



Carlo Rovelli Helgoland



Lectulandia

En junio de 1925, Werner Heisenberg, de veintitrés años, se retira a Helgoland, una pequeña isla en el Mar del Norte, sin árboles y batida por el viento, para descansar y tratar de apaciguar la alergia que padece. Insomne, pasea por la noche para reflexionar y al alba da con una idea que transformará la ciencia y nuestra concepción del mundo. Ha puesto la primera piedra de la teoría cuántica.

Carlo Rovelli, que a su profesión de físico añade su virtuosa pericia como contador de historias, nos expone los orígenes, el desarrollo y las claves de una teoría que lo cambia todo, que sirve para explicar el universo y las galaxias, que posibilita la invención de los ordenadores y otras máquinas, y que todavía hoy desconcierta e inquieta porque cuestiona aquello en lo que creemos.

Asoman por estas páginas Erwin Schrödinger y su famoso gato, las reacciones de Niels Bohr y Einstein a la propuesta de Heisenberg, un visionario loco llamado Aleksandr Bogdánov, la relación de la teoría cuántica con el cubismo, la filosofía y el pensamiento oriental... Un libro deslumbrante y accesible que nos acerca a uno de los avances más trascendentales de la teoría científica contemporánea.

Carlo Rovelli

Helgoland

ePub r1.0

Un_Tal_Lucas 23-02-2023

Título original: *Helgoland*
Carlo Rovelli, 2020
Traducción: Pilar González Rodríguez

Editor digital: Un_Tal_Lucas
ePub base r2.1



Índice de contenido

Hundir la mirada en el abismo

PARTE I

I. «Contemplando un interior de extraña belleza»

La absurda idea del jovencísimo Werner Heisenberg: «los observables»

La engañosa Ψ de Erwin Schrödinger: «la probabilidad»

La granularidad del mundo: «los cuantos»

PARTE II

II. Un divertido bestiario de ideas extremas

Superposiciones

Tomar Ψ en serio: mundos múltiples, variables ocultas y colapsos físicos

Aceptar la indeterminación

III. ¿Es posible que algo sea real para ti pero no para mí?

Hubo un tiempo en que el mundo parecía sencillo

Relaciones

El enrarecido y etéreo mundo de los cuantos

IV. La red de relaciones que teje la realidad

Entrelazamiento

El paso a tres que teje las relaciones del mundo

Información

PARTE III

V. «La descripción no ambigua de un fenómeno incluye los objetos a los que el fenómeno se manifiesta»

Aleksandr Bogdánov y Vladímir Lenin

Naturalismo sin sustancia

¿Sin fundamento? Nāgārjuna

VI. «Para la naturaleza es un problema ya resuelto»

¿Materia simple?

¿Qué significa «significado»?

El mundo visto desde dentro

VII

¿Pero es verdaderamente posible?

Agradecimientos

Sobre el autor

*A Ted Newman, que me hizo comprender que yo no comprendía la
mecánica cuántica*

HUNDIR LA MIRADA EN EL ABISMO

Čáslav y yo nos sentamos en la arena a unos pasos del mar. Habíamos hablado sin parar durante horas. Fuimos a la isla de Lamma, frente a Hong Kong, en la tarde de descanso del congreso. Čáslav era uno de los expertos más reconocidos en mecánica cuántica. Había presentado en la conferencia un análisis de un complejo experimento ideal. Lo habíamos discutido y discutido a lo largo del camino que bordea la selva junto a la playa; después aquí, a orillas del mar. Conseguimos ponernos prácticamente de acuerdo. En la playa se hace un largo silencio entre nosotros. Contemplamos el mar. Es de verdad increíble, susurra Čáslav, ¿cómo vamos a creerlo? Es como si no existiese... la realidad...

Hemos llegado al punto de los cuantos. Tras un siglo de extraordinarios resultados, después de habernos regalado la tecnología contemporánea y la base para toda la física del siglo xx, la teoría de mayor éxito de la ciencia, cuando la consideramos a fondo, nos llena de estupor, confusión e incredulidad.

Hubo un momento en el que la gramática del mundo parecía aclarada: en la raíz de todas las variadas formas de realidad parecían existir solo partículas de materia guiadas por pocas fuerzas. La humanidad podía creer que había levantado el velo de Maya, que había visto el fondo de la realidad. Pero no duró demasiado: muchos hechos no encajaban.

Hasta que en el verano de 1925, un joven alemán de veintitrés años fue a pasar unos días de inquieta soledad en una ventosa isla del Mar del Norte: Helgoland, la Isla Sagrada. Allí, en la isla, encontró una idea que permitió dar cuenta de todos los hechos recalcitrantes y construir la estructura matemática de la mecánica cuántica, la «teoría de los cuantos». Tal vez la revolución científica más grande de todos los tiempos. El joven se llamaba Werner Heisenberg. El relato de este libro se abre con él.

La teoría de los cuantos ha aclarado las bases de la química, el funcionamiento de los átomos, de los sólidos, de los plasmas, el color del cielo, las neuronas de nuestro cerebro, la dinámica de las estrellas, el origen de las galaxias... mil aspectos del mundo. Es la base de las tecnologías más recientes, desde los ordenadores a las centrales nucleares. Ingenieros, astrofísicos, cosmólogos, químicos y biólogos la utilizan a diario. Los rudimentos de la teoría aparecen en los programas del bachillerato. Nunca ha fallado. Es el corazón que impulsa la ciencia actual. Sin embargo, continúa siendo misteriosa. Sutilmente inquietante.

Ha destruido la imagen de la realidad formada por partículas que se mueven con trayectorias definidas, sin explicar, en cambio, cómo tenemos que interpretar el mundo. Su matemática no describe la realidad, no nos dice «qué es». Objetos lejanos parecen conectados entre sí por arte de magia. La materia es sustituida por fantasmagóricas ondas de probabilidad.

Quien pare a preguntarse qué dice la teoría cuántica sobre el mundo real se queda perplejo. Einstein, a pesar de haber anticipado las ideas poniendo a Heisenberg en el camino, nunca la digirió; Richard Feynman, el gran físico teórico de la segunda mitad del siglo xx, escribió que nadie entendía los cuantos.

Pero eso es la ciencia: una exploración de nuevos modos de interpretar el mundo. Es la capacidad que tenemos de poner siempre en cuestión nuestros conceptos. Es la fuerza visionaria de un pensamiento rebelde y crítico capaz de modificar sus propios cimientos conceptuales, capaz de reinterpretar el mundo desde cero.

Si bien la rareza de la teoría nos confunde, nos abre también perspectivas nuevas para comprender la realidad. Una realidad más sutil que la del materialismo simplicista de las partículas en el espacio. Una realidad constituida por relaciones, antes que por objetos.

La teoría sugiere nuevos caminos para repensar grandes cuestiones, desde la estructura de la realidad hasta la naturaleza de la experiencia, desde la metafísica hasta, quizá, la naturaleza de la consciencia. Todo esto es hoy tema de animadísimo debate entre científicos y entre filósofos, y de todo esto hablo en las páginas siguientes.

En la isla de Helgoland, desolada, extrema, azotada por el viento del Norte, Werner Heisenberg levantó un velo entre nosotros y la verdad; más allá de ese velo apareció un abismo. El relato de este libro comienza en la isla donde Heisenberg concibió el germen de su idea, y se extiende poco a poco a

cuestiones cada vez más amplias abiertas al descubrimiento de la estructura cuántica de la realidad.

ħħ

He escrito estas páginas en primer lugar para quienes no conocen la física cuántica y sienten curiosidad por comprender, hasta donde sea posible, qué es y qué implica. He intentado ser lo más conciso posible, dejando de lado todo detalle que no sea esencial para entender el corazón de la cuestión. He intentado ser lo más claro posible en torno a una teoría que está en el centro de la oscuridad de la ciencia. Tal vez, más que explicar cómo entender la mecánica cuántica, explico solo por qué es tan difícil de entender.

Pero el libro está pensado también para los colegas, científicos y filósofos, que cuanto más profundizan en la teoría más perplejos se quedan; para proseguir el diálogo en curso sobre el significado de esta física asombrosa y avanzar hacia una perspectiva general. El libro contiene numerosas notas destinadas a quienes ya conozcan bien la mecánica cuántica. Expresan con mayor precisión lo que trato de exponer en el texto de forma más legible.

El objetivo principal de mi investigación en física teórica ha sido comprender la naturaleza cuántica del espacio y del tiempo. Compaginar de forma coherente la teoría cuántica con los descubrimientos de Einstein sobre espacio y tiempo. He reflexionado de continuo sobre los cuantos. Este texto refleja el punto al que he llegado hoy. No ignora opiniones diversas, pero es decididamente partidista: se centra en la perspectiva que considero eficaz y abro las vías más interesantes, la interpretación «relacional» de la teoría.

Una advertencia antes de empezar. El abismo de lo que no conocemos es siempre magnético y vertiginoso. Pero tomar en serio la mecánica cuántica, reflexionar sobre sus implicaciones, es una experiencia casi psicodélica: exige que renunciemos, de un modo u otro, a todo lo que parecía sólido e inatacable en nuestra comprensión del mundo. Nos exige aceptar que la realidad es muy diferente de como la imaginábamos. Hundir la mirada en ese abismo, sin miedo a sumergirse en lo insondable.

*Lisboa, Marsella, Verona, Londres (Ontario),
2019-2020*

I. «CONTEMPLANDO UN INTERIOR DE EXTRAÑA BELLEZA»

De cómo un joven físico alemán dio con una idea verdaderamente extraña que, sin embargo, describía el mundo muy bien, y la gran confusión que siguió.

LA ABSURDA IDEA DEL JOVENCÍSIMO WERNER HEISENBERG: «LOS OBSERVABLES»

«Eran más o menos las tres de la mañana cuando apareció ante mí el resultado final de mis cálculos. Me sentía muy conmocionado. Estaba tan alterado que no podía pensar en dormir. Salí de casa y me puse a caminar despacio en la oscuridad. Trepé a una roca asomada a plomo sobre el mar, en la punta de la isla, y esperé que saliera el sol...»^[1].

Me he preguntado a menudo cuáles serían los pensamientos y las emociones del joven Heisenberg encaramado en aquella roca asomada al mar, en la desolada y ventosa isla de Helgoland, en el Mar del Norte, mientras contemplaba la inmensidad de las olas esperando la salida del sol, tras haber sido el primero en dirigir su mirada a uno de los más vertiginosos secretos de la naturaleza que la humanidad haya vislumbrado nunca. Heisenberg tenía veintitrés años.

Se encontraba allí para aliviar la alergia que padecía. Helgoland —el nombre significa «isla sagrada» no tiene prácticamente árboles, casi no hay polen. «Helgoland con su único árbol», dice Joyce en el *Ulises*. Estaba allí sobre todo para sumergirse en el problema que lo obsesionaba. La patata caliente que le había puesto en las manos Niels Bohr. Dormía muy poco, pasaba el tiempo en soledad tratando de calcular algo que justificase las incomprensibles reglas de Bohr. De vez en cuando se detenía para trepar por las rocas de la isla. En los breves momentos de pausa se aprendía de memoria poemas del *Diván de Oriente y Occidente* de Goethe, la antología donde el mayor poeta alemán canta su amor por el islam.

Niels Bohr era ya un científico prestigioso. Había escrito fórmulas sencillas pero extrañas que preveían las propiedades de los elementos químicos, antes incluso de medirlos. Preveían, por ejemplo, la frecuencia de la luz que emiten los elementos calentados, el color que adquieren. Un éxito notable. Sin embargo, las fórmulas estaban incompletas: no permitían calcular la intensidad de la luz emitida.

Pero, sobre todo, estas fórmulas contenían algo verdaderamente absurdo: asumían sin motivo que los electrones en los átomos orbitaban en torno al núcleo solo en *determinadas* órbitas concretas, a *determinada* distancia concreta del núcleo, con *determinada* energía concreta; después «saltarían» mágicamente de una órbita a otra. Los primeros «saltos cuánticos». ¿Por qué solo en esas órbitas? ¿Qué son estos incongruentes «saltos» de una órbita a otra? ¿Qué fuerza desconocida puede llevar a un electrón a seguir un comportamiento tan insólito?

El átomo es la piedra elemental de todo. ¿Cómo funciona? ¿Cómo se mueven los electrones en su interior? Hacía más de diez años que Bohr y sus colegas andaban a vueltas con estas preguntas. En vano.

Bohr se rodeó en Copenhague de los físicos jóvenes más brillantes que pudo encontrar para trabajar con ellos sobre los misterios del átomo, como en el taller de un pintor del Renacimiento. Se encontraba entre ellos Wolfgang Pauli, brillantísimo, inteligentísimo, engreído, insolente, amigo y compañero de colegio de Heisenberg. Pese a su arrogancia, Pauli había recomendado a su amigo Heisenberg al gran Bohr diciéndole que, si se quería avanzar, había que llamarle. Bohr le hizo caso y, en el otoño de 1924, también invitó a Copenhague a Heisenberg, que era ayudante del físico Max Born en Gotinga. Heisenberg permaneció unos meses en Copenhague discutiendo con Bohr ante pizarras llenas de fórmulas. El joven y el maestro dieron juntos largas caminatas por la montaña, hablando de los misterios del átomo, de física y de filosofía^[2].

Heisenberg estaba inmerso en el problema, lo había convertido en su obsesión. Como los demás, también él había probado de todo. Nada funcionaba. Ninguna fuerza razonable parecía capaz de guiar los electrones por las extrañas órbitas y los extraños saltos de Bohr. No obstante, aquellos saltos y órbitas permitían predecir bien los fenómenos atómicos. Confusión.

El desánimo empuja a buscar soluciones extremas. En la isla del Mar del Norte, Heisenberg, en soledad, estaba decidido a explorar ideas radicales.

En realidad, veinte años antes Einstein había asombrado al mundo con ideas radicales. El radicalismo de Einstein se había revelado eficaz. Pauli y Heisenberg estaban enamorados de su física. Einstein era el mito. ¿Habría llegado quizá el momento, se preguntaban, de atreverse a dar un paso no menos radical para salir del atolladero de los electrones en el átomo? ¿Y si ellos consiguieran dar ese paso? A los veinte años los sueños son desenfrenados.

Einstein había demostrado que las convicciones más arraigadas pueden ser erróneas. Lo que parece obvio puede no ser correcto. Abandonar ideas asumidas que parecen obvias puede llevar a comprender mejor. Einstein había enseñado a basarse solo en lo que vemos, no en lo que pensamos que debe existir.

Pauli repetía a menudo estas ideas a Heisenberg. Ambos jóvenes se habían nutrido de esa miel venenosa. Habían seguido las discusiones sobre la relación entre realidad y experiencia que agitaban la filosofía austríaca y alemana desde comienzos del siglo. Ernst Mach, que había ejercido una influencia determinante sobre Einstein, predicaba la necesidad de basar el conocimiento solo sobre las observaciones, liberándose de cualquier implícita idea «metafísica». Tales son los ingredientes dispares que se mezclan en los pensamientos del jovencísimo Heisenberg, como componentes químicos de un explosivo cuando, en el verano de 1925, se refugia en la isla de Helgoland.

Y allí surgió la idea. Una idea que solo puede aparecer en el radicalismo ilimitado de los veinte años. La idea destinada a trastocar toda la física, toda la ciencia, toda nuestra concepción del mundo. La idea que la humanidad, creo, todavía no ha asimilado.

ħħ

El salto de Heisenberg es tan audaz como sencillo. ¿Nadie lograba identificar la fuerza capaz de conducir los electrones en su extraño comportamiento? Pues bien, entonces dejémosla estar. Utilicemos mejor la que ya conocemos: la fuerza eléctrica que atrae el electrón al núcleo. ¿No encontramos nuevas leyes del movimiento que justifiquen las órbitas y saltos de Bohr? Sigamos entonces con las leyes del movimiento que ya conocemos, sin cambiarlas.

Modifiquemos, en cambio, el modo de pensar sobre el electrón. Renunciemos a la idea de que un electrón sea un objeto que se mueve siguiendo una trayectoria. Renunciemos a describir el movimiento del electrón. Describamos solo lo que *observamos desde el exterior*: intensidad y frecuencia de la luz emitida por el electrón. Basemos todo en las cantidades que sean *observables*. Esta es la idea.

Heisenberg prueba a recalcular el comportamiento del electrón utilizando únicamente las cantidades que observamos: la frecuencia y la amplitud de la luz emitida. Intenta recalcular la energía del electrón partiendo de ahí.

Nosotros observamos los efectos de los *saltos* del electrón de una órbita de Bohr a otra. Heisenberg reemplaza las variables físicas por *tablas* que

tienen la órbita de partida en las filas y la órbita de llegada en las columnas. Cada casilla de la tabla, en la intersección entre una fila y una columna, describe el salto de una órbita determinada a otra. Pasa el tiempo en la isla tratando de usar estas tablas para calcular algo que justifique las reglas de Bohr. Duerme muy poco. No consigue hacer los cálculos para el electrón en el átomo, son demasiado difíciles. Trata de hacerlos por medio de un sistema más sencillo: un péndulo. Investiga las reglas de Bohr en este caso simplificado.

El 7 de junio algo se mueve:

«Cuando el primer término pareció confirmarse correcto [reobtener las leyes de Bohr], comencé a inquietarme, a cometer un error aritmético tras otro. Eran más o menos las tres de la madrugada cuando tuve ante mí el resultado final de mis cálculos. Era exacto en todos sus términos.

»De pronto dejé de tener dudas sobre la coherencia de la nueva mecánica “cuántica” que mis cálculos indicaban.

»Me sentía verdaderamente desasosegado. Tenía la sensación de que a través de la superficie de los fenómenos estaba contemplando un interior de extraña belleza; me aturdí pensar que iba a tener que investigar entonces la nueva riqueza de estructura matemática que la naturaleza tan generosamente desplegaba ante mí».

Palabras que producen escalofríos. A través de la superficie de los fenómenos, «un interior de extraña belleza». Resuenan en ellas las palabras escritas por Galileo cuando vio aparecer una regularidad matemática en sus mediciones sobre la caída de objetos por un plano inclinado, la primera ley matemática descubierta por la humanidad que describe el movimiento de objetos sobre la Tierra: «No hay emoción como la de vislumbrar la ley matemática detrás del desorden de las apariencias».

ħħ

El 9 de junio, Heisenberg regresó de la isla de Helgoland a su universidad: Gotinga. Envía una copia de las conclusiones a su amigo Pauli comentándole: «Todavía es todo muy vago y no me resulta claro, pero parece que los electrones no se moverán ya en órbitas».

El 9 de julio entrega una copia de su trabajo a Max Born, el profesor del que es ayudante (no confundir con Niels Bohr, de Copenhague), con la siguiente nota: «He escrito un trabajo descabellado y no me atrevo a mandarlo a una revista para su publicación». Le pide que lo lea y le aconseje.

El 25 de julio, el propio Max Born envía el trabajo de Heisenberg a la revista *Zeitschrift für Physik*^[3].

Había intuido la importancia del paso dado por su joven ayudante. Trata de aclarar las cosas. Implica a su alumno Pascual Jordan con intención de poner orden en los extraños resultados de Heisenberg^[4]. Heisenberg, por su parte, intenta que también participe Pauli, pero este no está muy convencido, le parece un juego matemático demasiado abstracto y abstruso. Al comienzo, por tanto, solo trabajan tres en la teoría: Heisenberg, Born y Jordan.

Trabajan febrilmente y en unos meses logran poner a punto toda la estructura formal de una nueva mecánica. Es muy sencilla: las fuerzas son las mismas de la física clásica; las ecuaciones son las mismas de la física clásica (más una^[*1] de la que hablaré más adelante); pero se sustituyen variables por tablas de números o «matrices».

$\hbar\hbar$

¿Por qué tablas de números? Lo que observamos de un electrón en un átomo es la luz emitida cuando, según la hipótesis de Bohr, el electrón salta de una órbita a otra. Un salto afecta a dos órbitas: la de partida y la de llegada. Por tanto, cada observación se puede disponer, como ya he mencionado, en la casilla de una tabla en la que la órbita de partida fija la línea y la de llegada, la columna.

La idea de Heisenberg es anotar *todas* las cantidades que describen el movimiento del electrón, pero no como números sino como tablas de números. En lugar de tener una sola posición x para el electrón, se tiene una tabla completa de posibles posiciones X : una para cada salto posible. La idea de la nueva teoría es seguir usando las ecuaciones de la física de siempre, reemplazando simplemente las cantidades habituales (posición, velocidad, energía y frecuencia de la órbita...) por estas tablas. Intensidad y frecuencia de la luz emitida en un salto, por ejemplo, se determinarán por la correspondiente casilla de la tabla. La tabla que corresponde a la energía solo tiene números en la diagonal, y estos serán las energías de las órbitas de Bohr.

ÓRBITA DE PARTIDA	ÓRBITA DE LLEGADA				
	<i>Órbita 1</i>	<i>Órbita 2</i>	<i>Órbita 3</i>	<i>Órbita 4</i>	...
<i>Órbita 1</i>	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	...
<i>Órbita 2</i>	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	...
<i>Órbita 3</i>	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	...
<i>Órbita 4</i>	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	...
...

Una matriz de Heisenberg: la tabla de números que «representa» la posición del electrón. Por ejemplo, el número X_{23} se refiere al salto de la segunda a la tercera órbita.

¿Claro? En absoluto. Oscuro como la pez.

Y sin embargo, esta absurda receta de sustituir variables por tablas lleva a calcular resultados correctos: prevén exactamente lo que observamos en los experimentos.

Con gran pasmo de los tres mosqueteros de Gotinga, antes de acabar el año, Born recibe por correo un breve artículo de un joven inglés desconocido. En el artículo se cuenta en esencia la misma historia, en un lenguaje matemático todavía más abstracto que el de las matrices de Gotinga^[5]. El joven era Paul Dirac. En junio, Heisenberg había pronunciado una conferencia en Inglaterra y al final había esbozado sus ideas. Dirac se encontraba entre el público, pero estaba cansado y no había entendido nada. Más tarde obtuvo el trabajo de Heisenberg de manos de su profesor, que lo había recibido por correo y del que tampoco había comprendido nada. Dirac lo lee, decide que no tiene sentido, lo descarta. Pero un par de semanas después, rumiándolo durante un paseo por el campo, se da cuenta de que las tablas de Heisenberg se asemejan a cosas que había estudiado en un curso que no recuerda bien; tiene que esperar al lunes para que abran la biblioteca y pueda ir a refrescar las ideas en un libro^[6]... A partir de ahí y en poco tiempo, también él elaboró independientemente la misma teoría completa de los tres magos de Gotinga.

No falta más que aplicar la nueva teoría al electrón en el átomo y ver si de verdad funciona. ¿Permite realmente calcular todas las órbitas de Bohr?

El cálculo resulta difícil y no consiguen completarlo entre los tres. Piden ayuda a Pauli^[7], que siempre había sido el más brillante de todos (y el más arrogante). Pauli responde: «En efecto, es un cálculo demasiado difícil... para vosotros». Completa el cálculo, con enrevesados tecnicismos, en pocas semanas^[8].

El resultado es perfecto: los valores de la energía calculados con la teoría de las matrices de Heisenberg, Born y Jordan son exactamente los de la hipótesis de Bohr. Las extrañas leyes de Bohr para los átomos se rigen por el nuevo esquema. No solo. La teoría permite calcular también la intensidad de la luz emitida, las reglas de Bohr no lo lograban. ¡También esta resulta correcta con los experimentos!

Es un triunfo.

Einstein escribe en una carta a Hedi, la mujer de Born: «Las ideas de Heisenberg y Born nos tienen a todos en vilo y ocupan la mente de todo aquel con intereses teóricos»^[9]. Y en una carta a su querido amigo de siempre, Michele Besso: «La teorización más interesante de los últimos tiempos es la de Heisenberg-Born-Jordan sobre los estados cuánticos: pura y auténtica cosa de brujería»^[10].

Bohr, el maestro, recordará años después: «Se tenía entonces tan solo una vaga esperanza de [poder alcanzar] una reformulación de la teoría donde se eliminara todo uso no apropiado de las ideas clásicas. Impresionados por la dificultad de semejante programa, sentimos todos la mayor admiración por Heisenberg cuando, con apenas veintitrés años, llegó a la meta de un golpe»^[11].

Excepto Born, que está en la cuarentena, los demás, Heisenberg, Jordan, Dirac y Pauli, son veinteañeros. En Gotinga llaman a su física *Knabenphysik*, la física de los chicos.

ħħ

Dieciséis años después. Europa está trastornada por la guerra mundial. Heisenberg se ha convertido en científico famoso. Hitler le ha encomendado la misión de usar su conocimiento sobre el átomo para fabricar una bomba que le lleve a la victoria en la guerra. Heisenberg se va en tren a Copenhague, en la Dinamarca ocupada por el ejército alemán, y visita al viejo maestro. El viejo y el joven hablan. Se despiden sin entenderse. Heisenberg dirá que había

ido a visitar a Bohr para hablar del problema moral planteado por la perspectiva de una bomba espantosa. No todos le creerán. Poco después, un comando inglés secuestra a Bohr con su consentimiento y lo saca de la Dinamarca ocupada. Se traslada a Inglaterra, lo recibe el propio Churchill, después va a los Estados Unidos, donde su saber se pone en práctica con la generación de los jóvenes físicos que han aprendido a usar la mecánica de los cuantos para manejar los átomos. Hiroshima y Nagasaki son aniquiladas y doscientos mil seres humanos, hombres, mujeres y niños, mueren en una fracción de segundo. Hoy vivimos con miles de cabezas nucleares que apuntan a nuestras ciudades. Si alguno pierde el juicio, puede destruir la vida en la Tierra. La potencia mortal de la «física de los chicos» está en el punto de mira de todos.

ħħ

No se trata solo de la bomba, gracias al cielo. La teoría cuántica se ha aplicado a átomos, núcleos atómicos, partículas elementales, a la física de los enlaces químicos, a la física de los materiales sólidos, a los líquidos y a los gases, a los semiconductores, al láser, a la física de las estrellas como el Sol, a la física de las estrellas de neutrones, al universo primordial, a la física de la formación de las galaxias... y así sucesivamente, podría seguir durante páginas. Ha llevado a comprender partes enteras de la naturaleza, como la tabla periódica de los elementos, a aplicaciones médicas que han salvado millones de vidas humanas, a nuevos aparatos, nuevas tecnologías, a los ordenadores. La teoría predijo nuevos fenómenos nunca observados ni sospechados antes: correlaciones cuánticas a un kilómetro de distancia, ordenadores cuánticos, teletransportación... predicciones todas ellas que se han revelado correctas. La carrera de éxitos se produce ininterrumpidamente desde hace un siglo, y continúa.

El esquema de cálculo de Heisenberg, Born, Jordan y Dirac, la extraña idea de «limitarse a lo que es observable», y sustituir variables físicas por matrices^[12], nunca ha fallado. Es la única teoría fundamental del mundo que hasta ahora nunca se ha equivocado y cuyos límites no conocemos.

ħħ

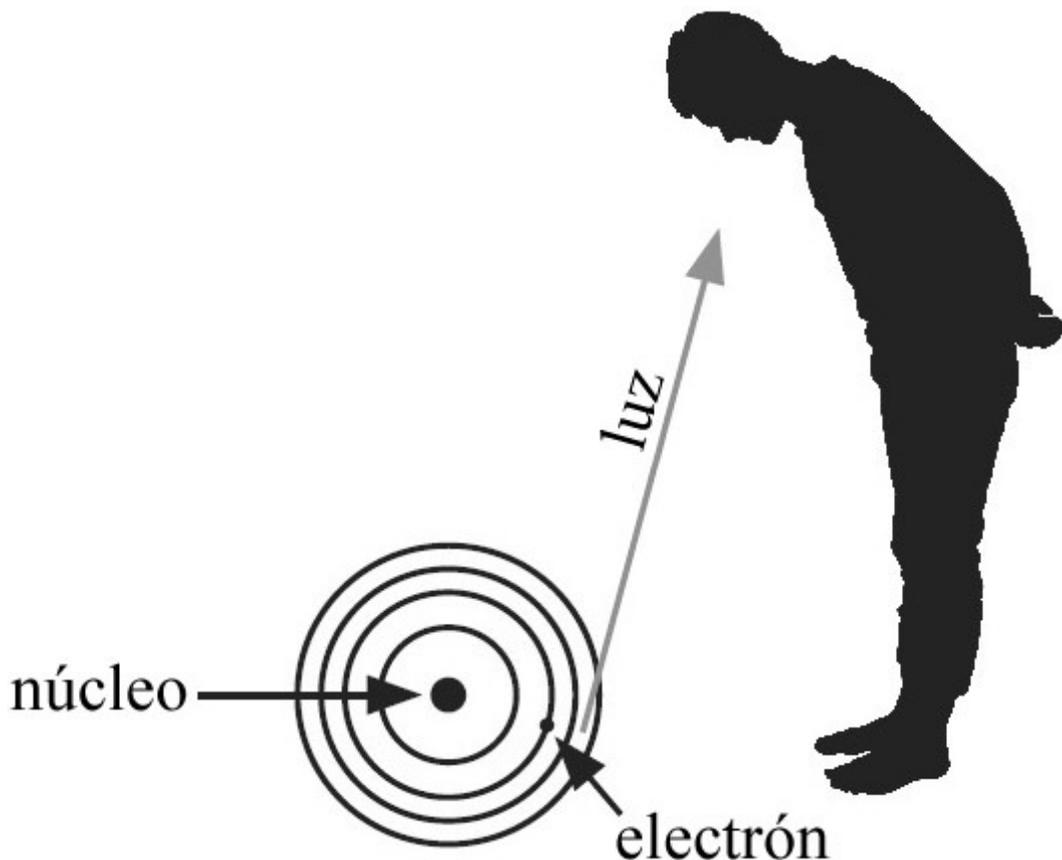
Pero ¿por qué no podemos describir dónde está y qué hace el electrón cuando no lo vemos? ¿Por qué tenemos que hablar solo de sus «observables»? ¿Por

qué podemos hablar solo de su efecto cuando salta de una órbita a otra y no podemos decir simplemente dónde está en cada momento? ¿Qué significa sustituir números por tablas de números?

¿Qué significa: «Todavía es todo muy vago y no me resulta claro, pero parece que los electrones ya no se moverán en órbitas»? Pauli escribirá sobre su amigo Heisenberg: «Razonaba de forma tremenda, era todo intuición, no prestaba ninguna atención a elaborar claramente los asuntos fundamentales y su relación con las teorías existentes...».

El mágico artículo de Werner Heisenberg que dio origen a todo, concebido en la Isla Sagrada del Mar del Norte, se abría con esta frase: «El objetivo de este trabajo es poner los fundamentos de una nueva teoría de mecánica cuántica basada exclusivamente en relaciones entre cantidades que sean observables».

¿Observables? ¿Acaso sabe la Naturaleza si hay alguien observando?



La teoría no explica cómo se mueve el electrón durante un salto. Dice solo lo que vemos cuando salta. ¿Por qué?

LA ENGAÑOSA Ψ DE ERWIN SCHRÖDINGER: «LA PROBABILIDAD»

Al año siguiente, 1926, todo parece aclararse. El físico austríaco Erwin Schrödinger logra el mismo resultado que Pauli, es decir, calcula las energías del átomo de Bohr, pero de modo completamente distinto.

Tampoco este resultado se origina en un departamento universitario: Schrödinger lo encuentra durante una escapada con una amante secreta a un chalet en los Alpes suizos. Crecido en el ambiente liberal y permisivo de la Viena de principios de siglo, brillante y seductor, Erwin Schrödinger siempre tuvo diversas compañeras al mismo tiempo y no ocultó cierta fascinación por las preadolescentes. Años después, a pesar del Premio Nobel, su puesto en Oxford salta a causa de un estilo de vida muy poco conformista incluso para el pretendido anticonformismo inglés: vive con su esposa Anny y su amante Hilde, que espera un hijo suyo, y es la esposa de su asistente. En Estados Unidos no le va mejor: en Princeton, Erwin, Anny e Hilde quieren convivir y ocuparse juntos de la pequeña Ruth, nacida mientras tanto; Princeton no lo tolera. Se irán a vivir a Dublín, más liberal. Pero también allí terminará Schrödinger por suscitar escándalo, después de haber tenido dos hijos con dos estudiantes diferentes... Comentario de su esposa Anny: «Es más fácil vivir con un canario que con un potro, yo prefiero un potro»^[13].

El nombre de la amante con quien Schrödinger se refugia en las montañas en los primeros días de 1926 ha permanecido en el misterio. Solo sabemos que es una antigua amiga vienesa. La leyenda cuenta que se marchó llevando solo a su amante, dos tapones para ponerse en los oídos cuando quisiera aislarse para pensar en la física y la tesis de un joven científico francés, Louis de Broglie, que Einstein le había recomendado que leyera.

La tesis de De Broglie estudia la idea de que las partículas como los electrones pueden ser en realidad ondas. Como las olas del mar o las ondas electromagnéticas. Basándose en algunas analogías teóricas bastante vagas,

De Broglie sugiere que podemos imaginar un electrón como una pequeña onda que corre.

¿Qué relación puede existir entre una onda, que se dispersa por todas partes, y una partícula, que permanece compacta siguiendo una trayectoria fija? Piénsese en el rayo de luz de un láser: parece seguir una trayectoria definida. Pero está hecho de luz, que es una onda, una oscilación del campo electromagnético. De hecho, al final, el rayo láser se dispersa en el espacio. La línea precisa trazada por la trayectoria de un rayo de luz es solo una aproximación que pasa por alto esta dispersión.

A Schrödinger le atrae la idea de que las trayectorias de las partículas elementales sean también solo aproximaciones del comportamiento de una onda subyacente^[14]. Había hablado de esta idea en un seminario en Zúrich, y un estudiante le había preguntado si estas ondas obedecían a una ecuación. En la montaña, con los tapones en los oídos, en las pausas de los dulces momentos compartidos con su amiga vienesa, Schrödinger recorre hábilmente a la inversa el camino que lleva de la ecuación de una onda a la trayectoria de un rayo de luz^[15], y de esta forma acrobática adivina la ecuación que el electrón-onda debe satisfacer cuando está en un átomo. Estudia soluciones de esta ecuación y... extrae exactamente las energías de Bohr^[16]. ¡Guau!

Más tarde, cuando conoce la teoría de Heisenberg, Born y Jordan, consigue demostrar que desde el punto de vista matemático las dos teorías son sustancialmente equivalentes: predicen los mismos valores^[17].

ħħ

La idea de las ondas es tan simple que descoloca al pequeño grupo de Gotinga y sus esotéricas especulaciones sobre las cantidades observables. Parece el huevo de Colón: Heisenberg, Born, Jordan y Dirac elaboraron una teoría intrincada y oscura solo porque habían tomado una vía retorcida y desorientadora. Las cosas son mucho más sencillas: el electrón es una onda, eso es todo. Las «observaciones» nada tienen que ver.

Schrödinger también es producto del vibrante mundo filosófico e intelectual vienes de comienzos del siglo. Amigo del filósofo Hans Reichenbach, está fascinado por el pensamiento oriental, en particular por el vedanta hindú, y es un apasionado de la filosofía de Schopenhauer (como lo es Einstein), que interpreta el mundo como «representación». Así pues, sin que el conformismo lo frene ni le preocupe el «qué dirán», no le asusta la idea de sustituir un mundo de materia por un mundo de ondas.

La letra que utiliza Schrödinger para designar sus ondas es la letra Ψ , la «psi». La cantidad Ψ es a menudo llamada la «función de onda»^[18]. El espléndido cálculo de Schrödinger parece mostrar que el mundo microscópico no está hecho de partículas: está hecho de ondas Ψ . Alrededor de los núcleos de los átomos no orbitan puntos de materia: hay ondulaciones continuas de las ondas de Schrödinger, como las olas que encrespan un pequeño lago siempre sacudido por el viento.

De pronto, esta «mecánica ondulatoria» parece mucho más convincente que la «mecánica de las matrices» de Gotinga, aunque produce las mismas predicciones. La explicación de Schrödinger es más sencilla que la de Pauli. Los físicos de la primera mitad del siglo xx estaban familiarizados con las ecuaciones de ondas, no estaban familiarizados con las matrices. «La teoría de Schrödinger llegó como un alivio: ya no nos veíamos obligados a aprender la extraña matemática de las matrices», recuerda un conocido físico de la época^[19].

Y sobre todo: las ondas de Schrödinger son fáciles de imaginar y visualizar. Nos muestran claramente qué es la «trayectoria del electrón» que Heisenberg quería eliminar: el electrón es una onda que se puede extender, eso es todo.

Schrödinger parece triunfar en toda regla.

$\hbar\hbar$

Pero es una ilusión.

Heisenberg pronto se dio cuenta de que la claridad conceptual de las ondas de Schrödinger era un espejismo. Antes o después una onda se difunde en el espacio, un electrón, no: cuando llega de cualquier parte, llega siempre y solo entero y en un único punto. Si un núcleo atómico expulsa un electrón, la ecuación de Schrödinger prevé que la onda Ψ se propague uniformemente por el espacio. Pero cuando el electrón se registra en un contador Geiger, por ejemplo, o en una pantalla, aparece en un solo punto, no se muestra disperso por el espacio.

La discusión sobre la mecánica ondulatoria de Schrödinger se enciende rápidamente y se vuelve enseguida virulenta. Heisenberg, que siente cuestionada la importancia de su descubrimiento, es tajante: «Cuanto más pienso en los aspectos físicos de la teoría de Schrödinger, más rechazables los encuentro. Lo que escribe Schrödinger sobre la “visualizabilidad” de su teoría “probablemente no es del todo exacto”, en otras palabras: son

estupideces»^[20]. Schrödinger trató de rebatirlo con ironía: «No puedo imaginarme un electrón saltando aquí y allá como una pulga»^[21].

Pero Heisenberg tiene razón. Poco a poco va resultando evidente que la mecánica ondulatoria no es más clara que la mecánica de matrices de Gotinga. Se trata de otro instrumento de cálculo que produce números correctos, quizá más sencillo de usar, pero que por sí mismo no nos da la imagen clara e inmediata de lo que sucede, que Schrödinger esperaba. La mecánica ondulatoria es tan oscura como las matrices de Heisenberg. Si cada vez que vemos un electrón lo vemos en un solo punto, ¿cómo puede el electrón ser una onda difusa en el espacio?

Años después, Schrödinger, que de todos modos se convertirá en uno de los más agudos pensadores sobre las cuestiones suscitadas por los cuantos, reconocerá el error: «Hubo un momento —escribe— en el que los creadores de la mecánica ondulatoria [es decir, él] se mecieron en la ilusión de haber eliminado las discontinuidades de la teoría cuántica. Pero las discontinuidades reaparecen en el momento de confrontar la teoría con lo que observamos»^[22].

Aparece de nuevo «lo que observamos». Pero —una vez más— ¿qué sabe la Naturaleza de si la observamos o no?

ħħ

Otra vez es Max Born quien añade una pieza^[23] al asunto al ser el primero en comprender el significado de la Ψ de Schrödinger. Born, con su aire de ingeniero serio y algo apocado, es el menos *flamboyant* y el menos conocido de los creadores de la teoría cuántica, pero tal vez sea su verdadero artífice, además de haber sido, como dicen los norteamericanos, el «único adulto en la sala», tanto en sentido figurado como literal. Fue él, en 1925, quien tuvo muy claro que los fenómenos cuánticos hacían necesaria una mecánica radicalmente nueva, y fue él quien inculcó esta idea en los jóvenes, fue él quien reconoció al vuelo la idea correcta en el primer cálculo confuso de Heisenberg y la tradujo a una verdadera teoría.

Born comprende que el valor de la onda Ψ de Schrödinger en un punto del espacio determina la *probabilidad* de observar el electrón en ese punto^[24]. Si un átomo emite un electrón y está rodeado por contadores Geiger, el valor de Ψ donde hay un contador determina la probabilidad de que sea ese contador, y no otro, el que revele el electrón.

La Ψ de Schrödinger no es por tanto la representación de una entidad real: es un instrumento de cálculo que nos dice la probabilidad de que algo real

suceda. Es como el pronóstico del tiempo, que nos dice lo que podría suceder.

Lo mismo —se entiende inmediatamente después vale para la mecánica matricial de Gotinga: las matemáticas nos ofrecen predicciones *probabilísticas*, no predicciones exactas. La teoría cuántica, tanto en la versión de Heisenberg como en la versión de Schrödinger, predice probabilidades, no certezas.

ħħ

¿Por qué probabilidades? Solemos hablar de probabilidades cuando no tenemos todos los datos del problema. La probabilidad de que salga 5 en la ruleta es una sobre 37. Si supiéramos exactamente el estado inicial de la bolita en el lanzamiento y las fuerzas que actúan sobre ella, podríamos predecir el número que saldrá. (En los años ochenta, un grupo de jóvenes brillantes ganó muchos dólares en los casinos de Las Vegas usando un pequeño ordenador escondido en un zapato...)^[25]. Es cuando no tenemos todos los datos del problema cuando no sabemos con certeza qué sucederá, y entonces hablamos de probabilidad.

La mecánica cuántica de Heisenberg y Schrödinger predice la probabilidad: ¿se trata de una teoría que no tiene en cuenta todos los datos relevantes del problema? ¿Por esto solo nos da probabilidades? ¿O es que la naturaleza salta aquí y allá realmente al *azar*?

El ateo Einstein formuló la pregunta en un expresivo lenguaje: «¿De verdad juega Dios a los dados?».

A Einstein le encantaba el lenguaje figurado y le agradaba utilizar a «Dios» para sus metáforas a pesar de su ateísmo declarado. Pero en este caso su sentencia puede leerse literalmente: a Einstein le gustaba Spinoza, para quien «Dios» es sinónimo de «Naturaleza». Por tanto, «¿De verdad juega Dios a los dados?» significa literalmente: «¿De verdad las leyes de la Naturaleza no son deterministas?». Todavía hoy, cien años después de las polémicas entre Heisenberg y Schrödinger, se sigue discutiendo sobre esta cuestión.

ħħ

En cualquier caso, la onda Ψ de Schrödinger no es suficiente para aclarar las oscuridades de los cuantos. No basta pensar que el electrón es una simple onda. La onda Ψ es algo poco claro, que determina la probabilidad de que el

electrón, una partícula que se muestra siempre concentrada en un punto, se observe en un sitio en lugar de en otro. La onda Ψ evoluciona en el tiempo siguiendo la ecuación escrita por Schrödinger, *solo hasta que la miramos*. Cuando la miramos, ¡zas!, se concentra en un punto, y ahí vemos la partícula^[26].

Como si el solo hecho de observar fuera suficiente para cambiar la realidad.

A la oscura idea de Heisenberg de que la teoría describe solo *observaciones*, y no lo que sucede entre una observación y otra, se añade la idea de que la teoría solo manifiesta la *probabilidad* de observar una cosa o la otra. El misterio se espesa.

LA GRANULARIDAD DEL MUNDO: «LOS CUANTOS»

He contado el nacimiento de la mecánica cuántica acontecido entre 1925 y 1926, y he presentado dos claves de la teoría: la sorprendente idea de describir solo *observables*, hallazgo de Heisenberg, y el hecho de que la teoría habla solo de *probabilidad*, incluido por Born.

Hay una tercera idea clave. Para ilustrarla es mejor volver atrás, a las dos décadas anteriores al decisivo viaje de Heisenberg a la Isla Sagrada.

El extraño comportamiento de los electrones en los átomos no era el único fenómeno raro e incomprensible a principios del siglo xx. Se observaban otros. Tenían algo en común: sacaban a la luz una curiosa *granularidad* de la energía y otras magnitudes físicas. Antes de los cuantos, nadie sospechaba que la energía pudiese ser granular. La energía de una piedra lanzada, por ejemplo, depende de la velocidad de la piedra: la velocidad de la piedra puede ser cualquiera y, por tanto, la energía puede ser cualquiera. Pero habían aparecido comportamientos extraños de la energía en experimentos a caballo del siglo.

ħħ

Dentro de un horno, por ejemplo, las ondas electromagnéticas se comportan de una manera curiosa. El calor (que es energía) no se distribuye entre las ondas de todas las frecuencias como cabría esperar: nunca alcanza ondas de alta frecuencia. En 1900, veinticinco años antes del viaje de Heisenberg a Helgoland, el físico alemán Max Planck había dado con una fórmula^[27] que reproducía bien el modo, medido en laboratorio, en que se distribuye la energía térmica entre ondas de diferentes frecuencias^[28]. Planck había logrado derivar esta fórmula de las leyes generales, a cambio, sin embargo, de añadir una hipótesis extraña: que la energía podría llegar a cada onda solo en múltiplos enteros.

Como si la energía se transfiriera solo en paquetes. El tamaño de estos paquetes, para que funcione el cálculo de Planck, debe ser diferente para ondas de diferentes frecuencias: debe ser proporcional a la frecuencia de la onda^[29]. Es decir, las ondas de alta frecuencia se componen de paquetes más energéticos. La energía no llega a las frecuencias muy altas porque no es suficiente para formar paquetes lo bastante grandes.

Planck había calculado la constante de proporcionalidad entre la energía de un paquete y la frecuencia de su onda, utilizando las observaciones experimentales. Llamó a esta constante « h », sin saber bien lo que significaba. En cambio hoy, por lo general, en lugar de usar h empleamos el símbolo \hbar , que representa h dividido por 2π . Fue Heisenberg quien empezó a poner una raya en la h porque en los cálculos h a menudo se divide por 2π y a él le fastidiaba escribir tantas veces « $h/2\pi$ ». El símbolo \hbar en inglés se llama « h bar», en español, «hache barra». También se llama a este símbolo «constante de Planck», como a la h sin barra, lo que genera algo de confusión. Hoy se ha convertido en el símbolo más característico de la teoría cuántica. (Tengo una camiseta con una pequeña \hbar bordada, con la que me paseo muy orgulloso).

$\hbar\hbar$

Cinco años más tarde, Einstein sugiere que la luz y todas las demás ondas electromagnéticas están compuestas precisamente de «granos» elementales, cada uno con una energía fija, que depende de la frecuencia^[30]. Los primeros «cuantos». Hoy los llamamos *fotones*, los cuantos de luz. La constante h de Planck mide su dimensión: cada fotón tiene una energía h veces la frecuencia de la luz de la que forma parte.

Aceptando que estos «granos elementales de energía» existen realmente, Einstein logra explicar un fenómeno entonces no entendido, llamado efecto fotoeléctrico^[31], y prever sus características antes de medirlas.

Einstein es el primero en darse cuenta, ya en 1905, de que los problemas planteados por estos fenómenos son tan importantes como para requerir una revisión de toda la mecánica. Esto lo convierte en el padre espiritual de la teoría cuántica. Su idea de que la luz es una onda pero también una nube de fotones es confusa, pero es la idea que inspira a De Broglie para pensar que *todas* las partículas elementales son ondas, y después a Schrödinger a introducir la onda Ψ . Einstein es, por tanto, el inspirador de la mecánica cuántica de variadas formas: Born advierte gracias a él que la mecánica debe ser revisada por completo; Heisenberg se inspira en él al centrar la atención

solo en cantidades mesurables; Schrödinger parte de la idea de De Broglie inspirada en los fotones de Einstein. Y más aún: Einstein también es el primero en estudiar los fenómenos atómicos utilizando la probabilidad, poniendo así a Born en el camino de comprender que el significado de la onda Ψ es una probabilidad. La construcción de la teoría cuántica había sido un juego de equipo.

\hbar

La constante de Planck aparece otra vez en 1913 en las reglas de Bohr^[32]. De nuevo la misma lógica: las órbitas del electrón en el átomo pueden tener solo ciertas energías, como si la energía estuviera en paquetes, granular. Cuando un electrón salta de una órbita de Bohr a otra, libera un paquete de energía que se convierte en un cuanto de luz. Y una vez más en 1922, en un experimento concebido por Otto Stern y realizado en Frankfurt por Walther Gerlach, se muestra que tampoco la velocidad de rotación de los átomos es continua, sino que solo toma ciertos valores *discretos*.

Estos fenómenos —fotones, efecto fotoeléctrico, distribución de la energía entre las ondas electromagnéticas, órbitas de Bohr, la medición de Stern y Gerlach...— están todos ellos regulados por la constante de Planck \hbar .

Cuando en 1925 aparece por fin, la teoría de Heisenberg y sus compañeros permite dar cuenta de *todos* estos fenómenos de golpe: preverlos, calcular sus características. Permite derivar la fórmula de Planck para la distribución del calor entre las frecuencias en un horno caliente, la existencia de fotones, el efecto fotoeléctrico, los resultados de las mediciones de Stern y Gerlach y todos los demás extraños fenómenos «cuánticos».

El nombre de la teoría cuántica proviene precisamente de «cuantos», es decir, «granos». Los fenómenos cuánticos revelan un aspecto granular del mundo, a pequeñísima escala. La granularidad no afecta solo a la energía: es extremadamente general. En mi campo de estudio, la gravedad cuántica, se demuestra que el espacio físico en el que vivimos es granular a pequeñísima escala. También en este caso, la constante de Planck determina la escala (muy pequeña) de los «cuantos elementales de espacio».

La *granularidad* es el tercer ingrediente conceptual clave de la teoría cuántica, junto con la *probabilidad* y a las *observaciones*. Filas y columnas de las matrices de Heisenberg corresponden directamente a los valores *granulares* únicos, o, como se dice, *discretos*, que la energía toma.

$\hbar\hbar$

Nos acercamos a la conclusión de la primera parte del libro, que cuenta el nacimiento de la teoría y la confusión que ha generado. En la segunda parte describo las vías para salir de la confusión. Antes de concluir esta parte, sin embargo, quiero decir algunas palabras sobre la única ecuación que, como ya he mencionado, la teoría cuántica añade a la física clásica.

Es una curiosa ecuación. Dice que multiplicar la posición por la velocidad es diferente a multiplicar la velocidad por la posición. Si posición y velocidad fueran números, no habría diferencia, porque 7 por 9 es lo mismo que 9 por 7. Pero la posición y la velocidad son ahora *tablas* de números, y cuando se multiplican dos *tablas*, el orden importa. La nueva ecuación nos da la diferencia entre multiplicar dos cantidades en un orden o bien en el orden inverso.

Es compacta, muy sencilla. Incomprensible.

No tratéis de descifrarla: todavía se afanan en ello científicos y filósofos. Más adelante volveré a discutir un poco el contenido de esta ecuación. Pero la escribo de todos modos, porque es el corazón de la teoría cuántica, y no se puede concluir la presentación de la teoría sin ella. Aquí la tenemos:

$$XP - PX = i\hbar$$

Eso es todo. La letra X indica la posición de una partícula, la letra P indica su velocidad multiplicada por su masa (en nuestra jerga se llama *momento lineal* o *cantidad de movimiento*). La letra i es el símbolo matemático de la raíz cuadrada de -1 y, como hemos visto, \hbar es la constante de Planck dividida por 2π .

En cierto sentido, Heisenberg y sus amigos *solo* añadieron a la física esta simple ecuación: de ahí vino todo. Llegaron los ordenadores cuánticos y la bomba atómica.

El precio de esta extrema sencillez en la forma es la extrema oscuridad en el significado. La teoría cuántica prevé granularidad, saltos, fotones y todo lo demás, basándose en una única ecuación de ocho caracteres añadida a la física clásica. Una ecuación que dice que multiplicar la posición por la velocidad es diferente de multiplicar la velocidad por la posición. La oscuridad es total. Quizás no sea una coincidencia que Murnau filmara escenas de *Nosferatu* en Helgoland.

En 1927 Niels Bohr pronuncia una conferencia en Italia, en el lago de Como, en la que resume todo lo que se ha comprendido (o no se ha comprendido) de la nueva teoría cuántica, y explica cómo utilizarla^[33]. En 1930 Dirac escribe un libro en el que explica magníficamente la estructura formal de la nueva teoría^[34]. Sigue siendo el mejor libro para comprenderla. Dos años después, el matemático más grande de la época, John von Neumann, resuelve cuestiones formales en un espléndido texto de física matemática^[35].

La construcción de la teoría se ve recompensada por una lluvia de premios Nobel sin parangón en la historia. Einstein recibe el Premio Nobel en 1921 por haber aclarado el efecto fotoeléctrico al introducir cuantos de luz. Bohr, en 1922, por las reglas sobre la estructura del átomo. De Broglie, en 1929, por la idea de las ondas de materia. Heisenberg, en 1932, «por la creación de la mecánica cuántica». Schrödinger y Dirac, en 1933, por «nuevos descubrimientos» en la teoría atómica. Pauli, en 1945, por contribuciones técnicas a la teoría. Born, en 1954, por haber comprendido el papel de la probabilidad (hizo mucho más que eso). El único que se queda fuera es Pascual Jordan, aunque Einstein (acertadamente) había propuesto a Heisenberg, a Born y a él como los verdaderos autores de la teoría. Pero Jordan había mostrado demasiada lealtad a la Alemania nazi, y los hombres no reconocen méritos a los vencidos^[36].

A pesar de estos premios, a pesar del rotundo éxito, a pesar de la tecnología que nació de ella, la teoría sigue siendo un pozo negro de oscuridad. Niels Bohr escribe: «No hay un mundo cuántico. Solo hay una descripción cuántica abstracta. Es incorrecto pensar que la tarea de la física sea describir cómo es la Naturaleza. La física solo se ocupa de lo que podemos decir de la Naturaleza».

Fiel a la intuición original de Werner Heisenberg en Helgoland, la teoría no nos dice dónde se encuentra una partícula cualquiera de materia cuando *no* la miramos. Nos dice tan solo cuál es la probabilidad de encontrarla en un punto *si la observamos*.

Pero ¿qué sabe una partícula de materia de si la observamos o no? La teoría científica más eficaz y potente que la humanidad haya producido jamás es un misterio.

II. UN DIVERTIDO BESTIARIO DE IDEAS EXTREMAS

Donde se ilustran extraños fenómenos cuánticos y se cuenta cómo diferentes científicos y filósofos tratan de entenderlos, cada uno a su manera.

SUPERPOSICIONES

Dudé mucho a la hora de elegir la dirección de mis estudios. Me decidí por la física en el último minuto. Cuando fui a matricularme en la Universidad de Bolonia (todavía no era posible hacerlo online), había colas de diferentes longitudes para las distintas facultades y el hecho de que la fila de física fuese la más corta fue lo que me ayudó a decidir.

Lo que me atraía de la física era la sospecha de que detrás del mortal aburrimiento de la asignatura en el bachillerato, detrás de la estupidez de los ejercicios con muelles, palancas y bolas que rodaban, se ocultaba un auténtico interés por comprender la naturaleza de la realidad. Un interés que resonaba en mi inquieta curiosidad de adolescente que quería probarlo todo, leer, saber, ver, recorrer todos los lugares, todos los ambientes, todas las chicas, todos los libros, todas las músicas, todas las experiencias, todas las ideas...

La adolescencia es el período en el que las redes de neuronas del cerebro se reorganizan de súbito. Todo parece intenso, todo atrae, todo desorienta. Yo había salido de ella lleno de confusión, rebosante de preguntas. Quería comprender la naturaleza de las cosas. Quería comprender cómo llega nuestro pensamiento a entender esa naturaleza. ¿Qué es la realidad? ¿Qué es el pensamiento? ¿Quién soy yo, que estoy pensando?

Fueron estas curiosidades adolescentes intensas y vivas las que me impulsaron a husmear qué luces podía ofrecerme la ciencia, el Nuevo Gran Saber de nuestra época. No es que yo esperara verdaderas respuestas, y mucho menos respuestas definitivas... Pero ¿cómo ignorar lo que la humanidad había comprendido en los dos últimos siglos sobre la estructura fina de las cosas?

ħħ

El estudio de la física clásica me divirtió a veces y me aburrí a ratos. Era elegante por su concisión. Más sensata y consistente que las fórmulas sin sentido que querían que me tragara en el bachillerato. El estudio de los descubrimientos de Einstein sobre el espacio y el tiempo me maravilló, me llenó de alegría y aceleró los latidos de mi corazón.

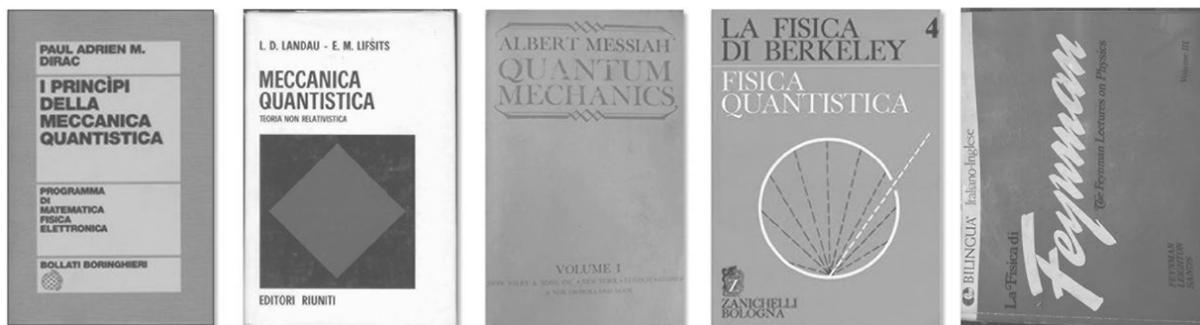
Pero fue el encuentro con los cuantos lo que me encendió luces de colores en el cerebro. Tocar la materia incandescente de la realidad, precisamente allí donde la realidad cuestiona nuestros prejuicios sobre ella... Me enfrenté con la teoría cuántica directamente, cara a cara con el libro de Dirac. Sucedió como sigue: había seguido en Bolonia el curso de matemáticas del profesor Fano, que se titulaba «Métodos matemáticos para la física», «Métodos» para nosotros. El curso incluía un tema en el que había que profundizar individualmente y después exponerlo en clase a los compañeros. Elegí un capítulo de matemáticas que ahora se estudia en la titulación de física pero que entonces no estaba en los programas: la «teoría de grupos». Fui a hablar con el profesor Fano para preguntarle qué debía incluir en mi presentación. Me respondió: «Las bases de la teoría de grupos y su aplicación a la teoría cuántica». Le señalé con cierta prevención que todavía no había seguido ningún curso sobre la teoría cuántica... de eso no sabía nada de nada. Y él: «¿Y qué? Estúdiatela».

Estaba bromeando.

Pero yo no entendí que bromeaba.

Compré el libro de Dirac, en la edición gris de Boringhieri. Olía bien (huelo siempre los libros antes de comprarlos: el perfume de un libro es decisivo). Me encerré en casa y lo estudié durante un mes. También compré otros cuatro libros^[37], y también los estudié.

Uno de los mejores meses de mi vida.



Y una fuente de preguntas que me han acompañado toda la vida. Y que tras muchos años, muchas lecturas, muchas discusiones y muchas incertidumbres, me han impulsado a escribir *estas* líneas.

En el presente capítulo me adentro en la extrañeza del mundo cuántico. Describiré un fenómeno concreto que capta esta rareza: un fenómeno que puede ver en persona. Es pequeño pero resume el punto clave. Después enumeraré algunas de las ideas más discutidas en la actualidad que tratan de dar un sentido comprensible a esta extrañeza.

Dejo para el capítulo siguiente la idea que considero más convincente. Si queréis llegar ahí enseguida, podéis saltaros las divertidas pero enrevesadas elucubraciones del resto de este capítulo y lanzaros directamente al siguiente.

ħħ

Así pues, ¿qué tienen de extraño los fenómenos cuánticos? Que los electrones estén en determinadas órbitas y salten tampoco es el fin del mundo...

El fenómeno del que surgen las rarezas de los cuantos se llama «superposición cuántica». Una «superposición cuántica» se produce cuando están presentes juntas, en cierto sentido, dos propiedades contradictorias. Por ejemplo, un objeto puede estar aquí y también estar allí. Es la idea de Heisenberg cuando dice que «el electrón ya no tiene una trayectoria»: el electrón está no estando ni en un lugar ni en otro. En cierto sentido está en ambos lugares. No tiene una sola posición. Es como si tuviera varias posiciones a la vez. En la jerga de la materia se dice que un objeto puede estar en una «superposición» de varias posiciones. Dirac llama a esta rareza el «principio de superposición» y, en su opinión, esta es la base conceptual de la teoría cuántica.

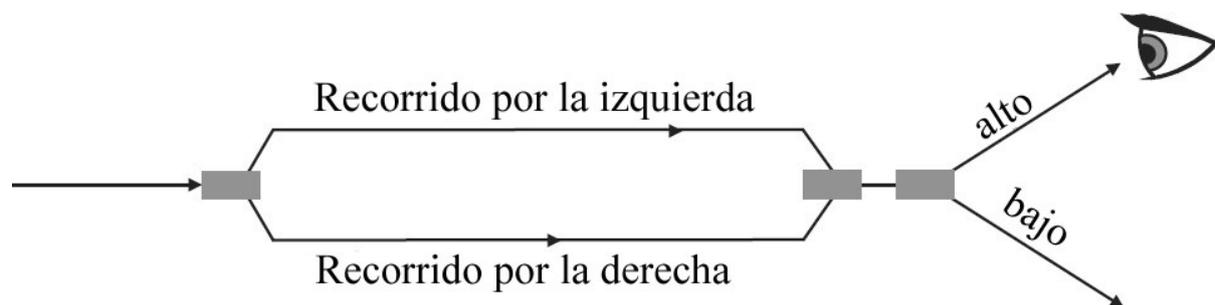
¿Qué significa que un objeto está en dos sitios?

Atención: no significa que *veamos* directamente una «superposición cuántica». Nunca vemos un electrón en dos sitios. La «superposición cuántica» no es algo que se vea directamente. Es algo que produce efectos observables, indirectamente. Lo que vemos son *consecuencias* sutiles de que una partícula esté, en cierto sentido, en varios lugares al mismo tiempo. A estas consecuencias se las denomina «interferencias cuánticas». Es la interferencia lo que observamos, no la superposición. Veamos qué significa esto.

La primera vez que observé con mis propios ojos la interferencia cuántica fue mucho tiempo después de haberla estudiado en los libros. Estaba en Innsbruck, en el laboratorio de Anton Zeilinger, un austríaco simpatiquísimo de gran barba y apariencia de oso bonachón. Zeilinger es uno de los importantísimos físicos experimentales que hacen maravillas con los cuantos:

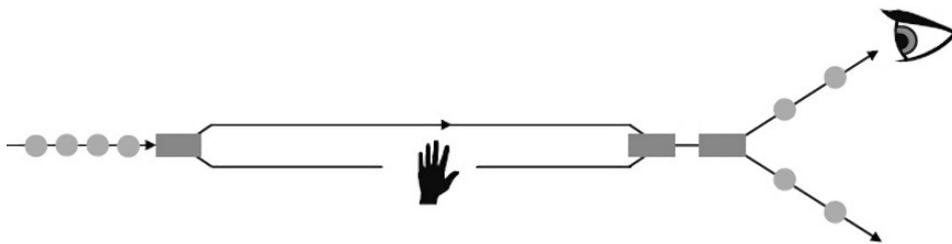
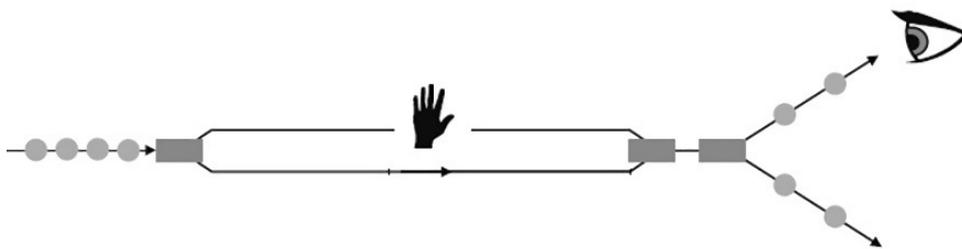
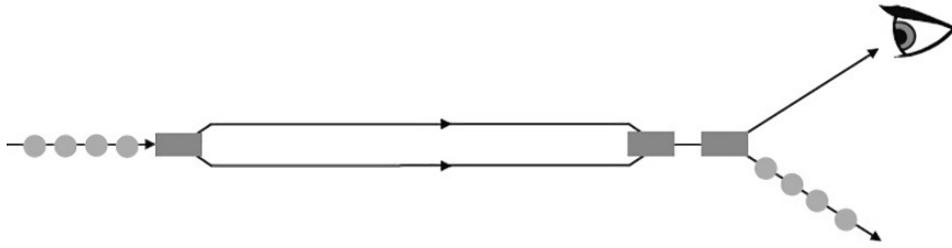
ha sido pionero de la informática cuántica, de la criptografía cuántica y de la teleportación cuántica. Les explicaré lo que vi: resume el motivo por el que los físicos están confusos.

Anton me mostró una mesa con instrumental de óptica: un pequeño láser, lentes, prismas que separan el rayo láser y luego vuelven a unirlos, detectores de fotones, etc. Un rayo láser débil hecho de unos pocos fotones se separó en dos partes, que siguieron dos caminos diferentes, digamos uno a la «derecha» y otro a la «izquierda». Luego, los dos caminos se volvieron a unir y luego se separaron nuevamente para terminar en dos detectores: digamos uno en lo «alto» y otro en lo «bajo».



Un haz de fotones separado en dos partes por un prisma, reunido y separado de nuevo.

Observé lo siguiente: si se dejan libres ambos recorridos (derecha e izquierda), los fotones terminan *todos* en el detector de abajo: *ninguno* en el de arriba (primera imagen del dibujo inferior). Pero si metemos una mano para interrumpir cualquiera de las dos trayectorias, la mitad de los fotones sigue abajo y la otra mitad continúa arriba (segunda imagen del dibujo inferior). Tratad de entender cómo puede suceder esto.



Interferencia cuántica. Si ambos caminos están despejados, todos los fotones acaban abajo (primera imagen). En cambio, si bloqueo un recorrido con la mano, la mitad de los fotones va arriba (segunda imagen). ¿Cómo actúa mi mano en uno de los recorridos para conseguir que los fotones que pasan por el otro recorrido vayan hacia arriba? Nadie lo sabe.

Hay algo extraño: la mitad de los fotones que pasa por *cada* recorrido llega arriba (segundo dibujo). Por tanto, parecería obvio esperar que la mitad de los fotones que pasan por *ambos* recorridos llegasen arriba. Sin embargo no es así: *nunca* llegan arriba (primer dibujo). ¿Cómo bloquea mi mano un recorrido y envía hacia arriba los fotones *que pasan por el otro recorrido*? El hecho de que desaparezcan los fotones arriba cuando *ambos* recorridos están despejados es un ejemplo de interferencia cuántica. Es una «interferencia» entre los dos recorridos: el de la derecha y el de la izquierda. Cuando ambos están abiertos, sucede algo que no sucede ni con los fotones que pasan por un

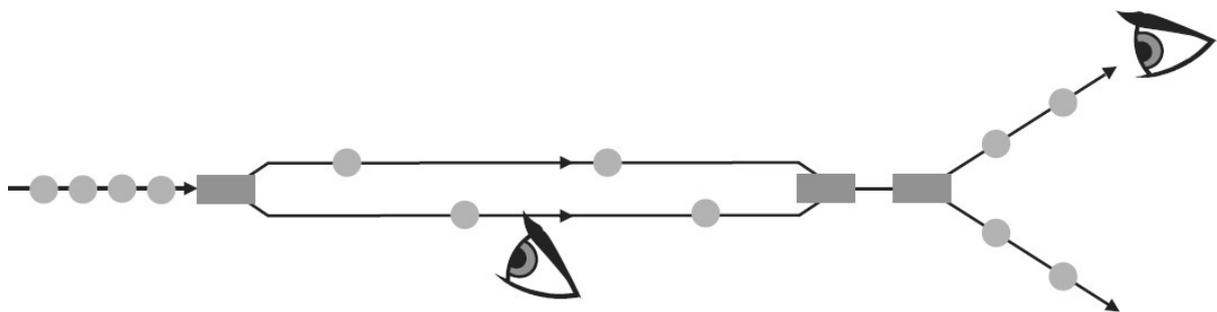
camino ni con los que pasan por el otro: desaparecen los fotones que van hacia arriba.

La teoría de Schrödinger dice que la onda Ψ de cada fotón se separa en dos partes: dos pequeñas ondas. Una ondita sigue el camino derecho, la otra, el izquierdo. Cuando ambas se encuentran de nuevo, se recompone la onda Ψ y toma el camino hacia abajo. Pero si bloqueo con la mano uno de los dos caminos, la onda Ψ no se recompone como antes y por lo tanto se comporta de forma diferente: se vuelve a dividir en dos y una parte va hacia arriba.

No es extraño que las ondas se comporten así: la interferencia de ondas es un fenómeno conocido. Las ondas luminosas y las olas del mar hacen estas cosas. Pero aquí nunca observamos una onda dividida en dos partes, siempre vemos solo fotones individuales *que pasan cada uno por un solo lado*: por la derecha o por la izquierda. De hecho, si ponemos detectores de fotones a lo largo de los recorridos, estos detectores nunca detectan «medio fotón»: nos muestran que cada fotón pasa (enteramente) a la derecha o (enteramente) a la izquierda. Cada fotón se comporta como si pasara por ambos recorridos como hacen las ondas (de lo contrario, no habría interferencia), pero si miramos dónde está, lo vemos siempre en un solo recorrido.

Esta es la «superposición cuántica» cuyas consecuencias observamos: el fotón pasa «tanto por la derecha como por la izquierda». Está en una superposición cuántica de dos configuraciones: la de la derecha y la de la izquierda. La consecuencia es que los fotones ya no van hacia arriba como lo harían si hubieran pasado por uno u otro de los dos recorridos.

Pero no es suficiente. Hay más. Y es realmente asombroso: si *mido* por cuál de los dos caminos pasa el fotón... ¡la interferencia desaparece!



¡Basta medir el recorrido por donde pasan los fotones para que desaparezca la interferencia! Si mido por donde pasan, de nuevo la mitad de los fotones va hacia arriba.

¡Parece que basta con *observar* para que cambie lo que sucede! Nótese el absurdo: si *no* miro por dónde pasa el fotón, este termina siempre abajo, pero si miro por dónde pasa, puede acabar arriba.

Lo más extraordinario es que un fotón puede terminar arriba *aunque no lo haya visto*. Es decir, el fotón cambia de trayectoria solo porque yo estaba al acecho en la parte por donde no pasó. ¡Aunque yo no lo haya visto!

Se puede leer en libros de texto de mecánica cuántica que si *observo* por donde pasa el fotón, su Ψ salta enteramente a un recorrido. Si veo el fotón a la derecha, la onda Ψ salta completa hacia la derecha. Si observo y *no* veo el fotón de la derecha, la onda Ψ salta completa a la izquierda. En ambos casos, no hay más interferencias. En nuestra jerga, se dice que la función de onda «colapsa», esto es, salta entera a un punto en el momento de la observación.

Esta es la «superposición cuántica»: el fotón está «en ambos recorridos». Si lo miro, salta a un solo camino y la interferencia desaparece.

No damos crédito.

Sin embargo, sucede: lo he visto con mis propios ojos. A pesar de haberlo estudiado mucho en la universidad, verlo y meter allí las manos me dejó confuso. Trata de encontrar también tú, querido lector, una explicación sensata a este comportamiento... Llevamos un siglo intentándolo todos. Si todo esto te aturde y no entiendes nada, no eres el único. Por esto decía Feynman que nadie comprende los cuantos. En cambio, si parece todo claro, quiere decir que no he sido claro yo. Niels Bohr decía: «Nunca te expreses más claramente de como piensas»^[38].

$\hbar\hbar$

Erwin Schrödinger ilustró este rompecabezas con un célebre apólogo^[39]: en lugar de un fotón que toma el camino de la derecha y a la vez el de la izquierda, Schrödinger imagina un gato que está despierto y dormido al mismo tiempo.

La historia es como sigue: un gato está encerrado en una caja con un dispositivo donde existe una probabilidad del 50% de que ocurra un fenómeno cuántico. Si sucede, el dispositivo abre un frasco de un somnífero que duerme al gato. La teoría dice que la Ψ del gato está en una «superposición cuántica» de gato-despierto y gato-dormido, y permanece así mientras no observemos al gato^[*2].

Por tanto, el gato está en una «superposición cuántica» de gato-despierto y gato-dormido.

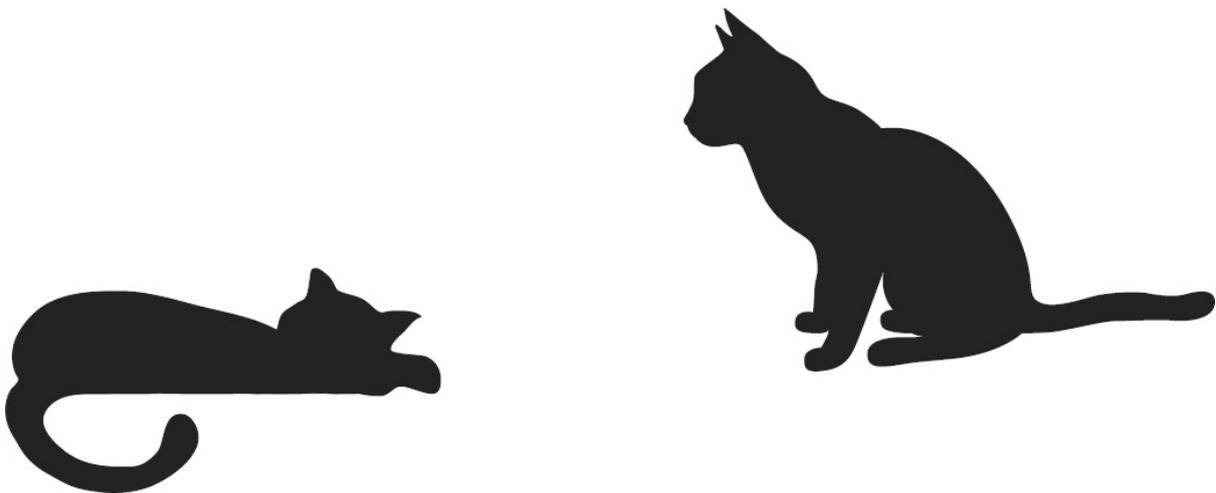
Esto es distinto a decir que *no sabemos* si el gato está despierto o dormido. La diferencia es que hay efectos de interferencia entre el gato-despierto y el gato-dormido (como los efectos de interferencia entre los dos

recorridos de los fotones de Zeilinger), que no se producirían estuviese el gato despierto o dormido. Suceden si el gato está en esta «superposición cuántica» de gato-despierto y gato-dormido. Como la interferencia del experimento de Zeilinger, que ocurre solo si los fotones «pasan por ambos caminos».

Para un sistema tan grande como un gato, los efectos de interferencia prevista por la teoría son demasiado difíciles de observar^[40]. Pero no hay una razón convincente para dudar de su realidad. El gato no está ni despierto ni dormido. Está en esta superposición cuántica entre gato-despierto y gato-dormido...

Pero ¿qué significa?

¿Cómo se siente un gato si está en una superposición cuántica de gato-despierto y gato-dormido? Si tú, lector, estuvieras en una superposición cuántica de tú-despierto y tú-dormido, ¿cómo te sentirías? Este es el rompecabezas cuántico.



TOMAR Ψ EN SERIO: MUNDOS MÚLTIPLES, VARIABLES OCULTAS Y COLAPSOS FÍSICOS

Para provocar una encendida discusión durante la cena tras una conferencia de física, basta con dejar caer al vecino de mesa como por casualidad la pregunta: «En tu opinión ¿el gato de Schrödinger está de verdad despierto y dormido?».

Las discusiones sobre los misterios de los cuantos fueron muy acaloradas en los años treinta, inmediatamente después del nacimiento de la teoría. Es famoso el debate que durante años mantuvieron Einstein y Bohr en encuentros, conferencias, escritos, cartas... Einstein se resistía a la idea de renunciar a una imagen más realista de los fenómenos; Bohr defendía la novedad conceptual de la teoría^[41].

En los años cincuenta, se extendió la actitud de ignorar el problema: la potencia de la teoría era tan espectacular que los físicos se esforzaron en aplicarla a todos los campos posibles sin hacerse muchas preguntas. Pero si no se hacen preguntas, no se aprende nada. El interés por los problemas conceptuales comienza a renacer en la década de los sesenta estimulado también, curiosamente, por la influencia de la cultura hippie, fascinada por la rareza de los cuantos^[42].

Hoy en día, son frecuentes las discusiones en los departamentos de filosofía y de física, con opiniones encontradas. Nacen ideas nuevas, se aclaran sutiles dudas; se abandonan algunas ideas, otras se mantienen. Las ideas que resisten la crítica nos proporcionan posibles modos de entender los cuantos, pero cada uno de estos modos tiene un costo conceptual elevado: nos obliga, una vez más, a aceptar cosas realmente extrañas. Todavía no existe un balance claro de los costos y beneficios que comportan los diferentes puntos de vista sobre la teoría.

Las ideas evolucionan. Espero que terminemos poniéndonos de acuerdo, como ha sucedido con otras grandes disputas científicas que parecían irresolubles: ¿la Tierra está quieta o se mueve? (Se mueve). ¿El calor es un

fluido o es un movimiento rápido de las moléculas? (Movimiento de las moléculas). ¿Existen realmente los átomos? (Sí). ¿El mundo es solo «energía»? (No). ¿Tenemos ancestros comunes con los monos? (Sí), etc. Este libro es un episodio del diálogo en curso: trato de destacar en qué punto se halla ahora, a mi juicio, la discusión, y en qué dirección nos está llevando.

Antes de llegar, en el siguiente capítulo, a las ideas que encuentro más convincentes, resumo a continuación las alternativas más discutidas. Se las llama «interpretaciones de la mecánica cuántica». De un modo u otro, todas exigen que aceptemos ideas muy radicales: universos múltiples, variables invisibles, fenómenos nunca observados y otras extravagancias. No es culpa de nadie: es la extrañeza de la teoría la que nos obliga a soluciones extremas. Así pues, el resto de este capítulo rebosa de especulaciones. Si os aburren, pasad al capítulo siguiente, donde llego al meollo: la perspectiva relacional. Por el contrario, si deseáis una descripción general del estado actual de la discusión y una idea de los temas en juego, también son divertidas las especulaciones... Aquí las tenemos.

Muchos mundos

En algunos círculos de filósofos y entre algunos físicos teóricos y cosmólogos está de moda hoy en día la interpretación de «muchos mundos»^[*3]. La idea es tomar en serio la teoría de Schrödinger, es decir, *no* interpretar la onda Ψ como probabilidad. Interpretarla, en cambio, como una entidad real, que describe el mundo como es en realidad. En cierto sentido, la idea es ignorar el Premio Nobel de Max Born, que se le había otorgado por haber entendido que la onda Ψ es solo una evaluación de probabilidad.

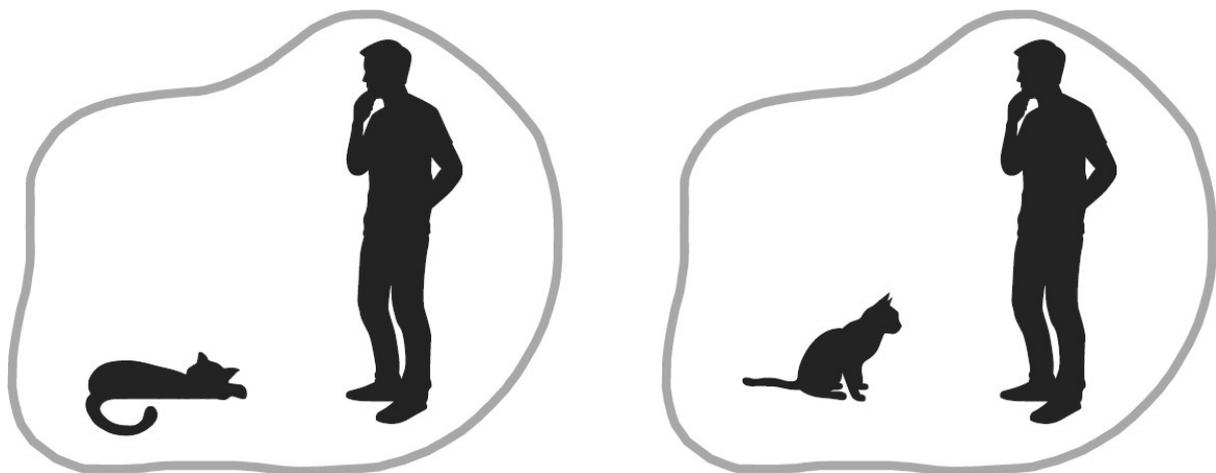
El gato de Schrödinger, si ese es el caso, se describe de verdad por su Ψ totalmente real. Por lo tanto, hay *de verdad* una superposición de gato-despierto y gato-dormido: ambos existen concretamente. ¿Por qué, entonces, si abro la caja y miro al gato lo veo despierto o lo veo dormido y no veo ambas cosas?

Agarraos. La razón, según la interpretación de muchos mundos es que también yo, Carlo, estoy descrito por mi onda Ψ . Cuando observo al gato, mi onda Ψ interactúa con la onda del gato y mi onda Ψ también se separa en dos componentes: uno que representa una versión de mí que ve el gato despierto y otro que representa una versión de mí que ve el gato dormido. Ambos, según esta perspectiva, son reales.

Por tanto, la Ψ total tiene ahora dos componentes: dos «mundos». El mundo se ha ramificado en «dos mundos»: un mundo en el que el gato está despierto y Carlo ve el gato despierto, y otro mundo donde el gato duerme y Carlo ve al gato durmiendo. Así que ahora hay dos Carlos: uno en cada mundo.

Y, entonces, ¿por qué, por ejemplo, yo veo solo el gato despierto? La respuesta es que en este momento *yo soy solo uno de los dos Carlos*. En un mundo paralelo, igualmente real, igualmente concreto, hay una copia de mí que ve al gato durmiendo. Es por eso que el gato puede estar despierto y dormido al mismo tiempo, pero si lo miro solo veo una cosa: porque si lo miro yo también me duplico.

Dado que el Ψ de Carlos interactúa continuamente con innumerables otros sistemas además del gato, se deduce que hay innumerables otros mundos paralelos, igualmente existentes, igualmente reales, donde hay innumerables copias de mí experimentando todo tipo de realidades alternativas. Esta es la interpretación de muchos mundos.



¿Suenan demencial? Lo es.

Sin embargo, eminentes físicos y eminentes filósofos consideran que esta es la mejor lectura posible de la teoría cuántica^[43]. Lo que resulta demencial no son ellos: es esta asombrosa teoría que lleva un siglo funcionando muy bien.

Pero... para salir de la niebla ¿vale realmente la pena aventurar la hipótesis de la existencia concreta y real de infinitas copias de nosotros mismos, indetectables para nosotros, ocultas dentro de una gigantesca Ψ universal?

También encuentro otra dificultad en esta idea. La gigantesca onda universal Ψ que contiene todos los mundos es como la noche negra de Hegel

donde todas las vacas son negras: por sí misma, no da cuenta de la realidad fenoménica que observamos^[44]. Para describir los fenómenos que observamos se necesitan otros elementos matemáticos además de Ψ , y la interpretación de muchos mundos no los explica.

Variables ocultas

Hay un modo de evitar la multiplicación infinita de mundos y de copias de nosotros mismos. Nos lo proporciona un grupo de teorías denominado «de variables ocultas». La mejor de ellas fue concebida por De Broglie, el creador de las ondas de materia, y puesta a punto por David Bohm.

David Bohm fue un científico estadounidense que tuvo una vida difícil porque era comunista en el lado equivocado del Telón de Acero. Investigado durante el macartismo, fue arrestado en 1949 y encarcelado durante un breve período. Fue absuelto, pero, de todos modos, la Universidad de Princeton lo despidió por convencionalismos de respetabilidad. Se vio obligado a emigrar a Sudamérica. La embajada estadounidense le retiró el pasaporte por temor a que se marchara a la Unión Soviética...

Su teoría es simple: la onda Ψ de un electrón es una entidad real, como en la interpretación de muchos mundos; pero además de la onda Ψ , existe *también* el electrón efectivo: una verdadera partícula material, que *siempre* tiene una posición definida. Esto resuelve el problema de conectar la teoría con los fenómenos que observamos. Solo hay una posición, como en la mecánica clásica: nada de «superposición cuántica», por tanto. La onda Ψ evoluciona siguiendo la ecuación de Schrödinger, mientras que el electrón verdadero y propio se mueve en el espacio físico, guiado por la onda Ψ . Bohm estudió una ecuación que muestra cómo la onda Ψ puede realmente guiar al electrón^[45].

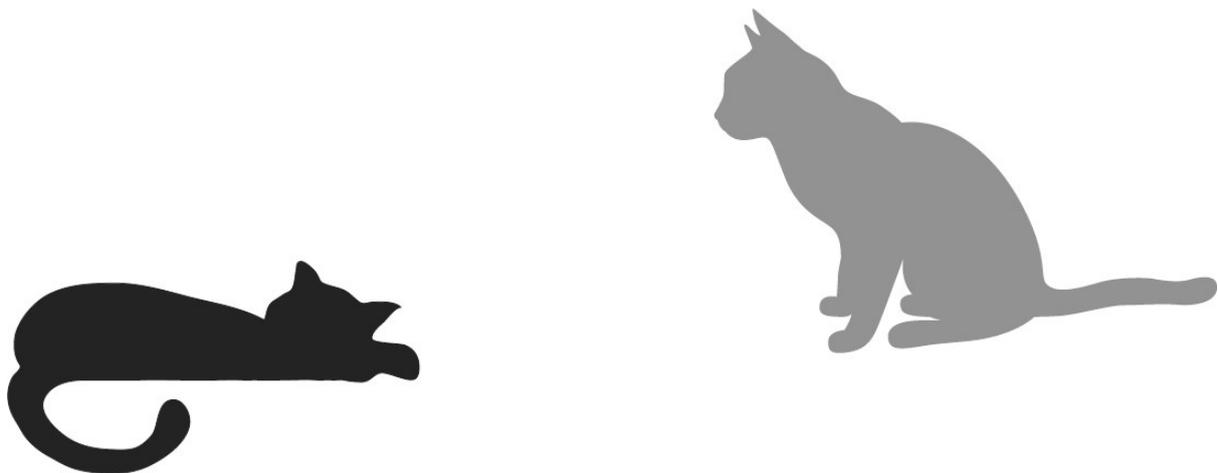
La idea es brillante: los fenómenos de interferencia son determinados por la onda Ψ que guía los objetos, pero los objetos en sí mismos no están en superposición cuántica. Siempre están en una posición precisa.

El gato está despierto o dormido. Sin embargo, su Ψ tiene ambos componentes: uno corresponde al gato real, el otro es una onda «vacía» sin gato real, pero la onda vacía puede dar lugar a interferencias con la onda del gato real.

Por eso veo al gato despierto o dormido y sin embargo se dan efectos de interferencia: el gato está en un solo estado, pero en el otro estado hay una

parte de su onda que genera interferencia.

Esto explica el experimento de Zeilinger descrito anteriormente. ¿Por qué, al bloquear *uno* de los dos recorridos, mi mano afecta al movimiento del fotón que pasa por el *otro* recorrido? Respuesta: el fotón pasa por un solo camino, pero su onda pasa por ambos. Mi mano altera la onda que luego guía al fotón de manera diferente a como lo haría en ausencia de mi mano. De este modo, mi mano altera el comportamiento futuro del fotón, incluso si el fotón pasa lejos de mi mano. Buena explicación.



La interpretación de variables ocultas devuelve la física cuántica al ámbito de la misma lógica de la física clásica: todo es determinista y predecible. Si conocemos la posición del electrón y el valor de la onda, podemos predecirlo todo.

Pero no es tan sencillo. De hecho, *nunca* podemos conocer realmente el estado de la onda, porque nunca vemos la onda: solo vemos el electrón^[46]. Por tanto, el comportamiento del electrón está determinado por variables que para nosotros permanecen «ocultas» (la onda). Las variables están ocultas por principio: no podemos determinarlas *nunca*. Por esto la teoría se llama de variables ocultas^[47].

El precio que hay que pagar por tomar en serio esta teoría es asumir la existencia de toda una realidad física inaccesible para nosotros. Su único propósito, si nos fijamos bien, es tan solo reconfortarnos con respecto a lo que la teoría *no* nos dice. ¿Vale la pena asumir la existencia de un mundo inobservable, sin efecto alguno que no esté ya previsto por la teoría cuántica, con el único objetivo de evitar nuestro miedo a la indeterminación?

Hay otras dificultades. La teoría de Bohm es muy del gusto de algunos filósofos porque ofrece un marco conceptual nítido. Pero es poco querida por los físicos, ya que tan pronto como se intenta aplicarla a algo más complicado

que una sola partícula se acumulan los problemas. La onda Ψ de varias partículas, por ejemplo, no es el conjunto de las ondas de las partículas: es una onda que no se mueve en el espacio físico, sino en un abstracto espacio matemático^[48]. La imagen intuitiva y clara de la realidad que la teoría de Bohm nos ofrece en el caso de una sola partícula se pierde.

Pero los problemas realmente serios se presentan en el momento en que se tiene en cuenta la relatividad. Las variables ocultas de la teoría violan de lleno la relatividad: determinan un sistema de referencia privilegiado. El precio de pensar que el mundo se compone de variables que siempre se determinan como en la física clásica, por tanto, no solo es aceptar que estas variables están ocultas para siempre, sino también contradecir todo lo que hemos aprendido sobre el mundo, precisamente con esa misma física clásica. ¿Vale la pena?

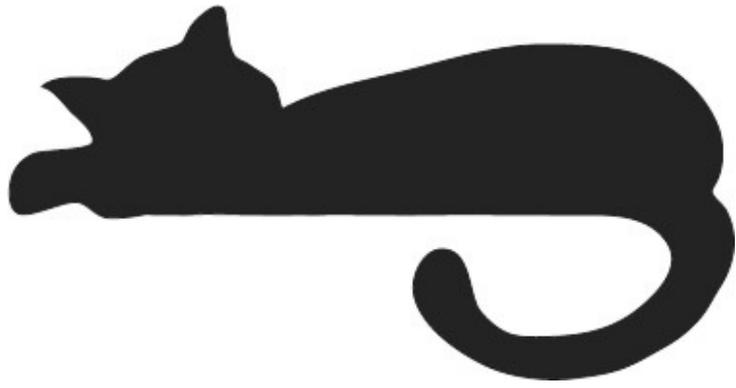
Colapso físico

Hay una tercera forma de considerar real la onda Ψ , evitando tanto muchos mundos como las variables ocultas: pensar que las predicciones de la mecánica cuántica son *aproximaciones* que descuidan algún aspecto capaz de hacer todo más coherente.

Podría existir un proceso físico real, independiente de nuestras observaciones, que sucede *espontáneamente*, de vez en cuando, e impide que la onda se disperse. A este hipotético mecanismo, nunca hasta ahora observado, se le denomina «colapso físico» de la función de onda. Así pues, el «colapso de la función de onda» no sucedería porque observemos, sino de forma espontánea, y tanto más rápido cuanto más macroscópicos son los objetos.

En el caso del gato, la Ψ enseguida saltaría por sí misma a una de las dos configuraciones, y el gato estaría rápidamente despierto o dormido. La hipótesis es que la mecánica cuántica habitual ya no es válida para cosas macroscópicas como los gatos^[49]. Por tanto, este tipo de teorías da predicciones que se apartan de las de la teoría cuántica habitual.

Varios laboratorios de todo el mundo han intentado y siguen tratando de verificar estas predicciones, para ver quién tiene razón. Por ahora, siempre tiene razón la teoría cuántica. La mayoría de los físicos, incluyendo a este su muy humilde amigo que escribe, apostarían a que la teoría cuántica todavía seguirá teniendo razón durante más tiempo...



ACEPTAR LA INDETERMINACIÓN

Las interpretaciones de la mecánica cuántica discutidas hasta ahora intentan evitar la indeterminación^[50] tomando la Ψ como un objeto real. El precio es añadir a la realidad cosas como múltiples mundos, variables inaccesibles o procesos nunca observados.

Pero no hay razón para tomar la función de onda Ψ tan en serio.

La Ψ no es una entidad real: es una herramienta de cálculo. Es como el pronóstico del tiempo, el presupuesto de una empresa, las previsiones de las carreras de caballos^[51]. Los acontecimientos reales del mundo ocurren de forma probabilística y la cantidad Ψ es nuestra forma de calcular la probabilidad de que ocurran.

A las interpretaciones de la teoría que no toman la onda Ψ tan seriamente se las denomina «epistémicas», porque interpretan la Ψ solo como un resumen de nuestro conocimiento ($\xi\pi\iota\sigma\tau\acute{\eta}\mu\eta$) de lo que ocurre.

Un ejemplo de este modo de pensar es el bayesianismo cuántico o «qbismo». El qbismo toma la teoría cuántica como es, sin tratar de «completar» el mundo. Toma su nombre de los «cúbits», que son las unidades de información utilizadas para las computadoras cuánticas^[*5].

La idea es que la Ψ es solo la información que *nosotros* tenemos sobre el mundo. Que la física no describe el mundo. Describe lo que *nosotros* sabemos sobre el mundo. Describe la información que tenemos sobre el mundo.

La información crece cuando hacemos una observación. Por eso la Ψ cambia cuando observamos: no porque suceda algo en el mundo externo, sino solo porque cambia la información que tenemos. Nuestros pronósticos del tiempo cambian si miramos un barómetro: no porque cambie el cielo repentinamente en el momento que miramos el barómetro, sino porque de pronto aprendemos algo que no sabíamos antes.

El nombre «qbismo», por su homofonía, juega con el cubismo de Braque y Picasso, que se forma en Europa en los mismos años en que madura la teoría cuántica.

Tanto el cubismo como la teoría cuántica se alejan de la idea de que el mundo sea representable de modo figurativo. Las pinturas cubistas a menudo superponen imágenes incompatibles de un objeto o una persona, representados desde diferentes puntos de vista. De manera similar, la teoría cuántica reconoce que medidas de diferentes propiedades de un mismo objeto físico pueden no ser conciliables (sobre esta idea volveré con más detalle en breve).

En las primeras décadas del siglo xx, es toda la cultura europea la que ya no cree que pueda representarse el mundo de una manera sencilla y completa. En Italia, entre 1909 y 1925, los años en los que nace la teoría cuántica, Pirandello escribe *Uno, ninguno y cien mil*, que habla de la fragmentación de la realidad según el punto de vista de diversos observadores.

El qbismo renuncia a dar una imagen realista del mundo, más allá de lo que vemos o medimos. La teoría habla solo de lo que un agente ve. No está permitido decir nada del gato o el fotón cuando no los estamos mirando.



El punto débil del qbismo es su concepción instrumental de la ciencia. El objetivo de la ciencia no es hacer predicciones; es también ofrecer una imagen de la realidad, un marco conceptual para pensar las cosas. Esta

ambición ha hecho eficaz el pensamiento científico. Si el objetivo de la ciencia fueran solo las predicciones, Copérnico no habría descubierto nada con respecto a Ptolomeo: sus pronósticos astronómicos no eran mejores que los de Ptolomeo. Pero Copérnico encontró una clave para repensar todo y comprender mejor.

Hay otro punto, y es la piedra angular de toda la discusión: el qbismo ancla la realidad a un sujeto del conocimiento, un «yo» que sabe, que parece estar fuera de la naturaleza. En lugar de ver al observador como parte del mundo, ve el mundo reflejado en el observador. Abandona un materialismo ingenuo, pero acaba cayendo en un idealismo exasperado^[52]. El punto crucial es que el propio observador puede ser observado. No tenemos motivo para dudar de que cualquier observador real sea también descrito por la teoría cuántica.

Si observo a un observador, puedo ver cosas que el observador no ve. De ahí deduzco, por razonable analogía, que hay cosas que tampoco yo, como observador, veo. Por tanto, existen más cosas que las que yo puedo observar. El mundo existe aunque yo no lo observe. Quiero una teoría física que dé cuenta de la estructura del universo, que aclare qué es un observador dentro de un universo, no una teoría que haga depender el universo de mí, que observo.

ħħ

Así pues, al final, todas las interpretaciones de la teoría cuántica descritas en este capítulo no hacen más que reproducir el debate entre Schrödinger y Heisenberg: entre una «mecánica ondulatoria», que intenta a toda costa evitar la indeterminación y la probabilidad en el mundo, y el salto radical de la «física de los chicos», que parece depender demasiado de la existencia de un sujeto que «observa». Este capítulo nos ha paseado entre muchas ideas curiosas, pero no nos ha llevado a dar un verdadero paso adelante.

¿Quién es el sujeto que conoce y posee la información? ¿Cuál es la información que tiene? ¿Qué es el sujeto que observa? ¿Escapa a las leyes de la naturaleza, o también a él lo describen las leyes naturales? ¿Está fuera de la naturaleza o es una parte del mundo natural? Si es parte de la naturaleza, ¿por qué tratarlo de una manera especial?

Esta pregunta, enésima reformulación de la pregunta planteada por Heisenberg —¿qué caracteriza una observación? ¿Qué es un observador?—, nos lleva, finalmente, a las relaciones.

III. ¿ES POSIBLE QUE ALGO SEA REAL PARA TI PERO NO PARA MÍ?

Donde por fin se habla de relaciones.

HUBO UN TIEMPO EN QUE EL MUNDO PARECÍA SENCILLO

En los tiempos en que Dante escribía, en Europa imaginábamos el mundo como el espejo oscuro de una gran jerarquía celestial: un gran Dios y sus esferas de ángeles llevan los planetas en su carrera por el Cielo y participan con ansia y amor en la vida de todos nosotros, frágil humanidad que, en el centro del Cosmos, oscilamos entre adoración, rebelión y arrepentimiento.

Más adelante cambiamos de idea. En los siglos siguientes comprendimos aspectos de la realidad, descubrimos gramáticas ocultas, encontramos estrategias para nuestros objetivos. El pensamiento científico construyó un complejo edificio de saberes. La física tuvo un papel motor y unificador, ofreciendo una imagen nítida de la realidad: un vasto espacio donde corren partículas, empujadas y atraídas por fuerzas. Faraday y Maxwell añadieron el «campo» electromagnético, ente que se difunde en el espacio y a través del cual cuerpos distantes ejercen fuerzas unos sobre otros. Einstein completó el cuadro mostrando que la gravedad también es transportada por un «campo», un campo que es la geometría misma del espacio y del tiempo. La síntesis es limpia y hermosa.

La realidad es una estratificación exuberante: montañas nevadas y bosques, la mirada de los amigos, el estrépito del metro en las contaminadas mañanas de invierno, nuestra sed insaciable, el baile de los dedos en el teclado del portátil, el sabor del pan, el dolor del mundo, el cielo nocturno, la inmensidad de las estrellas, Venus brillando solitario en el cielo azul ultramar del crepúsculo... Creíamos haber encontrado la urdimbre subyacente en esta caleidoscópica profusión, el orden escondido detrás del velo desordenado de las apariencias. Eran los tiempos en que el mundo parecía sencillo.

Pero las grandes esperanzas que alimentamos nosotros, minúsculas criaturas mortales, son breves sueños. La claridad conceptual de la física clásica ha sido barrida por la física cuántica. La realidad *no* es como la describe la física clásica.

Ha supuesto un duro despertar del sueño feliz con el que nos habían arrullado las ilusiones del éxito de Newton. Pero es un despertar que nos devuelve al corazón impulsor del pensamiento científico, que no está hecho de certezas adquiridas: es un pensamiento en movimiento continuo, cuya fuerza es precisamente la capacidad de cuestionar todo y comenzar de nuevo, de no tener miedo a subvertir un orden del mundo para buscar uno más eficaz y luego someterlo otra vez a discusión, subvertir todo una vez más.

No tener miedo de repensar el mundo es la fuerza de la ciencia: desde que Anaximandro eliminó las columnas sobre las que descansaba la Tierra, Copérnico la lanzó a girar en el cielo, Einstein disolvió la rigidez de la geometría del espacio y del tiempo y Darwin desenmascaró la ilusión de la alteridad de los humanos... la realidad se redibuja continuamente en formas cada vez más eficaces. El coraje de reinventar en profundidad el mundo: esta es la sutil fascinación de la ciencia que cautivó las rebeliones de mi adolescencia...

RELACIONES

En un laboratorio de física, donde se estudia un pequeño objeto como un átomo o un fotón en los láseres de Zeilinger, está claro quién es *el observador*: es el científico, que prepara, observa y mide el objeto cuántico estudiado usando sus instrumentos de medición, que revelan la luz emitida por el átomo, o el lugar donde llegan los fotones.

Pero el vasto mundo no está formado por científicos en el laboratorio o por instrumentos de medida. ¿En qué consiste una observación donde no hay científico alguno que mida? ¿Qué nos dice la teoría cuántica donde no hay nadie que observe? ¿Qué nos dice la teoría cuántica de lo que sucede en otra galaxia?

La clave de la respuesta, creo, y la piedra angular de las ideas de este libro, es la simple constatación de que el científico, igual que su instrumento de medida, también forman parte de la naturaleza. Lo que describe la teoría cuántica es el modo en el que una parte de la naturaleza se manifiesta a otra parte de la naturaleza.

El corazón de la interpretación «relacional» de la teoría cuántica, que aquí ilustro, es la idea de que la teoría no describe la forma en que los objetos cuánticos se manifiestan *a nosotros* (o a entes especiales que «observan»). Describe cómo cualquier objeto físico se manifiesta a cualquier otro objeto físico. Cómo cualquier objeto físico actúa sobre cualquier otro objeto físico.

Imaginamos el mundo en términos de objetos, cosas, entes (en jerga científica los llamamos «sistemas físicos»): un fotón, un gato, una piedra, un reloj, un árbol, un niño, un país, un arcoíris, un planeta, un cúmulo de galaxias... Estos objetos no están cada uno en altanera soledad. Al contrario, no hacen más que actuar unos sobre otros. Son estas interacciones las que debemos analizar para comprender la naturaleza, no los objetos aislados. Un gato escucha el tic-tac del reloj; un niño lanza una piedra; la piedra mueve el aire donde vuela, golpea otra piedra y la mueve, presiona el suelo donde se posa; un árbol absorbe energía de los rayos del sol, produce el oxígeno que

respiran los habitantes del pueblo mientras observan las estrellas y las estrellas recorren la galaxia arrastradas por la gravedad de otras estrellas... El mundo que observamos es una *interacción* continua. Es una densa red de interacciones.

Los objetos se caracterizan por la forma en que interactúan. Si hubiera un objeto sin interacciones, que no influyera en nada, no actuara sobre nada, no emitiera luz, no atrajera, no repeliera, no se dejara tocar, no oliera... sería como si no existiera. Hablar de objetos que nunca interactúan es hablar de cosas que, incluso si existieran, no nos conciernen. Ni siquiera se entiende bien qué significaría decir que tales cosas «existen». El mundo que conocemos, que nos concierne, que nos interesa, lo que llamamos «realidad», es la vasta red de entes que interactúan, que se manifiestan interactuando unos con otros, y de la que formamos parte. Es esta red la que estamos tratando.

Uno de esos entes es un fotón observado por Zeilinger en su laboratorio. Pero el propio Anton Zeilinger es uno más. Zeilinger es un ente como cualquier otro, como lo son el fotón, un gato o una estrella. Tú, lector que lees estas líneas, eres otro ente; yo, que las estoy escribiendo en una mañana de invierno canadiense, con un cielo aún oscuro tras los cristales de la ventana de mi estudio y una gatita color ámbar que ronronea acurrucada entre la computadora donde escribo y yo, soy también un ente como los otros.

Si la teoría cuántica describe cómo se manifiesta un fotón a Zeilinger, y estos son dos sistemas físicos, entonces también debe describir el modo en el que *cualquier* objeto se manifiesta a *cualquier* otro objeto. La esencia de lo que sucede entre un fotón y Zeilinger, que lo observa, es la misma que lo que pasa entre dos objetos *cualesquiera* cuando interactúan, cuando se manifiestan el uno al otro actuando el uno sobre el otro.

Existen, evidentemente, sistemas físicos particulares que son «observadores» en sentido estricto: tienen órganos de percepción, memoria, trabajan en un laboratorio, son macroscópicos... Pero la mecánica cuántica no solo describe estos: describe la gramática elemental y universal de la realidad física que subyace no solo en las observaciones de laboratorio, sino también en toda interacción.

Si vemos las cosas de esta manera, no existe nada de especial en las «observaciones» de la mecánica cuántica, en las «observaciones» introducidas por Heisenberg. En el sentido de la teoría no hay nada de especial en los «observadores»: cualquier interacción entre dos objetos físicos cuenta como una observación, y debemos tomar cualquier objeto como «observador» cuando consideramos que se le manifiestan otros objetos. Es decir, cuando

consideramos cómo se le manifiestan a este objeto las propiedades de otros objetos. La teoría cuántica describe cómo se manifiestan unas cosas a otras.

El descubrimiento de la teoría cuántica, en mi opinión, es el descubrimiento de que las propiedades de cualquier cosa no son más que el modo en que esta cosa afecta a las otras; existen solo en la interacción con otras cosas. La teoría cuántica es la teoría de cómo las cosas se influyen entre sí y constituye la mejor descripción de la naturaleza de la que disponemos hoy^[53].

Es una idea simple, pero tiene dos consecuencias radicales que abren el espacio conceptual necesario para entender los cuantos.

Ni interacción, ni propiedad

Bohr habla de la «imposibilidad de separar netamente el comportamiento de los sistemas atómicos de la interacción con el dispositivo de medición necesario para definir las condiciones en las que se produce el fenómeno»^[54].

Cuando escribió estas líneas, en los años cuarenta, las aplicaciones de la teoría se limitaban a laboratorios que medían sistemas atómicos. Casi un siglo más tarde, sabemos que la teoría es válida para *todos* los objetos del universo. Tenemos que sustituir «sistemas atómicos» por «cualquier objeto», e «interacción con el dispositivo de medición» por «interacción con cualquier cosa».

Analizada de este modo, la observación de Bohr capta el descubrimiento en la base de la teoría: la imposibilidad de separar las propiedades de un objeto de las interacciones donde se manifiestan estas propiedades, y de los objetos a los que se manifiestan. Las características de un objeto *son* la forma en que este actúa sobre otros objetos. El objeto en sí mismo no es más que un conjunto de interacciones con otros objetos. La realidad es esta red de interacciones, fuera de las cuales no se entiende ni siquiera de lo que estamos hablando. En lugar de ver el mundo físico como un conjunto de objetos con propiedades definidas, la teoría cuántica nos invita a ver el mundo físico como una red de relaciones cuyos nudos son los objetos.

Pero entonces atribuir siempre y necesariamente propiedades a una cosa, incluso cuando no interactúa, es superfluo y puede resultar engañoso. Y hablaríamos de algo que no existe: *no existen propiedades fuera de las interacciones*^[55].

Este es el significado de la intuición original de Heisenberg: preguntar cuál es la órbita del electrón mientras no interactúa con nada es una pregunta sin contenido. El electrón no sigue una órbita porque sus propiedades físicas son solo las que determinan cómo actúa sobre otra cosa cualquiera, por ejemplo sobre la luz que emite. Si el electrón no interactúa, no tiene propiedades.

Es un salto radical. Equivale a decir que es necesario pensar que cualquier cosa *solamente* es el modo en que actúa sobre cualquier otra cosa. Cuando el electrón no interactúa con nada, no tiene propiedades físicas. No tiene posición, no tiene velocidad.

Las propiedades son solo relativas

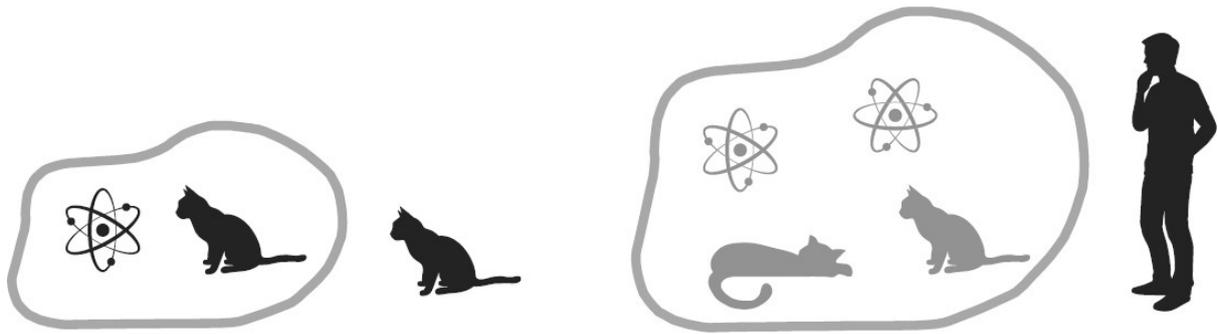
La segunda consecuencia es aún más radical.

Supongamos, querido lector, que eres el gato del apólogo de Schrödinger del capítulo anterior. Estás encerrado en una caja y un mecanismo cuántico (un átomo radiactivo, por ejemplo) tiene un 50% de probabilidades de activar la emisión de un somnífero. *Tú* percibes el somnífero emitido o no. En el primer caso te duermes, en el segundo te quedas despierto.

Para ti, el somnífero se ha lanzado o no. No hay dudas. *Para ti*, estás despierto o estás dormido. No ambas cosas, por supuesto.

En cambio, yo estoy fuera de la caja y no interactúo ni con el frasco de somníferos ni contigo. Más tarde puedo observar fenómenos de interferencia entre tú-despierto y tú-dormido: fenómenos que no se habrían producido si te hubiese visto dormido o si te hubiese visto despierto. En este sentido, *para mí*, no estás ni despierto ni dormido. Digo que estás «en una superposición de despierto y dormido».

Para ti, el somnífero se ha liberado o no, y estás despierto o dormido. *Para mí*, no estás ni despierto ni dormido. Para mí, «hay una superposición cuántica entre estados diversos». Para ti, existe la realidad de estar despierto o bien de no estarlo. La perspectiva relacional permite *que sean verdad ambas cosas*, porque cada una se refiere a interacciones con respecto a dos observadores diferentes: tú y yo.



¿Es posible que algo sea real para ti y no sea real para mí?

La teoría cuántica, creo, es el descubrimiento de que la respuesta a esta pregunta es sí. *Las propiedades de un objeto que son reales en relación con un segundo objeto no lo son necesariamente con respecto a un tercero*^[*5]. Una propiedad puede ser real con respecto a una piedra y no real con respecto a otra piedra^[56].

EL ENRARECIDO Y ETÉREO MUNDO DE LOS CUANTOS

Espero no haber perdido por el camino a demasiados de mis lectores en el párrafo precedente, delicado pero esencial. La síntesis es que las propiedades de los objetos existen solo en el momento de las interacciones y pueden ser reales con respecto a un objeto pero no con respecto a otro.

El hecho de que haya propiedades definidas solo con respecto a otra cosa no debería sorprendernos demasiado. Ya lo sabíamos.

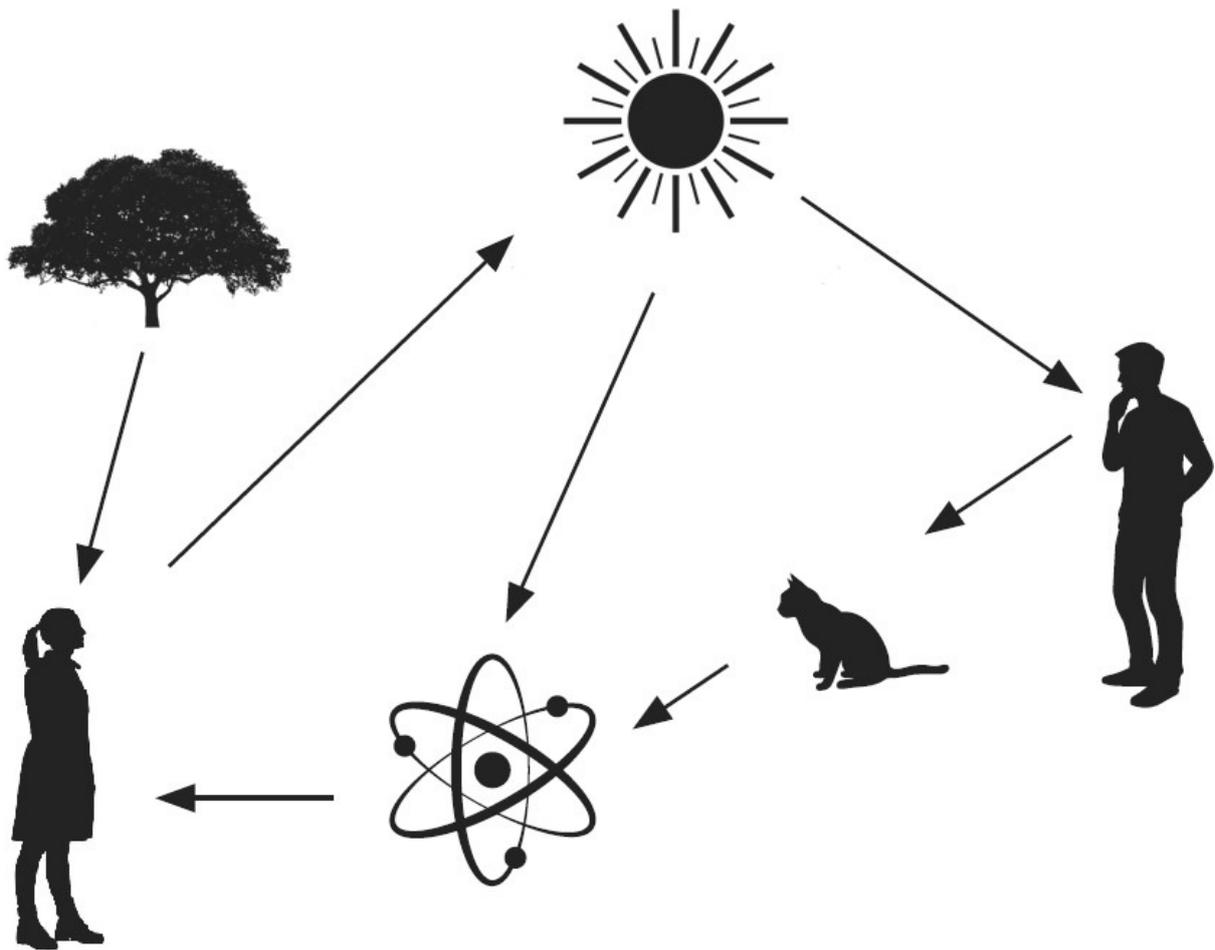
Por ejemplo, la velocidad es una propiedad que un objeto tiene *con respecto a otro objeto*. Si caminas por el puente de un ferry fluvial, tienes una velocidad con respecto al ferry, una velocidad diferente respecto al agua del río, otra diferente con respecto a la Tierra, otra diferente con respecto al Sol, una más diferente respecto a la galaxia, y así sucesivamente sin un punto final. No hay velocidad sin establecer (implícita o explícitamente) *con respecto a qué*. La velocidad es una noción que concierne a dos objetos (tú y el ferry, tú y la Tierra, tú y el Sol...). Es una característica que existe solo con respecto a otra cosa. Es una *relación* entre dos objetos.

Hay muchos ejemplos similares: aceptar la idea de que la Tierra es una esfera significa aceptar la idea de que «arriba» y «abajo» no son nociones absolutas, sino *relativas* al lugar de la Tierra donde nos encontremos. La relatividad especial de Einstein es el descubrimiento de que la noción de simultaneidad es relativa al estado de movimiento de un observador, y así sucesivamente. El descubrimiento de la teoría cuántica es solo un poco más radical: es el descubrimiento de que *todas* las propiedades (variables) de *todos* los objetos son relacionales, del mismo modo que lo es la velocidad.

Las variables físicas no describen las cosas: describen la forma en que las cosas se manifiestan unas a otras. No tiene sentido atribuirles un valor, excepto durante una interacción. Una variable adquiere valor (la partícula tiene una posición o una velocidad) en relación con algo, en el curso de una interacción con este algo.

El mundo es la red de estas interacciones. Relaciones que se establecen cuando los objetos físicos interactúan. Una piedra golpea otra piedra. La luz del Sol llega a mi piel. Tú, lector, lees estas líneas.

El mundo que emerge es un mundo enrarecido. Un mundo donde, en lugar de entidades independientes con propiedades definidas, existen entidades que tienen propiedades y características solo con respecto a otras, y solo cuando interactúan. Una piedra no tiene posición por sí misma: tiene posición solo con respecto a otra piedra con la que choca. El cielo no tiene color en sí mismo, tiene color en relación con mi ojo que lo mira. Una estrella no brilla en el cielo como entidad independiente: es un nodo en una red de interacciones que forma la galaxia en la que reside...



El mundo cuántico es, por tanto, más etéreo que el imaginado por la vieja física; se compone solo de interacciones, acaecimientos, eventos discontinuos, sin permanencia. Es un mundo con una urdimbre escasa, como un encaje de Burano. Cada interacción es un evento y son estos eventos leves y efímeros los que constituyen la realidad, no los pesados objetos cargados de

propiedades absolutas que nuestra filosofía introducía en apoyo de estos eventos.

La vida de un electrón no es una línea en el espacio, es una manifestación salpicada de eventos, aquí y allá, cuando interactúa con otra cosa. Eventos puntuales, discontinuos, probabilísticos, relativos.

En *Cosmological Koans*, un sugerente libro sobre los misterios de la física, Anthony Aguirre describe así la conclusión y el desconcierto que suscita todo esto: «Rompe las cosas en pedazos cada vez más pequeños, después, si examinamos los pedazos, no están. Solo queda el modo en que están organizados. ¿Qué son entonces cosas como un barco, su vela o vuestras uñas? ¿Qué son? Si son formas de formas de formas, y las formas son orden, y el orden es definido por nosotros... parece que solo existen creadas por y en relación con nosotros y el universo. Están, como diría Buda, vacías»^[57].

La sólida continuidad del mundo al que estamos acostumbrados en nuestra vida diaria no refleja el graneado de la realidad: es el resultado de nuestra visión macroscópica. Una bombilla no emite una luz continua, emite una densa serie de pequeños fotones evanescentes. A pequeña escala no existe continuidad ni fijeza en el mundo real, hay eventos discontinuos, interacciones escasas y discretas.

Schrödinger luchó como un león contra la discontinuidad cuántica, contra los saltos cuánticos de Bohr, contra el mundo matricial de Heisenberg. Quería defender la imagen de la realidad continua de la visión clásica. Pero al final también él capitula, décadas después de los enfrentamientos de los años veinte, y acepta la derrota. Las palabras de Schrödinger que continúan el pasaje que he citado anteriormente («Hubo un momento en el que los creadores de la mecánica ondulatoria se mecieron en la ilusión de haber eliminado las discontinuidades de la teoría cuántica») son claras y definitivas: «... es mejor considerar una partícula no como una entidad permanente sino como un evento instantáneo. A veces estos eventos forman cadenas que despiertan la ilusión de ser permanentes, pero solo en circunstancias especiales y solo por un período de tiempo extremadamente breve en cada caso concreto»^[58].

\hbar

¿Qué es, entonces, la onda Ψ ? Es el cálculo probabilístico de dónde esperamos que se produzca el próximo evento *con respecto a nosotros*^[59]. Es una cantidad prospectiva: un objeto no tiene una sola onda Ψ , tiene una

diferente con respecto a cualquier otro objeto con el que haya interactuado. Los hechos que suceden con respecto a otro no influyen sobre la probabilidad de futuros eventos que tendrán lugar con respecto a nosotros^[*6]. El «estado cuántico» descrito por Ψ es, por tanto, siempre solo un estado relativo^[60].

Las interpretaciones de muchos mundos y de variables ocultas, resumidas en el capítulo anterior, trataban de «rellenar» el mundo con realidades adicionales más allá de lo que vemos, para recuperar la «plenitud» del mundo clásico, para exorcizar la indeterminación de los cuantos. El precio era tener un mundo lleno de invisibles. La perspectiva relacional, en cambio, toma la teoría como es —a fin de cuentas es la mejor teoría que tenemos— en su descripción rala del mundo, y acepta por completo su indeterminación^[*7], como hace el qbismo. Sin embargo, a diferencia del qbismo, habla del mundo entero, no de la información de un tema, como si esto fuera externo a la naturaleza.

Es la gramática de nuestra comprensión de la realidad cuya modificación debemos aceptar, como Anaximandro cuando entendió la forma de la Tierra cambiando la gramática de las nociones de «encima» y «debajo»^[61]. Los objetos se describen por variables que adquieren valor cuando interactúan y este valor se determina en relación con objetos que interactúan, no con otros. Un objeto es *uno, ninguno y cien mil*.

El mundo se hace añicos en un juego de puntos de vista, que no admite una única visión global. Es un mundo de perspectivas, de manifestaciones, no de entes con propiedades definidas o hechos unívocos. Las propiedades no viven en los objetos, son puentes entre objetos. Los objetos son tales solo en un contexto, es decir, solo con respecto a otros objetos, son nodos donde se cruzan puentes. El mundo es un juego de perspectiva, como de espejos que existen solo en el reflejo de uno en otro.

El graneado fino de las cosas es este extraño mundo etéreo, donde las variables son relativas y el futuro no está determinado por el presente. Este fantasmal mundo de cuantos es nuestro mundo.

IV. LA RED DE RELACIONES QUE TEJE LA REALIDAD

Donde se habla de cómo se hablan las cosas entre ellas.

ENTRELAZAMIENTO

En el capítulo anterior he hablado del corazón de la teoría cuántica: las propiedades de las cosas son relativas a otras cosas y se realizan en interacciones. Aquí describo el fenómeno en el que se manifiesta más claramente esta interdependencia de las cosas. Es un fenómeno sutil, fascinante, el fenómeno cuántico que más ha hecho soñar: el entrelazamiento.

Es el fenómeno más extraño, el que más nos aleja de nuestro viejo mundo. Como subrayó Schrödinger, es el verdadero rasgo característico de la mecánica cuántica. Pero también es un fenómeno general, que teje la estructura misma de la realidad. Aquí es donde aparecen los aspectos más vertiginosos de la realidad revelados por la teoría cuántica.

Para designarlo se usa el término *entrelazamiento* (en inglés *entanglement*). Un entrelazamiento es la situación en la que se encuentran dos cosas o dos personas que, de alguna forma, han quedado enredadas entre ellas, en sentido literal o figurado. Nudo, enredo, implicación, maraña, embrollo, relación sentimental...

En física cuántica, se llama entrelazamiento al fenómeno por el cual dos objetos distantes entre sí, por ejemplo, dos partículas que se encontraron en el pasado, mantienen una especie de vínculo extraño, como si pudieran seguir hablando entre ellas. Como dos amantes lejanos que adivinan los pensamientos el uno del otro. Permanecen, podríamos decir, enredados, entrelazados. Es un fenómeno bien contrastado en el laboratorio. Recientemente, científicos chinos han logrado mantener en un estado entrelazado dos fotones que distan miles de kilómetros el uno del otro^[62].

Veamos de qué se trata.

En primer lugar, dos fotones entrelazados tienen características correlacionadas: es decir, si uno es rojo, el otro también es rojo; si uno es azul, el otro también es azul. Hasta aquí nada extraño. Si separo un par de guantes y envío uno a Viena y otro a Pekín, el que llegue a Viena será del mismo color que el que llegue a Pekín: están correlacionados.

La rareza surge si el par de fotones expedidos uno a Viena y el otro a Pekín están en una superposición cuántica. Por ejemplo, pueden estar en una superposición de una configuración en la que ambos son rojos y una en la que ambos son azules. Cada fotón puede revelarse tanto rojo como azul en el momento de la observación, pero si uno se revela rojo, el otro —lejano— hará lo mismo.

El aspecto del asunto que nos deja perplejos es que si ambos pueden mostrarse tanto rojos como azules, ¿cómo es posible que siempre se muestren ambos del mismo color? La teoría nos dice que hasta el momento en el que lo miramos, cada uno de los dos fotones no es ni definitivamente azul ni definitivamente rojo. El color se determina de una manera casual solo en el momento en que miramos. Pero si es así, ¿cómo puede ser que el color que se determina por casualidad en Viena pueda resultar el mismo color que se determina de manera casual en Pekín? Si lo echo a cara o cruz en Pekín y en Viena, los dos resultados son independientes, no están correlacionados: no sale cara en Viena todas las veces que sale cara en Pekín.

Parece haber solo dos explicaciones posibles. La primera es que una señal con el color del fotón viaja velocísima de un fotón a otro, es decir, tan pronto como un fotón decide si ser azul o rojo, de alguna manera se lo comunica inmediatamente a su hermano lejano. La segunda posibilidad, más razonable, es que en realidad el color ya estaba determinado en el momento de la separación, como en el caso de los guantes, aunque no lo supiéramos (Einstein se esperaba algo similar).

El problema es que ninguna de las dos explicaciones funciona. La primera implica una comunicación demasiado veloz desde demasiado lejos, excluida por todo lo que sabemos sobre la estructura misma del espacio-tiempo, que impide enviar señales demasiado veloces. En efecto, se puede demostrar que no hay forma de utilizar objetos entrelazados para enviar señales. Por tanto, estas correlaciones no están vinculadas a transmisiones rápidas de señales.

Pero también la otra posibilidad —que los fotones, como los guantes, supieran ya antes de alejarse si serían ambos rojos o ambos azules— está excluida. Quedó excluida por las agudas consideraciones que presentó el físico irlandés John Bell en un hermoso artículo escrito en 1964^[63]. Con un razonamiento elegante, sutil y muy técnico, Bell mostró que, si todas las propiedades correlacionadas de los dos fotones estuvieran determinadas desde el momento de la separación (en lugar de determinarse al azar en el momento de la observación), se derivarían de ahí consecuencias precisas (llamadas hoy

desigualdades de Bell) que, en cambio, contradicen claramente lo observado. Por tanto, las correlaciones *no* se determinan de antemano^[64].

Parece un rompecabezas sin salida. ¿Cómo pueden dos partículas entrelazadas decidir lo mismo, sin haberse puesto antes de acuerdo y sin enviarse mensajes? ¿Qué las une?

ħħ

Mi amigo Lee me contó que cuando, siendo un muchacho, estudió el entrelazamiento, pasó después horas tumbado en la cama con la mirada en el techo, pensando que cada átomo de su cuerpo había interactuado en un pasado lejano con muchos átomos del universo. Así pues, cada átomo de su cuerpo tenía que estar conectado con miles de millones de otros átomos esparcidos por la galaxia... Se sentía mezclado con el cosmos.

El entrelazamiento muestra que, de todos modos, la realidad es diferente de cómo la creíamos. Dos objetos tienen —juntos— más características que los dos objetos separados. Más exactamente, hay situaciones en que, aunque sé todo lo que puedo predecir en esa situación sobre un objeto y otro, no puedo, aun así, predecir nada de los dos objetos juntos. Nada de esto es cierto en el mundo clásico.

Si Ψ_1 es la onda de Schrödinger de un objeto y Ψ_2 es la onda de un segundo objeto, nuestra intuición nos dice que para predecir todo lo que podamos observar de los dos objetos debería ser suficiente conocer Ψ_1 y Ψ_2 . Pero no es así. La onda de Schrödinger de dos objetos no es el conjunto de dos ondas. Es una onda más complicada que contiene otra información: la información sobre posibles correlaciones cuánticas que no se pueden escribir en las dos ondas Ψ_1 y Ψ_2 ^[65].

En resumen, aunque sabemos todo lo que hay que saber en una situación particular sobre un objeto singular, si este objeto ha interactuado con otros no sabemos todo sobre él: ignoramos sus correlaciones con otros objetos del universo. La relación entre dos objetos no es algo que esté contenido en uno y en otro, es más^[66].

Esta interconexión de todos los componentes del universo es desconcertante.

ħħ

Volvamos al rompecabezas. ¿Cómo funcionan dos partículas entrelazadas para comportarse de la misma manera sin haberse puesto de acuerdo antes y sin enviarse mensajes de lejos?

La solución del rompecabezas en el ámbito de la perspectiva relacional existe, pero muestra cuán radical es esta perspectiva.

La solución es recordar que las propiedades existen con respecto a algo. La medición del color del fotón realizada en Pekín determina el color *respecto a Pekín*. Pero no respecto a Viena. La medición del color en Viena determina el color *respecto a Viena*. Pero no *respecto a Pekín*. No hay ningún objeto físico que vea *ambos* colores en el momento en el que se realizan las dos mediciones. Por tanto, no tiene sentido preguntarse si los resultados son iguales o no. No significa nada, porque no corresponde a algo que se pueda verificar.

Solo Dios puede mirar en dos lugares al mismo tiempo, pero Dios, si lo hay, no nos dice lo que ve. Lo que Él vea es irrelevante para la realidad. No podemos asumir que existe lo que solo Dios ve. No podemos asumir que existen ambos colores, porque no hay nada *con respecto a lo que* se determinen ambos. Solo hay propiedades que existen con respecto a algo: el conjunto de los dos colores no existe con respecto a nada.

Obviamente, podemos comparar las dos mediciones, en Pekín y en Viena, pero la comparación requiere que haya un intercambio de señales: los dos laboratorios pueden enviarse un correo electrónico, llamarse por teléfono. Pero un correo electrónico lleva tiempo, y también la voz en el teléfono: nada viaja instantáneamente.

Cuando el resultado de la medición de Pekín llega a Viena, por correo electrónico o por teléfono, *solo entonces* se vuelve real también con respecto a Viena. Pero situados en este punto ya no hay una misteriosa señal a distancia: respecto a Viena, la concreción del color del fotón de Pekín ocurre solo cuando llegan las señales de información a Viena.

Respecto a Viena, ¿qué sucede en el momento de la medición en Pekín? Hay que recordar que los dispositivos que efectúan las mediciones, los científicos que los leen, los cuadernos en los que toman notas, los mensajes en los que escriben los resultados de la medición, *también son todos ellos objetos cuánticos*. Hasta que se comunican con Viena, su estado *respecto a Viena* no está determinado, respecto a Viena todos son como el gato en superposición de despierto y dormido. Están en una superposición cuántica de una configuración en la que han medido azul y de una en la que han medido rojo.

Respecto a Pekín sucede lo contrario: los laboratorios de Viena y el mensaje que llega de Viena están en superposición cuántica, hasta el momento en que el mensaje con el resultado de la medición llega a Pekín.

Para ambos, las correlaciones no se vuelven reales hasta que se hayan intercambiado señales. De este modo podemos entender las correlaciones sin transmisión mágica de señales, ni predeterminación del resultado.

Es la solución al rompecabezas, pero su precio es elevado: no hay un relato unívoco de los hechos; hay un relato de hechos relativos a Pekín y uno de hechos relativos a Viena, y *no coinciden* ambos. Hechos relativos a un observador no son hechos relativos al otro. La relatividad de la realidad resplandece aquí totalmente.

Las propiedades de un objeto son tales solo con respecto a otro objeto. Por tanto, las propiedades de *dos* objetos lo son solo con respecto a un *tercero*. Decir que dos objetos están correlacionados significa enunciar algo que se refiere a un *tercer* objeto: la correlación se manifiesta cuando los dos objetos correlacionados interactúan *ambos* con este tercer objeto.

La aparente incongruencia planteada por lo que parecía una comunicación a distancia entre dos objetos *entrelazados* se debe al olvido de este hecho: es necesaria la existencia de un tercer objeto que interactúe con ambos sistemas para revelar y dar realidad a las correlaciones. La aparente incongruencia se produce por olvidar que todo lo que se manifiesta se le manifiesta *a algo*. Una correlación entre dos objetos es una propiedad de los dos objetos y, como todas las propiedades, existe solo en relación con un tercer objeto adicional.

El entrelazamiento no es un baile para dos, es un paso a tres.

EL PASO A TRES QUE TEJE LAS RELACIONES DEL MUNDO

Imaginemos la observación de una propiedad de un objeto. Zeilinger detecta un fotón y lo ve rojo. Un termómetro detecta la temperatura de una tarta.

Una medición es una interacción entre un objeto (el fotón, la tarta) y otro (Zeilinger, el termómetro). Al final de la interacción, un objeto «ha recogido información sobre otro objeto». El termómetro ha recogido información sobre la temperatura de la tarta que se está horneando.

¿Qué significa aquí que el termómetro «tiene información» sobre la temperatura de la tarta? Muy sencillo, simplemente significa que hay una *correlación* entre termómetro y tarta. Es decir, después de la medición, si la tarta está fría el termómetro indica frío (el mercurio del tubito está bajo); en cambio, si la tarta está caliente, el termómetro indica caliente (el mercurio del tubito está alto). Temperatura y termómetro se han vuelto como los dos fotones: correlacionados.

Esto aclara lo que sucede en cualquier observación. Sin embargo, atención, si la tarta estaba en una superposición cuántica de temperaturas diferentes, entonces:

- con respecto al termómetro, la tarta manifiesta una de sus propiedades (temperatura) durante la interacción;
- con respecto a un tercer sistema físico cualquiera, que no participa en esta interacción, no se manifiesta ninguna propiedad sino que la tarta y el termómetro están ahora en un estado entrelazado.

Esto es lo que sucede con el gato de Schrödinger. Respecto al gato, el somnífero puede liberarse o no. Respecto a mí, que todavía no he abierto la caja, el frasco del somnífero y el gato están en estado de entrelazamiento: una superposición cuántica de somnífero-liberado/gato-dormido y somnífero-no-liberado/gato-despierto.

El entrelazamiento, por tanto, no es un fenómeno raro que se dé en situaciones particulares: eso es lo que ocurre regularmente en una interacción, si esta se considera respecto a los sistemas físicos extraños a ella.

Desde una perspectiva externa, cualquier manifestación de un objeto a otro, es decir, cualquier muestra de una propiedad, es la aparición de una correlación —en general es la realización de un entrelazamiento— entre el objeto que se manifiesta en una relación y el objeto relacionado.

En resumen, el entrelazamiento no es más que la perspectiva externa sobre la relación misma que teje la realidad: la manifestación de un objeto a otro, en el curso de una interacción en la que las propiedades de los objetos se hacen actuales.

ħħ

Miras una mariposa y ves el color de sus alas. Lo que sucede con respecto a mí es el establecimiento de una correlación entre tú y la mariposa: tú y la mariposa estáis ahora en un estado entrelazado. Incluso si la mariposa se aleja de ti, queda el hecho de que si yo miro el color de sus alas y luego te pregunto de qué color las has visto, comprobaré que las respuestas coinciden, si bien no es imposible que se den sutiles fenómenos de interferencia con la configuración donde la mariposa era de otro color...

Toda la información que se puede tener sobre el estado del mundo, considerado desde fuera, está en estas correlaciones. Y, como todas las propiedades, son solo propiedades relativas, todas las cosas del mundo no existen más que en esta red de entrelazamiento.

Pero hay método en esta locura. Si sé que tú has mirado las alas de la mariposa y me dices que las has visto azules, sé igualmente que si las miro también las veré azules. Esto prevé la teoría^[67], *a pesar de que las propiedades son relativas*. La fragmentación de los puntos de vista, la multiplicidad de perspectivas abiertas por el hecho de que las propiedades son solo relativas, se recompone por esta coherencia, que es intrínseca a la gramática de la teoría, y es la base de la intersubjetividad que establece la objetividad de nuestra visión común del mundo.

Para todos nosotros, que nos hablamos, las alas de la mariposa tienen siempre el mismo color.

INFORMACIÓN

Las palabras nunca son precisas; la borrosa nube de significados que llevan consigo es su fuerza expresiva. Pero también puede generar confusión 'cause you know sometimes words have two meanings. La palabra «información» que utilicé en algunas líneas anteriores es una palabra llena de ambigüedad, utilizada en diferentes contextos para indicar nociones diversas.

A menudo se usa para referirse a algo que tiene *significado*. Una carta de nuestro padre está «llena de información». Para descifrar este tipo de información se requiere una mente que comprenda el *significado* de las frases de la carta. Esta es una noción «semántica» de información, o sea, vinculada al significado.

Pero existe también una acepción de la palabra «información» que es más simple y no tiene nada de «semántico», o de mental: entra de lleno en la física, donde no se habla ni de mentes ni de significados. Es el uso que he hecho de la palabra «información» antes, cuando escribí que el termómetro «tiene información» sobre la temperatura de la tarta, para decir tan solo que, si la tarta está fría, el termómetro indica frío y si la tarta está caliente, el termómetro indica caliente.

Este es un sentido simple y general de la palabra «información», usado en física. Si lanzo dos monedas, hay *cuatro* resultados posibles: cara-cara, cara-cruz, cruz-cara y cruz-cruz. Pero si pego las dos monedas a una misma lámina de plástico transparente, ambas con la cara hacia arriba, y las deajo caer así, ya no hay cuatro resultados posibles sino solo *dos*: cara-cara y cruz-cruz. La cara en una moneda implica que también la otra es cara. En el lenguaje de la física se dice que los lados de las dos monedas están «correlacionados». O que los lados de las dos monedas «tienen información el uno del otro», en el sentido de que si veo uno, este «me informa» sobre el otro.

Decir que una variable física «tiene información» de otra variable física tan solo significa, en este sentido, decir que existe algún tipo de vínculo (una historia común, una relación física, el pegamento en la hoja de plástico) por el

que el valor de una variable implica algo para el valor de la otra^[68]. Esta es la acepción de la palabra «información» que uso aquí.

Dudé antes de hablar de información en este libro justo porque la palabra «información» es ambigua: cada uno tiende instintivamente a leer lo que quiere, y no nos entendemos. Sin embargo, la noción de información es importante para los cuantos y me arriesgo a hablar de ella de todos modos. Por favor, recordad que aquí «información» se usa en sentido físico, no mental ni semántico.

ħħ

Las propiedades de un objeto físico se realizan con respecto a un segundo objeto y podemos concebirlas, según hemos visto, como el establecimiento de una correlación entre los dos, o como *información* que el segundo objeto tiene del primero.

Por tanto, podemos pensar en la física cuántica como una teoría sobre la información (en el sentido que acabamos de ver) que los sistemas tienen unos de otros.

Incluso en el caso de la física clásica, podemos limitarnos a pensar en la información que los sistemas físicos pueden tener uno de otro. Pero hay dos diferencias que se resumen en dos leyes generales, o «postulados», que diferencian radicalmente la física cuántica de la física clásica, y captan lo novedoso de aquella^[69]:

1. *La cantidad de información relevante que podemos tener sobre un objeto físico^[70] es finita.*
2. *Al interactuar con un objeto, siempre podemos adquirir nueva información relevante.*

A primera vista, los dos postulados parecen contradecirse. Si la información es finita, ¿cómo puedo obtener información nueva? La contradicción es solo aparente, porque los postulados hablan de «información relevante». La información relevante es la que nos permite determinar el comportamiento futuro del objeto. Cuando adquirimos nueva información, parte de la información antigua se convierte en «irrelevante», es decir, no cambia lo que se puede decir sobre el comportamiento futuro del objeto^[71].

Estos dos postulados resumen la teoría cuántica^[72]. Veamos cómo.

La información es finita: el principio de Heisenberg

Si conociésemos todas las variables físicas que describen algo con precisión infinita, tendríamos información infinita. Pero no podemos. El límite está determinado por la constante de Planck \hbar ^[73]. Este es el significado físico de la constante de Planck: el límite con el que pueden determinarse las variables físicas.

Fue Heisenberg quien sacó a la luz este hecho crucial, en 1927, poco después de haber elaborado la teoría^[74]. Demostró que si la precisión con la que tenemos información sobre la ubicación de una cosa es ΔX , y la precisión con la que tenemos información sobre su velocidad (multiplicada por la masa) es ΔP , las dos precisiones no pueden ser ambas arbitrariamente buenas. El producto de las precisiones no puede ser menor que una cantidad mínima: la mitad de la constante de Planck.

En fórmula:

$$\Delta X \Delta P \geq \hbar/2$$

Leemos: «delta equis por delta pe es siempre mayor o igual a hache barra partido por dos». Esta propiedad muy general de la realidad se conoce como el «principio de incertidumbre de Heisenberg». Se aplica a todo.

Una consecuencia inmediata es la granularidad. Por ejemplo, la luz está hecha de fotones, granos de luz, porque porciones de energía aún más pequeñas violarían este principio: el campo eléctrico y el campo magnético (que para la luz son como X y P) estarían ambos demasiado determinados y violarían el primer postulado.

La información es inagotable: la no conmutatividad

El principio de incertidumbre no significa que no podamos medir con gran precisión la velocidad de una partícula y *después* medir con gran precisión su posición. Podemos. Pero después de la segunda medición, la velocidad ya no será la misma: al medir la posición *perdemos información* sobre la velocidad, es decir, si la volvemos a medir la encontramos cambiada.

El segundo postulado dice que, pese a todo, incluso cuando alcanzamos la información máxima de un objeto, podemos aún aprender algo inesperado

(aun perdiendo información previa). El futuro no está determinado por el pasado: el mundo es probabilístico.

Dado que medir P altera X , medir primero X y después P da resultados diferentes a los de medir primero P y luego X . Es, por tanto, necesario que en matemáticas «primero X y después P » sea diferente a «primero P y después X »^[75]. Esta es exactamente la propiedad que caracteriza las matrices: el orden importa^[76]. ¿Recuerdan la única ecuación nueva de la teoría cuántica?

$$XP - PX = i\hbar$$

Nos dice exactamente esto, a saber: «primero X y después P » es diferente de «primero P y luego X ». ¿Cuán diferente? Diferente en una cantidad que depende de la constante de Planck: la escala de los fenómenos cuánticos. Por esta razón las matrices de Heisenberg funcionan, porque permiten tener en cuenta el orden en que se adquieren las informaciones.

También el principio de Heisenberg, esto es, la ecuación de la página anterior, sigue de cerca a la ecuación de esta página que, por tanto, lo resume todo. Esta ecuación traduce en términos matemáticos ambos postulados de la teoría cuántica. Los dos postulados representan, como mejor lo entendemos hoy, su significado físico.

En la versión de Dirac de la teoría cuántica ni siquiera hay necesidad de matrices: se obtiene todo usando solo «variables que no conmutan», es decir, que satisfacen esta ecuación. «No conmutan» significa que no se puede intercambiar el orden impunemente. Dirac los llamaba *números q* , cantidades *definidas* por esta ecuación. El pretencioso nombre matemático es «álgebras no conmutativas». Dirac es siempre un poeta cuando escribe física: simplifica todo al extremo.

¿Recuerdan los fotones de Zeilinger con los que comencé a describir los fenómenos cuánticos? Podían pasar «por la derecha o por la izquierda» y terminar «arriba o abajo». Su comportamiento, pues, puede describirse con dos variables: una variable X , que puede ser «derecha» o «izquierda», y una variable P , que puede ser «arriba» o «abajo». Estas dos variables son como la posición y la velocidad de una partícula: no se pueden determinar ambas. Por eso, si se cierra un recorrido determinando así la primera variable («derecha» o «izquierda»), la segunda es indeterminada: los fotones van al azar «arriba o abajo». Por el contrario, para que la segunda variable se determine, es decir, que todos los fotones vayan «abajo», es necesario que la primera variable no esté determinada, es decir, los fotones puedan recorrer ambos caminos. Todo

el fenómeno es, por tanto, consecuencia de la ecuación única que dice que estas dos variables «no conmutan» y por lo tanto no se pueden determinar ambas.

ħħ

Las últimas consideraciones han sido técnicas, quizás habría podido ponerlas en una nota... Pero estoy llegando al final de esta segunda parte del libro y quería completar el cuadro de la teoría cuántica, incluidos los postulados sobre la información que la resumen y el núcleo de su estructura matemática, dado por una sola ecuación.

Esta estructura nos dice en síntesis extrema que el mundo no es continuo sino granular, que su determinación tiene un límite inferior finito. No existe nada infinito cuando se va hacia lo pequeño. Nos dice que el futuro no está determinado por el presente. Nos dice que las cosas físicas solo tienen propiedades en relación con otras cosas físicas, y que estas propiedades existen solo cuando las cosas interactúan. No se pueden yuxtaponer diferentes perspectivas sin que parezcan contradictorias.

En nuestra vida diaria no nos damos cuenta de todo esto. El mundo nos parece determinado porque los fenómenos de interferencia cuántica se pierden en el zumbido del mundo macroscópico. Conseguimos destacarlos solo con observaciones delicadas y aislando los objetos tanto como sea posible^[77].

Cuando no observamos interferencias, podemos ignorar las superposiciones cuánticas y reinterpretarlas como si fuera nuestra ignorancia: si no abrimos la caja, no sabemos si el gato está despierto o dormido. Si no vemos interferencia, no es necesario pensar que exista una superposición cuántica: «superposición cuántica» —lo recuerdo porque muy a menudo hay confusión en este punto— *solo* significa que vemos interferencias. Los delicados fenómenos de interferencia entre gato-despierto y gato-dormido no los vemos porque están perdidos en el ruido del mundo. En efecto, más que en los objetos *pequeños*, los fenómenos cuánticos se manifiestan en los objetos *muy bien aislados*, que permiten aislar y detectar las sutiles interferencias cuánticas.

Por otra parte, solemos observar el mundo a gran escala, por lo que no vemos su granularidad. Vemos valores medios entre muchísimas variables pequeñas. No vemos moléculas individuales: vemos el gato completo. Cuando hay tantas variables, las fluctuaciones se vuelven irrelevantes, la probabilidad se aproxima a la certeza^[78]. Los miles de millones de variables

discontinuas y salpicadas en el agitado y fluctuante mundo de los cuantos se reducen a unas pocas variables continuas y bien definidas de nuestra experiencia diaria. En nuestra escala el mundo es como un océano agitado por las ondas observado desde la luna: una superficie plana de una bola inmóvil.

Nuestra experiencia diaria es, por tanto, compatible con el mundo cuántico. La teoría cuántica comprende la mecánica clásica y comprende también nuestra habitual visión del mundo, como aproximación. Las comprende como un hombre que ve bien puede comprender a un miope que no ve una olla hirviendo en la lumbre. Pero a escala molecular, el borde afilado de un cuchillo de acero fluctúa y es inexacto como la orilla de un océano tormentoso que rompe en una playa de arena blanca.

La solidez de la cosmovisión clásica no es más que nuestra miopía. Las certezas de la física clásica son solo probabilidades. La imagen del mundo nítida y sólida de la vieja física es una ilusión.

ħħ

El 18 de abril de 1947, en la Isla Sagrada, la isla de Helgoland, la armada inglesa hizo explotar seis mil setecientas toneladas de dinamita, restos del material de guerra abandonado por el ejército alemán. Probablemente sea la mayor detonación efectuada con explosivos convencionales. Helgoland está totalmente destruida. Como si la humanidad buscara borrar el desgarrón abierto en la realidad por el chico en aquella isla.

Pero el desgarrón permanece. La explosión conceptual desencadenada por aquel muchacho es mucho más devastadora que miles de toneladas de trilita: se hace pedazos la urdimbre misma de la realidad tal como la concebíamos. Hay algo desconcertante en todo esto. La solidez de la realidad parece disolverse entre nuestros dedos, en una infinita regresión de referencias.

Dejo de escribir estas líneas y miro por la ventana. Todavía hay nieve. Aquí, en Canadá, la primavera llega tarde. En mi cuarto hay una chimenea encendida. Tengo que levantarme para añadir un poco de leña. Estoy escribiendo sobre la naturaleza de la realidad. Miro el fuego y me pregunto de qué realidad estoy hablando. ¿De esta nieve? ¿De este fuego incierto? ¿O más bien de la realidad sobre la que he leído en los libros? ¿O solo del calor de la chimenea que llega a mi piel, del centelleo sin nombre de rojo anaranjado, de ese blanco azulado del crepúsculo que se acerca?

Por un momento estas sensaciones se entremezclan. Cierro los ojos y veo lagos luminosos de colores vivos que se abren ante mí como tras cortinas, y

me parece que me hundo en ellos. ¿También de esta realidad? Danzan formas moradas y anaranjadas, yo ya no estoy ahí. Tomo un sorbo de té, reavivo el fuego, sonrío. Navegamos por un incierto mar de colores y tenemos a nuestra disposición buenos mapas para orientarnos. Pero entre nuestros mapas mentales y la realidad hay la misma distancia que entre las cartas de navegación y la furia de las olas en las rocas de los blancos acantilados donde vuelan las gaviotas.

El velo frágil que es nuestra organización mental es poco más que un instrumento torpe para navegar por los infinitos misterios de este caleidoscopio mágico inundado de luz en el que, asombrados, existimos, y al que llamamos nuestro mundo.

Podemos atravesarlo sin preguntas, confiando en los mapas que tenemos, que, en el fondo, nos permiten vivir bastante bien. Podemos permanecer en silencio, abrumados por su luz y su infinita belleza que nos conmueve. Podemos sentarnos en una mesa con paciencia, encender una vela o un MacBook Air, ir a los laboratorios, discutir con amigos y enemigos, retirarnos a la Isla Sagrada para hacer cálculos y encaramarnos a una roca al amanecer. O podemos beber un poco de té, avivar la llama de la chimenea y empezar a escribir de nuevo, tratando juntos de entender algunos granos más, recuperar la carta de navegación y contribuir a mejorarla un poco. Una vez más, repensar la naturaleza.

V. «LA DESCRIPCIÓN NO AMBIGUA DE UN FENÓMENO INCLUYE LOS OBJETOS A LOS QUE EL FENÓMENO SE MANIFIESTA»

Donde nos preguntamos qué implica todo esto y también por nuestras ideas sobre la realidad, y descubrimos que, después de todo, la novedad de la teoría cuántica no es tan nueva.

ALEKSANDR BOGDÁNOV Y VLADÍMIR LENIN

En 1909, cuatro años después de la fallida Revolución de 1905 y ocho años antes de la victoriosa Revolución de Octubre, Lenin, firmando con el seudónimo «V. Il'in», publica *Materialismo y empiriocriticismo. Notas críticas sobre una filosofía reaccionaria*, su texto más filosófico^[79]. El objetivo político implícito contra quien se dirige el texto es Aleksandr Bogdánov, hasta entonces su amigo y aliado, cofundador y principal cabeza pensante de los bolcheviques.

En los años previos a la Revolución, Aleksandr Bogdánov había publicado un trabajo en tres volúmenes^[80] para ofrecer una base teórica general al movimiento revolucionario. Se refería a una perspectiva filosófica llamada *empiriocriticismo*. Lenin comienza a ver a Bogdánov como un rival y teme su influencia ideológica. En su libro critica ferozmente el *empiriocriticismo*, «filosofía reaccionaria», y defiende lo que él llama *materialismo*.

Empiriocriticismo es un nombre con el que Ernst Mach designaba ideas como las propias. Ernst Mach, ¿recordáis? La fuente de inspiración filosófica para Einstein y Heisenberg.

Mach no es un filósofo sistemático y, a veces, carece de claridad, pero ejerció una influencia en la cultura contemporánea que creo que se ha subestimado^[81]. Inspiró el comienzo de las dos grandes revoluciones de la física del siglo xx, la relatividad y la teoría cuántica. Desempeñó un papel directo en el nacimiento de los estudios científicos sobre las percepciones. Estuvo en el centro del debate político-filosófico que llevó a la Revolución Rusa. Fue decisiva su influencia en los fundadores del Círculo de Viena (cuyo nombre público era «Verein Ernst Mach», ‘Sociedad Ernst Mach’), el ambiente filosófico donde surgió el empirismo lógico, raíz de tanta filosofía de la ciencia contemporánea, que hereda de Mach la retórica «antimetafísica». Su influencia llega al pragmatismo americano, otra raíz de la filosofía analítica actual.

Su impronta llega a la literatura: Robert Musil, uno de los más grandes novelistas del siglo XX, realizó su tesis doctoral sobre Ernst Mach. Las agitadas discusiones del protagonista de su primera novela, *Las tribulaciones del joven Törless*, recorren los temas de la tesis sobre el significado de la lectura científica del mundo. Los mismos problemas se filtran en su obra principal, *El hombre sin atributos*, desde la primera página, que se abre con una socarrona descripción doble, científica y cotidiana, de un día soleado^[82].

La influencia de Mach en las revoluciones de la física fue casi personal. Mach era viejo amigo del padre y él mismo padrino de Wolfgang Pauli, el amigo con quien Heisenberg discutía de filosofía. Mach era uno de los filósofos favoritos de Schrödinger, que de muy joven había leído prácticamente toda su obra. Einstein tuvo como amigo y compañero de estudios en Zúrich a Friedrich Adler, hijo del cofundador del Partido Socialdemócrata Austríaco, promotor de una convergencia de ideas entre Mach y Marx. Adler se convertirá en dirigente del Partido Socialdemócrata Obrero. Para protestar contra la participación de Austria en la Gran Guerra asesinará al primer ministro austríaco Karl von Stürgkh, y en la cárcel escribirá un libro sobre... Mach^[83].

En resumen, Ernst Mach se encuentra en una asombrosa encrucijada entre ciencia, política, filosofía y literatura. Y pensar que hoy en día hay quien ve las ciencias naturales, las humanidades y la literatura como campos impermeables entre sí...

El controvertido objetivo de Mach era el mecanicismo del siglo XVIII: la idea de que todos los fenómenos son producidos por partículas de materia que se mueven en el espacio. Según Mach, los progresos de la ciencia indicaban que *esta* noción de «materia» es una concesión metafísica injustificada: un modelo útil durante un tiempo, pero del que hay que aprender a salir para que no se convierta en prejuicio metafísico. Mach insiste en que la ciencia debe liberarse de *cualquier* supuesto «metafísico». Basar el conocimiento solo en lo que es «observable».

¿Recordáis? Esta es exactamente la idea de partida del mágico trabajo de Heisenberg concebido en la isla de Helgoland. El trabajo que abrió el camino a la teoría cuántica y el contenido de este libro. Así es como se abre el artículo de Heisenberg: «El objetivo de este trabajo es sentar los cimientos para una teoría de mecánica cuántica basada exclusivamente en las relaciones entre cantidades que sean, en principio, observables», casi está citando a Mach.

La idea de que el conocimiento se fundamenta en la experiencia y la observación en realidad no es original: es la tradición del empirismo clásico

que se remonta a Locke y Hume, si no a Aristóteles. La atención a la relación entre sujeto y objeto del conocimiento y la duda sobre la posibilidad de conocer el mundo «como realmente es» habían conducido, en el gran idealismo clásico alemán, a la centralidad filosófica del sujeto que conoce. Mach, científico, traslada la atención desde el sujeto a la experiencia misma, que Mach llama «sensaciones». Estudia la forma concreta en la que crece el conocimiento científico basado en la experiencia. Su obra más conocida^[84] examina la evolución histórica de la mecánica. La interpreta como un esfuerzo por sintetizar de la forma más económica los hechos conocidos sobre el movimiento revelados por las sensaciones.

Por tanto, Mach no ve el conocimiento como la deducción o la conjetura de una realidad hipotética *más allá de las sensaciones*, sino como la búsqueda de un modo eficiente de organizar estas sensaciones. El mundo que nos interesa, según Mach, está *constituido* por sensaciones. Cualquier suposición sobre lo que se esconda *detrás* de las sensaciones es sospechosa de «metafísica».

No obstante, la noción de «sensación» en Mach es ambigua. Es su debilidad, pero también su fuerza: Mach toma este concepto de la fisiología de las sensaciones físicas y lo convierte en una noción universal *independiente de la esfera psíquica*. Utiliza el término «elementos» (en un sentido similar al *dhamma* de la filosofía budista). «Elementos» no son solo las sensaciones que percibe un ser humano o animal, es cualquier fenómeno que se manifieste en el universo. Los «elementos» no son independientes: están vinculados por relaciones, que Mach llama «funciones», y son estas las que estudia la ciencia. Si bien imprecisa, la de Mach es, no obstante, una verdadera filosofía natural que sustituye el mecanicismo de la materia que se mueve en el espacio con un conjunto general de elementos y funciones^[85].

El interés de esta posición filosófica es que elimina tanto cualquier hipótesis sobre una realidad detrás de las apariencias, como cualquier hipótesis sobre la realidad del sujeto que tiene la experiencia. Para Mach no hay distinción entre el mundo físico y el mundo mental: la «sensación» es igualmente física y mental. Es real. Así describe Bertrand Russell la misma idea: «La materia primera de la que está hecho el mundo no es de dos tipos, materia y mente; simplemente está organizada en estructuras diferentes por sus interrelaciones: algunas estructuras las llamamos mentales, otras físicas»^[86]. Desaparece la hipótesis de una realidad material detrás de los fenómenos, desaparece la hipótesis de un espíritu que conoce. Quien tiene conocimiento, para Mach, no es el «sujeto» del idealismo: es la actividad

humana concreta, en el curso concreto de la historia, que aprende a organizar cada vez mejor los hechos del mundo con el que interactúa.

En esta perspectiva histórica y concreta resuenan sin dificultad las ideas de Marx y Engels, para quienes el conocimiento es también inmersión en la historia de la humanidad. El conocimiento se despoja de todo carácter ahistórico, de toda ambición de absoluto o pretensión de certeza, y se sumerge en el proceso concreto de evolución biológica, histórica y cultural del hombre en nuestro planeta. Se interpreta en términos biológicos y económicos, como instrumento para simplificar la interacción con el mundo. No es una adquisición definitiva, sino un proceso abierto. Para Mach, el saber es la ciencia de la naturaleza, pero su perspectiva no está lejos del historicismo del materialismo dialéctico. Bogdánov desarrolla la consonancia entre las ideas de Mach y las de Engels y Marx y encuentra consensos en la Rusia prerrevolucionaria.

La reacción de Lenin es tajante: en *Materialismo y empiriocriticismo* ataca violentamente a Mach, a sus discípulos rusos e implícitamente a Bogdánov. Lo acusa de cultivar una filosofía «reaccionaria», el peor insulto. En 1909, Bogdánov fue expulsado del consejo editorial de *El proletario*, el periódico clandestino de los bolcheviques, y poco después del Comité Central del Partido.

La crítica de Lenin a Mach y la respuesta de Bogdánov^[87] nos interesan. No porque Lenin sea Lenin, sino porque su crítica es la reacción natural a las ideas que llevaron a la teoría cuántica. La misma crítica también es natural para nosotros y la cuestión debatida por Lenin y Bogdánov vuelve a la filosofía contemporánea y es una clave para comprender el valor revolucionario de los cuantos.

ħħ

Lenin acusa a Bogdánov y Mach de ser «idealistas». Un idealista, para Lenin, niega la existencia de un mundo real fuera del espíritu y reduce la realidad al contenido de la conciencia.

Si solo hay «sensaciones», sostiene Lenin, no existe entonces una realidad externa, vivo en un mundo solipsista donde solo estoy yo con mis sensaciones. Me afirmo a mí mismo, el sujeto, como única realidad. Para Lenin, el idealismo es la manifestación ideológica de la burguesía, el enemigo. Lenin opone al idealismo un materialismo que ve al ser humano, su

conciencia, el espíritu, como aspectos de un mundo concreto, objetivo, conocible, hecho solo de materia en movimiento en el espacio.

Cualquiera que sea el juicio sobre su comunismo, Lenin fue sin duda un político extraordinario. Además, su conocimiento de la literatura filosófica y científica es impresionante; si ahora eligiéramos a políticos tan cultos, quizás fueran también más efectivos. Pero como filósofo, Lenin no es tan bueno. La influencia de su pensamiento filosófico se debe más a su largo dominio de la escena política que a la profundidad de sus argumentos. Mach merece más^[88].

Bogdánov responde a Lenin que su crítica se equivoca de objetivo. El pensamiento de Mach no es idealismo, menos aún solipsismo. La humanidad que sabe no es un sujeto trascendente aislado, no es el «yo» filosófico del idealismo: es la humanidad real, histórica, parte del mundo natural. Las «sensaciones» no están «dentro de nuestra mente»; son fenómenos del mundo: la forma en que el mundo se presenta al mundo. No llegan a un yo separado del mundo, llegan a la piel, al cerebro, a las neuronas de la retina, a los receptores del oído, todos ellos elementos de la naturaleza.

Lenin define en su libro el «materialismo» como la convicción de que existe un mundo fuera de la mente^[89]. Si esta es la definición de «materialismo», Mach es, por supuesto, materialista, todos somos materialistas, hasta el Papa es materialista. Pero después, para Lenin, la única versión del materialismo es la idea de que «en el mundo no hay nada más que materia en movimiento en el espacio y el tiempo», y que podemos llegar a «verdades ciertas» en el conocimiento de la materia. Bogdánov señala la debilidad tanto *científica* como *histórica* de estas contundentes afirmaciones. El mundo está fuera de nuestra mente, cierto, pero es mucho más sutil que este materialismo ingenuo. La alternativa no es solo entre la idea de que el mundo exista solo en la mente o bien que esté formado solo por partículas de materia en movimiento por el espacio.

Mach, en efecto, no cree que no haya nada fuera de la mente. Al contrario, a él le interesa precisamente lo que está fuera de la mente (sea lo que sea la «mente»): la naturaleza en su complejidad, de la que somos parte. La naturaleza se presenta como un conjunto de fenómenos, y Mach recomienda estudiar los fenómenos, construir síntesis y estructuras de conceptos que la expliquen, no postular realidades subyacentes.

La propuesta radical de Mach es no pensar en los fenómenos como manifestaciones de objetos, sino pensar en los objetos como nudos de fenómenos. No es una metafísica de los contenidos de la conciencia, como la lee Lenin: es un paso atrás con respecto a la metafísica de los objetos en sí

mismos. Mach es mordaz: «La concepción del mundo [mecanicista] se nos muestra mitología mecánica [como] la mitología animista de las religiones antiguas»^[90].

Einstein reconoció en varias ocasiones su deuda con Mach^[91]. La crítica a la aceptación (metafísica) de la existencia de un espacio fijo real «dentro del cual» se mueven las cosas abrió las puertas a su relatividad general.

En el espacio abierto por la lectura de la ciencia que hace Mach —que no da por sentada la realidad de nada excepto en la medida en que nos permita organizar los fenómenos—, se introduce Heisenberg, al eliminar la trayectoria del electrón y reinterpretarlo solo en los términos de sus manifestaciones.

En este mismo espacio se abre la posibilidad de la interpretación relacional de la mecánica cuántica, en la que los elementos útiles para describir el mundo son manifestaciones de sistemas físicos entre sí, no propiedades absolutas de cada sistema.

Bogdánov reprocha a Lenin convertir la «materia» en una categoría absoluta y ahistórica, «metafísica» en el sentido de Mach. Sobre todo le reprocha haber olvidado la lección de Engels y Marx: la historia es proceso, el conocimiento es proceso. El conocimiento científico crece, escribe Bogdánov, y la noción de materia propia de la ciencia de nuestro tiempo podría revelarse solo como una etapa intermedia en el camino del conocimiento. La realidad podría ser más compleja que el ingenuo materialismo de la física del siglo XVIII. Palabras proféticas: pocos años más tarde Werner Heisenberg abre las puertas al nivel cuántico de la realidad.

Igualmente asombrosa es la respuesta *política* de Bogdánov a Lenin. Lenin habla de certezas absolutas. Presenta el materialismo histórico de Marx y Engels como algo adquirido para siempre. Bogdánov señala que este dogmatismo ideológico no solo abandona la dinámica del pensamiento científico, sino que también conduce al dogmatismo político. La revolución rusa —argumenta Bogdánov en los turbulentos años que siguieron a esta revolución— creó una estructura económica nueva. Si la cultura está influenciada por la estructura económica, como había sugerido Marx, la sociedad posrevolucionaria entonces debe poder producir una cultura nueva, que ya no puede ser el marxismo ortodoxo concebido *antes* de la Revolución.

El programa político de Bogdánov consistía en dejar el poder y la cultura al pueblo, para alimentar la cultura nueva, colectiva, generosa augurada por el sueño revolucionario. El programa político de Lenin, por el contrario, era fortalecer la vanguardia revolucionaria, depositaria de la verdad, que tenía que *guiar* al proletariado. Bogdánov predijo que el dogmatismo de Lenin

congelaría la Rusia revolucionaria en un bloque de hielo que ya no evolucionaría, sofocaría las conquistas de la Revolución, se paralizaría. Palabras proféticas, también estas.

ħħ

«Bogdánov» es un seudónimo. Uno de los tantos que usaba para esconderse de la policía del zar. Nacido como Aleksandr Aleksándrovich Malinovski, segundo de seis hermanos, era hijo de un maestro de escuela de una aldea. Independiente y rebelde desde muy pequeño, la leyenda dice que las primeras palabras que pronuncia, a los 18 meses, durante una riña familiar, son: «¡Papá es estúpido!»^[92].

Gracias a un ascenso de su padre (que no era estúpido) a profesor de física en una ciudad con una escuela más grande, el pequeño Aleksandr tiene acceso a una biblioteca y a un rudimentario laboratorio de física. Obtiene una beca para asistir al instituto, del que recuerda: «La cerrazón mental y la malicia de los profesores me enseñaron a desconfiar de los poderosos y a rechazar toda autoridad»^[93]. Es la misma visceral intolerancia a la autoridad que guía la formación de Einstein, unos años más joven que Bogdánov.

Tras haber terminado la escuela de manera brillante, se matriculó en la Universidad de Moscú para estudiar ciencias naturales. Se adhiere a una organización estudiantil que ayuda a los compañeros de provincias lejanas. Se involucra en actividades políticas. Lo arrestan varias veces. Traduce *El Capital* de Marx al ruso. Trabaja en la propaganda política, escribe textos de economía para los obreros. Estudia medicina en Ucrania, es arrestado de nuevo y exiliado. En Zúrich entabla relación con Lenin. Es uno de los líderes del movimiento bolchevique, casi como un vicejefe. En los años siguientes a la polémica con Lenin, se le aparta de la dirección y, después de la Revolución, se le aleja de los centros del poder. Es universalmente respetado y continúa ejerciendo una fuerte influencia cultural, moral y política. En los años veinte y treinta, es el referente de la oposición subterránea «de izquierda», que trata de defender los logros de la Revolución de la autocracia bolchevique, hasta que Stalin aplasta a este grupo disidente.

El concepto clave de la producción teórica de Bogdánov es la noción de «organización». La vida social es la organización del trabajo colectivo. El conocimiento es la organización de la experiencia y de los conceptos. Podemos entender la realidad como organización, estructura. Bogdánov propone una imagen del mundo en los términos de una escala de formas de

organización cada vez más complejas: a partir de elementos mínimos que interactúan directamente, pasando por la organización de la materia en lo viviente, el desarrollo biológico de la experiencia individual organizada en individuos, hasta el conocimiento científico, que es, para Bogdánov, experiencia organizada colectivamente. Mediante la cibernética de Norbert Wiener y la teoría de los sistemas de Ludwig von Bertalanffy, estas ideas tendrán una influencia poco reconocida pero profunda sobre el pensamiento moderno, sobre el nacimiento de la cibernética, sobre la ciencia de los sistemas complejos, hasta el realismo estructural contemporáneo.

En la Rusia soviética, Bogdánov es profesor de economía en la Universidad de Moscú, dirige la Academia Comunista, escribe una novela de ciencia ficción, *Estrella Roja*, que se convierte en un rotundo éxito editorial. La novela describe una utópica sociedad libertaria en Marte que ha superado toda distinción entre hombres y mujeres, y utiliza un eficiente aparato estadístico para procesar datos económicos capaces de indicar a las fábricas lo que conviene producir y a los desempleados en qué fábrica encontrar trabajo, y así sucesivamente, dejando a todos, sin embargo, libres de elegir cómo vivir.

Se ocupa de la organización de centros para la cultura proletaria, donde una cultura nueva, solidaria, sea autónoma para florecer de forma independiente. Apartado por Lenin también de esta actividad, se dedica a la medicina. Médico de formación, había servido en el frente durante la Gran Guerra. Funda un instituto de investigación médica en Moscú y se convierte en uno de los pioneros de las técnicas de transfusión de sangre. En su ideología revolucionaria y colectivista, las transfusiones de sangre eran un símbolo de la posibilidad que tienen los hombres de colaborar y compartir.

Médico, economista, filósofo, naturalista, escritor de ciencia ficción, poeta, profesor, político, precursor de la cibernética y de la ciencia de la organización, pionero en transfusiones de sangre, revolucionario durante toda su vida, Aleksandr Bogdánov es uno de los personajes más complejos y fascinantes del mundo intelectual de principios del siglo xx. Sus ideas, demasiado radicales para ambos lados del Telón de Acero, se extendieron de modo soterrado y lento. Hasta el año pasado no se publicó en inglés su obra en tres volúmenes que en su momento dio lugar a la crítica de Lenin. Curiosamente se han encontrado más rastros de Bogdánov en la literatura: en él se inspira la novela *Proletkult* de Wu Ming^[94], y el gran personaje de Arkady Bogdánov en la espléndida trilogía *Marte Rojo, Marte Verde, Marte Azul*, de Kim Stanley Robinson^[95].

Fiel a sus ideales de compartir, Aleksandr Bogdánov morirá de una manera increíble en un experimento científico en el que intercambia su propia sangre con la de un joven enfermo de tuberculosis y malaria, intentando curarlo.

Hasta el final, el coraje para experimentar, el coraje de compartir, el sueño de la fraternidad.

NATURALISMO SIN SUSTANCIA

He divagado un poco. La perspectiva de Mach que permitió a Heisenberg dar el paso crucial es importante para entender lo que hemos descubierto del mundo con los cuantos. La controversia entre Lenin y Bogdánov saca a la luz el punto que genera los malentendidos.

El espíritu «antimetafísico» que promovió Mach ha demostrado ser una actitud de apertura: no tratamos de enseñarle al mundo cómo debería ser. Estamos, más bien, escuchando el mundo, para que él nos enseñe la mejor manera de pensarlo.

Cuando Einstein se opone a la mecánica cuántica con su «Dios no juega a los dados», Bohr le responde: «Deja de decirle a Dios qué tiene que hacer». Al margen de la metáfora: la naturaleza es más rica que nuestros prejuicios metafísicos. Tiene más fantasía que nosotros.

Uno de los filósofos que con más perspicacia ha examinado la teoría cuántica, David Albert, me preguntó una vez: «Carlo, ¿cómo puedes pensar que experimentos hechos con trozos de metal y vidrio en el laboratorio puedan tener tanto peso como para cuestionar nuestras convicciones metafísicas más profundas acerca de cómo es el mundo?». La pregunta me ha perseguido durante mucho tiempo. Sin embargo, al final la respuesta me parece simple: «¿Y cuáles son “nuestras convicciones metafísicas más profundas” sino *también estas*, solo algo que nos hemos acostumbrado a creer verdadero, precisamente manipulando piedras y trozos de madera?».

Nuestros prejuicios sobre cómo está hecha la realidad son fruto de nuestra experiencia, y nuestra experiencia es limitada. No podemos tomar por oro de ley las generalizaciones que hicimos al respecto en el pasado. Nadie lo dice mejor que Douglas Adams con su ironía: «El hecho de que vivamos en el fondo de un profundo pozo de potencial gravitacional, sobre la superficie de un planeta cubierto de gas que gira alrededor de una bola de fuego nuclear a solo 90 millones de millas de distancia, y pensemos que esto es “normal”, es

un indicio cierto de cuán distorsionadas tienden a estar nuestras perspectivas»^[96].

Esperamos tener que modificar nuestras provincianas perspectivas metafísicas si aprendemos algo más. Nos tomamos en serio las novedades que aprendemos sobre el mundo, aunque choquen con nuestros prejuicios sobre cómo es la realidad.

Esto me parece una actitud de renuncia a la arrogancia del conocimiento y, al mismo tiempo, de confianza en la razón y en su capacidad de aprender. La ciencia no es la Depositaria de la Verdad, pero se apoya en el convencimiento de que no hay Depositaria de la Verdad. El mejor camino para aprender es interactuar con el mundo tratando de entenderlo, reajustar nuestros esquemas mentales a lo que encontramos. Este respeto por la ciencia como fuente de nuestro saber sobre el mundo ha crecido hasta el naturalismo radical de filósofos como Willard Quine, para quien nuestro propio conocimiento es uno de los muchos procesos naturales y como tal debe ser estudiado.

Muchas «interpretaciones» de la mecánica cuántica como las que enumeramos en el capítulo II me parecen esfuerzos para comprimir los descubrimientos de la física fundamental dentro de los cánones de prejuicios metafísicos. ¿Estamos convencidos de que el mundo es determinista y de que el futuro y el pasado están unívocamente determinados por el estado actual del mundo? Entonces añadimos cantidades que determinan el pasado y el futuro, aunque sean indetectables. ¿Nos perturba ver que desaparece un componente de una superposición cuántica? Entonces agregamos un universo paralelo inobservable, donde este componente esté escondido. Y así sucesivamente. Creo que debemos adaptar nuestra filosofía a la ciencia, no al revés.

ħħ

Niels Bohr fue el padre espiritual de los jóvenes turcos, como los llamaban, que concibieron la teoría cuántica. Incitó a Heisenberg a ocuparse del problema, lo acompañó dentro del misterio de los átomos. Fue él quien medió en la pelea entre Heisenberg y Schrödinger. Formuló la forma de pensar la teoría que terminó en los libros de texto de física de todo el planeta. Quizá fue el científico que más se esforzó en entender todo lo que aquello implicaba. La legendaria discusión entre él y Einstein sobre la razonabilidad de la teoría duró años y llevó a los dos gigantes a aclarar sus posiciones, a retroceder.

Einstein siempre reconoció que la mecánica cuántica era un paso adelante en la comprensión del mundo: fue él quien propuso a Heisenberg, Born y Jordan para el Premio Nobel. Pero nunca estuvo convencido de la forma que tomó la teoría. En distintos momentos la acusó de ser inconsistente, de ser inverosímil, de estar incompleta.

Bohr defendió la teoría de la crítica de Einstein, a veces con razón, a veces incluso ganando discusiones con argumentos incorrectos^[97]. El pensamiento de Bohr no es claro, siempre es un poco oscuro. Pero sus intuiciones son muy agudas y han articulado gran parte de la comprensión actual de la teoría.

La intuición clave de Bohr se sintetiza en esta observación, a la que ya me he referido:

Mientras que en el campo de la física clásica las interacciones entre un objeto y el aparato de medición pueden despreciarse —o, si es necesario, podemos tenerlas en cuenta y compensarlas—, en física cuántica esta interacción es una parte inseparable del fenómeno. Por eso, la descripción no ambigua de un fenómeno cuántico requiere, en principio, incluir la descripción de todos los aspectos relevantes del dispositivo experimental^[98].

Estas palabras captan el aspecto relacional de la mecánica cuántica, pero dentro del ámbito limitado de un fenómeno medido en un laboratorio con instrumentos de medición. Por eso se prestan a un equívoco: pensar que solo estamos hablando de una situación en la que hay un ser particular que usa instrumentos para medir. Pensar que un ser humano, su mente o los números que usa representan un papel especial en la gramática de la naturaleza es una tontería.

Lo que es necesario agregar al párrafo de Bohr es la conciencia — desarrollada en el transcurso de un siglo de éxitos de la teoría— de que *toda* la naturaleza es cuántica y no existe nada especial en un laboratorio de física con un aparato de medición. No hay fenómenos cuánticos en el laboratorio y fenómenos no cuánticos en otros lugares: todos los fenómenos son, en última instancia, cuánticos. Abierta a cualquier fenómeno natural, la intuición de Bohr se convierte en:

Mientras antes pensábamos que las propiedades de cada objeto estaban determinadas incluso si descuidamos las interacciones en curso entre

este objeto y los demás, la física cuántica nos muestra que la interacción es parte inseparable de los fenómenos. La descripción no ambigua de cualquier fenómeno requiere incluir todos los objetos involucrados en la interacción en la que se manifiesta el fenómeno.

Y *esto* es radical, pero claro. Los fenómenos son acciones de una parte del mundo natural sobre otra parte del mundo natural. Confundir este descubrimiento con algo que tiene que ver con nuestra mente es el error de Lenin: en la polémica con Mach el dualista es él, que no sabe concebir los fenómenos si no son relativos a un sujeto trascendente.

La mente no tiene nada que ver con eso. «Observadores» especiales no desempeñan ningún papel real en la teoría. El punto central es más sencillo: no podemos separar las propiedades de los objetos de los objetos que interactúan con los que estas propiedades se manifiestan. Todas las propiedades (variables) de un objeto, en última instancia, lo son solo con respecto a otros objetos.

Un objeto aislado, tomado en sí mismo, independiente de cualquier interacción, no tiene un estado particular. A lo sumo podemos atribuirle una especie de disposición probabilística^[99] para manifestarse de una manera u otra. Pero incluso esto no es más que una anticipación de fenómenos futuros y un reflejo de fenómenos pasados y, con todo, es solo y siempre relativo a otro objeto.

La conclusión es radical. Acaba con la idea de que el mundo deba estar constituido por una sustancia que tiene atributos^[100] y nos obliga a pensar todo en términos de relaciones.

Esto, en mi opinión, es lo que hemos descubierto del mundo con los cuantos.

¿SIN FUNDAMENTO? NĀGĀRJUNA

Esta forma de entender el descubrimiento central de la mecánica cuántica tiene sus raíces en las intuiciones originales de Heisenberg y Bohr, pero comenzó a aclararse a mediados de los años noventa, con el nacimiento de la «interpretación relacional de la mecánica cuántica»^[101]. El mundo de la filosofía ha reaccionado a esta interpretación del descubrimiento de la física cuántica de manera variada. Diferentes escuelas de pensamiento han tratado de enmarcarla en diversos términos filosóficos. Bas van Fraassen, uno de los filósofos contemporáneos más brillantes, realizó un agudo análisis de ella en el marco de su «empirismo constructivo»^[102]. Michel Bitbol ha llevado a cabo una lectura neokantiana^[103]. F.-I. Pris, una lectura en el ámbito de un realismo contextual^[104]. Pierre Livet la ha leído en términos de una ontología de procesos^[105]. Mauro Dorato, en un lúcido artículo donde analiza varios aspectos filosóficos^[106], la incluye en el realismo estructural, según el cual la realidad está constituida por estructuras^[107]. Laura Candiotta ha defendido la misma tesis con excelentes argumentos^[108].

No entro aquí en el debate entre las corrientes de la filosofía contemporánea. Añado, no obstante, algún apunte y cuento una historia personal.

El descubrimiento de que cantidades que creíamos absolutas son, en cambio, relativas es un hilo que atraviesa la historia de la física. La relatividad de la velocidad discutida por Galileo es un ejemplo de ello. Los descubrimientos de Einstein se sitúan en la misma línea. La diferencia entre un campo eléctrico y un campo magnético es relacional: depende de cómo nos movemos. El valor del potencial eléctrico es relativo al potencial en otros lugares. Y así sucesivamente.

Más allá de la física, se puede encontrar el pensamiento relacional en todas las ciencias. En biología, las características de los sistemas vivos son comprensibles en relación con el medio ambiente, integrado por otros seres

vivos. En química, las propiedades de los elementos son la forma en que estos elementos interactúan con otros. En economía hablamos de relaciones económicas. En psicología, la personalidad individual existe en un contexto relacional. En estos y muchos otros casos entendemos las cosas (vida biológica, vida psíquica, compuestos químicos...) en su ser *en relación* con otras cosas.

En la historia de la filosofía occidental, la crítica a la noción de «entidad» tomada como fundamento de la realidad es recurrente. Se encuentra en las tradiciones filosóficas más dispares^[109], desde el «todo fluye» de Heráclito, hasta la contemporánea metafísica de las relaciones. Tan solo en el último año se han publicado libros de filósofos como *Una aproximación formal a la metafísica de las perspectivas*^[110] y *El relativismo de los puntos de vista: una nueva aproximación epistemológica basada en el concepto de punto de vista*^[111].

En filosofía analítica, el realismo estructural^[112] se basa en la idea de que las relaciones se dan antes que los objetos: para Ladyman, por ejemplo, la mejor manera de comprender el mundo es pensar en él como un conjunto de relaciones sin objetos que estén en relación^[113]. Desde una perspectiva neokantiana, Michel Bitbol ha escrito *Desde el interior del mundo: para una filosofía y una ciencia de las relaciones*^[114]. En Italia, Laura Candiotti ha publicado junto con Giacomo Pezzano un libro titulado *Filosofia delle relazioni*^[115].

Pero la idea es antigua. En Occidente se encuentra ya en los últimos diálogos de Platón. En *El sofista*, Platón se pregunta sobre el hecho de que las ideas atemporales deban entrar en relación con la realidad fenoménica para tener sentido y llega a poner en boca del personaje central del diálogo, el extranjero de Elea, esta famosa definición completamente relacional —muy poco eleática— de la realidad: «Digo, pues, que solo existe realmente lo que por naturaleza puede actuar sobre otra cosa o sufrir la más mínima acción por parte de otro, por insignificante que sea, e incluso si solo sucede una vez. Propongo, por tanto, esta definición de ser: no es más que capacidad de actuar (δύναμις)»^[116]. Como de costumbre, alguien podría susurrar: en una frase, Platón ya había dicho todo lo que había que decir...

Aunque este resumen mínimo y fragmentario basta para mostrar cómo la idea de que son las relaciones y las interacciones las que tejen el mundo, más que los objetos, es recurrente.

ħħ

Tomemos un objeto, la silla que veo frente a mí. Es real y de hecho está frente a mí: no hay duda. Pero ¿qué significa exactamente que ese conjunto sea un objeto, una entidad, una silla, real?

La noción de silla se define por su función: un mueble fabricado para sentarse. Presupone a la humanidad, que se sienta. No se trata de la silla en sí, se trata de cómo la concebimos. Esto no afecta al hecho de que exista la silla ahí, como objeto, con sus obvias características físicas, color, dureza, etc.

Estas características, por otra parte, también son relativas a nosotros. El color surge del encuentro de las frecuencias de la luz reflejada desde la superficie de la silla con los receptores oportunos de la retina. La mayoría de las otras especies animales no ven los colores como nosotros. Las propias frecuencias emitidas por la silla nacen de la interacción entre la dinámica de sus átomos y la luz que la ilumina.

La silla, sin embargo, es un objeto independiente de su color. Si la muevo, se mueve todo junto... En efecto, ni siquiera esto es del todo cierto: la silla está hecha de un asiento apoyado en un bastidor que se levanta si lo cojo con la mano. Es una unión de piezas. ¿Qué hace que esta unión constituya un objeto, una unidad? No mucho más que el papel que este conjunto tiene para nosotros ...

Si queremos buscar la silla en sí, independientemente de sus relaciones con el exterior, y en particular con nosotros, no la encontramos.

No hay nada misterioso en esto: el mundo no está dividido en entidades independientes. Somos nosotros los que lo dividimos en objetos a nuestra conveniencia. Una cordillera no se separa en pequeñas montañas: somos nosotros quienes la dividimos en partes que nos afectan. Innumerables definiciones nuestras —si no todas— son relacionales: una madre lo es porque hay un hijo, un planeta es tal porque gira alrededor de una estrella, un depredador lo es porque existen las presas, una posición es tal en relación con otra cosa. El tiempo también está definido por relaciones^[117].

Todo esto no es nuevo. Pero a la física se le ha pedido que proporcione una base firme sobre la cual apoyar estas relaciones: una realidad que subyazca o sostenga este mundo de relaciones. La física clásica, con su idea de materia que se mueve en el espacio, caracterizada por cualidades primarias (la forma) subyacentes a las cualidades secundarias (el color), parecía capaz de representar este papel: proporcionar los primeros ingredientes del mundo, que podamos concebir como existentes por sí mismos, en la base del juego de combinaciones y relaciones.

El descubrimiento de las propiedades cuánticas del mundo es el descubrimiento de que la materia física no es capaz de desempeñar este papel. La física fundamental sí describe una gramática elemental y universal, pero no es una gramática constituida por simple materia en movimiento, con cualidades primarias propias. La relacionalidad que impregna al mundo se reduce a esta gramática elemental. No podemos describir ninguna entidad elemental sino en el contexto de aquello con lo que está interactuando.

Esto nos deja sin un punto de apoyo. Si la materia portadora de propiedades definidas y unívocas no constituye la sustancia elemental del mundo, si el sujeto del conocimiento es una parte de la naturaleza, ¿cuál es la sustancia elemental del mundo?

¿En qué podemos anclar nuestra concepción del mundo? ¿Por dónde empezar? ¿Qué es fundamental?

La historia de la filosofía occidental es en gran medida un intento de responder a la pregunta de qué es lo fundamental. Una búsqueda del punto de partida del que derivar el resto: la materia, Dios, el espíritu, los átomos y el vacío, las formas platónicas, las formas *a priori* del conocimiento, el sujeto, el Espíritu Absoluto, los momentos elementales de consciencia, los fenómenos, la energía, la experiencia, las sensaciones, el lenguaje, las proposiciones verificables, los datos científicos, las teorías falsificables, los círculos hermenéuticos, las estructuras... Una larga lista de propuestas de fundamento ninguna de las cuales ha llegado nunca a convencer a todos.

El intento de Mach de tomar las «sensaciones», o «elementos» como cimientos inspiró a científicos y filósofos, pero al final no me parece más convincente que otros. Mach truena contra la metafísica, pero de hecho elabora su propia metafísica, más ligera, más flexible, pero metafísica al fin y al cabo: elementos y funciones. Un realismo de los fenómenos, o un «empirismo realista»^[118].

En mis intentos por dar sentido a los cuantos, me rodeé de los textos de los filósofos en busca de una base conceptual para comprender la extraña imagen del mundo que ofrece esta increíble teoría. Encontré sugerencias muy atractivas, críticas agudas, pero nada totalmente convincente para mí.

Un día me topé con un texto que me dejó estupefacto, y cierro este capítulo, que no puede llegar a conclusiones, con el relato de tal encuentro.

ħħ

No llegué a él por casualidad: me había pasado en varias ocasiones, hablando de cuantos y de su naturaleza relacional, que algunas personas me decían: «¿Has leído a Nāgārjuna?».

Cuando me preguntaron por enésima vez: «¿Has leído a Nāgārjuna?», decidí leerlo. Se trata de un texto poco conocido en Occidente, pero no es un texto menor: es uno de los puntos de referencia de la filosofía india, y solo por mi lamentable ignorancia del pensamiento asiático, característica de un occidental, no lo conocía. Su título es una de esas palabras indias imposibles: *Mūlamadhyamakakārikā*, traducida de muchas maneras, por ejemplo, *Versos sobre los fundamentos del camino medio*. Lo leí en una traducción comentada por un filósofo analítico americano^[119]. Me dejó una profunda impresión.

Nāgārjuna vivió en el siglo II. Sobre su texto existen innumerables comentarios y se han estratificado interpretaciones y exégesis. El interés de los textos tan antiguos está, precisamente, en la estratificación de las lecturas que nos ofrecen, enriquecidas con distintos niveles de significado. Lo que nos interesa de verdad de los textos antiguos no es lo que el autor quiso decir inicialmente, es lo que el texto nos puede sugerir hoy.

La tesis central del libro de Nāgārjuna es simplemente que no hay cosas que tengan existencia en sí mismas, independientes de cualquier otra cosa. La afinidad con la mecánica cuántica es inmediata. Es obvio que Nāgārjuna no sabía y no podía saber nada de mecánica cuántica, ese no es el punto. La cuestión es que los filósofos nos ofrecen formas originales de pensar el mundo, y podemos usarlas si nos resultan útiles. La perspectiva que nos ofrece Nāgārjuna tal vez hace que sea un poco más fácil pensar en el mundo cuántico.

Si nada tiene existencia en sí mismo, todo existe solo en dependencia de otra cosa, en relación con algo. El término técnico utilizado por Nāgārjuna para describir la falta de existencia independiente es «vaciedad» (*śūnyatā*): las cosas están «vacías» en el sentido de que no tienen realidad autónoma, existen gracias a, en función de, con respecto a, desde la perspectiva de otra cosa.

Si miro un cielo nublado —por poner un ejemplo ingenuo—, puedo ver en él un castillo y un dragón. ¿Existen realmente un dragón y un castillo allí en el cielo? Por supuesto que no: el castillo y el dragón nacen del encuentro entre la aparición de las nubes y las sensaciones y pensamientos de mi cabeza; en sí mismos son entidades vacías, no existen. Hasta aquí es fácil. Pero Nāgārjuna sugiere que también las nubes, el cielo, las sensaciones, los pensamientos y

mi propia cabeza son cosas que nacen del encuentro entre otras cosas: entidades vacías.

¿Y yo cuando veo una estrella? ¿Existo? No, yo tampoco. ¿Quién ve entonces la estrella? Nadie, dice Nāgārjuna. Ver la estrella es una componente de ese conjunto que convencionalmente llamo mi yo. «Lo que articula el lenguaje no existe. El círculo de pensamientos no existe»^[120]. No hay ninguna esencia última o misteriosa que comprender, que sea la verdadera esencia de nuestro ser. «Yo» no es más que el vasto e interconectado conjunto de fenómenos que lo constituyen, cada uno dependiente de otra cosa. Siglos de especulación occidental sobre el tema y sobre la conciencia se desvanecen como escarcha en el aire de la mañana.

Nāgārjuna distingue dos niveles, al igual que hace mucha filosofía y mucha ciencia: la realidad convencional, aparente, con sus aspectos ilusorios o prospectivos, y la realidad última. Pero lleva esta distinción a una dirección inesperada: la realidad última, la esencia, es ausencia, vaciedad. No existe.

Si toda metafísica busca una sustancia primera, una esencia de la que todo dependa, el punto de partida de donde después derivar el resto, Nāgārjuna sugiere que la sustancia última, el punto de partida... no existe.

Hay tímidas intuiciones en líneas similares en la filosofía occidental. Pero la perspectiva de Nāgārjuna es radical. No se niega la existencia diaria convencional; al contrario, se afirma en toda su complejidad, con sus niveles y facetas. Puede ser estudiada, explorada, analizada, reducida a términos más básicos. Pero no tiene sentido, sugiere Nāgārjuna, buscar el sustrato último. La diferencia con el realismo estructural contemporáneo, por ejemplo, me parece clara: podemos imaginar a Nāgārjuna agregando hoy a su libro un pequeño capítulo titulado «También las estructuras están vacías». Existen solo en cuanto pensadas para organizar otra cosa. En su idioma: «No soy ni precedente de los objetos, ni no precedente de los objetos, ni ambas cosas, ni, finalmente, lo uno ni lo otro»^[*8].

La ilusoriedad del mundo, el *saṃsāra*, es un tema general del budismo; reconocerla es alcanzar el *nirvāṇa*, la liberación y la dicha. Para Nāgārjuna, *saṃsāra* y *nirvāṇa* son lo mismo: ambos vacíos de existencia propia. Inexistentes.

Entonces, ¿la única realidad es el vacío? ¿Esta es la realidad última? No, escribe Nāgārjuna en el capítulo más vertiginoso de su libro, cada perspectiva existe solo en dependencia de otro, nunca es la realidad última, y esto también se aplica a la perspectiva de Nāgārjuna: también la vaciedad está vacía de

esencia, es convencional. Ninguna metafísica sobrevive. La vaciedad está vacía.

Nāgārjuna nos da un instrumento conceptual formidable para pensar en la relacionalidad de los cuantos: se puede pensar en la interdependencia sin esencias autónomas que después entran en relación. Más aún, la interdependencia —este es el tema clave de Nāgārjuna *requiere* olvidar las esencias autónomas.

La larga búsqueda de la «sustancia última» de la física ha pasado a través de la materia, moléculas, átomos, campos, partículas elementales... y naufraga en la complejidad relacional de la teoría cuántica de campos y de la relatividad general.

¿Es posible que un antiguo pensador indio nos ofrezca un instrumento conceptual para sacarnos del atolladero?

h̄h

Se aprende siempre de los demás, de lo diferente. A pesar de milenios de diálogo ininterrumpido, Oriente y Occidente aún tienen cosas que decirse. Como en los mejores matrimonios.

La fascinación del pensamiento de Nāgārjuna va más allá de las cuestiones de la física moderna. Su perspectiva tiene algo de vertiginoso. Coincide con lo mejor de mucha filosofía occidental, clásica y reciente. Con el escepticismo radical de Hume, con el desenmascaramiento de las preguntas mal formuladas que nos permite el pensamiento de Wittgenstein. Pero me parece que Nāgārjuna no cae en la trampa en la que se enreda mucha filosofía al postular puntos de partida que siempre acaban por revelarse a la larga poco convincentes. Habla de la realidad, de su complejidad y de su comprensibilidad, pero nos defiende de la trampa conceptual de quererle encontrar un fundamento último.

Lo suyo no es extravagancia metafísica, es sobriedad: reconocer que la pregunta sobre cuál sea el fundamento último de todo es una pregunta que, simplemente, podría no tener sentido.

Esto no cierra la posibilidad de investigar. Al contrario, la libera. Nāgārjuna no es un nihilista que niegue la realidad del mundo, ni tampoco un escéptico que diga que no podemos conocer nada de la realidad. El mundo de los fenómenos es un mundo que cada vez podemos investigar y comprender mejor. Encontrar en él características generales. Pero es un mundo de

interdependencias y de contingencias, no un mundo que valga la pena tratar de derivar de un Absoluto.

Creo que uno de los grandes errores que cometen los seres humanos cuando intentan comprender algo es querer certezas. La búsqueda del conocimiento no se alimenta de certezas: se alimenta de una ausencia radical de certezas. Gracias a la lúcida conciencia de nuestra ignorancia, estamos abiertos a la duda y podemos aprender cada vez mejor. Esta ha sido siempre la fuerza del pensamiento científico, el pensamiento de la curiosidad, de la rebelión, del cambio. No hay soporte, ni punto fijo final, filosófico o metodológico, en el que fijar la aventura del saber.

Son numerosas las interpretaciones diferentes del texto de Nāgārjuna. La multiplicidad de lecturas posibles atestigua la vitalidad y la capacidad de hablarnos que tiene un texto antiguo. Lo que nos interesa, de nuevo, no es lo que pensara el monje de un monasterio en la India hace casi dos milenios, eso es cosa suya. Lo que nos importa ahora es la fuerza de las ideas que emana hoy de las líneas que dejó; importa que estas, enriquecidas por generaciones de comentarios, puedan abrir nuevos espacios de pensamiento, cruzándose con nuestra cultura y nuestro saber. La cultura es esto: un diálogo interminable que nos enriquece alimentándonos con experiencias, conocimiento y, sobre todo, intercambios.

No soy filósofo, soy físico: un *vil mecánico*. A este *vil mecánico*, que se ocupa de los cuantos, Nāgārjuna le enseña que puedo pensar las manifestaciones de los objetos físicos sin tener que preguntarme cuál es el objeto físico independientemente de sus manifestaciones.

Pero la vaciedad de Nāgārjuna también alienta una actitud ética muy tranquilizadora: el hecho de comprender que no existimos como entidad autónoma nos ayuda a liberarnos del apego y del sufrimiento. Precisamente por su impermanencia, por la ausencia de cualquier Absoluto, la vida tiene sentido y es valiosa.

A mí, como ser humano, Nāgārjuna me enseña la serenidad, la ligereza y la belleza del mundo: solo somos imágenes de imágenes. La realidad, incluidos nosotros mismos, no es más que un velo fino y frágil, tras el cual... no hay nada.

VI. «PARA LA NATURALEZA ES UN PROBLEMA YA RESUELTO»

Donde divago un poco. Me pregunto dónde habitan los pensamientos. Y si la nueva física no cambia algo los términos de la vexata quaestio.

¿MATERIA SIMPLE?

So, however mysterious the mind-body problem may be for us, we should always remember that it is a solved problem for nature^[121].

De vez en cuando paso unas horas en internet leyendo o escuchando con tristeza la montaña de estupideces que se cobija bajo el adjetivo «cuántico». Medicina cuántica, teorías holísticas cuánticas de todo tipo, espiritualismos cuánticos misticistas y así sucesivamente, un increíble desfile de tonterías.

Las peores son las necedades médicas. En ocasiones recibo algún mail alarmado: «Mi hermana acude a un médico cuántico, ¿qué piensa, profesor?». Se me ocurren todos los males del mundo, intente poner a su hermana a salvo lo antes posible. Cuando se trata de medicina, debería intervenir la ley. Todo el mundo tiene derecho a buscar cura como le plazca, pero nadie tiene derecho a engañar al prójimo con una desfachatez que puede costar la vida.

Alguien me escribe: «Tengo la sensación de haber vivido ya este momento. ¿Es un efecto cuántico, profesor?». ¡Santo Dios, no! ¿Qué tiene que ver la complejidad de nuestra memoria y de nuestros pensamientos con los cuantos? ¡Nada, absolutamente nada! La mecánica cuántica no tiene nada que ver con los fenómenos paranormales, medicinas alternativas, ondas que nos arrastran y vibraciones misteriosas.

¡Por favor!, me encantan las buenas vibraciones. También yo llevaba el pelo largo sujeto por una cinta roja, y de joven canté ¡Om! sentado con las piernas cruzadas justo al lado de Allen Ginsberg. Pero la delicada complejidad de la relación emocional entre nosotros y el universo tiene que ver con las ondas Ψ de la teoría cuántica tanto como una cantata de Bach con el carburador de mi coche.

El mundo es lo bastante complejo para dar cuenta de la magia de la música de Bach, de las buenas vibraciones y de nuestra profunda vida espiritual sin necesidad alguna de recurrir a rarezas cuánticas.

O viceversa, si preferís, la realidad cuántica es mucho *más* extraña que todos los delicados, misteriosos, encantadores, intrincados aspectos de nuestra realidad psicológica y de nuestra vida espiritual. Tampoco me parecen nada convincentes los intentos de utilizar la mecánica cuántica para explicar fenómenos complejos que entendemos poco, como el funcionamiento de la mente.

ħħ

Sin embargo, aunque está lejos de nuestra experiencia cotidiana directa, el descubrimiento de la naturaleza cuántica del mundo es demasiado radical para no tener *alguna* relevancia en los grandes problemas abiertos, como la naturaleza de la mente, por ejemplo. No porque la mente u otros fenómenos que aún entendemos poco sean fenómenos cuánticos, sino porque el descubrimiento de los cuantos cambia los términos de la cuestión, porque cambia nuestra concepción del mundo físico y de la materia.

La convicción sobre la que se apoya este libro es que nosotros, criaturas humanas, somos parte de la naturaleza. Somos un caso particular entre muchos fenómenos naturales, ninguno de los cuales escapa a las grandes leyes naturales que conocemos. Pero quién no se ha preguntado alguna vez: «Si el mundo está hecho de simple materia, partículas en movimiento por el espacio, ¿cómo es posible que existan mis pensamientos, mis percepciones, mi subjetividad, el valor, la belleza, el significado?». ¿Cómo produce la «simple materia» colores, emociones, el sentimiento vivo y ardiente que tengo de que existo? ¿Cómo sabe, aprende, se emociona, se asombra, lee un libro y llega a preguntarse cómo funciona la propia materia?

La mecánica cuántica no nos da respuestas directas a estas preguntas. No veo ninguna explicación cuántica para subjetividad, percepciones, inteligencia, conciencia u otros aspectos de la vida mental. Los fenómenos cuánticos intervienen en la dinámica de los átomos, de los fotones, de los impulsos electromagnéticos y de muchas otras estructuras microscópicas que dan lugar a nuestro cuerpo, pero no hay nada específicamente cuántico que nos ayude a comprender qué son los pensamientos, las percepciones o la subjetividad. Estos son aspectos que involucran el funcionamiento del cerebro a gran escala, o sea, allí donde la interferencia cuántica se pierde en el ruido de la complejidad. La teoría cuántica no nos ayuda directamente a comprender la mente.

Pero *indirectamente* nos enseña algo relevante, porque altera los términos de la pregunta.

Nos enseña que la fuente de confusión podría también residir en intuiciones erróneas que tenemos no solo sobre la naturaleza de la consciencia (donde con seguridad nuestras intuiciones son engañosas), sino también, y de manera crucial, sobre qué es y cómo funciona la «materia simple».

Es difícil imaginar cómo podemos estar hechos los seres humanos *solo* de pequeñas piedras que rebotan unas contra otras. Pero, si miramos de cerca, una piedra es un mundo vasto: una galaxia de entidades cuánticas rutilantes donde fluctúan probabilidades e interacciones. Por otro lado, lo que llamamos «piedra» es una estratificación de significados en nuestros pensamientos, evocados por la interacción entre nosotros y esa galaxia de puntiformes eventos físicos relativos. La «materia simple» se divide en estratos complejos y de pronto nos parece menos simple. La interrupción entre la materia simple y el evanescente desenmarañamiento de nuestro espíritu se muestra, tal vez, un poco menos infranqueable.

Si el grano fino del mundo está hecho de partículas materiales que solo tienen masa y movimiento, parece difícil de reconstruir a partir de este grano amorfo la complejidad que somos nosotros, que percibimos y pensamos. Pero si el grano fino del mundo está mejor descrito en términos de relaciones, si ninguna cosa tiene propiedades sino en relación con otras, quizá en *esta* física podemos encontrar mejor elementos capaces de combinarse de manera comprensible para servir de base de esos fenómenos complejos que llamamos nuestras percepciones y nuestra consciencia. Si el mundo físico está tejido a partir de la urdimbre sutil de imágenes de espejos que se reflejan en otros espejos, sin el fundamento metafísico de una sustancia material, tal vez sea más fácil reconocernos como parte de él.

hh

Algunos han sugerido que hay algo psíquico en todas las cosas. Argumentan que puesto que somos conscientes, y estamos hechos de protones y electrones, los electrones y protones deberían contar ya con una especie de protoconsciencia.

No me parecen convincentes tal «pansiquismo» ni semejante argumento. Es como decir que como una bicicleta está hecha de átomos, cada átomo debe ser protociclista. Nuestra vida mental requiere la existencia de neuronas, de los órganos de los sentidos, de nuestro cuerpo, del complejo procesamiento de

información que tiene lugar en nuestro cerebro; con toda evidencia, sin todo esto nuestra vida mental no existe.

Pero no es necesario atribuir una protoconciencia a los sistemas elementales, para sortear el hielo de la materia simple. Es suficiente haber observado que el mundo se describe mejor mediante variables relativas y sus correlaciones. Tal vez esto nos permita salir de la prisión de la radical oposición entre objetividad de la materia y vida mental. La rígida distinción entre el mundo mental y el mundo físico se atenúa. Tratemos de considerar los fenómenos mentales y los fenómenos físicos, ambos, como fenómenos naturales: ambos productos de interacciones entre partes del mundo físico.

En este, que es el último capítulo del libro antes de la conclusión, intento, en voz baja, hacer algunas sugerencias en esta difícil dirección.

¿QUÉ SIGNIFICA «SIGNIFICADO»?

Nosotros, humanos tontorrones, vivimos en un mundo de significados. Las palabras de la lengua «significan». «Gato» significa un gato. Nuestros pensamientos «significan», suceden en nuestro cerebro, pero si pensamos en un tigre, nos referimos a algo que no está en nuestro cerebro, el tigre puede estar en el mundo. Si tú, lector, estás leyendo este libro, ves las imágenes de las líneas blancas y negras en el papel o en una pantalla. «Ver» es algo que sucede en tu cerebro, sin embargo, ves las líneas «fuera» de ti. En tu cerebro se desarrolla un proceso que se refiere a las líneas sobre el papel. Estas, a su vez tienen significado: se refieren a mis pensamientos mientras escribo, que a su vez se refieren a un imaginario tú que está leyendo...

Un nombre técnico para el hecho de «referirse a algo» de nuestros procesos mentales (promovido por el filósofo y psicólogo alemán Franz Brentano) es «intencionalidad». La intencionalidad es un aspecto importante de la noción de significado y gran parte de nuestra vida mental. Existe una estrecha relación entre lo que sucede en los pensamientos y lo que sucede de algún modo «fuera» de los pensamientos, y que los pensamientos pueden *significar*. Hay una estrecha relación entre la palabra «gato» y un gato. Entre una señal de tráfico y lo que *significa* la señal.

No parece haber nada de esto en el mundo natural. Un hecho físico por sí mismo no significa nada. Un cometa viaja respetando las leyes de Newton, pero sin leer las señales de tráfico...

Si somos parte de la naturaleza, este mundo de significados tiene que poder emerger del mundo físico. ¿Cómo? ¿Qué es el mundo de los significados, en términos puramente físicos?

Dos conceptos también nos acercan a una respuesta, si bien ninguno de los dos por sí solo es suficiente para entender cuál es el significado en términos físicos: *información* y *evolución*.

ħħ

En la teoría de la información de Shannon, *información* es solamente contar el número de posibles estados de algo. Un pendrive USB tiene una cantidad de información, expresada en bits o gigabytes, que nos dice de cuántas formas diferentes puede organizarse su memoria. El número de bits no sabe qué *significa* lo que está en la memoria, ni siquiera sabe si cuanto hay en la memoria *significa* algo o es ruido.

Shannon también define la noción de «información relativa», que es la que utilicé en los capítulos precedentes: una medida de la correlación física entre dos variables. Dos variables, recuerdo, tienen «información relativa» si pueden estar en menos estados que el producto del número de estados en que puede estar cada una. El reverso de las dos monedas pegadas en la misma lámina de plástico rígido está correlacionado: las dos monedas «tienen información una sobre la otra».

Esta noción de «información relativa» es puramente física. También es fundamental para la descripción del mundo físico, si tenemos en cuenta su estructura cuántica: la información relativa es la consecuencia directa de las interacciones que tejen el mundo. La información relativa conecta dos cosas diversas como hace el significado. Pero no es suficiente para hacernos entender en términos físicos qué es el significado: el mundo rebosa de correlaciones, pero la gran mayoría de estas no *significa* nada. Para comprender qué es el significado falta algo.

El descubrimiento de la *evolución* biológica, por otro lado, nos ha permitido construir puentes entre conceptos que usamos cuando hablamos de cosas animadas y conceptos que usamos para el resto de la naturaleza. En particular, ha aclarado el origen biológico y, en última instancia, físico, de nociones como «utilidad» y «relevancia».

La biosfera está formada por estructuras y procesos *útiles* para la continuación de la vida: tenemos pulmones *para* respirar y ojos *para* ver. El descubrimiento de Darwin supone que entendemos por qué existen estas estructuras invirtiendo el orden de causa-efecto entre su utilidad y su existencia: la función (ver, comer, respirar, digerir... contribuir a la vida) no es el objetivo de las estructuras. Es lo contrario: los seres vivos sobreviven porque existen estas estructuras. No amamos para vivir, vivimos porque amamos.

La vida es un proceso bioquímico que se desarrolla en la superficie de la Tierra y disipa la abundante energía libre (baja entropía) que rebosa de la luz del Sol que inunda el planeta. Está constituida por individuos que interactúan con su entorno, formados por estructuras y procesos que se autorregulan,

manteniendo equilibrios dinámicos que persisten en el tiempo. Pero las estructuras y los procesos no están allí *para que* los organismos sobrevivan y se reproduzcan. Es lo contrario: los organismos vivos sobreviven y se reproducen *porque* sucedió que estas estructuras crecieron gradualmente, y les ocurrió que sobrevivieron y se reprodujeron. Se reproducen y pueblan la Tierra *porque* son funcionales.

La idea se remonta al menos a Empédocles, como subraya Darwin en su precioso libro^[122]. Aristóteles nos cuenta, en la *Física*, que Empédocles sugirió que la vida es el resultado de la formación casual de estructuras, debido a la combinación normal de las cosas. La mayoría de estas estructuras perecen muy rápido, excepto las que tienen características para sobrevivir: estos son los organismos vivos^[123]. Aristóteles objeta que vemos nacer a los terneros bien estructurados, no vemos que nazcan de cualquier forma y sobrevivan solo los adecuados^[124]. Pero hoy en día ha quedado claro que, trasladada de los individuos a las especies y enriquecida por cuanto hemos aprendido sobre herencia y genética, la idea de Empédocles es esencialmente correcta.

Darwin aclaró la importancia fundamental de la variabilidad de las estructuras biológicas, lo que permite seguir explorando el ilimitado espacio de las posibilidades y de la selección natural, que da acceso a regiones cada vez más grandes de este espacio, donde se encuentran estructuras y procesos todavía más capaces, *juntos*, de persistir. La biología molecular ilustra el mecanismo concreto con el que esto sucede.

El punto que me interesa aquí es que haber entendido todo esto no quita sentido a nociones como «utilidad» y «relevancia». Al contrario, aclara su origen, la forma en que están arraigadas en el mundo físico: son las características de esos fenómenos naturales que *de hecho* dan lugar a la supervivencia.

Estas ideas son hermosas, pero tampoco nos explican cómo puede surgir del mundo natural la noción de «significado». «Significado» tiene connotaciones intencionales que no parecen conectadas a variabilidad y selección. El significado de «significado» debe basarse en otra cosa.

ħħ

Sin embargo, se produce un pequeño milagro cuando las dos ideas, información y evolución, se combinan.

La información desempeña varios roles en biología. Estructuras y procesos se reproducen iguales a sí mismos por cientos de millones, en ocasiones miles de millones, de años, alterados solo por la lenta deriva de la evolución. El principal medio de esta estabilidad son las moléculas de ADN, que se mantienen muy similares a sus antepasadas. Esto implica que existen *correlaciones*, es decir, *información relativa*, a través de eones de tiempo. Las moléculas de ADN codifican y transmiten la información. Esta estabilidad informática es quizá el aspecto característico de la materia viva.

Pero hay una segunda forma de que la información sea relevante en biología: en las correlaciones entre lo interno y lo externo de un organismo. La mayor parte de estas correlaciones no tienen relevancia para el organismo. El estado de una molécula en mi cerebro está correlacionado con una estrella lejana a causa de un rayo cósmico absorbido: esta correlación es irrelevante para mi vida. Sin embargo, existen correlaciones relevantes para la vida en el sentido, mencionado anteriormente, en el que la teoría de Darwin permite definir la relevancia: favorecen la supervivencia y la reproducción.

Veo una piedra que está cayendo en mi dirección^[125]. Si me muevo, sobrevivo. El hecho de que me mueva no es misterioso, se explica por la teoría de Darwin: los que no se movían morían aplastados, yo soy un descendiente de los que se movieron. Pero para poder moverme, mi cuerpo necesita saber de alguna manera que la piedra se me viene encima. Para que lo sepa, debe existir una *correlación* física entre una variable física dentro de mí y el estado físico de la piedra. Esta correlación se produce, por supuesto, porque el sistema visual hace exactamente esto: correlaciona el entorno circundante con procesos neuronales en el cerebro. Entre exterior e interior se dan todo tipo de correlaciones, pero *esta* tiene una característica peculiar: si no existiera o no fuera apropiada, yo moriría golpeado por la piedra. La correlación entre exterior e interior que une el estado de la piedra a las neuronas de mi cerebro es directamente *relevante* en el sentido darwiniano: su presencia o ausencia influye en mi supervivencia.

Una bacteria dispone de una pared celular capaz de detectar gradientes de glucosa de la que se alimenta la bacteria, cilios capaces de hacerla nadar y un mecanismo bioquímico que la dirige en la dirección en la que hay más glucosa. La bioquímica de la pared determina una correlación entre la distribución de glucosa y el estado bioquímico interno, que a su vez determina la dirección hacia la que nada la bacteria. La correlación es relevante: si se interrumpe, disminuye la posibilidad de supervivencia de la bacteria, que se queda sin alimento. Es una correlación física con valor de supervivencia.

La existencia de tales correlaciones relevantes indica la posible fuente física de la noción de significado: la información relativa relevante. Información relativa en el sentido (físico) de Shannon, relevante en el sentido (biológico, por tanto en última instancia también físico) de Darwin. Este es un sentido preciso en el que podemos decir que su información sobre la concentración de azúcar tiene *significado* para la bacteria. O que el pensamiento del tigre en mi cerebro, es decir, de la correspondiente configuración neuronal, *significa* precisamente el tigre.

Definida así, la noción de información relevante es puramente física, pero es intencional en el sentido de Brentano. Es una conexión entre algo (interno) y algo más (generalmente externo). Lleva consigo, por supuesto, una noción de «verdad» o «corrección», puesto que en cualquier situación particular, el estado interno de la bacteria puede codificar el gradiente de glucosa correctamente o no. Hay, por tanto, muchos de los ingredientes necesarios para caracterizar el «significado».

Es obvio que hablamos de «significado» en contextos muy variados, que en general no tienen relevancia directa para la supervivencia. Un poema está lleno de significado, pero leerlo no parece ayudar a mis posibilidades de sobrevivir o reproducirme (quizá un poco sí: una chica podría enamorarse de mi espíritu romántico...). El espectro completo de lo que llamamos «significado» en lógica, psicología, lingüística, ética, etc., no se reduce a la información *directamente* relevante. Sin embargo, este rico espectro se ha desarrollado en la historia biológica y cultural de nuestra especie *a partir de* algo que tiene raíces físicas, a lo que se han añadido las articulaciones propias de nuestra enorme complejidad neuronal, social, lingüística, cultural, etc. Este algo es la información relativa relevante.

La noción de información relevante, en otras palabras, no es toda la cadena entre la física y el significado en el mundo mental, sino que es el primer eslabón, el difícil. Es el primer paso entre el mundo físico, donde no existe nada que corresponda a la noción de significado, y el mundo de la mente, cuya gramática se compone de significados y señales que tienen significado. Añadiendo las articulaciones y los contextos que nos caracterizan —el cerebro y su capacidad para manipular conceptos, es decir, procesos que tienen significado, sus integraciones emocionales, su capacidad de relacionarse con los procesos mentales ajenos, y recurrentemente con los propios, el lenguaje, la sociedad, las normas, etc.— obtenemos algo que se acerca cada vez más a las distintas nociones, más completas, de significado.

Una vez encontrado el primer vínculo entre nociones físicas y significados, el resto, en efecto, sigue de forma recurrente: cualquier correlación que contribuya a la información *directamente* relevante es también significativa, y así sucesivamente. Es evidente que la evolución se ha valido de todo esto.

Por un lado, estas observaciones aclaran por qué podemos hablar de significado solo en el ámbito de procesos biológicos o de origen biológico. Por otro lado, arraigan la noción de significado en el mundo físico: es uno de sus muchos aspectos. Nos muestran que la noción de significado no es externa al mundo natural. Podemos hablar de intencionalidad sin salir del contexto del naturalismo. El significado correlaciona algo con otra cosa, es un vínculo físico y desempeña un papel biológico. Es lo que hace que un elemento de la naturaleza sea un signo de algo más, relevante para nosotros.

Y al fin llego al meollo: si pensamos en el mundo físico en términos de simple materia con propiedades variables, las correlaciones entre estas propiedades se convierten en accesorias. Parece necesario agregar algo ajeno a la materia para poder hablar de ella. Pero el descubrimiento de la naturaleza cuántica de la realidad es el descubrimiento de que la naturaleza del mundo físico es en sí misma comprensible como una red de correlaciones: como información recíproca, precisamente en el sentido físico de correlación. Las cosas de la naturaleza no son conjuntos de elementos aislados que tienen cada uno sus propiedades, con desdeñoso individualismo. Significado e intencionalidad, entendidos como antes, son solo casos especiales, en el campo biológico, de la ubicuidad de las correlaciones. Existe continuidad entre el mundo de los significados de nuestra vida mental y el mundo físico. Uno y otro son relaciones.

La distancia entre el modo en que pensamos el mundo físico y el modo en que pensamos este aspecto del mundo mental disminuye.

ħħ

El hecho de que un objeto tenga *información* sobre otro objeto puede significar cosas distintas, según el contexto. La existencia de información relativa entre dos objetos significa que si observo los dos objetos, encuentro correlaciones: «Tú tienes información sobre el color del cielo de hoy» significa que si te pregunto el color del cielo y luego miro al cielo, constato que lo que me dijiste coincide con lo que veo, por tanto, existe una correlación entre tú y el cielo. Que dos objetos (tú y el cielo) tengan

información relativa es, por tanto, en última instancia, algo que afecta a un tercer objeto (yo que os observo). La información relativa, recuerdo, es un paso a tres, como el *entrelazamiento*.

Pero si un objeto (tú) es lo bastante complejo como para hacer cálculos y predicciones (como un animal, un ser humano, una máquina construida por nuestra tecnología...), el hecho de «tener información» en el sentido dicho implica *también* tener recursos para hacer previsiones sobre el resultado de sucesivas interacciones: si tienes información sobre el color del cielo y cierras los ojos, puedes *prever* lo que verás al reabrir los ojos, antes incluso de mirar. Tienes información sobre el color del cielo en un sentido mucho más fuerte que la palabra «información»: sabes qué verás antes de ver.

En otras palabras, la noción básica de información relativa es la estructura física sobre la que se apoyan todas las nociones de informaciones más complejas, que tienen, ahora sí, valor semántico.

Entre estas se encuentra la noción de información que se refiere a nuestro estudio del resto del mundo físico, con nosotros mismos como parte de ese mundo.

Una visión del mundo, una teoría del mundo, para ser coherente, debe poder justificar y dar cuenta de las formas en que los habitantes de ese mundo llegan a esa visión, a esa lectura.

Esta condición, que se considera a menudo como la dificultad del materialismo ingenuo, se satisface inmediatamente si repensamos la materia como interacciones y correlaciones.

Mi conocimiento del mundo es un ejemplo del resultado de interacciones que generan informaciones significativas. Es una correlación entre el mundo externo y mi memoria. Si el cielo es azul, en mi memoria está la imagen de un cielo azul. Mi memoria, por tanto, tiene los recursos para permitirme prever el color del cielo si cierro los ojos y los vuelvo a abrir inmediatamente después. En estos términos, tiene información sobre el cielo *también* en sentido semántico. Sabemos lo que *significa* que el cielo sea azul: lo reconocemos reabriendo los ojos.

Este es el sentido de «información» utilizado en los postulados de la mecánica cuántica al final del capítulo IV.

Es el doble significado de «información» que da al concepto su carácter ambiguo. La base que tenemos para comprender el mundo es nuestra información sobre el mundo, que es una correlación, de la que nos servimos, entre nosotros y el mundo.

EL MUNDO VISTO DESDE DENTRO

La noción de información significativa conecta el mundo físico con algunos aspectos del mundo mental, pero no llena la impresión de distancia entre estos dos mundos. Hay algo más, en cambio, que viene en nuestra ayuda gracias al radical replanteamiento de la realidad a que nos obliga la teoría cuántica.

El problema de la distancia entre el mundo mental y el mundo físico nos aparece, en ocasiones, intuitivamente claro, pero es muy difícil de delimitar con precisión. Nuestro mundo mental tiene muchos aspectos diferentes: significado, intencionalidad, valores, finalidad, emociones, sentido estético, sentido moral, intuición matemática, percepciones, creatividad, conciencia... Nuestra mente hace muchas cosas: recuerda, anticipa, reflexiona, deduce, se emociona, se indigna, sueña, espera, ve, se expresa, fantasea, reconoce, conoce, se da cuenta de que existe... Tomadas una por una, muchas de las actividades de nuestro cerebro no aparecen tan distantes de lo que puede realizar, con mayor o menor facilidad, un dispositivo físico suficientemente complicado. ¿Hay también algo que *no pueda emerger*, en cambio, de la física que conocemos?

En un artículo que se hizo famoso, David Chalmers dividió el problema de la conciencia en dos partes a las que llamó el problema «fácil» y el problema «difícil» (a menudo se denominan en inglés *the easy and the hard problems of consciousness*)^[126]. El problema que Chalmers llama «fácil» es todo menos fácil, se trata de cómo funciona nuestro cerebro; esto es, cómo da lugar a los diversos comportamientos que asociamos a nuestra vida mental. El problema que llama «difícil» consiste en comprender en qué consiste la sensación subjetiva que acompaña a todo esto.

Chalmers considera posible que el problema «fácil» se resuelva dentro de la actual concepción física del mundo, pero pone en duda la posibilidad de hacer lo mismo con el problema «difícil». Para aclarar este punto, nos pide que imaginemos una máquina, a la que llama «zombi», capaz de reproducir todos los comportamientos de un ser humano que se puedan observar (incluso

con un microscopio); en resumen, que sea indistinguible de un ser humano desde cualquier observación externa, pero que no tenga experiencia subjetiva. «Dentro del cual», como dice Chalmers, «no haya nadie». El mero hecho de que podamos concebir esta posibilidad demostraría que existe un «algo más» que distingue a un ser que siente de un hipotético zombi que reproduce cualquier comportamiento observable. Ese «algo más» identifica, según Chalmers, la dificultad de explicar la experiencia subjetiva en los términos de la concepción actual del mundo físico. Para Chalmers, este sería el verdadero problema de la consciencia.

Las neurociencias están haciendo avances notables en la comprensión del funcionamiento de los sentidos, la memoria, la capacidad del cerebro para situarse en el espacio, la producción del lenguaje, la formación de las emociones, su papel, etc. Todo esto y más terminará probablemente por aclararse. ¿Quedará algo fuera? Chalmers opina que sí, porque el «problema difícil» no es comprender cómo funcionan las actividades cerebrales, es comprender por qué estas actividades van acompañadas de la correspondiente sensación subjetiva que nosotros percibimos cuando ocurren. En otras palabras, para comprender la relación entre nuestra vida mental y el mundo físico es esencial tener en cuenta que describimos el mundo físico desde el exterior, mientras que experimentamos nuestras actividades cerebrales/mentales en primera persona.

El replanteamiento del mundo al que nos obligan los cuantos cambia los términos de la pregunta. Si el mundo es relación, si entendemos la realidad física como fenómenos que se manifiestan en sistemas físicos, entonces no existe descripción del mundo desde el exterior. Las descripciones del mundo posibles son, en última instancia, *todas* desde el interior. Se elaboran todas, al fin, «en primera persona». Nuestra perspectiva del mundo, nuestro punto de vista como seres situados dentro del mundo (*situated self*, como sostiene Jenann Ismael^[127]), no es especial, se apoya en la misma lógica que nos sugiere la física.

Si imaginamos la totalidad de las cosas, estamos imaginando estar *fuera* del universo y mirar «desde allí». Pero no hay «fuera» de la totalidad de las cosas. El punto de vista desde el exterior es un punto de vista que no existe^[128]. Toda descripción del mundo es desde su interior. El mundo visto desde fuera no existe, existen solo perspectivas internas del mundo, parciales, que se reflejan recíprocamente. El mundo es este mutuo reflejo de perspectivas.

La física cuántica nos muestra que esto ya sucede en las cosas inanimadas. El conjunto de las propiedades relativas a un mismo objeto forma una perspectiva. Si hacemos abstracción desde cada perspectiva, no reconstruimos la totalidad de los hechos; nos encontramos en un mundo sin hechos, porque los hechos son solo hechos relativos. Esta es precisamente la dificultad de la interpretación de muchos mundos de la mecánica cuántica: describe solo lo que un observador externo al mundo esperaría si interactuase con el mundo, pero no hay observadores externos al mundo, así que no describe los hechos del mundo.

Thomas Nagel, en un famoso artículo^[129], propone la pregunta «¿Qué se siente al ser un murciélago?» para argumentar que preguntas como esta están bien planteadas, pero escapan a las ciencias naturales. El error es asumir que la física es la descripción de las cosas en tercera persona. Es lo contrario: la perspectiva relacional muestra que la física siempre es descripción de la realidad en primera persona, a partir de una perspectiva. Cualquier descripción es implícitamente desde el interior del mundo, desde un punto de vista asociado a un sistema físico.

ħħ

Las ideas de la mente sobre la naturaleza se limitan por lo general a solo tres alternativas: el dualismo, según el cual la realidad de la mente es diferente por completo a la de las cosas inanimadas; el idealismo, que considera que la realidad material existe solo en la mente; y el materialismo ingenuo, para el que todos los fenómenos mentales se deben al movimiento de la materia. El dualismo y el idealismo son incompatibles con cuanto hemos aprendido sobre el mundo en los últimos siglos, en especial con el descubrimiento de que los seres sintientes somos una parte de la naturaleza como las otras. Son incompatibles con la evidencia creciente de que todo lo que conocemos, incluidos nosotros, sigue las leyes naturales ya conocidas. El materialismo ingenuo, por su parte, parece intuitivamente difícil de conciliar con la realidad de la experiencia subjetiva.

Pero no solo existen estas alternativas. Si las cualidades de un objeto nacen de la interacción con alguna otra cosa, la distinción entre los fenómenos mentales y los fenómenos físicos se atenúa mucho. Tanto las variables físicas, como las que los filósofos de la mente llaman «qualia», es decir, fenómenos mentales elementales como «veo rojo», pueden ser, unas y otras, fenómenos naturales más o menos complejos.

La subjetividad no es un salto cualitativo respecto a la física, requiere un aumento de complejidad (Bogdánov diría de «organización»), pero siempre en un mundo que se compone de perspectivas, ya desde el nivel más básico.

Por consiguiente, me parece que, cuando nos interrogamos acerca de la relación entre el «yo» y la «materia», estamos utilizando dos conceptos confusos, y que este es el origen de la confusión en torno a las preguntas sobre la naturaleza de la consciencia.

¿Quién es el «yo» que experimenta la sensación de sentir sino el conjunto integrado de nuestros procesos mentales? Por supuesto, tenemos una intuición de unidad cuando pensamos en nosotros mismos, pero esta se justifica sencillamente por la integración de nuestro cuerpo y por el modo en que funcionan los procesos mentales, donde la parte que llamamos consciente hace una cosa cada vez. El primer término del problema, el «yo», es, creo, el residuo de una metafísica incorrecta, el resultado del frecuente error de intercambiar un proceso por una entidad. Mach es apodíctico: *Das Ich ist unrettbar*, «el “yo” no puede salvarse». Preguntarse qué es la consciencia después de haber desentrañado los procesos neuronales es como preguntarse qué es una tormenta después de comprender su física: una pregunta sin sentido. Agregar un «poseedor» de las sensaciones es como añadir a Júpiter al fenómeno de la tormenta. Es como decir que, después de haber entendido la física de la tormenta, queda aún, en el lenguaje de Chalmers, el «problema difícil» de conectarla con la furia de Júpiter.

Es cierto que tenemos la «intuición» de una entidad independiente que es el yo. Pero también habíamos tenido la «intuición» de que detrás de las tormentas estaba Júpiter... Y de que la Tierra era plana. No es sobre «intuiciones» acrílicas como elaboramos una eficaz comprensión del mundo. Si nos interesa la naturaleza de la mente, la introspección es el peor instrumento de investigación: es ir en busca de los prejuicios propios más arraigados y chapotear en ellos.

Pero es sobre todo el segundo término de la cuestión, la «materia simple», el residuo de una metafísica equivocada, una metafísica basada en una concepción demasiado ingenua de la materia: la materia como sustancia universal definida solo por masa y movimiento. Es una metafísica errada porque la contradice la física cuántica.

Si pensamos en términos de procesos, sucesos, en términos de propiedades *relativas*, de un mundo de relaciones, la brecha entre los fenómenos físicos y los fenómenos mentales es mucho menos dramática.

Podemos considerar ambos como fenómenos naturales generados por complejas estructuras de interacciones.

ħħ

Nuestro conocimiento sobre el mundo se articula en ciencias diferentes, más o menos conectadas entre ellas. En esta relación entre los componentes de nuestros saberes, la física representa un papel que los cuantos en parte han vaciado, en parte, enriquecido. Se ha desvanecido la pretensión del mecanicismo del siglo XVIII de aclarar la sustancia fundamental presente en la base de todo; por el contrario, ha aumentado una comprensión de la gramática de lo real quizá desconcertante, pero más rica y sutil, que nos permite pensar el mundo de una manera más articulada.

El mundo es una red de información recíproca en el nivel físico más básico. La información que se vuelve significativa en el contexto del mecanicismo darwiniano tiene sentido para nosotros. 'Ὁ κόσμος ἀλλοίωσις, ὁ βίος ὑπόληψις, 'el cosmos es cambio, la vida es discurso', dice el fragmento 115 de Demócrito. El cosmos es interacción, la vida organiza información relativa. Somos un bordado delicado y complejo en la red de relaciones de las cuales, según entendemos hoy, está constituida la realidad.

Si miro un bosque a lo lejos veo un terciopelo verde oscuro. Cuando me acerco al terciopelo, se disgrega en troncos, ramas y follaje. La corteza de los árboles, el musgo, los insectos rebosan complejidad. En cada ojo de cada mariquita hay una elaboradísima estructura de células, conectadas a neuronas que la hacen vivir. Cada célula es una ciudad, cada proteína, un castillo de átomos; en el centro de cada átomo bulle un infierno de dinámica cuántica, giran vertiginosamente quarks y gluones, excitaciones de campos cuánticos. Y no es más que un pequeño bosque de un pequeño planeta que gira alrededor de una estrella, entre cien mil millones de estrellas de una entre miles de millones de galaxias consteladas de deslumbrantes eventos cósmicos. En cualquier rincón del universo encontramos vertiginosos pozos de estratos de la realidad.

Hemos logrado reconocer regularidades en estos estratos sobre las que hemos recopilado información relevante para nosotros, lo que nos permite crear una imagen coherente de los estratos individuales. Cada uno es una aproximación. La realidad no se divide en niveles. Los niveles en los que la descomponemos, los objetos en que la dividimos, son los modos con los que la naturaleza se relaciona con nosotros, en esas configuraciones dinámicas de

eventos físicos en nuestro cerebro que llamamos conceptos. La separación de la realidad en niveles está relacionada con nuestra forma de interactuar con ella.

La física fundamental no es una excepción. La naturaleza siempre sigue sus leyes simples, pero la complejidad de las cosas hace que las leyes generales sean irrelevantes. Saber que mi novia obedece a las ecuaciones de Maxwell no me ayuda a hacerla feliz. Para aprender cómo funciona un motor es mejor ignorar las fuerzas nucleares entre sus partículas elementales. Hay una autonomía e independencia de los niveles de comprensión del mundo que justifica la autonomía de los saberes. En este sentido, la física elemental es mucho más inútil que lo que quiere pensar un físico.

Pero no existen fracturas reales: los fundamentos de la química son comprensibles en términos de la física; los conceptos básicos de la bioquímica, en términos de la química; los fundamentos de la biología, en términos de la bioquímica, etcétera. Algunas articulaciones las entendemos bien, otras menos. Las fracturas son nuestras lagunas de comprensión. Este es el sentido de la pregunta sobre las bases físicas de la noción de significado.

La perspectiva relacional nos aleja de los dualismos sujeto/objeto, materia/espíritu y de la aparente irreductibilidad del dualismo realidad/pensamiento o cerebro/consciencia. Si llegamos a desentrañar los procesos que se desarrollan en el interior de nuestro cuerpo y sus relaciones con el mundo exterior, ¿qué queda por comprender? Estos procesos implican a nuestro cuerpo y al exterior, son reacciones y elaboraciones de la correlación entre nuestro cuerpo y el entorno. Son procesos a caballo entre el exterior y el interior (y entre el interior y el interior) de nuestro cuerpo. ¿Qué otra cosa puede ser la fenomenología de nuestra consciencia excepto el nombre que estos procesos se asignan a sí mismos, en el juego de los espejos de las informaciones relevantes contenidas en las señales transportadas por nuestras neuronas?

Como es obvio, esto no resuelve el problema de comprender cómo funciona la mente. Queda lo que Chalmers llama el problema «fácil», que está muy lejos de ser fácil y muy lejos de resolverse. Todavía comprendemos muy poco del funcionamiento del cerebro. Pero vamos entendiendo más, sin salir de las conocidas leyes naturales. Y no hay razón para sospechar que en nuestra vida mental deba existir algo que no sea comprensible en términos de las leyes naturales conocidas.

Las objeciones a la posibilidad de comprender nuestra vida mental en los términos de las leyes naturales conocidas, si lo pensamos bien, se reducen

solo a una repetición genérica de «no me parece posible, no me parece posible», basada en intuiciones sin argumentos de apoyo^[*9]. A no ser la triste esperanza de estar constituidos por alguna humeante sustancia inmaterial que sigue viva después de la muerte: una perspectiva que, además de parecerme del todo imposible (¡esta sí!), encuentro espeluznante.

Como escribe el filósofo americano Erik Banks en el epígrafe que abre este capítulo, «por misterioso que sea para nosotros el problema cuerpo-mente, debemos recordar siempre que para la naturaleza es un problema resuelto. Lo único que nos queda por hacer es comprender cómo lo ha hecho».

VII

Donde trato de concluir una historia que no está concluida.

¿PERO ES VERDADERAMENTE POSIBLE?

*You do look, my son, in a moved sort,
As if you were dismay'd: be cheerful, sir.
Our revels now are ended. These our actors,
As I foretold you, were all spirits, and
Are melted into air, into thin air:
And, like the baseless fabric of this vision,
The cloud-capp'd towers, the gorgeous palaces,
The solemn temples, the great globe itself,
Yea, all which it inherit, shall dissolve,
And, like this insubstantial pageant faded,
Leave not a rack behind. We are such stuff
As dreams are made on; and our little life
Is rounded with a sleep.*

Uno de los avances recientes más fascinantes de la neurociencia se refiere a nuestro propio sistema de visión: ¿cómo logramos ver? ¿Cómo sabemos con una mirada que frente a nosotros hay un libro o un gato?

Parecería natural pensar que los receptores detectan la luz que llega a la retina de nuestros ojos y la transforman en señales que corren hacia el interior de nuestro cerebro, donde grupos de neuronas procesan la información de forma cada vez más compleja, hasta interpretarla e identificar los objetos. Hay neuronas que reconocen líneas que separan colores, otras neuronas reconocen formas dibujadas por estas líneas, otras comparan estas formas con datos de nuestra memoria... otras llegan a reconocer algo: es un gato.

Pero no. El cerebro no funciona así. Funciona al contrario. La mayoría de las señales no viajan de los ojos al cerebro, viajan en dirección opuesta, del cerebro a los ojos^[130].

Lo que ocurre es que el cerebro *espera* ver algo, basándose en lo que ha sucedido antes y en lo que sabe. Elabora una imagen de lo que *prevé* que

tienen que ver los ojos. Esta información se envía del cerebro a los ojos, a través de etapas intermedias. Si se encuentra una discrepancia entre lo que el cerebro se espera y la luz que llega a los ojos, *solo* en este caso los circuitos neuronales envían señales al cerebro. Es decir, la imagen del ambiente observado no viaja de los ojos hacia el cerebro, sino solo la noticia de eventuales discrepancias con respecto a lo que el cerebro se espera.

El descubrimiento de que la visión funciona de esta manera ha sido una sorpresa. Pero si lo pensamos bien, está claro que este es un modo eficiente de recoger información del entorno. ¿Qué sentido tendría enviar al cerebro señales que no harían más que confirmar lo que el cerebro ya sabe? Los informáticos utilizan técnicas similares para comprimir archivos de imágenes. En lugar de introducir en la memoria el color de todos los píxeles, solo se almacena en la memoria la información de donde *cambia* el color: menos información, suficiente para reconstruir la imagen.

Las implicaciones conceptuales sobre la relación entre lo que vemos y el mundo, sin embargo, son notables. Cuando miramos alrededor no estamos realmente «observando», estamos, más bien, soñando una imagen del mundo basada en lo que sabíamos (incluidos prejuicios erróneos), de modo inconsciente, examinamos cualquier discrepancia y, cuando es necesario, intentamos corregirla.

En otras palabras, lo que vemos no es una reproducción del exterior. Es lo que nos esperamos corregido por lo que conseguimos captar. Los datos relevantes no son los que *confirman* lo que ya sabíamos, sino los que contradicen nuestras expectativas.

A veces es un detalle: el gato ha movido una oreja. A veces es algo que nos alerta para pasar a otra hipótesis: ¡Ah! ¡No era un gato, era un tigre! A veces es una escena completamente nueva a la que, de todos modos, intentamos darle sentido imaginando una versión que tenga sentido para nosotros. Tratamos de dar sentido a lo que llega a nuestras pupilas buscando en lo que ya sabemos.

Podría tratarse, incluso, de un modo general de actuación del cerebro. Por ejemplo, en el modelo llamado PCM (*Projective Consciousness Model*^[131]), la hipótesis dice que la consciencia es la actividad del cerebro que intenta prever los datos que dependen prospectivamente de la variabilidad del cuerpo y del mundo, con la elaboración de representaciones en este sentido, tratando siempre de minimizar los errores de predicción, a partir de las discrepancias observadas.

Usando las palabras de Hippolyte Taine, filósofo francés del siglo XIX, podemos decir que «la percepción externa es un sueño interno que logra estar en armonía con las cosas externas. En vez de llamar “alucinación” a una percepción falsa, deberíamos llamar a la percepción externa “una alucinación confirmada”»^[132].

En realidad, la ciencia es solo una extensión del modo en que vemos: buscamos discrepancias entre lo que nos esperamos y lo que conseguimos obtener del mundo. Tenemos visiones del mundo, si no funcionan, intentamos cambiarlas. Todo el saber humano se ha construido así.

La visión se produce en el cerebro de cada uno de nosotros, en fracciones de segundo. El aumento del conocimiento sucede mucho más lentamente, en el intenso diálogo de toda la humanidad, a lo largo de años, décadas, siglos. La primera afecta a la organización individual de la experiencia y moldea el mundo psíquico; el segundo afecta a la organización social de la experiencia que es el fundamento del orden físico como lo describe la ciencia. (Bogdánov: «La diferencia entre el orden psíquico y físico se reduce a la diferencia entre la experiencia organizada individualmente y la experiencia organizada socialmente»)^[133]. Pero son la misma cosa: actualizamos y mejoramos nuestros mapas mentales sobre la realidad, nuestra estructura conceptual, para dar cuenta de las discrepancias que hemos observado entre las ideas que tenemos y lo que nos llega de la realidad. Por tanto, para descifrarla cada vez mejor^[134].

A veces, consiste en un detalle, aprendemos algún hecho nuevo. A veces, someter de nuevo a discusión nuestras expectativas afecta a la propia gramática conceptual de nuestro modo de pensar el mundo. Actualizamos nuestra imagen más profunda del mundo. Descubrimos nuevos mapas para pensar la realidad que nos muestran un poco mejor el mundo.

Esto es la teoría cuántica.

ħħ

Es cierto que hay algo desconcertante en la visión del mundo que emerge de esta teoría. Tenemos que abandonar algo que nos parecía muy, muy natural: la idea de un mundo hecho de cosas. Tenemos que considerar esta idea como un viejo prejuicio, como una carreta vieja que ya no necesitamos.

Algo de lo concreto del mundo parece disolverse en el aire, como en los colores iridiscentes y violáceos de un viaje psicodélico. Nos deja aturdidos como en las palabras de Próspero en el epígrafe inicial de este capítulo: «Y,

como el tejido sin sustancia de esta visión, las torres coronadas de nubes, los maravillosos palacios, los templos solemnes, el mismo gran globo, sí, todo lo que contenía se disuelve y, como este espectáculo inconsistente, se desvanece, no deja tras de sí ni una voluta de humo».

Es el final de *La tempestad*, la última obra de Shakespeare, uno de los pasajes más emocionantes de la historia de la literatura. Después de haber hecho volar al público con la imaginación y de haberlo llevado fuera de sí, Próspero/Shakespeare lo reconforta: «Amigo mío, pareces turbado. Como si estuvieras desconcertado. ¡Ánimo, señor! Nuestra fiesta se termina. Estos actores nuestros, como ya os había dicho, eran espíritus y se han disuelto en el aire, en el aire ligero». Para luego desvanecerse suavemente en ese susurro inmortal: «Somos de la misma sustancia que los sueños, y nuestra breve vida culmina en un sueño».

Así me siento al final de esta larga meditación sobre la mecánica cuántica. La solidez del mundo físico parece haberse disuelto en el aire, como las torres coronadas de nubes y los palacios maravillosos de Próspero. La realidad se ha deshilachado en un juego de espejos.

Pero aquí no aparece la suntuosa imaginación del gran Bardo, ni sus incursiones en el corazón de los hombres. Ni siquiera hay una nueva especulación desenfrenada de algún físico teórico demasiado fantasioso. No, es la paciente, racional, empírica, rigurosa investigación de la física fundamental que nos ha llevado a esta disolución de la sustancialidad. Es la mejor teoría científica encontrada hasta ahora por la humanidad, la base de la tecnología moderna, cuya fiabilidad es indudable.

Creo que es hora de enfrentarse a esta teoría, de discutir su naturaleza fuera de los círculos restringidos de los físicos teóricos y de los filósofos, de derramar su miel destilada, muy dulce y un poco embriagadora, en la red de toda la cultura contemporánea^[*10].

Espero que este escrito mío contribuya un poco a ello.

La mejor descripción de la realidad que hemos encontrado es la formulada en términos de sucesos que tejen una red de interacciones. Los «entes» solo son efímeros nodos de esta red. Sus propiedades no se determinan hasta el momento en que se producen estas interacciones y solo en relación con otra cosa: cada cosa solo es lo que se refleja en las otras.

Toda visión es parcial. No existe un modo de ver la realidad que no dependa de una perspectiva. No hay un punto de vista universal, absoluto. No obstante, los puntos de vista comunican, los saberes mantienen un diálogo

entre ellos y con la realidad, en el diálogo se modifican, se enriquecen, convergen, nuestra comprensión de la realidad se hace más profunda.

El actor de este proceso no es un sujeto distinto a la realidad fenoménica, ni un punto de vista trascendente; su actor es una parte de esa misma realidad a la que la selección ha enseñado a emplearse en correlaciones útiles, informaciones que tengan significado. Nuestro discurso sobre la realidad es él mismo parte de la realidad.

Nuestro yo, nuestra sociedad, nuestra vida cultural, espiritual y política se compone de relaciones.

Por esto, todo lo que hemos sido capaces de hacer durante siglos lo hemos hecho en una red de intercambios. Por eso la política de colaboración es más sensata y eficaz que la política de competición...

Por esto, creo, incluso la idea misma de un yo individual, aquel yo rebelde y solitario que me empujó a mis desenfrenadas preguntas solitarias de la adolescencia, aquel yo que creía ser completamente independiente y totalmente libre... se reconoce por esto, al final, tan solo como un encrepamiento en una red de redes...

Las preguntas de la adolescencia que me llevaron a matricularme en física, hace muchos años —comprender la estructura de la realidad, comprender cómo funciona nuestra mente, cómo consigue entender la realidad—, permanecen abiertas. Pero aprendemos. La física no me ha decepcionado. Me hechizó, asombró, confundió, aturdió, inquietó, me dejó noches sin dormir con los ojos abiertos en la oscuridad pensando: «¿Pero es realmente posible? ¿Cómo vamos a creerlo?». La pregunta susurrada por Čáslav en la playa de la isla de Lamma, con quien comencé estas páginas.

La física me parecía el lugar donde la urdimbre entre la estructura de la realidad y las estructuras del pensamiento era más estrecha, el lugar donde esta urdimbre estaba sometida a la prueba incandescente de una evolución continua. El viaje emprendido fue más sorprendente y aventurero de lo que me esperaba. Espacio, tiempo, materia, pensamiento, la realidad entera no ha hecho más que rediseñarse ante mis ojos, como en un vasto caleidoscopio mágico. La teoría cuántica, más que la inmensidad del universo y que el descubrimiento de su gran historia, más incluso que las extraordinarias predicciones de Einstein, ha supuesto para mí el corazón de este radical cuestionamiento de nuestros mapas mentales.

La visión clásica del mundo, por usar las palabras de Taine, es una alucinación que ya no se confirma.

El mundo fragmentado e insustancial de la teoría cuántica es, por el momento, la alucinación en mejor armonía con el mundo...

Hay una sensación de vértigo, libertad, alegría, ligereza en la visión del mundo que nos ofrecen los descubrimientos cuánticos. «Amigo mío, pareces turbado. Como si estuvieras desconcertado. ¡Ánimo, señor!». Después de todo, las curiosidades adolescentes, que me condujeron a la física como un niño que sigue una flauta mágica, han encontrado más castillos encantados de lo que esperaba. El mundo de la teoría cuántica, que el viaje de un muchacho a la Isla Sagrada del Mar del Norte nos abrió, y que he tratado de contar en estas páginas, me parece extraordinariamente hermoso.

Goethe había escrito de Helgoland, extrema, azotada por el viento, que es un lugar de la Tierra que «ejemplifica la fascinación sin fin de la naturaleza». Y que en la Isla Sagrada podía experimentarse el «espíritu del mundo», el *Weltgeist*^[135]. Quién sabe, tal vez sea este espíritu el que habló a Heisenberg, para ayudarlo a sacudir un poco la calima de nuestros ojos...

Siempre que se cuestiona algo sólido, alguna otra cosa se abre y nos permite ver más lejos. Observar que se disuelve la sustancia que parecía sólida como una roca nos hace más ligera, me parece, la fugacidad de la vida y su dulce fluir.

La interconexión de las cosas, el reflejo de una en otra, resplandece con una luz clara que la frialdad de la mecánica del siglo XVIII no conseguía capturar.

Aunque nos deja estupefactos. Aunque nos deja un profundo sentido de misterio.



AGRADECIMIENTOS

Gracias a Blu. Gracias a Emanuela, Lee, Čáslav, Jenann, Ted, David, Roberto, Simon, Eugenio, Aurélien, Massimo, Enrico, por mil cosas. A Andrea por sus valiosos comentarios a una primera redacción del libro, a Maddalena por hacer estas líneas legibles, a Sami, con nostalgia, por su apoyo y su amistad, a Guido por mostrarme el camino de mi vida, a Bill por ser el primero en escucharme hace quince años sobre estas cosas, a Wayne por sus ideas, a Chris por su hospitalidad, a Antonino por sus excelentes consejos. A mi padre porque me está enseñando lo que significa estar todavía cuando ya no se está. A Simone y Alejandro por haber formado juntos el mejor grupo de investigación del mundo. A mis fantásticos estudiantes, a los colegas de física y de filosofía con quienes he discutido a lo largo de los años de todas estas cosas, a mis maravillosos lectores. A todas estas personas, que tejen juntas la red mágica de relaciones, de la que este libro es un hilo. Gracias, sobre todo, a Werner y Aleksandr.





Carlo Rovelli (Verona, Italia, 1956) es físico teórico, y uno de los fundadores de la llamada «gravedad cuántica de bucles». Es miembro del Instituto Universitario de Francia y de la Academia Internacional de Filosofía de la Ciencia. Responsable del equipo de gravedad cuántica del Centro de Física Teórica de la Universidad de Aix-Marsella, es autor de numerosos trabajos científicos aparecidos en las revistas más importantes de su ámbito y de dos monografías sobre la gravedad cuántica de bucles.

Ha publicado múltiples libros de divulgación, entre otros, *Siete breves lecciones de física* y *El orden del tiempo*. Colabora con frecuencia en la prensa italiana, especialmente en *Il Sole 24 Ore* y *La Repubblica*.

Notas

[1] Esta y las sucesivas citas de Heisenberg se han tomado, con adaptaciones mínimas, de W. Heisenberg, *Der Teil und das Ganze*, Piper, Múnich, 1969. (Trad. española: *La parte y el todo*, trad. de Rocío da Riva Muñoz, Ellago Ediciones, Castellón, 2004). <<

[2] N. Bohr, «The Genesis of Quantum Mechanics», en *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, Wiley, Nueva York, 1963, pp. 74-78; trad. it. «La genesi della meccanica quantistica», en *I quanti e la vita*, Boringhieri, Turín, 1965, pp. 190-191. (Trad. española: *Física atómica y conocimiento humano*, trad. de Albino Yusta, Aguilar, Madrid, 1964 y *Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano*, trad. de Carlos Rodríguez, Aguilar, Madrid, 1970). <<

[3] W. Heisenberg, «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Zeitschrift für Physik*, 33 (1925), pp. 879-893.
<<

[4] M. Born y P. Jordan, «Zur Quantenmechanik», *Zeitschrift für Physik*, 34 (1925), pp. 858-888. <<

[5] P. A. M. Dirac, «The Fundamental Equations of Quantum Mechanics», *Proceedings of the Royal Society A*, 109, 752 (1925), pp. 642-653. <<

[6] Se da cuenta de que las tablas de Heisenberg son variables que no conmutan, lo que le lleva a pensar en los corchetes de Poisson, al que conoció en un curso de mecánica avanzada. Podemos encontrar un delicioso relato de aquellos años decisivos en boca de Dirac, cuando contaba setenta y tres años, en [youtube.com/watch?v=vwYs8tTLZ24](https://www.youtube.com/watch?v=vwYs8tTLZ24). <<

[7] M. Born, *My Life: Recollections of a Nobel Laureate*, Taylor & Francis, Londres, 1978, p. 218. <<

[8] W. Pauli, «Über das Wasserstoffspektrum vom Standpunkt der neuen Quantenmechanik», *Zeitschrift für Physik*, 36, 1926, pp.336-363, un virtuosismo de técnica. <<

[9] Citado en F. Laudisa, *La realtà al tempo dei quanti: Einstein, Bohr e la nuova immagine del mondo*, Bollati Boringhieri, Turín, 2019, p. 115. <<

[10] A. Einstein, *Corrispondenza con Michele Besso (1903-1955)*, Guida, Nápoles, 1995, p. 242. <<

[11] N. Bohr, «The Genesis of Quantum Mechanics», cit., p. 75; trad. it. cit., p. 191. Trad. española cit. <<

[12] En términos de Dirac: números q . En términos más modernos: operadores. Más en general: variables del álgebra no conmutativa definida por la ecuación de la que hablaré en el capítulo IV. <<

[13] W. J. Moore, *Schrödinger, Life and Thought*, Cambridge University Press, Nueva York, 1989; trad. it. *Erwin Schrödinger scienziato e filosofo*, a cargo de B. Bertotti e U. Curi, Il poligrafo, Padua, 1994. <<

[14] E. Schrödinger, «Quantisierung als Eigenwertproblem (Zweite Mitteilung)», *Annalen der Physik*, 384, 6, 1926, pp. 489-527. <<

[15] Es decir, invirtiendo la aproximación eikonal. <<

[16] E. Schrödinger, «Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung)», *Annalen der Physik*, 384, 4 (1926), pp. 361-376. Había escrito en primer lugar la ecuación relativista y se había convencido de que era errónea. Después estudió el límite no relativista y eso funcionó. <<

[17] E. Schrödinger, «Über das Verhältnis der HeisenbergBorn-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen», *Annalen der Physik*, 384, 5 (1926), pp. 734-756. <<

[18] A lo largo del libro llamo Ψ tanto a la función de onda, es decir, el estado cuántico en la base de la posición, como al estado cuántico abstracto, representado por un vector en un espacio de Hilbert. Para las consideraciones siguientes, la distinción no es relevante. <<

[19] George Uhlenbeck, citado en A. Pais, «Max Born's Statistical Interpretation of Quantum Mechanics», *Science*, 218 (1982), pp. 1193-1198.
<<

[20] Citado en M. Kumar, *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality*, Icon Books, Londres, 2010; trad. it. *Quantum. Da Einstein a Bohr, la teoria dei quanti, una nuova idea della realtà*, Mondadori, Milán, 2017, p. 155. <<

[21] *Ibid.*, p. 218. <<

[22] E. Schrödinger, *Nature and the Greeks and Science and Humanism*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996. (Trad. española: *La naturaleza y los griegos*, trad. de Víctor Gómez Pin, Tusquets, Barcelona, 1997 y *Ciencia y humanismo*, trad. de Francisco Martín, Tusquets, Barcelona, 1985). <<

[23] M. Born, «Quantenmechanik der Stoßvorgänge», *Zeitschrift für Physik*, 38 (1926), pp. 803-827. <<

[24] El módulo al cuadrado de $\Psi(x)$ da la densidad de probabilidad de que la partícula se observe en el punto x y no en otro lugar. <<

[25] Ahora han cambiado las reglas y se ha vuelto ilegal. <<

[26] Del mismo modo, la teoría de Heisenberg nos da la probabilidad de ver algo, dadas las observaciones precedentes. <<

[27] $B = 2h\nu^3 c^{-2} / (e^{h\nu/kT} - 1)$. \ll

[28] M. Planck, «Über eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung», *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 2 (1900), pp. 202-204. <<

[29] $E = h\nu. \ll$

[30] A. Einstein, «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt», *Annalen der Physik*, 322, 6 (1905), pp. 132-148. <<

[31] Este es el efecto en el que se basan las células fotoeléctricas: en ciertos metales la luz produce una pequeña corriente eléctrica. Lo sorprendente es que esto no sucede con la luz de baja frecuencia, al margen de la intensidad de la luz. Einstein comprende que esto se debe a que, independientemente de cuántos haya, los fotones de baja frecuencia son menos energéticos y no tienen suficiente energía para extraer electrones de los átomos. <<

[32] N. Bohr, «On the Constitution of Atoms and Molecules», *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 26 (1913), pp. 1-25. <<

[33] Publicada después en N. Bohr, «The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Teory», *Nature*, 121 (1928), pp. 580-590. <<

[34] P. A. M. Dirac, *Principles of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, Oxford, 1930. <<

[35] J. von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer, Berlín, 1932. <<

[36] J. Bernstein, «Max Born and the Quantum Theory», *American Journal of Physics*, 73 (2005), pp. 999-1008. <<

[37] P. A. M. Dirac, *I principi della meccanica quantistica*, Bollati Boringhieri, Turín, 1968; L. D. Landau y E. M. Lifšits, *Meccanica quantistica*, Editori Riuniti, Roma, 1976; R. Feynman, *La Fisica di Feynman*, Addison-Wesley, Londres, vol. III, 1970; E. H. Wichmann, «Fisica quantistica», en *La fisica di Berkeley*, Zanichelli, Bologna, vol. IV, 1973; A. Messiah, *Quantum Mechanics*, vol. I, North Holland Publishing Company, Ámsterdam, 1967. <<

[38] Citado en A. Pais, *Ritratti di scienziati geniali. I fisici del XX secolo*, Bollati Boringhieri, Turín, 2007, p. 31. <<

[39] E. Schrödinger, «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik», *Naturwissenschaften*, 23 (1935), pp. 807-812. <<

[40] Por esto no notamos la mecánica cuántica en nuestra vida diaria. Nosotros no vemos los efectos de interferencia y por lo tanto podemos intercambiar la superposición cuántica entre gato-despierto y gato-dormido con el simple hecho de no saber si el gato duerme o no. La supresión de los fenómenos de interferencia para objetos que interactúan con un gran número de variables ambientales está bien comprendida. Su nombre técnico es «decoherencia cuántica». <<

[41] Muchos libros reconstruyen esta discusión histórica detalladamente. Por ejemplo, el excelente *Quantum* de Manjit Kumar (cit.), y el reciente *La realtà al tempo dei quanti* de Federico Laudisa (cit.). Laudisa simpatiza con la intuición de Einstein; yo sigo más los pasos de Bohr y Heisenberg. <<

[42] D. Kaiser, *How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival*, W. W. Norton & Co, Nueva York, 2012. <<

[43] Una reciente defensa de esta interpretación aparece en el libro de divulgación *Something Deeply Hidden: Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime* de Sean Carroll (Dutton Books, Nueva York, 2019). (Trad. española: *La zorra y las uvas. Los mundos cuánticos y la realidad oculta del universo*, trad. de Marc Figueras, Pasado & Presente, Barcelona, 2020). <<

[44] No son suficientes la onda Ψ y la ecuación de Schrödinger para definir y usar una teoría cuántica: es necesario especificar un álgebra de observables, de lo contrario no se puede calcular nada y no hay relación con los fenómenos de nuestra experiencia. El papel de esta álgebra de observables, muy claro en otras interpretaciones, no me queda claro en la interpretación de muchos mundos. <<

[45] Una presentación y defensa de la teoría de Bohm puede encontrarse en *Quantum Mechanics and Experience*, de David Z. Albert (Harvard University Press, Cambridge-Londres, 1992). <<

[46] La forma en que interactuamos con la partícula es sutil y a menudo poco clara en las presentaciones de la teoría: la onda de un dispositivo de medición interactúa con la onda del electrón, pero la dinámica del dispositivo se guía por el valor de la onda común determinado por la posición del electrón, por tanto, su evolución está determinada por el lugar donde está realmente el electrón. <<

[47] Existe también otra posibilidad: que la mecánica cuántica sea solo una aproximación y las variables ocultas se revelen en realidad en algún régimen especial. Sin embargo, estos cambios en las predicciones de la mecánica cuántica no se ven por ahora. <<

[48] El espacio de las configuraciones del conjunto de las partículas. <<

[49] Existen diferentes versiones de estas teorías, todas ellas bastante artificiales e incompletas. Dos son las versiones más conocidas: un mecanismo concreto ideado por los físicos italianos Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber; y la hipótesis de Roger Penrose de que el colapso se induce por la gravedad cuando la superposición cuántica entre diferentes configuraciones del espacio-tiempo excede un valor umbral. <<

[50] C. Calosi y C. Mariani, «Quantum Relational Indeterminacy», *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2020, en proceso de publicación. <<

[51] Con más precisión, la cantidad Ψ es como la función S de Hamilton (solución de la ecuación de Hamilton-Jacobi) de la mecánica clásica: un instrumento de cálculo, no una entidad que haya que considerar real. Como prueba, obsérvese que la función de Hamilton S es de hecho el límite clásico de la función de onda: $\Psi \sim \exp iS/\hbar$. <<

[52] En el sentido de Fichte, Schelling y Hegel. <<

[53] Para una introducción técnica a la interpretación relacional de la mecánica cuántica, véase «Relational Quantum Mechanics», en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edición de E. N. Zalta, en: plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/qm-relational/. <<

[54] N. Bohr, *The Philosophical Writings of Niels Bohr*, Ox Bow Press, Woodbridge, vol. IV, 1998, p. 111. <<

[55] Me refiero a las propiedades variables, es decir, las descritas por funciones en el espacio de las fases. No a las propiedades invariantes como la masa de una partícula no relativista. <<

[56] Un evento es real con respecto a una piedra si actúa sobre ella, si la modifica. Un evento no es real con respecto a la piedra si su aparición implica que no ocurren fenómenos de interferencia con respecto a la piedra que, en cambio, ocurren en algún otro lugar. <<

[57] A. Aguirre, *Cosmological Koans: A Journey to the Heart of Physical Reality*, W. W. Norton & Co, Nueva York, 2019. <<

[58] E. Schrödinger, *Nature and the Greeks and Science and Humanism*, cit.
(Trad. española cit.) <<

[59] Un evento $e1$ es «relativo a A, pero no a B», en el sentido siguiente: $e1$ actúa sobre A, pero hay un evento $e2$ que puede actuar sobre B y hubiera sido imposible si sobre B hubiera actuado $e1$. <<

[60] El primero en darse cuenta del carácter relacional de la onda Ψ fue un joven estudiante de doctorado norteamericano a mediados de la década de los 50: Hugh Everett III. Su tesis doctoral, titulada «La formulación de la mecánica cuántica basada en los estados relativos», ha tenido una gran influencia en las discusiones sobre los cuantos. <<

[61] C. Rovelli, *Che cos'è la scienza. La rivoluzione di Anassimandro*, Mondadori, Milán, 2011. <<

[62] Juan Yin, Yuan Cao, Yu-Huai Li *et al.*, «Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers», *Science*, 356 (2017), pp. 1140-1144. <<

[63] J. S. Bell, «On the Einstein Podolsky Rosen Paradox», *Physics Physique Fizika*, 1, 1964, pp. 195-200. <<

[64] El argumento de Bell es sutil, muy técnico, pero sólido. El lector interesado puede encontrarlo con abundantes detalles, por ejemplo en la *Stanford Encyclopedia of Philosophy*: plato.stanford.edu/entries/bell-theorem/. <<

[65] No vive en la suma tensorial de los dos espacios de Hilbert $H_1 \oplus H_2$, sino en su producto tensorial $H_1 \otimes H_2$. En una base cualquiera, la función de onda general de los dos sistemas no tiene la forma $\Psi_{12}(x_1, x_2) = \Psi_1(x_1)\Psi_2(x_2)$, sino que es una función genérica $\Psi_{12}(x_1, x_2)$ y por lo tanto puede ser una superposición cuántica de términos de la forma $\Psi_{12}(x_1, x_2) = \Psi_1(x_1)\Psi_2(x_2)$, es decir, incluye estados entrelazados. <<

[66] En el lenguaje de la filosofía analítica, la relación no surge en el estado de los objetos individuales. Es necesariamente externa, no interna. <<

[67] El motivo es que en el estado entrelazado de la forma $|A\rangle \otimes |OA\rangle + |B\rangle \otimes |OB\rangle$ donde A y B son las propiedades observadas y OA y OB son las variables del observador correlacionadas con estas propiedades, una medición de A colapsa el sistema sobre el estado $|A\rangle \otimes |OA\rangle$ e implica por tanto que una medición posterior de las variables del observador resulte en OA . <<

[68] Esta es la definición de «información relativa» ofrecida por Shannon en su trabajo clásico que introduce la teoría de la información: C. E. Shannon, «A Mathematical Theory of Communication», *The Bell System Technical Journal*, 27 (1948), pp. 379-423. Shannon insiste en que su definición no tiene nada de mental o semántico. <<

[69] Estos postulados se han introducido en C. Rovelli, «Relational Quantum Mechanics», *International Journal of Teoretical Physics*, 35 (1996), pp. 1637-1678; arxiv.org/abs/quant-ph/9609002. <<

[70] Su espacio de fases tiene un volumen de Liouville finito. Cualquier sistema físico se puede aproximar oportunamente con un espacio de fases de volumen finito. <<

[71] Por ejemplo, si medimos el espín de una partícula de espín $\frac{1}{2}$ a lo largo de dos direcciones diferentes, el resultado de la segunda medición convierte el resultado de la primera en irrelevante para predecir los resultados de futuras mediciones de espín. <<

[72] Ideas similares a las introducidas en el artículo citado en la nota 68 aparecieron independientemente en A. Zeilinger, «On the Interpretation and Philosophical Foundation of Quantum Mechanics», *Vastakohtien todellisuus*, Festschrift for K. V. Laurikainen, a cargo de U. Ketvel *et al.*, Helsinki University Press, Helsinki, 1996; Č. Brukner y A. Zeilinger, «Operationally Invariant Information in Quantum Measurements», *Physical Review Letters*, 83 (1999), pp. 3354-3357. <<

[73] Más exactamente: ningún grado de libertad de ningún sistema físico puede tener su estado localizado en su espacio de fases con precisión mayor que \hbar (la constante \hbar tiene las dimensiones de un volumen en el espacio de fases). <<

[74] W. Heisenberg, «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik», *Zeitschrift für Physik*, 43 (1927), pp. 172-198. <<

[75] Heisenberg y Bohr habían interpretado inicialmente que medir una variable alteraba otra de forma concreta. Debido a la granularidad, ninguna medición —pensaron— puede ser suficientemente delicada para no modificar el objeto observado. Pero Einstein, con insistentes críticas, los obligó a reconocer que las cosas son más sutiles. El principio de Heisenberg no significa que posición y velocidad tengan valores definidos y no podamos conocer ambos porque medir uno modifique el otro. Significa que una partícula cuántica es algo que nunca tiene posición y velocidad perfectamente determinadas. Algo de sus variables es siempre indeterminado. Se determina solo en una interacción, a costa de volver indeterminada alguna cosa más. <<

[76] Los observables constituyen un álgebra no conmutativa. <<

[77] Este hecho queda bien aclarado por el fenómeno de la «decoherencia cuántica», que provoca que los fenómenos de interferencia cuántica no se perciban en presencia de un ambiente con muchas variables. <<

[78] Es el teorema del límite central. Su versión sencilla es que la fluctuación de la suma de N variables comúnmente crece como \sqrt{N} y esto implica una fluctuación de la media del orden de \sqrt{N}/N que tiende a cero para grandes N .
<<

[79] V. Il'in, *Materializm i empiriokriticizm*, Zveno, Moscú, 1909; trad. it. V. Lenin, *Materialismo ed empiriocriticismo*, Editori Riuniti, Roma, 1973. (Traducción española, V.I. Lenin, *Materialismo y empiriocriticismo. Notas críticas sobre una filosofía reaccionaria*, trad. de Luis Crespo, Fundamentos, Madrid, 1974). <<

[80] A. Bogdánov, *Empiriomonizm. Stat'i po filosofii*, S. Dorovatovskij y A. Čarušnikov, Moscú-San Petersburgo, 1904-1906; trad. ingl. *Empiriomonism: Essays in Philosophy, Books 1-3*, Brill, Leiden, 2019. <<

[81] Una aguda exposición de las ideas de Mach y una interesante revalorización de su pensamiento se encuentra en E. C. Banks, *The Realistic Empiricism of Mach, James, and Russell: Neutral Monism Reconceived*, Cambridge University Press, Cambridge, 2014. <<

[82] «Sobre el Atlántico avanzaba un mínimo barométrico en dirección este, frente a un máximo estacionado sobre Rusia; de momento no mostraba tendencia a esquivarlo desplazándose hacia el norte. Las isothermas y las isóteras cumplían su deber. La temperatura del aire estaba en relación con la temperatura media anual, tanto con la del mes más caluroso como con la del mes más frío y con la oscilación mensual aperiódica. La salida y puesta del sol y de la luna, las fases de la luna, de Venus, del anillo de Saturno y muchos otros fenómenos importantes se sucedían conforme a los pronósticos de los anuarios astronómicos. El vapor de agua alcanzaba su mayor tensión y la humedad atmosférica era escasa. En pocas palabras, que describen fielmente la realidad, aunque estén algo pasadas de moda: era un hermoso día de agosto del año 1913». R. Musil, *Der Mann ohne Eigenschaften*, Rowohlt, Berlín, 1930, vol. I. (Trad. española, *El hombre sin atributos*, trad. de José M. Sáenz, Seix Barral, Barcelona, 2004). <<

[83] F. Adler, *Ernst Machs Überwindung des mechanischen Materialismus*, Brand & Co, Viena, 1918. <<

[84] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historischkritisch dargestellt*, Brockhaus, Leipzig, 1883. <<

[85] E. C. Banks, *The Realistic Empiricism of Mach, James, and Russell*, cit.
<<

[86] B. Russell, *The Analysis of Mind*, Allen & Unwin-Te Macmillan Company, Londres-Nueva York, 1921. (Trad. española: *Análisis del espíritu*, trad. de Eduardo Prieto, Buenos Aires, Paidós, 1950). <<

[87] A. Bogdánov, «Vera i nauka (O knige V. Il'ina “Materializm i empiriokriticizm”)», en *Padenie velikogo fetišizma (Sovremennyj krizis ideologii)* [La caída de un gran fetichismo (La crisis ideológica contemporánea)], S. Dorovatovskij y A. Čarušnikov, Moscú, 1910; trad. it. «Fede e scienza. La polemica su “Materialismo ed empiriocriticismo” di Lenin», en A. Bogdánov *et al.*, *Fede e scienza*, Einaudi, Turín, 1982, pp. 55-148. Una discusión detallada de las ideas de Mach aparece en A. Bogdánov, *Priključenija odnoj filofskoj školy*, Znanie, San Petersburgo, 1908; trad. it. «Le avventure di una scuola filosofica», en «Fede e scienza», cit., pp. 149-204. <<

[88] También Popper interpreta mal a Mach en unas líneas similares: K. Popper, «A Note on Berkeley as Precursor of Mach and Einstein», *The British Journal for the Philosophy of Science*, 4 (1953), pp. 26-36. <<

[89] «La única propiedad exclusiva de la materia a la que está vinculada la posición filosófica del materialismo es la de ser una realidad objetiva, la de existir fuera de nuestra mente». (V. Lenin, *Materialismo y empiriocriticismo*, cit., cap. v). <<

[90] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historischkritisch dargestellt*, cit. <<

[91] Y si eso no fuera suficiente, reléase la nota a pie de página del párrafo 4.9 de *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt* (cit.): parece una diligente explicación a la idea básica de la relatividad general de Einstein, ofrecida por un buen estudiante. Solo que... se escribió en 1883, treinta y dos años antes de que Einstein publicara su teoría. <<

[92] D. W. Huestis, «The Life and Death of Alexander Bogdánov, Physician», *Journal of Medical Biography*, 4 (1996), pp. 141-147. <<

[93] brill.com/view/book/edcoll/9789004300323/front-7. <<

[94] Wu Ming, *Proletkult*, Einaudi, Turín, 2018. (Trad. española: *Proletkult*, trad. de Juan Manuel Salmerón, Anagrama, Barcelona, 2020). <<

[95] K. S. Robinson, *Red Mars; Green Mars; Blu Mars*, Spectra, Nueva York, 1993-1996. (Trad. española de la *Trilogía marciana: Marte Rojo*, trad. de Manuel Figueroa; *Marte Verde*, trad. de Ana Quijada; *Marte Azul*, trad. de Ana Quijada, Minotauro, Barcelona, 2008-2010). <<

[96] D. Adams, *The Salmon of Doubt: Hitchhiking the Galaxy One Last Time*, Del Rey, Nueva York, 2005. <<

[97] Por ejemplo, su respuesta a la objeción de Einstein presentada con el experimento ideal de la caja de luz es incorrecta: Bohr evoca la relatividad general, pero esta no tiene nada que ver con el asunto, que afecta en cambio a un entrelazamiento entre objetos distantes. <<

[98] N. Bohr, *The Philosophical Writings of Niels Bohr*, cit., p. 111. <<

[99] M. Dorato, «Bohr meets Rovelli: a dispositionalist accounts of the quantum limits of knowledge», *Quantum Studies: Mathematics and Foundations*, 7 (2020), pp. 233-245; doi.org/10.1007/s40509-020-00220-y.
<<

[100] Para Aristóteles, la relación es una propiedad de la sustancia. Es algo de la sustancia que se orienta hacia otra cosa (*Categorías* 7, 6 a, 36-37). Entre todas las categorías, para Aristóteles, la relación es la que tiene «menos ser y realidad». (*Metafísica*, XIV, 1, 1088 a, 22-24 y 30-35). ¿Podemos pensar de otra manera? <<

[101] C. Rovelli, «Relational Quantum Mechanics», cit.; la entrada «Relational Quantum Mechanics», en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, cit. <<

[102] B. C. van Fraassen, «Rovelli's World», *Foundations of Physics*, 40, 2010, pp. 390-417; princeton.edu/~fraassen/abstract/Rovelli_sWorld-FIN.pdf.
<<

[103] M. Bitbol, *De l'intérieur du monde: Pour une philosophie et une science des relations*, Flammarion, París, 2010. (La mecánica cuántica relacional se discute en el capítulo III). <<

[104] F.-I. Pris, «Carlo Rovelli's quantum mechanics and contextual realism», *Bulletin of Chelyabinsk State University*, 8 (2019), pp. 102-107. <<

[105] P. Livet, «Processus et connexion», en *Le renouveau de la métaphysique*, edición de S. Berlioz, F. Drapeau Contim y F. Loth, Vrin, París, 2020, en proceso de publicación. <<

[106] M. Dorato, «Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Anti-Monism, and Quantum Becoming», en *The Metaphysics of Relations*, editado por A. Marmodoro y D. Yates, Oxford University Press, Oxford, 2016, pp. 235-262; arxiv.org/abs/1309.0132. <<

[107] Véase, por ejemplo, S. French y J. Ladyman, «Remodeling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure», *Synthese*, 136 (2003), pp. 31-56; S. French, *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*, Oxford University Press, Oxford, 2014. <<

[108] L. Candiotti, «The Reality of Relations», *Giornale di Metafisica*, 2 (2017), pp. 537-551; philsci-archive.pitt.edu/14165/. <<

[109] M. Dorato, «Bohr meets Rovelli», cit. <<

[110] J. J. Colomina-Almiñana, *Formal Approach to the Metaphysics of Perspectives: Points of View as Access*, Springer, Heidelberg, 2018. <<

[111] A. E. Hautamäki, *Viewpoint Relativism: A New Approach to Epistemological Relativism based on the Concept of Points of View*, Springer, Berlín, 2020. <<

[112] S. French y J. Ladyman, «In Defence of Ontic Structural Realism», en *Scientific Structuralism*, edición de A. Bokulich y P. Bokulich, Springer, Dordrecht, 2011, pp. 25-42; J. Ladyman y D. Ross, *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*, Oxford University Press, Oxford, 2007. <<

[113] J. Ladyman, «The Foundations of Structuralism and the Metaphysics of Relations», en *The Metaphysics of Relations*, cit. <<

[114] M. Bitbol, *De l'intérieur du monde*, cit. <<

[115] L. Candiotto y G. Pezzano, *Filosofia delle relazioni*, Il nuovo melangolo, Génova, 2019. <<

[116] Platón, *El sofista*, 247 d-e. <<

[117] C. Rovelli, *L'ordine del tempo*, Adelphi, Milano, 2017. (Trad. española, *El orden del tiempo*, trad. de Francisco José Ramos, Anagrama, Barcelona, 2018). <<

[118] E. C. Banks, *The Realistic Empiricism of Mach, James, and Russell*, cit.
<<

[119] Nāgārjuna, *Mūlamadhyamakakārikā*, trad. ingl. de J. L. Garfield, *The Fundamental Wisdom of the Middle Way: Nāgārjuna's «Mūlamadhyamakakārikā»*, Oxford University Press, Oxford, 1995. (Trad. española, *Mulamadhyamakakarika*, trad. de Pedro Piquero, Sirio, Málaga, 2018). <<

[120] *Ibid.*, XVIII, 7. <<

[121] E. C. Banks, *The Realistic Empiricism of Mach, James, and Russell*, cit., conclusiones. <<

[122] Ch. Darwin, *The Origin of Species by Means of Natural Selection*, Murray, Londres, 1859. <<

[123] «[Podrían existir] seres en los que sucede como si todo estuviera organizado con un objetivo, cuando en realidad las cosas se han estructurado casualmente y aquellas cosas que no se organizaron de modo adecuado murieron y siguen muriendo, como “terneros de rostro humano”, según dice Empédocles», Aristóteles, *Física*, II, 8, 198 b, 29-32. <<

[124] *Ibid.*, II, 8, 198 b, 35. <<

[125] Este capítulo sigue de cerca el artículo de C. Rovelli «Meaning and Intentionality = Information + Evolution», en *Wandering Towards a Goal*, edición de A. Aguirre, B. Foster y Z. Merali, Springer, Cham, 2018, pp. 17-27. El ejemplo y la idea se inspiran en una conferencia de David Wolpert titulada *Observers as systems that acquire information to stay out of equilibrium*, presentada en el congreso *The physics of the observer*, celebrado en Banff, Canadá, en 2016. <<

[126] D. J. Chalmers, «Facing Up to the Problem of Consciousness», *Journal of Consciousness Studies*, 2 (1995), pp. 200-219. <<

[127] J. T. Ismael, *The Situated Self*, Oxford University Press, Oxford, 2007.

<<

[128] M. Dorato, «Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Anti-Monism, and Quantum Becoming», cit. <<

[129] T. Nagel, «What Is It Like to Be a Bat?», *The Philosophical Review*, 83 (1974), pp. 435-450. (Trad. española: «¿Qué se siente ser un murciélago?», en *Ensayos sobre la vida humana*, Fondo de Cultura Económica, México, 2000, pp. 274-296). <<

[130] Véase por ejemplo A. Clark, «Whatever next? Predictive Brains, Situated Agents, and the Future of Cognitive Science», *Behavioral and Brain Sciences*, 36 (2013), pp. 181-204. <<

[131] D. Rudrauf, D. Bennequin, I. Granic, G. Landini *et al.*, «A Mathematical Model of Embodied Consciousness», *Journal of Teoretical Biology*, 428 (2017), pp. 106-131; K. Williford, D. Bennequin, K. Friston y D. Rudrauf, «The Projective Consciousness Model and Phenomenal Selfhood», *Frontiers in Psychology*, 2018. <<

[132] H. Taine, *De l'intelligence*, Librairie Hachette, París, vol. II, 1870, p. 13.

<<

[133] A. Bogdánov, *Empiriomonizm. Stat'i po filosofii*, cit.; trad. ingl. cit., p. 28. <<

[134] La relación entre visión y ciencia aparece desarrollada en «Appearance and Physical Reality», lectures.dar.cam.ac.uk/video/100/appearance-and-physical-reality, en trámite de publicación en el volumen *Vision* de las Darwin College Lectures (Cambridge University Press, Cambridge). <<

[135] J. W. Goethe, carta a Christian Dietrich von Buttler del 3 de mayo de 1827, en *Gedenkausgabe der Werke, Briefe und Gespräche*, edición de E. Beutler, Artemis, Zúrich, vol. XXI, 1951, p. 741; carta a Karl Friedrich Zelter del 24 de octubre de 1827, *ibid.*, p. 767. <<

$$[*1] \quad XP - PX = i\hbar. \ll$$

[*2] En la versión original, el frasco contenía un veneno, no un somnífero, y el gato no se dormía, moría. Pero no me gusta bromear con la muerte de un gato.
<<

[*3] También denominada «teoría de universos paralelos». (*N. de la T.*) <<

[*5] En español no hay una grafía bien asentada para el término inglés *qubit*, o *qbit*, y tanto se puede ver escrito como «qubit» o adaptado a «cúbit» o «cubit». Claro que, en caso de duda, siempre se puede escribir «bit cuántico». (N. de la T.) <<

[*6] El problema de la mecánica cuántica es la contradicción entre dos leyes: una describe lo que sucede en una «medición» y la otra describe la evolución «unitaria». La interpretación relacional es la idea de que ambas sean correctas: la primera se refiere a los eventos relativos a los sistemas que interactúan; la segunda a los eventos relativos a otros sistemas. <<

[*7] Esta es la intuición técnica central de la interpretación relacional de la teoría cuántica. Más precisamente: la probabilidad de eventos que suceden respecto a nosotros está determinada por la evolución de la función de onda Ψ definida con respecto a nosotros, que incluye la dinámica de todas las interacciones con otros sistemas, pero no está influenciada por eventos que suceden respecto a otros sistemas. <<

[*8] En la interpretación de muchos mundos cada vez que observo un evento existe «otro yo» que observa algo diferente. La teoría de Bohm asume que solo una de las dos componentes de Ψ me contiene a mí, la otra está vacía. La interpretación relacional desconecta lo que observo de lo que puede observar otro observador: si soy el gato, estoy despierto o dormido, pero esto no impide los fenómenos de interferencia respecto a otro objeto, porque respecto a este no hay un elemento de la realidad que limite estas interferencias. La observación que he hecho es un evento relacionado conmigo, no con otros. <<

[*9] Este es un ejemplo de un «tetralema»: la forma lógica de los argumentos de Nāgārjuna. <<

[*10] Un ejemplo de esta actitud es Thomas Nagel, *Mind and Cosmos: Why the Materialist Neo-Darwinian Conception of Nature is Almost Certainly False* (Oxford University Press, Oxford, 2012); ed. española, *La mente y el cosmos*, Biblioteca Nueva, Madrid, 2014. El libro repite de modo obsesivo: «No me parece posible, no me parece posible», pero no ofrece ningún argumento real para apoyar esta tesis ante una lectura atenta, más allá de la explícita y declarada ignorancia, la incomprensión y el desinterés por los progresos de las ciencias naturales. <<