

## **Demostración de interacciones quirales en un sistema cuántico sintonizable**

Investigadores del ICFO y de la UAB, en Barcelona, consiguen demostrar interacciones colectivas quirales entre átomos enfriados a las temperaturas más bajas del Universo. El resultado es un sistema cuántico sintonizable que se comporta de forma distinta a su imagen en el espejo y se describe con una teoría gauge, uno de los pilares de la Física moderna. El hito se aplicará a la computación cuántica de materiales y se publica en Nature.

August 11, 2022

---

En la física moderna, nuestra comprensión del mundo se basa en las teorías gauge: modelos matemáticos de la física teórica que describen las interacciones entre las partículas elementales (como los electrones o los quarks) y explican de forma cuántica tres de las fuerzas fundamentales de la naturaleza: electromagnética, débil y fuerte. La cuarta fuerza fundamental, la gravedad, se describe con la teoría de la relatividad general de Einstein, que

es una teoría de gauge clásica ya que aun no disponemos de una teoría que unifique la mecánica cuántica con la gravedad. Las teorías gauge pueden utilizarse asimismo para explicar el comportamiento exótico de los electrones en ciertos materiales cuánticos, o los códigos de corrección de errores que necesitarán los futuros ordenadores cuánticos para funcionar de forma fiable. Por ello, las teorías de gauge son esenciales para entender la física moderna.

Para comprender mejor dichas teorías, una posibilidad es realizarlas utilizando otros sistemas cuánticos. Esta estrategia recibe el nombre de simulación cuántica y constituye un tipo especial de computación cuántica. Fue propuesta por primera vez por el físico estadounidense Richard Feynman en los años 80, más de quince años después de recibir el premio Nobel de física por su trabajo teórico sobre las teorías gauge. La simulación cuántica puede entenderse como un juego de LEGO cuántico en el que los físicos experimentales dan realidad a modelos teóricos abstractos. Los construyen en el laboratorio *pieza a pieza*, utilizando para ello sistemas cuánticos muy bien controlados, como átomos o iones ultrafríos. Tras montar un prototipo de LEGO cuántico para un modelo concreto, los investigadores pueden medir con gran precisión sus propiedades en el laboratorio y utilizar sus resultados para comprender mejor la teoría que imita. Durante la última década, la simulación cuántica se ha explotado intensamente para investigar materiales cuánticos. Sin embargo, *jugar* al LEGO cuántico con las teorías gauge es fundamentalmente más difícil, y hasta ahora solo se había logrado investigar de ese modo la fuerza electromagnética. En un estudio reciente publicado en *Nature*, los investigadores experimentales del **ICFO Anika Frolian, Craig Chisholm, Ramon Ramos, Elettra Neri y Cesar Cabrera**, dirigidos por la profesora ICREA del ICFO **Leticia Tarruell**, en colaboración con **Alessio Celi**, investigador teórico del **programa Talent de la Universidad Autónoma de Barcelona**, han podido simular por primera vez una teoría gauge distinta del electromagnetismo, utilizando para ello átomos ultrafríos.

### **Una teoría gauge para fotones muy pesados**

El equipo se propuso realizar en el laboratorio una teoría gauge que se enmarca dentro de la clase de teorías gauge topológicas, diferente de la clase de teorías gauge dinámicas a las que pertenece el electromagnetismo.

En el lenguaje de la teoría gauge, la fuerza electromagnética entre dos electrones surge cuando intercambian un fotón: una partícula de luz que puede propagarse también en ausencia de materia. Sin embargo, en los materiales cuánticos bidimensionales sometidos a campos magnéticos intensos, los fotones intercambiados por los electrones se comportan como si fueran extremadamente pesados y solo pueden moverse mientras estén unidos a la materia. Esto da a los electrones propiedades muy peculiares: solo pueden fluir a través de los bordes del material, en una dirección que está fijada por la orientación del campo

magnético, y su carga se vuelve aparentemente fraccionaria. Dicho comportamiento se conoce como efecto Hall cuántico fraccionario, y se describe mediante la teoría de gauge de Chern-Simons (el nombre de los matemáticos que desarrollaron uno de sus elementos clave). El comportamiento de los electrones en el borde del material también se describe por una teoría gauge, que recibe el nombre de BF quirál. Dicha teoría fue propuesta en los años 90, pero nadie la había realizado en el laboratorio hasta que los investigadores del ICFO y la UAB la sacaron del congelador.

### **Una nube ultrafría que se comporta de forma diferente a su imagen en el espejo**

Para dar realidad a esta teoría gauge topológica y simularla en su experimento, el equipo utilizó una nube de átomos enfriados a temperaturas de unas mil millonésimas de grado por encima del cero absoluto. Como especie atómica eligieron el potasio, porque uno de sus isótopos tiene dos estados que interactúan con distinta fuerza y pueden utilizarse como piezas cuánticas para construir la teoría gauge BF quirál. A continuación, aplicaron luz láser para combinar los dos estados en uno nuevo. Esta técnica, denominada "vestir los átomos con luz", hizo que los átomos adquirieran interacciones peculiares cuya fuerza y signo dependían de la velocidad de la nube. Por último, crearon una guía de ondas óptica que restringía el movimiento de los átomos a una línea, y utilizaron láseres adicionales para golpear la nube de forma que se moviese a diferentes velocidades a lo largo de la guía de ondas.

En condiciones normales, al dejar evolucionar libremente los átomos en la guía de onda óptica, la nube de potasio se debería haber empezado a expandir inmediatamente. Sin embargo, la luz de vestido modificó completamente el comportamiento de los átomos, como los investigadores vieron al tomar imágenes de la nube en el laboratorio. Como explica **Ramón Ramos**, "en nuestro sistema, cuando los átomos se mueven hacia la derecha, sus interacciones son atractivas y anulan el comportamiento de los átomos que intentan expandirse. Así que lo que se ve en realidad es que la forma de la nube sigue siendo la misma. En términos técnicos, realizamos un solitón. Pero, si los átomos se mueven hacia la izquierda, estos átomos se expanden como un gas normal". El hecho de que los átomos se comporten de forma diferente al moverse en direcciones opuestas demuestra que el sistema es quirál, es decir, diferente de su imagen en el espejo. "Cuando observamos por primera vez el efecto de las interacciones quirales en nuestra nube atómica, no intentábamos simular una teoría gauge. Pero los datos eran tan bonitos e intrigantes que pensamos que necesitábamos entender mejor lo que estaba pasando. Cambiaron por completo los planes de investigación del equipo", dice **Leticia Tarruell**.

El equipo entendió rápidamente que sus observaciones estaban relacionadas con un artículo teórico publicado diez años antes, que proponía utilizar un montaje casi idéntico para estudiar un tipo modificado de electromagnetismo. Sin embargo, los resultados del experimento eran diferentes de los esperados. Como recuerda **Craig Chisholm**, al principio

"los resultados que obteniamos no parecian coincidir en absoluto con los de la teoria. El reto era comprender en que regimen habia que estar para ver realmente el efecto correcto - el procedente del lugar correcto - y eliminar los efectos procedentes de lugares equivocados". Para el equipo experimental, el significado del electromagnetismo modificado que se mencionaba en el articulo tampoco estaba muy claro. Citaba articulos de fisica matematica de los anos 90, que explicaban de forma mucho mas detallada el modelo y lo conectaban con las teorias gauge utilizadas para describir el efecto Hall cuantico fraccionario. Sin embargo, como dice Tarruell, "para fisicos atomicos experimentales como nosotros, el contenido de esos articulos era muy dificil de entender, porque estaban escritos en un lenguaje de fisica matematica completamente diferente al nuestro. Era realmente frustrante saber que la respuesta a nuestras preguntas estaba ahi, ¡pero no eramos capaces de entenderla! Fue entonces cuando decidimos pedir ayuda a un fisico teorico"

### **Una colaboracion fructifera entre teoria y experimento**

Para **Alessio Celi**, que trabajo durante muchos anos en fisica teorica de altas energias y gravedad antes de pasarse a la simulacion cuantica, leer los articulos originales sobre teorias gauge fue relativamente facil. Al mismo tiempo, pudo discutir con el equipo del ICFO y comprender el regimen en el que se podian realizar los experimentos y sus retos. Tras varios intentos fallidos, les propuso un modelo que explicaba adecuadamente los resultados observados en el laboratorio. Como explica, "el principal problema que teniamos era entrar en el marco adecuado. Una vez entendimos donde buscar, el problema se volvio facil de resolver". Sorprendentemente, existia un regimen de parametros en el que este modelo era exactamente la teoria de gauge topologica propuesta 30 anos antes para describir los bordes de los materiales de Hall cuantico fraccionario.

"Creo que este proyecto nos muestra el interes de las colaboraciones interdisciplinarias. Combinar metodos experimentales de fisica de ultrabajas temperaturas e ideas teoricas de fisica de altas energias ha hecho de todos nosotros mejores fisicos. Y hemos logrado la primera simulacion cuantica de una teoria de gauge topologica", concluye Tarruell. Ahora, el equipo se prepara a explorar las nuevas lineas de investigacion abiertas por este proyecto. Su objetivo es intentar extender los experimentos y la teoria de una linea a un plano, lo que les permitiria observar el efecto Hall cuantico fraccionario sin necesidad de un material cuantico. De esa forma, podrian crear de forma muy controlada cuasiparticulas exoticas, llamadas aniones, que en el futuro podrian utilizarse para formas mas robustas de computacion cuantica.

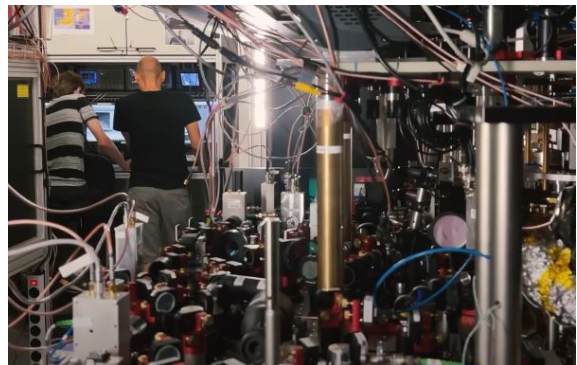
###

**Referencia: Realizing a 1D topological gauge theory in an optically dressed BEC**, Anika Frolian, Craig S. Chisholm, Elettra Neri, Cesar R. Cabrera, Ramon Ramos, Alessio Celi, and Leticia Tarruell, 2022, Nature, DOI: [10.1038/s41586-022-04943-3](https://doi.org/10.1038/s41586-022-04943-3)

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido financiado por la Union Europea (ERC CoG-101003295 SuperComp), el Ministerio de Ciencia e Innovacion y la Agencia Estatal de Investigacion (proyectos LIGAS PID2020-112687GB-C21 en el ICFO y PID2020-112687GB-C22 en la UAB, y Severo Ochoa CEX2019-000910-S en el ICFO), Deutsche Forschungsgemeinschaft (Unidad de Investigacion FOR2414, Proyecto No. 277974659), Fundacion Ramon Areces (proyecto CODEC), Fundacio Cellex, Fundacio Mir-Puig, y Generalitat de Catalunya (Programa Operativo FEDER de Catalunya, Proyecto QUASICAT/QuantumCat Ref. N° 001-P-001644 programa AGAUR y CERCA). A. F. agradece el apoyo de la Fundacion La Caixa (I 100010434, beca de doctorado LCF/BQ/DI18/11660040) y de la Union Europea (Mari Sklodowska-Curie-713673), C. S. C. de la Union Europea (Marie Sklodowska-Curie-713729), E N. de la Union Europea (Marie Sklodowska-Curie-101029996 ToPIKS), C. R. C. de una bec postdoctoral ICFO-MPQ Cellex, R. R. de la Union Europea (Mari Sklodowska-Curie-101030630 UltraComp), A. C. del programa Talent Research de la UAB, y L T. del Ministerio de Ciencia e Innovacion, la Agencia Estatal de Investigacion y el Fond Social Europeo (RYC-2015-17890).



imagenes de la izquierda (de arriba hacia abajo): ICFO Alumni Anika Frolian, Cesar Cabrera y Elettra Neri. Imagen de la derecha (de izquierda a derecha): investigadores del ICFO Craig Chisholm, Ramon Ramos, y Leticia Tarruell, junto con el investigador d



Ultracold atoms dressed by light simulate gauge theories