

BEC 生成へ向けた光双極子トラップ中の⁸⁷Rb 原子の高密度化

岸本研究室 三浦 拓朗

1 背景・目的

我々の研究室では、連続的なボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の生成を目標の一つとしている。今まで行われている BEC を用いた干渉実験や原子波レーザーなどの実験は、1 回 1 回生成した BEC を用いている。しかし一度に生成できる BEC の原子数には限りがあるため、原子数に制約がある中で実験が行われている。BEC を連続的に生成したり、溜め込んだりできるようになれば、干渉実験であれば S/N がよくなるなどの利点があり、実験の幅を広げることができる。

BEC 生成のためには位相空間密度を増加させることが重要である。一般的には磁気光学トラップ (MOT: Magneto Optical Trap)、圧縮磁気光学トラップ (CMOT: Compressed MOT)、磁場トラップあるいは光双極子トラップ (FORT: Far Off Resonance optical dipole force Trap) 中での蒸発冷却の手法を時間的に切り替えて行い、位相空間密度を増加させることで BEC を生成する。この時間的な切り替えの代わりに、空間的に領域を分離し、全ての冷却過程を同時に行うことができれば原子を連続的に冷却し続けることができると考えられる。また、さらに定在波による移動型光ポテンシャルに原子をロードすることで、

連続的に MOT 領域から原子を引き出すことが可能であると考えられる。よって、我々は FORT を用いる全光学的な手法を用いる。

本研究の目的は、MOT から FORT への定常的な移行を確立するための技術の開発である。時間的操作による全光学的手法では、FORT への移行の際に、MOT に用いる repump 光の強度を弱め、cooling 光の周波数を掃引させるのが一般的である [1]。しかし、今回の実験の場合、定常的に FORT へ移行させることを考えるため、repump 光及び cooling 光は常に働かせておく必要がある。そこで、MOT 領域の中心で repump 光の強度を弱くするダークスポットを形成し、さらにその中心に FORT のための 1064nm 波長のレーザー光を入れる。そして、cooling 光の周波数を掃引する代わりに depump 光を入れることで FORT に原子をロードすることを目指している。しかし、depump 光の効果や、周波数などの最適な条件は定かではないため、本研究では depump 光の効果を検証する。

2 離調掃引による光双極子トラップ

我々の目的は、depump 光を用いることで、cooling 光は働かせたまま定常的に FORT に原子をロードすることであるが、結果の比較のためにまずは cooling 光の離調を掃引する

手法により FORT へのロードを行った。

2.1 実験パラメータ

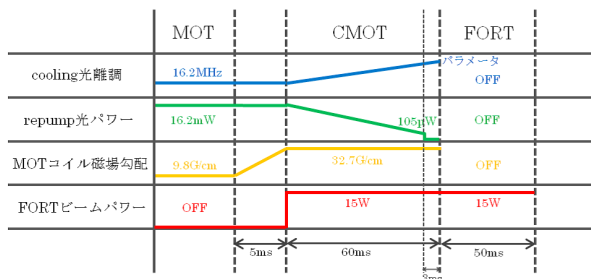


図 1 離調変化による FORT のタイミングチャート

cooling 光の離調変化により, FORT にロードされる原子数や温度, 数密度, 位相空間密度がどう変化するかを図 1 のようなタイミングチャートで測定した. FORT 中では, 異なる超微細構造の準位を占める原子の 2 体衝突 (hyperfine-changing collisions) がロスの原因になる [2]. そこで, FORT にロードする原子を全て $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$ に溜め込むために CMOT の最後の 3ms は repump 光を完全に切った. なお, まずは捕獲される原子数の比較をするために, 十分に深い FORT のポテンシャルを形成して実験を行った. FORT ビームの波長 1064nm, ビームスポットの e^{-2} 半径 $25 \mu\text{m}$ であり, FORT ビームのパワー 15W のとき, ポテンシャルの深さは 2.3mK となる.

2.2 離調掃引による FORT へのロードの結果

測定の結果を図 2 に示す. 離調 60MHz 付近までは離調をとるほど多くの原子がロードされているが, それ以上離調を大きくすると減少してしまっていることがわかる. 離調を大きくすることで原子が $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$ にいる割合が増えるが離調を大きくすると CMOT

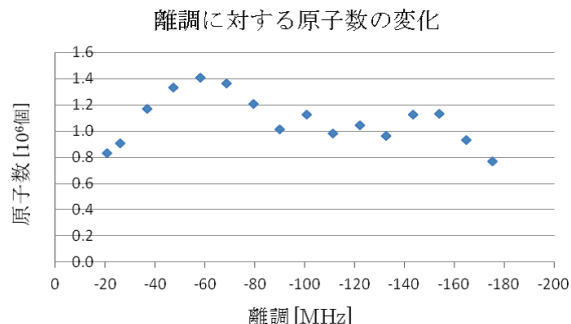


図 2 cooling 光の離調に対する原子数の変化

の密度が減少するためローディング効率はトレードオフになる. 離調 60MHz 付近までは $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$ にいる割合が増える効果の方が大きいためロードされる原子数が増加したが, それ以上では密度の減少の効果が大きくロードされる原子数が減少したと考えられる. 離調が -58MHz のとき, 原子数は 1.4×10^6 , 温度は $410 \mu\text{K}$, 数密度は $4.7 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, 位相空間密度は 3.8×10^{-8} であった.

3 depump 光による光双極子トラップ

cooling 光の離調を掃引する代わりに, depump 光を照射することにより FORT に原子をロードする手法と結果について述べる.

3.1 depump 光の周波数制御

FORT ビームによりシュタルクシフトを受ける原子に対し, depump 光の最適な周波数を求める必要があるため, depump 光の周波数は任意に制御できるようにする必要があった. そこで自己遅延の干渉信号を利用した周波数オフセットロックシステム [3] を用いて, depump 光の周波数制御を行った. 図 3 に周波数オフセットロックシステムのブロック図を示す. depump 光の周波数と原子のエネルギー準位の間を関数を図 4 に示す. cooling 光用

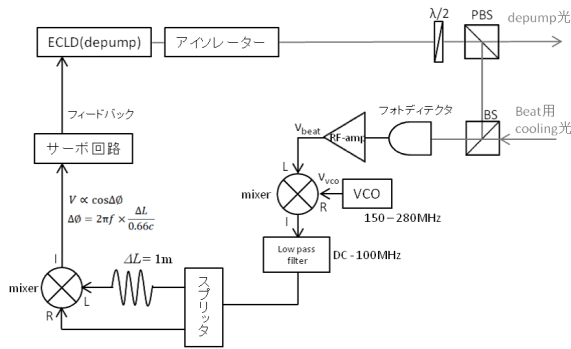


図3 depump用レーザーのオフセットロック

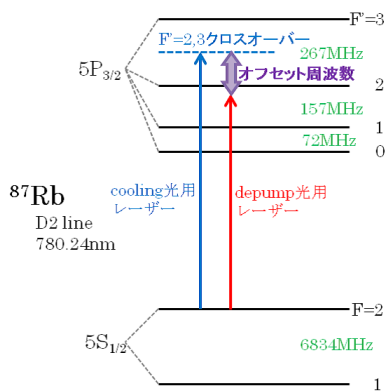


図4 エネルギー準位とオフセット周波数

レーザーは ^{87}Rb の飽和吸収線 $|5S_{1/2}, F=2\rangle$ から $|5P_{3/2}, F'=2\rangle$ と $|5P_{3/2}, F'=3\rangle$ のクロスオーバーにロックされている。depump 光用レーザーは cooling 光用レーザーとのビートを取り、ビート信号をロックする。このときのビート信号の周波数がオフセット周波数となる。VCO の発振周波数でオフセット周波数を制御できるため、depump 光の周波数を任意に制御することができる。このシステムでは $+300 \sim -300\text{MHz}$ の範囲でオフセット周波数を制御することが可能である。

3.2 実験パラメータ

depump 光を照射することで、FORT にロードされる原子数がどう変化するかを図5のようなタイミングチャートで測定した。depump 光は FORT ビームや cooling 光とは

異なる軸から原子集団に照射する。depump 光のビーム径は $1/e^2$ 半径 0.5mm であるため、FORT のトラップ領域よりも十分に広い範囲に照射する。

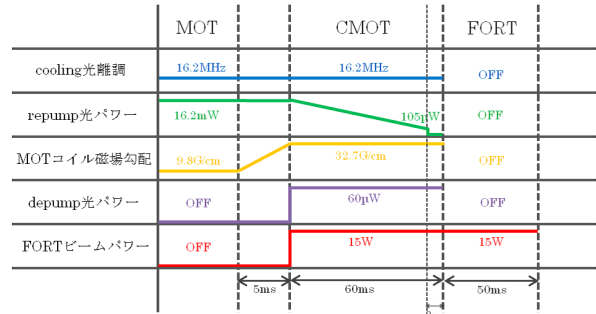


図5 depump 光による FORT のタイミングチャート

3.3 最適な depump 周波数

オフセットロックシステムを用いて depump 光の周波数を変化させ、図5に従ってロードされる原子を測定すると、図6、図7に示すように、ロードされる原子数がピークになる depump 周波数がオフセット周波数-136MHz、-288MHz の2つ存在した。オフセット周波数-136MHz は、シュタルクシフトを起こしていない原子の $|5S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}, F'=2\rangle$ 遷移に共鳴な周波数になっている。また、オフセット周波数-288MHz は $|5S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}, F'=1\rangle$ 遷移に共鳴な周波数になっている。FORT ビームパワーを 7.4W にしてシュタルクシフト量を変化させた場合でも同様のオフセット周波数でロードされる原子数がピークになる。よって原子が FORT ビームによりシュタルクシフトを受けている領域ではなく、その外側の領域の原子を $|5P_{3/2}, F'=1\rangle$ 準位に落とし込むことで FORT にロードしていると考えられる。

オフセット周波数-136MHz のとき、原子数は 1.2×10^6 、温度は $360 \mu\text{K}$ 、数密度は

$4.1 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, 位相空間密度は 3.9×10^{-8} であった。また, オフセット周波数-288MHz のとき, 原子数は 9.5×10^5 , 温度は $340 \mu \text{K}$, 数密度は $3.7 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, 位相空間密度は 3.8×10^{-8} であった。

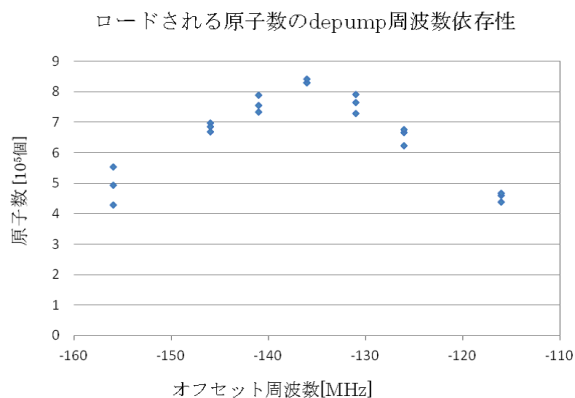


図 6 ロードされる原子数の depump 周波数依存性 1

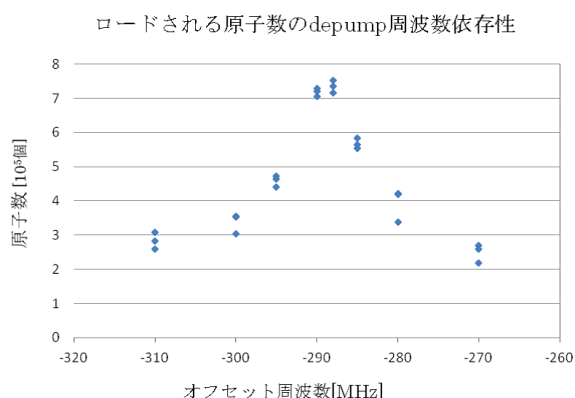


図 7 ロードされる原子数の depump 周波数依存性 2

3.4 ロードされる原子の FORT ビーム強度依存性

前節までに述べた結果は, ロードされる原子数の比較のために十分深い FORT ポテンシャルを形成した場合の結果である。そのためロードされた原子の温度は高くなっており, 位相空間密度が増加していなかった。そ

こで, FORT ビームのパワーを弱くした場合に, ロードされる原子のパラメータがどう変化するかを調べた。FORT ビームパワーを下げ, FORT ポテンシャルを浅くすると, ロードされる原子数が減少するが, 温度も低くなることが確認できた。FORT ビームパワーに対する位相空間密度の変化を図 8 に示す。原

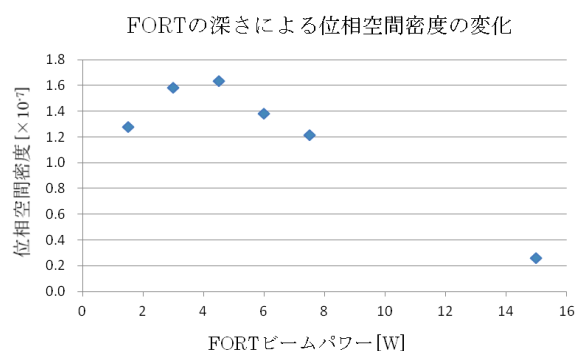


図 8 FORT の深さによる位相空間密度の変化

子数の減少と温度の低下のトレードオフにより, FORT ビームパワー 4.5W のとき位相空間密度がピークをとることが図 8 からわかる。このときの原子数は 7.4×10^5 , 温度は $120 \mu \text{K}$, 数密度は $3.2 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, 位相空間密度は 1.6×10^{-7} であった。

4 FORT のトラップ寿命

FORT 中では, 原子同士の衝突や, バックグラウンドのガスとの衝突によるロスが生じる。FORT にロードされて数密度が高い状況では原子同士の 2 体衝突によるロスが支配的になり, 数密度が低くなると 2 体衝突のレートが下がってバックグラウンドのガスとの衝突によるロスが支配的になる。ここでは, FORT にロードされた原子のバックグラウンドのガスとの衝突によるロスに対する寿命を評価する。

4.1 トラップ寿命

図5のFORTの時間を変化させ、長くしていくことでFORT中の原子数がどのように減少するかを測定した。測定の結果を図9に示す。図9の結果より、トラップ寿命は730ms

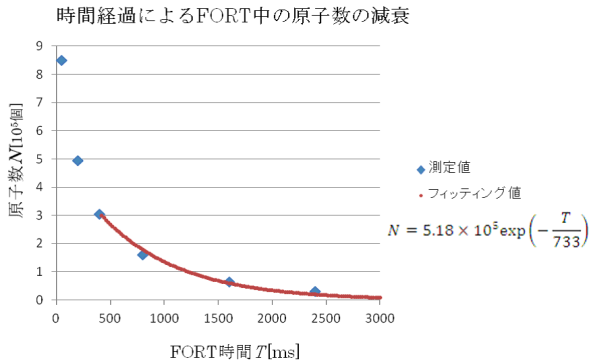


図9 depump 光による FORT の原子数の減衰

となった。TOF 測定により求めた原子数を N ,FORT 時間を T として $N = a \exp(-T/t)$ の式にフィッティングしたときの t をトラップ寿命とした。これは、ローディング時の原子数から $1/e$ に減衰するまでの時間である。なお、FORT にローディングしてすぐは2体衝突により急激に原子数がロスするため、400ms 以降のデータを用いてフィッティングした。

図9の結果はFORT ビームパワー 15W としたときの結果であるが、トラップ寿命がFORT ビームパワーに依存するかを調べるためにFORT ビームパワーが低い条件で同様にトラップ寿命の測定を行った。すると、FORT ビームパワー 7.4W のときトラップ寿命は 1300ms ,FORT ビームパワー 3.7W のときトラップ寿命は 1800ms となり、ビーム強度に依存したロスが起きていることが確認できた。しかし、FORT ビームは大きく負に離調をとっているため、散乱レートは非常に小さく原子のロスに起因しているとは考えに

くい。本実験ではマルチモードのファイバーレーザーを用いており、 $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$ の原子を $|5S_{1/2}, F = 2\rangle$ にポンプさせてしまい、それらの間の hyperfine-changing collisions によって原子のロスが加速されている可能性が考えられる [4]。

4.2 MOT 条件でのトラップ寿命

定常的に MOT から FORT に原子をロードする際には、FORT のトラップ領域には cooling 光や repump 光が定常的に存在することになる。よって、ここでは cooling 光や repump 光が存在する状況下での FORT のトラップ寿命を評価する。cooling 光は MOT 条件のまま維持し、repump 光は CMOT 時に 105 μ W まで落とした状態で維持する。これは、ダークスポットにより repump 光強度を落とした場合の MOT の条件になっている。この条件下で FORT 時間を長くしたときの原子数の減衰を測定した結果を図10に示す。こ

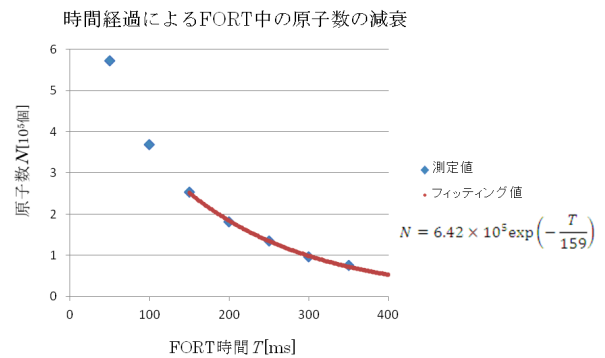


図10 MOT 条件での FORT の原子数の減衰

のときトラップ寿命は 160ms であり、cooling 光や repump 光を切った前節の結果より短くなっている。FORT 中の原子集団が cooling 光により散乱されていることになる。ただし、本研究では連続的な BEC の生成を目指しており、定在波による移動型光ポテンシャルで原子を MOT 領域から引き出すことを考えて

いる．そのため，トラップ寿命 160ms は，原子を MOT 領域から引き出すことが可能な時間領域に達しているといえる．

5 まとめと今後の展望

本研究では，MOT から FORT への定常的ロードに向けて，cooling 光を変化させずに原子を FORT にロードできるかを検証した．

まず一般的な手法として，cooling 光の離調を変化させる手法により FORT へのロードを行った．最もロード効率がよいのは離調を -58MHz まで変化させた場合で，FORT にロードされた原子数は 1.4×10^6 ，温度は 410 μ K，数密度は $4.7 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ，位相空間密度は 3.8×10^{-8} であった．次に，cooling 光の離調を変化させる代わりに，depump 光を照射する手法で FORT へのロードを行った．depump 光の周波数を，シュタルクシフトを起こしていない原子に対して $|5S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}, F' = 2\rangle$ 遷移及び $|5S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}, F' = 1\rangle$ 遷移に共鳴に近くしたときにロードされる原子数がピークになった． $|5S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}, F' = 2\rangle$ 遷移に共鳴な周波数のときの方が 2 割ほどロードされる原子数が多く，原子数は 1.2×10^6 ，温度は 360 μ K，数密度は $4.1 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ，位相空間密度は 3.9×10^{-8} であった．cooling 光の周波数を変化させなくても同程度の原子数を FORT にロードすることができた．

FORT ビームパワー 15W のときのトラップ寿命を測定したところ，730ms であった．FORT ビームパワーを弱くするとトラップ寿命が長くなることから，ビーム強度に依存したロスが起きていることがわかった．定常的に MOT から FORT に原子をロードする際に

は FORT のトラップ領域に cooling 光や弱い repump 光が存在する．その状態での FORT のトラップ寿命を測定すると 160ms であり，cooling 光や repump 光を切った場合と比較すると原子数のロスが加速されている．ただ，連続的な BEC の生成を目指す際には定在波による移動型光ポテンシャルを用いることができるため，その点では MOT 領域から原子を引き出すことが可能な時間領域に達していると考えられる．

なお本実験では，depump 光の効果の検証を目的としていたため，FORT にロードする際に repump 光の強度と磁場勾配は時間的に変化させていた．しかし定常的に MOT から FORT へのロードを行う際には repump 光の強度は一定にしておく必要がある．そこで repump 光のダークスポットの組み込みや折り返し MOT の改善により，時間的に repump 光の強度や磁場勾配を変化させずに原子を FORT にロードすることが今後の課題である．

参考文献

- [1] K J Arnold and M D Barrett, arXiv:1101.1140v1 (2011)
- [2] D. Senko, T. Walker, C. Monroe, A. Gallagher, and C. Wieman, *Phys. Rev. Lett.*, **63**, 961(1989)
- [3] U. Schuermann, H. Engler, R. Grimm, M. Weidemuller, and M. Zielonkowski, *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 242(1999)
- [4] T. Lauber, J. Kuber, O. Wille, and G. Birkl, *Phys. Rev. A*, **84**, 043641 (2011)