

原子干渉計のための磁気光学トラップの開発

中川研究室 1513150 羽石 暁

1 背景と目的

原子干渉計とは、重力加速度を 10^{-9} の精度で求めることができる装置である。原子干渉計は、高精度な測定に加えて、可搬型にすることや長時間運用が可能であるといった利点がある。原子干渉計を作成することで万有引力定数や石油・地下水といった天然資源の探索といった応用ができる。

この原子干渉計は、以前に中川研究室で先行実験が行われていたが、今年度から改めて立ち上げることとなった。今後原子干渉計を作成して測定を行うにあたり、小型で可搬型の装置を作成していく。原子干渉計では、測定を行うにあたり数百 nK の冷却原子で測定を行わないと重力加速度を求めることができない。そのため、レーザー冷却を行う必要がある。本研究では、可搬型装置を作成するに先立ち磁気光学トラップの原理実験を行った。

2 原理

2.1 レーザー冷却

レーザー冷却とは、レーザー光を用いることで気体原子の温度を絶対零度の近くまで冷却をすることである。このレーザー冷却には、ドップラー冷却と偏光勾配冷却の2種類が存在する。以降この2つの冷却方法について述べていく。また、簡便化のために二準位原子での場合を考えるものとする。

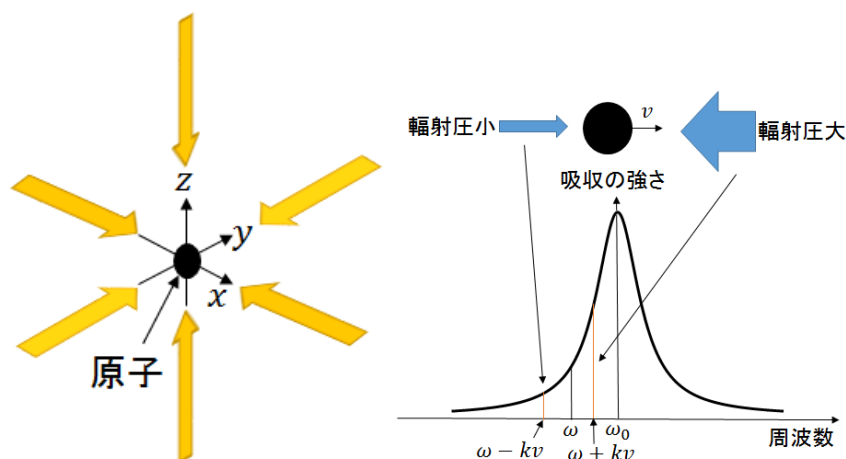


図 1.レーザー冷却の原理

図 1 の様にレーザー光 (周波数 ω 、波数 k) を x, y, z 軸の両側から照射する。尚、ここでは簡便化のため x 軸方向のみを考えて、原子の速さは v とする。また、レーザー光の周波数 ω は共鳴周波数 ω_0 との離調 δ を $\delta < 0$ (赤方離調のとき) として考える。レーザー光を両側から照射すると、ドップラー効果により原子の感じる周波数が変化する。原子の感じる周波数は、同じ方向に伝搬するレーザー光の場合は $\omega - kv$ 、逆方向に伝播するレーザー光の場合は $\omega + kv$ となる。つまり、同じ方向のレーザー光は共鳴周波数から遠ざかり、逆方向のレーザー光は共鳴周波数に近づく。さらに、図 1 のグラフは周波数に対する吸収の強さを示している。これにより、逆方向のレーザー光のほうが吸収されやすくなる。そして、輻射圧 (原子が光を吸収することで生じる力のこと) を強く受けて原子が減速、つまり冷却される。

2.2 磁気光学トラップ

ドップラー冷却のみの場合、原子の冷却はできる。しかし、原子の位置を限定して捕縛することができない。そのため、光軸上に原子を捕縛してレーザー光の照射を行わないと、ドップラー冷却を行う上

の都合が悪い。そこでアンチヘルムホルツコイル(各コイルに対して逆向きの電流が流れるコイルペア)を用いて四重極磁場を作る。この磁場によりゼーマン効果が生じ、 x, y, z 方向から円偏光のレーザー光を対向させるよう照射することで原子が捕縛される。この様な装置を磁気光学トラップという。四重極磁場を用いることでゼーマン効果が生じる。ゼーマン効果とは、原子を磁場の中に置いた場合、原子の縮退が解けて複数の磁気副準位に分裂を起こす現象である。このゼーマン効果によって原子は、磁場に比例したエネルギーシフトを起こす。したがって、原点から離れるにしたがって原子の共鳴周波数がシフトする。ここでは、議論を簡単にするため基底準位と励起準位を $F = 0, F = 1$ として、磁場を加えると図3の様に $z \neq 0$ では、 $F = 0$ の準位がそのままなのに対し $F = 1$ の準位は $m_F = 0, 1, -1$ の合計3つの磁気副準位の縮退が解ける。

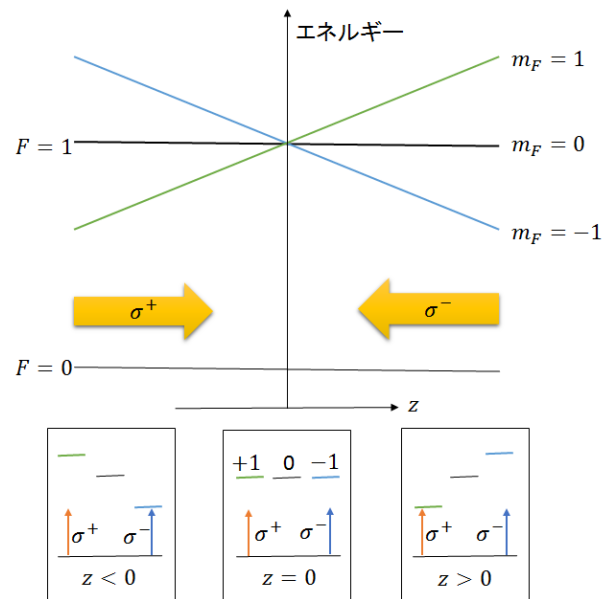


図 2.磁気光学トラップの原理

この条件で σ^+ と σ^- の円偏光レーザーを対向させるように照射する。尚、この円偏光の向きは、磁場に対して σ^+ 光又は σ^- 光かを定義していて、レーザーの進行方向ではないため注意が必要である。ここで、偏光による遷移選択性は、 σ^+ 光は $\Delta m_F = 1$ 、 σ^- 光は $\Delta m_F = -1$ である。図 2 から $z < 0$ の領域では σ^- 光が、 $z > 0$ の領域では σ^+ 光が共鳴に近づいて原子に強く吸収される。吸収が起これば、原点方向へ輻射圧が生じる。

3 実験装置

本研究では、MOT を作成してレーザー冷却の原理実験を行った。レーザー冷却をするためには、トラップに用いるコイルと対向させたレーザー光が必要である。そのため、光学系や磁場の作成を行った。装置は、同期の石川悠君と共同で使用しており、各自で必要な装置を分担した。本章では、その過程について記す。

トラップを作成するため、コイルを設置する台を作成し、セルの間にコイルペアを設置した。使用したコイルは、実験室で以前使用していたものを用いた。巻き数は、100回巻きとした。尚、コイルの銅線の太さは1mmであった。次に磁場勾配は、7.40 G/(cm·A)となった、

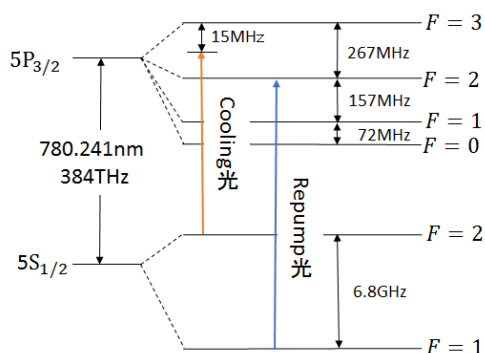


図 3. ^{87}Rb 原子のエネルギー準位図

レーザー冷却を行うには、Cooling 光と Repump 光の 2 つのレーザー光が必要となる。Cooling 光は、冷却を行うためのレーザー光である。Repump 光は、Cooling 光の遷移が完全に閉じていないためそれを補う役割がある。そして、自分はこの Repump 光レーザーの周波数安定化を行った。

周波数安定化のための光学系は、飽和吸収分光法によって吸収線を観測した。プローブ光とポンプ光をフォトディテクタで観測して、この 2 つの信号の差動信号と変調周波数をミキサーで積算してローパスフィルタにかける。これにより、吸収線の微分波形が得られる。この微分波形は、共鳴周波数からの周波数のずれ具合を表す信号として用いることができ、この信号を誤差信号という。この誤差信号を制御回路に入力してレーザーの電流源へフィードバックすることでレーザーの周波数を共鳴周波数に安定化させることができる。実際には、誤差信号が得られたら信号の零点が共鳴周波数になるようにオフセット調整を行う。そして、電流利得を調整してフィードバックをかけて、レーザー光の周波数を共鳴周波数にした。

4 実験結果と結論

4.1 Repump 光の誤差信号と周波数安定化の評価

Repump 光の誤差信号を測定し、その波形は図 4 である。図 5 は、周波数安定化を行って得られた周波数ゆらぎである。

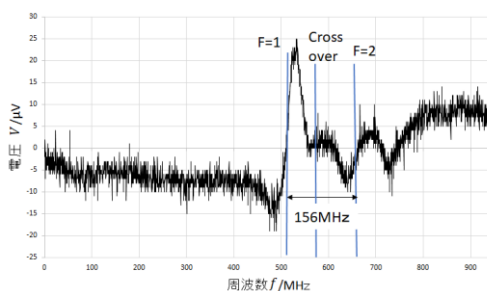


図 4. Repump 光の誤差信号

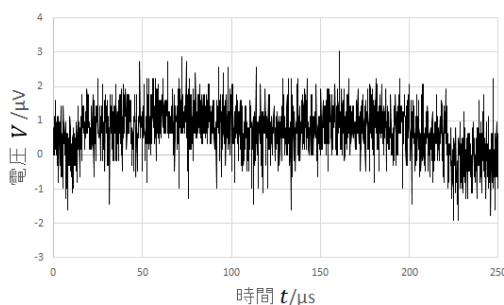


図 5. 周波数ゆらぎ

2つの図から周波数ゆらぎの値を求める。まず、誤差信号の最大値から最小値までの周波数差 Δf_1 と電圧差 ΔV_1 を求めて、 $\alpha = \frac{\Delta V_1}{\Delta f_1}$ を求める。この α は零点での傾きを表している。そして、図5の電圧値の標準偏

差 ΔV_2 を求めて $\frac{\Delta V_2}{\alpha}$ で周波数ゆらぎを簡易的に求められる。 $\Delta f_1/\text{MHz} = 46, \Delta V_1/\mu\text{V} = 44, \Delta V_2/\mu\text{V} = 0.67$ より $\alpha = 9.6 \times 10^{-13}$ となり、周波数ゆらぎは **699.8kHz** となった。ゆらぎの値はトラップするには十分であるが先行研究の **500kHz** の値と比べると大きい。原因としては、電気信号によるノイズやレーザーのパワーが大きすぎて線幅が広がってしまうことが考えられる。

4.2 冷却原子の撮影

周波数安定化を行う以前に一時的にドップラー冷却ができるか確認を行った。すると、図6のようにトラップの中心に冷却原子を観測することができた。

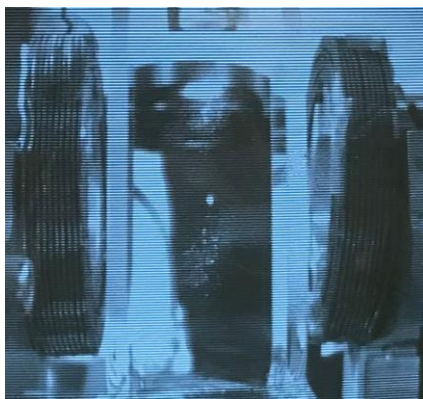


図 6.トラップされた冷却原子

図6の写真だけでは、トラップできた原子の個数や冷却温度の測定を行うことはできない。原子の個数や冷却温度の測定には、吸収撮像法などを行うことができるが、その測定を行うことはできなかった。

5 結論と今後の展望

Repump 光の周波数安定化は行うことができた。しかし、原子干渉計に使用するにはゆらぎが大きすぎるため、今後は周波数ゆらぎがなるべく小さくなるように回路設計やレンズを挿入するなどパワーを下げるように実験を行うようにする。

冷却実験は、周波数安定化を行う以前に Rb の冷却に成功した。しかし、冷却温度の測定を行うことができなかった。そのため、今後新しい実験系を組む際は、ルビジウムの冷却実験を行った際は、その様子をカメラで撮影する。そこから、冷却温度を測定する吸収撮像法を行うことで実際に冷却温度の測定を行う。

最終的には、このノウハウを活かして可搬型の原子干渉計を新しく作成して重力加速度の測定を行う予定である。