

^{87}Rb 原子の5S – 6P遷移を用いた Gray Molasses に関する研究

先進理工学科 応用物理工学コース 岸本研究室

1213034 大石 拓実

1. 研究背景と目的

本研究室では先行研究で ^{87}Rb 原子の5S – 6Pの遷移に対して 420nm の波長のレーザーを用いた MOT(420nm MOT)に成功している[1]。この遷移は従来の遷移(5S – 5P)での MOT(780nm MOT)に比べて遷移の自然幅が 1/4 程度と狭くドップラー冷却限界温度も34 μK となる。加えて開いた遷移であり、様々な準位を経て脱励起するので光の再吸収を抑え原子数密度の向上が期待される。

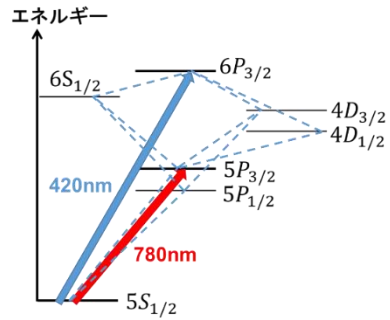


図1 ^{87}Rb 原子の5S – 6P遷移

今回、新たな冷却方法として更なる冷却効果が期待される Gray Molasses 冷却を行うことを考えている。先行研究[2]では同じアルカリ金属である ^{133}Cs において数 μK に到達している。これまでの Gray Molasses 冷却に関する報告はnS – nP遷移を用いたもののみとなっており、nS – (n + 1)P遷移に関する報告事例は無いが、この冷却の本質が暗状態の形成にあるとすれば、nS – (n + 1)P遷移でも Gray Molasses 冷却は実現可能と考えられる。そこで本研究の目的はnS – (n + 1)P遷移 を用いた Gray Molasses 冷却の実現性を検証することである。

2. 原理と実験方法

Gray Molasses 冷却の条件として互いに逆向きの円偏光を対向させる、冷却時は磁場を $B \approx 0$ とする、Cooling 光を $F = 2 \rightarrow F'' = 2$ の正離調に入れる、これらの3つがある。遷移選択則によりカップリングする磁気副準位が決まるので、これにより光と相互作用しない暗状態を形成することができる。この暗状態によって密度が向上する。次に 420nm レーザーを用いた Gray Molasses 冷却を以下図2の中央に示す。左側の ^{133}Cs に関する先行研究[2]、及び右側の ^{87}Rb 原子の5S – 5P遷移に関する実験[3]と比較すると遷移の自然幅と超微細構造のエネルギーとの比が似ているため、先述のように暗状態が形成できればこの遷移でも Gray Molasses 冷却は十分実現できると思われる。

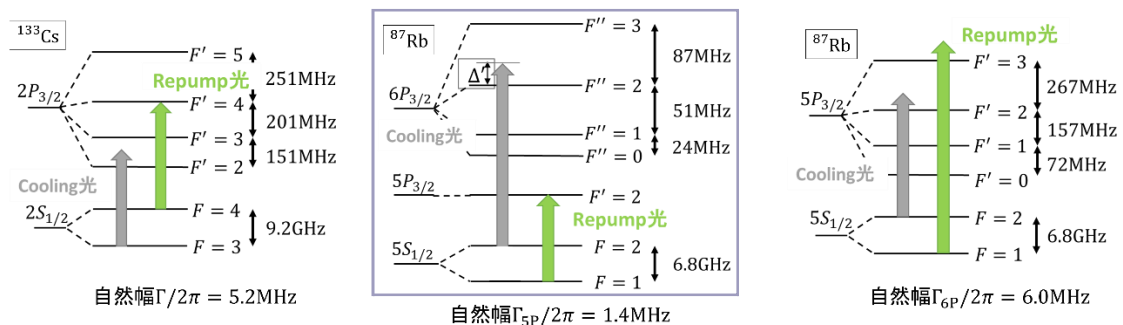


図2 5S – 6P遷移の Gray Molasses 冷却の実験方法 (図中央) と先行研究[2,3]との比較
本実験では 780nm MOT から移行期間 3ms をかけて 420nm Gray Molasses 冷却へ移行し冷却

を行う。Repump 光は 780nm MOT の Repump 光を引き続き利用する。

3. 実験結果

3.1. Gray Molasses 冷却の冷却時間における原子の温度依存性

本項では Gray Molasses 冷却の冷却時間を変化させた時の原子の温度を測定した。この測定結果を図 3 に示す。

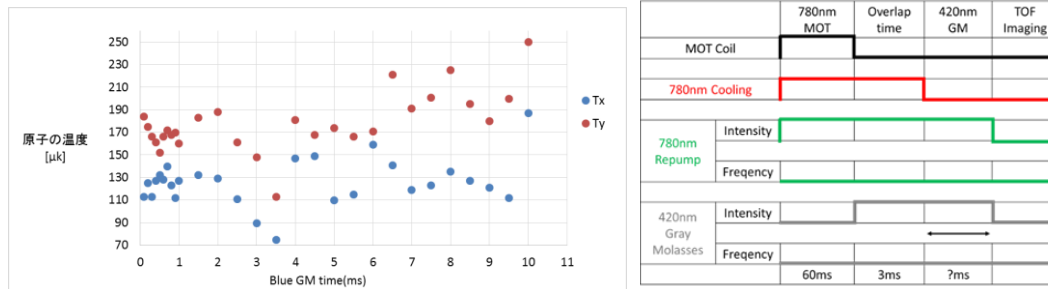


図 3 Gray Molasses の冷却時間における温度依存性の測定結果およびタイミングチャート結果から顕著な依存性は見られなかったが、短い冷却時間で 420nm MOT の先行研究[1] の冷却温度である約 90 μ Kと同程度まで冷却でき、Gray Molasses も同程度の冷却効果があることが確認できた。また、わずかながら冷却時間が長くなると加熱効果も見られた。ここでは 3.5ms を最適として採用して以降の実験を行った。

3.2. Gray Molasses 冷却における Cooling 光の離調に対する原子の温度依存性

本項では Gray Molasses 冷却で重要なパラメータのひとつとなっている Cooling 光の離調を変化させた時の原子の温度を測定した。この測定結果を図 4 に示す。

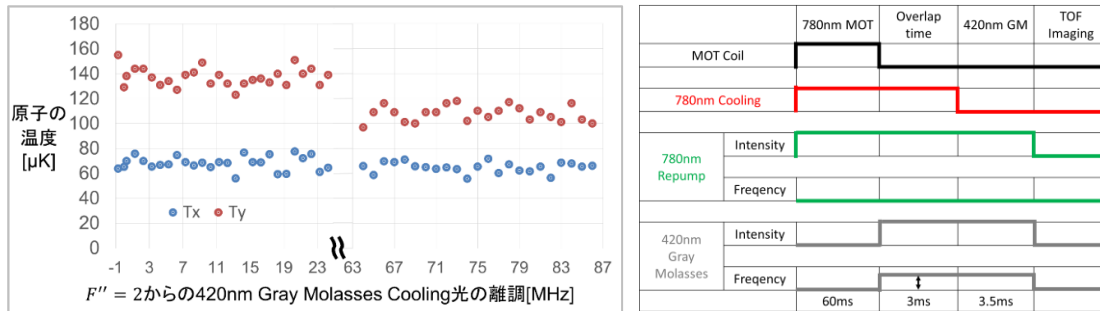


図 4 Gray Molasses の Cooling 光離調における温度依存性測定の結果およびタイミングチャート

図 4 より、離調の大きさに関わらず 3.1 節の 3.5ms での温度と同程度まで冷却できている。しかし、レーザーの垂直軸のバランスが悪い影響で加熱効果が起こり、 T_y (重力方向)が T_x に比べて高くなっている。また、 $F'' = 2$ 付近と $F'' = 3$ 付近で T_y に差が生じた原因のひとつとして実験日が異なることが挙げられる。ここでの最適離調は+13.3MHz を採用した。

3.3. Gray Molasses 冷却における移行期間の影響

本項では、移行期間(Overlap time)での温度変化を測定した。また、420nm のレーザーを切った場合についても同様に測定した。この測定結果を図 5 に示す。

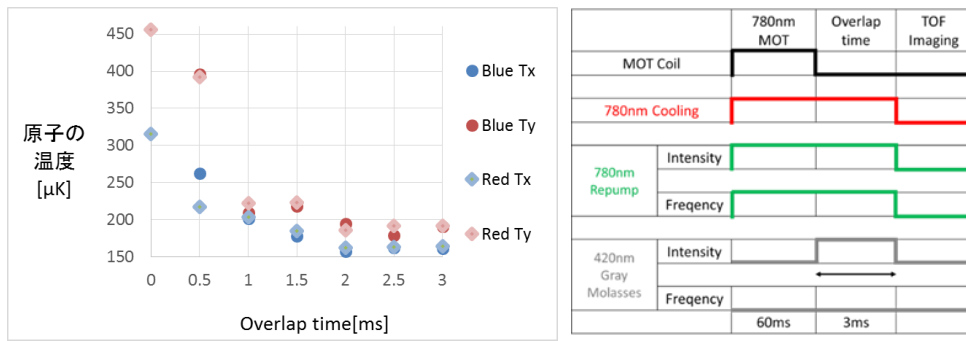


図5 Gray Molasses の移行期間における温度変化の測定およびタイミングチャート
 現状での 780nm MOT の冷却温度(移行期間 0ms での冷却温度)は $T_x = 310\mu\text{K}$, $T_y = 450\mu\text{K}$ であり、図5から移行期間(Overlap time)中は原子が徐々に冷却されていることがわかる。また 780nm の Cooling 光のみで測定した場合でも同程度の温度まで冷却されていることから、移行期間では 780nm の Cooling 光が主として冷却を行っていると考えられる。原子の 5S-5P 遷移(780nm)での吸収断面積と線幅の方が、5S-6P 遷移(420nm)のそれらよりも大きいので 780nm の Cooling 光の冷却効果が顕著に現れたということだろう。

3.4. Gray Molasses 冷却における Repump 光の離調に対する原子の温度依存性

先行研究[2]では Repump 光を僅かに正に離調しているが、本項では 5S-6P 遷移で同様に Repump 光の離調を正に振るとどう影響するか確認するため温度の Repump 光離調依存性を測定した。この測定結果を図6に示す。

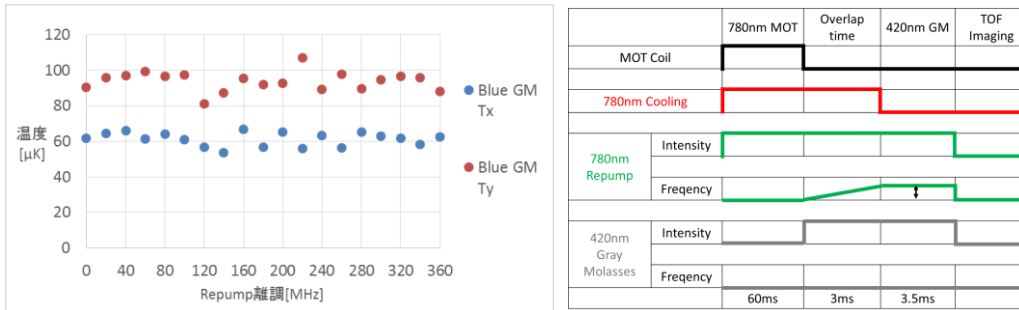


図6 Gray Molasses の Repump 光の離調における温度依存性の測定およびタイミングチャート

図6より離調に対する温度の依存性は見られなかったが、3.2節と同程度まで冷却できていることがわかる。先行研究[2]では Cooling 光と Repump 光を 320MHz 以上離しているが、この実験での Cooling 光(5S-6P 遷移)と Repump 光(5S-5P 遷移)は既にそれ以上離れているため、離調が温度に対して全く影響しなかったと思われる。

3.5. Gray Molasses 冷却における Repump 光の強度に対する原子の温度依存性

Cooling 光のパワーは捕獲できる限界のパワーまで強度を下げているが、本項では Repump 光の強度を同じように下げていくとどのような影響があるか確認するため温度変化を測定した。この測定結果を図7に示す。

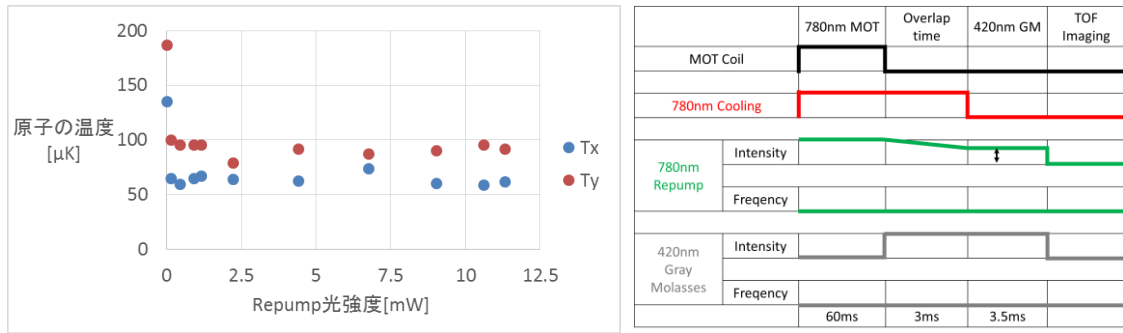


図7 Gray Molasses の Repump 光の強度における温度依存性の測定およびタイミングチャート

図7より、3.4節と同様 Repump 光の強度に対しても温度依存性は顕著に見られなかった。しかし、Repump 光を切った場合は原子の温度が時間 $t=0$ において移行時間直後の温度と一致しているため、Gray Molasses 冷却における Repump 光の必要性が確認できたとともに Gray Molasses 冷却が少し働いていることが示された。

まとめと今後の展望

420nm の Gray Molasses 冷却に冷却効果があることが確認できた。しかし、どのパラメータを変化させても T_x が $60\mu\text{K}$ までしか冷却できなかった原因のひとつとして冷却温度の高い 780nm MOT から移行していることが挙げられる。 $300\mu\text{K}$ 以上の温度から $100\mu\text{K}$ 程度まで冷却するのと、 $100\mu\text{K}$ 程度から冷却するのでは効果が異なってくると思われるからである。

そこで今後の展望として、780nm MOT と 420nm Gray Molasses の間に先行研究[1]で $100\mu\text{K}$ 以下の冷却を達成できている 420nm MOT の過程を入れた冷却を行い、初期温度を下げた状態で冷却効果を確認することを考えている。また、 $6P_{3/2}$ 準位の原子は複数の準位を経て基底状態に緩和されるため、通常の 780nm MOT に比べて $5S_{1/2}$ の $F = 1$ に多くの原子が落ち込む。このことから、Gray Molasses 冷却に際しての Repump 光の寄与が重要と考えられるため、さらに 420nm で Repump 光を作成し、効果を調べる必要があると考えている。

参考文献

[1]. 吉野 悠太

^{87}Rb 原子の $5S_{1/2} - 6P_{3/2}$ 遷移におけるレーザー冷却とマジック波長探索
電気通信大学 修士論文(2015)

[2]. D. Boiron, A. Michaud, P. Lemonde, Y. Castin, and C. Salomon

Laser cooling of cesium atoms in gray optical molasses down to 1.1mK
Phys. Rev. A **53** R3734(R) (1996)

[3]. 中村 貴紀

^{87}Rb 原子の $D2$ 遷移を用いた Gray Molasses 冷却に関する研究
電気通信大学 卒業論文(2016)