

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2009～2010

課題番号：21684022

研究課題名 (和文) 量子縮退した原子混合気体を用いた均一光格子の実現

研究課題名 (英文) Eliminating inhomogeneity from an optical lattice potential using interaction between atoms in a mixture of quantum degenerate gases

研究代表者

井上 慎 (SHIN INOUE)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：10401150

研究成果の概要 (和文)：光トラップ中で 41 カリウムと 87 ルビジウムを同時にボース凝縮させることに成功した。3 次元光格子ポテンシャルを作るために、半導体励起固体レーザー (DPSS) の開発を行い、単一周波数 (波長 1064nm) で 10 ワットの cw レーザーの作成に成功した。さらに、波長 809nm の光トラップも用いることで、ルビジウムとカリウムの質量差からくる位置のずれを補正することにも成功した。また、フェッシュバハ共鳴を用いて、異種原子間の相互作用を制御することで、ルビジウムとカリウムの 2 つのボース凝縮体の相分離と混合の制御が可能であることを示した。

研究成果の概要 (英文)：We succeeded in producing a dual Bose-Einstein Condensate made of rubidium-87 atoms and potassium-41 atoms in an optical dipole trap. In order to have ample optical power for lattice potential, we developed a single frequency diode-pumped solid state (DPSS) laser at 1064nm. Furthermore, by using an optical trap whose wavelength at 809nm, we successfully canceled the gravitational sag difference caused by mass difference between rubidium and potassium atoms. By using interspecies Feshbach resonance, we realized miscible and immiscible mixture of Bose-Einstein Condensates.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	16,600,000	4,980,000	21,580,000
2010 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
年度			
年度			
年度			
総計	21,400,000	6,420,000	27,820,000

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：量子エレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

2002 年の Greiner *et al.*, によるボース凝縮体を用いた超流動-モット絶縁体の観測を契機として、極低温量子縮退気体を用いて物性を開拓しようという試みは大きな広がりを見せた。フェッシュバハ共鳴をはじめと

する各種パラメーターの制御性の良さと、次元や粒子の統計性の違う系を同じ実験装置で比較するという明快さは、第一原理計算による計算結果との比較を極めて容易にした。そのため基底状態の性質やダイナミクスを含め、多種多様な研究が行われた。

しかし徐々に原子気体ならでは弱点があることも認識されていた。特に問題と考えたのがトラップの存在である。原子には重力が働くためトラップは必須である反面、トラップのために密度分布が不均一になってしまうという問題がある。密度分布が一様でないために、上記のモット絶縁体は俗に「ウェディングケーキ」と描写される異なる filling の領域が隣り合わせに展開する独特の形状をとる。また、フェルミオンを光格子に入れた場合はフェルミエネルギーが場所に依存し、実験データの解析を困難にする。この弱点を克服するために考え出されたのが本研究である。

2. 研究の目的

カリウム 41 とルビジウム 87 の同時ボース凝縮を達成する。Dual BEC を光格子ポテンシャルに閉じ込め、カリウムからの斥力ポテンシャルを用いて、ルビジウムに対して均質な周期的ポテンシャルを構築する。均一で大きなモット絶縁体を構築し、モット絶縁体の圧縮率の測定を行う。

3. 研究の方法

(i) 41 カリウムと 87 ルビジウムの同時ボース凝縮

41 カリウムはボソンの同位体であり、自然存在比は 5% 程度である。真空槽内で通常の金属カリウムをアンブルから供給し、Double-MOT システムを構築することで 10 の 6 乗個以上の 41 カリウム原子を磁気光学トラップに捕獲することができる。同じく磁気光学トラップで 10 の 8 乗個以上の 87 ルビジウム原子を用意し、ルビジウムとカリウムの両方を Compressed-MOT で冷却、高密度化した後、磁気トラップに捕獲してルビジウムの蒸発冷却を行う。このとき、カリウムはルビジウムとの熱接触により協同冷却される。ボース凝縮直前で冷却を止め、1 μ m の波長のレーザーを集光して作られた光トラップに移し、さらに蒸発冷却（協同冷却）を行う。十分な初期条件が与えられ、ルビジウムとカリウムの間の非弾性散乱が少なければ、Dual BEC を達成できると期待される。

(ii) 単一周波数 DPSS レーザーの開発

光格子の実験において、ビームのガウシアンプロファイルから来る不均一性を可能な限り取り除くためには、まず十分なレーザーパワーを用意し、可能な限りビーム径を広げる必要がある。さらに、レーザーからの加熱を最小にするためには、強度ノイズと周波数ノイズを十分低くする必要がある。この目的で半導体励起固体 (Diode Pumped Solid State, DPSS) レーザーの開発を行った。DPSS レーザ

ーに必要とされる仕様は、(i) 単一周波数であること、(ii) パワーが 10 ワット以上であること、(iii) 光格子の実験中 (100ms \sim 1s) にモードホップが起こらないこと (iv) 強度及び周波数ノイズが原子を加熱しない程度であること。の 4 項目である。

(iii) 混ざる超流動体

イタリアの LENS グループの先行研究により約 78 ガウスという低磁場において、41 カリウムの $|F, m_F\rangle = |1, 1\rangle$ 状態と 87 ルビジウムの $|F, m_F\rangle = |1, 1\rangle$ 状態の間にフェッシュバハ共鳴があることが知られている。散乱長を制御することで、カリウムとルビジウムの BEC が「混ざる」か「混ざらない」か制御することが可能である。特に混ざっていた超流動体を突然混ざらなくしたときの相分離のダイナミクスを実時間で追うことができれば大変興味深い。

4. 研究成果

(i) 41 カリウムと 87 ルビジウムの同時ボース凝縮の実現

波長 1 μ m の光トラップの中で 41 カリウムと 87 ルビジウムの蒸発冷却を行い、同時ボース凝縮を達成することができた。原子数はそれぞれ 5×10^4 個程度であった。波長 1 μ m の光トラップの中ではルビジウムの BEC とカリウムの BEC は質量の差から来る重力差より、上下に位置のずれがある。809nm の光トラップで BEC を捕獲しなおすことにより、トラップ中心の上下の位置のずれをキャンセルすることにも成功した。この成果は井上研所属の加藤宏平君の修士論文 (2011 年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻) によくまとめられている。

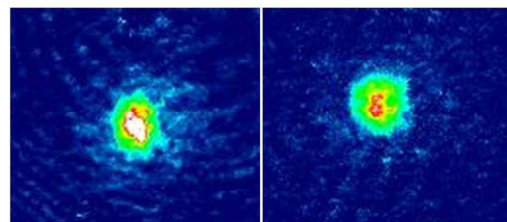


図1 Dual BEC の吸収像

87ルビジウムと41カリウムの同時 BEC に対してルビジウム (左) とカリウム (右) の共鳴光を短い間隔で次々と照射して得られた吸収像。BEC 中の原子数はそれぞれ 3.6×10^4 (Rb) と 2.8×10^4 (K)。TOF は 31.3ms (Rb) と 30.7ms (K)。

(ii) 単一周波数 DPSS レーザーの開発
光格子の実験用に、単一周波数、10 ワットの

DPSS レーザーの開発に成功した。具体的には温度調節した Nd:YVO₄ 結晶を 808nm の LD 光で Double End-Pump し、Bow-tie Cavity を組んでレーザー発振させた。共振器中にエタロンとアイリスを挿入することで周波数モード、空間モードを選択し、シングルモードで最大 11W の発振を確認した。共振器内にピエゾ素子が存在せず、アクティブにシングルモードを安定化させる機構がないため、モードホップを防ぐには温度や気流などの影響を最小にすることが必要である。アクリル製の囲いを製作し、1 時間以上モードホップが起きないという安定性を得ることが出来た。この成果は井上研所属の斉藤祐介君と福岡健太君の卒業論文(2010 年東京大学工学部物理工学科)によくまとめられている。



図 2 : 作成した半導体励起固体(DPSS)レーザー
単一縦モードで発振波長は 1064nm、得られた

(iii) 混ざる超流動体の実現

78 ガウスにあるフェッシュバツハ共鳴を用いて、41 カリウムの BEC と 87 ルビジウムの BEC が相分離したり混ざったりする変化の様子を Time-Of-Flight 像で観察することができた。809nm の光トラップで重力方向の位置のずれをキャンセルすると、相分離の場合は TOF 像がカリウムとルビジウムで避けあう。混ざるように磁場を設定すると 2 つの BEC の重なりが増し、3 体ロスが増加する。しかし定量的な比較は原子数ゆらぎのために行うことができなかった。

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 2 件)

1. Shin Inouye, School on quantum gases research, 2011 年 7 月 20 日, Pohang (KOREA)

2. K.Kato, T. Fukuhara, J. Kobayashi, Y. Saito, T. Kishimoto, M. Ueda, and S. Inouye, Gordon Research Conference (Atomic Physics) 2011 年 6 月 29 日, West Dover, VT (米国)

[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://ultracold.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 慎 (Shin Inouye)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号 : 10401150

(2) 研究分担者

(なし)

(3) 連携研究者

(なし)