

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS X JORNADAS

VOLUMEN 6 (2000), Nº 6

Pio García
Sergio H. Menna
Víctor Rodríguez
Editores



ÁREA LÓGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



Mecánica cuántica y determinismo: estados cuánticos y no-localidad

Olimpia Lombardi*

Introducción

Una afirmación que se ha convertido en lugar común en la filosofía de la física del siglo XX es la que sostiene que la irrupción de la mecánica cuántica (MQ) ha puesto punto final a la cosmovisión determinista clásica. Bien conocido es el hecho de que esta teoría impide predecir con certeza el valor de las magnitudes sujetas a medición. La pregunta es: ¿implica esto un indeterminismo de carácter ontológico?¹ No toda teoría que asocie probabilidades a ciertas magnitudes físicas representa un desafío al determinismo en el plano ontológico: la probabilidad puede ser interpretada como ignorancia acerca del valor preciso de tales magnitudes, tal como en el caso de la mecánica estadística clásica. Sin embargo, ciertas peculiaridades de la MQ parecen apuntar a profundos obstáculos para la concepción determinista, así como exigir una detenida revisión de la ontología subyacente a la cosmovisión clásica.

Una dificultad que surge en todo intento de analizar las implicaciones filosóficas de la MQ es la que se relaciona con las variadas y dispares interpretaciones de que ha sido objeto la teoría. Frente a tal multiplicidad interpretativa, ¿qué se entiende por MQ? El objetivo del presente trabajo consiste en examinar la relación entre MQ y determinismo a la luz de esta pregunta. No se trata aquí de defender una u otra de las diferentes interpretaciones, sino de abordar el problema bajo la guía de ciertos resultados teóricos y experimentales cuya aceptación goza de un consenso prácticamente unánime en la comunidad científica actual.

El carácter determinista de la ecuación de Schrödinger

En oposición a la tradicional interpretación indeterminista de la MQ, Nagel sostiene que: “con respecto a su propia forma de descripción de estado, la teoría cuántica es determinista en el mismo sentido que lo es la mecánica clásica con respecto a la descripción mecánica de estado” (Nagel, 1989, p. 283). Esta perspectiva supone un sentido peculiar del predicado “determinista”: un sistema es determinista si su estado en t_1 fija unívocamente su estado en t_2 (con $t_2 > t_1$); en otras palabras, si el sistema se encuentra en el estado e_1 en el instante t_1 , es imposible que se encuentre en un estado diferente de e_2 en el instante t_2 posterior a t_1 .² Si esta definición se aplica con rigor, Nagel está en lo cierto –al menos para la evolución del sistema cuántico aislado–. En efecto, dado el estado v_0 en el instante inicial, la ecuación de Schrödinger fija unívocamente el estado v_t en cualquier instante posterior t , según $v_t = U_t v_0$, donde U_t es un operador función del tiempo y de la energía total del sistema. Algunos autores agregan que, en un sentido amplio de determinismo, la MQ es aún más determinista que la mecánica clásica en la medida en que los sistemas cuánticos resultan ser “menos caóticos” que sus contrapartidas clásicas, de modo tal que la mecánica cuántica “atenuaría” los efectos del caos (*cf.* Schuster, 1988). Pero, si esto es tan claro, ¿por qué insistir con el carácter indeterminista de la MQ?

* Universidad de Buenos Aires-CONICET

Según Hughes (1994, p. 75), el determinismo en tanto tesis metafísica, impone dos exigencias:

- Existe un único estado e_1 del mundo en el instante t_1 que es físicamente compatible con su estado e_0 en t_0 ($t_1 > t_0$).
- Tales estados, e_0 y e_1 , determinan los valores de todas las cantidades físicas en el mundo en los instantes respectivos.

La MQ cumple el primero de los requisitos pero no el segundo, y ello por las peculiares características de los estados cuánticos.

En mecánica clásica, dado un conjunto de partículas, pueden identificarse ciertas propiedades individuales: algunas de ellas son constantes (por ejemplo, la masa) y otras varían con el tiempo (por ejemplo, la posición). El *estado* del sistema en el instante t es el conjunto de las propiedades variables de las partículas en t : particularmente relevantes son la posición y la cantidad de movimiento de cada partícula, pues de ellas pueden obtenerse las restantes propiedades individuales. Se denominan *observables* a las magnitudes físicas del sistema que dependen de las propiedades de las partículas, tanto constantes como variables: ejemplo de ello es la energía cinética del sistema; también cuentan como observables las propiedades individuales de cada partícula, como su posición y su cantidad de movimiento. Matemáticamente, cada estado del sistema queda representado por un punto en el espacio de las fases Γ asociado al sistema: para un sistema de N partículas, el espacio de las fases es un espacio euclídeo ortogonal de $6N$ dimensiones, una por cada coordenada de la posición y una por cada componente de la cantidad de movimiento. Cada observable A se asocia a una función f_A que hace corresponder a cada punto del espacio de las fases un número real ($f_A: \Gamma \rightarrow \mathbb{R}$).

En MQ la situación es diferente. El *estado* de un sistema cuántico queda representado por un vector unitario en un espacio de Hilbert: espacio vectorial complejo que puede poseer infinitas dimensiones. Los observables cuánticos se representan mediante operadores hermiticos en dicho espacio.³ Si el operador A posee autovectores v_1, \dots de modo tal que $Av_i = a_i v_i$, los autovalores a_i representan los valores que puede adoptar el observable A . Si el sistema se encuentra en un estado v_i que resulta ser autovector del operador A , la medición del observable A dará como resultado el autovalor asociado a_i con certeza. Pero, ¿qué sucede si el sistema se encuentra en un estado que no es autovector de A ? La teoría permite calcular las probabilidades de que el sistema adopte cada uno de los posibles valores a_i correspondientes al observable A .⁴ Por lo tanto, dado que como observables se consideran también las propiedades de las partículas que componen el sistema, en general el estado de un sistema cuántico no fija unívocamente tales propiedades.

En resumen, mientras en el caso clásico el estado del sistema viene dado unívocamente por las propiedades de sus partículas componentes, el estado cuántico sólo permite asociar una probabilidad a los valores que adoptan los observables del sistema, y esto es válido aún en el caso de una única partícula. Hughes (1994, pp. 68-69) señala esta diferencia al afirmar que el estado clásico es *descriptivo*, ya que puede pensarse como una "lista" de las propiedades de los componentes del sistema, y a la vez es *disposicional*, en la medida en que permite especificar la tendencia del sistema a comportarse de un cierto modo; el estado cuántico, en cambio, pierde todo carácter descriptivo y retiene únicamente el aspecto disposicional: sólo permite calcular la disposición del sistema a manifestar ciertos valores de sus

observables a través de la medición, lo cual ha sido exitosamente confirmado por vía empírica.

La pregunta es: ¿no podría reducirse el estado cuántico a un estado que mantuviera el carácter descriptivo de los estados clásicos? Esto se conseguiría considerando, a la manera de la mecánica estadística clásica, que el vector de estado representa, no el estado de un único sistema cuántico, sino la situación en la que se encuentra un *ensemble* de sistemas similares: las probabilidades se convierten así en frecuencias relativas dentro del *ensemble*. El sistema individual bajo estudio posee, entonces, valores definidos para sus observables, pero dado que ignoramos tales valores, sólo podemos calcular su probabilidad de ocurrencia a través de su frecuencia relativa en el *ensemble*.

Si bien clara y sencilla, la interpretación por *ensembles* (*ensemble interpretation*) se enfrenta a una dificultad insalvable. En un teorema de 1967, Kochen y Specker demostraron que el formalismo de la MQ impide asignar, de un modo consistente, un valor preciso a cada uno de los observables de un sistema que se encuentra en un cierto estado cuántico.⁵ En otras palabras, no es posible construir un espacio de las fases clásico que defina las propiedades de todos los componentes del sistema y, a la vez, permita reconstruir la estadística cuántica. Este resultado frustra todo intento de interpretar la probabilidad cuántica como medida de la ignorancia acerca de un microestado clásico subyacente en el que se encontraría el sistema, a la manera de la mecánica estadística clásica. En este sentido, muchos autores califican las probabilidades cuánticas como *irreducibles* (cfr. Earman, 1986, p. 232).

¿Cómo afectan estas peculiaridades de los estados cuánticos la cuestión del determinismo? La idea de determinismo implica que las propiedades que las entidades poseen en un instante fijan unívocamente las propiedades que poseerán en todo instante posterior. Esto se cumple en el caso de un sistema clásico. Pero en un sistema cuántico, el estado no es meramente un medio para expresar, de un modo resumido, las propiedades del sistema y sus componentes. Cómo interpretar esta singular característica de los estados cuánticos es objeto de diferentes interpretaciones; pero, al margen de ello, queda claro que el hecho de que exista una sucesión temporal unívoca entre los estados cuánticos de un sistema no permite asegurar que las propiedades del sistema en diferentes instantes también están relacionadas unívocamente. En consecuencia, a diferencia de lo que supone Nagel, el hecho de que la ecuación de Schrödinger fije unívocamente los estados futuros en función del estado presente no es suficiente para asegurar el carácter ontológicamente determinista del sistema.

Determinismo y localidad

En 1932, von Neumann formuló un famoso teorema mediante el cual consideraba haber demostrado la imposibilidad de que una teoría determinista de "variables ocultas", a la manera clásica, pudiera reproducir la estadística cuántica. El resultado de von Neumann fue citado por físicos y filósofos durante más de treinta años como argumento en contra del determinismo. En efecto, el teorema, en tanto tal, era totalmente correcto, pero no así la interpretación que brindaba su autor.⁶ En 1964 la discusión dio un giro inesperado cuando Bell, con su famosa desigualdad, cerró la posibilidad de formular una teoría de variables ocultas determinista y local que reprodujera la particular estadística cuántica.

Una teoría es *no-local* cuando predice que, en un sistema compuesto, el resultado de la medición de un subsistema no es independiente de las mediciones efectuadas sobre otro subsistema; esto da lugar a correlaciones entre los valores que adoptan, en un mismo instante, los observables correspondientes a subsistemas espacialmente separados. En una teoría de variables ocultas, la *no-localidad* implica que las variables ocultas que describen subsistemas espacialmente separados no son independientes entre sí. Pero, ¿cómo interpretar esta *no-localidad*?, ¿cómo explicar que dos subsistemas, no importa la distancia que los separe, puedan *simultáneamente* manifestar propiedades correlacionadas? Frecuentemente la respuesta alude a la posibilidad de acción a distancia: para mantener las correlaciones los subsistemas deben comunicarse entre sí y, por tanto, deben intercambiar información instantáneamente. La *no-localidad* se interpreta, así, como la posibilidad de propagación de señales a una velocidad superior a la de la luz, en abierta violación a la teoría de la relatividad. Pero, quienes adoptan esta perspectiva, consideran que el abandono de una teoría de tan amplia corroboración como la einsteniana es un precio demasiado alto para reinstaurar el determinismo a través de variables ocultas.

Sin embargo, es posible interpretar la *no-localidad* de manera que no implique, en modo alguno, acción a distancia: las correlaciones entre sistemas espacialmente separados no resultan, así, consecuencia del intercambio de señales superluminarias. En este sentido, suele señalarse que la *no-localidad* no permite enviar información entre puntos distantes entre sí a velocidad infinita; por ejemplo, en el famoso experimento EPR, nada hay que un experimentador pueda hacer sobre la partícula 1 para modificar el resultado que otro experimentador obtenga sobre la partícula 2, de modo tal de brindar información a este último acerca de lo sucedido sobre la primera partícula (*cf.* Wick, 1995, pp. 107-109). La *no-localidad* puede interpretarse como la *no-separabilidad* de los subsistemas que conforman un dado sistema: tales subsistemas no son independientes en la medida en que, aún separados distancias macroscópicas, siguen conformando un único sistema que se comporta como *un todo inescindible*. A esta idea apunta Michael Redhead cuando afirma que la *no-localidad* “niega la posibilidad de analizar o reducir totalidades en sus partes. En tal situación, la reducción parte-todo no puede siquiera ser formulada, en la medida en que requiere que cada subsistema posea sus propias propiedades locales independientemente del contexto holístico” (Redhead, 1995, p. 51). Ya no se trata, entonces, de explicar las correlaciones entre las propiedades de *dos* entidades espacialmente separadas –lo cual requiere una cierta “comunicación” entre ambas– sino de comprobar que existen correlaciones entre las propiedades de una única entidad, aún cuando ésta se encuentre extendida en el espacio.

El carácter holístico de la MQ también se manifiesta en otros resultados que se infieren de su propio formalismo. Por ejemplo, en general el estado de un sistema compuesto no es factorizable, esto es, no es expresable como producto de los estados de los subsistemas componentes (*cf.* Earman, 1986, p. 204; Dickson, 1996, p. 57). Además, en algunos casos los estados de los subsistemas componentes no definen unívocamente el estado del sistema total: podría decirse que hay más información en la especificación del estado del sistema compuesto que en la especificación de los estados de los subsistemas componentes (*cf.* Hughes, 1994, pp. 150-151); en términos aristotélicos, el todo es mayor que la suma de sus partes.

Varios autores (cfr. Earman, 1986, p. 204; Loewer, 1998, p. 319) coinciden en afirmar que, a diferencia de lo que suele suponerse, no es el indeterminismo sino este holismo de la MQ la razón por la cual Einstein consideraba la teoría fundamentalmente insatisfactoria: "Es una característica de los objetos físicos que sean pensados como dispuestos en el continuo espacio-temporal. Un aspecto esencial de tal disposición de los objetos de la física es que, en un cierto instante, posean existencia independiente entre sí, dado que tales objetos se encuentran situados en diferentes partes del espacio. Salvo que se adopte este tipo de supuesto acerca de la independencia de la existencia de objetos espacialmente separados, el pensamiento físico en el sentido familiar no sería posible" (en Born, 1971, p. 170). Pero es precisamente esta "independencia de la existencia de objetos espacialmente separados" lo que niega la no-localidad.

Es interesante preguntarse en qué medida la no-localidad interpretada como holismo, si bien no implica acción instantánea, resulta compatible con la relatividad especial. En el artículo donde demostraba su famosa desigualdad, Bell concluía que una teoría no-local que reprodujera la estadística cuántica "no podría ser Lorenz invariante" (Bell, 1964, p. 200). No obstante, en las últimas décadas algunos trabajos han señalado la posibilidad de reinterpretar la MQ respetando la Lorenz invariancia; en relación a uno de estos trabajos, en 1987 el propio Bell admitía que "esto aleja el fundamento de mi temor de que cualquier formulación exacta de la mecánica cuántica debe estar en conflicto con la invariancia Lorenz fundamental" (Bell, 1999, p. 284). Un ejemplo de este tipo de formulación es la que brinda Richard Healey: si bien acepta el carácter indeterminista de la MQ —pues no introduce variables ocultas que restauren el determinismo—, Healey admite el holismo de los sistemas cuánticos pero sin violar la invariancia de Lorenz, a condición de asignar las propiedades dinámicas al sistema en cada hiperplano tipo-espacio (*spacelike*); de este modo, tales propiedades ya no se asignan a puntos del espacio-tiempo sino a regiones extendidas; esto es, hiperplanos de tal espacio-tiempo (Healey, 1991, Cap. 5). No obstante, esta interpretación —o cualquier otra que implique holismo—, aún cuando logre no violar la letra de la relatividad restringida, se opone al espíritu einsteniano que a ella subyace, pues niega la independencia de sistemas situados en diferentes regiones del espacio.

Es imposible aquí pasar revista a los innumerables debates en torno al concepto de no-localidad. Sin embargo, si la no-localidad se libera de toda relación con señales superlumínicas y se interpreta como holismo, la MQ parece devolvernos una nueva imagen del universo: un universo que, desde el instante de su creación, constituye una entidad única, que se comporta como un todo inescindible en cada instante y a través de su evolución. Con esta interpretación, la no-localidad no se enfrenta al determinismo: la evolución del universo es la sucesión unívoca de sus estados, definidos ahora no sólo por sus observables sino también por las variables ocultas, cuyas correlaciones se explican por el hecho de representar propiedades de una entidad única e inanalizable en partes componentes. Desde esta perspectiva, la estadística cuántica es el resultado del recorte artificial y arbitrario que el observador efectúa para distinguir el sistema bajo estudio del resto del universo

Conclusión: ¿determinismo o indeterminismo?

En la primera parte del trabajo se ha rechazado la posición de Nagel argumentando que, dadas las peculiares características de los estados cuánticos, su sucesión temporal unívoca no es suficiente para asegurar el carácter determinista de los sistemas cuánticos. En la se-

gunda parte, se ha afirmado que ciertas teorías de variables ocultas permiten concebir un universo que evoluciona determinísticamente gracias a la no-localidad de tales variables. ¿Hemos presentado, entonces, una argumentación contradictoria?

Esta aparente contradicción pronto se disuelve si se considera una importante distinción que suele pasarse por alto en las discusiones acerca de la interpretación de la MQ: la MQ en su formulación tradicional y una teoría de variables ocultas que reproduce la estadística cuántica *no constituyen una misma teoría* sino dos teorías diferentes. Y ello no se debe a que difieran las interpretaciones, esto es, los referentes semánticos de los términos teóricos; ambas teorías son diferentes en el nivel de sus formalismos. El aspecto que las dos teorías comparten es su base empírica: ambas son empíricamente equivalentes en la medida en que permiten efectuar las mismas predicciones para las experiencias típicas en el ámbito cuántico.

Esta observación muestra la importancia de recordar las enseñanzas epistemológicas acerca de la subdeterminación de la teoría por los datos. Creer que es posible extraer conclusiones de alto nivel teórico a partir de los datos empíricos es caer en una posición epistemológicamente ingenua según la cual la evidencia determina la teoría. En particular, nuestro caso ilustra claramente la tesis de la subdeterminación: aún cuando la MQ tradicional y una teoría de variables ocultas puedan coincidir en el nivel observacional, no son equivalentes en el nivel teórico; por lo tanto, pueden diferir en gran medida las cosmovisiones que subyacen a cada una de ellas en lo que se refiere al problema del determinismo.

Notas

¹ El predicado "determinista" refiere, en su sentido ontológico, a una propiedad de los sistemas, y en su sentido gnoseológico, a una propiedad del conocimiento que puede adquirirse acerca de un sistema. Aquí utilizaremos exclusivamente el primero de los dos sentidos.

² Dicha caracterización depende del marco metafísico que se adopte para la elucidación de los conceptos de posibilidad y necesidad. Una interesante propuesta es la que brinda Earman (1986, pp. 12-14) en términos de la noción de *mundo posible*.

³ Un operador A es *hermítico* si, para cualesquiera dos vectores u y v , el producto escalar entre u y Av es igual al producto escalar entre Au y v ($\langle u|Av\rangle = \langle Au|v\rangle$) (cfr. Hughes, 1994, p. 47).

⁴ La probabilidad $p_\alpha(A, a_i)$ de que, encontrándose el sistema en el estado v_α , el observable A adopte el valor a_i es igual al cuadrado del módulo del vector que resulta de proyectar v_α sobre la dirección definida por el autovector v_i correspondiente al autovalor a_i ($p_\alpha(A, a_i) = |P_i^\dagger v_\alpha|^2$) (cfr. Hughes, 1994, pp. 64-65).

⁵ Este resultado se puede generalizar para cualquier teoría física que utilice la capacidad representacional completa de un espacio de Hilbert de tres o más dimensiones (cfr. Hughes, 1994, pp. 168-170).

⁶ Para una detallada revisión de las críticas al resultado de von Neumann, cfr. Jammer, 1974, Cap. 7.

Bibliografía

Bell, J. (1964), "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox", *Physics I*, pp. 195-200.

Bell, J. (1990), *Lo Decible y lo Indecible en Mecánica Cuántica*, Alianza, Madrid.

Born, M. (1971), *The Born-Einstein Letters*, Macmillan, Londres.

Dickson, W. M. (1996), "Determinism and Locality in Quantum Systems", *Synthese*, Vol. 107, pp. 55-82.

Earman, J. (1986), *A Primer on Determinism*, Dordrecht, Reidel.

Healey, R. (1991), *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge MA.

Hughes, R. I. G. (1994), *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Harvard University Press, Cambridge MA.

- Jammer, M. (1974), *The Philosophy of Quantum Mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
- Loewer, B. (1998), "Copenhagen versus Bohmian Interpretations of Quantum Theory", *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 49, pp. 317-328.
- Nagel, E. (1989), *La Estructura de la Ciencia*, Paidós, Barcelona (1° Ed. 1961).
- Redhead, M. (1995), *From Physics to Metaphysics*, Cambridge University Press, Cambridge MA.
- Schuster, H. (1989), *Deterministic Chaos*, VCH, Weinheim.
- Wick, D. (1995), *The Infamous Boundary. Seven Decades of Heresy in Quantum Physics*, Copernicus: an imprint of Springer-Verlag, Nueva York.