

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654131

研究課題名(和文) 冷却原子気体を用いた量子可積分系の非平衡過程に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental studies of non-equilibrium dynamics of quantum integrable systems using ultra-cold atomic gases

研究代表者

木下 俊哉 (Kinoshita, Toshiya)

京都大学・人間・環境学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80452259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：冷却されたボース気体を光格子中に閉じ込めて1次元系にすれば、近似的に量子可積分系とみなせる系が生成できる。この系において、可積分性を崩す1次元系間のトンネリングレートを調整することにより、非平衡過程の観測と制御が可能となる。本研究では、古典的近可積分系に対して構築されてきたKAM理論による重要な概念や結果が、実際の量子多体系ではいかに拡張されていくのかを解明することを究極の目標とし、そのための基礎的かつ予備的な実験を行った。

研究成果の概要(英文)：1D Bose gases constructed by ultra-cold atoms in optical lattices are quantum integrable systems. Adjusting the tunneling rate between the 1D Bose systems, one can observe and control non-equilibrium dynamics. Important concepts and models included in the KAM theory have been successfully applied for classical, nearly integrable systems. Preliminary experiments with cold Bose gases were done, eventually to clarify how the classical theory and model will be modified for integrable quantum many-body systems.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学

キーワード：ボース・アインシュタイン凝縮 光格子 1次元系 非平衡 可積分系

### 1. 研究開始当初の背景

量子系における非平衡過程、特に熱平衡から遠く離れた状態からの緩和過程は、解明すべき物理の難題として現在まで残されたままである。古典系における理論研究はあるものの、非平衡状態にある量子多体系の緩和過程の研究に関しては、実験研究はほとんどなかった。その一方、操作性に優れ、直接の可視化が可能な冷却原子気体を用いて、可積分系や近可積分系が生成できるようになり、量子非平衡ダイナミクスの実験研究が行える状況になってきた。

### 2. 研究の目的

本研究の当初の目的は、量子(近)可積分系とみなせる1次元ボース気体を生成し、これを熱平衡から遠い非平衡な運動量状態下に置く。可積分性を崩すことになる1次元系間のトンネリングを制御しながら緩和過程の詳細を調べ、古典的な近可積分系で構築されているKAM理論による重要な概念や結果が、量子系ではいかに拡張されていくのか、あるいはどのような差異があるのかなどを解明することであった。

### 3. 研究の方法

ボース凝縮した原子気体を2次元光格子内に誘導して閉じ込め、量子可積分系とみなせる1次元ボース気体を作り、非平衡な運動量状態下に置く。そこへ緩和を導きうる非可積分項である1次元系間のトンネリングを印加する。トンネリングがなければ保持し続けたはずの初期の運動量分布が、トンネリングレート of 強弱を制御し、運動量分布の変化を調べることを基本とする。これにむけて、  
 1) 可積分性を崩す1次元系間のトンネリングによる結合を2種類の手法で制御  
 2) 運動量分布の時間発展を詳細に追うため、精密な運動量分布の測定系の構築  
 3) トンネリングにより結合する1次元系の数の制限。これは、運動量分布に再帰現象のようなものが観測される可能性があり、そのためには結合した1次元系の数が少ない方が適しているためである。

### 4. 研究成果

研究を開始したH24年度の途中、BEC生成に不可欠な光双極子トラップ用ファイバーレーザーが故障し、ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が生成できない状況となった。冷却原子気体による1次元系はBECの生成を基盤としているため、BECのリカバーに向けてかなりの時間と精力を費やさざるを得なくなった。BECはその後、H25年度の冬に、2重光双極子トラップ中で蒸発冷却を行う手法を新たに開発し、約4秒の蒸発冷却で $10^6$ 個のBECを生成することに成功した(論文は投稿準備中)。全光学的手法によるBEC生成としては、画期的とも言える個数と時間であり、レーザー故障前より

も遥かに効率のよい形でBECはリカバーできた。しかしながら、時間的ロスはあまりに大きく、当初の計画通りに研究を進めることはできなかった。

BECの回復後は、凝縮した原子気体を2次元青方離調光格子内に断熱的に誘導し、2次元アンチドット型光格子を生成した。アンチドット型光格子では、ポテンシャル極小が多重に連結しており、基本的には原子は局在しないはずである。ところが、ビーム強度が極めて強い場合には、連結部分の筋状の通路にあたる部分は、トラップの閉じ込めは極めてタイトになり、仮に局在したとすると、不確定性によりこの部分の原子は周囲に比べて高いエネルギー状態になる。そのため原子は、閉じ込めが比較的緩くなる筋状の通路が交差しあうカusp状の部分に集まり、縦方向(本紙面に垂直な方向)にはチューブ状に伸びる。これは、当初計画していた1次元系とは異なるが、擬似的に1次元系とみなせる可能性があり、ビーム強度により連結部分の原子の通過を制御し、1次元系間にトンネリングとは異なる別のカップリングの手法の開拓につながりうる(下の図1参照)。

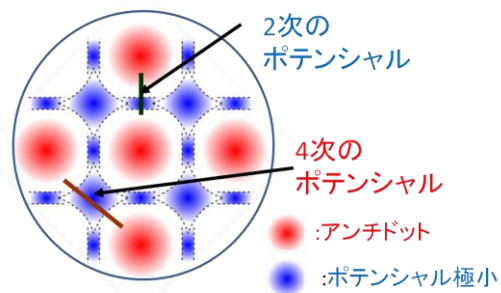


図1

実際の実験では、原子波干渉パターンの消失という形で、マクロなコヒーレンスを失われていることが分かった。ポテンシャル極小は多重連結しているものの実質的には移動できず、上記のカusp状の中心部に原子が局在していることを示唆する結果が得られた。また、パラメトリック共鳴法を用いて、同様に局在の可能性を調べた。すると、アンチドット型ではなく通常の2次元光格子によって生成された1次元系で観測された共鳴周波数の箇所には共鳴は見られず、ずっと低い周波数の所で共鳴に似た現象を観測した。これには、アンチドット型内で原子が局在していると予想される交差領域の形状が、結果に反映されていると考えている。通常の光格子による1次元系では、トラップ形状は等方的な調和型である2次であり、1次元軸方向以外はタイトなトラップで、パラメトリック共鳴励起が効率よく起こる。一方、アンチドット型で局在が起こると予想されるカusp部では、非調和型の4次関数であり、底付近では比較的緩く、しかもトラップは非等方的で、抜け道(ただし不確定性に伴うエネルギー上

昇により、途中でブロックされる) さえある状態である (図 1 参照)。従って、周波数は下がり、かつ不明瞭になる可能性が高い。局在場所をより確定させるには、今後、ブラッグ散乱などの手法が必要であると考えている。また、グロス・ピタエフスキー (G P) 方程式に基づく数値計算と比較し、系内で何が起きているのか、局在場所の予測を理論面から突き詰めていくことも必要であり、現在、理論グループとの共同研究を進めている。アンチドット内で局在した系が、どの程度“1次元性”を有しているのかなどの定量的な評価や、その制御の手法の開拓にまでは至っていない。

トンネリング (より広くは1次元系間のカップリング) の制御には、光格子ビーム強度の強弱の調整のほか、光定在波を作るための折り返しミラーをピエゾ素子で前後に高速で揺らすという、主に2つの方法が存在する。前者の手法は、ビーム強度の調整で行えるので簡単であり、これまでも利用してきた。後者の方法の有意性を調べるため、本研究では、光定在波用折り返しミラーに接着したピエゾ素子を使い、光格子系全体を高速で振動させるシステムを作った (右の図 2 参照。図中の P Z A はピエゾ素子を表わす)。

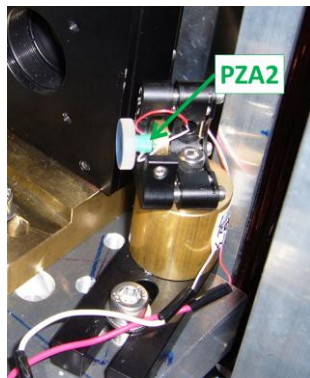


図 2

光格子のシェイキングのデモンストラーションとして、アンチドット型格子系全体の高速振動を行った。結果、ある臨界速度以上では、アンチドット格子内で量子渦生成によって超流動性が崩壊する現象などを観測したが、振動速度は 3 kHz、70 nm 程度の振動振幅が技術的に限界であった。光格子の高速振動の手法は、通常の2次元光格子による1次元系にも応用する予定であり、そこではもう少し速度を上げて揺らすことも可能にしたい。現在では、5 kHz、数 100 nm まで高速対応できるようピエゾ+ミラー系のレスポンスを改良した。これより1次元系での可積分性を崩す系間のトンネリング制御の実験へと進む予定である。

古典的な K A M 理論が量子系にまで適用できるとすれば、フェルミ= Pasta = ウーラム (F P U) の数値実験で見られるような、結合した1次元系における再帰現象が観測されうる (トンネリングで結合した1次元系が、必ずしも F P U 問題の系と物理的に正確に1対1対応しているわけではない)。ただし、観測可能な程度に短い時間で再帰現象を観測するには、互いにカップルしている1次

元系の数を少数個 (例えば5個程度) に制限する必要がある。そこで2本の青方離調したビームを小さな角度 (可変) を付けて交差させ、“アコーディオン型光格子”を形成し、これを B E C に新たに照射できるビームラインを構築した。これにより、アコーディオン型光格子に挟まれたごく狭い領域にある1次元系のみを、トンネリングにより結合させ、それ以外の領域にある1次元系は、アコーディオン格子のアンチトラップ壁により排除される。カップルした1次元系の数を、ごく少数に限定できるようにシステムを改良した。F P U 再帰現象に限らず、非平衡過程では、結合した系の数が重要なパラメータとなる場合もある。より観測に適したシステムが構築できたことになる。

B E C のリカバー後は、凝縮原子気体の安定供給が可能となった。1次元ボース系としては、アンチドット型光格子中で局在した擬似的な1次元系のほか、通常の2次元光格子で形成できる1次元系をメインに、実験を進める。上記した一連の手法と現在開発中のラマン遷移による運動量分布の精密測定系を組み合わせ、当初計画していた1次元の非平衡系のダイナミクスの研究を引き続き進めていく。

## 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 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 木下俊哉、「非平衡1次元ボース気体」(招待講演)、基礎物理学研研究会「非平衡系の物理 – その普遍的理解を目指して」、2012年8月4日、京都大学基礎物理学研究所
- ② 山下和也、安藤明博、酒徳唱太、澤剛生、木下俊哉、「アンチドット型光格子中における原子のコヒーレンス」(口頭発表)、日本物理学会秋季大会 2012年9月19日、横浜国立大学 (常盤台キャンパス)
- ③ 山下和也、安藤明博、花咲晃平、酒徳唱太、木下俊哉、「2次元青色離調光格子中におけるボース気体の相図の探索」(口頭発表)、日本物理学会秋季大会 2013年9月26日、徳島大学 (三島キャンパス)
- ④ 花咲晃平、山下和也、安藤明博、酒徳唱太、音石遥、金光浩志、木下俊哉、「2重光双極子トラップによる BEC の生成」(口頭発表)、日本物理学会第 69 回年次大会 2014年3月28日、東海大学 (平塚キャンパス)
- ⑤ 山下和也、安藤明博、酒徳唱太、花咲晃平、音石遥、金光浩志、木下俊哉、「青色離調2次元光格子中における Rb 原子気体のダイナミクス」(口頭発表)、日本物理学会第 69 回年次大会 2014年3月28日、東海大学 (平塚キャンパス)

[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

<http://www.amo.phys.jinkan.kyoto-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木下 俊哉 (KINOSHITA TOSHIYA)  
京都大学 大学院人間・環境学研究科  
准教授  
研究者番号：80452259

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：