



Simulació quàntica amb àtoms ultrafreds en interacció: avenços recents i perspectives futures

Un equip d'investigadors ha elaborat una revisió actualitzada sobre els models de Bose-Hubbard no estandard, un marc teòric típicament utilitzat per descriure simuladors quàntics basats en àtoms ultrafreds amb diversos tipus d'interaccions. Aquesta revisió recull resultats recents en el camp i analitza com en aquests sistemes poden emergir estats intrigants de la matèria i efectes mecanoquàntics.

March 28, 2025

Els simuladors quàntics atòmics són tecnologies quàntiques emergents que han demostrat un enorme potencial per revelar fenòmens innovadors de la mecànica quàntica. Típicament, la plataforma experimental d'aquests simuladors implica àtoms bosònics a temperatures ultrafredes. Mitjançant la creació d'una reixeta de llum amb lasers potents, coneguda com a xarxa òptica, els àtoms s'organitzen en l'espai seguint un patró periòdic i ocupant diferents

llocs de la xarxa. No obstant això, en lloc de romandre aïllats, els àtoms poden interactuar de diverses maneres: poden saltar d'un lloc de la xarxa a un altre de proper, poden experimentar atracció o repulsió amb els seus veïns més propers dins la xarxa, i fins i tot poden interactuar amb àtoms situats a una distància més gran mitjançant les anomenades interaccions de llarg abast, entre altres mecanismes.

La riquesa i la mal·leabilitat d'aquests sistemes permeten als investigadors simular sistemes més complexos, que d'altra manera serien inaccessibles, i explorar nous estats de la matèria que potser ni tan sols existeixen a la natura, essent la seva creació artificial al laboratori l'única forma d'observar-los.

Afortunadament, diversos models teòrics, els models de Bose-Hubbard no estàndard (BHM per les seves sigles en anglès), poden capturar fidelment les complexitats dels sistemes esmentats. Per aquest motiu, la investigació dels BHM no estàndard en el context dels simuladors quàntics atòmics és crucial per a l'avenc del camp, tant des d'una perspectiva teòrica com experimental.

La implementació de xarxes òptiques a la dècada del 2000 va impulsar l'expansió inicial de la investigació sobre els BHM no estàndard, que des de llavors ha continuat desenvolupant-se ràpidament. Ara bé, han passat deu anys des de l'última revisió sobre el tema, i en aquests temps s'han assolit avenços significatius. De fet, l'extraordinari progrés en l'enginyeria experimental i la caracterització teòrica dels BHM no estàndard ja ha deixat obsoleta la revisió anterior.

Recentment, una col·laboració conjunta entre l'Institut de Tecnologia Indore Índia, l'Institut de Física de la Matèria Condensada i Sistemes Complexos (Politecnich de Torí), l'Institut d'Òptica quàntica i Informació quàntica (Innsbruck), la Universitat d'Innsbruck, l'Institut de Física Teòrica (Universitat Jagielloniana), el centre Mark Kac d'Investigació en Sistemes Complexos (Universitat Jagielloniana), i el **Prof. ICREA de l'ICFO el Dr. Maciej Lewenstein**, ha presentat una revisió actualitzada, publicada a Reports on Progress in Physics. En aquest treball, **han recopilat alguns dels resultats més recents i emocionants sobre la investigació dels models de Bose-Hubbard no estàndard, centrant-se en la seva aplicació en simuladors quàntics atòmics.**

Des d'una perspectiva tant teòrica com experimental, els investigadors analitzen com en aquests sistemes poden emergir estats intrigants de la matèria i efectes mecanoquàntics, descriuen configuracions experimentals recents que utilitzen àtoms ultrafreds i els resultats obtinguts, i especulen sobre els futurs desenvolupaments. "Creiem que **aquesta revisió estableix les bases per a molts més avenços científics que el futur ens portarà**", afirmen els investigadors.

Alguns dels avenços clau inclouen la incorporació d'efectes dissipatius en el mateix lloc (com es perd energia en el sistema a causa de les interaccions) en la descripció teòrica, cosa que la fa més precisa; la implementació experimental d'interaccions de llarg abast i l'exploració del seu impacte en la dinàmica atòmica, fet que ha conduït a noves perspectives en la física.

de molts cossos quantics; i un major control sobre les interaccions entre atoms.

"La quantitat de resultats recents es impressionant", comenten els autors, que creuen que aquesta abundancia d'investigacions reeixides "demostra la importancia central que els models de Hubbard no estandard han tingut, tenen i continuaran tenint per entendre les lleis fonamentals de la natura en la materia condensada i, com s'ha observat recentment, en la fisica d'altres energies i la quimica quantica".

Referencia:

Titas Chanda, Luca Barbiero, Maciej Lewenstein, Manfred J. Mark and Jakub Zakrzewski, Recent progress on quantum simulations of non-standard Bose-Hubbard models. Reports on Progress in Physics (2025).

DOI 10.1088/1361-6633/adc3a7

Agraiments:

L.B. acknowledges financial support within the DiQut Grant No. 2022523NA7 funded by European Union - Next Generation EU, PRIN 2022 program (D.D. 104 - 02/02/2022 Ministero dell'Universita e della Ricerca). M.L. acknowledges support from: ERC AdG NOQIA; Ministerio de Ciencia y Innovation Agencia Estatal de Investigaciones (PGC2018-097027-B-I00/10.13039/501100011033, CEX2019-000910-S/10.13039/501100011033, Plan National FIDEUA PID2019-106901GB-I00, FPI, QUANTERA MAQS PCI2019-111828-2, QUANTERA DYNAMITE PCI2022-132919, Proyectos de I+D+I i Retos Colaboracion i QUSPIN RTC2019- 007196-7); MICIIN with funding from European Union NextGenerationEU(PRTR-C17.11) and by Generalitat de Catalunya; Fundacio Cellex; Fundacio Mir-Puig; Generalitat de Catalunya (European Social Fund FEDER and C RCA program, AGAUR Grant No. 2021 SGR 01452, QuantumCAT U16-011424, co-funded by RDF Operational Program of Catalonia 2014-2020); Barcelona Supercomputing Center MareNostrum (FI- 2022-1-0042); EU Horizon 2020 FET-OPEN OPTologic (Grant No 89974); EU Horizon Europe Program (Grant Agreement 101080086 - NeQST), ICFO Internal i QuantumGaudii project; European Union's Horizon 2020 research and innovation program under the Marie-Skłodowska-Curie grant agreement No 101029393 (STRECH) and No 847648 (La Caixa Junior Leaders fellowships ID100010434: LCF/BQ/PI 9/11690013, LCF/BQ/PI20/11760031, LCF/BQ/PR20/11770012, LCF/BQ/PR21/1184013). L. B. acknowledges financial support within the DiQut Grant No. 2022523NA7 funded by European Union - Next Generation EU, PRIN 2022 program (D.D. 104 - 02/02/2022 Ministero dell'Universita e della Ricerca). M.J.M. acknowledges financial support from a NextGeneration EU Grant AQuSIM through the Austrian Research Promotion agency (FFG) (No. FO999896041), and the Austrian Science Fund (FWF) Cluster of Excellence QuantA (10.55776/COE1). This research was also funded by National Science Centre (P

land) under the OPUS call within the WEAVE programme 2021/43/I/ST3/01142 (J.Z.). A partial support by the Strategic Programme Excellence Initiative at Jagiellonian University as well as that within the QuantEra II Programme that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement No 10101733 DYNAMITE (M.L. and J.Z.).