

# Rb 原子の 2 波長光双極子トラップ

中川研究室      加地 真英

## [研究背景・目的]

我々の研究室では、全光学的手法による BEC の生成を目指しており、この手法だと従来の磁場トラップを用いた方法に比べて、生成時間が早い、光学アクセスが良い、スピン自由度があるなどの利点があり、光格子などの実験に応用されている。

これまでの実験で、波長  $1\mu\text{m}$  のレーザーを用いて  $^{87}\text{Rb}$  原子のクロス光双極子トラップには成功している。しかし、トラップ寿命が約 1 秒と短く、蒸発冷却の時間が足りなかったため、BEC 生成には至らなかった。[1]そこで、本研究では真空度を改善した装置を用い、さらに、光双極子トラップへのローディング効率を上げるため、波長  $1\mu\text{m}$  のレーザーに加えて波長  $1.55\mu\text{m}$  のレーザーを用いる 2 波長光双極子トラップを行う。

## [原理]

光双極子トラップをする時に、波長  $1\mu\text{m}$  のレーザーのみで行うと、レーザーの当たっている部分では基底準位と励起準位がそれぞれ逆の方向に光シフトを起こす。そのため、エネルギー準位の間隔が広がり、MOT の時に  $1\mu\text{m}$  光を当てると、その部分だけ離調を大きくとることになり、冷却効率が悪くなる。また、波長  $1.55\mu\text{m}$  のレーザーでは、光シフトが基底準位と励起準位で同じ方向に起こり、励起準位のシフトの方がはるかに大きいので、結果としてエネルギー準位の間隔が狭まる。そこで、この 2 つの波長のレーザーを同時に照射すると、光シフトを打ち消すことで Magic Wavelength[2]と同様の効果をもたらし、光双極子トラップ中でも効率よく冷却することができる。

## [実験]

今回の実験では MOT から冷却・圧縮過程である DarkMOT を行い、その際に Optical Pumping 光を入れて原子を  $|5S_{1/2}, F=2\rangle$  の状態から  $|5S_{1/2}, F=1\rangle$  に落としている。そうすることで、原子同士の衝突が減り、長いトラップ寿命を得ることができる。DarkMOT から光双極子トラップへのローディングを行い、蒸発冷却へと移行していく。2 つの波長のレーザーは互いに逆から入射させて、ガラスセル前のミラーではそれぞれの波長のレーザーしか反射しないようになってお互いのレーザーのところまで戻らないようになっている。 $1\mu\text{m}$  光は MOT の途中から入れ始め、蒸発冷却の段階でパワーをゆっくりと下げていく。

1.55  $\mu\text{m}$  光は 1  $\mu\text{m}$  光と同時に入れ始めるが、ローディング過程である DarkMOT が終わると同時に切る。

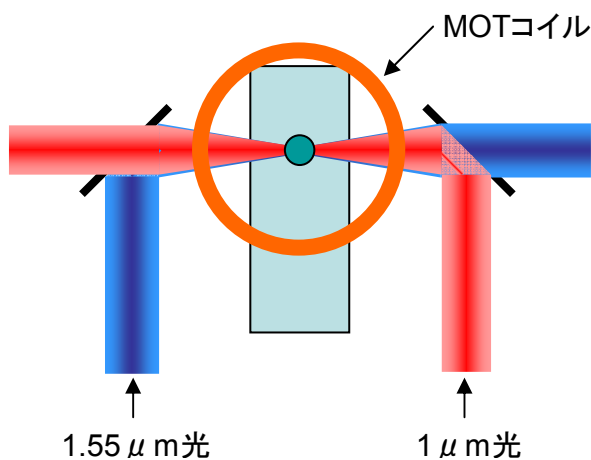


図.1 2波長光双極子トラップの光学系

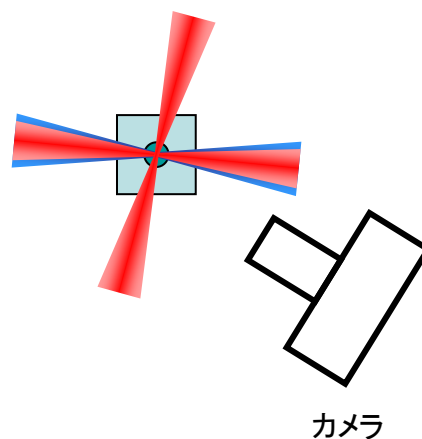


図.2 光学系(上から見た図)

[結果]

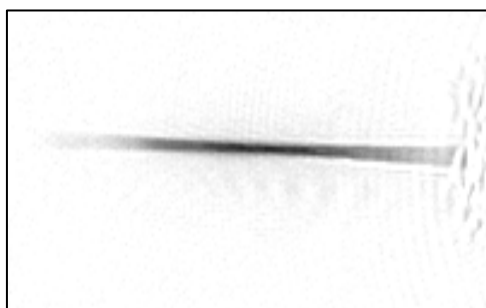


図.3 1波長光双極子トラップ

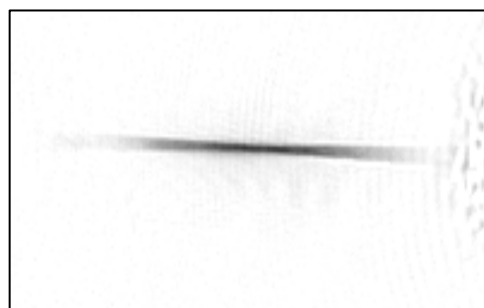


図.4 2波長光双極子トラップ

2つの図は、それぞれシングルパスでの1波長と2波長のトラップの吸収像である。ビーム径は共に  $60\mu\text{m}$  であり、1波長のトラップでの原子数は  $7.3 \times 10^5$  で温度は  $30\mu\text{K}$ 、位相空間密度は  $4 \times 10^{-6}$  となり、2波長のトラップでの原子数は  $5.6 \times 10^5$  で温度は  $20\mu\text{K}$ 、位相空間密度は  $1 \times 10^{-5}$  となる。2波長でのトラップは、1波長の時と比べると原子数が少し減っているが、その分温度が低いので位相空間密度では得をしている。また、1  $\mu\text{m}$  光のビーム径を  $28\mu\text{m}$  にして、1.55  $\mu\text{m}$  光より小さくした場合、1波長のときの原子数は  $6 \times 10^5$  で温度は  $70\mu\text{K}$ 、位相空間密度は  $3 \times 10^{-4}$  となり、2波長での原子数は  $6 \times 10^5$  で温度は  $80\mu\text{K}$ 、位相空間密度は  $2 \times 10^{-4}$  となり、今度は2波長の方が温度が高くなり位相空間密度でも損をしていた。本来は、1  $\mu\text{m}$  光のビーム径を  $28\mu\text{m}$  にした時に1.55  $\mu\text{m}$  光のビーム径も同程度にして重ね合わせる予定であったが、うまく重ね合わせることが出来なかったため、 $60\mu\text{m}$  のまま実験を行った。

シングルパスでの効果を確認できたので、その次の段階として1  $\mu\text{m}$  光をク

ロスさせて、2波長光双極子トラップからの蒸発冷却を行った。2本目のビームのビーム径は $35\mu\text{m}$ である。2本目のビームは1本目と同時に入れて、ポテンシャルが常に1本目と同程度になるようにパワーを下げた。次の2つの図は蒸発冷却したときのクロスしている部分の個数と温度と位相空間密度の変化を示している。1波長と2波長での値を比較するとあまり差がないのが分かる。

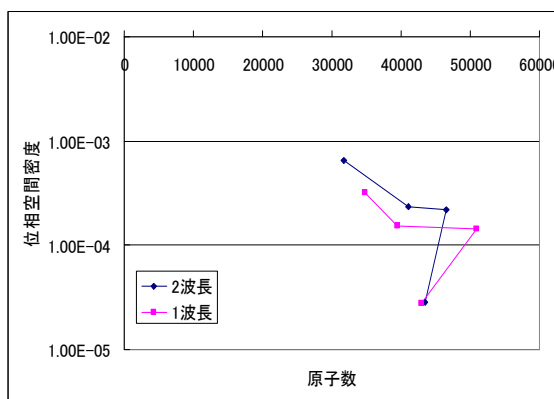
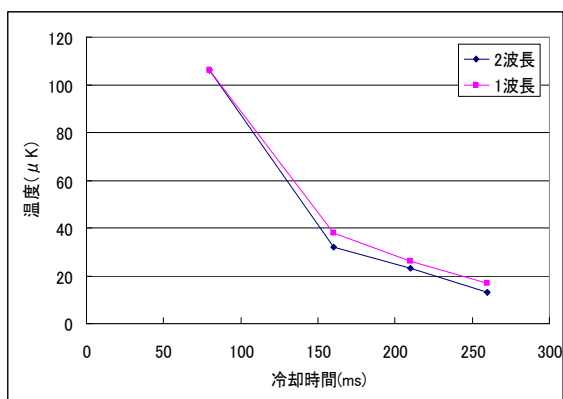


図.5 2波長での蒸発冷却の時間と温度      図.6 2波長での原子数と位相空間密度

最後に、 $1\mu\text{m}$ 光のみでクロス光双極子トラップから蒸発冷却を行った。このときのビーム径は2波長の時と同じである。

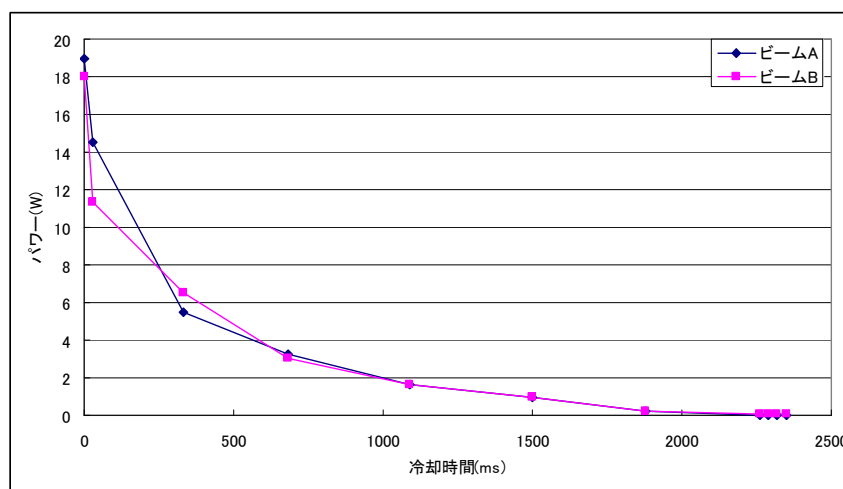


図.7 2つのビームのパワー変化

上の図のように2つのビームのパワーを変えていき、各段階で次のような吸収像が得られた。なお、いずれの画像もトラップから開放して (TOF) 5ms 後の吸収像である。

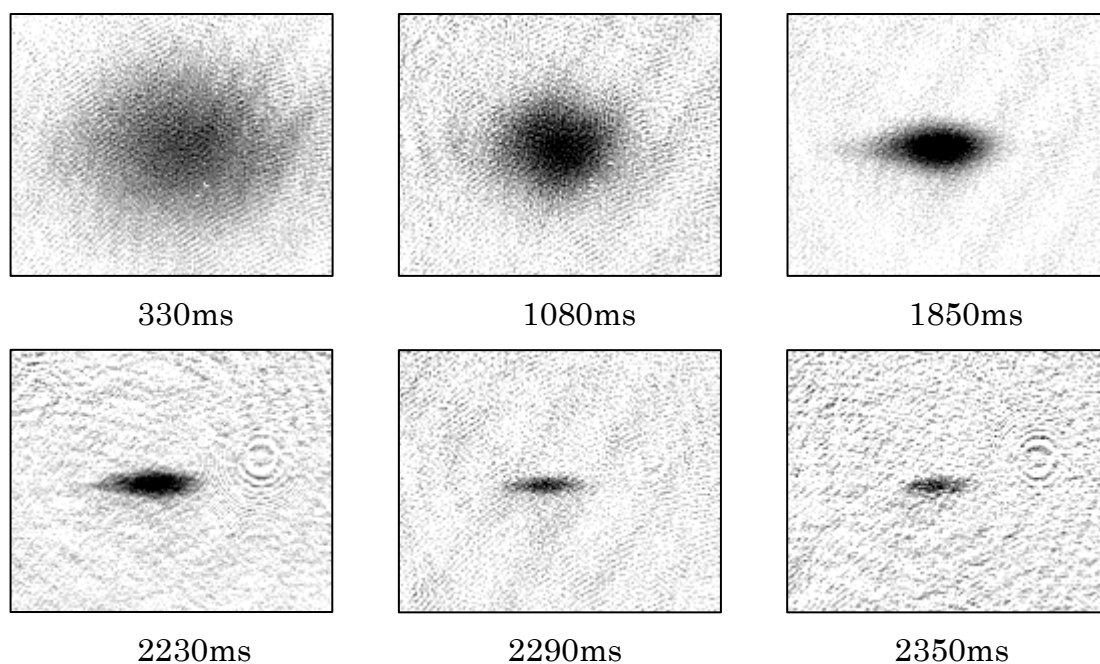


図.8 蒸発冷却の各段階における吸収像

また、蒸発冷却の最後の段階で  $1\mu\text{m}$  光が形成するポテンシャルの深さを  $12.4\mu\text{K}$ 、 $8.4\mu\text{K}$ 、 $8\mu\text{K}$  と変えていったときの吸収像が次の画像で中央部分の色が濃くなっていており、密度が上がっていく様子が分かる。各吸収像と原子数、温度、位相空間密度は次のようになり、BEC 生成に必要な位相空間密度は 2.6 なのでポテンシャルが  $8\mu\text{K}$  のときは計算上では BEC になっていることになる。

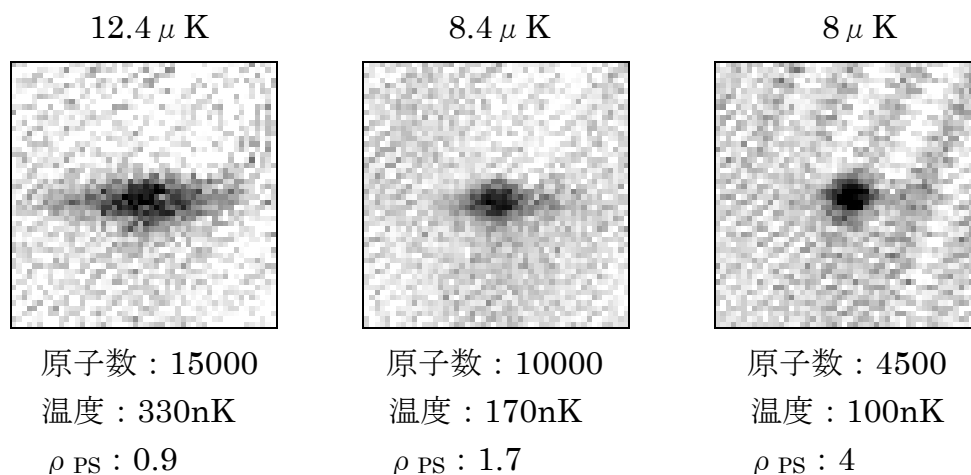


図.9 各トラップポテンシャルにおける吸収像

しかし、トラップから開放してからの時間を  $5\text{ms}$  から  $10\text{ms}$  にすると原子がほとんどいなくなってしまい、 $5\text{ms}$  のときのような原子の塊を確認することができなかった。

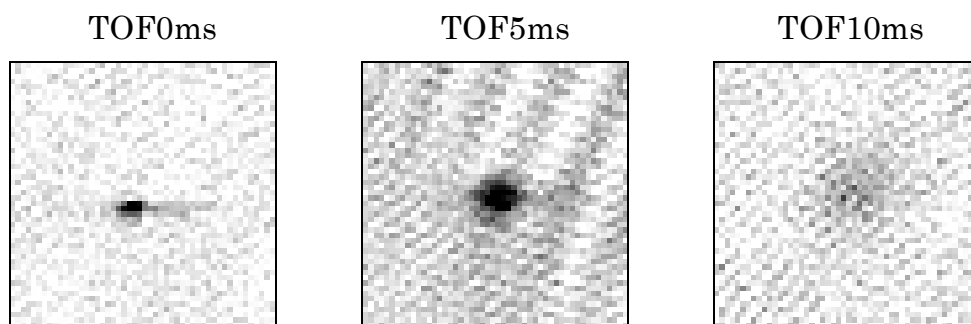


図.10 ポテンシャル  $8\mu\text{K}$  での各 TOF における吸収像

また、各トラップポテンシャルにおける吸収像の断面を比較してみると、ポテンシャルが浅い方がピークが鋭くなっている、ここでも中央部分のピークが上がっていく様子を確認できる。図.12 ではポテンシャル  $8\mu\text{K}$  での各 TOF における吸収像の断面を示している。なお、このグラフは形状を比較するために同じスケールになるようにしている。TOF5ms までは、密度分布が放物線に近い形状をしているが、TOF10ms ではその部分が広がり、ガウシアン分布に近い形状になっている。このことから、原子はサーマルなものや BEC 状態のものが一緒になっており、サーマルな原子が BEC 状態の原子と衝突することで加熱され BEC 状態が維持できないと考えられる。ここからもう少し冷却を進めることができれば完全な BEC になると考えられるが、すでに個数がかなり少ないので個数を増やすための改良が必要だと思われる。

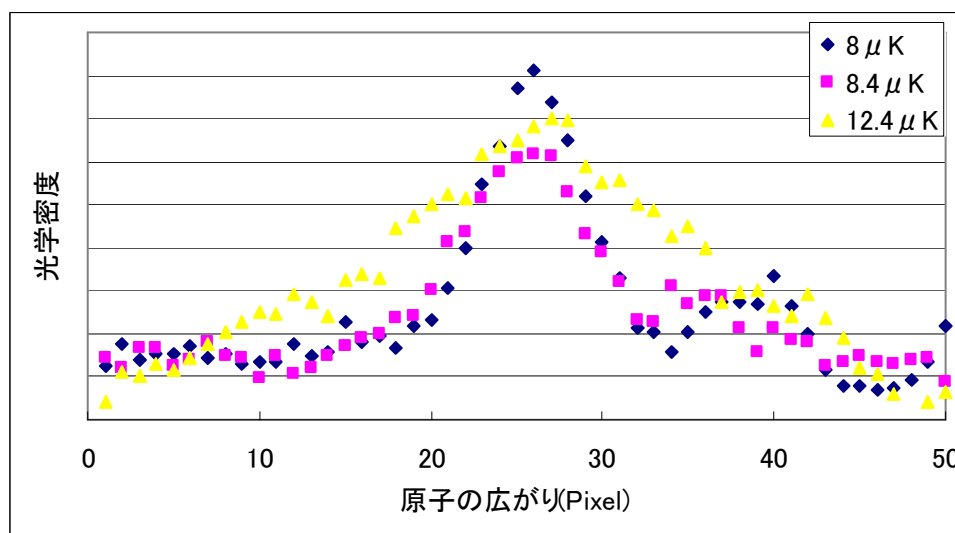


図.11 各トラップポテンシャルの吸収像の断面図

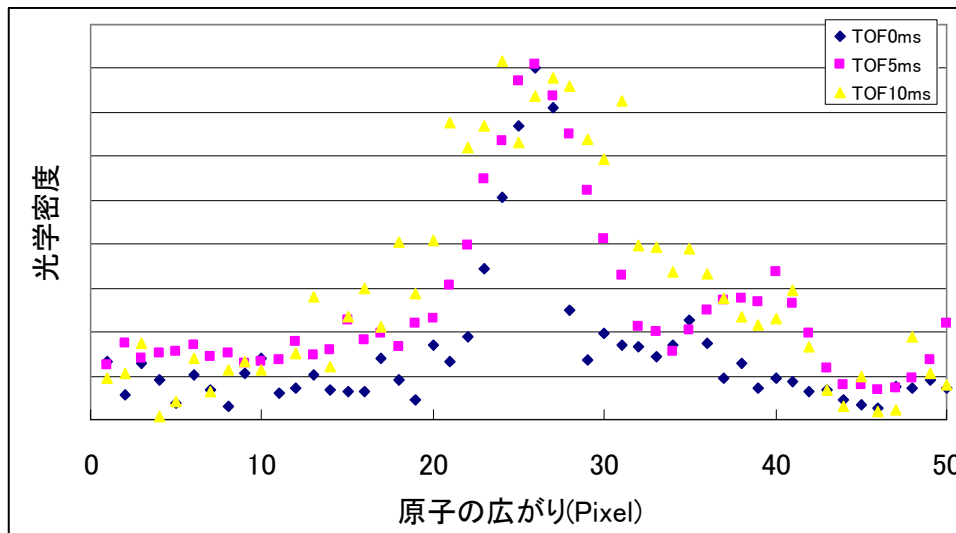


図.12 各 TOF での吸収像の断面図

[まとめ]

本研究では 2 波長光双極子トラップを行い、1 波長の場合との比較を行った。その結果、ビーム径が同じくらいで重ね合わせることができれば冷却効果があり、ビーム径が大きく異なれば加熱効果があるということが分かった。また、2 波長で蒸発冷却を行ったが、1 波長のとくとあまり違いがなかった。ビーム径が小さくなるほど重ね合わせることが難しくなるが、2つの波長のビーム径を同じくらいにして重ね合わせればローディング効率が上がり蒸発冷却においても差が出たと考えられる。

次に、 $1\mu\text{m}$  光のみで蒸発冷却を行った。その結果、位相空間密度を BEC 生成可能のところまで上げることに成功し、サーマルな原子と BEC の混合状態と思われるものを観測することができた。しかし、その時点での個数が少ないためそれ以上の冷却ができなかった。今後は、いかに効率よくローディングするかが問題となり、2 波長もビーム径が同じ状態で重ね合わせることができれば有効な手段であると考えられる。

参考文献

[1] 修士論文 関邨哲雄 中川賢一研究室 電気通信大学(2009)

[2] Hidetoshi Katori, Tetsuya Ido and Makoto Kuwata-Gonokami  
JPSJ,68,2479(1999)

[3] J.-F. Clément, J.-P. Brantut, M. Robert-de-Saint-Vincent, R. A. Nyman,\*  
A. Aspect, T. Bourdel, and P. Bouyer  
Phys,Rev,A,79,061406(2009)