

Rb 原子のレーザー冷却用光源の開発

電子物性工学科

中川研究室

田村 誠道

1. はじめに

我々の研究室では、ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) の実現を目標としている。しかし、BEC を実現させるためには多数の原子を高密度 (10^{12}atom/cm^3) かつ極低温 ($100\ \mu\text{K}$) にしなければならない。これを可能にするのがレーザー冷却である。我々の場合、2段階の磁気光学トラップ (MOT) を行い、さらに偏光冷却、磁気トラップ、蒸発冷却という手順を経て BEC に達する予定である。本研究は、この手順の内 MOT と偏光冷却で用いる光源の開発が目的である。

2. 磁気光学トラップ (MOT)

BEC 生成手順として、最初に MOT を行い原子を冷却・捕獲する。MOT とは図 1 のように 6 本のレーザー光を x, y, z の各方向から入射し、レーザーの交差点で極小になるような磁場で構成され、ドップラー冷却と光と磁場による捕獲の効果により原子がトラップする。互いに逆行するレーザーはそれぞれ直交する円偏光になっている。このときの原子の冷却温度は $\sim 200\ \mu\text{K}$ に達し、用いる光源の負の離調は $\sim 10\text{MHz}$ (自然幅) で行う。

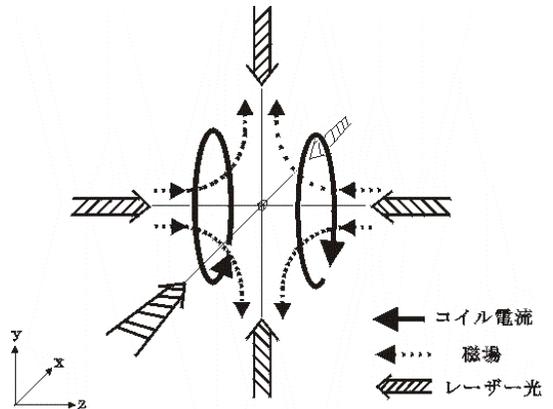


図 1. MOT

3. 偏光冷却

偏光冷却は MOT の装置から磁場を切り、離調を変化させて行う。冷却温度は、レーザーの離調を大きく、強度を小さくするほど低くなる。実験では、離調を $\sim 100\text{MHz}$ で数 $10\ \mu\text{K}$ まで冷却する。しかし、偏光冷却では磁場を使わないため原子を捕獲できず広がってってしまう。これを防ぐために短時間 (数 ms) で行わなければならない。したがって、レーザーの離調も数 ms の間に変化させる必要がある。

以上より必要とする光源の条件は、周波数揺らぎが 100kHz 以下であること。これは、MOT でトラップできる原子の個数に関係してくる。また、MOT から偏光冷却に移行するとき周波数を数 ms 間に 100kHz ほどシフトできなければならない。

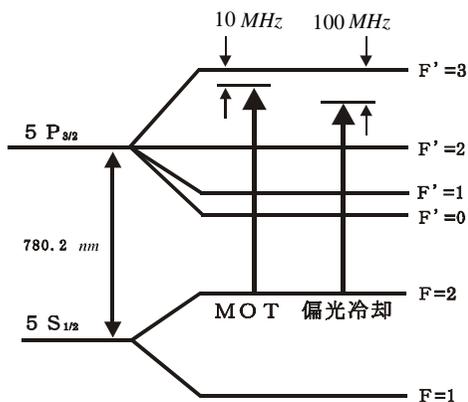


図2 Rb^{87} のエネルギー準位

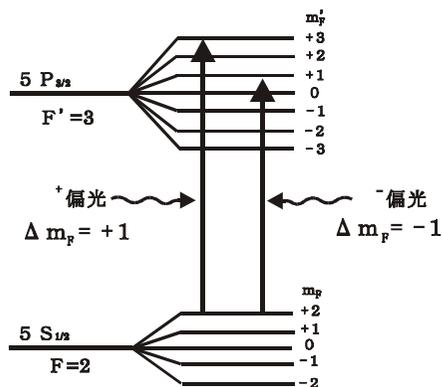


図3 Rb^{87} のゼーマン分裂

4. 誤差信号

誤差信号はドップラー吸収信号をゼーマン効果により直交する円偏光の成分を分離させ、その差をとることで発生させる。この誤差信号で安定化を行ったときの利点は、ドップラー吸収を用いることで捕捉範囲が広くなり、周波数のロックが外れにくい。さらに、光学的または電氣的にオフセットを加えることで周波数をシフトさせることができる。

ゼーマン効果による遷移選択律

ゼーマン効果とは、原子のエネルギー準位の超微細構造が磁場をかけるとで分裂することである。このときの下準位から上準位への遷移は、 $+$ 偏光を入れた場合は $m_F = +1$ 、 $-$ 偏光の場合は $m_F = -1$ の遷移しか起こらない。この選択律は全ての F および m_F について成り立つので、ドップラー吸収の中心周波数は図4のように $+$ 偏光では高い方にシフトし、 $-$ では低い方にシフトする。この差をとることで誤差信号が得られる。

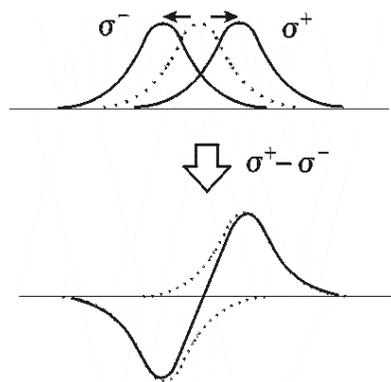


図4. 誤差信号

5. 実験方法

実験は図5のようなものを用いる。半導体レーザーから出た光の一部を偏光子によって直線偏光にする。この直線偏光は直交する2つの円偏光が同じ割合で重なっているものと考えられる。この光は磁場中のRbセルを通り、 $\lambda/4$ 板で直交する成分を分離し、偏光ビームスプリッター（PBS）で別々の方向に発射する。検出された信号は差をとって誤差信号をつくり、制御回路を介して、レーザーの回折格子を調節するPZTにフィードバックして周波数が安定化される。

また、 $\lambda/4$ 板を回転させることでPBSでの光を分ける比率を変化させることができ、誤差信号を上下にシフトさせ安定化した周波数を変えることができる（光学的オフセット）。MOTはこの方法で周波数を合わせ、偏光冷却に移行するときに制御回路にパルスを加えること（電氣的オフセット）で離調を変化させる。

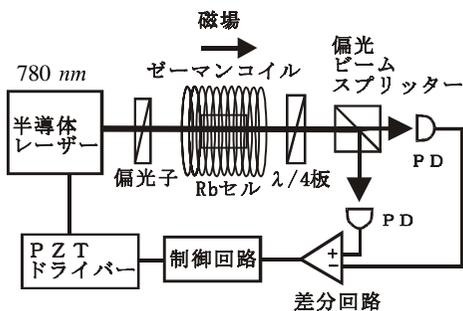


図5. 実験装置概略図

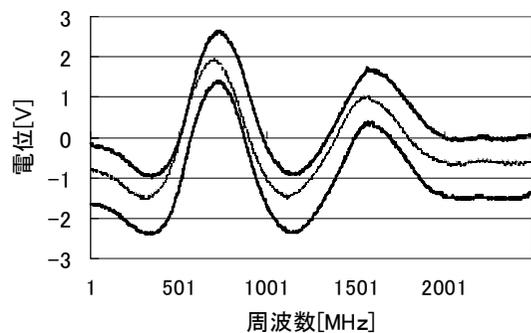


図6 光学的オフセット

6. 結果

誤差信号を発生させ、次に $\lambda/4$ 板を 0.5° 回転させて光学的にオフセットを変化させた。符号はレーザーの進行方向に対して左回りが+、右回りが-とする。図6に示すように $+0.5^\circ$ 回転させると誤差信号全体が上にずれて周波数が50MHz、 -0.5° 回転させると下にずれて120MHzだけシフトしている。+と-で値が違うのは全体の周波数が高い方にドリフトしているからだと思われる。

この誤差信号を用いて実際に周波数を安定化した。図 8 は誤差信号の揺らぎを測定したものである。ロック前後で 10MHz 以上揺らぎが 2MHz になった。しかし、この中には 100Hz で振動する成分が含まれるためラインノイズが何らかの形で影響していると思われる。

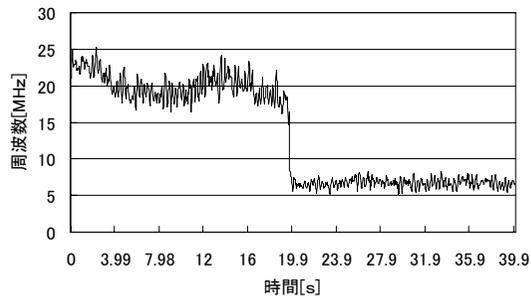


図 7 周波数安定化

安定化した光源で MOT を行った。周波数は光学的オフセットを調節した。トラップした原子の個数はおおよそ 10^8 個ほどであると思われる。

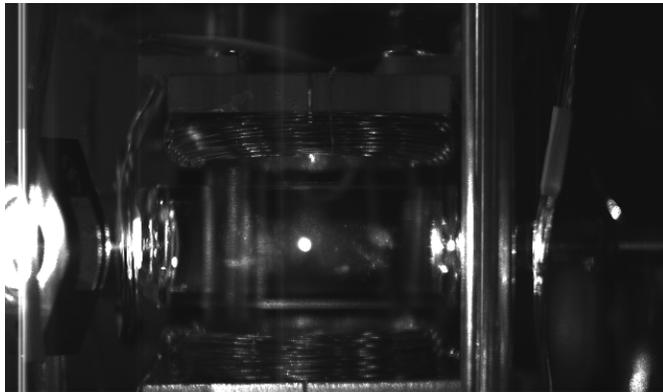


図 8 MOT でトラップされた原子

7. まとめと課題

本研究ではドップラー吸収を用いて誤差信号を発生させ周波数を安定化し、ロックが外れにくく、また、短時間で周波数をシフトできる光源を開発した。今後の課題として、検出器を GND で遮蔽してラインノイズによる揺らぎを消す。周波数のドリフトを小さくする。また、実際に電氣的オフセットを加えて MOT から偏光冷却に移行させる。