

IMPLICACIONES LÓGICAS Y FILOSÓFICAS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DEL PROGRAMA DE EXCELENCIA

AIDA GARCÍA CALLEJO



BAJO LA DIRECCIÓN DE:

CARLOS MADRID, *DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS*

EZEQUIEL CASTELLANOS, *DEPARTAMENTO DE FILOSOFÍA*

IES DIEGO VELÁZQUEZ, TORRELODONES, MADRID

ENERO, 2015



ÍNDICE

RESUMEN / ABSTRACT

1. EL MARCO CONCEPTUAL DE LA FÍSICA CLÁSICA.....	5
1.1 Primer aspecto: realismo e inteligibilidad.	
1.2 Segundo aspecto: atomismo y geometrización de la materia.	
1.3 Tercero: propiedades dinámicas de los sistemas físicos.	
2. INTRODUCCIÓN A LA CUÁNTICA.....	9
2.1 Radiación del cuerpo negro.	
2.2 Efecto fotoeléctrico.	
2.3 Hipótesis de Bohr: postulado cuántico de 1912-13.	
3. EL CUANTO DE ACCIÓN: h Y SUS CONSECUENCIAS EPISTEMOLÓGICAS.....	25
4. DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA.....	27
4.1 Hipótesis de De-Broglie.	
4.2 Respecto a la dualidad... ¿Qué son las cosas <i>realmente</i> ?	
5. EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE.....	37
6. EL FORMALISMO CUÁNTICO: Implicaciones y problemas de índole epistemológica.....	45
7. EPISTEMOLOGÍA.....	53
7.1 Condiciones epistemológicas para la descripción cuántica.	
7.2 Filosofía de la complementariedad de Niels Bohr.	
8. KANT VS BOHR: Fundamentos filosóficos.....	67
9. REFLEXIÓN ONTOLÓGICA.....	73
10. BIBLIOGRAFÍA Y RECURSOS ELECTRÓNICOS.....	80

RESUMEN

En el año 1900 se inició una revolución que afectaría a nuestra concepción del mundo físico y el conocimiento científico. El descubrimiento de Max Planck del cuanto de acción abrió el camino a un nuevo instrumento teórico entre las nociones deterministas de la física clásica, que se adentraría en las más pequeñas escalas de la realidad material.

La brecha que surgió entre los niveles macro- y microcósmico obligó a la ciencia a replantearse las bases conceptuales sobre las que se edificaban sus leyes, así como a reinterpretar las mismas. Las descripciones causales de los objetos propios de "nuestra realidad", sujetas a un espacio y un tiempo, que hasta el momento habían sido garantía de una representación objetiva de nuestro mundo, debían ahora ser debatidas. Así es como se produjo en el seno de la comunidad científica el despertar de un sueño dogmático, fuera del cual la (hasta cierto punto inocente) perspectiva determinista de un universo regido por leyes causales amplía sus horizontes para cuestionar la racionalidad y la comprensión de la realidad. Fue por ello por lo que la reflexión y el diálogo filosóficos hubieron de complementar el avance científico, para lo que el análisis del lenguaje y los recursos lógicos fueron esenciales. La reconstrucción conceptual del mundo ha de ser tan precisa como reflexiva y rigurosa, y requerirá una actitud filosófica abierta además de la analítica propia del científico, puesto que realmente no hay forma única, total, de resolver la cuestión de la interpretación de este nuevo conocimiento, bautizado con el nombre de mecánica (o física) cuántica.

ABSTRACT

Max Planck's discovery of the *quantum of action* in 1900 paved the way for a new theoretical tool among the deterministic notions of classical Physics, which went deep into the smaller scales of material reality, a revolution that would affect our conception of the physical world and scientific knowledge.

The gap that emerged between macro- and microcosmic levels forced science to reconsider the conceptual basis on which it had built its laws and to reinterpret them. The causal descriptions of objects in "our reality", subject to space and time, which until then had been proof of an objective representation of our world, had then to be discussed. That is how the scientific community awoke from a dogmatic slumber, outside of which the (to some extent naive) deterministic perspective of a universe governed by causal laws expanded its scope to question the rationality and understanding of reality. It was for this reason that philosophical reflection and dialogue had to complement the scientific breakthrough, with the analysis of language and logical resources becoming essential. The conceptual reconstruction of the world is to be as accurate as thoughtful and rigorous, requiring an open philosophical attitude besides the proper scientific insight, since there is not an only way to solve the question of this new knowledge's interpretation, which came to be known as *Quantum Mechanics*.

“Si la Naturaleza es la respuesta,
¿cuál era la pregunta?”

Jorge Wagensberg.

1. EL MARCO CONCEPTUAL DE LA FÍSICA CLÁSICA

(El ideal descriptivo clásico de la naturaleza)

Tres elementos fundamentales constituían el planteamiento clásico mecanicista: el paradigma racionalista, el atomismo y geometrización de la Naturaleza y el modelo de continuidad electromagnética. Estos postulados con los que la física tradicional interpretaba y explicaba la Naturaleza entraron fuertemente en conflicto con las nuevas ideas introducidas por la física cuántica, de ahí que resulte interesante detenerse a considerar la base conceptual sobre la que se desarrolló la ciencia clásica moderna.

A medida que profundicemos en el tema y se manifieste la imposibilidad de conciliar el conocimiento científico tradicional con la nueva teoría, resultará evidente que la renuncia a los principios fundamentales clásicos dificultará la correspondencia de las descripciones cuánticas con el “mundo objetivo” al que remiten, puesto que tampoco resultará factible conservar el contenido intuitivo tan valioso en la ciencia tradicional.

La ciencia clásica que nació en los siglos XVII y XVIII entendía la materia a nivel mesocósmico, que es aquel que a escala humana resulta accesible a nuestra percepción inmediata (medible con precisión mediante nuestros instrumentos), como una composición discontinua de otros constituyentes más simples, ya no perceptibles a través de nuestros sentidos, los del nivel microcósmico. Se consideraba además que las partes poseían características comunes con el todo, y de esa forma se asimilaba el concepto de materia. Así fue como arraigó la suposición de que objetos tanto micro- como mesocósmicos existían en un mismo sentido y podían ser igualmente explicados por un materialismo mecanicista basado principalmente en la segunda ley fundamental de Newton¹. De ahí que la teoría que trata sobre la evolución dinámica de los cuerpos recibiera el nombre de *mecánica newtoniana*.

¹ Objetos de masa m que, en un espacio y tiempo incondicionales, interactúan de acuerdo a alteraciones de su momento y energía, según la mencionada ley de proporcionalidad: $F=m \cdot a$.

1.1. Primer aspecto: realismo e inteligibilidad

El ideal descriptivo de la ciencia moderna se originó con el fin de detallar los comportamientos en la Naturaleza partiendo de una concepción realista, que diera una explicación efectiva de los fenómenos y no se cerrara simplemente a un cálculo predictivo que permitiera construir un modelo teórico de los movimientos aparentes con determinado apoyo instrumental. El convencimiento de que la teoría no debía ser ajena a la realidad y de la importancia de las causas físicas y el carácter racionalista llevó a los nuevos físicos a centrarse en el estudio del *cómo* y el *por qué* suceden los fenómenos en nuestro mundo. Se habla por tanto de realismo al referirse a la creencia de que es posible dar una explicación objetiva de lo que “*realmente*” ocurre, de obtener una verdad explicativa causal más allá de cualquier pronóstico matemático. (Actualmente sigue existiendo polémica respecto a este tipo de cuestiones en ramas como la astrofísica).

A partir de mediados de s. XVI, gracias a los trabajos de Nicolás Copérnico y posteriormente Galileo, se consiguió empezar a unificar en cierta medida ambas posturas; el instrumentalismo formal y el realismo científico, gracias a una importantísima labor epistemológica. Tal unificación permitió, por ejemplo, introducir un programa astronómico matemática y detalladamente elaborado que al mismo tiempo predecía y aportaba explicaciones de todos los movimientos planetarios. Por su puesto, su doctrina sostenía que el universo es inteligible porque posee una estructura ordenada y racional, influenciado en su época por la idea de la armonía platónica, y nosotros podemos alcanzar a comprenderlo a través de la matemática, que es la razón imperante.



Esta era la esencia de los pensamientos pitagórico y platónico, para los que el número y la geometría son la base de la disposición del mundo, si bien no coincidía en igual medida con la aristotélica, que concedía a estos últimos menor importancia. La identidad entre las dos posturas anteriormente mencionadas se justificaría así en que lo verdadero en una, debía

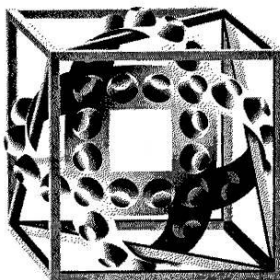
necesariamente cumplirse en la otra, haciéndose compatibles la predicción y la posterior explicación.

Los objetivos conjuntos de predicción y explicación originaron en los siglos venideros nuevos conceptos físicos que, estando matematizados, pudieran conectar teoría y experiencia. La física clásica se ajustó al propósito de mantener tanto la coherencia interna como la correspondencia entre los aspectos formal y real en sus razonamientos. Sin embargo, la física cuántica pronto suscitaría otra clase de problemas, ¿cuál es la realidad y exterioridad del mundo físico? ¿Cómo deben las teorías describir el mundo?

1.2. Segundo aspecto: atomismo y *geometrización* de la materia

¡El representacionismo pictórico en entredicho!

Como ha sido ya mencionado, el objetivo de la física clásica se estableció en la matematización de la realidad en la Naturaleza. Esto consistía en, siguiendo el programa cartesiano, derivar cantidades calculables de las propiedades cualitativas de los objetos materiales para extender una serie de reglas que rigieran el comportamiento de los mismos. La adecuación entre realidad y teoría desembocó en lo que se conoce como *experiencia idealizada*, por la que a partir de una experiencia ordinaria se precisaban determinados supuestos teóricos que esclarecían dicha experiencia desde su esencia, siendo éste el verdadero objeto de estudio y no tanto lo directamente perceptible. Esta racionalización de lo real se llevó a cabo desde las matemáticas, cuyo papel en cualquier postulado racionalista debía (y debe) ser imperante. De esta manera se construía un modelo explicativo de la realidad a partir de la teorización de un concepto empírico que pasaba a ser racionalizado.



¿Sobre qué conceptos se alzó la mecánica clásica?

Podemos hablar de espacio, tiempo, materia y fuerza.

La posición exacta de cualquier cuerpo precisa para ser estudiada del marco de referencia universal que forman el espacio y el tiempo. Al idealizar estos últimos, se habla de “continuo espacio-tiempo” porque se considera que la naturaleza del marco mencionado era continua, es decir, los cuerpos interactúan en un ambiente vacío que no influye ni altera su estado de movimiento, el espacio es plano y el tiempo una sucesión infinita de instantes. Esto se establecía así para poder calcular las propiedades geométricas (características espacio-temporales) de los cuerpos estudiados, una vez más gracias a la matematización, que posibilitaba basarse en observaciones cuantitativas.

Todo lo mencionado en el párrafo anterior debía ser complementado con una explicación de la materia desde el modelo corpuscular, porque según la mecánica clásica, cualquier objeto material estará constituido por partes atómicas (indivisibles, indestructibles, inmutables) sujetas también a un espacio y un tiempo. Espacio, tiempo y materia se geometrizaron, tomándose para su estudio la referencia de los ejes cartesianos de coordenadas x , y , z que asignarían a cada cuerpo una **única** posición determinada por tres coordenadas, añadiéndose la variable del tiempo t en función de la cual podrá medirse el desplazamiento de un cuerpo de un punto a otro. La trayectoria que se trazase entre las diferentes posiciones que tomase el móvil en su recorrido sería siempre continua.

¿Acaso no se correspondía esto con las observaciones? ¿O es que no observamos un desplazamiento de forma continua, como un paso por todos los puntos intermedios entre el comienzo y el final?



Metamorfosis I (1937), M.C. Escher.

1.3. Tercero: Propiedades dinámicas de los sistemas físicos

¿Cómo se produce el movimiento? Atendiendo a las causas responsables del movimiento de los cuerpos surge la dinámica, que planteada por Isaac Newton (1642-1727) establece que el movimiento de la materia, en sí misma pasiva e inerte (principio de inercia), se debe a la acción de fuerzas de naturaleza extrínseca a la misma y por las que interacciona con el resto de los sistemas materiales intercambiando cantidad de movimiento. Las magnitudes que aludan a estas variaciones se referirán a cualquier manifestación de energía, ya sea potencial, térmica, eléctrica..., pero entendido el concepto de energía desde el paradigma continuo que se utilizaba para la luz en el siglo XIX, debido a los trabajos de Young y Fresnel, y dejando de lado el modelo corpuscular propuesto por Newton.

Esto nos conduce directamente a mencionar los trabajos de Maxwell sobre el electromagnetismo, científico que mediante las conocidas “ecuaciones de Maxwell” explicó en términos ondulatorios los fenómenos electromagnéticos como entidades de naturaleza energética, incluyendo también los luminosos. Reunidas las leyes de electricidad y magnetismo, una de las bases de la teoría de Maxwell fue el concepto de campo electromagnético, como espacio dinámico de naturaleza ondulatoria y continua.

Así convivieron a finales de siglo XIX la teoría atomista corpuscular y el modelo ondulatorio para explicar materia y energía, respectivamente. Cada uno de estos modelos explicativos correspondía a una realidad diferente, partículas materiales o campos y radiaciones, de estructura corpuscular, discreta y localizable las primeras, y de naturaleza ondulatoria, continua y expandida como portadores de energía los segundos.

2. INTRODUCCIÓN A LA CUÁNTICA...

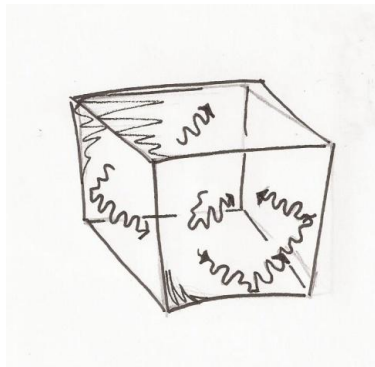
Nos situamos a finales del s.XIX, momento en el que los estudios sobre radiación y espectros electromagnéticos abrían el camino a la nueva teoría cuántica. A pesar de los numerosos y notables descubrimientos de los últimos siglos, el mundo de la física tenía aún trabajo por hacer. Más concretamente, era necesario matizar con precisión algunos de los fenómenos que se habían estado observando, por no haber quedado claramente asentados. De entre éstos, dos aspectos fueron relevantes al descubrimiento de la física cuántica en el siglo siguiente. Así, la revolución científica que desencadenaría dar sentido a la *radiación del cuerpo negro* o al *efecto fotoeléctrico*, demostraría a la ciencia del momento que su conocimiento sobre el universo estaba muy por debajo de lo que hasta entonces se creía. Los modelos con los que se había explicado la materia durante dos mil años convirtieron la naturaleza de los constituyentes del compuesto material en inexplicable. A continuación veremos cómo las leyes clásicas no son ya aplicables a esos constituyentes, cuyas características, distintas a las establecidas hasta ese momento, impiden que pueda reconstruirse el objeto material a partir de las mismas leyes que los rigen a éstos; no existe continuidad isomórfica entre las propiedades del átomo y los compuestos materiales a los que éste da lugar. El descubrimiento de la discontinuidad cuántica supondrá la ruptura entre el mesocosmos y el microcosmos.

2.1. Radiación del cuerpo negro:

Hace algo más de cien años, en pleno comienzo de la expansión de la física, ramas tan importantes dentro de ésta como lo eran la termodinámica o el electromagnetismo permitían a los científicos explicar de manera excelente *casi* todos los fenómenos que guardaban alguna relación con ellas. Casi todos, porque aún a pesar de su eficacia, existía un problema que implicaba a ambos campos al mismo tiempo y que no había sido resuelto. El de la radiación del cuerpo negro.

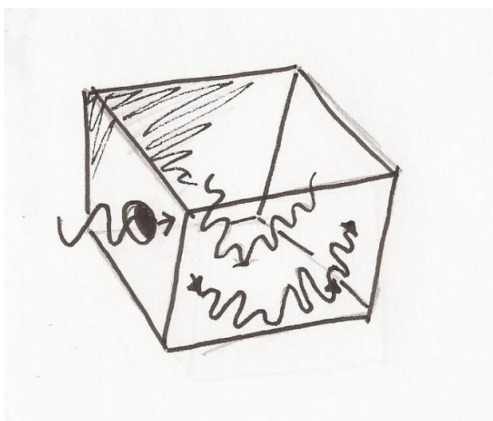
¿Qué es un cuerpo negro? En física se define como un sistema teórico o ideal que absorbe toda la energía radiante (en todas las frecuencias) que incide sobre él, es decir, posee un coeficiente de absorción de energía igual a la unidad. Puede visualizarse como un

recipiente hermético en cuyo interior materia y radiación estuvieran en equilibrio (pero realmente no existe nada que absorba todas las frecuencias por igual, aunque se han encontrado ejemplos bastante aproximados en la Naturaleza, como los hornos). Dicho objeto ni refleja ni transmite absolutamente ninguna radiación, pero lo absorbido puede ser emitido, por lo que no tendría que ser necesariamente negro en nuestras cabezas. Como puede emitir energía por sí mismo en todas las longitudes de onda, si le proporcionamos más y se va calentando, sí que puede llegar a brillar o cambiar su color, y no lo hará porque refleje nada.



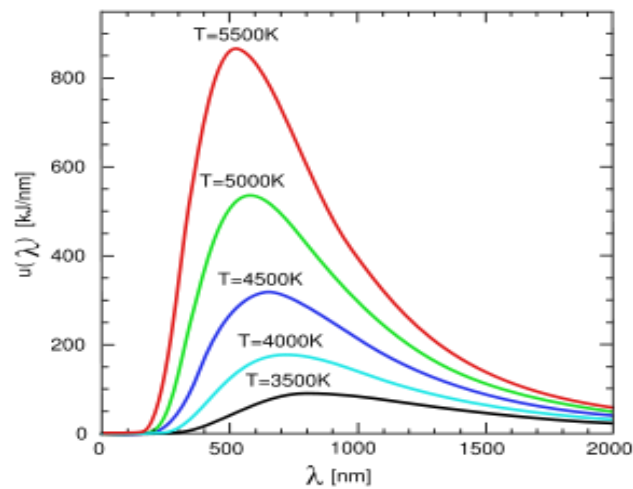
Aunque la ciencia del momento conocía los medios de transmisión de la radiación en el espacio, desconocía cómo funcionaba la materia a la hora de absorber y emitir dicha radiación.

Para que se diera el equilibrio que hemos mencionado, evidentemente no sería posible “abrir” el cuerpo negro. Sin embargo, ya que estamos imaginando, pongámonos en la situación de que pudiera conseguirse una abertura ínfima por la que la radiación que se mantenía rebotando entre las paredes imaginarias escapase lentamente sin alterar la estabilidad, y de ahí pudieran estudiarse las frecuencias e intensidades de las radiaciones del cuerpo negro.



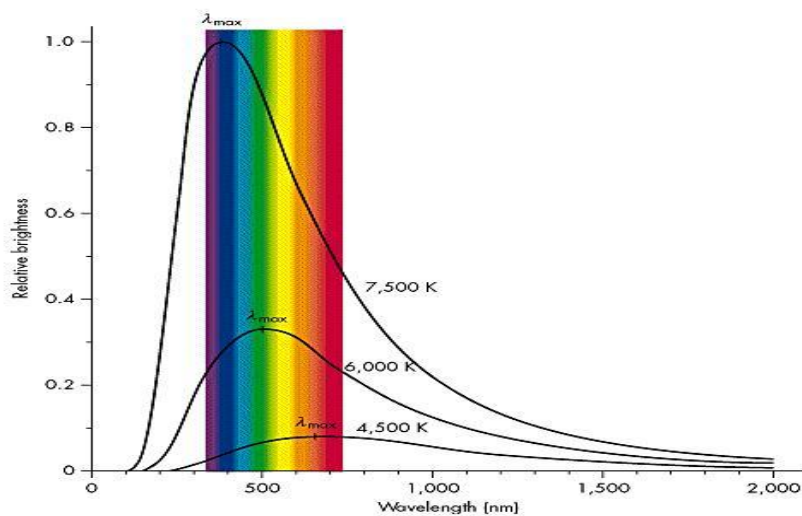
Las frecuencias determinadas que emitiría un cuerpo negro ideal, que son en su conjunto lo que recibe el nombre de radiación de cuerpo negro, describen una curva que podían conocer los científicos de la época. Si antes hemos dicho que el color de ese cuerpo negro imaginario variaba en función de la temperatura, en este punto lo asociamos de igual forma a la radiación emitida.

Cuanto más caliente se encontrase, menor sería la longitud de onda en la que tuviera un máximo de emisión.



(Recordemos que el producto de la longitud de onda por la frecuencia de la radiación equivale a la velocidad de la luz, y por tanto ambas magnitudes son inversamente proporcionales, $C = \lambda \cdot \nu$ (nu).).

Interpretando la gráfica, el eje vertical representa la energía que se emite en cada nanometro del espectro electromagnético, y el horizontal la longitud de onda. Queda por tanto manifiesto que cuánto más caliente está el cuerpo, más energética es la radiación que emite (esto es lógico) y menor es la longitud de onda, como muestra el máximo de emisión cada vez más situado hacia la izquierda. Un cuerpo muy frío apenas brilla porque la energía que emite se encuentra casi en su totalidad en la región infrarroja, mientras un cuerpo a mayor temperatura tiene un color rojo o incluso azulado, si está aún más caliente.

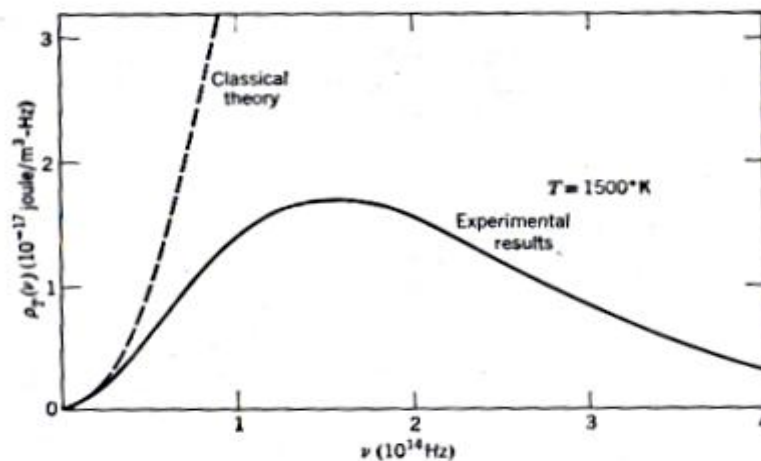


Volvamos ahora al pensamiento de la época, para poder entender cómo se dispusieron a explicar el comportamiento de un cuerpo negro:

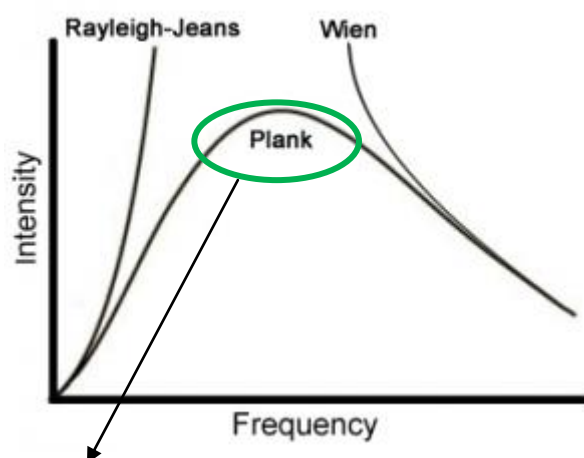
Las teorías imperantes en ese momento partían del supuesto de que la superficie de cualquier material estaba compuesta por miles de “osciladores” muy pequeños (corresponderían a los átomos con los que se trata hoy en día). Esos osciladores, como su propio nombre indica, se encontrarían vibrando alrededor de un punto en equilibrio. La amplitud y velocidad de la vibración eran proporcionales a la temperatura, pero también podían emitir parte de esa energía proporcionada por el incremento de grados en forma de onda electromagnética, lo que suponía que oscilaran más despacio y se enfriaran.

Lord Rayleigh y Sir James Jeans dieron lugar, basándose en esto, a lo que se conoce como Ley de Rayleigh-Jeans (1905). Grosso modo, la ley indica que el cuerpo negro emite en función del producto de la frecuencia de la radiación al cuadrado por la temperatura del cuerpo ($f^2 \cdot T$).

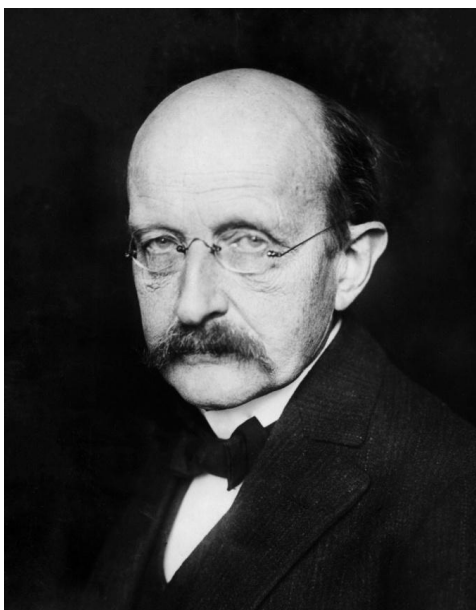
En un primer momento, la curva que se obtenía a partir de dicha fórmula para longitudes de onda largas se ajustaba bastante bien. Pero para longitudes de onda más cortas divergía exageradamente. Es decir, aplicando las teorías clásicas al fenómeno de la radiación de un cuerpo negro, resultaba imposible que la curva teórica de la radiación emitida y la curva real coincidieran. Esto resultaba catastrófico, la deducción lógica que se obtenía de la evidencia experimental de la física cotidiana predecía que un cuerpo negro debía emitir una energía, ¡infinita!. La fórmula teórica era imposible, y este problema recibió el nombre de “catástrofe ultravioleta” (por Ehrenfest), ya que la divergencia se producía en la región del azul al violeta del espectro:



El físico alemán Wilhelm Wien llegó a encontrar otra divergencia basándose en las fórmulas clásicas, esta vez en el nivel infrarrojo:



Así fue cómo, echando la vista atrás, fueron a dar con el trabajo publicado por Max Planck en 1900, al que no se había prestado demasiada atención. Este científico había dado ciertamente con una solución al problema, pero para ello se había basado en suposiciones que no gustaban a nadie, ni siquiera a él mismo. Cuando Planck decidió trabajar sobre el tema, era plenamente consciente de que ninguna de las teorías de finales de s.XIX producía una curva de emisión igual a la real. Por eso, imponiendo una pequeña condición, derivada de la concepción estadística que Boltzmann había proporcionado de la entropía, llegó a obtener una fórmula matemática de enorme precisión, tanto que además de ajustarse milimétricamente a la realidad, permitía explicar cualquier experimento realizado con cuerpos negros.



Max Planck

¿Cuál fue esta suposición? La argucia matemática en la que se basó Planck consistía en considerar que esos osciladores que componían la materia no podían tener *cualquier* energía arbitraria, sino sólo valores discretos entre los cuales no era posible ningún valor intermedio. Los intercambios de energía entre materia y radiación se realizan por medio de cantidades bien definidas, “cantidades mínimas de acción”. Lo intuitivo, de sentido común, habría sido considerar que un oscilador pudiera oscilar como le diera la gana. Sin embargo, al considerar las paredes del cuerpo negro como un

conjunto de osciladores, se topó con la necesidad de asumir que esto no podía ser así y en este punto los cálculos concordaban con la realidad perfectamente.

Como no vamos a entrar en fórmulas, lo que estableció Planck fue que los osciladores de materia sólo oscilan con valores de energía múltiplos enteros de una energía fundamental proporcional a la frecuencia con que lo hacían mediante una constante pequeñísima². Así se determinaba que la distribución total de la energía de un sistema debía estar dividida en un número finito de estas cantidades (al contrario de lo que imponía la teoría clásica), y por tanto que existía un límite por debajo del cual el cuerpo calentado ni absorbe ni emite energía.

$$E = h \cdot V \cdot n$$

(Siendo h la cte. de Planck y V la frecuencia de oscilación).

Esto implicaba que la radiación que cualquier cuerpo absorbiese y emitiese no se produciría de forma continua, sino a saltos. De ahí que actualmente se diga que la energía de cualquier sistema material está cuantizada, tiene valores discretos, escalones, paquetes, como queramos llamarlo, cuantos de energía. Además, se pudo determinar el error en las fórmulas de Rayleigh, en las que se suponía la naturaleza continua de la radiación.

Esta aparentemente inofensiva teoría, dio comienzo a todo el revuelo que causaría la nueva física. Desde luego, imaginar la cuantización de la energía era mucho más difícil que la de la materia, y Planck no sólo no empleó la palabra “cuanto”, sino que tardó años en reconciliarse con las implicaciones de su hipótesis. Precisamente por esas escalofrantes implicaciones tampoco resultó fácil de aceptar para los otros físicos, que no podían considerar su hipótesis como auténtica explicación a los sucesos del intercambio energético de la radiación porque contradecía la propia naturaleza continua de la misma, sobre la que se asentaban los modelos ondulatorios que la describían y la base de la física clásica. Si no hubiera sido porque Albert Einstein comprendió y fundamentó las explicaciones de Planck, quizá no habría recibido el Premio Nobel en 1918 *“en reconocimiento a los servicios que rindió al avance de la Física por su descubrimiento de los cuantos de energía”*, y la mecánica cuántica habría tardado algunos años más en ser descubierta.

² La cte. de Planck; $h=6.63 \cdot 10^{-34}$ J·s

2.2. Efecto fotoeléctrico:

El segundo experimento que impulsó el descubrimiento de una teoría coherente sobre la física cuántica y la destrucción de la realidad objetiva absoluta fue, como hemos comentado, *el efecto fotoeléctrico*:

Si las suposiciones que hacía la física clásica sobre el mundo microscópico todavía no habían sido derrumbadas, este segundo paso en la historia contribuyó notablemente a ello. Además, veremos a continuación cómo se establecen algunos paralelismos entre éste y el problema de la radiación de cuerpo negro. De nuevo remontándonos a finales del s. XIX, destacamos el efecto fotoeléctrico de entre los pocos fenómenos que hasta ese momento no tenían una correcta explicación teórica.

La observación, realizada por Heinrich Hertz en 1887, consistía en lo siguiente: si se hace incidir luz sobre un metal, ésta es a veces capaz de arrancar electrones de su superficie y conseguir que se muevan, produciendo así una corriente eléctrica (de ahí el nombre “electricidad a partir de luz”). Para los entendidos en el tema, este sintetizadísimo enunciado resultará sin duda muy pobre, pero por el momento sólo exponemos la idea general sobre lo, aún entonces bastante poco, que se sabía sobre el efecto. De dicho enunciado, lo que principalmente confundía a los científicos era el “a veces”, y en esto centraron toda su atención.

El principal aspecto que despertó la curiosidad de la comunidad científica fue la aparente relación entre la energía del rayo y la energía cinética de los electrones que eran arrancados de la placa metálica, mientras la intensidad de la luz no era un factor decisivo. Como no podía ser de otra manera, en un primer momento razonaron sobre por qué se producía y cuándo debía hacerlo partiendo de las bases clásicas. La conclusión a la que se llegaba de esta manera establecía que la luz, que transporta energía, al chocar contra el metal le transmitía la energía, y el efecto fotoeléctrico se produciría si dicha energía fuera suficiente, no ocurriendo nada en caso de que no lo fuera. Se llegó incluso a barajar que en función de la potencia de las bombillas de luz se produciría o no el efecto fotoeléctrico. Aunque algunas de estas suposiciones no estuvieran del todo alejadas, nada de esto coincidía con la práctica en la realidad. Por mucho que se incrementase la potencia, no se arrancaba ni uno solo de los electrones que componían el metal. Y para colmo, pronto observaron los científicos que si una bombilla era capaz de arrancar electrones del metal, continuaría siendo

capaz incluso reduciendo al mínimo posible su potencia. Ciertamente que arrancaba menos electrones en ese caso, pero los arrancaba al fin y al cabo.

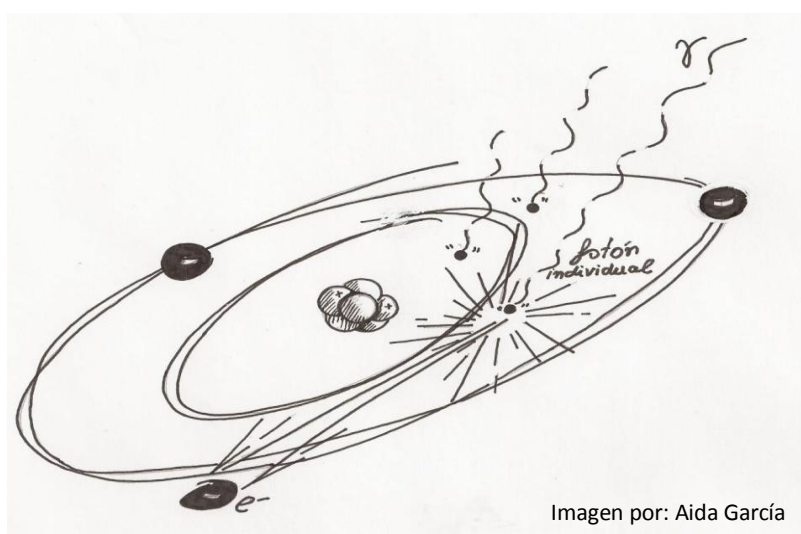
Prueba tras prueba, todavía tratando de ajustarse a la teoría clásica, sometieron el experimento a tantas condiciones diferentes que finalmente se dedujo el “absurdo” de que el factor decisivo para que se produjera el efecto, ¡era la luz de la bombilla! O lo que es lo mismo, en términos físicos, la frecuencia de la radiación, lo que nuestros ojos perciben como color en el visible del espectro. Así se iban recogiendo diferentes datos. Estudiando también la intensidad, observaron que, al parecer, sí podía llegar a influir en el experimento. Si el rayo de luz no tenía la frecuencia suficiente (denominada frecuencia umbral) para arrancar los electrones, simplemente nada ocurriría. Pero si una vez superado ese valor se incrementaba la intensidad, el número de electrones arrancados era mayor, aunque su energía fuera la misma que cuando se liberaban menos. Lo único que influía en el aumento de la velocidad era de nuevo la frecuencia de la luz. Así, una luz azul arrancaría electrones a mayor velocidad que una amarilla, por ejemplo. ¿Pero qué estaba pasando? Al fin y al cabo, en la teoría ondulatoria de finales de siglo XIX la frecuencia ni guardaba relación con la energía ni reconocía límite alguno a la repartición de esta última por la superficie de todo el metal.

Conocido todo esto, fue inevitable que Albert Einstein, basándose en la hipótesis de Planck, que sí relacionaba energía y frecuencia, y confiándolo todo a la lógica, razonase hasta concluir una interpretación que perfectamente se ajustaba al fenómeno. A pesar de que la ley de Planck del cuanto de acción no se ajustase al modelo explicativo clásico de onda electromagnética y fuera, además, un artilugio matemático con un reducido ámbito de aplicación, el científico alemán ignoró los posibles inconvenientes para adaptar la fórmula de Planck a su propio trabajo, publicado en 1905 y que trataba de lo siguiente:

Tomando como verdadero que la materia está compuesta por pequeños osciladores que poseían energías cuantizadas, de valores proporcionales a la cte. de Planck y a la frecuencia de oscilación, Einstein se planteó si la energía que desprenderían estaría sujeta a las mismas condiciones. Si los átomos del filamento de wolframio de una bombilla se calentaban, perdían, o mejor dicho, desprendían energía. Y si las fuentes de luz sólo podían entrar en los paquetes de energía pensados por Planck, y la emisión de luz es pérdida de energía, la luz debía cumplir la misma condición. Einstein determinó que no podía darse lugar a ninguna otra posibilidad, que *“la energía luminosa desprendida tampoco podría ser arbitraria, sino que tomaría valores discretos determinados”*. La luz está cuantizada.

(El concepto de luz cuantizada en paquetes o “trozos” fue formalizado por Einstein, y recibió el nombre en alemán de *lichtquant*, “cuanto de luz”. Actualmente recibe el nombre de *fotón*, y fue acuñado por Gilbert Lewis en 1926.)

Habiendo aclarado esto, pudo sustentar con claridad su explicación. La luz está compuesta por fotones, que transportan la energía de la onda: $E = h \cdot \nu$. A mayor intensidad de la luz, mayor número de fotones, y al cambiar la frecuencia, si no lo hace también la intensidad, se mantendrá el mismo número de fotones pero la energía que almacenen variará en consecuencia. De esa forma, cuando los fotones alcanzan a los electrones que forman la superficie del metal, son capaces de transmitirles su energía. Como se sabía a partir de las observaciones, el efecto se produciría si esa energía era suficiente para arrancar a los electrones de las fuerzas de atracción que los mantenían orbitando en torno al núcleo atómico. Fue preciso matizar que esa interacción se producía a nivel particular, entre un fotón y un electrón concretos, no simplemente “entre luz y electrones”, porque ya sabemos que tanto luz como materia están cuantizadas. Y corroborando la realidad, de nuevo, si, al estar una luz de alta frecuencia constituida por electrones de energía muy elevada, el electrón podría ser arrancado, mientras que si es muy intensa, habrá más fotones y cada uno arrancará un electrón. ¿Qué ocurre con los fotones? Que desaparecen. No pueden dar parte de su energía. O está o no está, y toda su energía es concedida al electrón. Pero recordemos, únicamente una vez superado el límite umbral de cada metal para la frecuencia de la radiación.



La teoría predicha por Einstein no sólo coincidía cualitativa y cuantitativamente con la realidad, sino que además fue pronto corroborada por Robert Andrews Millikan (en 1915),

que demostró experimentalmente que la energía de los electrones aumentaba de forma lineal con la frecuencia de la luz. Einstein recibió el Premio Nobel en 1921.

Las consecuencias lógicas de las explicaciones a las que llegaron tenían un impacto tremendo sobre nuestra concepción del universo. Aunque aparentemente las respuestas a los problemas no fueran coherentes, por muy reacios que se mostraran sus propios proponentes a aceptarlas (incluso habiéndolas planteado), estaban perfectamente ajustadas a la realidad.

Esto provocó muchos quebraderos de cabeza. Por ejemplo, sabían que aunque veamos la luz de forma continua, en realidad no es así, sino que las discontinuidades son demasiado pequeñas, igual que ocurría con las energías de los osciladores en el caso de Planck. Pero, ¿qué significa esto de cara a nuestro concepto de universo? Si hasta el momento se había considerado la luz como una onda sujeta a fenómenos sólo propios de ondas, ¿dónde cabía que estuviera ahora compuesta por partículas microscópicas? ¿Cómo podían ser compatibles para la luz fenómenos tan opuestos como la difracción y el efecto fotoeléctrico?

Todas estas cuestiones incrementaron la desconfianza hacia las fórmulas de Einstein, de ahí que se tratara de buscar una y otra vez el testimonio irrefutable de la validez de su teoría, así como la propia existencia de los fotones. Este objetivo se alcanzó en 1926 gracias a Compton. El por tanto denominado *efecto Compton* supuso una manifestación fiable del peculiar comportamiento de las partículas atómicas.

“(...) si dirigimos un rayo luminoso sobre un electrón, inevitablemente provocaremos un efecto Compton: la colisión de un fotón del rayo con el electrón lo desplazará de su posición, imprimiéndole una velocidad distinta a las que nos proponíamos observar. La medida nos indicará entonces lo que pasa después del choque comptoniano y ningún método imaginable nos podrá revelar lo que hubiera ocurrido si no hubiéramos provocado el choque perturbador”.³

Este modelo corpuscular suponía que la amplitud de la oscilación de los electrones dentro del átomo no podía ser una magnitud continua, puesto que mientras no se emitiera ningún cuanto permanecería constante, pero en caso de emisión descendería bruscamente. Se consideró inaceptable hasta 1913...

³ Cf. PAPP, D., *La doble faz del mundo físico* p.87.

2.3 Hipótesis de Bohr: postulado cuántico de 1912-13:

Cierto es que hasta ahora no se ha hecho referencia al momento en el que la teoría cuántica recibió su nombre. Si no ha sido mencionado ni cuándo ni cómo tuvo esto lugar, no es por descuido. Simplemente se trata de que su nacimiento precedió a su nombramiento, y no fue hasta la publicación del modelo atómico de Bohr en el año 1913 cuando éste se produjo (sería posteriormente, en 1924, cuando Max Born lo denominara “mecánica cuántica”). Poniendo en práctica las ideas cuánticas de Planck y Einstein, Bohr llegó a una conclusión muy interesante...

Para ponernos en situación, recordemos como ya a finales del s.XIX comenzó a admitirse la idea de que la materia estaba constituida por átomos, pero que éstos no eran indivisibles, ya que gracias a experimentos como el conocido efecto fotoeléctrico era posible extraer electrones del interior de los átomos, los cuales a su vez habían demostrado ser de gran importancia en el estudio de las relaciones entre materia y luz.

El por qué el átomo era capaz de absorber y emitir luz llevó a Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) a cuestionarse la relación materia-radiación. Desarrolló una teoría de los electrones, de la que, muy resumidamente, se deducía que cualquier cuerpo móvil eléctricamente cargado que experimentase una aceleración debía radiar una luz constante, ahí se planteaba el origen de la radiación.

Con el tiempo, los científicos habían ido progresivamente recopilando datos acerca de la estructura de los átomos. En ese momento se conocían las cargas positivas y negativas “dentro de éste” (la existencia de las primeras era lógica, si se conocía la naturaleza neutra del átomo y la carga negativa del electrón), que las positivas poseían la mayor parte de la masa localizada en un núcleo central aún así pequeñísimo, y que las negativas se encontraban en una zona mucho más amplia y menos densa fuera de dicho núcleo. Antes de esto se había considerado al átomo como una esfera maciza de carga positiva en la que se encontraban “incrustadas” las cargas negativas, lo que constituyó la primera propuesta atómica lanzada por Thomson en 1904. Sin embargo, después de la experiencia de Ernest Rutherford por la que al bombardear finas láminas de oro con partículas alfa éstas no se desviaban, tuvo que descartarse la idea anterior y asumir que el átomo era en su mayor parte vacío. Rutherford, basándose en el electromagnetismo de Maxwell y, de nuevo influido por las ideas clásicas,

produjo en 1911 el modelo más exacto y avanzado hasta la época, pareciendo encajar casi perfectamente. Su modelo, que tan sólo duró dos años, establecía que en el centro se encuentran inmóviles los protones de carga positiva (no hablaba de neutrones) y en torno a ellos giraban los electrones a gran velocidad.

La forma en la que esto era explicado establecía que la velocidad de giro de los electrones era capaz de conseguir que los electrones no cayeran hacia el núcleo a pesar de la atracción de la carga contraria, algo parecido al movimiento de traslación terrestre en torno al Sol, por lo que tenían velocidades altísimas. Como hemos dicho, el modelo era satisfactorio hasta que se intentaban explicar algunos conceptos de la teoría electromagnética de Maxwell-Lorentz. Atendiendo a dicha teoría, una carga que experimentase una variación de cualquier tipo en su velocidad emitía una onda electromagnética, que sería mayor cuanto mayores lo fueran la carga y la variación de la velocidad. El problema aparecía al considerar que, si los electrones giraban tan rápido y cambiaban su dirección alrededor del núcleo, debían por fuerza emitir radiación electromagnética constante, lo cual significaba perder energía, y por tanto velocidad. Tendrían que caer progresivamente hacia el núcleo, acercándose en espiral al centro hasta unirse a los protones. En un brevísimo periodo de tiempo, tendrían diferentes longitudes de onda y terminarían formando una amalgama microscópica con sus contrarios eléctricos. ¡La vida del átomo sería de una fracción de segundo!



Pero claramente, esto no pasaba. Las radiaciones electromagnéticas emitidas por los átomos tienen valores de longitud de onda concretísimos, y el ejemplo más claro era el del hidrógeno, cuya serie de frecuencias era invariable y muy bien conocida.

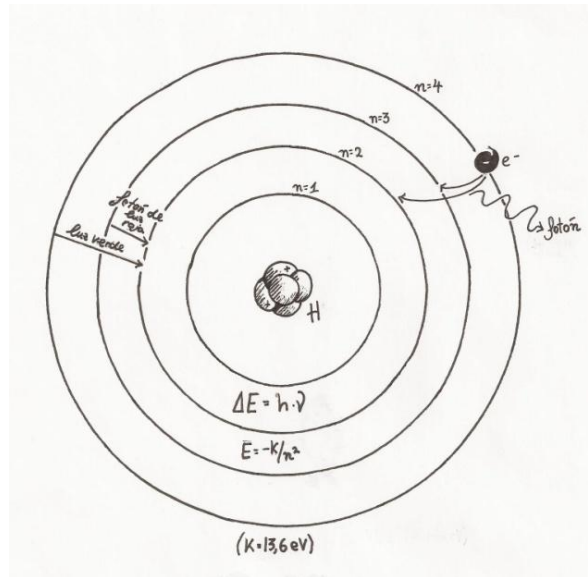
Así fue como en 1913 publicó Bohr “Sobre la constitución de los átomos y moléculas”, deshaciendo parte del enredo. A pesar de lo restringido de las teorías pensadas por Planck y Einstein, Bohr fue capaz de aplicarlas a un caso concreto para deducir después en un nivel mucho más amplio otros aspectos de mayor importancia. Una vez más, produjo una extraña teoría cuyas respuestas a los problemas hasta entonces sin solución eran absolutamente precisas.

Los problemas que planteaba el modelo de Rutherford desaparecían con “simplemente” suponer que los electrones en el átomo se comportaban de manera análoga a los pequeños osciladores de los que hablaba Planck. Supuso simplemente que el electrón no radia moviéndose dentro de una órbita y no perderá energía mientras permanezca ahí. Estas fueron sus conclusiones:

- Los electrones no pierden energía de forma gradual y continua. Ocupan niveles energéticos discretos, los “estados estacionarios” de particular estabilidad, que no tienen nunca energías intermedias porque están cuantizados.

- Sólo la transición de un estado estacionario a otro implicará una variación de la energía. Si un electrón se encuentra en determinado nivel energético, no emite energía, cosa que sí ocurrirá en caso de pasar a uno de energía inferior. Aun así, esa radiación no tendrá cualquier longitud de onda, sino la correspondiente al fotón emitido que se va a llevar la energía perdida en el traspaso. O lo que es lo mismo, la diferencia energética entre el estado final y el inicial en el que se encontrase el electrón.

Esto explicaba que los átomos emitieran determinadas longitudes de onda, porque los fotones tampoco poseían cualquier valor de energía, únicamente la que había entre niveles. Al calcular la energía de los fotones, midiendo sus longitudes de onda y aplicando la teoría fotónica de Einstein, se hizo posible hacer lo mismo con los “escalones” de energía de los electrones en el átomo, que debían tomar los mismos valores energéticos que dichos fotones.



La primera conclusión conllevaba que las órbitas estacionarias no fueran continuas. Así se habla de *niveles de energía* en un átomo, para expresar la forma en la que la energía se presenta cuantizada en estados discretos, discontinuos. La segunda implicaba que el origen de la radiación estuviera ahora en el *salto cuántico* del electrón de un estado a otro, y no en el movimiento acelerado de la carga en trayectoria curvilínea, que dejaría de existir porque el mencionado salto se realiza al margen de coordenadas espacio-temporales.

La conjunción de ambos supuestos dio lugar a lo que Bohr denominó **postulado cuántico**, que establece lo siguiente: los estados energéticos de los niveles del átomo están regulados por la constante h , la energía tiene un carácter discreto. Mezclando elementos de la física clásica y nuevos conceptos cuánticos, sostiene además que el electrón obedece a las leyes de Newton durante su movimiento en torno al núcleo (¡pero sin radiar!), y a las de Einstein y Planck al cambiar de órbita, que es cuando se produce la transmisión de energía en forma de radiación. Esto explicaba las series de Balmer para las frecuencias de las líneas espectrales del hidrógeno (y gran parte del misterio de los términos espectrales en función de la idea de que las frecuencias del átomo vendrán dadas por la diferencia entre niveles), aseguró la estabilidad del átomo con respecto al modelo de Rutherford y aclaró por qué se producía el fenómeno de la radiación de cuerpo negro (si se establece la causa de la radiación en la oscilación de los electrones en el átomo, la condición cuántica establecerá las cantidades enteras en las que variará la oscilación, brusca y no amortiguadamente, por lo que la energía luminosa se emite en cantidades mínimas indivisibles). Incluso supuso la introducción de tres números cuánticos más, n , m y s (en total son 4), para el estudio del estado energético y comportamiento del electrón:

(n) número cuántico fundamental. Puede tomar los valores $n=1, 2, 3, \dots$ nunca el cero y siempre positivos. Describe el tamaño del orbital y la energía del nivel.

(l) número cuántico del momento angular orbital: puede tomar los valores $n=1, 2, 3, \dots$ hasta $l = n-1$. Describe la forma o simetría del orbital y el subnivel de energía:

Para $l=0 \rightarrow$ orbital tipo "s"

Para $l=1 \rightarrow$ orbital tipo "p"

Para $l=2 \rightarrow$ orbital tipo "d"

Para $l=3 \rightarrow$ orbital tipo "f"

(m, m_l) número cuántico magnético: Los valores que podrá tomar se encuentran en el rango desde " $-l$ " hasta " $+l$ " pasando por el 0. Describe el campo magnético (la orientación en el espacio del orbital).

Pese a todo ello, la hipótesis de Bohr sólo permitía estudiar las frecuencias de las líneas espectrales, además de que únicamente se cumplía para el átomo de hidrógeno, y no esclarecía nada sobre las intensidades de la luz emitida por los átomos en esos saltos de sus electrones. Como el electromagnetismo clásico de Maxwell sí proporcionaba una explicación a esto último, Bohr desarrolló el principio de correspondencia a fin de completar su teoría, observando que por analogía los resultados clásicos se correspondían con las magnitudes cuánticas cuando los valores del número cuántico principal (n), eran muy elevados. Las leyes de la mecánica cuántica habían de corresponder a las de la mecánica clásica cuando las magnitudes estudiadas alcanzaban mayores dimensiones.

El científico danés demostró que toda regla sujeta a nuestra intuición resulta inútil al tratar con cosas del tamaño atómico. Era necesario desechar la mecánica clásica en este campo y elaborar una mecánica nueva, que tuviera en cuenta la cuantización energética, y estuviera basada exclusivamente en modelos teóricos con respaldo experimental. Esta fue la primera vez que se habló de la escalofriante teoría cuántica, y la comunidad científica, o como mínimo Bohr, consciente de que aún debía ser creada, partió de esta indispensable base.

3. EL CUANTO DE ACCIÓN: h Y SUS CONSECUENCIAS EPISTEMOLÓGICAS

Cuando se habla del concepto de cuanto de acción, es importante desvincularlo de la noción clásica de “acción”. En física clásica, ésta es una magnitud (mvx) que relaciona la cantidad de movimiento ($p=mv$) con una coordenada de posición (x). Introducida y desarrollada por Hamilton Y Maupertuis, sirvió para la fundamentación de la mecánica clásica a partir del *principio de mínima acción*, al que obedecen las ecuaciones mecánicas del movimiento. En la magnitud de acción se conjugan propiedades dinámicas y geométricas. Como sabemos, en física newtoniana es posible calcular al mismo tiempo momento y posición, o energía y tiempo. Hamilton denominó a estas parejas “magnitudes canónicamente conjugadas”, y podían ser conjugadas porque el espacio y el tiempo no tienen efectos sobre el movimiento de los cuerpos, y en caso de tenerlos, la naturaleza continua de las magnitudes con las que se trabaja permite reducir indefinidamente el valor de la posible interacción. Todo esto, por supuesto, en la física tradicional.

¿Qué ocurre con el concepto de cuanto de acción? Que la magnitud que introduce es discontinua. Aunque la constante de Planck también vincula una magnitud dinámica, la energía, con otra geométrica, la frecuencia (inversa del período, que indica tiempo), motivo por el cual recibe el nombre *cuanto de acción*⁴, no permite de ninguna manera la conjugación y obtención simultánea de movimiento y energía con espacio y tiempo, respectivamente. La discontinuidad marca la diferencia, y esta era imprescindible para solucionar el mencionado problema de la radiación del cuerpo negro. En el momento en el que Planck se dispuso a dotar de contenido físico a la base teórica con la que daba solución al enigma, no tuvo más opción que considerar la termodinámica estadística de Boltzmann y así la relación entre entropía y probabilidad. Y en ese momento se dedujo la ecuación de Planck, en la que aparece h . La relación $h \cdot \nu$ con la que pretendía dotar de significado físico a la ley de distribución espectral del cuerpo negro, significaba que existe una cantidad límite ante el proceso clásico de indefinida reducción del valor de cualquier interacción dinámica. Dos aspectos han de destacarse aquí; el primero, que si esa reducción se introduce en el estudio de un fenómeno para calcular su situación espacio-temporal, esas magnitudes no podrán ya

⁴ El nombre “cuanto de acción” es debido a que la acción (energía por tiempo de un proceso) es siempre un múltiplo entero de h . La teoría cuántica de Planck establece que la energía emitida o absorbida por un cuerpo en forma de radiación está cuantizada, no puede tomar cualquier valor, sólo aquellos múltiplos enteros del producto $h \cdot \nu$.

ser consideradas independientes ni ser estudiadas por separado. El segundo, derivado del primero, es que sería necesario descartar la idea de trayectoria como representación gráfica de un movimiento. Si el cuanto de acción impide seguir el movimiento de un móvil en el espacio en función de su velocidad (porque espacio y tiempo interfieren entre sí, no se pueden calcular por separado), no será posible calcular toda la serie de posiciones asignadas a dicho móvil.

De Broglie explicaba esto basándose en que el movimiento de cualquier objeto implica un cambio constante de posición, con lo que asignar una coordenada fija a ese movimiento es imposible y sólo se llegaría a determinar una serie de sucesivas posiciones derivada del conocimiento exacto de la velocidad del movimiento. La aparición de h tiene como consecuencia que las descripciones cinemática y dinámica de un sistema físico sean inseparables, tan indisolublemente ligadas que no sea posible asignarles valores exactos (para lo que sería necesario poder concebir su desarrollo por separado). Por considerar la descripción cuántica más ajustada a la dinámica, que debería desarrollarse en un espacio geométrico y estático, puede interpretarse la descripción clásica como una idealización de las condiciones a raíz de las nociones de movimiento y posición. Esto será tratado más adelante. Lo que ahora nos avenimos a comentar es la segunda unión que fija la constante cuántica, la de los aspectos ondulatorio y corpuscular. Para empezar, ya en la fórmula de Planck en la que se vincula la cuantización de la energía, es decir, su carácter discontinuo a través del cuanto de acción, con la frecuencia, magnitud ondulatoria, esta unión se ve en pequeña medida representada. Pero el ejemplo más notable se da en el trabajo de Einstein, donde se va más allá de los intercambios energéticos y se trata la propia naturaleza de la radiación, que sin intervenir con materia en el vacío posee la doble naturaleza, de estar cuantizada en fotones y a su vez asociada a una frecuencia y longitud de onda (otra magnitud ondulatoria). A continuación veremos un tercer ejemplo en la tesis de De Broglie, y concluiremos que el cuanto de acción es un signo fundamental de la dualidad, presente tanto en el modelo ondulatorio de la materia como en el corpuscular de la radiación.

4. DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA

4.1. Hipótesis de De Broglie

Tras la interpretación de Einstein del efecto fotoeléctrico, una de las grandes incógnitas giraba en torno a por qué las ondas, en determinadas condiciones, se comportaban también como partículas. La polémica entre el modelo corpuscular de Newton y el ondulatorio de Huygens volvió a renacer (del s. XVIII) para explicar la naturaleza de la luz y las radiaciones electromagnéticas, complicándose hasta el punto de ser extendida al ámbito de la materia.

La explicación a esto fue encontrada en 1924 por Louis-Victor-Pierre-Raymond, séptimo Duque de Broglie, que a través de un razonamiento de enorme sencillez, llegó a la conclusión de que si las ondas se comportan como partículas, también las partículas tendrán naturaleza ondulatoria, aunque por supuesto este enunciado es tan simplista como requiere el nivel al que se trata este asunto. Podríamos incurrir en el error de tomar esto a la ligera, pero recordemos: las imágenes de onda y partícula son irreductibles entre sí, y sus respectivas características radicalmente contrarias, basada la primera imagen en el modelo de continuidad y en el de discontinuidad la segunda. El modelo ondulatorio de la luz propone una energía difundida, ¡no puntual!, la onda se extiende a regiones del espacio y el corpúsculo tiene posición definida en un sólo punto del mismo.

Antes de explicar mejor el razonamiento de De Broglie, debe quedar claro que (aunque pueda parecer evidente) los enunciados no pueden ser dados la vuelta libremente y luego necesariamente correctos. Que todos los españoles sean europeos, no significa que todos los europeos vayan a ser españoles también (su hipótesis no sucede de cualquier manera). Al mismo tiempo, las implicaciones que tenía el simple revés al enunciado eran tremendas, en lo que respecta a cómo es el Universo y nuestra realidad. Significaba que, no sólo electrones, sino cualquier forma material que conozcamos, es también una onda en constante vibración, y nuestro entorno lo constituye una multitud enredada de ellas. ¿Y la solidez?

En la física tradicional de los siglos anteriores, se habían desarrollado modelos explicativos para materia y energía. Esto nunca había parecido suponer un problema puesto que las explicaciones eran excluyentes, seleccionar una implicaba renunciar inmediatamente

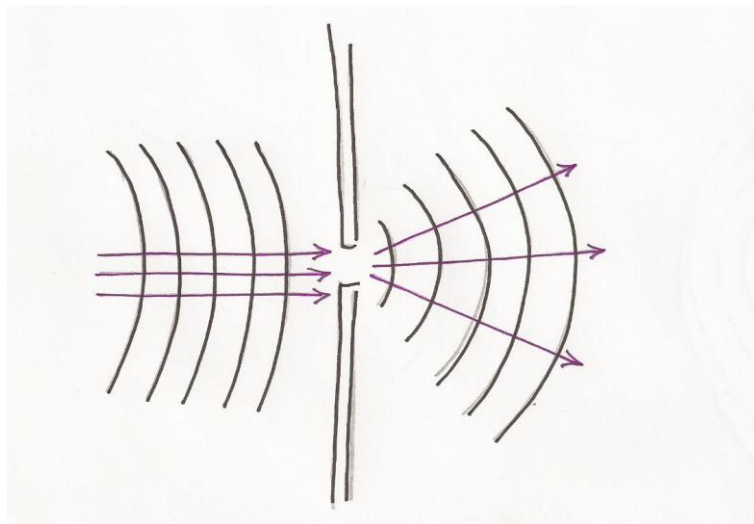
a la otra, no era posible utilizar ambos modelos simultáneamente como partes de una misma descripción física.



Imagen por: Aida García

La comunidad científica se decantó por la teoría ondulatoria de Huygens para estudiar fenómenos que no tenían explicación desde el modelo corpuscular de Newton, como interferencias, difracción o polarización de la luz. Según esta teoría, la propagación de la luz se produce en línea recta, siempre y cuando los obstáculos y aberturas que se interpongan en su trayectoria sean mayores que la longitud de onda. En el caso de que los objetos sean suficientemente pequeños comparados a la longitud de onda de la radiación, se desviará la propagación rectilínea de la luz.

El inferior es el fenómeno de difracción, predicho por la teoría ondulatoria e incompatible con el modelo corpuscular.



La difracción es un fenómeno característico de las ondas que se basa en la desviación de estas al encontrar un obstáculo o al atravesar una rendija. Ocurre con cualquier tipo de ondas, lo que les permite llegar a lugares a los que no deberían llegar.

También el fenómeno de interferencias quedaba explicado gracias al modelo luminoso, partiendo de la idea de que las ondas de dos haces de luz pueden encontrarse en oposición de fase, es decir, que la coincidencia del valle de una onda coincide con la cresta de otra, anulándose entre sí. Luz más luz podía dar oscuridad.

El experimento de la doble rendija de Young (y sucesivos), del que se hablará más adelante, estableció la naturaleza ondulatoria de la luz como hecho irrefutable; cualquier fenómeno que muestre un comportamiento de difracción o interferencia será indiscutiblemente considerado de naturaleza ondulatoria. Pero en el siglo XX se reintrodujo la posibilidad del modelo corpuscular debido a la teoría fotónica de Einstein, la única capaz de dar solución al problema de la radiación del cuerpo negro y al efecto fotoeléctrico. Aunque en un primer momento De Broglie redujo el modelo corpuscular de Einstein al ondulatorio, a fin de mantener el sentido de la frecuencia, magnitud en la que se basaban tanto la noción de onda como la de corpúsculo luminoso, en el año 1924 Satyendra Bose desarrolló una estadística a la que obedecen los fotones, a los que consideró partículas relativistas para demostrar la ley de Planck. Consiguió demostrar esta ley, dando lugar a una clasificación fundamental en dos tipos de corpúsculos. Los fotones pertenecían a la categoría de bosones, diferenciados de los fermiones de spin $\frac{1}{2}$, como son por ejemplo los electrones, en que no tienen spin o es entero. Los bosones no obedecen a la estadística de Fermi-Dirac que establece los principios de exclusión, por lo que varias de estas partículas pueden ocupar, y de hecho, es más probable que ocupen, un mismo estado cuántico de energía sin ser discernibles. Esto hacía aún menos ondulatorio el modelo presentado por Einstein, además apoyado por la realidad de los fotones demostrada por el efecto Compton. A pesar de que lógicamente carecían de relación, era imposible descartar ninguna de las dos teorías.

Como de forma primitiva conocemos de la obra de Einstein, la masa en sí es una forma de energía concentrada. Si ya era suficientemente duro aceptar el doble paradigma para la energía, De Broglie propuso en 1925 que la dualidad onda-partícula se trataba de una característica de la Naturaleza extensible también a la materia y se dio cuenta de que podía utilizarse la teoría fotónica para conocer las propiedades de una onda asociada a una partícula material. Consistiría en, conociendo la masa y la velocidad de la partícula, calcular su energía. Como cualquier onda conlleva energía, y conoceríamos la energía equivalente a esa partícula de materia, que habría de considerarse análoga en la onda a un fotón en la luz, podría calcularse, por ejemplo, la frecuencia de dicha onda asociada a su movimiento. Y esto

fue lo que efectivamente hizo Louis De Broglie, obtener la frecuencia y longitud de la onda asociada al movimiento de cualquier partícula, conocida alguna de sus propiedades físicas (energía, cantidad de movimiento). Para ello no consideró, sin embargo, que la partícula material tuviera asociada una onda monocromática de una única longitud de onda, sino que la velocidad a la que se movía el corpúsculo coincidía con la amplitud máxima de un conjunto de ondas interfiriendo entre sí (algo parecido al caso de un sonido, que es resultado de la superposición de una onda fundamental y otras armónicas).

Publicó su obra, que aunque fue acogida con menor escepticismo por parte de la comunidad científica, todavía era una suposición. Quedaban bastantes aspectos por aclarar, como por ejemplo, qué son las ondas de las partículas si no son luz, por qué las partículas no se perciben como ondas o cuál es entonces la diferencia entre partícula y onda.

La primera pregunta puede ser contestada gracias a diversos experimentos con partículas, que podían comportarse como ondas en algunas ocasiones, o responder en otras a nuestra intuición y tener solidez y consistencia. Por ejemplo, hasta la publicación de la hipótesis de de Broglie, la materia y las ondas se diferenciaban mediante experimentos como la difracción o las interferencias. Lo que cambió a partir de ese momento fue que, aunque una onda fuera también una partícula, esos experimentos pasaron a señalar cuándo se comportaba como tal.

En respuesta a otra de las extrañezas que han sido antes planteadas, si bien las partículas son ondas y viceversa, ¿qué es la materia sólida? Los objetos macroscópicos están constituidos por infinidad de partículas, que al mismo tiempo, son un enorme conjunto de ondas. Efectivamente, las cosas son ondas, pero la vibración es tan elevada, que a nivel de nuestra percepción se presentan como sólidas. Esto es así porque cuanto mayor sea la velocidad, o la oscilación, más imperceptible es el cambio, lo que hace al sistema parecer estático. Si hablamos de cifras, la vibración de las partículas de los cuerpos se produce aproximadamente cada 10^{-52} segundos, y la velocidad de vibración sumada a lo masivos que son los cuerpos hace imposible apreciar ningún movimiento. Importante, sin embargo, es distinguir entre partículas que oscilan y partículas que son la oscilación. Según la hipótesis de De Broglie, ambas cosas, oscilación y masa, son la misma, y no una (masa) realiza a la otra (oscilación), que era lo que contemplaba Planck. Resulta imposible demostrarlo experimentalmente.

Discutamos ahora la doble naturaleza de las cosas...

4.2. Respecto a la dualidad... ¿Qué son las cosas realmente?

Para empezar, antes de seguir con este tema hemos de recordar que los conceptos que entendemos de partícula y onda se basan en las percepciones de nuestros sentidos. Aunque ya hemos prevenido contra lo enraizado de la intuición, seguimos evidentemente visualizando una partícula como, dicho mal y pronto, una bolita o un punto, y una onda como un movimiento en expansión. Ambas ideas pueden resultar mutuamente excluyentes, pero resulta fundamental recordar que en la mecánica cuántica, nuestra intuición es opuesta a la realidad. No se trata de que las partículas y las ondas sean independientes y puedan darse a la vez, sino que *se tienen que dar* a la vez, porque son lo mismo. Y decimos “son”, pero realmente no es ésa la cuestión, sino que nosotros nos limitamos a llamar a una realidad “onda” o “partícula” en función de su comportamiento, pues su verdadera naturaleza no se experimenta directamente al interaccionar con ellas.

Esto quiere decir, que no existen estas dos formas, la partícula y la onda. Decir tal cosa de una de las dos sería incompleto, y resultaría confuso. Por poner un ejemplo, supongamos que existe un camaleón, que cuando sabe que nadie lo mira, presenta tonos verdosos, pero en cuanto algo centra su atención en él, adquiere un color rojizo. Si observáramos a varios de estos camaleones, los veríamos de color rojo, pero si por algún motivo su vista no fuera tan buena y no pudieran percibir la presencia de un observador, el color verde se mantendría. Aunque esto resulta un tanto simple, ¿de qué color diríamos que es el camaleón en cuestión? No podríamos decir ni que es rojo, ni que es verde, cualquiera de esas definiciones sería inconclusa, porque es ambos. ¡Su reacción responderá a las circunstancias del experimento al que sea sometido!

Ondas y partículas siguen este mismo razonamiento. Como realmente lo único que hacemos es bautizar la manera en la que estas diferentes entidades reaccionan, no podemos nombrarlas por lo que sean. Estamos rodeados de ondas-partícula camaleónicas que a lo largo de la historia han sido muy o muy poco conscientes de ser observadas, de ahí que se haya llegado a pensar que eran cosas diferentes.

Lo único que es imposible es ver a un camaleón rojo y verde a la vez; ningún experimento mostrará la naturaleza ondulatoria y corpuscular al mismo tiempo, básicamente porque al diseñar un experimento enfocado a mostrar la naturaleza de una onda automáticamente quedará anulado el comportamiento de partícula (principio de complementariedad de la Interpretación de Copenhague).

· ***Experimento de la rendija de Young:***

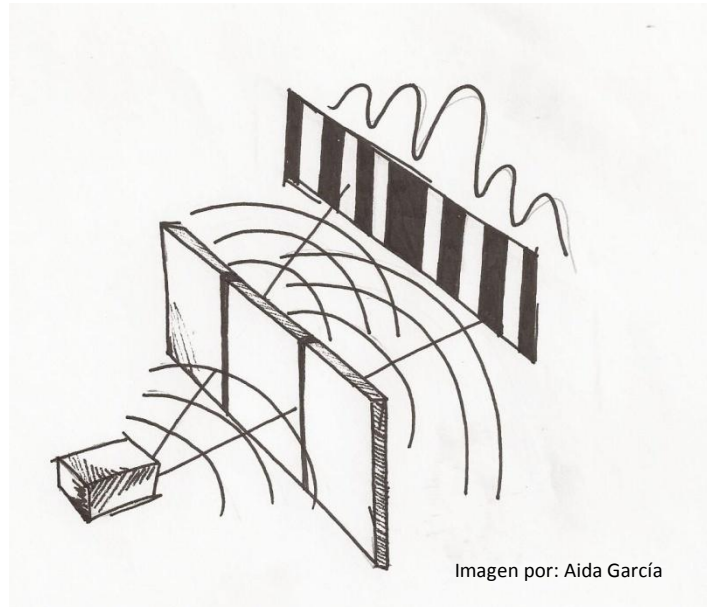
El experimento de la doble rendija es el experimento cuántico por excelencia, habiendo sido clave para la consolidación de la mecánica cuántica por esclarecer del carácter dual de la Naturaleza (no se trata exactamente de un experimento crucial y concreto, sino de una serie de ellos realizados históricamente). A partir de la descripción de varias situaciones posibles, se soluciona experimentalmente el problema de la dualidad onda-corpúsculo y se entiende con mayor claridad la idea de que las realidades físicas puedan comportarse de manera diferente en función de... ¿de qué?

A continuación describiremos las circunstancias en las que se realizaron una serie de experimentos basados en la primera experiencia llevada a cabo por Young para demostrar el carácter ondulatorio de la luz a partir de las interferencias luminosas. Los elementos fundamentales a tener en mente serán un cañón de fotones o electrones, dos placas con una y dos ranuras, y una pantalla sensor.

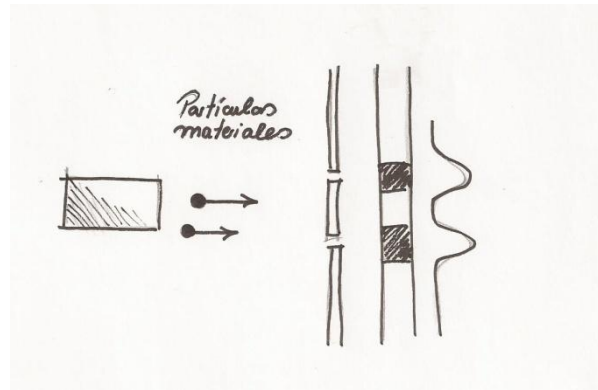
Es apropiado comenzar recordando la interferencia. Esta propiedad sucede con ondas de cualquier clase en todo sistema físico, siempre que sean planas, es decir, que oscilen todas en la misma dirección. El fenómeno de la interferencia tiene lugar al interponer una barrera con un par de aberturas ante, por ejemplo, una serie de ondas oscilantes en determinada orientación. Al incidir sobre cada una de las aberturas, las ondas la atraviesan y se expanden en ondulaciones circulares desde ambas ranuras al otro lado de la misma.

Si se presta atención a lo que sucede, pueden observarse regiones de mayor y menor amplitud (distancia entre el punto más alejado y el medio o de equilibrio de una onda). Dichas regiones son, en el caso de los máximos, el doble de “altas” de lo que serían en esos puntos concretos si la barrera tuviera una única abertura, lo que se denomina interferencia constructiva. Por el contrario, la interferencia destructiva es aquella que da lugar a los

mínimos de amplitud, pues en determinados lugares las oscilaciones de la onda provenientes de cada abertura se producen en sentidos contrarios, de manera que se cancelan entre sí. Podríamos definir la interferencia como la combinación de las amplitudes de dos ondas que se solapan entre sí. El resultado dará lugar a distribuciones extensas de regiones de actividad intensa o baja.



Por supuesto, esto ocurre con las ondas, y según la mecánica clásica, no es de ninguna manera posible con las partículas, como se demuestra al conducir el experimento análogo con las mismas. Bombardeando partículas al azar sobre la misma barrera de antes, se desarrollaría una clara tendencia de probabilidad de que las balas dieran en determinados puntos de una pared situada detrás de dicha barrera. Porque a diferencia de las ondas, llegan a un solo punto en lugar de expandirse, ¿no?, y el resultado será el mismo independientemente de si se tapa una de las rendijas o se dejan las dos, tan sólo se desplazaría la región de probabilidad al desplazarse el centro del bombardeo. De esta manera, como la mecánica clásica no contempla que las partículas puedan pasar por ambas rendijas, al pasar por una u otra, la distribución de probabilidad total equivaldría a la suma de las probabilidades de cada rendija. Ahora, ¿es así la realidad cuántica?



Imaginémonos efectuar el mismo experimento, pero hablando concretamente de electrones, o de fotones, nos es indiferente. Si en un primer momento colocamos un detector eléctrico que estudie la trayectoria del electrón, estos actuarán del mismo modo que las partículas materiales, como corpúsculos. Si a continuación dejamos de seguir al electrón, cambiando la posición del detector o colocando más, la experiencia ha demostrado que en lugar de cumplirse la predicción de la física clásica, el patrón impreso por los electrones en la pared posterior a la barrera se correspondería perfectamente con el que dejan las ondas.

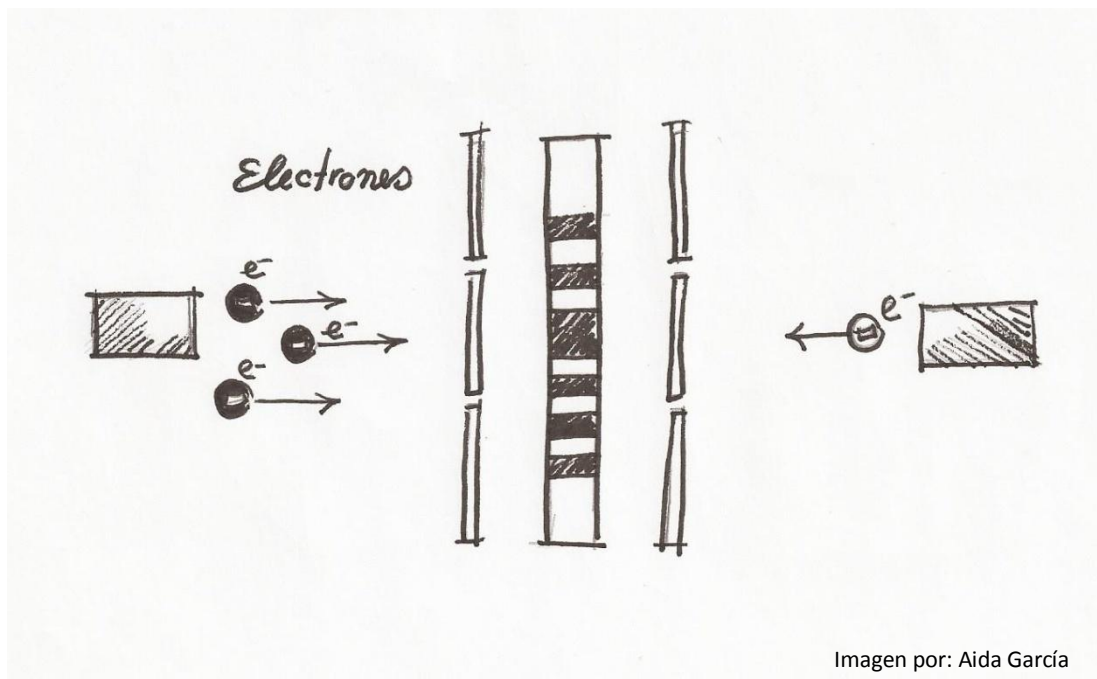
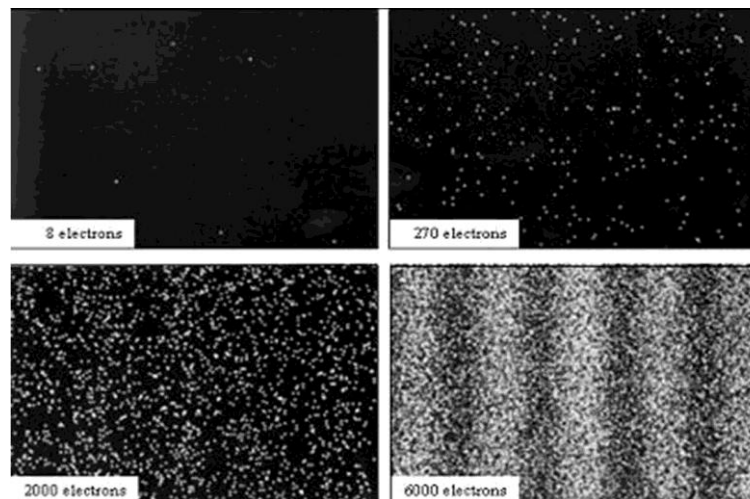


Imagen por: Aida García

La probabilidad de llegada del electrón obedecería entonces a la misma ley que se da al estudiar las interferencias ondulatorias. Es decir, en lugar de apreciarse una zona central de probabilidad máxima con un decrecimiento lento y constante, pensemos en una campana de Gauss, lo que se muestra es una serie de bandas con regiones completamente vacías entre ellas, es decir, regiones de gran actividad perfectamente diferenciadas de otras en completa

calma. El contraste entre el comportamiento ondulatorio y el corpuscular resulta muy útil para ilustrar la incompatibilidad conceptual de ambas nociones descriptivas, cuyas imágenes y estructuras espacio-temporales no pueden conjugarse de ninguna manera. El corpúsculo llega como unidad entera, la unidad de la onda es continuamente divisible, adquiriendo valores intermedios. Además, los corpúsculos impactan sucesivamente y las ondas interfieren entre sí llegando muchas de ellas al mismo tiempo.



A diferencia de con la teoría clásica, en este caso se diferencia entre actividad y probabilidad, porque la distribución de las intensidades de onda que se trataba en un principio aparece ahora sustituida por una distribución de probabilidad. Y esto no quiere decir que los electrones interfirieran unos con otros, pues ocurre lo mismo al “dispararlos” individualmente, sino que, por expresarlo de alguna manera, cada electrón podría mostrar interferencia por sí mismo, consigo mismo.

¿Qué ocurre cuando se intenta observar este fenómeno? Sorprendentemente, el patrón cambia hasta ajustarse a lo predicho por la otra física. La observación anula la interferencia, porque se encuentra que el electrón observado está en un lugar, pasando por una rendija, pasando por la otra, pero no ambas, actuando como se esperaría si sólo existiera una de las dos. No se pueden observar sin ser perturbados, porque este simple acto fuerza a las partículas a, vaya, escoger una trayectoria. Es así y no cabe discusión, los efectos de la interferencia se producen siempre que no se pueda determinar por qué rendija atraviesa el electrón, como si lo hiciera por ambas, y si se intenta comprobar, ¡desaparece la

interferencia! Nunca podremos predecir por qué ranura pasará el electrón si lo estamos observando, y si lo hacemos destruiremos el modelo de interferencias.

Esta ley de dualidad será una característica básica de la naturaleza, lo que quiere decir que cualquier otro objeto microfísico que no sea el electrón puede comportarse como lo hace éste. ¿Qué sentido tendrá entonces la intuición, si cualquier intento de percepción de un fenómeno u objeto cuántico induce un cambio en este? No tiene lugar: hemos de recurrir a la estadística. Así, la probabilidad de que se produzca un suceso cuántico en una experiencia idealizada es el cuadrado de su amplitud (de probabilidad). Si el experimento puede llevar a diferentes resultados, la amplitud de la probabilidad (a) será la suma de cada una de las amplitudes de probabilidad de las alternativas. Por eso si en el experimento se determina una, la probabilidad del suceso de la seguida alternativa cambia. No conoceremos por qué ranura ha pasado el electrón hasta que ya lo haya hecho, lo único que conoceremos son las probabilidades que están en las leyes fundamentales de la física, característica esencial de la Naturaleza, más allá de la falta de conocimiento detallado a la que se debían en física clásica. Como no es nuestra ignorancia la responsable de la carencia predictiva, se deduce que existe una interferencia al realizar el experimento con electrones que según el modelo clásico corpuscular no debería existir. Pero renunciar a este tampoco es una opción, pues el modelo ondulatorio no podría explicar el comportamiento del electrón cuando sí es observado. Ambos modelos, irreducibles entre sí, son incompatibles al tiempo que indispensables para la descripción del comportamiento de los objetos cuánticos.

5. EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

<<Cuanto más precisamente se determina la posición, menos precisamente se conoce el momento en ese instante, y viceversa>>.

Werner Heisenberg, 1927.

Cuando nos introducimos en el campo de la física cuántica, es importantísimo tener en cuenta que todo a lo que ésta se refiere, se reduce a órdenes de diezmillonésimas de milímetro. Por supuesto, se plantea una gran dificultad para los científicos, que no podrán detectar directamente las partículas que estudian por ser demasiado pequeñas. De la misma manera que la diferencia entre los puntos de vista (científicos) basados en un tiempo y espacio absolutos o una continuidad, y la posterior y revolucionaria teoría de la relatividad sólo se hace apreciable a grandes escalas, en la física cuántica los reducidísimos tamaños con los que se trabaja, obligan a apartarse de las leyes de la mecánica clásica. El estudio de los espectros de los átomos es prueba fehaciente de ello. Cada uno de los mencionados átomos emite una luz característica como resultado de la superposición de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, pero esta emisión se produce simultáneamente a las transformaciones bruscas que sufren al cambiar de un estado a otro. Un sistema microscópico nunca permanecerá quieto, y si a esto le sumamos discontinuidades en dichos estados posibles y transferencias de energías (al viajar las energías en paquetes o cuantos de radiación, llamados fotones) se hace evidente que los átomos, o más concretamente, los electrones en ellos, no pueden ser descritos con las mismas reglas que las establecidas por Newton al nivel macroscópico.

Lo que estudiaban los físicos teóricos a comienzos del s.XX, entraba de esta manera fuertemente en conflicto con la interpretación de la realidad que hasta entonces se realizaba. Así se adentraron en un mundo impredecible, que obligó a la física a relegar la experiencia a favor del ámbito de lo abstracto.

A pesar de su mediocridad como físico experimental, Werner Heisenberg demostró una extraordinaria capacidad de abstracción y manejo de las matemáticas. Antes de tratar su aportación a la ciencia más conocida, es importante mencionar que el enfoque desarrollado por este científico estaba fuertemente influido por las ideas de Bohr, y en cierto modo de

Einstein, que consideraba que todo aquello que no pudiera ser observado y medido no debía preocupar a la física. Uno de los obstáculos que se les planteó a estos dos científicos a la hora de crear una nueva formulación con la que trabajar la física cuántica, era lo absurdo del siquiera pensar que el electrón estaba unas veces en unos lugares y otras en otros, sin ser este el único de los fenómenos de este tipo. Lo que si tenían claro, era que la aplicación de las leyes mecánicas a ese mundo macroscópico resultaba del todo inútil. Y además, tampoco había sido esclarecido de qué serviría poder diferenciar un sentido de otro, o sólo ya encontrar unos principios que pudieran describir los sistemas cuánticos en este aspecto, si de ninguna manera iba a ser posible llegar a verlos.

Es por esto por lo que, como veremos en adelante, la filosofía de Heisenberg se centró no tanto en conseguir una predicción exacta sobre lo que son los objetos cuánticos, sino sobre qué son esos objetos a medir. No quedaría indudablemente más opción que abandonar imágenes como la del electrón en forma esférica, o los conceptos de órbita y de posición durante el giro. Fue a raíz de estas ideas como llegó a una formulación matemática basada en la predicción de observables, es decir, todas aquellas magnitudes que pudieran ser medidas por el experimentador, como por ejemplo la frecuencia de la radiación emitida o la energía cinética de un electrón. Basándose en la identificación de observables que le permitieran predecir el resultado de los diferentes experimentos, se encontró con la dificultad de que comprender las matemáticas inherentes a la teoría desentrañaba era bastante complejo, pues a partir de sencillas formulaciones, las observables requerían poseer propiedades muy chocantes. Dicho llanamente, lo que Heisenberg determinó en su matemática fue que el estado de los observables estuviera descrito por interminables series de términos, que debían ser multiplicados uno a uno para predecir los valores que se medirían de cada uno de ellos. En este punto observó cómo algunos de los observables estudiados estaban asociados “a pares” que no conmutaban, esto es, que al sumar las series infinitas de cada uno, no se llegaba al mismo resultado multiplicando, por ejemplo, la posición de una partícula por su momento, que al revés.

Fue probablemente gracias a esto por lo que Born apreció claramente que el trabajo de Heisenberg apuntaba al campo de las matrices (cuya multiplicación tampoco es conmutativa), y en 1925 Born, Jordan y Heisenberg publicaron un artículo sobre mecánica matricial que establecía fundamentos de gran solidez a la hora de predecir adecuadamente los resultados de los diferentes experimentos.

“Si la posición de una partícula viene determinada por los infinitos coeficientes de su matriz, y medir dicha posición supone realizar una operación matemática determinada sobre la matriz, que obtiene un vector⁵ poseedor de propiedades deducidas de ella...”

Este trabajo supuso un grado de abstracción y complejidad tales, que resultaba difícilmente asumible por muchos científicos, entre ellos Schrödinger, para el que, en sus propias palabras, conllevaba *“imposibilidad de visualización y álgebra trascendente”*. En cierto modo parecía muy absurdo, pues ¿cómo podían la posición, momento o energía de una partícula ser matrices sin significado físico *hasta que se realizaba una medición*? El problema que suscitaba la infinitud de enmarañados términos era fundamentalmente cuál sería la posición de la partícula en cualquier otro instante, o si debía el rango matricial que la determinaba permanecer infinito hasta que fuera observada.

Tampoco Einstein estaba satisfecho, pues creía firmemente en la existencia de una realidad concreta e independiente del observador, se realice o no medición. La idea de que *“lo que no se puede medir, no es sujeto de la ciencia”* lo disgustaba enormemente (aunque él emplearía eso en la 4ª relatividad.)

Lo que finalmente llegó a deducir Heisenberg en 1927 fue que el problema se encontraba en la no conmutabilidad de los pares de observables, y dependiendo de ésta el valor conjunto de los observables predicho por la teoría sería tanto preciso. Si el producto de un observable por el otro fuera igual que multiplicados a la inversa, la precisión con la que podrían medirse los observables sería tan alta como lo fueran los aparatos de medida. Si, por el contrario, el producto no coincidía al alterar el orden de los factores, la simultánea predicción de ambos valores (con precisión arbitrariamente alta) resultaría del todo imposible.

Así, a partir de la teoría matemática, obtuvo un límite de precisión para los observables conjugados, cuyo resultado era del orden de magnitud de la cte. de Planck.

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

$$\hbar = \text{cte. de Dirac} = h/2\pi$$

⁵ Dicho vector serviría para predecir el valor que se mediría de la posición de la partícula además del error en la medición.

La relación también es aplicable a otros pares de observables, como posición-energía. Además, de alguna manera también es un reflejo de otra forma de dualidad/complementariedad en la naturaleza, referida a propiedades en este caso. ¿Acaso no ocurre que cuando se muestra una de éstas, la otra está “oculta”? Aunque la relación sea quizá más de grado; cuanto mayor el conocimiento de una, menor el de la otra.

La mentalidad del “¡Cállate y calcula!” apenas sale de la deducción matemática, pero es inevitable que surjan todo tipo de dudas sobre el porqué de la imprecisión o los estados de los electrones ¿son los aparatos de medida los que limitan la precisión? ¿Tienen acaso los electrones una posición y momento determinados que puedan ser medidos? ¿Cuál es la situación de los mismos cuando nadie los observa?

Realmente, los términos de posición o momento para un electrón sólo tienen significado si se especifica concretamente el experimento con el que se determinan. No existe una magnitud que “de verdad” determine al electrón.

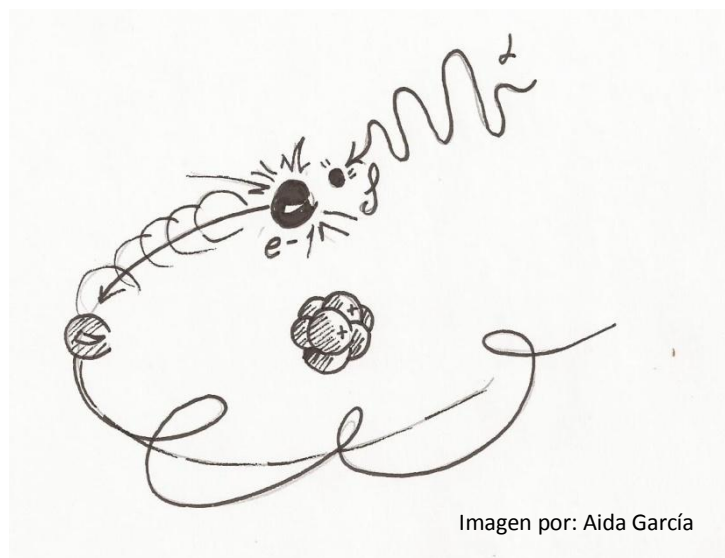
La primera prueba mental que llevó a Heisenberg al enunciado del teorema, a su vez uno de los constituyentes fundamentales de la interpretación de Copenhague, es la que sigue, y constituye la respuesta del científico alemán a los críticos que en su momento consideraban la imprecisión un aspecto inherente a los procesos de medición, y por tanto fácilmente solucionable con el avance de la ciencia y la tecnología:

Tal como hizo Heisenberg, imaginemos efectuar un experimento para estudiar el movimiento de una partícula subatómica cualquiera. Para entendernos, escogeremos por ejemplo, el electrón. Un científico razonaría emplear un radar que siguiera el rastro de nuestro electrón, a partir de las ondas electromagnéticas que rebotaran en él. La precisión del experimento será tanto mayor cuanto menor sea la longitud de onda de la radiación, por lo que seguramente elegiríamos radiación gamma. El problema que esto suscita es, que como sabemos, al disminuir la longitud de onda aumenta la frecuencia, y debido a la dualidad onda-partícula, los fotones que componen la radiación portarían una gran cantidad de energía, que al impactar contra el electrón, alteraría la velocidad del mismo.

Fue así como se dedujo el principio, ¡en, valga la redundancia, un principio!, puesto que aunque se conociera la posición exacta en ese instante, la velocidad habría cambiado de forma impredecible.

“Cuanto más precisa sea la medida de la posición, menor lo será la de su velocidad y viceversa”.

Viceversa, porque si lo pensamos al revés y utilizamos radiaciones de menor energía, se minimizaría el cambio de velocidad pero la precisión con la que podríamos medir la posición de la partícula se degradaría. De esto deducimos que siempre existirá un límite a nuestro conocimiento sobre un sistema atómico, aunque ahora aclararemos que va más allá.



La razón de la incertidumbre reside en la propia naturaleza cuántica de la materia y la energía, y no tiene nada que ver con el proceso de medición en sí⁶. Actualmente, dicha

⁶ Aunque aquí se mencione que la limitación en la Naturaleza no tiene que ver con los procesos de medición, existen, por supuesto, efectos que provocan imprecisión en tales medidas, pero es preciso que no sean confundidos con el principio de indeterminación.

La inexactitud del aparato, tanto en física clásica como cuántica, es un aspecto importante a la hora de realizar mediciones, cuya máxima precisión se dará en función de la mínima escala a la que el aparato pueda acceder. De todas formas, a nivel microscópico esto es un pequeño aderezo humano a las causas de la indeterminación cuántica, ya que hablar de valor de longitudes no tiene sentido una vez fuera del contexto de la medición. Otro efecto que tampoco tiene realmente nada que ver con la cuántica pero que podría dar lugar a confusión, es el producido por el propio observador. No entendido este último en su versión de la interacción objeto-sujeto, simplemente referido a la posibilidad de alterar la precisión en la medición por falta de dispositivos suficientemente sofisticados. Debe quedar claro que esto es independiente de las relaciones de indeterminación, la visión que se tendría en tal caso del principio de indeterminación sería errónea por su tinte clásico.

imagen puede incluso resultar un tanto ingenua, pues al fin y al cabo Heisenberg se sirvió de una interacción clásica entre fotón y electrón para hacer su modelo comprensible. Precisamente por eso se vio posteriormente obligado a abandonar esta explicación parcial en términos físicos, denominada "*Imagen del microscopio de rayos gamma*", pues presuponía variables ocultas. Así, la Interpretación de Copenhague pasó de ser epistemológica a ontológica, no se trata de desconocer la posición del electrón, es que ésta, antes de medir, ¡no existe!

Al examinar los procedimientos experimentales por los que se llegarían a medir las diferentes variables, tales como la posición, el momento angular o el lineal, en microfísica, resulta que el propio sistema de medición perturbaría irremediablemente la medida obtenida. Esta sin embargo, es una explicación cualitativa que no deja de ser engañosa, ya que transgrede en parte el principal aspecto del principio enunciado por Heisenberg, y es que éste establece un límite por el que los conceptos de la física clásica no tienen lugar en las descripciones a escala microscópica. Las variables que describen los sistemas físicos de la mecánica clásica, como la velocidad y posición, son excelentemente definibles en el tiempo y pueden, en principio, conocerse con exactitud. La física clásica concibe como alcanzable que la precisión en la determinación de la posición de una partícula tuviera un margen de error infinitesimal. Pero como la cuántica trata de otra escala, el principio de incertidumbre establecerá el mencionado límite fundamental a la precisión de cualquier medida, indicando la calidad de la aproximación al estudiar un sistema físico "clásico".

Lo que ha de quedar claro es que la relación de Heisenberg no es tan simple como puede parecer. No se trata únicamente de imponer una limitación sobre la capacidad de medida de un sistema que nos impida conocer con absoluta precisión la posición y el momento lineal de una partícula, ni siquiera los iniciales (puesto que las ecuaciones clásicas ofrecerían soluciones a posición y velocidad en cualquier punto temporal). Es incorrecto pensar que no se puede conocer x y p , pues seguiría subyaciendo la idea de que es posible continuar empleando las descripciones newtonianas en virtud de las que un elemento atómico seguiría, definida por unas ecuaciones de movimiento, una trayectoria.

No podemos conocer con exactitud qué trayectoria seguirá una partícula, porque, de hecho, no podemos aceptar que siga ninguna. Y así es como se desecha otra noción clásica, desviándose por completo la nueva física de las concepciones tradicionales.

Puede resultar paradójico que se estableciera una relación de incertidumbre en términos de posición y velocidad (momento lineal), para posteriormente aclarar que dichos elementos no tienen en realidad ningún sentido (esto no quiere decir que en física cuántica no pueda en ocasiones introducirse una sucesión de entidades matemáticas referidas a estos últimos que se correspondieran con los clásicos en algún aspecto, pero no es exactamente la misma circunstancia que trataba Heisenberg.)

Así se alteró la naturaleza de la física conocida hasta el momento, cuando dejó de regirse por un conocimiento absolutamente preciso. La cuántica muestra cómo las partículas no toman sucesivas posiciones de forma definida, por lo que no es posible conocer el valor de las magnitudes que *podrían describir*, si tuvieran ahí validez, sus estados de movimiento. Lo que sí se puede llevar a cabo es una distribución estadística, para afirmar que existe una determinada probabilidad de que una partícula se encuentre en una región del espacio señalada, en algún instante de tiempo dado.

“Si se preparan varias copias idénticas de un estado determinado, como puede ser un átomo, las medidas de la posición y cantidad de movimiento variarán de acuerdo a cierta distribución de probabilidad, característica del estado cuántico de un sistema.”

Este descubrimiento tuvo y tiene profundas implicaciones. Si la propia naturaleza imponía un límite a la precisión, para Heisenberg resultaba evidente que la ley de la causalidad no tenía aquí ninguna validez, por lo que habría que alejarse de una percepción directa el objeto de estudio en sí (como ya ha sido mencionado.)

La concepción de la causalidad que se tenía entonces, otra entre las muchas que conformaban la extensa tradición clásica, era inservible en el mundo microscópico. En este punto la formulación matemática de Heisenberg (mecánica matricial) chocaba con la de Schrödinger (mecánica ondulatoria), que parecía contar con una mayor popularidad por facilitar la comprensión y cálculos, pero cuya interpretación era sin embargo muy distinta. Ambas llevaban a consideraciones muy diferentes del conocimiento científico del que venimos hablando, cuando al ser matemáticamente equivalentes, lo normal hubiera sido que ambos científicos llegaran a las mismas conclusiones sobre las magnitudes medibles. ¿Continuidad o discontinuidad? La comunidad científica estaba dividida. Para Schrödinger, la equivalencia con lo enunciado por Heisenberg sólo podía significar la apertura del camino a la

elaboración de una teoría cuántica atada al determinismo, a la absoluta precisión en las mediciones, y, cómo no, a la continuidad. Pero, ¿y si la teoría clásica tenía ya en su estructura las raíces de su propia cuantización?

6. EL FORMALISMO CUÁNTICO:

Implicaciones y problemas de índole epistemológica

La conmoción que sufrió el mundo de la ciencia clásica no se produjo tan sólo por la aparición de una nueva y desconocida realidad. La repercusión física y epistemológica que supuso la aparición del cuanto de acción exigía nuevas formas de comprender y relacionar los conceptos que operaban en la teoría cuántica. Si el primer problema que se había planteado a la comunidad científica había sido el de desarrollar un formalismo matemático que permitiera estudiar y predecir los sucesos cuánticos, la interpretación del tipo de información que éste ofrecía sobre tales sucesos estaba sujeta aún a mayor discordancia. Cuanto más se ahondaba en las implicaciones físicas de la teoría, más lejos quedaban las descripciones clásicas.

Los tres problemas epistemológicos fundamentales que venimos a tratar son el *problema de la medida*, contra los ideales deterministas y la objetividad clásica, el *problema de la dualidad*, por la imposibilidad de reducir ninguno de los dos modelos, y el del *representacionismo pictórico*, que pone el ideal cartesiano en entredicho.

0: Repercusión de h en los formalismos

Tanto Heisenberg como Schrödinger habían desarrollado formalismos lógicos y experimentalmente muy consistentes. Pronto se demostró que la mecánica matricial del primero y la ondulatoria del segundo eran equivalentes, por lo que en el año 1926 ya se poseía una sólida base matemática sobre la que dar cuenta de los problemas físicos relacionados con las diferentes experiencias sin caer en las antiguas indeterminaciones (ambigüedades de la anterior teoría, como las que planteó Bohr al dar lugar a su principio de correspondencia, viéndose obligado a recurrir a la física clásica). Las expresiones matemáticas de la nueva mecánica se reconocieron por fin como descripción de la Naturaleza, y ya sólo era necesario resolver las incoherencias físicas y disolver un par de *problemillas* conceptuales. ¿A qué tipo de conocimiento se enfrentaban los físicos, cuando la descripción matemática no concordaba con la conceptual? Por supuesto, renunciar a esta última tampoco era una

opción, pues el sentido de la física no es otro que el de explicar, el de comprender, el comportamiento y naturaleza de los fenómenos del entorno.

1: El fracaso de la representación pictórica

La representación pictórica de cualquier sistema físico viene dada por la posibilidad de describirlo espacio-temporalmente. Sin embargo, en la mecánica cuántica no se sostiene más el marco objetivo del espacio y el tiempo. Ni la geometría euclídea ni la matematización clásica coinciden con las nuevas nociones cuánticas, es decir, el espacio de nuestra intuición resulta inservible en la escala de Planck, lo que hace que ya no sea posible representar los objetos cuánticos de la misma manera en que antes se realizaba.

La postura de Schrödinger, sin embargo, fue siempre opuesta a la abstracción que planteaban los constantes avances, y sostuvo con convencimiento que materia y radiación debían ser esencialmente ondulatorias, justificándolo en la idea de que su apariencia corpuscular se debía a longitudes de onda muy pequeñas en comparación con el tamaño de su trayectoria de propagación⁷. Sin aceptar el fracaso, se dedicó a buscar incansablemente un modelo atómico que posibilitase la comprensión intuitiva del mundo físico a partir de ideas propias de nuestra concepción cotidiana. Esta interpretación realista no fue aceptada por Bohr, puesto que no daba explicación a la contabilización del paso de los electrones en tanto como partículas de un contador Geiger, ni era compatible con la explicación que se daba de la radiación del cuerpo negro, cantidades discretas y saltos cuánticos incluidos. A la pregunta de qué oscilaba en la materia, tampoco ofrecía solución, ni siguió haciéndolo cuando en 1926 Bohr lo invitó a Copenhague para discutirlo. Una de las hipótesis planteadas por Schrödinger es la de las *nubes electrónicas*, según la cual los niveles energéticos del átomo serían sustituidos por un campo eléctrico, en el que se desecharía la imagen corpuscular del electrón a favor de simples cargas eléctricas difundidas en el seno de dicho campo, lo que implicaría la presencia constante del electrón en toda la “órbita”. Aunque esto ofrecía un modelo pictórico y concordaba con algunos fenómenos espectroscópicos (las amplitudes de onda medidas podrían considerarse muestras de elevadas densidades de la nube), esta hipótesis carecía de sustento matemático y empírico, además de que las fuerzas que se ejercieran entre las regiones del campo debían ser de repulsión, lo que provocaría el estallido

⁷ MURDOCH, D. *Niel's Bohr Philosophy of Physics*

del electrón. Y como la imagen de la nube electrónica no es aplicable fuera del átomo (por ejemplo, en un tubo de rayos catódicos), plantea una segunda hipótesis, la de los electrones como *ínfimos paquetes resultado de ondas superpuestas*, la cual fue incluso más fácil de rebatir, ya que en el momento en el que esas ondas se difractasen (al atravesar un cristal), los electrones se destruirían, lo cual se ha demostrado que no ocurre.

Una vez descartada esta interpretación, Bohr centró su atención en el tratamiento de Born de las ondas como onda de probabilidad, que por su carácter matemático pueden existir en más de una dimensión, más allá de nuestro espacio empírico. Estas ondas irían asociadas al corpúsculo indicando la probabilidad de su presencia, y una mayor o menor probabilidad de presencia justificaría las interferencias causadas por electrones y fotones. Las partículas eran reales, pero conducidas por una onda, cuya amplitud al cuadrado (o lo que es lo mismo, su intensidad) expresa la probabilidad de encontrar esa onda (o partícula) en determinado punto. No se pueden conocer con certeza dónde se situarán los electrones, pero sí diseñar experimentos para localizarlos en sitios concretos. Sin embargo, la interpretación de Born de la función de onda implicaba que el electrón pudiera estar en cualquier sitio, eliminando la poca certeza que se tenía del mundo cuántico, por lo que la idea de las ondas materiales fue también rechazada. Cada vez que surgía una teoría con el propósito de dar una imagen visualizable de los sistemas atómicos, cojeaba de algún aspecto fundamental.

Fue en parte de esta manera como Heisenberg se dio cuenta de que intentar “imaginar”, o visualizar, lo que acontece en el interior del átomo estaría siempre limitado por las representaciones mentales tomadas de nuestra propia escala, que no podían ser extrapoladas al mundo atómico. Al fin y al cabo, su mecánica matricial se limitaba a las magnitudes observables, que no son aquellas “que podemos observar”, sino las que podemos medir y calcular. Ya había renunciado a cualquier modelo imaginativo. Si bien esta renuncia era consecuencia de la interpretación de Bohr de la dualidad onda-corpúsculo (no se podrá obtener un único modelo visual, porque los dos a conjugar ofrecen información en términos espacio-temporales), la consecuencia no era del agrado del danés, que quedaba obligado a realizar descripciones exclusivamente matemáticas, y más que descripciones, predicciones, que no aclaraban nada de la realidad física que trataba de describir.

La teoría cuántica perdía el contenido físico intuitivo del que disfrutaba el marco clásico, al no poseer ninguna imagen o modelo espacio-temporal que garantizase la exacta e inequívoca representación de los objetos (el esfuerzo por conseguir esto se había mostrado

repetidas veces inútil). Una segunda consecuencia fue que cualquier concepción de similitud entre microcosmos y mesocosmos también sería eliminada, lo que significaba que contra la creencia clásica, nuestros conceptos no son representaciones reflejadas de otra realidad (¿verdadera?) y tampoco lo será el tipo de información que la física nos ofrece del mundo natural fundamental, pues dichos conceptos no tienen capacidad para explicar este último física y no sólo matemáticamente.

2: Espacio-tiempo y causalidad. Ruptura con el determinismo

La siguiente cuestión se presenta como consecuencia del apartado anterior. El fracaso de la descripción espacio-temporal suponía la renuncia a las imágenes visuales de lo que sucede en el nivel atómico, pero además sin este tipo de descripción no se puede dar una explicación completa de los sistemas físicos, condición indispensable para practicar el ideal clásico del determinismo físico. En el ámbito de la física clásica, las posibilidades de la observación determinan la descripción espacio-temporal, y la definición causal basada en los principios de conservación, se aplica para definir el estado dinámico del sistema físico y así predecir su evolución mecánica futura. Partiendo del supuesto de la continuidad, en el marco clásico ambos aspectos se combinan para dar una descripción completa de cualquier fenómeno, pudiendo ambos ser exacta y simultáneamente precisados sin restricción. Ese tipo de descripción, a través del ideal de observación de la no interferencia sujeto-objeto es determinista; puede precisarse el estado inicial del sistema y su futura evolución (todo ello gracias al estudio dinámico por la aplicación de los principios de conservación). La predictibilidad causal de la evolución de los sistemas físicos en el marco espacio-temporal clásico es absoluta, mientras que en física cuántica la imposibilidad de la descripción espacio-temporal causal elimina la teórica práctica del determinismo.

Otra noción que pierde su sentido por completo ante la renuncia a la descripción espacio-temporal es la de trayectoria. Los objetos cuánticos no realizan una traslación continua en el espacio-tiempo, a pesar de la contradicción por esa trayectoria que *aparentemente* siguen los electrones en una cámara de niebla, y esto vuelve a suscitar dudas acerca de cómo encontrar esa descripción completa del sistema microfísico cuando además falta uno de los elementos esenciales en la explicación mecánica. Más adelante estudiaremos la propuesta de Bohr, que tratará de renunciar sólo parcialmente a la descripción en el

espacio-tiempo sin recurrir a descripciones visuales, lo cual aún así no evitará de ninguna manera la supresión del determinismo físico de las teorías clásicas. Como la condición básica del determinismo es el conocimiento de los valores de posición y momento de una partícula de forma simultánea y perfectamente definida, y esta es negada una y otra vez por todos los formalismos de la física cuántica, Bohr buscará un nuevo procedimiento de descripción por completa, por decirlo de alguna manera. En adelante veremos que aunque el futuro de los microsistemas es esencial y matemáticamente incierto y no tiene cabida la absoluta predictibilidad causal, no toda causalidad en general será descartada, todo determinismo implicará causalidad pero no todos los nexos causales tienen por qué ser deterministas. Veamos un ejemplo:

Si decimos que a un fenómeno P le sucede siempre un fenómeno cualquiera entre Q , R o S , y además ninguno de estos fenómenos se produce si P no tiene lugar, estamos sin duda evidenciando que existe un vínculo de causalidad entre P y Q , R o S . P será la causa, pero, ¿de Q , de R o de S ? Al no poder prever *cuál* de éstos se producirá cuando P lo haga, no habrá determinismo. Sólo se daría en el caso de que hubiera un solo fenómeno como consecuencia de P , lo que en física cuántica es una situación límite.

Es decir, la ciencia seguirá trabajando con la causalidad, pero sin el determinismo. En física cuántica no se descartará la noción general de causalidad, como nexo entre antecedente y consecuente, pero sí la descripción causal en el espacio y el tiempo.

3: Problemas con la medida

La representación del mundo que realiza la física clásica nos ofrece un conocimiento del mismo basado en que las propiedades que se estudian en física son las que poseen los objetos naturales en sí mismos. Sin embargo, el esquema descriptivo de la mecánica cuántica es un manifiesto claro de que el realismo objetivo que persigue la física tradicional no sirve a la hora de entender otras escalas de la Naturaleza. Las propiedades físicas que la ciencia estudia no son universales, esto es, no sirven como descripción de una realidad independiente, sino que aparecen en función de la observación. Cada magnitud podrá ser operada para manipular o describir aspectos concretos, y por eso el factor experimental ocupa un puesto importante en esta física.

Dice John Gribbin⁸:

“Sólo se puede investigar el mundo cuántico realizando experimentos, y cada experimento, en efecto, plantea una cuestión del mundo atómico. Las preguntas que se presentan están altamente influidas por la experiencia cotidiana [...]. Los experimentos se basan en la física clásica, incluso a sabiendas de que la física clásica no es válida como descripción de los procesos atómicos. Además, es necesario interferir en los procesos atómicos si de verdad se desea observarlos, lo que significa, según Bohr, que carece de sentido preguntarse qué hacen los átomos cuando no se les está observando. Todo lo que se puede hacer, como Born puso de relieve, es calcular la probabilidad de que un experimento determinado proporcione un resultado concreto”.

Esto coincide con el fenómeno de colapso de la función de onda, que no tiene ninguna de las propiedades bien definidas, hasta que se concretan por el acto de medición, y sólo bajo observación las propiedades adquieren realidad más allá de potencialidad. Uno de los motivos de esta circunstancia es que las magnitudes desde las que se definían los conceptos en física clásica se han revelado carentes de sentido físico preciso en física cuántica, a no ser que se utilicen en el ámbito de una observación. De esta manera se contribuye aún más a la renuncia al realismo clásico de las propiedades objetivas, y por tanto, a la descripción determinista, porque como hemos comentado ya, ésta califica la interacción entre objeto y observador de causal, mientras el postulado cuántico obliga a reconocer que la descripción de la interacción entre objeto y sujeto observador es la única descripción física que se podrá realizar. La irreductibilidad de la interacción observacional es la que ha traído a colación gran cantidad de aspectos a considerar; además de llevar consigo el carácter discreto de la discontinuidad cuántica, supondrá un problema a la hora de realizar mediciones no deterministas, de intentar llevar a cabo descripciones objetivas de manera independiente a un observador, e incluso respecto a la noción de objeto o el intento de conciliar la descripción de las condiciones cuánticas con el contenido físico-intuitivo, para no sólo trabajar matemáticamente sino cumplir con los ideales explicativos de la ciencia moderna en mecánica cuántica.

Para ejemplificar el problema de la mediatización de la interacción observacional, recordemos el experimento de la doble rendija; un electrón puede ser interpretado

⁸ En busca del gato de Schrödinger

atravesando dos ranuras a la vez cuando no se le estaba observando, entendido en una superposición de estados que significaba que su estado estaba indeterminado. El fenómeno de interferencias que se observaba era el resultado de las posibilidades de esa superposición. No podremos salir de la observación en nuestro conocimiento de la realidad física, y tal conocimiento solo tendrá sentido dentro del propio contexto experimental. La pretensión de utilizar el conocimiento obtenido fuera de ese ámbito será una extrapolación no universal de nuestra concepción de la Naturaleza.

¿Cuál es el papel del sujeto en la medida de un sistema microfísico? Desde luego, éste será un aspecto muy importante a considerar en la conformación del nuevo marco conceptual a esta escala. Por un lado, habrá de tenerse en cuenta que la noción de “propiedad objetiva” perderá su valor, al ser el propio uso de los instrumentos el causante de la aparición de las propiedades que luego éstos observarán y medirán. Si además, como ya sabemos, las propiedades que se midan dependen del experimento y el instrumento utilizado, prácticamente se está escogiendo con antelación el tipo de magnitud que aparecerá bien definida. Es decir, el proceso de medida precisa las propiedades del objeto observado, pero lo que es más, se las atribuye, pues carecería de ellas si no intervinieran unos aparatos de medida. Al final y al cabo, el acto de observación es humano, nunca se da en la Naturaleza al margen y con independencia de nosotros, ¿no?

El tipo de información que ofrezcan las descripciones de los fenómenos cuánticos habrá perdido el ideal clásico de descripción objetiva, donde, vuelvo a insistir, los objetos se estudiaban como eran en sí mismos, con propiedades objetivas, y la realidad existía con independencia al sujeto que la conocía. Objetividad y realismo estaban irremediabilmente ligados en la física moderna.

Aquí, aún así, destacaremos lo siguiente: es posible dar un significado nuevo al concepto de objetividad, y aplicarlo en física cuántica, si se aclara que la identificación entre objetividad y realismo racionalista no constituye más que otra idealización del marco clásico, como la del “sistema aislado e independiente”, que tienen sentido al partir del supuesto de la continuidad en los procesos naturales, donde la interacción sería despreciable. La discontinuidad cuántica obliga a hablar de una realidad fenoménica en la que se incluye al observador y sus aparatos de medición. El nuevo sentido de la objetividad será aquel que ofrezca una descripción inambigua de las experiencias físicas. El peso de esto... recaerá en el lenguaje.

7. EPISTEMOLOGÍA

7.1 Condiciones epistemológicas para la descripción cuántica

Aunque mencionamos anteriormente que la propuesta de Born de las ondas de probabilidad, entre otras, no había resultado exitosa, sí que resolvió parte del afianzamiento de la base de la física cuántica. Las leyes causales que se habían venido empleando fueron entonces sustituidas por las de probabilidad. De esta situación del formalismo parte Bohr cuando se plantea su interpretación física, formalismo que ha sido tantas veces corroborado experimentalmente que es a día de hoy prácticamente inamovible, y por tanto las ideas que expone el científico danés derivan directamente de él. La finalidad que perseguía Bohr era que la teoría fuera explicativa además de operativa, que tuviera un contenido físico desde el que comprender la Naturaleza.

Trataremos ahora el problema de la descripción clásica objetiva, (luego también el de la crisis de los modelos visuales o la ruptura con la descripción causal y espacio-temporal), derivado de la inseparabilidad sujeto-objeto. Ya ha sido mencionado que el sentido de objetividad vinculado al realismo clásico de las nociones tradicionales no será descartado por completo, simplemente se referirá a un realismo diferente. Recordemos las propiedades sustanciales que poseían los objetos según las nociones clásicas, y cómo la ampliación de la experiencia humana dio a los científicos motivos para entender que los conceptos clásicos descriptivos serán más correctos si se atribuyen a estados de los fenómenos, no a ninguna realidad física independiente que pueda separarse del correspondiente dispositivo experimental que la analiza. No se podrá entender la objetividad como algo que persista más allá del fenómeno, sino simplemente como propiedad de las descripciones, que no representan una realidad absoluta. La relación de objetiva representación que se establecía entre conceptos y realidad en el marco clásico será sustituida por una relación, siempre dentro de los márgenes de la observación, entre conceptos y fenómenos. Lo que podemos decir con sentido físico de los elementos cuánticos en el micromundo es nada, la observación no sólo provoca una interacción, sino que esta interacción (además discontinua, lo que impide conocer el siguiente valor de la medición sin realizarla propiamente, porque tal valor no existe sin ella), escoge los valores de los parámetros medidos como propiedades de los fenómenos. La elección de uno u otro tipo de dispositivo define la propiedad que se va a

medir, del observable. La descripción sin restricción de todos los observables es la considerada completa en física clásica, pero la no-conmutatividad de las matrices desarrolladas por Heisenberg implica que al no ser todos los “observables” compatibles, no se puede realizar el mismo tipo de descripción completa, tan sólo se mantendrá la exactitud de los valores por separado. Esa es la individualidad que el postulado cuántico ha introducido a los fenómenos, y el requisito sólo se cumplirá “desintegrando” los fenómenos cuánticos, en función de los dispositivos experimentales. Pero volviendo de nuevo al tratamiento de la causalidad...

La nueva causalidad cuántica, en ocasiones denominada “estadística” o “débil”, reemplazará el vínculo de necesidad y la rigurosa previsibilidad de los fenómenos de la causalidad determinista por una evolución contingente y de carácter estadístico de los sistemas. No se tendrá nunca certeza, pero sí probabilidad de que se dé uno u otro fenómeno, aunque una vez se haya hecho efectiva la posibilidad en el futuro, se conozca bien la causa.

Con esto asentamos definitivamente la idea de que la discontinuidad clásica que conlleva la interacción objeto-sujeto y su inseparabilidad, era una de las nociones epistemológicas fundamentales a las que se tenía que adecuar cualquier nuevo marco conceptual.

· El carácter imprescindible de los conceptos descriptivos clásicos

A pesar de la imposibilidad de ofrecer modelos visuales a nivel atómico, renunciar a las nociones clásicas no era una solución al problema del entendimiento dentro del seno de la comunidad científica, al menos para Bohr. Para la adecuada interpretación conceptual del formalismo cuántico seguían siendo importantes los conceptos clásicos. ¿Por qué? Si bien es verdad que estos conceptos habían sido tradicionalmente empleados en física clásica, no era porque derivaran de ésta, sino porque habían surgido como consecuencia de la propia experiencia humana, y, al igual que tal física moderna, nacieron de la observación a través de nuestra percepción. Es decir, la terminología clásica no es específica ni está restringida al mundo de la meso-macrofísica, incluso denominarla clásica sería incorrecto si se atiende a que no es exclusiva de ella. Por eso mismo planteó Bohr que, igual que se habían adaptado los términos de la experiencia a las condiciones del marco clásico, éstos podrían adaptarse a

las nuevas condiciones cuánticas si se les otorgaba un sentido más general y se precisaban nuevos tipos de relaciones más adecuadas al ámbito de los microfenómenos. Al fin y al cabo no podemos disponer de conceptos propiamente cuánticos, pues tendríamos que desarrollarlos más allá de nuestra sensibilidad y percepción, lo cual tenemos por imposible.

Desde luego, en el camino a la sustitución de las relaciones semánticas surgirían dudas respecto al problema de la dualidad onda-corpúsculo. ¿Cómo no se iba a cuestionar el empleo de conceptos que habían sido contruidos sobre la sólida base de la continuidad de las interacciones energéticas? A pesar de ello, Bohr se resistió al abandono de los conceptos por no perder la conexión entre la matemática teórica y la base empírica. Además, agregó, como más adelante volveremos a subrayar, que los dispositivos experimentales de medición están contruidos de acuerdo al lenguaje propio de su escala, y debido a su reciente e importantísimo papel en la descripción del fenómeno, necesitamos el lenguaje clásico para tratar ampliamente con los términos necesarios para transmitir la información obtenida.

A partir de estas ideas desarrollaría Bohr desde 1927 su marco conceptual, dando lugar a la teoría de las propiedades y la medida, en la que se entiende que las “propiedades” dependen del proceso de observación, en calidad de fenómenos, por lo que tener en cuenta el proceso de observación, incluyendo al dispositivo experimental, era tanto o más importante que lo observado, que en sí mismo carecía de propiedades. ¿Cómo debía limitarse el uso de los conceptos clásicos?

7.2 Filosofía de la Complementariedad de Niels Bohr

La famosa interpretación de Bohr de la física cuántica fue expuesta en el Congreso Internacional de Física de la ciudad italiana de Como, el 16 de septiembre de 1927. En lugar de ofrecer una solución en términos físicos para aclarar las diferentes paradojas y problemas que la nueva física planteaba, apostó por un revés en nuestra forma de conceptualizar las experiencias, a pesar de lo alejado que pudiera quedar eso de nuestro sentido común. La propuesta epistemológica de Bohr, tan polémica como la teoría a la que intenta dar solución, trató de poner fin al conflicto entre la física clásica y la cuántica.

1ª Formulación de la Complementariedad:

Puesto que el objetivo primero fue compatibilizar los fenómenos cuánticos con los clásicos, fue desarrollándose un nuevo marco conceptual como generalización del tradicional marco de la causalidad.

Bohr sostiene que no existe uno, sino dos tipos de complementariedad a los que da lugar el postulado cuántico. La discontinuidad en la Naturaleza podía contemplarse tanto en la dualidad cinemático-dinámica como en la dualidad onda-partícula, y Bohr trató ambos desde la interrelación que gobierna su aplicabilidad a las situaciones empíricas. Lo que es lo mismo, la complementariedad se referirá al cómo se relacionan los conceptos físicos con las experiencias en el momento de dar una descripción de la Naturaleza, y se buscará conseguir esto de forma objetiva y completa.

· Complementariedad como nuevo marco conceptual:

A pesar de que el planteamiento cuántico debía suplantarse al clásico, existía una relación paradójica a la hora de establecer el marco conceptual de la complementariedad, pues éste debía remitirse a la terminología clásica para proceder. Esta paradoja que al parecer deleitaba a Bohr en gran medida, suponía que la sustitución de una física por la otra no pudiera realizarse al completo, lo que de alguna manera concuerda con la complementariedad de la que nos habla Bohr. Ésta no es entendida como aspectos contrarios pero complementarios de los conceptos que se aviene a relacionar, porque decir aspecto implica una perspectiva, una forma de ver. No, la complementariedad de Bohr hace referencia a diferentes aspectos de la propia Naturaleza, que en ocasiones pueden presentarse ante nosotros y que además de ser complementarios, son excluyentes entre sí. El término complementariedad permite la combinación de caracteres que debido a la introducción de la discontinuidad se han revelado excluyentes, y así la interpretación de la física cuántica se abre como una generalización de la física clásica en la que se da lugar a ambos tipos de fenómenos y descripciones. Porque ambos tipos de descripciones son absolutamente necesarios a la hora de entender rigurosamente la totalidad del sistema atómico.

Se establece aquí que los modos de descripción clásicos son, en su mayoría, inadecuados si se aplican a las descripciones cuánticas, pues el dominio atómico precisa una mayor limitación en el uso de tales descripciones. Aunque puede parecer contradictorio que

por ser el sistema clásico en sí insuficiente para abarcar los fenómenos cuánticos, su marco conceptual resulte al mismo tiempo demasiado “amplio”, esto ocurre así porque no está lo suficientemente restringido a una zona delimitada donde se den las condiciones adecuadas. Sin embargo, como los conceptos clásicos resultan indispensables, la idea básica de la complementariedad será señalar las condiciones restrictivas por las que se consiga su adecuación, y éstas las impondrá el postulado de indivisibilidad del cuanto de acción, dentro de cuyos límites los conceptos clásicos permanecerán definidos. Así nace el nuevo marco descriptivo iniciado por Niels Bohr, de forma que la limitación de la validez de aplicación de las descripciones clásicas permitiera una mayor precisión en el estudio de la significación y uso de los conceptos del marco cuántico.

Una de las caracterizaciones de la complementariedad como requisito para considerar un supuesto complementario es la siguiente, dada por Bohr en Física atómica y conocimiento humano:

“La descripción complementaria abarca toda la información inambigua acerca del mismo objeto atómico, que se puede obtener bajo diferentes condiciones experimentales, mutuamente excluyentes y descrita con ayuda de los conceptos clásicos.”

Y esas condiciones experimentales *“sólo juntas constituyen una generalización natural del modo de descripción clásico”*.

Además, añade Bohr que la relación de exclusión entre conceptos clásicos aplicados a objetos cuánticos que establece la descripción complementaria supone que aunque el uso de los mismos no pueda ser simultáneo, sí podrá ser alternativo en función de las diferentes condiciones y además indispensable para concebir la totalidad del fenómeno. Dos nociones son aquí importantes:

- Mutua exclusión, la de dos conceptos empírica o lógicamente incompatibles.
- Mutuo complemento, ambos conceptos conjuntamente constituirán la descripción completa.

Es la yuxtaposición de estos dos conceptos la que permite entender la idea de la complementariedad de Bohr, igual que lo es la de las caracterizaciones de un fenómeno para su comprensión total.

· Las imágenes de onda y corpúsculo en la complementariedad:

Para trabajar de lleno en la conjunción de los modelos ondulatorio y corpuscular, lo primero que hubo de rechazarse fue la idea de que la tarea de la física fuera la de describir objetos reales. No se trataba necesariamente de escoger entre la onda o la partícula, sino de resolver la aparente contradicción del dualismo proclamado por De Broglie para entender cómo están relacionadas ambas naturalezas con los objetos de estudio que representan.

El problema fundamental para ello sería aquí el lenguaje. Si bien las nociones físicas tradicionales servían perfectamente para trabajar en los sistemas clásicos, la ambigüedad de los mismos términos en mecánica cuántica resultaba abrumadora. Y Bohr encontraba que aquello se debía a la exclusión entre la continuidad clásica y la discontinuidad cuántica. Las palabras en nuestro idioma, que engloba el lenguaje científico, se basan en la noción de continuidad. Para el observador a nivel mesocósmico, toda experiencia está de antemano condicionada por el presupuesto de la continuidad, que tan evidente parece. Para poder por tanto utilizar los conceptos inequívocamente cuando la continuidad fallaba, habría que concederles nuevos significados y usos para el marco cuántico. Así surgieron los modelos de onda material y de partícula para la radiación, que a pesar de no constituir un modelo perfectamente ajustado a la materia y la radiación, sí que resultarían parcialmente adecuados para cada aplicación de éstas.

La complementariedad supone por tanto una abstracción del marco de la causalidad, una especie de ampliación de la causalidad clásica únicamente aplicable dentro de los límites de la fenomenología cuántica. Será por tanto el uso que se haga de los conceptos en cada una de las dos situaciones lo que permita preservar significados bien definidos y precisos, por lo que el cambio en el tipo de relaciones lógicas entre conceptos será un paso previo fundamental a la hora de referirnos a los elementos atómicos.

Antes de volver a centrarnos en la dualidad onda-partícula, conviene mencionar el tema de la complicada representación pictórica de éste y otros fenómenos microscópicos. Se ha hablado de dos posiciones respecto a la dualidad; la matemática por un lado, en la que se da un dualismo formal representado mediante las fórmulas matemáticas de Planck-Einstein-de Broglie, y una segunda empírica, donde cada experimento reclama un único modelo, ya sea ondulatorio o corpuscular. Mientras lo primero conduce irremediablemente a la indispensabilidad de ambos modelos, en el contexto empírico dicha formulación matemática

adquiere un sentido equívoco debido a la relación de mutua exclusión (la expresión de la evidencia experimental llega a poner en entredicho la aplicabilidad del principio de contradicción). Es el sentido empírico de la dualidad el que conduce a gran equivocidad, debido a la fuerza que tienen aquí las nociones clásicas, aunque, sin embargo, la imposibilidad de fabricar un modelo visual reside en que en su sentido formal ambos modelos permiten considerar todas las situaciones experimentales y están tan sincronizados que se pierde la capacidad de representación. ¡No se aludirá a nada visual!

En lo que respecta específicamente a la complementariedad de onda y partícula, es importante considerar que los modelos formales que se establecerán para el estudio de cada uno de los fenómenos no habrán de tener únicamente un valor heurístico. Esto no quiere decir que vayan a conservar el referente pictórico de los modelos clásicos estándar, pero sí cierto significado realista, aunque éste se limite al marco de la complementariedad. Es posible que incluso la referencia a un significado realista tenga que ser en este punto entendida de forma diferente, basta con establecer una analogía con el empleo habitual de los modelos ondulatorio y corpuscular para estudiar las propiedades fenoménicas de los objetos atómicos, y no desechar después el contenido empírico, porque en última instancia es a esos objetos a los que alude el fenómeno (aunque desde varios referentes).

El nuevo esquema conceptual de la mecánica cuántica había invertido las relaciones entre nociones que en el marco anterior habían sido bien incompatibles, como los conceptos de onda y partícula, bien compatibles, como posición y momento (que en física cuántica pertenecen a descripciones no sólo diferentes, sino además excluyentes). Para encontrar solución a la impracticabilidad de la descripción clásica en el nuevo sistema, Bohr recurrió a la propia estructura matemática de la teoría. La realidad cuántica no se corresponde en medida alguna con las ideas clásicas, se trata más bien de un realismo fenoménico que no diferencia entre observación y objeto atómico. Y de esta manera, las ecuaciones de Planck-Einstein-de Broglie conjugaban los conceptos, que por mutua exclusión se hacían incompatibles empíricamente, sin caer en contradicción. Es fundamental aclarar que la complementariedad de Bohr, sobre todo a partir de 1927 como consecuencia a los trabajos de Heisenberg, no trata de eliminar rotundamente la mencionada contradicción, sino de asimilar la coexistencia de elementos excluyentes de los cuales ninguno podrá ser prescindible. Ninguno de los dos puede ser descartado a favor del otro como tampoco podrá llegarse a la simplificación del modelo a una única imagen. A partir de las diferentes condiciones experimentales, se obtendrán e

integrarán resultados variados, y es la totalidad de todas las imágenes complementarias (y no conjugadas en una imagen) la que proporcionará toda la información posible sobre los objetos cuánticos. Esta fue la primera resolución que aportó Niels Bohr al problema del contenido físico cuántico y la discordancia de los modelos onda-partícula, restringiendo el uso de los conceptos al no estar referidos a nada visualizable. Era necesario renunciar a las imágenes visuales del realismo clásico.

2ª Formulación de la Complementariedad:

Esta segunda formulación apela al carácter cuantitativo de las interpretaciones cuánticas, surgida como consecuencia a las relaciones de Heisenberg. Busca una solución, aunque indeterminista, al problema de la descripción completa.

En cinemática y dinámica, los conceptos de localización espacio-temporal, así como de causalidad, se presentan como aspectos integrados en una misma descripción, como si habláramos de dos magnitudes unidas para cada definición de un fenómeno clásico. Mientras, en el nivel cuántico éstas se hacen incompatibles y la complementariedad general basada en el principio de incertidumbre de Heisenberg se considera una formulación cuantitativa de las relaciones entre ambas (igual que de momento y energía si buscamos una descripción causal).

Dejando a un lado el dualismo y centrándose en la matemática, Heisenberg demostró sobre la ecuación fundamental de la mecánica cuántica,

$$PQ-QP = \hbar/i$$

...que el producto de las incertidumbres en la posición (Δq) y el momento (Δp) tiene que ser siempre mayor que (\hbar), la cte. de Dirac (esta misma regla se aplicaba a cualquier par de variables conjugadas, que al multiplicarse entre sí han de tener una dimensión de acción, como cte. de Dirac.)

Las relaciones que de esto extrajo Heisenberg servían para establecer la máxima precisión con la que podrían usarse los preceptos clásicos en la física cuántica, lo que es lo mismo, la máxima precisión en la medida de determinadas *magnitudes*. ¿Por qué *magnitudes*? No sólo se descartarán las representaciones pictóricas de los sistemas cuánticos, sino que el modo complementario de descripción no da cabida tampoco al supuesto de que puedan emplearse conceptos descriptivos como posición, momento o tiempo como

poseedores de valor definido correspondientes a entidades cuánticas. No se puede estudiar tales entidades atendiendo unas veces sí, otras no, a las diferentes posibles magnitudes. Por eso la física cuántica se sirve de abstracciones y simbología para tratar, eso sí, no visualmente, los acontecimientos microscópicos, y renuncia a la perspectiva de *objetos con propiedades*.

No será posible dar una descripción física absolutamente completa y precisa de ningún sistema microfísico que contenga información espacio-temporal y/o causal. El científico habrá de limitarse a estudiar las probabilidades derivadas de la inexactitud que supone la combinación de las mencionadas *magnitudes*. A pesar de que las relaciones de indeterminación solucionaban el asunto del desajuste intuitivo con el lenguaje y permitían la predicción de resultados de las interacciones entre sistemas atómicos sin recurrir a ninguna clase de representación intuitiva, para Bohr primaba la interpretación física de los propios parámetros matemáticos. Lo que se propuso fue establecer las conexiones entre las descripciones espacio-temporal y causal.

Si bien no se pueden realizar medidas simultáneas de las magnitudes cinemáticas y dinámicas a escala microscópica, al contener el principio de Heisenberg información acerca de los límites entre los que se podrán obtener dichos valores, es posible conocer las posibilidades de definición para la observación de un fenómeno cuántico. Es decir, no sería necesario aplicar las diferentes descripciones de dicho fenómeno de manera radicalmente independiente, sino que la limitación en términos clásicos pasa a constituir una doble interpretación de carácter complementario. Así es como el principio de indeterminación de Heisenberg permite conjugar dos tentativas necesarias para la completa descripción del sistema, por muy mutuamente excluyentes que se hayan vuelto en física cuántica. Como estas concepciones tan perfectamente compatibles en física clásica siguen siendo necesarias para un estudio exhaustivo a escala h , podrán seguir estudiándose, no ya simultánea y exactamente, pero sí de acuerdo a la probabilidad derivada de la incertidumbre de la Naturaleza, que coincide con la incertidumbre teórica. La limitación impuesta por Naturaleza será absoluta y no influirá el tipo de experimento llevado a cabo.

Esto nos conduce directamente a tratar el tema de la causalidad. Es evidente que será necesario renunciar al ideal clásico de causalidad en favor de una ampliación del concepto de la misma. Una ampliación de la causalidad que se contemple a sí misma de forma más general, abarcando la idea de una causalidad débil no determinista, que pueda prescindir de

un vínculo causa-efecto. No debe sin embargo olvidarse, como ha sido mencionado en el párrafo anterior, que los comportamientos cuánticos son probabilistas y se producen dentro de un marco delimitado por las relaciones de Heisenberg. Por eso no sería prudente afirmar que el indeterminismo en la Naturaleza es absoluto, porque la existencia de una limitación, por la presencia de h en las relaciones de incertidumbre (a pesar de lo ínfima que sea ésta), permite hablar de probabilidades hasta esa escala.

La teoría causal cuántica establece así, y sólo en ocasiones, un vínculo muy impreciso y fundamentalmente estadístico entre antecedente y consecuente, dentro de los límites marcados. Esta aclaración es necesaria para subrayar que la causalidad clásica pierde el carácter certero y necesario para dar paso a una dilatadísima (pero no ilimitada) contingencia en la Naturaleza. Eso mismo se corresponde con la discontinuidad en la evolución de los sistemas cuánticos, que en lugar de repetirse en series causales indefinidas, se ven limitados por las posibilidades de observación y definición señaladas por Heisenberg, lo que imposibilita por completo seguir la evolución del sistema. Ya no hay continuidad, sino intermitentes “saltos causales”.

¿Qué tiene la discontinuidad de inherente al proceso de medida? ¿Se trata de la limitada precisión con la que pueden definirse las magnitudes clásicas en física cuántica? Pero si la limitación se halla en las condiciones de observación y definición ya mencionadas, y de acuerdo al estudio tradicional no puede definirse el estado de ningún sistema sin eliminar perturbaciones externas, o bien se excluye la posibilidad de observación y se vacía de su contenido inmediato a los conceptos de espacio y tiempo, o bien se admite la interacción con los instrumentos de medida (que supone dicha observación) y se acepta que no es posible definir inequívocamente el estado del sistema. ¿Por qué es esto así? Mientras en física clásica la aplicación de los conceptos está bien definida, en la teoría cuántica ni siquiera puede decantarse el científico por la naturaleza continua o discontinua para luz o materia. El elemento ajeno a la física tradicional es el cuanto de acción, donde resulta despreciable. Sin embargo, en microfísica este orden es imprescindible, y tiene como consecuencia la interacción de los objetos cuánticos con los instrumentos de observación. Un uso inequívoco de los conceptos requeriría garantizar la total y absoluta independencia del comportamiento de estos microcuerpos respecto a los presentes aparatos de medida, cosa imposible, porque la mencionada interacción es irreductible y mediatiza en gran medida la información que

podamos extraer de un fenómeno, concepto que deberá ahora englobar las propias condiciones y dispositivos con los que se observan los efectos cuánticos.

A pesar de de toda esta controversia, la posición de Bohr sigue siendo clara: las exigencias de la comunicación precisan el mantenimiento de los conceptos clásicos, puesto que sólo a través de éstos pueden expresarse las evidencias cuánticas, incluso aunque ellas mismas trasciendan al ámbito de explicación de la física clásica. Según este científico, mientras la física cuántica se verifique mediante experimentos, y los mismos se describan en términos clásicos (esto es, la construcción de los aparatos, la comprobación y divulgación de los resultados obtenidos, etc.), dichos términos clásicos deberán preservarse.

Así y con todo, insistiendo una vez más en lo anteriormente mencionado, el empleo de los conceptos clásicos resulta ambiguo en un ámbito en el que la interacción entre observado y observador no es despreciable. El análisis experimental de los fenómenos no permite determinar localización espacio-temporal alguna que pueda definir el sistema ni decantarse rotundamente por la interpretación corpuscular u ondulatoria, pues cada experimento exige uno de los casos. Esto explica por qué la limitación del ámbito de aplicación de los conceptos clásicos ha de ser teórica y no sólo práctica. Como en mecánica cuántica no son compatibles todos los observables, una descripción completa que dé cuenta de todas las propiedades del sistema físico simultáneamente es inviable. Para la completa descripción del sistema cuántico se requerirán todos los observables compatibles, pero también los incompatibles, pues son complementarios. Si se establece un *límite a la posibilidad de medida exacta de observables incompatibles* podrá llevarse a cabo dicha descripción complementaria. Así coinciden la complementariedad de Bohr y las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, que justifica el que finalmente fueran consideradas como la expresión cuantitativa del planteamiento general de la complementariedad.

Doctrina del espectador (A) vs. Doctrina del observador-observado (B)

(A) El primer ideal descriptivo, el denominado clásico, fue configurado en tiempos de Galileo y ha permanecido vigente hasta el último siglo. Este marco se caracteriza por proporcionar una descripción objetiva de la naturaleza, al considerar que el estudio de las interacciones entre sistemas físicos se realiza en un conjunto cerrado. Así, se podrá determinar el estado cinemático-dinámico de tales sistemas si se aplica un

principio de conservación de su momento y energía, lo que a su vez da lugar a la serie causal de sus estados.

Indispensable es para esto que el objeto de la observación esté aislado y sea perfectamente independiente de cualquier factor externo. El sujeto observador y cualquier dispositivo de medida quedarán suficientemente alejados, de forma que son despreciados. Para ser exactos, la noción de observación clásica es en realidad una idealización en la que en el contacto entre aparato de medida y objeto no da lugar a ningún intercambio energético. Por su puesto, esto no es así en la naturaleza, pero la alteración en física clásica es perfectamente eliminable.

El aspecto interesante surge cuando se indaga en el uso que en mecánica se hace de la continuidad y la discontinuidad. Sabemos que en mecánica newtoniana se hace un tratamiento discontinuo de la naturaleza, por ser de corte atomista, pero coexiste con el principio de continuidad en las operaciones de la naturaleza. Esto último es indiscutible, la evolución de cualquier proceso se realiza pasando por todos los estados intermedios del mismo, y el valor 0 es posible (al no haber valores mínimos, pues suponemos la continuidad). Si no se requiere una cantidad mínima de energía o acción, el intercambio energético entre observado y observador puede ser indefinidamente reducido (arbitrariamente, tanto como se desee) hasta hacerlo despreciable.

Lo que esto significa es que, de acuerdo a al contexto físico clásico, es posible atribuir determinadas propiedades (que cambiarán con el tiempo) a un objeto en un sistema aislado, entendiéndose el objeto como real e independiente. De esa forma se erige una noción de objetividad absoluta, referida a una realidad absolutamente ajena a nuestra influencia y experiencia, que existe por sí sola.

La tarea de la ciencia, del sujeto científico, será transcribir la naturaleza de los objetos y fenómenos tal cual son, como acciones externas y ajenas a él en el marco espacio-temporal.

(B) En el momento en el que interviene el cuanto de acción, la situación da un giro completo. Ya no se puede partir del postulado de la no-interferencia al observar sistemas físicos. El cuanto de acción demostró que el rango de validez de la física clásica tiene un límite, que encontramos en la formulación de la mecánica cuántica.

Ya no tiene sentido concebir la existencia independiente ni el comportamiento autónomo espacio-temporal de los objetos. Ni siquiera hablar de los objetos *como son*. El conocimiento de la naturaleza se ve muy comprometido si no puede ésta definirse prescindiendo de un sujeto observador, y en este punto interviene de nuevo Bohr con su formulación de la complementariedad. ¿Cómo llegar a una descripción objetiva de la naturaleza? Caer en ambigüedades es fácil si no se exige un uso recto de conceptos muy bien definidos. No son realmente los objetos que interaccionan con el observador los que crearán condiciones de objetividad en la comunidad científica, sino que son las herramientas lingüísticas empleadas por la misma las que garanticen la inequívoca transmisión de la información. Todo se basará en el lenguaje. Se dejará de intentar explicar cómo es la Naturaleza, para atender ahora a qué es lo que podemos entender acerca de esa Naturaleza, siendo fundamentales las condiciones tanto de observado como de observador. Si no se puede prescindir de la observación, será necesario aceptar que el mundo no se caracteriza al margen de los sujetos, que contemplar la Naturaleza es contemplarse a uno mismo (algo parecido a los preceptos que ya en el siglo VI a.C establecían las filosofías orientales del budismo y el taoísmo.)

“La nueva situación que se presenta en la física nos recuerda a la antigua verdad de que en el drama de la existencia somos a la vez actores y espectadores.”⁹

La filosofía de la complementariedad constituye un sustento a la reflexión de una realidad ligada a la acción humana misma, la convención entre los sujetos se remitirá a un marco formal universal (necesario) en el que se aclaren las relaciones lógicas entre los conceptos y que sea siempre revisable de acuerdo a la inclusión de nuevos avances en la ciencia.

⁹ Niels Bohr, La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la Naturaleza, 1929, p.156

8. KANT VS. BOHR

Sobre los fundamentos filosóficos de la mecánica cuántica, más allá de la complementariedad.

El aspecto interesante a tratar aquí es el tipo de realismo al que se refiere la mecánica cuántica. Hasta ahora ha quedado claro que científicos como Heisenberg y Bohr se basaban en la idea de la descripción del mundo físico a partir del “fenómeno observado”, dejando bastante apartada la noción de una realidad independiente del observador. Pero, si al mismo tiempo, esta teoría contiene elementos objetivos que se dan tanto teórica como empíricamente, es natural preguntarse hasta qué punto proporciona garantías de una verdad física. Además, el empleo de analogías o símbolos para referirse a realidades del mundo físico (y no ya a objetos como tal, sino a fenómenos inseparables de éstos), en lugar de representaciones pictóricas, suscita curiosidad acerca de la creación de vínculos que nos permitan hacer referencia y trabajar con tales objetos cuánticos.

El trabajo desarrollado por Bohr se centra en el estudio semántico de las relaciones lingüísticas entre los términos utilizados por los físicos, sin atender a la forma de los términos. Como ya no se trata de hacer referencia a objetos, sino a fenómenos, y los fenómenos sólo pueden ser representaciones simbólicas del mundo físico, la simbología que se emplee en las descripciones será analógica con respecto a la realidad física “independiente”. Esta será la conexión que la teoría cuántica establezca con la realidad, la fuga del subjetivismo, por la imposibilidad de recurrir a modelos pictóricos. Así, el científico podrá aproximarse a lo que el objeto sea (¿importa realmente?), pero precisará cierto fundamento intuitivo para resolver cuestiones relacionadas con la vinculación analógica del término lingüístico y la referencia empírica, como; ¿cuánto se distancia este modelo de la realidad? ó ¿cuántos de sus rasgos (los del modelo teórico) pertenecen propiamente al mundo que conozco?

En un primer momento, una parte importante de la comunidad científica sostuvo la queja constante de que el conocimiento que la teoría cuántica proporciona de la realidad no es sólo indirecto, sino además incompleto. Pese a ello, no podría negarse que a partir de conceptos indirectos es posible llegar al conocimiento directo de la realidad, aunque, eso sí, la conexión entre teoría y realidad sería de corte clásico, por basarse en la percepción

espacial. Sin embargo, la duda que la teoría cuántica verdaderamente plantea aquí está más relacionada con la naturaleza del propio conocimiento humano y de la realidad física. ¿Cuáles son las condiciones gnoseológicas de nuestro entendimiento que nos permiten abarcar y representar el mundo microfísico? ¿Y cuáles las condiciones impuestas, se entiende que objetivamente, por la teoría cuántica a los elementos atómicos?

A continuación nos proponemos comparar, basadas en modelos temporales, la fundamentación kantiana intuitiva del conocimiento en contraste con la complementariedad del científico danés Niels Bohr.

Bien sabemos que las estructuras del lenguaje conforman las estructuras del pensamiento, y al mismo tiempo el lenguaje natural que empleamos es una extensión de nuestro mencionado pensamiento. Si nuestras formas de percepción y entendimiento, así como nuestro lenguaje diario, se asientan sobre referencias espacio-temporales, queda claro que el lenguaje clásico es el apropiado para la descripción de los fenómenos físicos que se asienten sobre los mismos conceptos. Para Kant, el conocimiento y comprensión de nuestro mundo arranca a partir de las nociones de espacio y tiempo. Las intuiciones espacio-temporales como formas *a priori* de nuestro entendimiento garantizan la realidad externa a nosotros, y nuestro conocimiento de la misma se justifica por esa “fundamentación intuitiva”. Estas serían las *condiciones de posibilidad del conocimiento* que nos permiten aspirar a la comprensión del mundo, para lo que los términos descriptivos en física deben estar también contruidos en el espacio y tiempo sensibles, considerándolos por tanto “intuitivos”. Pero dichas intuiciones tienen al mismo tiempo un carácter físico; para que una teoría con contenido intuitivo ofrezca una descripción física de la realidad externa de forma recta, ha de contener elementos objetivos que la pongan en correspondencia con el mundo descrito, elementos sujetos a términos que poseerán un significado extralingüístico. La conexión entre teoría y mundo exterior se deberá al espacio y tiempo como *condiciones de posibilidad de los objetos* del mundo físico. Es decir, para sostener el realismo de cualquier teoría física, no podía considerarse al espacio y al tiempo como simples elementos subjetivos de nuestro entendimiento.

Hasta este punto las ideas de la complementariedad están en consonancia con la tesis kantiana. La sensibilidad ha de contener *a priori* las condiciones de los objetos que se nos dan en la intuición para justificar la conexión mente-mundo y no salir de la objetividad, pero una vez Kant profundiza en lo que él denominó el carácter trascendental de las intuiciones

“puras” para tratar sobre la validez universal del conocimiento científico, se acaban las semejanzas con lo que respecta al trabajo de Bohr. La complementariedad simplemente prescinde del método trascendental, aunque no está de más comentarlo brevemente.

La diferencia entre la intuición pura (o percepción *a priori*) y la empírica, es que la primera es anterior¹⁰ a nuestras percepciones sensitivas. Es importante aclarar que entiende las intuiciones no como conceptos, sino como “referencias inmediatas a un objeto único”, y las intuiciones puras son condiciones de los objetos basándose en toda percepción o referencia empírica posible. Así, establece a lo largo de su obra que las intuiciones son condiciones subjetivas de toda representación sensible y por ejemplo el espacio, condición de posibilidad de los fenómenos, es independiente a éstos por ser una representación *a priori*, siendo los fenómenos externos los que necesariamente han de ajustarse a las condiciones espaciales. La experiencia del fenómeno es posible gracias a la representación espacial, pero inversamente no puede tomarse tal representación a partir del fenómeno externo (podemos pensar en un espacio vacío, pero no en cuerpos sin un espacio anterior, incluso la percepción empírica del espacio supone anterioridad a la de los cuerpos). De esta forma, el fundamento de la matemática está para Kant en las percepciones *a priori*, y al considerar el espacio como tal, la geometría encontraría ahí su fundamentación y se explicaría la conexión geometría-realidad, así como su carácter universal y necesario, construida sobre razonamientos sintéticos. La intuición pura espacial coincide con la empírica en el marco de la geometría euclídea.

En los argumentos de Kant que defienden el carácter puramente intuitivo del espacio no nos detendremos, pero sí conviene comentar que la intuición *a priori* del espacio corresponde a uno infinito, que sólo podemos percibir por la experiencia de nuestros órganos sensitivos una vez lo limitamos.

La otra intuición pura de la que nos habla Kant es el tiempo. Tampoco es por tanto un concepto que pueda ser definido como tal, pero sí supuesto como *condición indispensable de toda serie sucesiva*, gracias a su base aritmética. Al igual que ocurre con el espacio, no podemos percibir el tiempo infinito sensorialmente, pero lo suponemos *a priori* para explicar cualquier posibilidad de sucesión.

¹⁰ ¡No temporalmente!

Cualquier percepción de movimiento o representación material está en relación con el espacio por su forma y con el tiempo por su duración (nunca se tienen dos percepciones simultáneas de un mismo objeto en diferentes lugares de un espacio, son sucesivas y eso implica transcurso de tiempo).

Ahora, por la mencionada aritmética que el tiempo posibilita, el ser puede formarse representaciones referidas a un tiempo que siendo *reales* no existen en el espacio. El tiempo prevalece sobre el espacio, porque cualquier percepción espacial se dará también como intuición temporal, pero no viceversa.

“El tiempo es la condición formal a priori de todos los fenómenos”

Lo que Kant deriva de esto es lo siguiente: el espacio es la “forma de intuición externa”, ya que es ahí donde se da cualquier percepción externa, cada forma material con su figura. Pero el espacio se ve irremediamente reducido a la intuición temporal, al ser siempre percibido como una sucesión, por lo que el tiempo es forma de intuición tanto interna como externa, junto con el espacio en el segundo caso. El espacio se reduce a tiempo, la geometría se reduce a aritmética ¿no es acaso cierto? (base de la geometría analítica).

Antes hemos mencionado el carácter trascendental de esta parte de la obra de Kant. La elección del término “trascendental” busca designar a todo aquello que es condición simultánea del conocimiento humano y del objeto extralingüístico, y no meramente del objeto sensible (trascendente) o de nuestra capacidad de conocer (inmanente). Pues bien, el tiempo y espacio kantianos, ambas intuiciones trascendentales, no son simples formas subjetivas de nuestro entendimiento, porque también comportan las propiedades objetivas de los objetos. Los cuerpos materiales, físicos, son susceptibles de ser matematizados, porque espacio y tiempo son condiciones de la matemática y la realidad física.

¿En qué aspectos se distancia esta filosofía de la sostenida por Bohr? Bien, además del hecho de que la epistemología de Bohr no persiga el sentido trascendental kantiano, puesto que no busca los límites de nuestro conocimiento (ya se conocen: la limitación del postulado cuántico a nuestro conocimiento de la Naturaleza está expresada cuantitativamente en las relaciones de Heisenberg), el tratamiento que cada uno de estos dos autores da al sujeto es bien distinto. El sujeto kantiano es gnoseológico, el introducido por Bohr, empírico. Este último es el diseñador y constructor de los propios dispositivos de medida que a su vez interaccionan irremediamente con el objeto sometido a estudio. La tarea del físico

consistía en encontrar las condiciones de la limitación que los conceptos descriptivos de nuestro lenguaje imponen, a fin de alcanzar la objetividad y la completa e inambigua transmisión de las experiencias en física. Por eso es cierto que al igual que Kant, considera cuáles son las *condiciones de posibilidad del uso de los conceptos descriptivos en nuestro mundo* partiendo de la importancia del sujeto en el conocimiento del objeto como elemento imprescindible a la hora de describir la realidad, pero sin perder la objetividad. Esencialmente sus objetivos sin embargo divergen; las “formas de intuición” kantianas imponen unas condiciones universales a partir de las cuáles habrán de buscarse los límites del conocimiento y la base de la objetividad, Bohr sin embargo parte de las limitaciones del conocimiento físico, que ya tiene en sus manos, para buscar las condiciones de la comunicación inambigua en el lenguaje, y no en los modos de conocer de la razón. Atención a esto último, porque Bohr no concede a dichas condiciones un carácter universal ni absoluto, queda claro que si éstas derivan del hecho de haber ampliado el área de la experiencia física, y esa área es susceptible de futuras ampliaciones, las condiciones del marco de la complementariedad siempre serán revisables. Podrán (¡y deberán!) ser cambiadas a medida que se revelen datos y circunstancias ahora desconocidos. Es decir, será necesario que existan unas condiciones específicas para la comunicación científica, pero éstas dependerán de la relación que guarden los conceptos del marco conceptual en cuestión entre sí. Esto no debe poner en duda la completitud de la teoría cuántica (en caso de ampliación de la experiencia), sólo su inadecuación al ámbito de fenómenos anterior, y la moldeable lección epistemológica inaugurada por Bohr seguiría perfectamente consistente. Porque, insistimos, son las propiedades de los objetos cuánticos, o, mejor dicho, su fenomenología, las que obligaron inicialmente a cambiar el marco conceptual clásico, y cualquier repentina información partirá de los límites fundamentales evidenciados por la física para establecer nuevas relaciones entre términos que se puedan aplicar inequívocamente a los elementos microscópicos.

Mientras Kant cuestionaba los límites del conocimiento, la complementariedad busca los requisitos que han de cumplir los términos de nuestro lenguaje natural para referirse de forma objetiva y completa a información sobre un determinado elemento de la Naturaleza, no tal cual, sino en función de sus propiedades. Las condiciones de este lenguaje son las propiedades que la física revela de los cuerpos atómicos, y esas propiedades al ser fenoménicas, aluden al sujeto además de al objeto. Esto significa que no se puede separar la realidad de nuestra actuación sobre ella, y los términos cuánticos no pueden representar los objetos pictóricamente basándose en un concepto, sino que emplean referencias *simbólicas*,

válidas en la medida en que, como se ha explicado, no son construcciones enteramente subjetivas.

9. REFLEXIÓN ONTOLÓGICA

Planteémonos ahora una nueva cuestión. En las páginas anteriores hemos venido tratando las contradicciones entre los mundos cuántico y clásico, así como los posibles puentes a establecer para trabajar entre ambos. Hemos considerado el estudio del mundo cuántico basándonos en una analogía con el clásico, y siguiendo la línea de pensamiento desarrollada hasta ahora, nos preguntamos, ¿qué sería más lógico pensar, que es el mundo cuántico el que debe tener prioridad como “realidad” sobre el otro, o viceversa? Al fin y al cabo, el cuanto de acción es un postulado esencial de la Naturaleza, que a escala mesoscópica, aunque sea despreciable a efectos prácticos, *no desaparece*. Pero por otro lado, los sucesos de nuestro entorno, que se rigen por leyes clásicas, constituyen la única e inmediata realidad a la que tenemos acceso sensorial, sin verse excesivamente alterados por los comportamientos atómicos. ¿Deberíamos suponer la superioridad de una física respecto a la otra? Hemos desplazado la controversia gnoseológica entre la realidad de ser del fenómeno cuántico y las limitaciones de nuestro conocimiento sobre él, y nos centramos en un debate más orientado al mantenimiento de nuestros hábitos intelectuales o al grado de realismo que podemos conceder al fondo cuántico que sustenta el mundo de nuestra experiencia.

Considerar que la idea de que el mundo clásico, al que pertenecemos, es el que prevalece sobre el cuántico, cuya naturaleza nos resulta tan contradictoria, podría ser errónea, y si bien es cierto que Bohr insiste en las propiedades clásicas, lo hace poniéndolas bajo la consideración del lenguaje. Sin embargo, si lo miramos desde otra perspectiva epistemológica, Bohr, motivado por el perseguido objetivismo en la ciencia, reflexiona sobre la terminología clásica para fundamentar nuestras formas habituales de pensamiento así como el alcance experimental que tienen nuestros dispositivos. ¿Acaso no constituyen esas formas de pensamiento la realidad que nos afecta? ¿De qué realismo habría que fiarse, del cuántico o del clásico? Ninguna de las dos físicas es descartable, pero ya hemos repetido en numerosas ocasiones que son incompatibles entre sí, ¿no?

Si lo que hasta ahora hemos tratado era de índole epistemológica, demos ahora un matiz ontológico a la cuestión. Efectivamente, en el marco conceptual de ambas físicas, éstas son inconmensurables, pero fuera del régimen estrictamente científico, a partir de los estudios de la complementariedad sería posible entender que el mundo físico no fuera

esencialmente uno. Esto es, nadie niega que los postulados del mundo cuántico sean hechos intrínsecos a la Naturaleza, a la realidad (o como mínimo a una, de naturaleza cuántica), pero ese mundo físico, la realidad absoluta de la que hablamos, no tiene por qué ser exactamente la misma en los dos niveles de experimentación, el cuántico y el clásico. Sabemos que nuestro conocimiento de la realidad se remite al segundo, construido a partir de nuestra sensibilidad y experiencias inmediatas. Elaboramos un lenguaje y un pensamiento derivados de las “limitaciones” de nuestra percepción humana, porque pese a que esas condiciones cuánticas siguen ahí, las consideramos inexistentes por sus inapreciables efectos en nuestro entorno inmediato. Y este es un punto importante. Aunque todos coincidiéramos en que el mundo clásico constituye, en efecto, una idealización de las condiciones cuánticas, ¿en qué medida afectaría ese realismo cuántico a nuestras vidas, más allá del teoricismo?

Volviendo a lo anteriormente planteado, en el plano ontológico no existiría necesariamente tal inconmensurabilidad antes tratada, aunque el realismo cuántico se oponga a la concepción clásica de realidad, incluso cuando ésta está siendo últimamente considerada una aproximación del nivel atómico. ¿Quiere esto decir que, en teoría, de acuerdo a la complementariedad, el “auténtico realismo” es el que se desprende del mundo cuántico? Porque pese a los últimos argumentos y el haber tenido conocimiento anterior del realismo clásico, éste se sostiene sobre las propiedades espacio-temporales, sobre las que ya se ha dicho que tampoco existen con independencia de la observación. No necesariamente. Los nuevos avances científicos han desmentido las nociones clásicas de realidad en nuevas escalas, pero, por supuesto, no podrán ser nunca erradicadas, no sólo porque sean las únicas a las que tenemos acceso directo, sino porque son válidas y sin duda alguna reales en la escala que nos ocupa. Esto último no deja de justificar el que nuestro patrón de conocimiento, nuestra forma de percibir el mundo siguiendo los cánones clásicos, no pueda imponer a dicho mundo cómo debe ser, porque, en esencia los patrones de otras realidades (que no son descartadas) probablemente escapen a nuestra sensibilidad, estén o no ajustadas a los cánones cuánticos.

Si nos decantáramos por un modelo de realismo cuántico como verdadero, nos veríamos en la tesitura de hacer frente a todo tipo de prejuicios y hábitos humanos, sobre todo a los referidos al lenguaje y la expresión en relación a nuestra forma de pensar en términos clásicos. He ahí la catarsis que desencadenó la física atómica y la limitación que sufrió en su desarrollo por las condiciones gnoseológicas de nuestro pensamiento. Tampoco

esa sería una solución. Por tanto, aquí no se sostiene que debamos, ni se cree que podamos, deshacernos de las formas del pensar humano ni relegarlas a un segundo puesto, porque son ineludibles, pero sí ampliar nuestros horizontes enriqueciéndonos en la reflexión que acompaña al “¿cómo se conforma el mundo en función de nuestro pensamiento y percepción?” para dar lugar a un modelo diferente de inteligibilidad. Debemos ser conscientes de que a pesar de que pensemos en términos espacio-temporales, los modelos formados en nuestra mente no son garantía de la verdad absoluta, no están ajustados a lo que la realidad es *en su totalidad*. Esto, por supuesto, es ciertamente irónico, cuando a día de hoy sigue siendo imposible aclarar el concepto de “realidad en su totalidad”. La respuesta de la ciencia será negar que el mundo sea único, pero determinar cuál de las discontinuidades que presenta debe servirnos como referencia para conducirnos sigue siendo una tarea harto complicada, aunque la respuesta, claro está, todavía se inclinaría por el peso de las referencias clásicas. Y esto porque esas son las bases del entendimiento que acontece a cada sujeto, que es lo que al fin y al cabo influye, volvemos a insistir, en nuestra existencia.

Aún así, si, inconformistas, siguiéramos dando pie al argumento de que la física clásica pierde validez como verdadero esquema de la realidad por sus conexiones intuitivas, ya que tales conexiones únicamente tienen que ver con la capacidad de percepción y experimentación humana, nos veríamos de nuevo arrastrados a la polémica sobre el supeditar nuestra existencia inmediata a la fenomenología cuántica, minimizando el impacto de lo que conforma y afecta a “nuestra vida”, en favor de otra dimensión únicamente alcanzable mediante dispositivos (que a su vez pertenecen a nuestra escala). Adoptando una postura prudente, nos apoyamos primero en la física tradicional como manifiesto riguroso de nuestras formas de entendimiento y aprehensión del mundo, y en el lenguaje clásico, vehículo con el que podemos comunicarnos. Estos son invariables porque nacen de nuestra experiencia ordinaria, que es desde donde partimos en nuestra aspiración a cualquier conocimiento. Ese es el desafío que suponía encajar la física cuántica con la percepción espacio-temporal y el lenguaje cualitativo, al que nunca podremos renunciar, ¡necesitamos entendernos unos a otros! Por eso, una vez más, se sostendrá irrevocablemente lo planteado por Bohr, el no rechazar los términos clásicos. Crear una terminología cuántica sería vano, porque no se compatibilizaría con ninguna experiencia, y a pesar de la aspiración de muchos científicos de dar sentido a un lenguaje cuántico, los conceptos de principios que los hechos y la teoría han unido seguirían siendo contradictorios a nuestra manera de conocer. No podemos entender por qué son incompatibles, no podemos, por tanto, disponer de un

lenguaje para la física cuántica, por lo que se recurre a los términos clásicos adaptados a las nuevas condiciones, de manera restringida de acuerdo a las limitaciones impuestas por el principio de indeterminación. Esto es, dándoles un uso diferente, ya que si fuera el mismo que se les da en el marco clásico sería tan ambiguo como inventar un lenguaje cuántico.

De ahí que de un mundo fragmentado, cuya naturaleza esencial es indeterminada, distingamos entre los niveles clásico y cuántico. Y destaquemos la necesidad de describir las propiedades fenoménicas de los objetos cuánticos en el lenguaje clásico, lo cual hace que no sea únicamente el dispositivo de medida el que influya en el fenómeno cuántico, sino además los términos clásicos que lo definan.

Construir tales términos a partir de las referencias espacio-temporales es la única opción posible, a pesar del fracaso de este tipo de descripción en la determinación fenoménica de las propiedades a escala atómica, resulta imprescindible. No podemos hablar correctamente de más “realidad cuántica” que la que llegamos a percibir indirectamente. Aún así, seguirá descartándose, es decir, restringiéndose en algunos campos, la intuición espacial, base de la representación pictórica, porque sólo es condición gnoseológica, y no elemento de la realidad, del marco clásico. Sin embargo, ¿se conserva la intuición temporal tanto en física clásica como en cuántica? Desde luego, la temporalidad ligada a la noción de causa y anterioridad a un efecto es impracticable en física cuántica. Aún así, el fracaso del representacionismo pictórico era el fracaso de la descripción espacio-temporal, sí, pero eso era porque los fenómenos dejaban de manifestarse espacialmente, sin embargo, el tiempo en sí, sí que es un elemento cognoscitivo y además objetivo de la realidad, ¿no es condición de posibilidad tanto del conocimiento como del objeto, para nosotros, más allá de la concepción de causalidad clásica?

¿Cuál es la realidad de los objetos cuánticos?

Remontándonos a los momentos anteriores al nacimiento de la física cuántica, esto es, a finales del siglo diecinueve, recordemos cómo el nacimiento de las diversas hipótesis y modelos atómicos se fundamentaba en la búsqueda de una explicación a la naturaleza de la materia que nos constituye y rodea. Si ahora, conocidos (aunque sea superficialmente) los postulados fundamentales de la mecánica cuántica, así como el marco de la complementariedad que parece facilitar el trabajo sobre la misma, volvemos a reflexionar

sobre el concepto de “objeto material”, nos encontramos sin duda ante un interesante giro en nuestra habitual consideración del mismo.

Lo primero que debemos volver a subrayar es el hecho de que el materialismo clásico no tiene nada que ver con el cuántico. Ya hemos hablado de las propiedades que se asignan a los objetos materiales en el espacio euclídeo, como lo son la extensión o la continuidad, igual que también hemos incurrido en la posibilidad de que la validez de los fenómenos y objetos físicos que tienen lugar ante nuestros ojos (los de la física clásica) se vea limitada por el alcance que posea la experiencia de nuestros sentidos. Ya Einstein afirmaba que la noción de objeto material era una libre creación de la mente humana, pues basándose en su percepción no existe ninguna explicación más lógica. Pero el problema lo encontramos cuando esa creación de nuestra mente, fundamentada en nuestra experiencia (que es bastante limitada), no arroja ninguna clase de luz sobre la comprensión del mundo microfísico, que en este trabajo hemos tomado como objeto de estudio. Profundizaremos ahora un poco más a fin de despejar dudas, aunque es probable que sólo terminen incrementándose, sobre estas últimas ideas.

La localización-espacio temporal ha de descartarse indiscutiblemente en el estudio de los objetos cuánticos, pues ya hemos dejado claro que estos no poseen ni la homogénea unidad que caracterizaba a la noción de objeto material clásico ni la continuidad que lo hacía infinitamente indivisible. Pero ahora, si los objetos cuánticos no ocupan lugar en ningún espacio definido, el principio de individualidad y diferenciación que se asignaba a la materia tampoco lo hallará en la física cuántica. ¿Podemos decir que es posible discernir entre las partículas materiales? No. Al descartar el continuo espacio-temporal y su homogeneidad, separar e individualizar a los sistemas físicos se vuelve imposible, y la materia que los compone tampoco tendrá por qué diferenciarse entre sí.

¿Qué quiere decir esto? Que en el estudio de los objetos clásicos no se atiende exactamente a propiedades de un espacio universal absoluto, sino a aquellas que se basan en un espacio clásico adaptado a la sensibilidad del hombre. Eso hace que la objetividad y autonomía que se concedía a los objetos materiales en el sentido clásico pierdan todo su rigor, pues en física cuántica, es la observación la que determina las propiedades mecánicas de los objetos, y las leyes de la probabilidad las que rigen la información que pueda anticiparse de ellos. Si, siempre refiriéndonos al objeto cuántico, hay que despedirse de las anteriores referencias espaciales, habrá que hacerlo también de la habitual descripción de los

objetos físicos en función de sus características espaciales, porque éstas variarán irremediablemente. La física cuántica niega para sí la objetividad del espacio euclídeo y el determinismo físico, lo que descarta la posibilidad de representar especularmente el mundo basándonos en ese espacio gnoseológico, así como el movimiento tal cual se produce en la realidad.

Si existe una espacialidad real de la materia (sabiendo que desde el s. XX los cuerpos “groseros” pasaron a incluir energía, etc.), no sólo probablemente no se corresponda con el ideal de materia en el espacio de la ciencia tradicional, sino que nos es totalmente inaccesible. Es aquí donde aclara Bohr en su tesis que sólo se podrá trabajar en los fenómenos físicos de acuerdo a un modelo espacial intuitivo que se establezca por analogía a lo que realmente podría suceder, lo cual no conoceremos directamente. El puente para ello sería, en todo caso, la temporalidad, puesto que, desde luego, el espacio de nuestra percepción dista bastante de la realidad no-euclídea de la que venimos hablando.

Por tanto, podemos destacar una serie de condiciones de posibilidad de los objetos cuánticos:

La primera y fundamental, será la determinación de su naturaleza fenoménica. Se puede afirmar con seguridad que la objetividad de los objetos microfísicos, cuyas propiedades se manifiestan a través de diferentes fenómenos, dependerá de las condiciones en que se den dichos fenómenos. Esto es, las condiciones subjetivas de nuestro conocimiento (Kant hablaría del carácter subjetivo intrínseco a la naturaleza de las intuiciones) y la mediatización de los dispositivos de medición determinarán la forma en que tales objetos se manifestarán. Pero como esos dispositivos de medición están contruidos en términos clásicos, el objeto que a través de ellos se manifiesta sólo podrá ser representado basándose en esos conceptos clásicos, y he aquí, de nuevo, el porqué de la representación analógica, que no exacta, de una realidad que no se rige por las mismas formas de ordenación que sigue nuestro intelecto, como consecuencia de nuestra experiencia. Por buscar una forma de explicar el proceso, lo que ocurriría sería que la posible realidad objetiva de los objetos se ve modificada al ser sometida a la medición de los dispositivos y pasa a ser definida de forma fenoménica de acuerdo a referencias espacio-temporales, condiciones de posibilidad de nuestro entendimiento, pero no del objeto, y que por lo tanto no podrían tomarse como intuiciones *a priori* en sentido kantiano (porque necesitarían ser condiciones de posibilidad objetivas del objeto). O, como mínimo, no podría serlo el espacio. Las condiciones de posibilidad del objeto

y del entendimiento sólo coincidirán en el caso de que la espacialidad sea euclídea, pues sólo a esa geometría se ajusta la percepción humana.

En resumen, el mundo cuántico ha significado la revolución de todos nuestros paradigmas. Es el momento de olvidar la imagen clara y concisa que hasta hace poco se tenía de “la forma en que el mundo realmente es” y ampliar las perspectivas del conocimiento científico para llegar a una mejor comprensión del funcionamiento de nuestro Universo.

BIBLIOGRAFÍA Y RECURSOS ELECTRÓNICOS

Fernández-Rañada, Antonio (2004): *Ciencia, incertidumbre y conciencia: Heisenberg*. Editorial Nivola, España.

Frayn, Michael (1988): *Copenhaguen*. Libreto de la obra de teatro traducido por Mary Sue Bruce (2002), Teatro General San Martín, Buenos Aires.

Wagensberg, Jorge (2003): *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Ed. Tusquets, España.

Madrid Casado, Carlos (2008): "Filosofía de la Física. El cierre de la Mecánica Cuántica", *El Basilisco*, nº 38, pp 1 - 40.

Gilmore, Robert (2006): *Alicia en el país de los cuantos*. Alianza Editorial, Madrid, España.

Diéguez Lucena, Antonio (1998): *Realismo científico. Una introducción al debate actual en la filosofía de la ciencia*. Universidad de Málaga.

Esteban Gómez, Pedro (2007) Trata de explicar los conceptos básicos de la Mecánica Cuántica sin apenas utilizar matemáticas y de forma relativamente accesible:

<http://eltamiz.com/cuantica-sin-formulas/>

Gribbin, John (1984): *En busca del gato de Schrödinger*. Biblioteca científica Salvat, España.

Heisenberg, Werner (1979): *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos*. Alianza Editorial, Madrid, España.

Heisenberg, Werner (1969): *La imagen de la Naturaleza en la física actual*. Biblioteca Breve, Editorial Seix Barral, Barcelona, España.

Murdoch, Dugald (1987): *Niels Bohr's Philosophy of Physics*. Cambridge University Press.

Rioja, Ana (1992): "La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza". *Revista de Filosofía*. Volumen V, nº8. págs. 257-282. Editorial Complutense. Madrid.

Madrid Casado, Carlos (2006): "Ochenta años de la equivalencia entre mecánicas cuánticas". Notas históricas, <http://www.esef.org>

Cadenas Gómez, Yolanda (2003): *Epistemología, Ontología y Complementariedad en Niels Bohr*. Facultad Filosofía, Universidad Complutense, Madrid, España.

Papp, Desiderio (1944). *La doble faz del mundo físico*. Buenos Aires: Espasa-Calpe Argentina.

Madrid Casado, Carlos (2009): "Cómo hacer ciencia con aparatos. Un enfoque materialista de la física cuántica." *EMPIRIA*, Nº18, pp 147-170.

Coble Sarro, David (2012): "Lo a priori trascendental en Kant (una investigación lógico-conceptual". *Factótum* 9, pp. 43-122. España.

Piulats Riu, Octavi (2012): "La filosofía trascendental de Kant y la cuestión del escepticismo". *Thémata. Revista de Filosofía*. Número 45. Facultad de Filosofía, Universidad de Barcelona, España.

Aarón Segura, Viviana Nieto y Esteban Segura (2012): "Un análisis profundo del fenómeno dualidad onda-partícula para la comprensión del mundo cuántico". *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol. 6, No. 1. <http://www.lajpe.org/> . Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia.

Esteban Gómez, Pedro (2007) Trata de explicar los conceptos básicos de la Mecánica Cuántica sin apenas utilizar matemáticas y de forma relativamente accesible:

<http://eltamiz.com/cuantica-sin-formulas/>

Documento PDF online: http://www.gabinete-psicologico.com/filosofia/t_con_t15.pdf

Especial agradecimiento a mis directores de proyecto, por la guía e inspiración.