



ASTROFÍSICA, RELATIVIDAD Y MECÁNICA CUÁNTICA
PARA INGENIEROS INQUIETOS
LA MECÁNICA CUÁNTICA



Structuralia

Este documento es de uso único e intransferible para el alumno matriculado en el curso. Cualquier reproducción física o digital del documento sin permiso de los autores vulnera los derechos de propiedad intelectual de los mismos.

INDICE

INDICE.....	3
1. LA MECÁNICA CUÁNTICA	4
1.1 El determinismo y la mecánica cuántica.....	5
1.2 La naturaleza de la luz. Young 1801	6
1.3 El electrón y la electricidad estática.....	12
1.4 Max Planck 1900. Los cuantos.....	14
1.5 El efecto fotoeléctrico. Einstein y Hertz 1887-1922.....	20
1.6 El experimento de Young, fotón a fotón	25
1.7 El átomo	28
1.8 La dualidad onda corpúsculo. Louis de Broglie 1924	33
1.9 Schrödinger 1925. La entrada al País de las Maravillas.....	35
1.10 La aleatoriedad en la mecánica cuántica. Born 1926.....	38
1.11 El principio de incertidumbre de Heisenberg. 1927	42
1.12 Acercándonos al misterio de la consciencia. La interpretación de Copenhague.....	43
1.13 El gato de Schrödinger. 1935.....	54
1.14 El experimento EPR. Un gran desafío a Bohr	57
1.15 La desigualdad de Bell. 1964. El descubrimiento más importante de la historia de la humanidad	60
1.16 Las tesis de Copenhague. El actual consenso interpretativo	67
1.17 El observador consciente. El problema de la medida. Von Neumann.....	68
1.18 El amigo de Wigner. 1961. La consciencia.....	71
1.19 Experimento de decisión retardada de Wheeler.....	76
1.20 La realidad de ahí fuera y yo	84
1.21 Las distintas interpretaciones al enigma cuántico	92
2. APÉNDICE. UNA EXPLICACIÓN MÁS DETALLADA SOBRE LA ONDA DE SCHRÖDINGER	117
3. BIBLIOGRAFÍA.....	135
3.1 Bibliografía recomendada para los primeros dos cursos de introducción a la astronomía para ingenieros inquietos.....	135
3.2 Bibliografía recomendada para el curso de astrofísica, relatividad y mecánica cuántica	136

1. LA MECÁNICA CUÁNTICA

Una vez analizados algunos de los desafíos más importantes de la física y de la ciencia en general, como la aparición del universo, la estructura última de la materia, el principio antrópico, la entropía, el origen de la vida y los desafíos que representa el espacio y el tiempo, podemos ahora afrontar el reto más increíble de todos. Nos adentramos en el increíble mundo de la mecánica cuántica.

Os aseguro que este capítulo no os va a dejar indiferentes, es más, si habéis llegado hasta aquí, sé que sois personas a las que la mecánica cuántica os va a obsesionar, quizás por muchos años ...

Lo que vamos a estudiar en este capítulo es, probablemente, lo más sorprendente a lo que ha llegado el conocimiento humano. El proceso para alcanzar este conocimiento ha sido casi opuesto al que la ciencia siguió con la Teoría de la Relatividad, que básicamente fue fruto de la increíble imaginación de una única persona genial. Todo lo que esta persona imaginó, resultó luego que cuadraba con los experimentos años más tarde.

En el caso de la mecánica cuántica estamos hablando de algo que es inimaginable a priori, pero han sido los propios resultados experimentales los que, poco a poco, han ido forzando a los científicos a ir creando una nueva teoría que se aleja absolutamente del sentido común. No es por tanto una teoría que es necesario demostrar, es más bien un conjunto de hechos incuestionables que es preciso asimilar... El reto está en las distintas interpretaciones que podemos hacer de esos hechos experimentales.

La mecánica cuántica es la teoría científica más precisa de la historia, y nunca un experimento ha logrado refutarla.

El problema con la mecánica cuántica no es, por tanto, si es exacta o no, ni si es capaz de predecir los sucesos. Todo eso lo cumple de manera sobresaliente. El problema con la mecánica cuántica es lo que parece decirnos sobre la “realidad” del mundo.

Si no logro que quedéis totalmente perplejos con lo que contaremos en este capítulo, es porque habré fracasado a la hora de intentar explicar los fundamentos de la mecánica cuántica. Si quedáis perplejos, entonces es que habéis captado lo esencial.

“Si la mecánica cuántica no le deja a uno perplejo, es que no lo ha entendido.” (Niels Bohr).

1.1 El determinismo y la mecánica cuántica

Como vimos, el extraordinario filósofo y matemático Laplace llegó a sostener, a principios del siglo XIX, que el universo era completamente determinista, y ya discutimos anteriormente los problemas y paradojas a las que nos conduce esta forma de pensar. Esto supondría que está todo determinado desde los inicios y, entre otras consecuencias importantes, se alcanzaría la conclusión de que las personas no tenemos libre albedrío. Cada uno de nosotros hacemos en cada momento lo que estaba “escrito” en la configuración de las partículas iniciales del Big Bang. Simplemente estamos formados por una especie de bolas de billar, o de partículas elementales, que chocan e interactúan unas con otras según leyes fisicomatemáticas bien definidas. Bastaría con conocer las condiciones iniciales y tener un buen procesador de cálculo, para determinar lo que va a suceder en cualquier lugar, en cualquier momento del futuro. Pero, además, a partir de las condiciones actuales de cada partícula del universo, podríamos calcular también todo lo que ha sucedido en el pasado. Lo que le ocurrió a este dinosaurio fósil que estoy viendo, cuántos hijos tuvo, etc.

Sin duda el determinismo parece bastante obvio en el caso de los planetas. Podemos calcular donde estaba exactamente cada planeta hace 3.000 años y podemos calcular donde estará dentro de otros 3.000. Basta con saber en qué posición se encuentran hoy y con qué velocidad se mueven hoy¹. Pero Laplace va más allá, y considera que esto mismo es posible hacerlo con todo proceso natural, incluido el comportamiento humano. Seríamos solo máquinas.

El optimismo respecto a la física era tan enorme que en 1894 Kelvin realiza la siguiente afirmación *“En física ya no queda nada nuevo por descubrir”*. Aun así, debemos reconocer también a Kelvin otra afirmación que realizó seis años después (1901). *“La física está esencialmente completada: solo hay dos nubes oscuras en el horizonte”*. Una de las nubes dio lugar a la teoría de la relatividad. La otra dio lugar a la mecánica cuántica².

En efecto, a principios del siglo XX nos hallábamos justo a las puertas de dos revoluciones o cambios de paradigma.

¹ Aun así, ya vimos que un sistema de solo tres astros interactuando entre ellos, acaba siendo caótico al cabo de 5 millones de años y por tanto impredecible e indeterminado

² *“La belleza y claridad de la teoría dinámica, que establece que el calor y la luz son modos de movimiento, están actualmente oscurecidas por dos nubes. La primera nació con la teoría ondulatoria de la luz y fue abordada por Fresnel y el doctor Thomas Young; involucra la cuestión: ¿cómo podría la Tierra moverse a través de un sólido elástico tal y como esencialmente es el éter? La segunda es la doctrina de Maxwell-Boltzmann relativa a la partición de la energía”* 1901. Kelvin

En este capítulo nos centraremos en el cambio de paradigma que ha supuesto la mecánica cuántica. Como en el caso de la relatividad, todo comienza con el estudio de la luz, el elemento clave.

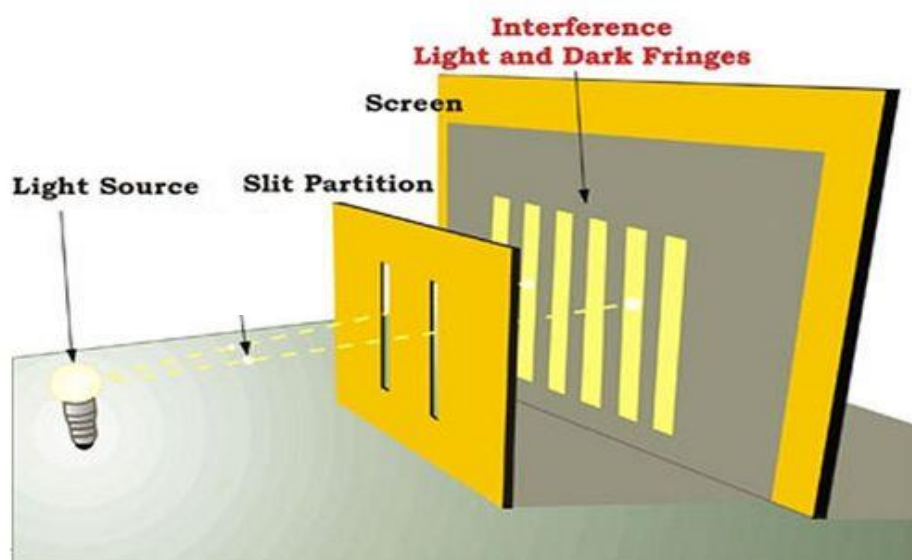
1.2 La naturaleza de la luz. Young 1801

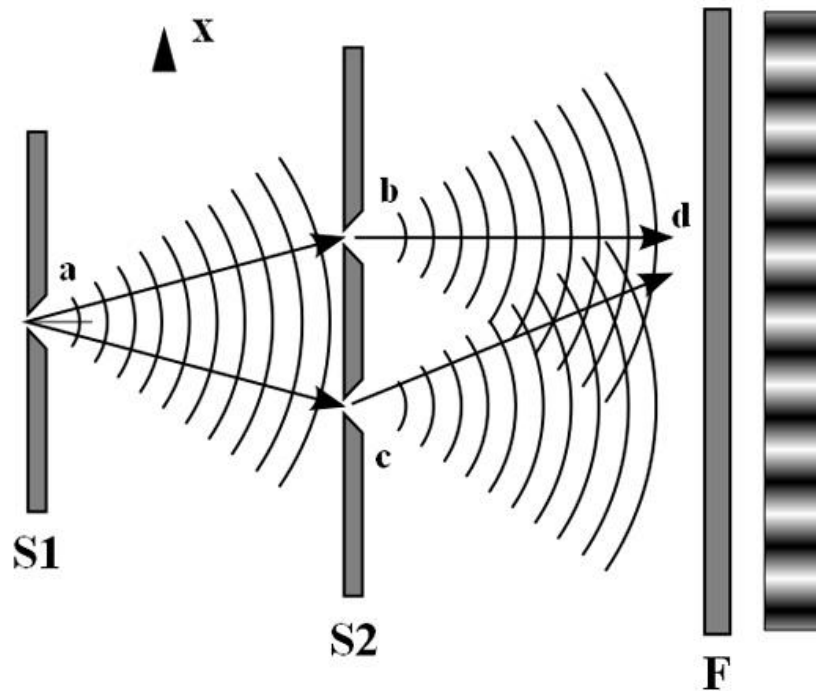
Los estudios sobre la naturaleza de la luz han sido la clave para los avances de la física. Tanto Newton como Einstein estuvieron muy interesados en los fenómenos de la luz.

Pero veamos los momentos clave de esta investigación para comprender qué es la luz, y como se relaciona con la mecánica cuántica.

Newton, a pesar de haber experimentado con fenómenos de interferencia en la luz, no podía aceptar que la luz fuera una onda, porque todas las ondas que conocía necesitaban un medio de propagación (las olas, el sonido, las ondas de presión, etc.). Dado que la luz viajaba evidentemente a través del espacio (porque la luz del sol llega hasta nosotros), debía de tratarse de una partícula, porque no podía aceptar que existiera un medio material en el espacio porque frenaría el devenir de los planetas. Por tanto, según Newton el espacio estaría totalmente vacío y la luz sería una partícula que viaja por él, sería un “*corpúsculo*”. La autoridad de Newton había hecho que su teoría “corpuscular” de la luz dominara por 100 años.

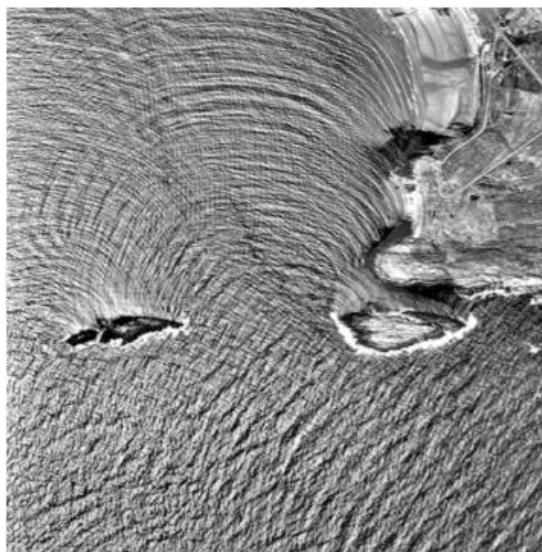
Pero en 1801 Young realiza un experimento que será determinante. Hizo pasar la luz a través de dos rendijas paralelas, y el resultado fue que, en la pared de enfrente, apareció un patrón de interferencias, prueba evidente de que la luz era una onda.





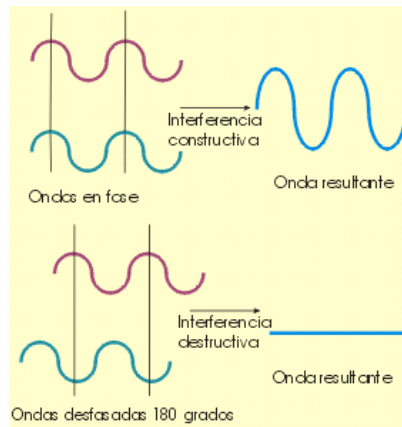
El patrón de interferencias es consecuencia de dos fenómenos que se dan en las ondas:

- Difracción: Cuando una onda pasa por un lugar estrecho, se expande en todas las direcciones. Podemos ver en la imagen un ejemplo de una ola con difracción que se expande en todas las direcciones al pasar por una bocana estrecha, entre dos islas.



Ejemplo de difracción de una onda (difracción de las olas del mar)

- Interferencia: Cuando una onda “choca” con otra onda, éstas pueden estar en fase o pueden estar desfasadas. Si están en fase (sus picos y valles coinciden en el tiempo) entonces se suman. Si están totalmente desfasadas (el pico de una coincide con el valle de la otra) entonces se restan y pueden incluso anularse.



El patrón que descubrimos en la pantalla en el experimento de Young es el resultado evidente de que la luz es una onda, que ha sufrido difracción al pasar por ambas rendijas, y luego interferencia entre ambas ondas.

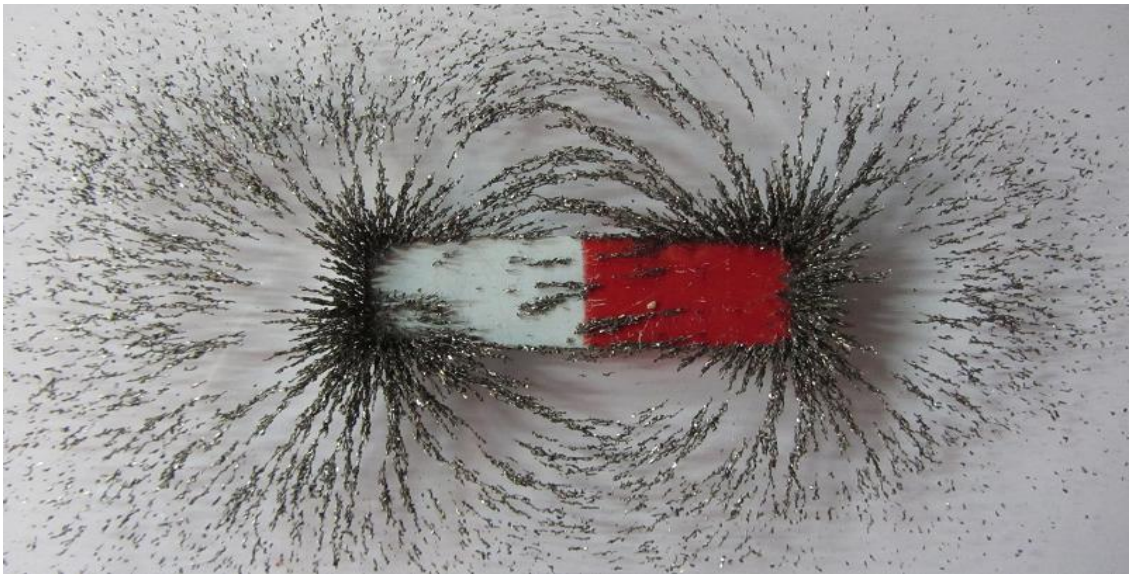
Puesto que la luz es una onda, luz con luz puede anularse y dar oscuridad. Esto es lo que ocurría en el experimento. En algunos lugares de la pantalla las ondas se suman y en otros puntos se anulan.

Pero entonces ¿cómo era posible que se propagara la luz por el espacio vacío si era una onda? Solo podía ser si el espacio no era vacío. Debía de existir en el espacio un medio fluido en el que esta onda pudiera propagarse. Sin embargo, ¿cómo era posible que este “fluido” no frenara a los planetas en sus vueltas alrededor del sol? Aunque solo fuera ligeramente. Ya vimos al principio de este curso que los cálculos del movimiento de los astros que resultaban de la ley de Newton eran tan exactos, de acuerdo con la experiencia, que este medio que llamaron “éter”, tendría que ser infinitamente ligero ¡Y no solo eso! Según se iban realizando experimentos a lo largo del siglo XIX se le fueron adjudicando al éter propiedades cada vez más asombrosas como ya vimos. Veamos como salimos de este atolladero... La luz resultó ser algo sorprendente.

1.2.1. Las ondas electromagnéticas

Desde antiguo los hombres se han visto confundidos y sorprendidos por las propiedades de los imanes.

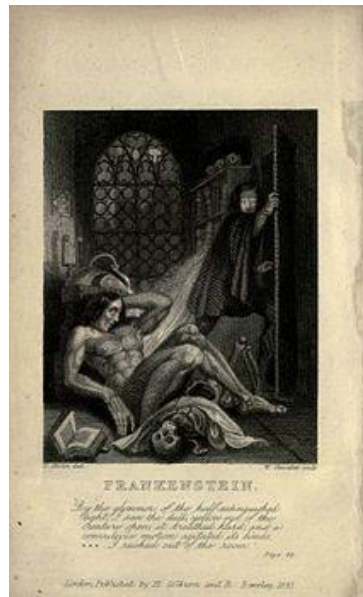
Era conocido el experimento de las virutas de metal que parecían dibujar líneas en el espacio, en presencia de un imán.



Los científicos no tenían por entonces las herramientas necesarias para poder empezar a trabajar en ello. Pero los filósofos se preguntaban si esas líneas existen cuando no están ahí las virutas... Una pregunta de las difíciles.

Ya en el siglo XIX, en paralelo con los estudios de la luz, los científicos comenzaban a investigar con la electricidad.

En 1818 Mary Shelley, impresionada por los experimentos que lograban que los brazos de un muerto se movieran al hacerles pasar la corriente eléctrica, escribió la novela "Frankenstein", una novela que imaginaba como un científico lograba dar vida a un muerto gracias a la electricidad.



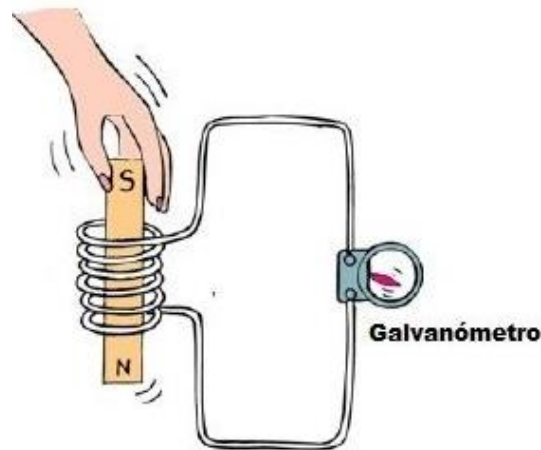
Portada original de "Frankenstein o el moderno Prometeo". 1 de enero de 1808. Reino Unido

Dos años después de esta hazaña de la literatura universal, en 1820 Oersted demostró además que, al dejar pasar una corriente eléctrica por un hilo de cobre, se generaba una corriente magnética a su alrededor. De modo que, si el hilo rodeaba un tornillo de hierro, éste se convertía en un imán (un electroimán). Esto fue llamado inducción magnética.



Once años después, Faraday demostró en 1831 que era posible crear corriente eléctrica en una bobina si modificábamos la posición de un imán en su interior.

En el gráfico de abajo subimos y bajamos el imán y generamos corriente eléctrica en la bobina de cobre. Esto fue llamado inducción electromagnética.

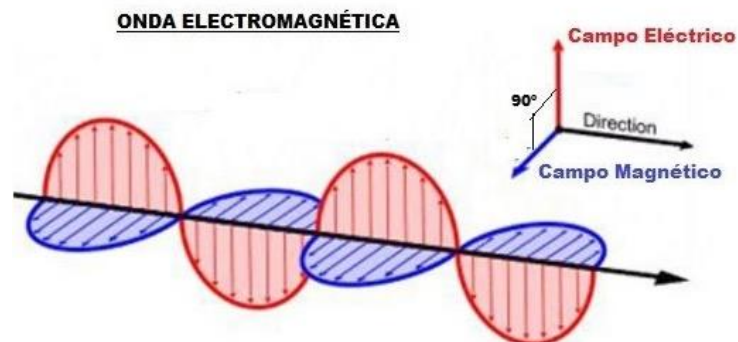


En resumen, ¡la electricidad producía imanes, y los imanes producían electricidad! Esto tendría dos utilidades prácticas impresionantes.

Por una parte, si movíamos el imán en presencia de una bobina de cobre lográbamos generar electricidad (se inventa así el alternador). Por otra parte, si hacíamos pasar electricidad variable por la bobina ¡podíamos lograr girar el imán! Creábamos así un motor eléctrico.

Con estos dos experimentos se demostraba además la interrelación evidente entre el campo magnético y el campo eléctrico.

Pero, además, Faraday conjeturó que un campo magnético variable podría generar un campo eléctrico variable, y éste generar un campo magnético variable, y así crear un campo electro-magnético que viajara a una increíble velocidad.



El mismo Faraday propuso que los campos eléctricos y magnéticos son además sustancias en sí mismas, que sí existen. Es decir, en el caso del experimento de las virutas de metal, él consideraba que “las líneas” existían, aunque no estuvieran las virutas, aunque no hubiera nada material, las líneas de campo “existían”. Por ello postuló que una onda electromagnética como la que imaginaba podría llegar a viajar por el espacio vacío. Esta propuesta no se tomó en serio.

Todo esto era difícil de aceptar porque estaba contradiciendo la autoridad del gran Newton, quien consideraba que este tipo de campos no eran “reales”. No existía algo así como el “campo gravitatorio”. Lo que existían eran las fuerzas que se producían entre las masas. Por el mismo motivo, no existían los campos magnéticos, sino las fuerzas de atracción entre el hierro y el imán. Según este razonamiento de Newton, si no pongo una chincheta cerca del imán, no hay fuerza, y por supuesto no hay campo.

Y llegó Maxwell (1831-1879), el gran matemático. Con sus ecuaciones capaces de modelar de manera totalmente exacta los campos eléctricos y magnéticos, llegó a la conclusión de que estos campos eléctricos y magnéticos se generan uno al otro de manera sucesiva a través del espacio vacío. Con las fórmulas matemáticas que dedujo, pudo calcular la velocidad a la que este efecto se propagaría por el espacio... y encontró que ¡sería a la velocidad 300.000 km/s! ¡La velocidad a la que ya sabíamos que iba la luz!

Maxwell demostró además que este tipo de ondas electromagnéticas eran capaces de transportar energía por el espacio vacío, hecho que fue experimentalmente comprobado por Hertz con las ondas de radio.

En definitiva, la luz era una onda. Una onda que se propaga en el vacío.

Pero aún quedaban muchas sorpresas pendientes como vamos a ver.

1.3 El electrón y la electricidad estática

Para poder llegar a entender bien los fundamentos de la mecánica cuántica, necesitamos adentrarnos en los misterios de los elementos últimos de la naturaleza, aquellos que forman la materia.

Tales de Mileto, uno de los siete sabios de Grecia, que vivió en el siglo VI a.C., y del que hablamos mucho en el primer curso, fue quien descubrió y documentó por primera vez la electricidad estática.

Frotando una piedra de ámbar con sus propias ropas pudo descubrir que la piedra atraía a su ropa y a su pelo. Por la forma que adquirió su pelo, probablemente llamó a esta piedra electrón, en recuerdo de Electra, quien llevaba el pelo alborotado por su desesperación por el asesinato de su padre Agamenón.



Electra se desespera cuando se entera de que su padre Agamenón había sido asesinado por su madre.

Drama de Sófocles. 418 a.C.

Por tanto, desde antiguo se conocía la “carga eléctrica”. Pero fue Benjamín Franklin, en el siglo XVIII, uno de los padres fundadores de la nación americana, quien se percató que cuando dos cuerpos eléctricamente cargados entraban en contacto, su atracción mutua **se iba debilitando**. Franklin razonó que lo que producía su atracción se iba anulando. Por eso pensó en cosas positivas y cosas negativas, de manera que cuando se sumaban se anulaban (como +1 y -1). Consideró que los cuerpos que tenían el mismo signo de carga se repelían, y los que tenían distinto signo se atraían. No se tenía conocimiento aún de la existencia de los electrones, que son los que pasan de un cuerpo cargado a otro no cargado, neutralizando así poco a poco las cargas electrostáticas, pero es fácil ver como la imaginación de Franklin condicionó desde entonces la manera en que entendemos la materia. Desde entonces hablamos de cargas positivas y negativas.

¿Cómo funciona el fenómeno electrostático? Por ejemplo, si frotamos seda con un cristal, este cederá parte de sus electrones a la seda, que quedará cargada negativamente, y el cristal quedará cargado positivamente por haber cedido electrones. Ambos se atraerán. Pero si ahora los juntamos durante un rato, se producirá la fuga de electrones (electricidad electrostática) de la seda al cristal neutralizándose así las cargas³. Una vez neutralizadas ambas piezas, dejarán de atraerse mutuamente.

1.4 Max Planck 1900. Los cuantos

En tiempos de Max Planck (justo en el paso del siglo XIX al siglo XX), ya vimos que Kelvin consideraba la física como algo ya consolidado y casi terminado.

Pero había dos nubarrones. Un nubarrón estaba relacionado con la velocidad de la luz, que parecía mantenerse constante de manera testaruda (esto dio lugar a la teoría de la relatividad de Einstein).

El otro nubarrón tenía que ver con la luz que emitían los cuerpos incandescentes, y se había denominado “la catástrofe ultravioleta”.

Era preciso entender por qué el espectro de colores de los cuerpos incandescentes era como era. Que un hierro caliente emitiera luz, era perfectamente lógico. Se conocía ya por entonces que la materia constaba de electrones, y estos electrones “vibrarían”⁴ de manera más acelerada al calentarlos y proporcionarles energía, por lo que pondrían en marcha la emisión de radiación electromagnética (ya vimos que una carga eléctrica al vibrar emite ondas electromagnéticas).

Se observaba además que la radiación era la misma con independencia del tipo de material que calentaban.

Cuanto más caliente estaba el metal, con más intensidad “vibraban” sus electrones, y la radiación electromagnética sería de más baja frecuencia (más azulada).

³ La existencia del electrón se descubrió en la década de 1870. Con un tubo cargado positivamente en un extremo, y negativamente en otro (tubo de rayos catódicos), se descubrió que se lograban proyectar partículas y se descubrió además que estas partículas estaban cargadas negativamente porque se veían atraídas por cargas positivas.

⁴ En realidad no “vibran”. Enseguida explicamos qué es exactamente lo que hacen para emitir ondas electromagnéticas.



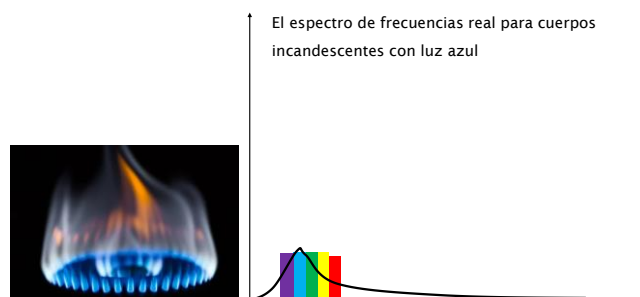
Hierro al rojo vivo. La parte roja es más fría que la amarilla. La parte amarilla tiene una temperatura similar a la del sol. Si lo calentáramos aún más tomaría colores azulados.

Por supuesto, aunque el ojo humano percibe para cada material un único color, los cuerpos incandescentes no emiten un único color. Emiten luz en distintas frecuencias, pero el ojo humano percibe una determinada frecuencia como *dominante*. Los físicos debían lograr entender cómo y por qué se producía ese determinado espectro de colores para cada temperatura.

Los experimentos en laboratorio daban curvas como esta. Para cuerpos al rojo vivo, por ejemplo, la curva de energía emitida para cada frecuencia era algo así:



Para cuerpos incandescentes que emiten luz azul, los experimentos nos dan una curva así:



En 1900 Rayleigh y Jeans habían deducido matemáticamente, a partir de las Leyes de Maxwell, como debía comportarse el espectro de radiación de luz de un cuerpo incandescente. Su fórmula indicaba la energía que emitiría un cuerpo a una temperatura dada (T) para cada frecuencia. Todos coincidían en que las leyes de Maxwell eran correctas, y desde luego el desarrollo matemático que ellos hicieron también lo era.

La fórmula que obtuvieron a partir de las leyes de Maxwell es esta:

$$B = \frac{2f^2 kT}{c^2}$$

Donde B es la cantidad de energía por segundo que emite cada unidad de superficie del cuerpo, en cada frecuencia (f), para una temperatura dada T.

Los resultados matemáticos de Rayleigh y Jeans parecían funcionar bien para las frecuencias más cercanas al rojo. Pero su deducción matemática irrefutable venía a decir que, para cualquier temperatura T a la que estuviera el cuerpo, acabaría desprendiendo energía infinita en las frecuencias más altas (más allá del violeta). Sin embargo, la energía total emitida (la suma de la energía emitida en cada frecuencia) debía coincidir con la fórmula ya conocida de Stephan Boltzmann:

$$E = k T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Catástrofe ultravioleta (Rayleigh y Jeans)



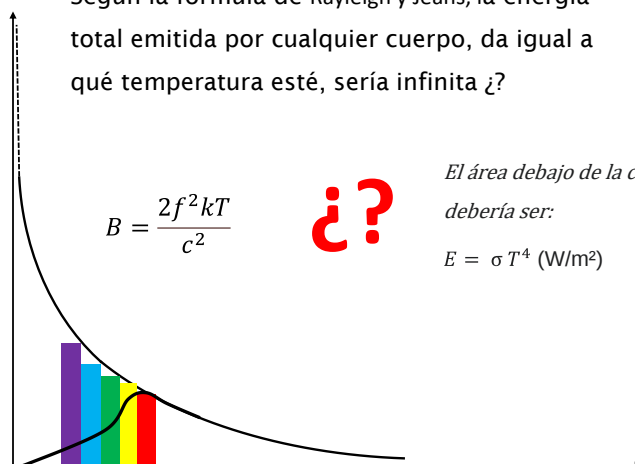
Según la fórmula de Rayleigh y Jeans, la energía total emitida por cualquier cuerpo, da igual a qué temperatura esté, sería infinita ¿?

$$B = \frac{2f^2 kT}{c^2}$$

¿?

El área debajo de la curva debería ser:

$$E = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$



Como se ve fácilmente en la fórmula, la intensidad de radiación para frecuencias altas (f alto, longitud de onda pequeña), tiende a infinito.

Esto era evidentemente falso por ser una violación flagrante de la conservación de la energía, porque un cuerpo que calentamos con energía finita no puede emitir energía infinita.

¿Qué estaba fallando?

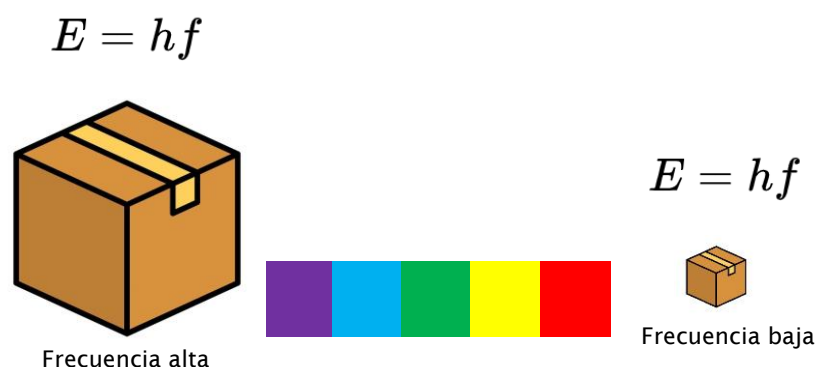
Los físicos llevaban años trabajando en este problema, entre ellos un físico alemán de algo más de 40 años, Max Planck. Se enfrentaba a uno de los nubarrones de la física que Kelvin había señalado. Desesperado, al no hallar una respuesta, se dispuso a **fabricar** una ecuación matemática que encajara con los resultados experimentales, exactamente igual que ya vimos que hizo Lorentz para intentar encajar los resultados de la constante de la velocidad de la luz, o Kepler para intentar encajar las órbitas de los planetas matemáticamente.

Para intentar cuadrar la fórmula con la teoría física termodinámica disponible se vio obligado a postular que la radiación de energía solo podía emitirse en paquetes o cuantos. Era una hipótesis desesperada porque no había ninguna razón lógica para que esto fuera así.

Planck propuso que, para determinados niveles de energía, los electrones vibrarían, pero **no emitirían energía electromagnética** (violando así las leyes de Maxwell). Pero en un determinado momento, radiaría de repente un cuanto de energía. Aún no se entendía en qué momento ni por qué... y difícilmente se entiende hoy, como vamos a ver.

Para ajustar su hipótesis con los datos experimentales, calcula el valor de la constante que hoy lleva su nombre, la constante de Planck (h). Los electrones solo emitirían energía, por paquetes. El tamaño de esos paquetes dependería de la frecuencia. A mayor frecuencia, más grande es el paquete de energía que emiten. Por ejemplo, en frecuencia ultravioleta el paquete de energía es mucho mayor que en frecuencia infrarroja.

$$E = hf$$



Con esa hipótesis, obtuvo la siguiente ecuación:

$$B = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Esta ecuación, para frecuencias bajas (grandes longitudes de onda), coincide prácticamente con la de Rayleigh y Jeans, que ya vimos que era muy precisa con los resultados de los experimentos en ese espectro de frecuencias. Porque cuando f tiende a cero:

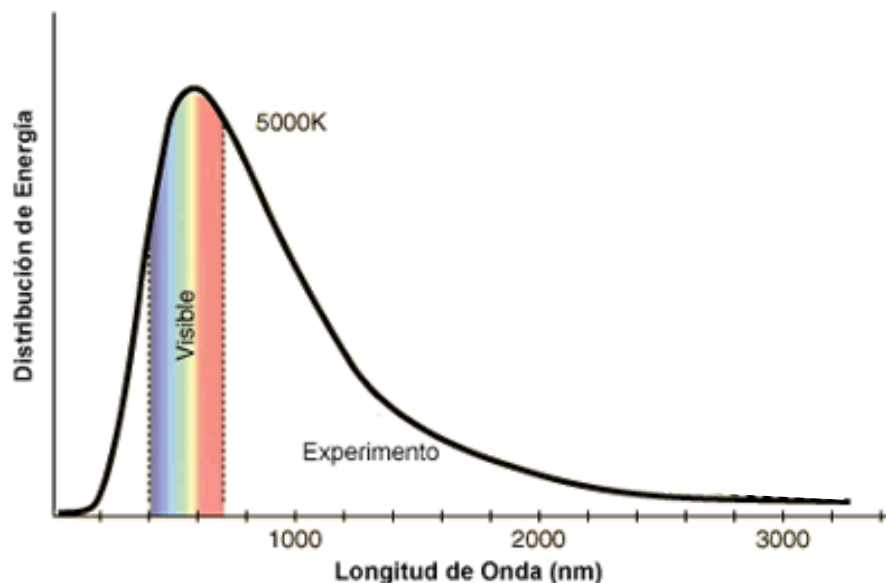
$$f \rightarrow 0 \quad e^{\frac{hf}{kT}} = 1 + \frac{hf}{kT} + \dots$$

Por tanto, cuando f tiende a cero:

$$f \rightarrow 0 \quad B = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \approx \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{(1 + \frac{hf}{kT} - 1)} = \frac{2f^2 kT}{c^2}$$

Es decir, Planck y Rayleigh-Jeans coinciden en frecuencias bajas. Pero en frecuencias altas la ecuación de Rayleigh y Jeans se agranda al infinito, mientras que la de Planck baja a cero.

Esta fórmula de Planck explica el espectro de frecuencias a la perfección:



Y por supuesto, la integral de la ecuación de Planck (la suma de las emisiones que emite el cuerpo en cada frecuencia) resulta ser la fórmula de Stephan Boltzmann⁵, como debía ocurrir.

$$E = k T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Es decir, la fórmula de Planck nos da la intensidad de emisión que emite el cuerpo en cada frecuencia. Y Stephan-Boltzmann nos da la cantidad de energía total que emite el cuerpo, si sumamos esas intensidades de todas las frecuencias. Y ambas fórmulas por fin cuadraban.

La ecuación de Planck resultó ser sorprendentemente exacta, para cualquier temperatura y para cualquier frecuencia. Había dado con algo que parecía representar de manera exacta lo que acontecía en la realidad, pero de momento nadie entendía por qué la energía debía emitirse por paquetes.

Y nadie lo entiende hoy tampoco.

Pero no nos adelantemos...

En altas frecuencia la fórmula de Rayleigh y Jeans sale infinito. Pero ¿por qué la hipótesis de Planck de los cuantos de energía consigue resolver el problema y hace que en frecuencias muy altas la energía emitida sea cero?

Un cuerpo que está a una temperatura T emite una energía total que depende exclusivamente de la temperatura, de acuerdo con la sencillísima fórmula de Stephan Boltzmann:

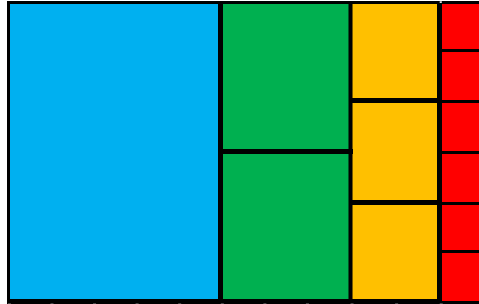
$$E = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Y, como hemos dicho, esa energía se reparte en distintas frecuencias, en paquetitos. En frecuencias bajas, se emiten muchísimos paquetitos pequeños (rojos e infrarrojos). En frecuencias más altas se emitirían muy poquitos paquetes grandes. En frecuencias muy altas no se emitiría ningún paquete muy grande, porque serían demasiado grandes y excedería la cantidad de energía total que puede emitir el cuerpo a esa temperatura T.

⁵ Puedes ver la demostración aquí: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/stefan2.html>

La energía total emitida es:

$$E = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

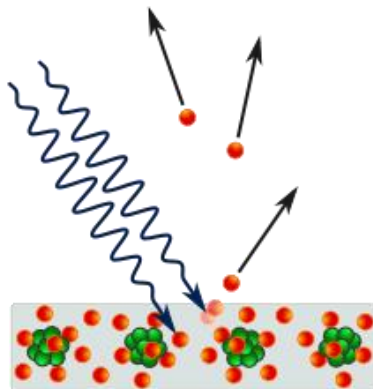


En este ejemplo simplificado, el cuerpo emite seis paquetitos rojos, tres amarillos, dos verdes y uno azul. El violeta no lo puede emitir porque el cuadrado sería más grande que la energía total que debe emitir a esa temperatura T

Estamos adentrándonos en la mecánica cuántica. Ten paciencia y no te preocupes si algo se te está escapando ¡Ánimo! Hasta ahora no hemos dicho nada que sea muy importante. Es preciso ir paso a paso porque el resultado final es tan sorprendente que, si no vamos despacio, parecería que hemos hecho alguna trampa por el camino.

1.5 El efecto fotoeléctrico. Einstein y Hertz 1887-1922

Desde 1887 se conocía que la luz enfocada sobre un metal podía lograr que se desprendieran electrones. Este hecho fue descubierto por Hertz y fue llamado “efecto fotoeléctrico”. Y el efecto fotoeléctrico trajo de cabeza a todo el mundo de la ciencia.



En el experimento del efecto fotoeléctrico la luz violeta es capaz de lanzar despedido a un solo electrón de una placa de metal

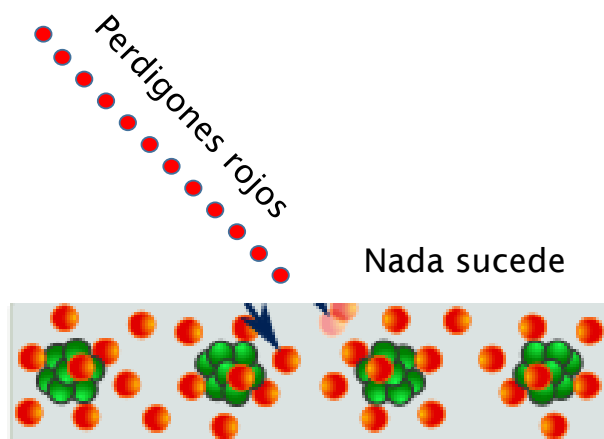
¿Como podía la luz comportarse como una minúscula canica para darle un “toque” a un único electrón de la capa metálica y sacarlo despedido? ¿no habíamos quedado en que la luz era una onda? ¿cómo podía ahora comportarse como un corpúsculo capaz de expulsar algo tan minúsculo como un solo electrón?

Para añadir aún más confusión, resultaba que solo la luz violeta y ultravioleta lo lograba.

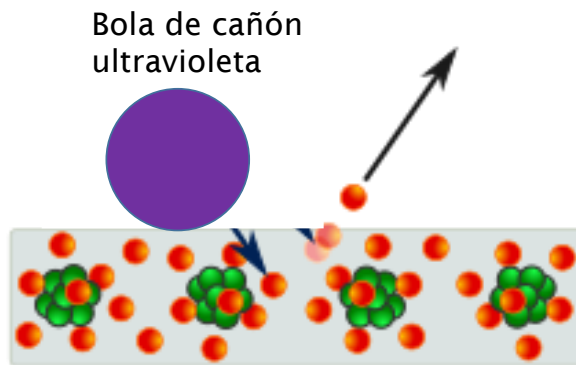
Cuando Planck expuso sus resultados en 1900, la ecuación y la propuesta de Planck llamaron la atención de un jovencísimo Einstein, que en ese momento trabajaba en su tesis doctoral preocupado en el efecto fotoeléctrico de Hertz. Se preguntó entonces ¿podría ser que, no solo las emisiones de los electrones, sino la luz en general se comporte como indicaba Planck y que fuera un flujo de paquetes compactos? Einstein propone que la luz solo existe en unidades discretas de energía que él llamó **fotones**.

Einstein se dispuso a recabar toda la información disponible de los experimentos realizados, y se percató de que los electrones salían despedidos con mayor energía cuando la luz era azul o violeta ¡aunque fuera luz tenue de poca intensidad! Y la luz roja, por mucha intensidad que tuviera la fuente de luz, ¡no lograba arrancar electrones! Cuanto mayor era la frecuencia de la luz, mayor era la energía de los electrones emitidos.

Una luz muy intensa roja solo enviaría muchísimos “perdigones” (fotones rojos), sin apenas capacidad.



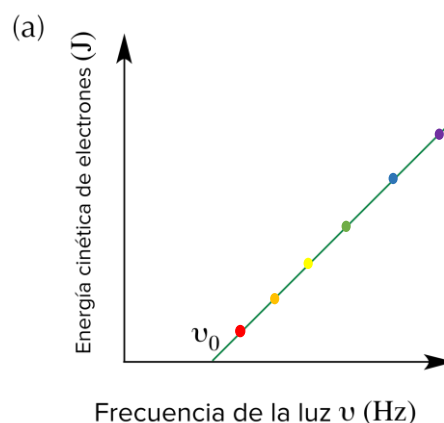
Sin embargo, basta una luz tenue, pero que sea ultravioleta, para poder enviar una única bola de cañón con enorme capacidad destructiva (un fotón ultravioleta).



La prodigiosa cabeza de un jovencísimo Einstein, que en ese mismo año de 1905 publicaba la relatividad especial, relacionó enseguida los “cuantos” propuestos por Planck con el efecto fotoeléctrico. Le pareció evidente que también la luz se estaba comportando como un “corpúsculo” (como había propuesto Newton). Solo si el corpúsculo, que él llamó fotón, tiene suficiente energía logra desprender al electrón del metal.

Este experimento demostraba que la luz era un corpúsculo (fotones), y toda la energía que lleva un solo fotón podía concentrarse en un solo electrón. Y esto explicaba que el fotón fuera capaz de desprender electrones de los metales, especialmente si es luz violeta o ultravioleta. Y si la luz era infrarroja, por mucha intensidad que le diéramos a la luz, los fotones infrarrojos, por muchos que fueran, no lograrían desprender a ningún electrón porque cada fotón sería como una canica muy débil.

Con los datos de los experimentos disponibles, dibujó una gráfica similar a esta:



Propone que la energía que lleva un fotón sería proporcional a su frecuencia con esta sencilla fórmula:

$$E = hf$$

E es la energía de los fotones.

h es la constante de Planck.

f es la frecuencia de la onda del fotón.

La energía de cada fotón coincidiría con el “cuanto” de Planck (su frecuencia multiplicada por la constante de Planck). De manera que los fotones (cuantos de luz) de mayor frecuencia (violetas) llevan más energía que los fotones de menor frecuencia (rojos).

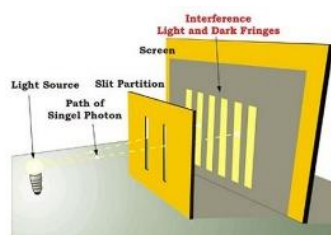
Así, como se indica en la gráfica, solo a partir de una determinada frecuencia se lograba extraer electrones. Y la proporción de la energía con que salía desprendida el electrón, respecto a la frecuencia, era ¡exactamente el número de Planck!

Esto era increíble porque, hasta entonces, el número de Planck solo había sido un número incluido en una ecuación complicadísima que ayudaba a entender el espectro de frecuencias de un cuerpo incandescente, pero no se le había dado una explicación real. Ahora teníamos una fórmula sencillísima que relacionaba la energía de un fotón con su frecuencia, y además la habíamos demostrado experimentalmente. ¡Y volvía a aparecer el mismo número! ¡El número de Planck!

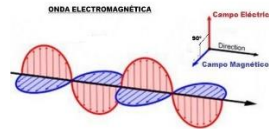
Einstein había logrado un gran descubrimiento que a la postre le daría un Nobel. Pero comienzan ahora los dolores de cabeza para los científicos, ¡que desde entonces solo se han ido incrementando! ¿La luz es un corpúsculo? ¿o es una onda?

A favor de que la luz es una onda tenemos:

- El patrón de interferencias en el experimento de la doble rendija (Young 1801). Algo que tiene difracción y que tiene interferencias **tiene que ser una onda**

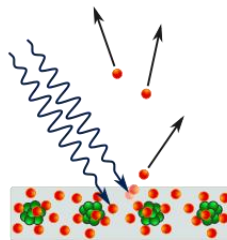


- Las ecuaciones de la propagación de onda de Maxwell, ecuaciones matemáticas y teóricas, demostraban que la luz debía propagarse como una onda a una velocidad de 300.000 km/s. Y esa era exactamente la velocidad de la luz. Inapelable.



A favor de que es un corpúsculo teníamos:

- La autoridad de Newton. Hasta 1801 nadie se había atrevido a cuestionar su hipótesis. Porque, además, la luz se desliza desde el sol hasta la tierra, y ahí fuera no podía existir ningún tipo de material en el espacio porque frenaría a los planetas. Y además los experimentos demostraban una y otra vez que el éter no existía. Pero ¿qué tipo de onda es capaz de transmitirse en el vacío? Tenía que ser un corpúsculo
- El efecto fotoeléctrico, la ley de Planck y las deducciones de Einstein parecían indiscutibles. Sus postulados se correspondían de manera perfecta con los experimentos. Solo si la luz era un corpúsculo sería capaz de almacenar toda la energía de un cuanto **en un solo punto**, y podría desprender un electrón del metal.



¡Vaya lio!

Einstein logró el Nobel 16 años después, en 1922, gracias a estos estudios sobre el efecto fotoeléctrico, pero sus propuestas del corpúsculo de luz (el supuesto “fotón”), no se mencionaron en el premio ¡Aún en 1922 este tema seguía siendo realmente polémico! A lo largo de estos años Einstein parecía ser el único que se tomaba la existencia del fotón en serio. Era de los pocos que creía en la naturaleza corpuscular de la luz (en esto estaba con Newton).

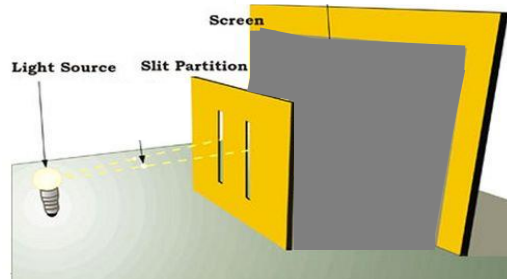
1.6 El experimento de Young, fotón a fotón

Ahora es cuando entramos en las partes más sorprendentes... Os insisto en que lo que viene en los próximos capítulos os va a dejar obsesionados, afectará a vuestra manera de ver el mundo y vuestra propia vida. Como lo que vamos a contar es muy difícil de creer, es importante no saltarse ningún paso, para que se vea que no hay trampa.

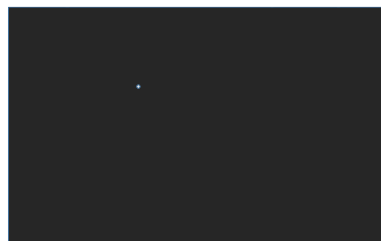
Haremos ahora un pequeño paréntesis en nuestra exposición cronológica de los hechos para hacer un pequeño salto de 50 años en el tiempo hacia mediados del siglo XX. Esto nos permitirá dar un pequeño aperitivo de los misterios cuánticos.

En la segunda mitad del siglo XX se ha hecho numerosas veces el experimento de Young de la doble rendija, ¡pero fotón a fotón!

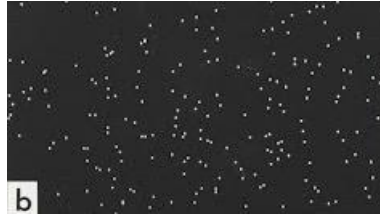
El resultado es totalmente sorprendente. Cuando lanzamos un único fotón, muy probablemente impacte contra la primera pantalla y no pase por la rendija. Lanzamos otro y ocurre lo mismo, vuelve a impactar en la primera pantalla. Y así vamos lanzándolos uno a uno, con mucha paciencia,...



Hasta que alguno pasa por alguna de las dos rendijas de la primera pantalla y se produce un impacto del fotón en un único punto en la pantalla de enfrente ¡como corresponde a un corpúsculo!

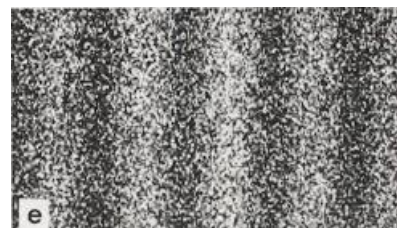
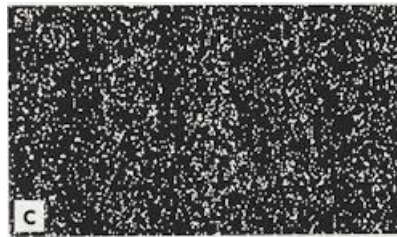


Así vamos logrando que algunos fotones vayan atravesando las rendijas. Si lo logramos con muchos obtenemos algo así en la pared del fondo.



Parece evidente que la luz es un corpúsculo

Si continuamos lanzando fotones, algo se va formando en la pantalla del fondo...



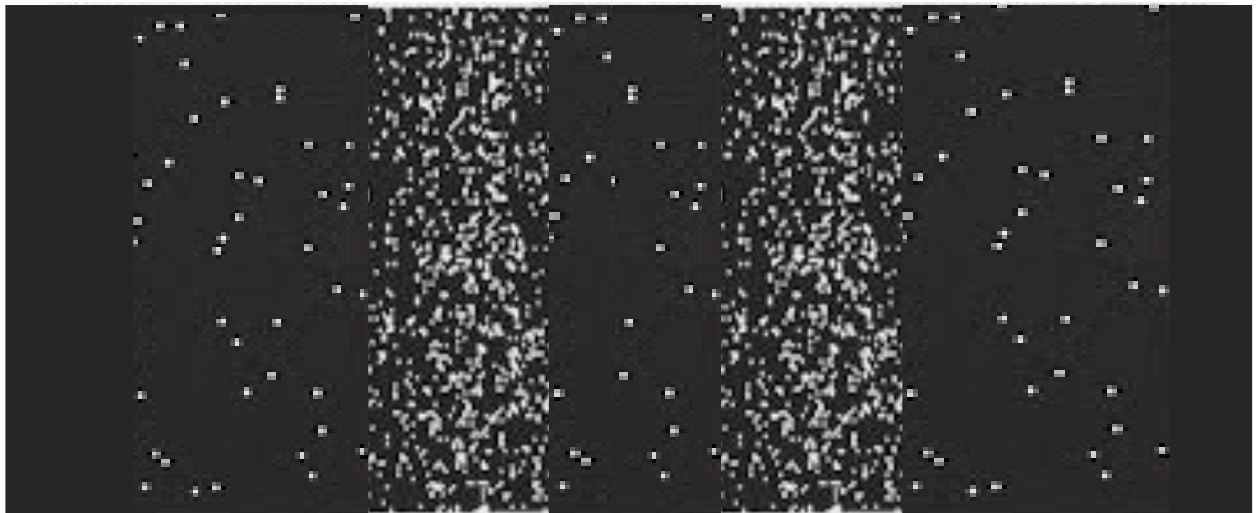
¡Un patrón de interferencia!

La existencia de un patrón de interferencia cuando emitíamos luz, antes la veíamos lógica, porque considerábamos que es una onda. Si ahora lo que mandamos es fotones, que se comportan como corpúsculos cuando chocan en la pantalla ¿cómo es posible que exista una interferencia?

Los impactos son un solo punto, como corresponde a la huella que dejaría un corpúsculo. Si estamos lanzando los fotones uno a uno, está claro que el fotón pasa, o bien por una rendija, o bien por la otra. Pero si el fotón ha pasado **solo por una rendija** ¿cómo es posible que se produzca un efecto de interferencia con la otra rendija si vamos fotón a fotón? ¿quizás la interferencia se produzca con los otros fotones que pasan por la otra rendija? ¿pero cómo es posible que un fotón tenga interferencia con otros fotones que pasaron por la otra rendija mucho antes y que golpearon en la pantalla mucho antes? ¿cómo sabe el fotón que existe la otra rendija si no ha pasado por allí? ¿y por qué hay zonas donde jamás impactan los fotones (bandas oscuras)? ¿cómo es posible que los fotones se anulen entre ellos si se están enviando uno a uno y para cada uno de ellos estamos viendo su impacto en la pantalla?

Pero ahí no acaba todo.

Colocamos ahora un mecanismo para saber por cuál de las rendijas pasa cada fotón. Vamos haciendo el experimento fotón a fotón, y vamos apuntando por qué rendija ha pasado cada vez. Por supuesto, como no podía ser de otra manera, cuando hacemos esta medida comprobamos que el fotón pasa solo **por una de las rendijas** cada vez que lo lanzamos. Nuestra sorpresa ahora es que, en este caso, los impactos en la pantalla del fondo ya no tienen ningún patrón de interferencia, y nos encontramos con algo así:



Es decir, obtenemos las dos franjas que cabe esperar obtener por ser dos rendijas.

De manera que, si sabemos por donde pasa el fotón, no se produce el patrón de interferencias en la pantalla del fondo. Y si no lo sabemos, se producen las interferencias.

Veremos que las distintas posibles interpretaciones a todo este misterio son totalmente inadmisibles para cualquier persona con sentido común, pero paciencia, ya llegaremos.

Para poder adentrarnos en el misterio necesitamos conocer la estructura de los átomos. Ten paciencia con lo que sigue a continuación, porque si me sigues, nos adentraremos en el País de las Maravillas de Alicia.

1.7 El átomo

La historia del descubrimiento de la estructura del átomo, aunque es apasionante, solo la resumiré en breves líneas. Pero he incorporado un anexo para aquel que quiera profundizar en ello.

Todo comenzó cuando en 1773 Lavoisier confirma en sus experimentos químicos, que para cualquier reacción que hagamos, la materia ni se crea ni se destruye, solo se transforma. La suma de las masas antes de la reacción química coincidía con la suma de las masas de los productos resultantes ¿Es entonces la materia eterna? ¿tenía razón Demócrito? ¿existirán esos misteriosos elementos que llamaron átomos, que se combinan entre sí formando todas las cosas que conocemos?

En 1811 Avogadro da un paso más hacia estas tesis. El volumen de un gas en unas condiciones fijas de presión y temperatura es proporcional al número de partículas que contiene ¿Qué son esas partículas? ¿podemos contarlas?

Durante los siguientes 60 años los científicos ensayan en sus laboratorios las propiedades de las distintas sustancias, siguiendo el método científico y abandonando la tradición alquimista. En 1869 Mendeléyev ordena todos los elementos conocidos en función del número de electrones (su número atómico). En la primera fila coloca los que tienen 1 y 2 electrones, en la siguiente los que tienen 3,4,5,6,7, 8 9 y 10 electrones. Y así sucesivamente.

Se da cuenta de que los que se encuentran en la misma columna se comportan de modo muy similar. Presenta así su “tabla periódica” donde, de manera casi profética, pronostica que todos los elementos simples que se vayan descubriendo tendrán que ir encajando en la tabla, cada uno en su casilla. Los elementos de una misma columna se comportarán de forma muy similar, los de las filas de más arriba serán los más ligeros, y los de abajo los más pesados, etc.

Tabla periódica de los elementos

Notas

- 1 kg/mol = 96.485 eV
- Todos los elementos tienen un estado de oxidación implícito zero.
- Las tablas de oxidación de los elementos 103-118.
- Las configuraciones de los elementos 119-120.
- Las configuraciones de los elementos 121-118.
- Las configuraciones de los elementos 119-120.

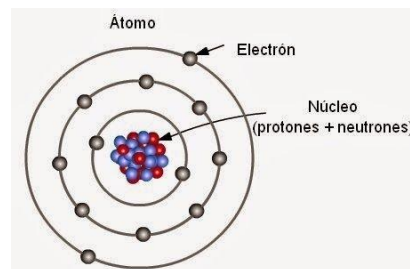
En 1904 Thomson se atreve a aventurar el primer modelo para el átomo. Se conocía que los electrones debían tener cierta libertad, porque era un hecho que, como hemos visto, en determinadas circunstancias los electrones escapan al átomo. Y por otra parte el átomo estable debía tener la misma carga positiva y negativa. Pero el átomo en sí mismo debía ser fácilmente atravesable, según demostraban los experimentos. Thomson propone para el átomo una estructura como si fuera un pudding con pasas, donde la masa es la carga positiva y los electrones las pasas. La parte de la masa sería fácilmente atravesable.



Modelo de Thomson para el átomo. 1904

Pero en 1908 Rutherford disparó partículas alfa (muy pesadas) a una lámina de oro.

La mayoría atravesaban la lámina sin dificultad, como se esperaba, pero unas pocas (solo una de cada 10.000) chocaba contra algo **realmente masivo** y salían totalmente desviadas, e incluso rebotaban. Había algo ahí dentro muy masivo y pequeño capaz de desviar sin problemas a las pesadísimas partículas alfa. Había descubierto el núcleo del átomo, que debía ser muy denso y tener carga positiva. Rutherford propone para el átomo una estructura “planetaria” donde los electrones estarían girando alrededor del núcleo.



Modelo “planetario” para el átomo de Rutherford. 1908

El núcleo estaría formado por protones (de carga positiva) y por neutrones (de carga negativa pero que aportan masa). El número de protones en el núcleo es igual al número de electrones girando alrededor de él, de manera que la carga de todo el átomo es neutra.

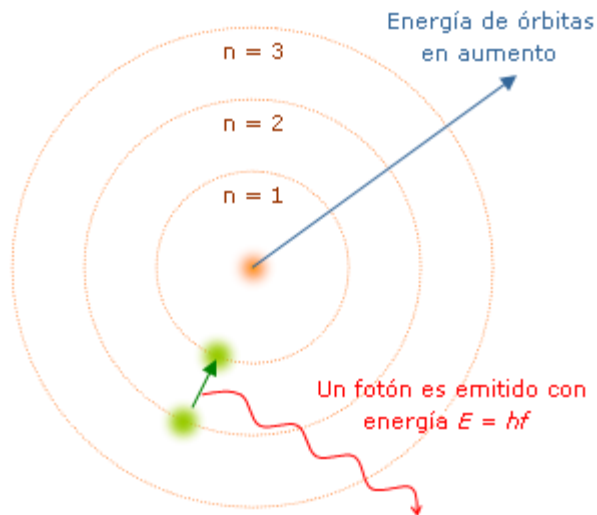
Este modelo explicaba muchas cosas, y parecía sencillo y exitoso, pero ahora vuelve a surgir un problema muy serio. Una partícula cargada eléctricamente, como es el electrón, debería desprender en su movimiento alrededor del núcleo una radiación electromagnética, y así debería perder energía enseguida y estrellarse casi instantáneamente contra el núcleo ¿Por qué se mantiene estable en su órbita?

Y apareció el genio. Bohr. 1913.

Podemos decir que Bohr es uno de los grandes fundadores de la mecánica cuántica. Fue un científico muy pragmático, aceptaba los hechos como venían, y establecía los modelos en función de lo que veía. Dio por hecho que los electrones solo se podían mover en determinadas órbitas y propuso que, mientras se movieran en esas órbitas estables, los electrones no emitían ningún tipo de energía. Si les proporcionas energía suficiente, logran saltar a una capa más externa. Y cuando retornan a una capa más interna emiten la energía que habían ganado.

¿Por qué era así?

Bohr era un científico joven de 28 años, y estaba, a estas alturas, ya totalmente convencido de que la energía se emitía por “cuantos” (fotones). Por tanto, el electrón solo podía desprender cuantos de energía. La diferencia de energía que tenía un electrón entre una capa interna y una más externa debía de corresponder con un cuanto.



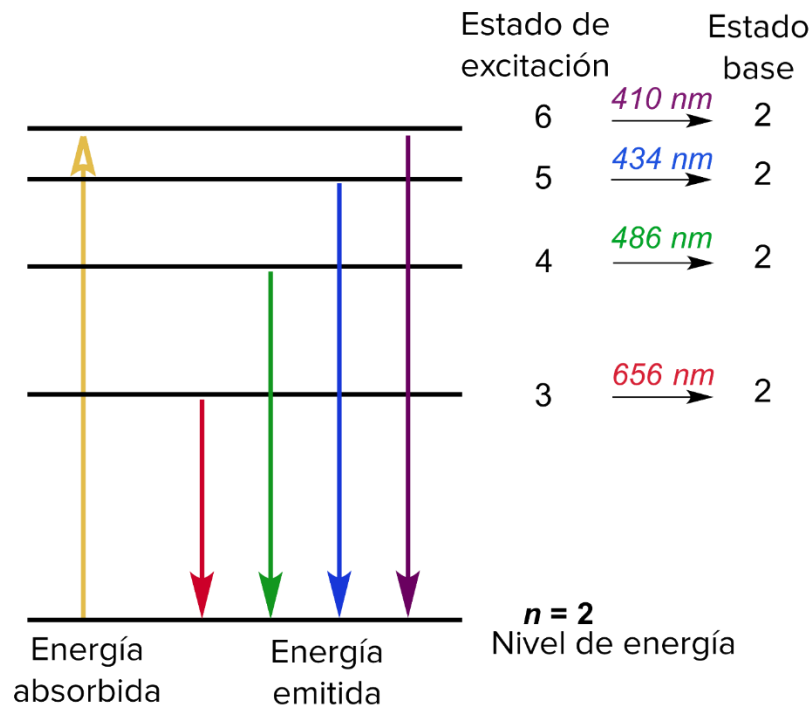
Bohr propuso fórmulas matemáticas mecánicas para el electrón. La energía que tiene depende de en qué órbita esté, y sería la suma de la energía cinética y la energía potencial en esa órbita. Teniendo en cuenta la energía del electrón en cada órbita, y teniendo en cuenta las cantidades mínimas de energía permitidas (cuantos), fue capaz de establecer cuáles eran **los radios** de las órbitas permitidas para el átomo de hidrógeno, que es el más sencillo (un protón y un electrón).

En el anexo explicamos con más detalle como logra esas fórmulas. El resultado era que los radios de las órbitas válidas debían cumplir

$$mv2\pi r = n h$$

Siendo r el radio de la órbita.

Lo realmente sorprendente es que estas sencillas fórmulas matemáticas explicaban a la perfección los espectros de frecuencia de luz que emitían los átomos de hidrógeno excitados. Cuando un electrón saltaba de la sexta capa directamente a la segunda, emitía un fotón ultravioleta (fotón de alta energía). Mientras que si saltaba de la tercera a la segunda emitía un fotón rojo.



Fuente KHAN ACADEMY. Espectros de luz emitidos por átomos de hidrógeno excitados. Cuando un electrón salta de la capa 6 a la capa 2 emite un fotón de alta energía (ultravioleta). Cuando salta de la capa 3 a la capa 2 emite luz roja (de baja energía).



Experimento de laboratorio con átomos de hidrógeno excitados. Los electrones van expulsando esa energía extra que tienen para volver a órbitas internas de menor energía, emitiendo luz en el proceso. Al descomponer la luz blanca que emiten, podemos ver los saltos violetas, azules, verdes y rojos que corresponden a los distintos saltos posibles entre capas, como explicaron los cálculos de Bohr.

Los postulados de Bohr provocaron un salto inmenso en el avance científico porque colocaban la investigación en la autopista adecuada. La ciencia y los experimentos se aceleraron, y con ellos la técnica y la tecnología. Pero el análisis de qué es lo que estas fórmulas querían decirnos acerca de la naturaleza quedó postergado, y aún no ha habido nadie que haya dado con una solución “lógica”.

Cientos de años antes Kepler había realizado una serie de postulados matemáticos sobre las órbitas planetarias. Había descubierto que los planetas orbitan formando elipses. Nadie sabía por qué, pero así era. Tuvo que llegar Newton para promulgar la ley que explicaba por qué los planetas orbitaban formando elipses.

Ahora los postulados y las fórmulas de Bohr funcionaban. Pero aún no ha llegado el Newton adecuado. Nadie sabe por qué las fórmulas de Bohr funcionan.

En esta época los grandes científicos se volvían locos intentando encajar la nueva propuesta de Bohr en el gran sistema de la física. Copiamos aquí la carta de Schrödinger a Bohr porque es realmente divertida.

Señor Bohr, seguramente debe usted entender que la idea de los saltos cuánticos necesariamente lleva a un disparate. Se dice que el electrón en una órbita estacionaria de un átomo da vueltas periódicamente en una suerte de órbita sin emitir radiación. No hay explicación de por qué no debería radiar; de acuerdo con la teoría de Maxwell, tiene que radiar. Luego el electrón salta a otra órbita y entonces sí emite radiación. ¿La transición es gradual o súbita?... ¿Y qué leyes determinan su movimiento en el salto? En fin, la idea entera de los saltos cuánticos debe considerarse simplemente absurda. (Schrödinger).

Estamos solo al inicio de las sorpresas. Te puedo asegurar que antes de que termine el curso me habrás tomado por loco.

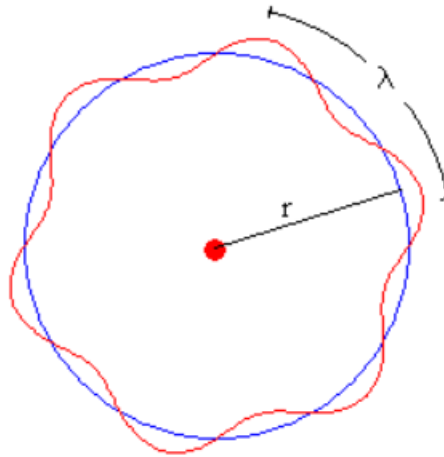
1.8 La dualidad onda corpúsculo. Louis de Broglie 1924

Como hemos visto, todavía en 1924 muy pocos científicos creían en la naturaleza corpuscular de la luz. Einstein consideraba que la luz era onda, pero también corpúsculo.

Luis de Broglie estaba con él, pero fue más allá. Si la luz era onda y también corpúsculo, ¿podría la propia **materia** ser corpúsculo y...también **onda**?

Propuso algo realmente extraño, de locos, pero realmente audaz. Propuso una “longitud de onda” para la materia. Esto es como intentar calcular cuál es la longitud de onda de una manzana.

Propuso la siguiente explicación de las órbitas estables de Bohr. Solo podrían existir aquellas órbitas donde la longitud de la órbita es un número entero de longitudes de onda del electrón.



En la primera capa ($n=1$), la longitud de onda sería exactamente igual a la longitud de la órbita ($2\pi r$).

En la segunda capa ($n=2$) la longitud de onda sería justo la mitad de la longitud de la órbita ($2\pi r/2$). Y así sucesivamente. De manera que

$$\lambda = 2\pi r / n$$

Teniendo en cuenta que, según los cálculos de Bohr, las órbitas debían cumplir esta fórmula:

$$mv2\pi r = n h$$

Obtenemos una sencilla relación entre la longitud de onda del electrón y su cantidad de movimiento.

$$\lambda = h/mv$$

Por tanto, el postulado de Bohr, con la aportación de De Broglie, se puede expresar ahora así: “las capas permitidas son solo aquellas en las que el perímetro corresponde a un **número entero** de longitudes de onda”

¿Y qué hizo la ciencia? ¿es posible que la ciencia aceptara un postulado que decía que un electrón que era algo material podía tener una longitud de onda?

¡Sin duda! ¡La ciencia recibió este postulado con inmensa excitación! Porque en paralelo con estos razonamientos, los experimentos estaban demostrando que **también los electrones sufrían difracción**, ¡Como las ondas!

Y lo más increíble es que la medida de esa difracción encajaba perfectamente con la longitud de onda que De Broglie proponía para el electrón. Todo esto supuso un paso de gigante.

¿Sería posible que la materia se comportara también como una onda? Esto sí que era ya algo realmente de locos ¿Qué teníamos entre manos? ¿qué es realmente lo que estamos analizando? De Broglie era muy consciente del problema. Consideraba absurdo pensar que los elementos de la materia eran “ondas”, y así lo escribió en las conclusiones de su tesis de 1924:

“...Por lo tanto, la presente teoría debería considerarse más como un esquema cuyo contenido físico no está completamente definido, que como una doctrina coherente que está definitivamente establecida”

Lo que vibra en el violín es el material de la cuerda, pero ¿qué demonios vibra en el caso de la onda del electrón?

Como vemos, las matemáticas y los propios experimentos iban haciéndose compatibles entre ellos, pero nos iban llevando a una visión sobre una naturaleza totalmente extraña a nuestros ojos.

1.9 Schrödinger 1925. La entrada al País de las Maravillas

Lo curioso es que la paradoja de que el fotón se comportaba a veces como onda, y a veces como corpúsculo, no parecía ser un problema para la mayor parte de los científicos. Porque la teoría funcionaba, siempre.

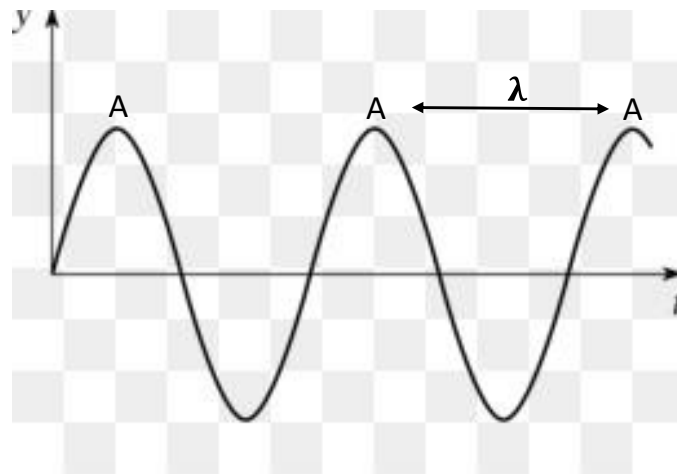
La paradoja de que, no solo el fotón, sino también **¡la materia!** se comportaba también como onda, tampoco parecía ser un problema, porque la teoría funcionaba. Pocos se preguntaban el por qué funcionaba. Simplemente veían que funcionaba y continuaban con sus investigaciones, sus cálculos y su tecnología.

Pero algunas mentes brillantes eran la excepción. Ya vimos que Schrödinger se volvía loco con estas ideas cuánticas. Sin embargo, debía admitir que la propuesta de De Broglie era inspiradora, y funcionaba.

Schrödinger partió de la onda de De Broglie, de su longitud de onda, etc. y se dispuso a calcular la ecuación de la función de onda del electrón y del fotón, de manera que cumpliera que, en escalas macroscópicas, se redujera a las ecuaciones de la física clásica que veníamos utilizando durante siglos.

Para intentar entender cómo se comporta una onda, simplifiquémosla al máximo. En realidad, matemáticamente, no es un concepto difícil. Si imaginamos el clásico ejemplo de una cuerda que hacemos vibrar, como cuando los niños juegan con las mangueras subiendo y bajando un extremo, tenemos la siguiente ecuación:

$$y(x, t) = A \operatorname{sen}(\omega t + Kx)$$



La onda del dibujo, de acuerdo con la fórmula arriba indicada, se iría moviendo hacia la derecha, de manera que la posición de cada partícula de la cuerda se modificaría en cada instante t .

A : es la amplitud de la onda (máxima elevación que alcanzan las partículas)

ω : es la velocidad angular, y da una idea de la velocidad con que el niño sube y baja el extremo de la cuerda. Por supuesto está íntimamente relacionada con la velocidad con que se propaga la onda. $V = \frac{\omega}{k}$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ Cuanto más grande es la k , menor es la longitud de onda (más se aprietan las crestas entre sí).

λ : longitud de onda.

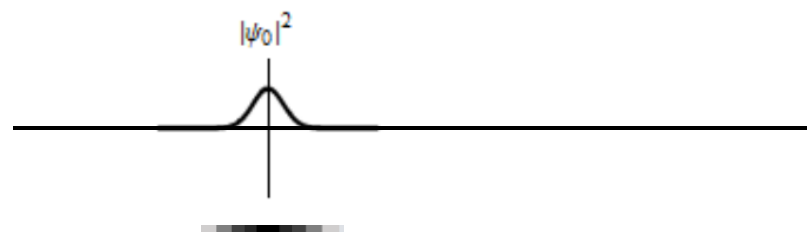
Con la sencilla fórmula arriba indicada, podemos conocer la situación de cada partícula para cada instante, del pasado, y del futuro.⁶

La ecuación de Schrödinger es bastante más complicada, pero obtuvo una ecuación de onda que, si se aplicaba al fotón, coincidía con las fórmulas de Maxwell que explicaban el comportamiento de las ondas electromagnéticas (luz). Y si se aplicaba al electrón coincidía con lo que cabía esperar de su comportamiento en la órbita del átomo según la propuesta de De Broglie. Si se aplica a cosas más grandes, se convierte en las fórmulas de Energía Cinética y Energía potencial que conocemos desde Newton.

La ecuación de onda de Schrödinger es una fórmula totalmente **determinista**, igual que la sencilla onda que hemos propuesto arriba. Conocidas las condiciones de la onda de Schrödinger en un instante t , podemos conocer cómo va a evolucionar en el futuro y conocer como era en el pasado. Igual que la fórmula de Newton que gobierna el movimiento de los planetas.

¿Pero qué es en realidad esa onda? ¿qué representa? ¿estas “ondas de materia” de qué dependen?

Schrödinger había interpretado su ecuación como algo que nos indicaba cómo se distribuía la materia del electrón en el espacio. Allí donde la onda tiene mayor amplitud, la “nube electrónica” sería más densa y el material del electrón estaría más concentrado.



Aspecto que tendría la nube de masa de la partícula según Schrödinger

En el dibujo anterior representamos la gráfica del cuadrado de la ecuación de onda, y debajo el aspecto que tendría la “nube de masa” de la partícula, según la interpretación de Schrödinger.

⁶ La relación entre k y w depende de la tensión de la cuerda. De manera que, si sabemos la velocidad en ciclos por segundo con que el niño sube y baja el extremo de la cuerda, y sabemos la amplitud del movimiento de su brazo (A), podemos conocer toda la fórmula de la onda, y por tanto conocer la posición de cada partícula de la cuerda en cada instante del pasado y del futuro.

Pero era una explicación difícilmente compatible con la experiencia que teníamos de los electrones comportándose como auténticas partículas diminutas que salen disparadas. Los experimentos demostraban que el electrón, cuando se le “observaba”, era una partícula totalmente **concentrada**, en un único punto, no era una especie de nube de materia. Y, además, cuando los observamos, o bien encontramos el electrón entero en su totalidad en un lugar concreto, o no está ahí en absoluto. La ondulatoriedad de una partícula según la onda de Schrödinger puede abarcar kilómetros, pero cuando observamos esa partícula, la vemos como un minúsculo punto, y ahí se encuentra ella “enterita”.

Había que buscar otra interpretación. Schrödinger había encontrado una fórmula muy interesante, que funcionaba, pero no la había interpretado bien.

Aquí hay muchas cosas aún pendientes de encajar.

1.10 La aleatoriedad en la mecánica cuántica. Born 1926

La ecuación de Schrödinger produjo un hervidero científico en el mundo occidental.

Justo al año siguiente, en 1926, Max Born da una interpretación sorprendente a la ecuación de Schrödinger y a la naturaleza de esas ondas. La onda de Schrödinger no estaba representando una distribución de masa difusa por el espacio, estaba representando ¡probabilidades!

Max Born pudo demostrar que esas ecuaciones nos ofrecen la evolución de las **probabilidades de encontrar**⁷ a la partícula en un determinado estado y lugar. Las probabilidades que calculamos con la ecuación de Schrödinger se cumplen de manera **exacta** cuando hacemos los experimentos muchas veces y analizamos las estadísticas.

¿Pero qué quería decir eso? ¿quería eso decir que los electrones a veces están en un sitio y otras veces en otro, pero no se sabe por qué?

Este comportamiento esencialmente aleatorio de las partículas elementales inquietaba realmente a Einstein, pero ¡también al propio Schrodinger!

Einstein responde a Max Born por carta con esta famosa frase de 1926:

⁷ Subrayo la palabra “encontrar”. Nótese que no digo que el electrón “esté”. Sino que hablo de la probabilidad de encontrarlo. Veremos más adelante que la palabra “estar” el electrón, antes de que se produzca una observación, no se puede aplicar.

*“La teoría produce un buen caso, pero no nos acerca al secreto del Viejo. Estoy del todo convencido que Él no **juega a los dados**”.*

La aleatoriedad esencial que atribuye Born a las partículas elementales es desconcertante, puesto que las cosas grandes están compuestas de esas mismas partículas elementales. Todo esto es lo que incomodaba a Einstein cuando dijo que “Dios no juega a los dados”. Hasta ese momento los fenómenos “*aleatorios*” que percibimos a diario no suponían ningún problema filosófico. Comúnmente decimos que, si tiramos una moneda al aire, ésta podrá salir cara o cruz. Decimos en lenguaje vulgar que el resultado es “aleatorio”. Y decimos que hay un 50% de probabilidades de que salga cara, y un 50% de probabilidades de que salga cruz. Pero en realidad, todos entendemos que no hay nada realmente aleatorio en ello. Todo el fenómeno es “**causal**”. Si tuviéramos la capacidad de calcular de manera totalmente precisa la masa, la velocidad de lanzamiento, la velocidad de rotación, etc. podríamos calcular de manera exacta si saldrá cara o cruz. Por tanto, en nuestro mundo macroscópico, cuando hablamos de aleatoriedad, lo que queremos decir es que desconocemos qué saldrá, porque nos es muy difícil calcularlo, o porque no conocemos todas las características de las condiciones iniciales o de las condiciones de contorno. No hay por tanto ningún misterio en el fenómeno de lanzar una moneda. Pero lo que Born estaba interpretando respecto a la fórmula de Schrödinger es que la aleatoriedad era algo esencial al comportamiento de las partículas elementales. Que podríamos encontrarla en un lugar o en otro, sin ninguna causa real que les haya obligado a situarse en ese lugar en concreto, o en otro. Es como si la naturaleza se reservara el derecho de “**decidir**” dónde situarse solo en el momento en que se produce una observación, antes no, porque no hay necesidad de decidirlo antes, puesto que nadie la observa.

Resumamos.

La ecuación de onda de Schrödinger es totalmente determinista. En función de unas condiciones iniciales de la onda, podemos calcular de manera exacta las condiciones que tendrá la onda en cualquier momento del futuro.

Pero es determinista solo mientras se comporta como onda, que por otra parte, es una onda de probabilidades.

En el momento en que se produce **una observación**⁸, la onda “colapsa”, y se convierte en **una partícula elemental** que se encuentra en un lugar determinado y muy concreto, en uno de los posibles lugares donde podría haber aparecido.

La postura de Einstein es que, ni los fotones, ni la naturaleza, deberían tener la capacidad de “elegir”. Siempre deben obedecer **a unas causas** y a unas leyes que les determinan. Einstein opinaba que, lo que para Born aparentemente es aleatoriedad intrínseca, debía ser en realidad, a la fuerza, debido a unas “causas ocultas” que desconocemos, unas leyes naturales desconocidas que gobiernan lo pequeño y que son las que determinan que a veces el fotón aparezca en un sitio, y otras veces en otro. Einstein se pasó el resto de su vida defendiendo la existencia de esas supuestas “variables o causas ocultas” que en realidad desconoceríamos, pero que tenían que existir. La ciencia ha demostrado que esas variables ocultas **no existen**, veremos más adelante como se demostró.

En efecto, el fenómeno es puramente aleatorio, y no existen causas que hagan que el fotón a veces aparezca en un sitio, y otras en otro.

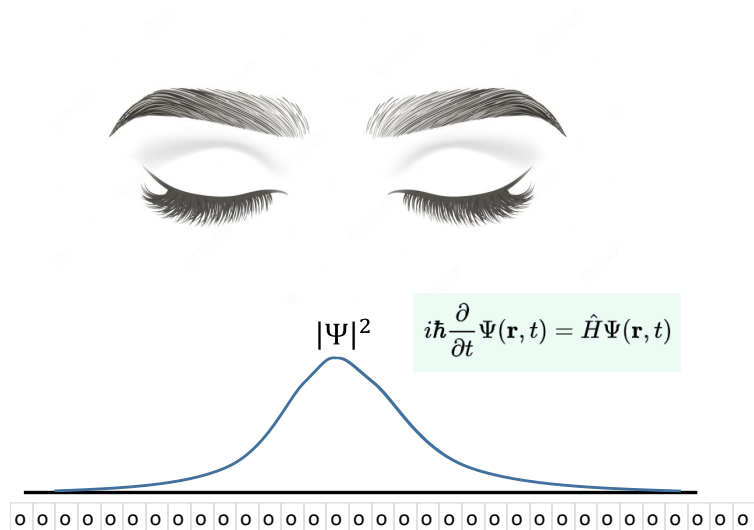
La importancia de esto que estamos diciendo es descomunal, porque lo que estamos diciendo es que las leyes naturales no son causa suficiente para que ocurran los sucesos que experimentamos. Pero ¿no será que faltan otras leyes naturales que no hemos descubierto? No, rotundamente no, como se ha demostrado posteriormente, y vamos a ver. No puede haber leyes naturales que expliquen el lugar exacto donde aparece la partícula. **El lugar en el que aparece la partícula no se decide naturalmente**. Veremos pronto por qué. Veremos el extrañísimo mundo que nos dibuja todo esto, con ejemplos muy esclarecedores.

Hagamos antes un resumen sobre las características más importantes de la ecuación de onda de Schrödinger:

- Se mostró increíblemente exacta desde el primer momento. Aún hoy, casi 100 años después, sigue siendo la fórmula más exacta de la historia de la ciencia de acuerdo con los experimentos.
- Es una fórmula totalmente determinista. Dadas unas condiciones iniciales de la onda de materia, se puede predecir de manera exacta cómo evoluciona la onda de probabilidad en el futuro, y cómo era en el pasado.

⁸ Dejemos por el momento la pregunta abierta de ¿quién? o ¿qué? hace esa observación. Pero sin duda, es una pregunta muy importante.

- Solo cuando se produce una observación, la partícula deja de comportarse como una onda y se ve como una partícula, que aparece en uno de los lugares posibles, de acuerdo con las probabilidades que tenía de aparecer según la ecuación de onda.



Si nadie hace una observación, la onda evoluciona de manera determinista y obedece a unos cálculos precisos, gobernados con mano de hierro por la ecuación de onda de Schrödinger



Cuando realizamos una observación, la onda colapsa, y podemos observar la partícula en una determinada posición de las posibles, obedeciendo a la ley de probabilidades que marca la ecuación de onda de Schrödinger en ese momento.

1.11 El principio de incertidumbre de Heissenberg. 1927

La propuesta de Born fue aceptada de buen grado por Bohr, y por su discípulo Heissenberg. Ambos estaban convencidos de que la ecuación de Schrodinger estaba demostrándonos que no era posible conocer el estado de velocidad y posición de las partículas antes de su observación, puesto que ese estado se “creaba” y se “producía” precisamente en el momento de la observación. Pero Heissenberg, quiso probar, además, que ni siquiera observándolos era posible conocer todas las características de su estado (velocidad y posición).

Imaginó diferentes experimentos posibles, y en todos los casos se daba que, o bien lográbamos certidumbre en la posición, pero desconocíamos su velocidad. O bien lográbamos certidumbre en la velocidad pero desconocíamos su posición.

Lo que es muy importante comprender es que esta imprecisión **no se debe a la precisión de nuestros aparatos de medida, ni se debe a nuestra torpeza al observar**. Esta característica es algo esencial e intrínseco de la naturaleza. La naturaleza **se reserva la opción de dejar velada siempre alguna de las dos características del estado de las partículas**.

Heissenberg demostró que, si queremos saber la posición de una partícula elemental, no tenemos más remedio que iluminarla con una luz de onda corta (para ganar en precisión), pero estos fotones de onda corta (violeta por ejemplo) son tan poderosos que darían un enorme golpe al electrón y desconoceríamos su velocidad. Si utilizáramos fotones de onda larga, podríamos no afectar a la velocidad, pero entonces no sabríamos donde está exactamente.

Heissenberg no quería decir que no teníamos la tecnología para poder saber las posiciones y velocidades de las partículas. Lo que quería en realidad demostrar es que, la tesis de que el observador crea la realidad al observarla, que era la tesis de Bohr, no podría nunca refutarse experimentalmente. Es decir, los partidarios de que hay una realidad “ahí fuera” que se comporta “lógicamente”, y que existe con independencia de nuestra observación, nunca podrán demostrarlo.

El principio de incertidumbre supuso un auténtico terremoto en nuestra visión acerca de la naturaleza, y desde luego fue un golpe mortal al viejo determinismo que se había fortalecido con Newton.

El determinismo había venido diciéndonos que, **si se conocen los estados de todas las partículas en un momento inicial**, es posible calcular el estado de ese sistema en cualquier momento del futuro y del pasado.

Pero desde Heisenberg, todos damos por hecho que siempre será imposible conocer el estado inicial de un sistema porque no podemos conocer las variables de posición y velocidad de las partículas, no tanto por que no tengamos tecnología suficiente, sino porque son indeterminadas, en cierto sentido no existen. La naturaleza se reserva siempre el derecho de mantener velado e incluso mantener indefinidas una parte de estas variables.

Ahora estamos preparados para poder entrar en el principal misterio de la mecánica cuántica ¿Cómo afecta un ser consciente a la realidad existente? Para poder entrar en este espinoso tema, recordemos lo aprendido. Insistimos en que la ecuación de Schrödinger puede predecirnos el estado de las ondas de materia en cualquier momento del futuro, en función de las condiciones iniciales, de una manera determinista. Durante milenios y miles de millones de años esa onda evolucionaría de manera exacta y precisa, de acuerdo con fórmulas matemáticas concretas. Pero en cuanto realizamos una observación, el determinismo desaparece, y aparece la aleatoriedad, desaparece la causalidad para dar paso a la **aleatoriedad esencial**. Desaparece la onda para dar paso a la partícula.

1.12 Acercándonos al misterio de la consciencia. La interpretación de Copenhague

Estoy seguro de que ahora estarás diciendo “a mi todo esto me parece muy abstracto ¿hay forma de hacer experimentos que demuestren este comportamiento tan extraño?”

Si, vamos a ello.

En el mundo científico se estaba librando en esos años una batalla de titanes. Por una parte, Einstein, Schrödinger y De Broglie no podían creer que la naturaleza fuera tan misteriosa. Seguían apostando por una naturaleza acorde con el sentido común. Su tesis principal es que “algo se nos está escapando que desconocemos”. Debe haber por ahí unas “causas desconocidas” que gobiernan esa “aparente” aleatoriedad.

Del otro lado, el llamado **Grupo de Copenhague** (liderado por Bohr, Heisenberg y Born) fue dinamitando, una por una, cualquiera de las ingeniosísimas objeciones que el grupo de Einstein iba oponiendo, de manera que se puede decir que Bohr y sus colegas ganaban por K.O., una y otra vez. Los experimentos y las demostraciones les dieron la razón, siempre.

Antes de adentrarnos en lo que la mecánica cuántica quiere decirnos, es mejor presentar los hechos. Porque lo que nos quieren decir los experimentos es tan asombrosamente increíble que, si no presentamos los hechos primero, dejaréis de leer esto y me tomaréis por loco.

En el año 1974 fue posible realizar el experimento de la doble rendija de Young, pero electrón a electrón. Ya no fotón a fotón, sino **electrón a electrón** (es decir con materia, no con luz). Los resultados eran idénticos que los que describimos para los fotones.

Mientras no pongamos los medios para averiguar por qué rendija pasa cada electrón, se produce el patrón de interferencia. Pero si ponemos un detector para conocer por qué rendija pasa el electrón, entonces desaparece el efecto de columnas de interferencia en la pared.

Es decir, **la materia** (y no solo la luz), se comporta de esa manera misteriosa.

1.12.1. Empezando a entender la función de onda de Schrödinger

Hemos visto que la ecuación de Schrödinger representa en realidad probabilidades y que la naturaleza tiene un componente esencialmente aleatorio.

Para poder entender cómo funciona la ecuación de onda es útil analizar cómo se comporta un fotón cuando atraviesa un espejo semi reflectante.

En los ejemplos de los experimentos que tratan de explicar el funcionamiento cuántico es habitual trabajar con espejos semi reflectantes.

Este tipo de espejos reflejan el 50% de la luz, mientras que el otro 50% de los fotones los atraviesan.

No existe **ninguna causa natural** que explique por qué **un fotón determinado** logra atravesar el espejo, y por qué otro fotón **idéntico** sí lo atraviesa. Lo que nos dice la mecánica cuántica es que, haciendo el experimento muchas veces, el 50% de ellos lo atravesarán.

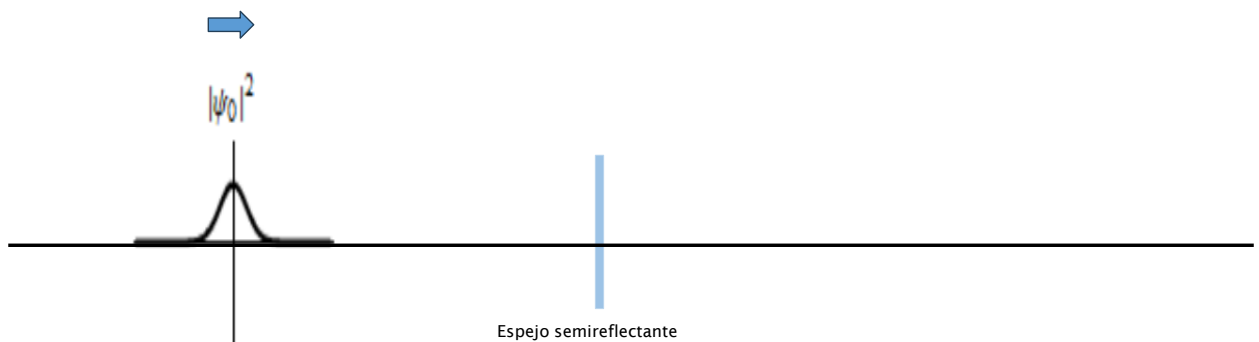
Esto, que puede resultar un poco extraño, es en realidad un fenómeno que vemos todos los días.

El cristal de la ventana de mi salón, por ejemplo, deja atravesar el 85% de los fotones y refleja el 15%. Por esta razón, cuando hay oscuridad fuera, logro ver mi cara reflejada, porque ese 15% que se refleja es suficientemente luminoso como para contrastarse con la imagen que veo del exterior.

Esto permite que vea una doble imagen en el cristal.

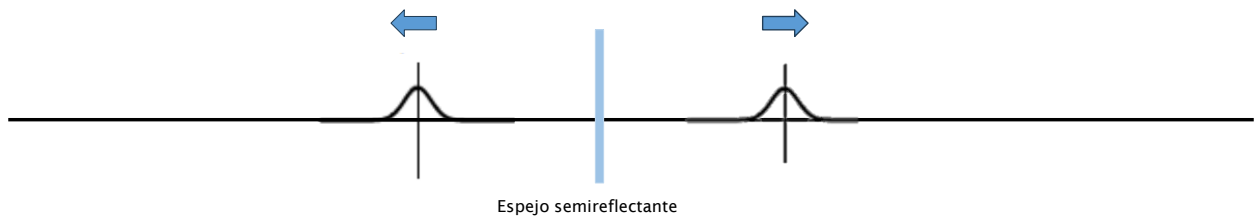


Cuando lanzamos **un solo fotón** contra un espejo semi reflectante, la ecuación de onda puede representarse como una onda que viaja hacia el espejo. La función de onda determina dónde es más probable que encontremos ese fotón.



Cuando la función de onda alcanza el espejo, se desdobra en dos “ondas” más pequeñas.

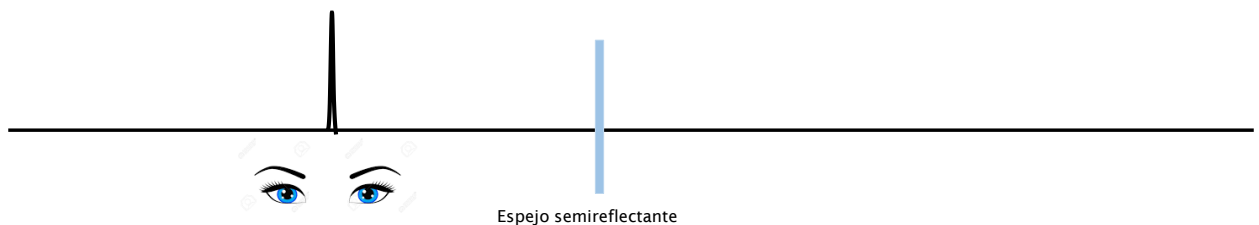
Una de ella (la refractada) continua su camino atravesando el espejo. La reflejada retrocede hacia atrás.



Vemos que **¡la función de onda de un único fotón tiene ahora dos picos!** El fotón lo podemos encontrar, en realidad, en cualquier lugar, pero donde es más probable localizarlo es en cada uno de los dos picos de la función de onda.

En los experimentos que explicamos de la doble rendija, cuando lanzábamos fotón a fotón, **¡lográbamos que estos dos picos de un mismo fotón crearan luego interferencias entre ellos!** Es decir, un fotón estaba creando interferencias consigo mismo. En seguida seguiremos realizando experimentos aún más asombrosos para jugar con esa increíble propiedad.

En el momento en que realicemos la medida, es decir la observación, la función de onda colapsa y el fotón debe decidir su posición (probablemente cerca de uno de los picos). Ahora el fotón se comporta como corpúsculo y no como onda.



El otro pico de la onda de Schrödinger ha desaparecido, porque ahora el 100% de probabilidad de encontrar la partícula está donde la hemos visto. Decimos que “ha colapsado” la onda cuántica.

No te preocupes si no te ha quedado del todo claro en qué consiste la onda de Schrödinger. En el apéndice de este capítulo explico con más detalle cómo funciona la onda, con su video correspondiente.

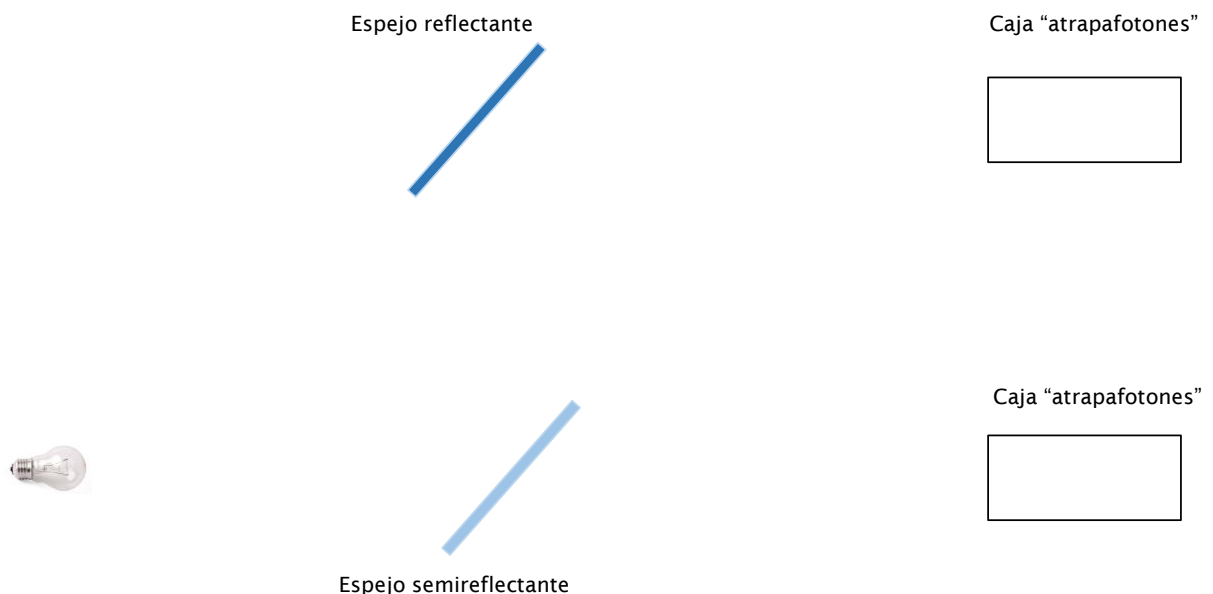
No recomiendo verlo aún, déjalo para el final porque en ese apéndice incluyo experimentos que aún no hemos visto.

1.12.2. Un experimento asombroso

Proponemos ahora el experimento definitivo, que deberá decirnos cuál es el papel que juega el observador consciente en todo esto. Este experimento que comentamos a continuación está algo simplificado con el fin de que sea más didáctico, por eso hablamos de cajas y cosas así, pero en esencia, es exactamente lo que sucede en los laboratorios. Está extraído del magnífico libro “el enigma cuántico” de Rosenblum y Kuttner.

Colocamos un emisor de fotones (una especie de bombilla) y enfrente de ella, un espejo semi reflectante, que tiene la propiedad de dejar pasar el 50% de los fotones y reflejar el otro 50%. El espejo estará colocado en un ángulo de 45° como se representa en la figura⁹.

Encima de él habrá un espejo totalmente reflectante (que refleja el 100% de los fotones). Y al final de la habitación dos cajas “atrapa-fotones”.



Si vamos lanzando los fotones uno a uno, algunos acabarán en la caja de arriba y otros en la caja de abajo.

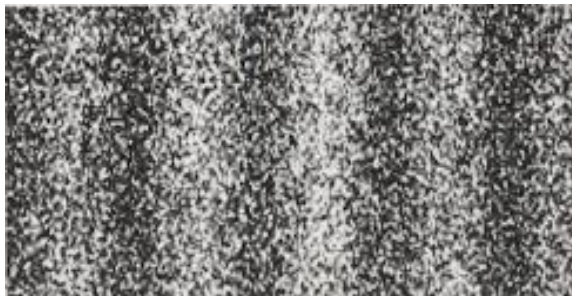
⁹ Un experimento muy similar se podría hacer exactamente igual con electrones. El comportamiento misterioso que vamos a ver aquí en los fotones ocurre exactamente igual en los electrones, en los protones, en los átomos, etc.

Si hacemos el experimento una única vez, sabemos que el fotón está en una de las dos cajas, pero mientras no destapemos la caja, no sabemos en cual. Hasta ahora, todo es lógico.

Ahora nos llevamos las dos cajas a otra habitación. Sabemos que en una de esas está el fotón, pero no sabemos en cual. A continuación, abrimos en las cajas una pequeña abertura, a la vez en ambas, para que el fotón (que está en una de las cajas) se estrelle contra una pantalla fotosensible en el otro extremo de la habitación.



Si lo hacemos una sola vez, veremos un punto en la pantalla. Pero si repetimos todo el procedimiento muchas veces, acabaremos viendo esto. De nuevo el patrón de interferencias.



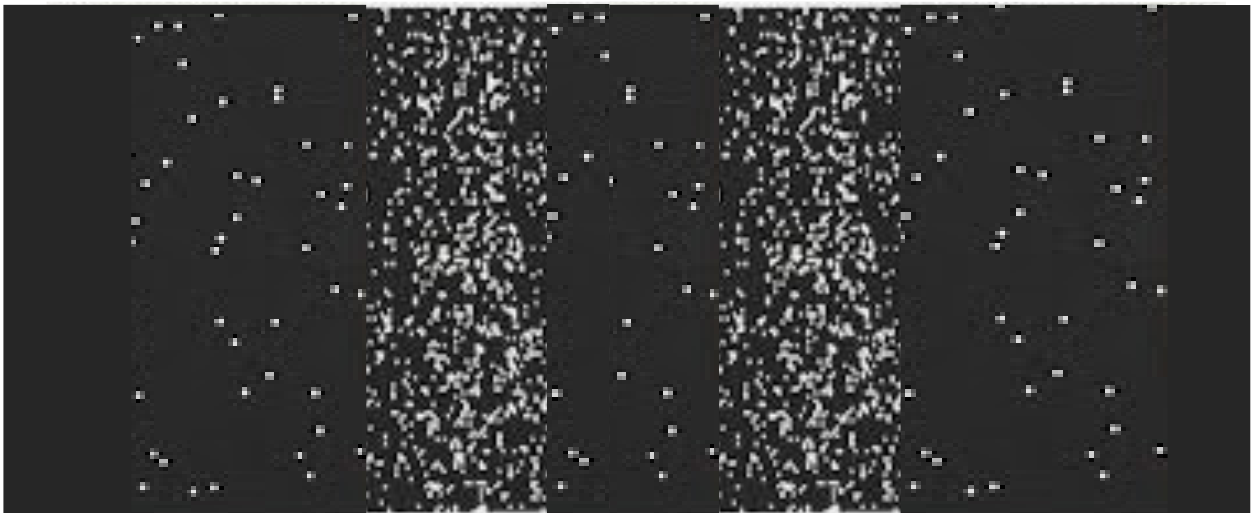
Como cabía esperar, siempre que nadie sepa de cuál de las cajas sale el fotón, el fotón estará, en realidad, en ambas, y por tanto es como si saliera de ambas, y por este motivo se da el patrón de interferencia.

¿Y qué pasa si volvemos a repetir el experimento, pero no abrimos las cajas a la vez? Es una buena idea.

De esta manera podremos saber de dónde sale el fotón exactamente. Si cuando abrimos la caja de arriba aparece un punto en la pantalla es que estaba arriba. Y si no aparece, entonces abriremos la caja de abajo y aparecerá en ese momento el punto en la pantalla (estaba abajo).

Si lo repetimos así muchas veces ¿qué patrón de puntos veremos en la pantalla?

Dado que en este segundo experimento sabemos en todo momento de donde ha salido en realidad el fotón, no se da el fenómeno de interferencia. Al no abrirlas a la vez, cuando abrimos solo una de ellas, estamos forzando a la naturaleza a tomar una decisión de dónde debía colocarse el fotón, y por tanto ya no se puede dar el fenómeno de interferencia, porque el fotón sale ahora de un solo sitio.



Si tenemos conocimiento del lugar que ocupaba el fotón no se da el fenómeno de interferencia. Obtenemos las dos franjas que corresponden a los fotones que han salido de una caja o de la otra.

Esto es realmente increíble. La naturaleza parece comportarse como si realmente tomara una decisión de dónde colocar el fotón, solo cuando observamos. Pero si no observamos, si no hacemos una medición, la naturaleza no lo coloca en un sitio concreto, está en ambos, está en “superposición cuántica”. Esta es exactamente la interpretación que da el Grupo de Copenhague, que son los fundadores de la mecánica cuántica, por muy sorprendente que te parezca.

¿Será que de alguna manera algo hacemos con el fotón durante el experimento y lo estropeamos? En el siguiente experimento vemos que no es así.

Una vuelta de tuerca más al experimento

Vayamos un paso más allá. Ahora vamos a hacer el mismo experimento algo modificado.

Volvemos a lanzar la partícula contra el espejo semi reflectante. Y abriremos la caja de arriba por la tapa superior, solo para asomarnos y ver si está o no está el fotón en esa caja. **Si no encontramos** el fotón en la caja superior, la volvemos a tapar.

Ya sabemos que el fotón está en la otra caja, ¡pero no abriremos la otra caja de momento!

Guardamos **las dos** cajas en nuestro armario, como si fueran un par de zapatos, y marcamos con un rotulador la caja que no contiene al fotón, sabiendo así, a ciencia cierta, cuál es la caja que está vacía y cuál es la que debe contener un fotón dentro.

Recuerda que nadie ha interferido con ese fotón nunca, **porque nunca hemos abierto la caja donde está.**

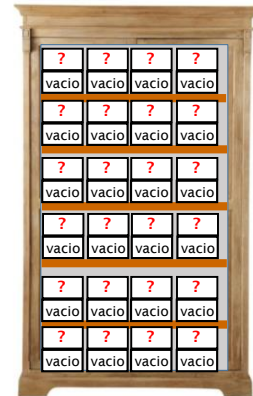


Volvemos a repetir el experimento, y volvemos a abrir la caja superior. Si encontramos el fotón en la caja superior, entonces quemamos las dos cajas y las damos por inservibles.

Lo repetimos así muchísimas veces.

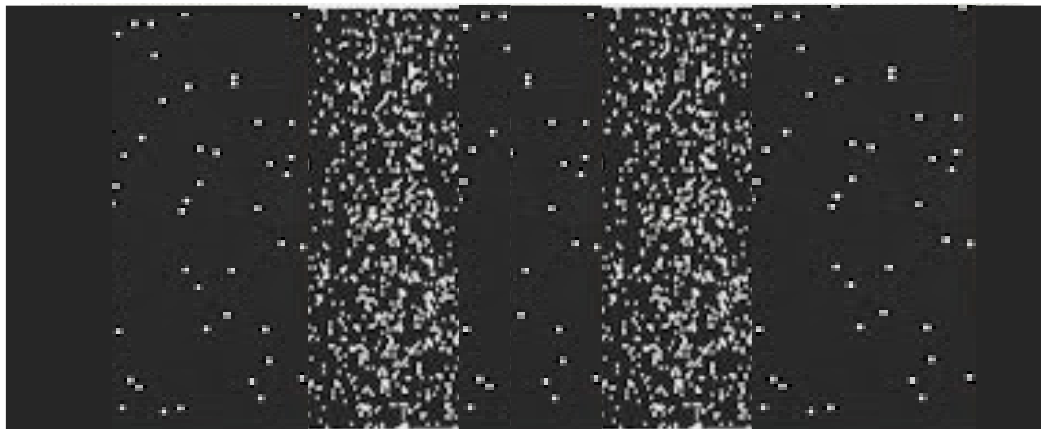
Siempre que NO encontremos el fotón en la caja superior, guardaremos ambas cajas en el armario. Y siempre que SI encontremos el fotón en la caja superior, quemamos las dos cajas.

Al final del día habremos quemado muchos pares de cajas, y tendremos muchos pares de cajas guardadas en el armario.



De todas esas cajas que tenemos guardadas en el armario, tenemos un conocimiento cierto (pero indirecto) de donde está el fotón, porque sabemos en la caja donde NO ESTÁ. Digo “conocimiento indirecto” porque, en realidad, nadie ha visto ese fotón aún en su caja. Nadie ha interactuado con él en absoluto, pero sabemos dónde está porque en la otra caja no está.

Ahora vamos cogiendo cada par de cajas del armario, y abrimos la micro abertura de ambas a la vez para que el fotón se estrelle en la pantalla. Y así hacemos con cada par de cajas ¿Cuál es el resultado que obtenemos en este caso, después de estrellar todos los fotones?



¡No se da la interferencia!

A pesar de que nadie ha interactuado con el fotón. Nadie ha visto donde estaba, solo teníamos un conocimiento indirecto de donde estaba. Pero la naturaleza es sabia, ella sí sabía que la estábamos tratando de engañar. Sabe que tenemos conocimiento de donde está el fotón, aunque sea indirectamente.

En el momento en que abríamos la caja de arriba, la naturaleza tuvo que decidirse por colocar el fotón en una de las dos cajas, (en los casos de los pares del armario, eligió colocar al fotón en la caja de abajo), y por tanto ya no puede haber interferencia, porque hemos forzado a la naturaleza a tomar una decisión de dónde colocar al fotón. La superposición cuántica “colapsa” cuando la observamos, es decir, la naturaleza se decide por una posición concreta. Parece que el comportamiento de la naturaleza varía, ya no tanto en función de las mediciones que hacemos, sino en función de **¡si tenemos o no tenemos información!**

Lo más increíble de todo es que este tipo de experimentos de interferencia se están logrando cada vez con cosas más grandes (átomos, moléculas...) En principio, según los científicos el límite está solo en el presupuesto y en la tecnología, pero los científicos consideran que, con los medios técnicos adecuados, es posible hacerlo con sandías... Es decir, según esta tesis, las sandías estarían en dos sitios a la vez, salvo que nos decidamos a mirarlas, que en ese momento se decidirían por colocarse en uno de los sitios concretos...

¡En 2010 se logró la superposición cuántica de una molécula de 356 átomos! El proyecto Q-Xtreme de la Unión Europea está abordando precisamente esta cuestión y espera realizar experimentos de interferencia con objetos de **tamaño macroscópico**.

Lo que todo esto no está queriendo decir es de locos ¿Qué queremos decir con que “la naturaleza decide dónde colocar el electrón”? ¿Qué es eso de “la naturaleza decide”?

Pero existe otro problema más grave ¿Se “crea” la realidad al observarla yo?

Desde luego, una vez que hacemos una observación, y “colapsa” la onda cuántica, la realidad será así para todos, no solo para mí, sino también para todas las personas, y para todo el universo. Al mirar nosotros en la caja, el fotón tuvo que decidirse por una de las dos. Pero una vez que ya está en una de las cajas, así será para todas las demás personas que miren después en la caja.

Y ante este galimatías, la ciencia, simplemente, se pone de lado. Las fórmulas **funcionan** y sirven para diseñar tecnología. Lo que quieran decir esas fórmulas sobre la esencia de la naturaleza, o lo que quieran representar, ha dejado de ser asunto suyo, el hecho es que “la cosa funciona”.

Indicamos a continuación algunas frases ilustrativas del Grupo de Copenhague, de lo que la mecánica cuántica está queriendo decirnos:

*“Es un error pensar que la tarea de los físicos consiste en descubrir cómo **es** la naturaleza”. El objetivo de la ciencia sería desvelar las leyes matemáticas que parecen gobernarla. “Realidad es una palabra que hay que aprender a usar correctamente” (Bohr)*

“Si la mecánica cuántica no le deja a uno perplejo, es que no la ha entendido” (Bohr).

“Una observación produce la realidad observada” (Bohr). Es decir, no solo la perturba, sino que **la produce**

*“Tomemos electrones, fotones o **piedras**, siempre iremos a parar a estas dos características: lo corpuscular y lo ondulatorio” (Heissenberg).* Es decir, **todo** es mecano cuántico.

Es increíble lo que dice Heissenberg. Ya sean electrones **o piedras**, la realidad se comporta de manera cuántica.

Contra este tipo de aseveraciones, Einstein se revelaba con frases ingeniosas:

“Dios no juega a los dados” (Einstein).

“Me gusta pensar que la luna está ahí, aunque no la esté mirando” (Einstein).

“La mecánica cuántica no es una teoría completa. Debe haber características ocultas que desconocemos, que son responsables de que lo percibamos como aleatorio, y como fantasmal” (Einstein).

La consigna actual de la mayoría de los científicos de mecánica cuántica es “calla y calcula”. La cosa funciona, y nos permite construir resonancias magnéticas, relojes atómicos, ordenadores, etc.

En efecto, los colegas y seguidores de Bohr (los científicos actuales) se conforman con que “la cosa funcione”, porque nos permite fabricar tecnología. Han dejado de plantearse la extrañeza que todo esto supone, diríamos que casi “ocultan” el misterio. Consideran que la ciencia no debe explicar la naturaleza o la realidad, sino solo buscar patrones matemáticos que funcionen, para que los ingenieros puedan luego diseñar aparatos. Contra esto Schrödinger se revelaba:

“La física no consiste solo en investigación atómica, la ciencia no cosiste solo en física, y la vida no consiste solo en ciencia. El objetivo de la investigación atómica es encajar nuestro conocimiento empírico (...), y si eso no es posible, entonces la ciencia fracasa totalmente y uno no sabe a qué propósito sirve realmente.” (Schrödinger).

Pero Heissenberg replicaba:

*“Todos los que se oponen a la interpretación de Copenhague están de acuerdo en un punto. Según su opinión sería deseable volver al concepto de realidad de la física clásica o, por utilizar un término más filosófico, a la ontología del **materialismo**. Preferirían volver a **la idea de un mundo real objetivo** y que las partes más pequeñas existieran objetivamente de la misma manera que existían los árboles y las piedras, con independencia de si son observables o no”* (Heissenberg).

En el discurso de aceptación de su Premio Nobel en 1954, Max Born recordó lo profundamente divididos que estaban los científicos, formando dos bandos:

“...Cuando digo que los físicos aceptaban la manera de pensar que en aquella época habían desarrollado, no estoy siendo del todo correcto. Entre los investigadores que contribuyeron de manera destacada a la construcción de la mecánica cuántica hubo algunas excepciones notabilísimas. El mismo Max Planck estuvo entre los escépticos hasta su muerte y Albert Einstein, Louis-Victor de Broglie y Erwin Schrödinger no dejaron de subrayar los aspectos insatisfactorios de la teoría...” (Max Born).

Como vemos en lo que sigue, la batalla continuará entre ambos bandos. Y será feroz.

1.13 El gato de Schrödinger. 1935

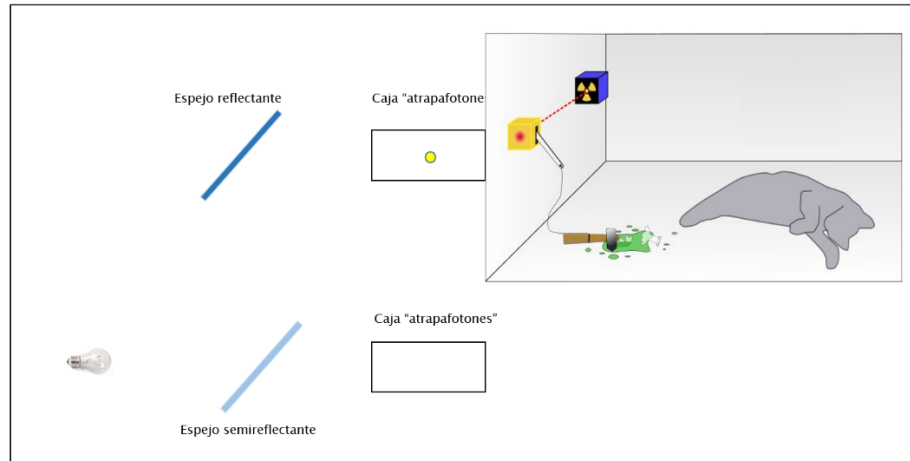
Desde que en 1925 Schrödinger había publicado su famosa ecuación, y tras las interpretaciones propuestas por el Grupo de Copenhague (Bohr, Born y Heissenberg), la guerra de titanes continuaba. Schrödinger, Einstein y De Broglie se esmeraban por salvar la lógica y el sentido común, en la naturaleza.

El problema era que, con cada esfuerzo titánico que hacían Schrödinger, Einstein y De Broglie por intentar echar abajo la teoría, en realidad ¡la fortalecían! Tratando de ridiculizarla ¡la cimentaban aún mejor! porque el otro bando encontraba soluciones que resultaban luego confirmadas por los experimentos.

En medio de esta batalla, Schrödinger propone un experimento imaginario que creía podía ayudar a entender, y él creyó que demostraba, que lo que el bando rival estaba proponiendo era un absurdo. Que todo eso de la aleatoriedad y las superposiciones cuánticas era un sinsentido.

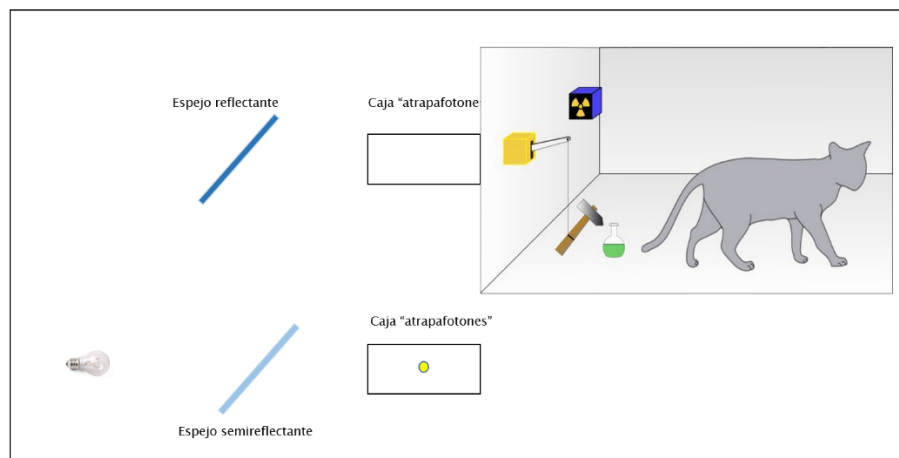
El imagina una habitación cerrada, totalmente incomunicada, con un gato dentro. Imagina dentro de la habitación un sistema similar al que describimos antes, con una fuente emisora de un fotón, y con un espejo semitransparente que desvía al fotón con un 50% de probabilidades.

Si el fotón llega a la caja de arriba, se abre un frasco de veneno que mata al gato.



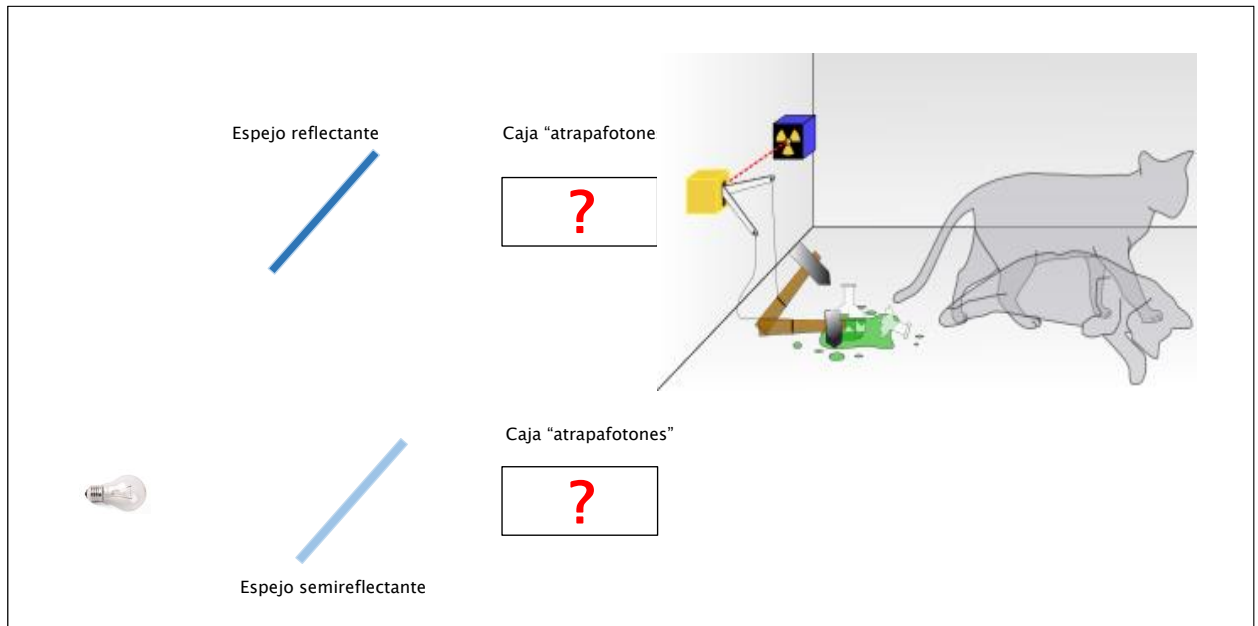
El fotón alcanzó la caja de arriba que puso en marcha el mecanismo que mata al gato.

Si el fotón va a la caja de abajo el gato sigue vivo.



El fotón fue a la caja de abajo. No puso en marcha el mecanismo. El gato sigue vivo.

Schrödinger quiso poner así en un aprieto a la interpretación de Copenhague. Según esta interpretación, mientras nadie entre en el recinto estanco que envuelve todo el sistema, y mientras nadie haya querido observar o medir dónde acabó el fotón, el fotón se mantendría en superposición cuántica, existiendo en ambas cajas. Y por tanto el gato estaría vivo, y muerto a la vez, ambas realidades en superposición cuántica.



Si nadie lo mide, el gato está vivo y muerto a la vez, ambas realidades en superposición cuántica

Con este experimento mental Schrödinger quiso demostrar que la interpretación de Copenhague no tenía sentido, su intención era ridiculizarla. Sin embargo, en absoluto logró su objetivo.

Pero vayamos más allá. Si dejamos pasar 24 horas desde el lanzamiento del fotón, y nadie entra en la habitación en esas horas, cuando entremos, nos encontraremos dos posibles escenarios:

- Un gato muerto que huele ya mal por llevar ya 24 horas en descomposición
- O bien un gato vivo, pero realmente furioso, con mucha hambre, sed y desesperación, por llevar ya 24 horas encerrado.

Es decir, según la mecánica cuántica, justo cuando entramos en la habitación, y vemos el resultado del experimento, ¡desencadenamos en ese momento todo el evento de sucesos del pasado! Si el gato está vivo, “producimos” en ese momento toda su historia de las últimas 24 horas. Si está muerto, lo mismo. Se que suena de locos, pero esa es la interpretación de Copenhague.

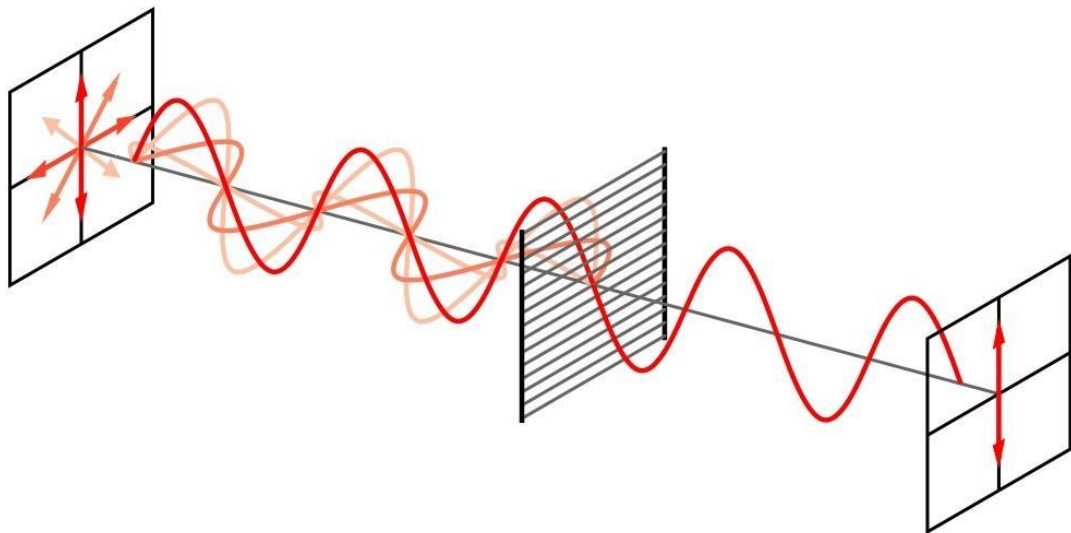
Por último, decir que, en este experimento, el resultado de gato vivo o gato muerto es totalmente aleatorio. Que el resultado se decante hacia un lado o hacia el otro **no depende de nada natural existente**. Es aleatoriedad esencial. Veremos más adelante por qué ha quedado descartada definitivamente la hipótesis de las “variables ocultas” que defendía Einstein.

Pero ¿por qué el ser humano con su observación tiene el poder de “colapsar” el fenómeno cuántico? ¿solo el ser humano? ¿puede hacerlo una cámara de video? ¿puede hacerlo el gato? Si el gato pudiera colapsar la onda con su observación, entonces el experimento mental que Schrödinger propone se resolvería fácilmente, no sería un experimento tan notable y famoso. Pero no es tan fácil. Estamos entrando en temas realmente espinosos, pero no nos vamos a detener, nos lleve a dónde nos lleve... Vayamos al fondo del meollo, porque la batalla entre los dos bandos continua.

1.14 El experimento EPR. Un gran desafío a Bohr

En el año 1935 el bando de Einstein puso en marcha su gran ofensiva. Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) prepararon minuciosamente un experimento mental que debía dar al traste, *definitivamente*, con las interpretaciones absurdas de la mecánica cuántica.

Tras mucho análisis, estos tres grandes científicos propusieron el siguiente experimento mental. Simplificaremos el experimento con luz polarizada, un tipo onda de luz que únicamente vibra en una única dirección. Es muy fácil conseguir luz polarizada, basta con hacerla pasar por un filtro especial, y conseguimos que la luz solo vibre en una única dirección.



Podemos ver aquí una fuente que envía luz no polarizada (que vibra en todas direcciones), pero al pasar por el filtro, solo vibra en dirección vertical.

Con un cristal de calcita somos capaces de producir dos fotones que son lanzados en sentidos opuestos y que tendrán siempre una dirección de polarización perpendicular el uno del otro (están entrelazados). Si el que sale por la izquierda tiene luz polarizada vertical, el de la derecha la tendrá horizontal. Y viceversa.

Productor de fotones de estados gemelos



Medidor de luz
polarizada

En este gráfico esquemático podemos ver un círculo azul que representa el emisor de fotones entrelazados. El fotón de la derecha sale disparado hacia la derecha, con una dirección de polarización que no conocemos. Mientras que el de la izquierda sale proyectado hacia el lado contrario con una dirección de polarización que debe ser perpendicular al del otro fotón. A la derecha del todo tenemos un medidor de luz polarizada

Según la mecánica cuántica, cuando los fotones salen del emisor, si nadie realiza una observación, ambos están en superposición cuántica (ambos tienen polarización vertical y horizontal a la vez). Pero, además, de alguna manera, están correlacionados (en mecánica cuántica se dice “entrelazados”), porque si uno salió con una vibración vertical, el otro tuvo que salir con vibración horizontal.

¿Y eso qué importancia tiene?

Si en uno de los lados de la habitación tenemos un medidor de luz polarizada, al medir ese fotón y su dirección de polarización, y si la interpretación de Copenhague es cierta, podremos colapsar la superposición cuántica del fotón que salió disparado por la derecha y “provocar” que se decante, bien por polarización horizontal, bien por polarización vertical.

Einstein y sus colegas planteaban que, según la mecánica cuántica, **justo en el instante** en que realizamos la observación del fotón de la derecha y comprobamos que lleva una polarización vertical, el otro fotón también “colapsa” y modificaría de manera instantánea su estado y dejaría su superposición cuántica para pasar a tener una polarización horizontal.

Porque están entrelazados. Y no importaría como de lejos estuvieran en ese momento los fotones, el efecto en el otro sería instantáneo.

Esto, según Einstein, violaría el principio de la relatividad, que prohíbe interacciones más rápidas que la velocidad de la luz. Con este argumento creían desmontar el edificio interpretativo que Copenhague había dado a la mecánica cuántica.

Bohr lo recibe al principio como un gran reto, una gran estocada, pero finalmente aceptó que, en efecto, debería producirse así, como decían ellos, pero no vio ningún problema. Aceptaba de buen grado que, en efecto, se producía una influencia **instantánea** (infinitamente rápida). Pero se esforzó en demostrar que sería imposible fabricar ningún sistema que fuera capaz de enviar ningún tipo de información más rápido que la luz aprovechando estas propiedades. De modo que la batalla quedó en empate técnico.

Bohr diría que La observación del fotón de la derecha ejerce una influencia instantánea en el fotón de la izquierda. Aunque se encuentre a tres años luz de distancia.

Einstein, tratando de ridiculizar la propuesta de su oponente decía que él no creía en “*acciones fantasmales a distancia*”.

Con el tiempo, experimentos en muchos laboratorios de todo el mundo han ido demostrando que, en efecto, el experimento EPR sucede tal y como la mecánica cuántica predecía. Se ha demostrado por tanto que existen esas “influencias fantasmales”, esas influencias instantáneas y esos “entrelazamientos” que Einstein trató de ridiculizar. Por tanto, un experimento que Einstein había diseñado para refutar estas interpretaciones “fantasmales” sirvió para confirmarlas.

Sin embargo, es perfectamente entendible la extrañeza y oposición que mostraba Einstein. Nicolas Gisin expresa muy bien la sorpresa ante este fenómeno:

“De alguna manera, las correlaciones no-locales ¡parecen surgir del exterior del espacio-tiempo! ¿Quién lleva la contabilidad de quién está entrelazado con quién? ¿Dónde está almacenada la información de los lugares en que un azar no local puede manifestarse? ¿Hay acaso “ángeles” que dominan un enorme espacio matemático (...) que contabilizan todo ello? Pese a la seriedad de esta pregunta infantil, todavía no se le ha prestado mucha atención” (Nicolas Gisin).

Copenhague ha ganado siempre por Knock out a Einstein y sus colegas, y se ha ido fortaleciendo con sus ataques.

En el siguiente apartado vemos el “toque de gracia” a una naturaleza “lógica y con sentido común”.

1.15 La desigualdad de Bell. 1964. El descubrimiento más importante de la historia de la humanidad

Desde la propuesta EPR de 1935, y durante casi treinta años, la interpretación de la mecánica cuántica quedó bastante dividida, puesto que, aunque el Grupo de Copenhague (Bohr y compañía) ganaba siempre, sus propuestas eran tan “alocadas” que costaba muchísimo creerlas.

Y, en cualquier caso, en el experimento EPR con dos fotones entrelazados que salen cada uno por su lado, ¿cómo podía demostrarse lo que proponía el Grupo de Copenhague? es decir ¿cómo podría demostrarse que **justo en el momento** en que mido uno de los fotones es justo cuando el otro fotón cambia su estado de manera inmediata y “con una influencia fantasmal”?

No había manera de probarlo en esos momentos.

Hasta que un buen día de 1964, Bell preparó el que después sería el toque de gracia a Einstein, con un teorema que muchos científicos consideran el “descubrimiento científico más importante de la historia de la humanidad” por sus increíbles implicaciones.

Como hemos dicho, en realidad, a los científicos “tecnológicos” no les importaban gran cosa estas disquisiciones, puesto que era perfectamente posible manejar la mecánica cuántica sin necesidad de pronunciarse en favor del bando de Einstein o el de Bohr. La disputa era, según ellos, solo metafísica o filosófica, es decir, la disputa a su juicio no tenía utilidad práctica.

Pero Bell fue un científico inusual, porque no estaba tan interesado por la eficacia de los experimentos, ni en sus efectos sobre posibles tecnologías futuras. Su principal interés estaba en **las consecuencias filosóficas** que se podían extraer del conocimiento científico. Era muy consciente de que los hechos experimentales no se podían refutar, porque una y otra vez habían resultado tal y como la teoría cuántica de Bohr y sus seguidores predecía. Pero ¿qué nos estaba queriendo decir la naturaleza realmente con esos experimentos? **¿qué había ahí detrás en esencia?**

Si realmente se daban esas influencias fantasmales ¿cómo era posible demostrarlo? ¿cómo podemos demostrar que cuando miramos uno de los fotones entrelazados, el otro fotón deja de estar en superposición inmediatamente, y comienza a tener las mismas características que ha mostrado su gemelo en la medición?

Bell lo logró. Consiguió dar un rodeo para pillar a la naturaleza infraganti, con una demostración del tipo “*reducción al absurdo*”.

Básicamente Bell lo que hizo es, en principio, dar por hecho que los fotones ya salían desde el inicio con una orientación de polarización concreta y determinada (sin superposición ni cosas raras), y por supuesto, da por hecho como punto de partida que los fotones existen cuando no los observamos.

Técnicamente se dice que Bell establece como hipótesis previas que el universo cumple estas dos características:

- Localidad (no hay influencias fantasmales).
- Realidad (los fotones existen cuando no los miramos).

Ambas premisas parecen bastante razonables, la verdad.

Es decir, lo que él establece como hipótesis es que si, por ejemplo, producimos fotones **gemelos**, si el de la derecha sale con polarización vertical, el de la izquierda sale también con polarización vertical desde el principio. Ya salen así, con independencia de si los observamos o no. Y desde luego, sin superposiciones cuánticas, ni entrelazamientos, ni influencias fantasmales instantáneas.

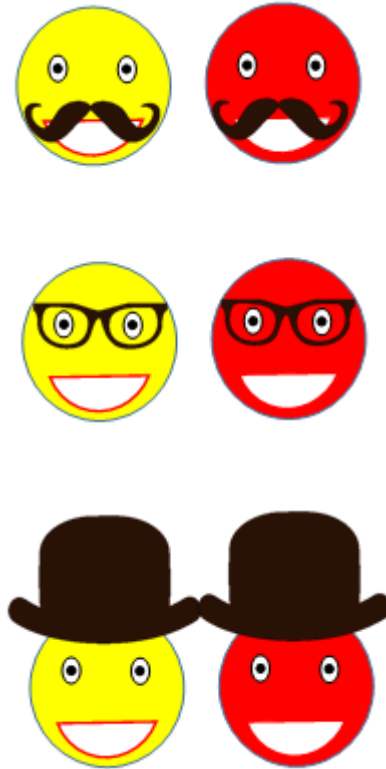
Y también presupone, por supuesto, que los fotones existen, aunque nadie los observe...

En este experimento, muy parecido al EPR, enviamos dos fotones, uno hacia la derecha y otro hacia la izquierda. Pero esta vez, en lugar de enviarlos distintos, los enviamos idénticos. Imaginemos ahora que en esos fotones idénticos queremos medir una propiedad que puede tener tres estados distintos (a / b / c). Solo una de las tres opciones puede darse, siempre una de ellas, y solo una.

Por la manera en que producimos esos fotones, dado que son idénticos, siempre encontraremos **en ambos la misma característica**.

Para hacerlo más claro, supongamos que el fotón puede llevar sombrero, bigote o gafas. Si el de la derecha lleva gafas, también lo llevará el otro. Si lleva bigote, también lo llevará el otro. Y si lleva sombrero también lo llevará el otro.

A priori sabemos que salen disparados idénticos, uno hacia la derecha, y otro hacia la izquierda. Pero no sabemos si llevan sombrero, gafas, o bigote hasta no observarlos. De manera que estas son las distintas opciones que nos podemos encontrar:



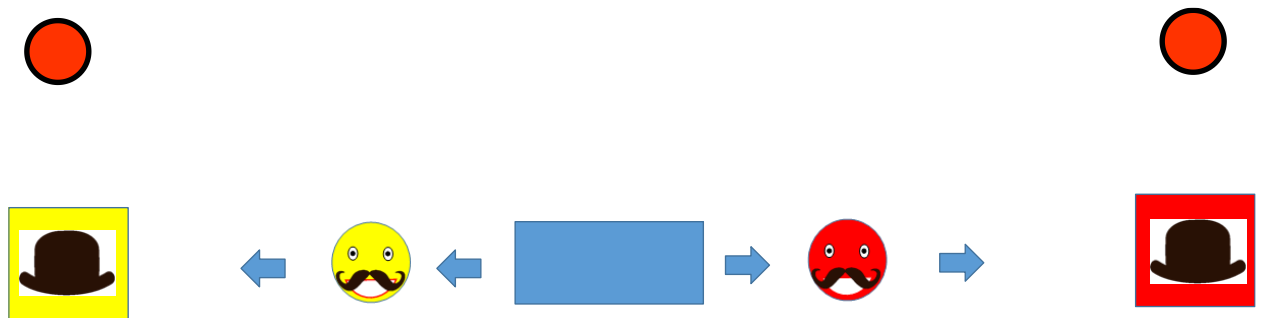
Cada uno de los fotones va dirigido a una caja. El de la derecha va hacia una caja que tenemos a la derecha, y el de la izquierda va a una caja que tenemos a la izquierda. En cada caja ponemos aleatoriamente una de esas tres prendas.

Si la prenda que hay en la caja coincide con la prenda que lleva el fotón, se enciende una luz verde en la caja. Si no coincide se enciende una luz roja.

Durante un día entero hemos estado lanzando fotones gemelos en ambas direcciones. Y en todos los casos hemos puesto, cada vez, en la caja de la derecha la misma prenda que en la caja de la izquierda.

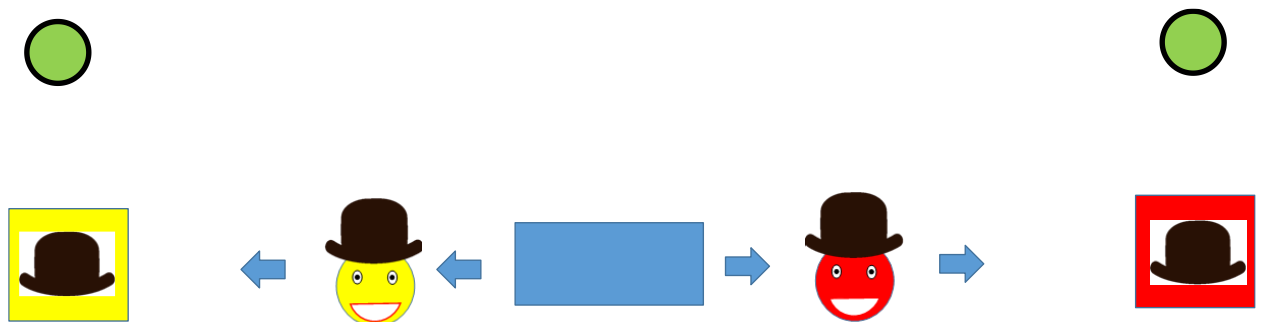
Representamos a continuación dos posibles ejemplos que podrían pasar, para entenderlo más fácilmente.

En un primer caso, cada uno de los fotones lleva bigote, y en las cajas hay un sombrero, y por supuesto la luz en ambas cajas será roja.



Si la prenda que hay en la caja no coincide con la que lleva el fotón, se enciende una luz roja

En este segundo ejemplo las luces son verdes porque la prenda de la caja coincide con la prenda que llevan los fotones:



Si la prenda que hay en la caja coincide con la que lleva el fotón, se enciende una luz verde

Habrán un científico en la caja de la derecha y otro científico en la caja de la izquierda que van contabilizando el número de luces rojas y luces verdes de su caja, a lo largo de todo el día. Evidentemente, dado que los fotones son gemelos, y dado que siempre hemos puesto la misma prenda a la izquierda que a la derecha, **siempre coincidirán las luces en la caja de la derecha y la de la izquierda** y, por supuesto, los científicos contabilizarán el mismo número de luces rojas y verdes en la caja de la derecha que en la caja de la izquierda. En concreto, si repetimos el experimento muchísimas veces, 1/3 de las veces será verde, y 2/3 de las veces serán rojas. En ambas cajas exactamente lo mismo, cada vez que lo hagamos. Hasta aquí todo es lógico y evidente.

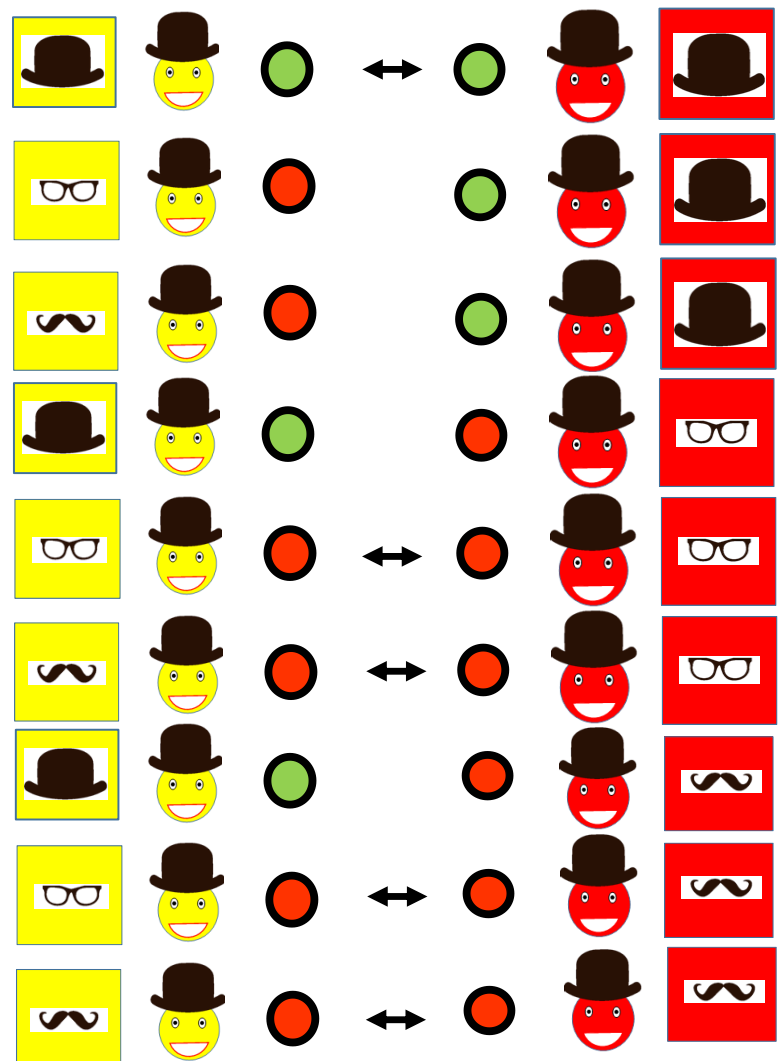
Ahora vamos a complicar un poco el experimento. Antes de cada lanzamiento, cada científico coloca en su caja la prenda de manera aleatoria, sin decirle al otro científico que prenda es.

Evidentemente, en este caso, si repetimos muchas veces el experimento, también ocurre que, en ambas cajas, 1/3 de las veces sale la luz verde, y 2/3 de las veces sale la luz roja. Pero en este caso no se cumplirá probablemente el número exacto en ambas cajas. Ahora bien, si lo hacemos muchas veces, la proporción en ambas cajas será muy muy próxima a 1/3- 2/3.

Pero la pregunta que a Bell le interesa es ¿cuántas veces **coincidirá** el color de la caja de la derecha con el color de la caja de la izquierda?

En el siguiente gráfico representamos las distintas opciones que podemos encontrarnos cuando los fotones llevan sombrero, en función de las distintas prendas que pudiera haber en la caja. Es fácil ver en el siguiente gráfico que 5 de cada 9 veces que hagamos el experimento coincidirán las luces.

5/9 de las veces
coinciden las
luces



Si hacemos lo mismo cuando el fotón lleva bigote, la proporción sería igual. Y si hacemos lo mismo cuando el fotón lleva gafas, será igual. Es decir, en este nuevo experimento, si lo repetimos muchas veces a lo largo de todo el día, comprobaremos que 5 de cada 9 veces las luces de ambas cajas coincidirán.

Si esa estadística no se cumpliera, algo muy raro estaría pasando. En efecto, si después de repetir muchísimas veces el experimento la estadística no se cumpliera, sería porque las hipótesis que habíamos planteado al inicio no se cumplen:

- O bien los fotones en realidad no existen hasta que los observas
- O bien, cuando observas uno de los fotones, afectas de manera inmediata al otro fotón que está entrelazado.

En concreto, la teoría cuántica (que por supuesto considera que existen influencias fantasmales) predeciría que las veces en que las luces coinciden es exactamente el 50%, y no 5/9. El experimento se realiza con propiedades cuánticas de los fotones, pero es lo mismo que hablemos de prendas que de otras características.

Bell propuso que, cuando fuera posible, deberían hacerse estos experimentos en laboratorio. Los experimentos lograron hacerse, y las proporciones que resultaron no fueron las que el sentido común nos dictaba (5/9) sino **la proporción predicha por la teoría cuántica (50%-50%)**.

Los experimentos demostraron de manera irrefutable, que:

- O bien las “influencias fantasmales” que proponía Einstein como ridículas, **Sí existen**. Es decir, que cualesquiera objetos que hayan interactuado alguna vez en el pasado, continúan influyéndose mutuamente de manera instantánea en el futuro, no importa cuán alejados estén. Lo que ocurre en el otro extremo de la galaxia influye de manera instantánea en lo que sucede en mi casa.
- O bien que los fotones, electrones (y materia en general) no “existen” hasta que los observas
- O lo uno, o lo otro, o ambas cosas...

Los experimentos de Bell que se hicieron entre 1972 y 1998, demostraron de manera irrefutable, que cualquier explicación que queramos darle a la naturaleza será “rara”, no obedece al sentido común. Que cualquier explicación que le demos tendrá que cumplir, o bien que la realidad no existe cuando no se observa, o bien que existen influencias fantasmales instantáneas. Demuestra que la naturaleza es rara, demuestra que Einstein y Schrödinger no tenían razón.

Porque cualquier teoría que se plantee en el futuro, **o bien debe aceptar las “influencias fantasmales” inmediatas a distancia, o bien debe aceptar que no hay una realidad objetiva ahí fuera**, o bien ambas cosas.

Los experimentos realizados con fotones entrelazados en 1972, 1982 y 1998 violaron las desigualdades de Bell, y han supuesto el premio nobel para Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger en 2022. Terminó así definitivamente el legado de la paradoja EPR. La Teoría Cuántica sigue viva. Einstein, Schrödinger y De Broglie estaban equivocados.

Hagamos una breve recapitulación. Recordemos que las interpretaciones de la mecánica cuántica de Bohr y los suyos habían estado poniendo en entredicho dos premisas que nuestro sentido común siempre había dado por hecho:

- Siempre habíamos pensado que la realidad estaba ahí fuera, y que tenía existencia autónoma, independiente del observador.
- Y jamás habíamos aceptado que unas cosas pudieran influir de manera instantánea en otras muy alejadas, como si fuera “magia de vudú”.

Bell parte de esas dos premisas de sentido común (la realidad existe ahí fuera de manera autónoma y no hay influencias fantasmales instantáneas entre unas cosas y otras), pero con su tesis y los posteriores experimentos se llega a la conclusión de que **¡al menos una de las dos es falsa!**¹⁰

O bien no existe una realidad ahí fuera, o bien, si existe, hay influencias fantasmales instantáneas a millones de años luz de distancia.

Ya nunca será posible una descripción “razonable” de nuestro mundo. Nunca será posible una descripción con separabilidad y realidad.

Y no solo eso. Bell y los experimentos posteriores demuestran que ninguna supuesta existencia de variables ocultas podría nunca explicar los experimentos cuánticos, a no ser que aceptemos que estas supuestas variables ocultas son “no locales”, es decir, que son variables con capacidad para tener “influencias fantasmales inmediatas” en otros lados del universo.

¹⁰ Henry Stapp ha llegado más lejos y ha demostrado que, ciertamente, nuestro mundo carece de separabilidad (las influencias fantasmales existen, sí o sí), pero queda abierta la cuestión de la realidad.

Desde EPR (1935), y hasta la llegada de Bell (1964), aún podíamos creer que existían las causas ocultas y desconocidas que buscaba Einstein desesperadamente, y que tarde o temprano las descubriríamos, y darían explicación al galimatías cuántico. Pero con Bell se viene abajo toda esperanza. La naturaleza NO es como el sentido común nos dicta.

Lo interesante del planteamiento de Bell es que lo diseñó de tal manera que era posible demostrarlo experimentalmente. Y los experimentos volvieron a dar la razón al bando de Bohr.

Los experimentos modernos han demostrado las “influencias fantasmales” instantáneas en extensiones de más de cien kilómetros. Por supuesto, la mecánica cuántica predice que este tipo de influencias abarcan al universo entero. Por tanto, lo que sucede en la Galaxia Andrómeda podría desencadenar que el gato de Schrödinger muera en el experimento...¹¹

Para resumir todo lo explicado hasta ahora realizamos un breve resumen de las tesis de Copenhague en el siguiente apartado.

1.16 Las tesis de Copenhague. El actual consenso interpretativo

Los experimentos no nos dan alternativa posible. Las objeciones que Einstein y sus colegas hacían para tratar de poner a salvo una naturaleza que se comportara con “sentido común” fueron siempre desmanteladas¹².

Resumimos a continuación las tesis de Copenhague (Bohr) que son las que actualmente representan el consenso científico más amplio respecto a cómo debemos interpretar la mecánica cuántica:

- No es posible conocer el estado presente de las cosas. El principio de incertidumbre no permite conocer cómo están, la velocidad que tienen y dónde están las partículas. No es un problema de que no sepamos como hacerlo, es un problema de que todas las variables “no existen” a la vez. Al **desconocer el presente**, el futuro es siempre incierto y totalmente impredecible. El determinismo queda para siempre sepultado.

¹¹ Para una mayor comprensión recomiendo esta explicación: <https://eltamiz.com/2010/10/27/cuantica-sin-formulas-el-teorema-de-bell/>

¹² “La creencia de un mundo exterior independiente de los objetos percibidos está en la base de todas las ciencias de la naturaleza” (La influencia de Maxwell en el desarrollo de la concepción de lo físico-real, Einstein)

- Las partículas que conforman la materia se comportan de manera totalmente aleatoria. No existe una causa que determine la posición en la que las encontramos, solo **aleatoriedad**. Esta aleatoriedad no es debida a nuestra falta de conocimiento (como puede ocurrir cuando lanzamos una moneda y no sabemos si saldrá cara o cruz), sino que es algo esencial e inherente a la naturaleza de las partículas elementales. **No existe una causa natural** que defina por qué la partícula aparece en un sitio o en otro. **Esta es otra de las razones por las que el determinismo queda para siempre sepultado.**
- La observación **“produce” la realidad**. Antes de la observación, la partícula no tiene una posición real definida, no existe en un lugar concreto. Solo se decide por una posición en el momento en que se realiza una observación.
- Cuando se realiza la observación, no solo se “produce” la realidad del presente, sino también se producen en ese instante **toda la cadena de sucesos del pasado** que dan lugar a la situación presente.
- **No tiene sentido hablar de una realidad “ahí fuera”**. De eso no se ocupa la física, ni debe ocuparse, porque no le aporta nada, y además no sabría responder a esa pregunta. Pero desde luego las tesis de Bell parecen poner en entredicho que realmente exista ahí fuera una “realidad”.
- Las partículas que alguna vez interactuaron entre ellas en el pasado, quedan **entrelazadas para siempre**, y se **influyen** entre ellas de manera **inmediata** e instantánea, por muy separadas que se encuentren.

Nos adentramos ahora, en el siguiente capítulo, en el mayor de los misterios. El que ha sido siempre el mayor misterio para el hombre. Hablaremos del hombre y la realidad.

1.17 El observador consciente. El problema de la medida. Von Neumann.

Estoy seguro de que a estas alturas sigues arrastrando una duda que no ha quedado respondida. Cuando decimos que una observación “produce” la realidad, y “colapsa” la superposición cuántica ¿qué entendemos por “observación”? ¿el gato cuando mira puede producir el colapso de la superposición cuántica? ¿y una cámara de video que está grabando puede hacerlo? Esta importantísima cuestión se ha llamado **“El problema de la medida”**. Os animo a que investiguéis sobre este importantísimo problema filosófico.

Cuando Bohr y los científicos del Grupo de Copenhague insistían en que la observación “produce” la realidad, no dejaban claro si “la observación” debía ser realizada por un observador consciente, o si pudiera ser por un aparato.

Pero en 1932 Von Neumann dejó claro que el encuentro final de la mecánica cuántica con el **observador consciente** es inevitable. Propuso como argumento lo que, desde entonces, se conoce como la “cadena de Von Neumann”. En realidad, esta cadena es una especie de juego de muñecas rusas (la muñeca pequeña entra en la que es un poco más grande, y ésta en la siguiente, y así sucesivamente).



Imaginemos el escenario del experimento del gato de Schrödinger, e imaginemos una cámara de video dentro de la habitación. Como hemos dicho, el fotón está en superposición y por tanto se dan los dos escenarios a la vez (el fotón está en una caja y en la otra). El detector fotosensible está constituido por partículas elementales que interactúan con el fotón y, están también en superposición (detecta y no detecta el fotón, ambos estados en superposición). Y el frasco con veneno, por tanto, estará también en superposición (entero y roto a la vez). Y la cámara está también en superposición (está grabando al frasco entero y el gato vivo, y también al frasco roto y al gato asfixiándose). La pantalla del cuadro de control de fuera de la habitación, que reproduce la escena grabada por la cámara, está también en superposición cuántica. Y el ojo del observador sentado frente a la pantalla está también en superposición cuántica y... todo está en superposición. **No hay nada que interrumpa esa cadena.**

Toda la cadena está en superposición cuántica y, según demuestra Von Neumann, así seguirá hasta que llegamos a la consciencia. Cuando un observador consciente echa una mirada y **toma consciencia de lo que ve**, consigue información consciente, y colapsa entonces toda la cadena de elementos (el fotón, el frasco, el gato, la cámara, la pantalla, el ojo, etc.) y provoca una de las dos posibilidades, “produciendo” la realidad presente. Y no solo produciría la realidad presente (el gato está vivo), sino toda la sucesión de hechos del pasado (el gato lleva 8 horas sin comer y tiene hambre).

Esta idea fue apoyada por el propio Max Planck, quien afirmó que la consciencia era la base fundamental de la que deriva todo.

*“La ciencia no puede resolver el problema fundamental último de la naturaleza. Y esto es porque, al fin y al cabo, **nosotros mismos** somos parte de ese misterio que se debe resolver”* Max Planck.

Parece que la única forma de romper la Cadena de Von Neumann es introduciendo una entidad disímil (una entidad extraña en la naturaleza), una consciencia. El problema de la medida es, por tanto, el problema de la consciencia.

Pero, según esta interpretación, ¿cada cuál ve la realidad según su propio colapso cuántico? No. Todo lo que sucede es una historia coherente para todos. Si un observador consciente ha realizado una medida, y ha conseguido **información** (por ejemplo, que el fotón está en la caja de arriba), ha producido inevitablemente el colapso cuántico y fuerza a la naturaleza a colocar el fotón en **esa** caja. Y en esa caja estará siempre para cualquier otra persona que quiera echar un vistazo en el futuro. La información de todos será coherente siempre.

En la actualidad se ha comprobado con experimentos recientes que, no solo las partículas elementales, sino los objetos suficientemente grandes para ser observados en un microscopio (como una tira de metal de 60 micrómetros) pueden exhibir un comportamiento de superposición cuántica (produciendo un fenómeno de “interferencia”), y en ese estado se mantienen hasta que un observador consciente realiza la medida. Es decir, no se encuentra ninguna diferencia de comportamiento entre las partículas elementales, y las cosas que están formadas por esas partículas elementales. Es decir, todo está en superposición cuántica hasta que lo observamos.

Pero si todo está en superposición cuántica hasta que alguien consciente lo observa ¿debemos considerar que la realidad NO existe hasta que no la observamos? Recordando a Einstein ¿existe la luna cuando no la observamos?

Bohr reconoció enseguida que la ciencia había topado con el observador. *“No hay un límite definido entre observación y observador”* (Bohr).

La ciencia se había dado de bruces con el viejo problema filosófico occidental que nos atormenta desde Descartes y Berkeley y que desarrolló el idealismo alemán, el problema de si existen objetivamente los fenómenos con independencia de nuestras observaciones.

“Toda interpretación de la mecánica cuántica involucra a la consciencia” (Euan Squires).

“No hay manera de interpretar la mecánica cuántica sin encontrarse con la conciencia” (Rosenblum y Kuttner).

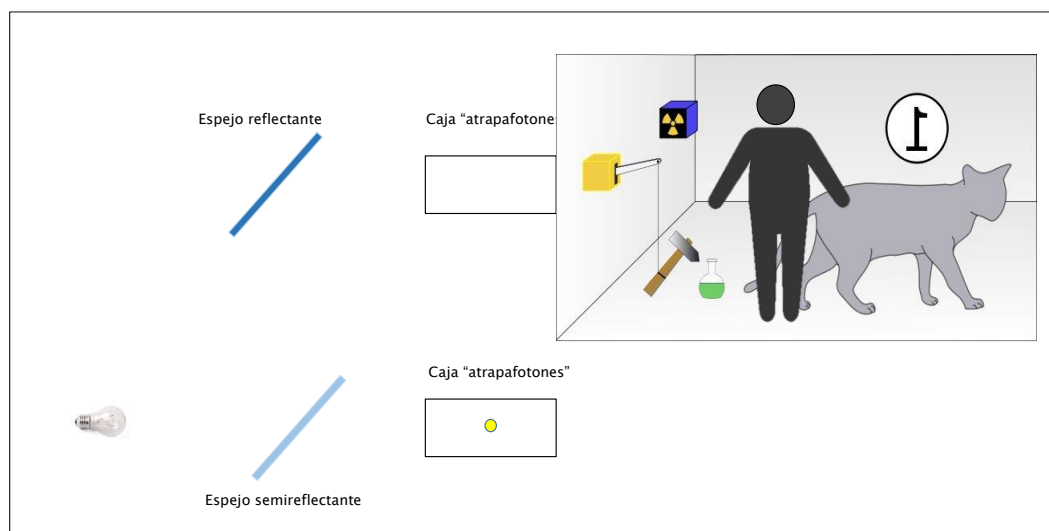
“El ser con conciencia tiene un papel diferente en la mecánica cuántica que el dispositivo de medición inanimado” (Wigner).

“Ni los cerebros artificiales ni las máquinas logran colapsar la superposición cuántica” (Stapp).

Profundicemos algo más en los problemas a los que nos conducen los experimentos y como encajarlos con nuestras observaciones y nuestra conciencia.

1.18 El amigo de Wigner. 1961. La conciencia

Wigner, premio Nobel de física (1963), quiso reflexionar acerca del papel que jugaba la conciencia en el fenómeno cuántico. La observación por parte de algún ser consciente parecía ser lo que desencadenaba el colapso de las superposiciones cuánticas. Para tratar de reflexionar sobre ello imaginó un experimento mental similar al del gato de Schrödinger, pero esta vez, un amigo de Wigner estaría dentro de la habitación, donde está el gato, y tomaría nota de todo lo que ocurre (por supuesto con un equipo para protegerse del veneno). Mientras tanto, Wigner está fuera del edificio preguntándose qué ocurre dentro.



En este caso, cabe plantearse ¿también el amigo de Wigner que está dentro de la habitación entrará en superposición cuántica? ¿estaría su amigo viendo a la vez el gato vivo y el gato muerto? ¿el amigo estaría triste y contento a la vez?

En este caso Wigner, que está fuera, tiene la posibilidad de analizar los procesos de interferencia desde fuera. Wigner confirma que, mientras él mismo no realice la medida, ni tenga constancia ni información de ningún tipo de en qué lugar está el fotón, todo el sistema de dentro de la habitación está en superposición cuántica, porque puede comprobar que ambas soluciones crean “interferencia”.

Wigner solo logra colapsar esa superposición cuántica de todo el sistema en el momento en que habla con su amigo de dentro (por cualquier sistema de comunicación), quien le informa de que, en efecto, el frasco no se rompió y el gato está vivo y ya lleva 3 horas inquieto.

Pero ahora nos encontramos con una paradoja:

- Desde el punto de vista de Wigner, que está fuera, todo el sistema (fotón-sensor-martillo-frasco-gato-amigo) estaba en superposición cuántica hasta que se comunicaron.
- Desde el punto de vista del amigo, que está dentro, no ha habido en ningún momento ningún tipo de superposición cuántica. Desde el principio el gato está vivo, y continua vivo.

¿Cómo pueden reconciliarse ambos puntos de vista?

Si en lugar de colocar un amigo, colocamos una cámara de video, no se produce paradoja alguna porque todo el sistema de cámara de video y sistema de grabación entraría, según Von Neumann, en superposición cuántica hasta que Wigner observa la grabación. Solo cuando colocamos al amigo dentro, que es una persona consciente, es cuando se produce una paradoja irreconciliable.

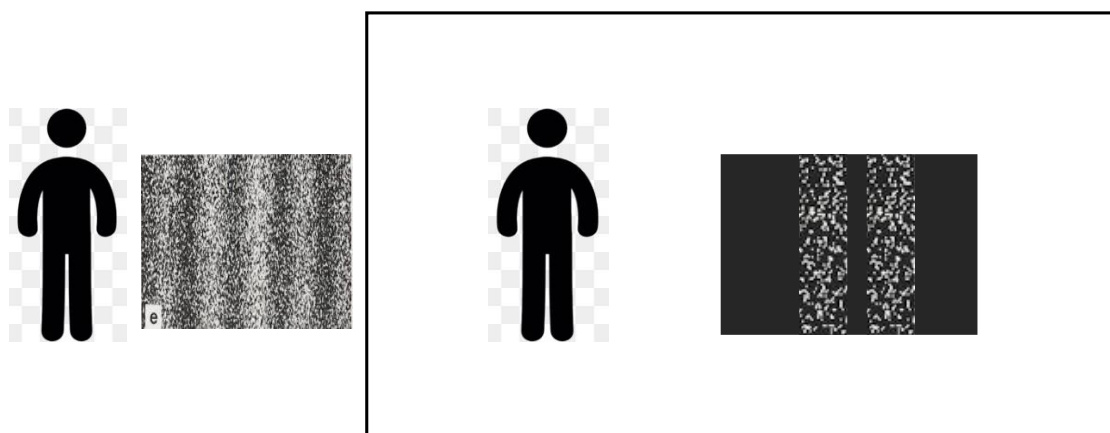
Este problema lo describe así Roger Penrose en su famoso libro *La mente del emperador*

*“Debemos tomar nota del hecho de que la única discrepancia completamente clara con la observación, en el experimento del gato de Schrödinger, parece surgir debido a que hay **observadores conscientes**, uno (¡o dos!) en el interior y otro en el exterior de la habitación. ¡Quizás las leyes de la superposición lineal cuántica compleja no se aplican a la consciencia!”*¹³ (Roger Penrose).

Lo que está queriendo poner de relieve Roger Penrose es que hay una discrepancia entre la realidad que percibe un observador y la que percibe el otro.

¹³ Pag 371. *La nueva Mente del emperador*. Roger Penrose. 1989. Ed. Grijalbo.

En 2018 científicos de la Universidad de Heriot-Watt en Edimburgo lograron confirmar en laboratorio que, en efecto, Wigner tenía razón. Se pudo demostrar desde fuera de “la habitación” que todo el sistema estaba, efectivamente, en “superposición cuántica”, creando interferencias entre las dos posibles soluciones. Mientras que, desde dentro, la medición se hizo sin superposición alguna, mucho antes. Las dos realidades medidas **son irreconciliables** porque para la persona de dentro no hay superposición cuántica (no hay interferencia), y para la persona de fuera sí la hay.



Desde el punto de vista de Wigner, que está fuera, todo el sistema está en superposición cuántica. Pero para su amigo, que está dentro, no hay interferencia y el sistema ha colapsado hace tiempo en una de las dos soluciones.

Pero entonces ahora no podemos hacer la interpretación que hacíamos en capítulos anteriores, de acuerdo con la interpretación de Copenhague. Recordemos que decíamos que “la naturaleza se reserva el derecho de decidir si el fotón está arriba o está abajo, hasta que lo observas”. Que en este experimento sería equivalente a decir que “se reserva el derecho de decidir si el gato está vivo o está muerto hasta que lo observas”. Pero ¿hasta que lo observa **quién de los dos**? Cuando Wigner aún no tiene conocimiento del resultado, Wigner puede reproducir el fenómeno de interferencia, lo que significaría que la naturaleza **no ha decidido aún de dónde colocar el fotón**. Sin embargo, para el amigo de Wigner, ¡la naturaleza hace tiempo que se decidió por dejar vivir al gato!¹⁴

¹⁴ Por razones didácticas decimos que “la naturaleza decide...” pero, en realidad, no existen causas naturales que decidan donde se coloca el fotón

¿Es posible que para el amigo la naturaleza ya se hubiera decidido, pero para Wigner aún estuviera todo por decidir? Eso sería como decir que cada conciencia es un cosmos en sí mismo. Y por muy raro que esto parezca, en realidad, algo de esto está en nuestra forma de pensar del día a día, desde siempre. Pongo un ejemplo sencillo para intentar transmitir lo que quiero decir. Cuando una madre ve desde lejos que el ejército donde marchó su hijo a la guerra está ya de vuelta, reza y pide a Dios que su hijo esté junto con los supervivientes que ve venir de lejos. Evidentemente de poco debería servir rezar en ese momento, porque la batalla sucedió semanas antes, pero ella, que tiene mucha fe, tiene una especie de intuición de que rezando ahora, quizás algo se puede hacer **aún**. Solo cuando ve el resultado, cuando le comunican la noticia, o bien cuando ve a su hijo, sabe con certeza que lo sucedido es ya inevitable ¿Es posible que su realidad colapse en ese momento y todo su futuro personal, a lo largo del resto de su vida, será coherente con la noticia que acaba de recibir? Lo mismo ocurre cuando el estudiante se acerca a ver la nota de su asignatura en el tablón de la escuela, reza porque haya aprobado, pero el examen y la corrección se realizaron semanas antes.

A nivel filosófico esta paradoja del amigo de Wigner tiene una enorme importancia por dos razones principales:

- La conciencia del observador parece jugar un papel muy relevante en la realidad.
- ¡Dos conciencias distintas pueden estar viviendo realidades distintas irreconciliables! Para uno el fotón está ya en un sitio, para el otro existe un fenómeno de interferencia entre ambas opciones, y por tanto sigue en superposición cuántica.

Pero cuando se encuentran ambas conciencias, todas las realidades se hacen coherentes desde ese momento.

Pero nos quedó una pregunta pendiente ¿Y el gato no logra colapsar la superposición cuántica? Quizás el gato vive también su propia realidad y es capaz de colapsar la superposición cuántica (igual que lo logra el amigo de Wigner), pero como Schrödinger dijo “*solo la conciencia es absolutamente fundamental, en el sentido que no puede ser explicada en términos de ninguna otra cosa*”. La clave está en la información que el gato puede transmitir. El gato, al estar vivo o muerto, transmite, sin quererlo, la información de en qué caja se situó el fotón y, por tanto, cuando un observador consciente ve al gato, la realidad del fotón y de todo el sistema colapsa en una de las posibles soluciones. Es decir, el gato no es consciente de nada pero, aun así, está transmitiendo información. En este sentido se comporta exactamente igual que la cámara de video.

La ciencia parece haberse topado con el problema de la conciencia. El principal problema para la ciencia viene a la hora de intentar definir qué es la conciencia, que sin duda es un concepto o una realidad muy esquivas. Podemos examinar cerebros y sistemas neuronales, pero no tenemos forma de demostrar si mi hermano es consciente de sí mismo, y mucho menos el gato¹⁵. Aun así, tenemos la sospecha de que los seres humanos son conscientes de sí mismos. Les llamamos “personas”.

Además, y esto creo que es aún más importante, la conciencia parece ser lo único en el universo que aparenta ser “libre”, es lo único que aparenta no obedecer de manera inexorable a las cadenas de causa-efecto. Las pelotas de billar obedecen de manera radical las leyes físicas, pero las personas parecen comportarse de manera “libre”, o al menos tienen la sensación de ser conscientes de sí mismos y la sensación de ser libres. En este sentido, las personas parecen algo “extra natural”, me refiero a que su pensamiento y decisiones no parecen obedecer a leyes físicas. No encontramos en todo el universo nada similar. Nada es **libre** en el universo, y nada es consciente de sí mismo en el universo (que sepamos hasta ahora), a excepción del ser humano.

Roger Penrose, en su famosísimo libro “La nueva mente del emperador”, argumenta que la mecánica cuántica y la conciencia están íntimamente relacionadas. Según Penrose la libertad consciente podría estar, de alguna manera, basada en la esencia aleatoria intrínseca de la mecánica cuántica. Como hemos visto, no hay una causa ni una razón para que el fotón se decida por aparecer en una caja o en la otra. La cadena de causa-efecto determinista aquí se interrumpe. De manera paralela, también parece interrumpirse esa cadena de causa-efecto cada vez que yo tomo una decisión “libre”.

Desde luego, las implicaciones de todo esto son inmensas, porque volverían a colocar al hombre en el centro del universo. La realidad parece tener existencia solo en función de que algo consciente la observe. El debate sigue abierto y es, como puedes imaginarte, muy espinoso.

¹⁵ A no ser que consideremos que el hecho de que él es capaz de colapsar la superposición cuántica sirva como demostración de que mi hermano es consciente de sí mismo. Rosenblum-Kuttner: “El experimento cuántico es una prueba objetiva de la existencia de la conciencia”

“Es útil en la vida práctica decir que el mundo existe “ahí fuera” con independencia de nosotros, pero esa visión ya no puede sostenerse” (Wheeler).¹⁶

“¿Sería el mundo de otro modo sin observadores conscientes, una obra representada ante asientos vacíos, sin existir para nadie, y por ende sin existir propiamente? (Schrödinger).

“Supongamos que, cuando se intenta una formulación más allá de los propósitos prácticos, encontramos un dedo inamovible que apunta obstinadamente hacia fuera del tema, a la mente del observador, a los textos hindúes, a Dios ... ¿Acaso esto no resultaría sumamente interesante?” (Bell).

Pero aún nos quedan algunos misterios que desvelar. Estoy seguro de que no te quedaste satisfecho cuando decíamos que el fotón “*decide*” donde colocarse. Es evidente que el fotón no debería decidir nada y, sin embargo, eso es lo que parece que sucede, puesto que no existe ninguna causa natural que obligue al fotón a aparecer en un sitio u otro. Lo que nos preguntaremos en el siguiente experimento es ¿cuándo decide el fotón situarse en un lugar u otro?

1.19 Experimento de decisión retardada de Wheeler

J.A. Wheeler es uno de los padres de toda la construcción científica y filosófica de la mecánica cuántica. A él se deben los conceptos de “agujero negro”, “agujero de gusano”, “espuma cuántica”, “geón”, etc....

Además de ser un eminente científico, dio mucha importancia a las consecuencias **filosóficas** que se podían deducir a partir de los experimentos cuánticos. Estuvo especialmente implicado en el papel que juega el ser consciente en la propia realidad física. Y, desde luego, en su opinión, el ser consciente juega un papel determinante.

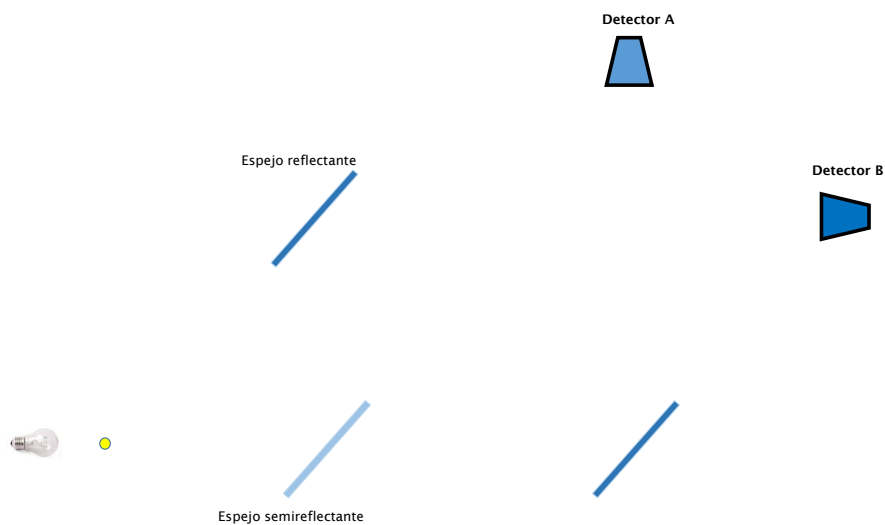
En 1978 propone un experimento para que, cuando fuera posible, se realizara en laboratorio. Este experimento se conoce como “Decisión retardada de Wheeler”.

El objetivo del experimento es saber en qué momento de todo el recorrido es cuando el fotón decide ir por un solo camino o ir por los dos caminos.

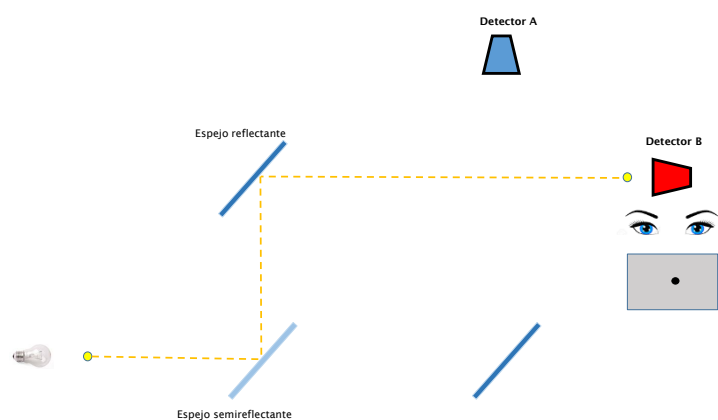
¹⁶ John Wheeler es uno de los científicos más importantes del siglo XX y XXI. Es alumno de Bohr. A él debemos los términos “agujero negro”, “agujero de gusano”, “espuma cuántica”, “agujero blanco” etc....

La conclusión del experimento, como vamos a ver, es que todo el pasado histórico de la partícula se crea justo en el momento en que es observada. Veamos como se demostró.

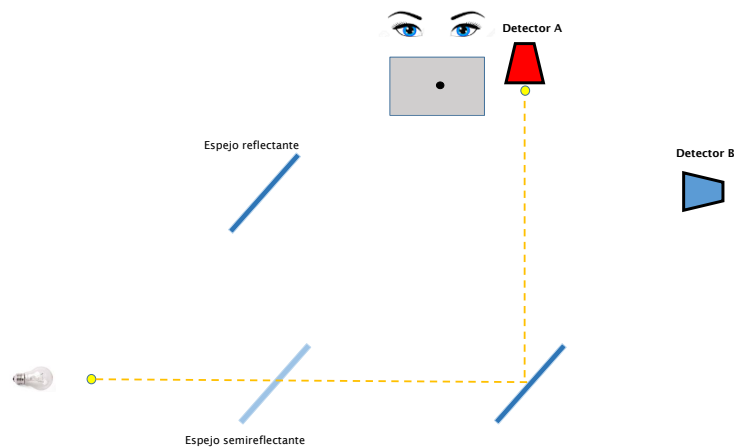
Wheeler propone un experimento con un sistema de espejos reflectantes y semi reflectantes como el de la figura, pero que abarque todo un campo de futbol. Es decir, que sea de dimensiones suficientemente grandes.



En este caso resulta muy fácil analizar los posibles caminos que puede tomar el fotón. Cuando el fotón llega al espejo semi reflectante se ve forzado a “decidir”; si lo atraviesa acabaría en el detector A), o si se refleja y acabaría en el detector B. Por tanto, los detectores al final del recorrido nos dirán si el fotón atravesó el espejo o se reflejó.



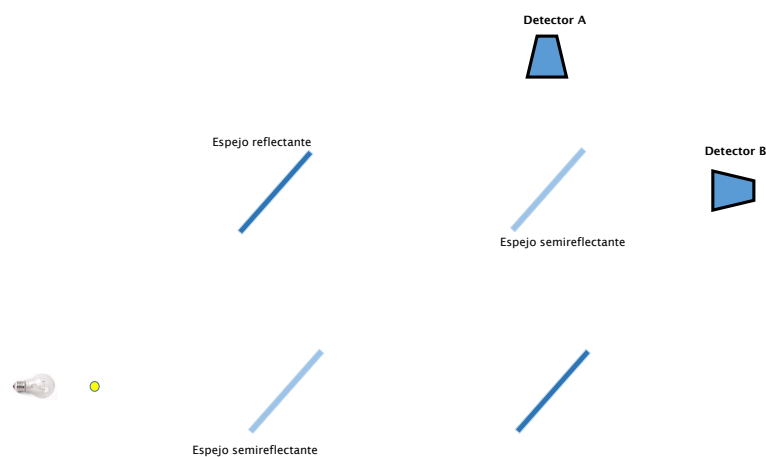
En este caso el fotón elige el camino de arriba, y es detectado en B



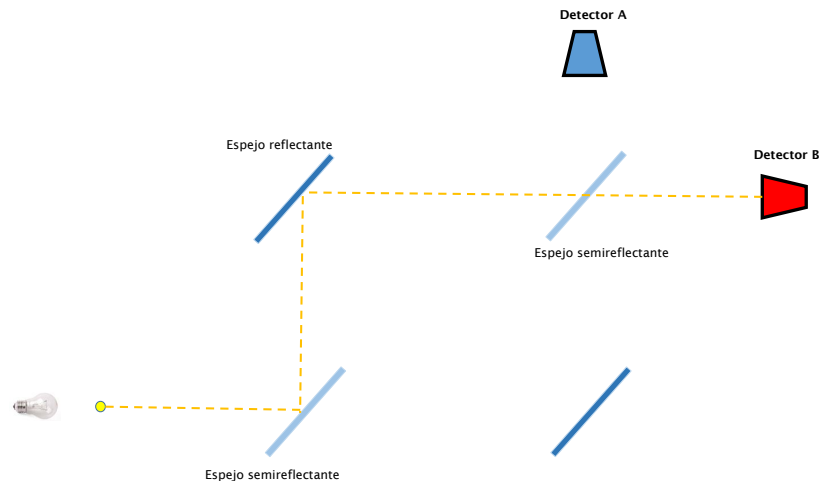
En este caso el fotón elige el camino de abajo, y es detectado en A

Si va por el camino de arriba el fotón será detectado en B. Y si va por el camino de abajo será detectado en A. Si lo hacemos muchas veces nos encontramos con que el 50% de las veces lo habrá detectado A, y el otro 50% lo habrá detectado B. Hasta aquí, todo es lógico. Y no se da ningún tipo de interferencia en este caso, porque los detectores están “observando” cuál de los dos caminos toma el fotón, y por tanto no es posible la superposición cuántica de ambas opciones.

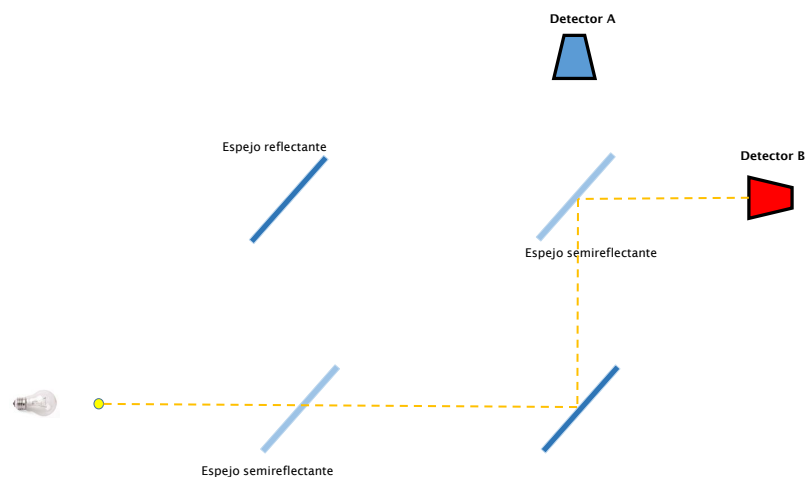
Es una situación equivalente a cuando colocábamos un detector en una de las rendijas en el experimento de Young. El detector nos permitía conocer por cuál de las dos rendijas pasaba el fotón, pero esto impedía la superposición cuántica, y por tanto desaparecía el fenómeno de interferencia. Pero fijaros como cambia todo si, ahora cambiamos el experimento, y ponemos un segundo espejo semi reflectante justo antes de los detectores.



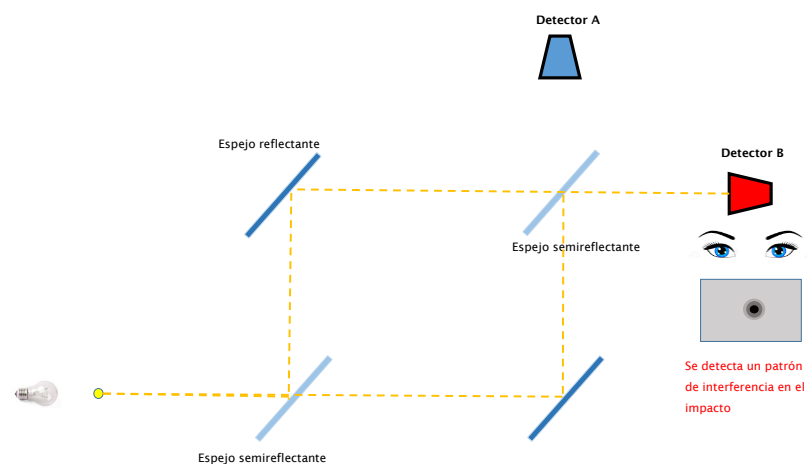
Analicemos ahora que hace el fotón si, por ejemplo, eligiera el camino de arriba (si se refleja en el primer espejo semi reflectante). Vemos que cuando llega al segundo espejo semi reflectante, puede decidir, de nuevo, si va hacia el detector A, o hacia el detector B. Supongamos que va hacia el detector B.



¿Es ese el único camino para llegar al detector B? En realidad no. Ahora imaginemos que cuando el fotón llega al primer espejo semi reflectante hubiera elegido el camino de abajo (atravesarlo). Cuando llega al segundo espejo semi reflectante, puede acabar también en B, como se indica en la figura:



Vemos, por tanto, que el fotón puede llegar al detector B **por ambos caminos**. Y por tanto este sistema de detectores, tal y como está diseñado, no ayuda al observador consciente a tener información de cuál de los dos caminos tomó el fotón. Así que, el fotón puede estar tranquilo y, por tanto, toma ambos caminos a la vez. Como toma ambos, lo que detectamos en B es un fenómeno de interferencia entre ambos caminos del mismo fotón, porque el camino de abajo está haciendo interferencia con el camino de arriba. En la imagen lo representamos de manera que el punto que detectamos está difuminado (interferencia).



Por supuesto, lo mismo que hemos dicho para B, ocurre en A, porque también al detector A se puede llegar por ambos caminos.

Si hacemos el experimento varias veces, en unos casos se enciende el detector B y los impactos aparecerán con patrón de interferencias (difuminado), y en otros casos se encenderá el detector A, y también aquí los impactos aparecerán con patrón de interferencias. Hasta aquí, todo está de acuerdo con lo que hemos aprendido en este curso. Pero ahora vayamos un pasito más allá.

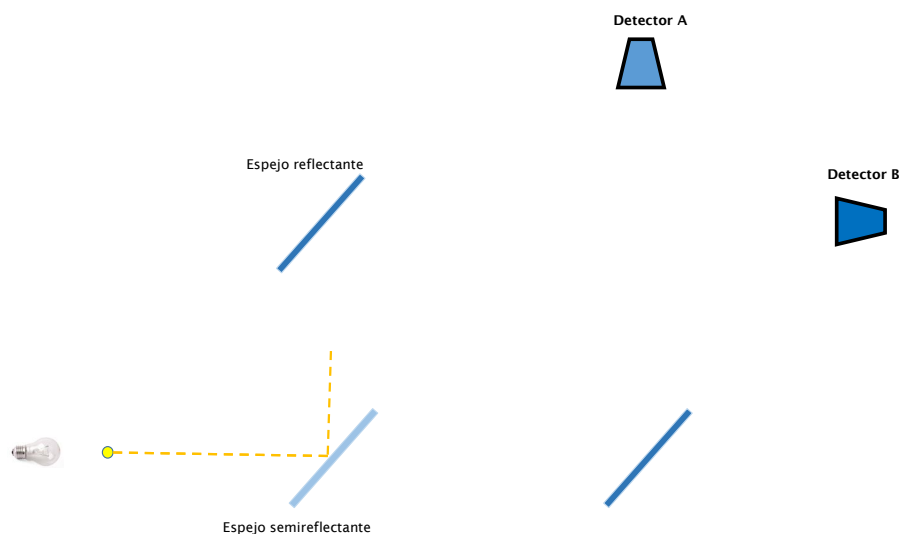
Hemos visto que, si ponemos el segundo espejo semi reflectante, lo que nos encontramos son impactos con patrón de interferencias en B, porque el fotón puede tomar ambos caminos para llegar a B (y lo mismo sucede en A). Pero antes habíamos visto que, si hacemos los experimentos sin el segundo espejo semi reflectante, lo que nos encontramos es impactos sin interferencias en B y en A porque los fotones han tenido que ir por un solo camino para llegar a cada detector.

Pero lo que Wigner estaba interesado en saber es en qué momento decide el electrón ir por un camino o ir por los dos.

Wigner estaba intrigado por la pregunta que nos hacíamos al inicio de este capítulo ¿cómo conoce el fotón la estructura general de los recorridos que hay en el experimento cuando aún está llegando al primer espejo semi reflectante? Y es que el fotón, de alguna manera, parece que conoce como está el recorrido estructurado, antes de entrar. Si está puesto el segundo espejo semi reflectante, entonces llega allí por dos caminos a la vez. Pero si no está puesto el segundo espejo semi reflectante, entonces se decide por un único camino cuando pasa por el primer espejo semi reflectante ¿Cuándo toma exactamente la decisión?

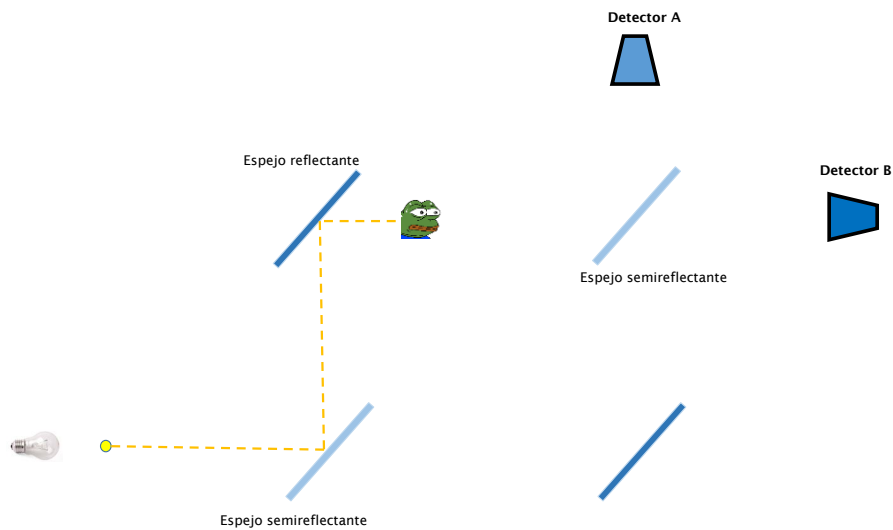
Wigner propone un experimento para engañarle.

Propone iniciar el experimento **sin el segundo espejo semi reflectante**. De manera que, como vimos, dado que ahora solo puede llegar a un determinado detector por un único camino, fuerza al fotón a decidir cuál de los dos caminos escoger cuando alcanza el primer espejo semi reflectante. Imaginemos que escoge el camino de arriba porque quiere ir hacia el detector B.

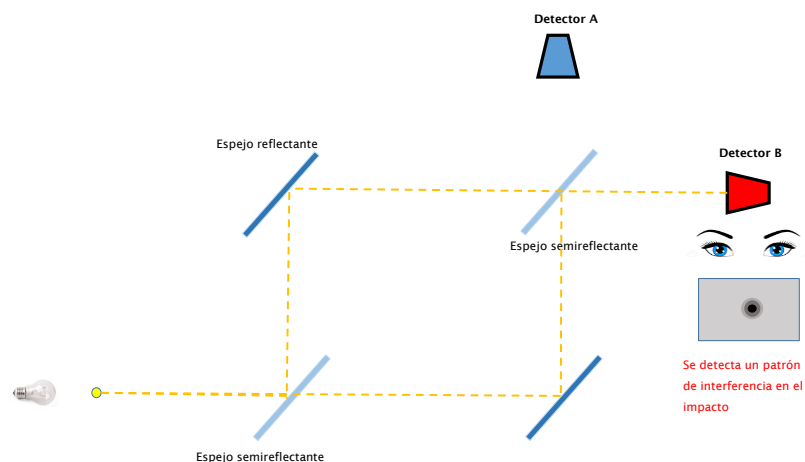


Una vez que ya ha pasado por esa primera “bifurcación” del primer espejo semi reflectante, y está a punto de llegar al detector B, ¡colocamos por sorpresa el segundo espejo semi reflectante!

¡Ahora el fotón tiene un problema! ¡Porque le hemos cambiado la configuración de caminos a mitad de recorrido! Ahora la configuración obliga a que en B aparezca un patrón de interferencias **¿qué hace ahora?**



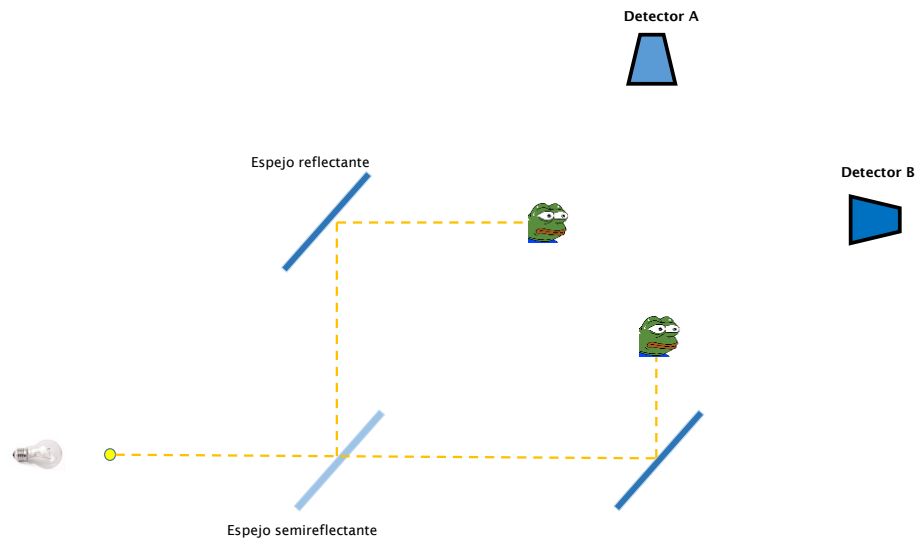
Los experimentos demuestran que, para él no es ningún problema. Acabará en el detector marcando un patrón de interferencia, como si hubiera ido **desde el principio** por ambos caminos.



¡Pero cómo lo hace! En teoría había tomado un solo camino (porque al principio no estaba el segundo espejo reflectante), pero cuando le hemos cambiado las condiciones en el último momento y a mitad de camino ¿qué hace? ¿vuelve otra vez sobre sus pasos y toma los dos caminos?

Por supuesto el mismo experimento podemos hacerlo poniendo el segundo espejo semi reflectante al inicio y luego quitarlo.

Si iniciamos el experimento colocando el segundo espejo semi reflectante desde el primer momento, el fotón al llegar a la primera bifurcación del primer espejo semi reflectante y “ver” la configuración de todo el sistema, tendrá que escoger ambos caminos. Pero cuando está a punto de finalizar ambos caminos, le quitamos el segundo espejo.



Los experimentos demuestran que entonces acabará llegando a uno de los detectores nítidamente, sin ningún tipo de interferencia, como si hubiera tomado un único camino desde el principio. Pero ¡cómo lo hace! ¿Cómo ha hecho desaparecer el otro camino que ya estaba prácticamente recorrido por completo?

Estos experimentos se han hecho muchas veces. Al principio se hacían con unos recorridos de 300 m. Ahora se hacen con recorridos de 3.500 km utilizando satélites, para asegurarse de que, cuando quitamos o ponemos el segundo espejo semi reflectante, el fotón ya había pasado por el primero. Los resultados son siempre los mismos.

En palabras de Wheeler:

«Por lo tanto, podemos elegir si los fotones individuales deben actuar Esquizofrénicamente o no.» Wheeler

Aunque los resultados de estos experimentos son realmente alucinantes, en realidad no contradicen la interpretación de Copenhague de Bohr. El fotón va siempre por los dos caminos, en superposición cuántica, salvo que le fuerces a decidirse, solo cuando queremos conocer por qué camino ha ido, colapsa la superposición cuántica.

Y en ese momento la naturaleza decide cuál de los dos caminos escoge, y como vimos, **reconstruye todo el pasado de manera coherente con esa elección**. Es lo mismo que comentábamos cuando explicábamos el experimento del gato de Schrödinger. Cuando entramos en la habitación y vemos al gato vivo, se reconstruye todo su pasado.

Si el observador diseña un experimento que no deja en evidencia por qué camino ha pasado el fotón, entonces el fotón no está forzado a decidir, y por tanto va por los dos caminos, mostrando una interferencia (ambos caminos están en superposición cuántica).

Luego en efecto, ¿debemos creer realmente que se reconstruye todo el pasado de manera instantánea cuando realizamos la medida? Oiremos aún cosas más increíbles.

Hasta aquí hemos hablado, sobre todo, de los experimentos. Hemos hablado de **hechos**, que no se pueden cuestionar. Es cierto que, por razones didácticas, hemos ido explicando la manera en que el grupo de Copenhague iba interpretando los resultados, así como las reticencias mostradas por Einstein, Schrödinger, De Broglie, etc....

Como seguro que has entendido ya, lo que está aquí en cuestión es algo absolutamente fundamental **¿existe la realidad objetiva ahí fuera?** Para poder responder a esta pregunta entramos en el mundo de las interpretaciones, que en mi opinión son tan importantes como los propios hechos, sino más.

Para poder afrontar las distintas interpretaciones que la ciencia ha dado a la mecánica cuántica es preciso entender bien de dónde venimos. La ciencia no es más que la evolución del pensamiento y filosofía occidental. Es preciso comprender como el pensador occidental moderno entiende la realidad de su mundo. Veremos que las distintas interpretaciones del enigma cuántico tienen su reflejo en las diferentes formas de pensamiento de los siglos XVII-XIX.

Esta introducción que vamos a hacer me parece imprescindible para poder avanzar en el ámbito de las interpretaciones.

1.20 La realidad de ahí fuera y yo

En este apartado hacemos una breve exposición del pensamiento occidental, centrándonos en los sistemas filosóficos de la edad moderna, que comienzan con Descartes. Veremos que mucho de lo que estos grandes hombres pensaron adelanta algunas de las sorpresas que los laboratorios nos están mostrando.

Desde Descartes toda la filosofía occidental ha rondado alrededor de los dos grandes misterios filosóficos. Por un lado, el misterio de la existencia del cosmos y su orden. Por otro, el gran misterio del ser humano o, mejor dicho, de **la persona**, ese extrañísimo ser que tiene la experiencia de creerse realmente “libre” y consciente de sí mismo.

Estos dos grandes enigmas están presentes en la conocidísima frase de Kant:

“Dos cosas llenan mi ánimo de creciente admiración y respeto, a medida que pienso y profundizo en ellas: el cielo estrellado sobre mí y la ley moral dentro de mí” (Immanuel Kant).

El progreso de la ciencia parece habernos metido de lleno en esos dos gigantes problemas filosóficos que han obsesionado a la civilización occidental durante casi 400 años ¿la naturaleza ha creado la conciencia a través de un grado de complejidad impresionante de redes neuronales? ¿o es la conciencia la que de alguna manera da realidad a la naturaleza y a todo lo que existe?

La visión determinista y realista que considera la materia como algo real, independiente y eterno, y la relación causa-efecto de los choques de sus infinitas partículas, había tenido en la Grecia clásica su máximo exponente con Demócrito, quien imaginó el universo como un tapete gigantesco cargado de pequeñas bolas de billar (átomos), que chocaban eternamente unas con otras. Pero no existía ningún orden en esos choques.

Fueron los discípulos de Sócrates los que se mostraron convencidos de que ese orden existía, porque existía una verdad. Sócrates consideró que merecía la pena morir por esa verdad, que no cualquier opinión era válida, puesto que había una sola verdad pero infinitas mentiras, y cambió el mundo para siempre. A partir de aquí el mundo del pensamiento parece dividirse en dos. Platón argumentaría que ese mundo de “la verdad” no es este mundo, sino uno divino que no podemos ver, salvo con la razón. Lo que nosotros vemos en este mundo son solo **sombras**, que pueden llegar a ser incluso incoherentes, que son un reflejo del mundo perfecto, divino y platónico. Pero, por otra parte, Aristóteles, discípulo de Platón, profundiza de manera más sistemática en el modo en que el hombre va alcanzando el conocimiento, y se percató de que todo lo que conoce lo logra a través de los sentidos. Sin embargo, acepta que los sentidos captan solo una parte de la “esencia” de las “sustancias” que **están ahí fuera**, y que son las que realmente existen.

Continuando con la visión “realista” de Aristóteles, esas sustancias existen como tales ahí fuera, y obedecen a un orden que es preciso conocer. El estudio científico de ese orden tuvo una primera revolución en Alejandría, y otra segunda revolución en el corazón de Europa en el siglo XVII, con el nacimiento de la ciencia occidental.

Especialmente con Newton esta visión llegó a su punto álgido, logrando una formulación con una capacidad de predicción sin precedentes. De repente, pareció como si hubiéramos comprendido el universo, ya para siempre. Todo se basa en leyes universales, matemáticas y simples y, dadas unas condiciones iniciales, se podía determinar todo el desarrollo futuro del universo, como decía Laplace.

Tiene sentido recordar en este momento el problema del determinismo que comentamos en el capítulo anterior. Dadas unas condiciones iniciales (por ejemplo el Big Bang), y dadas unas leyes naturales (gravitación, fuerza nuclear débil y fuerte, fuerza eléctrica, etc.) queda totalmente escrito todo el futuro. En este sentido Leibnitz consideraba que, si había que considerar a Dios perfecto, y a las leyes naturales perfectas, debería quedar todo definido **desde el inicio** y no serían necesarias intervenciones divinas adicionales posteriores para el mantenimiento del mundo. Bastaba con el “toque inicial”. Pero el propio Newton había mantenido que el orden del universo era solo posible gracias al sostenimiento divino en todo momento y lugar. Los seguidores de Newton se quejaban de que Leibnitz había convertido a Dios en una especie de deidad ausente, que solo había actuado **en el inicio**, y después no era en absoluto necesario. Pero claro, recibieron la respuesta de que ellos habían convertido a Dios en una especie de operario que, constantemente, tiene que supervisar y corregir el devenir del mundo.

*“El Señor Newton y sus seguidores tienen también una opinión extremadamente extraña sobre el trabajo de Dios. De acuerdo con ellos **Dios tiene que darle cuerda al reloj de tiempo en tiempo**. De otra forma dejaría de funcionar. Él careció de suficiente previsión para hacerlo un movimiento perpetuo.... De acuerdo con mi visión, la misma fuerza y vigor continúa existiendo en el mundo siempre (Leibnitz).*

A pesar de los avances y el prestigio de la ciencia, la filosofía occidental de los siguientes siglos iría poniendo en cuestión la visión mecanicista, realista y materialista del mundo.

Como se sabe, Descartes había sido el primero en cuestionar la existencia de la realidad extramental. Lo puso todo en duda, y cambió la historia del pensamiento para siempre. Puso en duda hasta su propia existencia, pero encontró una roca a la que podía agarrarse. “Pienso luego existo”. “Mi propia existencia” es la roca incuestionable a partir de la cual se intentó desarrollar todo el sistema filosófico posterior. Pero lograr ir más allá de esta “roca”, ir más allá del hecho incuestionable de que yo existo, para intentar *saltar* y asegurar la existencia real e independiente de *lo que está ahí fuera*, resultó mucho más difícil de lo esperado.

Con Descartes nace el pensamiento moderno, todo parte de aquí. Desde Descartes cualquier pensador tiene que inclinarse a un lado o hacia el otro. Racionalistas, empiristas, kantianos, idealistas, fenomenólogos, existencialistas, positivistas, materialistas, etc. parten, en realidad, de aquí, y toman su opción.

Los primeros seguidores de Descartes fueron racionalistas. Consideraron que los sentidos nos engañan, y es solo la razón la que nos puede dar ideas de cómo es la realidad. Son realistas, como Aristóteles, en el sentido que consideraron que “las cosas” sin duda están ahí fuera, y son de una determinada manera, pero cómo son realmente, no lo podemos saber porque es inaccesible a los sentidos. Para los racionalistas, lo que nosotros vemos, tocamos y olemos, son solo sensaciones, y probablemente no tienen nada que ver con lo que realmente existe ahí fuera. Nosotros solo percibiríamos lo que nos transmiten los “sentidos” y éstos nos engañan. Según ellos, las “sustancias” de ahí fuera **existen**, pero no sabemos cómo son realmente, y nunca lo sabremos.

Pero también partiendo de los razonamientos del propio Descartes, y como reacción a los racionalistas, nacen los empiristas. Fue Berkeley, en torno a 1720, quien pone en cuestión todos los conceptos metafísicos racionalistas anteriores. En especial ataca palabras **abstractas** como “sustancia”, “materia”, “espacio absoluto”, etc. Este obispo irlandés no entiende de qué modo puede alguien adquirir algún conocimiento, si no es a través de los sentidos. Y por tanto todo aquello que no captan los sentidos ¿qué tipo de existencia tiene en realidad? ¿qué diablos es eso de la “sustancia” que está ahí fuera pero que no captamos de ninguna forma, que nadie conoce, y que nadie ha visto nunca? Berkeley, de hecho, pone en cuestión la existencia de los objetos que vemos ahí fuera. **Considera que la única realidad fundamental que realmente existe son nuestros sentimientos y nuestras sensaciones.** Más allá de eso, todo son quimeras. Por tanto, para Berkeley, sin la existencia de un sujeto (es decir de una persona), no se puede dar el fenómeno de “realidad”. Sin la existencia de un sujeto, nada es real, por definición. Y sinceramente, es imposible de refutar. Lo explicamos a continuación.

Cuando decimos que algo es real, decimos que es algo que se puede tocar, ver, oler o conocer a través de alguno de nuestros sentidos. Algo que es “palpable”. Decimos “esto que está ahí es real”, y lo decimos porque lo podemos ver y tocar, porque somos personas conscientes de lo que sentimos. Por tanto, lo real, por definición, está íntimamente relacionado con el sujeto, con la persona. Berkeley considera que todo lo que existe, solo puede existir en la mente, y no entiende a qué se pueden referir los filósofos racionalistas y aristotélicos con el concepto “sustancia”, como algo autónomo que existe ahí fuera, y conceptos metafísicos similares.

Los racionalistas dicen que la “sustancia” es esa cualidad de “la cosa” que existe por sí misma, pero lo que nosotros percibimos cuando vemos, olemos y tocamos sería algo distinto ¿pero de qué demonios hablan cuando dicen “sustancia”? ¿no están hablando de algo que nadie jamás ha visto, ni ha sentido, ni ha tocado? ¿algo que nadie sentirá ni verá jamás? ¿no es simplemente mera fantasía, una quimera? Lo que realmente existe para Berkeley ese “ver” y “tocar” que yo experimento ahora mismo. Existen mis sensaciones y mis pensamientos. Existe la sensación de tocar y ver esta silla, esta mesa. Y solo existe mientras la toco y la veo...

*“Digo que existe la mesa sobre la que escribo, es decir, la veo y la toco; y si estuviese fuera de mi gabinete de estudio diría que existe, en el sentido que podría percibirla **si estuviese** yo en mi gabinete, o si hay algún otro espíritu que la percibe. (...) Para mí resulta del todo incomprensible lo que se dice de la existencia absoluta de las cosas que no piensan, sin ninguna referencia al hecho de que sean percibidas. **Las cosas no es posible que puedan tener existencia fuera de las mentes o de las cosas pensantes que las perciben**” “Todo el orden de los cielos y todas las cosas que llenan la tierra, todos los cuerpos que forman **la enorme estructura del universo no poseen ninguna subsistencia fuera de una mente**, y su esencia consiste en ser percibidos o conocidos. Por consiguiente, hasta que no sean percibidos por mí de una manera actual, hasta que no existan en mi mente o en la de algún otro espíritu creado, no existen en absoluto, a no ser que subsistan de algún modo en la mente de un Espíritu Eterno”* (Berkeley).

Cualquier crítico de Berkeley podría haberle respondido pronunciando la famosa frase de Einstein, pero 200 años antes “*me gusta pensar que la luna está ahí cuando no la estoy mirando*”.

Kant, influido por Berkeley, y sin lograr refutar su radicalidad, fue quien sistematizó y puso orden en la batalla que racionalistas y empiristas venían sosteniendo, proponiendo **una síntesis** de todo lo discutido. Kant aceptó la existencia de una realidad extramental (las cosas de ahí fuera debían existir), si bien consideró que era inaccesible al conocimiento. No se puede decir absolutamente nada acerca de lo que son realmente las cosas de ahí fuera. Todo lo que conoce el hombre pasa por su propio filtro mental, tiene que encajar en el “sistema operativo” de nuestro cerebro. Y este sistema operativo está basado en los elementos “espacio” y “tiempo”. Para Kant, el espacio y el tiempo no tienen realidad más allá del hombre. Son solo atributos de nuestra forma de pensar, de nuestro “sistema operativo”. Es evidente que Einstein tenía esto en la cabeza cuando comenzó a desarrollar su teoría de la relatividad.

Y a partir de Kant se inició una corriente de pensamiento realmente exótica. El idealismo alemán. Los idealistas se percataron de que la realidad extramental es muy problemática, como bien había apuntado ya Berkeley. Solo podemos estar seguros de que, lo que existe, es el sujeto consciente de sí mismo, **el espíritu**. Ahí fuera no hay nada, puesto que todo es espíritu.

El problema de esta forma de pensar es que puedes acabar rápidamente cayendo en el “solipsismo”. El solipsismo abogaría porque solo estoy seguro de existir yo. Y todo lo demás, incluidos mis padres, hermanos, amigos, etc. podrían no existir, y ser solo un producto de mi actividad mental. Volvemos a caer en el “pienso luego existo”, la roca en la que se apoyó Descartes, y salir de ahí es muy difícil. Existo yo, pero pensar que existe algo más es un salto al vacío, casi un acto de fe.

Esta corriente de pensamiento idealista llega a tener sus coletazos en el siglo XX con Heidegger, quien define a la persona como “*dasein*”, *el que está ahí, el que es*. Y el posterior desarrollo de la fenomenología que afirma que, al fin y al cabo, lo que existe es el “fenómeno”, es decir, lo que acontece en mi vida, en mi día a día, lo que yo pienso, lo que yo creo, lo que yo siento, lo que yo veo, lo que yo imagino, etc.

Casi en paralelo con este movimiento idealista-existencialista surge la filosofía positivista, cuyo padre es Comte (1798-1857). El positivismo coincide, por una parte, con Berkeley y los empiristas porque desprecia los esfuerzos de los metafísicos y racionalistas al intentar definir los conceptos de “sustancia”, “causa”, “tiempo”, “espacio”, etc., pero Comte no se molesta en analizar hasta qué punto tienen o no tienen realidad esos conceptos. Su desprecio por estos términos es aún más radical que en el caso de Berkeley porque, para Comte, ya solo reflexionar sobre esto es absurdo e inútil. El positivista debe reflexionar únicamente acerca de lo que la experiencia y los sentidos nos transmiten, así como tratar de lograr construir, a través del método científico, leyes universales que encajen con dichas experiencias y sean capaces de predecir el funcionamiento de la naturaleza, y así avanzar, gracias a la ciencia, en el progreso de la humanidad. Lo que realmente sea o no sea la naturaleza, lo que realmente haya ahí fuera, le es totalmente indiferente. El positivista sería un agnóstico no solo respecto a la religión, sino respecto a cualquier metafísica. **Ahora entendemos mejor la postura que hemos visto en Bohr cuando decía que el objetivo de la ciencia no es plantearse qué es la realidad, sino descubrir leyes matemáticas que sean capaces de predecirla.** Es una postura claramente positivista, porque rehúye la pregunta difícil y se centra en la física y la matemática. Esta postura práctica y positivista es la mayoritaria en el mundo de la ciencia actualmente.

Pero será la influencia radical de Karl Marx la que produce un giro total en el pensamiento occidental. Fue Marx y Engels quienes, por fin y de manera definitiva, fijan toda la atención filosófica y científica en **lo material**. Colocan la materia en el olimpo de los dioses. Es la materia lo único real, lo único que existe y lo único que existirá.

Sin un desarrollo filosófico ni metafísico, los marxistas materialistas dan por hecho la existencia incuestionable de la materia, así como la inexistencia de conceptos como “espíritu”, “alma”, etc. El hombre es consciente de sí mismo, pero esa consciencia es solo fruto de la complejidad de la materia. No existe nada que no sea materia.

La influencia del positivismo de Comte y del materialismo marxista es evidente a lo largo de todo el siglo XX. El pensamiento filosófico, social y cultural asumió como dogma de fe que solo lo material es lo que existe y, en cualquier caso, el debate por lo que realmente existe quedó aniquilado por inútil y estéril. Lo importante pasó a ser el debate social (marxismo) y el científico (positivismo), así como ponerse en marcha para el progreso de la humanidad. Estoy seguro de que este nuevo posicionamiento comienza a parecerse razonable, todos somos hijos de nuestro tiempo y estamos totalmente influidos por las corrientes filosóficas de nuestro momento.

Pero en paralelo, en los laboratorios científicos del mundo occidental, tenía lugar una batalla, tenía lugar una crisis de pensamiento. Porque la naturaleza, a través de cientos de experimentos de muy diverso tipo, estaba diciéndonos a gritos que la existencia absoluta de la materia, el espacio, el tiempo, la masa, la relación causa-efecto, etc., es mucho más problemática de lo que nos pensamos. El materialismo radical no encaja en los laboratorios de física modernos, esto es ya incuestionable.

Todo lo que hemos estado estudiando en este curso de astrofísica, relatividad y mecánica cuántica nos induce a pensar que el realismo radical, el materialismo radical, es ya difícil de sostener. Los descubrimientos científicos del siglo XX que hemos estudiado han ido dando lugar a un mundo mucho más complejo de lo que se esperaba.

En primer lugar, la relatividad ha supuesto un ataque despiadado a la supuesta realidad absoluta, autónoma e independiente del espacio y el tiempo. La realidad independiente y autónoma de estos elementos ya había sido cuestionada por las paradojas planteadas por el griego Zenón y filosóficamente refutada con Kant, pero solo un siglo después, la teoría de la relatividad los colocó definitivamente en el banquillo de los acusados. Y no solo eso, también la masa, hasta entonces considerada como una propiedad indiscutida de la materia, comenzó también a ser algo relativo, algo que dependía del punto de vista. Ya no se puede hablar de una masa absoluta. Otro golpe duro al materialismo.

Pero es sobre todo la mecánica cuántica lo que supone un bombazo en el corazón del pensamiento realista y materialista.

Los descubrimientos científicos que se han venido produciendo a lo largo del siglo XX nos han obligado a echar por tierra el valor absoluto de lo material. Lo corpuscular no siempre es corpúsculo, y no está claro el modo en que “existe” cuando no lo observamos. Pero, sobre todo, y aún más grave que eso, existen fenómenos que no se pueden explicar por causas naturales. El lugar concreto y específico que ocupan las partículas cuando se las observa no tiene ninguna causa natural, puesto que obedecen a una aleatoriedad esencial. Es el fin del determinismo.

Y más grave aún, parece cuestionarse muy seriamente la independencia de la realidad objetiva, cuando no existe ningún observador. E incluso, como hemos visto, dos observadores distintos pueden llegar a conclusiones irreconciliables sobre una misma realidad (para uno se da un fenómeno de interferencia, para el otro se ha producido ya el colapso cuántico). Existen además “influencias fantasmales” entre partículas alejadas cientos de millones de kilómetros aniquilando así el principio de *influencia únicamente local en el espacio*.

El mundo occidental se resiste como gato panza arriba, y trata a toda costa de defender que la realidad objetiva existe por sí misma, que todo obedece a unas causas, a unas leyes, etc. Pero los hechos incuestionables que están ocurriendo en los laboratorios científicos nos obligan a cambiar dolorosamente el rumbo de nuestros afianzados sistemas de pensamiento occidental.

Pero lo más significativo es que, ante la imposibilidad de poder defender la existencia de una realidad objetiva ahí fuera, que se comporte de manera lógica y de acuerdo con el sentido común, la gran mayoría de los científicos adoptan de manera pragmática la postura positivista. No se plantean preguntas difíciles y se dedican a “callar y calcular”. Hay mucho trabajo en el diseño de tecnologías y en la innovación, no hay tiempo para hacerse preguntas “inútiles”.

Esto ayuda a responder una de las preguntas que seguro te ha surgido a lo largo de todo el curso ¿Cómo es posible que la mayor parte de la gente tenga una total ignorancia de todos estos fenómenos cuánticos? ¿cómo es posible que pocos hayan oído hablar del Principio antrópico fuerte o de la Teoría del ajuste fino? ¿cómo es posible que nada de todo esto se estudie en las escuelas? ¿por qué no se divulgan mejor todos estos experimentos y descubrimientos? En mi opinión, la respuesta tiene muchas causas posibles, pero podría resumirse en las siguientes:

- Como decía, la mayoría de los científicos no se molestan en buscar una interpretación filosófica al fenómeno cuántico, siguen la regla del “calla y calcula” (actitud positivista). Si no hay nada que interpretar, no hay nada que divulgar.

- No existe un consenso en la interpretación de qué está sucediendo realmente en los fenómenos cuánticos. Los pocos científicos con inquietud intelectual que se plantean la difícil cuestión de qué está sucediendo realmente asumen distintas interpretaciones, muy influidos por su propia ideología (positivista / atea/ religiosa). Exactamente igual que hacemos tú y yo ahora mismo.

Hay quien va más allá y opina que podría existir un intento deliberado de no divulgar a la población general los experimentos científicos y sus consecuencias filosóficas porque podrían “*malinterpretarse*”, pero ¿en qué sentido podrían *malinterpretarse* y por qué eso da miedo? Quizás lo entendamos cuando entremos en el siguiente capítulo.

Ahora estamos por fin preparados para entrar en el increíble mundo de las interpretaciones de la mecánica cuántica.

1.21 Las distintas interpretaciones al enigma cuántico

En el mundo de las interpretaciones **la imaginación** toma ahora las riendas, pero no desdeñemos a esta “loca de la casa” porque fue ella quien creó toda la teoría de la relatividad especial y la relatividad general. Recuerda que toda esa teoría se construyó a base de experimentos mentales propuestos por un solo hombre. Solo después de estar la teoría totalmente construida se demostró experimentalmente.

Aun así, es preciso reconocer que cuando entramos en el ámbito de las interpretaciones nos alejamos del método científico, es por esto por lo que los positivistas desdeñan totalmente este ámbito del pensamiento. Y en efecto, entramos ahora más en el ámbito de la filosofía, o incluso de las creencias. Como verás incluso los científicos que pretenden ser más ortodoxos también tienen sus creencias.

Las diferentes interpretaciones las he agrupado en dos. Las que salvan la realidad como algo objetivo que realmente existe ahí fuera, con independencia de nosotros. Y las que tienen una visión que se acerca al idealismo alemán.

Comprobarás que es fácil entender que las interpretaciones están muy relacionadas con la ideología existencial que cada uno pueda tener.

“Difícilmente encontraremos entre los talentos físicos más profundos un solo que esté sin un sentimiento religioso propio” (Albert Einstein).

1.21.1. Las soluciones realistas

No hay duda de que el pensamiento dominante en el mundo occidental en estos momentos es “realista”. Nadie en su sano juicio pone en cuestión la existencia objetiva de las cosas de ahí fuera, una existencia que se mantiene “por sí misma”. Aunque los experimentos científicos nos estén mostrando cosas increíbles, y los hechos no se pueden cuestionar, es necesario para nosotros los occidentales salvar la existencia de las cosas de ahí fuera, y tenemos que proponer teorías que puedan hacer esto viable. Veremos que no es nada fácil.

Los multiversos

Aunque resulte algo decepcionante, la interpretación que dan algunos científicos vuelve a apostar por los múltiples universos. Se ha mostrado como una solución de enorme utilidad para lograr salir de atolladeros.

En este caso, la solución de los multiversos la aplicaron a la mecánica cuántica Brian R. Greene y H. Everett.

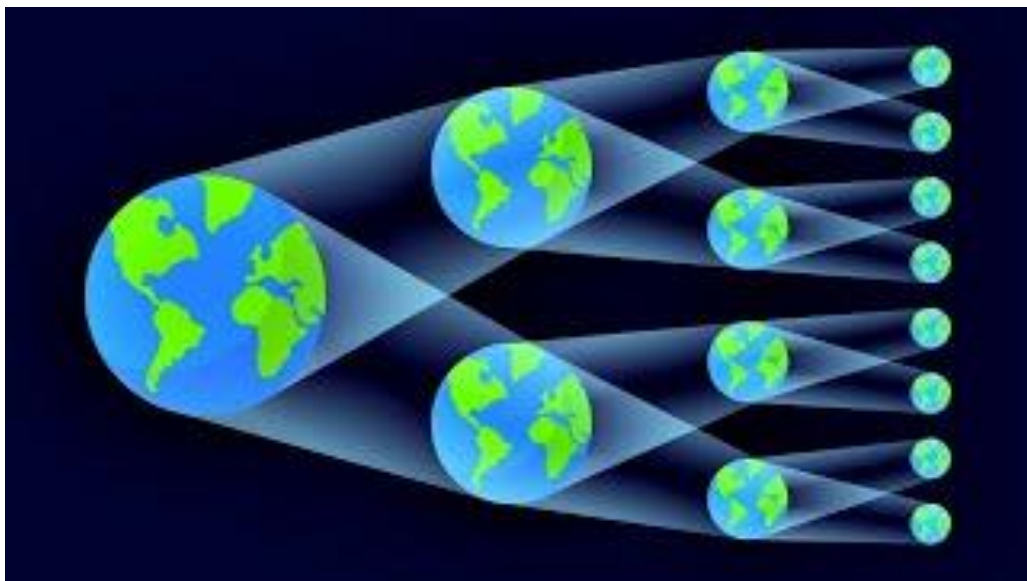
Según ellos, cuando el fotón se encuentra con un espejo semi reflectante y tiene que “elegir” si lo atraviesa o se refleja, nuestro universo se desdobla en dos. En uno de los universos (llamémoslo universo A) el fotón se ha reflejado y alcanza la caja de arriba, el gato se ha muerto, el amigo de Wigner está triste y Wigner que está fuera lo siente mucho también cuando luego se entera. Y en el otro universo (el universo B) el fotón atravesó el espejo semi reflectante, está en la caja de abajo, el gato está vivo y el amigo de Wigner y Wigner lo celebran. Por supuesto los habitantes del universo A no tienen constancia de la existencia del universo B, ni tienen posibilidad en absoluto de contactar con él jamás. Y viceversa.

Así, cada vez que una partícula elemental “elige” su posición, se crean distintos universos, un universo correspondiente a cada posible elección. Y si Penrose tiene razón y dentro del complejísimo sistema neuronal del cerebro humano se dan fenómenos cuánticos, también cada vez que una persona “toma una decisión” se crean también distintos universos, uno para cada posible decisión que podría haber tomado. Hay un universo por ahí flotando en el que Cesar decidió no cruzar el Rubicón, no hubo por tanto guerra civil romana con Pompeyo, nunca hubo un César emperador, Roma fue siempre una república, no hubo ningún “Cesar” Romano, ni ningún “Kaiser” alemán, ni ningún “Zar” ruso que quisiera emular a Julio “Cesar”.

Nótese que aquí no estamos hablando de infinitos universos que se crean en un inicio, y luego existen obedeciendo sus leyes naturales de manera indefectible, como habíamos supuesto cuando hablábamos del principio antrópico.

Ahora estamos hablando de que, **en cada instante**, se crean infinitos universos distintos. Pero en cada universo solo ha sucedido una de las cosas en el pasado, y todo el pasado es coherente en cada uno de ellos ¹⁷.

Por supuesto nadie es capaz de explicar, ni remotamente, cómo hacen los otros universos para crear “interferencias” en el nuestro. Y desde luego es indemostrable la existencia de todos esos otros universos. Pero, sobre todo, queda sin explicar tampoco por qué, cuando un observador realiza una medida, ya no se producen interferencias entre los distintos universos ¿tiene el ser humano tanto poder como para aislar universos?



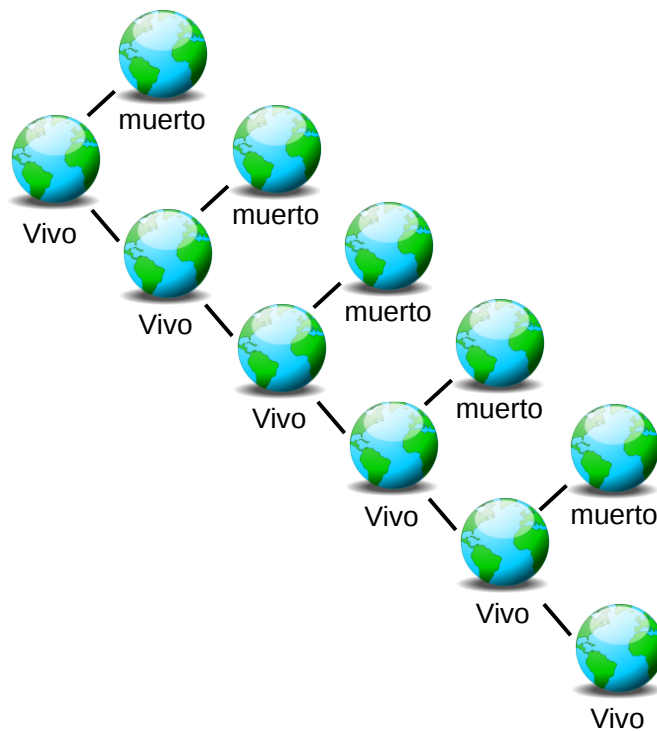
Para intentar refutar esta alocada hipótesis de los multiversos que se crean y se desdoblan constantemente Moravec propuso en 1987 el experimento mental del *suicidio cuántico*. La idea era poder demostrar de algún modo si la Hipótesis de Bohr es la correcta (la superposición cuántica colapsa cuando se realiza una medida) o es correcta la hipótesis de los multiversos.

¹⁷ Para seguir reflexionando: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56780694>

El suicidio cuántico

El experimento mental es muy similar al gato de Schrödinger, pero en este caso, en lugar de un gato tenemos una persona. La persona acciona el mecanismo cuántico y tiene un 50% de probabilidades de morir o vivir. Cada vez que se acciona el mecanismo, el universo se desdobra en dos. En un universo vive, y en el otro muere. Si lo acciona cinco veces, tendremos seis universos distintos:

1. En un universo se murió en el primer intento.
2. En otro universo sobrevivió al primer experimento, pero se murió en el segundo intento.
3. ...
- 4.
5. En otro universo se murió en el quinto intento.
6. En otro universo sobrevivió también al quinto intento.



Aunque lo hiciéramos mil veces siempre habría un universo en el que sigue vivo.

El problema es que este experimento no serviría para demostrar nada, porque el resto de las personas estaríamos en uno de esos 6 posibles universos, y por tanto el suicida podría haberse muerto perfectamente, con las mismas probabilidades que si los multiversos no existieran.

Solo el suicida, que solo puede estar en el universo 6 (porque en los otros está muerto), quedaría totalmente impresionado de seguir vivo. Pero los científicos del universo 6 que lo analizan verían que si lo hacen con otra persona se muere en el segundo o el tercer intento. Simplemente ese suicida tuvo suerte. Por supuesto siempre habrá un universo (entre muchísimos) en donde todos los suicidas siguen vivos por mucho que sigan accionando y accionando el aparato. En ese universo los científicos quedarían impresionados por la suerte que tienen todos los suicidas cuánticos (pero es solo un universo entre millones).

En fin, no quiero ni pensar lo que diría Ockham de esta extraña solución de los multiversos cuánticos, pero imagino que lo primero que diría es que la palabra *universo* viene de “*único*”, porque **todo** tiene que estar incluido en él, es precisamente esa su definición.

Pero existe otra opción que salva la existencia de las cosas “reales” de ahí fuera. Una solución que es la gran esperanza de la ciencia occidental actual. Ahora bien, es preciso tener presente que la desigualdad de Bell ha dejado demostrado para siempre que cualquier interpretación va a ser ya siempre “rara”.

La decoherencia cuántica

Desde finales del siglo XX muchos científicos ensayan con una interpretación que podría resolver el problema de la medida. Especialmente se trata de sacar de la ecuación al observador consciente, de manera que no le demos a él un papel más importante que a la cámara de video.

Los científicos han propuesto que, cuando realizamos una medida para saber dónde está el fotón, la interacción de la ecuación de onda del fotón con las ecuaciones de onda de los millones de partículas de la pantalla fotosensible y del entorno produce un enorme grado de complejidad en el sistema compuesto que hace, en última instancia, que la ecuación de onda colapse. Y esto se produciría desde el momento en que el fotón impacta en la pantalla, **con independencia de si un observador consciente lo mira o no**.

Lo mismo ocurriría en el experimento del gato de Schrödinger, desde el mismo momento en que lanzamos el fotón, al interactuar con el entorno y con el aparato detector, el fotón colapsa, y por tanto estará, por ejemplo, en la caja de arriba **desde el principio**. Con independencia de si el observador consciente ha realizado la observación o no.

Y además, según esta teoría, el propio gato, que consta de 10^{23} átomos añadiría una complejidad tan enorme que no se podría sostener de manera coherente la interacción de las ecuaciones de onda. Esto produciría el colapso de los objetos macroscópicos, y por esta razón los vemos en un solo lugar. Porque, en realidad, según esta teoría, están **siempre** en un solo lugar, **los observemos o no**.

El colapso de las ecuaciones de onda es un proceso irreversible que se da en el proceso de interacción con el ambiente y, por supuesto, en la interacción con los aparatos de medida, con independencia de que exista o no un observador consciente mirando el aparato.

Esta teoría contradice las reflexiones que vimos en relación con la cadena de Von Neumann. Recordemos que Von Neumann ya había considerado al aparato de medida como un conjunto enorme de partículas elementales, y había llegado a la conclusión de que no existía ninguna razón “cuántica” para que se produjera ningún tipo de colapso, ni nada semejante. Según él, el fotón interactuaría con todas esas partículas y todas ellas seguirían en “superposición cuántica”, y lo mismo ocurriría con el gato, con la cámara de video, etc. Pero esta nueva propuesta de la decoherencia cuántica considera que un “*determinado grado*” de complejidad provoca el colapso.

El punto fuerte de esta propuesta es que parece resolver el problema de la necesidad de un observador consciente para lograr el colapso de la onda cuántica. Y también explicaría por qué se da el fenómeno de la interferencia en las partículas de tamaño cuántico, y no se da en los objetos macroscópicos.

Sin embargo, no se ha demostrado de ninguna forma que la decoherencia se produzca debido al incremento de complejidad. Y tampoco se explica bien como sucede esto, razón por la cual volvemos a estar “al límite” de la ciencia.

Y desde luego, en cualquier caso, subsisten en esta solución todos los problemas que hemos ido descubriendo en los experimentos que hemos estudiado en este capítulo de mecánica cuántica:

- Si de verdad la onda cuántica colapsa por efecto de la complejidad de las interacciones, de alguna manera sigue respetando la onda de probabilidades que llevaba en origen. Es decir, el fotón ha colapsado cuando se estrella con la pantalla fotosensible, y esto supuestamente es debido a la complejidad de la interacción con las partículas de la pantalla. Hasta ahí bien. Pero ¿por qué no se sitúa nunca en las líneas de interferencia que quedan oscuras? De alguna manera, el fotón colapsa, pero respeta al 100% la teoría cuántica de las ondas de Schrödinger.

- Se han logrado superposiciones cuánticas de moléculas orgánicas de 356 átomos. El proyecto Q-Xtreme se propone lograr la superposición cuántica con objetos macroscópicos detectables por el ojo humano, de manera que no se sabe muy bien **donde está el límite de complejidad** que hace que la onda cuántica colapse.
- Por tanto, sea como sea, por supuesto, en esta solución todos los enigmas de la mecánica cuántica, que son un hecho, siguen existiendo:
- La **aleatoriedad esencial** sigue existiendo, es decir, siguen sin existir causas que definan dónde se sitúa una partícula en concreto cuando colapsa.
- Las **influencias fantasmales (no localidad)** siguen existiendo. Una partícula que es detectada por un aparato aquí en la Tierra provoca, de manera instantánea, que otra partícula entrelazada que está en la galaxia Andrómeda cambie su estado. El matiz es que, en este caso, el colapso cuántico y “las influencias fantasmales” entre dos partículas entrelazadas se producirían en cuanto el aparato detecta el estado de una de ellas, no en cuanto alguien consciente lo observa.
- La decoherencia cuántica tiene también el reto de explicar cómo es posible que se dé el fenómeno de la **“decisión retardada”** que vimos con Wheeler, donde el fotón parece rectificar su decisión de ir por un camino o por los dos a la vez, cuando le modificamos la estructura del experimento a mitad de recorrido.
- Y desde luego es preciso explicar el fenómeno de las **experiencias irreconciliables** que ocurren en el experimento del **amigo de Wigner**, donde dos personas están midiendo resultados muy distintos del mismo fenómeno. Para uno se da el fenómeno de interferencia y está todo por decidir. Para el otro no hay interferencia porque la suerte está echada desde el inicio.

La teoría de la decoherencia cuántica está evolucionando en estos momentos con gran rapidez, pero son muchos los científicos de primera línea que consideran que esta teoría, en realidad, no resuelve el problema del observador consciente. Por lo demás, existen otros problemas con esta teoría que, por ser excesivamente “técnicos” no son objeto de este curso, que están relacionados con la necesidad de un sistema “privilegiado” (un problema similar al que dio lugar a la relatividad).

“La decoherencia, en realidad, no resuelve el problema de la medida”. (Leggett) Premio Nóbel de Física 2003.

Hasta ahora hemos visto las dos principales interpretaciones de la mecánica cuántica que tratan de salvar el problema del observador consciente, tratándolo de sacar de la ecuación. Existen, sin embargo, otras propuestas que ponen el punto central del proceso precisamente en ese agente singular.

Es curioso analizar como el pensamiento cultural e ideológico dominante influye en cada época para dar validez a las distintas hipótesis posibles. Ya vimos en el capítulo anterior que la navaja de Ockham fue uno de los argumentos más fuertes a la hora de decidimos por la teoría de Copérnico, quien apostaba por que todos los planetas, incluida la Tierra, daban vueltas alrededor del sol. En frente tenía la hipótesis de que la Tierra era el centro del universo, hipótesis que exigía múltiples y complicadísimas esferas y epiciclos que debían girar de manera complejísima, y así poder explicar los complicados movimientos de avances y retrocesos que veíamos en los planetas y otros astros. La solución más sencilla era la correcta. Copérnico y Ockham tenían razón. La tierra giraba alrededor del sol.

En aquel momento, en el siglo XVI, la dificultad se hallaba en que era muy difícil de asumir **filosófica, cultural y religiosamente** que el hombre no estuviera en el centro. Pero la navaja de Ockham era difícil de descartar y nos llevó, al final, a que el hombre era un ser que vivía pegado a una de las muchas “piedras” que giran alocadas alrededor de una estrella, estrella que nada tenía de particular entre los millones de estrellas que divisábamos en el firmamento. Algo realmente difícil de asumir entonces.

En la actualidad la dificultad es similar, pero se da el proceso contrario. Inmersos ahora en un caldo cultural en el que el hombre parece interpretarse como un animal más, como algo compuesto solo de polvo de estrellas, que funciona solo de acuerdo con leyes físicas y químicas universales, un mundo en el que el planeta Tierra parece ser uno más de los miles de millones que puede haber por ahí **¿cómo asumir ahora que el hombre es pieza fundamental en el universo?** ¿cómo asumir que es la conciencia humana la que es capaz de colapsar la realidad? ¿cómo asumir que existe un *ajuste fino* en el universo que parece estar diseñado para hacer posible la existencia del ser humano?

En el siguiente apartado analizaremos dos posibles interpretaciones que colocan al ser consciente en el centro del fenómeno cuántico. Como ya dijimos, estamos saliéndonos ahora del método científico, y es precisamente por este motivo por el que las interpretaciones del mundo cuántico comienzan a chocar con los distintos posicionamientos existenciales que pudiera tener cada lector.

Los hechos de los experimentos científicos no tenemos más remedio que aceptarlos, por increíbles que sean, pero somos muy libres de rechazar las interpretaciones que no nos encajen. Aun así, conviene exponerlas para cerrar el curso de manera honesta.

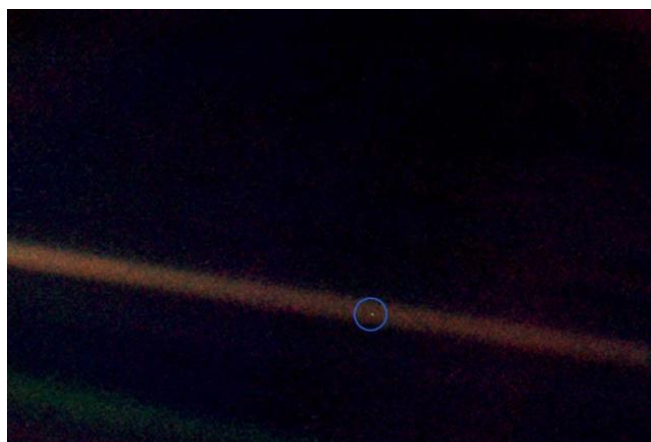
1.21.2. El hombre es el centro

Los padres de la mecánica cuántica y muchos de sus principales exponentes (Max Planck, Bohr, Von Neumann, Wigner, Wheeler) siempre han considerado que el fenómeno de la conciencia está íntimamente relacionado con el colapso de la onda cuántica. Esto nos lleva a poner al ser consciente en el centro mismo del universo natural.

“El imperativo de encontrar una salida de este atolladero no debería verse amortiguado por el miedo de suscitar las burlas de los sabios racionalistas” (Schrödinger).

Si es cierto que el ser consciente tiene un papel tan relevante en el colapso de la onda cuántica, la existencia de las cosas de “ahí fuera” cuando no son observadas sería cuestionable y muy problemática, como ya venían advirtiéndolo, por otra parte, los filósofos europeos desde el siglo XVII.

Pero ¿cómo recibe el mundo occidental semejantes interpretaciones? ¿cuál es el pensamiento cultural y filosófico dominante hoy respecto al hombre? En 1990 Carl Sagan logró convencer a la NASA para que la sonda Voyager 1, que por entonces se encontraba ya casi fuera del sistema solar (a 6.000 millones de km de distancia), girara su cámara para echar un rápido vistazo hacia atrás y enfocara al planeta Tierra. Esta fue la famosa foto que nos envió.



“Todo lo que conocemos”, La Tierra, se ve como un ínfimo punto azul.

Carl Sagan escribió entonces una magnífica oda a **la insignificancia del hombre**.

*“Mira ese punto. Eso es aquí. En él, todos los que amas, todos los que conoces, todos de los que alguna vez escuchaste, cada ser humano que ha existido vivió su vida. La suma de todas nuestras alegrías y sufrimientos, **miles de religiones seguras de sí mismas**, ideologías y doctrinas económicas, cada cazador y recolector, cada héroe y cobarde, cada creador y destructor de civilizaciones, cada rey y campesino, cada joven pareja enamorada, cada madre y padre, niño esperanzado, inventor y explorador, cada maestro de la moral, cada político corrupto, cada “superestrella”, cada “líder supremo”, cada santo y pecador en la historia de nuestra especie, vivió ahí – en una mota de polvo suspendida en un rayo de sol (...) **Nuestras posturas, nuestra importancia imaginaria, la ilusión de que ocupamos una posición privilegiada en el Universo... es desafiada por este punto de luz pálida.**”*

*“El Universo no parece ni benigno ni hostil, simplemente indiferente a las preocupaciones de seres tan **insignificantes como nosotros**” (Carl Sagan).*

Para Carl Sagan la supuesta importancia que el ser humano se da a sí mismo es “imaginaria”, una “ilusión”. En realidad, el hombre sería, como él dice, “insignificante”. Pero, bien mirado, sorprende precisamente ese calificativo, puesto que es precisamente el ser humano el único ser capaz de dar significado a las cosas.

A pesar de Sagan, en defensa de la hipótesis de este apartado, que el hombre parece mantenerse en el centro mismo de la razón de ser del universo, algunos pensadores, científicos, filósofos y teólogos apuntan a las siguientes ideas (todas ellas discutidas en este curso):

1. Ya desde Descartes, y sobre todo con los movimientos filosóficos posteriores, se ponía en cuestión si tiene sentido pensar en una realidad extramental de las cosas ¿las cosas ahí fuera tienen algún tipo de realidad por sí mismas? Este pensamiento llega a su máxima expresión con Berkeley. Hoy en día, los experimentos científicos realizados en la investigación de la mecánica cuántica parecen insistir de nuevo en que la realidad ahí fuera tiene una existencia cuestionable hasta que no la observa “alguien consciente”, o al menos no existe de la manera en que parecía dictarnos el sentido común.

“La consciencia es la base fundamental de la que deriva todo” (Max Planck).

*“Es útil en la vida práctica decir que **el mundo existe “ahí fuera”** con independencia de nosotros, pero esa visión **ya no puede sostenerse**” (Wheeler).*

2. Como hemos visto a lo largo de este curso, el universo parece estar diseñado con un increíble “**ajuste fino**”, desde sus inicios. El ajuste exacto necesario para hacer posible la existencia de vida y del ser humano (principio antrópico fuerte). Un ajuste fino que desconcierta a toda la comunidad científica.

“No es únicamente que el hombre esté adaptado al universo. El universo está adaptado al hombre ¿Imagina un universo en el cual una u otra de las constantes físicas fundamentales sin dimensiones se alterase en un pequeño porcentaje en uno u otro sentido? En tal universo el hombre nunca hubiera existido. Este es el punto central del principio antrópico. Según este principio, en el centro de toda la maquinaria y diseño del mundo subyace un factor dador-de-vida” (John Wheeler).

3. El orden universal que percibimos es realmente chocante, y fue esta sorpresa la que puso en marcha todo el movimiento filosófico griego y la posterior ciencia occidental. La creencia durante los últimos 2.500 años en ese orden inexplicable, en esas “leyes” que debían estar ahí fuera escritas en algún sitio y que gobernaban el mundo, esa creencia casi fundamentalista, es la que habría permitido que Occidente persiguiera y buscara unas leyes que “debían estar ahí”.

Ninguna otra civilización creía que pudieran existir esas leyes matemáticas que ordenaban el mundo, **y por eso no las buscaron**.

4. En todo el universo somos el único ser conocido que es capaz de razonar, de hablar, lo único que parece ser consciente de sí mismo, lo único que parece tener “libertad”. Es por tanto lo único en el universo conocido que puede ser considerado “responsable de sus actos”. El hombre sería una especie de “*extrauniverse*”, a juicio de algunos pensadores, **el mayor misterio del universo**.

Por otra parte, todos los científicos están de acuerdo en que, a nivel de estructura de sistemas, el cerebro humano es la estructura más compleja del universo conocido.

5. El misterio de que las leyes naturales y su exactitud matemática pueden ser comprendidas por nosotros parecería colocarnos también en una situación privilegiada ¿cómo es posible que las leyes que gobiernan el universo lo hagan de acuerdo con un lenguaje matemático que parece estar también en nuestra mente?

Es evidente que las leyes naturales se comportan de manera matemática, pero ¿cómo es posible que nuestra mente comprenda esa matemática compleja?

Por otra parte, al parecer los desafíos naturales a los que nuestros antepasados prehistóricos se enfrentaron en la sabana en África produjeron un ser increíblemente inteligente, capaz de planificar complejas estrategias de caza, capaz de adaptar la construcción de sus viviendas al entorno con los medios disponible. Pero,... esa presión biológica de hace casi 100.000 años ¿cómo pudo preparar en aquel entonces una mente con una capacidad matemática tan asombrosa que, mucho tiempo después, sería capaz de entender las ecuaciones diferenciales, las series e integrales complejas, el hamiltoniano y el lagrangiano, la geometría avanzada n-dimensional y muchos otros increíbles logros de la matemática y la física que nos permiten dominar la mecánica de partículas, los fenómenos relativistas y cuánticos, predecir el comportamiento de las estrellas y los agujeros negros, entender el inicio del universo, etc.? ¿Las capacidades de procesamiento de nuestro cerebro, de intuición y análisis matemático que eran precisos para sobrevivir en la sabana son las mismas capacidades que son precisas para entender el comportamiento cuántico en la superficie de los agujeros negros? ¿de dónde nos viene tan increíble capacidad?

“Lo más sorprendente del universo es su inteligibilidad” por el ser humano (Einstein).

Aún con todo, es difícil aceptar la importancia del ser humano en el universo cuando vemos la foto que tomó la Voyager 1 en 1990. Pero quizás ¿no es porque damos demasiada importancia al *tamaño*? Nos obsesiona que nuestro planeta sea algo muy pequeñito en un universo inmenso y desproporcionado. Y el hecho de que sea pequeño lo asociamos con que es algo “insignificante”, algo sin importancia, pero ¿dónde está la relación entre el tamaño y la dignidad? ¿dónde está la relación entre el tamaño y lo “significante” o “insignificante”? ¿qué importancia tiene el tamaño de las cosas?

“Todos los cuerpos, el firmamento, las estrellas, la tierra y sus reinos no valen más que la menor de las mentes, ya que ésta los conoce a todos y a sí misma también, mientras que los cuerpos no conocen nada” (Pascal).

*“Considera primero que **lo grande** o brillante **no supone excelencia**. La tierra, tan pequeña, comparada con el cielo y faltándole la luz, puede albergar más sustanciosos bienes que el sol, que estérilmente brilla, y cuya virtud no produce ningún efecto en él, sino en la fecunda tierra”* (Milton).

“La mecánica cuántica nos liberó de la pesada losa del materialismo determinista” “Bohr deshizo lo que Copérnico había hecho. Volvió a situar al hombre en el centro de su propia representación del Universo” (Bernard d’Espagnat).

Pero si, como decía Berkeley, y como decían los idealistas, y como parecen inducirnos a pensar los fenómenos cuánticos, la existencia de “algo” parece necesitar a un sujeto consciente que lo perciba, surge entonces la pregunta difícil ¿existía algo antes de la aparición del ser humano? ¿existía algo antes de la aparición del primer ser consciente?

Desde luego, solo el hecho de formular esta pregunta es ya realmente atrevido en cualquier análisis serio de la cuestión. Aun así, en el siguiente apartado nos tomaremos esta pregunta en serio, porque científicos eminentes así lo hicieron.

El principio antrópico participativo. Wheeler.

Antes de entrar en estas espinosas cuestiones presentemos al eminente científico John Archibald Wheeler; hablamos de uno de los más importantes físicos teóricos del siglo XX, creador de los términos “agujero negro”, “agujero de gusano”, “geón”, “espuma cuántica”, etc. Es uno de los padres de la física moderna.

Wheeler y otros eminentes científicos han reflexionado mucho sobre las cuestiones que dejábamos esbozadas al final del anterior apartado ¿Qué tipo de existencia tenía el universo antes de la aparición de los primeros seres conscientes?

Para Wheeler, antes de la existencia de la primera persona, antes del primer ser consciente, todo eran ondas cuánticas de “posibilidad”. Solo cuando aparece la primera persona consciente colapsa toda la realidad anterior y, en ese momento, se crea todo el camino de los tiempos pasados que llevan a la existencia del ser humano, desde el origen del tiempo...

Tengamos prudencia a la hora de tomar por loco o ignorante a alguien como Wheeler. Recordad que es uno de los más eminentes físicos teóricos del siglo XX. Podemos, por supuesto, no estar de acuerdo, sería lo más natural, pero no despreciemos sus propuestas sin un análisis previo.

Por tanto, entonces cabría preguntarse ¿qué tipo de realidad tuvieron los dinosaurios que “existieron” antes de cualquier ser consciente? ¿qué realidad tuvieron todos los acontecimientos que ocurrieron antes de la existencia de la primera persona consciente de sí misma?

Son cuestiones que parecen ridículas, pero han sido analizadas muy en serio por los grandes científicos y pensadores como consecuencia de las reflexiones que hemos venido haciendo hasta ahora.

Las interpretaciones que ponen al observador consciente en el centro del fenómeno cuántico parecen estar queriendo decirnos que todo el pasado del universo habría estado en superposición cuántica hasta que el primer ser consciente apareció en la tierra hace, digamos unos 100.000 años. Sería en ese momento cuando todas las superposiciones cuánticas colapsan, y pasa a “existir” todo el pasado de 13.700 millones de años. Por tanto, respondiendo a las burlas que Leibnitz le hacía a Newton, no habría sido necesario que Dios estuviera operando, supervisando, ni manteniendo el universo durante ese larguísimo periodo de tiempo de miles de millones de años, puesto que, al no haber seres conscientes en ese periodo, toda la historia se crearía, según Wheeler, de manera inmediata. Como en el caso del experimento del gato de Schrödinger, o como en el experimento de la medición retardada de Wheeler, **el pasado se crearía en el momento en que realizamos la observación.**

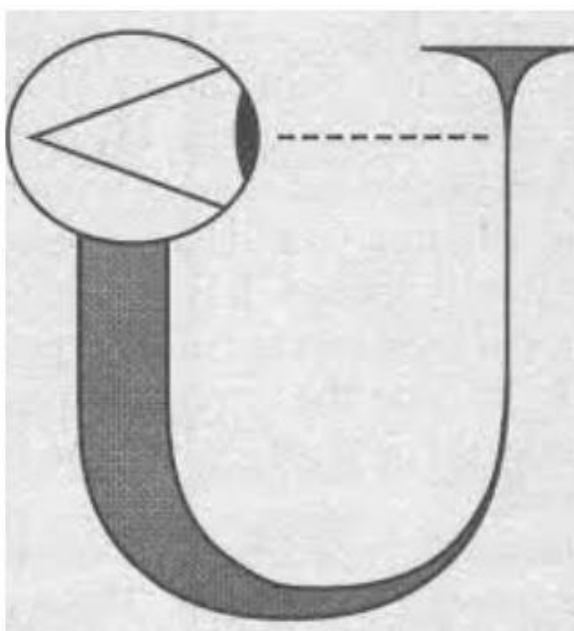
Recordemos, en cualquier caso, que el tiempo es solo una dimensión más, como la del espacio. Ni espacio ni tiempo tienen una realidad absoluta según la relatividad, y ya vimos que, según Kant, solo son atributos de nuestro pensamiento. Por otra parte, para la física moderna, el tiempo no es necesario que “fluya”. En la física moderna no tiene nada de particular “el presente”. El fluir del tiempo parece solo acontecer, en realidad, en la mente humana. Roger Penrose lo explica mucho mejor:

“La consciencia es, después de todo, el único fenómeno que conocemos según el cual el tiempo ¡necesita fluir! El modo de considerar el tiempo en la física moderna no es esencialmente diferente de la manera en que consideramos el espacio. El tiempo de las descripciones físicas no “fluye” en absoluto ¡solo tenemos un espacio-tiempo fijo de apariencia estática en el que están dispuestos los sucesos de nuestro universo! No obstante, según nuestras percepciones, el tiempo fluye” (Roger Penrose).

Es decir, todos los sucesos anteriores a la aparición de seres libres, conscientes de sí mismo (choques entre partículas, planetas girando, estrellas explotando, galaxias expandiéndose, etc.) habrían estado en superposición cuántica, según Wheeler, hasta que un ser consciente, una mente libre (algo impredecible y por tanto imposible de determinar), toma “consciencia” de la realidad. En ese momento, según Wheeler, todo habría colapsado, y se habría creado todo el pasado como una única realidad coherente para todos.

“La consciencia me parece un fenómeno de radical importancia. Es el fenómeno en el que se hace conocida la misma existencia del universo. Podemos argumentar, por tanto, que un universo gobernado por leyes que no permiten la consciencia no es un universo en absoluto” (Roger Penrose).

Tras estos análisis, llegamos a la conocida frase de John Wheeler “Mirar atrás ahora ¿da realidad a lo que ocurrió entonces?”. Es decir, Wheeler no solo cuestiona qué tipo de realidad tuvieron los miles de millones de años que transcurrieron antes de la aparición de la vida consciente ¡Wheeler va aún más lejos! En su propuesta del Principio Antrópico Fuerte Participativo propone la locura de que ¡es la propia conciencia del ser humano la que ha dado realidad al universo!



Este dibujo esquemático que hizo John Wheeler es la figura más emblemática del Principio Antrópico Fuerte “participativo”. El ojo somos nosotros, que miramos hacia el pasado, hacia el origen del universo, y le damos realidad.

Resumamos. Cuando vimos el principio antrópico, en el capítulo anterior, nos quedó pendiente profundizar en el principio antrópico fuerte **participativo**. Recordamos que el principio antrópico fuerte es difícil de asumir para los ciudadanos occidentales del siglo XXI. Lo que decía este principio es que el hombre existe porque todas las condiciones de las leyes naturales, las características de los átomos, todo lo que caracteriza a este universo tiene la configuración precisa y **necesaria para** que el hombre **pueda** existir, para que el hombre exista.

Pero la pregunta más intrigante es la que propone el principio antrópico fuerte **participativo** ¿es posible que esa consciencia creadora sea el propio hombre?

“El universo solo podía acceder a la existencia si alguien lo observaba. No importa que los observadores aparecieran varios miles de millones de años más tarde. El universo existe porque tenemos conciencia de él” (Martin Rees)¹⁸.

Por supuesto Wheeler encontró enorme oposición a este tipo de ideas, evidentemente. Pero él, para intentar explicarlo, puso el ejemplo de algo que le ocurrió en una fiesta en la que los invitados le gastaron la típica broma. Le pidieron que adivinara una palabra en un máximo de 20 preguntas, a las que respondían con un sí o un no. Antes de llegar a la pregunta 20 Wheeler había descartado todas las opciones posibles, la palabra tenía que ser “un roble”, y eso fue lo que dijo. La broma consistió en que los invitados no tenían pensada, en realidad, ninguna palabra. Fue Wheeler quién fue creando la palabra con sus preguntas, y los invitados con sus respuestas. Wheeler se plantea si es posible que nosotros con nuestras preguntas estemos *creando* las leyes naturales.

En esta línea, existe otra anécdota, y otra frase realmente inquietante. Hendrick Casimir fue un eminente científico que predijo que debía existir una partícula opuesta al electrón, es decir, igual al electrón, pero con carga positiva, el positrón. Los científicos, e incluso él mismo, consideraron muy improbable esta hipótesis. Cuando años más tarde fue descubierta esta partícula, Casimir dijo *“A veces casi parece que las teorías no son una descripción de una realidad casi inaccesible, sino que lo que llamamos realidad es un resultado de la teoría”*

Lo que las reflexiones de Wheeler parecen decirnos es que, cuando analizamos y estudiamos las causas que originaron el universo estamos haciendo existir esas mismas causas. En cierto sentido, podemos afirmar que el Big Bang no existió hasta que alguien pensó en él, pero Wheeler lo diría como algo “literal”. Los dinosaurios no existieron hasta que los antropólogos no excavaron los huesos y los recompusieron, y crearon las teorías que dieron lugar a su existencia y a su extinción. El dinosaurio era, en la edad media, como el dragón, una quimera. Habría pasado a existir con los descubrimientos y teorías científicas del siglo XIX y XX. Y el meteorito de hace 65 millones de años habría pasado a existir cuando la ciencia creó dicha teoría.

¹⁸ *Martin Rees es Rector (Master) del Trinity College, Cambridge (2004-2012) y presidente de la Real Sociedad de Londres*

Evidentemente este tipo de propuestas plantean más problemas que soluciones. Porque no es posible entender **cómo hace el hombre para crearse para sí mismo un universo**, con solo ser consciente de sí mismo y pensar en él.

Y desde luego es mucho más problemático y difícil de entender cómo es posible que las leyes naturales las estemos creando nosotros al pensarlas. Un ejemplo que contradice esta manera de pensar es que la ley de gravitación universal no solo explicó el movimiento de los planetas (que era el problema que en ese momento se intentaba descifrar), sino que esa misma ley ha explicado otras muchísimas cosas, mucho más tarde, que por aquel entonces eran totalmente insospechadas. Las leyes están ahí fuera, y son de naturaleza matemática. Parece que ese es un misterio que hay que dar como un hecho.

Pero la razón de haber incluido este apartado en este curso es para mostrar lo aventurado de las ideas que surgen cuando eminencias científicas se ponen a pensar en la mecánica cuántica.

Lo que parece claro es que no entendemos bien qué puede ser la consciencia, ni qué implicaciones puede tener el ser consciente en la naturaleza. En el siguiente apartado abordamos muy brevemente esta cuestión.

Estudios científicos acerca de la consciencia

Como hemos visto en apartados anteriores, la mecánica cuántica nos ha metido de lleno en el estudio del problema de qué es la consciencia.

“Aunque la vida pueda ser el resultado de un accidente, no creo que pueda serlo la consciencia. Porque la consciencia es absolutamente fundamental. No puede ser explicada en términos de ninguna otra cosa” (Schrödinger).

¿Es posible que la consciencia tenga mayor nivel de realidad que la propia materia?

En este sentido, vale la pena destacar lo que algunos investigadores americanos están empezando a revelar tras el estudio de los mecanismos cognitivos de la consciencia.

Donald Hoffman, investigador cognitivo de la Universidad de California se expresa casi como Berkeley *“Creo que la consciencia y su contenido son todo lo que existe. El espacio-tiempo, la materia y los campos nunca fueron los residentes fundamentales del universo, sino que siempre han estado, desde el principio, entre los contenidos más humildes de la consciencia, dependientes de ella para su propio ser”.*

Según este punto de vista, estaríamos dando la vuelta al esquema natural como quien da la vuelta a un calcetín. En lugar de pensar que las conexiones neuronales crean la consciencia ¿es posible que ocurra justo al revés? ¿la consciencia es quien opera sobre las conexiones neuronales? Os dejo a continuación algunas frases de científicos de prestigio que os van a sorprender:

“La consciencia causa actividad cerebral, y no al revés. De hecho, es la consciencia quien crea todos los objetos y propiedades del mundo físico” (Donald Hoffman).

“Lo mental, la consciencia, puede actuar de manera intencionada sobre el cerebro físico” (Stapp, quien trabajó muchos años con Pauli y con Heissenberg).

“Insisto en que el misterio del hombre se ve increíblemente disminuido por el reduccionismo científico y su pretensión materialista de llegar a rendir algún día cuentas del mundo del espíritu en términos de actividad neuronal. Semejante creencia no puede ser considerada sino como una superstición” (John Eccles. Premio Nobel de medicina. 1963).

Para terminar el curso expondremos la interpretación más atrevida, que, por otra parte, es la interpretación más conocida y antigua.

Recuerda, en cualquier caso, que seguimos en el ámbito de las interpretaciones y, por tanto, fuera del método científico.

Un cuento de hadas

Dependiendo de nuestro posicionamiento previo, podemos considerar que esta interpretación que vamos a presentar es la más simple y sencilla, o la más absurda y fantástica.

La hipótesis tiene más de dos mil años y más de la mitad de la población mundial cree en ella, razón por la que no tengo más remedio que considerarla.

Esta hipótesis postula la existencia de un Dios creador, que es persona, que ha creado al hombre a su imagen y semejanza, y que además tiene un plan.

Es casi inadmisibles hablar de esto en este curso, que se supone que es de enfoque científico, pero es honesto contemplar también esta otra opción, porque lo realmente curioso de esta fantástica interpretación tan antigua, es que resulta encajar sorprendentemente bien con la mayor parte de los modernos desafíos científicos expuestos en este curso:

- Resolvería el problema de la teoría del ajuste fino, por el que se muestran tan sorprendidos los científicos. Según esta antigua interpretación de las cosas, el hombre existe porque el universo ha sido creado precisamente para que él exista. El hombre sería su **causa final**, en concordancia con lo comentado en el tercer capítulo de este curso. Esto explicaría también por qué las constantes universales y las leyes naturales que observamos parecen estar diseñadas desde un inicio para hacer posible la vida y el ser humano.
- Resolvería la paradoja del segundo principio de la termodinámica. Vimos que, si todo tendía al desorden desde hace más de 13.000 millones de años, es incompatible o extremadamente improbable la existencia actual de la vida y el ser humano. Esta interpretación explicaría la existencia de un orden tan increíble en el universo, la aparición de seres tan improbables como las plantas, los animales y los seres humanos.
- Resolvería el misterio de por qué el hombre es capaz de entender la matemática que está presente en el universo. Al haber sido creado el hombre a imagen y semejanza del creador, tiene la capacidad lógica de comprender la creación. La matemática sería parte de ese “logos” que los griegos habían identificado que existía tanto en el hombre, como en la naturaleza.
- Explicaría por qué el hombre es libre y consciente de sí mismo, y parece ser algo distinto a todo, que no encaja si lo comparamos con todo lo demás que observamos en el universo.

Pero es evidente que la ciencia no puede aceptar el concepto de que haya existido una “creación” del universo para el hombre, sabiendo todo lo que sabemos hoy del Big Bang, y todos los procesos que tuvieron lugar a lo largo de más de 13.000 millones de años ¿qué sentido tendría el transcurrir de todo ese larguísimo periodo de tiempo anterior a la existencia del hombre?

Actualmente existen distintas interpretaciones cristianas, musulmanas y judías para tratar de conciliar con el libro del Génesis los evidentes e indiscutibles conocimientos científicos que tenemos del pasado de la tierra y del universo.

Una posible respuesta a esta cuestión puede aventurarse a partir de la propuesta de Wheeler que hemos presentado en el apartado anterior. Todos los eones de tiempo anteriores a la aparición del ser humano consciente habrían sido “*creados*” justo en el momento en que apareció el ser humano como ser consciente, en cierta concordancia con la interpretación cuántica de Copenhague.

*“Actualmente lo que es compatible con la física es un Dios que habría determinado todo en el origen, o bien, **que intervendría en la reducción del paquete de onda cuántica**. Todo lo demás es físicamente imposible, salvo si Dios, precisamente, es un ser que puede no respetar las leyes de la física”* (Vincent Fleury, investigador del CNRS).

Pero ¿cómo se explica entonces lo que vamos descubriendo con nuestras investigaciones científicas sobre el pasado? Es indudable que el hombre, cuando investiga el pasado a través de la geología, la antropología, la paleontología, la astrofísica, etc. descubre que la tierra y el universo son muchísimo más antiguos que él. Desde luego esto es innegable, pero también cuando entramos en la habitación del experimento de Schrödinger y vemos el gato vivo, está muy enfadado porque lleva 24h sin comer ni beber y, sin embargo, según algunas interpretaciones de la mecánica cuántica, el gato acabaría de “reaparecer” en ese instante a la vida, y se habría “creado” en ese momento todo su pasado. El pasado geológico y astrofísico que el hombre va descubriendo con apoyo de la ciencia se habría “creado”, o más bien “producido”, como decía Bohr para los fenómenos cuánticos, justo en el momento en que apareció el primer ser consciente. Justo en ese momento habría colapsado la ecuación de onda “universal” que incorporaba todas las posibles opciones.

¿Pero por qué entonces la ciencia nos muestra que el universo lleva existiendo a lo largo de más de 13.000 millones de años? ¿por qué la onda cuántica no colapsó presentando un pasado de solo seis días?

El cristianismo (como el judaísmo o el islam) cree en un Dios que da máxima importancia a **la libertad del hombre**, y, precisamente por eso, se oculta de él. La razón de ocultarse sería esta; *si un Dios todo poderoso, omnipresente, que todo lo ve, se hiciera evidente ¿cómo podríamos vivir **con libertad** en un mundo así? ¿cómo vivir en un mundo donde una persona mucho más lista, más inteligente y buena ve todo el rato todo lo que hacemos?*

Dios siempre se ocultaría a sí mismo, y ocultaría el propio acto de la creación, y se ocultará para no hacerse evidente, respetando la libertad del ser humano, dándole la opción de creer o no creer. Por eso, cuando investigamos el pasado, siempre encontraremos unas **causas naturales** que puedan explicar nuestra existencia de manera “natural”. Y en efecto, la aparición del hombre se puede explicar, bien como un acto de creación consciente y planificado. Pero también a través de la formación de un universo (uno de los infinitos universos que flotan por ahí) que ha permitido que uno de los planetas de los infinitos que flotan por ahí albergara vida, y que esta vida evolucionara con el tiempo para transformarse en un ser inteligente y consciente de sí mismo.

¿Pero entonces el tiempo se creó en el momento en que apareció el ser humano? De acuerdo con el pensamiento de Kant el tiempo es solo un atributo presente en la estructura de pensamiento humano. Para Roger Penrose el “fluir del tiempo” acontece solo en la mente humana. Ningún fenómeno científico necesita incorporar el “fluir” del tiempo, por lo mismo que no existe un “fluir” del espacio.

“La consciencia es, después de todo, el único fenómeno que conocemos según el cual el tiempo ¡necesita fluir! El modo de considerar el tiempo en la física moderna no es esencialmente diferente de la manera en que consideramos el espacio. El tiempo de las descripciones físicas no “fluye” en absoluto ¡solo tenemos un espacio-tiempo fijo de apariencia estática en el que están dispuestos los sucesos de nuestro universo! No obstante, según nuestras percepciones, el tiempo fluye” (Roger Penrose).

Pero si el universo fue creado para el hombre ¿por qué es preciso un universo tan gigantesco? ¡Cuánto espacio desaprovechado! Por una parte, ya vimos en el tercer capítulo que el análisis de las leyes naturales que vamos descubriendo nos muestra que el ser humano no podría existir en un universo más pequeño, ni en un universo menos viejo. Pero existe además una causa final para la existencia de algo tan inmenso. Mucho antes de la aparición del primer telescopio en el siglo XVII, el cielo estrellado ha sido siempre, como decía Kant, inspiración para el hombre, inspiración de algo infinito y perfecto que ha evocado la idea de divinidad. Posteriormente, el desarrollo tecnológico de los telescopios nos ha ido mostrando un mundo desproporcionadamente grande, pero al fin y al cabo ¿qué importancia tiene el tamaño? El cielo sería, sobre todo, un decorado inmenso que tiene un propósito inspirador para el ser humano, que sigue y seguirá en búsqueda de respuesta para las últimas preguntas.

Algunas interpretaciones cristianas van aún más lejos, y a pesar de haberse propuesto hace trescientos años, parecen anticipar respuestas a muchos de los desafíos que los experimentos cuánticos nos muestran hoy. Hablamos ahora de Berkeley, el obispo irlandés.

Nos preguntamos ¿cómo encaja la existencia de las leyes universales con la existencia de Dios? ¿el mundo lo gobierna Dios o lo gobiernan las leyes naturales? Ya vimos en el capítulo de los desafíos de la física que la ciencia, al descartar la hipótesis de la existencia de Dios, de alguna manera, había necesitado *divinizar* las leyes naturales como algo omnipresente, increado, omnisciente, eterno, inalterable, etc. Para el obispo irlandés, sin embargo, las leyes naturales son solo algo que Dios pone a nuestra disposición para que podamos *conducirnos* en nuestro día a día en este mundo ordenado.

Un mundo sin leyes naturales sería totalmente caótico y sería imposible vivir en él ¿cómo saber cuándo cosechar? ¿cómo poder construir nada? ¿cómo saber qué es comestible? En realidad, sería imposible la existencia de nada coherente. Para Berkeley las leyes naturales no tienen una existencia por sí mismas, ni son inexorables. Serían solo “unas reglas del juego”, que permiten un entorno ordenado, racional y, hasta cierto punto predecible, donde un ser libre pueda vivir en libertad.

*“Las leyes naturales las aprendemos por la experiencia, que nos da a conocer que tales o cuales hechos van seguidos por tales o cuales otros, en el curso ordinario de las cosas” **“Nos da en efecto una previsión que nos habilita para regular nuestras acciones en provecho propio. Sin ese conocimiento quedaríamos perpetuamente indecisos. Este trabajo uniforme lo despliega la bondad y sabiduría del supremo espíritu (Dios)”** (Berkeley)*

¿Y qué sería la materia entonces? ¿existe la materia ahí fuera o no? Para Berkeley lo que existe es este lápiz que yo toco, esta mesa que yo veo. Con esos “objetos” de la vida cotidiana convivo, del mismo modo que un jugador en los juegos de ordenador da por hecho la existencia del árbol que se le aparece enfrente, ignorando los bits de los que está compuesto. Estas cosas existen solo cuando las observamos, y su existencia, si no las observamos, es evidentemente absurda según este filósofo irlandés. Sabemos que, si hemos dejado las llaves encima de la mesilla, ahí seguirán cuando volvamos, esto es todo lo que debemos saber. Desde luego, es asombroso el parecido con la interpretación que los de Copenhague hacen en relación con el desafío de los fenómenos cuánticos ¿y entonces cuál es la causa de que yo perciba los objetos de la vida cotidiana? Porque es evidente que yo no me las imagino, no las produzco yo, de hecho, muchas veces me gustaría que no existieran, pero ahí siguen, tozudamente presentes. Según Berkeley, estas cosas que yo veo y toco se imprimen en mi mente por acción directa de Dios, de espíritu a espíritu, porque, al fin y al cabo, solo los espíritus existen. Como diría San Pablo para intentar convencer a los filósofos griegos en el ágora de Atenas *“En Él vivimos, nos movemos y existimos”*. La materia, por tanto, no tendría según Berkeley una existencia independiente fuera de un espíritu y, por tanto, ningún objeto material subsiste por sí mismo, y tampoco el espacio, el tiempo, ni las leyes naturales, tendrían capacidad alguna para subsistir de manera independiente, por sí mismas¹⁹.

¹⁹ *“Realizada la creación, Dios no abandona su criatura a ella misma. No solo le da el ser y el existir, sino que la mantiene a cada instante en el ser, le da el obrar y la lleva a su término”* (Catecismo de la iglesia católica).

Cuando buscábamos en el capítulo de desafíos de la física los últimos elementos constitutivos de la materia nos encontramos con paradojas. Como parece que demostró Zenón hace casi 2.500 años, la existencia de la materia, el espacio y el tiempo parece no tener sentido lógico. Este genial discípulo de Parménides llegó a la conclusión de que quizás los sentidos nos engañan haciéndonos suponer que todo eso que vemos existe por sí mismo, pero quizás, son solo *sombras* de ideas divinas, como luego aventuró Platón.

Esta “virtualidad” de la materia y de las leyes naturales, y del mundo en general, explicaría la imposibilidad de que lo comprendamos totalmente, como demuestra el trilema de Munchausen y el Teorema de Gödel, que vimos en el capítulo tercero.

Por último, y de nuevo según Berkeley, el determinismo sería solo una ilusión. En efecto, si las leyes universales no existen por sí mismas ¿cómo poder defender el determinismo? Pero este filósofo va más allá, porque según él, los propios objetos no tendrían la capacidad de “chocar” ni transmitirse el movimiento de uno a otro, puesto que no tienen ninguna capacidad “por sí mismos” de producir ni provocar **nada**. Solo los espíritus tienen “capacidades”. Si nosotros percibimos que una pelota de billar choca con otra, y la otra ahora se mueve por efecto del choque, según Berkeley esto sucedería solo porque Dios quiere hacer **predecible** el mundo, no porque esa primera pelota tenga *ninguna capacidad* de transmitir movimiento a la otra. Dios podrá incumplir cuando quiera las leyes naturales de la misma manera que un jugador de ajedrez puede, cuando quiera, mover el alfil como si fuera el caballo. Las leyes universales no tendrían existencia por sí mismas, pero su existencia sería necesaria para que el hombre fuera capaz de “conducirse” en el juego de la vida.

Aun así, Dios, que sería el señor de la historia y tendría un plan, se reserva el espacio para “operar” sin ser percibido. Cuando investigamos los últimos elementos de la materia, y entramos en los fenómenos cuánticos, descubrimos que parece que la naturaleza se reserva el derecho de “decidir” donde colocar la partícula en el momento de la medición, y no da razones de ningún tipo de por qué coloca esa partícula en concreto, en ese lugar, u en otro.

Bueno...“*Ya te escucharemos en otra ocasión*” le dijeron los griegos a San Pablo en el aeropuerto...

Está claro que Berkeley es radical en su planteamiento, pero es interesante comprobar que anticipa muchos de los problemas con los que se toparía la ciencia dos o tres siglos después. Por ejemplo, no olvidemos que la concepción que tenía Berkeley del espacio absoluto fue clave para influir en Mach, quien fue el gran inspirador de Einstein en la teoría de la relatividad.

Hasta aquí, a lo largo de todo un itinerario de tres cursos, hemos alcanzado conocimientos interesantes sobre astronomía, astrofísica, relatividad y mecánica cuántica. Un itinerario que nos ha llevado por un recorrido a lo largo de milenios de historia del pensamiento humano, para intentar responder a las grandes preguntas en relación con el COSMOS. Hemos trabajado sobre el universo ordenado que tenemos *ahí fuera*, pero al final del recorrido, nos hemos topado con otro gran misterio, **nosotros mismos**.

El método científico parece no estar siendo totalmente efectivo a la hora de abordar algunas de las características más importantes del ser humano. A partir de lo que conocemos de las leyes de la física y de la química, es difícil poder justificar que el ser humano es libre. Tampoco podemos conocer qué es exactamente la consciencia, y mucho menos podremos explicar a partir de las leyes físicas algunos hechos de nuestra experiencia diaria que todos hemos disfrutado, por ejemplo, el amor.

Por otra parte, como hemos visto a lo largo de todo este curso, el método científico se encuentra con dificultades para explicar un ajuste fino tan asombroso en las constantes y características del presente universo, así como un orden tan increíble en los cielos y en la tierra. Esto nos situaba de frente con el misterio del principio antrópico.

Los planteamientos que consideran al ser humano como algo de importancia central en el universo, alguien digno, libre, consciente de sí mismo, y capaz de amar, quizás sean *demasiado bonitos para ser verdad*. Pero el argumento de que una explicación es “*demasiado bonita*” merece una última reflexión. Os invito, como último “ejercicio”, a ver de nuevo una gran película, *La vida de Pi*. Como Pi quiso transmitir con su increíble historia, hay dos maneras de explicar la vida, de explicar la existencia del universo y la naturaleza. Una es bella, es mágica y maravillosa, por supuesto incluye una historia de sufrimiento, pero es una historia milagrosa. La otra manera de explicar los mismos hechos es algo más sosa, produce cierta desesperanza y encaja peor con lo que acontece. Y, sin embargo, tendemos a creer la historia fea y sosa antes que la maravillosa y bella que, quizás, encaja mejor con la realidad que observamos²⁰.

²⁰ La clave de la película “La vida de Pi” está justo al final, cuando el entrevistador de Pi lee el informe del seguro y comprueba que, efectivamente, Pi había logrado sobrevivir con un tigre de bengala adulto. La segunda historia que Pi cuenta al seguro es una historia más creíble que la magnífica historia de su epopeya con la cebra, el orangután, la hiena y el tigre. Su segunda historia es mucho más fea y sosa, pero es más creíble, sin embargo, no encaja con el hecho de que, realmente, hubiera un tigre de bengala adulto en la balsa cuando alcanzaron tierra. Para mí, es un hecho que somos libres, que somos conscientes, y que somos capaces de amar, pero esto no se logra explicar con las leyes universales deducidas con el método científico.

En fin, las preguntas sobre qué es el ser humano y qué es el mundo siguen siendo las mismas eternas preguntas que se vienen proponiendo desde el inicio de la filosofía hace más de dos mil quinientos años. A pesar de todo este largo plazo de pensamiento humano, las preguntas siguen ahí, y seguirán.

“Dos cosas llenan mi ánimo de creciente admiración y respeto, a medida que pienso y profundizo en ellas: el cielo estrellado sobre mí y la ley moral dentro de mí” (Immanuel Kant).

Una vez abordado el COSMOS, los próximos cursos de Ingenieros Inquietos irán centrados en el otro gran misterio, EL SER HUMANO. Abordaremos la historia, la filosofía, la religión, el arte, en fin, las ciencias humanas.

“Aunque todas las posibles preguntas de la ciencia recibiesen respuesta, ni siquiera rozarían los verdaderos problemas de nuestra vida.” (Ludwig Wittgenstein).

Nos queda mucho camino por recorrer.

2. APÉNDICE. UNA EXPLICACIÓN MÁS DETALLADA SOBRE LA ONDA DE SCHRÖDINGER

Hemos incluido este apéndice en el curso para poder explicar, con algo más de detalle, cómo puede producirse la interferencia entre dos “olas” de la onda de Schrödinger que pertenecen a **una misma partícula**. Creo que es importante dedicar un último esfuerzo a tratar de entender bien este mecanismo de interferencia.

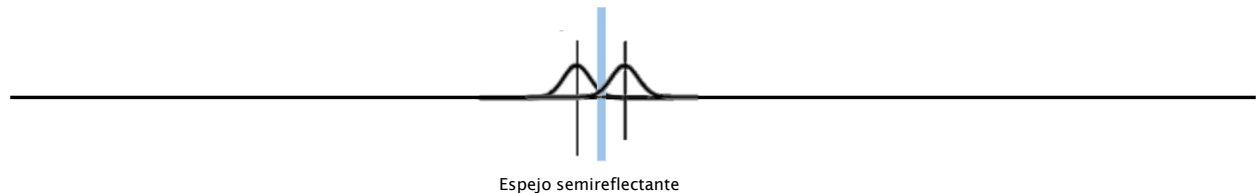
Partimos del mismo ejemplo de siempre; cuando lanzamos un fotón a través de un espejo semi reflectante, este fotón puede reflejarse en el espejo o puede atravesarlo. Lo que va a hacer ese fotón en particular es totalmente imposible de saber, puesto que existe una aleatoriedad esencial en dicho fenómeno, es decir, no existen causas naturales que obliguen al fotón a hacer una cosa u otra. Pero sabemos que, si lanzamos muchos fotones, el 50% de ellos van a atravesar el cristal, y el 50% se van a reflejar.

Como dijimos a lo largo del curso, mientras no realicemos la observación, el fotón se comporta como una “onda de probabilidad”. Dado que el fotón lo hemos lanzado contra el espejo, esa onda de probabilidad avanzará hacia el espejo como una ola en el mar:

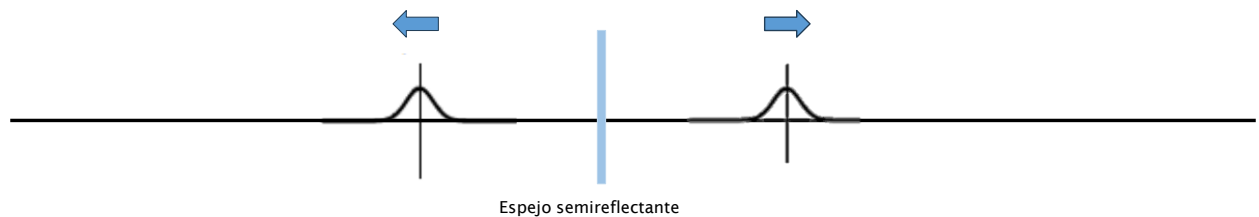


En el dibujo representamos la probabilidad de encontrar el fotón en ese instante, para cada uno de los lugares. Vemos que hay una zona donde es mucho más probable encontrarlo. Pero tengamos en cuenta que esa onda de Schrödinger que hemos dibujado no llega a valer cero en ningún punto, es decir, la curva no llega a tocar nunca con el eje horizontal en ningún sitio.

En el momento en que la “ola” alcanza el espejo semi reflectante , se desdobra en dos olas. Una de ellas continua su avance hacia la derecha, y la otra inicia el retroceso hacia la izquierda. Ahora tenemos una ecuación de onda de **un único fotón** que tiene dos “olas”.



Al cabo de unos instantes esta será la forma de la ecuación de onda del fotón (**de un único fotón**):



A lo largo de este apéndice vamos a intentar explicar cómo estas dos “olas” pueden producir interferencia la una con la otra.

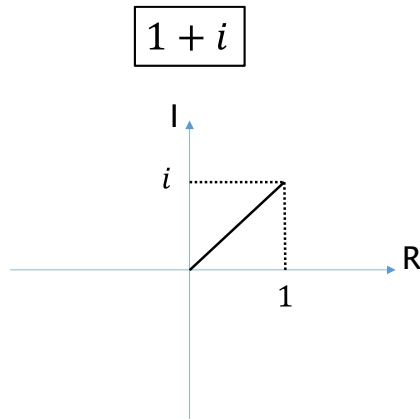
Para eso necesitamos explicar primero como funcionan los números complejos, porque la ecuación de onda de Schrödinger es, en realidad, un número complejo.

Un número complejo tiene una parte real y una parte imaginaria. La parte imaginaria es un múltiplo de i , siendo i este valor:

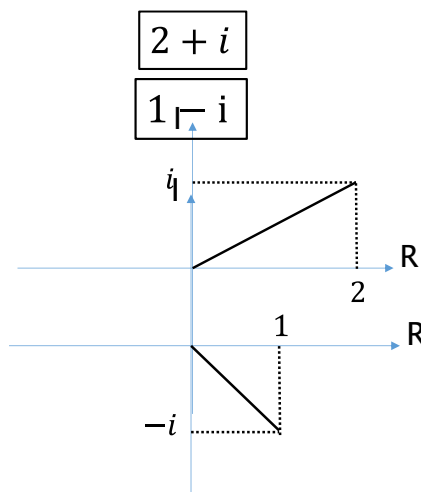
$$i = \sqrt{-1}$$

El número i no existe en realidad, porque no hay ningún número que, elevado al cuadrado, de -1 . Es importante decir en este momento que la parte real y la parte imaginaria nada tiene que ver con “lo que es real y lo que no” en el fenómeno cuántico. Los números complejos son solo un artificio matemático que resultan de enorme utilidad, no solo en el ámbito de la mecánica cuántica, sino en otros muchos ámbitos de la física.

Vamos a analizar algunos ejemplos de números complejos, y su representación gráfica. En el eje horizontal indicamos el número real, y en el eje vertical el número imaginario:



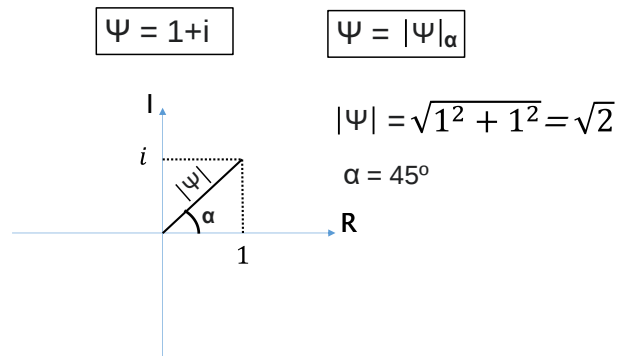
Otro ejemplo:



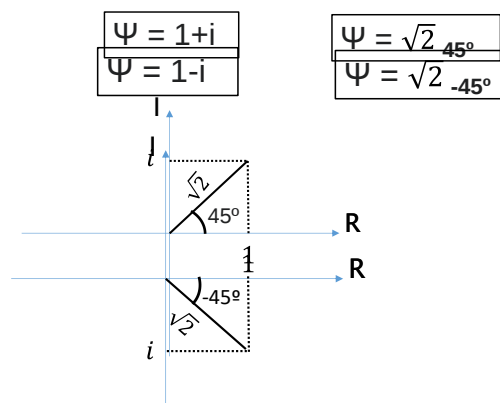
Otro ejemplo:

Ahora que sabemos lo que es un número complejo, podemos empezar a hablar de la ecuación de onda de Schrödinger, que la representamos con la letra Ψ .

Es fácil ver que un número complejo lo podemos identificar también por el tamaño del segmento (“módulo”) y por el ángulo que forma el segmento con el eje horizontal (“argumento”). Por ejemplo, para el caso del número $1+i$:



Es decir,

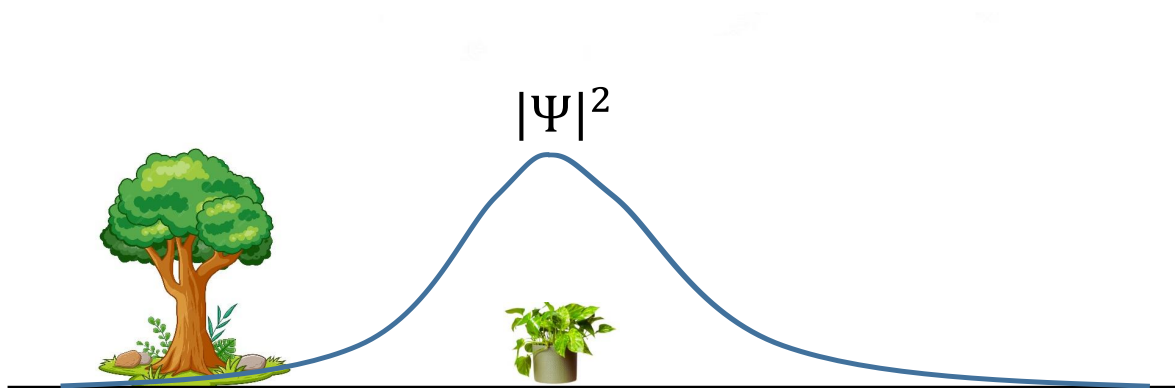


Otro ejemplo:

La probabilidad de encontrar la partícula en un determinado lugar es justo el módulo de Ψ , elevado al cuadrado.

$$P(x_0) = |\Psi|^2$$

Si representamos el valor del módulo de Ψ al cuadrado en cada lugar, encontramos la distribución de probabilidades de encontrar la partícula en cada lugar. Según este dibujo, es más probable encontrar la partícula cerca del tiesto, que cerca del árbol:

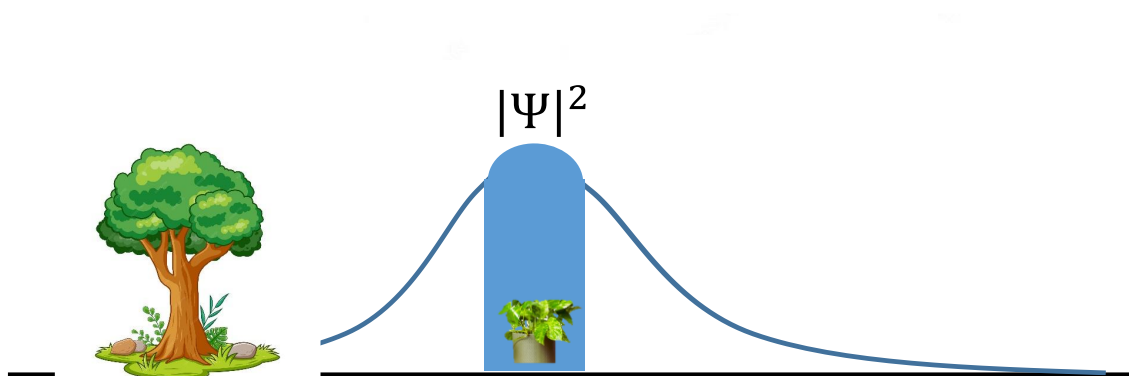


Por supuesto, para calcular la probabilidad siempre tendremos que hacer el cálculo del área encerrada debajo de la curva.

El área total encerrada, si consideramos la curva entera (que es infinitamente larga), es siempre 1 (100%) y, como dijimos, la curva se extiende desde el infinito (muy a la izquierda) hasta el infinito (muy a la derecha).

Si queremos calcular cuál es la probabilidad de encontrar la partícula en las cercanías del tiesto, calcularemos el valor del área que relleno de azul en el dibujo.

Como esa área azul es el 30% de todo el área que hay debajo de toda la curva, entonces la probabilidad de encontrar el fotón en las cercanías del tiesto es del 30%.



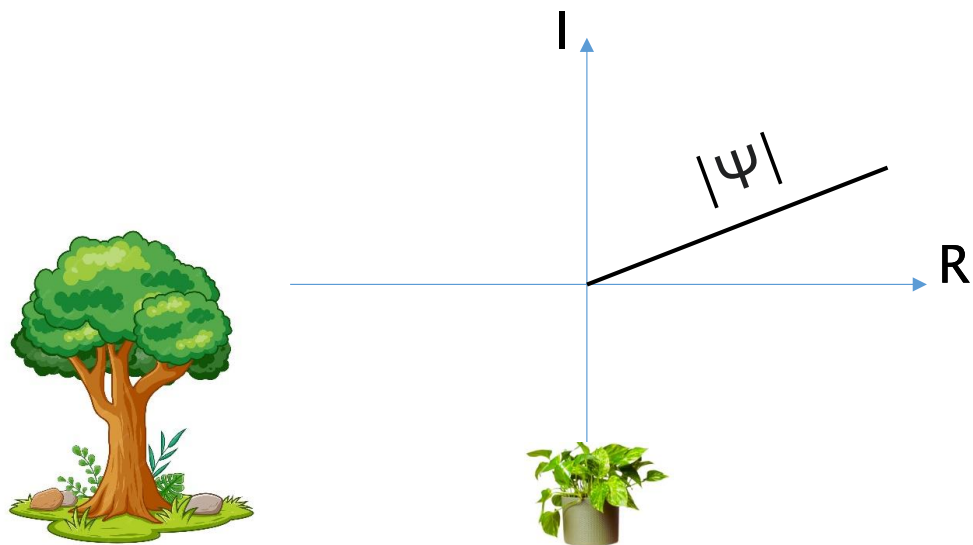
Obviamente esto es solo una simplificación porque, evidentemente, la onda no se da solo en una línea, ni siquiera en una superficie, abarca todo el espacio del universo.

Para cada coordenada del universo en el espacio de tres dimensiones, hay un valor de Ψ que nos dará la probabilidad de encontrar la partícula en ese lugar particular.

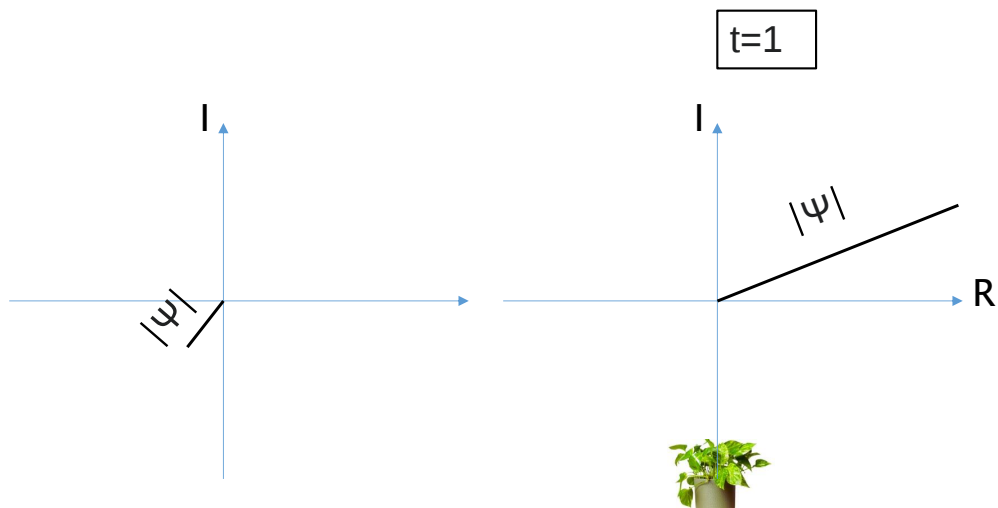
Demos ahora un paso más para poder entender cómo se producen las interferencias entre las distintas “olas” de una misma onda de Schrödinger de un único fotón.

Si en lugar de representar el módulo de Ψ al cuadrado, representamos la propia onda Ψ , tendríamos que representarla como un número complejo.

Por ejemplo, si representamos su valor justo en el centro del tiesto, podría ser algo así:

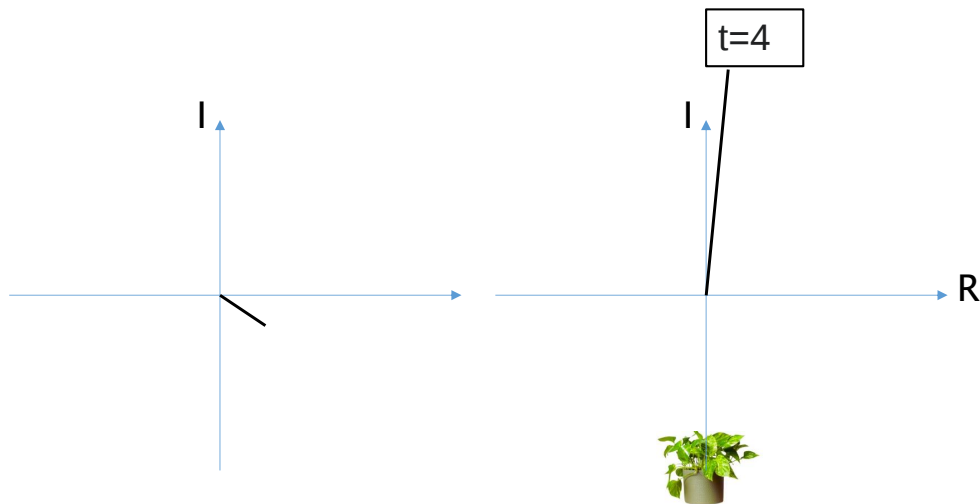


Y si representamos el valor de Ψ justo en la raíz del árbol veríamos que el módulo del número complejo sería menor. Por otra parte, el ángulo de ese número complejo en el árbol podría no coincidir con el ángulo de Ψ en el tiesto. Podría ser por tanto algo así:



En este ejercicio en concreto vamos a considerar que las probabilidades de encontrar el fotón en el centro del tiesto son siempre las mismas, aunque pase el tiempo.

Y lo mismo ocurre en el árbol. Se dice en ese caso que la onda es estacionaria. Por tanto, en ambos lugares, las “agujas” serán todo el rato de la misma longitud a lo largo del tiempo. Sin embargo, aunque las probabilidades no cambien, la onda si está evolucionando, porque el ángulo del número complejo de Ψ en cada punto puede estar cambiando (aunque no cambie el módulo). Por tanto, a lo mejor, cuatro segundos después, la situación es esta:

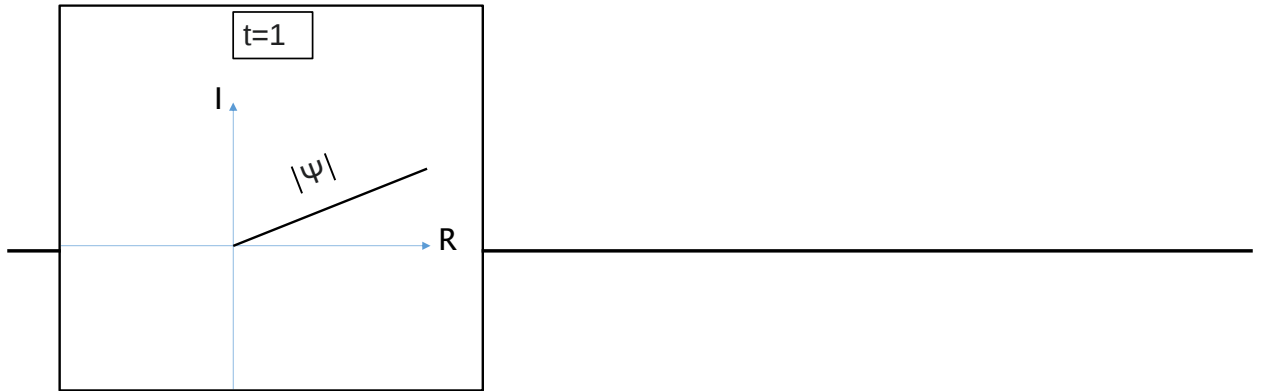


Vemos que no ha cambiado el módulo, y por tanto las probabilidades en cada punto siguen siendo idénticas. Pero si ha cambiado, con el tiempo, el ángulo en cada lugar. Enseguida entenderemos por qué el ángulo es importante.

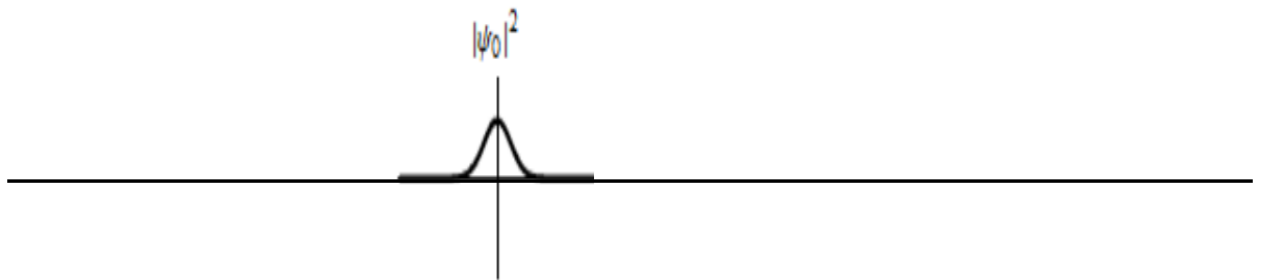
Imaginemos ahora que lanzamos un fotón hacia la derecha. Como vimos, si representamos el cuadrado del módulo, estaremos mostrando la distribución de probabilidades de encontrar el fotón en cada punto, en un determinado instante:



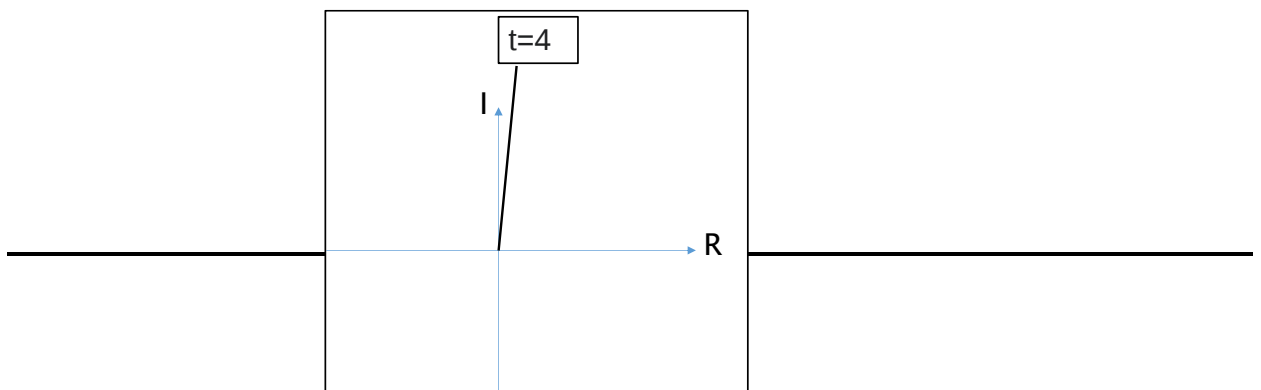
Si ahora representamos el valor complejo de Ψ en el centro de la cresta de la ola, podría ser algo así:



Con el paso del tiempo, la ola se va a ir moviendo a la derecha



Vemos que la probabilidad de encontrar el fotón en el centro de la ola sigue siendo la misma que antes, pero ahora está la ola en otro sitio. Pero no es eso lo único que ha podido cambiar. Si ahora representamos el valor de Ψ en el centro de la ola, podría tener otro ángulo, aunque conserve el módulo, y ser algo así:



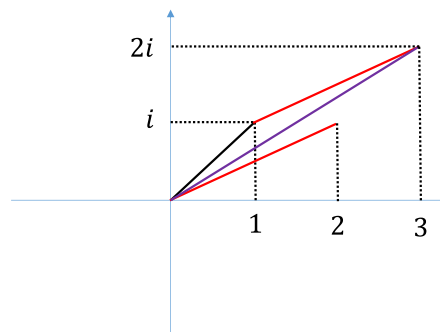
Vemos que el módulo sigue siendo el mismo, pero el ángulo ha cambiado con el paso del tiempo.

Ahora estamos más cerca de entender cómo funciona la interferencia entre las ondas de Schrödinger. La suma de estas ondas es, en realidad, la suma de dos números complejos. Sumar números complejos es muy sencillo. Basta con sumar la parte real por un lado, y la parte imaginaria por otro.

Ejemplo:

$$(1+i) + (2+i) = 3+2i$$

Si representamos estos números complejos vemos que la suma de números complejos se realiza igual que la suma de vectores, basta con poner uno de los vectores a continuación del otro para ver el vector resultante:

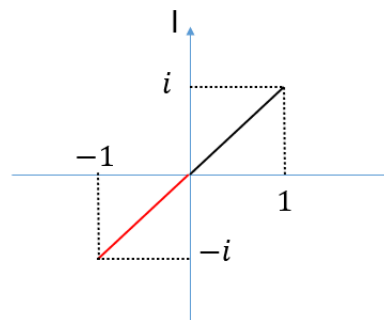


En este caso, el módulo del número complejo resultante (el tamaño de la “aguja”) es más grande. Y por tanto la probabilidad resultante de encontrar la partícula ha aumentado.

Pero no siempre ocurre esto cuando sumamos olas de la onda de Schrödinger

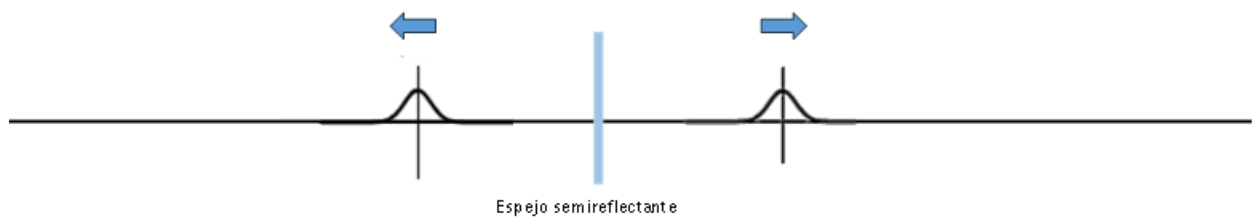
Veamos un ejemplo en donde se anulan:

$$(1+i) + (-1-i) = 0+0i$$



Como vemos el resultado final de la suma es nulo. Por tanto, en este caso, la probabilidad de encontrar al fotón en ese punto, en ese instante, será nula.

Al principio de este apartado veíamos que, si el fotón lo lanzamos contra un espejo semi reflectante, la onda de Schrödinger se desdoblaba en dos. Una continuaba su camino hacia la derecha y la otra se veía reflejada volviendo hacia la izquierda:

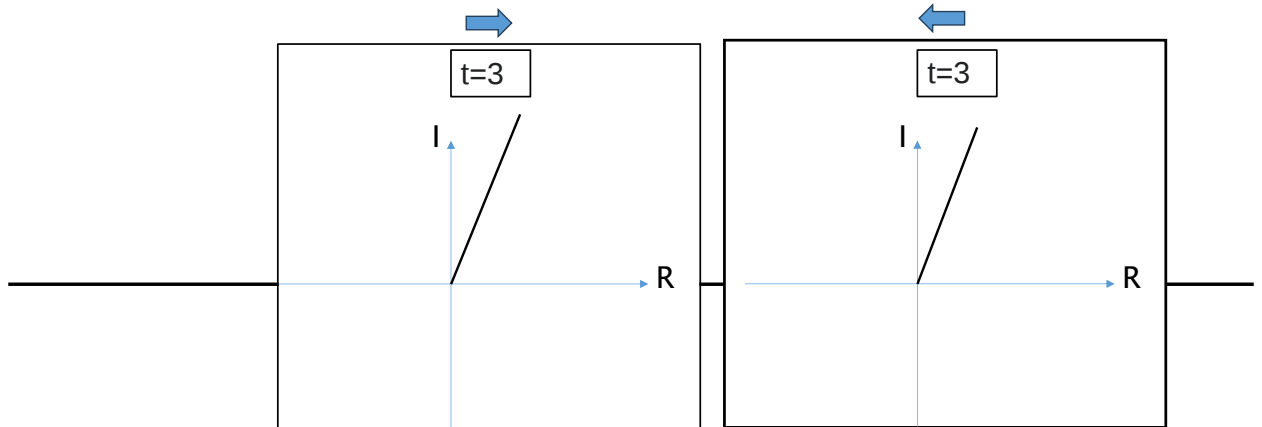


Si ahora colocamos dos espejos reflectantes al final del recorrido, que reflejen el 100% de la luz, podemos lograr que esas ondas vuelvan sobre sus pasos y se enfrenten la una contra la otra:

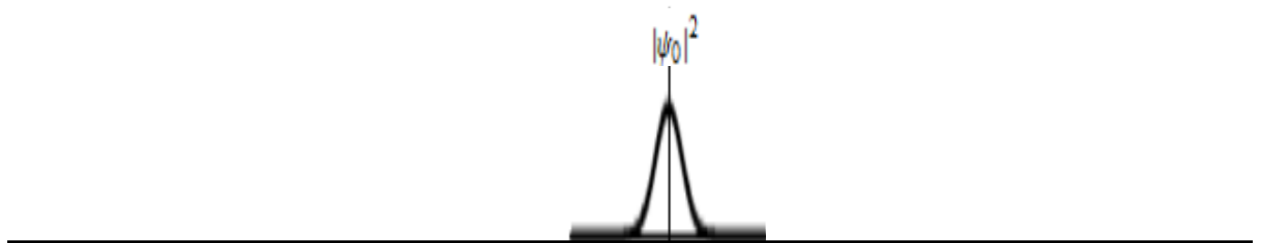


Recordemos que seguimos representando la ecuación de onda **de un solo fotón**, que tiene dos “picos” de probabilidad.

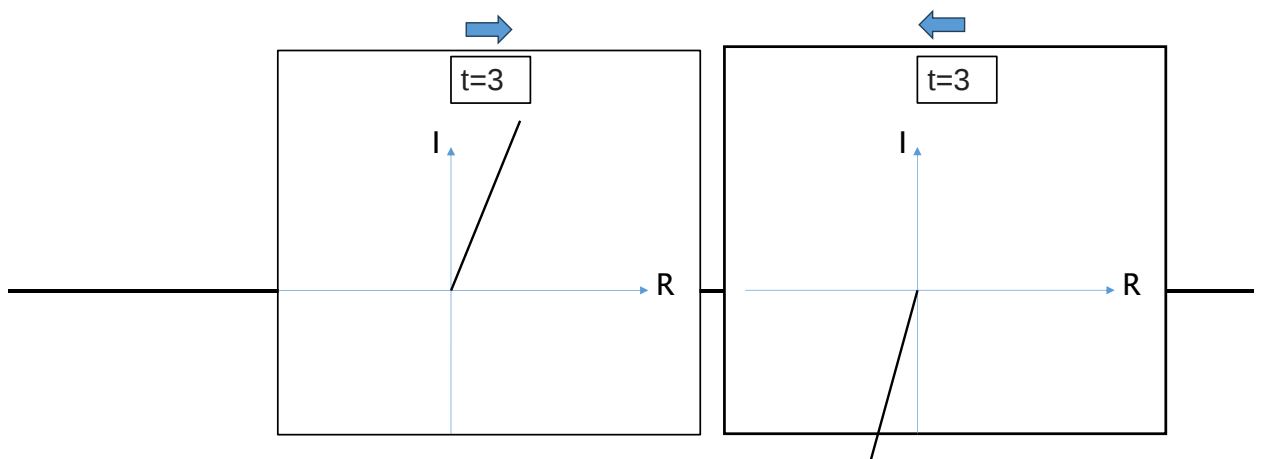
Ahora sabemos que cuando se acerquen estas olas, la una a la otra, sus números complejos podrán acercarse en fase (formando el mismo ángulo) como indico en la figura.



En este caso, cuando se junten ambas olas, se dará una suma constructiva, y la probabilidad de encontrar el fotón se duplica:



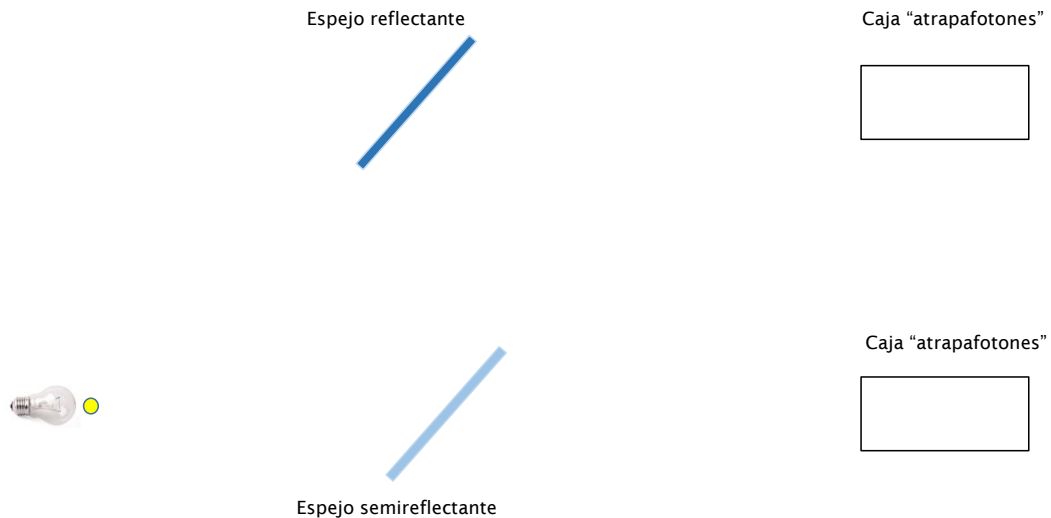
Pero podría ser que fueran totalmente en desfase:



De manera que la suma de ambas sería nula. En este caso la probabilidad de encontrar el fotón en ese punto en concreto, en ese instante, sería cero, a pesar de que la probabilidad que arrastraba cada una de las olas era positiva.

Ahora estamos en condiciones de poder explicar el experimento de la interferencia cuántica desde el principio.

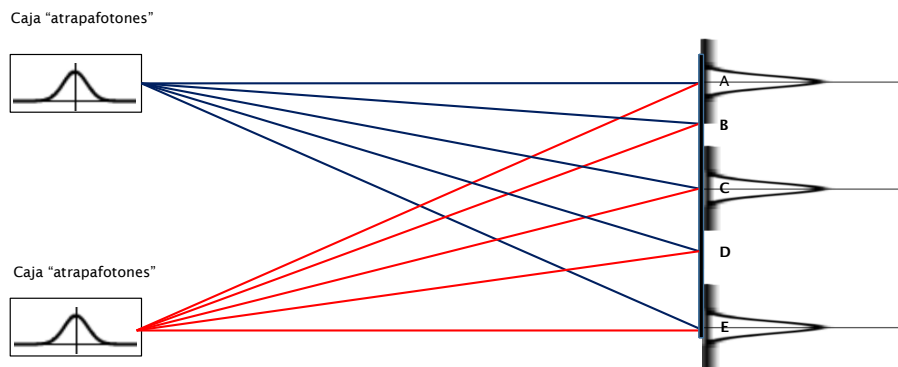
Primero lanzábamos el fotón contra un espejo semi reflectante , y este podía ir a la caja de arriba, o a la caja de abajo:



Si no realizamos la medida no sabemos en cuál de las dos cajas está, pero sabemos que la onda de Schrödinger se ha desdoblado en dos al pasar por el espejo semi reflectante . Una ola ha atravesado el espejo y ha acabado en la caja de abajo, y la otra se ha reflejado y ha acabado en la caja de arriba. De manera que si dibujamos el cuadrado del módulo de la onda de Schrödinger (ósea la distribución de probabilidades) tendría una pinta así, y nos muestra las probabilidades de encontrar el fotón (en una caja o en la otra):

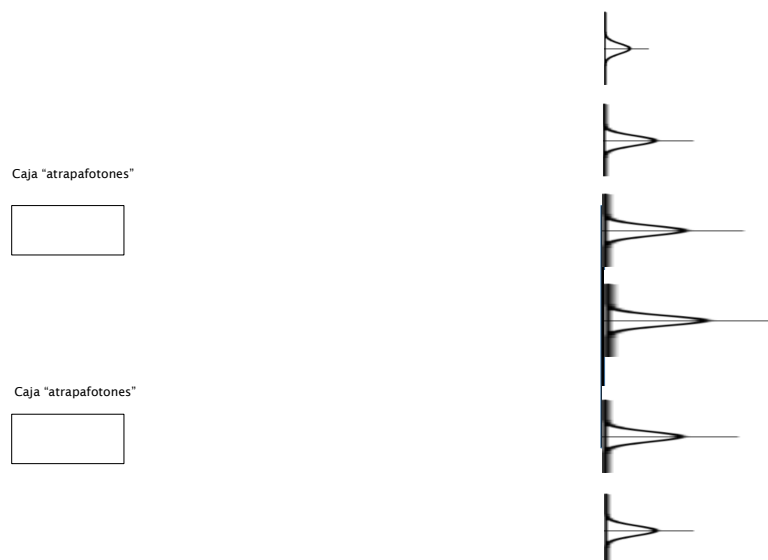


Ahora, sin saber aún en qué lugar se encuentra el fotón, porque nadie ha realizado aún la observación, pinchamos ambas cajas a la vez, y el fotón sale disparado contra la pantalla fotosensible de enfrente. Pero lo que salen disparadas son ambas ondas de Schrödinger, que además sufren una dispersión al salir por cada agujero de la caja. En cada punto de la pantalla recibiremos una onda que viene de la caja de arriba (rayos azules), y otra que viene de la caja de abajo (rayos rojos):



Vemos que en los puntos A, C y E ha coincidido que ambas ondas (la azul y la roja) han tenido una suma constructiva y la probabilidad de encontrar al fotón se ha duplicado. Pero en los puntos como B o D las ondas han llegado desfasadas y se han anulado, de manera que la probabilidad de encontrar al fotón en esos puntos es nula.

Ahora la ecuación de Schrödinger del fotón, **de un único fotón**, es esta:



Cuando realicemos la observación, la onda colapsa y el fotón aparecerá en un único lugar. Lo probable es que aparezca en uno de los picos, por ejemplo, aquí:

Caja "atrapafotones"



Caja "atrapafotones"



Si repitiéramos todo el experimento de nuevo, fotón a fotón, y realizáramos la observación, lo probable sería que el fotón volvería a aparecer en uno de los picos, quizás en un pico distinto del de antes.

Pero desde luego, lo que es seguro, es que no aparecerá en los lugares donde la probabilidad es nula (en los valles).

Imaginemos que aparece por ejemplo en este otro lugar:

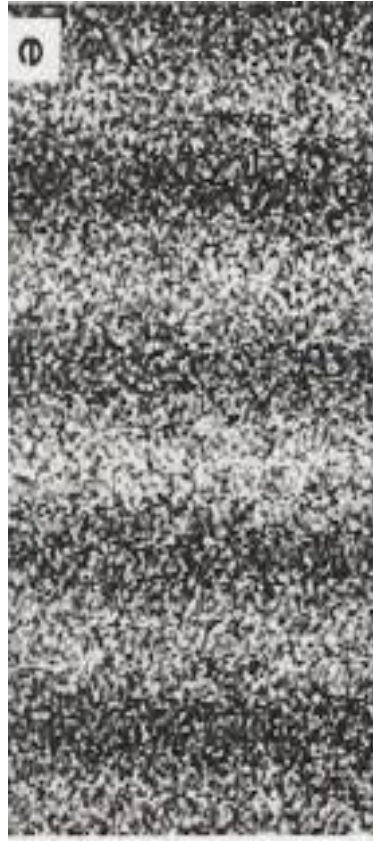
Caja "atrapafotones"



Caja "atrapafotones"



Cuando este experimento lo hacemos muchas veces, nos encontraremos con este resultado:

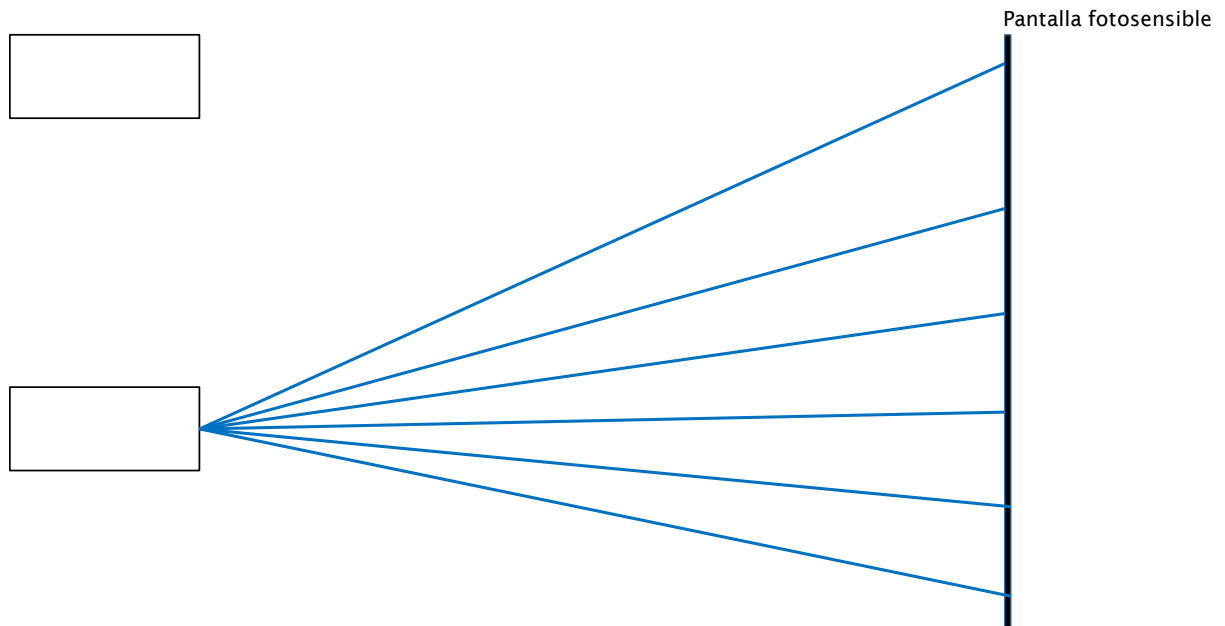


Es decir, se está dando un fenómeno de interferencia. Pero esta interferencia no se da entre el primer fotón que enviamos y el segundo que enviamos dos horas después. Se da entre las dos “olas” de la ecuación de Schrödinger **del mismo fotón**, lo cual impide que ese fotón aparezca nunca en los lugares donde ambas olas se anulan. Y lo mismo ocurre con el resto de los fotones que lanzamos.

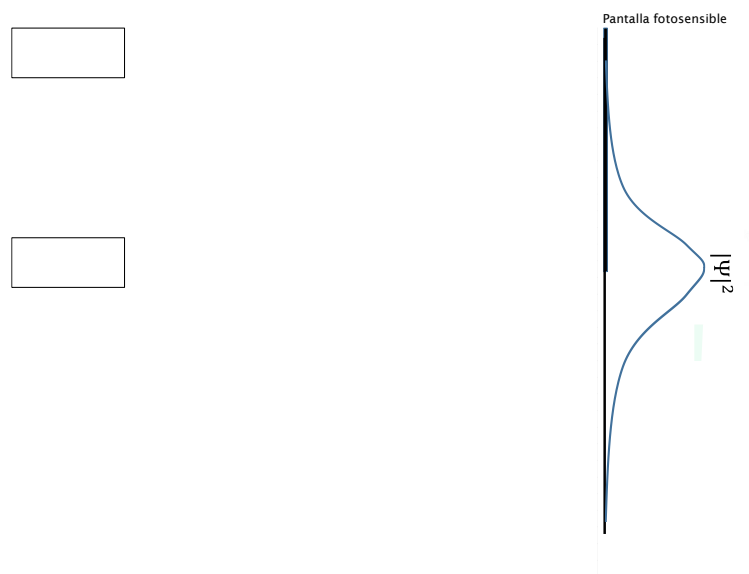
Ahora veamos qué es lo que ocurre si, antes de pinchar las cajas miramos en la caja de arriba:



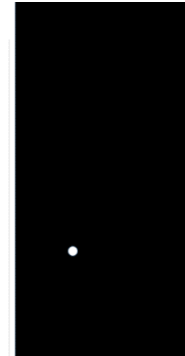
Cuando miramos en la caja de arriba, y resulta que ahí no ha aparecido el fotón, la onda colapsa porque forzamos a que, si o si, tenga que estar en la caja de abajo. Sin embargo, nadie mira aún la caja de abajo. Ahora pinchamos ambas cajas, y dado que el fotón (o la onda) está solo en la de abajo, solo salen rayos de la onda de Schrödinger de la de abajo:



La nueva onda de Schrödinger, ahora en la pantalla fotosensible, sería algo como lo que indico en el siguiente gráfico, dado que esta vez no se produce ningún tipo de interferencia con ninguna otra “ola”:



Cuando ahora realizamos la observación en la pantalla fotosensible, lo probable es que el fotón aparezca cerca del pico de esta ola. Por ejemplo, aquí:



Ahora volvemos a repetir el experimento, y volvemos a mirar en la caja de arriba. Si encontramos ahí el fotón quemamos ambas cajas. Y lo volvemos a repetir. Si ahora volvemos a mirar en la caja de arriba y no encontramos el fotón, colapsará de nuevo la onda, situándose la ola solo en la caja de abajo. Y de nuevo, cuando pinchamos ahora ambas cajas, no se produce ninguna interferencia puesto que solo salen rayos desde la caja de abajo, y la nueva onda de Schrödinger en la pantalla vuelve a tener la misma forma que antes. Y cuando ahora realizamos la observación, lo probable es que este segundo fotón aparezca cerca de la cresta de esa ola de dispersión, por ejemplo, aquí:



Cuando lo repetimos muchas veces nos encontramos con algo así, es decir, el típico fenómeno de dispersión, pero sin ningún patrón de interferencias:



Ahora hemos entendido el razonamiento matemático de por qué, en el primer grupo de experimentos, cuando nadie mira en las cajas, encontramos un patrón de interferencias. Y en el segundo grupo de experimentos, cuando miramos en la caja de arriba, encontramos con que no se da la interferencia.

Hemos entendido el razonamiento matemático, pero **es incomprensible que, por el hecho de mirar cajas que están vacías, se produzca una modificación en el resultado del experimento.**

3. BIBLIOGRAFÍA

En este apartado recomiendo algunos de los libros que pueden ayudar a afianzar o profundizar en algunos de los conceptos aprendidos a lo largo de todo el itinerario de tres cursos de astronomía, astrofísica, relatividad y mecánica cuántica.

Primero muestro los libros que pueden ayudar para los primeros dos cursos, y después los que pueden ser de utilidad para comprender mejor los conceptos esquivos del curso de relatividad, desafíos de la física y mecánica cuántica.

Me he permitido incluir mi propia valoración sobre los libros, así como una puntuación: Imprescindible / muy bueno / bueno / opcional.

3.1 Bibliografía recomendada para los primeros dos cursos de introducción a la astronomía para ingenieros inquietos

- Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano. Galileo Galilei. Una de las obras maestras de la literatura científica de todos los tiempos. Galileo utiliza sus increíbles dotes persuasivas para intentar convencer al mundo de que la tierra se mueve. **Imprescindible.**
- Introducción a la navegación astronómica. Petar Franolic y Zoran Visekruna. Aprendes a conocer tu posición mirando las estrellas. [Muy bueno.](#)
- Observar el cielo. David H. Levy. Una magnífica introducción a la astronomía. El libro con el que alguien inquieto debe empezar. [Muy bueno.](#)
- Principios matemáticos de la filosofía natural. Isaac Newton. Un libro de importancia gigantesca en la historia de la humanidad. Newton publica aquí todos sus descubrimientos y avances de la física y cambia el mundo. Sin embargo, a nivel literario, está muy lejos de los diálogos de Galileo, por ser excesivamente técnico. **Bueno.**
- Diario de a bordo. Cristóbal Colón. Un libro muy interesante para los que estén interesados en la navegación astronómica. **Bueno.**
- El libro de la astronomía. Editorial Akai. Un itinerario histórico de los grandes descubrimientos científicos y astronómicos. Opcional.
- Estrellas y Telescopios. Pedro Arranz García / Jorge García Martín: Interesante para aprender a usar el telescopio. Opcional.

- Las leyes del cielo. Astronomía y civilizaciones antiguas. Juan Antonio Belmonte. Interesante para conocer la relación entre astronomía y arqueología. Opcional.
- El clima. El calentamiento global y el futuro del planeta. Manuel Toharia. Interesante para un enfoque científico del problema del calentamiento global. Opcional.

3.2 Bibliografía recomendada para el curso de astrofísica, relatividad y mecánica cuántica

En relación con el capítulo de desafíos de la física

- El principio cosmológico antrópico. Barrow y Tipler. Un libro esencial que sin duda hay que leer. Es un repaso magnífico a través de un gran número de disciplinas científicas para llegar a la conclusión de que el hombre es algo central en el universo. La única pega es que no lo he encontrado en español. **Imprescindible.**
- Hijos de las estrellas. Manuel Toharia. Interesante para conocer la formación de las estrellas, los planetas y, en última instancia, la aparición de la vida y el ser humano. [Muy bueno.](#)
- La proporción áurea. Mario Livio. Es un interesante análisis de la presencia de las matemáticas en la naturaleza. **Bueno.**
- Ciclos del tiempo. Roger Penrose. Este libro explica de una manera bastante comprensible el misterio del segundo principio de la termodinámica que obliga a un crecimiento continuo e inevitable de la entropía. **Bueno.**
- El universo elegante. Brian Greene. Una exposición de los últimos avances en la teoría de las super cuerdas. Excesivamente técnico y difícil de seguir. Opcional.

Cuando ya había terminado de grabar todos los videos y de escribir toda la documentación ha salido en España un libro realmente interesante. Se llama Dios- La ciencia- Las pruebas. Ha vendido más de 250.000 ejemplares en Francia. Más allá de la presunción del título creo que es un libro realmente interesante para todo aquel que haya realizado el presente curso, porque va a entenderlo muchísimo mejor que el 99,99% de los lectores del libro.

Me parece interesante porque se tratan todos los temas que hemos expuesto en el capítulo de Desafíos de la Física, pero sobre todo es interesante porque incorpora centenares de citas de los más prestigiosos científicos del mundo que reflejan la sorpresa y el desconcierto de la comunidad científica ante los descubrimientos de los últimos 70 años.

Me he permitido incorporar algunas de estas citas en el documento del capítulo de Desafíos de la Física antes de subirlo a la plataforma.

- Dios. La ciencia. Las pruebas. El albor de una revolución. Michel-Yves Bolloré. Olivier Bonnassies. Un repaso magnífico sobre los grandes temas que desafían a la ciencia del siglo XXI. **Imprescindible.**

Algunos libros interesantes sobre la relatividad

- Mi visión del mundo. Albert Einstein. Editorial Metatemas. Incorpora escritos y cartas de este eminente científico que son de enorme interés para poder entender la génesis de su pensamiento y de sus intuiciones. [Muy bueno.](#)
- Sobre la teoría de la relatividad especial y general. Albert Einstein. Junto con los “principia” de Newton, este es el libro más influyente de la historia de la ciencia. Sin embargo, igual que el de Newton, es un libro excesivamente técnico, muy lejos de la maestría de Galileo. [Muy bueno.](#)

Sobre mecánica cuántica

- El enigma cuántico. Bruce Rosenblum y Fred Kuttner. Una magnífica introducción a la mecánica cuántica que permite entender por qué los experimentos de laboratorio del siglo XX están dejando estupefactos a la comunidad científica. **Imprescindible.**

Libros que abarcan prácticamente todos los temas del curso

- La nueva mente del emperador. Roger Penrose. Un libro que ya es un clásico de la divulgación científica. Te permite conocer los grandes misterios y desafíos de la física en el ámbito de las matemáticas, de la relatividad, la mecánica cuántica, la entropía, etc. Finalmente, a través de un recorrido impresionante se intenta demostrar que la conciencia e inteligencia humana es inimitable a través de algoritmos. Es decir, que la inteligencia artificial jamás podrá alcanzar la inteligencia del ser humano. **Imprescindible.**

- Brevísima historia del tiempo. Stephen Hawking. Un itinerario por la historia de los últimos descubrimientos científicos. Relatividad, mecánica cuántica y física de partículas. No incluye explicaciones suficientes para poder entender todos los argumentos y conclusiones. En mi opinión es un libro insuficiente, pero de una importancia enorme en cuanto impacto mediático. **Bueno.**

Libros del filósofo Berkeley

- Tratado sobre los principios del conocimiento humano. George Berkeley. Un libro que fue revolucionario en su época. Influyó de manera determinante en la corriente empirista, y en Kant. Sigue siendo de gran actualidad debido a que propone una filosofía que parece encajar con la mecánica cuántica (la materia no tiene una realidad consistente por sí misma). **Imprescindible.**
- Acerca del movimiento. George Berkeley. Influyó en Einstein a través de la figura de Mach. Estos tres genios consideraron que el espacio absoluto no podía existir por sí mismo como algo real e independiente. Las propuestas de Berkeley de que las fuerzas no podían existir fueron una inspiración para la relatividad. [Muy bueno.](#)
- Tres diálogos entre Hylas y Filonous. George Berkeley. Tras la publicación de su principal obra “Tratado sobre los principios del conocimiento humano” Berkeley intenta explicar con mayor detalle algunas de las ideas que no habían sido bien interpretadas por sus contemporáneos. Se escribe en forma de diálogo como hizo Galileo, pero está lejos de la obra maestra del autor italiano. **Bueno.**

Otros libros citados en el curso

- Los hermanos Karamazov. Dostoievski. Una de las cumbres de la literatura universal. Ya vimos que Einstein reconoció que aprendió más de Dostoievski que de cualquier otro autor o científico. **Imprescindible.**