

Demostració d'interaccions quirals en un sistema quantic sintonitzable

Investigadors de l'ICFO i de la UAB, a Barcelona, aconsegueixen demostrar interaccions col·lectives quirals entre àtoms refredats les temperatures més baixes de l'Univers. El resultat és un sistema quantic sintonitzable que es comporta de manera diferent de la seva imatge especular i es descriu amb una teoria de gauge, un dels pilars de la Física moderna. La fita s'aplicarà a la computació quàmica de materials i es publica a Nature.

August 11, 2022

En la física moderna, la nostra comprensió del món es basa en les teories gauge: models matemàtics de la física teòrica que descriuen les interaccions entre les partícules elementals (com els electrons o els quarks) i expliquen de forma quàmica tres de les forces fonamentals de la naturalesa: l'electromagnètica, les forces feble i forta. La quarta força fonamental, la gravetat, es descriu amb la teoria de la relativitat general d'Einstein, que és una teoria clàssica de gauge, ja que encara no disposem d'una teoria que unifiqui la mecànica quàmica amb la gravetat. Les teories gauge també poden explicar el comportament exòtic dels

electrons en certs materials quantics, o els codis de correcció d'errors que necessitaran els futurs ordinadors quantics per funcionar de manera fiable. Per això, les teories de gauge són essencials per entendre la física moderna.

Per comprendre millor aquestes teories, una possibilitat és realitzar-les utilitzant altres sistemes quantics. Aquesta estratègia rep el nom de simulació quàntica i constitueix un tipus especial de computació quàntica. Va ser proposada per primera vegada pel físic nord-americà Richard Feynman als anys 80, mes de quinze anys després de rebre el premi Nobel de física pel seu treball teòric sobre les teories gauge. La simulació quàntica es pot entendre com un joc de LEGO quàntic, en què els físics experimentals donen realitat a models teòrics abstractes. Al laboratori, els construeixen i $\frac{1}{2}$ peça quàntica a peça quàntica $\frac{1}{2}$, utilitzant sistemes quantics molt ben controlats, com ara àtoms o ions ultrafreds. Després de muntar un prototip de LEGO quàntic per a un model concret, els investigadors poden mesurar amb gran precisió les seves propietats al laboratori i utilitzar els seus resultats per comprendre millor la teoria que intenta imitar. Durant la darrera dècada, la simulació quàntica s'ha explotat intensament per investigar materials quantics. Tanmateix, jugar $\frac{1}{2}$ al LEGO quàntic amb les teories gauge és fonamentalment més difícil, i fins ara només s'havia aconseguit investigar així la força electromagnètica. En un estudi recent publicat a la revista **Nature**, els investigadors experimentals de l'ICFO **Anika Frolian, Craig Chisholm, Ramon Ramos, Elettra Neri i Cesar Cabrera**, dirigits per la professora ICREA a l'ICFO **Leticia Tarruell**, en col·laboració amb **Alessio Celi**, investigador teòric del programa Talent de la Universitat Autònoma de Barcelona, han pogut simular per primera vegada una teoria de gauge diferent de l'electromagnetisme, utilitzant per això àtoms ultrafreds.

Una teoria de gauge per a fotons molt pesats

L'equip es va proposar realitzar al laboratori una teoria de gauge que s'emmarca dins de la classe de teories gauge topològiques, diferent de la classe de teories gauge dinàmiques a que pertany l'electromagnetisme.

En el llenguatge de la teoria de gauge, la força electromagnètica entre dos electrons sorgeix quan intercanvien un foto: una partícula de llum que es pot propagar també en absència de matèria. En canvi, als materials quantics bidimensionals sotmesos a camps magnètics intensos, els fotons intercanviats pels electrons es comporten com si fossin extremadament pesats i només es poden moure mentre estiguin units o lligats a la matèria. Això dona als electrons propietats molt peculiars: només poden fluir a través de les vores del material, en una direcció que està fixada per l'orientació del camp magnètic, i la càrrega dels electrons es torna aparentment fraccionària. Aquest comportament es coneix com a **efecte Hall quàntic fraccionari**, i es descriu mitjançant la **teoria de gauge de Chern-Simons** (a partir del nom dels matemàtics que van desenvolupar un dels seus elements clau). El comportament dels electrons a la vora del material també es descriu per una teoria de gauge, que rep el nom de

BF quiral. Aquesta teoria va ser proposada als anys 90, però ningú l'havia fet al laboratori fins que els investigadors de l'ICFO i la UAB la van treure del congelador.

Un nuvol ultrafred que es comporta de forma diferent a la seva imatge al mirall

Per materialitzar aquesta teoria de gauge topològica i simular-la al seu experiment, l'equip va utilitzar un nuvol d'àtoms refredats a temperatures d'unes mil milionesimes de grau per sobre del zero absolut. Com a espècie atòmica van triar el potassi, perquè un dels seus isotops té dos estats que interactuen amb diferent força i es poden utilitzar com a peces quantiques per construir la teoria de gauge BF quiral. A continuació, van aplicar llum làser per combinar els dos estats en un de nou. Aquesta tècnica, denominada "**vestir els àtoms amb llum**", va fer que els àtoms adquirissin interaccions peculiars amb una força i signe que depenien de la velocitat del nuvol. Finalment, van crear una guia d'ones òptica que restringia el moviment dels àtoms a una línia, i van utilitzar làsers addicionals per colpejar el nuvol de manera que es mogues a diferents velocitats al llarg de la guia d'ones.

En condicions normals, en deixar evolucionar lliurement els àtoms a la guia d'ona òptica, el nuvol de potassi s'hauria d'haver començat a expandir immediatament. Tot i això, la imatge del nuvol de potassi va modificar completament el comportament dels àtoms, com els investigadors van veure quan van prendre imatges del nuvol al laboratori. Com explica **Ramon Ramos**, "en el nostre sistema, quan els àtoms es mouen cap a la dreta, les seves interaccions són atractives i anul·len el comportament dels àtoms que intenten expandir-se. Per tant, el que es veu en realitat és que la forma del nuvol segueix sent la mateixa. En termes tècnics, hem fet un solito. Però, si els àtoms es mouen cap a l'esquerra, aquests àtoms s'expandeixen com un gas normal". El fet que els àtoms es comportin de forma diferent quan es mouen en direccions oposades demostra que el sistema és quiral, és a dir, diferent de la seva imatge especular. "Quan vam observar per primera vegada l'efecte de les interaccions quirals al nostre nuvol atòmic, no intentàvem simular una teoria de gauge. Però les dades eren tan boniques i intrigants que vam pensar que necessitàvem entendre millor el que estava passant. Van canviar completament els plans de recerca de l'equip", explica **Dània Tarruell**. L'equip va entendre ràpidament que les seves observacions estaven relacionades amb un article teòric publicat deu anys abans, que proposava fer servir un muntatge gairebé idèntic per estudiar un tipus modificat de l'electromagnetisme. Tot i això, els resultats de l'experiment eren diferents dels esperats. Com recorda **Craig Chisholm**, al principi els resultats que obteníem no semblaven coincidir en absolut amb les prediccions de la teoria. El repte era comprendre en quin regim calia estar per veure realment l'efecte correcte - causat per la raó correcta - i eliminar-ne els efectes procedents de llocs equivocats. Per a l'equip experimental, el significat de l'electromagnetisme modificat estudiat a l'article tampoc estava gaire clar. Citava articles de física matemàtica dels anys 90, que explicaven de forma molt més detallada el model i el connectaven amb les teories de gauge utilitzades per descriure l'efecte Hall quàntic fraccionari. Tot i això, com diu **Dània Tarruell**, "per a físics

atomics experimentals com nosaltres, el contingut d'aquests articles era molt difícil d'entendre, perquè estaven escrits en un llenguatge de física matemàtica completament diferent del que nosaltres coneixem. Era realment frustrant saber que la resposta a les nostres preguntes hi era al davant nostre, però no erem capacs d'entendre-la! Va ser llavors quan vam decidir demanar ajuda a un físic teòric".

Una col·laboració fructífera entre teòrics i experimentals

Per a **Alessio Celi**, que va treballar durant molts anys en el camp de física teòrica d'altres energies i gravetat abans de passar a la simulació quàntica, llegir els articles originals sobre teories de gauge va ser relativament fàcil. Així mateix, va poder discutir amb l'equip de l'ICFO i comprendre el règim en què es podien fer els experiments així com els seus reptes. Després de diversos intents fallits, els hi va proposar un model que explicava adequadament els resultats observats al laboratori. Com explica, i½el principal problema que teníem era trobar el marc adequat. Un cop vam entendre on buscar, el problema es va tornar fàcil de resoldre½. Sorprenentment, existia un règim de paràmetres en què aquest model era exactament la teoria de gauge topològica proposada 30 anys abans per descriure les propietats dels materials de Hall quàntic fraccionari.

"Crec que aquest projecte ens mostra la importància de les col·laboracions interdisciplinàries. Combinar mètodes experimentals de física de temperatures ultra-freudes i idees teòriques de física d'altres energies ha fet de tots nosaltres millors físics.

hem aconseguit la primera simulació quàntica d'una teoria de gauge topològica", conclou Tarruell.

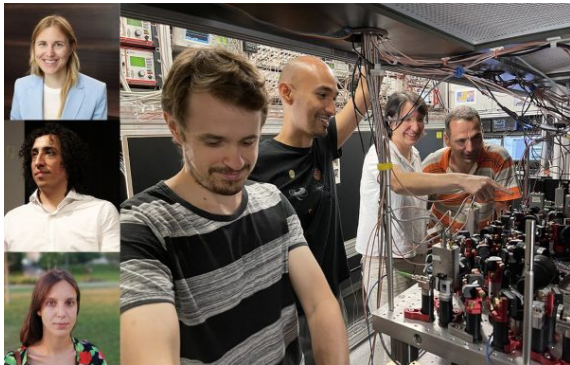
Ara l'equip es prepara per explorar les noves línies de recerca obertes per aquest projecte. El seu objectiu és intentar estendre els experiments i la teoria d'una línia a un pla, cosa que els permetria observar l'efecte Hall quàntic fraccionari sense necessitat d'un material quàntic. D'aquesta manera, podrien crear de manera molt controlada quasipartícules exòtiques, anomenades anions, que en el futur podrien utilitzar-se per a formes més robustes de computació quàntica.

###

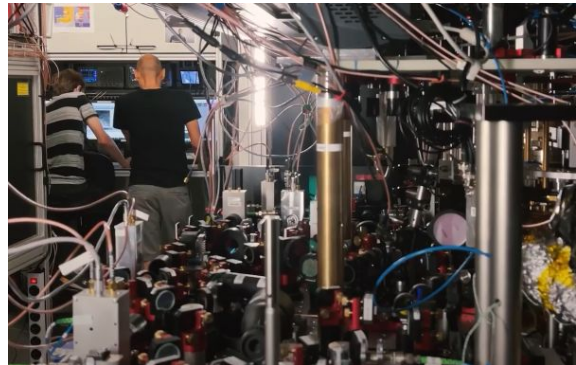
Referència: **Realizing a 1D topological gauge theory in an optically dressed BEC**, Anika Frolian, Craig S. Chisholm, Elettra Neri, Cesar R. Cabrera, Ramon Ramos, Alessio Celi, and Leticia Tarruell, 2022, Nature, DOI: 10.1038/s41586-022-04943-3

Agraïments: Aquest treball ha estat finançat per la Unió Europea (ERC CoG-101003295 SuperComp), el Ministeri de Ciència i Innovació i l'Agència Estatal de Recerca (projectes LLIGES PID2020-112687GB-C21 a l'ICFO i PID2020-112 UAB, i Severo Ochoa CEX2019-000910-S a l'ICFO), Deutsche Forschungsgemeinschaft (Unitat de Recerca

FOR2414, Projecte No. 277974659), Fundacio Ramon Areces (projecte CODEC), Fundacio Cellex, Fundacio Mir-Puig, i Generalitat de Catalunya (Programa Operatiu FEDER de Catalunya, Projecte QUASICAT/QuantumCat Ref. Num. 001-P-001644, programa AGAUR i PROP). A. F. agraeix el suport de la Fundacio La Caixa (ID 100010434, beca de doctorat LCF/BQ/DI18/11660040) i de la Unio Europea (Marie Sklodowska-Curie-713673), C. S. C. de la Unio Europea (Marie Sklodowska-C7), E. N. de la Unio Europea (Marie Sklodowska-Curie-101029996 ToPIKS), CR d'una beca postdoctoral ICFO-MPQ Cellex, RR de la Unio Europea (Marie Sklodowska-Curie-101030630 UltraComp), A. , i L. T. del Ministeri de Ciencia i Innovacio, l'Agencia Estatal de Recerca i el Fons Social Europeu (RYC-2015-17890).



imatges de l'esquerra (de dalt cap baix): ICFO Alumni Anika Frolian, Cesar Cabrera i Elettra Neri. Imatge de la dreta (d'esquerra a dreta): investigadors de l'ICFO Craig Chisholm, Ramon Ramos, i Leticia Tarruell, juntament amb l'investigador de la UAB Al



Ultracold atoms dressed by light simulate gauge theories