

Superposición cuántica



Por **Miles Mathis**

“Cuando falló el Maestro,
Que esperanza queda al alumno?
Tiene que obedecerle en todo?”

Richard Wagner, Siegfried

Primera Publicación : 17 de Octubre de 2005

En este artículo ofreceré una explicación mecánica simple de la superposición cuántica. Proporcionaré también una visualización sencilla, una que resuelve el misterio de la superposición cuántica y el movimiento ondulatorio de las partículas.

Heisenberg y Bohr le aseguraron a todo el mundo que esto no era posible. La Interpretación de Copenhague, que todavía es la interpretación predilecta de la mecánica cuántica de los físicos contemporáneos, afirma con total seguridad que los misterios de la física cuántica son categóricamente irresolubles. Es decir, no sólo no se han resuelto, sino que son imposibles de resolver. Todas las otras interpretaciones de la mecánica cuántica están de acuerdo con esta interpretación, respecto a la imposibilidad de que haya una visualización directa o una solución mecánica simple. Algunas variantes han negado otros aspectos de la Interpretación de Copenhague, especialmente respecto a la opinión del colapso de la función de onda. Bohm, por ejemplo, ha intentado una explicación determinista de ciertas partes de la Electrodinámica Cuántica(QED), incluyendo una reinterpretación de la función de onda y del Principio de Incertidumbre. Pero ni siquiera Bohm ni Bell creían que nadie pudiera ofrecer una visualización simple que explicara la superposición cuántica o la supuesta dualidad onda-corpúsculo.

Einstein fue el que más se acercó a esta creencia. Siguió convencido de que la mecánica cuántica se explicaría finalmente de una forma más consistente. Pero, de nuevo, fue principalmente la naturaleza probabilística de la dinámica cuántica la que le molestaba, no el hecho de que no se pudieran proporcionar visualizaciones simples. No le gustaba que Dios jugara a los dados, pero no esperaba que Dios nos mostrara un esquema con cada nueva teoría.

No abordé el problema intentando encontrar una visualización o una solución mecánica simple. Sólo quería hacer que todo cobrara más sentido en mi cabeza. Pero al analizar el problema descubrí que las dificultades mecánicas no eran tan formidables como se aseguraba. Descubrí que podía visualizar fácilmente los movimientos físicos, y que podía pasar esas visualizaciones a simples palabras y diagramas. Un descubrimiento básico me permitió hacer esto, y de eso es de lo que trata este artículo.

Creo que la forma más eficiente de guiar al lector a través del problema es analizar la explicación actual de la superposición cuántica, tal como se presenta en un texto contemporáneo. Como texto usaré *Quantum Mechanics and Experience*, de David Albert. Elegí este libro por la misma razón que el *status quo* decidió publicarlo: expone la teoría de la forma más clara posible, tanto para legos como para físicos. Albert es catedrático de filosofía en la Columbia, pero ha sido acogido e instruido por muchos físicos del *mainstream*. Este libro se puede tomar como una expresión representativa, si no perfecta, de la teoría actual. Si no lo fuera, seguramente no habría sido publicada por la *Harvard University Press*.

Albert empieza eligiendo dos características medibles de un electrón. Nos dice que esas características no importan, y que podríamos llamarlas color y dureza si quisiéramos. En una nota a pie de página de la página 1 informa al lector de que experimentalmente está hablando del spin x y el spin y , pero no profundiza más. Oportunamente, esta nota a pie de página me permite dar mi primer argumento sustancial. Desde un punto de vista lógico, un electrón no puede tener momento angular en los ejes x e y al mismo tiempo—no puede si ambos giros son alrededor de un eje que lo atravesase por el centro (Albert afirma que lo son). Imagina a la Tierra girando alrededor de su propio eje. Llámale a eso el eje x . Ahora ve al eje y , que también atraviesa el centro pero con un ángulo de 90° respecto del eje x . Intenta imaginar girar la Tierra alrededor de ese eje al mismo tiempo que gira sobre el eje x . Si puedes imaginarlo, tienes una imaginación muy vívida, cuando menos*. Si eso no te convence, entonces recuerda el giroscopio y el fenómeno llamado precesión giroscópica. Un par motor aplicado al eje de rotación se desvía, de modo que el movimiento circular no se permite sobre el eje y . Puedes tener movimiento circular en sólo uno de los planos a la vez. Para ver por qué esto es así, piensa en un punto de la superficie de la esfera o del borde de una rueda. Dale un giro en el plano xy . Ahora sigue su trayectoria mira la curva que describe. Una vez que hayas hecho eso, piensa en darle un giro en el plano zy al mismo tiempo. Tienes una segunda curva aplicada a la primera curva. Pero esas dos curvas no se pueden sumar para crear una nueva curva que el cuerpo pueda seguir como un todo. Si el cuerpo fuera libre de seguir ambas curvas desde el primer dt , entonces lo primero que haría sería deformarse gravemente. Muy pronto se retorcería hasta hacerse irreconocible. Pero los cuerpos reales no son libres de deformarse de cualquier forma posible. Ya tienen estructura a muchos niveles, y esta estructura es rígida a uno u otro nivel. Así que si intentas aplicar un segundo movimiento circular a un cuerpo real, estás aplicando una fuerza que no solo provoca un movimiento—estás aplicando una fuerza que intenta romper el propio cuerpo. Son los mismos enlaces moleculares los que te oponen resistencia. El cuerpo no quiere deformarse. Esa es la razón de que puedas aplicar un segundo giro a un líquido en movimiento circular. El líquido no se resiste a la segunda fuerza ortogonal. Pero tu segunda fuerza acaba destruyendo el movimiento circular del "cuerpo", que en un líquido no era más que un patrón de todas formas.

Dicho esto, es posible tener giros simultáneos en x e y , pero debes aplicar el segundo giro en un centro fuera del objeto. **Lo que quiero decir con esto es que el electrón debe girar de punta a punta, en vez de girar alrededor del eje que le atraviesa.** Volviendo al ejemplo de la Tierra, puedes ver que podemos imaginar fácilmente a la Tierra precipitándose de punta a punta a través del espacio, pues este movimiento de punta a punta no afectaría a el giro sobre su eje en nada. Un giroscopio se resiste a una fuerza a 90° , pero sólo porque tenemos fijado el centro del giroscopio respecto a la fuerza. Un giroscopio no girará de dos formas alrededor de su centro. Pero si metemos el

giroscopio en un contenedor circular, podemos girar el giroscopio alrededor de un punto de la superficie de la esfera. Podemos hacer eso incluso si el giroscopio está firmemente anclado al contenedor. Coge una rueda de bicicleta que esté girando y extiende el eje hacia fuera de modo que el diámetro del eje sea igual al diámetro de la rueda. Ancla los extremos de este eje firmemente a una gran esfera del mismo diámetro de modo que la rueda quede dentro de la esfera. Ahora puedes rotar la esfera alrededor de un punto de su superficie, sin que el movimiento interno provoque una precesión. Eso es así porque ya no intentas provocar dos rotaciones diferentes alrededor del mismo centro. Has creado un centro justo fuera de la influencia del primer eje.

Lo que es más interesante aún es que el círculo de esta nueva revolución ahora tiene un centro que no es estático—viaja. Y viaja de una forma muy interesante. Digamos que tienes a la Tierra girando alrededor del eje x , y le das al centro de la Tierra una velocidad constante en la dirección y . Ahora, le añadimos un giro de punta a punta, en esa misma dirección y . Ahora, ¿Qué tipo de curva total creará este giro de punta a punta para el centro de la Tierra? **Crearé una onda.**

PARTE NO TRADUCIDA

[To see an animation of this wave motion, you may take these links. The first is a windows media file, the second requires Quicktime (and is much faster to download). [wave.wmv](#) 4.5Mb. [wave.mov](#) 780kb. Expect to wait 30 seconds for the wmv file. Thanks to Chris Wheeler for use of these files.]

Deja que cale eso unos segundos. Albert asume que ambos momentos angulares se miden alrededor del mismo centro. Más aún, asume que las características o cantidades medidas no importan. Asume que el momento angular es equivalente conceptualmente a la velocidad o la posición u otro parámetro. Asume esto porque eso es lo que todos los físicos han asumido hasta ahora. Lo que importa en la QED es cómo encajar esas variables sin analizar en las ecuaciones. Acabo de mostrar que las variables de verdad importan y mucho. Toda la explicación de la QED se basa en los movimientos de esos cuerpos reales, y la explicación se puede enunciar con terminología simple y directa como hice arriba. Los dos momentos angulares no solo influyen el uno en el otro de formas específicas y distintas; el modo en que influyen el uno al otro proporciona la base conceptual y física de la QED—una base que se ha ignorado hasta ahora.

Pero volvamos al argumento de Albert. Nos da dureza y color para el electrón para simplificar el análisis. El electrón tiene cuatro estados: blanco, negro, duro y blando. El físico tiene herramientas igualmente simples. Tiene una caja de color y una caja de dureza. Si mete un electrón desconocido, la caja de color le dirá al físico si es **blanco** o **negro**. La caja de dureza le dirá si es **duro** o **blando**.

Ahora, si el físico sólo mete electrones blancos o sólo negros en una caja de dureza, la mitad se detectarán como duros y la mitad como blandos. Del mismo modo ocurre si se meten electrones sólo duros o sólo blandos en la caja de color. Esto quiere decir, de acuerdo con Albert, que "el color de un electrón no tiene aparentemente nada que ver con su dureza" y viceversa.

El problema que encuentra el físico de Albert es que estos dos detectores simples parecen funcionar de maneras extrañas, si los pones uno detrás de otro. Si el físico pone tres cajas en fila: color, dureza, color, los porcentajes al final son difíciles de comprender. La caja de dureza del medio se prepara de forma que sólo deja pasar electrones blancos. Sólo la mitad pasan a la última caja, y se supone que son blancos. La sorpresa es que cuando medimos el color de esos electrones que salieron de la caja de dureza, encontramos que la mitad son blancos y la mitad negros. ¡Uau! Albert y la QED nos dicen que esto es un gran problema. No se puede explicar lógicamente. Albert nos dice que si físico lo intenta todo. Construye cajas de muchas formas, para hacerlas más (incluso a veces menos), precisas. No importa lo que haga. Al final sale siempre el mismo reparto al 50/50.

Este ha sido uno de los problemas centrales de la física cuántica desde el principio. Ha sido un misterio durante al menos los últimos 80 años. Pero el resultado es fácilmente explicable una vez que tienes mi análisis de arriba a mano, respecto a los diferentes giros. Digamos que tienes una muestra de electrones a los que se le va a medir el momento angular tanto en el plano zx como en el zy . Si tenemos cuatro posibles salidas, entonces debemos suponer que cada momento es o bien horario, o bien antihorario, respecto a algún observador. Ahora, sitúate en la posición del observador y mira lo que pasa. En la primera medida, miras y ves que el electrón está rotando horario alrededor de su eje x , con el eje apuntando hacia tí. Esto significa que la rotación es en el plano zy . En otras palabras, estás mirando un pequeño reloj, pues se está moviendo respecto a tí como el segundero de un reloj. El segundero está en el plano zy . Un instante después, el electrón ha dado medio giro completo de punta a punta sobre el eje x . Esta rotación es en el plano zx , alrededor del eje y sobre el que viaja. Después de esta media vuelta, miras otra vez el segundero del reloj. Si movimiento es el mismo, pero ahora te parece antihorario.

Si eso te parece confuso, puedes realizar la visualización de arriba con un reloj de escritorio, siempre que no sea digital. Mantén el reloj delante tuya. Sus manecillas giran en sentido horario, y representan el giro en el eje x . Ahora dale al reloj entero un giro en el plano y , simplemente dándole media vuelta de punta a punta. Si haces esto estarás mirando la parte de atrás del reloj. Las manecillas ahora giran en sentido antihorario respecto a tí. Es así de simple. Eso es todo lo que estoy diciendo. El segundero del reloj gira sobre un eje x que apunta directamente hacia tí. Luego giras el reloj entero sobre el

eje y . Muy elemental, pero nos muestra que el giro en x del electrón debe ser variable, si lo mides relativo a un observador externo al electrón. Si el electrón tiene tanto giro en x como en y , entonces el giro en x será variable, al medirlo desde un dispositivo estacionario. Sólo un observador que viaje con el electrón medirá su giro consistentemente como siempre horario o siempre antihorario. Lo mismo se aplica al revés. Si estás midiendo el otro momento angular, entonces tendrás una variación periódica del primero.

Podrías decir que el giro cambia debido a la Relatividad, pero eso sería complicar innecesariamente la situación. No necesitamos transformadas aquí, y el tipo de relatividad simple que acabo de describir se conocía mucho antes de Einstein. Es cierto que mi análisis usa la relatividad para encontrar una solución, pero es la relatividad más simple pre-Einstein. Es simplemente decir que un observador debe prestar atención a cómo cambia el objeto que mide a lo largo del tiempo. Un dispositivo de medida, ya sea un ojo o un detector de electrones, es un marco de referencia constante, y un electrón que gira mostrará una variación respecto a ese dispositivo en instantes diferentes, como acabo de mostrar. No hay nada esotérico al respecto, aunque supongo que es algo sutil de lo que percatarse.

Una vez que aplicamos esto a nuestros dispositivos de medida, sean los que sean, vemos que debe afectar a nuestros resultados favorablemente. Volvamos al interior de la primera caja. Estaba midiendo color, así que le asignamos el color a la rotación del segundero. Blanco es horario, negro es antihorario. La caja descubre que algunos electrones son blancos y otros negros. Para distinguir esto, debe aplicar algún campo o fuerza sobre ellos durante algún pequeño intervalo de tiempo dt . Imaginemos, para simplificar, que la caja pone a los electrones en una pasarela, como al ganado, y los hace pasar a todos por la misma puerta. Esta puerta es como un detector de metal de un aeropuerto, salvo que toma una imagen del electrón a medida que pasa rápidamente a su través. Tiene una apertura muy pequeña, una apertura dt . Si el electrón era horario durante ese dt , entonces la caja lo saca por la puerta blanca. Si era antihorario durante ese dt , la caja lo saca por la puerta negra.

Esto es, de hecho, muy parecido al modo en que funcionan los detectores. No toman fotos, por supuesto, sino que algún tipo de fuerza o campo los separa en electrones blancos o negros. El campo puede no limitarse a un dt , pero la primera impresión del campo es crucial. Los electrones se mueven muy rápido, y los periodos de tiempo son bastante pequeños. El campo no tiene tiempo de sacar un montón de fotos y cambiar de opinión.

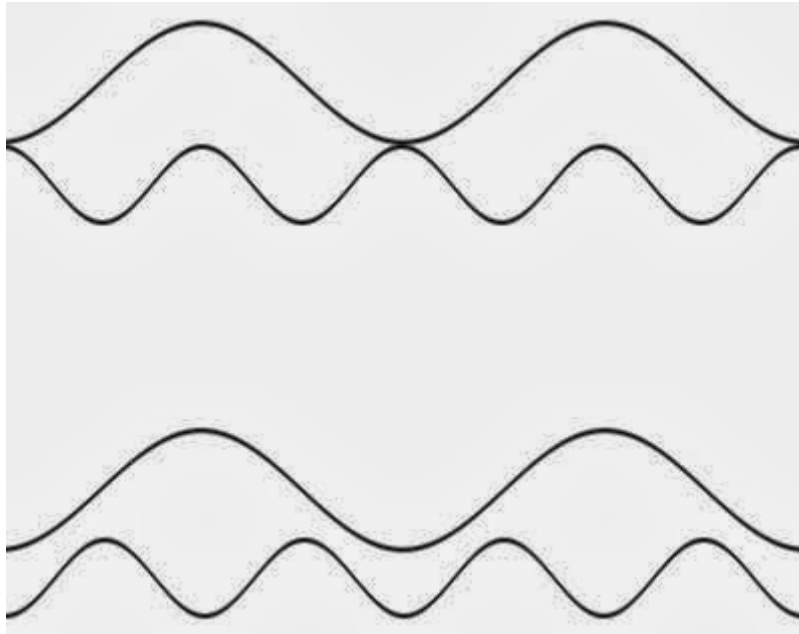
Lo que quiere decir todo esto es que el color y la dureza no son constantes. Cada electrón es a la vez blanco y negro y duro y blando en cada momento. Pero es todas

estas cosas sólo si las acumulas durante un periodo de tiempo con alguna extensión. En cada dt , es o duro o suave, o blanco o negro. No es ambas cosas al mismo tiempo. En una medida, será una cosa o la otra. A lo largo de una serie de medidas, será las dos cosas.

Esta es la sutileza en la que nunca penetró la QED. Explica los problemas de arriba de este modo: Si metes electrones como los que he descrito en una caja de color, la caja de color ve algunos de ellos negros y otros blancos durante el dt medido. Pero en realidad no son ni blancos ni negros cuando salen—siguen siendo potencialmente de los dos colores, dependiendo del punto de la onda en el que midas. Si midieras los blancos al salir de la caja en un punto diferente de la onda, los verías negros, y viceversa. Ahora, la determinación del color es repetible, pues una caja similar capturará a los electrones del mismo modo. Todas las cajas de color suelen encuadrar y canalizar a los electrones del mismo modo, así que el grupo que sale es coherente. Una segunda caja de color deberá medir lo mismo que la primera.

Lo que pasa en la segunda caja (la caja de dureza) resuelve el misterio. La segunda caja crea coherencia en el segundo momento angular. Esto asegura que las otras cajas de dureza hallarán la misma dureza. Pero al crear esta coherencia, la segunda caja re-aleatoriza la primera variable. ¿Por qué lo hace? Lo hace porque la longitud de onda de los dos momentos angulares es diferente. Si la primera longitud de onda era R , por el radio del electrón, entonces tenemos que darle la segunda una longitud de onda $2R$, por el diámetro. Esto es simplemente porque la segunda longitud de onda la provoca la rotación de punta a punta. Una es la mida de la otra, así que no puedes crear coherencia en las dos a la vez.

Te puedo mostrar esto con ondas simples en dos dimensiones. Estudia el diagrama de abajo. Tenemos dos combinaciones enfrentadas de ondas $\frac{1}{2}$ y 1 . Si sincronizas las ondas $\frac{1}{2}$, las ondas 1 no lo están. Si sincronizas las ondas 1 , las ondas $\frac{1}{2}$ no lo están. No puedes sincronizar ambas. Esto es, en esencia, lo que está pasando en la segunda caja. Las ondas de dureza se hacen coherentes, de modo que las ondas de color se desincronizan. La tercera caja las mide como un 50% de un tipo y un 50% del otro.



Puedes ver que resuelto simultáneamente el problema de la superposición cuántica y el problema del movimiento ondulatorio de las partículas cuánticas. Lo he hecho simplemente percatándome de que el segundo momento angular debe ser alrededor de un centro que está justo fuera del objeto. Es decir, el giro en y es de punta a punta.

A toro pasado, parece asombroso que no se viera esto antes. La razón por la que no se ha visto es que Heisenberg y Bohr convencieron a todo el mundo muy pronto de que la Mecánica Cuántica no se podía explicar con visualizaciones lógicas y simples. Nadie se ha molestado en aplicar un poco de sentido común a la situación física. Estaban tan seguros de que no se podía hacer, que ni siquiera intentaron abordar el problema desde una perspectiva visual o mecánica. Este aprieto creció pronto como una bola de nieve, pues a medida que más y más grandes físicos estudiaron el problema y fracasaron al explicarlo, los físicos que venían después se convencían más y más de que no se podía resolver. No querían malgastar su tiempo escudriñando algo que cada genio desde Bohr a Feynman ya había escudriñado. Hacer eso no sólo parecía una tontería, sino un sacrilegio. Pero el hecho es que no ha habido nadie desde Bohr que intentara seriamente hacer que el problema tuviera sentido clásicamente. Los físicos que llegaban después de Bohr aceptaban su palabra, y los físicos contemporáneos han llegado a un punto en el que la mayoría ni siquiera quiere una explicación mecánica de la QED. Las siniestras paradojas son más divertidas. Dan mejores titulares.

Puedes ir ahora a [mi segundo artículo sobre la superposición cuántica](#), para ver un experimento similar resuelto de forma incluso más rápida y transparente. El experimento es el famoso experimento de dos divisores de haz y dos espejos. En ese

artículo también proporciono más diagramas que os pueden ser de ayuda a muchos de vosotros.

Un problema relacionado es el del entrelazamiento cuántico, [que analizo y resuelvo en este otro artículo](#).

Más recientemente, he destrozado [los tests de Bell CHSH](#), desvelando la terrible trampa matemática en la base de esos experimentos. Eso deja al entrelazamiento hecho jirones.

Para ver cómo mi solución destruye la no localidad, puedes ir a [este reciente artículo](#), que incluso te da unas nuevas ecuaciones de la función de onda—incluyendo los nuevos grados de libertad que descubrí más arriba.

Creo que es obvio que el giro de punta a punta en la dirección y se puede aplicar a otros problemas, incluyendo [la propagación de los fotones](#), el [experimento de doble rejilla](#)[por traducir], y demás. En artículos posteriores aplicaré mi descubrimiento [al electrón y al protón](#) y a [una larga lista de mesones](#), para mostrar que los mismos cuatro giros apilados pueden explicar toda estructura y movimientos cuánticos. También tengo mucho más que decir sobre otros problemas específicos en QED y [QCD \(cromodinámica cuántica\)](#), y su solución mediante un análisis directo y lógico.

Addendum, Febrero de 2012: Un lector atento me acaba de pedir una clarificación sobre los giros que se exponen aquí. Señaló que la Tierra tiene un bamboleo en su giro. *¿Ese no es parte de un segundo giro, pues es a lo largo de un eje distinto al eje original? Si continuamos el bamboleo, podríamos crear un giro completo en cada dirección.* Le respondí: Excelente pregunta, e incluso la añadiré a mi artículo sobre superposición, para aclarar la confusión. Veamos tu bamboleo de la Tierra, para llegar al fondo de esto. El bamboleo de la Tierra no está provocado por dos giros sobre ejes diferentes, como en mi ejemplo. Está provocado por un movimiento del primer eje. Permitted a la Tierra girar sobre, digamos, el eje z, y luego movemos ese eje z. Sí, podemos girar realmente el eje z, moviendo el polo norte hacia el sur, y creo que es a lo que estás refiriendo. Tenemos giros en dos planos, lo que parece demostrar tu razonamiento. Podríamos llamarle a ese giro del eje z giro en x o giro en y, y parece que me habrías refutado. Sin embargo, no me has refutado, pues estamos hablando de cosas diferentes. Si renombras el giro del eje z como giro en x no será el mismo que el giro en x que estoy prohibiendo. ¿He prohibido el giro en x e y a la vez, no? Bien, estoy prohibiendo el giro original en x, el que es el mismo tipo de movimiento que el giro original en z. Que es un giro alrededor de un eje. Has encontrado un giro del eje, no un giro **alrededor** de un eje. Así que mi argumento se mantiene. Ese giro alrededor de un eje x sigue siendo prohibido. De hecho, tu nuevo giro sobre x es el mismo que mi giro de punta a punta en

x, pues si le diéramos a la tierra un movimiento lineal cualquiera, tu giro en x parecería de punta a punta. Que los polos norte y sur se intercambien es un giro de punta a punta, ¿no?

El lector respondió entonces *Sí, eso lo aclara, pero todavía está el tema del punto de giro. Dices que el giro de punta a punta tiene que ser sobre un punto al final de z. Te he recordado que podemos girar z sobre su centro. ¿Qué pasa entonces?* Respondí: admito que podría ser lo uno o lo otro. De las dos formas se crea lo que yo llamaría un giro de punta a punta. Pero mi forma me permite crear mi ecuación de giro cuántico, que responde un montón de preguntas que han estado en las sombras. Así que el argumento para mi forma sale de los datos. El cuanto podría girar de tu manera, pero de hecho, no creo que lo hagan. La ecuación de giro no encajaría con los datos. Para ser específicos, si dejamos que el eje z gire alrededor de su centro en vez de alrededor de un extremo, no conseguimos la duplicación del radio con cada giro apilado. Necesitamos eso. [Ve aquí](#) para la ecuación de giro de la que estoy hablando. Y para la razón física de que los giros se apilen de esta forma, girando alrededor de un punto del extremo del eje z, no veo la respuesta aún. Sospecho que es algo similar a la fuerza centrífuga, y que el veloz primer giro empuja a los giros adicionales al "borde". También podría tener algo que ver con la imperfección en la esfericidad del giro inicial. Se supone que se ha demostrado que el electrón es increíblemente esférico, pero nada es perfectamente esférico, supongo. Cualquier imperfección podría provocar que los giros posteriores fueran empujados hacia afuera de ese modo. Si alguien tiene una teoría mejor, puede mandarme un correo electrónico. No diría que sea crucial, pero estaría bien descubrirlo.

Actualización, 2013. Lo he descubierto yo mismo la siguiente vez que he releído este artículo. Para entender por qué el segundo giro del fotón gira sobre un punto en la superficie original del giro, tenemos que atender a la causa de ese segundo giro. He mostrado previamente que debe estar provocado por la colisión con otro fotón. El primer fotón acumula un segundo giro sobre el primero porque no puede girar más rápido en su primer eje. Ya ha llegado a una velocidad de giro c , y si se topa con una colisión de giro positivo que incrementaría su energía de giro, sólo puede acumular esa energía extra creando otro giro. Bien, puesto que el punto de colisión está en la superficie exterior, el fotón gira naturalmente alrededor de ese punto. El segundo giro debe tomar como nuevo centro el punto de esa colisión.

Original en milesmathis.com

Traducción de [Roberto Conde](#).