

EL NACIMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

CONTENIDOS BÁSICOS

1. **La Física a finales del siglo XIX**
2. **Radiación del cuerpo negro**
3. **Cuantización de la energía.
Teoría cuántica de Planck**
4. **Efecto fotoeléctrico**
5. **Espectros atómicos discontinuos**
6. **Principio de incertidumbre de Heisemberg**
7. **Dualidad onda - corpúsculo**



Max Planck (1858 – 1947) siendo profesor de la Universidad de Berlín propuso en 1900 una idea con relación a la energía, que sería el punto de partida de la Mecánica Cuántica. Consideró que la energía no se emite de forma continua, sino por el contrario es radiada de modo discontinuo. Esta idea revolucionaria en su época, consideró que la energía se emitía en cantidades discretas, y a cada una de estas unidades de energía le llamaron cuanto.

1. **La Física a finales del siglo XIX**

A grandes rasgos, durante el siglo XIX se verificó que las distintas formas de la energía (cinética, potencial, térmica, etc.) podrían transformarse unas en otras, pero la cantidad total se conservaba. Además, se empezó a indagar sobre la naturaleza de la materia: sólida, líquida o gaseosa, considerándola compuesta de moléculas, cada una de las cuales poseía sus átomos particulares. Las propiedades químicas de los elementos se encontraban recopiladas en la tabla periódica de Mendeleiev, que los ordenaba en orden creciente de sus masas atómicas.

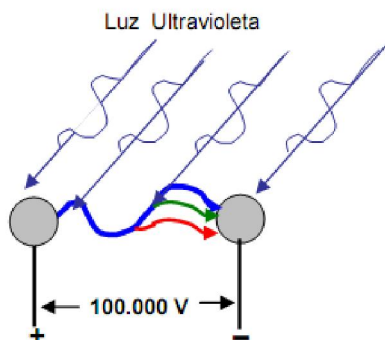
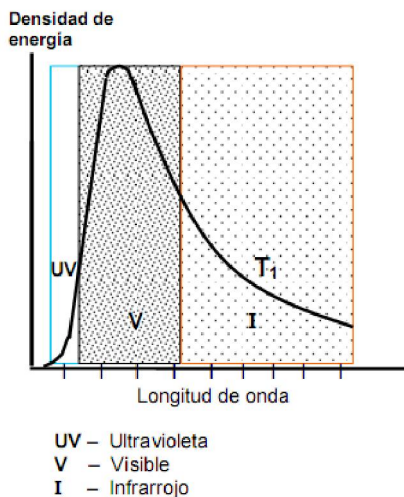


Fig. 2

Hertz observó que cuando dos esferas metálicas se encuentran a una diferencia de potencial muy elevada, son iluminadas con luz ultravioleta, la descarga eléctrica o chispa, se producía entre ellas, con más facilidad. Esta es la primera observación del efecto fotoeléctrico.

El movimiento de las partículas estaba descrito por las tres leyes de Newton que junto con la ley de Gravitación Universal, explicaba el movimiento de los cuerpos celestes. La luz, había quedado incorporada dentro de los fenómenos electromagnéticos que eran explicados con la teoría de Maxwell. En su conjunto, el mundo material se consideraba como un lugar muy lógico y comprensible, del que se creían conocidas sus leyes básicas.

Sin embargo, estas convicciones tuvieron que ser superadas en pocos años para explicar los nuevos fenómenos físicos observados al final del XIX, cuando los físicos ya habían descubierto un conjunto de ellos para los que no tenían explicaciones teóricas satisfactorias con los conocimientos de la Física Clásica. La comprensión de estos sucesos obligó a romper los moldes de la Física, para abrir el camino a la llamada Física Moderna.

Los fenómenos más significativos fueron: La radiación del cuerpo negro, la interpretación de los espectros, el efecto fotoeléctrico, los rayos X, la radiactividad y el fracaso del experimento de Michelson-Morley, cuya explicación consistente necesitó de la Teoría de la Relatividad expuesta por Einstein en 1905.

La radiación del cuerpo negro. Un cuerpo que se encuentra a una cierta temperatura distinta de la del cero absoluto, es un emisor de ondas electromagnéticas de distintas longitudes de onda. Cuando esta temperatura es de unos miles de grados kelvin emite radiaciones en el infrarrojo, en el visible y en el ultravioleta. Los científicos, mediante la medida de la energía radiada a cada longitud de onda, establecieron unas curvas para la radiación como la de la fig.1 Todos los intentos de describir la emisión de radiación y la determinación de una ecuación para la citada curva, fueron fallidos hasta 1900 en que Planck propuso una explicación revolucionaria para su tiempo, la teoría de los cuantos. Recibió el Premio Nobel de Física en 1918.

El efecto fotoeléctrico. Fue descubierto por Hertz en 1887 al observar que una chispa eléctrica saltaba más fácilmente entre dos esferas cargadas con una alta diferencia de potencial, si estaban iluminadas con luz ultravioleta que cuando el experimento se hacía en la obscuridad, fig.2. La explicación del efecto fotoeléctrico la efectuó A. Einstein en 1905, lo que le valió el Premio Nobel de Física en 1921.

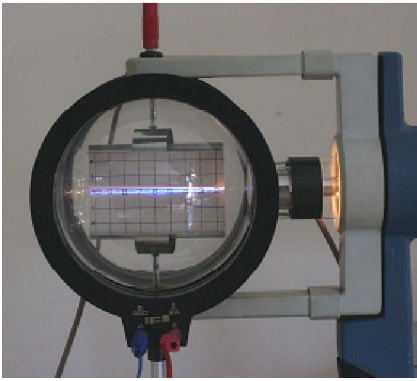


Fig. 3
Equipo para medir la relación e/m del electrón, muy parecido al empleado por J.J. Thomson. La traza permite visualizar la trayectoria de los rayos catódicos - electrones-. En el aparato se observan dos placas metálicas horizontales y paralelas que permiten crear un campo eléctrico perpendicular, con el fin de desviar a los electrones que salen lanzados en dirección horizontal. También se ven las bobinas de Helmholtz, para producir un campo magnético uniforme que los desvíe en sentido contrario al del campo eléctrico.



Fig. 4
 Aparato actual para la realización del experimento de Milikan de la gota de aceite. En 1906 intentó medir la carga del electrón pulverizando gotitas de aceite que electrizaba y de las que seguía su trayectoria con el visor dentro de un campo eléctrico. Encontró que cualquier carga era un múltiplo entero de un valor mínimo, que era la carga elemental, es decir la del electrón.

La interpretación de los espectros. Desde mediados del siglo XVIII se conocían los espectros luminosos emitidos por las sustancias, cuando eran excitadas previamente por una llama, o mediante descargas eléctricas. Al analizar la luz de los gases, se encontraron unas cuantas rayas espectrales características de cada gas, ¿pero a qué se debían?. Su explicación conduciría al establecimiento de los modelos atómicos, iniciándose el primer intento con el hidrógeno por ser el átomo más sencillo. Lo propuso acertadamente Niels Bohr en 1913 empleando la teoría cuántica. Le valió el Premio Nobel de Física en 1922.

La radiactividad. A principios de 1896 el físico francés Henri Becquerel la descubrió investigando sobre la fluorescencia de una sal de uranio. El fenómeno atrajo poca atención por la enorme popularidad de los rayos X y hubo que esperar a los trabajos de los esposos Curie para que recibiese la consideración merecida, siendo bautizado en 1898 como radiactividad. En 1903 Becquerel y los esposos Curie, recibieron el Premio Nobel de Física.

Los rayos X. Fueron descubiertos accidentalmente por Wilhelm Roentgen en Würzburg en Baviera, en 1895, lo que le valió recibir el Primer Premio Nobel de Física en 1901. Los rayos X tenían la propiedad de atravesar varias capas de cartón, láminas de metal y producir fluorescencia en pantallas de cristal, además de atravesar los tejidos humanos. Tan grande fue la importancia de su hallazgo que a las pocas semanas de su descubrimiento se utilizaban como auxiliares de las operaciones quirúrgicas en Viena. El modo de producirlos así como su Naturaleza se desconocía en su tiempo pues se dudaba entre si eran partículas u ondas y por este motivo se les llamó rayos X (de incógnita). Fue en 1912 cuando Von Laue investigador en Munich, los difractó con un cristal de sulfuro de cinc probando que eran ondas electromagnéticas. Laue fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 1914 por estos trabajos.

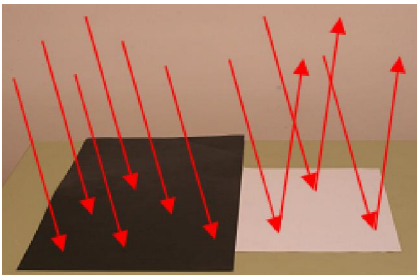
Un resultado trascendental para las ciencias físico-químicas: “El descubrimiento del electrón en 1896”. Las descargas eléctricas producidas a través de gases a baja presión, contenidos en tubos de vidrio sellados, en cuyos extremos se encuentran dos electrodos sometidos a una alta diferencia de potencial, condujeron a la observación de los rayos catódicos, llamados así por que viajaban desde el cátodo (-) hacia el ánodo.

Inicialmente se desconocía su naturaleza y propiedades, y tanto era así, que la escuela alemana los consideraba como ondas, mientras que la británica como partículas.

J. J. Thomson presentó un artículo en 1897 "Cathode rays", en el que explicaba los experimentos llevados a cabo para determinar su naturaleza. En el primero, observaba que se comportaban igual que la electricidad negativa, y en el segundo, los sometía a la acción de campos eléctricos y magnéticos midiendo la desviación que sufrían, fig.3. Entonces se preguntaba: ¿qué son estas partículas, átomos o moléculas, o materia aún más dividida?. Para obtener información tuvo que efectuar varios experimentos que le permitieron calcular la relación entre su carga/masa y del valor obtenido dedujo que no dependían del gas situado en el tubo. Considerando el bajo valor del cociente, deberían ser pequeñas partículas comparadas con las moléculas ordinarias.

La partícula de los rayos catódicos de carga negativa, fue considerada como la unidad natural de electricidad y llamada electrón. Su carga fue medida por Millikan fig. 4.

2. Radiación del cuerpo negro

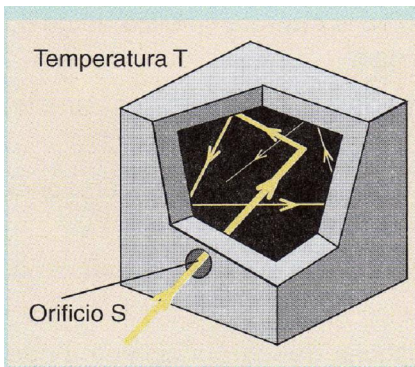


El cuerpo negro absorbe todas las radiaciones, mientras que el cuerpo blanco las refleja muy bien. La ropa negra no debe usarse al Sol del verano, pues absorbe gran cantidad de radiación y nos calentará en demasía, en cambio la blanca, al reflejar la radiación, nos mantendrá más frescos por ser muy poco absorbente.

Se llama **radiación térmica** de un cuerpo a la energía electromagnética que emite debido a su **temperatura**. Cualquier cuerpo cuando se calienta irradia energía. Cuando se calienta una barra de hierro a temperaturas cada vez mayores, su aspecto exterior cambia. Cuando la temperatura es relativamente baja emite energía, pero no se ve la radiación emitida (radiación infrarroja). A medida que su temperatura aumenta, la radiación emitida se hace visible, primero emite luz de color **rojo**, luego el rojo se hace más **amarillo** y finalmente el color es **amarillo-blanquecino**. Por lo tanto, **la longitud de onda decrece a medida que aumenta la temperatura**

Los cuerpos pueden radiar o absorber calor dependiendo de su temperatura y de la naturaleza de su superficie. Los objetos que son buenos emisores de radiación, son también excelentes absorbentes de la misma clase de radiación. En particular, si la superficie de un cuerpo es negra, es un excelente emisor y a la vez un extraordinario absorbente. En el otro extremo se encuentra el blanco, que es tanto mal emisor, como absorbente.

El concepto de cuerpo negro, es un concepto ideal. No obstante, puede conseguirse una buena aproximación a un cuerpo negro construyendo una caja herméticamente cerrada con un pequeño orificio en una de sus paredes y con las paredes interiores pintadas de negro: cualquier radiación que entra rebota hasta ser absorbida.



Ley de Stefan-Boltzmann

La energía total radiada en la unidad de tiempo, por un cuerpo negro, es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta y a su área S.

$$E = \sigma \cdot S \cdot T^4$$

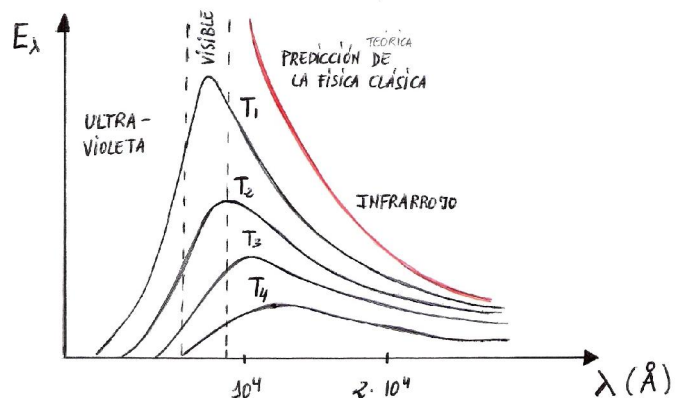
$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

σ = cte de Stefan-Boltzmann

Un **cuerpo negro** es un sistema ideal que absorbe íntegramente todas las radiaciones que inciden sobre él, cualquiera que sea su longitud de onda.

Si tenemos un objeto completamente negro, cuando se calienta los átomos que forman el objeto emiten radiación electromagnética y al mismo tiempo absorben la radiación emitida por el resto de los átomos vecinos. Cuando cesa el aporte de calor exterior, llega un momento en el que en el interior del objeto se alcanza el equilibrio entre la energía absorbida y la emitida. Si se abre un orificio en una de las paredes del objeto, parte de la radiación se escapa y se puede medir la energía radiante que emerge del interior de la cavidad por unidad de superficie y tiempo (intensidad). Esa energía que sale depende de la temperatura del objeto, a más temperatura más energía.

Representando la cantidad de energía emitida frente a la longitud de onda se observa que la energía emitida es mayor cuanto mayor es la temperatura lo cual es lógico pero también se observa que al disminuir la temperatura, el máximo de la energía emitida se desplaza hacia longitudes de onda mayores.



Estos resultados experimentales están en contradicción con lo que predice la física clásica. Según esta teoría, **la energía emitida debe disminuir de forma continua al aumentar la longitud de onda**, de tal forma que en la zona ultravioleta, correspondiente a las longitudes de onda más pequeñas, la energía emitida sería grande. Esta contradicción recibe el nombre de **catástrofe ultravioleta**.

Todas las tentativas de armonizar los resultados experimentales con la física clásica fracasaron. Era, pues, necesario buscar una nueva interpretación teórica de dichos resultados.

3. Cuantización de la energía. Teoría cuántica de Planck

Cabe el honor a Max Planck en 1900, el haber encontrado una ecuación matemática que resistió con éxito todas las verificaciones experimentales. Su razonamiento estaba fuera del pensamiento físico de aquel entonces y no era abordable con las ideas de la Física Clásica.

“La energía emitida o absorbida por el cuerpo negro no era continua sino que, por el contrario, era emitida o absorbida en paquetes discretos o cuantos de energía”

La energía de un cuanto debe ser:

$$E = n \cdot h \cdot f$$

donde f es la frecuencia de la radiación y h la constante de Planck:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \quad n = n^\circ \text{ entero positivo}$$

Con esta idea de cuantificación de la energía y empleando métodos estadísticos, encontró una ecuación, llamada después **ley de la radiación de Planck**, con la que pueden explicarse las curvas experimentales de la gráfica anterior.

4. Efecto fotoeléctrico

La idea de la emisión de la energía por cuantos era tan radical, que el mismo Planck pensaba que una vez emitida como cuantos, debería propagarse de forma continua como postulaba la teoría clásica. **Einstein amplió las posibilidades de la ley de Planck, considerando que la energía además de ser emitida y absorbida como cuantos, se propaga igualmente como cuantos de luz**, siendo designados por Einstein como **fotones**.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto por **Hertz (1857-1894)**, casi por casualidad, cuando realizaba experimentos para demostrar la naturaleza electromagnética de la luz. Comprobó que saltaba chispa entre dos esferas cargadas más fácilmente si se las iluminaba con luz ultravioleta. Realizó más experimentos con luz y con metales y estableció que los metales bajo la acción de la luz emiten electrones y en especial bajo la acción de luz de frecuencias altas.

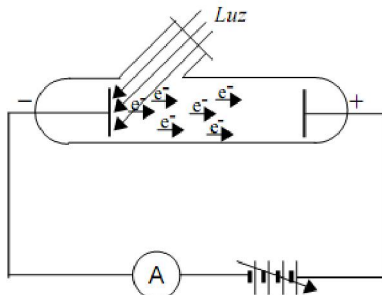


fig. 5

Se llama efecto fotoeléctrico al proceso mediante el cual se liberan electrones de un material por efecto de la luz y se puede producir por tanto una corriente eléctrica.

Consiste en la emisión de electrones por la superficie de un metal cuando sobre él incide luz de frecuencia suficientemente elevada

La luz incide sobre el cátodo (metálico) (figura 5) produciendo la emisión de e^- que llegan al ánodo y establecen una corriente eléctrica que es detectada por el amperímetro.

Los resultados experimentales obtenidos fueron los siguientes:

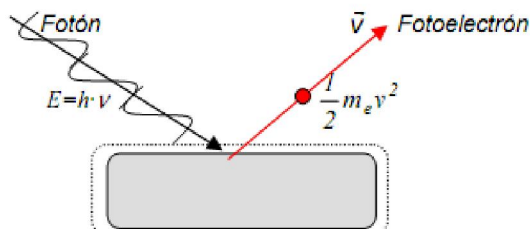
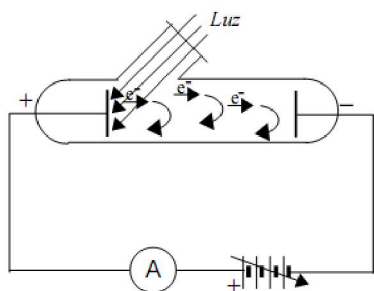
- § Al iluminar el cátodo con luces de distinta frecuencia se observa que el amperímetro deja de indicar paso de corriente cuando la frecuencia es inferior a cierto valor umbral característico del metal del cátodo. Es decir, si f_0 es la frecuencia umbral de un metal puro, el efecto fotoeléctrico sólo se presenta si $f > f_0$.
- § El número de electrones emitidos es proporcional a la intensidad de la radiación luminosa recibida, sin influir para nada en él la frecuencia de dicha radiación.
- § Los electrones emitidos salen todos con la misma velocidad, dependiendo ésta de la frecuencia de la radiación incidente, pero no de su intensidad.
- § El efecto fotoeléctrico es prácticamente instantáneo; es decir, aparece y desaparece con la radiación que llega a la superficie fotosensible.

Utilizando la física clásica no se puede explicar ninguno de los hechos experimentales que acabamos de ver.

Einstein en 1902, ampliando la teoría de Planck, postuló que la radiación no solo se emite en forma discontinua, sino que también se propaga en forma discontinua; es decir, la luz se propaga por el espacio transportando la energía en cuantos de luz, llamados **fotones**.

Interpretación de Einstein

Consideró a la luz formada por fotones de energía $E = h \cdot f$; estos fotones al incidir sobre la superficie limpia de un metal (ver figura) interaccionan con los electrones realizando trabajo para extraerlos hasta la superficie, liberándolos del metal y, además, les proporcionan energía cinética lo que les permite salir expulsados del metal con una cierta velocidad.



El fotón incidente arranca un fotoelectrón

La ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico, es la aplicación a este fenómeno del principio de conservación de la energía:

$$h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 \Rightarrow E = W_0 + E_c$$

Donde: E es la energía del fotón incidente, W_0 es el trabajo de extracción o función de trabajo de la superficie y E_c es la energía cinética del electrón.

El **trabajo de extracción** es la energía necesaria para extraer un electrón hasta la superficie del metal, pero sin proporcionarle energía cinética de modo que no puede ser expulsado. Es igual a $h \cdot f_0$, siendo f_0 una frecuencia característica de cada metal, llamada frecuencia umbral.

Mediante esta ecuación, Einstein pudo justificar todas las leyes experimentales, a saber:

- § Si la energía del fotón incidente es menor que el trabajo de extracción, el electrón no escapa, no se produce el efecto fotoeléctrico. Además el trabajo de extracción depende del metal del que esté constituido el emisor.
- § Si la intensidad de la radiación luminosa aumenta, aumentará el número de fotones por unidad de área que llega al emisor, luego el número de electrones emitidos será proporcional a dicha intensidad

Significado del potencial de frenado

Si se invierte la polaridad de los electrodos se crea un campo eléctrico que atrae a los electrones, observándose que la corriente se anula para un determinado valor de potencial V_f llamado **potencial de frenado**, que no depende de la intensidad de la luz pero sí de la frecuencia de la radiación.

Los electrones son emitidos por el cátodo con cierta velocidad, siendo su

energía cinética $\frac{1}{2} m \cdot v^2$. Cuando

se invierte el voltaje, estos electrones se encuentran sometidos a una fuerza que los rechaza, cuyo trabajo es $e \cdot V_f$, de tal manera que su velocidad se anulará cuando:

$$e \cdot V_f = \frac{1}{2} m \cdot v_{máx}^2 = E_{c(máx)}$$

Siendo $v_{máx}$ la máxima velocidad con que se emiten los electrones y $E_{c(máx)} = e \cdot V_f$ la máxima energía cinética del electrón más rápido emitido.

§ Según la ecuación de Einstein, la velocidad de los electrones será:

$$v = \sqrt{\frac{2h}{m}(f - f_0)}$$

Metal	W_0 (eV)	W_0 (J.10 ⁻¹⁹)	f_0 (Hz.10 ¹⁴)
Li	2.9	4.65	7.01
Na	2.75	4.41	6.65
K	2.30	3.68	5.55
Rb	2.16	3.46	5.22
Cs	2.14	3.43	5.17
Ca	2.87	4.60	6.94
Ag	4.26	6.82	10.29
Al	4.28	6.86	10.35
Cu	4.65	7.45	11.24
Au	5.1	8.17	12.32
Pt	5.65	9.05	13.65
W	5.40	8.65	13.04

Y, por tanto, la velocidad de estos electrones sólo depende de la frecuencia de la radiación incidente.

En la tabla adjunta se observan los trabajos de extracción y las frecuencias umbrales de algunos metales. Los alcalinos tienen la frecuencia umbral f_0 en el visible, por el contrario el resto de los metales, la presentan en el ultravioleta

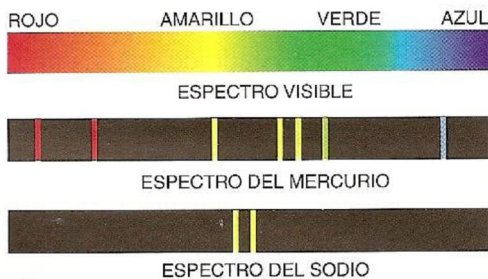
Consecuentemente, los metales alcalinos experimentan el efecto fotoeléctrico tanto con luz visible como con luz ultravioleta, mientras que el resto de los metales únicamente con la luz ultravioleta.

Ejemplo

El umbral fotoeléctrico del wolframio es de 230 nm. Calcula: a) La frecuencia umbral. B) El trabajo de extracción. C) La velocidad de los fotoelectrones emitidos cuando son iluminados con una luz de 220 nm.

6. Espectros atómicos discontinuos

Otro problema que no podía explicar la física clásica eran los espectros discontinuos atómicos. El espectro de la luz solar es un espectro continuo de los diferentes colores que integran la luz blanca, pero el espectro de emisión de los átomos de un elemento químico es discontinuo y está formado por un conjunto de líneas de colores sobre un fondo oscuro y están situadas a una longitud de onda determinada. Este hecho no lo puede explicar la física clásica mediante el modelo de Rutherford porque según este modelo el espectro tendría que ser continuo.



El espectro del átomo de hidrógeno es el más sencillo de todos los elementos químicos. En 1885 Johann Balmer descubre de forma empírica, que las longitudes de onda de la región del visible del espectro de hidrógeno responde a la fórmula:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Donde n es un número entero mayor que 2 y R es una constante (Rydberg). Todos los intentos efectuados para encontrar una explicación de la fórmula de Balmer fracasaron, hasta que en 1913 el danés Niels Bohr interpretó dicha fórmula dentro del marco de su modelo atómico que aplica el concepto de la cuantización de la energía de Planck y se basa en dos postulados que son:

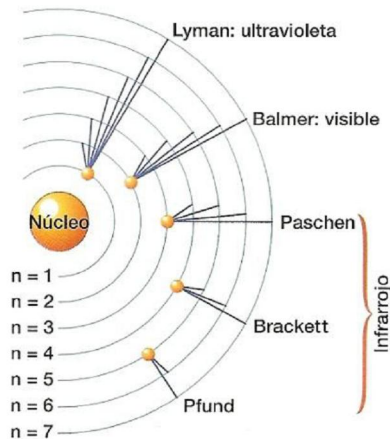
1) Los electrones giran en un número determinado de órbitas circulares alrededor del núcleo, sin emitir ni absorber energía radiante en las mismas.

2) Cuando el electrón pasa de una órbita a otra absorbe o emite energía en forma de fotón en una cantidad igual a $E = h$

La interpretación teórica de los espectros atómicos se basa en que los electrones de los átomos pueden estar en ciertos estados, caracterizados por sus distintos valores de energía llamados niveles. La transición entre dos niveles energéticos E_1 y E_2 da lugar a la emisión o absorción de radiación, cuya frecuencia viene dada por la

ecuación:
$$f = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Si es absorción el electrón pasa a un nivel superior llamado **estado excitado** y la vuelta del estado excitado al fundamental directamente o a través de estados intermedios, hace que se puedan emitir fotones de frecuencias distintas. Cada una de estas transiciones dará origen a una línea en el espectro, lo que explica que en el espectro de un átomo aparezcan varias rayas o líneas, de forma que cada una de ellas tiene una frecuencia o longitud de onda determinada.



En los espectros de emisión aparecen las líneas de colores que corresponden a las frecuencias emitidas, mientras que en el espectro de absorción aparecen a las mismas frecuencias que en el espectro de emisión rayas negras que corresponden a las frecuencias absorbidas.

Los saltos electrónicos al nivel 1 corresponden a la serie de Lyman (ultravioleta); al nivel 2 la serie de Balmer (visible); al nivel 3 la serie de Paschen ; al nivel 4 la serie de Brackeff y al nivel 5 la serie de Pfund (estas 3 últimas corresponden al infrarrojo).

Aunque el modelo de Bohr tuvo que abandonarse cuando se dispuso de mejores espectroscopios porque aparecían desdoblamientos de las rayas que no era capaz de explicar y que luego se explicaron utilizando la mecánica cuántica, si supuso un gran éxito porque fue capaz de explicar que la energía de los átomos está cuantizada

7. Dualidad onda - corpúsculo. Hipótesis de De Broglie

A principio del siglo XX la luz se consideraba que era una onda, pero el descubrimiento del fenómeno fotoeléctrico y del efecto Compton hicieron pensar que la luz podía tener una doble naturaleza onda - corpúsculo.

En 1923 De Broglie demuestra que efectivamente los fotones luminosos tienen una doble naturaleza de onda-corpúsculo mediante la siguiente demostración:

Un fotón según Planck tiene una energía: $E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$

Y según Einstein por viajar a la velocidad de la luz la energía de un fotón también es $E = m \cdot c^2$

Por tanto, igualándolos:

$$\left. \begin{array}{l} E = hf = h \cdot \frac{c}{\lambda} \\ E = mc^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{hc}{\lambda} = mc^2 \Rightarrow \lambda = \frac{h}{m \cdot c}$$

Es decir, que un fotón que es un corpúsculo material que se mueve a la velocidad de la luz tiene asociada una longitud de onda λ que viene

dada por la expresión: $\lambda = \frac{h}{m \cdot c}$

De Broglie generaliza esta expresión a cualquier partícula material que se mueve con una determinada velocidad lleva asociada una longitud de onda que viene dada por la expresión:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

m = masa de la partícula y v = velocidad de la partícula

La hipótesis de De Broglie fue confirmada experimentalmente en 1927 mediante experimentos de difracción de electrones que luego sirvieron de base para la construcción del microscopio electrónico.

8. Principio de incertidumbre de Heisenberg.

Según la mecánica clásica, si en un instante determinado se conoce la velocidad y la posición de una partícula, transcurrido un tiempo t se puede determinar con precisión la nueva velocidad y posición de la partícula,, pero si la masa de la partícula es muy pequeña, ya no se puede determinar con precisión y simultáneamente la posición y la velocidad de la partícula es decir, se puede determinar con precisión la velocidad pero no la posición y viceversa, esto es debido a que para ver la partícula hay que iluminarla y al iluminarla le comunicamos una energía que altera su velocidad inicial.

Esta imposibilidad de determinar la posición y la cantidad de movimiento de una partícula simultáneamente, constituye **el principio de indeterminación de Heisenberg** que dice:

“El producto de la indeterminación x de la medida de las coordenadas de una partícula por la indeterminación p de la medida de la cantidad de movimiento simultáneamente ha de ser igual o mayor que la constante de Planck”

Matemáticamente: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$

Este principio es la base de la mecánica cuántica que considera que toda partícula que se mueve tiene una doble naturaleza onda-corpúsculo, y la partícula se mueve dentro del tren de ondas asociado con lo que no podemos determinar con exactitud su posición, por eso no tiene sentido decir que sabemos con precisión la trayectoria del electrón cuando se mueve alrededor del núcleo y por eso lo que se representa es el cuadrado de la función de onda que nos indica el espacio alrededor del núcleo en el cuál la probabilidad de encontrar al electrón es máxima. A este espacio es al que se llama **orbital**.