

Alternativas a la Mecánica Cuántica. El origen del azar.

En este capítulo intentaremos resumir los intentos más importantes por buscar argumentos que permitan generar una descripción del mundo basada en principios “obvios”. Veremos que, de hecho, algunos de ellos son contradichos por la Mecánica Cuántica. Por ejemplo, hemos dicho varias veces que que la Mecánica Cuántica afirma que las probabilidades no provienen de nuestra ignorancia. En efecto, dentro del formalismo de la Mecánica Cuántica no hay nada que diga que ese, la ignorancia, es el origen del azar. Pero: ¿Cómo podemos estar seguros de que no hay descripciones alternativas que den lugar a las mismas predicciones cuantitativas que aquellas que realiza la Mecánica Cuántica? ¿Existe otra descripción más profunda de la naturaleza en la que el azar surja como consecuencia de nuestra ignorancia y no como algo inexplicable, o es algo a cuya existencia debemos resignarnos?

Presentaremos la demostración de que las predicciones de la Mecánica Cuántica son cuantitativamente contrapuestas a aquellas que surgen de una gran clase de modelos que aceptan hipótesis compatibles con nuestro sentido común. Estos modelos se conocen con el nombre de modelos “realistas y locales”, un nombre con una carga filosófica tal vez demasiado pesada. Describiremos en detalle las hipótesis en las que se basan esos modelos y presentaremos las predicciones que dan lugar a contradicciones experimentalmente verificables con la Mecánica Cuántica. ¡Que, de hecho, fueron verificadas experimentalmente en los últimos años!

13.1. Un poco de historia...

Una de las figuras icónicas de la lucha en contra de la Mecánica Cuántica fue, paradójicamente, uno de sus creadores: Albert Einstein. Sin duda, Einstein fue uno de los más grandes científicos de la historia. Sus ideas revolucionaron el pensamiento humano mostrando que, por ejemplo, conceptos tan básicos como el tamaño de los objetos y la duración de los intervalos de tiempo no tienen un carácter absoluto. Por el contrario, dependen del observador. La Teoría de la Relatividad nos obligó a repensar conceptos básicos que están anclados en nuestro sentido común, ese conjunto de ideas que consideramos como obvias y que se forjan en nuestras experiencias cotidianas. Hoy, a más de cien años del nacimiento de la Relatividad hay miles de científicos que la comprenden y aplican a la perfección. Más aún, a lo largo de estos cien años ha sido posible reconciliar algunas de sus ideas más extrañas con nuestro sentido común. Para ello muchas veces solemos apelar a metáforas: La vida en un espacio curvo puede imaginarse pensando en lo que le ocurriría a un ser plano condenado a existir sobre la superficie de una esfera; la materia curva el espacio-tiempo de manera análoga a como una cama elástica se deforma al apoyar sobre ella un objeto masivo, etc. Estas analogías tienen sus defectos y no siempre resultan precisas, pero al menos es posible imaginarlas.¹

La Teoría de la Relatividad se desarrolló en sus comienzos como una empresa familiar: Einstein la concibió trabajando en soledad. Es bien conocida la anécdota que cuenta que cerca de 1920 Sir Arthur Eddington fue reportado por un periodista que le mencionó el rumor que por ese entonces afirmaba que en el mundo solamente había tres personas que comprendían la Teoría de la Relatividad. Eddington (¿bromeando?) preguntó: “¿Y quién es el tercero?” Por esos años había otra rama de la física en pleno desarrollo: la física cuántica. Contrariamente a lo que sucedía con la relatividad, eran decenas los físicos que trabajaban activamente en su desarrollo. La Mecánica Cuántica fue una creación colectiva que surgió luego de un esfuerzo material e intelectual impresionante. Sin embargo, como todo cambio de paradigma su desarrollo no estuvo exento de críticas y controversias. En este capítulo nos referiremos, en particular, a los cuestionamientos de Albert Einstein hacia la Mecánica Cuántica que motivaron uno de los debates más interesantes de la física.

Einstein, con su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico, contribuyó sustancialmente al desarrollo de la Mecánica Cuántica. Sin embargo jamás fue capaz de aceptar sus consecuencias y siempre la aborreció. Para citar solamente alguna de sus opiniones escritas basta mencionar las siguientes: En 1912 en una carta a Heinrich Zangger afirmaba, de manera algo irreverente: “*Cuanto más éxitos logra, más tonta me parece*”. Más adelante, en 1930 en una carta dirigida a Max Born decía: “*Todavía no me resigno a creer que los métodos estadísticos de la Mecánica Cuántica sean la última palabra, pero por el momento soy el único que sostiene esa opinión*”. En otra carta

¹La influencia de Einstein en el pensamiento científico moderno se pone en evidencia mencionando algunas frases llamativas que no tendrían sentido sin su contribución: “el tiempo se dilata”, “las longitudes se contraen”, “vivimos en un espacio-tiempo curvo”, “la luz modifica su trayectoria al pasar cerca del sol”, etc.

dirigida a Max Born, Einstein acuñó, en 1944, su famosa frase: “*Usted cree que Dios juega a los dados, mientras que yo creo en la existencia de leyes y de orden en un mundo al que, de una manera brutalmente especulativa, estoy tratando de comprender*”. En 1950, hacia el final de su vida y en una época de gloria de la física cuántica, Einstein se atrevió a afirmar que “*...a pesar de sus notables avances parciales, el problema está lejos de tener una solución satisfactoria*”.

¿Qué era lo que más le molestaba a Einstein de la física cuántica? La respuesta es sencilla: Su insatisfacción se originaba en el indeterminismo. La Mecánica Cuántica es una teoría no-determinista. Afirma que es posible realizar muchas veces el mismo experimento y obtener siempre resultados diferentes. Para colmo de males, la Mecánica Cuántica afirma que el indeterminismo es de naturaleza fundamental y que no se origina en ninguna limitación de nuestro instrumental. Es decir, de acuerdo a ella, la razón por la cual al repetir un experimento obtenemos resultados diferentes no es la falta de precisión en los artefactos que utilizamos para preparar el objeto antes de efectuar la medición, ni tampoco la falta de control en los aparatos de medición. Por último, y esto resultaba intolerable para Einstein, la Mecánica Cuántica afirma que el indeterminismo tampoco puede atribuirse a nuestra ignorancia sobre los detalles del objeto estudiado. Einstein hubiera aceptado de buena gana una teoría que, con modestia, se limitara a predecir probabilidades. En cambio, le resultaba intolerable la Mecánica Cuántica que de manera contundente, afirma que las probabilidades no surgen de nuestra ignorancia ni de nuestra incapacidad de controlar todas las variables experimentales sino que tienen un origen fundamental e inexplicable.

Estas características de la física cuántica no solamente molestaban a Einstein, sino que todavía molestan a casi todos los físicos cuánticos, que se cuentan por decenas de miles. Paradojalmente, siendo la física cuántica la teoría científica mejor testada de la historia, todavía no se han acallado los debates sobre su interpretación. Estos debates comenzaron desde la concepción de la teoría y Einstein tuvo un notable protagonismo en muchos de ellos. Las predicciones de la física cuántica son múltiples y sumamente precisas. Por ejemplo, puede predecir que cada vez que iluminemos un átomo de Helio se emitirá un electrón sólo si la longitud de onda de la luz es menor que $50,425931 \pm 0,000002$ nanómetros. Esta predicción teórica es contrastada con el resultado de los experimentos donde se comprueba que los electrones son emitidos para longitudes de onda menores que $50,4259299 \pm 0,0000004$ nanómetros. El acuerdo entre la teoría y el experimento es notable: ¡una precisión comparable a la que tendríamos si fuéramos capaces de predecir la distancia entre Ushuaia y La Quiaca con un error menor que diez centímetros!²

Predecir propiedades de los átomos con precisión asombrosa puede ser impresionante, pero alejado de la vida cotidiana. Sin embargo, a partir de este tipo de logros es que la física cuántica ha permitido el desarrollo de tecnologías que cambiaron el mundo y nuestra forma de vida: sin ella no se hubiera desarrollado la

²Por el contrario, la física “clásica” predice que para cualquier longitud de onda algunos electrones serán emitidos por los átomos de Helio, lo cual entra en abierta contradicción con los resultados de los experimentos.

energía nuclear, ni la microelectrónica, ni el láser, ni ninguna de las tecnologías optoelectrónicas que revolucionaron las comunicaciones, ni las técnicas modernas de diagnóstico médico por imágenes, etc. ¡Casi todas las tecnologías relevantes del siglo XX se basan en la Mecánica Cuántica!

Sin embargo, pese a sus asombrosas predicciones ninguno de las decenas de miles de científicos cuánticos es capaz de “comprender” esta teoría. No es capaz de tornarla compatible con el sentido común. Richard Feynmann, uno de los científicos más brillantes de la segunda mitad del siglo XX afirmaba, en forma provocadora, que “*nadie entiende la Mecánica Cuántica*”. Y lo hacía en el contexto de una reflexión profunda: para Feynman, nadie era capaz de hacerse una imagen correcta del mundo microscópico usando los conceptos que generamos para describir el mundo macroscópico. Al hacer eso, caemos inevitablemente en preguntarnos: ¿cómo es posible que la naturaleza se comporte de este modo? Nadie lo entiende. Pero los hechos confirman que la naturaleza se comporta tal como lo predice la Mecánica Cuántica.

13.2. Einstein contra la mecánica cuántica. EPR

En 1935 Einstein Podolsky y Rosen (EPR) publicaron en el *Physical Review* un artículo con un título provocativo en el que preguntaban: “*¿Puede considerarse que la descripción cuántica de la realidad física es completa?*”. En el trabajo argumentaban que la respuesta a esta pregunta es negativa: Einstein creía haber encontrado un argumento que permitía demostrar que en la Mecánica Cuántica anidaba el germen de su propia destrucción. El trabajo de EPR tuvo inmediata repercusión en los medios (apareció en la primera plana del diario *New York Times*) pero fue rápidamente contestado por Bohr, que mostró que EPR no estaban poniendo en evidencia una contradicción en la teoría sino simplemente su rareza, su naturaleza contraria al sentido común. La profecía de Einstein, como veremos, demostró ser incorrecta. Hoy sabemos con certeza que, si el germen que destruirá a la Mecánica Cuántica existe, no es aquel encontrado por EPR en 1935.

El trabajo de EPR forma parte de un debate que dio lugar a muchos trabajos: ¿es posible construir teorías alternativas a la Mecánica Cuántica en las que el origen del azar sea nuestra ignorancia? Einstein creyó que en 1935 había demostrado que la propia Mecánica Cuántica reclamaba esas teorías, que era evidente que no proveía una descripción completa de la naturaleza.

En su célebre trabajo EPR establecen en primer lugar una serie de requisitos que toda teoría, que aspire a describir la realidad física, debe cumplir. De acuerdo a los autores, las teorías físicas tienen que tener a los *elementos de la realidad* como sus principales protagonistas. EPR proveen una definición operacional para distinguir aquellas propiedades de la naturaleza que deben ser consideradas elementos de la realidad. Esta definición es la siguiente: *Si somos capaces de predecir con certeza el valor de alguna propiedad de un objeto sin perturbarlo en modo alguno, entonces esa propiedad debe ser considerada un “elemento de la realidad”*. La idea es simple: si nuestra predicción no afecta en modo alguno al sistema, la propiedad en cuestión

tiene que tener un sustrato real, su valor debe de estar “escrito” en el objeto en cuestión. Estos criterios propuestos por EPR para toda teoría física pueden ser discutidos en el plano epistemológico o filosófico, pero suenan aceptables para la mayoría de las personas. El objetivo del trabajo de EPR es demostrar que la Mecánica Cuántica no cumple con estos principios y que, por lo tanto, no puede ser considerada una descripción completa de la realidad física.

La clave del trabajo de EPR consiste en analizar propiedades de los estados entrelazados. El nudo del argumento EPR (en la versión desarrollada más tarde por David Bohm) es el siguiente: consideremos un sistema compuesto por dos partículas de espín 1/2 que es preparado de modo tal que sus propiedades $M_1 = \sigma_x \otimes \sigma_x$ y $M_2 = \sigma_z \otimes \sigma_z$ toman los valores $M_1 = -1$ y $M_2 = -1$ (o sea, el estado es el estado de Bell $|\Psi_-\rangle = (|01\rangle - |10\rangle)/\sqrt{2}$). Consideremos además que las partículas 1 y 2 pueden ser separadas y llevadas a laboratorios distantes que llamaremos Labo-1 y Labo-2. Utilizaremos laboratorios tan separados como para que ninguna perturbación material generada durante las mediciones realizadas en el Labo-1 tenga tiempo suficiente para propagarse hasta el Labo-2 (y viceversa). Tal como discutimos más arriba, si en el Labo-1 medimos la propiedad σ_x sobre la primera partícula podemos predecir el resultado que obtendríamos si midiéramos σ_x en el Labo-2. En efecto, sabemos que si en el Labo-1 obtenemos $\sigma_{x,1} = +1$ entonces con certeza podemos predecir que si midiéramos σ_x en el Labo-2 deberíamos obtener el resultado $\sigma_{x,2} = -1$. Análogamente, si obtenemos $\sigma_{x,1} = -1$ entonces predecimos con certeza que si decidiéramos medir σ_x en el Labo-2 obtendríamos el valor $\sigma_{x,2} = +1$. Por lo tanto, el valor de la propiedad σ_x en el Labo-2 puede ser predicho con certeza a partir de los resultados de experiencias realizadas en el Labo-1, aún cuando los laboratorios se encuentren tan distantes uno del otro que ninguno de los eventos que ocurren en su interior puede alterar lo que ocurre del otro lado.

En consecuencia, podemos concluir que $\sigma_{x,2}$ debe ser un “elemento de la realidad”: a partir de $\sigma_{x,1}$ es posible predecir $\sigma_{x,2}$ sin perturbar en modo alguno a la partícula en el Labo-2. Lo mismo debe pasar con $\sigma_{z,2}$, ya que podríamos predecir con certeza su valor a partir de experimentos del mismo tipo, que involucran medir la propiedad $\sigma_{z,1}$ sobre la primera partícula. Sin embargo, para la Mecánica Cuántica estas propiedades son complementarias y sus valores no pueden ser definidos simultáneamente. En consecuencia, concluyen EPR: la Mecánica Cuántica no puede proveer una descripción completa de la realidad.

El trabajo de EPR recibió una rápida (y breve) respuesta de Niels Bohr quien hizo notar que el argumento de EPR no expone en realidad ninguna contradicción interna de la Mecánica Cuántica. Bohr destacó que el argumento de EPR utiliza un razonamiento “contra-fáctico” ya que mezcla resultados de experimentos reales con resultados de experimentos imaginarios. En efecto: en el primer laboratorio tenemos que decidir qué propiedad mediremos para la partícula 1. Podríamos elegir medir $\sigma_{x,1}$ o bien podríamos elegir medir $\sigma_{z,1}$. Pero, como sabemos, la Mecánica Cuántica nos dice que no podemos hacer las dos cosas a la vez admitiendo que hay predicciones que puede hacerse y otras que no tienen sentido. Bohr argumentaba que era necesario considerar a cada medición como un evento separado de manera que no es posible extraer conclusiones de experimentos incompatibles, y deno-

minó a este hecho “principio de complementariedad”. El argumento EPR mezclaba sutilmente los resultados de ambas mediciones ya que en definitiva ambas son necesarias si pretendemos otorgar el status de “elementos de realidad” tanto a la propiedad $\sigma_{x,2}$ como a $\sigma_{z,2}$. Efectivamente, aquí hay un razonamiento contrafáctico. Pero es un razonamiento que cualquier persona sensata estaría dispuesta a realizar: si la partícula 2 se encuentra en el Labo-2, nada puede saber sobre cuál es la propiedad que el experimentador decidirá medir en el Labo-1. En consecuencia, deberíamos estar dispuestos a aceptar que, pese a que no podemos realizar los dos experimentos sino que debemos elegir uno de ellos, tanto las propiedades $\sigma_{x,2}$ como $\sigma_{z,2}$ deben estar escritas en la segunda partícula (o sea, deben ser “elementos de la realidad”). En cambio, la Mecánica Cuántica no nos permite razonar de esta forma. Asher Peres acuñó la frase que mencionamos varias veces y que describe la actitud que debería tener un físico pragmático ante la posibilidad de caer en razonamientos contrafácticos. No debería olvidar nunca que *los experimentos que no se realizan no tienen resultados*.

13.3. Teorías realistas locales. Variables ocultas.

El argumento de EPR no demuestra una inconsistencia interna de la Mecánica Cuántica sino que pone en evidencia que esta teoría no satisface ciertos criterios de muy razonable apariencia. Naturalmente, debemos preguntarnos si es posible que exista una alternativa compatible con los resultados de los experimentos (que hasta el día de hoy coinciden con las predicciones de la Mecánica Cuántica) y que además sea compatible con el sentido común, o, más precisamente, con los postulados de EPR. Podríamos imaginar, entonces, que existen en la naturaleza grados de libertad microscópicos que todavía no hemos sido capaces de descubrir. Estos grados de libertad son usualmente denominados *variables ocultas*. Si existieran variables ocultas, podríamos concebir la posibilidad de que nuestra ignorancia sobre su comportamiento y su naturaleza sea la responsable de la aleatoriedad que observamos en los resultados de ciertos experimentos. Es decir, podríamos concebir la posibilidad de que al repetir muchas veces el mismo experimento sin controlar el comportamiento de las variables ocultas estuviéramos generando sistemas que en realidad no son idénticos entre sí. En cada realización experimental, en cada evento, los resultados de los experimentos estarían completamente determinados por esos valores ocultos. Pero al repetir muchas veces el mismo experimento podríamos obtener resultados distintos distribuidos de manera aparentemente aleatoria. Donde esta aleatoriedad sería simplemente una consecuencia de nuestra ignorancia. El trabajo de EPR tuvo la virtud de exponer de manera sistemática cuáles son las propiedades que nuestro sentido común le reclama a las teorías físicas.

Las teorías compatibles con el sentido común son aquellas que se engloban con el nombre de *teorías realistas locales*. Diremos que una teoría es *realista* si acepta el hecho de que todas las propiedades observables (los elementos de realidad) de los sistemas físicos tienen valores precisos que determinan los resultados de las

mediciones que efectuemos sobre ellas. Estas teorías incluyen a las que aceptan la existencia de variables ocultas. De acuerdo a ellas la realidad física se describe en su nivel más profundo mediante un modelo en el que los resultados de todos los posibles experimentos están escritos de algún modo en los objetos. Es decir, en este contexto el realismo es sinónimo de determinismo. Toda aleatoriedad debe originarse en nuestra limitada capacidad de control o de conocimiento. Diremos que una teoría es *local* si no admite la posibilidad de que exista acción a distancia o propagación instantánea de cualquier tipo de señal o perturbación. Estas teorías, son compatibles con la idea de que mediante la separación suficientemente grande de dos partes de un sistema, llevándolas a laboratorios muy distantes por ejemplo, se garantiza que las acciones que realizadas sobre una de ellas no tendrán influencia sobre lo que suceda con la otra.

13.4. ¿Cómo sabemos que no existen teorías de variables ocultas cuyas predicciones coincidan con las de la Mecánica Cuántica?

La posibilidad de que exista alguna teoría basada en variables ocultas que se más fundamental que la Mecánica Cuántica fue considerada por numerosos autores. La discusión sobre este asunto se aplacó luego de que John von Neumann publicara un teorema en el que se demostraba que no era posible construir una teoría de este tipo que diera lugar a las mismas predicciones que la Mecánica Cuántica. Su teorema fue publicado en el célebre libro en el que el genial von Neumann presenta su axiomatización de la Mecánica Cuántica. Sin embargo, a principios de los años 60, John Bell puntualizó que el teorema de von Neumann contenía un error, una hipótesis demasiado restrictiva que hacía que sus consecuencias no fueran trascendentes. El propio Bell, comenzó a explorar entonces la posibilidad de construir teorías de variables ocultas dando lugar a una serie de trabajos de consecuencias notables.

Bell intentaba demostrar que Einstein tenía razón y que no podía descartarse la existencia de teorías más fundamentales que la Mecánica Cuántica en las que el azar se originara en la ignorancia. Esa era su opinión, el prejuicio ideológico con el que comenzó sus trabajos. Para comenzar, Bell construyó un ejemplo sencillo: demostró que es posible construir una teoría de variables ocultas que prediga los mismos resultados que la Mecánica Cuántica para un sistema formado por una única partícula de spin $1/2$. De este modo, Bell no solamente demostraba que la conclusión de von Neumann era incorrecta sino que, pensaba, abriría el camino para el estudio de este tipo de teorías que, tal vez, algún día podrían reemplazar a la Mecánica Cuántica. Pero el final de la historia fue muy diferente a como lo imaginaba John Bell. Demostró exactamente lo opuesto a lo que pretendía...

Es muy ilustrativo recorrer la historia de los trabajos de Bell. En su primer trabajo célebre sobre el tema (publicado en 1966) Bell presenta una teoría de variables ocultas para una *única* partícula de spin $1/2$. La teoría da lugar exactamente a las

mismas predicciones que la mecánica cuántica (una gran virtud). En esta teoría Bell admite que el estado de un sistema debe describirse de manera más completa que como lo hace la Mecánica Cuántica. En efecto, admite que a la descripción del estado que hace la Mecánica Cuántica mediante un vector $|\psi\rangle$ podría agregarse un conjunto de variables desconocidas, a las que genéricamente denotamos como λ . La gran virtud de esta teoría es que admite que conociendo $|\psi\rangle$ y λ podríamos predecir con certeza los resultados de todas las mediciones sobre el espín. Nuestra ignorancia sobre λ es la responsable del lamentable hecho de que nos veamos obligados a predecir solamente probabilidades.

Por supuesto que esta teoría de Bell no tiene otra motivación mas que demostrar que no podemos descartar la existencia de modelos en los que el azar proviene de la ignorancia. El modelo es suficientemente sencillo como para describirlo sintéticamente. Como dijimos, el estado del sistema está descrito por el par $(|\psi\rangle, \lambda)$, donde la variable oculta λ es un número real tal que $-1 \leq \lambda \leq 1$. Supongamos que aceptamos la siguiente regla para predecir el resultado que se obtiene en la medición de alguna propiedad observable A , representada por el operador $\hat{A} = \vec{n} \cdot \vec{\sigma}$ y cuyos valores son siempre iguales a ± 1 , lo cual es un dato experimental:

1. $A(|\psi\rangle, \lambda) = +1$, si $-1 \leq \lambda \leq \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle$,
2. $A(|\psi\rangle, \lambda) = -1$, si $\langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle < \lambda \leq 1$.

Si admitimos que λ es una variable con una distribución uniforme (o sea, en cada realización del experimento se sortea un valor de λ al azar elegido en todo el intervalo) entonces $+1$ ocurrirá con una probabilidad $(1 + \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle)/2$, y -1 con una probabilidad $(1 - \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle)/2$. Por lo tanto, el valor medio de los resultados es

$$\begin{aligned} \langle \hat{A} \rangle &= (-1) \frac{(1 - \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle)}{2} + (+1) \frac{(\langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle + 1)}{2} \\ &= \frac{1}{2} \times 2 \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle = \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle \end{aligned}$$

En consecuencia, el valor medio de cualquier observable obtenido de esta manera es idéntico al predicho por la Mecánica Cuántica. Una teoría como esta es indistinguible de la Mecánica Cuántica en cuanto a sus predicciones, pero está basada en una imagen del mundo mucho más compatible con nuestro sentido común. Vale la pena comentar una propiedad del modelo de Bell, que está relacionada con aspectos fundamentales del espín que discutimos en el primer capítulo. Consideremos las tres propiedades $\hat{A}_i = \vec{n}_i \cdot \vec{\sigma}$ donde los versores \vec{n}_i ($i = 1, 2, 3$) forman ángulos de 120° entre sí. El modelo de Bell le asigna valores a estas tres propiedades de acuerdo al esquema presentado más arriba. Es decir, para un dado valor de λ y para un dado estado $|\psi\rangle$ los valores $A_i(|\psi\rangle, \lambda)$ están determinados. Sin embargo, estos valores no satisfacen la relación de consistencia funcional $\sum A_i = 0$. Esta relación se cumple para los valores medios pero no para los valores individuales.

Luego de formular este modelo, Bell analizó la siguiente pregunta obvia: ¿Será posible construir modelos de este tipo para cualquier sistema cuántico? En ese mismo trabajo Bell dio el primer paso en esa dirección analizando un sistema de dos

partículas de espín $1/2$. Nuevamente fue capaz de construir una teoría de variables ocultas cuyas predicciones coincidían con la Mecánica Cuántica. Sin embargo, el modelo de Bell para dos espines era no-local: Para estados entrelazados se verificaba que las variables ocultas que determinan los valores de las propiedades de cada subsistema son globales y no pueden separarse en variables que afecten localmente a cada parte. Bell se preguntó en su trabajo si esta propiedad era simplemente un defecto de su modelo o si, por el contrario, sería una propiedad general de cualquier modelo de variables ocultas cuyas predicciones coincidieran con las de la Mecánica Cuántica. En una nota al pie de página, que fue incluido en las pruebas de galera del trabajo, figura una aclaración: “Desde la escritura de este trabajo, he encontrado una prueba de que esta es una propiedad general”. Esa prueba fue publicada en otro trabajo, escrito con posterioridad al anterior pero publicado, por un problema editorial, antes. Es decir, el primer trabajo de Bell fue publicado en 1966 mientras que el primero lo fue en 1964. En este trabajo figura la demostración mencionada, junto con notables reflexiones sobre sus implicancias.

En efecto, Bell demuestra que cualquier teoría que acepte la existencia de variables ocultas que determinan los valores de todas las propiedades de un sistema (realismo) y al mismo tiempo aceptan el principio de localidad, conducen a predicciones cuantitativamente diferentes que la Mecánica Cuántica.

13.5. Desigualdades de Bell: la Mecánica Cuántica contra las teorías realistas–locales

Los trabajos de John Bell permitieron que la discusión sobre la existencia de teorías de variables ocultas pasara del terreno de la filosofía al de la física, en el cual la validez de los modelos es sometida al juicio de los experimentos. Es interesante notar que la intención de John Bell al comenzar sus investigaciones era encontrar argumentos a favor del punto de vista de Einstein. Bell expuso su posición ideológica con elocuencia: “Yo pensaba que la superioridad intelectual de Einstein sobre Bohr en este punto era enorme: una distancia gigante entre un hombre que veía claramente lo que se necesitaba (Einstein) y un oscurantista (Bohr)”. Paradojalmente, con sus trabajos Bell logró exactamente lo contrario de lo que se proponía: descubrió la forma en la cual el punto de vista de Einstein podía demostrarse falso a partir de los resultados de experimentos reales.

La trascendencia de los trabajos de Bell no puede subestimarse. Los mismos han tenido un impacto enorme en las últimas décadas. En breves palabras, Bell demostró que todas las teorías realistas locales conducen a predicciones cuantitativas sobre resultados experimentales concretos. Asimismo, demostró que estas predicciones pueden entrar en contradicción con las de la mecánica cuántica. En consecuencia, la validez de uno u otro modelo (el cuántico o aquel basado en nuestro sentido común) puede ser sometida al juicio de la ciencia experimental.

A primera vista resulta sorprendente que sea posible derivar predicciones para todas las teorías realistas locales. Estas predicciones toman la forma de desigualda-

des matemáticas que restringen los valores que pueden tomar las probabilidades de eventos registrados en laboratorios distantes cuando se realizan experimentos sobre las partes de un sistema compuesto. Estas relaciones matemáticas se conocen con el nombre de *desigualdades de Bell*. En lo que sigue presentaremos una deducción sencilla de una de estas desigualdades (que no fue presentada por Bell sino por David Mermin en 1981).

13.6. Descripción de un experimento sencillo realizado en dos laboratorios distantes.

Consideremos ahora una situación como la analizada en el trabajo de EPR (en la versión desarrollada por David Bohm): Tomamos un sistema compuesto por dos partículas de espín $1/2$. Determinamos simultáneamente los valores de las propiedades $M_1 = -1$ y $M_2 = -1$, creando de este modo un estado entrelazado

$$|\psi_{-}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle).$$

Luego llevamos a cada partícula a un laboratorio distinto (Labo-1 y Labo-2). Ambos laboratorios están espacialmente separados y la distancia entre ellos es tal que *no* hay posibilidad de propagación de alguna señal de un laboratorio a otro durante el tiempo en que transcurren nuestros experimentos. En cada laboratorio un experimentador medirá la componente del espín de su partícula a lo largo de alguna de las tres direcciones que indicamos como \vec{a}, \vec{b} o \vec{c} (que forman un ángulo de 120° entre sí) como indica la Fig. 13.1. Los experimentadores que actúan en cada uno de sus laboratorios eligen, al azar, medir la componente del spin en alguna de esas tres direcciones. Podemos pensar que cada experimentador tiene a su disposición un aparato como el que aparece en la Fig. 13.1. Dicho aparato tiene un selector con tres posiciones. Cuando el selector apunta hacia la izquierda el aparato mide la componente \vec{a} del espín, si el selector apunta hacia arriba el aparato mide la componente \vec{b} y si apunta hacia la derecha mide la componente \vec{c} . Cualquiera de esas mediciones da lugar solamente a dos resultados: $+1$ o -1 . El experimento se repite muchas veces. En cada instancia el estado de las partículas se prepara de manera idéntica, luego cada una de ellas es enviada a un laboratorio diferente, cada experimentador elige al azar (y de manera totalmente independiente) la posición del selector de su aparato y finalmente registra el valor que obtiene en su medición.

Como cada experimentador puede elegir medir una de tres propiedades (A , B , ó C), es posible agrupar las mediciones realizadas en ambos laboratorios en nueve configuraciones. Sin mucho esfuerzo podemos hacer una lista de todas ellas. Colocando en primer lugar la propiedad medida en el Labo-1 y en segundo lugar la que se mide en el Labo-2, las nueve configuraciones son: (A_1, A_2) , (B_1, B_2) , (C_1, C_2) , (A_1, B_2) , (B_1, A_2) , (A_1, C_2) , (C_1, A_2) , (B_1, C_2) y (C_1, B_2) .

¿Qué tipo de resultado podríamos obtener en un experimento de este tipo? Por ahora solamente vamos a aceptar un hecho que surge de los experimentos. Cada

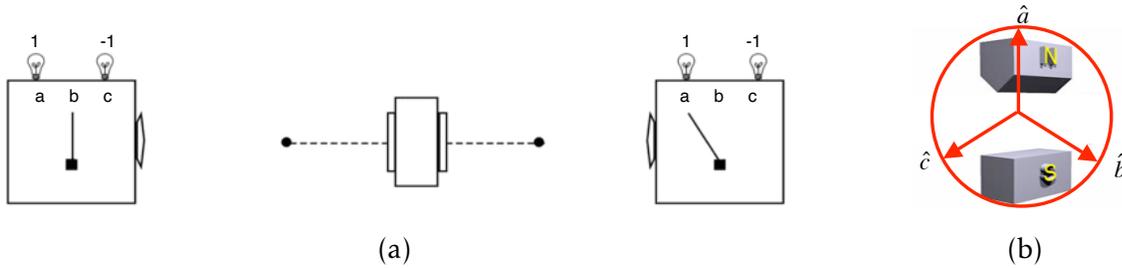


Figura 13.1: (a) Para poner a prueba la versión más sencilla de las desigualdades de Bell consideramos dos laboratorios que se encuentran suficientemente separados, y en cada uno se pueden realizar mediciones de la componente del spin en tres direcciones. (b) Las direcciones \vec{a} , \vec{b} o \vec{c} en las que se realizan las mediciones forman un ángulo de 120° .

vez que en ambos laboratorios se mide la misma propiedad, se obtendrán resultados opuestos. Es decir, los resultados de los experimentos en ambos laboratorios están fuertemente anti correlacionados.

13.6.1. El experimento según las teorías realistas locales.

Pensemos de qué manera describiría esta situación experimental una teoría realista local. En primer lugar, cualquier teoría de este tipo debe aceptar que antes de que el experimentador que trabaja en el Labo-1 decida qué propiedad medirá, el resultado de dicha medición debe tener existencia real en la partícula 1. Esto es así porque las tres propiedades que el experimentador puede medir (que denotamos como A, B o C) son “elementos de la realidad”. En efecto, el argumento EPR debería ser suficiente para convencernos de esto: los valores de estas propiedades podrían ser predichos con certeza si hiciéramos el experimento adecuado en el Labo-2. Entonces, todas las teorías realistas locales deben aceptar que cada partícula viaja hacia su detector llevando un conjunto de instrucciones consigo que indican el resultado de cualquier medición. Es tentador utilizar una metáfora biológica: cada partícula lleva consigo *genes* que determinan los valores de las propiedades A, B, C . Podríamos denotar a estas instrucciones con una terna de números (a, b, c) que indican los valores que se obtendrían si se midiera el valor de alguna de estas tres propiedades. Por ejemplo si la partícula lleva un gen del tipo $(+1, -1, +1)$ quiere decir que si el experimentador decidiera medir A ó C obtendría en ambos casos el valor $+1$ mientras que si midiera B el resultado sería -1 . Es evidente que, como solamente hay dos resultados posibles para la medición de cada una de las tres propiedades, tan solo hay ocho genes posibles para cada partícula. En la Tabla 13.2 presentamos la lista exhaustiva de todos ellos.

Por otra parte, toda teoría realista local debe aceptar que los genes que lleva la partícula 1 tienen que estar correlacionados con los que lleva la partícula 2. En efecto, esto debe ser así porque si los dos experimentadores decidieran medir la misma propiedad verificarían que obtienen resultados opuestos. Por lo tanto, el gen que lleva la primera partícula determina completamente al gen de la segunda.

| GENES POSIBLES | |
|----------------|-------------|
| Partícula 1 | Partícula 2 |
| (+1,+1,+1) | (-1,-1,-1) |
| (+1,+1,-1) | (-1,-1,+1) |
| (+1,-1,+1) | (-1,+1,-1) |
| (+1,-1,-1) | (-1,+1,+1) |
| (-1,+1,+1) | (+1,-1,-1) |
| (-1,+1,-1) | (+1,-1,+1) |
| (-1,-1,+1) | (+1,+1,-1) |
| (-1,-1,-1) | (+1,+1,+1) |

Figura 13.2: Lista de todos los “genes” o instrucciones posibles (a, b, c) para dos partículas que se encuentran perfectamente correlacionadas.

Por ejemplo, si la primera partícula lleva un gen del tipo $(+1, -1, +1)$ la segunda debe llevar un gen complementario, del tipo $(-1, +1, -1)$.

13.6.2. La desigualdad de Bell más sencilla.

El descubrimiento fundamental de Bell es que todas las teorías que aceptan la existencia de genes deben satisfacer ciertas restricciones, que toman la forma de desigualdades matemáticas. Presentaremos aquí la versión más sencilla de estas desigualdades.

Supongamos que la primera partícula lleva el gen $(+1, +1, +1)$. En ese caso la segunda llevará el gen $(-1, -1, -1)$. Entonces, aunque los dos experimentadores midan propiedades distintas los resultados que obtendrán serán siempre opuestos: en el Labo-1 siempre se obtendrá el resultado $+1$ mientras que en el Labo-2 siempre se obtendrá el resultado -1 . Una situación idéntica tiene lugar si el gen que lleva la primera partícula es $(-1, -1, -1)$ ya que en ese caso también los resultados serán siempre opuestos. Si las partículas fueran generadas únicamente con estos dos tipos de genes entonces deberíamos concluir que los resultados obtenidos en ambos laboratorios serían siempre opuestos. Por supuesto, esta no es una hipótesis razonable ya que no sabemos nada sobre el mecanismo subyacente que produce genes diferentes (esas son, precisamente, las variables ocultas).

Pero, aunque parezca mentira, es posible deducir una propiedad muy sencilla que se debe cumplir para todos los otros genes (o sea, aquellos en los que hay una instrucción que es distinta de las otras dos como es el caso de los genes $(+1, +1, -1)$ y $(+1, -1, +1)$). Es fácil mostrar que para todos esos genes *habrá cinco configuraciones para las cuales los resultados obtenidos en Labo-1 y Labo-2 serán distintos y cuatro configuraciones para las cuales estos resultados serán iguales*. Para ver que esto es cierto es suficiente con hacer un análisis exhaustivo de lo que sucede con cada uno de los

| GEN DE LA PARTICULA 1: (+1,+1,-1) | | | |
|---|--------|--|--------|
| Cinco experimentos con resultados distintos | | Cuatro experimentos con resultados iguales | |
| Labo-1 | Labo-2 | Labo-1 | Labo-2 |
| A | A | A | C |
| B | B | C | A |
| C | C | B | C |
| A | B | C | B |
| B | A | | |

Figura 13.3: Para el gen (+1, +1, -1) hay cinco configuraciones de los detectores que dan lugar a que el resultado registrado en el Labo-1 sea diferente que el registrado en el Labo-2 mientras que hay cuatro configuraciones para las cuales los resultados son idénticos. Esto se repite para todos los genes en los que las tres instrucciones no son iguales.

genes. Por ejemplo, si el gen que lleva la primera partícula es (+1, +1, -1), tal como está indicado en la Figura 13.3, los resultados de los experimentos serán opuestos siempre que el primero y segundo experimentador midan respectivamente las propiedades (A_1, A_2) , (A_1, B_2) , (B_1, B_2) , (B_1, A_2) y (C_1, C_2) . En cambio, los resultados serán idénticos siempre que los experimentadores realicen las mediciones de las propiedades (A_1, C_2) , (B_1, C_2) , (C_1, A_2) y (C_1, B_2) . El lector puede comprobar que para todos los genes en los que las tres instrucciones no sean idénticas se verifica este mismo resultado: *Siempre hay cinco configuraciones de los detectores para los que los resultados obtenidos en ambos laboratorios son opuestos y hay cuatro para las cuales los resultados son idénticos* (recordemos que si las instrucciones son idénticas entonces los resultados siempre serán distintos). Si los experimentadores eligen al azar las configuraciones de sus detectores entonces podemos concluir que ¡por lo menos en 5 de cada 9 experimentos los resultados serán opuestos! De esta manera, para *toda teoría realista local* (RL) predecimos que la probabilidad P_{RL} de que se obtengan resultados diferentes debe cumplir la siguiente desigualdad:

$$P_{RL}(\text{Labo-1} \neq \text{Labo-2}) \geq \frac{5}{9} = 0,555\dots \quad (13.1)$$

Esta predicción es notable, ya que es totalmente independiente de la naturaleza de las variables ocultas.

13.6.3. El experimento según la Mecánica Cuántica.

La Mecánica Cuántica también realiza una predicción sobre el valor de la probabilidad de que se obtengan resultados diferentes en ambos laboratorios. Esta

predicción es drásticamente diferente de la que obtuvimos para las teorías realistas locales. En efecto, de acuerdo a la Mecánica Cuántica, dado el estado inicial $|\psi_{-}\rangle$, la probabilidad de obtener resultados distintos es:

$$P_{\text{Cuántica}}(\text{Labo-1} \neq \text{Labo-2}) = \frac{1}{2} = 0,5. \quad (13.2)$$

Para llegar a esta conclusión es necesario utilizar el formalismo matemático de la Mecánica Cuántica. Sin embargo, podemos hacer un intento por explicar su origen de manera sencilla. Consideremos en primer lugar lo que sucede con un única partícula. Si realizamos mediciones sucesivas de las componentes de un spín de una partícula en direcciones perpendiculares sabemos que, como las proyecciones perpendiculares del spín definen magnitudes complementarias, los resultados de la segunda medición estarán distribuidos al azar con una probabilidad del 50% para cada uno de los dos valores posibles. En cambio, si realizamos mediciones sucesivas en dos direcciones \vec{a} y \vec{b} , que forman un ángulo $\theta_{\vec{a}\vec{b}}$, la Mecánica Cuántica establece que la probabilidad de que los resultados de ambas mediciones sean iguales es

$$P(B = A) = \cos^2\left(\frac{\theta_{\vec{a}\vec{b}}}{2}\right). \quad (13.3)$$

Si las direcciones \vec{a} y \vec{b} forman un ángulo de 120 grados, como en el caso de la Figura 13.1, la probabilidad de que los resultados de dos mediciones sucesivas sean iguales es 1/4 (o sea, en el 25% de los casos obtendremos resultados iguales y en el 75% obtendremos resultados distintos³). Con este ingrediente estamos en condiciones de deducir cuál es la predicción que la Mecánica Cuántica realiza para el experimento analizado en las secciones anteriores.

Para calcular la probabilidad de que los resultados del Labo-1 sean diferentes de los del Labo-2 tenemos que analizar todos los casos posibles. Se prepara entonces el estado $|\psi_{-}\rangle$, y supongamos que en el Labo-1 se mide la propiedad A y se obtiene el valor $+1$. En ese caso sabemos que si midiéramos la propiedad A en el Labo-2 obtendríamos con certeza el valor -1 . En consecuencia, podemos afirmar que la partícula que se encuentra en el Labo-2 está en el estado de spín -1 en la dirección \vec{a} . Nos interesa calcular en ese caso cuál es la probabilidad de obtener el valor -1 para la medición de las componentes \vec{a} , \vec{b} ó \vec{c} . Para eso podemos analizar todos los casos posibles: Si medimos A (lo que ocurre en la tercera parte de los casos) obtendremos el resultado -1 con probabilidad 1. En cambio, si medimos B ó C (lo que ocurre en las restantes dos terceras partes de los casos) podemos apelar al resultado que mencionamos más arriba y afirmar que obtendremos el valor -1 con probabilidad 1/4. En conclusión si en el Labo-1 se mide $a = +1$ la probabilidad de que los resultados de las mediciones realizadas en el Labo-2 sean distintas resulta ser $\frac{1}{3}(1 + 1/4 + 1/4) = 1/2$, que es justamente el resultado que mencionamos más arriba. Razonando de igual modo para los restantes resultados posibles para las mediciones realizadas en el Labo-1 llegamos a la misma conclusión y de ese modo demostramos la validez de la predicción cuántica expresada más arriba.

³Esto se debe a que el coseno de un ángulo de 60° es igual a 1/2.

El contraste entre la predicción cuántica y la predicción de cualquier teoría realista–local es drástico: De acuerdo a la Mecánica Cuántica en la mitad de los experimentos obtendremos resultados diferentes y en la otra mitad los resultados serán idénticos. Esto es incompatible con la predicción de cualquier teoría realista local ya que de acuerdo a todas ellas los resultados deben ser diferentes por lo menos en el 55,5% de los experimentos. Quién tiene razón: ¿la Mecánica Cuántica o las teorías realistas locales? Para dirimir este debate, debemos realizar el experimento y comprobar cuál de las dos predicciones es la correcta.

13.7. Otra desigualdad de Bell: CHSH

La desigualdad de Bell que discutimos más arriba no fue la que Bell expuso en su trabajo sino que fue propuesta por Mermin, y tiene la virtud de ser extremadamente simple. Sin embargo, los experimentos que se realizaron no se basaron en la detección de la violación de esta desigualdad. Por el contrario, han buscado violaciones de otras desigualdades. En particular, una de las más estudiadas fue introducida pocos años después del trabajo de Bell por cuatro físicos: Clauser, Horne, Shimony y Holt, y se conoce con la sigla CHSH.

Es interesante revisar el argumento en que se basa esta desigualdad. Como antes, consideraremos experimentos realizados en dos laboratorios distantes. En cada laboratorio hay una parte de un sistema compuesto. Es decir: en algún lugar del espacio se genera un par de partículas en un estado tal que las correlaciones entre ellas son fuertes. Cada una de ellas viaja a un laboratorio y en cada uno de ellos se mide uno de *dos* propiedades: en el Labo–1 se mide la componente del espín a lo largo de la dirección \vec{a} o de la dirección \vec{b} a estas propiedades las llamaremos A y B ; en el Labo–2 se mide la componente del espín a lo largo de otras direcciones \vec{c} o \vec{d} , propiedades que llamaremos C y D . Asumiremos que cada experimentador elige al azar la dirección en la cual va a medir, y que la distancia entre los laboratorios (y entre ellos y la fuente donde se producen los pares) es muy grande, de modo tal que no hay posibilidad de conexión causal entre los eventos registrados en los laboratorios 1 y 2.

Cualquier teoría realista local debe admitir que los valores de estas propiedades están determinados por variables ocultas (o genes como dijimos anteriormente) que llevan escritos los valores de los resultados de las mediciones $\lambda = (a_\lambda, b_\lambda, c_\lambda, d_\lambda)$. Esta es la única dependencia que existe para los resultados de las mediciones. Por ejemplo, el valor de la proyección del espín en la dirección \vec{a} , al que llamaremos $a_\lambda = \pm 1$, debe ser independiente de lo que mida el observador presente en el laboratorio 2 (de otro modo, deberíamos escribir $a_\lambda(\vec{c})$ o $a_\lambda(\vec{d})$). Como todos estos valores son ± 1 , se verifica siempre la igualdad

$$a_\lambda(c_\lambda + d_\lambda) + b_\lambda(c_\lambda - d_\lambda) = \pm 2.$$

El caso más general que podemos considerar es cuando variables ocultas no toman un único valor para todas las instancias del experimento, sino que se encuentran

definidas a partir de una distribución de probabilidad desconocida $p(\lambda)$. De manera podemos mirar el módulo del valor medio de la expresión anterior, y llegar a la siguiente desigualdad:

$$\left| \int d\lambda p(\lambda) (a_\lambda(c_\lambda + d_\lambda) + b_\lambda(c_\lambda - d_\lambda)) \right| \leq \left| \int d\lambda p(\lambda) \right| \cdot \left| a_\lambda(c_\lambda + d_\lambda) + b_\lambda(c_\lambda - d_\lambda) \right| = 2$$

Finalmente, expandiendo el término de la izquierda de la expresión anterior, podemos reescribir la desigualdad anterior en forma conveniente:

$$|K(\vec{a}, \vec{c}) + K(\vec{a}, \vec{d}) + K(\vec{b}, \vec{c}) - K(\vec{b}, \vec{d})| \leq 2,$$

donde las funciones de correlación K se definen como el valor medio del producto de los resultados de cada par de experimentos, por ejemplo $K(\vec{a}, \vec{c}) = \int d\lambda p(\lambda) a_\lambda c_\lambda$. Esta es la famosa *desigualdad CHSH*, que debe satisfacerse para toda teoría realista local, pero puede violarse de acuerdo a la Mecánica Cuántica.

En efecto, de acuerdo a la Mecánica Cuántica, para el estado $|\Psi_-\rangle$ esta función de correlación resulta ser $K(\vec{a}, \vec{c}) = -\vec{a} \cdot \vec{c}$, tal como vimos en capítulos anteriores. De esta manera, podemos ver que es posible violar esta desigualdad si elegimos los vectores \vec{b} , \vec{c} , \vec{a} , y \vec{d} formando un ángulo θ entre ellos (en ese orden). Entonces, la combinación de funciones de correlación que aparece resulta ser

$$|K(\vec{a}, \vec{c}) + K(\vec{a}, \vec{d}) + K(\vec{b}, \vec{c}) - K(\vec{b}, \vec{d})| = |3 \cos \theta - \cos 3\theta|.$$

Eligiendo $\theta = \pi/4$ (por ejemplo $\vec{a} = \vec{e}_z$, $\vec{b} = \vec{e}_x$, $\vec{c} = (\vec{e}_z + \vec{e}_x)/\sqrt{2}$, $\vec{d} = (\vec{e}_z - \vec{e}_x)/\sqrt{2}$) entonces resulta ser

$$|K(\vec{a}, \vec{c}) + K(\vec{a}, \vec{d}) + K(\vec{b}, \vec{c}) - K(\vec{b}, \vec{d})| = 2\sqrt{2},$$

que claramente es mayor que 2. Es posible demostrar además, que esta es la máxima violación admitida por la Mecánica Cuántica (esta es la *cota de Cirelson*). Es notable además, que es posible descartar la teoría de variables ocultas con el sistema cuántico en el escenario más sencillo (recordemos que con una única partícula, siempre es posible encontrar un modelo de variables ocultas).

13.8. La violación de las desigualdades de Bell

Después de los trabajos de Bell, varios grupos se lanzaron a realizar experimentos como los descritos en la sección anterior. Cabe aclarar que ninguno de estos grupos lo hizo con la esperanza de detectar violaciones a las predicciones cuánticas. Por el contrario, a esa altura del siglo XX nadie dudaba que la Mecánica Cuántica saldría airoso en su confrontación contra las teorías de variables ocultas. Para poder realizar estos experimentos fue necesario superar varios obstáculos tecnológicos y los primeros resultados en los que se detectaron claras violaciones a las desigualdades de Bell fueron obtenidos recién en 1982 por Alain Aspect en Paris.

El experimento de Aspect fue un verdadero *tour de force* por el que debería hacerse acreedor al premio Nobel de física. Fue realizado utilizando pares de fotones entrelazados generados a partir del decaimiento de átomos de Calcio. Cuando este tipo de átomo decae en una cascada $S-P-S$ emite dos fotones que tienen casi la misma frecuencia y que están entrelazados en su polarización. Este grado de libertad de los fotones se comporta de manera muy similar al espín de una partícula de espín $1/2$. Para realizar su experimento Aspect primeramente tuvo que perfeccionar su fuente de pares de fotones entrelazados (que para esa época eran toda una novedad). Una vez producidos cada uno de los fotones cada uno de ellos era dirigido hacia un extremo distinto del laboratorio donde se habían montado dos estaciones de trabajo idénticas que jugaban el rol del Labo-1 y el Labo-2 que mencionamos más arriba. Estas estaciones constaban de un detector que cumplía el papel del instrumento de medición que ilustramos en la Figura 13.1. El objetivo fue mostrar violaciones a la desigualdad de Bell CHSH, por lo que fue necesario realizar dos mediciones diferentes en cada estación. En el experimento, en cada estación de trabajo los fotones se encontraban con un modulador electro-óptico que cambiaba la polarización de los fotones. Para cada una de estas direcciones los fotones eran enviados a detectores diferentes en los que se medía la polarización en alguna dirección (las que juegan un papel equivalente a las direcciones \vec{a} , \vec{b} o \vec{c} de la Figura 13.1). Aspect invirtió un esfuerzo considerable para asegurarse de que los espejos variaran su orientación suficientemente rápido y que los detectores estuvieran suficientemente separados como para poder garantizar que no existía conexión causal posible entre los registros tomados en ambos extremos del laboratorio. La longitud del laboratorio era de alrededor de 10 metros y los espejos cambiaban de posición en tiempos del orden de varios nano-segundos (hay que recordar que la luz recorre una distancia de casi treinta centímetros en un nano-segundo).

Los resultados de los experimentos de Aspect fueron concluyentes para la mayoría de los físicos, que por otra parte no dudaban sobre la validez de la Mecánica Cuántica. Sin embargo, un núcleo de escépticos continuó intentando producir experimentos todavía más concluyentes. Para ellos, los resultados de Aspect podían ser criticados desde distintos ángulos. Por cierto, teniendo en cuenta las implicancias fundamentales del resultado del experimento, se justifica tener una actitud que en otro contexto podría ser calificada de exageradamente conservadora. Los problemas del experimento de Aspect eran fundamentalmente dos: Por un lado los ángulos de los espejos no variaban de manera totalmente aleatoria y por lo tanto era posible imaginar algún mecanismo (inverosímil pero imaginable) por el cual los fotones pudieran “conspirar” para que el experimento pareciera favorecer a la Mecánica Cuántica aún cuando la teoría subyacente fuera realista local. Y por otra parte el tiempo de respuesta de los detectores era demasiado largo lo cual traía aparejadas limitaciones en la sincronización de eventos (el tiempo de respuesta y el tiempo característico de la emisión en cascada era comparable). Asimismo, la baja eficiencia de los detectores originaba otro problema potencial: no todos los eventos eran registrados, y no había manera de garantizar que el subconjunto de eventos que dan lugar a la señal medida sea una muestra no-sesgada del total. Si

bien parece completamente razonable aceptar que esto es cierto, en el contexto de este experimento aún este tipo de suposiciones “razonables” son puestas en discusión. Debido a esta, y a muchos otros cuestionamientos más técnicos, durante las últimas dos décadas del siglo XX se realizaron muchos otros experimentos para testear la violación de las desigualdades de Bell.

En la actualidad las técnicas disponibles para generar pares de fotones entrelazados han avanzado notablemente. Los métodos más modernos utilizan un fenómeno que se conoce como *conversión paramétrica inversa*. Este fenómeno se observa cuando ciertos cristales son iluminados con un láser intenso. Para ciertos cristales no-lineales se produce el proceso de conversión de un fotón del laser en un par de fotones que tienen frecuencias cercanas (en este proceso se conserva la energía y por lo tanto la suma de las frecuencias de los fotones emitidos es igual a la frecuencia del láser incidente). El par de fotones resulta estar entrelazado en su polarización. Los fotones generados de este modo han sido utilizados para realizar un gran número de experimentos en los que se demuestra la violación de desigualdades de Bell. Los experimentos actuales involucran distancias mucho mayores que las usadas en el experimento de Aspect. En 2001 el grupo dirigido por Anton Zeillinger en Innsbruck presentó resultados de un notable experimento donde se detectaban violaciones a desigualdades de Bell con fotones que recorrían varios centenares de metros antes de ser detectados. Poco después, Nicolas Gisin detectó señales claras de violaciones a las desigualdades de Bell en experimentos donde los fotones viajaban decenas de kilómetros (desplazándose por fibras ópticas que corren bajo la superficie del lago de Ginebra). En la actualidad, la existencia de violaciones a las desigualdades de Bell es un hecho que goza de un abrumador consenso a partir de la acumulación de una enorme cantidad de resultados experimentales.

13.9. El entrelazamiento como un recurso físico

El entrelazamiento es una propiedad de la Mecánica Cuántica que fue reconocida desde sus primeros años. Por ejemplo, es bien sabido que para construir un modelo razonable del átomo de Helio es necesario aceptar que los spines de sus dos electrones están entrelazados. En efecto, los estados entrelazados en sistemas de dos spines surgen naturalmente y juegan un rol muy importante en muchos fenómenos de la física atómica y molecular. Ningún físico medianamente informado consideraría al entrelazamiento como una propiedad exótica de la física cuántica. Sin embargo, el tipo de entrelazamiento al que la mayoría de los físicos está acostumbrado es aquel que se produce entre las partes de sistemas microscópicos. En ese contexto, las consecuencias paradójicas de este fenómeno no se ponen de manifiesto. Pero es evidente que, tal como fue analizado en el trabajo de EPR, cuando el entrelazamiento está presente a escala macroscópica es responsable de buena parte de los misterios de la física cuántica.

Desde hace mucho tiempo que somos conscientes de la utilidad de almacenar energía, por ejemplo en una batería. Una vez almacenada es posible utilizarla para

prender una lámpara, mover un motor, etc. En definitiva, sabemos que la energía almacenada es útil para realizar trabajo. Sólo recientemente se llegó a la conclusión de que es posible concebir al entrelazamiento como un recurso físico. La pregunta que surge en este contexto es *¿cuál es el tipo de tareas que necesitan del entrelazamiento para su ejecución?*. Sólo recientemente se comenzó a abordar esta pregunta y se demostró claramente que, al igual que la energía, podríamos almacenar este recurso y utilizarlo para realizar tareas vinculadas con el procesamiento y la transmisión de la información. La exploración de las posibilidades que abre el uso del entrelazamiento como recurso físico es un campo relativamente nuevo y la demora en su desarrollo se debe a que sólo recientemente se comprobó que es posible generar, preservar y manipular pares de objetos entrelazados sobre distancias macroscópicas.

13.10. Comentarios y metáforas finales

¿Cuál es la imagen del Universo que nos provee la Mecánica Cuántica? No responderemos completamente esta pregunta aquí sino que sólo resumiremos los ingredientes de esta visión a los que nos hemos referido en este capítulo. La Mecánica Cuántica postula la existencia de propiedades observables de un objeto que son incompatibles entre sí. Esto es algo novedoso y profundo. Para asimilarlo es necesario cambiar radicalmente nuestra visión de la realidad física. En primer término deberíamos admitir que al hablar de las *propiedades de un objeto* podemos generar cierta confusión. Esta terminología nos induce a pensar en algo que es propio del objeto, que le pertenece solamente a él. Por el contrario, la Mecánica Cuántica establece que aquello a lo que llamamos propiedades (o que más técnicamente denominamos como una “magnitud física observable”) es en realidad un canal mediante el cual el objeto interactúa con el mundo que lo rodea. El legado del principio de complementariedad es que los objetos tienen distintas ventanas con las que se conectan con el resto del Universo y que existen ventanas que no son compatibles entre sí. Aquello que llamamos “posición” o “momento” son en realidad idealizaciones que lo único que expresan son distintos mecanismos de interacción (canales) por los cuales los objetos de la naturaleza pueden afectarse mutuamente. Lo que la Mecánica Cuántica nos enseña es que hay ciertos mecanismos de interacción que son compatibles entre sí y que, por el contrario, hay otros que no lo son. Cuando un objeto interactúa con el mundo que lo rodea mediante el “canal de posición”, no puede hacerlo mediante el “canal de momento” y viceversa. En definitiva, la Mecánica Cuántica nos enseña que los objetos tienen distintas caras y que no todas ellas pueden ser vistas al mismo tiempo. La esencia del principio de complementariedad es esa y ese es un hecho fundamental.

Otra de las enseñanzas de la física cuántica es que el acto de medición no es un hecho pasivo. Probablemente este sea uno de los aspectos más controvertidos de la Mecánica Cuántica. En efecto, la Mecánica Cuántica coloca al observador en un lugar diferente del que tradicionalmente le otorgaba la física. Anteriormente se pensaba que las perturbaciones inherentes a la observación podían ser minimi-

zadas. Se pensaba que era posible concebir al acto de observar como una acción asimilable a la de *revelar algo que está escrito en el objeto estudiado*. La Mecánica Cuántica derribó ese paradigma y lo reemplazó por otro en el que el acto de observar es siempre una interacción. Muchas veces se presenta este hecho como una ventana por la cual puede colarse el subjetivismo. Pero la física cuántica no dice eso sino que establece que el proceso de medición no puede dejar de objetivarse. No puede dejar de describirse como una interacción física. Pero claro, la forma en la que la física cuántica combina esto con la existencia de propiedades incompatibles no puede dejar de sorprendernos. En efecto, si interactuamos con un objeto mediante un cierto canal, determinamos el valor de una de sus propiedades y creamos un estado en el los valores de sus caras complementarias están completamente indefinidos. Lo sorprendente y anti-intuitivo es que no es posible concebir a este como un estado de *ignorancia* sobre los valores de las caras complementarias. Por el contrario, debe ser tratado como una superposición de todas ellas. Probablemente la lección cuántica que nos resulte mas difícil de digerir siga siendo aquella que sintetiza la frase de Asher Peres: *los experimentos que no se realizan no tienen resultados*.

Por último, las predicciones cuánticas para los sistemas compuestos son ciertamente sorprendentes pero a la luz de lo dicho anteriormente no deberían parecerlo tanto. La Mecánica Cuántica nos dice que podemos encontrar un conjunto de propiedades globales de un sistema compuesto que sean complementarias a todas las propiedades de cualquiera de sus partes. Cuando medimos ese conjunto de propiedades colectivas de un sistema compuesto preparamos al objeto en un estado en el que todas las alternativas de sus facetas complementarias están presentes. Ese es un estado entrelazado en el cual los valores de las propiedades de las partes, que son complementarias con las propiedades medidas, están completamente indefinidos. Es importante destacar que para que este estado mantenga sus propiedades más notables (el entrelazamiento) es vital que permanezca aislado de todo tipo de interacciones con el medio (que típicamente tienen lugar a través de canales locales). Si el objeto permanece aislado y no es afectado por ningún mecanismo que induzca su *decoherencia* entonces seguirá comportándose como un todo. Será un objeto extendido, una unidad no-local, pese a que sus partes se hayan desplazado a lugares distantes. Las manifestaciones del comportamiento cuántico de objetos compuestos cuyas partes entrelazadas están separados por distancias macroscópicas son realmente sorprendentes. El siglo XXI será, sin duda, el siglo donde el estudio, la ingeniería y el aprovechamiento de este tipo de estados dará lugar al desarrollo de novedosas tecnologías cuánticas que, tal vez, contribuyan a que alguna vez la afirmación de Richard Feynman "*nadie entiende la Mecánica Cuántica*" deje de ser cierta.