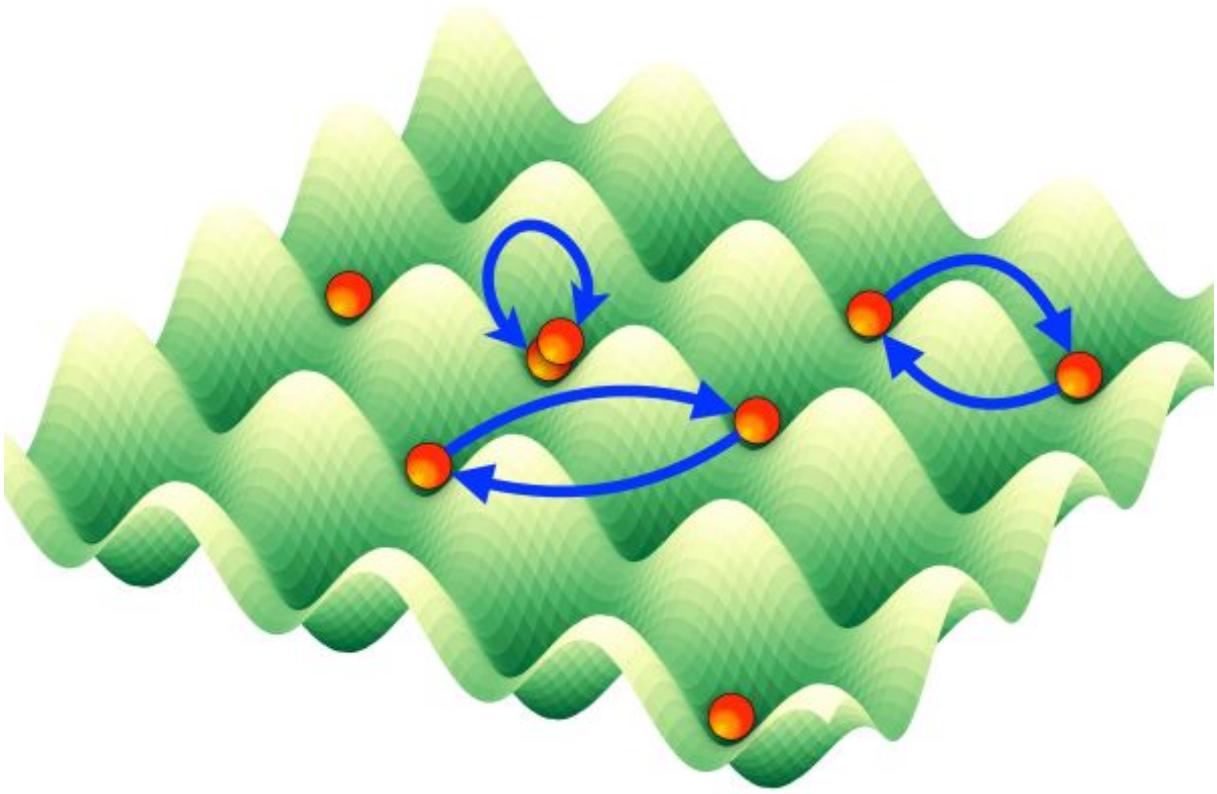


Simulacion cuantica con atomos ultrafrios en interaccion: avances recientes y perspectivas futuras

Un equipo de investigadores ha elaborado una revision actualizada sobre los modelos de Bose-Hubbard no estandar, un marco teorico tipicamente utilizado para describir simuladores cuanticos basados en atomos ultrafrios con diversos tipos de interacciones. Esta revision recopila resultados recientes en el campo y analiza como en estos sistemas pueden emerger estados intrigantes de la materia y efectos mecanico-cuanticos.

March 28, 2025

Los simuladores cuanticos atomicos son tecnologias cuanticas emergentes que han demostrado un enorme potencial para revelar fenomenos novedosos de la mecanica cuantica. Tipicamente, la plataforma experimental de estos simuladores involucra atomos bosonicos a temperaturas ultrafrias. Mediante la creacion de una rejilla de luz con laseres potentes, conocida como red optica, los atomos se organizan en el espacio siguiendo un

patron periodico, ocupando distintos sitios de la red. Sin embargo, en lugar de permanecer aislados, los atomos pueden interactuar de diversas maneras: pueden saltar de un sitio de la red a otro cercano, pueden experimentar atraccion o repulsion con sus vecinos mas proximos en la red, e incluso pueden interactuar con atomos ubicados a mayor distancia mediante las llamadas interacciones de largo alcance, entre otros mecanismos.

La riqueza y la maleabilidad de estos sistemas permiten a los investigadores simular sistemas mas complejos, que de otro modo serian inaccesibles, y explorar nuevos estados de la materia que quiza ni siquiera existan en la naturaleza, siendo su creacion artificial en el laboratorio la unica forma de observarlos.

Afortunadamente, varios modelos teoricos, los modelos de Bose-Hubbard no estandar (BHM, por sus siglas en ingles), pueden capturar fielmente las complejidades de los sistemas mencionados. Por ello, investigar los BHM no estandar en el contexto de los simuladores cuanticos atomicos es crucial para el avance del campo, tanto desde una perspectiva teorica como experimental.

La implementacion de redes opticas en la decada de 2000 impulso la expansion inicial de la investigacion sobre BHM no estandar, que desde entonces ha seguido desarrollandose rapidamente. Sin embargo, han pasado diez anos desde la ultima revision sobre el tema, y en ese tiempo se han logrado avances significativos. De hecho, el extraordinario progreso en la ingenieria experimental y la caracterizacion teorica de los BHM no estandar ya ha dejado obsoleta la revision anterior.

Ahora, una colaboracion conjunta entre el Instituto de Tecnologia Indore Indio, el Instituto de Fisica de la Materia Condensada y Sistemas Complejos (Politecnico de Torino), el Instituto de Optica Cuantica e Informacion Cuantica (Innsbruck), la Universidad de Innsbruck, el Instituto de Fisica Teorica (Universidad Jagiellonia), el centro Mark Kac de Investigacion en Sistemas Complejos (Jagiellonian University), y el **Prof. ICREA de ICFO el Dr. Maciej Lewenstein**, ha presentado una revision actualizada, publicada en Reports on Progress in Physics. En este trabajo, **han recopilado algunos de los resultados mas recientes y emocionantes sobre la investigacion de los modelos de Bose-Hubbard no estandar, centrandose en su aplicacion en simuladores cuanticos atomicos**.

Desde una perspectiva tanto teorica como experimental, los investigadores analizan como en estos sistemas pueden emerger estados intrigantes de la materia y efectos mecanico-cuanticos, describen configuraciones experimentales recientes que utilizan atomos ultrafrios y los resultados obtenidos, y especulan sobre los desarrollos futuros.

"Creemos que **esta revision sienta las bases para muchos mas logros cientificos que el futuro nos traera**", afirman los investigadores.

Algunos de los avances clave incluyen la incorporacion de efectos disipativos en el propio sitio (como se pierde energia en el sistema debido a las interacciones) en la descripcion teorica, lo que la hace mas precisa; la implementacion experimental de interacciones de largo alcance y la exploracion de su impacto en la dinamica atomica, lo que ha llevado a

nuevas perspectivas en la fisica de muchos cuerpos cuanticos; y un mayor control sobre las interacciones entre atomos.
"La cantidad de resultados recientes es impresionante", comentan los autores, quienes creen que esta abundancia de investigaciones exitosas "demuestra la importancia central que los modelos de Hubbard no estandar han tenido, tienen y seguiran teniendo para comprender las leyes fundamentales de la naturaleza en la materia condensada y, como se ha observado recientemente, en la fisica de altas energias y la quimica cuantica".

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

Agradecimientos:
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¿½Retos Colaboracioni¿½ QUSPIN RTC2019- 007196-7); MICIIN with funding rom European Union NextGenerationEU(PRTR-C17.I1) and by Generalitat de Catalunya; Fund cio 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 Ce ter MareNostrum (FI- 2022-1-0042); EU Horizon 2020 FET-OPEN OPTOlogic (Grant No 8997 4); EU Horizon Europe Program (Grant Agreement 101080086 - NeQST), ICFO Inte nal i¿½QuantumGaudii¿½ project; European Union's Horizon 2020 research and in ovation program under the Marie-Sk?odowska-Curie grant agreement No 101029393 (STRE CH) and No 847648 (i¿½La Caixai¿½ Junior Leaders fellowships ID100010434: LCF/BQ/PI 9/11690013, LCF/BQ/PI20/11760031, LCF/BQ/PR20/11770012, LCF/BQ/PR21/1184 013). L. B. acknowledges financial support within the DiQut Grant No. 2022523NA7 funded by European Union - Next Generation EU, PRIN 2022 program (D.D. 104 - 02/02/20 2 Ministero dell'Universit?a e della Ricerca). M.J.M. acknowledges financial su port from a NextGeneration EU Grant AQuSIM through the Austrian Research Promotion gency (FFG) (No. FO999896041), and the Austrian Science Fund (FWF) Cluster of Excel

ence 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 partia 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 Uni n's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement No 101017 33 DYNAMITE (M.L. and J.Z.).