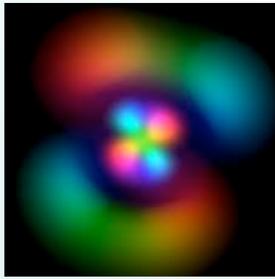


Mecánica Cuántica

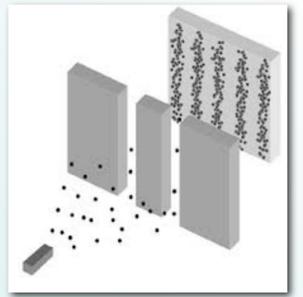
El átomo cuántico

La dinámica de las partículas subatómicas está regida por la Mecánica Cuántica. Una de sus leyes básicas es el **principio de superposición**, que implica que un objeto puede encontrarse en (una superposición de) varios estados distintos simultáneamente. Por ejemplo, los electrones de los átomos no describen órbitas con posiciones y velocidades definidas; en realidad, cada electrón se encuentra en una superposición cuántica de todos los estados de posición posibles. Estos orbitales son superposiciones cuánticas en las que la posición o el momento no están definidos (aunque sí la energía y el momento angular), y se describen adecuadamente mediante **funciones de onda**.



El experimento de la doble rendija

El principio de superposición se manifiesta en el fenómeno de la **interferencia**. Si imaginamos lanzar partículas cuánticas a una doble rendija, la probabilidad de impacto en una pantalla describe un patrón de interferencias, con regiones de alta y baja probabilidad de impacto. Este fenómeno se puede describir como una difracción (similar a la de la luz) de la función de onda de las partículas (y subyace la denominada **dualidad onda-corpúsculo**). La interferencia implica que cada partícula pasa simultáneamente por las dos rendijas; es decir, se encuentra en una superposición de estados asociados a pasar por cada una de las dos rendijas.



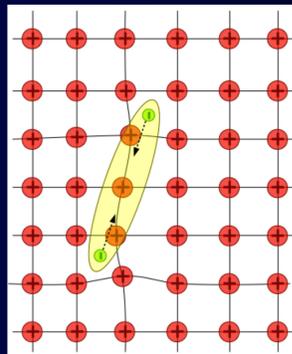
Fenómenos colectivos y cuasipartículas

La Mecánica Cuántica tiene implicaciones sorprendentes también cuando se aplica a sistemas de muchas partículas, como en la Física de la Materia Condensada (que estudia las propiedades de los materiales a partir de la dinámica de las partículas que los constituyen). En ocasiones se producen **fenómenos colectivos**, que involucran el **entrelazamiento** o correlación de muchas partículas, y que pueden cambiar las propiedades macroscópicas del material.

Una analogía de los fenómenos colectivos y de estas propiedades emergentes es una partida de ajedrez: las sencillas reglas de movimiento de cada pieza se pueden correlacionar en jugadas de enorme complejidad y belleza, con su propio repertorio de propiedades.

Un ejemplo de comportamiento colectivo es la **superconductividad** (en el modelo BCS). Cuando se enfrían determinados sólidos por debajo de una temperatura crítica, sus electrones pueden experimentar una fuerza atractiva capaz de combinar pares de electrones en un estado ligado denominado par de Cooper. Los pares de Cooper experimentan una condensación de Bose-Einstein, en la que todos los pares del material se mueven de forma coherente, y son capaces de transmitir corrientes eléctricas sin resistencia.

Las excitaciones elementales de un sistema colectivo se denominan **cuasipartículas**. En un metal ordinario las cuasipartículas son electrones con la misma carga eléctrica y spin que un electrón libre, pero con una masa diferente debida a las interacciones. Sin embargo en un gas de electrones bidimensional, sometido a un fuerte campo magnético, las cuasipartículas son excitaciones colectivas con una carga eléctrica fraccionaria (efecto Hall fraccionario).



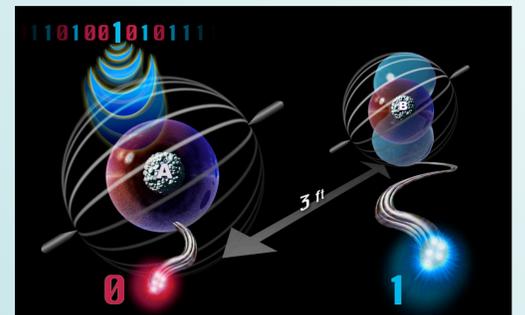
Entrelazamiento y qubits

La propiedad de **entrelazamiento cuántico** consiste en que un sistema de varias partículas se puede encontrar en una superposición de estados que no puede descomponerse en un producto de estados para las partículas individuales.

En sistemas entrelazados, el conjunto de partículas se encuentra en una combinación de todos los estados posibles del sistema. Esta observación ha motivado la aparición del muy activo campo de la **Computación Cuántica**, que propone diseñar dispositivos cuánticos capaces de ejecutar cálculos. Su ventaja respecto de los ordenadores tradicionales es que, gracias a la superposición cuántica de estados, pueden llevar a cabo operaciones muy diversas de forma simultánea. La unidad básica de información cuántica se denomina **qubit**, y corresponde a un objeto cuántico en superposición de dos estados (0 y 1).

Existen algoritmos cuánticos que permiten la resolución de ciertos problemas a una velocidad significativamente superior a los ordenadores tradicionales. Por ejemplo, la descomposición de un número en factores primos (de gran importancia en el campo de la encriptación de información, y por tanto de la seguridad digital).

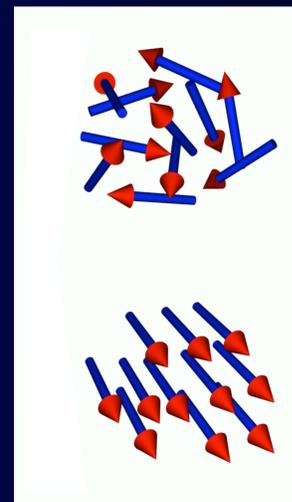
Otro ejemplo es el estado cuántico formado con la superposición números primos, que permitiría una verificación de la hipótesis de Riemann más allá de cualquier algoritmo clásico.



Ruptura de simetría vs. orden topológico

Muchas propiedades de los materiales y sus transiciones de fase se pueden comprender en términos de la **ruptura espontánea de la simetría**. Por ejemplo, un imán permanente está caracterizado porque los momentos magnéticos de sus partículas constituyentes no están distribuidas al azar (de forma invariante bajo rotaciones, desde el punto de vista macroscópico) sino que se alinean en una dirección específica (que por tanto rompe la simetría). Asimismo, el estado superconductor en el modelo BCS está caracterizado porque el condensado del par de Cooper rompe espontáneamente la simetría asociada a la interacción electromagnética (y da una masa efectiva al fotón, en un análogo del mecanismo de Higgs en Física de Partículas)..

Sin embargo, existen materiales con fases que no se pueden caracterizar en estos términos y requieren la introducción de un nuevo concepto: el **orden topológico**. Éste caracteriza nuevos estados de la materia (*quantum matter*) no en términos de simetrías rotas por condensados, sino en términos de invariantes topológicos del estado cuántico de las partículas constituyentes. La noción de "invariante topológico" significa que una propiedad no varía cuando el sistema sufre pequeñas perturbaciones (por ejemplo las debidas a pequeñas fluctuaciones térmicas por la temperatura).



Quantum matter

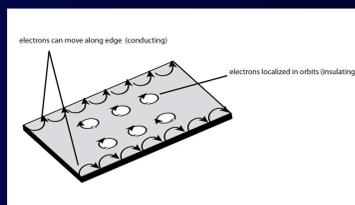
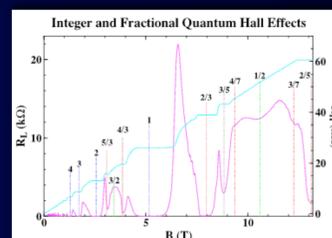
La formulación teórica y el estudio experimental de sistemas con orden topológico es un campo de gran actividad. Varios sistemas con orden topológico están relacionados con versiones cuánticas del efecto Hall. Éste consiste en que la aplicación de un campo magnético en un material 2-dimensional que lleva una corriente eléctrica en una dirección induce una corriente eléctrica en la dirección transversas.

- En el **efecto Hall cuántico entero**, la conductividad en la dirección transversa está cuantizada y sólo puede tomar valores múltiplos de cierta unidad básica (o cuanto). Ocurre a bajas temperaturas y para campos magnéticos suficientemente intensos. Se interpreta en términos de cuasipartículas formadas por estados ligados de electrones y cuantos de campo magnético.

- En el **efecto Hall cuántico fraccionario**, la conductividad está cuantizada en fracciones del cuanto anterior. Se interpreta en términos de un nuevo tipo de cuasipartícula, los **aniones**, que tienen la propiedad de no comportarse como bosones ni como fermiones (esto es posible en sistemas 2-dimensionales).

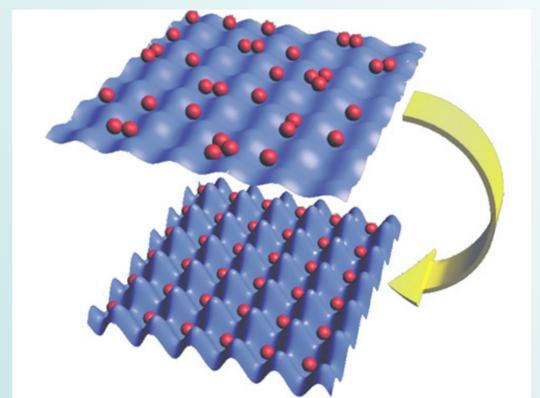
Otros sistemas interesantes con orden topológico son los **aislantes topológicos**. Son materiales aislantes en su interior, pero conductores en su superficie, debido a la presencia de cuasipartículas portadoras de la corriente eléctrica. La existencia de estos estado de borde (edge states) está asociada a ciertos invariantes topológicos.

Los aislantes topológicos incluyen diversos materiales de gran actualidad, como el grafeno.



Optical lattices

Mediante el uso de láseres cruzados y su patrón de interferencia, es posible construir "retículos ópticos" (*optical lattices*) en los que se pueden atrapar átomos. Los parámetros del sistema, como la geometría y espaciado del retículo, y las barreras de potencial entre sus nodos, son ajustables. Esta técnica permite diseñar sistemas cuánticos que simulen materiales con propiedades novedosas, y estudiar sus transiciones de fase al variar los parámetros (transiciones de fase cuánticas a temperatura cero)



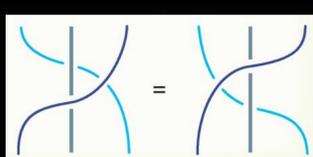
Misterios por resolver

Ordenadores cuánticos topológicos



La construcción de qubits en sistemas con orden topológico permitiría el uso de la información cuántica de forma robusta frente a perturbaciones que rompen la coherencia cuántica de los sistemas de qubits tradicionales.

Aniones no abelianos



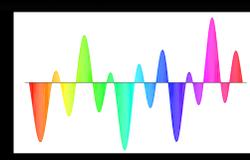
Existen formulaciones teóricas de aniones no abelianos, para los que las operaciones de intercambio de pares de partículas no conmutan. Se investiga si existen materiales con este tipo de cuasipartículas.

Superconductividad de alta temperatura



Los materiales llamados cupratos presentan un diagrama de fases muy complejo, con fases superconductoras, antiferromagnéticas y metálicas raras cuyas cuasipartículas presentan comportamientos anómalos. La caracterización de estos sistemas sigue siendo una pregunta abierta.

La hipótesis de Riemann



Existen numerosas razones para pensar que los ceros de la función zeta de Riemann son el espectro de un Hamiltoniano cuántico. Si esto fuera cierto, se habría demostrado la hipótesis de Riemann, la cual tiene importantes implicaciones en la Teoría de Números y del Caos Cuántico.