

磁気トラップによる冷却⁸⁷Rbの輸送

量子・物質工学科 中川賢一研究室 渡邊智貴

[背景と目的]

我々はアトムチップ(*atom-chip*)と呼ばれる基板上での⁴⁰Kフェルミ縮退原子の生成、及びそれを用いた原子干渉計の構成を目指している。我々の研究室では、既にボース粒子である⁸⁷Rb原子のBECやサーマル原子による原子干渉計の構成に成功している。しかし、ボース粒子ではS波散乱が存在し、原子間の衝突を無くすことができないために、干渉計構成の際に原子間の衝突により位相シフトが生じてコントラストの低下に繋がると考えられる。一方、フェルミ粒子では同一スピン状態でのS波散乱が存在しないため、極低温状態では原子間の衝突をほとんど無くすることができる。

上記の性質のために、フェルミ縮退の生成にはボース粒子か異なるスピンのフェルミ粒子を用いての共同冷却が必要となる。我々は共同冷却の担い手としてボース粒子である⁸⁷Rb原子を用いている。

実験装置は、私が本研究に取り掛かった時点で予備冷却である磁気光学トラップ(MOT)による⁴⁰K及び⁸⁷Rb原子の冷却及び捕獲が達成されていた。現時点では実験装置の構築を最優先に考え、⁸⁷Rb原子のBECを目標としている。

本実験では磁気トラップによる⁸⁷Rb原子の捕獲とアトムチップ近傍への輸送を目的として、原子の磁気トラップを目標とする。

[磁気トラップの原理]

磁気トラップとは、磁気モーメントを持つ原子と磁場との相互作用により原子をトラップする手法である。

磁場との相互作用で、原子はゼーマン分裂を起こして磁気サブレベルに分かれる。(図1)

このエネルギーシフトの式は、

$$U = g_F \mu_B m_F B$$

で与えられる。ここで m_F は原子の磁気サブレベル、 g_F はg因子、 μ_B はボーア磁子を表している。 $g_F m_F > 0$ のとき、原子は磁場の大きさに比例してゼーマン分裂してポテンシャルが増加するので、内部エネルギーを減らすために磁場の小さな場所へと動いてゆく。したがって、この状態の原子は三次元的に磁場の極小点を作ることによって捕獲することができる。

我々の実験では、レーザーで原子の内部状態を $|F=2, m_F=+2\rangle$ に揃えて磁気トラップする。

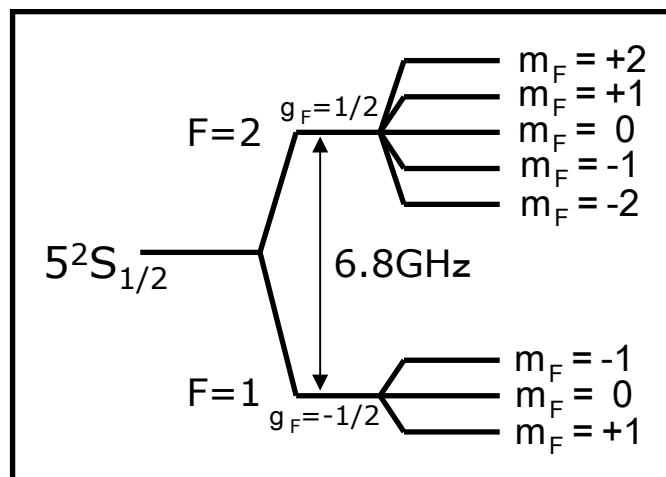


図1: ⁸⁷Rbのゼーマン分裂

[光学系]

実験には、それぞれ波長の異なる4本のレーザーが必要になる。
クーリング光は原子を冷却するための光で、 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ の遷移から負に離調している。リパンプ光は冷却サイクルを外れ $|F=1\rangle$ に落ちた原子をサイクルに戻すための光で、 $|F=1\rangle \rightarrow |F'=2\rangle$ に共鳴している。オプティカルパンプ光は磁気トラップ時に原子の内部状態を $|F=2, m_F=+2\rangle$ に揃えるための光である。プローブ光は原子を観測するために用いる光で、 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ に共鳴している。(図2)

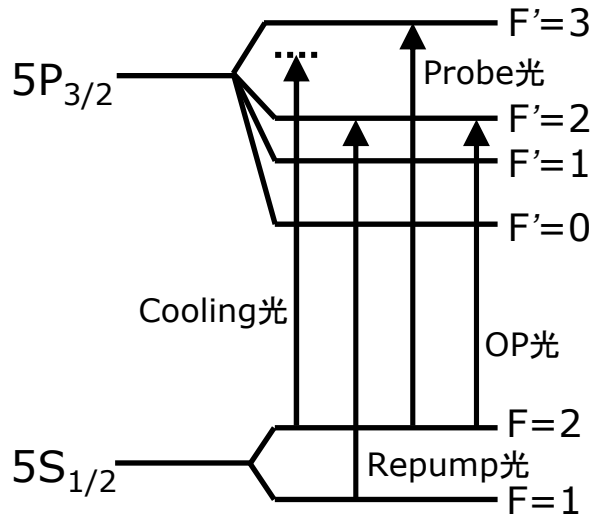


図2: ^{87}Rb のエネルギー準位

[実験装置]

磁気トラップには原子の捕獲を行うためのコイル、コイルに流す電流を制御する電子回路、電子回路を操作するためのコンピュータプログラムが必要となる。

コイルは2対のアンチヘルムホルツコイルと1対のヘルムホルツコイルがガラスセルを挟むように配置されている。(図3) MOTコイルは磁気光学トラップと磁気トラップを行うためのコイルで、電流1Aあたり重力方向に3.3G/cm、軸方向に6.6G/cmの磁場勾配を発生させる。輸送コイルは磁気トラップによる原子の輸送を行うためのコイルで、電流1Aあたり重力方向に2.9G/cm、軸方向に5.7G/cmの磁場勾配を発生させる。MOTコイルと輸送コイルの中心は3cmずれていて、磁気光学トラップでの原子の位置からアトムチップまでの距離5cmのうち、3cmの輸送ができるように設計されている。OPコイルは、オプティカルパンプ時に磁場の量子化軸を決定するために用いるヘルムホルツコイルで、電流2Aで1Gの均一磁場を発生させる。OPコイルはMOTコイルと輸送コイルの間にある。

コイルに流す電流値の操作はLabVIEW制御で行っている。(図4) コイルに流す電流のON/OFFはデジタルボードからの5Vデジタル信号でMOSFET、IGBTをスイッチングさせることにより行う。電流値の制御はアナログボードからの0~10Vアナログ信号で、電源を外部電圧操作することにより行う。

また、ボードへの電流の回り込みを防ぐために、ボードとFET及び電源との間にフォトカプラを用いたアイソレータを接続し、電氣的に絶縁してある。

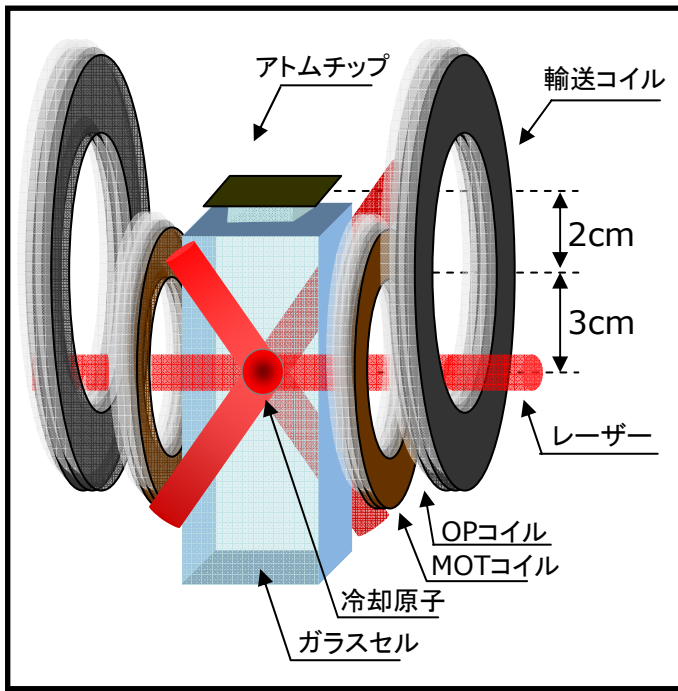


図3: 実験装置 (コイルの配置)

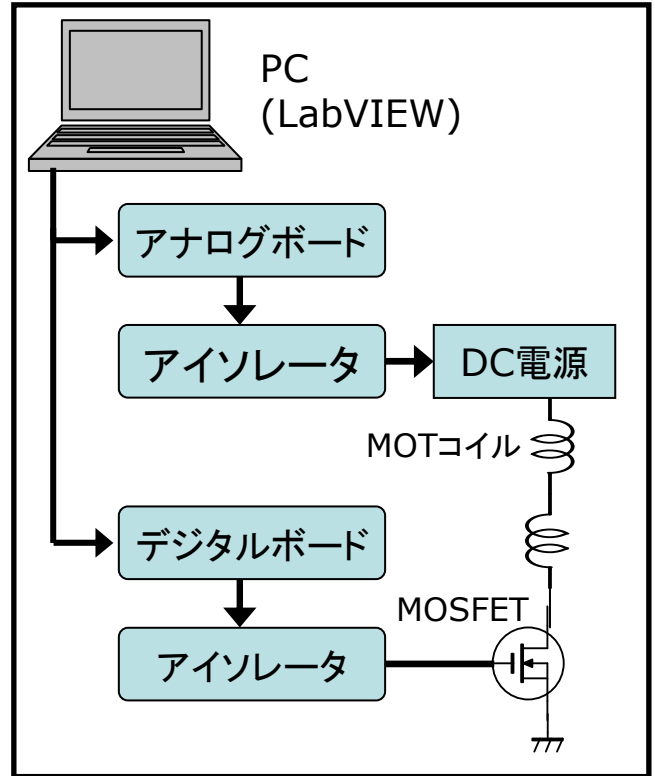


図4: 実験装置 (制御系)

[コイル電流制御回路の作製]

コイルに流す電流を制御するための電子回路を作製した。(図5)

電流の立下り時間を短くするために、コイルと並列に抵抗を加えた。立下り時定数 τ は $\tau = L / (R_{coil} + R)$ で表される。 $R = 2.2\Omega$ とすれば $\tau = 312\mu s$ となり、 $1ms$ 以下となるので妥当とした。

MT時の電流の立ち上がり時間を短くするために、コイルFETの間に 0.79Ω の抵抗を加えた。 $(\tau = 609\mu s)$ また、定電圧 $13.5V$ の時、MT、CMOT、MOTでの電流値がそれぞれ $8A$ 、 $4A$ 、 $2A$ となるように他の抵抗値を決めた。

輸送コイルに関しては素早い電流のON/OFFは要求されないなので、立ち上り、立ち下りの配慮は必要無い。

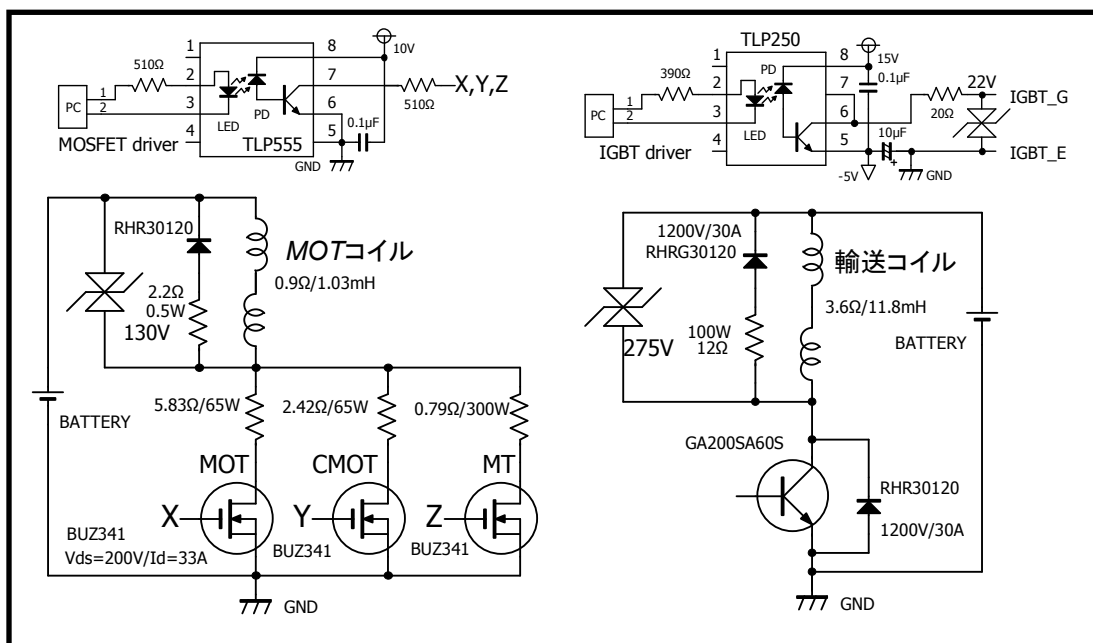


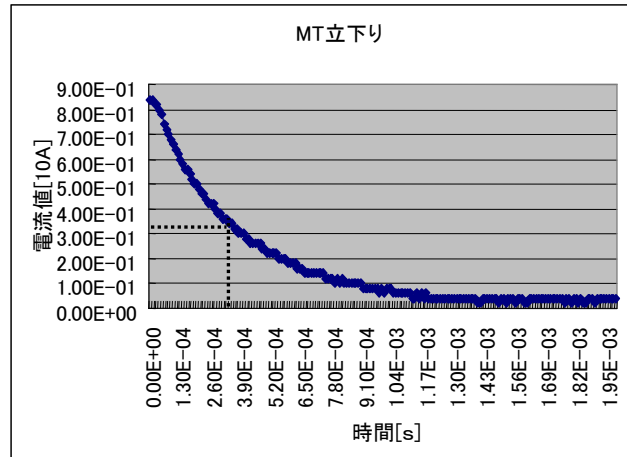
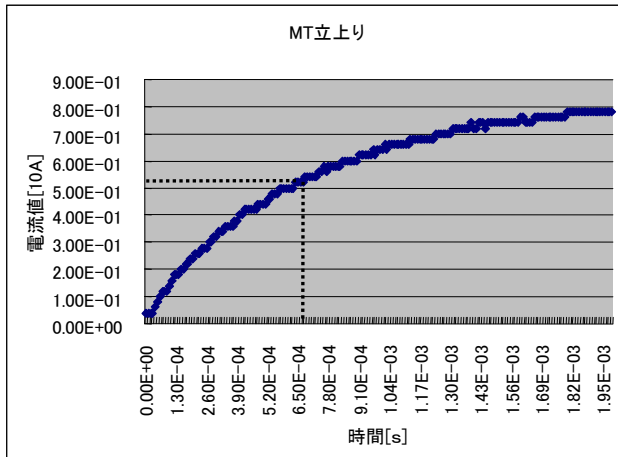
図5: MOTコイル、輸送コイル電流制御回路

[作製した回路の評価]

MOTコイルの制御回路について、立上り、立下り時定数が設計通りの時間になっているかをデジタルオシロスコープを使って確かめた。

立上り時定数については、グラフより電流が最大値の63% ($1-1/e$) となるのは $670\ \mu\text{s}$ の時で、計算値に近い値が得られた。

立上り時定数についても同様に調べた。 $350\ \mu\text{s}$ が得られ、計算値に十分近い値であった。



[まとめ]

- ・磁気トラップは達成できなかった。
- ・コイルの電流を制御する回路を作製し、正常に動作することを確認した。