

# MECÁNICA CUÁNTICA, DETERMINISMO Y LOCALIDAD

Olimpia Lombardi

Universidad de Buenos Aires – CONICET

## Introducción

Tal vez la prueba de imposibilidad más citada a favor del fin de la cosmovisión determinista clásica es la que surge del famoso teorema de Bell de 1964 (cf., por ejemplo, Fine, 1982). Tal teorema prueba que no puede existir una teoría de variables ocultas determinista y local que reproduzca las predicciones de la mecánica cuántica (MQ).

En el presente trabajo se analizará la relación entre el problema del determinismo y la noción de localidad puesta en juego en el teorema de Bell. En particular, se examinarán distintos enfoques según los cuales dicho teorema suministra elementos concluyentes en contra de una explicación determinista de los resultados cuánticos; el objetivo último consiste en argumentar que tales perspectivas no resultan aceptables en la medida en que se basan en una inadecuada interpretación del concepto de localidad.

## El teorema de Bell

El comienzo de la historia se remonta a 1935, cuando Einstein, Podolsky y Rosen (1935) idearon su famoso *Gedankenexperiment*, con el fin de demostrar el carácter incompleto de la MQ. La idea central del experimento consiste en considerar un par de partículas correlacionadas que se separan luego de interactuar, y utilizar las mediciones sobre una de las partículas para efectuar predicciones acerca de la otra. En el experimento EPR original, los observables incompatibles en juego eran posición y cantidad de movimiento; en 1951 Bohm propone una nueva versión donde los observables son las componentes de spin de partículas de spin semientero (para una descripción detallada, cf. Hughes, 1994, pp.159-162).

Sea un par de partículas cuyo spin total es cero. Una vez que las partículas se separan deben conservar el spin total: si se mide spin  $+1/2$  en una cierta dirección

sobre una de ellas, sobre la otra se medirá, con certeza, spin  $-1/2$  en la misma dirección. Pero, además, la MQ predice que si se realizan experiencias sobre una gran cantidad de pares de partículas, se observan correlaciones entre los valores del spin de una de las partículas en una cierta dirección y los valores del spin de la otra *en una dirección diferente*: tales correlaciones entre observables *distintos* son función del ángulo entre ambas direcciones. Sobre la base de este tipo de experiencias, Bell demuestra que ninguna teoría de variables ocultas determinista y local puede reproducir las correlaciones que la MQ predice, donde la *localidad* implica que las variables ocultas que describen sistemas espacialmente separados sean independientes entre sí (para una demostración detallada cf. Hughes, pp. 170-172). No obstante, debe resaltarse que el teorema de Bell no excluye la posibilidad de una teoría de variables ocultas determinista y no local que resulte predictivamente adecuada. Pero los problemas reaparecen cuando se trata de interpretar físicamente el concepto mismo de no-localidad.

### No-localidad y relatividad

Una teoría es no-local si las variables que describen sistemas espacialmente separados no son independientes, es decir, existen correlaciones entre ellas. Pero, ¿a qué se deben, físicamente, tales correlaciones?, ¿cómo explicar que dos sistemas puedan manifestar un cierto «acuerdo» respecto de sus propiedades *en un mismo instante*, aún cuando se encuentran separados por una gran distancia?

La respuesta a estas preguntas suele aludir a la necesidad de una acción a distancia entre ambos sistemas: las correlaciones se explican, así, como resultado de la comunicación instantánea entre sistemas espacialmente separados. De este modo, la no-localidad se interpreta como la posibilidad de propagación de señales a una velocidad superior a la de la luz, en abierta contradicción con la teoría de la relatividad. Sobre esta base, muchos autores consideran que una teoría determinista de variables ocultas constituye un desafío a la coherencia interna de la física; por ejemplo, Peter Kosso sostiene que

*el precio del determinismo es la violación de la teoría especial de la relatividad. La teoría de Bohm requiere señales causales que viajen más rápido que la velocidad de la luz (Kosso, 1998, p. 173).*

Pero quienes adoptan esta interpretación suelen considerar que el abandono de una teoría tan ampliamente confirmada como la einsteniana es un precio

demasiado alto para restaurar el determinismo a través de variables ocultas.

Pero, la no-localidad, ¿implica realmente acción a distancia? En la actualidad, diversos autores señalan la inadecuada asociación entre no-localidad y teoría de la relatividad. Por ejemplo, Earman (1986, p. 214) señala que la no-localidad requiere únicamente una dependencia semántica entre observables correspondientes a diferentes sistemas y no la presencia de señales superluminarias. En efecto, la mera correlación entre propiedades de sistemas espacialmente separados no permite enviar información entre ambos a una velocidad superior a la de la luz. Supóngase, por ejemplo, que por un motivo que desconocemos –y que, en este punto, no nos interesa– los números que se obtienen con dos dados se encuentran perfectamente correlacionados; aún así, una persona que juega con uno de los dados en Buenos Aires no puede enviar información mediante el resultado de sus tiros a otra que simultáneamente juega con el segundo dado en Roma, en la medida en que *no puede controlar* el resultado de su propio juego (para una analogía diferente, cf. Wick, 1995, pp. 107-108).

Por lo tanto, la no-localidad no implica acción a distancia: pueden existir correlaciones entre sistemas espacialmente separados sin la propagación de señales instantáneas. Pero, entonces, ¿cómo dar cuenta de tales correlaciones desde un punto de vista físico? La respuesta más inmediata consiste en suponer la existencia de un evento pasado que, actuando determinísticamente sobre los dos sistemas, sea el responsable de las correlaciones entre ambos. Sin embargo, según algunos autores, los resultados de Bell y su posterior confirmación experimental cierran el camino a toda posible explicación determinista de las correlaciones; pero esto es, precisamente, lo que aquí se pondrá en duda.

### El testeo de la desigualdad de Bell

Para obtener su famoso teorema, Bell arriba a una desigualdad matemática – conocida como *desigualdad de Bell*– que, según demuestra, se deriva de cualquier teoría de variables ocultas determinista y local que pretenda describir el experimento EPR en la versión de Bohm. La MQ, por el contrario, predice correlaciones que conducen a la violación de la desigualdad de Bell (cf. Hughes, 1994, pp. 172-174). Este resultado fue empíricamente confirmado en una serie de experimentos realizados en París por Aspect y sus colaboradores en la década del '80; allí se testearon correlaciones entre componentes de polarización –en lugar de spin– en pares de fotones: los fotones espacialmente separados manifestaron las correlaciones predichas por la MQ (cf. Rohrlich, 1983).

Tal vez bajo la influencia del famoso *dictum* de Bohr, según el cual para abordar un problema cuántico es necesario considerar el arreglo experimental completo, Bell supone que el resultado de la medición efectuada sobre una partícula es función del estado de la partícula y del estado del dispositivo de medición utilizado. Pero, al obtener su desigualdad, Bell asume además que el resultado de la medición efectuada sobre cada una de las partículas no es función del estado del dispositivo utilizado para medir sobre *la otra* partícula –y éste es el supuesto de localidad–. Ahora bien, la desigualdad es violada como consecuencia de la existencia de correlaciones entre los valores medidos sobre los dos subsistemas partícula+dispositivo de medición. La pregunta es: ¿no es posible que las correlaciones se deban al efecto determinista ejercido por un evento pasado sobre ambos dispositivos de medición? Hughes denomina *explicación tipo-E* a este modo de dar cuenta de las correlaciones, que las hace depender de la preparación previa del arreglo experimental (Hughes, 1994, p. 240).

Para descartar tal tipo de explicación, Bell asume los estados de los dispositivos de medición como *variables libres*, esto es, variables cuyos valores sólo tienen implicaciones en sus conos de luz futuros, pero no se relacionan con eventos pasados; de este modo se asegura que, al momento de la medición, los estados de los dispositivos resulten independientes entre sí, esto es, no correlacionados. A fin de efectivizar esta exigencia, Aspect diseña un arreglo experimental que permite modificar rápida, repetida e independientemente los polarizadores, suponiendo así, la independencia entre ambos dispositivos de medición (cf. Rohrlich, 1983). Muchos autores consideran que, de este modo, se cierra el camino a explicar las correlaciones predichas por la MQ en términos de la preparación previa del arreglo experimental. En particular, Hughes afirma que:

*las explicaciones tipo-E quedan excluidas por los experimentos de Aspect (Hughes, 1994, p. 245).*

Sin embargo, el propio Aspect reconoce que, en su experimento, el rápido y repetido cambio en el estado de los dispositivos de medición no se efectúa de un modo *verdaderamente aleatorio*: se trata, en realidad, de un cambio cuasi-periódico que simula un proceso aleatorio. Y agrega que sería necesario un experimento ideal, con la variación totalmente aleatoria de los estados de los polarizadores, para brindar una confirmación empírica definitiva de los argumentos teóricos de Bell. Pero, ¿cómo concebir tal experimento ideal?

En respuesta a esta cuestión, Earman (1986, p. 230) plantea una situación experimental en la cual, en el instante de medición, el estado de uno de los disposi-

tivos depende causalmente de un evento pasado que se encuentra fuera del cono de luz pasado del estado del otro dispositivo. En particular, Earman imagina un caso donde el estado del dispositivo *A* viene determinado por la frecuencia de un rayo de luz *L*, cuya línea de mundo no intersecta el cono de luz pasado del estado del dispositivo *B*. De este modo, el estado del dispositivo *A* podría ser diferente—debido a que la frecuencia de *L* es diferente— del que efectivamente se da en el instante de medición, y aún así ello no afectaría el estado del dispositivo *B* en el mismo instante: ambos estados resultarían, así, totalmente independientes.

Recapitulando, el problema puede formularse del siguiente modo. La MQ predice la existencia de correlaciones entre los resultados de las mediciones sobre sistemas espacialmente separados, en un experimento del tipo EPR. ¿Cómo explicar físicamente tales correlaciones sin contradecir la teoría de la relatividad? Si el resultado de cada medición es función del estado de partícula+dispositivo de medición, podría suponerse que las correlaciones se remontan a la existencia de un evento pasado, común a la historia de ambos dispositivos, que determina el estado de cada uno de ellos en el instante de medición. La estrategia para invalidar este tipo de explicación consiste en comprobar la existencia de correlaciones aún cuando los dispositivos de medición se comporten de un modo totalmente independiente: la no-correlación entre sus estados descartaría todo posible origen común. Esto es lo que Aspect intenta en sus experimentos y Earman mejora conceptualmente mediante su caso ideal. Por lo tanto, las correlaciones que la MQ predice no podrían explicarse en términos de una evolución determinista a partir de un evento pasado compartido.

### Tomándonos la no-localidad en serio

La pregunta es: ¿puede asegurarse la independencia causal entre los estados de los dispositivos en el instante de medición? Niall Shanks (1994) señala la posibilidad de que esto no ocurra: si nos remontáramos a un pasado suficientemente lejano, tal vez podríamos hallar un evento cuyo cono de luz futuro incluyera los estados de ambos dispositivos en el instante de medición;

*podría agregarse que todos los eventos se encuentran dentro del cono de luz futuro del Big Bang (Shanks, 1994, p. 32).*

La misma idea expresa Michael Dickson cuando señala que:

*si la teoría del Big Bang es correcta, entonces el estado inicial del universo se encuentra en el cono de luz pasado de todo evento (Dickson, 1996, p. 73).*

Por lo tanto, en *nuestro* universo se viola la independencia causal entre los estados de los dispositivos en el instante de la medición. En consecuencia, para el determinista persistente, ni los experimentos de Aspect ni el caso ideal de Earman resultarán argumentos definitivos en contra de su perspectiva metafísica: las correlaciones predichas por la MQ *pueden* ser explicadas en el contexto de un universo que evoluciona de un modo determinista.

Dickson señala el carácter *contingente* de una dependencia causal debida exclusivamente al peculiar origen del universo actual. En un sentido análogo, Shanks subraya que su argumento se dirige a demostrar la *posibilidad* de brindar una explicación determinista de los resultados de los experimentos tipo EPR sin violar las exigencias relativistas; sin embargo, admite que también pueden darse ciertos estados iniciales del universo que no permitan dar cuenta de un modo determinista de las correlaciones cuánticas. ¿Qué aspecto tendría uno de estos posibles estados iniciales?

Si bien Shanks y Dickson no desarrollan explícitamente esta cuestión, la respuesta parece sencilla. Basta con imaginar que el universo no se origina en un evento puntual único, como el Big Bang, sino en dos eventos espacialmente separados; de cada uno de ellos surgen rayos de luz que nunca se cortan en el continuo espacio-temporal; tales rayos actúan finalmente sobre los dispositivos del experimento tipo EPR en el instante de la medición. De este modo se efectivizan las condiciones exigidas por Earman: la independencia de los estados de los dispositivos en el instante de medición se hereda de la independencia de los eventos espacialmente separados que dan origen al universo.

Pero aquí es necesario volver al concepto de no-localidad y, en particular, a su interpretación física. Como algunos autores señalan, la no-localidad puede interpretarse como la *no-separabilidad* entre los subsistemas que componen un dado sistema (cf. Bunge, 1984); a esta idea apuntan, no sólo el teorema de Bell, sino también otros resultados teóricos de la MQ acerca de la irreductibilidad de los estados cuánticos de sistemas compuestos (cf. Hughes, 1986, pp. 148-149). Sin embargo, en las discusiones acerca de esta característica de la teoría, suelen no extraerse todas las consecuencias que conlleva esta interpretación. ¿Qué significa que puedan identificarse, en el origen del universo, dos eventos diferentes espacialmente separados? Un evento es un punto en el continuo espacio-temporal que pertenece a la línea de mundo de un sistema. Por lo tanto, considerar la posibilidad de que en el inicio del universo se dan *dos* eventos espacialmente se-

parados implica suponer que el universo está compuesto por dos subsistemas, cuyas líneas de mundo se inician en tales eventos. Pero esto es, precisamente, no hacer justicia a la interpretación de la no-localidad como no-separabilidad: si nos tomamos la no-separabilidad en serio, ya no se debe pensar que la separación espacial permite reconocer sistemas diferentes de comportamiento independiente. Desde esta perspectiva, no es posible concebir dos eventos independientes en el origen del universo: el universo no puede descomponerse en subsistemas; desde su inicio –sea puntual o como objeto extendido– constituye una entidad única, una totalidad *inescindible*. En consecuencia, al suponer la posibilidad de estados iniciales del universo que no permitan una explicación determinista de las correlaciones cuánticas, Shanks y Dickson conceden demasiado: la no-separabilidad impide que la independencia de los dispositivos de medición se remonte a la independencia de dos eventos espacialmente separados en el origen del universo. En un sentido estricto, nunca existen dos eventos simultáneos: en cada instante sólo existe un evento único, que viene dado por el estado del universo completo en dicho instante.

Pero si se extraen todas las implicaciones del holismo implícito en esta interpretación, incluso la formulación original del problema que surge del experimento EPR se presenta bajo una nueva luz. El problema ya no consiste en explicar las correlaciones entre las propiedades de *dos* subsistemas espacialmente separados –cada sistema partícula+dispositivo de medición–, lo cual exigiría o bien una comunicación instantánea entre ambos –violando la teoría de la relatividad–, o bien un evento pasado del cual dependan causalmente los estados de los dos subsistemas en el instante de medición. Se trata simplemente de dar cuenta de las correlaciones entre las propiedades de un único sistema irreducible, que conserva su unicidad aún cuando se encuentra extendido en el espacio.

## Conclusiones

En algunas ocasiones, las dificultades conceptuales que encierra el experimento EPR se formulan mediante una pregunta del siguiente tipo: ¿cómo «sabe» una partícula instantáneamente lo que ocurre en la otra, aún cuando se encuentra a una gran distancia de ella? (cf. Witmer, 1967, p. 47). Si la no-localidad se interpreta realmente desde una perspectiva holista, la pregunta misma pierde su sentido original. Las perplejidades acerca de las correlaciones entre los comportamientos de dos partículas desaparecen cuando se piensa que ambas, aún mucho tiempo después de la interacción, siguen conformando un único par, una entidad única

extendida en el espacio. En sentido estricto, cada partícula conforma una única entidad con su dispositivo de medición, con el otro sistema partícula+dispositivo, e incluso con el resto del universo.

El teorema de Bell demuestra la imposibilidad de explicar tal realidad desde el supuesto de localidad. Este resultado nos brinda una nueva visión holística del universo: un universo que no requiere de acción a distancia para comportarse de un modo coordinado; un universo que constituye una entidad única, una totalidad inescindible, evolucionando según leyes deterministas que fijan la sucesión unívoca de sus estados a través del tiempo. En el juego cósmico, Dios juega con un solo dado determinista.

### Referencias bibliográficas

- Bohm, D. (1952), «A Suggested Interpretation of Quantum Theory in Terms of «Hidden Variables» I y II», *Physical Review* 85, 166-193.
- Bunge, M. (1984), «Hidden Variables, Separability and Realism», *Revista Brasileira de Física*, volumen especial por los 70 años de Mario Schönberg, 150-168.
- Dickson, W.M. (1996), «Determinism and Locality in Quantum Systems», *Synthese* 107, 55-82.
- Earman, J. (1986), *A Primer on Determinism*, Dordrecht: Reidel.
- Einstein, A., Podolsky, B. y N. Rosen (1935), «Can Quantum-Mechanical Description of Reality Be Considered Complete?», *Physical Review* 47, 777-780.
- Fine, A. (1982), «Hidden Variables, Joint Probability and the Bell Inequalities», *Physical Review Letters* 48, 291-295.
- Hughes, R.I.G. (1994), *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge MA: Harvard University Press.
- Kosso, P. (1998), *Appearance and Reality*, Oxford MA: Oxford University Press.
- Rohrlich, F. (1983), «Facing Quantum Mechanical Reality», *Science* 221, 1251-1255.
- Shanks, N. (1994), «Quantum Mechanics and Determinism», *The Philosophical Quarterly* 43, 20-37.
- Wick, D. (1995), *The Infamous Boundary. Seven Decades of Heresy in Quantum Physics*, Nueva Cork: Copernicus, an imprint of Springer-Verlag.
- Witmer, E. (1967), «Interpretation of Quantum Mechanics and the Future of Physics», *American Journal of Physics* 35, 40-52.