

## Divulgación Científica

# ¿Es completa la mecánica cuántica? Replanteando el argumento de Einstein, Podolsky y Rosen

Por Elías Okón Gurvich



**Tema:** "El trío cuántico: Einstein, Podolsky y Rosen" [f1].

La mecánica cuántica es la teoría física más exitosa de la historia. Sin embargo, desde que se creó hace más de 90 años, ha sido fuente de acalorados debates. Un excelente ejemplo en este sentido es el famoso intercambio entre Albert Einstein y Niels Bohr con respecto a cómo debe interpretarse la teoría. Un elemento clave en esta discusión es el célebre artículo "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?"<sup>1</sup> que Einstein publicó, junto con Boris Podolsky y Nathan Rosen, en 1935 [1]. Mucho se ha dicho sobre el contenido de tal artículo, pero existe mucha confusión sobre el mismo. El objetivo de este texto es aclarar los malentendidos.

Como su nombre lo indica, el propósito del artículo de Einstein, Podolsky y Rosen, conocido coloquialmente como EPR, es evaluar si la

<sup>1</sup> Es decir, "¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?".

mecánica cuántica es o no *completa*; pero, ¿qué significa eso y cómo puede determinarse? Para responder dicha pregunta, EPR provee el siguiente criterio de completitud para una teoría:

**Com:** Una teoría es completa si todo elemento de realidad tiene una contraparte en la teoría.

Es decir, una teoría es completa si a todo elemento de realidad le corresponde un componente teórico. Pero, ¿qué es un elemento de realidad? EPR nos explica por medio de la siguiente condición suficiente:

**ER:** Si podemos predecir con certeza el valor de una cantidad física, sin perturbar un sistema, entonces existe un elemento de realidad correspondiente a dicha cantidad física.

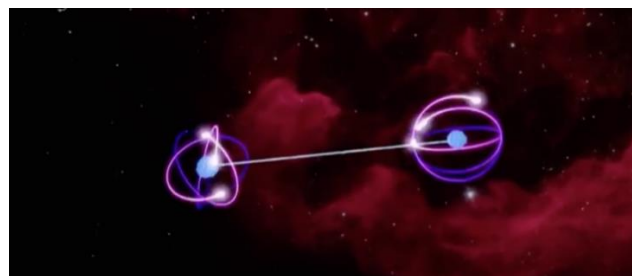
La idea es que si podemos predecir con certeza el valor de cierta cantidad física, entonces dicha propiedad debe existir de manera objetiva e independiente del observador. A partir de dichas definiciones, EPR construye un argumento que

intenta mostrar que la mecánica cuántica no satisface **Com**. Sin embargo, antes de revisar el argumento será necesario hablar un poco sobre la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica es una teoría sumamente contraintuitiva pues contiene varios elementos que parecen violar el sentido común. Por ejemplo, la mecánica cuántica introduce la idea de que una partícula puede no tener bien definida su posición. Esto no significa que, por alguna razón, no conocemos la posición de la partícula, sino que, de hecho, la partícula simplemente no está localizada en ninguna parte. Pero ahí no termina la cosa. La teoría indica que si uno mide la posición de la partícula, entonces dicha medición modifica el estado de la partícula de tal manera que después de medir, la partícula termina con una posición bien definida. Es decir, durante la medición, el estado de la partícula brinca repentinamente de una situación en la que su posición no está bien definida a una en la que sí lo está. ¿Qué sucede, sin embargo, si de inicio la partícula sí posee una posición bien definida? En este caso, la mecánica cuántica sostiene que al medir no se modifica el estado de la partícula y que el resultado de la medición coincide con el valor preexistente. Por lo tanto, en dicha circunstancia, se podrá hacer una predicción certera con respecto al valor de la posición de la partícula, así que, de acuerdo con **ER**, podremos decir que existe un elemento de realidad con respecto a la posición de la partícula.

Otro elemento intrigante de la mecánica cuántica es el fenómeno conocido como *enredamiento cuántico*, el cual juega un papel crucial en el argumento de EPR. La mecánica cuántica introduce la existencia de pares de sistemas enredados que se comportan de manera peculiar. En particular, los pares enredados actúan, en cierto sentido, como si fueran un solo sistema unido a pesar de que los miembros del par pueden estar muy alejados uno del otro. De hecho, de acuerdo con la mecánica cuántica, cada miembro de un par enredado, por separado, no posee propiedades bien definidas, sólo el par en conjunto las posee. Quizás un ejemplo clarifique el asunto.

Supongamos que tenemos un par de partículas. La mecánica cuántica sostiene que un posible estado para dicho sistema es una situación en la que ninguna de las partículas posee una posición bien definida, pero donde ¡la distancia entre ellas sí tiene un valor perfectamente definido! Es decir, ninguna de las partículas está localizada en ninguna parte, pero es seguro que la distancia entre ellas es, digamos, un metro. ¿Qué sucede, entonces, si medimos la posición de alguna de estas partículas? Bueno, de acuerdo con lo que dijimos arriba, al hacerlo modificaremos su estado y obtendremos una partícula bien localizada. Pero, ¿qué sucede con la partícula que no fue medida? Dado que la distancia entre ellas está fija, la localización de su compañera induce un cambio en su estado, a pesar de que nunca se realizó una medición sobre ella. Es decir, la medición sobre un elemento de un par enredado modifica el estado del otro elemento, a pesar de que este último puede estar tan lejos del primero como se quiera (véase figura 1).



**Figura 1.** Imagen del entrelazamiento cuántico de un sistema de dos partículas sin aparente conexión en el intercambio de información [f2].

Todo esto, sin duda, suena sumamente extraño y, peor aún, innecesario. ¿Para qué suponer que las partículas pueden no tener posiciones bien definidas si, en cualquier caso, al medirlas las localizamos?, ¿no sería más sencillo suponer que las partículas siempre poseen posiciones bien definidas y que al medir sólo descubrimos dichos valores? Y similarmente para pares enredados, ¿no es más natural pensar que las correlaciones que encontramos al medir pares enredados se deben a que dichas correlaciones ya existían desde antes y no a que, al medir, modificamos a ambos miembros del par?<sup>2</sup> Esta es justo la

<sup>2</sup> Existen, por supuesto, excelentes razones para adoptar el punto de vista cuántico. La más poderosa está relacionada

intuición detrás del argumento de EPR, el cual exploraremos a continuación.

El argumento original de EPR contiene algunos elementos innecesariamente complicados que únicamente distraen del asunto central. Por lo tanto, en lugar de discutir el argumento original, abordaremos una versión simplificada que expone plenamente la lección principal del artículo. El punto de partida es el par enredado de partículas introducido arriba. Es decir, un par de partículas enredadas donde ninguna de ellas tiene una posición bien definida, pero donde la distancia entre ellas sí tiene un valor bien definido. Supongamos ahora que medimos la posición de una de ellas y encontramos cierto resultado. A consecuencia de dicha medición, ahora podemos predecir con certeza la posición de la otra partícula, pues sabemos a qué distancia está de la primera. Parece entonces que podemos utilizar **ER** para afirmar que existe un elemento de realidad asociado con la posición de la partícula no medida. Sin embargo, recordamos que **ER** contiene la cláusula “sin perturbar un sistema” la cual no es claro que se cumpla en esta situación. En este momento, EPR introduce un principio que juega un papel central en el argumento. Este se conoce como el principio de localidad y sostiene lo siguiente:

**Loc:** Si dos sistemas se encuentran suficientemente alejados, entonces acciones sobre uno no pueden tener ningún efecto sobre el otro.

Es claro que si uno asume **Loc**, y si las partículas están suficientemente lejos, entonces la medición en una de ellas no puede modificar el estado de la otra, por lo que se satisface la cláusula arriba mencionada. En consecuencia, dado **Loc**, podemos afirmar que existe un elemento de realidad con respecto a la posición de la partícula no medida. Sin embargo, de acuerdo con la mecánica cuántica, dicha partícula no tiene una posición bien definida, así que la teoría no tiene una contraparte para el elemento de realidad en cuestión. De todo esto, junto con **Com**, se concluye que la mecánica cuántica no es completa. Este es el argumento de EPR.

con el, así llamado, “Principio de superposición” (ver, por ejemplo, el capítulo 6 de [2], el 1 de [3] o la sección 2.1 de [4]).

Es crucial notar, sin embargo, que dicha conclusión depende de asumir **Loc**, lo cual puede parecer natural, pero no es obligatorio en ningún sentido. De hecho, gracias a los trabajos del físico John Bell en los años sesenta, sabemos que ¡**Loc** de hecho se viola!<sup>3</sup> Incluso, si por alguna razón, se desea insistir que la mecánica cuántica es completa, entonces, dado el resultado de EPR, se debe de concluir algo similar. Esto es porque el resultado de EPR, el cual podemos escribir como

$$\text{Loc} \Rightarrow \neg \text{Com}$$

( $\neg$  indica negación y  $\Rightarrow$  implicación) que es lógicamente equivalente a

$$\text{Com} \Rightarrow \neg \text{Loc}$$

Por lo tanto, EPR muestra que si la mecánica cuántica es completa, entonces el mundo no puede ser local.



Dr. Elías Okón Gurvich  
Instituto de investigaciones filosóficas, IIF-UNAM  
eokon@filosoficas.unam.mx

## Referencias

- [1] Einstein A, Podolsky B y Rosen N (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Physical Review* 47(10): 777–780.
- [2] Feynman R (1994). *The Character of Physical Law*. Modern Library.
- [3] Albert DZ (1992). *Quantum Mechanics and Experience*. Harvard University Press.
- [4] Okon E (2014). *El problema de la medición en mecánica*

<sup>3</sup> La exposición del asunto en [5] es una excelente introducción al tema.

cuántica. Revista Mexicana de Física E 60:130–140.

[5] Mermin ND (1985). Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory. Physics Today April, 38-47.

#### Imágenes utilizadas

[f1] <https://goo.gl/5BlguJ>

[f2] <https://goo.gl/hS6dlo>

