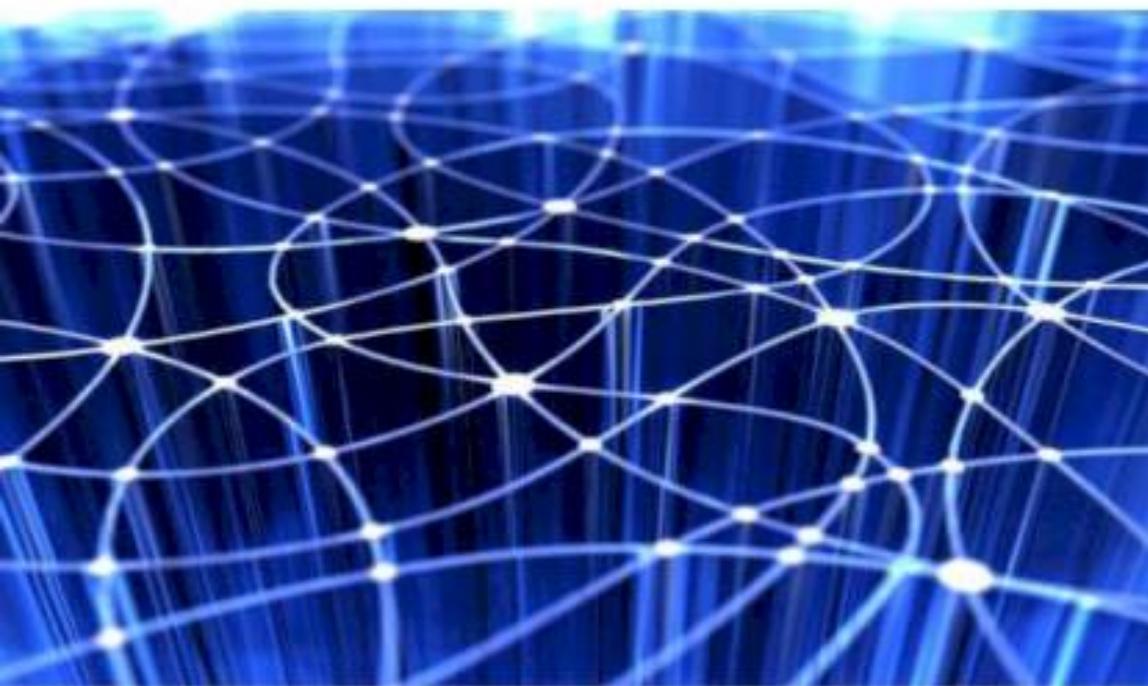


# ENTRELAZAMIENTO

El mayor misterio de la física

**AMIR D. ACZEL**



Entre las muchas teorías que pueblan el cosmos científico, pocas poseen la importancia de la física cuántica, creada por genios del calibre de Planck, Einstein, Heisenberg o Schrödinger. Desde hace mucho nuestras vidas y conocimientos están profundamente influidos por esta construcción de la física, cuyos contenidos desafían nuestros hábitos de comprensión más enraizados. Así ocurre, por ejemplo, con el hecho de que las partículas son también ondas, y las ondas partículas, o con que sea imposible determinar con absoluta precisión y al mismo tiempo posiciones y velocidades de una partícula.

Mucho se ha escrito sobre estas contraintuitivas características de la mecánica cuántica, pero hay más, como el fenómeno conocido como «entrelazamiento», según el cual los objetos (como partículas subatómicas) que describe la física cuántica, pueden llegar a estar tan enlazados, tan relacionados entre sí, que un cambio en uno de ellos se reflejaría instantáneamente en el otro, incluso aunque ambos estuvieran en extremos opuestos del universo. Einstein, quien identificó este extraño fenómeno, pensó que semejante posibilidad mostraba que la mecánica cuántica no era una teoría correcta, pero se equivocó, como han demostrado durante los últimos años una serie de distinguidos físicos. Este libro narra, en términos claros y accesibles, esta fascinante historia, una historia que abre posibilidades (como la construcción de códigos indescifrables) que hasta hace poco era imposible imaginar.

Para Ilana

## PREFACIO

*Mi propia sospecha es que el universo no sólo es más raro de lo que suponemos, sino más raro de lo que podemos suponer.*

J. B. S. HALDANE

**E**n el otoño de 1972, yo era un estudiante de la licenciatura de matemáticas y física en la Universidad de California, en Berkeley. Allí tuve la fortuna de escuchar una conferencia especial de Werner Heisenberg, uno de los fundadores de la teoría cuántica. Aunque tengo ciertas reservas acerca del papel histórico desempeñado por Heisenberg —mientras otros científicos abandonaban Alemania como protesta ante la política nazi, él permaneció allí y fue un instrumento de los intentos de Hitler de desarrollar la bomba atómica—, su charla tuvo un efecto considerable y positivo en mi vida, pues me proporcionó un profundo aprecio por la teoría cuántica y su papel en nuestros esfuerzos por entender la naturaleza.

La mecánica cuántica es la más extraña de las disciplinas científicas. Desde la perspectiva de nuestra vida cotidiana, nada tiene sentido en la teoría cuántica, teoría acerca de las leyes de la naturaleza que rigen el dominio de lo muy pequeño (así como de algunos sistemas grandes, como los superconductores). La misma palabra, *quantum*, denota un

paquete de energía muy pequeño. En la mecánica cuántica, nombre que se da a la teoría cuántica, se estudian los componentes básicos de la materia, las partículas de las que está hecho todo el universo. Estas partículas son los átomos, moléculas, neutrones, protones, electrones y quarks, así como los fotones, las unidades básicas de la luz. Todos estos objetos (si verdaderamente puede llamárseles así) son mucho más pequeños que cualquier cosa que pueda ver el ojo humano. A este nivel todas las reglas de comportamiento que nos son familiares dejan de cumplirse. La entrada en ese extraño nuevo mundo de lo muy pequeño es una experiencia tan chocante y rara como las aventuras de Alicia en el País de las Maravillas. En ese irreal mundo cuántico las partículas son ondas y las ondas partículas. Un rayo de luz, por lo tanto, es una onda electromagnética que se desplaza a través del espacio y una corriente de partículas minúsculas que se mueven hacia el observador, en el sentido de que ciertos experimentos o fenómenos cuánticos revelan la naturaleza ondulatoria de la luz mientras que otros revelan su naturaleza corpuscular, pero nunca ambas a la vez. Y, sin embargo, antes de observar un rayo de luz, éste es ambas cosas, una onda y una corriente de partículas.

En el dominio cuántico todo es borroso: existe un aspecto aleatorio común a todas las entidades con las que tratamos, sean éstas luz o electrones o átomos o quarks. Un *principio de incertidumbre* reina en la mecánica cuántica, donde la mayoría de las cosas no pueden verse, sentirse o conocerse con precisión, sino sólo a través de una neblina de probabilidad y azar. Las predicciones científicas sobre resultados (medidas) son de naturaleza estadística y se dan en términos de probabilidades; podemos predecir sólo la localización más probable de una partícula, no su posición exacta. Y en ningún caso podemos determinar la posición y el momento de una partícula con gran precisión simultáneamente. Además, la niebla que impregna el mundo

cuántico no puede desaparecer jamás. No existen «variables ocultas», que, de conocerse, aumentarían nuestra precisión más allá del límite natural que gobierna el mundo cuántico. Simplemente, la incertidumbre, la borrosidad, la probabilidad, la dispersión no pueden desaparecer; estos misteriosos, ambiguos y velados elementos son parte íntegra de ese mundo de maravillas.

Aún más inexplicable es la misteriosa *superposición* de estados de sistemas cuánticos. Un electrón (partícula elemental cargada negativamente) o un fotón (cuanto de luz) pueden hallarse en una superposición de dos o más estados. Ya no hablamos de «aquí o allí»; en el mundo cuántico se habla de «aquí y allí». En cierto sentido, un fotón, una parte de un flujo de luz que ilumina una pantalla con dos agujeros, puede pasar a través de los dos agujeros a la vez, y no, como cabría esperar, a través de uno u otro. Un electrón en órbita alrededor del núcleo (atómico) se halla potencialmente en muchos sitios a la vez.

Pero el fenómeno más asombroso en el extraño mundo del cuanto es el efecto llamado *entrelazamiento* («entanglement»). Dos partículas que pueden estar muy alejadas entre sí, incluso millones o billones de kilómetros, están misteriosamente ligadas la una con la otra. Cualquier cosa que ocurra a una de ellas causa *inmediatamente* un cambio en la otra.<sup>[P.1]</sup>

Lo que aprendí en la conferencia de Heisenberg hace treinta años fue que debemos abandonar todas las concepciones previas acerca del mundo derivadas de nuestra experiencia y nuestros sentidos y dejar que las matemáticas nos dirijan. El electrón mora en un espacio distinto del que vivimos nosotros. Reside en lo que los matemáticos llaman un «espacio de Hilbert», como también lo hacen las otras partículas microscópicas y los fotones. Este espacio de Hilbert, construido por los matemáticos independientemente de la física, parece describir bien las misteriosas reglas del mundo cuántico, las cuales no tienen sentido si se las con-

templa con ojos acostumbrados a nuestras experiencias cotidianas. De modo que el físico que trabaja con sistemas cuánticos confía en las matemáticas para predecir los resultados de experimentos o fenómenos, ya que no tiene ninguna intuición natural sobre lo que sucede dentro de un átomo o de un rayo de luz o de una corriente de partículas. La teoría cuántica limita nuestro mismísimo concepto de lo que constituye la ciencia, pues nunca podremos verdaderamente «comprender» el extraño comportamiento de lo muy pequeño. Y esto «grava» nuestra idea de lo que constituye la realidad. ¿Qué significa «realidad» en el contexto de la existencia de entes entrelazados que actúan al unísono incluso estando muy separados?

La bella teoría matemática del espacio de Hilbert, el álgebra abstracta y la teoría de la probabilidad —nuestras herramientas matemáticas para tratar los fenómenos cuánticos— nos permiten *predecir* los resultados de experimentos con una precisión asombrosa, pero no nos proporcionan una *comprensión* de los procesos subyacentes. Entender lo que sucede realmente dentro de la caja misteriosa puede estar más allá de las posibilidades de los seres humanos. Según una interpretación de la mecánica cuántica, sólo podemos usar la caja para predecir resultados. Y estas predicciones son de naturaleza estadística.

Existe una fuerte tentación de decir: «Bueno, si la teoría no puede ayudarnos a entender lo que verdaderamente ocurre, entonces simplemente es que es *incompleta*. Falta algo; debe haber algunas otras variables que, añadidas a nuestras ecuaciones, complementen nuestro conocimiento y nos proporcionen esa comprensión que buscamos». Y, de hecho, el mayor científico del siglo XX, Albert Einstein, lanzó este mismo desafío a la naciente teoría cuántica. Einstein, cuyas teorías relativistas revolucionaron nuestra visión del espacio y del tiempo, argüía que la mecánica cuántica era excelente en cuanto teoría estadística, pero no constituía una descripción completa de la realidad física. Su muy

conocida frase «Dios no juega a los dados con el universo» reflejaba su creencia de que existía un nivel no-probabilístico más profundo que la teoría cuántica que aún tenía que descubrirse. Junto con sus colaboradores Podolsky y Rosen, lanzó un desafío a la física cuántica en 1935, asegurando que la teoría era incompleta. Los tres científicos basaron sus argumentos en la existencia del fenómeno del entrelazamiento, el cual, a su vez, había sido deducido a partir de consideraciones matemáticas acerca de los sistemas cuánticos.

En su charla de Berkeley en 1972, Heisenberg expuso el desarrollo de su tratamiento de la teoría cuántica conocido como «mecánica matricial». Esto y el principio de incertidumbre fueron sus dos contribuciones más importantes a la teoría cuántica. Heisenberg contó que, cuando intentaba desarrollar su tratamiento matricial en 1925, ni siquiera sabía cómo multiplicar matrices (una operación elemental en matemáticas). No obstante, aprendió solo cómo hacerlo y sacó adelante su teoría. Así pues, las matemáticas proporcionaron a los científicos las reglas de comportamiento del mundo cuántico. Las matemáticas condujeron también a Schrödinger a su tratamiento alternativo, y más simple, de la mecánica cuántica: la ecuación de ondas.

A lo largo de los años he seguido estrechamente el desarrollo de la teoría cuántica. Mis libros han tratado de misterios en matemáticas y física. *El último teorema de Fermat* contaba la historia de la asombrosa prueba de un problema propuesto hace mucho tiempo; *God's equation* (La ecuación de Dios) era la historia de la constante cosmológica de Einstein y la expansión del universo; *The mystery of the Aleph* (El misterio del Aleph) era una descripción de los intentos de la humanidad por entender el infinito. Pero siempre he deseado abordar los secretos del cuanto. Un artículo reciente en *The New York Times* me proporcionó el ímpetu que necesitaba. El artículo trataba del desafío que Albert Einstein y sus dos colegas lanzaron a la teoría cuántica, ase-

gurando que una teoría que permitía el irreal fenómeno del «entrelazamiento» tenía que ser incompleta.

Hace siete décadas, Einstein y sus aliados científicos imaginaron maneras de demostrar que la mecánica cuántica, las extrañas reglas que describen el mundo de lo muy pequeño, era demasiado fantasmal para ser cierta. Entre otras cosas, Einstein probó que, según la mecánica cuántica, la medición de una partícula podía cambiar instantáneamente las propiedades de otra partícula, sin importar lo lejos que estuvieran entre sí. Einstein creía que esta acción a distancia, llamada entrelazamiento, era demasiado absurda para darse en la naturaleza, y usó sus experimentos mentales como un arma para mostrar las extrañas implicaciones que tendría este proceso si pudiera suceder. Pero los experimentos descritos en tres artículos posteriores de la revista *Physical Review Letters* dan cuenta de lo desencaminado que iba Einstein. Los experimentos muestran no sólo que el entrelazamiento realmente existe, algo que se sabe desde hace algún tiempo, sino que podría ser usado para crear códigos indescifrables.<sup>[P.2]</sup>

Como he llegado a saber a partir de mi estudio sobre la vida y obra de Albert Einstein, incluso cuando él pensaba que estaba equivocado (sobre la constante cosmológica), tenía razón. Y en lo concerniente al mundo cuántico —Einstein fue uno de los que desarrollaron la teoría—, yo sabía muy bien que, lejos de estar equivocado, el artículo de Einstein de 1935, aludido veladamente en el artículo del *Times*, fue de hecho la semilla de uno de los descubrimientos más importantes de la física del siglo XX: el descubrimiento real del entrelazamiento a través de experimentos físicos. Este libro cuenta la historia de la búsqueda humana del en-

trelazamiento, el más extraño de todos los extraños aspectos de la teoría cuántica.

Los entes entrelazados (partículas o fotones) están unidos entre sí porque fueron producidos por algún proceso que los ligó de una manera especial. Por ejemplo, dos fotones emitidos por el mismo átomo cuando uno de sus electrones baja dos niveles de energía están entrelazados. (Los niveles de energía están asociados a las órbitas de un electrón en el átomo). Aunque ninguno de ellos se emite en una dirección definida, el par siempre saldrá en direcciones opuestas entre sí. Y tales fotones o partículas, producidos de un modo que los liga entre sí, permanecen siempre entrelazados. Cuando cambia uno de ellos, su gemelo —*dondequiera que se halle*— cambiará *instantáneamente*.

En 1935, Einstein y sus colaboradores Rosen y Podolsky consideraron un sistema de dos partículas permitido por las reglas de la mecánica cuántica. Se probó que el estado de este sistema era entrelazado, y Einstein, Podolsky y Rosen usaron este entrelazamiento teórico de partículas separadas para suponer que, si la mecánica cuántica permitiera la existencia de tales efectos extraños, algo en la teoría debería ser falso o, como ellos decían, «incompleto».

En 1957, los físicos David Bohm y Yakir Aharonov analizaron los resultados de un experimento llevado a cabo por C. S. Wu e I. Shakhnov casi una década antes, y su análisis proporcionó el primer indicio de que el entrelazamiento de sistemas separados puede suceder ciertamente en la naturaleza. Después, en 1972, dos físicos norteamericanos, John Clauser y Stuart Freedman, presentaron pruebas de que el entrelazamiento existe realmente. Y unos años más tarde, el físico francés Alain Aspect y sus colegas proporcionaron una convincente y completa evidencia de la existencia del fenómeno. Ambos grupos siguieron el trabajo teórico fundamental de John S. Bell, un físico irlandés que trabajaba en Ginebra, y probaron que el experimento ideal de Einstein, Podolsky y Rosen no era algo absurdo usado para

invalidar la completitud de la mecánica cuántica, sino, al contrario, la descripción de un fenómeno real. La existencia de tal fenómeno proporciona evidencia a favor de la mecánica cuántica y en contra de una visión limitada de la realidad.

## NOTA AL LECTOR

La propia teoría cuántica, y en particular el concepto de entrelazamiento, es muy difícil de comprender, incluso para físicos o matemáticos experimentados. Así pues, he estructurado el libro de manera que las ideas y conceptos discutidos se explican y reexplican constantemente de diversas formas. Este enfoque tiene sentido cuando se considera que algunos de los científicos actuales más brillantes han trabajado sobre el entrelazamiento durante toda su vida; la verdad es que, incluso tras décadas de investigación, resulta difícil encontrar a alguien que admita entender perfectamente la mecánica cuántica. Esos físicos saben cómo aplicar la mecánica cuántica en una diversidad de situaciones. Pueden realizar cálculos y hacer predicciones con un alto grado de precisión, lo que es raro en otras áreas. Pero con frecuencia esos brillantes científicos confesarán que no *entienden* verdaderamente lo que acontece en el mundo cuántico. Es precisamente ésa la razón por la que, capítulo tras capítulo de este libro, repito los conceptos de la teoría cuántica y del entrelazamiento, en cada ocasión desde un ángulo ligeramente diferente, o exponiendo cómo ha sido explicado por un científico distinto.

Me he esforzado en incorporar el mayor número posible de figuras originales, proporcionadas por los mismos científicos, que describen experimentos y diseños reales. Espero que esos gráficos y figuras ayuden al lector a entender el misterioso y maravilloso mundo del cuanto y el marco en el que se produce y estudia el entrelazamiento. Adicionalmente, en los lu-

gares apropiados, he introducido algunos símbolos y ecuaciones. No lo he hecho para desconcertar al lector, sino para que los lectores con una preparación avanzada en ciencia puedan aprovechar más la presentación. Por ejemplo, en el capítulo sobre la ecuación de Schrödinger incluyo la forma más simple (y más restringida) de esa famosa ecuación pensando en quienes podrían desear ver su aspecto. Es perfectamente lícito que el lector, si así lo prefiere, se salte las ecuaciones y siga leyendo, y quien así lo haga no sufrirá de ninguna falta de información o de continuidad.

Éste es un libro acerca de la *ciencia*, de cómo se hace, de la filosofía subyacente, de sus fundamentos matemáticos, de los experimentos que verifican y ponen al descubierto los secretos profundos de la naturaleza, y de las vidas de los científicos que persiguieron el más extraño de ellos. Dichos científicos constituyen un grupo de las mentes más brillantes del siglo XX y en conjunto sus vidas abarcan la totalidad del siglo. Esas personas, en busca sin descanso de conocimiento sobre un profundo misterio de la naturaleza, llevaron y llevan hoy vidas que están, también ellas, entrelazadas.

Este libro cuenta los avatares de esa búsqueda, uno de los mayores episodios de detectives científicos de la historia. Y aunque la ciencia del entrelazamiento ha propiciado el nacimiento de nuevas y sorprendentes tecnologías, este libro no está centrado en ellas. *Entrelazamiento* trata de la búsqueda llamada ciencia moderna.

## 1

## UNA FUERZA MISTERIOSA

*Pero, ay, para vestir el manto de Galileo no basta con ser perseguido por una institución cruel, también se ha de tener razón.*

ROBERT PARK

¿Es posible que algo que sucede aquí haga *instantáneamente* que algo suceda en un sitio lejano? Si medimos algo en un laboratorio, ¿es posible que en el mismo instante tenga lugar un suceso análogo a diez kilómetros de distancia, en el otro extremo de la Tierra, o en el extremo opuesto del universo? Sorprendentemente, y en contra de toda intuición que podamos tener acerca de cómo funciona el universo, la respuesta es *sí*. Este libro narra la historia del *entrelazamiento*, un fenómeno en el que dos entes están inexorablemente enlazados independientemente de lo alejados que estén entre sí. Es la historia de los investigadores que se han pasado la vida buscando pruebas de que tan extraño efecto, anunciado por la teoría cuántica y objeto de una amplia atención científica por Einstein, forma, en efecto, parte de la naturaleza.

Al mismo tiempo que esos científicos estudiaban dicho efecto y presentaban pruebas concluyentes de que el en-

entrelazamiento es una realidad, descubrían también otros — igualmente sorprendentes— aspectos del fenómeno. Imaginémos a Alicia y Benito,<sup>[1.1]</sup> dos personas felizmente casadas. Mientras Alicia se encuentra lejos, en un viaje de negocios, Benito conoce a Carolina, que está casada con Damián. También Damián está fuera entonces, en la otra punta del mundo, alejado de los otros tres. Benito y Carolina acaban «entrelazándose»; olvidan a sus respectivos cónyuges y deciden formar una pareja estable. Misteriosamente, Alicia y Damián, que nunca se han visto, también llegan a estar entrelazados. De repente, se comportan como un matrimonio sin tan siquiera conocerse. Si sustituimos a las personas de esta historia por las partículas designadas A, B, C y D, el extraño fenómeno anterior sucede realmente. Si las partículas A y B están entrelazadas, y asimismo lo están C y D, entonces podemos entrelazar las partículas separadas A y D pasando B y C a través de un aparato que a su vez las entrelace.

Mediante el entrelazamiento, puede también «teleportarse»<sup>[1.2]</sup> el estado de una partícula hasta un destino lejano, como sucede con el capitán Kirk en la serie televisiva *Star Trek* cuando pide ser proyectado de vuelta al *Enterprise*. Para ser preciso, nadie ha sido todavía capaz de teleportar a una persona. Pero el estado de un sistema cuántico ha sido teleportado en el laboratorio. Es más, este increíble fenómeno puede en la actualidad usarse en criptografía y (podría usarse) en la futura computación cuántica.

En tales aplicaciones futuristas de la tecnología, el entrelazamiento se extiende frecuentemente a más de dos partículas. Es posible crear tríos de partículas, por ejemplo, de modo que las tres estén un 100 por 100 correlacionadas entre sí; cualquier cosa que suceda a una de ellas produce un cambio instantáneo semejante en las otras dos. Los tres entes se hallan entonces inexorablemente ligados dondequiera que se encuentren.