

Image not found

Simulación cuántica con átomos ultrafríos en interacción: avances recientes y perspectivas futuras

Un equipo de investigadores ha elaborado una revisión actualizada sobre los modelos de Bose-Hubbard no estándar, un marco teórico típicamente utilizado para describir simuladores cuánticos basados en átomos ultrafríos con diversos tipos de interacciones. Esta revisión recopila resultados recientes en el campo y analiza cómo en estos sistemas pueden emerger estados intrigantes de la materia y efectos mecánico-cuánticos.

March 28, 2025

Los simuladores cuánticos atómicos son tecnologías cuánticas emergentes que han demostrado un enorme potencial para revelar fenómenos novedosos de la mecánica cuántica. Típicamente, la plataforma experimental de estos simuladores involucra átomos bosónicos a temperaturas ultrafrías. Mediante la creación de una rejilla de luz con láseres potentes, conocida como red óptica, los átomos se organizan en el espacio siguiendo un patrón periódico, ocupando distintos sitios de la red. Sin embargo, en lugar de permanecer aislados, los átomos pueden interactuar de diversas maneras: pueden saltar de un sitio de la red a otro cercano, pueden experimentar atracción o repulsión con sus vecinos más próximos en la red, e incluso pueden interactuar con átomos 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 más complejos, que de otro modo serían inaccesibles, y explorar nuevos estados de la materia que quizá ni siquiera existan en la naturaleza, siendo su creación artificial en el laboratorio la única forma de observarlos.

Afortunadamente, varios modelos teóricos, los modelos de Bose-Hubbard no estándar (BHM, por sus siglas en inglés), pueden capturar fielmente las complejidades de los sistemas mencionados. Por ello, investigar los BHM no estándar en el contexto de los simuladores cuánticos atómicos es crucial para el avance del campo, tanto desde una perspectiva teórica como experimental.

La implementación de redes ópticas en la década de 2000 impulsó la expansión inicial de la investigación sobre BHM no estándar, que desde entonces ha seguido desarrollándose rápidamente. Sin embargo, han pasado diez años desde la última revisión sobre el tema, y en

ese tiempo se han logrado avances significativos. De hecho, el extraordinario progreso en la ingeniería experimental y la caracterización teórica de los BHM no estandar ya ha dejado obsoleta la revisión anterior.

Ahora, una colaboración conjunta entre el Instituto de Tecnología Indore India, el Instituto de Física de la Materia Condensada y Sistemas Complejos (Politécnico de Torino), el Instituto de Óptica Cuántica e Información Cuántica (Innsbruck), la Universidad de Innsbruck, el Instituto de Física Teórica (Universidad Jagiellonia), el centro Mark Kac de Investigación en Sistemas Complejos (Jagiellonian University), y el **Prof. ICREA de ICFO el Dr. Maciej Lewenstein**, ha presentado una revisión actualizada, publicada en Reports on Progress in Physics. En este trabajo, **han recopilado algunos de los resultados más recientes y emocionantes sobre la investigación de los modelos de Bose-Hubbard no estandar, centrándose en su aplicación en simuladores cuánticos atómicos.**

Desde una perspectiva tanto teórica como experimental, los investigadores analizan cómo en estos sistemas pueden emerger estados intrigantes de la materia y efectos mecánico-cuánticos, describen configuraciones experimentales recientes que utilizan átomos ultrafríos y los resultados obtenidos, y especulan sobre los desarrollos futuros.

"Creemos que **esta revisión sienta las bases para muchos más logros científicos que el futuro nos traera**", afirman los investigadores.

Algunos de los avances clave incluyen la incorporación de efectos disipativos en el propio sitio (como se pierde energía en el sistema debido a las interacciones) en la descripción teórica, lo que la hace más precisa; la implementación experimental de interacciones de largo alcance y la exploración de su impacto en la dinámica atómica, lo que ha llevado a nuevas perspectivas en la física de muchos cuerpos cuánticos; y un mayor control sobre las interacciones entre átomos.

"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 seguirán teniendo para comprender las leyes fundamentales de la naturaleza en la materia condensada y, como se ha observado recientemente, en la física de altas energías y la química cuántica".

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'Università 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 i½Retos Colaboracioni½ 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 i½QuantumGaudii½ project; European Union's Horizon 2020 research and innovation program under the Marie-Skłodowska-Curie grant agreement No 101029393 (STRECH) and No 847648 (i½La Caixa½ Junior Leaders fellowships ID100010434: LCF/BQ/PI9/11690013, 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'Università 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 (Poland) 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.).