

*Carlos Rivera Cruchaga*

## La luz y nuestro concepto de causalidad

### I. *La filosofía de la complementaridad*

EL CÉLEBRE físico Werner Heisenberg, a quien tanto debe hoy en día la física cuántica, ha precisado rigurosamente dentro de qué límites puede aplicarse el principio de causalidad a los sistemas atómicos. Sus ideas no son sino una consecuencia práctica de la notable filosofía de la complementaridad, de Niels Bohr, filosofía que ha logrado hacernos comprender qué puntos de vista que parecen ser diametralmente opuestos pueden conciliarse si se les considera como modos de ver que se complementan mutuamente, precisando uno lo que el otro no deja ver y viceversa.

Esta filosofía de Niels Bohr, nacida del esfuerzo por interpretar en una forma no contradictoria las experiencias de la física corpuscular, ha podido actualmente ser generalizada a dominios en los que sería imposible suponer a priori tal manera de pensar.

Para apreciar en debida forma las ideas de Bohr, indiquemos cómo se aplican éstas a un caso particular extraído de la experiencia física misma.

Hagamos pasar por un fino agujero practicado en una pantalla opaca un haz luminoso paralelo y observemos lo que sucede detrás de dicha pantalla. Si colocamos a cierta distancia de ella un cartón blanco, notaremos dos hechos diferentes según sea el diámetro del agujero. Si éste es grande, 1 milímetro o más, se podrá observar un círculo enteramente iluminado sobre un fondo oscuro. Es claro que la luz, que pasa en línea recta por el agujero, ha iluminado la pantalla colocada detrás de él formando en conjunto una imagen luminosa de dicha abertura. Pero supongamos ahora que vamos disminuyendo el diámetro del agujero hasta reducirlo a menos de una décima de milímetro. Poco a poco, el círculo luminoso formado anteriormente disminuye de diámetro y al mismo tiempo se comienzan a ver anillos luminosos de tanto mayor radio cuanto menor sea el agujero. Este fenómeno, conocido con el nombre de difracción de la luz, se puede explicar rigurosamente si se admite para la luz una naturaleza ondulatoria. Digamos de pasada que también para el primer caso las ondas luminosas permiten dar una explicación adecuada. La luz se comporta, pues,

en esta experiencia, como si se propagase por ondas en el espacio, y tales ondas dieron origen a la teoría ondulatoria.

Supongamos que en un punto del espacio en cierto instante comienza a producirse una onda esférica con su centro en dicho punto. Es evidente que para engendrar una onda es necesaria cierta energía que haremos igual a  $E$ , la cual se propaga junto con la onda, o mejor dicho, ésta posee la energía  $E$  distribuída sobre toda la superficie esférica de ella. Ahora bien, la superficie de una esfera es  $4\pi r^2$  siendo  $r$  el radio de ella, y el radio de la onda va aumentando a medida que la onda se propaga. Si la energía está distribuída uniformemente en la superficie, es claro que la cantidad de ella por centímetro cuadrado es igual a la energía total  $E$  dividida por la superficie, es decir,  $\frac{E}{4\pi r^2}$ . A esta cantidad se le llama densidad de energía, y ella será tanto menor cuanto mayor sea la esfera.

Supuesto esto, coloquemos a cierta distancia del punto desde donde emana la onda un pequeño objeto que, mirado desde dicho centro abarca una superficie pequeña  $s$ . Cuando la onda esférica llegue hasta donde se encuentra dicho objeto, le comunicará a éste cierta cantidad de energía; la energía restante seguirá propagándose por el espacio como si nada hubiese sucedido. El cuerpo recoge, según esto, aquella energía ondulatoria contenida en la onda dentro de la superficie  $s$ . Ella se obtiene multiplicando la densidad de energía,  $\frac{E}{4\pi r^2}$ , por el área  $s$ , lo cual da  $\frac{E}{4\pi r^2}$ . Si colocamos el objeto muy distante del centro de la onda, es decir, si  $r$  es muy grande, la energía que el cuerpo recoge es pequeñísima.

Este objeto será para nosotros un átomo colocado a cierta distancia de un punto en el que se producirá una rápida chispa y que dará origen, por consiguiente, a una onda luminosa que después de cierto lapso alcanzará el átomo prosiguiendo luego su marcha normal.

Así como para levantar un cuerpo del suelo y colocarlo encima de una mesa es necesario gastar cierta cantidad de energía, también para extraer un electrón de un átomo debemos gastar energía, sin la cual el electrón no puede ser separado del átomo a que pertenece.

Supongamos nuevamente nuestro átomo colocado a una distancia tal del centro de la onda, que la energía que recoge cuando la onda llega a él sea menor que la necesaria para extraer un electrón de dicho átomo.

El electrón no saldrá del átomo si éste se encuentra suficientemente lejos de la chispa. Esto es lo que enseña la teoría ondulatoria.

La experiencia, que en este caso recibe el nombre de efecto fotoeléctrico, está en plena contradicción con esta conclusión, pues aunque el átomo se encuentre muy lejos de la chispa el electrón lo abandona.

Pero si se supone que la luz está formada de corpúsculos, todo queda aclarado. Al emitirse la chispa, su energía se reparte en un conjunto de partículas llamadas fotones, cada uno de los cuales transporta cierta cantidad de ella. Si uno de estos fotones llega al átomo considerado, le entrega a él toda la energía de que es portador, *por lejos que se encuentre dicho átomo*. La salida del electrón entonces se hace posible si la energía que transporta un fotón cualquiera es suficiente para arrancarlo del átomo madre.

En resumen, dos experiencias diferentes, difracción y efecto fotoeléctrico, nos conducen a *suponer* para la luz dos naturalezas distintas.

Pero una realidad única como la luz no puede poseer más que una sola naturaleza, que se manifestará en ciertas experiencias como ondas y en otras como corpúsculos, siendo evidentemente ambas contradictorias entre sí.

Bohr nos dice entonces que ondas y corpúsculos no son más que dos aspectos complementarios de una misma realidad. La explicación es, pues, dual, requiriéndose un solo aspecto para poder interpretar una experiencia dada, y el otro aspecto completará la interpretación que el primero dé. Ambos se complementan y no debemos dar a uno prioridad respecto al otro, ni debemos tampoco aplicar los dos *simultáneamente*, pues se excluyen lógicamente.

Recuerdo aún haber oído decir al mismo Heisenberg en una conferencia, que esta exclusión lógica de la teoría ondulatoria y la corpuscular implica que no pueden ambas coexistir realmente, y como cada una de ellas no explica todos los hechos, no podemos dar a una más realidad que a la otra. Es conveniente fijar esta idea desde un principio, ya que en caso de no tomar en cuenta esta consideración, tropieza uno a menudo con dificultades en la comprensión de la teoría cuántica.

Nuevas perspectivas parecen, según Bohr, abrirse entonces a dominios ajenos a la física. Como ejemplos de esto podemos citar las interesantes especulaciones que emanan en torno al problema de los *organismos vivos* en nuestra imagen del mundo.

Siguiendo a este pensador, concretemos el problema en la forma siguiente: ¿Podemos extender el dominio de aplicación de nuestros conceptos adaptados a la descripción de los fenómenos de la naturaleza inanimada a las leyes que regulan los fenómenos vitales? La respuesta de Bohr a esta pregunta fué aclarada en una conferencia dada en 1929 ante la Asamblea de físicos y naturalistas escandinavos. He aquí sus propias palabras: “Los caracteres específicos de los fenómenos vitales y, en particular, la auto-estabilización de los organismos, deben estar inseparablemente ligados a la imposibilidad esencial de un análisis detallado de las condiciones físicas en que la vida se desenvuelve”.

Para poder abordar un problema de mecánica cuántica, es necesario conocer el modo estadístico del comportamiento del sistema que trata dicho problema. Pero no es posible estudiar el comportamiento estadístico de un número dado de átomos a menos que se conozcan exactamente las condiciones externas a que se encuentran sometidos. Según esto, no nos es posible hoy en día definir en la escala atómica un ser vivo, ya que debido al metabolismo nos es imposible discernir con rigor cuáles átomos pertenecen al organismo y cuáles no.

Si se quiere, por otra parte, estudiar un organismo hasta llegar a una descripción atómica de éste, es necesario practicar sobre él una intervención de tal naturaleza que arrastra a la muerte al ser vivo.

La descripción de los organismos vivos es actualmente susceptible de dos modalidades o aspectos que se complementan entre sí. Analizamos químicamente un organismo físico y perturbamos por consiguiente, en cierta medida, su evolución normal de vida, o bien, estudiamos esta última haciendo una descripción de las leyes fundamentales de los fenómenos vitales, pagando con esa vida la incertidumbre congénita de la descripción físico-química de dicho organismo.

Bohr concluye que el dominio de aplicación de la mecánica cuántica ocupa una posición intermedia entre el dominio en que es aplicable la mecánica clásica y el de la biología, caracterizado por el modo teleológico de razonamiento.

Las direcciones aparentemente opuestas a que ha estado sujeta la biología, es decir, el vitalismo y el mecanicismo, no son sino aspectos complementarios en nuestra descripción de los organismos vivos. El modelo metódico de la teoría de los cuantos nos muestra la tesis vitalista de la anatomía de la vida, y la tesis mecanicista; “en la naturaleza animada son

vigentes sin limitaciones las leyes físico-químicas”, no existe ninguna contradicción cuando ellas se aplican a la descripción de la vida ya que nunca aparecen simultáneamente.

## II. *El concepto de causalidad*

Todo lo que sucede en el presente tiene suficiente fundamento en el pasado, o dicho más brevemente, no hay hecho que no tenga causa. Existe pues una cierta trabazón legal que determina que todo acontecimiento en la naturaleza esté tan profundamente arraigado en el pasado del universo que su aparición resulta totalmente forzada por una necesidad que no admite libertad alguna. El universo, pues, forma un solo todo en *el espacio y en el tiempo*.

En la física, la causalidad toma una forma especial que requiere un enunciado explícito. Dos conocimientos son necesarios para explicar físicamente un hecho, a saber, un *estado* del universo antes del hecho y *la forma en que evoluciona dicho universo*. El primero es un hecho empírico, o mejor dicho, un *datum* que debe conocerse, y el segundo, una *ley* que nos enseña cómo cambia el universo en el curso del tiempo, es decir, cómo se desenvuelven entre sí los estados de él. Considérese, por ejemplo, para comprender esto, que se trata de explicar por qué un obús lanzado desde un cañón cayó en tal posición del terreno y en tal instante del tiempo. Nos es necesario, ante todo, conocer la posición que tenía el cañón antes de disparar, el instante en que se produjo tal disparo y la velocidad del proyectil en ese momento. Esto es un datum que sólo podemos obtener mediante un conocimiento empírico de dónde y cuándo sucedió el primer hecho. El resto del universo suponemos que no ha cambiado sino en la posición del obús (al que para mayor simplificación suponemos inerte, es decir, sin transportar explosivo). Pero nada obtendríamos con conocer esta condición inicial si no tuviésemos al mismo tiempo una información exacta de cómo se mueve el obús en el espacio en el transcurso del tiempo, o sea, si no conociésemos la forma de evolución de él. Es necesario conocer, pues, la ley que regula el movimiento y mediante ambas informaciones logramos dar lo que se llama en física una explicación de la posición y del instante en que cayó el proyectil. En efecto, introducidas en la ley del movimiento las condiciones iniciales antes señaladas: posición, instante y velocidad, automáticamente la ley nos da la

posición y el instante en que cayó el obús. Es un simple despeje de incógnitas de la ecuación matemática que expresa la ley.

Este enunciado de la causalidad que hemos dado era el que usaba inflexiblemente la física clásica y que pretendemos ahora analizar para estudiar qué hipótesis contiene implícitas. Desde luego, para conocer las condiciones iniciales es necesario realizar una observación de ellas. Cuanto más impreciso sea nuestro conocimiento al respecto, tanto más impreciso será el resultado del cálculo de la posición y velocidad finales. La física clásica suponía que era posible observar un sistema (el proyectil, en nuestro ejemplo) de manera tal que la perturbación que sobre él recaía debido a la misma observación fuese tan pequeña como se quisiese. Pero la experiencia ha mostrado que existe un "mínimum" de perturbación bajo el cual no es posible establecer acoplamiento alguno entre el sistema observado y el aparato de observación. Consecuencia de ello es que no podemos conocer con rigor las condiciones iniciales exigidas y, por consiguiente, tampoco podremos conocer con rigor el futuro exacto del sistema considerado.

Por otra parte, la misma imprecisión se observará en la ley de evolución, ya que ésta ha sido obtenida de numerosas observaciones de estados finales e iniciales y, por consiguiente, la misma ley es estadística y no nos da con todo rigor lo que sucederá, sino lo que más probablemente debemos esperar. Para la física clásica este defecto era debido a la imperfección de las observaciones, pero estas últimas podían hacerse tan exactas como se quisiera.

Nos enfrentamos ahora con el problema siguiente, que exigirá, como veremos luego, las ideas de Bohr para ser resuelto: si queremos considerar la causalidad en todo su rigor, entonces no debemos dividir el universo en parte observada e instrumento de observación, pues esta división imposibilita fundamentalmente toda comprobación rigurosa de los vínculos causales. Si, por el contrario, practicamos una observación ya no cabe pretender causalizar el sistema observado.

Entremos ahora a considerar el hecho de que toda observación implica necesariamente medidas de espacio y de tiempo. El resultado de ellas se esquematiza en una descripción espacio-temporal del sistema observado que podemos hacer después de realizar las mediciones. Sin una observación tal, no podríamos describir rigurosamente el sistema en el espacio y en el tiempo.

Concluimos de esto que la descripción de los fenómenos en el espacio y en el tiempo es consecuencia congénita de una observación practicable sobre ellos, e implica consigo la división de los fenómenos observados y de los instrumentos de observación.

La física clásica suponía que la ley general de la causalidad y la descripción de los fenómenos en el espacio y en el tiempo eran perfectamente compatibles, y en toda su doctrina usa ambas conjuntamente.

Este modo de ver de la física antigua es hoy en día insostenible, ya que no es posible, debido a la inevitable perturbación que arrastra consigo toda observación, describir con rigor un hecho en el espacio-tiempo, esto es, practicar una observación pura y causalizar este hecho en forma también rigurosa.

Si se comprendiesen en el sistema observado los instrumentos de medida, no podría sacarse partido de esta unión a menos que nuestra observación de esos mismos instrumentos fuese exenta de indeterminación, pero esto no es posible, ya que sobre ellos deberían aplicarse otros instrumentos. Finalmente, no se podría seguir las relaciones de causa a efecto cuantitativamente, sino haciendo intervenir junto con el sistema todo el universo, pero entonces la física, como ciencia experimental, desaparece y no queda más que un esquema matemático.

La división del universo en sistema observado e instrumento de observación se opone luego a que la ley de causalidad sea aplicada rigurosamente.

Este estado de cosas ha conducido a la situación siguiente: existe una relación de complementariedad entre el modo de descripción causal y el modo de descripción espacio-temporal.

Si describimos un sistema en el espacio-tiempo (que pasa por consiguiente a ser un ente imaginable), ya no podemos seguir su evolución causal y debemos contentarnos con cierta incertidumbre inevitablemente ligada a dicha descripción.

Si por el contrario, nos negamos a toda representación en el espacio y en el tiempo, la física, exenta entonces de observación, pasa a ser un esquema matemático perfectamente compatible con la causalidad.

La teoría cuántica nos enseña además que si nuestro modo de pensar ordinario, que es sólo el modo de intuición causal a la vez que espacio-temporal, se adapta bien a los fines de la explicación de los fenómenos macroscópicos, ello es debido a la pequeñez de la interacción mínima con

que puede ser imaginado un sistema cuando entra en contacto con un instrumento de medida, y que en la física se expresa por la extraordinaria pequeñez del cuanto  $h$  de Planck (del orden de  $1/10^{27}$  c. g. s.).

Esto nos hace ver que podemos seguir causalmente un sistema hasta un grado extraordinario de precisión sin que encontremos aún desviaciones sensibles a ella, pero que a la vez que nuestra medida se vaya afinando el sistema irá quedando cada vez más perturbado haciéndose al final tales las imprecisiones que quedará afectada hasta la definición misma del sistema.

El esquema matemático simboliza el significado mismo que tiene la causalidad en la física y expresa la inteligibilidad que poseemos de los resultados experimentales.

Para definir con precisión un sistema, tenemos que aislarlo del resto del universo, y no podemos entonces observarlo, y viceversa, para observarlo tenemos que hacerlo entrar en comunicación con los instrumentos de medida, lo que trae consigo una pérdida de la definición. En resumen tenemos que la definición y la observación tomadas como posibilidades ideales deben ser consideradas como aspectos complementarios, pero mutuamente exclusivos, de nuestra representación de los resultados experimentales.

Terminemos diciendo que el principio de causalidad en física ha llegado a expresar las posibilidades ideales de definición y de inteligibilidad matemática, excluyendo la posibilidad ideal de observación, la cual ha pasado a constituir un aspecto complementario de la primera.