

Causalidad y Mecánica Cuántica

OLGA LUCÍA VARELA MACHADO*

La causalidad en la filosofía

La noción de causalidad ha sido largamente debatida y analizada por gran cantidad de filósofos que encuentran en ella el misterio de un principio aparentemente necesario e indemostrable. Esta condición hace pensar en su validez para el conocimiento, pues gracias a ella, por ejemplo, se han desarrollado las ciencias en occidente y el hecho de que no pueda demostrarse formalmente, tal y como se demostraría cualquier teorema, hace que la discusión sobre su sentido y validez se convierta en algo irresoluto.

Como lo que interesa ahora no es hacer un tratado histórico sobre la evolución filosófica de la idea de causalidad, sino preparar el debate que se desarrolla en torno a ella en la física, específicamente en la mecánica cuántica, se tomará el sentido estricto de la idea de causalidad para dicha ciencia. Obviamente, también deberá tocarse inicialmente su sentido filosófico en algunos autores, pues, si bien la discusión nace en la filosofía, no se desprende completamente de ella aunque pase a hacer referencia directa a ecuaciones y experimentos concretos.

La idea de causalidad puede rastrearse, en la historia de las ideas, hasta los griegos. Se cree que Demócrito y la escuela de los atomistas fueron los primeros en hacer referencia explícita a ella. Sin embargo, la idea heredada por la ciencia proviene más concretamente de Aristóteles, quien realiza un primer estudio proponiendo cuatro causas: formal, material, eficiente y final; y, aunque no en todo su sentido, es la causa eficiente aristotélica la que retoma Descartes y la que se conoce, con algunas variaciones, en la física clásica. Básicamente la diferencia entre la causa eficiente aristotélica y la cartesiana radica en la definición que cada uno hace del movimiento, pues ésta hace referencia directa al motor de las cosas, a lo que las ocasiona o las produce. Restringir el papel de la causalidad a un solo principio demarca el comienzo de una discusión que toma básicamente dos caminos: el científico —en el sentido de las ciencias exactas— y el filosófico, que más adelante será abordado por el escepticismo.

* Filosofía · Instituto de filosofía · Universidad de Antioquia; volguita03@yahoo.es

La evolución que se ha dado en filosofía, de la causalidad, es mucho más compleja de lo que podría interesar para este estudio. Bastará con resaltar que el desarrollo del problema en la filosofía toma su camino más importante con la indagación hecha por Hume acerca de su carácter necesario. Descartes propone una causalidad totalmente analítica producida por la razón en concordancia directa y necesaria con la naturaleza, pero esta teoría parece albergar algunas contradicciones fundamentales que los mismos cartesianos tratarán de enmendar. Malebranche, Berkeley, Leibniz, entre muchos otros autores hacen diferentes retoques a la teoría, haciendo cada vez más evidente lo dudoso del carácter necesario del principio causal, hasta llegar a Hume quien definitivamente cambia la orientación de la idea. No es la naturaleza misma la que contiene las relaciones causales que descubre la razón humana, sino que se trata de cierta regularidad extraída de la experiencia la que hace creer que existe dicha relación en la naturaleza. Esto indica que las relaciones causales pertenecen al ámbito psicológico mas no a la naturaleza misma. Hume lo menciona de este modo en su *Investigación sobre el conocimiento humano*, (50): “Ningún objeto revela por las cualidades que aparecen a los sentidos, ni las causas que lo produjeron, ni los efectos que surgen de él, ni puede nuestra razón, sin la asistencia de la experiencia, sacar inferencia alguna de la existencia real y de las cuestiones de hecho”. Posteriormente, esta idea de Hume acerca del origen experimental de la causalidad llevaría a Kant a la categorización de este principio. Pasa entonces de ser una idea analítica para constituirse en un concepto sintético, necesario no en la naturaleza sino en el entendimiento humano; lo que implica que, aunque el principio de causalidad es necesario para comprender la naturaleza, es una elaboración del entendimiento anterior a toda experiencia. Al respecto dice el mismo Kant (KrV, 189): “El principio de la relación de causalidad en la sucesión de los fenómenos tiene, pues, también validez anterior a todos los objetos de la experiencia..., puesto que él mismo es fundamento de la posibilidad de esta experiencia.”

No es justamente aquí donde termina la discusión filosófica acerca de la validez de la causalidad, pero es con la formulación kantiana con la que se resuelven sus problemas fundamentales, dándole un acabado concreto de aplicación epistemológica al controvertido principio.

La causalidad en la física

Podría decirse que el problema de la causalidad en la física se resuelve cuando Newton introduce la fuerza, en su primera ley del movimiento, como causa del cambio de estado de un cuerpo y toma forma matemática cuando se propone que el efecto de la aceleración proviene directamente de una fuerza ejercida sobre el cuerpo, esto se formula tradicionalmente de la forma ($F=ma$).¹ A partir de esta idea se

¹ Vale la pena aclarar que la forma simbólica de esta ecuación no es propia de Newton, sino de científicos posteriores.

forman, a lo largo del desarrollo de la física, otras nociones como determinismo — que asegura la posibilidad de medir el estado de una partícula, es decir, medir simultáneamente su posición y velocidad— y predictibilidad —que es la posibilidad de calcular con bastante precisión el futuro o el pasado del estado de la partícula. Estas dos nociones, junto con la de causalidad, suelen tomarse erróneamente en la ciencia como una misma cosa. Sin embargo, es fácil aclarar el sentido de cada una de ellas si se piensa que la posibilidad de predicción de un fenómeno necesita de la posibilidad de determinar su posición y su velocidad en un instante cualquiera (determinismo) y a su vez ésta última solo puede darse si se considera verdadera la ley causal: predecir la posición y velocidad de una partícula en un instante depende necesariamente de la posibilidad de medirlos en el presente. Por lo tanto depende de que sea válido el determinismo, y así mismo para que el determinismo se cumpla es necesario pensar en la idea de que estados pasados iguales desencadenan estados futuros iguales que es, a grandes rasgos, lo que implica la causalidad en la física. No obstante, mirar el esquema en sentido contrario no tiene la misma validez, lo que implica que para que se cumpla la causalidad no se necesita que sea posible determinar posición y velocidad simultáneamente, y esta posibilidad, a su vez, no implica poder predecir ciertamente las consecuencias de estas medidas. Esta confusión, que aún puede encontrarse en algunos científicos, se debe a que las ideas de causalidad y determinismo fueron tomadas como la misma cosa hasta comienzos del siglo XX y es muy importante tener en cuenta esta distinción, pues suele llevar a confusiones cuando se analiza el papel de la causalidad en la nueva teoría cuántica.

Si se piensa entonces en la posibilidad de predecir con la mayor exactitud posible la posición y la velocidad de un planeta en el futuro, se pensará fácilmente en la ecuación causal de Newton con la cual, una vez medido el estado actual del planeta, se podrá predecir el estado futuro, dado que se conocen las consecuencias que la fuerza de gravedad producirá en él. Ahora, calcular el estado futuro del volumen determinado de un gas resulta mucho más difícil, a pesar de que la causalidad es válida para él: pese a que la acción de las diversas fuerzas que actúan entre sus moléculas puede conocerse (siendo posible, inclusive, determinar con bastante exactitud la posición y velocidad de las moléculas), resulta mucho más difícil debido a la gran cantidad de ecuaciones que supone tal predicción, asunto que finalmente hace inmanejable el sistema.

Pero esta imposibilidad de predicción no se debe a una limitación de principio, sino a una limitación humana.

Es claro entonces que la validez de la causalidad y el determinismo tomó fuerza en la física debido a la gran coherencia y simplicidad que estos imponían a la naturaleza, haciendo más fuerte la idea de un orden implícito en el universo.

Aplicación de la causalidad a la mecánica cuántica

El primer tropiezo que presenta la idea de causalidad en la física aparece con la propuesta de la dualidad onda-partícula. De Broglie, quien hace la propuesta (pensando en una analogía anterior hecha por Einstein), otorga características ondulatorias a los electrones. Esta idea desencadena una serie de aplicaciones duales de carácter ondulatorio y corpuscular para todos los objetos subatómicos. Gracias a esta dualidad logra explicarse la dificultad que se presenta en la medición del estado a niveles cuánticos, pues la *esquizofrenia* de las partículas subatómicas impide medir posición y velocidad en un mismo instante. Para solucionar este problema, que parecía sólo una limitación de los aparatos de medición, Heisenberg propone el principio de incertidumbre, no sin antes proponer una nueva noción de *estado*, donde la medición debe involucrar aspectos de carácter ondulatorio y corpuscular.

El éxito de Heisenberg es que logra involucrar dentro de un sistema axiomático la imposibilidad que se presentaba para medir el *estado* (en sentido clásico) en la mecánica cuántica. Esta axiomatización formaliza totalmente la imposibilidad —considerada como un defecto de la teoría—, convirtiéndola en parte esencial del mundo subatómico.

Muchos científicos se resistieron a creer en la validez de este principio pues el determinismo fue uno de los enunciados más valiosos en el desarrollo de la física, dado que permitió volcar toda la credibilidad en los resultados de la ciencia. Por eso, decir que el determinismo no era más que una creencia metafísica, significó un duro cambio de paradigma que muchos físicos no estuvieron dispuestos a afrontar.

Pero lo más terrible de Heisenberg no fue sólo introducir la invalidez del determinismo en la axiomática de la mecánica cuántica, sino utilizar para el cálculo de los sistemas subatómicos ecuaciones no causales, lo que alertó a la ciencia acerca de la validez de la causalidad.

La confusión de la causalidad y el determinismo

Es fácil, cuando se lee sobre el papel de la causalidad en la nueva teoría cuántica, encontrar autores que afirman la invalidez de la causalidad apoyados en la imposibilidad de medir la posición y la velocidad de un objeto subatómico. Esta confusión puede haber sido producida, en primera medida, por la forma indistinta en que se trataron determinismo y causalidad en los siglos XVIII y XIX, y en segundo lugar, por la introducción inicial de ecuaciones no-causales para el cálculo de la nueva teoría. Sin embargo, esta matemática revolucionaria usada en los fenómenos cuánticos no fue una imposición definitiva. Desde la axiomatización hecha por Heisenberg no pasó mucho tiempo antes de que otro científico lograra estructurar una ecuación causal equivalente a esta primera: la función de onda introducida por Schrödinger que tenía el firme propósito de restaurar la forma clásica de los principios científicos, introduciendo una ecuación que fuese equivalente a la

newtoniana. Puede ser ligero afirmar que esta forma matemática causal, aplicada a la mecánica cuántica, en lugar de ser un adelanto para la ciencia constituyó un retroceso, pero es importante mencionarlo, si se tiene en cuenta que los procesos de medida que seguían realizándose en la experimentación negaban continuamente la estructura causal del mundo subatómico.

Por eso, debe ser claro entender que la mecánica cuántica no rompe con la causalidad por la imposibilidad demostrada de medir posición y velocidad, pues estas características sólo la hacen indeterminista y por la misma razón se le da nombre al principio de incertidumbre (ahora demostrado y hecho teorema), porque niega el sueño determinista de poder conocer el estado de todas las partículas del universo en un instante dado.

¿Es o no es?

Queda entonces abierta la pregunta: ¿es o no aplicable la causalidad a la mecánica cuántica? Esta pregunta plantea ya un terreno resbaladizo y fangoso que lleva fácilmente a confusiones. Muchos estudiosos han llegado a concluir que, siendo posible usar ecuaciones causales para los fenómenos cuánticos, la validez de la aplicación causal es directamente deducible de esa posibilidad. Sin embargo, no puede ignorarse la importancia que tiene la experimentación en esta ciencia y por consiguiente la importancia que tienen los procesos de medida en la teoría. Estos procesos de medida, por condición axiomática y de principio, interfieren sustancialmente en los fenómenos mismos. No es posible realizar una observación a niveles cuánticos sin interferir en el sistema. Observar es interferir y no sólo eso: si no se observa no se puede saber nada acerca del sistema, y si se observa se está interfiriendo en el fenómeno mismo. Ésta es una de las razones fundamentales por las que los fenómenos subatómicos son no-causales, pues no puede saberse, mientras no se observe, lo que ocurre con el sistema y la separación entre un intervalo y otro de observación genera la necesidad de considerar los resultados de los cálculos sólo en términos de probabilidades. Así, aunque la función de onda sea una ecuación causal, los resultados son sólo probabilidades y no predicciones, como los resultados de las ecuaciones clásicas causales. La otra razón por la que puede decirse que los fenómenos cuánticos no son causales es porque, como se dijo anteriormente, la causalidad implica que estados pasados iguales desencadenen estados futuros iguales y ésta es una condición fundamental que no se cumple a la hora de observar un sistema cuántico, ya que, dado el estado de dos sistemas idénticos a este nivel, es imposible predecir el estado futuro de ambos que será, por demás, diferente en cualquier caso.

Debe concluirse entonces, cautelosamente, que no tiene validez experimental la aplicación de la causalidad a los fenómenos de la mecánica cuántica. Aunque en la forma matemática de la ecuación sea posible evidenciarla. Además, puede ser importante mencionar que si bien la causalidad en la filosofía cumple el papel de

una categoría del conocimiento, debe pensarse con cuidado las consecuencias que la ruptura de este principio trae para la comprensión de los fenómenos subatómicos. En alguna ocasión Heisenberg comentaba a su amigo y colega Pauli lo difícil que era entender en estos campos nuevos de la ciencia, planteando una reformulación del concepto entender. Puede decirse que la dificultad que encontró Heisenberg en este punto está sustentada en la ruptura esencial que se da en la correspondencia causal de los fenómenos. Y, aunque sea aventurado decirlo, si Kant tenía razón, no puede ser posible el conocimiento de estos fenómenos, o bien deberá superarse la ausencia de esta categoría para lograr comprenderlos.

Bibliografía

- Bohr, Niels, (1970) *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*, Madrid, Aguilar. Capítulo II, III y IV: “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica”, “El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza”, “La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la naturaleza”. Broglie, Louis de, (1939) *La física nueva y los cuantos*, Buenos Aires, Losada.
- Capec, Milic, (1973) *El impacto filosófico de la física contemporánea*, Madrid, Tecnos, Capítulo XVI: “El fin de la ilusión de Laplace”.
- Carnap, Rudolf, (1969) *Fundamentación lógica de la física*, Buenos Aires, Sudamericana. Capítulo XIX: “La causalidad”.
- Hume, David (1996) *Investigación sobre el conocimiento humano*, Madrid, Alianza. Kant, Emmanuel, [KrV] (1998) *Crítica de la Razón Pura*. (Rivas, Pedro. Traductor) Madrid, Alfabuara.
- Lopez Corredoira, Martín (2001) “Determinismo en la física clásica: Laplace vs. Popper o Prigogine“, *El Basilisco*, Oviedo, 2ª Época, 29, Enero-Marzo, pp. 29-42.
- Margenau, Henry (1970) *La naturaleza de la ley física*, Madrid, Tecnos. Capítulo XIX: “La causalidad”.
- Mittelstaedt, Meter (1969) *Problemas filosóficos de la física moderna*, Madrid, Alambra. Capítulo 5: “La ley de causalidad”.
- Ullmo, Jean (1959) *El pensamiento científico moderno*, Madrid, Taurus. Capítulos V y VI: “La causalidad”, “Causalidad y determinismo”.