



Un mapa puede decirnos muchas cosas. El mapa de un tesoro nos dice dónde está el tesoro y esto puede requerir una larga búsqueda. Si llegamos a una isla en la que hay una montaña con forma de cara de pirata al pie de la cual corre un río que hace una cierta curva, y si en el mapa hay una montaña con forma de pirata y un río con esa curva pensamos que por lo menos ya hemos encontrado la isla del tesoro.

Usamos las convenciones implícitas y explícitas en el mapa para hacer inferencias con respecto a dónde estamos y sobre cómo llegar al tesoro o a una ciudad. En general un mapa nos permite orientarnos, y por lo tanto predecir *determinado tipo de sucesos*, como un resultado de nuestras acciones. Un mapa de la ciudad de México nos permite predecir que si estamos cerca de Ciudad Universitaria y tomamos al norte llegaremos al centro de la ciudad. Sabemos, sin embargo, que el mapa no nos va a decir nada en relación con la gente que vamos a encontrar en el camino, ni si hay una gasolinera en el camino, aun-

Un siglo en la construcción de un mapa del mundo cuántico



SERGIO F. MARTÍNEZ

que ésa es una información que muchas veces aparece en un mapa de carreteras. Consideramos obvio que el mapa nos dice algo respecto de un tipo de cosas muy especiales y no sobre muchas otras, pero es importante recalcar que este hecho que consideramos obvio es el resultado de expectativas generadas como parte de una cultura, expectativas que son parte de lo que entendemos por saber leer un mapa.

Alguien podría pensar en la existencia de algo como un mapa maestro de carreteras por ejemplo, un mapa fundamental, que permitiera prever todo lo que encontraríamos en cualquier camino. Podríamos tener en una supercomputadora un mapa de México lo suficientemente completo como para que por medio de un sistema de *zoom*, como ya existen en muchas enciclopedias electrónicas, lo pudiéramos ver con la escala que quisiéramos y con los detalles deseados. Pero si reflexionamos un momento, o nos acordamos de algunos de los mapas de Borges, es claro que esta idea no puede ser sino una fantasía. Un "mapa completo" de una ciudad ¿va a incluir los

baches de las calles o no?, ¿va a incluir información que nos diga la pendiente de una calle, las corrientes de agua subterránea que pasan por el lugar, la intensidad del campo magnético terrestre, o la altura sobre el nivel del mar de cada metro cuadrado? En primer lugar tendríamos que ponernos de acuerdo respecto de qué vamos a entender por "completo", y esto no es fácil. Podríamos pensar que caracterizar un mapa completo de carreteras es fácil, pues simplemente es un mapa que contiene todas las carreteras. Pero esta respuesta es claramente insuficiente para caracterizar en general un mapa completo de carreteras. No es claro qué es una carretera. ¿Vamos a incluir carreteras de primera y segunda, o también de tercera? ¿Vamos a incluir brechas por donde sólo circulan vehículos de doble transmisión, o los caminos por donde sólo circulan motocicletas? Ciertamente podemos pensar que nos podemos poner de acuerdo con respecto a qué sería un mapa completo, pero también tendríamos que aceptar que la decisión de qué es un mapa completo va a depender de los fines para los que pensamos que va a ser utilizado el mapa. Parece que sería simplemente ininteligible pensar en un mapa que fuera completo con relación a cualquier fin que podamos tener. Si nuestro interés es viajar en automóvil nos van a interesar los mapas que tengan las carreteras por las que los automóviles pueden circular, e información relativa a dónde hay una gasolinera o un restaurante. Si nuestro interés es viajar en bicicleta otro tipo de mapa nos sería más útil, y por lo tanto el criterio de lo que sería un mapa completo sería diferente.

Una teoría científica es un tipo de mapa, sólo que a diferencia de lo que usualmente entendemos por mapa no es una descripción sólo de lo que es (o lo que ha sido) el caso (pertinente a un cierto fin), sino que muchas veces es una caracterización de lo que es posiblemente "el caso" en un cierto ámbito de la experiencia. Muchas teorías de las ciencias naturales y sociales son en parte caracterizaciones o clasificaciones de procesos históricos, y por lo tanto descripciones de lo que es el caso, y en parte son caracterizaciones de lo que es posible. Muchas teorías de la física, y en particular las llamadas teorías fundamentales, pueden caracterizarse como caracterizaciones de lo que es posible, no de lo que es el caso. La teoría de Newton nos dice que si una cierta distribución de materia tiene lugar entonces habrá un cierto tipo de fuerza. Esa cierta distribución de materia puede ser que no exista en ningún lugar del universo. La teoría de la evolución nos dice que si hay una cierta presión de selección en una población un determinado carácter va a

tender a extenderse en la población. Puede ser que no exista tal población.

Qué es posible y qué no es un tipo de pregunta que no podemos respondernos sentándonos a meditar; requiere la determinación de lo que usualmente denominamos como "leyes de la naturaleza", o la "estructura causal del mundo". Durante muchos siglos se pensaba que la estructura causal del mundo estaba caracterizada por lo que tenía que suceder necesariamente, y la estructura



de la ciencia por lo que era posible deducir de teorías que considerábamos verdaderas, o aproximadamente verdaderas. Incluso en el siglo xx muchos científicos estuvieron de acuerdo con Einstein en que "la tarea suprema del físico es llegar a aquellas leyes universales y elementales de las que el cosmos puede construirse por deducción pura". En este caso la estructura de lo posible podía identificarse con (o describirse por medio de) la estructura deductiva de las teorías que buscaba la ciencia. Pero

esta identificación de la estructura de lo posible con la estructura deductiva de las teorías ha sido muy cuestionada, y hoy día está claro que la estructura de las teorías es algo más que su estructura deductiva, y que entender la estructura de lo posible requiere que tomemos en cuenta aspectos contingentes del mundo, y en particular elementos prácticos o tecnológicos que van más allá de la estructura de teorías específicas.

Una teoría científica toma en cuenta de muchas maneras aspectos contingentes del mundo en su estructura.

entra en la caracterización de lo que es el caso, no en la caracterización de lo que es posible. En particular esto es claro en la manera como se piensa en la física clásica que una teoría de la mecánica es completa. Una teoría de la mecánica es completa si podemos caracterizar por medio de un cierto formalismo generalmente asociado con una ecuación fundamental, y un número determinado, relativamente pequeño de magnitudes, el comportamiento de los sistemas en el tiempo. En este tipo de caracterización lo contingente sólo entra en las condiciones



Esto es algo muy claro en la teoría de la evolución de Darwin, o en teorías de la geología, en donde la historia juega un papel muy importante en caracterizar las categorías de cosas de las que habla la teoría. Pero muchos físicos y filósofos de la ciencia piensan que la diferencia entre la física y otras disciplinas científicas tiene que ver con el hecho de que la física, a diferencia de otras ciencias, no está “infectada” por lo contingente en sus teorías. Por lo menos en el sentido que lo contingente sólo

iniciales y de frontera que nos permiten resolver las ecuaciones. La mecánica cuántica fue a lo largo del siglo xx el instrumento más importante para entender el sentido en el cual la estructura de lo contingente puede entrar en la caracterización de la estructura de lo posible en la física.

Uno de los grandes fundadores de lo que conocemos hoy día como la teoría de la mecánica cuántica es Niels Bohr. Una de las ideas centrales que introduce Bohr co-

mo parte de la primera teoría cuántica es que un enunciado como “un electrón tiene una posición x en un tiempo t ” adquiere sentido sólo en un contexto experimental, no hay tal cosa como el hecho de la posición del electrón independientemente del contexto experimental en el cual medimos la posición. Exactamente cómo entendemos este tipo de aseveraciones, y qué implicaciones tiene nuestra manera de entender este tipo de contextualización de lo que consideramos objetivo para nuestro concepto de “realidad física”, es un tema que es-

que esta incompatibilidad implica que algún elemento subjetivo entra en la caracterización del proceso físico de medición. Es claro que de aceptar este tipo de interpretaciones subjetivistas llegamos muy fácilmente a la conclusión de que hay aspectos contingentes que entran en la teoría física a nivel fundamental. Pero esto nos dejaría con toda una serie de preguntas respecto de la manera como tiene lugar esa incorporación de lo contingente. Parecería que tendría que asumirse (y algunos físicos lo han hecho) que la mecánica cuántica apunta a que la



tuvo en el centro de la filosofía de la física durante todo el siglo xx.

De acuerdo con la teoría cuántica, en un arreglo experimental en el que medimos la posición no es posible que se manifieste como una cantidad determinada el *momentum*. Y si medimos el *momentum* y luego regresamos a medir la posición vamos a encontrar que por lo general la posición ha cambiado de manera impredecible. Algunas interpretaciones de la mecánica cuántica sugieren

conciencia es un hecho fundamental del universo, como lo es la energía por ejemplo. Pero hay muchas maneras de entender un proceso de medición cuántica en las que no es necesario incorporar elementos subjetivos. Algunas de estas propuestas parten de una lectura a pie juntillas del formalismo y sugieren que en realidad nuestro universo es un multiuniverso de universos paralelos, con copias de cada uno de nosotros en cada uno de esos universos paralelos. Otra manera de rechazar el subjetivis-

mo que parece requerir la interpretación de la mecánica cuántica es por medio de la propuesta que apunta que simplemente la mecánica cuántica no es una teoría completa en el sentido que no nos dice todo lo que tendría que decirnos una teoría de los procesos fundamentales de la física. La situación es análoga al caso en el que un mapa no tiene todas las calles por donde podemos ir de un lugar A a un lugar B.

Podría ser que las partículas poseen todas las propiedades todo el tiempo, pero la mecánica cuántica no es



como se pensaba una teoría fundamental que nos dé una descripción completa de los factores que juegan un papel en la caracterización de la dinámica de las partículas elementales y los cuerpos que la componen. Esta alternativa sugiere que la mecánica cuántica tiene que enriquecerse con la descripción adicional de algunas “variables ocultas”.

La idea de esta última alternativa para entender el resultado de los experimentos fue concretizada en un fa-

moso trabajo publicado por Einstein, Podolski y Rosen en 1935. Ellos muestran que o bien la mecánica cuántica describe influencias entre sistemas que tienen lugar a distancia, sin mediación de procesos físicos conocidos, o bien la mecánica cuántica es “incompleta” en el sentido que no describe todas las propiedades que las partículas tienen de hecho. La discusión anterior respecto de las dificultades para entender qué puede querer decir que un mapa es completo debe de alertarnos a potenciales dificultades análogas relativas al concepto de teoría completa que se está utilizando.

La discusión se da entre aquellos que asumen que la realidad microscópica seguramente está constituida por partículas que tienen las propiedades clásicamente reconocidas, y que esas propiedades son todo lo que es necesario conocer para poder entender la estructura de lo real, o para ser más cuidadosos (y más exactos creo yo), la estructura de lo posible, y aquellos que piensan que la mecánica cuántica nos obliga a reconocer que la descripción clásica de las propiedades relevantes para describir la realidad física (*i.e.* la estructura de lo posible) tiene que abandonarse por una nueva manera de describir qué es una propiedad, o qué es un sistema físico. Antes de adentrarnos en la discusión vale la pena acordarnos del famoso experimento pensado (y su interpretación) al que se refiere el trabajo Einstein, Podolski y Rosen.

Supongamos que se crean dos partículas a partir de una fuente común en un tipo de estado que permite la mecánica cuántica y que se conoce como “enredado” (*entangled*). Se asume que tanto el *momentum* total como la (diferencia en) posición son cantidades conservadas (*i.e.* cantidades que obedecen un principio de conservación). Consideremos qué sucede con la partícula a la izquierda. Si conocemos su posición podemos inferir la posición de la partícula a la derecha por el principio de conservación de la posición total. Con el *momentum* podemos razonar de manera análoga. Pero como la mecánica cuántica asume desde Bohr que la posición y el *momentum* son cantidades incompatibles no podemos medirlas con exactitud para la partícula izquierda (ni para la derecha) en un mismo tiempo. Sin embargo, asumamos que a una cierta hora un científico decide medir ya sea la posición o el *momentum* en la partícula a la izquierda. Esto permitiría atribuirle a la partícula a la derecha ya sea una posición definida o un *momentum* definido en el tiempo de la medición. El argumento de Einstein, Podolski y Rosen es que es absurdo suponer que los procedimientos que se llevan a cabo localmente en una partícula puedan afectar la otra (que puede estar tan lejos

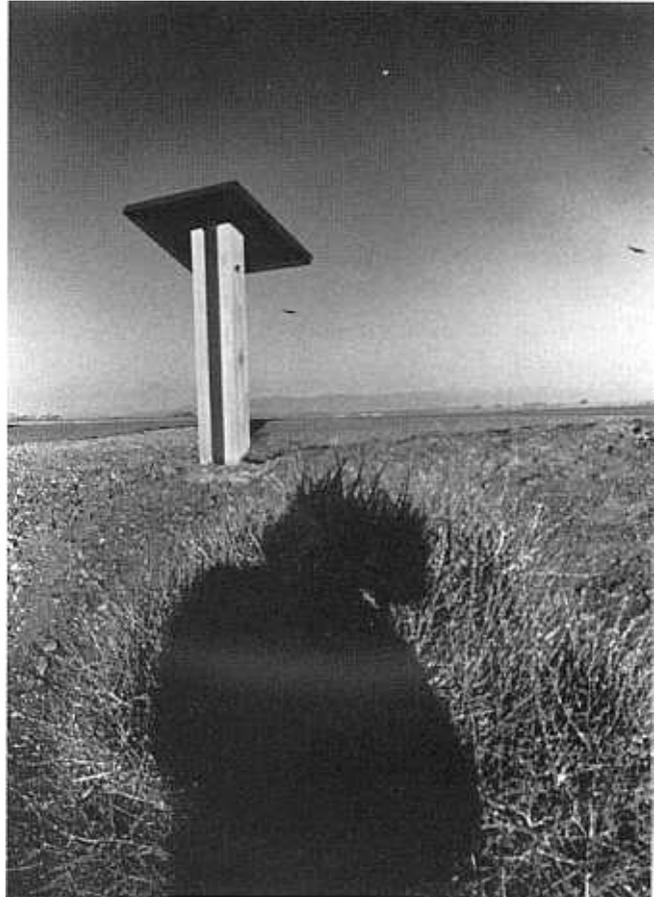
como queremos imaginarnoslo) al mismo tiempo. De aquí se infiere que la partícula de la derecha debe de tener tanto una posición como un *momentum* definido en el tiempo en el que tiene lugar la medición, en contra de lo que asume la mecánica cuántica. En todo caso, ellos plantean un dilema: o estamos dispuestos a aceptar que la mecánica cuántica describe procesos que actúan a distancia, algo que parecería dar un paso hacia atrás en el desarrollo de la física, o bien la mecánica cuántica es incompleta. En otras palabras, o bien la mecánica cuántica es no local o bien es incompleta. En la segunda mitad del siglo xx se buscaron formulaciones precisas tanto de la idea de localidad como de la idea de completitud que permitan resolver este dilema planteado por medio de experimentos mentales.

En primer lugar, es claro que la manera de formular la dicotomía en el trabajo citado es demasiado simplista. El tipo de localidad de la que ellos hablan puede entenderse de varias maneras. Por ejemplo, puede formularse como la conjunción de dos tesis: *realismo*: las partículas poseen valores definidos para todos sus atributos en todo tiempo, y *localismo*: estos atributos no pueden ser afectados instantáneamente por procesos físicos, tales como mediciones, que involucran otras partículas en localizaciones espaciales diferentes.

El realismo local caracterizado por la conjunción de estas dos tesis puede mostrar que implica algo falso. Por lo que al menos una de las dos tesis, el realismo o el localismo, es falsa. Es muy común en la literatura especializada llegar a la conclusión de que debemos de rechazar la tesis del realismo porque el localismo está apoyado por la otra gran teoría de la física del siglo xx, la teoría de la relatividad. Puede aceptarse que la mecánica cuántica es no local, pero en un sentido que no permite la existencia de efectos controlables que viajen a mayor velocidad que la luz, y por lo tanto que no contradiga la prohibición relativista con relación a causación más rápida que la luz. Es posible formular más precisamente las tesis del realismo y el localismo de manera tal que sus implicaciones ontológicas sean más claras. Por ejemplo, es posible reformular la primera tesis, la tesis del realismo, diciendo que: 1) todos los observadores locales pueden ser especificados independientemente de las propiedades globales del sistema combinado.

Y podemos reformular la tesis del localismo diciendo que: 2) los valores de cualquier observable local que pueden ser observados no pueden cambiarse alterando el arreglo de una pieza remota de equipo que forme parte del contexto de medición para el sistema compuesto.

Puede mostrarse que ambas tesis junto con algunos principios que son aceptados sin controversia, llevan a una contradicción. Como en la versión menos precisa que mencionamos anteriormente, la manera más común de resolver esta contradicción es diciendo que la primera no puede violarse porque esto implicaría que podemos modificar instantáneamente, y a nuestra discreción, las estadísticas de la medición de un tipo de sistema como el planteado por Einstein, Podolski y Rosen en un lugar distante, y esto se considera que entra en conflicto con



la teoría de la relatividad y por lo tanto no puede violarse. Pero este tipo de argumento deja de lado el hecho que la aceptación de la no localidad abre la posibilidad que de alguna manera la noción de causa asociada con la física relativista no sea extendible a toda la física, o simplemente que sea una concepción de causa que debemos abandonar. El reconocimiento de esta posibilidad ha motivado diferentes intentos por probar de manera independiente el principio de la no señalización a distancia

implícito en la segunda tesis. Pero todas las pruebas parecen basarse en diferentes versiones del supuesto de localidad expresadas en lenguaje técnico que son ajenas al formalismo de la mecánica cuántica, por lo que surge la duda si todas estas pruebas son en el fondo circulares.

Otro problema que genera la consideración del tipo de situaciones propuesto por Einstein, Podolski y Rosen es que la tesis del realismo reformador implica el colapso del principio reduccionista del todo a las partes, un principio que se conoce como el principio de la reducción parte-todo. Implícitamente esta tesis nos dice que las propiedades que podemos atribuir a colecciones de partículas pueden explicarse como una "suma" de las propiedades de las partículas constituyentes. En otras palabras, parece ser que el rechazo de ésta nos obliga a concluir que los sistemas cuánticos son tales que en general no tienen partes independientemente de la manera como esas partes se examinan experimentalmente. Sin embargo, de esto no tiene que concluirse, como a veces se concluye, que no podemos hablar de la realidad de los sistemas cuánticos, o que una metodología reduccionista ya no tiene cabida en la mecánica cuántica. Las cosas son más complicadas. De un par de partículas que constituyen un sistema del tipo planteado por Einstein, Podolski y Rosen podemos decir que algunas propiedades globales, como el *momentum* angular, tienen valores definidos, y podemos hablar de estos atributos como atributos del sistema como un todo. Esto sería suficiente para hablar de la realidad de esos sistemas, siempre y cuando estemos dispuestos a reconocer que ese tipo de realismo es compatible con la no localización de las partículas componentes.

Finalmente quiero hacer ver que los problemas de la interpretación de la mecánica cuántica que hemos ejemplificado a partir de la consideración de situaciones como las propuestas por Einstein, Podolski y Rosen tienen mucho que ver con falta de claridad respecto de qué entendemos por una teoría completa. La teoría física hasta el siglo xx asumía implícitamente que era posible construir una teoría de todo. Una teoría de todo es una teoría completa desde la perspectiva de cualquier propósito importante para la física, y en particular desde la perspectiva de la capacidad de predicción y explicación de fenómenos físicos. Una teoría de todo debería de respondernos, por lo menos en principio, a todas las preguntas importantes de la física. La famosa formulación de Laplace del determinismo es una formulación de ese ideal. Dice Laplace que: "Una inteligencia que en un instante dado conociera todas las fuerzas que animan a la naturaleza y la

situación respectiva de los seres que la componen, y que, por otra parte, fuera suficientemente amplia como para someter estos datos al análisis, abarcaría en la misma fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los de los átomos más ligeros; nada le sería incierto, y tanto el futuro como el pasado estarían presentes delante de ella". El determinismo de Laplace ya asumía la creencia que iba a ser muy extendida en el siglo xix: que en sus rasgos fundamentales las teorías físicas de entonces eran el núcleo de una teoría verdadera y completa del mundo físico.

Ahora bien, si no delimitamos clara y modestamente el sentido en el cual queremos que una teoría sea lo más completa posible, entonces, como en el caso de un mapa de carreteras al que le quisiéramos agregar información sobre todo lo que se nos pueda ocurrir, el vasto contenido empírico de la teoría haría que su información fuera irrecuperable o simplemente ininteligible. Además, como en el caso de la doctrina del determinismo laplaciano, una tesis de completitud muchas veces va acompañada de una serie de tesis reduccionistas que pueden ser muy cuestionables. Adicionalmente a todos estos problemas en los que no entraremos, la mecánica cuántica sugiere un sentido importante adicional en el que la búsqueda de una teoría *de todo* está en principio condenada al fracaso.

De ser cierta una historia como la del Big Bang, que sugiere que el Universo empieza en un estado del que todas las partículas surgen, entonces tenemos que reconocer que todos los sistemas están en mayor o menor grado "enredados", como lo están las partículas en un sistema como el planteado por Einstein, Podolski y Rosen. Pero entonces, incluso en principio, no sería posible pensar en aislar partes del universo de manera tal que pudieran modelarse por medio de las ecuaciones dinámicas. El método clásico de análisis está condenado en principio a fallar porque describir cualquier cosa nos comprometería con una descripción de todo. Por supuesto que esta visión de la física podría pensarse como muy pesimista. No lo es. Simplemente nos invita a reconocer que nuestros métodos de análisis están limitados por lo que es el caso de manera contingente, el grado de enredo de nuestros sistemas físicos, por ejemplo, y que quizás debamos aceptar que las limitaciones a una metodología reduccionista parte-todo que se sigue de un siglo de mecánica cuántica son también limitaciones al tipo de reduccionismo de las partes al todo que caracteriza nuestros modelos de dinámica de partículas (y que en particular se supone en la doctrina laplaciana del determinismo).

Sería muy fácil tomar una actitud positivista y pensar que los éxitos en el desarrollo de aplicaciones y explicaciones de fenómenos cuánticos es tal que problemas como los límites del reduccionismo parte-todo sólo pueden ser considerados como un pelo en la sopa. Pero es esta actitud triunfalista asociada con la cultura positivista en

sivamente remota". Es por supuesto irónico que precisamente en esos mismos años Planck y Einstein estaban dando los primeros pasos en la elaboración de la hipótesis cuántica que iba a terminar por dar al traste con lo que Michelson y sus contemporáneos consideraban un optimismo plenamente justificado en la física clásica.



la que se ha desarrollado la física desde el siglo XIX la que motivó la tesis determinista de Laplace y la convicción en la completitud de la física clásica, pensada como una teoría de todo. Bien al principio del siglo XX las famosas palabras de A. A. Michelson deben verse como la expresión de esa convicción generalizada: "Los más importantes hechos y leyes fundamentales de la física han sido ya descubiertos, y están ahora tan firmemente establecidos que la posibilidad de que tengamos que abandonarlos como consecuencia de algún nuevo descubrimiento es exce-

Explorar las implicaciones de la hipótesis cuántica nos ha llevado todo el siglo XX, y si bien es indudable que el avance en el desarrollo de aplicaciones y explicaciones de fenómenos físicos basados en la teoría cuántica ha sido impresionante, es también importante recordar que los fundamentos de la mecánica cuántica siguen siendo problemáticos, y que la elucidación de algunos de esos problemas fundamentales puede darnos sorpresas en el siglo que principia, comparables a las que nos dio en su primer siglo de vida. 🐾

Sergio F. Martínez

Instituto de Investigaciones Filosóficas,
Universidad Nacional Autónoma de México.

IMÁGENES

Jill Hartley, p. 30: *Mi sombra en el desierto*, Arizona, 1979; *La mano*, Baja California, 1977; p. 31: *Jardín del desierto*, Coahuila, México, 1999; p. 32: *Vientre*

de la tierra, Arizona, 1979; p. 33: *Vegetación caprichosa*, Francia, 1976; p. 34: *Cadillac Ranch*, Texas, 1978; p. 35: *Mi sombra en el matorral*, 1985; p. 37: *Yuca torcida*, Gran Cañón, Arizona.