

# 全光学的 BEC 生成のための 光双極子トラップ用高出力レーザーの開発

中川研究室 鈴木 勇輝

平成 25 年 3 月 4 日

## 1 背景・目的

本研究の目的は次の二点である。

1. 光双極子トラップ中での BEC 生成
2. BEC 原子を用いた原子干渉計の開発

我々の研究室では既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ズ凝縮体の生成に成功し、原子干渉計の実験まで行われている。しかし、トラップ原子はアトムチップに非常に接近した磁場にトラップされているため重力方向にレーザーを入射できず、前述したランポリン式原子干渉計の実験は不可能であった。一方で、全光学的手法により BEC を生成すれば、原子干渉計実験のためのレーザー光路を確保することは容易であるため、光格子トラップなどの原子を三次元的にトラップするなどの実験の将来性を望むことも可能である。そこで我々は  $\text{Rb}$  原子を磁気光学トラップで捕獲し  $1\ \mu\text{m}$  のレーザー光によるクロス光双極子トラップに移行させることによって全光学的な BEC の生成を行っている。この手法の利点は、実験装置及び実験方法が簡潔、BEC への光学アクセスが容易、短時間で BEC を生成可能であることが挙げられる。これらの特徴は、今後行う予定である BEC を用いた原子干渉計の実験において、非常に大きな利点である。一方問題点として、光双極子トラッ

プへ原子数の損失を抑えたローディングが難しく、高効率な蒸発冷却の為の条件が厳しいという問題が挙げられる。また、BEC 生成の再現性が低いという問題もある。また、光双極子トラップ用レーザー光源に既製品を用いていた。この光源にはレーザー強度の不足などの問題と、修理に長時間要してしまう問題があり、この問題を解決するためレーザー光源の製作が必要となった。

## 2 光双極子トラップ、蒸発冷却

### ・トラップ寿命

光双極子トラップ寿命は  $19\text{W}$  のとき数秒程度と短く、一般的な蒸発冷却時間は  $10\text{s}$  程度であるから十分なトラップ寿命ではなかった。この原因として考えられるのは、トラップ中の原子が何らかの拍子に  $5S_{1/2}F=1$  から  $F=2$  へ励起してしまい、その励起した状態で原子同士が衝突した際に元の順位に遷移することでトラップポテンシャルから飛び出すのに十分な運動量を得てしまうことである。当初は光双極子トラップに用いるレーザーはマルチモードのファイバーレーザーを用いており、その周波数モードは図 6.5 に示したように、各モード間周波数が  $6\text{MHz}$  であった。これに対して  $5S_{1/2}F=1$  から  $F=2$  準位間周波数は  $6.8\text{GHz}$  であり、この周波数と各モード

の周波数間隔の整数倍が一致してしまうと  
 トラップ中の原子は励起してしまうため、  
 ファイバーレーザーの周波数間隔は非常に  
 狭いという事が出来、原子は励起してしま  
 っていると考えられる。そこで、光双極子  
 トラップに用いるレーザーを  
**YLR-50-1060-LP-SF,IPG Photonics**  
 社製のシングルモードレーザーに変更し、  
 再び寿命を測定した結果が図 6.6 である。  
 この図からわかるように、シングルモード  
 レーザーを用いた場合にトラップ寿命  
 の大幅な改善が見られ、蒸発冷却の初期パ  
 ワー18W でトラップしても寿命は 17s で  
 あり、十分なトラップ寿命を得る事が出来  
 た。これ以降 BEC 生成に用いたレーザー光  
 源は、YLR-50-1060-LP-SF,IPG Photonics  
 社製のシングルモードレーザー光源である。

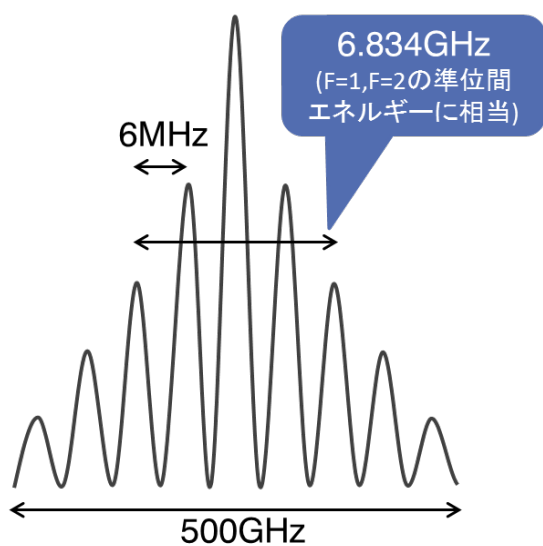


図 1 マルチモードレーザーの  
 周波数分布イメージ

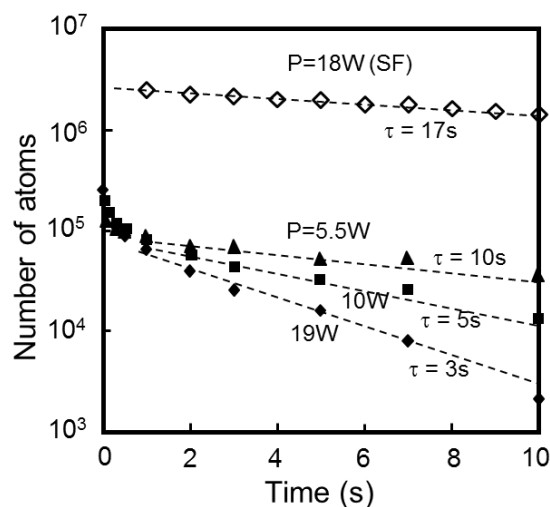


図 2 マルチ、シングルモードレーザーによる  
 トラップ寿命への影響

・蒸発冷却曲線

各蒸発冷却中のレーザーパワーは、まず初  
 めの 17W からパワーを減衰していく。パ  
 ワーが半分のところを次の点とし、半分に  
 なるまでの時間  $t$  を位相空間が最大となる  
 ように設定し、また次の点を探す、という  
 方法で図 6.10 のような冷却曲線を設定し  
 た。また、理論曲線  $U(t)$  は[1] で求められ  
 た最適な蒸発冷却のトラップポテンシャル  
 の減衰曲線であり、その関数は、

$$U(t) = U(0) \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-\beta}$$

$\gamma_i$ :初期弾性衝突レート、 $U(0)$ : 初期トラ  
 ップポテンシャル  
 と表すことができる。

(1) 前で述べたような方法で設定した蒸発  
 冷却曲線と理論曲線  $U(t)$  はこの区間にお  
 いてはほぼ一致していることがわかる。こ  
 のことからこの区間では最適な蒸発冷却が  
 行われているといえる。

(2) この区間では、位相空間密度の増加率が低下していることがわかる。この原因として考えられるのは、主にレーザーパワー減衰に伴うトラップ周波数低下や重力の影響、バックグラウンド圧力による影響がある。トラップ周波数が低下することにより、三体衝突が起こりにくくなり、より影響が強いのはバックグラウンド圧力によるトラップ寿命の現象であると考えている。そのため、蒸発冷却終盤では理論曲線よりも減衰を早めることでより効率的に冷却を行う事が出来た。

・ BEC 生成

以上のような冷却過程を行い、我々は BEC を生成することに成功した。図 6.12 は CCDカメラ (EVOLVE 512) を用いて吸収撮像法により得られた BEC の原子密度分布を表した図である。また、図 6.13 は横軸が BEC 中心を通るように直線を引き、その直線上の原子密度分布をプロットしたものである。図 6.13(1) では、測定値はガウシ

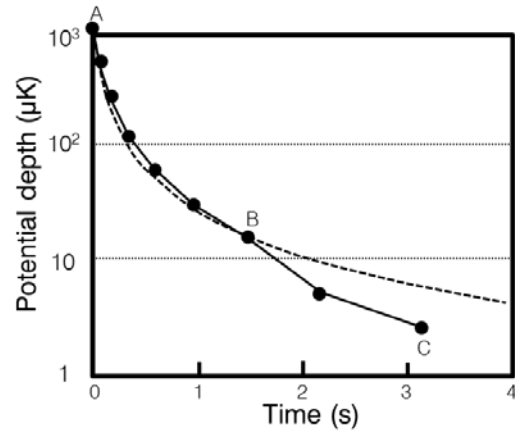


図 3 蒸発冷却曲線

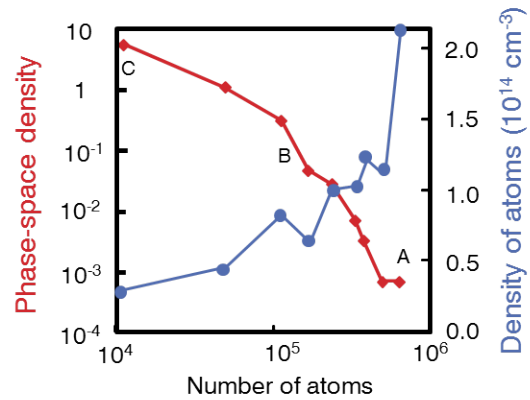


図 2 位相空間密度、原子密度の時間変化

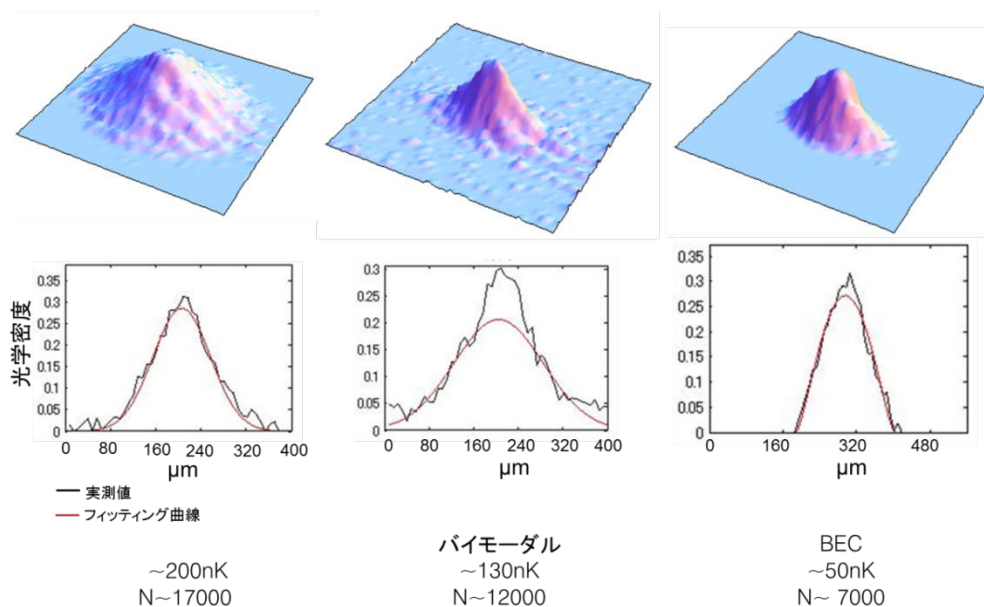


図 3 BEC

アンフィッティングとほぼ一致しており、まだサーマルな原子であることがわかる。次に図 6.13(2) では中心あたりの測定値がフィッティングから大きくずれており、これはサーマルと BEC の二つの原子分布が存在しており、そのことからバイモーダル状態と呼ばれる。この状態は、BEC への相転移温度付近で現れるため、相転移温度  $T_c$  は 130nK 付近であるという事が出来る。そして図 6.13(3) を見ると、BEC 特有の原子密度分布曲線である二次関数のフィッティング曲線が測定値とよく一致していることから BEC が生成されていることがわかる。

### 3 再現性の低さ

我々の BEC 生成再現性が低く、10 回に一回程度の頻度でしか生成できないという問題があった。その原因として蒸発冷却終盤のトラップポテンシャルの揺らぎが考えられる。光双極子トラップが十分大きいトラップポテンシャルである時には、重力の影響を無視する事が出来るが、蒸発冷却が進みトラップポテンシャルが低下してくると 図 6.14 のように 重力によるトラップポテンシャルの変化が顕著に表れ

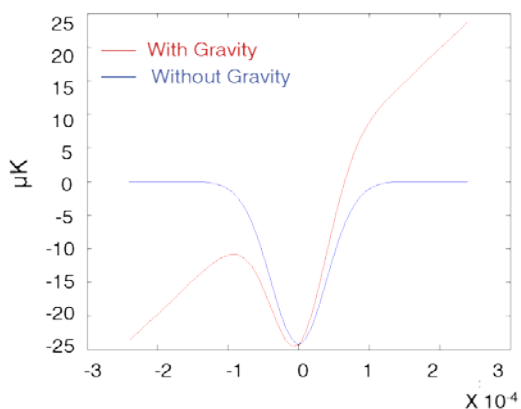


図 5 重力によるトラップポテンシャル歪み

るようになってくる。蒸発冷却終盤近くでは重力成分の影響が大きくなり、Z 軸方向のトラップポテンシャルに歪みを生じさせることとなる。この歪みはポテンシャルが少し変化するだけで大きく変わる。そこで、蒸発冷却終盤辺りでのレーザーパワーの揺らぎを計測した。このとき実験で用いていたレーザーは、YLR-50-1060-LP-SF,IPG Photonics 社製のシングルモードレーザー光源である。下図のようにチャンバーを通過したレーザーの一部をガラス板で反射させそのレーザー強度の計測を行った。

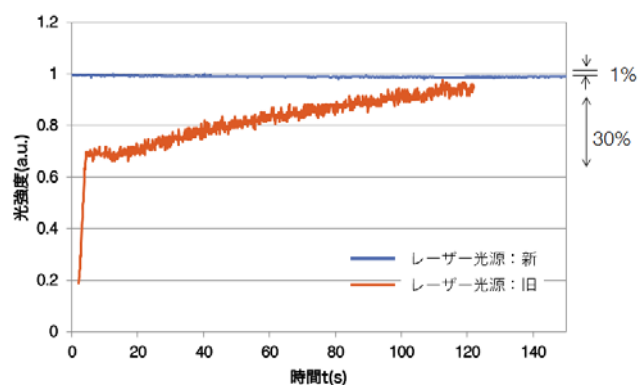


図 4 光双極子トラップ用レーザーの  
パワー安定度

図 6 からわかるように、変更前のレーザー光源では数分単位でレーザーのパワーが揺らいでいる。それに対して新しいレーザー光源によるレーザーパワーに大きな変化は見られない。このことから、パワー揺らぎの原因は AOM や光学素子の熱レンズ効果、レーザー光源本体のパワー揺らぎ等が考えられる。次にこのパワー揺らぎの蒸発冷却への影響について考える。図 6.14 を見ると、蒸発冷却の終盤近くではレーザーパワーが 10% 程度の変化でも大きくトラップポテン

シャルに影響を及ぼすことがわかる。それに対して、図 6.17 では 30%程度もの強度揺らぎを観測した。このレーザー強度揺らぎによってトラップポテンシャル深さの不安定さが生じてしまっており、これが再現性低下の原因であると考えている。レーザー光源を、Seed 光から出力されたレーザーをファイバーアンプ (NUA-1064-PC-0015-AO Nurnern 社) により増幅する方式へ変更し、AOM回折効率を再び 2.6% に設定して測定を行った。レーザー光源:旧のデータは、図 6.18 と同じデータである。上図からわかるように、変更後のレーザーパワーの強度揺らぎは 1%程度と十分に抑えられている。今後、このレーザーを用いて光双極子トラップを行い、BEC生成の再現性への影響を調べていきたい。

#### 4 固体レーザー(DPSS レーザー)

- ・必要とされる性能

以前と同じ条件で光双極子トラップ行うためには以下のような性能のDPSSレーザーが必要となる。

##### (1) 出力パワー18W

先に述べたように、トラップポテンシャルは1mK程度必要である。ビーム径を40μmにすると、必要な出力パワーは18Wとなる。

##### (2) 周波数モード:シングルモードまたはマルチモード

マルチモードでも 6.8GHz に相当しない FSR を持っていること FSR が 6.8GHz に相当するということは、FSRの整数倍が 6.8GHz になるということである。前述し

たように、FSRの整数倍が 6.8GHz になると光双極子トラップの原子トラップ寿命が減少する。

(3) 空間モード:シングルモードまたは 40 μm まで絞ることのできるマルチモードレーザー空間モードがマルチモードである場合、高次モードのレーザーはシングルモードに比べて集光性が悪いので一般的にはシングルモードレーザーの方が良い。

(4) パワー安定性:パワー揺らぎが 1% 程度

- ・レーザーの測定・評価

下図のように光学系を組み、製作したレーザーの各特性を評価した。

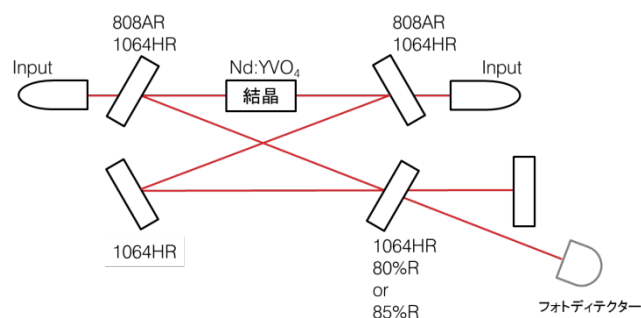


図 6 製作した共振器

ミラー反射率 80%、85%のどちらが適しているのかを決定するためそれぞれのミラー反射率で共振器を組んで測定を行った。その結果を示したグラフが図 8 である。

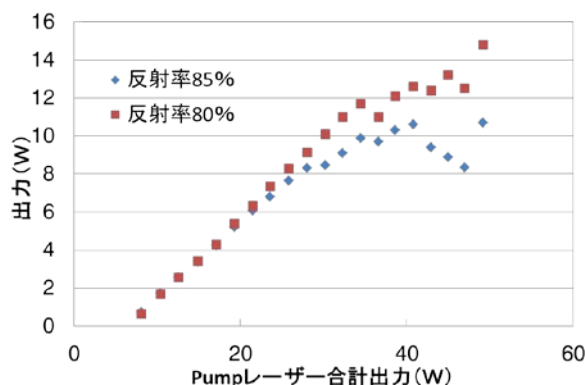


図 8 反射率による出力レーザーパワーへの影響

この図からわかるように、最大レーザー出力は反射率80%の方が高いため80%のミラーを使用することにした。

次に、出力レーザーの空間モードを調べた。図9からわかるように、出力レーザーの断面が円形でなくレーザー強度分布でありマルチモードである。

出力パワーは20W程度となり十分な出力パワーを得ることが出来た。

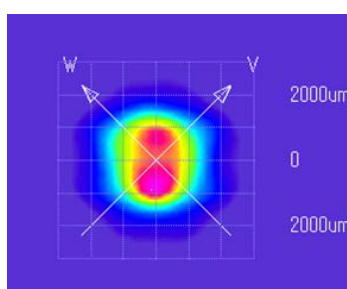


図9 空間モード

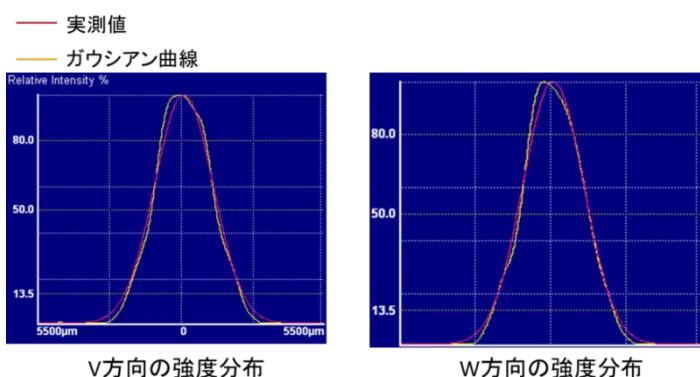


図10 レーザー強度分布

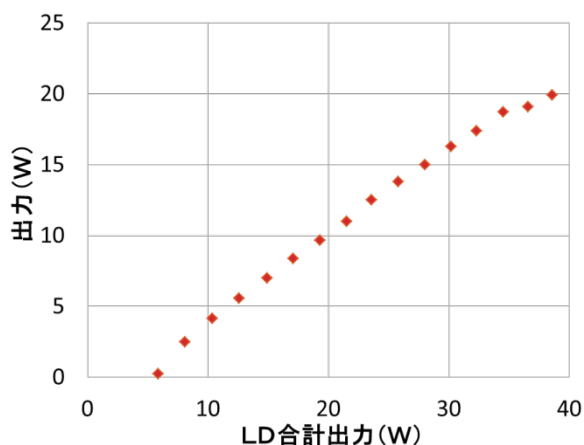


図7 DPSS レーザー出力パワー

## 5.まとめ

本研究では、光双極子トラップ用レーザーの安定性を1%程度の強度揺らぎまで改善することが出来た。また、DPSS レーザーの開発を行い、必要なパワーである18Wのレーザーを出力に成功した。

## 6.今後の予定

### ・BEC

製作したDPSSレーザーを用いて光双極子トラップを行い、BEC生成を実現し再現性が改善することを確認したい。

### ・DPSS レーザー

空間モードが単一モードになるよう、ピンホールを入れて再度発信させる予定である。また、単一方向発振を実現するため、下図のような共振器を組んでいきたい。

## 参考文献

- [1] K. M. O' Hara, M. E. Gehm, S. R. Granade, and J. E. Thomas  
PhysRevA.64.051403
- [2] K J Arnold and M D Barrett  
arXiv:1101.1140v1 (2011)
- [3] 齋藤裕介, 福岡健太 井上 慎研究室  
東京大学
- [4] Sanjay KUMAR, Shuuichi HIRAI, Yuuki SUZUKI, Masahide KACHI, Mark SADGROVE, and Ken 'ichi NAKAGAWA  
Institute for Laser Science, University of Electro-Communications
- [5] M. Robert-de-Saint-Vincent, J.-P. Brant ut, Ch. J. Bord, A. Aspect, T. Bourdel and P. Bouyer  
EPL, 89(2010)10002