



Otra forma de enseñanza de las Ciencias: El teletransporte, los viajes en el tiempo y los universos paralelos. Realidades y reflejos en el cómic contemporáneo

SANTIAGO RAMÓN GUERRA GUILLÉN
Dpto. de Didácticas Especiales
ULPGC, Facultad de Ciencias de la Educación
santiago.guerra@ulpgc.es

Resumen

El comic es una de las formas de expresión cultural, en la que se reflejan una gran variedad de tópicos sobre la Física Moderna, que se manifiestan en forma de artilugios tecnológicos que permiten el teletransporte, viajes en el tiempo y saltos a universos paralelos. En este contexto hacemos un repaso de los aspectos esenciales de la Física Moderna, la Mecánica Cuántica, usando como excusa el imaginario del cómic fantástico, para ello partimos de la controversia surgida en los orígenes de esta Nueva Ciencia, respecto a su interpretación y completitud, algo que aún no ha sido zanjado. Para continuar con los aspectos más recientes relacionados con la Comunicación Cuántica y finalizar con una descripción de los fenómenos, que se reflejan en los cómics, y de qué manera se muestran en ellos.

Palabras clave

Mecánica Cuántica, Teletransporte, Universos Múltiples.

Abstract

The comic is one of the forms of cultural expression, that are reflected in a variety of topics on Modern Physics, manifested as technological gadgets that allow teleportation, time travel and jumps to parallel universes. In this context we review the essential aspects of modern physics, Quantum Mechanics, using as an excuse the imagery of fantasy comics, for it we start with the controversy over the origins of this new science, regarding its interpretation and completeness, something that has not yet been settled. To continue with the most recent aspects of Quantum Communication and end with a description of which the phenomena are reflected in the comics, and as shown therein.

Key words

Quantum mechanics, Teleportation, Multiple Universe.

A veces el tiempo nos muestra que la realidad superar todas nuestras expectativas y que aquello que en un principio parecía imposible se convierte en realidad cotidiana. Son infinitos los ejemplos literarios y artísticos, que mostraron a los científicos el camino que debían seguir para revolucionar su campo de trabajo, entre los que más influencia ha tenido, en el campo científico, cabe destacar autores como Julio Verne, H.G. Wells, Isaac Asimov...etc. Hemos de comprender que la imaginación, en contraposición con la fantasía, que desborda la mente, junto con la intuición humana nos permite vislumbrar cosas que nuestros sentidos por sí solos no podrían percibir. Estas capacidades se pueden encausar mediante diferentes actividades de tipo filosófica, cultural, artística y científica, con lo que cada una de ellas puede retroalimentarse y acrecentarse de forma creativa. En este artículo mostraremos como la

física moderna, la Mecánica Cuántica, ha servido de inspiración a una de las formas culturales más representativas de nuestro tiempo el cómic y todo su imaginario. Donde tienen cabida desde seres mutantes, con capacidades y poderes ilimitados, hasta fenómenos físicos fruto de leyes desconocidas. Permitiendo que surjan superhéroes que son capaces de teletransportarse, viajar en el tiempo o moverse en mundos paralelos.

No es muy conocido de forma general, el hecho de que no existe un consenso definitivo sobre la interpretación de la Mecánica Cuántica. Pero como dicen algunos, lo que importa es que funciona y no el por qué funciona. En este sentido existen visiones muy diferentes de la Mecánica Cuántica, como paradigma de la ciencia moderna, aunque, el gran paradigma no está en su ortodoxia sino en la posibilidad de discrepar y establecer una controversia filosófica capaz de generar interpretaciones diferentes de un mismo fenómeno, a pesar de estar sujeto a un mismo lenguaje matemático. Como consecuencia no descartamos la especulación, en el buen sentido, para profundizar en la comprensión no sólo formal del fenómeno, sino también de sus aspectos filosóficos y ontológicos.

1. Eliminando prejuicios

1.1. ¿Existe una realidad a pesar de todo?

En 1900 el físico Max Planck propuso que la radiación sólo se absorbía en paquetes de energía a los que llamó «quanta» (Planck, 1901). Aplicando esta idea, que no es trivial y supuso un extraordinario salto cuantitativo y cualitativo en nuestra visión del universo y sus leyes, revolucionó hasta tal punto el pensamiento de su época que dio origen a una nueva ciencia que fue llamada la Mecánica Cuántica. Sus resultados de impresionante precisión y la gran variedad de fenómenos que describe, no la han hecho inmune a la polémica, una serie de importantes paradojas que emanan de sus postulados, y que han motivado desde su nacimiento un enorme debate en la comunidad científica la han convertido en fuente inagotable de reflexión y de nuevas ideas. Aspectos como la dualidad onda-partícula (De Broglie, 1924), la superposición cuántica, el principio de indeterminación de Heisenberg (1925) y el entrelazamiento, están detrás de los fenómenos más llamativos y paradójicos del mundo cuántico.

En el año 1935, Einstein, Podolsky y Rosen (1935), mostraron de forma certera donde se encontraba el problema esencial de la teoría, formulando la paradoja EPR, icono de los problemas generados por los aspectos más elementales de esta teoría en base a su contraposición al concepto de realismo local. El trío EPR trató de argumentar que el resultado de una medición en un sistema físico se determina antes y con independencia de la medida (realismo) y que el resultado no puede depender de las acciones en regiones del espacio separadas (localidad de Einstein), como afirma el principio de incertidumbre de Heisenberg. Además, sugirieron que las correlaciones cuánticas perfectas, que se producen en sistemas de dos partículas en un estado de máximo entrelazamiento, se pueden utilizar para definir los elementos de la realidad, sin contrapartida en la teoría cuántica. La conclusión del argumento EPR es que la Mecánica Cuántica es una teoría incompleta, porque no describe adecuadamente la existencia de elementos de realidad deducidos a lo largo del argumento, en base a la aceptación del principio de localidad. Es más, introdujeron el concepto de variables ocultas, como una forma de completar la teoría cuántica.

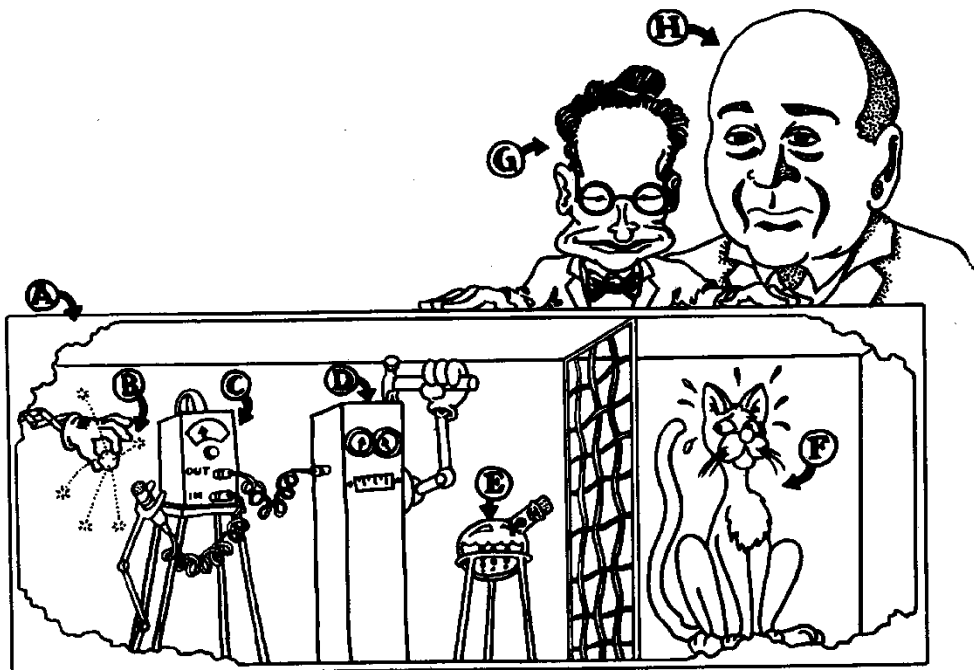


Figura1. Experimento mental de Schrödinger.

En este sentido el entrelazamiento, es básico en la paradoja, representado en la versión posterior de Bohm (1952a y 1952b) a través del estado singlete. El término entrelazamiento o enredo cuántico fue introducido por Schrödinger en 1935. Consideraba el entrelazamiento como la característica esencial de la Mecánica Cuántica. Para explicarlo usaremos el mismo ejemplo que usó el propio Schrödinger, pero veamos unos resultados previos. Schrödinger, en 1925 estudió el trabajo de L. de Broglie (1924) y propuso una ecuación de onda que permitía describir el comportamiento de las ondas de materia, donde cualquier superposición de soluciones es solución de la ecuación. Posteriormente, en 1926, Max Born sostuvo que la interpretación correcta de la función de onda era que el cuadrado del módulo en un punto dado en espacio era proporcional a la probabilidad de encontrar la partícula en ese punto en el espacio.

El cuadrado se llama la densidad de la probabilidad mientras que la función de onda era la amplitud de la probabilidad. Volviendo al ejemplo de Schrödinger, consideremos la viñeta de la figura 1, tenemos una caja sellada y aislada (A) con una fuente radiactiva (B), que tiene un 50% durante el curso del «experimento» de la activación de contador Geiger (C), que activa un mecanismo de (D), activando un martillo para romper una botella de ácido prúsico (E) y matar al gato (F).

Un observador (G) debe abrir la caja con el fin de colapsar el vector de estado del sistema en uno de los dos estados posibles. Un segundo observador (H) puede ser necesaria para el colapso del vector de estado del sistema más grande que contiene el primer observador (G) y el aparato (AF). Y así sucesivamente...

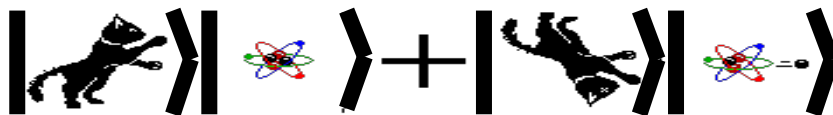


Figura 2. El gato en la superposición vivo y muerto a la vez.

Como consecuencia de todo el proceso tenemos las siguientes consecuencias:

- (1.) El estado del gato está entrelazado con el del átomo, figura 2
- (2.) El estado del gato está en una superposición simultánea de vivo y muerto.
- (3.) Se requiere el colapso de la función de onda para que el gato esté vivo o muerto.

Con lo que resulta la paradoja, de que hasta que no medimos obteniendo un valor en la medida (colapso de la función de onda) no podemos hablar de realidad objetiva.

La versión de Bohm del EPR, en 1951, utilizó el estado singlete de espín 1/2 de dos partículas, que hoy en día es un icono y un punto de referencia del entrelazamiento.

La formulación de la paradoja EPR fue sólo el principio de un largo periodo (unos 30 años), de un intenso debate, llevado siempre en el terreno teórico, sobre cómo se comporta la naturaleza, hasta que en 1964 John Bell dio la clave para poder discernir si el realismo local era violado por la naturaleza a través de algún experimento. Bell obtuvo unas desigualdades que violaban las correlaciones predichas por cualquier teoría de variables ocultas realista local, y demostró que hay estados cuánticos que violan estas desigualdades (teorema de Bell). Hasta el trabajo de Bell, podemos decir que la cuestión Mecánica Cuántica frente a realismo local se había convertido en algo filosófico o metafísico; no obstante, Bell consiguió que este tema de tan magna importancia regresara al campo de la física, abriendo un enorme abanico de posibilidades. Tuvieron que transcurrir algunos años hasta que esta cuestión pudiera llevarse al laboratorio de una forma efectiva, y en este período de tiempo surgieron distintos tipos de desigualdades que se podían contrastar en el laboratorio. La mayoría de los experimentos se han realizado con fotones, y hasta la fecha actual, el realismo local no se ha llegado a violar experimentalmente, es decir no se han violado desigualdades de Bell genuinas sin hipótesis experimentales adicionales. Por el contrario, lo que se ha violado ha sido la conjunción entre el realismo local y ciertas hipótesis adicionales (no-enhancement, fair sampling,..etc.), cuyo papel en las desigualdades tiene como objetivo el salvar dificultades técnicas de envergadura, la más importante la baja eficiencia de los detectores. Podemos afirmar que son las desigualdades no genuinas, basadas en un conjunto de hipótesis constituido por el realismo local más ciertas hipótesis adicionales, las que se han violado experimentalmente.

La mayor parte de los experimentos tipo Bell se han realizado en el campo de la Óptica Cuántica. Los primeros experimentos fueron realizados, en 1978, por Clauser y Shimony utilizando pares de fotones entrelazados en polarización mediante cascadas atómicas. A finales de 1980 esta técnica fue eclipsada por la conversión paramétrica a la baja (PDC) (Burnham y Weinberg, 1970), en donde se generan un par entrelazado mediante un cristal no lineal que es bombardeado mediante un láser, proceso que se ha venido utilizando desde entonces, no sólo para mostrar los aspectos contraintuitivos de la luz, que emanan del concepto de fotón como excitación elemental del campo electromagnético cuantizado, sino para el contraste de desigualdades de Bell.

La naturaleza cuántica del campo electromagnético se revela actualmente en experimentos multifotónicos. Sin embargo, el experimento clave en el que se estudió

por primera vez la dualidad onda-partícula en la luz es el experimento de Aspect, Grangier y Roger en 1986. Partiendo de pares de fotones emitidos en cascadas atómicas, usando uno de ellos como disparador, el otro fotón fue introducido en un interferómetro Mach-Zehnder, sistema óptico con dos caminos de diferente longitud que interfieren a la salida, observándose un patrón de interferencia en la medida de la tasa de detección simple en uno de los detectores a la salida del interferómetro, cuando se variaba la diferencia de camino óptico. Sin embargo, si se observa la tasa de detección conjunta correspondiente a las dos salidas del interferómetro, ésta es nula, lo que parece revelar el comportamiento corpuscular de la luz.

1.2. ¿Otra alternativa es posible?

A principios del siglo XX, Planck intentó explicar la cuantización de la luz, defendida por Einstein en su explicación del efecto fotoeléctrico, en base a las fluctuaciones de lo que llamó, energía o campo de punto cero, en principio, se llamó energía residual, el término energía del punto cero es una traducción del germano Nullpunktsenergie. Todos los sistemas mecano cuánticos tienen energía de punto cero, cuyo término emerge como referencia al estado base del oscilador armónico cuántico y sus oscilaciones nulas. En la teoría cuántica de campos, la energía de punto cero es un sinónimo de la energía del vacío o de la energía oscura, una cantidad de energía que se asocia con la vacuidad del espacio vacío. Planck introdujo este concepto con el objeto de salvar la naturaleza ondulatoria de la luz, bien asentada a finales del siglo XIX en base a las ecuaciones de Maxwell, pero que volvía a descartarse a partir de la interpretación de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico.

La alternativa de la radiación de punto cero, como base para explicar los fenómenos cuánticos, dio lugar en los años 60 del siglo pasado al desarrollo de una nueva disciplina, la electrodinámica estocástica (SED) (Santos, 1974), cuyo objeto era reproducir los resultados cuánticos, y reinterpretar los fenómenos en base a la intervención de la radiación de punto cero del campo electromagnético.

Aunque esta teoría dio lugar a importantes resultados, no consiguió explicar aspectos como la cuantización de la energía en el átomo de hidrógeno, por lo que tuvo que descartarse como alternativa a la teoría cuántica. Si bien se lograron algunos éxitos notables, como por ejemplo la explicación del efecto Casimir, hay aspectos que hoy por hoy la SED no ha conseguido explicar. Sin embargo, una ramificación de la electrodinámica estocástica en el campo de la óptica, la denominada óptica estocástica,

ideada por los Drs. T. W. Marshall y E. Santos (1989), que surgió a principios de los 80 como alternativa a la Óptica Cuántica. La Óptica Estocástica se creó con la idea de explicar los resultados de los experimentos de Óptica Cuántica utilizando el concepto de radiación de punto cero en lugar del concepto de fotón, regresando a la idea de la luz como algo intrínsecamente ondulatorio. La detección de fotones se entiende, en el ámbito de la Óptica Estocástica a partir de la sustracción, a la intensidad total, de la correspondiente al punto cero en la posición del detector, de modo que la intensidad medible es aquella que está por encima del umbral definido por el campo de punto cero.

1.3. La función de Wigner y la óptica estocástica, dos caminos con un mismo fin

Fue a principios de los 90 cuando Óptica Cuántica y Óptica Estocástica encontraron un puente formal a través de la Mecánica Cuántica en el espacio de fases. La representación de Wigner de la Óptica Cuántica recupera la idea del punto cero como umbral en la detección, y muestra los efectos del vacío cuántico en los experimentos, en contraposición con el espacio de Hilbert, que lo sustrae directamente a través del ordenamiento normal de operadores. Más aún, todos los experimentos con fotones utilizando la conversión paramétrica a la baja, realizados con el objetivo de mostrar los aspectos no clásicos de la luz, y la violación experimental de desigualdades de Bell, tienen una interpretación estocástica fundamentada en la positividad de la función de Wigner para este proceso, lo que añadió la posibilidad de estudiar el proceso típicamente cuántico de la conversión paramétrica a la baja, mediante ecuaciones de evolución clásicas, simplemente añadiendo a la onda clásica correspondiente al láser la radiación de punto cero a la entrada del cristal. El comportamiento cuántico se trasladaba entonces a la detección, debido a la aparición de «probabilidades negativas», cuando la intensidad total quedaba por debajo del umbral del punto cero. Este trabajo fue desarrollado en la década de los 90, y constituye una línea de exploración no completamente cerrada.

Además, la gran similitud entre la función de Wigner para la conversión paramétrica a la baja, y las teorías de variables ocultas locales, llevó a un intento por reproducir los resultados experimentales, modificando la teoría cuántica de la detección, con objeto de tener un modelo de variables ocultas basado en la función de Wigner para el PDC. Sin embargo, los modelos de detección propuestos para tal fin no han conseguido aun su objetivo.

1.4. La información cuántica, lo improbable entra en lo posible

Es bien sabido que cualquier tratamiento de la información se realiza siempre utilizando medios físicos, en un principio por medios clásicos pero, en los últimos 25 años, muchos científicos desarrollaron una idea que Richard Feynman había sugerido en 1982. Feynman se percató de que podría haber serias dificultades para simular sistemas mecánico-cuánticos en computadores clásicos, y sugirió que construyendo computadoras basadas en los principios de Mecánica Cuántica se podrían evitar tales dificultades. Pocos años más tarde, en los 90, varios equipos de investigadores desarrollaron esta idea, demostrando que, sí es posible utilizar computadores cuánticos para simular eficientemente sistemas que no tienen simulación eficiente conocida en un computador clásico. De este modo, las ventajas que ofrece la teoría cuántica, a través de propiedades que no tienen contrapartida en la física clásica, y procesos de post-selección, no exenta de polémica, que permiten que las variables tomen cualquier valor al azar y luego mediante la post selección se condiciona la respuesta que debe ser verdadera. Sin tener en cuenta automáticamente cualquier problema que pueda surgir. Esto conduce a todo tipo de predicciones fantásticas sobre el poder de los ordenadores cuánticos. Además junto con los experimentos realizados con el fin de mostrar los resultados a que dan lugar a propiedades «casi mágicas», han constituido la base para el desarrollo, en la década de los 80, de la información cuántica, en sus aspectos teórico y prácticos. Entre estos aspectos cubiertos se incluyen: la teleportación (Bennett *et alii*, 1993), cuántica, sin contrapartida clásica, donde un entrelazado se puede usar para reconstruir, en cualquier punto y de forma independiente del tiempo y el espacio, un estado arbitrario preparado previamente y que interacciona con una de las partículas entrelazadas; la codificación densa (Bennett y Wiesner 1992), mediante la cual, son transmitidos dos bits clásicos de información con el envío de sólo un bit cuántico desde el emisor al receptor; la computación cuántica, con el diseño de algoritmos Shor, (1997), utilizando efectos cuánticos, muy diferentes a los de los computadores clásicos; la criptografía cuántica (Bennett, Brassard y Ekert, 1992), para la que las propiedades de la Mecánica Cuántica permite establecer una clave de forma que la seguridad entre emisor y receptor no pueda ser vulnerada; corrección cuántica de errores y corrección cuántica tolerante a fallos (Steane, 1995), para proteger los estados cuánticos del ruido.

1.5 Consecuencias de la ortodoxia.

A raíz de todo lo que hemos expuesto, surgen fenómenos que no tienen ningún parangón con la física clásica y que podemos resumir como sigue:

- a) Antes de medir cualquier magnitud de un fenómeno físico, todas sus posibilidades existen simultáneamente en universos no ortogonales.
- b) Lo que obtenemos en nuestro aparato de medida depende del observador.
- c) El tiempo no es un observable físico.
- d) El entrelazamiento cuántico conecta dos regiones del universo independientemente del espacio y el tiempo.
- e) El teletransporte es posible mediante el entrelazamiento.
- f) La energía del vacío no es cero (sino infinita).
- g) En las condiciones experimentales adecuadas todo sistema material se comporta de forma ondulatoria.

2. Lo natural en la Mecánica Cuántica, es lo extraordinario en el cómic

2.1. El teletransporte el más común de los transportes

Todos los fenómenos descritos anteriormente se remarcan en el cómic de una manera o de otra mediante argumentos y razonamientos poco ortodoxos. En este sentido el teletransporte es el más paradigmático de estos fenómenos, ya sea en su forma de facultad física o de resultado de una tecnología avanzada. Por eso creo que es necesario exponer de forma detallada como se entiende el fenómeno en la Mecánica Cuántica.

El teletransporte consiste en reproducir en un punto el estado cuántico, en general desconocido, de un sistema individual existente en otro punto, destruyendo en el proceso el estado de partida. Dicho así, la importancia del fenómeno parece limitada: después de todo, clásicamente es posible en principio determinar completamente las características de un sistema no demasiado complicado, de forma que en otro lugar puedan fabricarse copias del original tan parecidas como se desee, sería posible fabricar en otro lugar cuantas copias quisiéramos. Las dificultades con objetos más complejos son esencialmente técnicas, no de principio. Las cosas cambian esencialmente cuando interviene la Mecánica Cuántica. Es posible teletransportar el estado cuántico de un sistema individual sin conocerlo previamente, pero no puede obtenerse más que una copia del mismo, y a costa de perder el original. Para entender el proceso fijémonos en la siguiente figura, en ella Alicia prepara un estado arbitrario en el haz 1 que interacciona con uno de los dos haces entrelazados 2-3, luego Alicia mide en 2' y 3'

obteniendo uno de los estados de Bell (en los detectores tras los PBS, separadores de polarización, que transmiten horizontal y reflejan vertical). Luego ella le comunica a Bob lo que ha obtenido y éste en el haz 3 aplica una transformación que reconstruye el estado que Alicia había preparado, ver figura 3.

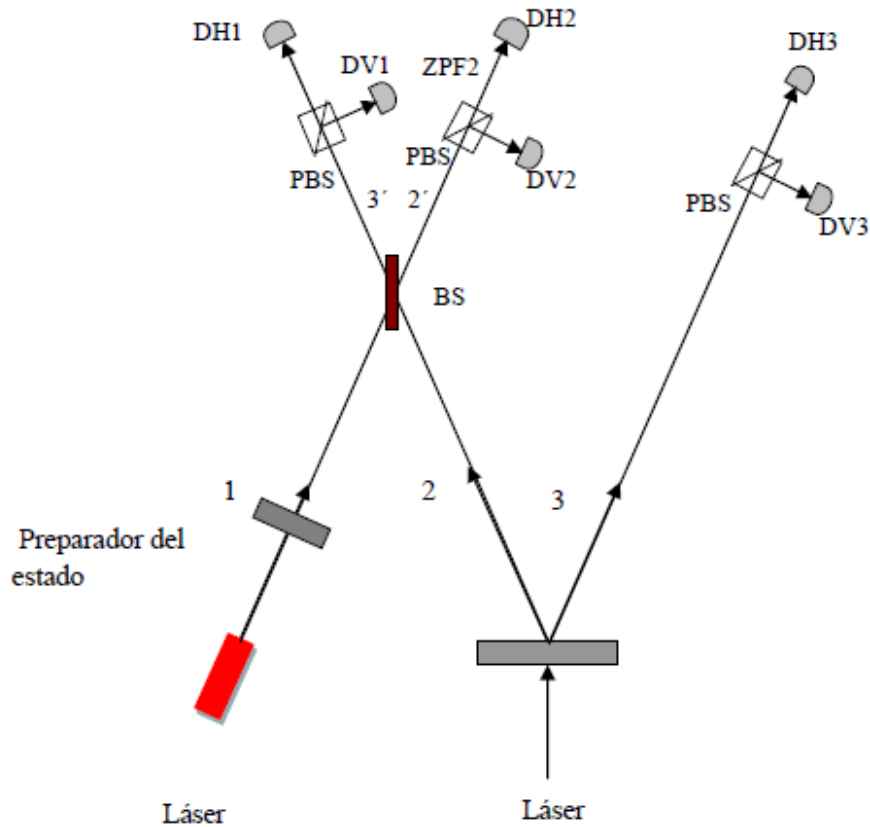


Figura 3. Experimento real de teletransporte cuántico.

De lo expuesto anteriormente podemos deducir que el teletransporte del laboratorio no tiene mucho que ver con la que aparece en los comics. La visión del teletransporte en el cómic (y en el cine) resulta ser poco real en el sentido de que normalmente, se manifiesta en forma de apariciones y desapariciones no instantáneas, sino que el objeto que sufre este fenómeno se va difuminando como una bruma en el aire, esto no coincide con el fenómeno cuántico donde la reconstrucción arbitraria de una propiedad del estado arbitrario, como puede ser la polarización, se realiza de forma instantánea, además lo que se teletransporta, tras recibir una información clásica correspondiente a una medida de Bell.



Figura 4. Ejemplos de personajes que se teletransportan en el cómic y el cine. los ejemplos se repiten constantemente y se convierten en un referente natural.

Además en el caso de átomos no es la materia lo que se teletransporta, sino el estado correspondiente a los átomos de tal materia. Aun así la posibilidad de ir a donde queramos de forma automática es usada por muchos héroes del cómic, ya sea por tener unos genes especiales como sucede con Nightcrawler (Rondador nocturno en castellano) de los *X-men* y Hiro Nakamura de *Héroes*, o por un entrenamiento de las destrezas no desarrolladas por los comunes de los mortales, como sucede con Son Goku, de Bola de Dragón, por otra parte también pueden haber sufrido el efecto de radiaciones especiales, Doctor Manhattan de los *Wachtmens* o en la serie *Fringe* (figura 4).

2.2. Ellos no tienen problemas con el tiempo

¡Ohhh Tempus fugit! que cercano en el palpitante doloroso de nuestro quehacer diario y que lejano en la comprensión de su naturaleza. En el presente apartado, profundizaremos un poco más sobre la naturaleza, centrándonos en el tiempo en la Mecánica Cuántica, usando como referencia las investigaciones de Muñoz González (2011).

En contraste con su papel dominante en la teoría de la relatividad, el tiempo en la teoría cuántica, después de unos primeros tanteos de Bohr y los grupos fundadores de Gotinga y Copenhague en los años veinte del pasado siglo, quedó relegado esencialmente, en escritos filosóficos y tratamientos teóricos de las siguientes décadas, a su aspecto paramétrico. Pauli y su famoso «teorema» de 1933 sobre la imposibilidad de asociarlo con un operador autoadjunto para sistemas con Hamiltoniano (energía del sistema) de espectro discreto o semiacotado, un observable, que son la mayoría de los sistemas de interés físico, proporcionaron para muchos físicos, una base suficiente para justificar el abandono teórico del tiempo como observable. Sin embargo, durante todos estos años de aplicaciones y desarrollo de la teoría cuántica, los laboratorios no han dejado de observar fenómenos que se manifiestan singularmente a lo largo del tiempo, mediante eventos que ocurren en instantes bien definidos (en una escala mucho menor que la de la duración temporal de la función de onda) y aleatorios. Si entendemos por «observable» en un sentido amplio, cualquier magnitud medible cuya descripción estadística como variable aleatoria es reproducible mediante repeticiones del experimento basado en una misma preparación del sistema, debemos concluir que existen de hecho muchos observables temporales, y que los libros de texto sobre Mecánica Cuántica no proporcionan un tratamiento teórico adecuado.

Uno de los ejemplos más importantes, por su, al menos aparente, sencillez, y por su cotidianeidad, es el tiempo de llegada a un detector. En laboratorios de física atómica o molecular, las partículas pueden prepararse, incluso individualmente, en condiciones esencialmente iguales, y después lanzarse, o desplazarse hacia el detector en el que los instantes de llegada se identifican como «*clicks*» bien definidos. Se obtienen también sus correspondientes distribuciones. Estas llegadas, como se ha demostrado, responden además a patrones perfectamente cuánticos, ya que en el perfil de la distribución temporal se pueden producir interferencias y difracción en el tiempo, análogas a las que se observan espacialmente cuando, por ejemplo, en la emisión intervienen, no ya dos rendijas en posiciones distintas, sino ventanas temporales de apertura de la fuente centradas en distintos instantes.

El tiempo de llegada de partículas cuánticas se ha estudiado teóricamente de forma esporádica desde los años sesenta, y de manera más sistemática e intensa durante los últimos diez años, mientras que la teoría de la difracción en el tiempo se remonta a trabajos de 1952. El observable temporal más fundamental, de hecho el único verdaderamente esencial para nuestro quehacer diario es el tiempo del reloj. Desde un punto de vista formal algunas características del tiempo del reloj son muy semejantes al tiempo de llegada. Los relojes cuánticos son sistemas cuánticos que se desplazan lineal o periódicamente con el tiempo. Al observar la posición del sistema en un instante dado, deducimos «qué hora –o qué milisegundo– es» y, en general, el tiempo transcurrido desde algún origen predeterminado, pero la observación está sujeta a la misma aleatoriedad inherente al tiempo de llegada. En la práctica, el tiempo que producen los metrologos en los Institutos oficiales de tiempo y frecuencia, si bien descansa internamente, en toda una batería de efectos cuánticos, no se deduce de relojes cuánticos definidos en el sentido anterior. Lo que de verdad se persigue en metrología es establecer con extremada precisión y estabilidad la frecuencia de una transición entre niveles del átomo de Cesio para reproducirla mediante osciladores macroscópicos de cuarzo. El segundo se define contando simplemente un número de estas oscilaciones acordado convencionalmente. La búsqueda de un tiempo cada vez más preciso ha llevado a diseñar relojes basados en átomos ultrafríos cuyo movimiento trasnacional es extremadamente lento. Las limitaciones del teorema de Pauli, cuyas consecuencias más dramáticas son técnicamente evitables mediante medidas positivas operador-valoradas

Otra forma de enseñanza de las Ciencias: El teletransporte, los viajes en el tiempo y los universos paralelos. Realidades y reflejos en el cómic contemporáneo

(«positive operator valued measurements» o POVM) no ha facilitado tampoco el examen de operadores que describan «duraciones».

Estos operadores conmutan con el Hamiltoniano, y por tanto no están en realidad sujetos al dominio de aplicación del teorema. El tiempo de permanencia de una partícula en una zona espacial, o más generalmente de un sistema en un subespacio del espacio de Hilbert, viene representados por operadores autoadjuntos y por tanto constituirían según la clasificación de von Neumann, perfectos «observables». Sin embargo Wigner señaló con acierto que esta acepción del término «observable» es problemática, y colisiona con la del lenguaje ordinario, puesto que no es en absoluto evidente cómo proceder en el laboratorio para realmente «observar» las distribuciones de valores propios de muchos operadores autoadjuntos, ni la teoría proporciona ningún tipo de receta automática para conseguirlo.



Figura 5. Viajeros del tiempo, con la imaginación.

El tiempo de permanencia se define y mide sin problema conceptual o de principio en sistemas clásicos pero se enfrenta en el mundo cuántico con la ausencia de trayectorias. Su interpretación operacional, es decir, en términos de manipulaciones concretas en el laboratorio que proporcionen la distribución estadística.

A pesar de todo lo expuesto en el párrafo anterior es bastante complejo, desde un punto de vista formal, el estudio de eso que llamamos tiempo, hemos preferido no profundizar mucho en ello como sucede en las viñetas, donde el tiempo se expresa de forma subjetiva en las sucesivas imágenes, el viaje en el tiempo en el guion del cómic usa parte de ciencia y parte de imaginación. Así en «*Futurama*» el protagonista viaja al futuro mediante un proceso de hibernación, algo que no representa una contradicción con las leyes de la naturaleza que conocemos. Sin embargo en su máquina del tiempo H.G. Wells, o en la conocida «*Regreso al futuro*» (figura 5) se puede ir al pasado y al futuro, algo que sí puede presentar contradicción con ciertas leyes de la física como las que se derivan de la «Teoría de la Relatividad», pues en ella se pone de manifiesto el hecho de que a velocidades próximas a las de la luz el tiempo se dilata, lo que permitiría que se envejecería más lentamente en un sistema con estas características, como consecuencia de esto se daría en la práctica el famoso ejemplo de la paradoja de los gemelos, por el cual dos hermanos gemelos que fueran separados de tal manera que uno de ellos se quedase en la tierra y el otro fuera introducido en un vehículo espacial, que se envía a la estrella Alfa Centauro, con una velocidad próxima a la de la luz, se encontraría al volver a la Tierra que su hermano gemelo sería mayor que él.

Sin embargo el viaje al pasado parece resistirse a la física como un hecho posible, pero la Mecánica Cuántica, tal como hemos visto, parece mostrar el camino hacia donde debemos mirar para dominar el tiempo, pues los procesos cuánticos son reversibles cuando hablamos de partículas individuales, pero además la Mecánica Cuántica no es sólo una teoría de lo pequeño sino que describe las leyes de la física moderna, hasta el punto de que en las condiciones experimentales adecuadas un sistema macroscópico presenta propiedades ondulatorias.

2.3. Se levanta cada día en un universo diferente

Tratando de evitar situaciones paradójicas como las presentadas en este texto han nacido tanto interpretaciones alternativas de la teoría como teorías diferentes. Una de estas interpretaciones es la de los muchos mundos (Muñoz González, 2011). Aquí el vector de estado representa completamente la realidad, sin la necesidad de elementos adicionales. De tal manera que cada elemento del vector de estado encuentra su contrapartida en la realidad y viceversa. Esto lleva indefectiblemente a admitir que todas las posibilidades que aparecen en el proceso de medida, y de las cuales somos conscientes de tan sólo una, tenga igualmente realidad. La compatibilidad con nuestra

experiencia más inmediata se alcanza suponiendo que en este proceso de medida el universo se desdobra en múltiples universos, y que en cada uno de ellos «la aguja» del aparato (o un suceso de nuestra vida paralela) tiene valor distinto (hemos tomado una decisión distinta de forma consciente o no). Nosotros sólo somos conscientes de la rama de universo en las que ahora estamos, existiendo otros «yoes» en los otros universos (¿De materia o no?).

Aparte de una crítica epistemológica en relación a su calidad como teoría física, esta interpretación tiene abiertos serios problemas. En primer lugar está lo que sería el cuándo se produce estas divisiones, ya que lo que lo que es un proceso de medida no es fácil de definir. En segundo lugar está el problema de las bases. Pues un mismo vector se puede descomponer matemáticamente de muchas formas a la misma vez. Al respecto se ha planteado la posibilidad de que sean las llamadas bases del aparato, en relación con las reglas de superselección inducidas por el ambiente. Aunque no arroja predicciones distintas a la de la interpretación ortodoxa, se han propuesto versiones ligeramente distintas que sí podrían ser contrastadas. Esta forma de hacer física ha sido duramente criticada.

A pesar de todo lo expuesto, los experimentos parecen indicar que el observador es crucial en la conformación de la medida física de tal manera que el aparato de medida sólo sería una mera prolongación, más precisa aunque no lo suficiente para llegar a la verdad, de nuestros sentidos. Como ejemplo podemos considerar un recinto dividido en dos, en uno de ellos ponemos un sensor y hacemos que una partícula pueda acceder a ambas zonas del recinto, cuando la partícula es detectada por el sensor decimos que se encuentra en la zona de la izquierda, por ejemplo. ¿Pero cuando no está a la izquierda? ¿Dónde está? La respuesta inmediata es, la partícula se encuentra a la derecha. Resulta que hemos obtenido una medida de posición sin interacción entre aparato de medida y partícula. En este ejemplo lo esencial es la capacidad del observador, elemento consciente ¿no sé hasta qué punto?, de discernir lo que significa medir, o no medir, en este experimento vinculándolo con un fenómeno físico. Todo esto parece indicar una relación esencial entre lo psíquico y lo físico. Sin ningún lugar a duda se abren perspectivas muy prometedoras en este sentido, así el físico británico Penrose junto con el anestesista y profesor de la Universidad de Arizona Stuart Hameroff, buscan la consciencia en los microtúbulos neuronales donde se produciría el auto colapso de nuestra función de ondas propia, lo que nos permite reconocer lo que somos y el mundo

que nos rodea, sin embargo parece ser que a esos niveles aún no se manifestarían los efectos de las leyes cuánticas, sin embargo en otros experimentos mediante electrodos introducidos en el cerebro se ha conseguido inducir la reversibilidad cuántica a un individuo que revivió un suceso del pasado, no como un recuerdo sino como un hecho consciente y real en ese momento, experimentando con todos sus sentidos una situación real de su pasado.

Otro aspecto interesante entre psicología y física, es la relación entre el mundo onírico y la idea de los múltiples mundos, en este sentido cabe destacar los onironautas que buscan sueños lúcidos mediante ciertas técnicas no ortodoxas, en estos sueños el individuo es consciente en todo momento dominando todo lo que acontece en el sueño, es como si todas las probabilidades cuánticas se manifestasen condicionada por unas leyes físicas menos restrictivas, de tal manera que los auto colapsos inducidos por el soñador son instantáneos, para lograr estos sueños lúcidos usan técnicas basadas en lo que se llama chequeos de realidad, que consiste en preguntarse a lo largo de nuestro quehacer diario sobre la realidad de lo que somos, donde estamos y que estamos haciendo. Este chequeo de realidad se repite de forma mecánica en nuestro sueño de tal manera que en un determinado momento ésta pregunta surgirá en el sueño y nos haremos conscientes en él y comenzaremos a controlar el sueño. Normalmente todo esto debe ir acompañado de un libro de sueños, donde apuntaremos los sueños, y de un proceso de autosugestión antes de dormir, donde nos auto convenceremos de que vamos a tener un sueño lúcido. Como comprenderán debemos guardar cierto escepticismo frente a estos relatos, sólo se puede decir que si alguien quiere comprobar si esto es verdad que siga la metodología indicada y que experimente por sí mismo.

Respecto a lo expuesto en el párrafo anterior, es como si hiciéramos un proceso inverso al colapso cuántico, algo que sería posible si la consciencia fuera la causa final del colapso y no verificase las leyes de la mecánica cuántica, sin embargo para muchos físicos el apelar a entes conscientes para solucionar el problema del colapso no es admisible, ya que no siguen las leyes de la mecánica cuántica (¿Serán leyes no lineales o quizás la consciencia no sea físicas?)

El creador de cómic ajeno, o no, a todo esto se vale de su imaginación para hacer que sus personajes se trasladen a otras realidades, ya sea por causas naturales como puede ser el propio estado de sueño o mediante fenómenos como pueden ser perturbaciones electromagnéticas o gravitatorias dando lugar a aventuras sin par en cada

Otra forma de enseñanza de las Ciencias: El teletransporte, los viajes en el tiempo y los universos paralelos. Realidades y reflejos en el cómic contemporáneo

viñeta, donde se juega y se mezclan los viajes en el tiempo la teleportación y los mundos paralelos.



Figura 6. El mundo paralelo de Oz.

Conclusión

No siempre resulta fácil intentar divulgar los aspectos más importantes de la ciencia y menos en el caso de la Mecánica Cuántica, sin embargo el cómic permite mostrar de una forma muy simplificada, y poco rigurosa, los aspectos más paradójicos de la Mecánica Cuántica. Desde sus orígenes hay un cisma en cuanto a la interpretación de los hechos que aparecen descritos por su matemática, a pesar de referirse a fenómenos físicos verificables en el laboratorio. Pero el hecho de que la teoría, a pesar de describir un mismo fenómeno, pueda dar lugar a interpretaciones diferentes, da pie a fomentar una atracción entre el público, que además suele mezclarse ciertas corrientes esotéricas. Lo que lleva a pensar que pueden usar la Mecánica Cuántica para justificar todo tipo de especulaciones sobre el carácter metafísico de los aspectos esenciales de la Mecánica Cuántica.

El cómic como reflejo de nuestra sociedad manifiesta lo que esta sociedad es, incluida su ciencia, pero siempre exagerándola, hasta un extremo que resulta más atractiva al consumidor de este tipo de productos gráficos, lo que no debemos hacer es convertirlos en modelos, sino como una forma de entretenimiento por lo menos en lo que respecta a su relación con la física, pues aunque puede haber algo de real, al no ser completamente real, no dejan de ser una fantasía.

Santiago Ramón Guillén

Recordemos siempre que la realidad que vivimos supera la ficción, incluido el cómic. Además según la interpretación ortodoxa, cada decisión que se toma genera una nueva realidad, con lo que la existencia de cada uno es fruto de nuestras decisiones.

BIBLIOGRAFÍA

- Aspect, A., Dalibard, J. y Roger, G. (1982): «Experimental test of Bell's inequalities using time varying analyzers». *Phys. Rev. Lett.* 49, 25, pp. 1804-1807.
- Bell, J.S. (1964): «On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox». *Physics* 1, pp. 195-200.
- Bell, J.S. (1966): «On the problem of hidden variables in quantum mechanics». *Rev. Mod. Phys.* 38, 3, pp. 447-452.
- Bennett C. H. y Wiesner S. J., (1992): «Communication via one and two particle operators on Einstein Podolsky Rosen states». *Phys. Rev. Lett.* 69, 20, pp. 2881-2884.
- Bennett, C., Brassard, G. y Ekert A. (1992): «Quantum Cryptography», *Scientific American* 267, p. 50.
- Bennett, C.H. et alii (1993): «Teleporting an unknown quantum state via dual classical and EPR channels». *Phys. Rev. Lett.* 70, 13, pp. 1895-1899
- Bohm, D. (1952a): «A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables». *I, Phys. Rev.* 85, p. 166.
- Bohm, D. (1952b): «A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables». *II, Phys. Rev.* 85, p. 180.
- Born, M., Heisenberg, W y Jordan, P. (1926): «Zur Quantenmechanik». *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei. Zeitschrift für Physik*, 35, 8-9. pp. 557-615
- Burnham D. C. y Weinberg D. L. (1970): «Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs». *Phys. Rev. Lett.* 25, p. 84.
- Casado, A., Marshall, T.W. y Santos, E. (1997): «Parametric down conversion experiments in the Wigner representation». *JOSA B*, 14, 3, pp. 494-502.
- Clauser, J.F. y Horne M.A. (1974): «Experimental consequences of objective local theories». *Phys. Rev. D* 10, pp. 526-535.
- Clauser, J.F., Horne M.A., Shimony A. y Holt R. A. (1969): «Proposed experiment to test local hidden variable theories». *Phys. Rev. Lett.* 23, 15, pp. 880-884.
- De Broglie, L. (1972): «Phase Waves of Louis de Broglie». *Am.J.Phys.* 40, 9, pp. 1315-1320, September
- Einstein, A., Podolsky B. y Rosen C., (1935): «Can quantum mechanical description of reality be considered complete?». *Phys. Rev.* 47, p. 777.
- Feynman R.P. (1982): «Simulating physics with computers». *Int. J. Theor. Phys.* 21, p. 467.

Heisenberg, W. (1925): «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Z. Phys.* 33, pp. 879-893.

Marshall, T.W. y Santos, E. (1989): «Stochastic optics: A local realistic analysis of optical tests of Bell inequalities». *Phys. Rev. A*, 39, p. 6271.

Muñoz González, J. (2011): «El tiempo como observable en la mecánica Cuántica». Tesis doctoral, Universidad del País Vasco.

Planck, M. (1901): «On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum». *Annalen der Physik*, 4, p. 553 ff.

Santos, E. (1974): «Foundations of stochastic electrodynamics». *Il Nuovo Cimento*, 22B, 2, pp. 201-214,

Schrödinger, E. (1935): «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik», *Naturwissenschaften* 23, pp. 807-812; 823-828; 844-849.

Shor, P. (1997): «Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer», *SIAM Journal on computing*, 26, 5, pp. 1484-1509.

Steane, A. (1995): «Error correcting codes in quantum theory». *Phys. Rev. Lett.* 77, p. 793.