

SIGNIFICACION FILOSOFICA DE LA CAUSALIDAD EN LA FISICA CONTEMPORANEA

Ramón QUERALTÓ MORENO

I

Pueden ser consideradas en principio dos nociones diversas acerca del contenido de la idea de causalidad; denominaremos a estas dos nociones causalidad en sentido amplio y causalidad en sentido estricto. La primera se refiere fundamentalmente a la existencia de una relación y una vinculación entre dos fenómenos o estados físicos. La naturaleza de este tipo de relación puede especificarse de muy diversos modos: como «circunstancias que acompañan» a un fenómeno, «datos concomitantes», «fenómenos contiguos» a un estado físico, etc. No se expresa en esta acepción de la causalidad ni la idea de una necesidad intrínseca, ni tampoco la de un determinismo unívoco. Es decir, lo que se quiere significar es la idea de una *dependencia* de un fenómeno con respecto a otro. Esta dependencia viene especificada a través de leyes, o sea, leyes de la naturaleza, que se expresan matemáticamente. En palabras de Max BORN:

«La causalidad postula que hay leyes por las cuales el acontecer de una entidad B de una cierta clase depende del acontecer de una entidad A de otra clase, donde la palabra 'entidad' significa algún objeto físico, fenómeno, situación, o suceso. A es denominada la causa, B el efecto»¹.

1. BORN, Max, *Natural Philosophy of Cause and Chance*, New York, Dover Books, 1964; p. 9. Las monografías sobre el problema de la causalidad son muy numerosas, entre ellas cabría destacar: Richard HONIGSWALD: *Kausalität, en Grundprobleme der Wissenschaftslehre*. Bonn, Bouvier & Co., Verlag,

Obsérvese que no se menciona la naturaleza de esa dependencia entre las entidades físicas. Tan sólo se afirma la existencia de una relación con carácter de dependencia, pero no que dicha dependencia sea unívoca, multívoca, estrictamente determinada, etc. BORN añade además una especificación de marcado interés:

«Si la causalidad se refiere a eventos singulares, tienen que ser considerados los siguientes atributos de la causalidad: el antecedente postula que la causa tiene que ser precedente, o al menos, simultánea con el efecto. La contigüidad postula que la causa y el efecto han de estar en contacto espacial o conectadas mediante una cadena de elementos intermedios en contacto»².

Es de destacar que estas dos precisiones quedan referidas esencialmente al caso de entidades físicas singulares, o sea, objetivables según unidad, así por ejemplo, la noción de partícula física. (Esta aclaración es de suma importancia para el desarrollo posterior del concepto de causalidad).

La noción de causalidad en sentido amplio que se ha descrito no es propiamente la que se aplica en la física clásica, sino que aquí se especifica de manera precisa la naturaleza de esa dependencia enunciada anteriormente, confiriéndole el carácter fundamental de necesidad y determinación unívoca. Entre los fenómenos considerados se afirma por tanto que existe una dependencia necesaria, o sea, que existiendo A necesariamente se ha de dar B, y además que B queda determinado estrictamente como tal B (y no como elementos pertenecientes a la misma clase, B₁, B₂, etc.). A determina B, y no B₁ por ejemplo, aún cuando B₁ sea de la misma índole fundamental que B. Por tanto, en esta concepción de la causalidad no se afirma ya una simple y general idea de dependencia, sino que se delimita estrictamente el contenido y carácter de esa dependencia inicial, implicándose una sucesión invariable de la forma causal.

Una tal acepción de la causalidad autoriza a conectar con ella la idea de predicción. Si dos entidades físicas responden en su relación de dependencia a la causalidad estrictamente considerada, entonces

1965; y Mario BUNGE: *Causalidad. El principio de causalidad en la ciencia moderna*. Buenos Aires, Eudeba, 1972 (3.^a ed.)

2. BORN, *ibid.*

conociendo el conjunto de parámetros que definen A, es posible determinar con exactitud todos los parámetros que hacen posible la definición de B, puesto que B está ligado a A mediante una necesidad y determinabilidad unívoca. El carácter de predicción de los fenómenos o de las situaciones de entidades físicas es un carácter fundamental de todo conocimiento científico, y en la física clásica este carácter se refiere además a la predicción de eventos singularizados. De este modo se tendría una formulación de la noción de causalidad en sentido estricto:

«Sean A y B estados completos de un sistema especificado en los instantes t_1 y t_2 , siendo t_1 anterior a t_2 ; si se realiza A, B lo seguirá con toda seguridad»³.

Importa señalar que un enunciado de este tipo se refiere a un sistema especificado, es decir, que se exige como condición indispensable para la posibilidad de afirmación de una causalidad estricta, el hecho de que las coordenadas de los sistemas o entidades físicas mediante las cuales éstas quedan unívocamente definidas sean perfectamente cognoscibles, o dicho de otro modo, que las entidades físicas sean objetivables. Al mismo tiempo, la idea de causalidad estricta, según el enunciado expuesto, implica la «seguridad» de la existencia del estado B a partir del estado A; esto indica claramente la posibilidad de predicción de B, siempre y cuando ambos estados puedan ser objetivados.

La importancia de la predicción es tan decisiva en la consideración de este tipo de causalidad que a menudo ésta se define en función de aquélla, de manera que causalidad y predicción son términos que se autoimplican:

«Como ley de causalidad en el sentido de la física clásica debe entenderse la afirmación siguiente: del conocimiento de los valores de x y p en un instante t_0 pueden determinarse los valores correspondientes de x y p en un instante posterior. La forma lógica de esta ley de causalidad es la de una implicación, cuya premisa P afirma la existencia en un objeto de valores determinados

3. MARGENAU, Henry, *La naturaleza de la realidad física. Una filosofía de la física moderna*, Madrid, Tecnos, 1970; p. 355.

x_0 y p_0 en un instante t_0 , y cuya conclusión K expresa la posibilidad de calcular los valores correspondientes a un instante posterior»⁴.

El hecho de que la ley de causalidad se exprese lógicamente en forma de una implicación destaca convenientemente la idea de necesidad implícita en la misma. La determinabilidad de las entidades físicas en un instante posterior es la característica que permite identificar una relación causal dentro del ámbito de la física clásica. De aquí que la ley de causalidad haya sido denominada determinismo causal, o simplemente, determinismo. Por determinismo se entiende de este modo aquella concepción por la cual la evolución de la totalidad de los acontecimientos de un sistema físico está contenido ya en el estado previo de dicho sistema, siendo posible así predecir el estado de cualquier sistema mediante el conocimiento de su situación anterior y de las leyes por las que se rige. En este sentido, como apunta SAUMELLS, se puede decir que las leyes de Kepler, por ejemplo, se basarán, desde la visión newtoniana, en el carácter causal de la propia naturaleza:

«He aquí cómo, desde el punto de vista de la mecánica de Newton, la segunda ley de Kepler es una relación matemática que deriva de considerar el movimiento de un planeta como causado por una fuerza determinada. Las leyes de Kepler van a ser fundadas, en última instancia, no en la 'inteligibilidad' de la naturaleza, sino en las causas mecánicas de su funcionamiento. Esta observación es importantísima: el sistema solar obedece en su marcha a ciertas leyes matemáticas, porque sus movimientos son realmente causados por una fuerza gravitacional»⁵.

Se puede afirmar así que el principio de causalidad en la física clásica adquiere su delimitación y configuración más precisas en la idea del determinismo, siendo la consecuencia más característica de éste la seguridad en la predicción de los acontecimientos físicos, o sea, en la evolución del sistema o entidad física considerada:

4. MITTELSTAEDT, Peter, *Problemas filosóficos de la física moderna*, Madrid, Alhambra, 1969; p. 151.

5. SAUMELLS, Roberto, *Fundamentos de matemática y de física*, Madrid, Rialp, 1965 (2.ª ed.); p. 132.

«Para el físico hay determinismo cuando el conocimiento de un cierto número de hechos observados en el instante presente o en los instantes anteriores, junto con el conocimiento de ciertas leyes de la naturaleza, le permite prever rigurosamente que tal o cual fenómeno observable tendrá lugar en tal época posterior. Esta definición del determinismo por la previsibilidad rigurosa de los fenómenos parece la única que el físico puede aceptar, porque es la única realmente verificable»⁶.

En la base de tal concepción de la causalidad se encuentra la creencia en la existencia de unas leyes de la naturaleza a las cuales se ajustan los fenómenos de una forma ineludible.

Ahora bien, tal contenido de la causalidad expresado por el determinismo conlleva algunos presupuestos fundamentales sin los cuales no sería aplicable. Estos presupuestos son de la máxima importancia para entender la evolución posterior de la idea de causalidad con la aparición de la teoría cuántica. En primer término se halla la objetivabilidad de las entidades físicas, o sea, la posibilidad de considerarlas como «individuos» físicos perfectamente definidos y delimitados. Ya anteriormente se ha llamado la atención sobre el hecho de que la noción de causalidad en física clásica implica la condición de que los sistemas o entidades físicas deben poder ser especificados, es decir, definidos unívocamente, y por tanto identificados exactamente. Se parte siempre de que los valores correspondientes a un fenómeno pueden ser determinados con todo rigor en el instante t_1 y en el instante t_2 , afirmándose así la existencia de parámetros que definen con exactitud el objeto u objetos en observación. Todo esto implica la consideración de las entidades físicas como entes perfectamente objetivables y a los que es posible aplicarles la categoría de individualidad. En todo momento se podría localizar exactamente a los objetos físicos en el marco del espacio y del tiempo, suponiéndose además la permanencia temporal y la constancia de las propiedades de dichos objetos.

Este presupuesto de la objetividad se legitimaba en el ámbito de la física clásica dado que la experiencia confirma la posibilidad de

6. BROGLIE, Louis de, *Continuidad y discontinuidad en física moderna*, Madrid, Espasa-Calpe 1957; p. 59.

seguir con exactitud las trayectorias locales de las partículas en el decurso temporal, pudiendo así definir las localizaciones sucesivas del movimiento de las partículas. Los corpúsculos materiales eran perfectamente diferenciables ya que cada uno venía caracterizado por su intrínseca individualidad. Así, la noción de partícula o entidad física individual es uno de los presupuestos esenciales de la física clásica, y por tanto de la idea de causalidad subyacente a ella:

«Esta ordenación y reunión de los sucesos que se siguen uno a otro en el tiempo, con la ayuda de la categoría de la causalidad, tiene como consecuencia que las variaciones temporales de los objetos de la experiencia suceden en forma causal. Mediante esto es posible asignar una individualidad a estos objetos. Debe entenderse aquí como individualidad la posibilidad de reconocer a un objeto determinado como él mismo en cada tiempo»⁷.

Así, la unión del concepto de causalidad con la idea de la individualidad de los objetos es algo que se presupone en la formulación de las leyes de la física clásica. La objetividad es un presupuesto fundamental de la noción de causalidad determinista.

Otro presupuesto implícito del determinismo es la idea de continuidad. Cuando se indica la posibilidad de predicción de un sistema observable desde un instante t_0 a otro t_1 subyace la concepción de una evolución continua de los fenómenos físicos en el curso temporal. Se supone que entre los dos instantes t_0 y t_1 no existe tipo de «vacío» espaciotemporal, implicándose una perfecta continuidad de los fenómenos. Las magnitudes que definen los diversos estados de los sistemas pueden tomar cualesquiera valores, de ahí su previsibilidad absoluta, no siendo necesario ningún intervalo, por mínimo que fuera, para la propagación del fenómeno en observación. Los sucesos se producen conectados causalmente sin que entre ellos medie ningún elemento cuantitativo que originara una separación entre los mismos.

De aquí que en principio no se indique ninguna clase de limitaciones a la posibilidad de predicción de los fenómenos de manera exacta y rigurosa. Consideremos por ejemplo un sistema físico de N partículas, y sean las coordenadas de una partícula cualquiera del

7. MITTELSTAEDT, *o. c.*, p. 145.

mismo x_i, y_i, z_i ; tales coordenadas serán funciones del tiempo t . Podemos escribir ecuaciones del sistema en forma newtoniana del siguiente modo

$$m \frac{d^2 x_i}{d t^2} = F_{ix}(t) ; \quad m \frac{d^2 y_i}{d t^2} = F_{iy}(t) ; \quad m \frac{d^2 z_i}{d t^2} = F_{iz}(t)$$

Estas ecuaciones constituirán una expresión matemática del sistema considerado que serían aceptadas dentro del ámbito de la física clásica. Ahora bien, tales ecuaciones diferenciales suponen que las coordenadas definitorias pueden ser diferenciadas, al menos dos veces; pero por la índole misma del cálculo diferencial se supone la continuidad de los fenómenos a los cuales se aplican dichas ecuaciones. O sea, como dice el conocido proverbio: «natura non facit saltus».

Así pues, cualquier estado del sistema físico en cuestión puede ser conocido con exactitud en cualquier instante temporal elegido para su medida; no existen límites en la naturaleza para esta posibilidad de predicción, ya que en cada instante el sistema tiene unos parámetros exactamente definibles y cognoscibles debido a su desarrollo causal en rigurosa continuidad de unos instantes a otros.

La causalidad, entendida al modo determinista, presupone necesariamente la continuidad de los fenómenos, y ello se muestra además en el tipo de ecuaciones matemáticas que la expresan. Como explica P. MITTELSTAEDT:

«La secuencia sucesiva de percepciones da constancia solamente de que el estado de una cosa varía con el tiempo. Con ello no se concreta aún la sucesión temporal de estos estados, o en todo caso, la sucesión objetiva de los distintos estados. Pues el tiempo en sí no puede percibirse y de este modo determinar empíricamente la sucesión en los objetos. Esta determinación se efectúa más bien desde el punto de vista de una sucesión causal de los sucesos. Con ello se entienden éstos como que se suceden estrechamente uno al otro en el tiempo, es decir, sucesos conectados de forma continua. La utilización de la categoría de la causalidad a los fenómenos está, pues, estrechamente enlazada a una cierta continuidad de los sucesos que se presenten»⁸.

8. *Ibíd.*, p. 144.

Por tanto, se puede concluir que el principio de causalidad determinista conlleva necesariamente la idea de que la naturaleza actúa sin «saltos», de forma continua, siendo posible la predicción de los fenómenos en instantes cualesquiera, sin ninguna limitación que proviniera del fenómeno en cuestión.

Se ha descrito de manera breve la noción de causalidad determinista y los presupuestos esenciales que acompañan a dicha noción. Se podría profundizar convenientemente en la exposición de tales presupuestos, pero esto implicaría una extensión excesivamente larga de esta primera parte de nuestro trabajo que, en principio, excedería de los límites del mismo, debido a que lo que nos interesa fundamentalmente es preparar de forma adecuada la comprensión de la evolución que ha originado en la concepción de la causalidad la teoría cuántica y la problemática inherente a tal evolución. Con esta finalidad cabe resumir que el principio de causalidad imperante en la física clásica implica un modelo determinista de la naturaleza, donde todos los acontecimientos están necesariamente conectados mediante un conjunto de leyes que definen en cualquier instante la situación del sistema físico considerado. Es importante subrayar el elemento de necesidad implícito en dicha concepción determinista, así como la univocidad en la posibilidad de predicción, pues son los dos factores que mejor caracterizan la evolución final a que llegó esta idea y de la que puede ponerse como modelo la conocida imagen del «genio» de LAPLACE.

Asimismo se ha de destacar que los presupuestos esenciales de esta concepción determinista son la objetividad de los fenómenos y su continuidad fundamental. La primera supone que en todo momento pueden individualizarse los sucesos mediante su definición matemática con parámetros observables; la segunda implicaría que en el acontecer de la naturaleza no existen «saltos» temporales ni espaciales, sino continuidad esencial. (También indicaría la negación de la acción a distancia, de la que ni siquiera MAXWELL llegó a desprenderse a pesar de sus descubrimientos fundamentales sobre el campo electromagnético; pero en este punto no entramos aquí al ser suficientemente expreso y no incidir directamente en nuestro cometido).

A continuación veremos la evolución que toma este determinismo causal con el desarrollo de la física cuántica.

II

La interpretación usual de la teoría cuántica es fundamentalmente indeterminista. Ahora bien, el término indeterminismo debe ser convenientemente clarificado, para excluir extrapolaciones de su contenido que no se deducen del intrínseco significado de esta noción. A establecer el sentido preciso de la concepción indeterminista de la física cuántica se dedicará la exposición que sigue.

Los dos factores que han contribuido a este cambio de perspectiva son el descubrimiento del *quantum* elemental de acción, h , y el principio de incertidumbre enunciado por HEISENBERG. La constante h indica que la energía se emite o se absorbe no en forma continua sino en cantidades bien definidas, es decir, que hay unos valores específicos para las manifestaciones energéticas, siendo la constante cuántica h la mínima cantidad posible y todos los demás valores múltiplos enteros de ella. Esto trae como consecuencia la puesta en cuestión del presupuesto de la continuidad de la materia, que se ha expuesto en el párrafo anterior. Según la idea de PLANCK la naturaleza efectúa sus cambios elementales a través de «saltos» discretos; esta idea fue confirmada en la práctica posteriormente de manera esclarecedora. El valor de h es por tanto indivisible, no pudiendo existir cantidades de energía por debajo de él. Así pues, con el *quantum* elemental de acción se admitía la existencia de discontinuidades fundamentales en la naturaleza, definiéndose valores específicos para tales discontinuidades de la energía a través de la fórmula $E=h.n$; con la introducción de la constante universal las posibilidades de predicción de los fenómenos se veían restringidas a los valores definibles a través de las cantidades discretas de energía.

No obstante, la crítica más decisiva a la idea de causalidad determinista se produjo con el principio de incertidumbre, el cual establece que no es posible conocer con exactitud la posición y el momento de una partícula de modo simultáneo, pues a mayor precisión en el conocimiento de una de las magnitudes, mayor imprecisión en el conocimiento de la otra. Por tanto, tan sólo se puede determinar con exactitud una de las dos, renunciando a la otra; si Δx es la incertidumbre que acompaña a la medida de la componente según x del

vector de posición, y Δp_x la correspondiente magnitud para el vector cantidad de movimiento, ocurre según HEISENBERG que

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h \quad (A)$$

Esto implica que el conocimiento de un estado actual de un sistema no puede hacerse con la precisión determinista que imaginaba LAPLACE, y por tanto que dicha imprecisión condicionará del mismo modo nuestro conocimiento de estados futuros. Así pues, la concepción de un «estado en un instante específico» pierde su preciso significado anterior.

El principio de incertidumbre no se refiere únicamente a las magnitudes posición y momento, sino también a la energía y al tiempo, en esta segunda formulación:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h \quad (B)$$

Con lo cual, si la formulación (A) impedía la localización precisa de una partícula en el espacio, (B) implica la imposibilidad de localización temporal. Si definimos con exactitud la energía, se pierde la referencia a un instante determinado, y si se especifica dicho instante, el valor energético de la partícula no se podrá precisar. Con estas dos primeras formulaciones del principio de incertidumbre se muestra la imposibilidad de predicción de los valores que definen un sistema físico de forma fundamental, así la posición, la velocidad, la energía, y la ubicación en el decurso temporal.

Finalmente, existen otras formulaciones del principio de incertidumbre, por ejemplo las referidas al movimiento circular; las variables son, por una parte el momento y posición angulares, y por otra, el momento de inercia y la velocidad angular:

$$\Delta A \cdot \Delta \gamma \geq h \quad (C) \quad ; \quad \Delta I \cdot \Delta \omega \geq h \quad (D)$$

De esta manera se completa la indeterminación de las partículas en los diversos tipos de movimiento que les pueden ser asignados.

Obsérvese que con las diversas formas del principio de incertidumbre se imposibilita el conocimiento exacto de las magnitudes que pueden especificar un sistema físico, con lo cual falla el primer re-

quisito de la idea determinista, es decir, que sea posible definir el estado de un sistema con precisión; si esto no es posible, tampoco lo será el conocimiento exacto del mismo en un instante posterior de su evolución. No es posible la determinación unívoca de una entidad física en un instante determinado, ya que si se cuenta con una precisión en la coordenada temporal, entonces se encontrará una incertidumbre fundamental en la definición de la energía. El mismo razonamiento puede hacerse de otras cantidades que definen un sistema físico de acuerdo con las concepciones de la física clásica. De este modo se pone de manifiesto que las variables definitivas son variables conjugadas, no siendo posible un conocimiento exacto de las mismas de manera simultánea.

Se podría aducir que el principio de incertidumbre no se refiere esencialmente a la naturaleza misma sino a nuestro modo de referirnos a ella, y que por tanto, se debe especialmente a una imperfección técnica de los aparatos de medida, los cuales podrán ser perfeccionados en el futuro desapareciendo así la incertidumbre. Pero esta interpretación del principio de HEISENBERG no parece correcta si se tiene en cuenta la significación universal de la constante de Planck, pues únicamente utilizando aparatos de medida que pudieran operar con magnitudes cuyos valores estuvieran muy por debajo de dicha constante, se podría eliminar la acción perturbadora de la observación. La cuestión radica en que para observar sistemas microfísicos es necesario utilizar elementos del mismo orden de magnitud que los que definen el sistema, produciéndose una interacción sistema-aparato que imposibilita el conocimiento del sistema antes de la aplicación de la medida. De aquí que únicamente utilizando magnitudes muy inferiores a la constante universal de acción se pudiera desprestigiar el efecto de esa interacción. Ahora bien, si se admite el valor universal y la realidad del *quantum* universal se ha de concluir que esto no es posible.

De otra parte, la interacción sistema-aparato no es más que un caso de interacción física en general, y no el único. Con ello se significa que el fenómeno de la interacción es algo que pertenece intrínsecamente al mundo físico, y esta interacción en todo instante viene dominada por la constante de PLANCK. Es así que la magnitud h es indivisible, luego ineludiblemente se ha de aceptar la realidad de la indeterminación a nivel cuántico. O sea, que ésta se sustenta en último

término en la validez universal del *quantum* elemental de acción. Y esta magnitud es independiente de cualquier tipo de observación, es decir, no depende de nuestras formas de acceso a la realidad física ni de los medios técnicos empleados en la misma. Como afirma MILIC CAPEK:

«El átomo de acción de PLANK es una constante universal, independiente de cualquier observador e invariante desde el punto de vista relativista; apenas hay quien afirme que su aparición en los datos empíricos es producida por una intervención del observador. Si consideramos la acción como realidad física fundamental, entonces, en una reflexión más minuciosa, se hará evidente que la realidad de los corpúsculos claramente localizados, dotados de valores instantáneos precisos de momento y energía, debe ser negada»⁹.

Por tanto, admitida la realidad invariante del *quantum* elemental, se puede justificar objetivamente el principio de incertidumbre. No se trata ya de un efecto perturbador de nuestros medios técnicos de medición sino de la validez universal de la constante *h*. Como apunta ROSENFELD:

«Nos encontramos así delante de una situación epistemológica particular, que no resulta de nuestra propia elección, sino que nos es impuesta como consecuencia directa de la existencia del *quantum* de acción»¹⁰.

En cuanto a la posibilidad de encontrar experimentalmente una reducción de la magnitud de la constante de PLANCK, se ha de decir que es posible admitirla teóricamente como una hipótesis aventurada, pues la cantidad de experiencias acumuladas en su favor y el conjunto de sus comprobaciones empíricas, así como su coherencia con las teorías físicas, proporciona una evidencia tal que puede considerarse suficiente confirmado dicho *quantum* elemental.

Ahora bien, admitida la validez del principio de incertidumbre se

9. CAPEK, Milic, *El impacto filosófico de la física contemporánea*, Madrid, Tecnos, 1965; p. 310.

10. ROSENFELD, L, *Considérations non philosophiques sur la causalité en physique*, en *Les théories de la causalité*, Paris, PUF, 1971; p. 142.

deduce una indeterminación fundamental en la naturaleza a escala microfísica. No es posible predecir el comportamiento de entidades físicas con toda exactitud, en tanto que no es posible determinar unívocamente el estado de un sistema, ni en el instante t_1 ni en el t_2 , requisitos indispensables del determinismo clásico. Esta indeterminación, según expone Pascual JORDAN, pertenece a la naturaleza misma:

«Los límites que imposibilitan la observación 'ideal', es decir, una observación que no influyera para nada en el objeto observado, arraigan, en virtud de la estructura atómica del sustrato físico, en la naturaleza misma de las cosas; de modo que nos vemos obligados a atribuir a los objetos atómicos un cierto carácter de 'indeterminación', de 'indefinibilidad' de su comportamiento físico, que impide el trazado de una imagen objetiva del acaecer atómico»¹¹.

Con la aserción de la indeterminación fundamental que radica en la naturaleza microfísica la causalidad determinista queda profundamente restringida en el ámbito de la teoría cuántica, acuñándose el término de causalidad probabilística, dado que las leyes a nivel microfísico son esencialmente estadísticas. Lo que se obtiene es una probabilidad de que las partículas o los sistema físicos evolucionen de una u otra manera, enunciándose la posibilidad matemática de que se produzca una cosa u otra.

Igualmente, considerando la función de onda es precisa la siguiente puntualización de J. ULLMO:

«Un sistema particular puede presentar en el curso de una observación valores propios de un observable, sin determinarlos. Bohr habla de diversas posibilidades constantemente presentes en el sistema y de las cuales, mediante la observación, se actualiza solo una. El *principio de superposición* expresa la misma idea: la función de onda al poderse descomponer siguiendo los términos de uno cualquiera de sus desarrollos en serie, hace que el estado actual contenga en sí cada uno de los diferentes estados que revelará una medición y que, a continuación, simbolizará la onda reducida»¹².

11. JORDAN, Pascual, *La física del siglo XX*, México, FCE, 1969; p. 120.

12. ULLMO, Jean, *La crisis de la física cuántica*, Buenos Aires, Columba, 1966; pp. 46-47.

Es decir, que dentro de la definición de un sistema físico existe la posibilidad de evolución en una u otra dirección, la cual sólo será cognoscible cuando en verdad se haya operado, no siendo posible su predicción exacta con anterioridad. Fenómenos empíricos que por ejemplo corroboran esta conclusión son la desintegración radiactiva y la incidencia de un rayo de luz linealmente polarizado en un prisma de Nicol¹³.

Se concluye por tanto que la idea de una determinabilidad unívoca de los fenómenos físicos, según la concepción de la física clásica, no es posible en el nivel microfísico; con esto pierde valor la aserción fundamental de la idea de causalidad determinista, tal como se describió en el párrafo precedente.

Pero se enunciaron también dos presupuestos fundamentales que acompañaban a dicha idea determinista, la objetivabilidad y la continuidad. Ya se ha indicado con anterioridad que la primera no es posible sostenerla en la nueva física. En efecto, por las cuatro formulaciones anteriores del principio de incertidumbre se deduce la imposibilidad de determinar individualmente los corpúsculos materiales o partículas, ya que no pueden ser definidos con rigurosa exactitud. En la física clásica se atribuía individualmente a las entidades físicas porque eran perfectamente determinables las magnitudes correspondientes que las definían: velocidad, posición, momento angular, energía en un instante t , etc. Pero estas magnitudes son, en el nivel cuántico, variables conjugadas que no es posible determinar simultáneamente con exactitud; si no es posible determinar con rigor las magnitudes que definen una partícula individualizada, ¿cómo poder suscribir la individualidad u objetivabilidad de la misma? Es decir, se hace insostenible la aplicación de la categoría de individualidad a las entidades físicas en el nivel microfísico. De aquí que se denominen a los objetos cuánticos objetos «impropios». HEISENBERG clarifica convenientemente la inobjetivabilidad de las «partículas»:

«Las partículas de la materia, en las cuales originariamente se pensó como última realidad objetiva, no podemos en modo alguno considerarlas ya 'en sí'. Se sustraen a toda fijación objetiva en

13. Véase una descripción detallada en CAPEK, *o. c.*, p. 312 ss.; y JORDAN, *o. c.*, p. 102 ss.

espacio y tiempo, de tal manera que en definitiva podemos hacer objeto de la ciencia solamente a nuestro conocimiento de estas partículas»¹⁴.

Y concretando más específicamente la cuestión:

«Según su esencia no es una estructura material en el espacio y el tiempo, sino en cierto grado solamente un símbolo, en cuya introducción las leyes de la naturaleza adoptan una forma especialmente sencilla. La teoría atómica de la física moderna se diferencia esencialmente de la atomística antigua en que no tolera la formación de un concepto del mundo ingenuamente materialista»¹⁵.

No es posible por tanto la aplicación de la objetivabilidad a las entidades físicas en la teoría cuántica. El concepto de partícula, como dice HEISENBERG, no es más que un símbolo para significar una entidad que en principio no puede considerarse «en sí». Las consecuencias filosóficas de esta inaplicabilidad de la categoría de individualidad quedan claramente reflejadas por MITTELSTAEDT:

«Si se quiere, no obstante, también en la teoría cuántica, referir todas las propiedades en algún sentido a una sustancia, se demuestra que esto no es posible. Entonces, basándonos en las condiciones físicas, con las cuales solamente se pueden obtener resultados a medidas, es imposible determinar experimentalmente en un sistema todas las propiedades, sin que este sistema varíe, de modo que tampoco es posible interpretar los resultados de las medidas correspondientes como accidentes de una sustancia. Pero además tampoco es posible hipotéticamente referir todas las propiedades a un objeto, incluso cuando no se han determinado de forma experimental, porque de lo contrario se llega a contradicciones con la lógica y el cálculo de probabilidades. En relación con la totalidad de las propiedades medibles, ya no es, pues, aplicable el concepto clásico de sustancia ni el correspondiente concepto de cosa. Los sistemas físicos, cuando se les quiere considerar como portadores de todas las propiedades, de-

14. Cfr. Eckart HEIMENDHAL, *Física y Filosofía*, Madrid, Guadarrama, 1969; p. 182.

15. *Ibíd.*, p. 249.

bido a lo objetividad de éstas, deben ser considerados solamente como 'objetos impropios'¹⁶.

El concepto de cosa no es aplicable a las realidades físicas cuánticas, o sea no es posible hablar de determinación unívoca de individualidades físicas, con lo que el presupuesto de la objetividad del determinismo clásico queda desplazado en la física actual. La determinada concepción filosófica de sustancia que subyacía en tal aserción es, asimismo, rechazada desde este punto de vista.

SCHRÖDINGER proporciona, finalmente, la condición cuantitativa para que sea posible hablar de partículas o entidades físicas individualizadas inequívocamente:

«La siguiente es la condición cuantitativa para que se desarrollen 'cadenas', que puedan pasar por individuos y sugieran el concepto de partícula: el producto del impulso p y la distancia media l entre partículas cercanas debe ser bastante grande comparado con la constante de PLANCK, h : $p \cdot l \gg h$ »¹⁷.

De nuevo se pone de manifiesto el límite absoluto impuesto por el *quantum* universal de acción, ya que según la fórmula expuesta se toma como valor referente para la aplicabilidad del concepto de partícula. Obsérvese asimismo que en el texto no se afirma la existencia real de corpúsculos, sino tan sólo la condición para que se pueda «sugerir» tal concepto; igualmente es sumamente cautelosa la frase «que puedan pasar por individuos», pero no que lo sean realmente. Por eso, SCHRÖDINGER aclara finalmente:

«Se trata, en realidad, de que las partículas no son individuos que puedan confundirse o revolverse. Tales aseveraciones carecen de sentido»¹⁸.

Hasta ahora se ha tenido en cuenta tan sólo las consecuencias que se derivan del principio de incertidumbre, pero hemos de referirnos,

16. MITTELSTAEDT, o. c., p. 140.

17. SCHRODINGER, Erwin, *¿Qué es una partícula elemental?*, en *¿Qué es una ley de la naturaleza?*, México, FCE, 1975; p. 189.

18. *Ibíd.*, p. 191.

aunque sea brevemente, a la dualidad onda-corpúsculo, con lo cual se complementa adecuadamente este punto de la no individualidad de las entidades físicas en el nivel cuántico. El hecho es lo suficientemente conocido y no se incidirá excesivamente en su descripción: la materia fenoménicamente se manifiesta unas veces con propiedades corpusculares y otras veces mediante caracteres ondulatorios; ahora bien, los conceptos de corpúsculo y onda expresaban entidades contrapuestas en el ámbito de la física clásica, y sin embargo dicha manifestación dual es una experiencia comprobada por la física actual de manera concluyente. Esto implica que las caracterizaciones de las entidades físicas bajo el aspecto corpuscular u ondulatorio resultan marcadamente insuficientes, o sea, que los conceptos de partícula y onda no describen con objetividad la realidad física. Que una misma entidad física, por ejemplo, el electrón, considerado tradicionalmente como partícula, manifieste caracteres ondulatorios induce a considerar que la realidad denominada bajo ese término no es adecuadamente expresada por ninguno de los dos conceptos, partícula y onda. Con lo cual se apunta claramente a que la conceptualización que la física clásica e incluso la teoría cuántica —ya que ésta utiliza constantemente dicha conceptualización— emplean para la aprehensión de la naturaleza no responde a la verdadera índole de ésta. Se impone, pues, el estudio de una nueva manera conceptual de afrontar la investigación física, desechando prejuicios filosóficos y reminiscencias anteriores¹⁹. Con el desarrollo de la teoría cuántica todo parecía indicar que se produciría esta revisión crítico-conceptual, pero hasta el momento no ha sido hecha²⁰.

No obstante todo lo dicho hasta ahora creemos oportuno considerar aquí el conjunto de ideas de la llamada «Escuela de París» que al lado de Louis DE BROGLIE ha reunido físicos tan relevantes como LOCHAK, BOHM, etc., los cuales explicarían la indeterminación cuántica a través de la existencia de un nivel subcuántico determinista que interaccionaría con el nivel cuántico produciendo dicha indeterminación. Se trata por ahora de una teoría que intenta reducir la incertidumbre de HEISENBERG, incluso hasta cero, confiriendo nuevamen-

19. Al respecto es esclarecedor el análisis de CAPEK, *o. c.*, p. 297 ss.

20. Una relación sumaria de sus causas en ULLMO, *o. c.*, p. 49 ss.

te individualidad a las partículas, todo lo cual implicaría la divisibilidad del *quantum de acción*²¹.

Examinando la idea de un nivel subcuántico, continuo y causalmente determinado, nos parece encontrar una posible contradicción consistente en que si dicho nivel responde a un modelo determinista, ¿cómo sería posible que el nivel cuántico manifieste relaciones de incertidumbre? БОММ, por ejemplo, admite la validez de la teoría cuántica en su dominio específico, pero supone que el nivel subcuántico «produciría» relaciones de incertidumbre en su interacción con el nivel cuántico. Ahora bien, ¿cómo sería esto coherente desde un punto de vista lógico? Obsérvese que la indeterminación cuántica es coherente con la causalidad hallada en la Macrofísica, debido a que las leyes estadísticas al aplicarse a grandes magnitudes permiten una predictibilidad elevada que ocasiona un margen de error perfectamente despreciable, con lo que las leyes de la Macrofísica siguen siendo válidas. Es decir, la indeterminación cuántica no se contradice con las leyes obtenidas en niveles de la realidad física de grandes magnitudes, siendo posible enlazar ambas sin contradicción lógica. Pero lo que se propone a través de la hipótesis del nivel subcuántico es el paso inverso: de un nivel inferior determinado a un nivel superior indeterminado: ¿Cómo sería posible esta aserción?, ¿qué postulados lógicos podrían ser aplicados para su demostración en la investigación

21. En la actualidad estamos realizando un trabajo sobre esta interpretación de la teoría cuántica que aparecerá próximamente. La cuestión se encuentra ya planteada por Louis de BROGLIE en *La physique quantique restera-t-elle indeterministe*, Paris, Gauthier-Villars, 1953. Asimismo son fundamentales para el estudio del problema, David БОММ, *Causalidad y azar en la física moderna*, México, UNAM, 1959 (con un importante prólogo de De Broglie); del mismo autor, *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of «hidden» variables*, *Physical Review*, 85, 1952. J. P. VIGIER, *Structura des micro-objets dans l'interprétation causale de la théorie des quanta*, Paris, Gauthier-Villars 1956 (con prólogo de De Broglie). J. ANDRADE E SILVA y G. LOCHAK, *Los cuantos*, Madrid, Guadarrama, 1969 (con una interesante bibliografía al final). También la obra colectiva, *Física cuántica y realidad*, Madrid, Norte y Sur, 1964. Entre las obras de Louis de BROGLIE hay que destacar, *La théorie de la mesure en mécanique ondulatoire (interprétation usuelle et interprétation causale)*, Paris, Gauthier-Villars, 1957; *Etude critique des bases de l'interprétation actuelle de la mécanique ondulatoire*, Paris, Gauthier-Villars 1963; *Nouvelles perspectives en microphysique*, Paris, Albin Michel, 1956.

físico-natural? Las leyes estadísticas de la mecánica cuántica son compatibles con las leyes estructurales de la Macrofísica, pero ¿de qué forma podría hacerse compatible un determinismo subcuántico con un indeterminismo cuántico?

De otra parte, una objeción grave a esta teoría radica a su vez en la suposición explícita de la divisibilidad del *quantum* de acción de PLANCK, lo cual implicaría unas consecuencias imprevisibles para las teorías físicas. Ya se ha señalado anteriormente que la constante h es universalmente admitida y ha sido comprobada experimentalmente, de aquí que la hipótesis de un nivel subcuántico continuo sea una idea que contradice todo el conjunto de experiencias fundamentales de la teoría cuántica. Incluso SCHRÖDINGER, que no era partidario del indeterminismo fundamental en el nivel cuántico, no oponía serias objeciones a la universalidad del *quantum* de acción. Y admitiendo el valor universal de éste, se hace prácticamente imposible hablar de relaciones deterministas. De la misma manera que la física cuántica originó un cambio esencial en las concepciones físicas y una revisión profunda de postulados metodológicos, la consideración de un nivel subcuántico podría implicar una reformulación a fondo de la actual Microfísica, pero no un retorno a concepciones y categorías de la Macrofísica, lo cual puede ser considerado como una extrapolación en el orden metodológico. Igualmente que la teoría cuántica es coherente con las leyes de la física clásica, es exigible una coordinación lógico-conceptual entre una física subcuántica y la presente, pero no una ruptura decisiva como significaría la divisibilidad del quantum de acción y la continuidad. O sea, la hipótesis de un nivel subcuántico y una descripción fundamentada en parámetros ocultos deben tener en cuenta las ideas básicas de la actual física, y no intentar extrapolar conceptos de niveles físicos superiores, sobre todo, si esto implica una contradicción o incoherencia lógicas.

De todo lo dicho anteriormente, y retomando el hilo de nuestra exposición, se puede obtener la conclusión de que el concepto de partícula es inadecuado para la expresión objetiva de la realidad física. Ahora bien, el concepto de partícula, es decir, de entidad física individualizada y objetivable era un presupuesto fundamental de la idea de causalidad determinista, por lo que esta idea de determinismo causal llega a ser profundamente problemática.

El segundo presupuesto estudiado de la idea de determinismo fue

el de la continuidad. Naturalmente, dicho concepto también queda afectado notablemente por la teoría cuántica, dado que la base esencial de ésta es la idea expresada por el *quantum* elemental de acción, o sea, la discontinuidad en la emisión de energía, la cual ha dado como modelos atómicos imágenes del átomo que quedan transformadas por dicha discontinuidad, es más, donde la idea de discontinuidad es la clave de tal modelo —así por ejemplo, el átomo de BOHR—. La continuidad de los fenómenos físicos implícita en los postulados deterministas de la física clásica es asimismo negada desde la física cuántica. Si se acepta la constante de PLANCK como una realidad con validez universal, no es posible sostener el presupuesto de la continuidad, si bien la teoría del campo unitario de EINSTEIN se instrumenta con un trasfondo continuista²², pero en una forma diferente la que aquí queremos significar.

El siguiente texto de SCHRÖDINGER aclara suficientemente la cuestión:

«Es este hábito de pensamiento el que debemos rechazar. No debemos admitir la posibilidad de una observación continua. Las observaciones deben ser consideradas como acontecimientos discretos, separados los unos de los otros. Entre ellas hay lagunas que no podemos colmar. Hay casos en los que trastornaríamos todo si admitiéramos la posibilidad de una observación continua. Por eso he dicho que lo mejor es no considerar una partícula como una entidad permanente, sino que más bien hay que ver en ella un acontecimiento instantáneo. Algunas veces estos acontecimientos forman cadenas que dan la ilusión de ser objetos permanentes, pero esto no sucede sino en circunstancias particulares y durante un período de tiempo extremadamente corto en cada caso particular...»²³.

El presupuesto de la continuidad de los fenómenos físicos se convierte en una imagen macroscópica compuesta de un sinnúmero de mínimas discontinuidades microscópicas, produciendo el efecto de una cadena permanente en las observaciones, pero tal imagen no respon-

22. Véase CAPEK, *o. c.*, p. 324 ss.

23. SCHRÖDINGER, Erwin, *Science and Humanism. Physics in our time*. Cambridge 1951; en Robert BLANCHE, *El método experimental y la filosofía de la física*, México, FCE, 1972 (antología de textos) pp. 454-455.

de de hecho a la auténtica realidad del comportamiento elemental de los sistemas físicos.

Así pues, la idea de causalidad determinista es profundamente transformada por la física actual. La noción de predictibilidad unívoca queda reducida a una dispersión probabilística de estados posibles, con lo que el determinismo clásico se restringe de manera significativa. Asimismo, los presupuestos básicos de objetividad y continuidad no pueden obtenerse debido a la constante de PLANCK y al principio de incertidumbre.

III

La primera conclusión que se deduce lógicamente de todo lo anteriormente tratado es que la idea del determinismo clásico no puede ser sostenida dentro del contexto de la investigación físico-natural. Los presupuestos que la informaban, tales como la exacta localización individual de las entidades físicas y la continuidad de las mismas, han sido desplazadas en la física actual. Es cierto que la hipótesis subcuántica postula la existencia de un nivel determinista, pero dicho nivel difícilmente podría ser explicado a través de la idea de un determinismo laplaciano; los mismos físicos defensores de esta teoría apuntan esta posible restricción²⁴.

La magnitud del *quantum* elemental de acción se muestra como un límite decisorio, tanto en el aspecto de la continuidad como en el de la objetividad de las entidades físicas. Esto indica que la determinación unívoca de la materia no puede afirmarse en la actualidad, siendo el espectro de posibilidades más amplio que en la física clásica; como puntualiza W. STROBL:

«No radica en la esencia del nexo causal el estar 'legalmente' determinado a ser así y no de otra manera de una vez para siempre; como tampoco pertenece esencialmente a la legalidad el necesitar del dinamismo y energía causales, es decir, de una transmisión de acción para realizarse»²⁵.

24. Véase ANDRADE E SILVA y LOCHACK, *o. c.* (21, p. 206 ss.

25. STROBL, Wolfgang, *La realidad científica y su crítica filosófica*, Pamplona, EUNSA, 1966; p. 119.

Ahora bien, ¿qué idea fundamental acerca de la causalidad subyace hoy en la física?, ¿ha desaparecido de ella el principio de causalidad? A esta última cuestión es necesario responder negativamente, y la razón de ello sólo podrá ser entendida respondiendo adecuadamente a la primera cuestión.

La negación de la causalidad implicaría una negación de la dependencia fundamental de unos fenómenos respecto de otros en el acaecer físico, pero esta dependencia en ningún modo es rechazada dentro de la física actual, pues si así fuera imposibilitaría la racionalidad científica y el postulado intrínseco de cualquier actividad investigadora. Como apunta Max BORN, recogiendo la distinción hecha al comienzo de este trabajo:

«No la causalidad, propiamente entendida, es eliminada, sino solamente una interpretación tradicional de la misma, consistente en su identificación con el determinismo. He tenido cuidado en mostrar que estos dos conceptos no son idénticos. La causalidad en mi definición es el postulado de que una situación física depende de otra, y la investigación causal significa el descubrimiento de tal dependencia. Esto es verdadero también en la física cuántica a pesar de que los objetos de la observación para los cuales es reclamada una dependencia son diferentes: son probabilidades de eventos elementales, y no estos mismos eventos simples»²⁶.

Por tanto, la idea de causalidad como dependencia fundamental entre los fenómenos y situaciones físicas es afirmada en la física actual, pero lo que no se admite es que la naturaleza de esta dependencia sea determinista. Afirmada la dependencia de las entidades físicas, queda restablecida asimismo la racionalidad científica, si bien un tipo de ella difiere notablemente de la racionalidad clásica, pero no por eso menos rigurosa o válida. En el universo de la física actual todo acontecimiento presente está indudablemente causado por las condiciones precedentes que lo informan, pero no necesitado esencial y unívocamente por su pasado específico; por su propia índole, la naturaleza física apunta una serie de posibilidades realizables en el futuro, y no una única posibilidad fáctica, siendo las leyes estadísticas las que confieren adecuada racionalidad científica al conjun-

26. BORN, Max, *o. c.*, pp. 101-102.

to posible de predicciones. La probabilidad, por tanto, es el instrumento fundamental en que se basa dicha racionalidad científica.

Milic CAPEK explica convenientemente esta dependencia fundamental:

«Es la conexión con el pasado, así como el contraste con éste, la que crea la actualidad específica de 'ahora'. En cuanto se refiere al futuro, es el *futuro* y no un presente disfrazado y oculto, como en el esquema necesitarista: *surgirá, no es todavía*. Pero puesto que no saldrá *ex nihilo*, sino de un estado presente particular, se bosqueja su *dirección* general, y así posee algunas facetas generales predecibles: tanto más predecibles cuanto mayores sean los complejos estadísticos de los sucesos elementales considerados. De aquí nace la posibilidad de una predicción prácticamente exacta de los sucesos macroscópicos». ²⁷.

No existe por tanto un indeterminismo absoluto en la física actual, como erróneamente pueden haber supuesto algunos críticos no rigurosos de la misma. Se afirma un principio de causalidad fundamental que no es determinista o necesitarista, sino que implica una dependencia dinámica básica de los fenómenos físicos que se rige por leyes perfectamente rigurosas de tipo estadístico. Hubiera sido imposible de todo punto un indeterminismo absoluto, pues ello significaría un caos imprevisible en el mundo físico, y la experiencia cotidiana más simple informa de la ordenación racional de los eventos físicos, siendo incompatible con un postulado del azar absoluto. La naturaleza tiene sus leyes causales probabilísticas que aseguran la posibilidad de predicción dentro de un marco más o menos amplio. Ahora bien, dichas leyes causales excluirían cualquier clase de determinismo ya sea al modo de la física clásica, o según un determinismo restringido. Es la idea determinista en sí misma considerada la que se muestra incompatible con la física actual. Como dice M. BUNGE:

«La comprensión del alcance limitado del principio causal no brinda apoyo ni al escepticismo ni al irracionalismo: todo fracaso de la causalidad *stricto sensu* puede considerarse como la victoria de otros principios de determinación y simplemente señala la quie-

27. CAPEK, *o. c.*, pp. 341-342.

bra de ontologías anticuadas que son demasiado estrechas para acomodar la ilimitada riqueza de la realidad, tal como progresivamente la van revelando las ciencias. Lo que en la ciencia contemporánea ha pasado a ocupar el lugar de predominio que en un tiempo correspondía al principio causal es el principio más amplio de *determinación* o de producción legal»²⁸.

Así pues, lejos de rechazarse la idea de causalidad por la física cuántica lo que se afirma es un nuevo marco de aplicación del principio, que desde el punto de vista conceptual supone incluso un conjunto de posibilidades considerablemente más amplias del contenido de la causalidad. El concepto de causalidad debe ser extendido y ampliado:

«Es importante observar que la emergencia contingente de novedades es tan incompatible con el universo estático de Spinoza y Laplace como con el universo milagroso de sucesos completamente no relacionados en el que puede suceder todo. Por el contrario, la influencia constructiva —aunque no predeterminante— del pasado es una faceta esencial de la transformación, tanto como lo es la novedad irreducible de cada suceso presente. La aplicabilidad de las leyes de probabilidad a los sucesos microfísicos indica claramente que el concepto de causalidad debe ser ensanchado en vez de abandonado; lo que debe ser eliminado es únicamente su forma necesarista estática anticuada»²⁹.

El concepto de causalidad probabilística, o no determinista, posibilita en esta forma una visión racional de la aparición de fenómenos nuevos integrándolos dentro del esquema general conceptual aplicable. Esta posibilidad se veía radicalmente restringida con la idea del determinismo causal, de manera que en realidad cualquier acontecimiento en el orden físico era una modalidad del presente, ya que la univocidad de la causalidad no permitía de hecho hablar de aparición de situaciones físicas propiamente nuevas; es por eso que la idea de causalidad no determinista supone un enriquecimiento de la visión de la naturaleza, en tanto que explica de modo más satisfactorio que el antiguo concepto, la variedad cualitativa de las

28. BUNGE, Mario, *o. c.* (1), p. 365.

29. CAPEK, *o. c.*, p. 393.

entidades físicas. Observese asimismo que este concepto de causalidad no determinista, al estar matemáticamente expresado por leyes estadísticas, no entra en conflicto con las leyes causales de la Macrofísica, ya que a nivel de grandes magnitudes las leyes estadísticas muestran una probabilidad muy elevada que hacen posible un grado prácticamente exacto en las predicciones. Retornar al antiguo determinismo sería, por tanto, renunciar a la variedad cualitativa que muestra la naturaleza; o sea, el marco determinista sería excesivamente estrecho para afrontar la problemática inherente a los niveles elementales de la materia. La física clásica podía explicar los fenómenos físicos mediante un determinismo, pero el grado descubierto con ella de esa complejidad de la naturaleza era todavía suficientemente limitado; con el descubrimiento de los niveles ínfimos de la realidad física dicha concepción se torna inadecuada, por lo que se instrumenta la necesidad de una ampliación del marco causal clásico, es decir, de un «ensanchamiento» del concepto, que ante una mayor riqueza en los fenómenos y situaciones físicas, asimismo se hace más amplio en sus matizaciones. Como afirma de nuevo M. BUNGE:

«La realidad es demasiado rica para poder comprimirse de una vez para siempre en un marco de categorías elaborado en una etapa inicial del conocimiento humano y que por tanto no puede dar cuenta de la totalidad de los tipos de determinación, cuyo número va siendo incrementado por la investigación científica y por la reflexión filosófica sobre ésta»³⁰.

La nueva física patentiza de esta manera que no son posibles los conceptos absolutos o extremados que afirmaran un indeterminismo o determinismo radicales. En este sentido se puede decir que, a pesar de las relaciones de incertidumbre, la física cuántica implica un equilibrio metodológico y conceptual en sus consecuencias últimas. Se rechaza tanto el determinismo extremo como el azar ilimitado. Existen unas leyes causales perfectamente explícitas que estarían en el término medio de tales conceptos. Ahora bien, es relevante entender qué tipo de determinación se confiere a las teorías físicas y sobre todo, acerca de qué entidades naturales se aplican éstas. Por supuesto la caracterización de lo que «existe» no es la misma en la

30. BUNGE, *o. c.*, p. 367.

física clásica que en la actual, pues la discontinuidad señala unas limitaciones de gran importancia al respecto, de ahí que una exactitud infinitesimal sea incoherente con la realidad intrínseca de lo existente, limitación que implica lógicamente una restricción en la objetividad de las entidades físicas. La imposibilidad de exactitud infinitesimal, al estar derivada de un conocimiento riguroso y comprobado de las entidades físico-naturales, «*minima naturalia*», no supone en ningún aspecto una deficiencia del saber, sino el descubrimiento de realidades empíricas que radican en la propia estructura de la naturaleza; de ahí que la racionalidad científico-filosófica siga estrictamente establecida, siendo por tanto improcedente un intento de retorno a concepciones deterministas, en el grado que sea. El principio de razón suficiente no sufre así ninguna restricción fundamental, pues es compatible con la idea de una causalidad basada en leyes probabilísticas.

La causalidad es un concepto que la propia razón exige cuando se coloca frente a la realidad³¹, porque esta misma realidad muestra una ordenación legal que la razón intuye y posteriormente descubre y explicita mediante relaciones fundamentales de dependencia causal. Esta dependencia es expresada, desde el punto de vista filosófico, por el principio de razón suficiente, el cual en la nueva física toma la forma de una estructura matemática probabilística que se deriva de la creciente complejidad de la naturaleza según se desciende a sus niveles últimos. La física cuántica mantiene en todo momento el principio de razón suficiente, pues sin él sería imposible la marcha ascendente de la investigación físico-natural. Quienes suponen que la racionalidad científica queda afectada por la física de los cuantos y sus relaciones de incertidumbre, negarían implícitamente el valor intrínseco de la misma y el grado elevado de confirmación experimental que ha alcanzado. La idea de causalidad postulada por la física actual, no obstante sus fundamentales diferencias con las concepciones clásicas, sigue manteniendo el principio general básico e indispensable a todo conocimiento científico de que todo hecho posee su correspondiente razón.

31. Véase al respecto Jean ULLMO, *El pensamiento científico moderno*, Madrid, Tecnos, 1959; p. 206 ss.