**FÍSICA DEL SIGLO XX: ELEMENTOS DE FÍSICA CUÁNTICA**

A finales del siglo XIX, se pensaba que la Física era capaz de explicar todos los fenómenos conocidos. La Mecánica de Newton, el Electromagnetismo de Maxwell, los estudios sobre el calor de Gibbs, Carnot…formaban un sistema completo.

Se tenía una imagen del Universo que parecía concluyente: las leyes de Newton rigen el movimiento de los cuerpos, la luz tiene naturaleza ondulatoria y la materia está formada por pequeñas partículas, los átomos. Pronto se vio que el Universo era mucho más complejo.

En los últimos años del siglo XIX y primeros del XX, se producen una serie de descubrimientos que ponen de manifiesto la insuficiencia de las leyes de la Física clásica. En el año 1900 Max Planck formuló los principios básicos de la Mecánica cuántica, y en 1905 Albert Einstein publicó su teoría especial de la relatividad acerca del movimiento en los sistemas inerciales. En 1916 amplió la teoría a los sistemas no inerciales e introdujo la gravitación como una consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo, lo que dio lugar a la teoría de la Relatividad General.

Las leyes de Newton iniciaron la primera revolución científica. La teoría de la relatividad y la mecánica cuántica han producido una segunda revolución de la que han surgido nuevas leyes, más generales y profundas.

1. **PROBLEMAS PRECURSORES DE LA FÍSICA CUÁNTICA**

Materia y energía, los dos conceptos clave para entender las transformaciones que tienen lugar a nuestro alrededor, sufrían importantes cambios conceptuales a principios del siglo XX. Si ya venía admitiéndose que la materia estaba cuantizada en forma de átomos, ahora empezaba a considerarse que la energía también lo estaba. Einstein, relaciona ambas magnitudes en su famosa ecuación E=mc2, por lo que la cuantización de ambas magnitudes parecía tener sentido.

Tres hechos fundamentales obligan a revisar las leyes de la Mecánica clásica, avalan la idea de **cuanto de energía** y propician el nacimiento de la nueva Mecánica cuántica:

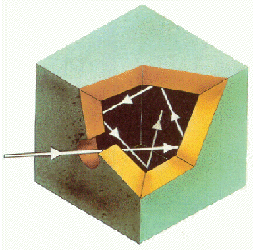
* La radiación térmica que se conoce como el problema del cuerpo negro y la correspondiente hipótesis de Planck para explicarla.
* El efecto fotoeléctrico que explica Einstein.
* Los espectros discontinuos de los átomos y la explicación de Bohr.

**A.1. LA RADIACIÓN DEL CUERPO Y LA HIPÓTESIS DE PLANCK.**

Nada más encender una chimenea, la leña mantiene su aspecto y color durante un tiempo; sin embargo, si acercásemos las manos, notaríamos ya el calor. Esta radiación invisible que percibimos en forma de calor es radiación infrarroja. A medida que la temperatura aumenta, la leña empieza a ponerse al rojo, es decir, ahora, además de la radiación infrarroja, la leña emite radiación correspondiente a las frecuencias más bajas del espectro visible. Si la temperatura sigue aumentando, llegará un momento en el que las brasas emitirán luz de tonos amarillos o casi blanco.

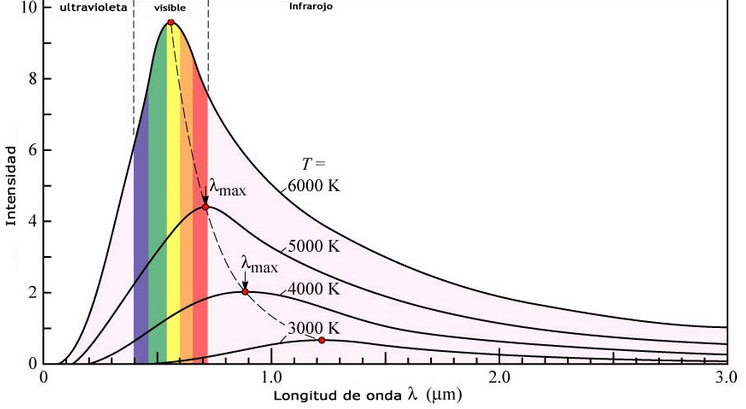
De lo anterior se desprende claramente que la frecuencia de la radiación que emite un cuerpo caliente aumenta con la temperatura. Sin embargo, la **potencia irradiada** (energía emitida por unidad de tiempo) depende de la composición del material. Pero, ¿por qué es así? ¿Por qué emiten menos luz a frecuencias altas que a frecuencias bajas? ¿Aumenta la energía térmica al aumentarse la frecuencia.

A finales del siglo XIX, **Gustav Kirchhoff** propuso el **modelo del cuerpo negro** para estudiar la radiación térmica emitida por los cuerpos. Según Kirchhoff, cuando un cuerpo está en equilibrio térmico, la energía que absorbe es igual a la que emite. En consecuencia un buen absorbente es también un buen emisor.

**Se conoce como cuerpo negro aquel que es capaz de absorber todas las radiaciones que llegan a él y como consecuencia de lo anterior, emitirá todas las longitudes de onda.**

Aunque no se conoce ningún cuerpo que se comporte rigurosamente como “negro”, se puede considerar como tal cualquier material resistente al calor que contenga una cavidad, con paredes rugosas y muy absorbentes, comunicada con el exterior por un pequeño orificio. La radiación que penetre por el orificio quedará absorbida en la cavidad, bien directamente, bien después de experimentar varias reflexiones en las paredes.

El concepto de cuerpo negro, es un concepto ideal. En un cuerpo negro, la radiación emitida solo depende de su temperatura, no de su composición.



Las gráficas corresponden a lo que se llama la **intensidad espectral**, donde se representa la intensidad (cantidad de energía, por unidad de tiempo y de superficie), radiada por un cuerpo negro en función de la longitud de onda para distintas temperaturas.

Como se desprende de la imagen anterior, la intensidad espectral cumple las siguientes leyes experimentales:

**Ley de Wien**: La longitud de onda, para la cual la intensidad emitida es máxima, disminuye al aumentar la temperatura:

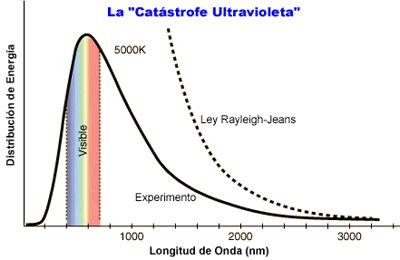
La ley de Wien permite determinar la temperatura de la superficie de las estrellas. Cuanto mayor es la temperatura, menor es la longitud de onda correspondiente al máximo de la radiación emitida.

**Ley de Stefan-Boltzmann:**  La energía total emitida por un cuerpo negro, por unidad de tiempo y de superficie, o intensidad de la radiación (área bajo la gráfica) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta:

Siendo σ la constante de Boltmann:

El que la emisión de un cuerpo negro no dependiera de la naturaleza del material, parecía dar a entender que nos encontrábamos ante una ley universal. Este hecho atrajo la atención de numerosos físicos que se empeñaron en encontrar un modelo que reprodujera los resultados experimentales.

Haciendo uso de la termodinámica y de la electrodinámica, **Rayleigh y Jeans** realizaron los cálculos correspondientes a partir de las dos teorías clásicas anteriores.

La predicción clásica de Rayleigh y Jeans conduce a que la intensidad irradiada es proporcional a la temperatura e inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda:

Este resultado se ajustaba para los valores altos de la longitud de onda, pero conducía a una conclusión inconsistente: la potencia irradiada tendería a infinito para longitudes de onda pequeñas (del rango del ultavioleta). Este resultado es denominado **catástrofe ultravioleta.**

**HIPÓTESIS DE PLANCK**

Como los resultados experimentales no podían explicarse mediante la teoría clásica de la radiación, era necesario buscar una nueva interpretación teórica. Fue Max Plank quien en 1900, sentó las bases de una nueva teoría: la teoría cuántica.

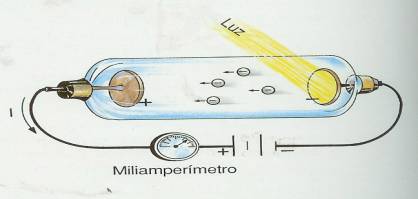
Planck afirma que la energía emitida por un cuerpo negro **no es continua, sino discontinua**, en forma de **cuantos o paquetes de energía. La energía emitida por los osciladores atómicos no puede tener cualquier valor, sino que debe ser proporcional a la frecuencia del oscilador.**

La energía de un cuanto o **fotón** viene dada por: , donde υ es la frecuencia de la radiación y h es la constante de Planck;

Basándose en la hipótesis anterior, e introduciendo una hipótesis complementaria: **el número de osciladores de baja frecuencia es muy superior al número de osciladores de alta frecuencia**, dedujo una ecuación para la radiación térmica, **ley de radiación de Planck**, cuya gráfica reproduce con exactitud los resultados experimentales.

De la hipótesis de Planck se deduce que, al igual que la materia está cuantizada en forma de átomos, la energía lo está en forma de cuantos, y del mismo modo que los átomos de distintos elementos tienen distintos tamaños, **los cuantos o fotones[[1]](#footnote-1) de distintas frecuencias tienen distintos tamaños energéticos.**

**A.2. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO Y LA EXPLICACIÓN DE EINSTEIN**

Se conoce con el nombre de efecto fotoeléctrico a **la emisión de electrones (fotoelectrones) por las superficies metálicas cuando se iluminan con luz de frecuencia adecuada.** En algunos metales alcalinos el efecto se presenta ya con luz visible; en los demás metales es necesaria la luz ultravioleta.

Fue observado por primera vez por Hertz, en 1887, al comprobar que la descarga entre dos electrodos se facilitaba si se iluminaba el dispositivo con luz ultravioleta.

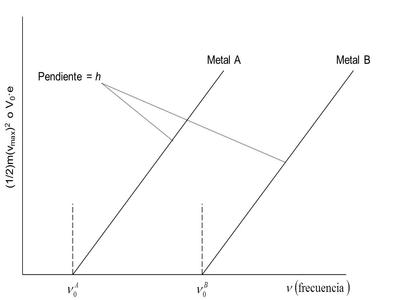
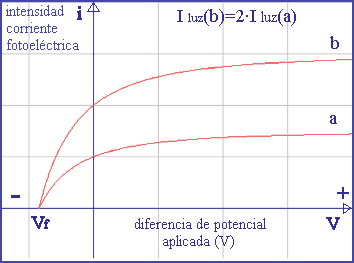
Un dispositivo experimental que permite observar este efecto se muestra en la figura:

Como el vidrio no deja pasar la radiación ultravioleta, el recipiente es de cuarzo, o de vidrio con una ventana de cuarzo, por ser este transparente a la luz UV. Dentro se hace un vacío elevado.

Entre el ánodo (positivo) y el cátodo (negativo) se establece una diferencia de potencial V, y al iluminar el cátodo se produce la emisión de fotoelectrones. La intensidad de la corriente fotoelectrónica se mide con un galvanómetro o miliamperímetro. En las condiciones anteriores, los electrones son acelerados hacia el ánodo. Si invertimos la polaridad, los electrones se frenan.

Al representar gráficamente la intensidad de la corriente fotoeléctrica i en función de la diferencia de potencial, V, para diferentes intensidades luminosas I, se obtiene lo observado en la imagen A

Además, los electrones debían ser emitidos con una cierta energía cinética que les permitía llegar a la otra placa. Cuando V se hace negativo, la corriente fotoeléctrica decrece bruscamente y se anula para un valor **Vf (potencial de frenado)**, que es independiente de la intensidad de la luz incidente pero que aumenta linealmente con la frecuencia de la radiación incidente (figura B). El potencial de frenado representa la diferencia de potencial necesaria para anular la corriente fotoeléctrica, es decir, para frenar los electrones más rápidos, de máxima energía cinética. Se cumple:

****

**Figura A. Figura B**

De las gráficas anteriores obtenemos las siguientes conclusiones experimentales:

1. Para cada metal existe una frecuencia mínima (**frecuencia umbral**) por debajo de la cual no se produce efecto fotoeléctrico, independientemente de la intensidad de la radiación incidente.
2. La emisión de los electrones es instantánea.
3. Sólo cuando la frecuencia de la radiación incidente es superior a la frecuencia umbral, la intensidad de la corriente fotoelectrónica es proporcional a la intensidad de la radiación incidente. Es decir, el aumento de la intensidad de la luz incidente, produce un aumento en el número de electrones emitidos, pero la energía con la que son emitidos, no cambia.
4. La energía cinética de los electrones, aumenta con la frecuencia de la luz incidente pero es independiente de la intensidad.

**Predicciones de la teoría ondulatoria clásica de la luz:**

Estas observaciones estaban en contradicción con las leyes clásicas, según las cuales, el efecto fotoeléctrico debería producirse para cualquier frecuencia de la radiación siempre que la intensidad[[2]](#footnote-2) de la radiación incidente fuera suficientemente grande. Además según la teoría ondulatoria clásica, la energía cinética de los electrones debería aumentar con la intensidad, cosa que no ocurre. La energía cinética solo aumenta con la frecuencia de la radiación incidente.

Otro hecho adicional es que, incluso para ondas muy intensas, a cada electrón le corresponde, por unidad de tiempo, una cantidad de energía tan insignificante, que debería existir un tiempo de retardo antes de empezar la emisión electrónica.

**Teoría de Einstein**

En 1905, Einstein explicó el efecto fotoeléctrico aplicando a la luz las ideas de Planck sobre la radiación térmica. Einstein no limitó el cuanto de energía a la explicación de la emisión y absorción de la luz por parte de los osciladores atómicos, sino que lo extendió a la propia naturaleza y propagación de la luz. **Einstein volvió a introducir la naturaleza corpuscular de la energía, en la propagación de la luz y su interacción con la materia.**

Según él, la energía luminosa no se reparte de un modo uniforme en todos los puntos del frente de ondas, sino que se encuentra concentrada en cuantos de energía o fotones, cuya energía viene dada por la ecuación de Planck: . Así, según Einstein, la luz ordinaria estaría formada por una infinidad de fotones de diferentes tamaños energéticos que se propagan en todas las direcciones a la velocidad de la luz. De este modo, al interaccionar con la luz, “**los osciladores atómicos absorben aquellos fotones que les son permitidos”.**

Según Einstein, un fotón de luz puede tener energía suficiente para arrancar un electrón de un átomo. El electrón transforma dicha energía en el trabajo necesario (**trabajo de extracción**) que debe efectuar contra la fuerza electrostática que lo liga al resto del átomo. Dado que los átomos de distintos metales son diferentes, esa energía será también distinta para cada metal, lo que explica la especificidad de la frecuencia umbral para cada metal.

Así pues, el **trabajo de extracción necesario para arrancar un electrón de una superficie metálica es igual a la constante de Planck multiplicado por la frecuencia umbral:**

Sin embargo, la energía de los fotones de luz incidentes puede ser mayor que el trabajo de extracción. En este caso, la energía restante es la energía cinética que adquiere el electrón una vez extraído de la superficie metálica. Es decir, haciendo un balance energético:

; y

* Si la energía del fotón incidente es menor que el trabajo de extracción, no se produce efecto fotoeléctrico.
* Si la energía del fotón es igual al trabajo de extracción, la energía cinética del electrón es nula.
* Si la energía del fotón es mayor que el trabajo de extracción, el electrón escapa del metal con una energía cinética que vendrá dada por:

Al aumentar la intensidad de la radiación incidente, aumenta el número de fotones que llega a la superficie del metal, y por tanto aumenta el número de electrones emitidos. Sin embargo, como no varía la energía de los fotones, tampoco lo hace la energía cinética con la que los electrones son emitidos.

En 1916, **Robert Millikan** proporcionó una demostración experimental de la teoría fotónica de Einstein y Planck al hallar el valor de la constante de Planck midiendo en un mismo metal los potenciales de frenado necesarios para distintas radiaciones incidentes de frecuencias conocidas. El valor que obtuvo concordaba con el que Planck había usado en su explicación de la radiación del cuerpo negro. Esta concordancia por dos métodos tan distintos no podía ser casualidad por lo que la idea de fotón se acepta totalmente.

**A.3. ESPECTROS ATÓMICOS: MODELO DE BOHR.**  (Ver archivo en la página web) No entra en selectividad.

**B. NACIMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA**

A principios de los años veinte del siglo pasado, la física debía enfrentarse a un gran dilema:

* En los fenómenos de difracción, interferencia y polarización, la luz muestra una naturaleza ondulatoria.
* En los fenómenos de emisión del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y la formación de espectros, entre otros, la luz muestra una naturaleza inequívocamente corpuscular (fotónica).

Es evidente que con el cúmulo de evidencias experimentales que había a favor de cada una de las dos opciones, resultaba descabellado renunciar a una de las dos opciones.

Como en los procesos dialécticos, de la tesis y la antítesis, habría de surgir la síntesis. Esto tuvo lugar en 1924 de la mano de Louis de Broglie. A partir de aquí se estructura una nueva mecánica con tres puntos de partida complementarios:

* La hipótesis de De Broglie.
* El principio de indeterminación de Heisemberg.
* La función de probabilidad de Schrödinger.

**B.1. HIPÓTESIS DE DE BROGLIE: DUALIDAD ONDA PARTÍCULA**

En 1924, Louis De Broglie extendió el carácter dual de la luz a los electrones, protones, átomos, moléculas, y en general a todas las partículas materiales.

Según la hipótesis de Planck y la teoría de la relatividad se cumple:

Por lo tanto: .

Ya Einstein en 1919 había sugerido que los fotones viajaban a la velocidad de la luz con una cantidad de movimiento

De Broglie extendió este resultado a toda partícula de masa m y velocidad v, asociándole una onda. Pensó que si la luz se comportaba como onda y como partícula, también la materia debía poseer este carácter dual.

**Hipótesis de De Broglie:** Cada partícula en movimiento lleva asociada una onda, cuya longitud de onda viene dada por la ecuación: siendo p=mv, el momento lineal de la partícula en movimiento. Cuanto mayor es el momento lineal, menor es la longitud de onda. Para los cuerpos ordinarios, la longitud de onda es tan pequeña que no se observa la naturaleza ondulatoria. En cambio, cuando se trata de cuerpos muy pequeños, como electrones, neutrones, etc, la longitud de onda es apreciable.

* Para un electrón no relativista que adquiere una energía cinética bajo la acción de una diferencia de potencial V se cumple:

**Comprobación experimental de la hipótesis de De Broglie: experimento de Davisson y Germer.**

Tres años después de la formulación de la hipótesis de De Broglie, Davisson y Germer, estudiando la dispersión de electrones, obtuvieron la difracción de los electrones a través de un cristal de níquel.

**B.2. PRINCIPIO DE INDETERMINACIÓN DE HEISENBERG**

En 1927, Werner Heisenberg enunció el principio de indeterminación, o incertidumbre, que tendrá profundas implicaciones en la concepción del electrón. Este principio junto a la formulación ondulatoria de Schrödinger, son las bases de la nueva Mecánica Cuántica.

El principio afirma que **existen pares de propiedades (magnitudes conjugadas) del electrón que no pueden determinarse simultáneamente con precisión.** Este principio suele enunciarse en función de la posición y la cantidad de movimiento del electrón.

Un astrónomo que ha determinado la posición y la velocidad del satélite Europa del planeta Júpiter puede predecir con gran exactitud cuál será su posición y su velocidad 20 años después. Sin embargo, no es posible hacer lo mismo con el electrón de un átomo, puesto que no puedo medir su posición y su velocidad con precisión de forma simultánea. Esta incapacidad no se debe a las limitaciones técnicas que puedan tener los aparatos de medida, sino a un principio fundamental de la naturaleza: el principio de indeterminación.

El enunciado más frecuente del principio de indeterminación sería:

**No es posible determinar simultáneamente, con precisión, la posición y la cantidad de movimiento de una partícula.**

O de manera más precisa:

**El productos de las indeterminaciones de la medida de la posición en un instante, y de la cantidad de movimiento en ese mismo instante, es, como mínimo, igual a la constante de Planck dividida por 2π, de modo que cuanto mayor sea la precisión en la medida de la posición, mayor será la imprecisión en la cantidad de movimiento y viceversa:** .

es la indeterminación de la medida de la posición, y , la indeterminación en la medida de la cantidad de movimiento de la partícula.

De forma general, según el principio de indeterminación, resulta imposible determinar simultáneamente, de modo preciso, dos magnitudes **complementarias** de un sistema. Son magnitudes complementarias aquellas cuyo producto tiene las dimensiones de la constante de Planck. Son magnitudes complementarias, la posición y la cantidad de movimiento, la energía y el tiempo…

Si nos referimos a las magnitudes complementarias energía y tiempo, el principio de incertidumbre puede enunciarse: Si es la indeterminación en la medición de la energía involucrada en un proceso y , es la indeterminación en la medida del tiempo transcurrido durante ese proceso:

El principio de incertidumbre es una consecuencia de la naturaleza dual de la radiación y la materia. Podemos ilustrarlo de la siguiente manera: Supongamos que deseamos determinar la posición de un electrón. Un modo de hacerlo es enfocar a dicho electrón con un fotón y medir la dispersión del fotón. Si empleamos luz de longitud de onda corta, podemos determinar la posición del electrón de un modo bastante preciso, pues no se produciría difracción, pero los fotones de onda corta, tienen alta frecuencia y por lo tanto, alta energía, y transferirán parte de su cantidad de movimiento al electrón, alterando su cantidad de movimiento.

Si empleamos luz de onda larga, la cantidad de movimiento del electrón no cambia, pero en cambio aparecerán efectos de difracción, dejando indeterminada su posición.

Todos los objetos, independientemente de su tamaño, están regidos por el principio de incertidumbre, lo que significa que su posición y velocidad se pueden determinar solo como probabilidades. En Mecánica clásica, sin embargo, las cantidades involucradas son tan grandes comparadas con la constante de Planck, que no es significativo.

*El origen del universo se intenta explicar mediante distintas teorías. Una de las más aceptadas es que el big-bang surge de una fluctuación infinitesimal (muy pequeña) del tiempo que, de acuerdo con el principio de indeterminación, permitió una variación tan grande de energía, que explica la inmensa cantidad de energía del Universo. Posteriormente, y antes de que desapareciera esa fluctuación, la energía explosionó, y la separación de la materia, al crearse el espacio-tiempo, impidió que se volviera al estado inicial.*

Las consecuencias del principio de indeterminación son enormes. En Física clásica, todas las magnitudes que definen a un sistema, pueden determinarse simultáneamente con cualquier grado de precisión, que dependerá solo de los aparatos de medida. Esto no es así en Física Cuántica. La imposibilidad de determinar con precisión, velocidad y posición de un electrón, deja sin sentido el concepto de trayectoria y por lo tanto la idea de electrones en órbita alrededor del núcleo. En Mecánica clásica, el concepto de órbita se sustituye por el de orbital: zonas en las que la probabilidad de encontrar al electrón es elevada.

**B.3. MECÁNICA CUÁNTICA: FUNCIÓN DE ONDA Y PROBABILIDAD**

En 1926, **Erwin Schrödinger**, basándose en el concepto de dualidad onda-partícula enunciado por De Broglie, publica un artículo en el que formula la **mecánica ondulatoria.** La base de dicha mecánica, es la ecuación que lleva su nombre, que es aplicable al movimiento de las partículas en cualquier campo de fuerzas, y cuando se aplica al átomo de hidrógeno, confirma la teoría de Bohr. La mecánica ondulatoria exige un cambio de mentalidad, “de paradigma”, y sus cálculos matemáticos son muy complejos.

La Física clásica se fundamenta en dos principios: el determinismo y la causalidad. Según el principio de determinismo, es posible determinar la evolución de cualquier fenómeno a partir de ciertas leyes. De acuerdo al principio de causalidad, todo fenómeno se debe a una causa concreta anterior al efecto.

La Física Cuántica introduce el concepto de **probabilidad**, porque es imposible conocer con exactitud el estado de un sistema (principio de indeterminación). Sustituye el determinismo por un tratamiento probabilístico, y el principio de causalidad, por el azar. Aunque la Mecánica Cuántica discrepa con nuestro sentido común, y sus cálculos son difíciles y tediosos, sus predicciones concuerdan a la perfección con los hechos observados.

Basándose en la hipótesis de De Broglie y considerando que el movimiento del electrón en el átomo, es análogo a un sistema de ondas estacionarias, Schrödinger, llegó a la siguiente ecuación de onda para el átomo de hidrógeno:

Ψ es la llamada **función de onda** y es función de las coordenadas cartesianas x,y,z; E es la energía total del electrón y V la energía potencial.

Puesto que el electrón en su movimiento asociada una onda, Schrödinger desarrolló la posibilidad de describir estos sistemas mediante ecuaciones similares a las que se emplean para describir los movimientos ondulatorios. El significado físico de Ψ no se aclaró hasta después, cuando **Max Born** sugirió que lo que tenía significado físico real no era la propia función de onda, sino su cuadrado. Así corresponde a la **densidad de probabilidad,**  de forma que representa la probabilidad de encontrar a un electrón en un elemento dV. La densidad de probabilidad es siempre positiva. Un valor grande de indica que existe una gran probabilidad de la presencia del electrón en el volumen dV, para valores pequeños, esta probabilidad es menor.

En el modelo atómico de Bohr, el electrón se mueve alrededor del núcleo en una órbita determinada. En la teoría cuántica, un electrón no está limitado a una órbita, sino que es libre para moverse en las tres dimensiones, en una nube de probabilidad que tiene una determinada forma en el espacio.

Al resolver la ecuación de Schrödinger aparecen los números cuánticos n, l, y ml, que ya habían sido introducidos por Bohr y las posteriores modificaciones de Sommerfeld y Zeeman. El número cuántico de spin (ms) aparece en un tratamiento posterior de Dirac que combina la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad..

A la función de onda que describe el comportamiento del electrón y que depende de los números n, l y ml  se le llama **orbital**. Los números cuánticos n, l y ml determinan respectivamente, el nivel de energía, la forma del orbital y la orientación de dicho orbital en el espacio. El principio de exclusión de **Pauli[[3]](#footnote-3)** establece que en cada orbital el electrón se puede encontrar en dos estados distintos según sea el valor del número cuántico de espín.

1. Un fotón es una partícula que se mueve a la velocidad de la luz y cuya masa en reposo es cero. [↑](#footnote-ref-1)
2. La intensidad de una onda en un punto es proporcional al cuadrado de la amplitud, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco. [↑](#footnote-ref-2)
3. En un átomo no puede haber dos electrones con los cuatro números cuánticos iguales. [↑](#footnote-ref-3)