Diánoia, vol. 6, no. 6, 1960

# CAUSALIDAD Y DETERMINISMO

La causalidad constituye la expresión particularizada de la conexión y la acción *recíproca* existentes entre todos y cada uno de los procesos del universo. En rigor, cada proceso se encuentra conectado con los demás de una manera múltiple y polimorfa; ya sea de un modo directo, por contigüidad, o indirectamente, a través de otros procesos concatenados. Igualmente, en cada proceso existe una interdependencia y una conexión íntima entre todos y cada uno de sus elementos y aspectos; siendo esta conexión intrínseca la que produce la unidad del proceso. A la vez, la conexión universal entre los procesos y en el interior de los procesos es una relación activa y recíproca. Los movimientos y los cambios de cada proceso influyen en las transformaciones y los movimientos de los otros procesos y, a su vez, reciben la influencia de ellos. Esta acción recíproca es una causalidad multívoca entre los procesos, que se condicionan mutuamente. Así, una acción produce como efecto otra acción; pero, al propio tiempo, el efecto actúa a su vez sobre la acción que lo causa. De esta manera, toda acción es simultáneamente efecto y causa, en sus múltiples relaciones con otras acciones; y existe una transferencia continua de causa y efecto en la transmisión recíproca de las acciones. Por otra parte, esta acción recíproca existe también entre el conocimiento y los procesos conocidos; ya que las manifestaciones de los procesos existentes son las que producen como efecto el conocimiento científico y, a su vez, los conocimientos adquiridos sirven de base para provocar otras manifestaciones de dichos procesos objetivos. Por todo esto, la categoría de causalidad —establecida como síntesis de los conocimientos logrados en la investigación científica y cuyo contenido objetivo lo constituyen las manifestaciones de la conexión universal— permite indagar y explicar las relaciones activas y recíprocas entre los procesos existentes en el universo.

## 1. *El determinismo clásico*

En su consideración clásica, el determinismo es una de las características fundamentales de la mecánica newtoniana, que se puede formular sencillamente de la siguiente manera: Cuando se conocen con precisión las condiciones en que se encuentra un proceso físico en un instante cualquiera y además, se conocen las leyes que gobiernan su comportamiento, entonces es posible prever rigurosamente las condiciones en que ese mismo proceso se encontrará en cualquier otro instante futuro, o en que se encontraba en cualquier instante pasado. Matemáticamente, este determinismo de los procesos

físicos se expresa como una propiedad analítica de las ecuaciones de la mecánica clásica, ya que éstas tienen siempre soluciones enteramente definidas para todos los valores del tiempo. Desde luego, la vigencia del principio determinista en la física implica necesariamente el reconocimiento del orden y la regularidad existentes en el universo. A su vez, esta regularidad de la naturaleza se manifiesta en la existencia de las leyes naturales que gobiernan las distintas clases de procesos y que se expresan, de manera aproximada, en las leyes físicas. Sin embargo, debido a su generalidad, las leyes únicamente condicionan las posibilidades del comportamiento de los procesos, pero no describen particularmente ningún desenvolvimiento específico futuro de un proceso determinado, ni suministran tampoco información precisa alguna acerca del desarrollo individual de un proceso en el pasado. Por esto es que, aun cuando siempre es indispensable que se conozcan las leyes que gobiernan la actividad de un proceso, este conocimiento no es suficiente para predecir la evolución del proceso o para saber cómo transcurrió su historia. Y lo mismo ocurre respecto al conocimiento de las condiciones específicas en que se encuentra el proceso, que es también imprescindible, pero tampoco es suficiente por sí solo. Por lo tanto, solamente con la conjugación de ambos conocimientos es que el problema del determinismo queda planteado de manera necesaria y suficiente.

Así, por ejemplo, cuando se considera un proceso mecánico formado por partículas materiales que se mueven libremente bajo la acción de sus atracciones gravitatorias recíprocas, tenemos que contar con el conocimiento de las leyes que gobiernan su evolución —que son las tres leyes newtonianas del movimiento y la ley de la gravitación— y con el conocimiento de las posiciones y las velocidades de las partículas materiales que constituyen el proceso, en un instante cualquiera. Entonces, partiendo de las condiciones iniciales y aplicando a ellas las leyes generales, es posible predecir teóricamente las posiciones y las velocidades que adquirirán las partículas del proceso en cualquier instante futuro; y, también, es posible establecer con exactitud estas determinaciones para los instantes pasados. Como se advierte, tenemos aquí un marcado contraste entre la contingencia de las condiciones iniciales y la permanencia necesaria —y, por lo tanto, opuesta y contradictoria a la contingencia— de las leyes físicas. Porque el instante en el cual se fijan las posiciones y las velocidades de las partículas materiales —esto es, el instante inicial que se considera— se escoge libremente, e incluso al azar, entre el conjunto de instantes posibles; mientras que las leyes que gobiernan su evolución —la cual seguirá distintos derroteros, conforme a las condiciones seleccionadas como iniciales— son siempre las mismas. Y, no obstante, el resultado de la conjugación de condiciones contingentes, pero definidas, con las condiciones necesarias que se expresan en las leyes —y que no definen caso particular alguno—, tiene un carácter de indudable necesidad, tal como

se acusa en la formulación misma del principio físico del determinismo. De este modo, la evolución de todo proceso físico se encuentra controlada por leyes rigurosas que, combinadas con las condiciones tomadas como iniciales, determinan inequívocamente todos los estados pasados del proceso, lo mismo que todos sus estados futuros. Y así, desde un punto de vista teórico, la historia del proceso queda enteramente determinada por las leyes naturales y por las condiciones particulares en que se encuentra en un instante cualquiera de su desenvolvimiento.

## 2. *Convergencia hacia el determinismo*

Sin embargo, ya en la propia física clásica encuentra algunas restricciones la concepción del determinismo que acabamos de expresar. En primer lugar, debemos tomar en cuenta que el presente físico nunca es un instante sin dimensión —aunque lo podamos considerar así aproximadamente en muchos casos, por analogía con la consideración del punto geométrico—, sino que implica siempre un lapso más o menos corto, pero de cierta duración. Por lo tanto, las condiciones tomadas como iniciales no son estrictamente instantáneas, ya que corresponden a cierto intervalo de tiempo, en el cual queda incluida cierta evolución del proceso considerado. De otra parte, para el cumplimiento del determinismo es indispensable que los efectos de las condiciones iniciales persistan en el tiempo, aun cuando su magnitud varíe, de tal manera que no pueden ser condiciones accidentales; y, con esto, se limita y precisa la libertad para la selección de dichas condiciones. Por otro lado, se necesita tener un conocimiento suficiente de todas las condiciones que producen efectos susceptibles de ponerse de manifiesto en el nivel o contexto dentro del cual se considera al proceso en cuestión; lo cual impone un rigor mayor en la selección que venimos examinando. Más aún, incluso suponiendo que se tenga una selección justa y un conocimiento suficiente de las condiciones escogidas, todavía subsiste la posibilidad de que otras condiciones exteriores al proceso, o extrañas al nivel o contexto considerado, produzcan perturbaciones no previstas. La única manera de tomar en cuenta todas estas influencias externas o ajenas sería la de considerar a la totalidad del universo, ya que ninguna porción de éste se encuentra estrictamente aislada de las demás; pero esta consideración es irrealizable, puesto que jamás podremos conocer exhaustivamente al universo, por más que cada vez lo conozcamos más y mejor. No obstante, lo que sí es posible es considerar que algunos procesos limitados, tales como el sistema solar, se encuentran aislados en forma muy aproximada, porque las influencias externas resultan ser muy pequeñas comparadas con las influencias internas, y las acciones de otros niveles o contextos no los afectan de manera manifiesta. Por consiguiente, respecto a estos procesos relativamente aislados y dentro de cierto

nivel o contexto de la existencia, es que se considera el cumplimiento riguroso y suficientemente aproximado del determinismo físico.

Ahora bien, la obligada aproximación a que nos referimos no surge únicamente en el caso del determinismo, sino que se presenta indefectiblemente en la aplicación de toda ley científica, dentro del dominio entero del conocimiento y en todos los niveles de la existencia. Y, lo que es más, también en la medición de las condiciones iniciales se plantea el problema de la aproximación. Porque la medición científica es siempre imperfecta, ya que está afectada ineludiblemente de errores experimentales —por más que el ingenio científico y la técnica experimental estén logrando continuamente reducirlos en la práctica y eliminarlos a través del cálculo racional— y, por otro lado, en cualquier observación se introducen siempre factores extraños al proceso —entre los cuales figuran como los más ostensibles, aunque no siempre los más importantes, los instrumentos de medición— que lo perturban y destruyen su aislamiento. Además, las mismas previsiones que se pueden establecer a partir de estos datos imperfectos, implican necesariamente cierta imprecisión. Sin embargo, a todo esto tenemos que agregar el hecho innegable de que la precisión de las observaciones se mejora continuamente, por el refinamiento de los procedimientos y con el perfeccionamiento de los instrumentos de experimentación. Por lo tanto, a medida que avanza el conocimiento, el principio del determinismo se comprueba en forma cada vez más aproximada y en condiciones más rigurosas. Y como, en cuanto a su carácter lógico, el principio del determinismo no difiere en nada de los otros principios científicos, se tiene que el determinismo ha acusado con toda precisión, en el curso del desarrollo de la ciencia, su tránsito desde un carácter primario de simple postulado, hasta su conversión en fundamento del conocimiento ya logrado. Por eso mismo, el determinismo no solamente sirve para establecer previsiones acerca del comportamiento de los procesos físicos, sino que el propio principio constituye un elemento integrante de toda explicación científica que se formula, incluso desde la etapa de la hipótesis. Entonces, podemos decir que el determinismo es un límite al cual converge, en este sentido, el conocimiento científico. Y, dentro del dominio de la física clásica, resulta ser enteramente consecuente la consideración de que la previsibilidad de los acontecimientos futuros se hace más precisa en tanto mayor sea la exactitud de las observaciones practicadas y de que, al mismo tiempo, esta exactitud crece prácticamente de manera ilimitada.

### 3. *La causalidad en la física relativista*

Con la teoría de la relatividad se abandonó la concepción clásica del tiempo absoluto y del espacio absoluto, considerados como independientes entre sí e independientes de las propiedades de los procesos. En su lugar, es-

tableció la concepción unitaria mucho más profunda del espacio-tiempo constituido por las propiedades mismas de los procesos y que, por consiguiente, depende de la distribución de las energías y las masas de los procesos y de sus respectivas transferencias y transformaciones. Por lo tanto, el espacio-tiempo actúa como un campo de fuerzas. De esta manera, se simplifica el problema de determinar las leyes físicas; ya que es suficiente con definir las trayectorias de las partículas en movimiento, para tener determinadas las dos clases de leyes consideradas en la física clásica: las leyes del movimiento y las leyes del campo de fuerzas. Por otra parte, la teoría de la relatividad se basa en el principio de la invariabilidad de las leyes físicas, cualquiera que sea el sistema inercial tomado como punto de referencia. Así, cuando dos procesos del mismo tipo, referidos a sistemas inerciales distintos, se reproducen en condiciones idénticas, entonces el desarrollo de ambos procesos es también idéntico en los dos sistemas. Por consiguiente, al ser conocidas las condiciones iniciales de un proceso, en un sistema cualquiera, se puede seguir con precisión su desenvolvimiento dentro del espacio-tiempo de cuatro dimensiones. De esta manera, se establece la unidad entre la estructura causal y la estructura espacio-temporal del universo. Y, así, la explicación de la teoría de la relatividad mantiene la consideración del desarrollo causal de los procesos, en el sentido preciso del determinismo: los valores de ciertos parámetros adecuados en un instante dado permiten determinar, en principio, el comportamiento de los procesos del universo.

Por otro lado, en la teoría de la relatividad también permanece intacta la consideración de la objetividad de la relación entre el proceso y el observador, con el mismo rigor que en la física clásica. Porque, aun cuando se ha puesto en claro que la simultaneidad entre dos acontecimientos depende de la posición ocupada por el observador, no obstante, es igualmente cierto que nada cambia en el desarrollo de los procesos cuando el observador es sustituido por algún instrumento de registro o, incluso, cuando no hay observador alguno. De este modo, la relatividad de la simultaneidad no introduce insuficiencia alguna en el conocimiento científico, ni admite interpretaciones subjetivistas.[1] Ahora bien, debido a la existencia de un límite superior —la velocidad de la luz— para la transmisión de la acción, resulta que, cuando los procesos se encuentran demasiado alejados, no puede haber entre ellos acciones recíprocas inmediatas, y menos aún pueden existir vínculos causales

1 Análogamente, el descubrimiento de la imposibilidad de determinar simultáneamente con precisión la cantidad de movimiento y la posición de una partícula elemental —o bien, su energía y su situación temporal—, tampoco representa una insuficiencia radical para el conocimiento científico, ni puede ser tomado rigurosamente como base de la interpretación subjetivista formulada por los físicos de la Escuela de Copenhague. Véase, a este respecto, una exposición más detallada en mis artículos "La categoría de espacio en la física atómica", *Diánoia*, III, 1957, págs. 96-125; y "El tiempo en la física atómica", *Diánoia*, IV, 1958, págs. 64-84.

directos. Por consiguiente, las relaciones causales directas entre los procesos dejan de tener carácter universal para todos los procesos. Entonces, las relaciones causales quedan limitadas por la condición de que la distancia entre los procesos no exceda de la longitud que puede abarcar la transmisión de la acción, durante el tiempo que dura el desenvolvimiento de los procesos, desde su surgimiento hasta su desaparición. De este modo, se establecen sectores espacio-temporales dentro de los cuales existen relaciones causales directas entre los procesos; y, así, se muestra nuevamente cómo la causalidad es una condición particular y limitada de la acción recíproca universal. Sin embargo, si consideramos que cada proceso está conectado causalmente con una multitud de procesos que forman una sucesión temporal, tanto hacia el pasado como hacia el futuro, que va de lo más inmediato a lo infinitamente remoto, entonces podemos advertir que estas cadenas causales no quedan limitadas por los sectores espacio-temporales antes dichos, sino que se extienden al universo entero. Además, el surgimiento de cada proceso en el universo se produce siempre por la transformación de otros procesos y, también, la desaparición de cada proceso consiste justamente en su conversión en otro u otros procesos diferentes; de tal manera que, a la cadena ilimitada de las transmisiones de acción, debemos agregar la sucesión igualmente ilimitada de las transformaciones entre los procesos, incluyendo su surgimiento y su desaparición. Por consiguiente, en estos dos sentidos, los procesos se desenvuelven dentro de un concatenamiento causal riguroso y universal; ya que las causalidades locales existentes dentro de los límites permitidos por la velocidad de la transmisión de la energía, se encuentran conectadas causalmente de modo cualitativo y cuantitativo. Y, por lo tanto, con la explicación relativista de los procesos existentes, ni siquiera se ha puesto en cuestión el cumplimiento de la causalidad, inclusive en su aspecto cuantitativo del determinismo físico.

### 4. *El indeterminismo de la teoría cuántica*

En cambio, en el dominio de la física atómica, la situación respecto a la causalidad y al determinismo es muy diferente. Desde su establecimiento a principios de nuestro siglo y hasta el año de 1929, el estudio científico de este nuevo nivel de la existencia se caracterizó por la intensa investigación acerca de los procesos físicos atómicos descubiertos con creciente rapidez y de sus correspondientes conceptos, junto con el descubrimiento de las leyes también nuevas que rigen su comportamiento. Pero, a partir de 1926, en que se estableció la mecánica cuántica, con la consiguiente formulación de los instrumentos matemáticos para describir el comportamiento de los objetos ultramicroscópicos, desde el punto de vista de la estructura teórica adoptada, la atención se concentró en la rigorización y la generalización del apa-

rato de la mecánica cuántica, sin que se hiciera nada fundamentalmente nuevo respecto al examen de los principios en que se basa la teoría. Por el contrario, los esfuerzos se enderezaron decididamente a la formulación de interpretaciones rígidas, a las que se atribuyó un carácter absolutamente definitivo e inmutable y se les erigió, por lo tanto, en dogmas indiscutibles. Con respecto a esta estructura "ortodoxa" dada a la teoría cuántica, es que se ha deducido la naturaleza indeterminista "en principio" de los procesos atómicos y que se han podido hacer tantas especulaciones acerca de la supuesta imposibilidad radical de conocer objetivamente dichos procesos. Además de lo extraño y apresurado que fue este intento de resucitar las "verdades absolutas y definitivas" en el seno de la ciencia —y precisamente en un campo de estudio en el cual se acababa de romper implacablemente con ellas, por imposición de los hechos descubiertos experimentalmente—, pronto se empezaron a acumular nuevos descubrimientos en forma abrumadora, para cuya explicación resultó insuficiente la teoría cuántica elaborada con tantas pretensiones. Por fin, en 1952, los trabajos de David Bohm iniciaron el rompimiento decidido con esta anómala situación que se mantenía en la física atómica. Y, aun cuando todavía no se ha podido elaborar una nueva teoría que permita explicar suficientemente todos los procesos conocidos experimentalmente, lo que sí es indudable es que la interpretación puramente probabilista de la Escuela de Copenhague tiene que ser abandonada.

En cuanto a la naturaleza indeterminista que se atribuye a los procesos atómicos, la clave de esta interpretación se encuentra en el llamado "principio" de complementariedad establecido sobre las relaciones de incertidumbre, que fueron elucidadas por Heisenberg en 1927. De acuerdo con estas relaciones, las partículas elementales tienen objetivamente la propiedad de que su posición espacial y su cantidad de movimiento, lo mismo que su energía y su posición temporal, se encuentran enlazadas intrínsecamente de un modo tan estrecho que resulta imposible determinar experimentalmente, de manera simultánea y con la misma precisión, dichas parejas de magnitudes. En rigor, lo que no es posible es determinar simultáneamente la componente de la cantidad de movimiento en una dirección y la coordenada espacial de una partícula en esa misma dirección —o bien, la posición temporal y la energía de una partícula— con una precisión ilimitada; porque existe un límite finito, determinado con toda exactitud y que no se puede traspasar, para la precisión que se puede alcanzar al medir simultáneamente ambas magnitudes. En este sentido, la propiedad objetiva expresada por la relación de incertidumbre hace que el curso de la convergencia hacia una estricta previsibilidad —de la cual hablamos en la Sección 2 de este artículo— se interrumpa bruscamente y sin remedio. Y, por lo tanto, para el caso de los procesos atómicos, queda excluida la posibilidad de sostener el determinismo a la manera clásica, como un límite al cual se aproxima

continuamente el conocimiento científico. Sin embargo, esta conclusión no tiene nada que ver con las absurdas consecuencias a que lleva la interpretación complementarista. De ellas ya nos hemos ocupado en otro trabajo,[2] demostrando: 1. que la relación entre las parejas de magnitudes complementarias es incluyente, y no de exclusión; 2. que no sólo es conceptualmente posible, sino también experimentalmente necesario el determinar a la vez dichas parejas de magnitudes, para una y la misma partícula elemental; y, 3. que una de las más conspicuas insuficiencias de la teoría cuántica "ortodoxa" es la de tratar de conservar a toda costa las categorías de la física clásica en el nivel de los procesos atómicos, cuando existen pruebas abrumadoras de su falta de cumplimiento en este nivel.

Ahora bien, tal como lo expusimos en la Sección 1, el determinismo físico exige que se tenga un conocimiento preciso de las condiciones iniciales del proceso considerado y, al mismo tiempo, un conocimiento suficiente de las leyes que gobiernan su comportamiento. Veamos qué ocurre en este sentido con la teoría cuántica "ortodoxa". En primer lugar, el hecho expresado por las relaciones de incertidumbre de Heisenberg nos indica, justamente, la imposibilidad de adquirir un conocimiento preciso y simultáneo de todas las condiciones que son consideradas clásicamente como indispensables para establecer el determinismo en las partículas elementales. Por otro lado, partiendo de una forma inicial de la onda asociada al corpúsculo, la ecuación de propagación permite calcular exactamente la evolución de esa onda durante todo el tiempo en que no se produce alguna nueva observación o medición. Y, por lo tanto, es posible prever teóricamente en cada instante la probabilidad de encontrar cierto valor para cualquiera de las magnitudes asociadas al corpúsculo, si se hiciera en ese instante una medición que permitiera determinarlo. No obstante, cuando se efectúa realmente una nueva medición, ésta suministra nuevos conocimientos sobre el estado del corpúsculo y cambia completamente la situación en cuanto a las probabilidades; tal como ocurre con la probabilidad de un acontecimiento cualquiera cuando se adquieren otros informes concretos sobre él. En ese caso será necesario construir una nueva onda asociada para representar el nuevo estado de nuestro conocimiento acerca del corpúsculo. Así, cada experiencia provoca una nueva perturbación en el estado del corpúsculo, que impide establecer una relación causal cuantitativamente exacta entre el estado anterior y el estado posterior. O sea que, dentro del marco de las observaciones espacio-temporales, en el cual el corpúsculo tiene magnitudes susceptibles de ser medidas, sólo una de estas magnitudes adquiere un valor definido cada vez y, además, los valores futuros no son previsibles con precisión o por completo. En cambio, dentro del esquema matemático de la función ondulatoria

2 Véase "La categoría de espacio en la física atómica", *Diánoia*, III, 1957, Secs. 3, 5 y 6; págs. 100-103 y 105-112.

—que, según la "ortodoxia" de la Escuela de Copenhague, escapa por entero a la verificación experimental y únicamente puede ser comprendido a través de nuestro pensamiento— la evolución de la onda asociada está completamente determinada por su forma inicial y por la ecuación de propagación y, por lo tanto, en el intervalo entre dos medidas obedece a un determinismo riguroso.

De este modo, en la teoría cuántica "ortodoxa" se utiliza un instrumento matemático determinista, para superponerlo a la naturaleza supuestamente indeterminista de la realidad objetiva. Y, como la descripción espacio-temporal de los procesos atómicos y su representación por medio del simbolismo matemático son consideradas como alternativas mutuamente excluyentes, resulta entonces que la ecuación de la propagación ondulatoria no representa a las leyes objetivas que gobiernan el comportamiento de los procesos atómicos; y, por ende, tampoco se cumple con otra exigencia ineludible del determinismo físico, puesto que se desconocen las leyes que rigen la evolución de los procesos considerados. Más todavía, debido a que la ejecución de una nueva medición hace necesaria la construcción de una nueva onda asociada para representar el nuevo estado de nuestro conocimiento sobre el corpúsculo, advertimos que es enteramente imposible la comprobación de las previsiones especulativas que se hayan establecido acerca de la evolución de la onda. En resumen, tenemos que no se conocen las condiciones iniciales, ni tampoco son conocidas las leyes que gobiernan el desarrollo de los procesos y, por si esto no fuese suficiente, también es estrictamente imposible someter a prueba experimental las previsiones calculadas simbólicamente. Por consiguiente, podemos afirmar que en la teoría cuántica "ortodoxa" no se cumple ninguno de los tres requisitos que son indispensables para la aplicación del determinismo. En rigor, ni siquiera se puede pretender que dicha explicación "ortodoxa" sea indeterminista —y, mucho menos, que sean indeterministas los procesos atómicos—; ya que, para ello, sería necesario que se cumplieran los tres requisitos señalados y que entonces, y sólo entonces, se comprobara que las previsiones deterministas no se cumplen experimentalmente. De esta manera, podemos concluir sencillamente que la teoría "ortodoxa", al no poder abordar el problema del determinismo físico, ha optado por mantenerse realmente al margen de la cuestión, sólo que adoptando la posición de rechazar lo que no puede comprender, y a lo cual ha denominado como "indeterminismo cuántico". En otras palabras, a lo más que ha llegado es al punto de no poder decidir si existe o no existe determinismo en los procesos atómicos. Y esta insuficiencia teórica y práctica de la teoría cuántica "ortodoxa" es lo que se proclama irracionalmente como "demostración" del indeterminismo.

5. *La causalidad en la física cuántica*

En la forma original de la teoría cuántica, Bohr sostenía que los procesos atómicos individuales no están gobernados por ley causal alguna y, en particular, negaba toda validez a las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento. Este punto de vista hizo crisis en relación con la interpretación del efecto Compton. Como es sabido, cuando una radiación de alta frecuencia choca con un objeto macroscópico, la radiación es desviada en varias direcciones y sufre un descenso en su frecuencia, al mismo tiempo que el objeto emite electrones. La interpretación de Compton fue la de considerar que la radiación está formada por fotones,[3] los cuales chocan elásticamente con los electrones del objeto y, como consecuencia de esto, salen despedidos con menor energía en distintas direcciones, a la vez que algunos electrones son despedidos también por los mismos impactos. Entonces, aplicando a estas colisiones las leyes de conservación de la energía y la cantidad de movimiento, y considerando así que estas leyes establecen una relación causal precisa entre el impacto de un fotón y la emisión de un electrón, Compton pudo formular una explicación cuantitativa del proceso observado. En cambio, de acuerdo con la interpretación de Bohr, no existiría conexión causal alguna entre la llegada del fotón y la emisión del electrón, de tal manera que los fotones serían desviados al azar con menor energía y, asimismo, los electrones serían emitidos enteramente al azar. Ante estas interpretaciones en conflicto, Bothe y Geiger planearon un experimento decisivo, haciendo que los electrones emitidos y los fotones desviados fueran recibidos en cámaras de ionización adecuadas, en donde se podía registrar inequívocamente su entrada. La alternativa planteada era la siguiente: si Compton estaba en lo justo, la penetración de un electrón y un fotón sería simultánea en las respectivas cámaras de ionización; en cambio, si la interpretación de Bohr fuera la correcta, las penetraciones de electrones y fotones ocurrirían independientemente y al azar. Pues bien, la realización del experimento demostró que las penetraciones simultáneas son mucho más frecuentes de lo que se podría esperar con arreglo a las leyes de la probabilidad. Es más, cuando se toman en cuenta los efectos parásitos, que no es fácil evitar, las penetraciones simultáneas se convierten en regla general. De esta manera, el resultado del experimento de Bothe y Geiger demostró el acierto de Compton, y entonces Bohr tuvo que reconocer su error. Por lo tanto, se comprobó experimentalmente que las leyes de conservación de la energía y la cantidad de movimiento se cumplen rigurosamente en los impactos individuales entre fotones y elec-

[3] En efecto, tal como lo formuló teóricamente Einstein, después se comprobó experimentalmente que la radiación —que abarca desde las ondas hertzianas hasta los rayos ultragama, e incluye la luz visible— está constituida por fotones que viajan a la misma velocidad —la de la luz— y que difieren por su longitud de onda, su frecuencia y su energía.

trones. A la vez, como las leyes de conservación se encuentran conectadas en forma indisoluble y recíproca con los principios de invariancia[4] y, por consiguiente, son ilustraciones de las leyes causales, podemos decir que el experimento referido es una verificación de la existencia de una causalidad rigurosa en los procesos atómicos individuales.

En otros casos, aunque no es posible establecer un determinismo estricto en el comportamiento de los procesos atómicos individuales, siempre es posible descubrir que existen conexiones causales rigurosas, tanto para los conjuntos de procesos atómicos como para los procesos individuales. Para explicar esto, vamos a referirnos a la clara ilustración presentada por De Broglie ante el IX Congreso Internacional de Filosofía. Supongamos que tenemos un "disparador de electrones" —esto es, un dispositivo que nos permite emitir a voluntad electrones de energía conocida— para bombardear una superficie de cristal, frente a la cual se encuentra colocada una pantalla fluorescente en la que se produce una centelluela instantánea a la llegada de cada electrón. Así, cuando emitimos electrones con lentitud, observamos cómo las centelluelas se suceden en el tiempo y se producen en diversos puntos de la pantalla. Pero es imposible prever exactamente, en un instante determinado, cuál será el punto de la pantalla en donde se producirá la siguiente chispa. Lo único que se puede hacer es calcular la probabilidad de que en tal o cual punto de la pantalla se observe la próxima centelluela, sin que sea posible determinar con precisión el comportamiento individual de un electrón. En cambio, si lanzamos electrones con gran rapidez, de modo que el cristal sea alcanzado constantemente por un torrente de electrones, entonces, en cada instante tendremos un centelleo continuo y las chispas se distribuirán dibujando en la pantalla las figuras de difracción, que podemos calcular precisamente en cada caso. En estas condiciones, podemos anticipar exactamente cuál va a ser el aspecto de la pantalla fluorescente cuando se hace funcionar el disparador a tiro rápido. Y, por consiguiente, para el conjunto de muchísimos electrones existe indudablemente una previsibilidad rigurosa y podemos afirmar que se cumple el determinismo de un modo estricto. Por otra parte, cuando el disparador empieza a funcionar, veremos aparecer centelluelas en ciertos puntos de la pantalla, cuya densidad dependerá enteramente de la frecuencia con que hagamos los disparos. Más precisamente aún, por cada electrón disparado tendremos una chispa, y recíprocamente, cada chispa corresponderá a un electrón. Por lo tanto, cuando el electrón no funcione, es indudable que no aparece centelluela alguna. Entonces, debido a esta relación biunívoca, podemos decir que el funcionamiento del disparador de electrones es la causa del centelleo en la pantalla —y, en rigor, que cada electrón disparado es la causa directa de que aparezca una chispa en la

[4] Véase, a este respecto, mi artículo "La categoría de energía", *Diánoia*, v, 1959, Sec. 6, págs. 59-61.

pantalla—, aun cuando no podamos prever exactamente cuál de las centelluelas posibles será la que se produzca cuando pongamos en acción el disparador. En consecuencia, podemos afirmar fundadamente que sí se cumple estrictamente la causalidad en este caso. Esto quiere decir que en el comportamiento de los procesos atómicos individuales se cumple rigurosamente el determinismo en su aspecto cualitativo de concatenación entre causas y efectos; no obstante que no se pueda decir lo mismo acerca de su aspecto cuantitativo. Y, por lo demás, esta conclusión sobre el cumplimiento indudable y estricto de la causalidad, se puede extender congruentemente a todos los problemas análogos que se han suscitado en torno al comportamiento de los procesos atómicos.

## 6. *Caracterización contemporánea de la causalidad*

De acuerdo con los resultados de las investigaciones científicas contemporáneas, la causalidad se puede expresar en la forma de una implicación recíproca entre dos conjuntos de procesos, vinculados de tal modo que la producción de un proceso perteneciente a uno de estos conjuntos traiga aparejada la producción de un proceso perteneciente al otro conjunto. Si representamos a los conjuntos por $A$ y $B$, respectivamente, podemos formular la causalidad como sigue:

> Si se produce un proceso $A$, entonces se produce un proceso $B$; y, viceversa, si se produce un proceso $B$, entonces se produce un proceso $A$.

En esta mutua implicación, tanto $A$ como $B$ representan conjuntos de procesos que pueden ser incluyentes o excluyentes entre sí. Es decir, que algunos de los procesos del conjunto $A$, pueden coexistir temporalmente, cuando son incluyentes, mientras que puede haber otros que solamente existan sucesivamente, cuando son excluyentes; y lo mismo se aplica a los procesos del conjunto $B$. Así, cuando se produce un proceso o varios del conjunto $A$, siempre se produce un proceso o varios del conjunto $B$; y, a su vez, la producción de un proceso o varios del conjunto $B$, provocará siempre cambios en los procesos del conjunto $A$ ya producidos o, incluso, puede suscitar la producción de otros procesos del conjunto $A$.

Como se advierte, la implicación causal es simétrica en cuanto a la conexión funcional, o sea, que los procesos $A$ son determinantes de los procesos $B$, a la vez que los procesos $B$ son determinantes de los $A$; con lo cual resulta que tanto los procesos $A$ como los $B$ son, simultánea y recíprocamente, determinados y determinantes. Debido a esto, nunca se puede considerar a uno de los conjuntos de esta implicación como determinante exclusivo del otro conjunto, ni tampoco se puede tener al otro conjunto como mero determinado. Sin embargo, respecto a la intensidad de la determinación, la implicación

causal es generalmente asimétrica, esto es, que los procesos *A* pueden ser determinantes de los *B* en un grado mayor de lo que los procesos *B* sean determinantes de los *A*, o viceversa. Por otra parte, las conexiones causales son irreflexivas, porque se trata de relaciones que no se pueden aplicar a un proceso aislado,[5] o sea, que ningún proceso es causa única de sí mismo, ni tampoco es el único efecto de sí mismo. Pero, a la vez, las conexiones causales son reflexivas, puesto que todo proceso es parcialmente causa y efecto de sí mismo; y, más aún, siempre es posible considerar como unitario a un conjunto complejo de procesos, que tenga como elementos integrantes a las causas y los efectos. Igualmente, las cadenas causales son transitivas, ya que: si los procesos *A* son causas de los procesos *B*, y éstos, por su parte, son causa de otros procesos *C*, entonces los procesos *A* son causas mediatas de los procesos *C*; y, de modo correspondiente, los procesos *C* son efectos mediatos de los procesos *A*.

En realidad, como todos los procesos existentes se encuentran en acción recíproca, la conexión causal se puede establecer entre todos y cada uno de los conjuntos de procesos. No obstante, no todas las conexiones recíprocas existentes tienen la misma importancia dentro del nivel o contexto considerado. De hecho, en cada nivel, la magnitud de los efectos de la mayoría de esas acciones recíprocas es tan pequeña que puede dejarse de tomar en cuenta. Por lo tanto, en cada nivel o contexto de la existencia, únicamente se consideran aquellas acciones que producen consecuencias considerables. Debido a esto es que la causalidad representa un aspecto parcial de la acción recíproca universal. Ahora bien, en las acciones recíprocas destacadas por su importancia como implicaciones causales, casi siempre resulta que la magnitud de los efectos producidos en los dos conjuntos no es comparable —debido a la exagerada asimetría de la determinación—, sino que generalmente los procesos de un conjunto tienen mucho mayor influencia sobre los procesos del otro conjunto. Entonces, al conjunto de procesos cuya influencia es dominante —y que, por lo tanto, es el que gobierna la relación de causalidad—, lo denominamos causa; y, correspondientemente, damos el nombre de efecto al otro conjunto de procesos. En todo caso, ni las causas ni los efectos pueden ser conocidos *a priori*, sino que deben ser encontrados en los procesos objetivos. Por consiguiente, uno de los problemas fundamentales de la investigación científica consiste en descubrir cuáles son los conjuntos de procesos que, en un nivel de la existencia y en un contexto determinado de condiciones, influyen notablemente sobre otros conjuntos de procesos, sin que sufran a su vez cambios importantes por la influencia recíproca de sus efectos.

Por otro lado, las variaciones de los procesos pertenecientes al conjunto considerado como causa y de los procesos integrantes del conjunto tenido

[5] Desde luego, no existen procesos aislados en el universo y, por lo tanto, aquí nos referimos simplemente al aislamiento relativo en que es posible considerar abstractamente un proceso.

como efecto, pueden ser continuas dentro de cierto intervalo, al cual pueden seguir uno o varios pasos bruscos por discontinuidad, hasta alcanzar otro intervalo de continuidad, y así sucesivamente. Pero no por esto se tiene necesariamente una correspondencia biunívoca entre el carácter de las variaciones en los dos conjuntos, ya que a una variación continua de los procesos en un conjunto puede corresponder una variación continua o discontinua de los procesos del otro conjunto y, también, una variación discontinua de un conjunto puede coexistir con una variación discontinua o continua del otro. A más de esto, la manifestación de la acción causal es histórica, es decir, que transcurre cierto intervalo de tiempo entre la variación de los procesos de un conjunto y la variación de los procesos del otro conjunto. Esto se debe, en primer lugar, a que la transmisión de la acción se realiza, cuando mucho, a la velocidad de la luz; y, en segundo lugar, a que antes de que se manifiesten en el exterior los efectos producidos en un proceso, se efectúan necesariamente ciertas transformaciones internas en el mismo proceso que pueden requerir algún tiempo. No obstante, cuando el intervalo de tiempo transcurrido es suficientemente pequeño, se puede considerar como relativamente instantánea a la manifestación de la acción determinista. Además, este carácter histórico significa que las transformaciones causales son irrepetibles, relativamente y en lo particular. Pero, a la vez, dichas transformaciones se repiten constantemente en el seno del universo, en cuanto a que constituyen la conexión entre dos conjuntos que cuentan, cada uno de ellos, con una multitud de especímenes. En fin, no debemos olvidar que la formulación anterior es enteramente general y que, por lo tanto, en cada caso concreto se le debe incorporar el conocimiento específico de las leyes que gobiernan a los conjuntos de procesos en cuestión, de las características peculiares del nivel de la existencia al que pertenecen y de las condiciones precisas que definen el contexto en que se encuentran.

## 7. *El orden de las conexiones causales*

Las causas y los efectos se advierten también por su sucesión temporal, mientras que las conexiones causales se establecen a través de la transmisión y la transferencia de energía, que es una propiedad temporal.[6] Por consiguiente, el tiempo constituye el orden de las concatenaciones de causalidad.[7]. Las relaciones causales se ordenan mediante la distinción temporal entre lo anterior

[6] Véase "El tiempo en la física atómica", *Diánoia*, IV, 1958, Sec. I, págs. 64-66.

[7] El orden temporal es invariante ante las transformaciones de Lorentz —esto es, para el cambio de coordenadas entre dos sistemas en movimiento— cuando, y sólo cuando, los sistemas en cuestión pueden ser conectados por señales —es decir, por discontinuidad en la transmisión de la energía que media entre causa y efecto— y, en consecuencia, por concatenaciones causales. A la vez, la inversión del orden temporal sólo es posible respecto de aquellos procesos cuya conexión causal no es manifiesta.

y lo posterior, ya que la causa antecede al efecto y, a su vez, el efecto procede de la causa. De este modo, podemos analizar con mayor detalle las relaciones de causalidad. Así, un conjunto de procesos *A* está conectado causalmente con otro conjunto de procesos *B*, en los siguientes casos: 1. cuando los procesos *A* son causas de los *B*; 2. cuando los procesos *B* son causas de los *A*; 3. cuando algún conjunto de procesos *C* es causa común de los procesos *A* y *B*; 4. cuando otro conjunto de procesos *D* es efecto común de los procesos *A* y *B*; 5. cuando existe una implicación causal recíproca entre el conjunto *A* y el conjunto *B*; y, 6. cuando los conjuntos *A* y *B* se encuentran, respectivamente, en conexión causal mutua con otro u otros conjuntos de procesos. En todo caso, los conjuntos de procesos que se encuentran en relación causal directa son colindantes en el tiempo y, entre ellos, distinguimos como causa al antecedente y como efecto al consecuente. Además, las causas directas son contemporáneas de sus efectos, al menos parcialmente, o sea, que la causa directa comienza antes del efecto y permanece durante una parte del tiempo que dura el efecto. Como ya lo hemos dicho, la concatenación causal se establece mediante la transmisión y la transferencia de energía —cuya velocidad máxima es la de la luz— y, entonces, siempre transcurre cierto intervalo de tiempo entre el surgimiento de la causa y la producción del efecto. Por otra parte, la repetición de una causa trae consigo la repetición del efecto; y cada reiteración de una cadena causal tiene idéntica duración. Más aún, dentro de ciertos límites —que se pueden precisar en cada caso—, la intensificación de la causa provoca la intensificación del efecto y, viceversa, la atenuación de la causa implica la reducción del efecto. De esta manera, con el conocimiento de las relaciones causales y de la posibilidad de su repetición en condiciones definidas, el hombre tiene uno de los medios mejores y más eficaces para intervenir en el curso de los procesos existentes, provocando e induciendo la presentación de las causas, y procurando la conveniente intensificación o atenuación de los efectos.

El establecimiento de una previsión con base en el conocimiento de una conexión causal entraña ineludiblemente la proyección del pasado conocido al futuro por conocer. Es decir, que establecer una previsión es tanto como trasladar lo ocurrido en un cierto intervalo de tiempo ya transcurrido a otro intervalo de tiempo por transcurrir. Tal cosa implica, necesariamente, la consideración de que el tiempo es homogéneo y congruente, y de que posee un sentido único e irreversible.[8] La causalidad se puede expresar matemáticamente por medio de una función, en la cual la variable independiente es la causa y la variable dependiente es el efecto. En rigor, toda función matemática es una expresión abstracta de la causalidad, en la que se puede hacer caso omiso de la secuencia temporal; y es por ello que la conexión de causalidad no queda definida completamente por el

8 Véase "El tiempo en la física atómica", *Diánoia*, IV, 1958, Sec. 5, págs. 72-76.

concepto matemático de función. Además, las funciones matemáticas admiten la inversión, debido a su simetría; y, por lo tanto, en ellas no queda definido el sentido temporal único que es inherente a la causalidad. Pues bien, debido a que todas las leyes físicas se expresan cuantitativamente en forma de funciones matemáticas, tenemos que la causalidad se encuentra contenida implícitamente en las leyes físicas, aunque de manera abstracta e insuficiente. De manera análoga, en las ecuaciones matemáticas que representan las leyes físicas, muchas veces las propiedades del tiempo están formuladas de modo abstracto e incompleto. Pero, cuando se abandona la abstracción y se incluye el orden del tiempo en la expresión funcional de las leyes físicas, entonces la conexión causal queda formulada explícitamente y en su integridad. Y, recíprocamente, en aquellas funciones en que el tiempo está representado abstractamente, la inclusión de la conexión causal hace que se determine de manera explícita un orden definido.

## 8. *Relaciones causales multívocas y biunívocas*

Una característica general de las relaciones causales —puesta en claro acusadamente en los procesos atómicos— es la de que la correspondencia entre causa y efecto no es estrictamente biunívoca; ya que, cuando existe conexión causal directa entre los conjuntos de procesos $A$ y $B$, entonces un proceso $A$ cualquiera puede producir como efecto alguno o varios de los procesos $B_1, B_2, B_3, \ldots$ y, a su vez, cada uno de estos procesos $B$ puede ser causado por alguno o varios de los procesos $A_1, A_2, A_3, \ldots$ Por lo tanto, la relación causal es multívoca en ambos sentidos. Esto queda ejemplificado con la ilustración presentada por De Broglie,[9] en la cual podemos considerar que los electrones emitidos por el disparador constituyen los procesos del conjunto $A$, y las centelluelas que aparecen en la plantalla fluorescente son los procesos del conjunto $B$. Así, el disparo de un electrón, un proceso $A$, produce como efecto una de las chispas $B_1, B_2, B_3, \ldots$; y, por otra parte, una centelluela en particular, un proceso $B$, será causada por alguno de los electrones disparados $A_1, A_2, A_3, \ldots$ En consecuencia, entre el conjunto de procesos $A$ (electrones emitidos) y el conjunto de procesos $B$ (chispas producidas en la pantalla) se cumple rigurosamente el determinismo; mientras que cada proceso $A$ se encuentra conectado multívocamente con los efectos $B_1, B_2, B_3, \ldots$ y, también, cada proceso $B$ está relacionado multívocamente con las causas $A_1, A_2, A_3, \ldots$ De esta manera, las relaciones de causalidad pueden ser: 1. de efectos multívocos, cuando un mismo proceso es causa de varios procesos o de uno solo que no es posible determinar unívocamente dentro de un conjunto; 2. de causas multívocas, cuando un mismo proceso es efecto de otros varios procesos o de uno solo de ellos, pero sin que se pueda

[9] A la cual nos referimos en la Sección 5 de este artículo.

determinar con univocidad dentro del conjunto al que pertenece; 3. de efectos multívocos y causas multívocas a la vez, cuando varios procesos de un conjunto o uno solo que no se puede determinar unívocamente, son la causa de varios procesos de otro conjunto o de uno solo de ellos que tampoco se puede determinar de manera unívoca; y, 4. de biunivocidad, que es el caso límite del determinismo riguroso, cuando un proceso bien determinado de un conjunto es la causa de un proceso igualmente determinado de otro conjunto, de manera que el segundo proceso es efecto del primero y únicamente del primero, en tanto que el primero es causa del segundo y sólo del segundo.

Desde luego, todas las relaciones causales cualitativas son multívocas en ambos sentidos; mientras que las conexiones cuantitativas de causalidad pueden ser de efectos multívocos, de causas multívocas, o simultáneamente de causas y efectos multívocos. En todo caso, cuando se conoce una relación de multivocidad de causas y otra de multivocidad de efectos, acerca de un conjunto de procesos, el avance del conocimiento siempre tenderá a enlazar estas dos relaciones en una conexión única. Por otro lado, el carácter objetivamente multívoco de las causas y los efectos en las relaciones de causalidad, es lo que permite obtener conocimientos suficientemente aproximados sobre los procesos del universo, sin necesidad de tomar en cuenta todas las acciones recíprocas que se producen constantemente en el universo. Además, a medida que un efecto producido por varias causas —o los diversos efectos de una misma causa— se considera con mayor detalle o en un contexto más amplio, se advierte cómo cada causa produce alguna diferencia en el efecto —o cada efecto pone de manifiesto cierta variación en la causa común. Por ello, en el estudio de las relaciones causales se sigue el procedimiento científico de examinar un conjunto de procesos paso a paso, de tal modo que cada paso suministre los elementos para realizar el estudio más profundo, detallado y extenso que conduce al siguiente paso.[10]

Dentro del marco general de las relaciones causales multívocas respecto a las causas y a los efectos, la reducción del margen de multivocidad requiere indispensablemente la consideración de factores causales nuevos y cualitativamente diferentes. Por lo tanto, la reducción del número de causas directas o del número de efectos también directos, implica ineludiblemente el tomar en cuenta efectos y causas mediatas o sea, que obliga a establecer cadenas causales con más de dos términos, en las cuales cada proceso es efecto de uno

[10] Así fue como resultó posible estudiar las leyes físicas de los procesos macroscópicos, antes de conocer las leyes de la física atómica, debido al carácter multívoco que tienen las manifestaciones estadísticas de los procesos microscópicos, lo cual permite considerar con cierta autonomía a las leyes del nivel macroscópico. En forma similar, actualmente se trabaja intensamente para pasar del nivel atómico al conocimiento de las leyes que rigen los procesos nucleares —sobre los cuales se conocen muchos hechos experimentales, pero todavía se carece de una teoría general—; además, ya se tiene la perspectiva de poder penetrar luego en un nivel más profundo que el de las partículas elementales.

anterior y causa de otro posterior. Y, mientras más se estreche la multivocidad, más prolongada será la concatenación causal tomada en cuenta; de manera que, cuando se alcanza el límite de la relación biunívoca entre causa y efecto, la cadena de causas anteriores y efectos posteriores se prolongará infinitamente en ambos sentidos. Por esto es que la relación biunívoca de causalidad, correspondiente al determinismo clásico,[11] constituye una idealización que nunca se realiza de manera completa en el conocimiento de los procesos existentes.[12] Por consiguiente, no se conoce un solo caso en que se haya logrado establecer una relación causal biunívoca perfecta, que permitiera formular predicciones con una precisión ilimitada, sin necesidad de tomar indispensablemente en cuenta otros factores causales cualitativamente diferentes, que existen fuera del contexto considerado o en otros niveles de la realidad objetiva.

## 9. *Interconexión de azar y causalidad*

La determinación más detallada y precisa de una relación de causalidad implica necesariamente la consideración de causas mediatas y de efectos indirectos, cuya indagación acaba por llevar fuera del contexto considerado en el planteamiento inicial del problema. Por otra parte, el avance de la investigación científica ha impuesto la necesidad de reconocer que los distintos procesos del universo se encuentran organizados objetivamente en diferentes niveles de la existencia.[13] Además, cada nivel forma parte de la subestructura

[11] El caso más aproximado que se conoce es el de un sistema mecánico aislado que se pueda tratar con arreglo a las leyes newtonianas del movimiento.

[12] La conexión biunívoca del determinismo clásico es una aproximación idealizada: *1.* porque un sistema mecánico jamás se encuentra totalmente aislado; *2.* porque, aun cuando estuviese aislado, siempre habría perturbaciones provenientes de las acciones que se producen incesantemente en su interior, en el nivel molecular, ya que el sistema no puede estar aislado de sí mismo; y, *3.* porque si tomáramos en cuenta las acciones moleculares, todavía quedarían sin considerar las perturbaciones provocadas por los procesos atómicos existentes en el interior de las moléculas y así, sucesivamente, en otros niveles más profundos.

[13] De acuerdo con los conocimientos actuales, podemos indicar esquemáticamente que ahora se considera como más profundo el nivel —que apenas se vislumbra— de la estructura interna de las partículas consideradas como elementales; luego viene el nivel nuclear, en el cual se incluyen los procesos que ocurren con elevadísimas energías y distancias del orden de $10^{-13}$ cm. y menores; en seguida tenemos los procesos atómicos de distintas clases, que abarcan energías menos elevadas y distancias mayores; después vienen los procesos químicos, que comprenden las integraciones y las desintegraciones moleculares; luego tenemos a los procesos biológicos, que se producen a partir de ciertas síntesis químicas muy complejas; a continuación tenemos los procesos sociales, que se inician en una etapa elevada de la evolución de la organización biológica; mientras que, por otro lado, los movimientos y las transferencias de energía que se producen entre las moléculas constituyen los procesos termodinámicos; después vienen los procesos macroscópicos de dimensiones semejantes a las humanas, que son estudiados por la física clásica; y finalmente, por ahora, se encuentran los procesos en que intervienen energías y masas elevadísimas con distancias astronómicas, cuyas leyes son investigadas por la física relativista.

interna de los niveles más elevados y, de manera recíproca, las propiedades de los procesos que se producen en cada nivel dependen de las condiciones fundamentales presentes, las cuales están determinadas a la vez por las propiedades de los niveles más elevados, por las de los niveles internos y por las del propio nivel en cuestión. De esta manera, cada nivel se distingue cualitativamente de los otros, sin perjuicio de la estrecha interrelación de dependencia mutua existente entre las propiedades de todos y cada uno de los diferentes niveles de la realidad objetiva. Ahora bien, todos los conocimientos científicos son representaciones abstractas del desarrollo y la transformación de los procesos existentes. Sólo que dicha abstracción no es arbitraria, sino que está limitada por la exigencia ineludible de que los conocimientos representen las propiedades fundamentales de los procesos objetivos dentro de cierto contexto, con un grado adecuado de aproximación y en correspondencia con las condiciones que distinguen cualitativamente al nivel de la existencia considerado. Por esto es que los conocimientos relativos a las conexiones causales aplicables dentro de un contexto determinado no permiten establecer predicciones enteramente rigurosas, ni siquiera respecto al comportamiento de los procesos incluidos dentro del contexto en cuestión.

En realidad, toda relación que se cumple necesariamente en un contexto finito de condiciones, se encuentra sujeta a las contingencias que surgen independientemente de dichas condiciones. Esta independencia de las contingencias hace que su fluctuación sea al azar, en forma muy complicada y dentro de un amplio margen de posibilidades. Sin embargo, en muchos casos se pueden despreciar los efectos de estas contingencias, sin que esto afecte notablemente el grado de aproximación de las relaciones causales establecidas, con tal que se tenga siempre en cuenta su carácter condicional. En todo caso, las fluctuaciones azarosas tienen la tendencia a cancelarse mutuamente, haciendo que los efectos de las contingencias se manifiesten, colectivamente y en promedio, de una manera regular y susceptible de determinarse con gran aproximación. Esta determinación se establece por medio del cálculo de las probabilidades, que representa la formulación matemática de las leyes del azar. Ahora bien, en cierto sentido, las probabilidades expresan también una conexión de causalidad, puesto que permiten partir de las condiciones colectivas en que se encuentra un conjunto de procesos, para prever definidamente las condiciones colectivas en que se encontrará después ese mismo conjunto. Así, las principales diferencias con la causalidad consisten en que, en la probabilidad se desconocen —o se ignoran deliberadamente— las leyes que gobiernan concretamente el comportamiento de los procesos y, además, la determinación se establece cuantificando con exactitud las posibles alternativas de su comportamiento colectivo.

Las conexiones causales descubiertas en la investigación científica tienen cumplimiento en la medida en que se cancelan los efectos de las fluctuacio-

nes azarosas de las contingencias.[14] Pero en cada caso concreto de aplicación de una relación causal subsiste un mínimo de error —que es característico y representa una propiedad objetiva de la relación causal— que está determinado por la magnitud de las fluctuaciones producidas al azar fuera del contexto investigado. Recíprocamente, hay una limitación correspondiente en el cumplimiento de cualquier relación de probabilidad, que resulta de despreciar las interconexiones causales existentes entre los diferentes contextos. Por consiguiente, una relación causal puede surgir como una aproximación estadística del comportamiento medio de un conjunto de procesos que sufren fluctuaciones al azar. Y, análogamente, una relación de probabilidad puede surgir como una aproximación estadística de los efectos de un gran número de conexiones causales que mantengan una gran independencia relativa. Por otra parte, siempre es posible enfocar un conjunto cualquiera de procesos desde el punto de vista causal, recurriendo a un contexto adecuado; y, a la vez, siempre es posible encontrar otro contexto en el cual el mismo conjunto pueda ser enfocado desde el punto de vista de las contingencias azarosas.[15] Así, la conexión causal y las contingencias azarosas representan dos aspectos necesarios e indisolubles de todos los procesos; de tal modo que la consideración de uno de estos aspectos corresponde a una aproximación que no se puede mantener ilimitadamente, sino que debe ser condicionada y complementada por el otro aspecto. Es más, la infinitud cualitativa del universo y su organización en niveles diferentes, suministra un marco en el cual encajan congruentemente las contingencias azarosas y las conexiones causales, como dos aspectos inseparables de todos los conjuntos de procesos existentes.

Entonces, cuando se encuentra una conexión regular entre procesos, que se cumple dentro de una amplia variación de las condiciones, se determina la existencia de una implicación causal. Pero, luego, a medida que se profundiza y amplía el conocimiento de esos mismos procesos, se puede advertir que las irregularidades contingentes desempeñan un papel cada vez más destacado, que puede llegar a ser preponderante y acabar por imponer la sustitución de la conexión causal por una relación de probabilidad. Sin embargo, una mayor penetración en el conocimiento de los pro-

[14] El tratamiento de esta relación recíproca entre azar y causalidad ha sido sugerido por David Bohm y se puede seguir en detalle en su libro *Causalidad y azar en la física moderna*, México, U.N.A.M., Problemas Científicos y Filosóficos, 1959.

[15] Incluso quienes sustentan la posición extrema del indeterminismo cuántico aceptan esta posibilidad. Así, por ejemplo, Paulette Février lo reconoce explícitamente con las siguientes palabras: "...Se ha establecido, de una manera general, que a toda teoría esencialmente indeterminista se le puede asociar una teoría determinista con parámetros inaccesibles a la medición; y, recíprocamente, a toda teoría determinista que contenga parámetros inaccesibles a la medición, se le puede asociar una teoría esencialmente indeterminista, eliminando los parámetros inaccesibles. Las teorías así asociadas tienen el mismo contenido físico...", *Determinismo e indeterminismo*, México, U.N.A.M., Problemas Científicos y Filosóficos, 1957, pág. 245.

cesos puede llevar a descubrir, en el seno de las irregularidades azarosas, formas más sutiles de regularidad y, por consiguiente, la existencia de conexiones causales más fundamentales. De esta manera, para explicar el comportamiento de un conjunto de procesos, a veces necesitamos una relación causal y otras veces una relación de probabilidad, sin perjuicio de que más adelante se vayan corrigiendo y complementando mutuamente. No obstante, ni las conexiones causales, ni tampoco las relaciones de probabilidad, pueden ser consideradas como aproximaciones ilimitadas, porque en cada una de ellas se excluyen inevitablemente algunas acciones que se producen en contextos más amplios o en otros niveles de la existencia. Por otra parte, bajo ciertas condiciones, una de estas clases de relación puede representar mejor los efectos de las acciones predominantes y ser, así, la mejor aproximación dentro de dichas condiciones. Sólo que, cuando las condiciones cambian suficientemente,[16] puede suceder que la relación establecida tenga que ser sustituida por una relación de la otra clase. En consecuencia, podemos formular finalmente el siguiente juicio de inclusión: *Las conexiones existentes entre dos o más conjuntos de procesos pueden ser de causalidad, o de probabilidad, o bien, de causalidad y probabilidad a la vez.*

## 10. *La causalidad como fundamento de la ciencia*

En el curso del desenvolvimiento histórico de la ciencia, la causalidad ha tenido varias formulaciones diferentes. Pero, no obstante la diversidad de las formas adoptadas para expresarla, siempre ha sido el medio de poner de manifiesto la conexión dinámica y recíproca existente entre todos y cada uno de los procesos objetivos, lo mismo que entre los distintos niveles de la existencia. Su expresión ha pasado desde la más sencilla consideración de causas y efectos, hasta la formulación que hemos expuesto en la Sección 6 de este artículo, de acuerdo con el nivel actual del desarrollo científico. En todo caso, el cumplimiento de las relaciones causales es una hipótesis imprescindible y un procedimiento metódico empleado en toda investigación científica. En rigor, la aceptación de la conexión causal es lo que permite inferir las propiedades de los procesos, partiendo de los resultados obtenidos en los experimentos y, también, es lo que hace posible que estos mismos experimentos sean reproducidos en las mismas condiciones por otros investigadores, para obtener los mismos resultados. Igualmente, es a través de las implicaciones causales como se relacionan unas propiedades con otras, unos procesos con otros y unos niveles con otros, para inferir las leyes que gobiernan el comportamiento de los procesos y, luego, someterlas a la prueba

[16] En realidad, las condiciones existentes cambian de manera incesante, pero, en muchos respectos, es posible considerar que se conservan relativamente durante un tiempo finito.

de su verificación experimental. En fin, la conexión causal está siempre implícita en las anticipaciones racionales y en los desarrollos teóricos que se efectúan en todos los dominios de la actividad científica. De esta manera, mediante el proceso laborioso de su prueba en la interminable sucesión de los experimentos realizados, la causalidad se ha convertido en un fundamento de la ciencia. Y, así, como generalización de los resultados de una multitud de experimentos y como explicación comprobada de manera reiterada y sin excepción, la causalidad suministra una perspectiva de conjunto y orienta las investigaciones posteriores, en las cuales desempeña la función de un postulado. Entonces, en cada nueva investigación, no obstante que ya se encuentra comprobada para los casos anteriores, la causalidad recobra su función de hipótesis elemental por verificar y, como tal, se sujeta a una nueva prueba; y, después, al obtenerse otra verificación de la causalidad, ésta confirma también en ese caso su carácter de fundamento del conocimiento. Por lo tanto, la causalidad refleja —dentro de la estructura interna de la ciencia— una de las formas objetivas de la existencia, expresándola de un modo definido. A más de esto, en la medida en que se ha obtenido su comprobación, la causalidad constituye un conocimiento cuya validez ya no se puede perder, ni tampoco deteriorar, sino que es susceptible de ser mejorada, ampliada y profundizada. Y, por la manera rigurosa en que se utiliza —como fundamento de todos los conocimientos anteriores y como postulado por verificar en las nuevas investigaciones— la categoría de causalidad coadyuva efectivamente a asegurar la objetividad de los resultados logrados en la experimentación y de las conclusiones establecidas en el desenvolvimiento teórico de la ciencia.

ELI DE GORTARI