

^{87}Rb 原子の D2 遷移を用いた Gray Molasses 冷却に関する研究

先進理工学科 応用物理工学コース 岸本研究室

1213128 中村 貴紀

1. 研究背景と目的

私達の研究室では、BEC を連続的に生成することを目的の 1 つとしている。一般的な BEC 生成の手順としては、磁気光学トラップ(MOT)から圧縮 MOT(CMOT)にかけて予備冷却した後、光双極子トラップ(ODT)にロードして蒸発冷却を行う。CMOT を 60ms 程度行うことで 50~80 μK まで冷却することができるが、この CMOT の過程においては位相空間密度向上のために磁場勾配なども操作することが不可欠であり、MOT 冷却から保存場への捕獲までの連続性を失うことになる。

そこで本研究では、CMOT に代わる冷却手法としてミリ秒で μK 程度まで冷却可能な Gray Molasses 冷却の上記の目的への有用性を実験的に検討した。この冷却法に関しては、近年になって 2 波長 Λ 型遷移によってできる暗状態を利用した種々の方法で実現可能なことが報告されている[1,2,3]。これらに対して初期の実験では、 ^{133}Cs の D2 遷移を用いて 1.1 μK までの冷却効果を実現しており[4]、これは 1 波長のみを用いた磁気副準位間遷移による暗状態を利用した Gray Molasses となっている。今回この点に着目し、 ^{133}Cs と ^{87}Rb の D2 遷移の超微細構造の形やエネルギースケールは似ているため、同程度の冷却効果を期待して、実験を行った。先行研究では、MOT 時の cooling 光と repump 光を Gray Molasses 時には周波数を変えて入れ替え、repump 光を cooling 光として扱っている。この時 repump 光は $\Delta_{\text{repump 光}} - \Delta_{\text{cooling 光}} = 320\text{MHz}$ になるように cooling 光から離している。Gray Molasses を行う際、 Λ 型のように $\Delta_{\text{repump 光}} = \Delta_{\text{cooling 光}}$ とするか、 $\Delta_{\text{repump 光}} \neq \Delta_{\text{cooling 光}}$ の場合は、repump 光の影響を最大限なくするために cooling 光から十分離す ($\Delta_{\text{repump 光}} > \Delta_{\text{cooling 光}}$) 必要がある。そこで本研究では、MOT 時と Gray Molasses 時で同じ cooling 光を用い、repump 光の周波数を十分離すだけで、冷却が可能かどうかを調べ、 ^{87}Rb 原子に対して最も冷却効果の高い cooling 光の離調値及び cooling 光と repump 光の差周波数に寄る影響を探すことを目指す。

2. 原理

Gray Molasses を行うための条件は、① $J \rightarrow J' = J$ または $J \rightarrow J' = J - 1$ 遷移、② 対向させる入射光が正離調 (偏光は $\text{lin} \perp \text{lin}$ または $\sigma^+ - \sigma^-$)、③ 磁場 B は $B \approx 0$ 、の 3 つである。

今、 $J = 1 \rightarrow J' = 1$ 遷移に正離調で $\sigma^+ - \sigma^-$ 偏光のレーザーを入射したとき、遷移選択則よりカップリングする磁気副準位が決まる(図 1)。

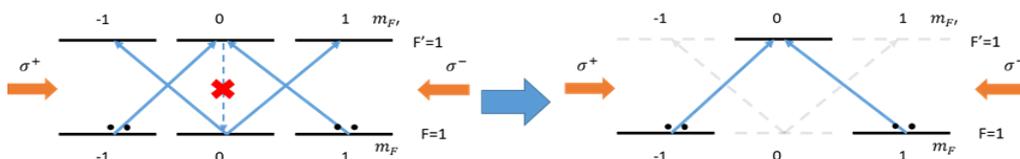


図1 $J = 1 \rightarrow J' = 1$ 遷移での Gray Molasses 時の遷移

2光子の相互作用によって基底準位 ψ は $m_F = -1$ と $m_F = 1$ の重ね合わせで表す事ができる。

$$\psi = A|F = 1, m_F = -1\rangle + B|F = 1, m_F = 1\rangle \quad (A, B \text{ は規格化された確率振幅}) \quad (2.1)$$

そして、(2.2) が成り立つような準位 ψ を dark state $|\psi_d\rangle$ とする。この準位は励起せずシュタルクシフトは起きない。

$$\langle F' = 1, m_{F'} = 0 | H | \psi \rangle = 0 \quad (2.2)$$

それに対して光と相互作用する準位を bright state $|\psi_b\rangle$ とする。同じ強度の σ^+ と σ^- 偏光のレーザーを対向させて入射した時、位置ごとに原子の電荷密度分布は変わる(図2)。これより原子がZ軸方向に進んだ時、位置ごとに光の感受率が変わる。

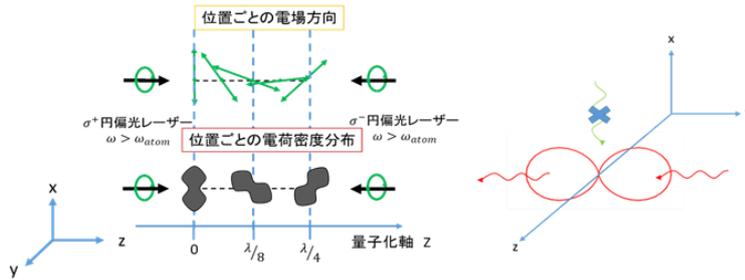


図2 位置ごとの電荷密度分布と光の感受率

これより、基底準位を dark state と bright state に分けて考えたエネルギー図は図3である。Bright state にいる原子は Z 軸方向に動くことによってポテンシャルの山を登りポテンシャルエネルギーが上がると同時に、エネルギー保存則によって運動エネルギーを失う。山の頂点に近づくほど電場との相互作用が大きくなるので励起しやすくなり、原子は dark state に溜まっていく。Dark state にいる原子の内、 $v = \frac{\omega_{bd}}{2k}$ の速さを持つ原子が運動量遷移によって bright state に遷移する。よって冷却できる速度範囲は $\frac{\omega_{bd,min}}{2k} \leq v \leq \frac{\omega_{bd,max}}{2k}$ である[5,6,7]。

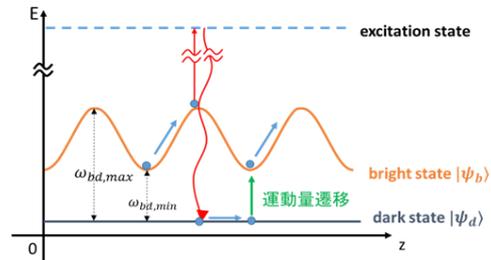


図3 Gray Molasses時のエネルギー図

3. 実験方法

MOT から Gray Molasses の間に移行期間を 2ms 設けて、その間に以下のパラメータを変更する。図4は、

MOT 時 (緑矢印) と Gray Molasses 時 (青矢印) での使用する遷移であり、Gray Molasses は $F=2 \rightarrow F'=2$ 遷移で行う。

^{87}Rb の D2 遷移での

Gray Molasses の初条件として $\Delta_{\text{repump光}}$ は ^{133}Cs の先行研究を参考に最も冷却された $\Delta_{\text{repump光}} - \Delta_{\text{cooling光}} = +320\text{MHz}$ に設定した。また Gray Molasses time は 1ms を初条件とした。

- 本研究での変更パラメータ
- Cooling光の離調 $\Delta_{\text{cooling光}}$
 - Repump光の離調 $\Delta_{\text{repump光}}$
 - Repump光の強度 $I_{\text{repump光}}$
 - Gray Molasses time
 - Cooling光の強度 $I_{\text{cooling光}}$

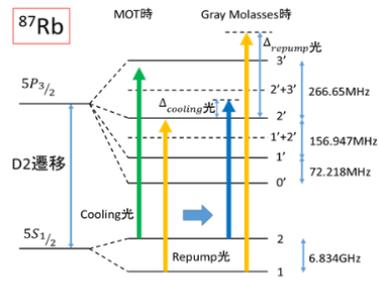


図4 MOT時とGray Molasses時の遷移図

次に、Gray Molasses 中の cooling 光の離調 $\Delta_{cooling光}$ を $F'=2$ から $F'=3$ の間で自由に操作するために、もう 1 本のレーザー(Master Laser 2)を用いてビートをとってオフセットロックする(図 5)。そしてスイッチを使って MOT 時と Gray Molasses 時で Error 信号を切替える(図 6)。

本実験では、オフセットロックに用いる正確な信号発生器として DDS(Digital Direct Synthesizer)を使用した。使用した DDS は 0~200MHz まで安定して出力できるため、beat 信号の後に 4 分周器をつけることによって Δ_{beat} を 0~800MHz まで操作できるようにした。これによって後々 $F=2 \rightarrow F'=1$ 遷移での Gray Molasses 冷却も行うことができるようにした。

4. 実験結果

4.1 Gray Molasses 時の Cooling 光の離調および強度による温度変化

Gray Molasses 時の cooling 光による light shift parameter $\frac{\Omega^2}{\delta\Gamma}$ に比例する $\frac{I}{\delta\Gamma}$ と温度 T の関係は

図 7 である。この時、 Ω はラビ周波数、 δ は cooling 光の離調 $\Delta_{cooling光}$ 、 Γ は ^{87}Rb の D2 遷移の自然幅、 I は cooling 光の強度である。また repump 光の強度は MOT 時と同じである。離調変化より、最低冷却離調 $\Delta_{cooling光}=59.05\text{MHz}(F'=2 \text{ から})$ がわかり、その離調で強度を下げることで、さらなる冷却効果が見られる。本実験では MOT を 5ms 行い、MOT での冷却温度は $300\mu\text{K}$ であった。これより MOT で $300\mu\text{K}$ まで冷却された原子集団の大部分が Gray Molasses を行う事ができる温度(速度)範囲内にいると考えられる。

4.2 Gray Molasses 時の Repump 光の離調および強度による温度変化

$\Delta_{cooling光}$ は $59.05\text{MHz}(F'=2 \text{ から})$ にした状態で、repump 光の離調および強度を変える。 $\Delta_{repump光}$ と $\Delta_{cooling光}$ の差を大きくするほど repump 光の影響をなくすことができ、図 8 より $\Delta_{repump光} \geq 360\text{MHz}(F'=2 \text{ から})$ のときに冷却されている。

また、 $\Delta_{repump光} = 500\text{MHz}$ で repump 光の強度を変えた時の温度変化が図 9 である。repump 光の強度が強くなるほど Gray Molasses の冷却サイクルに送られる原子数が増え、図 9 より $I_{repump光} \geq 0.6 \text{ mW}/\text{cm}^2$ のときに冷却されている。これより、 $F'=3$ から負離調条件である MOT から $F'=2$ から正離調条件である Gray Molasses 条件に移行しても、さらなる冷却効果があると分かる。

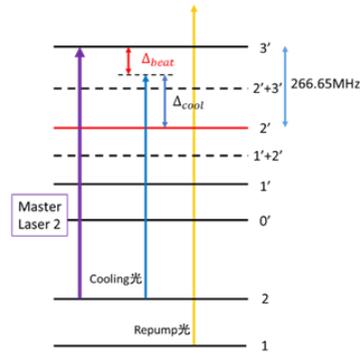


図5 Gray Molasses時の遷移図

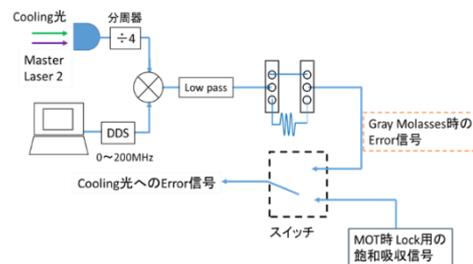


図6 実際のError信号の配線図

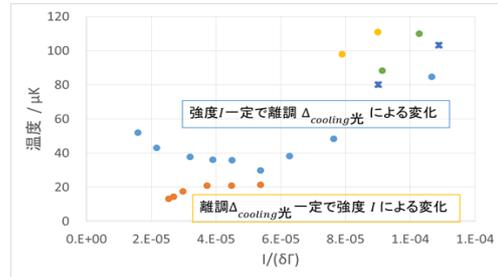


図7 $\frac{1}{\delta\Gamma}$ 変化による温度変化

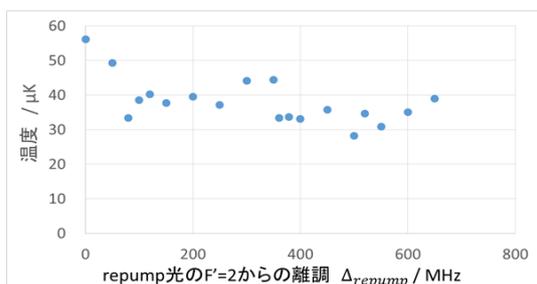


図8 Δ_{repump} 変化による温度変化

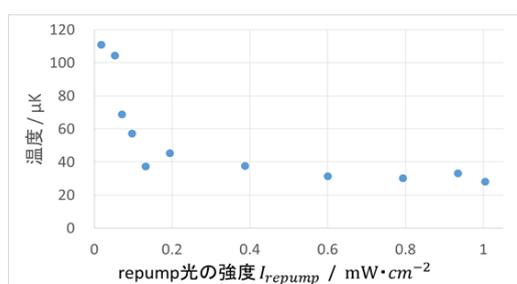


図9 I_{repump} 変化による温度変化

4.3 Gray Molasses time による温度変化

$\Delta_{cooling光} = +59.05\text{MHz}$, $\Delta_{repump光} = +500\text{MHz}$, $I_{repump光} = 1.01 \text{ mW}/\text{cm}^2$ の条件で、Gray Molasses を行う時間を変える。

Gray Molasses time と温度 T の関係は図 10 である。図 10 より、Gray Molasses time $\geq 2\text{ms}$ にすることで冷却される。

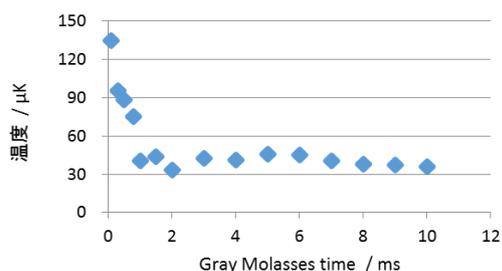


図10 Gray Molasses timeによる温度変化

5. まとめと今後の展望

本研究では自然幅及び D2 遷移の準位間の周波数が ^{87}Rb に近い ^{133}Cs の D2 遷移の Gray Molasses を参考に ^{87}Rb の D2 遷移の Gray Molasses を行い、変更点として MOT 時と Gray Molasses 時で同じ cooling 光を用いて MOT から Gray Molasses に移行しても冷却可能か調べた。結果として MOT 時と Gray Molasses 時で同じ cooling 光を使用しても冷却可能であり、MOT によって Gray Molasses の冷却範囲まで原子を冷却することができることがわかった。また、 $\Delta_{cooling光} = 59.05\text{MHz}$ ($F'=2$ から) , $\Delta_{repump光} = 500\text{MHz}$ ($F'=2$ から) , $I_{cooling光} = 8.95\text{mW}/\text{cm}^2$, $I_{repump光} = 1.01 \text{ mW}/\text{cm}^2$, Gray Molasses time = 2ms の条件で Gray Molasses 冷却を行うことで $10.2\mu\text{K}$ (水平軸) の温度まで確認できた。

しかし ^{133}Cs での先行研究では $1.1\mu\text{K}$ までの冷却が確認されたが、本研究では ^{87}Rb の D2 遷移を用いて $10\mu\text{K}$ 以下の温度を達成できていない。本研究では、cooling 光と Master Laser 2 でとった beat 信号をオフセットロックするために cooling 光を変調させて、ロックインアンプを通すことで微分信号を取り出している。その変調の影響や、残っている電気ノイズ等の影響で cooling 光の線幅が 10MHz 程度に広がってしまっているため、 $\Delta_{cooling光}$ が最適な値になっていないと考えられる。

今後、そのような技術的な問題を解決することによって ^{87}Rb の D2 遷移での Gray Molasses を利用した 1 桁 μK に達する冷却の実現性を探る。

参考文献

- [1] Phys. Rev. A **87**, 063411 (2013)
- [2] Phys. Rev. A **93**, 023421 (2016)
- [3] Phys. Rev. A **88**, 053407 (2013)
- [4] Phys. Rev. A **53**, R3734 (1996)
- [5] D. Budker et al. ATOMIC PHYSICS (2004)
- [6] Christopher J. Foot ATOMIC PHYSICS (2005)
- [7] C. COHEN-TANNOUDJI ATOMIC MOTION IN LASER LIGHT (1992)