

^{87}Rb 原子の D1 遷移用冷却光源の周波数安定化と光学系の構築

情報理工学研究科 物理工学プログラム 岸本研究室

1733063 白鳥智彰

1. 研究背景と目的

本研究室は ^{87}Rb を用いた連続的なボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の生成を目的としている。一般的には磁気光学トラップ(MOT)、圧縮磁気光学トラップ(CMOT)、光双極子トラップ中での蒸発冷却の手法を時間的に変えて行い、位相空間密度を増加させることで BEC を生成する。その中でも CMOT は磁場勾配を時間的に変化させる必要があり BEC の生成の連続性が失うこととなり、BEC を用いた研究の制限となっている。そこで、本研究室では、

CMOT の過程を廃し、MOT 中心近傍の低磁場領域で Gray Molasses 冷却の導入を検討している。先行研究では D1 遷移を用いた Gray Molasses 冷却により ^{23}Na 原子を 1×10^{-4} [1]、 ^{39}K 原子を 2×10^{-4} [2]の位相空間密度が実現されたと報告されている。この結果から本研究室で扱う ^{87}Rb の D1 遷移($5S_{1/2}$ から $5P_{1/2}$ への遷移)に対しても Gray

Molasses 冷却が適応できると考えている。特に $5S_{1/2}, F=1$ から $5P_{1/2}, F'=1$ の遷移(図 1.1 での赤線)に対応する遷移を Gray

Molasses 冷却の cooling 光として使用することを考えている。この光は ^{87}Rb の D2 遷移を用いた MOT の repump 光としても使用できる遷移である。そのため、この赤外線は Gray

Molasses 冷却が効果的ではない MOT の中心遠方の高磁場領域では Gray Molasses 冷却の repump 光として振る舞い、MOT の中心近傍の低磁場領域では Gray Molasses 冷却の cooling 光として振る舞うことが期待され、実験条件を変化させることなく

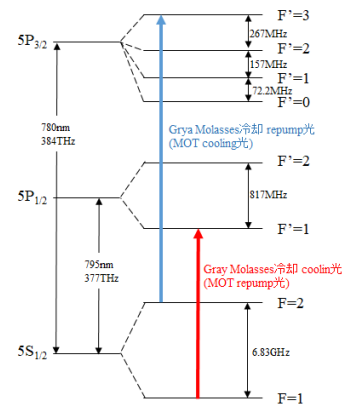


図 1.1 ^{87}Rb の遷移図。

2本のレーザー光源を用いることで MOT と Gray Molasses 冷却を同時に行うことを狙っている。

本研究では、この Gray Molasses 冷却を行えるような新たな光源及び光学系を開発しその特性の評価を行うことが目的である。

2. Modulation transfer 分光の特性

レーザー冷却を行う上で必要となる原子を遷移させるためには光源の周波数が励起準位の遷移線幅よりも狭く安定化されていなければならない。今回の研究ではそのための安定化手法とし Modulation transfer 分光を採用した。この分光方法は飽和吸収分光の一種で EOM により pump 光に与えた変調周波数 ω_{mod} が、四光波混合により probe 光にも移行することを利用した分光法である。特性として四光波混合は速度 0 の原子に対して起きるため、この分光により得られるエラー信号はドップラー広がりの影響を受けない利点を持つ。

エラー信号はミキサに probe 光を受光したフォトディテクターの信号と周波数 ω_m 位相 θ

の正弦波を入力し復調することで、次式のエラー信号 S_{err} が得られることが知られている[3]。

$$S_{\text{err}} = \frac{C}{\sqrt{\Gamma^2 + \omega_m^2}} \times [(L_{-1} - L_{-1/2} + L_{1/2} - L_1)\sin(\theta) + (D_1 - D_{1/2} - D_{-1/2} + D_{-1})\cos(\theta)] \quad (2.1)$$

$L_n = 1/\{1 + (\Delta/\Gamma - n\omega_m/\Gamma)^2\}$ 、 $D_n = (\Delta/\Gamma - n\omega_m/\Gamma)/\{1 + (\Delta/\Gamma - n\omega_m/\Gamma)^2\}$ であり、 C はフォトディテクター(PD)等により決まる定数、 Γ は励起準位の遷移線幅、 Δ は共鳴周波数からの離調である。式(2.1)を用いてエラー信号を計算した結果を図 2.1 に示す。ここでは例として $\theta = 0$ かつ、 ω_m/Γ の値を 4、2、0.8 と変えて計算を行った。この計算結果から共鳴周波数($\Delta = 0$)ではエラー信号は 0 点を取り $\Delta = 0$ を境に正負が反転するため、レーザーのロックポイントとして使用できることが分かる。特にエラー信号のロックポイントでの勾配が高いほどロック時の周波数が安定する。そして、その勾配は ω_m に依存している。そこで式(2.1)を $\delta = \Delta/\Gamma$ で偏微分したのち $\Delta = 0$ を代入することで各 ω_m/Γ に対するロックポイントでの勾配を計算した。図 2.2 に θ を選択することで得られる各 ω_m/Γ に対する最大の勾配を示す。この計算結果は $\Omega = \omega_m/\Gamma = 0.706$ で最大値を取る。そこで本研究室では、 ^{87}Rb の D1 遷移自然幅(5.75MHz)近傍の位相変調で動作するように EOM を作製した。

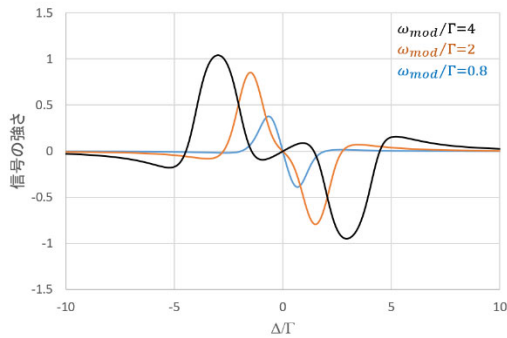


図 2.1 $\theta = 0$ の時のエラー信号の形状。

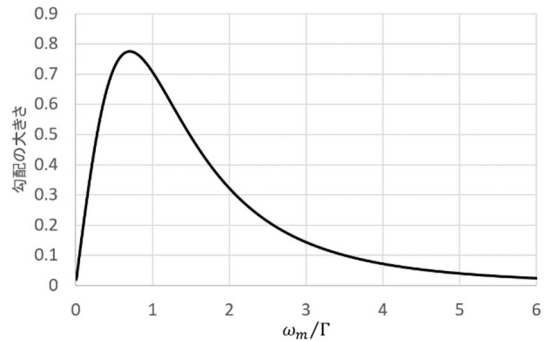


図 2.2 ロックポイント($\Delta = 0$)での各 ω_m/Γ に対する最大の勾配。

3. EOM の構成及び特性評価

本研究室で作製した EOM とその等価回路をそれぞれ図 3.1(a)に図 3.1(b)に示す。EOM は効率よく電圧を加えるため LC 共振型の構成となっている。結晶はニオブ酸リチウム結晶(入射面サイズ 2mm×2mm 長さ 40mm)であり、その電極には銅端子を使用して、結晶と銅端子間には凹凸を滑らかにするためにインジウムシートを挟んでいる。特にインダクタは抵抗値が 0.18 Ω と小さい TDK の 40 μH のインダク(B82111E0000C023)を用い効率よく電圧が加わることを狙っている。

ここではまず、信号発生器の出力電圧を 5Vpp に固定して周波数を掃引させ、795nm の波長のレーザーの駆動周波数に対する出力特性を評価した。EOM の透過光に対してファブリペロ共振器を用いて測定した 1 次のサイドバンド光強度とキャリア光強度の比を図 3.1(c)に示

す。図 3.1(c)の結果から変調度を算出したものを図 3.1(d)示す。作製した EOM は LC 共振型であるので図 3.1(d)に対してローレンツ曲線でフィッティングを行った結果、中心周波数は 6.16MHz、半値全幅 3.0kHz であることが確認された。この結果から、この LC 共振回路の Q は 2.1×10^3 、内部抵抗は 0.740Ω である。また、5Vpp の印加電圧で変調度が 1.30rad を得たのでこの共振型 EOM の π 電圧は 12.1Vpp であると考えられる。以上の測定結果から作製した EOM は ^{87}Rb の D1 遷移の自然幅(5.75MHz)近傍で効率よくサイドバンドを形成し、印加する電圧はアンプを使用する必要がなくファンクションジェネレータ(FG)を使用するのみで十分なサイドバンドを生成できるものであることが確認された。

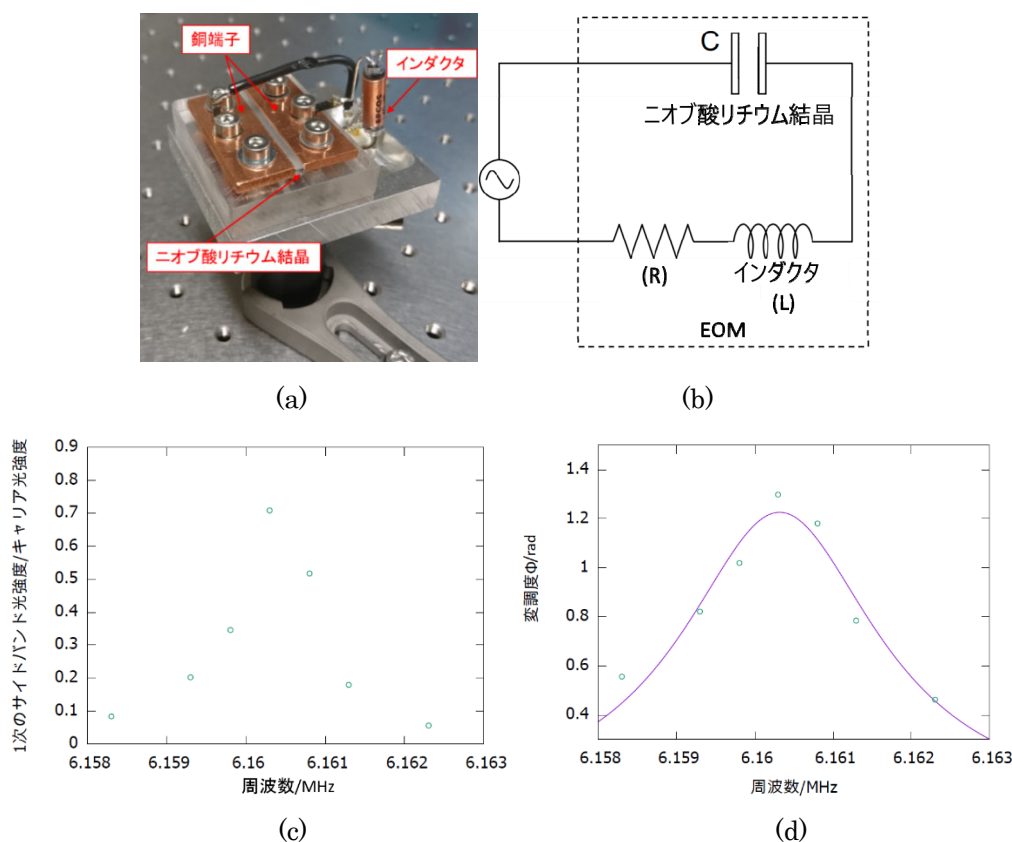


図 3.1 EOM の構成及び特性。(a)実際の EOM。(b)EOM の等価回路。(c)入力電圧の周波数に対する 1 次のサイドバンド光強度とキャリア光強度の比。(d) 入力電圧の周波数に対する変調度。

4. 周波数ロックの評価

Modulation transfer 分光を用いて周波数の安定化を行った実験光学系を図 4.1 に示す。ECDL からの光は偏光ビームスプリッター(PBS)を用いて probe 光と pump 光に分けられ Rb 原子気体を封入したセル(Rb セル)に入射する。pump 光は EOM により 6.16MHz の変調を与えられている。PD を用いて検出された信号を 6.16MHz の正弦波で復調することによりエラー信号を形成し、サーボ回路を用いて ECDL 内の PZT 素子に対してフィードバックをかけるこ

とにより電気を用いて高速周波数制御が行えるようになっている。

ECDL 内の PZT 素子に対して線形に電圧を加えた時に観測されたエラー信号と Rb セル内の Rb 原子群の吸収信号に対応する PD の DC 信号を図 4.2 に示す。得られたエラー信号はドップラー広がりによる影響を受けていないことを意味するバックグラウンド信号が平らであることが確認された。そのため、室温の変化等により Rb 原子群の吸収量が変化しても、ロックポイントは動くことなく同じ周波数でロックすることが可能となる。

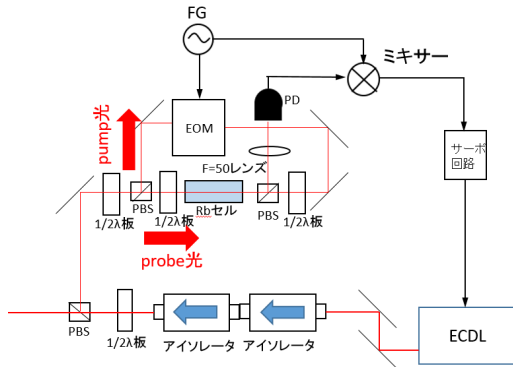


図 4.1 実験光学系。

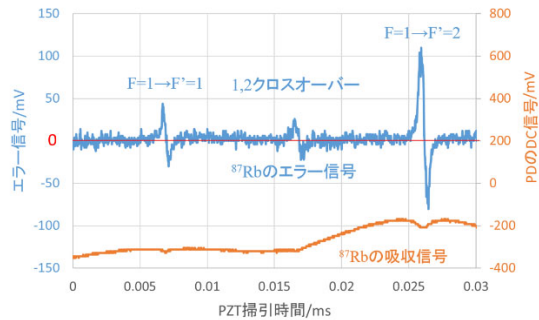


図 4.2 エラー信号と PD の DC 信号の測定値。

実際に $5S_{1/2}F=1$ から $5P_{1/2}F'=1$ 遷移に周波数ロックを行った時に得られたエラー信号を図 4.3 に示す。この信号は使用した回路に由来するノイズが乗っている。参考までに周波数掃引を行った時に得られた $5S_{1/2}F=1$ から $5P_{1/2}F'=1$ 遷移のエラー信号からロック時の周波数がどの程度安定しているのか見積もった。図 4.4 の青線は PZT 素子の掃引時間から見積もった $5S_{1/2}F=1$ から $5P_{1/2}F'=1$ 遷移の共鳴周波数からの離調 Δ に対するエラー信号を示している。この図から $\Delta = \pm 0.5\text{MHz}$ の範囲では $\pm 3\text{mV}$ 以内の電圧のエラー信号であると見積もられ、実際にロックした信号の大部分がこの範囲に収まっている。また、検出器 (PD) に光を入射していない場合でも、回路の出来栄えに由来したノイズによって同等の信号幅が観測されている。これらのことから、現時点での見積もりとして、周波数ロックによりレーザーが少なくとも 1MHz 以下の振れ幅を持ち、安定していると考えた。この値は D1 遷移の自然幅 (5.75MHz) よりも小さく、レーザー冷却に使用可能であると考えられる。

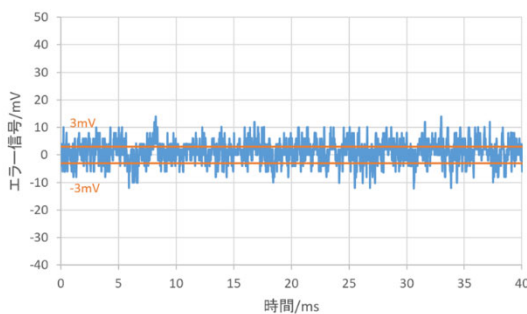


図 4.3 ロック時のエラー信号。

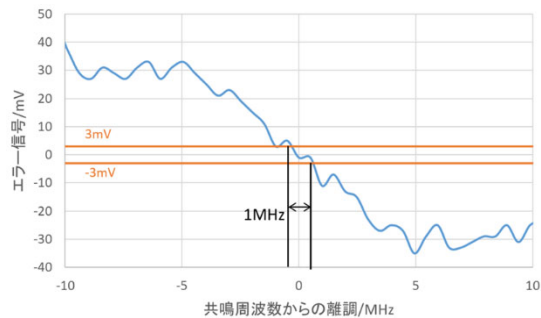


図 4.4 $5S_{1/2}F=1 \rightarrow 5P_{1/2}F'=1$ の共鳴周波数からの離調 Δ に対するエラー信号。

5. 1/4λ板の評価

Gray Molasses 冷却を行うため、ダイクロイックミラーを設置することで、既存の⁸⁷Rbの D2 遷移(波長 780nm)を用いた MOT の cooling 光の光学系と混ぜ合わせることを考えている(図 5.1)。このようにすることで、光学系を増築することなく Gray Molasses 冷却に必要な円偏光を作製でき、そして三軸方向の光強度比が適当となることを狙っている。そのとき起こりうる問題として波長板の波長依存性によって、今回準備した 795nm の波長に対しては適切ではなくなるが考えられる。そこで今回はまず Gray Molasses 冷却を行う上で重要となる円偏光を形成する 1/4λ板について評価を行った。測定方法としては、検光子の手前に設置した 1/4λ板を回転させることで生じる検光子の透過光強度の変化を測定することで 1/4λ板のファスト軸とスロー軸により生じる位相差 d を求めた。1/4λ板に入射する光は 780nm と 795nm の波長の直線偏光であり、検光子の回転角は 1/4λ板を設置する前に透過率が最大になるように調整した。780nm 及び 795nm での測定結果をそれぞれ図 5.2(a)と図 5.2(b)に示す。1/4λ板に入射する光は直線偏光であり、1/4λ板と検光子により変化する偏光状態をジョーンズ・マトリックスを用いて計算することで検光子の透過光強度 I は次の関係式となる。この式を用いてフィッティングを行うことで d を求めた。

$$I = A^2 \left\{ 1 - \sin^2 \left(\frac{d}{2} / 180 \times \pi \right) (\sin^2(2(e - x) / 180) \times \pi) \right\} \quad (5.1)$$

A は 1/4λ板に入射した直線偏光の電場の大きさに比例しており、 x は 1/4λ板の回転角であり、 e は波長板に入射する直線偏光と波長板のファスト軸が一致する回転角である。フィッティングの結果から 1/4λ板は 780nm に対して d は $92.3 \pm 0.3 \text{deg}$ 、795nm に対して d は $90.2 \pm 0.1 \text{deg}$ であった。1/2λ板に対しても同様に波長依存性を見積もることで、冷却の影響について検討を行う予定である。

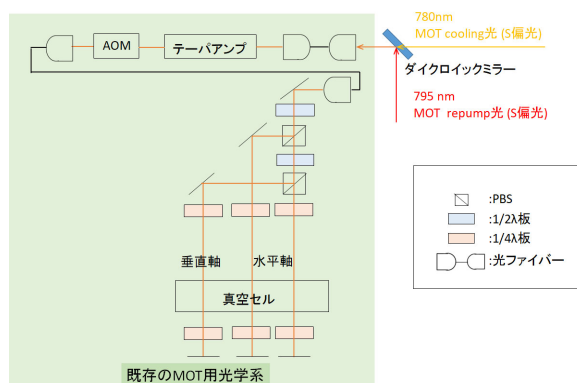


図 5.1 波長 780nm のレーザーとの合流後の光学系

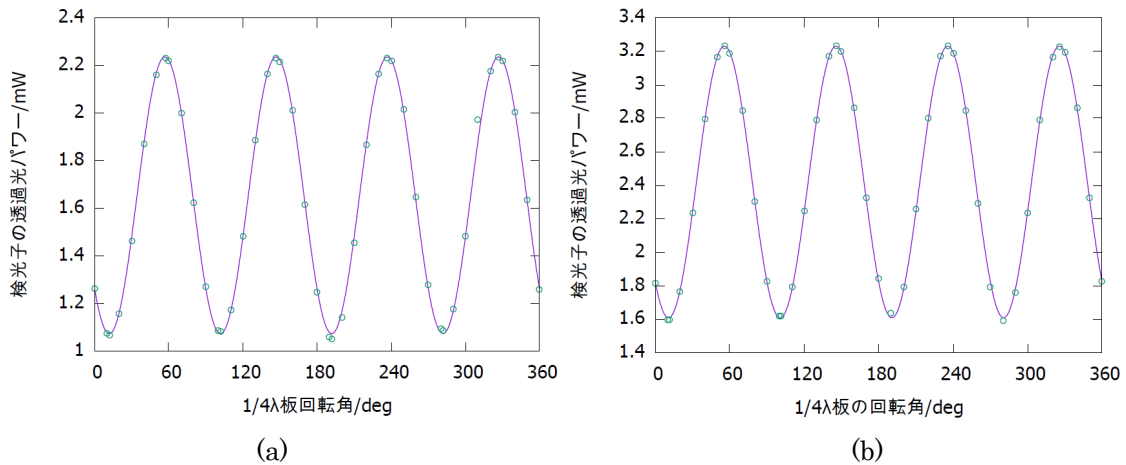


図 5.2 1/4 λ 板を回転させたときの検光子の透過光パワー。(a)780nm での測定結果。
(b) 795nm での測定結果。

まとめと今後の展望

本研究では適切な位相変調周波数で動作する EOM を用いて Modulation transfer 分光のエラー信号を形成した。得られたエラー信号のバックグラウンド信号は平らであることが確認され、ドップラー広がりの影響を受けていないことが分かった。また実際に ^{87}Rb の $5S_{1/2}F=1$ から $5P_{1/2}F=1$ の遷移に周波数ロックを行ったところ、 ^{87}Rb の D1 遷移の自然幅よりも十分小さい振れ幅で安定化されていることが確認され、レーザー冷却に使用可能であることが分かった。そして、作製した安定化光源を既存の MOT 用の光学系に混ぜ合わせることを考慮して 1/4 λ 板の評価を行ったところ、ファスト軸とスロー軸による位相の遅れは 780nm に対しては $92.2 \pm 0.3\text{deg}$ 、795nm に対しては $90.2 \pm 0.1\text{deg}$ となった。今後の展望として 1/4 λ 板だけでなく既存の cooling 光との合流に関わる素子の波長特性を評価することで、既存の MOT 用光学系と混ぜ合わせることで、Gray Molasses 冷却が行えるか検討する予定である。

参考文献

- [1] G. Colzi, G. Durastante, E. Fava, S. Serafini, G. Lamporesi and G. Ferrari, Phys. Rev. A **93**, 023421 (2016)
- [2] G. Salomon, L. Fouche, P. Wang, A. Aspect, P. Bouyer and T. Bourdel, EPL **104**, 63002 (2013)
- [3] D. J. McCarron, S. A. King and S. L. Cornish, Meas. Sci. Technol. **19**, 105601 (2008)