

EL RACIONALISMO DE NIELS BOHR

Manuel Pavón. Universidad de Sevilla

Resumen: Bohr propone una nueva forma de racionalismo científico que puede ser analizado desde la perspectiva de una posición antimoderna frente a la racionalidad. Esa oposición a la racionalidad moderna cristaliza en la crítica al supuesto fundamental de la física clásica: la inteligibilidad del mundo físico y, por tanto, la posibilidad de una explicación causal en tanto que descripción racional completa.

Abstract: The new sort of scientific rationalism Bohr espouses can be analyzed from the anti-modernistic stand against rationality, which perfectly shows itself in its criticism to classical physics fundamental assumption, namely, the intelligibility of the physical world and, therefore, also to the very possibility of a causal explanation as a complete rational description of it.

Contraria sunt complementa fue la divisa elegida por Niels Bohr para su escudo de armas al serle concedida por la corona danesa una alta distinción. La noción de *complementariedad* que había ido adquiriendo para Bohr una significación creciente, llegó a ser para él una de las claves de la estructura del conocimiento humano y la fórmula en que venía a sintetizarse su esfuerzo intelectual en el campo de la física atómica.

Lo que Bohr llamó *principio de complementariedad*, uno de los pilares de la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, puede ser considerado *uno de los más grandes descubrimientos en la historia científica de la humanidad*¹ o, junto con toda la interpretación de Copenhague, *mala filosofía y unos pocos errores muy sencillos* como sostiene Popper²; e incluso, tal y como asegura Bunge, *científica y filosóficamente insostenible por ser incoherente y no enteramente física*³.

Es un debate que sigue abierto y que sin duda tiene una repercusión mucho mayor que la ya de por sí muy considerable cuestión de los fundamentos de la física cuántica. El debate sobre la mecánica cuántica y sobre su interpretación *ortodoxa* es probablemente uno de los puntos cruciales en el problema de la racionalidad porque involucra la elucidación de un asunto completamente central en su consideración: el del límite absoluto de la

¹ J.M. Jauch, *Sobre la realidad de los cuantos. Un diálogo galileano*, Alianza, Madrid, 1985, p. 36

² K.R. Popper, *Teoría cuántica y el cisma en física*, Tecnos, Madrid, 1985, p. 104-105

³ M. Bunge, *Filosofía de la física*, Ariel, Barcelona, 1982, p.112

comprensión racional. *Jamás oculto* —afirma Jauch— *mi profunda modestia al hablar de la complementariedad. Se me antoja que hemos llegado a una especie de límite en la capacidad de comprensión*⁴. Si así fuera estaríamos ni más ni menos que ante el límite físico de la racionalidad científica, ante un punto a partir del cual todo es irracional, inaccesible a la racionalidad, ante la imposibilidad de la racionalización. Y ello se produciría mediante la ruptura, en el ámbito de la física cuántica, del vínculo entre racionalidad y realidad⁵.

Pero si la consideración de la mecánica cuántica es asunto clave para el problema de la racionalidad científica, y por lo tanto de la racionalidad humana, a su vez la racionalidad es el centro de gravedad de cualquier intento de comprender la crisis de la modernidad. Comenzaré por insertar mi planteamiento en ese contexto.

1

La *modernización* en cuanto proceso que llevó de la sociedad preindustrial a la sociedad industrial avanzada fue un proceso de racionalización a la *Weber*. Por eso las nociones de *modernidad* (como proceso histórico y social y como el proyecto que se seguía de la idea de progreso) y de *racionalidad* van inevitablemente unidas.

En el planteamiento ya clásico de Weber la racionalidad es lo definitorio de la actividad económica moderna, de la regulación de la vida social mediante el derecho y de la gestión política entendida como administración. Pero también, mediante la industrialización del trabajo, de muchos otros ámbitos de la vida que se tecnifican progresivamente. Y, a su vez, la racionalización y la modernización de la sociedad han venido determinadas por el progreso de la ciencia y de la tecnología.

Es un tópico pero también un hecho que la historia de la modernidad tiene como columna vertebral la historia de la ciencia porque lo propio de la sociedad y de la cultura modernas es precisamente que la innovación científica y tecnológica se ha convertido en el origen del cambio social.

Aunque sólo sea por eso, y hay mucho más que sólo eso, ya sería interesante relacionar un momento crítico de la historia de la ciencia con una crisis histórica general. Pero es que, si hay un lugar idóneo para examinar la noción moderna de racionalidad, no es otro que en la ciencia y, dentro de ella, en lo que vino a ser su buque insignia: la física teórica.

En este sentido no es una simplificación sino un subrayado certero lo

⁴ J.M. Jauch, op. cit., p.37

⁵ B. d'Espagnat, *En busca de lo real*, Alianza, Madrid, 1983, cap. 14.

que sostiene Alain Touraine: *la idea de modernidad sustituye en el centro de la sociedad a Dios por la ciencia, dejando en el mejor de los casos las creencias religiosas en el seno de la vida privada, (...) en todos los casos ha hecho de la racionalización el único principio de organización de la vida personal y colectiva*⁶.

La racionalidad encarnada en ciencia se constituye en el dios, en el principio primordial, de la sociedad, de la cultura y del pensamiento. Y en la crisis de la modernidad lo que se pone en cuestión es a ese dios, es decir, se cuestiona esa encarnación de la racionalidad en conocimiento científico y esa reducción de lo real a objeto de una teoría científica o de un experimento científico.

Y si algo es evidente en el proceso social, cultural e intelectual de la crisis de la modernidad es el asalto iconoclasta contra ese dios, o sea, el descentramiento, el derrocamiento de ese principio (la ciencia como encarnación de la racionalidad) en cuanto eje de la organización social, del sistema cultural y del pensamiento.

Por el momento no es, y quizá no sea nunca, el desplazamiento de un principio axial por alguna otra alternativa de organización, sino precisamente el descentramiento, la pérdida del eje que articuló la sociedad moderna como sociedad racional y la cultura moderna como cultura científica. Y ello, como apunta Vattimo, no ha sido el resultado de una transformación teórica. No es el precipitado de los embates recibidos por el marxismo, el positivismo o el idealismo, es decir, no es una batalla más en la república de las ideas, sino la emergencia de una nueva sociedad caracterizada por la multiplicación, plural e incluso caótica, de las imágenes del mundo.

Porque ésta es otra faceta de la transformación. Si en el anterior ideal la racionalidad se encarnaba en ciencia, la unidad del mundo, esto es, la *imagen* racional del mundo se esperaba no ya de la universalidad total del discurso, sino de la unidad sintética de las ciencias. Esta unidad del conocimiento del mundo proporcionada por las teorías certificadas de la ciencia venía a ser la *inteligibilidad* de la realidad que la racionalidad científica, y sólo ella, podía proporcionar.

Frente a eso se tiene una pluralidad, una oscilación y *en definitiva la erosión del mismo principio de realidad*⁷. Pero esa erosión es el resultado de la puesta en cuestión de una regla, de una norma del discurso racional. *De hecho* —añade Vattimo— *intensificar las posibilidades de información acerca de la realidad en sus más variados aspectos hace menos concebible la idea misma de una realidad. (...) La realidad, para nosotros, es más bien el resultado de cruzarse y contaminarse (en el sentido latino) las múltiples imágenes, interpretaciones, re-*

⁶ A. Touraine, *Crítica de la modernidad*, Temas de Hoy, Madrid, 1993, p. 24-25.

⁷ G. Vattimo y otros, *En torno a la postmodernidad*, Anthropos, Barcelona, 1990, p. 24-25.

*construcciones que distribuyen los medios de comunicación*⁸.

En definitiva: *contraria sunt complementa*. Lo que Bohr sostiene es que la información empírica acerca de la naturaleza no se deja reducir a unidad, hemos pues de atenernos a la diversidad de la información, incluso a su contrariedad. De ahí, de la imposibilidad de unificar la información se sigue la imposibilidad de sostener, en el ámbito cuántico, la noción de realidad.

La información diversa, la pérdida de su unidad, supone que *la realidad* no se obtiene sino en la complementariedad de esa información, es decir, que no hay *una* realidad. Vattimo se refiere a la pérdida de una concepción unitaria de la historia, pero antes se ha erosionado el principio de realidad como regla de unidad de cualquier discurso. Y este punto de vista es el adoptado por Bohr.

Puede que sea un mucho frívolo el asimilar la polémica sobre la física cuántica, especialmente en sus orígenes, con el enfrentamiento entre modernos y postmodernos, y aún más sostener que el planteamiento de Bohr es asimilable algo así como a una *física postmoderna*. Puede que así sea, pero tengo para mí que tanto en la interpretación de Copenhague como en la crítica filosófica a la modernidad hay un punto de semejanza muy importante: el ajuste de cuentas con un proyecto de la Ilustración. El iluminismo aspiraba a la unidad del discurso racional basada en la objetivación de la realidad. Así se podía tener *una* historia (la de la especie humana) y *un* conocimiento (el de la ciencia), ambos como desarrollo de una racionalización de la sociedad y del mundo natural respectivamente.

Y tanto en los postmodernos Vattimo, Lyotard, etc. como en Bohr hay esto en común: la renuncia (basada en una imposibilidad de hecho) a la unidad del discurso, el desvanecimiento, a consecuencia de ello, del principio de realidad y la imposibilidad de proseguir con la racionalización tal y como era entendida cuando la racionalidad se encarnaba en ciencia y el mundo en objetividad de las teorías científicas.

En la discusión de esa encarnación caben dos perspectivas. Se puede, de un lado, cuestionar que la única racionalidad sea la ciencia y que el único mundo sea el objeto de las ciencias. Es decir, se puede cuestionar frontalmente al positivismo y oponerse a que la naturaleza sea disuelta en objetividad científica y la racionalidad reducida a teoría. No otra cosa ha hecho la mayor parte del pensamiento en el siglo XX⁹.

Pero también se puede, y es lo que se sigue de la posición de Bohr, oponerse a que sea la teoría científica el modo de objetivar al mundo y por tanto la objetividad misma de la racionalidad humana. Uno se puede

⁸ Ibid. p.15

⁹ Como dice Touraine un siglo antimodernista.

oponer a que la comprensión sea reducida a teoría científica, pero también a que la teoría sea reducida a comprensión.

En la epistemología asociada a la física clásica, uno de los criterios de evaluación de la teoría consistía en que ésta debía proporcionar una imagen inteligible de algún aspecto de la realidad física, es decir, debía suponer una comprensión de alguna propiedad real del mundo físico. Con Bohr lo que se tiene es que esa exigencia puede y debe serle demandada a la física clásica pero no a la física cuántica. Esta última no debía ser juzgada bajo la norma de la comprensión de la realidad, ni cuestionada porque no proporcionaba tal comprensión.

Y con esto se quiebra el viejo ideal de la unidad de la ciencia que Popper expone con casi las mismas palabras que Einstein: ofrecer una imagen coherente e inteligible del mundo¹⁰. Desde ese punto de vista la filosofía de Bohr es postmoderna. Lo es porque parte del cuestionamiento del ideal ilustrado de racionalidad científica y porque su resultado es no una alternativa frente a ese eje, sino el descentramiento, la pérdida de una norma axial para el conocimiento que permita su unidad.

No obstante, esa expresión *la filosofía de Bohr* obliga a alguna precisión. ¿De qué podemos hablar cuando hablamos de la *filosofía de los científicos* como es el tema de estos estudios? y también ¿de qué se habla cuando se refiere uno, como es el caso de este trabajo, al *racionalismo de Bohr*?

2

¿Tienen filosofía los científicos? es una pregunta que en gran medida puede plantearse como un detalle de esta otra, más general: ¿tienen creencias los científicos, sustentan criterios estéticos, opiniones políticas, convicciones morales, albergan ideas filosóficas? Sin duda que así es y en esto los científicos son como todo el mundo. Pero está claro que si los científicos son como todo el mundo, lo que hacen (investigación científica) no es lo que hace todo el mundo. Por ello la cuestión de las creencias nos interesa en relación con la investigación científica o, si se quiere expresado de otro modo, nos interesa la relación entre el pensamiento filosófico de un científico y el desarrollo y el resultado de su investigación.

Cierto que no pocos científicos han desarrollado un pensamiento filosófico, tocando temas que habitualmente etiquetamos bajo ese rótulo. Pero por muy claro que esté ya a estas alturas que la distinción entre contexto de descubrimiento y contexto de justificación es imposible y que en manera alguna el discurso científico está libre de presuposiciones filosóficas y de

¹⁰ Vid. Popper, op. cit. p.25.

otro tipo¹¹, sigue en pie el hecho de que para entender la teoría de la relatividad no hay por qué saber tocar mal el violín.

Einstein era un físico genial, un violinista deplorable y sostenía ciertas ideas filosóficas. Y aunque parece claro que sus planteamientos filosóficos guardan relación con su pensamiento científico, no hay que coincidir con estos para entender y aceptar la teoría de la relatividad.

Es preciso reconocer que la inmensa mayoría de los científicos no prestan mayor atención a los aspectos filosóficos de la ciencia. Es más, se suscitan cuestiones filosóficas cuando *tiemblan los cimientos*, cuando como en el caso del debate sobre la mecánica cuántica se ponen en cuestión los fundamentos. Cuando hay crisis de fundamentación los científicos reflexionan, cuando el panorama está tranquilo investigan dando por establecidos los cimientos y sin prestarles atención¹².

Que algún científico desarrolle un pensamiento filosófico y lo exponga en textos de esta estirpe es algo interesante para la historiografía del pensamiento científico. Pero el que haya una relación estructural entre el pensamiento filosófico y la investigación científica eso es algo crucial para la propia naturaleza del pensamiento científico y de su historia.

Desde esa perspectiva, el problema no reside en examinar qué creencias filosóficas han sustentado determinados científicos, sino que consiste en un aspecto particularmente decisivo de esta cuestión general: ¿cómo se articulan, en un contexto social determinado, la creencia y la acción?

Así la *filosofía de los científicos* será relevante cuando podamos probar que el tipo de investigación científica que se hace viene condicionada por el tipo de creencias filosóficas que se sostienen. En tal sentido, y al hilo del asunto que nos ocupa, la filosofía de Bohr, hay un extremo destacable.

Lo menciona J. S. Bell, uno de los físicos más importantes que hace pocos años se ha ocupado de *filosofía cuántica*, al referirse a algunas de las cuestiones fundamentales en mecánica cuántica que se presentaban como muy problemáticas: *los pioneros de la mecánica cuántica eran conscientes de estas cuestiones, pero, muy acertadamente, no esperaron a ponerse de acuerdo antes de desarrollar la teoría. Estuvieron enteramente justificados por los resultados. La vaguedad de los postulados no interfiere con la precisión milagrosa de los cálculos*¹³.

Los postulados eran vagos pero la potencia predictiva excelente, o sea, que la teoría en cuanto que algoritmo no necesitaba para nada de postulados igualmente potentes, de hecho, había eficacia predictiva a pesar de la

¹¹ Desde los programas metafísicos de investigación de Popper, pasando por los paradigmas de Khun, hasta la negación de la ciencia como actividad diferenciada de los sociólogos cognitivos, todo esto es ya casi un estereotipo.

¹² Eso lo admitió Popper de la crítica de Kuhn.

¹³ J.S. Bell, *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, Alianza, Madrid, 1990, p.75.

debilidad conceptual de la fundamentación. Eso quiere decir que la relación estructural entre la reflexión filosófica y el aparato matemático y experimental es muy poco significativa, lo segundo es autónomo con respecto a lo primero. Hasta el punto que la discusión fundamental fue posterior a la formulación de la teoría. La cuestión de los cimientos se planteó una vez terminado el edificio y una vez comprobada su solidez.

Las ideas filosóficas no se formularon y se confrontaron en relación con el problema de explicar los fenómenos cuánticos, sino que una vez obtenida la explicación el problema era saber qué y cómo explicaba la teoría. En este sentido ciertamente que no podemos afirmar que la investigación científica que se hizo vino condicionada por las creencias filosóficas que se albergaban. La filosofía aparece, en el debate sobre la mecánica cuántica, como una racionalización de la racionalización, a la hora de justificar racionalmente la teoría.

Naturalmente, con esto no quiero decir que el debate filosófico sobre los fundamentos de la física fuera cronológicamente posterior a la formulación de la teoría cuántica, eso no sólo sería un error histórico sino un error garrafal ahistórico. Lo que sugiero es que la discusión filosófica (por ejemplo en torno a la causalidad) y la investigación en física cuántica se pueden mantener relativamente autónomos hasta que la teoría cuántica se completa, y ello precisamente porque la discusión filosófica aparece en torno al problema de la *completitud* de la teoría cuántica.

El momento, estructural no histórico, en que las ideas filosóficas como la complementariedad de Bohr están más cercanas a la práctica de la investigación científica es la etapa en la que una vez formulada en sus aspectos principales la mecánica cuántica, se plantea si tal teoría ya acabada es completa o no.

Es obvio que el problema de la completitud no es otro que el de la suficiencia cognitiva de la teoría. Por tanto la racionalización filosófica (el debate acerca de la completitud) se plantea en torno al problema de justificarla racionalmente. Justificación no en el sentido de la validez, que era admitida, sino en relación a si la teoría era cognitivamente suficiente o no lo era.

Pero si tal es el caso, si la relación entre creencia (filosófica) y práctica (de la investigación) se produce de tal modo que la primera es una racionalización y una justificación de la segunda, bien podemos hablar de una relación ideológica. Si llamamos *ideología* a la creencia que cumple la función de racionalizar y justificar una determinada práctica social. La complementariedad de Bohr podemos considerarla como la formulación de un marco ideológico que proporciona coherencia racional a las diferentes contribuciones teóricas realizadas en el período de formulación de la mecánica cuántica.

Ahora bien, ¿por qué era necesario racionalizar la práctica que daba

como resultado la mecánica cuántica?, esto es: ¿qué puede entenderse al decir que era necesario justificar racionalmente la práctica de la investigación en física atómica? Para la física teórica clásica, encarnación de la racionalidad, los resultados de esa práctica eran irracionales porque la mecánica cuántica proporcionaba una imagen ininteligible del mundo físico, pero eso significaba una incompatibilidad frontal entre la práctica y sus presupuestos, entre los resultados de la acción y la creencia básica que articulaba esa acción en la tradición de la física moderna. Digamos que lo que resultaba incompatible con la mecánica cuántica era la modernidad de la física clásica. Resultaba irreconciliable el resultado de la práctica de la investigación con la historia moderna de la racionalidad científica.

3

Llamaré *racionalismo* a este presupuesto básico, a esta creencia fundamental, para la práctica de la investigación científica. P. Feyerabend se refiere al *racionalismo* como una creencia que ha servido de columna vertebral del desarrollo del pensamiento científico. Surgió con el descubrimiento de que las ideas abstractas e independientes de la situación generan historias especiales, pronto llamadas «pruebas» o «argumentos» cuya trama no es impuesta a los caracteres principales sino que «se sigue de» la naturaleza de ellos. (...) Son las propias cosas las que producen la historia y la dicen «objetivamente», esto es, independientemente de las opiniones y de las compulsiones históricas¹⁴. Esta tradición produjo el presupuesto de que el conocimiento es único —existe una sola historia aceptable: la «verdad»—, abstracto, independiente de la situación («objetivo») y basado en argumentos¹⁵.

El racionalismo así entendido, y despojado el término de la carga despectiva que le pone Feyerabend, es un ideal epistemológico basado en creencias metafísicas que se articula con la práctica en la medida en que opera como norma de ésta.

Con suficiente aproximación podemos considerar que éste ha sido el ideal que ha presidido la tradición de la racionalidad epistémica en occidente. Por supuesto que no ha sido una historia lineal y que ha tenido sus rupturas y sus cambios radicales de orientación. Quizás el más decisivo para nosotros haya sido lo que Habermas caracteriza por el paso de un pensamiento metafísico a un pensamiento postmetafísico. Para J. Habermas una evolución histórica de significado fundamental se produce cuando el pensamiento, antes dirigido al Uno y al Todo, es puesto en cuestión por

¹⁴ P. Feyerabend, *Adios a la razón*, Tecnos, Madrid, 1987, p. 9

¹⁵ *Ibidem*

un nuevo tipo de racionalidad que se impone desde el siglo XVII¹⁶.

Esta imposición de un nuevo tipo de racionalidad se produce con el método experimental de la ciencia natural y, en el siglo XVIII, con el formalismo en teoría moral y teoría del derecho. De esta forma, tanto la filosofía natural como el derecho natural tienen que hacer frente a exigencias de fundamentación que son nuevas.

El racionalismo del siglo XVII es todavía la consecuencia de un supuesto religioso y metafísico, por este orden, según el cual Dios es el soporte último de la inteligibilidad del mundo. Toulmin¹⁷ resume del siguiente modo uno de los tópicos epistemológicos del racionalismo del XVII: *El orden de la Naturaleza es fijo y estable, y la Mente del hombre adquiere dominio intelectual sobre él razonando de acuerdo con los Principios del Entendimiento que son igualmente fijos y universales*. Pero esto era posible porque los principios eran los mismos, o sea, principios de la totalidad. Es el mundo, el todo, lo esencialmente inteligible y por ello es posible la comprensión racional, por eso la racionalidad humana y la inteligibilidad del mundo pueden converger, porque son partes de una unidad, momentos de un todo.

Aparece una necesidad nueva de fundamentación cuando la ciencia y la moral hacen un esfuerzo por hacerse autónomas respecto de este supuesto religioso y metafísico. Quiero decir que la novedad reside en el esfuerzo consciente de una fundamentación autónoma o, si se quiere, de una auto-fundamentación. La física de Newton todavía se mueve dentro de los parámetros del ideal racionalista del XVII, todavía no es autónoma porque no pretende serlo. El esfuerzo por una fundamentación de la ciencia experimental, y de la moral, desde la racionalidad y no desde la inteligibilidad del mundo es posterior y tiene su máxima expresión en Kant.

Habermas¹⁸ sostiene que *las modernas ciencias experimentales y una moral que se ha vuelto autónoma sólo se fan ya de la racionalidad de su propio avance y de su procedimiento, a saber: del método del conocimiento científico o del punto de vista abstracto desde el que es posible resolver algo en moral*. La racionalidad se encoge reduciéndose a racionalidad formal tan pronto como la racionalidad de los contenidos se evapora y se convierte en validez de los resultados. Por mi parte preferiría decir que el esfuerzo por hacer autónoma a la ciencia natural y a la moral, el alejarlas de todo soporte metafísico, es lo que obliga a abandonar el pilar de la inteligibilidad de todo con lo cual ya no es lo mismo racionalidad humana que inteligibilidad del mundo, ya no forman partes articuladas de un todo. Ahora la racionalidad no está, como inteligibilidad en las cosas, sino que está en sus productos. Por ello el problema de fun-

¹⁶ J. Habermas, *Pensamiento postmetafísico*, Taurus, Madrid, 1990, p. 44-45.

¹⁷ S. Toulmin, *La comprensión humana. El uso colectivo y la evolución de los conceptos*, Alianza, Madrid, 1977, p.29-30

¹⁸ *Ibid.* p. 45

damentación es nuevo y otro: el de la validez, la fundamentación de la verdad, el examen de las condiciones de posibilidad de la validez objetiva del conocimiento.

En palabras otra vez de Habermas: *la filosofía permanece fiel a sus orígenes metafísicos mientras pueda partir de que la razón cognoscente se encuentra a sí misma en un mundo racionalmente estructurado (...). Una totalidad en sí racional, sea la del mundo o la de la subjetividad formadora del mundo, asegura a sus miembros o momentos particulares la participación en la razón*¹⁹. Si la racionalidad es cognoscente es porque encuentra en el mundo lo que éste es: inteligible. La racionalidad que persigue entender encuentra la inteligibilidad del mundo.

Pero cuando este supuesto es abandonado, el perfil del racionalismo cambia radicalmente. El esfuerzo por hacer autónoma a la ciencia respecto de toda cosmovisión metafísica obliga a *poner aparte* la inteligibilidad del mundo, es decir, a sacar este supuesto de la estructura constitutiva del conocimiento. Sin embargo, la inteligibilidad de la naturaleza no puede ser abandonada. Ni lo es, de hecho.

Si llamamos racionalismo a la creencia en que la naturaleza es inteligible, que puede ser comprendida por la racionalidad humana, entonces el pensamiento postmetafísico puede seguir siendo racionalista, y no le cabe más remedio, si localiza el principio de la inteligibilidad de la naturaleza aparte de los fundamentos del conocimiento, pero no fuera del proceso de investigación. Para Kant la inteligibilidad de la naturaleza no es un principio constitutivo sino regulativo del conocimiento (hoy diríamos que pertenece al aparato heurístico de las teorías científicas) pero como principio subjetivo (el de finalidad de la naturaleza) es constitutivo de un modo de reflexión sobre la naturaleza, a saber: el modo técnico²⁰, el modo que representa a la naturaleza como el resultado de una legalidad.

Y este principio, que no es para Kant una ley natural, si es un principio necesario de la investigación de la naturaleza. La inteligibilidad no es ya la fibra de la que está hecho el mundo natural, pero sí es la fibra con que se teje nuestra investigación de él²¹.

Ahora bien, este supuesto de que la naturaleza es inteligible porque está sujeta a legalidad es la forma *postmetafísica* que adopta la creencia

¹⁹ Ibidem

²⁰ J. Habermas, *Teoría y praxis. Estudios de filosofía social*, Tecnos, Madrid, 1987, cap.9

²¹ «Esa concordancia de la Naturaleza con nuestra facultad de Conocimiento es presupuesta a priori por el Juicio para su Reflexión sobre ella según sus leyes empíricas, tomándola del Entendimiento como objetiva y contingente, al mismo tiempo, y atribuyéndola a la naturaleza, como finalidad transcendental, sólo el Juicio (con relación a la facultad subjetiva de conocer) ya que nosotros, sin presuponerle, no obtendríamos ordenación alguna de la Naturaleza según leyes empíricas y, por lo tanto, hilo conductor alguno para organizar una experiencia y una investigación de la misma en toda su diversidad» EE V (A.K. XX, 214).

racionalista y que en el contexto de la física clásica remite al supuesto de la causalidad. En términos muy simplificados podemos decir que la física clásica es racionalista porque parte del supuesto de la inteligibilidad de la naturaleza; está convencida de que tal inteligibilidad es debida a una legalidad; y por último está convencida de que puede dar cuenta de tal legalidad en forma causal, esto es, explicando un suceso particular por subsunción en una ley universal, el caso individual como particularización de un caso universal.

El racionalismo de la física clásica descansa en la causalidad porque entiende que esa relación de explicación entre la ley y el fenómeno es una relación real y no formal. Esto es, no sólo se establece una relación lógica de subsunción explicativa, es que la relación lógica se basa en una relación real, la estructura formal puede ser explicativa porque es causal la estructura física.

Por ello en el contexto de la física clásica la interpretación física de una teoría supone dos cosas, la interpretación semántica del cálculo y la interpretación causal de la estructura de la teoría.

Que sea necesario interpretar físicamente la teoría física se sigue del ideal tanto metodológico como epistemológico que persigue la física moderna. El ideal arquimediano, adoptado por Galileo, perseguía expresar leyes generales de la naturaleza en términos de relaciones matemáticas entre magnitudes físicas susceptibles de observación y medida. Una vez construido el modelo, éste podía ajustarse o no a la experiencia, pero si resultaba ajustado proporcionaba la estructura formal de la explicación porque, a partir del modelo, todo efecto observado podía ser deducido del cálculo y, por lo tanto, todo efecto observable del dominio considerado venía a ser una predicción de ese cálculo.

A los efectos que nos interesan, no importa si ese cálculo se limitaba a salvar las apariencias o si se entendía que la relación matemática es la ley natural como, según Koyré y otros, pensaba Galileo. Lo que importa es que se persigue, en la investigación física, un ideal matemático, o sea, un ideal que se entiende alcanzado cuando hay un cálculo que explique formalmente y que pueda demostrar todo el dominio fenomenológico estudiado.

Sin embargo, ese ideal era ya griego, había sido perseguido por Arquímedes y Ptolomeo. Lo que, como señala Cohen²², hace de la física moderna una nueva física es el ideal metódico y epistémico incorporado por Newton y que preside el desarrollo de la física hasta principios del siglo XX, entrando en crisis precisamente en la discusión acerca de la interpretación de

²² I.B. Cohen, *La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas*, Alianza, Madrid, 1983, cap. 3.

la teoría cuántica.

El ideal de los *Principia* y después de la física clásica, persigue dos objetivos y, como dice Cohen, los jerarquiza.

En primer lugar, y como objetivo jerárquicamente segundo, se pretende describir matemáticamente las propiedades de un cierto elemento de realidad que se entiende como causa de ciertos efectos observados. En el caso de los *Principia* se describen matemáticamente las propiedades de ciertas fuerzas que son consideradas causas de los cambios observables en la cantidad de movimiento.

En segundo lugar, y como objetivo prioritario de la explicación física, a partir de las propiedades matemáticas expresadas en el formalismo, se indaga acerca de la naturaleza física real de esa causa.

Primero la matemática, luego en el marco de restricciones de ésta la explicación de la realidad física. La descripción matemática reduce los fenómenos a un orden matemático, después se indaga por el orden físico que produce esa organización de los fenómenos.

Con eso la estructura formal de la teoría, el orden matemático de los fenómenos, se pone en correlación con la estructura de la realidad, se considera que los fenómenos son deductivamente subsumibles en la estructura formal del cálculo porque ésta representa la estructura real de la que, por decirlo de algún modo, emergen causalmente los fenómenos.

Así la teoría proporciona la estructura formal de la explicación pero también la comprensión de la realidad. Este ideal epistemológico ya no es matemático, no se satisface sólo con la explicación formal, persigue comprender la realidad, persigue entender la teoría como representación de lo real.

Por consiguiente, desde el punto de vista de su ideal epistemológico, la física clásica es causalista, y por ser causalista puede ser realista. Esto es, porque persigue, mediante el formalismo, la comprensión de la causa, puede considerar que ese formalismo es una representación de la realidad, una representación que se refiere y se corresponde con ciertas propiedades estructurales del mundo físico.

Tenemos con ello que la interpretación física de una teoría, en el ideal clásico, no es lo mismo que la interpretación semántica del cálculo. La interpretación semántica convierte al formalismo en un modelo matemático con significado físico, o sea, en un formalismo cuyos términos significan magnitudes físicas mensurables, pero no le proporciona la referencia y la correspondencia con la realidad física porque para ello el modelo físico matemático debe ser sometido a una interpretación causal, es decir, a una dilucidación de su estructura en términos de referencia a la estructura de la situación física.

Este ideal epistemológico causalista y realista siguió impulsando a los científicos mucho después de que la misma noción de causalidad fuera

puesta en cuestión, e incluso después de que Mach propusiera como objetivo de la investigación científica la organización lógica de la experiencia y no la explicación de la realidad. Sin embargo, hizo crisis en el debate sobre la teoría cuántica.

4

Para el racionalismo *postmetafísico* de la física clásica la racionalidad engranaba con la realidad, y en consecuencia objetivaba al mundo físico como inteligible, mediante la causalidad. Si el racionalismo de la tradición anterior partía del supuesto *el todo es inteligible*, el racionalismo moderno tenía como presupuesto *todo lo físico es causal*. Pero el desarrollo más significativo de tal presuposición no era el determinismo, sino la inteligibilidad del mundo físico. Por eso los conceptos clave de la mecánica cuántica no tocaban, como suele decirse, al determinismo, sino al racionalismo de la física clásica. No tocaban una creencia filosófica asociada a la física (como era el determinismo) sino a la creencia básica que era condición subjetiva de su posibilidad como investigación de la naturaleza: el racionalismo, la convicción de que la naturaleza es inteligible para la racionalidad.

Desde la perspectiva de un físico racionalista que aparezca un nivel de la realidad natural (como el nivel atómico) en que haya aspectos fundamentales ininteligibles quiere decir que se acaba la física porque se torna imposible la racionalización. Si hay una zona del mundo físico del que no es posible trazar una imagen coherente e inteligible, entonces simplemente no hay conocimiento físico.

En este punto un ejemplo muy sencillo ayuda a situar la cuestión. Decir que la vida media de una muestra de isótopo radiactivo es de tantos años quiere decir que transcurridos esos tantos años la mitad de la muestra no será ya radiactiva. Pero que un átomo de esa muestra emita radiación en un momento determinado es un suceso completamente estocástico. Un átomo puede emitir radiación ahora y su vecino dentro de mil años.

El físico clásico, como Einstein, parte del supuesto de que el fenómeno es inteligible, es decir, que podrá explicar causalmente esta diferencia. Considera que el comportamiento diferente de los átomos tendrá que deberse a factores internos o a algún factor externo, en suma, considera que debe haber *algo* que explique el fenómeno.

El fenómeno deberá poder ser explicado por una correlación legal. Así la búsqueda de la causa es la de una ley y ésta la de una razón, la de *algo en razón de lo cual* se explican los hechos.

En este esquema, causalidad, legalidad e inteligibilidad se articulan. Y esa articulación se rompe con la mecánica cuántica. Desde un cierto punto de vista, el de la física clásica, la situación podía ser perfectamente asimila-

ble a la producida en la termodinámica estadística. Las leyes de ésta son estadísticas, pero los sucesos que describe no son aleatorios, son tratados como tales (y por lo tanto sometidos al cálculo de probabilidades) porque es imposible establecer experimentalmente el detalle de las condiciones de estos fenómenos. La teoría estadística es una aproximación, perfectamente eficaz a los efectos del cálculo, pero no es conocimiento completo del fenómeno. La comprensión de éste, y con ello la suficiencia cognitiva de la teoría, exige una apelación a la estructura causal (a la estructura física real) que lo produce.

La mecánica cuántica puede ser considerada una electrodinámica estadística y su discusión podría asimilarse a la de la termodinámica estadística. Sin embargo tal discusión siguió por derroteros muy diferentes. La cuestión de la completitud de la teoría se suscitó en relación con la alternativa entre explicación causal o estadística y el asunto consistía en establecer si la teoría era estadística porque no tenemos una comprensión suficiente de los fenómenos que explica. Conviene subrayar que tanto para Einstein como para Bohr el carácter estadístico venía unido a la insuficiencia cognitiva en términos clásicos, es decir, Bohr admitía que la teoría era estadística porque su dominio es ininteligible. La discrepancia estaba en que para Einstein el carácter estadístico e ininteligible de la teoría suponía su incompletitud y, en consecuencia, la *posibilidad lógica* de la comprensión completa (causal) de los fenómenos cuánticos. En cambio Bohr²³ mantenía que la teoría era completa y por tanto no podía ser sino estadística e *ininteligible*.

5

El problema de la completitud se desglosaba en tres cuestiones alrededor de las cuales ha venido girando la discusión:

1) Las entidades teóricas básicas de la física atómica ¿son físicamente reales y por tanto existen y tienen propiedades con independencia de los procesos experimentales de observación?

2) Si se trata de objetos reales, ¿es posible comprender la estructura y evolución de los objetos atómicos, entendiendo por «comprender» la formulación de concepciones espacio-temporales que guarden alguna correspondencia con la realidad?

3) Finalmente, ¿las leyes físicas por las que se rigen tales objetos han

²³ Los escritos de N. Bohr sobre los aspectos interpretativos de la mecánica cuántica son abundantes, pero donde precisa el concepto de complementariedad es en *Atomic Physic and human knowledge*, Nueva York, 1958 (trad. esp. *Física atómica y conocimiento humano*, Aguilar, Madrid, 1964) y en *Atomic Theory and the description of Nature*, Cambridge, 1934 (trad. esp. *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*, Alianza, Madrid, 1988).

de ser formuladas de tal modo que se postulen relaciones causales?

Desde el punto de vista clásico, si la teoría ha de proporcionar una comprensión, o sea, hacer inteligible al mundo físico, la respuesta a las tres cuestiones tiene que ser afirmativa. La otra posición, hacia la que se inclinaron Bohr, Heisenberg, Born, Jordan, Pauli y Dirac, por citar sólo algunos de los creadores de la física cuántica, sostenía que la teoría cuántica es completa porque es imposible diseñar una teoría que proporcione un conocimiento más completo del dominio cuántico. Su carácter estadístico no la convertía sólo en una aproximación, por el contrario, era un avance definitivo el haber descubierto que los objetos atómicos sólo pueden ser explicados estadísticamente.

Ciertamente la interpretación de Copenhague considera que forma parte de la teoría cuántica la imposibilidad de considerar como físicamente reales aquellas propiedades de los objetos atómicos para las que la teoría no proporciona una métrica posible. Esa limitación de la métrica, establecida por la teoría, equivale a un límite absoluto de la posibilidad del conocimiento de la realidad de tales objetos. Ese límite se manifiesta de dos formas, a saber:

Para los partidarios de la interpretación de Copenhague, si la teoría cuántica es válida, también lo es la limitación que interpone, y de ello se sigue que la teoría cuántica no es conocimiento objetivo de la realidad física. Y sin embargo, la teoría es completa y definitiva porque no es posible construir otra que lo sea más. La teoría cuántica no es comprensión objetiva de procesos físicamente reales, una teoría que sí lo fuera sería más completa que la cuántica, pero esa teoría es imposible.

Como dice Franco Selleri: *es razonable sostener que nadie entiende realmente por qué funciona la teoría cuántica y que su epistemología está todavía hoy muy atrasada respecto de su física*²⁴. O dicho de otro modo, la teoría cuántica se ha mostrado como una teoría correcta, según los criterios más exigentes de convalidación de las teorías científicas, pero seguimos sin saber por qué es válida. Es, sin duda, una estructura formal de explicación muy poderosa, pero no comprendemos la realidad que se supone que describe.

6

La posición de Bohr es que tenemos que conformarnos con la estructura formal y que no se puede ir más allá. No obstante, hay que tener en cuenta que todo el debate se suscitó por la necesidad de una interpretación filosófica que hiciese inteligible la interpretación física del formalismo de la

²⁴ F. Selleri, *El debate de la teoría cuántica*, Alianza, Madrid, 1986.

teoría cuántica

Fue esa interpretación física, debida a Max Born, la que suscitó los problemas de la realidad física, del conocimiento objetivo y de la causalidad en el dominio cuántico. A esos problemas se les dió como solución la interpretación de Copenhague, pero el hecho de que se suscitaran tiene que ver con el cambio fundamental de la noción misma de interpretación física de una teoría que propició la aportación de Born.

En el contexto de esa discusión, cuando los partidarios de la interpretación de Copenhague se refieren a la física clásica aluden a esa física causalista y realista, y cuando declaran que la física clásica tiene límites, se refieren a los límites del causalismo y del realismo en física. Cuando, en fin, todos admiten que hay una crisis en la física se entiende que hay una crisis del ideal epistemológico clásico.

En este sentido, la oposición entre física clásica y física cuántica es, ante todo, el enfrentamiento de dos epistemologías. Y ese enfrentamiento tienen un origen tanto lógico como histórico: la interpretación física de Born de la teoría cuántica.

En los primeros meses de 1926 quedó concluido lo que después se conocerá como *Drei Manner Arbeit*, trabajo como dice Born que puso prácticamente fin a la parte formal de la investigación, o sea, a la construcción del formalismo de la mecánica matricial. Casi al mismo tiempo y en rápida sucesión fueron publicados los artículos de Schrödinger que contenían la mecánica ondulatoria.

La situación, en este momento, presentaba tres perfiles que Born relata sintéticamente en su conferencia *Die statistische Deutung der Quantenmechanik*, pronunciada en la aceptación del premio Nobel de Física de 1954:

No estaba claro, ni mucho menos lo que significaba este formalismo (se refiere al de la mecánica matricial). *Las matemáticas resultaban, como ocurre a menudo, más inteligentes que el pensamiento interpretativo*; y un poco más adelante: *por un corto periodo de tiempo (...) pareció que existían dos sistemas explicativos cerrados, pero completamente diferentes: la mecánica de matrices y la mecánica ondulatoria*; finalmente: *Schrödinger (...) propuso (...) abandonar por completo el modelo de partículas y considerar los electrones como una distribución continua de densidades*²⁵.

Es decir, el grupo encabezado por Born y en que trabajaban también Heisenberg, Pauli y Jordan, contaba con un formalismo eficiente, con una explicación matemática sólida, había reducido los fenómenos a un orden matemático, pero no estaba en condiciones de exponer qué estructura física era la descrita por ese formalismo. Por otra parte no había sólo un

²⁵ La conferencia de Born ha sido publicada en español en el volúmen *Ciencia y conciencia en la era atómica*, Alianza, Madrid, 1971, pgs. 100-115.

formalismo correcto sino dos sistemas explicativos cerrados, porque a la mecánica matricial había que sumar la mecánica ondulatoria de Schrödinger. Sin embargo, en lo que se refiere a esta última, la adopción de su formalismo implicaba una concepción física en términos de campo y no de partícula, de modo que la función de onda del electrón era físicamente real y, por consiguiente, el electrón debía ser considerado en términos de densidad electromagnética en un volumen o por decirlo de otro modo como una «onda material». Pero, como dice Born, *a la vista de los hechos experimentales esta interpretación nos parecía, al grupo de Gotinga, inaceptable. (...) Era posible contar las partículas por medio del contador de centelleos o con ayuda del contador Geiger, así como fotografiar sus trayectorias con la cámara de niebla de Wilson*²⁶.

Por tanto, el formalismo de la mecánica ondulatoria podía ser correcto pero la realidad física representada por la ecuación de ondas de Schrödinger, al prescindir del modelo corpuscular, chocaba con la evidencia experimental y se volvía, para el grupo de Gotinga, inaceptable.

Hay que subrayar que lo inaceptable no era el formalismo en sí sino su uso como representación de la realidad física. Ello no es de extrañar teniendo en cuenta que las dos teorías partían de postulados bien distintos y respondían a problemas diferentes. Heisenberg partía de la teoría cuántica primitiva de Bohr y su principal problema era explicar la estabilidad de las cortezas electrónicas de los átomos, se inscribía, pues, la mecánica matricial en el contexto de una teoría mecánica de la estructura de la materia.

Schrödinger en cambio partía de la hipótesis de De Broglie, la mecánica ondulatoria se inserta, por tanto, en el marco conceptual de una teoría electromagnética de la estructura de la materia. La función ψ que describe el estado del electrón es una ecuación de ondas, una función de amplitud que, desde el punto de vista del comportamiento cinemático del electrón debe entenderse como una función de densidad, es decir, como una función que establece la densidad material en un determinado volumen o, dicho de otro modo, como una función de densidad que proporciona el número de electrones en un volumen, al igual que la estadística de Einstein-Bose proporcionaba el número de fotones en un volumen del frente de ondas.

A pesar de ello, todavía en 1926, Eckart y el mismo Schrödinger demostraron que pese a sus grandes diferencias los formalismos de la mecánica matricial y de la mecánica ondulatoria eran matemáticamente equivalentes. Dada esa equivalencia y teniendo en cuenta las ventajas heurísticas de la segunda, el grupo de Gotinga aplicó este formalismo al campo de la mecánica matricial. Eso significó sustituir, en el plano de la descripción

²⁶ Ibidem.

física, el modelo de la mecánica de ondas por el modelo de la mecánica de partículas. Se tiene con ello una primera interpretación física del formalismo de Schrödinger que podríamos llamar interpretación mecánica de la teoría ondulatoria de Schrödinger, mediante ella la función de ondas pasa de describir estados electromagnéticos a describir estados mecánicos.

Pero, como dice Born, una cosa era postularlo y otra demostrarlo. Una cosa era postular que el formalismo de la mecánica ondulatoria podría aplicarse al comportamiento mecánico de las partículas y otra demostrarlo. Para demostrarlo había que proporcionar una interpretación física a la función de ondas en relación con la estructura mecánica de la materia. Born proporcionó esa interpretación: *de nuevo fue una idea de Einstein la que marcó el camino. Einstein había intentado explicar la dualidad de partículas y ondas considerando el cuadrado de la amplitud óptica de onda como la densidad de probabilidad de la existencia de fotones. Esta idea podía aplicarse sin más a la función ψ : el cuadrado del módulo de la función ψ debía representar la densidad de probabilidad de los electrones (u otras partículas)*²⁷.

Ahora bien, como la función de ondas de Schrödinger describe el comportamiento del electrón, donde antes representaba una densidad material en el espacio, ahora representa una densidad de probabilidad. Por lo tanto la función ψ es interpretada estadísticamente, se interpreta que representa la distribución de una variable aleatoria continua.

A la interpretación en términos de mecánica de partículas de la mecánica ondulatoria se suma ahora la interpretación estadística de la función de ondas como representación del estado mecánico de la partícula.

El descubrimiento de Born consiste en probar que ambas interpretaciones han de ir necesariamente unidas o, lo que es lo mismo, Born descubre que la única forma de explicar los procesos atómicos como procesos mecánicos es explicarlos estadística y no causalmente, considerando los sucesos individuales como estocásticos y tratándolos mediante funciones que proporcionan una distribución de probabilidad, pero no la determinación exacta de su valor como magnitud física.

Hasta aquí el proyecto de Born era, a mi modo de ver, perfectamente congruente con el ideal clásico. No es el proyecto, sino los resultados lo que entra en colisión con el ideal de la epistemología clásica, cuando la búsqueda de una interpretación causal desemboca en una interpretación estadística, incompatible con la epistemología de la física clásica. Pero de esa incompatibilidad no se sigue la puesta en cuestión de la mecánica cuántica, sino un cambio de la noción misma de interpretación física de una teoría y, por tanto, del concepto de explicación física y de conocimiento de la naturaleza.

²⁷ Ibidem.

Voy a resumir, en primer lugar, los resultados de Born para señalar después su incompatibilidad con la epistemología de la física clásica.

La evidencia experimental pone de manifiesto propiedades corpusculares en el electrón, el número de electrones (de un haz o de un átomo) es una cantidad discreta, por lo tanto, el electrón tiene, entre otras, una propiedad esencial al concepto mismo de partícula, a saber, la discontinuidad espacial. Pero por otra parte, si en lo relativo al movimiento de los electrones era necesario aplicar el modelo de partícula, en lo que hace a su movimiento era preciso recurrir al modelo de onda a la vista de los experimentos de Davisson y Germer, que suponían una confirmación experimental de la hipótesis de De Broglie.

Desde el punto de vista de la interpretación de Born, lo que se tiene es una partícula que se comporta cinemáticamente como una onda, eso que produce una dualidad irreductible de su descripción mecánica ya que al no conocerse la naturaleza física de la asociación de los aspectos corpuscular y ondulatorio, lo que sucede en el fondo es que no se comprende la relación entre la partícula y su movimiento.

Como dice Mott: *es una generalización natural suponer que todas las predicciones acerca del comportamiento de un haz de electrones deben hacerse acudiendo a un modelo ondulatorio. Esta hipótesis se utiliza mucho como el hecho básico sobre el que debe cimentarse la mecánica cuántica (...). Pero, a partir de los experimentos sobre difracción de electrones, no conocemos a priori nada acerca de estas ondas. Aparte de la longitud de onda, todo lo que sabemos es que los electrones (u otras partículas) se encuentran donde está la onda*²⁸.

Es decir, la ecuación que nos describe la onda nada nos dice acerca de la partícula. El valor del cuadrado de la amplitud de onda no mide ninguna propiedad física de la partícula, por tanto la función de ondas, desde el punto de vista de la descripción mecánica de la partícula, no representa ninguna entidad material en el espacio-tiempo ni se corresponde con ninguna magnitud física real, sino que equivale a una probabilidad, a la medida de una posibilidad.

Por otra parte, como la función de ondas no describe sino el estado posible de una situación física, una observación que determine el estado real efectivo de la situación experimental, modifica la medida de esa posibilidad, es decir, cambia la probabilidad y, por lo tanto, cambia la función de ondas.

Esto último es lo que se conoce como *reducción del paquete de ondas*. Con esa reducción observacional del estado posible a un estado real efectivo lo que se plantea es esto: si la función de ondas cambia con la observación esa función no se corresponde con una situación física real en el sentido de

²⁸ N.F. Mott, *Mecánica cuántica elemental*, Alhambra, Madrid, 1982, p. 45.

independiente del observador, por el contrario, la función depende de la información del observador. Con lo cual hay dos posibilidades: o bien la función de ondas no describe la realidad, sino la información del observador, o bien describe algo real que se ve modificado por la información del experimentador.

Por último, la función de ondas sólo nos permite decir que el electrón estará en algún lugar del volumen del espacio ocupado por el frente de ondas. Si de ese volumen escogemos una unidad pequeña el hecho de que esté o no ocupado por un electrón es por completo impredecible a partir del cálculo. Por consiguiente, ese suceso al no poderse determinar desde el cálculo no depende de una regla sino que es estocástico. Es decir, si en relación con la partícula la función de ondas es probabilitaria, la variable que permite calcular es aleatoria, luego el suceso físico medido por esa variable es estocástico y no se sigue causalmente de regla alguna.

7

Los resultados de la interpretación de Born son inaceptables para la epistemología de la física clásica porque esta última no puede admitir:

Uno. El carácter estocástico, y por tanto acausal, de los fenómenos atómicos.

Dos. Que el formalismo describa la información experimental que tiene el observador y no al objeto físico.

Tres. Que la descripción matemática de una situación física cambie con la información del observador porque esta información forma parte de la situación física.

Cuatro. Que un formalismo permita calcular la medida de una posibilidad y no el valor de una magnitud física.

Cinco. Que haya dos aspectos asociados de los que se desconozca su asociación y que, experimentalmente, se excluyan entre sí.

Las opiniones de los físicos más eminentes de nuestro tiempo se dividieron a partir de esto. Para unos, los cinco puntos que acabo de mencionar, venían a ser conclusiones epistemológicas definitivas y válidas, para otros se trataba de conclusiones inadmisibles que no hacían sino poner de manifiesto deficiencias de la mecánica cuántica.

Admitir que se trata de conclusiones definitivamente válidas supone admitir que la interpretación de Born hace de la mecánica cuántica una teoría estadística correcta y completa. Para la epistemología de la física clásica, la mecánica cuántica podía ser una teoría estadística (como lo era la termodinámica clásica), y podía ser correcta (un formalismo consistente y predictivamente eficaz), pero no podía ser completa.

Desde la perspectiva epistemológica de la física clásica, si la mecánica

cuántica es un cálculo de probabilidades, entonces las variables que permite calcular no dependen de una regla causal, sino que son variables aleatorias. En esta perspectiva ninguna variable física se considera aleatoria *per se*, porque la aleatoriedad implica un proceso físico desordenado, es decir, sin ninguna estructura real. Se admite que hay procesos físicos con una estructura ordenada tan compleja que desde el punto de vista matemático no cabe otra posibilidad que tratarlos estadísticamente. Así se trata una variable como aleatoria porque depende de otras que operan causalmente sobre ella, pero que desconocemos.

En consecuencia, para la física clásica la corrección de una teoría estadística prueba que hay variables ocultas, en el sentido de no descritas por la teoría, pero que, si pudieran serlo, permitirían sustituir la explicación estadística por la causal.

Lo que sostiene la interpretación de Copenhague es que la teoría cuántica evidencia un límite físico, prohíbe un hecho físico, pero este hecho no es otra cosa que la posibilidad de un conocimiento del dominio cuántico más completo que el de la teoría cuántica, la teoría prohíbe la explicación causal, pero no por una limitación técnica sino por la imposibilidad racional absoluta de la explicación causal debida a su vez a la imposibilidad física absoluta de un conocimiento completo del mundo atómico.

Este es un aspecto importante del asunto porque permite centrar el núcleo de la posición epistemológica de Copenhague, ese ajuste exige entender bien la relación entre el problema de la corrección de la teoría cuántica, el problema de su completitud y el problema de su carácter estadístico. Para sus partidarios si la teoría es correcta y si forma parte de ella una limitación que hace imposible completarla causalmente, entonces esa limitación es válida, constituye un conocimiento válido del dominio cuántico.

Pero es que se da el caso de que, cuando la interpretación de Copenhague niega la posibilidad de la explicación causal en el dominio de la física atómica, sus argumentos no son relevantes en relación con el grado de precisión de las predicciones, son relevantes en relación con el segundo sentido del problema de la causalidad. Lo que se afirma es que la limitación impuesta al conocimiento hace imposible pensar los sistemas cuánticos como reales y por tanto hace imposible que la teoría proporcione comprensión de la estructura de esos sistemas. De ahí que sólo pueda tener lugar una explicación formal y que sea imposible pensar el formalismo de la teoría cuántica como una descripción objetiva y verdadera de la realidad física.

Si esto es así, la crítica a la interpretación de Copenhague y la solvencia de la epistemología que se presenta como una alternativa a la de ésta debería ante todo sopesar lo que valgan los argumentos con los cuales se justifica la imposibilidad de la explicación causal.

Esos argumentos son las relaciones de indeterminación de Heisenberg, pero mucho más aún, el principio de complementariedad de Bohr²⁹.

El principio de complementariedad es el núcleo de la interpretación de Copenhague, criticar la segunda exige tomarse en serio al primero ya que explica por qué es imposible una explicación causal al probar que es imposible la comprensión de los sistemas cuánticos como sistemas físicamente reales. Por sí sólo es un argumento filosófico, en combinación con las relaciones de indeterminación de Heisenberg es, además, un argumento físico.

El principio de complementariedad establece que a la comprensión racional le es imposible penetrar la realidad de la naturaleza, al menos en lo que se refiere al mundo microfísico. Con ello señala un límite absoluto al pensamiento en su relación con el mundo físico, una limitación por otro lado que no es interna sino externa, un límite físico, interpuesto por el hecho de que el conocimiento humano se rige también, como sus objetos, por las leyes de la naturaleza. Una ley de la naturaleza prohíbe al pensamiento humano la comprensión racional de la realidad física.

8

El momento material primario en la relación de conocimiento es la interacción física, el intercambio de energía entre el sistema observado y el observador. Pero en esa relación física no hay todavía una relación sujeto-objeto, hay una relación física entre dos objetos, el observador y sus aparatos y el sistema de observación. Antes de la relación sujeto-objeto, antes de la relación entre el observador dotado de conciencia y aquello que observa, hay una interacción física entre sistemas materiales, una interacción, por tanto, regida por leyes físicas.

Por otro lado, también para Bohr, como para Kant, el conocimiento de la naturaleza tiene, como condición de posibilidad, ciertos conceptos que estructuran racionalmente la experiencia y sin los cuales no es posible el entendimiento de la naturaleza. Pero como el sujeto, y sus aparatos, son sistemas materiales macrofísicos, esos conceptos son los que estructuran racionalmente la experiencia del mundo macrofísico. La cuestión es si esas categorías son aplicables a la comprensión objetiva de la realidad microfísica. Bohr piensa que no es verdad que tales categorías y con ellas la comprensión que hacen posible sean aplicables al mundo atómico.

Considera Bohr que la comprensión objetiva de la realidad de un

²⁹ G. Holton en un famoso artículo hace una reconstrucción del origen de la idea de complementariedad. Vid. *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Alianza, Madrid, 1982, p. 118-164.

sistema mecánico, exige una descripción precisa de la coordinación espacio-temporal y de la causalidad; por causalidad entiende que los fenómenos se rijan por reglas determinadas lo cual, en relación a un sistema mecánico, equivale a que se mantenga la ley de conservación de la energía y la ley de conservación de la cantidad de movimiento. Como ya estableció Hamilton, todo esto significa que la comprensión objetiva de la realidad de un sistema mecánico supone la determinación métrica absolutamente precisa de la posición de la partícula, el tiempo, la energía cinética y el impulso.

Ahora bien, en el caso de los sistemas mecanicocuánticos, el intercambio de energía entre el sistema material que es el sujeto y el sistema en observación se rige por la ley de Planck y por ello rigen las relaciones de indeterminación de Heisenberg, según las cuales a un error cero en la determinación métrica de la posición corresponde una indeterminación absoluta del valor de la variable impulso; del mismo modo, una determinación completamente exacta del valor del parámetro tiempo supone una completa indeterminación de la variable energía. Cuanto mejor, en términos de precisión métrica, es nuestra descripción observacional de una de las variables tanto más inobservable se vuelve la otra.

Que el intercambio de energía entre el sistema material del sujeto y el sistema material objeto se rija por la ley de Planck y que las relaciones de Heisenberg resulten teórica y experimentalmente válidas, explica por qué no es sólo técnica sino racionalmente imposible una descripción completa, es decir, conjunta de las propiedades reales de un sistema físico en el dominio mecánico-cuántico. Las relaciones de indeterminación establecen la imposibilidad física de una determinación métrica conjunta y precisa de las propiedades reales de un sistema. Prohiben, por decirlo así, la realización de experimentos en los que las variables mencionadas pueden ser conjuntamente determinadas con una precisión métrica completa.

Hay que tener en cuenta que en el contexto de la física a partir de Newton decir que algo es métricamente indeterminable es lo mismo que decir que es inobservable. Si algo puede ser observado pero no medido, entonces esa observación no es relevante para la explicación física. De ahí que si dos variables no se pueden medir conjuntamente entonces es que no se pueden observar conjuntamente.

Sucede no obstante que Bohr, Heisenberg y buen número de los partidarios de la interpretación de Copenhague dan un paso más: lo que no puede ser medido conjuntamente no puede ser observado conjuntamente y no es simultáneamente real. De lo que se sigue una afirmación chocante: cuando es real, o sea, cuando es observada, cuando hay una determinación métrica de la posición de una partícula, no es real, no es observable, no se puede medir su impulso.

Como señala Popper³⁰, esa equiparación entre observable y real es un pronunciamiento positivista. La posición de Bohr es, efectivamente, esa, un sistema mecánico real ha de tener cuatro propiedades observables en un mismo experimento: posición, tiempo, energía e impulso. Como la teoría cuántica establece la imposibilidad física de realizar experimentos en los que se puedan observar conjuntamente esas propiedades se sigue de ello que una ley de la naturaleza hace racionalmente imposible pensar los sistemas cuánticos como reales.

Como bien dice Popper, eso lo sostiene un positivista, para el cual no hay más realidad que la observable, no un realista para el cual la realidad es independiente de la observación.

Pero, a mi modo de ver, Popper no atiende a un aspecto de la cuestión que es importante. Una cosa es decir que la realidad es independiente de la observación desde el punto de vista de la descripción y comprensión de las propiedades de esa realidad y otra cosa muy diferente es decir que podemos formar un concepto de lo que sea físicamente real sin recurrir para ello, en absoluto, a la observación. Es el concepto de realidad física y no el carácter de la descripción física lo que está aquí en cuestión.

Sucede, no obstante, que ese concepto funda lo que es el conocimiento físico, no hay conocimiento físico y no hay realidad física con independencia de las condiciones materiales de la experiencia, otra cosa es que su descripción dependa o no de la configuración de esas condiciones materiales. Así lo entendió Bohr y así lo entendieron los partidarios de la interpretación de Copenhague, pensar algo como físicamente real cuando es físicamente imposible que concuerde con las condiciones materiales de la experiencia no es hacer física, es pensar lo real sin recurrir al experimento para sostener esa realidad.

En la física clásica la comprensión objetiva exigía la descripción de propiedades que no sufrían perturbación alguna por el hecho de estar en observación, la objetividad suponía en este sentido exterioridad, posibilidad de considerar la interacción física sujeto-objeto como matemáticamente despreciable y por tanto físicamente nula. En el dominio atómico la interacción no es nunca despreciable, el sistema material observado no es nunca un sistema cerrado desde el punto de vista del intercambio de energía. Luego ¿cuándo es cerrado el sistema objeto? ¿cuándo es exterior y físicamente independiente?: cuando no es observado, cuando en absoluto entra en relación con las condiciones materiales de la experiencia (con los aparatos de medida), o sea, cuando no lo podemos considerar como física-

³⁰ Popper en *Teoría cuántica y el cisma en física* sostiene que la complementariedad de Bohr no es sino el fruto de la desesperación. Según esto Bohr había desesperado de obtener comprensión de la mecánica cuántica, pero a su vez esto no era sino el resultado, a decir de Popper, de haber elegido una filosofía inadecuada: el positivismo.

mente real. ¿Y cuándo lo podemos pensar como físicamente real?; sólo cuando forma un único sistema con los medios de observación, cuando no tiene una realidad independiente del experimento, cuando no es objetivamente real.

Ahora bien, como señala el físico Fock, la complementariedad de Bohr establece un límite absoluto e infranqueable a la descripción clásica, no así a la cuántica. Esta última describe las propiedades de los objetos atómicos, propiedades reales sin duda, como el spin, el tipo de ecuación de onda, etc.

Obviamente es así, la comprensión racional de la realidad física que se torna imposible por el principio de complementariedad es la comprensión clásica, por tanto, lo que hace crisis con la teoría cuántica es la estructura filosófica de la física clásica y en consecuencia la racionalidad moderna que ésta encarnaba.

Por decirlo de algún modo, a partir del principio de complementariedad la física se queda sin recursos para seguir sosteniendo que lo que sucede en la estructura de la materia sea un proceso físicamente real y objetivamente inteligible. Con ello se abre un problema que ya no es físico sino filosófico y, en gran medida, metafísico³¹.

El concepto clásico de realidad física estaba sostenido, en último término, por el principio de causalidad, y éste a su vez se sostenía sobre la posibilidad de un conocimiento completo de los sistemas físicos. La epistemología de la interpretación de Copenhague, niega que haya conocimiento completo y niega que el conocimiento sea trascendente a la naturaleza y por eso no puede ser completo. De ahí que el supuesto de una posible completitud del conocimiento deba ser sustituido por el objetivo de un conocimiento más complementario.

La diversidad de la naturaleza no puede ser reducida a unidad, y por tanto a inteligibilidad, mediante su reducción a un sistema completo por medio de la teoría. No hay, para la epistemología generada por el principio de complementariedad, ninguna teoría que sea un sistema completo, por tanto no hay unidad posible del conocimiento, y no hay posibilidad de reducir absolutamente la diversidad de la naturaleza.

Por ello el principio de causalidad y el supuesto de la completitud deben ser sustituidos por el principio de complementariedad, por un ideal según el cual la complejidad y diversidad de la naturaleza supera nuestras posibilidades de sistematización racional.

Naturalmente lo que se niega en la posibilidad de la completitud causal

³¹ O quizás de una índole bien distinta, P. Forman ha realizado un análisis de la situación histórica en las primeras etapas de la formulación de la teoría cuántica y presenta la interpretación de ésta como un esfuerzo de adaptación de los físicos al medio ambiente ideológico, vid. *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927*, Alianza, Madrid, 1984.

y objetiva del conocimiento, lo que una ley de la naturaleza establece es la prohibición a la epistemología clásica de traspasar el límite del mundo atómico con el ideal del racionalismo postmetafísico. La comprensión racional y la inteligibilidad del mundo son imposibles en ese ámbito. De este modo el mundo físico queda escindido en dos. En el primero, el mundo macrofísico donde es posible la explicación causal y por tanto la representación de un objeto como real, lo que tenemos con fenómenos inteligibles. En el segundo, el mundo microfísico donde no cabe la causalidad ni la representación de la realidad, los fenómenos son ininteligibles.

La racionalidad organiza la experiencia mediante ciertos conceptos y la comunica intersubjetivamente (por tanto comprende y objetiva) mediante un lenguaje. Ambas cosas, conceptos y lenguaje, racionalización y objetivación son adecuados para el mundo de nuestra experiencia, pero no para el mundo cuántico. Aquí la única comprensión posible es la intelección del formalismo, no cabe entender las cosas, sólo cabe entender las matemáticas con las que comunicamos la descripción de los fenómenos.

Es decir, Bohr admite que el carácter estadístico supone una insuficiencia cognitiva para nuestra racionalidad, pero es que esta racionalidad no puede, por una ley de la naturaleza, ir más allá de los fenómenos cuánticos. No hay así una *realidad cuántica* ni tampoco una inteligibilidad del mundo atómico.

Bohr admite pues que todo lo que queda bajo el dominio de la mecánica cuántica es *ininteligible* y que su descripción no es física en el sentido que este término tiene para la posición racionalista. Con ello el principio de complementariedad lo que ofrece es una fórmula para racionalizar eso que aparece como irracional. Y la solución consiste en decir que lo que aparece como ininteligible para la epistemología de la física clásica se torna inteligible una vez que se desprende uno de la causalidad, de la objetividad y de la realidad.

Con ello la creencia básica de la ciencia física puede sostenerse sin más que reformar el aparato heurístico del racionalismo. Ya no partiremos de la inteligibilidad del mundo y nos apoyaremos en la explicación causal. Partiremos de la ininteligibilidad del mundo y nos apoyaremos en la corrección del formalismo.

Ahora bien se puede sugerir que una solución así puede proponerse y puede aceptarse de un modo bastante general porque, en el contexto de la comunidad de científicos que practicaron la investigación en teoría cuántica, el ideal moderno de racionalidad ya se había debilitado hasta el punto de poder ser desplazado.

La práctica de la investigación se puede justificar racionalmente por sus resultados y sólo por sus resultados. La eficacia predictiva y la consistencia del cálculo bastan como requisitos. Esto ya no es racionalismo postmetafísico, ya no es una racionalidad que se reduce a sus productos sino a la

instrumentalización de esos productos.

La pregunta no es ya ¿qué comprendemos mediante esta teoría?, sino: ¿funciona este formalismo como algoritmo consistente y predictivo? La reducción de la teoría a instrumento puede ser realizada con éxito porque se ha reducido la racionalidad científica a racionalidad instrumental.

Pero la racionalidad instrumental, que se justifica a sí misma por el éxito de sus resultados, viene a ser un marco ideológico, un marco que racionaliza y justifica la expulsión del momento de la reflexión del proceso de cualquier práctica.

* * *

Manuel Pavón Rodríguez
Depto. de Metafísica y Corrientes
Actuales de la Filosofía
Universidad de Sevilla
Avda. de San Francisco Javier s.n.
41005 Sevilla