

Ciencia
y
Sociedad

Director de la Colección

Carlos Eduardo Maldonado

El mundo es cuántico

**Una teoría a partir de las múltiples
interpretaciones
de la mecánica cuántica**

Carlos Eduardo Maldonado
Jairo Giraldo Gallo

Ediciones
desde abajo

El mundo es cuántico
Una teoría a partir de las múltiples
interpretaciones de la mecánica cuántica
Carlos Eduardo Maldonado y Jairo Giraldo

Marzo de 2022

Ediciones desde abajo
www.desdeabajo.info
Bogotá, D.C. - Colombia

ISBN:978-958-8926-73-5

Diseño y diagramación: Difundir Ltda.
Cra. 20 N° 45A - 85, telf: 60 (1) 345 1808

Impresión:
Editorial Bolívar Impresos S.A.S.
Calle 19B N° 33-38, Bogotá D.C., Colombia
Teléfonos: 60 (1) 340 71 23

El conocimiento es un bien de la humanidad.
Todos los seres humanos deben acceder al saber.
Cultivarlo es responsabilidad de todos.

Se permite la copia, de uno o más artículos completos de esta obra o del conjunto de la edición, en cualquier formato, mecánico o digital, siempre y cuando no se modifique el contenido de los textos, se respete su autoría y esta nota se mantenga.

Índice

Prefacio	9
-----------------------	---

Introducción: Entrecruzamiento entre las ciencias naturales, las matemáticas y la filosofía	15
--	----

Capítulo 1: ¿De qué trata la mecánica cuántica?	47
Un formalismo matemático	47
Lo básico del formalismo	51
Principio de Superposición	53
El problema de las interpretaciones	55
Un concepto que parece tomado de una metáfora musical	56
Función de onda monocromática	63
La clave de la teoría es la observación.....	66
Extrañas predicciones con inmensas aplicaciones	69
Un poco de historia: etapa precuántica	70
No incertidumbre, sí indeterminación.....	73
Tunelamiento cuántico.....	78
Estados cuánticos	80
Partículas y antipartículas.....	82
Dos caminos a la vez.....	84
Abre bocas a la teoría cuántica de campos	93
No-localidad como premisa	97
Entrelazamiento	99
Teorema EPRB y sus limitaciones.....	101
Efecto Aharonov-Bohm y no localidad	106
Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica	107
Los teoremas tipo Bell y sus consecuencias.....	108
Primeros experimentos de entrelazamiento cuántico	111
Nuevos experimentos	114
Entrelazamiento de tres partículas:	115
La segunda revolución cuántica:	117
¿Qué significa todo esto?	118

Capítulo 2: Las diferentes interpretaciones de la Mecánica Cuántica	123
1-. La interpretación de Copenhague.....	127
2-. La paradoja EPR	130

3-	La teoría de de Broglie-Bohm	135
4-	La lógica cuántica	138
5-	La conciencia genera el colapso (von Neumann-Wigner)....	142
6-	La teoría de los múltiples mundos	146
7a-	La mecánica estocástica	150
7b-	La electrodinámica estocástica	152
8-	Las interpretaciones modales	153
9-	Las historias consistentes.....	156
10-	Las teorías cuánticas de la información.....	159
11-	La mecánica cuántica relacional	163
12-	La interpretación transaccional	166
13-	La interpretación de conjunto.....	168
14-	El darwinismo cuántico.....	170
15-	Las teorías del colapso objetivo.....	172
16-	El bayesianismo cuántico	175
17-	Las teorías de la simetría del tiempo	177
18-	Las teorías de la ramificación del espacio-tiempo.....	179
19-	La interpretación de Montevideo.....	181
20-	La interpretación de las múltiples mentes.....	182
21-	La interpretación de la función de onda geométrica	184
22-	Interpretaciones epistémicas	186
23-	Otras interpretaciones.....	186

Capítulo 3: ¿Por qué es bueno que haya múltiples interpretaciones?	189
---	-----

Capítulo 4: El mundo es cuántico	211
Una revisión a los estados de la materia, y entonces del universo	219
Una idea fuerte: el tiempo no existe.....	222
Reconsiderando las posibilidades	225
La termodinámica cuántica.....	234
El mundo es cuántico. I.....	236
El mundo es cuántico. II.....	241

Conclusiones (provisionales)	249
---	-----

Bibliografía	255
---------------------------	-----

Índice de esquema, figura, tablas y gráfico

Esquema N° 1:	
Origen y desarrollos principales de la mecánica cuántica.....	44
Figura N° 1:	
Difracción a través de una ranura.....	74
Figura N° 2:	
Paquete de ondas y principio de indeterminación	78
Figura N° 3:	
Ilustración del efecto de tunelamiento cuántico.....	80
Figura N° 4:	
El experimento de interferometría de Mach-Zehnder	85
Figura N° 5:	
Superposición de ondas en una dimensión	
a) en fase; b) en antifase.....	88
Figura N° 6:	
Resultados del experimento con el interferómetro	
de Mach-Zehnder	91
Figura N° 7:	
Primer diagrama de Feynman para la interacción	
entre dos electrones.....	94
Figura N° 8:	
Entrelazamiento de dos cuantos	100
Figura N° 9:	
Correlación entre la mecánica cuántica y las variables ocultas.....	111
Figura N° 10:	
Comparación de resultados entre mecánica cuántica	
y variables ocultas locales.....	113
Tabla N° 1:	
Tiempo microscópico y tiempo macroscópico.....	216
Tabla N° 2:	
Premios Nobel de Física por Trabajo	
en el Mundo Macroscópico	218
Gráfico N° 1:	
Coherencia, decoherencia y recoherencia cuántica	227

Prefacio

*–Gigante con pies de barro...
–¿Quisiste decir ‘Héroe de las mil caras’?
–Tal vez sí: Ciencia cuántica, de todas maneras.*

Este libro plantea una teoría: el mundo es cuántico; por tanto, no es clásico, a la manera como la tradición nos hizo creer. Un mundo clásico puede ser entendido de varias maneras: en física, se trata del principio analítico del espacio: es imposible que dos cuerpos ocupen al mismo tiempo un mismo espacio; en lógica, se trata del principio de tercero excluido, según el cual es imposible que una cosa sea algo y otra al mismo tiempo; por ejemplo, que una pared sea una jirafa a la vez; en filosofía, es imposible que el ser no sea, y que el no-ser sea. Otras explicaciones serían igualmente posibles.

Decir que el mundo es cuántico es, inmediatamente, una idea contraintuitiva. Al fin y al cabo, la cuántica se ocupa de fenómenos y comportamientos que no descansan ya, en absoluto, en el primado de la percepción natural y en la importancia de los sentidos. La cuántica habla de superposición, complementariedad, no-localidad, indeterminación, entrelazamiento, tunelamiento, teleportación y otros fenómenos próximos y semejantes.

Proponemos con este libro una teoría del mundo. Para ello, el primer capítulo expone, brevemente, una historia de la física cuántica, cuyo núcleo es la mecánica cuántica. Algunos experimentos centrales, los autores más determinantes, incluso alguna que otra ecuación como ilustración, tejen ese primer capítulo. Sobre esta base, el segundo capítulo es una auténtica novedad. No sabemos de ningún otro libro que sumariamente exponga el abanico, a la fecha, de interpretaciones de la mecánica cuántica. Más de veinte interpretaciones.

Seguidamente, los dos últimos capítulos constituyen, si cabe, el plato fuerte de este libro. Se trata de dos tiempos de una misma idea: el mundo es cuántico. El lector juzgará el acierto del libro. A lo largo del

texto, exponemos qué es una teoría del mundo, y cómo es posible una teoría cuántica del mundo. Hablamos de teoría cuántica por cuanto ésta se articula en cinco capítulos principales así: cronológicamente, se trata de la física cuántica, la química cuántica, las tecnologías basadas en principios y comportamientos cuánticos, la biología cuántica, y más recientemente las ciencias sociales cuánticas.

Existe ciertamente una asimetría en la extensión de los capítulos de este libro. Primero, presentamos una introducción más larga de lo que se acostumbra en un libro, con la finalidad de poner el marco de lo que aquí nos interesa. El primer capítulo cumple una función histórica, esencialmente. El segundo capítulo presenta el panorama de todas y cada una de las interpretaciones de la mecánica cuántica a la fecha y plantea que un panorama semejante es positivo y deseable. Los capítulos tercero y cuarto son el corazón mismo de este libro y en ellos se plantea, en dos tiempos, la teoría formulada aquí. El mundo es cuántico. Cada capítulo implica al siguiente y está tejido sobre los anteriores.

* * *

Este es un texto como tal vez ninguno otro en su especie. No es un libro de física; es algo más que eso. El núcleo duro de la teoría cuántica –o, como en ocasiones lo decimos también, de las ciencias cuánticas–, es la mecánica cuántica. Este es un muy robusto y difícil aparato matemático destinado a explicar justamente fenómenos y comportamientos cuánticos. Pues bien, este núcleo duro ha sido el objeto de numerosas *interpretaciones*. No cabe la menor duda: el Santo Grial en ciencia es la interpretación –de los datos, de los fenómenos, de las ecuaciones, de los experimentos, y demás–. Interpretar es el gran escándalo de la ciencia de corte positivista y pragmático, que clama por calcular y medir, y no por pensar. Interpretar es, distintivamente, un acto filosófico. Que es lo que la mayoría de los físicos o bien no osan, o no se les permite que lo hagan. Libres, nosotros nos atrevemos donde otros no entran. Y planteamos una nueva teoría del mundo, la naturaleza, la realidad o la vida.

El siglo XVII introdujo una creencia que no existía antes, a saber: que existe una realidad anterior al sujeto, independiente de este y superior

a este. Pues bien, el sujeto es precisamente el acto de la observación. En la ciencia clásica, el mundo tiene lugar primero y la comprensión o la explicación suceden después. Sin ambages, la conciencia es un epifenómeno; la historia de esta creencia ha sido bien narrada (LeShan y Margenau, 1996). Así pues, la física cuántica representa el quiebre más importante de esa creencia que instauro la primera revolución científica. Precisamente por ello emergen tantas interpretaciones; esto es, alternativas, cuestionamientos, lecturas acerca de lo que *nos está diciendo* la mecánica cuántica.

De manera significativa, los propios padres de la física cuántica, después de la Segunda Guerra Mundial y una vez que se hubieron decantado los ánimos con todo lo sucedido –Proyecto Manhattan, Hiroshima y Nagasaki, desarrollo de la bomba H, Guerra Fría, surgimiento de un mundo bipolar–, se dedicaron a reflexionar acerca de algunas de las consecuencias de lo que habían sembrado o construido. Todos ellos hicieron entonces elaboraciones filosóficas, y no en pocos casos incluso religiosas o espirituales, sobre la física cuántica. Queremos decirlo, no elaboraciones confesionales –por ejemplo, de una religión determinada, monoteísta, revelada, panpsiquista o algo por el estilo, sobre otra–. A ninguno escapó el hecho de que lo evidente de la cuántica fue, para decirlo con nuestros propios términos sin exageración alguna, el quiebre de la creencia de que la realidad posee un fundamento *in re*, y que la conciencia, e incluso la vida, son epifenoménicas.

Sin entrar en las diversas interpretaciones que desarrollaron los fundadores de la mecánica cuántica –Einstein, de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Bohr, Born, Bohm, y varios más– sobre religión o espiritualidad, es preciso arrojar mejores luces acerca de las diferentes interpretaciones.

Las teorías físicas no constituyen, en absoluto, el único y probablemente ni siquiera el principal modo de una teoría científica hoy en día. El sueño del predominio de la física como ciencia primera –en filosofía se hablaría de *prima philosophia*– fue exactamente el sueño de una teoría física como teoría *par excellence*. Toda teoría física se caracteriza por su predictibilidad y por la reproducibilidad del experimento. Asimismo,

es una teoría que, si bien puede reconocer la complejidad del mundo y la naturaleza, sostiene que en la base de la complejidad hay principios o comportamientos o leyes elementales. Murray Gell-Mann y Steven Weinberg expresan bien esta idea (Gell-Mann, 1996; Weinberg, 1992).

Pues bien, las matemáticas han conocido en el curso del siglo XX y hasta hoy un desarrollo magnífico como nunca antes había sucedido en la historia de la humanidad, y ha quedado en claro que las matemáticas se ocupan de mundos (matemáticamente) posibles incluso independientemente de que puedan ser incompatibles con el punto de vista físico. La topología, la cohomología o el estudio de la simetría y el descubrimiento del grupo Monstruo son algunos ejemplos conspicuos. El fisicalismo es un sueño que ya se soñó. Digámoslo de modo directo y provocador: el fisicalismo corresponde a la idea de localidad defendida fuertemente por Einstein.

Habrá que insistir en que la mecánica cuántica es un formalismo matemático. Interpretarla es tarea de todos, matemáticos o no, materialistas o espiritualistas, científicos o filósofos, por ejemplo. En esta tarea, hasta ahora la visión eurocéntrica de la ciencia ha predominado.

En la concepción clásica, Occidente nace con la Grecia clásica, en marcado contraste con la Grecia arcaica y con otros pueblos, culturas y civilizaciones anteriores y gracias a la síntesis con Jerusalén y con Roma. Lo que se llamó el nacimiento del pensamiento abstracto fue, al mismo tiempo, una simplificación. Hemos vivido dos mil años de esta estrategia de simplificación. Contra esta tradición, no es ni evidente ni necesario que la abstracción signifique simplificación. Específicamente, es posible la coexistencia de distintos modelos explicativos del mundo y la naturaleza sin que sea imperativo que uno de ellos predomine, y ciertamente sin que sea a priori y sin que tenga criterios de autoridad sobre las demás; sin relativismos, con posibles diferentes explicaciones del mundo, y sin ser ninguna determinante sobre las demás; nos hemos ocupado de este tema en (Maldonado, 2019b). En esto consiste la idea de complejidad (teoría de la complejidad, ciencias de la complejidad), un tema ciertamente difícil para una mentalidad acostumbrada a criterios unificadores o únicos o simplificantes o excluyentes, tres maneras distintas de decir una sola y misma cosa.

Pues bien, partimos de cuatro hechos: primero, la mecánica cuántica no es un fenómeno estático y definitivo; ha evolucionado y con el tiempo se ha transformado. Segundo, cada vez es menos cierto que se aplique a nivel atómico o subatómico; efectos cuánticos macroscópicos como la superconductividad y la superfluidez, instrumentos como el SQUID o el LASER, sofisticados tejidos de fibra óptica o simplemente dispositivos optoelectrónicos, imposibles de concebir por fuera de la fenomenología cuántica lo demuestran. Tercero, existen numerosas interpretaciones de la mecánica cuántica; la inmensa mayoría de interpretaciones, tema central de nuestro libro, suceden después de la Segunda Guerra Mundial. Cuarto, no existe aún algo así como una teoría del mundo cuántico debido a que ha existido tradicionalmente una antinomia entre ciencia y filosofía; esto es, entre mecánica cuántica, las interpretaciones de la misma, y numerosas implicaciones, consecuencias y significados que son eminentemente filosóficos.

Queremos proponer de entrada en este libro una idea: el mundo es cuántico. De salida, la idea es (deviene en) una teoría. La amalgama entre la filosofía de la naturaleza y la naturaleza de lo que hoy debe entenderse por filosofía es este texto, en el que convergen la complejidad del mundo real y la simplicidad del mundo de las partículas. Las ciencias de la complejidad deben abordar los dos espacios, pero deben hacerlo como corresponde, no solo con esquemas mentales que corresponden al mundo de las ideas (platónicas).

* * *

Antes de entrar en el tema, queremos dar nuestro reconocimiento a las diversas personas e instituciones que han contribuido a plasmar esta primera etapa sobre el controvertido tema de las interpretaciones. En primer lugar, nuestras familias. Es cierto: en numerosas ocasiones los autores escriben la deuda y la gratitud con sus familias por haberlos abandonado un tiempo mientras escribían un libro. Gracias a las circunstancias del Covid-19 fue posible estar en casa y escribir el libro a la vez. Dedicamos este libro a Laura, Santiago, Julia y Constanza. Buinaima no sería la misma si “Conny” ni se hubiera apersonado desde el comienzo. Jairo tiene que agradecer a la Universidad Nacional de Colombia, particularmente al Departamento de Física, su apoyo a lo

largo de medio siglo. Carlos expresa su reconocimiento a la Facultad de Medicina de la Universidad El Bosque: el espacio de investigación ideal para la investigación.

Introducción:

Entrecruzamiento entre las ciencias naturales, las matemáticas y la filosofía

El eterno misterio del mundo es su comprehensibilidad
(Einstein, 1936, p. 351)

Este no es un libro sobre el formalismo de la mecánica cuántica. El término “mecánica cuántica” fue empleado por primera vez por Born y Jordan a finales de 1925 y fue acogido sin crítica alguna por los fundadores de la nueva teoría (Born y Jordan, 1925). A todas luces, como se puede concluir de sus textos originales, se trataba de sustituir la mecánica desarrollada desde Newton, aparentemente válida para el mundo macroscópico, por otra que incluyera la nueva fenomenología observada a nivel atómico. Pero los fenómenos cuánticos son la negación del mundo clásico. Por eso, como afirma Dirac en sus famosos *Principles* (1932), era indispensable partir de un nuevo marco conceptual; habría sido desastroso limitarse a corregir de alguna manera las deficiencias de la mecánica newtoniana para producir una teoría capaz de explicar *el nuevo mundo*, ese que se ha dado en denominar precisamente “cuántico”. No se trataba de describir “el mecanismo” por el cual un núcleo se desintegra; es más, no hay un “mecanismo de reloj” que nos permita saber en qué momento eso va a ocurrir. Puede ser en un tiempo tan corto como el de la escala de Planck (véase más adelante), o no decaer en un tiempo tan largo como el que le asignamos al proceso de expansión del universo a partir del Big Bang, que por cierto no puede calificarse de “enorme explosión” a pesar de sus consecuencias: a lo mejor, no es posible localizar los puntos (seguramente no uno solo) en los que ocurrió la supuesta explosión (si es que puede asemejarse a eso), como suponemos que ocurre, gracias al principio de indeterminación, con las partículas elementales. En la nueva teoría que ha surgido al cabo de un siglo, la teoría cuántica de campos, o su aplicación más formidable, el modelo estándar de partículas elementales, no podemos partir de un fotón visualizado

como una diminuta partícula localizada, sino precisamente “como un campo cuántico” que puede ocupar todo el espacio.

Que algo andaba mal con la física clásica, no era una idea novedosa a finales del siglo XIX. Las anomalías iban en aumento, pero los físicos a finales del siglo XIX se negaban a aceptarlo. Ellos creían ciegamente que ya no había mucho más que descubrir, tal vez correcciones en la precisión de las medidas o banalidades de ese estilo. A pesar de la hipótesis atómica, de vieja data entre los presocráticos, para la mayoría de estos nuevos filósofos de la naturaleza la materia era continua. Fue precisamente Einstein quien no solo se atrevió a tomar en serio la hipótesis atómica; su osadía fue mucho más lejos en aquel *annus mirabilis* (1905), cuando se atrevió a proponer que esos campos clásicos de los que nos hablara Maxwell eran, en realidad, corpúsculos de energía, energía pura concentrada en un punto. El mismo Planck calificaría la idea de absurda.

Examinemos los conceptos que expresan esos términos, atomicidad (indivisibilidad) o continuidad, no ya en la matemática —pues podemos hacerlas continuas o discretas a voluntad o conveniencia—, sino en el mundo físico, ese que llamamos “real”. Un punto matemático es eso: no se extiende en ninguna de las direcciones del espacio, pero es a la vez el punto de partida para trazar imaginariamente una línea, recta o curvada; no nos preocupemos por ahora de su forma. Un instante podría ser, por convención, la atomicidad equivalente del tiempo: un punto en la línea imaginaria del tiempo. En la teoría de la relatividad no se puede hablar del espacio y del tiempo como conceptos absolutos sino del espacio-tiempo. El punto imaginario a que nos referimos tiene ahora cuatro dimensiones. ¿Imaginar ese punto es tan solo una abstracción?

Creíamos que el mundo físico estaba lleno de materia. Imaginábamos que la materia llenaba todo el espacio, ese espacio absoluto que ahora resulta imaginario. El mundo real no es ese, pues en el espacio-tiempo también hay energía y hay también información. Clásicamente, la información se mide en *bits*, cuánticamente en *qubits*, pero definirla es otra cosa. Tampoco es trivial definir la energía; un fotón es *energía pura*, pero no tiene masa en reposo. Y la masa es “lo que provee el bosón de Higgs”. Por eso los gluones, al igual que los fotones, no tienen masa (esto es, energía en reposo), de la que sí disponen los neutrinos y los bosones

de la interacción electro-débil. Cuando queríamos hablar de materia en el siglo pasado solíamos decir que estaba compuesta de átomos y de moléculas. Y si queríamos referirnos a la vida elemental, pensábamos en células. El ADN solo o el ARN solo no tendrían vida. Los virus tampoco: probablemente eso ya no es válido. Pero vamos por partes.

Partamos de 1923. En aquel año, Paul Langevin tenía como estudiante de doctorado a un brillante príncipe cuyo hermano era físico experimental. Se trataba de Louis Victor de Broglie, de la casa Broglia. Contra todo lo que cabría suponer sobre el electrón, la partícula descubierta por Joseph J. Thomson en 1897, de Broglie asumió que ese objeto exhibiría también un comportamiento ondulatorio. La idea sería la misma de Einstein, pero invertida. Ante tan inaudita hipótesis, su tutor consultó a Einstein su autorizada opinión, a lo que el ya famoso genio comentó: “es el primer rayo de luz en esta terrible obscuridad”. El noble estudiante se graduó con honores en 1924. Se habían logrado acumular suficientes fichas para armar en forma definitiva –al menos eso se esperaba– el marco general del nuevo rompecabezas teórico.

La mecánica cuántica se formaliza en los años 1925-1927 a partir de observaciones que se remontan algunas de ellas al siglo antepasado, otras más a comienzos del siglo XX, y sobre todo, a planteamientos, postulados e interpretaciones que se desarrollan en los últimos noventa años, como queremos ilustrarlo. Se trata de un muy robusto aparato matemático dedicado a explicar los fenómenos y comportamientos cuánticos. En 1927 se realiza la quinta reunión de las conferencias Solvay, la más famosa de todas; el tema central fue “Electrones y fotones”. El evento reúne a veintinueve personajes, de los cuales diecisiete habían recibido o habrían de recibir después el premio Nobel en física o química. Sin embargo, es claro que la mecánica cuántica –que es, verosímilmente, el núcleo duro de la física cuántica–, no se detiene en aquel famoso año. Continúa desarrollándose hasta el día de hoy. Sus aplicaciones en la química no se hicieron esperar; lo mismo puede decirse de sus aplicaciones a sólidos cristalinos. A la formulación relativista de la teoría (1928) siguió la de la teoría cuántica de campos, que llevaría posteriormente, en los años 1970, al denominado *modelo estándar* para las partículas elementales. Ese modelo continúa siendo el predominante, a pesar de que muchos parámetros se siguen introduciendo *ad hoc*.

A pesar de los grandes triunfos de la teoría en el terreno de las aplicaciones, desde un comienzo tropezó con dificultades en la interpretación de sus *principios*. Por un lado, Bohr, Born, Heisenberg, Jordan, Pauli, Dirac y otras figuras estelares que marcaron la pauta para la interpretación dominante se distanciaron de Einstein, Planck, Schrödinger y de Broglie, una importante minoría. Por el otro, el carácter probabilístico de la teoría, introducido principalmente por Born, y los principios de superposición, de indeterminación y de complementariedad —este último, responsabilidad de Bohr— hacían que la nueva teoría fuera principal y prioritariamente un rompimiento definitivo con la causalidad, un principio que difícilmente podía echarse por la borda. Algunos aún se resisten a abandonarlo. Ese será el tema de los capítulos que siguen.

Si 1900 (el año de Planck) marcó el nacimiento del *quantum*, la publicación en *Physical Review Letters* (PRL) de EPR (por el apellido de sus tres autores, a saber, Einstein, Podolsky y Rosen) en 1935 fue el inicio de una segunda revolución cuántica sin haberse consumado la primera (Einstein *et al.*, 1935). Los autores concluían que la mecánica cuántica no podía dar una descripción completa de la realidad física. Cabe mencionar que con la migración a América de una buena proporción de los investigadores en la física de punta que empezó a desarrollarse en los países europeos, PRL se convirtió en la primera revista de física a nivel mundial¹.

Poco después, en el mismo año de 1935, E. Schrödinger publicó su mayor crítica a la teoría que él mismo había ayudado a construir con tanto esmero y que culminó con su *mecánica ondulatoria* una década antes (1926); tanto que creyó con ella habernos liberado de los “malditos saltos cuánticos” propuestos por Bohr en 1913. La ecuación que lleva su nombre suele presentarse como el punto de partida de una nueva teoría en física, usualmente denominada *mecánica cuántica*. Su contribución en los años 1930 sigue produciendo todavía confusión: se condensa en la famosa paradoja, formulada como un experimento mental, la del

1 Antes de la segunda guerra mundial el centro de la ciencia mundial era Europa en general, y Alemania en particular. Después de 1945, la ciencia en general encuentra su centro en Estados Unidos, una situación que, grosso modo, pervive hasta la fecha. Cfr. (Reisch, 2009).

Gato de Schrödinger. ¿Puede el felino estar vivo y muerto a la vez en la caja de Schrödinger?

Niels Bohr, por su parte, creyó haberse salido con la suya una vez más aquel mismo año memorable (1935) publicando en la misma revista que lo hicieron los autores de EPR un artículo con el mismo título que aquellos, pero llegando a la conclusión opuesta: la mecánica cuántica sí es una teoría completa. El mutismo (público) de Einstein de ahí en adelante, interrumpido solo por comentarios sin mayor trascendencia, o bien en la amplia correspondencia sostenida con Max Born y otros expertos en el tema, parecía haberle concedido la razón a Bohr. El malestar con la teoría cuántica que él mismo había ayudado a construir le acompañaría hasta su muerte, acaecida en 1955. Casi noventa años después, la interpretación en boga sigue siendo la del “Imperio de Bohr”, es decir, la de la escuela de Copenhague.

Nos referimos al *imperio de Bohr*, aunque el nombre no es quizá el apropiado. La interpretación dominante no es solamente la de Bohr o, de manera más fiel a lo que se quiere decir, la llamada interpretación de Copenhague. Esta es una interpretación variopinta de la que podrían hacerse más de diez imágenes sobre la interpretación definitiva que, para todos los efectos, podría llamarse la *no realista*. “No existe el mundo cuántico”, empleando las palabras de Bohr. Heisenberg es más explícito: “...los átomos o las partículas elementales en sí no son reales”. Einstein opinaba lo contrario: “Prefiero creer que la luna está ahí, aunque no la esté mirando”; es una expresión que bien podría interpretarse como la réplica, no solamente a Bohr sino a todos los que piensan como él y, por supuesto, a los universos paralelos “tan irreales” como el que propone Bohr o quizá más. “Universos infinitos que surgen por doquier a todo instante” parece una idea descabellada. ¿Es el remedio peor que la enfermedad? El *colapso de la función de onda* es el Talón de Aquiles de la teoría. Decir que hay un paso brusco del mundo cuántico al clásico no arregla las cosas, las complica. El llamado “Principio de Correspondencia” es un intento desesperado por “poner las cosas en su sitio”. La complementariedad, “escudo de armas” del *máximo representante* del “imperio”, a pesar de haber sido defendido “con furia” por cerca de un siglo, sigue dejando mucho que desear. Como consecuencia, en lo que va corrido hasta la fecha las interpretaciones siguen apareciendo por

doquier y el *paper* de EPR sigue siendo un referente obligado, como lo sigue siendo el teorema (de la desigualdad) de Bell, de trascendental importancia para lo que vendrá.

En el capítulo uno haremos referencia a la merecida fama que adquirió EPR a partir de los años 1960. También es de destacar la todavía mayor fama del *paper* de Bell que retomó el tema: el número de citas de uno y otro sigue creciendo con los años, el de Bell todavía más que EPR. El sabor del vino no se adquiere de la noche a la mañana. Einstein y Bohr, no cabe duda alguna, fueron agudos pensadores. Desconocer los desconocidos aportes de uno y otro sería miope. “¿Significa eso que la teoría esté en rigor *completa*?”, era el cuestionamiento de Einstein. Aunque la desigualdad de Bell ha sido rebatida a nivel experimental, de ninguna manera es concluyente con respecto al “carácter de completud” de la teoría.

El resultado de la desigualdad de Bell es la respuesta a una pregunta bien hecha desde el punto de vista científico. Sentimentalmente ligado a la sospecha de Einstein sobre la incompletud de la teoría, Bell propone que el veredicto se dé en el terreno experimental. Si la desigualdad se cumpliera, Einstein tendría la razón. Pero no toma partido. Hay indicios, por recientes experimentos de Bohm y Aharonov, de que los efectos locales tienen presencia física. La sospecha de uno y otro, desde distintas perspectivas, da lugar a una nueva revolución. A diferencia de Einstein, Bohm propone un experimento que dista mucho de los experimentos pensados por el venerable científico.

Siguiendo los pasos de la historia cuántica a lo largo de un siglo, consideramos que la inquietud de Einstein y sus coautores no ha sido plenamente resuelta. Con una salvedad: la teoría cuántica “completa” exige la *no-localidad*. Hay algo extraño, comparable a lo cuántico, en la mente del genio de Ulm²: acertar cuando se creía que estaba equivocado. Así ocurrió con su *constante cosmológica*, con los *granos de luz* y con la *espeluznante acción a distancia*. Si se parte de las dos

2 Ulm es la población alemana en donde nació, en el seno de una familia judía, el padre de la relatividad; como dato curioso, anotamos que fue también allí donde nació Nicolás de Federmán, el conquistador español que llegó a la antigua Santa Fé de Bogotá justo a tiempo para asistir a su fundación.

posiciones irreconciliables de Einstein y de Bohr, las opiniones se dividen en dos categorías: la de los realistas consumados y las de los no realistas por principio. A diferencia de la energía, discreta en el mundo microscópico, un espectro continuo de opiniones se encuentra entre esos dos extremos. Eso no ha sido malo, como argumentamos a continuación y en los capítulos centrales de este libro. El acierto del “padre de la relatividad” no fue negar la no-localidad, fue precisamente ponerla de manifiesto como nunca antes había ocurrido antes de esa fecha en que se escribió y publicó EPR.

El entrelazamiento cuántico, *el mayor de los misterios* de acuerdo con la mayoría de expertos, fue imaginado por Einstein, pero su incredulidad, o mejor, sus convicciones *relativistas* y deterministas, le impidieron aceptarlo: sería fruto de la fantasía, más que de la imaginación creativa. Lo mismo cabría decir de Schrödinger, cuando le recriminó a Bohr “la idea de los saltos cuánticos”, un disparate, a su modo de ver en ese entonces. David Bohm retomaría las banderas de Einstein y Schrödinger dos décadas más tarde, elaborando una atrevida propuesta no-local que no fue del agrado de Einstein.

Schrödinger cambiaría de posición una década después de haber recriminado a Bohr por sus “saltos cuánticos” y reconocería, además, que el entrelazamiento, *Verschränkung*, es la característica principal de la teoría cuántica.

* * *

¿Realidad?

Repasando la propuesta de Bohm, el gran descubrimiento para la segunda revolución cuántica en pleno apogeo es que la no-localidad está por todas partes. De existir variables ocultas, estas tienen que ser necesariamente no-locales. Así lo demostraría Bell una década después trabajando a hurtadillas en la demostración del famoso teorema que lleva su nombre. Todo indica que la motivación principal de su autor fue darle la razón a Einstein. El teorema es clásico, pero los resultados de las pruebas demuestran a las claras que el universo tiene que ser cuántico, es decir, *no-local*. Hemos subrayado el califi-

cativo, porque la equivalencia entre cuántico y no-local no es siempre apreciada. Si la teoría definitiva se llamara de otra manera, tendría que continuar siendo no-local, esa es su característica principal. ¡La historia está llena de paradojas! ¿Serán esas paradojas fruto de efectos no locales? De ser así, una vez se aceptan estas *indeseables acciones a distancia*, las paradojas desaparecerían. Si hemos de creer a los experimentos, los efectos no locales invaden la fenomenología cuántica. Y si de ella provienen los *aparentes* efectos clásicos, o mejor, si el mundo clásico es la evolución del mundo cuántico (no hay razón alguna para que sea a la inversa), eso indicaría que *lo más maravilloso del universo son los efectos no-locales*, sea o no comprensible en el sentido einsteniano.

Hay un acuerdo prácticamente unánime en que la física cuántica, como muchos físicos prefieren hoy en día denominarla (antes se denominaba a secas mecánica cuántica), goza de una salud envidiable. “Así como está, está bien”, diría quizá un 99 % de quienes practican esa ciencia. Quienes no, los que se limitan a utilizar sus inimaginables características en dispositivos, máquinas, herramientas, materiales de todo tipo — así desconfiaran de su completud, que no es el caso —, la usan con entera confianza, a pesar de su presunta *indeterminación* “por principio”. Nosotros no somos la excepción, pero preferimos elaborar nuestra propia interpretación; digámoslo de entrada: nos proponemos formular una teoría, que es, por tanto, bastante más que una interpretación. Una teoría como la que proponemos no ha sido antes planteada de forma explícita y directa.

Bell resulta importante en este marco. Dejaremos de lado sus contribuciones en múltiples campos de la teoría cuántica, salvo en uno: el de la completud o no de la teoría cuántica. Quien aborde el tema tendrá que tomarlo como referente obligado. En los años 1930, el punto de partida fueron los clásicos textos de Paul Dirac y John von Neumann. Particularmente este último había puesto punto final a la discusión sobre variables ocultas antes de que EPR volvieran sobre el asunto: “No existen variables ocultas que puedan ser compatibles con el formalismo de la mecánica cuántica”, fue su veredicto. Pues bien, el primer aporte de Bell a esta discusión fue develar un error en la demostración de von Neumann. Su segundo tema fue EPR y

posteriormente, hasta su muerte acaecida (de manera accidental y absurda) en 1990, su producción en estos tópicos fue no solo pionera sino abundante. Esta fue recopilada en un texto con el título de uno de sus artículos que mereció una segunda edición, esta vez con una introducción hecha por el premio Nobel en física Alain Aspect: *Lo decible y lo indecible en la mecánica cuántica* (2004). Se han celebrado ya dos congresos (*un)speakable*, uno para conmemorar el décimo aniversario de su fallecimiento (2000) y otro para celebrar el cincuentenario desde la publicación de su teorema y del artículo que le siguió (publicados en 1966 y 1964, respectivamente, en ese orden). Está previsto otro de la misma serie cuando se cumpla el centenario de su natalicio (2028). En todo caso, téngase en cuenta que con esas conmemoraciones se está también reconociendo la importancia de la investigación en los fundamentos mismos de la mecánica cuántica, lo que de alguna manera se había perdido debido al *imperio de Bohr*, es decir, al primado de una interpretación monolítica.

Hay que decir, por lo demás, que los avances logrados por Nicolás Copérnico, retomados por Galileo, Kepler, Newton y otros nos llevaron, a pesar de sus errores, a una nueva comprensión del mundo. El siglo XVII instaura una idea. Se trata de la creencia según la cual: a) existe una realidad objetiva y anterior al ser humano, y b) esa realidad posee un fundamento *in re*, que es al cabo susceptible de ser explicado mediante leyes físico-matemáticas. Nunca antes había existido una creencia semejante, y somos herederos de la misma. Esta creencia es la que expresa Einstein cuando afirma que el eterno misterio del mundo es que sea “compreensible”. Pues bien, por paradójico que resulte, a pesar de su *oscuridad fundamental*, la mecánica cuántica es el más fuerte de los cuestionamientos de dicha creencia; más específicamente, esa creencia que imperó durante cuatro siglos ha llegado a ser cuestionada en sus propios fundamentos, gracias, notable y originariamente a la interpretación de Copenhague.

Cuando se publicó EPR, el padre de la teoría general de la relatividad había aceptado a regañadientes el mal llamado principio de incertidumbre, uno de los principios fundamentales de la nueva física, formulado por Werner Heisenberg en 1927. El famoso escrito conocido como EPR, publicado con sus auxiliares Boris Podolsky y Nathan

Rosen en 1935, pone en duda que la mecánica cuántica sea una teoría completa, pero por otras razones; en particular, porque parece no ajustarse a su teoría de relatividad especial. Einstein moriría veinte años después, creyendo todavía que el mundo es comprensible en términos de localidad y realismo.

¿Habrá que redefinir “la realidad”? Uno de los físicos más destacados de la segunda mitad del siglo pasado, recientemente fallecido, escribió sarcásticamente: *no sé qué es la realidad, y no me interesa*. Se trata de Stephen Hawking, quien ocupó la Cátedra Lucasiana (Cambridge, 1980-2009) por cerca de tres décadas. ¿Pueden los físicos hoy, cuando más conocemos sobre el mundo, mirar con desdén *la realidad*, cualquiera que ella sea? ¿Es esa una posición científica? O bien, ¿no será que lo que era “ciencia” ha cambiado –está cambiando– radicalmente?

La física tiene una importancia capital en el ecosistema de la ciencia. Es, para decirlo de entrada y de forma muy genérica, la ciencia que nos permite comprender qué es real, qué es la realidad, y por derivación, qué es la naturaleza, el mundo, el universo. Dicho en griego, es la ciencia que se ocupa *ta physiká*. Ningún pensador inteligente en la Grecia antigua se abstuvo de escribir un libro con este título; análogamente, en otro contexto, como en la Edad Media, los mejores pensadores escribieron siempre una *Summa*.

La física nace dos veces; o en realidad, tres, hasta la fecha. La primera vez, si hemos de creer a la versión habitual, nace con Aristóteles; la segunda nace con Galileo y Copérnico, pero encuentra su cénit con Newton. La tercera, nace con Max Planck, y se proyecta hasta nuestros días como la física cuántica. Con una salvedad: mientras que siempre esta ciencia se ocupó de establecer qué es real y qué no lo es, de acuerdo con Bohr, para quien “el mundo cuántico no existe”, ahora se trata de precisar lo que podemos saber y decir sobre el mundo y el universo, y qué no podemos decir ni saber, siguiendo a Bohr y Heisenberg. Como se aprecia sin dificultad, se trata de un giro radical. Ahora bien, si la física, presumiblemente como ciencia, ha nacido tres veces, la “cuántica” (califíquese de mecánica, de física, de teoría, o más ampliamente, de ciencia cuántica) ha nacido dos: cuando la energía y la materia se volvieron discretas y, posteriormente, cuando

la información, expresada en bits, se volvió continua, “qubits”: *un campo de información*, de procesamiento de la información cuántica (Maldonado, 2021b). Empecemos con el calificativo de ciencia que solemos darle a una descripción supuestamente adecuada de un mundo físico, un universo real. Cronológicamente, la primera revolución cuántica comprende los años 1900 hasta 1935. Luego, por razones extracientíficas, la física cuántica muere debido a la abrupta irrupción de la física nuclear, la Segunda Guerra Mundial y la historia subsiguiente. La segunda revolución científica abarca hasta la fecha, gracias a los trabajos de Bohm –en especial– y de Feynman, una historia apasionante que desemboca en la información cuántica o en el procesamiento cuántico de la información cuyas expresiones más acabadas son el entrelazamiento, la teleportación, el tunelamiento, la computación cuántica y la criptografía (o criptología).

No existe una única comprensión de lo que sea “ciencia” y, manifiestamente, no existe, mucho menos, una única definición de lo que sea “la realidad”. Quisiéramos poder decir, como Hawking, que ese no es nuestro problema, pero no podemos eludirlo. Aunque no nos ocuparemos en el cuerpo de este texto de la historia de la ciencia en general ni tampoco de la historia de la física, precisamente porque no podemos eludirlos del todo, hemos asumido esta tarea dentro de esta introducción a nuestro libro. Pues bien, sorprendentemente, existen a la fecha numerosas comprensiones diferentes sobre lo que sea, y lo que pueda hacer y decir la física (cuántica). Todo reina, menos unanimidad, mayoría o consensos; una situación que merece una mirada cuidadosa. Nos resistimos a afirmar, y la práctica lo demuestra, que el problema de la interpretación sea *una moda, un gusto o simple especulación*. Advirtamos que no tenemos nada contra la especulación filosófica o científica. La especulación es una heurística útil cuando la información disponible no es convincente o no es concluyente.

Durante mucho tiempo, la física tuvo quizás el más alto de los prestigios y lo sigue teniendo en la corriente principal de pensamiento (*mainstream science*). Si algo era ciencia, lo era a la manera de la física. En la mirada tradicional, otras ciencias tenían una valía o un rigor secundario, relativo a la física. De hecho, cuando nacen las ciencias sociales y humanas, nacen teniendo como modelo –epistémico,

lógico y metodológico— a la mecánica clásica (Maldonado, 2016). Digámoslo de manera fuerte y directa, sin ánimo de provocar y sin aspavientos: el prototipo de lo que es una “teoría” (iccientífica!) es la física; particularmente en el ámbito de la tradición y de la corriente principal de pensamiento. Todo el Círculo de Viena coincide en este punto, y con ello, marca el destino de la investigación del siglo XX. Sin ambages, una teoría era física, o no podía serlo. La voz de Popper resuena con fuerza desde el fondo (Popper jamás aceptó que la teoría de la evolución mereciera ese nombre; mucho menos, el marxismo).

De suerte que es imperativo tener una idea básica de lo que sea la física. Pues bien, la física de hoy es, por mucho, la física cuántica. Queremos ir más lejos y proponer que se trata de la ciencia cuántica, no solo de la física. Creemos que es posible tener algo más que una idea básica o fundamental. Para ello, se impone, como *conditio sine qua non*, entender qué son los *quanta*.

* * *

Quantum

Como ya hemos señalado, la hipótesis de los *quanta* en palabras de su autor, “una idea desesperada”, fue utilizada en física por primera vez por Planck en 1900 para poder reproducir los resultados experimentales del espectro de radiación del cuerpo negro, un objeto macroscópico ideal. Muchos años después (1931), recordaría así la situación: “Se puede describir lo que hice como un acto de desesperación, ya que por naturaleza soy pacífico y rechazo cualquier aventura dudosa. Pero por entonces llevaba luchando sin éxito seis años (desde 1894) con el problema del equilibrio entre radiación y materia. Tenía que encontrar, al precio que fuera, una justificación teórica” (Blanco Laserna, 2012, p. 39).

Los primeros indicios de la relación entre la temperatura de un cuerpo y la radiación que emite la encontró el astrónomo alemán Wilhem Herschel en 1800. Desplazando un termómetro sobre las distintas regiones de la luz descompuesta por un prisma, observó que la temperatura seguía disminuyendo por debajo del rojo, una región que por supuesto estaba vedada a nuestra vista: en cada pequeña zona del espectro habría

energía. Por la misma época, Joseph Fraunhofer notaría la ausencia de algunas líneas en el espectro solar analizado mediante el prisma. Se abrió así el camino para los espectroscopistas del siglo XIX que para entonces tuvieron que contentarse con obtener relaciones empíricas; en el caso más sencillo, las líneas espectrales del hidrógeno. Pasaría medio siglo antes de que se intentara encontrar una estrecha relación entre la termodinámica y la radiación electromagnética. Era necesario que la termodinámica recibiera un fuerte soporte en la mecánica newtoniana, mérito que corresponde innegablemente a Boltzmann.

Los estudios sobre la interacción de la radiación en todo su espectro con la materia empezaron con la unificación lograda por Maxwell en 1860; el siguiente reto era unificar esta teoría con la termodinámica y la naciente mecánica estadística. Aunque la hipótesis atómica serviría a Boltzmann no solo para establecer su ecuación de distribución, sino también para formular a nivel microscópico la segunda ley de la termodinámica, no le fue útil para encontrar su relación con la radiación. Hacían falta otros ingredientes que solo podrían provenir de una nueva teoría. No obstante, Boltzmann fue lo suficientemente perspicaz como para darse cuenta que la distribución de la energía tenía que pasar por la discretización de la misma.

Una de las primeras interpretaciones de la teoría cuántica fue la interpretación estadística. Quien la destacó e impulsó desde un comienzo fue el propio Einstein. No debe olvidarse que su tesis de doctorado fue sobre la medida de las dimensiones moleculares aplicada a moléculas de azúcar. Einstein y Planck estudiaron a fondo la teoría de Boltzmann y se inspiraron en ella para enunciar sus respectivas hipótesis. En el antiguo cementerio vienés donde reposan los restos de Boltzmann aparece escrita su famosa ecuación para la entropía $S: S = k \ln W$, donde W es el número de configuraciones o “microestados” que conforman el macroestado y k la constante que lleva su nombre. Las ecuaciones más expresivas suelen ser muy simples. La de Boltzmann conduce directamente a la irreversibilidad en el mundo macroscópico.

Nada ha inquietado más a la humanidad que el carácter irreversible de los procesos físicos, o mejor, “la flecha del tiempo”. El primer aporte genial a ese devenir lo expresó matemáticamente Boltzmann en su

monumental ecuación, tan sencilla como poderosa. No es difícil llevarla al formalismo cuántico y es lo que se ha logrado con la función respuesta generalizada. Recuérdese que la ecuación de Schrödinger también es reversible. La irreversibilidad se introduce “a mano”, generalmente en los procesos de decoherencia.

Dos artículos memorables de Boltzmann son suficientes para destacar su contribución a la física del siglo XX y, por qué no, del presente siglo. Fueron publicados respectivamente en 1872 y 1877. En este último, encuentra que la entropía es una medida de la probabilidad de un estado y que la Segunda Ley se reduce a aseverar que la evolución natural es de estados improbables a estados más probables, “una flecha de tiempo”. La mecánica cuántica nos habla precisamente de estados probables e improbables. La matriz densidad es el mecanismo para tratar todo tipo de procesos, de evolución de un estado a otro, no importa qué tan complejo sea el sistema bajo estudio.

Así pues, a finales del siglo XIX se tenía, por un lado, una teoría unificada del campo electromagnético; del otro, una teoría estadística de los gases fundamentada en la hipótesis atómica. Se conocían los espectros de los elementos hasta entonces identificados y de muchos de sus compuestos, así como el espectro de radiación del cuerpo negro. Pero era indispensable elaborar una teoría que diera cuenta de la interacción de la radiación con la materia. A la luz de la física clásica, los esfuerzos resultarían infructuosos. Fue en ese ambiente que surgió “la hipótesis desesperada” de Planck, que de paso abrió el camino a la nueva física.

Planck se vio obligado a asumir que un cuerpo a determinada temperatura solo podría absorber o emitir energía de la radiación en cantidades enteras (1, 2, 3...) de minúsculos paquetes (cuantos) de energía, no en forma continua como hasta entonces se había supuesto. Esos pequeños paquetes de energía serían tan insignificantes que no deberían poderse diferenciar de una absorción o emisión continua de energía, como *a todas luces* debería ocurrir, pero marcaban la diferencia en sus cálculos para reproducir la ecuación que daba cuenta *exacta* de la distribución espectral. Contrario a sus expectativas, los *quanta* llegaron para quedarse. La llamada *distribución de Planck* se

aplica al universo entero. Ideas más desesperadas que la de Planck abundarían en la construcción del edificio cuántico, pero tomaron otra perspectiva: la de la física atómica o nuclear y la subatómica. Vale la pena insistir en que Planck no era un convencido de la teoría atómica.

El giro trascendental, aunque no aceptado de inmediato, lo daría Einstein. Atomista por principio e inspirado en Boltzmann, propuso que la radiación ya estaba cuantizada. Era natural entonces que fuera absorbida por los átomos y sus electrones en forma discreta. Por cerca de una década su propuesta no mereció atención. Su único éxito hasta entonces había sido explicar el efecto fotoeléctrico, pero a un costo demasiado elevado para los conceptos físicos del momento.

El siguiente paso no fue menos abrupto y lo dio Bohr en 1913, tratando de explicar la estabilidad del átomo recurriendo a la cuantización de sus órbitas. Aunque su modelo estaba restringido al átomo de hidrógeno, las cuentas cuadraban demasiado bien para que fuera rechazado del todo. Los postulados de Bohr hacían uso explícito de la hipótesis de Einstein.

Así pues, el primer triunfo, por cierto, incontrovertible, de una nueva física iniciada propiamente por Einstein en 1905 y continuada por Bohr en 1913, a la que se dio un formalismo matemático impecable en las versiones aparentemente distintas de Heisenberg y de Schrödinger entre 1925 y 1927, fue *explicar* a su modo la *mecánica* del átomo. Se convirtió así, en poco más de dos años, en la gran teoría del momento y del futuro. Las opiniones de estos cuatro grandes personajes no fueron las mismas. Einstein y Schrödinger se apoyaron mutuamente en contra de la opinión mayoritaria, representada por Bohr y Heisenberg principalmente.

* * *

¿Mecánica?

El término *quantum* (en español cuanto, como calificativo, cuántico) sigue siendo ambiguo. Pero basta con la siguiente aclaración, ahora, desde el lenguaje. Como hemos dicho, Planck introduce el térmi-

no –quantum–, en alemán (procedente del latín, con una ligera variación semántica), para designar el más pequeño cambio, la más mínima de las transformaciones en la naturaleza. Es consciente, sin embargo, de que ese cambio depende de la frecuencia. ¿Frecuencia de qué? De la radiación electromagnética. Esa radiación interacciona con la materia, y la materia responde de manera diferente a cada una de las frecuencias contenidas en la radiación, que por cierto tiene un espectro continuo. Planck asume que puede representar la materia por osciladores armónicos. Surge aquí un tremendo problema conceptual, pues quienes pensaban como Planck, al igual que él, no aceptaban la hipótesis atómica. Es esto lo que permite a Einstein, para entonces “una mente revolucionaria”, ir más allá de la hipótesis original de Planck; por ese mismo camino, Bohr llega a unos postulados que, de no ser “por sus frutos”, nadie, ni siquiera el mismo Einstein, estaría dispuesto a aceptar para entonces. Pasa, pues, de los ambiguos “cuantos”, a los “saltos cuánticos”, no solo ambiguos sino “fantasmales”. Einstein no gusta de “efectos fantasmagóricos”.

Conocemos cambios enormes; por ejemplo, terremotos y maremotos, colisiones cósmicas, meteoritos, agujeros negros, explosiones de supernovas y otros. Pues bien, el más pequeño de todos los cambios en la naturaleza atómica –un “quantum”– es que un electrón cambie de órbita (órbita no es un concepto cuántico, ahora se dirá: “cambie de estado”). Cuando el electrón cambie de estado pueden suceder dos cosas: o bien hay una emisión de luz, o bien una absorción. De manera más general, si en el núcleo ocurre un cambio, ese cambio será cuántico. Seguramente ocurre lo mismo con la otra interacción, la gravitacional, pero del gravitón no tenemos todavía evidencias como para afirmar cuál puede ser el cambio mínimo en ese terreno; se supone que es menor que el de los otros *quanta*.

Si ambiguo es el término *quantum*, más ambiguo es todavía el nombre que se le dio a la teoría científica que surgió veinticinco años después de formulada la hipótesis de Planck: la mecánica cuántica, matricial en su primera versión, completada por Heisenberg con la colaboración de Born y de Pascual Jordan (1925), imaginada como ondas de materia en la formulación de Schrödinger (1926), relativista y rigurosamente probabilística en la versión de Paul Dirac (1928). Ya para entonces se

incierto, pues Heisenberg había puesto el *principio fundamental* que, como indicaremos, es en realidad de *indeterminación*. Podría decirse que su primera formulación correspondió a Bohr con sus tres postulados (1913), aunque solo pudo explicar parcialmente *la mecánica* del átomo de hidrógeno; la versión de Heisenberg fue complementada por la notación de Dirac y a la postre sustituida por la formulación menos abstracta de Schrödinger, con la reinterpretación de la *función de onda* propuesta por Born. En los cursos elementales se elude la versión *matricial* de Heisenberg. Es así como se habla de la *mecánica de ondas* (cuánticas, por supuesto). ¡Es ahí donde empiezan los conceptos a ser insuficientes!

Se suele decir que el nombre es lo de menos. Eso es parcialmente cierto, siempre y cuando entendamos el lenguaje (convencional) con el que designemos las cosas. En ciencias y en filosofía de las ciencias o de la lógica, también en matemáticas, el nombre sí importa. Se apela a las definiciones, los postulados, las hipótesis y se construyen los principios. Surge así la inmortal obra de Newton o la igualmente imperecedera de Bertrand Russell y Alfred N. Whitehead, sus *Principia*. ¿Son verdaderos principios los enunciados por los padres de la que hoy debería llamarse (pomposamente) teoría cuántica, o para ser más precisos, ciencias cuánticas?

Los “principios de la mecánica cuántica” son particularmente ambiguos y extraños en su denominación y en su enunciado, con todo y que es la teoría más precisa que se haya construido en toda la historia de la humanidad. Aceptando que los principios son el fundamento de una teoría, bien vale la pena examinar a cabalidad lo que para el caso que nos ocupa significan. Si bien *los juegos del lenguaje* en el sentido de Wittgenstein son perfectamente válidos, el término “mecánica” sugiere al pensamiento una acción provocada por un mecanismo (movimiento y transformación): a toda causa le sigue un efecto. Es el mecanicismo aristotélico-newtoniano. Digámoslo de entrada, de manera escueta: el término “mecánica” no aplica en el caso de “lo cuántico”. Argumentaremos en primer lugar por qué se deben denominar ciencias cuánticas. Paralelamente, en un segundo capítulo, examinaremos distintas interpretaciones en boga, para concluir en los siguientes dos con una ampliación del *campo cuántico* y una nueva propuesta teórica.

Precisemos: los llamados “principios” de la mecánica cuántica no son tales. Hay que eliminar de este contexto cualquier idea principialista, justamente, en el sentido de Newton o de Russell y Whitehead. “Principios” era, simple y llanamente, la manera como Bohr, Heisenberg y los demás denominaron los comportamientos cuánticos y algunas de las características centrales del mundo cuántico. En otras palabras, se trata de una manera de hablar (un juego de lenguaje, si se quiere, *à la* Wittgenstein). Era la forma que imperaba en la época; los “principios” de la física cuántica no tienen, en absoluto, ni un carácter constitutivo, ni tampoco regulativo.

La ley de gravitación universal consagra a Newton como el mayor genio de la ciencia moderna. Ella establece la fuerza que el sol ejerce sobre la tierra y la que esta ejerce sobre la luna, por tanto, el movimiento de una y otra, y recíprocamente. En efecto, su segunda ley es inexorable: toda fuerza que actúe sobre un cuerpo en un momento determinado produce en el mismo un cambio preciso, proporcional a su masa, en la velocidad con que se desplace en ese momento. Es así como podemos predecir el movimiento de los planetas, de los cometas y de todo cuanto en ellos se mueva. En principio podemos describir con la precisión que queramos el movimiento de la masa sujeta a un resorte o dar cuenta de las variaciones en los periodos de las órbitas de los llamados cuerpos celestes. El universo newtoniano funciona de la misma manera que el mecanismo de un reloj: es por eso que el periodo de rotación de la luna y el de oscilación del péndulo pueden servirnos para medir el tiempo con una precisión que depende de cómo se cumplan en la práctica ciertas condiciones que en principio podemos controlar.

La formulación matemática precisa de la segunda ley de Newton exige definiciones que se encuentran en sus *Principia*. La de masa inercial no debe confundirse con el peso, una fuerza. Esa masa dejará de ser constante en la nueva versión, formulada finalmente por Einstein dos siglos y medio más tarde. Su bien conocida fórmula de masa prohíbe que la rapidez (magnitud del vector velocidad, para ser precisos) iguale a la de la luz, la más alta que pueda concebirse hasta el presente, a menos que se extienda la definición usual de masa.

De otra parte, trabajando en su oficina de patentes en Berna, Suiza, Einstein se preocuparía por la sincronización de relojes, un problema práctico de interés en la programación de las salidas de trenes desde distintas estaciones. Hasta entonces se consideraba válida la ley de adición de velocidades, propuesta por Galileo para un espacio y un tiempo que se suponían absolutos. Partiendo de su principio de relatividad y de la invarianza de la velocidad de la luz, Einstein llegaría a otras conclusiones.

Removidas las limitaciones impuestas por un espacio y un tiempo absolutos, examinar la deflexión de un rayo de luz en un campo gravitatorio llevó a Einstein a la formulación de una teoría más general de la gravitación universal, concluida en 1915. Ya antes, en su *annus mirabilis* (1905), había propuesto que la luz está constituida por unos diminutos corpúsculos a los que posteriormente se les denominó fotones. Un siglo antes (1801), Thomas Young había diseñado un experimento que demostraba, contra lo sostenido por Newton, que la luz era un típico fenómeno ondulatorio. Se trata del famoso experimento de la doble ranura. En la imagen de Einstein, la luz podría tener un comportamiento dual. Siguiendo sus pasos, de Broglie (1924) propuso que el electrón, visualizado como partícula, por tanto, obediente a la ecuación de movimiento de Newton en el experimento de John J. Thomson (1897), podría comportarse como onda. La atrevida hipótesis de de Broglie llevó a que en los años siguientes surgiera lo que hasta hoy se sigue denominando mecánica cuántica.

Que la luz sean corpúsculos y los electrones ondas no es algo que pueda demostrarse plenamente. Con experimentos cuidadosos, Young y Thomson padre habían llegado a otras conclusiones. George P. Thomson, hijo del anterior, *demonstraría* el comportamiento ondulatorio del electrón (1927); también lo hizo Clinton Davisson el mismo año en un experimento independiente, por lo cual los dos compartieron el premio Nobel en física en 1937. En resumen, dependiendo del experimento que se haga, se puede demostrar el carácter corpuscular o el carácter ondulatorio de uno y otro, razón por la que puede concluirse que los dos se comportan de la misma manera: su comportamiento es cuántico, lo que para el caso quiere decir *dual*. Tal vez si se hubiera hecho con mayor cuidado el experimento de Young, se habría podido

concluir que *la luz está compuesta por corpúsculos* antes que Einstein hubiera lanzado su famosa hipótesis, la que lo conduciría a recibir el merecido premio Nobel diecisiete años después. Como una nota histórica interesante, para entonces su teoría de relatividad general ya había sido comprobada, aunque no comprendida por quienes le asignaron el premio. Su hipótesis sobre la luz no es suficientemente comprendida aún.

* * *

Imperios

El premio Nobel otorgado a Bohr el mismo año en que fue entregado el de Einstein facilitó a aquel construir lo que alegóricamente y en doble sentido puede denominarse “el imperio de Bohr”. La tenacidad del danés no se redujo a la enorme convicción con que defendió sus ideas e interpretaciones; su prestigio y su encomiable dinamismo le permitieron llevar a cabo exitosamente una empresa que para cualquiera otro hubiera resultado poco menos que imposible: la creación en Copenhague del Instituto de Física Teórica que llegó a ser durante varias décadas el más afamado del mundo. Por allí circularon, prácticamente sin excepción, todas las grandes luminarias del momento. Desde 1965, luego de la muerte de Bohr acaecida en 1962, pasó a denominarse Instituto Niels Bohr. El nombre dado a la interpretación dominante de la mecánica cuántica no lo es solo por Bohr, sino también por algunos de sus ilustres visitantes, entre ellos Heisenberg, Pauli, Jordan y Born. Mención aparte merece J.A. Wheeler, cuando le visitó en 1934 poco después de su doctorado en la Universidad Johns Hopkins.

Wheeler pudo conjugar desde muy temprano el lenguaje de las dos teorías, cuántica y relativista. Junto con Bohr puso los pilares que permitieron el desarrollo de la fisión nuclear. Sus contribuciones en el campo le llevaron, por un lado, a participar en el proyecto Manhattan de manera decidida, con contribuciones de trascendental importancia, y por el otro, a ser el artífice de los primeros modelos sobre los agujeros negros, término introducido por él mismo en la década de los 1960.

A Wheeler correspondió la tarea de formar varios de los físicos que darían un nuevo impulso a los fundamentos de la teoría cuántica y nuevos desarrollos en la cosmología. Feynman sacó sus más brillantes ideas, entre ellas las de la QED y la de suma de historias, de sus permanentes discusiones con Wheeler. Este dirigió también la tesis de Hugh Everett III que condujo a la idea de “universos paralelos”, la de Kip Thorne con sus distorsiones y máquinas del tiempo, agujeros de gusano y otras singularidades. W. H. Zurek, otro estudiante de Wheeler, ha contribuido a entender el problema de la medida y de la decoherencia cuántica. Charles Misner, otro de sus estudiantes estrella, destaca la influencia que Bohr ejerció sobre su tutor. Señala, no obstante, la radical diferencia entre las dos escuelas, la europea de Bohr y la americana de Wheeler. Así lo ilustra Halpern: “La mayoría de físicos norteamericanos (como Feynman) pensaban que todos los argumentos acerca de la interpretación eran irrelevantes para lo que estaban haciendo” (Halpern, 2017, p. 37). Ello no impidió a Wheeler y Feynman imaginar otros mundos en los que el tiempo corre hacia adelante y hacia atrás o una partícula puede ser todas a la vez. La “suma de historias” no es solo un procedimiento de cálculo: en los diagramas de Feynman –el más poderoso del que dispone la teoría de campos cuánticos–, es también “un laberinto de alternativas”, como lo expresa Halpern en su *laberinto cuántico* (Halpern, 2017, p. 18). ¿Por qué no empezar por replantearse qué se entiende por el entretreído del espacio-tiempo desde la perspectiva de la unidad del universo?

La mecánica cuántica y la relatividad general son las dos grandes teorías de la física contemporánea. Aunque sus enunciados son completamente generales, las dos presentan esquemas diferentes y contradictorios del mundo físico. Unificarlas es el mayor reto de la actualidad. Un avance significativo fue la verificación de la existencia de las ondas gravitacionales predichas por Einstein hace más de un siglo (1915), comprobación lograda gracias a nuevas tecnologías cuánticas. En 2017 el premio Nobel fue otorgado efectivamente al Laboratorio LIGO por el descubrimiento de las ondas gravitacionales. Por su parte, la detección del gravitón, partícula mediadora de la interacción gravitacional, tendrá que esperar seguramente décadas. Recordemos de paso que los fotones, granos de luz, son las partículas mediadoras de la interacción electromagnética de cuya existencia ya

no cabe la menor duda. En los tiempos que corren nos encontramos en una promisorio etapa de la segunda revolución cuántica, pero la interacción gravitacional, la más vieja de todas si se parte de Newton, no ha podido ajustarse al nuevo esquema o paradigma de pensamiento.

Si las partículas mediadoras tienen cuantos de energía $\hbar\omega$, como ocurre por ejemplo con los fotones (y los fonones, cuantos de sonido), es posible que sus frecuencias sean extremadamente bajas. Si, por ejemplo, ω vale 2π , la energía es de 6.62×10^{-34} J. Pero puede ser mucho menor. Puede estar en la escala de Planck y es imposible, por ahora, detectar una energía con ese valor. Para dar una idea, la luz visible es de unos pocos eV; 1 eV, recuérdese, es la energía de un electrón acelerado en un potencial de 1 V. Las fuerzas en los imanes también son mediadas por fotones que están por debajo de la región visible. Más sorprendentes habrán de ser los gravitones, responsables de la atracción entre partículas masivas, por ahora invisibles en todas las regiones.

La teoría de gravedad cuántica, cuando deje de ser lo que es hoy, una variedad de modelos que compiten entre sí, tendrá que abordar el espacio-tiempo probablemente de manera diferente a como lo concibió Einstein, un *continuum* creado por la materia-energía que dice al primero (espacio-tiempo) cómo curvarse; su curvatura, a su vez, le dice al segundo (materia-energía) cómo debe moverse. Esta dúplice expresión fue la genial síntesis esbozada por Wheeler del universo einsteniano. De seguro, de estar vivo en 2016, el nombre de Wheeler habría tenido que ser tomado en cuenta por el Comité Nobel a la hora de otorgar el premio por tan grandioso descubrimiento; sin embargo, de manera atávica, se entregan premios Nobel por contribuciones experimentales; difícilmente por teorías. Obsérvese que igual o peor ocurrió con Einstein: el premio Nobel otorgado en 1921, recibido en 1922, le reconoció solamente su aporte a lo que en esencia constituyó el verdadero punto de partida de la teoría cuántica. Su teoría general de relatividad, en particular la predicción recientemente comprobada de las ondas gravitacionales, no fue reconocida por el comité; esa comprobación experimental sí fue reconocida por el comité Nobel con el premio otorgado en 2016.

Dar el salto a una nueva etapa, a un nuevo periodo de la ciencia o un nuevo paradigma, por tanto, a una nueva revolución tecnológica y,

por qué no, filosófica, significaría pasar a la formulación de una nueva síntesis, fruto de una nueva revolución científica, que no es sino otra forma de ver el mundo. Es exactamente en esta dirección que se mueve este libro.

Para resolver el problema planteado por la unificación de las dos grandes teorías de la física es indispensable abordarlo *de otra manera*, aunque nadie sepa todavía plenamente cómo hacerlo. Hay que seguir al pie de la letra el consejo de Einstein: no podemos resolver un problema si no modificamos el contexto o el marco en el que surge el problema. La premisa vale también, por lo demás, para afrontar los retos del futuro, el calentamiento global, las crisis económicas y globales de diverso tipo y tantos otros retos y desafíos. Una *mirada cuántica* exige superar el pensamiento mecanicista y determinista, así como el reduccionismo y el dualismo. También ciertas miradas *espiritualistas* que podríamos calificar de *esoterismo* (la más acendrada de las cuales es el holismo; no precisamente buena ciencia, digamos).

La onda piloto introducida por de Broglie no tuvo acogida sino tres décadas después, cuando Bohm la complementó con el experimento pensado de EPR. Desafortunadamente su propuesta fue mirada con displicencia por parte de algunas figuras estelares del desarrollo de las ideas. Parte de su rechazo probablemente se deba a la tendencia de Bohm, influido por su mujer, a acercarse a figuras controvertibles en el campo de la ciencia y de las religiones. El orden sí importa: si de Broglie hubiera podido defender adecuadamente su idea original, la prevalencia de la interpretación de Copenhague quizá no se hubiera producido.

* * *

Propósito

“El universo se parece cada vez menos a una gran maquinaria y cada vez más a un gran pensamiento”, afirma Sir James Jeans, físico, astrónomo y matemático de la primera mitad del siglo XX (citado por González de Alba, 2001, p. 9). Es notable que Jeans, para entonces, haya dejado de ser “mecanicista”, lo que no ha ocurrido con la ma-

yoría de sus colegas físicos ya avanzado el siglo XXI. Reiterémoslo: nos resistimos a seguir llamando mecánica una teoría que no dispone de “mecanismos”, mucho menos de engranajes y, *à la limite*, de estructuras.

Empezaremos por establecer una distinción conveniente entre mecánica cuántica, física cuántica y teoría cuántica para proponer finalmente una denominación más genérica: ciencias cuánticas. Nos referiremos particularmente a estas últimas sin dejar por fuera, desde luego, a las ciencias sociales y las ciencias humanas (Maldonado, 2019a).

El problema de base que nos servirá como punto de partida tiene que ver con el hecho de que la física cuántica es el primer peldaño de una escalera breve constituida hasta la fecha por otros cuatro escalones, que producen una segunda revolución científica perfectamente distinta y radicalmente opuesta a la primera revolución científica; es decir, la ciencia clásica o moderna. En efecto, mientras que la ciencia moderna se basa en observación y descripción, la física cuántica parte de paradojas en la observación y fenómenos alta y crecientemente contraintuitivos; y adicionalmente, un muy robusto aparato matemático. El experimento de base sucede en 1801, el experimento de la doble ranura de Young. Mediado históricamente por la termodinámica, este experimento habría conducido de manera directa al descubrimiento, totalmente anodino, cuando se lo mira desde la nueva perspectiva, de que la energía, primero, y luego también la materia, son discretas; esto es, no son continuas, de manera alguna. El experimento de la doble ranura podría interpretarse como si un fotón (o un electrón, para el caso da igual) interfiriera consigo mismo, produciendo el resultado totalmente inesperado que se observa en la pantalla.

Pues bien, hay dos cosas que son perfectamente distintas, los estados de las cosas, y sus mediciones. La relación entre ambos es sutil y contraintuitiva. Es lo que puntualmente se denomina el problema de la medición. La realidad ya no se determina ni se comprende con base en observación, descripción, medición. Es decir, la percepción natural y los sentidos no constituyen ninguna garantía para decir lo que es real y lo que acontece; y entonces, tampoco lo hacen para comprenderlo y explicarlo. Este problema es lo que se denomina de

entrada como el problema de la interpretación. Es posible, como sostuvo Einstein, que sepamos todo sobre un sistema y nada sobre sus partes o componentes individuales. Bohr nunca estuvo de acuerdo. El argumento de Einstein se basaba claramente en la mecánica estadística.

Feynman sostuvo que nadie ha comprendido o puede entender lo que es la mecánica cuántica, pues esta es esencialmente incomprensible. Este comentario ha generado ríos de tinta y largas horas de comentarios, aquí y allá. Nuestra posición aquí es que sí es posible comprender la teoría cuántica, incluso independientemente de las technicalidades matemáticas. Esta idea requiere una observación puntual que implica una reflexión breve sobre la filosofía de las matemáticas.

Las matemáticas son un lenguaje, mucho más que una ciencia. Se trata de ese lenguaje que permite comprensión de expresiones gracias al desarrollo de fórmulas y ecuaciones. Hoy por hoy, parece existir un consenso de parte de muchos matemáticos en que las ecuaciones, fórmulas y demás constituyen simplemente ilustraciones de un argumento, pero que no son el argumento (cfr. Penrose, 2012). Queremos plantear de entrada que la mecánica cuántica es un problema filosófico, incluso aunque en ocasiones implique atravesar por discusiones de tipo matemático. Precisamente por ello existen, a la fecha, más de veinte interpretaciones.

Pues bien, contradiciendo a Feynman no solamente es posible comprender la mecánica cuántica sino que, mejor aún, *debemos* poder comprenderla. Se trata del núcleo mitocondrial de lo mejor existente hasta la fecha para entender el mundo, la naturaleza, la realidad, en fin, la vida misma. La teoría cuántica podrá ser —à la limite—, una teoría incompleta, pero debe poder ser entendida. En este sentido compartimos el optimismo de Hilbert: *wir werden wissen, wir müssen wissen*: “podremos conocer, deberemos poder saber”. Toda una filosofía abierta a las posibilidades de comprensión y apropiación.

Digamos, incluso, que es favorable que la teoría cuántica no sea completa; un tema que nos conduce directa e inmediatamente al ámbito de la metateoría y las lógicas no-clásicas. Algo que ha permanecido al

margen, es decir, que sigue siendo algo desconocido por parte de los especialistas física y en las interpretaciones sobre la mecánica cuántica. Todavía más: cuando los filósofos griegos, presocráticos y posteriores, decidieron cambiar la mitología por la observación directa de los fenómenos, llegaron a conclusiones inesperadas. Los epicúreos, Demócrito, Aristarco de Samos, y otros más, para no mencionar a Pitágoras, encontraron cosas tan asombrosas e inimaginables para su tiempo como que la Tierra (con mayúscula) no era el centro del universo y que había partículas diminutas que serían los ladrillos de la materia. Hasta imaginaron que la luz estaba compuesta de partículas todavía más diminutas que los átomos y que entre estos y aquella debería de haber una estrecha relación. Podría decirse, incipientemente, que fue *–ex ante–* el comienzo de los *quanta*. Imaginaron o creyeron que jamás podríamos aspirar a examinar la materia ni a gran escala ni a la escala atómica. En esto último se equivocaron, pero recuérdese que lo mismo ocurrió con las siguientes generaciones de científicos de todas las épocas, incluso los de la primera revolución cuántica. Los de la segunda fueron mucho más lejos, y gracias a ellos hoy se puede manipular “objetos cuánticos”: un fotón, un electrón, un ión y muchos ingredientes más, aunque hayamos sido incapaces de “observar” un quark aislado: ellos vienen en parejas, tripletas, cuartetos, quintetos, sabores, colores, y demás.

* * *

Propuesta de teoría

Con este libro queremos desarrollar una teoría: el mundo es cuántico. Ahora bien, de acuerdo con Maudlin (2019), una teoría física no necesita ser realista o antirrealista, y no es una cosa ni la otra. Son, por el contrario, las actitudes de cada quien hacia la teoría las que la convierten en realista o antirrealista. De manera tradicional, una teoría física es predictiva; debe serlo, o de lo contrario carece de sentido y fundamento. Esta idea nos permite precisar lo siguiente.

Existen diversos tipos de teorías, y las teorías físicas son solamente uno de ellos. Existen, por ejemplo, teorías biológicas, y teorías matemáticas –estas últimas se articulan de forma muy sutil y desconocida para muchas otras ciencias y disciplinas; así, estas tienen: una hipótesis,

una conjetura, un problema, o también una teoría. Existen, asimismo, teorías en química y en ciencias sociales, por ejemplo. Cada una de ellas comporta un significado perfectamente distinto al que es habitual, de corte físico o fisicalista. De la misma manera, existen teorías en las ciencias sociales y humanas que tienen un estatuto propio y merecen por decir lo menos, un respeto. Todo esto es el tema de la filosofía de la ciencia, en el sentido más amplio e incluyente.

Después de Gödel es imposible pretender una teoría completa. De cara a la física, ello quiere decir: carece de sentido pretender una teoría de todas las cosas (*theory of everything*, ToE). Si una teoría quiere ser consistente debe necesariamente ser incompleta; de lo contrario, es simplemente una teoría tautológica. Todas las teorías habidas hasta Gödel (y muchas después de él) son completas; esto es, concluyentes, conclusivas, y por ello mismo inconstantes (= tautológicas). El principio de indeterminación de Heisenberg de alguna manera recoge en la física los teoremas de la incompletitud de Gödel.

Existen y son posibles, adicionalmente a una teoría completa, teorías inconsistentes, paraconsistentes, y subdeterminadas (Maldonado, 2020). El panorama sucinto se condensa en la siguiente ecuación:

$$\{\{\{TC\}\} \{TI\} \{TP\} \{TS\}\}$$

Esta ecuación se lee de izquierda a derecha, así: inicialmente existen teorías consistentes (TC). Una teoría consistente es aquella que pretende ser concluyente o conclusiva. Se trata de la inmensa mayoría de comprensiones y explicaciones habidas en la historia de la humanidad desde los inicios de Occidente. Las teorías consistentes están cerradas; esto es, su capacidad comprensiva o explicativa ya concluyó. Con ellas es posible hacer cosas, pero no es posible hacerles decir más de lo que ya dijeron. Es lo que se expresa con los corchetes repetidos al inicio de la ecuación. Por su parte, las teorías inconsistentes son aquellas que admiten contradicciones, con la condición de que no sean triviales. El mejor ejemplo aquí es justamente la mecánica cuántica: la materia se comporta corpuscular y ondulatoriamente a la vez. Esto es inconsistente, pero no es trivial. Una teoría paraconsistente es aquella que no es superconsistente en el sentido preciso de las lógicas paraconsistentes

estudiadas por N. da Costa. La paraconsistencia, en otras palabras, es el reconocimiento explícito de que la racionalidad y la logicidad no se corresponden necesariamente. Las lógicas subdeterminadas (*underdetermined*) son aquellas que permiten comprender *grosso modo* los fenómenos, aunque se desconozcan los detalles.

El sueño de una teoría completa es, sin más, un sueño ya soñado. En realidad, corresponde a un afán religioso o teológico. La primera revolución científica —esto es, la ciencia clásica— fue víctima de ese espíritu o afán. Las teorías posibles en el marco de la segunda, y particularmente de la tercera revolución científica (Maldonado, 2020c) han sido despertadas por Gödel, y con Gödel también por parte de las lógicas no-clásicas, dicho en general. Pero entonces también, por la propia física que se ocupa de comportamientos, fenómenos y principios cuánticos.

Sin embargo, por el mismo camino, cabe también señalar que carece de sentido pretender una teoría de todas las cosas —*theory of everything* (ToE) —, cuyo espíritu coincide, por lo demás, plano por plano, con una teoría completa.

Sin ninguna clase de relativismo, la cuántica pone al descubierto que no existe “la” verdad, y ciertamente no una verdad única y superior a todas las demás. Este es exactamente el problema de la medición. La complejidad de “verdad” estriba en el reconocimiento de que múltiples verdades son posibles, y ninguna es a priori más valedera sobre las demás. No existe, para decirlo con un filósofo de la mente, “un lugar desde ninguna parte” (Nagel, 1989), esto es, un lugar supremo desde el cual observar el paisaje, con una posición privilegiada y que permite una comprensión de la totalidad y al mismo tiempo de los detalles. Pues bien, no existe ni es posible, en absoluto, una visión desde ninguna parte simple y llanamente porque no existe ni es posible un observador único, privilegiado, de cualquier tipo.

Nos hemos referido a mecánica cuántica, física cuántica, teoría cuántica y ciencias cuánticas en forma indiscriminada. No es el lugar para establecer diferencias, pero sí debe quedar claro que, así como en la física clásica se desarrolló primero la mecánica y luego la electrodiná-

mica, algo similar ocurrió con la física cuántica. La electrodinámica cuántica goza de un gran privilegio: es, dentro de la teoría más precisa, la más exacta de todas. Hubo en una primera etapa, un desarrollo paralelo de la formulación relativista de la mecánica cuántica (Dirac), la formulación de una teoría cuántica de campos y la electrodinámica cuántica. Esta última ha sido hasta el momento la formulación más exitosa de una teoría de campos cuánticos. El modelo estándar es el estado actual de la unificación de los campos cuánticos, intento que en el terreno clásico inició Maxwell y continuó Einstein. La unificación de las interacciones electromagnética y débil, la interacción electro-débil, fue la obra conjunta de Steven Weinberg, Abdus Salam y Sheldon Lee Glashow, por lo cual recibieron el premio Nobel en 1979.

Para terminar esta ya larga introducción, debe decirse que, así como hubo unos personajes, ya mencionados en su mayoría, que fueron protagonistas de la primera revolución cuántica, hay también otros destacados investigadores que impulsaron la segunda revolución cuántica y con ella, tal vez sin proponérselo, un cambio en la concepción del mundo. Lo que nos interesa destacar principalmente no es tanto la revolución tecnológica, por importante que sea. Es difícil hacer un listado con todos los nombres que han jugado un papel relevante, pero indudablemente Bell, por razones históricas y filosóficas debe ocupar un primerísimo lugar, sin dejar de lado una figura que poco ha sido reconocida en la historia de la física cuántica: D. Bohm. Puede argumentarse que Einstein jugó también un papel crucial, con la salvedad de que no creyó en esas acciones no locales que denominó “acciones fantasmagóricas a distancia”.

Es imposible establecer un orden de importancia, ni siquiera mencionarlos a todos, pero cronológicamente nos atreveríamos a mencionar a Abner Shimony, John Clauser, Michael Horn, Richard Holt, Alain Aspect y su equipo, Eduard Fuchs, Anton Zeilinger y colaboradores, Daniel Greenberger, Nicolas Gisin y muchos más.

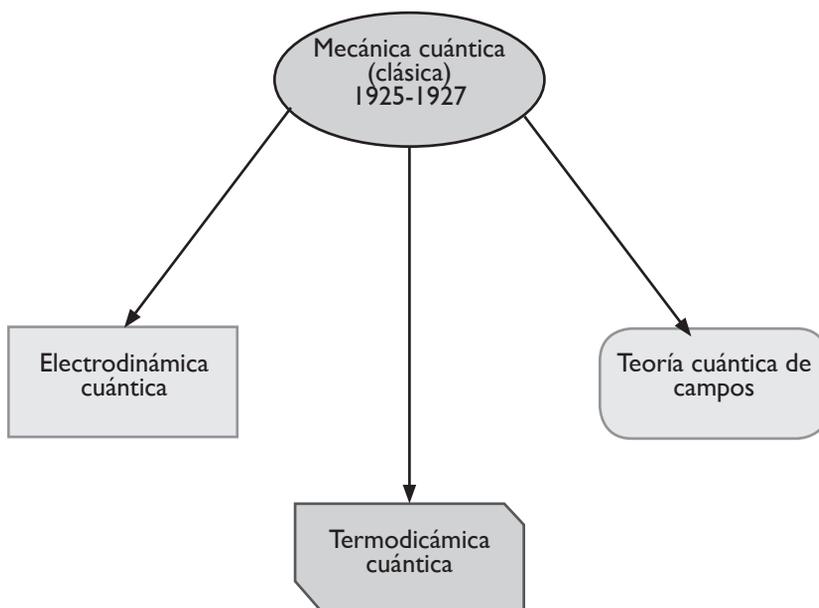
En un extraño proceso histórico que más parece de “entrelazamiento”, los cuatro primeros unieron esfuerzos para: 1) montar un experimento con fotones entrelazados cuya orientación se podía cambiar “al vuelo”; 2) generalizar la desigualdad de Bell para poderla aplicar a fotones con

cualquier orientación. El segundo resultado se conoce con el nombre de teorema o desigualdad CHSH. Para la materialización del primero fue necesario esperar un poco más y condujo a varios resultados que analizaremos al final del primer capítulo. Vino después el teorema de “la no desigualdad” conocido como GHZ. La conclusión final es incontrastable, a pesar de los vacíos que puedan quedar sobre la completud o no de la mecánica cuántica: los resultados que esta predice no pueden obtenerse a partir de teorías de variables ocultas locales.

No tendremos por mucho tiempo una herramienta de cálculo libre de miles de interpretaciones. Dicho en otras palabras, la teoría final es una quimera. En cuanto a los resultados que con ella se obtienen no hay lugar a dudas: generará nuevas formas de sentir, pensar y actuar, o pereceremos en el intento.

El esquema N° 1 sintetiza los ejes principales de su desarrollo.

Esquema N°1: Origen y desarrollos principales de la mecánica cuántica



Elaboración: propia

Una teoría final no puede suponer que la materia sea homogénea. El comportamiento de las rocas y los seres vivos no es exactamente igual, aunque procedan básicamente de lo mismo, al menos en nuestro entorno: electrones, protones y neutrones. En las estrellas, por otra parte, se dan procesos nucleares que generan otras partículas y anti-partículas. Algunas estrellas son mucho más complejas, en particular las que han alcanzado masa varias veces la de nuestro sol. Ni qué decir sobre el comportamiento nada usual de los agujeros negros.

Las rocas son sistemas de átomos en equilibrio termodinámico o cuasi-equilibrio; su entropía se mantiene más o menos la misma por años y hasta milenios; lo mismo puede afirmarse de materiales cristalinos, incluso de los policristalinos. Las estrellas, por otra parte, aumentan la entropía de su entorno a medida que emiten y emiten fotones. Los seres vivos mantienen (des)equilibrio degradando en mayor o menor grado el entorno con excepción de las plantas y algunos tipos de bacterias, cianobacterias, por ejemplo. Dicho en general, los sistemas vivos se hacen posibles gracias a que degradan la energía —en nuestro caso— del sol, y mantienen baja dicha energía. En otras palabras, la vida es un fenómeno consistente en degradar altas energías en energías bajas y mantenerlas bajas. De esta suerte, la vida es la mejor solución que el universo encontró para resolver el mayor de los retos a los que se abocó desde el comienzo: la entropía. Al cabo, la vida se hace posible como un fenómeno húmedo, cálido y pegajoso.

Entre las estrellas y los seres vivos existe otra diferencia básica: el grado de complejidad. Los seres vivos estamos organizados en varios niveles (presuntamente jerárquicos) de complejidad, desde lo subatómico, atómico y molecular, que son básicamente los mismos, hasta aquellos que poseen estructura celular, en los que ya no hay rasgos comparables. A partir de ahí los seres vivos presentan áreas regionales, tejidos, órganos, sistemas de órganos, niveles que están ausentes en las estrellas. Schrödinger se preguntó: “¿Qué es la vida?”, y aunque no proporcionó una respuesta definitiva sí inspiró a quienes la han respondido parcialmente. Sobre estos asuntos volveremos en el capítulo final.

Un comentario adicional cabe, antes de cerrar la introducción: el concepto de calor suele confundirse con el de temperatura. Limitémonos

a señalar que el primero corresponde a lo que en física se denomina una “propiedad extensiva” (depende del tamaño del sistema), mientras que el segundo es una cantidad intensiva. La temperatura poco después del Big Bang (10^{-43} segs. después) debió ser de unos 10^{32} K. El tamaño de esa “pequeña gota de materia” se estima en 10^{-33} cm, casi veinte órdenes de magnitud más pequeño que el núcleo de un átomo de hidrógeno. Hoy la temperatura promedio es de solo 2.7 K, y el tamaño se estima en 13,750 millones de años luz sin corrección relativista, y sigue expandiéndose cada vez más aceleradamente. ¿Sigue esa mota de “materia-energía” que incluye la materia-energía oscura un comportamiento clásico en el sentido de Einstein? Eso es poco probable. Tampoco puede imaginarse como el átomo de Bohr. ¿Qué es entonces lo que sabemos?

Capítulo 1:

¿De qué trata la mecánica cuántica?

Un formalismo matemático

Asumiremos que el lector ha adquirido previamente un bagaje de lo que llamaremos “el mundo cuántico”. Para una breve introducción sin matemáticas a los temas que se tratarán en este capítulo, le sugerimos algunas fuentes recientes (Brody, 2020; Giraldo, 2019; Ball, 2018; Roseblum and Kuttner, 2014)³. Como queda dicho en el Prefacio, según Bohr “no hay mundo cuántico. Hay solamente una descripción física abstracta. Es erróneo pensar que el objetivo de la física sea encontrar cómo es la naturaleza. La física tiene que ver con lo que podemos decir acerca de ella”. Heisenberg, por otra parte, afirmó: “Las leyes naturales formuladas matemáticamente en la teoría cuántica no tienen que ver con las partículas elementales mismas sino con nuestro conocimiento sobre ellas”.

Tales fueron las advertencias de los padres fundadores, para quienes la construcción de la teoría fue un juego de malabarismos, producto de su enorme capacidad creativa. En algunas de las interpretaciones de sus propias concepciones y contribuciones estuvieron equivocados, pero el formalismo sigue siendo correcto. El principio de indeterminación de Heisenberg no se sigue de la explicación que él diera con base en, o en referencia a, la importancia del microscopio; la ondulatoriedad, concebida inicialmente por Schrödinger en un sentido literal, no tiene nada que ver con una onda mecánica. En este último caso, el aporte de Max Born fue decisivo. Algo similar podría decirse de la onda piloto introducida por Louis de Broglie y de algunas afirmaciones (exageraciones) de Bohr.

3 Uno de los autores (JG) ha utilizado en su curso de *Cuántica para todos y para todo* (curso de contexto que se ofrece a todas las carreras en la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá) el texto, por ahora en borrador PDF, *Quantum sapiens I*. La versión impresa estará disponible después que la digital sea revisada por pares.

Uno de los experimentos con que suele iniciar la discusión de los conceptos es el de la doble ranura, brillantemente expuesto y realizado por primera vez hace ya medio siglo (Feynman, 1963; Jönsen, 1961). Vale la pena anotar que Feynman también expresa algunas ideas que hoy suenan un poco estrafalarias y no son de común aceptación: siguen muy al pie de la letra la interpretación de Copenhague. Un texto que sin ambages recomendamos describe en detalle este importante experimento y expresa con claridad los nuevos conceptos básicos, sin que tome partido por la interpretación (Klein, 2004).

La siguiente generación de físicos se encargó de llevar mucho más lejos la separación radical, en ocasiones antagónica, entre los dos esquemas de pensamiento, cuántico y clásico. John Archiwald Wheeler, por ejemplo, asegura: “Ningún fenómeno es un fenómeno hasta que es un fenómeno observado”. De Richard Feynman (1965, p.129), uno de los mayores expertos en el tema durante el siglo pasado, ganador con Julian Schwinger y Sin-Itiro Tomonaga del premio Nobel en física 1965 por la teoría más precisa, la QED (electrodinámica cuántica, QED por sus siglas en inglés) suele citarse la siguiente frase, reflejo del problema de fondo: “Creo que puedo afirmar con certeza que nadie entiende la mecánica cuántica”.

Todavía en la década precedente aparecen serias dudas sobre el problema, no solamente de interpretación, sino de comprensión⁴. Por otra parte: “cabe afirmar que la más importante lección de la mecánica cuántica es que necesitamos revisar críticamente nuestras más básicas nociones acerca de la naturaleza” (Aharonov *et al*, 2016).

Yakir Aharonov y David Bohm son bien reconocidos por el efecto cuántico que lleva sus nombres, “efecto Aharonov Bohm”. Este es atribuido a la existencia del potencial vectorial que se utiliza en la electrodinámica clásica. Para no desviarnos del tema, volveremos a

4 Como ejemplo, véase (Laloe, 2012). El título del texto de Laloe es más que sugestivo: “Do we really understand quantum mechanics?” En esta misma línea, el libro de divulgación de Philip Ball referido anteriormente (2018), empieza recordando la icónica frase de Feynman en el primer capítulo. Además, previamente ha citado en el prefacio “a modo de introducción”, otra afirmación de Feynman: “Espero que puedas aceptar la naturaleza tal como es: absurda”.

él al final de este capítulo, solo para recalcar que en la denominada mecánica cuántica caben muchas interpretaciones.

Con el fin de no exagerar el significado y la trascendencia de la frase de Feynman, admitamos simplemente que muchas de las predicciones de la mecánica cuántica son extrañas, lo que ha dado lugar, y seguirá haciéndolo, a diversas interpretaciones. También Bohr se sorprendería si alguien afirmara que no se inmuta cuando se encuentra por primera vez con esa teoría, concluyendo que es “porque no la ha entendido” (citado en Heisenberg, 1971).

Los físicos que se han preparado matemáticamente para ello entienden, sin duda alguna, el formalismo; todavía más, han logrado aplicar ese formalismo a sistemas físicos cada vez más complejos para hacer predicciones espectaculares acerca de los resultados experimentales. Con las técnicas computacionales del momento han podido hacerlo con una coincidencia entre teoría y experimento que no se había obtenido antes en ningún otro campo. Para reafirmar también la precisión de las tecnologías cuánticas, mencionemos que los patrones de medida, masa, longitud, tiempo, y todos los demás, hoy en día son rigurosamente cuánticos. Por extensión, sin duda alguna, las tecnologías del futuro serán esencialmente cuánticas. Pero asimilar el formalismo medianamente o en forma destacada y poderlo aplicar a las situaciones más complejas no es entender lo que hay detrás de *la teoría más extraña*.

Sin hilar fino en los giros idiomáticos, el “comprehensible” de Einstein puede traducirse a comprensible. Este significado es menos fuerte que el “entendible” de Feynman. Si se maneja el aparato matemático, se llega a resultados que se corresponden con la realidad, la que resulta de la observación. Agreguemos que, gracias al aparato matemático, cuyos cimientos fueron puestos azarosamente desde 1925, se han predicho y encontrado nuevos campos y descubierto o anticipado aplicaciones que de otra manera hubieran sido prácticamente imposibles de siquiera imaginar.

Es posible aplicar el aparato matemático sin comprenderlo. La tecnología cuántica está disparada. Ya la criptografía cuántica es un hecho.

La teletransportación se ha logrado realizar de manera impresionante. Queda, a la fecha, el reto de la computación cuántica. Unos pocos *qubits* no serán suficientes para la mayoría de las aplicaciones, pero las pruebas experimentales han sido sorteadas con éxito, salvo una: el problema de mantener la coherencia sigue siendo un gran reto. Dejemos de lado las aplicaciones tecnológicas. En este capítulo mencionaremos solo de paso el aparato matemático en que se sustenta sin echar mano del mismo, destacaremos algunos aspectos históricos relevantes –no necesariamente en orden cronológico–, y repasaremos sucintamente los aspectos conceptuales más fundamentales –algunos de ellos controversiales–, antes de ir a lo que constituye el propósito esencial de este libro.

El formalismo matemático que se requiere es complicado y muy técnico. Habla de y trabaja con funciones de onda complejas, vectores de estado (*bras y kets*), matrices, productos tensoriales, campos escalares y vectoriales multidimensionales, operadores hermíticos en espacios de Hilbert discretos y continuos, lagrangianos y hamiltonianos, espacios vectoriales de infinitas dimensiones, espacio-producto de Fock, ortonomía, números imaginarios y otros conceptos abstractos.

La mecánica newtoniana se suele resumir en tres leyes, dos de las cuales en realidad son principios: el de inercia y el de conservación de la cantidad de movimiento. La ley de movimiento es la fundamental. A esta se agrega una ley de fuerza, la de gravitación universal. Con las primeras y con esta última, a partir de unas condiciones iniciales, puede predecirse el movimiento de los satélites y de los planetas si se hace caso omiso de las perturbaciones externas al sistema solar. Debe tenerse en cuenta, no obstante, el problema de la precisión analítica, y ha de recurrirse al método de perturbaciones aun para resolver el llamado problema de los tres cuerpos. Siguiendo el mismo procedimiento se pueden resolver, en principio, todo tipo de problemas mecánicos de la vida cotidiana, incorporando los aspectos más relevantes y utilizando diversas herramientas de cálculo; estas son cada vez más eficientes gracias al uso de la computación clásica.

A la formulación original de Newton siguieron las formulaciones Lagrangiana (siglo XVIII) y Hamiltoniana (siglo XIX), dando lugar

a la denominada mecánica analítica. Esta culmina en la ecuación de Hamilton-Jacobi, punto de partida para lo que vendrá después a sustituirla, la abstracta formulación de Heisenberg (1925), y la ecuación de onda de Schrödinger (1926), más intuitiva que la de Newton. Poco después (1927) se encontró que esa nueva mecánica no tenía mucho que ver con la anterior: no solo era completamente contraintuitiva sino que sus consecuencias parecían verdaderamente absurdas, aunque resultaron ser completamente correctas.

Lo básico del formalismo

Los fundamentos de la (mal llamada) mecánica cuántica son unos postulados enunciados matemáticamente. Para entenderlos hay que introducir unos conceptos matemáticos previos que no abordaremos aquí. No son indispensables para los capítulos que siguen y el lector puede dejarlos de lado. Debe advertirse, sin embargo, que no hay acuerdo en la literatura para un enunciado único de los mismos. En los textos básicos, se suele recurrir a la función de onda para hacerlo. En los avanzados, se parte de la matriz densidad, más fundamental. Recurriremos a este procedimiento, dejando de lado los aspectos técnicos.

El *primer postulado* afirma que a todo sistema físico se le puede asociar un espacio lineal de vectores complejos, denominado espacio de Hilbert. El estado del sistema se describe por un operador densidad ρ (una matriz, o mejor, un operador matricial) de traza positiva definido en ese espacio.

Los estados pueden ser puros o mixtos. A los primeros se los representa por un vector en el espacio de Hilbert. En la notación de Dirac (denominada de *bra-ket*, por analogía con los *brackets* o corchetes) esos vectores de estado se suelen representar por el símbolo $|\psi\rangle$ o su conjugado hermítico $\langle\psi|$, para hacer conexión con la llamada *función de onda* $\psi(\mathbf{r},t)$ y su conjugado complejo introducida por Schrödinger. A la formulación de Schrödinger se la suele denominar *mecánica ondulatoria*, en contraste con la de Heisenberg, llamada *mecánica matricial*. Las dos son equivalentes. La notación de Dirac se aplica directamente a la representación de Heisenberg. El vector

de estado, al igual que la función de onda, ha de estar normalizado: $\langle \psi | \psi \rangle = 1$. Un estado cuántico es puro si el rango de la matriz densidad es 1: $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$. La pureza del estado está garantizada si $\text{Tr}(\rho^2) = \text{Tr}(\rho)$.

El *segundo postulado* da la evolución dinámica del estado. Es el equivalente de la ecuación de movimiento de Newton:

$$[\hat{H}(t), \rho(t)] = i\hbar\partial\rho/\partial t.$$

La evolución en el tiempo de un sistema cuántico aislado o cerrado está dada por:

$$[\hat{H}(t), \rho(t)] = i\hbar.$$

La operación $[\hat{H}, \circ]$ se denomina conmutador: $[\hat{H}, \rho] = \hat{H}\rho - \rho\hat{H}$. Esta ecuación garantiza la evolución unitaria del sistema, pero no entraremos en detalles sobre lo que eso significa, salvo mencionar que el operador unitario nos permite obtener la matriz densidad en cualquier instante de tiempo a partir de la matriz densidad en un momento inicial.

Para un sistema en estado puro, la ecuación anterior se reduce a la ecuación de Schrödinger:

$$\hat{H}\psi = i\hbar\partial\psi/\partial t.$$

El *tercer postulado* se refiere a las cantidades físicamente observables o medibles del sistema. En el caso más sencillo, los denominados estados estacionarios (ψ independiente del tiempo), pueden obtenerse a partir de la ecuación de Schrödinger para esos estados estacionarios, la cual toma la forma:

$$\hat{H}\psi = E\psi,$$

en donde E es simplemente la energía del sistema para ese estado. Es preferible entonces hacer referencia a un estado n que se representa por una función de onda ψ_n y que tendrá una energía E_n .

La ecuación anterior es todo lo que se necesita usualmente para calcular en la mayoría de problemas que han de resolver los físicos: problemas de potenciales (confinamientos o ligaduras) no relativistas. El del átomo de hidrógeno fue el primero en resolverse y mostrar la enorme capacidad predictiva de la nueva teoría. Para ello, el protón se trata clásicamente.

El *cuarto postulado* es una prescripción sobre cómo construir el espacio de Hilbert para un sistema compuesto, a partir de un producto tensorial. Permite también separar en dos o más espacios de Hilbert grados de libertad de diferente categoría, como ocurre por ejemplo con las coordenadas de posición y el espín o *momentum* angular intrínseco. También permite separar en dos el problema de dos cuerpos, bajo ciertas circunstancias. Ello no es siempre posible: así como el problema de tres cuerpos en la mecánica newtoniana es complejo, en mecánica cuántica *dos es complejo*. El caso más sencillo, dos electrones o dos fotones, empiezan planteando lo que Einstein descubrió inicialmente y en lo que no creyó: el fenómeno de entrelazamiento, denominado así por Schrödinger.

Principio de Superposición

El principio de superposición es el más básico de los principios cuánticos. Con las propiedades que tiene el espacio de Hilbert, es claro que un estado se puede representar mediante la combinación lineal de dos o más estados o vectores de estado en ese espacio. En eso consiste la superposición, principio extraído de la observación experimental que dio lugar a los postulados matemáticos. Ilustrémoslo específicamente para el caso en que el espacio de Hilbert es bidimensional, dando lugar a dos estados posibles, $|a\rangle$ y $|b\rangle$ en la notación de Dirac.

Si se sabe con certeza cuál es el estado del sistema, digamos que es el estado $|a\rangle$, se debe satisfacer la condición de normalización. En otras palabras, con esa información la probabilidad de encontrar el sistema en ese estado es 100 %: el sistema siempre se observará en ese estado, mientras permanezca aislado. Esto se enuncia de la siguiente manera:

$$\langle a|a\rangle \equiv 1.$$

Lo mismo podría decirse si el sistema estuviera en el estado $|b\rangle$:

$$\langle b|b\rangle \equiv 1.$$

Otro sería el caso si el sistema pudiera estar en cualquiera de los dos estados, con diferente probabilidad, (se asume que los estados son ortogonales, es decir, $\langle a|b\rangle = \langle b|a\rangle = 0$). Escribiríamos entonces que:

$$|\psi\rangle = c_1|a\rangle + c_2|b\rangle,$$

en donde c_1 y c_2 son coeficientes (de probabilidad) complejos. Es evidente que, para que la suma de probabilidades nos dé 1, se debe exigir:

$$|c_1|^2\langle a|a\rangle + |c_2|^2\langle b|b\rangle = 1,$$

de donde se deduce que los dos coeficientes de probabilidad deben satisfacer:

$$|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1.$$

La generalización a más de dos estados es inmediata: si hay n estados posibles para un observable representado por el operador \hat{O} , un estado cualquiera $|\psi\rangle$ se puede representar por una suma ponderada de n términos $|a_i\rangle$ con coeficientes complejos c_i en la forma

$$|\psi\rangle = c_1|a_1\rangle + c_2|a_2\rangle + \dots + c_i|a_i\rangle + \dots + c_n|a_n\rangle.$$

La normalización de la función de onda está garantizada si

$$\sum |c_i|^2 = 1.$$

No entraremos en más detalles. Sólo queríamos ilustrar, a la par con el enunciado matemático del principio de superposición, el formalismo que sirve de fundamento a la mecánica cuántica.

El problema de las interpretaciones

Rigurosamente hablando, como lo hemos advertido e ilustrado en la sección anterior, lo que se denomina mecánica cuántica es su formalismo matemático y nada más. Otra cosa son sus innumerables aplicaciones. En este sentido, podría pensarse que no caben interpretaciones. Pero ha ocurrido todo lo contrario, lo cual en gran medida es positivo.

En principio, podríamos afirmar que es posible elaborar una propia interpretación, siempre y cuando ella se mantenga dentro del aparato matemático y no contradiga sus extrañas predicciones que han sido ratificadas por los resultados experimentales. Aunque las discusiones que se generaron en los primeros años luego de su formulación –1925-1927– sobre el problema de la interpretación fueron muy ácidas, pronto se abrió camino la denominada interpretación de Copenhague, cuyo indiscutible líder fue Niels Bohr y que se erigió en lo que podría considerarse como la versión estándar de la teoría. Así las cosas, durante la mayor parte del siglo XX fueron mirados con escepticismo, por no decir menosprecio, quienes se atrevieron a disentir. Se impuso el famoso “*shut up and calculate*”, recomendación que por cerca de un siglo ha predominado en la enseñanza del tema a todos los niveles⁵. En otras palabras: “haga física y no filosofía”, como si “hacer física” fuera únicamente trabajar –irreflexiva y acríticamente– con el aparato matemático; y como si hacer filosofía fuera deleznable.

Significativamente, en las últimas décadas la situación ha cambiado. Han surgido así no solamente nuevas interpretaciones sino también extensiones a otros campos. La química cuántica se abrió camino desde muy temprano. Ello era perfectamente natural, en la medida en que el nombre mismo, mecánica cuántica, hacía alusión a la supuesta “mecánica” del átomo, por consiguiente, de las moléculas, compuestas de átomos. Más adelante se abrió camino, por la misma razón, la

5 La expresión *cállate y calcula* suele atribuirse equivocadamente a Feynman, seguramente el físico norteamericano más brillante del pasado siglo, al que tendremos que volver en varias ocasiones. La frase se debe originalmente a David Mermin, uno de los opositores a la interpretación en boga, la de *Copenhague*, quien contribuyó a una de las interpretaciones que mencionaremos en el capítulo segundo.

biología cuántica, inicialmente gracias a Schrödinger, con un largo interregno de más de medio siglo. Gracias a esas diversas interpretaciones y a las nuevas extensiones, hoy podemos hablar de ciencias cuánticas y, como argumentaremos más adelante, del mundo cuántico.

Un concepto que parece tomado de una metáfora musical

A continuación repasaremos rápidamente lo que dio lugar al formalismo básico que acabamos de enunciar, *para todos los efectos prácticos* (FAPP, por sus siglas en inglés), sintetizado en la famosa ecuación de onda que lleva el nombre de su creador, el austríaco E. Schrödinger⁶. Tanto en la formulación ondulatoria como en la matricial, el primer resultado de bulto es la cuantización de los valores de energía. Planck ya lo había hecho, siguiendo en todo el procedimiento un esquema clásico. A pesar de esto, no puede negarse el carácter revolucionario de su propuesta, un aspecto que ha sido reconocido por diversos autores, entre ellos Kuhn (1978), y más recientemente, Büttner y otros (2000). Es de resaltar la crítica que estos autores hacen al enfoque de Kuhn.

El oscilador armónico simple es el sistema ligado más sencillo que puede resolverse a partir de la ecuación de movimiento. Su solución en el formalismo cuántico no es del todo trivial. Puesto que la hipótesis fundamental de Planck tiene que ver con este sistema, conviene remontarse más atrás en la historia para comprender su importancia.

“La armonía de las esferas” como concepto es seguramente anterior a la Grecia Antigua. Pero es casi seguro que Pitágoras fue el primero en encontrar la relación entre las longitudes de las cuerdas y sus frecuencias fundamentales, y entre estas y sus armónicos. Esta idea permeó la cosmogonía antigua y medieval. Copérnico cambió las esferas geodésicas de Aristóteles y los movimientos retrógrados de

6 La expresión *for all practical purposes* (FAPP) es debida a John Stewart Bell. Hay otras formulaciones equivalentes de la teoría, en particular la mecánica matricial de W. Heisenberg y los múltiples caminos de R.P. Feynman. P.A.M. Dirac formularía la versión relativista de la ecuación y propondría la nomenclatura más en boga entre los expertos.

Ptolomeo por órbitas circulares alrededor del sol. Es interesante observar que el movimiento circular es una superposición de dos movimientos armónicos simples desfasados noventa grados. Lo mismo puede decirse del movimiento elíptico y elipsoidal con un poco más de complejidad: una diferente amplitud para las dos componentes. Las órbitas elípticas fueron tempranamente descartadas, porque supuestamente eran *imperfectas*. Fue Kepler quien descubrió que las órbitas son elípticas, sin perder su “perfección”. Las figuras de Lissajou exhiben en la práctica combinaciones que van más allá de la combinación de osciladores armónicos. La generalización a tres dimensiones es trivial. En matemáticas, las series de Fourier y sus transformadas nos permiten generar todo tipo de pulsaciones, de oscilaciones, de ondas en tres o más dimensiones. Pierde así el oscilador armónico su complejidad, gracias a las matemáticas y gana espacio el anarmónico, dando lugar a otro resultado de la complejidad: el caos, una variante del orden.

Vale la pena tener en cuenta lo anterior cuando se examina la desesperada hipótesis de Planck a la hora de proponer una solución al problema de la radiación del cuerpo negro. Planck no creía en la hipótesis atómica cuando inició sus investigaciones sobre el cuerpo negro, pero conocía muy bien la teoría electromagnética de Maxwell y la solución que Lord Rayleigh había dado al problema de la radiación en una cavidad: un conjunto de osciladores armónicos que en su concepto tendrían un espectro continuo. La hipótesis desesperada del primero, supuestamente provisional, fue reemplazar una integral por una suma, un espectro discreto, una idea que por cierto ya había propuesto Boltzmann para la energía de sus átomos, en los que no creía Planck.⁷

Sin embargo, Einstein, de mayor estatura intelectual quizá que el mismo Planck, aunque veintiún años menor, con solo veintiséis años fue más lejos. Propuso algo que Planck no pudo aceptar más que a regañadientes cuando la evidencia experimental se puso en contra suya.

7 Vale la pena comparar ese procedimiento con la denominada “suma de trayectorias” (integral de caminos), formulación de Feynman de la teoría que condujera finalmente a sus famosos diagramas.

Einstein toma la idea de la cuantización de Planck, quien la había elaborado para un cuerpo macroscópico, y la extiende a la radiación misma, a cualquier campo electromagnético, en el vacío o en una cavidad, no importa. Logra así colocar el primer peldaño de la cuantización del campo, de hecho, lo que se denomina segunda cuantización. Reemplaza los modos en la cavidad de Planck por partículas de luz que oscilarían de la misma manera que lo hace un oscilador armónico simple. La polarización de la luz que se propaga en una dirección, z por ejemplo, es sustituida por fotones que tienen dos modos de vibración en las direcciones perpendiculares, x e y . La polarización circular, en una dirección u otra, o la elíptica, más general, es una combinación de los dos modos, nada más. La hipótesis de que parten los dos, tanto Planck como Einstein, es la del oscilador armónico simple, pero con enfoques diferentes que conviene tener en cuenta.

El oscilador armónico no es un objeto particular, por ejemplo, un electrón, o un átomo de hidrógeno, o un quark. Antes bien, es un marco matemático que permite comprender una amplia variedad de fenómenos. Ya hemos mencionado a Fourier, podríamos referirnos a “la transformada de Fourier”. Eso nos lleva a dos espacios, el de coordenadas y el de velocidades o cantidades de movimiento. Podemos, inicialmente, ilustrar un oscilador armónico, así sea desde un punto de vista clásico, y luego podremos comprenderlo mejor desde una perspectiva cuántica. Es más fácil entenderlo desde el espacio de fase⁸. Su energía se transforma permanentemente de potencial en cinética y viceversa. Clásicamente, el oscilador “barre” en forma continua todos los puntos que le corresponden en su espacio de fase.

8 El espacio de fase es un espacio combinado de posición y *momentum*. Visualizarlo es muy fácil en dos dimensiones: eje horizontal para la coordenada x , por ejemplo, y vertical para la correspondiente componente de *momentum*, p_x . La energía total se puede escribir como la suma de dos términos, U y K (potencial y cinética), que al sumarlas dan el total $E = \frac{1}{2}p^2/m + \frac{1}{2}kx^2$. Con $k/m = \omega^2$, siendo ω la frecuencia, del oscilador, cuando se escribe la condición de cuantización, $E = (n + \frac{1}{2}) \hbar\omega$, es fácil ver que el espacio de fase es de forma elipsoidal: el oscilador “describe” una trayectoria elíptica en el espacio de fase. Como el radio de la elipse es dependiente de n , un número entero positivo, esas “órbitas” están cuantizadas. Sería ingenuo pensar que, como conclusión, la cantidad de movimiento y la posición en cada momento están dadas de manera precisa. Todo lo que se puede predecir es el valor promedio de esas cantidades.

Cuánticamente esa evolución no se da de manera continua sino por saltos; adicionalmente, no se pasa de un punto a otro sino por franjas discontinuas y en forma aleatoria. Ese fue el escollo insuperable que se encontró para la generalización de los postulados de Bohr, formulados para supuestas órbitas circulares, acompañadas estas de innumerables y fallidos intentos por extenderlas a órbitas elípticas por analogía con el clásico problema de los dos cuerpos.

Un oscilador armónico clásico es una partícula que se mueve en una línea de fuerza que se restaura linealmente; se habla de “fuerza de restitución” debido a que se trata del proceso mediante el cual una masa retorna a un estado de equilibrio. Es comparable esta aproximación a lo que idealmente sucede con las estaciones —en los países donde hay estaciones. Asimismo, otro ejemplo, es el movimiento de una canica que rueda hacia atrás y hacia adelante, por ejemplo, en el fondo de una vasija en el que no hay ninguna pérdida de energía debido a la fricción. Cuánticamente esas aparentes transformaciones, esos vaivenes no ocurren de manera continua, pero se preserva la reversibilidad de los procesos: he ahí la diferencia.

Las oscilaciones armónicas abundan en física, es decir en la naturaleza, pero son resultado de una aproximación. Más explícitamente, se obtienen por el hecho de que un potencial atractivo se aproxima mediante una parábola (oscilación) con un mínimo de la función. En la física clásica podemos acercarnos a esto con la idea del principio de mínima acción. Cuando un sistema cualquiera es perturbado, oscila alrededor —o en las proximidades— del punto de equilibrio. El equilibrio aquí no tiene, en modo alguno, la acepción que el término tiene en la termodinámica. La mecánica clásica sabe de oscilaciones, pero es definitivamente en la física cuántica donde salen a relucir ampliamente.

Hay una radiación electromagnética de fondo que es como el eco del primer amanecer, el Big Bang. Clásicamente se puede considerar que aquella está formada por un *continuum*, pero esa suposición conduce al absurdo de “la catástrofe del ultravioleta”, denominada así por Paul Ehrenfest. Hay que cuantizar, como lo hizo Einstein, esa radiación primigenia para obtener el resultado correcto, la radiación de Planck del llamado *cuerpo negro ideal*, sin importar si representa este una

cavidad hipotética, un horno imaginario o el universo en su conjunto. Esa radiación, ondas electromagnéticas, está compuesta de partículas extremadamente diminutas, como acertaron en calificarlas los presocráticos, los hoy denominados fotones. Esos fotones oscilan, de alguna manera, en dirección arbitraria mientras no los observemos. Pero, además, debemos asumir que llenan todo el espacio (no solamente el *vacío cuántico*, que por cierto no es tal). Una manifestación de ese vacío-lleno es el llamado *Efecto Casimir*, cuya manifestación macroscópica es la fuerza neta de atracción entre dos placas metálicas, un efecto puramente cuántico observable a bajas temperaturas. Esa radiación de fondo permite también explicar las llamadas Fuerzas de Van der Waals, un efecto de polarización (polaridad, oscilaciones de supuestos dipolos eléctricos) que clásicamente no aparece pero que se conoce desde hace mucho, ahora resultado de las fluctuaciones del vacío. Ellas juegan, de hecho, un efecto significativo en la dinámica (leyes generalmente empíricas) de los gases; en otras palabras, una corrección importante al comportamiento de los gases ideales proviene de esos efectos. En las interacciones moleculares que dan lugar a la química, esas fuerzas juegan un importantísimo papel, también a nivel biológico: son efectos cuánticos “triviales” que se invocan en la química y en la biología cuánticas. La polarización a nivel atómico y molecular es fluctuante, es decir, son “oscilaciones del vacío cuántico”.

La mecánica cuántica, tanto como los experimentos en el campo, ponen al descubierto que los electrones oscilan también de alguna forma dentro de la materia, que el mundo subatómico está conformado por ondas y vibraciones, que incluso, en otro plano hay partículas subatómicas, algunas de cuyas características se definen en términos alegóricos de color y sabor. Las teorías de cuerdas y supercuerdas, branas y m-branas, son distintos tipos de “cuantización”, pensando en oscilaciones musicales, de colores, de sabores y demás. Pero no se trata solamente de metáforas. Se trata, por el contrario de matemáticas: nuevas matemáticas. Debido a la importancia que tienen en el marco de la comprensión de la mecánica cuántica y para el desarrollo subsiguiente de este libro vale la pena reflexionar sobre su impacto.

La primera revolución cuántica pivota en torno a dos problemas: el principio de superposición y los estados discretos del oscilador

armónico. La segunda lo hace en torno a dos partículas entrelazadas, trátase de dos fotones o de dos electrones. Las cantidades físicas a observar o medir, la polarización en el caso de fotones y el espín cuando se trata de electrones, son equiparables. Lo más interesante para el caso es el nuevo concepto de información —la nueva unidad— el qubit. Un fotón u otro objeto cuántico (el electrón, por ejemplo) se puede entrelazar, de hecho lo hace, con un ente aparentemente inmaterial: el vacío cuántico. Ese vacío está lleno de partículas y antipartículas que permanentemente se crean y se aniquilan unas a otras. La dinámica de ese vacío es lo que se denomina *fluctuaciones del vacío*.

Como bien se sabe, los fotones son partículas sin masa que se mueven a la máxima velocidad permitida por la teoría de la relatividad: su energía es pura, es solo “de movimiento”, pero está asociada a la frecuencia con que oscilan, la frecuencia de la onda que representa a un fotón. Cuando se descubrieron los neutrinos, se supuso inicialmente que su masa sería nula. Hubo que asociarles luego una masa, también unas oscilaciones, las cuales les permitirían pasar de un tipo a otro. Los neutrinos son de tres tipos: electrónico, muónico y tauónico. Al igual que los electrones, muones y tauones, su espín es $1/2$. Un neutrino electrónico puede cambiar, transmutar a otro muónico o tauónico. Tampoco los bariones son estables. Un neutrón decae en un protón, un electrón y un neutrino. Y así sucesivamente. No puede hablarse de estados en el sentido estacionario. Son estados en un instante que pueden exhibir algo completamente diferente en el instante siguiente, sin que se sepa cuál será ese instante: puede llegar a ser tan largo como la edad del universo o reducirse a cero. No podemos solamente hablar de estados, ni siquiera de procesos, prioritariamente de transformaciones. Pero volvamos a lo más simple, que puede ser muy complejo.

Lo verdaderamente importante es que, a través de un complejo aparato matemático (la mecánica cuántica), la física pone de manifiesto que el mundo está:

- a) Perfectamente afinado, en el sentido literal de una orquesta sinfónica;

- b) Perfectamente sincronizado, particularmente en términos de cargas eléctricas, potenciales, campos escalares, vectoriales y tensoriales, todo lo cual determina los comportamientos cuánticos;
- c) Esa sincronización no significa que los procesos sean solamente cíclicos: unas partículas se transforman en otras; con mayor razón un sistema más complejo sufre transformaciones mayores;
- d) Adicionalmente, el entrelazamiento, como veremos, introduce una sincronización (correlación) adicional, “a distancia o instantánea”, sin que medie señal física alguna. Estas son las rigurosamente denominadas correlaciones cuánticas, por cierto no-locales.

Esta es la importancia para lo que sigue – particularmente de cara a los capítulos tres y cuatro –, a saber: el mundo cuántico es alta y finamente armónico, y esta no es para nada una característica trivial, en marcado contraste con lo que sabemos del mundo clásico, continuo y anarmónico. El mundo cuántico ha sido descrito – matemáticamente – como un mundo afinado y sincronizado, sin metáforas, sin recursos literarios, sin ambigüedades. Es además no-local. El reconocimiento de estas características del mundo cuántico son determinantes a la hora de evaluar su extensión, su profundidad y su necesidad.

Sin dualismos, el mundo clásico se caracteriza por inestabilidades, perturbaciones, fluctuaciones y turbulencias. El mundo cuántico está sincronizado y es armónico. No hay nunca pérdida de energía, y tampoco pérdida de información. Es un mundo perfectamente reversible. Las matemáticas lo garantizan.

Las teorías de cuerdas (que son múltiples), pueden servir como ejemplo del modo de proceder de los físicos teóricos hoy. Ellas asumen que las partículas subatómicas, aparentemente puntuales, son en realidad «estados vibracionales» de un objeto extendido más básico llamado “cuerda” o “filamento”. El esquema matemático solo funciona para un espacio de once dimensiones y debe ser supersimétrica. El nombre genérico actual es de “teoría de supercuerdas”, debe ser invariante bajo transformaciones de supersimetría. Pero volvemos a lo básico, regresando a Bohr, de Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Born y Dirac.

Función de onda monocromática

Schrödinger llegó a su famosa ecuación atendiendo la sugerencia de de Broglie de asociar una onda a las órbitas permitidas previstas por Bohr para los electrones en los átomos. Bohr (1913) se había referido a *saltos cuánticos* en su modelo planetario con órbitas estacionarias para el átomo más sencillo de todos, el de hidrógeno. Con su función de onda continua el primero creyó eliminar esas desagradables singularidades. Las órbitas estacionarias concebidas por Bohr sirvieron también para que de Broglie se inspirara en las ondas estacionarias producidas en cuerdas y otras similares. La interpretación probabilística de la función de onda introducida por Born dio un nuevo giro a la propuesta de Schrödinger: el cuadrado de la amplitud daría la densidad de probabilidad. Esa función podría ser compleja (con parte real y parte imaginaria), pero su amplitud daría un valor real positivo, como corresponde a las cantidades complejas, para poderlo interpretar de esa manera: las probabilidades “reales” tienen que ser positivas y menores que la unidad. Los vectores de estado de Dirac satisfacen la misma exigencia. Poner el énfasis en el cuadrado de la amplitud fue una idea que provino de la característica de las ondas mecánicas en las cuales lo importante, en términos de energía, es su intensidad, dada precisamente por el cuadrado de la amplitud. En la función de onda, la amplitud al cuadrado se traduce en probabilidad.

En el caso más sencillo que cabe imaginar, un electrón que se mueve con velocidad constante estará descrito por una función de onda con una longitud de onda perfectamente determinada: $\lambda = h/p$, siendo h la constante introducida por Planck en su hipótesis de cuantización de la energía y p la magnitud de la cantidad de movimiento correspondiente, $p = mv$. Vale la pena anotar que de Broglie obtuvo su relación a partir de la ecuación relativista de Einstein que relaciona la energía del fotón con su frecuencia, $E = hf$, y con su cantidad de movimiento p , que para el caso tiene masa en reposo nula y se mueve con la velocidad de la luz. Esto es, $E = pc$, (la fórmula completa de Einstein es: $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$, siendo m la masa en reposo). Entre la velocidad de la onda de luz con frecuencia f y longitud de onda λ existe una relación muy sencilla: $c = f\lambda$. Es fácil deducir entonces

la relación de de Broglie expresada arriba, válida para cualquier partícula que tenga una cantidad de movimiento determinada, es decir, que se mueva con velocidad constante ($hf = hc/\lambda = pc$, de donde $\lambda = h/p$).

Creíamos entender lo que oscila a medida que una onda electromagnética se propaga en el espacio: suponíamos que eran los campos eléctrico y magnético, más escuetamente, el campo de radiación electromagnética. El espectro electromagnético tiene una delgada franja visible. Si la onda es plana y el campo eléctrico oscila en una dirección determinada, digamos que vertical, mientras que la onda se propaga en una dirección horizontal, se dice que la luz está polarizada verticalmente. Cabe otra dirección de polarización independiente de la anterior, la dirección horizontal perpendicular a la de propagación. Las dos polarizaciones, vertical y horizontal, pueden combinarse para obtener una polarización oblicua en la dirección que se desee. Nótese que hablar de orientación vertical u horizontal es arbitrario. Para la discusión que sigue es conveniente referirse a estados de polarización, para el caso, vertical y horizontal.

¿Qué es lo que oscila cuando se dice que el fotón está polarizado en una cierta dirección? Suponíamos que el campo eléctrico, también su complemento, el campo magnético, oscilaría en la dirección perpendicular al anterior. Cuando se habla del campo electromagnético clásico, esta interpretación no deja lugar a dudas. En el caso cuántico el asunto es más complejo. En lenguaje cuántico, el estado de polarización se asigna a cada fotón individual. Cuando la polarización no está determinada, se dice que el estado es de superposición. En la práctica, el fotón procede de un átomo también individual en procesos de emisión como el que visualizó Bohr en el primer modelo cuántico para el átomo o en procesos más complejos que se utilizan hoy con tecnologías cuánticas cada vez más sofisticadas. En los procesos atómicos o nucleares usuales los fotones emitidos no tienen una polarización determinada: son estados de superposición. Se suele decir que son estados aleatorios.

Cómo describir un fotón adecuadamente es algo que solo puede lograrse después de haber hecho la cuantización del campo electromagnético. No es necesario hacer todo ese proceso si lo que queremos

es comparar la partícula mediadora aparentemente más sencilla y abundante (el fotón) con la otra partícula más abundante en nuestro *mundo visible*, el electrón. La función de onda de un fotón, siempre libre, es muy similar a la del electrón libre. En un metal o conductor ideal de gran tamaño, el electrón puede representarse por una función de onda muy sencilla, la que hemos descrito arriba. Un fotón se puede representar fácilmente si recurrimos a un esquema *semiclásico* para la interacción radiación materia. Solamente para dar una idea, agreguemos que el resultado es una combinación de ondas sinusoidales en la forma $\text{Sin}(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - \omega t)$, $\text{Cos}(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - \omega t)$. Quienes han oído hablar de la función de Euler reconocerán de inmediato que la combinación más sencilla conduce a $\exp[\pm i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - \omega t)]$. En otras palabras, oscilaciones y ondas de cualquier tipo pueden representarse en últimas recurriendo a esta maravillosa fórmula.

El nombre “vector de estado” para referirse al estado físico de un sistema cuántico, descrito por una función de onda en el lenguaje de Schrödinger y Born, fue propuesto por Dirac, conjuntamente con la nomenclatura en términos de *bras* y *kets* (*rompimiento* de *brackets*). Para nuestro gusto, *estado* a secas, con el adjetivo que mejor corresponda, es un buen nombre. Cuando se habla de teletransporte o *teletransportación* (o incluso *teleportación*), lo que se transporta de Tierra a Marte en tiempo cero es precisamente el estado, no una función de onda ni un vector de estado. Al tema volveremos después. Se pasa de un estado a otro, y en principio el paso está regulado por la ecuación de Schrödinger o su equivalente, la ecuación de Dirac en la región de altas velocidades de las partículas, con el Hamiltoniano adecuado o la matriz que lo represente en la formulación de Heisenberg, o en forma integral adecuada en la formulación de múltiples caminos elaborada por Feynman.

Otras versiones de la teoría, la de la onda piloto, por ejemplo, nos dirán que la onda guía la partícula. Born prefirió decir que la amplitud de la onda al cuadrado es “probabilidad”. Esa fue la interpretación que se impuso. Tal vez la más cercana a la realidad, introduciendo una “aleatoriedad” perfectamente determinada. Por otra parte, la interpretación de “múltiples caminos” se utiliza *mecánicamente*, sin pensar en el sentido filosófico del procedimiento.

La clave de la teoría es la observación

La ciencia moderna nace con base en la observación de los fenómenos y su descripción.

En el sentido clásico, percibir es conocer, y la percepción natural se funda en el primado de los sentidos. Los fundadores de la mecánica cuántica fueron más precisos: la observación es la clave de la comprensión del universo y es la realidad misma. Bohr va más lejos y nos dice que es la observación la que crea lo observado.

Se habla de observables, y para acomodarlos al esquema de la física, una ciencia cuantitativa por excelencia, debe hablarse rigurosamente de cantidades medibles. La medida es, pues, el punto de partida. En ocasiones la medida es simplemente detección. Se detecta una partícula que llega a una pantalla material, formada por átomos o moléculas de alguna sustancia o de algún compuesto químico. Independiente del *mecanismo* que se utilice en el *aparato de medida* (fluorescencia, fosforescencia, contador de centelleo, placa fotográfica, cámara de burbujas, etc.), este tiene que entrar en interacción con el sistema cuántico bajo estudio; el aparato de medida es un objeto clásico en el caso más sencillo (mas no necesariamente, lo que quedará claro más adelante).

Con luz visible, es posible observar a simple vista el fenómeno de interferencia en un experimento de dos ranuras, que fue precisamente el resultado del experimento diseñado por Young. La interpretación del experimento se complica cuando se asume que la luz está compuesta por los corpúsculos imaginados por Einstein. No obstante, es esa la imagen que logra explicar satisfactoriamente el efecto fotoeléctrico, aunque en su momento (1905) no fue aceptada por la comunidad científica. Consiste aquel en desprender electrones de una placa metálica cuando se ilumina con luz visible en la región de mayor frecuencia, por ejemplo, violeta. Si, por el contrario, la frecuencia de la luz se encuentra en la región del rojo, no se logrará desprender electrón alguno del metal incluso cuando la intensidad del haz sea grande. El tiempo que dura la *transición* (absorción del fotón y emisión del electrón) es cero: de no serlo, es tan pequeña que puede considerarse cero, FAPP (*for all practical purposes*). La comprobación experimental del “carácter

granular” de los fotones se realizó mucho después, primero en 1916 (Millikan) y luego, más ostentosamente, en 1923 (Compton).

Los experimentos que comprobaron el comportamiento ondulatorio de los electrones se realizaron en 1927. Los resultados los llevaron a cabo dos grupos independientes, uno en Estados Unidos liderado por Joseph Davisson y otro en Inglaterra dirigido por George Paget Thomson, hijo del descubridor del electrón. Así pues, cada aspecto de la dualidad del electrón, partícula u onda, correspondió descubrirla a dos generaciones, padre e hijo. El principio de complementariedad enunciado por Bohr (1927) refleja ambos aspectos.

Un descubrimiento notable se adelantó a los experimentos que acabamos de mencionar. En un experimento realizado en 1922 por Otto Stern y Walther Gerlach se encontró que el electrón tiene un momento magnético característico, intrínseco. De manera similar a lo que ocurre con la polarización de un fotón emitido por un electrón cuando desciende a un nivel de energía más bajo dentro del átomo del que forma parte, el momento magnético del electrón usualmente no tiene una orientación definida. Aunque su origen se asocia a un *momentum* angular intrínseco, no tiene análogo clásico: es una propiedad rigurosamente cuántico-relativista, un resultado de la ecuación de Dirac (1928). Hay también un *momentum* angular, por tanto, un momento magnético asociado al movimiento indeterminado del electrón alrededor del núcleo. El *momentum* angular intrínseco conduce a esa otra propiedad física, todavía más determinante para lo que interesa, la interacción de un electrón (libre, aclararemos enseguida qué es eso) con un campo magnético inhomogéneo, como respuesta a su momento magnético intrínseco. Pero el interés prioritario (momento de dipolo magnético del electrón) cambió por otro: la existencia y el carácter fraccionario del *momentum* angular intrínseco. Los valores medidos siempre son necesariamente $\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$ en unidades convencionales (\hbar , véase más adelante).

Recuérdese que Bohr postuló la cuantización de los valores del *momentum* angular de los electrones en los átomos. Las *órbitas estacionarias* propuestas por él tenían que corresponder a valores de *momentum* angular que fueran múltiplos enteros de la constante de

Planck dividida por 2π , denominada h-barra y escrita como \hbar . Pues bien, como se desprende del experimento Stern-Gerlach, los valores del *momentum* angular intrínseco del electrón solo pueden ser $\frac{1}{2}\hbar$ o $-\frac{1}{2}\hbar$. A esta cantidad se le denomina el espín del electrón y se abrevia diciendo que el electrón tiene espín $\frac{1}{2}$. Toda partícula tiene un espín característico; las partículas cuyo espín es semientero ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, etc.) se denominan fermiones y deben satisfacer el denominado principio de exclusión de Pauli: los valores de los observables (las cantidades que determinan el estado de un sistema u objeto cuántico) deben diferir al menos en el valor de su espín. La ilustración más sencilla puede hacerse con los electrones del átomo de helio en su estado fundamental, con dos electrones en su nivel más bajo, uno con espín $\frac{1}{2}$ y el otro con espín $-\frac{1}{2}$.

Téngase en cuenta que el He es el gas noble por excelencia. Es el prototipo de gas cuántico. A muy baja temperatura se vuelve superfluido, una manifestación macroscópica de efectos cuánticos. Tiene dos protones, dos neutrones y dos electrones. Su espín “se aparea” en el estado fundamental: para los dos n, los dos p y los dos e. Llevando la temperatura por debajo de su “valor crítico” para que se presente la superfluidez, se observa el interesante fenómeno, característico de un líquido cuántico.

La combinación de dos espines opuestos es una especie de camuflaje. Los protones y neutrones, los quarks de que están constituidos, los leptones, todos, incluidos los neutrinos, tienen espín $\frac{1}{2}$. Los dos protones, los dos neutrones y los dos electrones del átomo de helio forman parejas de partículas de espín 0: por eso es que sus propiedades, por tanto, su comportamiento, cambian radicalmente. Las partículas de espín entero son bosones. Los bosones intermediarios de las interacciones tienen espín entero, por lo que no están restringidos por el principio de exclusión de Pauli. El mecanismo de la superconductividad básica (BCS por el apellido de sus tres proponentes o creadores, John Bardeen, Leon Cooper y John Robert Schrieffer) invoca la formación de *pares de Cooper*, dos electrones que se unen formando un par con espín 0. No es el espacio para referirnos a estos interesantes fenómenos cuánticos macroscópicos, pero es importante saber que existen: son la esencia en el mundo cuántico, al menos el

que se observa a temperaturas bajas, lo que tiene que ver con la termodinámica, a la que nos referiremos en el tercer capítulo.

Extrañas predicciones con inmensas aplicaciones

Hemos mencionado varios experimentos que manifiestan a las claras tanto las rarezas cuánticas como la confirmación de esas rarezas. Algunas de esas extrañas predicciones tardaron varias décadas en plasmarse en aplicaciones. Una de las predicciones más notables de los años veinte fue el denominado *condensado de Bose-Einstein* (1924). El condensado que propuso Satyendra Bose y que complementó Einstein solo se pudo materializar siete décadas después (1995). Pero las aplicaciones básicas y tecnológicas de la teoría cuántica son inmensas y demandan un espacio aparte. Mencionemos algunas, no necesariamente en orden de importancia: en primer término, para entender las propiedades químicas de los elementos y producir nuevos compuestos; en segundo lugar, para comprender y predecir las de los cuerpos sólidos o cristalinos; la bioquímica y la astrofísica no habrían podido desarrollarse sin la física cuántica; las tecnologías de la información y de la comunicación modernas no habrían podido surgir sin la aplicación de sus principios; la biología cuántica puede llevarnos más lejos en los logros que se persiguen para lo que sería la verdadera inteligencia artificial.

El LASER (*light amplification by stimulated emission of radiation*) es, quizá, uno de los dispositivos más versátiles en todos los campos científicos y tecnológicos, en los hogares y en las empresas, en hospitales e industrias de todo tipo. Los avances en aplicaciones tecnológicas continúan. Los láseres en el verde-azul-violeta son un resultado de logros recientes en estado sólido para producir condensados bosónicos a temperatura ambiente con las inmensas aplicaciones que se les conoce. Todo esto fue fruto de lo que se denomina *la primera revolución cuántica*. No haremos referencia, por razones de espacio, a las que vendrán con *la segunda revolución cuántica*. Pero sí debe quedar claro desde ya que es ese aparentemente sencillo dispositivo y otros similares los que permiten, por un lado, avances científicos imprevisibles y, por el otro, tecnológicos inimaginables. El entrelazamiento de dos y tres fotones está mediado por láseres que hoy en día pueden

controlar la intensidad del haz fotón por fotón. Retornaremos a este asunto al final del capítulo.

Volvamos a los que podríamos denominar *objetos cuánticos* por antonomasia, al menos en el mundo que observamos cuotidianamente, aunque no nos percatemos: los fotones y los electrones, protagonistas principales en este espacio. Los estados de polarización de fotones y los estados de espín de los electrones son propiedades intrínsecas de las partículas que suelen tomarse como prototipo de objetos cuánticos sencillos. Cuando examinemos el entrelazamiento cuántico, la propiedad más característica y extraña de un sistema cuántico, nos limitaremos a fotones y electrones. Para los primeros, la polarización del uno, vertical u horizontal, determina la del otro y viceversa. Para los segundos, es la orientación del espín, hacia arriba o hacia abajo. Estas orientaciones por supuesto son puramente convencionales. Se toman con respecto a un sistema escogido usualmente de acuerdo con el aparato de medida que se emplee.

¿Creamos un fotón cuando medimos su estado de polarización? ¿Creamos un electrón cuando detectamos la orientación de su espín? En los dos casos, tenemos que utilizar un “objeto clásico”, un aparato macroscópico, para detectarlos. Antes de la medida, están en cualquier estado de polarización o de espín. Y si el aparato de medida es un “objeto cuántico”, como ahora resulta posible, ¿creamos el aparato de medida también al medir?

Estas inquietudes dan pie a que se sigan proponiendo alternativas a la interpretación ortodoxa. Algunos autores van más lejos y ponen en tela de juicio la completud de la teoría (Smolin, 2019). Eso es positivo: se corresponde con el desarrollo científico, que no es estático en absoluto.

Un poco de historia: etapa precuántica

Si de cuantización se trata, podría argüirse que las primeras ideas se remontan a los griegos y más allá. Demócrito y los epicúreos tienen el mérito de haber arribado a una filosofía cercana a la que se recuperó dos milenios más tarde desde distintos flancos. El cubrimiento de todo ese periodo histórico hasta nuestros días lo logra admirablemente

Karoly Simonyi con ayuda de su hijo Charles, que puede ser consultada en la versión en inglés de David Kramer (Simonyi, 2012). El libro *Quantum* de Kumar (2013) es una introducción histórica actualizada al largo debate entre Born y Einstein que revivió con Bell y dio lugar a la segunda revolución cuántica. Sin duda alguna, fue Heisenberg quien inició la verdadera revolución cuántica, un aspecto que desarrolla a cabalidad Rovelli en un texto muy reciente (2021). Para completar la bibliografía histórica, ya nos hemos referido atrás al periodo que inicia con Planck a fines de 1900, año reconocido casi unánimemente como el partaguas de la física. Por convención, llamaremos precuántico el periodo anterior a diciembre de 1900 (siglo XIX), aunque la teoría definitiva inició un cuarto de siglo más tarde.

Como hemos advertido atrás, la esencia de la teoría cuántica no son los *quanta* o cuantos sino los campos. Para llegar a esta conclusión hubo que recorrer un largo camino de cuantización que vale la pena repasar.

La primera advertencia sobre la insuficiencia de la teoría clásica para explicar el comportamiento de la materia en todos sus detalles fueron las líneas espectrales. Newton fue pionero en el estudio del denominado espectro continuo al descomponer mediante el prisma la luz blanca. Se suele reconocer a Joseph von Fraunhofer el primer análisis que se hizo de los espectros discretos de los elementos. La historia se remonta un poco más atrás, a los albores del siglo XIX, y es muy extensa pero no daremos cuenta de ella. Explicar ese comportamiento de la emisión o radiación atómica tomó poco más de un siglo: correspondió a Bohr dar el primer gran salto, un acto de audacia como muchos otros en los albores de la nueva física. A sus hipótesis para lograrlo, fundamentales en la construcción de la teoría, volveremos más adelante.

En la segunda mitad del siglo XIX se descubrieron nuevos fenómenos y se hicieron observaciones que no podían explicarse o que no encajaban con las predicciones de la teoría clásica. Esta fue también la etapa en que se desarrolló la mecánica estadística, inicialmente bajo el liderazgo de James Clerk Maxwell, posteriormente con los trascendentales aportes de Ludwig Boltzmann. Planck y Einstein se basarían en los resultados de este último para sus respectivas hipótesis de cuantización de la radiación.

Dentro de los fenómenos más extraños, cuya explicación tendría que esperar al desarrollo de la teoría cuántica, está el comportamiento de las sustancias radiactivas. Estas fueron originalmente descubiertas por Henri Becquerel. La importancia del hallazgo, ocurrido en 1896, fue destacada al año siguiente por Henri Poincaré al afirmar que “puede pensarse hoy que esto abrirá el camino a un mundo insospechado”. En 1900 Ernest Rutherford señaló agudamente: “Todos los átomos que se formen al mismo tiempo deberían durar lo mismo (antes de decaer). No obstante, esta suposición es contraria a lo que se observa: los átomos tienen unos tiempos de vida que abarcan todos los valores, de cero a infinito”⁹. El decaimiento de los núcleos atómicos es el típico comportamiento no determinista a que se puede recurrir para subrayar el carácter probabilista, diferente al concepto estadístico clásico, de la nueva teoría.

Nos hemos referido atrás al espectro de radiación del cuerpo negro ideal y al efecto fotoeléctrico. La fórmula descubierta por Planck a partir de su hipótesis, para él provisional, y la generalización de esa hipótesis, elaborada por Einstein, están suficientemente documentadas y no insistiremos más sobre ellas como precursoras de “la nueva mecánica”.

Por el contrario, sí consideramos de trascendental importancia extendernos someramente en los postulados de Bohr para explicar la estabilidad del átomo y las transiciones atómicas que explicó recurriendo a los “saltos cuánticos”. El tema lo abordaremos más adelante, cuando nos refiramos a los estados cuánticos. Es innecesario recalcar que esos postulados, formulados sin más fundamento que las ideas de cuantización de Planck y Einstein y los resultados experimentales de los espectroscopistas del siglo XIX, fueron el acicate para que Heisenberg, discípulo de Bohr y con solo 23 años de edad, obtuviera “mágicamente”

9 La trascendencia de este descubrimiento para el nacimiento de la nueva teoría, todavía mayor que la inicialmente imaginada, fue señalada con gran tino por Ernest Rutherford unos años después: “El año 1896 [...] marcó el comienzo de lo que ha sido acertadamente denominada la edad heroica de la ciencia física. Nunca antes en la historia de la física se había asistido a un periodo de tan intensa actividad en el que descubrimientos de importancia fundamental se sucedieron unos a otros con desconcertante rapidez” (citado por Cox y Forshaw, 2010, p. 5 y siguientes).

la formulación teórica a la vez adecuada e incomprensible hasta nuestros días (Rovelli, 2021; Aitchison *et al.*, 2004). Al respecto, escribe el premio Nobel en física Steven Weinberg, recientemente fallecido:

“Si el lector se siente desconcertado con lo que Heisenberg estaba haciendo, él o ella no está solo. He tratado varias veces de leer el artículo que Heisenberg escribió a su regreso de Heligoland y, aunque creo que entiendo la mecánica cuántica, nunca he comprendido las motivaciones de Heisenberg para los pasos matemáticos que emplea en su artículo... El artículo de Heisenberg de 1925 es magia pura” (Weinberg, 1992).

No incertidumbre, sí indeterminación

Empezamos esta sección citando nuevamente a Feynman (1965): “Dijo una vez un filósofo: ‘Es indispensable para la existencia de la ciencia que las mismas condiciones produzcan siempre los mismos resultados’. Pues bien, no es así. El futuro es impredecible”. A otro de los grandes íconos de la cuántica, nada menos que el mayor gestor de la interpretación de Copenhague, se le atribuye esta otra frase, no exenta de humor o sarcasmo: “Predecir es difícil, particularmente cuando se trata del futuro”. Tal vez sea la incertidumbre sobre lo que pueda pasar lo que mejor caracterice el estado natural de una persona. Pero no es a esa incerteza a la que se refiere el famoso principio de Heisenberg. Por extraño que parezca, la teoría más exacta es a la vez la ciencia de la aleatoriedad más precisa (Ball, 2018).

Algunos autores afirman que el principio de incertidumbre es el más fundamental de la nueva física. Llamarlo de esa manera, incertidumbre, lo hace más ambiguo. En su artículo de 1927 donde Heisenberg lo enuncia por primera vez utiliza la palabra indeterminación: es a eso a lo que se refiere explícitamente. No se pueden determinar con precisión arbitraria ciertas parejas de variables físicas que para el caso se denominan conjugadas: esa es la generalización de su propuesta, restringida inicialmente a la posición y el *momentum*. El título completo del artículo, “*Über den anschaulichen inhalt der quantentheoretischen Kinematik Mechanik*”, es de difícil traducción por la palabra *anschaulichen*, que puede entenderse como “intuitiva”. Parece ser que Heisenberg

estuvo motivado inicialmente por la aprehensión que le causó la versión equivalente a la suya propuesta por Schrödinger, que gozó de mejor aceptación precisamente por lo que era “físicamente más intuitiva”.

¿Qué es lo que la teoría cuántica puede decirnos acerca de propiedades familiares de las partículas como la posición (o la velocidad)?, empieza por preguntarse. En el sentido original de su teoría (1925), la posición (o la velocidad) tiene(n) sentido solamente si se especifica cómo se mide(n). Heisenberg (1927) supone que el acto de medir algo introduce una perturbación y que como consecuencia hay un límite sobre lo que podemos saber de un objeto (cuántico).

El llamado *microscopio de Heisenberg* se suele tomar como ejemplo para ilustrar su principio: al iluminar con un *quantum* de luz (un fotón) la partícula que se quiere observar (un electrón, por ejemplo), este es perturbado alterándose su cantidad de movimiento. La imagen suministrada da la impresión de que la alteración se debe a la conservación de la cantidad de movimiento total de los dos objetos. Eso no es lo que ocurre en la práctica ni es ese el sentido de lo que se quiere ilustrar. El enunciado es más general y afirma que esas dos cantidades, por ejemplo, posición y cantidad de movimiento, que es con las que se suele ilustrar el principio, no se pueden asignar simultáneamente y con precisión arbitraria a un objeto cuántico. En palabras, el producto entre la incerteza Δs en la posición y la incertidumbre Δp en la cantidad de movimiento es mayor o igual a $\hbar/2$; en símbolos,

$$\Delta p \Delta s \geq \hbar/2.$$

Para apreciar la diferencia con lo que ocurre clásicamente, ilustrémoslo con otro ejemplo: el caso de uno de los dados que se lanzan en un casino. Desde el punto de vista clásico, siempre existe la posibilidad de describir la trayectoria que seguirá su centro de masa y la orientación que tendrá en cada momento cada una de sus caras. Lo mismo ocurrirá con una moneda que se lance al aire y que finalmente tendrá que caer por una u otra cara. En los dos casos habrá infinidad de detalles en el lanzamiento que determinan la evolución del estado del dado o de la moneda que determinan por qué lado caerá y que en últimas se pueden expresar en términos de fuerzas y torques y de las condiciones

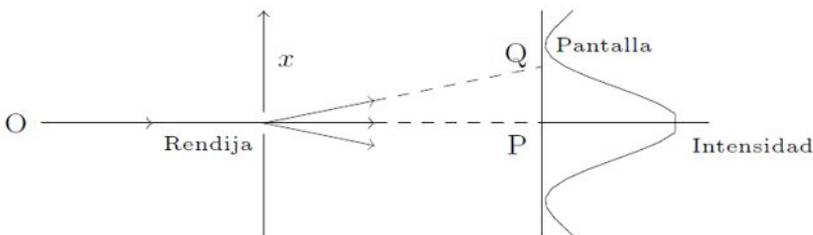
iniciales del objeto. Por complejo que sea en la práctica, de hecho, imposible porque no se puede proveer la suficiente información, en principio las leyes de Newton nos permiten hablar de la trayectoria de cada uno de los puntos materiales que conforman el objeto.

Eso no es lo que podemos asegurar de un objeto cuántico. El *demonio de Maxwell* o cualquier otro personaje que tenga poderes para leer y utilizar toda la información que se tenga disponible no podrá predecir el resultado en el lanzamiento de un *dado cuántico*, porque esa información no es suficiente.

A nivel semántico, los términos que emplea Heisenberg en su artículo de 1927 son: imprecisión (*Ungenauigkeit*) e indeterminación (*Unbestimmtheit*). Nunca el de incertidumbre (*Unsicherheit*), y ni siquiera el de ausencia de conocimiento o ignorancia (*Ungewissenheit*). Más vale dejar de hablar, por tanto, del “principio de incertidumbre” y emplear, mejor, el adecuado: principio de indeterminación. Lo que quiere decir Heisenberg exactamente es que la realidad misma es indeterminada; no se la puede determinar con exactitud. El sujeto no tiene nada que ver al respecto. Este aspecto es determinante para los fines de este libro. Una teoría cuántica del mundo es la teoría de un mundo indeterminado. O lo que es equivalente, se trata de una teoría de la indeterminación del mundo.

El experimento de Young está precedido de otro que poco se menciona en los textos para ilustrar el principio de indeterminación: es el experimento de difracción a través de una ranura, lo que se ilustra en la figura N° 1.

Figura N° 1 : Difracción a través de una ranura



Un haz de luz pasando por una ranura de ancho Δx se difracta, formando máximos y mínimos en la pantalla. Entre más angosta la ranura, mayor es el ensanchamiento del patrón de difracción en la pantalla. En el modelo corpuscular de la luz, esto es consecuencia del principio de indeterminación debido a Heisenberg.

En concordancia con el modelo ondulatorio de la luz, se encuentra que el haz se ensancha mucho más entre más angosta sea la ranura, dando lugar a un patrón de difracción. Asumiendo el modelo ondulatorio para la luz que Young en cierta medida comprobó, se entiende perfectamente lo que ocurre: es lo mismo que pasa con ondas de agua o con las ondas de sonido. La onda (mecánica) se difracta, es decir se ensancha, tanto más cuanto más angosta sea la ranura. Vale la pena examinar lo que pasa cuando partimos del modelo corpuscular que resulta después de los experimentos del efecto fotoeléctrico y la dispersión de Compton. Imaginemos entonces que se envía o bien un haz de fotones (lo que ocurre las más de las veces), o bien, en un experimento más fino, enviamos cada vez un fotón desde O, lo que con la tecnología actual es fácil de realizar en un laboratorio adecuado.

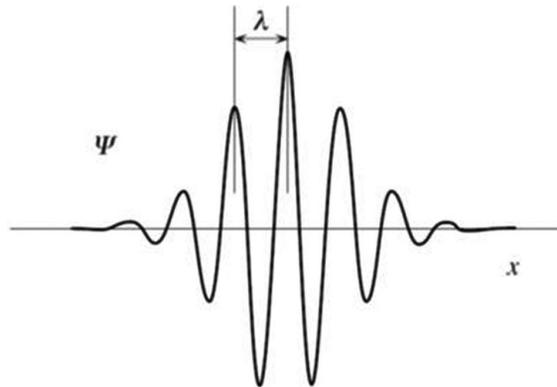
El experimento podría también realizarse con luz suficientemente tenue, disminuyendo la intensidad hasta el punto que se tuviera solo un fotón cada vez cruzando la ranura. Los fotones individuales llegan aleatoriamente a distintos puntos en la pantalla, pero el patrón de difracción (la extensión de la región a la que llegan los fotones) se ensancha cada vez más y se hace cada vez más evidente a medida que más y más fotones arriban a la pantalla. Una ranura suficientemente estrecha causa una serie de zonas brillantes y oscuras muy alargadas en la pantalla detectora cuando se hace incidir luz desde el otro lado y a través de la ranura, como se puede demostrar teórica y experimentalmente a partir de la teoría ondulatoria de la luz.

Veamos qué puede decirnos el principio de indeterminación. Partamos del supuesto de que no se puede seguir la trayectoria de cada fotón, simplemente sabemos que el fotón ha pasado cuando se detecta al otro lado en la pantalla B (un átomo lo ha absorbido, por ejemplo, emitiendo algún destello). Después de enviar muchísimos fotones, encontramos que estos han caído dentro de un rango cobijado por el

ángulo θ . Este hecho es evidencia de que los fotones generalmente han adquirido una cantidad de movimiento adicional Δp , en su trayectoria, en dirección y . La probabilidad de que caigan en el centro de la pantalla es más grande, la de que se desvíen todo el ángulo θ es muy baja, mas no cero. El ancho de la ranura, practicada a lo largo de y , es la incertidumbre en la posición del fotón al cruzar la pantalla, determinada de antemano; llamémosla Δy . Tratar de medir esta con mayor precisión equivale a hacerla más angosta, lo que repercute en un aumento en la incertidumbre de la cantidad de movimiento en esa dirección, lo que a su vez se manifiesta en el ensanchamiento del haz, es decir, un mayor θ .

Otra forma de ilustrar el principio es precisamente recurriendo a la descripción ondulatoria. Cada línea del espectro característico de cualquier sustancia, en particular de los elementos, tiene un color específico, una frecuencia fina. Cuando nos referimos a una longitud de onda específica para el fotón, su frecuencia queda determinada porque el producto de esas dos cantidades da su velocidad, la de la luz: $f\lambda = c$. Se dice entonces que la luz es monocromática y no una mezcla de colores. El término se extiende a todo el espectro electromagnético, no solo a la región visible; se suele llevar la analogía más lejos, refiriéndose a una onda monocromática para cualquier tipo de onda, siempre y cuando su frecuencia esté perfectamente determinada. Para que rigurosamente lo sea, una onda monocromática se extiende indefinidamente. Esa es la máxima manifestación de la no localización de una onda clásica: extensión infinita y longitud de onda muy precisa. Cuando la extensión de la onda es finita, se tiene lo que se denomina un paquete de ondas. En este caso no se puede hablar de una frecuencia determinada sino de un rango de frecuencias y lo mismo ocurre para la longitud de onda y su inverso. Este último, más exactamente la cantidad $2\pi/\lambda$, se denomina número de onda k : da el número de ondas por unidad de longitud. La figura No.2 ilustra lo que queremos decir: es imposible precisar el número de ondas en el conjunto. Todo lo que se puede decir es que el inverso de la extensión del tren, Δx , es aproximadamente el número de ondas, Δk . Se tiene así que $\Delta x \Delta k \approx 1$. Si se tiene en cuenta la relación de de Broglie $p = h/\lambda$, se ve que $\Delta p = h \Delta k/2\pi$ y $\Delta x \Delta p \approx \hbar$. Salvo por el factor $1/2$ esto coincide con la relación de Heisenberg.

Figura N° 2: Paquete de ondas y principio de indeterminación



Un paquete de ondas de extensión Δx representa una partícula que está localizada en ese rango de posición. Su longitud de onda λ o, lo que es equivalente, su número de onda $k = 2\pi/\lambda$ no está determinada. Se tiene que, aproximadamente, $\Delta x \Delta k \approx 1$, equivalente a la relación de indeterminación de Heisenberg.

Como conclusión de este apartado queremos destacar que el principio cuántico que algunos consideran *el más básico* generalmente es mal interpretado. Sí es cierto que la observación perturba el sistema, pero la determinación de una cantidad sin perturbar a la parte que de él se observe también puede alterar el resultado de la medida.

El experimento más destacado que se ha hecho en esa dirección es el denominado “experimento de borrado cuántico”. Su versión más sencilla es una variación del experimento de Young, realizado para el caso con fotones entrelazados (Walborn *et al.*, 2002)¹⁰.

Tunelamiento cuántico

El principio de indeterminación se aplica también a la energía y el tiempo. Para este caso la relación se escribe como

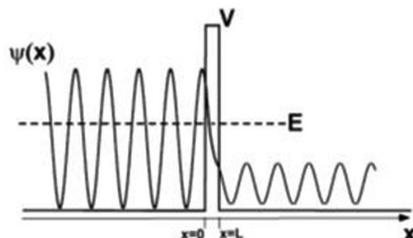
$$\Delta E \Delta t \geq 1/2 \hbar.$$

10 Una versión pedagógica puede verse en (Orozco, 2002).

Traducido en palabras esto significa que siempre habrá una incerteza en la energía asociada con el tiempo del que disponemos para medirla. La onda monocromática que representa a un electrón libre permite asignarle a este una energía perfectamente definida dada por $E = \hbar\omega$. Para un intervalo de tiempo Δt hay una extensión temporal de la onda similar a la de la figura 12 sustituyendo la coordenada espacial por el tiempo (*coordenada temporal*). Aplicando el razonamiento hecho para el tren de ondas de longitud espacial se llega a un resultado equivalente a la expresión anterior.

Una de las aplicaciones de mayor relevancia proviene del fenómeno denominado tunelamiento cuántico, ilustrado esquemáticamente en la figura No. 3. Aceptando que un objeto cuántico, generalmente una partícula, por ejemplo, un electrón, se puede describir mediante una función de onda, la figura representa la amplitud de una onda (partícula) que incide desde la izquierda sobre una *barrera de potencial*, un obstáculo para que esa onda o partícula continúe hacia la derecha. Lo que se observa clásicamente es que la partícula o el objeto rebota contra el obstáculo, para el caso ilustrado mediante una pared. En la práctica la pared puede ser el espacio vacío entre dos metales o entre dos semiconductores o entre un semiconductor y un metal. El electrón forma parte del trozo de materia a la izquierda, pero hablando en términos probabilísticos, descritos por la función de onda, puede entrar a formar parte del trozo de materia a la derecha violando provisionalmente el principio de conservación de la energía. La línea discontinua representa la energía que tiene la partícula. La altura de la barrera representa la energía necesaria clásicamente para que el objeto dé el salto, pasando de uno a otro material. El efecto se da también en los núcleos atómicos: un nucleón (el neutrón, por ejemplo), puede abandonar el núcleo, espacio en el que usualmente está confinado, por efecto túnel. La amplitud de la onda a la derecha, menor que la de la izquierda, representa la probabilidad de encontrar la partícula del lado derecho. En el espacio entre las dos regiones, la intensidad (amplitud de probabilidad) va decreciendo de izquierda a derecha. Si la pared o el obstáculo es muy extenso, es en la práctica imposible que se dé el paso de una a otra región. Por el contrario, una pared muy delgada facilitará que se dé el tunelamiento.

Figura N° 3: Ilustración del efecto de tunelamiento cuántico



Estados cuánticos

La ecuación de Schrödinger nos permite tener acceso a lo que podemos conocer con respecto a los diferentes estados cuánticos de un sistema. Ilustrémoslo con los estados cuánticos más fáciles de describir del más sencillo de los átomos, el de hidrógeno. A pesar de que las órbitas en el sentido clásico no existen, se utiliza la expresión *orbital* para referirse a la imagen que nos queda después de resolver la ecuación correspondiente, para el caso, la de Schrödinger, a la que debe agregarse la característica intrínseca de carácter cuántico a que nos hemos referido en la sección anterior, el espín.

Sin entrar en detalles, el espín se puede observar sometiendo el átomo de hidrógeno, para el caso, el electrón ligado al protón (núcleo), a un campo magnético inhomogéneo. Esta última exigencia es necesaria si se quiere confirmar que, para una orientación escogida de antemano, el momento magnético del electrón solo puede tomar uno de los dos valores a los que nos hemos referido anteriormente. Asumamos que este no es el caso y que podemos describir el campo como si fuera homogéneo (uniforme) en una cierta dirección, llamémosla z . El valor del espín será $1/2$ o $-1/2$, de acuerdo con lo expresado arriba, dependiendo de que el momento magnético se oriente en dirección antiparalela o paralela al campo magnético (recuérdese que al electrón se asigna una carga negativa). La dirección del campo magnético determina también la componente del *momentum* angular en esa dirección.

De la solución de la ecuación de Schrödinger resulta que la energía que pueden tener los electrones en los átomos está cuantizada. Para el caso del hidrógeno la expresión es muy sencilla y, salvo por una constante, depende solo de un número entero que se suele simbolizar por n : es proporcional a $-1/n^2$. Pero no solamente la energía está cuantizada, también lo está el *momentum* angular y su proyección o componente en la dirección del momento magnético, llamémosla z . En definitiva, el *momentum* angular (su magnitud) solo puede ser un múltiplo entero positivo de \hbar ; ese número se suele simbolizar por l . Como consecuencia, la componente z del *momentum* angular solo puede tomar valores $-\hbar, -(l-1)\hbar, \dots, 0, \dots, (l-1)\hbar, l\hbar$. Hay además una restricción para los valores que puede tomar l : debe ser menor que n .

Las conclusiones que queremos destacar de los resultados que acabamos de enunciar son las siguientes:

- Los valores de energía que puede tener el electrón ligado al núcleo en el átomo de hidrógeno (o en cualquier otro) son valores discretos que están plenamente determinados (hay algunas contribuciones relativistas que no se pueden incluir *a priori* en la ecuación de Schrödinger);
- Aunque el espín del electrón no tiene una orientación definida, si aplicamos un campo magnético externo hacemos que se oriente en dirección paralela o antiparalela al campo; el resultado es, pues, cualquiera de los dos valores permitidos para el espín;
- Con el procedimiento anterior, se manifiesta también la componente en la dirección del campo del *momentum* angular orbital, el cual puede tomar cualquiera de los valores arriba especificados;
- De la misma manera quedan determinados los valores que puede tomar la magnitud del *momentum* angular orbital.

¿Qué puede decirse de otras cantidades físicas que son cruciales para describir un objeto clásico, como la posición y la cantidad de movimiento lineal? Todo lo que nos puede decir la función de onda con el cuadrado de su amplitud es la probabilidad de encontrar el objeto

cuántico, para el caso, el electrón, en una cierta región. Si $n = 1$, se sigue que l tiene que valer 0 y la mayor probabilidad de localizarlo está en un cascarón esférico alrededor del protón, particularmente a una distancia que se denomina *radio de Bohr*, que se suele identificar entonces con el radio del átomo. Pero debe quedar claro que la probabilidad de encontrarlo a una distancia de varios radios atómicos no es nula, aunque sea pequeña. También debe tenerse en cuenta que, mientras no intentemos localizarlo, no podemos referirnos a una posición del electrón; sería incorrecto imaginar que el electrón está distribuido en la región en donde la probabilidad de encontrarlo no es nula. Por esa razón sería incorrecto referirse a una *densidad de carga* para la región en donde la probabilidad no es nula. Ello solo es válido en sentido probabilístico.

Partículas y antipartículas

Nos hemos referido a la conferencia Solvay de 1927, la más famosa de todas. Los personajes centrales fueron Bohr y Einstein y lo que la hizo más famosa, más allá de las personalidades, fue la agria, pero amistosa polémica entre los dos. Otra de las sesiones famosas de la serie ocurrió en 1961 y reunió también a dos personajes muy distinguidos en el campo que nos ocupa: Dirac y Feynman. La ecuación relativista de Dirac y su cuantización por parte de Feynman (segunda cuantización) condujo a la QED.

Aunque puede ser apócrifo, antes de iniciada la primera sesión se dio un supuesto diálogo entre los dos que transcribimos a continuación (no se habían visto nunca antes, aunque es indudable que cada uno conocía a fondo los trabajos del otro):

Feynman extendió la mano y dijo: “Yo soy Feynman”. Dirac extendió la suya y dijo: “Yo soy Dirac”. El diálogo continúa por algunos minutos:

F: Tiene que sentirse muy satisfecho por haber inventado esa ecuación.

D: Pero de eso ya hace mucho tiempo. ¿En qué está usted trabajando ahora?

F: En teorías sobre el mesón.

D: ¿Trata usted de encontrar una ecuación similar?

F: Eso sería muy difícil.

D: ¡Pero debe tratar de hacerlo...!

En ese punto terminó la conversación porque había comenzado la primera sesión. El “entrelazamiento” de personas se da, en gran medida por azar, pero deben existir condiciones previas; para el caso, la afinidad entre los dos personajes.

“La ecuación más hermosa de la física” dicen que es la de Dirac. Los diagramas de Feynman son uno de los más grandiosos legados del más brillante físico norteamericano del siglo pasado. Hay aquí un proceso de convergencia de incalculable valor.

Fue Dirac quien predijo, a partir de su ecuación, la existencia de antipartículas. No nos detendremos en este aspecto, excepto para decir que la primera observada fue el positrón, de la misma masa que el electrón, pero con carga opuesta. Los dos objetos pueden formar un “átomo artificial”, con vida muy efímera, denominado positronio. Este fue predicho por Wheeler en 1946 y observado por “Madame Wu” en 1949. Al experimento de Wu y Shakhnov volveremos más adelante, pero vale la pena hacer un reconocimiento a esta extraordinaria mujer, seguramente merecedora de un premio similar al que sí recibió M. Curie.

Fue así como empezó, desde la óptica de Einstein, con la proyección de Dirac y el enfoque de Feynman, la teoría más exacta, la QED, de la que nos ocuparemos más adelante. Gracias a los diagramas de Feynman, ya mencionados, se puede predecir con una precisión asombrosa el valor del momento magnético del electrón. En unidades, para hacerlo más sencillo, el primer diagrama daría justamente 1, o si se prefiere, un 1 seguido de varios ceros. Mil diagramas arrojan un resultado razonablemente distinto: 1.00115965217586(8480); las cifras entre paréntesis son inciertas. Las mediciones más finas hasta la fecha arrojan un resultado muy similar a este: 1.00115965218590(0380). La coincidencia hasta la undécima cifra decimal es algo que en una medida clásica resulta totalmente impensable. Por eso cuando se dice que la física cuántica es una teoría probabilística, no determinista, y se agrega el principio de indeterminación de Heisenberg,

suele echarse a perder este aspecto: que esa teoría probabilística es la más precisa.

Dos caminos a la vez

El experimento de la doble ranura, realizado por primera vez con luz blanca por T. Young, suele tomarse en todos los textos como prototipo para ilustrar la interferencia cuántica. Si el lector no lo conoce, le sugerimos ir a cualquiera de los textos, en particular (Feynman, *The Meaning of It All* (1963); Giraldo, “Unos cuantos para todos” (2019); Klein, 2003). Vale la pena entenderlo a cabalidad para comparar los resultados con los que presentaremos en esta sección, completamente equivalentes, pero más ilustrativos para los propósitos de este texto.

Los interferómetros han jugado un papel crucial en los últimos siglos. Por mencionar solo tres, el de Fabry-Perot echó por el piso la teoría del éter luminífero, el LIGO (*Laser interferometer gravitational-wave observatory*) demostró la existencia de las ondas gravitacionales, y el de Mach-Zehnder (MZI) ha jugado un papel crucial en establecer los efectos cuánticos no locales a los que nos referiremos someramente más adelante.

Hay otros efectos asociados a la interferometría. Pero esa generalización del término, por así decirlo, la dejaremos de lado. Baste por ahora con mencionar que el fenómeno de interferencia, del que son ejemplo los aparatos mencionados, está estrechamente relacionado con lo que hemos denominado el principio fundamental de la teoría cuántica: el de superposición.

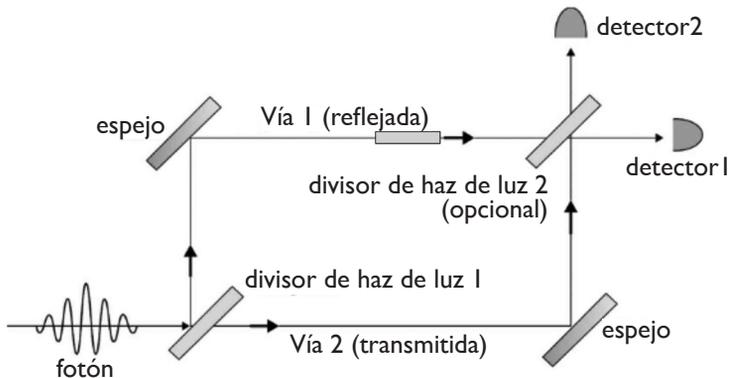
El MZI se esquematiza en la figura N° 4. Su funcionamiento básico es el siguiente: un pulso de luz monocromática incide sobre un espejo semitransparente, usualmente semiplateado, denominado divisor del haz o simplemente divisor porque divide a este en dos haces de igual intensidad; de ellos, uno se refleja siguiendo el camino 1 y otro se transmite siguiendo la trayectoria 2; los dos encontrarán en su camino espejos totalmente reflectores que les obligará a reencontrarse de nuevo e interferir, si se interpone al final un segundo divisor del haz. A los divisores del haz les denotaremos D1 y D2, respectivamente. Al

haz que va por el camino 1 se le obliga a cruzar por un selector de fase antes de que llegue al D2. En ausencia del selector de fase, los dos haces llegan en fase ($\Phi = 0$ en la figura 6). El selector de fase nos permite variar esta entre 0 y 2π . Nótese que para garantizar el reencuentro de los dos haces basta inclinar los espejos divisores y reflectores 45 grados respecto a la dirección en que avanza el haz en cada sección.

Los resultados, al variar la fase entre 0 y 2π , se muestran en la figura 6. En dicha figura, de momento puede asumirse que N nos da una medida de la intensidad de la luz que llega al detector 1. Se asume que no hay pérdidas por absorción de la radiación original al propagarse en el aparato.

Con un pulso de luz como el que hemos indicado, uno puede entender clásicamente el fenómeno de interferencia en los detectores de los dos haces en que se divide el pulso. La interpretación es más compleja si el experimento se hace disminuyendo la intensidad a tal punto que solo se tenga un fotón cada vez. Para entender lo que ocurre, vamos a dividir el experimento y su análisis en varias partes.

Figura N° 4: El experimento de interferometría de Mach-Zehnder



En primer lugar, vamos a examinar cuidadosamente lo que ocurre en el interior de los divisores de haz y del selector de fase en términos clásicos. El divisor de haz 50-50 o espejo semiplateado es una delgada lámina transparente a la que se recubre con una capa metálica mucho más delgada, usualmente plata. Su espesor se ajusta de tal manera que

la intensidad de los dos haces, del transmitido y del reflejado, sea la misma. Pero no se pierda de vista que un haz de luz es un enjambre de fotones. Así pues, en condiciones ideales el efecto de la placa recubierta es dejar pasar cada fotón con una probabilidad de un 50 % o hacer que se refleje con la misma probabilidad. Téngase presente que la lámina transparente tiene dos caras y solo una de ellas se recubre con la capa metálica. Para la configuración mostrada en la figura N° 4, en el D1 la capa metálica recubre la superficie por donde sale parte del haz, la que va por el camino 2, mientras que la parte reflejada, precisamente en esa cara después de recorrer el interior de la lámina de ida y vuelta, toma el camino 1; lo contrario se hace en el D2: la parte del haz que había tomado el camino 1 encuentra primero el espejo antes de dividirse de nuevo. Este detalle es importante para lo que sigue. Si se invirtiera la disposición de los dos espejos semiplatedados, no se encontraría variación alguna, por simetría. El selector de fase ocasiona un retraso en el haz que toma el camino 1 si se le compara con el que va por el camino 2, esto es lo más importante. Ese retraso o cambio de fase se traduce en términos de fracciones de longitud de onda adicionales para el recorrido del camino 1. Esto se entiende mejor si se examina la figura N° 4.

Como podrá imaginar fácilmente el lector, hoy se hacen sin problemas experimentos con fotones individuales y es sobre esta base que describimos este experimento pensado, de fácil realización en un laboratorio apropiado. Desde el punto de vista conceptual, al utilizarlo de esa manera hay varias conclusiones que podemos extraer las cuales enumeramos a continuación.

Asumamos, para empezar, que se ha removido D2. Si el fotón se refleja en D1, seguirá el camino 1 y llegará sin duda al detector 1. Lo contrario ocurre si se transmite a través de D1, siguiendo el camino 2: al reflejarse en el espejo que encuentra, llegará finalmente al detector 2. Para un montaje en ausencia de D2, el detector nos indica claramente qué camino ha seguido el fotón.

Lo primero que se observa es que siempre se detectan fotones enteros, no fracciones de fotones; uno podría imaginar que eventualmente un fotón se dividiera en dos partes al llegar a D1 y que cada una de ellas siguiera por un camino diferente, pero eso nunca ocurre. ¿Qué

significa entonces que el haz incidente se divide en dos partes iguales, dos haces de igual intensidad? Significa que, si hacemos muchísimas veces el experimento de un solo fotón incidente, muy aproximadamente la mitad de las veces el fotón será detectado en el detector 1 y otro tanto en el detector 2.

Podríamos creer entonces que en cada experimento individual el fotón escogerá aleatoriamente el camino 1 o el camino 2 con la misma probabilidad. Para estar seguros imaginemos que se coloca un detector en frente de D1 en el camino 1 de tal manera que un fotón emitido y reflejado en D1 necesariamente se cruza con el detector interpuesto. Como era de esperar, en ocasiones este primer detector revela que pasó un fotón y en el mejor de los casos el detector 1 confirmaría que siguió el camino 1 (es de advertir que la detección de un fotón puede aniquilarlo, pero no necesariamente). Por el contrario, habrá ocasiones en que no se detecta el fotón emitido en el detector que hemos colocado en frente de D1, descartándose la posibilidad de que el fotón haya seguido la trayectoria 1; en estos casos el detector 2 invariablemente nos mostrará que el fotón siguió la trayectoria 2 (no hemos colocado de nuevo el D2): no detectarlo por el camino 1 equivale a saber que ha seguido por el camino 2.

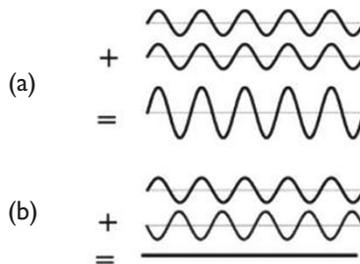
Con el D2 removido podemos observar fotones individuales todo el día y nunca sabremos con seguridad cuál de los dos caminos va a escoger uno de ellos. Esto ocurre en forma completamente aleatoria. En otras palabras, el camino escogido en cada ocasión no depende del resultado del evento anterior: ellos son totalmente independientes. Tenemos que hacer ese mismo experimento muchísimas veces para concluir que aproximadamente la mitad de las veces el fotón incidente se refleja en el D1 y la otra mitad de las veces se transmite. No hay nada que determine lo que hará cada fotón, pues todos ellos se han preparado en idénticas condiciones: son fotones idénticos¹¹.

11 Compárese con el fenómeno de radiactividad que señalábamos al comienzo del capítulo. A diferencia del fenómeno que estamos analizando, el decaimiento de un núcleo atómico es un fenómeno totalmente imprevisible: puede ocurrir en cualquier momento.

Veamos qué ocurre cuando interponemos el D2 en frente de los detectores 1 y 2, con ayuda de la figura N° 5. Imaginemos primero dos variantes del experimento antes de examinar la situación que más nos interesa. Reemplacemos primero el D1 por un espejo totalmente reflector: con toda seguridad el fotón va a seguir el recorrido 1; al llegar a D2, para un número muy grande de experimentos, la mitad de las veces atravesará el divisor siendo detectado por el detector 1 y otras tantas se reflejará siendo detectado por el detector 2. Removamos ahora el espejo, en ausencia del D1: hemos obligado al fotón a seguir el recorrido 2. De nuevo, para un número muy grande de experimentos, aproximadamente la mitad de las veces los fotones llegarán al detector 1 y otro tanto al detector 2, pues la probabilidad de que el fotón que ha seguido el camino 2 sea transmitido al llegar a D2 es la misma de que sea reflejado por este: 50 % de probabilidad en cada situación.

Cuando se hace el experimento en la forma en que se indica en la figura 4, sin el selector de fase, con los dos detectores en su sitio y los recorridos 1 y 2 exactamente iguales en número de longitudes de onda, el resultado cambia por completo: el fotón invariablemente llega al detector 1. Vale la pena examinar minuciosamente qué es lo que puede estar ocurriendo. Para entenderlo más fácilmente podemos partir de los resultados de la figura No. 5 ilustrados para ondas clásicas y aceptar que los fotones se comportan como ondas. Las ondas tienen como propiedad fundamental la superposición. Cuando dos ondas de igual amplitud se encuentran en fase (figura 5a), sus perturbaciones se suman dando lugar a una con el doble de amplitud. Si se encuentran en antifase (figura 5b, desfase de 180°), las dos ondas se anulan: su amplitud es cero.

Figura N° 5: Superposición de ondas en una dimensión: a) en fase; b) en antifase



En términos clásicos, el argumento es el siguiente: cuando un pulso de ondas (un haz) procedente del emisor al lado izquierdo del interferómetro incide sobre el primer divisor del haz, supuestamente simétrico, 50 % del haz se refleja y otro tanto se transmite, siguiendo respectivamente los caminos 1 y 2. Al llegar a los espejos totalmente reflectores en las condiciones indicadas, los haces se van a cruzar e interferir de nuevo en el divisor 2. Como explicaremos a continuación, las partes de cada haz que avanzan hacia el detector 1 se encuentran en fase; lo contrario ocurre para las componentes que avanzan hacia el detector 2, que se encuentran en antifase. El resultado es que, en ausencia del selector de fase llegará luz, en general radiación, al detector 1 y no llegará al detector 2. Para lograr iluminación en el detector 2 debemos, en condiciones ideales, cambiar el recorrido modificando así la fase y eso es lo que hacemos interponiendo en el camino 1 el selector de fase. Veamos por qué.

Las ondas electromagnéticas que llegan desde el vacío a un espejo se reflejan con una diferencia de fase de 180 grados. Visto desde la perspectiva de las ondas y teniendo en cuenta lo que acabamos de decir, la luz que llega al detector 1 procede de dos caminos que tienen la misma longitud (misma separación en términos de longitudes de onda); cada haz se ha reflejado dos veces y por lo tanto los dos llegarán en fase. No pasa lo mismo con el haz que llegaría al detector 2: la mitad del haz, la que ha hecho el recorrido 2, ha tenido solamente una reflexión, mientras que la otra parte, la del recorrido 1, ha tenido tres reflexiones. Una de ellas, la primera, en el interior de D1, sin cambio de fase; las otras dos, en el espejo totalmente reflector y en la capa externa de D2, cada vez con cambio de fase π , es decir con cambio de fase total 2π . No olvide que la del recorrido 2 tuvo un cambio de fase π . Esto introduce una diferencia de fase entre los dos haces de 180 grados (π radianes), por lo que llegan al detector 2 en antifase con una diferencia de fase de 180 grados, y por lo tanto no se formará imagen en condiciones ideales. En la práctica es muy difícil balancear o igualar exactamente las dos partes, la reflejada y la transmitida, por lo que llegará un poco de luz al detector 2.

Esta imagen clásica, aunque satisfactoria para un haz de luz que se comporta para todos los efectos prácticos como una onda clásica,

pierde validez por completo cuando examinamos el comportamiento de cada uno de los eventos individuales, fotón por fotón. Habíamos concluido que un fotón individual sigue la trayectoria 1 o la trayectoria 2. Examinemos detenidamente esa posibilidad a partir de los diferentes experimentos realizados y los resultados obtenidos.

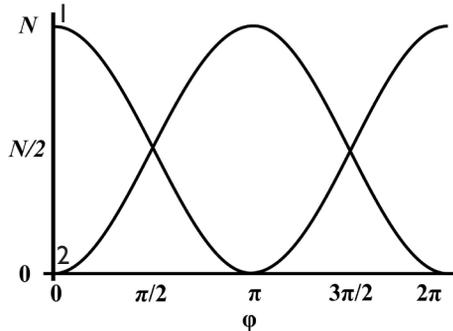
Hay una diferencia radical entre los dos tipos de resultados que hemos obtenido: aquellos en que pudimos identificar una trayectoria definida para cada fotón y los que no nos lo permiten. En los primeros experimentos sabíamos de antemano qué trayectoria estaba siguiendo el fotón. El último pertenece al tipo de experimentos que no permiten saber la trayectoria. En estos casos el comportamiento del objeto cuántico, cualquiera que sea, fotón, electrón, átomo, molécula, virus y demás es *como de onda*, pero no podemos afirmar que se trata de una onda. Por el contrario, si podemos asociar una trayectoria al objeto cuántico, su comportamiento es como de partícula, mas no podemos asegurar que sea una partícula.

El resultado del experimento que se acaba de mencionar con fotones individuales es inexorable: se detectarán fotones en el detector 1 y, por el contrario, no se detecta el arribo de fotones al detector 2. Una explicación posible es que el fotón ha interferido consigo mismo, es decir, ha decidido seguir las dos trayectorias simultáneamente, comportándose como una onda. Pero recuerde que la imagen de *onda* para este caso es una imagen matemática.

En términos matemáticos, la única imagen incontrovertible que podemos construir es esta: la *onda* o cualquier otro ente matemático que represente al fotón (el campo, una perturbación en el espacio-tiempo), por ahora la denominaremos función de onda para no confundirla con una onda mecánica, al llegar al primer espejo semiplatedado o divisor (D1) ha de tener dos componentes, cada una de ellas abre la posibilidad de que el fotón vaya por los dos caminos permitidos con el mismo peso (la onda o el campo puede hacerlo); esas dos *componentes de probabilidad* se reencuentran en el segundo espejo semiplatedado D2 dando lugar a una nueva *onda* (matemáticamente función de onda) y en últimas al objeto que podemos detectar nuevamente como un fotón solamente en el detector 1, para este caso. Para decirlo más prosaicamente: es como si el fotón explorara las dos ramas al mismo

tiempo en ausencia de nuestra supervisión y aparece en el detector 1 en el momento preciso en que tiene que aparecer, cuando es detectado. Una vez detectado, se manifiesta como partícula, aunque haya actuado como onda en los instantes previos.

Figura N° 6: Resultados del experimento las dos curvas ilustran lo que se mide en los detectores 1 y 2 respectivamente. con el interferómetro de Mach-Zehnder



En la figura N° 6 podemos ver los resultados del experimento realizado con el interferómetro de Mach-Zehnder con fotones individuales cuando se varía el recorrido 1 o lo que es equivalente, si se cambia la diferencia de fase de las dos componentes en que se divide la onda entre 0 y 2π . Recuérdese que la diferencia de fase inicial entre las dos componentes es π para el detector 2. Después de un elevado número de experimentos (N) para cada diferencia de fase, se observa que el número de fotones que llega a cada detector es el que indican las dos curvas superpuestas. Al comienzo todos los fotones llegan al detector 1; cuando la diferencia de fase introducida por el selector de fase es de un cuarto o tres cuartos de longitud de onda (diferencia de fase de $\pi/2$ o $3\pi/2$), a cada detector llega el mismo número de fotones; si la diferencia es π , todos llegan al detector 2, y así sucesivamente.

La anterior configuración (dos ramas del MZI dispuestas de tal manera que el fotón sea percibido en el detector 1) es apenas una de las muchas, de hecho, innumerables, configuraciones. Para completar nuestro experimento mental asumiremos que se ha colocado el selector de fase, variando uno de los caminos de tal manera que lo que sea que represente al fotón en la rama escogida (una parte de la onda en la imagen clásica) contenga información sobre la fracción adicional

de longitud de onda o camino extra. Este experimento se ha hecho cuidadosamente, dando el resultado que se ilustra en la figura No. 6. Obsérvese que en cada experimento que se haga con el selector de fase y un fotón individual uno podría asumir que el fotón ha seguido las dos trayectorias simultáneamente y solo en el momento de la detección *escoge* el detector al que llegará.

Hemos dicho “podría asumirse que ha seguido”; no obstante, si nos atenemos a las matemáticas solamente, no deberíamos decirlo de esa manera. En la imagen de Heisenberg o en la formulación de Dirac, se habla de potencialidades o de estados superpuestos. Dirac los llama “vectores de estado” y esa denominación nos permite alejarnos de la imagen de una onda, que nos compromete. Si al final del recorrido no hubiera detectores, el fotón continuaría en los dos estados permitidos simultáneamente: uno de ellos, con peso $\frac{1}{2}$ en el espacio de probabilidades o potencialidades, nos permite ubicarlo en la rama de la izquierda; otro, con un peso igual por la rama de la derecha. Cuando hagamos el experimento de la *localización*, lo encontraremos en una u otra, no en las dos. Téngase en cuenta lo discutido atrás. Este experimento se ha hecho, fue sugerido por Wheeler y se denomina el experimento de elección retardada.

Mencionemos brevemente otros experimentos básicos de dos estados. El polarizador es uno de ellos. Si un fotón polarizado verticalmente incide sobre un polarizador orientado oblicuamente un ángulo de 45 grados, el fotón pasará o no pasará. En el segundo caso, nada impide enviarlo en otra dirección.

Con electrones, es posible hacer un experimento de dos estados utilizando el fenómeno cuántico de tunelamiento. El resultado es completamente equivalente al del MZI, si la probabilidad de pasar al otro lado del túnel es 50%.

Como hemos advertido al comienzo, se suele citar como ejemplo del principio de superposición el experimento de las dos ranuras, en esencia el experimento de Young. Ese experimento tiene por un lado la ventaja de que se ha repetido múltiples veces utilizando fotones, electrones, átomos, moléculas tan grandes como fullerenos y proteínas, etc., y por

el otro la incontrovertible *huella de las partículas*. Esto último quiere decir que el experimento se puede hacer enviando una partícula cada vez, o lo que creíamos que era una partícula, fotón, electrón, etc.

Abrebocas a la teoría cuántica de campos

Recordemos que la electrodinámica clásica, la formulación completa de la teoría electromagnética, es “la joya de la corona” entre las teorías clásicas. Para no dejar lugar a dudas, esa teoría puede formularse en forma más elegante incorporando dentro de ella la teoría especial de la relatividad. No pretendemos hacerlo, ni siquiera haremos un breve resumen. Mucho menos lo haremos con la QED, pero en pocas palabras podemos referirnos a ese paso crucial. Es bueno advertir que la EDC (electrodinámica clásica) contiene en sí la teoría cuántica: es mediante transformaciones denominadas *gauge* como se descubre la posibilidad de extenderla más allá del régimen clásico pre-relativista y pre-cuántico. Hemos mencionado el efecto Aharonov-Bohm y volveremos a él. Hay consecuencias del efecto en las dos direcciones. En particular, los efectos no-locales, están allí presentes.

La cromodinámica cuántica, QCD por sus siglas en inglés, no es tan espectacular en su precisión como lo es la QED. Los colores no son como las cargas, tal vez porque son más que estas últimas. En principio, se pueden reducir a tres, los colores primarios. Por analogía, así como hay dos clases de cargas en la interacción electromagnética, hay tres clases de “colores” en la interacción fuerte, lo que se aplica a las partículas mediadoras, los gluones. Pero también hay “sabores”, lo que da mayor variedad a la interacción fuerte, de mayor intensidad que las otras tres. Hay seis partículas básicas, los seis “quarks”, un nombre tomado de la literatura¹². Se han escogido seis letras para designarlas,

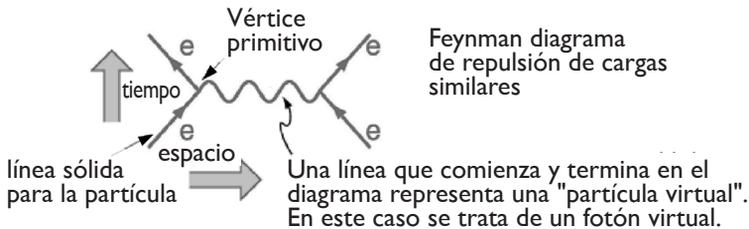
12 Murray Gell-Mann, distinguido con el premio Nobel de física en 1969 por sus aportes a la física de partículas elementales, fue quien asignó el nombre de *quarks* a las partículas hadrónicas que son ingredientes básicos de las demás: neutrones, protones, etc. El nombre aparece en la novela *Finnegans Wake*, de James Joyce. Uno de los versos del extraño poema es precisamente: “Three quarks for / Muster Mark!” Hasta 1969 solo se conocían 3 quarks. Gell-Mann y G. Zweig supusieron que habría partículas con cuatro y cinco quarks, lo que se vino a comprobar mucho después.

cada una con un significado en gran medida poético: *u, d, c, s, t, b*. En inglés: *up, down, charm, strange, top, bottom* (y también, *beauty*).

La ley de Coulomb nos habla de la repulsión entre dos cargas de la misma clase, dos electrones, por ejemplo. La QED también, pero habla más bien de un intercambio de fotones virtuales, que es lo que en últimas produce la transferencia de *momentum*, resultado de la interacción. Dicho en forma más elegante, a partir de las líneas de fuerza introducidas pictóricamente por Faraday y retomadas matemáticamente por Maxwell, clásicamente hablamos de un campo de fuerza, el campo eléctrico. Cuánticamente la idea es que hay un intercambio de partículas. La interacción se representa así mediante un conjunto de “diagramas de Feynman”, de los cuales el más básico es el que ilustra la figura. Allí el tiempo va hacia arriba, y se ilustra el intercambio de un fotón entre los dos electrones o positrones, da igual entre cuál de los dos.

Recordemos que el positrón es la antipartícula del electrón. La QED se aplica a variados fenómenos asociados con partículas fundamentales cargadas, como electrones y positrones, o a otros procesos asociados: producción de pares, aniquilación electrón-positrón, dispersión de Compton, etc. También se ha utilizado para modelar con precisión fenómenos cuánticos como el corrimiento Lamb, el momento magnético anómalo del electrón, etc.

Figura N° 7: Primer diagrama de Feynman para la interacción entre dos electrones



Más allá de la QED o como consecuencia de ella, empezó a elaborarse en la década siguiente una teoría más general que tenía en cuenta la creación y aniquilación de otras partículas. Para entonces ya se habían

descubierto el positrón (1932) y el muón (1936). La existencia del neutrino había sido postulada desde 1930. La observación experimental del primer neutrino (el electrónico) tardó hasta 1956; el muónico fue encontrado seis años más tarde, mientras que el hipotético neutrino tauónico solo pudo identificarse claramente en el año 2000. El tauón, su contraparte cargada, había sido descubierto en 1975. Recuérdese que los quarks se habían postulado desde 1963, aunque para entonces ya había algunas pistas. En los años siguientes, desde 1969 y hasta 1995 se identificaron en total seis, lo que coincide con las predicciones de la teoría. Como contraparte, hay otras seis partículas, livianas ellas, que corresponden a la familia leptónica enumerada al comienzo del párrafo.

Para completar el panorama, debemos referirnos a la interacción débil. Inicialmente limitada a la desintegración β , tuvo una perspectiva más amplia en los años 1960 y condujo finalmente a la unificación de lo que se conoce con el nombre de interacción electro-débil. La teoría llevó en 1983 al descubrimiento de los bosones masivos W^+ , W^- y Z^0 . Ella supone que en el universo primigenio y a muy altas temperaturas las dos interacciones, electromagnética y débil, son manifestaciones de una única fuerza.

Volvamos a la teoría de campos cuánticos, una herramienta fundamental en las investigaciones a altas energías. Aclaremos de entrada que esos campos se aplican también en procesos de baja energía, particularmente en la física del estado sólido, con excelentes resultados; en este caso se suele hablar más bien de “física de muchas partículas”, y las estadísticas cuánticas se vuelven esenciales (Mahan, 2008).

Lo que se busca con la teoría cuántica de campos se denomina “segunda cuantización”. El *quantum*, recuérdese, se introdujo para referirse a la mínima cantidad de energía a una frecuencia dada. Pero llevó a algo totalmente inesperado: al comportamiento ondulatorio del electrón y, por ende, de todas las demás partículas y configuraciones de partículas (protones, neutrones, átomos, moléculas y demás). La “onduloriedad”, interpretada después como una distribución de probabilidad, fue su consecuencia; y la teoría cuántica de campos su formulación más precisa. Nótese que el origen fue lo inverso: el

comportamiento corpuscular de la luz, lo que con sobrada evidencia había demostrado Young que sería una onda.

Formalizar la cuantización del campo electromagnético es algo en principio muy sencillo. El campo mismo se visualiza como un conjunto de osciladores. Cada oscilador se materializa en un fotón, con una frecuencia y una polarización definida. Pero hay algo que diferencia notablemente a estos osciladores de los que aparecerían en la materia: uno puede tener “en el mismo estado”, vale decir, la misma posición espacial y con la misma cantidad de movimiento, por tanto, energía, un número arbitrario de ellos puesto que son bosones; por ende, no están limitados por el principio de exclusión de Pauli. Es lo contrario que se exige del electrón y partículas similares: estos obedecen el principio de exclusión de Pauli, lo que no sucede con los primeros. Surge así la diferencia entre fermiones y bosones. Cada conjunto separadamente obedece a una estadística distinta, la de Fermi-Dirac para los primeros, la de Bose-Einstein para los segundos.

Dejando de lado los detalles técnicos, la idea de la segunda cuantización es la siguiente: la descripción en términos de una onda cuántica de las partículas conduce a un campo escalar. Lo que se hace básicamente es poner en pie de igualdad este campo y el campo de la interacción. Los dos se describen entonces en términos de operadores, incluyendo los de creación y aniquilación, que satisfacen ciertas reglas de conmutación. La etapa crucial en la teoría cuántica de campos es, pues, interpretar como campo cuántico no solo el campo de interacción sino también el de la función de onda de la partícula.

Lo más maravilloso de la teoría cuántica de campos es que campos y partículas emergen uno del otro, como en un juego de intercambio. Gracias a la ecuación de Einstein que permite la conversión de materia en energía y viceversa, desaparece la diferencia entre partículas y ondas. El mayor éxito de la teoría y del modelo estándar fue la predicción (1964) y verificación experimental (2012) del campo de Higgs. Por la predicción anticipada (con casi medio siglo de antelación), el físico británico Peter Higgs recibió el galardón Nobel en 2013.

No-localidad como premisa

Sabemos que la no-localidad es la característica esencial de la fenomenología cuántica. El entrelazamiento es un caso particular de no-localidad. Este fue previsto por Einstein, al señalar el carácter incompleto de la teoría. Los experimentos que hoy en día lo confirman son muchos y nos referiremos escuetamente a algunos de ellos. Mucho se ha escrito sobre las dos características, los efectos no-locales y el enmarañamiento, como debería traducirse rigurosamente hablando la expresión introducida por Schrödinger (*Verschränkung*).

Los objetos que describe la física cuántica pueden llegar a estar tan entrelazados, tan interrelacionados, que un cambio en uno de ellos se refleja instantáneamente en el otro, incluso cuando ambos pudieran encontrarse en extremos opuestos del universo. Einstein creyó que “lo absurdo” de semejante posibilidad mostraba nítidamente que la mecánica cuántica no podía ser una teoría correcta. En esto se equivocó, como han demostrado durante el último medio siglo una serie de experimentos, el primero de ellos realizado por Clauser y Freedman (1972), tomando como base la desigualdad CHSH como sustituto o generalización de la de Bell (1969).

La física newtoniana asume, por simplicidad, que la fuerza se propaga *instantáneamente*. Newton reconocía esa limitación, pero ignoraba cómo introducir el mecanismo mismo de la propagación de la fuerza: postuló *la acción a distancia* de la misma manera que postuló un espacio absoluto y un tiempo también absoluto. Introducir el espacio-tiempo como una sola entidad, un nuevo absoluto, pero relativo, fue el primer paso dado por Einstein. A ello agregó el límite de velocidad, dado precisamente por la velocidad de la luz. De ahí se sigue que en la física clásica relativista todo fenómeno físico ha de ser local: la información o cualquier otra cantidad física no puede propagarse o moverse a mayor velocidad que la de la luz. La no-localidad implicaría lo contrario; para el caso cuántico, hay fenómenos que se dan simultáneamente estando correlacionados. Es de subrayar, sin embargo, que estos fenómenos no locales no violan la teoría de la relatividad.

Considérese una situación no imposible de realizar, al menos parcialmente, con las técnicas actuales: el ión de H_2 , una molécula ionizada constituida por dos protones y un electrón (dos núcleos formados cada uno de ellos por un protón, que para el caso podrían aproximarse mediante “comportamiento clásico”, pues cada uno de ellos es dos mil veces mayor que el electrón compartido). Se podrían separar a distancias arbitrariamente grandes los dos protones: ¿a cuál de ellos pertenecería el electrón? Para el nivel fundamental el electrón tiene la misma probabilidad de “estar ligado” al primero que al segundo, mientras no se le ubique. Una vez se haga esto, en el caso más sencillo se encontrará ligado a uno de los dos. Para que esto ocurra, la función de onda tiene que “reducirse”, dando lugar a un efecto no-local. No hay posibilidad alguna de enviar información en el proceso de “colapso” de la función de onda, por lo que el principio de relatividad no se viola.

Cuando se presentaron los experimentos de “dos caminos a la vez” en el apartado anterior, la interpretación de los resultados condujo directamente a efectos no locales. En el MZI tuvimos que aceptar que, para explicar los resultados, hay que imaginar al menos que el fotón pudo haber tomado “los dos caminos simultáneamente”. Esto es una metáfora, para poder *explicar* de alguna manera esa *rareza cuántica*. Cuando el fotón arriba a uno de los detectores, está fuera de toda duda que ha explorado los dos caminos, aunque es imposible que podamos detectarlo simultáneamente en los dos. Si de alguna manera hubiéramos detectado al fotón en alguno de los brazos del interferómetro antes de llegar al segundo espejo semiplatedado, instantáneamente hubiera desaparecido del otro brazo. En el experimento de las dos ranuras ocurre lo mismo con el electrón (o con el fotón o cualquier otro ente cuántico que se utilice para realizar el experimento) cuando sea detectado por un átomo o una molécula en un punto sobre la pantalla: la función de onda *colapsa* o se reduce a un punto. El significado del colapso o reducción del paquete de ondas puede ser controvertible, pero la detección en un punto no deja lugar a dudas sobre el valor cero de la probabilidad, a partir de ese momento, en todos los demás puntos.

Desde el congreso Solvay celebrado en 1927 Einstein había manifestado su inquietud frente a la situación anterior, pues a su entender el colapso violaba el principio de relatividad. Heisenberg reconocería más tarde

(1930) que la situación que acabamos de mencionar para el interferómetro era un efecto no local. Sin embargo, era consciente de que el fenómeno no podía utilizarse para transmitir información.

Entrelazamiento

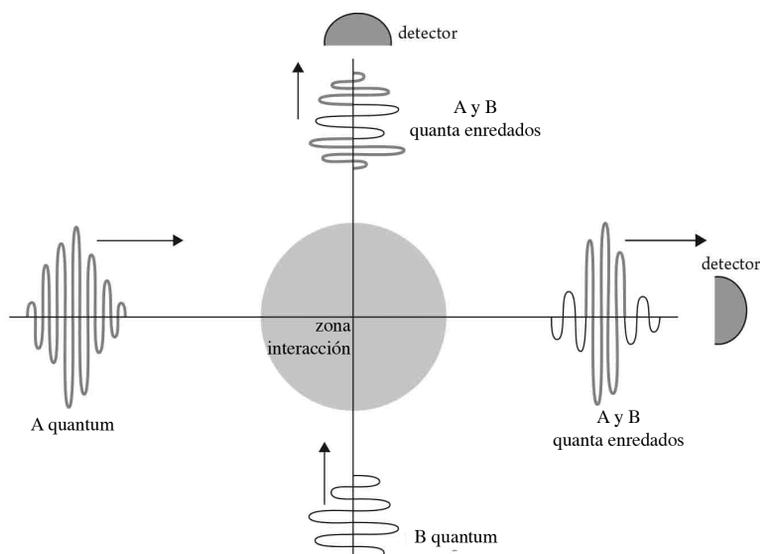
¿Qué sucede cuando dos cuantos interactúan? La función de onda que los describe ya no puede separarse a menos que ocurra un fenómeno que se denomina *decoherencia*, al que nos referiremos más adelante: constituye de hecho un fenómeno cuántico fundamental que no se ajusta a la noción de realidad a la que estamos acostumbrados. La figura No. 8 ilustra lo que ocurrirá: el nuevo estado se denomina *entrelazamiento* y es, a no dudarlo, el más intrigante, a la vez que el más prometedor, fenómeno cuántico sin parangón en el mundo clásico. Puede tomarse como punto de partida para separar los dos mundos de que nos habla Bohr y, si fuere el caso, construir una teoría que sustituya a la cuántica.

De la misma manera que puede asegurarse que no hay en el universo un cuerpo rigurosamente aislado, es completamente ideal representar un objeto cuántico por una función de onda monocromática; vale decir mediante una función de onda que tenga longitud de onda perfectamente definida. Los paquetes de onda que describen a los dos cuantos esquematizados en la figura No. 8, uno que se desplaza de izquierda a derecha y otro que lo hace de abajo hacia arriba, tienen en cuenta los principios cuánticos fundamentales, el de indeterminación y el de superposición. Lo que se indica esquemáticamente en la figura es que cuando los dos paquetes se solapan ya no pueden rigurosamente separarse o considerarse de manera independiente; si tomamos como punto de partida y como instante inicial la posición y el tiempo en el que los dos supuestamente estuvieron más cerca, la función de onda que describe a los dos objetos es una combinación lineal de las funciones de onda iniciales. Esquemáticamente, si el objeto 1 está inicialmente en el estado a y el 2 en el b , o viceversa, debemos escribir con los coeficientes adecuados para que la función de onda esté normalizada:

$$\Psi_1(a)\Psi_2(b) + \Psi_2(b)\Psi_1(a),$$

porque ya no podemos adscribir a cada cuanto un estado particular.

Figura N° 8: Entrelazamiento de dos cuantos



(Adaptada de Hobson, 2017, p.169)

El entrelazamiento es una consecuencia de la nueva descripción en términos de funciones de onda o de vectores de estado. Esa descripción tiene que satisfacer el principio de superposición, el más fundamental de los principios cuánticos. Así pues, lo que acabamos de describir no debería sorprendernos, pero no podemos dejar de asombrarnos con las predicciones que de esa simple descripción se deriva. Fue esto lo que asombró a Einstein y le dio el mayor argumento para afirmar que la teoría cuántica es una teoría incompleta.

Como corolario, cualquier alteración que se haga de uno de los dos objetos cuánticos debe afectar al otro instantáneamente en algún sistema de referencia. Es esa la esencia del entrelazamiento.

Ahora bien, la dualidad onda-corpúsculo o su generalización, el principio de complementariedad (como lo visualizó Bohr), o para ser más precisos, el principio de superposición, así como el principio de indeterminación, son el fundamento de la primera revolución cuántica y de sus productos tecnológicos, que son muchos. Por otra parte, la no-localidad y su manifestación más extraña, el entrelaza-

miento, están dando lugar a la segunda revolución cuántica, con un impacto todavía imposible de prever. Podría rastrearse el origen de la primera revolución cuántica a los nubarrones a los que se refiriera Lord Kelvin y otros más que él no enunció pero que para entonces ya daban indicios de que la física clásica no era suficiente. De manera sorprendente, la segunda revolución cuántica, que se inició con las supuestas contradicciones que Einstein y Schrödinger señalaron en 1935, sirvieron para afirmar la convicción sobre el carácter no local de la teoría, en aparente discordancia con la teoría de relatividad, y sus potenciales aplicaciones, las cuales apenas empiezan a materializarse en el laboratorio. Sin lugar a dudas las más destacadas, con gran impacto en la informática y las comunicaciones, por tanto, en la cuarta revolución industrial, son: la criptografía cuántica, la teletransportación cuántica y la computación cuántica.

Los historiadores de la ciencia tendrán que referirse a tres periodos bien diferenciados que dieron lugar a la segunda revolución cuántica. El primero se inicia con la publicación del denominado EPR. El segundo es su reinterpretación, elaborada por Bohm, dando lugar a lo que en justicia debe llamarse EPRB. El tercero recoge las ideas anteriores y, en su empeño por darles un asidero experimental, logra no solo establecer un criterio de comparación o validez sino también sentar las bases para futuras aplicaciones. En efecto, que se cumpla o no la desigualdad de Bell o sus posteriores generalizaciones, marcará la diferencia, la que solamente pueden establecer cuidadosos experimentos hechos en condiciones cada vez más precisas y confiables. Se inicia así, no ya un cuarto periodo, sino lo que hemos denominado segunda revolución cuántica. La balanza se inclina cada vez más a favor de la no-localidad. ¿Significa esto que la teoría cuántica esté completa? Nada podría demostrarlo, al menos por ahora. Pero EPRB, a pesar de su limitación, sigue siendo un referente básico.

Teorema EPRB y sus limitaciones

Hemos hecho referencia a EPR a secas, indicando al comienzo de la introducción que se trata de un artículo escrito por Einstein y sus dos jóvenes colaboradores Podolsky y Rosen. La redacción definitiva correspondió al segundo, pero la idea original provenía de Einstein,

desde por lo menos dos años atrás durante la última conferencia Solvay a la que asistió. Es impredecible la suerte que habría corrido Einstein de no haberse refugiado en Estados Unidos a finales de ese año (1933), pero se puede prever que, de haberse mantenido en Europa, habría escrito él solo lo que, a contracorriente, se podría denominar teorema EPR (Laloë, 2012). Nadie desconoce que el argumento central provenía de Einstein. Rosen, americano de origen israelí, fue quien imaginó lo que después resultaría siendo un sistema de dos partículas entrelazadas (para el caso, electrones). Tal vez la fortaleza misma de los argumentos, desde el punto de vista lógico, hayan sido puestos por Podolsky, ya que era su especialidad. Este era un ruso de familia judía que había trabajado previamente con Lev Landau en teoría de campos y migró a Estados Unidos, como muchos otros físicos con antecedentes judíos; su relación con Einstein se remontaba a varios años atrás.

La redacción del *paper* fue principalmente obra de Podolsky. A Einstein finalmente le desagradó la forma, pues según su propia confesión no expresaba claramente la idea que tenía en mente, un argumento físico que la argumentación lógica obscureció. Esto no fue aparentemente tan grave para el curtido físico. Pero filtrar el *paper* a la prensa antes de su publicación oficial en PRL fue para Einstein una grave falta que rompió por completo la relación del ruso con el padre de la relatividad. No ocurrió lo mismo con Rosen, quien mantuvo relaciones con Einstein hasta su muerte ocurrida en Israel.

Se ha escrito mucho sobre ese famoso artículo al que, paradójicamente, poca atención se le prestó durante varios años, después de que Bohr publicara un artículo con el mismo título, en el volumen siguiente de la misma revista, pocos meses después: *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* (1935). Se sabe que EPR causó gran malestar entre los más famosos partidarios de la interpretación de Copenhague, en especial en Bohr, quien en la práctica se sintió directamente atacado por Einstein, como si se tratara de revivir la polémica de los años anteriores con acentuada pasión.

Transcurrieron tres lustros hasta cuando Bohm desempolvó nuevamente la polémica, pero desde otra perspectiva. A cambio de consi-

derar posición y velocidad de los dos electrones entrelazados, Bohm simplificó la idea del experimento pensado y lo llevó más nítidamente al terreno cuántico, introduciendo de paso el concepto de no-localidad. EPRB, como se reconoce la *nueva paradoja*, para algunos un teorema, va mucho más allá; en esta y las siguientes dos secciones trataremos de ilustrar por qué. Las citas textuales y referencias, principalmente en los últimos cincuenta años, se cuentan por miles.

La argumentación está acompañada de un experimento mental. Se trata de dos objetos cuánticos que en algún momento interactúan formando uno solo y luego se separan en direcciones opuestas. La discusión se centra en la cantidad de movimiento y su variable conjugada, la posición. Desde el enunciado de los postulados, perfectamente válidos en el esquema del realismo exigido por Einstein y de la localidad que no lo abandonaría, no hay falla alguna en la demostración y así lo reconocería Bohr.

En realidad, la respuesta de Bohr fue muy confusa: pareció no haber entendido la argumentación de Einstein, a lo que seguramente contribuyó que la responsabilidad de la redacción la haya dejado Einstein en manos de Podolsky. Sí conviene aclarar que la argumentación se hace con criterios esencialmente clásicos, pero utilizando rigurosamente el formalismo cuántico, lo que hace todavía más sorprendente que, después del *alboroto* causado en los círculos afines a Bohr, se haya dejado de lado este *paper* y solo se le haya prestado tanta atención después de que el teorema de Bell, tema de la siguiente sección, hubiera sido puesto a prueba experimentalmente. En las últimas décadas el número de citas ha crecido. La razón es muy sencilla: las expectativas para las aplicaciones del entrelazamiento son muchas; de ello depende en gran medida la cuarta revolución industrial.

Se critica a Bohr que en sus réplicas a EPR haga énfasis en el principio de complementariedad, donde ponen el énfasis los autores del artículo. La complementariedad, en muchos aspectos, incluye la no-localidad, lo que no fue percibido plenamente por Bohr. Para entonces Einstein había aceptado, contra su voluntad, que *en ocasiones Dios juega a los dados, pero no es malicioso*: un reconocimiento a la validez del principio de indeterminación. Los temas son localidad y realismo, al

menos una versión clásica del segundo. En cuanto a lo primero, la localidad que definitivamente habrá que abandonar, una versión más moderna de EPR, esbozada 20 años después por Bohm (la EPRB) pero que no satisfizo a Einstein (la calificó de muy barata o baja calidad, textualmente: *too cheap*), habría ahorrado muchas discusiones: ese modo de no-localidad no contradice la relatividad, pues no permite transmisión de información. El físico americano Abner E. Shimony se referiría a una coexistencia pacífica entre la relatividad y la cuántica (Whitaker, 2012, p. 76). La situación es equiparable a la geometría euclidiana, contrastada con las versiones no euclidianas de la misma: sus teoremas no pierden validez, simplemente no aplican en la nueva concepción geométrica no plana.

En el peor de los casos, la propuesta debería llamarse como lo que rigurosamente es: un par de postulados que, de ser válidos, llevan a la conclusión con que termina el *paper*. Ahora bien, el realismo exigido por Einstein no parece primar en la naturaleza; en cuanto a la localidad, lo contrario, la no-localidad, es la predicción cuántica más característica y universal, a pesar de ser la más extraña.

Quien pudo ver a fondo las consecuencias de la teoría cuántica en la interpretación ortodoxa de Heisenberg, Bohr y von Neumann fue Schrödinger. Aunque puede afirmarse que sus cavilaciones acerca de la validez y completud de la teoría no fueron las mismas que las de Einstein, fue siempre su mejor aliado en el ataque a lo que podría denominarse *el círculo de Copenhague*. En una serie de artículos publicados en alemán en el mismo año con el título *La situación actual en la mecánica cuántica*, traducidos posteriormente al inglés y reconocidos con el nombre de *La paradoja del gato*, ilustra las absurdas conclusiones que pueden derivarse de la reducción o colapso de la función de onda (Schrödinger, 1935).

Toda esta disputa sirvió para afirmar la posición de Bohr. En particular, quedó claro que Einstein había identificado un serio problema de forma, tal vez no de contenido, problema que había que resolver a toda costa. Fue así como llegó a una clara formulación de lo que, en su criterio, es la medida. El artículo sirvió, en últimas, para ratificar en Bohr la *creencia* en dos mundos separados uno del otro, el cuán-

tico, una especie de ficción, y el clásico en el mundo macroscópico o *mundo real*.

Más allá del colapso de la función de onda causado por “el proceso de medida” (una controversia que todavía no se da por concluida), subsiste el problema de la interpretación del “principio de correspondencia”, si es que debe aceptarse como principio fundamental de la teoría. Entre las diversas interpretaciones, tema del siguiente capítulo, varias de ellas han surgido de un intento por reformular ese principio o al menos reinterpretarlo.

Einstein no desconocía el enorme mérito de la teoría cuántica. Tomando la mecánica y la electrodinámica como las dos teorías fundamentales de la física clásica, reconocía que la cuántica iba más allá, pero alegaba que no era una teoría completa. Él por un lado exigía realismo y separabilidad. Por el otro, partía de la teoría de relatividad y la predicción del experimento imaginado le llevaba a desconocer la existencia de las “acciones fantasmagóricas a distancia”, encontrando en ese resultado una contradicción.

Bohm dio al experimento imaginado por EPR una formulación más transparente en 1951. Imaginemos que se tienen correlaciones entre propiedades discretas de objetos cuánticos, por ejemplo, el espín o la polarización. Si disponemos de dos electrones que se han producido en forma entrelazada, emitidos en direcciones opuestas para mayor facilidad, se puede en cierto momento medir el espín de uno y obtener un valor, por ejemplo, espín hacia arriba, de tal suerte que el otro deberá exhibir espín hacia abajo en el momento de ser observado. Ateniéndonos a la interpretación de Copenhague, el espín de cualquiera de las dos partículas no está definido antes de que sea observado. Lo mismo ocurre con la polarización de fotones entrelazados. Antes de la medición, esas cantidades no tienen un valor particular; sin embargo, sí debe existir una correlación entre los valores de una y otra partícula. La inquietud que queda por resolver es si la correlación se produce en el momento de la medida, en cuyo caso podría ser causada por el observador.

La respuesta, como veremos, es tajante: la correlación es inherente al entrelazamiento desde su origen. Es eso lo que hace ese *enredamien-*

to lo más característico de la mecánica cuántica. Todavía en 1935, Einstein y algunos de sus seguidores no aceptaban las consecuencias de la nueva teoría. Formados en la antigua física clásica, los efectos de no-localidad se asemejaban para ellos a *acciones fantasmagóricas a distancia* (terminología utilizada sarcásticamente por Einstein. Su incomodidad era una *pedra en el zapato* para la nueva generación de físicos y para Bohr. Recuérdese que este último nació en 1885 y que pertenecería, por tanto, a la generación anterior).

La comunicación *instantánea o permanente*, sin mediación o *existencia* del tiempo a pesar de la separación espacial, es lo que queda por aclarar, y eso es lo que no dejaría en paz a Einstein. La medida misma es *el fenómeno* en sí, y la mecánica cuántica predice con confianza el resultado de la misma.

Efecto Aharonov-Bohm y no localidad

El aporte de David Bohm a la interpretación de la mecánica cuántica ha tenido mucha mayor trascendencia de la que usualmente se le reconoce. Las razones para no darle pleno reconocimiento son principalmente de dos tipos: el primero tiene que ver con el desdén con que recibió Einstein su propuesta de la onda piloto; el segundo, razones políticas que hemos discutido en otro espacio (Maldonado, 2009).

En 1957, Bohm y Yakir Aharonov, un físico israelí, analizaron los resultados de un experimento llevado a cabo por Chen-Shiung Wu e Irving Shakhnov unos años atrás (1949); estos habían logrado formar positronio y observar su decaimiento unas fracciones de segundo después. El experimento había sido sugerido por Wheeler. Surgió así el primer indicio de que el entrelazamiento ocurre en la naturaleza. Aunque para el caso lo que se observa es la aniquilación de un par, en otros puede mantenerse, aun cuando los componentes del sistema de dos partículas se hayan separado a enormes distancias. Este hecho, la interpretación que en 1952 propuso Bohm al revivir “la onda piloto” de de Broglie y la decisión de Bell una década más tarde de investigar a fondo el asunto, abrieron el camino a una nueva etapa. Pasarían más de diez años (1969) antes de que los experimentos propuestos por Bell pudieran llevarse a cabo.

En 1959, Bohm y Aharonov descubrieron el efecto que en la actualidad lleva su nombre (Aharonov and Bohm, 1959). Este extraño fenómeno es no local. Ellos encontraron un desplazamiento de fase en la interferencia de electrones debido a un campo electromagnético que tiene intensidad nula en cualquier punto de la trayectoria del electrón. Lo que esto significa es que incluso cuando se tiene un cilindro en cuyo interior hay un campo electromagnético, pero este se halla estrictamente confinado en dicha zona (dentro del cilindro), un electrón que pase por fuera del cilindro acusará *no obstante* los efectos del campo electromagnético (EM). Así pues, un electrón que pase por fuera del cilindro que contiene el campo magnético se verá – misteriosamente – afectado por el campo *dentro* del cilindro. Como otros misterios de la mecánica cuántica, nadie entiende realmente «por qué» sucede esto. El efecto es similar al entrelazamiento en el sentido de que es no-local. Bohm y Aharonov dedujeron este efecto mediante consideraciones teóricas, matemáticas. Algunos años más tarde, el efecto fue verificado experimentalmente. Las implicaciones y aplicaciones del fenómeno siguen siendo tema de muchas investigaciones.

Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica

Salvo por lo mencionado atrás y la correspondencia sostenida entre los principales protagonistas, la comunidad científica no prestó mayor atención al asunto de la interpretación. Si el formalismo cuántico, incluido el controvertido tema del colapso o reducción del paquete de ondas, daba buenos resultados, no valía siquiera la pena prestar atención a un asunto que supuestamente correspondería a la filosofía de la ciencia. Tres décadas después de publicado EPR, Bell se atrevería a sostener que el problema planteado por Einstein exigía aclarar si las correlaciones que se establecen provienen de la teoría misma, de una *misteriosa acción a distancia*, de algunas variables ocultas no tenidas en cuenta o de la imposibilidad de conocer la naturaleza misma en su evolución; descubriría de paso que la controversia podría dirimirse a nivel experimental (Bell, 1966). Aunque no logró del todo los propósitos del programa que se propuso entonces, su teorema establece que una teoría basada en variables ocultas solo podrá reproducir los resultados de la cuántica si incluye la no-localidad. Abrió de paso el camino a una segunda revolución cuántica en la que

prosperaron múltiples interpretaciones, tema central de este trabajo, e indudablemente a una nueva revolución tecnológica, hoy en plena efervescencia. La historia de esta segunda revolución cuántica en la que se produce al mismo tiempo un enriquecimiento y un alejamiento de los fundamentos sentados específicamente alrededor de 1925-27 ha sido llamada como el resultado de disidentes (Freire Junior, 2015). Siempre habrá que valorar el papel de los *outliers*.

El trascendental descubrimiento de Bell fue publicado en una revista de revisión. Para complicar aún más las cosas, tuvo un retraso de dos años, por lo que una segunda publicación suya, conteniendo un segundo teorema, apareció primero en una revista de baja circulación, hoy desaparecida (Bell, 1964). Téngase en cuenta que durante las cuatro décadas transcurridas desde la publicación de EPR hasta por lo menos finales de los 1960 prácticamente todos los departamentos de física y los institutos de investigación estuvieron cerrados a investigar algo diferente a las aplicaciones de la mecánica cuántica, por lo que los dos teoremas que lo hicieron famoso fueron ignorados por la mayoría de expertos. Puede decirse con certeza que muchas de las ideas allí expuestas, ampliadas en artículos posteriores que tampoco recibieron en su momento la atención adecuada, son el fundamento de lo que hoy se denomina teoría cuántica de la información, origen de nuevas tecnologías y dispositivos cuánticos. Pero no hay que olvidar que el germen de todo esto fue el artículo conocido como EPR, o mejor, el propuesto experimento y la idea de que la mecánica cuántica puede complementarse o completarse en un principio con las denominadas variables ocultas.

El tema de las variables ocultas no era nuevo. Su proponente original fue de Broglie, en el famoso congreso Solvay, en donde introdujo el concepto de la onda piloto. A este asunto volveremos en el capítulo 2, cuando examinemos la teoría de Broglie-Bohm. Bell decide tomar el toro por los cuernos y descubre un error en la argumentación de von Neumann.

Los teoremas tipo Bell y sus consecuencias

No se sabe qué admirar más en Bell: si su persistente trabajo en solitario, realizado prácticamente a hurtadillas los fines de semana mien-

tras que su labor diaria debía concentrarse en análisis teóricos más o menos técnicos en el CERN, o la trascendencia de su descubrimiento, no solo desde el punto de vista teórico sino también como ciencia aplicada. Su origen modesto le permitiría afrontar las dificultades que ese trabajo en solitario demandaría, teniendo a la vez la paciencia suficiente para que el extraordinario fruto de sus esfuerzos solo fuera reconocido muchos años después.

Bell sería el encargado de ponerle fin a la controversia Bohr-Einstein; equivocadamente se suele afirmar que a favor del primero: eso no es del todo cierto. Lo que demostró Bell en su corto artículo de 1964, reiterémoslo, es que no puede construirse una teoría local con variables ocultas que prediga los mismos resultados de la teoría cuántica. En particular, cuando dos objetos se encuentran separados por una distancia desde la cual lo que le sucede a uno no puede afectar al otro desde la perspectiva de la relatividad especial, hay que aceptar que se producen correlaciones cuánticas instantáneas. Esas correlaciones son mayores que las que puede predecir una teoría con efectos puramente locales, de ahí que no se cumpla su desigualdad, deducida bajo esas condiciones.

Visto en perspectiva, son tres los logros de su esfuerzo: i) romper el unanimismo que se había establecido en torno a la interpretación; ii) recuperar el camino que conduce a someter las ideas al juicio de los resultados experimentales; iii) dar lugar a nuevas tecnologías que, de otra forma, no habrían sido imaginadas siquiera en tan corto tiempo. Uno de los más ansiados resultados, la computación cuántica, aunque limitada aún a las pruebas de laboratorios altamente especializados, ha logrado ya mostrar sus ventajas al compararla con la computación clásica. Por otra parte, la criptografía cuántica se hace cada vez más imprescindible en la nueva era digital y ha avanzado a pasos agigantados.

Bell reformula el experimento propuesto por EPRB en términos que permiten llevarlo a la práctica utilizando la tecnología del momento. El experimento dará resultados diferentes a los de una teoría clásica local si la mecánica cuántica describe la situación o si algo adicional (variables ocultas) se requieren para ello. Es de advertir que Bell, al igual que Einstein, era escéptico sobre la completud de la mecánica cuántica.

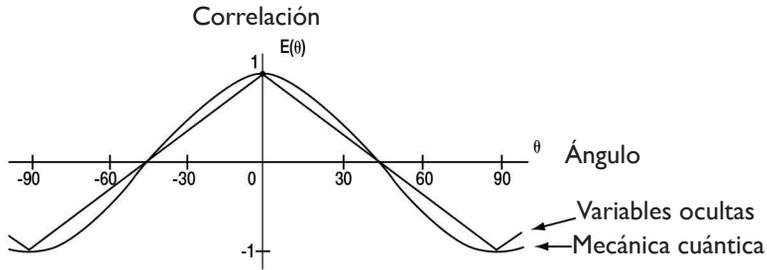
La propuesta de Bell implica hacer múltiples medidas sobre parejas de partículas entrelazadas. Si los resultados caen por fuera de cierto rango de valores numéricos, las variables ocultas no tienen sentido y la mecánica cuántica no los requiere. El experimento de Bell equivale a valorar qué tan fuerte es la correlación entre las parejas y si eso puede describirse sin modificar la teoría.

Bell fundamentó su análisis en términos de partículas con espines correlacionados, para el caso, electrones. Dos experimentalistas pueden medir los valores del espín usando un aparato de tipo Stern-Gerlach, por ejemplo. Como se sabe, el resultado solo puede ser uno de dos valores (*hacia abajo o hacia arriba, hacia la derecha o hacia la izquierda*, en direcciones opuestas para cualquier orientación determinada por el aparato).

Es importante destacar que, para tener en cuenta la aleatoriedad de las mediciones cuánticas, es necesario tomar muchas medidas en experimentos idénticos y tomar luego promedios. Cada medida envuelve dos partículas con espines correlacionados. Hay así cuatro resultados posibles: $\{u, u\}$, $\{u, d\}$, $\{d, u\}$, y $\{d, d\}$, si convenimos en indicar hacia arriba por u y hacia abajo por d , recordando que la orientación del aparato puede ser cualquiera. Cuando las dos orientaciones coinciden, la correlación es $+1$, -1 en caso contrario. Los resultados que se obtendrán con los dos modelos se esquematizan en la figura N° 9.

En su momento, John Bell planteaba un experimento poco práctico porque involucraba el espín del electrón (1964). Sin embargo, cinco años después con el aporte de J. Clauser, M. Horne, A. Shimony y R. Holt, CHSH (1969), quienes generalizaron el teorema para extender su aplicación a fotones, y con la llegada del láser a los laboratorios a finales de los años setenta y comienzos de los años ochenta del siglo pasado, fue posible probar experimentalmente que se viola la desigualdad. El lector puede descubrir aquí otro aporte indirecto de Einstein, el LASER que teóricamente anticipó, a la comprobación de lo que él mismo en su momento (1935) descartó: efectos no locales en fotones gemelos.

Figura N° 9: Correlación entre la mecánica cuántica y las variables ocultas



Fuente: Aczel, 2003

Primeros experimentos de entrelazamiento cuántico

Con razón, algunos se refieren a la segunda revolución cuántica como “la era del entrelazamiento” (Gilder, 2008). De un reciente texto de Whitaker, compatriota de Bell, se destaca el capítulo noveno dedicado al entrelazamiento y a los experimentos que han confirmado una y otra vez los efectos no locales observados en fotones entrelazados (Whitaker, 2012). El título no pudo ser más incitante: “*Experimental philosophy: the first decade*”, aunque en rigor no pueda hablarse ya hoy de filosofía experimental. Un texto más accesible a los no expertos es el de Gilder, también el de A. Aczel (2003), aunque ya ligeramente desactualizado y demasiado centrado en anécdotas históricas. Un tratamiento más de fondo, sin mayores matemáticas y de bastante actualidad es el de Brody (2020).

Un importante requisito para los test de los experimentos sugeridos por EPR provino de Aharonov y Bohm; ellos descubrieron en 1957 que, para saber si las partículas del experimento se comportaban de la manera que EPR objetaban, se debería usar un mecanismo de elección retardada. En otras palabras, el experimentador tendría que escoger qué dirección de espín (o de polarización) medir solo *después* de que las partículas estuvieran en vuelo. De acuerdo con ellos, solamente este diseño garantizaría que una partícula, o en un caso más general, el aparato de medida, no indicara a la otra lo que está sucediendo. Este requisito sería enfatizado por John Bell y sus seguidores (CHSH, por

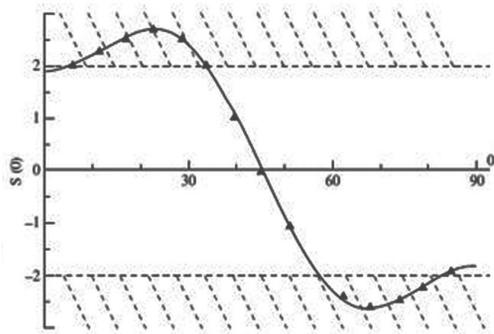
ejemplo), cuyos teoremas cambiarían de una vez por todas nuestra percepción de la realidad aparente.

Un investigador cuidadoso añadiría este requisito a sus test de los teoremas tipo Bell, ayudando a establecer el hecho de que el entrelazamiento de partículas muy alejadas entre sí constituye un fenómeno físico real. Quien pudo establecer una más estrecha relación entre la física y la filosofía, a partir del trabajo pionero de Bell, es sin duda alguna A. E. Shimony, a quien ya hemos mencionado atrás. Su interés por el tema era un cierto malestar que le causaba el problema de la interpretación. Algo podría estar mal con la mecánica cuántica, en lo que coincidía con Einstein. Recordemos que el primer artículo de Bell sobre EPR apareció publicado con dos años de retraso. Dos años más tarde, en 1968, durante su primer año como profesor en la Universidad de Boston, conociendo los intereses de Shimony, un amigo le envió el artículo de Bell, el que de inmediato analizó con gran entusiasmo, siendo consciente de las dificultades experimentales que la materialización de la propuesta implicaba. Sin mayores expectativas, propuso a un estudiante de doctorado que le fue recomendado, Michael Horne, estudiar el artículo de Bell y pensar en la posibilidad del diseño experimental para poner a prueba la fortaleza de la teoría. Coincidentemente, en la Universidad de Columbia el artículo llamó la atención a un estudiante graduado, John F. Clauser. A este le parecían acertadas las críticas de Einstein. De cómo coincidieron los intereses de los tres y lograron vincular a otro estudiante de doctorado, Richard Holt, de la Universidad de Harvard, para llevar a cabo entre los cuatro una muy difícil tarea, nos dan detalles los autores atrás referidos. Los esfuerzos conjuntos condujeron a una adecuación del teorema de Bell, lo que se denominó desigualdad CHSH, y a los primeros intentos por materializar un experimento que contrastara las predicciones de la teoría cuántica no local con la propuesta local de EPR. A finales de los sesenta se dispuso de una poderosa herramienta que permitía realizar experimentos con fotones, como alternativa a la propuesta de hacerlo con electrones, de manipulación más difícil. Fue así como pudo llevarse a la práctica la propuesta originalmente concebida por Bohm, posteriormente complementada por Bell. Aunque los primeros intentos correspondieron al esfuerzo de los cuatro hombres ya mencionados, le correspondió materializar el experimento definitivo

de esta primera época a Clauser, ahora en la Universidad de California en Berkeley, con el apoyo de su nuevo colega Stuart Freedman. A pesar de que su experimento para medir las correlaciones no era suficientemente confiable, estas se daban en una proporción mayor de lo que permitía la teoría clásica, violándose la desigualdad de Bell (Clauser and Freedman, 1972). Desde entonces, a los experimentos se le han señalado varios vacíos o lagunas (en inglés *loopholes*) de distinto tipo que se han venido corrigiendo paulatinamente. J.-Å. Larsson sugiere que deberían denominarse “efectos no deseados o inesperados” (2017).

En 1974 Clauser y Horne mostraron por primera vez que todas las teorías consistentes con el “realismo local” están restringidas por una desigualdad de Bell libre de vacíos, la CH (1974). Clauser y Shimony mostrarían más tarde que la CHSH se podría probar sin esos efectos indeseados usando una fuente “heráldica” (1978). Experimentos libres de las lagunas fueron realizados más finamente y reportados por Giustina *et al.* (2013) y por Christensen *et al.* (2013), casi medio siglo después de publicado el artículo original de Bell. Para una revisión de los vacíos o efectos indeseados puede verse Giustina (2017).

Figura N° 10: Comparación de resultados entre mecánica cuántica y variables ocultas locales



Tomado de Whitaker, 2012.

S es la correlación entre distintas medidas y en la predicción cuántica está dada por:

$$S = 3\cos(2\theta) - \cos(6\theta),$$

mientras que teorías de variables ocultas locales deben satisfacer la desigualdad

$$-2 \leq S \leq 2.$$

El primer experimento concluyente que evidenció los aspectos mencionados, fue realizado por Alain Aspect y su equipo en 1981 en la Universidad de París, Orsay, Francia, en el cual se sobrepasaba el límite por más de cuarenta desviaciones estándar alcanzando un valor de 2.697 ± 0.015 (Aspect *et al.*, 1982).

Usando también láseres con tecnología de fibra óptica, pudieron manipular fotones entrelazados, al igual que Clauser y Freedman, pero con tiempos de respuesta más rápidos. Para evitar un posible intercambio de información o influencia entre los polarizadores utilizados, se cambió su orientación cuando los fotones estaban en vuelo. La correlación por encima de la predicción clásica se manifestaba ahora más nítidamente. El entrelazamiento no deja lugar a dudas que las dos partículas forman parte de un mismo objeto cuántico, sin que por ello se ponga en riesgo la teoría de la relatividad: entrelazamiento y relatividad conviven amistosamente. Que la teoría cuántica sufra algunas modificaciones es altamente probable, pero este aspecto de la teoría ya previsto por Einstein, en contravía de su negativa, sobrevivirá.

Nuevos experimentos

Experimentos más decisivos han sido realizados posteriormente en múltiples oportunidades. Uno de ellos, lo denominaremos RTO siguiendo a Hobbes (2017), puede realizarse en un laboratorio con suficiente tecnología (Rarity and Tapster, 1990; Ou, Lee and Mandel, 1990). Los más exigen la colaboración de varios laboratorios, pero no dejan lugar a duda sobre la supervivencia a escala macroscópica de los fenómenos de no-localidad y entrelazamiento. Hagamos un breve recuento de esta larga historia de las últimas décadas, en las que grupos de hábiles experimentalistas se han unido a excelentes teóricos para verificar una vez más que los resultados favorecen una formulación cuántica del mundo con todas sus rarezas, en particular las correlaciones a distancia sin que haya mediación física.

Lo primero que cabe destacar es que todavía en la década de 1980 los esfuerzos por esclarecer el ambiguo resultado del teorema de Bell eran mirados con escepticismo por dos razones: 1) la mayoría seguía considerándolo una pérdida de tiempo; 2) no alcanzaban a preverse todavía las enormes potencialidades de los resultados. En efecto, la teoría de la información cuántica, que hoy se anticipa como la mayor y más revolucionaria contribución a las nuevas tecnologías cuánticas, estaba todavía en su infancia.

El primer avance espectacular de la última década fue el experimento realizado en Islas Canarias por el grupo de Zeilinger. Para ello se echó mano de dos de los telescopios más grandes del mundo, ubicado uno en la isla de La Palma y otro en la isla de Tenerife, a una distancia de 150 km. Esta última es la OGS (*Optical Ground Station*), manejada por la Agencia Espacial Europea, construida para desarrollar y probar comunicaciones ópticas con satélites.

El grupo de Zeilinger publicó una nueva prueba del entrelazamiento cuántico con ese equipo usando fotones procedentes de objetos astronómicamente distantes (Rauch, *et al.*, 2018).

Entrelazamiento de tres partículas:

Uno de los experimentos de mayor dificultad es el de entrelazamiento de tres fotones. Su trascendencia en la práctica por ahora está lejos de lograrse, pero no deja lugar a dudas: ni siquiera una sofisticada teoría de variables ocultas podrá reproducir los resultados. Ya no se trata de una desigualdad, un nuevo teorema conocido como GHZ (Greenberger, Horn y Zeilinger), aunque en rigor debería llamarse GHSZ, no solo pone límites a los modelos que puedan reproducir los efectos, sino que los cuantifica todavía más. De nuevo la participación de Shimony fue significativa para el resultado final predicho.

En 1990, el artículo «El teorema de Bell sin desigualdades», de Greenberger, Horn, Shimony y Zeilinger (1990), se publicó en el *American Journal of Physics*, aunque la idea del entrelazamiento de tres partículas y el teorema de Bell perfeccionado se sigue llamando GHZ por razones históricas (Whitaker, 2012). Como se sabe, la revista es

prioritariamente de carácter didáctico y sorprende que se haya escogido ese medio para dar a conocer un resultado de tan trascendental importancia.

El dispositivo de tres partículas para presentar el teorema de GHZ puede ser o bien una versión de espín o polarización del experimento, o bien una versión tipo entrelazamiento del haz. Lo más sorprendente del entrelazamiento de tres partículas, y la razón principal del interés que despertó la propuesta del teorema GHZ, es que puede emplearse para probar el resultado de Bell sin el pesado uso de desigualdades.

El teorema hace ver que cualquier conjunto de instrucciones que por caminos convencionales pudieran recibir las partículas, deben ser internamente inconsistentes y, por lo tanto, son imposibles: solo efectos no locales pueden explicar los resultados. Las partículas responden *instantáneamente* a través de cualquier distancia que las separe a fin de proporcionar los resultados que la teoría cuántica predice, como consecuencia del entrelazamiento. Eso no lo logra la suposición del realismo local. El teorema de GHZ muestra la contradicción de una manera más directa y más fácil de entender, sin consideraciones estadísticas, en comparación con el teorema original de Bell.

Las primeras comprobaciones experimentales del teorema GHZ correspondieron a Dirk Bouwmeester y colaboradores (1999) en el laboratorio de Anton Zeilinger en Viena, utilizando un cristal no lineal conocido como BBO (β -borato, óxido). Ese tipo de cristales, que produce primero dos fotones gemelos entrelazados de la misma frecuencia, y luego otro, se utiliza también en los llamados “experimentos de borrado cuántico”.

El entrelazamiento de tres fotones, conocido también como estado GHZ, promete grandes avances en criptografía cuántica. Uno de los experimentos más recientes se describe en (Fang, *et al.*, 2019).

Experimentos más actuales sobre el teorema de Bell y sus generalizaciones no dejan lugar a dudas: las acciones fantasmagóricas a distancia son un hecho, y las teorías de variables ocultas no pueden explicar lo que ocurre (Moreau, 2019).

En 2012 el premio Nobel de física se otorgó a Serge Haroche y David Wineland por la manipulación de cuantos individuales. El primero “atrapó” fotones y midió su estado con átomos, el segundo “atrapó” iones y midió su estado con fotones. Uno se pregunta qué podría pensar Bohr, quien creía que un aparato de medida tiene que ser un objeto macroscópico, vale decir, clásico. ¿Será que todo aparato de medida tiene que ser clásico, como enseña la interpretación ortodoxa? La interpretación de universos paralelos tiene una arista más: nos ayuda a comprender mejor la computación, la criptografía y el (tele)transporte cuántico. A este asunto nos referimos brevemente enseguida.

La segunda revolución cuántica:

La primera revolución cuántica se dio en Europa, escenario principal de las dos guerras mundiales. Muchos de los que contribuyeron al desarrollo de la primera, particularmente los que se encontraban bajo la influencia de Alemania, se vieron obligados a migrar a otros países. Las dos circunstancias contribuyeron a que las interpretaciones alrededor de “la escuela de Copenhague” no fueran puestas en duda durante mucho tiempo.

Nos hemos referido a los cimientos de una segunda revolución cuántica: los inesperados efectos no locales que, si bien eran aceptados por la comunidad que trabajaba en las aplicaciones, no se esperaba que pudieran ser verificados; mucho menos las aplicaciones a las que darían lugar. La minoría que dudaba de ellos y los que se atrevieron a buscar nuevas posibles interpretaciones fueron los responsables del desarrollo de una segunda revolución. A esto contribuyó decididamente que, al menos en algunos espacios, se empezara a tolerar la investigación en los fundamentos de la teoría.

La (re)elaboración de la desigualdad de Bell para adaptarla a los experimentos, CHSH por las siglas de sus autores, fue apenas un primer paso. Mucho más esfuerzo requirió montar los experimentos que negaron la validez de la desigualdad. Los de Aspect y su equipo constituyeron el primer éxito rotundo en esa dirección. Más allá de las desigualdades, GHZ fue el siguiente paso. Posteriormente los equipos de Zeilinger y de Gisin unieron esfuerzos para montar experimentos

de mayor dificultad, pero dispusieron de instrumentos más adecuados. No cabe duda alguna: en el siglo XXI las aplicaciones de los efectos no locales, aunados a las otras “extrañas” propiedades de los efectos cuánticos (superposición, tunelamiento, recoherencia, un efecto todavía muy difícil de lograr, y otros más de los que nos ocuparemos más adelante) llevarán esta nueva revolución científica todavía más lejos.

Recabemos en este punto: hay procesos atómicos, probablemente los habrá nucleares y otros más que no han sido suficientemente investigados, en los que se producen dos fotones que, a menos que se dé su aniquilamiento (lo cual puede ocurrir al detectarlos), van a permanecer en ese estado. Es este efecto el que se aprovecha básicamente en los sofisticados experimentos que se realizan hoy en muchos laboratorios o en asociación de laboratorios. En este punto, vale la pena resaltar la cooperación científica internacional, la que siempre ha dado enormes dividendos, de todo tipo, incluso a nivel de las relaciones entre los países. La investigación básica arroja buenos dividendos, conclusión inexorable a la que llegan comisiones de expertos cuyas recomendaciones no son tenidas en cuenta por los gobiernos en países como el nuestro.

Por brevedad no nos referiremos a la “interferencia de neutrones”, un tópico demasiado interesante para no mencionarlo siquiera, en donde convergen además efectos gravitacionales, que jugó así mismo un papel muy importante en el desarrollo de los experimentos más finos de detección del efecto del entrelazamiento y de la confirmación del teorema GHZ.

¿Qué significa todo esto?

The meaning of it all es un corto libro de *corte filosófico*, recopilación de tres conferencias de Feynman, con cierto menosprecio por la filosofía (Feynman, 1963). Pensando más desde la filosofía, Th. Nagel escribió después un corto libro con el mismo título en forma de pregunta: ¿Qué significa todo esto? (Nagel, 1987).

Si la mecánica cuántica es un formalismo matemático, ¿qué sentido tiene lo que se observa a simple vista o se interpreta e infiere de la

lectura o imagen producida por un sofisticado aparato de laboratorio y qué validez puede darse a la afirmación de que sus predicciones concuerdan con las mediciones realizadas, en ocasiones tan finas que son fiables hasta la duodécima cifra decimal? Más explícitamente, ¿qué es la fenomenología cuántica?

Debe quedar claro desde ya que los fenómenos que observamos con nuestros propios ojos o con ayuda de un sofisticado aparato de laboratorio caen en el dominio de lo que solemos llamar clásico. Podemos ver una pastilla superconductor levitando sobre la superficie que rodea una cinta magnética orientada horizontalmente, un comportamiento a todas luces clásico que ilustra una de las aplicaciones más prometedoras de la superconductividad, trenes bala que podrían ir a velocidades cercanas a mil kilómetros por hora o más; pero el fenómeno mismo, lo que da lugar a ese comportamiento, es rigurosamente cuántico. ¿Qué es para este caso lo que denominamos cuántico? Si se trata de una pastilla de plomo que se mantiene a una temperatura cercana al cero absoluto gracias a un criostato que emplea helio líquido, de seguro hay un comportamiento colectivo de un enorme número de electrones dentro de la pastilla que, expresado en términos de la llamada teoría BCS de la superconductividad, forman pares de Cooper. Los pares de Cooper son parejas de electrones (cargas negativas) o de *huecos* (ausencia de electrones, lo que resulta equivalente a disponer de cargas positivas) que, contrario a lo que enseña la ley de Coulomb, se atraen. Aunque el mecanismo en el caso del plomo se entiende perfectamente (dio lugar al premio Nobel otorgado a J. Bardeen, L. Cooper y J.R. Schrieffer en 1972), no ha ocurrido lo mismo con los llamados “nuevos materiales superconductores”; lo único claro es que en ambos casos el fenómeno es un efecto cuántico que se manifiesta macroscópicamente, por cooperación entre un enorme conglomerado de “objetos cuánticos” (los pares de Cooper). Nótese que no puede hablarse de “un par de Cooper aislado”, ese ente aparentemente cuántico no existe. Hay un conglomerado de pares de Cooper que, dentro de un sólido, dan lugar al fenómeno macroscópico denominado superconductividad.

El problema de la comprensión del fenómeno en sí se manifiesta también a nivel macro. Creemos entender la caída de la piedra cerca de la superficie de la tierra y el movimiento de la luna o de un satélite que

orbita a su alrededor. Aristóteles también creía entenderlo, pero su explicación no sobrevivió a la ciencia moderna. El gigantesco aporte de Newton fue radicalmente transformado por Einstein. Quienes trabajan en supercuerdas o modelos similares creen podernos explicar algún día, de mejor manera, la caída de la piedra mediante lo que se denominará *gravedad cuántica*. Esa teoría todavía no existe: todo lo que podemos decir es que hay muchos modelos, pero ninguno ha sido confirmado experimentalmente. Lo que sí podemos garantizar es que Einstein tenía razón: hay ondas gravitacionales; esto es, el universo se mueve de forma ondulatoria.

Dicho sea de paso, antes de abordar el tema que nos ocupa, el modelo clásico del magnetismo es obsoleto. Obsoleta es también la llamada ley de Coulomb. Hay una teoría más sofisticada que ocupa el lugar del electromagnetismo clásico, la QED. De ella nos hemos ocupado brevemente atrás, señalando cómo la ecuación de onda de Schrödinger no es suficiente para formularla; debe emplearse la ecuación de Dirac, versión relativista de la anterior. Hoy sabemos que el campo de Higgs dota de masa a las partículas que tienen esta propiedad y que no interactúa con las que no la poseen, fotones, por ejemplo. El concepto de masa propuesto por Newton y mejorado por Einstein ha sido rebasado.

El lenguaje con que iniciamos este capítulo puede desalentar a un lector no experto en el tema. A ese lector le pedimos un poco de paciencia. Este texto, insistimos, ha sido escrito para *profanos*. En otras palabras, no haremos mayor alusión a la *teoría final* de la gravedad cuántica, así como no lo hemos hecho tampoco a la teoría cuántica de campos, ni a la versión matricial de la mecánica cuántica, ni siquiera a la más asequible versión de Schrödinger, salvo al ente matemático que ha dado lugar a mucha confusión, la función de onda: la onda misma, en el sentido clásico, físicamente no existe. La versión de Feynman apenas la hemos mencionado, a pesar de su aplicabilidad en teoría de campos de sus famosos diagramas. Para una introducción sin matemáticas a la formulación de múltiples caminos recomendamos el texto de Cox y Forshaw (2011).

Onda o partícula es la alternativa clásica a localización o no en el sentido espacial. Si hemos de creerle a Einstein en la versión de

Wheeler, la materia-energía crea el espacio-tiempo y una vez que lo crea, lo deforma. El resultado de la deformación, “la curvatura del espacio-tiempo”, dicta a la materia-energía cómo debe moverse en ese espacio-tiempo. Los objetos cuánticos elementales, con masa o sin ella, son producidos por campos cuánticos que, como su nombre lo indica, no tienen localización. Reconciliar las dos teorías es la tarea del momento. Anticipando las conclusiones de este trabajo, la existencia de múltiples interpretaciones es a la vez resultado de ese esfuerzo y la mejor garantía para contribuir a que los avances logrados no nos dejen todavía satisfechos.

Se dice a menudo que el mundo cuántico se limita al dominio microscópico. Eso no es cierto, como lo acabamos de ilustrar con la pastilla superconductor. De hecho, la nueva visión de la naturaleza que empezó con la cuantización partió de un objeto macroscópico, el llamado *cuerpo negro*, un objeto que puede llegar a ser tan grande como el universo mismo. Volveremos a este asunto básico más adelante.

Hemos hecho énfasis en que la denominación que ha persistido hasta hoy, la mecánica cuántica, es a nuestro modo de ver equivocada. Denominaciones más precisas como física cuántica o teoría cuántica se abren a un panorama más amplio, pero todavía insuficiente. Nosotros nos proponemos hablar más a menudo de ciencias cuánticas, lo que quedará claro a lo largo del texto y como conclusión final. Y al cabo, sin más, del mundo cuántico.

Si el comportamiento cuántico no se refiere necesariamente a objetos diminutos, ¿qué es lo que produce un comportamiento tan peculiar y con tan extraordinarias aplicaciones? He ahí el meollo del asunto.

Los fenómenos y comportamientos cuánticos son contraintuitivos, y dado que no se pueden explicar con base en lo que clásicamente habría de llamarse como “el método científico”, se hizo necesaria una nueva matemática. Es la matemática de la física cuántica, cuyo epítome es la mecánica cuántica, formulada originariamente por Heisenberg, y luego refinada y desarrollada por Schrödinger, Born, Dirac y Pauli principalmente.

Una precisión se impone. La expresión “mecánica cuántica” es en realidad una forma equivocada de hablar, análogamente a lo que sucederá con los llamados “principios” de la mecánica cuántica. En términos básicos, la mecánica se ocupa de las relaciones entre la materia o masa y las fuerzas. La mecánica clásica será convertida en un caso particular de la mecánica cuántica, esto es, del estudio de las relaciones entre partículas subatómicas. El concepto mismo de “fuerza” habrá de desaparecer y en su lugar aparecerá el concepto de “campos”. En ciencia, una manera de resolver mejor los problemas y de comprender mejor el mundo, la realidad y la naturaleza es mediante cambios semánticos. Ya volveremos sobre esta idea.

Mientras tanto, digámoslo de manera expresa: mecánica cuántica tiene cualquier cosa menos de mecanicismo. No es una concepción, comprensión o interpretación *mecanicista* del mundo o la realidad. Es, sencillamente, la forma de hablar en su momento para designar el estudio de comportamientos “inesperados” de partículas subatómicas. Este carácter “inesperado” se expresará, justamente, con las expresiones “principios”; por ejemplo, principio de complementariedad, principio de indeterminación, principio de no-localidad y varios más. Así, concluimos que la física cuántica es cualquier cosa menos una ciencia “principalista”. Era, sin más, la forma que había en su momento para decir algo así como “aspectos fundamentales”.

Con la interpretación de Broglie-Bohm, a la que nos referiremos de manera especial en el capítulo 3, y lo que siguió al teorema de Bell, para decirlo más sintéticamente, con los teoremas EPRB y Bell, se abrió un nuevo panorama para la física cuántica que dio lugar a lo que en rigor podemos denominar ciencias cuánticas, sin dejar de lado la filosofía y, sin pudor, incluir también las ciencias sociales. Son las diversas miradas que hoy podemos hacer, desde una nueva filosofía natural, sobre la ciencia toda, pretendidamente duras, semi-duras y blandas, si lo prefieren los que gustan de clasificarlas por su contenido matemático.

Capítulo 2:

Las diferentes interpretaciones de la Mecánica Cuántica

La historia de las interpretaciones de la mecánica cuántica se puede articular en dos grandes periodos. En primer término, el del desarrollo de la mecánica cuántica y sus debates en lo que podemos designar como la primera etapa de la revolución cuántica, esto es, el periodo comprendido entre 1900 y 1935, cuyo epítome se sitúa alrededor de 1927 cuando se formula la mecánica cuántica y alcanza la cima con el *paper* reconocido como EPR. Viene luego una etapa que podríamos llamar de estancamiento o de conformismo; uno de los factores fue, sin lugar a dudas, el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial y el desplazamiento de los intereses hacia la física atómica o nuclear. En un segundo periodo aparecen todas las interpretaciones que suceden a partir de los años 1950 hasta la fecha, las cuales pivotan principalmente alrededor del debate acerca de la mecánica de Bohm o de los universos paralelos. Dicho de un modo general, esta puede ser llamada como la segunda etapa de la revolución cuántica¹³.

Recabemos en este punto: el Santo Grial en ciencia, si cabe el uso de la expresión, es la interpretación. El rasgo de la inteligencia, de la genialidad o de la torpeza, según el caso, es la interpretación de los fenómenos, de las teorías, de los modelos. Es exactamente la interpretación lo que marca la diferencia, por ejemplo, entre Parménides y Heráclito, entre Platón y Aristóteles, entre Agustín y Tomás, entre Roberto Bellarmino y Giordano Bruno y Galileo, entre Pasteur y Koch, entre Hegel y Marx, entre Einstein y Bohr, y así sucesivamente. Los ejemplos se pueden multiplicar sin dificultad. La interpretación de los datos, de las teorías o las tesis es un tema distintivamente filosófico. Al fin y al cabo, toda discusión sobre conceptos es una discusión

13 Esta historia ha sido bien narrada por diferentes fuentes (Freire Junior, 2015; Whitaker, 2012; Gilder, 2008; Aczel, 2003).

filosófica, solo que, en el caso de la mecánica cuántica, se trata, dicho *grosso modo* y de entrada, de interpretaciones sobre el formalismo matemático tanto como sobre las implicaciones y consecuencias del mismo. Precisamente contra esta inclinación a la filosofía es que se imponía, parece ser, la recriminación de Mermin ya mencionada: “*shut up and calculate*”.

Pues bien, antes de presentar las distintas interpretaciones se hace necesario subrayar una idea del primer capítulo. El formalismo matemático se queda corto con respecto al verdadero problema: el de la interpretación y las consecuencias. Este es un tema de mucho mayor calado que la apariencia, fundamental como es, del aparato matemático.

La forma más elemental, pero en verdad menos rigurosa de plantear los ejemplos mencionados y otros más posibles, consiste en sostener, como se ha dicho en innumerables ocasiones, que es el debate entre realistas e idealistas, o entre empiristas y racionalistas, o entre versiones ortodoxas y oficiales y heterodoxas y revolucionarias, y varias otras variantes. Como argumentaremos a lo largo de este capítulo, el asunto es bastante más complicado por sutiles que estas clasificaciones sean.

Queremos sugerir una tesis en este segundo capítulo. Antes que una desventaja que acaso podría ser asimilada a una postura relativista, ecléctica o escéptica, la existencia de múltiples interpretaciones de la mecánica cuántica es un rasgo altamente positivo —exactamente desde el punto de vista filosófico, y por tanto, científico; por ejemplo, desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia. Solo después de exponer en detalle todas y cada una de las interpretaciones habidas hasta la fecha, volveremos a una justificación de esta tesis, que es lo que haremos en el capítulo tercero. Anticipemos, sin embargo, que una diversidad tan amplia de interpretaciones sugiere una vitalidad del pensamiento y, a la vez, una indicación de hacia dónde hay que girar la mirada. Jamás, en toda la historia de la humanidad, se asistió a una situación semejante en la que había mucho más que dos interpretaciones principales o fuertes. Salvo con una notable excepción: histórica y culturalmente, una situación parecida se presentó en la Edad Media a propósito de las numerosas herejías para la Iglesia Cristiana. Esas herejías eran interpretaciones, y consiguientemente,

formas de vida, acordes a comprensiones diferentes. La idea de herejía solo tiene sentido sobre el trasfondo de que hay una doctrina única y oficial, la cual, por definición, es la única verdadera.

Para reforzar lo anterior, adelantemos una segunda tesis: no existe *un* método científico, y ciertamente no *el* método científico. Este punto de vista no es original, pero se hace necesario declarar la validez de la negación en la medida en que muchos manuales introductorios a alguna de las ciencias naturales, por ejemplo, la física, empiezan con una introducción al tema. Si algo tiene validez en la ciencia es la falsabilidad de sus principios, de sus postulados, de sus hipótesis, hasta de sus teoremas. En mecánica cuántica se empieza por enunciar unos postulados. Afortunadamente hoy se acepta que esos postulados pueden ser revisados, (por ello no hemos hecho mención expresa a los mismos). Contra la ortodoxia de una de las primeras interpretaciones de la mecánica cuántica, para muchos la primera, el postulado de la reducción del paquete de ondas –o lo que es esencialmente lo mismo, el colapso de la función de onda– podría revisarse, una tarea que llevan a cabo la mayoría de las interpretaciones a que nos referiremos en este capítulo.

Observemos este hecho: existen numerosas interpretaciones sobre la mecánica cuántica. Pero, a su vez, dentro de cada interpretación existen variantes, matices, desacuerdos, disimilitudes. Nada es homogéneo, ni en el mapa, ni tampoco en cada una de las comprensiones y explicaciones del problema que aquí nos ocupa. En consecuencia, hemos tomado una decisión: brindar los rasgos generales que sí permiten una comprensión básica en cada caso sobre cada interpretación. Una profundización de los matices y variantes al interior de cada interpretación sería objeto, sin ninguna dificultad de un libro propio, aun cuando no necesariamente sea largo; pero sí sería muy técnico. Asimismo, hemos dejado de lado una elaboración exhaustiva de la bibliografía sobre cada una de las interpretaciones. En numerosas ocasiones se trata de una bibliografía amplia, y con frecuencia técnica. Ese sería el objeto de una serie de artículos de revisión (*review papers*), cuyo espacio y calibre no es este.

Vale aquí una analogía: ¿existe algún equivalente de la visión ortodoxa que equivalga a esa visión oficial que se fue construyendo a través de

Encíclicas, Sínodos y Conclaves a lo largo de diez siglos en el medioevo, y que tanta sangre generó, en el caso del cristianismo? Esto es, ¿las diferentes interpretaciones —que podrían ser adoptadas, *lato sensu*, como herejías—, se contraponen a una visión oficial u ortodoxa? La respuesta es afirmativa. Esa versión ortodoxa no es, contra lo que pareciera ser el caso, la interpretación de Copenhague; ella misma es una herejía. La versión ortodoxa es: a) la de la ciencia moderna, o también, b) la de la racionalidad occidental, por lo menos desde Platón y Aristóteles. Es exactamente en este sentido, como hemos sugerido en otro texto (Maldonado, 2020), que la teoría o ciencia cuántica es una segunda revolución científica, y más radicalmente, la más radical de las inflexiones en la historia de la racionalidad occidental. Volveremos sobre esta idea.

Mientras tanto, subrayemos esta afirmación: la variedad de interpretaciones connota la riqueza de un problema. Es sobre este problema que volvemos ahora la mirada.

Primero presentamos cada una de las interpretaciones y luego, paralelamente, llevamos a cabo evaluaciones puntuales sobre las mismas; o más bien precisiones conceptuales. Una lectura atenta pone de manifiesto que el resultado será el de poner de manifiesto que entre algunas de ellas hay complementariedades, otras son perfectamente disyuntas, y alguna más son alternativas. Procedamos por pasos. Como se observó en la Introducción, el orden de las interpretaciones corresponde a su surgimiento cronológico.

La lógica de este capítulo es la siguiente: primeramente, se presenta cada una de las interpretaciones, elaborando, cuando sea necesario, alguna precisión o ampliación. La ponderación de estas interpretaciones es el objeto del tercer capítulo. La idea es doble, así: de un lado, es imposible desconocer el abanico de interpretaciones de la mecánica cuántica, independientemente incluso de que algunas hayan tenido menos significación —científica o filosófica— que otras, o incluso de que haya alguna que bien pudiera no ser el objeto de consensos o acuerdos por parte de la mayoría de los autores. Solo sobre esta base, de otra parte, será posible la verdadera finalidad de este libro, a saber: ponderar el abanico existente y proponer una línea nueva y perfectamente distinta.

1-. La interpretación de Copenhague

La primera interpretación es, ampliamente, la más conocida y aceptada, tanto por el gran público como por la comunidad académica y científica (Tegmark, 2001). Su fecha de nacimiento puede situarse en 1927 aun cuando los gérmenes de la misma pueden remontarse, sin dificultad hasta 1913. Se trata de la interpretación de N. Bohr, reforzada con W. Heisenberg, E. Schrödinger, W. Pauli, M., Born, P. Jordan y P. Dirac, y que puede resumirse en una afirmación, así: la realidad depende del observador, y es el acto de la observación el que crea, y modifica consecuentemente, el comportamiento del objeto observado. Antes de la observación no es que la realidad no exista; sencillamente no es posible decir lo que es; en el mejor de los casos es la x de una ecuación cuya contraparte, sin embargo, sí es o puede ser conocida.

El papel del observador, o del acto de medición puede ser traducido, más ampliamente, también como el papel de la conciencia, la razón, o la mente. Ciertamente diferentes, estos conceptos pueden, sin embargo, ser asumidos aquí como equivalentes. A favor de la interpretación de Copenhague está el hecho de que le otorga un papel activo a la mente, y no meramente pasivo, de reflejo, de representación o de explicación *ex-post* al mundo y a la realidad. La realidad en general es lo que acontece cuando la conciencia o la mente actúan sobre ella. Sin esta acción, la realidad carece de sentido o de significación, lo que ha sido muy ampliamente la tesis, explícita o tácitamente, afirmada en toda la historia de la civilización occidental. Habitualmente el mundo acontece, y la conciencia o la mente lo entienden o lo explican posteriormente. Nunca *ex-ante*. La mente siempre llega tarde al mundo, como el Búho de Minerva en la conocida sentencia de Hegel en las *Lecciones sobre la Filosofía del Derecho*. En esta interpretación, la mente deja de ser un epifenómeno del universo, el mundo o la naturaleza, que es lo que siempre fue en toda la historia de la humanidad occidental.

En contra de la interpretación de Copenhague está el hecho de que una tesis semejante afirma el dualismo mente-materia, o cualesquiera traducciones que se quiera hacer sobre el mismo. En verdad, el mundo y la mente son distintos, solo que el segundo tiene lugar como un acto de observación o de medición.

Ahora bien, esta interpretación no afirma, literalmente, que la mente crea la realidad. Solo que esta última carece de cualquier significación por sí misma, y que la adquiere gracias a una acción por parte de la mente. Más exactamente, el mundo es una amplia gama de posibilidades perfectamente aleatorias. Es esto lo que significa la “x” que es la realidad, antes mencionada. Mediante la observación o la medición, una de esas infinitas posibilidades aleatorias acaece entonces. Si, como se mencionó en el capítulo anterior, la realidad es probabilística gracias a la mecánica cuántica –subrayamos: no es la mecánica cuántica la que es probabilística, es la realidad misma–, la observación o la medición le otorga una de las probabilidades al mundo, y es entonces lo que acaece como lo “real”. Dicho en el lenguaje propio de la mecánica cuántica, tiene lugar entonces el colapso de la función de onda, y el mundo cuántico se vuelve entonces clásico. Es decir, pasa a imperar el principio de tercero excluido de Aristóteles, que es lo que define singularmente al mundo clásico.

“No existe el mundo cuántico”, afirma Bohr una y otra vez. Frente a esta afirmación caben solamente dos opciones: se la acepta o se la rechaza. El título de este libro le dirá al lector que hemos optado por la segunda.

Bohr abrió el camino a la interpretación que todavía prima desde aquel año memorable en el que introdujo los *saltos cuánticos* (1913). Asumamos que el electrón en cierto momento se encuentra en un estado, por ejemplo, el primer nivel excitado. Ese estado tiene la característica de que no puede ser estable. El electrón necesariamente tendrá que cambiar de estado y lo puede hacer en dos formas, de acuerdo con lo que Einstein descubriría más tarde (1917): por emisión espontánea o por emisión inducida, estimulada por un fotón. Dicho sea de paso, el descubrimiento de Einstein fue el origen del LASER (*light amplification by stimulated emission of radiation*), fabricado 40 años más tarde. La ecuación de Schrödinger, formulada en 1926, nos dice qué puede ocurrir en el intermedio, mas no puede afirmarnos rigurosamente lo que ocurrirá, ni siquiera cómo ocurrirá. En el lenguaje de Bohr, que Schrödinger repudió desde un comienzo, el electrón realiza un *salto cuántico*. Bohr completaría su esquema mental en 1927, a partir de sus discusiones con Einstein en el V Congreso Solvay.

Así, de acuerdo con la interpretación de Copenhague, la realidad o el mundo se dividen en dos: el mundo cuántico, que es el de la función de onda, y el mundo que acontece como resultado del colapso de la función de onda. Este mundo es la realidad convencional. Es decir, el mundo acorde a la percepción natural, a los sentidos, en fin, al sentido común.

El debate de Copenhague que da lugar a la interpretación de Copenhague fue fácticamente posible gracias a que, siendo ya profesor de la Universidad de Copenhague, N. Bohr abogó por la creación del Instituto de Física Teórica, adscrito a la misma universidad, el cual logra ser fundado en 1921. El Instituto se convirtió en el centro de desarrollo de la física de partículas y de la física cuántica a nivel mundial, y logró reunir a las más prominentes figuras. Ulteriormente no hubo ni una sola figura destacable que no asistiera y participara en las discusiones en el instituto.

Las dos figuras más prominentes del debate de Copenhague fueron Einstein, quien siempre defendió lo que se suele identificar como una posición realista, y Bohr, con la tesis que lleva el nombre de esta escuela de interpretación. Alrededor de ambos, todos los físicos fundadores de la teoría cuántica terminaron, más o menos, alineándose a favor o en contra de una o de otra posición, con la excepción de dos nombres importantes en el estudio subsiguiente de este capítulo. Ellos son E. Schödinger y L. de Broglie.

De esta suerte, la interpretación de Copenhague consiste, dicho de forma negativa, en el rechazo de la tesis que afirma que la realidad tiene un fundamento propio, independientemente de la mente o la conciencia, que era la tesis de Einstein. La posición de Bohr equivale a sostener que, si en medio del bosque cae un árbol y nadie lo nota de alguna forma, no podremos afirmar, en manera alguna, que el árbol ha caído. Einstein sostenía que el árbol había caído, incluso aunque nadie lo hubiera observado.

De forma más amplia, esta interpretación plantea uno de los problemas más sensibles, desde el punto de vista filosófico, a saber: la relación entre la mente y el mundo. El debate acerca de estas relaciones ha dado lugar a numerosas posturas de un lado y de otro. Una apro-

ximación reciente que busca superar el dualismo es el conocimiento encarnado (*embodied knowledge*), originariamente postulado por F. Varela, una de cuyas aristas más sugestivas es la enacción. El tema compete, dicho en el sentido más amplio e incluyente, a la filosofía de la mente y a las ciencias cognitivas.

2-. La paradoja EPR

Einstein tuvo el mérito grande de que, gracias a él, empezó a tomar forma otra visión del mundo. Por más de una década, su revolucionaria propuesta fue mirada con suspicacia, incluso por parte de Planck. Planck había publicado un artículo inaugural pero que recibió, por distintas razones, muy poca o ninguna atención. En su *annus mirabilis* (1905), Einstein publica el tercer artículo de cinco invitando a mirar la importancia de la contribución original de Planck. En ese momento nace, paradójicamente, gracias al padre de la teoría de la relatividad, la física cuántica para la comunidad científica. Fue la hipótesis de Einstein sobre “los cuantos de energía electromagnética” los que llevaron a Bohr a postular “los saltos cuánticos” que tanto incomodaron a Schrödinger. Sin embargo, muy pronto, particularmente gracias a los debates con Bohr, Einstein dejó en claro que no estaba convencido por las tesis e implicaciones de la teoría cuántica. A fortiori, no estuvo nunca de acuerdo con la mecánica cuántica; al final de su vida, en el mejor de los casos, simplemente guardó silencio al respecto. Como es sabido, a raíz del triunfo del nacionalsocialismo y el ascenso al poder por parte de Hitler, y particularmente debido a las persecuciones y acusaciones sistemáticas de Philipp Lenard y Johannes Stark, Einstein tuvo que huir a los Estados Unidos.

Según parece, allí, dos físicos, N. Rosen y B. Podolsky le proponen escribir un artículo. Se trató del famoso *paper* EPR (1935) –Einstein, Podolsky y Rosen–, en el que se sientan importantes bases para el desarrollo subsiguiente de lo que habría de ser la física cuántica. El tema es conocido como la paradoja EPR. Por derivación, este artículo da lugar a la interpretación EPR de la mecánica cuántica.

¿Puede considerarse que la descripción de la realidad que lleva a cabo la mecánica cuántica es completa? Este es el problema que plantea

el artículo. Desde luego, y por lo que antecede, cabe anticipar la respuesta. De entrada, el artículo plantea su postura: la realidad es objetiva, independientemente de la teoría que se pueda referir a ella. Una teoría –y entonces, manifiestamente esto quiere decir: la teoría cuántica– solo puede considerarse como correcta por los grados de acuerdo entre la teoría y la experiencia humana. Es la experiencia la única que permite elaborar inferencias acerca de la realidad. Tal es el reto que el artículo le plantea a la mecánica cuántica.

Pues bien, una teoría puede decirse que es *completa* cuando cada elemento de la realidad física tiene una contraparte en la teoría física. Abiertamente, EPR sostienen que los elementos de la realidad física no pueden ser determinados por consideraciones filosóficas a priori, sino solamente por vía de experimentos y observaciones. El artículo no pretende ninguna caracterización comprensiva de la realidad; es suficiente con que, sin perturbar al sistema, sea posible predecir el valor de una cantidad física; esto es, debe existir un elemento de la realidad física que corresponda a la cantidad física. Este aspecto debe quedar subrayado explícitamente: una teoría física se juzga por su capacidad predictiva. Si la predicción no tiene lugar, la teoría es insatisfactoria.

La paradoja que acusan los autores del *paper* es la siguiente, y es en efecto formulada de varias maneras. Una de ellas es: o bien la descripción de la realidad que lleva a cabo la función de onda no es completa o bien la cantidad de la realidad física y la posibilidad de predecirla no tienen realidad simultánea. Siempre siguiendo al texto de EPR, otra formulación es en términos de la conmutatividad entre la cantidad física y la matemática, que no posee realidad simultánea. En otras palabras, no puede haber un desajuste entre la realidad física considerada y la matemática que se refiere a ella si es que se desea que una explicación del fenómeno sea completa. Y desde luego, el supuesto básico es que la descripción matemática es completa: no en otra cosa consiste exactamente la mecánica cuántica; esto es, como queda dicho en el capítulo anterior, el formalismo matemático desarrollado por Schrödinger, Born y Heisenberg principalmente. El principio fundamental en el que se basa el artículo y esta interpretación es el realismo local. Los fenómenos físicos existen independientemente de su me-

dición, y esta debe poder corresponderse mediante experimentación y observación con el fenómeno mismo. La matemática debe poder mostrar esta correspondencia. Ahora bien, como la matemática de la mecánica cuántica –sostienen EPR– no lo hace entonces la teoría (cuántica) es incompleta. Como se recordará, la teoría general de la relatividad es lapidariamente realista, incluso independientemente de que se ocupe del universo macroscópico.

Una observación importante se impone aquí. Por principio, toda paradoja solo existe y tiene sentido cuando el marco en el que se trabaja es binario o bivalente (Sainsbury, 2004). Por fuera de un marco semejante, por ejemplo, cuando se trabaja con tres o más contextos, fenómenos, referentes o formas de realidad, las paradojas pierden sentido (Maldonado, 2020a).

La conclusión se desprende sin dificultad: la teoría cuántica es esencial o intrínsecamente incompleta, pues no sabe del realismo local de los fenómenos mismos; o lo que es equivalente, su aparato matemático no da cuenta *simultáneamente* del fenómeno observado y de la propia medición del objeto en consideración. Filosófica y científicamente, a pesar de lo que dice el propio artículo acerca de la filosofía, el determinismo emerge como una petición de principio. Este rasgo ha sido suficientemente observado por toda la bibliografía sobre el tema formulado por el artículo.

Dicho en otras palabras, es exactamente con este artículo –sobre el cual, por lo demás, Einstein mismo se pronunciaría en una de sus cartas a Born con quejas, pues Podolsky y Rosen le hicieron decir cosas que él no entendía bien o no expresaron bien la idea central de Einstein, por su deficiente dominio del inglés– que se pone de presente la contradicción entre las dos grandes teorías de la física, la teoría general de la relatividad y la teoría cuántica; aunque no se diga explícitamente, surge la imperiosa necesidad de realizar lo que a la postre se denominará como la gravitación cuántica; esto es, la posibilidad de unificación entre la teoría general de la relatividad y la física cuántica. Una unificación que permanece, hasta la fecha, como un *desideratum* antes que como un logro efectivo, si bien se han alcanzado avances muy importantes; sin la menor duda, el más

importante de estos avances fue la identificación tanto del campo de Higgs como del bosón de Higgs.

De manera significativa, sin embargo, la paradoja EPR sentará las bases, conjuntamente con la idea de las variables ocultas de Bohm sobre la cual nos ocuparemos más adelante, para el desarrollo del entrelazamiento cuántico. Esto es, que las dos cantidades físicas puedan existir simultáneamente. Le corresponderá el mérito a J. Bell de haber establecido cuantitativamente la diferencia entre dos posibles descripciones del mundo, aquel en que ocurren solamente fenómenos locales, como lo demandaba Einstein, y el más amplio que incluye la no-localidad, abriendo de paso el camino a una nueva teoría de la información, la llamada información cuántica, en particular la que echa mano del entrelazamiento cuántico (Whitaker, 2017). Pero este es un asunto que queda aquí al margen de la interpretación misma expuesta por la paradoja EPR.

Recabemos en esto: la interpretación de EPR de la mecánica cuántica es en términos de incompletud. La mecánica cuántica, desde el punto de vista de sus autores, es una teoría esencialmente incompleta que solo puede ser llenada con una teoría que sepa de realismo local de los fenómenos, y por consiguiente del determinismo de la realidad independientemente de la medición, que le dará toda la razón a la idea de la ciencia moderna basada en experimentación y observación.

Una observación importante se impone. Tiene que ver con el carácter completo de una teoría –física– de la realidad. La asunción principal de esta interpretación expresa la creencia más fuerte de toda la tradición filosófica y científica, en el sentido amplio de la palabra –es decir *epistémica*–, habida en Occidente según la cual una explicación o comprensión del mundo y la realidad debe poder ser completa. Dicho en forma elemental, no debe poder presentar contradicciones; justamente paradojas.

Dicho en lenguaje matemático, por ejemplo, los teoremas o demostraciones deben poder corresponderse perfectamente con los axiomas o postulados de la teoría. En términos históricos, el problema de una teoría de carácter completo surge a raíz de la crisis generada por la

emergencia de geometrías no-euclidianas, y el subsiguiente Programa de veintitrés problemas formulado por D. Hilbert. Digamos de pasada que este programa —la idea de un sistema perfectamente formal o deductivo—, fracasa estruendosamente gracias ante todo a los trabajos de Gödel y Turing. Los físicos parecen no haberse dado suficientemente cuenta de este problema. El título en el que se condensa el problema es, hoy por hoy el de la metateoría, un capítulo propio de las lógicas no-clásicas. Digámoslo rotundamente: es imposible hoy por hoy hacer ciencia o filosofía en general al margen de una consideración acerca de la metateoría. Este tema debe quedar por lo pronto de lado. Al final del libro volveremos sobre él.

La idea de una teoría completa: en esto exactamente consiste, dicho por su forma más elaborada en la modernidad, el fisicalismo, cuya mejor expresión quizás se encuentra en la filosofía de la ciencia de K. Popper y que es la depuración de todo el Círculo de Viena. Dicho de forma sucinta, para Popper una teoría científica es a la manera de la física o no lo es, y si lo es entonces debe poder ser completa. En la historia de la ciencia en general, esta circunstancia es imposible. Tal es, exactamente, el mérito del teorema de la incompletud de Gödel (Gödel, 1992).

Es fascinante que mientras en 1935 se escribe y publica el *paper* de EPR, en 1931 — *grosso modo*, casi contemporáneamente—, K. Gödel publica su tesis doctoral sobre el teorema de la incompletud, que es, hay que decirlo, el rechazo más fuerte a toda la estructura racional dominante en Occidente, y precisamente a la idea de una teoría completa del mundo o de la realidad cuya expresión matemática era una parte del programa Hilbertiano, en referencia a D. Hilbert. Dicho de manera breve y directa: el argumento de Gödel es que una teoría completa es tautológica, y debe ser recusada por ello mismo. La razón del rechazo o recusación estriba en que si es completa es entonces inconsistente, que es la crítica más fuerte que se le puede hacer desde el punto de vista de la lógica a cualquier teoría (Nagel, Newman, 2007).

Como se ha observado por parte de distintos autores, el teorema de Gödel es el rechazo al mecanicismo y al determinismo, lo que Einstein nunca logró superar.

Como quiera que sea, la interpretación de EPR, que es en rigor la expresión de un teorema si se acepta la premisa de entrada, constituye una interpretación de imposibilidad hacia la mecánica cuántica; esta imposibilidad es su capacidad para describir la realidad de manera completa. Si la mecánica cuántica desea describir la realidad de forma plena, entonces debe poder dar cuenta de los fenómenos en términos de realismo local. De lo contrario, no podrá sostenerse, en manera alguna, la simultaneidad de la cantidad física y el objeto físico; es decir, del fenómeno físico y su medición – matemática, notablemente.

Si se reconoce en EPR una propuesta de interpretación, lo es mucho más las implicaciones que tiene. Einstein llegó a la conclusión que le condujo al premio Nobel por “pensar estadísticamente”. Conocía como muy pocos la teoría desarrollada por Boltzmann; en su artículo no lo cita, pero la conclusión se deriva del trabajo de este. Si se mira a la luz como un enjambre de partículas con las propiedades que solo él podía vislumbrar, ese enjambre se comporta estadísticamente como otros sistemas de partículas. En especial, pueden derivarse propiedades termodinámicas del mismo tipo que pueden obtenerse en un sencillo modelo para las propiedades cinéticas de los gases ideales (o menos ideales, como los de Van der Waals) que consideró el padre de la mecánica estadística. La interpretación estadística (mecánica y electrodinámica estocásticas) de la mecánica cuántica, de la cual fue pionero y a la que volveremos más adelante, conduce a resultados muy interesantes que vale la pena examinar.

3-. La teoría de de Broglie-Bohm

L. de Broglie no estuvo enteramente convencido de la tesis de Einstein, pero tampoco de los argumentos de Bohr. Se mantuvo un tanto a distancia. En 1927 de Broglie presenta en la famosa Conferencia Solvay un texto en el que defiende la idea de una teoría determinista de variables ocultas. La idea de determinismo era acorde a las ideas de Einstein; su interpretación de las variables ocultas era una manera de darle razón al argumento contraintuitivo de Bohr acerca de la física cuántica. De Broglie propuso que existe una onda piloto que sirve como guía para la trayectoria de una partícula en el espacio. Como muchas veces sucede en ciencia, esta idea no alcanzó un verdadero

impacto debido a la notoriedad de muchas otras ideas presentadas en esa misma conferencia. Por sobre todas, notablemente, la discusión que ese año tuvo la propuesta de Schrödinger acerca de la mecánica ondulatoria.

Posteriormente, una serie de circunstancias al mismo tiempo científicas y extracientíficas echaron un manto de olvido sobre la idea de de Broglie. Solo a partir de los años 1950 D. Bohm volvería sobre ella, ampliándola y enriqueciéndola.

Pero Bohm va más allá de la propuesta de de Broglie. Las partículas son guiadas por la función de onda, sostiene esta línea de interpretación y, de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, la función de onda nunca colapsa. Bohm tomará la idea original de de Broglie y la desarrolla —de allí el nombre que conjuga a ambos autores—, combinando dos aspectos aparentemente contradictorios: de un lado, acorde con los postulados básicos de la interpretación de Copenhague, el comportamiento de las partículas es no-local; algo que va contra la tesis de Einstein y en apoyo de Bohr. Pero, de otra parte, al mismo tiempo, se trata de una teoría determinista, lo cual termina concediéndole la razón a Einstein. Así, la interpretación llamada como la teoría de de Broglie-Bohm sostiene una independencia de Einstein tanto como de Bohr, pero logra introducir un elemento novedoso que es la teoría de variables ocultas. Esta servirá como el antecedente más claro para el desarrollo del entrelazamiento por parte de J. Bell y, muy específicamente, para lo que se conocerá como la desigualdad de Bell, a la cual nos hemos referido ya en el capítulo uno.

La teoría de variables ocultas es una contribución específica de Bohm, gracias a antecedentes señalados, pero nunca desarrollados por de Broglie. De acuerdo con esta teoría, es posible tener una visión determinista de fenómenos cuánticos. Las variables ocultas son entidades hipotéticas no observables. La manera más razonable de explicar estas entidades no observables es entendiéndolas a la manera de grafos: grafos e hipergrafos cuya topología puede cambiar de un tiempo a otro.

Desarrollada en 1952, la idea de Bohm es sencillamente la de establecer sobre el trasfondo del *paper* EPR, que es perfectamente posible

tener una teoría completa de la realidad. Esta teoría respeta el formalismo matemático estándar de la interpretación de Copenhague, que es esencialmente indeterminista, pero la idea de variables ocultas permite afirmar que el comportamiento (físico) de las partículas es determinista; justamente, gracias a estas variables ocultas. D. Bohm continuará durante varios años más trabajando y exponiendo su teoría, atendiendo a las observaciones de J. Bell. El resultado de estos trabajos posteriores de Bohm dará como resultados dos libros singulares: *Wholeness and the Implicate Order* (1980) y *The Undivided Universe* (1993). Correspondientemente, el potencial cuántico no local —léase N. Bohr— da lugar a un orden (oculto) implicado que le confiere un orden a las partículas; a su vez, este orden da lugar a otro orden más, igualmente oculto e implicado —digamos, de segundo orden—, que permite el funcionamiento de los campos. Es exactamente esta la idea que, de un orden implicado a otro, o lo que es equivalente de un nivel de oculto implicado al siguiente, da como resultado la realidad como una totalidad (*wholeness*). Como lo afirma el propio Bohm, la suya es, ulteriormente, una interpretación ontológica de la mecánica cuántica.

En términos más elementales pero directos, la idea de Bohm es que no hay un mundo cuántico y un mundo clásico —que es el resultado de todo el debate a partir de la interpretación de Copenhague—, sino una sola realidad indivisa. El mundo o la realidad es la amalgama de comportamientos cuánticos, que son no locales y marcados por indeterminación (*Unbestimmtheit*), pero sostenidos por una trama de implicaciones deterministas.

En cualquier caso, la postura de Bohm es que la propia idea de variables ocultas es necesaria y puede ser perfectamente aceptada. La realidad es un mosaico subyacente que no termina de ser determinado pero que posee una realidad propia. Bohm esperaba que posteriores experimentos y desarrollos matemáticos pudieran ratificar su teoría, algo que no ha sucedido como tal hasta el momento.

La interpretación reconocida como la teoría de la onda piloto ha sido igualmente llamada como la mecánica bohmiana; que es, como se aprecia, una variación de la mecánica cuántica. En su formulación matemática, existe una interpretación para el comportamiento de

una sola partícula, pero también otra formulación para el de múltiples partículas. De manera generalizada, la comunidad de físicos que trabajan en principios o comportamientos cuánticos no se ha detenido particularmente en la idea de Bohm. Una razón posible para ello es que el propio Bohm hizo de su interpretación un motivo para dialogar con algunos aspectos de la filosofía oriental, específicamente a través de la obra de Krishnamurti, generando así numerosas suspicacias de corte místico, orientalista o “nueva era”. Vale mencionar, de pasada, que este giro se produjo particularmente debido a la influencia que sobre Bohm tuvo su esposa.

En cualquier caso, hay que decir que el libro fundamental de Bohm, *Mecánica cuántica* (1989), originalmente publicado en 1951, en el que se exponen y se desarrollan estas ideas, constituye un auténtico baluarte en la exposición de la mecánica cuántica. Sin ambages, se trata de una interpretación ontológica que logra tomar distancia de las posiciones clásicas pero cada una cerrada en sí misma de Bohr y Einstein, y que se fue desarrollando desde los años 1950 hasta el fallecimiento de Bohm en 1992.

4-. La lógica cuántica

Una interpretación adicional de la mecánica cuántica es la lógica cuántica.

En 1936 G. Birkhoff y J. Von Neumann escriben un artículo singular: *The Logic of Quantum Mechanics* en el que, dicho de manera genérica, se trata de establecer si lo que sabemos del mundo microscópico (mecánica cuántica) se corresponde o no con lo que sabemos del universo macroscópico (lógica formal clásica).

La lógica formal clásica es binaria o bivalente, descansa sobre, y afirma al mismo tiempo, el principio de tercero excluido, el cual consiste en la imposibilidad de que una cosa sea algo y su opuesto o una diferencia, a la vez. Este es, dicho brevemente, el dúplice fundamento de todo el mundo clásico. Por su parte, la mecánica cuántica es eminentemente probabilística, como ya se ha dicho, e implica necesaria y concomitantemente indeterminación. En el corpus de la mecánica

cuántica es el principio de indeterminación de Heisenberg el que sienta las condiciones de posibilidad para los otros llamados principios: superposición, complementariedad, indeterminación, principio de exclusión, no-localidad y demás. Así las cosas, surge inevitablemente el problema de las adecuaciones o correspondencias y tipos de relaciones posibles entre dos lógicas perfectamente disjuntas: la lógica formal clásica y la de ese aparato matemáticamente muy robusto que es la mecánica cuántica.

La lógica formal clásica nace —o comienza a nacer— con la lógica booleana en 1848, conjuntamente con las contribuciones de de Morgan por la misma época. Es a partir de ese momento que la lógica formal nace sin pretensiones de metafísica, rompiendo así toda la tradición desde Aristóteles y el *ars combinatoria* medieval hasta 1848. Puntualmente, son cuatro los hitos que dan nacimiento a la lógica formal clásica. Estos son: los trabajos de Boole y de Morgan hacia 1848, los trabajos de Frege, notablemente en la *Conceptografía (Schriftbegriff)*, y los desarrollos de Tarsky en 1932 y 1936 sobre las consecuencias lógicas y la noción de correspondencia como criterio de verdad. La historia del nacimiento de la lógica clásica está muy bien narrada en van Heijenoort, *From Frege to Gödel. A Source Book in Mathematical Logic, 1879-1931* (1967). La lógica formal clásica que nace así adquiere distintas denominaciones que aquí pueden ser contadas como equivalentes, para efectos prácticos. Se trata de la lógica matemática, la lógica simbólica, la lógica proposicional o la lógica de predicados.

El primer mérito de Birkhoff y von Neumann es semántico, a saber: crean una lógica que no existía hasta el momento: la lógica cuántica. Posteriormente, esta lógica entrará a configurar un panorama más amplio y profundo que son las lógicas no-clásicas. Para cuando los dos autores publican su *paper* en 1936 ya la lógica polivalente ha nacido, gracias a los trabajos de Lukasiewicz. Este hecho facilita el trabajo crítico, de interpretación y transformación que es el artículo de 1936.

De manera puntual, sin embargo, el artículo que introduce a la lógica cuántica y la concibe como una interpretación de la mecánica cuántica se basa principalmente en el propio aparato matemático de la mecánica cuántica y en el formalismo espacial de Hilbert. Para ese

momento, había dos grandes escuelas en la filosofía de las matemáticas; el intuicionismo y el formalismo; el primero representado por Poincaré, y el segundo por Hilbert, como figuras centrales. Al mismo tiempo, Poincaré se encuentra entre los antecedentes más firmes y directos de la teoría del caos. El de Hilbert es un trabajo eminentemente formal, deductivo, algorítmico.

En su espíritu y naturaleza, la lógica cuántica nace como una lógica complementaria a la lógica formal clásica. Será solo en las décadas de 1980 y 1990 cuando la lógica cuántica conocerá otros desarrollos menos formales y deductivos que la vinculan con la lógica difusa y la inscriben como lógica alternativa a las lógicas no-clásicas. Para entonces, hacia finales del siglo XX, ya se han consolidado, aunque no aun plenamente desarrollado, las lógicas no-clásicas (Engesser *et al.*, 2009; Maldonado, 2020a). La lógica cuántica nace como una lógica distintivamente conservadora con Birkhoff y von Neumann, pero se desarrollará posteriormente como una lógica innovadora y disruptiva, es decir, a pesar de los fundamentos sentados en 1936.

En su expresión más básica, la lógica cuántica tal y como fue concebida en sus inicios es una lógica proposicional que puede ser adaptable a la comprensión de los retos que implica el problema de la medición en la mecánica cuántica. Esto es, el problema del colapso de la función de onda como resultado de un acto de observación por parte de un agente. En otras palabras, la intención de Birkhoff y von Neumann no es otra que la de reconciliar las inconsistencias entre la lógica formal clásica y la mecánica cuántica, o lo que es equivalente, entre la lógica clásica booleana y el problema de la medición en la física cuántica.

Manifiestamente, la mecánica cuántica es la mejor teoría que permite entender el universo, la realidad o el mundo. La dificultad es que, dado su carácter altamente contraintuitivo, no parece encajar para nada con lo que se sabe del mundo clásico. Desde el punto de vista lógico y matemático, quizás las dos mejores comprensiones del mundo clásico son la lógica booleana y el formalismo matemático de Hilbert. Así las cosas, debe ser posible una integración de ambas perspectivas. Es a lo que se abocan Birkhoff y von Neumann. Para ello, el *paper* de 1936 plantea la necesidad de alcanzar un “cálculo proposicional cuántico”;

este cálculo ha de tener la misma estructura que la geometría abstracta (Birkhoff y von Neumann, 1936: 842). Dicho en términos más elementales, la idea consiste en resolver el problema en términos de una geometría continua; o de una teoría de geometría de sistemas continuos; dos expresiones equivalentes para una sola y misma idea.

Como se aprecia inmediatamente, emerge una dificultad enorme. El *paper* de 1936 no podrá resolverla y al final, posteriormente (1961) Birkhoff rechazará varias de las asunciones de su artículo con von Neumann. La dificultad estriba en que la mecánica cuántica ha puesto de manifiesto que la energía es discreta, que subsecuentemente a la famosa ecuación de Einstein que da lugar a la teoría especial de la relatividad, la materia también es discreta. La intención del artículo es por tanto perfectamente conservadora, por así decirlo.

Digámoslo en otras palabras: la interpretación de la mecánica cuántica en términos de la lógica cuántica tiene el mérito de llamar la atención hacia una estructura algebraica no-clásica, pero tiene el defecto enorme de plantearlo en el contexto de una geometría continua. Solo los desarrollos más recientes, ya muy independientes del artículo original de 1936 permitirán avanzar: a) tanto con respecto a la idea de la lógica cuántica misma, como, b) en la interpretación por parte de esta lógica de la mecánica cuántica.

Vale la pena precisar lo siguiente. La finalidad de Birkhoff y von Neumann no era la de crear una lógica no-clásica. La lógica cuántica nace como lógica no-clásica posteriormente y a pesar del propio von Neumann. Por el contrario, la finalidad es bastante más modesta. Se trata de establecer una coherencia entre los fenómenos o comportamientos cuánticos, la explicación de los mismos (lógica), y el aparato probabilístico de la mecánica cuántica. El énfasis está en la posibilidad de transformar o de interpretar la lógica booleana como un cálculo proposicional clásico que sepa de, o que admita, la aleatoriedad de los comportamientos cuánticos.

En el mejor de los casos, el artículo de 1936 es el planteamiento de un problema, perfectamente identificado, pero que suministra una solución que no es enteramente satisfactoria. El manejo matemático y de lógica

proposicional es impecable. Lo que falla es la capacidad reflexiva o de apuesta y riesgo de los dos autores, algo que sucede con frecuencia en la historia de la ciencia. Hay en el *paper* de 1936 un desafío al formalismo hilbertiano, pero este termina por quedarse cojo dado que no logra captar la esencia misma de toda la cuestión en la mecánica cuántica, que no es precisamente el aparato matemático, sino lo que se encuentra en su base, a saber: el universo y la realidad son discretos, carecen de soluciones de continuidad. Dicho puntualmente, el espacio y el tiempo son discretos. Precisamente por ello se introducen en el corpus de la mecánica cuántica los números cuánticos¹⁴.

5-. La conciencia genera el colapso (von Neumann-Wigner)

Antes de sus contribuciones a la teoría de juegos, antes de su trabajo en torno a la arquitectura de la computación, y mucho antes de su activa participación en el Proyecto Manhattan, J. von Neumann publica en alemán en 1932 *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (1955) en el que sienta las bases de una interpretación novedosa, en su momento, sobre la mecánica cuántica. Von Neumann se detiene sobre el núcleo duro de la interpretación de Copenhague; específicamente sobre el problema planteado acerca del colapso de la función de onda. Su preocupación consiste en explicar dicho colapso.

Este es uno de esos notables ejemplos de excepciones que suceden en el proceso de avance del conocimiento. Dicho más directamente, se trata de un autor que escribe un libro y con él introduce una novedad o una inflexión en la ciencia. De manera habitual son artículos los que, en la

14 Reconocemos que la gran mayoría de autores, académicos e investigadores coinciden en afirmar que el espacio, el tiempo, y la naturaleza en general son continuos. Lo mínimo que podríamos, por nuestra parte, conceder, es que el tiempo es un *parámetro*. Verosíblemente, la posible unificación de la gravedad y la mecánica cuántica podría arrojar más y mejores luces. Que el mundo es cuántico, que es nuestra teoría, comporta reconocer el carácter discreto de la energía y de la materia –y a fortiori, de la información–. A lo largo del libro hemos aportado ya algunos argumentos, y seguiremos haciéndolo en lo que sigue. No hay que temerle a las mayorías o a las corrientes principales o dominantes de pensamiento (*mainstream*), ciertamente no en ciencia/filosofía.

gran mayoría de las ciencias y disciplinas, introducen una innovación. Todo el trabajo sobre mecánica cuántica fue siempre el resultado de artículos científicos; con dos notables excepciones: Von Neumann y Bohr, quienes hacen una interpretación desarrollada, en cada caso, en un libro.

Matemático de primer orden, von Neumann lleva a cabo una transformación del aparato mismo de la mecánica cuántica (su formalismo matemático) y ofrece lo que considera que puede ser su forma definitiva. Digamos, en referencia al *paper* EPR, que se trata, *avant la lettre*, del desarrollo de una teoría completa. El centro de esta transformación es, desde luego, el problema de la medición. La tesis de von Neumann es que la totalidad del universo puede estar sujeta a la ecuación de Schrödinger. Esta interpretación sostiene genéricamente que “la conciencia genera el colapso de la función de onda” debido justamente al acto de medición que lleva a cabo un observador; la conciencia.

De cara al problema planteado por el artículo EPR, puede decirse que la teoría cuántica queda completa cuando se considera no solamente el comportamiento de las partículas y ni siquiera el aparato matemático que las describe, sino además y necesariamente, el papel de la medición —es decir, de la conciencia— en el experimento y el fenómeno mismo. En otras palabras, la conciencia es inseparable del problema cuántico. La física cuántica no puede descartar, en absoluto, el papel de la conciencia. Una comprensión en esta línea se encuentra en (Stapp, *Mind, Matter, and Quantum Mechanics* (1993) y *Mindful Universe. Quantum Mechanics and the Participating Observer* (2011), Roseblum y Kuttner, *El enigma cuántico. Encuentros entre la física y la conciencia* (2014). De acuerdo con Stapp, ulteriormente, sin ambages, el universo mismo es consciente o está animado; una tesis radical en la que, sin embargo, y por otros caminos, Stapp no está solo. Volveremos sobre este tema (Maldonado, 2018a).

Es preciso recabar en lo siguiente. La interpretación de Copenhague y más ampliamente la mecánica cuántica son eminentemente probabilísticas. El mundo solo puede ser entendido y explicado en términos de probabilidades, jamás de certeza (justamente por ello la contribución fundamental de Heisenberg). Pues bien, dado que la teoría —léase los aportes de Born, Heisenberg y Schrödinger— no le concede ningún papel destacado —y acaso absolutamente ningún papel— a la concien-

cia —esto es, al acto de la medición—, se hace necesario considerar el hecho mismo de la observación; por ejemplo, ya desde el propio experimento de la doble ranura, esta es específicamente la contribución de von Neumann. Sin tener en cuenta la medición, la mecánica cuántica es incompleta. La conclusión no se presta a ambigüedades: es, por consiguiente, la conciencia la que genera el colapso de la función de onda. Es sobre este punto preciso que emerge la disyunción clásica entre el mundo cuántico y el mundo clásico. El mundo clásico es el resultado de un acto de observación de la o de una conciencia. Dicho negativamente, mientras ningún acto de medición o de observación se lleva a cabo, la función de onda sigue siendo coherente y jamás colapsa.

Todo el debate subsiguiente, de tipo al mismo tiempo científico y filosófico (y no más una cosa que la otra) emerge, consiguientemente, acerca del carácter físico o no de la conciencia. Diferentes lecturas surgen en este punto, desde aquellas creacionistas y confesionales (Auletta, 2009) hasta las eclécticas o abiertas sin sesgos religiosos de ningún tipo; la mejor expresión de este segundo caso es el pensamiento de J. A. Wheeler¹⁵.

En 1967, E. Wigner escribe un artículo en el que plantea que la conciencia causa el colapso de la función de onda. Sin embargo, posteriormente, Wigner se retractó de su propia comprensión. Subsecuentemente, por razones mucho más de orden extrínseco, se lo ha conducido a la denominación: la “teoría von Neumann-Wigner”¹⁶, (en ciencia o en

15 Una observación se impone aquí. Decimos “el pensamiento de J. A. Wheeler” y no la obra de este autor. Wheeler fue un profundo y original pensador con intuiciones siempre novedosas que fue presentando en conferencias y declaraciones —por ejemplo, de radio— antes que en *papers*, capítulos de libro y libros. Desde el punto de vista normal, el mayor mérito de Wheeler parece haber sido en la pléyade de alumnos y estudiantes que tuvo, entre quienes destaca R. Feynman y varios más. Su espíritu filosófico no fue nunca abiertamente reconocido por el establecimiento científico. Él lo supo siempre. Y no tuvo dificultades con ello, aparentemente (Halpern, 2018).

16 La historia de la ciencia está articulada por factores, fenómenos, eventos o fuerzas intrínsecas tanto como extrínsecas. Esta idea encuentra su origen en la obra de I. Lakatos y da lugar a lo que en filosofía de la ciencia se conoce como el debate entre el internalismo y el externalismo de la ciencia. Se trata de un asunto delicado y que no puede ser despachado a la ligera. En un capítulo posterior habremos de convertir esta nota en texto central.

filosofía, muchas veces sucede que un autor se desdice o corrige algo que había sostenido previamente).

El debate planteado por la tesis originaria de von Neumann consiste en poner de manifiesto que la conciencia –dicho en general– o la medición –dicho de forma mucho más puntual– no es ningún epifenómeno en la economía del universo o en el corpus de la física; que es, hay que decirlo, la asunción básica de toda la física clásica. De manera indudable, la conciencia no es un acontecimiento excepcional en la historia del universo o en la explicación del mismo. La duda que permanece es si esta debe ser considerada como causa de las perturbaciones del universo –léase, del colapso de la función de onda–, o bien si esta se reduce a la expresión humana de la misma o si abre las puertas a otras posibilidades. Serias consideraciones y preocupaciones de la misma, como se aprecia sin dificultad.

La radicalidad u originalidad de von Neumann estriba en elaborar una interpretación que transforma sustancialmente el aparato matemático considerado estándar de la mecánica cuántica, llamando la atención sobre la importancia de la ecuación de Schrödinger –algo que hasta ese momento nadie había observado exactamente–, y situando a la medición como un aspecto igualmente necesario como el comportamiento de las partículas y la onda; esto es, atendiendo a la no-localidad, la indeterminación, el carácter en fin probabilístico de la teoría. Dicho de forma puntual, ello equivale a decir que la clave para que la teoría cuántica pueda ser considerada como completa se encuentra en la mecánica ondulatoria. Esta permite incluir a la medición como un aspecto a la par de cualquier otra consideración.

R. Penrose (1990) ha adoptado una comprensión propia en esta línea de análisis, que ha implicado un importante aporte a la economía del universo y al papel de la conciencia. Sin dilaciones, se trata del reconocimiento explícito de que la conciencia no es, en absoluto, una máquina de Turing. Dicho de manera puntual en el lenguaje computacional, se trata del reconocimiento de que la conciencia no procesa información de forma algorítmica. Así, esto puede ser traducido idóneamente en el contexto de la interpretación que aquí nos ocupa en los siguientes términos: el acto de la medición no es ni puede ser, en manera alguna, una acción algorítmica.

La derivación más inmediata o directa es que la medición no puede ser considerada simplemente como un acto clásico; debe poder ser comprendida en términos subsecuentemente cuánticos; ciertamente no es lo que afirma Penrose en 1990 pero sí la traducción del carácter no-algorítmico de la conciencia. Existen numerosas máquinas de Turing –determinista, no-determinista, multicinta (*multi-tape*), multilectura, e incluso una máquina de Turing cuántica, por mencionar algunas. Terminemos esta sección con una afirmación abierta: ni siquiera una máquina de Turing cuántica permite allanar los alcances de las tesis, originariamente planteadas por von Neumann, adoptadas con modificaciones por Stapp, Penrose y otros. Deberemos dedicarle un espacio propio a este tema posteriormente.

6-. La teoría de los múltiples mundos

Ya desde el experimento de la doble ranura de Young queda retrospectivamente en evidencia no solamente que el mundo es probabilístico y contraintuitivo, sino además, que la función de onda se comporta como si interactuara consigo misma. Esta idea es muy importante: en la mecánica cuántica puede haber sistemas de un solo elemento, y la expresión más básica es justamente el comportamiento del electrón o del fotón. Cuando se habla del entrelazamiento de un fotón, se dirá que se entrelaza *con el vacío cuántico*.

Ya en 1927 Bohr interpretó el experimento de la doble ranura de la siguiente manera: podemos imaginar que el fotón pasa por el agujero de la izquierda, y entonces sucede una realidad; pero si el fotón pasa por el agujero de la derecha entonces acaece otra realidad. El mundo clásico es la combinación de las dos posibilidades; se produce, acaso incesantemente, una interferencia entre ambos mundos. Fue exactamente en este contexto que Bohr formuló el famoso principio de complementariedad, el cual afirma que si sucede una cosa entonces no sucede la otra, o al revés (aun cuando este principio implica otras consideraciones un poco más técnicas).

En 1957, trabajando en su tesis doctoral en la universidad de Princeton bajo la dirección de J. A. Wheeler, Hugh Everett desarrolla una idea muy sugestiva que es, sencillamente la continuación o la

radicalización —dos expresiones aquí equivalentes— de la interpretación de Copenhague. La tesis doctoral de Everett se llamó “Quantum Mechanics by the Method of the Universal Wave Function” publicada apenas en 1973 (Everett, 1973) por la Universidad de Princeton en una antología editada por DeWitt y Graham. El propio DeWitt será importante en la interpretación de la mecánica cuántica como teoría de múltiples mundos. La derivación cosmológica de la tesis de Everett afirma que vivimos en múltiples universos —ulteriormente paralelos. En otras palabras, existen universos ocultos en dimensiones extras (Randall, 2011).

La interpretación de los múltiples mundos es quizás, en el marco de la cultura y la sociedad, la más popular de todas. La idea de Everett no es difícil, y sin embargo fue y continúa siendo altamente innovadora. Corresponde a la extensión, derivación o consecuencia de la interpretación de Copenhague. Simple y llanamente, Everett sostiene que cada evento cuántico posible existe como un mundo real. Esta idea se puede ilustrar sin dificultad en varios sentidos. Así, por ejemplo, se puede evidenciar observando el experimento —físicamente muy elemental— del recorrido de un fotón —es decir, de un haz de luz—. En este experimento, en un cuarto oscuro se sitúan espejos de reflejo ubicados en ángulos de 45 grados en cada esquina de modo que desvíen al fotón. Habrá entonces tres espejos, así: uno en la esquina A que conduce hacia el ángulo opuesto desde donde se produce el disparo de luz, y otro espejo más en la esquina B también orientado hacia el ángulo opuesto. Un camino se denomina A y el otro B. Se trata de observar por cuál camino opta el fotón. Si se observa el espejo de A, sorpresivamente el fotón tomará el camino B, pero si observa el espejo de B, tomará el camino de A. Este es el famoso experimento con el interferómetro. Contraintuitivamente suceden dos cosas: en un caso, el fotón de luz siempre sabrá cuál es el espejo observado y tomará el camino contrario. O bien, en otro caso, tomará los dos caminos a la vez.

Experimentos como este se han multiplicado y variado con el objeto de determinar el problema de base: la medición del objeto o del comportamiento cuántico. Pues bien, la idea de Everett es que cada camino es, o conduce a, un mundo real, desde el experimento de la doble ranura a cualquier otro. No se trata simplemente de comprender

cada comportamiento como una probabilidad, y ni siquiera como una posibilidad. Cada uno representa, es, un mundo real. Y así, asistimos a un espectro de múltiples mundos, cada uno más real que el otro, y todos correspondientemente reales en relación con los demás.

En otras palabras, el universo se divide en cada caso en dos, y así, se sigue dividiendo en cada caso, digamos indefinidamente. Asistimos a una suerte de árboles de decisión que, en cada caso, son reales, no simplemente hipotéticos; en la mejor tradición, cabría pensar en los experimentos de la física cuántica para ponerlo en evidencia. Esta interpretación, hay que decirlo, tiene libertad con respecto a la experimentación. Esta es su especificidad. La inteligencia de Everett (Byrne, 2013) consiste en poner de manifiesto que no se trata únicamente de caminos u opciones, sino de mundos efectivamente reales. Solo basta con seguir el hilo en cada caso, e interpretar lo que efectivamente sucede. Sin dificultades. Mientras que en la interpretación de Copenhague cada mundo es simplemente una apariencia –o como se dice en el lenguaje técnico, un mundo “fantasma”–, con Everett, por el contrario, cada mundo es empíricamente real.

La dificultad enorme que emerge consiste en establecer o bien cuál de los dos –de los diversos mundos– es el correcto o es el real, o bien, en otro plano, se trata de distinguir cuál es el mundo que “para el caso” es el real, relativamente a todos los demás. Esta ha sido la delicia de la ciencia ficción, de las artes, el cine y la literatura.

Ya en 1952, es decir, unos pocos años antes de que Everett trabajara en su doctorado, el propio Schrödinger sostenía que la ecuación que él desarrolló permitía no solamente poner de manifiesto que existen distintas alternativas –digamos, que el gato está vivo y muerto al mismo tiempo– sino justamente que ambos acontecimientos suceden simultáneamente. Es exactamente esta idea la que dará lugar al principio de superposición. La superposición no afirma que hay distintas alternativas; mucho mejor, sostiene que cada alternativa existe simultáneamente con las demás.

En la literatura especializada se ha observado numerosas veces que una versión breve de la tesis de doctorado fue publicada en 1957, es de-

cir, un año después de que Everett presentara su tesis a la Universidad, en la *Reviews of Modern Physics*. Este artículo fue acompañado en el mismo número con un texto de una hoja de Wheeler recomendando el artículo. Sin embargo, a pesar incluso de las palabras de Wheeler, el artículo de Everett jamás llamó la atención de la comunidad científica. Un espeso silencio se produjo alrededor suyo. Esto tiene que ver con algunos aspectos mencionados al comienzo de este capítulo, como que en los años 1950 la física cuántica no era precisamente el principal motivo de preocupación de los físicos, mucho menos en contextos en los que en 1952 la entonces existente Unión Soviética había anunciado el desarrollo de la bomba de hidrógeno, en el contexto de la Guerra Fría. Toda la preocupación estaba enteramente volcada hacia la física atómica o nuclear. Habrá que esperar a las contribuciones de Bohm y de Feynman para un renacimiento de los intereses en torno a la física cuántica.

Digamos que en ciencia como en filosofía la inteligencia o la innovación de un planteamiento puede verse alterada por razones extracientíficas. Que ocasionalmente pueda alcanzar una importancia dicho planteamiento permanece como un fenómeno perfectamente aleatorio. La ciencia es el muy complejo entramado de factores internos y externos, y no unos más que otros.

En cualquier caso, la tesis de Everett constituyó un auténtico desafío a lo que los físicos —pero con ellos entonces también los filósofos— consideran que es la “realidad”, tomando como base las ideas más fundamentales hasta el momento, a saber: la mecánica cuántica. El problema no es otro que el siguiente: si el mundo cuántico es un mundo de posibilidades y superposiciones, ¿cómo es posible que emerja el mundo que vivimos?

Como quiera que sea, el acto de medición —esto es, más exactamente, cada acto de medición— produce una transformación en el mundo elaborando alternativas consistentes en cada caso, y cada una es igualmente real. A la postre lo que se tiene es una amplia variedad de mundos, todos simultáneos, a la manera como se ilustra usualmente en los árboles de decisión que se han ramificado continuamente al cabo de varios pasos.

En la historia de la física cuántica en general, y en el marco de esta interpretación específicamente, es D. Deutsch (2002) quien más y mejor ha adoptado con seriedad la lectura original de Everett y la ha desarrollado. De acuerdo con Deutsch, en el futuro previsible se podrá construir un computador que permitirá el acceso –computacional– a los distintos mundos existentes simultáneamente. La estructura de la realidad sucede a la manera de las capas de la cebolla, de suerte que, si se elimina una capa y la siguiente, nos quedamos al final sin nada. Eso es el universo y esa es la realidad, la superposición de capas paralelas, cada una con igual realidad como las demás.

En numerosas ocasiones, la interpretación de los múltiples mundos posibles ha sido reconocida, mucho más que como una interpretación alternativa, como una nueva teoría. Para ello, hay que recordar que en física una teoría permite una predicción. En otros ámbitos existen otras características o exigencias a lo que hace o puede hacer una teoría. Aquí por lo pronto, el marco es el de la física cuántica (algo semejante cabe para la interpretación de de Broglie-Bohm).

7a-. La mecánica estocástica

Aparecida por primera vez en la forma de un artículo publicado en 1966 (Nelson, 1966), esta interpretación introduce una inflexión con respecto a las interpretaciones que hemos visto hasta el momento.

La ecuación de difusión es una ecuación diferencial parcial parabólica que permite describir el comportamiento macroscópico de muchas micropartículas en forma de movimientos brownianos, a partir de los comportamientos aleatorios y erráticos de las micropartículas. Ya de Broglie había introducido procesos estocásticos en la mecánica cuántica a fin de que las micropartículas viajaran de una onda piloto a otra. Como se mencionó en la interpretación de de Broglie-Bohm, la introducción de la onda piloto resultó en una innovación y una necesidad para de Broglie.

Como se observa, se trata de una verdadera rareza dado que la mecánica cuántica afirma explícitamente el carácter discreto de la naturaleza e introduce, consiguientemente, una comprensión de la naturaleza,

el mundo, el tiempo y el espacio como carentes de continuidad. Basta con una mirada sensible a la combinación del tejido histórico y epistemológico con el que se ha tejido este libro. Las ecuaciones diferenciales en todas sus formas forman parte de las matemáticas de sistemas continuos y nada saben de los números cuánticos. Como se aprecia, en el núcleo de esta interpretación se halla el debate entre una visión discreta y una continua de la realidad. Dicho brevemente, esta interpretación consiste en el esfuerzo por comprender los fenómenos y comportamientos cuánticos como sistemas continuos. Los movimientos brownianos resultan entonces más que adecuados. Digamos de pasada que Einstein ya resaltó y acogió los movimientos brownianos en uno de sus cinco *papers* de 1905.

La interpretación de la mecánica cuántica en términos estocásticos es, por tanto, una comprensión perfectamente clásica de la ecuación de Schrödinger, como lo dice explícitamente Nelson en su artículo de 1966. No gratuitamente, Nelson se destacó como un defensor del formalismo matemático, exactamente muy en la línea de D. Hilbert —a pesar de los debates de Poincaré, Gödel y Turing, respectivamente.

Así pues, en la interpretación estocástica de la mecánica cuántica acontece una única historia, no hay colapso de la función de onda y el observador no desempeña ningún papel particularmente destacado.

Hay que decir que, en el abanico de interpretaciones, esta no ha recibido una atención especial por parte de la comunidad científica ni ha logrado permearse en el imaginario social o cultural, a diferencia, muy especialmente, de la interpretación de Copenhague o de la de múltiples mundos posibles de Everett. Sugestiva, desafiante, la mecánica estocástica sufre, sin embargo, del enorme defecto de no haber logrado captar el verdadero espíritu de la mecánica cuántica, según parece. La propia ecuación de Schrödinger describe la naturaleza ondulatoria y no relativista de una partícula subatómica. Independientemente de si se adopta la ecuación de Schrödinger como dependiente o como independiente del tiempo —dos formas distintas y no contradictorias de expresar el problema de base—, el viaje de la partícula a través del espacio libre es, radicalmente, un acto de libertad (de la propia partícula). La libertad —o si se quiere, la aleatoriedad— es el más destacado

de todos los rasgos en el contexto de la mecánica cuántica. Pues bien, la mecánica estocástica no sabe para nada de esta libertad. Dicho de forma general, los sistemas estocásticos son sistemas continuos, y así, están sujetos siempre a un marco, a una anterioridad y consecuencia, en fin, a una dinámica que ata o condiciona el comportamiento de una partícula subatómica. Esto exactamente es lo que quiere expresar una ecuación diferencial.

7b-. La electrodinámica estocástica

La propuesta de Nelson ha generado otras interpretaciones que, si bien hoy habrá que descartar como teorías completas – como ocurre con la de Nelson –, dan cuenta de muchos de los fenómenos de la primera revolución cuántica. No pueden aspirar a más mientras no incorporen los efectos no locales que se dan pródigamente en el caso de los fotones, ingredientes esenciales de la teoría. Aun así, con toda su limitación sí ilustran que otras concepciones son posibles.

El punto de partida de la electrodinámica estocástica (SED por sus siglas en inglés) es lo que se denomina “la radiación de punto cero del universo”. No es una premisa, pues hay evidencia científica de su existencia, con una diferencia: esa radiación es en esencia la radiación de Planck de un universo que se ha ido expandiendo y que hoy se presenta a una temperatura de 2.7 K. Dicho de otra manera, es la misma que pudieron identificar Penzias y Wilson en 1965, por lo cual fueron acreedores al premio Nobel de Física en 1978. Con un telescopio adecuado, el CMB es identificable y esto es lo que se ha hecho.

Con esta radiación de fondo como base, la SED construye un modelo en el que las partículas cargadas elementales y todas las compuestas (téngase en cuenta que las partículas neutras fundamentales son pocas) responden siguiendo las leyes de la electrodinámica clásica y obedeciendo la fuerza de Lorentz.

El exponente principal de la SED, propuesta que contó con muchos seguidores antes de que fuera verificada la no-localidad de la teoría cuántica mediante experimentos ya mencionados, es Timothy H. Bo-

yer: “Stochastic Electrodynamics: The Closest Classical Approximation to Quantum Theory” (2019)¹⁷.

Cuando se incorpora a la SED los ingredientes sustanciales de la QED, el resultado no está lejos de una teoría completa, en el sentido en que puede ser una teoría cuántica de campos alternativa. La única variable oculta es la radiación de fondo, un problema relativamente minúsculo. El resultado es altamente satisfactorio: el efecto Casimir, las fuerzas de Van der Waals y muchos otros fenómenos que se invocan y proceden del “vacío cuántico” se recuperan. Si se incorporan las ideas provenientes de una interpretación transaccional, estaremos más cerca de una interpretación que incorpora los diversos ingredientes de la fenomenología cuántica.

8-. Las interpretaciones modales

La idea de modalidad proviene de una de las lógicas no-clásicas, la lógica modal, pero encuentra sus orígenes, manifiestamente, ya en Aristóteles (en las lógicas no-clásicas se ha desarrollado incluso una lógica multimodal, pero este tema debe quedar aquí de lado). Una interpretación modal de la mecánica cuántica es en realidad una transposición –no siempre afortunada ni rigurosa– introducida originariamente por B. Van Fraassen, un connotado lógico interesado principalmente en la lógica semántica, en 1972. Posteriormente se hablará de varias interpretaciones multimodales. Un aire de ambigüedad las cobija, puesto que el denominador común de modalidad no es muy riguroso en este caso.

Hacia los años 1970, gracias a los trabajos de J. Bell, ya quedaba suficientemente en claro que el entrelazamiento cuántico es una realidad, en esto consiste el teorema de Bell. La no-localidad es un hecho reconocido, a pesar de Einstein. Como queda mencionado en el capítulo uno, la mecánica cuántica continúa desarrollándose más allá de los primeros pasos de su formalización en 1927. El teorema

17 Otros exponentes son: Marshall en Inglaterra, Louis de Broglie en México, Emilio Santos en España, Surdin en Francia. Antes de los experimentos de Aspect, uno de los autores (JG) participó de estas interpretaciones alternativas.

de la desigualdad de Bell constituye otro paso en su desarrollo. Pues bien, las interpretaciones modales de la mecánica cuántica se dirigen exactamente hacia, y en la mayoría de las ocasiones en contra de, el entrelazamiento o la no-localidad.

La interpretación introducida por Van Fraassen se denomina la interpretación modal de Copenhague. Es posteriormente, en los años 1980, cuando S. Kochen y D. Dieks desarrollan, de forma independiente, las que sí se entienden propiamente como las interpretaciones modales de la mecánica cuántica propiamente dichas. Kochen es un matemático de primer orden sobre el cual volveremos posteriormente cuando consideremos el teorema del libre albedrío (*The Strong Free Will Theorem*) que escribe conjuntamente con J. Conway. Dieks edita el más importante libro hasta la fecha sobre interpretación modal de la mecánica cuántica (Dieks, Vermaas, 1998).

La base mínima para entender esta interpretación exige considerar que las modalidades básicas son: realidad, necesidad, posibilidad e imposibilidad. Se trata de modos o modalidades de “realidad” o de “verdad”. Así, el tema es el de estudiar cómo algunos (pero no todos) de los fenómenos observables en física tienen valores definidos. La atención se desvía hacia la posibilidad de que no todas, sino algunas observaciones de preferencia tienen un valor dado.

Las interpretaciones modales son intentos por afirmar la localidad y el realismo en el aparato central de la física, y proponen eliminar o subsumir la no-localidad en el marco de una comprensión. Específicamente, el estado dinámico nunca colapsa, y así, no se produce una decoherencia.

Comprender la mecánica cuántica desde un punto de vista modal requiere ampliar o bien los estados o bien las apreciaciones sobre los estados. Así, mientras que la mecánica cuántica ortodoxa asigna un solo estado –a saber, justamente el que resulta de la observación o del colapso–, la interpretación modal adscribe dos estados: uno dinámico y otro de valor. Lo que busca este modo de interpretación es superar la exclusión de los dos estados, que es lo que acontece normalmente. Un estado es comprendido en acuerdo con la ecuación

de Schrödinger –la cual implica continuidad–, y el otro estado es discreto.

En cualquier caso, las diferentes interpretaciones modales sostienen que los sistemas físicos poseen una serie de propiedades físicas bien determinadas en todo momento, independientemente del observador. Estos valores propios son justamente los valores de estado del sistema.

En realidad, lo que se encuentra en la base de estas interpretaciones (o por lo menos con certeza) en la comprensión de Van Fraassen, es una filosofía de la ciencia –y una filosofía de la lógica– empirista: mejor, se trata de un empirismo constructivo (o constructivista). En verdad, la teoría cuántica –en este caso, exactamente la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica– debe ser empíricamente adecuada; en otras palabras, debe poder encajar con los fenómenos observados (doble ranura, interferómetro y otros). Cada medición debe poder arrojar resultados que sean susceptibles de ser comprobados o verificados empíricamente. La teoría debe poder suministrar mediciones de los fenómenos incluso aunque no sean medidos; a esto se refiere la idea de estados de valor (por sí mismos). Los valores de estado deben poder apoyar los valores dinámicos, que son los que verdaderamente interesan, desde el punto de vista físico. Es en este sentido que la interpretación modal ha sido considerada como una variante de la interpretación de Copenhague; mucho más que una alternativa a la misma.

Las interpretaciones modales son realistas, y lo que hacen es imponer algunas restricciones que permitan que los valores físicos propios de los fenómenos se puedan determinar mediante las mediciones, de tal manera que se afirma el valor dinámico del fenómeno estudiado. Este valor dinámico es exactamente el de la mecánica cuántica, el de la teoría misma. En pocas palabras, la medición probabilística de la mecánica cuántica debe poder permitir una adecuación empírica, que es lo que un investigador esperaría.

Ahora bien, en el caso de que se considere no ya un solo sistema –o fenómeno, o contexto, o comportamiento–, sino varios, digamos dos, por ejemplo, entonces el valor esperado empírico de un sistema

debe corresponderse con el valor físico del otro sistema considerado. En cualquier caso, la demanda de adecuación empírica no es, en esta comprensión, negociable. En otras palabras, la modalización de la realidad no es otra cosa que la consideración de otras posibilidades cuya heurística es la de arrojar luces frescas, pero de confirmación sobre el fenómeno real mismo. En este sentido, la interpretación modal de la mecánica cuántica se corresponde con la idea de base de la modalidad lógica tal y como las concibió originariamente Aristóteles. Digamos que la lógica modal es una variación de, pero jamás una alternativa a, la lógica formal clásica.

Las mediciones de fenómenos cuánticos están marcadas por imperfección. Este es el problema de la medición. No hay, en otras palabras, una medición que pueda calificarse como perfecta; esto es, que no produzca el colapso de la función de onda o que no altere el comportamiento del fenómeno observado. Pero este no es un problema de técnicas o de ingeniería. Forma parte intrínseca de la física cuántica —de la realidad. Por consiguiente, toda la finalidad de las interpretaciones modales de la física cuántica no busca otra cosa que la construcción de la mecánica cuántica como una teoría objetiva, independiente de observadores, esto es, de sujetos humanos. Cabe decir que, antes que de una interpretación meramente, se trata de un programa que busca, ya sea mediante restricciones, o bien a través de ajustes al aparato mismo de la mecánica cuántica, establecer una teoría de la realidad que sea realista o empírica, para lo cual, en resumen, se requieren modalidades o modalizaciones al aparato. Este es el programa introducido por Van Fraassen y que se desarrolla hasta Dieks y otros (Dieks, 2007).

9-. Las historias consistentes

La interpretación llamada historias consistentes es una generalización de la interpretación de Copenhague y concierne específicamente a las relaciones entre la mecánica cuántica y la cosmología. Surge a partir de los años 1980 y 1990.

A fin de entender esta relación es preciso decir que la cosmología científica es perfectamente reciente. Si bien es posible partir de la

teoría general de la relatividad de Einstein, nace en 1964 a partir de las observaciones de Wilson y Penzias sobre la radiación de fondo cósmica. La cosmología científica se denomina la teoría inflacionaria del Big Bang. Por tanto, el problema que interesa aquí es el de las adecuaciones entre la mecánica cuántica y el universo macroscópico.

La idea de base aquí es que de todas las formas posibles en las que pueden desembocar los resultados de un experimento observado —y entonces la referencia más básica es el experimento de la doble ranura—, solo unos pocos resultados tienen sentido de cara a las reglas establecidas por la teoría. En pocas palabras, las historias —resultantes o posibles— deben ser consistentes con lo que establece la teoría. Las historias son, simple y llanamente, los caminos que toma la partícula a partir del disparo de fotón hasta la pantalla de detección del resultado. Esta explicación pueda ampliarse sin dificultad cuando se consideran otra clase de experimentos.

Como se aprecia, existe en esta interpretación una lectura distinta a la ortodoxa, según la cual el fotón se dispersa en todas las direcciones, pero colapsa en un solo sentido cuando es detectado. En otras palabras, las probabilidades de cada historia son consideradas de forma que la suma de cada historia se ajusta con la teoría clásica de probabilidades. Se dice entonces que cada historia es consistente con la ecuación de Schrödinger. En una parte de la bibliografía a veces se llama a las historias consistentes también como historias decoherentes —o historias de decoherencia.

El vértice de esta interpretación es por tanto lo que propiamente se denomina como una cosmología cuántica. Esta se ocupa de los primeros momentos en la historia del universo, en ese umbral anterior al tiempo de Planck y a la escala de Planck —que son los límites absolutos (también podríamos hablar de la masa de Planck)—, ese momento que ha sido llamado como *Susy* —el acrónimo para el estado de supersimetría—, el momento mismo del Big Bang (Gribbin, 2000). La cosmología cuántica habrá de servir para alcanzar una teoría definitiva sobre el espacio y sobre el tiempo, algo que, propiamente, aún no tenemos por completo. Distintas teorías alternativas se han sugerido para explicar el Big Bang; las más importantes son

la teoría de la gravedad cuántica, la teoría de bucles, el caos cuántico, la teoría de cuerdas, las teorías brana y M-branas. Vale decir que existen diversos otros modelos alternativos a la teoría inflacionaria del Big Bang. Como es sabido, todo el fundamento de esta teoría sobre el universo se funda esencialmente en un aparato matemático muy sólido, y las observaciones, por ejemplo, de astronomía y otras, cumplen solamente un papel ilustrativo para el aparato matemático; ilustrativo y de confirmación.

En cualquier caso, las historias consistentes se combinan usualmente con la decoherencia cuántica. La decoherencia cuántica consiste básicamente en la pérdida de información por parte de un sistema en su medioambiente. La asunción básica es que se habla entonces de un sistema aislado. Recientemente se ha venido trabajando en términos de sistemas cuánticos abiertos, así como de una termodinámica de sistemas cuánticos. En el capítulo cuarto nos ocuparemos de estos aspectos.

La decoherencia cuántica hace que, en la escala macroscópica, las historias se vuelvan automáticamente consistentes dando lugar al mundo clásico —que no es otra cosa que la realidad convencional—, con sus criterios, principios, reglas y modos propios. Diversas mediciones entre el mundo cuántico y el mundo clásico ponen en evidencia, subsiguientemente, la existencia de dos mundos, así: el mundo es de entrada, por así decirlo, cuántico y es justamente lo que la gravedad cuántica debería poner de manifiesto. Este mundo cuántico colapsa dando lugar a historias consistentes, todas las cuales conforman el mundo clásico. El mundo, de salida, es la realidad convencional. Este es el mundo que las ciencias, la filosofía y las artes han considerado de manera atávica. Este puede ser llamado, en una palabra, el mundo pre-cuántico, relativamente al surgimiento de la teoría cuántica, justamente (Omnés, 2018; 2000). Algunos autores optan por hablar de las relaciones entre los dos mundos como del mundo cuántico y el mundo clásico en cuya intersección habría un mundo que se denomina cuasi-cuántico (*quantum-like*).

Los defensores de esta interpretación son investigadores de prestigio, principalmente M. Gell-Mann, R. Omnés, R. Griffiths, J. Hartle, quie-

nes han desarrollado sus investigaciones a partir de los años 1980 y hasta la fecha. Algunos aspectos técnicos que implica esta comprensión es la introducción de espacios de Hilbert y de un sistema dinámico en la mecánica cuántica, generalmente un hamiltoniano. Estos son ingredientes fundamentales de la teoría. En términos elementales, un espacio de Hilbert, es un espacio de fases que incluye todas las posibilidades; un hamiltoniano es simplemente un operador que permite sumar energías cinéticas y energías potenciales.

En resumen, para esta línea de interpretación, la medición, e incluso una teoría de la medición, no es algo verdaderamente necesario en la mecánica cuántica. Basta con asignar probabilidades y trabajar con ellas. El resultado es un cuadro de la realidad en el que el mundo clásico emerge con perfecta probabilidad a partir de fenómenos y de comportamiento cuánticos. En otras palabras, no hay una comprensión determinista de la realidad convencional; esta es sencillamente el resultado de historias cuya probabilidad cabe sumar sin más.

10- Las teorías cuánticas de la información

En el abanico de comprensiones acerca de la física, la realidad, el mundo, la vida, y la propia mecánica cuántica, las teorías cuánticas de la información constituyen una de las aristas más sobresalientes. Con todo, una observación preliminar se impone.

La física clásica pivota enteramente en torno a un concepto: masa (o materia, para ser más preciso). Aunque Newton jamás definió propiamente a la masa, logró explicar la totalidad del universo a partir de este concepto; es decir, de lo que le sucede a la masa. A la masa básicamente le suceden tres cosas, así: está en movimiento inercial cuando se encuentra aislada; interactúa o se pone en relación con una masa mayor o menor y entonces intercambia con esta cantidad de movimiento para que este se conserve, independiente del tipo de interacción; o, como consecuencia de adquirir masa, gracias al bosón de Higgs, contribuye a formar conglomerados cada vez más densos de materia ordinaria, hasta llegar a los agujeros negros. Este concepto del siglo XVIII es unívoco, pero se transforma hasta lo que entendemos hoy, gracias a Peter Higgs y otros.

En contraste, el siglo XIX introduce un concepto perfectamente novedoso, que es polisémico y que explica más y mejor lo que la masa explicaba. La introducción de este concepto es la obra de la termodinámica, de la generalización de la mecánica (Lagrangiana y Hamiltoniana) y del surgimiento de la física estadística. Se trata del concepto de energía, el cual es polisémico. En efecto, cabe distinguir, por ejemplo, energía mecánica, de la que forman parte la cinética y la potencial; la energía calórica, un nombre inventado para disimular nuestra ignorancia; térmica, asociada a la energía interna de un sistema; de radiación, presente en el campo electromagnético; nuclear, la más abundante, y varias otras. La energía es explicada en este momento con base en tres leyes o principios: la ley de su conservación (Fourier, 1811), la entropía (Boltzmann, 1851) y la escala Kelvin, que sirve incluso para dar cuenta de la temperatura del universo (Thompson, 1871).

Pero el concepto de energía se vuelve más fundamental en muchos aspectos. Primero, en la formulación Hamiltoniana y en la versión de Hamilton-Jacobi de la mecánica Lagrangiana; luego, con el surgimiento de la mecánica cuántica, en las ecuaciones fundamentales de esa teoría. Fue el Hamiltoniano (una función que contiene el principio sagrado de conservación de la energía de un sistema o, todavía más, la energía que se transfiere entre las distintas partes de un sistema cerrado, convertido en un operador en el espacio de Hilbert mediante el procedimiento cuántico) el que permitió a Heisenberg primero y después a Schrödinger introducir lo básico de cada una de las dos formulaciones, la matricial y la ondulatoria. No entraremos en los detalles de los valores propios de ese operador hermítico, detalles con los que empieza todo curso formal de mecánica cuántica.

Pues bien, a mediados del siglo XX se introduce un concepto que explica aún mejor lo que revela la energía, que también da cuenta de lo que hace la masa. Este nuevo concepto físico es la información, introducido originariamente por Shannon y Weaver en 1949. Con una salvedad: la información es una cantidad física, pero que es inmaterial; esto es, no tangencial (Landauer, 1991). Se puede calcular la información, mas no hay un aparato de medida para ella.

Así, la historia de la física pasa de un enfoque basado en cuerpos a una física de fenómenos inmateriales. La expresión más acabada y sintética de esta física se condensa en aquella de Wheeler (1990), “*It from bit from qubit*”, y que sirve para sintetizar el conjunto de las interpretaciones en este caso, a saber: las cosas son la información que tenemos de ellas, pero esta información, antes que una comprensión simplemente clásica, y en términos binarios, es, al cabo, información cuántica.

La información tiene dos momentos: el primero, introducido justamente por Shannon y Weaver, es información clásica cuyo problema más importante es la existencia del ruido en el mensaje. Esta comprensión permea rápidamente a la biología y permite la comprensión de los procesos biológicos en términos informacionales. Esto sucede inicialmente en la biología molecular, luego en la genética y posteriormente en la biología del desarrollo. Ulteriormente toda la biología será, adicional y acaso fundamentalmente, biología de sistemas y procesos informacionales: biosemiótica, biología de sistemas, ómicas, epigenética.

El segundo momento es la información cuántica, que coincide con el desarrollo en gran escala —es decir, a escala cotidiana— del computador y la computación, entre los años 1970 y 1980 por primera vez. Consiguientemente, algunos temas que emergen son entrelazamiento, criptología o criptografía (cuántica), teletransportación, codificación y otros próximos y semejantes. Todo conduce, finalmente, al desarrollo del computador cuántico y a la computación cuántica. En este mismo espectro, se habla ya incluso de criptografía post-cuántica.

Sin duda, el hecho más crucial consiste en el reconocimiento de que mientras que la información clásica es discreta (-1 o 0-), la información cuántica posee un valor continuo y, sin embargo, es imposible medirla con exactitud; es 1 y 0, al mismo tiempo.

De manera básica, un estado de información cuántica —escrito entonces como *qubit*— posee toda la información posible sobre un fenómeno determinado, y se dice que los espines están al mismo tiempo ascendentes y descendentes: $\uparrow\downarrow$. En rigor, y esto es fundamental, se habla de procesamiento cuántico de información.

Dos observaciones importantes sobresalen. La primera es que esta interpretación de la mecánica cuántica permite la integración entre la segunda revolución científica –las ciencias cuánticas– y la tercera revolución científica –la teoría de la información. Con ello, al mismo tiempo se radicaliza la distancia con respecto a la primera revolución científica –la ciencia moderna (Maldonado, 2020). La segunda es que en la teoría de la información cuántica se hace total abstracción del mundo clásico. Implícitamente se afirma que el mundo es cuántico. Sin embargo, esta asunción implícita no es hecha explícita jamás por ninguno de los autores, incluido Wheeler.

Una advertencia se impone: la idea de una física de fenómenos inmatriciales fundada en la información no debe asemejarse a idealismo ni nada semejante. Tres ideas clave para esta nota se hacen necesarias: de un lado, se trata del hecho de que hasta la fecha se sabe que el universo está compuesto en un 4 % de materia bariónica y el otro 96 % no se sabe exactamente qué es; se lo denomina materia oscura y energía oscura. El universo, la vida, la naturaleza son materiales, pero no sabemos a la fecha exactamente qué sea la materia. De otra parte, al mismo tiempo, se trata del reconocimiento explícito de que la materia es esencialmente vacía. Estamos hechos de vacío, pero ello no debe dar pie a comprensiones fáciles y atávicas de tipo “idealismo”, “espiritualismo” y demás. Téngase en cuenta que el vacío cuántico no es lo que clásicamente concebimos como vacío. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que el concepto de energía se amplió con los cuantos de energía introducidos por Einstein: ya no son solamente los fotones los que tendrán energía sino también otros bosones que no tienen masa en reposo. Cuando se resuelva el problema de la energía oscura, seguramente podremos estar más satisfechos de reconocer otras formas de existencia física diferentes a la materialidad en el sentido de la masa. La información así concebida, de forma general, a la manera de Wheeler, adquirirá mayor significado físico.

Clarificar estos aspectos perfectamente conectados modificará por completo el Modelo Estándar, y con ello, transformará verosímelmente la teoría inflacionaria del Big Bang. El futuro, acaso inmediato, dados los ritmos acelerados de investigación, arrojará nuevos y prometedores resultados al respecto.

No deja de haber una proximidad entre esta interpretación y la propia comprensión de la mecánica cuántica por parte de Bohr. La física, sostenía Bohr, no se ocupa ya, a diferencia de Aristóteles, Galileo o Newton acerca de qué sea el mundo, la realidad o la naturaleza, sino sobre qué podemos decir o saber acerca de la naturaleza (Bohr, 2015; originariamente publicado en 1963).

11-. La mecánica cuántica relacional

Esta interpretación no se encuentra para nada lejana de las interpretaciones informacionales de la mecánica cuántica en general, y de la teoría cuántica de la información en particular. La idea de base, introducida originariamente por C. Rovelli en un *preprint* en 1996 (Rovelli, 1996) es que todos los sistemas son equivalentes y no existe ninguna distinción entre observador y fenómeno observado. Lo que hace la mecánica cuántica es describir tan solo la información que los sistemas tienen acerca de cada uno. En el trasfondo del *paper* EPR de 1935, Rovelli sostiene —y es uno de los pocos investigadores en afirmar algo semejante— que la teoría es completa. Esto es, no necesita ser completada —por ejemplo, por la relatividad general, o por cuerdas, branas ni nada semejante. Literalmente, asistimos al nacimiento de la mecánica cuántica relacional. El estado cuántico no es el comportamiento del electrón o del fotón, tampoco es el acto de observación o de medición por parte del observador sobre la partícula o la onda; es exactamente la relación entre el observador y lo observado. Se trata de una relación no disyunta en manera alguna, una relación intrínseca. Ambos, el observador y fenómeno observado, son contemporáneos.

Simple y llanamente, la mecánica cuántica, sostiene Rovelli, es una teoría acerca de la descripción de sistemas físicos en relación de unos con otros. Pues bien, la forma más básica de afirmar esto es que un sistema es el observador, y otro el electrón o el fotón, según el caso. Es la relación lo que importa, y ninguna cosa existe independientemente de la otra.

En otras palabras, puede ser que un fenómeno cuántico esté siendo observado por un observador y se produzca un colapso de la función de onda, mientras que, para otro observador, dicho colapso no sucede

—por razones por ejemplo de onda-piloto, o por entrelazamiento, o por la razón que sea. Pues bien, esta interpretación de Rovelli sostiene que, en cada caso, eso que acontece es verdadero, pues lo que se hace evidente es que se trata de una relación que sucede de maneras diferentes en cada ocasión, o que incluso puede ser interpretada de un modo diferente, en cada ocurrencia. Lo cierto, en cada caso, es la relación.

Como se aprecia, se trata de una comprensión amplia que, sin embargo, debe ser tomada como muy lejana a cualquier tipo de relativismo. El mundo posee múltiples verdades, y cada verdad es cierta en el contexto específico en el que acaece. En otras palabras, no existe nunca algo así como un relato “real” privilegiado sobre el mundo. Este es un aspecto fundamental que coincide perfectamente con lo mejor de las ciencias de la complejidad en general, y con las lógicas no-clásicas en particular. La idea de Rovelli debe ser asumida incluso independientemente de si se trata de fenómenos o comportamientos o agentes microscópicos o macroscópicos.

En la génesis del problema observador-fenómeno observado se encuentra la tesis doctoral de Everett ya mencionada. Lo que hace cada observador en la bifurcación del mundo, o también, lo que sucede en cada caso con la arborización del mundo mismo, es un proceso mediante el cual la realidad gana en grados de libertad. Mientras que el mundo clásico parece cerrar o disminuir los grados de libertad que intrínsecamente es el mundo cuántico, la mecánica cuántica relacional amplía los grados de libertad. La realidad es un tejido incesante de relaciones que nunca se agotan y que, por el contrario, apuntan a un proceso de complejidad creciente.

Antes que modificar o transformar la mecánica cuántica —por ejemplo, mediante formalismos matemáticos—, lo que propone Rovelli es transformar nuestra propia visión del mundo de modo que se adecúe a los movimientos y dinámicas que la teoría plantea. Esto implica de plano rechazar la idea de una distinción a priori entre el mundo cuántico y el mundo clásico. Son dos sistemas o marcos de referencia o dimensiones equivalentes. En este mismo sentido, se puede descartar sin dificultad la idea de variables ocultas y argumentos semejantes —la

onda-piloto—, lo que significa que la mecánica cuántica puede ser considerada sin ambages como una teoría completa. Esta idea comporta un rechazo del tiempo en el sentido tanto de la física newtoniana como de la propia teoría de la relatividad (Rovelli, 2018).

Todos los sistemas son cuánticos, es lo que explícitamente sostiene Rovelli. Esto quiere decir que no existe, en absoluto, un observador externo al fenómeno cuántico, lo cual, desde otro punto de vista sería tanto como decir que no podemos pensar por fuera del lenguaje. El mundo en general es la suma total de cada existencia y el hecho de que en cada caso hay un observador particular. Lo innegable es que existe y es posible describir una relación en cada caso y que dicha relación es incuestionable, esto es, es verdadera (esta interpretación es de un muy alto valor democrático, pues no existen puntos de vista privilegiados sobre la naturaleza; cada observador aporta, si cabe, una cantidad de verdad a la suma total, y así, el sistema global, aunque sea la suma de fenómenos o dinámicas particulares, es abierto e indefinido).

En otras palabras, y también consiguientemente, la información sobre un sistema determinado nunca se agota; siempre es posible obtener más información del mismo; en esto consiste el carácter abierto de la relación y de una suma de relaciones con otras. El universo, el mundo, la naturaleza o la realidad son intrínsecamente abiertos, inagotables e indeterminados. No obstante, en cada caso sí existe un máximo de información relevante. La articulación de ambos reconocimientos pone en evidencia que el recuento físico de la realidad puede decirse que tiene máximos locales, pero que su mapa es esencialmente abierto e ilimitado.

En resumen, cada observador posee unos grados de libertad con respecto al sistema observado. La teoría, esto es, la mecánica cuántica, es completa puesto que permite reconocer justamente la adecuación o correspondencia en cada caso de los fenómenos observados y sus observadores. No hay que buscar ninguna modificación del aparato de la mecánica cuántica. Es suficiente con poner de manifiesto que existe una gama amplia y posible de observadores, todos los cuales se encuentran en perfecta conexión con el sistema observado en cuanto que cada relación revela una fase, un espectro propio. La física no se

ocupa, así, de objetos, ni siquiera del mundo o del universo, sino de las relaciones reales y posibles con ellos.

12-. La interpretación transaccional

A finales de los años 1930 y comienzos de la década de 1940, Feynman estuvo trabajando en su tesis doctoral bajo la dirección de J. A. Wheeler en Princeton. Es en este contexto que se concentra en la electrodinámica y en el que se formula, en 1940, la teoría del medio absorbente o también la teoría de acción a distancia de Feynman-Wheeler, que consiste básicamente en una teoría simétrica del tiempo. Es decir, no hay ninguna razón para adoptar la asimetría del tiempo, y entonces el quiebre entre el pasado y el futuro. Posteriormente, entre los años 1950 y 1960, R. Feynman estuvo trabajando en el campo que le daría un lugar en la historia, a saber: el desarrollo de la electrodinámica cuántica, por la cual recibiría en 1965 el premio Nobel (Gleick, 1993). Dicho en un lenguaje más específico, la solución de las ecuaciones del campo electromagnético debe ser invariante con respecto a las transformaciones del tiempo. Pues bien, la interpretación transaccional, introducida por J. Cramer en un artículo de 1986 (Cramer, 1986), es a su vez una interpretación de la teoría del medio absorbente.

El problema al que específicamente se aboca Cramer es que, dado el hecho de que la mecánica cuántica es altamente contraintuitiva, su intención es convertir a la teoría en una cuestión intuitiva, de suerte que haya una mejor comprensión de los procesos cuánticos.

En efecto, cuando se emite un electrón o un fotón en el experimento de base de la mecánica cuántica en cualquiera de sus expresiones, se produce una onda que avanza en el tiempo, pero al mismo tiempo hay una onda que retrocede según la flecha del tiempo. A su vez, al mismo tiempo, el receptor —que bien puede ser un observador, o la pantalla de recepción y demás— también emite una onda que viaja hacia atrás en el tiempo, así como una onda que está retardada según la dirección del tiempo. Pues bien, la interpretación introducida por Cramer consiste en afirmar que hay un intercambio o transacción (literalmente, un saludo de manos —*shakehand*—, que fue el término originariamente introducido por Feynman y Wheeler) entre ambas ondas o direcciones

o flechas del tiempo –según se prefiera–, de tal modo que la energía, el *momentum* angular y los demás aspectos propios de la medición física se transfieren gracias a dicho intercambio o transacción.

Literalmente, se trata de una transacción en la que hay equilibrio puesto que no hay pérdida de energía o de información. Es decir, hay una simetría en el tiempo; esto es lo que establece esta interpretación; es decir, las ondas son vistas como un fenómeno físico real u objetivo, y no simplemente como un artificio matemático que registra la observación hecha por el observador, que es lo que acontece en varias otras interpretaciones.

Lo importante es que esta interpretación ha sido confirmada experimentalmente, con lo cual adicionalmente, se afirma claramente la no-localidad. El papel que la interpretación de Copenhague le asigna al observador queda aquí suprimido o dejado de lado, justamente gracias a la transacción entre las dos ondas o direcciones del tiempo. El artículo de 1986 encuentra un desarrollo más amplio en Cramer (2016), cuyo subtítulo arroja más y mejores luces sobre su contribución a la física cuántica. En verdad, la interpretación transaccional de la mecánica cuántica consiste en una puesta en evidencia de la no-localidad, el entrelazamiento y los intercambios o absorciones mencionados, todos los cuales ponen en evidencia que el espacio y el tiempo son solamente efectos de fenómenos y comportamientos cuánticos.

En otras palabras, el colapso de la función de onda es visto en esta interpretación como el resultado de una transacción simétrica en el tiempo, como una onda de posibilidad que viaja desde la fuente hasta el receptor y una onda de posibilidad que viaja del receptor hacia la fuente. Es exactamente en este sentido: a) que el comportamiento cuántico es hecho intuitivo, y b) que la simetría en el tiempo pone de manifiesto que vivimos un mundo que puede ser comprendido más allá (es decir, independientemente) de las formalidades matemáticas de la teoría. Baste con decir lo siguiente: la mecánica cuántica requiere de números imaginarios para explicar la realidad.

Podemos explicar mejor las dos direcciones de la onda o las dos flechas del tiempo en los siguientes términos: en un caso, hay una emisión

de energía; en el otro caso, al mismo tiempo, hay una absorción de energía. Puede hablarse legítimamente de energía positiva y de energía negativa. Análogamente a lo que sucede con las transacciones comerciales o financieras, una parte hace una oferta y la otra la acepta, y entonces se produce un intercambio. Esto es lo que significa la absorción o también la transacción; por ello la expresión de saludo de manos como acuerdo: *handshake*. No hay pérdida, hay un acuerdo, y entonces, paridad. Pues bien, esta paridad consiste exactamente en la simetría en el tiempo, o la simetría del tiempo.

Es posible afirmar que el mundo no se compone de hechos o de fenómenos, como tampoco de ondas y partículas subatómicas; mucho mejor, el mundo está compuesto originariamente de potencialidades o, aún mejor, de posibilidades. Los hechos o los fenómenos son simplemente expresiones o traducciones de esas posibilidades. De esta suerte, el mundo es, en otras palabras, el resultado de transacciones entre posibilidades. Como se aprecia, una idea filosófica altamente sugestiva. Un eco de Heisenberg alcanza a escucharse.

Digámoslo de manera franca y directa: el mundo de posibilidades no está en el tiempo ni en el espacio, pero es el fundamento mismo del espacio y el tiempo. En otras palabras, en el universo, el mundo y la naturaleza hay mucho más que lo que se aprecia o lo que está contenido en el espacio y en el tiempo. Una manera de señalar esa dimensión que desborda el espacio-tiempo es el mundo de las posibilidades. Pues bien, las transacciones entre las dos ondas y sus flechas del tiempo no son otra cosa que transacciones entre posibilidades. Dejamos así de pensar en “cosas”, “fenómenos”, “sistemas”, “hechos,” o incluso “partículas subatómicas” y “ondas” para entender que en su base hay procesos de absorción incesantes; un mundo de absorción permanente, una transacción constante, es decir, un acuerdo. Es, simple y llanamente, una traducción de la coherencia cuántica.

13-. La interpretación de conjunto

La interpretación de conjunto es igualmente llamada como la interpretación estadística de la mecánica cuántica. En el marco de las interpretaciones es conocida como minimalista debido a que elabora

asunciones apenas mínimas con respecto al aparato matemático desarrollado originalmente en 1927 o bien, respecto a los desarrollos subsecuentes que han fortalecido a la mecánica cuántica. Es esencialmente la afirmación o reiteración de las ideas de Born de 1927 (Ballentine, 1998).

El nombre de esta interpretación procede del hecho de que el énfasis se concentra en elaborar muchas copias de un mismo sistema cuántico y describirlas. Es esto lo que se denomina, en este caso, un conjunto. En efecto, en el marco de la física cuántica no hay un único fenómeno que sea objeto de observación. La razón estriba en que precisamente una medición viola el aislamiento o la singularidad o la individualidad de un fenómeno dado. Siempre existe la referencia al acto de medición, por lo menos.

Es importante resaltar que esta interpretación pone al descubierto el efecto de Zenón, el cual tiene consecuencias determinantes para todo el marco de las ciencias cuánticas. Este efecto afirma que la observación constante o repetida de un fenómeno previene la decadencia del mismo, o lo que es equivalente, inmoviliza el proceso de decoherencia y lo congela en el tiempo. Kauffman ha llamado la atención sobre el efecto Zenón para poner de manifiesto que la conciencia no es un epifenómeno y que efectivamente cumple un papel activo en la economía del universo. En últimas, se sientan aquí todas las bases para el pansiquismo, el panteísmo, el hilozoísmo o el biocentrismo, cuatro maneras diferentes de afirmar que o bien la materia está animada, o bien la conciencia es propia de los fenómenos y de la naturaleza misma.

El efecto Zenón –en referencia al filósofo griego Zenón de Elea– ha sido observado repetidas veces y es hoy reconocido como un hecho efectivo. En palabras elementales, se trata de la afirmación según la cual un fenómeno no puede cambiar mientras está siendo observado. Dicho de otra forma, la medición sostenida de un fenómeno previene el colapso de la función de onda, y es por ello mismo que, en acuerdo con la interpretación de conjunto, es preciso recrear numerosas copias de un mismo fenómeno; esto, verosíblemente podría evitar el efecto Zenón, el cual surgió a finales de los años 1970.

14-. El darwinismo cuántico

Una vez que emerge la física cuántica con todo y su muy robusto aparato matemático y conceptual, incluso aunque a la vista de algunos (Einstein) pueda parecer como una teoría incompleta, el problema que inmediatamente surge es el del mundo clásico. Esto es, la justificación o la explicación del mundo clásico. Este es un tema inaplazable.

Pues bien, el darwinismo cuántico, originariamente planteado por Zurek en un artículo de 2003, se aboca a la explicación acerca de cómo es que surge la realidad convencional. Es posible plantear con Zurek el problema de dos maneras, así: cómo es que los sistemas cuánticos se hacen clásicos, o lo que es equivalente, cómo es que surge la realidad clásica a partir de principios y comportamientos cuánticos. La respuesta de Zurek, perfectamente novedosa, es que ello sucede como resultado de un proceso de selección —análogamente a lo que acontece en la teoría de la evolución— de naturaleza cuántica.

La decoherencia es el resultado de un proceso de superselección —que Zurek denomina como *einselection* (que es la expresión breve de “*environment-induced superselection, superselección inducida por el medioambiente*)¹⁸—, en el que se encuentra el sistema cuántico considerado, con lo cual, consiguientemente sucede una pérdida de información. El mundo cuántico es informacionalmente rico, pero pierde información con la decoherencia cuántica; esto es el mundo clásico: un mundo determinado o de determinaciones. En efecto, el mundo en el que reina el principio de tercero excluido impide que una cosa sea ella misma y otra distinta al mismo tiempo.

Dicho en otros términos, la superselección le impone restricciones al espacio de Hilbert. La realidad clásica es algo así como una propiedad de los sistemas de superselección, una propiedad emergente de sistemas cuánticos abiertos.

18 Mantendremos aquí la expresión “superselección” para hablar de la *einselection*. Podríamos acuñar la expresión “selección-mind”, manteniendo la “inducción del medioambiente”, pero hemos creído forzado el giro semántico.

Este lenguaje es importante. La realidad convencional no tiene, en modo alguno, un fundamento *in re*; es simplemente una propiedad emergente. Así, se hace inevitable señalar que el mundo es esencialmente cuántico, y que la realidad convencional es tan solo una característica emergente; sin ambages, un epifenómeno.

En verdad, la decoherencia conduce a procesos de superselección, y el mundo clásico puede ser descrito a partir de comportamientos y principios cuánticos. En otras palabras, el medioambiente impone una serie de reglas de superselección. Los estados cuánticos son denominados por esta interpretación como puntos de señalización (*pointer states*) queriendo significar la importancia de la medición. Naturalmente, los estados clásicos carecen de superposición o entrelazamiento o no-localidad. En el universo sucede un proceso incesante de autoevolución y de intercambio con, o de influencia de, el medioambiente. Los estados cuánticos son el resultado de este intercambio, y cabe decir entonces que tienen una duración mayor.

El mundo en general es, sin más, el resultado de un proceso de selección darwiniano como resultado de las interacciones entre el medioambiente y fenómenos cuánticos. Todas las posibilidades cuánticas sufren un proceso de selección que tiene como resultado un punto de señalización más estable (que los demás). L. Smolin se cuenta entre los autores que mejor han acogido esta interpretación para explicar el universo en el que vivimos. Por esta vía, el problema de la medición queda igualmente resuelto.

En verdad, la interacción del sistema cuántico con el medioambiente genera una variedad de copias de información —justamente en los estados de señalización— que pueden ser leídos por diferentes agentes. Pues bien, es esta pluralidad de lecturas y los acuerdos entre ellas los que permiten hablar sin dificultad de objetividad del mundo y la realidad. La realidad objetiva resulta de los cruces entre lecturas e interpretaciones diferentes por parte de distintos observadores.

Un aspecto importante de la interpretación de Zurek es que en el proceso de selección darwiniana se producen diferentes puntos de señalización y estos, en correspondencia con la teoría darwiniana

evolucionan generando así procesos de herencia y descendencia. De este modo, la interpretación de Zurek permite entender, desde el punto de vista cuántico, cómo es que la realidad clásica –esto es, el mundo alrededor– sufre evoluciones. La evolución del universo macroscópico es una propiedad emergente de la evolución de: a) estados de señalización, y consiguientemente, b) la superselección que sucede con el medioambiente.

Como se aprecia sin dificultad, la teoría de la evolución –erróneamente llamada evolución darwinista– pone de manifiesto que la evolución no acontece únicamente al nivel de los sistemas vivos, sino, mucho más originariamente, desde la propia escala microscópica o subatómica de la realidad. No solamente la realidad es el resultado de cambios selectivos, sino, adicionalmente, estos van evolucionando más que con el tiempo, con las interacciones con el medioambiente. Así, la evolución macroscópica al mismo tiempo se corresponde con, y es el resultado de, una evolución microscópica. La consecuencia no puede ser más evidente: no hay dos mundos; la división entre el mundo cuántico y el clásico no se sostiene. Esta es una propiedad emergente justamente de procesos evolutivos procedentes de las escalas subatómicas. Evitamos así una comprensión dualista o binaria de la realidad, y se logra integrar, gracias a una de las más importantes teorías jamás desarrolladas (la teoría de la evolución) dos escalas de una sola y misma realidad¹⁹.

15-. Las teorías del colapso objetivo

El colapso de la función de onda es, manifiestamente, un problema serio y difícil. Una arista de abordaje del problema son las teorías llamadas del colapso objetivo. De entrada, lo que sostienen estas

19 Dado el carácter de este segundo capítulo precisado ya desde la introducción, dejamos de lado una ampliación o discusión de la asimilación entre mecánica cuántica y evolución –y no única o principalmente con la idea “darwiniana” de la evolución. Como es sabido, existen otras comprensiones complementarias y también alternativas a la teoría de Darwin. Digamos únicamente que, en rigor, no existe algo así como una teoría darwiniana. Existe la teoría de la evolución. El universo en su conjunto es evolución, y es lo que debe cambiarse en “El Universo Darwiniano”.

teorías es que la función de onda no colapsa por el acto de medición, sino que colapsa independientemente del observador. La función de onda colapsa espontáneamente.

Desde luego, el problema grueso permanece el mismo: cómo es posible que el mundo clásico emerja del universo cuántico. La respuesta más general de estas teorías es que el asunto funciona muy bien a escala microscópica, pero a medida que se va pasando, de forma gradual o abrupta, al universo macroscópico, la función de onda se va haciendo más aproximada, perdiendo superposición y no-localidad. La ecuación de Schrödinger es remplazada en estas interpretaciones por aproximaciones no-lineales y estocásticas cuya función es determinar la indeterminación de la función de onda. El problema de la medición es dejado de lado a cambio de una concentración de la mirada en las bifurcaciones que suceden objetivamente.

En la bibliografía especializada se destacan principalmente dos teorías: primero, el modelo GRW, por sus autores: Ghirardi, Rimini, y Weber propuesto en 1986 (Ghirardi *et al.*, 1986). En GRW, el nombre del artículo deja ver inmediatamente de qué se trata todo, a saber: de alcanzar una comprensión unificada de las escalas micro y macro de la realidad. Tácitamente, se trata de superar el debate de Copenhague. En este sentido, puede decirse también que es una teoría no-relativista.

Como queda mencionado en el capítulo 1, la mecánica cuántica tiene dos principios dinámicos: la ecuación de Schrödinger, que es lineal y determinista, y el postulado de la reducción del paquete de onda, que es no-lineal y estocástico. Pues bien, las teorías del colapso objetivo integran, por caminos distintos o de formas diferentes, ambos principios. De esta suerte, se desplaza el foco de la preocupación por lo que observamos hacia aquello que efectivamente sucede o existe “allá afuera”, independientemente del acto de observación.

La segunda teoría es el modelo Diósi-Penrose desarrollado en 1987 y 1989 por L. Diósi y luego también por R. Penrose en 1996. El foco de la atención de este modelo se concentra en el estudio de las fluctuaciones gravitatorias. La idea de base es que la mecánica cuántica se ve alterada debido a efectos gravitatorios. Así, en el panorama físico

y cosmológico, aparecen dos lecturas perfectamente distintas: de un lado, la cuantificación de la gravedad, que coincide con el estudio de la supersimetría que habría existido antes del Big Bang y que produjo la gran explosión. De otro lado, se trata de la gravitización de la mecánica cuántica. Pues bien, esta segunda opción es la que afirma el modelo Diósi-Penrose.

Resaltemos lo siguiente: los electrones y fotones decaen. Esa decaencia conduce a, o consiste en, el colapso de la función de onda y el rompimiento de la coherencia. Pues bien, el modelo GRW consiste en la suma o agregación de procesos no-lineales y estocásticos a la ecuación de Schrödinger, lo que justamente permite la unificación de la escala micro y macro del universo. Mientras que en el universo microscópico esta agregación es apenas perceptible, en la escala macroscópica permite la localización de la decoherencia, justamente como un fenómeno independiente de la medición o la observación. Esta localización ha sido tanto desarrollada como adaptada en otros modelos de colapso objetivo. Se trata, específicamente de los modelos CSL, QMSL y QMUPL. Correspondientemente, se trata del modelo *continuous spontaneous localization*, el modelo *quantum mechanics with spontaneous localization*, y el modelo *quantum mechanics and universal position localization*. Dejamos aquí de lado una consideración de ambos modelos debido a que hasta la fecha no han recibido una atención especial y a algunos aspectos técnicos; en cualquier caso, no son más robustos que las teorías GRW y de Penrose.

En fin, una visión filosófica de las teorías del colapso puede ser vista en el trabajo de Ghirardi y Bassi de 2020. Las teorías del colapso objetivo se plantean, pues, como rivales de la mecánica cuántica. Subrayemos este aspecto: en esta comprensión, el mundo o la realidad, el universo o el tiempo o el espacio —según se prefiera— son interpretados como continuos. Desde luego, en marcado contraste con los fundamentos más originarios de la física cuántica.

Otro aspecto interesante del colapso objetivo resulta de considerar el colapso de un fotón en presencia de otro fotón, o todavía más visible, el colapso de un electrón en presencia de otro electrón. El resultado es el entrelazamiento de las dos partículas. ¿No es este el origen del

entrelazamiento, punto de partida de la fenomenología cuántica en el sentido de Schrödinger?

16-. El bayesianismo cuántico

Esta interpretación, que es resultado del trabajo de distintos autores, se desarrolla a comienzos de los años 2000 hasta la fecha, y en marcada diferencia con la mayoría de las interpretaciones sobre la mecánica cuántica, se centra en el papel que el observador y la medición tienen en la teoría.

Análogamente a la teoría bayesiana de probabilidades, esta interpretación destaca el valor de la experiencia, o de la comprensión, o del papel, que la subjetividad desempeña con respecto a la realidad. La idea que sostienen los autores más destacados de esta comprensión, como Ch. Fuchs (que podemos encontrar en una variedad muy amplia de artículos, usualmente escritos en coautoría, o mejor aún, en un *preprint* de 2010) y sorpresivamente como D. Mermin (2014), es que todos los estados cuánticos no son elementos de la realidad, sino probabilidades subjetivas. En esta comprensión, la epistemología y la ontología coinciden y son una sola y misma cosa, la física no determina lo que es la realidad, sino solamente lo que sabemos de ella o lo que se puede decir de ella. En este sentido, esta interpretación es una variación de la interpretación de Copenhague y de los trabajos más fundamentales, notablemente aquellos de Born.

El bayesianismo cuántico también ha sido llamado como una interpretación epistémica, y en algunos lugares se la puede identificar con este nombre.

Esta interpretación concibe las probabilidades como juicios personales por parte de los investigadores que trabajan en la mecánica cuántica. Los acuerdos intersubjetivos son la única garantía, ulteriormente, acerca de la objetividad del mundo, que es, en efecto, lo que numerosas veces sucede en la historia de la ciencia y de la cultura. Cuantiosos ejemplos pueden presentarse en diferentes dominios del conocimiento. Dicho en un lenguaje más general, los estados cuánticos no son, en esta perspectiva, otra cosa que creencias, conocimientos, información,

en fin, posturas o concepciones epistémicas. El mundo, más que ser el resultado de las percepciones, creencias, sensaciones o experiencias de un agente, lo es de la puesta en común de estos aspectos entre numerosos agentes. No hay aquí, en absoluto solipsismo, en ninguna acepción de la palabra. La realidad objetiva es intersubjetiva; es el resultado de acuerdos, debates, disensiones y puestas en común de diversos agentes que trabajan sobre un mismo tema. Una aproximación filosófica a este aspecto puede verse en el trabajo de Kozłowski (1991). Manifiestamente, tenemos aquí una línea de interpretación distintivamente filosófica de la mecánica cuántica.

Hay que decir que existen incluso algunas variantes que postulan una reformulación de la teoría cuántica de suerte que se introduzcan una serie de axiomas para que tenga cabida el conjunto de probabilidades como componentes necesarios de la mecánica cuántica. Sugestivos, estos intentos permanecen a la fecha como propuestas simplemente. En todo caso, se trata de la más reciente de todas las líneas de trabajo en el tema.

Desde el punto de vista filosófico, la influencia o bien, por lo menos, la confluencia, con las ideas de Ramsey son aspectos importantes que no cabe menospreciar, en manera alguna. Ramsey, hay que decirlo, es el padre del coherentismo en filosofía de la ciencia; es decir, de aquella concepción que desea que todas las piezas del rompecabezas encajen perfectamente y no falte ninguna.

Es importante subrayar el siguiente aspecto. El QBismo –que es el otro nombre en el que sintetiza esta interpretación– no afirma que todos los aspectos del formalismo cuántico sean subjetivos, pero sí que la mayoría lo son. Notablemente, lo son todos aquellos que son susceptibles de una lectura probabilística. Todo lo que existe, consiguientemente, son grados de creencias, o grados de percepción; justamente, probabilidades subjetivas.

En este sentido, la interpretación del bayesianismo cuántico es local, y la localidad apunta exactamente al papel central del observador y la gama de sus consideraciones. La no-localidad queda aquí desechada como un asunto fundamental. Al mismo tiempo, sin acusarlo de

subjetivista, el bayesianismo cuántico ha sido llamado con frecuencia como no-realista.

17-. Las teorías de la simetría del tiempo

Una de las más sugestivas interpretaciones de la mecánica cuántica sostiene, sin más ni más, que no solamente las cosas (eventos) del pasado nos afectan en el presente y acaso también en el futuro, sino, además y más sorprendentemente, que eventos del futuro afectan al presente y al pasado. El tiempo es simétrico. No solamente recordamos o podemos recordar el pasado, también podemos hacerlo con el futuro. Como se aprecia, una idea altamente contraintuitiva.

Esta interpretación encuentra fuertes vínculos con la teoría de la absorción de Wheeler y Feynman así como con la interpretación transaccional. Existe una causalidad desde el futuro, análogamente a como existe la clásica desde siempre causalidad desde el pasado.

Más específicamente, en esta visión se asume que una medición u observación de un fenómeno cuántico es insuficiente. Se requiere por lo menos una segunda medición —y teóricamente varias más— de tal manera que diferentes mediciones llevadas a cabo en tiempo diferentes puedan hacer posible calcular todos los estados cuánticos intermedios entre las dos (o más) mediciones. Desde este punto de vista, el colapso de función de onda no es un acontecimiento físico real sino el resultado de las relaciones entre nuestros conocimientos en cada una de las mediciones consideradas. En consecuencia, el mundo revela una simetría de tiempos como resultado de una ampliación o modificación de los estados de conocimiento. Es posible, simple y sencillamente, que el observador seleccione independientemente el estado inicial y el estado final de un fenómeno, lo que permite comprender que el tiempo no transcurre en una sola dirección —del pasado al presente, por ejemplo—, sino también desde el futuro hasta el presente. Esta interpretación ha sido llamada como no-invasiva con relación al tiempo y la medición.

La medición introduce una asimetría en el tiempo, de acuerdo con la interpretación de Copenhague. Bohr y Jordan ya dejaron este tema en claro: la observación de un fenómeno al mismo tiempo que crea el fenó-

meno, modifica el comportamiento del fenómeno observado. Pues bien, la interpretación de autores sobresalientes como Watanabe y Aharonov (discípulo de Bohm) busca distanciarse de la comprensión habitual produciendo el resultado mencionado: el tiempo es simétrico; en otras palabras, el pasado y el futuro son simétricos. O lo que es equivalente, el tiempo transcurre tanto hacia adelante como hacia atrás. De pasada, esta teoría imprime una inflexión fuerte con respecto a la segunda ley de la termodinámica, que es también una teoría de tiempos asimétricos.

En física cuántica el fenómeno de reversibilidad o simetría del tiempo da lugar al estudio de los dipolos o también el momento eléctrico dipolar. La dipolaridad ha sido observada en fenómenos subatómicos, en procesos químicos y en la conformación de estructuras moleculares. Digámoslo de manera gruesa: se encuentra en la base de la vida, de tal suerte que no es dominante la idea de polos opuestos que se acercan o implican, sino también que se alejan (tanto como de polos con una misma carga que se acercan). Este es todo el terreno de estudio, especialmente, de la fuerza débil –una de las cuatro fuerzas físicas fundamentales.

Dicho en otras palabras, la simetría del tiempo viola la idea clásica de una direccionalidad en un solo sentido del universo. La clave, y esto hay que subrayarlo, estriba en mediciones no invasivas. Son estas las que ponen en evidencia la simetría del tiempo, contrariando así la segunda ley de la termodinámica.

Esto quiere decir que existe al mismo tiempo una causalidad en sentido clásico, tanto como una causalidad desde el futuro. El presente y el pasado son causados por el futuro; o bien, lo que es lo mismo, pueden ser causados. Esta simetría del tiempo ha sido extendida recientemente también a la consideración de simetría en el espacio. Como sostenía Heráclito: lo mismo que está arriba está abajo, lo mismo que está adentro está afuera. Dicho en términos sencillos: no hay adentro y afuera, como tampoco arriba y abajo (tampoco habrá futuro y ya no hay pasado; pero los dos influyen en el presente).

Hay otra manera de exponer las ideas de esta interpretación. Se trata de la importancia del entrelazamiento. Dos partículas entrelazadas

se comportan de tal manera que una partícula en el pasado está conectada con otra en el futuro, y los comportamientos de cualquiera de ellas afecta a la otra. La importancia de mediciones no invasivas es muy importante en los terrenos aplicados de la física cuántica, especialmente en el estudio de fenómenos de estado sólido y en nanotecnología (Bülte *et al.*, 2017).

El aspecto verdaderamente interesante, como se aprecia, es que esta interpretación de la mecánica cuántica resulta de mucho interés para los campos aplicados –ciencia de materiales, ingeniería, física del estado sólido, y varios campos más– que retan las capacidades tecnológicas para explorar y confirmar esta idea. Esta interpretación permite poner claramente lo que significa una teoría en física: una teoría debe permitir predicciones. Pues bien, esta interpretación permite hacerlo y reta la capacidad aplicada en dominios de punta como la nanotecnología. Según parece, esta es bastante más que una simple “interpretación”. Es cuando la filosofía resulta ciencia básica y esta a su vez resulta en ciencia aplicada y tecnología.

Las bases de esta interpretación son puestas en las décadas de 1950 y 1960 por Watanabe y Aharonov, pero han venido siendo ratificadas y desarrolladas al mismo tiempo por parte del propio Aharonov y por K. W. Wharton. Aquí, hemos presentado los aspectos conceptuales más importantes. La verdad es que la matemática de esta interpretación es (bastante) técnica, así como lo es la de sus derivaciones y aplicaciones.

Cuando se incorpora la simetría del tiempo, resultan muchas cosas adicionales que vale la pena considerar. Uno podría imaginar que el entrelazamiento ocurre en ambas direcciones.

18-. Las teorías de la ramificación del espacio-tiempo

Las teorías sobre la ramificación del espacio-tiempo fueron originalmente propuestas por N. Belnap, un destacado lógico y filósofo, en 2003. Desde entonces han conocido diversas variaciones. Estas teorías o interpretaciones se encuentran en estrecha relación con las interpretaciones sobre múltiples mundos, así como las interpretaciones estocásticas.

En esta comprensión, el indeterminismo de la mecánica cuántica está asociado a la estructura no-clásica del espacio-tiempo la cual se compone de múltiples ramificaciones dando lugar a diferentes resultados posibles acerca de las observaciones. La particularidad aquí descansa en el reconocimiento de que las ramas del espacio-tiempo constituyen un rasgo de la topología del conjunto de eventos junto a sus relaciones causales. El llamado a la topología aquí es un aspecto novedoso en el abanico de las interpretaciones estudiadas en este capítulo. Por derivación, cabe hablar legítimamente de una ramificación de la historia.

En verdad, cerca al tiempo de Planck —e incluso por debajo suyo—, las fluctuaciones del espacio-tiempo son de tal carácter que la multiplicidad del espacio y del tiempo se pierden. Pues bien, los trabajos de Belnap, Kowalski y Placek, independientemente, buscan resolver este problema. La solución estriba en un cambio de la topología.

Manifiestamente, en el proceso de arborización, por así decirlo del espacio-tiempo, nuevas leyes físicas aparecen y deben ser consideradas. De manera simple y directa: las ramificaciones del espacio-tiempo no son otra cosa que una mixtura entre la relatividad y el indeterminismo. La idea de base de estas ramificaciones es elemental: todas las cosas suceden por una causa. Cada causa produce, por tanto, ramas distintas. Es posible estudiar y trazar la topología de estas ramificaciones. Este es el trabajo que llevan a cabo dichas interpretaciones. De manera puntual, la idea de ramificaciones del espacio-tiempo permite teóricamente una unificación descriptiva de la relatividad y la mecánica cuántica. Y esta unificación sucede mediante un giro topológico. Podría decirse, por ejemplo, que el espacio-tiempo está inmerso en un espacio más amplio. Un espacio semejante ha sido considerado como compuesto por seis dimensiones y se denomina un espacio de Minkowski. No en última instancia la idea de ramificaciones del espacio-tiempo y la propuesta de que la unificación tiene lugar en topologías especiales apunta a un universo matemático o, lo que es equivalente, a las matemáticas como fundamento de la física. No muchos autores han elaborado una propuesta semejante; sin embargo, quizás la más sólida es aquella desarrollada por Tegmark (2014). En un plano distinto, pero en la misma dirección, puede verse asimismo la propuesta hecha por Penrose (2004).

Decir que la física descansa ulteriormente en la matemática no es muy diferente a la idea de Wheeler: *it from bit from qubit*. En otras palabras, el fundamento de la realidad es una física de la inmaterialidad. O las matemáticas; para el caso da lo mismo.

19-. La interpretación de Montevideo

La interpretación de Montevideo, desarrollada originariamente por R. Gambini y J. Pullin entre 2007 y 2010, encuentra su mejor expresión en el trabajo de Gambini y Pullin (2018). Se trata de una interpretación basada en alrededor de treinta artículos. El problema de base tiene que ver con la ontología –del mundo real, de la mecánica cuántica. Esta interpretación postula un modelo realista de la decoherencia que implica a los espines. En otras palabras, se trata del uso de variables físicas reales que implica la modificación de las ecuaciones de la mecánica cuántica. Esta idea permite decir que la interpretación, si bien hace referencia, aquí y allí a autores como Whitehead y Russell, consiste en un robusto aparato matemático. Desde el punto de vista filosófico, esta interpretación ha sido entendida como o asimilada con la interpretación de Everett (Butterfield, 2015).

La principal preocupación de esta interpretación es la decoherencia, es decir, el colapso de la función de onda, pero con ello, al mismo tiempo, el foco del trabajo de Gambini, Pullin y otros colaboradores radica en apuntarle a la solución de la gravedad cuántica. Para ello, el problema que plantean es que la gravitación cuántica constituye el límite de cualquier reloj real. En otras palabras, esta interpretación resuelve, según sus autores, los problemas de la decoherencia debida al medioambiente como solución al problema de la medición. La solución, dicho en una palabra, es la indecibilidad, un tema que remite a Hilbert y la relación de sus trabajos con Gödel y Turing.

Todo el esfuerzo de esta interpretación consiste en encontrar una fuente de decoherencia que sea irreversible por razones físicas fundamentales. Estas razones descansan sobre un dúplice argumento, a saber: una ontología de los cuerpos y estados físicos, y una ontología de los eventos. En verdad, la gravedad cuántica le plantea serias limitaciones a un reloj físico. Así, al realizar un experimento cuántico cual-

quiera –por ejemplo, el de la doble ranura o el del interferómetro–, no podemos saber *con exactitud* cuándo podemos hacer la medición.

Hay que decir que, de acuerdo con los autores de esta interpretación, ésta no puede ser llamada simplemente como tal (una interpretación), puesto que quiere ser “nueva física” que puede hacer nuevas o diferentes predicciones verificables. La motivación de esta nueva física descansa en el hecho de que es imposible observar de manera precisa fenómenos cuánticos en el mundo ordinario. Por esta razón, los autores de esta línea de interpretación se dan a la tarea de postular una nueva axiomática.

Gambini y Pullin argumentan que la pérdida de la coherencia sucede de dos maneras al mismo tiempo. Existe una pérdida de coherencia a través de la interacción con el medioambiente, más una pérdida de coherencia de la física cuántica cuando se la compara con un reloj real y con herramientas de medición. Es así como emerge el mundo clásico. Como resultado de ambas pérdidas de coherencia toda información sobre el aparato teórico y de medición cuántica resulta finalmente inaccesible. No es posible establecer con claridad si hay una evolución que sea unitaria o que colapse. Es exactamente esto lo que los autores denominan una condición de indecibilidad. Es decir, no es posible responder afirmativa o negativamente, y manifiestamente no existe ningún algoritmo que lo haga posible (Gambini y Pullin, 2009). Esta interpretación es realista, y así lo reconoce explícitamente.

Es interesante observar que existe un diálogo y un debate abierto con autores de otras interpretaciones –notablemente la modal y la transaccional-; es imposible, por lo demás, observar de manera precisa fenómenos cuánticos en el mundo ordinario. Los autores de esta interpretación se dan a la tarea de considerar contra-argumentos y mostrar con distintos términos su posición.

20-. La interpretación de las múltiples mentes

Propuesta originalmente en 1988 por D. Albert y D. Loewer en un artículo sobre la base de algunos trabajos anteriores de H. D. Zeh, se plantea inmediatamente como una interpretación –esto es, una va-

riación de la imposibilidad de observar de manera precisa fenómenos cuánticos en el mundo ordinario— de la propuesta de los múltiples mundos de Everett (Albert y Loewer, 1988)²⁰.

De acuerdo con Everett, solo existe una única función de onda —esta es toda la “realidad” o el universo. La función de onda describe el universo (como un todo). Ahora bien, en el universo o en la realidad o en la naturaleza —como se prefiera— existen numerosos subsistemas. Pues bien, originariamente, el universo es la superposición de todos esos subsistemas. La ecuación de Schrödinger describe esta situación. Mejor aún, todos los subsistemas están perfectamente entrelazados, de tal manera que la comprensión o explicación de un subsistema solo puede ser llevada a cabo en consideración con los subsistemas con los que actúa, y así sucesivamente. Este es el mundo cuántico. En cuanto totalidad —un concepto introducido en este contexto por Bohm—, el universo o la realidad es indeterminada, pues una determinación del mismo supondría la consideración de todos y cada uno de los subsistemas y sus interacciones. Sin embargo, y esto es fundamental, la indeterminación del mundo es propia al mundo y no es un rasgo que dependa, para nada, del observador.

Podría decirse que el mundo es la suma de todas las historias posibles de estos subsistemas y sus interacciones. Pero, al mismo tiempo, hay que decir que en su evolución se van produciendo incesantemente bifurcaciones, y así, la consideración de la suma de todas las historias posibles es, en el mejor de los casos, una idea límite.

Pues bien, la interpretación de las múltiples mentes es exactamente la interpretación de los múltiples mundos de Everett, pero al nivel de un observador particular. Más exactamente, en lugar de que sea el mundo el que se bifurca —o ramifica—, es la mente del observador la que lo hace.

Lo que buscan Albert y Loewer, sobre la base de los trabajos pioneros de Zeh, es evitar o superar la idea de una incesante superposición del observador (o los observadores, para el caso no hay problema

20 Puede verse esta propuesta en el trabajo desarrollado por Zeh (1999).

aquí) consigo mismo. Debe ser posible que el observador explique o describa sin la menor duda aquello a lo cual se refiere, evitando así contradicciones. En otras palabras, las mentes se encuentran en un estado determinado, y son los estados físicos los que se superponen y a los que les suceden cosas.

De acuerdo con esta interpretación, siempre que un observador mide un objeto cuántico, ambos se convierten en un fenómeno cuántico más grande puesto que quedan entrelazados. Solo es posible, en todo caso, experimentar una sola mente. Las demás mentes, siendo reales, escapan de nuestro alcance en cada caso. Existen infinitas mentes, todo en acuerdo con la amplitud de la función de onda. En la base de esta idea hay un hecho elemental: la luz –que es una forma de energía– existe en distintas frecuencias. Ulteriormente, es posible decir sin ambages que existen ilimitadas o incluso infinitas frecuencias. Pues bien, exactamente en este mismo sentido existen numerosas –digamos ilimitadas o infinitas– mentes. La interpretación de las múltiples mentes es manifiestamente no-local.

Es posible decir que esta es una interpretación distintivamente filosófica, y que no hay evidencias empíricas que la soporten. Sin embargo, no es necesario que haya evidencias empíricas pues puede comprenderse fácilmente. Es bastante más que un experimento mental. Se conserva el carácter probabilístico de la mecánica cuántica, se afirma la idea de indeterminación, y la no-localidad queda, por así decirlo, ratificada. Un aspecto importante es que esta interpretación implica lo que se ha llamado una “inmortalidad cuántica”.

21-. La interpretación de la función de onda geométrica

La mecánica cuántica concibe a la función de onda esencialmente en términos de dos herramientas: matrices –que es notablemente la obra de Heisenberg y Born–, y en términos de la ecuación de Schrödinger, es decir, en formas diferenciales. Hasta la segunda década del siglo XXI esta había sido la forma de entender el tema. Pues bien, a partir de 2011, en especial gracias al trabajo de B. I. Lev (2011), emerge la interpretación de la función de onda en términos

geométricos. Si ya, en otro contexto, Gödel había emprendido una revolución mediante la geometrización de la lógica, con esta interpretación nace una geometría cuántica y una nueva forma de entender la función de onda. Desde luego, gracias a Minkowski, algo análogo ya había sucedido gracias a Einstein, lo que da lugar al nacimiento de la teoría de la relatividad.

Así, la naturaleza del electrón se asume que es geométrica. Una verdadera novedad que ayuda a precisar una comprensión más bien vaga de la función de onda, pero que tiene evidentes desarrollos tecnológicos. La solución de la ecuación de Dirac admite una respuesta geométrica.

En esta interpretación, y en marcado contraste con la comprensión de los múltiples mundos y de las múltiples mentes, se afirma que la realidad es el resultado de múltiples funciones de onda que interactúan entre sí. Se hace imperativo entender estas diversas funciones de onda y sus interacciones. La adopción de la función de onda geométrica es, no sin los trabajos de Lev, el resultado de la colaboración entre Cameron y Suisse (2018).

Dos aspectos merecen ser mencionados con respecto a esta interpretación. De un lado, esta afirma el carácter discreto del tiempo, el espacio, y el mundo, a partir de un elemento técnico que es la gravedad cuántica de Lorentz. En otras palabras, se trata de la aproximación a la gravedad cuántica en términos discretos, y no ya continuos. De otra parte, al mismo tiempo, esta interpretación le concede una favorabilidad a la teoría de cuerdas – acaso la más favorable en el logro de la gravedad cuántica. En contra de la teoría de cuerdas, sin embargo, se puede consultar el postulado de Smolin (2006). Adicionalmente, el tema se ocupa de un espacio-tiempo difuso, así como de una geometría no conmutativa.

Dicho en una palabra, la función de onda es una entidad geométrica, lo cual significa que es una entidad autocontenida. En cualquier caso, debe quedar en claro que el trabajo que lleva a cabo esta interpretación consiste en un trabajo de síntesis gracias a una geometrización del problema.

22-. Interpretaciones epistémicas

En términos generales, las interpretaciones epistémicas de la mecánica cuántica establecen que las probabilidades cuánticas constituyen límites acerca de lo que podemos saber o lo que es dado creer racionalmente de los comportamientos cuánticos. De manera tradicional estas interpretaciones están sujetas a la lógica formal clásica, saben y se ocupan por tanto de paradojas, y sus sistemas son bivalentes. Por ello mismo, se acentúa o se rescata o se hace inevitable –según se prefiera– la dicotomía entre la relatividad y la cuántica. Este carácter bivalente constituye una seria limitación cuando se las compara con el espectro, inmensamente más amplios de las lógicas no-clásicas. Aprovechemos esta oportunidad para decir que ninguna de las interpretaciones sobre la mecánica cuántica sabe de lógicas no-clásicas; ni siquiera la interpretación modal. He aquí o bien un vacío, o bien una oportunidad. La razón de base es que todo está situado entre dos teorías: la relatividad general de Einstein, y el aparato desarrollado por Born, Heisenberg y Schrödinger principalmente y luego modificado y/o ampliado por tantos otros.

Esta sección sirve para señalar que recientemente ha emergido una distinción más sutil entre las interpretaciones epistémicas de la mecánica cuántica y alguna interpretación doxástica de la misma (Cabello, 2017)²¹.

23-. Otras interpretaciones

Dado el carácter probabilístico de la teoría cuántica, cabe una segunda mirada sobre la teoría de probabilidades. Pues bien, es entonces cuando surge un espacio sobre la teoría de propensiones, la cual es, a su vez, una interpretación de la teoría clásica de probabilidades. Se habla entonces de una propensión, o tendencia o disposición física para que se produzca un determinado resultado de un cierto tipo. Se trata de causas intencionadas por frecuencias relativamente estables. Sirven específicamente para explicar por qué razón al repetir un expe-

21 Para una lectura crítica de las interpretaciones epistémicas, recomendamos el trabajo adelantado por Ruebeck, Lillystone y Emerson (2019).

rimento se deben producir resultados aproximados o esperados que puedan entonces ser predecibles. Popper se ocupó de este tema en la *Lógica del descubrimiento científico*.

Pues bien, en el abanico de interpretaciones de la mecánica cuántica, la teoría de propensiones es considerada como una interpretación que permite establecer lo que se denomina un carácter frecuentista de la teoría; es decir, un carácter realista de la misma. Para una visión global de este tipo de interpretaciones, véase la propuesta de Suárez (2009). Evidentemente, se trata de una interpretación ontológica y realista de la mecánica cuántica.

Al lado de la comprensión de propensiones, vale mencionar, igualmente, el superdeterminismo como una de las interpretaciones de la teoría cuántica. En este caso, se trata sencillamente del teorema de imposibilidad de Bell. Dado que ya nos hemos ocupado del mismo en el capítulo primero, podemos omitirlo en este lugar.

* * *

Como se aprecia, emerge ante la mirada un abanico amplio, sorprendente, en muchos aspectos técnico, pero filosóficamente provocativo, de interpretaciones. Es sobre este tema que volvemos inmediatamente la mirada.

Capítulo 3:

¿Por qué es bueno que haya múltiples interpretaciones?

Vayamos al origen de todas las cosas en el contexto que nos ocupa. Habiéndose doctorado en termodinámica, y siendo uno de los más importantes científicos en el tema, Planck sabe que cuando se calienta o quema un material determinado comienza a generar rayos lumínicos; a medida que la temperatura se eleva, pasa al rojo, al amarillo, al violeta. La temperatura es la del cuerpo, generalmente sólido. La combinación de colores: el rojo, el azul y el verde produce el blanco, que puede verse a elevadas temperaturas. El cambio de color no depende de la superficie, es principalmente un efecto volumétrico. Aunque él no reparó en este detalle, los gases no emiten una radiación continua sino discreta, no dependiente de la temperatura, como pudieron apreciarlo los espectroscopistas del siglo XIX. De manera singular, para un cuerpo de radiación negra el color depende de la temperatura. Planck comienza sus investigaciones sobre la radiación de un cuerpo negro en 1895. Decide entonces desplazar la atención de los rayos lumínicos al estudio mismo de los componentes de la materia, concebidos como osciladores elementales del átomo que emite la radiación, advirtiendo una cosa: para entonces, Planck no era atomista. Un giro semejante no resolvió el problema, pero le permitió simplificar la interpretación del fenómeno empírico.

Hay algo interesante en esta historia personal que cambiaría la historia de la ciencia, reiterémoslo. Su tutor le había recomendado no estudiar física, puesto que, sostenía von Jolly, ya estaba terminada; es decir, ya se había logrado saber todo lo que se podía saber sobre la misma. Podríamos continuar esta historia, pero lo esencial ya queda expuesto: lo que lleva a cabo Planck es un proceso de interpretación. Tanto es así que Planck se ve conducido a comprender que la radiación térmica sucede de tal manera que esos osciladores elementales deben poseer números enteros, cuantos discretos, de energía: la energía está cuantizada, y lo está en cantidades minúsculas. Planck escribe el

artículo sobre el tema y lo publica en diciembre de 1900. Conservador, escéptico, Planck no estará enteramente convencido de su propio descubrimiento; y no lo está a pesar de la conferencia que presenta ante la Sociedad Física Alemana el 14 de diciembre de aquel año.

Solo cinco años después, trabajando también en la interpretación sobre diferentes relojes que podrían sincronizarse, o no, Einstein descubre el artículo de Planck, sobre el cual nadie había reparado seriamente, y llama la atención sobre él.

La interpretación está en la génesis de la revolución cuántica. Pero la interpretación es, manifiesta, absolutamente, de cabo a cabo, un acto, un proceso de imaginación. En verdad, una interpretación no es un proceso asociativo, tampoco es el seguimiento de un hilo de pruebas o de argumentos, y mucho menos se trata de análisis de datos. Es la imaginación creativa la que está en juego y logra ver fenómenos, problemas, dimensiones, posibilidades antes inexistentes. Y trata de desentrañar significados, consecuencias, implicaciones, contextos; no en última instancia, orígenes y finales.

En unas ocasiones, una interpretación es un mecanismo de simplificación, como acabamos de observar. En otras, se trata de un cambio total de foco, que permite nuevos *insights*. La inteligencia en ciencia estriba exactamente en la capacidad de interpretación, y en definitiva, ella implica la propia capacidad de desafío, de apuesta, de riesgo. En otro contexto hemos hablado incluso de la investigación como ludopatía (Maldonado, 2018c). Si la inteligencia puede definirse como la capacidad de resolver problemas, es más bien por el uso que se haga de la información disponible. Dicho de otra manera, la inteligencia es “uso de información”, por eso resulta en ocasiones innecesario establecer diferencia entre la inteligencia artificial y la llamada inteligencia natural (Giraldo, 2017).

Recalquemos en lo siguiente. En general, una interpretación de la mecánica cuántica consiste en un trabajo teórico que vincula el formalismo matemático con determinados fenómenos físicos de interés; ulteriormente, con lo que podamos decir que es el mundo, el universo o la realidad. El trabajo de interpretación es esencialmente un trabajo

filosófico. Ello no impide que, en determinadas ocasiones y según si se hace necesario, dicho trabajo pase, como es efectivamente el caso, a través de consideraciones matemáticas. Ello no debería ser, en modo alguno, un motivo de zozobra. La matemática es, dicho en general, sencillamente un magnífico lenguaje; a saber, el tipo de lenguaje que permite comprimir en fórmulas, ecuaciones, diagramas o grafos aquello que de otra manera requeriría muchas palabras para ser expresado. Volveremos sobre esta idea.

Podemos decir que existen cuatro referentes principales en las interpretaciones de la mecánica cuántica. Estas son: en primer lugar, el aparato matemático que comporta las ideas y contribuciones de Born, Heisenberg, Dirac, Pauli y Schrödinger. El más elocuente intérprete del formalismo es, no cabe duda alguna, Bohr. Es así como se da el arduo debate del V Congreso Solvay, en el que la posición dominante fue la del danés. Sobre esta base y siempre en el marco del debate de Copenhague, emerge el artículo de EPR, cuyo inspirador es Einstein. Debe quedar claro, y lo hemos señalado suficientemente en el capítulo anterior, que esas variables ya habían sido propuestas por de Broglie y aparecen de nuevo en EPR. El segundo referente es la mecánica bohmiana y la idea de la onda piloto o la de variables ocultas. El tercer referente es el entrelazamiento cuántico, desarrollado originariamente por Bell, aunque aparece implícito en EPR. De hecho, ya Schrödinger lo había puesto en evidencia. Vienen luego los desarrollos pioneros a partir de los trabajos de Shimony, Zeh, Zeilinger y otros hasta la fecha que conduce a la criptografía y la teletransportación cuánticas. El cuarto eje referencial es la idea de la decoherencia cuántica formulada inicialmente por Zurek y recogida por otros.

El tema de este capítulo implica de entrada una posición. Antes que una dificultad o un marasmo o algo semejante, es altamente positivo que existan más de veinte interpretaciones. El objetivo de este capítulo consiste en explorar por qué razón es algo favorable, en qué sentido y qué se sigue de ello. Esto permitirá continuar allanando ampliamente el camino en la tesis general del libro.

La ciencia cuántica, dicho en general, constituye una revolución científica. Se trata, notablemente, de una relación con respecto a la

ciencia clásica o moderna, análogamente a como la ciencia clásica fue una revolución con respecto al medioevo. Quisiéramos destacar inmediatamente el primer rasgo revolucionario de la física cuántica. Es el hecho de que:

- i) Vemos cosas que no entendemos, y
- ii) Montamos y hacemos experimentos que no entendemos

Como es sabido, dos aspectos saltan inmediatamente ante la mirada sensible: de un lado, se trata de la dualidad onda-partícula, y los problemas que genera. Y de otro lado, al mismo tiempo, se trata de la interferencia del electrón o el fotón consigo mismo produciendo resultados perfectamente contraintuitivos.

Es lo que sucede exactamente ya a partir del experimento de Young de la doble ranura, y a fortiori con todos los demás experimentos²². Quizá lo más sorprendente es que, al espiar el paso de la “partícula”, de la “onda” o de la “partonda”, el comportamiento de onda desaparece y aparece nítidamente el comportamiento corpuscular. Moraleja: cuando el objeto cuántico “se siente” espiado, deja de comportarse *en forma extraña* para exhibir el comportamiento esperado.

Esto implica lo siguiente: tienen lugar comportamientos que no cabía esperar en modo alguno. Al mismo tiempo, el aparato cognitivo disponible –conceptual y matemático– es incapaz de explicar lo que sucede. Dicho de manera general, la realidad sucede de forma que no se ve, y para lo cual la percepción es sencillamente insuficiente o imperfecta. Este es el rasgo, al mismo tiempo cultural, social, filosófico y científico más sorprendente, particularmente cuando se lo ve desde el punto de vista de la tradición occidental.

Sucede aquí algo análogo a dos revoluciones fundamentales que suceden en la misma época del desarrollo y consolidación de la mecánica cuántica. Una sucede al interior de la propia mecánica cuántica, y la otra es externa, pero responde a un mismo clima académico, científico y de investigación.

22 (cfr. “Key experiments and wave-particle duality”, en las referencias al final, página web).

En el primer caso, se trata del descubrimiento y formulación de la indeterminación por parte de Heisenberg (1927). La tesis no admite dilaciones: la realidad misma es indeterminada; independientemente del observador, y de todo lo que pueda decirse sobre él o ella. Desde Anaximandro, nadie había formulado una tesis semejante en toda la historia de Occidente con tal claridad, abiertamente. En el segundo caso, se trata del cisma provocado por el teorema sobre la incompletud de Gödel, que pone en evidencia la inutilidad de cualquier modelo explicativo de corte formal y deductivo, por tanto, algorítmico y axiomático, tanto como la recusación de la tautología en los modelos comprensivos del mundo y la realidad.

En el caso de Heisenberg, la idea no es difícil: el mundo posee una indeterminación implícita que el sujeto no puede superar. En el caso de Gödel, es el reconocimiento de que hay cosas que son verdaderas y no sabemos (exactamente) por qué. Pues bien, con la mecánica cuántica se trata de la tercera arista de un triángulo, que afirma: hay cosas que observamos y no caben en el aparato cognitivo disponible.

Estos tres ejes revolucionarios implican un claro elemento de complejidad, a saber: debemos poder estar abiertos a fenómenos que no caben en el lenguaje, en la percepción, en los conocimientos habidos. Se trata, manifiestamente, del hecho de que para ver fenómenos abiertos, o también, fenómenos inesperados y para los cuales ni el lenguaje ni las herramientas conceptuales disponibles logran abordarlos, se requiere entonces una estructura de mente abierta. Algo que se dice fácilmente pero que es sumamente difícil de llevar a cabo. El conocimiento humano está siempre, de entrada, sesgado; y es solo a través de un muy arduo trabajo que logramos superar los sesgos; por ejemplo, los atavismos, o las tradiciones, o las estructuras corrientes y normales –de pensamiento y de vida.

Digamos que prácticamente todo el aparato semántico, matemático, lógico y heurístico de la mecánica cuántica es nuevo, si se lo mira con los ojos del pasado, y que cada vez se va haciendo más nuevo. Es lo que observamos, para decirlo de manera puntual, con el teorema de Bell, la electrodinámica cuántica, el descubrimiento de y el trabajo con el efecto túnel, la incorporación del efecto Zenón, y otras carac-

terísticas. Podemos hablar sin dificultades, entonces, de avance en el conocimiento. Un tema sensible que conduce al eslabón siguiente que es hablar de historia de la ciencia.

Esta situación apunta, sin la menor duda, a una revolución científica. Pues bien, es exactamente en este marco que emergen múltiples interpretaciones.

Las múltiples interpretaciones²³ constituyen una señal de vitalidad de la investigación, antes que de dificultades. Esta constituye la plataforma de estudio aquí.

Existen diferentes clasificaciones de las distintas interpretaciones en términos de diversos conjuntos que agrupan a varias de ellas, a diferencia de otros grupos. No es ese nuestro interés aquí. Lo que debe llamar inmediatamente la atención es la misma pluralidad, en primer lugar; y luego también, lo que significa esta pluralidad. Evidentemente que hay unas comprensiones de tipo ontológico o realista o empirista —como se prefiera— y que hay otras de carácter más especulativo, o integrador, o radical con respecto a la historia de la ciencia. Hay incluso alguna que es presentada como una teoría, lo cual no es, en absoluto contradictorio. En sentido amplio, desde luego que una interpretación es o puede ser una teoría; o al revés. Sin embargo, bien vale la pena considerar qué es una interpretación, el verdadero talón de Aquiles o acto Prometeico en ciencia en general, según se prefiera; es decir, en física, o química, o biología, o cualquier otra.

23 El sitio repositorio *PhilPapers* con edición de A. Wilson registra 263 artículos sobre el tema, a las que hay que agregar 222 artículos sobre la mecánica bohiana, 94 sobre las interpretaciones de colapso, 184 sobre la interpretación de Copenhague, 76 sobre decoherencia, 244 sobre la interpretación de Everett, 301 sobre el problema de la medición, 66 sobre interpretaciones modales, 311 sobre probabilidades, 30 sobre las interpretaciones relacionales, 24 sobre las transaccionales, 214 sobre el papel de la conciencia. Cfr. <https://philpapers.org/browse/interpretations-of-quantum-mechanics-misc>. A esto habría que agregar numerosos capítulos de libro, y libros sobre el tema. Como se aprecia sin dificultad, todo un continente de exploraciones, interpretaciones, debates, problemas, la inmensa mayoría con inteligencia y agudeza.

Una interpretación consiste en un procesamiento de información por parte de un agente de tal suerte que cumple biológicamente una función precisa: adaptarse mejor a un medioambiente que no controla. Así, antes que meras elucubraciones mentales y demás, las interpretaciones tienen ventajas selectivas desde el punto de vista biológico. Esto significa que la existencia de múltiples interpretaciones es una señal de vitalidad del pensamiento y una búsqueda de más y mejores caminos de investigación; y entonces, sin ambages, de vida, de evolución. Solo que, contra los afanes academicistas de los científicos, la adaptación es un fenómeno local que permite un proceso a largo plazo: procesamiento de información, inteligencia, conocimiento y, por tanto, evolución. La condición para la adaptación y la evolución es el aprendizaje. Por ejemplo, la ponderación de las interpretaciones habidas o propuestas.

Ahora bien, no existe, en absoluto, solamente un criterio internalista o bien, exclusivamente externalista para una interpretación. Esta es el resultado complejo de numerosos factores. La historia y la filosofía de la ciencia ya han dejado esto suficientemente en claro.

Crear que las interpretaciones consisten en la comprensión teórica –por ejemplo, conceptual, o metodológica, o lógica– de una teoría o un modelo es falso por abstracto. En este plano, existe una compleja mezcla de factores psicológicos y racionales que se mueven a veces en direcciones contrarias y que el investigador busca, de alguna manera, compaginar. Al mismo tiempo, los investigadores son, en ocasiones, representantes de un cierto poder institucional que los hace posibles o que los apoya. Así, por ejemplo, existen lecturas católicas, cristianas, budistas, y otras, de la mecánica cuántica y lecturas desde la “nueva era” (“sanación cuántica” y cosas parecidas) que están por tanto sesgadas, análogamente a como había lecturas marxistas de la genética que le hicieron un flaco favor a la investigación. Los ejemplos se pueden multiplicar sin dificultad. Manifiestamente, la mecánica cuántica es ciencia de punta y quien logre desentrañar, interpretar y apropiarse lo mejor suyo tendrá ventajas científicas, y entonces tecnológicas, y en consecuencia económicas, y por tanto sociales y culturales sobre quienes no lo logren. La ciencia es, además, una actividad política.

El futuro será cuántico. Y no lo será solo en el sentido de las tecnologías cuánticas, también desde el aprovechamiento de la energía, la única posibilidad de construir, por lo demás, una nueva economía.

Con esto lo que queremos sostener es que no existen interpretaciones neutras. Tampoco la nuestra quiere serlo. Solo que no pretendemos única o principalmente elaborar una interpretación (más) de la mecánica cuántica. Ya tendremos la ocasión de hacer más explícita esta afirmación.

En verdad, una mirada al espectro de las interpretaciones comporta elaborar un cruce entre la historia de la ciencia con la sociología de la ciencia, los estudios culturales sobre ciencia y tecnología, la antropología de la ciencia y la propia psicología del descubrimiento científico, así como desde el punto de vista de las políticas de ciencia y tecnología, por ejemplo. Digámoslo *en passant*, sin que sea por lo demás el núcleo de nuestro interés aquí: la casi totalidad de interpretaciones son llevadas a cabo por hombres, y solo en una ocasión, y algo tangencialmente, aparece una mujer. Esta es solo una ilustración, no un argumento. En el desarrollo de la física clásica, y a partir de 1900 en el desarrollo de la física cuántica, no ha habido mujeres sobresalientes no porque no las hubiera, sino por el sesgo machista que primó en las matemáticas, en la física y también en otras ciencias.

La mecánica cuántica es un asunto de álgidos, sensibles, interesados, bien dispuestos e inteligentes argumentos. Esta es la verdadera complejidad del asunto. Se trata, manifiestamente, de un tema que no deja insensible a una inteligencia fina y que merece la mayor seriedad.

Pues bien, nuestra tesis al respecto no es que esta (digamos, x) interpretación es preferible a aquella (por ejemplo, y); ni siquiera que lo es, por esta y aquella razón. Un debate semejante entre un abanico amplio de más de veinte interpretaciones argumentadas jamás se había presentado en la historia de la humanidad, y ciertamente no en un tiempo tan breve, alimentándose con el tiempo, a medida que crece la comunidad científica, que las bases de datos son más amplias, que hay más experimentos, en fin, nuevos desarrollos en ámbitos como la filosofía y las matemáticas, por ejemplo. Desde que se formaliza en 1927, nuevas interpretaciones van apareciendo, hasta, como se-

ñalamos, trabajos serios con fecha del 2018 y 2019. Verosíblemente una situación semejante seguirá sucediendo en el futuro inmediato. Nuevas interpretaciones podrán emerger. Este es el hecho primario.

Históricamente hablando, una situación semejante solo encuentra parangón entre ese espectro amplio que se denomina: los filósofos presocráticos, los cuales tenían, dicho de manera puntual, un problema común. Por esto mismo todos ellos escribieron un libro llamado: *ta physis*; es decir, sobre la naturaleza. También en un tiempo breve de cerca de cien años surgieron comprensiones, explicaciones, interpretaciones sobre un mismo problema acaso comparables con lo que acontece alrededor de las ciencias cuánticas. Hasta que se produjo un giro: surgió el pensamiento abstracto en la Grecia clásica, y vino gente como Platón, Aristóteles, Euclides, entre otros. La dificultad enorme radica en que el pensamiento abstracto se tradujo inmediatamente como simplificación. Pues bien, este es el pilar de nuestra línea de reflexión aquí: no es deseable ni ya, hoy, históricamente hablando, y hacia futuro, que el pensamiento abstracto signifique necesariamente simplificación. El pensamiento abstracto fue, indudablemente una ganancia; pero el costo fue demasiado elevado, a saber: la reducción de la multiplicidad, de la pluralidad, en fin, de la complejidad. Hoy es posible un pensamiento abstracto no simplificador. En consecuencia, un pensamiento abstracto que no necesita hablar de una teoría simple, unificada, o generalizante de todas las cosas. Este no es un hecho menor, en absoluto.

Una diversidad de interpretaciones –diversidad, y no ya como siempre fue el caso en numerosos ámbitos del conocimiento, solamente dos o principalmente dos corrientes de pensamiento– es manifiestamente la expresión de la importancia de un asunto que se encuentra lejos de ser evidente. En efecto, la opinión más generalizada en la comunidad de los físicos es que la existencia de numerosas interpretaciones de la mecánica cuántica es una señal de dificultad y un obstáculo, como si se deseara una interpretación única o definitiva. Verosíblemente, una comprensión semejante sería, entre varias otras, la gravedad cuántica. Disentimos de esa opinión mayoritaria de los físicos.

El trabajo alrededor de las interpretaciones, que es, por lo menos cuantitativamente, el más significativo desde el punto de vista con-

ceptual, es, dicho de forma gruesa, un afán verdaderamente filosófico, pero con claros visos existenciales por *comprender* qué es la realidad, el mundo, el universo, la naturaleza, y con ella, cuál es el lugar que le corresponde a la vida y a los propios seres humanos. Para una parte de los investigadores no es suficiente con producir física de materiales, tecnología y computación con base en principios y comportamientos cuánticos. Además, es preciso entender qué es esa extraña teoría (Ball, 2018) y por qué las cosas son como ella dice que son. Entender esa teoría rara (*weird*) no es otra cosa, afirmamos, que entender que el mundo es cuántico.

Nuestra época se caracteriza porque las explicaciones de los más importantes aspectos de la realidad son alta y crecientemente contraintuitivos, y ello en diferentes planos. Cada vez importa menos la percepción natural y el peso de los cinco sentidos. La mecánica cuántica inaugura en el siglo XX esta tendencia que, con todo, no se reduce a, ni se agota en, ella. Una de las importantes hijas de la teoría cuántica es la teoría inflacionaria del Big Bang. Pues bien, esta teoría tiene un fundamento matemático, y para nada observacional. Lo que sostiene a la teoría inflacionaria del Big Bang no es la observación, sino un muy robusto aparato matemático. La astronomía en general, y la astrofísica y la astroquímica en particular, están al servicio del aparato matemático. En verdad, la astronomía, la astrofísica y la astroquímica cumplen tan solo el papel de verificación, pero no de confirmación del modelo de la cosmología científica. Sin ambages, estamos explicando cosas que no vemos al mismo tiempo que estamos viendo cosas que no podemos comprender. Dos caras de la moneda, si cabe la expresión. Un capítulo de esta astronomía son los agujeros negros, los “objetos” más simples del universo, cuya primera fotografía –imperfecta y todo dada la tecnología disponible– apenas se logró en el año 2019.

La cosmología científica conoce unos límites absolutos. Esto es exactamente lo que acontece con dichos límites, hasta la fecha: la escala de Planck, el tiempo de Planck y la masa de Planck. La búsqueda de la teoría de la gravitación cuántica consiste exactamente en lograr una teoría que nos permita ver lo invisible, a saber: el origen de este universo. Literalmente, el nacimiento del tiempo, del espacio, y de la energía; y con ellos, el nacimiento de las cuatro fuerzas funda-

mentales. Pues bien, ya el origen de la materia está bastante bien explicado, si bien quedan aún numerosas lagunas. Está establecida la transformación de una parte de la energía en materia que constituye la primera gran inflexión en la historia — conocida — de este universo. Asimismo, está establecida incluso la fecha aproximada de la segunda inflexión, consistente en la transformación de un aparte de la energía y la materia en vida, hace alrededor de 3.800 millones de años. Adicionalmente, se han ganado muchas luces acerca del origen de la vida, sin que el tema quede definitivamente dirimido. No sucede, sin embargo, lo mismo con la materia oscura y la energía oscura, que son cerca del 95 % del universo. Así las cosas, el problema de las múltiples interpretaciones de la mecánica cuántica tiene, incluso a pesar de algunas disconformidades de varias entre sí, el hecho de que se trata de hacer visible lo invisible. El título del *paper* de Heisenberg de 1927 es ilustrativo al respecto; se trata de la dificultad de ver fenómenos en la teoría cuántica.

Cabe recordar aquí a D. Hilbert. Debemos poder ver los fenómenos cuánticos, no ya simplemente sus efectos; vamos a poder verlos (Hilbert, 1927): *wir müssen wissen, wir werden wissen*. La dificultad, como ya lo pusieron por caminos distintos entre sí Heisenberg, Gödel y Turing, es que no lo sabremos por vía de razonamientos deductivos, formales, en fin, axiomáticos; y manifiestamente tampoco con base en los sentidos. En una palabra, no lo lograremos ver por vía de algoritmos, ni tampoco a través de aquello que nutre al cerebro según la más rancia tradición: “nada llega al cerebro que no pase a través de los sentidos”. Nos encontramos ante un magnífico desafío. El mundo cuántico es susceptible de ser *concebido*, esto es, imaginado; pero no visto, y ciertamente, no representado (“el mundo como representación”). Después de recorrer a cada una de las interpretaciones sobre la mecánica cuántica, este es el punto de partida en el que nos dejan todas las interpretaciones habidas hasta el momento. Sí hemos ganado terreno, contra toda apariencia y escepticismo.

Nos encontramos en las antípodas, como ya señaló Hilbert, del *ignoramus et ignorabimus*. Solo debemos poder saber renunciando a los saberes y conocimientos adquiridos hasta la fecha; o bien, lo que es equivalente, reconociendo que todos los conocimientos habidos hasta

el momento son perfectamente insuficientes de cara a los límites de Planck. La imaginación, como suele suceder, es la mejor guía para el entendimiento. Este puede abandonarse con confianza a aquella. Contra todas las advertencias y temores de una tradición centrada en el sentido común y en el peso de los sentidos.

Digamos una cosa: confiar en el sentido común y en los sentidos cumplió una función selectiva, a saber: nos permitió llegar hasta aquí, hoy. Nos permitió eso que en la tradición se llamó la complementariedad entre “realismo” –por ejemplo, empirismo–, y el peso de la razón ajustando, afinando, corrigiendo, a veces, a los sentidos. Pero hoy –a partir de 1900– y en adelante, podemos ya, si cabe la expresión, dejar los sentidos como garantes del mundo y la realidad –esto es, muy exactamente, de la ciencia, la filosofía y la epistemología– en un segundo plano; sin renunciar, en absoluto a ellos. Debemos poder confiar más en la complejidad del mundo y la naturaleza, en la fantasía, las pompas de intuición y los actos ideatorios, y en las tecnologías (vida artificial e inteligencia artificial) para entender y “ver” lo que sea real y posible.

Muy ampliamente, la carga de trabajo en torno a la mecánica cuántica ha sido en el aparato matemático. Un aparato que nace en 1925-27 pero que conoce otros desarrollos, tales como el teorema de Bell, la teoría de la electrodinámica cuántica (QED), y otros. Pero, sostenemos, no se ha reparado suficientemente en el núcleo de la misma, a saber: hay fenómenos que pueden y deben ser comprendidos pero que convocan a las mejores capacidades de imaginación, lenguaje y comprensión. El problema se encuentra más allá de las matemáticas, aunque ellas ayudan a señalar la dirección en la que podemos movernos. Ellas mismas son entidades físicas no materiales que no están en el tiempo ni en el espacio, y que, sin embargo, son el resultado de un tesonero trabajo por parte de los investigadores.

Las matemáticas dejaron hace ya un tiempo de ser sencillamente lazarillo de la física, que fue lo que aconteció en especial en la modernidad. Las matemáticas han cobrado vida propia, y van bastante más adelante que la experimentación y la observación. Pensar matemáticamente consiste exactamente en pensar en posibilidades –espacios de fase–,

e incluso en imposibilidades (cohomología). Cultural y socialmente hablando, las matemáticas en general cumplen una función enormemente liberadora. Existen, dicho grosso modo, las matemáticas de sistemas continuos y, gracias a la teoría de conjuntos, a la cuántica y al estudio de sistemas de complejidad reciente, las matemáticas de sistemas discretos, uno de cuyos capítulos es la combinatoria. Pensamos ya hoy no solamente lo real —lo cual es importante, pero demasiado poco—, además y principalmente, cada vez más, pensamos lo posible y lo imposible. Que es, queremos decirlo abiertamente con base en el interés de este libro, el mundo cuántico.

Manifiestamente que los datos (hechos) —*facts*— constituyen la base de la buena ciencia y uno de los criterios más sólidos para trazar criterios de demarcación con respecto a la pseudociencia. Sin embargo, con la mecánica cuántica, estos hechos no son ya de carácter empírico en el sentido natural de la palabra. Es decir, la percepción natural y los sentidos no son suficientes para sostenerlos. Esta es la limitación de cualquier comprensión de tipo local u ontológica o realista (en el sentido clásico de la palabra). Los hechos son, cada vez más, fenómenos conceptuales. Esta es la inflexión que el transcurso del siglo XX hasta hoy, ha venido produciendo. Ayer, los hechos eran tozudos. Toda la filosofía —por lo demás pesimista— de Wittgenstein consiste en esto. Por lo menos el primer Wittgenstein. Hoy, los hechos están abiertos, saben de no-localidad, entrelazamiento e incluso del andar cuántico (*quantum walk*); esto es, de aleatoriedad.

Sostenemos que el mundo es cuántico, incluso aunque se trate de una teoría incompleta. La completud no viene —no puede venir— del lado de la teoría de la relatividad. Pretender una teoría completa es ya una ilusión. Debemos poder liberarnos de esa apariencia. La idea de una teoría completa conduce a la ciencia por el camino de la religión. Una teoría de un universo abierto y en constante evolución no puede ser completa en modo alguno. En contraste, tener una estructura de mente abierta significa reconocer que asistimos a un acercamiento asintótico a la explicación del mundo, el universo, la vida. La existencia de múltiples interpretaciones es un evidente signo del proceso asintótico —por tanto, no lineal, no teleológico. Sin embargo, al mismo tiempo, las limitaciones señaladas en esta diversidad de comprensiones ponen

en evidencia que el foco del problema se ha vuelto borroso; y decimos borroso, no difuso.

Un segundo aspecto merece ser destacado en el centro del abanico de interpretaciones habidas hasta el momento. No existe, no debe existir ninguna separación y mucho menos jerarquía, entre la ciencia y la filosofía. Una separación semejante fue uno de los errores de Descartes y la historia que se sigue de él. En realidad, la mecánica cuántica es el título de un problema, pero este problema no puede ser dirimido con una sola mano; se necesitan ambas. Hasta el momento, ha habido en general, un desplazamiento de la filosofía por parte de la física, y más exactamente por parte de la matemática, lo cual ha impedido una solución efectiva del problema.

Subrayemos esto: el problema consiste en establecer lo que sea el mundo, la naturaleza, el universo. Esto mismo es lo que expresamente reconoce Heisenberg en las famosas *Gifford Lectures* que dicta en 1955-56 en la Universidad de Saint-Andrews (Heisenberg, 1971). El obstáculo ha sido el observador, esto es, el acto de medición, con todo y el reconocimiento explícito de que el observador no necesita ser un agente humano, algo que ya es conocido suficientemente en el tema. Más ampliamente, es la turbulencia de un medioambiente el que funge como observador; y como se dice en el lenguaje de la cuántica, el que hace que la función de onda colapse. Pues bien, sostenemos que una comprensión de la física es imposible sin alcanzar paralela y contemporáneamente una comprensión sobre el observador y/o el medioambiente; superando cualquier comprensión de tipo estrictamente antropológico, el tema se aboca al papel mismo de la vida en el universo. Existen indicios, buenos avances, pero se encuentran en las laderas de la mecánica cuántica y en absoluto en su centro. Se trata, por ejemplo, de las intuiciones de Wheeler, de los trabajos de Kauffman, de las elaboraciones de Stapp, por mencionar algunos de los nombres más destacados.

La física se caracteriza por un espíritu de totalidad. Muy a la manera hegeliana, muy a la manera de Bohm, en fin, muy a la manera de Weinberg. La termodinámica, por el contrario, ha sido, si se nos permite la expresión, más relajada en esto. La física debe poder liberarse del

sueño de una teoría completa de la realidad. Esto es lo que enseñan las múltiples interpretaciones sobre ella. En otras palabras, asistimos al mito de Sísifo, o a los sufrimientos de Prometeo; dos expresiones de una misma verdad.

Evidentemente que existe una disyunción entre la relatividad general y la cuántica. Es innegable que ambas apuntan, por decir lo menos, a la otra, y ambas a una *terra ignota*. Es evidente que es inevitable el sueño de hacerlas compatibles o bien, como se ha sugerido ya en numerosas ocasiones por parte de distintos autores, buscar una alternativa que o bien las contenga a ambas o que las supere. Sería supino negar estos hechos.

No obstante, las interpretaciones formuladas hasta el momento no deben ser tomadas como teorías, sino en su valor heurístico, es decir, como esfuerzos por superar limitaciones y restricciones. Digamos, de cara al capítulo que sigue, que el mejor resultado de esas interpretaciones es el descubrimiento del entrelazamiento cuántico, el cual subraya, una vez más, la importancia o inevitabilidad de la no-localidad.

Pensar en términos cuánticos equivale estrictamente a pensar en posibilidades; mucho más y mucho antes que en probabilidades, y mucho menos como si fuera una teoría estadística. El mundo cuántico está constituido de posibilidades. El mundo clásico, por su parte, esencialmente de actualidades, incluso aunque sepa de posibilidad (en cada caso, singular); pero no es esto lo central suyo, según parece por la tradición. El verdadero problema, todo parece indicarlo, es que Occidente no estuvo nunca acostumbrado a pensar en posibilidades, solo en la actualidad —el ser, la realidad, lo dado, lo que está ahí, y otras variaciones del mismo tema. Incipientemente Aristóteles trató de pensar el tema, en términos de potencialidades. Pero ese fue un momento efímero. Lo que terminó prevaleciendo fue su idea de la causalidad, y el motor primero traducido en dios.

La multiplicidad de interpretaciones constituye expresiones de una muy fuerte tensión, a saber: las dificultades de romper con una tradición que descansa fuertemente en la percepción natural. En otras palabras, la dificultad de reconocer y aceptar las consecuencias de

lo que comporta ver fenómenos que no se pueden explicar y realizar experimentos con resultados que no aceptan comprensión en el aparato disponible.

Una observación puntual se impone aquí. El lenguaje de la modernidad, como ha sido reconocido, se desarrolló para tres actividades principales: el cortejo, la descripción de un mundo que se descubría (a partir de 1942), y el comercio y todo lo que él representa. Fue, por consiguiente, un lenguaje vinculado a las cosas. La dificultad para la herencia de la modernidad estriba en que hoy en día hablamos de fenómenos contraintuitivos, tales como la información, el ADN, el ARN, el calentamiento global, la investigación, la solidaridad, y muchos más. Estamos desarrollando un lenguaje diferente (que ve realidades diferentes) a la modernidad.

Ha habido tres revoluciones científicas: la de la ciencia moderna, la de las ciencias cuánticas y la teoría de la información (Maldonado, 2020b). Podemos aventurar la idea que la tercera revolución científica encuentra condiciones de posibilidad de su surgimiento gracias a la segunda revolución. Pero que es verdaderamente la segunda revolución la que produce la más fuerte inflexión no solamente con respecto a la ciencia clásica, sino, además y fundamentalmente, con relación a la historia de Occidente –esa civilización que exalta el valor de la episteme. Y con ella, dicho *en passant*, el valor del individuo. La tercera revolución científica se anticipa, de paso, a la tercera revolución cuántica.

La cantidad y calidad de interpretaciones, y a su vez, el número de artículos y libros dedicado a cada una de ellas es una clara señal de que la mecánica cuántica apunta en una dirección fundamental, acaso como ninguna otra teoría. Los seres humanos necesitan una comprensión de lo que es “real” y lo que no lo sea, pero que ya no se corresponde a una realidad basada en materia o masa o energía; esto es, literalmente, una realidad objetual. Pues bien, la verdad es que, por paradójico que parezca, la teoría cuántica contribuye como ninguna otra teoría o concepción a la resolución del problema. Lo dicho en la Introducción, es la teoría que más ha sido confirmada, verificada, testeada, falseada. Ninguna otra, ni en la historia de la filosofía ni

tampoco en la historia de la ciencia había logrado esta robustez. Y sin embargo, al mismo tiempo, brinda una “respuesta” perfectamente inopinada, inaudita. Hay un viejo proverbio oriental que dice que los dioses castigan a los hombres concediéndoles los deseos que piden. El deseo era, luego de Newton, Kant, Hegel y varios más, alcanzar un conocimiento sólido sobre el mundo y la naturaleza. La alcanzan en la historia que, por así decir, va de Planck a Zeilinger, Fuchs o Vedral, por ejemplo, pero brinda una respuesta que genera eso: numerosas interpretaciones con diferentes tipos de relaciones entre sí. Se quería una respuesta, y se tienen múltiples. He aquí la base del tema. Una teoría cuántica más satisfactoria, como la que algunos grupos están desarrollando, unifica la materia, la energía y la información. Esa es una perspectiva que no se ha examinado plenamente.

Parte de la dificultad consiste en que se planteó la pregunta desde el mundo clásico, se obtuvo una respuesta desde el mundo cuántico, y entonces no se supo muy bien qué hacer con el mundo clásico y por tanto con su relación con el cuántico. La génesis del problema no admite, sin embargo, cuestionamiento alguno. Hay un tiempo límite absoluto: 10^{-43} segundos; hay un espacio, llamado escala de Planck igualmente absoluto como base: 10^{-35} metros; y hay también una masa que sirve como punto de partida sin más: la masa de Planck, definida como la masa contenida en una esfera con radio igual a la longitud de Planck que daría lugar a una densidad de 10^{93} g/cm³, o más sencillamente 21,7644 microgramos. Antes de estas medidas, el tiempo pierde sentido, la geometría deja de ser clásica, la materia se absorbe sobre sí misma. Es, literalmente, la nada cuántica; que no tiene absolutamente nada que ver con la nada clásica (esa nada que, al decir de Heidegger, nadea: *das Nichts vernichtet*). La nada cuántica es creativa, es un vacío creativo (Cassé, 2001; Vedral, 2010).

Precisemos. La dificultad estriba en que se asume que antes de los límites mencionados debe haber algo. Algo debe suceder antes de estos límites absolutos. Incluso, con la asunción de que las leyes de la física ya no se cumplen en ese umbral. Aun con el reconocimiento de que el espacio y el tiempo no son, en absoluto los mismos, y acaso no existen. La imaginación humana asume que algo debe haber “allí detrás”. Esta es toda la dificultad. En el fondo resuena la pregunta:

“¿Por qué el ser y no la nada?”. La dificultad de esa pregunta consiste en su carácter dualista o binario.

El universo puede ser entendido, sin mayor dificultad —y manifiestamente cada vez con menor dificultad a partir de los límites de Planck— hasta este instante y lugar que se erige como límite absoluto. Cabe incluso comprender que no todo sucede necesariamente, o acaso incluso que la aleatoriedad no reina sin más. Digamos: cabe entre aquel límite y el ahora un amplio umbral de conocimiento y aceptación, con todo y el muy mal llamado principio de incertidumbre, por ejemplo (aquí sí usamos deliberadamente mal el concepto). Todo el problema conduce hacia los eventos anteriores al tiempo, la escala y la masa de Planck. El espíritu humano no se satisface con límites; el espíritu no sabe de límites. La situación es, como se aprecia, apasionante.

Consiguientemente, se entiende bien, el problema que emerge es el de las relaciones entre lo que atávicamente se denomina el mundo cuántico y el mundo clásico. Debemos poder pensar, además, el lenguaje mismo.

Ha quedado establecido que no existe única e incluso no principalmente la decoherencia cuántica. Además, existe recoherencia cuántica (Maldonado, 2018b). El mundo cuántico, que es coherente sufre decoherencia (colapso de la función de onda), pero luego se recoherentiza nuevamente. El problema que queda abierto es si en el proceso hay pérdida de información o no. La primera ley de la termodinámica permite afirmar que se trataría de transformaciones de energía. Mientras esto se resuelve por completo, puede quedar en claro una cosa: el mundo clásico es un momento del mundo cuántico.

Precisemos esta idea: afirmamos que el mundo clásico no simplemente es el efecto del mundo cuántico, algo que sí queda establecido en buena parte de la bibliografía especializada en el tema. Lo que queremos decir, a partir de lo que precede es que el mundo clásico es una expresión o un momento o una fase —transitoria, por tanto— del mundo cuántico.

Ninguna de las interpretaciones habidas hasta el momento afirma algo semejante. Para decirlo en un lenguaje similar al que se utiliza

para hablar de una “teoría completa”, ninguna de las interpretaciones puede considerarse por lo demás como “una interpretación completa”.

Hay un hecho, implícita o explícitamente expuesto en las diferentes interpretaciones, que es que el mundo tiene un manifiesto componente cuántico. La discusión es acerca de la extensión o el porcentaje o la magnitud de la dimensión cuántica con respecto a la clásica. Este es todo el núcleo mitocondrial de las interpretaciones, y por ello es necesario ponerlas sobre la mesa, a plena luz del día, conocerlas y apropiárselas, epistemológicamente, por lo menos. Es decir, es imposible hacer ciencia y filosofía hoy por hoy sin tener un mapa básico del estado del arte sobre las interpretaciones de la mecánica cuántica. Esta es toda la justificación de este libro. Es la *conditio sine qua non*, simple y llanamente, para pensar hoy en día.

Queremos compartir nuestra más sincera convicción de que el panorama expuesto es importante y tiene todo el sentido. No se trata de escoger entre una y otra interpretación. No es esa nuestra finalidad aquí. Asistimos a un desarrollo de inteligencia que expresa, por lo menos implícitamente, el hecho de que tenemos ante nosotros, entre las manos un problema inescapable. Este problema es el de la mecánica cuántica y sus diversas comprensiones. No en última instancia, el tema hace referencia al papel de la imaginación, de la intuición, de una visión intelectual o un acto ideatorio relativamente al peso, fundamentalmente atávico, de la percepción natural y los sentidos. Según parece, requerimos de los sentidos para vivir y para explicar el mundo. Pero no podemos confiar enteramente en ellos. Nuevos desafíos, nuevos retos, nuevas posibilidades emergen, consiguientemente.

Es sobre esta base que, entonces, nos abrimos al capítulo que sigue a continuación.

* * *

Contra el denominador común de todas las interpretaciones habidas, sin embargo, precisemos una cosa. La creencia de que hay un observador —por consiguiente, un observador con una posición privilegiada— es errónea. Empírica, ecológicamente e incluso también desde

el punto de vista del entrelazamiento: el observador es observado; no hay un observador excelso. Esta es una creencia que resulta del antropocentrismo congénito de la humanidad occidental. La naturaleza pone en evidencia que existen redes; mucho mejor, redes dinámicas, y la idea de nodos pone en evidencia justamente que no existe un centro, y entonces, una periferia. Así como tampoco existe un pináculo, y entonces una realidad superior que se la mira desde arriba. Estas son asunciones, abiertas o tácitas de prácticamente toda la ciencia y la filosofía occidentales. Debemos decir que las dificultades que plantean las interpretaciones estriban exactamente en esta asunción. Y por ello mismo existen tantas y, mientras el asunto no se supere, seguirán surgiendo otras. Debemos poder tomar al pie de la letra el abanico de experimentos de la cuántica. Estos ponen de manifiesto, sin la menor duda, que lo que existe es un entramado, un conjunto de relaciones, o mejor aún, conjuntos de relaciones.

El primero de los méritos de la mecánica cuántica es que nos permite aprender a pensar en términos relacionales; o bien, mucho mejor, en interacciones. La indeterminación, se sigue, es una consecuencia de este hecho.

Queremos decir algo que es evidente a todas luces. Qué sea la filosofía es el objeto de la presentación, en términos académicos o no, por parte de cada filósofo acerca de lo que entiende por “filosofía”. Así, existen numerosas comprensiones acerca de la filosofía. Nunca una sola, y manifiestamente no una que sea canónica. Jamás podrá encontrarse una presentación y discusión de lo que sea la filosofía que no sea diferente de las demás. Los ejemplos serían profusos y, al cabo, podrían rayar con lo anecdótico. Pues bien, exactamente lo mismo acontece con la mecánica cuántica, subrayando incluso un aspecto que ya queda en claro a partir de la Introducción. La mecánica cuántica es la mixtura de un aparato matemático altamente técnico (*shut up and calculate*), y de profundas ideas e interpretaciones filosóficas. No una cosa más que la otra, incluso a pesar de las diversas líneas de interpretación expuestas en el segundo capítulo.

Si hay una esfera en la que las interpretaciones son el pan de cada día es en las artes; y por derivación, en la estética. Mientras que la ciencia

presuntamente trabaja con fórmulas, ecuaciones, datos, y hechos que, verosímilmente son incuestionables, las artes son un caldo de cultivo incesante para juegos de interpretación. O bien, como con acierto señala Wittgenstein, para juegos de lenguaje. No hay una única interpretación, una única comprensión en las artes. Y esa es su riqueza. Por ello mismo también, ya desde Platón, fueron objeto de sospechas; las artes siempre han sido políticamente incorrectas. Emerge en ellas toda esa dimensión polisémica, cromática, ambigua y ambivalente al mismo tiempo, llena de sentidos implícitos, silencios y ruidos, por ejemplo, de la subjetividad. Las artes siempre se han opuesto a los sistemas verticales, de pensamiento único, violentos. Desde Platón, se contrapuso la ciencia y el arte. Una fue, en la tradición, incompatible con el otro.

Pues bien, la riqueza de interpretaciones es, *prima facie*, una señal de vitalidad, mucho antes que un obstáculo o una debilidad. Se trata del esfuerzo por otorgarle un sentido a las cosas; un sentido que sea definitivo, o perdurable, o estable, y que no se preste a variaciones, dudas, malas interpretaciones, comentarios y demás. Todo, en realidad, una esperanza fútil.

La pretensión de una “verdad” única y dominante —esto es, sin ambages, una interpretación y lectura singular y definitiva— es, al final del día, una pretensión religiosa. Fue el monoteísmo el que introdujo —erróneamente— la idea de una visión unívoca del mundo y la realidad, en contraste con pueblos, culturas y civilizaciones que conocieron y conocen el politeísmo, y, mucho mejor, el panteísmo. No hay, a la hora de la verdad, mucha dificultad con la existencia de dos teorías sólidas sobre el universo: la relatividad y la cuántica. En el próximo capítulo ahondamos esta idea. Digamos, de cara a preocupaciones de orden religioso o espiritual que muchos de los padres de la mecánica cuántica muy pronto vislumbraron este plano. No es nuestro interés, sin embargo, entrar en él. Solo señalarlo, específicamente a propósito de las veleidades del monoteísmo.

Digamos, a título genérico —y esto es algo que queda suficientemente claro gracias a la historia y la filosofía de la ciencia— que tampoco existe en absoluto, una única “definición” o comprensión de lo que sea

la ciencia. Incluso a pesar de ese embeleco ideológico que se llama “el método científico” (Ruiz y Ayala, 1998; Pérez Tamayo, 1998).

A partir de lo que precede, cabe sin problema alguno decir entonces: el hecho de que haya numerosas interpretaciones no constituye, desde ningún punto de vista una dificultad. Antes bien, es un signo claro de vitalidad del conocimiento. Sobre esta base avanzamos hacia la tesis central de este libro, luego de un largo rodeo.

Capítulo 4:

El mundo es cuántico

El mundo es cuántico. No clásico; ciertamente no semiclásico, y tampoco semicuántico (*quantum-like*). El dualismo clásico-cuántico resulta sencillamente insostenible una vez que hemos ganado la dimensión de la cuántica. Digámoslo de manera franca, pero, lo reconocemos, al mismo tiempo provocativa: el dualismo mismo es el resultado del (acento en/del) mundo clásico. Desde una perspectiva cuántica no hay dualismo cuántico-clásico.

Ahora bien, decir que el mundo es cuántico equivale a decir que el tiempo es discreto, el espacio es discreto, la energía y la materia son discretas. A fortiori, también la información lo es (no hay que olvidar que incluso hemos adelantado, sin profundizar, la idea de que el tiempo no exista de la mano de los trabajos de Rovelli y otros). Varias otras derivaciones se desprenden de aquí y permanecen como cuestiones abiertas: por ejemplo, el carácter discreto de la conciencia. Este deberá ser tema de otro trabajo aparte. En fin, claramente, el mundo, la vida y la naturaleza son discretos. Veamos qué significa esto.

Examinemos primero los hechos. En primer lugar, físicamente, el mundo, el universo, puede decirse que está compuesto por materia (siglo XVIII), por energía (siglo XIX) y por información (siglos XX y XXI). Planck establece suficientemente que la energía es discreta. La famosa ecuación de Einstein dice, sin más ni más, que la materia también es discreta, dado que la única diferencia con respecto a la energía se establece en función de la velocidad de la luz. En términos clásicos esto se ha expresado habitualmente afirmando que la energía y la materia son intercambiables, supuesto el límite absoluto en el mundo macroscópico que es la velocidad de la luz. Adicionalmente, anticipado por Shannon y Weaver, es el desarrollo mismo de la teoría de la información (clásica) que establece que esta también es discreta, y que la información misma es un fenómeno físico (Landauer). Las matemáticas de los sistemas discretos son,

justamente, matemáticas de sistemas discretos. Un lugar destacado ocupa aquí la combinatoria.

Segundo, observemos lo que implican los tres límites absolutos existentes: el tiempo de Planck, la escala de Planck y la masa de Planck. Solo podemos conocer el universo a partir de estos límites. Retroceder a los momentos anteriores de estos límites implica entender, notablemente, el origen del Big Bang, cuya explicación estándar es la teoría inflacionaria. Las leyes de la física no fueron las mismas antes del tiempo de Planck. Todo lo que podríamos decir por ahora es que somos el producto de un agujero primordial, o un punto (incluso pudieron ser muchos) con la masa de Planck, no el punto euclidiano con radio cero, sino con una longitud inferior a la de Planck. Es aquí donde surge el problema, dicho en términos tradicionales, de la gravedad cuántica.

En tercer término, sin embargo, no sabemos en realidad qué sea la materia. Aproximadamente el 4% del universo es materia bariónica, y el restante, alrededor del 96%, es energía oscura y materia oscura. Aunque se ha ganado un espacio acerca de lo que hacen o significan no se sabe a la fecha qué sean exactamente. De consuno, la vida en general, esto es, los sistemas vivos, son sistemas físicos; pero dado que no se sabe exactamente lo que sea la materia, tampoco la energía, no es posible expresar algo así como la última palabra acerca de lo que sea la vida. Un tema concomitante con el conocimiento de los sistemas vivos es la conciencia, o la mente. Nos encontramos ante un problema abierto.

Cuarto, la teoría de la relatividad plantea dos problemas nucleares; o mejor un dúplice problema, a saber: el tiempo y el espacio. Ambos emergen a partir de los límites establecidos por Planck. Y si hemos de creerle a Einstein, el espacio-tiempo surge de la materia-energía.

Es perfectamente posible que exista algo así como un denominador mínimo común a los cuatro hechos señalados: se trata del hecho de que la cuántica se ocupa de y pone en evidencia al mismo tiempo, un mundo de posibilidades. El mundo cuántico, mucho más y mucho antes que de actualidades está constituido y articulado por posibilidades. Así, pensar cuánticamente equivale a pensar en posibilidades.

Es a partir de estos cuatro hechos básicos que comienzan entonces los problemas, las interpretaciones, las lecturas. Así, es en este punto que comienza propiamente este capítulo.

Pensar en posibilidades. Esta es toda la dificultad de entrada. Lo real es tan solo un subconjunto de un conjunto mayor que es el de las posibilidades, el cual, a su vez, está atravesado por otro más amplio que el subconjunto de lo real, que es el de lo imposible. Pensar de manera cuántica equivale a pensar la dúplice dimensión de lo posible y lo imposible, inmensamente más profunda, rica y amplia que la de lo “real”. Toda la filosofía clásica, al igual que toda la ciencia clásica –centradas en lo real o el “ser”– quedan aquí desplazadas a convertirse en actores y actrices de reparto.

Originariamente –y queremos que este espíritu permanezca hoy en día– la física se ocupa de la naturaleza. Todos los filósofos griegos escribieron un libro llamado *ta physiká*; sobre la naturaleza. Así, pensar la física no es, contra muchas desviaciones muy extendidas –particularmente entre los físicos (modernos y contemporáneos)– pensar una ciencia; es originaria y radicalmente pensar la naturaleza. La física cuántica comienza pensando la luz como el ámbito más originario de la naturaleza. Como es sabido, el problema de base es si la luz es corpuscular u ondulatoria. Pero en realidad, el problema que da origen a toda la cuántica es el fenómeno de la emisión y absorción de energía a partir del estudio de radiaciones; nuevamente, la radiación de cuerpo negro. Cabe pensar que el cuerpo primordial fue un agujero negro primordial, un hueco negro cuántico. El cuerpo negro mayor que tenemos hoy es el universo en expansión cada vez más acelerada, con un radio aproximado de 13.750 millones de años luz. Este cuerpo negro, aunque parezca extraño, satisface macroscópicamente la ley de la radiación de Planck a una temperatura de 2.7° K.

Así, el antecedente más directo de la física cuántica no es Newton y lo que él representa; esto es cierto para Einstein, pero no para Planck, Bohr y los demás. Es la termodinámica la que directamente antecede a la física cuántica. En particular, la termodinámica de los agujeros negros presupone “un universo cuántico”. Siempre habrá que recabar en este aspecto.

Valga decir que si de algo se hapreciado la física a lo largo de la historia, que no empezó con Galileo y Newton, es la de ser la más fundamental de las ciencias. En un comienzo era astronomía, pero debe entenderse que el mundo físico sujeto a leyes era el cosmos. Los griegos, desde los presocráticos, intentaron darle una racionalidad al mundo, pero al no haber datos empíricos de los que se pudiera partir en la observación, cesaron en su empeño. Aristarco y la escuela epicúrea fueron derrotados por la tradición aristotélica. Fue necesario esperar a las meticulosas observaciones de Tycho Brahe que, en manos de Kepler consolidaron el modelo heliocéntrico. Hay que decir que el modelo de Copérnico es reconocido por su valor cualitativo, no cuantitativo. Esta es la versión estándar de la cuestión. La física fue siempre una filosofía de la naturaleza (*philosophia naturalis*); en la letra con Newton; en el espíritu, queremos decirlo, con la física cuántica.

El problema con el materialismo de los siglos XVIII y XIX es que sus impulsores no conocían la otra forma de la *materia* que Einstein rebeló, la *energía pura*. Llamemos pura temporalmente, por simple convención, a la energía de la luz, la energía contenida en un fotón que, dicho sea de paso, tiene masa cero. Más enfáticamente, carece de masa; visto desde la relatividad especial, el tiempo para la energía o el fotón no transcurre. Nadie ha intentado medir el radio de un fotón. Este es el fenómeno más misterioso del universo: tiene longitud cero, tiempo cero, masa cero. ¿Es esto posible? Debemos confesar que no lo sabemos, pues la relatividad especial es eso: una versión idealizada de la relatividad general. A su vez, ese punto de partida para la relatividad especial lo es también como un primer indicio para la cuantización.

Como quiera que sea, el problema de base es entonces la naturaleza. Pero no única o principalmente una naturaleza que es masiva, material (Newton), sino energética; la luz es una forma de energía. Una energía que implica radiaciones, frecuencias, comportamientos claramente contraintuitivos; todo sobre la base de las tres leyes enunciadas por Fourier, Boltzmann y Thomson. La termodinámica —no sin las bases de la óptica en dos diferentes orígenes: Newton y Goethe— puede ser reconocida, si cabe, como la ciencia de la luz. La termodinámica clásica nace gracias a Fourier, Boltzmann, Carnot, y Thomson, principalmente. Posteriormente se desarrolla, además, como termodinámica del

no-equilibrio (de la mano de Onsager, de de Donder, y de Prigogine, principalmente) y adquiere un tercer momento de su desarrollo como termodinámica cuántica.

Por otra parte, estaban las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia. En un principio, más que ayudar a una comprensión racional del mundo, ayudaron a fortalecer concepciones metafísicas. Fue necesario esperar a la unificación de ambos fenómenos, que fue la maravillosa síntesis lograda por James Clerk Maxwell e inspirada por Michael Faraday, para que se abriera camino un entendimiento de la materia a nivel elemental²⁴. Este entendimiento terminó concediéndola –en el espíritu– al atomismo griego, la verdadera “gran maldición” de la antigüedad contra la cual luchó con ahínco el creacionismo.

Suele repetirse que dijo Dios: “hágase la luz”, y surgió Newton. En realidad, más vale decir que la respuesta a esa orden del supuesto creador fue Maxwell. Pues bien, lo mismo cabría afirmar cuando, dos siglos más tarde de los *Principia* nació un nuevo genio en Ulm. Einstein habría revelado el secreto que Newton intuía pero que no pudo entender: la luz son corpúsculos –mucho mejor: *quanta*–, que, en realidad, fue el acierto de Planck (sin proponérselo). Einstein confesaría cincuenta años después que continuaba sin entender el asunto.

En cualquier caso, es fundamental lo siguiente: el camino determinista y casuístico que abrieron la mecánica y la electrodinámica se veía obstaculizado por las observaciones y principios de la termodinámica. Fueron los químicos, y no los físicos, quienes supieron sacar mejor provecho de esas azarosas leyes que finalmente se concretaron en la mecánica estadística y que hicieron renacer la esperanza de un mundo

24 Digamos una cosa: la termodinámica tiene un origen putativo en una dúplice ciencia: la alquimia y la química. La termodinámica habla de transformaciones, pero su tema no es la materia; es la energía. Semánticamente, la energía se anida en el lenguaje de la alquimia, pero se formaliza y aparece ante el mundo de la mano de la química y de la termodinámica. Mientras está naciendo la termodinámica, la química ha roto todos los lazos que alguna vez tuvo con la alquimia y estará naciendo, particularmente gracias a la organización de la Tabla de Elementos por parte de Mendeléyev.

ordenado racionalmente. Cabe recordar aquí exactamente la idea de origen alquimista que expresa muy bien Prigogine: *ígneas mutat res*, el fuego –la luz– cambia todas las cosas.

Así, resulta comprensible que el estudio del electrón, la discusión sobre la naturaleza del átomo, en fin, los trabajos en torno a la emisión o absorción de energía constituyeran las claves originarias de la física cuántica; no solamente en su primera etapa (1900-1935), sino también mucho después. Una mirada ligera al tema haría creer que la física cuántica se ocupa del mundo subatómico. Y que, entonces, quedaría por fuera el universo macroscópico del cual se ocuparía, con propiedad, la teoría de la relatividad. Sin embargo, no existe en todo el corpus de los *papers* y libros fundacionales de la cuántica ni una sola palabra que permita dividir, y mucho menos jerarquizar, un mundo microscópico, de un lado, y un mundo macroscópico, de otra parte. La teoría cuántica no se ocupa, en absoluto, de tamaños, masas o volúmenes; mucho mejor, se ocupa de tiempos, procesos y comportamientos. Precisemos este lenguaje.

Los tiempos microscópicos son vertiginosos. En contraste, los tiempos macroscópicos son lentos. Toda la historia de la ciencia, la filosofía y la cultura fueron –y aún continúan siendo ampliamente– la historia de tiempos macroscópicos, parsimoniosos. Los tiempos macroscópicos son: segundo, minuto, hora, día, semana, mes, año, siglo. La tabla N° 1 presenta los tiempos microscópicos:

Tabla N° 1: Tiempo microscópico y tiempo macroscópico

Universo microscópico	Universo macroscópico	Unidades de información
Mili = 10^{-3}	Segundo = 1/60 m	Kilo = 10^3
Micro = 10^{-6}	Minuto = 1/60 h	Mega = 10^6
Nano = 10^{-9}	Hora = 60 m	Giga = 10^9
Pico = 10^{-12}	Día = 24 h	Tera = 10^{12}
Femto = 10^{-15}	Semana = 7 días	Peta = 10^{15}
Atto = 10^{-18}	Mes = ~ 30 d	Exa = 10^{18}
Zepto = 10^{-21}	Año = ~ 365 d	Zeta = 10^{21}
Yocto = 10^{-24}	Siglo = 100 años	Yotta = 10^{24}
	Millón de años = 10^6	Bronto = 10^{27}
	Billón de años = 10^{12}	

Fuente: modificación a partir de (Maldonado, 2014)

Pues bien, queremos sugerir que la relación entre los llamados mundo microscópico y mundo macroscópico no es, en absoluto, una relación entre masas o volúmenes, sino entre tiempos. Digámoslo expresamente: el tiempo nace en la escala microscópica, pero se plasma, al cabo, en la escala macroscópica. Así, el tiempo “real” es el tiempo microscópico, que transcurre vertiginosamente, en últimas, hasta el tiempo de Planck. Dicho con prudencia.

Varias observaciones se desprenden de la tabla No. 1. En primer lugar, si el límite establecido por Planck es de 10^{-42} segundos, queda un margen muy amplio todavía entre lo que sabemos actualmente, medidas y técnicas zeptoescalares, hasta el tiempo de Planck. Quedan exactamente 21 unidades microescalares. Una enormidad. Sin embargo, al mismo tiempo, los avances han sido vertiginosos en el mundo microscópico. Para no hacer muy larga la ilustración, cabe decir que, por así decirlo, el mundo femtoescalar nace en el año 2001 cuando se le entrega el premio Nobel de química a A. Zewail por sus trabajos en femtoquímica. En alrededor de 20 años se ha pasado de la escala femto a la yocto. Especulativamente, cabría pensar que en un tiempo de entre cincuenta y ochenta años (con prudente optimismo) se podría estar alcanzando en biología, en química o en física aplicada el límite de Planck.

La segunda observación consiste en señalar que la cuántica, supuestos los antecedentes originarios de Feynman acerca del universo microscópico (*there is plenty of room at the bottom*, 1959), ha logrado —en algo menos de setenta años a la fecha— ampliar las escalas y medidas del universo y la realidad de manera significativa. Dicha ampliación ha venido a complementar los tiempos macroscópicos, y poner de manifiesto el problema de las relaciones entre ellos. Sin embargo, no se trata, en absoluto de oposiciones o jerarquías. Para decirlo de manera prudente, se trata de complementariedades. Es imposible tener una buena comprensión del universo y la naturaleza sin conectar ambos mundos.

Pues bien, en realidad, más que de complementariedades cabe afirmar lo siguiente: en general, el tiempo macroscópico nace en el tiempo microscópico; el origen del tiempo es cada vez microescalar. Los tiem-

pos macroscópicos, importantes como son, encuentran su origen en dinámicas y comportamientos microscópicos. Y a cabo, ulteriormente, en el tiempo de Planck.

La tercera observación hace referencia al hecho de que existe una imbricación entre los tiempos microscópicos y los macroscópicos, y que las unidades de información son las que median entre ambos. A esto se refiere la tercera columna en la Tabla No. 1. En otras palabras, hay una implicación indirecta entre las escalas microscópicas y los procesos en curso en computación. No tiene sentido entenderlas por separado. Los avances en un plano se corresponden con los que tienen lugar en el otro plano. Sin ambages, lo que sucede en el universo son procesos computacionales que se imbrican recíprocamente o en zigzag entre billones de años –que es exactamente la ventana de observación de la cosmología– y física cuántica, química cuántica y biología cuántica; al cabo, también astrobiología cuántica. No en última instancia, se trata de fenómenos y procesos de computación cuántica; o lo que es equivalente, de procesamiento cuántico de información.

Dicho esto, es entonces perfectamente posible sostener que es equívoco afirmar que la física cuántica se ocupa exclusivamente –y ni siquiera principalmente– de fenómenos subatómicos. A esto apunta la Tabla N° 2, a continuación:

Tabla N° 2: Premios Nobel de Física por Trabajo en el Mundo Macroscópico

Año	Ganador y Logro
1999	G. 't Hooft, and M. J. G. Veltman: Por elucidar la estructura cuántica de las interacciones electrodébiles en física
2001	E. A. Cornell, W. Ketterle, and C. E. Wieman: Por el logro de condensado Bose-Einstein en gases diluidos de átomos alcalinos, y por los estudios fundamentales pioneros acerca de las propiedades de los condensados
2003	A. A. Abrikosov, V. L. Ginzburg, and A. J. Leggett: Por sus contribuciones pioneras a la teoría de superconductores y superfluidos
2005	R. J. Glauber: Por su contribución a la teoría cuántica de la coherencia óptica
2012	S. Haroche, and D. J. Wineland: Por los métodos innovadores experimentales que permiten medir y manipular sistemas cuánticos individuales

Fuente: (Maldonado, 2019a)

La Tabla N^o 2 contiene el reconocimiento de que hay fenómenos macroscópicos fundamentales que competen también a una comprensión y explicación de la naturaleza. La segunda columna de la Tabla expone, de manera resumida, las razones que la Academia de Ciencias de Suecia aduce para la entrega del premio Nobel a los investigadores mencionados en cada año. Como se observa, se trata de trabajos en física de materiales, el condensado Bose-Einstein, y entonces, en física de la materia condensada, superconductores y superfluidos, óptica y sistemas tecnológicos. Estos como los ejemplos más destacados, pero debe ser claro que existe una muy amplia gama de trabajos e investigaciones en numerosos otros campos del universo macroscópico que se ocupan justamente de principios, aplicaciones y comportamientos cuánticos, todo lo cual ya ha sido suficientemente reconocido en la bibliografía especializada en el tema: imagenología en medicina, rayos láser, pantallas LED y LCD, prácticamente todas las telecomunicaciones, computación cuántica, y varios ámbitos más. Así pues, cabe poder superar el dualismo entre el universo microscópico y macroscópico. Las tablas No. 1 y No. 2 indican el camino correcto, creemos. Esto es posible desde la propia teoría cuántica, incluso con una cierta independencia de lo que se pueda decir o saber acerca de la teoría de la relatividad. Así las cosas, no hay dos cosas (el mundo macroscópico y el mundo microscópico), sino uno solo: el mundo regido o regulado por principios y comportamientos cuánticos. Sin la menor duda, hoy por hoy, una muy buena comprensión del mundo macroscópico en toda la línea de la palabra es imposible sin un reconocimiento de que es cuántico.

En fin, la física cuántica no es física de fenómenos subatómicos exclusivamente, en manera alguna (podría especularse, y debe quedar claro que es solo especulación, que a la detección de ondas gravitacionales seguirá en algunas décadas la detección de gravitones; su existencia es una hipótesis puramente cuántica, como en su momento lo fue la de los hoy denominados fotones).

Una revisión a los estados de la materia, y entonces del universo

La materia tiene, hasta donde se sabe varios estados: físico, líquido, gaseoso, plasma y el condensado de Bose-Einstein. En física de la ma-

teria condensada, se habla también de un estado superconductor. El agua es la única sustancia que puede existir en estado líquido, sólido y gaseoso, en coexistencia de las tres fases. Pues bien, la primera idea que puede quedar en claro es que la materia no existe en un único estado. Las formas en las que existe o se expresa la materia dependen directamente de la temperatura, y con ello, entonces de sus relaciones con la energía. Cada vez descubrimos que es posible que la materia esté en más de un estado a la vez.

En pocas palabras, no existen dos cosas: materia y energía, sino materia-energía, en formas, comportamientos o estados diferentes. Existe una fuerte relación de implicación entre la física cuántica, la física del plasma, la física de materia condensada y la física atómica, o nuclear, y la física de partículas elementales (el modelo estándar). No son distintas clases de física; se trata, mucho mejor, de diferentes expresiones o niveles o escalas de un solo y mismo fenómeno: la naturaleza (cuántica), el universo (cuántico). Así, contra la idea de herencia newtoniana, la materia no es, en modo alguno, un concepto simple o singular, sino polisémico. Es exactamente en este reconocimiento que se abre la ventana a los retos que plantean la energía oscura y la materia oscura.

En este mismo sentido, la energía existe en una combinación de múltiples frecuencias, tanto como en diferentes “estados o formas”, así: energía potencial, energía cinética, energía calórica, energía química, energía informacional, y varias otras. La energía es, manifiestamente, un concepto polisémico. En otras palabras, no es cierto que “todo sea energía”; es más adecuado sostener que la energía puede expresarse como materia, pero también de forma lumínica, en escalas de centígrados o grados Kelvin, y en manifestaciones múltiples (cinética, gravitacional, etc.). No hay una única forma de energía, como tampoco de masa o materia. Existen gamas, dimensiones, grados, estados –según se prefiera. Hay una energía en reposo para las partículas que denominamos “materiales”, pero sería equivocado visualizarla como otra forma de energía. Es simplemente otra expresión de la energía. Recuérdese de paso que el principio de indeterminación prohíbe “reposo absoluto”; es así como nace el concepto de energía de punto cero.

Es inevitable pensar en este contexto en la primera ley de la termodinámica, en primer lugar. Y con ella, desde luego, en las otras leyes. Pensar la naturaleza equivale, así, a pensar en cruces, complementariedades, redes, relaciones, y en absoluto en términos entitativos u ontológicos, en ninguna acepción de la palabra.

El concepto de información comporta una dificultad mayor. La información no existe antes de ser procesada y tampoco después del procesamiento de la misma. La idea de información es inseparable del procesamiento. Ayer, ese procesamiento era a la manera de una Máquina de Turing. Hoy y mañana, además y principalmente, es procesamiento cuántico. Esto significa dos cosas: de un lado, que la información es una sola y misma cosa con “proceso”, no ya con “estado(s)”. Antes del procesamiento simplemente hay datos, y los datos son ciegos, brutos. El procesamiento de información entraña necesariamente la idea de inteligencia e interpretación. Procesar información significa interpretar los datos. De otra parte, al mismo tiempo, la traducción de “procesamiento de información” a la biología significa “metabolización”; es decir, transformar una cosa en otra. Por consiguiente, vivimos un río incesante, con varios rápidos, para recordar la metáfora de Heráclito. Un permanente proceso que, consiguientemente, no tiene comienzo ni tiene fin. Una imagen adecuada para expresar la idea de procesos, es la de ciclos, y entonces hablamos de ciclos más amplios o más estrechos. Así pues, la idea según la cual: a) las cosas tienen comienzo y b) como tienen comienzo tienen entonces necesariamente un fin, es sencillamente incompleta; mejor aún, equivocada. Pensar la física cuántica equivale a pensar en procesos. Debe ser posible una teoría general de procesos. Los estados son tan solo un fotograma de una película más larga, amplia y rica. Los hologramas ilustran de mejor manera esta idea. Así las cosas, un fotograma, es el mundo clásico. Dicho sin más, la información comporta códigos, y procesamiento de códigos.

Se impone, con todo, una observación puntual: hablar de procesamiento cuántico es distinto a hablar de una Máquina de Turing cuántica (MTC). Existen, y son posibles, varios tipos de máquinas de Turing, y uno de ellos es la (MTC). La información cuántica o lo que es equivalente, el procesamiento cuántico de la información no asume, en modo alguno,

la forma de una máquina de Turing, y tampoco, consiguientemente se reduce a la tesis Church-Turing (Maldonado, Gómez, 2015).

Sintetizando: la materia son ondas y partículas, y la sensación de gravedad, de pesantez, de dureza es tan solo una apariencia, puesto que es suficientemente sabido cómo el átomo está esencialmente vacío. Sin metáforas, sin analogías, estamos esencialmente hechos de vacío. Como enseñara Demócrito, “solo existen los átomos y el vacío”; pero debemos reconocer que a-tomo es lo indivisible (un fotón o un electrón, por ejemplo), mientras que “el vacío está lleno de virtualidades o potencialidades. De hecho, en la vastedad del universo, tan solo una muy pequeña fracción es material o masiva; la inmensa mayoría del universo es o bien gases, o vacío. Por su parte, la energía son frecuencias, ondas, vibraciones, radiaciones, en fin, luz. Y, finalmente, la información es, igualmente, códigos, ondas, frecuencias y vibraciones. La conclusión no puede ser menos evidente. La verdad es que tan solo una muy pequeña fracción de la totalidad del universo tiene una forma sólida.

Esta idea es verdadera. Sin embargo, hay que estar permanentemente advertidos de habladurías y posturas “nueva era”. Dicho de manera puntual, el tema de las vibraciones remite a la biofísica. Es evidente que existen efectos cuánticos en biofísica, pero el tema exige el mayor rigor conceptual y metodológico.

Una idea fuerte: el tiempo no existe

Pensar el tiempo y/o el espacio es una sola y misma cosa, gracias a la teoría de la relatividad. El tiempo, podemos decir, es el resultado del calor. Con el Big Bang, podemos decir: en el comienzo –una expresión, sencillamente– fue “el calor”; luego sucedió, según parece, un enfriamiento largo, hasta el día de hoy. Recuérdese que, rigurosamente hablando, el calor es una forma de energía, si utilizamos el lenguaje de la transformación, más amplio que el de procesos, o recurrimos al de “ciclos”.

La complejidad del mundo, del universo y de la vida es el tiempo; esto es más exactamente, la flecha del tiempo. Sin embargo, contra las

tres religiones monoteístas constitutivas de Occidente, el tiempo no es un factor destructor. Todo lo contrario, el tiempo es generador de diversidades, de multiplicidades, de vida, en últimas. De acuerdo con la versión oficial u ortodoxa de la evolución cósmica, el universo tardó dos terceras partes desde su nacimiento hasta hoy para que la vida, tal y como la conocemos, fuera posible. Primero se forma el sistema solar y con él la Tierra, hace cerca de 4.500 millones de años. La vida emerge hace 3.800 millones de años. La edad del universo se ha calculado en aproximadamente 13.800 millones de años. Un muy largo y complejo proceso combinatorio tuvo lugar, una y otra vez, hasta que la entropía empezó a encontrar una solución: el surgimiento de la vida. Este es el esquema convencional. Al final hablaremos de la termodinámica cuántica.

La flecha del tiempo, por consiguiente, como una flecha creativa fue descubierta, rigurosamente hablando, apenas en la segunda mitad del siglo XX gracias a Prigogine. Caprichosamente, podemos decir que el tiempo nace en 1977 cuando Prigogine recibe el premio Nobel de química precisamente por sus contribuciones a la termodinámica del no-equilibrio (en esta historia, no puede olvidarse las contribuciones, primero, de L. Onsager, y luego de T. de Donder, quien sienta las bases de lo que se ha dado en llamar la Escuela de Bruselas, cuyos dos máximos representantes son Prigogine y G. Nicholis). Subsiguientemente, nacen distintas flechas del tiempo: la flecha del tiempo cosmológica, la de la evolución, la psicológica y varias más. Simple y llanamente, el pasado y el futuro son asimétricos. Sin ambages, el descubrimiento del tiempo (la flecha del tiempo) como un factor que suma o que es creación da nacimiento a las ciencias de la complejidad.

Ahora bien, hay que decir que en el seno de la mecánica cuántica el tiempo no existe. Lo mejor que podemos decir, muy razonablemente, es que en la cuántica, el tiempo es presente puro, y en el presente puro todas las posibilidades se cumplen al mismo tiempo. Ya hemos apreciado en el capítulo anterior que el fotón carece de masa, no sabe de tiempo y no ocupa ningún espacio en particular. Extrapolando, es lo que sucede, análogamente al universo mismo, a saber: el universo no está en el tiempo o en un tiempo determinado, el universo no ocupa ningún espacio, y no está algo más a la derecha o hacia arriba, y el universo no posee un peso determinado. La forma convencional de

decir lo anterior es que el universo mismo es el tiempo, es el espacio, y en él algunos cuerpos adquieren masa, localmente hablando.

Pues bien, relativamente al tiempo, una amplia minoría de autores plantea una comprensión sorprendente. Se trata, notablemente, visto en orden cronológico, de Gödel (Yourgrau, 2007), Barbour (1999), Rovelli (2018). Dicho de manera resumida, el argumento es el siguiente: el tiempo es una ilusión o una apariencia – algo que va directamente en contra de la idea de Prigogine (1993)–. No existe un ahora universal, sino, siempre local. El tiempo es una creación del cerebro que le permite simplificar la complejidad del mundo y la naturaleza en términos de pasado-presente-futuro, y de una flecha que corre en una sola dirección. Si el tiempo fluye, su flujo comporta la llegada de siempre nuevas cosas. Y cada cosa trae su propio tiempo y tiene un cono temporal único. La idea de un tiempo universal común a todas las cosas es una ilusión; más exactamente, un lenguaje –*flatus vocis*–, un mecanismo de simplificación o un procedimiento reduccionista.

Así, en otras palabras, el tema de fondo no es el estudio del tiempo, sino, comprender cómo la naturaleza genera la impresión del tiempo. El mundo está hecho, simple y llanamente de muchos “ahoras”. La complejidad del mundo estriba en los procesos de traducción, de traslape, de sincronización y demás de los múltiples *ahoras*. En esto consiste la cultura humana. O también, este es, en este plano, el mérito del sistema encefálico: crear (la ilusión o la sensación de) el tiempo. Esta creación cumple una función evolutiva, a saber: le ayuda a vivir en medio de un universo esencialmente fluctuante, con inestabilidades y turbulencias. Por ejemplo, el tiempo le ayuda al cerebro a proponerse planes, a concebir futuros, a distanciarse del pasado, por ejemplo, de errores o experiencias negativas, a alimentar la vida, pues lo cierto es que son la ausencia, la carencia y la necesidad las que nutren a la existencia; esto es, aquello que aún no conocemos, no podemos, no somos, no hacemos y demás. La vida necesita de tiempo, todo parece indicarlo. El tiempo es un llamado incesante a una completud que es, al final del día inacabada, si no imposible.

La verdad es que, en cada instante, las cosas del universo, el mundo y la vida tienen un arreglo, un orden que es relativo y provisional. Lo

que prima ampliamente es el cambio, la sucesión de un ahora en otro ahora. Es posible expresar adecuadamente esta idea como: el universo o la existencia o la realidad convencional consisten en un presente viviente (*Lebendige Gegenwart*), una expresión que se encuentra en Rovelli tanto como, en otro plano, en E. Husserl.

Ahora bien, es evidente que hay un sinnúmero de fenómenos naturales, en el sentido más amplio de la palabra, que se explican por interferencias. Las interferencias pueden ser entendidas de dos maneras básicas: como entrelazamiento –y por tanto en términos de no-localidad–, y como cruce, complementariedad, alternación o diálogo, según se prefiera, de múltiples *ahoras*. Dos expresiones equivalentes.

En pocas palabras: debemos poder deshacernos de la idea según la cual el tiempo es algo; esto es, una idea entitativa u ontológica del tiempo es un error que puede remontarse sin dificultad a Platón y a Aristóteles. El tiempo no existe: lo que existen son cosas que cambian, procesos y transformaciones. El tiempo es el título que comprende una serie de explicaciones que rigen al cambio.

La compuerta que se abre aquí es la cuantización del tiempo, y no la que ha sido predominante: la gravitación de la mecánica cuántica. Es exactamente en este sentido que el tiempo es discreto. Lo que sucede es que el cerebro (la cultura) lo lee como continuo –*for all practical purposes (FAPP)*.

Reconsiderando las posibilidades

El mundo clásico está regido por el principio de tercero excluido. Este principio se reafirma con el principio de no-contradicción tanto como con el del carácter analítico de las cosas en general. De acuerdo con este principio rector del mundo clásico, es imposible que una cosa sea algo y otra distinta al mismo tiempo. La identidad no sabe de tiempo, y tampoco, por tanto, de historia; esto es de cambios. En toda la historia de la humanidad occidental prevaleció ampliamente la idea de que la naturaleza tiene estados y consiste en estados, desde Aristóteles y hasta 1992, cuando en bioquímica esto cambia gracias a C. Woese. De manera típica, la causalidad fue

concebida naturalmente como el tipo de explicación de un estado y en general como el principio constitutivo del universo. De acuerdo con la causalidad, que no es otra cosa que una creencia, las cosas tienen un comienzo, y como tienen un comienzo tienen entonces también un final. La causalidad es lineal.

La cuántica constituye el quiebre más radical de una larga historia fundada en la causalidad. Pensar en términos cuánticos significa abandonar (la creencia en) la causalidad. Pues bien, en esto exactamente consiste el problema de la medición y el colapso de la función de onda. El mundo cuántico, mucho más que un mundo de *estados*, es un mundo de *procesos y transformaciones*.

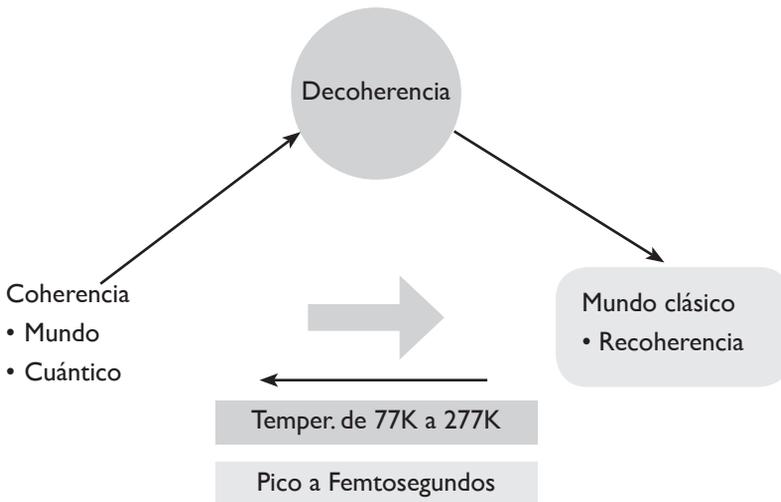
Como queda claro, el problema de la medición consiste en que no es necesario que exista un agente humano, o de cualquier otro tipo, para que suceda el colapso de la función de onda. Cualquier interacción puede producirla. Pues bien, una reflexión se hace necesaria.

El mundo cuántico es conocido como un mundo coherente. Las coherencias significan que todas las posibilidades están teniendo lugar al mismo tiempo; o bien, que un electrón se encuentra en todas partes al mismo tiempo; o bien que recorre todos los caminos al mismo tiempo; (o bien, como afirmara Feynman, va hacia adelante o hacia atrás en el tiempo) o bien, que se trata de un mundo afinado en el que todas las cosas —ondas y partículas— están perfectamente sincronizadas. Distintas maneras de expresar una sola y misma idea. Manifiestamente, se trata de una idea altamente contraintuitiva. Más radicalmente, el universo cuántico es un universo de libertad. En efecto, Coway y Kochen elaboraron en 2009 el teorema fuerte del libre albedrío señalando este hecho. Pues bien, el colapso de la función de onda hace que el mundo coherente se decoherente, dando lugar al mundo clásico. En el mundo clásico lo que impera es la necesidad de que las cosas sean de una manera precisa y no de otra. La mayoría de las interpretaciones de la mecánica cuántica consisten en el estudio del colapso de la función de onda y sus consecuencias, como si la historia terminara aquí —es lo que sucede, notablemente con Zurek, que fue quien introdujo la idea de decoherencia cuántica.

Sin embargo, la verdad es que el mundo no está destinado a perder la coherencia y reducirse a los criterios de su expresión clásica, sin más. Recientemente se puso en evidencia lo que con legitimidad podemos llamar como la continuación de la historia; esto es, muy adecuadamente, la configuración de un proceso. Así, la decoherencia no es el estadio último, pues a su vez tiene lugar una recoherencia del mundo clásico. Es decir, el mundo clásico vuelve a hacerse cuántico. De esta suerte, es posible un modelo del mundo cuántico. El mundo clásico es tan solo un momento del mundo cuántico, un caso límite, digamos.

La recoherencia ha sido estudiada como sucediendo espontáneamente pero también producida en laboratorio. Para un estado del arte y los aspectos técnicos de este proceso, véase (Maldonado “A Quantum Coherence-Recoherence-Based Model of Reality” (2018b)). El gráfico N° 1 ilustra el proceso de decoherencia y recoherencia cuántica:

Gráfico N° 1: Coherencia, decoherencia y recoherencia cuántica



Fuente: Maldonado, 2018b

De acuerdo con el gráfico N° 1, el proceso de recoherentización sucede en tiempos vertiginosos, claramente establecidos: entre pico y femtosegundos. Y las temperaturas en las que tiene lugar la recoherencia oscilan entre 77 grados Kelvin y 277 grados Kelvin, que son en verdad temperaturas bastante altas cuando se las compara con

la temperatura media del universo, $2.73^{\circ} \text{K}^{25}$. Podemos dejar de lado otras consideraciones técnicas para concentrarnos en el significado propio del proceso.

No obstante, es preciso señalar expresamente que la biología cuántica ha puesto en evidencia que la coherencia cuántica se mantiene incluso en temperatura de medioambiente en la que existen los sistemas vivos (McFadden, Al-Khalili, 2019), toda una sorpresa para los físicos. Lo que sí es cierto es que la velocidad a la que sucede la coherencia es vertiginosa –alrededor de varios nanosegundos hasta femtosegundos–, pero que los sistemas vivos saben aprovechar y mantener.

Detengámonos en este punto un momento.

La mecánica cuántica es de base una teoría de origen físico. Pero actualmente es bastante más que una teoría física. Comporta también elementos biológicos que permiten entender mejor a la propia física. Este rasgo, digamos, de inter, o de multi, o de transdisciplinariedad –para el caso da lo mismo– es fundamental para entender el mundo cuántico. El mundo cuántico no es más físico que químico, y no más físico que biológico. La idea del carácter fundamental de la física se ve fuertemente sacudida con la cuántica, pues, bien entendida, la física cuántica es también y al mismo tiempo química cuántica, biología cuántica y astrobiología cuántica²⁶. *À la limite*, adicionalmente, la física cuántica resulta también ser ingeniería basada en principios y comportamientos cuánticos –buena parte de las tecnologías NBIC+S–,

25 De acuerdo con varios estudios recientes, provenientes por lo general de la biología cuántica, se ha establecido: a) que la coherencia cuántica es perfectamente posible en condiciones de temperatura ambiente; b) que la coherencia cuántica logra mantenerse en esta temperatura hasta treinta y nueve minutos. Antes que cuestionar el gráfico N° 1, estas observaciones amplían el espectro del mismo. Un motivo de optimismo intelectual o investigativo.

26 McFadden y Al-Khalili ponen de manifiesto que varios de los descubrimientos de biólogos resultan ser sorprendidos para la comunidad de físicos, pero que, al cabo, deben tener que admitir. La idea de una jerarquía de la física sobre las demás ciencias resulta hoy por hoy insostenible. En otro plano, las contribuciones y observaciones que mencionan McFadden y Al-Khalili se corresponden, plano por plano, en otro contexto, con los estudios sobre neurofisiología de las plantas llevados a cabo por Mancuso, Baluska y otros más.

tanto como ciencias sociales cuánticas (Maldonado, 2019a) —un tema que debe quedar aquí simplemente mencionado.

En verdad, la física cuántica es una “totalidad” que puede ser comprendida en los cruces, las implicaciones, las complementariedades y las alteraciones entre distintas ciencias: la física, la química, las matemáticas, y demás. En otras palabras, una buena comprensión de la teoría cuántica permite romper el fisicalismo; esto es, cualquier reduccionismo de tipo físico. Esta es una consecuencia que va más allá de lo que en el plano de la física jamás se consideró, incluyendo a Galileo, Newton, Einstein y muchos más.

El mundo no puede ser captado por una sola ciencia, y ninguna tiene a priori la última palabra. Más exactamente, el mundo no puede reducirse a las explicaciones, comprensiones, teorías, postulados, modelos o lenguajes de una única ciencia, cualquier que sea. Dicho de manera puntual: la mecánica cuántica es de entrada una teoría física, pero de salida, también una teoría de varias otras ciencias. Notablemente, de biología cuántica, química cuántica, su impronta en las tecnologías convergentes, e incluso las propias ciencias sociales cuánticas. Ya Pauli y Schrödinger hacen las más importantes contribuciones fundacionales para la química cuántica, así esta se desarrolle más adelante. En esta misma dirección, Schrödinger sienta las bases para una biología cuántica que habrá de desarrollarse en realidad a partir de finales del siglo XX.

El mundo clásico es un momento de un proceso bastante más amplio entre la coherencia y la recoherencia. Así las cosas, el mundo es cuántico de entrada y de salida, y se expresa en un momento determinado como mundo clásico. Este mundo clásico es el que se ha dicho que posee leyes físicas propias y que, ulteriormente, son el objeto del Modelo Estándar y la teoría de la relatividad general. Este mundo clásico es lo que la cultura humana ha entendido en términos genéricos como “la realidad” (convencional). Sin embargo, como se aprecia sin dificultad, esta realidad se inscribe en un marco más amplio que la comprende y la hace posible: el universo de fenómenos, comportamientos y postulados cuánticos.

Surgen, sin embargo, varias preguntas. ¿Existe pérdida de información del proceso de coherencia al de decoherencia? La respuesta es afirmativa. La pérdida de información consiste en la pérdida de posibilidades. Sin embargo, paradójicamente, el mundo clásico es de complejidades crecientes, de no-linealidad, diversificación y multiplicidades, con lo cual, manifiestamente, gana en información, aun cuando tienda a perder memoria. A su vez, ¿puede decirse que exista pérdida de información del proceso de decoherencia al de recoherencia? Lo que puede afirmarse sin ambages es que esa transición consiste en una ganancia de libertad, un abandono de la necesidad y una ampliación magnífica de aleatoriedad.

La dificultad con las tres leyes de la termodinámica consiste en que estas aplican específicamente para el universo clásico. Sin embargo, recientemente, se viene hablando asimismo de termodinámica cuántica. En la siguiente sección volveremos sobre este tema. Aquí, por lo pronto, es posible decir claramente que la termodinámica cuántica nada tiene que ver con la mecánica cuántica estadística. El tema que se encuentra en el centro es la comprensión de los procesos adiabáticos. Sin la menor duda, la clave en estos procesos es la velocidad vertiginosa en la que suceden los cambios, las transformaciones (Binder *et al.*, 2018).

Quisiéramos subrayar esa idea, que consiste en un desplazamiento del foco de atención. Las transiciones del mundo cuántico al mundo clásico y nuevamente en los procesos de recoherencia del mundo clásico al mundo cuántico no puede decirse, de manera taxativa, si implican pérdida de información; o acaso, quizás, una pérdida de energía. La primera ley de la termodinámica afirma que no existe, en absoluto, ninguna pérdida de energía; solo un incesante proceso de transformación de una forma de energía en otra. El estado del conocimiento actual no permite afirmar o negar algo al respecto. Nos hemos referido a los agujeros negros en el primer capítulo, los cuales ponen de manifiesto el problema de la pérdida o no de información. R. Penrose (2012) ha sugerido un modelo sugestivo acerca del fenómeno de los agujeros negros y es el primero en hablar del otro extremo de un agujero negro como un agujero blanco; que sería, verosímilmente, el equivalente de un nuevo Big Bang. Subrayemos

esto: la robustez de la propuesta de Penrose es matemática, y no tiene por qué ser necesariamente física.

Queremos hacerlo más explícito. Materia, energía e información son tres expresiones de un mismo fenómeno que cada vez logra explicarse mejor. Al comienzo, en términos de masas, supuesta la gravitación primero, y luego el electromagnetismo. Luego, la termodinámica en general, y muy especialmente la termodinámica del no-equilibrio. Y finalmente, la información cuya clave es el procesamiento y la transformación —por ejemplo, la traducción— de un código en otro(s). Pues bien, así las cosas, cabe legítimamente la analogía según la cual, en el universo no hay pérdida de información —por la primera ley de la termodinámica, pero referida entonces a la teoría de la información—, sino una transformación de la misma en otros tipos de información. Más exactamente, la transformación de un código en otro(s).

Lo que sí queremos decir expresamente es que el tránsito de la decoherencia a la recoherencia consiste en una ganancia de grados de libertad. Un tema fundamental, sin la menor duda. Es posible una física de sistemas libres, y en esto consiste exactamente la cuántica. Dicho en otras palabras: la función de onda consiste en la existencia, simultánea de todas las posibilidades; la decoherencia es el hecho de que existe solo una posibilidad, en cada caso. Cabe pensar que la recoherencia es la recuperación de las n posibilidades originarias. En el mundo clásico siempre hay una posibilidad. Y decir que hay innumerables posibilidades es un acto irracional, de esperanza, de lenguajeo, de optimismo, si se quiere (y ser optimista, como ser pesimista, no es una cuestión racional). Con una observación fundamental: para que sean posibles todas las posibilidades no es necesario el tiempo-espacio; o lo que es equivalente, todas las posibilidades no están en el tiempo-espacio. El tiempo-espacio está sujeto a leyes, a constantes, a fuerzas, a campos. Y en ellos siempre existe una sola posibilidad en cada caso. Es lo que expresa justamente la idea de bifurcaciones.

En este sentido, es perfectamente posible decir que la coherencia consiste en el hecho de que el sistema en consideración está afinado, a la manera de una orquesta sinfónica. Este afinamiento ha sido entendido también por diversos autores como una danza coordinada entre

partículas u ondas (Zeilinger, 2010). El mundo cuántico es altamente ordenado; es lo que sencillamente se quiere exponer mediante la expresión —¿una metáfora?— de la danza. El mundo clásico emerge del colapso de la función de onda; es decir, del proceso mediante el cual el afinamiento se quiebra, se interrumpe o se desafina, debido principalmente a las perturbaciones del medioambiente. Queda suficientemente establecido que el medioambiente es, por definición, turbulento y ruidoso. La decoherencia no es otra cosa que el proceso mediante el cual, entonces, el mundo: a) debe poder adquirir sentido, un sentido que carece del suyo propio; b) debe poder ordenarse; c) debe poder ser inteligible (Einstein). Es exactamente lo que hacen las ciencias, la filosofía y las artes: introducirle sentido a aquello que carece de sentido, o también, concebirle un orden a aquello cuyo orden no es aparente. Tenemos condensada, aquí, toda la historia, si se quiere, del espíritu humano, y lo que define y constituye a la cultura y la historia.

Pues bien, sin dualismos, esa es la historia de órdenes: órdenes que emergen y se hacen posibles, que se desbaratan, que vuelven a reconstituirse de otras maneras, y así sucesivamente. Ulteriormente esta vuelve a recoherentizarse —de otra forma que como en el mundo clásico se quiso que sucediera. El mundo es cuántico, y sin embargo, no es teleológico. Es decir, no existe, en manera alguna, una teleología en el tránsito de la coherencia a la decoherencia y de la decoherencia a la recoherencia. Mucho más y mucho mejor que una teleología, existe un proceso mediante el cual el mundo clásico gana grados de libertad mediante la recoherentización (cuántica).

En otras palabras, el tiempo emerge del colapso de la función de onda, y puede decirse que su necesidad estriba en ordenar el mundo clásico introduciendo la asimetría entre el pasado y el futuro. La complejidad es el tiempo mismo, y en el mundo clásico el tiempo no es, en absoluto, una ilusión. Sí lo es cuando se lo entiende en el marco, inmensamente más amplio, de la teoría cuántica. El espacio-tiempo son configuraciones de una materia-energía-información que busca mediante procesos complejos combinatorios ordenarse de la mejor manera posible de suerte que, ante la abundancia de una enorme cantidad de energía libre, la entropía pueda ser resuelta a

como dé lugar. Esto es, el universo da lugar al orden: orden a través de fluctuaciones (*order through fluctuations*, Prigogine).

De suerte que es evidente que la teoría cuántica se encuentra en la base —una expresión literal— de cualquier comprensión o explicación del universo, la naturaleza, el mundo y la vida; la teoría cuántica, la mejor teoría jamás desarrollada, cuya capacidad de predicción tanto como su testabilidad ha superado muy ampliamente a cualquier otra teoría. Las dificultades que supone su comprensión —esto es, las interpretaciones sobre la misma—, tienen que ver con sus significados —relativamente al mundo llamado clásico. Ya hemos dicho algo acerca del proceso mismo de la interpretación —o mejor, de las interpretaciones— en el capítulo tercero.

Como se aprecia sin dificultad, entender que el mundo es cuántico comporta alcanzar una mirada de mucho mayor alcance. La teoría inflacionaria del Big Bang —sólida en todo lo que aparece e incluso con el reconocimiento explícito de que otras cosmologías son posibles y están siendo discutidas— constituye apenas un momento de un espectro inmensamente más amplio. El mundo cuántico existe en el mundo clásico y lo permea por completo. De este modo, no hay que entender que primero hay un mundo cuántico que luego hay uno clásico y posteriormente vuelve a haber un proceso de recoherencia. Al mismo tiempo, es cierto que el mundo clásico está permeado y sostenido por fenómenos, comportamientos y principios cuánticos en una magnífica historia cuya explicación comienza en 1900 y continúa a la fecha, una historia fantástica de enriquecimiento, de debates, de evolución conceptual y experimental. Como queda en evidencia con el capítulo primero, la mecánica cuántica no es únicamente el aparato originariamente elaborado por Born, Schrödinger, Jordan y Heisenberg. Dicho aparato se ha venido desarrollando, por ejemplo, gracias a Bohm, Bell, Feynman, Wheeler, y tantos más hasta la fecha, con todo y sus debates, desacuerdos y múltiples consideraciones, muchas veces disyuntas.

Debemos poder dejar de pensar que la sucesión es la única o la principal de las formas como acontece el mundo y la naturaleza. Las cosas son sugestivamente bastante más complejas. Complejas: no compli-

cadadas ni difíciles, exactamente en el sentido que el término tiene en el contexto de las ciencias de la complejidad.

La termodinámica cuántica

Queremos destacar aquí la heurística que siguen los razonamientos de este libro. Hay que conocer muy bien, todo lo mejor que se pueda, lo que es el sentido común; ese que, de acuerdo con Descartes, es el sentido mejor repartido en el mundo. El sentido común consiste y al mismo tiempo se funda en los atavismos, en la cultura en el sentido más amplio pero normalizado de la palabra. Es el mundo de los hábitos, de las costumbres, de las normas, recetas, preceptos, algoritmos y reglas, de lo políticamente correcto, lo que se debe hacer y lo que no contraviene ningún poder ni autoridad en ningún sentido. El sentido común es acrítico, es obediente, sigue las prescripciones, se pliega sin dificultad, entiende lo que se le pide y lo hace sin más. Al cabo, es pasivo y sumiso.

Pues bien, la razón por la que debemos conocer muy bien el sentido común es que los fenómenos y comportamientos cuánticos son todo lo contrario de lo que dicta el sentido común. Esto, el peso de la tradición y de lo que, en cualquier acepción de la palabra es “normal”. Es en este sentido que hemos dicho que la cuántica es altamente contraintuitiva. *El mundo cuántico carece de sentido común.*

Existen, en la historia de la humanidad estupendos ejemplos de ciencia y filosofía propias del sentido común. Se trata, entre muchos ejemplos, de gente como Aristóteles, Descartes, Newton, Faraday, por mencionar tan solo unos nombres. En el origen de la física cuántica hay estupendos contraejemplos. El primero de ellos es el mismo Planck, quien descreyó de sus propios estudios acerca de la radiación del cuerpo negro. El ejemplo de Lobachevski, unos años antes es exactamente del mismo tipo, en el marco de la discusión del quinto postulado de Euclides y el nacimiento de las geometrías no-euclidianas. Y con ellos, claramente, es también el caso Heisenberg y Schrödinger. La física cuántica fue hecha sin el menor sentido común. Vale recordar la recriminación que le hizo Schrödinger a Bohr: “entenderá usted que los saltos cuánticos son un disparate”.

Las anteriores observaciones sirven para ocuparnos de la termodinámica cuántica. Esta permite reformular por completo las relaciones entre materia, energía e información.

La flecha del tiempo no es, en realidad, el resultado del calor; de un calor que tiende a enfriarse, y así, que tiende al equilibrio. Mucho mejor, la flecha del tiempo de la termodinámica es el resultado de la información que se expande entre partículas (Gemmer, J., *et al.*, 2009). De acuerdo con la teoría cuántica, no hay pérdida de información en el universo. Justamente, la primera ley de la energía se expresa como transformación de la información; se trata de la transformación de un código en otro(s). Dicho de otra forma, el estado actual del universo conserva toda la información del pasado. Algo que ha sido observado en química tanto como en biología. Mejor aún, la evolución de las partículas es tal que estas tienden a estar cada vez más entrelazadas (Deffner, Campbell, 2019). El mundo cuántico es un mundo *crecientemente* entrelazado. Una idea que no es muy distante de lo que en el marco de las ciencias de la complejidad cabe afirmar, a saber: sistemas crecientemente complejos. La entropía consiste en un intercambio y ampliación de información.

Es maravilloso. Contra la termodinámica clásica, la termodinámica cuántica —que es en realidad el cruce entre termodinámica y procesamiento cuántico de la información— pone de manifiesto que no hay, en absoluto, un aumento de la entropía en la historia del universo, de la naturaleza o de la vida, sino que esta permanece siempre en cero. Un paso decisivo, sin duda.

Precisemos esto: la termodinámica cuántica es la comprensión de la mecánica cuántica en términos de teoría de la información; esto es, teoría cuántica de la información (o lo que es equivalente, teoría de la información cuántica).

La termodinámica cuántica es una historia en proceso. Aquí simplemente hemos querido destacar algunos de los aspectos puntuales que permanecen incontrovertidos de la misma, y aprovecharla en el contexto del estudio que nos ocupa. La idea de base debe quedar en claro: el universo es un proceso de creciente entrelazamiento, lo que significa

la imposibilidad de lograr una visión del mismo por caminos analíticos en cualquier acepción de la palabra. Un mundo cuántico no es otra cosa que la comprensión sintética del universo y la naturaleza. Mientras se avanza, verosímelmente, en el camino de la unificación de la relatividad y la cuántica, es posible señalar que la termodinámica cuántica permite la integración entre dos ciencias fundamentales, o también, dos conceptos cardinales en la comprensión del universo: energía e información.

De esta suerte, si antes quedó en claro que la materia y la energía son, finalmente una sola y misma cosa, ahora, con la termodinámica cuántica queda adicionalmente en evidencia que la energía y la información son, a su vez, una sola y misma cosa. La materia se expresa como energía y queda incluida en esta, y la energía se expresa como información y queda incluida en esta. No es poco.

Sin reduccionismos, cabe decir que la relatividad es la mejor teoría acerca de la materia hasta la fecha; esto es, se trata de una teoría del espacio-tiempo. El tema entonces compete al origen del espacio-tiempo, puesto que ya se sabe con claridad qué es lo que ambos, tiempo-espacio, hacen. En esa perspectiva, la ontología deja de tener un carácter entitativo o sustancial y adquiere un carácter eminente funcional o procesal. Es decir, entendemos a los fenómenos por lo que *hacen*, puesto que por fuera de lo que hacen, no son nada.

El mundo es cuántico. I

Decir que el mundo es cuántico no significa afirmar que finalmente, en la base del universo y la naturaleza todo se reduce a partículas y ondas, a sus interacciones, campos y dinámicas, de suerte que entonces originariamente existe una función de onda que es coherente pero que permanentemente, a cada segundo, está colapsando, y que, así, la decoherencia cuántica da lugar al mundo clásico. De este corpus podría afirmarse, por ejemplo, que está teniendo lugar, incesantemente, a cada instante, una bifurcación de historias o de mundos, o de yoes, y entonces... todo lo demás se sigue, a partir de varias de las páginas que preceden. Queremos decir algo distinto; si cabe, algo mejor. La idea anterior no es novedosa; por el contrario, forma parte del corpus más ortodoxo de la física cuántica.

Digámoslo primero de forma negativa en tres puntos. Primero, no queremos sostener que el mundo es cuántico y clásico. Seguidamente, tampoco queremos hablar de un mundo cuántico y un mundo que es como-cuántico (*quantum-like*), que es el mundo clásico, en el cual tan solo apreciamos los efectos del mundo cuántico. Finalmente, no decimos tampoco que el mundo es cuántico en un proceso de decoherencia que se va bifurcando constantemente al cabo de lo cual tendríamos una variedad de mundos, realidades con respecto a las cuales, en este mundo-aquí, en este caso inmediato, solo podríamos pensar esas posibilidades y hacer lo mejor; es decir, conocer lo mejor, vivir lo mejor posible y demás; algo al estilo de Everett.

El mundo clásico es aquel en el que domina, muy ampliamente, el principio de tercero excluido. Es un mundo analítico en toda la acepción de la palabra, marcado por individualidades que pueden ser relacionadas y contextualizadas. Sin más, es la realidad convencional; aquella que ha definido la historia humana, muy específicamente a partir de los orígenes de Occidente. Pues bien, este mundo clásico es un caso límite –para los seres humanos– de un universo y una naturaleza que son y se comportan, en verdad, de manera cuántica. Esto implica una dificultad.

Los seres humanos hemos pensado como seres humanos; una proposición que está lejos de ser trivial, incluso aunque sea tautológica. El espectro de realidad de los seres humanos está constituido por un espectro luminoso de 400 nanómetros de ancho, un umbral auditivo que oscila en 120 decibeles, a partir de cinco sentidos, y con todo el peso de la cultura. Estos aspectos determinan un sesgo, a saber, afirmar que la realidad en general es lo que los seres humanos juzgan, saben y *experientian* que es “real”. Esta fue toda la historia, muy particularmente, de alrededor de los últimos 2.500 años.

En contraste, recientemente hemos aprendido a pensar –aún no enteramente a vivir– reconociendo que es posible, y que incluso es necesario pensar como otros seres, fenómenos y sistemas. Por ejemplo, hemos empezado a reconocer que existe una inteligencia biológica que es inmensamente más vasta y robusta que la inteligencia humana. Hemos descubierto que las plantas tienen más de veinte sentidos

(Baluska *et al.*, 2006; Mancuso y Viola, 2015), y que los animales tienen por lo menos diez sentidos (McFadden y Al-Khalili, 2019) incluidos la magnetocepción, la gravedad, la humedad del agua y del aire, y otros. Sin ambages, un sistema que tiene más sentidos –que simplemente cinco, que es el caso de los seres humanos– puede leer el entorno de una manera más compleja dado que requiere un mayor y mejor procesamiento de información. En este caso, más es más complejo (en una traducción de una idea ya clásica según la cual “*more is different*”). Hemos empezado a pensar, adicionalmente, que hay sistemas que piensan por sí mismos, como las selvas, las bacterias, los ríos. No en última instancia, hemos comenzado a aprender que el mundo cuántico sabe, decide y actúa como un sistema que es libre y que sabe de libertad (Conway, Kochen)²⁷.

Dicho de manera genérica, los sistemas vivos piensan en términos no-algorítmicos²⁸.

Pues bien, queremos decirlo ahora de forma positiva o afirmativa: que el mundo es cuántico significa exactamente que debemos poder comprender las cosas de otro modo que como seres humanos. Se trata, así, de superar el propio límite cultural e histórico en toda la línea de la palabra. Un desafío colosal como jamás se había conocido en la historia de la humanidad; por lo menos en los últimos 2.000 años. Es esto lo que significa unificar la relatividad y la cuántica y superar los límites de Planck: la masa, la escala, el tiempo de Planck. Solo así podremos entender eso: que el mundo es cuántico. Se trata de superar los sesgos específica y determinadamente humanos; un desafío único. Esto se dice fácilmente, pero es extremadamente difícil de llevar a cabo, dicho en el plano de la cultura, de la historia, de la educación, por ejemplo. Es en este sentido que se dice que la cuántica es alta y crecientemente contraintuitiva.

27 Una visión integrada de estos reconocimientos se encuentra en Maldonado, *Teoría de la información y complejidad. La tercera revolución científica* (2020b).

28 Para una comprensión afirmativa de esto, cfr. Maldonado, “Positive affirmation of non-algorithmic information processing” (2017).

¿Cómo es pensar como un agujero negro? ¿Cómo es pensar como un campo cuántico? ¿Cómo es pensar y vivir en un universo afinado —musicalmente hablando—, con innumerables posibilidades y en danza permanente (para apelar a la expresión de Zeilinger)? Esta no es poesía ni literatura, sosteniendo, por lo demás, que no habría absolutamente nada malo con que lo fueran. Dicho en el marco del lenguaje de este libro, es exactamente lo que significa pensar los fenómenos, los principios, los postulados, las leyes y las dinámicas cuánticas. Se trata de salir de nuestra propia piel para descubrir un mundo que es diferente a lo que hemos solido pensar, conocer y *experimentar*, que es un mundo pobre, en realidad. Un mundo en el que impera el principio de tercero excluido, en el que reina ampliamente la causalidad, en el que solo existe en cada caso una (sola) posibilidad, y en el que la necesidad parece dominar las cosas. El mundo cuántico es, por el contrario, en toda la acepción de la palabra, un mundo inmensamente rico. Sin embargo, no es cierto que literalmente debamos “salir de nosotros mismos” para descubrirlo. Esa es una expresión física o fisicalista. La biología cuántica ha venido a poner de manifiesto que podemos “entrar en nosotros”, en los sistemas vivos, para comprender cómo, notablemente, existe coherencia cuántica en sistemas y medios húmedos, calientes y pegajosos.

La función de onda es una sola; eso ya está suficientemente establecido por la teoría estándar. Lo que apreciamos en cada momento son fotogramas de la misma; pero una vez que observamos sus efectos, o lo que es equivalente, su condensación, la función de onda continúa su evolución, su proceso. Vemos, en cada caso, con la ayuda de las tecnologías, cada vez más, lo que en cada caso acontece; pero es claro que, sin atisbos de una filosofía kantiana o nada semejante, hay bastante de lo que vemos. Ese es el sesgo humano. Podemos pensarlo, pero no conocerlo. Pensamos con la intuición y la imaginación, determinadamente. Las matemáticas, según parece, como la filosofía, van por delante de la física. Es lo que vimos con las interpretaciones y mencionamos en varias ocasiones a propósito de las matemáticas. La física debe poder aceptar y reconocer este aspecto, sin hegemonismos o jerarquías, puesto que, por lo demás, las matemáticas y la filosofía no lo hacen tampoco así.

No sabemos exactamente, esto es, positivamente, si existen universos ocultos (Randall, 2011) o bien universos paralelos. Pero la cuántica

lo pone en evidencia, a pesar de sí misma (*shut up and calculate*). No es única ni principalmente real aquello que cabe ver con los ojos. Debemos poder avanzar de inferencias directas a otros tipos de inferencias, siendo la más inmediata entonces la de inferencias indirectas. La lógica ha avanzado por este sendero con mucha mayor libertad que cualquier otra ciencia o disciplina (Maldonado, 2020a). Cabe identificar, de modo genérico inferencias inductivas e inferencias transductivas, cada una de ellas compuesta por lo menos de otros ocho tipos de inferencias. No cabe sospechar sin más otro tipo de inferencias que no sean explícitamente directas.

Hay y son posibles otras formas de realidad que las simplemente humanas. Esta aseveración no tiene ninguna dificultad en buena ciencia. Y no es posible ni necesario reducir esas otras formas a la simplemente humana. Sucede algo análogo a lo que acontece en el plano de los lenguajes en general y de la biosemiótica en particular. La inteligencia humana consiste en el aprendizaje de otros lenguajes –no solamente idiomas o lenguas–, y en el reconocimiento de que es posible traducir unos lenguajes a otros, y que la traducción implica un enriquecimiento. En biología se habla propiamente de transducción, transformación y conjugación, en los que están en juego códigos y señales que los sistemas vivos leen incesantemente e interpretan, y producen constantemente. Contra el reduccionismo de Galileo, no es cierto que la naturaleza hable exclusiva o principalmente en el lenguaje de las matemáticas. La naturaleza es políglota y polisémica, sinfónica y cromática. En esto consiste su complejidad, en el sentido preciso de la palabra.

Pues bien, una buena comprensión de la cuántica comporta –sin reduccionismos– la posibilidad misma de que haya múltiples interpretaciones y, sin embargo, hasta la fecha, ninguna teoría; tanto menos cuanto que lo que se piensa es atávicamente una teoría unificada (*à la* Maxwell), o una teoría simple (*à la* Gell-Mann), o una teoría completa (*à la theory of everything*). Tres esfuerzos condenados al fracaso (cfr. Weinberg, *Dream of a Final Theory. The Search for the Fundamental Laws of Nature* (1992, quien todavía se debate expresamente en contra de la filosofía).

Una teoría del mundo no necesita, en absoluto ser completa, pues entonces cae objeto de la crítica de Gödel. Digámoslo de manera puntual:

es posible una teoría del mundo que no sea: a) unificada, b) simple, c) de todas las cosas, d) completa. Este es resultado fantástico del estudio de la mecánica cuántica y sus interpretaciones. No es posible una teoría de un mundo abierto, en el que no sucede la flecha del tiempo de la termodinámica, que no obedece a la causalidad, en el que el azar no puede ser descartado ni domeñado en absoluto, y en el que la observación pueda ser no invasiva o perturbadora. La historia de la ciencia y la filosofía de la ciencia no conocen expresamente una teoría semejante. Según parece, la ciencia no puede hacerse en el plano del desarrollo de teorías de forma acumulativa o secuencial. Concorde con el cuerpo y el espíritu de la física cuántica, una teoría semejante implica discontinuidad con respecto a la historia. Literalmente, un carácter discreto.

El mundo es cuántico. II

Es evidente que los griegos, específicamente en el periodo clásico, descubrieron el pensamiento abstracto. Sin embargo, dicho descubrimiento consistió al mismo tiempo en una simplificación de la riqueza y la diversidad del mundo (Couloubaritsis, 2014). Así, la historia subsiguiente de la humanidad consistió en el triunfo de la simplicidad, en nombre de la abstracción. Pues bien, no es inevitable que la abstracción pueda ser compatible con la complejidad, la riqueza, la pluralidad. Como se observa, todo tiene que ver, dicho de forma genérica, con la meta-teoría. Desde el punto de vista reflexivo, la formulación de cualquier teoría está abocada, en nuestros días, a una contextualización en términos de su naturaleza lógica. Según parece, no es suficiente con formular una (buena) teoría; además, debe ser posible establecer su carácter. Esto es algo que en ciencia en general aún no sucede, lo cual afecta su robustez.

Queremos sugerir que una teoría –o explicación– de un fenómeno debe corresponderse con el carácter mismo del fenómeno. Por ejemplo, Darwin señala al final de la Introducción de su libro más importante (1859) que la teoría de la evolución y el mecanismo de la selección natural son incompletos, dado justamente el carácter evolutivo de los sistemas vivos. Y abre las puertas para que el mecanismo de la selección natural sea ampliado o complementado, cosa que efectivamente sucedió luego.

Que el mundo es cuántico significa explícitamente que se caracteriza por ausencia de continuidad, que es discreto, probabilístico, en él el azar no puede ser descartado, y es esencialmente indeterminado en el sentido preciso de Heisenberg. Las dificultades que encuentra la relatividad general con respecto al espacio y al tiempo consisten exactamente en el hecho de que atávicamente espacio y tiempo han sido continuos. Una comprensión cuántica del espacio-tiempo no puede ser continua. El sesgo humano de la continuidad puede ser superado. Ampliamente, el lenguaje empleado por expertos en todas las áreas de la cuántica es el de “efectos cuánticos”. He aquí una clave que merece una segunda consideración.

Las interpretaciones sobre la mecánica cuántica expresan una dificultad: la adecuación entre una tradición de continuidad y por tanto el sesgo humano, y la posibilidad de no pensar más en tanto que humanos (problema de la medición) y aceptar y explayar las consecuencias que los fenómenos cuánticos exhiben. Es precisamente en este sentido que se trata de la más fantástica revolución desde los orígenes de Occidente; una auténtica inflexión en la historia del espíritu humano.

El mundo llamado clásico se nutre de fenómenos y comportamientos cuánticos de forma incesante. Esta alimentación se expresa perfectamente en la dinámica —¿cabe la expresión ciclo?— coherencia-decoherencia-recoherencia. Sin embargo, esta idea puede ser expresada de otra manera en los siguientes términos.

El mundo cuántico se expresa de múltiples maneras, pero los seres humanos solo conocemos una de ellas: la realidad convencional. Y sin embargo, esto no es enteramente cierto. Estamos descubriendo que la realidad clásica es solo una expresión, un efecto, o una manifestación del mundo cuántico. Y entonces, claro, estamos comenzando a aprender de modo cuántico. Y esto significa que estamos comenzando a explicar el mundo con base en conceptos, principios, teoremas, postulados y conceptos perfectamente anodinos. De allí la dificultad de lo que representan las interpretaciones. Podemos soltar las amarras.

* * *

Efecto túnel, entrelazamiento, dualidad onda-partícula, superposición y no-localidad son, queremos sugerirlo sin ánimo reduccionista, los rasgos más característicos del mundo cuántico. Hay tres fenómenos diferentes que podemos conectar, así:

- i) Cada segundo hay un millón de células que están muriendo, lo que al día significa 1.2 kilos. Al mismo tiempo, ese mismo número de células están siendo generadas y regeneradas. La vida es un incesante proceso de recreación de sí misma;
- ii) Cada segundo hay alrededor de 37 billones de átomos que se están desintegrando. Lo que significa que cada cuerpo vivo y cada cuerpo físico en la naturaleza está siendo recreado de manera constante, al mismo tiempo;
- iii) La decoherencia cuántica está sucediendo permanentemente a una velocidad entre decenas de pico y de femtosegundos. Los sistemas vivos logran aprovechar los comportamientos cuánticos antes de ese tiempo. Al mismo tiempo, no obstante, entre los mismos rangos de tiempo están teniendo lugar procesos de recoherentización.

Pues bien, estos tres fenómenos conjugados ponen en evidencia que el mundo es un permanente despliegue de sí mismo, en una re-creación que tiene lugar de manera vertiginosa. Queremos sostener que la verdaderamente determinante de las leyes es la primera ley que expone la termodinámica. Y esta es la llave que abre la puerta al reconocimiento expreso que sostenemos en este libro. El mundo llamado clásico no es la última palabra, algo que se vislumbra ya, sin la menor dificultad a partir notablemente de la tesis doctoral de Everett.

Desde luego que quedan dos preguntas que no están enteramente separadas. Una tiene que ver con el destino de los agujeros negros; por ejemplo, con el otro extremo de un agujero negro. La otra tiene que ver con el final del universo (Mack, 2020). Lo cierto es que la respuesta a ambas preguntas depende de la elucidación que se haga del aproximadamente 94 % del universo compuesto por energía oscura y materia oscura. Digamos de pasada que brillante como es, el libro de Mack, como su autora misma lo plantea, es una consideración de posibilidades que pueden suceder. ¿Posibilidades? Ese es el mundo de la

cuántica; posibilidades en plural; esto es, *à la lettre*, un mundo abierto, en marcado contraste con el mundo clásico que es un mundo cerrado; específicamente cuando se lo mira con las luces de la física cuántica.

Recabemos en esto: incluso a pesar de lo que afirman las ciencias de la complejidad, el mundo clásico es, al cabo, cerrado, finito; por ello mismo, el reto fantástico que significa la segunda ley de la termodinámica. La termodinámica cuántica permite explicar que efectivamente la materia se integra en la energía y esta, en la información. El mundo es cuántico porque en su base es digital, no analógico. Y los sistemas digitales son no-locales; casi que cabría la expresión, “ubicuos”, exactamente como la función de onda.

Que el mundo es cuántico significa que la función de onda es el mundo mismo, del cual captamos fotogramas. Una teoría cuántica del mundo permite reconocer este hecho de modo preciso, y situar el fotograma en el contexto o en el horizonte de la evolución de la función de onda. El futuro actúa sobre el presente, y el mundo clásico está signado por el presente, tanto como que el pasado incide sobre el presente, y de eso sí sabe el mundo llamado clásico. Pero el pasado y el futuro son en realidad ilusiones relativamente a la realidad convencional. Son reales para el mundo clásico, pero son ilusiones para el mundo en tanto que cuántico. Es en este sentido exacto que el principal de todos los problemas en el mundo clásico es de las relaciones entre realidad y ficción, y que en la filosofía y la ciencias griegas era el problema de distinguir entre lo que es (*to on*) y lo que parece (*to pseudós*). El mundo cuántico es un enmarañamiento de historias múltiples, cruzadas, superpuestas, polifónicas. En el lenguaje técnico se habla de afinación y danza. En cualquier caso, nunca linealidad ni secuencia.

Una analogía se impone en este punto. La forma predominante de pensamiento en la historia de la humanidad occidental ha sido la de inferencias directas del tipo:

$$A \rightarrow B$$

En buena lógica, en matemáticas y en filosofía es sabido que este tipo de inferencias son esencialmente triviales. Mucho más significativas

son las inferencias indirectas, un grupo compuesto por una amplia variedad. Pues bien, un tipo de esta clase de inferencias son la modelaciones y simulaciones computacionales. En esta misma línea, las modelaciones matemáticas son otro tipo de esta clase de inferencias.

Una inferencia indirecta en general es aquella que no puede ser vista de manera inmediata y que no es soportada por una percepción natural, ni siquiera con la ayuda de tecnologías sofisticadas, de punta. Una analogía de esta clase de inferencias es el inconsciente, en el marco del psicoanálisis. Sin embargo, somos conscientes que el psicoanálisis no forma parte, en absoluto, de la corriente principal de pensamiento.

El mundo cuántico no puede ser observado de manera directa. Este es un hecho. Solo sabemos de sus efectos – un lenguaje fundamental aquí. Y estos los hemos estudiado a partir de los modelos matemáticos que, grosso modo, son llamados como “mecánica cuántica” en todos sus desarrollos y variantes, desde su primera expresión en 1925-1927 hasta la fecha, pasando por los elementos estudiados en el capítulo uno, y la variedad, entonces, de sus interpretaciones en el capítulo dos.

Las cosas más importantes en la vida y la naturaleza no pueden ser inferidas directamente y, según todo parece indicarlo, no pueden ser vistas directamente. La fisiología arroja luces al respecto, con el caso de la óptica, a saber: los ojos no se desarrollaron para ver la luz, sino para ver las cosas que la luz permite observar. La percepción natural jamás nos permitirá directa e inmediatamente “ver” que el mundo es cuántico. Pero los argumentos, las matemáticas, los experimentos, la filosofía misma no admiten ninguna duda al respecto. Este reconocimiento es eminentemente filosófico, y perfectamente distinto al marcado por el “*shut up and calculate*”, y los temores de muchos físicos para adentrarse en elucubraciones filosóficas (el miedo a la descalificación ronda los pasillos de la ciencia: así, solo puede crearse, efectivamente, cuando se es joven o bien cuando se han perdido las inseguridades y los temores). Contra toda la tradición, las cosas más importantes en la vida y en la naturaleza son generalmente del tipo de inferencias indirectas.

El mundo clásico es un caso límite del mundo cuántico, y el mundo cuántico es el proceso de coherencia-decoherencia-recoherentización,

como hemos dicho. ¿Existe pérdida de información en estos procesos? ¿Los agujeros negros, que son los fenómenos-límite en los que el mundo clásico y el mundo cuántico coinciden en escala cósmica, arrojan alguna conclusión definitiva al respecto? La biología cuántica tiene, según parece, mejores argumentos que la propia física cuántica.

Pues bien, la analogía no ha concluido. Es posible continuarla de la siguiente manera: Einstein sostenía que cualquier cantidad de observaciones o experimentos jamás podrán permitir la conclusión de que tiene él la razón, pero que uno solo sí podría poner en evidencia que está equivocado –una idea de la cual se desprende sin ninguna dificultad el falsacionismo de Popper. Así, de igual forma, cualquier cantidad de observaciones directas en el mundo clásico permitirá entender que ese mundo es cuántico. La cuántica –en los campos de la física, química, biología, y de las tecnologías y ciencias sociales– constituye una radical inflexión en la *estructura mental clásica* de la humanidad. Este es todo el problema, todo el escándalo del problema de la medición, y que definió, verticalmente, a la interpretación de Copenhague y sus desarrollos y variaciones.

Algunos fenómenos fantásticos que no pueden ser vistos con los ojos ni inferidos en términos de implicaciones directas son: la vida, la salud, el conocimiento, la naturaleza, el universo mismo, en fin, el mundo, como tal. Esta idea nos acerca bastante más a Gödel y a su teorema. Las buenas teorías son incompletas, y no se fundan, manifiestamente, en inferencias o implicaciones directas. Con sumo cuidado, podemos pensar entonces en sutilezas. El positivismo salta entonces colérico de su silla.

Los sistemas cuánticos son abiertos. Siempre que se habla de sistemas cuánticos aislados o cerrados, se trata de simplificaciones con propósitos prácticos. El lenguaje adecuado es siempre el de correlaciones cuánticas. En términos generales, la termodinámica estudia la manera como los sistemas y fenómenos intercambian procesos con el medioambiente; así, se ocupa de los límites de un sistema determinado (Manzano Paule, 2018). En este sentido, cabe distinguir tres clases de sistemas: sistemas completamente cerrados, que son aquellos en los que no hay ningún intercambio de materia o de energía; sistemas

cerrados, en los que hay intercambio de energía, pero no de materia; y sistemas abiertos, que son aquellos en los que hay intercambio de energía y materia. El mundo cuántico es, en pocas palabras, un mundo de interacciones, entrelazamientos, no-localidad, y sincronización o afinamiento. El mundo cuántico es altamente ordenado; el mundo clásico es, manifiestamente, de fenómenos, sistemas y dinámicas de complejidad creciente. A través de esta tendencia el orden se sostiene y aumenta. Un acontecimiento magnífico. La entropía no es la última palabra, en absoluto.

Conclusiones (provisionales)²⁹

Este libro es una apuesta fuerte. Se trata de sentar las condiciones para el desarrollo de una teoría. La teoría que formulamos afirma que el mundo es cuántico. Esto es, contra la ortodoxia, no sostenemos que hay dos mundos (el mundo clásico y el mundo cuántico), ni tampoco, como es igualmente el caso en la corriente principal de pensamiento, que existe un mundo semi-cuántico (*quantum-like*) que unificaría al mundo clásico y al mundo cuántico.

La necesidad del primer capítulo y, dicho *en passant*, del recorrido histórico presente en la Introducción, obedece a un afán propedéutico. La mayoría de los académicos y científicos que trabajan en teoría cuántica no sostienen que el mundo sea cuántico. Hemos omitido deliberadamente un estado del arte al respecto. El mundo es cuántico pero el cerebro humano —específicamente por razones culturales (esto es, por razones de atavismo cultural)— lee el mundo *como si* fuera clásico. Evidentemente que existen numerosas razones de economía de esfuerzo, simplicidad y reducción en semejante lectura.

Hemos venido descubriendo, de manera reciente, incipiente y muy parcelada, que es legítimamente posible decir, sin rodeo alguno, que el mundo es cuántico. La puerta que abre esta posibilidad no proviene, sin embargo, del lado de la física cuántica, sino de la biología cuántica. Pero el conjunto que enmaraña a una y otra es la mecánica cuántica, sobre la cual no existe una interpretación única. Los biólogos que trabajan en fenómenos y comportamientos cuánticos saben y ven cosas que los físicos ni ven ni saben³⁰, (habría necesidad de abrirle un espacio a las contribuciones de la química cuántica en el cuadro que

29 Estas conclusiones obedecen a una sugerencia de uno de los evaluadores. Personalmente creemos que es innecesario escribir unas conclusiones pues los dos últimos capítulos son suficientes ilustrativos de la tesis y el objetivo de este libro. No obstante, no tenemos ningún óbice en hacerlo.

30 Digamos, de pasada, que no existen físicos cuánticos. Existen físicos que trabajan en fenómenos y comportamientos cuánticos. Punto.

elaboramos aquí, no obstante, ese es el tema de un trabajo aparte, que desborda el perímetro y las pretensiones de este trabajo).

Contra Feynman, W. R. Ashby —*avant la lettre*— sostenía, no sin razón, que no existe una teoría de procesos fundamentales³¹. Ashby hablaba desde la cibernética. A título de conclusiones abiertas, queremos sugerir que el desarrollo de una teoría de procesos fundamentales, la posibilidad de alcanzar una teoría de la vida o de los sistemas vivos, y la idea de que el mundo es cuántico son equivalentes. No iguales; apuntan en la misma dirección y coinciden en un mismo espíritu.

De forma maravillosa, no fue la biología, ni la filosofía, ni siquiera la religión o la teología, tampoco fueron las ciencias sociales y humanas las que descubrieron el tema/problema de la vida. Fue la física cuántica, con nombre propio, gracias al trabajo pionero de Schrödinger en 1944. De manera desprevénida, bien habría podido pensarse que aquellas hubieran debido descubrir a la vida como un programa de investigación científica. Contra el modelo mecanicista de Galileo-Newton incluyendo a la mecánica estadística, fue la revolución de la cuántica la que hizo efectivamente posible tal descubrimiento, el cual, sin embargo, aún debería esperar mejores tiempos y condiciones para nacer propiamente.

Que el mundo es cuántico tiene varias consecuencias. Queremos presentarlas aquí sumariamente:

- No es cierto que las cosas comiencen y entonces deban terminar. En realidad, las cosas nunca comienzan y jamás

31 En 1998, se publica con el título *The Theory of Fundamental Processes*, un texto de Feynman —New York, Basic Books— publicado originalmente en 1961 por Addison Wesley, una serie de cursos (*lectures*) que abarcan un abanico de preocupaciones del autor. El título, como generalmente sucede, es más un truco de edición que un tema distintivamente científico. Queremos decir: Ashby plantea un reto que permanece abierto a la fecha. Este libro es un diálogo —indirecto— con la preocupación en torno a una teoría de procesos fundamentales, que invita en realidad a mirar en dirección a la importancia de los sistemas vivos. Sobre esto, puede consultarse la página web: <https://eapad.dk/author/w-ross-ashby/>.

terminan. Todo es un incesante proceso de transformación (subrayemos: trans-formación). Ser occidentales significa creer que las cosas comienzan, y que como comienzan, entonces terminan (o deben terminar). La clave aquí emerge a partir del primer principio de la termodinámica, la ley de la observación de la energía. Las cosas, podemos decir, sí comienzan y terminan, como enseñó Bell, tan solo por (*all practical purposes*).

- La materia, la energía, la información —que son las unidades básicas de la física— son discretas. Así, el mundo —esto es, dicho en general, el universo, la naturaleza, la realidad— son discretos. Lo que sucede es que el cerebro, por culpa de la cultura y por razones de economía de esfuerzo, los lee o los interpreta como si fueran continuos. Dicho en otras palabras, el tiempo, el espacio y el universo son continuos simple y sencillamente para todos los efectos prácticos (FAPP), lo cual es pragmáticamente importante pero lógica y semánticamente muy pobre.
- El tiempo no existe. He aquí una idea difícil, vista con los ojos de la tradición. La teoría cuántica de campos, específicamente gracias a los trabajos de Rovelli arroja refrescantes luces al respecto, pero antes, con Gödel, es posible ver coincidencias y congruencias. Dicho de manera positiva, comprender al mundo de modo cuántico, tiene efectos liberadores (o emancipadores). Podemos liberarnos de esa atadura del tiempo, que es tanto como liberarnos de una ilusión.
- El mundo es cuántico, se decoherentiza —y se *expresa* entonces como mundo clásico—, pero vuelve a recoherentizarse. Ciertamente queda abierta la cuestión acerca de si en el proceso coherencia-decoherencia-recoherencia existe o no una pérdida de información. Conjeturalmente queremos pensar que no la hay. Pero esto, claro, habrá que demostrarlo. Es en este sentido que hemos apuntado en dirección a la termodinámica cuántica, un área incipiente de investigación, promisorio hacia futuro.
- En ciencia —como por lo demás en la vida— las más importantes de las inferencias no son, contra lo que comúnmente se cree, las inferencias directas, sino las inferencias indi-

rectas. Sutiles, no-deícticas, acaso ctónicas, las inferencias indirectas tienen un inmenso potencial expresivo, computacionalmente hablando, sobre las inferencias directas. A título heurístico, esto es lo que revela el panorama, abierto y complejo de las más de veinte interpretaciones sobre la mecánica cuántica. No existe un recuento –*une mise au jour*– del panorama que presentamos en el segundo capítulo. Esta, por sí misma, ya es una novedad expresa de este libro. Que existan y sean posibles numerosas interpretaciones de la mecánica cuántica es un signo de vitalidad y robustez y no de escepticismo o eclecticismo. Y sin embargo, nadie pretende decir que cualquier interpretación sea superior a otra(s). Es precisamente gracias a esta pluralidad de interpretaciones que, sin duda alguna, se abre de par en par la puerta, para allanar el camino que presenta este libro hacia una teoría del mundo como un mundo cuántico.

- En fin, sin mayores dilaciones, pensar en términos cuánticos consiste en indeterminar el mundo, la naturaleza, la realidad o la sociedad. Este fue el conflicto sobre el que llamó la atención Feynman acerca de que nadie podía entender la mecánica cuántica –y que fue, por lo demás, una de las razones que lo condujo a la novedad de la creación de los diagramas de Feynman. Contra toda la tradición determinista –y entonces, a fortiori, analítica–, la cuántica nos permite –queremos decir, nos obliga a– pensar en términos de indeterminación. Dicho simple y llanamente, es *imposible* determinar al mismo tiempo el lugar y la dirección de un fenómeno cuántico. Por derivación, pensar en términos de indeterminación comporta pensar en imposibilidades (Maldonado, 2021a).
- Informacional o computacionalmente hablando, el mundo es un procesador cuántico de información (Maldonado, 2021b). Esto quiere decir que la información –que es la mejor expresión para entender qué son las cosas, desde el punto de vista científico–, es un fenómeno cuántico y no clásico. El mundo es el procesador de su propia información, lo cualquier decir que no es el mundo el resultado de una información externa o ajena a partir de la cual el mundo

sea un resultado o una expresión. La información puede ser creada a partir de la nada (¡cuántica!) (cfr. Vedral. 2010) o, lo que es equivalente, el mundo es cuántico precisamente porque es autopoietico o autoorganizado. In extremis, el mundo es *causa sui*, una idea en cuyo eco resuena la *natura naturans y la natura naturata* como una sola y misma cosa.

Las consecuencias de este trabajo aún deberán ser el objeto de discusiones ulteriores, sin duda.

Bibliografía

- Aczel, A. (2003). *Entanglement*. New York: Plume
- Albert, D., Loewer, B., (1988). “Interpreting the Many-Worlds Interpretation”, en: *Synthese* 77, noviembre, págs. 195-213; doi: 10.1007/bf00869434
- Aspect, A., Dalibard, J., and Roger, G. (1982). “Experimental Test of Bell’s Inequality Involving Time-Varying Analyzers,” *Phys. Rev. Lett.* 49, 1804– 1807.
- Auletta, G., (2009). *Foundations and Interpretations of Quantum Mechanics. In the Light of a Critical-Historical Analysis of the Problem and of a Synthesis of the Results*. World Scientific
- Ball, Ph. (2018). *Beyond wurd. Why everything you thought you knew about quantum physics is different*. Chicago: The university of Chicago Press
- Ballentine, L., (1998). *Quantum Mechanics: A Modern Development*. Wspan
- Baluska, F., Mancuso, S., Volkann, D., (2006). *Communication in Plants*. Springer Verlag
- Barbour, J., (1999). *The End of Time. The Next Revolution in Physics*. Oxford: Oxford University Press
- Bell, J.S. (1984). *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. (En 2004 se publicó una segunda edición, con una introducción hecha por Alain Aspect. Hay una versión en español producida por Alianza Editorial en 1990.)
- Bell, J.S. (1964). ““On the problem of hidden variables in quantum mechanics,” *Revs. Mod. Phys.* 38, 447-52
- Bell, J.S. (1966). “On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox,” en: *Physics* 1, 195-200.
- Bertlmann, R., and Zeilinger, A. (Eds.) (2017). *Quantum (un)speakables II. Half a century of Bell’s theorem*. Zürich: Springer
- Binder, F., Correa, L. A., Gogolin, C., Anders, J., Adesso, G., (Eds.), (2018). *Thermodynamics in the Quantum Regime. Fundamental Aspects and New Directions*. Springer Verlag
- Birkhoff, G., Von Neumann, J., (1936). “The Logic of Quantum Mechanics”, en: *Annals of Mathematics*, 37 (4), págs. 823-843
- Bohm, D., (1980). *Wholeness and the Implicate Order*. London and New York: Routledge

- Bohm, D., (1989). *Quantum Theory*. New York: Dover; edición original de 1951
- Bohm, D., & Hiley, B. J., (1993). *The Undivided Universe. An ontological interpretation of Quantum Theory*. London and New York: Routledge
- Bohr, N., (2015). “Physics concerns what we can say about nature”, citado por A. Petersen, “The Philosophy of Niels Bohr”, en: *Bulletin of the Atomic Scientists*, 19(7): 8-14; doi: <https://doi.org/10.1080/00963402.1963.11454520>
- Bohr, N., (1935). “Can Quantum-Mechanical Description of Reality Be considered Complete?”, en: *Phys. Rev.* Mayo, 48, 696-702
- Boltzmann, L. (1872). *Weitere Studien Über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen*, Wien. Ber. 66, 275-370. (Más estudios sobre el equilibrio térmico de las moléculas de los gases)
- Boltzmann, L. (1877). *Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über des Wärmegleichgewicht*, Wien. Ber. 76, 373{435.
- Born, M., Jordan, P. (1925). “Zur Quantenmechanik”, en *Z. Physik* 34, 858–888. <https://doi.org/10.1007>
- Bouwmeester, D., Pan, J.-W., Daniell, M., Weinfurter, H., and Zeilinger, A. (1999). “Observation of Three-Photon Greenberger-Horne-Zeilinger Entanglement”, *Phys. Rev. Lett.* 82, 1345–9.
- Boyer, T. H., (2019). “Stochastic Electrodynamics: The Closest Classical Approximation to Quantum Theory”, *Atoms* 7(1), 29-39; doi: [10.1088/1361-6404/abffee](https://doi.org/10.1088/1361-6404/abffee)
- Brody, J. (2020). *Quantum entanglement*. Cambridge: The MIT Press
- Bülte, J., Bednorz, A., Bruder, Ch., Betzig, W., (2017). “Noninvasive Quantum Measurement of Arbitrary Operator Order by Engineered Non-Markovian Detectors”, en: *ArXiv*, 1711.11347; doi: [10.1103/PhysRevLett.120.140407](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.140407)
- Butterfield, J., (2015). “Assessing the Montevideo interpretation of quantum mechanics”, en: *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, noviembre, vol. 52, part A, pp. 75-85, doi: <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2014.04.001>
- Byrne, P., (2013). *The Many worlds of Hugh Everett III: Multiples Universes, Mutual Assured Destruction, and the Meltdown of a Nuclear Family*. Oxford: Oxford University Press
- Cabello, A., (2017). “Interpretations of quantum mechanics: a map of madness”, en: *arXiv:1509.04711 [quant-ph]* , 138 (2017), ar-

- Xiv:1509.04711 [quant-ph]
- Cameron, P., Suisse, M., (2018). “Electromagnetic Synthesis of Four Fundamental Forces from Quantized Impedance Networks of Geometric Wave functions interactions”, en: <https://vixra.org/abs/1710.0325>
- Cassé, M., (2001). *Du vide et de la création*. Paris: Odile Jacob
- Clauser, J.F., and Freedman (1972). Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories’, *Phys. Rev. Lett.* 28, 938– 941
- Clauser, J. F. , Horne, M. A., Shimony, A., and Holt, R. A., (1969). *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*, *Phys. Rev. Lett.* 23, 880–4
- Couloubaritsis, L., (2014). *La philosophie face à la question de la complexité. Le défi majeur du 21^e siècle. Tome I. Complexités intuitive, archaïque et historique*. Bruxelles: Ousia
- Conway, J., Kochen, S., (2009). “The Strong Free Will Theorem”, en: *Notices of the AMS*, ol. 56, No. 2, págs. 226-232; disponible en: <https://www.ams.org/notices/200902/rtx090200226p.pdf>
- Cramer, J. G., (2016). *The Quantum Handshake: Entanglement, Non-Locality and Transactions*. Springer Verlag
- Cramer, J. G., (1986). “The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics”, en: *Reviews of Modern Physics*, 58 (647), Julio; doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.58.647>
- Deffner, S., Cambell, S., (2019). *Quantum Thermodynamics: An Introductin to the Thermodynamics of Quantum Information*. IOP Concise Physics
- Deutsch, D., (2002). *La estructura de la realidad*. Barcelona: Anagrama
- D. Deutsch, (1985). “Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer”, en *Proc. R. Soc. A* 400, 97
- Dieks, D., (2007). “Probability in Modal Interpretations of Quantum Mechanics”, en: *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 38, issue 2, Junio, págs. 292-310; doi: <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2006.05.005>
- Dirac, P.A.M. (1930). *The principles of quantum mechanics*. Oxford: Clarendon Press
- Blanco Laserna, D. (2012). *La paradoja cuántica: Schrödinger*. Navarra: Editec, National Geographic
- Einstein, A. (1949). “Remarks to the essays appearing in this collective volume”, en *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, pg. 663–688P.A. Schilpp (Ed.). New York: Tudor

- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N., (1935). "Can Quantum-Mechanical Description of Reality Be Considered Complete?", en: *Phys. Rev.* Mayo, 47, 777; disponible en: <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.47.777>
- Engesser, K., Gabbay, D. M., Lehmann, D., (2009). *Handbook of Quantum Logic and Quantum Structures. Quantum Logic*. Elsevier
- Fang, *et al.*, (2019). "Three-photon discrete-energy-entangled W state in an optical fiber", en *Phys. Rev. Lett.* 123, 070508
- Feynman, R.P. (1985). *Surely You're Joking, Mr. Feynman: Adventures of a Curious Character*. New York: Bantam Books, p. 4
- Feynman, R.P. (1965). *The character of physical law*. London: BBC
- Feynman, R. P. (1963). *The meaning of it all*. New York: Penguin
- Freire Junior, O., (2015). *The Quantum Dissidents. Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)*. Springer Verlag
- Fuchs, Ch. A., (2010) "QBism, the Perimeter of Quantum Bayesianism", en: *arXiv*: 1003.5209
- Gambini, R., y Pullin, J. (2018). "The Montevideo Interpretation of Quantum Mechanics: A Short Review", en: *ArXiv*, 30 mayo, <https://arxiv.org/pdf/1502.03410.pdf>
- Gambini, R., y Pullin, J., (2009). « The Montevideo interpretation of quantum mechanics: frequently asked questions », en: *Journal of Physics: Conference Series* 174, 012003; doi: 10.1088/1742-6596/174/1/01200
- Gell-Mann, M., (1996). *El quark y el jaguar. Aventuras en lo simple y lo complejo*. Barcelona: Tusquets
- Gemmer, J., Michel, M., Mahler, G., (2009). *Quantum Thermodynamics. Emergence of Thermodynamic Behavior Within Composite Quantum Systems*. Springer Verlag
- Ghirardi, G. C., Bassi, A., (2020). « Collapse Theories », en : Zalta, E. N., (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, (Ed. de verano), Metaphysics Lab., Stanford University; disponible en: <https://plato.stanford.edu/entries/qm-collapse/>
- Ghirardi, G. C., Rimini, A., and Weber, T., (1986). "Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems", en: *Physical Review D*, 34 (2): 470-491; doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470>
- Gilder, L., (2008). *The Age of Entanglement. When Quantum Physics Was Reborn*. New York: Vintage Books
- Giraldo, J., (2019). "Unos cuantos para todo" en MOMENTO Revista de Física 59E, pp.84-123

- Giraldo, J., (2018). *Nano---¿qué?* Bogotá: Ediciones Desde Abajo
- Giraldo, J. (2017). “Intrusiones cuánticas en educación”, en Revista Educación y Ciudad N34, pp.65-73 (Bogotá). Disponible en versión digital en: <https://revistas.idep.edu.co/index.php/educacion-y-ciudad/article/view/1628/1607>
- Giraldo, J. (2005). *Genio entre genios*. Bogotá: Ediciones Buinaima
- Giraldo, J., y otros, (2009). *Unos cuantos para todo*. Bogotá: Buinaima
- Giustina, M. (2017). “On loopholes and experiments”, en: Bertlmann, R., and Zeiliger, A. (Eds.). *Quantum (un)speakables II. Half a century of Bell’s theorem*. Zürich: Springer
- Giustina, M., et al. (2013). *Bell violation using entangled photons without the fair-sampling assumption.*, en: Nature 497, 227–230
- Gleick, J., (1993). *Genius. The Life and Science of Richard Feynman*. New York: Vintage Books.
- González de Alba, L. (2001). *El burro de Sancho y el gato de Schrödinger*. México: Paidós
- Gödel, K., (1992). *On Formally Undecidable Propositions of Principia Mathematica and Related Systems*. New York: Dover
- D. M. Greenberger, M. A. Horne, A. Shimony and A. Zeilinger, (1990). ‘Bell’s Theorem without Inequalities’, *American Journal of Physics* 58, 1131–43
- Gribbin, J., (2000). *En busca de Susy. Supersimetría, cuerdas y la teoría del todo*. Barcelona: Crítica
- Gribbin, J., (1998). *Q is for Quantum. An Encyclopedia of Particle Physics*. New York: The Free Press
- Halpern, P., (2018). *The Quantum Labyrinth. How Richard Feynman and John Wheeler Revolutionized Time and Reality*. New York: Basic Books
- Heisenberg, W., (1971). *Physique et philosophie*. París: Éditions Albin Michel
- Heisenberg, W., (1971). *Physics and beyond*. New York: Harper and Row
- Heisenberg, W., (1927). “Über den anschaulichen Inhalt der Quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”, en: *Zeitschrift für Physik* (43), págs. 172-198; disponible en: <http://www.fisicafundamental.net/relicario/doc/Heisenberg1927.pdf>
- Hugh, E., (1973). *Quantum Mechanics by the Method of the Universal Wave Function*; Ph.D. Thesis; disponible en: <http://ucispace.lib.uci.edu/handle/10575/1302>

- Klein, É. (2006). *Petit voyage dans le monde des quanta*. (Flammarion, 2004.)
- Koestler, A. (1959). *Los sonámbulos*. México: CONACYT
- Kozlowski, R., (1991). *Die Aporien der Intersubjektivität. Eine Auseinandersetzung mit Edmund Husserls Intersubjektivitätstheorie*. Köln: Königshausen & Neuman
- Landauer, R., (1991). “Information is Physical”, en: *Physics Today*, vol. 44, issue 5, pág. 23; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.881299>
- LeShan, L., y Margenau, H., (1996). *El espacio de Einstein y el cielo de Van Gogh. Un paso más allá de la realidad física*. Barcelona: Gedisa
- Lev, B. I., (2011). “Wave function as geometric entity”, en: *ArXiv*, doi: 10.4236/jmp.2012.38096
- Larsson, J.-Å. (2017). “How to avoid the coincidence loophole”, en: Bertlmann, R., and Zeilinger, A. (Eds.) *Quantum (un)speakables II. Half a century of Bell’s theorem*. Zürich: Springer
- Mack, K., (2020). *The End of Everything (Astrophysically speaking)*. Scriber
- Mahan, G. (2008). *Many-particle physics*. (Springer Verlag, Boston.)
- Maldonado, C. E., (2021a) “Epistemología de la imposibilidad o ciencia de la indeterminación”, en: *Cinta de Moebio*, 70: 44-54; doi: <https://doi.org/10.4067/S0717-554X202100100044>
- Maldonado, C. E., (2021b). “The world as a quantum information processor”, en: *Praxis Filosófica* (53), pp. 53-68, doi: <https://doi.org/10.25100/pfilosofica.voi53.11448>
- Maldonado, C. E., (2020a). *Pensar. Lógicas no-clásicas*. Bogotá: Universidad El Bosque (2a edición)
- Maldonado, C. E., (2020b). *Teoría de la información y complejidad. La tercera revolución científica*. Bogotá: Ed. Universidad El Bosque
- Maldonado, C. E., (2020c) *Camino a la complejidad. Revoluciones – científicas e industriales. Investigación en complejidad*. Ciudad de Guatemala: Asociación Rujotay Na’oj
- Maldonado, C. E., (2019a) “Quantum Theory and the Social Sciences”, en: *Momento. Revista de Física*, 59E, Octubre, págs. 34-47; <https://doi.org/10.15446/mo.n59E.81645>; disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/view/81645>
- Maldonado, C. E., (2019b) “Solving the Puzzle of a Theory of Com-

- plex Systems”, en: *Gazeta de Antropología*, 35 (2), artículo 3; disponible en: <http://hdl.handle.net/10481/59600>
- Maldonado, C. E., (2018a) “Quantum Physics and Consciousness: A (Strong) Defense of Panpsychism”, en: *Trans/from/acao*, Edicao especial, Vol. 41, pp. 101-118, doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0101-3173.2018.v41esp.07.p101>
- Maldonado, C. E., (2018b). “A Quantum Coherence-Recoherence-Based Model of Reality”, en: *Neuroquantology*, 16(11): 44-48, ISSN: 1303-5150; doi: 10.14704/nq.2018.16.11.1858; disponible en: <https://www.neuroquantology.com/index.php/journal/article/view/1858/1285>
- Maldonado, C. E., (2018c). “La investigación como ludopatía”, en: *Pacarínadelsur*, Año, 10, No. 37, Octubre. Diciembre; disponible en: <http://www.pacarínadelsur.com/home/alma-matinal/1677-la-investigacion-cientifica-como-ludopatia>
- Maldonado, C. E., (2017) “Positive affirmation of non-algorithmic information processing”, en: *Cinta de Moebio*, 60, pp. 279-285, doi: 10.4067/S0717-554X2017000300279, ISSN 0717-554X; disponible en: <http://www.cintademoebio.uchile.cl/index.php/CDM/issue/view/4769>
- Maldonado, C. E., (2016). *Complejidad de las ciencias sociales. Y de otras ciencias y disciplinas*. Bogotá: Ed. Desde Abajo
- Maldonado, C. E., Gómez-Cruz, N., (2015) “Biological Hypercomputation: A New Research Problem in Complexity Theory”, en: *Complexity*, Vol. 20, Issue 4, págs. 8-18, ISSN 1099-0526 ; doi: <https://doi.org/10.1002/cplx.21535>; disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cplx.21535>
- Maldonado, C. E., (2014). “¿Qué es un sistema complejo?”, en: *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia* 14.29: 71-93
- Maldonado, C. E., (2009) “El problema y el reto de la interpretación en ciencia: David Bohm y la física cuántica”, págs. 339-356, en: Giraldo, 2009.
- Mancuso, S., Viola, A., (2015). *Brilliant Green. The Surprising History and Science of Plant Intelligence*. Washington, D. C.: IslandPress
- Maudlin, T., (2019). *Philosophy of Physics. Quantum Theory*. Princeton, NJ: Princeton University Press
- Manzano Paule, G., (2018). *Thermodynamics and Synchronization in Open Quantum Systems*. Springer Verlag
- McFadden, L., Al-Khalili, J., (2019). *Biología al límite. Cómo funciona la vida a muy pequeña escala*. Barcelona: RBA

- Mermin, N. D., (2014). "Physics: QBism puts the scientist back into science", en: *Nature*, 507 (7493): 421-423; doi: 10.1038/507421a
- Mermin, N. D., (1985). "Is the moon there when nobody is looking? Reality and the quantum theory", en *Physics Today* (April, pg.38-47).
- Moreau, P-A., Toninelli, E., Gregory, T., Aspden, R. S., Morris, P. A., and Padgett, M. J. (2019). "Imaging Bell-type nonlocal behavior", en: *Science Advances* 5, pg.1-8 DOI: 10.1126/sciadv.aaw2563
- Nagel, E., Newman, J. R., (2007). *El teorema de Gödel*. Madrid: Tecnos
- Nagel, Th., (1987). *What does it all mean? A Very Short Introduction to Philosophy*. New York-Oxford: Oxford University Press
- Nagel, Th., (1989). *The View from Nowhere*. New York-Oxford: Oxford University Press
- Nelson, E., (1966). "Derivation of the Schrödinger Equation from Newtonian Mechanics", en: *Phys. Rev.* 150, 28 de octubre, 1079, doi: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.150.1079>
- Omnés, R., (2018). *The Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton, NJ: Princeton University Press
- Omnés, R., (2000). *Comprendre la mécanique quantique*. Paris : Broché
- Ou, Z.-Y. , Zou, X., Wang, L., and Mandel, L. (1990). "Observation of Nonlocal Interference in Separated Photon Channels," *Phys. Rev. Lett.* 65, 321– 324.
- Penrose, R., (2012). *Cycles of Time. An Extraordinary New View of the Universe*. Neew York: Vintage Books
- Penrose, R., (2004). *The Road to Reality. A Complete Guide to the Laws of the Universe*. New York: Alfred A. Knopf
- Penrose, R., (1990). *The Emperor's New Mind. Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. New York: Vintage
- Planck, M., (1965). *Vorträge und Erinnerungen*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft
- Prigogine, I., (1993). *¿Tan solo una ilusión?* Barcelona: Tusquets
- Randall, L., (2011). *Universos ocultos. Un viaje a las dimensiones extras del cosmos*. Barcelona: Acantilado
- Rarity, J., and Tapster, P. (1990). "Experimental Violation of Bell's Inequality Based on Phase and Momentum," en *Phys. Rev. Lett.* 64, 2495– 2498
- Rauch, D. Handsteiner, J., Hochrainer, A., Gallicchio, J., . Friedman, A.S., Leung, C., Liu, B., Bulla, L., Ecker, S., Steinlechner, F., Ursin, R., Hu, B., Leon, D., Benn, C., Ghedina, A., Cecconi,

- M., Guth, A.H., Kaiser, D.I., Scheidl, T., and Zeilinger, A. (2018). “Cosmic Bell Test Using Random Measurement Settings from High-Redshift Quasars”, en *Phys. Rev. Lett.* 121, 080403.
- Reisch, G. A., (2009). *Cómo la guerra fría transformó la filosofía de la ciencia. Hacia las heladas laderas de la lógica*. Bernal: Universidad Nacional de Quilmes
- Rosenblum, B., y Kuttner, F., (2014). *El enigma cuántico. Encuentros entre la física y la conciencia*. Barcelona: Tusquets
- Rovelli, C., (2018). *El orden del tiempo*. Barcelona: Anagrama
- Rovelli, C., (1996). « Relational Quantum Mechanics », <https://arxiv.org/abs/quant-ph/9609002>
- Ruebeck, J. B., Lillystone, P., Emerson, J., (2019). “Epistemic interpretations of quantum theory have a measurement problem”; disponible en: http://qpl2019.org/wp-content/uploads/2019/05/QPL_2019_paper_2.pdf
- Pérez Tamayo, R. (1998). *¿Existe el método científico?* México: FCE, La ciencia para todos
- Sainsbury, R. M., (2004). *Paradoxes*. Cambridge: Cambridge University press
- Ruiz, R., Ayala, F. J., (1998). *El método de las ciencias. Epistemología y darwinismo*. México, D. F.: F.C. E.
- Suárez, M., (2009). “Propensities in Quantum Mechanics”, en: Grebenberger, D., Hentschel, K., Weinert, F., (Eds.), *Compendium of Quantum Mechanics*. Berlin: Springer Verlag, págs. 502-505
- Smolin, L., (2006). *The Trouble with Physics. The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*. Boston-New York: Houghton Mifflin Company
- Schrödinger, E. (1935). „Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik“, *Naturwissenschaften* 23: pp.807-812; 823-828; 844-849
- Stapp, H- P., (2011). *Mindful Universe. Quantum Mechanics and the Participating Observer*. Springer Verlag
- Stapp, H. P., (1993). *Mind, Matter, and Quantum Mechanics*. Springer Verlag
- Susskind, L., & Friedman, A., (2014). *Quantum Mechanics. The Theoretical Minimum*. New York: Basic Books
- Tegmark, M., (2014). *Our Mathematical Universe. My Quest for the Ultimate Nature of Reality*. New York: Vintage Books
- Tegmark, M., Wheeler, J. A., (2001). “100 Years of Quantum Mysteries”, en: *Scientific American*, 284 (2), pp. 68-75; doi:doi:10.1038/scientificamerican0201-68

- Van Heijenoort, J., (1967). *From Frege to Gödel. A Source Book in Mathematical Logic, 1879-1931*. Cambridge, MA-London: Harvard University Press
- Vedral, V., (2010). *Decoding Reality*. Oxford: Oxford University Press
- Von Neumann, J., (1955). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton, NJ: Princeton University Press
- Weinberg, S., (1992). *Dream of a Final Theory. The Search for the Fundamental Laws of Nature*. New York: Pantheon Books
- Wheeler, J. A., (1990). "Information, Physics, Quantum: The Search for Links », págs. 309-336, en : Zurek, W. H., *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, Addison-Wesley; disponible en: <https://cqi.inf.usi.ch/qic/wheeler.pdf>
- Whitaker, A. (2017). "John Stewart Bell, Quantum Information and Quantum Information Theory", pág. 5, en: Bertlmann, R., and Zeilinger, A. (Eds.) *Quantum (un)speakables II. Half a century of Bell's theorem*. Zürich: Springer
- Whitaker, A. (2012). *The new quantum age*. London: Academic Press
- Yourgrau, P., (2007). *Un mundo sin tiempo. El legado olvidado de Gödel y Einstein*. Barcelona: Tusquets
- Zeilinger, A (2017). "New dimensions for entangled photons: the role of information", en *Quantum (un)speakables II. Half a century of Bell's theorem*. Bertlmann, R., and Zeiliger, A. (Eds.), Zürich: Springer
- Zeilinger, A., (2010). *Dance of the Photons. From Einstein to Quantum Teleportation*. New York: Farrar, Straus and Giroux
- Zeh, H. D. (1999). *The physical basis of the direction of time*. Springer
- Zurek, W. H., (2003). "Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical", en: *Reviews of Modern Physics*, 75 (3): 715-775; doi: <https://www.10.1103/RevModPhys.75.715>
- Páginas web:
- Interpretación de Montevideo: https://arxiv.org/find/quant-ph/1/au:+gambini/0/1/0/all/0/1?skip=0&query_id=8ffd19153db1fb34
- Key Experiments and wave-particle duality, Universidad de Yale: <https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-19>
- Hilbert, D., (1927). <https://www.swr.de/swr2/wissen/archivradio/aexavarticle-swr-42234.html>; disponible también en: https://www.youtube.com/watch?v=EbgAu_X2mm4

Para la diagramación se utilizaron los caracteres
Georgia, Gill sans
Marzo de 2022

El conocimiento es un bien de la humanidad.
Todos los seres humanos deben acceder al saber.
Cultivarlo es responsabilidad de todos.