

^{87}Rb 原子の D1 遷移を用いた Gray Molasses 冷却のための光源開発

先進理工学科 応用物理工学コース 岸本研究室

1413198 渡辺 雅生

1. 背景と目的

アインシュタインが予言したボース・アインシュタイン凝縮体(Bose Einstein Condensation:BEC)は、1995年にJILAのグループがRb原子を用いて、MITのグループはNa原子を用いてそれぞれ個別にその生成に成功した[1]。この成功以来、極低温物理の分野ではBECについてのさまざまな研究が行われている。

岸本研究室では、BECの連続的生成を目指している。BECを生成する一般的な手順としては、高速で飛来する原子を磁気光学トラップ(MOT)により捕獲と冷却を行い、圧縮磁気光学トラップ(CMOT)により原子数密度を増加させたのち、光双極子トラップにロードして蒸発冷却を行う。このような生成法は段階的に行うためBECの研究に時間的制約を与えている。この欠点を克服するため本研究室では複数の実験条件の同時掃引を要するCMOTの代わりに、より単純なGray Molasses冷却を行うことを考えている。具体的には既存のMOTに新たな光源を取り付け、そのレーザー光の周波数を正に離調し、磁場勾配を減少させる系を構想している。このような系により4重極磁場のうち高磁場領域ではドップラー冷却、低磁場領域ではGray Molasses冷却が支配的に作用し、複数の冷却を時間的に切り替えることなく更なる高密度化、低温化が行えると期待される。これを実現するために、Gray Molasses冷却用の新たなレーザー光源を開発することが、本研究の目的である。

2. Gray Molasses に用いる ^{87}Rb の遷移と冷却の原理

原子集団に偏光したレーザー光を当てると、基底状態に複数の磁気副準位を持つ場合、励起状態を介して基底状態の磁気副準位が結合し、光を吸収できる明状態と、光を吸収しない暗状態が形成される。その際、逆向き円偏光の光を対向させているため、各状態は図1のようなポテンシャルを感じる。そこで、明状態にいる原子はポテンシャルの山を登り減速し、ポテンシ

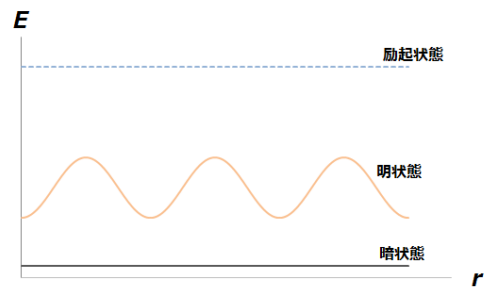


図1 Gray Molasses 冷却のイメージ

シャルの頂点付近で共鳴光により励起される。励起された原子は自然放出により明状態か暗状態のいずれかに落ち、再度明状態に落ちた原子は先ほどと同じ過程により減速される。暗状態に落ちた原子はしばらくその状態を維持するが、明状態の谷までのエネルギー間隔より大きい運動エネルギーを持つ速度の速い原子は明状態へ結合する確率が高いため、再び明状態に戻る。これらの過程を繰り返すことで、いずれすべての原子が2状態のエネルギー間隔以下の運動エネルギーとなり、暗状態に溜まる。暗状態にいる原子は光と相互作用

用しないため、光子の再吸収を受けずドップラー冷却限界を超えた冷却が可能となる。

研究背景で述べたように、既存の光学系に新たな光源を加えて Gray Molasses 冷却を行うことを予定している。現在の光源としては $5S_{1/2} F = 2 \rightarrow 5P_{3/2} F' = 3$ の遷移に該当する周波数 780nm のレーザー光を cooling 光として用いている。一方、Gray Molasses 冷却の要請として用いる遷移の準位は $F \rightarrow F'$ または $F \rightarrow F' - 1$ のどちらかでなければならない。これを満たす遷移は D1 遷移に 1つと D2 遷移に 2つあるが、暗状態形成の妨げとなる他の近接した準位への実励起を避ける意味で励起状態の超微細構造分裂幅の広い D1 遷移の方を採用する。先行研究においてもアルカリ金属の D1 遷移を用いて ^{23}Na で $9\mu\text{K}$ [2]、 ^{39}K で $6\mu\text{K}$ [3] を達成している。また、ドップラー冷却中でも repump 光として併用できるに考慮し、当研究では光源として $5S_{1/2} F = 1 \rightarrow 5P_{1/2} F' = 1$ の遷移を用いることとした。

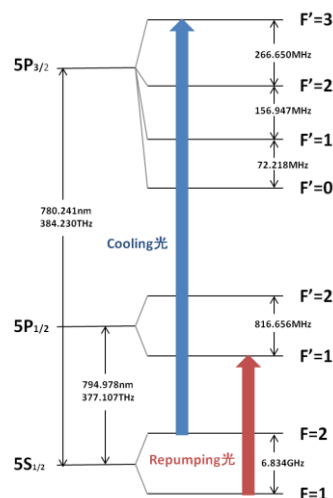


図2 ^{87}Rb のエネルギー準位

3. 発振周波数の操作と安定化

原子を遷移させるためには光源の周波数が原子の励起準位の遷移線幅よりも狭く安定化され、所望の遷移から任意の離調で安定し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法として変調移行分光法を採用した。変調移行分光法は飽和吸収分光法の一つで、周波数変調を pump 光に与え、四光波混合という現象によりその変調が probe 光に移行することを利用した分光法である。図3に変調移行分光法を行った光学系を記す。

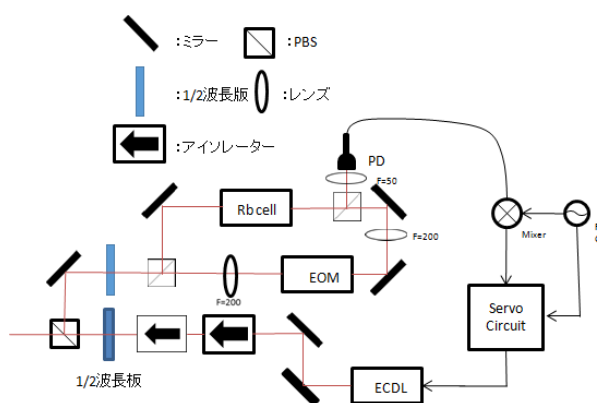


図3 変調移行分光法の光学系

まず冷却に用いるレーザー光の一部を PBS で分割し、さらにもう一度分割させ Rb cell 内の原子を励起させる pump 光と PD に検出される probe 光を対向させる。ここで、pump 光に対しては EOM によって周波数変調を与えておく。対抗した光は Rb cell において周波数が原子の共鳴周波数に等しいときに probe 光が透過するが、このとき四光波混合という現象が起こる。この現象はエネルギー保存則と運動量保存則の要請から idler 光という新たな光が probe 光と同じ向きに生成される。そのため、PD に検出される光は probe 光と idler 光のビートとなり、pump 光の乗せた変調信号は原子を介して probe 光に移すことができる。

この分光法のメリットとしては四光波混合が原子の速度 0 の成分に対してのみ条件が満たされるので、エラーシグナルにドップラー広がり起因するオフセットが乗らずオフセットの変動によりロックが外れるということが起こらないといった点があげられる。



図 4 四光波混合のイメージ

4. 周波数安定化に用いる機具

レーザーの発振周波数の操作と安定化を行う機具として外部共振器型半導体レーザー (ECDL) とサーボ回路を用いた。ECDL は回折格子により一次回折光を入射方向に戻すことで外部共振器を形成し線幅の狭窄化を行う装置で、回折格子の後ろにつけられた圧電素子を電気信号で操作することによって共振器長を変動させ、発振周波数の操作と安定化を行う。共振器長を操作する電気信号は変調移行分光法で得られたエラーシグナルを復調しサーボ回路でコントロールを行っている。

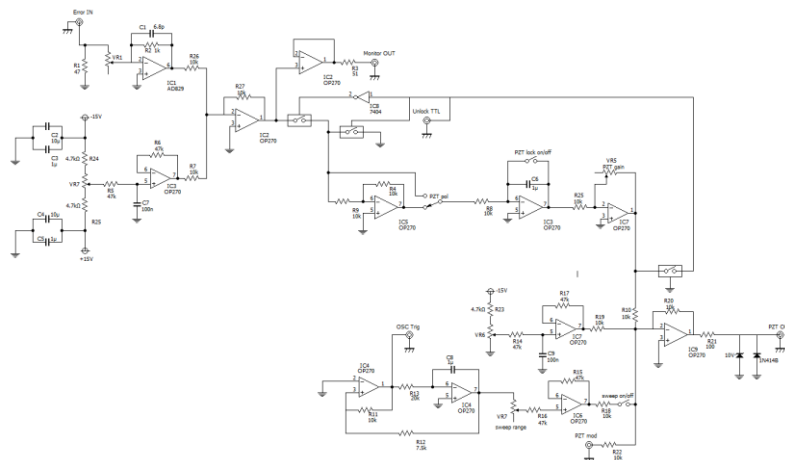


図 5 サーボ回路の回路図

実際の動作としては、図 5 の回路図の下段の三角波発生器で周波数掃引を行い、中段でバイアスを与え、上段で周波数ロックを行う。

5. 光源の動作の検証

作成したサーボ回路により、レーザーの発振周波数の操作と周波数ロックを行うことは確認できた。その後本研究で採用した変調移行分光法と一般的に広く行われている FM サイドバンド分光法で吸収線の線幅の比較を行った。(FM サイドバンド分光法は probe 光に周波数変調を行う。)

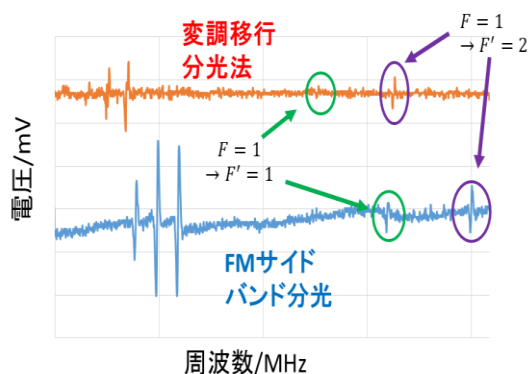


図 6 エラーシグナルの大きさの比較

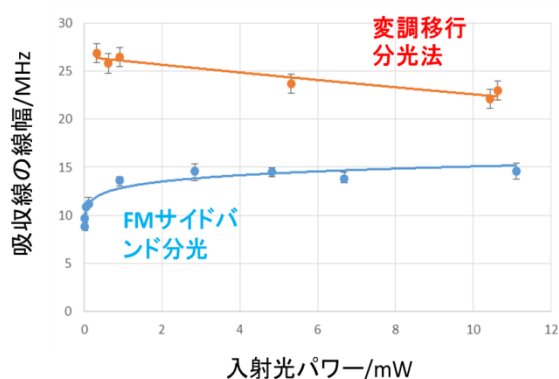


図 7 吸収線の線幅の比較

まず、図 6 に変調移行分光法と FM 再度バンド分光法で実際に得られるエラーシグナルを示す。前述のように、変調移行分光法の方が FM サイドバンド分光法よりもバックグラウンドの信号が非常に平滑なのが確認できる。尚、図中のデータに周波数シフトが存在するのはそれぞれ異なる時間に測定を行ったためである。次に、図 7 は射光パワーに対する吸収線の線幅を変調移行分光法と FM サイドバンド分光法の二つの方法で比較したものである。本来、入射光強度を下げることで飽和強度広がりを抑えられ、吸収線の線幅が小さくなるが、変調移行分光法ではそのような振る舞いは示していない。これは、変調移行分光法において自然幅程度の位相変調が最適とされているものの、今回用いた共振型 EOM の共振周波数が 15MHz のものを用いたためである。

6. 今後の展望

上記の結果の通り、現時点では吸収線幅が大きいですが、今後は自然幅程度の周波数で駆動可能な EOM を用意して吸収線幅の狭窄化を行いたい。さらに、光学系の再調整やサーボ回路の改善などにより安定化した際の光源の線幅を小さくするとともに、Rb cell にヒーターを設置し蒸気圧をあげることによって吸収線を大きくすることを考えている。周波数安定化が達成された折には既存の cooling 光と混ぜ合わせたときの光学素子ごとの波長依存性を比較し、Gray Molasses 冷却が行えるか検証する。

7. 参考文献

- [1] 鳥井 寿夫 東京大学 博士論文(2008)
- [2] E. L. Raab et al. Phys. Rev. Lett., A **93**, 023421 (2016)
- [3] G. Salomon et al. EPL **104**, 63002 (2013)