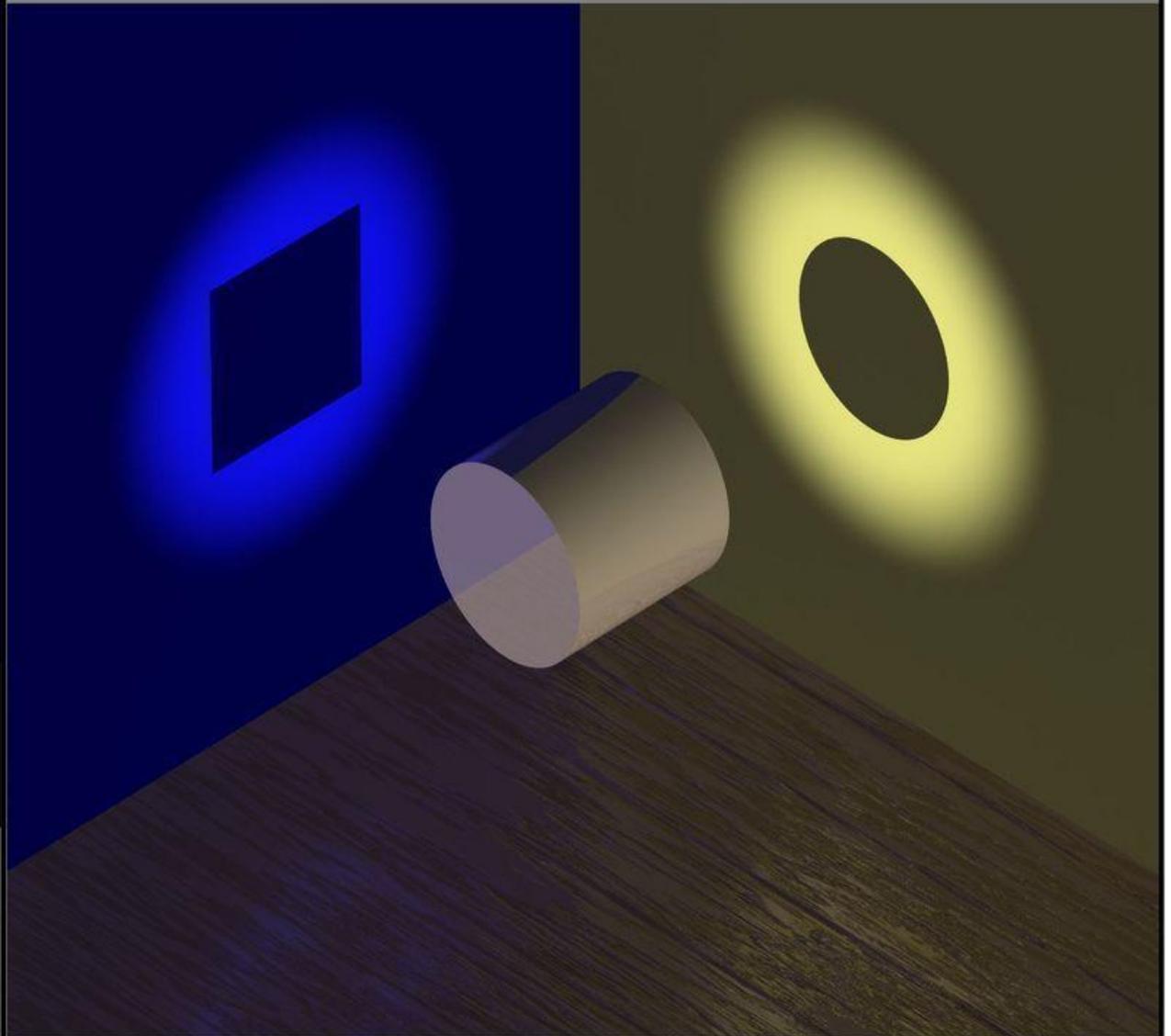


Cuántica sin fórmulas



El Tamiz

<http://www.eltamiz.com>

Cuántica sin fórmulas

Fuente:

<http://eltamiz.com/cuantica-sin-formulas/> *

* Todos los créditos sobre la información aquí presentada son para los creadores de esta página.

Recopilado y editado en "www.epubbud.com" por:

Alonso D. Cornejo

12 Enero del 2011

Aviso: Esta serie, aunque trata de ser “antes simplista que incomprensible”, como todas las de El Tamiz, es avanzada. Requiere un grado de abstracción bastante grande, tiempo y esfuerzo, y es posible que te parezca un ladrillo o no entiendas nada. Recomendamos tomarla sólo en pequeñas dosis y hacerlo en orden — cada artículo supone que se han entendido los anteriores.

Cuántica sin fórmulas trata de explicar los conceptos básicos (y algunos no tan básicos) de la Mecánica Cuántica: el principio de indeterminación, la dualidad onda-corpúsculo, los estados cuánticos, la naturaleza probabilística de los sucesos, etc. Intentamos hacerlo de manera accesible y sin utilizar fórmulas matemáticas.

Esta serie está activa: es posible que la información que buscas aún no se haya publicado y tengas que esperar.

INDISE:

- **Preludio**
- **La hipótesis de Planck**
- **El efecto fotoeléctrico**
- **El átomo de Bohr**
- **La hipótesis de de Broglie**
- **La dualidad onda-corpúsculo**
- **El principio de incertidumbre de Heisenberg (tres partes)**
- **La ecuación de onda de Schrödinger (tres partes)**
- **El pozo de potencial infinito**
- **El pozo de potencial finito**
- **El efecto túnel**
- **Estados cuánticos**

- **Estados y valores propios**
- **Superposiciones cuánticas**
- **El gato de Schrödinger**
- **El entrelazamiento cuántico**
- **Criptografía cuántica**
- **Teletransporte cuántico**
- **El detector de bombas de Elitzur-Vaidman**
- **El Teorema de Bell**

Preludio

Empezamos hoy una nueva serie en *El Tamiz* en la que vamos a zambullirnos en el mundo fascinante de la física cuántica. De manera similar a la serie de *Relatividad sin fórmulas*, vamos a tratar de hacerlo manteniendo las matemáticas al margen en la medida de lo posible – no porque haya nada de malo en ellas, sino porque en muchas ocasiones los libros de texto recurren a las fórmulas como sustitución de las explicaciones, y nosotros estamos aquí para compensar eso. De ahí el nombre de *Cuántica sin fórmulas*.

Antes de meternos en faena quiero dedicar esta entrada a establecer unas bases que (espero) te ayuden a asimilar más fácilmente los conceptos de los siguientes artículos. La razón es que, más incluso que en el caso de la relatividad, la cuántica es contraria a nuestra intuición, y para poder empezar a entenderla es necesario ser consciente de ciertos prejuicios e ideas preconcebidas que todos (y me incluyo) tenemos. De modo que, en cierto modo, vas a recibir un pequeño sermón. ¿Preparado?

En primer lugar, y como hice en el comienzo de la serie de *Relatividad sin fórmulas*, tengo que pedirte que tengas paciencia. Sí, estoy seguro de que quieres recorrer los vericuetos de la cuántica ahora mismo, pero créeme – es muy probable que, si empezamos ahora mismo, no te creyeras nada de lo que voy a contarte, porque muchas de las cosas de las que vamos a hablar son totalmente contrarias a la intuición. De ahí la necesidad de estos párrafos: tengo que prevenirte contra esa intuición y contra el “sentido común”, que son tus peores enemigos al leer esta serie.

El *DRAE* da las siguientes dos definiciones de “intuición” relevantes a lo que nos ocupa:

* *Facultad de comprender las cosas instantáneamente, sin necesidad de razonamiento.*

* *Percepción íntima e instantánea de una idea o una verdad que aparece como evidente a quien la tiene.*

Esta intuición es una herramienta muy útil: es una manera de entender cosas y adaptarse al medio que nos rodea rápidamente, sin necesidad de pensar cuidadosamente sobre las cosas, **cuando ese medio y esas cosas son similares a los que entrenaron la intuición que trata de comprenderlos**. La manera más fácil de entender lo que quiero decir es poner un ejemplo (sobre todo, uno en el que puedas ver las dos caras de la moneda):

Cuando se explica a muchos escolares que, si te encuentras en el vacío del espacio interestelar, lejos de cualquier cuerpo, y lanzas una pelota hacia delante a 10 km/h, esa pelota seguirá moviéndose para siempre a esa velocidad sin que nadie le dé energía, la mayor parte no se lo creen al principio. *Pero, si dejas de empujar un cuerpo, ¿no debería frenar hasta pararse?*, dicen.

¿Por qué piensan esto? Porque se lo dice su intuición, que se ha desarrollado en un medio en el que casi todos los cuerpos sufren rozamiento y se paran, salvo que sigas empujándolos. Suelen tardar algún tiempo (en general, no mucho, porque hay algunas situaciones similares en su entorno, como un patinador en el hielo) en desterrar las conclusiones de su intuición y aceptar las de la lógica, pero normalmente lo consiguen.

Lo mismo sucedería si explicases a un hombre primitivo que la Tierra es una esfera que gira alrededor del Sol – para él, sería una idea tan fantástica y absurda que ni siquiera se la tomaría en serio. La rechazaría sin pararse a razonar sobre ella: la rechazaría su intuición.

Sin embargo, el concepto de que un cuerpo sólo se frena si alguien ejerce una fuerza sobre él, o de que la Tierra no es plana, no son enormemente anti-intuitivos, sólo ligeramente: los hay peores. El concepto de que, *cuanto más rápido te mueves, más lentamente ven los demás que pasa el tiempo para ti...* eso sí que va contra la intuición. Por eso mucha gente, cuando lee sobre relatividad, se rebela a aceptar las conclusiones de la lógica, porque van contra su intuición. Lo mismo ocurre con la cuántica.

Todo este repetitivo discurso tiene que ver, por cierto, con un artículo reciente, el de la *Paradoja de Monty Hall*, de la que escribí precisamente como “entrenamiento” para esta serie: **si tienes que elegir entre las conclusiones de la lógica y las de la intuición, elige la lógica y destierra la intuición**. Si no lo haces, algo que era una herramienta útil para las situaciones en las que ha sido entrenada se convierte en un obstáculo para entender las situaciones para las que no ha sido entrenada.

Por si te ayuda, la mayor parte de los físicos que sembraron las semillas de la física cuántica se resistieron a aceptar las conclusiones que se obtenían de sus propios descubrimientos. Sin embargo, fíjate en lo que Born dijo de Max Planck, uno de los reticentes padres de la cuántica:

“Era por naturaleza y por la tradición de su familia conservador, reticente ante las novedades tecnológicas y escéptico frente a las especulaciones. Pero su convicción en el poder imperativo del razonamiento lógico basado en los hechos era tan fuerte que no dudó en expresar una afirmación que contradecía cualquier tradición, porque se había convencido de que no había otra explicación posible”.



Max Planck – lógica antes que intuición.

Lo que le sucedió a Planck no fue único: la mayor parte de los físicos que establecieron las bases de la cuántica se sentirían incómodos al principio con lo “anti-intuitivo” de la teoría. Algunos de ellos, como Albert Einstein, nunca la aceptarían, y tratarían de desmontarla (sin éxito) durante el resto de su vida. Otros aceptaron la precisa explicación que daba la nueva teoría de los fenómenos físicos antes inexplicables.

De manera que esto es lo que te pido para encarar esta serie: que, como Planck, olvides tus ideas preconcebidas sobre lo que es “de sentido común”, que prestes oídos sordos a una intuición que no está preparada para juzgar las situaciones que vas a estudiar, que destierres cualquier herramienta de entendimiento que no sea la fría lógica.

Y, desde luego, el aviso perenne en *El Tamiz*: si eres un experto en el tema, las simplificaciones que voy a hacer pueden hacerte rechinar los dientes y maldecir mi nombre, pero estoy harto de ver textos farragosos y abstractos sobre el asunto. Desde luego, no es posible transmitir un conocimiento profundo de la cuántica sin utilizar matemáticas complicadas, como los *espacios de Hilbert*, pero ¿significa eso que sólo un puñado de “elegidos” pueden atisbar de qué va la teoría? Me niego – antes simplista que incomprendible. Si esta serie sirve de algo a alguien que nunca ha entendido ni ápice de la cuántica, bienvenida sea.

Quiero aprovechar también esta entrada para avisarte de que la teoría cuántica me supera – es algo en lo que tengo que pensar mucho y ser muy cuidadoso para no quedarme en las matemáticas y simplemente soltar fórmulas como un loro. De todos modos, también te prevengo contra cualquiera que te diga que entiende perfectamente la física cuántica. En palabras de Niels Bohr,

Cualquiera que piense que puede hablar sobre la teoría cuántica sin marearse ni siquiera ha empezado a entenderla.

En cualquier caso, haré lo posible por transmitir lo que entiendo bien y es posible explicar sin utilizar fórmulas, de modo que tal vez te sirva como un primer paso para leer textos más académicos.

Como dijimos en la serie sobre relatividad, a finales del siglo XIX la sensación general era que el próximo siglo se dedicaría a perfeccionar detalles, limar zonas ásperas y terminar de explicar algunas cosas que no tenían una explicación adecuada con las teorías clásicas (las “intuitivas”). Estos “pequeños flecos” de la física fueron el germen de las dos grandes teorías físicas del siglo XX: la *Teoría de la Relatividad* de Einstein y la *Teoría Cuántica*, elaborada por varios físicos y poco a poco, como veremos a lo largo de la serie.

En la serie sobre relatividad ya hablamos acerca de los “flecos” que precedieron a esa teoría. En esta serie vamos a hablar sobre los que conciernen a la teoría cuántica, pequeños detalles que resultaron ser la punta del iceberg: cuando pensábamos que entendíamos cómo funciona el Universo salvo esos pequeños detalles nos dimos cuenta – justo mirando con cuidado esos pequeños detalles – de que sabíamos bastante menos de lo que pensábamos.

Hay varios de esos “flecos” que tienen que ver con la cuántica, pero vamos a centrarnos en los dos más importantes: la *radiación de cuerpo negro* y el *efecto fotoeléctrico*, por qué no tenían sentido – y cómo el explicarlos desencadenaría una revolución aún mayor que la de la relatividad. En la próxima entrada hablaremos del primero de los dos: *la radiación de cuerpo negro*.

La hipótesis de Planck

En la [primera entrada](#) de la serie *Cuántica sin fórmulas* mencionamos los pequeños “flecos” que harían tambalearse a la física clásica hasta que algunas de las cosas evidentes e intuitivas que todo el mundo daba por sentadas demostraron ser totalmente falsas. Hoy vamos a dedicarnos al primero de estos “flecos”, y la semilla de la teoría cuántica, mientras que en la próxima entrada hablaremos del segundo.

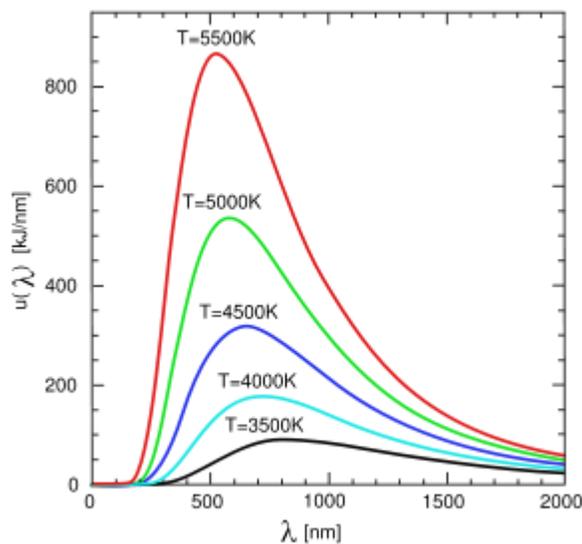
Como veremos, ambos son relativamente similares: en ambos casos existe un fenómeno físico del que no tenemos una explicación coherente. En ambos se propone una explicación que se ajustaría perfectamente a la realidad, pero cuyas consecuencias lógicas acerca de cómo es el Universo son tremendas. Y ambos proponentes de estas explicaciones son muy reacios a aceptar esa nueva concepción del Universo, a pesar de ser ellos mismos los que las han planteado.

El primero de ellos, al que está dedicado este artículo, es la radiación de cuerpo negro y la hipótesis de Planck. Dicho mal y pronto, $6,63 \cdot 10^{-34} \neq 0 \dots$ y *el mundo es un lugar muy, muy raro como consecuencia de eso*.

A finales del siglo XIX, tanto la termodinámica como el electromagnetismo eran ramas muy sólidas de la física y explicaban excelentemente bien casi todos los fenómenos relacionados con ellas. En algunos de ellos, ambas estaban involucradas a la vez, y uno de ellos era el problema de la *radiación de cuerpo negro*.

Un *cuerpo negro* es, como su propio nombre indica, un cuerpo que absorbe absolutamente toda la radiación electromagnética que recibe: ni refleja ni transmite nada de radiación. Un cuerpo de este tipo no es necesariamente de color negro: sí, no refleja nada, pero eso no quiere decir que él no emita radiación. Como absorbe toda la radiación que recibe, si le proporcionamos mucha energía se irá calentando hasta brillar. Puedes pensar en un tizón de madera totalmente negro como un cuerpo negro: si se calienta mucho es una brasa, brilla, no porque refleje luz sino porque emite la suya propia.

Igual que un tizón de madera, según su temperatura, brilla de un color o de otro (rojo profundo si no está demasiado caliente, amarillo si está más caliente, etc.), un cuerpo negro ideal emite radiación con una distribución de frecuencias determinadas. Esta radiación, denominada *radiación de cuerpo negro*, sigue una curva conocida por los físicos de la época. Dependiendo de la temperatura del cuerpo, la radiación emitida varía, de modo que cuanto más caliente está menor es la longitud de onda en la que tiene un máximo de emisión:



Crédito: Wikipedia (GPL).

El eje vertical representa la energía emitida en cada nanómetro del espectro electromagnético, y el horizontal la longitud de onda. Como puedes ver, cuanto más caliente está el cuerpo, más radiación emite (lógico), y más hacia la izquierda está el máximo de emisión: un cuerpo bastante frío emite casi toda la energía en la región infrarroja y no lo vemos brillar, un cuerpo más caliente brilla con color rojo, uno muy caliente sería azulado, etc, según la curva tiene un máximo más hacia la izquierda. Una vez más, lógico.

Las teorías de la época suponían que la superficie del material estaba compuesta por una infinidad de osciladores muy pequeños (que hoy diríamos que son los átomos del material) que se encuentran vibrando alrededor de un punto de equilibrio. Cuanto más caliente está el material, más rápido y con mayor amplitud vibran esos minúsculos osciladores, que pueden emitir parte de la energía que tienen en forma de onda electromagnética. Al emitir esta energía, oscilan más despacio: es decir, se enfrían.

Al aplicar estas teorías clásicas a la radiación de cuerpo negro, se obtenía una curva teórica de la radiación emitida...y *ninguna curva teórica coincidía con la curva real*. La más conocida era la propuesta por Lord Rayleigh en 1900, y perfeccionada por Sir James Jeans en 1905. Era elegante, se deducía de manera lógica a partir de las teorías conocidas... **y predecía que un cuerpo negro debería emitir una energía infinita.**

La curva que se obtenía a partir de la fórmula de Rayleigh-Jeans se ajustaba muy bien a la curva real para longitudes de onda largas, pero para longitudes de onda cortas divergía de una forma exagerada: no es que fuera algo diferente, es que era totalmente imposible. En descargo de Rayleigh y Jeans, los dos (y también Einstein) se dieron cuenta muy pronto de que la fórmula teórica era imposible.

Esta imposibilidad disgustó mucho a los físicos. De hecho, el fracaso de la ley propuesta por Rayleigh y Jeans suele llamarse “catástrofe ultravioleta” (pues la divergencia se producía para pequeñas longitudes de onda, en la región ultravioleta). Sin embargo, alguien había resuelto el problema sin encontrarse con ninguna “catástrofe” cinco años antes, aunque haciendo una suposición que no gustaba a nadie (ni a su propio creador): el genial físico alemán Max Planck.

A veces se dice, incluso en algunos textos de física, que fue Planck quien se dio cuenta de la “catástrofe ultravioleta” y propuso una fórmula alternativa para resolverla, pero esto no es cierto: Planck había obtenido su fórmula en 1900, cinco años antes de que nadie se diera cuenta de la “catástrofe”. Además, la ley de Rayleigh-Jeans se basa en algunas suposiciones (como el [principio de equipartición](#)) con las que Planck no estaba de acuerdo.

Lo que sucedió en 1900, al mismo tiempo que Lord Rayleigh obtenía su propia fórmula e independientemente de él, fue lo siguiente: Planck era consciente de que ninguna de las teorías del momento producía una curva de emisión que coincidiera con la real. Sin embargo, haciendo simplemente una pequeña, una minúscula suposición, y realizando los cálculos de nuevo, *se obtenía una fórmula que se ajustaba milimétricamente a la realidad*. Una fórmula de una precisión enorme, que explicaba todos los experimentos realizados con cuerpos negros.

Esa suposición era simplemente una pequeña argucia matemática, a la que Planck, en principio, no dio mucha importancia, ni consideró como una concepción del Universo físico. La suposición era que los minúsculos osciladores que componían la materia **no podían tener cualquier energía arbitraria, sino sólo valores discretos entre los cuáles no era posible ningún valor**.

Dicho de otra manera, lo que todo el mundo (incluyendo al propio Planck) consideraba lógico e intuitivo es que un oscilador puede oscilar como le dé la gana. Por ejemplo, si haces oscilar un péndulo, puedes darle un golpe pequeño (poca energía) o uno grande (mucho energía), de modo que oscile poco o mucho: entre cualquier par de péndulos idénticos que oscilan puedes imaginar otro que oscila con más energía que el primero y menos que el segundo. A continuación puedes fijarte en el primero y el que acabas de inventar: entre ellos puedes imaginar otro que oscile con un poco más de energía que el primero y menos que el segundo, etc.

Sin embargo, si Planck suponía que esto no era así, es decir, que un péndulo *no puede* oscilar con la energía que le dé la gana, sino que es posible tener dos péndulos oscilando con dos energías *y que sea imposible que exista ningún péndulo con una energía intermedia*, entonces todos los cálculos que realizaba concordaban a la perfección con la realidad.

De modo que Planck publicó sus cálculos y su suposición en 1901, y durante cuatro años nadie le prestó mucha atención. Aunque no vamos a entrar en fórmulas, Planck supuso que los pequeños osciladores de la materia podían oscilar sólo con energías que fueran múltiplos enteros de una “energía fundamental” que era proporcional a la frecuencia con la que oscilaban mediante una constante que probablemente era muy pequeña.

En su hipótesis, como hemos dicho, Planck supuso que el tamaño de estos “escalones” era proporcional a una constante (que fue calculada más tarde, como veremos en el próximo artículo de la serie), la **constante de Planck**, que hoy sabemos que tiene un valor de $6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s. Toda la teoría cuántica, y la diferencia entre el Universo “intuitivo” y el “cuántico”, se basan en ese hecho:

$$6,63 \cdot 10^{-34} \neq 0.$$

Bienvenido al mundo cuántico.

En la próxima entrada de la serie hablaremos del segundo escalón (nunca mejor dicho) en el ascenso hacia una teoría cuántica coherente y la destrucción de la realidad objetiva: la extensión por parte de Albert Einstein de la hipótesis de Planck para explicar otro fenómeno que no tenía explicación clásica, y el nacimiento del fotón. Nos dedicaremos al [efecto fotoeléctrico](#).

El efecto fotoeléctrico

Tras realizar un pequeño [preludio](#) y hablar sobre la [hipótesis de Planck](#), continuamos hoy la serie de *Cuántica sin fórmulas* hablando acerca del segundo paso que derrumbaría las suposiciones de la física clásica y revolucionaría la física del siglo XX aún más que la relatividad. Este segundo paso, como veremos, se basa en el primero, y tiene ciertos paralelismos con él. Me refiero al **efecto fotoeléctrico**.

Este efecto era uno de los pocos fenómenos que no tenían una correcta explicación teórica a finales del siglo XIX (lo mismo que la radiación de cuerpo negro, de la que ya hablamos y que Planck logró justificar mediante su hipótesis), y consiste en lo siguiente: si se coge un trozo de un metal y se hace incidir luz sobre él, a veces la luz es capaz de arrancar electrones del metal y hacer que se muevan, produciendo así una corriente eléctrica – de ahí el nombre del efecto, “electricidad producida con luz”. Pero la clave está en el “a veces”, y ahí es donde los físicos se mesaban los cabellos con preocupación.

Los científicos se dedicaron, por supuesto, a pensar por qué se producía y cuándo debería producirse el efecto fotoeléctrico (que debería involucrar partes de la ciencia bien desarrolladas como el electromagnetismo), y la teoría clásica razonaba de la siguiente manera:

La luz transporta energía. Cuando la luz choca contra el metal, le transfiere energía. Si esa energía es suficiente para arrancar electrones, se produce el efecto fotoeléctrico, y si no es suficiente, no ocurre nada. De manera que si, por ejemplo, apunto una bombilla muy tenue contra una chapa de metal, no se produce efecto fotoeléctrico, pero si aumento la potencia de la bombilla mil veces, se producirá el efecto.

Pero esto no pasaba. Si la bombilla tenue no era capaz de producir el efecto fotoeléctrico, entonces por mucho que aumentara la intensidad de la luz, diez, mil, un millón de veces, *no salía ni un solo electrón del metal*. También pasaba al revés, claro: si la bombilla era capaz de arrancar electrones del metal, era posible disminuir su potencia todo lo que se quisiera: incluso

un debilísimo rayo de luz de la bombilla era capaz de arrancar electrones – arrancaba menos electrones que la luz potente, pero los arrancaba. *Y esto no tenía absolutamente ningún sentido.*

¿De qué dependía entonces que se produjera el efecto, si no era de la intensidad de la luz? Los científicos, por muy tercos que fueran tratando de explicar las cosas con la teoría clásica, son científicos: se dedicaron a cambiar otras condiciones del experimento hasta llegar a una conclusión absurda, imposible, totalmente inaceptable – **el factor que decidía que se arrancaran electrones era el color de la luz de la bombilla.** Dicho en términos más técnicos era la *frecuencia* de la radiación, pero nuestros ojos “ven” la frecuencia de la luz como el color, de modo que nos vale con eso.

Es decir, que si cogiéramos una bombilla cuyo color pudiéramos hacer variar siguiendo los colores del arco iris (los físicos de la época iban más allá de la luz visible, pero una vez más nos vale con esto), desde el rojo al violeta, al principio no se producía el efecto. Pero llegaba un momento, que dependía del metal que se tratase (*y no dependía para nada de la intensidad de la luz*) en el que empezaban a arrancarse electrones – supongamos que al llegar al amarillo. Si se seguía variando el color a lo largo del arco iris, cualquier color pasado el amarillo en ese recorrido (por ejemplo, el violeta) también arrancaba electrones.

La intensidad de la luz sí tenía cierto efecto, como hemos dicho: si un rayo de luz roja (por ejemplo) no producía el efecto, por muy intensa que fuera la luz no ocurría nada. Pero si un rayo de luz amarilla sí lo producía, entonces al aumentar la intensidad de la luz aumentaba el número de electrones arrancados. Sin embargo, incluso esto no encajaba con la teoría clásica: aumentaba el número de electrones arrancados (la intensidad de la corriente), *pero no la energía de cada electrón* (el voltaje de la corriente), que era absolutamente igual para la luz amarilla independientemente de la intensidad. Es decir, si la luz amarilla producía electrones con una determinada energía cada uno, multiplicar la intensidad de la luz por cien hacía que salieran cien veces más electrones del metal, *pero todos con la misma energía que cuando salían menos.* La verdad es que era desesperante.

Pero es que la cosa no acaba ahí: la frecuencia (el color) de la luz no sólo determinaba si se producía el efecto o no. Además, la energía de cada electrón (que ya hemos dicho no dependía de la intensidad) *aumentaba según la frecuencia de la luz aumentaba.* Es decir, que si se usaba luz azul, los electrones tenían más energía que si se usaba luz amarilla. Pero ¿qué demonios tenía que ver el color de la luz con la energía de los electrones?

La solución la dio el siempre genial Albert Einstein, quien, recordemos, ya había apuntado a la hipótesis de Planck como la solución teórica al problema de la radiación de cuerpo negro. Einstein aplicó el razonamiento lógico y extrajo una conclusión inevitable de la hipótesis de Planck – aplicar la lógica y extraer conclusiones eran cosas en las que Einstein era un genio sin igual. El razonamiento del alemán fue el siguiente:

Si los pequeños osciladores que componen la materia sólo pueden tener unas energías determinadas, unos “escalones de energía” que son proporcionales a la constante de Planck y a la frecuencia con la que oscilan, ¿cómo será la energía que absorben y desprenden? La luz, al fin y al cabo, *sale de estos osciladores.* Una bombilla, por ejemplo, brilla porque los átomos del filamento están muy calientes y desprenden energía electromagnética, que ellos mismos pierden. Pero si los osciladores pierden energía, no pueden perder una cantidad arbitraria: deben “bajar la escalera” de energía y, como mínimo, perder un “escalón”. De forma inevitable, **la energía luminosa que desprenden no puede ser arbitraria, tiene que estar hecha de estos “escalones”.**



Einstein en 1905, cuando publicó su explicación del efecto fotoeléctrico.

Si lo piensas, es totalmente lógico (aunque generó una gran polémica al principio): si las fuentes de luz sólo pueden estar en los escalones de energía que propuso Planck, y cuando emiten luz es porque pierden energía, la luz que emiten debe estar hecha de esos “escalones”. No es posible emitir una cantidad arbitrariamente pequeña de energía luminosa: sólo puede tenerse luz “en píldoras”. *La luz está cuantizada.*

Naturalmente, un físico que se precie no habla de “píldoras”, “escalones” o “trozos” de luz. Einstein llamó a este concepto *Lichtquant*, “cuanto de luz”. En 1926, Gilbert Lewis propuso otro nombre, que es el que usamos hoy en día: fotón. Durante el resto de este artículo hablaremos de *fotones*, aunque Einstein no los mencionara en la publicación en la que propuso su existencia.

Cuando se considera el efecto fotoeléctrico en términos de fotones, todo tiene sentido: la luz que llega al metal está compuesta de fotones. Cada uno de ellos tiene una energía

proporcional a la constante de Planck y la frecuencia de la radiación. Si la luz es muy intensa (una bombilla muy grande y potente), hay muchos fotones. Si la luz cambia de color pero no de intensidad, hay el mismo número de fotones, pero cada uno tiene más energía (hacia el azul) o menos energía (hacia el rojo).

Cuando uno de estos fotones llega al metal y choca con un electrón, puede darle su energía: si esta energía es suficiente para arrancarlo del metal, se produce el efecto fotoeléctrico, y si no es suficiente, no pasa nada. La cuestión es que la interacción se produce entre un fotón y un electrón – no entre “toda la luz” y “todos los electrones”, porque tanto la luz como la materia están cuantizadas. ¿De qué depende entonces de que se produzca el efecto? *De la frecuencia de la luz, es decir, del color.* Si es luz roja (por ejemplo), cada fotón tiene muy poca energía. Tal vez haya muchísimos fotones, pero a este electrón en particular sólo le afecta el que ha chocado contra él, y éste no tiene suficiente energía para arrancarlo, de modo que no sucede nada.

Si se tiene luz con una gran frecuencia (por ejemplo, azul), cada fotón tiene mucha energía: proviene de un “escalón grande” de Planck. Cuando choca con un electrón puede darle suficiente energía para arrancarlo del metal, y entonces se produce el efecto fotoeléctrico. Claro, si esta luz azul es muy intensa (hay muchos fotones), y cada uno arranca un electrón, se arrancarán muchos electrones, exactamente como sucede en la realidad. Pero si cada fotón no hubiera tenido suficiente energía para arrancar a su electrón, por muchos fotones que hubiera, no pasaría nada en absoluto.

Puede que te preguntes, querido lector, *Vale, pero ¿no puede el electrón recibir un fotón con poca energía, “guardarse la energía” que le ha dado el fotón, aunque no sea bastante, y esperar al siguiente fotón, y así hasta tener suficiente energía para escapar?*

No, no y mil veces no – recuerda la hipótesis de Planck. Si un fotón no tiene suficiente energía para arrancar el electrón es *porque el escalón de energía es demasiado alto.* Un electrón no puede tener “un poquito más de energía” arbitrariamente: o tiene la que tiene ahora, o tiene la del siguiente escalón. Si el fotón no tiene suficiente energía para arrancar el electrón es que la energía del siguiente escalón es demasiado alta, de modo que el electrón ni siquiera puede almacenar la energía del fotón, porque lo pondría “entre dos escalones”. De modo que se queda exactamente como estaba antes, por muchos fotones de poca energía que le lleguen. Estos fotones, al no poder ser absorbidos por el electrón, continúan su camino, y probablemente acabarán dando su energía a algún átomo, haciéndolo vibrar más rápidamente (es decir, calentando el metal), pues los “escalones” son ahí más pequeños que los necesarios para arrancar el electrón.

Y, por supuesto, si la luz tiene una frecuencia altísima, los electrones arrancados tendrán una gran energía (y la corriente, un gran voltaje): el fotón tiene mucha energía, y gasta parte de ella en arrancar el electrón. El resto se la queda el electrón, pues el fotón ha desaparecido: un fotón es un “escalón”, y no puede romperse y dar parte de su energía. O está, o no está. Cuando le da su energía al electrón, se da entero. El electrón, entonces, tiene mucha energía. Mientras que si la frecuencia de la luz es sólo la necesaria para arrancar al electrón y nada más, el electrón tiene muy poca energía. Una vez más, coincidía a la perfección con los experimentos.

Pero la teoría de Einstein no sólo coincidía con la realidad cualitativamente, sino que era capaz de realizar predicciones cuantitativas: si la energía de cada fotón era proporcional a la constante de Planck y a la frecuencia de la luz, entonces la energía de los electrones arrancados debería aumentar proporcionalmente a la frecuencia de la luz. Aunque cueste creerlo, en 1905, cuando Einstein publica su propuesta, aún no se había medido

cuantitativamente la energía de los electrones arrancados. En 1915, Robert Andrews Millikan realizó experimentos muy precisos: la energía de los electrones aumentaba de forma lineal con la frecuencia, *exactamente lo que Einstein había predicho*.

Parte de la comunidad científica aún se resistía a aceptar la existencia del *Lichtquant*, pero una vez más, aceptando una idea aparentemente absurda y contraria a la intuición (que la luz está hecha de “trozos”), los experimentos se explicaban con una precisión indiscutible. Albert Einstein recibió el Premio Nobel en 1921 por su explicación del efecto fotoeléctrico, siguiendo los pasos de Planck – y, como él, muy reacio a aceptar las implicaciones posteriores de su teoría, de las que hablaremos en artículos posteriores en la serie.

La pregunta inmediata, por supuesto, es: *si la luz está hecha de pequeños paquetes, ¿por qué la vemos de forma continua?* Nadie ve “trocitos” de luz, no, y la respuesta (que ya deberías saber, si has entendido la serie hasta ahora) es que *son demasiado pequeños*. Si recuerdas la hipótesis de Planck, la energía de cada escalón es minúscula y, por lo tanto, la energía de cada fotón es igualmente minúscula. Cuando nos llega, por ejemplo, la luz del Sol, está hecha de fotones, pero cada segundo llegan a nuestro ojo unos **veinte trillones de fotones**: 20.000.000.000.000.000 fotones. ¿Pero cómo vamos a distinguir que no es un “chorro” de energía sino un “goteo”? Es imposible.

La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico tiene implicaciones profundas sobre nuestro concepto del Universo: la luz era, para la comunidad científica, clara e indiscutiblemente una onda, como el sonido o las olas. Sufría fenómenos, como la interferencia y la difracción, que sólo sufren las ondas. Sin embargo, ahora llegaba Einstein y decía que la luz estaba compuesta de lo que, a efectos prácticos, eran pequeñas partículas... ¿cómo podía la luz sufrir difracción si estaba hecha de fotones? Pero ¿cómo podía la luz producir el efecto fotoeléctrico si *no estaba* hecha de fotones? La solución de Einstein generaba preguntas aún más difíciles de responder: ¿era la luz una onda o partículas?

La solución, por supuesto, es el tercer paso en nuestra caída de la realidad objetiva, y el responsable fue otro genio del razonamiento lógico: el francés Louis-Victor-Pierre-Raymond, séptimo Duque de Broglie (normalmente conocido como Louis de Broglie). Pero, antes de acabar de responder a la pregunta sobre las ondas y las partículas, en el próximo artículo trataremos otra aplicación de la hipótesis de Planck a un problema sin responder: [el modelo atómico de Bohr](#) y el nacimiento del término “*mecánica cuántica*”.

El átomo de Bohr

Iniciamos esta serie de [Cuántica sin fórmulas](#) con el [Preludio](#), tras el cual discutimos dos de los principales “fleclos” en los que fallaban las teorías clásicas a finales del siglo XIX: la [radiación de cuerpo negro](#) y el [efecto fotoeléctrico](#). Como recordarás, la solución del primero dio lugar a la *hipótesis de Planck* y su famosa constante; la solución del segundo produjo el nacimiento del *fotón* y la consideración de las ondas como conjuntos de partículas. (Por cierto, si no has leído los artículos anteriores es muy difícil que entiendas éste, pues se basa en los conceptos establecidos allí).

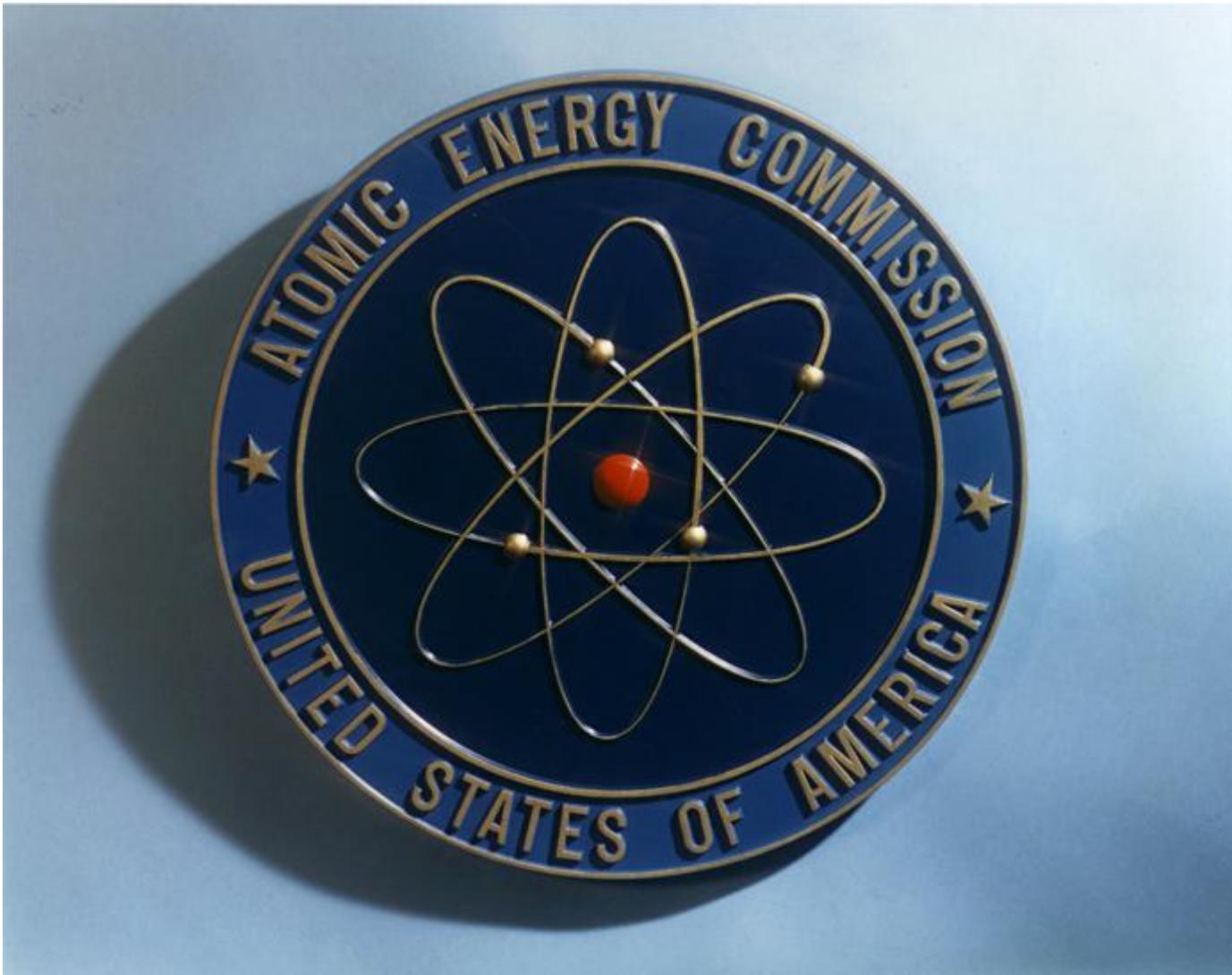
Antes de seguir zambulléndonos a mayor profundidad dentro de la mecánica cuántica, quiero dedicar este artículo a explicar precisamente cómo y cuándo recibió su nombre esta parte de la física, y cómo resolvió el tercero de los “fleclos” que los físicos clásicos no habían logrado

resolver hasta entonces. Lo interesante en este caso es que no se plantea una idea nueva como en los dos anteriores, sino que –por primera vez– se ponen en práctica las primeras ideas cuánticas de Planck y Einstein para resolver un problema concreto. Vamos a hablar del **átomo de Bohr**.

El “pequeño detalle” resuelto por Niels Bohr, en el que la física clásica fallaba, era básicamente éste: **la materia, tal y como la conocemos, no debería existir**. Menudo “pequeño fleco”, ¿eh?

La razón es la siguiente: poco a poco, los científicos habían ido obteniendo datos sobre la estructura de los átomos. Sabían que tenían cargas positivas y negativas (aunque aún no conocían los neutrones), y que las cargas positivas (los protones) constituían la mayor parte de la masa de los átomos y estaban en el centro (el núcleo), ocupando un espacio muy pequeño. Las cargas negativas (los electrones) estaban en el exterior, en una zona mucho más grande y menos densa.

De modo que los físicos explicaron esta estructura de acuerdo con las teorías de la mecánica que hoy llamamos “clásica” y la teoría electromagnética de Maxwell. Todo encajaba casi a la perfección, y el modelo más exacto y avanzado era el de Ernest Rutherford (que seguro que has estudiado en el colegio): *los protones están en el núcleo, quietos, y los electrones giran alrededor del núcleo a gran velocidad*. El símbolo típico del átomo sigue siendo el de Rutherford, aunque su modelo sólo duró dos años. Así son a veces las cosas.



Logo de la Comisión de Energía Atómica estadounidense, que aún utiliza el símbolo del átomo de Rutherford.

Claro, como los electrones tienen carga negativa y los protones positiva, se atraen, pero la velocidad de giro de los electrones hace que éstos no caigan hacia el núcleo, igual que la velocidad de la Tierra en su movimiento alrededor del Sol hace que nuestro planeta realice órbitas alrededor de la estrella y no se acerque a ella. Naturalmente, los electrones están muy cerca del núcleo, de modo que tienen que moverse muy, muy rápido para no caer hacia el centro, pero ambos casos son parecidos (de hecho, a veces se llama al modelo de Rutherford "modelo planetario"). Todo el mundo estaba muy satisfecho, salvo por una cosa.

De acuerdo con la teoría electromagnética de Maxwell, cualquier carga acelerada (que vaya cada vez más rápido, más lento o que cambie su dirección de movimiento) emite una onda electromagnética, tanto más energética cuanto mayor sea la carga y más rápida sea la variación de velocidad. Y aquí estaba el problema: *los electrones, al girar alrededor del núcleo y por lo tanto cambiar su dirección de movimiento constantemente, deberían estar emitiendo radiación electromagnética todo el tiempo.* Pero claro, al emitir radiación electromagnética

deberían perder energía, moverse más despacio, “caer” un poco hacia el núcleo, emitir más radiación, perder más energía...

Es decir, si el modelo de Rutherford (y no había ningún otro que pudiera explicar la naturaleza de los átomos) era cierto, **el átomo como lo conocemos existiría durante una minúscula fracción de segundo**, pues sus electrones girarían en una espiral hacia el centro, emitiendo radiación según caen hacia él hasta que protones y electrones se “fundieran” en una bola minúscula del tamaño del núcleo atómico. Los átomos deberían “brillar” con diferentes longitudes de onda durante un tiempo muy corto y luego... bueno, básicamente, dejar de ser átomos y convertirse en “minibolas” de electrones y protones.

Pero esto, evidentemente, no pasaba. Además, cuando los átomos emiten radiación electromagnética (“brillan”), no lo hacen con cualquier longitud de onda, como deberían hacer de acuerdo con Rutherford: lo hacen con unas cuantas longitudes de onda (colores, si es radiación visible) muy, muy concretas. El hidrógeno, por ejemplo, lo hacía en una serie de frecuencias que se conocían muy bien, y nunca, jamás, emitía radiación en otras frecuencias, mientras que el modelo de Rutherford predecía emisión continua en muchísimas longitudes de onda según el electrón iba cayendo hacia el átomo.

De modo que ¿qué estaba pasando? Irónicamente, muchos científicos ya sabían por dónde iban los tiros incluso cuando Rutherford postuló su modelo: lo hizo en 1911 y, para entonces, la hipótesis de Planck ya había sido propuesta y Einstein había postulado también la existencia del fotón (aunque, como dijimos, aún no con ese nombre). Por otro lado, gran parte de la comunidad científica aún se resistía a aceptar las ideas de Planck y Einstein.

Entra en escena Niels Bohr (que ya ha aparecido antes en *El Tamiz*) y, utilizando un razonamiento lógico agudísimo, deshace el nudo gordiano de los electrones girando alrededor del núcleo aplicando las ideas de Planck y Einstein al problema. En 1913, Bohr publica *Sobre la constitución de átomos y moléculas*, donde realiza el siguiente razonamiento (naturalmente, escrito a nuestra manera):

La teoría de Planck había sido aplicada en principio a sus “pequeños osciladores” (que, como recordarás, eran los átomos o moléculas del material vibrando debido a su temperatura), pero debería ser aplicable a cualquier sistema en el que algo puede moverse alrededor de cierto punto de equilibrio pero sin poder alejarse mucho de ese punto por alguna fuerza que lo impida: un péndulo oscilando, un columpio, una molécula en un cristal... **o un electrón girando alrededor del núcleo de un átomo.**

Espero que te des cuenta de que el genio de Bohr, en este caso, no está en plantear algo radicalmente nuevo, sino en tomar una teoría que se había restringido a un caso muy concreto y utilizarla para explicar algo mucho más amplio y de una gran importancia. Éste sería el primero de muchos casos en los que la teoría cuántica (que aún era incómoda para muchos), a pesar de su extrañeza, daba una respuesta de una enorme precisión a un problema que no había tenido solución hasta entonces, sin necesidad de grandes avances teóricos.

Y es que, en efecto, simplemente suponiendo que los electrones en el átomo son algo análogo a los pequeños osciladores de Planck, *todos los problemas del modelo de Rutherford se desvanecen sin dejar rastro.*

En primer lugar, ¡por supuesto que los electrones no pueden ir perdiendo energía de forma gradual y continua! Los electrones ocupan escalones de energía discretos, y no pueden tener energías intermedias: **su energía está cuantizada**. Por lo tanto, un electrón que está en un “escalón” determinado (más técnicamente, en un *nivel energético* determinado) no emite

energía. Sólo lo hará si “cae” a un escalón de energía inferior, pero entonces no emitirá cualquier longitud de onda, puesto que aquí también echa mano Bohr de los dos genios anteriores: *el electrón que pierde un escalón de energía emite un fotón que se lleva la energía perdida.*

¡Por eso los átomos sólo emitían energía de longitudes de onda (“colores”) determinadas! Los fotones emitidos no pueden tener cualquier energía, sino únicamente la que hay entre escalones. De modo que era posible algo aún más increíble: medir la longitud de onda de esos fotones y, mediante la teoría fotónica de Einstein, calcular la energía de los fotones. *El tamaño de los escalones de energía de los electrones debía ser exactamente la energía de los fotones emitidos.*

Desde este crucial papel de Bohr, siempre que se hable de electrones en un átomo se hablará de sus *niveles de energía*. Aunque no quiero entrar en muchos detalles aquí, las predicciones de su modelo (que, como digo, no es más que la aplicación de las ideas de Planck y Einstein al átomo) fueron tan extraordinariamente precisas, cualitativa y cuantitativamente, que fue muy difícil para nadie cuestionar su validez. Esto no quiere decir que fuera perfecto (por ejemplo, supone órbitas circulares para los electrones, no tiene en cuenta otros fenómenos cuánticos que no se conocían entonces...) pero para la época y los datos experimentales de entonces su éxito fue despampanante. Bohr recibió el Premio Nobel de Física en 1922 *“por sus servicios a la investigación de la estructura de los átomos y la radiación emitida por ellos”*.

Desde luego, hay muchos otros sistemas análogos a los pequeños osciladores de Planck, y uno de ellos (la Tierra alrededor del Sol) cumple esas condiciones perfectamente. De hecho, como dijimos antes, fue un ejemplo muy utilizado para hacer entender el modelo de Rutherford. ¿Por qué entonces no se observa nada del estilo de los escalones de energía en la Tierra? Una vez más, la cuestión es el tamaño de los “escalones”: la Tierra tiene una energía tan gigantesca comparada con ese tamaño que no notamos que existan “niveles energéticos” alrededor del Sol.

Y ahí está la segunda razón de la importancia del modelo de Bohr: de acuerdo con el genial danés, todas las reglas de nuestra intuición, las leyes de la mecánica que podemos entender, son absolutamente inútiles al tratar con cosas del tamaño de un átomo. La mecánica clásica no sirve para nada allí, hay que elaborar una mecánica nueva que tenga en cuenta la cuantización de la energía: **hay que crear una mecánica cuántica**, basada únicamente en modelos teóricos respaldados por la experimentación. Ésta es la primera mención del nombre que tantos escalofríos sigue causando a los estudiantes de física, y Bohr era perfectamente consciente de que su modelo era sólo un parche — había que *crear* esa mecánica cuántica, y él ayudó enormemente a su creación, aunque fueran otros los verdaderos artífices del aparato teórico posterior. Sin él nunca se hubiera desarrollado.



Niels Henrik David Bohr.

Desde luego, de acuerdo con Bohr, las leyes de esa mecánica cuántica deben siempre corresponderse con la mecánica clásica cuando las magnitudes se hacen suficientemente grandes (como en el caso de la Tierra), algo que se conoce como *principio de correspondencia*. Claro, si una ley cuántica predijese que un objeto de 10 kilogramos no se comporta como sabemos que lo hace (porque objetos así sí podemos verlos y nuestra mecánica anterior funciona para ellos), esa ley probablemente sería errónea.

De modo que lo que propone Bohr es crear una mecánica nueva que sea una *generalización* de la antigua: que funcione cuando aquélla funcionaba, pero que funcione también cuando la antigua no lo hace. Algo parecido a la *Teoría de la Relatividad Especial* de Einstein, que se ajusta perfectamente a la cinemática clásica cuando las velocidades son muy bajas.

Además del *principio de correspondencia*, Niels Bohr propuso otro principio aún más interesante y mucho más revolucionario, el *principio de complementariedad*: puesto que nuestra intuición no es aplicable a estos sistemas tan alejados de nuestra experiencia, es posible que algunas de las conclusiones que extraigamos de los experimentos nos parezcan contradictorias, pero esto no se debe a que las conclusiones sean falsas, **sino a que los conceptos que utilizamos para tratar de entenderlas no son los adecuados.**

Por ejemplo, *¿por qué el electrón que está a una determinada distancia del átomo no puede acercarse “un poquito” y perder “un poquito” de energía? ¿Por qué tiene que caer un escalón entero? ¿Qué impide que haya energías intermedias? ¿No debería haber algún tipo de barrera que “pare” al electrón, si no puede estar ahí?*

Todas esas preguntas se basan en una suposición previa de la que a veces no somos conscientes porque es intuitiva (“salvo que nada lo impida, algo puede tener cualquier valor de energía y estar a cualquier distancia del núcleo”) que no tiene base alguna. El problema no está en cómo es el Universo – el Universo es como es. El problema está en que nuestro cerebro piensa de maneras que no se corresponden con el Universo, sino sólo con un conjunto de situaciones muy concretas que son el entorno en el que se ha desarrollado.

Pero hay otros muchos casos de aplicación del principio de complementariedad, y el más claro y famoso de ellos nos llevará en el próximo artículo de la serie al asunto que ya anunciamos en la anterior entrada: [la hipótesis de Louis de Broglie](#).

La hipótesis de Broglie

En entradas anteriores de la serie [Cuántica sin fórmulas](#) hemos hablado acerca de la [actitud adecuada](#) para enfrentarse a la mecánica cuántica y poder entenderla, la [hipótesis de Planck](#), el [efecto fotoeléctrico](#) y el [átomo de Bohr](#). Si no has leído esos artículos deberías hacerlo antes de seguir leyendo éste, pues se basa en conceptos establecidos en los anteriores. Por cierto, no hace falta decir que voy a realizar simplificaciones y aproximaciones que, si eres físico como yo, pueden hacer hervir tu sangre. Si es así, tómate un respiro y lee algo más elevado — la red es muy amplia.

Dicho esto, recordarás cómo Einstein había revolucionado las teorías sobre la naturaleza de la luz al sugerir que la luz está *cuantizada*, es decir, compuesta de entidades elementales que denominamos *fonones*. La suposición de Einstein no sólo explicaba el porqué del efecto fotoeléctrico, sino que fue confirmada experimentalmente pocos años más tarde y hoy la aplicamos a todo tipo de ondas. Dicho mal y pronto —y como espero que recuerdes— la teoría de Einstein dice que si se observa el comportamiento de las ondas (por ejemplo, la luz) en determinadas condiciones, se comprueba que dichas ondas son también partículas.

El siguiente paso en nuestro camino hacia la realidad cuántica lo dio Louis-Victor-Pierre-Raymond, séptimo Duque de Broglie, en su tesis doctoral de 1924. La idea de de Broglie es de una sencillez tremenda, pero las conclusiones ponen la carne de gallina. El genial francés realiza el siguiente razonamiento, que al principio puede parecer una estupidez: *si las ondas son también partículas, eso quiere decir que las partículas son también ondas*. Dicho de otro modo, querido y paciente lector: **tú eres un ser... ondulatorio**.

Como digo, a veces cuando la gente escucha el razonamiento de Louis de Broglie le parece una tontería. *Las ondas son partículas, luego por lo tanto las partículas son ondas*. Qué bobada, ¿no?

Pues no.

En primer lugar, dar la vuelta a una afirmación así no es necesariamente correcto. Por ejemplo, si todos los músicos son humanos, *¿quiere eso decir que todos los humanos son músicos?* De ahí que lo que de Broglie plantea sea una *hipótesis*: hace falta comprobarla para ver si es cierta o no. No te voy a tener en ascuas: es cierta, y se ha comprobado experimentalmente, como veremos luego. Pero antes de que eso ocurriera la hipótesis era todo menos trivial.

En segundo lugar, aunque sea simplemente “dar la vuelta a la frase”, las consecuencias conceptuales sobre cómo es el Universo y todo lo que nos rodea son tremendas. Si aceptamos la propuesta de de Broglie, los electrones no son “canicas diminutas” que giran

alrededor del núcleo atómico como si fueran minúsculos planetas... ¡son también ondas! Pero claro, lo mismo sucede con los protones, los neutrones... toda la materia que conocemos, lejos de ser sólida, es una "maraña de ondas" vibrando constantemente.

Puesto que una de las premisas de esta serie es no utilizar fórmulas, no vamos a entrar en la formulación matemática de la teoría de de Broglie, pero el concepto no es demasiado complicado, sobre todo si has leído ya la serie de [Relatividad sin fórmulas](#). Recordarás de allí que, según Einstein, la materia y la energía son caras de la misma moneda: la masa no es más que una forma "concentrada" de energía.

De modo que, según de Broglie, conocida la masa y la velocidad de una partícula puede utilizarse la teoría de Einstein para calcular su energía... **y entonces suponer que la partícula es un cuanto de energía de una onda** (como un fotón, pero de una onda *que no es luz sino "otra cosa"*), y calcular la frecuencia de dicha onda. Claro, si toda onda conlleva energía, y la materia es energía, suponiendo que toda materia es onda puedo calcular las propiedades de la onda. Sé que es un trabalenguas, pero es simplemente darle la vuelta a la tortilla de la teoría fotónica de Einstein, y aplicarla a cualquier partícula conocida.



Un ser ondulatorio: Louis de Broglie.

Armado con las ecuaciones de la relatividad y el efecto fotoeléctrico de Einstein, Louis de Broglie calculó la frecuencia y la longitud de onda de cualquier partícula, conocida su energía u otras propiedades físicas como la cantidad de movimiento. Cuando publicó su tesis doctoral, en la que planteaba esta hipótesis y los cálculos correspondientes, los físicos (que a estas alturas ya no rechazaban de primeras las propuestas cuánticas) se entusiasmaron muchísimo, pero al mismo tiempo empezaron a hacerse muchas preguntas, algunas de las cuales seguro que han cruzado tu mente ya.

La hipótesis de de Broglie es simplemente eso, una suposición. ¿Cómo comprobar si es cierta? Si las partículas son ondas pero no de luz sino de "otra cosa", ¿de qué "están hechas" esas ondas? ¿Qué oscila en ellas? ¿Por qué cuando miramos al mundo a nuestro alrededor no vemos las partículas como ondas? Si todas las ondas son partículas y todas las partículas son ondas, ¿cuál es la diferencia entre una partícula y una onda?

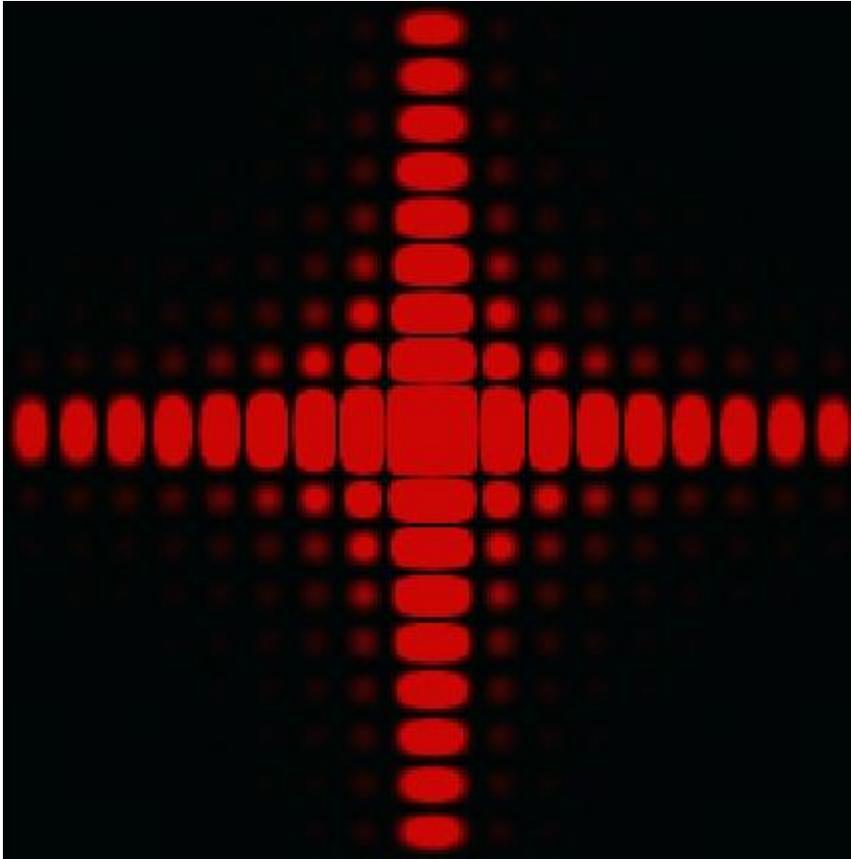
De hecho, contestar a estas preguntas nos llevará por derroteros complicados pero fascinantes en próximos artículos de la serie, pero afortunadamente la primera pregunta es fácil de responder: existen diversos experimentos físicos que permiten saber si algo es una onda o no. No hacía falta más que realizar uno de estos experimentos con partículas (por ejemplo, electrones), y ver si se comportaban como ondas (y de Broglie tenía razón) o por el contrario la materia era lo que nuestra intuición dice que debería ser: algo sólido y consistente.

Por ejemplo, las ondas sufren *interferencias* y *difracción*, dos fenómenos característicos. De hecho, hasta la llegada de la cuántica los físicos utilizaban esos experimentos para demostrar que algo *no era una partícula*: si algo sufre difracción es que es una onda y, por lo tanto, no es una partícula. Claro, la hipótesis de de Broglie dice justo lo contrario: si algo es una onda es *también una partícula*, pero los experimentos que muestran que es una onda son los mismos que se utilizaban desde hace mucho tiempo.

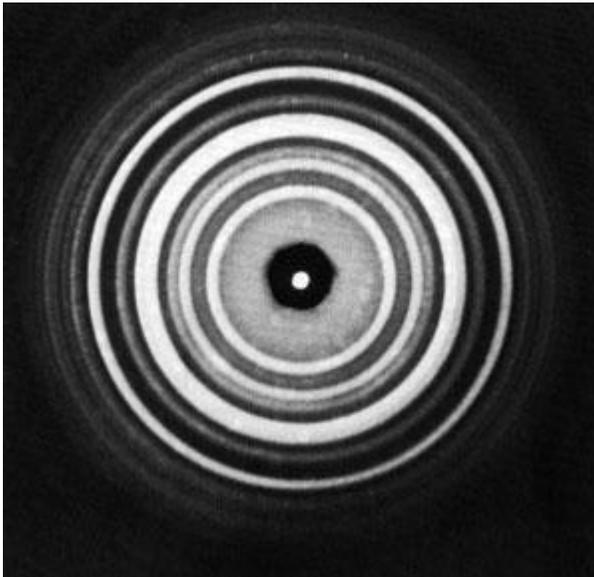
Aunque desgraciadamente no tengo espacio en este artículo para hablar en profundidad de la [difracción](#), una breve descripción: cuando se hace pasar una onda por una abertura (o se le interpone un obstáculo) de un tamaño no mucho mayor que su longitud de onda, al otro lado de la abertura (o el obstáculo) se produce un patrón de interferencia — en el caso de la luz, una serie de bandas o anillos de luz y sombra alternas. En el caso del agua, cuando una ola llega a la playa y hay una pequeña roca semisumergida en la orilla, la ola golpea la roca y forma detrás de ella una serie de anillos concéntricos con la roca. Si has estado en la playa, seguro que sabes a lo que me refiero: eso es la difracción.

De hecho, una manera de verlo es la siguiente: las olas del mar son ondas. Cuando llegan a una roca de un tamaño suficientemente pequeño, justo detrás de la roca “no debería haber olas”, pues la roca tapa el agua de la ola que viene. Sin embargo, debido a la difracción, hay pequeñas olitas concéntricas incluso justo detrás de la roca. La difracción hace que la onda llegue a lugares a los que no debería llegar.

El caso es que las figuras de difracción son viejas conocidas de los físicos. Dependiendo de la forma de la abertura u obstáculo se forman figuras de uno u otro tipo, pero siempre son repetitivas y muy fáciles de ver. Fíjate en ésta de un rayo láser a través de una abertura cuadrada:

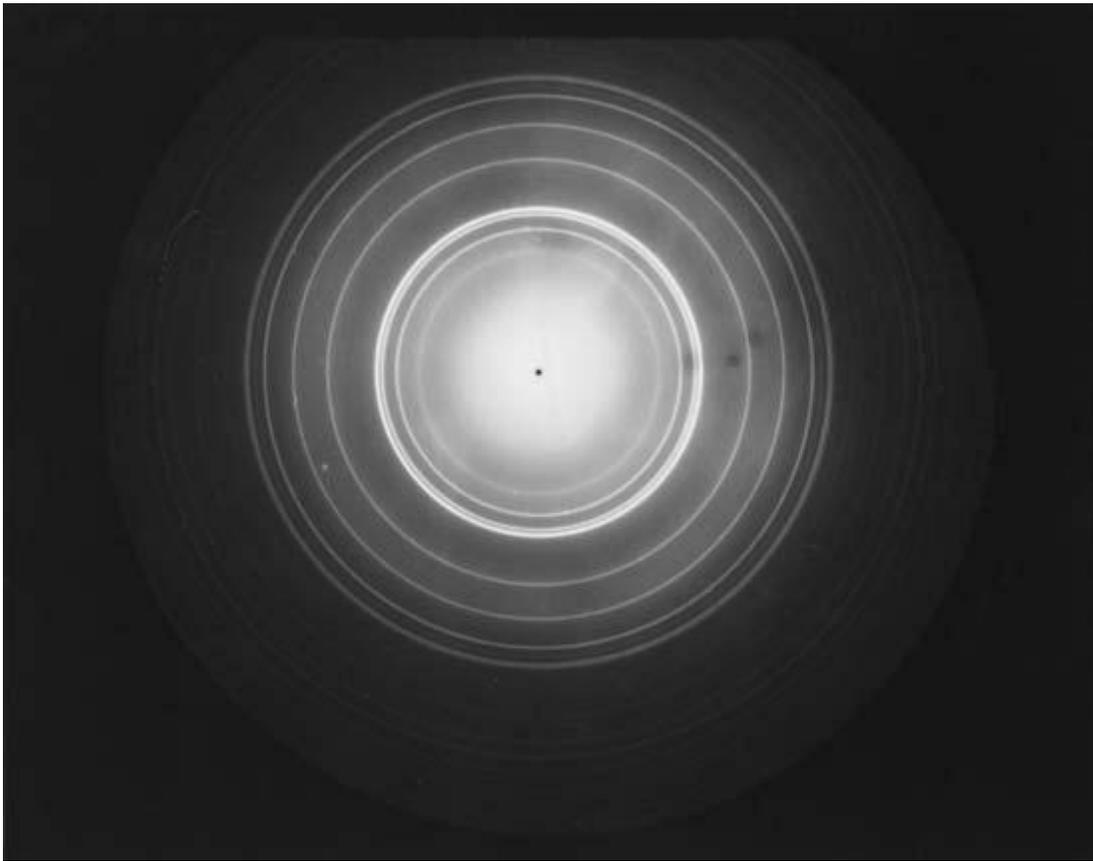


O en esta otra de rayos X a través de una red de cristales de aluminio:



De hecho, figuras como éstas demuestran sin ningún género de dudas que la luz es una onda. Como dijimos hace un par de artículos, lo difícil para los cuánticos fue convencer al resto de que era también un conjunto de partículas. Pero el caso es que los físicos experimentales se pusieron manos a la obra: lanzaron chorros de electrones contra minúsculas aberturas, para

comprobar si se difractaban o no. En 1927, sólo tres años después de la publicación de la tesis de de Broglie, Clinton Davisson y Lester Germer lanzaron electrones contra cristales de níquel. La figura que obtuvieron al otro lado fue algo parecido a esto:



Si se hacen pasar “pequeñas bolitas” a través de un minúsculo agujero, al otro lado deberían verse los impactos de las bolitas justo detrás del agujero, pero lo que se veía era algo casi exactamente igual a la difracción de los rayos X: ¡compara las dos imágenes! La conclusión era absolutamente inevitable: *los electrones eran ondas*. En pocos años se observó lo mismo con otras partículas subatómicas e incluso con átomos enteros... todos interferían y se difractaban.

De hecho, hoy en día utilizamos el carácter ondulatorio de los electrones para “ver” mediante ondas hechas de electrones: eso es el microscopio electrónico. Los electrones forman una onda de una longitud de onda tan corta que permite una precisión inmensa, mucho mayor que una onda luminosa.

En cualquier caso, Louis de Broglie recibió el Premio Nobel de Física en 1929 “*por su descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los electrones*”. Nunca antes alguien había recibido el Nobel por una tesis doctoral, y todo esto sólo cinco años después de publicarla y dos años después de su comprobación experimental. Si sabes cómo suelen funcionar estos premios y, sobre todo, con qué lentitud, te darás cuenta de la impresión que causó. Una vez más, la cosa se repetía: un físico proponía algo totalmente contra la intuición. Algo que a cualquiera (desde luego, a mí mismo) le hace rechinar los dientes, algo que *debería ser imposible*... y ese algo se demuestra experimentalmente con una elegancia y precisión apabullantes. La comunidad científica estaba, en general, convencida. Confundida, pero convencida.

(la partícula) la que realiza la otra (la oscilación). La masa no está oscilando, la oscilación es la masa.

Espero que todo esto haya hecho volar tu imaginación: a mí aún me maravilla cada vez que lo leo o escribo sobre ello, y me recuerda por qué me encanta la física. Sin embargo, esto no ha hecho más que empezar. En los próximos artículos de la serie empezaremos a contestar algunas de las preguntas que hemos hecho en éste. En el siguiente hablaremos de una cuestión fundamental: si las ondas son partículas y las partículas son ondas, ¿qué son las cosas *realmente*? ¿ondas que parecen partículas? ¿partículas que se comportan como ondas? ¿ni una cosa ni la otra? Hablaremos de la [dualidad onda-corpúsculo](#).

La dualidad onda-corpúsculo

En las últimas tres entradas de la serie [Cuántica sin fórmulas](#) hemos hablado acerca del [efecto fotoeléctrico](#), el [modelo atómico de Bohr](#) y la [hipótesis de Louis de Broglie](#). Como probablemente recuerdes, la hipótesis de de Broglie fue el resultado de aplicar la lógica al modelo de Einstein del efecto fotoeléctrico, ampliando sus ideas a todas las demás partículas conocidas. Sin embargo, aceptar ambas ideas (que las ondas son también partículas y que las partículas son también ondas) lleva a cuestionarse la naturaleza misma de la realidad que observamos: *¿qué son las cosas realmente, ondas o partículas?*

El enfoque que estoy dando a esta serie es diferente del de [Relatividad sin fórmulas](#): estoy yendo más despacio, sin intentar dar una idea básica de la teoría en su conjunto en diez artículos. De ahí que estemos saboreando cada paso, más que avanzar a saltos, y que podamos dedicar un artículo entero a discutir la doble naturaleza de las cosas, tras los artículos en los que hemos hablado acerca de los experimentos y modelos que muestran cada una de las dos facetas. Hoy hablaremos por tanto, con calma, de la **dualidad onda-corpúsculo**.

Aunque sigue la filosofía de *El Tamiz* de “antes simplista que incomprensible”, es un artículo bastante denso, de modo que respira hondo y vamos con ello.

El problema es más complicado de lo que puede parecer al principio. Para empezar, nuestros conceptos de *partícula* y *onda*, por supuesto, se basan en lo que observamos con nuestros sentidos. Son términos con una gran antigüedad y bien enraizados en nuestra intuición (contra la que ya deberías estar prevenido, si llevas con nosotros desde el [principio de la serie](#)). Todo el mundo tiene claro, de manera “evidente”, lo que es una partícula y lo que es una onda. Es más, la idea intuitiva que tenemos de ambas cosas es mutuamente excluyente: decir que algo es partícula y onda nos parece similar a decir que algo es rojo y no es rojo a la vez. Y ahí está el primer obstáculo a superar.

La cuestión, si has aceptado las hipótesis de artículos anteriores de la serie, no es sólo que esa idea intuitiva es falsa, sino que es completamente opuesta a la realidad. Es decir: “*partícula*” y “*onda*” no son lo mismo que “*rojo*” y “*no rojo*”, pero no porque sean cosas independientes pero que pueden ser ciertas a la vez, como “*rojo*” y “*grande*” — *deben*

necesariamente ser ciertas a la vez. Son algo así como “rojo” y “bermejo”. La misma cosa con nombres distintos. Si has entendido esto, has superado ese primer obstáculo y estás listo para saltar sobre el segundo, que es algo más sutil — lo de “rojo” y “bermejo” es sólo una primera aproximación a la realidad.

La cuestión es la siguiente: cuando llamamos a algo “partícula” o bien “onda” **no estamos definiendo lo que es, sino lo que hace ante una situación determinada**. La verdadera naturaleza de las cosas es algo que no experimentamos directamente al interaccionar con ellas, de modo que decir que las cosas son “ondas que a veces parecen partículas” o “partículas que a veces parecen ondas”, aunque típico al principio, no es llegar al fondo de la cuestión — aunque esto es, desde luego, cuestionable, como veremos después.

Aquí es donde debo pedirte una vez más, amable lector, que tengas paciencia conmigo, porque voy a salirme por la tangente con un ejemplo que puede parecerte un poco tonto al principio. Sin embargo, creo que este “experimento mental” puede resultar útil para traducir las sutilezas de la dualidad onda-partícula a algo más accesible a nuestra intuición.

Imagina que existe una enfermedad mental muy extraña, que llamaremos *síndrome de Heisenberg*. Un *heisenbérnico* se comporta del siguiente modo: **cuando sabe que nadie lo está mirando, baila alegremente**. Eso sí, **en cuanto sabe que alguien lo mira, deja de moverse y simplemente mira al que lo está mirando a él**. Sí, ya sé que suena muy raro, pero así son las cosas con el *heisenbergismo*. Las enfermedades imaginarias tienen estas cosas.

Ahora imagina que, sin saber nada de esta enfermedad, entras en un edificio que está lleno de *heisenbérnicos*. Algunos de ellos son muy miopes, de modo que hace falta que te pongas justo frente a ellos, casi tocando frente contra frente, para que se den cuenta de que los miras; otros, en cambio, son muy perceptivos y en cuanto entras en la habitación dejan de bailar, antes incluso de que puedas verlos.

Supongamos que en una habitación hay doce *heisenbérnicos*, cuatro de los cuales son del tipo miope y los otros ocho del tipo perceptivo. Si tú entrases en la habitación, *verías a ocho tipos mirándote fijamente a los ojos, y a otros cuatro bailando alocadamente*. Lo mismo ocurriría en el comedor: tal vez veinte personas te mirarían fijamente, mientras otras siete bailan la conga alrededor de tu mesa.

Desde luego, si entrases de nuevo en la primera habitación ocurriría lo mismo que la vez anterior, y observarías que los que te miran fijamente son siempre los mismos, y los que bailan también. Muy probablemente, **tu conclusión sería que en ese edificio existen dos tipos de enfermos mentales: los mirones y los bailarines**. Todas las personas que has visto en el edificio pertenecen a un grupo o al otro.

Sin embargo, eso ocurre porque no estás dando nombre a su enfermedad, *sino a cómo se comportan en una situación determinada*. Decir que alguien es un *mirón* es algo incompleto y confuso: no es un mirón, **te mira porque es un heisenbérnico que sabe que estás ahí**. De igual modo, un *bailarín* no es algo diferente: **baila porque es un heisenbérnico que no sabe que estás ahí**. No sólo es erróneo pensar que uno de ellos no puede ser *mirón* y *bailarín* a la vez: *si alguien es mirón, seguro que es posible hacer las cosas de modo que sea bailarín, y al revés*. Hay algo más profundo que “mirón” y “bailarín”, común a ambos, pero que no has experimentado aún.

Por ejemplo, si fueras más cuidadoso con tus experimentos, podrías instalar cámaras ocultas en las habitaciones. Cuando observases una de ellas, *todos serían bailarines*. También

podrías ir persona por persona, poniéndote delante de ellos frente con frente y mirándolos fijamente: *todos serían mirones*. Lo que deberías hacer entonces, por supuesto, es denominar *heisenbérnico* a cualquier persona con esa enfermedad, y saber que el baile y las miradas son las reacciones de un *heisenbérnico* a experimentos diferentes.

Lo mismo sucede en nuestro caso con las ondas y las partículas: llamamos a las cosas *ondas* o *partículas* porque, cuando interaccionamos con ellas, lo hacemos de modos específicos. **Estamos dando nombres a la manera en la que esas entidades reaccionan, no a lo que son.** Una manera alternativa (aunque algo tonta, lo reconozco) de utilizar el lenguaje sería ésta:

El Universo está compuesto de *ondículas* (este nombre no es mío, por cierto, aunque no recuerdo la primera vez que lo leí). En determinadas circunstancias, esas ondículas se comportan de cierta manera, a la que hemos llamado tradicionalmente “onda”, y en otras se comportan de una manera diferente, a la que hemos venido llamando “partícula”. Pero las cosas no son ondas ni partículas: son ondículas.

La cuestión está en que algunas de esas *ondículas* son “heisenbérnicos muy miopes”. Es realmente difícil verlas “mirándote a los ojos”. Y otras son “heisenbérnicos muy perceptivos”: es realmente difícil verlas bailar. De ahí que, durante muchos años, hayamos pensado que eran dos tipos independientes y mutuamente excluyentes — hacen falta experimentos muy específicos para que una ondícula “muy onda” muestre su comportamiento como partícula. Un ejemplo es el efecto fotoeléctrico. Lo mismo sucede, aunque al revés, con un electrón: es complicado observar su comportamiento como onda, pues es una ondícula “muy partícula” ante la mayor parte de los experimentos.

Espero que el ejemplo de los *heisenbérnicos* no te haya parecido demasiado tonto, porque voy a seguir con él (tiene más miga de lo que parece). En ese ejemplo, si ves a uno de esos lunáticos bailar es porque no te ha visto. Si te ve, te mira y no baila: es imposible ver a un *heisenbérnico* como *mirón* y como *bailón* a la vez. Pero lo mismo sucede, naturalmente, con las ondículas: **es imposible que un experimento muestre la naturaleza ondulatoria y corpuscular de algo a la vez.**

Esta afirmación (en una forma simple, por supuesto) es lo que se conoce como *principio de complementariedad*, y es una de las bases de la formulación más ortodoxa de la física cuántica, la *interpretación de Copenhague*. Básicamente, si diseñas un experimento que muestre la naturaleza como onda de una ondícula, ese experimento no puede a la vez mostrar que se trata de una partícula. Es como si quisieras “mirar y no mirar” a un *heisenbérnico* al mismo tiempo.

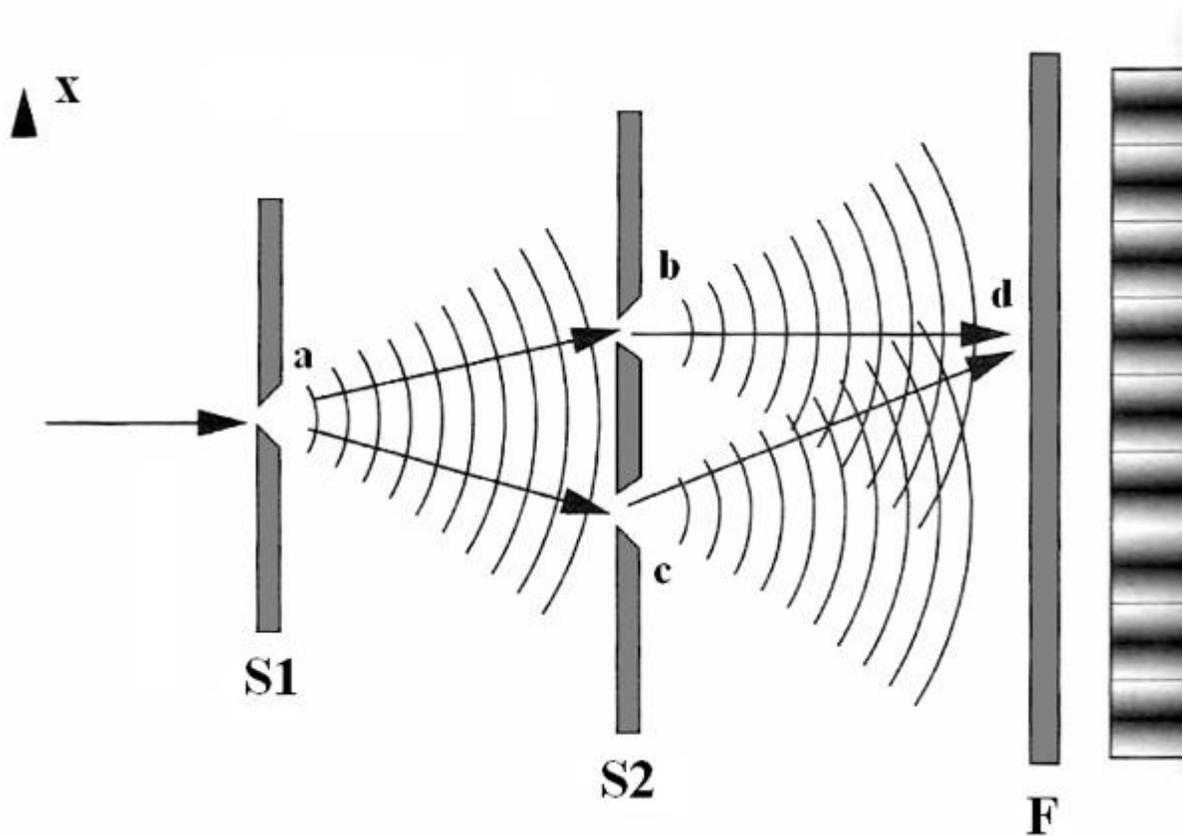
Desde luego, no todo el mundo está de acuerdo con la interpretación de Copenhague. De hecho, aparte de las fórmulas que describen la física cuántica, no todo el mundo está de acuerdo en nada. Respecto a ondas, partículas y ondículas, hay físicos que piensan que la idea de “partícula” es la que nos hemos inventado nosotros, y todo son ondas. Otros piensan como los de Copenhague, otros piensan que se trata realmente de partículas que parecen ondas en alguna situación determinada.

Existen otros físicos, incluso, que sostienen que es una estupidez tratar de entender realmente la física cuántica: sus conceptos están tan alejados de lo que podemos experimentar que sólo podemos acercarnos a ella a través de fórmulas que predicen resultados que podemos medir, e ir más allá es inútil. A veces se atribuye a Paul Dirac o a Richard Feynman (probablemente de forma errónea en ambos casos) la frase: “*¡Cállate y calcula!*”, que resume esta filosofía. Sin

embargo, tanto Dirac como Feynman tenían mucho interés en entender lo que había detrás de las fórmulas, de modo que dudo que fuera ninguno de los dos quien dijera algo así.

La dualidad onda-corpúsculo lleva a problemas de una profundidad aún mayor, como los físicos descubrieron según iban realizando experimentos relacionados con ese concepto. Al principio, algunos pensaban que los *grupos de partículas* se comportan como una onda. Es decir, una onda luminosa está compuesta por un número muy grande de fotones: los fenómenos ondulatorios, como la interferencia o la difracción, se producen porque los fotones interactúan unos con otros y se afectan unos a otros. Una vez aceptada la hipótesis de de Broglie, lo mismo sucede con los electrones, los neutrones, etc.: grupos de partículas se comportan como una onda.

Por ejemplo, pensemos en el famoso experimento de la doble rendija de Young. En él, se ilumina una lámina con un foco luminoso. La lámina tiene dos rendijas finas, y al otro lado de la lámina se pone una pantalla. La interferencia de las ondas procedentes de ambas rendijas produce un patrón característico al otro lado de la lámina:



Crédito: [Wikipedia/GPL](https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_la_doble_rendija).

En la pantalla aparecen bandas de luz y sombra alternas. Cuando las ondas de ambas rendijas llegan a un punto oscilando en el mismo sentido, ambas oscilaciones se suman, produciendo una luz brillante. Cuando llegan oscilando "al revés" a la pantalla, se cancelan la una a la otra igual que si tú y un amigo dais sacudidas a una cuerda de modo que en el centro tu sacudida y la suya van en sentidos contrarios: en ese punto, la cuerda no se mueve. En esas zonas hay sombra.

Este fenómeno es característico de las ondas (de hecho, fue la prueba que convenció a muchos en el siglo XIX de que la luz era, efectivamente, una onda). Por si te lo estás preguntando, sí, cuando se ha hecho el experimento con electrones, en la pantalla aparecen también bandas de “luz” y “sombra”, es decir, zonas con muchos impactos de electrones y zonas con pocos impactos de electrones, demostrando que los electrones son también una onda.

Pero lo realmente extraño no acaba aquí: durante muchos años fue imposible realizar este experimento sin que se lanzaran cantidades enormes de fotones (o electrones) contra la lámina y la pantalla. Casi instantáneamente aparecían las bandas de luz y sombra. Esto hizo a mucha gente pensar, como he dicho, que *cada fotón es una partícula*, pero que todos juntos, al interaccionar, forman una onda. Es decir, la mitad de los fotones pasan por una rendija, la otra mitad por la contraria, y cuando llegan a la pantalla interaccionan para formar luz o sombra.

Pero he aquí que, cuando los físicos dispusieron por fin de los medios adecuados, repitieron el experimento lanzando los fotones o electrones uno a uno. De ese modo, cada partícula atraviesa la lámina ella sola, sin que haya absolutamente ninguna otra con la que tener nada que ver. **Y, partícula a partícula, poco a poco, en la pantalla van apareciendo bandas de luz y sombra.**

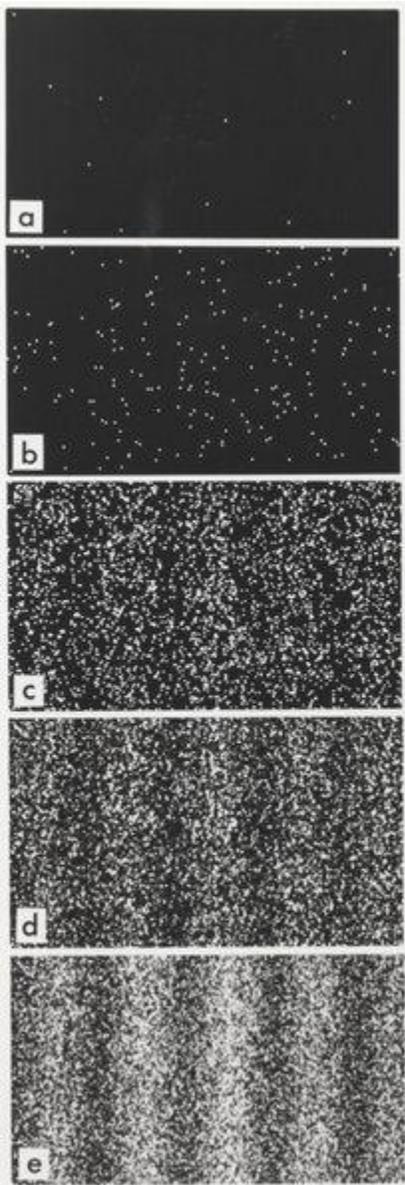


Figura de interferencia realizada electrón a electrón. Las imágenes fueron tomadas tras el impacto de (a) 10, (b) 200, (c) 6.000, (d) 40.000 y (e) 140.000 electrones. Crédito: [Wikipedia/GPL](#).

Es decir: no es que los grupos de electrones se comporten como una onda, *cada electrón es una onda él solo*. Pero esto lleva a conclusiones inevitables y desasosegadoras: una onda puede llegar a la pantalla en todos sus puntos, y pasar por ambas rendijas a la vez, pero ¿y un electrón? Nos parece “evidente” que un electrón que llega a la pantalla sólo puede pasar por una rendija o por la otra. Pero si pasa sólo por una rendija, ¿cómo pueden aparecer bandas de interferencia al otro lado? **¿Con quién está interfiriendo el electrón que viaja solo por el experimento?**

A estas alturas de la serie, supongo que no te sorprenderá la respuesta (es posible que te hayas respondido tú solo): *interfiere consigo mismo*. El electrón es una onda y, *como onda, pasa por ambas rendijas a la vez*. La parte de la onda que pasa por una rendija interfiere con la parte de la onda que pasa por la otra, y forma una figura de interferencia al otro lado...

Por supuesto, lo siguiente que intentaron los científicos fue poner algún tipo de detector delante de cada rendija, para comprobar exactamente por cuál de las dos pasaba el electrón: ¡como partícula, el electrón no puede romperse, pasar la mitad por cada rendija y luego volverse a unir y chocar con la pantalla! Pero aquí es donde el principio de complementariedad muestra su naturaleza y frustra nuestros intentos:

Cuando se ponen detectores en las rendijas, el electrón pasa sólo por una de ellas como una partícula obediente, y al otro lado de la lámina no se forma ninguna banda de interferencias. No hay ninguna onda.

Antes de seguir con esto, puede ayudarte ver este excelente vídeo (en inglés, pero subtulado en español):

[youtube KYX4ki7y-xI]

Como digo, el vídeo es muy bueno, pero la parte de que el electrón “sabe que lo estás mirando” es un poco engañosa. El problema, en el que profundizaremos en el próximo episodio, es que *mirar algo requiere interactuar con ese algo y, por lo tanto, modificarlo*. Cuando pones un detector frente a una rendija, hace falta algo (por ejemplo, un chorro de fotones que atraviesa la rendija) que modifica físicamente lo que estás mirando. No hay un electrón “de por sí”: *hay lo que tú percibes cuando interactúas con el electrón*.

Cuando interactúas con el electrón mediante un experimento que pregunta: “¿Eres una partícula”, lo que observas es una partícula — o, mejor dicho, un comportamiento corpuscular. Cuando lo haces mediante un experimento que pregunta: ¿Eres una onda?, lo que observas es un comportamiento ondulatorio. Y no es posible que diseñes uno en el que se pregunten ambas cosas al mismo tiempo: una de las dos va a modificar al electrón y convertir la otra en algo inútil.

Las posibles interpretaciones del experimento de la doble rendija son muchas: es inevitable, puesto que, como has visto, es imposible saber qué sucede exactamente cuando el electrón atraviesa la pantalla salvo que lo consideremos únicamente como una onda. Pensando en él como partícula, ¿atraviesa una de las dos rendijas al azar? ¿atraviesa la mitad del electrón cada una de las dos rendijas? ¿atraviesa el electrón cada una de las dos rendijas en Universos paralelos y versiones “paralelas” de nosotros mismos observan ambos sucesos, pero el “nosotros” de ahora mismo es uno de los dos tomado al azar?

Exploraremos, desde luego, estas posibilidades en artículos posteriores de la serie. Existen tantas cosas inherentes a este experimento que muestran aspectos fundamentales de la cuántica que, de acuerdo con el genial Richard Feynman (esta vez sí), pensando cuidadosamente sobre este experimento es posible deducir toda la mecánica cuántica. Aunque tal vez eso sea una exageración, puede expresarse este experimento para sacar de él multitud de ideas — y de nuevas preguntas.

En primer lugar, probablemente recuerdes la pregunta que nos hicimos en el artículo anterior: si las partículas son ondas, ¿qué está oscilando? Muchos físicos ven en este experimento la respuesta a esa pregunta: cuando las ondas de ambas rendijas están oscilando “al revés” la una de la otra al llegar a la pantalla, aparece una banda de sombra. En el caso de los electrones, el resultado es que ningún electrón llega a la pantalla en ese punto. También sucede al contrario: cuando las dos ondas se suman, en esa banda muchos electrones chocan contra la pantalla.

Por lo tanto, es posible pensar en esa onda como una **onda de probabilidad**, es decir, cuando esa onda tiene crestas muy altas, es muy probable que el electrón esté ahí, y al revés. Desde luego, no todo el mundo está de acuerdo en esta interpretación, y a lo largo de la serie hablaremos de otras posibles explicaciones de lo que está oscilando en las “ondas de materia”.

Aunque volveremos a este experimento varias veces durante la serie, quiero dejarlo un momento para hablar acerca de una consecuencia inevitable acerca de la dualidad onda-corpúsculo, y uno de los aspectos más fascinantes de la mecánica cuántica: [el principio de incertidumbre de Heisenberg](#).

El principio de incertidumbre de Heisenberg (I)

Continuamos hoy nuestro viaje por las procelosas aguas de la mecánica cuántica en la serie Cuántica sin fórmulas. Si no has leído los anteriores artículos de esta serie es muy difícil que éste te ayude a entender nada; si es así, te recomiendo encarecidamente que empieces la serie desde el principio.

En las anteriores entradas de la serie hemos hablado acerca de lo que se conoce hoy en día como *cuántica antigua*, la cual había llegado en 1924 a una suerte de “callejón sin salida” tras la publicación de la tesis de Louis de Broglie, en la que postulaba la doble naturaleza corpuscular y ondulatoria de la materia. Bien, se tenían “parches” (la hipótesis de Planck, el átomo de Bohr, el efecto fotoeléctrico y la propia hipótesis de de Broglie) a las teorías clásicas, pero ¿cómo ir más allá? Para describir el Universo, ¿se utilizarían las ecuaciones de Newton o Maxwell sabiendo que no lo describen correctamente? ¿cómo podían incluirse en ellas los efectos cuánticos?

Hacía falta una formulación teórica coherente: no una teoría clásica parcheada, sino una base matemática completa que describiera el mundo de acuerdo con las teorías cuánticas. Dos verdaderos genios elaboraron sendas formulaciones matemáticas que concordaban perfectamente con los resultados experimentales obtenidos hasta entonces: Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger. El primero en hacerlo fue Heisenberg, y una de las consecuencias inevitables de su formulación haría temblar otro de los pilares de la física clásica. Hoy hablaremos brevemente de la mecánica matricial del genial alemán y más en profundidad de esa consecuencia: el **principio de incertidumbre de Heisenberg**.

Un aviso: esta serie es densa y difícil. A pesar de que la filosofía de *El Tamiz* es “antes simplista que incomprensible”, hay límites. He reescrito esta entrada tres veces tratando de hacerla tan accesible como puedo, pero sigue sin ser fácil. De hecho, hablaremos del *principio de incertidumbre* en tres entradas diferentes — una para la razón de su existencia, otra para el experimento mental de Heisenberg que trataba de explicarlo y algunas falsas concepciones relacionadas con el principio y, finalmente, otra para las consecuencias que tiene sobre nuestra concepción del Universo. Sin embargo, incluso partiéndolo en tres, es un artículo que requiere una concentración mayor que la mayoría. De modo que tómatelo con calma y, si te resulta infumable, deja pasar un par de días antes de leerlo de nuevo.

Hemos hablado ya antes de Werner Heisenberg, pero no puedo dejar de repetir lo mucho que me impresiona su genio. En 1924, todos los físicos involucrados en el nacimiento y el desarrollo de la teoría cuántica, incluidos los dos más prominentes (Einstein y Bohr) estaban de acuerdo en que hacía falta una formulación matemática rigurosa de la teoría: algo de lo que los efectos observados (como el efecto fotoeléctrico) pudieran ser deducidos teóricamente, en vez de ser añadidos como los “parches” que hemos mencionado antes a la teoría clásica. Podría pensarse que una empresa de ese calibre llevaría décadas: no para Heisenberg. *Un año* bastaría, aunque afortunadamente para él no estaba solo.



Werner Heisenberg.

Con tan sólo 23 años el joven físico empezó a trabajar en el problema. Heisenberg era bastante mediocre como físico experimental, pero su manejo de las matemáticas y su capacidad de abstracción eran extraordinarias. Con la ayuda y el consejo de Bohr y Kramers en Copenhague, Pauli en Hamburgo y Born en Göttingen, se dedicó a analizar los obstáculos teóricos y probar soluciones matemáticas que predijesen los resultados experimentales obtenidos hasta entonces. Menudo equipo de mentores, ¿eh?

Heisenberg había conocido a Niels Bohr en 1922, y las ideas del danés lo influyeron profundamente: podríamos decir que el enfoque de Heisenberg es de la “*escuela de Bohr*” (como veremos a lo largo de la serie, una filosofía completamente distinta a la de la “*escuela de Einstein*”). Bohr era de la opinión de que la física debe preocuparse de lo que puede ser observado y medido, y lo demás es perder el tiempo, y Heisenberg llevó esta idea al extremo al elaborar su teoría.



Werner Heisenberg y Niels Bohr.

Al fin y al cabo, tal y como lo veía Heisenberg, el principal obstáculo para crear una formulación de la cuántica era que hablar del electrón como una bolita minúscula que se mueve alrededor del núcleo de modo que a veces está “a la izquierda”, a veces “a la derecha” y cosas parecidas es inane y absurdo. ¿Cómo es posible aplicar las leyes mecánicas del mundo macroscópico a algo tan diferente? Y lo que es más importante, ¿para qué hacerlo, si es imposible verlo? Heisenberg rompe con la idea de aplicar leyes clásicas a un mundo que no lo es: en vez de eso, **parte de cero para elaborar una teoría que no trata de predecir lo que es, sino lo que semide.** Piensa en lo tremendo de este cambio de filosofía, que para muchos físicos era “tirar la toalla” al mirar al Universo.

Heisenberg se olvida entonces del electrón como una pequeña esfera, del concepto de una órbita como la de un planeta alrededor del Sol, de la posición que pueda tener en cada momento cuando gira... *se olvida de todo lo que sucede “detrás del telón”,* y elabora una formulación matemática que predice lo que se denominan *observables*: magnitudes que pueden ser medidas por el experimentador, como la frecuencia de la radiación emitida o la energía cinética de los electrones del efecto fotoeléctrico. En sus propias palabras,

Este artículo pretende establecer una base para una mecánica cuántica teórica fundada exclusivamente en las relaciones entre magnitudes que son, en principio, observables.

El físico se dedicó a identificar los observables de los que predecir los valores que se obtendrían en experimentos, y a tratar de elaborar fórmulas nuevas (partiendo de las clásicas pero teniendo en cuenta los resultados de los experimentos que mostraban efectos cuánticos, como los valores escalonados de energía en un oscilador), y en un momento dado se dio cuenta de algo sorprendente: existía una forma relativamente sencilla (¡ojo! sólo relativamente) en la que todo encajaba muy bien, *pero las matemáticas de esa solución al problema requerían propiedades muy extrañas para los observables*. ¿Te suena esto? Una vez más, el cálculo sugiere una solución muy eficaz pero que resulta difícil de tragar. Justo como en el caso de Planck y su constante.

Para empezar, el estado de los observables venía descrito por series de infinitos términos, y para predecir el valor que se mediría de uno de ellos hacía falta realizar productos, término a término, de estas series infinitas. ¿Qué significaba físicamente cada uno de los términos? De acuerdo con Heisenberg, la pregunta no tenía sentido: al aplicar las matemáticas y realizar las operaciones requeridas, se obtenía un valor final que era el que tenía un significado físico. Como ves, la cuántica estaba entrando ya en una etapa en la que comprender realmente las matemáticas inherentes a la teoría era muy complicado –por no decir imposible. “¡Cállate y calcula!”

Pero había algo más extraño aún en esos observables, y ese algo es la base del confusamente llamado *principio de incertidumbre*: algunos observables estaban asociados “a pares”, de modo que al sumar las series infinitas no daba lo mismo multiplicar (por ejemplo) la posición de una partícula por su momento que al revés. Dicho de otro modo: en la formulación de Heisenberg, a veces $a * b \neq b * a$. Estos pares de observables *no conmutaban*. Heisenberg no sabía aún qué significaba esto, o si significaba algo en el mundo real, pero no le era ajeno que estaba utilizando conceptos matemáticos muy abstractos. Llegado este punto publicó lo que había desarrollado hasta entonces y, si hubiera estado solo, posiblemente no hubiera llegado más allá.

Afortunadamente, no estaba solo: cuando leyó el artículo de Heisenberg (con sumas de varios términos y multiplicaciones no conmutativas), Born vio claramente que todo apuntaba a las matrices (por si no estás familiarizado con ellas, la multiplicación de matrices no es conmutativa). Junto con su ayudante, Pascual Jordan, elaboró una formulación de las ideas de Heisenberg que utilizaba matrices, publicándola un par de meses después del artículo de Heisenberg. Los tres hombres trabajaron juntos para refinar las matemáticas del asunto, y el mismo año de 1925 publicaron el artículo definitivo que establecía una base matemática solidísima que predecía bien los resultados de los experimentos: **la mecánica matricial**.



Max Born, hacia 1920. Crédito: American Institute of Physics.

Esta formulación matemática predecía muy bien los resultados, pero era de una complejidad y un grado de abstracción difícilmente asumibles por muchos físicos. Imagina que en 1925 —o ahora, porque lo mismo da— te dicen que la posición de una partícula viene determinada por los infinitos coeficientes de una matriz, y que medir la posición de la partícula supone realizar una operación matemática determinada sobre la matriz que obtiene un vector que posee propiedades deducidas de ella. Operando con el vector podía predecirse el valor que se mediría de la posición de la partícula y el error en la medición. Como puedes comprender, muchos científicos sentían un desasosiego enorme al leer esto. *Bien*, pensaban muchos de ellos, *si mido la posición, la teoría predice qué mediría en ese instante y con esas condiciones, pero ¿dónde diablos está la partícula el resto del tiempo? ¿su posición es una matriz de rango infinito hasta que la miras? ¿qué significa toda esa maraña de fórmulas ininteligibles?*

En las crudas palabras de Erwin Schrödinger,

Conocía la teoría [de Heisenberg], por supuesto, pero me sentía descorazonado, por no decir repelido, por los métodos de álgebra trascendente, que me parecía muy complicada, y por la imposibilidad de visualización.

El propio Einstein estaba extraordinariamente insatisfecho con la formulación de Heisenberg, Born y Jordan. Todo eso de que *“lo que no se puede medir no es sujeto de la ciencia”* disgustaba enormemente al insigne físico. Para Einstein había una realidad concreta e independiente del observador, la midamos o no. Eso de

que la posición de una partícula, su momento o su energía fueran matrices sin el menor significado físico *hasta que se realizaba una medición* le parecía absurdo.

Sin embargo, las diferencias entre los dos grupos (el de Bohr y el de Einstein) se harían aún mayores cuando el propio Heisenberg extrajo por fin la conclusión que da nombre a este artículo, trabajando a partir de la propiedad de esos pares de observables que no conmutaban. Como he dicho antes, el producto de matrices no tiene la propiedad conmutativa: es posible que si multiplicas dos matrices A y B, $A * B = B * A$, pero la mayor parte de las veces esto no pasa. Dos años después de publicar el artículo original y tratando de descubrir qué significaba el hecho de que algunos observables no conmutaran (si es que significaba algo), Heisenberg dedujo que **la imprecisión en el valor conjunto de los observables predicha por la teoría dependía de si los observables conmutaban o no.**

Es decir, si un observable venía descrito por la matriz A y otro por la matriz B y $A * B = B * A$, entonces podían medirse ambos observables con una precisión arbitrariamente alta (dependiendo, por supuesto, de la precisión del aparato de medida) sin ningún problema... *pero si $A * B \neq B * A$, era imposible predecir ambos valores con una precisión arbitrariamente alta.* Esto sucedía, por ejemplo, con el par de observables posición-momento (es decir, dónde está la partícula y cómo de rápido se mueve).

Heisenberg publicó sus conclusiones en 1927. En sus propias palabras,

Cuanto mayor es la precisión en la determinación de la posición, menos precisión hay en la determinación del momento, y viceversa.

Como puedes ver, el término “principio” no es estrictamente cierto en este caso. “*Relación de incertidumbre*” es probablemente más correcto, pues se deduce de una teoría matemática (la mecánica matricial) más general. Lo curioso es que, al obtener el límite de precisión para los pares de observables conjugados operando con la mecánica matricial, el resultado obtenido por Heisenberg incluía la constante de Planck (que, como recordarás, aparecía en el efecto fotoeléctrico y en la hipótesis de de Broglie): **el producto de ambas imprecisiones era, en el mejor de los casos, del orden de magnitud de la constante de Planck.** Hablaremos de las implicaciones de este hecho en un par de artículos.

Si leíste y entendiste el artículo sobre la dualidad onda-corpúsculo, espero que todo esto te suene a algo. ¿Recuerdas cómo el *principio de complementariedad*, en términos de Bohr, decía que no es posible observar algo para verlo como onda y partícula a la vez? La relación de incertidumbre de Heisenberg refleja una vez más esta dualidad de la naturaleza, aunque en este caso referida a otras propiedades físicas de la materia, como la posición y el momento. Si diseñas un experimento que muestre una cosa, la complementaria está “oculta”. Al menos, en el caso de la relación de indeterminación, no se trata de una elección de sí/no, sino de grado: cuanto más te fijas en una cosa, más borrosa se vuelve la otra.

Sin embargo, vemos aquí una vez más asomar la cabeza a una idea que se repite mucho en cuántica. Desde los científicos griegos, la idea había sido que el Universo es comprensible para nosotros: podemos mirarlo, pensar y comprender cómo funciona. Sin embargo, en los experimentos en los que la cuántica muestra sus rarezas parece como si el propio Universo “se escondiera” de nosotros: *no, no puedes saber si un electrón es una partícula o una onda; no, no puedes saber dónde y cómo de rápido se mueve; no, cuanto mejor observas esto peor observas lo otro...* Esto ha llevado incluso a algunos a plantearse si el Universo está diseñado específicamente para que sus habitantes no puedan llegar a entenderlo “desde dentro”, aunque desde luego esto no es demostrable ni refutable científicamente. Como probablemente diría Bohr, “¿puedes medir eso? ¿no? pues entonces déjalo”.

Además de la posición y el momento, la relación es deducible para otros pares de observables, como la posición y el momento angulares de un objeto en rotación o la posición y la energía de una partícula en un potencial. Contrariamente a lo que piensa mucha gente, Heisenberg no dedujo la relación también para la energía y el tiempo — eso lo haría Dirac nueve años más tarde, combinando la Teoría Especial de la Relatividad con la cuántica; eso sí, muchos físicos ya pensaban que la relación de Heisenberg se cumpliría también para la energía y el tiempo cuando publicó su artículo, aunque no pudieran demostrarlo.

Una vez más, la relación de incertidumbre puede mirarse de dos maneras. La manera “*cállate y calcula*” es simplemente tomarla estrictamente como es: *cuando mides la posición y el momento de una partícula en un momento determinado, no puedes medir ninguna de las dos con absoluta precisión y cuanto mayor es la*

precisión en una de ellas menor lo es en la otra. Pero es difícil no intentar ir más allá. Por ejemplo, ¿por qué? ¿por qué no es posible medir las dos con una precisión arbitraria? La deducción matemática está muy bien, pero ¿qué me impide tener mayor precisión? ¿la manera en la que mido? ¿los aparatos de medida?

Otra pregunta aún más interesante, y que se hicieron muchos físicos casi inmediatamente, como es posible que te hayas hecho tú: *el electrón está en una posición y con un momento determinados pero yo no puedo medirlos, ¿o no puedo medirlos porque no los tiene determinados? Dicho de otra manera, cuando nadie lo mira, ¿dónde y cómo está el electrón?* No hace falta decir que Bohr y Heisenberg se hubieran reído de esta pregunta, pero muchos otros no dormían al pensarlo. Pero exploraremos estas preguntas en los otros artículos acerca de la relación de incertidumbre.

El próximo artículo de la serie será publicado antes de lo normal, en vez de esperar su turno: no quiero dejar pasar mucho tiempo entre estos tres artículos sobre el principio de incertidumbre para que no se nos olvide el anterior al leer el siguiente. Por otro lado, creo que es una buena idea partirlo para dejar pasar unos días y asimilar las cosas, aparte de que leer el artículo completo de un golpe sería como tragarse un yunque.

En ese artículo hablaremos acerca del experimento mental diseñado por Heisenberg para tratar de explicar la razón física de que aparezca la relación de incertidumbre, además de desmontar algunas ideas falsas que se oyen a veces acerca del principio de incertidumbre. Puedes seguir leyéndolo en el siguiente capítulo.

El principio de incertidumbre de Heisenberg (II)

Ésta es la segunda parte (de tres) del artículo sobre el *principio de indeterminación* de Heisenberg, que continúa la primera parte que publicamos hace tan sólo unos días y que puedes leer aquí. Este artículo forma parte de la serie de Cuántica sin fórmulas, que deberías leer desde el principio antes de zambullirte en la entrada de hoy.

En la primera parte del artículo hablamos acerca del origen teórico de las relaciones de indeterminación obtenidas por Heisenberg. Hoy nos centraremos en la interpretación física que el propio Werner Heisenberg dio a esas relaciones, mediante un experimento mental que trató de poner de manifiesto el origen físico de la incertidumbre en cuántica. Además de describir el experimento hablaremos acerca de lo que el principio de incertidumbre **no es** y de algunas falsas concepciones sobre el asunto.

Como mencioné en la primera parte de este artículo, Heisenberg no era un físico experimental demasiado bueno, pero era un teórico de primera. El hecho de que desarrollase la primera formulación matemática de la mecánica cuántica a los 23 años no deja lugar a dudas. De ahí que su primer impulso al obtener las relaciones de incertidumbre en 1927 fuese tratar de explicar el origen físico de esa incertidumbre de modo que pudiera ser entendida sin utilizar la compleja teoría matemática. (Como diríamos aquí, trató de explicar el principio de indeterminación *“sin fórmulas — antes simplista que incomprensible”*).

Siendo un gran teórico le encantaban los experimentos mentales, como a Einstein. De manera que su explicación tuvo la forma de un experimento mental muy famoso, el del *microscopio de rayos gamma de Heisenberg*. La verdad es que es una explicación parcial de la razón de que exista la *relación de incertidumbre* — la cosa es más profunda de lo que el propio Heisenberg sospechaba, y la mayor parte de los físicos actuales consideran el experimento como una primera aproximación al problema. Sin embargo, es relativamente intuitivo, de modo que me parece interesante hablar de él, aunque no baste para entender el asunto por sí solo.

Casi cualquiera que lee el principio de indeterminación por primera vez se pregunta —como ocurría ya entonces cuando fue publicado— *“¿me están diciendo que el electrón no está en un sitio determinado? ¿dónde está “de verdad?”*

La primera idea de la que parte Heisenberg al imaginar su experimento es, por supuesto (como haría Bohr), que no tiene sentido preguntarse dónde está el electrón “de verdad”. En el propio artículo de la incertidumbre, Heisenberg afirma:

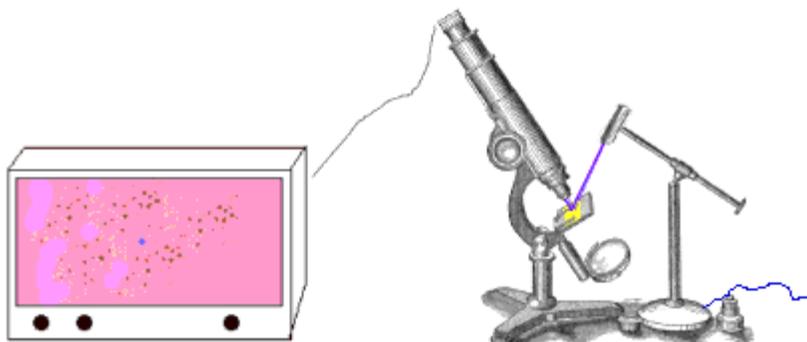
Si se quiere ser claro acerca de lo que significa “la posición de un objeto”, por ejemplo un electrón [...], debe especificarse el experimento concreto con el que se determina “la posición del electrón”; de otra manera, este término no tiene significado.

Si has leído Relatividad sin fórmulas esto probablemente te suena: Einstein se plantea exactamente lo mismo al desarrollar la Teoría Especial de la Relatividad al hablar del tiempo. No basta con decir que veo algo, o que el tiempo pasa: debo especificar *cómo lo veo* (por ejemplo, un rayo de luz me llega desde allí), o *cómo mido el tiempo* (por ejemplo, con un reloj de péndulo). De hecho, cuando Einstein reprochase a Heisenberg su renuncia a la realidad absoluta, Heisenberg recordaría a Einstein esta coincidencia de sus teorías, como veremos en la tercera y última parte del artículo.

Algunos críticos iniciales de las relaciones de incertidumbre afirmaban que los resultados de Heisenberg representaban simplemente la *imprecisión inherente a los instrumentos de medida*: según avanzase la tecnología y la física experimental, decían, los errores irían disminuyendo hasta hacerse tan pequeños como podamos imaginar. Si en un momento dado la imprecisión tenía un valor cualquiera, no haría falta más que esperar unos años a que los aparatos de medida se hicieran mejores y la imprecisión seguiría disminuyendo. Tal vez nunca sería cero, pero siempre podría ser más pequeña. Naturalmente, Heisenberg no estaba de acuerdo, y su experimento mental trató de desmontar esa idea.

En el experimento mental de Heisenberg, el físico se pregunta cómo determinar, por ejemplo, el lugar en el que se encuentra un electrón. Para saber dónde está hace falta medir esa posición con algo, y Heisenberg lo hace en su experimento **con un microscopio muchísimo más potente y preciso que cualquiera que existiera entonces**. Si has seguido la serie con detenimiento y mis (a veces pobres) explicaciones han servido de algo, puedes imaginarte ya dónde está la clave de la cuestión: para ver algo hace falta que haya luz que vaya de ese “algo” hasta ti, *pero la luz no es infinitamente divisible*: está compuesta de fotones discretos. No se puede tomar un “trozo infinitamente pequeño de luz”.

Por un lado, *para poder ver algo hace falta radiación de una longitud de onda más pequeña que ese algo*. Imagina por ejemplo que intentas detectar un lápiz con ondas de radio de 1 km de longitud: es muy probable que las ondas ni se enteren de que el lápiz esté ahí y pasen sin rebotar y permitirte detectarlo. Haría falta radiación con una longitud de onda comparable al tamaño del lápiz. Para poder determinar la posición con una precisión grande hacen falta ondas muy pequeñas, muy cortas: pero cuanto más cortas son las ondas electromagnéticas mayor es su frecuencia (ambas magnitudes son inversamente proporcionales). Y de acuerdo con Einstein (y la propia mecánica matricial de Heisenberg, que tenía en cuenta el efecto fotoeléctrico), *cuanto mayor es la frecuencia de un fotón mayor es su energía*.



Heisenberg's Microscope Thought Experiment -- Looking for a suitable atom to zoom in on.

Microscopio de rayos gamma de Heisenberg. Crédito: Wikipedia/GPL.

De modo que, en el microscopio de Heisenberg, un fotón incide sobre el electrón y luego llega al microscopio. Pero para detectar la posición del electrón con mucha precisión hace falta un fotón de onda muy corta, es

decir, con mucha energía. Un fotón de radiación gamma: **y cuando ese fotón muy energético choca con el electrón, lo manda disparado en una dirección determinada**, independientemente de la velocidad que tuviera antes. Al saber muy bien dónde estaba el electrón no tenemos ni idea de cómo de rápido va.

Sé que tal vez suena repetitivo, pero quiero dejar bien claro que no es simplemente que el electrón se ve alterado por el fotón. La naturaleza cuántica de la materia y la energía es la razón de que aparezca la incertidumbre de Heisenberg. La cuestión es que la luz no es infinitamente divisible: está formada por cuantos de energía, los fotones. Y el “tamaño energético” de cada uno de esos pedazos discretos **es mayor cuanto más corta es la longitud de onda**. *No es posible utilizar radiación gamma y emitir una cantidad tan pequeña como queramos — la energía mínima emitida es un fotón muy energético*. Si la física clásica fuera cierta, podríamos coger radiación de longitud de onda arbitrariamente corta (muy precisa) y sin embargo emitir una cantidad arbitrariamente pequeña de esa radiación (que apenas afectase al electrón).

Desde luego, también sucedería lo contrario: *si quisiéramos alterar muy poco la velocidad del electrón haría falta un fotón con muy poca energía, es decir, de longitud de onda muy larga, y entonces no tendríamos ni idea de dónde está el electrón*. No se puede ganar: conocer el estado completo del electrón (su posición y velocidad) con precisión arbitraria es imposible.

La clave de la cuestión, si has entendido la idea del experimento, es que la limitación para poder “ver” el electrón no se debe a que el microscopio no sea suficientemente bueno, ni que su diseño sea defectuoso: *se debe a la dualidad onda-corpúsculo de la materia y la energía*. No hay, como decían los primeros críticos, un error que pueda ir haciéndose más y más pequeño: no hay ningún límite para la imprecisión en la medida de la posición ni la velocidad *por separado*, pero cuando se intenta medir las dos con cierta precisión hay un límite que no se puede sobrepasar jamás.

De hecho, si recuerdas la dualidad onda-corpúsculo y los heisenbérquicos miopes, ambas ideas están relacionadas, pues ambas son la consecuencia de la naturaleza del Universo. Para mirar algo, debes hacerlo de una manera determinada: puedes diseñar un experimento que muestre el comportamiento corpuscular de un electrón, pero entonces no lo verás ondulatorio. **Puedes diseñar un experimento para saber dónde está exactamente un electrón, pero entonces no sabrás cómo de rápido se mueve**. Son enunciados diferentes del *principio de complementariedad* de Bohr. El Universo muestra sus secretos, pero no todos a la vez.

El experimento de Heisenberg es algo ingenuo visto desde la perspectiva actual (aunque hay que tener en cuenta que han pasado ochenta años). Heisenberg supone una interacción clásica entre el fotón y el electrón, como si fueran bolitas que chocan de modo que el electrón sale disparado. Sin embargo, independientemente de las sutilezas teóricas, creo que es una buena manera de atisbar por qué el Universo es, en último término, un lugar borroso — cuanto más te acercas más se diluyen los contornos.

Desafortunadamente, casi desde el momento de su publicación, este experimento mental ha confundido a mucha gente acerca de la verdadera naturaleza de la indeterminación cuántica, pues aunque es cierto que se debe en parte a que se mide y se modifica algo, hay algo más que eso. En particular hay dos efectos que producen incertidumbre en la medida y que **no son consecuencias del principio de indeterminación**, y que durante los años mucha gente ha confundido con el principio de incertidumbre: la *imprecisión del aparato* y los *efectos del observador*.

La imprecisión del aparato: cuando mido la longitud de algo con una regla, el tamaño mínimo de las divisiones de la regla representa la máxima precisión que puedo tener al medir esa longitud. Esto tiene que ver sólo en parte con las causas de la indeterminación cuántica: en efecto, para saber la longitud de algo tengo que medir esa longitud, y no tiene sentido hablar del valor de la longitud fuera del contexto de la medición.

Pero este efecto existe ya en la física clásica —no tiene que ver con la cuántica—, y todos los científicos de la época, estuvieran de acuerdo con Heisenberg o no, aceptaban su existencia. La cuestión es que es posible diseñar métodos de medida de la longitud más ingeniosos que cualquiera que podamos imaginar. Por ejemplo, utilizando radiación muy energética podemos medir longitudes más cortas que las que puede medir cualquier regla.

Los efectos del observador: ésta es la interpretación errónea más común del principio de indeterminación. El ejemplo que he leído más a menudo es el siguiente: *cuando quiero medir la temperatura de un cubo de*

agua introduzco un termómetro en el agua. ¡Ah, pero el termómetro no tiene por qué tener la misma temperatura que el agua, y puede enfriarla o calentarla! Cuando mido la temperatura no estoy midiendo la del agua sin perturbar: el proceso de medida acaba de modificar la temperatura del agua, de modo que estoy midiendo la temperatura del “agua + termómetro”.

Una vez más, ¿alguien se cree que científicos de la talla de Lord Kelvin no se habían planteado esto? Los efectos del observador han sido conocidos durante siglos, y no tienen que ver, una vez más, con la cuántica. En primer lugar, es posible medir la temperatura del agua sin necesidad de meter ningún termómetro en ella: no basta más que medir la longitud de onda de la radiación infrarroja que emite el agua. En segundo lugar, como en el caso anterior, de acuerdo con la física clásica no hay ningún límite rígido que impida diseñar experimentos y aparatos que midan la temperatura de algo modificando su estado menos que cualquier otro, de manera arbitrariamente precisa.

Lo que quiero decir es que afirmar cosas como *El principio de incertidumbre se produce porque al medir la posición del electrón se modifica su estado* es incompleto y, por lo tanto, falso. La clave de las relaciones de indeterminación es que **existe un límite fijo para la precisión conjunta de las mediciones de la posición y momento lineal del electrón, de modo que si una es casi infinita, la otra es casi nula**. Las palabras “conjunta” e “infinita” no aparecen por ninguna parte en los efectos clásicos que hemos descrito.

De modo que, aunque sirve para comprender la razón de que las relaciones de indeterminación aparezcan en la teoría cuántica, el experimento ha supuesto que mucha gente oiga una versión errónea (de hecho, una versión clásica, no cuántica) del efecto. Una forma teóricamente más correcta de entender la razón de que aparezcan las relaciones de incertidumbre de Heisenberg es recurrir a la segunda formulación completa de la mecánica cuántica, que se elaboró en el intervalo de tiempo entre la publicación de la mecánica matricial de Heisenberg, Born y Jordan y la publicación del principio de incertidumbre: la *mecánica ondulatoria* de Erwin Schrödinger. Pero eso tendrá que esperar al artículo correspondiente (que será el próximo de la serie después de terminar con las relaciones de indeterminación).

Sin embargo, antes de eso nos dedicaremos en la tercera y última porción de este artículo —una vez más sin esperar a su turno natural, probablemente a finales de la semana o principios de la siguiente— a hablar sobre las consecuencias del principio de incertidumbre sobre nuestra concepción del Universo, el determinismo y la realidad objetiva.

El principio de incertidumbre de Heisenberg (III)

Ésta es la tercera y última parte del artículo sobre el *principio de indeterminación* de Werner Heisenberg, que continúa la primera y la segunda parte que hemos publicado recientemente. Este artículo forma parte de la serie de Cuántica sin fórmulas, que deberías leer desde el principio antes de zambullirte en la entrada de hoy.

En la primera parte del artículo hablamos acerca del origen teórico de las relaciones de indeterminación obtenidas por Heisenberg, y en la segunda describimos el experimento mental ideado por el propio Werner Heisenberg para tratar de explicar la base física de su principio. Hoy nos dedicaremos a hacer lo contrario de “*¡Cállate y calcula!*” — discutiremos acerca de las implicaciones de las relaciones de indeterminación sobre el Universo que conocemos. Un poquito de filosofía natural *heavy metal*, reduccionismo “a la Ockham” incluido.

La formulación matricial de Heisenberg tiene dos consecuencias muy difíciles de asumir (al menos para muchos), si la aceptas sin reparos. La primera de ellas es la propia base sobre la que se construye, y que supone una manera de mirar al Universo radicalmente distinta de la que había existido hasta entonces. Ya hemos hablado sobre ella, pero es esencial entender el cambio de enfoque de gran parte de la ciencia a partir

de este momento, de modo que disculpa que me repita: *para Heisenberg sólo tiene sentido hablar de lo que puedo medir.*

Sin embargo, la base de la física, como la de nuestra propia concepción intuitiva sobre nosotros mismos y el mundo que nos rodea, había considerado siempre –salvo en el caso de algunos filósofos más agudos de lo que sus contemporáneos pensaban– que el mundo existe independientemente de nosotros. Existe un Universo “ahí fuera”, y tal vez yo lo mire o no, pero su existencia es independiente de este hecho.

Heisenberg no sólo niega, como dijimos en la segunda parte del artículo, que tenga sentido hablar de la posición del electrón sin especificar cómo se mide; niega *el sentido de hablar siquiera de lo que no se mide.* En sus propias palabras, hablando acerca de la trayectoria clásica de una partícula y su existencia, dice:

Creo que la existencia de la “trayectoria clásica” puede formularse productivamente de la siguiente manera: la trayectoria existe desde el momento en que la observamos.

Ya dos años antes, en una carta a Pauli, afirma:

Todos mis pobres esfuerzos están dirigidos a destruir y reemplazar el concepto de una trayectoria orbital que nadie puede observar.

De modo que *Heisenberg renuncia a la realidad disociada del observador*, puesto que considera que todo lo que no puede ser observado, en cuanto a la ciencia se refiere, no existe. Esto hubiera hecho, probablemente, fruncir el ceño a Newton, y a Einstein le producía verdadera angustia. Lo curioso es que, al final, el resultado de los cálculos es el mismo, pero las sensaciones que nos produce son muy diferentes según lo interpretemos.

Para entender mejor este concepto, al que es algo difícil hincarle el diente más allá de lo obvio, permite que ponga un ejemplo algo simplón pero que tiene más miga de la que parece. Imagina que en lo alto del Monte Everest hay una caja cerrada, y que estamos absolutamente seguros (no me preguntes por qué) de que si la abrimos encontraremos una canica negra o una canica blanca, pero no hay manera de saberlo hasta que abramos la caja. No existe manera de que el resto del Universo interactúe con el interior de la caja si no la abrimos.

Según Newton –y Einstein–, **hay una caja cerrada, y dentro de la caja hay una canica.** Esa canica es blanca o es negra, pero no lo sabemos porque no la hemos visto. Al abrir la caja somos capaces de posar la vista en ella, y por fin sabemos si la canica es de un color o de otro, como sabíamos que pasaría. *Antes* de abrirla sabemos que tenemos una caja cerrada con una canica (blanca o negra) dentro, pero no podemos relacionarnos con ella de ningún modo hasta abrir la caja. *Después* de abrirla tenemos una caja abierta y una canica blanca o negra, según el caso.

Según Heisenberg, **hay una caja cerrada.** Al abrir la caja vemos una canica blanca o negra, como sabíamos que pasaría. No tiene sentido preguntarse por el contenido de la caja antes de eso, pues no podemos relacionarnos con ello de ningún modo. *Antes* de abrirla sabemos que tenemos una caja cerrada. *Después* de abrirla tenemos una caja abierta y una canica blanca o negra, según el caso.

La diferencia entre ambas concepciones *no tiene ninguna influencia* sobre los experimentos que se puedan realizar en este caso: si es imposible relacionarse con la canica hasta que se abre la caja, **su existencia o no es totalmente irrelevante empíricamente.** Según Heisenberg, es inane hablar de la canica con la que no podemos relacionarnos. Según Einstein, es surrealista pensar que la canica no existe hasta que abrimos la caja. ¿Quién tiene razón? Cada uno debe formarse su propia opinión y, como digo, la interpretación de una ecuación no altera su resultado. Aunque al principio me produjo rechazo, mi preferencia (creo que sería difícil y deshonesto ocultarla) es por Heisenberg, y quiero tratar de explicar por qué.

Probablemente conoces el *principio de economía* de Guillermo de Ockham (a veces llamado “*navaja de Occam*”). La versión que se suele dar más a menudo (lo de “*la explicación más sencilla...*”) no me gusta demasiado. Pero me entusiasma la que tradicionalmente se le atribuyó (no voy a entrar aquí en si la atribución es cierta o no), “*Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem*” (“*No deben multiplicarse los entes más allá de lo necesario*”). En sus textos, el genial franciscano repite varias veces versiones de la misma idea, como en

esta otra joya: "*Frustra fit per plura quod potets fieri per pauciora*" ("*Es vano hacer con varios lo que puede hacerse con uno*"). (¡Sí, soy un pedante y no me avergüenzo de ello!). La ciencia ha progresado enormemente gracias a la aplicación de este principio.

Bien, en mi opinión Heisenberg se adhiere más al *principio de economía* que Einstein. El problema es que nuestra intuición casi nos exige la existencia de una realidad objetiva independiente de la observación, pero suponer que ésta existe es suponer algo. Si podemos construir una teoría física sin suponerlo, ¿por qué hacerlo, si dejamos fuera las emociones y la incomodidad? La teoría de Heisenberg predice los rangos de las observaciones de cualquier experimento, sin preguntarse qué sucede *antes* o *independientemente* de la observación. Es un asunto profundo, y hay opiniones para todos los gustos –incluso entre los propios cuánticos–, de modo que no quiero insinuar que mi opinión es “la buena”, ni mucho menos; simplemente compartirla.

En cualquier caso, esta primera consecuencia está relacionada con la segunda, que no proviene de la base teórica en la que se fundamenta la mecánica matricial sino más bien en el *resultado final* de las relaciones de incertidumbre. Me explico. Imagina que utilizo el “microscopio de rayos gamma” del experimento mental de Heisenberg para detectar la posición y la velocidad de un electrón, pero por supuesto no logro medir ambas con total precisión.

Supongamos, por hacer las cosas sencillas, que cuando mido la posición obtengo el intervalo desde 1 cm a 2 cm, y la velocidad está entre 3 cm/s y 4 cm/s. Todos estos datos son tan enormes que no se cumplen las relaciones de incertidumbre, pero eso es lo de menos. Veamos cómo interpretarían Einstein y Heisenberg el resultado.

Según Einstein, el electrón tiene *una* posición que se encuentra entre 1 cm y 2 cm. No estoy seguro de cuál es, pero es *un valor concreto* dentro de ese intervalo. Igualmente, tiene *una* velocidad que se encuentra entre 3 cm/s y 4 cm/s, pero no sé cuál es.

Según Heisenberg, el electrón está en [1 cm, 2cm] y tiene una velocidad de [3 cm/s, 4 cm/s]. No es que yo no sepa cuál es su posición, *¡acabo de medir su posición!*— **su posición es un intervalo.**

Es decir, para Einstein yo veo el electrón “borroso” porque estoy limitado en mi interacción con él, o porque mi teoría física es limitada en sí misma, pero el electrón tiene una velocidad/posición “de verdad”. Para Heisenberg, hablando estrictamente desde la ciencia, *el electrón es borroso* y debemos tratarlo como tal.

La consecuencia de la visión de Heisenberg sobre la realidad y el determinismo es tremenda, y fue una de las razones principales por las que Einstein se opondría durante el resto de su vida, no a las matemáticas de la cuántica, sino a la concepción de que el Universo es *así*, en vez de que simplemente no podemos verlo con más exactitud.

Durante mucho tiempo, los físicos estuvieron convencidos de que el Universo estaba completamente determinado: todo, absolutamente todo, era un conjunto de partículas puntuales y energía que interaccionaban unos con otros mediante leyes fijas. Sabiendo la posición y la velocidad inicial de todas las partículas era posible predecir con absoluta precisión lo que sucedería después. Nosotros no podemos predecir lo que sucederá después porque no tenemos todos los datos necesarios, pero en teoría sería posible. Esta forma mecanicista y de causalidad “dura” de mirar al Universo tenía un enorme peso desde Newton.

¡Ah! Pero Heisenberg niega esto:

En la formulación dura de la ley de causalidad –“si conocemos el presente con exactitud, podemos calcular el futuro”– no es la conclusión la que es incorrecta, sino la premisa.

De modo que, según Heisenberg, puesto que es imposible saber dónde están las cosas y cómo se mueven, es imposible saber lo que van a hacer exactamente — y para él la distinción entre “*no podemos medir su posición fija*” y “*no tienen posición fija*”, como he dicho, es inexistente desde el punto de vista de la ciencia. Desde luego, el genial físico no dice que tiremos la toalla y que no tenemos ni idea de lo que va a pasar. No dice que lo mismo te puede aparecer un payaso en la cabeza que los cristales de tu casa vayan a ponerse a

cantar, sino que hay que pasar de “*es posible elaborar leyes que nos digan exactamente lo que va a suceder*” a “*es posible elaborar leyes que nos digan aproximadamente lo que va a suceder*”.

Naturalmente, otros no estaban de acuerdo — los oponentes de la interpretación de Copenhague, como Einstein y Schrödinger, pensaban que el Universo *sí* tiene un estado determinado, independientemente de que podamos observarlo o no, y *sí* evoluciona de una manera fija y predeterminada, independientemente de que nosotros podamos predecirla o no. La causalidad está, según ellos, perfectamente definida, y nuestras limitaciones para llegar a ella son sólo nuestras, no una cualidad del Universo. Una vez más, si la ciencia se restringe a predecir mediciones futuras, ambas interpretaciones son equivalentes en las ecuaciones que producen.

Hubo gente que vio en el principio de indeterminación un posible punto de apoyo para defender el *libre albedrío* desde el punto de vista científico. Al fin y al cabo, según el mecanicismo anterior, puesto que tu cerebro y todo el resto del Universo están compuestos por partículas cuyo comportamiento puede predecirse, el hecho de que dentro de una semana elijas ir al cine o quedarte en casa está determinado — no hay nada que pueda cambiarlo, aunque ni siquiera tú sepas ahora lo que vas a hacer. Los deterministas negaban la libertad humana salvo en formas “light” (como por ejemplo el hecho de que no conozcamos nuestro propio futuro).

¡Ah! dijeron algunos al oír hablar de las relaciones de incertidumbre, *luego no todo está determinado. ¡Soy libre de ir al cine o no, y ningún estúpido físico puede decirme si voy a hacer una cosa o la otra!*

Pero esto indica una comprensión incompleta de las relaciones de indeterminación. El problema es que las relaciones de Heisenberg no sustituyen el “albedrío fijo” con el “albedrío libre”, sino con el “albedrío aleatorio”, que es tan poco libre como el fijo. Es decir, según Heisenberg no es que cuando llegue la semana que viene tú elijas ir al cine o no independientemente de las leyes físicas: **las leyes físicas establecen una probabilidad de que lo hagas o no, y no existe absolutamente nada en el Universo, incluido tú mismo, que pueda afectar la total aleatoriedad aparte de eso.** Vamos, que cuando llega la semana que viene tiras una moneda al aire y vas al cine si sale cara, y no vas si sale cruz... eres tan poco libre como antes.

Desde luego, hay una diferencia: que antes se pensaba que era posible, conociendo suficientes datos, predecir *con total exactitud* si irías al cine o no; a partir de Heisenberg los físicos son conscientes de que no es posible predecir más allá de “va al cine 80%, no va al cine 20%”. Pero, aunque me repita: que no se pueda llegar más allá *no quiere decir* que tú tengas “la sartén por el mango” y que la imprecisión se deba a que puedas sorprender a los demás y hacer lo que no esperan si así lo eliges. Cualquier cosa que tenga que ver contigo y tu voluntad está ya dentro de las ecuaciones que llevan al 80%/20%.

La única diferencia aquí entre Einstein y Heisenberg es que, en términos de Einstein, sí está determinado si vas a ir al cine o no, pero yo no puedo, como observador, ir más allá del 80%/20% en mi predicción. **Einstein estaba convencido de que la teoría cuántica era incompleta y faltaban variables:** si se considerasen todas las variables con una teoría completa, la determinación sería absoluta. Es decir, la indeterminación de Heisenberg es, para Einstein, una consecuencia de nuestra propia ignorancia, no de la naturaleza de las cosas. Pero según Heisenberg, no tiene sentido decir eso — hasta que llega el día de ir al cine, ni has ido ni has dejado de ir, ¡porque aún no ha llegado ese momento! De modo que sé que, cuando llegue, hay un 80% de probabilidades de que vayas y un 20% de que no lo hagas. Punto.

Hasta ahora he mencionado siempre a Heisenberg y Bohr “en el mismo bando”, pero no siempre estaban de acuerdo, como veremos en el próximo artículo. Como dije al empezar la primera parte de éste, la formulación matricial de Heisenberg era únicamente *una* de las dos que se realizaron en pocos años para crear una teoría cuántica coherente. La otra fue vista al principio por su propio creador, Erwin Schrödinger, además de por Einstein, como una manera de evitar los quebraderos de cabeza que suponía aceptar las premisas de Heisenberg.

Poco podían imaginar a dónde llevaría aceptar la segunda teoría, pero hablaremos de eso dentro de unas semanas, al estudiar la *mecánica ondulatoria de Schrödinger*.

La ecuación de onda de Schrödinger (I)

Continuamos hoy nuestro viaje por las aguas traicioneras de la mecánica cuántica en la serie [Cuántica sin fórmulas](#). Creo que es absurdo que leas este artículo si no has seguido la serie desde el principio — en ese caso, te recomiendo encarecidamente que empieces [con el primer artículo](#). En este apunte se hace referencia a conceptos definidos y explicados en los anteriores, y probablemente no entiendas mucho si no conoces el asunto o has leído el resto de artículos.

En el [artículo anterior](#) hablamos, como espero que recuerdes, sobre la *mecánica matricial* de Werner Heisenberg y su *principio de indeterminación*. Hoy empezaremos a hablar sobre la segunda formulación matemática de la teoría cuántica, elaborada y publicada muy poco tiempo después de la de Heisenberg, y que supondría durante cierto tiempo (no muy largo, por otro lado) casi un cisma en la comunidad física. Estudiaremos la **mecánica ondulatoria** y la **ecuación de onda de Schrödinger**.

Como en el caso de las relaciones de indeterminación, este artículo requiere un grado de abstracción bastante mayor que la mayoría de los apuntes de *El Tamiz*. Por lo tanto, para empezar vamos a partir el asunto en tres entregas que serán publicadas con aproximadamente una semana de separación: una sobre la ecuación en sí, otra sobre la interpretación de la función de onda y finalmente otra sobre el principio de incertidumbre visto desde la mecánica ondulatoria. E incluso así, pido disculpas de antemano si mi pobre explicación no es capaz de aclararte las cosas lo suficiente — créeme, es muy difícil hacerlo eficazmente. Desde luego, al final de la tercera parte dejaré enlaces para seguir aprendiendo sobre el asunto.

Dicho todo esto, sigamos nuestro recorrido — en 1925, Heisenberg publica su mecánica matricial. Veamos qué sucedió entonces.

Ya mencioné en la primera parte del artículo sobre el principio de incertidumbre que a muchos físicos de la época la formulación matricial de Heisenberg les parecía aberrante, tanto por las suposiciones de las que partía como por la complejidad matemática y la dificultad de traducir las matemáticas a algo relacionado con el mundo real. De hecho, muchos intentaron elaborar formulaciones matemáticas alternativas que fueran más sencillas y fáciles de visualizar, pero hacía falta un talento y conocimiento similares a los de Heisenberg para tener éxito — hacía falta otro genio de su talla, pero afortunadamente lo había. Se trataba del austríaco-irlandés Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger.



Erwin Schrödinger.

No está de más repetir aquí la cita en la que se resume la opinión que le merecía a Schrödinger la mecánica matricial de Heisenberg, Born y Jordan puesto que era compartida por una gran parte de la comunidad científica:

Conocía la teoría [de Heisenberg], por supuesto, pero me sentía descorazonado, por no decir repelido, por los métodos de álgebra trascendente, que me parecía muy complicada, y por la imposibilidad de visualización.

De modo que Schrödinger dedicó sus energías a tratar de obtener una formulación matemática más intuitiva y menos abstracta (como veremos, sólo tuvo éxito en parte), partiendo de una base diferente de la de Heisenberg. Como espero que recuerdes, Heisenberg basa su teoría en el concepto de Planck y Bohr de que todo está cuantizado: los “escalones de energía” en la luz y los niveles energéticos en los átomos, que se convierten en *observables* para él. **La formulación de Heisenberg es, por lo tanto, una especie de afirmación en lenguaje matemático de que “todo es partículas”, y la consecuencia de esa cuantización de todo es el principio de incertidumbre.**

El problema fundamental de la formulación de Heisenberg, y la causa de que sea tan compleja matemáticamente, es que la naturaleza discreta de la materia y la energía (especialmente de la energía) es muy difícil de visualizar para nosotros y, por lo tanto, nuestras matemáticas tienen problemas para traducirla en términos sencillos. La solución de Schrödinger fue basarse en todo lo contrario a lo de Heisenberg: sí, las ondas son partículas, *pero las partículas son también ondas*. Donde Heisenberg hace énfasis en la cuantización, *Schrödinger lo hace en la naturaleza ondulatoria*.

Las ondas son algo fácil de visualizar para nosotros, y sencillas de describir matemáticamente. De hecho, las ondas electromagnéticas tenían desde el siglo XIX una formulación matemática extraordinariamente precisa y elegante: las llamadas *ecuaciones de Maxwell*, propuestas por el genial James Clerk Maxwell en 1861. Desde luego, había resultado que esas ecuaciones sólo describían el comportamiento *ondulatorio* de la luz y otros fenómenos electromagnéticos, y no

el corpuscular descubierto por Einstein, pero sus resultados seguían siendo igual de válidos para la mayor parte de las situaciones que en tiempos de Maxwell.

Bien, de acuerdo con la hipótesis de Louis de Broglie, la materia es también ondulatoria: las partículas son ondas. *¿No sería entonces posible tratarlas matemáticamente como tales, y obtener ecuaciones de onda igual que las de Maxwell, pero para la materia?* Desde luego, las condiciones que deberían cumplir las “ondas de materia” serían diferentes de las de las electromagnéticas. Por ejemplo, deberían ajustarse a las leyes de la mecánica de Newton — una fuerza debería producir una aceleración proporcional a ella, tendría que existir una energía cinética, un momento lineal, etc.

Afortunadamente para él, como hemos visto a lo largo de la serie Planck y de Broglie ya habían propuesto ecuaciones que resolvían parcialmente sus problemas. De acuerdo con Planck, *la energía de una partícula oscilante era proporcional a su frecuencia*; según de Broglie, *la longitud de onda de una partícula material en movimiento era inversamente proporcional a su velocidad*. Sólo faltaba incorporar esas fórmulas a una o varias ecuaciones que no sólo contemplasen los conceptos de energía cinética o momento lineal, sino que también se ajustasen a todas las propiedades de las ondas — su oscilación en el tiempo, su estructura espacial, la frecuencia, longitud de onda, etc. Tela marinera.

En 1925, el mismo año de la publicación de la mecánica matricial de Heisenberg, Born y Jordan, Erwin Schrödinger se retira a una casita de los Alpes suizos (tras abandonar a su mujer y llevarse a una antigua novia, pero eso es otra historia). Allí, lejos de las distracciones de la Universidad y la comunidad científica —desconozco qué tipo de distracciones le supondría la fémina en cuestión—, Schrödinger empieza a pensar sobre el asunto en profundidad.

Schrödinger prueba diversas funciones de onda (es decir, descripciones matemáticas de ondas), tratando de hacer que cumplan las ecuaciones de la mecánica clásica, pero tiene verdaderos problemas para lograrlo. Sin embargo, en un momento determinado, a finales de 1925, una chispa de inspiración resuelve todos sus problemas... aunque, como veremos, crea nuevas preguntas. De hecho, esto te va a sonar porque es casi igual que lo que les sucedió a Planck y al propio Heisenberg: Schrödinger encuentra una expresión matemática para la ecuación de onda que cumple perfectamente todas las condiciones que debe cumplir, y los resultados concuerdan precisamente con los experimentos. Todo es fantástico, **pero esa función de onda no es una función real, sino compleja.**

Desconozco tu nivel de conocimiento matemático, y no puedo ponerme aquí a explicar lo que son los [números complejos](#). Lo importante es que incluyen el número i , es decir, la raíz cuadrada de -1 , y son un conjunto de números de los que los números reales son sólo un subconjunto. Lo importante es que, en general, cualquier cosa que se pueda ver o medir en física es representada por un número real: la velocidad, la posición, la energía... De hecho, cuando en una ecuación física se obtiene un resultado con raíces negativas (un resultado complejo), suele decirse que la ecuación “no tiene solución”, puesto que los resultados complejos no son medibles.

Sin embargo, *la función de onda de materia que propone Schrödinger es compleja por definición*. Cuando el físico intenta utilizar funciones reales, éstas se comportan bien en determinadas ecuaciones, pero no son capaces de satisfacer tanto los requisitos de las ondas como los de la física clásica para las partículas. Cuando prueba con la función compleja, absolutamente todos los problemas desaparecen, excepto uno: **¿qué demonios significa que sea compleja?** Si esto quiere decir que no existe, *¿cómo se explica que exista la materia?* Si existe, *¿qué es? ¿qué está oscilando, y por qué no es real?*

Dicho de otra manera: si la onda que describe un electrón es el electrón, y esa onda no es real sino compleja, luego no puede medirse, ¿es el electrón real? ¿puede observarse *realmente*, o sólo estimar algunas de sus propiedades? Como digo, aceptar una función de onda compleja es difícil de tragar conceptualmente.

Sin embargo, la parte matemática es todo lo contrario: Schrödinger propone una ecuación de onda muy sencilla, que actúa de manera similar a las de Maxwell, pero en vez de describir el comportamiento de las ondas electromagnéticas lo hace para las ondas de materia. Desde luego, no tiene comparación con la complejidad matemática de la formulación de Heisenberg.

Básicamente, la manera en la que la función de onda y la ecuación de Schrödinger describen la realidad es de la siguiente manera:

- **Se establecen las condiciones del sistema.** Por ejemplo, un electrón se encuentra sometido a la atracción de un protón y no existe nada más cerca de él. Estas condiciones constituyen algunas de las variables en la ecuación de Schrödinger, y “construyen” la ecuación.
- **Se resuelve la ecuación de la onda**, lo cual da una solución (o más de una): la función del electrón. Desafortunadamente, esa función es una función compleja y no representa ninguna magnitud física. Es “la función del electrón”. En un momento hablaremos más sobre esto.
- **Se manipula la función de onda matemáticamente** para obtener información sobre la partícula en cuestión — un electrón en nuestro ejemplo. Si se hace una operación determinada con ella, se obtiene la energía del electrón. Si se hace otra cosa, se obtiene su posición, etc. Estos resultados sí son números reales, aunque la función no lo sea.

Creo que la clave de la cuestión, y la ruptura inevitable (como en cualquier formulación cuántica) con la física clásica, están bastante claras: **toda la información sobre el electrón está condensada en una función matemática compleja**, pero mirando la ecuación no se ve absolutamente nada real. Hace falta aplicar operaciones matemáticas (una para cada cosa que se puede medir del electrón), y se obtienen resultados que sí son reales. Las características de la onda (como su longitud de onda, su amplitud, si es estacionaria o no, etc.) determinan las características que se pueden medir de la partícula, *pero indirectamente* (hace falta calcular unas a partir de otras).

Sin embargo, cuando Schrödinger publica su propuesta a principios de 1926, en el artículo *Quantisierung als Eigenwertproblem*, la comunidad física la recibe con los brazos abiertos. Por un lado, las matemáticas involucradas son mucho más sencillas que las de Heisenberg y por otro, aunque la función de la onda del electrón no tenga un valor real, al menos es posible visualizar al electrón como una onda descrita por esa ecuación, de una manera similar en cierto sentido a un fotón que es una onda descrita por las ecuaciones de Maxwell.

Heisenberg, sin embargo, no recibe la ecuación de onda de Schrödinger demasiado bien. De hecho, “no demasiado bien” es un eufemismo. En palabras del propio Heisenberg,

Cuanto más pienso sobre la parte física de la teoría de Schrödinger, más repulsiva la encuentro [...]. Lo que Schrödinger escribe sobre la “visualizabilidad” de su teoría “probablemente no es del todo cierto”, en otras palabras, es una basura.

De hecho, las conversaciones entre Heisenberg, Schrödinger y Bohr (que trataba en cierta medida de reconciliar ambas interpretaciones) fueron bastante acaloradas, aunque es sorprendente lo bien que se llevaban a pesar de todo. Ni qué decir tiene que Einstein y de Broglie apoyaban a Schrödinger — el principio de incertidumbre repelía a Einstein, y tanto él como de Broglie estaban mucho más cómodos con la concepción ondulatoria de la materia que con las relaciones de indeterminación de Heisenberg.

Sin embargo, Schrödinger no acabó de contribuir al problema con el artículo original. Durante 1926 publicó varios otros en los que mostraba soluciones de su ecuación para casos sencillos, como el átomo de hidrógeno —del que hablaremos en la siguiente entrega de este artículo—, y algo mucho más importante: **demostró matemáticamente que su teoría y la de Heisenberg eran equivalentes.**

En otro artículo aplicó su ecuación de onda para obtener la onda del electrón en el átomo de hidrógeno: sus resultados para la energía del electrón eran *exactamente los mismos* que los del átomo de Bohr del que hemos hablado ya. Su ecuación funcionaba tan bien como la de Heisenberg en casos reales.

Es decir, aunque ambos partían de bases distintas y tomaban enfoques matemáticos muy diferentes (matrices infinitas por un lado y ondas complejas por otro), al final los resultados medibles eran los mismos. Desde luego, los pasos intermedios eran radicalmente distintos, pero si se quería una predicción de la velocidad o la energía de un electrón, el resultado era exactamente el mismo en uno y otro caso — de acuerdo con la demostración matemática de Schrödinger, *debía ser siempre exactamente el mismo en las dos formulaciones matemáticas.*

La mayor parte de los físicos, a partir de ese momento, se decantaron claramente por la formulación de Schrödinger para tratar sistemas físicos: si salía lo mismo al final, ¿por qué utilizar los abstrusos conceptos de Heisenberg y no la ecuación de onda, mucho más sencilla?

Sin embargo, la ecuación de Schrödinger prácticamente grita una pregunta cuando piensas en ella, y estoy seguro de que ya te has planteado esto antes, o bien en este mismo artículo o bien cuando hablamos sobre la hipótesis de de Broglie: **¿Qué demonios está oscilando?**

Dicho de otra manera, cuando veo una onda en una cuerda no tengo problemas para ver lo que está pasando, qué oscila y qué sucede en cada punto y en cada momento. En algunos puntos, la onda tiene una cresta, donde la cuerda llega a su punto más alto. En otros, la cuerda está en su posición de equilibrio. Lo que significa la ecuación de la onda en la cuerda es evidente. Pero ¿y en el caso de un neutrón? Al contrario de lo que alguna gente piensa cuando oye estas ideas por primera vez, el neutrón no está oscilando como si fuera una canica unida a un muelle — el neutrón no oscila, el neutrón es *la oscilación*. Una oscilación compleja.

De modo que en la segunda parte del artículo, dentro de una semana, hablaremos acerca de la naturaleza de estas “ondas de materia”, cómo conectar la ecuación de Schrödinger con la realidad y cómo el genial Max Born, que ya había contribuido su talento a la mecánica de Heisenberg, haría lo mismo para Schrödinger y resolvería parte de los problemas de la ecuación de onda y su interpretación física. Puedes seguir con la segunda parte [aquí](#).

La ecuación de onda de Schrödinger (II)

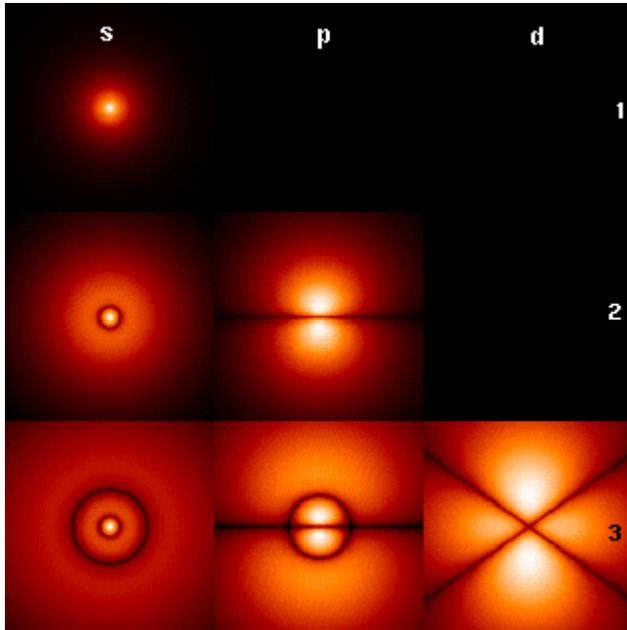
Este artículo es la segunda parte de tres dentro de la discusión sobre la *ecuación de onda de Schrödinger*, dentro de la serie [Cuántica sin fórmulas](#). Antes de seguir puedes leer la [primera parte](#) o incluso, si no lo has hecho, empezar desde el [primer artículo de la serie](#) (algo muy recomendable o vas a estar más perdido que un pulpo en un garaje).

En la primera parte hablamos acerca de cómo el genial Erwin Schrödinger propuso una formulación matemática alternativa a la matricial de Werner Heisenberg, y cómo dos razones llevaron a una gran parte de la comunidad física a preferir la mecánica ondulatoria de Schrödinger: por una parte, *su mayor sencillez matemática*, y por otra parte la noción de algunos físicos contrarios a la incertidumbre de Heisenberg, como Einstein y de Broglie, de que *la formulación de Schrödinger evitaba ese problema conceptual* (el propio Schrödinger estaba de acuerdo con ellos). Una noción, como veremos en este artículo y el siguiente, absolutamente errónea.

En esta segunda parte nos dedicaremos a filosofar un poco sobre la función de onda, haciéndonos las mismas preguntas que se hacían los físicos por entonces — *si la materia está descrita por una función de onda, ¿qué oscila? ¿es posible tratar las partículas simplemente como ondas? ¿qué relación hay entre las propiedades de esa onda y las que observamos en las partículas?*

El primero en tratar de dar un sentido físico a esa función de onda fue el propio Erwin Schrödinger. El físico intentó una interpretación más bien clásica (dentro de lo raro y ajeno a la intuición que era todo, por supuesto): la onda, como había dicho de Broglie, es la propia partícula —por ejemplo, el electrón. La cuestión según Schrödinger es que **la masa y la carga de un electrón no están en un solo punto, sino “desparramadas” por todo el espacio**. Allí donde la función de onda tiene una gran amplitud hay una gran parte de la densidad de carga y masa, y en las zonas en las que la amplitud (la “altura”) de la onda es muy pequeña hay una porción muy pequeña del electrón.

Cuando Schrödinger aplicó su ecuación al átomo de hidrógeno, como dijimos, obtuvo resultados plenamente compatibles con el [modelo atómico de Niels Bohr](#). Su interpretación de estos resultados, por tanto, era que el electrón no estaba dando vueltas alrededor del núcleo, sino que *el electrón era una especie de nube de densidad de carga y masa alrededor del núcleo*. La forma de esta nube venía dada por la función de onda:



Nubes electrónicas en el átomo de hidrógeno.

La interpretación de Schrödinger tenía dos problemas fundamentales: el primero tenía que ver con la naturaleza compleja de la función de onda. La densidad de carga o de masa en una región del espacio es algo medible, pero entonces *¿por qué la función era compleja?* Por supuesto, el propio Schrödinger había tratado de utilizar funciones reales para resolver matemáticamente el problema, pero no lo había logrado, y le resultaba bastante incómodo el hecho de que la función necesariamente fuese compleja.

La solución para su interpretación era simple: en vez de fijarse en la amplitud de la onda, había que observar la *intensidad* de la onda, que es proporcional al módulo de la amplitud elevado al cuadrado — **la intensidad de la función de onda sí era un número real y medible**. ¿Por qué no podía ser esa intensidad la densidad de carga o masa del electrón en cada punto? Hay “más electrón” en las zonas de mayor intensidad, y “menos” en las de menor intensidad.

Sin embargo, existía un problema más grave con su interpretación puramente ondulatoria de la función. La ecuación de onda podía aplicarse a sistemas esencialmente estáticos en el tiempo, como un átomo de hidrógeno aislado, o a sistemas dinámicos. De hecho, la ecuación daba resultados muy exactos para casi cualquier sistema físico, mientras que las velocidades fuesen pequeñas comparadas con la de la luz (los físicos ya eran conscientes de que tanto la formulación de Heisenberg como la de Schrödinger no tenían en cuenta la relatividad de Einstein). Pero cuando se estudiaba la función de onda de un electrón que chocase contra el núcleo de otro átomo, por ejemplo, la interpretación de Schrödinger chocaba con la realidad. Veamos cómo.

Antes del choque, el electrón se va acercando al núcleo “objetivo” del choque. La onda del electrón está más o menos concentrada alrededor de un punto: la interpretación de Schrödinger era que una gran parte de la carga y la masa del electrón estaban encerradas en esa región, y la densidad se iba haciendo más pequeña al alejarse del punto. Hasta aquí, todo correcto.

Pero, después del choque, la función de onda se “esparcía” en todas direcciones (aunque no necesariamente por igual en todas ellas). *Es como si, de pronto, la densidad de carga y masa*

del electrón se hiciera mucho más pequeña y se extendiese mucho más lejos, en todas las direcciones posibles, como una clara de huevo que se extiende por una mesa. Sin embargo, cuando se observaba dónde estaba el electrón después del choque, este “desparrame” no aparecía por ningún sitio: si el electrón había salido disparado, por ejemplo, hacia la derecha, **toda la carga y la masa del electrón estaban a la derecha**. La interpretación del pobre Schrödinger era insostenible, pero ¿cuál era la alternativa?

La solución vendría de la mano de otro genio, el alemán Max Born. Al igual que había llegado en ayuda de Heisenberg, proporcionando su conocimiento de las matemáticas matriciales a la formulación de aquél, ahora resolvería una gran parte del problema de interpretar la función de onda de Schrödinger mediante la aplicación de otra rama de las matemáticas que haría felices a Bohr y Heisenberg, pero no a Einstein y Schrödinger: la probabilidad. Y lo haría tan sólo un año después de la publicación de los artículos de Schrödinger.



Max Born.

Born se había dado cuenta de un aspecto curioso de la ecuación de onda de Schrödinger: salvo que pasaran cosas raras, *si una función ψ era una solución de la ecuación, entonces multiplicar la función por cualquier número real no suponía ningún problema*. Por ejemplo, 2ψ , $7,5\psi$ o 300ψ también eran soluciones igualmente válidas de la misma ecuación. Esto parece algo sin importancia, pero como verás dentro de unos párrafos es una propiedad fundamental.

Por otra parte, aunque ψ era una función compleja, como bien había dicho Schrödinger el módulo al cuadrado de la función, $|\psi|^2$, era un número real. De lo que no cabía duda es de que la intensidad de la onda no indicaba simplemente la densidad de carga o masa, porque **cuando se “veía” el electrón en un experimento era posible verlo “todo” en un solo punto, como partícula, no como onda**. Pero si $|\psi|^2$ no indicaba la cantidad de carga o masa en cada punto, ¿qué indicaba?

Born combinó ambas ideas (la multiplicación por un número y lo significativo de la intensidad) para dar una interpretación probabilística de la función de onda... pero antes de describirla, un pequeño inciso que espero, paciente lector, que no te resulte absurdo.

Imagina que tiras un dado de seis caras. Existen seis resultados posibles: uno para cada cara del dado. La probabilidad de que se produzca cada uno de ellos es de $1/6$, naturalmente. Y la probabilidad total (es decir, la probabilidad de que salga alguna de las seis caras) es exactamente 1, puesto que siempre va a ocurrir: $1/6 + 1/6 + 1/6 + 1/6 + 1/6 + 1/6 = 1$.

Lo mismo sucede con una baraja de cartas. Si hay 100 cartas diferentes (ya sé que es una baraja muy rara), la probabilidad de que saques una carta concreta es de $1/100$, y al sumarlas todas, evidentemente, resulta $1/100$ sumado cien veces, es decir, 1. Sin embargo, las cartas no tienen por qué ser iguales.

Imagina una baraja nueva, que voy a llamar *la baraja de Born*. Tiene 100 cartas, y en ellas se muestran los retratos de físicos famosos como Einstein, Schrödinger o Newton. Pero algunos están repetidos — por ejemplo, hay cinco cartas “Einstein”, siete “Newton” y dos “Bohr”. El pobre de Broglie sólo tiene una carta, mientras que Aristarco de Samos no tiene ninguna. Te ahorro una lista de todas las demás cartas, porque no viene al caso.

En esta baraja, la probabilidad de sacar una carta al azar y ver la foto de Einstein no es $1/100$, sino $5/100$, mientras que Newton tiene una probabilidad de $7/100$ y Aristarco 0. Pero, una vez más, la probabilidad de que salga algún científico es 1, pues todas las cartas tienen la cara de un científico impresa. Volveremos a esta baraja dentro de unos pocos párrafos, de modo que no la olvides.

Born piensa de la siguiente manera: si obtenemos la solución a la ecuación de Schrödinger en un problema determinado (como el átomo de hidrógeno) y la multiplicamos por un número elegido por nosotros exactamente de manera que $|\psi|^2$, sumado en todos los puntos del espacio, sea exactamente 1, el problema se parece muchísimo al de la baraja o el dado.

En este caso, el cuadrado de la función de onda en todo el espacio suma un total de 1. Traducción: *el electrón está en algún punto del espacio*. Si calculo $|\psi|^2$ en una pequeña región del espacio, obtendré un número menor que 1, por supuesto. Pero este número no me indica qué cantidad de carga y masa del electrón se encuentran en esa región, como decía Schrödinger, **sino la probabilidad de que, si miro dónde está el electrón exactamente, se encuentre en esa región.**

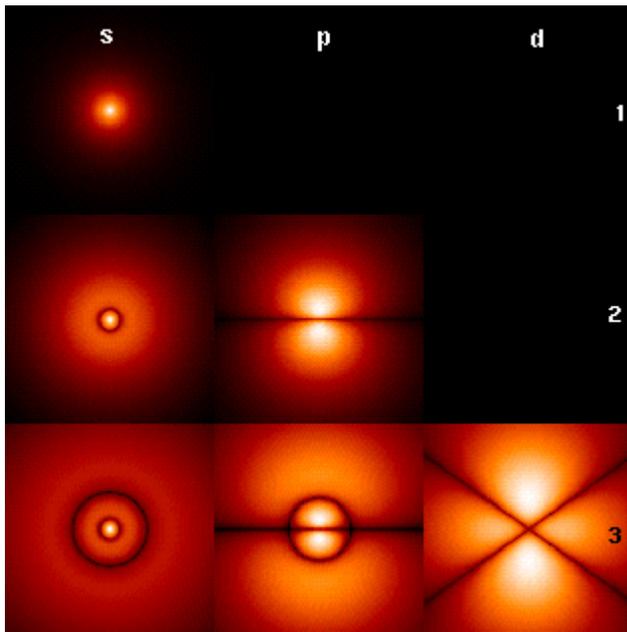
Es decir, supongamos que obtengo la solución de la ecuación de Schrödinger para un electrón que choca contra un núcleo atómico y la multiplico por un número para que la intensidad en el espacio entero sea exactamente 1 (algo que se denomina, por cierto, *normalizar la función de onda*). Ahora supongamos que divido el espacio completo en dos partes exactamente iguales, la “izquierda” y la “derecha” (da igual en qué criterios siga para hacerlo). Supongamos que la intensidad total en la parte izquierda es 0,75 y en la derecha es 0,25.

Según Schrödinger, esto significaría que un 75% de la carga y masa del electrón están “a la izquierda” y un 25% “a la derecha”, pero como hemos visto, cuando observo con un experimento adecuado si el electrón está a uno u otro lado, obtengo un resultado concreto, no una porción del electrón en cada parte.

Según Born, si hago el experimento del choque un millón de veces, 750.000 veces (un 75% de ellas) el electrón estará “a la izquierda” y 250.000 veces (un 25% de ellas) estará “a la derecha”. Pero en cada una de ese millón de veces, cuando detecte el electrón detectaré el *electrón entero*, no una carga o masa “esparcidas”. Desde luego, estrictamente hablando esto no ocurrirá exactamente 750.000 veces, porque es una probabilidad — sólo se cumplirá exactamente si lo hago infinitas veces, pero con un millón de ellas ya debería parecerse bastante a esa proporción.

Es posible incluso, dependiendo de la función de onda, que en ciertas zonas del espacio $|\psi|^2$ sea exactamente igual a cero: en ese caso, según la interpretación de Born, no encontraremos jamás al electrón en esa región. La probabilidad puede llegar a ser así de extrema: si la función no tiene amplitud en algún sitio, el electrón nunca será encontrado allí. En las zonas en las que $|\psi|^2$ es bastante parecido a 1, el electrón es encontrado muchas veces si repito el experimento. Algunos interpretan esto como *“el electrón se mueve por la “nube” de la función de onda, pero pasa más tiempo en aquellos sitios en los que tiene más amplitud, de modo que lo encuentro más frecuentemente allí”*, pero esto es una cuestión de gusto. En la interpretación de Born, hablar de lo que hace el electrón antes de que yo lo observe es inane.

Observemos las imágenes del principio de nuevo, pero esta vez desde el punto de vista de Born:



Fíjate en ellas. Según Born el electrón no está “extendido” por toda esa región. Cuando lo detectas como partícula, está en un punto exacto. La nube naranja de la imagen no es una nube de carga o masa, **es una nube de probabilidad**: si realizas el experimento de detección es mucho más probable que encuentres el electrón en las zonas brillantes, y menos probable que lo encuentres en las zonas oscuras.

En esta interpretación probabilística de la función de onda, **ψ es el conjunto de toda la información que tenemos sobre el electrón**, y manipulándola es posible conocer la probabilidad de que las características del electrón sean unas u otras. Por ejemplo, al calcular $|\psi|^2$ en una región del espacio obtengo la probabilidad de que el electrón se encuentre en esa región. *La función de onda en sí misma no es una entidad física con la que sea posible interactuar en el mundo real.*

De hecho, Born aplicó el mismo razonamiento al resto de las variables relacionadas con el estado del electrón: la función de onda contiene la información sobre todas ellas, y manipulándola es posible calcular la probabilidad de que la velocidad, la energía o cualquiera de las magnitudes que definen su estado tengan un intervalo de valores determinado.

Para comprender esto mejor, volvamos a la *baraja de Born*. La baraja es la función de onda: contiene toda la información que conocemos sobre el sistema. Las cartas que hay en ella vienen determinadas por las condiciones del sistema: por ejemplo, es posible que si mi experimento se realiza de noche, eso significa que haya 10 cartas con la cara de Einstein pero sólo 2 con la de Bohr, mientras que si es de día Aristarco recibe 20 cartas con su nombre. En términos de Born, existe un 10% de probabilidades de que, si es de noche, al sacar una carta aparezca la cara de Einstein (pues hay 10 cartas).

Hasta el momento en el que yo saque la carta (realice el experimento con el que mido la magnitud), *es imposible ir más allá de la afirmación "hay un 10% de probabilidad de que salga Einstein"*. En el momento en el que saco la carta y –por ejemplo– aparezca la cara de Newton, he alterado el sistema y no se puede volver a intentar con esta función de onda particular. Al medir una magnitud y determinarla –sacar la carta– la baraja ha sido alterada, la función de onda ya no es la que era: **la función de onda se ha colapsado**.

Si quiero volver a hacer el experimento, tengo que volver a meter la carta con las demás y barajar todas. Ese “barajar” es la preparación del experimento. Una vez hecho esto, lo que tendría, por supuesto –si todas las condiciones son las mismas de antes– sería otra *baraja de Born* idéntica a la anterior, y la probabilidad de que salga Einstein es de un 10%.

Con lo que básicamente eso es la ciencia en términos de la baraja: si conozco las condiciones de un sistema y qué es lo que voy a observar de él, y cómo voy a observarlo, estoy construyendo la baraja, eligiendo todas las cartas. En ese momento tengo toda la información que es posible tener sobre el sistema, salvo que lo altere de algún modo y compruebe qué carta he sacado. Cuando lo hago, la baraja ya no es la misma, con lo que consigo la información a cambio de destruir la estructura matemática que contenía esa información. Raro, ¿no?

En la interpretación de Born, esto es todo a lo que podemos aspirar en física: a establecer con qué probabilidad mediremos algo en unas condiciones determinadas. Desgraciadamente para Schrödinger, esto se parece mucho a las relaciones de indeterminación de Heisenberg (tanto, tanto que son básicamente la misma cosa, como veremos en la tercera parte de este artículo).

Para comprobar si las afirmaciones de Born tenían sentido no hacía falta más que coger un sistema determinado y realizar un experimento idéntico muchas veces, para comprobar si el número de veces que pasaba cada cosa coincidía con las predicciones probabilísticas de este físico. Ni qué decir tiene que cuando se realizaron experimentos de este estilo las predicciones de Born se cumplían al dedillo. De modo que la interpretación probabilística de Born fue aceptada por todos...

¿Todos? ¡No! Una aldea poblada por irreductibles galos... quiero decir, Schrödinger, por ejemplo, nunca aceptaría la interpretación de Born. En sus propias palabras, un par de décadas después, el creador de la ecuación de onda diría:

Debo empezar diciendo que en esta disertación me opongo, no a algunas afirmaciones concretas de la mecánica cuántica actual (década de 1950), me estoy oponiendo –podríamos decir– al conjunto, me opongo a las ideas básicas que tomaron forma hace 25 años, cuando Max Born propuso su interpretación probabilística, que fue aceptada por prácticamente todo el mundo.

La razón era, una vez más, la imbricación del proceso de observación con las matemáticas de la física. Fíjate en que según Schrödinger la función de onda describe *lo que el electrón es*, mientras que la interpretación de Born afirma que la función de onda contiene la información sobre *lo que probablemente mediré cuando observe el electrón*. Pero Schrödinger, como

Einstein, se oponía a esta idea de que la realidad es algo incognoscible de manera absoluta, sino que sólo es posible describir lo que veo como sujeto:

El mundo me viene dado una vez, no uno existente y otro observado. El sujeto y el objeto son uno mismo. No puede decirse que la barrera entre ellos ha sido rota como resultado de las recientes experiencias en las ciencias físicas, pues esta barrera no existe.

Ni siquiera el propio Born consideraba la función de onda meramente como un artilugio matemático:

La pregunta sobre si las ondas son algo “real” o una función que describe y predice fenómenos de forma conveniente es sólo una cuestión de gustos. A mí personalmente me gusta considerar la función de probabilidad, incluso en el espacio tridimensional, como algo real, desde luego más que una herramienta para cálculos matemáticos [...] Hablando de forma general, ¿cómo podríamos fiarnos de las predicciones probabilísticas si éstas no parten de algo real y objetivo?

Finalmente, aunque Einstein seguía incómodo con la noción de probabilidad y la ausencia de una realidad objetiva, su postura frente a Born era bastante más moderada que la de Schrödinger. De hecho, el alemán reconocía claramente que la interpretación de Born coincidía perfectamente con los experimentos realizados. En 1940 afirmaría:

Los campos de onda de de Broglie-Schrödinger no debían interpretarse como la descripción matemática de cómo se produce un suceso realmente en el tiempo y el espacio aunque, por supuesto, se refieren a ese suceso. Más bien son una descripción matemática de lo que realmente conocemos sobre el sistema. Sirven únicamente para realizar afirmaciones estadísticas y predicciones de los resultados de todas las medidas que podemos realizar sobre el sistema.

Eso sí, ¡esto no significaba que el divino Albert se rindiese! En sus propias palabras,

No puedo evitar confesar que sólo doy una importancia transitoria a esta interpretación. Aún creo en la posibilidad de un modelo de la realidad — es decir, una teoría que representa las cosas mismas y no únicamente la probabilidad de que ocurran.

La cuestión —y lo siento si soy repetitivo, pero es una de las consecuencias más importantes de la ecuación de onda y la interpretación de Born— es que, a partir de este momento, tanto con Heisenberg como con Schrödinger (a su pesar), **las matemáticas de la física no representan lo que las cosas son, sino lo que medimos de ellas.**

Un electrón, en términos de las ecuaciones de Schrödinger, no “es” nada en particular. *La función no es la oscilación de nada que sea posible observar en ningún modo.* La función oscilante es la representación matemática de toda la información que se tiene del sistema, y para saber qué relación tiene esa función con magnitudes medibles hace falta manipularla matemáticamente para obtener predicciones probabilísticas sobre esa magnitud.

Es decir, la respuesta de Born a “¿qué está oscilando?” es más bien difusa: el electrón es una oscilación. Esta oscilación viene definida por una función matemática que no se puede experimentar de ningún modo en el mundo real, sino sólo manipular para obtener resultados que sí son medibles. Ya sé que no responde aún a la pregunta “del millón”, pero al menos nos da una pista — la intensidad de la oscilación indica la probabilidad de encontrar al electrón en un sitio. No es sorprendente que algunos, como Einstein, pensasen que nos falta algo por descubrir si a lo más que podemos llegar es a eso.

Desde luego, como he dicho antes, esa probabilidad puede ser del 0% o incluso casi del 100%. Pero, por un lado, *el concepto de un Universo en el que un electrón tiene un 99% de*

probabilidades de ir más lento que un valor determinado es radicalmente distinto de un Universo en el que el electrón tiene una velocidad determinada.

Y por otro, cuando establezco un experimento en el que una probabilidad es enorme, como contrapartida la predicción de Born para otras magnitudes relacionadas se convierte en minúscula — una vez más, cuando miro algo fijamente y lo veo muy nítidamente otras cosas, inevitablemente, por mucho que lo intente, se vuelven borrosas. ¿Te suena esto? Por supuesto, es *la misma conclusión de Heisenberg en sus relaciones de incertidumbre*, y en la [tercera parte de este artículo](#) hablaremos precisamente de cómo se interpretan esas relaciones en términos de la función de onda de Schrödinger y la interpretación probabilística de Born.

La ecuación de onda de Schrödinger (III)

Hoy finalizamos la discusión sobre la *ecuación de onda de Schrödinger*, dentro de la serie [Cuántica sin fórmulas](#). Antes de seguir puedes leer la [primera parte](#) o mejor aún, si no lo has hecho, empezar desde el [primer artículo de la serie](#). Partimos de conceptos que, si no conoces, pueden confundirte.

En la parte I de este artículo hablamos sobre la elaboración de la ecuación en sí, y algunas de las preguntas y reacciones que suscitó. En la segunda parte nos dedicamos a especular acerca de la naturaleza de la función de onda, con especial énfasis en la interpretación probabilística de Born, de gran éxito experimental. Hoy veremos cómo, para desánimo de los enemigos de las relaciones de indeterminación de Heisenberg, *éstas aparecen meridiana e inevitablemente cuando se acepta como válida la ecuación de Schrödinger*. No hay escapatoria.

El primero en demostrar matemáticamente que las relaciones de Heisenberg eran inevitables a partir de la formulación de Schrödinger fue el físico y matemático estadounidense Howard P. Robertson en 1930, pocos años después de la publicación de los artículos de aquél. De hecho, el propio Schrödinger “refinó” la relación matemática obtenida por Robertson, de modo que se la conoce como [relación de Robertson-Schrödinger](#). Sí, como ves estos físicos no tenían reparos en aceptar conclusiones que no les gustaban – lo que querían era saber la verdad de las cosas, aunque se opusiera a lo que ellos deseaban que fuera la verdad última. Muchos deberían aprender de ellos.

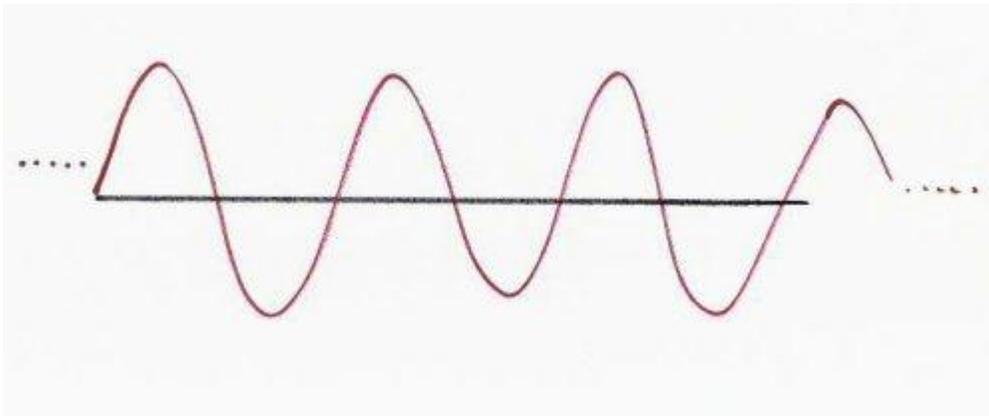
La relación de Robertson-Schrödinger incluye como un caso concreto las relaciones de indeterminación de Heisenberg. Por supuesto, aunque esto se puede demostrar matemáticamente, dada la naturaleza de esta serie y el elevado nivel de las matemáticas involucradas, aquí vamos a hacer lo que hacemos siempre: explicarlo en términos sencillos y sin necesidad de emplear fórmulas matemáticas. Eso sí, si quieres elevadas disquisiciones sobre el asunto éste no es el lugar adecuado. Ser “*antes simplista que incomprensible*”, como es nuestro propósito, tiene una parte buena pero también una mala (el propio hecho de ser simplista). Avisado estás para cuando hable de “apretar ondas infinitas” y cosas así.

Para entender por qué la función de onda implica la indeterminación de Heisenberg hace falta recordar algunos conceptos explicados en artículos anteriores de la serie, y también entender algunas ideas básicas sobre ondas (estoy convencido de que los ingenieros de telecomunicaciones y similares no tendréis el más mínimo problema para entenderlo).

Como espero que recuerdes, en su [hipótesis](#) Louis de Broglie había propuesto que las partículas materiales, como los electrones, tienen una [longitud de onda](#) asociada que depende de su [momento lineal](#) (y por lo tanto de su velocidad): *cuanto más rápido se mueve la partícula, más corta es la longitud de onda*. Conocida la longitud de onda, puedo calcular la velocidad de la partícula.

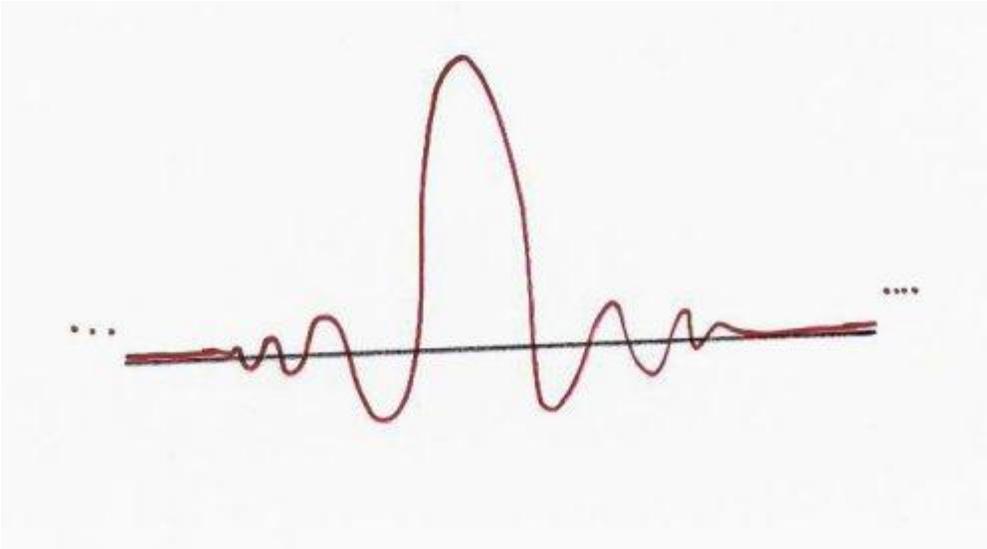
Sin embargo, en el artículo en el que hablamos de la hipótesis de de Broglie consideramos ondas “perfectas”, como hacía el propio Louis de Broglie, es decir, ondas armónicas simples indefinidas. Sin embargo, las soluciones de la ecuación de Schrödinger pueden ser ondas de muy diversa índole, y muchas de ellas no son “perfectas”. Y esta distinción hace que la hipótesis de Louis de Broglie no pueda ser considerada sólo respecto al *valor* de la longitud de onda, sino que puede producir un *intervalo de valores* de la longitud de onda.

La cuestión es que no todas las ondas tienen una longitud de onda bien definida. La longitud de onda es la distancia que separa las crestas (o los valles) de una onda, pero no todas las ondas tienen una distancia fija, ni siquiera crestas de la misma altura en todas partes. Algunas sí tienen una longitud de onda perfectamente definida, como este tren de ondas infinitamente largo (los puntos suspensivos indican que esto continúa hasta el infinito):



Disculpas por el pobre dibujo. Desde luego, cuando publiquemos la serie en forma de libro, Geli se encargará de hacer las ilustraciones para que sean más profesionales; por ahora tiene que valer éste que, por otro lado, debería servir para entender lo que quiero decir. Sólo es posible definir perfectamente la longitud de onda cuando la onda es infinita.

Un caso muy diferente del dibujo de arriba es una onda muy localizada en el espacio, como un pulso de este tipo:



Desde luego, al resolver la ecuación de Schrödinger para condiciones distintas (como diferentes experimentos con un electrón) pueden obtenerse ondas similares a los ejemplos de estos dos dibujos (aunque se trata de ondas complejas, por supuesto). La cuestión, naturalmente, es interpretar qué diablos significa que la onda de un electrón sea como en el primer caso o como en el segundo.

Fíjate en el primer dibujo, y recuerda tanto la interpretación probabilística de Born como la hipótesis de de Broglie: *en los puntos de máxima amplitud de la onda es donde más probablemente encontraríamos al electrón si lo detectamos como partícula*, por ejemplo con una pantalla. En los puntos en los que la onda cruza la horizontal *no encontraríamos jamás al electrón*. Por otro lado, *la velocidad de ese electrón está definida por la longitud de la onda*.

Respecto a la velocidad, no hay ningún problema — podríamos simplemente calcularla como hacía de Broglie y la conoceríamos perfectamente, pues esa onda infinita tiene una longitud de onda perfectamente definida. **Pero no tenemos ni la más mínima idea de donde está el electrón**. Recuerda que esa onda es infinita, de modo que el electrón puede encontrarse en cualquier punto en el que la amplitud no sea nula: *¡hay infinitas crestas!* Cuando la onda tiene una longitud de onda perfectamente definida, se extiende por todo el espacio.

Por supuesto, ocurre justo lo contrario con el segundo dibujo: ahí la onda está muy bien definida en el espacio. No encontraríamos al electrón en cualquier parte, y de hecho *la mayor parte de las veces estaría en algún sitio del pico más alto de todos...* pero esa onda no tiene una longitud de onda bien definida, porque es un pulso muy estrecho. Sabemos muy bien dónde está el electrón, **pero no conocemos su velocidad con casi ninguna precisión**.

Puedes pensarlo así: para que esté bien definida la longitud de una onda hace falta que ésta tenga muchas crestas y muchos valles. Pero para que suceda eso tiene que extenderse mucho en el espacio. Por otro lado, cuanto más alto y estrecho es un pulso de onda —y, por lo tanto, más precisa es la posición de la onda—, peor definida está su longitud de onda. **No es posible tener una onda muy restringida en el espacio (con un pico muy alto y muy estrecho) pero que tenga la longitud de onda bien definida, porque la longitud de onda requiere, para tener un valor fijo, muchas crestas de la onda.**

Existen ondas con algunas características peculiares, como las [ondas estacionarias](#), que pueden tener una extensión relativamente pequeña y una longitud de onda bien definida. De

hecho, puede pensarse en los electrones en orbitales atómicos como una especie de “ondas estacionarias” que rodean el núcleo. Sin embargo, incluso en este caso no podemos conocer la posición del electrón (o la partícula que sea) con precisión arbitraria sin volver “borrosa” la longitud de onda. Sí podemos saber que está entre los dos extremos de la onda, no en los puntos de amplitud nula (los *nodos* de la onda estacionaria), y más probablemente en las crestas de la onda.

Es decir, podemos conocer la distribución de probabilidad de encontrar el electrón en cada lugar, pero la suma de todas esas probabilidades (la *nube de probabilidad*) es la propia onda estacionaria que rodea al átomo, con la forma que tenga según la solución a la ecuación de Schrödinger.

Por si acaso la explicación te deja confuso, voy a intentarlo de una forma diferente, aunque tienes que ejercitar tu imaginación para visualizar lo que voy a decir. Imagina que tienes una onda infinita y perfecta, con todas sus crestas y valles perfectamente definidos. Su longitud de onda tiene un valor fijo, pero la onda se extiende por todo el espacio, como en el primero de los dos dibujos de arriba.

Pero supongamos que no estás contento con eso, sino que quieres que la onda sólo exista en una región más pequeña del espacio, de modo que agarras los extremos (sí, en el infinito, ¿no te he dicho que ejercites la imaginación?) y los “aprietas” con las manos hacia dentro, de modo que la onda ocupe menos espacio. Por la propia naturaleza matemática de las ondas, la onda se “arruga” y pierde su forma perfectamente definida, de modo que algunas de las crestas casi desaparecen (o lo hacen completamente), mientras que otras se hacen más grandes, y algunas quedan más cerca de otras mientras que algunas se alejan. Al final acabas con el pulso de onda de abajo, muy definido en el espacio pero con una longitud de onda muy difusa.

¡Es justo lo que decía Heisenberg, en términos diferentes! Si la velocidad está muy bien definida, no tenemos ni idea de dónde está el electrón (en términos de Schrödinger, si la longitud de onda está bien definida, la onda se extiende mucho en el espacio). Si la posición está muy bien definida, no tenemos ni idea de la velocidad del electrón (en términos de Schrödinger, si el pulso es muy estrecho su longitud de onda está mal definida).

Por lo tanto, aceptar la formulación de Schrödinger –como parecía ya evidente una vez Born propuso su interpretación probabilística– no es la salvación que algunos esperaban de un “mundo aleatorio”. Puesto que las dos formulaciones matemáticas son equivalentes, esto no debería ser sorprendente, pero para algunos supuso un duro golpe.

Lo que sí es cierto es que mientras que deducir de forma lógica las relaciones de incertidumbre a partir de la formulación matricial de Heisenberg es muy difícil, hacerlo a partir de la ecuación de onda de Schrödinger es relativamente intuitivo: de hecho, mejor o peor, acabamos de hacerlo aquí mismo. Esta fue una de las razones que hicieron a la formulación ondulatoria mucho más común que la matricial.

De lo que no cabía duda, a partir de cualquiera de las dos teorías alternativas, era de lo inevitable: es imposible conocer con precisión arbitraria la posición y la velocidad de una onda-partícula material. La razón, en términos de Schrödinger, no es otra que la naturaleza ondulatoria de la materia.

Quiero incidir una vez más en esto por lo extendido de las falsas ideas sobre el principio de incertidumbre, aunque ya las desmentimos en los artículos dedicados a él, en este caso utilizando la formulación ondulatoria: **la indeterminación no se debe simplemente a que al**

observar el electrón lo modifiquemos; la indeterminación es una consecuencia inevitable del hecho de que el electrón es una onda, y una onda no puede tener una posición y una longitud de onda muy bien definidas a la vez.

Desde luego, aceptar el buen funcionamiento experimental de ambas formulaciones no requiere aceptarlas como verdades últimas: muchos físicos pensaban que no conocíamos todo lo que hay que conocer sobre las partículas, y de ahí que las describamos como ondas. Otros pensaban que no existe tal cosa como una “partícula”, sino simplemente ondas. A lo largo de la serie iremos desgranando las diversas interpretaciones de la aparente aleatoriedad del Universo.

Sin embargo, la solidez matemática y –más importante aún– la extraordinaria precisión con la que las teorías de Heisenberg y Schrödinger predecían los experimentos no dejaban lugar a dudas: cualquier teoría posterior muy probablemente sería compatible con ellas. Tal vez las dejara como casos particulares de una teoría más extensa, como la mecánica newtoniana es un caso particular de la relatividad Einsteiniana, pero no podían ser ignoradas.

En la siguiente entrega de la serie hablaremos acerca de algún caso concreto de aplicación de la ecuación de Schrödinger, y una más de las conclusiones que se extraen de ella pero que hacen chirriar nuestra intuición. Estudiaremos las soluciones para varios “pozos de potencial”, para comprobar cómo los resultados de Schrödinger parecen imposibles si se piensa en términos clásicos, y lo que es más interesante, *efecto túnel*. En el siguiente artículo, [el pozo de potencial infinito](#).

El pozo de potencial infinito

En la última entrega tripartita de la serie Cuántica sin fórmulas hablamos acerca de la *ecuación de onda de Schrödinger*: su elaboración, el significado de la función de onda y su relación con el principio de incertidumbre de Heisenberg. Ni qué decir tiene que te recomiendo que leas aquellos artículos antes de seguir con éste, pues me baso en conceptos explicados allí y vamos a aplicar cosas generales mencionadas en ellos a problemas concretos. Mejor aún, si no conocías esta serie hasta ahora, es que empieces por el primer artículo y poco a poco avances hasta éste — la cuántica ya es puñetera por sí misma, como para encima no empezar desde el principio.

Como recordarás, la mecánica ondulatoria de Schrödinger tuvo mejor aceptación general que la matricial de Heisenberg por su mayor facilidad de visualización. Esta característica es especialmente útil para nosotros en esta serie — sería casi imposible analizar casos concretos mediante la formulación de matrices sin utilizar fórmulas, pero las ondas son fáciles de representar gráficamente y, tras haber leído la entrega anterior de la serie, deberías ser capaz de interpretar los resultados gráficos para comprender lo que significan físicamente (veremos si es así o no).

Este artículo, como todos los de esta serie, es denso y abstracto. Aunque he dejado las neuronas tratando de hacerlo lo más accesible que puedo, requiere un mayor esfuerzo que otros de *El Tamiz*, y es posible que tengas que darle una pasada, dejarlo estar y volver a él al cabo de un tiempo. No te desanimes si al principio te resulta difícil (si te parece simplemente infumable, lo siento).

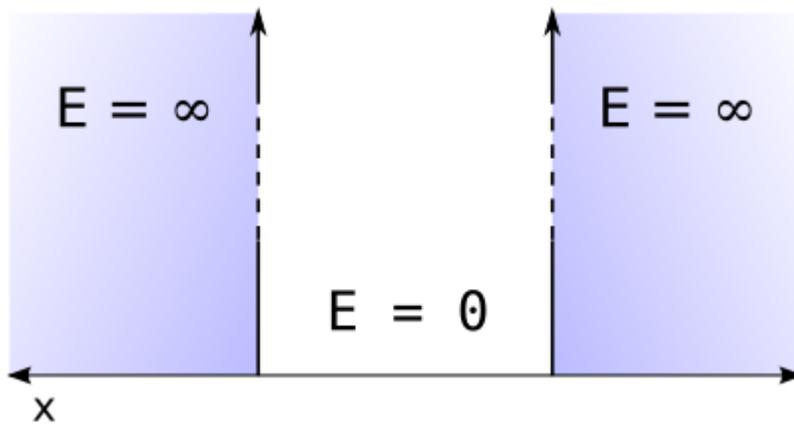
El objetivo hoy es doble: por un lado, vamos a descubrir cosas nuevas sobre el comportamiento del mundo a nuestro alrededor; sin embargo, me parece más importante aún otra cosa. Soy consciente de que aprender de cuántica a veces desmoraliza, y parece que piensas y lees mucho y al final te quedas tan confundido como al

principio. Mi objetivo en esta entrada es demostrarte –si has leído el resto de la serie, claro– que **sabes más de lo que piensas**. Hoy vamos a poner en acción lo que hemos aprendido sobre el principio de incertidumbre, las hipótesis de Planck y de Broglie, la interpretación de la función de onda, etc., para aplicar todo eso a un caso concreto. Estudiaremos el **pozo de potencial infinito**.

Para empezar, vamos a trabajar en una sola dimensión para no liar las cosas, como hicieron muchos físicos de la época — sí, no es realista, pero pueden obtenerse muchísimas conclusiones trabajando en una dimensión que son aplicables al mundo tridimensional, y es mucho más fácil ver las cosas en movimientos en una dimensión. De modo que supongamos que tenemos una partícula (da igual la que sea, pero imaginemos que se trata de un electrón) que puede moverse –en principio libremente– a lo largo de una recta infinitamente larga.

Naturalmente, si no existe nada más que ese electrón la cosa no tiene gracia: la ecuación de Schrödinger resulta útil para saber qué le sucede a ese electrón en situaciones determinadas. De modo que el primer caso que quiero que estudiemos juntos es el de **un electrón que se encuentra encerrado en una determinada región del espacio**: a ambos lados de esa región existen fuerzas tremendas que no le permiten ir más allá, como si fueran las paredes de una caja infinitamente resistente, o un pozo infinitamente profundo. De este modo estamos absoluta y totalmente seguros de que –por definición– el electrón va a estar en esa región del espacio. Esta simple condición (que estamos seguros de que el electrón está en esa región de la recta) tiene consecuencias inmediatas (y estoy seguro de que algunas puedes adelantarlas tú mismo).

En términos de energías, esta situación puede representarse de la siguiente manera — en el eje x se encuentra la recta sobre la que se mueve el electrón, que puede hacerlo a derecha o izquierda; en el eje y representamos la energía que debe tener el electrón para llegar a cada punto. Si el electrón se encuentra confinado en una región de la que es absoluta y totalmente imposible salir, eso es lo mismo que decir que fuera de esa región la energía requerida es infinita. Mi explicación es algo pobre pero si observas el dibujo creo que entenderás lo que quiero decir (todas las ilustraciones estáticas de hoy están hechas por Geli, afortunadamente para vosotros, que no tenéis que sufrir mis dibujos en papel):



En los libros de física en los que se describe este problema suele hablarse del *potencial* en vez de la *energía potencial*, pero ambos son proporcionales y no quiero meterme en disquisiciones entre uno y otra, de modo que –aunque sea algo heterodoxo– dibujaré siempre la energía necesaria para estar en un punto en el eje y , y no el potencial (pero seguiré refiriéndome al pozo como un *pozo de potencial* de vez en cuando, porque así lo llama todo el mundo). Como puedes ver en el dibujo de arriba, para abandonar la región central el electrón necesitaría una energía infinita.

¿Cómo se resuelve este problema utilizando la física clásica? Fácilmente, no hay más que emplear la mecánica newtoniana: el electrón tendrá una velocidad inicial determinada, nula o no. Si es nula, se quedará para siempre en el punto en el que empezó; si no es nula, se moverá hacia una pared, rebotará en ella, se dirigirá hacia la otra pared, rebotará en ella, y así infinitamente. Si va muy rápido rebotará muchas veces por

segundo, si va despacio rebotará cada mucho tiempo (y si no se mueve, evidentemente, no rebotará nunca). Pero *¿qué resultado se obtiene empleando la ecuación de Schrödinger?*

Al resolver la ecuación de Schrödinger para este “pozo infinitamente profundo”, el resultado es como siempre la función de onda del electrón confinado en él. Esta función de onda tiene varias peculiaridades que son consecuencia de las condiciones que hemos establecido y de la naturaleza cuántica de la materia, y es una versión distinta de la visión clásica: no hay un electrón como una canica que rebota entre pared y pared, sino una onda que se refleja entre pared y pared. Y *una onda que se refleja entre dos lugares fijos es necesariamente un tipo de onda especial: una **onda estacionaria**.*

Por si no estás familiarizado con las ondas estacionarias, el ejemplo más intuitivo es el de la cuerda de una guitarra. Cuando la tocas, se produce una onda que llega a un extremo que está fijo (pues la cuerda está atada a un punto determinado), se refleja y llega al otro extremo, se refleja y vuelve, y así sucesivamente. Puesto que va y viene por la cuerda, la onda interfiere consigo misma y produce algo así:

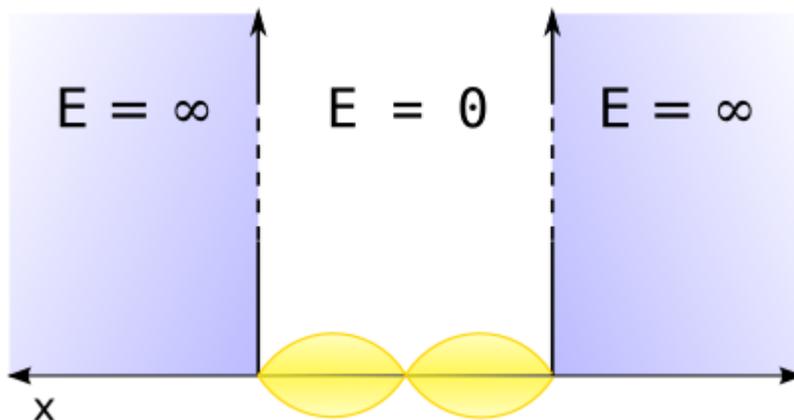


Por cierto, esta animación* te permite ver cómo oscila la onda, pero en el resto de ilustraciones del artículo no vamos a mostrar animaciones, de modo que tendrás que imaginarte cómo oscilaría la onda en cada caso (entre los puntos más alto y más bajo de la onda dibujada en cada lugar).

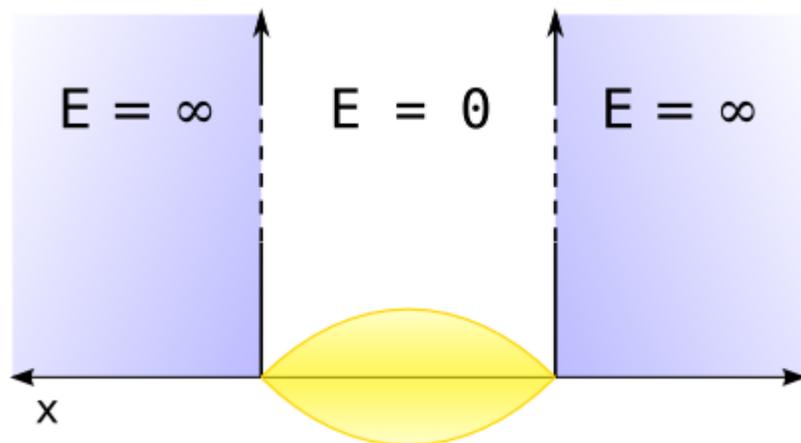
**La animación solo es visible en el navegador WEB. Aquí la he subido como una imagen jpg. NOTA del editor.*

En el caso del electrón pasa algo parecido a la cuerda de guitarra: puesto que es una onda que “rebota” (se refleja) de un lado a otro entre ambas “paredes”, produce una onda estacionaria de materia. Como digo, esto no es demasiado sorprendente por sí mismo, puesto que hemos forzado que sea así al impedir al electrón abandonar este tramo de recta entre las “paredes”.

Lo extraño empieza a aparecer cuando nos fijamos en las propiedades de las ondas estacionarias. Para empezar, una onda estacionaria entre dos puntos determinados *no puede tener cualquier longitud de onda*. En el ejemplo de la cuerda de guitarra, o del electrón en este pozo infinito, los extremos de la onda (en los extremos de la cuerda de guitarra, o en las “paredes” del pozo) están fijos con amplitud nula. Como consecuencia, una onda estacionaria de longitud de onda exactamente igual que la longitud del pozo –o la cuerda– cabe perfectamente. Aquí puedes ver un dibujo en el que se muestra la amplitud de la onda en cada punto:



Una onda estacionaria el doble de larga que la anterior también cabe bien:



Pero ahora llegamos a una de las claves de este problema, y la consecuencia inevitable de la naturaleza ondulatoria del electrón dentro del pozo: **cualquier onda más larga que la del dibujo no cabe dentro del pozo**. Uno de sus extremos no estaría fijo con amplitud nula.

Ésa es la razón de que dos cuerdas de longitudes diferentes, si tienen la misma tensión, suenen con notas diferentes: la más larga permite ondas más largas (sonidos más graves), mientras que la más corta sólo permite que existan ondas estacionarias más cortas (sonidos más agudos). En el caso de las cuerdas la cosa se complica cuando se tiene en cuenta la tensión de la cuerda (a mayor tensión mayor velocidad de propagación y mayor frecuencia, aunque la longitud de onda se mantenga constante), pero espero que el ejemplo de las cuerdas de guitarra te ayude a entender el del electrón.

Observa de nuevo la onda del dibujo de arriba, que es la onda estacionaria más larga que puede existir en ese pozo de potencial (y que suele llamarse “estado fundamental”). Traduzcamos eso utilizando la hipótesis de Broglie: es lo mismo decir que *no puede haber longitudes de onda más largas* que decir que *no puede haber velocidades más lentas*. Esa longitud de onda, que depende de la longitud del pozo, nos da la mínima velocidad que puede tener un electrón que está dentro del pozo.

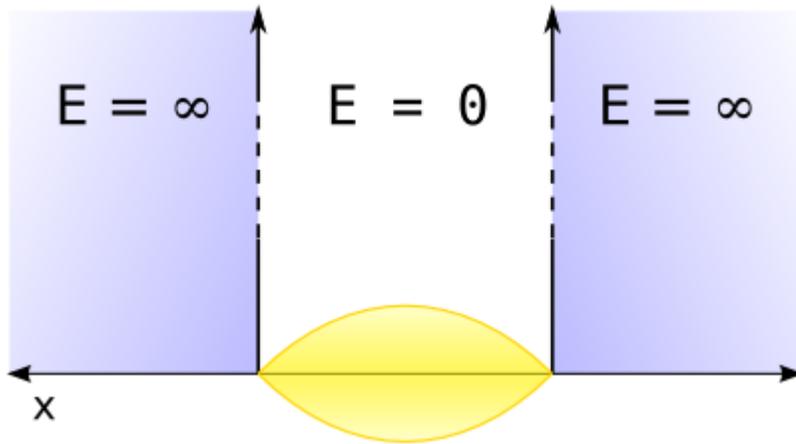
Podemos llegar a esta conclusión también a través del principio de indeterminación de Heisenberg: estamos absolutamente seguros de que el electrón se encuentra dentro de esa región del espacio, luego no podemos saber con demasiada exactitud su velocidad. El electrón se mueve dentro del pozo a derecha o izquierda, pero la onda obtenida por Schrödinger, al ser estacionaria, *es la suma de las dos*. No nos dice hacia dónde se mueve el electrón en un momento determinado, a izquierda o derecha. De modo que si la velocidad predicha por la función de onda fuera arbitrariamente pequeña (y tuviera un valor v), estaríamos seguros de que el electrón tiene una velocidad nula con un margen de error de $\pm v$ arbitrariamente pequeño, lo cual incumpliría el principio de incertidumbre. *No podemos a la vez encerrar al electrón y pararlo*.

De hecho, pensemos en lo que sucede si hacemos el pozo más y más estrecho: la onda del estado fundamental se haría más y más corta, con lo que la velocidad mínima del electrón se haría más y más grande. Lo mismo sucedería, pero al revés, si hacemos el pozo más ancho — permitiríamos velocidades menores y por lo tanto una mayor precisión límite en el conocimiento de la velocidad del estado fundamental, pero al mismo tiempo sabríamos peor dónde se encuentra el electrón, que puede estar en cualquier parte del pozo.

De modo que puedes ver cómo este simple estado fundamental es contrario a la física clásica: una de las soluciones clásicas del problema (que el electrón esté quieto en un sitio y punto final) *no es posible* de acuerdo con la ecuación de Schrödinger. El electrón no puede estar quieto. De hecho, si hablamos en términos de energías, el electrón debe tener una energía mínima, que depende de la anchura del pozo — **la energía del estado fundamental**. Por mucho que intentásemos extraer energía del electrón, no podríamos quitarle esa energía mínima.

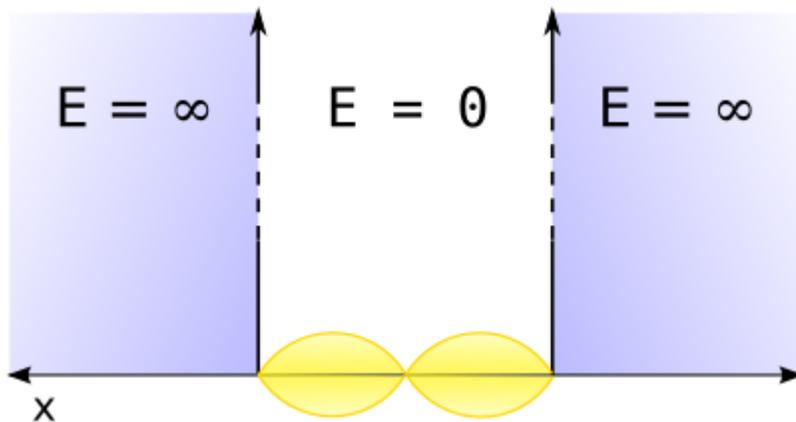
Y esa energía mínima es proporcional a la frecuencia de la onda (que depende de la longitud de la onda) — esa energía mínima es la de la hipótesis de Planck. Es el tamaño del “escalón de energía” del que hablamos

en aquel artículo. Pero la relación entre la hipótesis de Planck y este pozo de potencial no acaba aquí, como veremos en unos párrafos.



Pero sigamos analizando el dibujo del estado fundamental, que vuelvo a reproducir para que no tengas que andar arriba y abajo para verlo. Como recordarás de la función de onda, la amplitud de la onda (la separación de la horizontal en ese dibujo) nos indica la probabilidad de encontrar el electrón en un lugar o en otro. Cuando el electrón se mueve lo más lento que es posible —está en el estado fundamental— es muy probable que lo encontremos cerca del centro del pozo, y poco probable que lo encontremos cerca de un extremo, aunque puede estar en principio en cualquier punto del pozo. Todo esto es, creo, bastante intuitivo.

Hemos hablado del estado fundamental, que es el de la onda más larga que cabe dentro del pozo, pero ¿qué hay de ondas más cortas? Existen infinitas ondas estacionarias que pueden existir dentro de este pozo. La siguiente más larga después de la del estado fundamental la hemos mostrado arriba, pero quiero volver a mostrártela para analizarla:



Varias conclusiones sobre esto. Para empezar, la longitud de esta onda es la mitad que la de la anterior — no existe ninguna onda intermedia entre ambas que tenga sus extremos fijos en los lados del pozo. Lo mismo sucede por lo tanto con la energía: no es posible que el electrón tenga una energía intermedia entre la del estado fundamental y éste. Ese escalón de energía es justo la misma energía que tenía el estado fundamental, y cumple por lo tanto una vez más la hipótesis de Planck.

Además, esta solución de la ecuación —que es la de un electrón que se mueve más rápido que el anterior— tiene una peculiaridad muy curiosa. Como puedes ver, existe la misma probabilidad de encontrar el electrón en la parte izquierda del pozo que en la derecha, lo cual es lógico... pero **es absolutamente imposible encontrar este electrón en el punto medio del pozo**. ¿No es raro? En física clásica, un electrón con una

velocidad determinada pasa por todos los puntos del pozo dos veces en su recorrido completo del pozo, y pasa el mismo tiempo en cualquier región del pozo... pero en cuántica no. La ecuación predice dónde encontraremos el electrón en el momento de mirarlo, y la conclusión —clara pero extraña— es que nunca jamás lo encontraremos en el punto medio.

De hecho, lo que nos indica la amplitud de esa onda es que lo más probable es que encontremos el electrón en el punto medio *de una de las dos mitades*. ¿Por qué? ¿Cómo es posible que la solución elija esos puntos como especiales? Es posible que seas capaz de responder tú mismo, pero si no puedes no te preocupes — como he dicho antes en la serie, descartar todo el “equipaje mental” de la física clásica es difícil.

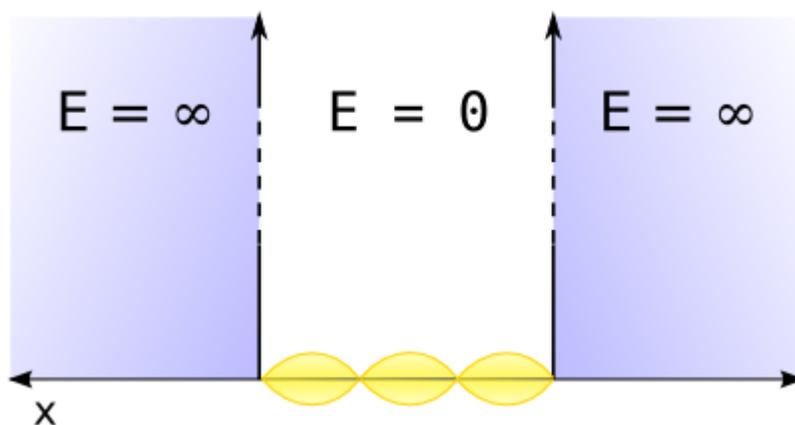
La razón es que el electrón es una onda que interfiere consigo misma. Al ser una onda estacionaria, resultado de la interferencia del “electrón que va hacia la derecha” con el “electrón que va hacia la izquierda”, en algunos puntos se produce una interferencia destructiva — la onda del “electrón que va hacia la derecha” está en su punto más alto por encima de la horizontal, mientras que la del “electrón que va hacia la izquierda” está en su punto más bajo por debajo de la horizontal... *¡y la suma es nula en ese punto!*

Puede que estés pensando algo así: *¿Me estás diciendo, estimado pero lunático Pedro, que el electrón que va interfiere consigo mismo a través del tiempo? ¿Pero qué clase de mundo es éste?*

Mi respuesta a las dos preguntas no puede ser otra que ésta: *Sí, y Un mundo muy raro*. Hablaremos más sobre la interferencia de un electrón consigo mismo en otros lugares y momentos en un artículo posterior de la serie, pero el resultado de Schrödinger no deja lugar a dudas — la onda que viene interfiere con la que vuelve de modo que hay lugares en los que el electrón no se encuentra nunca cuando lo miras. El electrón interfiere consigo mismo.

Por cierto, aunque sea una cuestión de pura terminología, ese punto en el que la amplitud de la onda es nula se denomina un *nodo*. Si vuelves a mirar la primera onda estacionaria dibujada, la que está animada y se ve oscilar, puedes ver que tiene cinco nodos (dos en los extremos y tres entre ellos). Si te fijas en la onda del estado fundamental, tiene dos nodos (en los extremos). La onda que hemos analizado ahora tiene tres nodos (dos en los extremos y uno justo en el centro del pozo).

Cada una de estas ondas estacionarias que “caben” dentro del pozo con sus extremos fijos se denomina un *modo normal* de vibración. Como he dicho, hay infinitos puesto que el límite se encuentra en una longitud de onda máxima —la del estado fundamental—, pero puede haber ondas infinitamente cortas dentro, con tropecientos nodos. Sólo voy a analizar el siguiente y extraer conclusiones generales. Después del de tres nodos, el modo siguiente es el de cuatro nodos:



Como puedes ver, es un electrón más rápido aún que los anteriores, con más energía (un “escalón” más que el anterior), y tiene una vez más lugares en los que nunca lo encontraremos debido a su interferencia consigo mismo. También puedes ver que hay varios lugares en los que la probabilidad de encontrarlo es máxima: en el estado fundamental había un lugar así (el centro del pozo) con una probabilidad muchísimo mayor que en cualquier otro sitio, en el siguiente modo normal había dos (los centros de las dos mitades) pero la diferencia

de probabilidad era algo menor, y aquí hay tres (el centro del pozo y un lugar de cada mitad), pero la diferencia es aún menor.

De modo que, si seguimos añadiendo nodos y “acelerando” el electrón, tendríamos muchísimos puntos de probabilidad máxima que se la repartirían muy bien, y sería mucho más difícil predecir dónde va a estar el electrón. También habría muchísimos nodos en los que no podríamos encontrarlo jamás, lo cual es bastante extraño — la cosa se vuelve muy borrosa según el electrón va más y más rápido.

Puede parecer que esto no tiene que ver con la vida real porque es un sistema unidimensional y además establecemos una condición arbitraria — que el electrón no puede escapar de esa región. Es cierto que ambas cosas son abstracciones, pero podemos establecer similitudes con algunos sistemas reales y veremos cómo varias de las cosas que hemos mencionado a lo largo de la serie (además de lo que hemos dicho ya en este artículo) se corroboran una vez más, y algunas incluso se justifican.

Imagina que el “pozo” no es en una dimensión sino en tres, y que el responsable de esa energía es el núcleo del átomo, que atrae al electrón de modo que no puede escapar de él. En la realidad esa energía necesaria para escapar no es infinita (y hablaremos de pozos finitos en el próximo artículo de la serie), pero podemos ya ver por qué algunas cosas son como son.

Si recuerdas el modelo de Bohr para el átomo, decía que los electrones en el átomo sólo pueden tener unas energías determinadas. Esas energías son exactamente las energías de los modos normales de nuestro pozo — no puede haber electrones estables dentro del átomo con energías intermedias. Un electrón puede pasar de un modo normal a otro (por ejemplo, del de tres nodos al de dos) y emitir un fotón cuya energía es la diferencia entre ambos “escalones energéticos”. Todo encaja, incluso aunque esto sea una aproximación idealizada.

Pero es que hay más: imagina que no se trata de un electrón, sino de un átomo en el interior de un cristal. Una vez más, las fuerzas que mantienen al átomo del cristal en la región en la que se encuentra no son infinitamente intensas como en nuestro pozo, pero es una abstracción útil para pensar en el problema. Imagina el átomo vibrando dentro del cristal debido a su temperatura (cuanto más caliente, más rápido vibra). En vez de hablar de temperatura, podríamos hablar de “modo normal” y el número de nodos que tiene. Si está muy caliente podría tener diez, un poco más frío cinco, más frío tres, dos...

Pero la mínima energía de oscilación del átomo en el cristal es la del estado fundamental con sus dos nodos. Ni por radiación ni por ningún otro método podré conseguir que el átomo vibre más lentamente que en el estado fundamental — es imposible quitarle toda la energía de vibración al átomo, porque siempre tiene una “energía residual”. Esa energía se denomina *energía del punto cero*—del alemán *Nullpunktenergie*, propuesto por Einstein y Stern—, y es una consecuencia inevitable de la naturaleza ondulatoria de la materia.

Espero que, después de todo este rollo, tu moral haya subido unos cuantos enteros y veas que todos los artículos anteriores, aunque simples comparados con un libro de texto “de verdad” sobre cuántica, sí te proporcionan un conocimiento básico del comportamiento de la materia y te permiten analizar sistemas físicos para extraer conclusiones sobre ellos, algunas de ellas muy raras.

En el siguiente artículo de la serie estudiaremos un pozo de potencial parecido a éste pero algo más complejo, y con conclusiones también extrañas — un *pozo finito*.

El pozo de potencial finito

Continuamos hoy buceando en las procelosas aguas de la mecánica cuántica en la serie Cuántica sin fórmulas. Tras establecer unos fundamentos teóricos más o menos claros, en la última entrada de la serie nos dedicamos a aplicar esos conceptos teóricos a un caso concreto y relativamente sencillo de formular: el del pozo de potencial infinito. Como espero que recuerdes, ese simple experimento mental nos llevó a

conclusiones contrarias a la intuición, como el hecho de que no todas las energías están permitidas, o que sea imposible encontrar la partícula en lugares en los que la física clásica le permite estar, o la existencia de la *energía del punto cero*.

Hoy vamos a estudiar un caso similar al de esa entrada, pero la aparentemente leve diferencia entre ambos nos llevará a conclusiones aún más extrañas que las del pozo infinito y nos abrirá las puertas de fenómenos cuánticos muy interesantes. Estudiaremos el **pozo de potencial finito**.

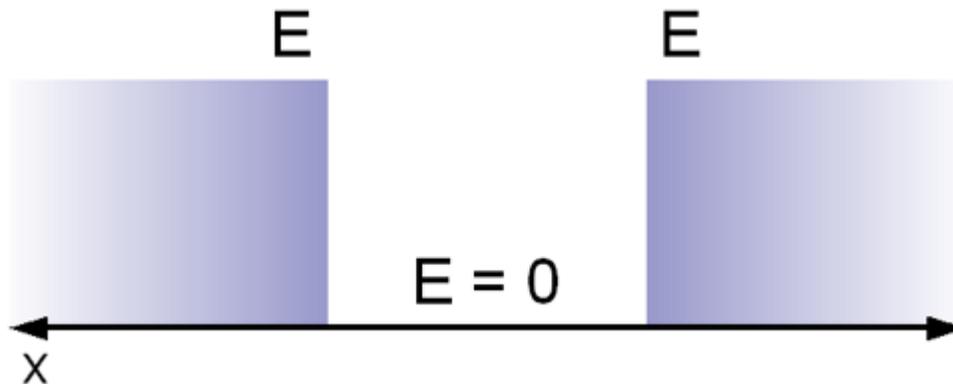
Lamento ser repetitivo en esta serie, pero tocan los avisos de rigor. En primer lugar, se trata de artículos densos y bastante abstractos, de modo que no te desmoralices si al principio te pegas con una pared: desde luego, si no lo has hecho aún deberías empezar la serie desde el principio o te va a costar bastante entender este artículo, pero incluso entonces puede que esto te parezca un ladrillo. Si es así, tal vez sea mejor que leas alguna otra cosa, porque por mucho que me esfuerce por hacerlo asequible esto no deja de ser difícil de asimilar.

En segundo lugar, si eres físico como yo leer esta entrada puede provocarte urticaria, escozor espiritual y un intenso dolor en las meninges: me dispongo a realizar, como en muchos artículos de esta serie, simplificaciones que pueden parecerle infames. Es el precio que pago gustoso a cambio de tratar de explicar estas cosas en un lenguaje más o menos llano, pero entiendo que puedes no compartir esta filosofía — si es así, no merece la pena que sufras leyendo esto.

Dicho todo esto, aunque espero que aún tengas fresco en la memoria el artículo del potencial infinito, recordemos algunos conceptos básicos de los que hablamos allí, puesto que este caso es bastante parecido en su planteamiento inicial. Supongamos que tenemos una partícula —un electrón, para que sea igual que en la entrada anterior— que se mueve libremente en una dimensión, a lo largo de una recta infinitamente larga.

En la entrada anterior “encerramos” al electrón dentro de un segmento de esa recta: establecimos que era imposible que se encontrara fuera de ese segmento, suponiendo que la energía necesaria para escapar fuera infinita (de ahí el nombre de “*pozo de potencial infinito*”). Al igual que en ese artículo, en general voy a hablar de la energía y no del potencial, porque la diferencia entre ambos es irrelevante para este ejemplo.

Supongamos que hoy somos algo menos exigentes que en aquel artículo: **en vez de tener escalones de energía infinita a los lados del segmento, encerramos al electrón entre escalones de energía finita**. Al igual que en el caso anterior, representaremos la energía necesaria para alcanzar cada zona de la recta en el eje y , y la recta en sí en el eje x . De este modo, la energía necesaria para alcanzar una región de la recta es la altura de la zona sombreada:



Como puedes ver, nuestro electrón va a estar, igual que en el artículo anterior, dentro de un “pozo” de energía, pero en este caso el pozo no es infinitamente profundo. Al igual que hicimos entonces, estudiemos este problema desde el punto de vista de la física clásica, tan familiar, tan intuitiva y tan falsa, antes de

hacerlo desde el punto de vista cuántico (primero desde el punto de vista ondulatorio y luego desde el corpuscular).

Supongamos que el electrón que ponemos dentro del pozo no tiene suficiente energía como para escapar de él: tiene, por ejemplo, la mitad de la energía necesaria. En este caso, la solución clásica a nuestro experimento mental es exactamente la misma que era en el artículo anterior — *si se está moviendo, el electrón llegará a la barrera y, puesto que no tiene suficiente energía para seguir, rebotará en ella y volverá por donde vino; chocará con el otro escalón de energía y volverá otra vez, y así infinitamente.*

El comportamiento del electrón es exactamente el mismo que antes porque, si no tiene suficiente energía para escapar, lo mismo le da que le falte un poquito, mucha o (como sucedía en el artículo anterior) infinita energía para escapar. **En mecánica clásica lo esencial es que no puede escapar, le falte poco o infinito, y punto.**

De hecho, este experimento mental —como el de la entrada anterior— no tiene demasiado interés desde el punto de vista clásico, no es más que una partícula rebotando entre los bordes de la “caja” en la que se encuentra o escapando si tiene suficiente energía para hacerlo. *Pero al mirar el problema desde el punto de vista cuántico, la cosa cambia mucho...*

En el artículo anterior establecimos como una condición absoluta que el electrón sólo podía encontrarse dentro del pozo: era completamente imposible, por definición, que escapase de él (de ahí el requisito de “energía infinita” para escapar). Pero, de acuerdo con la hipótesis de de Broglie, el electrón es una onda, de modo que *¿cómo describir en términos ondulatorios las condiciones de aquel pozo infinito?*

Disculpa que vuelva de nuevo al ejemplo del artículo anterior, pero si entiendes la diferencia entre las condiciones de ambos estarás muy, muy cerca de entender el núcleo del artículo de hoy, de modo que te pido paciencia. En términos ondulatorios, nuestro “pozo infinito” tenía tres regiones o medios diferentes. Uno de ellos, el “interior” del pozo, permitía que la onda del electrón se propagase libremente. Las otras dos regiones a izquierda y derecha, por el contrario, no permitían la transmisión de la onda en absoluto.

Puedes pensar en esas dos regiones de energía infinita del siguiente modo: *es como si ahí hubiera un material que reflejase la onda del electrón completamente (el electrón “rebota” en la pared), y que absorbiera la onda del electrón instantánea y completamente cuando ésta intenta atravesarlo.*

Por el contrario, el pozo finito de hoy tiene dos regiones a los lados en las que la onda no puede penetrar (no tiene suficiente energía para hacerlo, lo mismo que en el pozo infinito), pero con una diferencia esencial: la onda no tiene suficiente energía para penetrar la barrera, **pero no le falta infinita energía, sino una cantidad finita.** De hecho, no hay más que un posible pozo infinito en cuanto a la profundidad (que es, por supuesto, infinita) *pero hay muchísimos pozos finitos posibles, unos más profundos que otros.*

En términos de la física clásica, como he dicho antes, la profundidad del pozo es irrelevante si el electrón no tiene energía para escapar, pero en términos ondulatorios sí hay una diferencia. Si la onda no tiene suficiente energía para penetrar en la región “prohibida”, siempre acabará reflejándose en ella y volviendo por donde vino, pero parte de ella es capaz de entrar ligeramente en la región de mayor energía.

Voy a intentar explicarlo utilizando el ejemplo de ondas luminosas y materiales absorbentes. Cuando la onda se encuentra con la barrera energética de altura infinita, es como si la luz encontrase un material con un coeficiente de absorción infinito — antes de que la onda pueda recorrer ninguna distancia, toda su energía desaparece. En ese momento, el material vuelve a emitir la onda hacia el lado contrario, con lo que se produce una reflexión sin que la onda penetre lo más mínimo en él.

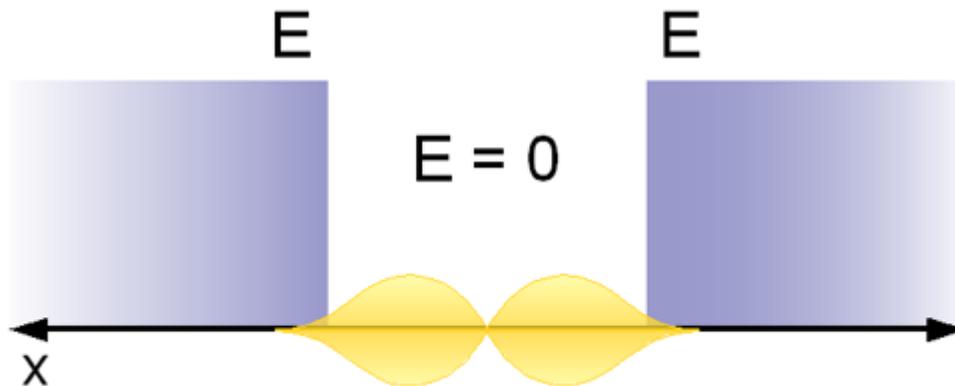
Pero imaginemos que la barrera energética no es infinita. Entonces aparece una variable que voy a llamar “defecto de energía”, que es la diferencia entre la energía necesaria para penetrar en el nuevo material y la energía de la que dispone la onda. Es evidente que, si hay un defecto de energía, la onda va a reflejarse y volver por donde vino; pero el valor del defecto de energía determina la intensidad de la onda que es capaz de penetrar hasta cierta distancia en el nuevo material.

Si el defecto de energía es muy grande (la barrera es mucho más alta que la energía de la onda), la onda es absorbida por el material muy rápido, **pero no infinitamente rápido, pues el defecto de energía ya no es**

infinito. Es algo parecido a lo que le sucede al Coyote cuando persigue al Correcaminos y camina sobre el vacío de un precipicio: no cae instantáneamente, sino que tarda un tiempo en darse cuenta de que no hay suelo bajo sus pies. En el caso de nuestra onda, el “tiempo que tarda en darse cuenta” depende del defecto de energía.

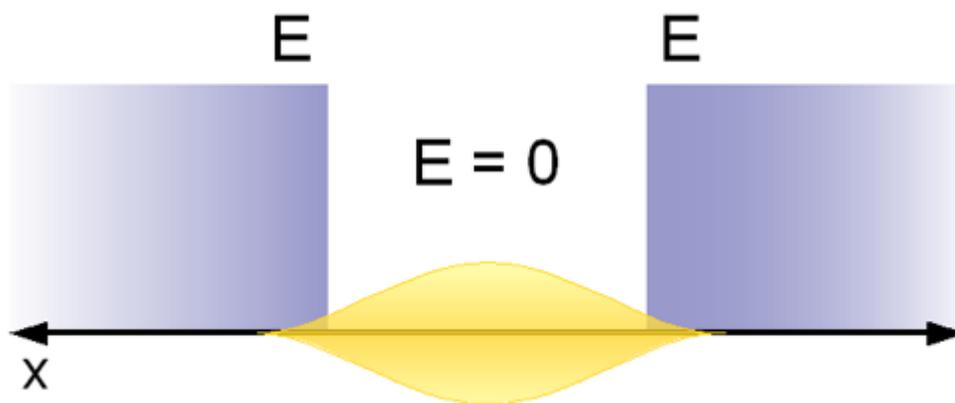
Así, si el defecto de energía es muy pequeño (la onda no tiene suficiente energía como para penetrar en la nueva región, pero por muy poquito), la onda disminuye de intensidad según se mueve por la nueva región, hasta que finalmente “rebota” y vuelve a la región permitida.

En términos algo más técnicos, lo que se produce es una *onda evanescente*, cuya amplitud disminuye exponencialmente con la distancia. Si el defecto de energía es muy grande, esta disminución es muy brusca, de modo que ni siquiera se nota que la onda haya penetrado lo más mínimo en la barrera. Si el defecto es muy pequeño, el decrecimiento de la amplitud de la onda es más suave. Por cierto, si sabes de estas cosas, en todos los dibujos del artículo de hoy (que no son tan buenos como los del anterior, pues estamos de vacaciones y sin el ordenador habitual de modo que Geli ha hecho lo que ha podido) la onda parece acabar en un punto dado, pero estrictamente se trata de una exponencial negativa con el eje x como asíntota. Lo esencial es la forma cualitativa de la onda:



Pero ¿qué quiere decir todo esto en términos de nuestro electrón? Que las ondas que resuelven la ecuación de Schrödinger en el interior de nuestro pozo finito son muy parecidas a las del artículo anterior, *pero no son iguales*. La mayor parte de sus características son iguales, y no voy a extenderme en ellas tanto como lo hice en aquella entrada, pero puedes verlas en el dibujo: sólo hay unos valores posibles de la longitud de onda, existe un estado fundamental cuya longitud de onda es el doble de la anchura del pozo, etc.

Pero supongamos que la energía del electrón es casi la suficiente como para escapar del pozo. Observa el diagrama del estado fundamental y verás la consecuencia tremenda, revolucionaria, de la naturaleza ondulatoria de la materia cuando el pozo no es infinito:



Como he dicho al hablar de las ondas evanescentes, la onda no se acaba abruptamente en el borde del pozo como sucedía en el caso del pozo infinito, sino que se extiende más allá. Naturalmente, si el defecto de energía fuera enorme esa “extensión” por la región prohibida clásicamente sería muy pequeña, pero grande o minúscula está ahí, *¡y eso es muy raro!*

Es relativamente fácil aceptar que una onda que se encuentra con un material que no puede atravesar sea capaz de penetrar ligeramente en él antes de ser devuelta al lugar del que vino... pero recuerda lo que significa la intensidad de la onda del electrón: **es una medida de la probabilidad de encontrarlo en un lugar dado**. Fíjate una vez más en el dibujo de arriba.

¡El electrón puede estar fuera del pozo! Vale, la probabilidad de encontrarlo fuera del pozo es muy pequeña comparada con la de verlo dentro, y según nos alejamos del borde del pozo la probabilidad disminuye exponencialmente, pero de lo que no hay duda es de una cosa: es posible encontrar al electrón fuera del pozo a pesar de que no tiene suficiente energía para estar ahí clásicamente.

Naturalmente, el electrón tiene todo el derecho del mundo a estar ahí: el problema no lo tienen el electrón ni la formulación de Schrödinger, sino la mecánica clásica. La cuestión es que, en cuántica, las variables que determinan la posición y velocidad del electrón son “borrosas” por su condición de onda, y por lo tanto es posible encontrarlo en lugares —o con velocidades— imposibles según el buen Newton.

Si has seguido la serie desde el principio (y, si no es así, ¿qué haces leyendo esto?) ya sabes que la formulación matemática cuántica predice qué mediremos, y con qué probabilidad, si observamos el electrón. Lo que no hace es decirnos qué sucede “realmente” según el electrón penetra en la región prohibida. De hecho, como bien sabes si eres fiel seguidor de *El Tamiz*, la propia pregunta no tiene sentido de acuerdo con Heisenberg y compañía.

Sin embargo, una interpretación muy común de lo que sucede en términos de partículas (espero que la explicación ondulatoria te haya quedado más o menos clara) es la siguiente:

Como recordarás de entradas anteriores, muchas de las variables que describen el estado del electrón están asociadas a pares, de modo que cuando una se conoce con mucha precisión la otra se vuelve “borrosa”. Esto sucede con la energía y el tiempo, como mencionamos al hablar de las relaciones de indeterminación de Heisenberg — si enfocamos muy bien la energía, el tiempo se vuelve algo borroso y viceversa, como sucedía con el momento lineal y la posición de las partículas.

Esto quiere decir, de acuerdo con la interpretación que acabo de mencionar, que el electrón puede variar su energía mientras lo haga durante un tiempo muy corto: en la escala macroscópica la energía se conserva, pero esta conservación se vuelve borrosa cuando nos fijamos en períodos de tiempo muy cortos. Pero permite que ponga otro ejemplo ligeramente estúpido pero tal vez revelador.

Imagina que miras un electrón, y puedes mirarlo de dos maneras (¿recuerdas a los *heisenbéricos miopes*?) — o bien lo miras cada segundo, fijándote muy cuidadosamente en la energía que tiene, o bien lo miras cada milésima de segundo, pero sin fijarte mucho en su energía (no, la propia naturaleza de las cosas hace que no puedas mirarlo muy rápidamente y saber muy exactamente qué energía tiene). De la primera manera, podrías observar lo siguiente: en el segundo 1 tiene una energía de 0,55. En el segundo 2 tiene una energía de 0,55. En el segundo 3 tiene una energía de 0,55. Qué alivio, ¡se cumple el principio de conservación de la energía! Pero *¿se seguiría cumpliendo si lo mirásemos más rápidamente? ¿Es posible que entre el segundo 1 y el 2 haya tenido más energía pero no lo hayamos visto?*

De la segunda manera, podrías ver lo siguiente: en el segundo 0,001 tiene una energía de unos 0,55 con un posible error de 0,1 (es decir, entre 0,45 y 0,65). En el segundo 0,002 tiene una energía de unos 0,57 con un posible error de 0,1 (es decir, entre 0,47 y 0,67). En el segundo 0,003 tiene una energía de unos 0,53 con un posible error de 0,1 (entre 0,43 y 0,63). *¿No se cumple la conservación de la energía? No podemos estar seguros, porque al mirar el electrón tan rápidamente no somos capaces de determinar con precisión la energía que tiene.*

De modo que, de cualquiera de las dos maneras, nos es imposible saber exactamente qué energía tiene el electrón todo el tiempo. Es perfectamente posible que el electrón se comporte como un buen electrón, obediente y “clásico”, cuando lo miramos cada segundo... pero que en el período de tiempo en el que no lo

miramos tenga más energía de la que debería, volviéndose un electrón rebelde y desobediente, para luego volver a la que tenía al principio, como si supiera que vamos a volver a mirarlo de nuevo y se presente una vez más como un electrón obediente.

Naturalmente, el electrón no sabe que vamos a mirarlo ni nada parecido: **la limitación se debe a la propia naturaleza “borrosa” de la materia, que hace que no podamos determinar la conservación de la energía exactamente salvo que lo hagamos para períodos de tiempo relativamente largos.**

Así que es posible interpretar lo que le sucede al electrón de la siguiente manera: *el electrón puede “tomar prestada” energía y añadirla a la suya propia durante un período de tiempo muy corto.* Mientras dispone de esa energía “extra”, es capaz de penetrar en la región prohibida, pero puesto que no puede quedársela durante mucho tiempo, debe devolverla y volver a la región en la que sí puede existir, “rebotando” en la barrera. Al final, el electrón acaba rebotando, pero en vez de hacerlo justo en el borde como cuando se trataba de un pozo infinito, lo hace como si fuera una especie de almohada, en la que puede hundirse una distancia determinada antes de volver.

Claro, esto no podía suceder en el caso del pozo infinito, porque el electrón hubiera necesitado “tomar prestada” una energía infinita para entrar, lo cual hubiera requerido que el intervalo de tiempo hubiera sido nulo, con lo que no podría llegar a ninguna parte. De ahí que la diferencia entre no tener suficiente energía por un poquito o no tener suficiente energía por infinito sea tan importante: porque si no se trata de una energía infinita el electrón puede ser capaz de “robarla” durante un tiempo corto y entrar en una zona en la que, de acuerdo con la teoría clásica, no podría llegar.

Estoy convencido de que te vas a hacer la misma pregunta que me hice yo cuando leí esta interpretación por primera vez: sí, vale, el electrón “toma prestada” energía durante un corto tiempo y luego la “devuelve” antes de que podamos darnos cuenta... pero, **¿de dónde demonios la coge? ¿de dónde sale esa energía “extra”?**

La respuesta no es fácil de aceptar, pero no tengo otra: no la saca de ninguna “parte”. La propia energía no está definida para períodos de tiempo cortos, y oscila como el agua de una piscina — vista de lejos y durante mucho tiempo, la superficie de la piscina es lisa y estática. Vista de cerca y en períodos de tiempo cortos, la superficie sube y baja en unos lugares y otros. De hecho, más que hablar de “energía robada” o “prestada” me gusta hablar de energía “borrosa”. Pero, al final, todo se reduce a lo de siempre: no es posible comprender *realmente* el comportamiento cuántico de la materia por estar tan lejos de cualquier cosa que podamos percibir. Sólo podemos aspirar a atisbar esbozos de su verdadera naturaleza (la otra opción es, ya sabes, “¡cállate y calcula!”).

Dentro de un par de semanas (quiero dejar un artículo más ligerito en medio para no apabullar) seguiremos con una entrada muy relacionada con ésta en la que hablaremos de un fenómeno que aparece muy a menudo en medios diversos y que, espero, tras entender la de hoy no tendrás ningún problema en comprender perfectamente — hablaremos del *efecto túnel*.

El efecto túnel

Tras un paréntesis más largo de lo que planeábamos (hemos estado sin una conexión decente a la red durante bastante tiempo), y aunque todavía seguimos de vacaciones unos días más, continuamos hoy con el artículo prometido de la serie [Cuántica sin fórmulas](#). Desde luego, pedimos disculpas por haber tardado bastante más en dar señales de vida de lo planeado.

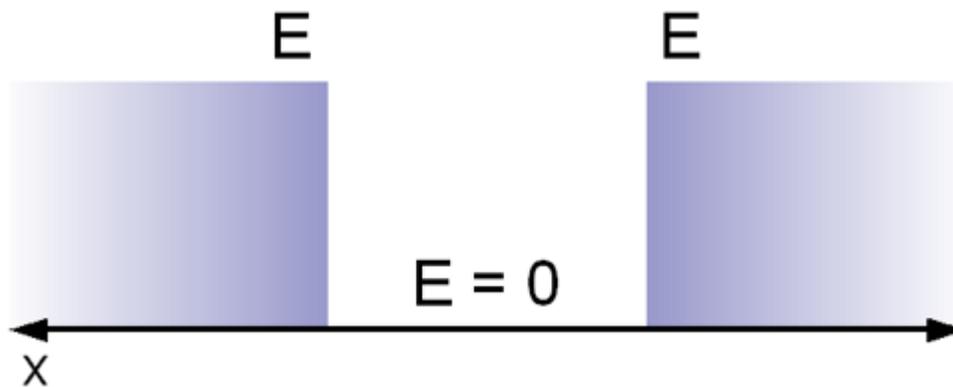
En el último artículo de la serie hablamos acerca del [Pozo de potencial finito](#), llegando (como casi siempre en esta serie) a resultados contrarios a nuestra intuición, pero inevitables si aceptamos las formulaciones de Schrödinger y Heisenberg. Como espero que recuerdes, lo

más extraño de todo era la capacidad de una partícula de llegar a lugares en los que, de acuerdo con la física clásica, no tiene suficiente energía para estar.

Hoy modificaremos ligeramente nuestro “pozo de energía” una vez más: en vez de limitarnos a tener una región en el interior del pozo y las paredes a los lados, complicaremos la cosa un poco más para hacerla más realista. Las conclusiones de nuestro experimento mental de hoy, si has entendido la serie hasta ahora, probablemente no serán demasiado chocantes — si es así y no te sorprendes, enhorabuena porque tanto leer y pensar ha servido de algo. Lo más interesante de la entrada de hoy no es tanto la conclusión inmediata del experimento mental, sino su importancia en el mundo a nuestro alrededor y como prueba de que todo esto de lo que hablamos no es simplemente palabrería: los globos de helio son una prueba de ello, como verás en un momento.

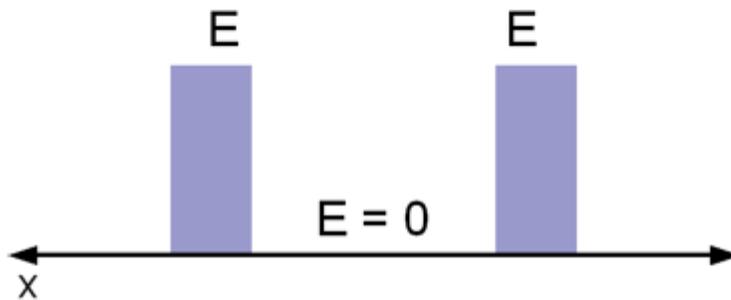
Espero que veas, además, cómo algo de lo que has oído hablar muchas veces (aquí en *El Tamiz*, sin ir más lejos) tiene una explicación perfectamente lógica y no demasiado complicada, si tienes la base necesaria para entenderla antes: y espero que, a estas alturas de la serie, tengas esa base. Hablaremos del **efecto túnel**.

Nuestro “pozo finito” de la entrada anterior tenía, como espero que recuerdes, tres regiones distintas. En el centro se encontraba el “interior” del pozo, en el que la energía requerida era nula y la partícula —en nuestro ejemplo, un electrón— tenía derecho a estar de acuerdo con Newton. A los lados de esa región central había sendos “escalones de energía”, de modo que el pozo estaba confinado por esas dos regiones de mayor energía:



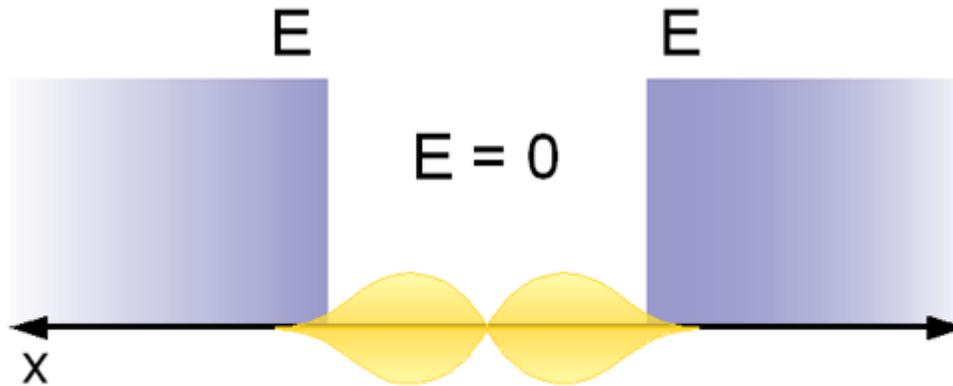
Como siempre, en la horizontal se representa la dimensión espacial y en la vertical la energía necesaria para estar en ese punto. Y, como siempre, este tipo de diagramas se llaman “pozos de potencial”, pero puesto que las conclusiones son equivalentes al usar energía y casi todos estamos más familiarizados con ese concepto que con el de potencial, aquí usamos diagramas de energía.

El dibujo de arriba es algo así como un pozo en el suelo, de modo que las regiones laterales son el terreno y la central el fondo del pozo. Pero supongamos que esas dos regiones laterales no se extienden indefinidamente, sino que llega un momento en el que se acaban, y volvemos a tener una energía necesaria nula más allá de ellas: en ese caso no se trata tanto de un “pozo” como de una “caja” o un “cuenco”, que tiene bordes que confinan algo dentro, pero más allá de esos bordes la energía requerida es la misma que dentro de la caja:



Puede parecer al principio que la diferencia entre el diagrama de arriba y el de abajo es muy pequeña: al fin y al cabo, si estás encerrado dentro de un pozo o una caja, ¿qué más da si más allá de las paredes hay algo, o las paredes se extienden hasta el infinito? Ah, pero a estas alturas, estimado y perspicaz lector de *El Tamiz*, espero que respondas rápidamente “¡Claro que importa, y mucho!”. Por supuesto que importa, porque de acuerdo con la mecánica cuántica **no estás encerrado de manera absoluta**.

Como vimos en el artículo anterior de la serie, existe una posibilidad de encontrar el electrón en la región “prohibida”. Esa posibilidad depende de la energía que le falta al electrón y de la distancia penetrada en la región “prohibida”, de modo que la probabilidad disminuye de forma exponencial con la distancia, pero no es nula:



En la región interior, en la que el electrón tiene derecho a estar clásicamente, tenemos una onda estacionaria que describimos en la entrada anterior. Dentro de la barrera, la función de onda disminuye exponencialmente. *Imagina entonces que la región prohibida, la “pared de la caja” es muy delgada.* Sí, la función de onda en la pared disminuye muy rápidamente, pero cuando llegamos al borde exterior de la pared la amplitud de la onda sigue siendo no nula, de modo que al llegar al exterior tenemos una onda de amplitud más pequeña que la del interior, pero que está innegablemente ahí.

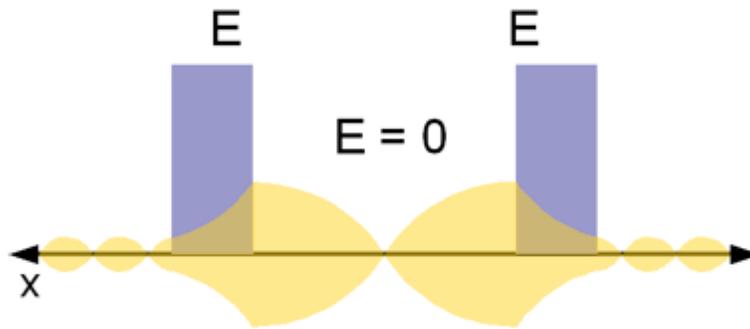
Puedes imaginarlo, en términos de ondas luminosas, de la siguiente manera: la pared de la caja es un material absorbente. Pero sólo hay dos maneras de absorber completamente la onda de modo que no escape de la caja: o bien el material es absolutamente opaco y absorbente (la energía de la barrera es infinita, como en el artículo del [Pozo infinito](#)), o bien el espesor del material es infinito. En cualquier otra situación una parte de la luz conseguirá atravesar la barrera, aunque sea una parte muy pequeña. Una vez más la naturaleza ondulatoria, “borrosa” de la materia hace que las partículas se comporten de maneras incompatibles con la mecánica clásica.

Naturalmente, si la energía de la pared es muy grande comparada con la del electrón, o su espesor es suficientemente grande, la probabilidad de encontrar al electrón fuera de la caja es prácticamente nula. Pero, en cualquier caso, van a suceder dos cosas que no ocurrirían cuando las paredes, como en la entrega anterior de la serie, eran infinitas:

En primer lugar, **existe una onda “normal”, que no disminuye exponencialmente, fuera de la caja**, puesto que si el electrón se encuentra ahí tiene la suficiente energía como para moverse libremente de acuerdo con la mecánica clásica. El material fuera de las paredes es “transparente”. Esa onda puede tener una amplitud muy pequeña si las paredes eran gruesas o de gran energía, pero siempre va a estar ahí, y representa al electrón que ha conseguido escapar de la caja.

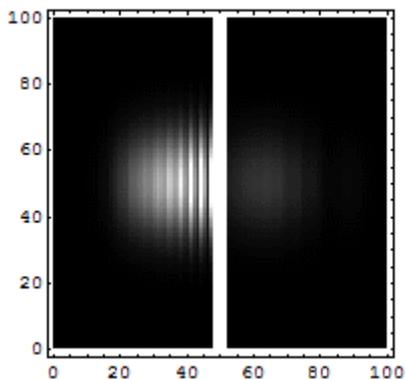
En segundo lugar, recuerda uno de los conceptos que establecimos al hablar de la [mecánica ondulatoria de Schrödinger](#): la probabilidad total de encontrar al electrón en alguna parte es siempre del 100%. Esto quiere decir que, si existe una probabilidad no nula de encontrar al electrón fuera de la caja, **la probabilidad de encontrarlo dentro de la caja es más pequeña que antes**. Cuanto más delgada sea la barrera y menor sea su energía, más se parecerá la onda dentro de la caja a la onda fuera, y más parecida será la probabilidad de encontrar al electrón en un punto dentro o fuera de la caja. Por el contrario, si las paredes son gruesas y “altas”, la onda dentro de la caja será casi idéntica a la del caso del pozo finito (tal vez un poquito más baja), mientras que la onda fuera de la caja será casi inapreciable.

El resultado gráfico es algo así:



También puede ayudarte a verlo la siguiente animación*, en la que la probabilidad se representa con el brillo de cada punto en vez de con la altura de una función. En ella se observa un paquete de ondas que incide desde la izquierda sobre una barrera (la línea vertical gruesa). La mayor parte de la onda se refleja en la barrera (lo que representa la probabilidad de que el electrón rebote en la barrera), pero hay un tenue “fantasma” que atraviesa la barrera y continúa su camino por el otro lado:

**La animación solo es visible en el navegador WEB. Aquí la he subido como una imagen jpg.
NOTA del editor.*



Puesto que parece que el electrón atraviesa una barrera que no debería atravesar, como si hiciera un “túnel” a través de ella, este fenómeno se denomina *efecto túnel*. Desde luego, no hay ningún túnel y el electrón tiene todo el derecho del mundo a atravesar la barrera. Y, por supuesto, no tiene por qué tratarse de un electrón: cualquier partícula “encerrada” dentro de un potencial de cualquier tipo experimenta este fenómeno.

Como sucede con tantos otros efectos cuánticos, las probabilidades involucradas suelen ser tan pequeñas que no somos conscientes de ellos: si no fuera así hubiésemos desarrollado una mecánica que los incluyese desde el principio, y serían perfectamente intuitivos para nosotros. Pero esto no quiere decir que nunca se produzca el efecto túnel: *se produce todo el tiempo en la naturaleza y explica cosas que eran imposibles de entender antes de conocerlo*.

Algunos núcleos atómicos, al cabo de un tiempo relativamente corto, se desintegran de forma espontánea en otros más ligeros, liberando *partículas alfa* (núcleos de helio, formados por dos protones y dos neutrones) en el proceso. Uno de los ejemplos más conocidos es el del uranio-238, el isótopo más común del uranio (más del 99% del uranio natural es uranio-238). Como probablemente sabes, el uranio-238 es inestable y al cabo del tiempo se desintegra. Aquí tienes la reacción nuclear en cuestión, un ejemplo de lo que se conoce como *desintegración alfa*:



Lo que se produce entonces es un átomo de torio y un núcleo de helio (la partícula alfa). De hecho, **la mayor parte del helio que existe en la Tierra ahora mismo es el resultado de esta reacción de desintegración**. Y esa desintegración se produce en un momento determinado para cada átomo de uranio, *un momento que es imposible predecir*. Los científicos eran capaces de estimar la *vida media* de los átomos de uranio observando enormes cantidades de ellos y midiendo la rapidez con la que se desintegraban: esa vida media es, en el caso del uranio-238, de unos 4 460 millones de años, similar a la edad de la Tierra, de ahí que se utilice como método de datación a escala geológica.

Dicho de otra manera, si tienes un número muy grande de átomos de uranio-238 y esperas 4 460 millones de años, más o menos la mitad de los átomos iniciales se habrán desintegrado. Pero si miras un único átomo de uranio-238 de esa muestra, no hay manera posible de saber cuándo va a desintegrarse: puede hacerlo dos segundos después de que empieces a mirarlo, o tal vez no lo haga durante la vida del Universo. *¿Por qué diablos sucede esto, y qué determina que se produzca en uno u otro momento?*



Georgiy Antonovich Gamov (1904-1968).

La respuesta la dio el genial Georgiy Antonovich Gamov (más conocido como George Gamow tras su huida de la Unión Soviética) en 1928, aplicando la mecánica ondulatoria de Schrödinger al núcleo atómico y utilizando las condiciones de contorno adecuadas. La fuerza nuclear que contiene las partículas en el núcleo actúa como una “caja de energía” similar a las que hemos dibujado en este artículo. Dependiendo de la estructura del núcleo, la “altura” y el “espesor” de las paredes de la caja es diferente.

De acuerdo con la mecánica clásica, *las partículas del núcleo están confinadas en él y nunca pueden escapar*, pues no tienen la energía suficiente, pero la mecánica cuántica y el efecto túnel permitían que, a veces, fuera posible encontrar una de esas partículas fuera del núcleo. Al calcular la probabilidad de que esto ocurriera, la vida media y la energía de las partículas alfa producidas utilizando las ecuaciones de Schrödinger, Gamov obtuvo resultados que coincidían perfectamente con los experimentales — **la desintegración alfa era una consecuencia inevitable de la naturaleza cuántica de la materia.**

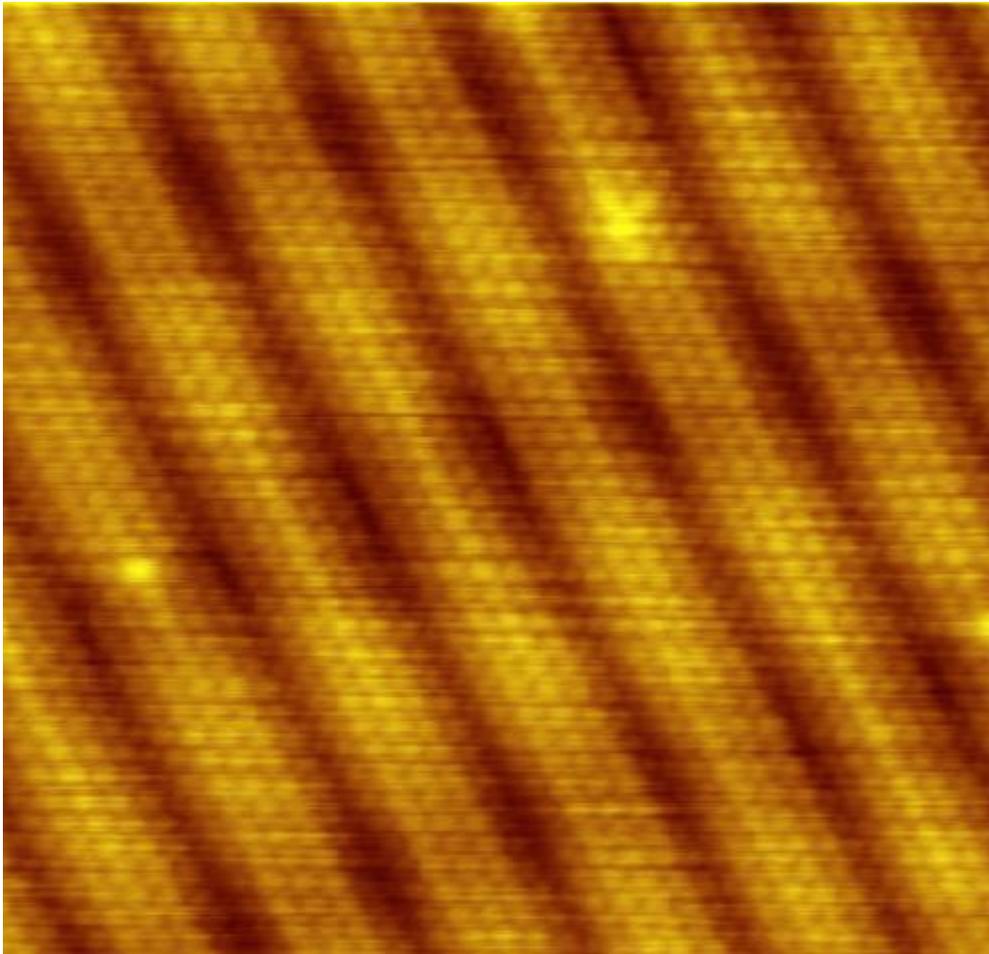
Desde el punto de vista clásico, debía haber algo que desencadenase la desintegración, y el hecho de que no pudiéramos predecir cuándo se produciría era el reflejo de tener una información incompleta sobre el sistema (pero los físicos clásicos eran incapaces de decir qué era ese algo que desconocíamos o por qué no podíamos detectarlo). Pero, de acuerdo con Gamov, la incapacidad de predecir ese momento se debe a la propia naturaleza probabilística de los fenómenos naturales: no hay nada más allá que determine lo que no podemos predecir, *la Naturaleza es impredecible por su carácter cuántico.*

De modo que, cuando sostengas un globo de helio en la mano, recuerda que la mayor parte de ese helio es el resultado de una partícula alfa que escapa de un núcleo de uranio debido al efecto túnel. La mecánica cuántica no es sólo un manojo de ecuaciones, refleja la naturaleza del Universo en el que vivimos. Pero es que la cosa no acaba ahí.

Como he dicho al principio, la amplitud de la onda dentro de la zona “prohibida” disminuye muy rápidamente: *lo hace de forma exponencial.* Esto quiere decir que si, por ejemplo, la barrera se hace el doble de gruesa de modo que el electrón debe recorrer el doble de distancia por la zona “prohibida”, la probabilidad de encontrarlo al otro lado *no es la mitad:* es mucho más pequeña debido a la disminución exponencial.

Dicho de otro modo: **la probabilidad de que el electrón atraviese la barrera es extraordinariamente sensible al espesor de la barrera**, de modo que cambia bruscamente cuando lo hace el espesor, mucho más bruscamente que el propio espesor. Esto hace que se pueda emplear el efecto túnel para medir distancias con una precisión absolutamente increíble. Permite que, como de costumbre, trate de explicar cómo se logra esto de manera simple.

Imagina la siguiente situación: tenemos electrones confinados en una punta de metal finísima, y acercamos esa punta de metal a un material determinado. Los electrones no tienen suficiente energía como para saltar del metal al material... *pero de acuerdo con la mecánica cuántica, algunos de ellos inevitablemente lo harán*. La cantidad de electrones que lo consiguen “saltar” a través del espacio de separación entre nuestra punta de metal y el material **depende de la distancia entre la punta y el material mediante el efecto túnel**. Al variar la distancia de separación, la cantidad de electrones que “tunelean” varía de una manera tremendamente brusca — *exponencialmente* brusca, lo que permite determinar esa distancia de separación con una precisión extrema.



Superficie de oro vista a través de un microscopio de efecto túnel. Pueden distinguirse los átomos individuales.

Tan extrema, de hecho, que es posible alcanzar una resolución lateral de unos 0,1 nanómetros y una resolución en profundidad de unos 0,01 nanómetros, lo que permite, al traducir esa información a imágenes que podemos ver en una pantalla, *visualizar átomos*

individuales. Si has entendido este artículo, comprendes como funciona un *microscopio de efecto túnel*.

¿Verdad que es irónico? Un efecto cuántico que hace imposible predecir cuándo cualquiera de esos electrones va a atravesar la barrera, un efecto que vuelve nuestro mundo “borroso”, nos permite ver la materia con una precisión y nitidez que no sería posible si el Universo fuera clásico. *Nitidez a través de la turbiedad: la cuántica en estado puro*.

En los próximos artículos de la serie empezaremos a zambullirnos en la llamada “cuántica moderna”, empezando con la elegantísima teoría de Paul Dirac y su notación bra-ket. Comenzaremos hablando del concepto de [estado cuántico](#).

Estados cuánticos

El nacimiento de la nueva serie sobre los [Premios Nobel](#) ha modificado los planes de la serie de [Cuántica sin fórmulas](#): ya que hablaremos en aquella serie más en detalle sobre el valor de la constante de Planck, el artículo que habíamos anunciado para esta serie no tiene demasiado sentido; nos saltaremos, pues, el interludio en el que hablaríamos precisamente de esa constante para seguir con el recorrido normal por la cuántica.

Si has entendido los artículos de la serie hasta el momento (para los que no la han leído, mi recomendación es empezar [por el principio](#)), ya tienes superada –hasta donde puede estarlo– la llamada “*cuántica antigua*”: tienes una idea básica de la naturaleza cuántica del Universo y las consecuencias que eso tiene sobre los fenómenos que observamos; conoces las formulaciones de Heisenberg y Schrödinger y el hecho de que son equivalentes; entiendes el principio de indeterminación, la dualidad onda-corpúsculo de la materia... incluso, espero, has razonado conmigo y aplicado esos conceptos a casos concretos en los que se han puesto de manifiesto algunas de las “cosas raras” que suceden debido a la cuántica (el pozo de potencial infinito, el de potencial finito y el efecto túnel). A partir de ahora iremos más allá de la “*cuántica antigua*”.

En los próximos artículos (aún no sé cuántos harán falta) daremos un paso más en nuestro conocimiento de la cuántica avanzando más allá de Heisenberg y Schrödinger; seguiremos, en primer lugar, los pasos de Paul Dirac para establecer una notación complementaria (más moderna que las de aquellos dos físicos), y a continuación utilizaremos nuestros nuevos conocimientos para “atacar” otros problemas fascinantes relacionados con la cuántica — el *principio de exclusión de Pauli*, el *entrelazamiento cuántico* y otros asuntos igualmente fascinantes, asuntos que, sin ampliar algo nuestra base, no podríamos comprender igual de bien.

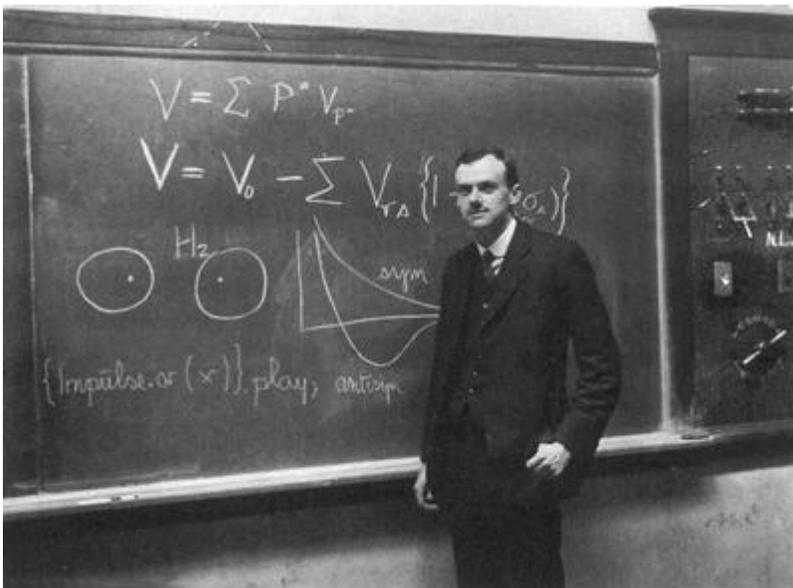
Digo esto porque nos esperan, a corto plazo, algunos artículos realmente abstractos (¡como si el resto de la serie hubiera sido fácil!), en los que hablaremos de cosas realmente raras y disociadas de nuestra experiencia, como hiperesferas de infinitas dimensiones, pero que son necesarias como herramientas para explicar con un mínimo de rigor (aunque sea lo accesible

que siempre intentamos que sea) algunos de los conceptos y experimentos mentales posteriores. Ni qué decir tiene que intentaré poner el máximo número de ejemplos posible y no hacer artículos demasiado largos, sino más cortos y frecuentes — aunque rompa el ritmo normal de otras series. Mi intención es centrar cada artículo en una única idea básica y dejarla bien clara, sin mezclarla con la siguiente.

Empecemos esta nueva “etapa moderna” de la cuántica, por lo tanto, refinando los términos y conceptos que hemos venido empleando hasta ahora. En el artículo de hoy trataremos de establecer el concepto de **estado cuántico** de un sistema, y de paso empezaremos a introducir algunos aspectos de la notación *bra-ket* de Dirac. ¿Tienes las aspirinas a mano? Pues vamos con ello.

Los físicos de la primera etapa de la cuántica, y de los que hemos hablado extensamente a lo largo de la serie —Heisenberg, Schrödinger, Planck, Born, Bohr, Einstein, etc.— eran verdaderos genios. Todavía no deja de maravillarme el hecho de que, mirando a su alrededor, fueran capaces de notar la *granularidad* de las cosas que parecían continuas y, al mismo tiempo, la *borrosidad* de las cosas que parecían nítidas, y además de mostrar cómo ambos aspectos estaban inextricablemente unidos y hacían del Universo un lugar muy, muy raro.

Pero la siguiente generación de físicos, los que estudiaron la “cuántica antigua” como alumnos y la expandieron y asentaron en sus tesis doctorales y trabajos posteriores, aunque tuvieran la ventaja de disponer de las bases de la teoría, fueron también genios. Uno de estos “cuánticos de segunda generación” fue el británico Paul Adrien Maurice Dirac, cuyo nombre va a aparecer en los próximos meses en varias series y por razones diferentes — contribuyó al avance de la física en diversos campos, y lo que suele caracterizar a su trabajo, en mi opinión, es la exquisita elegancia que proporcionó a cualquier cosa que tocó.



Paul Dirac (1902-1984).

En los próximos artículos de *Cuántica sin fórmulas* nos centraremos en un aspecto particular de su trabajo, que se inició en 1930 en su libro *Principios de Mecánica Cuántica*. En él, entre otras cosas, Dirac logra algo que aquellos que tenéis que ver con la informática probablemente entenderéis bien: toma las matemáticas “de bajo nivel” de Schrödinger y

Heisenberg y las engloba bajo una serie de conceptos más elevados y menos detallados, como un lenguaje “de alto nivel” que permite una gran eficacia al estudiar sistemas cuánticos complejos.

En cierto modo, se trata de la misma tendencia que se observa desde los inicios de la cuántica: la elaboración de un aparato matemático de una tremenda eficacia para calcular resultados experimentales, a costa de un distanciamiento cada vez mayor entre las matemáticas empleadas y el mundo que vemos con los sentidos. No en vano el “*¡Cállate y calcula!*” que ya hemos mencionado en ocasiones anteriores, y que tan a menudo destilan – sin mencionarlo explícitamente– muchos textos académicos.

Sin embargo, aunque parezca extraño, a vosotros y a mí el trabajo de Dirac nos viene muy bien: puesto que la notación y conceptos introducidos por él son de más alto nivel que los de Schrödinger o Heisenberg, es posible utilizarlos con mayor soltura que los de aquéllos, pues no involucran tan a menudo fórmulas matemáticas espantosas — aunque, por supuesto, esas fórmulas estén implícitamente en la formulación de Dirac, y haga falta emplearlas para obtener muchos resultados experimentales en la práctica.

En primer lugar, Dirac establece el concepto de **estado cuántico**, que es una generalización de conceptos equivalentes en el caso de Schrödinger y Heisenberg (como, por ejemplo, la ecuación de onda). Antes de nada, definámoslo: **un estado cuántico es un objeto matemático que contiene la información de que disponemos sobre un sistema físico**; idealmente, si la cuántica es una teoría completa y conocemos el sistema perfectamente, un estado cuántico contiene *toda la información* acerca del sistema.

Sé que, dicho así, definir un estado cuántico parece casi no definir nada, pero ahí está parte de la potencia de la formulación de Dirac: que ese objeto matemático puede ser casi cualquier cosa. Por ejemplo, si recuerdas los artículos sobre la ecuación de onda de Schrödinger, la función de onda contiene la información que conocemos sobre el sistema y, manipulándola, podemos obtener esa información para predecir lo que observaremos si realizamos medidas sobre el sistema — por lo tanto, podemos describir el estado cuántico mediante la función de onda... o, si queremos, mediante la mecánica matricial de Heisenberg, o mediante lo que nos dé la gana, no importa: cualquiera que sea el formalismo matemático que haya debajo, *lo que estamos describiendo es el estado del sistema de una manera concreta*. De ahí que el estado sea un concepto de mayor nivel.

Puesto que hablamos a muy alto nivel, podemos utilizar las palabras o los símbolos que nos vengan en gana para referirnos a un estado de un sistema determinado (para calcular cosas concretas sobre él, sí tendremos que ir a más bajo nivel, pero eso ya es otra historia). Permite pues, estimado y paciente lector, que elija una manera de referirnos a un estado determinado de un sistema para no tener que estar repitiendo todo el tiempo “el estado x del sistema”, como hizo en su momento Dirac. Si un sistema se encuentra en un estado E determinado, lo representaremos así: $|E\rangle$. En próximas entradas hablaremos más a fondo del porqué utilizar ese “paréntesis” tan raro para encerrar al estado, pero por ahora simplemente utilicemos esta notación.

Date cuenta de la potencia (debido a su grado de abstracción) de esta notación, y la brevedad que permite al expresarse. Imagina que el sistema que estamos estudiando es el Universo completo; decir, en notación de Dirac, “*Universo: $|\Psi\rangle$* ” es la afirmación de que tenemos la información del Universo como sistema; de todos los estados posibles de todas las partículas que lo componen, el Universo se encuentra en el estado Ψ (que es la letra griega *psi* mayúscula, una gran amiga de los cuánticos por razones históricas). Claro, el grado

de abstracción también significa que parto de la base de que soy capaz de definir Ψ con más detalle, o realmente no conozco nada.

Si estuviéramos hablando de mecánica clásica y la cuántica no existiera, entonces conocer el estado de un sistema (es decir, tener un objeto matemático que contenga la información del sistema) nos permitiría saber exactamente qué va a suceder en el sistema en cualquier momento del futuro: por ejemplo, conociendo la posición y la velocidad de una partícula podemos saber exactamente dónde va a estar en cualquier otro momento. Esto quiere decir que sería equivalente decir *el electrón está en el estado $|c\rangle$* que decir *conozco todas las magnitudes relevantes al movimiento del electrón y soy capaz de conocer exactamente dónde va a estar en cualquier momento*.

Sin embargo —y es esencial comprender esto para entender lo que viene después— conocer exactamente el estado cuántico de un sistema no permite saber perfectamente lo que vamos a medir si lo observamos (sí, la razón es el [principio de indeterminación](#), por supuesto). Cuando conocemos perfectamente el estado de un sistema, eso quiere decir que somos capaces de predecir **la probabilidad de medir un valor determinado de las magnitudes observables en el sistema**. Creo que esto, si has seguido la serie desde el principio, está ya superado... pero no te confíes.

Es muy probable que estés pensando que no he dicho casi nada, y que entiendes el concepto de estado cuántico perfectamente. Las malas noticias son que posiblemente no lo has entendido, y un ejemplo te lo pondrá de manifiesto; las buenas noticias son que, normalmente, al darte cuenta de que no lo entendías comprendes también por qué, de modo que lo entiendes de verdad. (También es posible que lo hayas entendido perfectamente desde el principio, claro — enhorabuena, porque casi nadie lo logra a la primera).

Utilicemos un ejemplo aparentemente estúpido y simple, pero que debería ser revelador. Supongamos que nuestro sistema es una moneda, y que el único aspecto relevante para nosotros es si muestra cara o muestra cruz cuando la miramos (da igual, por ejemplo, su color o su temperatura). La moneda, para que no podamos verla sin más, está dentro de una caja cerrada: **observar** la moneda significa abrir la caja y mirar dentro. Recordarás que ya hablamos de un ejemplo similar en la serie hace algún tiempo.



Sistema cuántico de dominio público.

Bien, si no has entendido realmente el concepto de estado cuántico, dirás que este sistema puede encontrarse en dos estados, que podríamos llamar $|cara\rangle$ y $|cruz\rangle$. Repito: si piensas

así es que no has entendido lo que es un estado (te sorprendería cuántos físicos hay por ahí que no lo han entendido, por muchas fórmulas que usen).

Si piensas así es probablemente porque confundes *la moneda* con *el estado*: el estado no es la moneda, **el estado es toda la información que tenemos sobre la moneda**. Efectivamente, cuando miramos la moneda ésta nos muestra únicamente dos posibilidades — o cara o cruz. Pero la clave de esa frase es “*cuando miramos la moneda*”. El estado de la moneda *no es el mismo antes y después de mirarla*, y el estado —al representar la información que tenemos del sistema— depende de lo que sabemos acerca de la moneda. El estado está definido *en cualquier momento, no sólo cuando miramos la moneda, y nos permite predecir lo que veremos si la observamos*. ¿Ves por qué no lo habías entendido, y cómo es realmente la cosa?

Imagina, por ejemplo, que con nosotros está Paul Dirac. Dirac agita la caja cerrada muchas veces, de maneras aleatorias, y luego la deposita sobre la mesa. *¿Cuál es el estado de la moneda?* ¿Ves que no es $|cara\rangle$ ni $|cruz\rangle$? No, no me digas que “es $|cara\rangle$ o es $|cruz\rangle$ pero no sabemos cuál de los dos”: el estado de la moneda *está definido en todo momento para nosotros*, y es el que nos permite predecir lo que vamos a observar si miramos la moneda. En este caso, evidentemente, si la única información que existe es que la moneda se ha agitado aleatoriamente y lo único que queremos predecir es si ha salido cara o ha salido cruz, no hay mucho que decir (sí hay *algo* que decir, pero hablaremos de eso en el próximo artículo). Lo que quiero que veas es que hay, al menos, un tercer estado además de $|cara\rangle$ y $|cruz\rangle$.

Llamemos, por ahora, $|agitada\rangle$ a ese estado, y ya nos preocuparemos luego de cómo obtener más información sobre él. Pero es que, además de $|cara\rangle$, $|cruz\rangle$ y $|agitado\rangle$ hay más estados posibles, dependiendo de la situación inicial del experimento y de lo que conocemos sobre la moneda.

Por ejemplo, supón que Dirac nos informa de lo siguiente: se va a llevar la caja con la moneda. Va a agitar la caja durante un rato de forma aleatoria, y entonces va a abrir la caja: si la moneda muestra cara, la va a dejar como está, pero si la moneda muestra cruz, va a volver a agitar la caja una vez más de forma aleatoria y ya está (no va a mirar cómo está la moneda una segunda vez). Una vez nos ha dicho esto, el buen Paul se lleva la caja y realiza ese proceso —puedes fiarte de él, ¡es Paul Dirac!— para, finalmente, dejar la caja sobre la mesa frente a nosotros.

¿Cuál es el estado de la moneda? A estas alturas, deberías ser capaz de ver que ni es $|cara\rangle$, ni es $|cruz\rangle$ **ni tampoco es $|agitada\rangle$** . Recuerda que el estado nos permite predecir la probabilidad de ver una cosa u otra cuando observemos la moneda, y debería ser evidente que antes, al agitar la caja una vez, había un 50% de probabilidad de ver la moneda como “cara” al abrir la caja y un 50% de verla como “cruz”, mientras que ahora las probabilidades han cambiado (da igual cuánto valen por ahora, lo importante es que no son las mismas de antes y, por lo tanto, el estado no es el mismo). *¡No hay tres estados, hay al menos cuatro!*

Pero podría inventarme muchísimos otros experimentos que podría realizar Dirac con la caja, informarte de ellos y luego preguntarte sobre el estado de la moneda. La realidad está, como suele suceder en esta serie, peleada con la intuición: **no hay un estado, ni dos, ni tres, ni veinticinco ni cien: hay infinitos estados posibles de la moneda**.

De hecho, como veremos en los próximos artículos, salvo que haya alguna condición que limite las cosas, cualquier sistema físico, en cuántica, puede tener infinitos estados: el caso de la moneda es extremo por lo simple (sólo hay dos posibilidades al observarla), de modo que

imagina en los que no lo sean tanto. Desde luego, una vez que observamos el sistema, la cosa cambia, y esto –si has entendido el concepto de estado– es lógico: *si el estado es el conjunto de la información que tenemos sobre el sistema, y observamos el sistema, nuestra información sobre él cambia y, por tanto, su estado también lo hace.*

Ya sé que el primer impulso es pensar que esa disociación entre el sistema “real” y su estado es extraña, pero recuerda: en los sistemas en los que realmente se notan los efectos cuánticos, a diferencia de nuestra moneda, *no tenemos forma de saber qué es “realmente” lo que pasa en el sistema independientemente de su estado. El estado es lo único que tenemos*, de modo que hablar de lo que “pasa realmente” puede ser interesante, pero completamente ajeno al dominio de la cuántica. Esto no quiere decir que no hablemos de ello (lo haremos) pero, salvo que tenga una consecuencia mensurable en las observaciones que realicemos, no es ciencia. A todos los efectos prácticos, el estado es el sistema.

Digo esto porque debes recordar que nuestro ejemplo de la moneda es un ejemplo macroscópico, en el que no se notan los efectos cuánticos: los simulamos metiendo la moneda en la caja. Dicho con otras palabras, en el caso de la moneda el carácter impredecible y “borroso” del sistema lo hemos forzado utilizando la caja, pero en los sistemas reales –como un fotón, un electrón o tu propio cuerpo– *la “borrosidad” es inherente a la naturaleza de la materia.* El ejemplo de la moneda es útil, pero tal vez te haga pensar que los sistemas están bien definidos intrínsecamente y que es nuestra información incompleta la que los hace “borrosos”; recuerda el principio de incertidumbre, y no dejes que un ejemplo borre de tu memoria todo el resto de la serie, o no sería útil en absoluto.

“Sí, vale”, puedes estar pensando también. *“Hay infinitos estados de la moneda, ¡pero no todos son iguales! Hay dos ($|cara\rangle$ y $|cruz\rangle$) que son especiales de algún modo, porque la moneda sólo puede mostrar cara o cruz...”*

Efectivamente, no todos los estados son iguales: algunos, como esos dos, son especiales, y de ellos hablaremos en la [siguiente entrada de la serie](#) dentro de unos días. No guardes las aspirinas.

Estados y valores propios

Hace unos días hablamos acerca del concepto de estado cuántico, dentro de la serie *Cuántica sin fórmulas*. Hoy continuaremos empapándonos de la “cuántica moderna” elaborando un poco más las ideas esbozadas entonces pero, una vez más, sin alargar demasiado el artículo de modo que haya una idea central que – espero– quede clara sin liarla con otras.

Como recordarás de aquel artículo, utilizamos el ejemplo de una moneda dentro de una caja. Si entendiste las ideas que se definieron entonces y los razonamientos que realizamos juntos, sabes que antes de abrir la caja la moneda puede tener infinitos estados posibles. Sin embargo, terminamos aquel artículo diciendo que existen algunos estados “especiales”: después de abrir la caja y mirar la moneda, ésta sólo puede mostrar una de dos posibilidades, cara o cruz. Hoy hablaremos acerca de estos “estados especiales”.

A lo largo de la entrada de hoy voy a utilizar expresiones sin rigor y simplificar conceptos de forma abyecta. Los posibles efectos secundarios a físicos y matemáticos incluyen sudoración inguinal, irritación en las

meninges e hipotermia talámica; *El Tamiz* no se hace responsable de ninguno de ellos — si empiezas a notar cualquiera de esos síntomas, mejor lees otra cosa.

En primer lugar, definamos lo que suele llamarse un **observable**. Como hemos dicho en anteriores ocasiones (al hablar de la función de onda en particular y, recientemente, de los estados cuánticos en general), un estado cuántico contiene la información sobre un sistema. Ese sistema es algo que podemos *observar*, es decir, que contiene determinadas variables que se pueden medir de alguna manera; el estado cuántico nos permite predecir la probabilidad de medir unos valores u otros de esas variables.

Bien, cada una de esas variables que podemos medir se denomina **observable**. Un estado cuántico sin observables sería un objeto matemático sin relación con la realidad: recuerda que, aunque utilicemos conceptos abstractos, *el fin último de la física cuántica es predecir el comportamiento de sistemas físicos del Universo real*. Si nuestro estado cuántico no permite predecir ninguna medición de nada, entonces puede ser divertido hablar sobre él, pero no es física. Como mínimo, un sistema debe poseer al menos un observable (aunque prácticamente todos tienen muchos observables).

En nuestro ejemplo de la moneda, al ser tan simple como pude hacerlo, el sistema tiene un único observable, la “cara” que muestra la moneda. Desgraciadamente, la palabra “cara” en este contexto es ambigua, porque la moneda puede mostrar cara o cruz al mirarla, de modo que espero que estés de acuerdo conmigo en darle otro nombre a la magnitud observable: digamos que es el **lado** de la moneda. Nuestro observable *lado*, al medirlo, puede tener dos valores, *cara* y *cruz*.

Observar la moneda significa por lo tanto, en nuestro *argot* de estados cuánticos, **medir el valor del único observable**, el *lado* de la moneda. En el caso de un sistema físico real, como podría ser un electrón dentro de un pozo infinito, puede haber varios observables, como la posición del electrón, su energía, su momento lineal, etc., y podemos medir uno de ellos o varios a la vez (muchas veces, como ya vimos, con límites en la precisión de unos u otros de acuerdo con el principio de indeterminación).

Si comprendiste el significado de un estado cuántico debería resultarte evidente que, **en el momento de observar la moneda, el estado cuántico cambia**. De hecho, en el caso de la moneda, una vez que la observamos ésta sólo puede encontrarse en uno de estos dos estados, $|cara\rangle$ o $|cruz\rangle$, que se corresponden con los dos posibles valores del único observable del sistema, el *lado* que muestra la moneda. Sin embargo, antes de mirar la moneda el estado podía haber sido otro de muchos, como dijimos en la entrada anterior.

Es esencial entonces que comprendas que, en el mundo real, existen *dos razones* por las que el estado cuántico cambia al observar el sistema; quiero hacer énfasis en esto porque, en nuestro ejemplo de la moneda, sólo se pone de manifiesto la primera razón, pero en la realidad entran en juego las dos:

* En primer lugar, puesto que el estado representa la información que tenemos del sistema, al *observar* el sistema *la información de que disponemos cambia*, con lo que el estado también lo hace.

* En segundo lugar —aunque esto no suceda en la moneda— la observación del sistema *requiere necesariamente una interacción con él*, lo que inevitablemente lo modifica de alguna manera.

La segunda razón es la que, como ya mencionamos al hablar del principio de indeterminación, suele llamarse *efecto del observador* y es muy comúnmente mostrada como la causa del principio de indeterminación; recuerda que esto no es cierto, y que además del efecto del observador el principio de indeterminación se debe a la naturaleza dual de la materia, que hace que muchas variables del sistema

aparezcan “a pares”, como la posición y el momento lineal, que no pueden medirse con precisión simultáneamente.

Evidentemente, en el caso de la moneda esto no sucede porque hemos simplificado tanto las cosas que sólo existe un observable: podemos medirlo con precisión absoluta (es decir, conocer exactamente si el valor del *lado* es *cara* o es *cruz*) sin afectar a ningún otro observable... *porque no existe ningún otro*. Simplemente quiero recordarte el principio de indeterminación para que este ejemplo no te haga olvidar que el proceso de observación tiene sus límites en los sistemas reales.

La cuestión es que existen casos en los que el estado antes y después de mirar la moneda es el mismo. Por ejemplo, imagina que nuestro admirado Paul Dirac se lleva la caja con la moneda y nos dice que *va a coger la moneda con la mano y la va a colocar cuidadosamente dentro de la caja de modo que muestre cruz*. Luego cierra la caja y nos la entrega.

Ya sé que en el mundo real tendríamos que tener en cuenta que Paul Dirac puede mentirnos, pero en nuestro “mundo simplista de la moneda” no: *¡es Paul Dirac, y siempre dice la verdad!* De modo que, en este caso especial, el estado de la moneda antes de mirarla es $|cruz\rangle$, y si abrimos la caja y miramos la moneda, veremos *¡oh, sorpresa!* que muestra cruz: su estado sigue siendo entonces $|cruz\rangle$. En este caso particular (al igual que hubiera sucedido si supiéramos que la moneda mostraba cara) el estado no cambia durante la observación.

Es más: ni siquiera nos hace falta una observación, ya que nosotros (o, en este caso, Dirac) **hemos preparado el sistema** de modo que el observable tenga, seguro, uno de los valores que podemos medir. Pero lo importante de todo esto es que sólo podemos lograrlo en dos situaciones fijas: cuando la moneda está en los estados $|cara\rangle$ o $|cruz\rangle$, que se corresponden con los dos valores posibles del observable *lado*. Estos dos estados son, por lo tanto, especiales — no cambian al medir el observable asociado a ellos y se corresponden con valores concretos del observable (en este caso, *cara* y *cruz*).

En el argot *cuántico* estos valores del observable se denominan **autovalores, valores propios o eigenvalores** (por el alemán de “propio”), y los estados correspondientes se llaman **autoestados, estados propios o eigenestados**. Como se leen por ahí unos nombres u otros, intentaré alternarlos durante los artículos para que se te queden en la cabeza las tres versiones.

Resumamos, pues (lo siento si soy repetitivo, pero es importante que esto quede muy claro): de los infinitos estados que puede tener nuestra moneda antes de la observación, existen dos que son especiales, los dos *estados propios* de la moneda, $|cara\rangle$ y $|cruz\rangle$. Cuando la moneda está en uno de estos estados (lo cual requiere que hayamos preparado las cosas cuidadosamente para que así sea), al observarla su estado no cambia, y el valor que medimos del observable *lado* es *cara* o es *cruz*, los dos *autovalores* del sistema, correspondientes a los dos *autoestados* anteriores.

Pero, además del hecho de que se corresponden con los valores posibles de un observable, los *estados propios* tienen otra propiedad muy importante, aunque sea una consecuencia de la primera. Esta segunda propiedad parece una solemne estupidez al principio, pero nos será muy útil para hablar, en la siguiente entrega de la serie, de todos los estados de la moneda que no son autoestados.

Esta segunda “estúpida propiedad”, dicho mal y pronto, es la siguiente: **los autoestados son completamente incompatibles entre sí tras una medición**. Sé que esto suena raro al principio, pero deja que explique a lo que me refiero con “*incompatibles*”.

Imagina dos estados cualesquiera de la moneda que no sean los dos *eigenestados* (uno de ellos puede serlo, pero no los dos). Por ejemplo, pensemos en dos estados que manejamos en el artículo anterior, $|cara\rangle$ y $|agitada\rangle$. Supón que tú tienes una moneda en una caja, y yo tengo otra. Tu moneda es $|cara\rangle$, la mía es $|agitada\rangle$. Sin mirar dentro de las cajas, te pregunto: *¿es posible que, tras mirar las monedas, ambas estén en el mismo estado?*

Si has entendido algo de estos dos artículos, tu respuesta debería ser un rotundo “Sí”. Cuando miremos las monedas, la tuya va a estar sin duda alguna en el estado propio en el que estaba, $|cara\rangle$. No sabemos en cuál de los dos autoestados va a estar la mía, pero es posible que también sea $|cara\rangle$, con lo que los estados iniciales de nuestras dos monedas no eran incompatibles.

Supongamos que tu moneda es $|agitada\rangle$ y la mía sigue el proceso que describimos en el artículo anterior — Dirac se lleva la caja, la agita y, si muestra cruz, vuelve a agitarla de nuevo; llamemos al estado de mi moneda $|agitada/cara\rangle$, simplemente para mostrar que se favorece el que al final salga “cara”.

Ambos estados son una vez más, de acuerdo con nuestra particular definición de “compatible” *estados compatibles*: es perfectamente posible que, al mirar nuestras dos monedas, las dos muestren el mismo estado (que puede ser, en este caso, tanto $|cara\rangle$ como $|cruz\rangle$).

Sin embargo, **los eigenestados no pueden ser jamás compatibles**. Si tu moneda está en $|cara\rangle$ y la mía en $|cruz\rangle$, es absoluta y totalmente imposible (y fíjate en lo extremo de esta afirmación en física cuántica) que se encuentren en el mismo estado cuando las miremos. Y esta tontería proporciona a los autoestados una potencia tremebunda para describir estados que no lo son — aunque de eso hablaremos en la entrada próxima.

En la notación de Dirac existe una forma poderosa, simple y elegante (como no podría ser de otro modo, viniendo de Dirac) de expresar este concepto *decompatibilidad*. Si has estudiado cálculo vectorial en algún momento, no deberías tener ningún problema en comprender el concepto. La compatibilidad entre dos estados $|a\rangle$ y $|b\rangle$ puede expresarse simplemente como $\langle a|b\rangle$, y su valor determina lo compatibles (o incompatibles) que son ambos estados.

En primer lugar, observa que hemos “cambiado de lado” los paréntesis de $|a\rangle$; a efectos de esta simplista serie, nos da igual escribir un estado con el paréntesis a un lado o a otro, pero los estados escritos como hemos hecho hasta ahora se denominan *kets* (que podríamos traducir como *tesis*) y los estados escritos “al revés” se denominan *bras* (algo así como *paren*). Sé que esto suena algo triste, pero cuando escribes los dos estados juntos de ese modo, como $\langle a|b\rangle$, escribes un *bra-ket* (parecido a un *bracket* en inglés), o un *paren-tesis*... al completar el “paréntesis” de los símbolos $\langle \rangle$. Como digo, sé que no es tan ingenioso como pretende ser, pero así son las cosas.

En segundo lugar, aunque $|a\rangle$ y $|b\rangle$ son dos estados cuánticos, el *bra-ket* $\langle a|b\rangle$ **es un número**. Y el valor de ese número nos indica si $|a\rangle$ y $|b\rangle$ son completamente incompatibles, si son más o menos compatibles o si se trata del mismo estado cuántico. Veamos cada caso con cuidado, porque utilizaremos esto en la próxima entrada sin ningún rubor.

Si $\langle a|b\rangle = 0$ eso quiere decir que **los estados son incompatibles**. De modo que, si quieres dártelas de intelectual, en vez de decir “una moneda no puede mostrar cara y cruz a la vez” podrías decir simplemente “ $\langle cara|cruz\rangle = 0$ ”.

Si $\langle a|b\rangle = 1$ eso quiere decir que **los dos estados son realmente el mismo estado**. Puedes pensar en ese 1 como “100% de compatibilidad, es decir, son la misma cosa”, mientras que el 0 anterior es “0% de compatibilidad, no tienen nada que ver”. Aunque parezca raro, es posible tener dos estados que parecen diferentes pero que, si miras con cuidado, resultan ser el mismo. La manera más fácil de verlo es comprobando la compatibilidad de ambos estados — si es 1, es que se trata realmente del mismo estado. Por cierto, si eres físico y te muerdes las uñas, sí, supongo que los estados están normalizados y tampoco voy a meterme en números complejos.

Finalmente, es posible que $\langle a|b\rangle$ no sea 0 ni 1. En general (por razones que ni vienen al caso ni nos interesan ahora mismo) se trata de un número complejo, pero cuanto mayor sea su módulo, es decir, más

parecido a 1 —ya que 1 es el máximo de compatibilidad—, más parecidos son los dos estados, y cuando más similar a 0 sea, más incompatibles son los dos estados.

Si no conoces cálculo vectorial, sáltate este párrafo; si lo has estudiado en algún momento, puede ayudarte a entender lo anterior:

Como veremos en la próxima entrada, los estados cuánticos pueden expresarse como vectores unitarios, y el *bra-ket* $\langle a|b\rangle$ es el *producto escalar* o *producto interno* de ambos. Al igual que en los vectores de toda la vida, si el producto escalar es nulo, los vectores son perpendiculares (en nuestra jerga de hoy, “incompatibles”); si el producto es 1 es que tienen la misma dirección y sentido, es decir, son el mismo vector (pues suponemos que ambos son unitarios), y en cualquier otro caso no son ni una cosa ni la otra, pero cuanto más parecido a 1 sea el producto escalar, más pequeño es el ángulo que forman los dos vectores.

Por ejemplo, supón que tu moneda está en $|cara\rangle$. Dirac se lleva mi caja y la agita; mira la moneda y, si muestra cara, la deja como está, pero si es cruz, agita la caja de nuevo; a continuación mira la moneda y, si es cara, la deja como está, pero si es cruz agita la caja... *y realiza ese proceso cien veces*, de modo que la probabilidad de que mi moneda, cuando la miremos, muestre cara es casi del 100%. Llamemos al estado de mi moneda $|agitada/cara/cien/veces\rangle$.

Sin entrar en cálculos matemáticos, creo que puedes ver que el producto de nuestros dos estados, $\langle cara|agitada/cara/cien/veces\rangle$, aunque no es 1 (porque tu estado y el mío no son iguales, ya que existe la posibilidad de que mi moneda muestre cruz cuando la miremos aunque sea una probabilidad muy pequeña), es casi, casi, casi 1: supongamos que su módulo es 0,99.

Como puedes ver, el valor de $\langle a|b\rangle$ es de gran utilidad para comprobar cuánto tienen que ver los dos estados entre sí; y, en términos de esta notación, si $|a\rangle$ y $|b\rangle$ son dos autoestados del sistema, podemos estar completamente seguros de que $\langle a|b\rangle = 0$.

En términos de andar por casa, los autoestados son completamente incompatibles — en términos vectoriales (y esto tendrá gran importancia en el próximo artículo) **los autoestados son siempre perpendiculares entre sí**.

Pero ¿qué hay de todos los demás estados que no son autoestados? ¿Cómo podemos calcular $\langle agitada|agitada/cara/cien/veces\rangle$? ¿Es que vamos a tener que inventarnos nombrecitos para todos los infinitos estados posibles del sistema, como $|agitada/pero/un/poquito\rangle$, $|agitada/cara/cincuenta/veces\rangle$ o $|agitada/cruz/luego/cara\rangle$? En la próxima entrada de la serie veremos cómo la “estúpida propiedad” de los autoestados, el hecho de ser incompatibles, nos hace las cosas muy fáciles para describir cualquier otro estado del sistema. Hablaremos de *superposiciones cuánticas*.

Superposiciones cuánticas

Por tercera semana consecutiva seguimos enzarzados en la serie [Cuántica sin fórmulas](#), tratando de desentrañar los secretos de los estados cuánticos. Hace dos semanas hablamos acerca del concepto de [estado cuántico](#), y la semana pasada lo hicimos sobre un tipo de estados especiales: los [eigenestados](#), *estados propios* o *autoestados* de un observable determinado. Como espero que recuerdes, una de las propiedades fundamentales de los *autoestados* era que se trataba de lo que llamamos “estados incompatibles”. Como dije entonces, esta propiedad proporciona a los *autoestados* una enorme potencia para describir

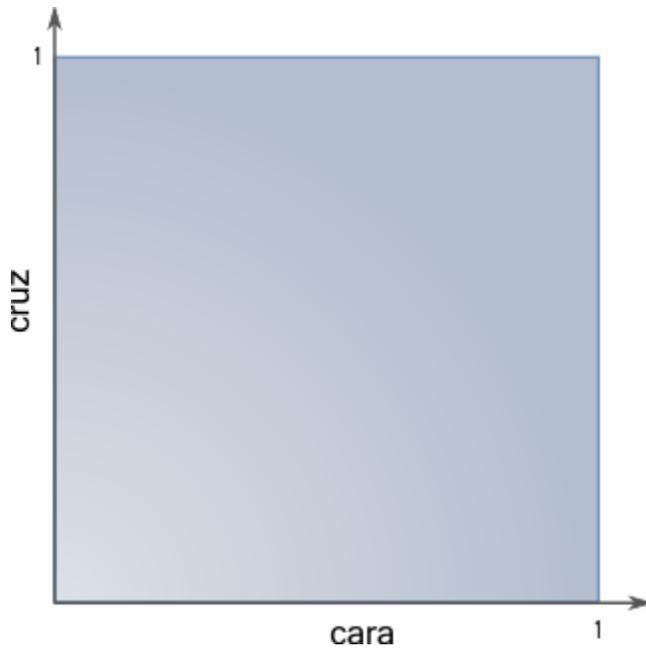
cualquier otro estado cuántico del sistema (al menos, en lo que se refiere al observable al que describen). Hoy nos centraremos precisamente en esto, y trataremos de escribir cualquier estado de nuestra “moneda cuántica” en función de sus *estados propios* utilizando, por supuesto, la elegante notación *bra-ket* de Dirac. Hablaremos sobre las **superposiciones cuánticas**, utilizando las mismas simplificaciones abyectas de los artículos anteriores.

Para empezar, debemos profundizar algo más en el concepto de “estados incompatibles”, puesto que si no conoces cálculo vectorial –y no parto de la base de que lo conozcas– no es sencillo entender las implicaciones del hecho de que, por ejemplo, $\langle \text{cara} | \text{cruz} \rangle = 0$. Naturalmente, de lo que sí parto es de que entiendes la expresión que acabo de escribir; si no es así, mejor retrocedes a los artículos anteriores.

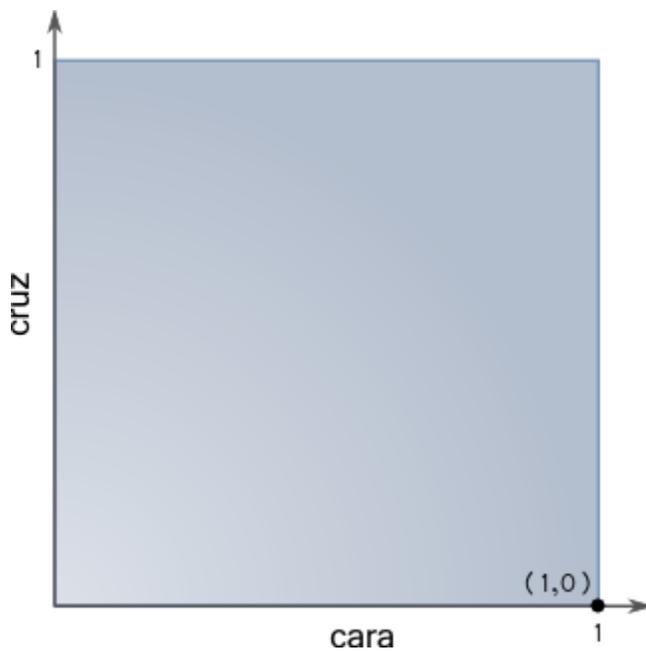
Los dos *eigenestados* de la moneda, $|\text{cara}\rangle$ y $|\text{cruz}\rangle$, establecen las dos únicas posibilidades que pueden medirse del observable *lado* de la moneda; cualquier otro estado se “colapsa” a uno de estos dos estados una vez que observamos la moneda. Es más: cualquier estado anterior, como vimos en las entradas anteriores, viene a ser una medida de la probabilidad de que, al observar la moneda, su estado sea $|\text{cara}\rangle$ o $|\text{cruz}\rangle$.

Es como si cualquier estado pudiera ser “completamente $|\text{cara}\rangle$ ”, “completamente $|\text{cruz}\rangle$ ”, o una combinación de los dos: “casi completamente $|\text{cara}\rangle$ y un poquito $|\text{cruz}\rangle$ ”, “prácticamente $|\text{cara}\rangle$ pero un poco $|\text{cruz}\rangle$ ”, “medio $|\text{cara}\rangle$ y medio $|\text{cruz}\rangle$ ”, etc. **Es decir, puede pensarse en los estados de la moneda como superposiciones de los dos autoestados.** Esto es posible, precisamente, por la “estúpida propiedad” que mencionamos en el artículo anterior: la incompatibilidad de los dos estados o, matemáticamente, por la *perpendicularidad* entre los dos *autoestados*.

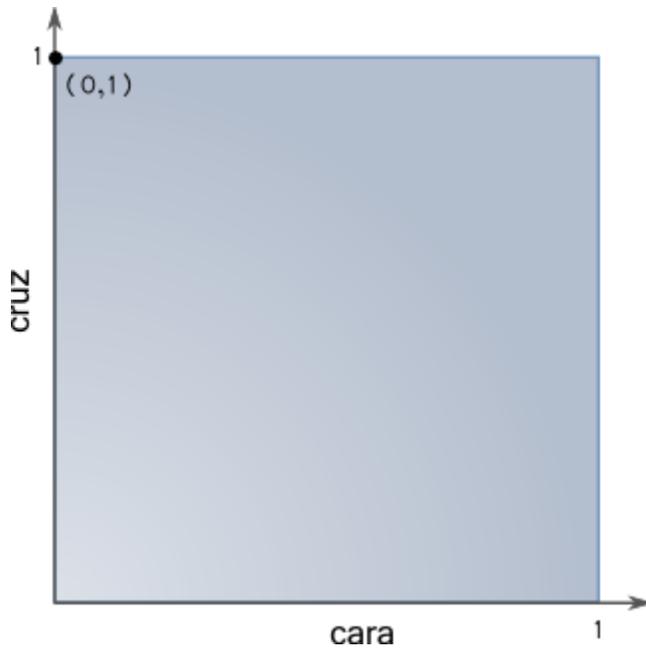
Una manera bastante visual de representar las posibilidades del estado de la moneda es utilizar coordenadas espaciales: esto requiere cierta imaginación y que te abstraigas, pues no son coordenadas espaciales del espacio euclidiano. Imagina que dibujamos dos ejes: voy a llamar al eje horizontal “eje *cara*” y al eje vertical “eje *cruz*”. Ambos ejes van de 0 a 1 (porque, si sabes algo de cuántica, como hicimos en la entrada anterior suponemos que los estados están *normalizados* y ese 1 significa “100%”), con lo que al final, tenemos un cuadrado de lado 1 como éste, en el que el origen –el punto $(0, 0)$ – está en la esquina inferior izquierda:



Mi intención es ahora convencerte de que podemos representar cualquier estado posible de la moneda en ese cuadrado. Empecemos por los dos más evidentes: el estado $|cara\rangle$ está puramente sobre el “eje cara” horizontal, y no tiene absolutamente nada de “cruz”, con lo que sus coordenadas en nuestro cuadrado serían $(1, 0)$, y en el dibujo se encuentra aquí:

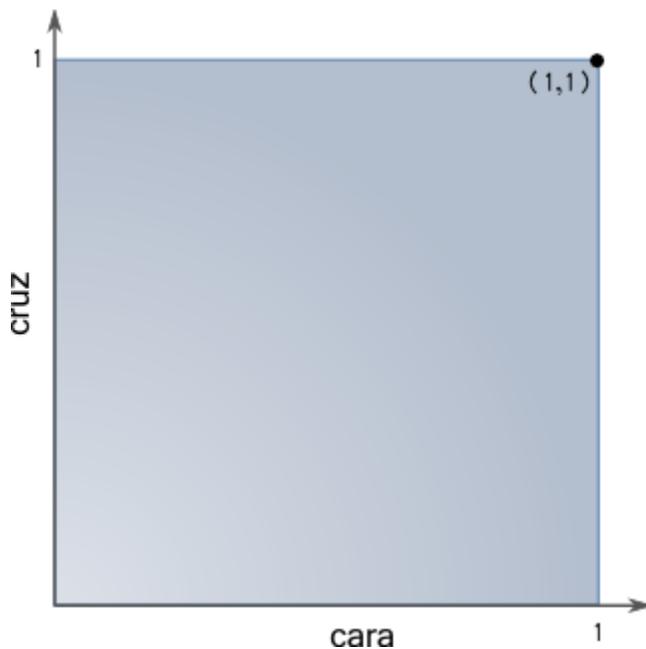


Lo mismo sucede con el otro *autoestado*, $|cruz\rangle$: en este caso, por supuesto, sucede al contrario. No tiene nada de “horizontal” (cara) y es completamente “vertical” (cruz), de modo que sus coordenadas en nuestro cuadrado son $(0, 1)$:



Cualquier otro estado de la moneda puede dibujarse como un punto dentro del cuadrado, pero ¡ojo!, es fundamental que entiendas este breve párrafo para comprender realmente la naturaleza de nuestra representación de estados en función de $|cara\rangle$ y $|cruz\rangle$: **todos los estados posibles son puntos dentro del cuadrado, pero no todos los puntos del cuadrado son estados posibles.**

Por ejemplo, fíjate en el punto $(1, 1)$:

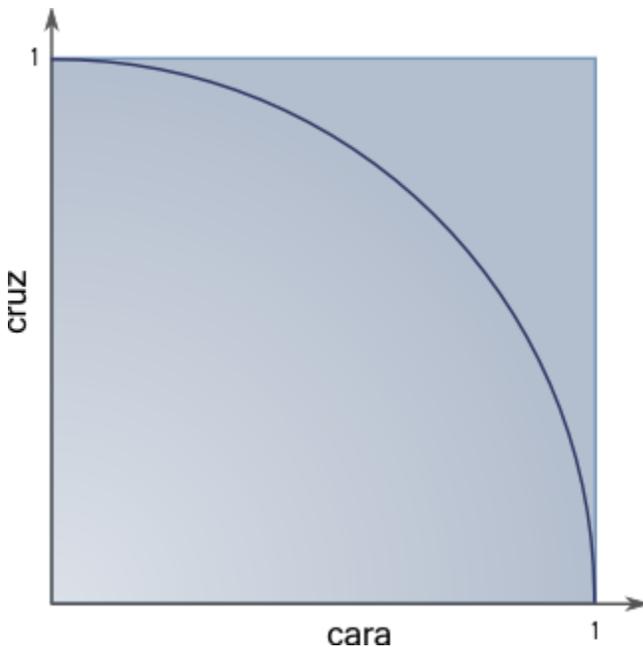


¡Es imposible que ese punto se corresponda con un estado de nuestra moneda! Significaría que ese estado es un 100% $|cara\rangle$ y un 100% $|cruz\rangle$ a la vez, ¡absurdo! Como recordarás, en el artículo anterior definimos $\langle estado1|estado2\rangle$ como el “grado de compatibilidad” de un

estado con otro, y dijimos que su valor máximo era 1, cuando ambos estados eran el mismo. Aunque no voy a entrar en cálculo vectorial aquí, esa condición, en nuestro cuadrado, se traduce al hecho de que **la distancia de cualquier estado al origen debe ser exactamente 1**. Esto garantiza, entre otras cosas, que la probabilidad de observar “cara” o “cruz” al mirar la moneda sea siempre del 100% en total.

Puedes mirarlo de este modo: cualquier estado que no esté a una distancia 1 del origen no puede ser un estado real, porque al sumar las probabilidades de obtener “cara” y de obtener “cruz” al medir el valor del *lado* de la moneda, obtendríamos un valor de menos del 100% (en cuyo caso la moneda puede estar en algún estado que no es $|cara\rangle$ ni $|cruz\rangle$ al observarla y, entonces, hay algún *autoestado* que no habíamos considerado) o mayor del 100% (y entonces a veces es posible que la moneda esté *al mismo tiempo* en $|cara\rangle$ y $|cruz\rangle$, lo cual significa que esos estados *no son autoestados*). En cualquiera de los dos casos habríamos metido la pata: o faltan *autoestados* en un caso, o no son *autoestados* en el otro.

¿Ves ahora qué puntos de nuestro cuadrado *sí* se corresponden con estados posibles de la moneda? Si sabes geometría, probablemente ya lo ves: los puntos del interior del cuadrado que están a una distancia de 1 del origen, es decir, *un cuarto de circunferencia*. Pero hay una forma muy fácil de verlo, incluso si no estás muy puesto en geometría. Puesto que cualquier estado real de la moneda está a una distancia de 1 del origen (es decir, de la esquina inferior izquierda de nuestro cuadrado), imagina que tenemos una barra de longitud 1, y que ponemos un extremo justo en la esquina inferior izquierda: el otro extremo se encuentra siempre a una distancia 1 de ese punto, con lo que cualquier estado real de la moneda está sobre el otro extremo de la barra — si ahora movemos la barra (siempre con un extremo sobre el origen), el extremo opuesto “pinta” todos los posibles estados de la moneda, es decir, todos los puntos del cuadrado que distan 1 del origen:

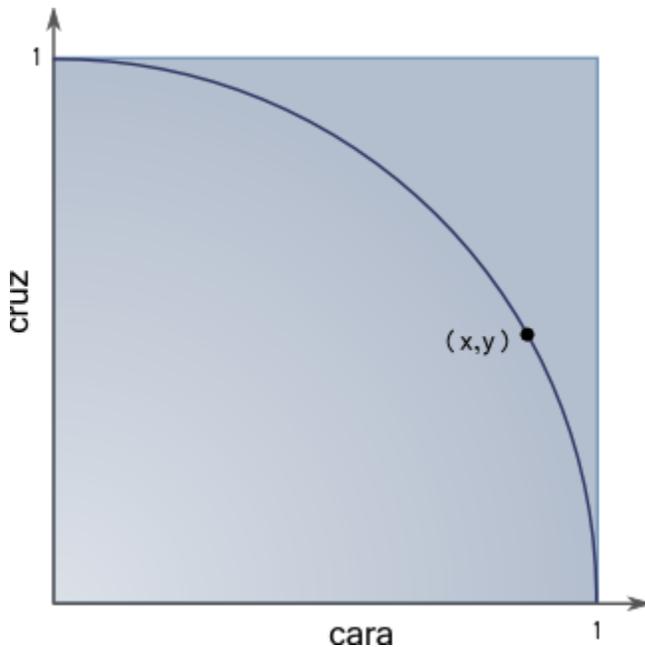


Pensemos un momento en las consecuencias de lo que acabamos de hacer, que es bastante más profundo de lo que puede parecer en un principio:

En primer lugar, fíjate en ese trozo de circunferencia que acabamos de dibujar, y que representa gráficamente **todos los estados posibles de la moneda**. Como dijimos en la

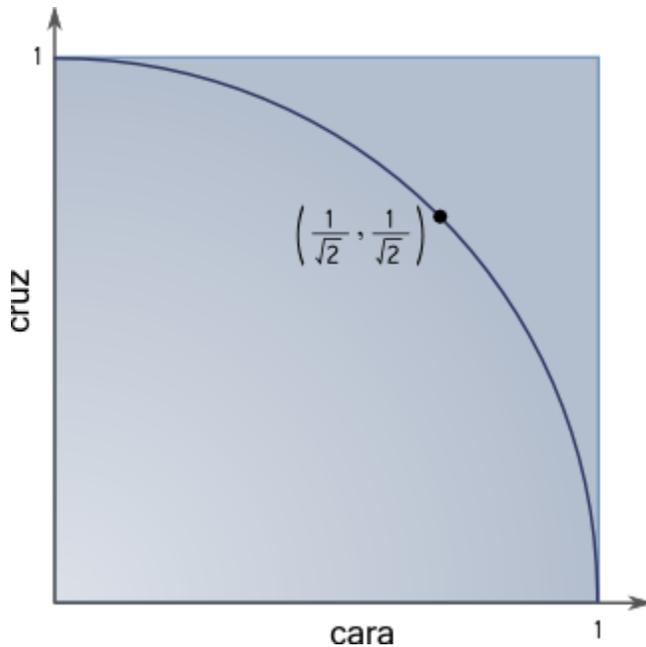
entrada anterior, *hay infinitos estados*, puesto que esa línea contiene infinitos puntos. Dos de ellos son especiales: los que se encuentran justo sobre los ejes, es decir, $(1, 0)$ y $(0, 1)$, que se corresponden con $|cara\rangle$ y $|cruz\rangle$. Permite que los escriba de una manera un tanto estúpida pero que —espero— pronto sea reveladora: $|cara\rangle = 1|cara\rangle + 0|cruz\rangle$, y $|cruz\rangle = 0|cara\rangle + 1|cruz\rangle$.

Cualquier otro estado posible de la moneda puede expresarse como un punto (x, y) de ese cuadrado. Pero fíjate en lo que esto significa: **las coordenadas x e y del punto nos indican cuánto de $|cara\rangle$ y cuánto de $|cruz\rangle$ tiene**. Es decir, el punto (x, y) representa un estado que podemos escribir como $|\text{estado}\rangle = x|cara\rangle + y|cruz\rangle$:



En nuestras coordenadas del cuadrado, ¿cómo escribiríamos el estado $|agitada\rangle$ del que hablamos hace dos artículos? Si lo recuerdas, se trataba del estado de la moneda cuando Dirac había agitado la caja una vez y nadie había mirado aún dentro de ella. Es posible que tu primer impulso sea decir que $|agitada\rangle = \frac{1}{2}|cara\rangle + \frac{1}{2}|cruz\rangle$, pero fíjate en nuestro cuadrado: el punto que representa ese estado, es decir, el punto $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ *no está a una distancia 1 del origen*, está en el interior de la circunferencia, no sobre su borde.

No voy a entrar aquí en fórmulas matemáticas, pero gráficamente creo que es fácil ver que el punto que tiene “lo mismo de cara que de cruz” es el punto que se encuentra justo en el medio de nuestro arco de circunferencia, y sus coordenadas se pueden calcular utilizando el Teorema de Pitágoras (sumando el cuadrado de los dos catetos, es decir, las dos coordenadas x e y , debe obtenerse la hipotenusa, es decir, 1). Sólo hay un punto que tenga lo mismo de cara que de cruz y diste 1 del origen:



Las coordenadas de ese punto, por si te interesan, son $(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})$, y el estado $|agitada\rangle$ sí puede escribirse como $|agitada\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |cara\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |cruz\rangle$. Por supuesto, *cualquier otro estado también puede escribirse como una combinación “ponderada” de los autoestados.*

En segundo lugar, piensa en lo que acabamos de hacer: hemos representado todos los estados posibles de la moneda en un “sistema de coordenadas” que acabamos de inventar, en el que hemos empleado los dos *estados propios* como dimensiones. Hemos creado, por lo tanto, **un espacio conceptual de dos dimensiones**, dentro del cual se encuentran localizados (conceptualmente, claro) absolutamente todos los posibles estados de la moneda. No sé a ti, pero a mí esto me parece algo apabullante: los infinitos estados, constreñidos a una línea imaginaria (el arco de circunferencia) en un espacio conceptual cuyas dimensiones son los propios *eigenestados* del sistema.

No es necesario, por lo tanto, realizar complejos cálculos para determinar todos los posibles estados de la moneda: *sólo hace falta calcular dos estados*. Para cualquier otro estado sólo tenemos que calcular dos números: sus coordenadas en nuestro espacio bidimensional *cara-cruz*. Sí, a veces puede ser peliagudo calcular esos dos números, pero no me negarás que es una tarea menos imponente que enfrentarse a los infinitos estados posibles “a pelo”.

Pero es que hay mucho más: ten en cuenta que, hasta ahora, hemos trabajado con nuestra moneda, el sistema más simple que he podido imaginar. Creo que estamos listos para ir más allá. Imagina que tenemos un sistema algo más complejo que la moneda, aunque no mucho más: **un dado de seis caras**. En este caso voy a describir el sistema, los *autoestados* y todo lo demás bastante más rápido que en el caso de la moneda, porque parto de la base de que tienes el sistema de la moneda superado.

Simplificando todo lo necesario, nuestro sistema —el dado— tiene un observable, el *lado* que muestra al mirarlo. Al lanzar el dado, éste puede mostrar seis posibles valores del observable *lado*, es decir, puede mostrar 1, 2, 3, 4, 5 o 6. Estos seis valores se corresponden, por supuesto, con los seis *autoestados* del sistema, que son los seis estados en los que puede

encontrarse el dado una vez que lo hemos lanzado. Llamemos a estos seis *autoestados* como sus valores asociados, para que sea evidente cuál es cuál: $|1\rangle$, $|2\rangle$, $|3\rangle$, $|4\rangle$, $|5\rangle$ y $|6\rangle$.

¿Cómo representar todos los demás estados del dado que no son autoestados? Pues, una vez más, utilizando los *autoestados* como las dimensiones de nuestro espacio conceptual. En este caso, y se trata de un simple y vulgar dado, ya aparecen cosas bien abstractas: no se trata ahora de un espacio de dos dimensiones, como en el caso de la moneda, ni de tres dimensiones como el que vemos con los ojos cuando miramos al mundo... **se trata de un espacio de seis dimensiones**, las correspondientes a los seis *estados propios* del dado.

Como comprenderás, en este caso no puedo utilizar dibujos para ayudarte a verlo, porque Geli todavía no ha aprendido a dibujar en 6D, pero sí podemos intentar imaginar –hasta donde es posible– a qué equivale la cosa. En el caso de la moneda teníamos dos dimensiones y dos coordenadas, ahora tenemos seis. En este espacio imaginario, cualquier estado del dado podría escribirse como un punto (x, y, z, p, q, r) , donde esas letras son las coordenadas del punto en el espacio. Todos los estados posibles del dado son puntos de ese tipo pero, una vez más, *no todos los puntos posibles son estados del dado*. No hace falta dibujar nada para ver esto: por ejemplo, creo que estarás de acuerdo conmigo en que el punto $(1, 1, 1, 1, 1, 1)$ no es un estado posible, está “fuera de la circunferencia”.

Pero, claro, ahora no hay una circunferencia: *estamos hablando de seis dimensiones*. Imagina –para que sea más fácil de ver– que hubiéramos aumentado las dimensiones, pero no hasta seis, sino hasta algo más asequible: tres dimensiones, algo que sí podemos visualizar. En ese caso, la condición que pusimos (los puntos posibles son aquéllos que están a una distancia 1 del origen) se traduciría, no en los puntos del cuadrado que disten 1 del origen, es decir, un cuarto de circunferencia, *sino en los puntos de un cubo de tres dimensiones que disten 1 del origen*, es decir... **una esfera**. Si tienes visión espacial, espero que no tengas problema para ver eso — el conjunto de puntos del espacio que distan 1 de un punto determinado constituye una esfera en tres dimensiones.

En seis dimensiones, por supuesto, no aparece una esfera, pero la condición sigue siendo la misma: es el conjunto de puntos que están a una distancia 1 del origen. La generalización del concepto de “esfera” a un espacio de n dimensiones recibe el nombre de *hiperesfera* o *n-esfera*, y es lo que se obtiene en este caso. Sé que suena un poco a ciencia-ficción, pero **los infinitos estados posibles del dado constituyen una hiperesfera en el espacio de seis dimensiones formado por los autoestados**.

Por ejemplo, el estado del dado justo antes de lanzarlo (suponiendo que no hacemos trampa y que nada favorece que salga un lado más probablemente que otro) es un estado que tiene lo mismo de todos los *autoestados*. No, no es $\frac{1}{6}$ de cada uno, porque entonces la distancia no sería 1: recuerda el caso de la circunferencia y cómo las coordenadas del “punto medio” no eran $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$, sino $(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}})$. En este caso sucede lo mismo, y podemos escribir el “punto medio” entre todos los estados como $(\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}})$.

En notación *bra-ket*, si llamamos al estado del dado antes de lanzarlo *previo*, podemos decir que $|\text{previo}\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}} |1\rangle + \frac{1}{\sqrt{6}} |2\rangle + \frac{1}{\sqrt{6}} |3\rangle + \frac{1}{\sqrt{6}} |4\rangle + \frac{1}{\sqrt{6}} |5\rangle + \frac{1}{\sqrt{6}} |6\rangle$. Quitémonos un sombrero n -dimensional ante Paul Dirac y compañía, señores.

Ah, pero la cosa no acaba aquí: si crees que los cuánticos se conforman con trabajar con espacios de seis dimensiones es que los subestimás. Apliquemos nuestra nueva

“representación espacial” a un caso aún más complejo, y del que hemos hablado ya en la serie anteriormente: [el pozo de potencial infinito](#). Si te hace falta, no dudes en releer la entrada antes de seguir con este artículo.

Como recordarás, una partícula dentro del pozo infinito no podía tener cualquier energía: sólo podía tener unos valores determinados. El valor más pequeño era el correspondiente al estado fundamental, y según aumentaba el número de nodos de la onda lo hacía también la energía que medíamos al mirar al electrón. *¿Qué quiere decir todo esto en los términos que venimos manejando ahora?* En primer lugar, el observable que estamos midiendo en este caso es la energía del electrón, y cuando lo hacemos obtenemos una serie de posibles valores — no todos son posibles, sino sólo los correspondientes a los “escalones” que describimos en aquella entrada.

Es decir, las energías de cada escalón (la del estado con dos nodos, la del de tres, la del de cuatro, etc.) **son los autovalores de la energía del sistema**. Y los estados del electrón que describimos entonces **son los autoestados del sistema**. En aquel entonces nos limitamos a cavilar sobre lo que sucedía *cuando mirábamos al electrón*, pero ahora estamos listos para describir el estado del electrón *en cualquier momento*, no sólo al medir su energía.

Pero ahora la cosa es todavía más abstracta que en el caso del dado. Como espero que recuerdes de aquel artículo sobre el pozo infinito, *existen infinitos escalones de energía*. Es decir, al construir ahora nuestro “espacio conceptual” utilizando los *autovalores* del electrón como las dimensiones del espacio... **hay infinitas dimensiones, una por cada autoestado posible del electrón**.

Llamemos, por ejemplo, $|E_0\rangle$ al estado fundamental del electrón (la onda de dos nodos en los extremos), $|E_1\rangle$ al siguiente “escalón”, $|E_2\rangle$ al siguiente, etc. Entonces, cualquier estado posible del electrón —antes o después de mirarlo— puede expresarse como un punto en un espacio de infinitas dimensiones, cuyas coordenadas serán (a, b, c, d, \dots) . Sí, dentro del paréntesis *hay infinitas coordenadas*. Raro, ¿eh?

En nuestra notación de Dirac, cualquier estado del electrón puede escribirse como $|E\rangle = a|E_0\rangle + b|E_1\rangle + c|E_2\rangle + d|E_3\rangle \dots$ y así hasta el infinito. Naturalmente, algunos de los estados posibles del electrón no son sumas infinitas, porque tal vez no incluyen a todos los autoestados, sino que muchas de sus coordenadas son cero. Por ejemplo, supongamos que el electrón se encuentra “a medias” entre los estados $|E_0\rangle$, $|E_1\rangle$ y $|E_2\rangle$. Entonces, su estado será (recuerda que la distancia debe ser siempre 1, y las raíces correspondientes) $\frac{1}{\sqrt{3}}|E_0\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|E_1\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|E_2\rangle$.

Pero, por supuesto, otros estados sí pueden involucrar infinitas coordenadas no nulas. Es decir, en general, **un estado cuántico se corresponde con un punto cualquiera de una hiperesfera en un espacio de infinitas dimensiones**. Podrías pensar que, llegados a este punto, sólo hay dos opciones: asumir la propia demencia y hundirse en un mundo de ilusión y fantasía delirantes, o abandonar cualquier esperanza de estudiar estas cosas. Sin embargo, curiosamente, para cuando la cuántica alcanzó este grado de madurez, las matemáticas ya habían llegado hasta aquí.

Sí, puede resultar extraño, pero alguien había definido ya el concepto de un espacio parecido al euclídeo que podemos ver, pero con infinitas dimensiones, y había desarrollado las matemáticas necesarias para operar con esos espacios. Ese genio —porque no merece otro calificativo— no es otro que David Hilbert, que ya ha aparecido en *El Tamiz* hace un tiempo

(también hablando [en aquella ocasión](#) del concepto de infinito). Y estos espacios conceptuales reciben el nombre, en su honor, de **espacios de Hilbert**.

Puede parecer que no es posible algo más abstracto y difícil de imaginar que el caso del pozo infinito y similares, pero lo hay; no vamos a hablar de ello hoy, porque tiene sutilezas que deberíamos preparar mejor, pero si conoces la diferencia entre un número infinito pero contable y otro incontable (como, por ejemplo, la diferencia entre los números naturales y los números reales) puedes comprender el horror en el que puede convertirse todo esto: en el caso del pozo infinito existen tantos estados como números naturales hay... *pero también es posible tener un número infinito e incontable de dimensiones en un espacio de Hilbert*. Por ejemplo, recordarás que la energía de un sistema cuántico “encerrado”, como el electrón en el pozo infinito, sólo puede tomar valores escalonados... pero esto no sucede para un sistema libre: un electrón –por decir una partícula concreta– que viaja libre por el espacio puede tener cualquier energía. Entonces, los infinitos autoestados del sistema no son valores discretos, **sino cualquier valor real de la energía**. Tenemos entonces un espacio ∞ -dimensional con tantas coordenadas como existen números reales. Si no puedes imaginarlo, bienvenido al club: *¡cállate y calcula!* (al menos a ti, a diferencia de mí, alguien ha intentado explicártelo en términos que pueden comprenderse hasta cierto punto).

Además, lo que acabamos de describir son *estados cuánticos puros*; también existen, cuando el sistema consta de muchas partículas, por ejemplo, *estados cuánticos mixtos* en los que la estadística tiene aún más que decir, pero por ahora no nos preocuparemos de ello — simplemente recuerda que, aunque esto sea complicado, aún hay más complicaciones en la formulación cuántica moderna. Pero, por otro lado, si has entendido esto no dejes que el hecho de que existan otras complicaciones te quite la satisfacción de haber comprendido algo realmente complejo. ¡Saborea el momento!

Dentro de unas semanas continuaremos nuestro viaje por las procelosas aguas de la física cuántica aplicando estos conceptos a otros sistemas que ya hemos estudiado antes, pero primero volveremos a otras series más pedestres que tenemos abandonadas, como la del [Sistema Solar](#). Entre otras cosas, la **OMS** recomienda no leer más de tres entradas seguidas sobre cuántica, “[...] o la mente del lector puede ser empujada más allá de los débiles límites de la cordura de modo que las simples tres dimensiones del espacio euclídeo se difuminen, revelando un Universo en el que los mitos de Cthulhu parecen cuentos de abuela”. Hasta la próxima, en la que hablaremos del [gato de Schrödinger](#).

El gato de Schrödinger

Tras una pausa más larga de lo que hubiera deseado, hoy seguimos buceando en las brumosas aguas de la mecánica cuántica, en la serie [Cuántica sin fórmulas](#). Es muy difícil entender este artículo sin tener claros los tres últimos de la serie, de modo que una recomendación: si eres un *tamicero añejo*, relee esas tres entradas ([estados cuánticos](#), [eigenestados](#) y [superposiciones cuánticas](#)), pues hace bastante tiempo y tal vez no las recuerdes demasiado bien; si eres un recién llegado, creo que sería aún mejor que empezases la serie [por el principio](#) o te va a parecer aún más inaccesible de lo que ya es de por sí.

Afortunadamente, este artículo es menos denso que los tres que lo precedieron, y no introduce conceptos nuevos, con lo que no hace falta que recomiende aspirinas para leerlo. De hecho, como alguna otra entrada de la serie, funciona bien como baremo: si no te pierdes al leerlo es que has entendido las últimas entradas de la serie. ¡Ojo! Te prevengo contra el peligro contrario: si el experimento te parece una estupidez con una solución obvia es que *no has entendido la serie hasta ahora*.

Es mucho más profundo de lo que parece, y tantos físicos insignes no han estado discutiendo (y aún siguen) sobre él durante décadas porque sean unos imbéciles de mente obtusa. Es un experimento mental en el que se mira, cual espejo, toda interpretación que se precie de la mecánica cuántica. Empezaremos a hablar del **gato de Schrödinger**. Esta primera entrada será una introducción al problema, que atacaremos desde distintas interpretaciones y nos llevará a lugares bastante raros de la cuántica. Pero paciencia, como siempre.

Cuando definimos lo que es un estado cuántico dentro de la teoría, recordarás que lo hicimos de una manera bastante cautelosa. Permite que me cite a mí mismo para discutir el asunto en este artículo:

Un estado cuántico es un objeto matemático que contiene la información de que disponemos sobre un sistema físico; idealmente, si la cuántica es una teoría completa y conocemos el sistema perfectamente, un estado cuántico contiene toda la información acerca del sistema.

La primera frase es una definición, y no hay mucho que discutir ahí. De hecho, los estados cuánticos son herramientas matemáticas, como las formulaciones de Heisenberg y Schrödinger, que permiten realizar predicciones científicas de una precisión tan extraordinaria que, desde muy pronto, prácticamente nadie cuestionaba unos ni otras. Pero la segunda frase tiene un condicional como una catedral, como no puede ser de otra manera si queremos ser rigurosos — si la teoría cuántica, por ejemplo, *no* es una teoría completa, un estado cuántico es algo con un valor muy relativo, mientras que si es una teoría completa y conozco el estado cuántico completo de un sistema, **conozco el sistema todo lo bien que puede ser conocido**.

Por ejemplo —un poco tonto, como casi todos los que pongo, pero qué se le va a hacer—: imagina que tú tienes una moneda, y te vas al interior de una habitación. Mientras estás allí, colocas la moneda sobre una mesa como te parece, y sales de la habitación. Si me informas de que has colocado la moneda sobre la mesa, pero no de si la moneda muestra cara o cruz, para mí el estado de la moneda será $\frac{1}{\sqrt{2}}|cara\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|cruz\rangle$, ya que no hay nada que me haga suponer que una posibilidad es más probable que la otra. Por cierto, si lo que acabo de decir te ha sonado a chino es que no has seguido mi consejo y releído los artículos anteriores.

Pero, como comprenderás, en ese caso estamos dando una definición *suave* o *blanda* del concepto de *estado* de la moneda. Tú sabes perfectamente qué lado muestra la moneda. Yo no, pero no porque no esté definido en sí mismo, ni porque sea imposible conocerlo, **sino porque no tengo toda la información que es posible tener sobre la moneda**. En el caso de la moneda hay una diferencia muy intuitiva entre el “*estado real*” de la moneda y el “*estado de información*” que representa mi conocimiento sobre la moneda, ya que no tengo más que preguntarte (por ejemplo) para cambiar mi conocimiento sobre la moneda sin cambiarla a ella. Son conceptos claramente separados.

En el caso de un electrón, un fotón o un átomo, es mucho más difícil saber si lo que conozco sobre ellos es todo lo que se puede conocer o no lo es. Por eso en esos casos es muy

complicado saber si lo que conozco es el “estado de información” o el “estado real” de lo que estoy estudiando. Las ecuaciones de la cuántica no distinguen entre ambos, pero eso no quiere decir que muchos físicos se conformaran con eso. Crearon interpretaciones de las ecuaciones y las predicciones que éstas realizaban.

Algunos de ellos, como Heisenberg y Bohr, desarrollaron la *Interpretación de Copenhague*, de la que ya hemos hablado en la serie con anterioridad, ya que ha sido durante décadas –y sigue siendo, aunque seamos conscientes de sus limitaciones– la interpretación más extendida de la cuántica. Esta interpretación se basa en varios principios, y varía bastante según a quién le preguntes. Sin embargo, aquí tienes los cuatro principios esenciales expuestos por Bohr y Heisenberg; el primero debería ya ponerte las orejas alerta. La negrita es mía:

1. Un sistema está **completamente definido** por una función de onda, que representa el conocimiento del sistema por parte de un observador.
2. ([Principio de indeterminación](#)) **No es posible conocer los valores de todos los observables del sistema al mismo tiempo**; sí lo es establecer leyes probabilísticas sobre ellos.
3. ([Principio de complementariedad](#)) Las cosas tienen una naturaleza dual, y se comportan como partículas o como ondas, **pero no como ambas a la vez**.
4. (Principio de correspondencia) La descripción cuántica de sistemas macroscópicos **tiende a la descripción clásica** de esos sistemas, según la probabilidad tiende hacia la estadística en un número muy grande de medidas.

Como puedes ver, el primer principio de la *Interpretación de Copenhague* invalida el estado $\frac{1}{\sqrt{2}}|cara\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|cruz\rangle$ de la moneda como estado cuántico del sistema. Ese estado representa información, pero *notoda* la información que se puede tener sobre el sistema. Es información, pero no un estado cuántico, pues no todo conjunto de información sobre un sistema es un estado cuántico, **sólo los que contienen toda la información del sistema lo son**. Entender esta diferencia es esencial para comprender la diferencia entre esta interpretación y otras, y por qué el problema del gato no es una estupidez.

Por el contrario, si conozco la posición y el momento de una partícula con la máxima precisión posible (que no es infinita para ambos, como ya sabes), y escribo esa información sobre la partícula como objeto matemático, eso *sí* es un estado cuántico de acuerdo con la *Interpretación de Copenhague*, porque conocido ese objeto matemático se conoce el sistema tan bien como es posible conocerlo. Siento ser repetitivo, pero este concepto es fundamental.

Ese primer principio produjo un intensísimo escozor mental a muchos físicos, ya que supone la verdadera ruptura con las ideas anteriores de realidad objetiva, como hemos mencionado ya anteriormente en *El Tamiz*. No es que un estado cuántico sea probabilístico porque no hayamos obtenido toda la información del sistema: el estado cuántico **es** toda la información del sistema. En resumen: Dios *sí* juega a los dados. Esto era inaceptable para muchos, entre ellos Einstein y Schrödinger, que trataron de encontrar agujeros en la interpretación de Copenhague y de proponer otras alternativas.

Es importante que entiendas, antes de que discutamos otras interpretaciones alternativas de la mecánica cuántica, que divagar es fácil, pero no siempre es ciencia. Una interpretación es científicamente relevante, entre otras cosas, si es [falsable](#). Yo podría decir, por ejemplo, que

es imposible conocer a la vez la posición y la velocidad de un electrón porque, cuando intento medir una, un demonio invisible (que nunca jamás podríamos ver de ningún modo porque no está en nuestro Universo, pero es capaz de afectarlo imperceptiblemente) le da un golpe al electrón y lo mueve o altera su velocidad. Y eso puede ser interesante o divertido, pero no es ciencia.

Einstein discutió durante bastante tiempo con Bohr y sus partidarios, y [ya hemos dedicado un artículo](#) a esos debates. Allí hablamos de la *paradoja EPR*, que Einstein publicó junto con Podolsky y Rosen en 1935. El mismo año, en parte como reflexión ante esa paradoja, Erwin Schrödinger propuso otro experimento mental que trataba de mostrar lo absurdo de llevar la interpretación de Copenhague a sus últimas consecuencias: la **paradoja del gato de Schrödinger**.

El artículo de Schrödinger, en la revista alemana *Die Naturwissenschaften (Las Ciencias Naturales)*, es bastante largo, y trata de desmontar las ideas de Bohr y compañía de diversas maneras. En lo que se refiere al gato, la parte más memorable del artículo, Schrödinger intenta mostrar cómo es fácil suponer que un estado cuántico representa absolutamente la información completa de un sistema cuando hablamos, por ejemplo, del espín de un electrón, o de la probabilidad de que una partícula sufra el [efecto túnel](#), pero no cuando hablamos de cosas macroscópicas.

Sin más preámbulos, aquí tienes una traducción del párrafo en cuestión:

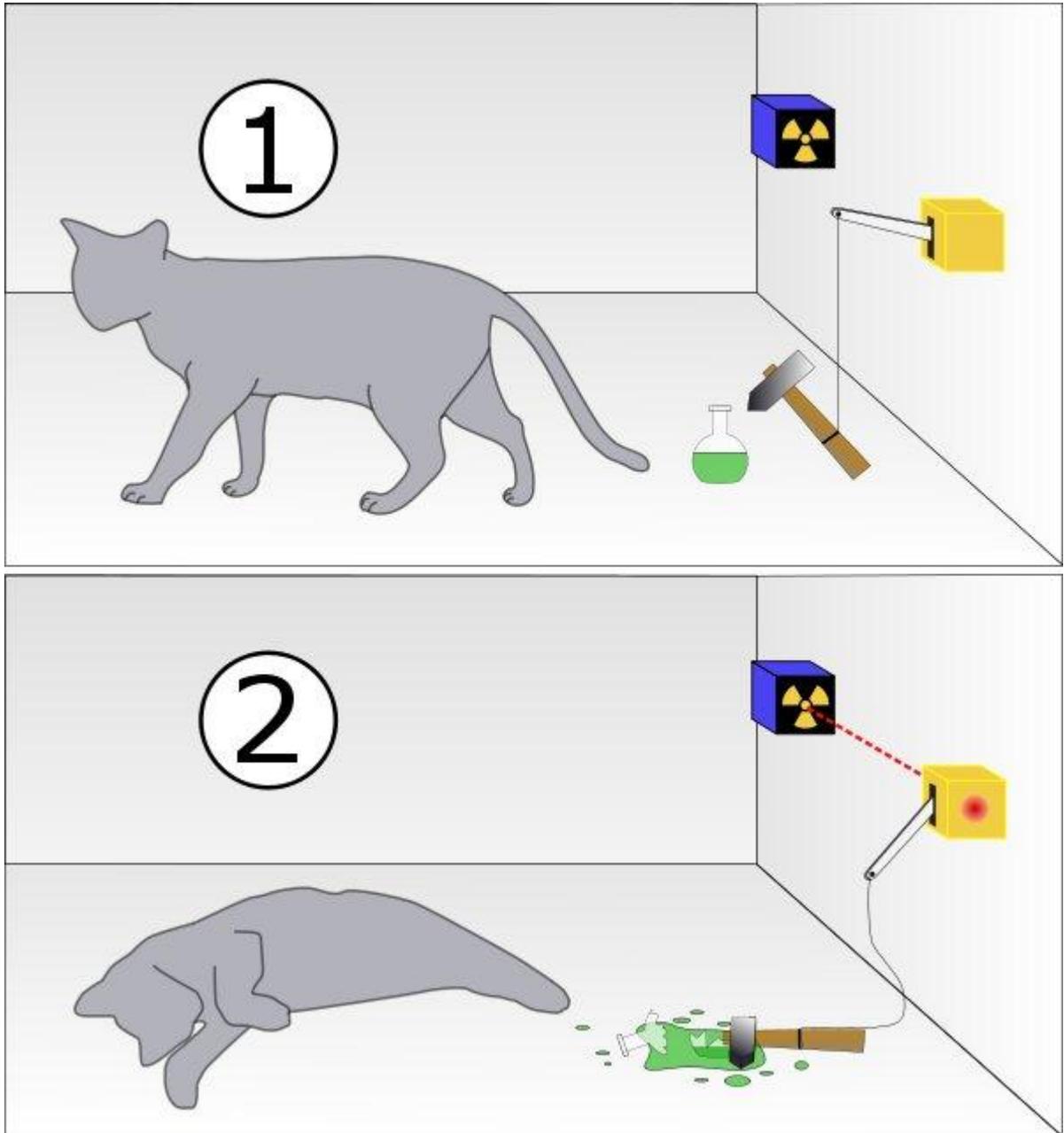
Pueden incluso plantearse casos bastante absurdos. Un gato está encerrado en una cámara de acero, junto con el siguiente aparato (que debe ser protegido frente a una posible injerencia por parte del gato): en un contador Geiger hay una minúscula cantidad de una sustancia radioactiva, tan pequeña que tal vez, en el transcurso de una hora, uno de los átomos se desintegre, pero también, con igual probabilidad, ninguno lo haga; si sucede, el tubo del contador Geiger se descarga y, a través de un relé, libera un martillo que rompe un pequeño frasco de ácido cianhídrico. Si se deja este sistema aislado durante una hora, podríamos decir entonces que el gato seguirá vivo si ningún átomo se ha desintegrado. La función de onda de este sistema expresaría esto incluyendo el gato vivo y el gato muerto (perdón por la expresión) mezclados o esparcidos a partes iguales.

Es decir, como hay un 50% de probabilidades de que se haya desintegrado algún núcleo y un 50% de que no, hay un 50% de probabilidades de que el gato esté vivo y un 50% de que esté muerto, y no estaré seguro de cuál de las dos posibilidades es real hasta que abra la caja. De acuerdo con la notación de Dirac que expliqué en los artículos anteriores, podemos describir el estado del gato antes de abrir la caja así: $\frac{1}{\sqrt{2}} |vivo\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |muerto\rangle$. Pero *¿qué quiere decir eso exactamente?* Es una cosa hablar de estados del núcleo que se desintegra o no, y una muy distinta de algo, como un gato, que es cercano a nuestra experiencia. ¡O el gato está vivo, o está muerto! *¿O no?*

El experimento mental de Schrödinger plantea preguntas fundamentales sobre el concepto de estado y de realidad, de observación y localidad, como veremos luego; preguntas que toda interpretación de la mecánica cuántica que se precie debe responder. De hecho, una manera relativamente sencilla de presentar una interpretación determinada de la cuántica es responder a la pregunta, *¿Cómo se describe el caso del gato de Schrödinger con esta interpretación?*

Por ejemplo, supón que eres un partidario de Einstein, y piensas que la naturaleza probabilística de la cuántica no se debe a propiedades inherentes a la materia, sino a que no conocemos todas las variables del sistema. ¿Cómo explicarías entonces el caso del gato de Schrödinger? Básicamente así: el gato está en todo momento vivo o muerto. Si digo que el gato está $\frac{1}{\sqrt{2}} |vivo\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |muerto\rangle$, estoy diciendo más sobre mi propia información sobre el

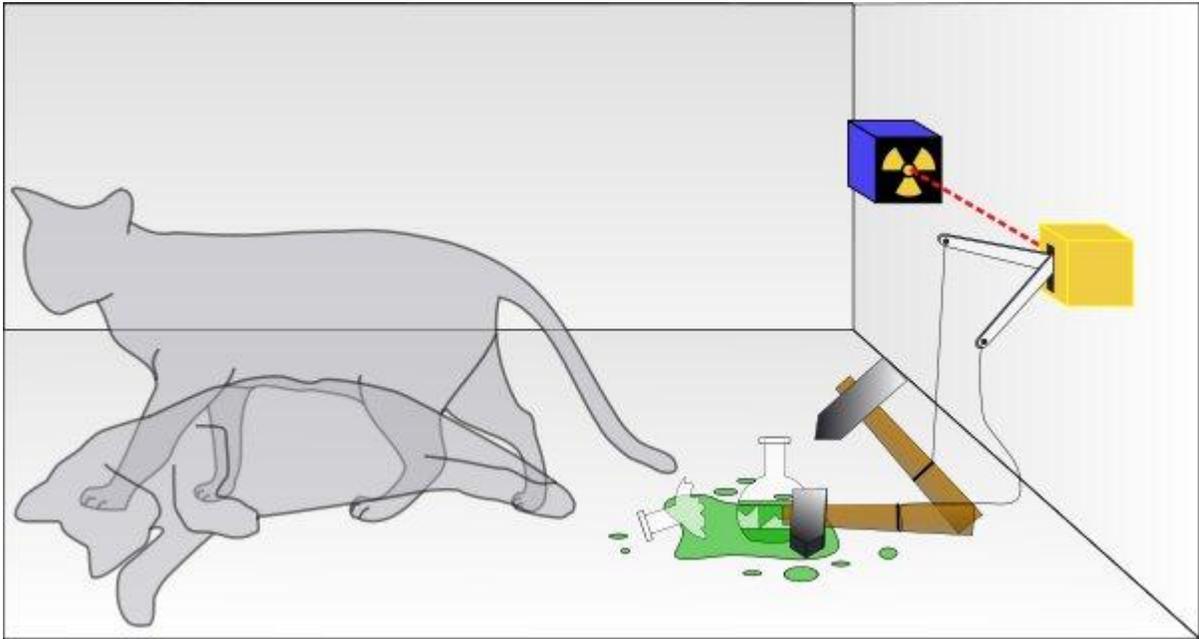
problema que sobre el propio gato. Mi información es incompleta; desconozco si se ha desintegrado un núcleo o no porque estoy tratando el problema de manera probabilística debido a mi conocimiento parcial sobre el comportamiento de los átomos. Si tuviera en cuenta *todas* las variables del problema, el estado del gato siempre sería $|vivo\rangle$ o $|muerto\rangle$.



El gato según Einstein: o está vivo o está muerto, independientemente de que lo miremos o no. Crédito: [Wikipedia/FDL](https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Schr%C3%B6dinger).

Por lo tanto, cuando abro la caja no sucede nada especial: el gato es el mismo de antes. El estado del gato cambia simplemente porque lo hace mi información sobre él, y entonces lo conozco perfectamente. Dicho mal y pronto, según Einstein **el gato no está borroso, es que nosotros tenemos unas gafas mal ajustadas, tenemos que buscar unas mejores.**

Heisenberg, por el contrario, frunciría las cejas ante la explicación de Einstein. Lo que sucede, según la versión más “dura” de la Interpretación de Copenhague, es que el estado $\frac{1}{\sqrt{2}} |vivo\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |muerto\rangle$ *estoda* la información que es posible obtener sobre el gato. A efectos prácticos, para un científico que se enfrenta al problema, es *el gato*. La indeterminación sobre su estado no se debe al hecho de que no conozcamos bien el comportamiento de los átomos y sus desintegraciones: se debe al hecho de que una partícula en un pozo de potencial finito puede escapar de él en cualquier momento y no es posible asegurar cuándo lo hará, ni siquiera si lo hará, sólo realizar predicciones probabilísticas.



*El gato según Heisenberg: Hasta que lo miramos, el gato está $\frac{1}{\sqrt{2}} |vivo\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |muerto\rangle$.
Crédito: [Wikipedia/FDL](#).*

Cuando abro la caja, la función de onda se colapsa y mido uno de los *autoestados* del gato. Es decir, según Heisenberg **el gato está borroso y se hace nítido al abrir la caja**. No tiene sentido preguntarse sobre si “realmente” estaba vivo o muerto antes de ese momento, ya que no hemos medido el observable.

Tanto la interpretación de Einstein como la de Heisenberg tienen problemas serios, y hablaremos de ellos (y de otras interpretaciones alternativas, como los Universos paralelos y otras aún más raras) más adelante, pero la importancia del experimento mental de Schrödinger es cómo diferencia las distintas interpretaciones a un nivel que es fácil de entender, ya que se refiere a algo que podemos imaginar fácilmente e incluso experimentar en cierto sentido. Es algo mucho más cercano que un núcleo atómico o un fotón.

En él se ponen de manifiesto algunas lagunas enormes de la *Interpretación de Copenhague*, como el propio hecho de la medida: *¿qué es “medir” en este experimento? ¿Abrir la caja? ¿Cómo modifica al gato el que yo abra la caja, cuando la desintegración se ha producido (o no) en el pasado? ¿Qué es lo relevante, el hecho de que yo conozca el resultado o el proceso físico de la medida? ¿Por qué se trata cuánticamente al gato y la caja, pero no a mí ni al proceso de medida?, etc.*

Además, el hecho de que el gato sea un ser vivo plantea preguntas adicionales: *¿cuál es el estado del gato para el propio gato? ¿es el mismo que para mí, que estoy fuera de la caja? Si abro la caja y el gato sigue vivo, debe tener recuerdos de lo que sucedió antes; ¿se recuerda a sí mismo siempre vivo, o como una superposición de vivo y muerto? Es más, si una persona diferente de mí abre la caja, ¿qué le sucede al estado del gato? Si en vez de un gato meto en la caja a una persona que puede relatar con posterioridad lo que ha sucedido, ¿qué contaría?*

En resumen, el experimento del gato muestra la clave de las diferencias entre unas interpretaciones y otras: *¿es el estado cuántico una entidad con existencia propia, es sólo una abstracción de mi conocimiento incompleto, o no tiene sentido hacerse esa pregunta?*

Afortunadamente, las interpretaciones de la cuántica (las interpretaciones *científicas*, debería decir, porque hay mucho charlatán por ahí) realizan predicciones que pueden comprobarse empíricamente, y algunas son predicciones incompatibles con otras interpretaciones. Es posible diseñar experimentos que demuestren que una u otra característica de una interpretación concreta es falsa o verdadera, aunque algunos de estos experimentos no se hayan realizado aún por problemas prácticos (otros sí lo han hecho, y hablaremos de ellos en el futuro).

El experimento mental del gato es importante además porque, en él, Schrödinger hace mención de un término que hoy en día utilizamos hasta la saciedad y tiene implicaciones muy serias, según la interpretación que le demos. Este término es *Verschränkung*, que podemos traducir como *entrelazamiento* o, más específicamente (para no confundir), *entrelazamiento cuántico*. Existe, en el caso del gato y la muestra de material radioactivo, una conexión íntima entre sus estados cuánticos — están *entrelazados*. A este concepto dedicaremos [la siguiente entrega de la serie](#), dentro de unos días.

El entrelazamiento cuántico

En el último artículo de la serie [Cuántica sin fórmulas](#) hablamos acerca del [gato de Schrödinger](#), el experimento mental en el que el genial físico austríaco trataba de poner de manifiesto las conclusiones aparentemente absurdas de llevar la mecánica cuántica hasta las últimas consecuencias en su interpretación del mundo que observamos. En el artículo en el que describe ese experimento mental, Schrödinger introdujo el término *Verschränkung*, y a él vamos a dedicar la entrada de hoy. Hablaremos acerca de ese *Verschränkung*, del **entrelazamiento cuántico**.

Ni qué decir tiene que, si no llevas con nosotros desde el principio de la serie, es muy recomendable que empieces por el [primer artículo](#) o esto te va a parecer aún más raro de lo que ya es. Además, un par de avisos adicionales: en primer lugar, como siempre en esta serie, voy a realizar simplificaciones terribles que sólo merecen que maldigas mi nombre, especialmente si eres físico como yo. Emplearé, además, ejemplos estúpidos y absurdos, para obtener conclusiones aberrantes. En resumen, no se me ocurre ninguna razón para que sigas leyendo este artículo, de modo que *¡allá tú si lo haces!*

Dicho esto, Schrödinger introduce el término de *entrelazamiento* al hablar del sistema gato-isótopo, ya que –como espero que recuerdes del experimento mental– si se ha producido una desintegración, el gato habrá muerto, mientras que si no se ha producido, el gato estará vivo. Existe una “conexión íntima” a nivel físico entre el gato y el isótopo. Sin embargo, permite que ilustre el concepto de entrelazamiento cuántico con un ejemplo diferente, antes de hacerlo con casos algo más realistas.

Imagina, querido y paciente lector de *El Tamiz*, que existe una extrañísima especie de conejos, los *cuantejos*, que tienen ciertas características muy peculiares. Existen dos tipos de cuantejos: los *cuantejos angelicales* y los *cuantejos diabólicos*. Y esos nombres describen las dos variantes de cuantejo perfectamente bien — los cuantejos angelicales son adorables, pacíficos y afectuosos. No hay nada que les guste más que recibir abrazos. Sin embargo, los cuantejos diabólicos son criaturas sanguinarias y ferocísimas — intenta acariciar a uno de ellos y seguro que acabas sin dedo y, probablemente, sin sangre en las venas.

Las dos variantes de cuantejos están perfectamente equilibradas: los cuantejos siempre nacen a pares, un cuantejo angelical y otro diabólico. Y, al nacer, ambos son absolutamente indistinguibles, tanto por su apariencia como por su comportamiento. Es durante la primera noche después de nacer cuando, de pronto, muestran su naturaleza angelical o demoníaca de forma inequívoca. A partir de ahí, no cabe duda de a qué variante pertenece el cuantejo en cuestión — un 50% de las veces, para desgracia de quien esté cerca.

Imagina ahora que nace un par de cuantejitos pequeños y monísimos, y *un amigo común nos regala uno a ti y otro a mí*. Ambos han nacido juntos, lo que significa que llegará un momento, esta misma noche, en el que uno de los dos cuantejitos se mostrará como un cuantejo angelical, y el otro como diabólico. Sin embargo, nuestro amigo común nos ha dado los cuantejitos metidos en sendas cajas (con agujeros, por supuesto, y suficiente agua y comida para que puedan sobrevivir sin problemas), con lo que no podemos verlos y no hay nada exterior que los afecte de ningún modo.

De manera que tú te vas a tu casa con tu cuantejito, y yo me voy a mi casa con el mío, ambos metidos en las cajas, y nos prometemos mutuamente que no abriremos las cajas hasta la mañana siguiente, después de que la verdadera naturaleza de los dos cuantejos ya sea evidente. Pero, antes de seguir con el ejemplo, con lo que tenemos hasta ahora podemos empezar a discutir sobre algunas propiedades de las teorías físicas y, sobre todo, de la cuántica.

Si recuerdas las entradas sobre estados cuánticos, $|angelical\rangle$ y $|diabólico\rangle$ son *autoestados* del observable *tipo de cuantejo*. Cuando nos vamos a nuestras respectivas casas, el estado de mi cuantejo es $\frac{1}{\sqrt{2}}|angelical\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|diabólico\rangle$, ya que no hay absolutamente nada que me indique de qué tipo es, pero sé que, de los dos, uno es el diabólico y el otro el angelical, con lo que existe la misma probabilidad de que mi cuantejo resulte ser el uno o el otro. Espero que, para empezar, este ejemplo te haya servido para refrescar los conceptos de estado y autoestado; ahora, vayamos más allá.

Si la teoría cuántica es **completa**, eso quiere decir que conozco absolutamente todas las variables que definen a mi cuantejo, con lo que el estado de mi cuantejo y el cuantejo en sí son, a todos los efectos, indistinguibles. Ya hablamos de esto al definir los estados cuánticos (lo hicimos entonces con un dado), pero creo que este concepto se entiende mejor negando su definición: *si la teoría cuántica es incompleta, entonces existen variables que definen mi cuantejo, que pueden ser conocidas, pero que mi teoría no contempla*. Por ejemplo, si todos

los cuantejos nacen con un gen que determina si son angelicales o diabólicos, pero ese gen no afecta al comportamiento ni la apariencia del cuantejo hasta la primera noche, y mi teoría no contempla los genes, entonces mi teoría es incompleta. No es que la variante del cuantejo no esté determinada, es que yo no la conozco porque mi teoría falla.

Esto tiene la suficiente importancia como para que lo repita: si la teoría es completa y conozco el estado del cuantejo, si cambia el estado es que ha cambiado el cuantejo o al revés. Pero si la teoría no es completa existe una desconexión entre la información que tengo del cuantejo y el cuantejo en sí. Es posible que mi información cambie sin que lo haga el cuantejo, o viceversa, porque haya variables que cambien sin que yo me dé cuenta porque la teoría no las contemple.

Las variables de ese tipo se denominan *variables ocultas*, y algunos físicos, como Einstein, consideraban que su existencia explicaría la aparente aleatoriedad de la cuántica — no es que las cosas no estuvieran definidas, sino que no estábamos teniendo en cuenta las cosas que las definían. (Por si te lo estás preguntando, no, no hemos encontrado ninguna de esas variables hasta ahora, y mira que lo hemos intentado).

Pero supongamos, para seguir con el ejemplo, que la teoría cuántica *sí* es completa, y que la naturaleza de mi cuantejo *no* está determinada en absoluto cuando me lo llevo a casa, como tampoco lo está la del tuyo, por supuesto. Lo que sí está claro es que no es posible conocer la variante de mi cuantejo sin conocer la del tuyo y viceversa: ambos nacieron a la vez, con lo que uno de ellos es necesariamente angelical y el otro diabólico. En cierto sentido, *no tiene sentido describir a nuestros cuantejitos separadamente*, porque sus estados cuánticos están íntimamente unidos: **nuestros cuantejitos están entrelazados**.

Dicho de otro modo, si mi cuantejito es el cuantejito A y el tuyo el B, lo que tiene de verdad sentido es describir el estado de los dos cuantejitos juntos como algo así: $\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{angelical}\rangle_A \otimes |\text{diabólico}\rangle_B + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{diabólico}\rangle_A \otimes |\text{angelical}\rangle_B$. Ese símbolo \otimes , en lo que a nosotros respecta en esta serie, simplemente significa “combinado con”, ya que las dos posibles combinaciones son que mi cuantejito sea angelical y el tuyo diabólico o al revés. Lo usaremos en otros artículos de la serie pero creo que, sin entrar en disquisiciones matemáticas, es bastante evidente lo que significa.

Imagina que, de madrugada, decido romper mi promesa y abro la caja de mi cuantejito para ver si es afectuoso y adorable o una máquina de muerte y destrucción. Supongamos que, en el momento en el que abro la caja, el pequeño animalito salta hacia mi yugular con las fauces abiertas, sediento de sangre. No tiene sentido que diga que el estado de mi cuantejo es $|\text{diabólico}\rangle$. Lo que sí tiene sentido que diga es que el estado de los dos cuantejos entrelazados es $|\text{diabólico}\rangle_A \otimes |\text{angelical}\rangle_B$. Si has entendido esto, has comprendido lo que es el entrelazamiento cuántico y creo que, cuando lleguemos a algunas de sus posibles aplicaciones, no tendrás ningún problema en comprenderlas tampoco... pero la cosa no acaba aquí.

Hay una parte intuitiva de esto, y otra que hace que nuestra intuición rechine los dientes, de modo que vamos primero con la parte fácilmente asimilable. Al determinar que mi cuantejo es diabólico, estoy absolutamente seguro de que, cuando tú abras tu caja, tu cuantejo saltará a tus brazos, afectuoso y adorable, deseoso de cariño. Esto es inevitable dado el entrelazamiento de los cuantejos: si sé la variante de uno, sé la variante del otro sin lugar a dudas.

Si la variante de los cuantejos estuviera determinada por alguna variable oculta, entonces todo sería así de sencillo: mi cuantejo siempre fue diabólico desde el principio, y el tuyo adorable. Nada ha cambiado en ninguno de los dos cuantejos al abrir mi caja, simplemente lo ha hecho la información que yo tengo de ellos. Pero, *¿y si la teoría cuántica es una teoría completa y el estado del cuantejo contiene absolutamente toda la información que es posible obtener sobre el cuantejo?* Supongamos que es así, y verás cómo obtenemos consecuencias muy raras: tan raras que a Einstein le parecían aún más aberrantes que la aleatoriedad de la cuántica, e hicieron que el insigne físico rechazase este concepto de entrelazamiento con garras y dientes.

Si los estados contienen toda la información, antes de que yo abra mi caja y mi cuantejito salte a mordirme el cuello, no es que no sepamos si tu cuantejo es angelical o no; **es que tu cuantejo no es ni una cosa ni la otra**. Porque, si lo fuera pero no lo supiéramos, entonces habría algo que no estamos teniendo en cuenta en la teoría, luego no sería completa... pero hemos partido de la base de que lo es. Si la teoría cuántica es completa y el estado de tu cuantejo cambia, es *que tu cuantejo cambia*. Si el estado cambiase de $\frac{1}{\sqrt{2}} |\text{angelical}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{diabólico}\rangle$ a $|\text{angelical}\rangle$ sin que lo hiciese el cuantejo, es que el estado inicial no contenía toda la información del sistema, algo absurdo porque es nuestra premisa. Si esto te parece un galimatías y no lo tienes claro, ¡vuelve a leer los dos últimos párrafos antes de seguir!

¿Preparado?

Esto quiere decir que, en el momento en el que yo abro la caja y mi cuantejito salta de ella con ojos inyectados en sangre, de manera absolutamente instantánea, tu cuantejito ha cambiado y, de ser un cuantejito “indeterminado” se ha convertido en un cuantejito angelical. La conexión entre nuestros cuantejos es así de íntima: no hay nada en el Universo que pueda hacer que, al alterar el estado de mi cuantejo, el tuyo no cambie también. Esa interacción, a diferencia de la fuerza eléctrica o la gravitatoria, no disminuye con la distancia, no puede ser detenida por barreras físicas de ningún tipo, no puede ser detectada en su “transmisión” porque no hay ninguna transmisión mensurable en el espacio entre los dos cuantejos. Lo que sea que va de mi cuantejo al tuyo (aunque ésta no es, en mi opinión, una buena descripción, porque no hay movimiento ni transmisión de nada, hay un cambio simultáneo) es intangible, imparable e inmediato.

En palabras de Einstein, se trata de una *spukhafte Fernwirkung*, una *acción fantasmal a distancia*. Esto es algo que repugnaba al genial físico profundamente; tanto que, de ser la teoría cuántica una teoría completa, él mismo “preferiría ser zapatero, o incluso empleado de una casa de apuestas, antes que físico”. Ya hemos hablado antes en *El Tamiz* acerca de su argumento, elaborado junto con Podolsky y Rosen, al mencionar las [discusiones entre Einstein y Bohr](#) hace ya más de dos años (!).

La razón de esta repugnancia puede no resultar evidente al principio, pero se debe a la siguiente razón: **si la cuántica es una teoría completa, la realidad no es local**. Hasta este momento, se había considerado que un cambio en cualquier componente del Universo sólo producía un cambio en su inmediata vecindad, que luego podía ir propagándose (como mucho, a la velocidad de la luz) hasta alcanzar puntos alejados de él según pasaba el tiempo. Por ejemplo, si tú tienes un objeto y yo otro, y tu objeto cambia, ese cambio no afectará a mi objeto hasta que haya pasado un tiempo determinado (tanto más grande cuanto más alejados estén los objetos).

Por lo tanto, de acuerdo con la teoría clásica, si yo quiero estudiar mi objeto durante un tiempo corto, puedo ignorar los cambios que tú puedas realizar sobre el tuyo, porque no llegarán a

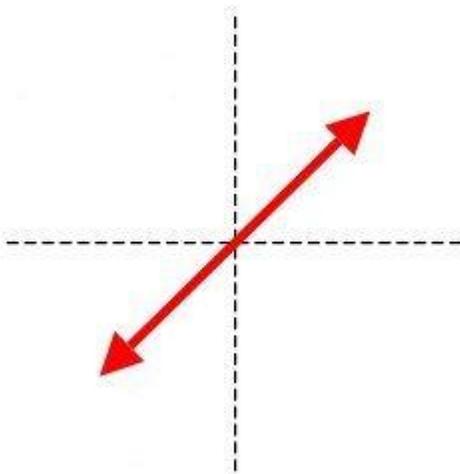
afectar al mío. Pero, si la teoría cuántica es completa, como en el caso de los cuantejos de arriba, un cambio en uno de ellos puede producir cambios en otros de manera instantánea, por muy alejados que estén de él, sin que haya una mediación de cambios intermedios a través del espacio que los separa. Esa realidad no es *local*: no puedo describir una parte del Universo sin describirlo todo, porque los cambios se producen “en todo a la vez”, en vez de producirse en un punto y propagarse a otros. En palabras de Einstein,

La siguiente idea caracteriza la independencia relativa de los objetos A y B alejados en el espacio: la influencia externa sobre A no tiene influencia directa sobre B; esto se conoce como Principio de Acción Local [...]. Si este axioma se rechazase completamente, la idea de la existencia de sistemas cuasi-aislados, y por lo tanto la postulación de leyes que pueden comprobarse empíricamente en el sentido comúnmente aceptado, sería imposible.

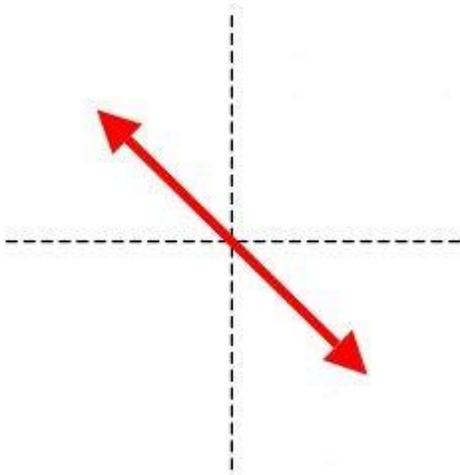
Si has entendido esto con los cuantejos, pasemos a describir brevemente cómo se lleva a cabo esto en la realidad. Desde luego, lo de los cuantejitos es un ejemplo tonto cuyo objetivo es simplemente hacer esto más accesible: un cuantejo macroscópico no presentará fácilmente características cuánticas, pero bueno.

Una de las maneras más comunes de lograr el entrelazamiento es el uso de láseres y cristales. Ciertos cristales tienen la curiosa propiedad, cuando reciben luz (dicho “en cuántico”, fotones) de que a veces un fotón es absorbido por el cristal y a continuación se emiten dos en su lugar, en un proceso llamado **conversión paramétrica a la baja**. Desde luego, la energía total suma de los dos fotones es la del fotón original, pero existe otra propiedad más curiosa, debida a la conservación del momento lineal — *los dos fotones que salen están polarizados perpendicularmente el uno respecto del otro*. No sé lo que conoces sobre la polarización, y no tengo espacio aquí para explicarla, pero dicho mal y pronto, si la onda electromagnética que transporta el primer fotón oscila *verticalmente*, entonces seguro que la del otro lo hará *horizontalmente*, y para cualquier otra dirección de oscilación, ambas serán perpendiculares la una a la otra.

Fíjate en cómo esto es bastante parecido al caso de los cuantejos: los dos fotones aparecen al mismo tiempo, y son indistinguibles el uno del otro hasta que se realice una observación sobre ellos. Dado que los dos fotones pueden alejarse el uno del otro, es posible que yo, como observador, sólo me fije en uno de ellos, y que nunca jamás tenga acceso al otro. Pero lo que es seguro es que, si mido la dirección de polarización de mi fotón y veo esto:



Entonces el estado de mi fotón ha cambiado, como también lo ha hecho, de forma instantánea, el otro fotón que nunca he visto; y puedo estar seguro de que, cuando alguien lo mida, observará esto:



En entradas posteriores hablaremos de diversos experimentos que utilizan el entrelazamiento, y verás cómo casi siempre se usan variaciones de esta idea, porque es relativamente fácil de reproducir el proceso y los dos fotones producidos están siempre entrelazados. Eso sí, es muy difícil mantener ese entrelazamiento, y ahí sí que la cosa es diferente de la de los cuantejillos, que se mantenían entrelazados sin que tuviéramos que preocuparnos por ellos. Ya hablaremos de los aspectos prácticos en el futuro.

Como siempre en esta serie, prefiero dedicar cada artículo a un concepto determinado porque ya son lo suficientemente turbios como para, encima, mezclar unos con otros. Sin embargo, no puedo terminar sin dejar de mencionar una falsa concepción relacionada con el entrelazamiento que se oye con relativa frecuencia, sobre todo al hablar de un concepto que trataremos más adelante en la serie, el teletransporte cuántico. Esa falsa concepción es la idea de que lo que acabo de describir, de ser la cuántica una teoría completa, *permite una transferencia instantánea de información entre dos observadores*. Esto es falso, y tal vez ya tengas claro por qué es así si has comprendido muy bien el entrelazamiento; por si no es así, sigamos con el ejemplo de los cuantejos para hablar de esto.

Sigamos partiendo de la hipótesis de que la cuántica es una teoría completa y que, cuando yo abro la caja y mi cuantejo se abalanza sobre mí, algo cambia en el tuyo de manera instantánea. La pregunta aquí es, *¿cómo puedo utilizar esa instantaneidad para enviarte un mensaje burlándome de los límites de la velocidad de la luz?* Por ejemplo, supongamos que, cuando nos separamos, cada uno con su cuantejo, estábamos pensando en ir al cine al día siguiente, pero yo no estaba seguro de querer ir o no.

Yo estoy en mi casa, con la caja de mi cuantejito cerrada, y decido que no tengo nada importante que hacer al día siguiente y que sí quiero ir al cine. Puedo llamarte por teléfono para decírtelo, desde luego, pero *¿existe alguna manera de utilizar mi cuantejo y el cambio instantáneo en el estado del tuyo para que pueda darte ese mensaje sin utilizar nada más? ¿qué código preestablecido podemos utilizar para eso, que no requiera que yo sepa de antemano, mientras estamos juntos, cuál va a ser mi elección?*

Si piensas durante un rato verás, espero, que... simplemente, **no puedo**. Yo abro mi caja, mi cuantejito resulta ser diabólico y se abalanza sobre mí, y entonces sé que el tuyo es

necesariamente angelical, pero no hay manera de que pueda utilizar ningún código para enviarte el mensaje de que, si sobrevivo a esta bestia infernal que trata de devorarme, sí me gustaría ir al cine contigo mañana. La única manera que tengo de emplear el entrelazamiento es utilizar un canal clásico de información (por ejemplo, llamarte por teléfono) para complementar el hecho de que sé que tu cuantejo es angelical.

Desde luego, puedes estar preguntándote, “Entonces, ¿para qué diablos sirve todo esto? ¡Si me vas a llamar por teléfono de todos modos para decirme si vienes al cine, ¿de qué sirven los cuantejos?” Y la respuesta es interesante, pero tendrá que esperar a posteriores entradas. Como pista, desde luego que no sirve de nada si simplemente quiero que sepas que quiero ir al cine contigo. Sirve de mucho si quiero que *nadie más que tú*, incluso si está escuchando nuestra conversación telefónica, pueda saber si quiero ir al cine o no. Tiempo al tiempo.

En la próxima entrega de la serie hablaremos acerca de la [criptografía cuántica](#).

Criptografía cuántica

¡Sí, por fin llega otro artículo de [Cuántica sin fórmulas](#)! Ya sé que es una de vuestras series favoritas, y que hace mucho tiempo del último artículo, pero tened en cuenta un par de cosas: por una parte, hay muchas series abiertas, y al ritmo de un artículo semanal, no podemos avanzar más rápido. Por otra parte, podría intercalar más artículos de esta serie que de otras, pero redactar cada uno de ellos me cuestamuchísimo más que los de cualquier otra serie — no hay comparación. Siempre acabo reescribiendo éstos entre dos y cuatro veces, porque es muy difícil expresar lo que quiero decir sin que sea algo insulso y sin profundidad, o un rollo insufrible (y ni aun así lo consigo siempre). Mi mente ya está lo suficientemente dañada como para acabar de destruirla con excesos; de ahí que os pida paciencia.



Cuantejo zanahoriófilo y cuantejo zanahoriófobo. Sí, dile adiós a la cordura.

Hablando de daños mentales, los avisos pertinentes antes de cualquier artículo de esta serie: si la acabas de conocer, te recomiendo encarecidamente que empieces [desde el principio](#). Incluso si eres de la vieja guardia, yo me releería las últimas entradas de la serie, especialmente desde los [estados cuánticos](#) hacia delante, salvo que tengas la memoria fresca. En cualquier caso, suele tratarse de artículos más densos que la media en *El Tamiz*, y es común que haya que leerlos un par de veces para poder entenderlos de verdad. Éste en particular va a requerir probablemente que saques lápiz y papel para seguir los detalles, y es especialmente largo y farragoso, ¡avisado estás! Si lo lees demasiado rápido, probablemente acabes confundido y sin aprender nada nuevo; es mejor que vayas poco a poco y releas lo que no queda claro, y si tienes que tomar notas, pues eso.

De modo que, si estás listo y tu mente clara –poco tardará en dejar de estarlo–, sumerjámonos una vez más en el mundo cthulhoide de las superposiciones cuánticas y los autoestados. En el artículo de hoy trataré de poner de manifiesto cómo todo lo que has aprendido hasta ahora no es una sarta de elucubraciones sin la menor relación con el mundo real, sino que puede utilizarse (y de hecho se utiliza) en aplicaciones prácticas... que serían imposibles si esta serie no fuera más que ciencia-ficción.

En el [anterior artículo](#) de la serie hablamos acerca del *Verschränkung*, el entrelazamiento cuántico. Conocimos entonces a los adorables –y a veces mortales– *cuantejos*, criaturas de naturaleza cuántica sobre los que realizamos algunas observaciones un tanto surrealistas. Como espero que recuerdes, acabamos aquel artículo haciendo énfasis en que, a pesar de que el entrelazamiento supone una unión entre sistemas físicos (como dos cuantejos) que no está sometida a límites de velocidad ni se ve entorpecida por barrera física alguna, eso *no significa* que podamos utilizarlo para transmitir información de manera instantánea: no podemos usar un par de cuantejillos para informarnos el uno al otro, por ejemplo, de si queremos ir al cine o no instantáneamente. Pero eso no quiere decir que la naturaleza cuántica del Universo no pueda ser utilizada para transmitir información de formas insospechadas y utilísimas; simplemente significa que hay matices que debemos tener en cuenta. Hoy hablaremos precisamente de eso: de cómo comunicarnos de una forma que, si la cuántica no fuera real, sería imposible. Hablaremos sobre **criptografía cuántica**.

Aunque no vamos a hablar en profundidad del concepto general de [criptografía](#), estoy seguro de que conoces el concepto básico. Sin embargo, para que puedas comprender la utilidad de la cuántica en criptografía necesito explicar muy brevemente algunas de las limitaciones de los sistemas tradicionales, o no sería posible ver por qué la criptografía cuántica supone una mejora sobre ellos. De modo que, como tantas veces hago, tengo que pedirte paciencia antes de que empiecen a aparecer adorables cuantejillos. Hablemos muy, muy brevemente sobre criptografía. Voy a encerrar mi pobre explicación de la criptografía tradicional entre un par de líneas horizontales, para que si sabes de ella no tengas que volver a leerlo y puedas saltar directamente al lado cuántico de las cosas.

Imagina que, por azares del destino, es posible que Chuck Norris venga a visitarme mañana a mi casa, y que tú, ínclito lector de *El Tamiz*, eres un fan incondicional (lo cual no es mucho suponer porque, *¿quién no lo es?*). Pero Chuck tiene muchos y muy peligrosos enemigos, así que es esencial que nadie se entere de si va a venir o no excepto tú, con lo que no puedo simplemente llamarte esta noche para decírtelo... *¿y si alguien ha pinchado la línea telefónica?*

La manera más típica de resolver el problema es que la información que debo enviarte (que es muy sencilla, básicamente “sí” o “no”) esté *encriptada* o *cifrada*, es decir, que sea un mensaje en clave. Podríamos habernos visto esta mañana, por ejemplo, y haber acordado la siguiente clave: si esta noche te llamo y te digo que “*la rana croa*”, es que Chuck no viene. Si, por el contrario, te digo que “*la rana salta*”, es que Chuck viene a verme. Incluso si alguien tiene acceso de algún modo a nuestra conversación telefónica, no puede saber si Chuck viene mañana o no: el único con la información necesaria para descifrar el mensaje (el único con la clave) eres tú, con lo que nuestro problema está resuelto. Hemos utilizado una **clave privada**.

Podríamos incluso enviarnos mensajes mucho más complejos que “Chuck viene” o “Chuck no viene”, porque podríamos asociar “la rana salta” a un 1 binario, y “la rana croa” a un 0 binario. Cualquier mensaje puede ser reducido a ceros y unos –empleando el morse, caracteres ASCII o cualquier otro sistema similar–, con lo que nuestra clave de la rana es mucho más versátil de lo que pudiera parecer en un principio. Naturalmente, nuestra clave es algo tan primitivo que, si la usásemos para hablar todos los días, tarde o temprano alguien conseguiría descifrarla

simplemente detectando estructuras o repeticiones en los mensajes; pero estoy seguro de que comprendes que, complicando la clave lo suficiente, podría llegar a ser muy difícil descifrarla.

La limitación fundamental de este sistema de clave privada debería ser obvia: requiere **que nos pongamos de acuerdo en una clave privada** que nadie más puede saber. Salvo que nos veamos en persona, seguros de que absolutamente nadie más nos está escuchando, *¿cómo diablos te comunico la clave?* No hay manera de que pueda transmitirme la clave por teléfono, porque si lo hago abiertamente, alguien podría estar escuchando, y si lo hago con un mensaje cifrado, *¿cómo te paso la clave?* Tampoco puedo enviarte una carta, ni mandar un mensajero.

Esta limitación ha sido superada por sistemas más modernos de **clave pública**. En ellos, no compartimos la misma clave, sino que tú tienes una y yo otra, pero con un detalle ingeniosísimo que los hace utilísimos y que sería imposible sin una propiedad curiosa de muchos procesos matemáticos, como la descomposición en factores primos.

En estos sistemas, cada uno de los dos tenemos una clave propia que no comunicamos absolutamente a nadie — no, *ni siquiera el uno al otro*. A continuación, generamos a partir de esta clave privada una segunda clave, la clave pública, utilizando un algoritmo matemático prefijado. El *quid* de la cuestión está aquí: en matemáticas, existen algunos procesos que son triviales en un sentido *pero horriblemente complicados en el contrario*, y el algoritmo que empleemos debe ser uno de esos procesos. Así, yo puedo producir una clave pública a partir de mi clave privada sin complicación alguna, pero si alguien tiene mi clave pública, es difícilísimo que consiga obtener mi clave privada.

La cuestión está en que para cifrar un mensaje hace falta simplemente la clave pública: una vez así cifrado, la única manera de volver a descifrarlo es utilizando también la clave privada. Es decir, a diferencia del sistema anterior, ahora hay una **asimetría** entre ambos procesos (una asimetría que aparece por esa dificultad diferente en algunos algoritmos matemáticos en uno y otro sentido): *cifrar un mensaje es sencillo, descifrarlo es complicadísimo*. Puedo incluso publicar mi clave en el periódico, para que todo el mundo la vea... y todo el mundo podría enviarme mensajes cifrados, pero sólo yo podría leerlos. Es como si pudieras dar a todo el mundo una llave para *meter* cartas en tu buzón, pero sólo tú tuvieras una segunda llave con la que *sacar* cartas del buzón.

De modo que supongamos que quiero enviarte un mensaje acerca de los planes de Chuck para la próxima semana. Lo primero que hago es llamarte por teléfono, para darte mi clave pública y que tú hagas lo mismo, y no nos importa que alguien pueda estar escuchando, porque no pueden obtener nuestras claves privadas a partir de la pública sin cálculos matemáticos absurdamente complejos. A continuación, utilizo tu clave pública para encriptar el mensaje que te voy a mandar (no uso mi clave absolutamente para nada). Una vez que lo hago, nadie puede descifrar ese mensaje sin tener además la clave privada... de hecho, como yo no la tengo, una vez he encriptado el mensaje para ti *¡ni siquiera yo puedo descifrarlo!* Por supuesto, no me hace falta, porque tengo el mensaje original sin cifrar, pero bueno.

Finalmente, te envió el mensaje así cifrado con tu clave pública. Incluso si alguien detecta el mensaje, como no tienen tu clave privada, no pueden descifrarlo: sólo tú, cuando lo recibes y utilizas tu clave privada, puedes saber que la semana que viene Chuck ha decidido ir al zoo a ver a los osos panda. Podrías a continuación contestar a mi mensaje, cifrarlo con mi clave pública, y sólo yo sería capaz de descifrarlo. Y hemos conseguido esto *sin disponer en ningún momento de un canal de comunicación a prueba de escuchas*, y sin vernos en persona — una maravilla que, desgraciadamente, mis pobres palabras no describen en toda su ingeniosidad,

pero que espero que sirva para nuestro propósito, que no es más que introducir la cuántica como mejora de todo el sistema.

Porque el sistema, como cualquier sistema criptográfico, no es perfecto. Fíjate que he dicho que el algoritmo matemático es muy sencillo en un sentido y muy difícil en el otro... *pero "muy difícil" no es "imposible"*. Alguien con la suficiente capacidad de cálculo siempre puede, con tiempo, obtener inevitablemente mi clave privada a partir de la pública. Lo único que nos protege en este caso es que, si la clave es larga y el algoritmo complejo, pueden hacer falta años para descifrarla salvo que alguien tenga capacidades de cálculo absolutamente sobrehumanas, como el propio Chuck.

Pero todo este lío de la clave privada y la pública podría resolverse empleando nuestro primer sistema de clave privada, mucho más sencillo, simplemente si consiguiéramos una cosa: **ponernos de acuerdo en la clave privada sin que nadie más pueda saberla**, incluso sin vernos en persona. Y es aquí donde entra en juego la mecánica cuántica, los estados, las superposiciones y todo lo demás que hemos venido estudiando últimamente.

Aunque luego mencione cómo se realizan estos procesos de criptografía cuántica utilizando fotones y polarización, vamos a empezar empleando nuestros adorables cuantejillos. Pero, para ello, tenemos que ser más cuidadosos en su descripción que en el artículo anterior, porque algunos de los aspectos más sutiles de la mecánica cuántica son clave en el asunto de la encriptación, con lo que no podemos utilizar el mismo tipo de cuantejos que utilizamos al hablar del entrelazamiento.

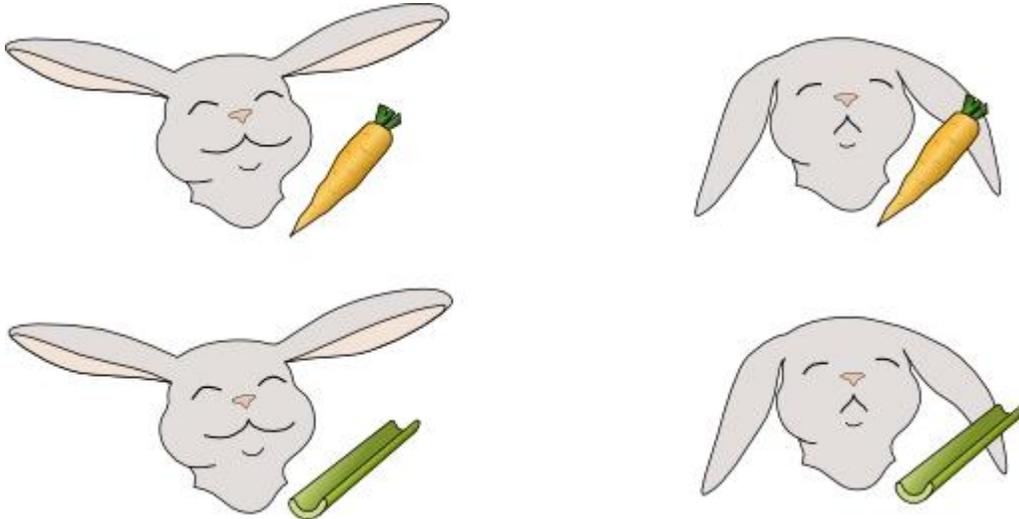
La clave para entender por qué la criptografía cuántica es útil es recordar, como ya dijimos en los múltiples artículos sobre el [principio de indeterminación](#), que **al realizar una observación sobre un sistema lo modificamos irremediamente**. Cuando detectamos un fotón, por ejemplo, es porque ese fotón ha impactado contra algún detector... con lo que ese fotón ya no existe.

De modo que los cuantejos que usaremos hoy en nuestra comunicación se comportan del siguiente modo: antes de que nadie realice cualquier medición sobre ellos, son de un color especial, inconfundible y cuántico — el color *octarino*. Pero, en cuanto un observador interacciona con el cuantejillo, éste se vuelve de un vulgar color gris como cualquier conejo normal y se echa a dormir. Una analogía más exacta sería decir que, cuando interaccionas con un cuantejo, éste muere y desaparece... pero no tengo estómago para hacer eso, ¡son tan monos! De modo que los cuantejos simplemente cambian de color y se dan una larga siesta. Los dibujos, por cierto, son todos de Geli y no míos, afortunadamente para vosotros.

Puesto que, además, vamos a tener que mandarnos cuantejos el uno al otro unas cuantas veces, sería recomendable no emplear las variedades angelical y diabólica, porque tarde o temprano podría haber un accidente. Supongamos que existen cuatro tipos de cuantejos diferentes (para el primer ejemplo que utilizaré nos bastarían dos, pero luego nos harán falta los otros, de modo que creo que es mejor que los definamos todos ahora), todos ellos absolutamente adorables. ¡Ojo! Es importante que entiendas bien los próximos párrafos en los que los definimos, o el resto del artículo te va a resultar un galimatías, de modo que lee con calma.

A algunos cuantejos les encantan las zanahorias más que cualquier otra cosa. Dales una zanahoria y son el ser más feliz del Universo. Estos amantes de las zanahorias tienen su opuesto en los cuantejos que las odian a muerte: si les acercas una zanahoria les has arruinado el día y pueden llegar incluso a llorar del disgusto. Llamemos a la primera subespecie **zanahoriófilos**, y a los segundos **zanahoriófobos**.

También hay otras dos subespecies de cuantejos que tienen apetencias opuestas por el apio. Los cuantejos **apiófilos** se zampan esta verdura en cuanto se la enseñan, pero los **apiófobos** reaccionan de manera extrema y opuesta a ellos, rechazando el apio con gran disgusto.



Las cuatro subespecies de cuantejos, tras enseñarles las verduras correspondientes.

Todos estos cuantejillos son tan predecibles en lo que respecta a la verdura que les importa como *impredecibles respecto al resto de verduras*. Si le enseñan un apio a un cuantejo zanahoriófilo, por ejemplo, es igualmente probable que se lance a por el apio y lo devore con fruición que lo rechace y se ponga a llorar. No hay manera de saber cuál va a ser su reacción hasta que le enseñan el apio; y lo mismo sucede, por poner otro ejemplo, si le enseñan una zanahoria a un cuantejo apiófobo. Tal vez se disguste y la rechace, o tal vez – con igual probabilidad– sonría y se coma la zanahoria con gran placer.

Dicho en términos de nuestra serie, un cuantejo zanahoriófilo es, expresado en términos de apio, una superposición de estados igualmente probables: $\frac{1}{\sqrt{2}} |apiófilo\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |apiófobo\rangle$. Al enseñarle el apio, el cuantejillo se colapsa a uno de los dos autoestados, pero no hemos obtenido información sobre lo que realmente lo definía (si le gustaba la zanahoria o no), porque no hemos realizado la pregunta correcta.

Y, en cualquiera de los casos, antes de enseñar una zanahoria a un cuantejo (es decir, antes de realizar una observación sobre él para determinar su tipo) el cuantejo es de un psicodélico color octarino, *pero tras realizar la medición, el cuantejo se vuelve gris y se pone a dormir a pierna suelta*. De modo que, por un lado, es evidente cuándo un cuantejillo se ha enfrentado a una verdura, y una vez eso ha sucedido, el cuantejo no sirve para nada en lo que a verduras se refiere, porque se ha ido a dormir.

Supongamos también, como en el artículo anterior, que es posible producir pares de cuantejos entrelazados: uno zanahoriófilo junto a uno zanahoriófobo, o uno apiófilo junto a uno apiófobo. *¿Cómo podríamos comunicarnos la clave privada utilizando cuantejillos sin que nadie pueda enterarse de ella y sin vernos en persona?* Si comprendiste el artículo anterior, estoy convencido de que puedes idear un sistema que funcione perfectamente. Si quieres pensarlo, hazlo un momento antes de seguir leyendo.

Vamos a emplear los cuantejos para describir los dos sistemas fundamentales de criptografía cuántica, el **protocolo BB84** y el **protocolo E91**, así nombrados por las iniciales de sus diseñadores y el año de su creación. Sin embargo, aunque el primero es anterior históricamente al segundo, vamos a estudiarlos al revés, simplemente porque el E91 es conceptualmente más fácil de entender a partir de nuestro artículo anterior, mientras que el BB84 es más retorcido. De hecho, estoy bastante seguro de que el sistema en el que has pensado tú solo es básicamente el protocolo E91.

Una manera muy sencilla de poner nuestra clave en común de forma segura es que yo produzca un *par de cuantejos entrelazados*, uno amante de las zanahorias y otro que las odie. Yo me quedo con uno de los dos (da igual cuál), y tú te llevas el otro en una caja a tu casa. Tanto tu cuantejo como el mío son de color octarino, porque nadie ha interactuado con ellos aún: nadie les ha enseñado una zanahoria ni apio.

Esa tarde, le enseño a mi adorable cuantejillo una zanahoria, y pueden pasar dos cosas: o bien se abalanza sobre ella y se pone a comer vorazmente, o bien muestra cara de disgusto y la rechaza. Supongamos, para seguir con nuestro ejemplo concreto, que mi cuantejo pone cara triste y se niega a comer la zanahoria. Al mismo tiempo, su color cambia y deja de ser octarino, para ser gris, puesto que he interactuado con él, y se pone a dormir y a soñar con zanahorias. Y también al mismo tiempo yo puedo estar *absolutamente seguro* de que el cuantejo que te has llevado es un cuantejo zanahoriófilo, lo contrario del mío.

Ojo: es *esencial* que entiendas una cosa. Yo no he presentado ninguna verdura a tu cuantejo: nadie lo ha hecho aún. Por lo tanto, aunque mi cuantejillo es ahora gris, *el tuyo sigue siendo octarino*, y lo será hasta que vea alguna verdura. Como he dicho antes, si los cuantejos fueran fotones, al realizar la medición sobre el mío éste dejaría de existir, pero el tuyo seguiría existiendo. Este cambio en la observación es fundamental para entender la utilidad de nuestro sistema de comunicación más tarde, porque puedo saber con exactitud el tipo de tu cuantejo sin modificarlo en modo alguno.

De modo que, esa noche, puedo llamarte por teléfono y decirte lo siguiente: “*Si tu cuantejo es zanahoriófilo, nuestra clave es 1. Si es zanahoriófobo, nuestra clave es 0*”. Y tú puedes colgar, enseñar una zanahoria a tu cuantejillo y saber cuál es la clave, sin que yo te la haya dicho por teléfono, con lo que si alguien está escuchando la conversación no tiene ni idea de cuál es la clave. Esto debería haber resultado claro, como digo, si entendiste el anterior artículo, de modo que vayamos más allá.

Antes de nada, también debería ser fácil ver cómo enviarnos una clave más larga: bastaría con que no te llevaras un cuantejo en una caja, sino *una serie de cajas ordenadas del 1 en adelante*, y que luego hiciéramos lo mismo de antes pero más veces. Así tendríamos una serie de ceros y unos que constituirían nuestra clave de comunicación. Pero *¿y si no podemos reunirnos en ningún momento?* Porque, si podemos hacerlo, no nos hacen falta cuantejos: nos decimos la clave de palabra y punto. Pero entonces no hemos ganado nada respecto al sistema tradicional de clave privada.

Supongamos, por tanto, que tú vives en una ciudad y yo en otra, y que podemos enviarnos paquetes por una empresa de mensajería. Nuestro problema, claro está, es que no sabemos qué puede pasar a los paquetes que enviamos por el camino, o si alguien va a registrarlos o no. El mensajero puede estar a sueldo de los enemigos de Chuck –que son muchos y peligrosos– y, entonces, *¿cómo te envío la clave privada utilizando cuantejillos sin que nadie pueda verla?* Piensa un momento antes de seguir, porque tal vez tengas la respuesta si agudizas el ingenio.

La clave es, claro está, el hecho de que **la medición del sistema lo modifica**, y es imposible ignorar que ha sido modificado. Podemos utilizar el sistema de antes: te voy enviando cuantejos en cajas, uno detrás de otro, a través de la empresa de mensajería. Si el mensajero es de fiar no hay problema, y todo funciona exactamente como antes. Si el mensajero es un espía, la única manera que tiene de descifrar la clave es ir abriendo las cajas y enseñando una zanahoria a cada cuantejillo. Incluso aunque luego los vuelva a meter en sus cajas y te los entregue, cuando llegue la hora de que tú hagas la prueba enseñándoles una zanahoria... *¡los cuantejos no serán octarinos, porque alguien ya les ha enseñado una verdura!* De modo que, esa noche, antes de que nos pongamos de acuerdo como antes, tú me avisarás de que nuestra comunicación ha sido interceptada por un espía y que no vale.

De este modo, el principio de incertidumbre se confabula con nosotros, no para que podamos evitar la interceptación del mensaje, sino **para que podamos saber que se ha producido la interceptación** antes de poner en común la información secreta. Lo único que tenemos que hacer entonces es cambiar de empresa de mensajería al día siguiente y volver a empezar, y así hasta que alguna vez recibas cuantejos octarinos, pongamos la clave en común y todos nuestros problemas estén resueltos.

Como ves, el sistema funciona empleando dos fenómenos cuánticos: el *entrelazamiento*, por el que estoy seguro de cómo es tu cuantejo si conozco el mío, y el *principio de indeterminación*, por el que podemos saber si alguien ha interactuado con tu cuantejo, puesto que inevitablemente lo modifica. Chuck Norris está a salvo.

Este sistema de encriptación, en la realidad, se realiza con **pares de fotones entrelazados** con polarizaciones determinadas, y se denomina **protocolo E91**; fue desarrollado en 1991 por Artur Ekert. Estoy convencido, en cualquier caso, de que si Ekert hubiera podido emplear cuantejillos zanahoriófilos y zanahoriófobos en su sistema de encriptación, los hubiera elegido antes que simples fotones.

Es posible, sin embargo, que ya hayas descubierto el punto débil de nuestro plan si nuestros enemigos son lo suficientemente inteligentes... y tienen sus propias fuentes de cuantejos. El mensajero puede abrir una caja y enseñar una zanahoria al cuantejo número 1. Si resulta que es zanahoriófobo, el mensajero se apunta este dato. No puede seguir enviando el cuantejo a tu casa, porque ha dejado de ser octarino para ser gris... pero puede preparar un nuevo cuantejo zanahoriófobo, meterlo en la caja y enviártelo. *¿Cómo puede hacer eso?* Por ejemplo, creando un par de cuantejos zanahoriófilo-zanahoriófobo y enseñando una zanahoria a uno de ellos. Si resulta ser zanahoriófilo, mete al otro en la caja y te lo envía: es, con total seguridad, zanahoriófobo, y sigue siendo octarino porque nadie le ha enseñado una verdura. Si ese par de cuantejos no funciona porque el que él detecta es el zanahoriófobo, crea otros hasta que haya suerte y obtenga el resultado que necesita.

Sí, el problema es que si este intermediario es listo, puede enviarte sus propios cuantejos y quedarse con los míos, de modo que ambos pensemos que todo ha ido bien y esa noche nos pongamos de acuerdo en la clave... y, si nuestra línea telefónica está pinchada, la hayamos delatado al enemigo. Por cierto, esta pega no se produce en la realidad con el protocolo E91 porque, en el caso de los fotones entrelazados, existen maneras de detectar el hecho de que los fotones que recibes ya no están entrelazados con nada, con lo que sabrías que el mensajero es un enemigo de Chuck. Pero la potencia tremenda de la cuántica basta para que, *incluso si este sistema no funcionase por esa razón*, pudiéramos emplear otro que no fuera vulnerable de ese modo.

Ese otro sistema es el **protocolo BB84**, desarrollado en 1984 por Charles Bennett y Gilles Brassard, y no utiliza en absoluto cuantejos entrelazados. Como he dicho antes, es más

enrevesado que el de Ekert, de modo que vayamos paso a paso, con un ejemplo muy concreto, para que puedas comprender en qué se basa este protocolo, primero sin mensajero espía y luego con él.

En primer lugar, preparo unos cuantos cuantejos al azar de las cuatro subespecies posibles: zanahoriófilos, zanahoriófobos, apiófilos y apiófobos. Puedo hacer esto de diversas maneras, por ejemplo creando pares de cuantejos entrelazados y determinando uno de ellos (mostrándole la verdura correspondiente), y luego metiendo el otro cuantejo del par en la caja, todavía octarino. Como digo, utilicemos un ejemplo concreto: preparo cinco cuantejillos de los cuatro tipos al azar, que resultan ser (1) zanahoriófilo, (2) apiófobo, (3) apiófobo, (4) zanahoriófobo y (5) apiófilo. En la realidad lo haríamos con un número mucho mayor, pero bueno. En el dibujo muestro la verdura al lado del cuantejillo, pero eso no quiere decir que haya una verdura cerca, sino simplemente de qué tipo de cuantejo se trata:



Mensaje preparado por mí.

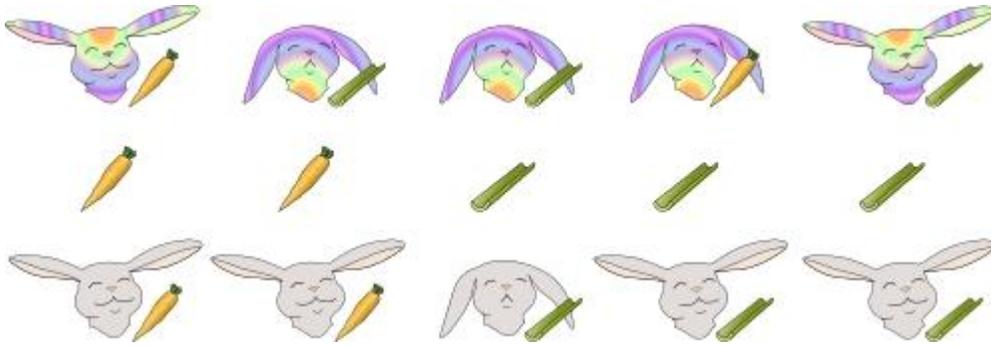
A continuación, te envío los cuantejos en cajas numeradas del 1 al 5. Por ahora, como he dicho, imaginemos que el mensajero no es un espía y que recibes los cuantejos como te los mando — luego veremos qué sucede si es un espía, y cómo podemos saber que lo es. De modo que recibes en tu casa cinco cajas numeradas, abres la primera caja y te encuentras, claro está, con un adorable cuantejillo octarino.

Aquí está la clave de la diferencia con el protocolo E91: *¿qué haces, le enseñas una zanahoria o le enseñas un apio?* Tienes que elegir una verdura, y una vez que lo hagas el cuantejo se volverá gris, se irá a dormir y no servirá para nada más. Si eliges la verdura que se corresponde con esa subespecie de cuantejo, el animal hará lo que corresponde a su subespecie, pero si eliges la verdura incorrecta, el cuantejo actuará al azar, comiendo o rechazando la verdura con igual probabilidad. Y no tienes manera de saber qué subespecie es... de modo que le enseñas la verdura que te dé la gana.

Supongamos que enseñas al cuantejillo una zanahoria. Como el cuantejillo (1) es zanahoriófilo, se lanza a por la zanahoria, la devora, se vuelve gris y se va a dormir. Tú, desde luego, no tienes manera de saber si esto ha sucedido porque es un cuantejo zanahoriófilo, o porque es de una de las dos subespecies de cuantejo sensibles al apio que ha reaccionado al azar, pero puedes apuntar lo que ha sucedido **[(1) zanahoria: se la ha comido]**.

Con el segundo cuantejo haces lo mismo: le enseñas una zanahoria. Pero el cuantejo (2) es apiófobo, con lo que su reacción a la zanahoria es aleatoria. Imaginemos, por ejemplo, que se abalanza sobre ella feliz y contento y se la come, se vuelve gris y se va a dormir. Una vez más, no sabes cuál es su subespecie, pero apuntas el resultado: **[(2) zanahoria: se la ha comido]**. Y lo mismo haces con los demás; supongamos que los resultados que obtienes son **[(3) apio: lo ha rechazado]**, **[(4) apio: se lo ha comido]**, **[(5) apio: se lo ha comido]**.

Recapitemos lo que ha sucedido hasta ahora; aquí tienes los cuantejos que he mandado yo, lo que le has enseñado a cada uno y el resultado en cada caso:



Una vez más, tú sabes sin duda lo que has enseñado a cada cuantejo y la reacción del cuantejo, pero no de qué tipo de cuantejo se trata. Pero por fin llegamos al final del proceso — el momento en el que hablamos por la noche por teléfono, sabiendo que la línea telefónica puede estar pinchada, con lo que tenemos que ser cuidadosos con la información que compartimos.

“Al primer cuantejo le enseñé una zanahoria”, me dices tú.

“Buena elección”, respondo yo. “Entonces no tienes duda de qué tipo de cuantejo se trata”

Y tú apuntas en tu libreta: **Cuantejo (1): zanahoriófilo.**

¿Ves lo maravilloso del sistema de Bennet y Brassard? Tú no me has dicho en ningún momento qué resultado has obtenido, simplemente qué experimento has realizado. Si alguien está escuchando la conversación, sabrá que el primer cuantejo es zanahoriófilo o zanahoriófobo, pero no cuál de los dos.

A continuación, me dices: *“Al segundo cuantejo también le enseñé una zanahoria”*. Yo sé, claro está, que el segundo cuantejo era apiófobo, de modo que no tengo manera de saber cómo reaccionó ante la zanahoria, pero es que **me da exactamente igual.**

“No, este no sirve para nada”, respondo. “Es la verdura equivocada”. Con lo que el segundo cuantejillo no nos ha servido para nada.

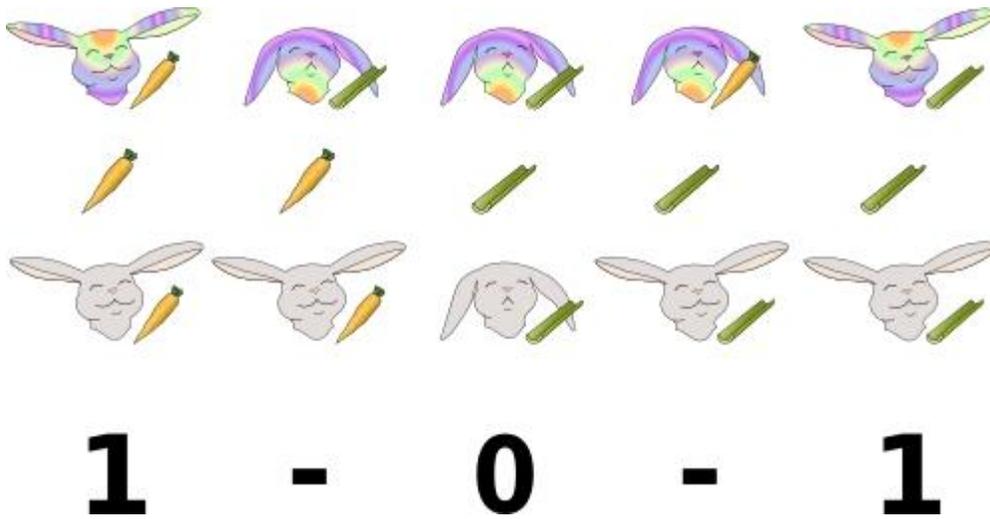
*“Al tercero le enseñé un apio”, sigues tú. Y yo, naturalmente, respondo: “Buena elección”, con lo que tú, sabiendo que ese cuantejo rechazó el apio, escribes en tu libreta: **Cuantejo (3): apiófobo.***

“Al cuarto le enseñé también un apio”, continúas. Pero yo respondo “No, no vale para nada”, porque sé que el cuantejo (4) era zanahoriófobo. Así que tú no apuntas nada.

*“Al quinto y último le mostré, una vez más, un apio”, sigues tú. Y yo respondo “Bien hecho, entonces éste nos sirve”... y tú apuntas, sabiendo que se comió el apio: **Cuantejo (5): apiófilo.***

Y entonces, como último paso, quedamos en la siguiente clave: los cuantejos -filos (zanahoriófilos o apiófilos) son “unos”, y los -fobos (zanahoriófobos o apiófobos) son “ceros”. Ambos sabemos, entonces, que la clave, compuesta de tres dígitos, correspondientes con los tres cuantejos que nos han valido, es **101**. Y *nadie que esté escuchando nuestra conversación tiene manera alguna de saberlo.* ¿No es apabullante?

Aquí tienes el resultado final. Observa cómo sólo utilizamos, para nuestra clave, los cuantejos en los que acertaste en la elección de verdura, e ignoramos aquéllos en los que utilizamos verduras diferentes:



Ah, pero ¿y si el mensajero que te envió los cuantejos hizo lo mismo que en el ejemplo anterior, reemplazando mis cuantejos por otros idénticos tras enseñarles una verdura para saber cuáles son? Aquí es donde se pone de manifiesto la verdadera genialidad de este sistema criptográfico.

Sigamos con el mismo ejemplo de arriba y los mismos cuantejos, y supongamos que tú realizas exactamente las mismas elecciones que antes. El mensajero **es esta vez un espía** de los enemigos de Chuck Norris, abre la caja número 1, y se encuentra con un adorable cuantejillo octarino. Pero él, igual que tú, no sabe qué verdura debe enseñarle... *tiene que elegir una al azar*. Supongamos que le muestra, por ejemplo, una zanahoria. El cuantejillo (1), que es zanahoriófilo, se la come con fruición, se vuelve gris y se echa a dormir, con lo que al espía ya no le sirve. Pero el espía, que no es tonto, prepara un cuantejo zanahoriófilo y octarino, lo mete en la caja y te la envía.

Cuando tú abres la caja, sucede exactamente lo mismo que en el ejemplo de arriba: le enseñas una zanahoria, se la come, etc. En este caso, todo ha sucedido en tu casa igual que sucedió cuando no había espía, y no tienes manera de saber que alguien ha interceptado nuestro cuantejo. Pero —y ésta es la clave del asunto— *esto sólo ha sucedido porque el espía ha acertado en la elección al azar de la verdura*.

Lo que haga el espía con los cuantejillos (2) y (4) es irrelevante, porque cuando me digas la verdura que has escogido en cada caso te diré que no nos sirve e ignoraremos esos cuantejos, que no pasarán a formar parte de nuestra clave privada, pero para seguir con nuestro ejemplo, imaginemos que acierta en ambos casos en la elección de la verdura, con lo que te envía cuantejos idénticos a los míos. Lo importante es qué sucede en los cuantejos que sí vamos a acabar utilizando, el (3) y el (5).

Supongamos que al cuantejo (3) el espía le muestra una zanahoria. Aquí el espía ha cometido un error con la verdura (algo que sucederá un 50% de las veces, claro). El cuantejo (3) era apiófobo, con lo que reaccionará al azar ante la zanahoria — supongamos que se la come. Entonces, el espía prepara un cuantejo octarino zanahoriófilo, *¡algo diferente de lo que envié yo!*

Esto no significa que, necesariamente, detectemos el problema. Cuando ese cuantejo “falsificado” te llegue, tú harás lo mismo de antes: le presentarás un apio. Pero el cuantejo falso es zanahoriófilo, con lo que un 50% de las veces se comerá el apio que le ofreces, y el otro 50% de las veces lo rechazará. Si lo rechaza, entonces habrá sucedido exactamente lo mismo que cuando no había espía y no podremos saber que algo malo ha sucedido, pero si se lo come, el espía se habrá delatado. Supongamos que el espía tiene suerte y el cuantejillo rechaza, muy triste, el apio que le ofreces. Apuntarás en tu libreta exactamente el mismo dato de antes, cuando no había espía.

Finalmente, supongamos que al quinto cuantejo el mensajero espía le ofrece una zanahoria (una vez más, un error, pues el cuantejo es apiófilo). El cuantejillo rechaza la zanahoria, con lo que el espía te envía un cuantejo octarino zanahoriófobo... y cuando tú lo recibes, le presentas un apio. Pero esta vez el espía tiene mala suerte: el cuantejo falso, zanahoriófobo, se pone a llorar y no se come el apio, con lo que apuntas **[(5) apio: lo ha rechazado]**. En este caso algo ha cambiado respecto al caso en el que no había espía, y esto será el talón de Aquiles de la estrategia del espía, como veremos en un momento.

Aquí tienes la recapitulación de lo que ha sucedido, con la interferencia del espía encuadrada en amarillo. He marcado en rojo el dígito de la clave que no coincide con el que obtuviste antes de la aparición del espía:

1 - **0** - **0**

Nuestra conversación telefónica sería exactamente igual que antes y, si no hacemos nada que no hiciéramos entonces, no habría manera de detectar al espía. Como verás, el único caso en el que algo ha cambiado en tus observaciones a causa de la interferencia del espía es el quinto cuantejo (en el caso anterior se comió el apio, como debe ser, pero esta vez lo ha rechazado)... pero eso no es algo que nos digamos por teléfono. Tú seguirás diciendo que le mostraste un apio, y yo responderé “*Excelente, buena elección*”. Sin embargo, yo consideraré ese dígito de la clave un 1 (pues el cuantejo (5) era apiófilo), mientras que tú considerarás que es un 0 (puesto que tu cuantejo, que era falso, no se comió el apio). Mi clave es 101, como antes, pero tú crees que es 100, debido a la injerencia del maldito enemigo de Chuck. El último dígito, como está marcado arriba, no coincide en nuestras claves.

Pero existen maneras sencillas de que nos demos cuenta, simplemente teniendo un poco de cuidado. La más sencilla de todas es ésta: una vez acaba nuestra conversación telefónica y **antes de enviar información secreta** te envío un mensaje cifrado de prueba, como por ejemplo: “*¿Hay algún espía escuchando esto?*”

Pero yo encripto el mensaje con la clave “101”... y tú tratas de descifrarlo con una **clave incorrecta**. En vez de obtener el mensaje correcto, recibirás un sinsentido parcial o total, por ejemplo “*¿Hsy slgún espís escuchando esto?*” Automáticamente sabrás que alguien ha interferido el mensaje, me llamas por teléfono, me dices que la clave no vale y empezamos todo el proceso otra vez, con una empresa de mensajería más de fiar.

Naturalmente, puedes pensar que es posible que el espía tenga suerte todas las veces. Al fin y al cabo, para que nos demos cuenta de que un cuantejo fue interceptado, tiene que tener mala suerte al elegir la verdura (50% de las veces), y además yo tengo que elegir la verdura correcta (un 50% de las veces), con lo que, en media, sólo uno de cada cuatro cuantejos será susceptible de ser revelado como uno falso. Y en nuestro ejemplo así ha sido, más o menos: un error detectable en cinco cuantejos.

Pero la solución es muy fácil: no usamos cinco cuantejos, **usamos cien**. Por mucha suerte que tenga el individuo, la probabilidad de que *absolutamente ninguno* de los cuantejos que modifica sean detectados es de un 75% por cuantejo, es decir, para cien cuantejos, $0,75^{100}$ en este caso. Sí, *¡elevado a cien!* ¿Quieres más seguridad que eso?

La segunda manera, un poco más elaborada, es que no empleemos todos los cuantejos en los que coinciden nuestras verduras para la clave, sino que **sacrifiquemos unos cuantos para comparar resultados**. Si, por ejemplo, usamos un total de 1000 cuantejos, de los cuales nos resultan útiles 500, podemos dejar 100 de ellos como prueba, y emplear los otros 400 (que siguen siendo secretos) como clave. De los 100 que compartimos abiertamente, si no hay espía, coincidirán todos –con lo cual los hemos descartado simplemente para estar seguros, pero podemos usar el resto con confianza–, mientras que si hay espía, unos 25 de esos 100 no coincidirán entre sí, con lo que sabremos que hay un espía y tendremos que volver a empezar. En cuanto alguno de los dígitos que compartamos sea “rojo”, como en el dibujo de arriba, sabemos que los enemigos de Chuck están al acecho.

Como ves, el protocolo BB84 no hace uso del entrelazamiento como el E91, pero sí del principio de incertidumbre — con él, podemos estar seguros con una probabilidad aplastante, si usamos los suficientes cuantejos, de que nadie ha interferido la comunicación de nuestra clave. Y, como siempre, no se trata de un sistema absolutamente seguro, porque existe la posibilidad –por baja que sea– de que alguien haya tenido suerte al interceptar cuantejos. Pero ningún sistema criptográfico es seguro al 100%, y éste les da sopas con honda a todos los tradicionales.

Vamos con los aspectos más teóricos de todo el asunto, tanto la relación con artículos anteriores (para que veas que sí has aprendido bastante, aunque hayas sufrido) como lo que se hace en la realidad, porque la base es la misma que con los cuantejos.

En primer lugar, la clave de los cuantejos zanahoriófilos, apiófobos y demás es que hemos usado estados cuánticos **incompatibles entre sí**: se trata de [autoestados](#) de las variables “amor por las zanahorias” y “amor por el apio”. En el caso de los sistemas reales de criptografía cuántica, como he dicho al principio, se utilizan fotones. En el caso de los fotones se emplean autoestados de la polarización, por ejemplo, polarización vertical u horizontal (equivalente a zanahoriófilo y zanahoriófobo), y polarización sudeste-noroeste o sudoeste-nordeste (equivalente a apiófilo y apiófobo). Dos pares de estados perpendiculares entre sí, de modo que si realizas la prueba “incorrecta” (apio para un cuantejo al que le importan las zanahorias o al revés, polarización vertical-horizontal para un fotón polarizado sudoeste-nordeste, etc.) existe un 50% de probabilidad de un resultado u otro, ya que se trata de una superposición de estados.

En segundo lugar, las limitaciones reales hacen que estos sistemas –como cualquier sistema criptográfico, por otro lado– no sean perfectos. Si tú y yo nos comunicamos la clave enviando fotones polarizados a través de un cable de fibra óptica, **es casi imposible que absolutamente todos los fotones que te envío te lleguen bien**, incluso si no hay espía. Por lo tanto, si seguimos un criterio tan radical como el del ejemplo de arriba (si un solo resultado es imposible, suponemos que hay un espía), nunca nos pondríamos de acuerdo en la clave, pues siempre va a llegarte una señal con algo de ruido, aunque no haya espía. Pero, si aceptamos cierto nivel de inconsistencia en los resultados, *¿en qué punto sabemos si hay un espía, y cómo de seguros estamos?*

Además, **en la realidad es casi imposible enviar fotones uno a uno**: suelen enviarse cortos “chorros” de fotones en el mismo estado de polarización, y es imposible saber cuántos van a salir en cada uno exactamente. Alguien puede detectar un solo fotón del chorro –disminuyendo muy ligeramente la intensidad del chorro, pero dejando varios fotones en él–, y así realizar una observación sobre él sin que ni tú ni yo seamos capaces de saber que alguien ha interceptado nuestra comunicación.

Pero, como digo, ningún sistema criptográfico es irrompible. Con una calidad de la señal muy buena y muy pocos fotones por cada pulso, es posible conseguir niveles de seguridad muy altos. De hecho, como he dicho al principio, esto nos viene muy bien en la serie para mostrar la “cuántica en la realidad”. Estas cosas no son elucubraciones de un puñado de científicos locos, sino que la criptografía cuántica se emplea en la realidad y existen incluso empresas que venden sistemas comerciales de encriptación por estos protocolos.

En 2006 se envió una clave empleando pares de fotones entrelazados –es decir, el protocolo E91 de Ekert– a través del aire entre las islas de La Palma y Tenerife, a lo largo de nada más y nada menos que 144 kilómetros. El mismo año se realizó un experimento empleando el protocolo BB84 de Bennet y Brassard, a través de un cable de fibra óptica de 148,7 km. Y se han empleado comunicaciones con criptografía cuántica para enviar datos electorales en Suiza, datos bancarios en Austria, etc. No es barato, pero ya está funcionando — y no sería posible sin la cuántica.



Cerberis, sistema de criptografía cuántica de [id Quantique](#).

Finalmente, una de las limitaciones inherentes a los sistemas como el de la imagen es que no vale cualquier cable de fibra óptica. En las conexiones “normales”, la señal se amplifica en varios puntos de la conexión, ya que se atenúa según avanza por el cable. Pero en el caso de la comunicación encriptada como hemos descrito, la **amplificación no puede producirse**, porque sería detectada en el otro extremo como un “espía”. Con lo que no se han logrado comunicaciones a enormes distancias (aunque 148 km no está nada mal), y no vale utilizar los cables de fibra óptica normales: los fotones del mensaje encriptado, al no estar amplificados, serían engullidos por todo el resto de comunicaciones normales –amplificadas–. Pero, aun así, las posibilidades prácticas de estos sistemas tienen un enorme potencial. La cuántica no sólo es real, sino que es útil.

Con esto tampoco estoy diciendo que la salud mental de alguien que trabaja con cuantejos apiófobos sea encomiable. Pero tengo que preguntarte, estimado lector, *¿qué dice esto de la salud mental de alguien que lleva leyendo sobre cuantejos el tiempo que tú llevas haciéndolo?* Pues eso. En la próxima entrada de la serie hablaremos sobre algo relacionado con esto, el [teletransporte cuántico](#).

Teletransporte cuántico

Tal vez estás leyendo este artículo, pero ¿estás seguro de ello? No deberías estarlo, ya que tras los meses de rigor entre artículo y artículo, hoy volvemos al nebuloso mundo de [Cuántica](#)

sin fórmulas. Continuamos el bloque dedicado a los [estados cuánticos](#) en general y, en concreto, a las aplicaciones prácticas del [entrelazamiento cuántico](#). En el último artículo de la serie hablamos acerca de una de ellas, la [criptografía cuántica](#), mediante la cual utilizamos las borrosas propiedades del Universo para transmitir información sin que nadie se entere de lo que nos decimos.

Soy consciente de que algunos anheláis artículos más filosóficos que aquél, y tarde o temprano vendrán, pero a quienes así pensáis tengo que pedir os paciencia: no tendría sentido hablar de estados y entrelazamiento sin hacerlo sobre criptografía, teletransporte, qubits o computación cuántica, si queremos dar una idea más o menos amplia sobre la mecánica cuántica actual, con lo que los alternaremos. De modo que hoy seguiremos con un asunto muy relacionado con el anterior, aunque mucho me temo que a algunos os decepcione porque los medios de comunicación suelen darle unos aires que no se corresponden con la realidad, y el propio nombre puede ser engañoso: el **teletransporte cuántico**.

Como digo, tanto el nombre como las descripciones que a veces se oyen por ahí –no quiero hablar sobre el nivel general de las secciones de ciencia de muchos medios o empezaría a soltar espumarajos por la boca– conducen mucho a confusión. Antes de que entremos en una descripción más detallada de *lo que es* el teletransporte cuántico, quiero que quede claro *lo que no es*: **no es** ni un transporte de materia ni un proceso instantáneo. ¿Ya estás decepcionado? Si no es así todavía, veamos algunas razones más para estarlo, y luego hablemos de cómo conseguir el teletransporte cuántico de manera descriptiva e inmundamente simplista –si eres físico como yo, aléjate de este artículo ahora mismo o luego vendrá el rechinar de dientes, ¡avisado estás!–.

Cuando decimos la palabra “teletransporte”, lo que viene a la cabeza –por lo menos a la mía– es el transporte instantáneo de materia a través del espacio. Evidentemente, siempre podemos transportar materia a lugares lejanos, simplemente moviéndola, pero eso requiere tiempo y nadie lo llamaría “teletransporte”. Si hay una barrera física entre ambos lugares, por ejemplo, ya no podríamos transportarnos. De igual modo, si queremos transportar algo entre dos lugares que están a una distancia gigantesca, hacerlo mediante el movimiento requiere de un tiempo muy largo, mientras que el teletransporte –entendido, como digo, de manera intuitiva– significaría que podemos realizar el tránsito instantáneamente. Y, siguiendo este criterio, ese “teletransporte” es imposible de acuerdo con la mecánica clásica, con la relativista y la cuántica, todas por igual.

Pero imagina esta otra situación, que podríamos llamar **pseudoteletransporte clásico**, y que podría tener lugar si el mundo no fuera “borroso”, sino que la mecánica clásica fuera la que describe el Universo de forma completa; no es un “teletransporte verdadero”, pero no está nada mal. Supongamos que tú, estimado y valiente lector, estás tan a gusto leyendo este artículo frente a tu ordenador en vez de hacer algo más útil con tu vida, y yo consigo, de alguna manera, conocer con una exactitud absoluta la posición y velocidad de todas y cada una de las partículas fundamentales que componen tu cuerpo.

Si así fuera, y *luego yo transmitiera toda esa información hasta otro lugar diferente*, por ejemplo, la Estación Espacial Internacional, y allí dispusiera de los suficientes átomos de distintos elementos como para reconstruir un cuerpo humano, podría utilizar esa información que he obtenido, disponer los átomos en la estación de modo que todos y cada uno de ellos

tuvieran exactamente las mismas posiciones relativas, velocidades, energías, etc., con lo que tendríamos una copia exacta e indistinguible de ti en la Estación.

A continuación, yo podría destruir tu cuerpo en tu habitación frente a tu ordenador, para que no tuviéramos la incómoda situación de que hubiera dos copias de ti, y entonces el único “tú” que existiría sería el que está en la Estación Espacial Internacional, sin que tu cuerpo se haya movido en ningún momento desde tu habitación hasta la estación. Naturalmente, existe un problema filosófico muy profundo ahí: el que está en la Estación Espacial Internacional ¿eres realmente tú? Si la configuración y estructura exacta de tus huesos, músculos, sistema nervioso con cada una de las neuronas, recuerdos, etc., son indistinguibles del original, ¿eres “tú”? Esto lleva a cuestiones mucho más profundas aún, como la propia pregunta de qué significa “tú”, en las que no vamos a entrar ahora, porque no es el objetivo de este artículo.

La cuestión es que, de este modo, habríamos logrado una suerte de “pseudoteletransporte”. Por un lado, los átomos de tu cuerpo no se han movido de su sitio, ni instantáneamente ni de ninguna otra manera. De hecho, para evitar situaciones incómodas he reducido tu cuerpo original a cenizas; además, he necesitado tener ya, en el lugar de destino, **un conjunto de átomos de muchos elementos listo para recibir la información** de tu cuerpo y convertirse en tu “nuevo cuerpo”. Por otro lado, el proceso *no es instantáneo* en absoluto: he necesitado transmitir la información desde la habitación de tu casa hasta la Estación Espacial, por ejemplo utilizando ondas de radio, y luego recibir la información allí y disponer la materia que tengo para reformar tu cuerpo de la manera adecuada. De ahí que no sea un teletransporte “de verdad”, aunque todo depende, claro está, de cómo definamos el término.

Como ves, este pseudoteletransporte es teóricamente perfectamente plausible de acuerdo con la mecánica clásica... e irrealizable en la práctica por razones obvias. Para empezar, *¿puedes imaginar la cantidad de información que requeriría transmitirse para conocer con exactitud todas las variables que definen cada una de las partículas que forman tu cuerpo?* Y, aunque enlace otra vez con los aspectos filosóficos del asunto, *¿estarías dispuesto a someterte al proceso, y sentirías que quien aparecería al otro lado en la Estación eres tú mismo?*

Pero este “pseudoteletransporte” mediante la transferencia de la información completa sobre un sistema físico para reconstruirlo en otro lugar no sólo es imposible en la práctica: **es imposible debido a la naturaleza cuántica del Universo**. No es posible conocer todas las variables de un sistema con exactitud o, lo que es lo mismo, *no es posible conocer el estado de un sistema sin alterarlo*. De hecho, espero que cuando hayas leído más arriba lo de “conocer con una exactitud absoluta la posición y la velocidad” hayas lanzado un gruñido de desdén; “¿Con exactitud ambas cosas a la vez? ¡Menudo atrevimiento!”, habrás pensado, y con razón. De modo que ¿cómo conseguir ese pseudoteletransporte en un mundo cuántico?



(top, left) Richard Jozsa, William K. Wootters, Charles H. Bennett. (bottom, left) Gilles Brassard, Claude Crépeau, Asher Peres. Photo: André Berthiaume.

Los primeros en definir teóricamente un proceso por el cual conseguirlo fueron C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres y W. K. Wootters, en 1993, en [*“Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels”*](#), publicado en 1993. No esperes que te explique con detalle el sistema de Crépeau y compañía, pero sí al menos una descripción que te dé una idea de dónde está la clave de todo el asunto. La primera vez que conseguimos llevar el sistema de estos científicos a la práctica “teletransportando” fotones fue, por cierto, cuatro años más tarde: en 1997 se publicó en *Nature* [*“Experimental Quantum Teleportation”*](#), de D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter y A. Zeilinger. Eso sí, no esperes cohetes: como veremos luego, no hemos logrado aún nada que se parezca, ni de lejos, a lo que consigue Scotty en cada episodio de Star Trek.

La clave del sistema de Brassard y sus colegas es, como tal vez hayas sospechado ya, el [entrelazamiento cuántico](#) del que llevamos hablando unos cuantos artículos de la serie. **Mediante el entrelazamiento es posible transmitir, de manera indirecta, el estado de una parte de un sistema sin alterarlo**, midiendo por el contrario otra parte del sistema que esté entrelazada con él, como hicimos en el caso de la [criptografía cuántica](#) del último artículo.

Supongamos el caso de un sistema físico más sencillo que el de tu cuerpo; de hecho, supongamos un caso muy, muy sencillo, el de un sistema físico con dos [autoestados](#), como un electrón que puede tener el espín hacia arriba o hacia abajo, un fotón que puede estar polarizado horizontal o verticalmente o, ya que éstos son ejemplos mundanos y aburridos, el de un cuantejo que puede resultar ser zanahoriófilo o zanahoriófobo cuando le muestras una zanahoria, e intentemos teletransportarlo en el Universo cuántico. Tal vez, como en artículos anteriores, pueda hacerte falta papel y lápiz, porque la cosa va a volverse liosa (si no fuera así, me estaría quedando en la superficie que suele leerse por ahí, con lo que este artículo no aportaría nada). Eso sí, mi explicación, como suele suceder, es bastante pobre, y mira que lo intento aclarar... de modo que, de antemano, disculpas por los líos en los que voy a meterte.

No voy a insultar tu inteligencia repitiendo todas las propiedades de los cuantejos que explicamos en el artículo de criptografía. Supongamos que tu cuantejo está en un estado cualquiera que es una superposición de los dos estados propios, $a|zanahoriófilo\rangle + b|zanahoriófobo\rangle$, donde a y b tienen que ver, como hemos

visto en la serie, con la probabilidad de que al mostrarle esa verdura el cuantejillo se lance a por ella o se ponga a llorar.



Sí, mucho me temo que los cuantejos han vuelto.

Antes de nada –porque si no entiendes esto, nada de lo que viene después tiene sentido–, veamos por qué no puedes hacer lo mismo que si el mundo no fuera cuántico; *¿por qué no puedes simplemente mostrarle una zanahoria al cuantejo, ver si es zanhoriófilo o zanhoriófobo, llamar por radio a la Estación Espacial y comunicárselo y punto final?* Si te haces esa pregunta, permite primero que te dé un pescozón, porque eso significa que no has asimilado la serie hasta ahora. Si le enseñas una zanahoria a tu cuantejo, claro que su estado va a colapsarse a $|zanhoriófilo\rangle$ o $|zanhoriófobo\rangle$... Pero si eso es lo que comunicas a la Estación Espacial y ellos preparan un cuantejo idéntico al que tienes tú *después de mostrarle la zanahoria*, lo que tienen no es idéntico al cuantejo original.

Para entender esto, en el resto del artículo supondremos un estado concreto para tu cuantejillo –un estado que tú y yo, por supuesto, desconocemos si no realizamos ninguna medición sobre el cuantejo enseñándole una zanahoria–, de modo que no haya unas a y b abstractas. Imaginemos pues que tu cuantejo está en el estado $\frac{1}{2}|zanhoriófilo\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|zanhoriófobo\rangle$, es decir, es bastante más probable que al enseñarle la zanahoria se muestre zanhoriófobo que zanhoriófilo. Si esto te suena muy raro, te recomiendo que releas el artículo sobre [superposiciones cuánticas](#), por cierto.

¿Ves cómo enseñarle una zanahoria al cuantejo y luego comunicar el resultado a la Estación no resuelve el problema? Esto es lo que sucedería:

1. Tú tienes $\frac{1}{2}|zanhoriófilo\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|zanhoriófobo\rangle$.
2. Enseñas una zanahoria al cuantejo, y éste se pone a llorar, luego su estado se ha colapsado a $|zanhoriófobo\rangle$.
3. Llamas por radio a la Estación Espacial Internacional, y les comunicas que el estado del cuantejo es $|zanhoriófobo\rangle$.
4. Ellos de algún modo preparan a su cuantejo para que también lo sea, con lo que tienen un cuantejo en el estado $|zanhoriófobo\rangle$.

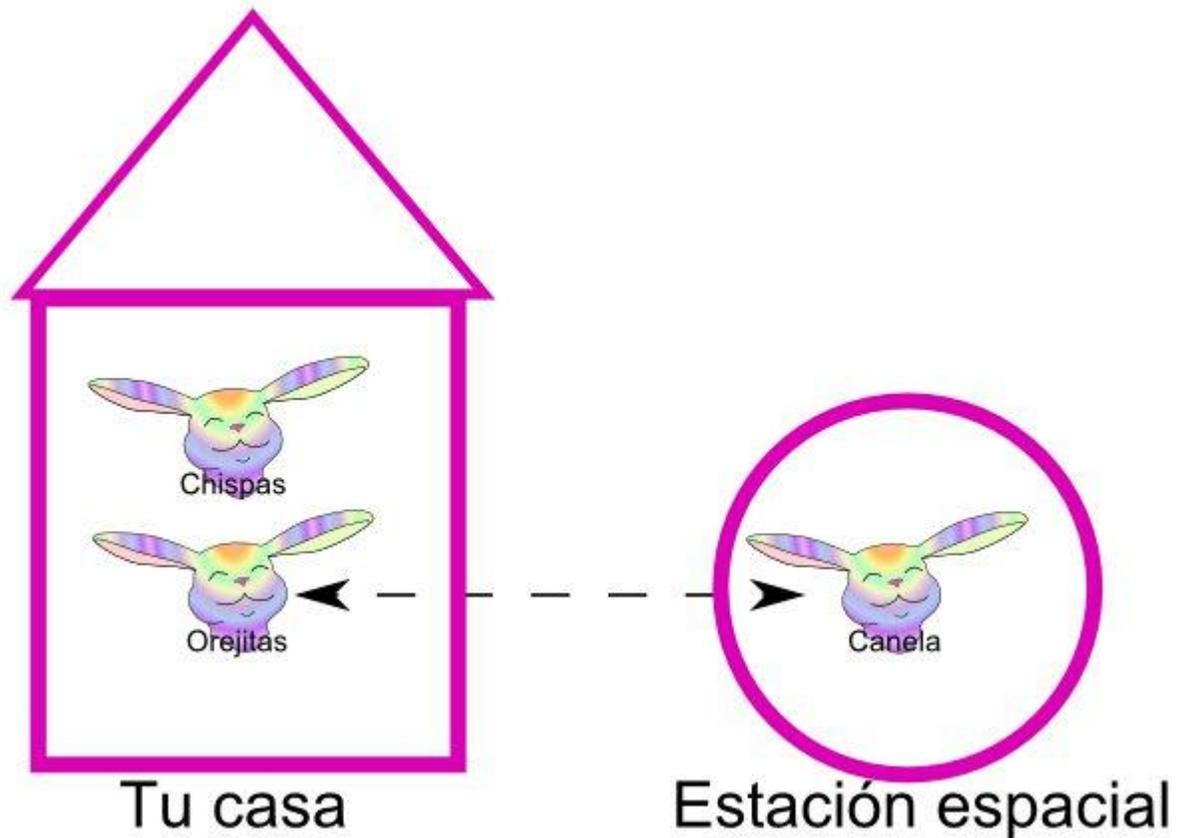
¡No hemos teletransportado el cuantejo original! Hemos obtenido una cosa diferente, pues el proceso ha modificado el cuantejo inicial. De hecho, como puedes ver, este pseudoteletransporte funcionaría sólo para cuantejos que están en uno de los autoestados, porque entonces la información a transmitir es trivial y se trata de un caso casi idéntico al clásico.

Pero, si el cuantejo está en un estado que no es trivial **y que no conocemos**, como por ejemplo $\frac{1}{2}|zanhoriófilo\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|zanhoriófobo\rangle$, *¿cómo teletransportar ese cuantejillo a*

otro lugar como la Estación sin modificar su estado, de modo que al otro lado tengamos un cuantejo indistinguible de éste sin llevarlo físicamente hasta la Estación?

Lo primero que nos hace falta, además de tu cuantejo (el original que queremos pseudoteletransportar), es **otro par de cuantejos más**. Porque la clave de la cuestión es utilizar el entrelazamiento cuántico para convertir el cuantejo de la Estación en una copia indistinguible del tuyo — a efectos prácticos, en tu mismo cuantejo.

De modo que, en primer lugar, producimos un par de cuantejillos entrelazados como explicamos al hablar de criptografía, de modo que estén siempre en estados opuestos. Tú te quedas en tu casa con uno de ellos, al que llamaremos Orejitas, y yo me voy a la Estación con el otro cuantejo, Canela. Y unos días después intentamos realizar nuestro experimento con un cuantejo más, Chispas. **Nuestro objetivo es que Chispas acabe en la Estación Espacial conmigo**, o un cuantejo indistinguible de Chispas, claro.



Situación inicial (Orejitas y Canela están entrelazados).

Y, aunque sea repetitivo, recuerda: si realizas una medición sobre Chispas, *entonces dejará de ser Chispas* como era antes y habremos fastidiado todo el asunto, porque lo que me mandarías sería sólo parte de la información sobre Chispas, de manera que yo sería incapaz de recrear a Chispas tal y como era. Pero esto merece una pausa, porque es una de las claves de todo el asunto (y me disculpo de nuevo si lo estás entendiendo tan bien que estas pausas te resultan aburridas).

La razón de que el teletransporte no pueda funcionar a la manera clásica es que lo que quiera que queremos transportar –Chispas, un fotón, un átomo de sodio– *no es completamente cognoscible*. Si medimos absolutamente algunas de sus propiedades, por el [principio de incertidumbre de Heisenberg](#) perdemos otras, con lo que no es posible convertir el sistema en información a la antigua usanza, transferir esa información y luego reconstruir el sistema en el punto de destino con la información transmitida.

En términos de Chispas, nuestro simple cuantejillo tiene una “personalidad” en lo que a las zanahorias se refiere, una personalidad que nos es imposible conocer completamente: $\frac{1}{2} | \text{zanahoriófilo} \rangle + \sqrt{3} | \text{zanahoriófono} \rangle$. La única manera de conocer parte de su personalidad es mostrarle una zanahoria –medir–, pero entonces sólo tenemos una parte de la información sobre él, y la otra parte se ha perdido y nunca podremos recuperarla de nuevo.

Nuestro sistema, que es el del teletransporte cuántico, salvará ese obstáculo haciendo uso del entrelazamiento, mediante el cual hay una conexión íntima entre Orejitas y Canela, *una conexión que transmite el estado de uno al otro de manera instantánea y sin que haya necesidad de que lo conozcamos nosotros*. Lo que haríamos sería lo siguiente:

1. Entrelazamos a Chispas con Orejitas. Para ello, en el caso de los cuantejos, metemos a ambos en una misma caja durante cierto tiempo, y en el caso de sistemas físicos reales... bueno, depende. Estos experimentos suelen hacerse con fotones, que pueden llevarse junto con otros fotones a través de láminas semiespejadas y “combinarse” para formar estados entrelazados diversos. El caso es que, en los absurdos términos de nuestra analogía, ahora Orejitas y Chispas son amigos.

Medimos el estado conjunto de Chispas y Orejitas, mostrándoles una zanahoria. Una vez hemos hecho esto, no hay vuelta atrás: Chispas ya no es el que era antes, hemos colapsado el estado Chispas + Orejitas y sólo hemos obtenido parte de la información que queremos transmitir. Si no hubiéramos hecho nada más, nuestro experimento sería un fracaso, porque la parte de la información sobre Chispas que no hemos obtenido se habría perdido. Para seguir con nuestra analogía, ya que conocemos algo sobre Chispas pero no todo, imaginemos que ahora sabemos que Chispas tenía mayor probabilidad de ser zanahoriófobo que de ser zanahoriófilo, es decir, sabemos que $b > a$ ni b

1. Aquí es donde está lo genial del sistema desarrollado por Bennet, Jozsa, Wootters y compañía. Al entrelazar a Chispas con Orejitas, éste contiene parte de la información de Chispas, y por tanto la misma información –o más bien la opuesta– está en Canela, en la Estación Espacial. Aunque se escapa con mucho al nivel de este artículo, de modo que tendrás que creerme, la parte de la información original que se queda en Orejitas y, a través de él, en Canela, *es justo la información que no hemos obtenido al hacer la medición*.

Es decir, ahora Canela “se parece” a Chispas, pero puede no ser exactamente igual que él. En términos de nuestro ejemplo, supongamos que tras la medición Canela puede acabar en uno de estos dos estados: $\sqrt{3} | \text{zanahoriófilo} \rangle + \frac{1}{2} | \text{zanahoriófono} \rangle$, o $\frac{1}{2} | \text{zanahoriófilo} \rangle + \sqrt{3} | \text{zanahoriófono} \rangle$.

Supongamos que hay un 50% de probabilidades de que Canela haya quedado en uno u otro estado, con lo que es incluso posible que ya sea exactamente igual que Chispas, o tal vez no. Y recuerda también que nosotros no conocemos el estado de Canela ni esos números, ya que no lo hemos “medido”.

1. Tenemos, por tanto, el estado original de Chispas “partido” en dos pedazos: por un lado, información que conocemos nosotros explícitamente, al haber mostrado la zanahoria a Chispas + Orejitas, a saber, que Chispas es más zanahoriófobo que zanahoriófilo. Por otro lado, información contenida en Canela, un cuantejo sobre el que no hemos realizado medición ni modificación alguna todavía, que

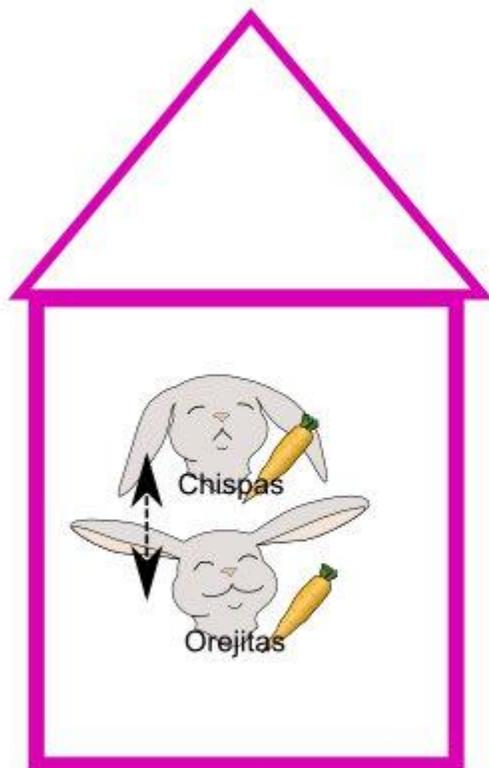
es el hecho de que Canela está en uno de los dos estados que he escrito un poco más arriba. De modo que, para que yo pueda disponer de toda la información, implícita y explícita, hace falta que me envíes un mensaje con lo que has visto al enseñar la zanahoria a Chispas + Orejitas, por ejemplo, mediante una llamada de radio. Tú me llamas a la Estación y me dices, "Pedro, he enseñado zanahorias a los cuantejillos y mi conclusión es que Chispas es más zanahoriófono que zanahoriófilo".

2. Finalmente, utilizando la información que me has enviado, yo modifico a Canela. Por ejemplo, lo "entreno" para que si su probabilidad de ser zanahoriófilo era menor que la de ser zanahoriófono se quede como estaba, pero si era al revés intercambie los coeficientes de zanahoriófilo y zanahoriófono. En la realidad, claro está, hablamos de cosas como fotones, de modo que puede hacerse pasar el fotón por un sistema físico que asegure, por ejemplo, que la componente horizontal de la polarización del fotón sea mayor que la vertical si no era así.

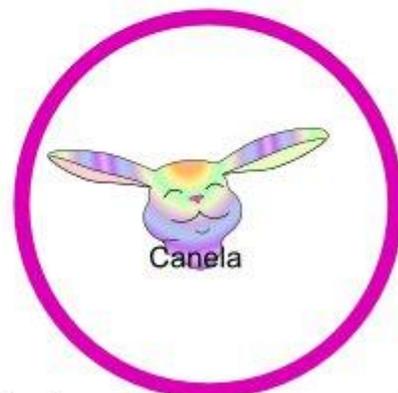
Observa que mi entrenamiento de Canela consiste básicamente en "decirle": si ya eres más zanahoriófono que zanahoriófilo, quédate como estás. Si es al revés, intercambia ambas probabilidades, **pero no estoy enseñando ninguna zanahoria a Canela**. No he medido nada sobre él, luego no se ha colapsado ni a $\frac{1}{2}$ /zanahoriófilo, ni a $\frac{1}{2}$ /zanahoriófono.

Supongamos que, en nuestro caso particular el estado de Canela era $\sqrt{3}, \frac{1}{2}$ /zanahoriófilo > + $\frac{1}{2}$ zanahoriófono. Tras el entrenamiento, el cuantejillo habrá comprendido que debe intercambiar ambos coeficientes, pues quiero que sea más zanahoriófono que zanahoriófilo al igual que Chispas, de modo que se modifica hasta convertirse en $\frac{1}{2}$ /zanahoriófilo > + $\sqrt{3}, \frac{1}{2}$ zanahoriófono.

es decir, en Chispas.



Tu casa



Estación espacial

La situación final (los dibujos de Chispas y Orejitas sólo tratan de mostrar que ya han sido medidos).

Si los ojos aún no te dan vueltas, recapitulemos lo que hemos conseguido: hemos logrado tener en la Estación a un cuantejillo exactamente idéntico a Chispas. Recuerda que, si la cuántica es una teoría completa, cuando el estado de dos sistemas es el mismo estado no es sólo que tengamos la misma información de ambos, *sino que ambos sistemas son idénticos en sí mismos*, es decir, **quien está en la Estación ya no es “Canela” sino “Chispas”**, porque todo lo que hace a Chispas ser Chispas, sin excepción, está en él. A cambio, nuestro Chispas original ya no es Chispas — su estado se ha colapsado a otra cosa. Hemos “pseudoteletransportado” a Chispas.

Observa que todas las limitaciones del pseudoteletransporte clásico siguen presentes aquí: hace falta un cuantejo en el destino antes de “transportar” nada, y hace falta transmitir información a la manera clásica —en nuestro caso, cuando me llamas por radio— para completar el proceso, ya que la información transmitida por el entrelazamiento entre Orejitas y Canela es sólo una parte del total. De modo que no estamos cerca, ni mucho menos, de transportarte a ti u objetos similarmente complejos: la cantidad de información necesaria, como en el caso anterior, es increíblemente grande.

Otra limitación, en este caso una que no existía de igual modo en el método clásico, es el hecho de que, como verás, hemos tenido dos cuantejos entrelazados en tu casa y la Estación. Pero, en la práctica, mantener el entrelazamiento sin que se produzcan interacciones con el entorno que acaben con ella es muy difícil, sobre todo si es durante un tiempo o distancias largas.

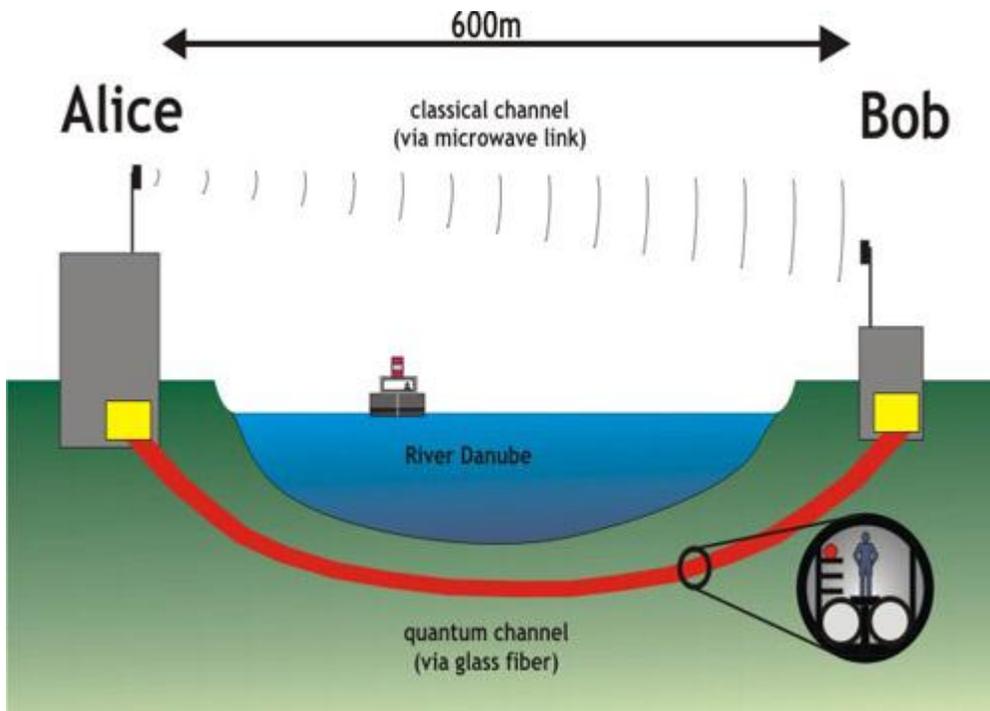


Diagrama del teletransporte cuántico de fotones bajo el Danubio.

Hasta ahora hemos logrado “teletransportar” de este modo fotones y unos pocos átomos, pero **cuanto más complejo es el sistema a transportar, menor distancia** hemos conseguido. Con fotones, en 2004 se logró el teletransporte cuántico bajo el río Danubio y una

distancia de unos 600 metros, utilizando una fibra óptica para transmitir los fotones entrelazados –si alguien conoce un experimento más reciente de mayor distancia, decídmelo y actualizamos el artículo–; con átomos, tan sólo de unas cuantas micras. De manera que hacerlo con algo tan sumamente complejo como, qué se yo, una taza de café está todavía muy lejos, y lograrlo distancias que merezcan la pena, todavía más: porque, si vas a utilizar una tecnología compleja y carísima para “transportarte” unos cuantos cientos de metros, mejor te montas en el autobús.

En el próximo artículo atacaremos un asunto un poco más filosófico apoyándonos en éste; observa que hoy, en cierto sentido, *hemos obtenido información de algo sin medirlo*, a través del entrelazamiento entre Orejitas y Canela. En la siguiente entrada de la serie exploraremos más en detalle cómo utilizar esta peculiaridad del entrelazamiento para saber cuándo algo está ahí sin mirarlo, algo que parece justo lo contrario de lo que sugiere la mecánica cuántica (que suele involucrar no poder ver cosas que están ahí aunque las miremos), hablando sobre [el detector de bombas de Eilitzur-Vaidman](#).

Si no has saltado a este último párrafo sino que te has leído el ladrillo entero, me quito el sombrero. Eso sí, no lo comentes con las personas de tu entorno o puedes encontrarte aislado socialmente en menos que canta un gallo. Y, si ves un cuantejo por ahí, busca ayuda inmediatamente.

El detector de bombas de Eilitzur-Vaidman

En el último artículo de Cuántica sin fórmulas hablamos acerca del teletransporte cuántico. Como recordarás, si tu mente no fue dañada por su lectura, se trató de una entrada un poco deprimente, en el sentido de que destrozaba muchas de las concepciones más ingenuas sobre el teletransporte que suelen verse en películas y televisión. No es que sea por compensar, pero hoy haremos justo lo contrario: veremos un experimento en el que los efectos cuánticos sí nos permiten realizar algo que a primera vista parece imposible –y lo sería sin la cuántica, claro–, y que nos permitirá hincarle el diente a aspectos muy teóricos relacionados con la cuántica moderna en el artículo siguiente.

Aunque la entrada de hoy no es tan terrorífica como algunas anteriores en esta serie, es de las “puntillosas”. Requiere que explique –mal y pronto, como siempre– algunas cosas no relacionadas directamente con la cuántica pero necesarias para entender el experimento, y hay detalles varios a los que hay que seguirles la pista. No nos engañemos: por mucho que lo haya intentado, este artículo es bastante petardo, estoy seguro de que contraviene la Convención de Ginebra y sólo cuando finalmente lleguemos a la parte “cuántica” tendrá más interés. Si te sirve de aliciente, al final sí llegaremos a conclusiones de las que hacen arquear la ceja. Al menos, he tratado de ilustrar cada paso y detalle para que sólo te tires de los pelos lo necesario durante el planteamiento inicial.

Si recuerdas el teletransporte cuántico, una de sus claves era *obtener información sin “medir” algo*, de modo que no lo modificásemos. Hoy iremos mucho más lejos en este aspecto; mi intención es que no te sorprendan los argumentos, sino que te parezcan lógicos dentro de lo posible, mientras que a la vez la conclusión te haga maravillarte, como me sucedió a mí la primera vez que oí hablar del experimento de hoy. Hablaremos del **detector de bombas de Eilitzur-Vaidman** y, dicho mal y pronto, conoceremos de la existencia y naturaleza de algo sin mirarlo.

Aunque posteriormente se ha realizado el experimento en la realidad, originalmente se trata de un experimento mental, similar a otros de los que hemos hablado en la serie, como el del gato de Schrödinger.

Fue propuesto por primera vez en 1993 por los físicos Avshalom Elitzur y Lev Vaidman, y voy a intentar explicarlo de la manera más clara posible, paso a paso y haciendo énfasis en las cosas relacionadas con otros aspectos de la cuántica que hemos visto ya. Como tantas otras veces, te pido paciencia si al principio parece que no llegamos a ningún sitio, pero si no dejamos algunas cosas claras primero –aunque no sean el núcleo del experimento–, mal vamos a llegar a conclusiones lógicas, y no quiero partir de la base de que sepas óptica y lo que es un interferómetro, por ejemplo.



Avshalom Elitzur (izquierda) y Lev Vaidman (derecha) (imagen compuesta, originales de Tzahy Lerner y Yairm, CC 3.0 Attribution-Sharealike License).

Imagina, estimado y paciente lector de *El Tamiz*, que en una habitación subterránea, en total oscuridad –en un momento verás por qué– tenemos un conjunto de bombas de características muy peculiares. En primer lugar, hay dos tipos de bombas: las **bombas falsas** son inofensivas (no pueden estallar), y permiten el paso de la luz sin obstáculos, es decir, son transparentes. Las **bombas reales**, sin embargo, son extraordinariamente inestables: sólo hace falta que incida sobre ellas la más mínima cantidad de luz para que la absorban y exploten (un simple fotón basta para hacerlas reventar). Y, naturalmente (porque, si no, ¿qué gracia tendría todo esto?) ambos tipos de bombas son *absolutamente indistinguibles entre sí* hasta el momento de la explosión –o falta de ella–.

Es evidente que determinar si una bomba pertenece a uno u otro grupo es muy fácil: no hay más que exponerla a la luz. Si no explota es una bomba falsa, y si estalla es una bomba real. El problema con este sistema, claro, es que nunca podemos conseguir una bomba real, lista para explotar, sin hacer que estalle antes... porque la única manera de saber que es real es haciéndola estallar primero. Con lo que, con este sistema, acabamos con bombas falsas por un lado, y restos de bombas reales ya estalladas por el otro, algo muy poco eficaz porque, por razones que son irrelevantes para el experimento, supongamos que las bombas reales tienen un enorme valor. *¿Sería posible tener en la mano lo que sabemos que es, con absoluta seguridad, una bomba real... pero sin hacer que explotase?*

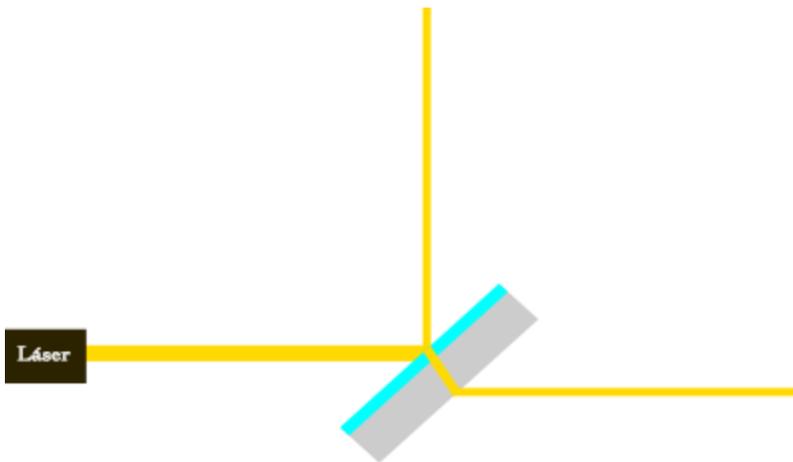
A primera vista, esto parece imposible, ya que lo único que distingue unas bombas y otras es que unas explotan al recibir luz y otras no. De hecho, si la mecánica cuántica fuera un sueño y la newtoniana –e incluso la relativista– rigieran el Universo, nuestro dilema no tendría una solución satisfactoria. Sólo tenemos certeza si la bomba es falsa, o si la bomba ya explotó. La única solución válida sería la que obtuviera información sobre la reacción a la luz de una bomba... sin que le llegase un solo fotón de luz. Y Elitzur y Vaidman dieron con la clave de cómo hacerlo, empleando el concepto de la dualidad onda-corpúsculo.

Imagina que construimos el siguiente sistema –que es, básicamente, un interferómetro de Mach-Zehnder, pero parto de la base de que nunca has oído hablar de uno, así que no te preocupes si no lo conoces–. En primer lugar, disponemos de una fuente de luz, en este caso un láser de gran precisión con el que podemos emitir fotones uno a uno. Naturalmente, debemos ser cuidadosos con él, porque si un fotón emitido por el láser choca con cualquier bomba, y esa bomba resulta ser real, explota y la perdemos. Ya hemos descartado, desde luego, la solución trivial: apuntar con el láser a cada bomba en la habitación oscura, ya que entonces

tenemos total seguridad de qué bomba pertenece a cada grupo... pero nos hemos quedado sin bombas reales. Primero, el láser (como siempre, disculpad los dibujos, pero uno tiene sus limitaciones):



A continuación del láser, ponemos un dispositivo un tanto peculiar, aunque muy empleado en interferometría: una *superficie semiespejada*. Suena raro, pero no es más que una lámina de vidrio, con uno de sus dos lados pintados con una capa muy fina de aluminio. La capa de aluminio tiene el grosor adecuado para que la mitad de la luz que recibe sea transmitida, y la mitad reflejada (o, en términos de partículas, de que un fotón que llega tenga un 50% de ser reflejado y un 50% de atravesarla). De esta manera es muy fácil dividir un haz de luz en dos perpendiculares con la mitad de intensidad cada uno, simplemente poniendo el espejo de la siguiente manera:

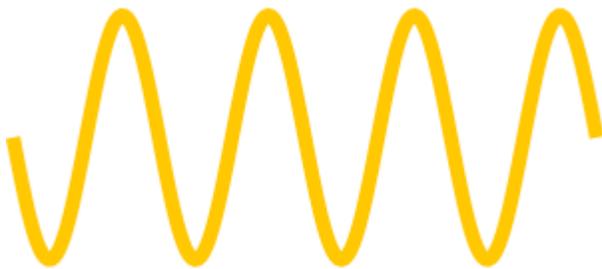


En el dibujo he representado el aluminio en celeste y el vidrio en gris. Como ves, al llegar a la lámina, la mitad de la luz es reflejada y sale hacia arriba en el dibujo, y la mitad atraviesa el aluminio, entra en el vidrio refractándose, y sale por el otro lado en la misma dirección que el rayo original –aunque, por supuesto, no con la misma intensidad–. La construcción de la lámina semiespejada es cuidadosa, de modo que ambos rayos salgan perpendiculares el uno al otro, como en mi pobre dibujo.

Eso sí, algo más cambia en la onda luminosa o esto no tendría ninguna gracia. Aunque los detalles de esto se escapan al objetivo del artículo de hoy (que no es precisamente sobre óptica, aunque parezca lo contrario), permite que explique mal y pronto lo que nos afecta a nosotros sobre la reflexión y refracción de la luz en este semiespejo. Al reflejarse en la lámina de aluminio desde el aire, *la onda luminosa "se da la vuelta"*. Esto puede sonar a chino, pero básicamente quiere decir que, si la onda luminosa fuera como la onda que viaja por una cuerda, cada cresta de la ola se convierte en un valle, y cada valle en una cresta, como si fuera el "negativo" de la onda original (si sabes de ondas, la onda reflejada tiene un desfase de π respecto a la original):



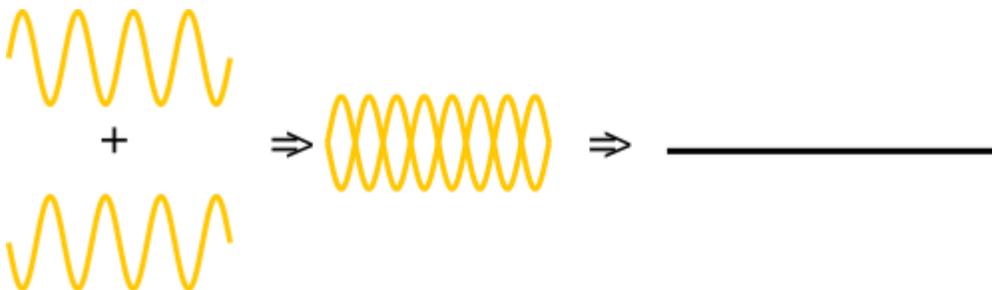
Antes



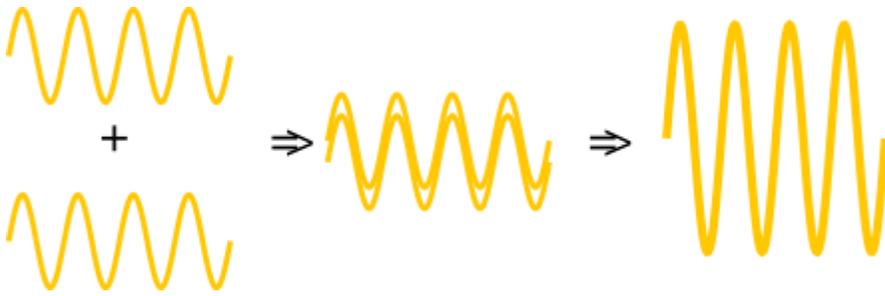
Después

Uno de los aspectos curiosos de esta “inversión” de la onda al reflejarse es que sólo sucede cuando lo que hay al otro lado del aluminio es un medio con un índice de refracción mayor que el inicial. Es decir: si la onda va por el aire y se encuentra con el aluminio y a continuación el vidrio, al reflejarse se “da la vuelta”... *pero si viene por el vidrio y se encuentra con el aluminio y detrás el aire, entonces la reflexión no altera en absoluto la forma de la onda.* Como digo, curioso, pero estas cosas de óptica llevarían una serie en sí mismas (¡y seguramente algún día la reciban!), así que sigamos con lo que nos interesa ahora mismo.

La razón de que no te hayas dado cuenta de esto nunca, por cierto, es que a nuestro ojo le trae sin cuidado si la cresta está desplazada o no respecto a ninguna “posición original”. Sin embargo, si por alguna razón la onda original y la onda “invertida” se encuentran de nuevo, lo que sucede es lo mismo que sucedería en una cuerda en la que produjéramos esas dos ondas a la vez: cada punto sufre el mismo “tirón” hacia arriba y hacia abajo, con lo que no se mueve en absoluto. Este “sumar una onda y la onda invertida” se conoce como **interferencia destructiva**, y en el caso de la luz tu ojo sí podría detectarla, porque al cancelarse ambas ondas se produciría oscuridad:

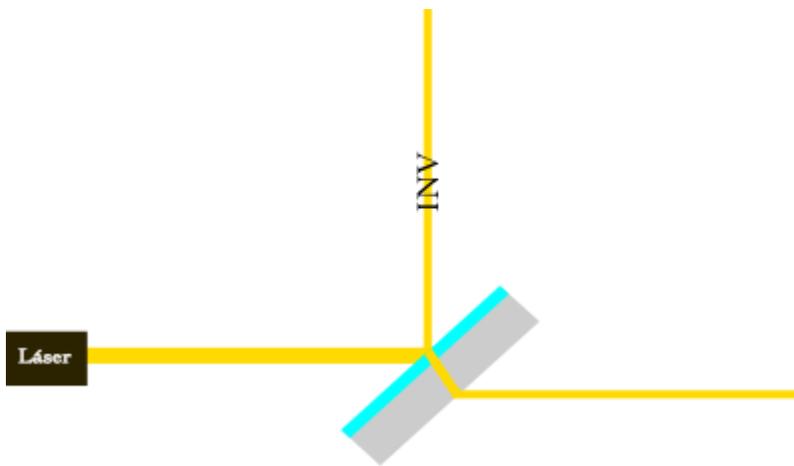


Sin embargo, si sumamos una onda con otra idéntica a ella en vez de “dada la vuelta”, ambas contribuciones se suman y se produce una onda que es la suma de ambas, en lo que se llama **interferencia constructiva**:

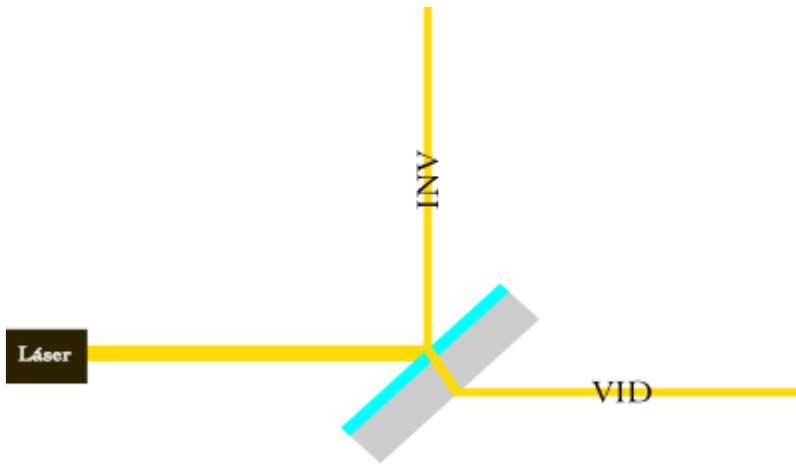


Es posible, por lo tanto, dividir un haz luminoso en dos, y luego volver a juntar las dos “mitades”... y obtener un haz como el original (si conseguimos producir una interferencia constructiva), o simplemente oscuridad (si producimos una interferencia destructiva). Es importante además, para entender el resto del experimento mental, que comprendas una cosa: **invertir una onda dos veces significa dejarla como estaba**. Si reflejamos un haz de luz en una superficie de aluminio, se “da la vuelta”, pero si luego la reflejamos en una segunda superficie, se “da la vuelta otra vez”... *¡con lo que se queda como al principio!*

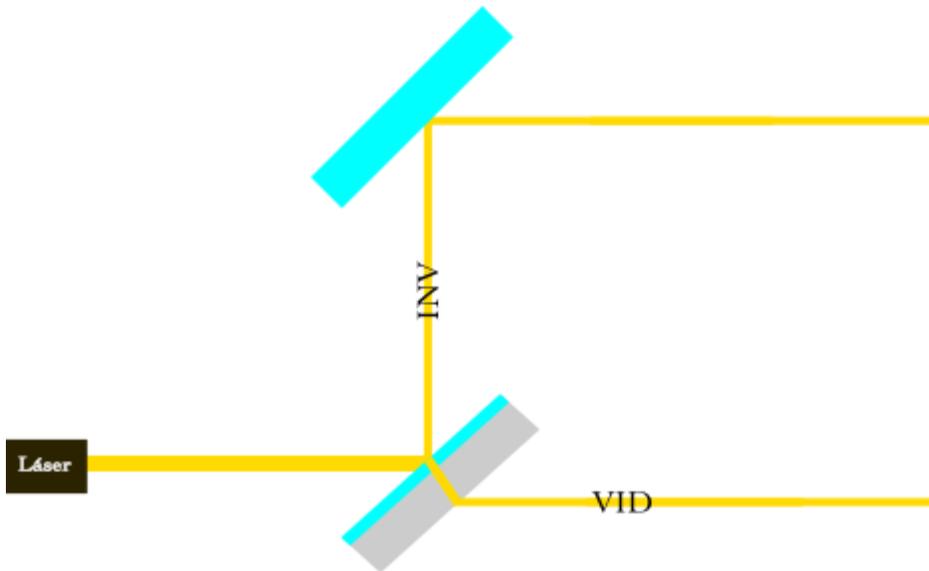
Lo que nos importa a nosotros ahora mismo, por si toda esta explicación te ha dejado los pelos de punta, es que la onda que sale hacia arriba, al haberse reflejado, se ha “invertido”. En el dibujo, ya que no voy a ponerme a dibujar onditas dadas la vuelta o no, pongamos un “INV” en el haz de luz reflejado para representar ese hecho:



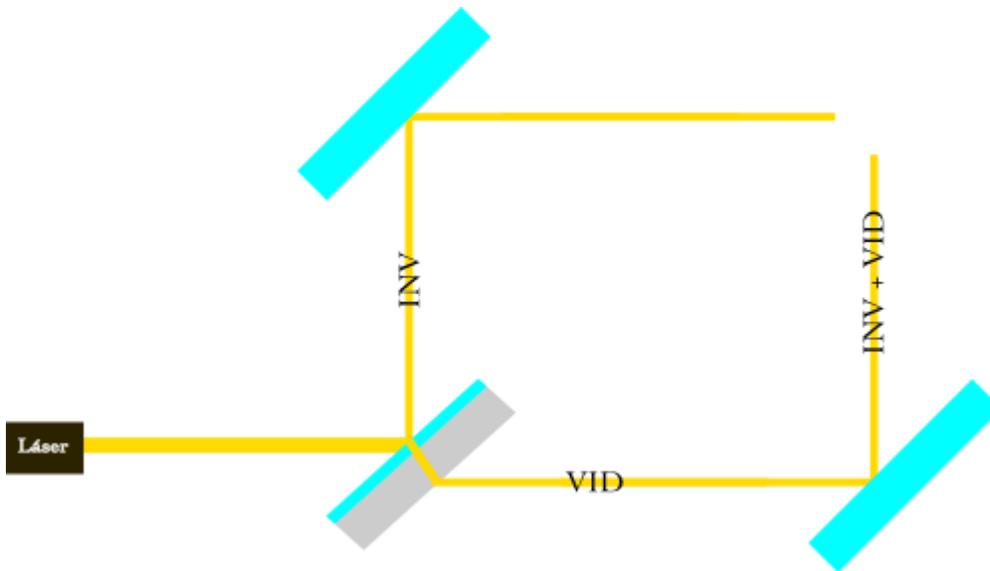
Ahora bien, *¿le pasa algo similar a la otra parte de la onda original, la que atraviesa el aluminio y se refracta a través del vidrio?* La respuesta es que sí, aunque en este caso, al atravesar el vidrio la onda es alterada de maneras más complicadas, de modo que no está justo “dada la vuelta”, sino desplazada en un factor que depende de la naturaleza del material, el grosor, etc. Las buenas noticias son que, en este caso, *nos da exactamente igual* lo que le pase a esa parte de la onda original, porque, como verás luego, siempre va a suceder lo mismo con lo que no hace falta conocer el detalle. Llamemos a la modificación de la onda original “VID” en los dibujos, ya que es la alteración producida al atravesar el vidrio, y listo:



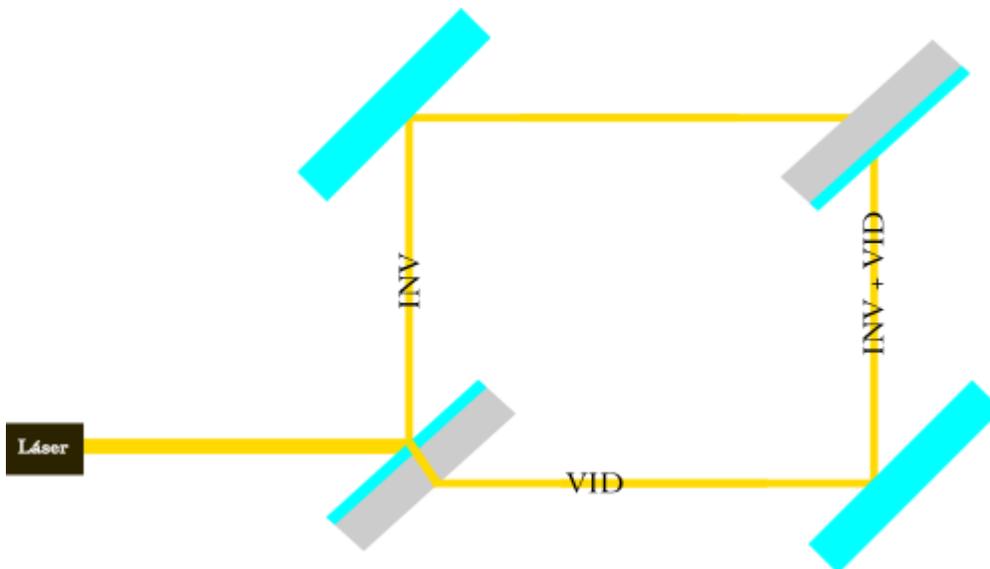
Sigamos entonces con la construcción de nuestro aparatejo. Arriba ponemos un espejo normal y corriente, para reflejar el rayo superior. En este caso no se trata de una superficie semiespejada, sino de un espejo de verdad, que refleja el rayo completamente. Eso sí, ¡recuerda!: ya que se trata de una reflexión, la onda se “da la vuelta”, es decir, se invierte de nuevo, lo que significa que se queda otra vez exactamente igual que al principio, pues ha sufrido dos inversiones (INV + INV es lo mismo que no hacer nada):



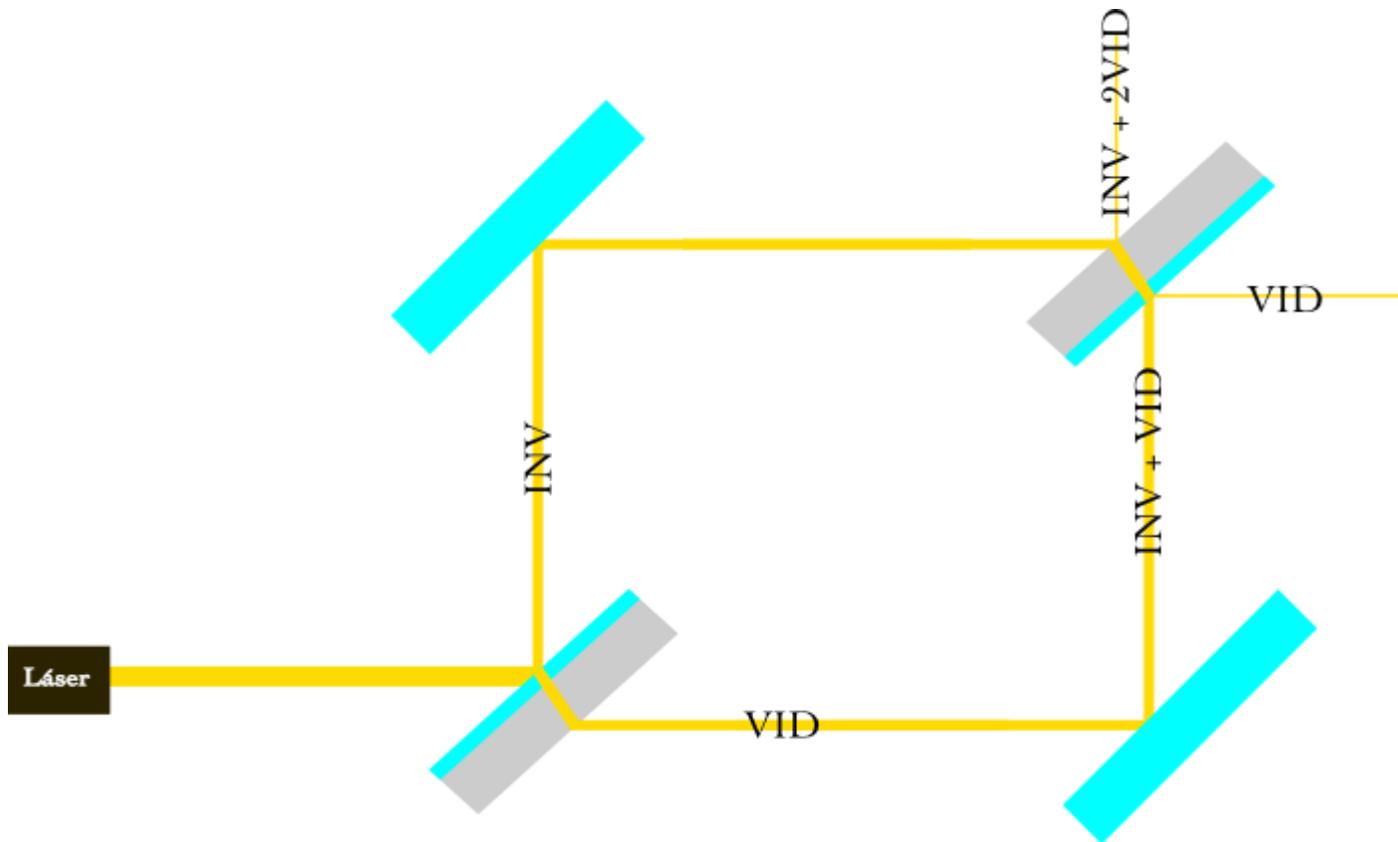
Y pongamos otro espejo normal idéntico que desvíe el rayo inferior, de modo que se dirija hacia arriba. Una vez más, la reflexión produce “inversión”, pero en este caso no podemos cancelarla con otra igual, porque esta onda no ha sufrido una inversión, sino una modificación arbitraria, de modo que llevemos la cuenta de las dos modificaciones:



¡Ya casi lo tenemos, ánimo! Pongamos ahora una segunda lámina semiespejada igual que la primera, de modo que esté justo donde se encuentran los dos haces luminosos, de la siguiente manera:

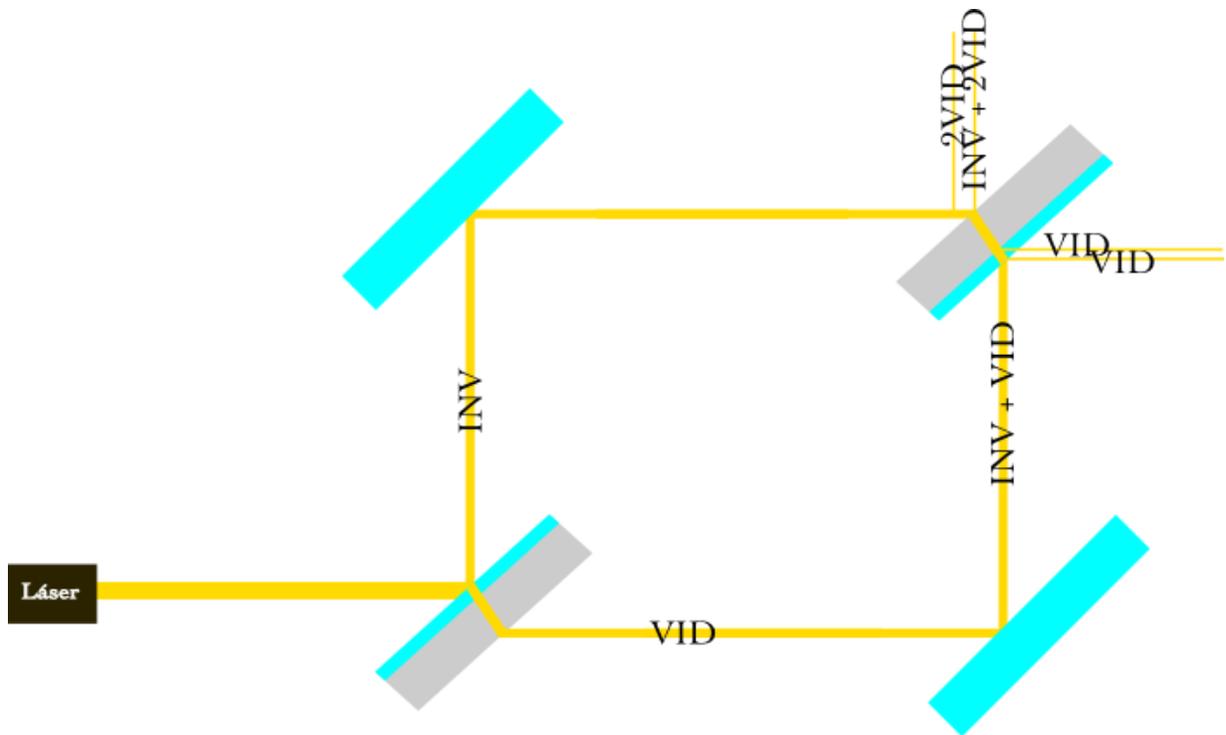


Pensemos ahora juntos lo que le sucede a cada uno de los dos haces que llegan a la segunda lámina semiespejada. El rayo inferior se dividirá de nuevo en dos: la mitad se reflejará en el aluminio y saldrá hacia la derecha, con lo que sufrirá una segunda "inversión". La modificación total de ese haz habrá sido $VID + INV + INV$, es decir, VID (porque $INV + INV$ es dejarla como antes). La mitad que atraviese la lámina hacia arriba sufrirá una vez más la modificación debida al vidrio, es decir, VID , con lo que su modificación total será $VID + INV + VID$, es decir, $INV + 2VID$. Dibujemos esto antes de pensar en lo que le pasa al haz superior:



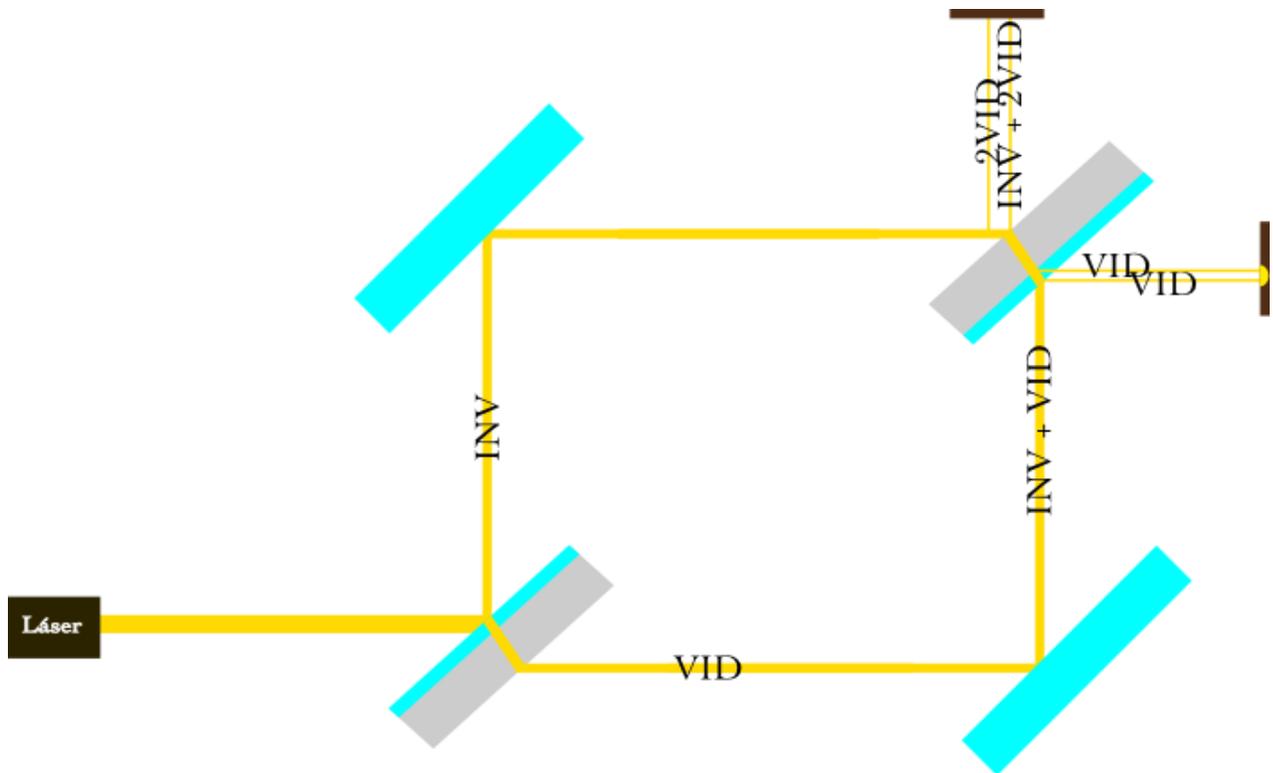
El haz superior, como el otro, también se dividirá en dos mitades. Una de ellas atravesará la lámina y saldrá hacia la derecha. Al atravesar la lámina, su modificación será la correspondiente VID, con lo que su modificación total es simplemente VID. La otra mitad atravesará el vidrio, se reflejará en la lámina de aluminio y volverá a atravesar el vidrio para salir hacia arriba. Sin embargo, dado que la reflexión en el aluminio se produce en este caso no desde el aire, sino desde el vidrio, como hemos dicho antes, no hay inversión de la onda, y la reflexión la deja igual que antes. En lo que a nosotros respecta, esa onda atraviesa el vidrio (modificación VID), se refleja en el aluminio desde el vidrio (no hay modificación) y luego atraviesa de nuevo el vidrio hasta salir por arriba (modificación VID).

Por lo tanto, la modificación total de este haz que sale hacia arriba es 2VID. Representemos ambos haces resultantes de la división del haz superior, con sus respectivas modificaciones (los dibujo junto a los otros, aunque realmente se superpongan, para que puedas distinguir unos de otros):



¡Por fin! Ya podemos ver qué diablos sucede al final. Aprovecho, por cierto, para felicitarte por tu tesón y paciencia si aún estás leyendo esto –no se lo confieses a amigos y familiares–. Si te fijas en el dibujo y tu cerebro aún funciona, verás que *la situación no es igual a la derecha y arriba*. A la derecha, ambos haces han sufrido la misma modificación total, con lo que son absolutamente idénticos y sufren una interferencia constructiva, de modo que por ahí sale bastante luz de nuestra construcción infernal.

Sin embargo, observa lo que sucede arriba: tanto un haz como el otro han sufrido la misma modificación debida al vidrio ($2VID$), *pero uno está invertido respecto al otro*. Por lo tanto, ahí arriba la interferencia es destructiva, y no hay absolutamente **nada de luz**. Si pusiéramos una pantalla en cada una de las dos “salidas” de nuestra construcción, la de la derecha brillaría, mientras que la de arriba permanecería oscura:



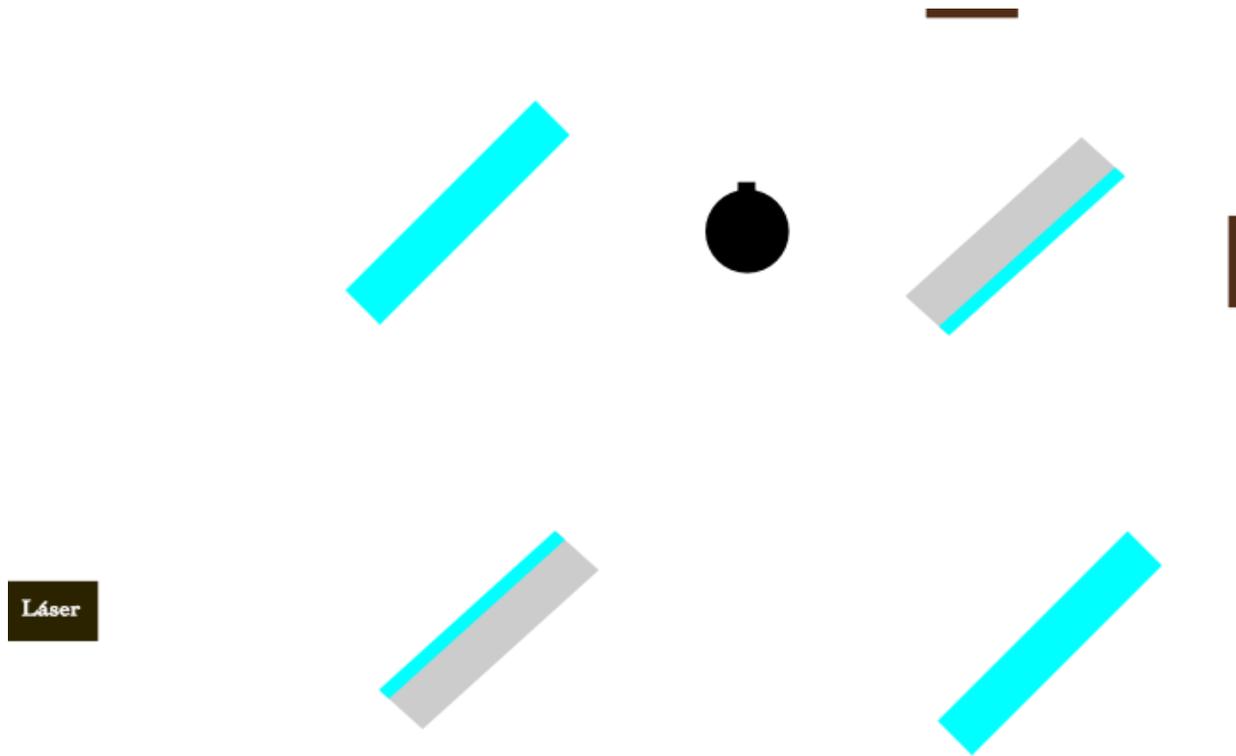
Todo esto viene perfectamente descrito por la física clásica, y hasta ahora no hemos utilizado la cuántica en absoluto. ¡Hasta ahora! Para empezar a introducirla repasando conceptos de hace tiempo, y antes siquiera de que nuestras misteriosas bombas entren en escena, mi recomendación es que releas –si no te acuerdas bien– el artículo sobre la dualidad onda-corpúsculo. Si te acuerdas de los heisenbérgicos miopes y el resto de barbaridades que allí se escribieron, piensa conmigo: *¿qué sucedería si nuestro láser emite un único fotón? ¿cuál de los caminos seguirá?*

En este aspecto, este experimento se parece mucho al de la doble rendija de Young, y allí ya preguntamos, cuando lo realizábamos mentalmente con un único electrón: *¿por cuál de las dos rendijas viaja el electrón?* Y la respuesta, ahora, es la misma de entonces, claro: nuestro único fotón *recorre los dos caminos*, pues se está comportando como onda. Si eres novato en la serie, o no tienes los conceptos frescos, puede que alces las manos y preguntes: *“Pero, si uno de los dos caminos de salida brilla y el otro no por las interferencias, ¿con quién diablos interfiere ese fotón, si es el único?”* Y la respuesta tiene que ser la misma que dimos en el artículo de la doble rendija: **el fotón interfiere consigo mismo**. Recuerda que la onda no está “compuesta por fotones que oscilan”, *nuestro fotón es la onda*.

El hecho de que haya un solo fotón no hace que se comporte únicamente como partícula y no como onda; lo que determina un comportamiento u otro, como sucedía con los heisenbérgicos, es *qué tipo de experimento realizamos*. Recuerda la doble rendija, que tal vez sea un experimento más intuitivo para resaltar este hecho: cuando permitimos que el fotón pase por los dos caminos, se produce la interferencia, y la luz se comporta como onda. Pero, si en algún momento introducimos un elemento que nos diga *por cuál de los dos caminos* ha pasado, entonces deja de producirse la interferencia y la luz se comporta como un fotón de naturaleza corpuscular. Y, aunque repita lo que dije entonces, no es posible diseñar un experimento en el que ambas naturalezas se muestren a la vez. Disculpa si ya tenías esto claro, pero es totalmente esencial para entender el detector diseñado por Elitzur y Vaidman.

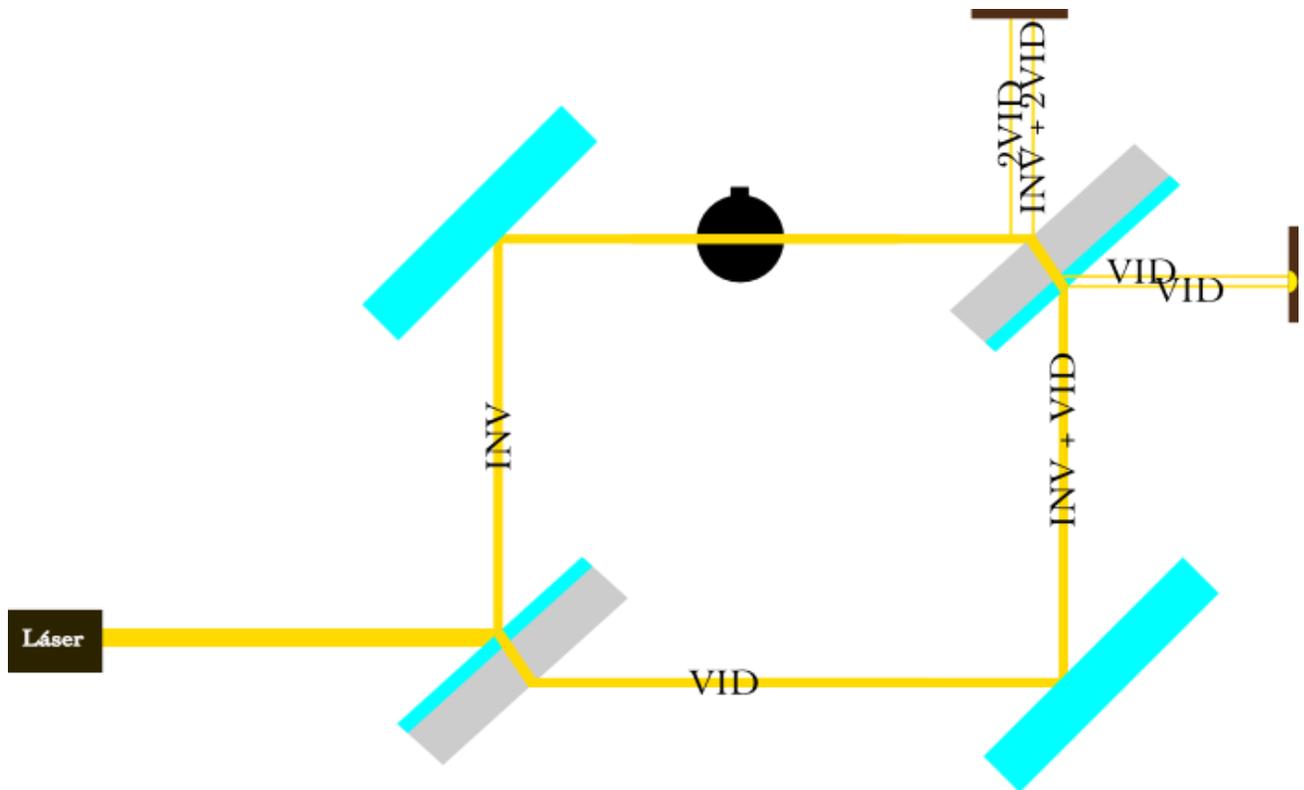
Lo que quiero que tengamos muy clarito es lo siguiente: cuando ponemos en marcha nuestro láser en el interferómetro que hemos construido, y el láser dispare un único fotón, la lámina de la derecha se iluminará y la de arriba no, porque da igual que haya un fotón o cinco millones, el comportamiento es ondulatorio. Será, por supuesto, un brillo brevísimo, pero detectable. Hasta aquí, ningún problema. Pero veamos qué sucede si ponemos una bomba en el escenario, porque para eso llevamos aquí todo este tiempo construyendo el interferómetro.

Supongamos que introducimos una bomba en el aparato, de la siguiente manera:



Lo que suceda entonces cuando nuestro láser emita un fotón, naturalmente, depende de si la bomba es real o falsa, aunque eso no lo sabemos al introducir la bomba en escena, claro. Veamos qué pasa si la bomba es de las falsas, con lo que deja pasar la luz sin absorberla y, por supuesto, sin explotar.

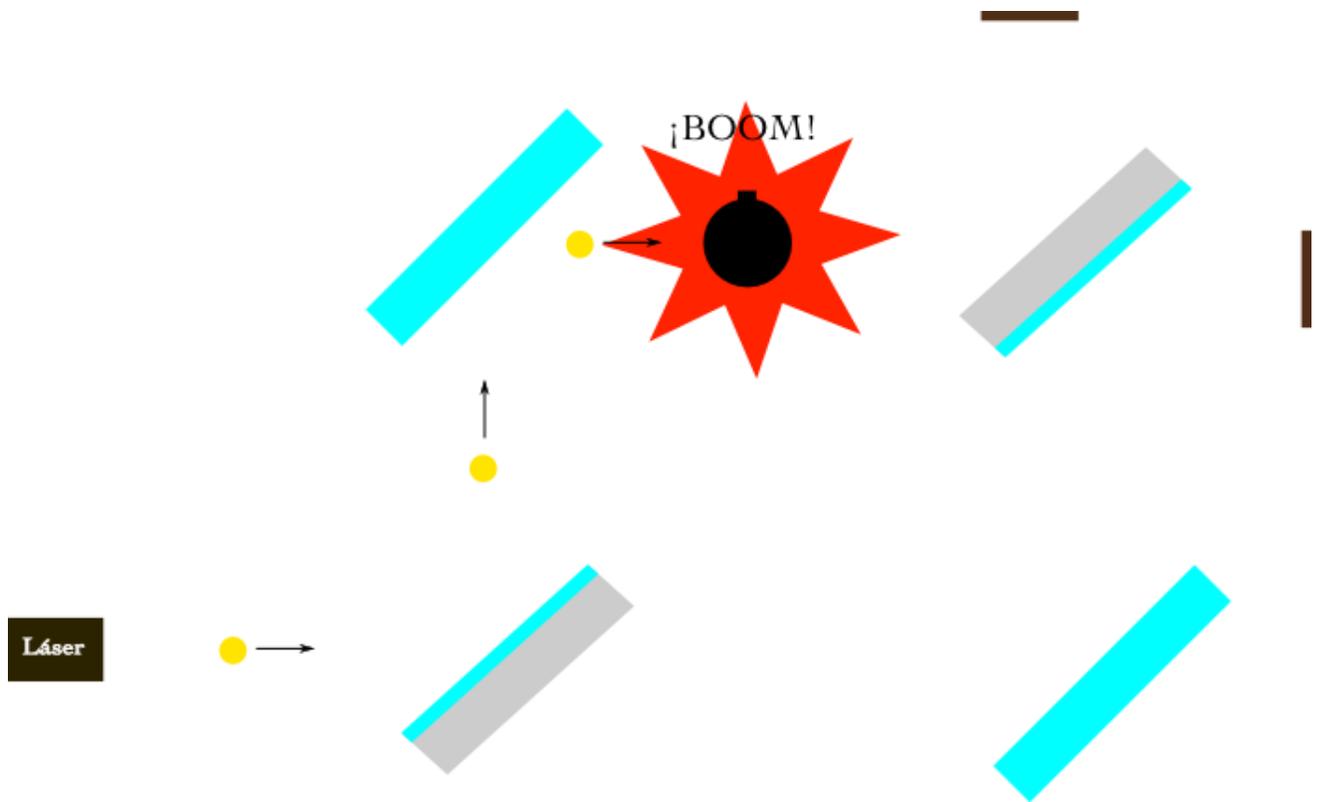
Lo que sucedería entonces es lo mismo que sucedía cuando no había bomba. Puesto que nuestra bomba “de pega” no altera la luz que le llega, la onda puede seguir viajando por los dos caminos –superior e inferior– sin problemas, interfiriendo consigo misma al llegar a las salidas, y produciendo el mismo efecto. De modo que, si la bomba es de pega, seguiríamos viendo exactamente lo mismo que cuando no la había, es decir, un destello de luz en la pantalla de la derecha y nada de nada en la de arriba:



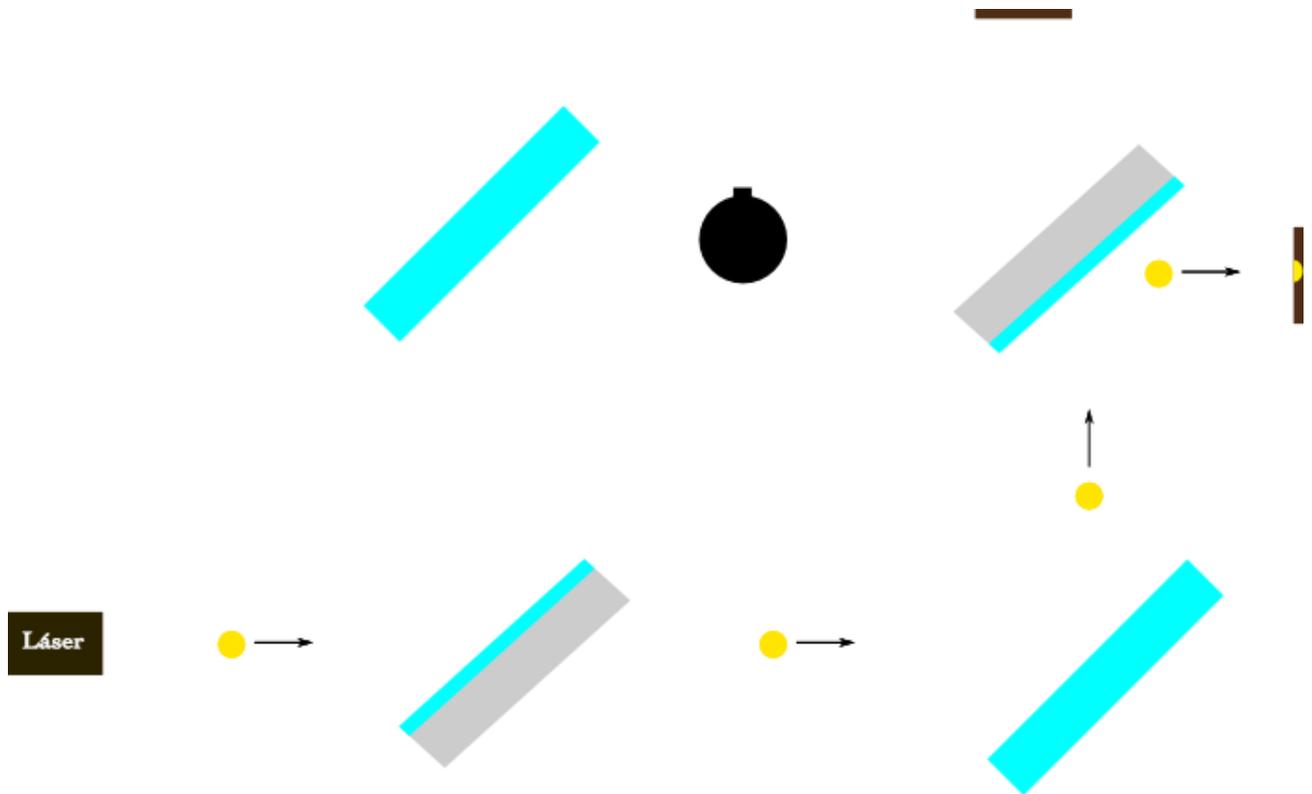
Si te fijas, en este caso la luz sigue comportándose de forma ondulatoria, y nos es imposible saber por cuál de los dos caminos ha recorrido el interferómetro. De hecho, la respuesta a esa pregunta es “ambos”. Y, aunque ahora seguiremos con el otro caso, recuerda que no es lo mismo decir “*si la bomba es falsa, necesariamente brilla la pantalla de la derecha*” que “*si brilla la pantalla de la derecha, necesariamente la bomba es falsa*”. Antes de sacar conclusiones así tenemos que ver si, de ser la bomba verdadera, esa pantalla no brilla. De modo que pensemos en qué sucederá si la bomba es verdadera.

En ese caso, si el fotón emitido por el láser llega a la bomba, ésta lo absorberá y explotará. Es decir: ahora estamos poniendo un “detector de fotones” en uno de los dos caminos. Es como si, en la doble rendija de Young, pusiéramos un detector en una de las rendijas pero no en la otra. Ahora ya no da igual qué camino recorre el fotón, y se pone de manifiesto la naturaleza corpuscular de la luz: tenemos que pensar en el fotón como partícula, y en probabilidades en vez de interferencias.

El fotón sale del láser, y se encuentra con la primera superficie semiespejada. Allí debe elegir un camino al azar; tendrá un 50% de probabilidad de salir por arriba, y otro de salir hacia la derecha. Supongamos primero que sale por arriba, con lo que rebota en el espejo de arriba y se encuentra con la bomba. ¡BOOOM! Fin del experimento:

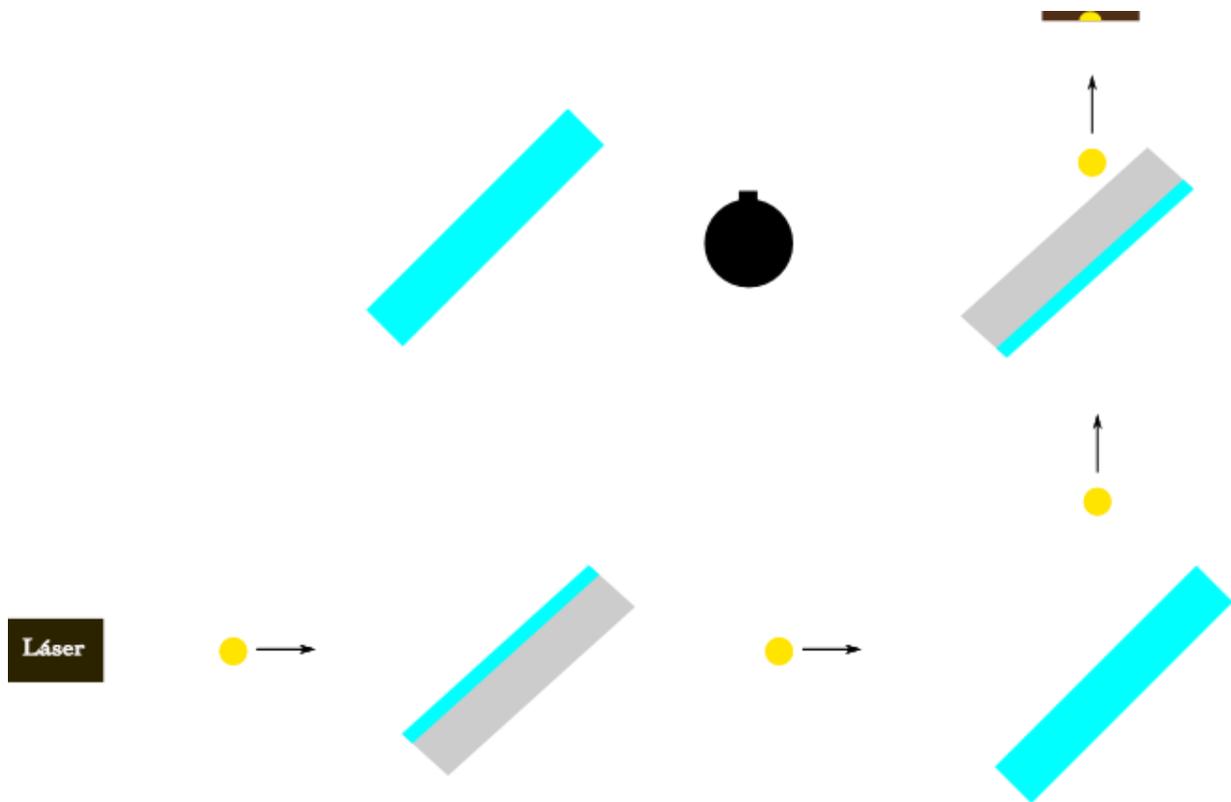


En este caso no brilla ninguna de las dos pantallas, claro. Y hemos “detectado” el tipo de bomba con total seguridad... pero, claro, no hemos conseguido nada digno de mención, porque la bomba ha estallado y lo mismo hubiéramos conseguido simplemente exponiéndola a la luz. ¡Pero ésta es sólo una de las posibilidades para el fotón! Sigamos. La otra posibilidad es que el fotón hubiera salido por el camino de la derecha, en cuyo caso rebotará en el espejo de la esquina inferior derecha y saldrá hacia arriba, hasta encontrarse con la siguiente superficie semiespejada. Allí tiene dos opciones, ambas con un 50% de probabilidad: o bien rebota en el aluminio y sale hacia la derecha, o bien atraviesa la lámina y sale hacia arriba. La primera opción resulta en esto:



Observa que lo que observaríamos es exactamente lo mismo que cuando la bomba era falsa. Con lo que, como ya avisé entonces, el hecho de que la pantalla de la derecha brille no quiere decir que la bomba sea falsa necesariamente: puede que la bomba sea falsa, o puede que la bomba fuera verdadera y que el fotón siguiera el camino marcado en esta figura, algo que sucederá un 25% de las veces (50% elige el camino de la derecha en la primera lámina, 50% de esas veces elige el camino de la derecha otra vez en la segunda lámina). Así que, si la lámina de la derecha brilla, ¡ojo! *la bomba puede ser verdadera o falsa, no lo sabemos.*

Finalmente, la otra mitad de las veces el fotón saldrá hacia arriba atravesando la lámina, con lo que veremos esto:



Sí, ahora sí, hemos llegado a la meta, y espero convencerte de la maravilla que hemos conseguido. Si la bomba es verdadera, ya hemos visto que un 50% de las veces estallará, un 25% de las veces no estallará y brillará la pantalla de la derecha... **y un 25% de las veces no estallará y brillará la pantalla de arriba.** Pero, si la bomba era falsa, la pantalla de arriba no brillaba jamás, pues se producía la interferencia destructiva en ella, y sólo brillaba la de la derecha.

De modo que, si brilla la pantalla de arriba, **tenemos una bomba verdadera e intacta en el detector.** Ya sé que el sistema no detecta todas las bombas verdaderas, y que nunca estamos seguros de que las falsas lo sean. *Pero hemos detectado la bomba verdadera sin que el fotón la toque jamás.* Si en la pila de bombas hubiera, por ejemplo, 20 bombas verdaderas, acabaríamos con 5 bombas verdaderas sin explotar en la mano.

Perdona si insisto, pero es que es algo tan apabullante que no lo puedo evitar: *hemos detectado la naturaleza de la bomba verdadera sin “mirarla”.* ¡Un brindis por Elitzur y Vaidman, señores! Menudo ingenio, y menudo experimento mental. Este tipo de medición suele denominarse “*medición sin interacción*”, aunque el nombre es algo confuso. Lo fascinante del asunto es que pensábamos que la única manera que hay de saber si una bomba verdadera era hacer incidir un fotón sobre ella... pero no hemos hecho incidir ningún fotón sobre ella, y sin embargo sabemos que es verdadera con absoluta certeza.

Esto ya ha sucedido antes en la serie: la naturaleza “borrosa” del Universo hace que de algunas cosas de las que, de acuerdo con la mecánica clásica, deberíamos estar completamente seguros, ya no podamos estarlo... pero, al mismo tiempo, obtenemos certezas que antes nunca jamás podríamos obtener. Qué irónica es la vida a veces.

Sólo un año después del planteamiento teórico de Vaidman y Elitzur, un grupo de físicos (Anton Zeilinger, Paul Kwiat, Harald Weinfurter y Thomas Herzog) construyó un “detector de bombas” que utilizaba este concepto –aunque, por supuesto, no detectaba la presencia de bombas sino de espejos... y el experimento funcionó: detectó la presencia de los espejos sin que le llegase luz alguna (si quieres leer una descripción detallada del experimento, el enlace está al final del artículo). Dicho de otro modo, esto no es una elucubración de seres perturbados, sino que ha sido comprobado experimentalmente.

Lo que nos lleva al “elefante en la habitación”: *¿cómo rayos se come que pueda medirse algo sin interactuar con él?* Si el fotón que llega a la pantalla de arriba en nuestro caso no ha interactuado de ningún modo con la bomba, *¿por qué se comporta de manera diferente cuando la bomba está ahí?*

Las preguntas más filosóficas, si nos paramos a hacérselas, se multiplican. ¿Es posible que la bomba y el fotón que nunca la toca sino que llega a la pantalla de arriba sí estén interactuando de alguna manera? Pero, si nuestro interferómetro no tuviera unos pocos centímetros de tamaño sino que fuese del tamaño del Sistema Solar, de modo que el fotón nunca estuviera a menos de cien millones de kilómetros de la bomba, *¿cómo puede alterar el fotón su comportamiento dependiendo de si hay bomba o no?* Si aceptamos que es posible esa alteración a distancias arbitrarias y de manera instantánea, estamos desterrando la concepción de **localidad**, algo que ya hemos mencionado alguna vez en esta serie.

Otra pregunta es, *¿tiene sentido hablar de la naturaleza de una bomba con la que nunca hemos interactuado?* ¿No habíamos quedado, desde Heisenberg, en que si no lo “vemos” no tiene sentido hablar de ello? Renegar de la naturaleza de la bomba independientemente de nuestra medición es descartar la idea de **realismo** —la idea de que existe una realidad independiente de su observación—, algo de lo que también hemos hablado varias veces en *El Tamiz*. Tanto una cosa como la otra, como ya sabes si eres “habitual”, incomodaban seriamente a Einstein, y nunca cejó en su empeño de defender localidad y realismo.

Cuando Elitzur y Vaidman propusieron su experimento, estas preguntas llevaban muchos años planteadas y un físico en particular, el genial John Stewart Bell, elaboró uno de los teoremas más importantes de la cuántica tratando de responderlas. De ello hablaremos en el próximo artículo de la serie, cuando le hincemos el diente al *Teorema de Bell*. Que Dios nos ampare, a vosotros y a mí.

El Teorema de Bell

“Sin embargo, no puedo creerla seriamente, porque la teoría es inconsistente con el principio de que la Física debe representar una realidad en el espacio y el tiempo sin acción fantasmal a distancia...”

Albert Einstein en una carta a Max Born, 1947.

Hace ya un año que hicieron su aparición los cuantejos en *El Tamiz*. Se trataba del momento en el que introducíamos en la serie Cuántica sin fórmulas el concepto de entrelazamiento cuántico, y desde entonces la serie se ha dedicado, fundamentalmente, a explorar las consecuencias prácticas y teóricas del concepto de entrelazamiento, dañando irreversiblemente las mentes que la han ido siguiendo desde entonces. Hoy continuamos con ello, de una forma aún más teórica que antes; intentaremos comprender juntos la demostración y enunciado del Teorema de Bell, cuyas consecuencias filosóficas hubieran hecho temblar a Einstein — no olvides la cita de arriba según avancemos en el artículo—. Es considerado por algunos como uno de los más revolucionarios del último siglo por lo que significa, combinado con los experimentos, acerca del Universo que nos rodea.

Pero, antes de bucear juntos en la cuántica, los avisos de rigor (si llevas mucho tiempo con nosotros, mejor saltas hasta el párrafo “En el último artículo...” para no leer lo que, con unas palabras u otras, has leído muchas veces ya):

En primer lugar, esta serie es, de lejos, la más abstracta y difícil de comprender de *El Tamiz*. Algunos artículos, como éste, prácticamente requieren coger un lápiz y un papel y hacer algunas anotaciones según los lees para no liarte, y a menudo es necesario leerlos varias veces para ir asimilando las cosas; en parte esto se debe a que describen conceptos complejos, y en parte a que muchas veces se trata de cosas completamente ajenas a nuestra intuición. En resumen, que hace falta cierto esfuerzo para sacar algo en claro de ellos, y gran parte del trabajo para comprender las ideas tras estos pobres artículos debe ser tuyo. Si te

sirve de consuelo, imagina el esfuerzo que me supone a mí escribirlos –éste en particular, tres veces antes de quedarme sólo parcialmente satisfecho con el resultado–.

En segundo lugar, lo que vas a leer es un hatajo de simplificaciones y trampas abyectas para hacer comprensible al lego algo que es muy difícil de entender incluso para nosotros los físicos, así que si buscas rigor y explicaciones completas, mejor lo haces en otra parte. En mi opinión, como sabéis los viejos del lugar, es mucho mejor para el lego recibir una explicación conceptual asequible, aunque sea mediante analogías con sus correspondientes “agujeros”, que simplemente recibir un “esto es muy complicado, no lo entenderías” –que tiene la ventaja para nosotros de servir de escape cuando nosotros tampoco lo entendemos de verdad, con lo que no podemos explicarlo con palabras sencillas–.

Finalmente, si las palabras cuantejo zanahoriófilo, entrelazamiento o superposición te suenan raras, es que no has llegado hasta aquí con el resto de nosotros. Mi recomendación es que empieces la serie por el principio, o al menos desde que introdujimos el concepto de estado cuántico, o este artículo te va a resultar aún más raro de lo que es por sí mismo. ¿Que tienes que leer mucho antes de volver aquí? Pues sí... como he dicho antes, gran parte del esfuerzo para sacar algo en claro de esto debe ser tuyo.

En el último artículo, como espero que recuerdes, nos dedicamos a estudiar el experimento del detector de bombas de Elitzur-Vaidman. Allí nos preguntábamos acerca de dos conceptos puestos en duda por muchas predicciones de la cuántica y esenciales en la concepción clásica del Universo, y que se ponían de manifiesto en el experimento mental de esos dos físicos.

Por un lado, el realismo: la idea de que las cosas son como son y tienen unas propiedades determinadas, independientemente de que las midamos o no. Para entendernos, siempre que ante una paradoja cuántica te preguntas, “Sí, pero ¿dónde está el electrón/qué velocidad tiene/cuál es su espín/cómo son las cosas... de verdad?”, estás apelando, consciente o inconscientemente, al realismo, algo que está enterrado en nuestra intuición de una manera muy difícil de desterrar.

Por otro lado, el localismo, es decir, la idea de que los sucesos se producen en un lugar determinado y sus consecuencias viajan por el resto del Universo pasando por todos los puntos intermedios. Es más fácil comprender la idea de localismo expresándola a la Einstein, a saber: no existen “acciones fantasmales a distancia” que conecten, de forma instantánea, puntos diferentes del Universo. Lo que yo hago en un lugar no puede tener consecuencias inmediatas en otros lugares muy lejanos. Como el realismo, se ha tratado tradicionalmente de una idea implícitamente asumida por la Ciencia, aunque la cuántica en muchos casos la ponga en duda.

Sin embargo, a veces aquí hemos hablado de cómo cambiar el estado de una partícula modificaba instantáneamente el estado de una partícula entrelazada con ella. Ya dijimos entonces que esto puede interpretarse de dos maneras: si la mecánica cuántica es una teoría completa, el estado es la partícula, de modo que si cambia el estado es que ha cambiado la partícula, y el realismo no se sostiene. Por el contrario, es posible que el estado no sea toda la información sobre la partícula, en cuyo caso es posible que cambie el estado sin que cambie la partícula.

Tanto Einstein como otros científicos, a quienes llamaré real-localistas, rechazaban de plano una Física que abandonase cualquiera de esos dos conceptos. El problema era, naturalmente, que los experimentos parecían avalar la mecánica cuántica, ya que sus predicciones se cumplían extraordinariamente bien. Para los real-localistas el problema no era que el Universo fuese así de raro –en su opinión, no lo era–, sino simplemente que la propia teoría cuántica estaba incompleta, algo que podemos ver claramente con un ejemplo sencillo de los que hemos trabajado antes en la serie si lo explicamos desde el punto de vista de un real-localista.

Si yo produzco un par de cuantejillos entrelazados, de modo que si al medir el estado de uno de ellos resulta ser zanahoriófilo puedo estar seguro de que el otro es zanahoriófobo (y, antes de medir ninguno, ambos tienen un 50% de probabilidad de estar en cualquiera de los dos estados), un real-localista lo explicaría así:

Lo que sucede es que se han generado dos cuantejos con características opuestas desde el principio. Uno de ellos es zanahoriófilo, y siempre lo ha sido desde su creación, aunque yo no lo mida. El otro es zanahoriófobo desde el principio. Cuando mido uno de los dos, puesto que no sé cuál es cuál, naturalmente hay un 50% de probabilidad de que resulte ser, por ejemplo, zanahoriófobo. Pero el cuantejo no ha cambiado, lo que ha cambiado es mi conocimiento sobre él. Y el otro cuantejo no cambia instantáneamente cuando mido éste, ¡qué idea más peregrina! No, lo que pasa es que, si yo tengo el zanahoriófobo, el otro debe ser

necesariamente su contrapartida, un cuantejo zanahoriófilo, como siempre fue, aunque yo no lo supiera. La zanahoriófilia y la zanahorifobia son características reales de los cuantejos, y no se transmiten fantasmalmente a distancia.

¿Cómo es posible entonces que nunca podamos ir más allá de simples probabilidades en la cuántica? Para el real-localista, el problema es la propia cuántica. Hacía falta una teoría más completa, que tuviese en cuenta “variables ocultas” que la cuántica no consideraba — entonces, las probabilidades se desvanecerían y podríamos saber cómo son las cosas de verdad. Es como si yo tuviera una teoría acerca de que, tras un día lluvioso, hay un 60% de probabilidad de que llueva otra vez, sin tener en cuenta nada más. ¡Menuda meteorología! Si estudiase las variables que no tengo en cuenta (temperatura, velocidad del viento, humedad relativa, etc.) y estableciese modelos correctos, ese 60% se convertiría en algo muchísimo más preciso y determinado — la indeterminación no estaba en el tiempo meteorológico, sino en mi conocimiento limitado anteriormente.

Podría parecer que no se puede ir más allá en la discusión. ¿Cómo demostrar que la cuántica sí es una teoría completa? ¿Cómo demostrar que el realismo, o el localismo, no se cumplen en el Universo? El argumento “ah, pero la teoría cuántica no es completa” es difícil de rebatir con experimentos de ningún tipo... porque nunca es posible estar seguro de cuándo una teoría científica es completa. Aquí es cuando entra en escena el físico norirlandés John Stewart Bell (a la derecha de pie frente a la pizarra), que consigue con una elegancia fuera de lo común lo que parecía imposible: predecir resultados experimentales que deben cumplirse, sí o sí, para un Universo real-localista, sin la menor hipótesis acerca de la mecánica cuántica.

Antes de zambullirnos en la demostración del Teorema en cuestión, quiero tratar de hacerte ver la enorme originalidad de enfoque de Bell: otros habían intentado antes demostrar, a partir de las propiedades de la mecánica cuántica, resultados experimentales determinados. Pero eso no resolvía el problema: sí, la mecánica cuántica predecía esos resultados, pero tal vez habría otra teoría más completa que no sólo predijese los mismos resultados en esos experimentos, sino que además tuviera en cuenta variables ocultas o cosas que se hubiesen escapado a la cuántica, y lo explicase todo sin romper el localismo ni el realismo. Un callejón sin salida para discutir sobre esos dos aspectos.

Pero Bell hace exactamente lo contrario. Partamos de la hipótesis de que la realidad existe y es local, dice Bell, ¡justo el mismo punto de partida que el de Einstein y los real-localistas! ¿Qué consecuencias experimentales tiene eso? Naturalmente, muchas, pero John Bell consigue razonar meticulosamente sobre una en concreto: existe un límite en un determinado resultado experimental que no puede sobrepasarse si la realidad es local. Cualquier experimento que esté dentro de esos límites es compatible con una realidad local y no demuestra nada... pero si un solo experimento se sale de esos límites, no es posible explicarlo con absolutamente ninguna teoría real-localista. Fíjate que Bell no sostiene que la cuántica sea verdad, sino que su Teorema se centra en el localismo y el realismo, y consigue romper el nudo gordiano como debe hacerlo la Ciencia, estableciendo condiciones que pueden comprobarse de manera empírica. Después volveremos a hacer énfasis en esto.

De modo que ponte el gorro de pensar, audaz y estimado lector, y razonemos juntos de un modo similar a como lo hizo Bell en 1964 en su “On the Einstein Podolsky Rosen Paradox” —a la que enlazaremos al final para los valientes— en la que establece su famoso Teorema. Naturalmente, Bell era una persona respetable y seria, y nunca jamás hubiera utilizado cuantejos, apio ni zanahorias en su razonamiento... peor para él, que se quede con sus aburridos electrones, fotones, espín y estados de polarización. Nuestro argumento es conceptualmente equivalente al suyo, pero con todas las salvedades que puedas imaginar: si ves agujeros en este razonamiento, los agujeros están en mis pobres analogías, no en el impecable artículo de Bell.

Como verás, el razonamiento completo es bastante lógico y, francamente, no hay sorpresas ni momentos extraños... lo extraño no es la conclusión del razonamiento, como veremos al finalizar, sino otra cosa diferente.

¡Vamos con ello!

En nuestro razonamiento, partiremos de dos hipótesis que harían feliz a Einstein —y muchas veces, para qué vamos a engañarnos, al resto de nosotros—, y olvidemos por un momento la maldita mecánica cuántica y sus conceptos incomprensibles:

Las propiedades de un sistema físico existen independientemente de cualquier medición — existe una realidad “de verdad”.

Los cambios en un sistema físico no pueden propagarse instantáneamente a otros lugares del Universo — esa realidad es “local”.

Imaginemos pues que tenemos una máquina que produce cuantejos. Los cuantejos producidos pueden ser de tres tipos: zanahoriófilos, apiófilos y manzanófilos, según adoren una de esas tres comidas (zanahoria, apio o manzana). Un cuantejo tiene gusto por uno de los tres alimentos y sólo uno, de modo que si es zanahoriófilo es necesariamente apiófobo y manzanófobo, y del mismo modo con las otras viandas. Naturalmente, nunca podemos estar seguros de a cuál de los tres tipos pertenece la adorable criatura hasta que le presentamos algún alimento, e incluso entonces es posible que no sepamos cuál es: si le presentamos una zanahoria y la rechaza, por ejemplo, no sabremos si es apiófilo o manzanófilo, simplemente habremos descartado el hecho de que pueda ser zanahoriófilo.

Eso sí, dado que la realidad existe, los cuantejos son de un tipo determinado desde que nacen, nada de esa palabrería cuántica de que “está en un estado superpuesto de zanahoriófilo, apiófilo y manzanófilo hasta que colapsamos la función de onda al medirla”. Nada cambia el tipo de cuantejo una vez éste ha nacido como es. En este artículo, para entendernos gráficamente, representaremos por tanto a los cuantejos con uno de estos tres dibujos, dependiendo de a qué grupo pertenezca en cada caso:

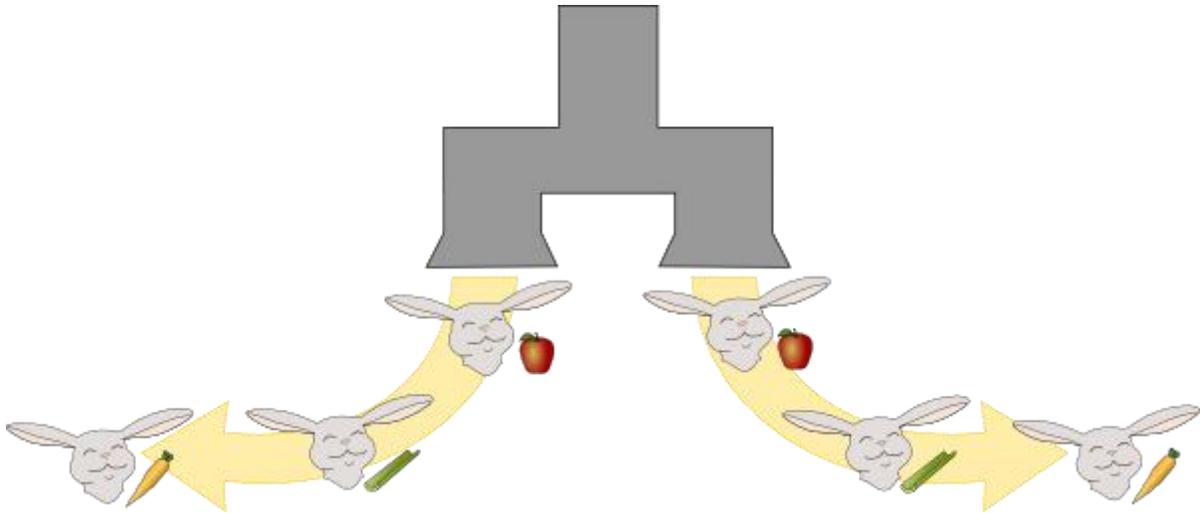


Cuantejos zanahoriófilo, apiófilo y manzanófilo.

(Todas las ilustraciones de este artículo, por cierto, son obra de Geli, afortunadamente para vosotros).

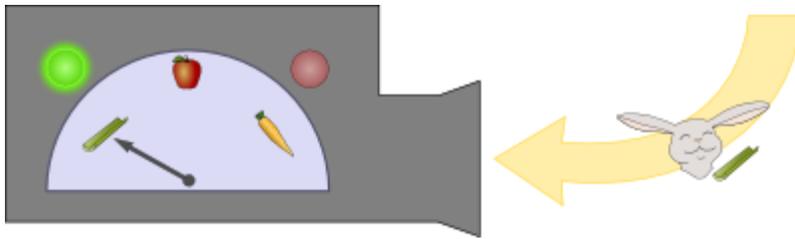
Nuestra máquina tiene otra peculiaridad: produce los cuantejos como pares de gemelos idénticos. Ambos son zanahoriófilos, ambos apiófilos o ambos manzanófilos. Esto significa que si yo estoy en un lugar y tú en otro, y yo enseño a mi cuantejillo una manzana y se la zampa feliz y contento, puedo estar seguro de que el tuyo también es manzanófilo, no porque haya habido una conexión instantánea entre ellos ni nada parecido, sino porque simplemente he comprobado que mi cuantejo siempre fue manzanófilo, luego el tuyo también lo ha sido siempre. ¡En esta casa se respeta el localismo!

Además, esta máquina produce los pares completamente al azar: un tercio de las veces produce cuantejos zanahoriófilos, un tercio apiófilos y un tercio manzanófilos. Cómo hace esto es indiferente, y no requiere en absoluto de probabilidades cuánticas; podemos tener dentro un operario con un dado de seis caras que lo lance cada vez y produzca el par de cuantejos correspondiente: 1-2 significa zanahoriófilos, 3-4 apiófilos y 5-6 manzanófobos. O podemos tener un ordenador que genere al azar el tipo de cuantejos, da exactamente lo mismo mientras desde fuera no podamos saber de qué tipo se han producido y los tres casos sean equiprobables.



Máquina productora de pares de cuantejos.

Finalmente, supongamos que tú y yo tenemos sendos detectores de cuantejos a una gran distancia entre ellos, simplemente para eliminar cualquier posible interacción que no pudiéramos detectar. Estos detectores son máquinas muy simples: a elección de quien las maneja, pueden presentar al cuantejo que llega una zanahoria, un apio o una manzana. Si el cuantejo se lanza, ávido y feliz, a por la comida, se enciende una luz verde en la máquina. Si el cuantejo pone cara de asco y rechaza, despectivo, el alimento, se enciende una luz roja. Nuestras máquinas tienen una palanca con la que podemos seleccionar cuál de los tres alimentos habrá esperando al cuantejo cuando llegue. Por ejemplo, en este caso la luz se pondrá verde, pues estamos ofreciendo apio a un cuantejo apiófilo (aunque no sabemos que lo es hasta entonces, claro):



Máquina detectora de tipos de cuantejos.

Supongamos que tú y yo ponemos las palancas de nuestros detectores en la misma posición, da igual cuál, y que la máquina que produce cuantejos nos lanza un millón de pares aleatorios de las adorables criaturas. ¿Qué probabilidad habrá de que las luces de nuestras dos máquinas coincidan cada vez?

Naturalmente, la probabilidad es del 100%. Si los cuantejos son, por ejemplo, zanahoriófilos, y ambos ponemos la palanca en “zanahoria”, tanto tu máquina como la mía encenderán la luz verde. Si ponemos la palanca en “apio” o “manzana”, tanto tu luz como la mía serán rojas. Si la máquina produce un millón de cuantejos al azar y nuestros detectores tienen la palanca en la misma posición el uno que el otro, el millón de veces coincidirán nuestras luces: a veces serán verdes cuando acertemos, otras serán rojas, pero siempre del mismo color la tuya que la mía. Y, aunque no sea demasiado importante para nuestro experimento, nuestras luces serán verdes 1/3 de las veces (cuando acertemos con la comida), y rojas los 2/3 restantes (cuando no acertemos con la comida).

Espero que, hasta aquí, todo esté claro. Ahora, compliquemos la cosa un poquito, que te toca pensar a ti.

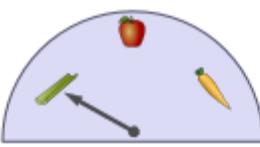
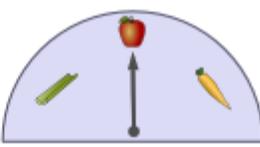
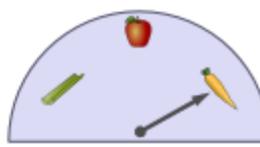
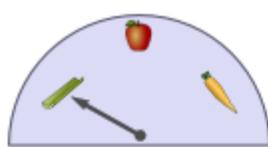
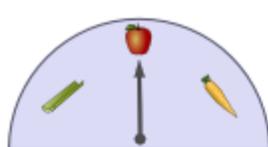
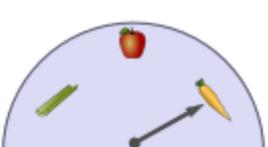
Imagina que tanto tú como yo nos agenciamos un dado, y hacemos lo mismo que el operario de la máquina productora de cuantejos. Para cada cuantejo que vaya a llegar a mi detector, si me sale 1-2, pondré la

palanca en posición “zanahoria”, si es 3-4 en “apio” y si es 5-6 en “manzana”. La probabilidad de que acierte con la comida, desde luego, sigue siendo de $1/3$ para cada cuantejo, y si me llegan 9 millones de cuantejos, se encenderá la luz verde unos tres millones de veces. Pero ésa no es la cuestión, sino hacernos la misma pregunta de antes: ¿cuántas veces de los nueve millones coincidirán nuestras luces?

Podría decírtelo directamente, pero creo que la comprensión es mucho mejor si haces la cuenta tú mismo. Si tú seleccionas cada vez una palanca al azar, y yo hago lo mismo, y recibimos nueve millones de pares de cuantejos aleatorios, ¿cuántas veces coincidirán nuestras luces? Seguramente te hará falta un lápiz y un papel para hacer alguna pequeña tabla en la que mostrar las posibles combinaciones de “posición de palanca” en tu máquina y la mía. Antes de seguir leyendo, piensa sobre ello.

1,2,3,4,5,6,7,8,9...

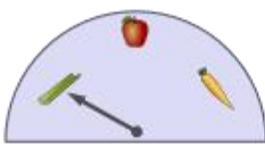
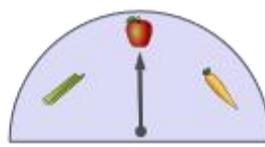
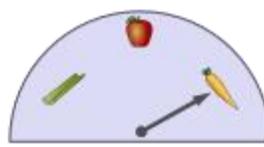
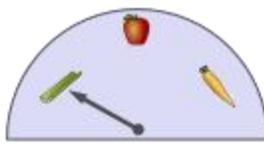
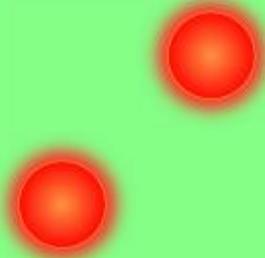
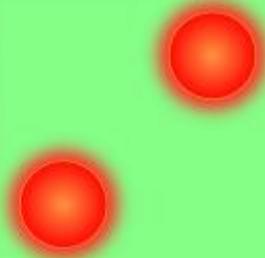
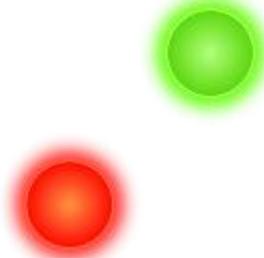
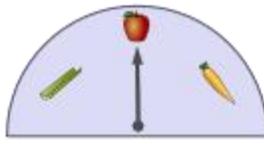
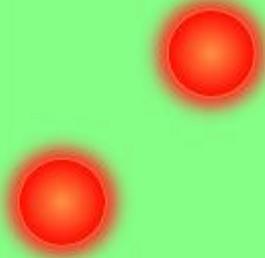
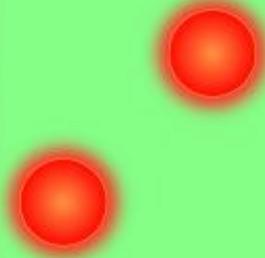
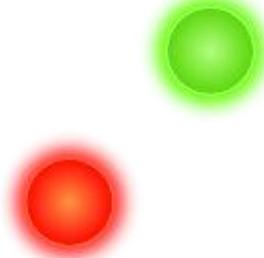
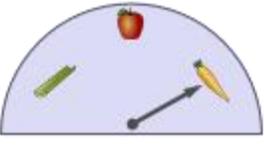
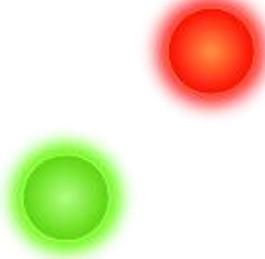
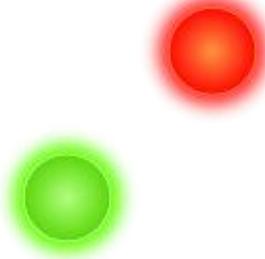
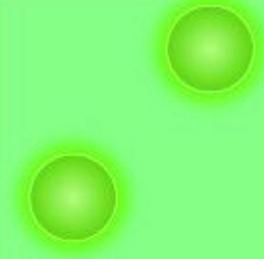
Básicamente, existen nueve posibles combinaciones de posiciones de palanca entre tú y yo, todas igualmente probables: tú zanahoria-yo zanahoria, tú zanahoria-yo apio, etc. Puedes verlas todas en la siguiente tabla:

 <p>Yo</p> <p>Tú</p>			
			
			
			

Supongamos que recibimos un par de cuantejos zanahoriófilos (lo que hemos representado en la tabla, para no olvidarlo al rellenarla, en la esquina superior izquierda). ¿En cuántas de las nueve posibles combinaciones coinciden nuestras luces? Si ambos ponemos las palancas igual, naturalmente obtenemos los dos el mismo resultado. Pero hay veces en las cuáles también obtenemos el mismo resultado de luz roja incluso aunque no tengamos las palancas igual: puesto que al cuantejillo le gustan las zanahorias, si tú tienes la palanca en “apio” y yo en “manzana”, tanto tu luz como la mía serán rojas. Si antes de ver la tabla no sabías por dónde empezar, piensa en cuáles de los nueve casos coinciden nuestras luces, y luego sigue leyendo. Puedo parecer pesado, pero no es lo mismo verlo hecho que haberlo trabajado tú mismo.

1,2,3,4,5,6,7,8,9...

Aquí tienes la tabla rellena para un par de cuantejos zanahoriófilos, con las casillas en las que coincidimos resaltadas con “tic” verde:

 <p>Yo</p> <p>Tú</p>			
			
			
			

Pero ¿qué sucedería con las probabilidades para un par de cuantejos apiófilos, o manzanófilos? Pues exactamente lo mismo: siempre hay tres de las nueve opciones en las que coincidimos seguro (cuando hacemos lo mismo con la palanca el uno que el otro), y otras dos en las que también coincidimos aunque las palancas no estén igual (cuando no acertamos ninguno pero con alimentos diferentes). El resultado es, por tanto, siempre el mismo. Si cuentas las casillas en las que coincidimos en la tabla de arriba, verás el número mágico: cinco de cada nueve veces ($5/9$ de las veces) coincidirán nuestras luces.

Sería posible, naturalmente, que nuestro operario hiciese trampa o tuviese un dado defectuoso, de modo que no lanzase pares cuantejos con $1/3$ de probabilidad cada uno, sino que unos tipos fueran más probables que otros... pero eso no modificaría en absoluto el $5/9$. También sería posible que el operario, en vez de producir cuantejos zanahoriófilos, apiófilos o manzanófilos produjese cuantejos “aberrantes”: por ejemplo, cuantejos que siempre se comen cualquier alimento que se les pone delante, o que nunca comen ninguno. Pero, si hiciese eso, entonces coincidiríamos siempre: por ejemplo, si los cuantejos aceptan cualquier comida, tanto tu luz como la mía serán verdes siempre, y lo mismo si los cuantejos rechazan cualquier comida.

El operario podría incluso hacer que los cuantejos fueran aún más complejos: podría lanzar cuantejos zanahorio-apiófilos, que aceptasen esas dos verduras pero no las manzanas, o manzano-zanahoriófilos, o cualquier combinación que en vez de aceptar una y rechazar dos viandas, aceptase dos y rechazase una. Pero eso tampoco podría hacer jamás que coincidiésemos menos de $5/9$ de las veces. De hecho, si tú y yo nos mantenemos firmes en nuestra aleatoriedad al poner la palanca en nuestros detectores, y el operario lanza pares de cuantejos idénticos que son de los tipos normales o los aberrantes, todos mezclados, podemos estar seguros de una cosa, la conclusión final de nuestro teorema absolutamente lógico y razonable:

Nuestras luces coincidirán, al menos, $5/9$ de las veces.

Fíjate que digo “al menos” para protegernos de la posibilidad de cuantejos aberrantes. Puede que sean $5/9$, o un poquito más, pero seguro, segurísimo, que no van a ser menos, ya que cualquier desviación de la aleatoriedad del operario sólo puede mantener o aumentar la proporción de coincidencia entre nosotros — si lo hacemos suficientes veces, claro; es posible que lo hiciéramos nueve veces y salieran dos coincidencias y siete desacuerdos, pero sobre nueve millones de veces, seguro que se aproxima mucho a $5/9$. Y en todo esto no hemos hablado en absoluto de cuántica, pero hemos establecido un límite claro que es imposible atravesar. Ésa es la maravilla y la genialidad de John Stewart Bell: que obtuvo una desigualdad inquebrantable y relativamente sencilla de comprobar experimentalmente. Y esa desigualdad es el resultado de un razonamiento que, espero, te habrá parecido lógico, sensato e inevitable.

Sin embargo, la conclusión de arriba es una mentira como un piano de cola.

Porque, una vez tenemos una afirmación como ésta, no hay más que preparar experimentos de este tipo y comprobar cuántas veces coinciden nuestras luces. Desgraciadamente, nuestra tecnología aún no ha logrado producir cuantejillos zanahoriófilos, con lo que los experimentos para comprobar que se cumple la desigualdad de Bell (que coincidimos $5/9$ o más de las veces) se han realizado con miríadas de pares de partículas entrelazadas, como electrones y fotones, y se emplean propiedades como el espín o el estado de polarización. Mucho más prosaico, pero igualmente válido. Y, cuando se hace el experimento análogo al que hemos hecho nosotros arriba con cuantejos, ¿sabes cuántas veces coinciden nuestras luces?

La mitad.

En otras palabras, $4,5/9$ de las veces, no $5/9$. Puede parecer que los números se parecen mucho, y que el 50% y el 55,555...% son tan similares que la diferencia puede ser simplemente un error, y que la desigualdad de Bell no se cumple por la falta de precisión. Pero, si sabes de probabilidad, eres consciente de que, para un número enorme de pruebas —y en muchos experimentos diferentes, no sólo en uno— un 5% de diferencia es una enormidad. Dicho de otro modo, la conclusión empírica, escribiéndola como hemos hecho arriba es que

Nuestras luces pueden coincidir menos de $5/9$ de las veces.

Y eso es imposible.

O, mejor dicho: es imposible si nuestro razonamiento anterior era válido. Puesto que ese $4,5/9$ se ha comprobado experimentalmente, nuestro razonamiento anterior no puede ser válido. Ahora bien, un razonamiento puede no ser válido porque hay un error en el proceso seguido, o porque alguna de las

premisas de que partía era falsa. Puesto que nuestro razonamiento es sólido, la conclusión es impecable: al menos una de nuestras premisas es falsa.

Dicho de otro modo: o bien no existe una realidad objetiva, o bien la realidad no es local, o ninguna de las dos cosas. Y esto no tiene absolutamente nada que ver con la mecánica cuántica, pues es aplicable independientemente de cuánto avance la cuántica y cuántas cosas tenga en cuenta. Si las partículas tienen propiedades intrínsecas que no son establecidas al medirlas sino inherentes a las cosas, y no existe manera de que esas propiedades cambien instantáneamente cuando suceden cosas en otro lugar, no es posible que nuestras luces coincidan la mitad de las veces... pero sí lo hacen.

De modo que el Teorema de Bell establece un límite experimental que ninguna teoría real-localista puede rebasar. Ese límite se rebasa experimentalmente, luego ninguna teoría real-localista puede explicar esos experimentos. Eso es, básicamente, el avance revolucionario que estableció el bueno de John. De haber estado vivo, Einstein indudablemente hubiera sufrido al ver los resultados experimentales que desmontaban las hipótesis del teorema.

Por si cabe duda, el teorema en sí no dice que las premisas sean falsas, sino que si son verdaderas, la desigualdad debe cumplirse. Podríamos enunciarlo, en los términos de este artículo, así:

Si existe una realidad local, nuestras luces coincidirán al menos 5/9 de las veces.

Los experimentos violan esa desigualdad, de modo que nuestra conclusión puede ser entonces que no hay una realidad local, pero el teorema es independiente de los resultados de los experimentos, simplemente establece el marco teórico que deben o no cumplir para satisfacer las premisas o no. Siento ser repetitivo, pero no quiero confusiones respecto a qué es el Teorema de Bell y qué son los intentos empíricos de extraer conclusiones a partir de él, ya que mi intención en este artículo es precisamente que tengas una idea aproximada del razonamiento y el enunciado del Teorema.

Hay otra cosa que tampoco dice el Teorema de Bell, aunque a veces se oiga por ahí. No dice que si se incumple la desigualdad "la cuántica tiene razón". Es perfectamente posible que haya una teoría más completa, mejor, más precisa que la cuántica, y que la mecánica cuántica que tenemos resulte patética e hilarante para nuestros nietos: pero, lo que quiera que sea que la reemplace, no puede ser una teoría real-localista. En otras palabras: la cuántica es rara, y tal vez esté equivocada, pero no es rara por estar equivocada; cualquier teoría que la reemplace también será rara, porque el Universo lo es.

Tampoco es posible concluir que el Universo no es real ni tampoco local: recuerda que hemos demostrado que al menos una de las dos premisas es falsa, no que ambas son falsas. Es perfectamente compatible con esta combinación de razonamiento y experimentos un Universo real en el que hay transferencia instantánea de propiedades físicas. También lo es un Universo sin esa transferencia instantánea, pero en el que la realidad se define al medirla. Desde luego, también es posible que ni una cosa ni la otra existan; con lo que quiero que te quedes es con que tal vez las cosas sean raras por un lado, raras por otro o raras por todos los lados, pero raras son.

Eso sí, aunque esto no demuestre nada y sea ajeno al Teorema en sí, la cuántica se comporta de manera ejemplar en estos experimentos. Porque, si se aplica el formalismo cuántico a los experimentos que hemos descrito arriba, la cuántica predice una coincidencia que viola la desigualdad, es decir, una coincidencia menor de 5/9. Y no sólo eso: la probabilidad de coincidencia de acuerdo con la cuántica es exactamente 4,5/9... justo lo que hemos obtenido en los experimentos. No voy a justificar ese resultado aquí, porque los experimentos involucran polarizaciones con ángulos de 45 y 90°, y el 1/2 resulta del coseno de 45° al cuadrado, y es un follón, y no quiero que te quedes con la idea de que la cuántica explica nada: ¡la cuestión no es ésa!

No faltan quienes cuestionan la conclusión a la que hemos llegado; por lo que sé, muy pocos lo hacen atacando el Teorema de Bell –aunque los hay–, cuya conclusión es muy generalmente aceptada. Lo que los proponentes del real-localismo sostienen es que los experimentos con los que obtenemos ese 4,5/9 no son válidos, sino que tienen errores de precisión o de concepto que podrían explicar la diferencia con la predicción de 5/9. Sin embargo, es mucho más numeroso el grupo que opina que tanto la teoría como la práctica son bastante sólidas, y que debemos abandonar la idea de un Universo de realidad local, al menos por uno de los dos lados; por ejemplo, la mayor parte de los defensores de la idea de que la cuántica no tiene aún en cuenta todas las variables (es decir, hay "variables ocultas") piensan que las variables ocultas explican que nos parezca que no hay una realidad objetiva... pero sí aceptan, en su inmensa mayoría, que eso significa necesariamente que debe haber transmisión instantánea de algunas de estas variables entre sistemas físicos.

Y, sin más, mi salud mental perjudicada irreversiblemente por la elaboración de este artículo, lo mismo que, seguramente, la tuya por leerlo, me retiro a la mazmorra de nuevo. Pero no sin preguntarte, lunático lector de este ladrillo: aunque no tengas manera de demostrar tu afirmación, ¿por qué opción te inclinas tú? ¿real pero no local, local pero no real, o ninguna de las dos cosas? ¿o tal vez estás en el equipo de Einstein y crees que existe una realidad local, y que seguimos fallando en algo?