

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340106

研究課題名（和文） 2次元アンチドット型光格子中の量子気体のダイナミクス

研究課題名（英文） Dynamics of Quantum Gases in the two Dimensional
Anti-dot Optical Lattices

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

研究成果の概要（和文）：

ポテンシャル障壁が規則的に配列し、エネルギー極小が多重連結であった、新しいタイプの光格子である2次元アンチドット型光格子を構築し、その中へ位相空間密度の高い冷却原子気体を誘導し、アンチドット型光格子の中で非平衡過程の生成と観測を目指した実験を行った。アンチドット光格子を高速で揺らした場合、揺らす速度に明瞭な閾値は見られなかったものの、運動量分布の広がりを観測し、エネルギー散逸が引き起こされていることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We created a new type of optical lattices, two dimensional anti-dot optical lattices, in which the periodic potential minima are multiply connected. Then, by transferring cold atomic gases with a high phase space density into the lattices, we experimentally studied non-equilibrium phenomena. By shaking the anti-dot lattices with a large velocity, we observed broadening in the momentum distributions of atomic gases. Although the threshold above which the momentum broadening increases was not seen clearly, the results show that the energy dissipation induced by shaking the anti-dot lattices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
20年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
21年度	3,000,000	900,000	3,900,000
22年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	1,911,000

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：ボース凝縮、光格子、アンチドット、レーザー冷却

1. 研究開始当初の背景

1) これまでの光格子研究は、すべて規則的に原子を局在させるタイプの光格子系である。強相関系など固体物理の未解決問題の解明や量子情報処理のハードウェアとしての応用を目指したものが主流であった。

2) アンチドット型光格子は、原子を局在させない特異な幾何学配置の光格子であり、到達目標を非平衡量子多体系のダイナミクスの解明に特化した本研究は、国内外ともに皆無であった。

2. 研究の目的

ポテンシャル障壁が規則的に配列し、エネルギー極小が多重連結しあった、新しいタイプの光格子「2次元アンチドット型光格子」内へ量子気体（量子統計性が顕著に現れる原子気体）を流し込み、非定常状態やより一般には熱的に非平衡な物理状態を生成させ、量子渦生成や量子輸送現象の詳細を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

1) 冷却原子の操作性を最大限に利用するため、まずは、全光学的手法によりボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) を生成する。これを量子気体として研究の出発点とする。

2) 共鳴遷移の角周波数から青方に離調された2つの定在波の相対位相を0に固定すれば、ポテンシャルの極小が多重連結しあった2次元アンチドット型光格子が生成される (図1)。

この光格子に量子気体を流し込み、光格子を揺らす、あるいは量子気体を高速に流し込むなどして、非平衡な物理状態を生成し、原子の運動量分布や密度分布を気体のイメージングにより測定し、非平衡・非線形ダイナミクスを調べる。

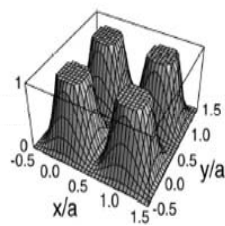


図1

4. 研究成果

1) 冷却光源の開発

原子冷却に必要な半導体レーザー（波長780nm付近）とその出力を最大1W以上にまで増幅するための高出力半導体レーザー（計3台）を製作し、発振周波数線幅が1MHz以下に狭窄化されていること、光ファイバー転送後も予定通りのレーザー出力が得られていることを確認した。

2) 真空系と実験シーケンス制御系の製作

原子ビーム生成用のオープンチャンバーと原子捕獲用の光学セルを連結して超高真空システムを完成し、光学セル内で研究遂行に必要なとなる 7.5×10^{-11} Torr の真空度を得た。また、アナログとデジタル信号、合計64チャンネルを自在に制御できる実験シーケンスの制御プログラムを完成させ、時間分解能、チャンネル間の同期、出力の分解能などの性能を確認した。

3) 原子の冷却

オープン内の細管によりコリメートされた⁸⁷Rb原子ビームを生成し、ドップラー冷却法で減速させながら光学セルに誘導し、同時に3軸方向からのトラップ光と磁場勾配を組み合わせた磁気光学トラップ (MOT) により原子を捕獲した。各種パラメーターを最適化させ、原子の誘導レートとして 5×10^8 個/s、MOT内に $50 \mu\text{K}$ 程度の 10^9 個の原子数を得ることができた。次に、瞬間的に磁場勾配を3倍にあげ、同時にレーザーの離調を大きくし、かつ光強度を下げてMOTを圧縮した (図2は定型的な場合)。数密度も上げながら、同時に原子の温度も最適化するため、実際の圧縮過程は、離調の増大を少し遅らせる2段階の圧縮を行い、開始から25ms後、 8×10^{11} 個/cm³の密度を達成した。

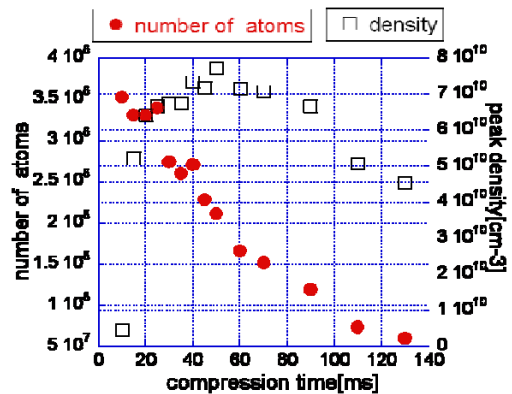


図2 圧縮されたMOTの特性(典型的な場合) 右縦軸が原子数、左縦軸が原子数密度

さらに、密度がピークに達した瞬間に青色離調した3次元光格子ビームを印加し、真空中ではなく光格子中で偏光勾配冷却を行い、 $15 \mu\text{K}$ にまで冷却した。その後、磁場を印加して光ポンピングを行い、100%近い原子を特定の磁気サブレベルに移行させ、さらに断熱的に光格子ポテンシャルを遮断する断熱冷却法により、 $2 \mu\text{K}$ 程度にまで冷却した。この段階で、 4×10^8 個の原子気体を生成、 7×10^{-4} の位相空間密度を得た。

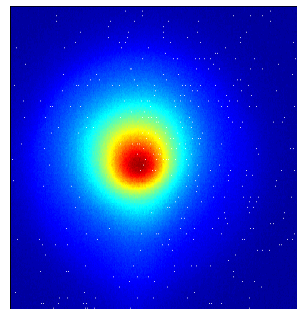
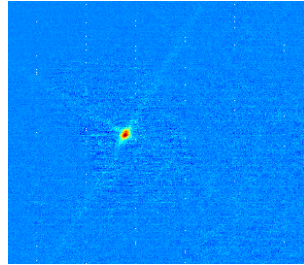


図3 光ポンピング後の原子気体のイメージング。温度 $2 \mu\text{K}$ 、特定の磁気サブレベル $|11\rangle$ に移行されている。

5) 光双極子トラップ中での蒸発冷却
断熱冷却した原子集団から、波長 1064nm のレーザーによる圧縮可能な交差型光双極子トラップへ、 10^7 個の原子をローディングすることができた (図 4)。

図 4
交差型光双極子トラップ中の原子のイメージング



このトラップ中で原子気体の断熱圧縮と蒸発冷却を繰り返し行い、現在、BEC の直前、位相空間密度が 0.1 近くまで増大した原子気体を生成することができた。

6) アンチドット型光格子の生成とエネルギー散逸の観測

アンチドット用の光格子 (X、Y 方向) のビーム系と、これらとは別に、相対位相の観測専用のビームを各光格子ビームのわずかに下に構築した。レーザー光源は、上記した 3次元の光格子とは別に、リング型チタンサファイアレーザーから生成している。2本のビームを干渉させて相対位相を測定、折り返しミラーに附置したピエゾ素子に帰還し、YビームはXビームとの位相差を常に維持するよう制御した。この2次元光格子系に、BEC 前ではあるが、位相空間密度がかなり高い原子気体を誘導、その後、トラップから解放して原子気体の運動量分布を観測した。相対位相を維持したまま、Xビームを意図的に高速で揺らしたところ、散逸による運動量分布の広がり (揺らす前には存在しなかった運動量分布のテール) を観測したが、揺らす速度に明瞭な閾値は見られず、速度の上昇とともにほぼ連続的にテールの増大が見られた。また、原子気体の干渉パターンも明瞭ではなく、現時点では再現性にも問題があることがわかった。観測結果は、散逸機構が存在していることを示すものであるが、その詳細な過程は明確には至っていない。原因は、まだ BEC 前なので原子気体中にマクロなコヒーレンスが確立していないこと、制御した光格子の相対位相値が完全ではないためと考えられるが、これらは BEC を生成できれば、解決できる問題である。一方、仮に量子渦が生成されたとして、それを明瞭に観測する、特に、量子渦が絡み合う乱流への遷移を捕えるためには、運動量分布のみでは不十分であることもわかった。そこで、波長 1064nm のフ

イバーレーザーを別に用意した。それをシリンドリカルレンズで集光し、薄い板上の光双極子トラップを新たに1方向に加えて気体を圧縮し、その後にアンチドット光格子内へと誘導できるようにした。3次元性は維持しつつも量子渦自体は2次元的挙動を示すような光学系の配置を準備し、これにより、トラップ解放後直後の渦の挙動を捕えられるように装置系を改良した。

現在、全力で BEC 生成を目指しており、BEC 生成後は、2次元アンチドット型光格子内で発現する様々な非平衡・非線形現象、量子輸送現象を探求していく予定である。

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1件)

①木下俊哉、「光格子を利用したアトムトロニクスのためのデバイス開発」
レーザー学会誌、査読有、37号、2009年28-31

[学会発表] (計6件)

①木下俊哉、「光格子を利用したアトムトロニクスのためのデバイス開発」(ポスター発表)、日本応用物理学関連連合講演会 シンポジウム、2009年3月31日、筑波大学
②木下俊哉、「光格子を利用したアトムトロニクスのためのデバイス開発」(口頭発表)、日本応用物理学関連連合講演会 シンポジウム、2010年3月18日、東海大学
③木下俊哉、「非平衡状態にある1次元ボースガス」(招待講演)日本物理学会(領域1, 6, 11 合同シンポジウム)、2010年9月25日、大阪府立大学
④山下和也、田中一将、小笠原誠、澤剛生、高濱優宏、木下俊哉、「全光学的手法による ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮の生成」(口頭発表)、日本物理学会、2010年9月23日、大阪府立大学
⑤山下和也、田中一将、小笠原誠、澤剛生、高濱優宏、木下俊哉、「全光学的手法による ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮の生成」(口頭発表)、日本物理学会、2011年3月26日、新潟大学
⑥木下俊哉、「光格子を利用したアトムトロニクスのためのデバイス開発」(ポスター発表)、日本応用物理学関連連合講演会 シンポジウム(光科学の未来を拓く・10年先の新規研究領域開拓のために-) シンポジウム、2011年3月24日、神奈川工科大学

〔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：