

# 全光学的に生成した BEC を用いた原子干渉計の開発

中川研究室 氏名：平井 秀一

平成 23 年 3 月 4 日

## 1 背景・目的

本研究では以下の 2 つの項目を目標として掲げている。

それは、1. 全光学的に BEC 原子を生成する装置の開発、2. 生成した BEC 原子を用いた原子干渉計の開発である。

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  $^{87}\text{Rb}$  原子をトラップすることでボース凝縮体の生成に成功しており、原子干渉計の実験がなされている。しかし、チップ上では重力方向からレーザーを入射できず上記の実験を実行できない。全光学的手法による BEC 生成では、これを回避でき且つ原子干渉計実験を行う際のレーザー光路を十分確保できる。さらに、本研究における光双極子トラップには  $1.0\ \mu\text{m}$  光を用いるため、 $\text{CO}_2$  レーザーで用いているような  $\text{ZnSe}$  などの特別な光学素子が必要なく実験装置の汎用性を上げることができる。また、同じ実験装置で 3 次元光格子のような BEC 原子を 3 次元的に操作する場合への将来性・拡張性も期待できる。

すでに、我々の研究室では全光学的手法による BEC 生成を Single-MOT システムによって実験してきたが、蒸発冷却過程において初期原子数が不足で BEC 生成には至らなかった。これは主に 2 つの理由が考えられている。1

つには光双極子トラップ中における原子の寿命である。この装置では MOT の寿命が 20 s、光双極子トラップの寿命が 1~5 s 程度であった。この寿命では蒸発冷却中に原子数をロスしてしまい、十分な蒸発冷却を行うことができない。この原因はバックグラウンドのガス圧よるものと考えられており、真空度を改善する必要があった。2 つ目は初期原子数が不足していることである。蒸発冷却の際に原子数が不足していると数密度が上がらないため冷却が進まなくなる。この装置では MOT の段階で  $7 \times 10^7$  個、クロス双極子トラップに  $10^5$  個ローディングしている。これを MOT の段階で原子数が  $10^8$  個、トラップ寿命が 30 s、シングル光双極子トラップに  $10^6$  個、クロス光双極子トラップに  $10^5$  個ローディングする必要がある。光双極子トラップ内での寿命は少なくとも 5 s 以上必要である。

以上から、真空を悪化させずに多くの原子をローディングできる装置の開発が必要となった。

## 2 Double-MOT システムの開発

Double-MOT システムは磁気光学トラップ (MOT: Magneto Optical Trap) を 2 つ用意するもので、これは真空度を維持したまま実験に使える原子数を増やすことができる。通常、MOT では捕獲できる速度領域以外の原

子というのはチャンバー内の真空度を悪くしてしまう。従って、より多くの原子を捕獲しようとする結果的に真空度が悪化させてしまうため、真空度と原子数はトレードオフの関係にある。

これを改善するため、MOT を 2 つ使い、1 つ目の MOT (以後、1st MOT) で予備冷却された原子を必要な分だけ 2 つ目の MOT (以後、2nd MOT) に移行する。この時、1 次側のチャンバー (以後、1 次側) と 2 次側のチャンバー (以後、2 次側) の間のコンダクタンスを悪くすることで 1 次側と 2 次側に真空差をつけることができる。こうすることで、1 次側の真空が悪化しても 2 次側の真空は維持できるため、2 次側は真空を維持したまま原子数を増やすことができる。

### 2.1 低速原子源

次に 1 次側の低速原子を 2 次側に送り出すシステムについて考える。

1st MOT 原子を 2 次側に送り出す機構としては、プッシュビームで押し出す方式と 1st MOT 原子全体を 2 次側に移行する方式がある。後者の方式は、重力で落とす方式やリニアレールで移行する方式 [4] があるが、装置が巨大化してしまうことや移行速度の問題から、本研究では前者の方式を採用した。高いコンダクタンスを得ようとする穴の半径を小さくするのが一番効率的である。しかしながら、小さい穴を通るようにプッシュビームのアライメントをするのが難しく結果的に実験の効率を悪くしてしまう。そこで図 1 のように穴開きミラーを真空チャンバー内に配置し、その折り返しビームを使って MOT をつくる。穴が開いている部分からの反射はないため、穴の投影部分に相当するビームは実効

的にプッシュビームとなる。つまり、MOT の中心と穴の中心さえ一致していれば、必ず原子が 2 次側に押し出されるようになる。この低速原子源は LVIS [1] と呼ばれており、アンチヘルムホルツコイルを用いた 3 次元の四重極子磁場を使った方法である。

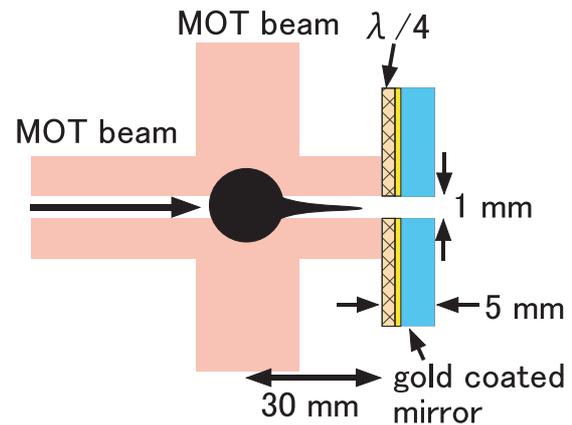


図 1 LVIS

### 3 2nd MOT の特性評価

2nd MOT では 1 次側から送られてきた原子を余す所なく再捕獲したいという要望がある。これは 2 次側の真空度を悪くせずに多くの原子を捕獲できることを意味している。

2nd MOT では室温原子のトラップではなく一度冷却された遅い原子の再トラップであるため、MOT のコイルの磁場勾配、cooling 光の離調が異なることが予想された。また、1 次側チャンバーとの圧力差も 2nd MOT に影響を及ぼすパラメータとして扱った。ただし、1 次側チャンバーの圧力はディスペンサ電流で評価した。MOT の特性評価として図 2 のローディングレート  $N_{\chi}$ 、MOT 時定数  $\tau$  および原子数  $N$  について実験を行った。2nd MOT の最適条件はこの 3 つのパラメータが最大値になるポイントを探すことである。



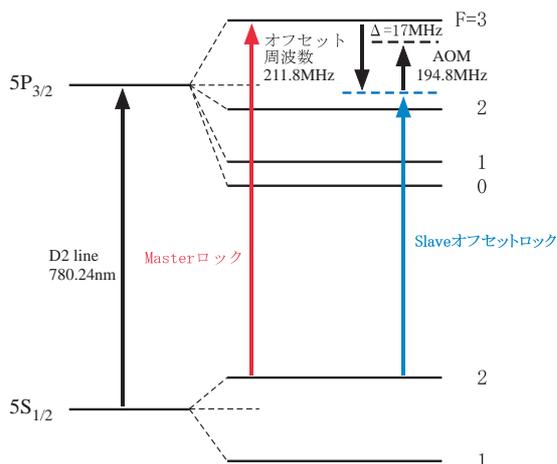


図 6 周波数ロックの準位とオフセット周波数

Master レーザーは  $|5S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}, F = 3\rangle$  の遷移に周波数ロックする。Slave レーザーは Master レーザーに対して  $-211.8 \text{ MHz}$  のところにオフセットロックする。この周波数からさらに AOM を使って  $+194.8 \text{ MHz}$  シフトさせることで、cooling 光として使用できるようになる。VCO の周波数を大きくするとオフセット周波数が大きくなり、結果として離調が大きくなる。このシステムで、 $-5 \sim -115 \text{ MHz}$  の範囲で離調を変えられるようになった。

## 5 シングル光双極子トラップ

シングル光双極子トラップに  $10^6$  個以上の原子が入らなければ、クロス光双極子トラップへローディングできる原子数を増やすことができず、蒸発冷却する際に原子数が足りなくなる。そこで、シングル光双極子トラップにローディングできる原子数をどれだけ増やすことができるか検証する。

### 5.1 離調変化によるローディング原子数

シングル光双極子トラップへのローディングの際、離調をパラメータとしローディングできる原子数の評価をしたのが図 7 である。こ

の図から、離調が大きくなるとローディングできる原子数が増えるが、 $60 \text{ MHz}$  より大きくなると原子数が飽和する。さらに、 $140 \text{ MHz}$  より大きくなると逆に原子数が減少する。このことから、離調を大きくすることで原子が圧縮され光双極子トラップへローディングされる効率が上がっていると思われる。しかし、MOT の時に圧縮されていたからと言って、光双極子トラップへローディングできる原子数が増えるわけではないことが分かった。離調を大きくしすぎると、逆に MOT の原子数が減少するため光双極子トラップへローディングできる原子数も減少しているものと思われる。以上のことから、光双極子トラップのトラップ体積は決まっているため、ローディングできる原子数が増えないということは光双極子トラップ内で数密度が高くなっていないことになる。

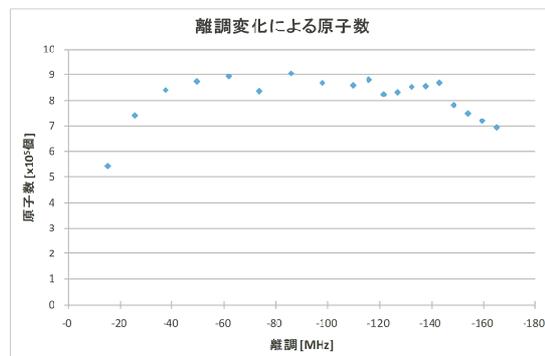


図 7 離調変化によるシングル光双極子トラップ内の原子数

### 5.2 dark state の検証

そこで、光双極子トラップにローディングした原子が  $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$  の dark state になっていないため、数密度が高くないのではないかと考えた。 $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$  の原子数評価は 2 枚の吸収像を撮ることで行う。1 枚は撮像直前に repump 光を入射し、もう 1 枚は

入射しない．repump 光を入射した場合は，図 8 から分かるように  $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$  の原子は  $|5S_{1/2}, F = 2\rangle$  に遷移するため，すべての原子を撮像できる．一方，repump 光を入射しない場合は， $|5S_{1/2}, F = 2\rangle$  の原子しか probe 光と共鳴しないため撮像できない．この 2 枚の吸収像の差を評価することで， $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$  の原子数の見積りが可能となる．図 9 は離調変化における光双極子トラップ内の  $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$  である原子数の割合を示したものである．この図から，離調が 17 MHz  $\rightarrow$  30 MHz の変化においては，急激に  $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$  に移行できている原子の割合が増えるが，それ以上の離調では増加は見られない．つまり，光双極子トラップ内では離調大きくしても原子を  $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$  の状態に遷移させることができているため数密度が高くなり，結果としてローディングできる原子数が増えないと推測できる．

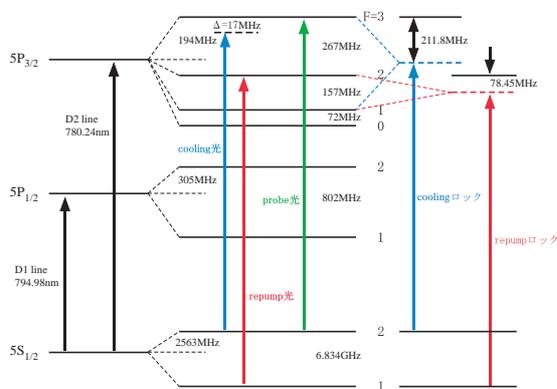


図 8  $^{87}\text{Rb}$  原子のエネルギー準位図

### 5.3 トラップ寿命

光双極子トラップ内の原子の時間的振る舞いは MOT の時ほど単純ではない．強い光電場の中で原子は光散乱され，急峻なポテンシャル内では原子同士の衝突によりトラップ内の原子数は減少していく．さらにバック

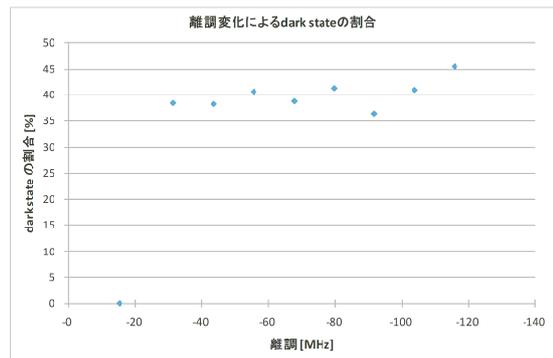


図 9 離調変化における dark state の割合

グラウンドのガス圧による減少もある．ここではバックグラウンドのガス圧による寿命を評価する．図 10 に光双極子トラップに原子をローディングしてからの原子数の減衰の様子を示す．この図では 1500 ms まで衝突による影響で急激に原子数が減少することが分かる．従って，2000 ms 以降のデータを使ってフィッティングしてトラップ寿命の評価を行った．この時のトラップ寿命は 2.8 s だった．しかし，光散乱の影響でトラップ寿命はレーザーパワーにも依存するため，レーザーパワーに対するトラップ寿命をこれからさらに評価していく必要がある．

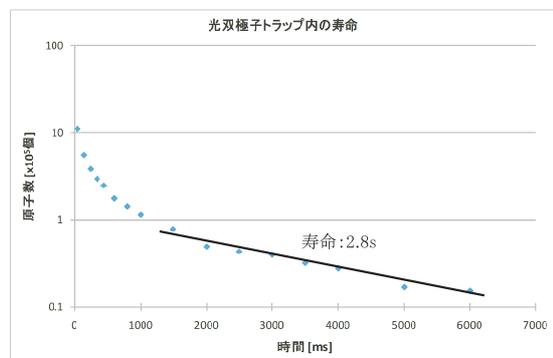


図 10 シングル光双極子トラップ内の原子数の時間的振る舞い

#### 5.4 最大ローディング効率

結果として、現在  $10^8$  個の MOT 原子をシングル光双極子トラップに  $1.26 \times 10^6$  個ローディングできた (図 11)。移行効率は約 1.3 % となり、この時の位相空間密度  $\rho_{ps}$  は  $5.2 \times 10^{-5}$  となった。

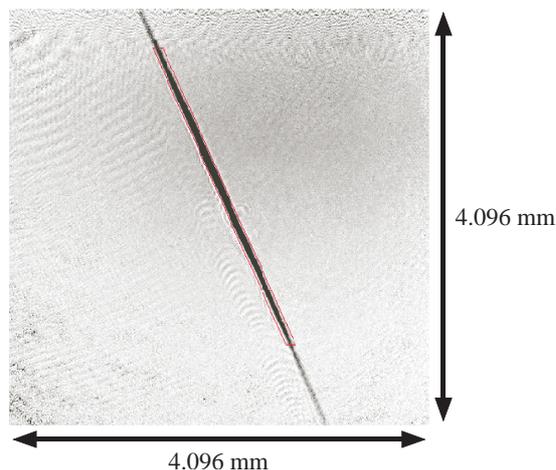


図 11 シングル光双極子トラップに最大効率でローディングした時の吸収像

## 6 まとめと今後の課題

本研究で私は光双極子トラップを用いて BEC を生成するため、Double-MOT システムを採用した新しい実験装置を開発した。

この装置では光双極子トラップへローディングする前段階である MOT で、原子数が  $7 \times 10^8$  個、トラップ寿命が 61.2 s となった。これは従来の実験装置に比べて、原子数で 10 倍、トラップ寿命で 3 倍改善したことになる。また、MOT への原子のローディングレートは  $9.5 \times 10^7$  個/s となり、数秒で実験に必要な  $10^8$  個を集めることができると分かった。

また、MOT から光双極子トラップへのローディングも行った。現在、シングル光双極子トラップに  $1.26 \times 10^6$  個、トラップ寿命 2.8 s、位相空間密度  $5.2 \times 10^{-5}$  でのローディングを実

現した。目標としていた原子数をローディングすることはできたが、この結果は想定していた原子数よりも少ない。これは  $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$  へ原子を遷移させることができていないためであると考えられ、今後、原子をさらに多くローディングするためには光双極子トラップ内で  $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$  へ遷移させるメカニズムを解明する必要がある。

さらに、この条件でもクロス光双極子トラップへローディングし、蒸発冷却して BEC 生成を試みる。

## 参考文献

- [1] Z.T. Lu, K.L. Corwin, M.J. Renn, M.H. Anderson, E.A. Cornell, C.E. Wieman  
*Phys. Rev. Lett.*, **77**, 3331(1996)
- [2] K J Arnold and M D Barrett  
arXiv:1101.1140v1 (2011)
- [3] U. Schunemann, H. Engler, R. Grimm, M. Weidemuller, M. Zielonkowski  
*Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 242 (1999)
- [4] 修士論文 鈴木裕介 中川賢一研究室 電気通信大学 (2005).
- [5] 修士論文 関邨哲雄 中川賢一研究室 電気通信大学 (2009).