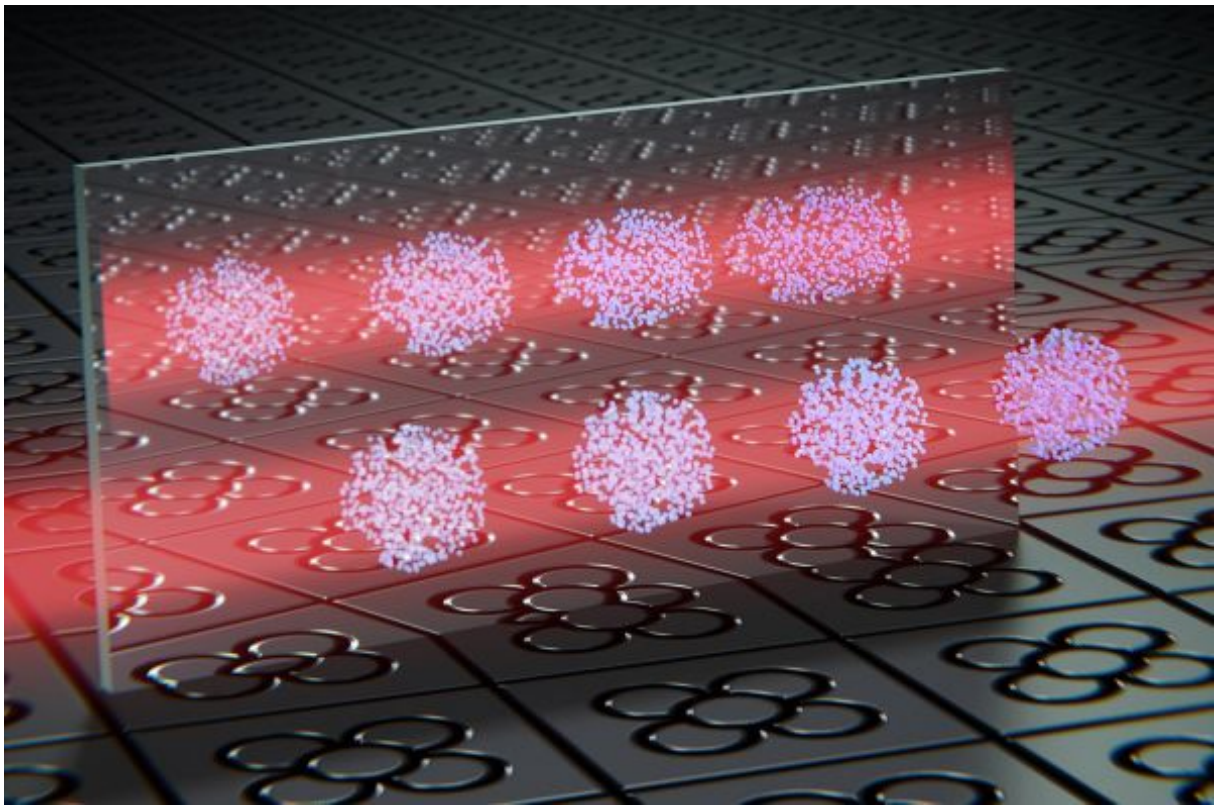


Demostracio d'interaccions quirals en un sistema quantic sintonitzable

Investigadors de l'ICFO i de la UAB, a Barcelona, aconsegueixen demostrar interaccions col·lectives quirals entre atoms refredats les temperatures mes baixes de l'Univers. El resultat es un sistem quantic sintonitzable que es comporta de manera diferent de l seva imatge especular i es descriu amb una teoria de gauge, u dels pilars de la Fisica moderna. La fita s'aplicara a la computaci quantica de materials i es publica a Nature.

August 11, 2022

En la fisica moderna, la nostra comprensio del mon es basa en les teories gauge: models matematics de la fisica teorica que descriuen les interaccions entre les particules elementals (com els electrons o els quarks) i expliquen de forma quantica tres de les forces fonamentals de la naturalesa: l'electromagnetica, les forces feble i forta. La quarta forca fonamental, la gravetat, es descriu amb la teoria de la relativitat general d'Einstein, que es una teoria classica de gauge, ja que encara no disposem d'una teoria que unifiqui la mecanica quantica amb la gravetat. Les teories gauge tambe poden explicar el comportament exotic dels

electrons en certs materials quantics, o els codis de correccio d'errors que necessitaran els futurs ordinadors quantics per funcionar de manera fiable. Per aixo, les teories de gauge son essencials per entendre la fisica moderna.
Per comprendre millor aquestes teories, una possibilitat es realitzar-les utilitzant altres sistemes quantics. Aquesta estrategia rep el nom de simulacio quantica i constitueix un tipus especial de computacio quantica. Va ser proposada per primera vegada pel fisic nord-america Richard Feynman als anys 80, mes de quinze anys despres de rebre el premi Nobel de fisica pel seu treball teoric sobre les teories gauge. La simulacio quantica es pot entendre com un joc de LEGO quantic, en que els fisics experimentals donen realitat a models teorics abstractes. Al laboratori, els construeixen i¿½**peca quantica a peca quantica** i¿½, utilitzant sistemes quantics molt ben controlats, com ara atoms o ions ultrafred
. Despres de muntar un prototip de LEGO quantic per a un model concret, els investigado
s poden mesurar amb gran precisio les seves propietats al laboratori i utilitzar els seus resulta
s per comprendre millor la teoria que intenta imitar. Durant la darrera decada, la simulac
o quantica s'ha explotat intensament per investigar materials quantics. Tanmateix, i¿½juga i¿½ al LEGO quantic amb les teories gauge es fonamentalment mes dificil, i fins ara nomes s havia aconseguit investigar aixi la forca electromagn
tica. 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·laboracio amb **Alessio Celi**, investigador teoric del programa Talent de la Universitat Autonoma de Barcelona, han pogut simular per primera vegada una teoria de gauge diferent de l'electromagnetisme, utilitzant per aixo atoms 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 topologiques, diferent de la classe de teories gauge dinamiques a que pertany l'electromagnetisme.
En el llenguatge de la teoria de gauge, la forca electromagnetica entre dos electrons sorgeix quan intercanvien un foto: una particula de llum que es pot propagar tambe en absencia de materia. En canvi, als materials quantics bidimensionals sotmesos a camps magnetics intensos, els fotons intercanviats pels electrons es comporten com si fossin extremadament pesats i nomes es poden moure mentre estiguin units o lligats a la materia. Aixo dona als electrons propietats molt peculiars: nomes poden fluir a traves de les vores del material, en una direccio que esta fixada per l'orientacio del camp magnetic, i la carrega dels electrons es torna aparentment fraccionaria. Aquest comportament es coneix com a **efecte Hall quantic fraccionari**, i es descriu mitjancant la **teoria de gauge de Chern-Simons** (a partir del nom dels matematics que van desenvolupar un dels seus elements clau). El comportament dels electrons a la vora del material tambe es descriu per una teoria de gauge, que rep el nom de

BF quiral. Aquesta teoria va ser proposada als anys 90, pero ningu 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 topologica i simular-la al seu experiment, l'equip va utilitzar un nuvol d'atoms refredats a temperatures d'unes mil milionesimes de grau per sobre del zero absolut. Com a especie atomica van triar el potassi, perque un dels seus isotops te dos estats que interactuen amb diferent forca i es poden utilitzar com a peces quantiques per construir la teoria de gauge BF quiral. A continuacio, van aplicar llum laser per combinar els dos estats en un de nou. Aquesta tecnica, denominada "**vestir els atoms amb llum**", va fer que els atoms adquirissin interaccions peculiars amb una forca i signe que depenien de la velocitat del nuvol. Finalment, van crear una guia d'ones optica que restringia el moviment dels atoms a una linia, i van utilitzar lasers 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 atoms a la guia d'ona optica, el nuvol de potassi s'hauria d'haver comencat a expandir immediatament. Tot i aixo, la i¿½ll m de vestiti¿½ va modificar completament el comportament dels atoms, com els investiga ors van veure quan van prendre imatges del nuvol al laboratori. Com expl**Ramon Ramos**, i¿½en el nostre sistema, quan els atoms es mouen cap a la dreta, les seves interaccions s n atractives i anul·len el comportament dels atoms que intenten expandir-se. Per tant, el que es veu en realitat es que la forma del nuvol segueix sent la mateixa. En termes tecnics, hem et un solito. Pero, si els atoms es mouen cap a l'esquerra, aquests atoms s'expandeixen com un gas normal". El fet que els atoms es comportin de forma diferent quan es mouen en direccions oposades demostra que el sistema es quiral, es a dir, diferent de la seva ima ge especular. "Quan vam observar per primera vegada l'efecte de les interaccions quirals al nostre nuvol atomic, no intentavem simular una teoria de gauge. Pero les dades eren an boniques i intrigants que vam pensar que necessitavem entendre millor el que est va passant. Van canviar completament els plans de recerca de l'equip", d**Leticia Tarruell**. L'equip va entendre rapidament que les seves observacions estaven relacionades amb un article teoric publicat deu anys abans, que proposava fer servir un muntatge gairebe identic per estudiar un tipus modificat de l'electromagnetisme. Tot i aixo, els resultats de l'experiment eren diferents dels esperats. Com recorda **Craig Chisholm**, al principi i¿½e s resultats que obteniem no semblaven coincidir en absolut amb les prediccions de la teoria. l repte era comprendre en quin regim calia estar per veure realment l'efecte correcte - caus t per la rao correcta - i eliminar-ne els efectes procedents de llocs equivocats . Per a l'equip experimental, el significat de l'electromagnetisme modificat estudiat a l'artic e tampoc estava gaire clar. Citava articles de fisica matematica dels anys 90, que explicav n de forma molt mes detallada el model i el connectaven amb les teories de gauge utilitzad s per descriure l'efecte Hall quantic fraccionari. Tot i aixo, com di**Tarruell**, "per a fisics

atomics experimentals com nosaltres, el contingut d'aquests articles era molt dificil d'entendre, perque estaven escrits en un llenguatge de fisica matematica completament diferent del que nosaltres coneixem. Era realment frustrant saber que la resposta a les nostres preguntes hi era al davant nostre, pero no erem capacos d'entendre-la! Va ser llavors quan vam decidir demanar ajuda a un fisic teoric".

Una col·laboracio fructifera entre teorics i experimentals

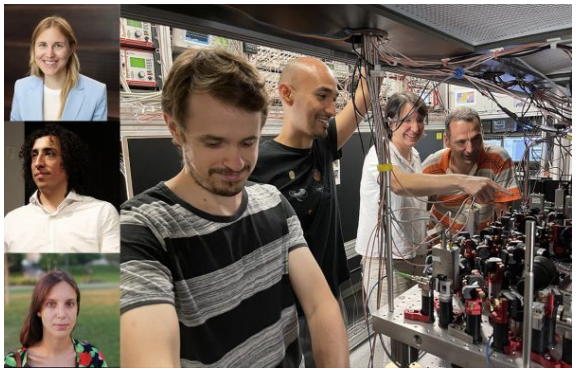
Per a **Alessio Celi**, que va treballar durant molts anys en el camp de fisica teorica d'altes energies i gravetat abans de passar a la simulacio quantica, llegir els articles originals sobre teories de gauge va ser relativament facil. Aixi mateix, va poder discutir amb l'equip de l'ICFO i comprendre el regim en que es podien fer els experiments aixi com els seus reptes. Despres de diversos intents fallits, els hi va proposar un model que explicava adequadament els resultats observats al laboratori. Com explica, i¿½el principal problema que teniem era trob r el marc adequat. Un cop vam entendre on buscar, el problema es va tornar facil e resoldrei¿½. Sorprenentment, existia un regim de parametres en que aquest model era exactament la teoria de gauge topologica proposada 30 anys abans per descriure les v res dels materials de Hall quantic fraccion ri. "Crec que aquest projecte ens mostra la importancia de les col·labora ions interdisciplinaries. Combinar metodes experimentals de fisica de temperatures ultra-fre es i idees teoriques de fisica d'altes energies ha fet de tots nosaltres millors fisics. hem aconseguit la primera simulacio quantica d'una teoria de gauge topologica", co clou Tarr ell. Ara l'equip es prepara per explorar les noves linies de recerca obertes per aquest project . El seu objectiu es intentar estendre els experiments i la teoria d'una linia a un pla, cosa qu els permetria observar l'efecte Hall quantic fraccionari sense necessitat d'un material qua tic. D'aquesta manera, podrien crear de manera molt controlada quasiparticules exoti ues, anomenades anions, que en el futur podrien utilitzar-se per a formes mes robust s de computacio quan

###

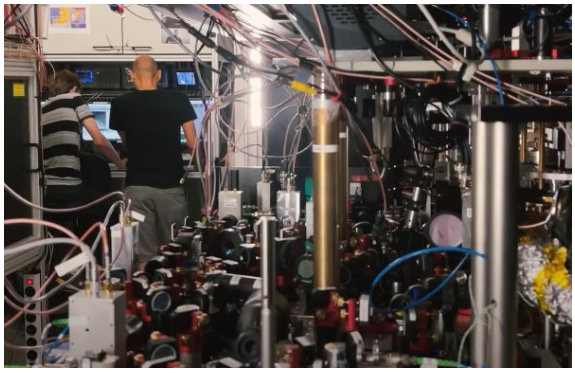
Referencia: Realizing a 1D topological gauge theory in an optically dressed BEC, Anika Frolian, Craig S. Chisholm, Elettra Neri, Cesar R. Cabrera, Ramon Ramos, Alessio Celi, and Leticia Tarruell, 2022, Nature, DOI: 10.1038/s41586-022-04943-3

Agraiments: Aquest treball ha estat financat per la Unio Europea (ERC CoG-101003295 SuperComp), el Ministeri de Ciencia i Innovacio i l'Agencia 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 abaix): 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