

ALGUNAS OBSERVACIONES SOBRE EL DEBATE EINSTEIN-BOHR DE LA MECÁNICA CUÁNTICA.

Juan José Icaza
Universidad del País Vasco

Lo que, en la Historia de la Física Moderna, se ha dado en llamar "el gran debate de la Mecánica Cuántica", constituye uno de los más relevantes ejemplos de controversia interna, mantenida por filósofos de la Ciencia, y que, surgida en la década de los 20 a propósito de la interpretación del formalismo de la teoría cuántica, puede asegurarse que se prolonga hasta nuestros días y continúa siendo aún un tema abierto a la especulación y a las investigaciones, con no pocas y trascendentales repercusiones en otros campos de la Ciencia, de la Filosofía y aún de la Psicología.

Aunque el comienzo del debate entre Einstein y Bohr suele fijarse propiamente en octubre de 1927, con ocasión de la celebración de la 5ª Conferencia Física del Instituto Solvay -conocida comúnmente por Congreso Solvay- en Bruselas, la relación entre ambos estaba planteada desde bastante antes y ya los instrumentos, con los que se iban a preparar las argumentaciones de crítica y de defensa de las respectivas posiciones, estaban suficientemente delineados en la mente de ambos contendientes.

En efecto, ya desde el encuentro de Bohr con Einstein, en Berlín, en 1920, era conocedor aquél de los sentimientos de éste acerca de nociones tales como la continuidad y la casualidad, y su absoluta resistencia a prescindir de ellas en su concepción del mundo.

Sin embargo, aunque Bohr temía y deseaba, al mismo tiempo, una confrontación con Einstein, que, por otra parte, veía inevitable ante la inminente celebración de ese 5º Congreso Solvay, tenía esperanzas de que el contenido positivista que, indudablemente, tenía su interpretación, convenciera a éste. No es de extrañar esta confianza de Bohr, pues, por aquellas fechas, parece que todos estaban en la creencia de que Einstein seguía profesando las mismas ideas positivistas que anterior-

mente y como consecuencia sin duda de la influencia de Mach, le habían llevado a su revolucionaria Teoría de la Relatividad. No obstante, según observan algunos autores, para entonces parece que Einstein había adoptado ya una cierta actitud idealista, en un proceso de creciente oposición al positivismo.

En el debate final de las sesiones de esa edición del Congreso Solvay, titulada oficialmente "Electrones y Fotones", pero esperada por todos los presentes como la ocasión de mantener discusiones en profundidad sobre el inquietante problema de la interpretación de la nueva teoría cuántica, y después de presentadas las comunicaciones de De Broglie, Born, Heisenberg y Schrödinger, alguna de las cuales fué seriamente constestada (la de De Broglie por Pauli), salieron a la superficie y se plantearon las deseadas y decisivas cuestiones.

Empezó la polémica Lorentz, que presidía el Congreso, al comentar, en tono de queja, el rechazo del determinismo en la Física Atómica, propuesto por la mayoría de los que habían intervenido. Su comentario, sin dejar de aceptar el elemento probabilístico de la Mecánica Cuántica, se refería a que, en su opinión, aquél debería estar, más bien, en las conclusiones de la teoría y no como un axioma de partida de la misma. Después de esta manera de preparación del ambiente, para la discusión del tema fundamental para el que estaban reunidos, Bohr fué invitado a exponer sus puntos de vista, cosa que empezó inmediatamente.

Sin decirlo de una manera expresa, estaba claro que Bohr hablaba para Einstein, a quien deseaba convencer, más que ninguna otra cosa. Hay que recordar que éste era, sin duda, el personaje más importante de la Física de entonces, cuya opinión era suficiente para bendecir o poner en entredicho una teoría. El mismo Bohr admiraba profundamente a Einstein, por sus numerosas contribuciones, especialmente por la Teoría de la Relatividad.

A pesar de ello, no compartía el concepto de los cuantos de radiación o fotones, con la dualidad onda-corpúsculo que Einstein admi-

lía, y buscaba, más bien, una ruptura con las ideas de la Física Clásica, que para él, aunque asintóticamente relacionada con la teoría cuántica por medio del principio de correspondencia, era esencialmente irreconocible con ésta. Como muestra de esta postura de no aceptación por parte de Bohr de ese concepto del fotón de Einstein, puede recordarse su teoría cuántica de la radiación, enunciada en su trabajo de 1924, junto con Kramers y Slater, en la que se colocaba completamente fuera de dicha concepción.

Einstein, por su parte, no se resignaba a abandonar las exigencias de la causalidad y tenía puestas sus esperanzas en una teoría causal unificada para todos los fenómenos físicos.

No sólo Bohr admiraba a Einstein y veía en él a la figura máxima de la Física de su tiempo. El propio Einstein, también, profundamente impresionado por la personalidad de Bohr, desde su primer encuentro en Berlín, en 1920, sentía por éste una especial inclinación y respeto intelectual, a pesar de las muy encontradas posiciones y duras críticas que, en las próximas décadas, ambos personajes iban a protagonizar.

El año 1924 registró varias declaraciones de Einstein contrarias a las ideas de Bohr. Por recoger algunas de las opiniones contenidas en su abundante correspondencia, se pueden señalar las que manifestó en sendas cartas a Born y Ehrenfest. En ellas decía que, aun reconociendo su fracaso en los repetidos intentos de dar una forma palpable a los cuantos de radiación, no pensaba abandonar tal esperanza todavía por un largo tiempo, convencido como estaba de que la teoría de Bohr no podía ser correcta, ya que le resultaba insoportable la idea de renunciar a la causalidad estricta.

Einstein y Bohr se encontraron en 1925 en Leyden, con ocasión de la celebración de un acto en honor a Lorentz, retirado hacía poco, a quien acababa de sustituir Ehrenfest. Este, que mantenía excelentes relaciones tanto con Einstein como con Bohr, invitó a ambos, con el propósito de mediar entre sus respectivas posturas y dar, al mismo tiempo, ocasión de que discutieran sus diversos puntos de vista.

Parece que, como consecuencia de este encuentro, y sin renunciar a sus respectivas posturas, los dos tuvieron motivos para recoger parte de sus argumentos desplegados. Einstein, por un lado, tuvo que reconocer que el experimento crucial, que él mismo había propuesto con anterioridad, para decidir definitivamente la validez de la teoría ondulatoria de la luz o la de la fórmula cuántica de las frecuencias de Bohr, no conducía realmente a ningún resultado decisivo o crucial, una vez que, por Ehrenfest, se sugirió que, para el tren de ondas finito considerado en el experimento, no era la velocidad de fase, sino la de grupo, la que había que tener en cuenta. En efecto, los tratamientos ondulatorio y corpuscular, aplicados al problema de la propagación de la luz en un medio dispersivo, conducían a idéntico resultado.

Bohr, a su vez, contradicha su teoría de la radiación, elaborada en base a consideraciones puramente estadísticas, sin utilizar el concepto de fotón, por los experimentos de Bothe y Geiger sobre el efecto Compton, había aceptado ya la idea de Einstein de los cuantos de luz, aunque acrecentó sus llamadas para una ruptura con los conceptos de la Física Clásica, poniendo un énfasis cada vez mayor en las dificultades que, de no hacerlo así, tenían que aparecer al ser aplicadas a la Mecánica Cuántica.

Aún, antes de su encuentro de octubre en Bruselas, escribirían varias veces Bohr y Heisenberg a Einstein, insistiendo en su planteamiento. Con una de las cartas, Einstein recibió una prueba del famoso artículo de Heisenberg sobre las relaciones de indeterminación, que se publicaría poco después. En ella, aun reconociendo tácitamente Bohr su aceptación del concepto de fotón, en el contexto de la dualidad onda-corpúsculo, reclamaba la atención de Einstein sobre las relaciones de indeterminación, señalando que, por medio de esa nueva formulación, sí era posible reconciliar el requisito de la conservación de la energía con las exigencias de la teoría ondulatoria de la luz, justamente porque la naturaleza de la descripción de Heisenberg evitaba que los aspectos corpuscular y ondulatorio se manifestaran simultáneamente. Parece claro que ya, en la mente de Bohr, se estaba formando el

tipo de argumento que daría lugar a la interpretación complementaria o de Copenhague de la Mecánica Cuántica.

Volviendo al 5º Congreso Solvay, de octubre de 1927, hay que señalar que, tras la intervención de Bohr, que fué prácticamente la repetición de la conferencia "El Postulado cuántico y el desarrollo reciente de la Teoría Atómica", que había pronunciado en Como un mes antes, con ocasión de la celebración del centenario de la muerte de Volta, Einstein, que había escuchado atentamente las palabras de Bohr, permanecía en silencio.

Ciertamente, era la primera vez que Einstein oía de su propio autor aquellas ideas sobre la complementariedad, pues no había asistido a la reunión de Como, y sólo después de una alusión de Born, se decidió a hablar, tomando inmediatamente como ejemplo un experimento de difracción, para plantear los dos puntos de vista que, según él, había para la interpretación de la teoría de los cuantos.

De acuerdo con el De Broglie-Chrödinger, las ondas representan, más que partículas aisladas, conjuntos de partículas en el espacio, y por lo tanto la teoría, y la información que proporciona, sólo es aplicable a conjuntos de procesos, no a procesos individuales. Según esta interpretación, pues, el cuadrado del módulo de la función de onda de un conjunto de partículas representaría la densidad de probabilidad de presencia de alguna de las partículas del conjunto.

Por el contrario, el de Born-Heisenberg considera a la Mecánica Cuántica como una teoría aplicable a cada proceso individual. Así, cada partícula difractada en el experimento citado por Einstein está descrita por una onda y, desde este punto de vista, el cuadrado del módulo de la función de onda de cada una de las partículas expresa la densidad de probabilidad de presencia de esa misma partícula.

Presentadas así las cosas, Einstein puso a continuación de manifiesto su disconformidad con este último punto de vista, por parecerle, en primer lugar, que violaba uno de los postulados de la relatividad.

En efecto, con la interpretación del cuadrado del módulo de la función de onda, como una densidad de probabilidad de presencia de cada partícula, extendida como su onda asociada, por toda la región de posible detección, parecía, según él, que la interrupción de la condición de potencialmente presente en toda la región, correspondiente a la situación previa a la localización de la partícula en una determinada posición, como consecuencia de que efectivamente tiene lugar dicha localización, suponía una acción a distancia instantánea, que a Einstein le sonaba como no conforme con una de las exigencias fundamentales de su Teoría de la Relatividad. El colapso instantáneo de la onda asociada como una partícula, en el momento de la localización de ésta -lo que se conoce como la reducción del tren de ondas- implicaría, en palabras de Einstein, "un mecanismo muy peculiar de acción a distancia". Hoy sabemos, que el requisito de la propagación finita de las señales se entiende que se refiere a señales útiles, en el sentido de conectar sucesos en relación causal, y que el principio de relatividad no excluye señales supraluminosas, que conectan sucesos relacionados por causas comunes en el pasado.

A este argumento añadió Einstein otros dos más, concernientes a la utilización de espacios configuración multidimensionales, en la descripción de los sistemas atómicos. Estas objeciones, un tanto chocantes, pues indicaban que era precisamente el aspecto geométrico de la descripción lo que no le gustaba, a él, que había reducido la gravitación a la geometría, parecían, sin embargo, ir dirigidas más bien a Schrödinger, cuya formulación de la Mecánica Cuántica, por otra parte, prefería sin ninguna duda, por tratarse de una teoría de campos con ondas continuas.

Einstein tomaba, pues, partido claramente por el punto de vista según el cual, la Mecánica Cuántica que se había desarrollado en aquellos años describe el comportamiento de conjuntos de sistemas idénticos, no de sistemas individuales: lo que se ha llamado después interpretación de conjuntos o frecuencial de la Mecánica Cuántica, para la que las probabilidades mecánico-cuánticas se identifican con las frecuen-

cias relativas de los resultados de un conjunto de experimentos idénticos.

Esta toma de posición de Einstein en el 5º Congreso Solvay le dejó bastante sólo, pues hasta De Broglie, que había propuesto el concepto de "onda piloto" para la función de onda, como recurso para una teoría causal, temió por abandonar esa idea y dejó a aquél enfrentado a la interpretación complementaria aceptada por la mayoría.

La disparidad de las posiciones por Bohr y Einstein, aunque no produjera consecuencias observables inmediatas en la predicción de resultados experimentales, tenía, sin embargo, una trascendental importancia desde el punto de vista epistemológico. Efectivamente, la interpretación de Einstein, de que la Mecánica Cuántica explica el comportamiento estadístico de un conjunto de sistemas idénticos, dejaba abierta la posibilidad de la existencia de parámetros desconocidos o variables ocultas, como son más conocidas. Por su parte, la posición de Bohr sostenía que con el formalismo de la Mecánica Cuántica se agotaba el conocimiento que se puede alcanzar de los sistemas microscópicos, que hay una incompatibilidad intrínseca para encajar descripciones causal y espacio-temporal simultáneas de los fenómenos, y que las relaciones de indeterminación de Heisenberg son justamente la expresión matemática de esa limitación.

Pues, precisamente, a demostrar la violación o incumplimiento de tales relaciones se afaná Einstein, persiguiendo poner en entredicho toda la interpretación de la complementariedad. Para ello, retomó los experimentos imaginados utilizados por Heisenberg para reivindicar sus relaciones de indeterminación, y concentró todo su esfuerzo en tratar de demostrar la posibilidad de compatibilizar una descripción espacio-temporal exacta de un proceso microscópico con el cálculo preciso de los intercambios de momento y energía habidos en el mismo.

Resulta realmente curioso que el propio Einstein, ganado ya en 1927 por el idealismo, se volviera contra un tipo de argumentación, la de Bohr y Heisenberg, que era en cierta manera semejante a la que él

mismo, años antes, había utilizado al establecer la Teoría de la Relatividad. En efecto, la idea revolucionaria de Einstein, de que espacio y tiempo son dos conceptos interrelacionados, desprovistos de realidades independientes, y que su contenido se trasvasa de uno a otro, con una única realidad en común, según el punto de vista o sistema de referencia desde el que se observa, ayudó, sin duda, a sugerir a Bohr su noción de la complementariedad, de que los comportamientos corpuscular y ondulatorio de las partículas son excluyentes, en el sentido de que son descripciones mutuamente limitantes y la mayor precisión en una de ellas introduce inevitablemente mayor distorsión en la otra.

El primer experimento imaginado que, en el transcurso de dicho 5º Congreso Solvay, utilizó Einstein para intentar rebatir a Bohr fué una variante del famoso experimento de difracción de partículas por una rendija, en el que se añadía una corredera deslizante, que dejaba abierta la rendija durante un intervalo de tiempo, que se podía hacer tan corto como se quisiera.

A la sugerencia de Einstein de que, si se conociera de forma precisa la transferencia de momento entre una partícula difractada y la rendija, quedaría automáticamente, replicó Bohr que tal argumentación se apoyaba en las leyes de conservación del momento y de la energía, aplicadas al sistema compuesto por la partícula incidente y la corredera, siendo así que la transferencia entre ambas es un proceso incontrolable, sujeto, por demás, a la relación de indeterminación tiempo-energía, como seguidamente demostró.

Admitida la contestación, Einstein modificó el experimento imaginado, intercalando el diafragma con la rendija y el plano de observación, un segundo diafragma móvil provisto de dos rendijas. Su planteamiento era que, midiendo el impulso recibido por este diafragma, al paso de una partícula, se podía llegar al conocimiento de la trayectoria de ésta, es decir de su posición y de su momento, con precisión arbitraria, contrariamente a la limitación impuesta por la relación de indeterminación.

El debate de la Mecánica cuántica

Rápidamente constestó Bohr, con su agudeza habitual, a esta nueva sugerencia de Einstein, señalando que la medida del momento del diafragma intermedio, con la precisión suficiente como para discernir a través de qué rendija ha pasado la partícula, implica forzosamente una indeterminación en la posición de dicha rendija, considerado el diafragma como un objeto microscópico, del mismo orden que la distancia entre las franjas de interferencia, con lo cual se destruye precisamente la figura de difracción.

En ambas respuestas de Bohr a las propuestas de Einstein, sobre el experimento imaginado de difracción, hizo uso aquél de la relación de indeterminación posición-momento, para mostrar encaje en la interpretación complementarista, de la que es su expresión más visible, contrariamente a la afirmación sostenida por Einstein de que, tomando datos de las descripciones corpuscular y ondulatoria simultáneamente, se llegaba a violar las relaciones de Heisenberg. Bohr venía a afirmar que no nos está permitido tomar, con precisión arbitraria, de forma simultánea esos datos, porque trayectorias de partículas y figuras de interferencia son concepciones incompatibles y excluyentes. La Naturaleza deja libremente la opción, pero impone justamente que se deba optar por una u otra descripción, si se desea que sea exacta.

Hay que señalar que esta fase del debate Einstein-Bohr se saldó con una victoria parcial de este último, pues, si bien tuvo éxito al defender la consistencia lógica de su interpretación, no logró en cambio convencer a Einstein de su necesidad.

Tres años más tarde, en octubre de 1930, tenía lugar la siguiente fase de estos encuentros entre Einstein y Bohr, en la 6ª edición del Congreso Solvay, igualmente en Bruselas. Esta vez, presidido por Langevin, estaba dedicado al estudio de las propiedades magnéticas de la materia, aunque, de nuevo, como en la anterior ocasión, iban a ser los fundamentos de la Mecánica Cuántica el tema principal de discusión.

En el tiempo transcurrido desde el Congreso, había tenido lugar un hecho importante para el desarrollo del debate, como fué la publicación, en 1929, de un artículo de Bohr, en el que explicaba en de-

talle los fundamentos filosóficos de su interpretación, haciendo una intencionada comparación entre el planteamiento complementarista de la Mecánica Cuántica y la Teoría de la Relatividad de Einstein.

El argumento clave esgrimido por Bohr, para apoyarse en la teoría relativista, a fin de justificar su propia interpretación de la Mecánica Cuántica, se puede resumir diciendo que, así como la inexistencia de una definición operacional de la simultaneidad absoluta permitió a Einstein rechazar la concepción newtoniana del tiempo, análoga imposibilidad operacional de definir simultáneamente variables conjugadas con precisión arbitraria, debe conducir a rechazar la validez de tales conceptos. Está claro que, una vez más, Bohr se estaba dirigiendo, ahora por escrito, a Einstein.

Picado así éste, por tener que soportar que Bohr utilizara, en defensa de una posición que él combatía, justamente su más preciada elaboración : la Teoría de la Relatividad, se esforzó de nuevo en demostrar la invalidez de las relaciones de indeterminación de Heisenberg, en particular la relación tiempo-energía, urdiendo nuevos experimentos imaginados o modificaciones de los ya propuestos con anterioridad.

Así, sobre un dispositivo análogo al inicialmente utilizado años atrás, Einstein planteó una experiencia de difracción de radiación a través de una rendija, con el añadido de una corredera deslizante, provista igualmente de rendija, accionada por un mecanismo de relojería programable. Su argumentación era que, conocida con precisión arbitraria la energía del pulso de radiación que atraviesa las dos rendijas, y puesto que el intervalo de tiempo en que dichas rendijas coinciden puede hacerse tan pequeño como se quiera, se llegaría a la violación de la relación de indeterminación tiempo-energía.

Esta sugerencia de Einstein resultó, sin embargo, ser sólo una aparente impugnación de la relación de indeterminación, porque si se tiene en cuenta el intercambio de energía entre la radiación incidente y la corredera, como es obligado para conocer la energía del pulso emi-

tido, se sigue que la indeterminación en el valor de ésta no puede hacerse tan pequeña como se quiera, si se desea que al mismo tiempo sea arbitrariamente pequeña la indeterminación en el instante de tiempo en que tal intercambio ha tenido lugar.

Puestas así las cosas, y dado que Bohr seguía reivindicando la Teoría de la Relatividad en apoyo de sus propias ideas, Einstein se empleó a fondo para tratar de contradecir la relación de indeterminación tiempo-energía, sobre la que ultimamente había concentrado sus críticas, en base precisamente a consideraciones relativistas, lo que, de haberlo logrado, habría supuesto, sin duda, un rotundo fracaso para los argumentos de Bohr.

Así, propuso un nuevo experimento imaginado, consistente en una caja llena de radiación, la después llamada "caja de fotones", con paredes perfectamente reflectantes, provista de una abertura obturada por una corredera, accionada por un mecanismo de relojería, que deja la abertura libre durante un intervalo de tiempo, que puede hacerse arbitrariamente corto, como para que un solo fotón salga de la caja. Einstein hizo observar que, pesando la caja antes y después de la emisión, se obtendría por diferencia, y con un error arbitrariamente pequeño, la energía del fotón emitido, tenida en cuenta la equivalencia relativista de la masa con la energía. De esta manera, decía poderse predecir simultáneamente, con precisión arbitraria, la energía del fotón y el instante de su llegada a un receptor, lo cual evidentemente destruye la limitación de la relación de Heisenberg.

Este experimento imaginado, lanzado como un desafío a Bohr, fué recogido por éste y estudiado con profunda atención, pues se trataba nada menos que de clarificar la compatibilidad de su interpretación de la Mecánica Cuántica con la Teoría de la Relatividad.

Esta vez, la respuesta de Bohr se produjo después de una larga noche de insomnio, y en forma de una de sus más prodigiosas y preclaras reacciones. Efectivamente, lo que Einstein, el autor de la Teoría General de la Relatividad, había olvidado es que la marcha de un reloj

El debate de la Mecánica cuántica

en movimiento en un campo gravitatorio, queda afectada en proporción directa a su desplazamiento. Como, por otra parte, la indeterminación en el momento de la caja es comparable al impulso dado por el campo gravitatorio a la diferencia de masas de aquella, durante el tiempo que dura la operación de pesado, y admitida por supuesto la relación de indeterminación posición-momento, demostró Bohr brillantemente que no había tal contradicción y que las indeterminaciones en la energía y en el tiempo, que se podían obtener en dicho experimento, eran conformes con la relación de Heisenberg.

Lo que acababa de poner en claro era que, así como una medida de la posición de una partícula o sistema microscópico altera su estado de movimiento, de forma que posición y momento han de considerarse variables incompatibles o complementarias, el mero hecho de pesar un reloj altera su marcha, como lo ponen de manifiesto las consecuencias de la relatividad general.

Esta vez, la magistral respuesta de Bohr dejó prácticamente desarmado a Einstein, que no pudo por menos de aceptar esa explicación surgida de su propia Teoría General de la Relatividad. Sin embargo, eso no significó en absoluto que se convirtiera en partidario de la complementariedad, sino más bien que, abandonando ya los ataques a la pretendida inconsistencia interna de la teoría, su táctica fué la de intentar demostrar la incompletitud de la Mecánica Cuántica.

Con el final de las discusiones del 6º Congreso Solvay, en 1930, terminó esa importante fase del debate Einstein-Bohr, con el triunfo de la posición defendida por éste. El propio Einstein consideró zanjado el asunto y no cuestionó ya la validez de las relaciones de indeterminación, aunque siguiera pensando que había algo oculto bajo la apariencia formal de la teoría. Para ésta es ya otra historia y lo que se inició en 1935, con la aparición del llamado "argumento E.P.R. o de Einstein-Podolsky-Rosen", constituyó otra etapa diferente del debate que ambos personajes sostuvieron durante buena parte de sus vidas.

El debate de la Mecánica cuántica

en movimiento en un campo gravitatorio, queda afectada en proporción directa a su desplazamiento. Como, por otra parte, la indeterminación en el momento de la caja es comparable al impulso dado por el campo gravitatorio a la diferencia de masas de aquella, durante el tiempo que dura la operación de pesado, y admitida por supuesto la relación de indeterminación posición-momento, demostró Bohr brillantemente que no había tal contradicción y que las indeterminaciones en la energía y en el tiempo, que se podían obtener en dicho experimento, eran conformes con la relación de Heisenberg.

Lo que acababa de poner en claro era que, así como una medida de la posición de una partícula o sistema microscópico altera su estado de movimiento, de forma que posición y momento han de considerarse variables incompatibles o complementarias, el mero hecho de pesar un reloj altera su marcha, como lo ponen de manifiesto las consecuencias de la relatividad general.

Esta vez, la magistral respuesta de Bohr dejó prácticamente desarmado a Einstein, que no pudo por menos de aceptar esa explicación surgida de su propia Teoría General de la Relatividad. Sin embargo, eso no significó en absoluto que se convirtiera en partidario de la complementariedad, sino más bien que, abandonando ya los ataques a la pretendida inconsistencia interna de la teoría, su táctica fué la de intentar demostrar la incompletitud de la Mecánica Cuántica.

Con el final de las discusiones del 6º Congreso Solvay, en 1930, terminó esa importante fase del debate Einstein-Bohr, con el triunfo de la posición defendida por éste. El propio Einstein consideró zanjado el asunto y no cuestionó ya la validez de las relaciones de indeterminación, aunque siguiera pensando que había algo oculto bajo la apariencia formal de la teoría. Para ésta es ya otra historia y lo que se inició en 1935, con la aparición del llamado "argumento E.P.R. o de Einstein-Podolsky-Rosen", constituyó otra etapa diferente del debate que ambos personajes sostuvieron durante buena parte de sus vidas.

En efecto, hasta poco antes de morir, en 1955, Einstein no perdía ocasión de reafirmar su fe determinista, contraria a la interpretación de Copenhague de la Mecánica Cuántica. Bohr, por su parte, que le sobrevivió siete años, solía decir que, después de muerto Einstein, seguía entablando con él discusiones imaginarias, representando un doble papel : lo que él pensaba y lo que esperaba que Einstein dijera. Todavía, la víspera de su muerte, en noviembre de 1962, dejó, sobre el tablero de su estudio, el dibujo de aquella caja de fotones de Einstein, como testigo de una discusión imaginada sobre un experimento imaginado.

Puede afirmarse, sin ninguna duda, que el debate Einstein-Bohr, por la trascendencia de las cuestiones implicadas, por la profundidad de los argumentos empleados y por la finura y categoría intelectual de los contendientes, es uno de los más grandes pasajes registrados en la formación de las teorías físicas y en la Historia de la Ciencia en general, comparable, quizás, por su importancia a la controversia Newton-Leibniz del siglo XVIII.

BIBLIOGRAFIA.

- .BOHR,N., KRAMERS,H.A., SLATER,J.C.; "The quantum theory of radiation", Philosophical Magazine 47, 785-802 (1924).
- .BOHR,N.; "Wirkungsquantum und Naturbeschreibung", Die Naturwissenschaften 17, 483-486 (1929).
- .BOHR,N.; "Natural philosophy and human culture", Nature 143, 268-272 (1939).
- .EINSTEIN,A., PODOLSKY,B., ROSEN,N.; "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", Physical Review 47, 777-780 (1935).
- .HEISENBERG,W.; "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen kinematik und Mechanik", Zeitschrift für Physik 43,172-198 (1927).
- .HEISENBERG,W.;The physical Principles of the Quantum Theory,Dover,

El debate de la Mecánica cuántica

New York (1949).

.JAMMER,M. The conceptual development of Quantum Mechanics, McGraw-Hill, New York (1966).

.JAMMER,M.; The philosophy of Quantum Mechanics, Wiley, New York (1974).

.MEHRA,J., RECHENBERG,H. The Historical Development of Quantum Theory, vols. 1-4, Springer, New York (1982).