

UNIVERSIDAD COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
CÁTEDRA DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y RELIGIÓN

Seminario, curso 2004-2005
Segunda Sesión Básica
18 de febrero de 2005

Microfísica: materia, partículas, ondas, mecánica cuántica

DOCUMENTO MARCO

Si se pudiera conocer qué es la materia se habría dado *probablemente* el paso más importante en el conocimiento del mundo físico, del mundo de la vida, e incluso quizá también del mundo del psiquismo (y si la materia no pudiera explicar el psiquismo se justificaría quizá entonces el paso a posiciones dualistas, ya que en este caso los hechos impondrían romper la expectativa científica inicial de un mundo unitario y monista). El término “materia” está sesgado incuestionablemente por ciertas interpretaciones específicas sobre la esencia de la materia aparecidas en el curso de la historia (vg. en el aristotelismo, la posterior escolástica o el dualismo cartesiano de la *res extensa*); en las representaciones populares la palabra “materia” suscita sin duda también interpretaciones sesgadas condicionadas por formas de pensar cuestionables. Pero cuando aquí nos referimos a la “materia” no apuntamos a un concepto preciso de materia, ya hecho, sino a aquella *realidad primordial* cuyo ser dinámico ha dado origen a todo cuanto vemos: primero el mundo de los objetos físicos organizados como universo; segundo el mundo de los seres vivientes, *presumiblemente* surgidos del mundo físico; tercero, el mundo de los organismos con psiquismo, también *presumiblemente* surgidos de la realidad biofísica anterior. En principio, pues, el término “materia” no designa algo conocido, sino algo desconocido que la ciencia debe esforzarse en

conocer. Llegar, pues, a conocer qué es la materia, en su realidad y en su ser, constituye probablemente el objetivo más importante de la ciencia. De ahí se derivaría, en lógica científica, todo otro conocimiento posterior.

El conocimiento de este “algo” o “realidad primordial” permitiría una explicación de la naturaleza de los objetos físicos de nuestra experiencia macroscópica (fenoménica), ya que el universo es resultado de la dinámica de la materia y su compleja organización. Igualmente permitiría un acercamiento en mayor profundidad hacia la verdadera naturaleza de los seres biofísicos surgidos en la evolución del mundo físico, e incluso quizá una aproximación al enigma del psiquismo (en los seres vivos y en el hombre).

Ya los filósofos griegos especularon sobre la naturaleza de la materia y los cuatro principios (aire, tierra, agua y fuego); la especulación continuó a lo largo de los siglos medievales. Pero, ¿qué ha dicho la ciencia moderna sobre la materia o *realidad primordial* del universo? El resultado del conocimiento alcanzado puede resumirse en dos momentos sucesivos, que no agotan las posibilidades de avance futuro de la ciencia: la mecánica clásica y la mecánica cuántica. Pero, asumiendo muchos principios de la mecánica clásica, lo que hoy sabemos de la materia y la forma de valorar este conocimiento se encuadra en el paradigma de la mecánica cuántica que llena los últimos ochenta años de producción científica; aunque sea también un hecho que hoy se comienzan a cuestionar algunos de sus presupuestos más importantes. La mecánica cuántica es, pues, hoy todavía la gran teoría física que ordena nuestros conocimientos más profundos y últimos sobre esa realidad primordial nombrada tentativamente con la palabra “materia”. Pero no deja de ser sorprendente que estos conocimientos cuánticos nos llenen de perplejidad y nos ofrezcan con persistencia una imagen enigmática, todavía abierta, sobre la naturaleza última de la materia.

No es, pues, de extrañar que la idea de la realidad primordial construida en la mecánica cuántica se haya aplicado a la explicación del universo (por ejemplo, las referencias al *vacío cuántico* en Alan Guth en las teorías del universo burbuja), o a la explicación de la *realidad psicobiofísica* (por ejemplo en las teorías de Hameroff y Penrose sobre fenómenos cuánticos presentes en las estructuras neuronales). Volveremos sobre esto al final.

Pero, por otra parte, tampoco cabe duda de la importancia de nuestro conocimiento de la materia para proyectarlo sobre las grandes cuestiones filosóficas que dependen de nuestra idea última del universo físico, de la vida y del psiquismo animal y humano (que a su vez dependen de nuestra idea de esa realidad primordial, o materia, de que está hecho presumiblemente todo lo real). Por ello, a continuación, vamos a presentar un esquema (sólo un esquema conceptual) de nuestro conocimiento de la materia en la ciencia

física siguiendo los pasos de la transformación de la mecánica clásica en mecánica cuántica. No pretendemos ofrecer respuestas a los enigmas: sólo describir resultados científicos, aunque también mostrando los problemas por ellos planteados para nuestra imagen científica de la materia. [Para elaborar este resumen de la mecánica cuántica tomamos como referencia amplia dos obras de John Polkinghorne: *The Quantum World*, Princeton University Press, New Jersey 1984 y *Quantum Theory. A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford 2002].

I. HISTORIA CONCEPTUAL DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

1. *Materia en la mecánica clásica de Newton.* La física de Newton se construyó desde nuestra experiencia fenoménica y macroscópica del mundo. Se suponía que los objetos físicos estaban hechos de una “materia” que les confería masa, volumen, peso ..., así como otras propiedades que podían también ser susceptibles de medida y cuantificación (vg. la fuerza de atracción que sirvió para su cosmología del universo en equilibrio gravitatorio). Ahora bien, ¿qué era en último término la “materia” para Newton? Estaba sin duda influido por el atomismo griego y por ello debía de consistir en pequeñas partículas o corpúsculos hechos de “materia”. Esta teoría no decía qué era la “materia” en sí misma, pero afirmaba que primordialmente se reducía a unos componentes corpusculares de reducidísimas dimensiones que dotaban a los cuerpos de masa, peso y las restantes propiedades físicas describibles en el mundo macroscópico como variables científicas cuantificables. La luz era así explicada por Newton como un finísimo haz de corpúsculos de materia (teoría corpuscular de la luz).

2. *Radiación al comenzar el siglo XIX.* Thomas Young demostró hacia 1801, por medio de experimentos de rendijas, que la luz era un evento físico ondulatorio (las imágenes proyectadas sobre la cámara oscura por la interferencia de la luz entrante por dos rendijas sólo podían interpretarse ondulatoriamente). En ese tiempo, pues, el calor, la luz y los fenómenos de naturaleza electromagnética (que comenzaban a conocerse: Franklin, Faraday, Ampere...) condujeron a entender que la realidad física no sólo estaba constituida por “materia”, sino también por fenómenos de “radiación”. Si la materia eran “corpúsculos” discontinuos (independientes, aunque agrupados o en movimiento), en cambio la radiación era un fenómeno continuo que llenaba un campo y se propagaba ondulatoriamente. El mundo físico real estaba así constituido por materia y por radiación. Una realidad corpuscular discontinua y otra realidad campal continua. En estos campos físicos la energía (calor, energía electromagnética, luz) se propagaba ondulatoriamente (oscilaciones

entre máximos y mínimos) de forma continua; esta energía de radiación llenaba campos y cualquier partícula de materia introducida en ellos se veía afectada misteriosamente por esa nueva fuerza. A lo largo del siglo XIX se siguió profundizando por caminos paralelos en el conocimiento de la *materia*, por una parte, y de la *radiación*, por otra.

3. *Imagen clásica de la materia en el XIX*. La continua investigación físico-química en el XIX permitió una profundización en la idea “clásica” de materia. El presupuesto era la idea de átomo. Los estudios de las relaciones ponderales y volumétricas entre las sustancias en las reacciones químicas (Dalton, Lavoisier, Avogadro y otros) condujo pronto a consolidar la idea de *elementos químicos* atribuyendo sus propiedades a la forma específica de sus átomos. Al atribuir, pues, a los elementos un *peso atómico* relativo, teniendo también en cuenta otras propiedades, se pudo llegar a la construcción del *sistema periódico*, cuyas casillas vacías irían llenándose poco a poco. Pero los átomos seguían siendo unidades primordiales (átomo = indivisible) llenas de “materia”. Dos descubrimientos forzaron el avance en nuestra idea de la materia: los fenómenos de radioactividad de Madame Curie y otros (los cuerpos desprendían partículas cargadas eléctricamente) y el descubrimiento del electrón por Thompson en 1898 en el tubo de rayos catódicos. El modelo del *puding de pasas* (*the plum pudding model*) fue la primera respuesta al reto de estos hechos (el átomo era una masa positiva compacta de materia con pequeñas partículas negativas que podían desprenderse). Más adelante, el experimento de Lord Rutherford (sólo algunas pocas partículas alfa eran repelidas por la laminilla de oro rebotando hacia atrás) llevó por primera vez a la idea del átomo como sistema planetario (núcleo de protones positivos y electrones negativos en órbita, mediando un espacio *quasi* vacío de enormes proporciones relativas).

4. *Imagen clásica de la radiación en el XIX*. El paso más importante en esta línea, y uno de los más importantes en la historia de la física, fue la teoría electromagnética de James Maxwell (1867) donde los conocimientos hasta entonces dispersos de electricidad y magnetismo se explicaron a partir de un juego esencial de ecuaciones que presentaban soluciones ondulatorias. La teoría de Maxwell apuntaba a que en la naturaleza debían de existir las radiaciones que acabarían encuadrándose, según longitud de onda y frecuencia, en el abanico del espectro electromagnético (donde la luz visible corresponde a la reducida franja de 400-700 nanómetros). Así, Herz descubrió pronto y manipuló las ondas de radio (herzianas). Maxwell y sus contemporáneos creyeron, pues, que las ondas electromagnéticas eran oscilaciones en un medio elástico que lo atravesaba todo y que denominaron *éter*. Consideraban que éste era el concepto más firmemente establecido de la teoría física; además, en

alguna manera se relacionaba con las ideas de campos físicos y continuidad que conectaban con la naturaleza general de los fenómenos de radiación. Los experimentos de Michelson-Morley (en los años 1880ss) permitieron medir la velocidad de la luz –dotando de valor a una constante fundamental del electromagnetismo-, pero, al mismo tiempo, llevando a la conclusión de que las medidas de la luz (presumiblemente, como se pensaba en aquel tiempo, discurriendo en el éter) en relación con los movimientos de la tierra no eran congruentes con la hipótesis física de la existencia del éter.

5. *Primer nacimiento de la mecánica cuántica (Planck y Einstein)*. La así llamada mecánica clásica (a veces física clásica) es la física de Newton y Maxwell. Es una física de materia corpuscular, pero que ya conoce los campos (de fuerza gravitatoria en Newton y de fuerza electromagnética en Maxwell). En realidad, las unidades discontinuas de los átomos presentes en la materia y la radiación de energía presente en campos continuos (electromagnetismo y calor) eran dos tipos de realidad física, sin duda existentes, pero irreductibles (la *materia* era materia y la *radiación* era radiación, sin que se concibiera el tránsito de una cosa a otra). La mecánica cuántica (la nueva idea de la materia en la ciencia actual) va naciendo a medida que materia y radiación se van conociendo como manifestaciones enigmáticas de una realidad primordial unitaria. El primer paso hacia esa nueva imagen de la materia lo dio Max Planck al introducir la idea del *quantum* de energía (de ahí que, por extensión, se haya denominado “cuántica” a la nueva idea de la materia y de la mecánica que surgen de Planck). El segundo paso lo dio Einstein un poco más tarde al aplicar las ideas cuánticas de Planck a la interpretación de la naturaleza de la luz, de tal manera que pudiera explicarse el efecto fotoeléctrico.

Al comenzar el siglo XX, la teoría termodinámica estaba enredada en la explicación de la radiación del cuerpo negro (un objeto imaginario que absorbía toda la radiación incidente y la reemitía en su totalidad, objeto que podía ser construido con bastante aproximación real). Las predicciones de la forma de radiación según la física estadística del XIX, como mostró Lord Rayleigh en 1900, no se correspondía con los resultados experimentales. Las hipótesis *ad hoc* de Max Planck en 1903 lograron una explicación satisfactoria de los hechos empíricos. Planck consideraba que la absorción o emisión de energía de radiación no era continua (negando un presupuesto esencial de la física del XIX), sino discontinua; es decir, por paquetes de energía que eran siempre múltiplos de una unidad básica. La energía de uno de estos cuantos era proporcional a la frecuencia de la radiación multiplicada por una constante (constante de Planck, h). Lo importante es que Planck cuantificaba la energía en cuantos discontinuos (*quanta*), acercándolos al mundo corpuscular, pero lo hacía atribuyéndoles propiedades ondulatorias de la radiación (frecuencia). La

transformación de la frecuencia en sus equivalentes a través de las funciones ondulatorias producía una extraña fusión de lo corpuscular y lo ondulatorio.

Esta extraña fusión continuó muy poco después en 1905 cuando un joven físico, Albert Einstein, logró explicar los datos experimentales del llamado efecto fotoeléctrico (producción de electricidad en metales por efecto de la incidencia de luz) al suponer que la luz era un corpúsculo (fotón) al que, de acuerdo con Planck, se debía atribuir una determinada frecuencia propia (como variable aparte de la pura intensidad de luz). Einstein corpuscularizaba la luz (frente a la teoría ondulatoria del XIX), pero curiosamente no negaba que la luz pudiera ser también una onda. Era una realidad física a la que se debía atribuir la virtualidad de actuar como corpúsculo o como onda (aunque no supiéramos explicar la naturaleza última de la luz para justificar este dual comportamiento). Nos encontramos ya ante la primera introducción del concepto de *dualidad* (o *complementariedad* como después dirá Bohr) corpúsculo-onda. Los mundos decimonónicos del corpúsculo material y de la radiación ondulatoria entran por la vía de la unificación.

6. *El átomo de Niels Bohr*. Este modelo atómico de 1915 (perfeccionado poco después por Sommerfeld y Wilson) responde al camino ya iniciado por Rutherford, pero generalizado y reinterpretado por las ideas cuánticas de Planck y Einstein, con el transfondo conceptual de la mecánica clásica de Newton y Maxwell. Los electrones del primer átomo planetario de Rutherford, según la teoría electromagnética, al girar en torno al núcleo, debían emitir una cierta energía de radiación que les conduciría a precipitarse irremediabilmente sobre el núcleo. La idea de Bohr consistió en postular que la energía de los electrones debía estar cuantificada y responder a unos valores discretos (no continuos). Así, los electrones en el átomo sólo debían de existir en ciertos niveles de energía (1, 2, 3 ...) y, al mantenerse en ellos, no debía darse radiación de energía: ésta se absorbía o emitía sólo al saltar, subiendo o bajando, entre niveles superiores e inferiores de energía. Bohr estudió con precisión el número de electrones diferentes que podía albergar cada nivel energético: 2, 8, 16, 32 ... El número dependía de una serie de factores en función de su ubicación y giro en el espacio. Ningún electrón podía coincidir con otro en los llamados *números cuánticos* (más tarde se diría que al menos debían distinguirse en su spin). Con esta teoría se podía reinterpretar al fin la distribución de los elementos químicos en el sistema periódico en función de las estructuras atómicas y explicar convincentemente las propiedades de los grupos de elementos (vg. las propiedades de los halógenos o de los metales por la estructura electrónica de sus últimos niveles electrónicos). Permitía también de forma convincente explicar los resultados empíricos alcanzados por espectrografía (análisis de la luz emitida por elementos y sustancias

químicas, tras pasarla por el prisma de Newton para dividirla en sus longitudes de onda). Así, la emisión discreta de energía entre diferentes niveles explicaba también las rayas espectrográficas y la fórmula de Balmer para la emisión espectral del átomo de hidrógeno (que se conocía ya desde unos cuarenta años). En último término el átomo de Bohr se construyó desde una idea decimonónica de la materia corpuscular y de la radiación. En realidad era una aplicación de la mecánica de Newton y Maxwell con ligeras adaptaciones a su idea cuantificada del átomo y con la introducción de la constante de Planck, h , en sus fórmulas. Por ello, las partículas seguían siendo corpúsculos materiales clásicos estudiados por las fórmulas dinámicas de la mecánica clásica.

7. *Generalización de la dualidad corpúsculo-onda: Louis de Broglie.* Un aristócrata francés pasado de la historia a la física teórica iba a dar en su tesis doctoral de 1924 un paso decisivo en la idea moderna de la materia: si Einstein había mostrado que la luz debía ser entendida al mismo tiempo como partícula y como onda, ¿no podríamos extender esa teoría al electrón como constituyente esencial de la materia? De Broglie se propuso, en efecto, la tarea de mostrar que la física teórica permitía considerar que así debían de ser efectivamente las cosas. Inspirándose en las fórmulas de Planck y Einstein construyó una propuesta teórica consistente sobre la naturaleza del electrón en su órbita atómica. Como Planck había relacionado la energía del cuanto con la frecuencia, De Broglie relacionó el momento de la partícula con la propiedad ondulatoria de la longitud de onda. Así, al entenderse como una vibración ondulatoria cerrada sobre sí misma en el espacio se llegaba a la conclusión de que ésta sólo podía tener estabilidad en ciertos niveles, de tal manera que se encontraban evidencias teóricas nuevas añadidas para la cuantificación de los orbitales en que las ondas electrónicas tenían posibilidades de existencia estable. Si De Broglie tenía razón el electrón no era ya sólo un corpúsculo, puesto que su existencia en el orbital atómico podía entenderse como una vibración ondulatoria que lo llenaba establemente: el electrón no estaba ya en un punto definido, sino en toda la amplitud ondulatoria de su orbital. Muy poco tiempo después, hacia 1927, Davisson, Germer y G. Thompson (hijo de J.J. Thompson), trabajando con haces de electrones libres mostraron, de forma semejante al experimento de rendijas de Young, que éstos producían patrones de interferencia ondulatoria similares a los de la luz.

8. *Las mecánicas de Heisenberg, Schroedinger y Dirac.* Si las ideas de De Broglie, como parecía, eran correctas, entonces había que repensar en profundidad el átomo de Bohr, ya que éste parecía responder a una etapa ya superada de la mecánica cuántica. Había, pues, que reconstruir un modelo matemático en que se describiera la naturaleza corpuscular-ondulatoria de la densa estructura de electrones en sus orbitales, de tal manera que se explicaran

las absorciones y emisiones de energía de radiación, así como la naturaleza de los enlaces atómicos, iónicos o covalentes, y todo ello en concordancia con los datos empíricos existentes (vg. los resultados de la espectrografía atómica). La respuesta a esta necesidad fue ofrecida en torno a 1925-1930 por la propuesta de tres sistemas matemáticos cuya equivalencia pudo ser demostrada. Eran, en definitiva, tres formas matemáticas equivalentes para describir en función del tiempo la realidad del átomo: la energía de las partículas, sus orbitales, su posición, su momento y otras propiedades mecánicas, su posible localización en uno u otro punto, las absorciones y emisiones de energía, etc. Nos estamos refiriendo a la mecánica matricial de Heisenberg, la mecánica ondulatoria de Schroedinger y el álgebra de Dirac.

Werner Heisenberg había estado analizando en profundidad todos los detalles conocidos de la espectrografía atómica, ya muy amplia y con altos grados de precisión, que se presentaba como, digamos, la radiografía más cercana de la intimidad de las estructuras atómicas. La idea esencial de Heisenberg consistió en aplicar al átomo el cálculo de matrices por medio de una representación de las variables por matrices y un seguimiento de sus reglas de cálculo específicas. El hecho de que el producto de matrices no era conmutativo iba a tener una significación física importante conectada con las mediciones que era posible realizar simultáneamente en mecánica cuántica. Por otra parte, el esquema de fondo de Heisenberg (al que daría una compleja reinterpretación matricial) siguió siendo el átomo clásico de Bohr en el marco de la mecánica de Newton y Maxwell.

Un sistema matemático equivalente, mas bien relacionado con las ondas y su expresión matemática, es la llamada ecuación de Schroedinger. Su objetivo era calcular aquellas variables esenciales descriptoras del sistema atómico. Fue una ecuación construida por intuición y por tanteo, hasta dar con un resultado apropiado a sus objetivos. La ecuación de Schroedinger (o, a veces, ecuación de ondas) relaciona diversas variables (posición, energías ...). Introduce un factor Psi, la función de onda para un sistema real concreto, donde las variables tienen un valor definido y se trata de valorar la probabilidad de que otra variable adquiriera un valor dentro de ciertos condicionamientos. La resolución de la ecuación de Schroedinger con esa función de onda proporciona un valor que tiene una probabilidad concreta en ese sistema. La ecuación de Schroedinger cuadra cuando en ella sustituimos el valor Psi por el valor calculado de la función de onda para un sistema concreto. Naturalmente nunca sabremos si en un experimento concreto esa variable tendrá el valor acotado; pero sí sabemos que si hacemos un cálculo para muchos experimentos, en el mismo sistema o en varios, se cumplirá determinísticamente la probabilidad calculada con la ecuación de

Schroedinger. En este sentido se dice también que su ecuación es por ello determinista (es decir, es determinista en la probabilidad que establece). La interpretación de la ecuación de Schroedinger es compleja y discutida. Max Born interpretó que el módulo de la función Psi al cuadrado de la correspondiente función de ondas nos daba la probabilidad de encontrar una partícula en el punto x. La ecuación general de Schroedinger puede sufrir transformaciones bajo diferentes supuestos (vg. la irrelevancia del factor tiempo) que conducen a presentaciones diferentes y, además, se puede referir a sistemas atómicos con uno o más electrones. Todo ello la complejiza más y más, y la hace más difícilmente asequible para los profanos.

Paul Dirac hizo también aportaciones importantes, siendo junto a Max Born quién más contribuyó a entender que la mecánica cuántica era una teoría general basada en unos principios comunes, cuya articulación matemática se podía orientar de diversas formas, en el fondo equivalentes (descriptoras de la misma realidad). Dirac hizo ver también que otro sistema matemático posible para el tratamiento del mundo atómico podían ser las ecuaciones de Hamilton (importante matemático inglés del XIX que las propuso desde una perspectiva cosmográfica en el marco newtoniano).

9. *Superposición de estados.* La mecánica cuántica (o sea, la moderna imagen de la materia en la ciencia física que nace de Max Planck y ha ido mucho más allá de cuanto la mecánica clásica podía concebir) ha nacido de hechos constatables en experimentación y de complejos sistemas conceptuales ingeniosos para interpretarlos. Según lo dicho, la extensión de la dualidad corpúsculo-onda al electrón hizo necesario superar el modelo clásico de Bohr para construir matemáticamente descripciones formales nuevas (Heisenberg, Schroedinger, Dirac) que introducían ya un factor probabilidad evidente en nuestro conocimiento de los eventos microfísicos (vg. en la ecuación de Schroedinger). Pero si la mecánica cuántica va haciéndose extraña es porque los hechos objeto de experimentación son extraños y conducen a la necesidad de introducir conceptos extraños. Uno de ellos es el concepto cuántico de *superposición de estados*. Para la física clásica una entidad material en un estado se encuentra en A o B, pero no en los dos lugares a la vez. Sin embargo, el análisis de resultados de experiencias con haces de electrones entrando en una cámara oscura a través de dos orificios (1 y 2), llevó a la consecuencia de que partículas como el electrón podían presentar su realidad al observador como siendo reales en dos estados superpuestos (como estando a la vez en A o B; o, en el experimento de rendijas, pasando simultáneamente por el orificio 1 y 2).

Algo parecido sucede en la imagen cuántica del electrón cuando se dice que está aquí, allí, en todas y en ninguna parte (también el célebre *gato de*

Schroedinger presenta una situación de superposición de estados). Sin embargo, cuando en la experimentación buscamos la detección del electrón en su órbita o al atravesar alguno de los orificios, entonces se produce el llamado *colapso de la función de onda* y los enigmáticos estados superpuestos colapsan en la realidad de uno solo. Otro campo en que consideraciones parecidas surgen con fuerza son las aportaciones de Richard Feynman en torno a la descripción cuántica de la trayectoria de las partículas. Para la física clásica el tránsito desde A a B es definido y único. Pero en la mecánica cuántica la partícula puede moverse de A a B por todos los caminos posibles a la vez (esto es como una forma de superposición). Por ello, lo que en realidad sucede, dirá Feynman literariamente, es como una *suma de historias* (de posibles caminos). La técnica de cálculo conocida como *integrales de Feynman* ayuda a manejarse en ese mundo de trayectorias borrosas en que juegan un papel intermediario *partículas virtuales* que conducen al estado final en que la función de onda colapsa.

Las reflexiones construidas a partir de este hecho han llevado a insistir en la dificultad de predecir con precisión cuál va a ser el comportamiento de las partículas microfísicas, obligándonos de nuevo a reducir nuestro conocimiento a predicciones estadísticas y probabilísticas. Conocimiento, en último término, reducido al conocimiento de funciones o amplitudes de probabilidad de los sucesos microfísicos. En todo caso aparece una imagen del mundo microfísico difícil de entender desde los parámetros de nuestra experiencia macrofísica. Una imagen sorprendente, borrosa, enigmática desde el mundo clásico.

10. *Espacios cuánticos y vectores de estado*. La mecánica cuántica comenzó a describir los estados de partículas por medio de vectores (por ejemplo, su posición en el espacio). El espacio vectorial más apropiado fue el construido por Hilbert (el espacio de Hilbert). Un estado (un vector) podía ser intervenido por un operador (también un vector, observable en física macroscópica) para producir un estado resultante (otro vector resultante). Las operaciones en estos estados no son siempre conmutativas (ni en operación vectorial, ni en las matrices de Heisenberg) y sirven para representar cambios de estado reales no conmutativos. Pero los mismos operadores actuando sobre estados similares no siempre producen los mismos resultados en el momento de la medida (probablemente por la concurrencia de otros vectores diferentes y desconocidos en cada momento). De nuevo aparecen aquí la incertidumbre y borrosidad del mundo cuántico.

11. *El principio de incertidumbre de Heisenberg*. Este es el principio que más contribuyó al conocimiento del nombre de Heisenberg, más incluso que su más importante aportación, la mecánica matricial. Este principio trató de establecer los límites del nuestro conocimiento microfísico por medio de la

experimentación. Para ello Heisenberg se valió de experimentos o situaciones imaginarias para extraer sus consecuencias. Se trataba de medir la posición y el momento de un electrón por medio de un microscopio apropiado. Ya la no conmutatividad de las operaciones de medida permitía atisbar un problema teórico. Pero veamos qué pasaría. El electrón debería reflejar al menos un fotón hacia el microscopio para poder ser visto. Pero el fotón sólo podría tocar el electrón si tuviera una alta frecuencia, y por ende una alta energía (esto era ya claro desde Planck). Consecuencia: una vez que el fotón se desviara produciría un *efecto de incertidumbre* en el electrón que se traduciría en un cambio indeterminado en su momento. Pero igual, pero a la inversa, sucedería si tratáramos de medir el momento del electrón: la intervención necesaria nos dejaría en incertidumbre sobre la posición de la partícula. El principio de Heisenberg, dejando aparte su expresión matemática, nos dice simplemente que no es posible conocer con precisión simultánea al mismo tiempo la posición (dónde está) y el momento (qué hace) de una partícula. Esta imposibilidad se extiende también a otros pares de variables correlacionadas.

12. *Lógica cuántica y principio de complementariedad*. La lógica aristotélica clásica (y muchas versiones de la lógica matemático formal) se basaban en el principio de sólo dos posibilidades: algo es o A o NO-A. En cambio, la mecánica cuántica ha abierto el conocimiento hacia un mundo microfísico borroso en que las cosas no son A o NO-A, sino que pueden tener estados intermedios (el electrón puede estar aquí, allí y en todas partes). Estas intuiciones han inspirado la construcción de una *lógica cuántica* (una especie de *lógica difusa*) para responder a esta enigmática borrosidad de los eventos. Ante este mundo de borrosidades y superposición enigmática de estados Niels Bohr aportó pronto el establecimiento de un *principio de complementariedad* como criterio de interpretación: las superposiciones, las incertidumbres, las dualidades no son contradictorias sino más complementarias e iluminadoras hacia un saber más profundo. Así, la dualidad partícula-onda no supone una contradicción ontológica, sino un concepto complementario que lleva a una idea mejor de la ontología profunda de la materia (aunque quizá no sepamos, de momento, explicar cómo se concilian ontológica o formalmente estos dos aspectos).

13. *Corpuscularidad y ondulatoriedad en la teoría de partículas*. Desde los años milagrosos del nacimiento de la mecánica cuántica (1925-1930) han sido descubiertas un enorme número de nuevas partículas (el neutrón no fue detectado hasta 1934). Se conocen, pues, hoy partículas casi infinitamente más pequeñas que el electrón o el protón. Además estas partículas estarían también construidas internamente por una serie de quarks que constituirían las piezas de intercambio, digamos, en transformaciones y reacciones entre partículas.

Las partículas forman una tabla compleja que da lugar a una necesaria *teoría de partículas* correspondiente. Es importante advertir que los principios comentados hasta ahora (que describen la imagen del mundo microfísico en la mecánica cuántica) se aplican también al conjunto integral de las partículas conocidas. Así, sigue vigente la dualidad corpúsculo-onda, hasta el punto de que los mismos quarks responden también a un comportamiento ondulatorio (energía de radicación, vibración). La última teoría aparecida, la teoría de las cuerdas, pretendería también un concepto más preciso de las partículas construido también desde la idea de vibración y plegamiento. Sigue vigente, por tanto, un mundo de partículas con posición puntual en el espacio y trayectoria (recordemos los registros en ciclotrones y similares); pero también sigue vigente un mundo ondulatorio en campos extendidos en el espacio-tiempo.

14. *Un mundo conocido por probabilidad y estadística.* Es posible así entender el carácter probabilístico-estadístico del conocimiento de los eventos microfísicos en la mecánica cuántica. Hay muchas incertidumbres (pares de variables excluyentes), borrosidades, superposiciones de estado ... que no hacen posible conocer qué estado o comportamiento tomará una partícula en un momento concreto del espacio-tiempo. Pero la mecánica cuántica ha construido muchos métodos y fórmulas matemáticas precisas (probabilístico-estadísticas) para conocer qué pasará globalmente en un conjunto grande de mediciones o en comportamientos de masas de partículas. La aplicación de estos conocimientos cuánticos se comprueba constantemente en el mundo de la química industrial o en el diseño de la tecnología de la luz, por ejemplo. Constituyen el gran éxito empírico de la mecánica cuántica.

15. *Fermiones y la construcción del mundo atómico.* Los fermiones son un subgrupo de partículas que corresponde, en general, a las partículas antes conocidas y de mayor, digamos, entidad material (vg. en su masa). Cuando se produce un intercambio entre estas partículas (sea aparición, desaparición, combinación, transformación ...) cambian sus propiedades ondulatorias: esto se expresa diciendo que la función de onda es antisimétrica en el intercambio entre dos partículas. Son partículas digamos que tienden a tener un estado propio y específico. Son partículas, para entendernos, hablando con licencia antropomórfica, “individualistas” y con “personalidad”. La estadística para estudiar cómo se comportan masas de estas partículas similares es la *estadística de Fermi*. Los electrones son fermiones. No se pueden encontrar nunca dos en el mismo estado. Esto conduce al *principio de exclusión* (formulado por Linus Pauling), de ayuda esencial para interpretar cuánticamente tanto el sistema periódico de los elementos químicos como el átomo de Bohr (niveles de energía, números cuánticos, etc.). Son partículas

que tienden a no “diluirse en la masa”, diferenciándose, aunque muestran los fenómenos de borrosidad y superposición característicos del mundo cuántico (vg, en los electrones). Así, se ordenan diferencialmente en las estructuras atómicas y son las más cercanas a la constitución de nuestro mundo macroscópico.

16. *Bosones y coherencia cuántica.* El comportamiento físico de los bosones resulta ser el contrario de los fermiones. Tienden a ser bosones las partículas más primigenias. Los fotones son así el ejemplo paradigmático de los bosones. No existe principio de exclusión para ellos y su tendencia es a estar en el mismo estado (en las propiedades vibratorias u ondulatorias de su función de onda). Esta “convergencia” de los bosones conduce, por ejemplo en un caso máximo, a un estado de concentración en un mismo estado simple que se conoce como *condensación de Bose* (en la base de la tecnología del láser y en la explicación de fenómenos de superconductividad). En general pueden producirse variadas interacciones entre masas de bosones para entrar en estados globales de vibración unitaria que conocemos como estados de *coherencia cuántica*. Pero, así como los fermiones tienden a mantener su individualidad ondulatoria (principio de exclusión), los bosones tienden a constituir estados físicos donde la individualidad se diluye en estados cuánticos de conjunto para grandes masas con funciones de onda simétricas.

17. *Decoherencia cuántica, experimentación, mundo macroscópico.* Una de las grandes cuestiones planteadas en la mecánica cuántica es la explicación de cómo los constituyentes microfísicos de la realidad material, como son quarks, gluones y electrones, caracterizados por la borrosidad, nebulosidad e inestabilidad, pueden producir el mundo macroscópico de nuestra experiencia fenoménica con objetos definidos, permanentes y fiables, donde las cosas son lo que son establemente. En cierto sentido es el mismo problema definido por medio del análisis del hecho experimental: el experimentador que desea recoger información del mundo cuántico diseña y construye sus instrumentos en el mundo macrofísico y consige que el borroso mundo cuántico colapse en respuestas definidas que son atrapadas en el mundo macroscópico (vg. cuando la función de onda de un electrón colapsa y podemos fijar su posición en el espacio, o bien, alternativamente, conocer dinámicamente su momento). Lo que en realidad parece ocurrir es que el mundo microfísico, desde el que se genera cuanto vemos, va siendo “atrapado” por las complejas estructuras del mundo macroscópico: esas estructuras macroscópicas generan como tales un tipo de propiedades (de estabilidad) esencialmente distintas de las propiedades germinales de la materia en niveles más primigenios (es decir, de materia en estadios menos complejos de organización). Así, las características de las partículas que llamamos fermiones, los electrones, quedan “atrapadas”

(neutralizadas en parte) en la organización compleja de un átomo, una molécula o macromolécula; por ejemplo en una masa compacta de mineral que se comporta macroscópicamente con la estabilidad y fiabilidad propia. Sin embargo, quizá los electrones ahí atrapados mantienen en sus orbitales un campo físico donde pueden todavía desplegar su forma ondulatoria en el marco de borrosidad, superposición e inestabilidad, propios de la realidad cuántica más primigenia (el electrón seguiría sin estar aquí, allí, o en algún lugar definido). Parece como si la naturaleza de la materia condujera sin remedio a quedar atrapada en organizaciones complejas que hacen emerger estructuras de orden superior que, a su vez, neutralizan o congelan ciertas propiedades más primigenias de la materia en estados anteriores a ese atrapamiento organizativo superior. Es como si el medio ambiente físico de la realidad macroscópica fuera atrapando o absorbiendo partículas u estados más primitivos neutralizando sus propiedades cuánticas más primigenias.

La llamada *decoherencia cuántica* es un efecto medio ambiental en los sistemas cuánticos con la virtualidad de inducir rápidamente comportamientos cuasi-clásicos (propios del mundo macroscópico). Esta decoherencia parece inducida por un espacio circundante que no está vacío sino lleno de radiación. Dado que en el mundo cuántico más primigenio no parece ser posible el caos, una frontera en el proceso de decoherencia sería cuando las partículas muestran ya un comportamiento caótico. En todo caso la historia del universo físico parece ir desde los estados más primigenios de *coherencia cuántica*, propios de masas de bosones, hasta los fermiones y su atrapamiento en organizaciones complejas de materia en que, por la *decoherencia*, se va ya entrando en el mundo clásico.

18. *Fenómenos Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)*. La previsión de EPR en 1935 era que, según los principios de la mecánica cuántica, si una partícula se dividía en dos correlacionadas que divergieran en trayectorias que las separaran indefinidamente, la actuación sobre una de ellas (vg. en el spin o en la polarización de sus campos de vibración) debería tener inmediatamente un efecto sobre la otra (en su spin o en su polarización). Se debería producir una *acción a distancia* o una *causación no local* que, según Einstein, entraban en contradicción excesiva con la mecánica clásica y no podían aceptarse. Más adelante, las *desigualdades de Bell* estudiaron las condiciones que debía satisfacer una teoría que fuera estrictamente local en su carácter pero que presentara correlaciones no-locales. Y esto abrió el camino para el diseño y realización de los experimentos de Aspect en Paris, al comenzar los años 80, que llevaron a comprobar que la interacción entre partículas prevista en los efectos EPR se cumplía realmente. A los enigmas del mundo cuántico, borrosidad, superposición, indeterminación, inestabilidad, había que añadir

entonces uno nuevo, quizá más sorprendente: la causalidad no local y la acción a distancia. Se entraba en un mundo cuántico holístico (*togetherness*) y de *enmarañamiento* a distancia de las partículas (*entanglement*).

19. *Teoría de campos cuánticos: el vacío cuántico.* Otra de las grandes aportaciones de Dirac fue aplicar los principios cuánticos a la teoría de los campos electromagnéticos. Esto condujo a la primera formulación de una *teoría cuántica de campos*. Una partícula tiene un número finito de grados de libertad (camino diferentes para cambiar de estado). Un campo, en cambio, tiene infinitos grados de libertad y ofrece un universo de posibilidades. Un campo es una entidad extendida en el espacio y en el tiempo, apropiada por su propia naturaleza para soportar eventos ondulatorios (el éter se pensaba ya en el XIX como una especie de campo). Al aplicar la teoría cuántica a un campo sus variables físicas (como la energía o el momento) se hacen presentes en el campo como *quanta* o paquetes discretos. Los estados que en el campo muestran eventos ondulatorios son aquellos en que se involucran un número indefinido de partículas. La teoría cuántica puede así relacionar todos esos estados de las partículas de manera más flexible que en la mecánica clásica gracias al principio de superposición.

El concepto de *vacío* en la teoría de campos cuánticos es importante. El vacío es el estado más bajo posible de energía en que no se encuentran ningún tipo de excitaciones que correspondan a partículas. En el fondo un campo puede describirse como una colección de infinitos y posibles *oscilantes armónicos*, semejantes a los sinusoides del análisis Fourier. “Vacío” en este campo cuántico significaría que todos esos posibles oscilantes se encuentran en reposo, en su energía y en su momento (no hay partículas ni energías ondulatorias, funciones de onda asociadas con ellas). Pero los principios de la teoría cuántica no permiten atribuir a ese campo un reposo absolutamente perfecto. Aplicada una vibración residual a todos los posibles oscilantes armónicos significa que de por sí el vacío cuántico está lleno de actividad. Las fluctuaciones variantes en ese vacío son las que producen la emergencia y la desaparición de partículas. Todas las teorías actuales de partículas (como la misma teoría de quarks) las entienden como excitaciones o fluctuaciones energéticas en el campo subyacente). El vacío cuántico, sin embargo, no puede identificarse por ello, según la teoría de campos cuánticos, con el vacío absoluto o con la nada.

20. *Relatividad, gravedad, computación cuántica.* La relatividad, la gravedad o la computación son conceptos físicos construidos en el mundo macroscópico. ¿Cómo se aplican al mundo cuántico? ¿Existen la relatividad, la gravedad, la computación cuántica? La respuesta a estas cuestiones ha propiciado el desarrollo de nuevos desarrollos teóricos de la mecánica

cuántica. La *relatividad cuántica* fue desarrollada por Dirac y en relación con ella apareció el concepto de anti-materia, el mar de anti-materia cuya realidad se debe hoy explicar en el marco de una teoría de campos cuánticos. La gravedad, evidente en el mundo clásico-gravitatorio de Newton, juega también un papel en el mundo cuántico y, al igual que fotones, existen también otras partículas relacionadas con la gravedad o gravitones. Y todo ello, en efecto, se intenta estudiar en la teoría de la *gravedad cuántica*. Por último, el estudio de la computación en el mundo cuántico, la *computación cuántica*, ha abierto posibilidades importantes de investigación, ya que en el mundo cuántico pueden encontrarse estados susceptibles de dos posiciones físicas, A y B, que microfísicamente permitieran el registro de información binaria de forma más compacta y de más rápida operación.

II. INTERPRETACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

21. *Posición epistemológica.* La epistemología nos dice qué es conocer y qué es conocer científicamente; o sea, qué es ciencia. La epistemología de cada disciplina científica nos hace valorar el tipo de conocimiento producido en esa ciencia. En relación, pues, con el conocimiento sobre la materia producido en la mecánica cuántica, ¿qué tipo de epistemología debemos defender? Hay un problema de interpretación y, en esencia, dos posiciones posibles. La *primera* afirma que el conocimiento mecano-cuántico nos permite llegar a un cierto conocimiento de la realidad u ontología del mundo físico, de la materia (aunque sea por modelos provisorios, revisables, no absolutos, en el marco del racionalismo crítico popperiano y postpopperiano). Una variante de esta posición, por ejemplo, es el *realismo crítico* defendido por Polkinghorne, Barbour y Peacocke, entre otros muchos. La *segunda* afirma que el mundo microfísico no puede ser observado fenoménicamente y, por ello, nuestros conocimientos son sólo esquemas o modelos formales, matemáticos, que nos sirven para representarnos subjetivamente el mundo, así como para predecir correctamente la experiencia. Son sistemas funcionales (*funcionalismo*) y útiles (*utilitarismo*), pero no nos permiten saber si el mundo es en sí mismo como nosotros nos lo representamos formalmente. Esta posición de sabor kantiano no responde al kantismo, ni supone aceptar la teoría kantiana del conocimiento. Responde más bien, a nuestro entender, a las epistemologías neopositivistas lógicas y operacionalistas (vg. al *fisicalismo* de Rudolf Carnap).

La escuela o Círculo de Copenhage (Niels Bohr) surgió en efecto del positivismo de los años 20, al igual que hubo un Círculo de Viena fundador, un Círculo de Praga (Carnap) y otro Círculo de Berlín (Reichenbach). En

principio, Schrodinger se resistió al formalismo de Bohr; creía que las ondas debían tener un correlato ontológico, e incluso reivindicó un re-nacimiento del concepto de éter (cuando faltaba aún una teoría cuántica de campos). Pero más tarde no pudo resistir la presión de la escuela de Copenhage. La interpretación “oficial” de la mecánica cuántica la dio, pues, la escuela de Copenhage, y es quizá todavía la más seguida por los científicos (en el fondo es la posición más descomprometida). Sin embargo, la epistemología dice que el objetivo de la ciencia es el conocimiento de la realidad (como se ve en el racionalismo crítico popperiano, realista crítico o racionalista, en su interpretación de la mecánica cuántica): por ello una ciencia puramente formalista no respondería, en el fondo, a las expectativas humanas.

22. *Inestabilidad e identidad de las partículas.* El mundo clásico presenta una interminable serie de objetos permanentes que son objeto de nuestra experiencia, comenzando por la experiencia de la estabilidad del propio cuerpo. Sin embargo, las propiedades clásicas no parecen cumplirse en los objetos microfísico-cuánticos. El electrón partícula que, según el principio de superposición, se encuentra aquí y allí, y en todas partes, no sabemos si es el mismo: si tiene una identidad y persistencia ontológica semejante a la clásica. Cuando una masa de bosones entra en coherencia cuántica no parece que pueda mantenerse la individualidad entitativa de las partículas, ni recuperarse si la coherencia desaparece. La materia en su ontología primordial parece más bien un *fluir inestable* de eventos que aparecen y desaparecen en un puro proceso que ya fue descrito hace muchos años por Norbert Whitehead. Parece más bien el chisporroteo inconsistente del fuego heraclitano que no tiene realidad temporal para consistir en el ser. ¿Debemos, pues, atribuir a esta inestabilidad fluyente un carácter ontológico, considerándolo una propiedad de la realidad misma, o es simplemente una impresión fenoménica de la realidad construida formalmente por la física? El realismo crítico diría que debemos pensar que probablemente la realidad microfísica es quizá parecida a la forma en que constatamos en la ciencia física. El agnosticismo de la escuela de Copenhage mantendría nuestro desconocimiento de la verdadera naturaleza ontológica de la materia.

23. *Continuidad-discontinuidad.* Qué sea la continuidad es difícil de imaginar: baste pensar que entre dos números reales cabe siempre una cota de infinita profundidad. Pero, dejando aparte el análisis matemático, ya los griegos pensaron que los átomos eran indivisibles y, en alguna manera, algo así como “materia compacta” (quizá como materia con una ontología capaz de saltar por encima de esas cotas de infinita profundidad). Pero en la imagen corpuscular de la materia el mundo aparece como discontinuo. Recordemos el átomo de Rutherford: un protón en el núcleo de hidrógeno y un electrón a

enorme distancia relativa (guardando proporciones, unos 40 kilómetros de distancia); la distancia intermedia un espacio vacío. Sin embargo, al añadir la imagen ondulatoria del mundo físico, unida a la radiación y a los campos, el espacio queda en alguna manera lleno. El campo no es el vacío absoluto y la teoría de la relatividad dota también al espacio de una cierta entidad, incluso geométrica. Sin embargo, cómo se relacionan físicamente la continuidad y la discontinuidad en el mundo microfísico descrito por la mecánica cuántica y cómo desde él se produce la continuidad-discontinuidad del espacio macroscópico en la experiencia fenomenológica humana, es todavía un problema abierto que permite diversas interpretaciones. Desde un punto de vista fenomenológico humano (que debe ser explicado por la ciencia) la experiencia del espacio es tanto una experiencia de continuidad (la percepción visual, la sensación continua del propio cuerpo en la propiocepción, la misma sensación de continuidad física entre los objetos en el espacio) como de discontinuidad (distancias métricas entre objetos individuales y autónomos unos frente a otros). ¿Qué tipo de ontología de la materia funda la continuidad y discontinuidad del mundo físico que advertimos empíricamente? Son preguntas todavía abiertas a la interpretación.

24. *Determinación-indeterminación.* Es un hecho incuestionable que la mecánica ha construido su conocimiento del mundo microfísico por medio de cálculos de probabilidad y estadística. Este factor de indeterminación está presente en la borrosidad cuántica, en la superposición de estados, en la imposibilidad de conocer las incertidumbres que se producen en el acontecer cuántico. La ecuación de onda de Schroedinger introduce ya con toda claridad este factor de probabilidad y el principio de incertidumbre de Heisenberg abre a un abanico de incertidumbres relativo a nuestro posible conocimiento simultáneo de pares de variables cuánticas. El mundo microfísico conocido, pues, en la mecánica cuántica parece presentarse como un mundo de *sucesos indeterminados*: los estados físicos resultantes (los efectos) de la concurrencia de un conjunto de factores causales (las causas), tal como son conocidos en la mecánica cuántica, no se producen de forma determinada (con determinismo), sino que están abiertos a un abanico de amplitudes de posibilidad, que darán el marco en que necesariamente se producirá el efecto. Esto es diferente a lo que sucede en el mundo clásico donde las causas producen con determinación los efectos. [Aunque también en la mecánica clásica el conocimiento del caos ha introducido factores de indeterminación en cuando a los *resultados finales de la evolución del sistema*, de tal manera que cadenas de causación determinista no están cerradas sino abiertas en cuanto a su evolución futura (aunque en todo caso la indeterminación caótica clásica puede también interpretarse de

forma epistemológica u ontológica): ver la documentación sobre la primera sesión básica y la segunda sesión general de este seminario].

Se plantea, pues, en consecuencia, la pregunta fundamental: cuando en la mecánica cuántica se habla de indeterminación, ¿se trata de indeterminación epistemológica u ontológico-real? *Epistemológica* querría decir que el mundo real aparece indeterminado en nuestros sistemas de conocimiento porque no conocemos en profundidad el mundo microfísico, puesto que en éste todos los sucesos se producen con absoluta determinación (un sistema de causas preciso concurrente en un estado produce con necesidad un solo efecto, esto es, una única posible evolución del estado afectado). *Ontológico-real* significa admitir que la indeterminación cuántica no sólo es epistemológica (que lo es) sino que además refleja algo que sucede realmente en la ontología dinámica de la materia. Como sabemos se trata de un tema interminablemente discutido al que cabe dar una de tres soluciones posibles.

La *primera solución* es afirmar que la indeterminación física es sólo epistemológica. Es la teoría de Einstein (Dios no juega a los dados), pero su principal valedor es David Bohm con su conocida teoría de las *variables ocultas*. Aunque nosotros constatamos indeterminación, en realidad los procesos microfísicos están siempre absolutamente determinados: pero ocurre que nosotros no conocemos todas las variables o causas concurrentes (variables ocultas) que producen con necesidad efectos determinados, semejantes a los del mundo clásico. De hecho Bohm propuso un nuevo complejo sistema de interpretación de la mecánica cuántica absolutamente determinista que la mayor parte de los autores consideran bien construido, aunque no se inclinen por él (este sistema cuántico distinguía, como sabemos, entre partículas y ondas, dando entidad independiente a estos dos factores). La *segunda solución* es afirmar que la indeterminación es sólo epistemológico-metodológica (afecta al sistema de conocimiento que nosotros hemos construido), pero no sabemos en realidad si el mundo microfísico está realmente determinado o se presentan escenarios reales de indeterminación. Se trata, pues, de la posición agnóstica defendida por el funcionalismo utilitarista de la escuela de Copenhage. La *tercera solución* es afirmar que lo más probable es aceptar que la materia microfísica presenta indeterminación real-ontológica. Son, pues, las mismas partículas y sus funciones de onda las que están realmente indeterminadas: los sistemas de causas que concurren sobre ellas no conducen con necesidad determinista a un único efecto posible, sino que éste se produce por una decantación espontánea dentro de un abanico de posibilidades (existe determinación, pero no absoluta). Esta es la opinión de Polkinghorne, Barbour y Peacocke; según Polkinghorne la mayoría de los científicos cree hoy en una cierta indeterminación real de las partículas. En su

filosofía del *universo abierto* Popper también cree en la indeterminación, pero dentro de la matización de su *teoría de las propensiones* (las partículas tienen una cierta tendencia o propensión a responder de una cierta manera).

Supongamos el experimento imaginario que dio origen al principio de incertidumbre de Heisenberg: cuando un fotón de alta frecuencia (y con la suficiente energía) cae sobre una partícula y se refleja hacia el microscopio para ser visto, entonces la partícula absorbe una cierta energía que cambia su momento y se produce un efecto (su comportamiento consecuente). Si creemos en el indeterminismo tenderíamos a pensar que con una cierta espontaneidad la partícula tiene un marco de amplitud para oscilar en la respuesta: habría una incertidumbre real sobre su comportamiento (hacia dónde). Si somos deterministas tenderíamos a pensar que las variables ocultas determinan con necesidad una única respuesta posible: la incertidumbre sobre su respuesta sería sólo nuestra, epistemológica. Si la indeterminación fuera real imaginemos qué podría pasar en una masa de partículas, de átomos o de moléculas: de la misma manera que el fotón produce incertidumbre en la partícula, igualmente las entidades en esa masa (pensemos en las radiaciones residuales presentes desde el medio ambiente) estarían entonces sometidas constantemente a causas productoras de incertidumbre. En el mismo mundo microfísico, aparte de la intervención experimental, se estarían produciendo ya por sí mismos ámbitos naturales de incertidumbre complejos que afectarían continuamente a la evolución del sistema. En esos sistemas cuánticos complejos se podrían producir entonces por incertidumbre procesos caóticos (semejantes a los clásicos, o incluso quizá ya clásicos) en que los resultados finales serían imprevisibles.

Pero, ¿existe ontológico-realmente la indeterminación o sólo un sistema de conocimiento cuántico limitado e imperfecto? Se trata de una cuestión abierta la interpretación personal de cada científico y que mantiene hasta ahora un cierto enigma final sobre nuestro conocimiento posible del mundo microfísico.

25. *Holismo (togetherness) y enmarañamiento (entanglement) cuántico.* Los fenómenos holísticos que se manifiestan en el comportamiento masivo de los bosones, que se traducen en la nivelación homogénea o en la simetría de sus funciones de onda, por una parte, y los fenómenos de acción a distancia y causación no local, del tipo de los efectos EPR, por otra parte, plantean también problemas de interpretación sobre la enigmática imagen del mundo físico (de la materia) que está construyéndose hoy en la mecánica cuántica. Es la imagen de un mundo físico que tiende a construir totalidad, sistemas holísticos en interacción. Es lo que se ve en estados de *coherencia cuántica* y en la interdependencia (en cierto modo holística, y así lo interpreta el mismo

Polkinghorne) manifiesta en los *fenómenos EPR* donde sistemas de partículas a distancia, sin posibilidad de causación local ni de emisión de información, actúan en interacción sistémica coordinada. Todo esto abre muchas preguntas, todavía sin contestar. ¿Hasta dónde puede llegar esta constitución de sistemas holísticos en el mundo físico y de qué propiedades de la materia depende? ¿Es posible que fenómenos semejantes a los efectos EPR actúen entre masas distantes de bosones en estado de coherencia cuántica? ¿Puede producirse coherencia cuántica a distancia y sin causación local?

26. *Mundo macroscópico clásico.* Otro de los grandes problemas de la mecánica cuántica, que abre también diversidad de interpretaciones, es cómo nace el mundo macroscópico clásico, determinado y estable, desde los procesos ontológicos cuánticos, inestables, superpuestos e indeterminados. Este proceso de nacimiento es el que conduce de la *coherencia* a la *decoherencia*, el proceso en que el mundo cuántico pierde su indefinición para ser “atrapado” por el mundo clásico macroscópico de organizaciones estables de materia. Este proceso de conexión cuántico-clásica es, en el fondo, el mismo problema conceptual de interpretar qué sucede en la experimentación sobre el mundo microfísico que atrapa lo cuántico desde el ámbito clásico. La clave del proceso de decoherencia parece ser la aparición evolutiva de los fermiones, partículas individualistas, de función de onda antisimétrica que tienden a diferenciarse y que no caen en estados de uniformidad diluida. Estas partículas han creado el orden físico de los objetos que observamos en el mundo macroscópico. Este orden fenoménico firme es el campo de la diferenciación, de las distancias, del espacio y el tiempo. Sin embargo, por aquí y por allá todavía existen en el mundo físico clásico ciertos reductos (nichos o burbujas) donde de manera natural o artificial se producen estados que responden a formas de ser más primigenias de la materia. En ellas observamos un mayor grado de presencia de cuanto es extraño en la imagen cuántica de la realidad física: borrosidad en general, superposición, dualidad partícula-onda, indeterminación, coherencia ...

III. PROYECCIÓN FILOSÓFICA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

No es objetivo principal de esta sesión de seminario estudiar a fondo los problemas planteados por la mecánica cuántica a la filosofía. Es decir, la forma en que la imagen de la materia en la mecánica cuántica influye en la tarea propia de la filosofía (que no es la de la ciencia como tal): producir conocimiento, aunque sea hipotético, sobre la naturaleza última del universo que habitamos, físico, biológico y humano. El conocimiento filosófico no sólo depende del conocimiento producido en las ciencias, pero no puede prescindir

de él. Sin embargo, en esta sesión sólo pretendemos contribuir a una cuestión previa al planteamiento propiamente filosófico: hacernos una idea científica en profundidad de la imagen de la materia ofrecida en la mecánica cuántica.

Pero para concluir hagamos un apunte final, a modo de sugerencia, de dos campos en que se proyectan inmediatamente los conocimientos cuánticos. Campos que tienen una incuestionable influencia en la idea crítica y racional, científico-filosófica, que podamos formarnos de la realidad.

En primer lugar, digamos que el universo se ha ido construyendo y ha ido evolucionando pasando de la pura radiación a un mundo organizado en átomos, moléculas, cuerpos, estrellas, planetas y galaxias, a partir de la lógica inicial establecida por el mundo cuántico. Todo ha nacido de las reglas cuánticas. De ahí que la consideración más profunda de nuestro conocimiento del universo, su origen y su destino, nos lleve hoy a una cosmología cuántica (recordemos, por ejemplo, el papel jugado hoy por el “vacío cuántico” en las discusiones cosmológicas).

En segundo lugar, tampoco cabe duda de que los seres vivos han salido del universo físico y que en ellos han emergido los ámbitos de sensibilidad-conciencia. ¿Qué causas han podido producir esta emergencia? No nos referimos sólo al hombre, sino a la capacidad de sentir emergida ya en las organizaciones biológicas más primitivas en que la sensación (o sentisciencia) se hizo presente (ver documento marco de la segunda sesión general del seminario). ¿Cuál sería el soporte físico apropiado para situar en él la causa real de la emergencia de la sensibilidad orgánica? ¿Son quizá los organismos vivientes lugares en que se han ido, digamos metafóricamente, abriendo burbujas de coherencia cuántica conectadas por los sentidos a la radiación ambiente y ligadas por interacciones del orden EPR? Nos dice Polkinghorne, sin duda refiriéndose a Roger Penrose, aunque sin citarlo, “*Quantum processes in the brain may possibly have some connection with the existence of the human conscious mind, but random subatomic uncertainty is very different indeed from the exercise of the free will of an agent*” (Polkinghorne, *Quantum Theory*, o.c., pág. 92). Sin embargo, esto nos llevaría ya hacia otros temas de discusión no abordables de momento.