

全光学的手法による ^{87}Rb 原子の BEC 生成

レーザー新世代研究センター 中川研究室 関邨 哲雄

研究の背景・目的

ボース凝縮体は、1924年にアインシュタインとボースによって予言され、レーザー技術の進歩によりその予言から70年以上経過した1995年にJILAのグループが ^{87}Rb の原子で初めて実現した。それ以来この分野における研究は急速に進展し、現在数多くの中性原子でのボース凝縮体の生成が確認されている。

ボース凝縮体の特徴の1つとして、全ての原子の位相が揃っている性質が挙げられるが、この性質により、今日までボース凝縮体による原子レーザーや原子干渉計など、量子力学、凝縮物理、低温物理など様々な分野で多くの研究に貢献してきた。

また、ボース凝縮体となった原子群は高密度かつ約数百 nK と極低温であることから、3次元の定在波による微細なポテンシャルの各サイトに原子を1つずつ入れ、単一原子を一定間隔に並べること（光格子）ができる。[1] この光格子を用いた研究は、性質を操作できる人工の物質を生成することや高温超伝導などの研究に応用が期待されている。そのほかにも、ボース凝縮体から光格子にローディングされ1つずつ並べられた原子は、全原子の位相が同じ基底状態に揃っている為、量子コンピューターの実現に必要な量子ビット（Qビット）の用意やスピン依存によるポテンシャル操作 [2] から原子の内部状態に依存した原子操作を行えることが期待され、量子情報や量子コンピューターの実現に有効な方法であると考えられる。

本研究の目的は3次元光格子の実現に向けた、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（BEC）生成である。我々の研究室では、すでにアトムチップ上の微細な磁場に ^{87}Rb 原子をトラップすることでボース凝縮体の生成が実現しており、原子干渉計の実験がなされている。それに対し、全光学的手法によるBEC生成には光学アクセスを広く確保できること、数秒の間にBECを生成できることスピンの自由度の高い原子を扱えるといったことが利点に挙げられる。特に3次元光格子には広い光学アクセスが必要となるが、磁場を用いたBEC生成方法ではBECを生成する所の周辺でコイルが多数必要なため光学アクセスが悪くなり、全光学的手法ではそれを回避できる利点があるため、新たなBEC生成装置が必要になった。

また、これまでに全光学的手法によるBEC生成の成功例がいくつかあるが、 CO_2 レーザーを用いた例 [3] では ZnSe の結晶などの特殊な光学器具が必要になり装置が大型化してしまうことや、その他にNd:YAG laserを用いた例では予備冷却が $1.5\mu\text{K}$ まで必要 [4] などの難点があった。そこで我々は $1.0\mu\text{m}$ 光を用いてガラスセルの使える方法で全光学的手法によるBEC生成を目指す。

BEC 生成の手順

BEC を生成するには位相空間密度が 2.6 以上になることが条件であるが、これには原子群を高密度かつ極低温にする必要がある。通常、BEC 生成方法としては、磁気光学トラップ (MOT) によって約 $100 \mu K$ まで冷えた原子を 1 箇所にはトラップし、圧縮と偏光勾配冷却で数十 μK まで冷却した後、数百 μm スケールの極狭い空間に磁気トラップや光双極子トラップによって閉じ込め、蒸発冷却で $1 \mu K$ 以下になるまで冷却するという流れで行う。

私たちの研究室ではすでに MOT によって 10^7 個以上の原子をトラップすることには成功しているので、次の課題は MOT で集めた原子をいかに高効率でローディングを行うようにできるかということである。

2 波長光双極子トラップ

これまでの全光学的手法による BEC 生成の成功例から、 10^4 個以上の BEC を生成するには光双極子トラップに 10^6 個以上の原子をローディングする必要がある。そこで、光双極子トラップへの高効率なローディングを可能にする方法として 2 波長光双極子トラップを考えた。まず、図 1 のような ^{87}Rb 原子のエネルギー準位において、レーザー冷却に使用する $5S_{1/2}$ を基底準位、 $5P_{3/2}$ を励起準位とした遷移幅は、 $1.0 \mu m$ の光双極子トラップ中では基底準位と励起準位が異なる光シフトをし、レーザー冷却効果が働かなくなってしまう。そこで $1.5 \mu m$ 光を入れることによって励起準位を基底準位と同じに光シフトさせることで、Magic Wavelength [5] と同様の効果をもたらし、光双極子トラップ中でもレーザー冷却を行えるようになるため、ローディング効率の向上が見込める。

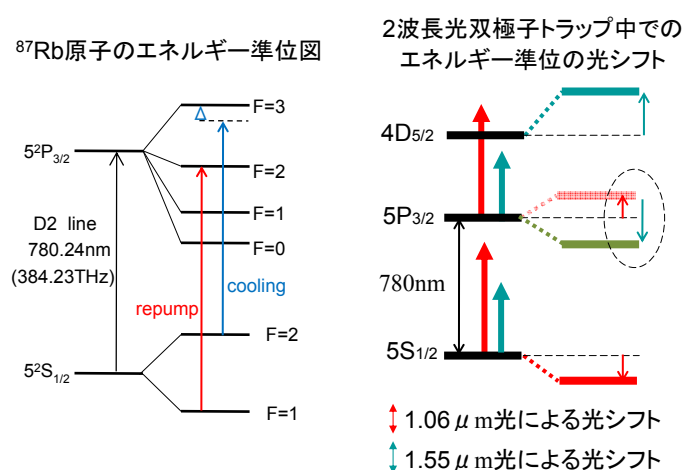


図 1: ^{87}Rb 原子のエネルギー準位図 及び 2 波長光双極子トラップ中での光シフト

1.0 μm 光による光双極子トラップ

2 波長光双極子トラップのローディング効率との比較が行えるように、まず 1.0 μm 光のみによる光双極子トラップを行った。

< 実験手順 >

実験は光源にマルチモード型の Yb 添加ファイバーレーザー (NUFERN 社) を使い、図 2 のような光学系を組んで行った。ガラスセル内は高真空になっており、そこに磁気光学トラップ (MOT) で集めた ^{87}Rb 原子の冷却原子群に、光双極子トラップ光が 2 回通るようになっている。

光双極子トラップへのローディング方法について説明する。まず、MOT で集めた原子を Dark MOT と呼ばれる方法で密度を上げる。レーザー冷却時には repump 光によって原子を cooling 光を吸収する $5S_{1/2}$ 準位へ集めるが、Dark MOT では repump 光を切り、原子を $5P_{3/2}$ の準位へ集めることで、冷却された原子同士での cooling 光を吸収し光子を放出する際の反発力を抑えることができる。これにより、原子間距離を縮められ、密度を上げることができる。密度を上げた後に偏光勾配冷却によって更なる冷却を行った後に光双極子トラップを行った。また、光双極子トラップへのローディングは Dark MOT のタイミングから始め、約 $100ms$ 間かけて行った。

最後に光双極子トラップ中の原子の観測を、トラップから原子を開放した後に repump 光により $5S_{1/2}$ 準位へ原子を集め、吸収撮像法によって行った。

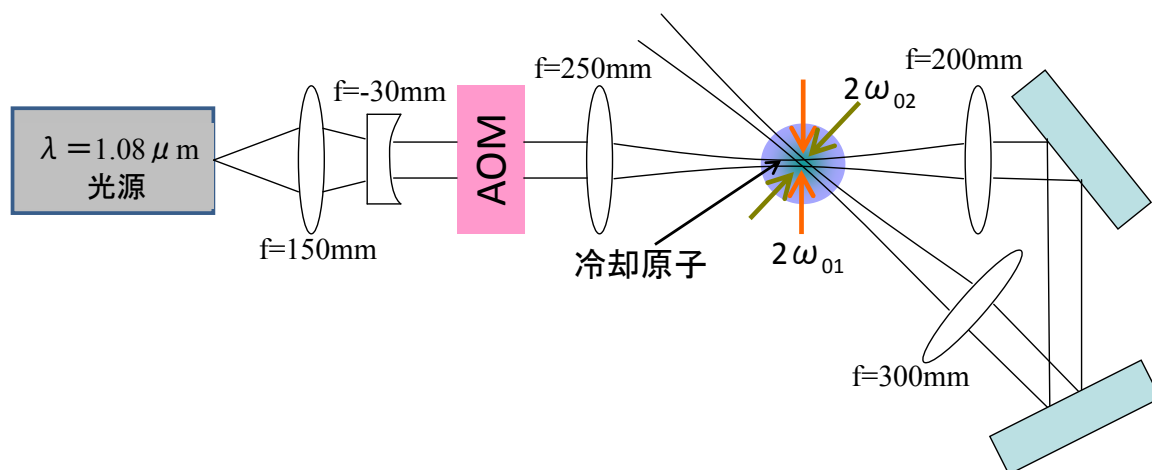


図 2: クロス光双極子トラップの光学系

< 結果 >

まず、 $1.0 \mu m$ 光が強度 $14W$ 、ビーム半径 $50 \mu m$ のシングルパスによる光双極子トラップを行った。このときのトラップ深さは $-420 \mu K$ であった。この結果、トラップされた原子数は MOT でトラップした原子の 1% であることが分かり、トラップ個数は約 1×10^4 と見積もることができた。(図 3 の帯状に並んだ原子がトラップ原子)

次に強度 $10W$ 、ビーム半径 $55 \mu m$ と強度 $6W$ 、ビーム半径 $65 \mu m$ の 2 つの $1.0 \mu m$ 光によるクロス光双極子トラップを行った。このときの深さは $-350 \mu K$ であった。そしてクロス光双極子トラップにローディングされた原子数は約 1×10^5 個で、温度が $40 \mu K$ だった。また、このときのトラップ周波数は約 $1000Hz$ で位相空間密度は約 10^{-4} であった。

これらの結果から、このときの原子数密度は $2 \times 10^{10}(cm^{-3})$ であり、これは Dark MOT 時と同じ密度の原子がトラップへローディングされていることが分かった。このことから、2 波長光双極子トラップによって光双極子トラップ中でレーザー冷却を働かせられる条件下で Dark MOT によって圧縮を行っても、今以上の密度で原子をローディングするのは困難であると思われる。

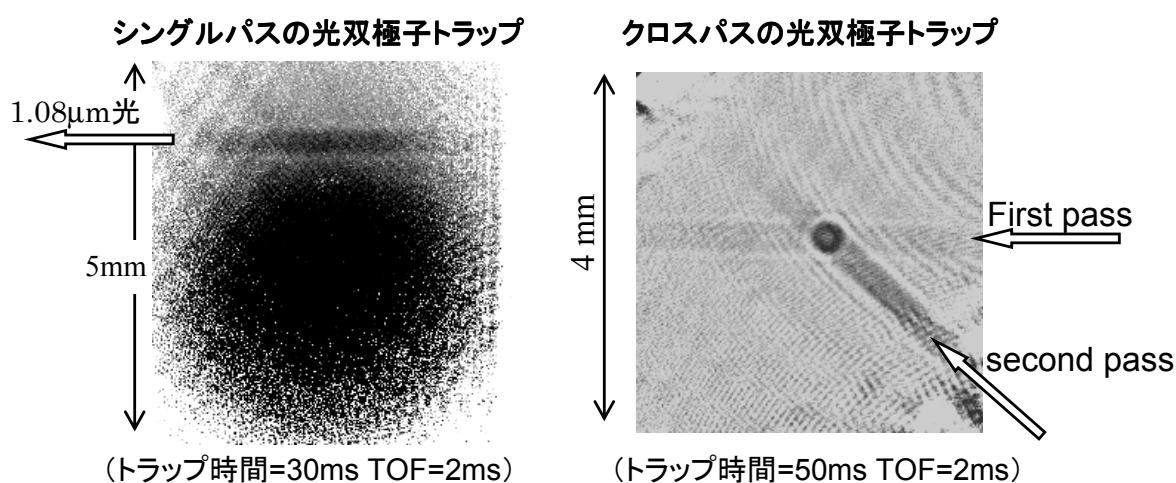


図 3: 吸収撮像法による光双極子トラップ中の原子の観測

次にクロス光双極子トラップ中の原子の寿命の評価を行った。結果を図 4 に示す。光双極子トラップ中での原子数・温度・位相空間の密度の変化を見ると、光双極子トラップを始めてから約 $150ms$ 間は蒸発冷却の効果と同様にトラップからサーマルな原子が逃げていくため、原子群全体の温度は下がり位相空間密度が上がっていることが分かった。

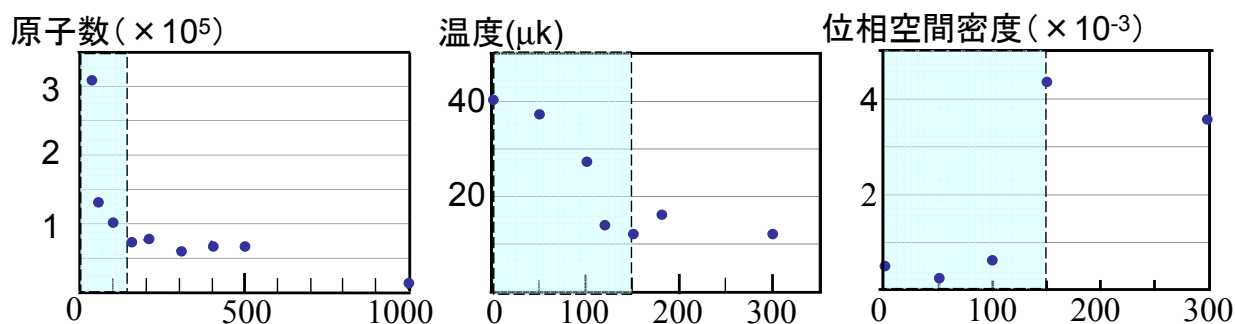


図 4: 光双極子トラップ中の原子の寿命

光双極子トラップ中での蒸発冷却

光双極子トラップ中の原子の蒸発冷却は $1.0 \mu m$ 光の強度を下げ、トラップバリアを低くしていくことによつて行ふ。蒸発冷却の結果、蒸発冷却を約 $500ms$ 間行うことで、約 7000 個の原子を温度が $1 \mu K$ まで冷却した。このときのトラップ周波数は約 $700Hz$ で位相空間密度は 0.1 であった。この結果から蒸発冷却によつて、位相空間密度を 3 桁分上げることができたが、BEC の位相空間密度は 2.6 なのであと一桁分上げる必要がある。

まとめと今後の展望

私は 3 次元光格子の実現に向けて、全光学的手法による BEC 生成を目指している。そして今回、シングル光双極子トラップに原子を 10^4 個、クロス光双極子トラップに原子を 10^5 個ローディングすることに成功した。

現段階では光双極子トラップの寿命が 1 秒と短いことが、BEC 生成における大きな課題となっている。この原因には 3 つの大きな理由がある。1 つ目はガラスセル内の真空度である。光双極子トラップの寿命を決める一つの要因がガラスセル内の不純物とトラップ原子との衝突による加熱なので、蒸発冷却時の原子のロスはガラスセル内の真空度に依存する。

2 つ目は MOT 周りの磁場補正が安定していないため、偏向勾配冷却時において MOT の磁場を切ったと同時に、束縛される力のなくなった原子が周辺の磁場の影響でどこかへ飛んで行ってしまい、冷却効果が薄くなってしまふことである。このままでは光双極子トラップでのローディング効率の低下につながり、実験に再現性を持たせることが難しくなってしまう。

3 つ目は光双極子トラップにローディングされる原子数がまだ目標に達していないことである。BEC 生成の最終段階である蒸発冷却には原子数のロスがあるので、 10^4 個の BEC

を生成するには約 10^6 個の原子が必要とされる。しかし現時点で実現している光双極子トラップにローディングされた原子数は 10^5 個のため、まだ目標には到達していない。

これらの課題に対し、まず光双極子トラップへのローディング効率の向上させることを考えている。方法としては、最大出力が現在使用しているものより大きいレーザーを用いて、光双極子トラップサイズを大きくすることである。実際にレーザー光源を最大 30 W 出力可能なレーザー（偏波保持型 1.0 μm 帯ファイバーレーザー）に変え、強度が約 24W の光を 2 回原子に通すことで、ビーム半径が 100 μm のクロス光双極子トラップを行った。このときのトラップ深さは約 300 μK で、光双極子トラップを始めてから 30ms 間たったとき、 8.5×10^5 個の原子をローディングできたことを確認した。しかし、1 s より長い時間、光双極子トラップ中にトラップされた原子を吸収像から確認することはできなかったため、十分な蒸発冷却を行うためには、真空度を良くする必要がある。

参考文献

- 1、Markus Greiner , Olaf Mandel , Tilman Esslinger , T.W.Hansch and Immanuel Bloch
Quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator in a gas of ultracold atoms
Nature,**415**,39(2002)
- 2、O.Mandel , M.Greiner , A.Widera , T.Rom , T.W.Hansch and I.Bloch
Coherent Transport of Neutral Atoms in Spin-Dependent Optical Lattice Potentials
Phys. Rev. Lett.,**91**,010407(2003)
- 3、M.Barrett , J.Sauer , and M. S. Chapman
All Optical Atomic Bose-Einstein Condensates
Phys. Rev. Lett.,**87**,010404(2001)
- 4、Toshiya Kinoshita, Trevor Wenger, and David S. Weiss
All optical Bose-Einstein condensation using a compressible crossed dipole trap
Phys. Rev. A,**71**,011602(2005)
- 5、Hidetoshi Katori, Tetsuya Ido and Makoto Kuwata-Gonokami
Optimal Design of Dipole Potentials for Efficient Loading of Sr Atoms
Phys. Rev. A,**71**,011602(2005)