

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610125

研究課題名(和文) アンチドット型光格子中のボース凝縮体による量子乱流の生成

研究課題名(英文) Quantum Turbulence of BEC in Anti-dot optical lattices

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を2次元アンチドット型光格子内に誘導し、光格子全体を正弦波的に振動させる、あるいは逆に静止した格子内でBEC自体を一定速度でドラッグさせて、超流動性の安定性を調べた。ドットが低い場合、ブロッホ端の半分の速度を超えると、格子の周期性に起因する大きな波数をもつ励起が生成した。ドットが高い場合は、より小さい速度で低波数の励起がまず起こり、次に低ドットの場合に見られた励起が同じ速度のところで現れることがわかった。現時点では、前者が動的不安定性、後者がエネルギー不安定性で、BECを崩壊させる2つの機構が共存した形になっていると考えている。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the onset of dissipation of BEC in sinusoidally shaken Anti-dot optical lattices (ADL). The dissipation can be monitored in matter wave interference patterns, where excitations with a particular wavenumber are manifested as different spots or distributions. At low lattice heights, excitations with the wavenumber corresponding to a lattice period is generated when the shaken velocity exceeds a half of Bloch velocity. At larger heights, excitation with a smaller wavenumber is first created at lower velocities. BEC is destroyed by either of these excitations. The same things can be observed clearly by dragging BEC at constant velocities in ADL. At the moment, we attribute the former and the latter to dynamical instability and energetic instability, respectively.

研究分野：数物系科学

キーワード：ボース・アインシュタイン凝縮 アンチドット型光格子 動的不安定性 超流動 量子渦

1. 研究開始当初の背景

量子乱流に関する研究は、エネルギースペクトルなどマクロな物理量に現れる普遍的な定数や統計則を調べ、それらを渦系のタングルによるものとした数値解析によって理解するというスタイルであった。乱流現象の本質を捉え、古典乱流にはない量子性の効果を見出すには、渦が引き起こす様々な素過程を詳細に観測する必要があり、それには渦系を可視化し、乱流を適度に制御できなければならない。

系全体が量子性を有志し、さらに精密な制御と操作性、現象の可視化という特徴を併せ持つ冷却原子気体では、こうした実験研究が実行できる可能性がある。実際、量子渦の生成、観測なども行われており、これらが絡み合った量子乱流の実験も始められつつある。

2. 研究の目的

ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)した冷却原子気体を2次元アンチドット型光格子内に誘導する。高い柱状のドット内には原子は入り込めないため多数の穴が生じるが、エネルギー極小は多重連結しており、気体全体はBECの特質であるマクロなコヒーレンスを維持している。この光格子系全体を高速で振動させる、あるいは静止した光格子内でBECをドラッグさせて、量子渦を生成させる。さらに、アンチドットという特異な幾何学的構造を利用し、量子渦を渦系として適度に安定化させ、量子渦の時間発展を追いかける。本研究では、量子渦の生成のみならず、渦の安定化および量子乱流の素過程の制御と観測を、当初の目的としていた。

3. 研究の方法

本研究ではまず、アンチドット型光格子内を流れるBECの安定性、超流動性の崩壊、そして、量子渦が生成されるのかを調べた。手法としては、 ^{87}Rb 原子のボース凝縮体(BEC)を 10^6 個生成し、それを二次元アンチドット型光格子というエネルギー極小が多重連結した空間内へ誘導する。そして、光格子全体を正弦波的に数回振動させる、あるいは静止した光格子内でBEC自体をドラッグさせ、直後の運動量分布の変化を観測することを主に行った。

これまでに行っていた、振動後に光格子を切って3次元トラップ内で気体を熱化させ、非凝縮成分を測定する実験によると、振動の最大速度がある臨界速度以上に達すると、非凝縮成分の割合が急激に上昇し、凝縮体の散逸が始まるということがわかっている。ただ、50回程度振動させた後であり、さらに途中の過程がよくわかっていない熱化後の測定であったため、正確な臨界速度の値やそれらがアンチドットの高さによってどのように変化するのかなど、散逸の詳細な機構など未解決な点も多かった。また、臨界速度は明瞭に存在するものの、量子渦の観測には至って

おらず、散逸の開始が量子渦生成ではなく、別の機構による可能性も考えられた。そこで、本研究では、振動直後にトラップを切って原子を開放し、原子波干渉パターンを観測から運動量分布を直接観測する手法に切り替えた。さらに振動回数も、数回程度に減らした。散逸の原因として、何らかの励起がBEC内に生成されたと考え、運動量分布の変化をより直接的に観測する方針に切り替えた。

4. 研究成果

以下、年度ごとに結果を説明する。

H26年度は、まず光格子系を振動させるシステムの改良を行った。光格子系全体の振動には、光格子ビームの定在波を作るための折り返しミラーが付随しているピエゾ素子に、振動電圧を加えて行う。振動の最大速度は振幅と周波数の積で決まり、これまでは振幅の限界値が比較的小さかったため、振動周波数を大きくして実験を行っていた。しかし、ピエゾ素子の共振周波数付近で臨界速度となる場合も多く、これが定量的な測定を困難にしていた。そこでまず、ピエゾ素子には軽い小型のミラーを取り付けてピエゾの共振周波数の低下をふせぎ、さらにピエゾ駆動用に高電圧アンプ(最大120V)を挿入して振動振幅をこれまでの3~4倍に増大させた。これにより、より低い周波数でも散逸が始まり、振動の速度領域も拡大した。また、高速振動中やその直後の光格子形状のゆがみや変化も小さく抑えられ、より安定化した散逸の観測が可能になった。

この手法で実験を行ったところ、光格子のドットの高さが低い場合、振動の最大速度がプロット端速度のおよそ半分を超えたあたりで、原子波干渉パターンのスポットのうち、振動方向に沿う第1ピークが他のスポット点よりも急激に増大した(図1左)。これは、格子間隔と同じ空間周期をもつ励起が生じたためであり、散逸の開始を示している。

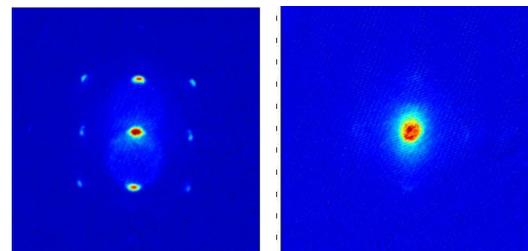


図1 光格子振動直後の原子の運動量分布。最大振動速度は左側で2.53 mm/s、右側で1.63 mm/s。振動方向は、この図ではともに縦方向。プロット端速度の半分は、およそ2.1 mm/s。それぞれ特徴的な波数をもつ励起が生じていることを示している。

次に、ドットの高さを上げて同様の実験を行うと、臨界速度は下がり始め、原子波干渉

パターンの第1ピーク強度に変化は現れず、代わりに中心にある0次スポットの近傍に低波数のインコヒーレントな運動量をもつ励起が生じ始めた(図1右)。速度をさらに上げると、低いドットの場合に観測された時と同じ速度のところで、干渉パターンの第1ピークの急激な増大が再び現れた。光格子をさらに高くすると、本質的に同じ現象が繰り返し観測された。励起が最初に現れる臨界速度およびドットの高さ依存性は、これまでに熱化後に得られていた結果とほぼ同じであり、BECの崩壊が、特徴的な波数をもつ励起によって誘起されていることがわかった。また、崩壊機構には2つあり、共存する形になっていることもわかった。後述することになるが、これらは各々、動的不安定性とエネルギー不安定性によるBECの崩壊機構と深い関連性があるとうかがわせるような結果である。

観測されたBECの崩壊は、量子渦生成そのものによるものではないが、もしも動的不安定性やエネルギー不安定性による散逸の過程が直接観測されたならば、それ自体、意義深いことである。動的不安定性の議論では、凝縮体(あるいは光格子系)が一定速度で動くことを前提としている。しかし、光格子系の振動実験では速度が時間変化する加速度系であり、速度に起因した現象なのか加速度が原因なのか、このままでは崩壊の機構の詳細を解明しにくい。そこでH27年度は、静止したアンチドット格子の中をより長い時間、ほぼ等速度でBECをドラッグさせる実験を行った。

我々のBECは、磁場によるアンチトラップの中心に、光トラップが重なってできたポテンシャル極小の位置に生成されている。ここへ横方向の磁場を印加し、さらにその大きさを時間的にスキャンすることで、極小の位置を変え、BECをドラッグさせる手法を試みた。光トラップのタイトさにも依るが、5mm/s程度の速度で数十ミリ秒間、一定速度でドラッグできることを確認した。光格子を振動させていた場合よりもはるかに長い時間、ほぼ一定速度下におくことができるので、崩壊の詳細が調べられるようになった。

この手法を用いてドラッグ直後の運動量分布の観測を行った。その結果、格子系を振動させた場合と本質的に同じ特徴を有する観測結果が得られ、BECの崩壊や不安定性は速度に起因したものであることを、臨界速度に達すると特定の波数の励起が生じること、そしてタイプの異なる2つの崩壊機構が共存していることを、まず再確認した(図2参照)。

この他にも、低波数の励起が放出され時間発展していく様子や、大きな波数の励起では急激にBECの崩壊が進む様子など、格子系を振動させた場合よりも、より詳細な情報を得ることができた。

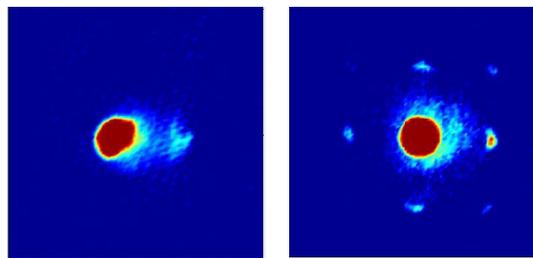


図2 BECドラッグ後の運動量分布。ドラッグの方向は、図では横方向。左側は、第1スポットのピーク強度が急激に上昇し、図1左のものに対応する。右側は、低波数をもつ励起が0次スポット横に生じている様子を示しており、図1右に対応。

1次元光格子中を流れるBECでは、格子の周期性と原子間相互作用の非線形性により、動的不安定性とエネルギー不安定性が起こるとされている。前者はブロッホ端の速度の半分を超えると、大きな波数をもつ擾乱が指数関数的に増大するもので、後者は有限温度の下、より低速度でphonon-likeな低波数の励起が起こり、系全体のエネルギーを低下させるものである。いずれの場合も、これらの励起により超流動性は崩壊する。格子構造や次元は異なるが、我々の観測結果はこれら2つの不安定性の特徴と定性的に合致している。さらに、不安定性が生成され、時間発展する様子や2つの不安定性の機構が共存し、速度を上げることで変遷していく様子が、本研究によって初めて直接的に観測できたのではないかと現時点では考えている。

今後は、本研究で得られた実験結果を理論計算と比較し、特に有限温度の効果を検証し、不安定性の全容を明らかにする必要がある。また、実験面では、散乱長を変化させることができる⁸⁵RbでBECを作り、相互作用の強さを制御して実験を行い、非線形性の効果を検証したいと考えている。

最後に、本来の研究目標であった量子乱流生成に関して言及しておく。本研究で観測されたBEC崩壊は、量子渦によるものというより、動的およびエネルギー不安定性による可能性が高いが、量子渦が生成されたのではないかとと思われる実験結果もいくつか得られている。

本実験での光格子の振動方向は、エネルギー極小の道に沿う方向であり、原子がドットの隙間を通り抜ける方向であった。それと45度の角度をなす方向に振動させると、原子はドットを迂回する、あるいは超える(トンネルする)など、より複雑な動きが誘起される。実際に実験してみたところ、低波数の励起が生成され始める速度と高い波数のスポットが現れる速度の間の中間領域において、原子分布に「穴」のあいたイメージが、毎ショットごとではないがかなり高い確率で観測された(図3参照)。

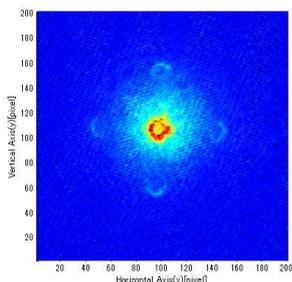


図 3 穴のあいた原子気体のイメージの一例

また、45度の方向にBECをドラッグする方法も同様に試みたが、これまでのところ穴は観測されていない。このことから光格子を振動させることが本質的に重要であると思われる。

現時点では、この穴が量子渦生成の証拠なのか、ダークソリトンであるのか、あるいは他の何か別のものであるのか、まだわかっていない。実は以前にも、静止した光格子の実験で、ドットの高さを高くしていくと、原子が局在し始める直前あたりの高さで、量子渦と考えられる穴のあいたイメージが観測されていた。これに関しては、局在前の大きな位相揺らぎが原因であると考えているが、今回の振動格子系で観測された結果との間には、深い関連性があるかもしれない。この点については、現在、理論グループとともに研究を進めている。

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 4 件)

山下和也、花咲晃平、金光浩志、音石遥、後藤良輔、木下俊哉、「振動するアンチドット光格子中での⁸⁷RbBECの潮流同姓の崩壊」(口頭発表)日本物理学会 秋季大会 2014年9月9日、中部大学(春日井キャンパス)

T. Kinoshita, K. Yamashita, K. Hanasaki, A. Ando, H. Kanemitsu, R. Goto, Onset of dissipation of BEC in shaking 2D Anti-dot optical lattices (Poster presentation), Atomic, molecular and optical division of the American Physical Society, June 11, 2015, Columbus, Ohio, USA

K. Yamashita, K. Hanasaki, A. Ando, H. Kanemitsu, R. Goto, T. Kinoshita, Phase Coherence and Superfluidity of BEC in a Two-Dimensional Anti-dot Optical Latticeshaking (Poster presentation), 22th International Conference on Laser Spectroscopy, June 30, 2015, Singapore

山下和也、金光浩志、後藤良輔、湯川巧、

木下俊哉、「2次元光格子中におけるBECの安定性の探索」(口頭発表)日本物理学会 秋季大会 2015年9月18日、関西大学(千里山キャンパス)

〔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

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

(3) 連携研究者