

# $^{87}\text{Rb}$ 原子の $5S_{1/2}$ - $6P_{1/2}$ 遷移を用いた Gray-Molasses 冷却

岸本研究室 1733047 児玉識彰

## 研究背景

ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)は一般的に、希薄原子気体中で磁気光学トラップ(MOT)を使用することで捕獲・冷却した原子を圧縮 MOT(CMOT)や蒸発冷却などでさらに冷やしこみ、位相空間密度(PSD)を 2.6 以上に増加させることで生成される。BEC は絶対零度に最も近い温度を持ち、また個々のボース粒子の物質波がコヒーレントに重なった状態でもあるため、原子波レーザーや量子干渉計のソースなどの他に、レーザーによる冷却が難しい原子種を冷やすための冷媒として利用することが考えられる。しかし CMOT では MOT の磁場勾配を変化させつつ冷却光の離調を共鳴から離すことで原子を冷やしこむため、BEC が背景を常温で飛び回る原子と衝突することで原子数を失っていくレートに対して新たな冷却原子を BEC に供給できず、このように生成された BEC にはトラップ寿命が生じてしまう。岸本研究室では BEC の連続生成を目的に、CMOT の代わりに MOT の四重極磁場の中心近傍の零磁場を利用して Gray-Molasses 冷却を行うことで、MOT で捕獲・冷却した原子集団をさらに冷やしこみ、定常的に位相空間密度(PSD)が高く維持される手法を研究している。本研究では  $^{87}\text{Rb}$  の  $5S_{1/2}$ - $6P_{1/2}$  遷移に着目し、この遷移による Gray-Molasses 冷却を行うことで冷却時の光吸収断面積を抑え、原子数密度  $n$  の増加による PSD の向上を目指す。また岸本研究室では 2015 年に  $5S_{1/2}$ - $6P_{3/2}$  遷移のマジック波長の測定に成功している[1]。本研究が成功すればこのようなマジック波長を用いた光双極子トラップ(ODT)と  $5S_{1/2}$ - $6P_{1/2}$  遷移の Gray-Molasses 冷却を組み合わせることで  $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$  遷移を使用した MOT との同時冷却の実現が可能となると考えている。

## Gray-Molasses 冷却の原理

運動する原子の運動方向に、互いに直交した偏光を対向して入射すると、干渉場が形成され、原子は位置に依存したポテンシャルの勾配を感じる。また対向して入射されている光の周波数は等しい場合、原子はドレスト状態を取る。ドレスト状態では光と相互作用する明状態 $|C\rangle$ と光と実効的に相互作用しない暗状態 $|NC\rangle$ が対になって生じる。

明状態 $|C\rangle$ では干渉場との相互作用なので原子は運動エネルギーに従ってポテンシャルの勾配を登り、頂上では励起準位 $|e\rangle$ とのエネルギー差が小さいため、そこから励起準位に上がった原子は自然放出を経て暗状態 $|NC\rangle$ に緩和する。暗状態に緩和した原子でも運動エ

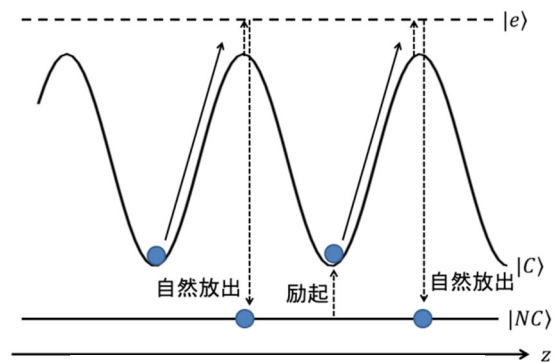


図 1. Gray-Molasses 冷却の概要

エネルギーが十分に残っている場合、モーショナルカップリングを介してエネルギー差が少ない明状態 $|C\rangle$ の勾配の谷部分に励起し、再度勾配を登るサイクルを繰り返す。運動エネルギーを失って明状態 $|C\rangle$ に励起できない原子は暗状態 $|NC\rangle$ にとどまり続け、冷却光による再加熱が防がれる。

### Modulation Transfer 分光法によるレーザー発振周波数の安定化

岸本研究室ではレーザーの発振周波数安定化のために FM サイドバンド分光法を使用していたが、ガスセルの温度が変化することでエラー信号にのるバックグラウンドの電圧が変化するという問題点があった。バックグラウンドの電圧が変化すると周波数ロックしていてもレーザーの周波数が変化してしまう。これを解消するため信号のバックグラウンドに Doppler 効果によるオフセットがのらない Modulation Transfer 分光法を採用した。今回、先行研究[2]を参考に発振周波数シフト用に予め光学系に組み込んであった AOM を用いてサイドバンドを立てることで大きな系の変更なく適用できた。Modulation Transfer 分光法ではガスセルに互いに対向するように入射させたキャリアに励起準位の自然幅程度のサイドバンドを立てた光と何も信号を乗せていないプローブ光を使用する。四光波混合の原理によってキャリアとプローブが原子の遷移に共鳴したとき、プローブ光にサイドバンドが移行する。これをフォトディテクタに入射することで遷移の分光を行う。四光波混合は速度  $v=0$  の原子にのみ発生するためエラー信号のバックグラウンドは平坦であり、ガスセルの温度が変化してもエラー信号の大きさのみが変化する。そのため FM サイドバンド分光よりも周波数安定化の安定性の向上を見込める。

本研究では AOM に Crystal Technology 社の 3200-121、VCO に Mini-Circuits ZHL-1-2W、FG として Tektronix AFG3201 を使用し、電気系統を図 2 のようにした。Modulation transfer の実験では pump 光のパワーを 1.55mW、probe 光のパワーを 1.70mW とし、FG からの AC 信号の振幅は 1.0Vpp とした。

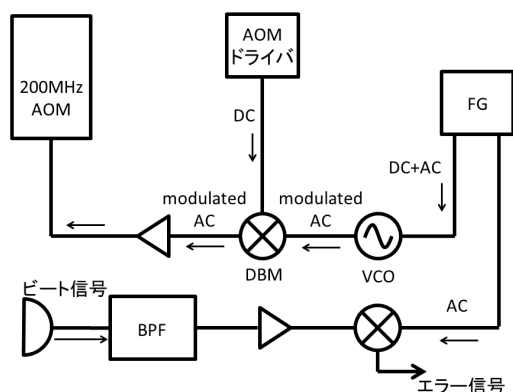


図 2. Modulation transfer 分光での電気系統

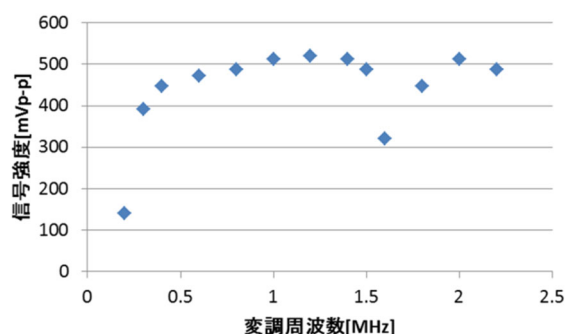


図 3. 分光によって得られた結果

Modulation transfer 分光によって得られた微分信号強度と AOM にサイドバンド発生用に加えた変調信号の周波数のグラフは図 3 のようになった。周波数 1.6MHz で信号強度が落

ち込んでいるのはエラー信号を取り出す際に使用している DBM と LPF の組み合わせによって信号がフィルタリングされたからである。本研究では得られた信号強度とエラー信号の形状の対称性を考慮して、変調周波数 1.2MHz で Modulation transfer 分光を運用することに決めた。また分光法を変えることで以前は数 MHz の安定度だったレーザーの発振周波数は 0.88MHz の安定度まで向上した。尚、現時点では外部共振器レーザーのピエゾ素子へのフィードバックのみとなっているため、電流へのフィードバックをすることでさらに安定度の向上は可能と考えられる。

### Gray-Molasses 冷却で現れる暗状態の予測

$nS-nP$  遷移の Gray-Molasses 冷却とは異なり  $5S_{1/2}-6P_{1/2}$  遷移といった  $nS-(n+1)P$  遷移を使用した Gray-Molasses 冷却の場合、励起準位からの緩和ルートは図 4 のように複雑なものとなる。計算のモデルをより一般的に考えるため、緩和だけを考える準位を図 5 のような中間準位|4)にまとめて考えた。緩和レートの計算により  $6P_{1/2}, F=2$  から中間準位|4)への緩和レートは 6.811MHz、中間準位|4)から  $5S_{1/2}$  への緩和レートは 11.01MHz であった。また中間準位|4)から  $5S_{1/2}, F=1,2$  (それぞれ図 5 の|1), |2)に対応)へのブランチングレートはそれぞれ 0.480 と 0.520 と求められた。

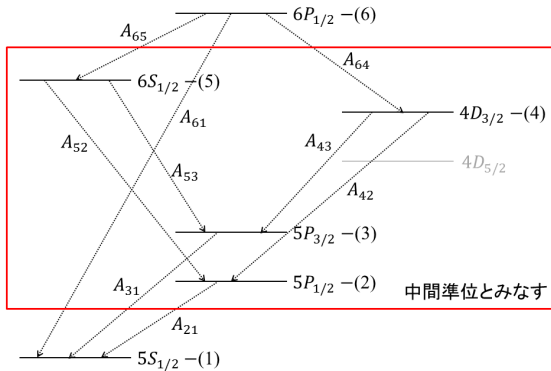


図 4.  $5S_{1/2}-6P_{1/2}$  遷移の緩和に関する準位

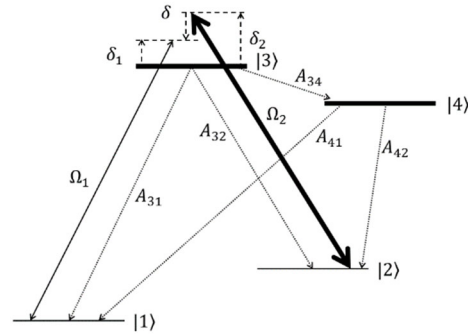


図 5. 中間準位を含む四準位系のモデル

Gray-Molasses 冷却ではサブドップラーの条件( $v \ll \Gamma/k$ ,  $d/dt \rightarrow v \times \partial/\partial z$ )の下で光学ブロッホ方程式(OBE)を立ててポピュレーションの移動を計算することができる[3]。本研究では立式した OBE に対して原子の速度  $v$  と repump 光の光強度  $\Omega_1$  についての摂動解を適用することで解を求めた。そしてそれらの解を基に散乱レートの Raman-detuning についてのグラフを求め、Gray-Molasses 冷却に必要な暗状態の形成が可能かどうか見積もった。紙面の都合上計算式を掲載できないが、実際の準位を考慮した場合の散乱レートのグラフは図 6 となった。一方で四準位系の場合、 $\hbar, k \rightarrow 1$  と置くことで OBE は次の(1)~(6)式のようなになった。

$$iv \frac{\partial \rho_{22}}{\partial z} = -2i\Omega_2 \cos(z) \text{Im}(\rho_{23}) + iA_{32}\rho_{33} \quad (1)$$

$$iv \frac{\partial \rho_{11}}{\partial z} = -2i\Omega_1 \cos(z) \text{Im}(\rho_{13}) + iA_{31}\rho_{33} \quad (2)$$

$$iv \frac{\partial \rho_{44}}{\partial z} = -\Gamma_4\rho_{44} + A_{34}\rho_{33} \quad (3)$$

$$iv \frac{\partial \rho_{23}}{\partial z} = \left(\delta_2 - i\frac{\Gamma_3}{2}\right)\rho_{23} + \Omega_2 \cos(z) (\rho_{33} - \rho_{22}) - \Omega_1 \cos(z) \rho_{21} \quad (4)$$

$$iv \frac{\partial \rho_{13}}{\partial z} = \left(\delta_1 - i\frac{\Gamma_3}{2}\right)\rho_{13} + \Omega_1 \cos(z) (\rho_{33} - \rho_{11}) - \Omega_2 \cos(z) \rho_{12} \quad (5)$$

$$iv \frac{\partial \rho_{21}}{\partial z} = (\delta_2 - \delta_1)\rho_{21} + \Omega_2 \cos(z)\rho_{31} - \Omega_1 \cos(z) \rho_{23} \quad (6)$$

ここでは  $5S_{1/2}-6P_{1/2}$  遷移でのアインシュタインの A 係数を基準に、Gray-Molasses 冷却の cooling 光の強度を 2.1A、repump 光の強度を 0.14A、離調の変化の刻み幅を 0.001A、ポピュレーションは  $5S_{1/2}, F=1$  を 1.0、他を 0 として計算した。

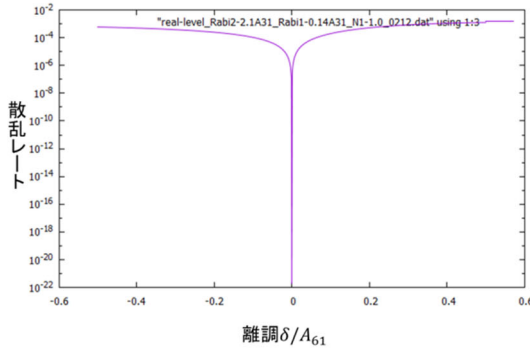


図 6. 実際の準位による散乱レート

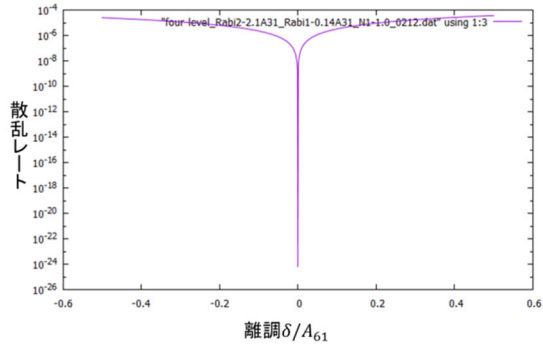


図 7. 四準位系による散乱レート

図 6 より cooling 光と repump 光がカップルする  $\delta = 0A$  で暗状態が形成され、その深さは  $10^{-22}$  程度となった。また中間準位を含む四準位系について同じ光強度と離調の変化の刻み幅の条件で計算した結果は図 7 となった。二つのグラフを比較すると実際の準位で計算した散乱レートの方が四準位系のものより全体的に 10 倍程度大きい値となっていたが、全体的な傾向は似ていたため、四準位系に簡略化しても Gray-Molasses 冷却のモデルとして考えられることが分かった。

### Gray-Molasses 冷却の実験と結果

シミュレーションによって暗状態が形成されることが分かったため、Gray-Molasses 冷却の実験を行った。Gray-Molasses 冷却には 1990 年代に行われた磁気副準位間の遷移を使用したもの (VSCPT 型) と 2010 年代から研究され始めた超微細構造レベルでの遷移を使用したもの ( $\Lambda$  型) との二種類があり、それぞれについて冷却の効果を確かめた。

最初に図 8 のような VSCPT 型 Gray-Molasses 冷却について結果をまとめると図 9 となる。

冷却スキームは 60 秒以上の  $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$  遷移による MOT 後、四重極磁場を解放した後 5ms かけて  $5S_{1/2}$ - $6P_{1/2}$  遷移の Gray-Molasses 冷却光と  $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$  遷移の repump 光を照射するものである。Gray-Molasses 冷却の cooling 光は水平軸の入射が各ビーム  $0.10\text{mW/cm}^2$  で垂直軸には照射しなかった。repump 光が三次元の各ビームで  $0.9\ \mu\text{W/cm}^2$  であった。図 9 によるといずれの離調でも Gray-Molasses 冷却光の照射後に加熱が生じていることが分かる。また図 9 の灰色のプロットは磁場を整える前の温度のデータであるが、残留磁場を 20mG に整えたデータは整える前よりも加熱の傾向が弱くなっていることが分かる。しかし磁場を整えた後に残留磁場を 170mG まで増加させても加熱の傾向は  $10\ \mu\text{K}$  程度しか変化しなかった。

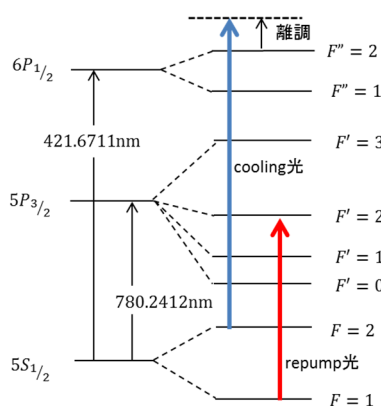


図 8. VSCPT 型 Gray-Molasses 冷却での cooling 光と repump 光の設定

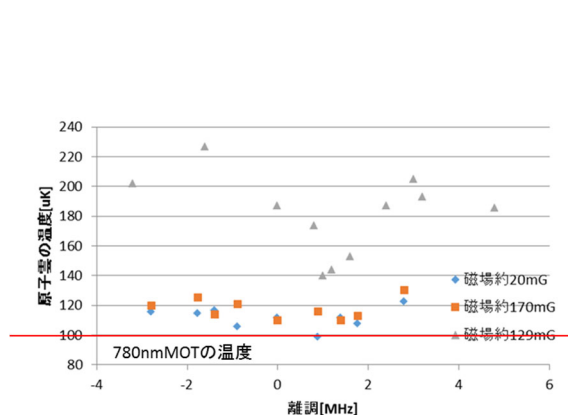


図 9. VSCPT 型 Gray-Molasses 冷却の測定結果

一方で  $\Lambda$  型 Gray-Molasses 冷却の実験では cooling 光を  $0.088\text{mW/cm}^2$ ,  $0.084\text{mW/cm}^2$ 、垂直軸では  $0.007\text{mW/cm}^2$  を入射し、repump 光は水平軸の各ビームで  $4\ \mu\text{W/cm}^2$ 、垂直軸には  $0.4\ \mu\text{W/cm}^2$  を入射した。冷却スキームは 60 秒以上の MOT の後、自由空間中で 10ms の間  $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$  遷移による光モラセス(OM)による予備冷却を行った後に Gray-Molasses 冷却を 5ms の順に行った。図 11 によると  $\Lambda$  型の Gray-Molasses 冷却を行っても加熱の傾向しか見られなかった。

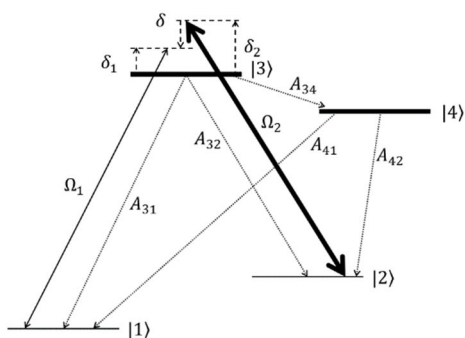


図 10.  $\Lambda$  型 Gray-Molasses 冷却のモデル

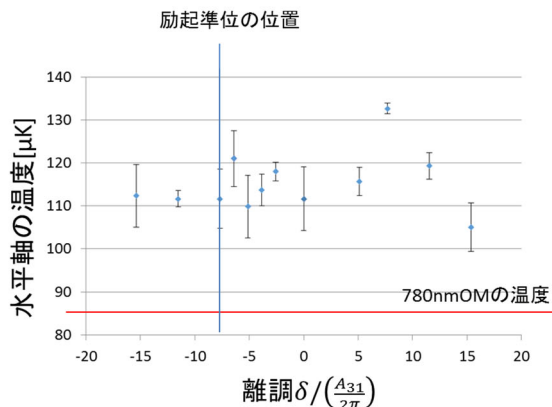


図 11.  $\Lambda$  型 Gray-Molasses 冷却の実験結果

## 将来の展望

今回の実験では  $5S_{1/2}$ - $6P_{1/2}$  遷移を用いた Gray-Molasses 冷却は実現できなかった。しかし CPT の実験では暗状態を確認できている [4] ため、Gray-Molasses 冷却時に照射する光強度が少ないことが原因であると考えられる。先行研究 [5] を参照すると Gray-Molasses 冷却で照射する光強度は飽和強度よりも大きい値であるので、 $^{87}\text{Rb}$  の  $5S_{1/2}$ - $6P_{1/2}$  遷移での飽和強度を先行研究 [6] に従って求めた。 $6P_{1/2}$  準位の緩和レートを  $\Gamma$ 、 $5S_{1/2}$ - $6P_{1/2}$  遷移の直接の緩和レートを  $\Gamma_0$  とすると、多準位系での飽和強度は次の式のように表される。

$$I_{sat} = \frac{\hbar\omega_0^3 \Gamma^2}{4\pi c^2 \Gamma_0}$$

この式で飽和強度を求めた結果、 $I_{sat}$  は約  $26\text{mW/cm}^2$  であった。一方で先行研究 [7] によると Gray-Molasses 冷却のパラメータとして使用できる light-shift パラメータの値の範囲は

$$0.02\Gamma < \frac{\Omega^2}{\delta} < 0.4\Gamma \quad (\text{ただし } \delta \geq 5\Gamma)$$

であり、光強度が最小の  $\Omega^2/\delta = 0.02\Gamma$  かつ  $\delta = 5\Gamma$  とした場合、ビーム全体の平均光強度とするとビーム径  $1\text{cm}$  とするとトータルパワーが  $4.08\text{mW}$ 、径  $5\text{mm}$  の場合では  $1.02\text{mW}$  となる値である。現在チャンバセルへ入射できている光パワーは  $0.8\sim 0.9\text{mW}$  であるため、 $5S_{1/2}$ - $6P_{1/2}$  遷移の Gray-Molasses 冷却を行う場合、最低限でも  $0.1\sim 0.2\text{mW}$  ほど光パワーを増加させる必要がある。

また、入射光パワーを増加させることで  $5S_{1/2}$ - $6P_{1/2}$  遷移の Gray-Molasses 冷却が実証できた場合、冷却の特性を分析した後に ODT 内の原子に対する Gray-Molasses 冷却を検証する予定である。一方で入射光パワーを増加させても Gray-Molasses 冷却が実証できない場合、中間準位による緩和の影響をシミュレーションを使用することで分析することになる。

## 参考文献

- [1] 吉野悠太, 電気通信大学平成 26 年度修士論文.
- [2] M. Aldous, J. Woods, A. Dragomir, R. Roy and M. Himsworth, *Opt. Express* **25**, 12830 (2017).
- [3] A. T. Grier, I. Ferrier-Barbut, B. S. Rem, M. Delehaye, L. Khaykovich, F. Chevy and C. Salomon, *Phys. Rev. A* **87**, 063411 (2013).
- [4] 西山透, 電気通信大学平成 30 年度黄表紙.
- [5] L. Gabardos, S. Lepoutre, O. Gorceix, L. Vernac and B. Laburthe-Tolra, *Phys. Rev. A* **99**, 023607 (2019).
- [6] D. McKay, "Potassium 5p line Data", [http://fermionlattice.wdfiles.com/local--files/papers/5P\\_structure](http://fermionlattice.wdfiles.com/local--files/papers/5P_structure), 2009.
- [7] C. G. Townsend *et al*, *Phys. Rev. A* **52**, 1423 (1995).