SELF-ORGANIZATION AND SYNTHETIC GAUGE FIELD FOR ULTRA-COLD BOSONS FROM ATOM-PHOTON INTERACTION INSIDE A CAVITY

POORNIMA SHAKYA

Department of Physics
Indian Institute of Technology, Delhi

July 2023

SELF-ORGANIZATION AND SYNTHETIC GAUGE FIELD FOR ULTRA-COLD BOSONS FROM ATOM-PHOTON INTERACTION INSIDE A CAVITY

by

POORNIMA SHAKYA
DEPARTMENT OF PHYSICS

Submitted
in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy
to the

Department of Physics
Indian Institute of Technology, Delhi

July 2023

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled, "**Self-organization and synthetic gauge field for ultra-cold bosons from atom-photon interaction inside a cavity",** submitted by **Ms. Poornima Shakya,** to the Department of Physics, Indian Institute of Technology Delhi, for the award of degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of bonafide research work carried out by her under my supervision. She has fulfilled the requirements for the submission of the thesis, which to the best of our knowledge has reached the required standard. The results obtained in this thesis have not been submitted in part or full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

Prof. Sankalpa Ghosh
Department of Physics
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi - 110016, India

Date: 31-01-2023

Dedicated to my loving family...

Abstract

We investigate the self-organization of a condensate of ultra-cold bosons trapped in a linear cavity illuminated by a two-pump configuration making different angles with the cavity axis. We demonstrate that our proposed pump-cavity configuration provides a smooth transition from a one-dimensional to a two-dimensional cavity-generated optical lattice potential that arises from the dipole interaction between the atoms and the cavity photons. The critical cavity-pump detuning required to transition from a normal phase to a superradiant phase is obtained using a Holstein-Primakoff approximation. Our calculations resemble a Dicke-like phase transition under the limiting case of equal and orthogonal pump angles. The superradiant phase sees a sudden rise of cavity photon number accompanied by simultaneous self-organization of the atoms in lattice supersolid phases, confirmed by the atomic density profiles plotted in the normal and the superradiant regime. We also obtain the extended Bose-Hubbard model from the microscopic Hamiltonian of the system, and the resulting nearest-neighbour, on-site, and long-range interaction parameters give us a qualitative understanding of the emergent self-organized superradiant phases. We also identify the underlying symmetries of the Hamiltonian, which are spontaneously broken across the superradiant phase transformation and study the effect of the dimensional crossovers on the collective excitation spectrum of the atomic and the photonic fluctuations.

We also explore another single atom-ring cavity system which can generate an atomic analogue of the snake state trajectories of electrons encountered in condensed matter experimental systems such as two-dimensional electron gas and graphene p-n junctions, to name a few. The atom interacts with the running wave modes of the ring cavity to give rise to a complex Rabi frequency that accounts for the appearance of geometric gauge potentials and the corresponding synthetic gauge fields. We examine the atom's motion in such spatially varying magnetic fields representing electronic snake states' atomic analogue. The real-time observation and non-demolition measurements of the atom dynamics are carried out through the output cavity photons, which depend on the atom's position inside the cavity. Tuning the atom-photon coupling strength, the external pumping strength, the initial velocities of the atom and the cavity backaction via atom-photon coupling allow us to change the properties of these atomic trajectories. These atomic trajectories can be used for the

loss-less transport of ultracold atoms to long distances, which can have a wide range of applications in quantum computing and atomtronics.

शोध सार

हम गुहा अक्ष के साथ अलग-अलग कोण बनाते हुए दो-पंप विन्यास द्वारा प्रकाशित एक रैखिक गुहा में फंसे अल्ट्रा-ठंडे बोसोन के संघनन के स्व-संगठन की जांच करते हैं। हम प्रदर्शित करते हैं कि हमारा प्रस्तावित पंप-गुहा विन्यास एक-आयामी से दो-आयामी गुहा-जनित ऑप्टिकल जाली क्षमता में एक सहज संक्रमण प्रदान करता है जो परमाणुओं और गुहा फोटॉन के बीच द्विध्रुवीय संपर्क से उत्पन्न होता है। सामान्य चरण से सुपररेडियंट चरण में संक्रमण के लिए आवश्यक महत्वपूर्ण कैविटी-पंप डिट्यूनिंग को होल्स्टीन-प्रिमाकॉफ़ सन्निकटन का उपयोग करके प्राप्त किया जाता है। हमारी गणना समान और ऑर्थोगोनल पंप कोणों के सीमित मामले के तहत डिकी-जैसे चरण संक्रमण से मिलती जुलती है। सुपररेडिएंट चरण में जाली सुपरसॉलिड चरणों में परमाणुओं के एक साथ स्व-संगठन के साथ गुहा फोटॉन संख्या में अचानक वृद्धि देखी जाती है, जिसकी पुष्टि सामान्य और सुपररेडिएंट शासन में प्लॉट किए गए परमाणु घनत्व प्रोफाइल द्वारा की जाती है। हम सिस्टम के सूक्ष्म हैमिल्टनियन से विस्तारित बोस-हबर्ड मॉडल भी प्राप्त करते हैं, और परिणामी निकटतम-पड़ोसी, ऑन-साइट और लंबी दूरी के इंटरैक्शन पैरामीटर हमें उभरते स्व-संगठित सुपररेडिएंट चरणों की गुणात्मक समझ देते हैं। हम हैमिल्टनियन की अंतर्निहित समरूपताओं की भी पहचान करते हैं, जो सुपररेडियंट चरण परिवर्तन में स्वचालित रूप से टूट जाती हैं और परमाणु और फोटोनिक उतार-चढ़ाव के सामूहिक उत्तेजना स्पेक्ट्रम पर आयामी क्रॉसओवर के प्रभाव का अध्ययन करते हैं।

हम एक अन्य एकल परमाणु-रिंग गुहा प्रणाली का भी पता लगाते हैं जो संघनित पदार्थ प्रायोगिक प्रणालियों जैसे कि दो-आयामी इलेक्ट्रॉन गैस और ग्राफीन पी-एन जंक्शनों में पाए जाने वाले इलेक्ट्रॉनों के साँप राज्य प्रक्षेपवक्र का एक परमाणु एनालॉग उत्पन्न कर सकता है। परमाणु एक जटिल रबी आवृत्ति को जन्म देने के लिए रिंग गुहा के चलने वाले तरंग मोड के साथ बातचीत करता है जो ज्यामितीय गेज क्षमता और संबंधित सिंथेटिक गेज क्षेत्रों की उपस्थिति के लिए जिम्मेदार होता है। हम इलेक्ट्रॉनिक साँप राज्यों के परमाणु एनालॉग का प्रतिनिधित्व करने वाले ऐसे स्थानिक रूप से भिन्न चुंबकीय क्षेत्रों में परमाणु की गति की जांच करते हैं। परमाणु गतिशीलता का वास्तविक समय अवलोकन और गैर-विध्वंस माप आउटपुट कैविटी फोटॉन के माध्यम से किया जाता है, जो गुहा के अंदर परमाणु की स्थिति पर निर्भर करता है। परमाणु-फोटॉन युग्मन शक्ति, बाहरी पंपिंग शक्ति, परमाणु के प्रारंभिक वेग और परमाणु-फोटॉन युग्मन के माध्यम से गुहा बैकएक्शन को ट्यून करने से हमें इन परमाणु प्रक्षेप पथों के गुणों को बदलने की अनुमति मिलती है। इन परमाणु प्रक्षेप पथों का उपयोग लंबी दूरी तक अल्ट्राकोल्ड परमाणुओं के हानि-रहित परिवहन के लिए किया जा सकता है, जिसमें क्वांटम कंप्यूटिंग और एटमट्रॉनिक्स में अनुप्रयोगों की एक विस्तृत श्रृंखला हो सकती है।

PUBLICATIONS

1. **Poornima Shakya**, Amulya Ratnakar and Sankalpa Ghosh,
   "Dimensional crossover in self-organised super-radiant phases of ultra cold atoms inside a cavity", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 56 035301 (2023)

2. **Poornima Shakya**, Nishant Dogra and Sankalpa Ghosh,
   "Generation, manipulation and detection of snake state trajectories of a neutral atom in a ring-cavity", arXiv:2002.11926v1, (manuscript communicated)

3. **Poornima Shakya**, and Sankalpa Ghosh,
   "Collective excitations in superradiant phases of ultra cold atoms inside a cavity", (to be submitted)

Turns out, not where, but who
you're with that really matters.

— Anonymous

ACKNOWLEDGEMENTS

This thesis was only possible with the support of many people. I want to thank all those who have been instrumental in making this thesis possible.

I would first like to express my deepest gratitude to my loving family for encouraging me to pursue my academic goals and being my moral support throughout this journey.

I would like to acknowledge and thank my thesis supervisor, Prof. Sankalpa Ghosh, for introducing me to the field of ultracold atoms. I have benefited greatly from your wealth of knowledge and meticulous editing.

I would also like to thank my SRC committee members, Prof. Rahul Marathe, Prof. V. Ravishankar, Prof. Sanjay Puri, and Prof. K. Thyagarajan, for their valuable comments on the research work presented in this thesis.

I also express my gratitude to Dr Nishant Dogra for his insightful discussions for the fifth chapter of this thesis work. It has been a pleasure to work with and learn from him.

I would also like to thank my labmates, Shahrukh Salim, Amulya Ratnakar, Partha Sarathi Banerjee, and Neha Kumari, for their support. I would also like to thank my senior, Puja Mondal, for her motivation and support, which made things easier for me.

Finally, I would like to acknowledge the financial support provided by UGC, Govt. of India and BRNS (DAE, Govt. of India) Grant No. 21/07/2015-BRNS/35041 (DAE SRC Outstanding Investigator scheme).

CONTENTS