

**TEMA 8. FÍSICA CUÁNTICA.****ÍNDICE**

- 1. El nacimiento de la física cuántica.**
  - 1.1. El cuerpo negro.
  - 1.2. Ley del desplazamiento de Wien.
  - 1.3. La catástrofe del ultravioleta.
  - 1.4. Hipótesis cuántica de Planck.
- 2. El efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.**
  - 2.1. El efecto fotoeléctrico.
  - 2.2. El efecto Compton.
- 3. Espectros de emisión y absorción. Teoría atómica de Bohr.**
  - 3.1. Espectros atómicos.
  - 3.2. Modelo atómico de Bohr.
    - 3.2.1. Cuantización de la energía en el modelo de Bohr.
    - 3.2.2. Transiciones electrónicas.
    - 3.2.3. El láser.
- 4. Dualidad onda-corpúsculo.**
  - 4.1. La doble naturaleza de la luz.
  - 4.2. Hipótesis de De Broglie.
- 5. Mecánica cuántica.**
  - 5.1. Principio de incertidumbre de Heisenberg.
- 6. Las implicaciones de la Mecánica Cuántica**
  - 6.1. El “gato de Schrödinger” y la decoherencia.
  - 6.2. La interpretación de Copenhague y los mundos paralelos.
  - 6.3. El efecto túnel.

---

*"Aquellos que no quedaron disgustados cuando se iniciaron con la mecánica cuántica, seguramente no la entendieron."*

*Niels Bohr*

**1. El nacimiento de la física cuántica.**

Todos los fenómenos relacionados con la interacción de luz con luz, como es el caso de las interferencias y la difracción, así como la polarización, pueden ser descritos y explicados con una teoría basada en el modelo ondulatorio de la luz. Pero cuando se intenta estudiar las interacciones de la luz con la materia, como emisión, absorción y dispersión de luz por la materia, se presentan serias dificultades con la teoría ondulatoria. En algunos fenómenos no se trata de pequeñas desviaciones entre teoría clásica y resultados experimentales, sino que la teoría predice resultados en completa contradicción con los resultados observados experimentalmente.



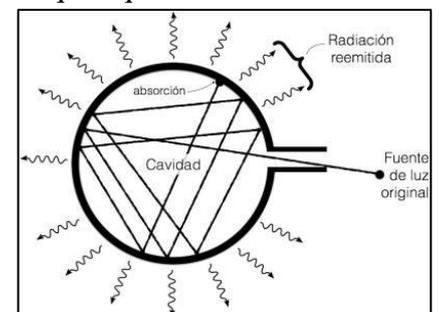
La foto más famosa de la ciencia: el quinto congreso Solvay en octubre de 1927, Bruselas. El tema principal fue *Electrones y fotones*, donde los mejores físicos mundiales discutieron sobre la recientemente formulada teoría cuántica. Construyeron una nueva manera de entender el mundo y se dieron cuenta que para describir y entender a la naturaleza se tenían que abandonar gran parte de las ideas preconcebidas por el ser humano a lo largo de toda su historia.

### 1.1. El cuerpo negro.

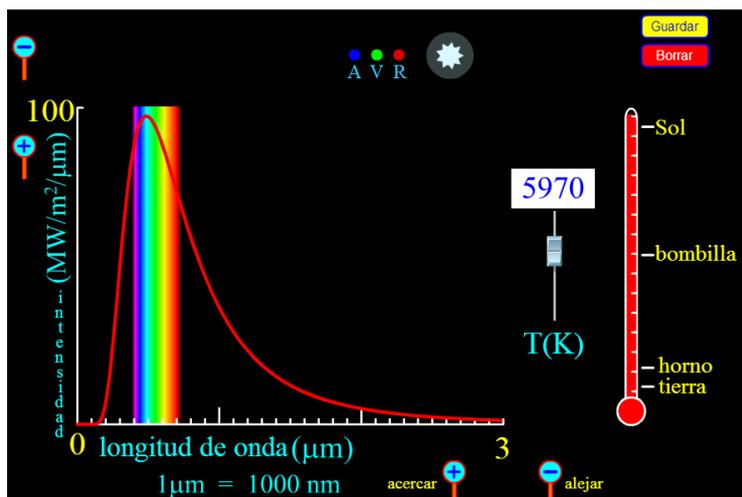
Históricamente el primer caso de este tipo se encontró al intentar explicar la distribución de energía en el espectro de un cuerpo calentado a alta temperatura, (radiación del cuerpo negro).

Todos los cuerpos emiten radiación en forma de onda electromagnética denominada radiación térmica. Por definición, un cuerpo negro es aquel que absorbe toda la radiación que le llega y, por lo tanto, no refleja nada.

Por definición, un cuerpo negro es un sistema ideal que absorbe toda la radiación que llega a él. La cantidad y distribución de la radiación que emite sólo depende de la temperatura y existe una relación directa entre las capacidades de absorción y de emisión, por lo tanto, se dice que el cuerpo negro es un emisor y absorbente perfecto.



La radiación emitida sigue un espectro continuo, es decir, emite en todas las longitudes de onda, tal y como se observa en la figura. Además, al subir la temperatura aumenta la intensidad emitida para todas las longitudes de onda. Cada una de las curvas para cada temperatura presenta un máximo en una longitud de onda dada. Estas características se pueden observar en la simulación asociada a la imagen:



Simulación de la radiación emitida por un cuerpo negro. Fuente <https://phet.colorado.edu/es/simulations/category/physics>.

La energía total emitida por un cuerpo negro se puede calcular sumando la energía emitida para cada longitud de onda. Esta se expresa en forma de radiancia ( $R$ ), que se define como energía por unidad de tiempo y de superficie, y se calcula mediante la ley de Stefan-Boltzman:

$$R = \frac{E}{t \cdot S} = \sigma \cdot T^4$$

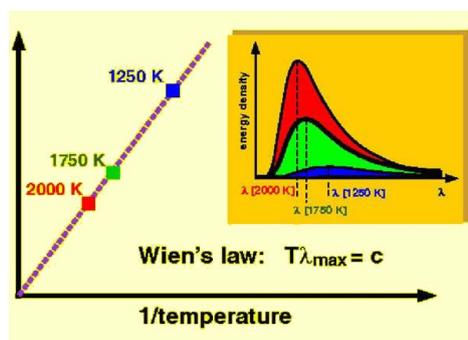
$\sigma$  se denomina constante de Stefan-Boltzman y su valor es de  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

### 1.2. Ley del desplazamiento de Wien.

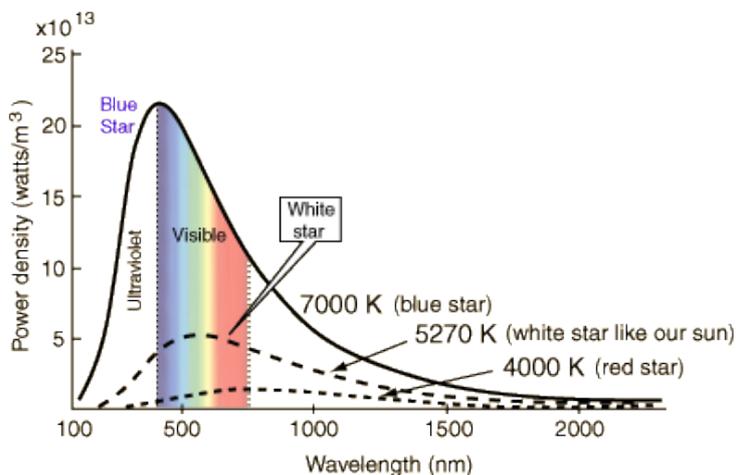
Se ha comentado que existe un máximo de radiación emitida correspondiente a una longitud de onda concreta. Si se varían las temperaturas del cuerpo emisor, se observa que, a medida que la temperatura aumenta, la longitud de onda para la cual se produce el máximo de energía emitida ( $\lambda_{\text{max}}$ ) disminuye. Es decir, la temperatura  $T$  y  $\lambda_{\text{max}}$  son inversamente proporcionales. La relación que existe entre ambas magnitudes es constante y se conoce como ley del desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,896 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Si se representa gráficamente  $\lambda_{\text{max}}$  respecto a  $1/T$  se obtiene una línea recta:



En la siguiente gráfica se observa la ley del desplazamiento de Wien comparando la temperatura superficial de varias estrellas. El color predominante que observamos de una estrella, nos da una idea aproximada de la temperatura en su superficie, ya que el pico de máxima emisividad cae cada vez en una zona diferente del espectro visible.



### 1.3. La catástrofe del ultravioleta.

Cuando se intentó dar una interpretación física, basada en el modelo clásico, a estas curvas de distribución de energía, se llegó a un completo fracaso. El primer intento de interpretación basado en un modelo clásico de la radiación del cuerpo negro se conoce como la ley de Rayleigh-Jeans.

Con longitudes de onda elevadas, esta ley proporciona resultados razonablemente concordantes con los datos experimentales, pero conforme las longitudes de onda disminuyen se producen grandes discrepancias. Cuando la longitud de onda tiende a cero, la energía radiada tiende a infinito, al contrario de lo que se observa con los datos experimentales. Esta contradicción se conoció como la “catástrofe del ultravioleta”.

### 1.4. Hipótesis cuántica de Planck.

Max Planck, en 1900, propuso una fórmula empírica para explicar la radiación del cuerpo negro que coincidía con las curvas experimentales en todas las longitudes de onda.

Para justificar dicha fórmula, Planck tuvo que establecer la hipótesis cuántica, la cual fue propuesta como un artificio matemático, pero que ni el mismo creía en su realidad. La hipótesis cuántica establece que el intercambio de energía entre la radiación y la materia no tiene lugar de forma continua, sino a través de paquetes de energía denominados cuantos cuyo valor depende de la frecuencia de la radiación:

$$E = n \cdot h \cdot \nu$$

Esto quiere decir que la luz y todas las demás clases de radiación electromagnética, que siempre eran consideradas como trenes continuos de ondas, consistían realmente en paquetes individuales de energía con cantidades bien definidas de energía por paquete.

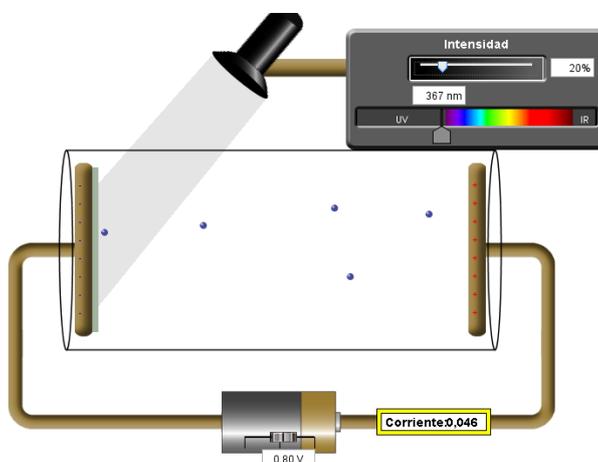
En la expresión,  $E$  es la energía intercambiada entre la materia y la radiación,  $n$  un número cuántico entero,  $\nu$  la frecuencia de la radiación y  $h$  una constante denominada constante de Planck y cuyo valor es  $h = 6,623 \cdot 10^{-24} \text{ J}\cdot\text{s}$

## 2. El efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.

### 2.1. El efecto fotoeléctrico.

El Efecto Fotoeléctrico, descubierto por Hertz, consiste en que al incidir la luz sobre ciertas superficies metálicas, éstas emiten electrones,

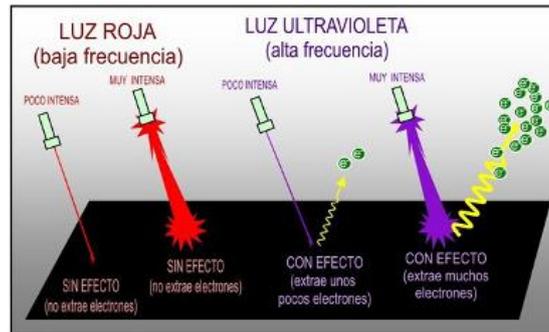
Para estudiar el efecto fotoeléctrico se utiliza una fotocélula, la cual es un tubo de vacío que contiene un cátodo metálico y un ánodo entre los que se mantiene una diferencia de potencial constante mediante un generador de corriente continua, acoplada a un galvanómetro. Esto se muestra en la [simulación](#):



Cuando no se ilumina el tubo el galvanómetro no detecta paso de corriente por el circuito. Sin embargo, cuando se ilumina el cátodo con la luz monocromática de frecuencia apropiada, el galvanómetro detecta una corriente que se debe a los electrones emitidos por el cátodo y recogidos por el ánodo, cerrando el circuito.

La Física Clásica y la Teoría Electromagnética de la luz no podían explicar satisfactoriamente el Efecto Fotoeléctrico por las siguientes razones:

- No se emiten electrones, denominados fotoelectrones, por debajo de un cierto valor de la frecuencia de la luz incidente llamada **frecuencia umbral** que depende del material iluminado. La teoría ondulatoria, sin embargo predice que la emisión fotoeléctrica debe ocurrir a cualquier frecuencia, suponiendo que la intensidad luminosa es suficientemente alta.
- Si la frecuencia de la luz es mayor que la frecuencia umbral se produce la emisión de fotoelectrones y el número de electrones emitidos es proporcional a la intensidad luminosa. Sin embargo la energía cinética máxima de los fotoelectrones no depende de la intensidad de la luz sólo de la frecuencia, hecho que no se puede explicar por la teoría clásica.



- Los electrones se emiten desde el cátodo casi instantáneamente, incluso cuando las intensidades luminosas son bajas. Según la física clásica, era lógico un retraso en la emisión fotoeléctrica ya que los electrones requirieran un cierto tiempo para absorber la radiación ondulatoria incidente, antes de adquirir la energía suficiente para escapar del metal.

En 1905, Einstein explicó este fenómeno utilizando el concepto de “cuanto” de energía postulado por Max Planck cinco años antes.

De acuerdo con la teoría cuántica de Planck la energía de un fotón es:

$$E = h \cdot \nu$$

El efecto fotoeléctrico tiene lugar cuando un fotón procedente de la radiación que se está emitiendo incide sobre un electrón del átomo metálico y le cede su energía, la cual es invertida por el electrón en romper el enlace con el átomo. Al ser la energía del fotón proporcional a la frecuencia de la radiación se comprende que el efecto fotoeléctrico sea provocado, únicamente, por las radiaciones de gran frecuencia.

La energía mínima necesaria para arrancar un electrón del átomo se denomina trabajo de extracción ( $W_e$ ):

$$W_e = h \cdot \nu_0$$

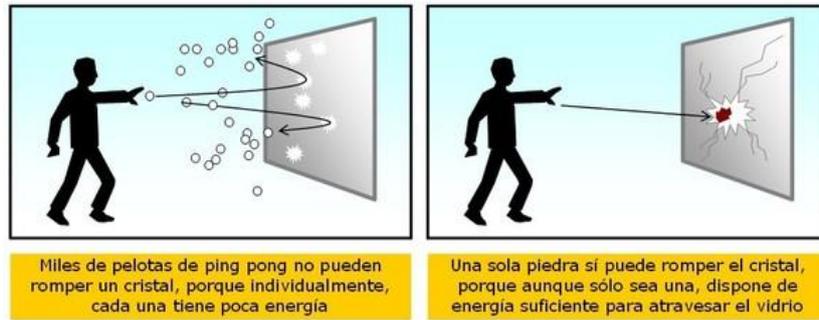
Siendo  $\nu_0$  la frecuencia umbral del metal, que será diferente para cada metal.

Si la energía del fotón es mayor que la energía de extracción, la energía restante se invierte en aumentar la velocidad con la que sale despedido el fotoelectrón. La energía cinética máxima del electrón emitido está dada por:

$$h \cdot \nu = W_e + E_{Cmax} \rightarrow E_{Cmax} = h \cdot \nu - h \cdot \nu_0 = h(\nu - \nu_0)$$

A la luz de la teoría corpuscular de la luz pueden explicarse las características del efecto fotoeléctrico:

- El efecto fotoeléctrico no se observa por debajo de la frecuencia umbral. Se explica considerando que, si la energía del fotón incidente no supera el trabajo de extracción, los electrones nunca serán expulsados de la superficie, independientemente de la intensidad de la luz.



- La energía cinética máxima es independiente de la intensidad de la luz incidente. Esto es debido a que, si la intensidad luminosa se duplica también se duplica el número de fotones y por ello el número de fotoelectrones emitidos, pero su energía cinética depende exclusivamente de la energía de los fotones, que es función de su frecuencia y no del número de ellos.
- La energía cinética máxima aumenta con la frecuencia de los fotones. Se explica mediante la ecuación del efecto fotoeléctrico de Einstein, puesto que depende exclusivamente de la frecuencia.

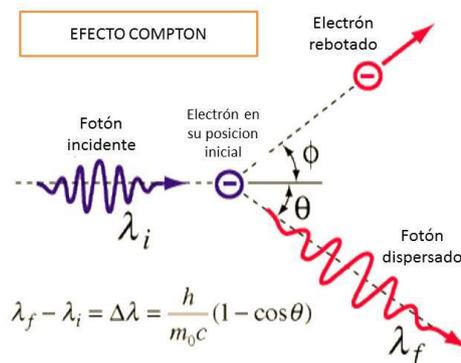
## 2.2. El efecto Compton.

En 1921 Arthur H. Compton descubrió que, si se hace incidir rayos X de una longitud de onda determinada sobre una lámina de un material con electrones débilmente ligados, como el grafito, ambos se comportaban como cuerpos materiales que tenían energía cinética y momento lineal, cuyas dos magnitudes se conservan después del choque.

A la luz de la teoría fotónica, Compton interpretó el proceso de dispersión como una colisión elástica de una partícula (fotón) con otra (electrón).

En una colisión entre un fotón incidente de longitud de onda  $\lambda_0$  y un electrón inicialmente en reposo, parte de la energía del fotón se transfiere al electrón, que sufre una perturbación de su “estado de reposo”. La energía y la frecuencia del fotón dispersado se reducen y su longitud de onda aumenta. Suponiendo que la energía y el momento lineal se conservan durante la colisión, se obtiene la relación para el corrimiento en la longitud de onda del fotón dispersado:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos\theta)$$



Efecto Compton: Fuente <http://espiadellabo.com/>

Donde  $m_e$  es la masa del electrón,  $h$  la constante de Planck,  $c$  la velocidad de la luz y  $\theta$  el ángulo de observación del fotón secundario.

### 3. Espectros de emisión y absorción. Teoría atómica de Bohr.

#### 3.1. Espectros atómicos.

En el tema 9 ya se explicó lo que es un espectro de absorción y de emisión. La radiación térmica tiene un espectro continuo, esto es, emite en todas las longitudes de onda. Sin embargo, los átomos emitiendo de forma individual dan lugar a espectros discontinuos.

El espectro de emisión más estudiado es el del hidrógeno. Existen varias fórmulas que recogen todas las líneas conocidas para el hidrógeno, incluido el ultravioleta y el infrarrojo. Para las líneas del visible Balmer definió la siguiente expresión:

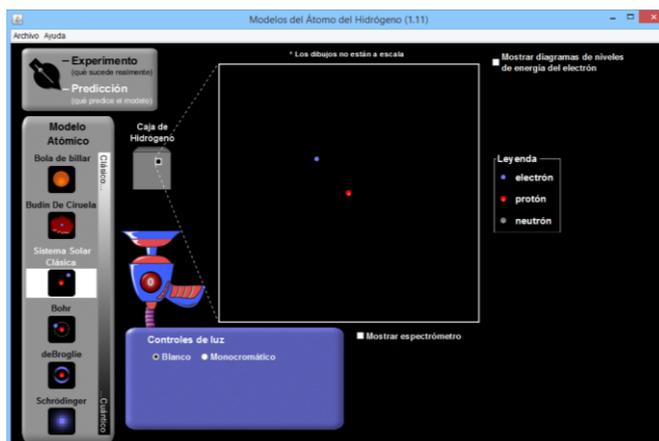
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \cdot \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Donde  $R_H = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$  es la constante de Rydberg del hidrógeno, y  $m$  y  $n$  son números enteros tales que  $n > m$ . Cada valor de  $m$  define una serie de líneas compuesta por las longitudes de onda que generan los posibles valores que adopta  $n$ .

#### 3.2. Modelo atómico de Bohr.

La Física Clásica entra en el siglo XX en una profunda crisis ante la imposibilidad de explicar el origen de los espectros atómicos y otras características que se postulaban en los incipientes modelos atómicos propuestos. Resultaba inexplicable, por ejemplo, la estabilidad de las órbitas circulares de los electrones alrededor del núcleo. Según la teoría electromagnética de Maxwell, toda partícula cargada acelerada (el electrón posee aceleración centrípeta) se convierte en emisora de radiación electromagnética y por tanto perdería energía al exterior. El electrón, como tal partícula cargada, al girar alrededor del núcleo, emitiría energía radiante, disminuiría su energía potencial y su radio orbital y terminaría por colapsarse contra el núcleo y el átomo no sería estable, lo que va en contra de la evidencia de un átomo estable. Además producirían un espectro continuo con toda clase de frecuencias en la radiación emitida y la realidad evidente es que el átomo da lugar aun espectro discontinuo de determinadas frecuencias, lo que resulta incompatible con la teoría electromagnética clásica

En la siguiente [simulación](#) se pueden observar los problemas que presentan los diferentes modelos atómicos anteriores al de Bohr.



En 1913, el científico danés Niels Bohr propuso la primera explicación con éxito de los espectros atómicos. Su teoría contenía una combinación de ideas que parten de la teoría cuántica original de Max Planck, del concepto fotónico de la luz propuesto por Albert Einstein y del modelo atómico de Ernest Rutherford que postula un núcleo pequeño cargado positivamente y rodeado por electrones en órbitas circulares. El modelo propuesto por Bohr contiene algunas características clásicas así como algunos postulados revolucionarios que no podían justificarse dentro del esquema de la Física Clásica.

Niels Bohr aplicó al modelo nuclear de átomo establecido por Rutherford, la teoría cuántica de la radiación tal y como la desarrollaron Planck y Einstein. La hipótesis de Bohr se fundamentaba en los siguientes postulados:

1. Los electrones se mueven alrededor del núcleo en órbitas circulares estables sin emitir energía radiante y sometidos a las fuerzas de atracción eléctrica que le produce el núcleo.
2. El momento angular está cuantizado. Las únicas órbitas permitidas para los electrones son aquellas en las que el momento angular del electrón alrededor del núcleo es un múltiplo entero de un valor mínimo dado por:

$$L = m \cdot r \cdot v = n \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi}$$

Donde L es el momento angular, m la masa del electrón, r el radio de órbita, v la velocidad orbital y n un número entero, llamado número cuántico.

Cuando el electrón se encuentra en una de estas órbitas permitidas, no radia energía y el átomo es estable. Estas órbitas se denominan niveles de energía o estados estacionarios, pues a cada órbita le corresponde una energía potencial determinada.

3. El átomo sólo irradia energía electromagnética cuando un electrón salta de un estado estacionario o nivel de energía permitido a otro. La frecuencia de la radiación emitida corresponde a la relación:

$$h \cdot \nu = E_1 - E_2$$

siendo  $E_1$  y  $E_2$  las energías correspondientes a los estados estacionarios o niveles de energía 1 y 2. Esta expresión para la energía del fotón, concuerda con la que propuso Einstein para llegar a su ecuación del efecto fotoeléctrico.

### 3.2.1. Cuantización de la energía en el modelo de Bohr.

Tomando como base los postulados establecidos vamos a determinar las energías de las órbitas permitidas o estados estacionarios para el electrón en el átomo de hidrógeno.

La energía de un electrón en una órbita permitida se compone de dos términos: la Energía Cinética y la Energía Potencial Eléctrica:

$$\left. \begin{array}{l} E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\ E_p = -K \frac{e^2}{r} \end{array} \right\} \rightarrow E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 - K \cdot \frac{e^2}{r}$$

Como la fuerza centrípeta es igual a la fuerza eléctrica se cumple lo siguiente:

$$\begin{aligned} F_c = F_e &\rightarrow m \cdot \frac{v^2}{r} = K \frac{e^2}{r^2} \\ v^2 &= K \cdot \frac{e^2}{r \cdot m} \end{aligned}$$

Y sustituyendo en la expresión de la energía, queda lo siguiente:

$$E = -\frac{1}{2} \cdot K \cdot \frac{e^2}{r}$$

El radio de órbita se puede calcular de acuerdo con el postulado de la teoría atómica de Bohr:

$$L = m \cdot r \cdot v = n \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} \rightarrow v = n \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot r}$$

Elevando al cuadrado esta expresión de la velocidad y sustituyéndola por la expresión determinada arriba se puede despejar el radio de órbita, el cual queda:

$$\left. \begin{array}{l} v^2 = K \cdot \frac{e^2}{r \cdot m} \\ v = n \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot r} \end{array} \right\} \rightarrow r = n^2 \cdot \frac{h^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot K \cdot e^2}$$

Finalmente, sustituyendo este radio de órbita en la expresión de la energía:

$$E = -\frac{1}{2} \cdot K \cdot \frac{e^2}{n^2 \cdot \frac{h^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot K \cdot e^2}} = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot K^2 \cdot e^4}{h^2} = \frac{E_0}{n^2}$$

La energía es negativa y sólo puede tomar determinados valores, que dependerán del número cuántico n. Para n=1, la energía es la que tendría el electrón en el estado fundamental. El resto corresponderán a estados excitados.

### 3.2.2. Transiciones electrónicas.

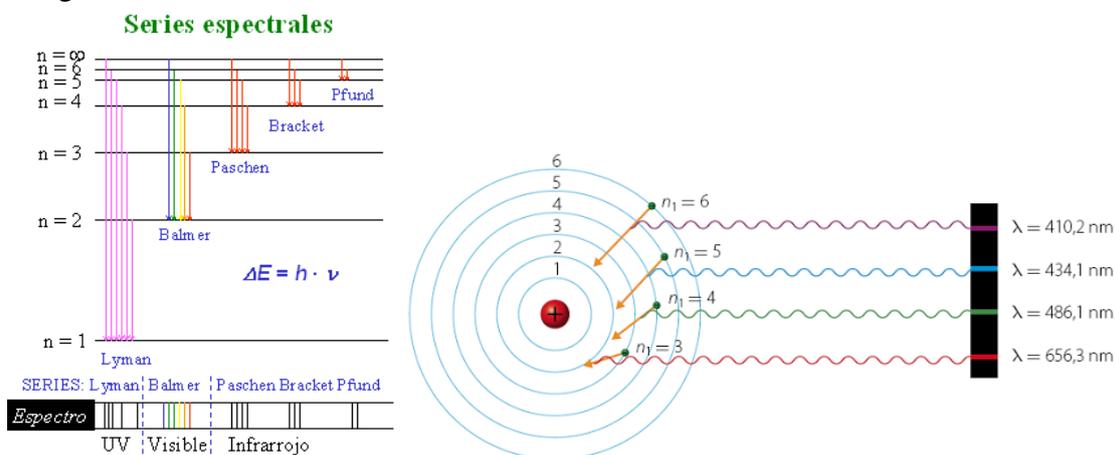
De acuerdo con la demostración anterior, a cada órbita le corresponde un nivel de energía.

Según Bohr, la emisión y absorción de la radiación sólo se produce por un salto cuántico entre niveles de energía. Como ya se ha dicho, la frecuencia de la radiación emitida corresponde a la relación:

$$h \cdot \nu = E_1 - E_2$$

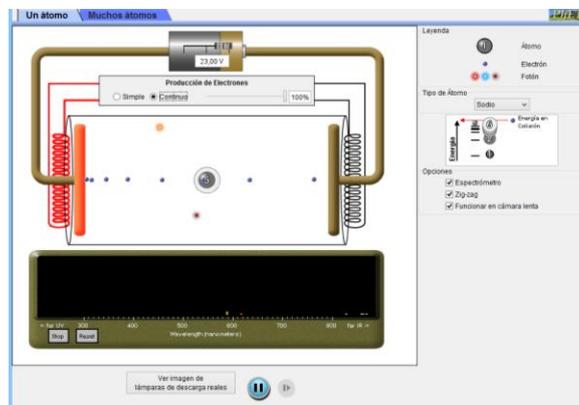
La fórmula para el espectro de emisión del hidrógeno de Rydberg, así como otras de Balmer, Paschen, etc. se puede deducir mediante esta expresión.

Para que se produzca la emisión de un fotón, el electrón debe “saltar” de un nivel de energía mayor a uno menor. Asimismo, si un electrón es excitado mediante radiación, este “saltará” de su estado fundamental o menos excitado a otro más energético.



Niveles energéticos en el modelo de Bohr y representación de los saltos que originan y la radiación emitida.

Una aplicación práctica de las transiciones electrónicas puede observar en la siguiente [simulación](#) de las lámparas de descarga



### 3.2.3. El laser.

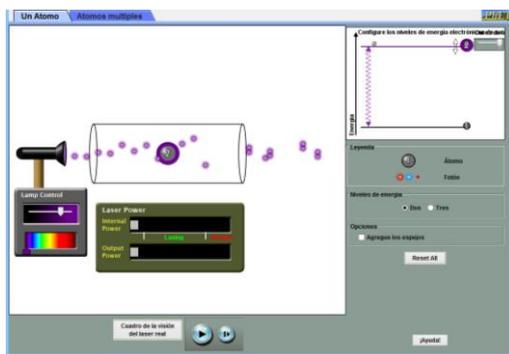
La palabra láser deriva de un acrónimo del inglés que significa Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Los láseres son dispositivos que generan y amplifican señales electromagnéticas en frecuencias de radio, audio, microondas y luz. Tal y como indica el nombre, se trata de dispositivos en los que se excita a los electrones de un medio para que adquieran un nivel superior de energía y luego se estimulan para que decaigan a un nivel inferior de energía emitiendo radiación electromagnética.

La diferencia que presentan los láseres con las lámparas normales es que en estas últimas la emisión de la radiación electromagnética se produce de forma dispersa en numerosas longitudes de onda. La suma de esas longitudes de onda en el espectro visible da como resultado una luz blanca, salvo que la propia lámpara posea un filtro.

En el caso del láser, la radiación que emite es coherente. Un conjunto de radiaciones electromagnéticas se dicen que son coherentes cuando tienen la misma fase y longitud de onda. Esto implica que la radiación emitida viaja en la misma dirección de manera muy ordenada en tiempo y espacio y emiten luz a una sola frecuencia o en un solo color. Los láseres amplifican la radiación generando un gran flujo de energía de salida, por ello los láseres son altamente direccionales y muy energéticos.

El color de la luz emitida depende de que está compuesto el medio que es excitado. Por ello existen láseres de distintos “colores” (distintas longitudes de onda). El más conocido tal vez es el Helio-Neon, usado en los punteros rojos (633nm)

El fundamento del láser se puede observar en la siguiente [simulación](#), así como en el siguiente [vídeo](#)



Las aplicaciones del láser son muy numerosas, desde el ocio, medicina, industria, hasta la investigación. Algunos de los láseres más potentes, como los del la Instalación de Ignición de Estados Unidos (National Ignition Facility, NIF), pueden disparar pulsos individuales con una potencia de salida de 500 Teravatios. Esto puede comprimir nanocristales de diamante hasta una presión de 5 billones de pascuales, unas 14 veces la presión que hay en el centro de la Tierra. Así se puede estudiar mejor el comportamiento de la materia en las entrañas de los planetas, como Júpiter. La maquinaria y los componentes electrónicos que activan el láser NIF requieren un espacio mayor que un estadio de fútbol



Instalaciones del NIF en la película Star Trek, en la oscuridad, 2013.

#### 4. Dualidad onda-corpúsculo.

##### 4.1. La doble naturaleza de la luz.

En el Tema 9 se estudiaron los fenómenos de difracción y polarización de la luz, los cuales demostraban la naturaleza ondulatoria de la luz, la cual es una onda electromagnética que se comporta de acuerdo con la teoría electromagnética de Maxwell.

Sin embargo, en este tema se han presentado evidencias experimentales que apoyan el concepto corpuscular de la luz, tales como la emisión o absorción de espectros, el efecto fotoeléctrico o el efecto Compton.

Esto pone de manifiesto la doble naturaleza de la luz: ondulatoria y corpuscular ya que, según el tipo de fenómeno, esta se manifiesta de una u otra forma. En general, la luz se comporta como una onda cuando se propaga y lo hace como un corpúsculo o partícula, denominada fotón, cuando incide con la materia, es decir, cuando se absorbe o se emite.

Las magnitudes características de una onda son la frecuencia y la longitud de onda, mientras que las magnitudes típicas de una partícula son su energía y su momento lineal. Para los fotones se cumple:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad E = m \cdot c^2 = m \cdot p$$

La combinación de la hipótesis cuántica de Planck y la ecuación de la energía transportada por fotones de Einstein permite obtener la relación entre ambas naturalezas de la luz:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$$

##### 4.2. Hipótesis de De Broglie.

Ante el doble comportamiento de onda y corpúsculo que presenta la luz, Louis de Broglie, en 1924 llegó a proponer que, de forma análoga, debería observarse un comportamiento ondulatorio en las partículas de la materia. Según la hipótesis de De Broglie, toda partícula en movimiento tiene una onda asociada cuya longitud de onda viene dada por la expresión:

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

Donde  $m$  es la masa de la partícula y  $v$  su velocidad. La confirmación de esta hipótesis llegó en 1927 cuando los científicos G. Thompson, C. Davisson y L. Germer obtuvieron un diagrama de difracción para los electrones, demostrando así su naturaleza ondulatoria. El experimento aparece reflejado en la siguiente [simulación](#).

La hipótesis de De Broglie proporciona una interpretación de la cuantización de las órbitas de los electrones del modelo de Bohr. Si el electrón lleva asociada una onda, sólo serán posibles aquellas órbitas en las que dicha onda sea estacionaria., ya que en el caso contrario la onda interfiere consigo misma y terminaría aniquilándose.



## 5. Mecánica cuántica.

Desde la propuesta de cuanto de energía propuesta por Planck, se obtuvieron notables éxitos en la explicación de determinados fenómenos bajo este nuevo concepto. La nueva teoría que vendría a sustituir a la física clásica se denominó mecánica cuántica.

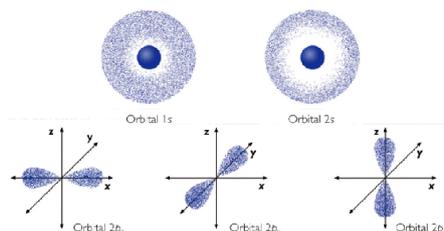
Esta se formuló bajo dos formas diferentes pero equivalentes. La primera apareció en 1925 y se llamó mecánica matricial y fue desarrollada por Heisenberg, Borg y Dirac, entre otros.

La segunda se denominó mecánica ondulatoria y estaba basada en la hipótesis de De Broglie del comportamiento dual de la materia. Se basaba principalmente en la ecuación de ondas de Schrödinger, la cual proporciona información sobre la energía de los niveles permitidos y la función de onda de los sistemas atómicos.

El significado físico de función de onda fue motivo de un profundo debate hasta que, en 1927, se aceptó la interpretación de Born:

- Cada partícula lleva asociada una función de onda, la cual contiene toda la información que es posible conocer de la partícula.
- La función de onda permite calcular la probabilidad de encontrar una partícula en una determinada región del espacio. Esto es lo que se conoce como el principio de incertidumbre de Heisenberg.

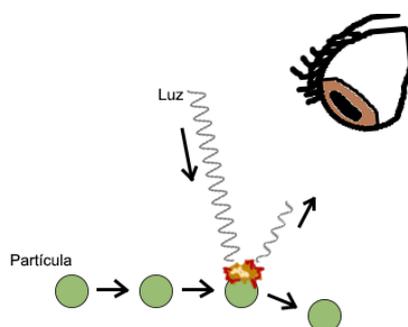
Las funciones de onda del átomo de hidrógeno son los orbitales atómicos, los cuales representan la probabilidad de encontrar un electrón en cada punto del espacio en torno al núcleo.



### 5.1. Principio de incertidumbre de Heisenberg.

El mayor contraste entre la física clásica y la mecánica cuántica lo demostró W. Heisenberg en 1927 investigando las implicaciones del proceso de medida sobre el sistema objeto de estudio. Heisenberg concluyó que en el mundo microscópico es imposible realizar una medición sin modificar la situación de partida del sistema: medir es perturbar.

Esto es debido a que si queremos observar una partícula y medir sus propiedades, es necesario “observarla” mediante un rayo de luz para que interactúe con ella y nos devuelva algún tipo de información al respecto. Pero, a escalas tan pequeñas, incluso propia la luz empuja nuestra partícula, alterando su dirección. Es decir que, aunque podamos saber dónde estaba la partícula en el instante justo en el que la luz impacta contra ella (en la siguiente imagen), no sabremos dónde estaba hace un momento ni dónde estará después, así que no podremos calcular su velocidad.



Alteración de las propiedades de la partícula al “iluminarla”. Se observa como el fotón de la radiación lumínica utilizada interactúa con la partícula, modificando sus propiedades. Fuente:

[www.cienciasofa.com](http://www.cienciasofa.com)

Heisenberg enunció su principio de incertidumbre, según el cual es imposible medir de manera exacta y simultánea la posición y la velocidad de una partícula ya que el producto de la incertidumbre en la posición por la incertidumbre en el momento lineal es siempre mayor que  $h/(4 \cdot \pi)$ :

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

De esta manera, si se aumenta la precisión en la medida de la posición empeora la medida simultánea del momento lineal.

El principio de incertidumbre se aplica a otras parejas de magnitudes, tales como la energía intercambiada en el proceso y su duración:

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

## 6. Las implicaciones de la mecánica cuántica

La principal diferencia de la Física cuántica con la Física clásica es que esta es determinista, es decir, las ecuaciones de la física clásica permiten conocer la posición, velocidad, energía de cada partícula en cualquier instante.

El paradigma cambia completamente en la mecánica cuántica, ya que los mismos principios que rigen el universo a nivel macroscópico no funcionan cuando intentamos aplicarlos a escalas subatómicas. Para ello es necesario el tratamiento estadístico. A esas escalas, nada tiene sentido: las partículas aparecen y desaparecen sin motivo alguno, el efecto puede preceder a la causa o las cosas pueden estar en dos sitios a la vez.

### 6.1. El gato de Schrodinger y la decoherencia.

El famoso experimento mental conocido como “gato de Schrödinger” propuesto por el físico austriaco Erwin Schrödinger en 1935 sirve para ejemplificar la diferencia existente entre el mundo macroscópico, donde podemos estar seguros de la situación de las cosas en cada instante, y el mundo subatómico.

Este consiste en lo siguiente: dentro de una caja hay un gato y un dispositivo que tiene exactamente un 50% de probabilidades de liberar un veneno mortal. El gato tendrá un 50% de probabilidades de haber sobrevivido y otro 50% de estar muerto. Sin embargo, mientras no abramos la caja, este se encontrará en un estado intermedio, ni vivo ni muerto, y no será hasta que abramos la caja cuando comprobemos que le ha sucedido.



Desde el punto de vista de la Física Clásica esto no tiene ningún sentido, pero este modelo es el más aceptado para explicar y estudiar el mundo subatómico. Suponiendo que el gato es una partícula subatómica, el gato se comporta como una función de onda, según la cual ambas posibilidades tienen sentido a la vez. Sin embargo, cuando se observa al gato al abrir la caja, esa partícula deja de comportarse como una onda y se comporta como una partícula, dejando de existir las dos posibilidades a la vez y decantándose aleatoriamente por una de ellas. A este fenómeno, según el cual la observación destruye la superposición de las partículas, se le denomina **decoherencia**. La decoherencia explicaría por qué los sistemas físicos macroscópicos tienen un comportamiento tan diferente de los sistemas que exhiben efectos cuánticos.

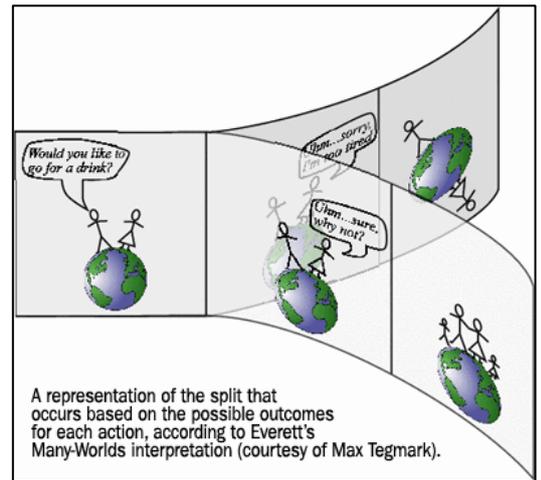
Este experimento mental del gato de Schrödinger ha sido visualizado con electrones mediante el famoso experimento de la doble rendija, diseñado por Young para demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz, con electrones (Donati et al, 1973). Dicho experimento puede ser perfectamente entendido en el siguiente [video](#).

### 6.2. La interpretación de Copenhague y los mundos paralelos.

Si nos pudiéramos a analizar el experimento del gato de Schrödinger desde el punto de vista del gato, tendríamos dos posibles interpretaciones.

La más aceptada hasta la fecha es la interpretación de Copenhague, según la cual el gato, como sistema macroscópico, viviría o moriría según el azar. Si se dispara el dispositivo la vida acabaría para el gato.

Sin embargo, aunque es sólo teórica, resulta muy sugerente la interpretación de los universos múltiples de Hugh Everett, según la cual cada vez que tiene lugar un suceso aleatorio el universo se ramifica en varias realidades. Esto quiere decir que cuando decimos que una partícula existe en todos sus estados posibles, estaría haciéndolo en realidades distintas y, al observarla, estaríamos entrando en una de estas realidades.

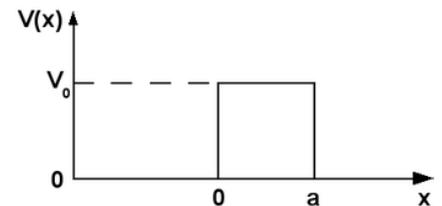


Esto quiere decir que, cada vez que una partícula ha tenido la oportunidad de adoptar varios estados diferentes, el universo se ha dividido en varias realidades, donde en cada una la partícula sigue una de las opciones disponibles. A su vez, en estos nuevos universos ocurre lo mismo, lo que da lugar a otra rama de universos.

Teniendo en cuenta el número desorbitado de interacciones entre partículas que ocurren cada segundo, la cantidad inimaginable de partículas que existen y los casi 14.000 millones de años que han pasado desde entonces, podría considerarse que el número de realidades paralelas existentes es infinito.

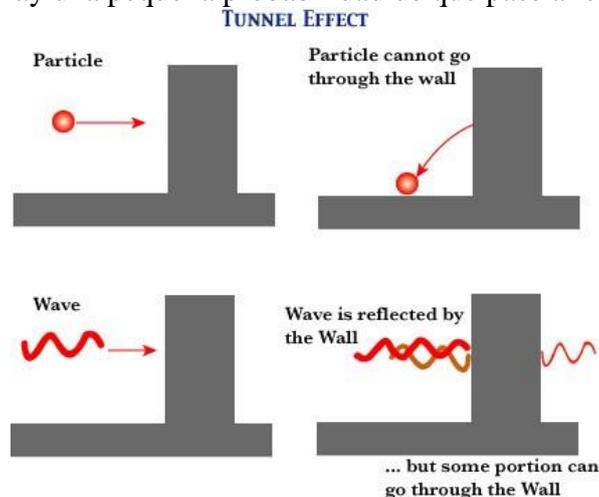
6.3.El efecto túnel.

De acuerdo con la Física clásica, un sistemas que quieren atravesar una barrera energética necesitan adquirir una energía igual o mayor que la que desea superar. En la siguiente figura se representa la barrera de energía potencial que una partícula necesita superar para realizar algún fenómeno:



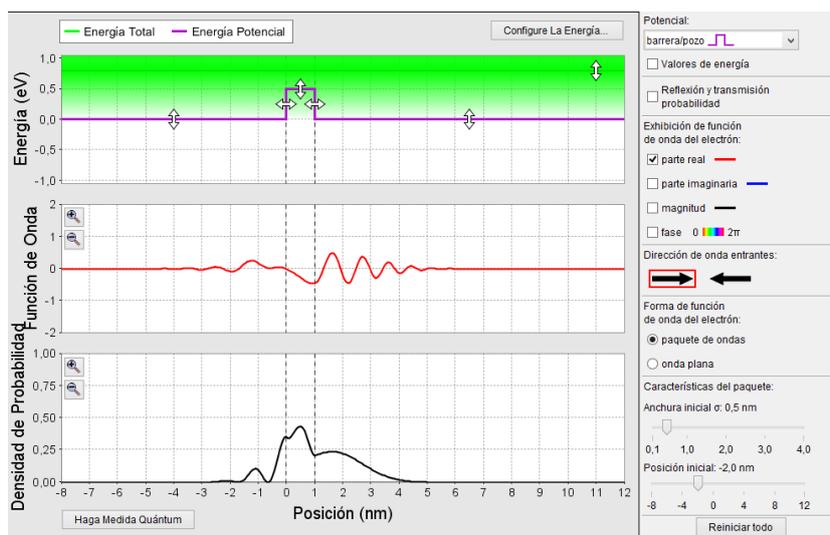
Si tenemos la partícula tiene energía (cinética) mayor que  $V_0$ , entonces se podrá mover sin problema en todo el eje X. Pero, si por el contrario, la partícula tiene una energía menor no podrá superarla. Sería como intentar superar un edificio sin conseguir el impulso necesario.

Sin embargo, Cuando una partícula subatómica se encuentra con una barrera de potencial resulta que, aunque dicha partícula no tenga la energía suficiente como para “superar” la barrera hay una pequeña probabilidad de que pase al otro lado.



Fuente: [www.cuentos-cuanticos.com](http://www.cuentos-cuanticos.com)

Como ya se ha comentado, las partículas se describen como funciones de onda en la mecánica cuántica. Cuando la partícula descrita por la función de onda se encuentra con la barrera de potencial, la función de onda inicial se parte en dos contribuciones: Parte reflejada + Parte transmitida. La parte transmitida tiene una amplitud menor. La amplitud está relacionada con el cuadrado de la función de onda, y eso es la probabilidad de encontrar la partícula en una determinada posición. Por lo tanto, como se ve en la figura, aunque la probabilidad de encontrar a la partícula que ha superado la barrera es pequeña, existe dicha posibilidad. Menor será la probabilidad cuanto mayor sea la anchura de la barrera y menor el tamaño de la partícula.



El efecto túnel se puede observar en la siguiente [simulación](#)

Esas son dos magníficas razones para que podamos decir que nunca viviremos una experiencia de efecto túnel. Primero porque somos grandes y con mucha masa y segundo porque las barreras de potencial a las que nos enfrentamos suelen ser grandes y anchas. Vamos que es mejor dar la vuelta, que esperar atravesar una pared. ([www.cuentos-cuánticos.com](http://www.cuentos-cuánticos.com))

## Bibliografía

- Física 2º bachillerato. Editorial Anaya, 2009. ISBN: 978-84-667-8263-0.
- Física 2º bachillerato. Editorial McGraw Hill, 2009. ISBN: 978-84-481-7027-1.
- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. <http://acer.forestales.upm.es/>
- Departamento de física y química del IES Leonardo da Vinci. <http://intercentros.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica>.
- Laplace. Departamento de Física Aplicada III. Universidad de Sevilla. [http://laplace.us.es/wiki/index.php/P%C3%A1gina\\_Principal](http://laplace.us.es/wiki/index.php/P%C3%A1gina_Principal).
- Blog Ciencia de sofá: [www.cienciadesofa.com](http://www.cienciadesofa.com).
- El Universo en una taza de café. Jordi Pereyra. Autor del blog Ciencia de Sofá.
- Donati, O, Missiroli, G F, Pozzi, G (1973). An Experiment on Electron Interference. American Journal of Physics 41:639–644.
- Blog cuentos cuánticos: [www.cuentos-cuanticos.com](http://www.cuentos-cuanticos.com)
- PhET Interactive Simulations. Simulaciones de la Universidad de Colorado: <https://phet.colorado.edu/es/simulations/category/physics>.
- Blog planeta curioso. <http://www.blogplanetacurioso.com.br/>
- Blog el físico loco: [www.elfisicoloco.blogspot.com.es](http://www.elfisicoloco.blogspot.com.es).

- Página web [www.fisicalab.com](http://www.fisicalab.com).
- Blog de Mercedes González Bas. <https://mgmdenia.wordpress.com>.
- Página web históptica. <http://histoptica.com/>
- Página web centro de cirugía ocular. <http://centrocirurgiaocular.com/>
- Simulaciones Walter Fendt. <http://www.walter-fendt.de>.