

INDETERMINISMO Y RACIONALIDAD. EN TORNO AL PROBLEMA DE LA CAUSALIDAD EN FÍSICA

1. PRELIMINAR

La polémica determinismo-indeterminismo originada en el primer tercio del presente siglo como consecuencia de la Mecánica cuántica lleva consigo, en primer término, un problema filosófico. Afecta fundamentalmente a la imagen de la Naturaleza que se deriva de los resultados de la Física, y tal imagen se perfila esencialmente desde unas coordenadas filosóficas que asumen las exigencias y consecuencias del indeterminismo microfísico. Resulta de suma importancia, por ejemplo, destacar la base epistemológica del problema, cuyo análisis será decisivo para alcanzar un correcto planteamiento del tema dentro del significado propio de la teoría científica en que se encuadra.

Precisamente una importante serie de malentendidos, incorrectas interpretaciones gnoseológicas, y concepciones exclusivistas de la racionalidad científica, se plantearon en la primera mitad de nuestro siglo por la falta de una previa crítica filosófica, principalmente epistemológica, de los términos considerados como polos de la cuestión. En general, podría afirmarse que el hecho de ignorar aspectos filosóficos fundamentales incluidos en el núcleo de la polémica misma, imposibilitaron realmente el acuerdo entre las corrientes opuestas. El propio planteamiento de los términos de la cuestión como "causalismo" frente a "acausalismo" indicaría claramente, como se verá más adelante, esa falta de crítica epistemológica necesaria para el correcto análisis del problema. Como Max Jammer ha mostrado¹ una de las principales cuestiones a tener presente es la dificultad de encontrar una interpretación física adecuada del simbolismo matemático básico de la Mecánica cuántica. Siendo así que tal problema interpretativo afecta en el fondo a lo que haya de entenderse por entidad físico-material en los niveles cuánticos, de ahí que un análisis filosófico, especialmente epistemológico como primera aproximación, sea procedente para esclarecer los límites específicos de la controversia.²

En este sentido nuestra reflexión se centrará específicamente en las raíces filosóficas envueltas en el debate, y en un análisis previo del contenido filosófico de la noción de determinismo —e indirectamente de la de indeterminismo—. Seguidamente se estudiará cuál es el significado particular del indeterminismo microfísico, y qué aspectos concretos del determinismo derivado de la Física Clásica se rechazan. De este modo se contribuirá a su vez al análisis del con-

¹ Cfr. JAMER, M. *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretation of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, Wiley, New York, 1974.

² La bibliografía sobre el problema de la causalidad es extensísima en los aspectos aquí tratados. Aparte de las referencias que se hacen a lo largo de este trabajo se podrían reseñar las siguientes obras de modo indicativo: WALLACE, W., *Causality and Scientific Explanation*, vol. I, *Medioeval and Early Classical Science*; vol. II, *Classical and Contemporary Science*. University of Michigan Press, 1972-74. MACKIE, J. L., *The Cement of the Universe: a Study of Causation*, Clarendon Press, Oxford, 1975. BUNGE, M., *Causality and Modern Science*, 3rd. revised edition, Dover, New York, 1979.

tenido correcto de la imagen de la Naturaleza derivada de la Mecánica cuántica en la medida en que lleva implícita una base indeterminista de la realidad física.

2. DETERMINISMO, INDETERMINISMO Y RACIONALIDAD CIENTÍFICA

La imagen determinista derivada de la Física newtoniana se asentaba especialmente en los paradigmas de continuidad, exacta localización, y determinabilidad completa de las entidades físicas básicas.³ Los fenómenos físicos se producían sin saltos o discontinuidades, pudiéndose predecir con rigurosa exactitud la situación de un móvil cualquiera, sea en su referencia a su posición espacial o a su momento cinético o cantidad de movimiento. La contrapartida filosófica de todo ello era doble. Por una parte, la imagen corpuscular de la realidad física que llevaba consigo en este caso, una visión mecanicista del mundo; y por otra, un concepto de sustancia directamente basado en el principio de completa determinabilidad expuesto por Kant en su *Crítica de la Razón Pura*.⁴ La ecuación fundamental del movimiento, en consecuencia, podía ser escrita del siguiente modo, tratándose de partículas o corpúsculos perfectamente definidos y localizables en cualquier instante de su trayectoria:⁵

$$m_i \frac{d^2 S_i}{dt^2} = F_i(t)$$

La formulación posterior de las Relaciones de Incertidumbre o Indeterminación⁶ dentro de la Mecánica cuántica rompería justamente ese cuadro armónico y cerrado en cuanto a la imagen del mundo físico. Si mediante la primera relación de incertidumbre no se podían establecer simultánea y exactamente la posición y la cantidad de movimiento, se cuestionaban precisamente los paradigmas que definían la corpuscularidad como base de los fenómenos físicos. De modo similar ocurría con la energía y el tiempo, según la segunda relación. El panorama se completaba de manera paralela con las dos relaciones de indeterminación referidas al momento angular y posición angular, y al momento

³ Vid. QUERALTO, R., "Significación filosófica de la causalidad en la Física actual", *Anuario Filosófico*, vol. X, nº 2, (1977), p. 145 ss.

⁴ *Kritik der reinen Vernunft*, B 599.

⁵ Es preciso aclarar aquí que el hecho de remitir a ecuaciones diferenciales de esta clase no significa que supongamos que tal tipo de ecuación es la "correspondencia" matemática de la causalidad o del postulado determinista. Esa identificación entre términos filosóficos y términos matemático-metodológicos no sería sino origen de confusiones que llevarían a resultados insostenibles.

⁶ No distinguiremos en el presente trabajo los matices entre "indeterminación" e "incertidumbre", porque eso nos llevaría muy lejos y fuera de nuestro objetivo. De modo general puede decirse muy simplificado que "indeterminación" incide especialmente en el plano ontológico, mientras que "incertidumbre" se referiría en primer término al gnoseológico. No obstante, estamos de acuerdo con M. Capek al afirmar que es más correcta la interpretación como "indeterminación", si bien su justificación no es posible desarrollarla ahora. Cfr., entre otros, CAPEK, M., *Particles or Events?* En *Physical Sciences and History of Physics*, edited by R. S. Cohen and M. W. Wartofsky, D. Reidel, Dordrecht, 1984, pp. 1-28. Véase también del mismo autor, *o. c.* nº 27.

de inercia y velocidad angular, respectivamente. Todo ello venía a poner en crisis el elemento fundamental de interpretación de la imagen de la Naturaleza derivado de la Física Clásica, es decir, el corpúsculo como entidad básica. Pero, al mismo tiempo, las Relaciones de Incertidumbre incidían directamente en el comportamiento dinámico de los corpúsculos, o sea, cuestionaban el funcionamiento determinista de la "máquina" de la Naturaleza. La pretensión de Laplace de absoluta determinabilidad de los fenómenos físicos se tornaba una ilusión irrealizable.

Ahora bien, si la realidad física no obedecía a categorías deterministas, entonces, qué tipos de categorías de interpretación había que emplear para "entender los fenómenos mecanocuánticos? Esta pregunta formulada en estos términos era la que se desprendía inmediatamente de la grave situación epistemológica creada, pero, de hecho, no fue correctamente planteada en su justo momento, ni quizás tampoco hubiera podido ser correctamente respondida. Por el contrario, los científicos de mentalidad más enraizada en los marcos de referencia clásicos se aprestaron a la defensa del determinismo como una necesidad "física" criticando duramente la teoría cuántica desde muy diversos puntos de vista. Tal defensa, motivada muchas veces por razones ajenas a la misma Física, especialmente razones epistemológicas y ontológicas, originó a su vez una reacción opuesta de afirmación de la teoría cuántica, pero sin explicar convenientemente la noción de indeterminismo y su contenido básico. Así, a la defensa de un determinismo ciego se oponía la afirmación indefinida de un indeterminismo del mundo físico, sin especificar su correcto significado. En este sentido no deja de ser significativo que Moritz Schlick, por ejemplo, considerase que el problema de la causalidad en la Física cuántica había tomado por sorpresa al pensamiento moderno.⁷

Y aquí es necesario preguntar por qué se llegó a una tal situación de tensión que tan sólo fue decreciendo por el cansancio acumulado en disputas sin término aparente. ¿Acaso no era posible encontrar un cierto puente de enlace entre el sentido del determinismo clásico y el indeterminismo cuántico? O planteado de otro modo: ¿Qué raíces filosóficas llevaba implícitas el paradigma determinista que eran prácticamente irrenunciables para sus defensores, a pesar del ya inevitable triunfo de la Mecánica cuántica? Esta cuestión tiene una respuesta definida contemplada desde la situación de formalización definitiva adquirida por la Mecánica cuántica. En efecto, pues se trataba fundamentalmente de que el determinismo se consideraba idéntico a racionalidad del conocimiento científico, es decir, sin categorías deterministas, se pensaba, no era posible la Ciencia misma, al menos en los niveles físicos. Lo que se defendía en el fondo era, para los deterministas, la validez intrínseca del conocimiento científico. Se identificaba el determinismo como una condición fundamental de la posibilidad del conocimiento científico. Si el mundo físico no obedecía a categorías deterministas dejaría de ser automáticamente un objeto de conoci-

⁷ Cfr. SCHLICK, M., "Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik". *Die Naturwissenschaften*, 19, (1931), pp. 145-162.

miento accesible a la razón científica.⁸ De ahí, por ejemplo, la celebrada afirmación de Einstein "Dios no juega a los dados" (*Der Herrgott würfelt nicht*), cuyo sentido último es una defensa de la racionalidad determinista, la cual mantuvo hasta el fin de sus días.

Ahora bien, ¿por qué esa identificación del paradigma determinista con la racionalidad científica? La respuesta nuevamente no es difícil: porque sin determinismo, se argumentaba, no puede haber causalidad física, esto es, lo que se cuestionaba con el indeterminismo sería entonces el mismo principio general de causalidad con todas sus consecuencias. Al respecto, y por citar de nuevo un caso de radical importancia en la historia de la Ciencia, Einstein declaraba que en ningún modo abandonaría la causalidad así entendida, expresando su profunda preocupación por la situación creada.⁹ Entre las consecuencias del principio causal obviamente se encontraba la existencia de un orden en la Naturaleza, el cual sin un principio determinista de causalidad se desvanecería sin solución posible. Así pues, la defensa del determinismo en cuanto racionalidad científica era referida en último término a una defensa del principio de causalidad, de ahí la acusación esgrimida contra los físicos cuánticos de "acausalistas", o sea, de negadores absolutos de la causalidad física, sin olvidar que algunos de ellos justamente provocaron tal denominación, como más adelante se tendrá ocasión de comprobar. En el fondo, a los importantes desarrollos matemáticos de la teoría cuántica se opondría siempre un rechazo más o menos directo, porque de lo contrario, se temía, la Física habría firmado su acta de defunción.

Sin embargo, tal identificación del determinismo con la racionalidad científica y con el principio general de causalidad adolece de una grave confusión de categorías filosóficas. Resulta obvio afirmar que el indeterminismo microfísico, correctamente entendido, no puede significar una quiebra del principio de causalidad, de lo contrario habrían sido vanas, por la fundamentalidad de este principio, las importantes y definitivas aplicaciones que los principios cuánticos tuvieron para resolver muchos problemas de la Física —recuérdese, por ejemplo, el modelo atómico de Bohr—. Si, tomando como base precisamente el presupuesto de los críticos de la Mecánica cuántica, la causalidad debía ser un requisito ineludible del conocimiento científico y, al mismo tiempo, el indeterminismo mecano-cuántico se convertía en un paradigma científico, es claro que éste no podía afectar al núcleo de significación del principio general de causalidad. Esta conclusión, que puede parecer sencilla ahora, no pudo ser tan fácilmente expresada en los tiempos "duros" de la polémica. Y la razón de todo ello es que en el fondo existía una confusión de planos y

⁸ Cfr. FORMAN, P., *Weimar Culture, Causality and Quantum Theory, 1918-1927. Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment*. Historical Studies in the Physical Sciences, 3, 1971, pp. 1-115. Trad. esp.: *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica, 1918-1927*, Alianza Universidad, Madrid, 1984. Especialmente parte tercera, p. 108.

⁹ *The Bohr-Einstein Letters*, Walters-McMillan, New York-London, 1971, p. 26. Carta fechada en 27 de enero de 1920: "I should be very very loath to abandon complete causality... This question of causality worries me a lot".

niveles en el mismo planteamiento de la cuestión. Bachelard, por ejemplo, ya señalaba en una conocida obra que causalidad y determinismo no eran la misma cosa.¹⁰ Efectivamente, pues se confundía un nivel epistemológico con un nivel ontológico, y se identificaban ambos sin discernimiento crítico previo. En este sentido Agazzi también ha señalado los diferentes niveles críticos implicados en el problema con gran claridad.¹¹ La afirmación de la necesidad de la causalidad es incontrovertible, es decir, si el mundo físico en su estructura ontológica no está ordenado causalmente entonces no será posible conocimiento científico, pues éste presupone desde los inicios del pensamiento racional que todo objeto para ser cognoscible debe poseer una ordenación interna, una mínima estructura que conecte sus diferentes partes entre sí y con el todo para poder ser accesible a nuestra razón. Ahora bien, esta necesidad del principio de causalidad debe entenderse en su justo sentido. Por causalidad en el ámbito del mundo físico significamos aquí la relación de determinación y producción total o parcial entre una entidad física —o grupo de ellas— y otra entidad física —o grupo de ellas—. Nótese que en ningún momento se señala la necesidad de especificar la naturaleza intrínseca de esa relación de determinación y producción, es decir, si es de naturaleza mecánica, puntual, teleológica, etc. La causalidad como principio ontológico general deberá ser lo suficientemente universal como para abarcar las múltiples y diversas formas de hacerse efectiva aquella relación de determinación y producción. Tal hacerse efectivo vendrá reglado justamente por la estructura específica del dominio físico-material que ha de adecuarse operativamente al principio causal. De este modo, la causalidad se entiende a su vez como la relación que conecta estructuralmente la realidad física en general, y contribuye, junto con otros elementos que no es momento ahora de referir, a establecer sistematización ontológica propia al dominio físico-material correspondiente. Obsérvese que la legalidad natural entonces no sería identificable con el principio de causalidad, como sucede muchas veces si se pregunta por el contenido de aquélla, sino en todo caso con una consecuencia estructural de la propia causalidad ontológica. Esta confusión entre causalidad y legalidad ha originado también diversos problemas que en algunas ocasiones han aumentado la controversia acerca del alcance del determinismo y su relación con el principio de causalidad.

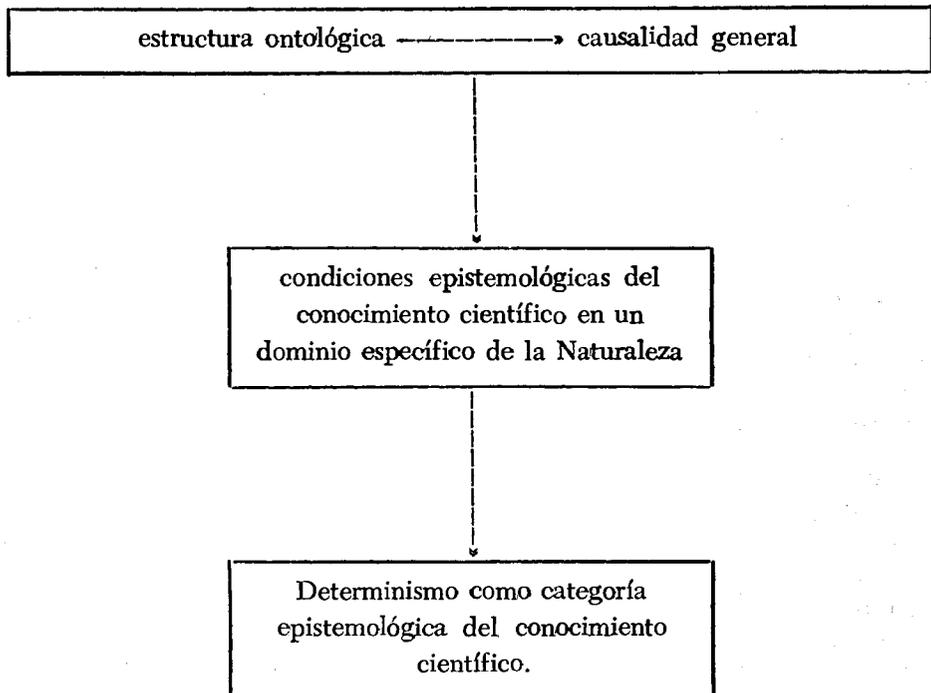
Todo esto significa que la estructura causal pertenece a la estructura ontológica de la realidad física, y tal estructura causal exige fundamentalmente la existencia de un orden interno en los objetos que regla. Al mismo tiempo, el determinismo sería una categoría epistemológica, esto es, una forma concreta de llevarse a cabo en un determinado nivel con sus caracteres específicos, y dentro de una determinada teoría, el requisito ontológico de causalidad. El determinismo, expresado en otras palabras, sería el paradigma epistémico acorde con las características del conocimiento científico que traduciría a un determinado nivel de la realidad física las condiciones requeridas por el principio ontológico de causalidad. Concretando más, y siguiendo en esta ocasión a Pop-

¹⁰ Vid. BACHELARD, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Alcan, Paris, 1934, p. 110.

¹¹ AGAZZI, E., "Determinismo, indeterminismo e causalità", *Synesis*, I, 2-3, 1984, pp. 13-36.

per,¹² se podría afirmar que “la doctrina del determinismo ‘científico’ es la doctrina que dice que el estado de cualquier sistema físico cerrado en cualquier instante futuro dado puede ser predicho, incluso desde dentro del sistema, con cualquiera que sea el grado estipulado de precisión, mediante la deducción de la predicción a partir de teorías, en conjunción con condiciones iniciales cuyo grado de precisión requerido puede calcularse siempre si la tarea de predicción es dada”. Como puede apreciarse el nivel filosófico propio, sin excluir otros ciertamente, de la definición popperiana es principalmente el epistemológico.

La identificación de determinismo y causalidad, vista desde estos términos, no podía traer consigo más que una vía sin salida, ya que la confusión de categorías epistemológicas y ontológicas entre sí conduce irremediabilmente a contradicciones básicas. En la cuestión que analizamos aquí la contradicción estribaba en el éxito indiscutible por una parte de la Mecánica cuántica, y la defensa del determinismo como único paradigma de racionalidad causal por la otra. El siguiente esquema podrá contribuir a un mejor entendimiento de nuestro análisis.



Así pues, por una parte la causalidad correspondería sin lugar a dudas al plano ontológico, y por otra la categoría determinista se originaría como categoría epistemológica en función de la modalidad de condiciones epistémicas

¹² POPPER, K. R., *The Open Universe. An Argument for Indeterminism. Potscript to the Logic of Scientific Discovery*, vol. II, Hutchinson, London, 1982. Trad. esp.: *El Universo abierto. Un argumento en favor del indeterminismo*, Tecnos, Madrid, 1984, p. 59.

propias del dominio físico-natural bajo consideración (en este caso, como se verá con más detalle, se trataría del nivel macrofísico). La diferenciación entre el principio de causalidad y el determinismo queda formalmente manifiesta.

De esta manera, el determinismo no podría ser identificado de modo absoluto con el principio de causalidad, sino con una forma concreta de aprehensión del sujeto cognoscente de la estructura causalmente ordenada de la realidad física. Obsérvese en el esquema propuesto que existe una clara distancia entre la ubicación del principio de causalidad y la categoría determinista; precisamente la correspondiente a la distinción de los planos ontológico y epistemológico, sin significar por ello falta alguna de su necesaria conexión y coordinación cognoscitivas, pero sin confundirlos entre sí.

Ahora bien, esta investigación crítica diferenciadora de los planos ontológico y epistemológico no podía apreciarse en su justo momento porque el determinismo estaba elevado a categoría ontológica, o sea, el determinismo llegaba a ser un carácter metafísico, y no un paradigma epistemológico. De ahí que se defendiera como única vía posible de racionalidad. En el fondo, como puede comprobarse, la defensa del determinismo tenía sus últimos fundamentos no en la Física como tal sino en la Metafísica derivada de la imagen mecanicista de la realidad física. Así puede entenderse que la disputa entre deterministas e indeterministas en muchas ocasiones se convirtiera en un monólogo de cada una de las posturas defendidas y no en un verdadero diálogo, porque los términos empleados eran entendidos de manera radicalmente distinta por cada una de ellas, y no existía previamente un acuerdo acerca del contenido filosófico de dichos términos.

Ciertamente un punto importante a destacar en esta situación extrema habría que situarlo en el propio Heisenberg, a causa de su posición inicial ambigua acerca de si la Mecánica cuántica negaba o no la causalidad. En un primer momento afirmó la caída de la causalidad como tal, para después considerar una especie de causalidad restringida requerido precisamente por exigencias filosóficas.¹³ Todo ello no hizo sino provocar y avivar la controversia, cuyas fases principales —Congreso Solvay de 1927, argumento EPR de 1935, etc.— forman ya parte de la historia de la Física en nuestro siglo. Como muestra de esta situación generalizada de confusión y en síntesis apresurada, cabría añadir que, por ejemplo, Brunschvicg pensaba justamente que la Mecánica cuántica constituía en el fondo una confirmación del determinismo,¹⁴ mientras que Popper, con un mejor criterio quizás, señalaba que las fórmulas de indeterminación no implicaban ni determinismo ni tampoco indeterminismo en el

¹³ Cfr. HEISENBERG, W. "Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", *Zeitschrift für Physik*, 43, 1927, pp. 172-198, especialmente p. 197. Acerca de una causalidad restringida: "Die Rolle der Unbestimmtheitsrelationen in der modernen Physik", *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 38, 1931, pp. 365-372. "Kausalgesetz und Quantenmechanik". *Erkenntnis*, 2, 1931, pp. 172-182.

¹⁴ Cfr. BRUNSCHVICG, L., *La Physique du XXe Siècle et la Philosophie*, Hermann, Paris, 1936.

sentido ontológico,¹⁵ —sin olvidar en su caso la defensa posterior del indeterminismo en el *Postscript to the Logic of Scientific Discovery*, vol. II—. Estas múltiples interpretaciones de las relaciones de indeterminación de Heisenberg fueron estudiadas más adelante desde un punto de vista filosófico-sistemático por muy diversos y variados autores.¹⁶ Finalmente, señalaremos que más recientemente Bunge¹⁷ ha sugerido que la fórmula de indeterminación que se refiere al tiempo y a la energía podría ser eliminado de la teoría al no implicarse lógicamente de ella. Nótese al respecto la importancia de esta relación precisamente para el tema de la causalidad en el mundo físico desde un punto de vista filosófico. Como puede verse la situación era sumamente compleja, y difícilmente podría haberse llegado a un acuerdo más o menos aceptable y generalizado.

Ahora bien, de acuerdo con el esquema de interpretación apuntado, ¿cuál sería el contenido filosófico del indeterminismo si ha de respetar el principio general de causalidad? Intentaremos responder a esta cuestión en lo que sigue a fin de completar el contenido de la interpretación propuesta.

3. LO QUE EL INDETERMINISMO NO SIGNIFICA

En primer lugar, es necesario destacar que el contenido filosófico derivado del indeterminismo cuánto no significa una “absoluta indeterminación”. Si así fuera no cumpliría la necesaria correlación con el principio ontológico de causalidad. La “absoluta indeterminación” implicaría una completa falta de orden interno en la Naturaleza y en los fenómenos físicos. En otras palabras, el indeterminismo microfísico no significa que se produzca “caos” en la realidad física. De aquí que el indeterminismo no implique negación del orden de la causalidad física, pues como afirma Popper¹⁸ es preciso “distinguir entre causalidad y determinismo” y evitar “el error que cometen tantos filósofos que creen que es válido argumentar en favor del determinismo señalando que cada suceso tiene una causa”.¹⁹

Ahora bien, ¿qué clase de orden causal definiría el indeterminismo? Si acudimos a la descripción de un sistema físico dentro de la teoría cuántica, se ha de observar que aquello que finalmente se obtiene es un cuadro de probabilidades, o más técnicamente, amplitud de probabilidad. Como es suficiente-

¹⁵ Vid. POPPER, K. R., *The Logic of Scientific Discovery*, Hutchinson, London, 1958. Trad. esp.: *La lógica de la investigación científica*, Tecnos, Madrid, 1962, especialmente cap. 9, parágrafo 78. Véase también: *El Universo abierto*, o. c. cita 12.

¹⁶ A título de simple ejemplo y sin pretensión alguna de exhaustividad se podrían citar autores tan diferenciados como HEELAN, P. A., *Quantum Mechanics and Objectivity*, Nijhoff, The Hague, 1965. HÖRZ, H., “Die philosophische Bedeutung der Heisenbergs Unbestimmtheitsrelationen”, *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 8, 1960, pp. 702-709. McMULLIN, E., *The Principle of Uncertainty*, apud JAMMER, o. c., p. 79.

¹⁷ BUNGE, M., “The so called Fourth Indeterminacy Relation”, *Canadian Journal of Physics*, 48, 1970, pp. 1410-1411. Véase también como interpretación general: “The Interpretation of Heisenberg’s Inequalities”, en *Denken und Umdenken, zu Werk und Wirkung von Werner Heisenberg*, hrsg. von H. Pfeiffer, Piper, München, 1977, p. 146 ss.

¹⁸ *El Universo abierto*, o. c., p. 71.

¹⁹ *Id.*, p. 35.

mente conocido, la información sobre los observables del sistema viene dada por una expresión que contiene a la función de onda y al operador asociado al observable. En particular, y tratándose del caso más sencillo, el cuadrado de la función de onda,

$$|\Psi_t(x)|^2$$

representa la densidad de probabilidad de localización del sistema en el punto de coordenadas x .²⁰ Mas la probabilidad no significa caos ni absoluta indeterminación: existe un orden de probabilidades respecto a los parámetros que definen el sistema como entidad física. Con otras palabras, el fenómeno mecano-cuántico no está absolutamente indeterminado sino que puede oscilar dentro de un cuadro de valores probabilísticos. Así el orden físico derivado de la indeterminación cuántica es un orden de probabilidades, pero no un desorden absoluto. Al respecto y a pesar de su conocida posición crítica, D. Bohm, como es sabido uno de los más relevantes representantes de la teoría de "parámetros ocultos", acuñó el término "causalidad multívoca" en referencia a este problema, diferenciándolo netamente de la "causalidad unívoca".²¹

Una prueba importante de lo anterior radicaría en el hecho de que los marcos de probabilidad, en los cuales se desarrollará la evolución del fenómeno físico, pueden ser hallados objetivamente por todos los observadores posibles, o sea, no se trata de un aspecto caprichoso de la realidad física o de una fluctuación imposible de estudiar estadísticamente. Podrá estar indeterminado básicamente el conjunto de valores que en un preciso instante tomen cada uno de los parámetros físicos relativos a la incertidumbre simultáneamente, pero ese conjunto de valores no es radicalmente indefinido, sino que está reglado por leyes matemáticas que remiten a un cuadro objetivo de probabilidades. Si por el contrario no existiera tal marco de probabilidades entonces efectivamente sería muy difícil mantener algún tipo de orden interno en los fenómenos cuánticos.

Una explicación más simple de la idea anterior puede darse también acudiendo a la noción de sistema físico. Este concepto es entendido hoy, en consonancia con la Física teórica, como la entidad básica de la realidad que en un determinado nivel se considera como unidad física. Ahora bien, un sistema está formado por un conjunto de elementos que interaccionan entre sí y con el todo, ya sean tales elementos metodológicamente identificados sin una correspondencia biunívoca con la realidad, o bien sean localizados individualmente como

²⁰ Cualquier manual de Física cuántica puede consultarse a fin de abundar sobre este punto. Diferente es el problema del significado físico real de la función de onda, que hasta el momento plantea dificultades irresolubles en cuanto a una aceptación generalizada. En el fondo, el tema se conecta con la ausencia de un concepto definido de materia, admitido genéricamente, y que tenga en cuenta a su vez la otra teoría fundamental de la Física, o sea, la Relatividad general.

²¹ Vid. BOHM, D., *Causality and Chance in Modern Physics*, Routledge and Kegan Paul, London, 1957. Trad. esp.: *Causalidad y azar en Física Moderna*, U.N.A.M., México, 1959.

formando parte del sistema en cuanto unidad superior. Si el sistema físico queda definido como tal, es decir, es identificado matemáticamente como unidad física, entonces la distribución de probabilidades antes mencionadas serían las permitidas por su estructura sistémica. El comportamiento del sistema será probabilístico, pero en ningún modo indeterminado absolutamente, pues entonces no habría habido previamente identificación del sistema como unidad física. Que existan diversos caminos de evolución temporal del sistema físico no significa que el sistema pueda devenir "cualquier cosa". En realidad, los posibles estados posteriores del sistema pueden calcularse de acuerdo con las leyes probabilísticas, y tales estados, al ser regidos por esas leyes ya implican un orden y no un caos absoluto, como se pretendía desde una concepción determinista. No existirá evolución causal determinista en el sistema físico, pero sí obedecerá éste a las leyes de probabilidad dentro del marco propio de definición física del mismo sistema. Justamente las relaciones internas que constituyen el sistema físico imponen los límites probabilísticos de su evolución temporal. La red de las relaciones físicas que definen el sistema son así origen de su marco de probabilidades que aparece derivado de la incertidumbre cuántica. De ahí que el indeterminismo no sea absoluto sino relativo a la red físico-sistémica.²²

De esta forma, la causalidad en el ámbito microfísico ha sido denominada usualmente causalidad estadística o causalidad probabilística. Quizás no sean del todo acertadas tales denominaciones, ya que unirían un término metafísico con otro término cuya significación más básica sería de orden metodológico y matemático, lo cual muchas veces podría inducir lógicamente a error. No obstante, así se halla referida esta noción en la mayoría de los casos. Sería más oportuno utilizar el concepto de causalidad indeterminista que remite a niveles de comprensión fundamentalmente filosóficos en sus dos componentes, y que, tras lo expuesto hasta aquí, no serían incompatibles. En cualquier forma, y hecha esta aclaración se utilizarán indistintamente las anteriores denominaciones.

Obviamente este tipo de causalidad no podrá ser determinista, pero tampoco significará una negación del principio ontológico de causalidad. De este modo, por ejemplo, ha sido concebida por Max Born,²³ de Broglie —en una primera etapa—,²⁴ y Ullmo,²⁵ entre otros físicos y filósofos. Si el fenómeno responde a un orden determinable, aunque no determinista, quiere decir que se cumple el requisito para establecer secuencias temporales de orden causal. Tal secuencia temporal no será de carácter lineal-puntual sino de conjunto de elementos a conjunto de elementos, como se verá más adelante.

²² Vid. QUERALTO, R., "On The Meaning of Chance in Modern Physics", *Abstracts of the 7th. International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science*, J. Hutteger, Salzburg, 1983, vol. 4, pp. 179-182.

²³ BORN, M., *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Dover, New York, 1964. Especialmente p. 9.

²⁴ Vid. BROGLIE, L. DE, *Continu et discontinu en Physique moderne*, Albin Michel, Paris, 1941, p. 64.

²⁵ Cfr. ULLMO, J., *La crise de la Physique quantique*, Hermann, Paris, 1961.

Fue precisamente este contenido filosófico del indeterminismo cuántico lo que no pudo apreciarse convenientemente desde la postura de los defensores del determinismo. La completa identificación del principio de causalidad con la categoría determinista impedía discernir que el indeterminismo no suponía una negación de aquél, sino precisamente, como el determinismo, una forma epistemológica del principio de causalidad válida en los niveles cuánticos. La interpretación de la polémica histórica que se propone así mantiene por una parte la validez del determinismo en el nivel macrofísico al ser una categoría epistemológica acorde con la magnitud de los parámetros físicos allí implicados, y mantiene igualmente y por la misma razón la validez del indeterminismo en el nivel cuántico. Nótese bien que no se trata aquí de entender un tipo de causalidad "fuerte" en el nivel macrofísico, y otro tipo de causalidad "débil" en el nivel microfísico. Eso sería un dualismo ontológico metafísicamente insostenible. El principio de causalidad como tal no sería doble sino específicamente único, pues de lo contrario sería una contradicción contemplar la unidad de la Naturaleza —a través de sus diferentes dominios definidos— como objetivo a mostrar por el conocimiento humano, y en especial por el conocimiento científico, el cual, desde su constitución histórica, opera con el postulado de la unidad de la Naturaleza como un prerequisite formal o, si se prefiere, como una intuición reguladora o condición de posibilidad de la unidad del conocimiento científico, meta a su vez claramente enunciada y procurada.

No obstante, para aprehender en sus justos términos el recto sentido final del indeterminismo, se precisará desarrollar el concepto de causalidad implícito en él, es decir, estudiar con más detalle los caracteres de la causalidad indeterminista. De este modo se podrá entender con mayor claridad cómo el indeterminismo no es en absoluto una negación del principio básico de causalidad ontológica y, al mismo tiempo, cómo el determinismo no puede identificarse con la única forma posible de causalidad. A ello se dedicarán las reflexiones que siguen, las cuales pretenderán dilucidar el contenido conceptual del indeterminismo causal.

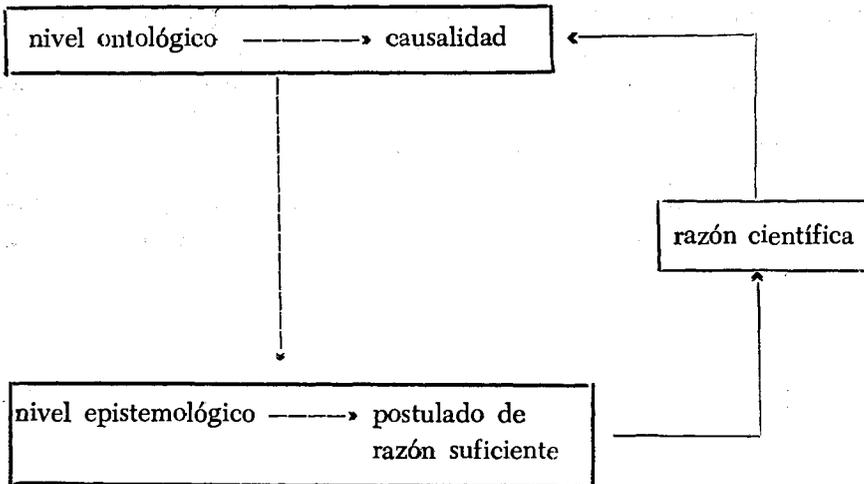
4. EL SIGNIFICADO DEL INDETERMINISMO

A fin de responder a las cuestiones antes planteadas es necesario ahora preguntar por el correlato epistemológico de ese principio ontológico de causalidad entendido de modo genérico, es decir, sin referencias explícitas a una interpretación determinista o indeterminista. Y es pertinente formular esta pregunta en este momento porque se tratará de mostrar cómo las exigencias epistemológicas del principio de causalidad son satisfechas por el indeterminismo. Obsérvese que situamos la discusión en un nivel epistemológico, dado que como ya dijimos más arriba, consideramos el indeterminismo, en una primera aproximación, como categoría epistemológica. De ahí que, para mostrar su compatibilidad con el principio de causalidad, se plantee la cuestión de cuál sea el correlato de éste a nivel epistemológico. En síntesis, preguntáramos ahora por el contenido filosófico estricto, desde el punto de vista epistemológico, del principio de causalidad en general. Ese contenido esencial no es otro sino el postulado epistémico de razón suficiente. La causalidad es un principio ontológico de ordenación de la realidad física, y el postulado de razón suficiente sería

la "formulación", al nivel del conocimiento científico válido, de las exigencias de la causalidad ontológica. El postulado de razón suficiente sería el principio de ordenación del conocimiento válido de la realidad obtenido por el sujeto cognoscente, ya sea en el dominio de la Ciencia o en el de cualquier otro saber, como la Filosofía.

Se ha de aclarar previamente que con estas afirmaciones no quiere indicarse que el postulado de razón suficiente sea *únicamente* interpretable epistemológicamente, o reducible a ese plano. Eso sería en el fondo desconectarlo de su referencia ontológica, lo cual es inaceptable y estaría ignorando el sentido metafísico que el racionalismo leibniziano le asignaba.²⁶ Por el contrario, asumiendo ese enlace al considerarlo correlato del principio de causalidad, centramos el análisis en el nivel epistemológico por las razones antes expuestas.

El postulado de razón suficiente, en el sentido en que aquí se emplea, indica fundamentalmente que todo hecho o acontecimiento en el mundo físico, en cuando es conocido de modo racionalmente correcto —por la Ciencia o la Filosofía—, posee una explicación válida dentro del dominio cognoscitivo en el que se debe dar tal explicación. "Explicar" significaría justamente así "dar razón" del hecho, de tal modo que se produzca una ordenación del conocimiento acerca del objeto o del hecho bajo consideración. El siguiente esquema simboliza lo anterior:



Así, la razón científica cuando se enfrenta al conocimiento de la realidad física supone una ordenación intrínseca en su objeto, esto es, que el mundo sea orden —sin explicar de qué tipo—, y no caos. Esta es una condición previa del proceso de conocimiento. Tal orden ontológico supone a su vez que existe una organización causal, sin requerir, al igual que antes, una concretización ulterior de la naturaleza de ese vínculo causal. Ahora bien, ese contenido causal se expresa como conocimiento válido del sujeto cuando se cumple el postulado de razón suficiente, o sea, cuando explica de una forma válida el acontecer físico investigado. De este modo el correlato epistemológico del orden causal

²⁶ Véase por ejemplo este doble plano claramente enunciado en la *Monadología*, parágrafo 32, y *Teodicea*, parágrafo 44.

ontológico sería el postulado de razón suficiente. Nótese que éste posee una clara conexión ontológica puesto que si es explicación válida del objeto físico, de alguna manera y en algunos aspectos al menos, está desvelando lo que el propio objeto es. No es el conocer científico una creación racional entendida como invención absoluta, sino en todo caso, el resultado de la creatividad humana reglada por leyes ontológicas y leyes epistemológicas. Tales leyes poseen una efectiva correspondencia entre ellas, conectándose así en una síntesis unificadora los diversos planos a tener en cuenta en el acto cognoscitivo. Y es justamente el nivel epistemológico el que, en este caso, es meta de nuestro análisis.

Puede entenderse ahora por qué el determinismo y el indeterminismo son, en primera aproximación, formas epistemológicas o categorías de comprensión del mundo físico. Tanto el primero como el segundo darían una explicación válida, suficiente, de los fenómenos, de acuerdo al nivel físico en que tales fenómenos se hallan situados en la investigación. Cuando la razón científica investiga el nivel macrofísico se produce una categoría determinista de interpretación epistemológica; pero, cuando se enfrenta a niveles microfísicos, es decir, nivel en el cual no son válidos los parámetros en que se basa el determinismo, entonces se ha de producir un cambio de categorías epistemológicas de interpretación, y así surge el indeterminismo como nueva forma o categoría epistemológica adecuada al nivel microfísico.

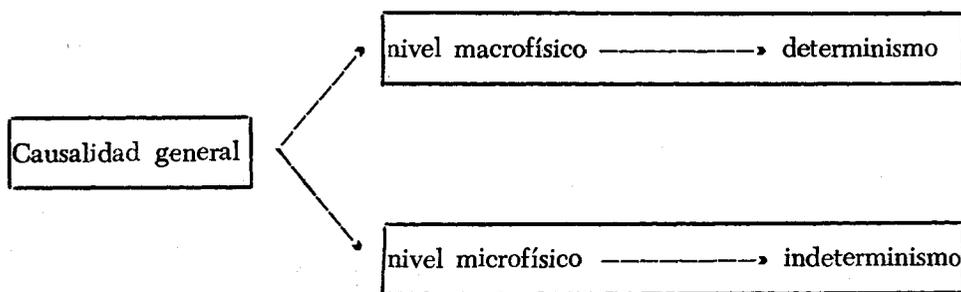
Una de las derivaciones más interesantes que aparecen aquí es la referente al concepto de materia que puede aprehenderse desde una perspectiva determinista o indeterminista. Es obvio que, al variar las categorías epistemológicas en sus contenidos, la concepción o imagen de la realidad física se verá afectada por esta variación con mayor o menor intensidad, en función precisamente de la magnitud de los cambios que se operan respecto a la concepción inicial. Así, en nuestro caso, la causalidad determinista llevaba consigo una imagen cinético-corpúscular,²⁷ que es justamente la que entra en crisis con el indeterminismo cuántico. Esto significa que el concepto de materia está ligado en cada momento, con mayor o menor intensidad, según los casos, a las categorías epistemológicas de aprehensión de la realidad física, y no se puede minimizar esta influencia si no queremos alejarnos del verdadero núcleo del problema. Desde este punto de vista, el indeterminismo microfísico traía consigo —junto con otros elementos de la Mecánica cuántica— la necesidad ineludible de investigar una nueva imagen de la realidad física acorde con los niveles de esa misma realidad a que ese indeterminismo se refería. De este modo, se pueden apreciar con claridad dos cosas: por una parte, que la teoría cuántica necesariamente implicaba un cambio profundo en los contenidos e imagen de la Naturaleza, de tal forma que la crisis del determinismo causal no se cerraba sobre sí misma dentro de sus propios límites; y, por otra parte, que esta nueva faceta del problema general de la causalidad y del indeterminismo venía a dificultar aún más la ya complicada posibilidad de un acuerdo entre las posiciones contrapuestas. Precisamente, uno de los motivos por los cuales algunos problemas filosóficos de la teoría cuántica están todavía abiertos es el hecho de no haberse instituido todavía una concepción de la realidad físico-material que asuma

²⁷ Se toma esta denominación de la conocida obra de CAPEK, M., *The Philosophical Impact of Contemporary Physics*, Van Nostrand, Princeton, 1961. Trad. esp.: *El impacto filosófico de la física contemporánea*, Tecnos, Madrid, 1965.

en toda su complejidad los resultados diversos de la Física actual que afectan a los fundamentos de esa realidad. No en vano afirma, por ejemplo, Prigogine, que las consecuencias del principio de indeterminación parecen hoy todavía tan revolucionarias, como hace más de cincuenta años.²⁸

De lo anterior se desprende asimismo cómo las categorías epistemológicas se conectan claramente con los niveles ontológicos. De ahí que más arriba se hiciese una sucinta referencia a la indiscutible implicación ontológica del postulado de razón suficiente en cuanto correlato epistemológico del principio general de causalidad. Así pues, que los principios filosóficos se refieran originariamente a un plano determinado no significa en ningún modo que se aislen en él; antes bien, por el contrario es preciso señalar que, si no se quiere ignorar el conjunto de componentes esenciales que forman parte de un problema filosófico de la magnitud del aquí tratado, las categorías implicadas por tal conjunto se han de conectar recíprocamente, si bien sin confundirlas, ni en su origen inicial ni en su operatividad concreta en el análisis. Fue justamente esto último lo que no se cumplió en el tema que estamos analizando, de ahí la enorme dificultad para hallar alguna vía de acceso de posible solución a las cuestiones planteadas.

En términos generales, las relaciones expuestas entre determinismo, indeterminismo y causalidad, podrían ser representadas según el siguiente esquema:



De ese modo, tanto el indeterminismo como el determinismo, correctamente entendidos, o sea, el indeterminismo relativo al marco propio de probabilidad, y el determinismo como categoría primariamente epistemológica, satisfarían el principio general de causalidad, y por tanto la necesaria racionalidad del conocimiento científico. Así, indeterminismo cuántico no significa caos físico, sino orden causal probabilístico, y significando orden causal satisfaría el postulado de razón suficiente y la subsiguiente exigencia de racionalidad. Obsérvese que, de acuerdo con el esquema propuesto, tanto el determinismo como el indeterminismo serían expresiones del principio de causalidad. Así, este principio ontológico, en función de los niveles de la materialidad física, admitiría conceptualizaciones determinista o indeterminista, sin por ello suponer ninguna ruptura de la causalidad ontológica como tal.

Esta dualidad de categorías epistemológicas, a saber determinismo e indeterminismo, no supone una quiebra de la unidad del conocimiento de la reali-

²⁸ Vid. PRIGOGINE, I., *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*, Freeman, San Francisco, 1980, p. 51.

dad física, o una escisión de la Ciencia como tal. No sería correcta aquí una argumentación contra el indeterminismo en base a una supuesta negación de la unidad estructural de la Naturaleza, o aduciéndose una falta de continuidad y coherencia lógicas en el conocimiento científico. Todo lo contrario, porque justamente existe una vía de conexión desde el indeterminismo al determinismo, o sea, desde el nivel microfísico al macrofísico. Tal instrumento sería el mismo cálculo probabilístico cuando el número de unidades físicas bajo consideración es suficientemente grande. Entonces la probabilidad para una completa determinación de los fenómenos llega a ser cercana a la unidad, y puede decirse que se cumpliría así una relación causal determinista de la Física clásica. Por el contrario, cuando se cambian las condiciones iniciales de tipo epistemológico, afectando de modo esencial a la forma de conocimiento de los objetos, entonces se produce necesariamente una modificación de las categorías epistemológicas de aprehensión y entendimiento de la realidad física. Pero, tal cambio de ninguna manera implica una ruptura de la unidad causal de la Naturaleza en el nivel ontológico, pues ésta sigue siendo causalmente ordenada tanto a nivel determinista como indeterminista. Lo que sucede especialmente es que, al variar profundamente los parámetros que definen lo que se considera la unidad física del mundo material, entonces consecuentemente varían a su vez las categorías epistemológicas de comprensión de la ordenación causal de los fenómenos considerados a dichos diferentes niveles. Pero, como puede comprenderse con facilidad, esto no ha de afectar a la unidad y orden propios de la estructura ontológica de toda la realidad física.

Así pues, la categoría epistemológica indeterminista significa esencialmente dos cosas. Por una parte, que la evolución de los objetos físicos que caen bajo ella no puede conocerse con carácter lineal, es decir, de punto físico a punto físico con precisión absoluta. Esto se debe a que justamente el indeterminismo trae consigo la invalidez de los parámetros físicos —y por consiguiente, los filosóficos derivados— que hacían posible tal definición causal de naturaleza lineal. De ahí que el contenido cognoscitivo sea específicamente estadístico, según cuadros de probabilidad determinados y determinables. Y, por otra parte, que en tales fenómenos así reglados se opera una presencia efectiva de la causalidad física en general, siendo por tanto obsoleto contraponer ésta al indeterminismo en cuanto tal. En definitiva, queda definido un orden intrínseco aunque no sea lineal-puntual en el devenir de dichos fenómenos, los cuales poseen precisamente esos caracteres apuntados.

Es de esta manera cómo la polémica determinismo-indeterminismo puede ser correctamente entendida, pues, desde la interpretación aquí desarrollada no es necesario admitir que la imagen indeterminista no posee racionalidad científica. Antes bien, al satisfacer el postulado de razón suficiente como pauta explicativa necesaria satisface a su vez la exigencia básica de toda racionalidad cognoscitiva. Y ciertamente no podía ser de otro modo, porque, en principio, era absurdo pensar que el inmenso edificio de la Mecánica cuántica fuese una equivocación sin precedentes. A corroborar esto precisamente apuntan los resultados de recientes experimentaciones.²⁹

²⁹ Así las experiencias de A. Aspect, del Instituto de Óptica de Orsay (París), para someter a prueba las desigualdades de Bell, y cuyos resultados inducen a rechazar la conocida crítica de Einstein-Podolsky-Rosen (argumento EPR) a la Mecánica cuántica.

5. CONCLUSION

El debate histórico determinismo-indeterminismo no sólo implicaba contenidos físicos sino especialmente contenidos filosóficos. Estos últimos remitieron a cuestiones ontológicas de fundamentos, cuyo análisis mostraría progresivamente la complejidad filosófica del problema. Se defendía el determinismo por razones de cosmovisión filosófica del mundo físico. Esta cosmovisión identificaba el determinismo con la única forma posible de racionalidad científica, y no atendió las demandas de crítica filosófica promovidas por el cambio de categorías de interpretación implicadas en la imagen determinista derivada de la Mecánica cuántica.

Ahora bien, el determinismo no es un principio ontológico de la Naturaleza sino una categoría epistemológica de aprehensión de la misma a un determinado nivel de consideración, esto es, el nivel macrofísico. Del mismo modo, el indeterminismo resulta ser otra categoría epistemológica adecuada al nivel microfísico. Ambas categorías epistemológicas interpretan válidamente a su determinado nivel el principio ontológico de estructura causal de la Naturaleza, el cual aparece como supuesto de orden interno necesario para toda investigación de la razón científica. De ahí que no sea válida la acusación de falta de racionalidad científica al paradigma indeterminista. El indeterminismo satisface, en su nivel, las características del principio ontológico de causalidad, el cual adquiere su correlato, desde el punto de vista epistemológico, en el postulado de razón suficiente. En tanto en cuanto la Física cuántica, con su paradigma indeterminista, proporciona una explicación válida de los fenómenos, decimos que cumple con las exigencias del postulado de razón suficiente.

El indeterminismo fue incorrectamente entendido como una negación completa de toda determinabilidad, pero esto constituye un error en la medida en que la probabilidad en los fenómenos cuánticos se refiere a un marco definible de valores o, lo que es igual, pueden establecerse objetivamente marcos de probabilidades. Por eso, el paradigma indeterminista no supone un caos en el mundo físico, sino un orden propio, aunque no sea un orden lineal-puntual como en la imagen determinista.

En definitiva, fue especialmente la confusión de planos filosóficos, o sea, los niveles epistemológico y ontológico, una de las causas importantes de una disputa sin término, que estaba conducida desde su mismo origen a una vía sin salida, y todo ello debido, entre otras razones, a un insuficiente y débil planteamiento filosófico. Nuestro análisis ha pretendido mostrar que también en el indeterminismo cuántico se cumple el postulado de que todo fenómeno posee su correspondiente y suficiente razón.³⁰

RAMÓN QUERALTÓ
Universidad de Sevilla
España

³⁰ El término "suficiente" no debe ser entendido aquí como "completo", sino en el sentido de satisfacer el grado de exactitud requerido por los presupuestos de la teoría. Además, sería muy difícil sostener que el conocimiento humano, y por tanto también el conocimiento científico, pudiera proporcionar un conocimiento total y completo sobre sus objetos. La perfectibilidad del conocer es justamente una de sus características permanentes.