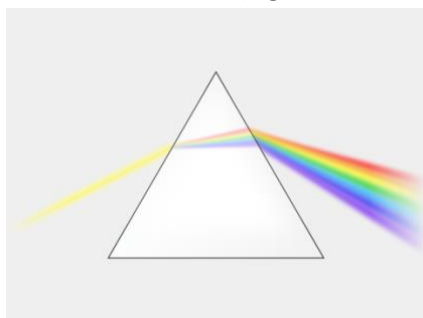


## Física Cuántica:

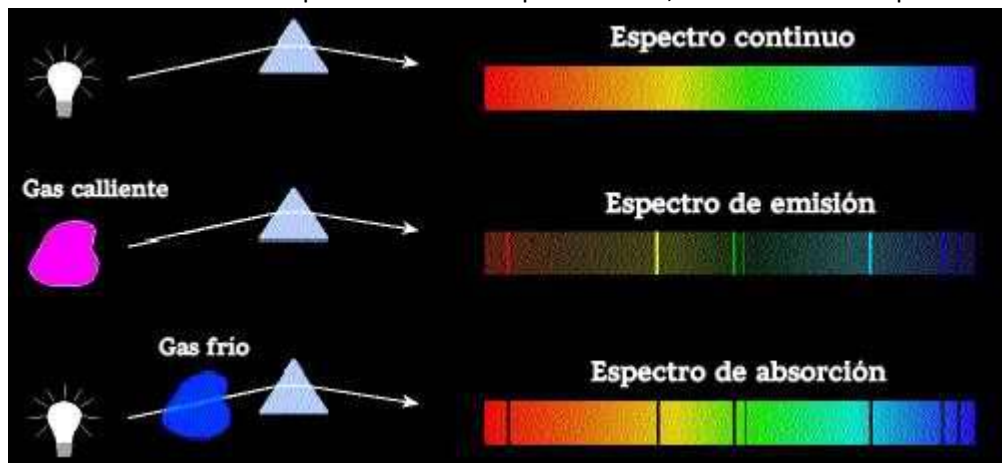
Un espectro es el resultado del análisis de la radiación que emiten los átomos cuando son excitados de alguna manera. Por ejemplo, los átomos que conforman un gas en un tubo cuando conectamos un extremo a diferente potencial (tensión) que el otro de modo que haya una diferencia energética generada, son excitados por esa energía. Los átomos reaccionan emitiendo radiación, en particular luz, o radiación visible, que se puede analizar. El análisis de la luz que proviene de la excitación de átomos es lo que constituye el estudio de los espectros. Newton fue quien comenzó a estudiarlos con un poco más de detalle y se dio cuenta de que la luz del sol, que a priori es ciertamente bastante blanca, cuando atraviesa un prisma, un objeto diseñado de manera apropiada, genera un espectro, una separación de sus componentes de diferentes colores (Figura 1). Este proceso se debe a que cada color que constituye la luz



blanca, que es la mezcla que recibimos del sol, se comporta de manera diferente durante el pasaje a través del prisma, el índice de refracción del prisma es diferente para cada color. Un componente se dispersa más, otro menos, etc. El que se dispersa menos es el rojo, un poco más lo hace el naranja, un poco más el amarillo y el componente que sufre mayor dispersión es el violeta. Tenemos el espectro que vemos en el arco iris producido

en ese caso por las gotas de lluvia que actúan como prismas. La observación abre la posibilidad de hacer una identificación, un registro de elementos. En efecto, a partir de su uso sistemático podemos hacer un catastro observando la “impresión digital”, de cada uno de los átomos ya que cada tipo de átomo produce su propio espectro.

Inversamente, si la luz blanca antes de llegar al prisma pasa a través de un gas de cualquier elemento, el espectro que presentaba originalmente todos los colores: rojo, naranja, amarillo, etc. Presenta líneas oscuras en algunas posiciones. Hay colores que desaparecen, lo que ocurre es que a ese gas le “gusta” alguna radiación de un color dado y la absorbe. Pero lo que absorbe un elemento es diferente de lo que absorbe otro. Pero eso las imágenes del espectro de la luz blanca que pasa a través de diferentes elementos, tienen diferentes faltantes. Esos faltantes nos informan de que elemento se trata. Entonces, podemos determinar qué elementos se están interponiendo en el camino del haz con solo conocer que líneas oscuras que aparecen, que colores particulares desaparecen. Esa es la impresión digital del elemento. El elemento tiene ciertamente comportamiento complementario, en el sentido que si se lo excita



efectivamente produce exactamente las mismas líneas y la misma impresión digital pero ahora brillante. Por eso también podemos hacer un registro a partir de la emisión, a diferencia del caso anterior de absorción. (Figura 2)

El análisis de estos espectros de la radiación de luz o radiación electromagnética en general, condujo a la necesidad de entender mejor el proceso de la radiación. En principio a la radiación se la define en términos ondulatorios, al hablar por ejemplo de las ondas de luz, porque muchos de los efectos de la luz se comprenden si ese fenómeno se comporta como una onda. Es decir, es de carácter periódico en el tiempo y en el espacio. Allí hay una periodicidad de máximos y mínimos que se reitera en el tiempo y tiene una reiteración espacial. Sin embargo, para entender otros fenómenos como la radiación llamada de cuerpo negro, es decir, como emite energía un cuerpo que se calienta, se necesita explicación de la hipótesis cuántica:

La hipótesis cuántica fue formulada por el físico alemán Max Planck a finales del año 1900. Según esta, la energía emitida por un sistema mecánico oscilante solo puede tener un conjunto discreto de valores, múltiplos de una cantidad mínima, el cuanto, de valor  $E = h\nu$ , donde  $\nu$  es la frecuencia de oscilación, y  $h$ , una constante, llamada de Planck, cuyo valor es  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J/seg}$ . Al ser un valor tan pequeño, está claro que la hipótesis de Planck no tiene efectos prácticos en la vida cotidiana. Es un número del orden de seis dividido por un uno seguido de treinta y cuatro ceros, en unidades de energía por tiempo.

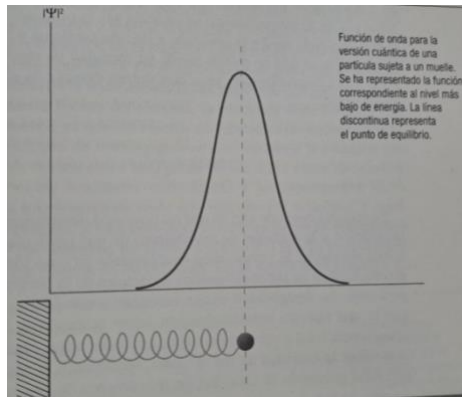
Esta serie de valores recibe el nombre de niveles de energía del sistema. En su formulación inicial, la hipótesis de Planck se aplicaba a sistemas oscilantes con una frecuencia fija; un resorte, por ejemplo. En su formulación final, la Mecánica Cuántica proporciona las herramientas matemáticas para calcular los niveles de energía permitidos en cualquier sistema cuántico. En el caso de sistemas ligados, por ejemplo, un electrón y un protón que forman un átomo de hidrógeno, estos niveles de energía permitidos forman un conjunto discreto. Heisenberg y Schrödinger, entre 1924 y 1926, propusieron dos formulaciones diferentes, pero equivalentes, de la Mecánica Cuántica. Ambas formulaciones permiten, en principio, calcular los niveles de energía de un sistema mecánico microscópico cualquiera. En la Mecánica Clásica todas las energías son posibles: los valores de energía permitidos forman un continuo. La hipótesis cuántica implica que, en un sistema cuántico, no todas las energías son posibles, solo un conjunto discreto de ellas.

La dualidad onda-partícula fue intuita por Einstein, en primer lugar, y explotada por Louis de Broglie y Erwin Schrödinger. Según de Broglie, toda partícula cuántica lleva asociada una onda cuya longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

La masa de la partícula está representada por  $m$ , y  $v$  es su velocidad. El producto  $mv$  es la cantidad de movimiento (momento lineal),  $p$ , de la partícula. En la formulación de Schrödinger de la mecánica cuántica, conocida como mecánica ondulatoria, toda partícula lleva asociada una función  $\psi(x,y,z)$ , la función de onda, cuyo módulo cuadrado da la densidad de probabilidad de encontrar la partícula en un volumen infinitesimal alrededor de  $(x,y,z)$  determinado del espacio. Schrödinger dedujo una ecuación que lleva su nombre, cuya

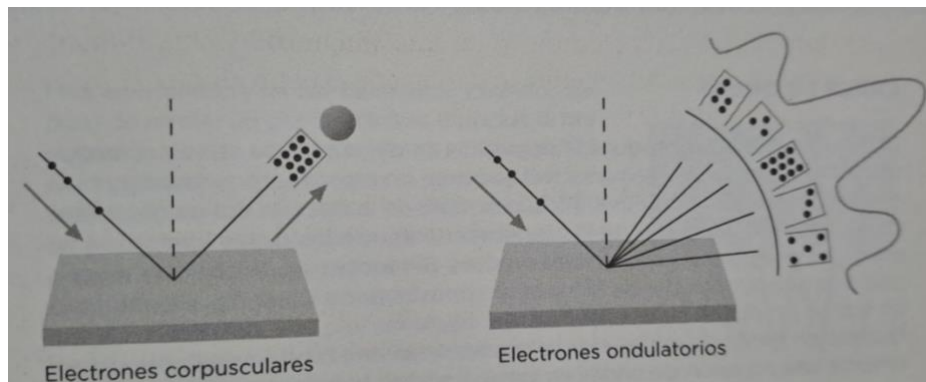
resolución proporciona la función  $\psi(x, y, z)$ . Schrödinger dedicó sus mejores esfuerzos y forjó lo que sería la llave maestra para la física moderna: la ecuación de onda, como los había hecho en la física clásica la expresión  $F = ma$  de Newton. En la figura 3 se representa el cuadrado de la función de onda para una partícula sometida a una fuerza análoga a la de un resorte clásico en el estado más bajo de energía. Desde una perspectiva clásica, la partícula ejecutaría un movimiento oscilatorio alrededor de su punto de equilibrio.



Desde una perspectiva cuántica, la función de onda nos da la probabilidad de encontrar la partícula en una zona del espacio. La función es máxima en su posición de equilibrio, lo que significa que es ahí donde es más probable de encontrar la partícula. A medida que nos alejamos del equilibrio la probabilidad disminuye, y es prácticamente cero para puntos alejados.

Estas ondas son la solución de ecuaciones matemáticas similares a la de Schrödinger, y suelen tener un aspecto suave y continuo. Las partículas cuánticas comparten así las propiedades fundamentales de las ondas matemáticas. En particular, cuando dos ondas se superponen se producen interferencias: los máximos se refuerzan y los mínimos y máximos se cancelan. El fenómeno se puede observar, por ejemplo, si tiramos simultáneamente dos piedras a un lago: en la zona donde las dos ondas coinciden se produce un patrón de interferencias característico.

El propio De Broglie señaló que si lanzaban contra un cristal electrones con una longitud de onda asociada de tamaño semejante a las distancias interatómicas del sólido ( $10^{-10}$  m), al otro lado se manifestaría un patrón de interferencia. Si los electrones se hubieran comportado como partículas, al penetrar en la red de átomos de un sólido hubieran rebotado como pelotas diminutas, en direcciones bien definidas. Sin embargo, al contar los electrones desviados en cada dirección, se obtuvo una amplia dispersión de perfil ondulatorio. (Figura 4)



En el átomo de hidrógeno, el electrón puede hallarse en dos tipos de estados. Hay estados ligados, los que corresponderían a las órbitas elípticas clásicas, y estados no ligados, en la que el electrón no está preso y puede abandonar el átomo. Para que los estados ligados sean estacionarios, la función de onda de Schrödinger debe ser una onda estacionaria, similar a las ondas que se producen en las cuerdas de una guitarra. En una onda viajera los máximos y mínimos van cambiando de posición a medida que la onda se propaga. En una onda estacionaria los nodos (puntos donde la onda se anula) y en las crestas (puntos donde las oscilaciones alcanzan mayor amplitud) ocupan siempre la misma posición. En los sistemas ligados esto implica ciertas restricciones sobre la forma de la onda, que solo se cumplen para algunos valores de la energía. El conjunto de estados ligados es, por tanto, un conjunto discreto, al que corresponde un conjunto discreto de niveles de energía. Los estados no ligados vienen representados por ondas viajeras, que pueden abandonar el átomo, y ni tienen ninguna restricción, por lo que los valores posibles de energía forman un continuo.

Los experimentos realizados en Manchester por el grupo de científicos de Ernest Rutherford pusieron que los átomos tienen estructura. En su centro existe un núcleo de carga positiva, que contiene prácticamente toda la masa del átomo, y a su alrededor hay electrones, con carga negativa, en número suficiente para asegurar que el átomo tenga carga neutra. La imagen que resulta es una especie de sistema planetario, donde la interacción gravitatoria es reemplazada por la interacción electromagnética. Pero este modelo es inestable según las propias Leyes del electromagnetismo, pues toda la carga eléctrica acelerada emite radiación. Ese es el fundamento de cualquier antena: la información transmitida por la emisora de radio o de televisión se transforma en variaciones de corriente, es decir, en aceleraciones de las cargas de la antena. Estas cargas emiten ondas electromagnéticas que son captadas por otra antena y traducidas en forma de sonido e imagen en el receptor. Pues bien, un electrón que gira alrededor del núcleo es una carga eléctrica sometida a aceleración, y por tanto emite radiación que en este caso se llama sincrotrón. Como nada repone la energía emitida, según esta imagen los electrones perderían su energía y colapsarían con el núcleo en un intervalo muy corto de tiempo. Por otro lado, los espectros atómicos proporcionan información acerca de la estructura interna de los átomos. En 1913 Bohr propuso para “salvar” el modelo de Rutherford una serie de propiedades, no que justifico y, al contrario de lo sucede con los axiomas de la geometría euclídea, estaban muy lejos de satisfacer al sentido común.

- Los electrones no tienen a su disposición todo el espacio que los rodea. Solo pueden girar en órbitas circulares, situadas a determinadas distancias del núcleo. Esta era una premisa cuántica: el radio de la órbita no admitirá una serie continua de valores, sino que eventualmente daba saltos entre órbitas.
- Mientras el electrón permanece en una órbita, se suspende la electrodinámica de Maxwell: no emite luz ni pierde energía. Se encuentra en lo que se conoce como un estado estacionario.
- El electrón no está condenado a vagar ad eternum en su órbita. Se permite su mudanza, siempre y cuando se traslade a otra de las órbitas permitidas. Puede descender, por su cuenta, a una órbita de radio más corto y menor energía. El electrón se desprende entonces de la energía que le sobra en su nuevo destino emitiendo un paquete de energía o fotón. También puede escalar a una órbita superior, pero para ellos precisa una inyección de energía del exterior. La puede absorber de un fotón que

salga a su encuentro o de la colisión con otra partícula, por ejemplo. Esta promoción lo deja en lo que se conoce como un estado excitado, puesto que los electrones buscan el estado de menor energía disponible.

- Los saltos del electrón de una órbita a otra se cobran y pagan con la moneda de los fotones, de modo que siempre cuadre el balance energético, la diferencia de energía entre el estado final y la inicial viene dada por la expresión de Planck:

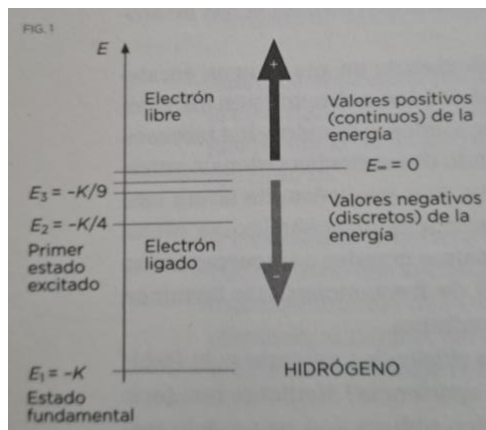
$$\Delta E = E_F - E_I = h\nu$$

¿Por qué iba a asumir la Física Clásica los preceptos de Bohr, algunos de ellos tan arbitrarios en apariencia? Mediante una serie sencilla de cálculos, Bohr obtuvo con su modelo una expresión para la energía de cada órbita en función de un número entero,  $n$ , que pasaría a recibir el nombre de primer número cuántico para el átomo de hidrógeno:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 me^4 K_c^2}{n^2 h^2} = \frac{K}{n^2}$$

Donde  $m$  es la masa del electrón,  $e$ , su carga eléctrica,  $K_c$  es la constante de proporcionalidad de la Ley de Coulomb, y  $h$  es la constante de Planck.

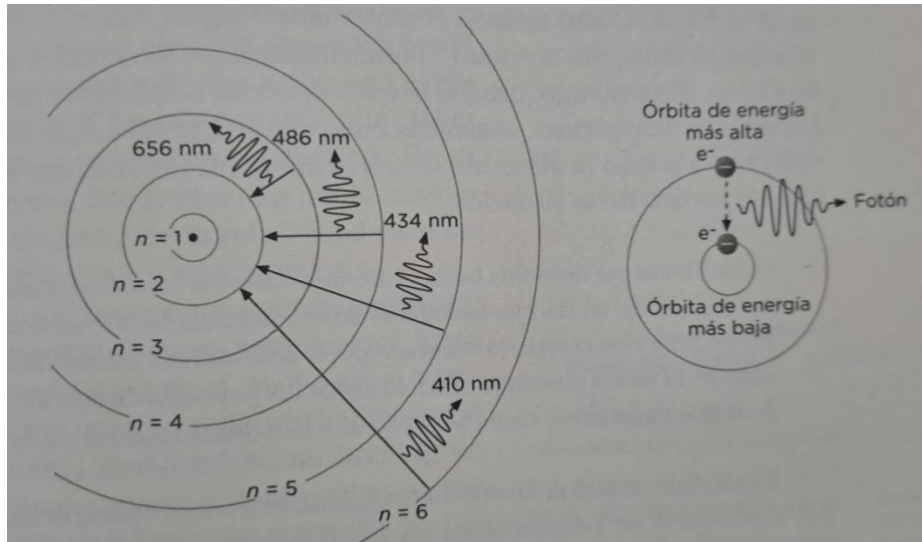
Cada  $n$  denota una órbita de distinto radio. El signo negativo implica que el electrón posee menos energía cuando está ligado al átomo que cuando está en libertad: hace falta energía para arrancarlo y separarlo del núcleo (figura 5). Cuanto más bajo sea  $n$  más bajo será su energía. El estado fundamental corresponde a  $n=1$ . Se desplegaba así una sucesión de círculos concéntricos (figura 6).



Al restar los valores de la energía para dos radios distintos e igualar la diferencia a la expresión de Planck, Bohr derivó la fórmula empírica de espectros de Balmer. También dedujo el valor de la constante de Rydberg a partir de constantes más fundamentales, como la masa y la carga del electrón o la velocidad de la luz. Bohr podía proporcionar la longitud de onda de cualquier transición entre órbitas cualesquiera. Los espectroscopistas habían detectado líneas que caían fuera del rango visible del espectro, en el

infrarrojo y el ultravioleta, y habían registrado sus frecuencias.

El modelo de Bohr ofrecía una primera versión de lo que ocurría dentro de un tubo de descarga lleno de hidrógeno cuando se aplicaba un voltaje. Al chocar un electrón de la corriente que se generaba entre los electrodos con una molécula de gas. Cedía energía a uno de sus electrones. Este la invertía en mudarse a una órbita superior, donde permanecía poco tiempo excitado. La frecuencia del fotón que emitía, al descender de nuevo, dependía de la magnitud del escalón energético. Cuanto más alto, mayor la energía del fotón y, por tanto, mayor su frecuencia.



El principio de incertidumbre fue formulado por Heisenberg en 1927, año que se encontraba en Copenhague trabajando estrechamente con Niels Bohr. El principio de incertidumbre dice: la precisión  $\Delta x$  con la que se puede medir la posición  $x$  de una partícula y la precisión  $\Delta p$  con la que se puede medir su cantidad de movimiento  $p$  no son independientes, sino que deben cumplir la siguiente desigualdad:

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

La consecuencia de ello es que no podemos determinar a la vez la posición y la cantidad de movimiento de una partícula con absoluta precisión. Si se conoce exactamente su posición no hay incertidumbre en las coordenadas espaciales de la partícula y  $\Delta x$  sería cero. La desigualdad obliga entonces a que  $\Delta p$  sea infinita, por lo que nuestra indeterminación sobre la cantidad de movimiento será total y esta podrá tomar cualquier valor. Nada sabremos sobre la cantidad de movimiento. Igualmente, si conocemos con tal precisión la cantidad de movimiento de una partícula,  $\Delta p$  será cero,  $\Delta x$  infinito, con lo que la partícula puede estar en cualquier lugar del espacio. Como la cantidad de movimiento de una partícula es igual a la masa por la velocidad, entonces: no se puede conocer simultáneamente con toda precisión la posición y la velocidad de una partícula. Con ello la Mecánica Cuántica despoja de sentido al concepto de trayectoria de un cuerpo, ya que si medimos la posición de una partícula en un instante dado, al no saber cuál es su velocidad, será imposible determinar donde se encontrara en el instante siguiente.

El principio de correspondencia fue enunciado por Niels Bohr en 1918, y sirvió como guía en la elaboración de la Mecánica Cuántica. Según este principio, los resultados obtenidos por la Mecánica Cuántica deben coincidir con los de la Física Clásica, si hacemos tender a cero la constante de Planck. Otra forma de verlo, si nos fijamos en la relación entre longitud de onda y cantidad de movimiento de De Broglie, es decir que cuando la longitud de onda de la onda comparada con las dimensiones físicas del sistema, la partícula debe comportarse clásicamente, ya que los efectos ondulatorios no serán notables.

