

^{87}Rb 原子の $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移における Gray Molasses 冷却に関する研究

岸本研究室 1213068 児玉識彰

1. 背景

1995 年の Cornell の研究グループによる ^{87}Rb の希薄原子気体によるボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の観測[1]以来、BEC は元となる原子集団の位相空間密度を増加させることで生成されている。位相空間密度 ρ は原子数密度 n と温度 T の関数で、箱型ポテンシャルでは $\rho > 2.6$ で BEC が生成される。一般的には磁気光学トラップ(MOT)で捕獲・冷却した原子を圧縮 MOT(CMOT)によって原子数密度を増加させ、最終的に磁気または光双極子トラップ内での蒸発冷却を行うことで BEC を得る。CMOT では原子の冷却に使用しているレーザーの離調を大きくずらして光誘起衝突を回避してから MOT の磁場勾配を増加させるため MOT による原子の捕獲の機能がなくなり、さらに蒸発冷却では全体の熱平衡を保ちつつ、熱を持つ原子を逃すことで位相密度を増加させるため、得られる BEC の量は限られたものとなる。本研究室の目的の一つは BEC の連続生成であり、BEC の連続生成によって BEC の保持時間が増大し、冷却原子の波動性を利用した原子波レーザーの連続発振や BEC に生じる量子渦を使用した長時間の実験が可能になる。現在、BEC 生成でのボトルネックとなる CMOT の代わりに、冷却効果の位置依存性が期待でき、同時にドップラー限界よりも低い温度、サブドップラーまで原子を冷却できる GrayMolasses 冷却の使用を検討している。GrayMolasses 冷却は原子と光の相互作用を量子化して得られる明状態と暗状態を使用し、明状態で冷却された原子集団を暗状態に落とし込むことで冷却された原子が再度加熱されることを防ぐ冷却方法であり、暗状態の形成に単色光を利用する非 Λ 型と二色光を利用する Λ 型とがある。GrayMolasses 冷却の研究の例としては Li[2]、Na[3]、K[4]、Rb[5]、Cs[6]などがあり、本研究室では 2016 年の ^{87}Rb 原子の $5S_{1/2}-5P_{3/2}$ 遷移を使用した GrayMolasses 冷却に成功した[7]。本研究ではより吸収断面積が小さく、冷却効果と同時に原子数密度の向上が期待できる $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移の GrayMolasses 冷却の可能性を追求すべく、光源の開発と冷却の効果について検証する。

2. ^{87}Rb の構造と GrayMolasses 冷却の原理

^{87}Rb 原子の $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移と $5S_{1/2}-6P_{3/2}$ 遷移のエネルギー準位を図 2.1 に示す。本研究で使用する $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移は全角運動量 F' のエネルギー準位の分裂幅が 265MHz であり、波長が近い $5S_{1/2}-6P_{3/2}$ 遷移の F'' のエネルギー準位の分裂幅よりも広い。これによって後に記す GrayMolasses 冷却で離調をとっても使用している準位とは異なる準位に励起することによる加熱効果が小さくて済み、原子集団の冷却を効率的に行うことができる。

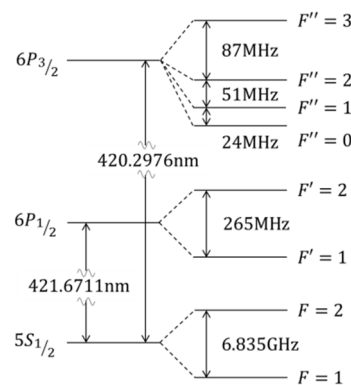


図 2.1 ^{87}Rb 原子の

また ^{87}Rb 原子の $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 準位間のアインシュタイン $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移のエネルギー準位

の遷移確率が約 400kHz[8]なので、レーザーの線幅は 1MHz 以下となることが望ましい。GrayMolasses 冷却は使用する準位と偏光によって 4 種類に分けられる。非 Λ 型では図 2.2 のように速度選択コヒーレントポピュレーショントラップ(VSCPT)と似た機構を使用し[9]、同時に VSCPT では使用しない repump 光を入射する。一方で Λ 型では図 2.3 のように二つの異なる角運動量の基底準位 $|g_1\rangle$ 、 $|g_2\rangle$ を使用する。これら各々に互いに直交した偏光の直線偏光を対向させて入射させる $\text{lin} \perp \text{lin}$ と互いに直交した円偏光を対向させる $\sigma^+ - \sigma^-$ の二つの種類がある。GrayMolasses 冷却で使用される遷移は全角運動量 $F \rightarrow F' = F - 1$ または $F \rightarrow F' = F$ であり、これらの遷移では図 2.4 のように磁気副準位 $m_F = 0$ と $m_{F'} = 0$ の間のクレブシュ・ゴルダン係数の値が 0 である。そのため GrayMolasses 冷却では $\text{lin} \perp \text{lin}$ 、 $\sigma^+ - \sigma^-$ のいずれでも σ^+ 、 σ^- の偏光のみを誘導放出・吸収し、電磁誘起透明化(EIT)が生じる。本研究では $\sigma^+ - \sigma^-$ の GrayMolasses 冷却について実験を行うことを目標としている。

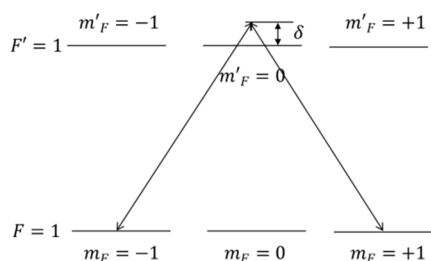


図 2.2 非 Λ 型の GrayMolasses 冷却

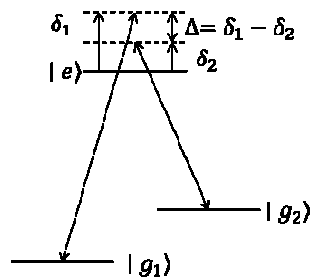


図 2.3 Λ 型の GrayMolasses 冷却

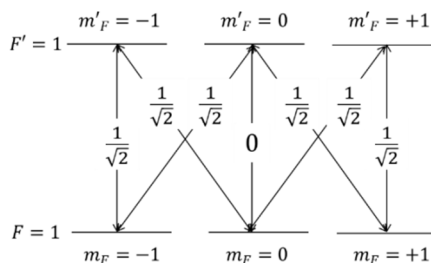


図 2.4 $F = 1 \rightarrow F' = 1$ 遷移のクレブシュ・ゴルダン係数

3. 冷却用の外部共振器型光源モジュールの改良

本研究では冷却光源として日亜化学製モジュール型 ECDL NUV614T に今回新たに温調用のサーミスタとペルチェ素子を取り付けたものを使用する。NUV614T の LD は現在運用している 780nm の LD と比較して波長温度係数が小さく、また ECDL モジュールのサイズも小さいため、ペルチェ素子の追加によって精度が良い温調を期待できる。NUV614T の発振波長の範囲は図 2.1 の ^{87}Rb 原子の $5S_{1/2} - 6P$ 遷移に対応し、内蔵されている透過型グレーティングをマイクロメータ付きアジャスタで発振波長を、光軸をずらすことなく調整することができる。また現在運用している青色 Master1 と 6.835GHz のビートをとると相対線幅は約 1MHz であり、NUV614T の線幅は 1MHz 以下になると見積られる。一方で NUV614T にはピエゾ素子による発振波長の制御機構がないため、発振波長の安定化のために LD 電流にフィードバックをかける電流フィードバックを使用する。

4. 光学系の構築と飽和吸収ロック

図 4.1 に今回構築した光学系の配置図を示す。非 Λ 型 GrayMolasses では NUV614T の光のみを使用し、 Λ 型 GrayMolasses では NUV614T と Master1 の二光源を使用する。そのため NUV614T の発振波長を安定化させる機構を二種類用意する必要がある。非 Λ 型 GrayMolasses では飽和吸収分光による周波数安定化、 Λ 型では Master1 の発振周波数を飽和吸収分光によってロックしてから、NUV614T の発振周波数は Master1 との差、二光源のビートから周波数ロックを行うビートロックを使用する。飽和吸収分光から得られる ^{87}Rb 原子の $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移の微分信号は図 4.2、4.3 のようになり、ロックシステムで信号を反転して LD 電流に乗せることで発振周波数のフィードバックをかけることができる。一方でビートロックでは二光源の干渉によって得られる時間的なビートをフォトダイオードで検出し、外部の RF 信号源と参照して発振周波数がずれた分をフィードバックとして NUV614T の LD 電流にかけることで発振周波数を安定させる。

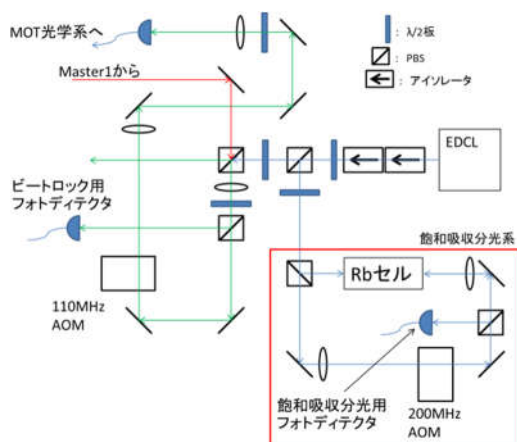


図 4.1 本研究で構築した発振周波数安定化のための光学系

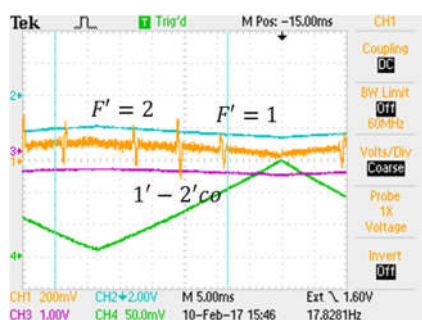


図 4.2 $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 6P_{1/2}$ 遷移の微分信号

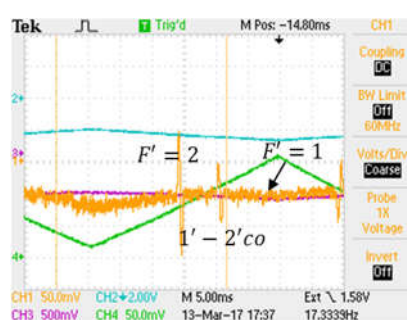


図 4.3 $5S_{1/2}, F=1 \rightarrow 6P_{1/2}$ 遷移の微分信号

5. $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移の repump 光による F ポンピングのテスト

発振波長を安定化させた NUV614T の光を MOT を行うガラスチャンバーに導き、repump 光による原子集団の F ポンピングを行うことで ^{87}Rb 原子の $5S_{1/2}, F=1-6P_{1/2}$ 遷移に相当する波長の光の効果の評価した。本研究室ではイメージング光に $5S_{1/2}, F=2-5P_{3/2}$ 遷移の波長

の光を使用しているため、一度 $5S_{1/2}, F=2-5P_{3/2}$ 遷移の光を用いて $5S_{1/2}, F=1$ にポンピングした後に $5S_{1/2}, F=1-6P_{1/2}$ 遷移の光を原子集団に時間を変えて照射することで $5S_{1/2}, F=2-5P_{3/2}, F=3$ 遷移に共鳴な光によるイメージング時に得られる原子数が変化する。結果は図 5.1 のようになり $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移の repump 光によって原子が応答することが確認できた[10]。

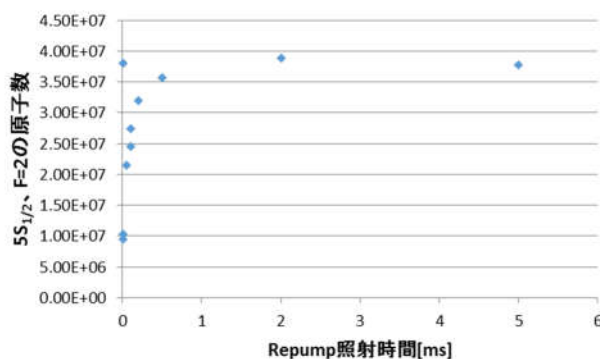


図 5.1 421nm の repump 光による F ポンピングの結果

6. 今後の展望

今回、 ^{87}Rb の $5S_{1/2}-6P$ 遷移の波長域の光源を用意し、日亜化学製モジュール型 ECDL NUV614T の発振波長を冷却遷移等に安定化する光学系とシステムを準備することができた。また、MOT を行うガラスチャンバーまで光を通し、 ^{87}Rb 原子が $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移の光に応答することが分かった。現在、GrayMolasses 冷却を行うために残留磁場消磁のための補正磁場を調整している。今後の展望としては磁場の条件が整い次第 $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移の各エネルギー準位について非 Λ 型と Λ 型の GrayMolasses 冷却の実験を行い、冷却を行うためのレーザーの光強度や離調といったパラメータを求め、それらの条件下での冷却効果を測定することを目指す。

7. 参考文献

- [1] M. H. Anderson et al., Science **269**, 198 (1995). [2] Andrew T. Grier et al., PRA **87**, 063411 (2013). [3] Giacomo Colzi et al., PRA **93**, 023421 (2016). [4] D. Rio Fernandes et al., Europhys. Lett, **100**, 63001 (2012). [5] M. Weidemuller et al., Europhys. Lett, **27**, 109 (1994). [6] D. Boiron et al., PRA **52**, R3425 (1995). [7] 中村貴紀, “ ^{87}Rb 原子のD2遷移を用いたGrayMolasses冷却に関する研究”, 平成27年度卒業論文. [8] Peter L. Smith, Claas Heise, Jim R. Esmond, Robert L. Kurucz, “R. L. Kurucz' CD-ROM 23”, <http://www.pmp.uni-hannover.de/cgi-bin/ssi/test/kurucz/sekur.html> [9] Dipankar Nath et al., PRA **88**, 053407 (2013). [10] さらに、今回製作した光源は、 $5S_{1/2}-6P_{3/2}$ 冷却遷移による MOT の実験の repump 光($5S_{1/2}, F=1-6P_{3/2}, F=2$ に共鳴)として用い、冷却効果の評価や原子の応答も観測している。(詳細は、【H28 年度卒研：沖山慶太】を参照。)