

# 磁気トラップによる原子操作

量子・物質工学科(9913057) 鈴木裕介

## <背景・目的>

現在、我々の研究室ではワイヤーに電流を流したときに出来る磁場中で  $^{87}\text{Rb}$  のボーズ・アインシュタイン凝縮体(BEC)の生成・操作を目指しています。初めから原子をワイヤーの作る磁場中にトラップできれば良いのですが、ワイヤーなどが邪魔になり非常に困難になります。そのためワイヤーから 2cm 下でレーザー冷却した原子を磁気トラップにより持ち上げワイヤートラップに移行する方法をとります。

今回はレーザーの安定化装置、光学系の設計、磁気トラップによる高効率移行を目指して実験を行いました。

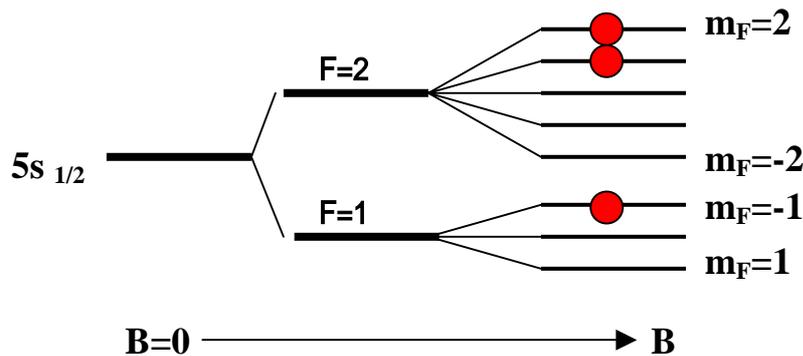
## <磁気トラップ>

磁気トラップは磁気双極子モーメントをもつ原子と磁場との相互作用を利用してトラップします。磁場との相互作用は下の式のようにになります。

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = g_F \mu_B m_F |B|$$

( $g_F$ :g 因子、 $\mu_B$ :ボーア磁子、 $m_F$ :磁気副準位)

ここで  $g_F$ 、 $m_F$  がともに正の場合、相互作用(ゼーマン分裂)により磁場が大きくなれば原子の内部エネルギーは増加してこのようなスピン状態の原子は磁場の極小点がポテンシャルの極小点になるので、三次元的に磁場の極小点を作れば原子はその場所にトラップされる。



$^{87}\text{Rb}$  のゼーマン分裂

$^{87}\text{Rb}$  の場合、 $5s_{1/2}: |F=2, m_F=2\rangle, |F=2, m_F=1\rangle, |F=1, m_F=-1\rangle$  でトラップ可能だが本実験では  $|F=2, m_F=2\rangle$  の状態でトラップしている。

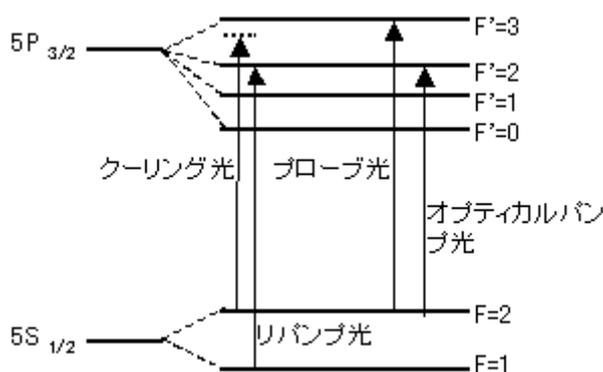
また、三次元的に磁場の極小点を作るためアンチヘルムホルツコイルという向かいあった円形のコイルに逆向きの電流を流すことにより四重極磁場を作り原点に磁場の極小点を作ることが出来ます。

$g_F$ 、 $m_F$  のどちらかが負の場合がありますが、この場合三次元的に磁場の極大値を

作ればいいのですが、三次元的に磁場の極大値を作ることは不可能なのでこのような状態ではトラップできません。

#### < 光学系 >

本実験ではレーザーの周波数が安定でそれぞれ周波数の異なった4本のレーザー光が必要になります。レーザーは吸収線にロックすることにより安定な周波数の光を作ります。4本のレーザーはそれぞれ「クーリング光」「リパンプ光」「プローブ光」「オプティカルパンプ光」でそれぞれの光の周波数は下図のような遷移の周波数に合わせてあります。



$^{87}\text{Rb}$  のエネルギー準位図

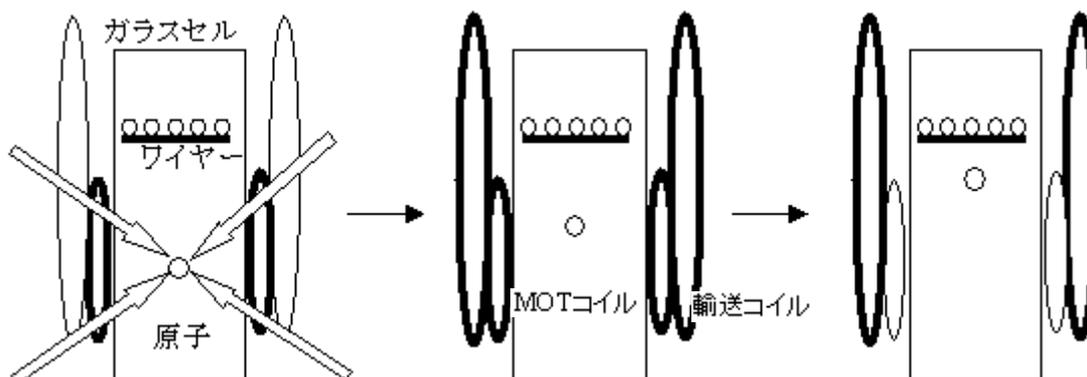
クーリング光は原子の冷却に必要な光で、 $F'=3$  の遷移より-15MHz の離調をつけています。リパンプ光はクーリングのサイクルの中で  $F=1$  に落ちてきた原子を  $F'=2$  へ上げてクーリングのサイクルに戻してあげます。オプティカルパンプ光は磁気トラップの際、原子の状態を  $F'=2, m_F=2$  に揃えるための光です。そしてプローブ光は原子の吸収像をとる時に必要な光です。

#### < 実験手順 >

初めに超高真空のガラスセル内で MOT(磁気光学トラップ)、PGC(偏光勾配冷却)を行い  $2 \times 10^7$  個の原子をトラップして、 $40 \mu\text{K}$  まで温度を下げます。次にリパンプ光、クーリング光を切り、オプティカルパンプ光を入れ原子の状態を  $|F=2, m_F=2\rangle$  に揃えて磁気トラップに移行します。その後、外側の輸送コイルをゆっくり立ち上げるにより、MOT コイルと輸送コイルの合成磁場ができ、磁場の極小点が上に上がります。最後に MOT コイルを切ることにより輸送コイルだけの磁場になり、ワイヤーから約 2mm の場所に磁場の極小点ができ、ワイヤートラップが可能な場所まで原子の輸送が完了します。

原子の観測方法は磁場を切り原子を自由発展させたあとにプローブ光をいれ、その強度分布を CCD カメラによって読み取ります。撮る写真は「原子が存在する時のプローブ光の強度分布」「原子がないときのプローブ光の強度分布」「原子とプローブ光がないときの強度分布」の3つでこれを PC 上で計算することにより原子の個数、

温度を見積もります。

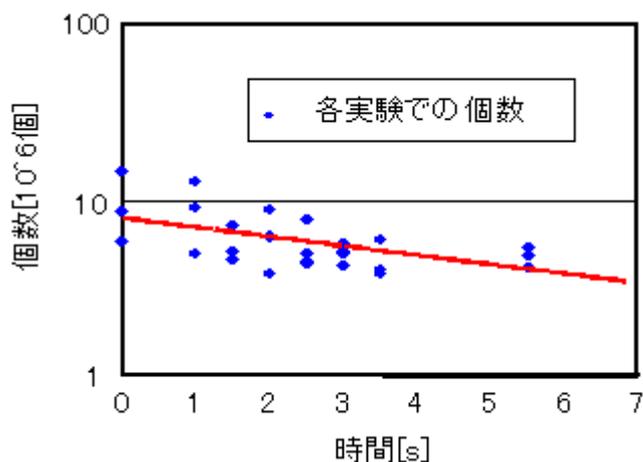


実験装置・手順

### < 実験 >

#### ( 寿命測定 )

原子の寿命を測定するために原子を磁気トラップに移行したあとのトラップ時間を変えて原子の個数を見積もった。原子は指数関数的に減衰するので指数関数でフィットすれば原子の寿命が測定できる。今回の実験では寿命は約7秒となった。原子は真空が悪いとバックグラウンドのガスとの衝突により早く減衰してしまうので、今回のような1つのセル内での寿命は短くなってしまいますが、その後の BEC 生成の時間としては十分だと思われる。磁気トラップ時の原子の個数、温度はそれぞれ  $2 \times 10^7$  個、 $90 \mu\text{K}$  になり、磁気トラップへの移行は 100% となっている。

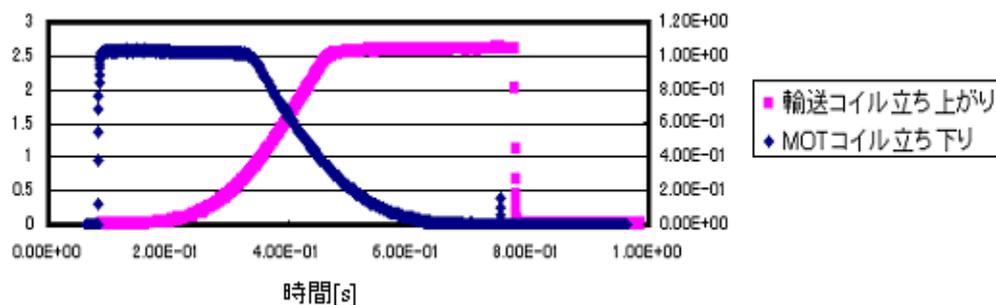
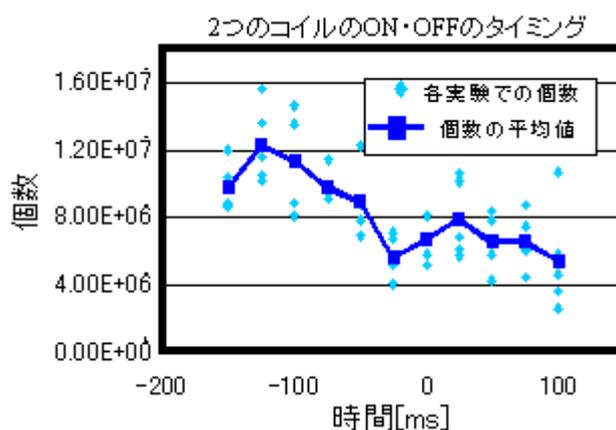
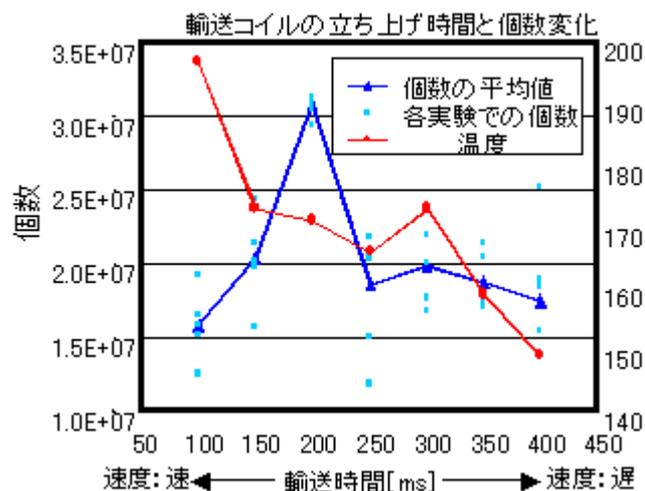


#### ( 輸送の最適化 )

ワイヤートラップ中での BEC 生成のためにも、磁気トラップした原子を上を持ち上げる際は原子数のロスが少ない高効率な移行を行わなければならない。また原子の加熱を抑えるためにも断熱的な輸送も必要である。そのため今回は輸送コイルを立ち上げる速さ、MOT コイルを OFF にする時間を変えて原子の個数を見積もり高効率移行の条件を探していく。

まずは輸送コイルの立ち上げる速さを変えて個数、温度の測定を行った。下図上のグラフで左にいくほど輸送の速度は速くなり、右に行くほど遅くなり。やはり輸送

速度が速くなるほど原子は加熱されてしまい温度が上がってしまう様子がわかる。今回は温度より個数を重視したいので個数の一番多い 200ms を高効率なコイルの立ち上がり時間とする。また右下の図は輸送コイルを ON にした後 MOT コイルを OFF にする タイミングを変えて原子の個数を測定した。時間 0ms の時は輸送コイルが立ち上がった瞬間に MOT コイルが切れ始めることを意味し、マイナスはそれぞれのコイルの立ち上がりと立ち下りをオーバーラップさせることを意味しています。一番多い時間は-125ms で個数は  $1.5 \times 10^7$  個となりオーバーラップさせたときが原子の感じるポテンシャルが輸送の際に常に等しくなると思われます。



#### < 今後の課題 >

今回の実験では磁気トラップにローディングした原子をワイヤー近傍への高効率移行 (~ 100%) ができた。しかし同じ条件での測定でばらつきが大きくなってしまっている。これはレーザーのロックが弱く周波数が揺らいだり、ロック自体が外れてしまい初期個数にばらつきがあるからだと思われるので、今後は安定化装置の見直しをしていきたいです。また実験全体を通した真空・個数の向上を目指したいです。

