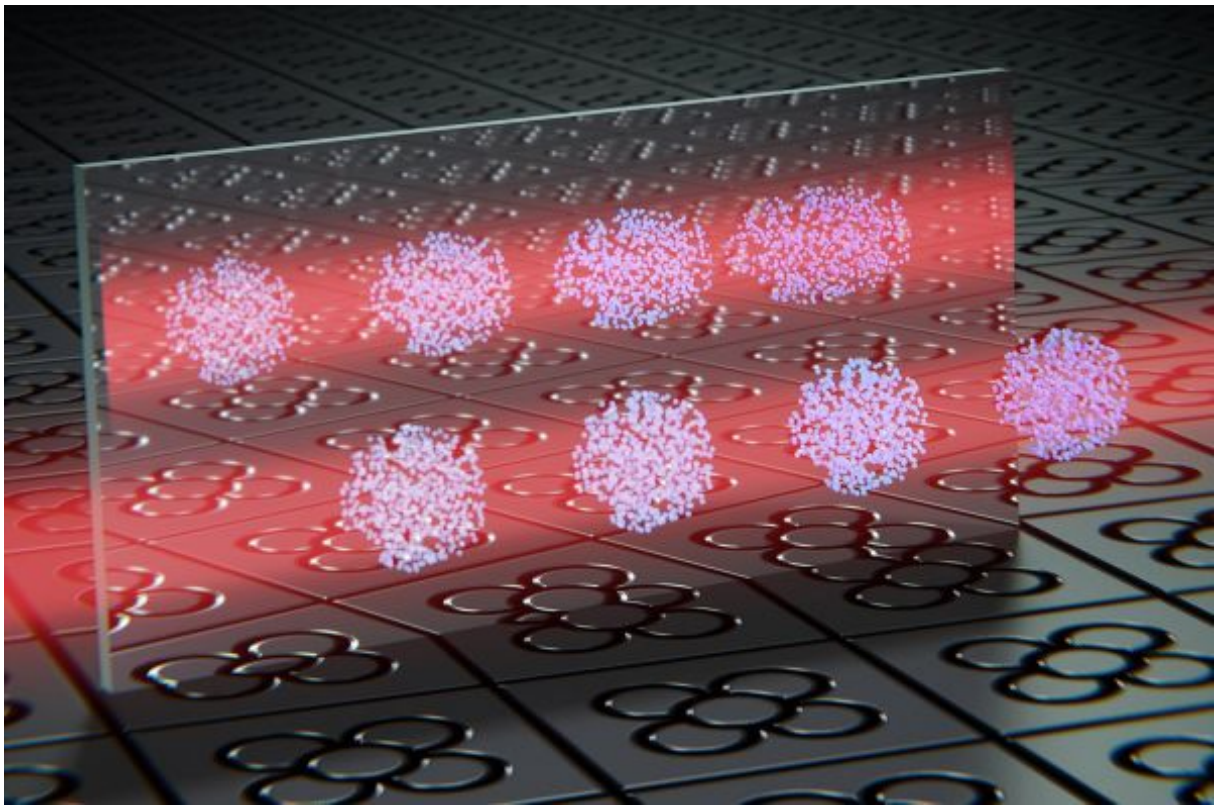


Demostracion de interacciones quirales en un sistema cuantico sintonizable

Investigadores del ICFO y de la UAB, en Barcelona, consiguen demostrar interacciones colectivas quirales entre atomos enfriados a las temperaturas mas bajas del Universo. El resultado es un sistema cuantico sintonizable que se comporta de forma distinta a su imagen en el espejo y se describe con una teoria gauge, uno de los pilares de la Fisica moderna. El hito se aplicara a la computacion cuantica de materiales y se publica en Nature.

August 11, 2022

En la fisica moderna, nuestra comprension del mundo se basa en las teorias gauge: modelos matematicos de la fisica teorica que describen las interacciones entre las particulas elementales (como los electrones o los quarks) y explican de forma cuantica tres de las fuerzas fundamentales de la naturaleza: electromagnetica, debil y fuerte. La cuarta fuerza fundamental, la gravedad, se describe con la teoria de la relatividad general de Einstein, que

es una teoria de gauge clasica ya que aun no disponemos de una teoria que unifique la mecanica cuantica con la gravedad. Las teorias gauge pueden utilizarse asimismo para explicar el comportamiento exotico de los electrones en ciertos materiales cuanticos, o los codigos de correccion de errores que necesitaran los futuros ordenadores cuanticos para funcionar de forma fiable. Por ello, las teorias de gauge son esenciales para entender la fisica moderna.

Para comprender mejor dichas teorias, una posibilidad es realizarlas utilizando otros sistemas cuanticos. Esta estrategia recibe el nombre de simulacion cuantica y constituye un tipo especial de computacion cuantica. Fue propuesta por primera vez por el fisico estadounidense Richard Feynman en los anos 80, mas de quince anos despues de recibir el premio Nobel de fisica por su trabajo teorico sobre las teorias gauge. La simulacion cuantica puede entenderse como un juego de LEGO cuantico en el que los fisicos experimentales dan realidad a modelos teoricos abstractos. Los construyen en el laboratorio i¿½pieza cuantica a pieza cuanticai¿½, utilizando para ello sistemas cuanticos muy bien controlados, omo atomos o iones ultrafrios. Tras montar un prototipo de LEGO cuantico para un mo elo concreto, los investigadores pueden medir con gran precision sus propiedades e el laboratorio y utilizar sus resultados para comprender mejor la teoria que imita. Durant la ultima decada, la simulacion cuantica se ha explotado intensamente para invest gar materiales cuanticos. Sin embargo, i¿½jugari¿½ al LEGO cuantico con las teorias auge es fundamentalmente mas dificil, y hasta ahora solo se habia logrado investigar de ese modo la fuerza electroma

netica. En un estudio reciente publicado en la revista **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 colaboracion con **Alessio Celi,** investigador teorico del **programa Talent de la Universidad Autonoma de Barcelona**, han podido simular por primera vez una teoria gauge distinta del electromagnetismo, utilizando para ello atomos ultrafrios.

Una teoria gauge para fotones muy pesados

El equipo se propuso realizar en el laboratorio una teoria gauge que se enmarca dentro de la clase de teorias gauge topologicas, diferente de la clase de teorias gauge dinamicas a las que pertenece el electromagnetismo.

En el lenguaje de la teoria gauge, la fuerza electromagnetica entre dos electrones surge cuando intercambian un foton: una particula de luz que puede propagarse tambien en ausencia de materia. Sin embargo, en los materiales cuanticos bidimensionales sometidos a campos magneticos intensos, los fotones intercambiados por los electrones se comportan como si fueran extremadamente pesados y solo pueden moverse mientras esten unidos a la materia. Esto da a los electrones propiedades muy peculiares: solo pueden fluir a traves de los bordes del material, en una direccion que esta fijada por la orientacion del campo

magnetico, y su carga se vuelve aparentemente fraccionaria. Dicho comportamiento se conoce como efecto Hall cuantico fraccionario, y se describe mediante la teoria de gauge de Chern-Simons (el nombre de los matematicos que desarrollaron uno de sus elementos clave). El comportamiento de los electrones en el borde del material tambien se describe por una teoria gauge, que recibe el nombre de BF quiral. Dicha teoria fue propuesta en los anos 90, pero nadie la habia realizado en el laboratorio hasta que los investigadores del ICFO y la UAB la sacaron del congelador.

Una nube ultrafria que se comporta de forma diferente a su imagen en el espejo

Para dar realidad a esta teoria gauge topologica y simularla en su experimento, el equipo utilizo una nube de atomos enfriados a temperaturas de unas mil millonesimas de grado por encima del cero absoluto. Como especie atomica eligieron el potasio, porque uno de sus isotopos tiene dos estados que interactuan con distinta fuerza y pueden utilizarse como piezas cuanticas para construir la teoria gauge BF quiral. A continuacion, aplicaron luz laser para combinar los dos estados en uno nuevo. Esta tecnica, denominada "vestir los atomos con luz", hizo que los atomos adquirieran interacciones peculiares cuya fuerza y signo dependian de la velocidad de la nube. Por ultimo, crearon una guia de ondas optica que restringia el movimiento de los atomos a una linea, y utilizaron laseres adicionales para golpear la nube de forma que se moviese a diferentes velocidades a lo largo de la guia de ondas.

En condiciones normales, al dejar evolucionar libremente los atomos en la guia de onda optica, la nube de potasio se deberia haber empezado a expandir inmediatamente. Sin embargo, la i¿½luz de vestidoi¿½ modifico completamente el comportamiento de los ato os, como los investigadores vieron al tomar imagenes de la nube en el laboratorio. Como exp **Ramon Ramos**, "en nuestro sistema, cuando los atomos se mueven hacia la derecha, sus interacciones son atractivas y anulan el comportamiento de los atomos que intentan expandirse. Asi que lo que se ve en realidad es que la forma de la nube sigue siendo la misma. En terminos tecnicos, realizamos un soliton. Pero, si los atomos se mueven hacia la izquierda, estos atomos se expanden como un gas normal". El hecho de que los atomos se comporten de forma diferente al moverse en direcciones opuestas demuestra que el sistema es quiral, es decir, diferente de su imagen en el espejo. "Cuando observamos por primera vez el efecto de las interacciones quirales en nuestra nube atomica, no intentabamos simular una teoria gauge. Pero los datos eran tan bonitos e intrigantes que pensamos que necesitabamos entender mejor lo que estaba pasando. Cambiaron por completo los planes de investigacion del equipo", dice **Leticia Tarruell**.

El equipo entendio rapidamente que sus observaciones estaban relacionadas con un articulo teorico publicado diez anos antes, que proponia utilizar un montaje casi identico 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 d 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.

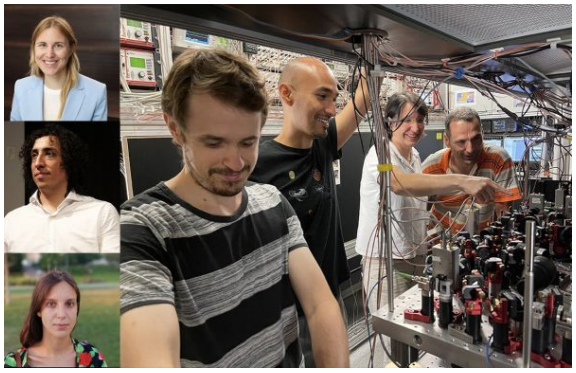
"Creo que este proyecto nos muestra el interes de las colaboraciones interdisciplinarias. Combinar metodos experimentales de fisica de ultrabajas temperaturas e ideas teoricas de fisica de altas energias ha hecho de todos nosotros mejores fisicos. Y hemos logrado la primera simulacion cuantica de una 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.

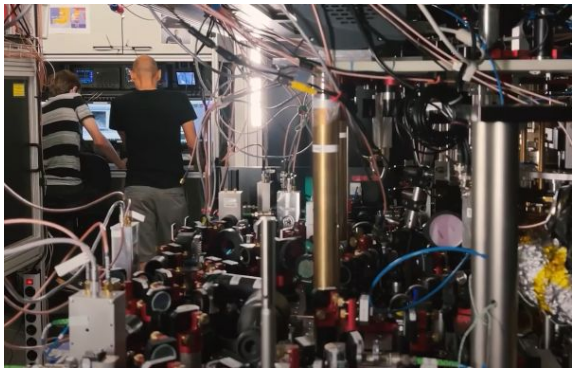
###

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

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. Nº 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