

^{87}Rb 原子の2色同時磁気光学トラップに関する研究

情報理工学研究科 物理学プログラム 岸本研究室
1633018 大石 拓実

1. 研究背景と目的

本研究室では ^{87}Rb 原子を用いた連続的なボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の生成を目的の一つとしている。BECの生成には極低温かつ高密度な状態が必要であり、一般的には磁気光学トラップ(MOT)を始めとするレーザー冷却や、蒸発冷却等を時間段階的に行うことで生成される。しかし、この手法では次の冷却ステップへ移行する際に連続性が失われてしまう上に、生成されたBECには寿命が存在するため、実験に時間的な制限がかかるといった問題が発生する。これに対して、我々は実験条件を空間的に変化させて位置に依存した冷却を行うことで、連続的にBECを生成しようと試みている。通常 ^{87}Rb 原子のレーザー冷却には $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$ 遷移が用いられるが、励起準位の自然幅由来する冷却限界温度が高いため、蒸発冷却へ移行するためには原子を更に冷却する必要がある。本研究室では先行研究において $5S_{1/2} - 6P_{3/2}$ 遷移を用いたMOTに成功している[1]。これは従来の $5S-5P$ 遷移に比べて自然幅が1/4程度小さいために冷却限界温度が低く、更に遷移波長が短く開いた遷移であるために光の再吸収が抑えられ密度の向上が期待できるという特徴がある。

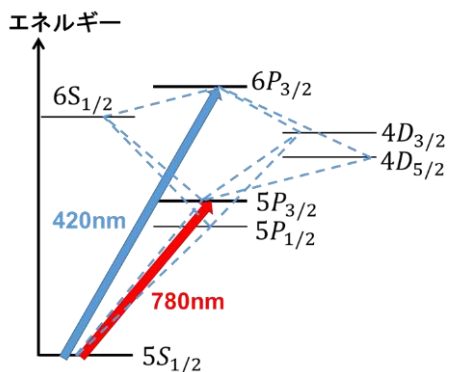


図1 ^{87}Rb 原子のエネルギー準位図

そこで、我々は連続的という目的を踏まえてこの780nmと420nmのレーザーを同時に用いてMOTを行い、定常的に位相空間密度の高い冷却原子集団を生成することを考えている。420nmのレーザーは補足力が弱く、室温原子が捕獲できないため予備冷却が必要になるが、これを780nmのMOTで補う。しかし、780nmのレーザーは420nmのものに比べて吸収断面積が大きいため、確率的に780nmのレーザーが吸収されやすくなる。つまり、同時に入れると780nmのレーザーによる冷却効果が支配的になってしまう。これを防ぐために $5P_{3/2}$ 準位のエネルギー準位のみをシフトさせる高強度・非共鳴のレーザーを照射する。これにより中央近傍のみ420nmのMOTが支配的になり、外側では780nmのMOTが支配的になるような系が実現できると考えている。

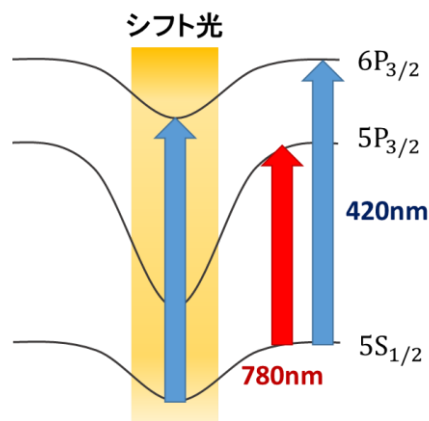


図2 シフト光を入れた時の準位のシフトの様子

本研究では、2色同時MOTに向けて780nmのMOTの予備冷却としての最適化、420nmのMOTの条件の最適化を行い冷却効果、高密度化を評価した。

2. 実験原理と方法

まず、MOT の特徴として互いに逆向きの円偏光を対向させて入射すること、アンチヘルムホルツコイルを用いて四重極磁場を発生させることが挙げられる。レーザーの周波数は原子の全角運動量 F に対して $F \rightarrow F' = F + 1$ かつ負離調となるように設定する。

原子の「光の吸収・放出」現象を利用して原子の温度を下げていき、四重極磁場と偏光を巧みに組み合わせた中心力により原子を捕獲する。

MOT におけるドップラー冷却限界温度は $T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}$ で表され、 $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$ 遷移の自然幅は $2\pi \times 6.0\text{MHz}$ であるため温度は $143\mu\text{K}$ 、 $5S_{1/2} - 6P_{3/2}$ 遷移では励起準位からの緩和の過程を考慮すると自然幅が $2\pi \times 1.4\text{MHz}$ であるため、温度は $34\mu\text{K}$ となる。

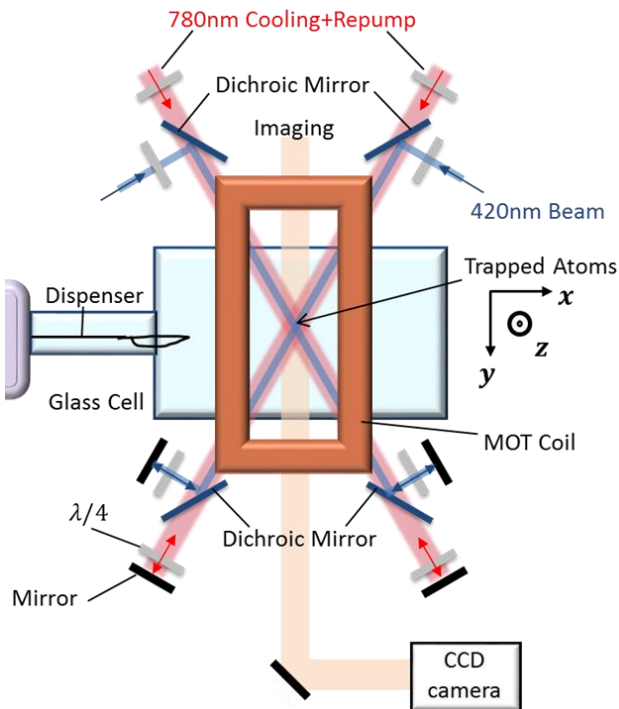


図3 420nmMOT 及び実験系の概略図

次に実験系を図3に示す。 10^{-11}torr 程度の真空状態にした Glass Cell 中にディスペンサを用いて気体の Rb 原子を放出させ、780nm の

Cooling 光と Repump 光を入射し、室温原子を冷却・捕獲する。その後、420nm の Cooling 光を Dichroic Mirror を用いて 780nmMOT のビームと中心が重なるように入射する。そして、3ms のオーバーラップタイムをかけ 420nm の MOT へ移行し、最終的には 420nm の Cooling 光と 780nm の Repump 光で 18ms 間冷却を行った。本実験ではレーザーの強度比を x (水平方向) と z (垂直方向) に対して $x:z = 2:1$ となるよう調節しており、中心での 420nm レーザーの 6本の合計強度は $0.68\text{mW}/\text{cm}^2$ である。また、レーザーの周波数は離調 $\Delta = -3.6\text{MHz}$ を初期条件としている。MOT で使用するコイルには電流 3A を流すことで z 軸方向に $10\text{G}/\text{cm}$ の磁場勾配をつくっている。

3. 予備冷却の最適化

まず 780nmMOT を予備冷却として用いるにあたり、どの条件を最適化する必要があるか調査した。

ここでは温度と原子数をそれぞれ最適化した。その時のパラメータの比較を以下の表4に示す。

表4 最適化した 780nmMOT の条件とその時の各パラメータ

780nmMOTの最適化条件	パワー比 [mW]	離調 [MHz]	原子数 [$\times 10^7$]	温度 [μK]
温度	80:80:20	-22	2.02	134.7
原子数	65:65:50	-19	20.87	448.3

表4から互いの条件に対して、温度は 1/4 弱程度、原子数は 10 倍強程度に向上していることが分かる。

これらを予備冷却として用いて 420nmMOT を行い、原子の温度等を 3 回ずつ測定した。表5にその結果を示す。

表 5 各予備冷却を用いた 420nmMOT の比較

条件	温度 [μK]	原子数密度 [/cm ³]	位相空間密度
780nmMOT (温度最適化)	134.7	4.13×10^9	1.77×10^{-8}
420nmMOT	81.9	1.32×10^9	1.21×10^{-8}
780nmMOT (原子数最適化)	448.3	2.34×10^9	1.61×10^{-9}
420nmMOT	112.0	3.39×10^9	1.87×10^{-8}

表 5 より、温度を最適化した場合は 420nmMOT で原子を 100μK 以下まで冷却することができ、位相空間密度も予備冷却の時点で $\rho_{\text{PSD}} \sim 10^{-8}$ 台を達成していることが分かる。しかし、420nmMOT で原子数密度が大きく低下していることで、結果的に位相空間密度が冷却前より小さくなってしまっている。

一方、原子数を最適化した場合は 420nmMOT で冷却できる温度は若干上昇してしまうものの、原子数密度が向上していることで結果的に予備冷却よりも高い位相空間密度が得られることが分かった。

これらの結果から、予備冷却では温度よりも原子数を最適化する必要があることが分かった。

4. 420nmMOT の最適条件の探索

次に、420nmMOT の最適条件の探索を行った。MOT の初期条件は先行研究[2]から以下の表 6 のように設定されている。

表 6 420nmMOT の初期条件

冷却時間	18ms
離調	-3.6MHz
強度	0.68mW/cm ²
磁場勾配	3A - 10G/cm(垂直軸)

先行研究では、磁場勾配についての調査が行われていないため、このパラメータを中心に調査を行った。

まず、420nmMOT において磁場勾配を変えた時の原子の温度等を測定した。磁場勾配を変えるタイミングについては、予備冷却の後が原子数の損失を抑えられるためオーバーラップタイム中に勾配を変えている。

以下図 7~10 にその結果を示す。

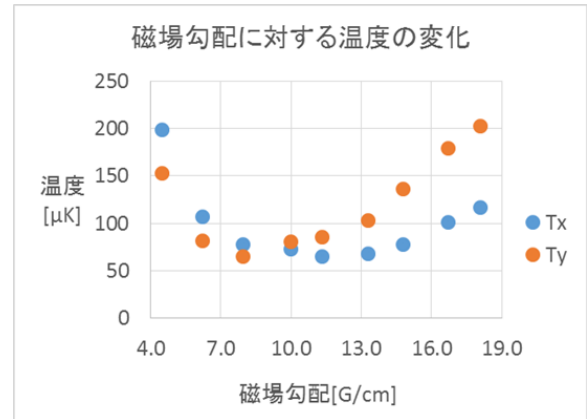


図 7 磁場勾配に対する原子の温度

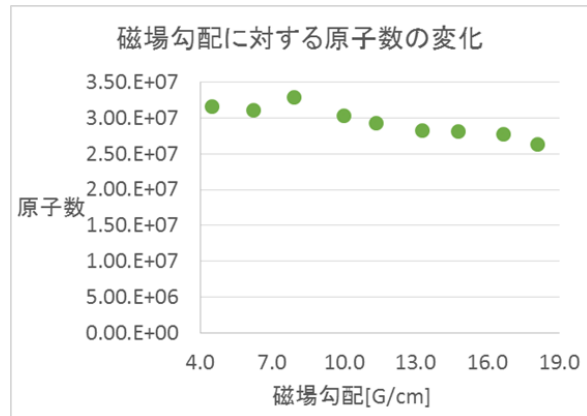


図 8 磁場勾配に対する原子数

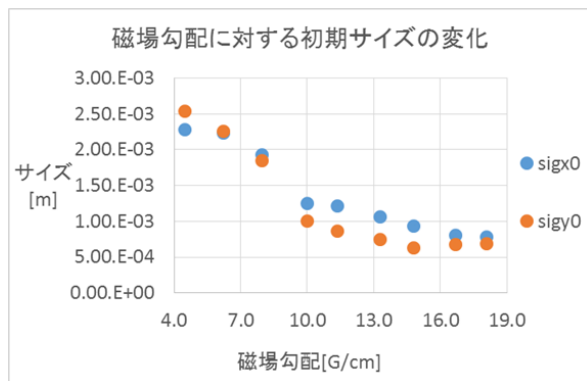


図 9 磁場勾配に対する原子の初期サイズ

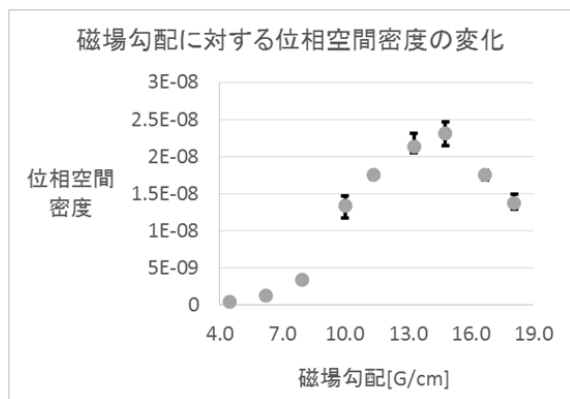


図 10 磁場勾配に対する原子の位相空間密度

図 7~10 から磁場勾配を 4.5A-14.8G/cm に設定すると最も高い位相空間密度が得ることができた。10G/cm のデータと比較すると、温度は 0.6 倍、初期サイズは 3 倍、原子数は 0.9 倍のファクターで位相空間密度に影響していることがわかる。

ただし、磁場勾配の大きさが変化するということは、ゼーマンシフトの大きさが変化するということになる。つまり、レーザーの離調は異なる勾配に対してそれぞれ最適な値が存在すると考えられる。そこで、高い位相空間密度を得られた 14.8G/cm に加えて 2 番目に高い 13.3G/cm の 2 つの勾配において 420nm レーザーの Cooling 光の離調を変化させて 420nmMOT を行った。

その結果を図 11~14 に示す。

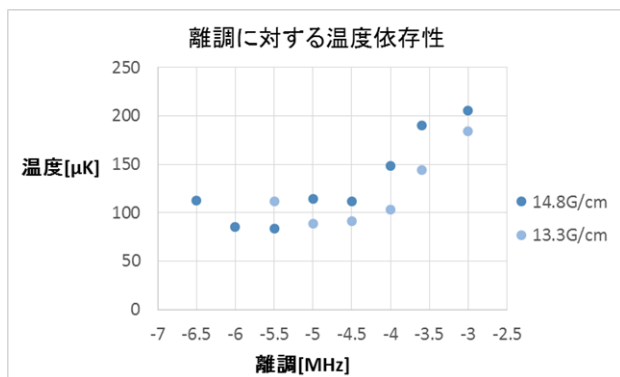


図 11 Cooling 光の離調に対する原子の温度

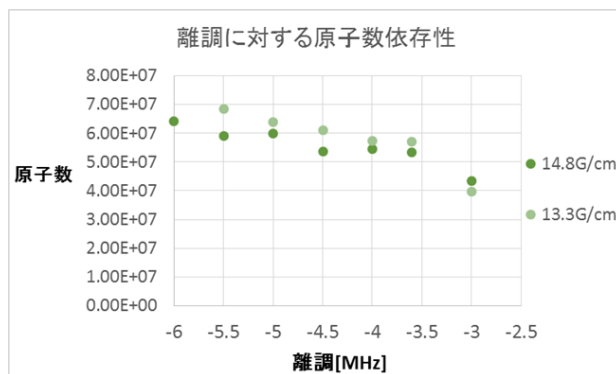


図 12 Cooling 光の離調に対する原子数

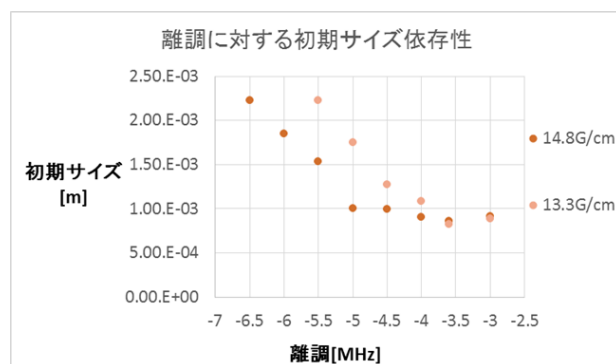


図 13 Cooling 光の離調に対する原子の初期サイズ

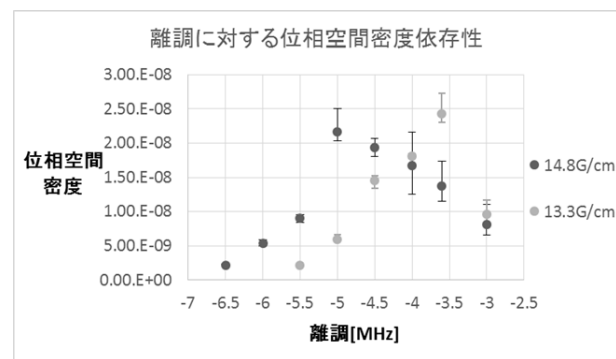


図 14 Cooling 光の離調に対する原子の位相空間密度

図 11~14 より、14.8G/cm において離調を負に大きくすることで、より高い位相空間密度が得られることが分かる。一方、13.3G/cm については最適な離調は変化しなかった。ただし、それぞれの勾配で最も温度が冷える離調の値が異なること、温度が最適な離調と位相空間密度が最

適な離調が一致しないことも見て取れる。また、図 13 から勾配が大きくなることで、原子の初期サイズがより小さくなっていることが分かる。現時点での 420nmMOT の最適なパラメータは磁場勾配 13.3G/cm に対して離調-3.6MHzであると決定できる。

しかし気になる部分として、図 14 からそれぞれの勾配において位相空間密度が急激に低下している点が存在することが挙げられる。13.3G/cm の場合は原子数の急激な減少、14.8G/cm の場合はサイズの拡大が主な原因であると考えられるが、このデータだけでは確証でないため、原子群のサイズと中心位置の、パラメータ変化による位置ずれを 2 つの MOT に対して比較した。概略図を以下図 15 に示す。

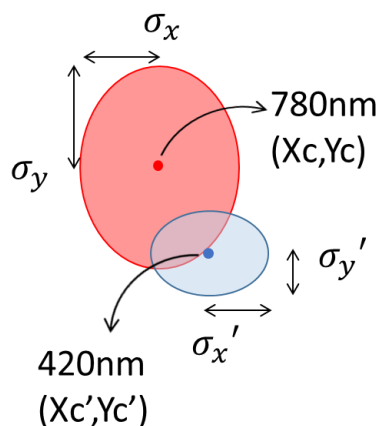


図 15 サイズと中心位置による MOT の比較

手順として、測定を行うことで原子群の初期サイズと MOT の中心位置のデータが得られる。この初期サイズの概形をそれぞれ半径 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_x', \sigma_y'$ を持つ楕円と仮定し、2 つの MOT の中心位置 $(X_c, Y_c), (X_c', Y_c')$ との関係性を調査した。まず、磁場勾配 13.3G/cm の場合について評価を行った。その結果を以下図 16 に示す。青い点線で囲まれた円は 420nm MOT における 420nm レーザーが原子を捕獲できる範囲を表している。x,y 軸はそれぞれ位置を表しており、y 軸について上方向が重力の働く方向である。図 16 より、離調が負に大きくなるに従って 420nmMOT の中心位置は重力に従って落下していき、780nmMOT による初期サイズと 420nmMOT の捕獲範囲の重複部分も小さくなっている。これは離調が変化することで補足力が弱まり、重力で落下していくからであると考えられる。また位相空間密度が急激に低下した -3.0MHz の離調については、2 つの MOT による初期サイズの重複部分の割合が小さいこと、位相空間密度が高い領域では 2 つの初期サイズの中心間距離が小さく、更にサイズの重複部分の割合が大きいことから、中心間距離と位置のずれ具合が位相空間密度に影響を及ぼすという説が考えられる。この説が磁場勾配 14.8G/cm でも同様に成り立つかどうか確かめる。

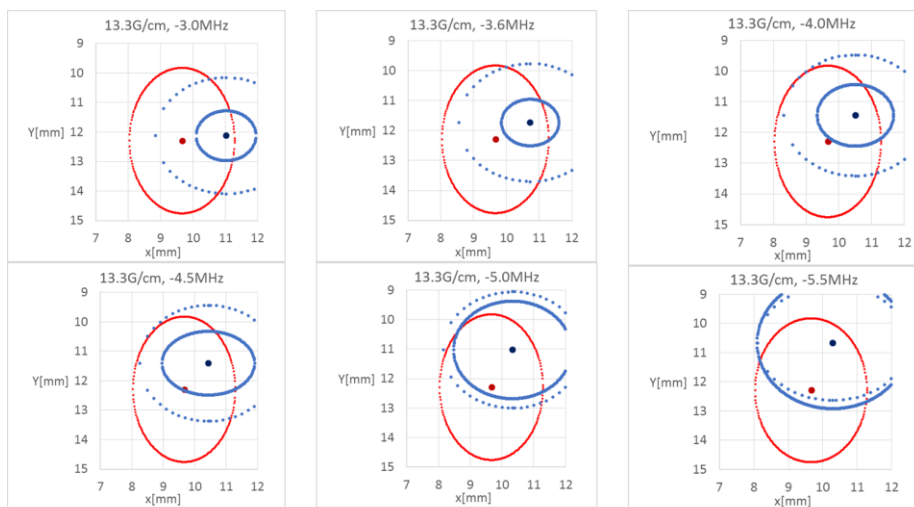


図16 磁場勾配13.3G/cmに対する原子群のサイズと中心位置の比較

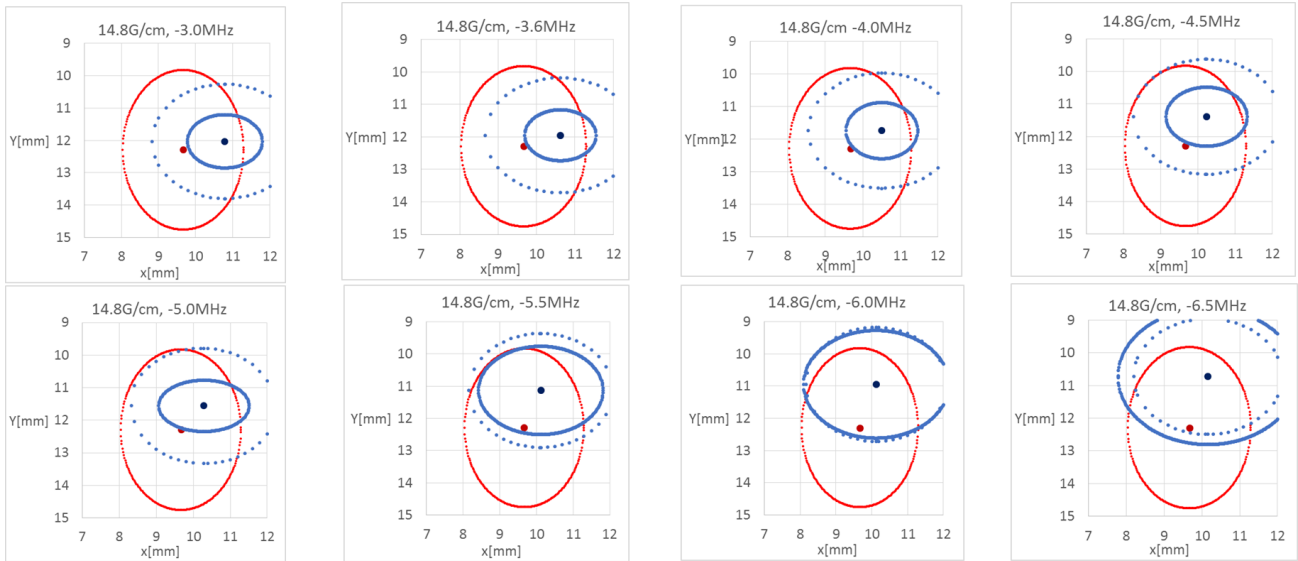


図17 磁場勾配14.8G/cmに対する原子群のサイズと中心位置の比較

磁場勾配 14.8G/cm について評価した結果を図 17 に示す。

図 17 より、先と同様に離調が負に大きくなるに従って 420nmMOT の中心位置は重力に従って落下していき、780nmMOT による初期サイズと 420nmMOT の捕獲範囲の重複部分も小さくなっている。また先と同様に、この勾配でも中心間距離が小さいことに加えて初期サイズの重複部分の割合が大きいほど高い位相空間密度が得られるという結果となった。

したがって、これらの結果から 420nmMOT では MOT の中心間距離とパラメータ変化による中心のずれが位相空間密度に少なからず影響を及ぼしているが、サイズの重複部分の大きさとの関連性は今のところ見られないという結論が得られた。しかし、これらの結果は一部のパラメータでのみ測定を行っていることから、今後は全ての磁場勾配において離調及びサイズ等の比較を行う必要があると考えられる。

5. まとめと今後の展望

予備冷却の段階では 2 色同時 MOT を考慮して、より多くの原子を捕獲できるような条件を設定する必要があることが明らかになった。

また、420nmMOT において、磁場勾配を変化させることで、より高い位相空間密度を得られることが分かった。そして、いくつかの磁場勾配に対して離調を変えて測定することで、各磁場勾配に最適となる離調が異なることも分かった。

更に、原子群の初期サイズや MOT の中心位置をそれぞれの MOT に対して評価を行うことで、2 つの MOT の中心間距離とパラメータ変化による位置のずれが位相空間密度に影響を及ぼしていることも発見できた。

今後はこれらに加えて、地磁気を打ち消すために用いる補正磁場についても現在よりも精密に決定していく必要がある。コイルに流す電流値によって発生する各軸の磁場勾配の大きさは計算により既に求められているので、効率的に最適化が行えるだろう。将来的には高強度のシフト光を実際に導入し、2 色同時磁気光学トラップで高い位相空間密度が得られるような条件を探索することを予定している。

参考文献

- [1] 吉野 悠太 9aAW-1 日本物理学会秋季大会 (2014)
- [2] 沖山 慶太 電気通信大学 卒業論文(2017)