

機関番号： 82401

研究種目： 研究活動スタート支援

研究期間： 2010～2010

課題番号： 22840051

研究課題名（和文）

冷却原子気体で実現する量子系のフェルミ・パスタ・ウラムの再帰現象

研究課題名（英文） Quantum Fermi-Pasta-Ulam recurrence in ultracold atomic gases

研究代表者

段下 一平 (DANSHITA IPPEI)

独立行政法人理化学研究所・柚木計算物性物理研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号： 90586950

研究成果の概要（和文）：

Fermi, Pasta, and Ulam (FPU)の再帰現象は古典力学的な一次元非線形格子模型の数値実験から発見され、その発見がさらにはソリトンの発見やカオス理論の発展に繋がったように、非線形物理学の礎となっている。にもかかわらず、実際の実験における観測は非常にまれである。本研究では、光格子中の一次元ボース気体の実験において、FPUの再帰現象が実現可能であることを提案した。さらに、量子揺らぎによってFPU振動が顕著に減衰することを見いだした。

研究成果の概要（英文）：

The Fermi-Pasta-Ulam recurrence has been a foundation of the nonlinear physics in the sense that the pursuit of the understanding of the FPU recurrence led to the discovery of “solitons” and the development of chaos theory. Nevertheless, experimental observation of the FPU recurrence is very rare. In this work, we proposed that the FPU recurrence can be actually observed in experiments with one-dimensional Bose gases confined into an optical lattice. Moreover, we showed that strong quantum fluctuations cause significant damping of the FPU oscillation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,250,000	375,000	1,625,000
年度			
総計	1,250,000	375,000	1,625,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：フェルミ・パスタ・ウラムの再帰現象、冷却原子気体、光格子、ボース・アインシュタイン凝縮、エルゴード性、非線形シュレーディンガー方程式、ボース・ハバード模型

1. 研究開始当初の背景

2006年に Kinoshita らが、「点接触型の二体相互作用ポテンシャルをもつ一次元ボース気体」という可積分系に非常に近い量子多体系を冷却原子気体の実験で実現し、その系で非エルゴード的なダイナミクスを初めて観測した。この実験は、可積分性と熱平衡化の関係という統計力学の基本的な問題を改めて問い直す契機となり、最近この問題に関する理論研究が盛んになってきていた。

一方、非可積分系においても非エルゴード的な運動が起こりうる代表例として、「Fermi-Pasta-Ulam (FPU)の再帰現象」がよく知られている。FPUは、非線形一次元格子モデルにおいて、最低エネルギーの固有モードだけにエネルギーが励起されているという初期条件に対する時間発展を調べ、次のような結果を得た。時間が経つにつれて最低エネルギーの固有モードのエネルギーは他のモードに分配され、熱平衡化に向かっているように見える。しかし、さらに時間が経過すると初期のモードにほぼ全てのエネルギーが戻ってしまい、この運動は熱平衡化に向かわないことが示された。この反直感的な現象を理解しようとする試みがソリトンの発見やカオス理論の発展に繋がるといったように、FPU現象の発見は非線形物理学という一大分野を築くに至った。これほどまでに重要な現象であるにもかかわらず、FPU現象を(数値実験でなく)観測する実験研究は非常にまれであり、我々は冷却原子気体の制御性を活かしてFPU現象を実験で実現するアイデアを模索していた。

2. 研究の目的

本研究では、光格子中に閉じ込められた冷却原子系の実験でFPUの再帰現象を実現できると提案することを目的とした。さらに、FPU現象に対する量子揺らぎの効果を調べることも目指した。光格子中の冷却原子気体の実験では、光格子の深さを変えることで量子揺らぎの強さ(すなわち系の実効的なプランク定数)を思いのままに制御することができるので、このFPU問題の量子力学系への拡張もまた実験で実現可能な提案であった。量子揺らぎが強いときには、超流動-絶縁体量子相転移や巨視的量子トンネル効果による超流動流の崩壊などの古典場では起こりえない質的に新しい現象が現れることがよく知られており、FPU現象においても量子揺らぎの影響による興味深い効果が見つかる可能性が高いと考えられた。

3. 研究の方法

具体的には、光格子中の一次元ボース気体を考えた。この系は一次元ボース・ハバード模型という量子力学的な格子模型で定量的に記述されることが知られている。この模型の古典極限においては、ボソン場演算子は超流動秩序変数という古典場に置き換えられ、その古典場は離散的非線形シュレーディンガー方程式(discrete nonlinear Schrödinger equation)なのでDNLSEと略すという一次元非線形格子模型に従う。古典極限においては、このDNLSEの時間発展をRunge-Kutta法で数値的に解析した。一方、量子揺らぎを完全に取り入れた計算には、Time-evolving block decimation (TEBD)法という最先端の数値計算手法を駆使し、ボース・ハバード模型の量子実時間発展を厳密に解析した。

4. 研究成果

我々は、ある条件のもとで DNLSE が FPU の非線形格子模型に一致することを示し、実際に、一様な DNLSE の数値シミュレーションから、DNLSE 系においても FPU の再帰現象が起こることを発見した。その FPU の再帰現象が起こりうるパラメータ領域を特定した。量子力学的領域における FPU 現象の研究のために、我々はまず TEBD 法を拡張し、サイトあたりの粒子数が非常に大きいときにも使えるようにした[発表論文 (1)]。この拡張された TEBD 法による解析から、FPU 振動が量子揺らぎによって顕著に減衰することを見いだした。興味深いことに、この減衰のあとでも、系はなお準安定状態にとどまり熱平衡状態に達しないこともわかった。上記の成果を American Physical Society March meeting と日本物理学会年次大会で発表し、また論文にまとめ Physical Review Letters 誌に投稿し現在査読中である (preprint は発表済み。arXiv:1012.4159, I. Danshita, R. Hipolito, V. Oganesyan, and A. Polkovnikov)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

①『Stability of superflow in supersolid phases of lattice bosons with dipole-dipole interaction』, D. Yamamoto and I. Danshita, Journal of Physics: Conference Series 273, 012020 (2011). 査読有

②『Accurate numerical verification of the instanton method for macroscopic quantum tunneling: dynamics of phase slips』, I. Danshita and A. Polkovnikov, Physical Review B 82, 094304 (2010). 査読有

[学会発表] (計 6 件)

①「光格子中のボース気体における Fermi-Pasta-Ulam の再帰現象に対する量子効果」, 段下一平, R. Hipolito, V. Oganesyan, and A. Polkovnikov, 『日本物理学会年次大会』、岡山大学 (岡山)、2011 年 3 月 26 日

②『Quantum effects on Fermi-Pasta-Ulam recurrence in ultracold lattice bosons』, I. Danshita, R. Hipolito, V. Oganesyan, and A. Polkovnikov, American Physical Society March Meeting, Dallas Texas, USA, March 22nd 2011.

③『Stability and critical velocity of dipolar bosons in a moving optical lattice』, I. Danshita and D. Yamamoto, ERATO Macroscopic quantum control conference on ultracold atoms and molecules, Tokyo, Japan, January 24th 2011.

④『Transport and macroscopic quantum tunneling of one-dimensional Bose gases in an optical lattice』, I. Danshita, C. W. Clark, and A. Polkovnikov, New Development of Numerical Simulations in Low-Dimensional Quantum Systems: From Density Matrix Renormalization Group to Tensor Network Formulations, Kyoto, Japan, October 28th 2010.

⑤「一次元ボース・ハバード系における超流動-絶縁体転移とインスタントンの関係」, 段下一平, A. Polkovnikov, 『日本物理学会秋季大会』、大阪府立大学 (堺)、2010 年 9 月 26 日

⑥「光格子中における一次元ボース気体の超流動」, 段下一平, 『日本物理学会秋季大会』、大阪府立大学 (堺)、2010 年 9 月 25 日 (招待講演)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

段下 一平 (DANSHITA IPPEI)
独立行政法人理化学研究所・柚木計算物性物
理研究室・基礎科学特別研究員
90586950

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者