

# CUENTOS CUÁNTICOS: MÁS ALLÁ DE LA PSEUDOCIENCIA

Coordinadores

John Alexander Franco Villafañe ⊙ Georgina. A. Olivares Rentería

Editores

John Alexander Franco Villafañe ⊙ Georgina. A. Olivares Rentería ⊙  
Carlos Pineda

Autores

Eduardo Gómez García • Víctor M. Valenzuela Jiménez • John Alexander  
Franco Villafañe • Carlos Pineda • Karel Zapfe • Karina Garay Palmett •  
Francisco Domínguez Serna • Rosario Paredes • Víctor Romero Rochín •  
David Bermúdez Rosales

**CopIt-arXives**  
Publishing Open Access  
with an Open Mind  
2025

Este libro contiene material protegido por las leyes de autor

Todos los derechos reservados © 2025

Publicado digitalmente en México, por CopIt-arXives

Coordinado por John Alexander Franco Villafañe y Georgina. A. Olivares Rentería

Editado por John Alexander Franco Villafañe, Georgina. A. Olivares Rentería y Carlos Pineda

Diseño de portada: Fabiola Monserrat Pérez Rubio

*Cuentos cuánticos: más allá de la pseudociencia*

John Alexander Franco Villafañe, Georgina. A. Olivares Rentería y Carlos Pineda, editores. — México CDMX: CopIt-arXives, 2025

ISBN: 978-1-938128-31-8 ebook

### **Derechos y permisos**

Todo el contenido de este libro es propiedad intelectual de sus autores quienes, sin embargo, otorgan permiso al lector para copiar, distribuir e imprimir sus textos libremente, siempre y cuando se cumpla con lo siguiente: (i) el material no debe ser modificado ni alterado, (ii) la fuente debe ser citada siempre y los derechos intelectuales deben ser atribuidos a sus respectivos autores, (iii) estrictamente prohibido su uso con fines comerciales.

El contenido y puntos de vista planteados en cada capítulo es responsabilidad exclusiva de los autores y no corresponden necesariamente a los de los editores o a los de ninguna institución, incluidas CopIt-arXives o la UNAM.

Producido con software libre incluyendo L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Indexado en Google Books.

Todas las figuras e imágenes son cortesía de [www.wikimedia.org](http://www.wikimedia.org) o bien de los autores, a menos que se señale lo contrario explícitamente.

**ISBN: 978-1-938128-31-8 ebook**

<https://copitarxives.fisica.unam.mx>

**Este libro ha pasado por revisión de pares**

**CopIt-arXives**

Cd. de México - Cuernavaca - Madrid - Curitiba

Viçosa - Washington DC - Mallorca - Londres

Con el apoyo de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Instituto de Física

## CONTENIDO

PREFACIO	V
INTRODUCCIÓN	VII
<b>1. ¿CON QUÉ TIENE Y NO TIENE QUE VER LA CUÁNTICA?</b> <i>Dr. Eduardo Gómez García</i>	<b>1</b>
Los átomos son ondas . . . . .	2
Las mediciones modifican al sistema que estamos midiendo . . . .	4
<b>2. DETERMINISMO Y EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE</b> <i>Dr. Víctor M. Valenzuela Jiménez</i>	<b>7</b>
<b>3. LA CUÁNTICA Y EL AURA</b> <i>Dr. John Alexander Franco Villafañe</i>	<b>13</b>
¿Qué es el Aura? . . . . .	13
¿Qué instrumentos usamos para medirla? . . . . .	13
¿El Aura sigue sin sustento científico hasta el día de hoy? . . . . .	14
¿Y qué tiene que ver todo esto con la Cuántica? . . . . .	16
¿Qué es eso de los espectros atómicos? ¿Son los fantasmas de los átomos? . . . . .	16
¿Cómo podemos entender la luz? . . . . .	17
¿Se utiliza en México la luz para estudiar fenómenos cuánticos? . .	17
¿Qué le diría a las personas que creen en el Aura y otras energías del cuerpo? . . . . .	18
<b>4. DECOHERENCIA CUÁNTICA</b> <i>Drs. Carlos Pineda y Karel Zapfe</i>	<b>19</b>

<b>5. COMPUTACIÓN CUÁNTICA Y OTRAS TECNOLOGÍAS</b> <i>Drs. Karina Garay Palmett y Francisco Domínguez Serna</i>	<b>31</b>
<b>6. LA CUÁNTICA Y LOS ESTADOS DE LA MATERIA</b> <i>Dra. Rosario Paredes</i>	<b>39</b>
<b>7. CORRELACIONES CUÁNTICAS</b> <i>Dr. Víctor Romero Rochín</i>	<b>47</b>
<b>8. VIAJES EN EL TIEMPO</b> <i>Dr. David Bermúdez Rosales</i>	<b>53</b>
Introducción . . . . .	53
Espacio-tiempo . . . . .	53
Velocidad de la luz . . . . .	55
Viajes hacia el futuro . . . . .	55
Comprobaciones experimentales de viajes hacia el futuro . . . . .	55
Primer experimento . . . . .	56
Reloj dando la vuelta al mundo . . . . .	56
Astronautas y cosmonautas . . . . .	56
GPS . . . . .	57
Viajes hacia el pasado . . . . .	57
Telescopios . . . . .	57
Conclusión . . . . .	58

## PREFACIO

La mecánica cuántica, con sus misterios y maravillas, ha fascinado a científicos y entusiastas durante más de un siglo. Este libro, titulado “Cuentos Cuánticos: Más Allá de la Pseudociencia”, nace de la necesidad de presentar esta fascinante área de la física desde una perspectiva rigurosamente científica y accesible. En cada capítulo, expertos en la materia nos guían a través del sorprendente mundo subatómico, revelando sus secretos con precisión y claridad.

La mecánica cuántica desafía nuestra intuición y redefine nuestra comprensión del universo. Desde la dualidad onda-partícula hasta los enredos cuánticos, cada concepto nos invita a repensar la realidad. Este libro no es una colección de teorías y experimentos, sino una invitación a un viaje intelectual, donde cada página nos lleva más profundo en el conocimiento del comportamiento de la materia y la energía a escalas diminutas.

Al recorrer las páginas de este libro, descubrirás que la mecánica cuántica no es un reino de misterios esotéricos, sino una ciencia sólida, respaldada por experimentos rigurosos y teorías matemáticas robustas. Cada capítulo, escrito por especialistas en sus respectivos campos, ha sido cuidadosamente revisado por pares para asegurar la calidad y precisión de la información.

Te invitamos a dejarte llevar por la curiosidad y a disfrutar de este viaje a través del mundo cuántico. Esperamos que al finalizar esta lectura, no solo comprendas mejor la mecánica cuántica, sino que también compartas nuestra admiración por la belleza intrínseca de la naturaleza revelada a través de la ciencia.

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a los estudiantes de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Jenny Marcelle Mar Leyva y Saúl Tonalli Rodríguez Vázquez. Gracias a su dedicación en el servicio social, Jenny hizo posible la compilación de este texto y Tonalli realizó las ilustraciones que acompañan a los capítulos -excepto el cuarto-, enriqueciendo visualmente nuestras explicaciones y haciendo más amena la lectura.

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

## INTRODUCCIÓN

EN el año 1900, el físico alemán Max Planck revolucionó la ciencia al proponer una solución matemática a un problema práctico relacionado con la radiación de los cuerpos negros. Lo que comenzó como un “truco” matemático terminó siendo el primer paso hacia el desarrollo de una de las teorías más trascendentales en la historia de la ciencia: la mecánica cuántica. La incógnita sobre cómo se distribuían las frecuencias de la luz emitida por los materiales incandescentes no podía resolverse utilizando los principios de la física clásica, y fue Planck quien, al proponer que la energía no se emitía de manera continua, sino en paquetes discretos o “cuantos”, sentó las bases de esta nueva forma de entender el mundo.

Aquel hallazgo inicial tuvo consecuencias mucho más profundas de las que Planck habría podido imaginar. La física cuántica, que inicialmente surgió como una corrección para resolver un problema específico, cambió para siempre nuestra visión del universo. Donde la física clásica, la obra monumental de Isaac Newton, concebía un mundo determinista y continuo, la mecánica cuántica planteaba una realidad fundamentada en la probabilidad y la discontinuidad. En la década de 1920, físicos como Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg y Paul Dirac desarrollaron la teoría cuántica en su forma moderna, una formulación que desafiaría la intuición y daría pie a lo que quizás sea la mayor revolución científica del siglo XX.

No ha habido, hasta la fecha, una revolución científica comparable en términos de impacto científico y filosófico. La física cuántica no solo cambió la forma en que entendemos los fenómenos subatómicos, sino que también planteó preguntas fundamentales sobre la naturaleza misma de la realidad. Desde la dualidad onda-partícula hasta el principio de incertidumbre, la cuántica reconfiguró nuestra comprensión del universo. Los avances tecnológicos que de ella derivaron —como los semiconductores, los láseres y la computación cuántica— han transformado el mundo moderno, acercándonos a un futuro donde la ingeniería cuántica juega un rol central en el desarrollo de nuevas tecnologías.

México, al igual que otras naciones, no ha estado exento de esta revo-

lución. A principios del siglo XX, la física cuántica comenzó a influir en la ciencia mexicana, aunque en sus primeras décadas, los científicos interesados en este campo se formaron mayoritariamente en el extranjero, sobre todo en Europa. Figuras como Manuel Sandoval Vallarta, Marcos Moshinsky y Leopoldo García Colín fueron pioneros en llevar el conocimiento cuántico a México, estableciendo una base sólida para el desarrollo de la ciencia en el país. Gracias a ellos, se creó una tradición científica que no solo contribuyó al desarrollo de la física cuántica en México<sup>1</sup>, sino también a la implementación de tecnologías avanzadas, como los aceleradores de partículas, la energía nuclear, y más recientemente, la metrología y computación cuánticas.

En 2007 se crea la División de Información Cuántica de la Sociedad Mexicana de Física, un esfuerzo conjunto de destacados científicos como Octavio Castaños, Rocío Jáuregui y Jorge Hirsch, en un contexto en el que México buscaba avanzar en las tecnologías cuánticas y experimentar con nuevas áreas de investigación, como los condensados de Bose-Einstein y la computación cuántica.

Durante la pandemia de COVID-19, el científico Eduardo Gómez identificó la necesidad urgente de divulgar el conocimiento científico nacional sobre la física cuántica. Este desafío, marcado por la falta de acceso a medios convencionales de enseñanza y difusión, inspiró la creación de este libro, concebido como una herramienta accesible para promover y compartir los avances científicos mexicanos en el fascinante mundo de la cuántica.

Este libro, *Cuentos Cuánticos: Más Allá de la Pseudociencia*, pretende ofrecer una visión clara y accesible de la física cuántica, desmitificando algunos de los conceptos más complejos y contrastándolos con las interpretaciones pseudocientíficas que a menudo aparecen en la cultura popular. A lo largo de sus capítulos, los autores nos invitan a explorar cómo la física cuántica ha transformado no solo nuestra comprensión científica, sino también el desarrollo tecnológico. Con ejemplos que abarcan desde los relojes atómicos hasta la manipulación de partículas mediante láseres, la obra ilustra cómo México ha jugado un papel significativo en la evolución de estas tecnologías.

Este libro es una invitación para que el lector, sea estudiante, investigador o entusiasta de la ciencia, se sumerja en el fascinante mundo de la cuántica. A través de sus capítulos, esperamos que los misterios de la mecánica

---

<sup>1</sup>El libro *México cuántico: Historia de una ciencia en desarrollo*, escrito por Emerson Sadurní y Justiniano Lorenzo Díaz Cruz en 2024, proporciona una narrativa extensa sobre el desarrollo de la física principalmente teórica de la cuántica en México.

cuántica se revelen con claridad, despojados de las brumas de la pseudociencia, y que al final de este recorrido, compartamos todos una admiración profunda por la belleza intrínseca de la naturaleza tal como nos la revela esta extraordinaria teoría.

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

## ¿CON QUÉ TIENE Y NO TIENE QUE VER LA CUÁNTICA?

*Dr. Eduardo Gómez García\**

La física estudia a la naturaleza desde el punto de vista más fundamental. Nos interesa poder describirla y predecir lo más exacto posible lo que harán las cosas a nuestro alrededor bajo diferentes condiciones. Por ejemplo, si tomo una piedra y la aviento, puedo predecir perfectamente la trayectoria que seguirá la piedra al caer. Gran parte de este conocimiento se lo debemos a Isaac Newton, un físico brillante que estableció las leyes que siguen los objetos con los que estamos acostumbrados a interactuar. Este poder predictivo nos ha permitido construir gran parte de lo que vemos a nuestro alrededor, como automóviles, edificios y muchas cosas más.

Puedo ahora partir la piedra en dos y ver si cada mitad se comporta de la misma manera. Si repito ésta división múltiples veces, eventualmente llegaré a los átomos, que son los bloques fundamentales de los que está hecha la piedra y todo lo que está a nuestro alrededor, incluso nosotros mismos. Si aviento ahora un átomo ¿se moverá de igual manera que la piedra? Sorprendentemente, resulta ser que no. Estos objetos diminutos siguen leyes diferentes a las de Newton, y es por ello que tenemos que aplicar una corrección. Los átomos se comportan ahora bajo las leyes de la Mecánica Cuántica.

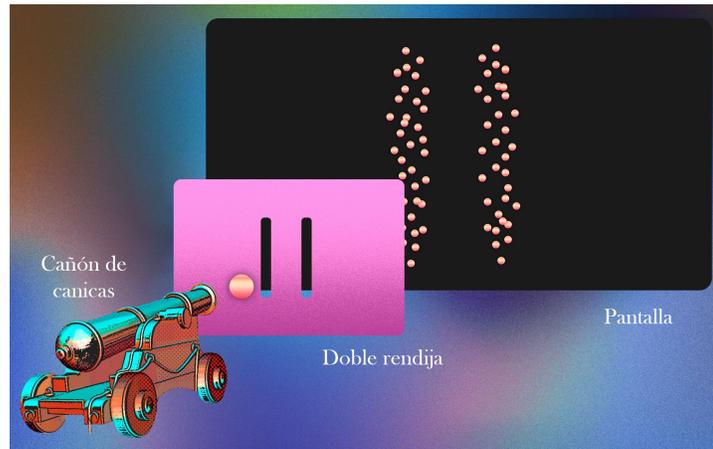
Podemos resumir lo que hemos aprendido de la Mecánica Cuántica en sus dos puntos más importantes:

1. Los átomos, y otras partículas muy pequeñas, son ondas.
2. Hacer mediciones modifica al sistema que estamos midiendo.

Entender estos dos puntos nos ayudará a tener una comprensión más clara de lo que se puede lograr gracias a la Mecánica Cuántica. Vamos a tratar de explicar cada uno con un ejemplo.

---

\*Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

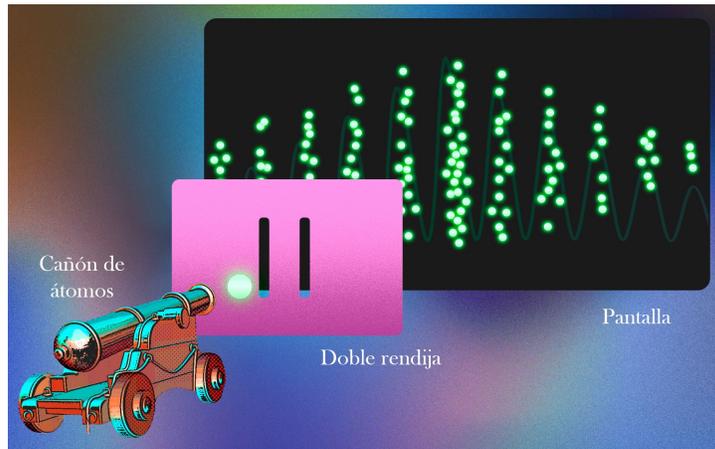


**Figura 1.1:** Experimento de la doble rendija, en el que las canicas se comportan como partículas.

## LOS ÁTOMOS SON ONDAS

Cuando uno piensa en un átomo la imagen que viene a la mente es algo como una canica muy pequeña. En realidad los átomos son ondas, es decir, se parecen más a las olas en el mar que a una canica. Esa es la imagen que debemos conservar en nuestra mente de estos objetos diminutos. Ésta es una observación asombrosa de la naturaleza que nadie hubiera anticipado. Pero, ¿cómo es que sabemos esto? Platicaremos sobre un experimento famoso llamado el “Experimento de la doble rendija”. Consideremos una pantalla en la cual se tienen dos agujeros. Comenzamos a aventar pequeñas canicas una tras otra. Las canicas que logren pasar por los agujeros continuarán viajando en línea recta hasta alcanzar una pantalla algo alejada, y si dibujamos todos los puntos donde cayeron canicas veríamos dos manchas circulares correspondientes a las canicas que pasaron por un agujero o por el otro (Fig. 1.1).

Repetimos el mismo experimento pero en lugar de lanzar canicas aventamos ahora átomos uno por uno, o electrones o alguna otra partícula muy pequeña. Si dibujamos nuevamente todos los puntos donde cayeron estas partículas observamos en la pantalla alejada un patrón muy diferente al que habíamos obtenido antes (Fig. 1.2). El patrón que se observa es típico de ondas, es el patrón que se observaría si enviáramos olas como las del mar a través de las dos rendijas. Este experimento, que es uno de los más bellos de la física, muestra que los átomos, electrones y otras partículas pequeñas



**Figura 1.2:** Experimento de la doble rendija, en el que se manifiesta el carácter ondulatorio de los átomos.

se comportan como ondas.

¿Qué pasaría ahora si vamos incrementando el tamaño de nuestros proyectiles desde átomos hasta canicas? Esto es algo que se ha hecho en varios laboratorios alrededor del mundo [Arndt 1999], y lo que se observa es que conforme se aumenta el tamaño de los objetos, el patrón en la pantalla lejana va cambiando de ser el patrón de ondas a ser el de canicas. Es decir, conforme vamos incrementando el número de partículas que componen al proyectil, los efectos cuánticos desaparecen y regresamos al comportamiento clásico de Newton. Dejamos de observar este comportamiento de ondas. En general, hoy en día sólo se pueden observar efectos cuánticos en sistemas con un alto control, como un laboratorio, y muy pocas partículas.

¿Qué consecuencia tiene que los átomos sean ondas? Para lo que nos interesa discutir, la consecuencia más importante de que los átomos sean ondas es que pueden estar en varios lugares al mismo tiempo. Así como una ola en el mar puede estar en varios lugares a lo largo de la playa al mismo tiempo, un átomo también puede estar en varios lugares al mismo tiempo. Puedo entonces tomar un átomo y ponerlo en dos posiciones,  $a$  y  $b$ , al mismo tiempo, es decir, voy a poner al átomo en un estado de superposición o combinación de dos posiciones. Esto será crucial en los siguientes capítulos cuando se discutan los usos espectaculares que se le ha dado a la Mecánica Cuántica.

## LAS MEDICIONES MODIFICAN AL SISTEMA QUE ESTAMOS MIDIENDO

La segunda cosa importante que aprendimos de la Mecánica Cuántica es que no podemos hacer una medición sin afectar el estado de la partícula. Esto fue de nuevo algo inesperado, ya que es muy diferente a lo que estamos acostumbrados en nuestra experiencia diaria. Para explicarlo pongamos un ejemplo.

Supongamos que tenemos una piedra en el piso y queremos determinar dónde está. Para hacerlo, aventamos luz sobre la piedra, esa luz se refleja y, eventualmente, llega a nuestros ojos para darnos a conocer su posición. El hecho de iluminar con luz la piedra no cambia su posición, sino que ésta se mantiene fija todo el tiempo. En otras palabras, medir o conocer la posición de la piedra no afecta su posición.

¿Qué pasaría si ahora trato de determinar la posición de un átomo? En este caso, la luz que incide sobre el átomo ejerce una fuerza sobre éste, es decir, lo empuja, y cambia por lo tanto su posición a otra diferente. En este ejemplo sencillo vemos que la acción de medir la posición del átomo, cambia eso que queremos medir, que es su posición. Un experimento tras otro ha mostrado que siempre hay un precio a pagar cuando realizamos una medición a nivel cuántico. Cada vez que medimos, cambiamos el estado de la partícula.

Las cosas se ponen más interesantes si ahora combinamos ambas enseñanzas. Supongamos que pongo a mi átomo en una superposición o combinación de dos posiciones al mismo tiempo y trato de medir su posición. ¿Qué resultado voy a obtener? ¿Mediré una doble posición para el átomo? Versiones de este experimento se han realizado en diversos laboratorios, incluyendo varios en México (ver *Saber más*) y lo que se encuentra es que el átomo se decide por alguna de las dos posiciones, es decir, yo no vería al átomo en ambas posiciones, más bien al hacer la medición, esto afecta el estado de mi átomo de tal manera que éste se decide por una de las dos posiciones. Cada vez que se repite el experimento y se mide la posición, el átomo termina decidiéndose por una de las dos posiciones, misma que escoge al azar al momento de la medición en cada experimento.

Estos dos pilares de la Mecánica Cuántica son resultado de múltiples experimentos y se entienden bien las leyes matemáticas detrás de ellos. Con ellas hemos extendido nuestro poder predictivo al mundo microscópico de manera que lo podamos controlar a nuestro beneficio.

Pero, ¿puedo trabajar con un solo átomo? Los átomos son increíblemente pequeños, por lo que suena imposible poder atrapar uno solo de ellos.

Sin embargo, eso es algo que ocurre hoy en día en muchos laboratorios alrededor del mundo. Atrapar un solo átomo es una tarea complicada, y esta es la razón que hace difícil ver estos fenómenos cuánticos sorprendentes. Si quiero tener un solo átomo de un elemento, debo primero aislarlo. El aire a nuestro alrededor contiene una gran cantidad de átomos y moléculas formados de diversos elementos, por lo que requiero una caja a la que pueda quitarle todo el aire que contenga, es decir debo eliminar todos los átomos que son diferentes al que quiero manipular. Requiero después de unas pinzas muy finas para poder agarrar al átomo. Estas pinzas están hechas de luz, a manera de manipular a los átomos utilizando láseres [Aboites 2002]. Agarramos así un solo átomo en el haz de luz y podemos moverlo a cualquier posición que queramos. Un mensaje importante aquí es el siguiente: si bien es posible atrapar átomos individuales para ver fenómenos cuánticos, lograr esto requiere de laboratorios muy avanzados y de arreglos sofisticados. Por esta razón, no vemos efectos cuánticos en nuestra experiencia cotidiana.

Muchas veces escuchamos interpretaciones incorrectas de la Mecánica Cuántica que se deben en su mayoría a tratar de extrapolar lo que se observa con unos cuantos átomos a un objeto con muchos átomos. Un ser humano, por ejemplo, está compuesto de un número gigantesco de átomos (unos 4,000,000,000,000,000,000,000,000 o  $4 \times 10^{27}$  átomos). En un sistema así de grande los efectos cuánticos desaparecen, como en el experimento de la doble rendija, y nos regresa al comportamiento clásico descrito por Newton. En un objeto tan grande como una piedra o un ser humano no se van a manifestar los efectos cuánticos.

Con esto entendemos que la Mecánica Cuántica está relacionada con el comportamiento de unas cuantas partículas fundamentales, muy pequeñas, en un ambiente extremadamente controlado. Dado que se trata de un comportamiento muy frágil, uno debe tener cuidado al extrapolar o extender estas observaciones a objetos con muchas partículas como lo serían la mayoría de los objetos que vemos a nuestro alrededor. Estamos aún muy lejos de tener el control necesario para poder observar efectos cuánticos en nuestros objetos cotidianos.

PARA SABER MÁS:

Algunos laboratorios e iniciativas en México relacionadas con experimentos en los que se estudian son:

- Laboratorio Nacional de Materia Cuántica, <https://lanmac.org.mx/es> (visitado el 11-11-2024).
- Red de Tecnologías Cuánticas, <http://redtc.nucleares.unam.mx> (visitado el 11-11-2024).
- Iniciativa Mexicana en Tecnologías Cuánticas, <https://www.dicu.com.mx/imtc> (visitado el 11-11-2024).

Además, recomendamos los siguientes textos.

- Arndt, M., Nairz, O., Vos-Andreae, J. et al. **Wave–particle duality of C<sub>60</sub> molecules**. *Nature* **401**, 680–682 (1999).
- Aboites, V. y Vega, J. **Enfriamiento de átomos por láser**, *Fondo de Cultura Económica* (México 2002). Colección LA CIENCIA PARA TODOS.

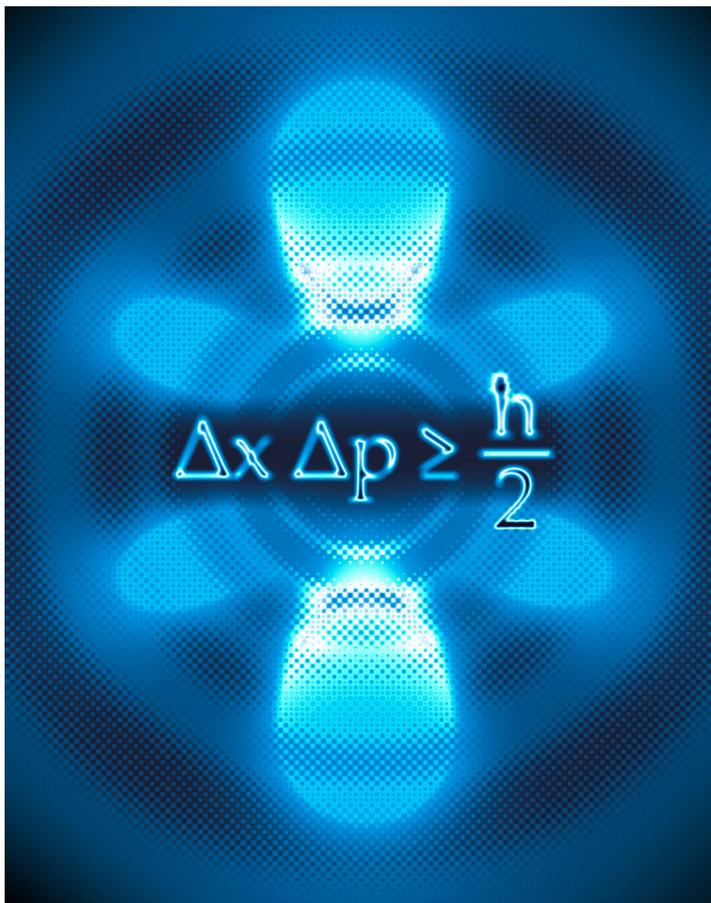
**DETERMINISMO Y EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE**

*Dr. Víctor M. Valenzuela Jiménez\**

Durante siglos atrás creímos tener una idea muy clara del determinismo, es decir, pensábamos que podíamos predecir el comportamiento de cualquier objeto en el universo siempre y cuando conociéramos las leyes que lo gobiernan. Sin embargo, la mecánica cuántica vino a aclarar este punto de vista. Un objeto cuántico tal como lo es un átomo o un electrón no sigue las reglas antiguas del determinismo, es decir, de un momento a otro no podemos medir con la precisión que nosotros queramos lo que va a hacer un átomo o un electrón y esto no se debe a nuestra falta de conocimiento, sino simplemente a una limitante impuesta por la naturaleza misma. Por ejemplo, estábamos acostumbrados a que podíamos determinar la trayectoria de un objeto con la precisión que quisiéramos, simplemente utilizando las leyes de Newton. Por lo tanto, conociendo la posición y la velocidad de todas las partículas del universo, y las fuerzas entre ellas, el futuro del universo quedaría completamente determinado. Sin embargo, la mecánica cuántica nos enseñó que no podemos determinar dicha trayectoria con la precisión que nosotros queramos, sino que existe un límite fundamental conocido como el principio de incertidumbre, el cual se aplica para la determinación simultánea de la posición y el momento de un objeto, así como para otros pares de cantidades físicas, como por ejemplo, la energía y el tiempo. No debemos confundir la parte determinista que posee la mecánica cuántica, la cual nos permite predecir el estado de un objeto a un tiempo posterior, siempre que conozcamos su estado inicial, por lo cual el problema de la incertidumbre se origina a la hora de realizar una medición. El principio de incertidumbre es uno de los conceptos más confusos en la cultura popular que sale a relucir cuando se tiene una conversación sobre temas de mecánica cuántica. Este principio dice que no podemos medir al mismo tiempo la posición y la velocidad de un objeto con la precisión que

---

\*Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Sinaloa.



**Figura 2.1:** Esta figura ilustra el concepto de determinismo y el principio de incertidumbre, utilizando la nube de probabilidad de un átomo de hidrógeno en su estado 4f. Se emplea una técnica de mapeo estilo puntillismo para enfatizar la naturaleza inexacta de la teoría, capturando así la esencia del capítulo. En el centro de la imagen, destacada como protagonista, se encuentra la ecuación formulada por Heisenberg, simbolizando el corazón teórico de estos conceptos cuánticos.

nosotros queramos. Este resultado proviene del proceso de medición que realizamos los físicos para medir la posición y la velocidad de un objeto. Al momento de medir la posición de un objeto, esta medición cambia su velocidad y lo mismo sucede de manera inversa, es decir, cuando medimos la velocidad de un objeto, la medición provoca un cambio en su posición. La magnitud de este cambio depende del sistema de estudio en particu-

lar, la cual se magnifica y se vuelve evidente en mediciones con sistemas microscópicos, como un átomo. Esto implica que el concepto clásico de trayectoria de un objeto es más complicado en Mecánica Cuántica. Pero ¿Cuál es el origen del principio de incertidumbre? ¿Por qué no podemos medir al mismo tiempo la posición y la velocidad de un objeto con la precisión que queramos?

Para entenderlo tenemos que recurrir al concepto de la dualidad onda-partícula de la mecánica cuántica, para lo cual les recomiendo ver dos de los capítulos de esta serie: El capítulo 1 titulado “¿Con que tiene y no tiene que ver la Cuántica?” y el capítulo 3 titulado “Ondas o Partículas”. Una partícula es un objeto cuya posición está bien definida en el espacio, es decir, si graficamos su posición para un tiempo dado, esta va a estar representada por un punto. Viéndolo en términos de probabilidad, significa que la partícula tiene una probabilidad del 100 % de encontrarse en ese punto y 0 % de probabilidad de encontrarse en cualquier otro. Por otro lado, una onda es un objeto que se expande por todo el espacio, es decir, no tiene una posición definida. Se caracteriza por tener valles y crestas similares a las que observamos en las olas del mar o las generadas por la caída de una piedra en un estanque de agua. Entonces, debemos tener presente que la diferencia entre una partícula y una onda es que la primera se encuentra bien localizada en el espacio, mientras que la segunda no lo está. En términos de probabilidad, a una onda podemos localizarla en cualquier parte de todo el espacio con una cierta probabilidad distinta de cero. Una característica clave de las ondas es su longitud de onda, la cual está definida como la distancia entre dos valles o crestas consecutivos. Gracias a esta propiedad es que las ondas también poseen un momento, definido como la masa del objeto multiplicado por su velocidad (mecánica de Newton) o como la constante de Planck dividido por la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2.1)$$

Por lo tanto, un objeto que se mueve a velocidades muy altas tiene un momento muy grande y por lo tanto, una longitud de onda muy corta. Lo mismo sucede con los objetos masivos, los cuales también poseen un momento muy grande y una longitud de onda muy corta. Esta es la razón por la cual los objetos macroscópicos no muestran un comportamiento de tipo onda en nuestra vida cotidiana, ya que su longitud de onda es increíblemente pequeña e imposible de medir, lo que hace que el comportamiento de onda de los objetos macroscópicos no sea detectable, aun con los instrumentos modernos.

Sucede todo lo contrario cuando estudiamos el comportamiento de objetos muy pequeños, como átomos o electrones. Estos pueden tener longitudes de onda lo suficientemente grandes para poderlas detectar experimentalmente. Entonces, para objetos pequeños podemos medir perfectamente su longitud de onda y con ello su momento, pero no podemos medir su posición de manera precisa ya que introducimos ruido durante la medición. De igual forma, podemos medir perfectamente su posición, pero esta tendrá una longitud de onda indeterminada y por lo tanto una incertidumbre en su momento. Cabe mencionar que esto no sucede cuando realizamos mediciones en objetos macroscópicos, ya que el ruido que introduce la medición es muy pequeño e indetectable.

Para tener una idea más clara de lo anterior, imaginemos que tenemos una pantalla donde proyectamos una onda, la cual debido a su longitud de onda solo podemos ver 15 ondulaciones. Ahora, imaginemos que colocamos una pequeña rejilla antes de la pantalla, por la cual podemos observar de manera precisa solo una pequeña parte de la onda, es decir, una posición. Ahora repetimos el experimento proyectando una nueva onda sobre la pantalla, pero esta vez con una longitud de onda mayor, digamos que podemos observar solo 10 ondulaciones. Observando de nuevo a través de la rejilla la misma posición, veremos que no observamos una diferencia clara entre la parte observada de la onda con 15 y 10 ondulaciones, respectivamente. ¿Qué significa esto? Que gracias a la rejilla podemos observar una posición bien determinada de la onda, pero no podemos determinar su longitud de onda, es decir, el momento tendrá una incertidumbre muy grande.

De forma inversa sucede algo similar. Ahora proyectemos en la pantalla dos ondas con longitudes de onda muy pequeñas comparadas con el tamaño de la rejilla, digamos que observamos 1500 y 1000 oscilaciones en la pantalla. Lo que vamos a observar a través de la rejilla son varias oscilaciones para ambas ondas, es decir, vamos a poder medir sus respectivas longitudes de onda de manera precisa y por lo tanto su momento. ¿Pero que perdimos? La parte que observamos de ambas ondas es muy grande comparado con su longitud de onda, por lo tanto, no podemos determinar de manera precisa la posición particular de la onda.

Mediante el experimento anterior, queda claro que en mecánica cuántica podemos medir la posición y el momento de un objeto, pero esta medición tiene ciertas limitaciones que acabamos de exponer, es decir, entre mejor conozcamos la posición de un átomo más indeterminado quedará su momento. Y de forma inversa, entre mejor conozcamos su momento peor será nuestro conocimiento sobre su posición. Sin embargo, lo anterior no aplica

para objetos macroscópicos ya que como mencionamos antes, su longitud de onda es demasiado pequeña y los efectos ondulatorios desaparecen, es decir, un objeto macroscópico se comporta perfectamente como una partícula, y por lo tanto, podemos medir su posición y su momento de manera precisa.

Esto último queda más claro si notamos que para realizar una medición sobre un sistema cuántico, digamos un átomo, es necesario interactuar con él, por ejemplo, enviando un fotón de luz para observar su posición, cuya longitud de onda debe ser pequeña si queremos identificar su posición con mucha precisión, es decir, el fotón debe tener un momento muy grande y por lo tanto también una energía muy grande. Esta energía del fotón es transferida al átomo durante la medición, lo cual resulta en una modificación originada por la medición y que es bastante significativa cuando se trata de objetos pequeños como un átomo, pero no lo es para objetos macroscópicos.

A la propiedad de la indeterminación del momento y la posición de un objeto que describimos anteriormente es lo que conocemos como el principio de incertidumbre de Heisenberg o principio de indeterminación, el cual está perfectamente establecido tanto matemáticamente como a través de experimentos. Este principio establece un límite entre la incertidumbre experimental de la posición y del momento cuando realizamos la medición. Tal límite es la mejor determinación que podemos tener para la medición simultánea de la posición y del momento:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}. \quad (2.2)$$

Finalmente, es necesario aclarar que esta incertidumbre en la medición simultánea de la posición y del momento, no se debe a nuestra incapacidad de llevar a cabo correctamente estas mediciones, sino que es un principio establecido por la naturaleza cuántica de todos los objetos que componen el universo. Espero que hayan encontrado interesante este capítulo y haya contribuido un poco a despejar la confusión que genera el determinismo y el principio de incertidumbre cuando escuchamos de ellos por primera vez. Los invito a continuar viendo nuestros siguientes capítulos, los cuales estoy seguro encontrarán fascinantes.

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

## LA CUÁNTICA Y EL AURA

*Dr. John Alexander Franco Villafañe\**

### ¿QUÉ ES EL AURA?

Es una pregunta difícil porque es un concepto que para la mayoría siempre ha estado allí y no tiene una definición clara y específica. Muchas civilizaciones desde la antigüedad han representado sus deidades rodeando sus cuerpos por emanaciones luminosas quizá en un intento de enfatizar el estatus superior de estos personajes. Estas ideas de que todos los seres poseen una luminiscencia corpórea capaz de ser vista sólo por seres muy especiales está tan arraigada en el imaginario colectivo actual que se da como un hecho que a través del Aura es posible hasta detectar enfermedades.

Como científicos el primer problema al que nos enfrentamos es que no existe una definición consistente de lo que es el Aura lo que genera polémica y debates dispares. Entonces quedémonos con la más ampliamente aceptada: es una emanación lumínica proveniente del cuerpo que poseen los seres vivos.

### ¿QUÉ INSTRUMENTOS USAMOS PARA MEDIRLA?

Lo primero que se nos viene a la cabeza son las personas que aseguran ser capaces de detectar el Aura de otras personas. Estas personas son consideradas especiales. Sin embargo, por este camino enfrentamos al menos dos problemas: el primero, si yo veo algo que nadie más puede ver, es imposible verificar mi observación independientemente, un requisito del método científico. El segundo problema es que la vista por sí sola no es un buen mecanismo para estudiar un fenómeno. Hoy en día, se tiene conocimiento de diferentes alteraciones en el cerebro o algunas patologías oculares que

---

\*CONAHCYT - Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

pueden inducir visiones que no corresponden a la realidad. Un ejemplo de este tipo de patologías oculares es el síndrome de Charles Bonnet, el cual se presenta en personas cuya visión empieza a deteriorarse y en algunos casos puede presentarse con alucinaciones.

Es aquí donde a principios del siglo XX los esposos Kirlian inventaron lo que hoy día conocemos como cámara Kirlian, que es usada comúnmente como sustento científico del Aura. Pero ¿qué es lo que realmente detectan las cámaras Kirlian? Los científicos se dieron cuenta de que estas cámaras detectan otro efecto llamado efecto corona. El efecto corona es un fenómeno eléctrico que se produce debido a la ionización del aire que rodea a un objeto, siendo una descarga eléctrica común, como un rayo, que pertenece al aire y no al cuerpo. Este tipo de luminiscencia puede ser inducida en objetos que no tienen vida, como un par de monedas o líneas de alta tensión, contradiciendo así nuestra definición original de Aura, que solo pertenece a los objetos vivos. En definitiva, las cámaras Kirlian no observan el Aura, sino que observan la descarga eléctrica del aire que rodea el cuerpo al ser sometido a un generador de alto voltaje.

¿EL AURA SIGUE SIN SUSTENTO CIENTÍFICO HASTA EL DÍA DE HOY?

La respuesta correcta es sí. Hasta el día de hoy la definición más aceptada de Aura no coincide con el conocimiento científico moderno. Aun así, a modo de ejercicio, podríamos buscar qué sería lo que más se acerca a la definición común de Aura. En la actualidad sabemos que todo cuerpo caliente es capaz de emitir luz, a este fenómeno se le conoce como Radiación de Cuerpo Negro. Esto significa que el cuerpo humano produce continuamente emanaciones lumínicas por sí mismo. Sin embargo, la mayor parte de la luz irradiada por el cuerpo humano pertenece a una parte del espectro electromagnético conocido como infrarrojo, que tendría un color más allá del rojo del arcoíris, que no puede ser percibida por el ojo humano pero sí por cierto tipo de dispositivos.

El mismo patrón de radiación infrarroja se obtendría para un objeto sin vida, mientras mantenga la misma temperatura. Lo cual nuevamente contradice la definición que aceptamos de Aura. Esto puede parecer menos romántico que las imágenes que se nos vienen a la mente cuando pensamos en el Aura, pero sí sería una idea más moderna, con una base sólida científica.



**Figura 3.1:** Representación del aura, envuelta en un ambiente distinto y enigmático, dejando la incertidumbre de si es una manifestación tangible o simplemente una noción espiritual.

## ¿Y QUÉ TIENE QUE VER TODO ESTO CON LA CUÁNTICA?

El estudio de la Radiación de Cuerpo Negro rompió la cabeza de los científicos a principios del siglo XX. De ese quebradero de cabeza, la humanidad dio un enorme salto en el conocimiento, así nació la mecánica cuántica. La ciencia moderna ha logrado explicar, a través de la teórica cuántica, que toda la materia está compuesta de átomos, y estos átomos tienen niveles de energía diferentes. Cuando un electrón de un átomo cambia de nivel de energía ¡emite luz! Tan importante es este fenómeno que hoy día usamos estas emisiones características de luz como si de “huellas dactilares” se tratase. Así logramos identificar componentes de objetos muy lejanos y saber que existe agua en Plutón o hidrógeno en Alfa Centauro, aunque ninguno de nosotros pueda ir a estos objetos celestes, ya que están muy muy lejos. Estas huellas o emisiones de luz características se les conoce como espectros atómicos y son únicas para cada átomo, puesto que los niveles de energía de cada átomo son únicos. Los átomos forman objetos más complejos como las moléculas, y la unión de las moléculas forma órganos y tejidos, que finalmente desemboca en nosotros. Es decir, los humanos estamos compuestos por millones de moléculas que debido a su temperatura vibran y rotan, y al hacerlo emiten luz continuamente, luz infrarroja, formando una luminiscencia al rededor de los tejidos. Con la sutileza de que no importa si son seres vivos o no, sino solamente que estén calientes. Entonces no estaban tan equivocados los antiguos al considerar que los cuerpos humanos tienen una luminiscencia propia, solo que no es visible por el ojo humano. También valga la aclaración que el cuerpo humano no solo emite luz infrarroja, sino que también la absorbe. Y es gracias al andamiaje de la mecánica cuántica que hemos podido entender todos estos fenómenos.

## ¿QUÉ ES ESO DE LOS ESPECTROS ATÓMICOS? ¿SON LOS FANTASMAS DE LOS ÁTOMOS?

No, los espectros atómicos no tienen nada que ver con fantasmas. En ciencias espectro no es una aparición, es un conjunto de COLORES que emite o absorbe un objeto. El espectro de los átomos, al que hacemos referencia, es la luz que puede emitir o absorber dicho átomo, que es específica para cada uno. Por ejemplo,

## ¿CÓMO PODEMOS ENTENDER LA LUZ?

Pensemos en un día soleado y llueve. Cuando la luz del sol (luz blanca) pasa por las gotas de agua se descompone en colores, lo que conocemos como el arcoiris. Uno puede asociarle a cada color una longitud de onda específica. Cada color tiene una longitud de onda distinta, y es así que podemos tener luz de longitud de onda del tamaño de edificios, la cual usábamos para comunicarnos anteriormente y la llamamos radiofrecuencia o longitudes de onda más pequeñas, milimétricas, que usamos para calentar cosas, como en los famosos microondas que tenemos en casa. También podemos encontrar los rayos X, que tienen longitudes de onda del tamaño atómico mismo. Y así nos podríamos seguir. Todo este continuo de longitudes de onda forma lo que llamamos el espectro de la luz, o espectro electromagnético en términos más científicos. De este espectro, nuestros ojos solo son sensibles a un pequeño rango, que llamamos visible, por eso no podemos ver el infrarrojo, o el ultravioleta, porque o bien la longitud de onda es muy grande o muy pequeña para nuestros bastones y conos en la retina. Con el tiempo hemos desarrollado aparatos capaces de medir la luz visible y la que no lo es, estos instrumentos sirven para medir cuánta luz hay por cada longitud de onda. Así es como podemos caracterizar la luz que emite continuamente el cuerpo humano, y sabemos que la misma no es visible, ubicándose principalmente en el infrarrojo. Lo que me lleva de nuevo a una de las cosas que nos ha enseñado la mecánica cuántica: aunque la luz es un continuo de longitudes de onda, los átomos solo emiten y absorben ciertas partes de ese espectro, así es como podemos caracterizarlos, porque esta huella es única para cada átomo. Solo aceptando las reglas de la mecánica cuántica es posible explicar las características de la luz que emiten o absorben los diferentes átomos. Curiosamente las leyes de Newton fallan para explicar tal luminiscencia.

## ¿SE UTILIZA EN MÉXICO LA LUZ PARA ESTUDIAR FENÓMENOS CUÁNTICOS?

Por sorprendente que le parezca, en Latinoamérica, y en particular en México, a través del Conacyt se han logrado varios laboratorios muy avanzados de manipulación atómica por medio de luz láser, que han alcanzado notables avances en la ciencia a nivel internacional. ¿Sabía por ejemplo que el tiempo oficial de México está controlado por un reloj cuántico o que existen varios laboratorios que enfrían con láseres la materia cerca del cero

absoluto? Incluso se logró hace poco un nuevo estado de la materia llamado condensado de Bose-Einstein. En la actualidad está en construcción el primer gravímetro cuántico de Latinoamérica. Además, existe la iniciativa Mexicana en tecnologías cuánticas que fomenta el desarrollo tecnológico para evitar el rezago de la sociedad frente a todas las nuevas tecnologías que se derivan de la física cuántica, un mercado que se estima en no menos de 2 billones de dólares.

¿QUÉ LE DIRÍA A LAS PERSONAS QUE CREEN EN EL AURA Y OTRAS ENERGÍAS DEL CUERPO?

Las personas son libres de creer en lo que consideren apropiado, sin sentirse discriminadas por ello. Sin embargo, la ciencia no es una creencia, y debemos como sociedad apoyar y no entorpecer el desarrollo de investigaciones que llevan las fronteras del conocimiento cada vez más lejos de una forma ética y responsable. El conocimiento es el motor de nuestro desarrollo como humanos. La ciencia y el método científico son una construcción que ha tomado siglos de desarrollo, que no tiene un origen geográfico único, que ha evolucionado desde la Edad Antigua hasta establecerse más formalmente en nuestros días. Es una de las joyas del conocimiento humano, no de un periodo específico y menos de una civilización en particular. Es una construcción de la humanidad en su conjunto a través del tiempo y se merece todo nuestro respeto y admiración. No por nada hoy vivimos más años saludables que nuestros propios parientes hace un par de siglos atrás. Le corresponde a cada quien, si así lo desea, el ejercicio de contrastar sus creencias con las evidencias científicas comprobables que existen hoy en día. Es decir, formar su propio criterio.

*“Lo bueno de la ciencia es que es cierta, creas o no en ella.”*  
-Neil deGrasse Tyson.

## DECOHERENCIA CUÁNTICA

*Drs. Carlos Pineda\* y Karel Zapfe†*

En este capítulo hablaremos de la *decoherencia cuántica*, un fenómeno que “ataca” a sistemas cuánticos, degradando su propiedad más importante, según algunos, de dichos sistemas: las superposiciones. El tema es fascinante, pues, como veremos, da luces a una gran pregunta: ¿por qué si la física subyacente es la mecánica cuántica, no vemos los fenómenos predichos por esta teoría, como la coexistencia de gatos vivos y muertos a la vez (¡por fortuna!). Este texto está escrito en parte como cómic pues la narrativa gráfica fija mejor ideas complejas que la narrativa textual, además de hacer más divertida tanto la lectura como la escritura. Cada página del cómic corresponde a una sección del texto, por lo que el lector podría leer cada sección y luego leer la página correspondiente del cómic. A lo largo del texto, daremos referencias que nos han resultado útiles para comunicar estos conceptos; nos centraremos en dar referencias divulgativas más que académicas. Por ejemplo, [Ball, 2018] nos parece una gran referencia para no expertos. Esperamos que ésta, y otras que se dan a lo largo de este capítulo, sean un punto de partida para los lectores curiosos que deseen profundizar en estos temas.

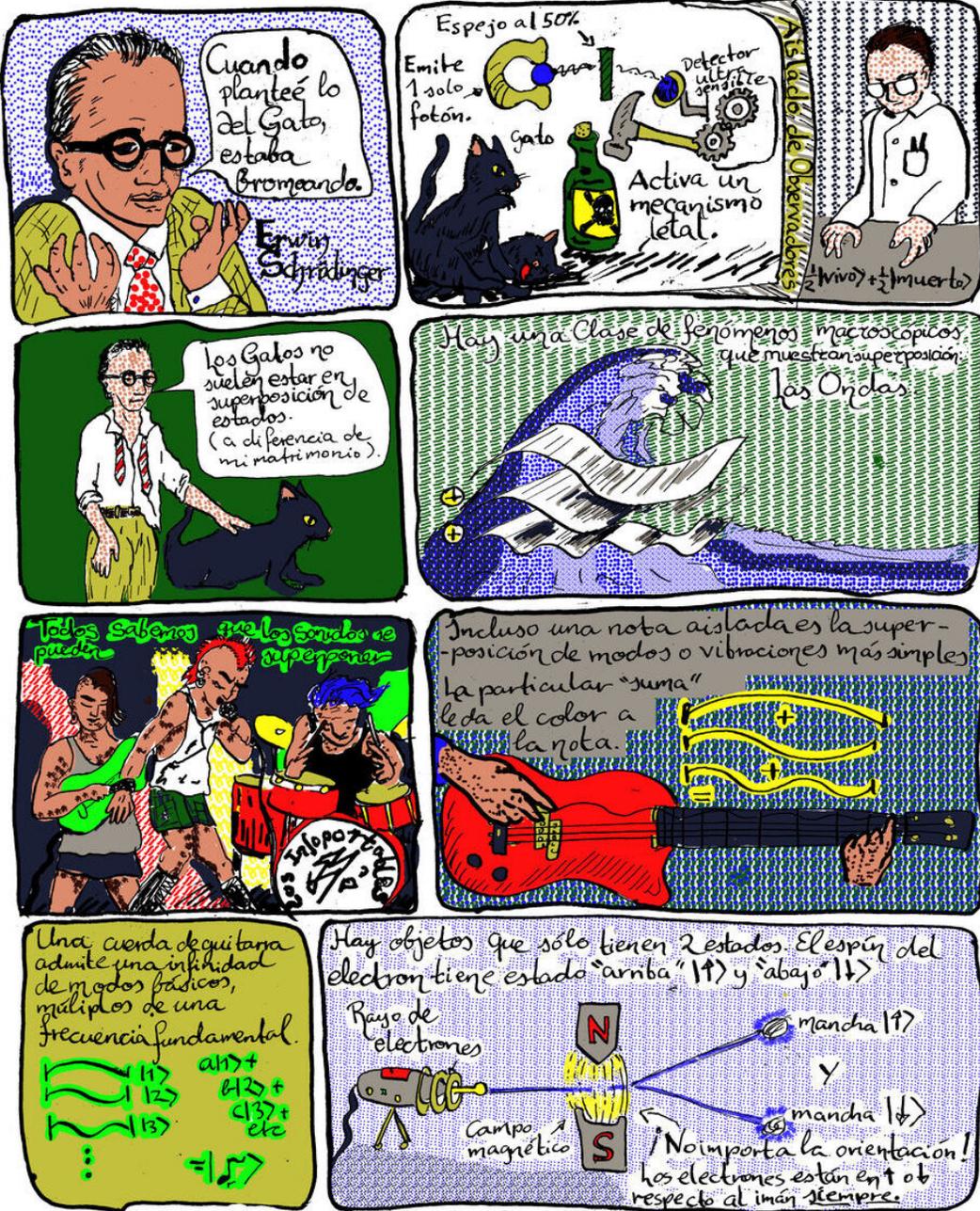
### SUPERPOSICIÓN DE ESTADOS CUÁNTICOS

Allá donde coincidan dos o más ondas, habrá una superposición. Este es un fenómeno que percibimos diariamente y que resulta crucial para entender la decoherencia. Por ejemplo, al escuchar una banda, podemos escuchar la guitarra a la vez que estamos escuchando la voz gracias a la superposición. Matemáticamente, el sonido de cada uno de los instrumentos se describe mediante una onda. Cuando estos se emiten de manera simultánea, las ondas se suman o, en un lenguaje un poco más técnico, se superponen.

---

\*Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México.

†Investigador Independiente.



Las ondas tienen la posibilidad de presentar fenómenos especiales, uno de ellos es la interferencia. Ésta la podemos ver en la alberca cuando “hacemos olitas” desde diferentes puntos de la alberca. En cualquier otro punto, las dos ondas se van sumando y en algunas partes aumenta la amplitud de la ola (interferencia constructiva) mientras que en otras partes se anulan (interferencia destructiva). El fenómeno de interferencia constructiva o destructiva no es exclusivo del agua; en cualquier onda (agua, luz, sonido, etc) podemos observar dichos efectos. Por ejemplo, este fenómeno también es usado por los audífonos que cancelan el ruido. Esta cancelación, es una interferencia destructiva que anula esas ondas de sonido.

Cuando queremos describir objetos muy, muy pequeños, debemos recurrir a la mecánica cuántica. La ecuación que describe la dinámica en mecánica cuántica es una ecuación vectorial en el espacio de los números complejos. Cuando queremos describir al electrón (o la posición de cualquier otra partícula), dicha ecuación toma la forma de una *ecuación de onda*. Esta predicción desconcertó a la comunidad en ese entonces, pues en principio se deberían poder observar fenómenos ondulatorios, como la interferencia, pero en partículas. Efectivamente, se lograron observar estas y otras predicciones en experimentos con partículas, lo que cimentó el éxito experimental de la mecánica cuántica, a pesar de sus desconcertantes y poco intuitivas predicciones [Aaronson y Weinersmith, 2016].

El fenómeno de la superposición y la interferencia normalmente se visualiza sobre un continuo de posiciones. Sin embargo, se puede reducir el problema a que la partícula esté, no en una dimensión continua, sino en una de dos posibles posiciones<sup>1</sup>. Matemáticamente, la descripción de dicho sistema es idéntica a cuando estudiamos el espín de una partícula subatómica, o un fotón que puede tomar uno de dos caminos alternativos (el lector interesado puede investigar el interferómetro de Mach-Zehnder para ahondar en este tema). En este caso, también tenemos superposición, interferencia, y otros varios fenómenos propios de ondas, pero reducidos a su más mínima expresión. El famoso gato de Schrödinger, que popularmente decimos que está vivo y muerto, realmente estaría en una superposición cuántica, con coeficientes complejos, y en principio podemos estudiar fenómenos ondulatorios con él. La descripción precisa de esto requiere de herramientas matemáticas que están por fuera del alcance de esta contribución, pero los lectores interesados pueden recurrir a su texto favorito de mecánica cuántica.

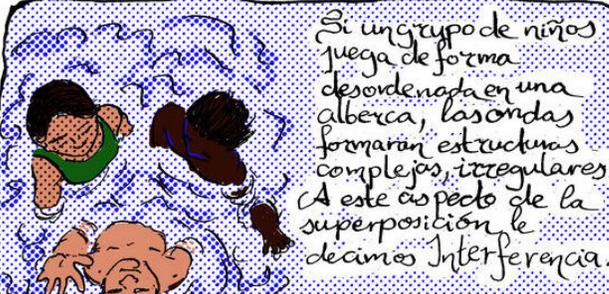
---

<sup>1</sup>Cualquier sistema cuántico con solo dos posibilidades diferentes se le conoce como qubit.

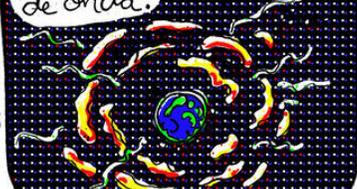
Algunas ondas presentan un patrón muy ordenado. El patrón concéntrico de una piedra cayendo en agua, por ejemplo.



Si un grupo de niños juega de forma desordenada en una alberca, las ondas formarían estructuras complejas, irregulares. A este aspecto de la superposición le decimos Interferencia.



El postulado fundamental de la Mecánica Cuántica es que todo tiene una cara de onda.

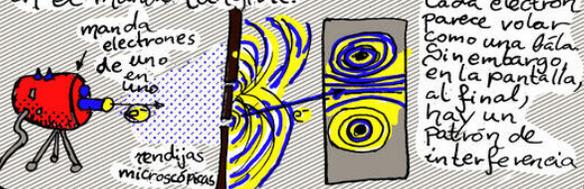


Estas "ondas" no son ondas "normales". Hay sería discusión sobre su naturaleza profunda. Pero sus patrones de Interferencia sí que están en el mundo tangible.

manda electrones de uno en uno

rendijas microscópicas

Cada electrón parece volar como una bala. Sin embargo en la pantalla, al final, hay un patrón de interferencia



Los Estados interfieren



Pero esos efectos sólo se observan en condiciones neuróticamente controladas

Macromundo y mundo micro

Trio extrema

Casi Vacío Perfecto Control Digital



Cuando esas condiciones fallan, la magia se pierde.



La Coherencia es lo que un sistema tiene de Cuántico. Esta tiende a fugarse hacia el Mundo. A esto le llamamos Decoherencia



Hay otro asunto que destruye la "magia" Cuántica.

la Observación



No se trata de una Observación Consciente. Cualquier medición automática lo hace: "escoge" un estado entre los posibles y registra sólo ese.

Alforno de Sodio Caliente

Filtro por nivel de energía

E1 aquí

E2 aquí

Placa Fotográfica



## DESTRUCCIÓN DE SUPERPOSICIÓN

Mientras podamos observar interferencia, podemos decir que las ondas son coherentes. Para entender cómo se destruye la coherencia cuántica, podemos iniciar imaginando ahora no un solo niño en la alberca, sino varios niños jugando de manera descoordinada. Ahora, en vez de tener un patrón ordenado, tenemos un pequeño caos. Recurramos entonces al experimento de la doble rendija, donde podemos observar un patrón de interferencia. Este patrón es sensible a la posición de cada rendija: si movemos uno de los huecos, el patrón se desplazará. Al agitar desordenadamente las rendijas, los patrones se mezclarán y dejaremos de observar interferencia. Diríamos entonces que hubo decoherencia [O'Dowd, 2020].

Esta agitación (y por ende la decoherencia) se produce en la Naturaleza por varios motivos. Quizá el más fácil de entender es debido a la temperatura ambiente. Esto causa que los instrumentos que estemos usando en nuestro experimento vibren de manera aleatoria y entonces destruyan la coherencia cuántica. Es por eso que muchos experimentos cuánticos se deben realizar a temperaturas cercanas al cero absoluto. Otra manera de perder la coherencia es observando<sup>2</sup>. Cuando tenemos la certeza de por cuál rendija pasó la partícula, se destruye el patrón de interferencia [O'Dowd, 2020]. Esto mismo sucede con un sistema de dos niveles, como el espín. Si realizamos cualquier perturbación del sistema que afecte de manera ligeramente diferente a la partícula cuando tiene espín arriba o espín abajo, destruiremos la coherencia y dejaríamos de observar cualquier efecto que ella produzca [Zurek, 1991].

En el contexto de mediciones, ¿sería necesario entonces un observador consciente para que ocurra decoherencia? No. Sabemos que la conciencia no juega ningún rol en el proceso de decoherencia. Basta con que la información para determinar el resultado de la observación se encuentre disponible en el ambiente. Por ejemplo, imaginemos que ponemos un detector de partículas en las rendijas del experimento de la doble rendija. Al pasar una partícula, la información sobre la ruta ya está impresa en el “ambiente” (en este caso el detector) y la coherencia se pierde completamente sin necesidad de que un humano verifique cuál de los dos detectores se activó. Una vez revisada la placa de registro verificaremos que no hay interferencia.

Sin embargo, nada mágico ocurre. Si pensamos que todo el mundo es cuántico, ¿entonces por qué no observamos la coherencia? Analicemos el

---

<sup>2</sup>La observación destruye por completo la información de la fase de la onda pues la obliga a localizarse.

problema con más cuidado. Al interactuar un sistema cuántico con coherencia con otro sistema cuántico (llamado ambiente), la coherencia se propagará al nuevo sistema. En principio, se pueden observar fenómenos de interferencia cuando consideramos los dos sistemas en conjunto. Sin embargo teniendo en cuenta que *podríamos* medir el segundo sistema para obtener información, la coherencia del primer sistema se destruye. Una descripción matemática detallada no requiere introducir herramientas nuevas, más allá de la mecánica cuántica estándar; sólo requiere extender nuestro sistema cuántico, considerar la interacción y luego asumir que solo mediremos el sistema central. El campo que lleva a cabo este estudio es el de sistemas cuánticos abiertos.

El observador y el ambiente juegan roles similares. Esto ha sido confirmado experimentalmente, sustituyendo el ambiente por un sistema pequeño y controlable, de tal manera que las coherencias puedan ser revertidas. Sin embargo, en situaciones típicas este proceso sucede de manera muy rápida y descontrolada.

## EL MUNDO CLÁSICO

En el mundo cotidiano no observamos fenómenos de interferencia entre partículas, mucho menos entre gatos u otros objetos macroscópicos. Sin embargo, hasta donde sabemos, no hay un tamaño en el cual la mecánica cuántica deje de funcionar. Entonces, ¿por qué no vemos superposiciones de gatos en el mundo cotidiano?

Existen dos motivos fundamentales. El primero es que, típicamente, la coherencia se disipa rápidamente; en otras palabras, la coherencia se destruye localmente. Esto hace que no veamos gatos en una superposición cuántica de estar vivos y muertos. Esto solo nos cuenta la mitad de la historia. El segundo motivo es que, de acuerdo a la mecánica cuántica, al realizar una *observación* el estado colapsa a una de las posibilidades, destruyendo, de otra manera, la coherencia. Esto hace que veamos *solo uno de los gatos*; es decir, vemos un gato vivo o un gato muerto. Ahora, por qué ocurre este colapso es algo que la mecánica cuántica no responde, solo lo postula. Más aún, mientras que parte de la comunidad de físicos sostiene que el postulado de la medida plantea un problema serio para la mecánica cuántica, otra parte opina que ni siquiera hay tal problema [Ball, 2013]. Este es un tema largo y complicado, por lo que nos enfocaremos en el primer mecanismo. Vale la pena mencionar que estos dos procesos están íntimamente relacionados, pues para realizar una observación es necesario que la coherencia



El Problema de por qué el Mundo parece clásico y no Cuántico es debatido fieramente hasta hoy.

Los tiempos de coherencia varían muchísimo 1g de agua a temp. ambiente. Pierde coherencia tan rápido que la luz no alcanzaría a cruzar un átomo.

Una proteína flotando en el espacio. Pierde coherencia en 3'000 billones de años. \*10<sup>12</sup> años.

Serge Haroche

...y, sin embargo, son muy similares.

La decoherencia acaba con la interferencia, y la observación, con la superposición.

del objeto a observar se propague a nuestro instrumento de medida.

El proceso por el que una superposición cuántica se propaga al ambiente (y por consiguiente deja de ser observable) ocurre, para objetos de tamaños cotidianos en circunstancias cotidianas, a una escala de tiempo ridículamente corta. Por ejemplo, los tiempos de decoherencia para una partícula de polvo suspendida en el ambiente se calculan en  $10^{-31}$  segundos (menos que una quintillonésima de segundo) [Schlosshauer, 2019]. Es decir, la coherencia cuántica, en estas circunstancias, es prácticamente imposible de observar. Estas escalas de tiempo dependen de los parámetros mencionados anteriormente y, entre más pequeño, frío, confinado y aislado esté nuestro sistema cuántico, mejor conservará la coherencia cuántica.

Nos queda por responder, ¿a qué decaen los sistemas cuánticos después de sufrir decoherencia? A mezclas<sup>3</sup> de estados clásicos con los que estamos familiarizados: gatos vivos o muertos, objetos con una posición definida, etc. La mezcla colapsa a uno solo de los estados al momento de la medición. Es decir, decae a lo que conocemos como el mundo clásico. Efectivamente, la decoherencia actúa como un filtro con el cual solo algunos estados cuánticos sobreviven. Estos son los estados que estamos acostumbrados a observar y sobre los cuales podemos hacer una versión efectiva de la mecánica clásica que llamamos “mecánica clásica” [Zurek, 2022].

## TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

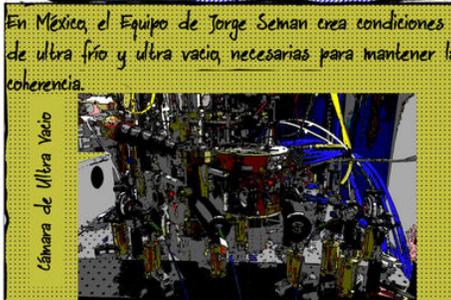
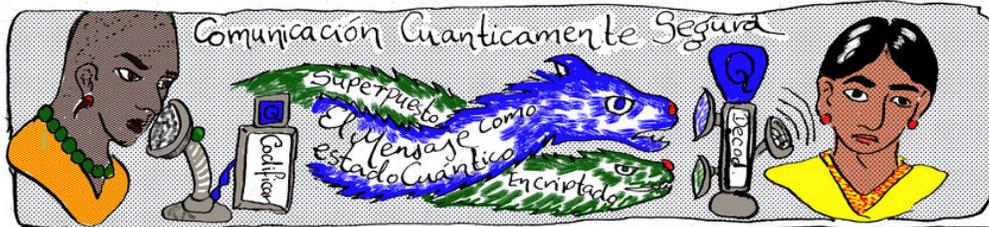
Nuestros desarrollos tecnológicos están basados en sacar provecho de la Naturaleza y nuestro entendimiento de ella. Dado que estamos más familiarizados con la física clásica, es natural que nuestra tecnología esté basada en sus principios. Sin embargo, con el descubrimiento de la mecánica cuántica, pronto se notó que ésta se podía explotar para nuevos desarrollos.

Los primeros avances prácticos usan las propiedades cuánticas de una o pocas partículas. Quizá la aplicación más espectacular es la teleportación, que se ha realizado en varios sistemas experimentales. Además de ésta podemos contar, entre otras, la comunicación segura, que se basa en el hecho de que al medir un sistema cuántico se destruyen las coherencias, por lo que se protege de cualquier espía indeseado. Estas tecnologías, aunque aún no están totalmente maduras, ya se encuentran de manera comercial.

Otro tipo de tecnologías requiere controlar las propiedades cuánticas de sistemas de muchas partículas de manera simultánea. El representan-

---

<sup>3</sup>Diferenciamos una superposición cuántica, como la que hemos discutido, de una mezcla probabilística. En [Aaronson y Weinersmith, 2016] y [Zurek, 2022] se discute el tema.



te más famoso de este grupo es el cómputo cuántico. En sus aplicaciones se aprovecha el fenómeno de interferencia para amplificar la respuesta correcta a un problema, mientras que las respuestas incorrectas interfieren destructivamente y por consiguiente la probabilidad de observarlas disminuye dramáticamente. Esta ventaja hace que algunos problemas que eran virtualmente imposibles de resolver con la tecnología actual, sean tratables con una computadora cuántica. Hay aplicaciones en medicina, farmacología, desarrollo de nuevos materiales y procesamiento de información en general.

El mayor enemigo de estos dispositivos es la decoherencia. Se puede demostrar que cuando un sistema cuántico sufre cierta decoherencia crítica, éste puede ser simulado con una computadora corriente. De esta manera, la decoherencia destruye cualquier ventaja genuinamente cuántica que nos pueda dar un sistema. Dados los tiempos de decoherencia extremadamente cortos que hemos comentado, muchas personas han dudado si será posible lograr tecnología cuántica usando muchas partículas.

En las últimas décadas, la comunidad de información cuántica experimental se ha enfocado en lograr aislar sistemas cuánticos de manera obsesiva, para evitar que las decoherencias se degraden. Esto implica llevar algunos sistemas a temperaturas cercanas al cero absoluto, sistemas de alto vacío, fibras ópticas de altísima pureza, aislamiento mecánico, etc. Estos esfuerzos han retribuido y hoy en día hay bastantes sistemas en los que creamos y controlamos correlaciones cuánticas. Hemos llegado al punto en que hay computadoras cuánticas de unos pocos qubits que, gracias a la IBM, podemos usar de manera remota y realizar experimentos cuánticos desde nuestras casas. En México, hemos desarrollado varios laboratorios que nos permiten pensar que seremos actores activos de la revolución cuántica que estamos viviendo.

PARA SABER MÁS:

- Zurek, W. H. **Decoherence and the transition from quantum to classical**, *Physics Today* **44** (10), 36 (1991).
- Ball, P. **Experts still split about what quantum theory means**, *Nature* (2013). [Link](#) (visitado 26-04-2024).
- Aaronson, S. y Weinersmith Z. A. **The Talk**, (2016). [Link](#) (visitado 26-04-2024).

- Ball, P. **The Universe Is Always Looking**, *The Atlantic* (2018). [Link](#) (visitado 26-04-2024).
- Schlosshauer, M. **Quantum decoherence**, *Physics Reports* **831**, 1 (2019).
- O'Dowd, M. **How Decoherence Splits The Quantum Multiverse** (dirigido por Andrew Kornhaber, 2020). [Link a youtube](#) (visitado 26-04-2024).
- Zurek, W. H. **Emergence of the Classical World from Within Our Quantum Universe**. En el libro *From Quantum to Classical: Essays in Honour of H.-Dieter Zeh*, ed. por Claus Kiefer. Cham: Springer International Publishing (2022), páginas 23-44.

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

## COMPUTACIÓN CUÁNTICA Y OTRAS TECNOLOGÍAS

*Drs. Karina Garay Palmett\* y Francisco Domínguez Serna†*

Cuando hablamos de sistemas cuánticos nos estamos refiriendo a partículas diminutas de materia, como los átomos, o bien a partículas individuales de luz, a las que llamamos fotones. Asimismo, ya sabemos que los sistemas cuánticos son gobernados por leyes que no aplican a los sistemas macroscópicos; por lo tanto, los fenómenos que surgen debido a las relaciones de estos sistemas entre sí y de éstos con su ambiente, no son apreciables en la cotidianidad.

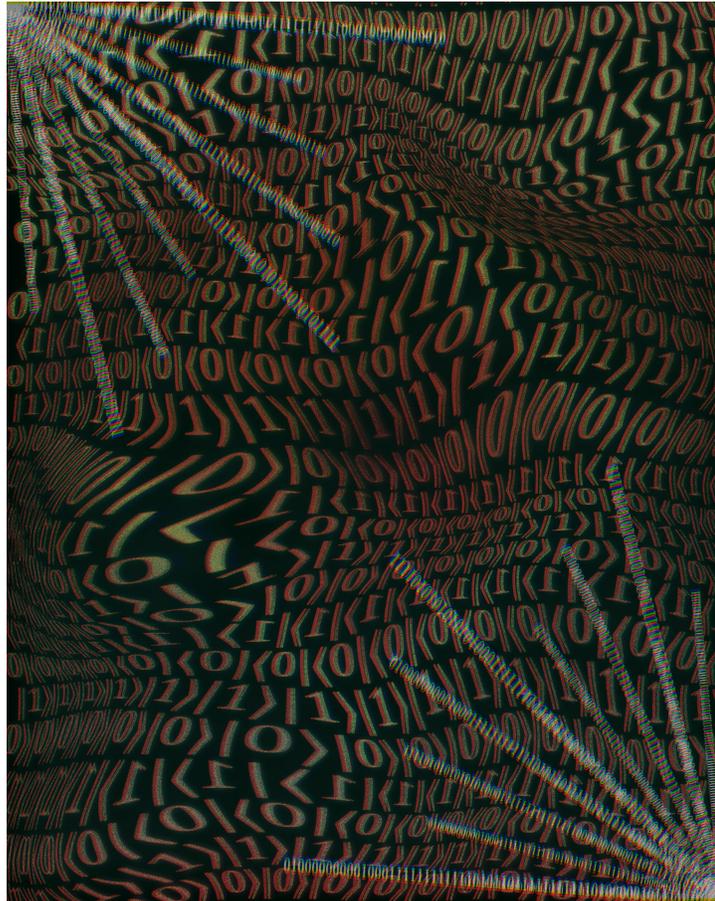
En esta oportunidad, vamos hablar de cómo los sistemas cuánticos y sus propiedades son aplicados al desarrollo de tecnología, en especial en computación cuántica; un tema del que seguramente ya habrás escuchado y sobre el que quizás te habrás preguntado en qué consiste; ¿podré comprar una computadora cuántica y utilizarla en mi casa o en la oficina?, y si es así para cuándo estarán disponibles comercialmente, en qué se diferencian de las computadoras que usamos hoy en día como unidades portátiles y de escritorio. Durante este capítulo estaremos desarrollando algunas ideas con las que esperamos dar respuesta a algunos de estos interrogantes.

Antes de adentrarnos en el tema, es preciso mencionar que ya es mundialmente reconocido que nos encontramos ante una nueva revolución tecnológica, conocida como la segunda revolución cuántica. Una era en la que usamos la mecánica cuántica para el desarrollo de tecnologías, cuya realización exitosa permitirá la solución de problemas en diferentes disciplinas, que de otra forma sería imposible. Estas tecnologías se basan en la disponibilidad de sistemas cuánticos y en la capacidad para poderlos controlar o manipular. Computación cuántica es un ejemplo de este tipo de tecnologías, pero también lo son comunicaciones y metrología cuántica, esta última

---

\*Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada B.C.

†CONAHCYT, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.



**Figura 5.1:** Esta figura ilustra la computación cuántica y otras tecnologías relacionadas, destacando los dos métodos fundamentales de codificación de datos: bits y cúbits. Los bits se muestran en primer plano, organizados de forma familiar y cotidiana, reflejando su uso diario en la computación clásica. En contraste, los cúbits se sitúan en el fondo, representados con una disposición más intrincada, simbolizando su complejidad y el carácter no clásico de su comportamiento en la computación cuántica.

relacionada con dispositivos capaces de hacer mediciones extremadamente precisas.

Enfocándonos ahora sí en el tema de la computación cuántica, tengamos presente que en general el término computación se refiere al estudio de sistemas automáticos que permiten el manejo o procesamiento de información. Por otro lado, vamos a distinguir entre dos formas de computación: la clásica y la cuántica. Con cómputo clásico nos referimos a las tareas realizadas por la computadora tal cual la conocemos y que en la actualidad forma parte del conjunto de aparatos electrónicos en nuestros hogares. En estas computadoras, el procesamiento de la información se realiza mediante operaciones lógicas en un circuito electrónico conocido como “procesador”. Este es el responsable de arrojar un resultado tras alguna instrucción que el usuario le haya indicado, por ejemplo: si le indicamos a la computadora realizar la operación  $3 \times 5$ , internamente se darán un conjunto de funciones u operaciones que llevarán a la obtención del resultado 15, el cual podrá ser observado en el monitor.

En computación clásica la información se codifica en bits. El bit es la unidad mínima de información clásica, o dicho de otra forma es la unidad más pequeña de datos que se puede almacenar en una computadora. Un bit puede tomar solo dos valores 0 ó 1, los cuales pueden representar las dos posibles alternativas para un sistema físico, por ejemplo; una puerta que puede estar abierta o cerrada, o los valores verdadero o falso que pueden resultar de una operación. En el ejemplo que estamos considerando sobre el producto  $3 \times 5$ , si bien desde el teclado se presionan las teclas que señalan a los números 3 y 5, y aunque en pantalla en efecto podemos ver estos números, internamente la computadora los convierte a una cadena de bits para poder realizar cualquier operación con ellos. El 3 sería convertido a 0011, mientras que el 5 a 0101. Y algo similar pasaría con las letras o símbolos.

Pasando ahora al tema de la computación cuántica, inicialmente debemos conocer cuál es en este caso la unidad mínima de información. Resulta que, similar al cómputo clásico, la unidad fundamental en computación cuántica es el bit, pero en este caso es el bit cuántico o cúbit como es comúnmente conocido. Esto nos lleva a la pregunta: ¿y en qué se diferencian el bit y el cúbit? Ya sabemos que el bit puede tomar los valores 0 ó 1. Resulta que, en efecto el cúbit también puede ser 0 ó 1, pero su definición más general es que puede ser 0 y 1 a la vez; un concepto que encuentra su explicación en una propiedad exclusiva de sistemas cuánticos: la superposición, que como vimos en capítulos anteriores, hace referencia al hecho de que un mismo sistema físico puede estar en dos posibles estados al mismo

tiempo. Por ejemplo, cuando una moneda es lanzada al aire, mientras se mantenga en el aire la moneda está al mismo tiempo en los estados cara y cruz, dado que no es posible conocer con total certeza si al caer y observar ésta mostrará cara o cruz. Un ejemplo usando luz puede ser el de un fotón proveniente de una fuente que está en capacidad de emitir fotones rojos o azules. Al salir un fotón de la fuente, este estará en la superposición de los estados rojo y azul, que en otras palabras quiere decir que es azul y rojo a la vez, a menos que sea observado o medido, en cuyo caso quedará determinado su color. Recordemos que los estados cuánticos se alteran al realizar mediciones sobre éstos.

Sabiendo ahora que en computación clásica la información se codifica en bits, mientras que en computación cuántica se codifica en cúbits; pasemos a analizar, mediante una situación sencilla y cotidiana, la capacidad para procesar información en las dos formas de computación, clásica y cuántica. Consideremos que una persona, digamos Pepe, quiere caminar desde su casa a su cafetería preferida de la ciudad; algo que nunca ha hecho y quiere intentar con el propósito de ejercitarse un poco, aunque en el menor tiempo posible. En esta situación existen sólo dos posibles rutas que Pepe puede tomar. Como nunca ha realizado esta actividad, decide antes calcular la distancia que tendría que caminar al ir por la ruta A o la ruta B y así optar por la ruta más corta.

Si Pepe usa una computadora clásica de un bit, la ruta A será codificada como 0 y la ruta B será codificada como 1. La operación que debe realizar la computadora es evaluar la distancia que se recorre en cada ruta. En este caso, la computadora calculará las dos posibilidades una a la vez, Primero calcula la ruta A y luego la ruta B. Al final Pepe sabrá cuál ruta es más corta.

Al contrario, si Pepe tuviera acceso a una computadora cuántica de un cúbit, la información sería codificada en el cúbit formado por la superposición ruta A y ruta B. De esta forma, las distancias asociadas a cada ruta son calculadas simultáneamente, lo cual tomaría la mitad del tiempo que le toma a la computadora clásica resolver la misma operación.

Ahora, hagamos el problema un poco más complejo. Pepe sigue con la iniciativa de ejercitarse cada día, sin invertir mucho tiempo. Para variar un poco su rutina, ahora se propone caminar de su casa a la casa de su mejor amigo, para lo cual pudiera elegir entre 4 posibles rutas. Igual que antes, decide calcular cuál es la ruta más corta.

En este caso, si Pepe usa una computadora clásica, esta calcularía la distancia para cada ruta una a la vez, mientras que una computadora cuántica podrá calcular las cuatro posibilidades simultáneamente, obteniendo el

mismo resultado que la computadora clásica, pero en un cuarto del tiempo.

Los ejemplos anteriores ponen de manifiesto que la capacidad de procesamiento de una computadora cuántica es mucho mayor que la de una computadora clásica. De hecho, la capacidad de procesamiento de una computadora cuántica crece exponencialmente con el número de cúbits, mientras que la de una computadora clásica crece sólo linealmente con el número de bits.

Resumiendo lo que hasta ahora hemos tratado en este capítulo, podemos decir que la computación cuántica codifica la información en cúbits y su capacidad para procesar información es dramáticamente mayor a la de una computadora clásica.

Pero, ¿en qué tipo de aplicaciones podemos aprovechar la capacidad de procesamiento de las computadoras cuánticas? Describiremos aquí una aplicación de gran relevancia que es en sí misma un tipo de tecnología: la criptografía cuántica.

Un aspecto importante de la computación cuántica es su capacidad para vencer los sistemas de seguridad informática actuales, como lo son nuestras claves bancarias, de Facebook, correo electrónico, entre otros. Para explicar porqué esto es así, primero analicemos la forma en la que se realiza el cifrado de información actualmente, el cual se basa en un algoritmo llamado RSA que básicamente consiste en dos claves, una que todo el mundo conoce, denominada pública y otra secreta, que sólo nosotros conocemos, denominada clave privada. Esto lo podemos imaginar como si tuviéramos una caja que se puede cerrar a través de una llave. Si queremos que alguien nos envíe un mensaje que nadie más pueda ver, entonces le mandamos la caja abierta, de tal forma que nuestro amigo o amiga, pueda depositar en el interior el mensaje y cierra la caja. Si alguien se encuentra con la caja no la podrá abrir, puesto que no posee la llave y por lo tanto no podrá ver el mensaje. Es hasta que recuperamos la caja que podemos utilizar la llave correcta y obtener la información del interior de la caja.

Ahora, si algún espía mal intencionado quisiera tener acceso al mensaje secreto, debería poder abrir la caja, es decir, actuar de forma equivalente a un cerrajero digital que, sin tener la llave, la pudiera fabricar. Y podríamos pensar que para lograrlo, este cerrajero debería probar con muchas y diferentes llaves hasta dar con la adecuada. La forma en la que funciona el cifrado es tal, que la construcción de la llave privada y la pública depende de la multiplicación de dos números primos (aquellos que son divisibles sólo por ellos mismos y la unidad) relativamente grandes, de tal manera que para lograr descifrar el mensaje, el atacante tendría que enfrentarse al

problema contrario, es decir, a factorizar un número en otros dos que al multiplicarse lo producen.

En un caso sencillo, por ejemplo el número 15, resulta fácil ir probando si podemos dividir al 15 entre una lista de números, de tal modo que si hacemos  $15/2$ , no funciona porque el 2 no cabe un número entero de veces en el 15, luego  $15/3$ , nos dice que el 3 si es un factor de 15. Rápidamente podríamos concluir que  $3 \times 5 = 15$ . El problema radica en que los números empleados en el cifrado son mucho más grandes que el 15, siendo números con muchos dígitos. Por lo que, ir probando consecutivamente si el número se puede dividir de forma entera entre una, ahora también, larguísima lista de números, es muy tardado e ineficiente. De tal manera que el tiempo necesario para probar los diferentes números en que se puede dividir, o sea, factorizar dependerá del número de dígitos involucrados. Y dicho tiempo se duplicará más o menos cada que aumentemos dos dígitos al número que forma las claves. Por ejemplo, si un número de 300 dígitos nos toma menos de un segundo descifrarlo en una computadora de escritorio, uno de 1000 dígitos requerirá más de un año, mientras que uno de 2000 dígitos podría requerir un millón de años.

Por otro lado, una computadora cuántica no está restringida a probar si un número es divisible entre otro de forma entera uno a la vez, sino que puede explotar la capacidad de los sistemas cuánticos de estar en varios estados al mismo tiempo, de tal forma que, esto es equivalente a tomar el número en cuestión y dividirlo entre varios números primos al mismo tiempo para saber si alguno de ellos es un factor de dicho número. La idea básica sigue siendo la misma, que es probar si un número es factor de otro, tomando números de una larga lista, sólo que ahora al hacerse de forma simultánea, el tiempo de cálculo empleado se ve enormemente disminuido. De tal manera que si el tiempo total empleado para factorizar un número de 300 dígitos en una computadora cuántica es de alrededor de 1 segundo, factorizar ahora uno de 2000 dígitos, rondará poco más del minuto y medio. Que si se compara con el poder de cómputo tradicional, resulta abismal.

Pero, y a todo esto, ¿qué podemos esperar de la computación cuántica?

No es de esperar que una computadora cuántica vaya a sustituir nuestras laptops o aparatos de procesamiento personales, sino que algunas instalaciones cuenten con computadoras cuánticas que permitan realizar tareas específicas en las que son más eficientes que las clásicas. Por ejemplo, un nicho importante de aplicación para la computadora cuántica está en los problemas de optimización, que podrían ser de naturaleza común, como encontrar la mejor ruta a seguir por una empresa de mensajería, como

en el ejemplo de Pepe. Esto es así porque una computadora cuántica puede evaluar múltiples posibilidades de manera simultánea, al explotar las capacidades de la superposición y por lo tanto ser más eficiente.

Como ya lo hemos mencionado, la computación cuántica es sólo una de las tecnologías emergentes en la segunda revolución cuántica. Otro tipo de tecnologías que motivan hoy en día un gran número de proyectos de investigación y de desarrollo tecnológico son la metrología cuántica, la simulación cuántica y las comunicaciones cuánticas que comprende a la criptografía y la teleportación cuántica.

Finalmente, abordemos un último cuestionamiento: ¿Podemos usar las tecnologías cuánticas para resolver problemas que impacten a la sociedad, más allá de sistemas de comunicación confiables y capacidad de procesamiento incrementada?

La respuesta a esta pregunta es sí. Una aplicación potencial con un impacto social importante se encuentra en el diseño de medicamentos para padecimientos específicos. Se cree que con el avance en la computación cuántica será posible simular el efecto de diversos medicamentos en el organismo y así avanzar con mayor velocidad en la producción de medicamentos y vacunas. Similarmente, con la disponibilidad de computadoras cuánticas se podrían diseñar materiales para energías renovables, un problema que impacta nuestras vidas en relación con el medio ambiente.

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙

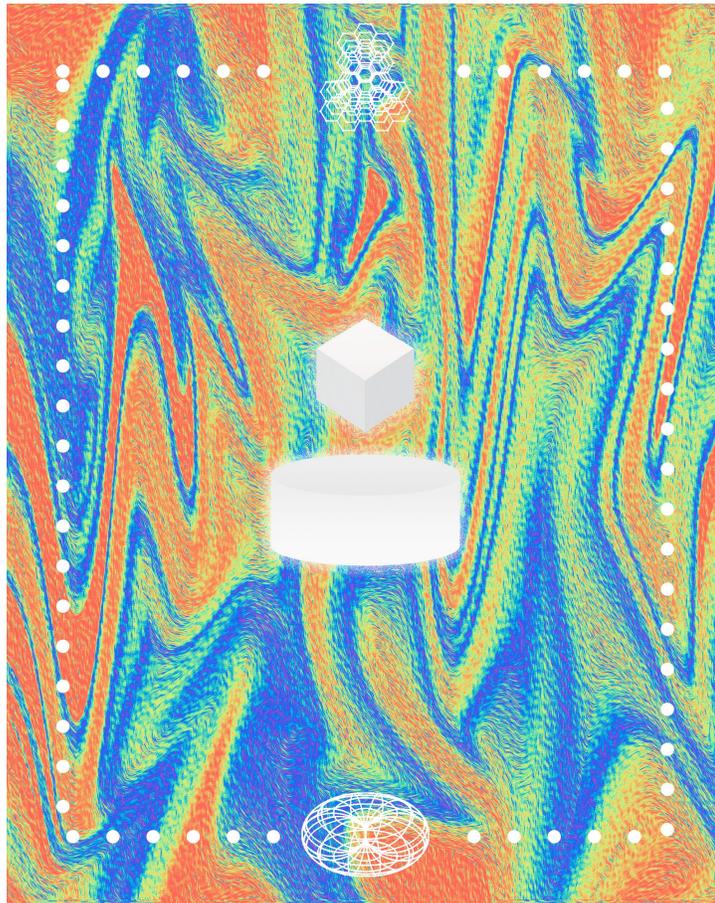
## LA CUÁNTICA Y LOS ESTADOS DE LA MATERIA

*Dra. Rosario Paredes\**

La primera idea que se viene a la mente al pensar en “Estados de la materia” es que hay de tres tipos; sólido, líquido y gaseoso. Esa noción, sin duda correcta, obedece al hecho que a través de nuestros sentidos hemos constatado que el agua existe precisamente en esos estados o fases. ¿Cómo están relacionadas, o qué tienen en común esas tres fases? Desde luego son químicamente iguales entre sí pues el agua ya sea como hielo, como vapor, o en su estado líquido, está compuesta de las mismas moléculas, específicamente moléculas de  $H_2O$ . Pero, ¿Cuál es la diferencia entre las fases del agua? ¡La densidad! Esta cantidad mide qué tan cerca se encuentran las moléculas entre sí y va de mayor a menor en las fases sólida, líquida, y de vapor; respectivamente. En el caso de la fase sólida del agua, es decir, el hielo, tiene una densidad menor que la fase líquida, y la fase de vapor tiene una densidad aún menor. Es curioso, mientras que la mayoría de las sustancias se comportan de forma que la densidad de la fase sólida es menor que la de la líquida, en el caso del agua no ocurre así, sus moléculas se encuentran más próximas entre sí en la fase líquida, que en la fase sólida. La siguiente pregunta que viene a la mente es ¿cómo pasar de una fase a otra? Empíricamente, sabemos que suministrando calor es posible pasar de la fase sólida a la líquida y, a medida que se suministra más calor, se alcanza la fase gaseosa, mejor conocida como vapor de agua. La ocurrencia de estas transiciones fase no solamente tiene lugar en el caso del agua, sino en metales y en general en todo tipo de compuestos cuando se les suministra calor. La diferencia es que la temperatura a la que ocurre la transición varía entre distintas sustancias y elementos. Por ejemplo, en el caso de los metales, la temperatura a la cual ocurre que dejan de ser sólidos y se funden, ronda los 1000 grados centígrados. Lo más importante y que distingue a las fases de la materia es que estas sustancias tienen propiedades distintas, y, por lo

---

\*Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México.



**Figura 6.1:** Esta ilustración vívida muestra cómo los estados de la materia son influenciados por la temperatura, utilizando un gradiente visual que transita de rojo a azul para simular una visión térmica. Se destacan tres representaciones de los estados de la materia: en la parte superior, un estado basado en la distribución de átomos; en la parte inferior, una fase topológica; y en el centro, la superconductividad, representada icónicamente por un superconductor y un imán en levitación, destacando como el ejemplo principal del capítulo.

tanto, se comportan de forma muy diferente. Como describiremos en este capítulo, hay propiedades especialmente relevantes en algunas sustancias.

Además de los ya mencionados en el párrafo anterior, existen otros estados de la materia que son reconocidos como tal y se manifiestan u ocurren también a una temperatura específica. Algunos ejemplos de estos son; la transición de un material de ser no magnético a convertirse en un imán, las llamadas fases topológicas que ocurren en una superficie, las diferentes estructuras que adopta un sólido, es decir la disposición específica que adquieren los átomos que lo conforman, entre otros. Existen, sin embargo, estados de la materia que, aunque quizá son aún menos comunes, es relevante mencionarlos. Nos referimos a las transiciones de fase de naturaleza cuántica. En particular a las transiciones a los estados superconductor y superfluido.

En 1911, Heike Kamerlingh Onnes, científico de origen Holandés, se encontraba estudiando en su laboratorio la conductividad de diversos metales a bajas temperaturas. La gran sorpresa es que descubrió que el mercurio se vuelve un conductor perfecto a temperaturas menores que 4.15 Kelvin, otra forma de entender esta propiedad es diciendo que su resistencia eléctrica se anula por completo por debajo de esa temperatura. Decimos, entonces, que el mercurio se convierte en un ¡superconductor!

Poco más de dos décadas después, en 1937, Piotr Kapitsa, John Allen, y Don Meissner descubrieron que al enfriar  $^4\text{He}$  a temperaturas aún menores que 4.15 Kelvin, se observa una transición de fase a un nuevo estado de la materia. Dicho estado, que aparece cuando el helio se enfría a 2.17 Kelvin, y que en apariencia parece ser líquido, se caracteriza por tener una viscosidad nula, esto significa que es un fluido que fluye sin resistencia, a tal grado que ni siquiera las paredes del recipiente que lo contienen impiden que el material escape. Otra característica es que, si a este líquido peculiar se le pusiera en un contenedor poroso, éste se saldría por la parte de abajo del mismo. A esta fase se le denominó estado superfluido. Es importante resaltar que los fenómenos de superconductividad y superfluididad son análogos en el sentido que mientras que en el caso de los primeros, los electrones que son las partículas portadoras de carga, y que de hecho están cargados negativamente, se mueven sin ninguna resistencia. En el caso de los superfluidos, son los átomos neutros los que fluyen sin resistencia por debajo de la temperatura a la que ocurre la transición de fase. Por lo tanto, entender uno u otro fenómeno es equivalente. Decimos que la física de uno u otro fenómeno es la misma, con la diferencia del material y temperatura a la que se presenta cada uno. De hecho, la forma en la que se entiende a

nivel fundamental el surgimiento de estos dos fenómenos es muy similar, y atañe al uso y comprensión del comportamiento cuántico de los constituyentes elementales de la materia. El inmenso cúmulo de constituyentes; los átomos, electrones, protones y neutrones exhiben propiedades muy particulares cuando se encuentran a una temperatura específica.

Una vez descritas las características de los estados superfluido y superconductor comentaremos ahora sobre su naturaleza cuántica. Tomemos como referente al superconductor. Para elaborar sobre su origen cuántico, primeramente es pertinente precisar que la palabra cuántica está directamente relacionada con el vocablo “cuantos” que significa pedazos, pero ¿pedazos de qué? La respuesta a esa pregunta es que el intercambio de energía de todos los objetos que llamamos cuánticos ocurre en pedazos o “porciones” de energía con tamaño específico. Para tener una idea de lo que representan los “cuantos”, pensemos en lo siguiente. Es claro que podemos intercambiar con alguien una manzana porque es una unidad, pero no podemos intercambiar agua en su estado líquido porque se escurre de nuestras manos, no hay unidades de agua porque es un continuo. Pues bien, los objetos de naturaleza cuántica son tales que su energía y/o el intercambio de la misma, solamente ocurre en pedazos de cierto tamaño. Ese es el origen de la palabra cuántica. Toda la materia que tiene un comportamiento en el que el intercambio de energía ocurre en fracciones, cuantos, o de forma discreta, decimos que es materia cuántica.

Volviendo al punto de interés, el superconductor, la pregunta es ¿Cuáles son los cuantos de energía en el estado superconductor? Para dar respuesta a esta interrogante comenzamos por describir al mercurio, el material en el que surge la superconductividad a una temperatura de 4.15 Kelvin. Este metal, está constituido de miles y miles de millones de átomos, si pudiéramos ver cómo están organizados estos átomos nos daríamos cuenta que se acomodan formando una especie de cuadrícula periódica en tres dimensiones. Esta cuadrícula o red tridimensional se llama estructura cristalina. Los átomos de mercurio se acomodan en la cuadrícula de esa red cristalina y se mantienen vibrando siempre, de hecho, cuando la temperatura es muy alta, la amplitud de las vibraciones es mayor. Resulta que estas vibraciones con energías bien definidas se llaman fonones, y precisamente estos fonones, o vibraciones de átomos en la red, son esenciales para el fenómeno de superconductividad. Los fonones, o cuantos de energía de vibración de los átomos, “se acoplan” con los electrones de los átomos de mercurio y dan origen al estado superconductor!, una posible acepción que puede darse al término “se acoplan” es decir que trabajan al unísono o cooperativa-

mente con el inmenso mar de electrones formando una especie de nuevas partículas: fonones más electrones en movimiento se conjuntan para dar origen a un nuevo estado de la materia. Dentro del lenguaje científico, estas nuevas partículas que son la combinación de otras, son conocidas como quasipartículas. En otras palabras, como resultado de esa colectividad establecida entre electrones cargados negativamente y los fonones de la red es que emerge el estado superconductor. En resumen, cuando la materia es sometida a temperaturas cercanas al cero absoluto, ésta exhibe o da lugar a la emergencia de nuevos estados que son producto del comportamiento colectivo del incontable número de entes individuales que la constituyen y en el que la mecánica cuántica juega un papel preponderante.

Más arriba, se decía que la física de los superconductores y la de los superfluidos es muy parecida, y más aún, que la teoría que explica a nivel fundamental estos fenómenos comparte las mismas características. En efecto, mientras que en el caso de los superconductores los portadores de carga efectivos son pares de electrones, acoplados como ya se describió a través de los fonones; en el caso de la superfluidez, es la interacción efectiva de pares de átomos neutros la que da origen al surgimiento de la superfluidez. Vale la pena mencionar que esta interacción efectiva no es de origen eléctrico; se debe y está descrita por el proceso de colisión átomo-átomo en forma cuántica. Es decir, nuevamente nos encontramos con el hecho que se requiere describir el comportamiento cuántico de la materia a nivel cuántico para poder dar explicación al fenómeno de la superfluidez. Si bien no es la intención de este capítulo ahondar en la forma rigurosa en la que se explicaron estos fenómenos dentro del contexto teórico, sí es importante subrayar que en 1947 y 1957 fueron formuladas las teorías microscópicas de la superfluidez y la superconductividad respectivamente. En el primer caso debemos la explicación a Nikolái Bogoliubov, mientras que en el segundo a John Bardeen, Leon Cooper y John Robert Schrieffer.

Uno de los retos que siguieron a la consecución del fenómeno de la superconductividad, fue el lograr contar con materiales en los que a temperaturas mayores se observara. Y sí, fue en 1986 cuando Georg Bednorz y Karl Müller consiguieron observar la superconductividad en un material cerámico a una temperatura de 35 Kelvin. También, la superfluidez fue encontrada en  $^3\text{He}$  en 1972. Si bien hasta ahora ambos fenómenos no han sido del todo entendidos, sí se sabe que también son de naturaleza cuántica, así lo confirman todos los estudios experimentales. Vale la pena señalar que el  $^3\text{He}$  es un isótopo del átomo de  $^4\text{He}$ . La diferencia entre ambos es la presencia de un neutrón menos por átomo en el caso del  $^3\text{He}$ .

La carrera por el enfriamiento, es decir, la capacidad de lograr enfriar materia a muy bajas temperaturas, no se detuvo a principios de los 1900, cuando se descubrieron los estados superconductor y superfluido. La búsqueda y consecución de la física de bajas temperaturas, continuó a lo largo de las siguientes décadas. Fue hasta 1995 cuando se logró otro gran salto en lo que respecta a conseguir un nuevo estado de la materia: dicho estado, conocido como condensación de Bose-Einstein surge cuando se enfría un gas de átomos a una temperatura apenas menor a un millonésimo de Kelvin por encima del cero absoluto, y se caracteriza por el hecho que la gran mayoría de átomos que componen al gas toma el valor mínimo de energía. En 1925 Satyendra Nath Bose y Albert Einstein predijeron la existencia de este fenómeno de condensación que precisamente lleva su nombre y tuvieron que transcurrir 70 años para que pudiera lograrse en un laboratorio la observación de este fenómeno.

¿Cómo es posible enfriar un gas a esas temperaturas? Primero debemos decir que enfriar significa lograr que los átomos disminuyan su velocidad. Esta extracción de energía o disminución de calor en el gas se debe a que es posible establecer un canal de comunicación con los átomos del gas a través de la luz. ¿Cómo se llegó a tan sofisticado conocimiento? En 1913 Niels Bohr introdujo el modelo del átomo de hidrógeno, que lo concibe como una especie de sistema solar en el que electrón requiere absorber o emitir luz para cambiar de órbita. La cantidad de energía involucrada en estos procesos de emisión y absorción también es en fragmentos de tamaño definido o ¡cuantos!. Las partículas de luz con energía específica se llaman fotones. Cada vez que un fotón, o cuanto de luz, golpea a un átomo éste lo absorbe, pero además, por haber chocado con el átomo hace que este último pierda energía. El átomo sigue su camino, habiendo reducido su velocidad y expulsa al fotón en algún momento. Ojo: el átomo no pierde ni gana energía por haber absorbido y emitido al fotón, pierde velocidad por el choque con el fotón. Repitiendo este proceso un número enorme de veces, es que se consigue que poco a poco los átomos del gas disminuyan su velocidad. Esta idea es la base del enfriamiento de un gas usando luz láser y con ello es posible que los átomos de un gas reduzcan su velocidad esencialmente a cero. ¡Qué curioso! Lo común es pensar que un láser o cualquier tipo de luz calienta al objeto o masa sobre la que incide, aquí se logra enfriar porque se sabe cómo utilizar la luz láser.

Quizá el mayor éxito de lograr la condensación de Bose en gases de átomos alcalinos es la capacidad de “observar y manipular” la materia en el régimen cuántico. Lo que es importante señalar, es que estos grandes con-

glomerados de átomos que conforman el gas en su fase condensada ofrecen la posibilidad de explorar el comportamiento colectivo de la materia con su naturaleza cuántica intrínseca.

Actualmente, hay muchas interrogantes por resolver en la ciencia, particularmente en lo que se refiere a la comprensión de los estados de la materia y sus propiedades físicas. Seguimos aprendiendo que, del comportamiento colectivo de la materia en el régimen cuántico, surgen nuevos estados de la materia. Por mencionar sólo uno, se especula sobre la realidad del estado supersólido. Dicho estado es la combinación de contar con un orden estructural en los átomos que componen la materia, pero a la vez que ese sólido fluya sin resistencia.

Sin duda, la mecánica cuántica, y particularmente la forma que tenemos de comunicarnos con la materia, es decir la luz, es una llave o posible ruta para seguir indagando hacia su comprensión. El legado de Niels Bohr de 1913 continúa vigente.

PARA SABER MÁS:

- D. van Delft, P. Kes. **The discovery of superconductivity**, *Physics Today* **63**(9), 38 (2010).
- J. Bardeen, L.N. Cooper and J.R. Schrieffer. **Theory of Superconductivity**, *Physical Review* **108** 1175-1204 (1957).
- R. J. Donnelly. **The discovery of superfluidity**, *Physics Today* **48** (7), 30 (1995).
- P. Kapitza. **Viscosity of Liquid Helium below the  $\lambda$ -Point**, *Nature* **74** 141, (1938).
- J. F. Allen, A. D. Misener. **Flow of Liquid Helium**, *Nature* **141**, 75 (1938).
- K. B. Davis, M. -O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, y W. Ketterle. **Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms**, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3969 (1995).
- Y. Ren y otros. **Topological phases in two-dimensional materials: a review** *Rep. Prog. Phys.* **79** 066501 (2016).

La siguiente referencia relata con detalle el descubrimiento de la superconductividad.

- van Delft, D. y Kes, P. **The discovery of superconductivity** *Europhysics News* **42** (1), 21 (2011).

**CORRELACIONES CUÁNTICAS**

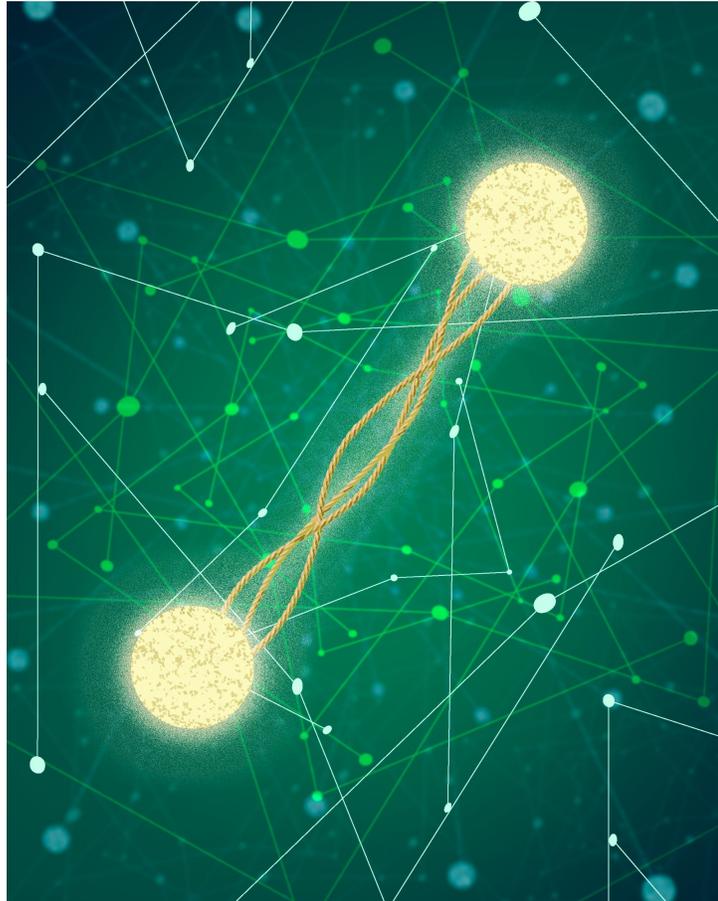
*Dr. Víctor Romero Rochín\**

Imagínese que usted se encuentra en su ciudad natal y que está platicando por teléfono con otra persona que está en otra ciudad a 1000 kilómetros de la suya. Dentro de la plática, por alguna decisión que deben tomar, “echan volados” dejándolo a la suerte. Cada uno de ustedes tiene una moneda de 5 pesos, cada quien arroja la suya y va registrando si cae “águila o sol”, o “cara o cruz” como dicen en otros países. Nos resulta evidente que el que caiga cara o cruz en su moneda no tiene nada que ver con que haya salido cara o cruz en la moneda de la persona que está en la otra ciudad. No hay manera de que una pudiera afectar a la otra. Decimos que esos dos eventos azarosos; el volado de usted y el volado de su amistad, son independientes. Si quisiéramos ser más precisos diríamos que esos dos eventos azarosos son estadísticamente independientes. Es decir, no hay nada que los conecte o los pudiera conectar.

Sin embargo, existen muchos eventos azarosos que no son independientes unos de los otros. Veamos un ejemplo muy sencillo: Un granjero cultiva manzanas y tiene dos clientes a los que les lleva sus manzanas y que se las compran. Uno vive en una ciudad, digamos A, y otro vive en otra ciudad, que llamaremos B. Sin embargo, cada mañana el granjero decide al azar si se las lleva a A o si se las lleva a B, o si no se las lleva a ninguno y se las queda. Esto lo hace arrojando un dado: si sale 1 ó 2, se las lleva a A, si sale 3 ó 4, se las lleva a B y si sale 5 ó 6, se queda con las manzanas. Así, las personas que reciben las manzanas se dan cuenta que, de manera azarosa a veces llega el granjero con las manzanas y a veces no. Por lo tanto, el que en un día A reciba manzanas es un evento azaroso y el que las reciba B también lo es. Después de todo, fue el dado el que “decidió” quién las recibiría. Sin embargo, el que reciba manzanas A no es un evento independiente de si las recibe B o no. Claramente, los días que A recibe manzanas, B no lo

---

\*Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México.



**Figura 7.1:** Esta figura captura la fascinante noción del entrelazamiento cuántico, representando dos fotones entrelazados con cuerdas, un concepto familiar y tangible. En el trasfondo, un tapiz de correlaciones se despliega en una variedad de colores y dimensiones, ilustrando la complejidad y riqueza del mundo cuántico.

hace y viceversa, aunque hay días en que ninguno de los dos recibe. Por lo tanto, decimos que los eventos de que A y B reciban manzanas o no, son eventos correlacionados, que es la palabra que usamos para decir que NO son estadísticamente independientes.

Notemos algo muy importante y sutil: el hecho que B no reciba manzanas no se debe a que A sí las recibió. Esos dos hechos están “unidos” o “conectados”, decimos correlacionados, por algo que ocurrió en el pasado: lo decidió el dado que arrojó el granjero en la mañana de ese día. Esto es muy importante, pues existe una ley de la naturaleza llamada relatividad especial de Einstein, que nos dice que ningún evento puede afectar a otro de manera instantánea, si se encuentran separados. En otras palabras, lo que nos afecta azarosamente o no en un momento dado, tuvo su origen o causa en algún momento en el pasado. Por lo tanto, las correlaciones entre eventos al azar que ocurren a distancias muy alejadas entre sí son generadas por otro u otros eventos en el pasado. No es el efecto instantáneo de uno en el otro. En la vida real estamos rodeados de eventos o sucesos correlacionados cuyas causas son muy diversas con muchas conexiones previas. Y una parte importante de entender cómo funcionan las cosas en nuestro mundo tan complicado es hallar esas correlaciones.

Las reglas que rigen a las correlaciones son parte de lo que llamamos probabilidad y estadística. Estas reglas, a su vez, deben obedecer las leyes de la naturaleza, particularmente la relatividad, que nos impone limitaciones en la transmisión de la información de un lugar a otro. Por lo tanto, las correlaciones terminan quedando acotadas y limitadas por todas esas reglas; no son arbitrarias.

Lo fascinante del mundo cuántico es que esas limitaciones o reglas que deben obedecer las correlaciones no son obedecidas del todo, debido a lo que llamamos las “correlaciones cuánticas”. Vale la pena mencionar que el primero que señaló que esto podía ocurrir fue el mismísimo Albert Einstein ... y no le gustó. Estas correlaciones cuánticas ocurren en situaciones muy particulares que llamamos “estados enredados” o “entrelazados”, pero esos son sólo adjetivos técnicos. Veamos un caso muy sencillo de tales situaciones, que pueden realizarse con mucho cuidado en los laboratorios modernos de óptica.

Sabemos ahora, por la mecánica cuántica, que si una sustancia absorbe luz usualmente la regresa, decimos que la emite “de regreso”. Así, si un material absorbe luz roja, lo esperado es que vuelva a emitir luz roja. Diríamos que esto es “lo normal”. A un nivel muy básico de la materia, decimos que los átomos de ese material absorben fotones rojos y emiten fotones ro-

jos. Pero como siempre, hay ciertos materiales que hacen algo maravilloso: sus átomos pueden absorber luz azul y ¡emitir luz roja! Y con más detalle podemos descubrir que cada átomo de ese material, por cada fotón azul absorbido, emite dos fotones rojos. Lo más interesante es que, para cada par de fotones rojos, uno sale en una dirección y el otro sale en otra. Es un poquito más complicado, resulta que la luz tiene otra propiedad que es la polarización (que tiene que ver con los anteojos o lentes polarizados). Así, podemos considerar que la polarización es una “flechita” asociada a cada fotón que apunta al azar: sólo podemos saber en qué dirección está si la medimos (con unos lentes polarizados). Por lo tanto, cada fotón tiene su flechita apuntando en una dirección al azar ... y ahora viene lo bueno, aunque las flechitas apuntan al azar en el par de fotones rojos, están correlacionadas una con la otra. Esta situación de dos fotones con sus flechitas al azar, pero correlacionadas, es un ejemplo de un estado entrelazado ... Y lo más increíble: esas correlaciones de las flechitas NO obedecen las reglas que dijimos que deberían obedecer las correlaciones. Veamos con un poquito de más calma.

La forma de corroborar esta rareza de la mecánica cuántica es realizar una serie de experimentos, todos iniciando igual: enviamos luz azul al material mencionado y este emite dos fotones rojos en diferentes direcciones. Luego, muy lejos del material ponemos una lente polarizadora en el camino de un fotón rojo y otra en el camino del otro fotón rojo, tal que las mediciones ocurren a una distancia muy grande entre ellas. Por un lado, sin problema, podemos verificar que, efectivamente, la dirección de la flechita de cada fotón es un evento azaroso. Lo importante ahora es que también podemos verificar que estas mediciones están correlacionadas. Es decir, la dirección de la flechita de uno de los fotones no es independiente de la dirección de la flechita del otro. Suena lógico, después de todo los fotones fueron creados en el mismo material al mismo tiempo, algo los “conectó” en el pasado, la medición ocurre después. Lo que resulta, sin embargo, es que esas correlaciones no obedecen las reglas que suponíamos deberían obedecer. Y la “desobediencia” a esas reglas es tan grande que parecería que la medición de una de las flechitas afecta instantáneamente a ¡la medición de la otra! Pero esto “no debería de valerse” pues está en contradicción con el hecho de que nada puede comunicarse instantáneamente: la teoría de la relatividad nos dice que lo más rápido que podemos comunicarnos entre dos sitios alejados es enviando una señal a la velocidad de la luz de uno al otro, y esto toma su tiempo, no puede ser instantáneo... Pero no, las mediciones de las polarizaciones de los fotones nos imponen la penosa necesidad de aceptar

que hay algo en el mundo cuántico que parece desobedecer a la teoría de la relatividad. Y note que hemos sido muy cuidadosos en insistir que, por la mecánica cuántica, “parecería que se afectan instantáneamente”, en oposición a la relatividad que prohíbe tal situación. ¿Quién gana? Bueno, pues la Naturaleza es tan sabia que ¡ninguna! Es decir, aunque los eventos estén correlacionados de esa manera peculiar, no los podemos usar para transmitir información instantáneamente. No podemos, pues no es sino hasta que medimos, que sabemos cuál es la dirección de la flechita. Si lo pudiéramos saber de antemano, la usaríamos para enviar información de manera instantánea, pero no es posible. Así, la mecánica cuántica y la relatividad, de manera cómplice, resuelven el problema.

Lo anterior no ha impedido que gente muy ingeniosa haya usado ya estas correlaciones para avances tecnológicos y que se vean otras en el horizonte, como la criptografía cuántica y la teleportación. Aquí sólo mencionamos brevemente la primera, pues es muy útil y ya es una realidad, sirve para señalar un aspecto muy curioso e interesante de las correlaciones cuánticas que tiene que ver con la mecánica cuántica misma: si interferimos con los procesos cuánticos, ya no es posible ponerlos “como estaban antes”, debido a que, previo a cualquier medición, no podemos decir qué va a ocurrir, sino sólo la probabilidad de que ocurra. Al interferir, alteramos lo que se tenía antes de dicha medición y es como si se volviera a empezar. Por lo tanto, si alguien trata de escudriñar lo que pasa en el viaje de los dos fotones, las correlaciones se “destruyen”. En el caso de la entrega de manzanas descrito antes, si alguien espía al granjero y viera lo que le salió en el dado, ya sabría a quién le entregarían las manzanas, podría hacer uso de esa información y no alteraría quién las recibiera. Esto no ocurre en las correlaciones cuánticas, en este caso el resultado sí se altera. Este hecho tan peculiar se ha explotado en lo que se llama la criptografía cuántica. Esta consiste en que una parte del protocolo de la transmisión de la información se haga usando correlaciones cuánticas. Así, si alguien interfiriera en el camino para tratar de obtener la información enviada, no sólo la correlación se rompería, además habría la manera de saber que se rompió. Esta aplicación es muy importante en nuestra vida moderna pues gran parte de nuestra información fluye por la red del internet a través de fibras ópticas y satélites espaciales, y no deseamos que se le dé un mal uso.

Por otro lado, las correlaciones cuánticas, con su efecto de no localidad, podrían dar lugar a que creyéramos que fuera posible que los seres humanos nos entrelazáramos y que, por ejemplo, un pensamiento de una persona lo captara o recibiera otra instantáneamente, afectando nuestras de-

cisiones. Es interesante y divertido especular en este sentido, sin embargo, como ya comentamos, las correlaciones cuánticas no permiten transmitir información de manera instantánea. Por otro lado, los efectos azarosos de la mecánica cuántica tienden a perderse conforme los objetos involucrados se hacen grandes o macroscópicos, como nosotros. Y aunque sí podemos tener correlaciones con otras personas con las que compartimos un pasado común, estas obedecerían las reglas como las del ejemplo del granjero y sus manzanas.

PARA SABER MÁS:

El siguiente texto contiene una colección de artículos clásicos sobre los fundamentos de la Mecánica Cuántica, incluidos los artículos de Einstein, Podolski y Rosen (EPR) y la respuesta de Bohr, ambos titulados “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?” publicados en el *Physical Review* en 1935, así como el escrito “On the Einstein Podolsky Rosen Paradox” por John Bell. Estos trabajos sentaron las bases del estudio de las correlaciones cuánticas.

- Wheeler, J. A. y Zurek, W. H., editores. *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, 1983.

Recomendamos también consultar las conferencias de los Premios Nobel de Física 2022.

- Aspect, A. *From Einstein's doubts to quantum technologies: non-locality a fruitful image*. [Link](#) (visitado el 18-08-24).
- Clauser, J. *Experimental proof that nonlocal quantum entanglement is real*. [Link](#) (visitado el 18-08-24).
- Zeilinger, A. *A Voyage through Quantum Wonderland*. [Link](#) (visitado el 18-08-24).

## VIAJES EN EL TIEMPO

*Dr. David Bermúdez Rosales\**

### INTRODUCCIÓN

En algún sentido siempre estamos viajando en el tiempo hacia el futuro porque, por ejemplo, en un tiempo de un minuto avanzamos un minuto hacia el futuro. Sin embargo, lo que ahora llamaremos un viaje en el tiempo es aquel viaje en el que en un minuto pudiéramos avanzar o retroceder una cantidad distinta de tiempo.

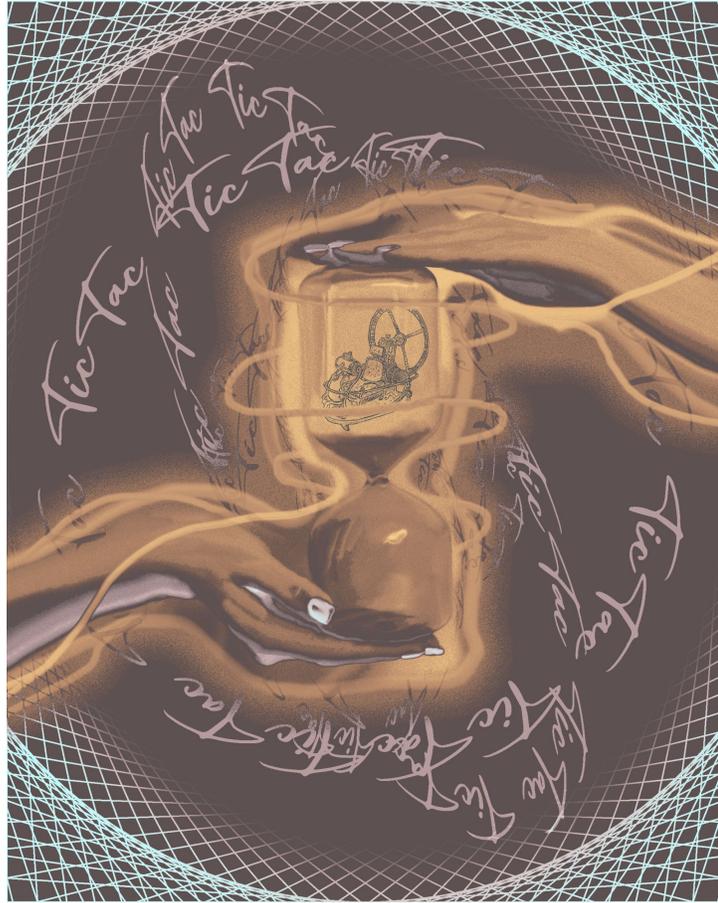
El concepto de viaje en el tiempo que tenemos en la actualidad fue popularizado por la novela “La máquina del tiempo”, escrita por H. G. Wells [Wells, 1895] y desde entonces ha fascinado a quienes llegan a considerar dicho concepto. En esta novela, una máquina puede llevar a sus pasajeros a cualquier momento del tiempo, ya sea en el futuro o en el pasado, a través de un viaje corto. Este tipo de máquinas solo existen en libros y películas de ciencia ficción y no son el objeto de estudio de este texto. Sin embargo, hay viajes en el tiempo que sí tienen base científica y comprobación experimental. De ellos hablaremos a continuación, para ello necesitamos repasar algunos conceptos de física.

### ESPACIO-TIEMPO

En las teorías físicas clásicas de Galileo Galilei o Isaac Newton del siglo XVII [Newton, 1687], el espacio es de 3 dimensiones (alto-ancho-profundo, o  $x,y,z$ ) y el tiempo es un parámetro que avanza independientemente a un ritmo constante. Durante el desarrollo de su teoría de relatividad especial, Albert Einstein se dio cuenta que el espacio y el tiempo no existen de forma independiente, sino formando una entidad distinta llamada espacio-tiempo

---

\*Departamento de Física, Cinvestav.



**Figura 8.1:** Esta figura evocadora explora la idea de los viajes en el tiempo, mostrando manos humanas manipulando simbólicamente el flujo temporal, en alusión al desarrollo de una máquina del tiempo. En el fondo, las palabras 'Tic Tac' resuenan como el constante avanzar de un reloj, mientras que una malla distorsionada sugiere el tejido del espacio-tiempo siendo moldeado y controlado, capturando la esencia de cómo podríamos interactuar y dominar el tiempo.

donde se combinan las tres dimensiones espaciales y la dimensión temporal [Einstein, 1905]. Tiempo después, Einstein también se dio cuenta que la fuerza de gravedad también puede deformar este tejido de cuatro dimensiones y cambiar la noción de tiempo, con ello formuló la teoría de la relatividad general, que es la mejor descripción física de la gravedad que tenemos actualmente [Einstein, 1915].

#### VELOCIDAD DE LA LUZ

Uno de los principios fundamentales descubiertos por Einstein es que hay una velocidad límite de todo lo que existe en el universo [Einstein, 1905]. Nosotros descubrimos dicha velocidad usando luz, por ello la llamamos velocidad de la luz, denotada con la letra  $c$  y con un valor de alrededor de 300 mil km/s. A esta velocidad, un viaje de la Tierra a la Luna toma 1 segundo y del Sol a la Tierra, 8 minutos.

La velocidad de la luz se usa para definir la unidad de medida para medir distancias muy grandes. Por ejemplo, la distancia a la estrella más cercana al Sol, Próxima Centauri, es de 4 años luz de distancia, lo que significa que viajando a la velocidad de la luz nos tomaría 4 años llegar a dicha estrella. Remarcamos que un año luz es una unidad de distancia y no de tiempo.

#### VIAJES HACIA EL FUTURO

Aunque parezca increíble, por la teoría de la relatividad especial sabemos que los viajes al futuro son posibles si nos movemos a una velocidad muy alta, cercana a la velocidad de la luz. Esto se debe a que Einstein descubrió que la forma en que experimentamos el paso del tiempo depende de nuestra velocidad: entre más rápido viajemos, más lento pasa el tiempo. Es decir que no hay un tiempo absoluto para todos los objetos del universo y este hecho es el que le da nombre a la teoría (relatividad) [Einstein, 1905]. Además, por la teoría general de Einstein sabemos que la fuerza generada por el potencial gravitacional también acelera el paso del tiempo [Einstein, 1915].

#### COMPROBACIONES EXPERIMENTALES DE VIAJES HACIA EL FUTURO

Como dijimos, para notar los efectos de la relatividad especial a nuestras escalas temporales, por ejemplo de un segundo, debemos movernos a

velocidades cercanas a la luz. Estas velocidades son extremadamente difíciles de alcanzar para objetos masivos. Sin embargo, también podemos verificar los efectos de la relatividad de Einstein midiendo con relojes ultra precisos. A continuación daremos varios ejemplos de experimentos que se han llevado a cabo durante los últimos cien años con los que logramos la comprobación experimental de los viajes hacia el futuro.

#### Primer experimento

H. E. Ives y G. R. Stilwell confirmaron que el tiempo pasa más lento para iones de  $H_2^+$  en un tubo de rayos catódicos (como el usado en las televisiones antiguas) midiendo el cambio en la frecuencia de la luz emitida [Ives y Stilwell, 1938]. Este efecto es conocido como dilatación temporal.

#### Reloj dando la vuelta al mundo

En 1971 J. C. Hafele y R. E. Keating hicieron un experimento con dos relojes idénticos. Uno de ellos se quedó en una base la tierra y el otro viajó en avión dando dos vueltas alrededor del planeta durante una semana para luego regresar a la base [Hafele y Keating, 1971]. El aparato de medición era conocido coloquialmente como el Sr. Reloj (Mr. Clock), viajó en varios vuelos comerciales y ocupaba el espacio de dos asientos.

Cuando se compararon, el reloj del avión midió un mayor paso del tiempo de casi 300 ns, justo como lo predijo la teoría de relatividad especial de Einstein. Es decir, en un viaje de una semana, viajó hacia el futuro una semana y 300ns, es por ello que se considera un viaje en el tiempo. Por supuesto, esto no tiene comparación con lo imaginado por H. G. Wells en su máquina de tiempo.

#### Astronautas y cosmonautas

Las estaciones espaciales están a una altura de alrededor de 420 km sobre la Tierra y viajan a una velocidad de 8 km/s, equivalentes a 28,000 km/h (aproximadamente un 0.003 % de la velocidad de la luz) [García, 2021] por lo que sus tripulantes también viajan a dichas velocidades. El cosmonauta ruso Gennady Padalka tiene el récord de la persona con el viaje más largo hacia el futuro. Al vivir en el espacio dentro de las estaciones espaciales MIR e ISS por un total de 879 días [BBC News, 2015] y viajando a una velocidad de 8 km/s viajó un total de 0.02 segundos hacia el futuro. Esto quiere decir que el Sr. Padalka es 0.02 segundos más joven por sus estancias en el espacio, comparado con las demás personas que nos quedamos en la Tierra.

## GPS

Este efecto de viaje temporal puede parecer pequeño para nuestras escalas de tiempo, pero hay un aspecto donde sus efectos impactan de gran manera nuestra vida diaria. El efecto de viaje temporal debe tomarse en cuenta para calcular correctamente la posición de nuestros celulares respecto a los satélites de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés *global positioning system*). Al orbitar alrededor de la Tierra, los satélites viajan más rápido hacia el futuro que nuestros celulares, la diferencia en un día es de 40  $\mu$ m (micro segundos). Expresada en tiempo, esta diferencia parece pequeña, sin embargo, esto equivaldría a un error en la posición de nuestros mapas de 10 km. Si no se tomara en cuenta el viaje en el tiempo, el GPS solo podría darnos una estimación de en qué ciudad estamos y no en qué calle estamos y perdería su utilidad [Winterberg 1956].

## VIAJES HACIA EL PASADO

Para viajar al pasado necesitaríamos movernos más rápido que la velocidad de la luz, de esta forma podríamos hacer una trayectoria en el espacio-tiempo que nos regrese al punto espacial de salida en un tiempo anterior al de salida. Hasta el día de hoy no hay evidencia de que estos viajes sean posibles. Incluso, hay razones para pensar que esto no debería ser posible, ya que violaría la llamada ley de causalidad, donde la causa es primero que el efecto. Sin embargo, sí hay una forma de observar al pasado distante.

## TELESCOPIOS

Ya sabemos que la luz viaja a una velocidad finita y que la luz de las estrellas tarda varios años luz en llegar, como los 4 años de la luz de Próxima Centauri. Cuando vemos esta luz de las estrellas, realmente estamos viendo cómo eran en el momento en que emitieron esa luz, es decir, en el pasado.

Entre más distante está el objeto que emite la luz, más hacia el pasado estamos observando. Próxima Centauri es la estrella más cercana a nuestro Sol [Nasa, 2020], la estrella más lejana conocida hasta ahora se llama Icarus [Kelly 2018]. En 2016, el telescopio Hubble observó a Icarus a 9 mil millones de años luz de distancia. Considerando que la edad del Universo es calculada en unos 14 mil millones de años, estamos viendo señales emitidas en el primer tercio de la historia del Universo. Estas señales viajaron por miles de

millones de años antes de ser detectadas por nuestros telescopios. Lo mismo sucede para las estrellas que podemos ver a ojo en un cielo nocturno y despejado. Recordemos entonces que realmente estamos viendo cómo eran esas estrellas en el pasado distante.

## CONCLUSIÓN

No podemos viajar tiempos largos hacia el futuro o hacia el pasado, eso es parte de la ciencia ficción. En cambio, los viajes hacia el futuro a escalas de tiempo muy pequeñas son algo cotidiano, inicialmente predicho por las teorías de relatividad especial y general de Einstein y después confirmado por varios experimentos. Con la tecnología actual es posible medirlo con relojes precisos, sin embargo, sus efectos forman parte de nuestra tecnología de uso diario, como el mencionado GPS.

Los viajes hacia el pasado no han sido comprobados y tenemos razones para pensar que no son posibles. Sin embargo, sí es posible observar cómo era el universo en un pasado distante.

## PARA SABER MÁS:

- Wells, H. G. **The Time Machine** William Heinemann Publishing (1985).
- Newton, I. **Philosophiae Naturalis Principia Mathematica** (1687).
- Einstein, A. **Zur Elektrodynamik bewegter Körper** *Annalen der Physik* **322** 891–921 (1905).
- Einstein, A. **Die Feldgleichungen der Gravitation**, *Sitzungsberichte* **1915** 844–847 (1915).
- Ives H. E. y Stilwell, G. R. **An experimental study of the rate of a moving atomic clock**, *Journal of the Optical Society of America* **28** 215 (1938).
- Hafele J. C. y Keating, R. E. **Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains**, *Science* **177** 168–170 (1972).
- Garcia M. **About the Space Station: Facts and Figures**. [Link](#) (visitado el 17-11-2021).
- BBC News. **Russian astronaut record-breaker Padalka returns to Earth**, (2015). [Link](#) (visitado el 17-11-2021).

- Winterberg, F. **Relativistische Zeitdilatation eines künstlichen Satelliten**, *Astronautica Acta* 2 25 (1956).
- NASA. **Seeing Stars in 3D: The New Horizons Parallax Program**, (2020). [Link](#) (visitado el 17-11-2021).
- Kelly P. L. **Extreme magnification of an individual star at redshift 1.5 by a galaxy-cluster lens**, *Nature Astronomy* 2 334-342 (2018).

⊙ *Página intencionalmente en blanco* ⊙