

# Mecánica cuántica: la revolución perpetua

Álvaro S. Núñez, DFI

1. ¿Qué es la mecánica cuántica?
2. Hágase la luz
3. Probabilidades de lluvia
4. Incertidumbre
5. ¿Dónde esta la luna cuando nadie la esta mirando?
6. Ni lo uno ni lo otro, sino todo lo contrario
7. Einstein otra vez
8. Teorema de Bell
9. Tecnologías cuánticas

***“Todo lo que llamamos real está compuesto por cosas que no pueden considerarse como reales”, Niels Bohr***

## ¿Qué es la mecánica cuántica?

La mecánica cuántica es la teoría física de la materia a pequeña escala. Describe la estructura de los átomos y su interacción con la luz. Describe la composición del protón y el comportamiento del núcleo atómico. Describe los electrones que circulan por los circuitos de los computadores. Es una teoría hermosa. Llena de sutilezas conceptuales, que esperan, como trampas, que uno se equivoque. La teoría es, sin duda, la teoría científica más exitosa que haya sido creada por la humanidad. Esta frase es más que una declaración de intereses. Las predicciones de la mecánica cuántica han sido corroboradas cuantitativamente con una precisión sin precedentes. Sin embargo, el éxito tiene un precio. Una generación entera de científicos se enfrentó con la necesidad renunciar a una forma de ver la realidad heredada desde tiempos ancestrales. Para entender el universo tal y como se entiende desde el prisma de la mecánica cuántica debemos renunciar a varios principios. Atesorados principios atávicos que dan forma a nuestra concepción cotidiana de la naturaleza. No hablo de modificar un poco las leyes de la física. No hablo de que el electrón, dentro de un átomo, siga una trayectoria distinta a la predicha por alguna ley. La reforma es más profunda, es una renuncia definitiva a ciertos principios tan arraigados que ni siquiera nos damos cuenta cuando los usamos. Tomemos por ejemplo el principio de causalidad. Todo en el universo, es consecuencia de algo anterior y, a su vez, tiene consecuencias. Todo tiene causa y, por lo tanto es un efecto. Todo es una causa y, por lo tanto, tiene efectos. Al termino del siglo XIX este principio empezó a ser desafiado por abundante evidencia experimental. El primer signo fue el descubrimiento de la radioactividad. Sin saber todavía de núcleos, ni de la estructura del átomo, los científicos se vieron enfrentados a un proceso que no obedecía el principio de causalidad. Una muestra radioactiva emitía radiación en forma irregular. Sin un patrón determinado. Las radiación (partículas alpha, beta, gamma) salían disparadas de la materia, cada una, a un ritmo aleatorio. Este ritmo determina el sonido característico de los detectores de radioactividad. Rápidamente las evidencias se fueron acumulando y, de a poco, se fue formando una nueva teoría. La radioactividad se transformó, de esta forma, en el primer fenómeno que era intrínsecamente irregular, impredecible. Sin causa alguna que lo motivara el núcleo emitía su

radiación en un instante arbitrario y no en otro. Un fenómeno, sin causa, que torna en impredecible el instante en que ocurre. Por muchos años los científicos trataron de construir teorías que dieran cuenta del fenómeno radioactivo. Nunca pudieron predecir el momento exacto en que se emitiría radiación. Contemplando el fenómeno desde la perspectiva actual, sabemos que dicho esfuerzo estaba condenado al fracaso. Actualmente sabemos que no es posible predecir el instante exacto en que se emitirá radiación.

El determinismo es otra idea arraigada en nuestro imaginario colectivo. El futuro esta determinado irreversiblemente por el pasado. Bien, esta idea se adapta bien a nuestra experiencia cotidiana, pero en los albores de la mecánica cuántica los científicos descubrieron profundas violaciones. Primero tímidamente empezaron a hablar de probabilidades, pero con el tiempo asumieron la indeterminación como un hecho irrefutable. La idea es sencilla, preparo dos copias de un objeto en condiciones idénticas y las observo. A pesar de comenzar con un estado idéntico los sistemas evolucionan en forma distinta. Este simple hecho, el pasado común no implica un futuro común, representa el más drástico quiebre conceptual que se ha experimentado en las teorías físicas. El principio de indeterminación se torno en el emblema de la nueva teoría.

Comencemos nuestra discusión con un ejemplo concreto que debemos esencialmente a Albert Einstein.

## Hágase la luz

La revolución cuántica tuvo su origen en la pregunta sencilla: ¿qué es la luz?. El debate científico sobre la naturaleza de la luz es muy antiguo. Diversas teorías han formulado a lo largo de la historia,

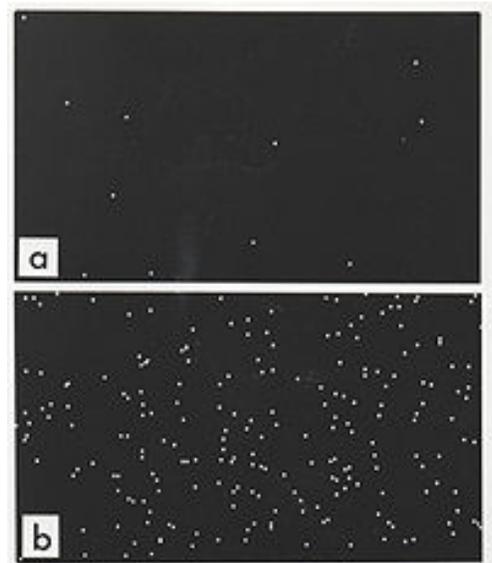
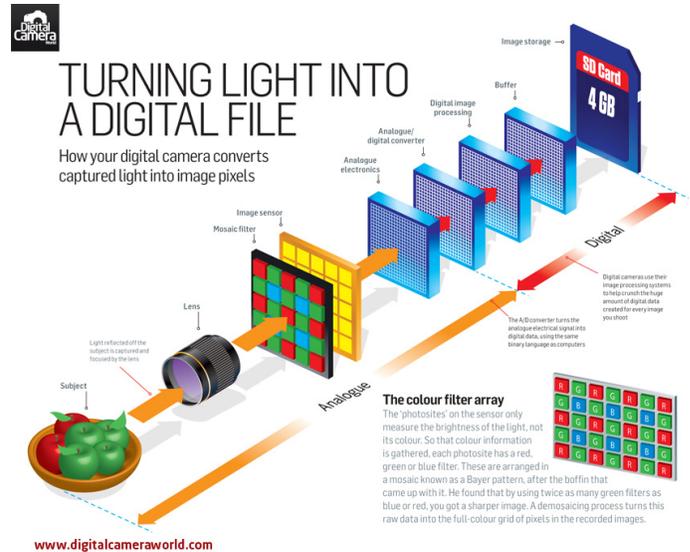


muchas de ellas muy interesantes, pero ninguna resistió la comparación con los experimentos. No es el propósito de este libro relatar dicho debate, sino que nos situaremos directamente en el año 1905 cuando el joven Albert Einstein hizo un descubrimiento revolucionario. El gran descubrimiento que fundó la nueva teoría de la naturaleza es muy sencillo de enunciar. La luz esta compuesta de partículas. Corpúsculos, pequeñas entidades que portan energía en forma compacta y coherente. Dichas partículas fueron, con el tiempo, llamadas fotones. Los fotones viajan, evidentemente, a la velocidad de la luz. Gran parte del misterio detrás de la naturaleza de la luz se debe que en nuestra experiencia cotidiana lidiamos con muchos fotones. Es difícil dar una idea de cuantos fotones estamos acostumbrados a tratar, por ejemplo, al prender una ampolleta salen disparados “un millón de millones de millones” de fotones en cada segundo. Un número colosal, de hecho mucho mayor que el número de estrellas en nuestra galaxia. Dicho número explica porque se nos hace aparente que la luz es un continuo que varia en intensidades suavemente de un lugar a otro. Esto es solo una ilusión, como lo es la imagen la arena en una playa, o en un reloj de arena, moviéndose de un lugar a otro como un fluido.

No podemos, en estas lineas, dar una descripción de los argumentos que llevaron a Einstein a esta conclusión. Se trata de analogías muy sofisticadas entre distintos sistemas físicos que lo inspiraron. Sin embargo, podemos convencernos de sus conclusiones analizando diversos experimentos que se han desarrollado con el tiempo. El primero se conoce como en efecto fotoeléctrico. En este experimento se usan fotones para jugar a las bolitas con electrones (partículas que portan carga eléctrica). Los fotones chocan con los electrones y los hacen a moverse según reglas bien establecidas. Por ejemplo la energía resultante del electrón depende de la energía del fotón que lo impacta (conservación de la energía). De esta manera Einstein hizo una predicción: al iluminar ciertos materiales se generaría una corriente eléctrica muy precisa. Años más tarde el experimento se llevó a cabo y la predicción de Einstein se corroboró con gran exactitud. Debido a esta predicción A. Einstein fue galardonado con el premio Nobel el año 1921. Es interesante hacer notar que este fenómeno es

usado por nosotros en nuestra vida diaria. Las cámaras de nuestros teléfonos celulares reciben los fotones (provenientes del objeto al que estamos fotografiando) y convierten dicha información en corrientes eléctricas que se usan para codificar las imágenes. De esta forma vemos como incluso el primer descubrimiento de la mecánica cuántica tiene una aplicación tecnológica.

El efecto fotoeléctrico, su predicción y el acuerdo cuantitativo entre teoría y experimento proveen un argumento muy fuerte a favor de la teoría de los fotones. Pero es una evidencia indirecta, los fotones interactúan con otro objeto, los electrones, y es a este último a quien observamos. Por años solo tuvimos evidencia indirecta de la teoría de Einstein. Recientemente debido al desarrollo tecnológico hemos encontrado evidencia directa, hemos logrado ver los fotones individualmente. Como mencionamos, la sensación de continuidad de la luz es una ilusión debida a que usualmente “vemos” muchos fotones. Para superar esto, y apreciar la naturaleza corpuscular de la luz, debemos trabajar con una fuente muy tenue o con un filtro que deje pasar muy pocos fotones. De esta forma podremos “ver” fotones uno a uno, en lugar del océano de ellos que recibimos comúnmente. Este experimento se llevó a cabo por científicos de la Universidad de Leiden y la imagen que se formó es abrumadamente convincente. Los fotones llegan uno a uno a la cámara y hacen una imagen aislada. Uno tras otro los fotones llegan a la imagen. Los fotones se diferencian por su energía. De hecho, según la energía que tienen reciben distintos nombres. Fotones de baja energía se llaman ondas de radio y son fundamentales en telecomunicaciones. Con un poco más de energía están las microondas que usamos a diario para calentar nuestra comida. Los fotones de energía moderada pueden reaccionar con ciertas células receptoras en nuestros ojos y se llaman fotones ópticos (o simplemente “luz”). Fotones de mayor energía se llaman “rayos X” y son usados en diversas circunstancias. Las radiografías que estamos acostumbrados a usar se basan en los rayos X. En el extremo de mucha energía los fotones se llaman rayos gamma y son una de las componentes de la radioactividad.



Con la aparición triunfal del fotón se inicia la saga conocida como la mecánica cuántica. La verdad es que como lo hemos presentado no pareciera haber mayores problemas. ¿Qué importa si la luz esta hecha de partículas? Nuestras teorías pueden tomar la idea de Einstein sin mayores contratiempos. Naturalmente que la revolución no se limita a este hecho. El verdadero cambio de paradigma

se originó cuando los científicos intentaron describir el comportamiento de los fotones. De eso se trata el resto de estas notas y de eso se trata la mecánica cuántica. Lo extraño del comportamiento de los fotones es, en primer lugar, que es aleatorio. El comportamiento de los fotones no es determinista.

Por determinista me refiero a una propiedad común a todos los objetos que conocemos. Si lanzo una piedra hacia un lago sé que si la lanzo con más fuerza, es decir, le entrego una mayor velocidad, la piedra llegará lejos. La trayectoria de la piedra, decimos, está determinada por la velocidad y posición iniciales. Este comportamiento está asociado a las bases conceptuales más elementales de la mecánica.



La teoría, llamada teoría clásica, fundada por Isaac Newton, asumía que cada partícula del universo cumplía con este principio, llamado determinismo. El futuro quedaba determinado por el pasado en forma unívoca. Si, siguiendo a la teoría clásica, asumimos que esto es válido para cada partícula, el destino del universo completo estaría escrito y habría estado escrito desde siempre. Esta visión puede ser considerada como aterradora para algunos, pero los filósofos de la época aprendieron a vivir con ella. Unos la rechazaban terminantemente, por cuestionar la noción de libre albedrío, mientras que otros la aceptaban con entusiasmo, pues veían la voluntad absoluta de Dios escrita en las leyes de la física. Un aspecto particularmente perturbador es el análisis de las implicancias que el determinismo tiene sobre el entendimiento que tenemos de nuestra libertad. Si todo, en particular nuestros átomos y todo lo que somos, tiene su comportamiento completamente determinado, entonces ¿qué sentido tiene decir que nuestras decisiones son tomadas con libertad. La verdad es que dicha discusión por interesante que haya sido ha quedado obsoleta a la luz de la mecánica cuántica. Esto es porque los fotones, y todas las partículas sub-atómicas, no obedecen el principio de determinismo. Se comportan de manera impredecible. Este comportamiento puede parecer extraño, de hecho lo es, pero la mecánica cuántica lo ha incorporado como uno de sus principios fundacionales. Diremos que se trata de fenómenos espontáneos, sin causa.

Todos estamos acostumbrados a ver estos fenómenos espontáneos regularmente sin darnos cuenta. Consideremos el fenómeno de reflexión parcial. La luz que sale desde una ampollita impacta sobre una superficie de vidrio. Parte de la luz atraviesa, por eso podemos ver a través de un vidrio, pero parte de la luz se refleja, por eso al otro lado del vidrio se observa una imagen reflejada. Si miramos este comportamiento desde la teoría de Einstein encontramos un problema. Los fotones son emitidos por la ampollita en las mismas condiciones. Sin embargo, algunos atraviesan el vidrio mientras que otros se reflejan. ¿Cómo sabe un fotón si tiene que reflejarse o atravesar? La respuesta es que no lo sabe. La decisión es aleatoria. No tengo como saber, si miro a un solo fotón, cuál de los dos caminos seguirá. La mecánica cuántica asume esto como un principio y se resigna a él. La mecánica cuántica se limita a calcular la fracción de fotones que pasan. Es decir, asignamos una probabilidad cuantitativa a las posibilidades de pasar o reflejarse.

## Probabilidades de lluvia

¿Qué significa que algo sea aleatorio?, ¿Qué significa que algo tenga una probabilidad numérica de ocurrir?. Hay discusiones de muchos años sobre esto. Sin desmerecer dicha discusión nosotros tomaremos una perspectiva pragmática. Una probabilidad es una medida de lo esperable que es un fenómeno. Miro el pronóstico del tiempo en mi teléfono y me dice que hay 70% de probabilidades de lluvia. ¿Qué significa esto?. La interpretación precisa de una información como esa requiere una reflexión. Un caso más familiar es el siguiente: lanzo la moneda al aire y un 50% de las veces sale cara. Decimos, entonces, que la probabilidad de sacar cara es 50% (o 0.5 si no queremos marearnos con los porcentajes.) Es fácil si podemos repetir el experimento. La mitad de las veces salió cara y la otra mitad salió sello. Pero para entender la probabilidad de lluvia tenemos dos posibles interpretaciones. La primera es concreta y perfectamente razonable: de todas las veces que las condiciones climáticas han sido como las de hoy, un 70% de ellas han resultado en lluvia. Otra posibilidad involucra predicciones de modelos teóricos considerando diversos escenarios para

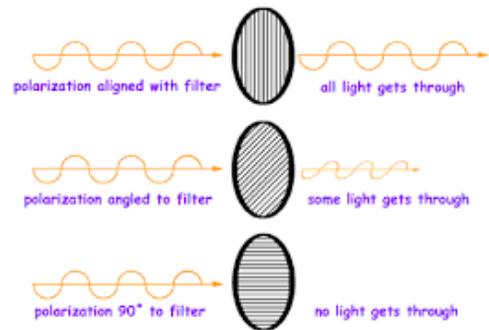
condiciones que no podemos controlar o medir. En un 70% de dichos escenarios hipotéticos ha llovido. La tercera es más rara, quizás más exótica: si nos imaginamos un universo replicado muchas veces con las mismas condiciones climáticas de las de hoy, en un 70% de las replicas lloverá. Es raro hablar de universos paralelos, copias de nuestra realidad que son idénticas pero que dan resultados distintos. En unos universos llueve, en otros chispea, mientras que en otros sale el sol. Imaginemos que somos capaces de crear esos universos paralelos y hacemos un experimento en todos ellos para ver en cuantos llueve. La probabilidad se podría calcular directamente como el caso de la moneda. Por supuesto, el pronóstico del tiempo de mi celular hace referencia a la interpretación más convencional. Lo que es increíble es que las probabilidades en mecánica cuántica hacen uso de la segunda. Lo extraño es que es perfectamente posible crear replicas de un sistema que son idénticas en todos los aspectos entre ellas y que, sin embargo, evolucionan en forma diferente cubriendo todo un abanico de posibilidades. Repetimos un experimento con las condiciones exactamente replicadas y, sin embargo, los resultados son disimiles. Esta es la esencia de la espontaneidad, cosas que ocurren sin causa aparente. Las probabilidades de las que hablamos corresponden a la frecuencia de medición tomadas en cuenta todas las replicas. Aun así las probabilidades le pertenecen a cada elemento del sistema. Cada electrón, cada fotón, cada partícula, tiene una probabilidad potencial de estar en algún estado, de hacer algo. Cada fotón tiene una probabilidad seguir un camino u otro, pero solo apreciamos las probabilidades al considerar muchos fotones. La probabilidad es una propiedad de cada individuo que solo toma sentido concreto al considerar al grupo como un todo.



Ahora bien, si pensamos un poco la situación es un poco paradójica. Si cada fotón tiene una probabilidad de pasar y otra de rebotar, de alguna forma el fotón tiene que saber que pasara si pasa o si rebota. Si la probabilidad esta predeterminada, el fotón ya tiene que haber recorrido todos los caminos. Cada fotón recorre todos y cada uno de los caminos simultáneamente. Solo al medir, el fotón escoge si pasó o rebotó. Volveremos al efecto de la medición en el próximo capítulo. Por mientras, recalquemos que la interpretación de muchos caminos simultáneos, con las técnicas matemáticas asociadas a ella, ha sido uno de los caminos más fructíferos en la comprensión cuantitativa de los fenómenos microscópicos.

## Incertidumbre

Consideremos una nueva propiedad de los fotones, que es llamada polarización. Todos hemos oido hablar de polarización, o al menos de vidrios polarizados. Es increíble pensar que un simple lente polarizado, como los que componen los lentes de sol, es en realidad un detector cuántico sofisticado. De alguna forma, los vidrios polarizados dejan pasar solo una fracción de la luz que los atraviesa. El resto es reflejado. Una forma de imaginar esta situación es que la luz es separada en dos componentes, la que se refleja y la que atraviesa. Pero que diferencia a los fotones que pueden pasar de los que no. ¿Que información acarrean con ellos que les permite discernir si pasarán o no? Precisamente, lo que los diferencia es la polarización. Es un argumento, a primera vista, circular. Polarización es lo que mide un polarizador, un polarizador es algo que mide la polarización. Estos argumentos circulares presentarían un grave problema si estuviéramos hablando de una teoría pura, matemática o filosófica. Sería un punto final, no podríamos seguir avanzando. En



física la situación es distinta. El argumento no es circular pues un polarizador es un objeto concreto, que se construye de acuerdo a un procedimiento preciso. Son polarizadores, por ejemplo, ciertos materiales o ciertas estructuras de formas específicas que demuestran su naturaleza al ser sometidos a experimentos .

La polarización de la luz es un fenómeno conocido desde hace mucho tiempo. Incluso la teoría clásica explicaba sus propiedades. Sin entrar en detalles, tiene que ver con las orientaciones de los campos electromagnéticos que componen la luz. Desde el punto de vista cuántico es, sin duda, algo misterioso. La verdadera naturaleza de la polarización queda manifiesta si hacemos pasar la luz saliente por otro polarizador. Si orientamos el segundo polarizador alineado con el primero la luz lo atraviesa directamente en un 100%, el polarizador es perfectamente transparente para fotones polarizados a lo largo la dirección privilegiada. Por el contrario, si lo orientamos en forma transversal la totalidad de la luz se refleja y no puede atravesar. Aun más, las polarizaciones dependen de la orientación del filtro. Así un polarizador puede estar orientado verticalmente o de costado. En realidad puede tomar todas las direcciones que queramos, en cada una mide algo ligeramente distinto.

Imaginemos por un momento que vamos a la feria a comprar tomates. Los tomates vienen en dos categorías, una relacionada con su turgencia y otra con su color. Los tomates pueden ser clasificados entre rojos y verdes, pero también entre duros y blandos. Los tomates duros pueden ser rojos o verdes y los tomates verdes pueden ser duros o blandos. Así tenemos cuatro categorías (RB, RD, VB, y VD) y podemos ordenarlos en cuatro pilas separadas. Incluso les podemos poner precios diferenciados. Aunque puede sonar confuso, para hacernos una idea de lo simple y misterioso que es el fenómeno de la polarización, cambiaremos el nombre a las polarizaciones diremos que, orientados en una cierta dirección, un polarizador en realidad mide la “dureza” de los fotones (separándolos en “duros” y “blandos”) mientras que otro polarizador, orientado transversalmente, mide el “color” (separando los fotones entre “rojos” y “verdes”). Estos son solamente nombres, elegidos para hacer más marcadas las diferencias. La dureza es medida por el polarizador vertical y puede tomar dos posibles valores: fotones duros o blandos. Con el mismo derecho podría haber elegido otros nombres, por ejemplo en lugar de llamar al color “rojo” de “verde” lo podría haber llamado +1 y -1. Más adelante, al hablar del teorema de Bell, haremos una breve discusión para la cual dicha nomenclatura numérica será de gran utilidad. Por mientras nos quedaremos con la nomenclatura verbal de “rojo” o “verde”. Si hago pasar luz por el polarizador los fotones duros seguirán un camino mientras que los blandos un camino distinto, de esta forma los puedo separar. Este es el experimento esencial del que hablaremos. Basados en él construiremos una compleja red de experimentos que revelan aspectos misteriosos de la naturaleza. Para que todo esto tenga sentido tenemos que entregar una prueba de consistencia: si, después de separar duros y blandos, tomo un haz de fotones blandos y les mido su dureza lo que obtengo es que todos resultan ser blandos. Esta clase de consistencia es lo que nos hace decir que la propiedad de la polarización es una propiedad “real” de los fotones. Pero cuidado con la palabra “real”, la realidad de la que hablamos es muy distinta a todo lo que imaginamos. Es una definición operacional de lo que entendemos por realidad, bueno, volveremos a esto más adelante cuando esta definición operacional nos de problemas.

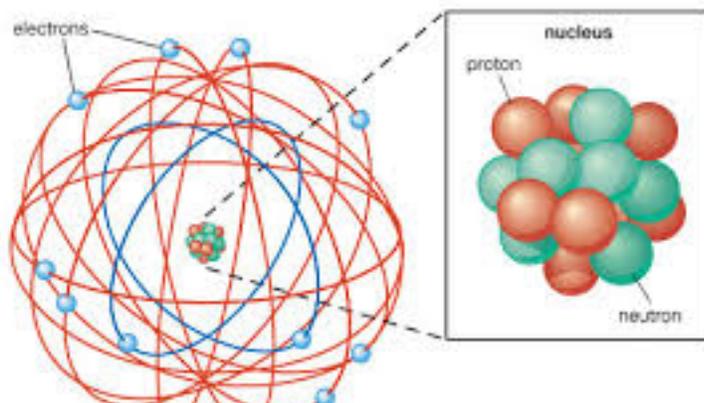
Lo mismo ocurre si mido el color de los fotones. Un polarizador debidamente orientado separa rojos y verdes. Si elijo solo a los rojos y los hago pasar por el mismo polarizador el resultado es que todos son rojos, consistencia que nos hace ratificar que el color es un elemento de la realidad. Una vez que mido el color, y mientras no afecte de alguna manera a los fotones, se con certeza que resultado me dará una nueva medición. Podemos usar el lenguaje coloquial y decir que sabemos “con exactitud” el color del fotón. Los tomates pueden ser separados en duros y blandos, y por supuesto podemos elegir entre tomates rojos o verdes. Así como elegimos tomates podemos elegir fotones. Pero hay una diferencia y esta es la primera sorpresa. De hecho ha sorprendido a sucesivas generaciones de estudiantes de mecánica cuántica. Hay una diferencia entre los fotones y los tomates.

Esta diferencia emerge al intentar separar a los fotones en las cuatro categorías (según color y dureza: RB, RD, VB, VD) al igual como lo hacemos con los tomates. El paso siguiente es naturalmente tratar de determinar el color y la dureza simultáneamente, para así poder seleccionar los fotones de

acuerdo a las cuatro categorías. Es fácil imaginar un arreglo experimental que hace dicha medición. Primero medimos los fotones por su dureza, separándolos entre duros y blandos. Luego tomamos los blandos y los sometemos a una medición de su color. Si usted cree que el resultado de este experimento es que tenemos fotones “blandos y rojos” o “blandos y verdes” esta equivocado. El resultado es muy distinto. Pero es precisamente en este punto en que nuestra concepción de la realidad (conocida como física clásica) se rompe en mil pedazos. La medición de color interfiere con la medición de dureza. Si volvemos a medir la dureza nos encontraremos con que la mitad de los fotones es duro y la mitad es blando. De esta forma, determinar el color nos hace perder toda la información que tenemos respecto a la dureza. Del mismo modo, si conozco la dureza, pierdo todo conocimiento del color. En resumen, no puedo saber ambas cosas a la vez. Los fotones no tienen ambas polarizaciones escritas simultáneamente. No están clasificados en cuatro categorías. Este resultado fue una predicción del físico Werner Heisenberg y es conocido como el principio de incertidumbre. No podemos conocer el color y la dureza al mismo tiempo, los experimentos hechos para medir uno estropean lo que sabemos del otro. Esta propiedad es intrínseca, no es debido a nuestra impericia experimental ni a nuestra limitada tecnología. La realidad es así, los fotones no tienen definido su color y su dureza simultáneamente. Las consecuencias de este principio son impresionantes. Se puede entender diversos aspectos de la naturaleza, que resultan misteriosos de otra forma, invocando al principio de incertidumbre.

¿De que dureza son los fotones verdes? La pregunta que se abre es directa y merece una respuesta igualmente directa. Tenemos un 50% de posibilidades de que sean duros y un 50% de posibilidades de que sean blandos. No podemos decir más. En el lenguaje científico decimos que esta en una superposición con los dos estados simultáneamente. Escribimos que el estado del fotón como una suma entre los dos estados “D + B”. Esta suma es una representación simbólica, una forma de representar este estado extraño de la naturaleza. El símbolo “+” refleja la superposición de dos estados simultáneos. Recordemos nuestra imagen de realidad que nos hacía decir que la dureza era una propiedad real de los fotones. Lo que estamos diciendo es que la realidad esta indeterminada, la realidad sobre la dureza solo emerge al medir la dureza. Esta idea es clave en diversas interpretaciones de la mecánica cuántica. La realidad emerge al ser observada. Es una idea loca, sobre la cual volveremos más adelante pero antes veamos un ejemplo de la importancia del principio de incertidumbre.

La incertidumbre no solo se limita a la polarización de los fotones. Se aplica a muchas propiedades de todos los tipos de partículas. En particular se aplica a la velocidad y posición de las partículas. Es decir cualquier medición que yo haga sobre la posición de la partícula destruirá la información que tenga sobre la velocidad, y viceversa. Es curioso pues solemos imaginar a las partículas directamente en relación a sus trayectorias. En cada instante sabemos donde están y a que velocidad se mueven. Esa imagen nos acompaña desde que tenemos memoria. Imaginamos con facilidad a la luna describiendo una órbita en torno a la tierra y esta última orbitando en torno al sol. Según nuestra intuición los autos, los aviones, incluso las moscas, todo lo que se mueve tiene una trayectoria. El principio de incertidumbre nos despoja de esta idea primitiva. Si conozco la posición desconozco la velocidad, es decir no se donde estará en el instante siguiente. La trayectoria se transforma en una difusa nube de probabilidades. Este hecho es curioso pero, más aún, es un elemento fundamental que otorga estabilidad a la materia como la conocemos.



Pensemos en el átomo. La historia de la teoría del átomo esta muy ligada al origen de la mecánica cuántica. En un periodo de tiempo muy breve entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX se estableció la estructura básica del átomo. Tras una serie de experimentos que involucraban la interacción de la radiación con la

materia se llegó a una imagen muy precisa del átomo. Esta consiste en un centro muy pequeño, un núcleo, que concentra casi toda la masa del átomo. Este núcleo atómico tiene carga eléctrica positiva, es decir, atrae con fuerza a los electrones, de carga negativa, que lo rodean. Los electrones son muy livianos, pesan mil veces menos que el núcleo más pequeño (el del átomo de hidrógeno.) Nuestra imagen inicial es muy similar a un sistema solar. Los electrones describen órbitas en torno al núcleo. Esta imagen entra en problemas que alarmaron a los científicos de la época. A lo largo de su trayectoria la dirección del movimiento electrónico va cambiando, de esta forma el movimiento orbital de los electrones implica corrientes eléctricas que cambian de dirección a lo largo de la órbita. Al igual que en una antena común, de celular o de televisión, esto implica que el átomo estaría emitiendo radiaciones, es decir perdiendo continuamente energía. Con esto se acercaría cada vez más al núcleo y lo que es peor, lo haría cada vez más rápido. En resumen, en un sistema clásico los electrones se “caerían” hacia el núcleo liberando grandes cantidades de energía. Esto es problemático pues la materia sería inestable. Todos los átomos se habrían desintegrado en menos de un segundo. ¡El mundo será muy distinto a como lo conocemos! La situación se salva gracias al principio de incertidumbre. El electrón no puede estar cerca del núcleo pues de ser así su velocidad sería indeterminada. Si un electrón se acerca al núcleo, al instante siguiente estará en algún lugar indeterminado. Ese ir y venir es mejor representado por una nube. De esta forma los electrones no describen trayectorias. Hablaremos de una nube electrónica rodeando al núcleo. Esta nube es estable gracias al principio de incertidumbre. De esta forma el principio de incertidumbre es fundamental para la estabilidad de la materia, lo que nos incluye.

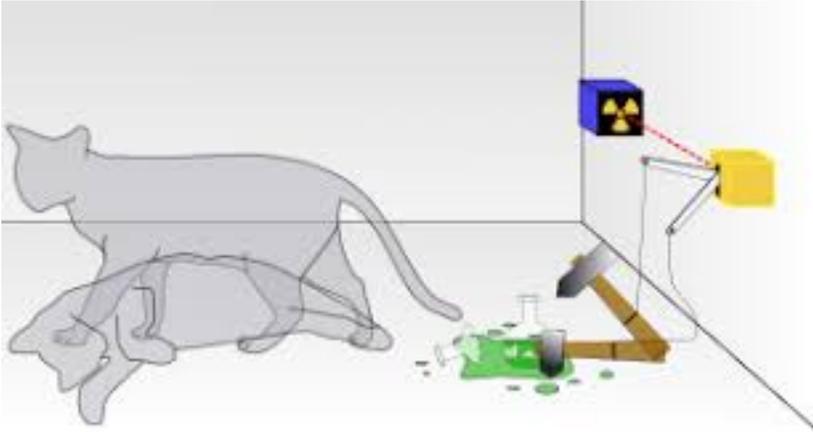
## ¿Donde esta la luna cuando nadie la esta mirando?

Supongamos que hacemos un experimento para medir el color. El resultado es indeterminado hasta justo el momento de la medición. Previo al experimento decimos que el fotón se encuentra en una superposición de los dos colores a la vez. Si el color es una propiedad de la realidad del fotón, su realidad es “creada” al momento de la medición. Esta idea es perturbadora. Debemos renunciar a una realidad independiente y objetiva. Son las mediciones las que crean la realidad. Heisenberg lo explicaba en las siguientes palabras: “La realidad objetiva acaba de evaporarse.” Por su parte Albert Einstein declaraba: “La realidad es una ilusión, aunque una muy persistente.” Cuesta convencerse de este hecho. Vivimos engañados por esa persistencia. El resto del texto se dedica a presentar argumentos convincentes de esta nueva visión de la realidad. Incómodo con esta nueva interpretación, Einstein se preguntaba: ¿Donde esta la luna cuando nadie la esta mirando?

Uno podría argumentar que este descubrimiento hecho con fotones ha sido anticipado por los filósofos. La realidad siempre tiene una componente subjetiva, todos lo experimentamos cuando discutimos sobre algún tema controversial. Notemos una diferencia entre la falta de realidad cuántica con la que encontramos usualmente en las discusiones filosóficas. Muy por el contrario, esta ausencia de realismo no significa que todo depende del punto de vista. Si yo mido un fotón y resulta ser verde, será verde para todos y cada uno de los observadores. No se trata del punto de vista. La realidad se evapora pues esta indefinida antes de medir. Una vez que la medición crea la realidad esta se hace objetiva. Sin duda esta realidad objetiva es la que experimentamos cotidianamente. Ya sea la trayectoria de la micro que nos lleva a casa, el balance en nuestra cuenta de banco, etc, nosotros experimentamos una realidad objetiva en nuestra vida cotidiana. Lo relevante acá es que la pérdida de la realidad se aplica incluso aquellas cosas que nos parecen objetivas, como la trayectoria de un electrón y como la polarización de un fotón. ¿Como reconciliar la dimensión cuántica subjetiva con la objetividad del mundo que nos rodea? En otras palabras: ¿cual es el origen de la persistencia de la ilusión de Einstein.? Es interesante esta reversión del argumento. Partimos hablando de lo misteriosa que era la mecánica cuántica. Tratamos de explicar cuidadosamente sus peculiaridades, pero resulta

que ahora la pregunta es la inversa: porque la naturaleza se comporta clásicamente, ¿cuál es el origen de la realidad objetiva?. La pregunta ha sido invertida. En las discusiones contemporáneas de la gente trata de explicar nuestra realidad cotidiana en términos de la mecánica cuántica. Para eso recurriremos a un experimento pensado.

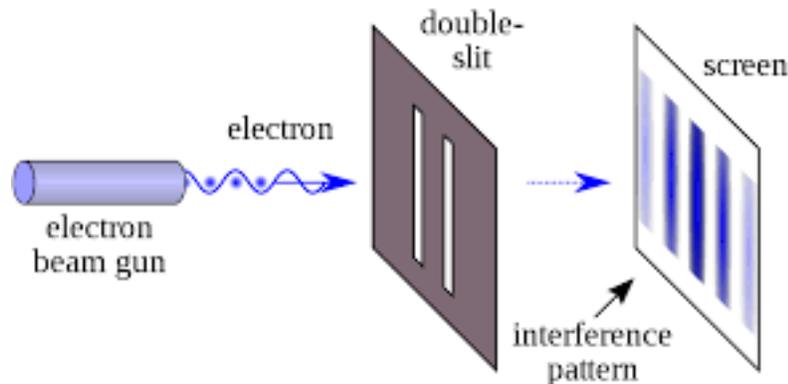
A los físicos nos gustan las contradicciones. Cuando vemos una nos alegramos, pues sabemos que estamos un paso más cerca de comprender algo profundo. La contradicción que vamos a discutir ahora es un experimento pensado. Nunca se ha hecho y probablemente nunca se hará. Es solo un ejercicio mental para poner a prueba nuestra comprensión de la naturaleza. Es, sin duda, el experimento más siniestro jamás ideado. Se trata del famoso gato de Schrödinger. La idea es sencilla, aunque perversa. Imaginemos un gato (¡podría ser cualquier animal!) encerrado en una caja. Dentro de la caja hay un dispositivo que emite fotones duros, una ampolleta o un LED, da lo mismo, pero lo importante es que emite muy pocos fotones, uno a uno salen disparados hacia su objetivo.



Como sabemos los fotones pueden ser rojos o verdes. Si son rojos, los fotones actúan sobre un recipiente y liberan un gas venenoso que mata instantáneamente al gato. Si son verdes el recipiente con veneno permanece sellado y el gato vive. La paradoja es ahora fácil de enunciar. Hecho este arreglo perverso, podemos dar rienda suelta a nuestra imaginación. Apliquemos lo que hemos aprendido a esta situación.

Antes de medir el fotón se encuentra en una superposición de rojo y verde. Pero esto quiere decir que, antes de que observemos adentro de la caja, es decir antes de que sepamos la polarización del fotón, nuestro gato se encuentra en una superposición de vivo y muerto. El gato está al mismo tiempo vivo y muerto (o, como escribimos para el fotón, “vivo + muerto”) y solo asume un estado definido cuando lo observo. Esta situación es interesante, pero parece un absurdo. Schrödinger planteó este experimento precisamente para argumentar lo absurda que era, a su parecer, la teoría cuántica. Si pensamos cuidadosamente sobre este experimento podremos contestar la gran pregunta: cual es el origen de la realidad objetiva, de la persistente ilusión a la que nos tiene sometidos la naturaleza. La medición de el estado de vida del gato se ve influenciada por la interacción del fotón con todas las componentes del aparato que libera el gas. En realidad los millones de millones de átomos del dispositivo siniestro actúan, sin que nosotros lo planifiquemos, como una medición del estado de polarización. Al pasar por el aparato el fotón colapsa y se hace rojo o verde en forma definida. El gato esta por lo tanto vivo o muerto, pero no ambas al mismo tiempo. Sin abrir la caja no sabemos si esta vivo o muerto, solo sabemos la probabilidad de 50% de cada opción. Pero hay una realidad objetiva, el gato esta o vivo o muerto. Vemos así que el origen de la realidad objetiva es la complicada interacción con millones de constituyentes microscópicos. La persistente ilusión de una realidad objetiva se origina, entonces, en

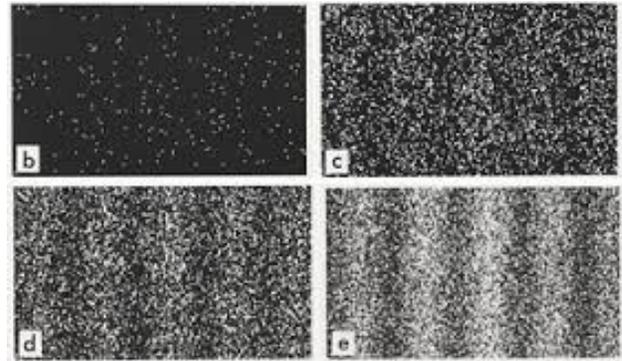
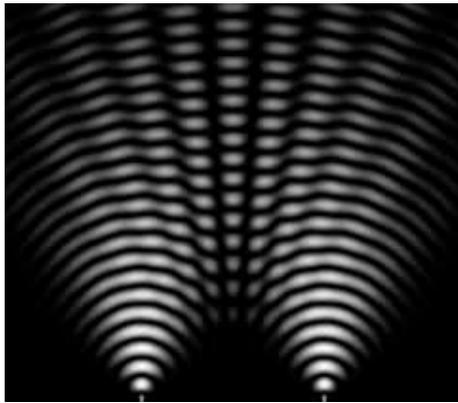
la complejidad de nuestros sistemas de observación. Nuestras reglas de medir, nuestros termómetros, nuestros detectores de luz, y en general todo lo que usamos para observar el universo que nos rodea, nuestros sentidos incluidos, esta compuesto de un número astronómico de componentes, el más simple aparato de medición es, en si mismo, un sistema complejo. De alguna forma esta complejidad es la responsable de nuestra realidad objetiva. La complejidad mata al gato. El mecanismo preciso mediante el cual nuestra realidad es creada a partir de las mediciones es desconocido. Hay varias teorías propuestas para este mecanismo pero ninguna ha sido puesta a prueba experimentalmente de manera exitosa. Dejaremos la discusión de dichas teorías para más



adelante. Hay, sin embargo, un aspecto práctico que resolver.

¿Que tan grande es grande? ¿Que sistemas podemos considerar suficientemente grandes como para que las indeterminaciones cuánticas no les afecten? Esta pregunta es interesante y merece una respuesta empírica. Como sabemos el gato es muy grande y se comporta clásicamente. Que hay de un ratón, bueno resulta que también es muy grande. Que tal una célula, no hay reportes de experimentos de este tipo con células, pero tomando en cuenta el hecho que una célula esta compuesta por millones de millones de átomos es de esperar que también sea muy grande. El sistema más grande en el que se ha observado la dualidad es una molécula. Por supuesto, en este ejemplo la propiedad estudiada no se trata de la vida o la muerte sino que se usa otra propiedad, conocida por todos nosotros, la posición.

Hablemos entonces del experimento de la doble rendija. Este experimento es muy célebre y, a diferencia del gato de Schrödinger, si se ha hecho en la realidad. Consideremos una fuente de fotones (o electrones) que dispara hacia una barrera que tiene dos ranuras. Al otro lado de la barrera se encuentra una pantalla donde los fotones pueden dejar su imagen. La ranuras están muy cerca entre ellas. Cuando un fotón llega a la zona debería pasar por una de las dos ranuras. Supongamos primero que una de las ranuras esta cerrada, los fotones pasaran con certeza por la única rendija abierta, dejando un rastro característico en la pantalla. Una imagen se formará justo detrás de la rendija abierta indicando que ahí llegan los fotones con gran probabilidad. Si cambiamos el rol de las rendijas y dejamos abierta la que esta cerrada, los fotones pasaran por la segunda rendija, actualmente abierta, y dejaran un rastro correspondiente en otra zona de la pantalla. Hasta ahora no ha pasado nada interesante. Lo verdaderamente curioso ocurre cuando abrimos las dos rendijas simultáneamente. Los fotones pasan a través de las rendijas y dejan una imagen que no es la superposición de las dos imágenes previas. Por el contrario la imagen que forman esta compuesta de franjas: zonas de alta probabilidad seguidas de zonas de baja probabilidad. Este resultado, que ha sido reproducido muchas veces en diversos laboratorios, es impresionante y tiene muchas implicancias. Acá solo me limitare a explicar el extraño comportamiento apelando a las dos cosas que hemos aprendido: el principio de incertidumbre y la superposición. Cuando un fotón se acerca a las rendijas sabemos que su posición esta indefinida producto del principio de incertidumbre. Luego es imposible saber por cual rendija esta pasando, o en otras palabras su estado es una superposición de



las dos situaciones. Al igual que el gato puede estar vivo o muerto, el fotón puede pasar a través ambas rendijas simultáneamente. Que un objeto este en dos lugares al mismo tiempo no es algo que experimentemos en nuestra vida cotidiana, suena a ciencia ficción, pero a nivel cuántico es algo común, más bien la regla que la excepción. Para cuando el fotón llega a la pantalla final, no sabemos por cual rendija paso y eso da origen al patrón de franjas. El motivo específico del patrón es tema del siguiente capítulo. Antes quiero destacar lo impresionante que es que algo pueda estar en dos lugares al mismo tiempo, es algo que escapa a todo lo que conocemos. Las cosas grandes están en posiciones definidas, volvemos a la pregunta de que tan grande es grande, pero ahora tenemos un experimento que nos permite responder esto. Los objetos más grandes que se ha mostrado que pueden estar en dos posiciones a la vez son moléculas de cientos de átomos. Es impresionante que moléculas relativamente grandes que al pasar por las dos rendijas muestran el patrón de franjas.

## Ni lo uno ni lo otro, sino todo lo contrario.

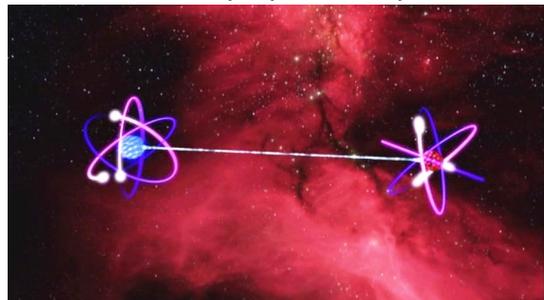
Una idea que parece emerger espontáneamente de la discusión que hemos tenido es que desde cierto punto de vista los fotones, electrones y todas las partículas cuánticas son objetos extendidos. Hablábamos de una nube electrónica, que reemplazaba a las trayectorias de las partículas. Esta idea se hace más evidente si tenemos en cuenta que, según la teoría clásica, la luz es una onda. Bueno, ¿es onda o partícula?, si es una onda ¿que es lo que vibra?. Nuevamente la respuesta es interesante. Se trata de una dualidad, a veces se comporta como una y otras como la otra. Dos realidades complementarias, dos aspectos mutuamente excluyentes pero necesarios para describir la naturaleza. Esto no solo es una propiedad del fotón sino que de todos los objetos cuánticos. Así como Einstein propuso que la luz estaba hecha de partículas, en 1920 Luis de Broglie, propuso que la materia era al mismo tiempo ondas. Dependiendo del experimento que hagamos los objetos cuánticos se comportan, a veces como ondas y otras veces como partículas. Ya hemos visto este tipo de dualidad en la discusión. La luz al incidir sobre la pantalla hace una marca puntual bien definida, que, por lo demás, ha sido nuestro principal argumento a favor de la teoría corpuscular de Einstein. Al enfrentar la pantalla la luz se comporta como partículas. Sin embargo, dichas partículas son distintas a todo lo que conocemos, obedecen el principio de indeterminación, y sus trayectorias son difusas. Al enfrentarse a la doble rendija el fotón no se comporta como una bala de plomo o una pelota de tenis. Por el contrario, pierde noción de por cuál rendija esta pasando, pasa por ambas rendijas a la vez, y esto nos hace pensar que el fotón es un objeto extendido, se comporta como una onda. Ambos comportamientos son desplegados por fotones dependiendo de a que medición los estemos sometiendo. Este hecho se conoce como dualidad onda-partícula y es otra de las características de la mecánica cuántica. Si pensamos bien lo que estamos haciendo notaremos que estamos describiendo el comportamiento de las partículas microscópicas en términos de analogías con aspectos de nuestra experiencia cotidiana. La verdad es que nos vemos obligados a usar aspectos complementarios porque ningún fenómeno cotidiano se comporta como los objetos cuánticos. Tampoco sería razonable que así fuera. Un aspecto esencial de la actividad científica es hacer, precisamente, este tipo de

analogías. Decimos que un péndulo se comporta de manera análoga a una masa atada a un resorte, y que ambos son análogos a las soluciones de ciertas ecuaciones diferenciales. Para que ambas descripciones contradictorias puedan ser reconciliadas necesitamos el principio de incertidumbre. Solo invocando a este principio podemos dar con una descripción coherente de la realidad. Eso responde la primera pregunta, no es ni onda ni partícula, a veces se comporta como una y otras veces como la otra, dependiendo del experimento. Sin embargo, deja abierta la segunda pregunta, ¿ondas de qué?. Las ondas a las que estamos acostumbrados siempre tienen identificado un elemento clave que es el objeto que vibra. Por ejemplo, para ondas sonoras se trata del aire, cuyas oscilaciones en presión y densidad nuestros oídos interpretan como sonido. En una ola marina, se trata oscilaciones del agua y su altura. Para las ondas electromagnéticas es más sutil, se trata de oscilaciones en los campos electromagnéticos que se propagan de un lado a otro en forma de ondas. Las ondas electromagnéticas son el elemento clave la descripción clásica de la luz. ¿De que están hechas las ondas de la mecánica cuántica? La respuesta es electrizante, se trata de ondas de probabilidad. Así es la misma probabilidad de la que hablamos anteriormente se propaga de un lado a otro en forma de ondas. Cuando mido obtengo resultados con las probabilidades resultantes del movimiento ondulatorio.

## Einstein otra vez...

Que la realidad esta indeterminada hasta que hacemos una observación es una idea revolucionaria que presentó resistencia de grandes científicos. En particular, Albert Einstein se oponía ferozmente a ella. De esta resistencia surgió uno de los debates más entrañables de la historia de la física. La discusión Einstein vs. Bohr. Niels Bohr era el principal defensor de las nuevas ideas cuánticas, de hecho fue el creador del modelo atómico del que hablamos con anterioridad. Su contribución al desarrollo de la mecánica cuántica lo hizo merecedor del premio Nobel en 1922, al año siguiente al premio de Einstein por el efecto fotoeléctrico. La creatividad de Bohr era exótica, por decir lo menos, abrazando las contradicciones cuánticas con entusiasmo. Sus ideas dieron forma a lo que se conoce como la “Interpretación de Copenhague” de la mecánica cuántica que, básicamente, consiste en todo lo que hemos hablado hasta ahora.

El debate Einstein-Bohr consistía en un juego persistente de desafíos mentales. Einstein conjugaba con su imaginación ingeniosos “experimentos pensados” que, según él, ponían en entredicho al principio de incertidumbre y por lo tanto amenazaban los cimientos de la nueva teoría. Una vez hecha la jugada de Einstein, Bohr buscaba salidas que mostraban que los experimentos pensados de Einstein eran imposibles y que el principio de incertidumbre se mantenía a salvo. Es muy divertido ver la evolución de los debates y observar como las dos mentes brillantes se desafiaban con habilidad. Los experimentos pensados de Einstein fueron evolucionando progresivamente pero, contrario a lo que se podría pensar, en lugar de hacerse más complejos se hacían cada vez más elementales, más simples. Einstein estaba depurando una idea, una intuición, que lo motivaba. El juego duró más de una década hasta que a mediados de los años '30 Einstein encontró una forma de comunicar con precisión lo que le incomodaba de la interpretación de Copenhague. Su lenguaje evolucionó desde decir que la teoría cuántica era errónea a decir que era “incompleta”. Para Einstein si era posible clasificar a los fotones en cuatro categorías según color y dureza, es decir creía en una realidad definida y objetiva. El problema radicaba en que al medir una de las dos propiedades perturbábamos inadvertidamente a los fotones y de manera incontrolada perdíamos la información sobre la otra propiedad. Las partículas cuánticas tendrían, según esta idea, algún tipo de estructura interna que codificaba la respuesta a diversos experimentos pero que era afectada por la medición. Esta estructura interna era objetiva, tenía una realidad definida con precisión. Con el tiempo a esta estructura hipotética



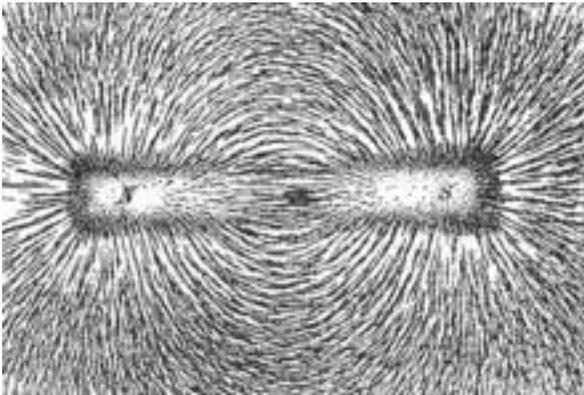
se le ha dado un nombre de fantasía: “variables ocultas”. Según esta idea el principio de incertidumbre es consecuencia de nuestra incapacidad de manipular y observar las variables ocultas, es decir, un problema tecnológico. Einstein no se limitó al discurso y propuso un experimento pensado que mostraba con exactitud donde estaba el problema de la mecánica cuántica. Este experimento ha pasado a la historia como la “paradoja EPR”, en honor a sus creadores Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen. La jugada maestra consistió en considerar un sistema con dos fotones al mismo tiempo (hasta ahora solo hemos hablado de cada fotón individualmente.) Si tenemos dos fotones es posible medir el color y la dureza de cada uno por separado. En la paradoja EPR se propone un par de fotones en un estado especial mezclando dos configuraciones como en un gato de Schrödinger “RR+VV”. Se trata de una superposición de que al mismo tiempo este los dos rojos o que al mismo tiempo ambos sean verdes. Este estado es especial pues cada vez que mido el color a ambos fotones me da el mismo resultado. Si mido el color en un fotón y me da rojo, sé con certeza que el otro también me entregará el color rojo. Si uno me da verde, el otro también será verde. Notablemente, a pesar de esta fuerte correlación, los resultados de la medición son completamente aleatorio, somos incapaces de predecir si el resultado será rojo o verde. Adicionalmente preparamos dos detectores que arbitrariamente, al azar, eligen entre medir color o dureza. El juego es simple, lanzar los dos fotones hacia los dos detectores y medir ya sea su color o su dureza. Los resultados serían algo como esto:

Fotón 1/Medición	Foton 1/Resultado	Fotón 2/Medición	Fotón 2/Resultado
Color	Rojo	Color	Rojo
Dureza	Blando	Color	Verde
Color	Verde	Dureza	Duro
Color	Verde	Color	Verde
Dureza	Blando	Dureza	Blando
Color	Verde	Dureza	Blando
Color	Rojo	Color	Rojo
Color	Verde	Dureza	Duro

Este ejercicio se repite muchas veces. Los resultados son completamente aleatorios pero hay un patrón muy claro: cada vez que mido el color en ambos fotones me da el mismo resultado. Si pensamos que el color no esta definido hasta el momento de la medición ¿como es que los fotones “saben” el color del otro?. El problema es acentuado si resaltamos que podemos preparar el segundo equipo detector tan lejos como queramos del primero (después de todo, es un experimento pensado). Imaginemos que un detector esta en la Tierra y el otro en el Sol (o incluso en otra galaxia). La medición crea la realidad, pero se crea la “misma” realidad en ambos extremos del experimento sin importar la distancia a la que se encuentren. La información de una medición afecta a la otra instantáneamente. Es como si hubiese una comunicación a distancia entre los fotones. Einstein llamó a esto una “acción fantasmagórica a distancia”. Para Einstein esto implicaba información propagándose más rápido que la velocidad de la luz, de hecho a una velocidad infinita, y resultaba inaceptable. Por eso se llama paradoja. Einstein encontró una salida a esta paradoja. La única posibilidad, según la mirada de EPR, es que los fotones saben de antemano de que color son, y llevan esta información con ellos, esta información debe estar codificada en la estructura del fotón en

forma de... variables ocultas. La conclusión parece irrefutable. Era la prueba final de la incompletitud de la mecánica cuántica y echaba por tierra a la interpretación de Copenhague. Era la última jugada de Einstein.

Bohr acepto el desafío y, con preocupación, estudio el fenómeno propuesto. La respuesta que forjó debe haber resultado exasperante para Einstein pues, según Bohr, a pesar de oponerse firmemente a ella, lo que había hecho Einstein era dar con una manifestación más de las renuncias que implicaba aceptar la mecánica cuántica. Este experimento pensado dio origen al concepto de “entrelazamiento cuántico” que es una de las facetas más extraordinarias de toda la teoría. Los estados como los que propusieron EPR se llaman entrelazados pues mezclan distintas partículas en combinaciones exóticas. La mezcla RR+VV resulta inseparable, cada fotón no tiene asignada una realidad individual, solo el par existe definidamente. Solo tiene sentido hablar del sistema como un todo y separarlo nos lleva a la contradicción, la teoría es no-local. Es decir, una vez más la mecánica cuántica nos hace renunciar a un principio atesorado por nuestras intuiciones, la localidad. El principio de localidad se puede enunciar simplemente: las cosas solo afectan a otras cosas que estén cerca, en “contacto”. Nunca vemos, en física clásica, a una partícula interactuar con otras que estén a distancia. Puede parecer que el caso es el contrario, a primera vista, en diversos ejemplos aprendidos en los cursos de física elemental. Por ejemplo, la interacción magnética entre dos imanes da la impresión de actuar a distancia, un imán atrae a otro que está a unos centímetros de distancia. Esta acción a

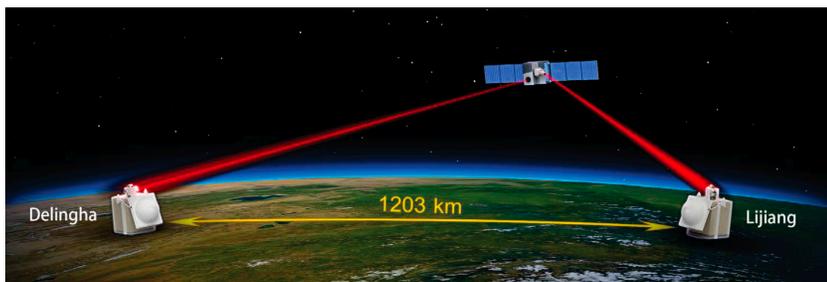


distancia es solo una ilusión, lo que no vemos es que entre los dos imanes actúan campos electromagnéticos. Cada imán crea su propio campo, mediante un mecanismo local, el campo en un lugar afecta solo al campo en la vecindad inmediata. Esta acción siempre entre vecinos se propaga como una avalancha y propaga la información de cada imán. La información se propaga través de los campos electromagnéticos. Es el campo generado por un imán el que afecta al otro. Como no vemos a los campos magnéticos, nos da la impresión de una acción a distancia. Uno de los

grandes logros de Einstein fue el desterrar las acciones a distancia, no locales, de la física clásica. La teoría de los fenómenos gravitatorios, debida a Newton, contenía interacciones a distancia, no-locales, de la tierra a la luna, o del sol a la tierra. Einstein propuso una modificación a la teoría de la gravedad en su teoría de la relatividad general. En esta el fenómeno gravitatorio está asociado a la curvatura del espacio tiempo. Esta última, que se origina a partir de las distribuciones de energía, obedece leyes perfectamente locales. El principio de localidad es satisfecho a cabalidad por todas las teorías clásicas y está incluido en nuestra propia intuición. Si vemos un objeto afectando a otro a cierta distancia, nos imaginamos algún tipo de contacto, el viento, el campo eléctrico, el campo magnético, etc. que ponga en comunicación a los dos.

La mecánica cuántica nos hace renunciar a este principio. En la situación descrita en la paradoja EPR, la realidad de cada fotón no está definida, solo la realidad del par como un todo lo está. Cuando preparo los fotones en un estado entrelazado los resultados de las mediciones en lugares remotos están correlacionados. La objeción de Einstein era que esta comunicación a distancia implica una comunicación más rápida que la velocidad de la luz. En realidad es un muy buen argumento, pero si lo miramos con cuidado vemos que no hay ninguna contradicción. La solución al problema radica en darse cuenta que no hay información que se propague más rápido que la luz. Un detector no entrega nada hacia el otro que pueda usarse como información valiosa. El resultado en cada lado será aleatorio y no tengo como saber si la elección hecha en un detector coincidió con el detector al otro lado. No hay forma de enviar un “mensaje” usando el entrelazamiento cuántico. Solo cuando los observadores a cada lado del experimento se “comunique” se darán cuenta de la correlación entre los resultados, pero esta última comunicación es clásica y se mueve a la velocidad de la luz.

¿Quién estaba en lo correcto?, Einstein con sus teoría de las variables ocultas o Bohr con su teoría no-local. Si existiese una teoría que, incluyendo variables ocultas, reprodujera todas y cada una de las predicciones de la mecánica cuántica, sería una materia de preferencias filosóficas a cuál de ellas adscribir. Por el contrario, de haber alguna diferencia entre las dos, si la teoría de variables ocultas predijese para algún fenómeno algo distinto que la mecánica cuántica, el escenario sería muy distinto. En este ultimo caso la disputa debería ser resuelta experimentalmente (comparando las predicciones de las teorías con los resultados experimentales.) En la época del debate Einstein-Bohr no se encontró una teoría de variables ocultas con la capacidad de reproducir los resultados de la mecánica cuántica, todas las discrepancias le daban la razón a Bohr. A pesar de esto, Einstein seguía aferrado a la idea de que algún día se encontraría una teoría capaz de reemplazar las ideas cuánticas y derrotarlas experimentalmente. En la próxima sección estudiaremos una contribución hecha al debate en 1964, cuando ambos protagonistas ya había fallecido, se trata de una clase de teorías de variables ocultas y mostraremos que todas ellas conducen a algunos resultados que difieren con los de la mecánica cuántica. Este resultado conocido como el teorema de Bell y nos ofrece la posibilidad de resolver el debate Einstein-Bohr en forma experimental. Antes quisiera dedicar unas líneas a uno de los experimentos tipo EPR más impresionantes que conozco. Cuando hablamos de llevar a cabo un montaje de EPR en un experimento la clave es la distancia. Que tan lejos puedo ubicar los detectores el uno del otro. Se trata de una carrera contra la luz, si las señales que viajan a la velocidad de la luz alcanzan a llegar de un detector a otro en el intervalo que hay entre las mediciones entonces la correlación no presenta ninguna paradoja. Para llevar a cabo el experimento tengo que medir en ambos detectores en instantes muy cercanos, de esta forma me aseguro que no hay señal posible de comunicación. También hay un problema tecnológico, si mis detectores están muy alejados, es posible que, en el camino, sean afectados por agentes externos al experimento. Es por eso que



implementar el experimento EPR es un desafío. Lo anterior despierta la curiosidad, ¿que tan lejos puedo ubicar los detectores y aun ver la correlación no-local?. Nuevamente el problema es tecnológico y la respuesta dependerá de la fecha en que usted este leyendo estas notas. A la fecha el récord lo

ostenta un experimento de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China, con una marca impresionante de 1200 kilómetros. Para el desarrollo de este experimento se utilizó luz saliente desde un satélite elevado hasta 500 kilómetros de altura. Desde ahí pares de fotones entrelazados son enviados, uno a la ciudad de Delingha y el otro a la ciudad de Lijiang. En dichos destinos los científicos midieron la polarización de los fotones encontrando un acuerdo con la correlaciones predichas por la mecánica cuántica. Esto a una distancia que hace imposible a la luz viajar entre los dos destinos en el tiempo disponible entre mediciones. Sin duda, este limite es solo temporal y a futuro podemos imaginar canales de comunicación cuánticos que cubran toda la Tierra.

## Teorema de Bell

Cada vez que explico los principios básicos de la mecánica cuántica me hacen la misma pregunta. Una pregunta inocente, que seguramente usted también se ha hecho, ¿como estar seguros de la indeterminación de los resultados.? Es decir mencionamos con total soltura que era imposible saber de que color eran los fotones duros, ¿como estar seguro de esto?, ¿no será que una nueva generación de experimentos si tengan la posibilidad de medir el color con certeza. Después de todo los experimentos que hacemos tienen limitaciones tecnológicas de diversa índole. Quizás hemos sido poco prudentes al cambiar nuestra visión de la estructura más básica de la naturaleza basados en unos pocos experimentos. El lector no esta solo si su imaginación lo lleva por esos lares. Esta no es

otra cosa que la idea de Einstein y sus variables ocultas. Según esta idea, al medir la dureza afectamos profundamente ciertas estructuras internas del fotón que estropean nuestro conocimiento del color. Quizás en un futuro estas variables ocultas se dominen y el principio de incertidumbre se transforme en un recuerdo. Estamos tan aferrados a las ideas de la física clásica que esta noción es una respuesta natural, casi refleja, cuando se nos presentan los principios de la revolución cuántica. Pero, será posible formular una teoría de variables ocultas que este a la altura. Durante la época del debate Einstein-Bohr no se pudo formular ninguna teoría de variables ocultas cuyas predicciones coincidieran con las de la mecánica cuántica. A pesar de esto, mucha gente siguió creyendo firmemente en la posibilidad de que dicha teoría existía. Es por eso que el teorema de Bell tiene una importancia tan relevante en la discusión. El teorema, debido a John Stewart Bell en 1964, tiene un enunciado para el bronce: es imposible formular una teoría de variables ocultas que coincida en todas sus predicciones con la mecánica cuántica. El teorema no se limita a dicho enunciado sino que describe con precisión la diferencia entre la teoría cuántica y las supuestas teorías de variables ocultas, ciertas predicciones que hacen todas las teorías de variables ocultas son violadas por la mecánica cuántica. Estas predicciones se tratan de “correlaciones” una medida de que tan dependientes son diversos resultados aleatorios. La importancia del teorema es que lleva el debate Einstein-Bohr de una discusión teórica a un problema experimental. Para determinar quien esta en lo cierto debemos hacer un experimento, medir las correlaciones indicadas por el teorema, y la naturaleza se pronunciará sobre el debate. Es, por muchos, considerado el resultado más importante de la física teórica. La verdad es que pocos experimentos tienen dicho potencial de resolver dudas filosóficas tan profundas como la naturaleza verdadera de la realidad. El montaje propuesto por Bell fue implementado por Alan Aspect en 1982, y los resultados causaron revuelo. Einstein, y con él todas las teorías de variables ocultas, habían perdido el debate.

Para ilustrar el teorema de Bell haremos una leve modificación en nuestra descripción de los experimentos. Para poder hacer un estudio cuantitativo de las correlaciones, en lugar de llamar a los colores verde o rojo, los llamaremos +1 o -1. En lugar de llamar duro o blando a la dureza, la llamaremos +1 o -1. Haremos ciertas operaciones matemáticas y tener valores numéricos para los resultados será de gran utilidad. Estas manipulaciones matemáticas son muy elementales, de hecho lo único que tenemos que saber es la tabla de multiplicar elemental  $+1 \cdot +1 = -1 \cdot -1 = +1$  y  $+1 \cdot -1 = -1 \cdot +1 = -1$ . Ahora hay que tener cuidado, para indicar el resultado de un experimento no basta con decir que la polarización es +1 o -1, esa información no es suficiente pues debemos indicar, también, que es lo que estamos midiendo “color” o “dureza”. Hecha esa aclaración podemos plantear un experimento inspirado en el teorema de Bell.

Se trata de una generalización natural del montaje EPR pero en un problema con tres fotones. Los fotones son preparados en un estado que superpone la situación en la que los tres son rojos con la situación en que los tres son verdes: RRR+VVV. Estos son enviados a tres medidores muy alejados entre ellos. Tan lejos que es imposible que durante una medición los observadores alcancen a establecer ningún tipo de comunicación. En dichos medidores, tres observadores eligen medir color o dureza en forma aleatoria. Por ejemplo el primer observador mide color y obtiene +1, el segundo observador mide dureza y obtiene +1, mientras que el tercer observador mide color y obtiene +1. Denotamos esta situación simbólicamente mediante la expresión:  $C^1=1$ ,  $D^2=+1$  y  $C^3=+1$ . El número arriba indica el medidor que esta reportando el resultado. C significa que se midió color y D que se midió dureza. Se repite el experimento muchas veces y un resumen de los resultados es presentado en forma de tabla.

Observador 1		Observador 2		Observador 3	
$C^1$	1	$D^2$	1	$C^3$	1
$C^1$	1	$C^2$	-1	$C^3$	1
$D^1$	1	$C^2$	-1	$C^3$	-1

Observador 1		Observador 2		Observador 3	
D <sup>1</sup>	1	D <sup>2</sup>	-1	D <sup>3</sup>	-1

Al reunir la información de cada medición notamos una correlación: cada vez que mido el color para dos fotones y la dureza para el tercero el producto de las tres polarizaciones es +1.

Esta situación, que es un resultado experimental, puede ser resumida como una ecuación:  $C^1 C^2 D^3 = C^1 D^2 C^3 = D^1 C^2 C^3 = +1$ , esta ecuación resume las correlaciones entre los resultados en los tres medidores. Si imaginamos que cada fotón tiene definido de antemano su resultado al ser medido podemos multiplicar estas ecuaciones, tomando en cuenta que  $C^1 C^1 = C^2 C^2 = C^3 C^3 = 1$ , nos encontramos con el valor  $D^1 D^2 D^3 = +1$ . Si las polarizaciones tienen realidad objetiva, esto implica directamente que cuando los tres medidores midan dureza el producto de los resultados será +1. Esa es la esencia del teorema de Bell, todas las teorías de variables ocultas predicen que el producto de las tres durezas será +1. Es notable, pues las teorías de variables ocultas podrían ser construcciones muy abstractas y muy sofisticadas y son, esencialmente, desconocidas, sin embargo la única forma de ser consistentes con los resultados experimentales es que todas las posibles teorías predigan que el producto de las durezas sea +1. Si hacemos el experimento la sorpresa es grande. El producto de las polarizaciones es exactamente igual a -1!. Este experimento es similar a los hechos por Alan Aspect en 1982 y descarta cualquier posibilidad de que una teoría de variables ocultas entregue una descripción de las correlaciones observadas en la naturaleza. Es relativamente sencillo verificar que las predicciones de la mecánica cuántica coinciden exactamente con la situación experimental, la predicción de la teoría cuántica es que precisamente el producto de las durezas es -1. Sin embargo, dicho análisis escapa a los contenidos de este apunte.