

CAPÍTULO II

La física moderna y la mecánica cuántica

El siglo XX abrió las puertas a una nueva física que se concentró en el fenómeno a escala atómica y sub- atómica. Este nuevo paradigma –origen de nuestra problemática- trajo consigo la necesidad de reformular y hacer algunos ajustes a la interpretación de la mecánica, la física y la ciencia. Una serie de descubrimientos en la física hicieron evidentes los límites de la visión mecanicista *como sistema explicativo universal* y pusieron en tela de juicio la validez de principios de investigación científica que se habían asegurado sin criticismo. Como apunta Metzger:

...por casi dos siglos, los científicos de la naturaleza inerte se aferraron a la idea de que exclusivamente los paradigmas de la mecánica newtoniana debían aplicarse a cualquier sistema fisicoquímico si se quiere llegar a un entendimiento cabal de todos los fenómenos naturales. Así fue posible aplicar el modelo mecánico –sin mayores dificultades- a la acústica, a la investigación del calor, a la dinámica de los fluidos y a la óptica por cuanto se mantuvo la teoría corpuscular (de Newton); inclusive la ley de las cargas electrostáticas de Coulomb de 1785 es formalmente idéntica a la ley de la gravitación universal de Newton.¹

¹ Metzger. *Introducción a la Historia de la ciencia*. (En preparación).

1.-Los límites de la física newtoniana:

Los problemas se le presentaron a la *mecánica clásica* dentro de tres campos fundamentales: la **termodinámica**, el **electromagnetismo** y la **teoría de la luz**, ejes fundamentales de la teoría cuántica.

Por un lado estaba el problema en la termodinámica referente a las relaciones entre energía y los cambios físicos de origen térmico. El fenómeno llamado *fenómeno irreversible*, inexistente en la mecánica clásica ocurren cuando la presión de un gas aumenta por aplicar calor (en un contenedor sellado). Desde 1847 Rudolf Clausius introdujo el concepto de **entropía** demostrando que el comportamiento de los gases puede ser bien descrito si asumimos una temperatura absoluta (0), ya que se debía a una medición de la energía cinética de las moléculas. Si esta presión se debe a las moléculas, calentarlas incrementa la presión de dos maneras: las colisiones con las paredes del contenedor y la fuerza de cada impacto molecular aumentan. Ya que el primer efecto es proporcional a la velocidad y el segundo al momento, la presión debe ser proporcional a la masa por la velocidad al cuadrado y por lo tanto a la energía cinética.

Parecía simplista suponer que todas las moléculas del gas se movían a la misma velocidad. La energía cinética de la que habló Clausius se refería al valor promedio. Ludwig Boltzmann publicó una serie de ensayos en la década de 1870 que demostraban que la Segunda Ley de Termodinámica podría explicarse analizando estadísticamente los movimientos de los átomos. Estos ensayos introdujeron la **mecánica estadística** y desarrollaron su principio: fenómenos visibles a gran escala se pueden explicar examinando estadísticamente las propiedades microscópicas de un sistema, como el de los movimientos atómicos.

La única forma de hacer compatible el fenómeno de la entropía (es decir, la magnitud que determina el grado de desorden molecular de los sistemas termodinámicos), con el modelo dinámico de Newton, fue aplicando métodos estadísticos a gigantes sistemas de partículas de gas,² tarea que llevó a cabo Boltzmann. Este científico se concentró en el mecanismo molecular que conduce al estado de *equilibrio termodinámico* y fundamentó la *mecánica estadística*. Quería reconciliar la dinámica clásica de la reversibilidad de objetos individuales con la termodinámica de la irreversibilidad que cristaliza en el Segundo Principio de Termodinámica.

En 1872 publicó la fundamentación teórica de la irreversibilidad con su ecuación cinética (no lineal) en la que introduce la constante k , hoy llamada “constante de Boltzmann”. Boltzmann interpretó el Segundo Principio de Termodinámica como el traspaso de los estados improbables del no- equilibrio hacia los estados probables de equilibrio y la entropía como una medida para el número de las posibilidades de llegar al estado macroscópico de equilibrio. Dejó establecido el paso direccional desde estados no equilibrados e improbables hacia unos equilibrados y más probables -más fácilmente realizables probabilísticamente. Ya que los fenómenos térmicos se revelan como *efectos estadísticos* (globales) de una gran cantidad de movimientos elementales y microscópicos, a través del cálculo estadístico es posible coordinar el estado global que se caracteriza por algunas velocidades y posiciones de los átomos (una cierta *probabilidad*).³

El **electromagnetismo**, por su parte, demostró ser de una naturaleza muy particular y su campo de estudio también fue fundamental para el desarrollo de la teoría

² Metzger, *Op. Cit.*

³ *Ibid.*

cuántica. El descubrimiento y la investigación de fenómenos eléctricos involucró un nuevo tipo de *fuerza* que no podía ser explicada por el modelo clásico. Michael Faraday estudió los efectos de estas fuerzas y en un intento por superar la física newtoniana introdujo el concepto de *campo* para remplazar el de *fuerza*. Además mostró que estos campos tienen una entidad real (*ontológica*) y pueden ser estudiados sin referencia a cuerpos materiales.⁴

El autor de la teoría electromagnética ondulatoria de la luz, James Clerk Maxwell, gran admirador de Faraday, demostraría la interacción entre fuerza eléctrica y fuerza magnética que hay en un rayo de luz. Evidencia directa de la naturaleza ondulatoria de la luz, se puede tener del fenómeno conocido como *interferencia*⁵ * en el que podemos ver la estrecha relación entre la teoría electromagnética y la teoría de la luz. Juntas dieron fin a la importante controversia generada durante la segunda mitad del siglo XVII respecto a la naturaleza de la luz. Ya Olav Roemer (1644- 1710) había demostrado que la luz viaja a una velocidad finita, pero aún no quedaba claro *qué* es lo que viaja.⁶

Aunque Newton pudo explicar ciertas propiedades de **la luz** en términos de corpúsculos o partículas, la mecánica clásica sugería dos posibilidades: *partículas* y *ondas* (siendo su comportamiento algo claro: una partícula es como una bola de billar diminuta y una onda como las producidas en la superficie de los líquidos). A pesar del éxito de la explicación ondulatoria de la luz expuesta por Christiaan Huygens, la idea que

⁴ *Ibid.*

⁵ Rae. *Quantum Physics: illusion or reality?* P.3

* Interferencia: las crestas de uno de los conjuntos de ondas pueden coincidir con los valles del otro conjunto. Ambos se cancelan mutuamente en vez de sumarse en una onda más intensa. Vemos interferencia en las burbujas jabonosas causadas por la reflexión de la luz en las dos caras del delgado cristal que forma la burbuja. La luz blanca está compuesta por ondas luminosas de todas las longitudes de ondas o colores, para algunas longitudes de onda, las crestas de las ondas reflejadas en una cara de la burbuja coinciden con los valles de la onda reflejada en la otra cara. Los colores que corresponden a estas longitudes de onda están ausentes en la luz reflejada y por lo tanto se colorea.

⁶ Sellars, et al. (Ed.). *Philosophy for the Future*. P. 190

predominó fue que la luz consistía en *partículas* cuya finesa determina su color. A principios del siglo XIX se desarrollaron varios experimentos para terminar por fin con la controversia. Los experimentos de Thomas Young y Augustin- Jean Fresnel cerraron la discusión estableciendo la forma ondulatoria de la luz.⁷ Hacia 1720, la mayoría de los científicos explicaban el fenómeno de la luz en términos de partículas, cien años después la comunidad científica aceptaba que la luz se propagaba en ondas.

La electrodinámica terminó por colocar a la luz como un campo electromagnético que alterna a alta velocidad viajando en el espacio en forma de *ondas*.⁸ La teoría ondulatoria electromagnética de Maxwell demostró que en cualquier punto en un rayo de luz hay una fuerza eléctrica y una magnética que son perpendiculares tanto a sí mismas como a la dirección del rayo. Estas fuerzas o *campos* oscilan varias millones de veces por segundo y varían periódicamente a lo largo del rayo.⁹

Así, a finales del siglo XIX la mecánica newtoniana dejaba de ser la teoría fundamental de los fenómenos naturales. El arribo de complicadas teorías como la entropía, el darwinismo y sobre todo la *teoría de la relatividad* y la *teoría cuántica* terminaron por quitarle el dominio a una visión que había dado los conceptos básicos de la ciencia occidental. Conceptos como **espacio, tiempo, partículas, ondas, continuidad** y muchos otros, tuvieron que cambiar, pero sobre todo se abrió un campo sumamente rico para nuevos conceptos dentro de la posibilidad de descripción objetiva del fenómeno físico.

La física clásica no ha perdido su importancia en nuestro tiempo y de hecho ha sido la herramienta que nos ha llevado al espacio. Por otro lado, hemos de recordar que

⁷ *Ibid.*

⁸ Capra, *The Turning Point*. P 70

⁹ Rae. *Ibid.*

como apunta Ernest Nagel, “La mecánica clásica continúa siendo una parte fundamental de la física moderna y, al mismo tiempo, ilustra un tipo importante de explicación física, a pesar de los grandes cambios que se han producido en la física”.¹⁰ Y sobre todo, hemos de decir con la filósofa Melba Phillips que si la física clásica fue y es un triunfo, se debe en gran medida a que dio lugar a la mecánica cuántica.¹¹

2.- La Teoría Cuántica:

Como hemos visto, Clausius, Maxwell y Boltzmann introdujeron en la física las nociones de átomo y molécula (que la química había retomado fructíferamente) en un intento por crear teorías cinéticas de la materia y hallar una interpretación de los principios termodinámicos y en particular la entropía. Entre 1880 y 1900 aumentaron las pruebas experimentales de discontinuidad en la materia y la electricidad. El estudio de los gases y el análisis de fenómenos electrolíticos sugerían que tal vez en los gases y los líquidos hubiese átomos o agrupaciones de átomos (iones) que transportaban cargas eléctricas siempre múltiplos enteros de una unidad fundamental.

Por otro lado, el descubrimiento de los *rayos catódicos*, William Crookes, indicaba que la electricidad negativa era siempre transportada por pequeños corpúsculos en extremo ligeros a los que se terminó por llamar **electrones**. En general, la experiencia cada vez corroboraba que discontinuidades corpusculares juegan un papel subyacente a las apariencias continuas de los fenómenos observables escala habitual. Un giro se produjo en la física, se tomó la hipótesis atómica que ya la química había aceptado. Esto implicaba que debía admitirse como demostraron en 1815 Ampere y Avogadro, que la

¹⁰ Nagel. *La estructura de la ciencia*. P. 150

¹¹ Sellars, et al. (Ed.). *Op Cit*. P. 189

molécula- gramo de un cuerpo contiene siempre el mismo número de moléculas. Esta constante fundamental del atomismo llamada el “número de Avogadro” aportó por fin una confirmación de la existencia de átomos.¹²

En abril de 1897 Sir Joseph John Thomson reportó el descubrimiento de radiación proveniente de un tubo de rayos catódicos diferentes a los Rayos X (de Röntgen), compuesta por partículas 200 veces más pequeñas que un átomo y cargadas negativamente: los electrones. Supuso que el núcleo debía tener una carga positiva por lo que propuso un *modelo atómico* en el que éstos neutralizan a las concentraciones de partículas cargadas positivamente.¹³

Este modelo atómico fue abandonado por su estudiante Ernest Rutherford en base a sus experimentos de dispersión realizados con sus estudiantes Hans Geiger y Ernest Marsden en el Laboratorio de Cavendish, dirigido entonces por Thompson. En 1909 la dispersión de partículas alfa mediante una hoja de oro en la que observaron (a ojo) grandes ángulos de dispersión, les permitió sugerir que los átomos tienen un núcleo pequeño y denso cargado positivamente: el **protón**. Rutherford enunció la teoría de la estructura del átomo en 1911 en la que establece que hay un núcleo atómico cargado positivamente y que los electrones orbitan a su alrededor.

Ahora bien, el origen de la teoría cuántica fue el descubrimiento del **cuanto de energía** por Max Planck en 1900. Este científico investigaba el sentido de la Segunda Ley de Termodinámica aplicada a la *radiación del calor* desde el punto de vista de la teoría

¹² Taton (Dir.). *Historia general de las ciencias*. Pp. 151- 152

¹³ Ibid.

electromagnética.¹⁴ En el artículo *On the Energy Distribution in the Blackbody Spectrum*, utiliza por primera vez el concepto de *Energieelement* (lo que hoy llamamos *cuanto de energía*) y que usa el símbolo h (en notación moderna \hbar) como **constante universal**.¹⁵

El descubrimiento de este tenaz investigador, lo llevó a la hipótesis de que la energía se emite en *cantidades discretas* o cuantos de radiación¹⁶, lo cual le permitió dar una base teórica a la fórmula del espectro de radiación del cuerpo negro¹⁷ *, pero no desarrolló una *teoría* sobre su descubrimiento y no discutió consecuencias filosóficas; de hecho, no volvió a hablar del cuanto (salvo en un artículo sin grandes resultados), hasta 1943. Por esto el hallazgo de Planck ha sido llamado por algunos pura suerte, un vislumbre que se le presentó a alguien que no logró entender su alcance.

La mecánica clásica había heredado un mundo construido de materia y radiación, la materia consistía en átomos y la radiación en ondas. Para determinar por completo la distribución espectral de la radiación de cuerpo negro, era preciso analizar los intercambios de energía entre la **materia** y la **radiación**. Supuso que en la materia, los electrones no pueden estar animados de cualquier tipo de movimiento, sino de movimientos privilegiados, movimientos cuantificados. Consecuentemente, la energía radiante de frecuencia ν se emitía y absorbía en cantidades finitas iguales a $h\nu$, siendo h una nueva constante fundamental de la física.

La esencia de la teoría cuántica es el **postulado cuántico**: todo proceso atómico tiene una discreción esencial caracterizada por \hbar , el cuanto de acción de Planck. El

¹⁴ Duck, Ian and E.C.G. Sudarshan. *100 years of Planck's Quantum*. Pp.31-37

¹⁵ Duck. *Ibid.*

¹⁶ Wysozka. *El encanto, lo extraño, la verdad y la belleza de la naturaleza*. Boletín de la Sociedad Mexicana de Física. P. 91

¹⁷ *Op. Cit.* P. 101

* La **radiación de cuerpo negro** es la radiación que existe en el interior de un recinto, de un horno, sometido a temperatura uniforme. Esta radiación depende sólo de la temperatura del recinto y es totalmente independiente de la naturaleza de las paredes del recinto y de los cuerpos materiales que contenga.

descubrimiento de Planck sugería que los cambios en el universo no consisten en movimientos continuos y llevó a un cambio en el concepto de continuidad. Parecía que la atomicidad de la radiación era similar a la aceptada para la materia. La radiación venía en “pedazos separados” o *paquetes* a los que Planck llamó *cuanta* trayendo consigo importantes consecuencias filosóficas.¹⁸

Junto con G (constante gravitacional) y c (la velocidad de la luz), h , la constante de Planck es uno de los factores fundamentales que determinan la naturaleza del universo. El tamaño del cuanto, como unidad mínima, depende de la frecuencia de luz o energía producida. Para la frecuencia de la luz ν la unidad es: $E=h\nu$ que junto con $E=mc^2$ es una de las más significativas fórmulas del siglo XX. La introducción de esta fórmula ante la academia de Ciencias de Berlín el 14 de diciembre de 1900 se considera el nacimiento de la teoría cuántica.

La idea de Planck fue retomada por Albert Einstein, quien la generalizó en su teoría del Efecto Fotoeléctrico (1905) con la fórmula $E=nh\nu$ (donde $n=1,2,3\dots$ números enteros, $h=$ constante de Planck y $\nu=$ la frecuencia) y considerando la naturaleza de la luz (radiación electromagnética) constituida por lo que hoy llamamos **fotones**, es decir, cantidades (cuantos) discretas de energía; entendiendo así que las ondas luminosas muestran un comportamiento dual o sintético: corpuscular complementario al ondulatorio (dualidad onda- partícula).

El origen de esta teoría sintética de la radiación se dio en el *efecto foto-eléctico*^{*}, fenómeno descubierto por vez primera en 1887 por Heinrich Hertz y que llevó a una

¹⁸ Jeans. *Physics and Philosophy*. P. 126.

* **Efecto fotoeléctrico:** Cuando la luz ultravioleta o azul llega a una superficie metálica, se lleva a cabo un disparo continuo de electrones por parte del metal, lo que no sucede con una luz roja. Una luz intensa emite un mayor número de electrones del metal que una luz opaca. La energía de los electrones emitidos no cambia con la intensidad sino sólo con la frecuencia (color) de la luz: a mayor frecuencia mayor energía.

especie de renacimiento de la teoría corpuscular con la que Newton intentó explicar la luz. Si una luz incide sobre un metal es capaz de arrancar electrones de los átomos de la superficie de éste. La velocidad de los electrones emitidos no depende de la *intensidad* de la *radiación* –como sería si fuese una onda- sino de la frecuencia. Planck supuso que un átomo sólo podía emitir radiación por unidades completas (*cuanta*). Einstein transformó cada cuanto transmitido en un “*paquete*” indestructible de radiación viajando en el espacio en forma de unidad indivisible (*fonones o cuantos de luz*).¹⁹ En esta teoría el cuanto de luz se propaga no como una onda continua como en la teoría clásica, sino como unidad discreta en la que la energía hf está contenida en un espacio pequeño (donde h es la constante de Planck y f la frecuencia).²⁰

El siguiente gran paso dentro de la teoría cuántica lo dio otro estudiante de Rutherford, Niels Bohr, el físico danés que en 1913 realizó una revisión del concepto de la emisión de radiación por partículas eléctricamente cargadas que se mueven en órbitas en el interior del átomo, a la que hasta entonces se había aplicado la teoría electromagnética. Bohr introdujo un modelo que combinaba la teoría clásica de Maxwell con la teoría cuántica de Planck. Esta teoría híbrida dio como resultado una fórmula general para la radiación emitida por el átomo de hidrógeno y es la *primer aplicación de la idea cuántica a la materia*.

El razonamiento de Bohr era que la existencia de un átomo como el hidrógeno, formado por un protón cargado positivamente y un electrón cargado negativamente que gira alrededor de él, sólo se puede entender a partir de una determinada distancia básica entre ambos que explique las dimensiones estables del átomo (es decir, que explique por

¹⁹ Jeans. *Physics and philosophy*. P. 130

²⁰ Duck. *100 years of Planck's Quantum*. P.115.

qué el electrón no cae en el núcleo). Como las consideraciones dimensionales demuestran que esta distancia no puede obtenerse mediante una combinación matemática que implique exclusivamente la carga del electrón (e) y su masa (m), Bohr argumentó que había que introducir en la teoría atómica otra constante física fundamental que combinada con las constantes e y m , proporcione la distancia buscada. La constante de Planck h cumplía bien el cometido y sugirió que la distancia básica viene dada por la combinación matemática: $h^2/4\pi^2e^2m$.

Ya que no puede haber una acción menor que h Bohr explicó la estabilidad del átomo de hidrógeno asignando una única unidad de acción a la primera de las hoy llamadas “órbitas de Bohr”. Con ello eliminó cualquier posible órbita más pequeña, porque una órbita así tendría una acción menor que h , lo que violaría la hipótesis cuántica. A continuación, Bohr supuso que cada órbita permitida del electrón, a medida que se aleja del protón, difiere de la órbita inmediatamente anterior en una única unidad de acción h . Por tanto la acción de la segunda órbita debe ser $2h$, la de la tercera $3h$ y así sucesivamente. Esto significa que la acción de la órbita número n , donde n es un entero, debe ser nh y entonces se puede demostrar que el radio de la n -ésima órbita tiene que ser: $n^2h^2/4\pi^2e^2m$.

Por la dinámica clásica, Bohr sabía que la energía total cinética y potencial de una partícula que se mueve en una órbita circular es negativa, porque la energía potencial negativa de la órbita es mayor que su energía cinética (que es positiva). Además, la energía total es inversamente proporcional al radio de la órbita. Por tanto, asignó a la energía del electrón en la órbita n -ésima el valor $-2n^2e^2m/n^2h^2$ multiplicando la inversa del radio por $e^2/2$ y cambiando su signo por motivos

dimensionales. Cuando el electrón salta de la órbita n -ésima a la órbita k -ésima, experimenta un cambio de energía. Este cambio aparece en la forma de un único cuanto de energía, o fotón, emitido o absorbido. Cuando k es mayor que n , se absorbe un fotón; cuando k es menor que n , se emite un fotón.

Niels Bohr caracterizó muchos de los aspectos generales y de los conceptos fundamentales del desarrollo de la teoría cuántica. Su modelo, basado en hipótesis bastante *ad hoc*, se encontraba en directa contradicción con la física clásica (aunque involucraba las mismas ideas sobre las partículas; los electrones y el núcleo seguían el modelo de bola de billar –excepto que se comportaban de forma particular por sus distintos estados de energía). Tuvo que desarrollar una liga entre la teoría cuántica y la electrodinámica clásica así que creó una regla general que causaría importantes problemas filosóficos: el *Principio de Complementariedad* (1916).

De acuerdo a este principio, en el límite de números cuánticos grandes (en comparación con h), las frecuencias, intensidades y otras propiedades de sistemas radiantes calculados por la teoría cuántica, son las mismas que las de la física clásica. Es decir, este principio es un puente entre la teoría cuántica y la mecánica clásica que establece que ambas teorías ofrecen el mismo resultado bajo ciertas condiciones.²¹ Bohr lo describía así: “*Any given application of classical concepts precludes the simultaneous use of other classical concepts which in a different connection are equally necessary for the elucidation of the phenomena*”.²² Ejemplos de estos **conceptos** serían **momento**, **“posición” de la partícula**, **onda** y **corpúsculo**, todos, conceptos problemáticos en la interpretación de la teoría. La doctrina de la complementariedad es de corte

²¹ *Ibid.*

²² Pauli. *Op. Cit.* P. 55

fenomenalista ya que renuncia la explicación de los mecanismos de los procesos cuánticos, y *dualista* ya que proclama una dualidad irreductible, no en la naturaleza, sino en la *descripción de los experimentos*. Como explica el Profesor Metzger: “Su teoría era un revoltijo de conceptos clásicos y cuánticos y sólo resultó ser aplicable al hidrógeno”.²³ En 1922 fue galardonado Premio Nobel de Física por “sus servicios en la investigación de la estructura de átomos y la radiación emanada por ellos”.²⁴

Desde las modificaciones que Arnold Sommerfeld hizo al modelo de Bohr (extender su aplicación a órbitas elípticas) y estableció su teoría cuántica de *líneas espectrales*,²⁵ el desarrollo de la teoría cuántica se detuvo hasta 1924 debido a la Primera Guerra Mundial. La física encontraba una gran confusión: la dualidad onda-partícula parecía inaceptable y el modelo atómico de Bohr resultaba inaplicable para átomos complejos o moléculas.

Por estos años Arthur Holly Compton, físico americano y Premio Nobel de 1927 introdujo la relación entre la longitud de onda que lleva su nombre, la masa y la velocidad de la luz a través de h .²⁶ Con él, entre 1921 y 1925 quedó definida precisamente la naturaleza cuántica de la luz.²⁷ Hizo experimentos que confirmaron la dualidad onda-partícula del fotón que Einstein había introducido en 1905. La naturaleza corpuscular de la luz postulada por Newton volvió a ser considerada.²⁸

En octubre de 1922 descubrió un efecto que parecía traerle a la teoría de partículas y la teoría de ondas de luz a una confrontación. En el **Efecto Compton** los cuantos incidentes y dispersos de rayos X tienen líneas direccionales definitivas de movimiento.

²³ Metzger. *Op. Cit.*

²⁴ Moore. *Schrödinger life and thought*. Pp. 159- 160.

²⁵ *Ibid.*

²⁶ Duck. *Op. Cit.* P. 102.

²⁷ *Ibid.* P. 52.

²⁸ Metzger. *Op. Cit.*

Así se convirtió en un dilema de la física la naturaleza de la luz como onda o como partícula.²⁹

La tesis doctoral del físico francés Louis de Broglie (que le valió a la vez el Premio Nobel de 1929), postuló el principio de dualidad bajo la hipótesis de que el electrón posee también propiedades ondulatorias. Resume lo anterior en su ecuación que relaciona, nuevamente a través de h , el momento lineal y la longitud de onda de la partícula dando origen a la *Mecánica Ondulatoria*³⁰. En su artículo de la *Philosophical Magazine*. 47, 446 (1924) titulado *A Tentative Theory of Light Quanta*, de Broglie estudia la realidad del *cuanto de luz* estableciendo la dualidad onda- partícula resumiendo así:

It is assumed that light is made up of quanta. It is shown that the Lorentz- Einstein transformation together with the Planck quantum radiation leads us necessarily to associate particle motion and wave propagation, and that this idea gives a physical interpretation of Bohr's quantization condition. Diffraction is shown to be consistent with an extension of Newtonian dynamics. It is then possible to have both the particle and the wave character of light....³¹

También enfatizó que cada partícula está acompañada de una onda con longitud y frecuencia.³²

De Broglie adoptó una actitud “*realista*” de la naturaleza y evitó consideraciones abstractas para representarse la unión de ondas y partículas de forma concreta, convirtiéndose la partícula en un pequeño objeto que se encuentra incorporado a la

²⁹ Moore. *Op. Cit.* P. 160.

³⁰ Moore. *Ibid.*

³¹ *Op. Cit.* P. 140

³² P. 188

estructura de una onda en propagación.³³ A diferencia de Einstein y Planck, el científico francés no pudo basar su hipótesis en ningún resultado experimental por lo que, usando la equivalencia masa-energía (Einstein, $E=mc^2$) y en el efecto fotoeléctrico (en el que el electrón se manifiesta como onda y partícula a la vez), supuso que las ecuaciones $E=hf$ y $h=mv$ eran válidas para ambos, partículas y fotones. En consecuencia la llamada “fórmula de De Broglie”: $L=h/mv$ (en la que L = longitud, h la constante de Planck, m la masa y v la velocidad), que establece que cuanto mayor es la velocidad o la masa más corta será la onda.³⁴

En 1925 los físicos experimentales George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit interpretaron el doblete del espectro luminoso del sodio, en base a la existencia de un momento angular interno del electrón conocido hoy como *spin*, cuyo valor es proporcional a h . Así que el electrón actúa como un magneto microscópico. El spin es una característica interna de todas las partículas microscópicas y determina su comportamiento estadístico.³⁵ El electrón que circunda el núcleo del átomo es una carga móvil de electricidad negativa. Su movimiento crea un campo magnético con un eje en el centro del átomo, perpendicular al plano de la órbita del electrón. Además de su movimiento orbital, el electrón también tiene *spin*. En el modelo de Bohr el *spin* puede ser visto como la rotación del electrón sobre un eje en su centro, similar a como la Tierra rota mientras gira alrededor del sol.

2.1.-La Mecánica Cuántica:

³³ P. 186

³⁴ Metzger. *Op. Cit.*

³⁵ *Ibid.*

La dualidad onda-partícula se perfiló como problema decisivo para el desarrollo de la teoría cuántica que para los años 1925- 1927 entró en una etapa crucial. ¿Cómo podía ser el electrón una mezcla de dos elementos excluyentes? Para usar términos de Metzger: “ser un trozo de materia concentrada y delimitada en un pequeño lugar del espacio y a la vez una perturbación amorfa del espacio que se extiende y se disipa oscilando por amplias regiones espaciales”.³⁶ La analogía con modelos macroscópicos y por lo tanto la representación mental de lo que ocurre físicamente en el átomo causaba muchas dificultades.

Lo que hacía falta era un modo matemático para describir acontecimientos cuánticos. Dos esquemas equivalentes desarrollaron la *Mecánica Cuántica*: uno formulado directamente de la hipótesis de De Broglie por Erwin Schrödinger, y el otro desarrollado por Werner Heisenberg. La primera, llamada **Mecánica de ondas**, es de carácter matemático y la segunda, la **Mecánica Matricial**, es más formal en el sentido de que depende menos de la visualización; aunque ambas requieren *correlación* con la experimentación sólo en los resultados, no en los estados intermedios del proceso físico. Ambos modelos hacen uso de la mecánica clásica.³⁷

Ya hemos dicho que el universo contiene energía en dos formas posibles: materia y radiación. Ambas son atómicas o *cuantizadas*, no continuas. La mecánica cuántica también es una descripción de este hecho, un *método formal- matemático* para dar cuenta de la atomicidad y *discreción* de la naturaleza.

Influenciado por el positivismo de su maestro Max Born y el ejemplo de Einstein, Werner Heisenberg rechazó las abstracciones inverificables en la teoría científica

³⁶ *Ibid.*

³⁷ Sellars et al. *Philosophy for the Future*. P. 194

quedándose sólo con elementos medibles, los datos observables (Einstein había eliminado los conceptos metafísicos de la teoría de Newton como *velocidad absoluta* y *simultaneidad* para desarrollar sus teorías).³⁸

Ya que no se podía hacer observación o medición de las órbitas, la velocidad de un electrón ni su revolución sin perturbar, evitó construir imágenes y hacer analogías. En su teoría carecía de importancia el camino de un electrón o la estructura del átomo. Explica el Dr. Metzger: “sus datos eran solo los fotones emitidos o absorbidos cuando el nivel energético del electrón cambiaba desde un estado inicial “n” a un estado final “m”, antes y después del salto cuántico”³⁹.

Su mecánica de matrices es un esquema matemático que en vez de funciones usa una tabla numérica para calcular posiciones y velocidades del electrón con un formalismo matemático que le permite hacer operaciones (sumas, restas, multiplicaciones, divisiones, etc.). En 1925, mientras Heisenberg estaba en la isla de Helgoland recuperando su salud, inventó las reglas para hacer estos cálculos pero no las publicó hasta que, una vez en Gotinga le presentó a Max Born y a Pascual Jordan los resultados.⁴⁰ Fue en un artículo publicado en la *Zeitschrift für Physik* 33, 879 (1925) y titulado *On the Quantum Reinterpretation of Kinematical and Mechanical Relations* de julio 29 1925, que Heisenberg los dio a conocer.⁴¹

Heisenberg también postuló el axioma fundamental de la mecánica cuántica: el **Principio de Incertidumbre** que convierte la certidumbre absoluta de las mediciones en *probabilidades* relativas para describir a la naturaleza. Se expresa en base a conceptos de

³⁸ Metzger. *Op. Cit.*

³⁹ *Ibid.*

⁴⁰ *Ibid.*

⁴¹ Duck. *Op. Cit.* P.174

partículas y especifica los límites dentro de los cuales esa imagen puede ser aplicada. “Entre más precisamente se determine la posición, con menos precisión se conocerá el momento”. Si p es una coordenada espacial que describe posición, hay una incertidumbre en su especificación, llamada Δp . De forma similar, el momento m , que es la masa por la velocidad en dirección de p , está indeterminado por una cantidad de Δm . El principio no dice nada sobre cada incertidumbre por separado, aunque sí dice que su producto no es mayor que h , dividida por el factor numérico 4π . Matemáticamente se formula así $\Delta p \Delta m \leq h$, donde \leq significa “es menor o igual”. Lo mismo puede ser aplicado a incertidumbres en las otras coordenadas espaciales y su momento correspondiente. También ocurre con energía y tiempo: $\Delta E \Delta t \leq h$.⁴²

El principio de incertidumbre se aplica tanto a cuantos de luz como a partículas materiales. Si es válido para uno debe ser válido para el otro por conservación de energía y momento. A pesar de la aparente inexactitud de la determinación de un evento, descrita por este principio, el efecto final es enriquecer la teoría al generar resultados teóricos altamente precisos debido a la introducción de “fenómenos virtuales”, entonces novedosos, que acompañan a los procesos físicos reales.⁴³

A finales de 1925 no había un modelo matemático que tratara *el aspecto ondulatorio* del electrón. El físico teórico Erwin Schrödinger formuló la ecuación con la que se entiende al átomo de hidrógeno. Las soluciones de esta ecuación dan origen al conocimiento más profundo del átomo como un núcleo rodeado por una “**nube**” de

⁴² Sellars et al. *Op. Cit.* P. 195

⁴³ *Op. Cit.* P. 165.

electrones, es decir, que en este modelo la ubicación de los electrones está dada por una *densidad de probabilidad* de localizarlos en cierta región.⁴⁴

El fundamento de la revolución mecánica de ondas vino de la tesis doctoral del joven Louis de Broglie. Sabemos que Schrödinger estudió sus escritos durante el verano-otoño de 1925.⁴⁵ Schrödinger publicó su mecánica ondulatoria en seis artículos sucesivos en el *Annalen der Physik* en 1926. Dentro de este modelo el átomo era un sistema oscilante tridimensional -como gotas de agua oscilando en una plancha caliente- y la forma de su **función de onda** –simbolizada como ψ y llamada **Psi**- (a diferencia de la circular de Bohr) era multiforme creando una especie de nubes simétricas.

La ecuación que desarrolló Schrödinger es una *ecuación diferencial continua* que proporciona soluciones para todos los puntos del espacio, las soluciones permitidas de la ecuación estaban restringidas por ciertas condiciones expresadas por ecuaciones matemáticas llamadas funciones propias o autofunciones (*Eigenfunktionen*). Esta ecuación de onda sólo tenía determinadas soluciones discretas que eran expresiones matemáticas en las que los números cuánticos aparecían como parámetros. La ecuación de Schrödinger se resolvió para el átomo de hidrógeno y dio resultados que encajaban sustancialmente con la teoría cuántica anterior. Además, la superaba en que dio también la solución para el átomo de helio que la teoría de Heisenberg no había logrado explicar adecuadamente. Las soluciones de la ecuación de Schrödinger también indicaban que no podía haber dos electrones que tuvieran sus números cuánticos iguales, o sea, que estuvieran en el mismo estado energético (regla establecida por Wolfgang Pauli en 1925: Principio de Exclusión, lo estudiaremos más adelante).

⁴⁴ *Ibid.*

⁴⁵ Moore. *Op. Cit.* P. 188

Este modelo permitía al electrón sólo determinadas formas en oscilación, con determinada energía. Al cambiar de una forma oscilante a otra, se inyectaba o se liberaba energía que abandonó el electrón en paquetes energéticos, bien identificables en la radiación electromagnética.⁴⁶ Las ondas de Schrödinger fueron en un principio tomadas como las verdaderas ondas- materia tridimensional –comparable a las ondas electromagnéticas cuyo objeto era eliminar por completo la discontinuidad de la teoría cuántica, sobre todo los llamados “saltos” cuánticos.⁴⁷

Max Born propuso una **interpretación estadística** sobre la función de onda de Schrödinger que expresa una **amplitud probabilística**. Es una amplitud probabilística asociada a un ensamble de sistemas cuánticos idénticos los cuales se propagan de acuerdo a la ecuación de Schrödinger y dan amplitudes y probabilidades de transición concorde a la experimentación.⁴⁸ “Psi” (ψ) no mide algo realmente existente, una *actualidad*, sino una *potencialidad*, algo que puede suceder.⁴⁹

En el artículo *Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge* (1926), Born, partiendo de la investigación del proceso de colisión, asegura que la mecánica cuántica en la forma de Schrödinger permite describir no sólo los estados estacionarios, sino también los “saltos cuánticos”. La “onda de probabilidad” describe el comportamiento, no de una gran cantidad de electrones, sino de un solo sistema de partículas cuyo número determina la dimensión del espacio de configuración. La hipótesis de Born se extendió a la conclusión que la magnitud al cuadrado de los elementos de la transformación mecánico

⁴⁶ Metzger. *Op. Cit.*

⁴⁷ Heisenberg. *Op. Cit.* P. 51

⁴⁸ Duck. *Op. Cit.* P. 309

⁴⁹ Metzger. *Op. Cit.*

cuántico matricial ha de ser interpretada como la *probabilidad* que el sistema será encontrado en el estado *b* si está en estado *a*.

El cuadrado de la amplitud de onda de cualquier punto en el espacio determina la probabilidad de hallar el electrón en este lugar. Las “nubes” de onda de Schrödinger dicen dónde es posible que se encuentre el electrón, pero hay inseguridad respecto a su lugar preciso. Lo que ondulaba en el átomo no era el electrón mismo, sino la probabilidad de la existencia de un electrón en cierto_lugar. Así, Born introdujo su *onda de probabilidad*: entre más intensas sean las ondas (ψ^2), más probable que el electrón se encuentre en este lugar, pero nunca se podrá pronosticar una medida única de la futura posición de un electrón, sólo estadística. Por supuesto que Schrödinger combatió estas opiniones, como veremos en el próximo capítulo.

En síntesis, las investigaciones de Born (realizadas en configuraciones espaciales multidimensionales en vez de tridimensionales) referentes a las ondas de Schrödinger llegaron a la conclusión de que el cuadrado de la función de onda debía ser tomado como una medida para la probabilidad de la configuración en cuestión. Esto implicaba que las ondas-materia en espacio tridimensional no permiten una descripción adecuada de la naturaleza y que la teoría cuántica tiene elementos estadísticos.⁵⁰

Bien, hasta ahora hemos hablado de la *mecánica cuántica no-relativista*, fundada por Heisenberg y Schrödinger. Para fenómenos dentro de su rango de validez, esta teoría es ahora tan bien sustentada como la mecánica clásica aunque, también como ella, tiene sus límites. Como pretende demostrar nuestra tesis, **la mecánica cuántica no es una respuesta final, sino sólo un comienzo**. Hay muchos problemas que deja parcial o totalmente sin resolver.

⁵⁰ Heisenberg. *Encounters with Einstein*. P. 52

2.2.-La Mecánica Cuántica Relativista (*Relativistic Quantum Mechanics*- RQM)

Desde antes de la mecánica cuántica se daba por sentado que la **Relatividad** debía ser considerada en toda teoría (ya que la mecánica newtoniana es una aproximación válida sólo para bajas velocidades –en comparación a c , la velocidad de la luz). RQM es aún hoy problemática para la física, pero su introducción a la mecánica cuántica se dirigió como una corrección a la mecánica de Schrödinger y Heisenberg⁵¹ y aportó grandes descubrimientos, por lo que la incluimos en nuestro discurso aunque sólo con el fin de hablar de hechos históricos relevantes a la discusión que estamos por desarrollar.

El físico Paul Dirac fue el primero en combinar la física cuántica de bajas velocidades con la Relatividad especial de Einstein. Consideró que la velocidad de las partículas que provienen del desmembramiento del átomo alcanza un considerable porcentaje de c . La ecuación que desarrolló -que satisface todos los requerimientos relativistas- incluye la necesidad teórica de que el electrón tiene que girar sobre sí mismo y comportarse como un pequeño magneto, lo que **fundamentó matemáticamente la existencia del spin**, hasta entonces sólo con base empírica.⁵²

El edificio matemático de Dirac condujo a la posibilidad de “dos mundos”, uno “positivo” y uno “negativo” ya que predijo la existencia de **antimateria** como estado de la materia con energía negativa. Encontró que en la naturaleza, si bien hay partículas, también existen **antipartículas**.⁵³ Una de sus características es que cuando son empujadas en una dirección se mueven en la opuesta.

⁵¹ Sellars et al. *Philosophy for the Future*. P. 200

⁵² Metzger. *Op. Cit.*

⁵³ *Ibid.*

Hacia 1931 James Chadwick, descubrió experimentalmente al acompañante del protón dentro del núcleo: el **neutrón**⁵⁴ y un año después el físico norteamericano Carl David Anderson, detectó antielectrones en el laboratorio que a partir de entonces se llaman **positrones** (electrones con carga positiva).⁵⁵ Ese mismo año Wolfgang Pauli predijo la existencia del **neutrino**, cuya masa en reposo es cero, o sea que debe viajar en el espacio a la velocidad de la luz. No tiene carga, ni campo magnético: es puro spin. Ya que no es atraído ni repelido por los campos eléctricos y magnéticos de otras partículas; un neutrino que entra a la tierra desde el espacio exterior puede atravesar el espacio sin ningún obstáculo.⁵⁶ Pauli también postuló su **Principio de Exclusión** (1925), en el que establece que dos partículas de spin semientero (o sea partículas cuyo spin es una fracción: $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, etc.) que posean la misma energía no pueden encontrarse en el mismo estado cuántico simultáneamente. Con lo cual se pudo explicar el comportamiento “elitista” de partículas de spin semientero y con ello el ordenamiento en la tabla periódica de los elementos.⁵⁷

El italiano Enrico Fermi describió con la estadística “Fermi-Dirac” (1926) el comportamiento de partículas (“fermiones” en su honor) sujetas al principio de Exclusión de Pauli. Demostró que los núcleos atómicos sufren transformaciones al ser bombardeados con neutrones (fenómeno conocido como fisión nuclear) y que la energía nuclear almacenada en los núcleos de los átomos puede ser liberada a través de los procesos de fisión, fusión o radioactividad. En esos procesos, una pequeña cantidad de

⁵⁴ Bol. Soc. Mex. Fís. 15- 4, 2001: 166.

⁵⁵ *Ibid.*

⁵⁶ Gardner. *The Ambidextrous Universe*. P. 241

⁵⁷ Bol. Soc. Mex. Fís. 15- 4, 2001: 166.

masa se convierte en energía de acuerdo a $E=mc^2$.⁵⁸ También introdujo la llamada “**fuerza débil**” (10¹¹ veces menor que la electromagnética, capaz de convertir un neutrón en un protón y viceversa) que a diferencia de la fuerza electromagnética y la de gravitación pueden dividir el neutrón. Él y un grupo de colaboradores construyeron la primera pila atómica y produjeron la primera reacción en cadena con uranio.

El desarrollo de la bomba atómica en la Segunda Guerra Mundial se basó en el trabajo de Otto Hahn y su colega Fritz Strassman quienes en 1938 estudiaron métodos de separación de partículas radioactivas, trazadores radiactivos y la fisión nuclear bombardeando uranio y torio en neutrones.⁵⁹

Posteriormente el físico japonés Hideki Yukawa estudió la fuerza nuclear llamada “**fuerte**” (responsable de mantener unidos los nucleones -protones y neutrones) en su *teoría mesónica* de las fuerzas nucleares. Desarrolló la teoría de que estas fuerzas se debían al intercambio de partículas “virtuales” 200 veces más pesadas que los electrones: *piones* o mesones.⁶⁰ En 1957 Chen-ning Yang y Tsung-Dao Lee predijeron que la naturaleza distingue a nivel subatómico entre configuraciones de tipo izquierdo y derecho,⁶¹ es decir, la **violación de la Ley de Conservación de la Paridad**, confirmada a nivel experimental por Chien-Shiung Wu, física chino-americana.⁶²

Dada la gran cantidad de “partículas” descubiertas, se retomó el concepto de “elementaridad” y se propuso como hipótesis la existencia de entes más pequeños de carga eléctrica fraccional: los **quarks**. Hoy hablamos del quark *s, c, u, d, t* y *b*.⁶³ La mayoría de estas partículas son inestables y “*decaen*” en otras partículas o radiación. A

⁵⁸ *Ibid.*

⁵⁹ *Ibid.*

⁶⁰ *Bol. Soc. Mex. Fís.* 15-4,2001: 167

⁶¹ *Op. Cit.* P.168

⁶² *Op. Cit.* P.169

⁶³ P.170

partir de aquí se han descubierto otras cosas importantes que obviamos porque no atañen a nuestra argumentación, sin embargo, será conveniente remarcar que una de las preguntas principales de la física hoy es si hay entidades más básicas.

Hemos visto que el desarrollo de la teoría cuántica se fundamenta en gran medida en una red de relaciones entre científicos y universidades. El progreso y el refinamiento de esta teoría, así como la selección de sus problemas obedece estas relaciones. Su historia hace evidente una serie de tendencias ligadas a condiciones geográficas por lo que es importante poder distinguir las líneas de pensamiento que juegan un importante papel tanto a nivel experimental como teórico –y con esto queremos decir filosófico.

El cuanto de Planck se presentó como algo embarazoso para la física. Dentro de los bien fundados cimientos de la física clásica trajo ideas que llevaron a dificultades y contradicciones por lo que había pocas universidades en donde se pudiera trabajar el problema seriamente. Además de Copenhague, la teoría de Bohr fue enseñada y desarrollada por Sommerfeld en Munich y desde 1920 en la universidad de Gotinga.⁶⁴

Cada una de ellas tenía su propia línea teórica. La escuela fenomenológica (que intenta unir nuevos descubrimientos observacionales de forma inteligible), la escuela matemática y la “filosófica” o “conceptual”. Podríamos identificar a Sommerfeld y su escuela de Munich con la perspectiva fenomenológica, el centro de Gotinga con la matemática y el grupo de Copenhague con la tendencia filosófica. También podemos marcar tres periodos: los años preparatorios de 1922- 1924, el año decisivo 1925 y los años de explosión de 1926 a 1927. Para 1930 el formalismo matemático había quedado establecido, lo que no quedaba del todo claro, sin embargo, era la **interpretación** de lo

⁶⁴ Heisenberg. *Encounters with Einstein*. P. 38

que sucedía. Esto originó muchos debates filosóficos además del desarrollo de la interpretación que llamamos “ortodoxa” de la teoría cuántica.

Principalmente la “**dualidad onda- partícula**” establecida no sólo en el caso de la luz, sino como una propiedad de la física a nivel subatómico a través del electrón por De Broglie; y el **principio de incertidumbre** de Heisenberg fueron importantes para la intrusión del **subjetivismo** como una propiedad del mundo subatómico por parte de las escuelas englobadas en la denominación “**ortodoxa**”. (Feynman ha llamado al método que distingue entre onda y partícula el “experimento crucial” de la Mecánica Cuántica porque se considera que “el observador” interfiere en lo que ocurre inevitablemente). Como explica Shahen Hacyan del Instituto de Física de la UNAM: si decidimos medir la velocidad de un electrón con absoluta precisión -según el principio de incertidumbre- su posición puede ser cualquiera, por lo tanto,

ese electrón puede estar en cualquier lugar en el universo, y uno puede preguntarse: ¿tiene realidad objetiva la posición de un electrón en el universo?”. Si decidimos medir con absoluta precisión su posición pierdo toda precisión sobre la velocidad y habríamos de preguntarnos “¿tiene realidad objetiva la velocidad de un electrón? ¿O será que los objetos del mundo atómico adquieren realidad objetiva sólo después de la medición?”.⁶⁵

Otro importante argumento del círculo de científicos que engloban estas tres escuelas y centrado en la interpretación de Born de la ecuación de onda de Schrödinger, fue que en la formulación de la mecánica cuántica se habla de *estados se un sistema*. Un sistema atómico puede estar en varios estados a la vez y el estado general del sistema se

⁶⁵ Shahen. *Comunicaciones cuánticas, teleportación y el gato de Schrödinger*. P. 154.

describe por Ψ , la función de onda que es en general una superposición de todos los estados. La información que se obtiene en la mecánica cuántica es la *probabilidad* de encontrar al sistema en cierto estado después de efectuar la medición, de ningún modo dice en cuál de estos estados se encontrará el sistema.

En este sentido -usado por la interpretación de Copenhague- la teoría cuántica es *indeterminista*. Según ella, la indeterminación de la mecánica cuántica proviene del hecho de que cuando se hace una medición se introduce un nuevo elemento, ya no se trata de la función de onda de la ecuación de Schrödinger, sino de algo que los físicos llaman “*colapso*” o la *reducción de la función de onda*, en el que interviene “*el observador*”, que obliga al sistema a manifestarse en uno de los estados posibles.⁶⁶

Esta interpretación parece olvidar que también podemos decir que la teoría cuántica es determinista en otro sentido. Recordemos que la mecánica cuántica, cuando menos la no- relativista se rige por la ecuación de Schrödinger que es una *ecuación lineal* de primer orden en el tiempo y que como tal es una ecuación 100% determinista. Si se conoce la función de onda en un tiempo dado, esta ecuación permite evaluar la función de onda en cualquier otro tiempo con absoluta precisión.

Esta problemática condujo a lo que Popper llama un “cisma en física” entre dos visiones diferentes de la mecánica cuántica: la de **Copenhague** –centrada en Bohr- que sostiene todo lo anterior como una teoría *terminada*; y la posición determinista que **Einstein** defendió durante toda su vida de que debía haber una *teoría más profunda y que estábamos lejos de la última palabra*. Einstein nunca negó el valor de la mecánica cuántica en la formulación de Heisenberg y Schrödinger; para él era una teoría válida que funcionaba muy bien, sin embargo siempre la consideró *incompleta*.

⁶⁶ *Ibid.*

Podemos ver que la exploración del fenómeno atómico y subatómico trajo a los científicos relaciones con extrañas e inesperadas circunstancias; bastante distintas a las consideradas habitualmente, lo que los llevó a muchas especulaciones. Los físicos del siglo XX se enfrentaron a un problema respecto a la forma de *interpretar* el mundo físico. Las respuestas que la naturaleza daba a sus preguntas eran paradójicas y mientras más se esforzaban por aclarar la situación, más grandes se volvían las paradojas.

Parecía que los conceptos básicos, el lenguaje y el total de la mentalidad clásica eran inadecuados para describir fenómenos atómicos. La dualidad onda- partícula de la materia y el papel fundamental de la probabilidad dieron un giro a la visión clásica de objetos físicos. A nivel subatómico, los objetos materiales del mundo clásico se disuelven en patrones probabilísticos de ondas. Patrones que no representan la probabilidad del objeto, sino de sus interconexiones. Las partículas subatómicas no tienen sentido como entidades aisladas, tienen que ser entendidas como interconexiones entre varios procesos.

Sir James Jeans –a quien identificamos con la posición ortodoxa- distingue seis consecuencias principales de la atomicidad de la radiación o la cuantización de la materia a la par de los hechos establecidos de la teoría ondulatoria de la luz:

- 1.- En cuanto al “**fenómeno**” –dice- la uniformidad de la naturaleza desaparece.
- 2.- Conocimiento preciso del mundo exterior es “**imposible**” para nosotros.
- 3.- Los procesos naturales no pueden ser representados adecuadamente sin un marco de espacio y tiempo.
- 4.- La división entre **sujeto y objeto ya no es definitiva** o precisa; completa precisión sólo se puede obtener uniendo sujeto y objeto en una unidad completa.

5.- Hasta donde concierne a nuestro conocimiento, la **causalidad** *carece de sentido*.

6.- Si aún queremos pensar en los hechos en el mundo del fenómeno como gobernado por una ley causal, debemos suponer que estos sucesos están determinados en algún sustrato del mundo subyacente al del “fenómeno” y por lo tanto también *supera nuestros límites*.⁶⁷

Ernst Nagel resume la problemática así:

la concepción que ha sido desafiada con especial vigor es la de que los sucesos de la naturaleza se producen en órdenes causales fijos cuyo descubrimiento constituye la tarea de la ciencia. Se sostiene frecuentemente que los hallazgos actuales de la física ya no garantizan la postulación de tales órdenes causales y que el ideal de una ciencia de la física con teorías estrictamente deterministas debe ser abandonado porque es intrínsecamente irrealizable.⁶⁸

Hoy, la mecánica cuántica avanza sin dificultad sosteniéndose en esta interpretación. Evidentemente, a pesar de las dificultades que presenta a nivel teórico, la teoría cuántica ha arrojado resultados asombrosos ya que se encuentra en perfecta concordancia con la experimentación y ha sido sumamente fructífera. En ella se basa casi toda la ciencia y tecnología modernas. Es el origen del 30% del producto interno bruto de

⁶⁷ Jeans. *Physics and Philosophy*. P. 145

⁶⁸ Nagel. *La estructura de la ciencia*. P.258.

Estados Unidos y gobierna nuestros transistores, circuitos integrados (componentes esenciales de los aparatos electrónicos), y por ello las computadoras, el láser, los enormes equipos de resonancia magnética... y en ella se basan la química y la biología de nuestro tiempo, sin mencionar que hoy nos permite hablar de *teleportación cuántica*.⁶⁹ Por todo esto, la interpretación subjetivista se ha estandarizado y respetado como la versión “oficial” de la teoría cuántica.

Esta tesis tiene como objeto comprobar que todos estos argumentos son insostenibles. Que esta es una visión errónea y que en el mundo subatómico sigue reinando la objetividad y el realismo, precisamente porque es producto de una tradición que los presupone. Los siguientes capítulos serán una argumentación en favor de esta postura. El próximo capítulo lo hará a través de las críticas que se desarrollaron dentro de los sectores de la propia física que se mostraron insatisfechos con estas interpretaciones y resultados. Sectores que diseñaron experimentos cuyo propósito era poner en crisis la interpretación subjetivista de la mecánica cuántica.

⁶⁹ Boletín de la Sociedad Mexicana de Física. 15-3, 2001. Pp. 91-92