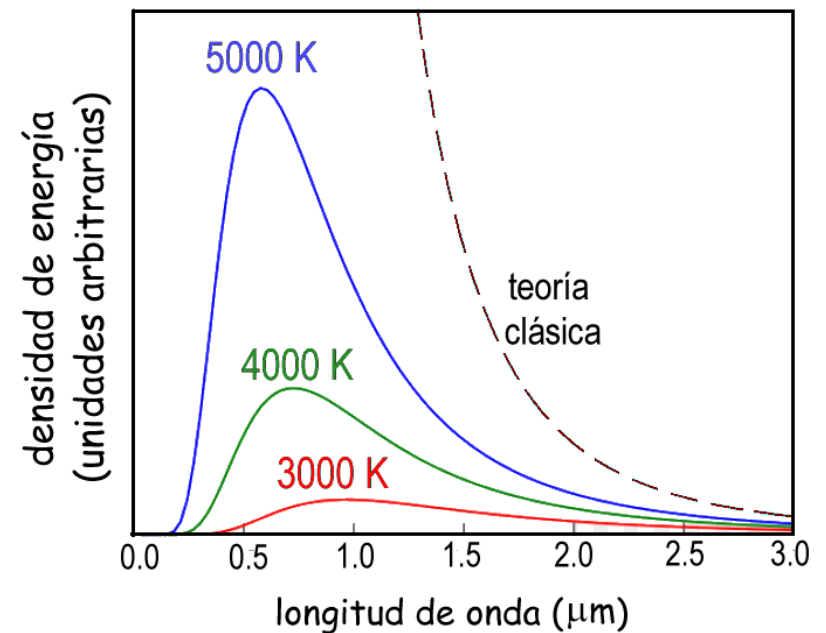
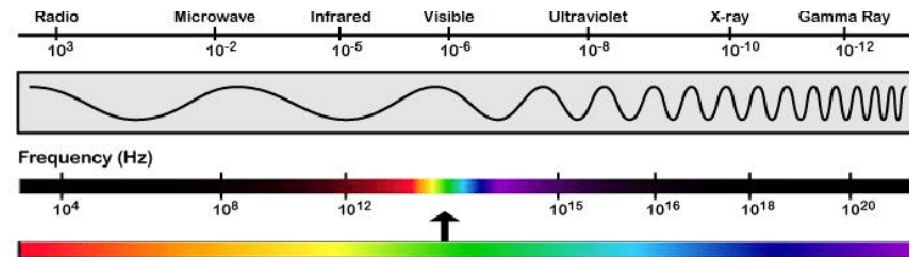
Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations

El cuerpo negro

El espectro de radiación emitida del cuerpo negro

- Distribución continua para las diferentes longitudes de onda, con un máximo cuya intensidad y posición depende de la temperatura, pero no del material de las paredes de la cavidad.
- La intensidad del máximo aumenta con la temperatura y la longitud de onda asociada a este disminuye con la temperatura.

Estos espectros representaron uno de los problemas más importantes a los que se enfrentaron los físicos a finales del siglo XIX y principios del siglo XX ya que las teorías clásicas (únicas existentes en la época) no podían explicar satisfactoriamente el comportamiento experimental observado.



La catástrofe ultravioleta

El cuerpo negro

El espectro de radiación emitida del cuerpo negro

Una aplicación muy interesante es la medición de los espectros de emisión de los cuerpos celestes, como las estrellas.

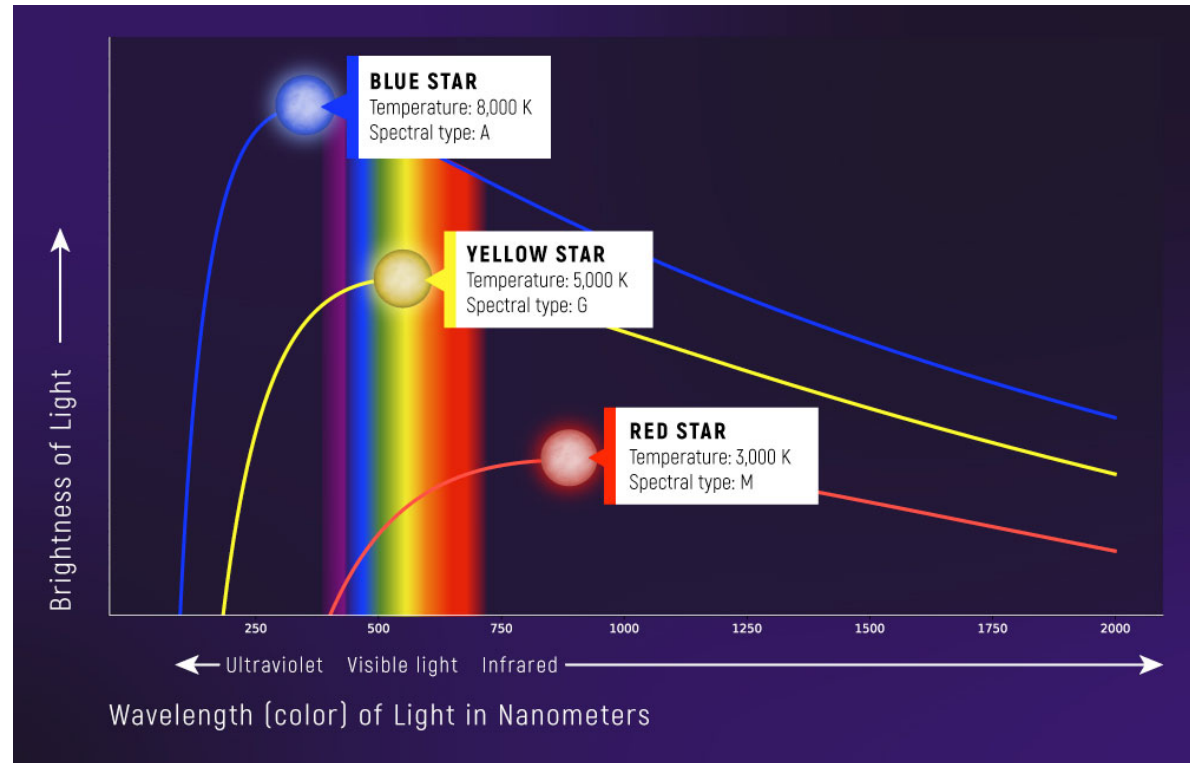
Con los espectros medidos se puede determinar el máximo de emisión y entonces estimar su temperatura.

Dada la **temperatura** de un objeto ¿cuál será la principal **longitud de onda** emitida por radiación?



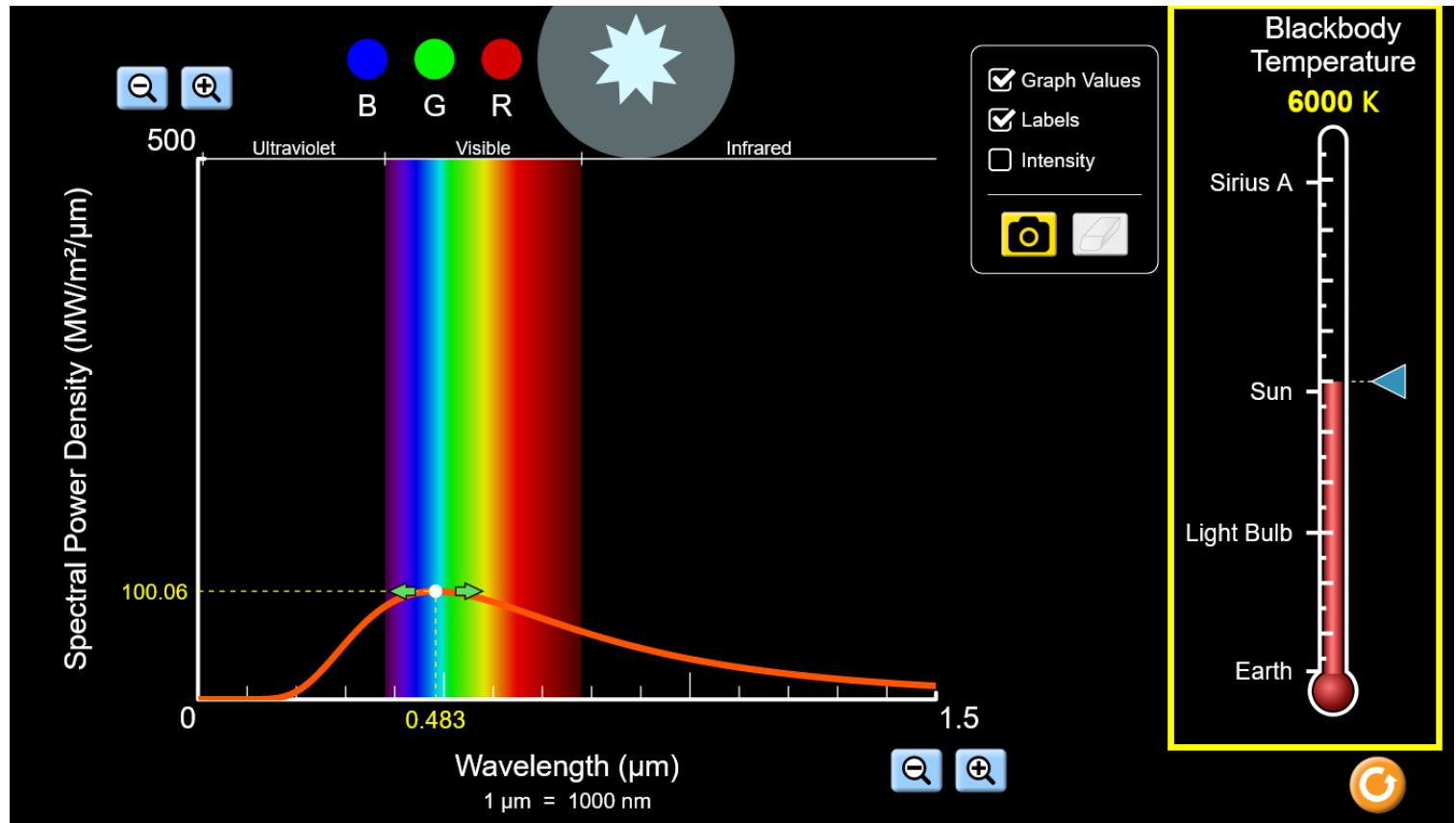
O planteado de otra manera:

¿Cuál es el modelo matemático que relaciona la **longitud de onda máxima detectada con la temperatura** de los objetos?



El cuerpo negro

Simulador del espectro de radiación del cuerpo negro



Ejercicio 1:

- Usando el simulador determina el valor de la longitud de onda, a la cual se presenta el máximo de emisión de energía por la tierra a 300K y comparar con la longitud de onda emitida por una bombilla incandescente a 3000K.
- ¿Qué tipo de radiación es emitida por esos objetos? (¿UV, Visible, IR, etc.?)
- ¿Con qué tipo de telescopio podríamos buscar objetos que estén a la misma temperatura de la tierra?

El cuerpo negro

Wilhelm Wien: desarrolló una teoría para predecir la forma general de las curvas obtenidas tratando a las radiaciones como moléculas gaseosas. Propuso que la longitud de onda correspondiente a la intensidad máxima del espectro era inversamente proporcional a la temperatura, lo que se conoce actualmente como la ley de desplazamiento de Wien. *A largas longitudes de onda su teoría divergía del comportamiento experimental.*

$$\lambda_m T = 0.2884 \text{ cm K}$$

Rayleigh y Jeans consideraron que la radiación del cuerpo negro puede entenderse como un conjunto de ondas estacionarias causadas por las oscilaciones de los átomos en las paredes del cuerpo negro. Propusieron que la intensidad de la radiación era inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda.

$$dU = \rho d\lambda \quad \rho = \frac{8\pi K_B T}{\lambda^4}$$

donde ρ es la densidad de estados
y K_B la constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

Esta propuesta ajustaba con la evidencia experimental a largas longitudes de onda (justamente donde fallaba la propuesta de Wien). *Fallaba en predecir la existencia de un máximo en la curva, y en general en reproducir la forma del espectro a longitudes de onda cortas.* Cuando la longitud de onda tiende a cero la curva teórica obtenida, según la propuesta de Rayleigh y Jeans, tiende a infinito. Esta falla fue conocida como la “**catástrofe ultravioleta**”.

El cuerpo negro

Wilhelm Wien: desarrolló una teoría para predecir la forma general de las curvas obtenidas tratando a las radiaciones como moléculas gaseosas. Propuso que la longitud de onda correspondiente a la intensidad máxima del espectro era inversamente proporcional a la temperatura, como la ley de desplazamiento de Wien.

Rayleigh y Jeans consideraron un conjunto de ondas estacionarias causadas por la reflexión en las paredes de una cavidad. Propusieron que la intensidad de la radiación era proporcional a la longitud de onda.

$$dU = \rho c v dv$$

Esta propuesta ajustaba bien la curva teórica en el rango de longitudes de onda donde fallaba la propuesta de Wien. Sin embargo, no pudo reproducir la forma del espectro a bajas longitudes de onda. Cuando la longitud de onda tiende a cero la curva teórica obtenida, según la propuesta de Rayleigh y Jeans, tiende a infinito. Esta falla fue conocida como la “**catástrofe ultravioleta**”.

En términos clásicos no era posible encontrar una expresión que describiera correctamente la radiación del cuerpo negro en todo el rango de longitudes de onda.

El cuerpo negro

Stefan y Boltzmann comprobaron que la energía total de la radiación del cuerpo negro era directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura. *Válida para cuerpos negros ideales*

$$U = \int_0^{\infty} U_{\lambda} d_{\lambda} = \sigma T^4 \quad \text{donde } \sigma \text{ es la constante de Stefan-Boltzmann } (0.56687 \times 10^{-18} \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-4})$$

La solución a la catástrofe ultravioleta fue aportada por **Max Planck**, quien consideró que las paredes de la cavidad del cuerpo negro estaban formadas por osciladores que no podían tener cualquier energía, sino determinados valores permitidos. Planck logró obtener expresiones adecuadas para describir todo el espectro de radiación del cuerpo negro que cumplían con las leyes de Wien y Stefan-Boltzmann y se basaban en los siguientes postulados:

- I) Cuando se emite o absorbe radiación electromagnética, la energía asociada a cada oscilador solo puede variar en una cantidad finita (discreta) que es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación.
- II) Todos los osciladores de las paredes del cuerpo negro, así como las ondas de la radiación obedecen la estadística de Maxwell-Boltzmann.

$$E = n h \nu$$

donde n es un número entero, h es la constante de Planck (6.6252×10^{-34} Js) y ν es la frecuencia.

$$\frac{N(E)}{N} = A e^{-h\nu/K_B T}$$

El cuerpo negro

El postulado I representa la hipótesis más radical de la teoría de Planck. Rompió con lo tradicionalmente establecido por la teoría clásica según la cual no hay nada que prohíba que un oscilador absorba o emita una cantidad arbitraria de energía, la cual será directamente proporcional a su amplitud.



Por ejemplo, podemos hacer oscilar un péndulo dándole un impulso inicial de poca energía, de mucha energía, o de cualquier cantidad de energía intermedia. La amplitud de las oscilaciones del péndulo dependerá de la energía absorbida en ese impulso inicial y, al igual que esta, tiene un rango continuo de valores permitidos.



También podemos pensar en las olas del mar, las cuales chocarán con una energía directamente proporcional a su altura y las puede haber de cualquier altura, ninguna está prohibida.

El cuerpo negro

Por el contrario, el postulado I de Planck establece que **solo ciertas cantidades de energía están permitidas**, o lo que es lo mismo **cuantifica la energía de las ondas y por lo tanto sus variaciones de energías**. De modo que los osciladores de Planck se comportaban de manera muy diferente a los osciladores conocidos, y con los que intuitivamente estaba familiarizada la comunidad científica del momento.

Sin embargo, en el mundo macroscópico también existen muchos ejemplos donde las variaciones no pueden ser continuas, sino que tienen que ser necesariamente discretas. Un ejemplo común son las escaleras, no es posible subir o bajar cantidades fraccionarias de peldaños, solo podemos movernos en números enteros de peldaños. La unidad mínima de cambio en este caso es la altura de un escalón y en el caso de las radiaciones electromagnéticas es una constante conocida como constante de Planck ($6.62606896 \times 10^{-34}$ J·s) quien le llamó “cuanto de acción”.



Por su parte la estadística de Maxwell-Boltzmann permite conocer la fracción de osciladores con una energía determinada, o lo que es lo mismo con una frecuencia específica. El número de osciladores capaces de emitir radiaciones de una frecuencia específica disminuye en la medida en que dicha frecuencia aumenta. De modo que cuando la frecuencia tiende a infinito, la fracción de osciladores (con la energía correspondiente) tiende a cero.

El cuerpo negro

Si es de su interés aquí hay algo de divulgación que explica la radiación del cuerpo negro, el catástrofe ultravioleta y la ingeniosa solución de Planck para solucionarlo introduciendo el concepto de “cuanto”



https://youtu.be/8YL_QIGtdOc?si=Mq5wChXU1V-oS3rf

Un trabajo más formal y con una visión histórica del desarrollo de las ideas seminales que llevaron a Planck a la propuesta de los cuantos se puede encontrar en:

“The Thermal Radiation Formula of Planck by Luis J. Boya”

<https://arxiv.org/pdf/physics/0402064.pdf>

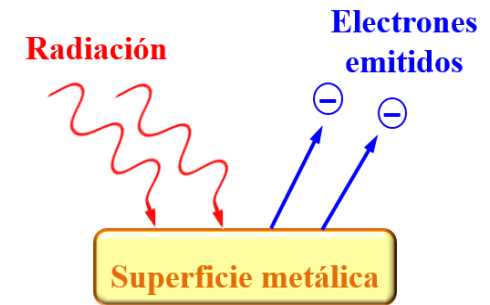
Además el artículo original de Planck se puede encontrar aquí:

<https://github.com/yousbot/Quantum-Papers/blob/master/1900%20-%20M.%20Planck%2C%20Distribution%20law.pdf>

Es interesante notar que en este mismo artículo Planck calcula 4 constantes adicionales demostrando así el alcance de su hipótesis y estableciendo la universalidad de los modelos utilizados.

Efecto fotoeléctrico

Las observaciones de los experimentos realizados por Hertz en 1887 y por Hallwachs en 1888, indicaban que si se ilumina con luz adecuada la superficie de diferentes metales se produce una emisión de electrones. A este fenómeno se le conoce como efecto fotoeléctrico.



Información experimental:

- A. Para cada metal existe una frecuencia límite, conocida como frecuencia umbral, por debajo de la cual no ocurre la fotoemisión.
- B. Si la frecuencia es adecuada, la fotoemisión ocurre instantáneamente.
- C. El número de electrones emitidos aumenta con la intensidad de la radiación incidente, y es independiente de la frecuencia de ésta.
- D. La energía cinética máxima de los electrones emitidos es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación incidente, pero independiente de su intensidad.

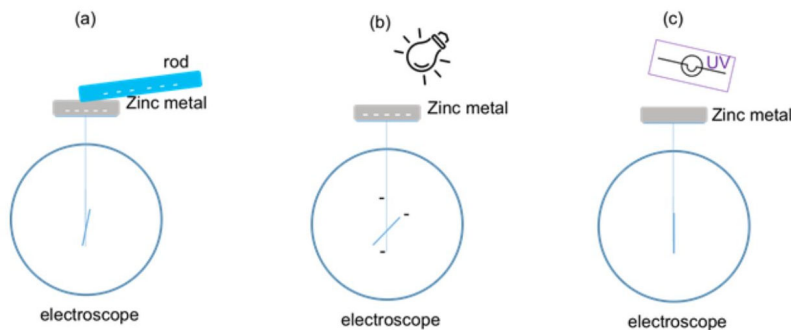
Al igual que sucedió con el espectro de radiación del cuerpo negro, estas evidencias experimentales tampoco podían explicarse con la física clásica que asume que la naturaleza de la luz es puramente ondulatoria.

Efecto fotoeléctrico

Experimento sobre el efecto fotoeléctrico: <https://youtu.be/oUxub7Pnuni?si=GKd-azUN7afupfdu>

En el siguiente experimento se coloca una placa de zinc sobre un electroscopio, se carga eléctricamente la placa usando la piel de un conejo y con el electroscopio se confirma que la placa ha quedado cargada.

Posteriormente, se acerca una fuente de luz UV, que posee la energía suficiente para lograr hacer que los electrones se desprendan de la placa. Cuando los electrones han sido arrancados de la placa el electroscopio regresa a su posición inicial confirmando que la radiación tiene la capacidad de desprender electrones de placas metálicas.



Efecto fotoeléctrico

- A. Para cada metal existe una frecuencia límite, conocida como frecuencia umbral, por debajo de la cual no ocurre la fotoemisión.

Según la teoría clásica los electrones absorberían energía de forma continua hasta alcanzar la necesaria para desprenderse de la superficie. En unos casos tomaría más tiempo y en otros menos dependiendo de la intensidad de la radiación y del metal en cuestión que se utilizara (o sea de la energía de amarre de los electrones en cada metal particular) pero al final el efecto siempre ocurriría. *En contradicción con las observaciones realizadas.*

Pensemos en un ejemplo hipotético, pero del mundo conocido, o sea del mundo macroscópico. En este ejemplo tenemos un edificio de ladrillos construido a la orilla del mar, donde puede ser alcanzado constantemente por todas las olas, sin importar la altura de estas. Aquí el edificio representa al metal, los ladrillos a los electrones y las olas a la radiación incidente. A nadie se le ocurriría construir un edificio en un lugar como este porque todos sabemos que más tarde o más temprano terminará destruido (los ladrillos ya no estarán formando parte del edificio). No existe un tamaño umbral de la ola que evite esto. Si las olas son grandes caerá más rápido, si son pequeñas demorará más, pero el efecto ocurrirá siempre.



Efecto fotoeléctrico

B. Si la frecuencia es adecuada, la fotoemisión ocurre instantáneamente.

Según la teoría clásica es necesario un período de tiempo entre el momento en el que la radiación incide sobre la superficie del metal y el momento en que los electrones son emitidos. Más aún, el tiempo necesario para la observación de este fenómeno se incrementaría para un mismo metal en la medida en que la iluminación se hiciera más débil. *En contradicción con las observaciones.*

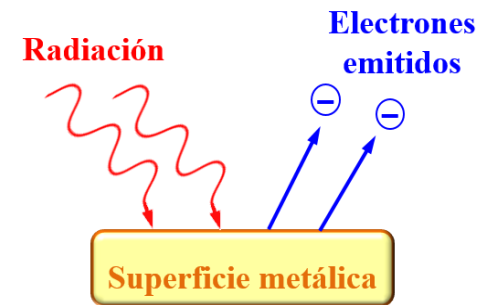
C. El número de electrones emitidos aumenta con la intensidad de la radiación incidente, y es independiente de la frecuencia de ésta.

D. La energía cinética máxima de los electrones emitidos es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación incidente, pero independiente de su intensidad.

Tampoco pueden ser explicadas con la teoría clásica. Regresemos a nuestro ejemplo macroscópico. Tanto si aumenta la intensidad (altura de la ola) o si aumenta la frecuencia (número de olas) esperaríamos que aumentara el número de ladrillos desprendidos. Sin embargo, la observación indica que el número de electrones desprendidos es independiente de la frecuencia de la radiación. Mucho más desconcertante fue la observación de que la energía cinética de los electrones emitidos era independiente de la intensidad y proporcional a la frecuencia. En nuestro ejemplo hipotético esto sería como decir que la velocidad a la que se desprenden los ladrillos depende de la frecuencia con que el edificio es golpeado por las olas, pero no de la altura de estas!

Efecto fotoeléctrico

La explicación que actualmente aceptamos como correcta la propuso **Einstein**, en 1905. En ella se interpreta el fenómeno de fotoemisión como resultado de la interacción (choque) entre partículas. Dicho en otras palabras, Einstein cambió la noción de que la luz era una onda por una nueva. Propuso que la radiación electromagnética estaba formada por “paquetes” o “partículas” de energía a los que llamó **cuantos** de energía, y que hoy conocemos como fotones. O sea, **la radiación electromagnética está cuantizada**.



- A. Para cada metal existe una frecuencia límite, conocida como frecuencia umbral, por debajo de la cual no ocurre la fotoemisión.**

Cada metal retiene a sus electrones con una fuerza específica, a la que podemos llamar fuerza de amarre. Por lo tanto, para cada metal existe un mínimo de energía que es necesario suministrar para desprender sus electrones. Esta será de igual magnitud que la fuerza de amarre. Si la energía de los fotones que inciden sobre la superficie del metal es menor que la energía de amarre, el electrón no podrá ser “arrancado” del metal y no se observará el efecto fotoeléctrico. De modo que las radiaciones electromagnéticas capaces de producir el efecto fotoeléctrico tienen que tener una frecuencia mayor o igual a un valor específico, que es característico de cada metal.

Efecto fotoeléctrico

B. Si la frecuencia es adecuada, la fotoemisión ocurre instantáneamente.

Desde el punto de vista de la explicación propuesta por Einstein, la interacción de la radiación con la superficie de los metales puede considerarse como choques fotón-electrón. Estos choques pueden ser o no efectivos, pero cuando lo son el efecto ocurre inmediatamente

C. El número de electrones emitidos aumenta con la intensidad de la radiación incidente, y es independiente de la frecuencia de ésta.

Si la radiación está compuesta por “partículas” de energía, su intensidad representa el número de fotones que llegan a una unidad de área superficial en una unidad de tiempo. Mientras mayor sea la intensidad de la radiación incidente, mayor será el número de fotones que llega a la superficie metálica, y por lo tanto aumentará el número de choques fotón-electrón. Si los fotones incidentes tienen la energía adecuada el número de electrones emitidos aumentará con la intensidad de la radiación incidente.

D. La energía cinética máxima de los electrones emitidos es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación incidente, pero independiente de su intensidad.

Teniendo en cuenta el principio de conservación de la energía, si la energía de los fotones que inciden sobre la superficie del metal es mayor que la energía de amarre, el exceso de energía se convertirá en energía cinética. De modo que, a mayor frecuencia de la radiación incidente, o sea mayor energía de los fotones que la componen, mayor será también el exceso de energía después de consumir la necesaria para desprender los electrones, y por lo tanto estos serán emitidos con mayor energía cinética.

Efecto fotoeléctrico

La teoría de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico permitió explicar de manera satisfactoria todas las observaciones experimentales relacionadas con este fenómeno.

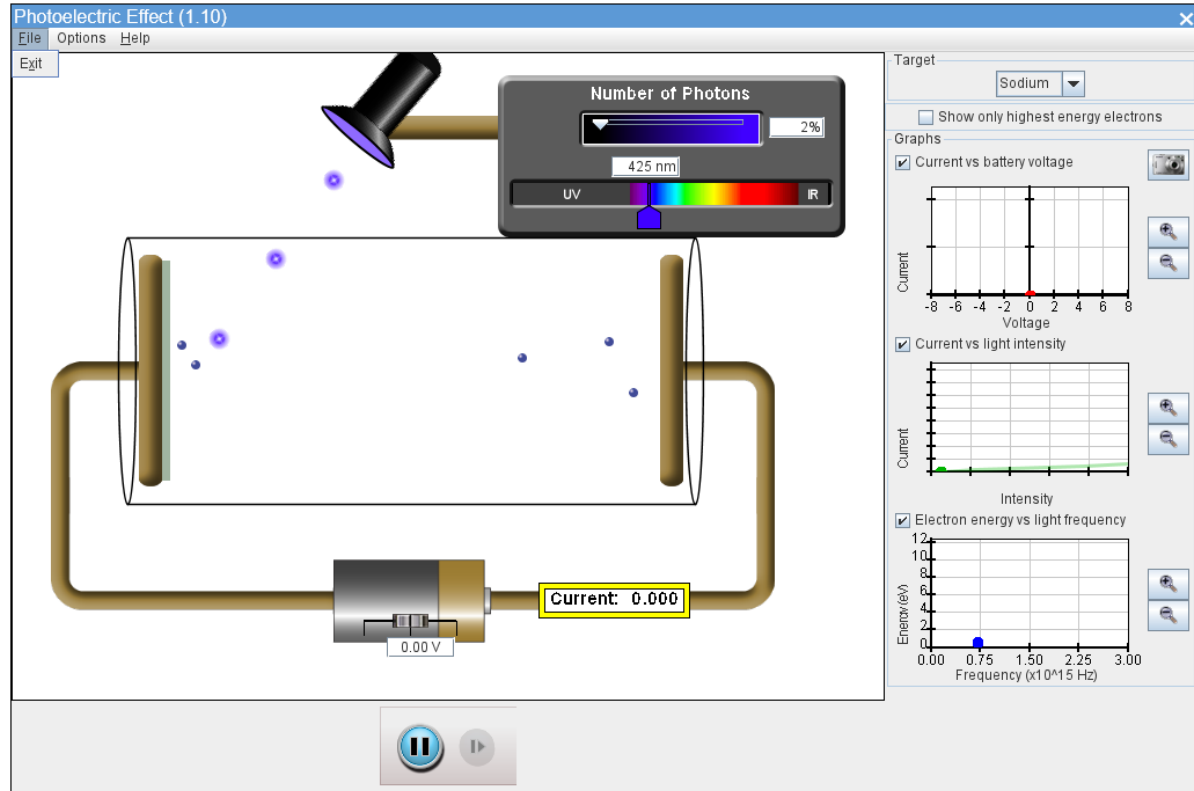
$$\begin{aligned} E_{\text{incidente}} &= h\nu \\ &= E_{\text{amarre}} + E_{\text{cinética}} \\ &= h\nu_0 + \frac{1}{2}m_e v_e^2 \end{aligned}$$

donde h es la constante de Planck (6.6252×10^{-34} Js), ν_0 es la frecuencia umbral, m_e es la masa del electrón (9.11×10^{-31} kg) y v_e la velocidad del electrón.

Efecto fotoeléctrico

Enlace al simulador PhET de la universidad de colorado sobre el efecto fotoeléctrico:

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric/activities>



Ejercicio 2:

Para cada una de las cuatro observaciones experimentales que se han discutido, plantea un experimento para demostrarlas usando el simulador.

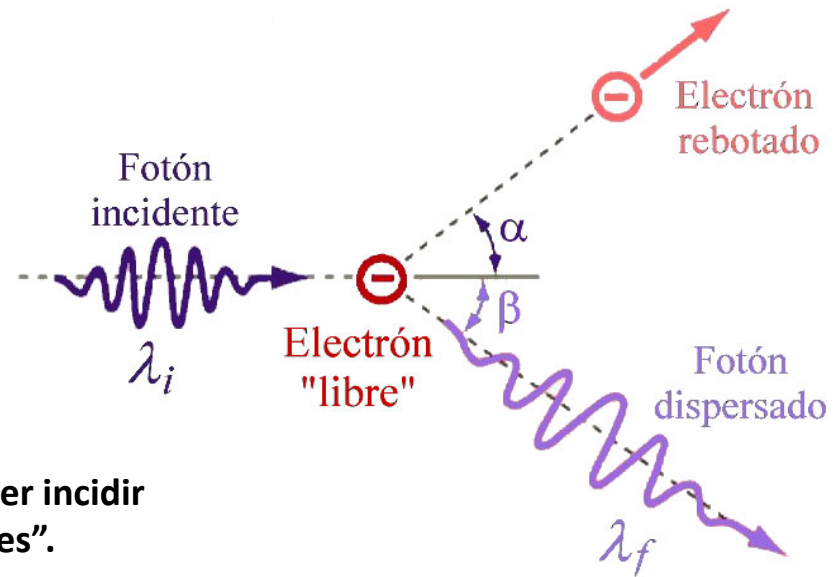
Puedes adjuntar las gráficas necesarias y las capturas de pantalla indicando las variables empleadas para demostrar cada punto.

Efecto Compton

A pesar de su éxito para explicar el efecto fotoeléctrico la teoría de Einstein sobre la naturaleza corpuscular y el comportamiento cuántico de la luz no había sido demostrada. La existencia del fotón y su comportamiento de partícula fueron demostradas en 1923 por Compton, en un experimento realizado con rayos X.

En este experimento se estudió el efecto causado al hacer incidir un fotón de alta energía (rayos X) sobre electrones “libres”.

Antes de analizar este fenómeno es importante explicar a que nos referimos con electrones “libres”. Llamaremos de este modo a aquellos electrones cuya energía de amarre a los átomos a los que pertenecen es mucho menor que la energía de la radiación incidente. Esto se cumple para los electrones de las capas más externas de elementos de alto número atómico (por ejemplo el oro), mientras que para elementos de bajo número atómico (por ejemplo el carbono) todos los electrones pueden considerarse “libres” cuando interaccionan con los rayos X ya que la energía de amarre de todos ellos, incluso de aquellos en las capas más internas, son menores a la energía de este tipo de radiación.

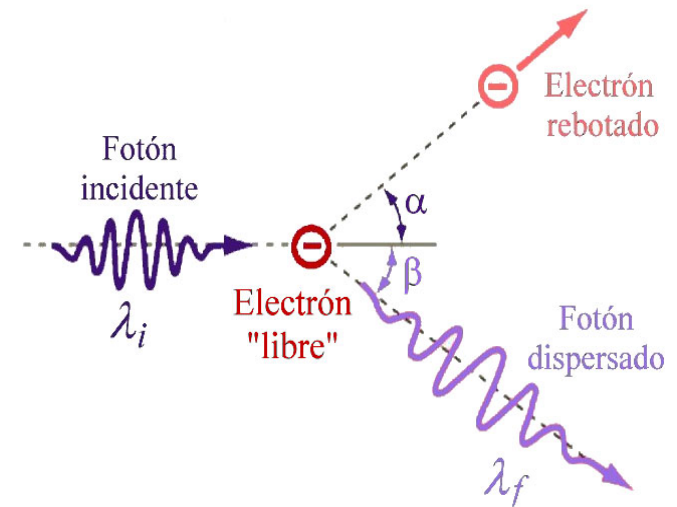


Efecto Compton

Lo que observó Compton al realizar su experimento fue que al hacer incidir fotones de rayos X sobre grafito, después del choque los fotones de la radiación incidente y los electrones (originalmente unidos a los átomos de carbono) siguen direcciones diferentes, o sea la radiación es dispersada.

Además se observó que la longitud de onda del fotón aumenta después del choque, o lo que es lo mismo su energía disminuye.

Compton también encontró que la energía perdida por el fotón incidente es igual a la ganada por el electrón y que la cantidad de movimiento del fotón original es igual a la cantidad de movimiento del electrón más la cantidad de movimiento del nuevo fotón.



Este fenómeno puede compararse, intuitivamente, con lo que ocurre cuando una bola de billar en movimiento golpea a otra inicialmente inmóvil. La bola que golpea transmite parte de su energía a la bola en reposo, ambas salen en diferentes direcciones después del choque y la energía total se conserva. De modo que es fácil comprender que en el experimento realizado por Compton tanto los electrones como los fotones incidentes se comportan como partículas.

Efecto Compton

Pero si el efecto Compton consiste en hacer incidir radiación sobre la superficie de un material
¿Cuál es entonces la diferencia entre el efecto observado en este caso y el efecto fotoeléctrico?

La diferencia esencial es la energía de la radiación incidente.

En el efecto Compton la radiación incidente es de gran energía, de modo que los electrones involucrados en este efecto pueden considerarse libres. Al chocar los fotones de alta energía con estos electrones los arrancan de sus átomos produciendo un par de iones (el átomo ionizado y un electrón) y la radiación se dispersa. Entonces parte de la energía del fotón incidente se gasta en arrancar al electrón de su órbita y proporcionarle cierta energía cinética. El resto de la energía inicial la mantiene el fotón que sale desviado con un ángulo determinado.

El efecto fotoeléctrico tiene lugar con fotones de energía no muy alta. De modo que al interactuar con los electrones más externos de los átomos (que en este caso no pueden considerarse libres, sino ligados o “amarrados” a sus átomos) toda la energía del fotón incidente se gasta en arrancar el electrón y en comunicarle cierta energía cinética. En este caso también se forma un par de iones (el átomo ionizado y un electrón) pero al gastarse toda la energía del fotón este desaparece y no hay dispersión.

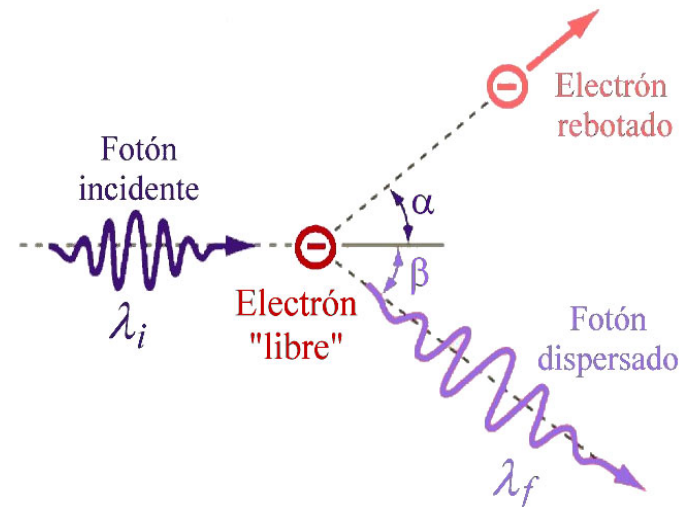
El descubrimiento del efecto Compton fue la demostración experimental de la naturaleza corpuscular de las radiaciones, o sea, de la existencia de los fotones.

$$\lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{mc} (1 - \cos \beta)$$

Efecto Compton

El descubrimiento del efecto Compton fue la demostración experimental de la naturaleza corpuscular de las radiaciones, o sea, de la existencia de los fotones.

$$\lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{mc} (1 - \cos \beta)$$



La relación de De'Broglie

Siguiendo la teoría de Einstein sobre la naturaleza dual de los fotones, que pueden comportarse no solo como ondas sino además como partículas, en 1924 Luis De'Broglie postuló la contraparte: el carácter dual de sistemas hasta entonces considerados corpusculares (partículas). Esta hipótesis no solo fue una idea sorprendente para los físicos de la época, acostumbrados a imaginar a los electrones como partículas clásicas, sino que permitió generalizar el concepto de la **naturaleza dual de la materia** presente en fenómenos microscópicos.

De'Broglie propuso que la longitud de onda asociada a cada partícula debería ser inversamente proporcional a su momento, o lo que es lo mismo a su masa en reposo y a su velocidad.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mV}$$

La longitud de onda correspondiente por ejemplo a una silla, un balón de futbol, una rata o incluso un mosquito, será muy pequeña; tanto que su comportamiento ondulatorio es despreciable. Por el contrario electrones, neutrones y protones necesitan de la mecánica cuántica para ser descritos correctamente.

$\lambda \ll$ dimensiones
de interés

Mecánica Clásica



	$\lambda \cong$ dimensiones de interés
<i>Mecánica Clásica</i>	
<i>Mecánica Cuántica</i>	

Pero si el comportamiento ondulatorio de la materia no es observable en el mundo macroscópico.... entonces ¿cómo podemos estar seguros del comportamiento ondulatorio de la materia en el mundo microscópico, que no podemos observar directamente?



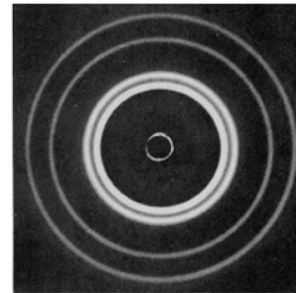
Difracción de electrones

Una de las propiedades ondulatorias, que no se manifiesta en el comportamiento newtoniano de las partículas es el fenómeno de difracción. Entonces si se observa un patrón de difracción podemos concluir que estamos en presencia de ondas.

En 1927 Thomson en Inglaterra y Davisson y Germer en los Estados unidos demostraron, independientemente, que los electrones producen patrones de difracción, o sea que se comportan como ondas.

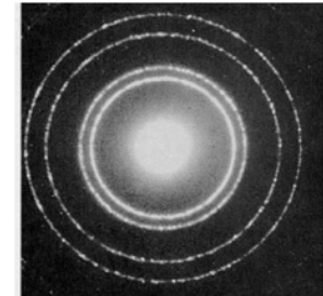
Los patrones producidos al hacer incidir un haz de electrones sobre cristales espaciados adecuadamente son sorprendentemente similares a los producidos por los rayos X. Estos patrones los podemos observar directamente, con nuestros ojos, y esto permite que aunque no podamos observar el fenómeno microscópico no nos queden dudas de que ambos (rayos X y electrones) se comportan de manera similar y como se espera que lo hagan las ondas.

Rayos X



Patrón de difracción rayos X al pasar por una lámina de aluminio

Electrones



Patrón de difracción electrones al pasar por una lámina de aluminio

Difracción de electrones

En la época en que se llevaron a cabo los experimentos de Thompson y de Davisson y Germer ya era conocido que la difracción de rayos X cumple con la Ley de Bragg. La cual predice los ángulos en los que los rayos X son difractados por un material con estructura atómica periódica (materiales cristalinos). O sea permite analizar las direcciones en las que los rayos X difractados sobre la superficie de un cristal producen interferencias constructivas, dando lugar a patrones característicos. La Ley de Bragg establece una relación directa entre la longitud de onda de los rayos X y el ángulo formado por la radiación incidente y los planos de dispersión. Davisson y Germer aplicaron esta ley a los patrones obtenidos de sus experimentos con electrones, y encontraron que se cumplía perfectamente. **Esto demostró de forma definitiva la hipótesis de De Broglie sobre la naturaleza ondulatoria de las micropartículas.**

Hoy sabemos que no solo los electrones, sino también los neutrones, protones, e incluso los átomos producen patrones de difracción cuando son dispersados por un material cristalino apropiado. Más aún, este fenómeno ha permitido el desarrollo de técnicas de microscopía con alto grado de resolución, que se utilizan actualmente para la elucidación de estructuras de materiales. El microscopio electrónico por transmisión y el microscopio electrónico por escaneo son dos ejemplos de este tipo de aplicación.

RESUMIENDO:

Las evidencias experimentales acumuladas nos permiten concluir, sin lugar a dudas, que los sistemas microscópicos se comportan de manera diferente a como lo hacen los objetos que nos rodean. **Los objetos del micromundo, y las radiaciones electromagnéticas, presentan un comportamiento dual, o sea presentan simultáneamente propiedades ondulatorias y corpusculares.** Es importante destacar que la importancia relativa de una u otra depende de la relación que haya entre las dimensiones del corpúsculo y su longitud de onda asociada.

Implicaciones en Química y Biología

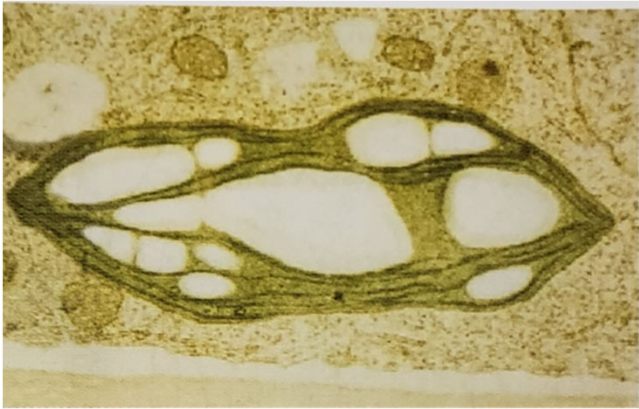
Microscopía electrónica

La resolución de un microscopio, es decir la mínima distancia entre dos puntos cuya imagen puede distinguirse, es del orden de la longitud de onda de la luz utilizada. Por lo tanto, los microscopios convencionales que emplean luz visible tienen una resolución en la escala del micrómetro y no permiten distinguir objetos de tamaño en el rango de los nanómetros.

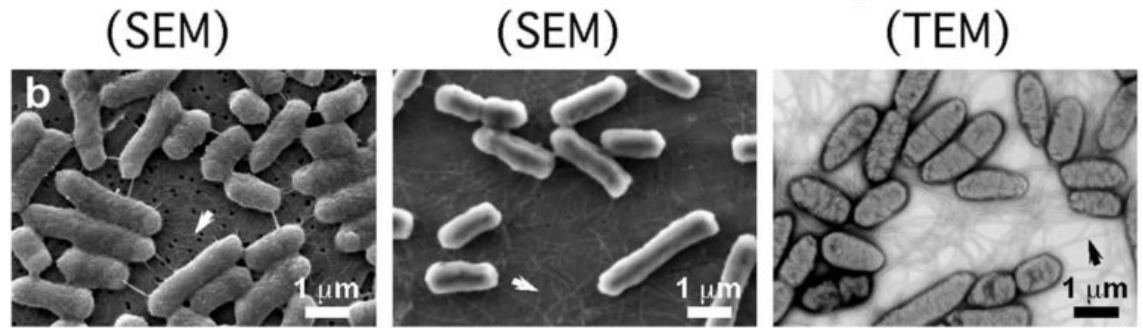
En los microscopios electrónicos, un haz de electrones con una longitud de onda de deBroglie definida sustituye a la lámpara de los microscopios ópticos tradicionales. En lugar de lentes de cuarzo o vidrio, se utilizan campos magnéticos para enfocar el haz.

En microscopios electrónicos por transmisión (TEM, *transmission electron microscopy*), el haz de electrones pasa a través de la muestra y la imagen es recogida en una pantalla. Las muestras analizadas no deben exceder los 100nm de espesor. Resolución típica: 2nm

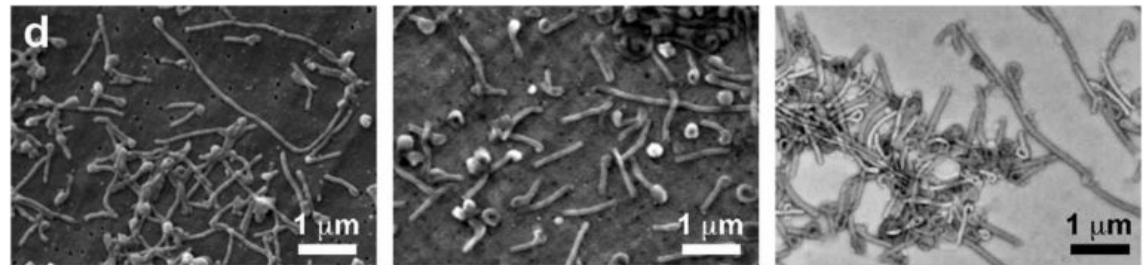
En los microscopios electrónicos de Barrido (SEM, *scanning electron microscopy*) los electrones retrodispersados de una pequeña área de la muestra son detectados y la señal eléctrica es enviada a una pantalla de video. Se obtiene una imagen de la superficie mediante el barrido del haz de electrones por toda la muestra. Las muestras deben estar secas y ser conductoras (cuando no lo son, se recubren con una fina capa metálica). Resolución típica: 50 nm



TEM. Corte transversal de una célula de una planta que muestra cloroplastos, orgánulos responsables de las reacciones de fotosíntesis.

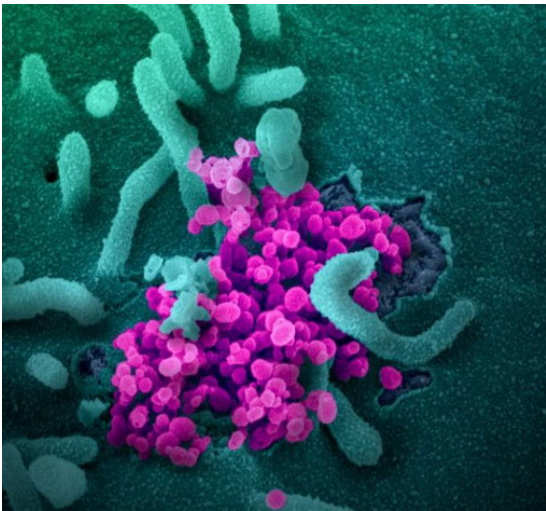


Salmonella Senftenberg

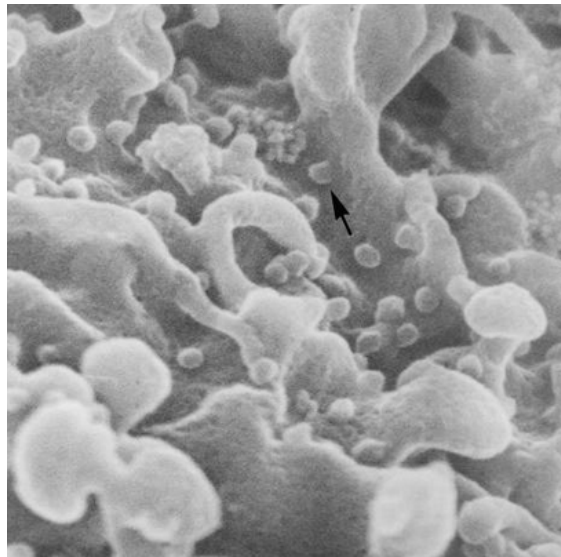


virus Ebola

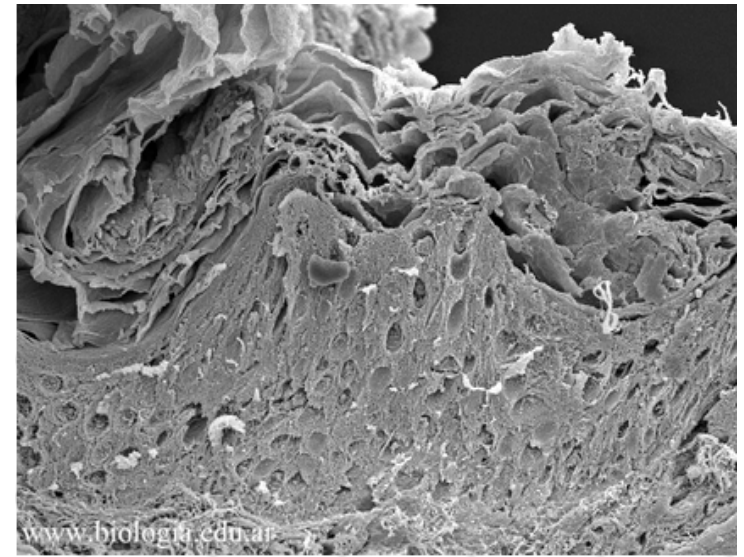
<https://www.cecoltec.com/blog/idi/microscopia-electronica-de-barrido-sem-para-uso-en-microbiologia/>



SEM. Nuevo coronavirus SARS-CoV-2 (esferas rosas) emergiendo de una célula infectada



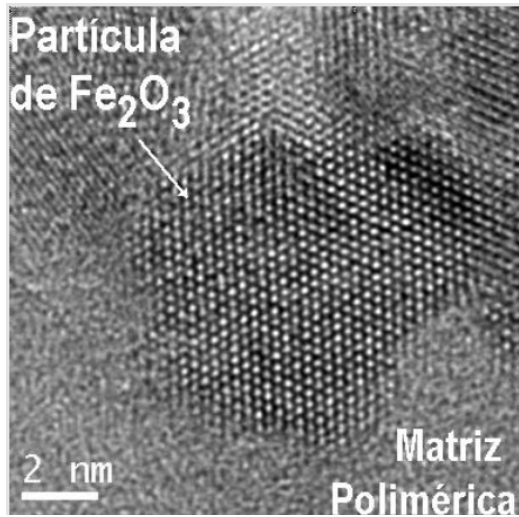
SEM. Virus del VIH que brota de la superficie celular de un linfocito (flecha)



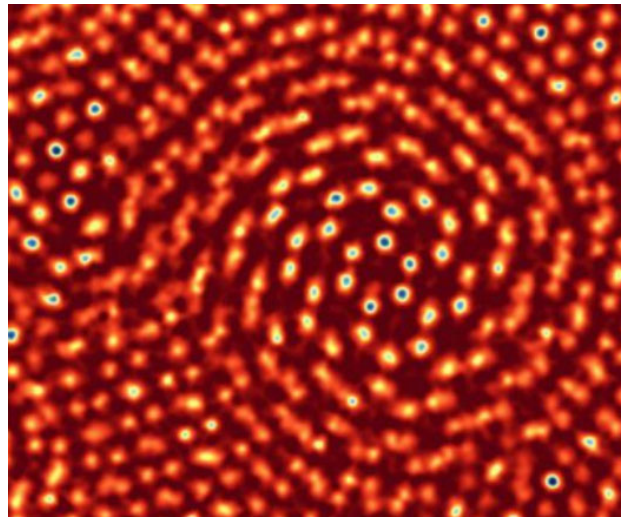
SEM. Piel humana.

<https://www.cecoltec.com/blog/idi/microscopia-electronica-de-barrido-sem-para-uso-en-microbiologia/>

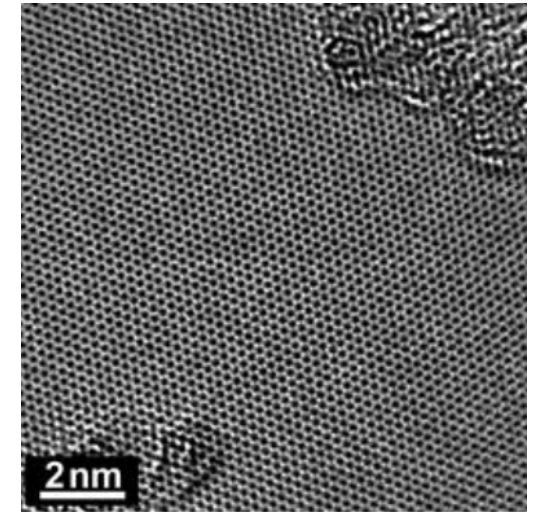
<http://www.biologia.edu.ar/microscopia/meb.htm>



HR-TEM



HR-TEM Azufre



HR-TEM Grafeno

<http://www.razonypalabra.org.mx/N/n68/13aponce.html>

<https://rpp.pe/ciencia/mas-ciencia/ciencia-este-microscopio-te-muestra-el-mundo-cuatico-de-una-forma-nunca-vista-microscopio-de-crioelectrones-noticia-1266360>

http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:grado-Filosofia-Filosofia-Mamor/Amor_Garcia_Mario_TFG.pdf

Ejemplos desarrollados:

Ejemplos resueltos en Google Colab: Físicoquímica IV – 24I

<https://eduardo-gabriel-guzman-lopez.github.io/Fisicoquimica-IV/intro.html>

Ejercicios (Todos los ejercicios son de tarea):

- 3.- ¿Cuántos fotones emite un telemetro infrarrojo monocromático de 1 mW de potencia y 1000 nm de longitud de onda durante 0.1 s?

- 4.- Calcule:
 - (a) la longitud de onda de un neutrón con una energía cinética de traslación equivalente a kT a 300 K.
 - (b) para una pelota de tenis de 57 g que se desplaza a 80 km/h.

Otros Ejercicios:

- 5.- - Cuando una luz de longitud de onda de 400 nm choca con una superficie metálica de calcio, la energía cinética de cada electrón emitido tiene un valor de 6.3×10^{-20} J. Calcula la energía de unión de los electrones en el calcio, la frecuencia mínima y la longitud de onda máxima de la luz requerida para producir este efecto fotoeléctrico.
- 6.- La energía necesaria para extraer un electrón del sodio es de 2.3 eV ($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$).
- ¿Presenta el sodio efecto fotoeléctrico para luz amarilla con longitud de onda de 5 890 Å?
 - Calcula la longitud de onda umbral del sodio.
- 7.- Se realizó un experimento fotoeléctrico al iluminar con un láser de 450 nm (luz azul) y otro de 560 nm (luz amarilla) la superficie limpia de un metal y midiendo el número y la energía cinética de los electrones liberados. Supón que en la superficie del metal se libera la misma cantidad de energía con cada láser y que la frecuencia de la luz láser es superior a la frecuencia umbral. ¿Cuál luz liberaría electrones con mayor energía cinética? ¿Cuál luz generaría más electrones?