

### 3 コイル磁場トラップによる Rb 原子のボーズアインシュタイン凝縮の生

成

電子物性工学専攻 上原 治

#### 1. 序論

1920 年代、インドの物理学者 S.N. Bose が発表した光子の統計に関する論文に触発された A. Einstein が理論的に指摘したのを発端とし、ボーズ凝縮における量子縮退、いわゆる Bose-Einstein Condensate (以下 BEC) がこの二人の物理学者によって予言された。ボーズ粒子系では、無限数の粒子が同一の一粒子状態を占めることができ、低温では最低エネルギー状態を占める粒子が巨視的な大きさになるとされておりこれこそが二人が予言した BEC という現象である。しかし、この現象は当時の冷却技術では実現は不可能であり現実起こることはないと思われていた。

その後量子光学の分野では 1970 年代にはいるとレーザーを用いて原子気体を冷却、捕獲するアイデアが提唱され、1980 年頃に多くのレーザー冷却の実験が行われるようになるのである。そうして磁気光学トラップ、偏光勾配冷却の技術が確立しこれを用いてボーズ凝縮を実現させようと実験が行われるようになるのである。しかし、レーザー冷却だけを用いてのボーズ凝縮の実現を困難であることが分かりレーザー冷却、磁気トラップ、蒸発冷却を用いての実験を 1990 年代に入ってから MIT や JILA のグループによって行われ、1995 年 6 月に JILA のグループが Rb 原子を用いて、そして 9 月には MIT のグループが Na 原子を用いてそれぞれボーズ凝縮の生成に成功した。

そして現在、世界中でボーズ凝縮した原子を用いて色々な実験が行われている。我々の研究室でもボーズ凝縮した原子を用いて原子干渉計の実験を行うことを目的として実験を行っている。そのような中私は Rb 原子のボーズ凝縮を成功させるために実験を行った。本論文ではボーズ凝縮生成のための各実験の結果について報告していく。

#### 2. ボーズ凝縮体生成のための実験手法と各結果

Rb 原子のボーズ凝縮体 (BEC) の生成方法を説明する。我々のグループでは以下の手順でボーズ凝縮を目指している。

1. 磁気光学トラップ (MOT: Magneto-optical Trap) により大量の原子を超高真空内で冷却かつ捕獲する。
2. 偏光勾配冷却 (PGC: Polarization Gradient Cooling) によって原子集団をさらに冷却する。
3. 捕獲した原子を磁気トラップで捕獲し直す。
4. 磁気トラップの磁場勾配をあげて原子集団を断熱圧縮する。

5. rf (radio frequency) 磁場を磁気トラップにあて、運動エネルギーの大きい原子を選択的に磁気トラップから逃がし、残った原子集団の温度を下げる(蒸発冷却)。
6. 磁気トラップを瞬間的に切り、原子集団を拡散させその分布を吸収撮像法で確認する。

## 2.1 1stMOTにおけるトラップ

レーザーはクーリング光、リポンピング光、オプティカルポンピング光を用意する。クーリング光は1stMOTと2ndMOT両方共通で使われるためにTaper Amp.を用いてパワーを増幅されている。またリポンピング光も同様にインジェクションロックングを用いることによってパワーを増幅されている。

1stMOT、2ndMOT 両方とも同じ構成になっていて x,y 方向は独立のビームを対向するように z 方向だけ折り返しとなっている。x,y 方向のクーリング光にリポンピング光を重ねて入れている。クーリング光の直径は約 20mm、パワーは約 5mW/cm<sup>2</sup>、離調は約 15MHz であり、四重極磁場の勾配は約 15G/cm である。約 1 秒で直径約 2mm、約 10<sup>8</sup> 個の原子をトラップする。図 1 は 1stMOT でトラップされた原子の写真である。ここでトラップされた原子を 2ndMOT に移すのである。



図 1 1stMOT でトラップされた原子

## 2.2 2ndMOT によるトラップ

2ndMOT に原子をトラップする為に、我々はプッシュ光と呼ばれる <sup>87</sup>Rb に共鳴した光を入れ、1stMOT でトラップされた原子を 2ndMOT 側に送っている。この時、ただ 1stMOT でトラップされた原子にプッシュ光を照射し 2ndMOT 側に送るだけでは全くトラップすることは出来ない。途中の導管で原子が広がってしまい 2ndMOT 側に達しないのである。そのため我々は導管に六重極磁場を作るように永久磁石を配置し、その磁場で原子がトラップされながら 2ndMOT 側に送られるのである。方法としてはまず 1stMOT において 1s 間原子をためる。そして、MOT の磁場とクーリング光を切った後 1Gauss 程度の磁場を 16ms 発生させトラップされた原子をゼーマン分裂させる。そしてその 1ms 後に + の円偏光になったプッシュ光を

照射することで原子は $|2,2\rangle$ ,または $|2,3\rangle$ の準位に励起しながら 2ndMOT 側にプッシュされる。プッシュしている時はリポンプ光を切ってはならない。また、原子を長い時間プッシュしすぎると原子の移動する速度が速くなりすぎてしまい、2ndMOT でキャッチされるキャプチャーレンジを越えてしまいトラップされない。そして、短すぎると途中の導管に重力によって落ちてしまい 2nd 側にとどかない。そのため我々は原子の速度が 15m/s から 20m/s になるようプッシュ時間を調節している。さらに、2nd 側にトラップされた原子にプッシュ光があたってしまうと、この光がトラップされた原子を吹き飛ばしてしまうので、2ndMOT のセルの中でプッシュ光が焦点を結ぶようレンズで集光し、原子に当たらないようにしている。

2ndMOT は1stMOT とアレンジメントはほぼ同じだがクーリング光の強度だけは慎重に選ぶ必要がある。光強度が強すぎると、光誘起衝突(light-assisted collision)によるロスが増えるし、弱すぎるとトラップのポテンシャルが浅くなり1stMOT から送られてくる原子や、トラップ内での ground-state hyperfine changing collision を起こした原子( $5S_{1/2} : F=1$  と  $5S_{1/2} : F=2$  のエネルギー差 6.8GHz に相当する運動エネルギーを持つ)を捕獲できなくなる。実験では強度は  $2.5\text{mW}/\text{cm}^2$ 、ビーム径は約 15mm としている。さらにキャプチャーレンジを広げるために離調を-25MHz にとした。また 2ndMOT の磁場勾配は約  $15\text{Gauss}/\text{cm}^2$  である。

図 2 は 2ndMOT でトラップされた原子の吸収の像である。この像の断面をとってやると図 3 のようになる。このことから原子は  $5 \times 10^8$  個トラップされ温度は約  $120\ \mu\text{K}$  になっていると思われる。

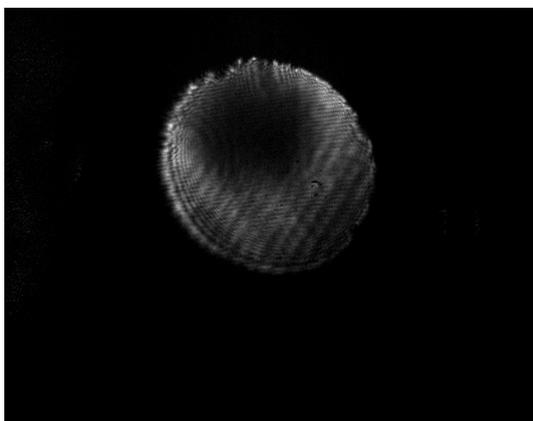


図 2 撮影された原子の像

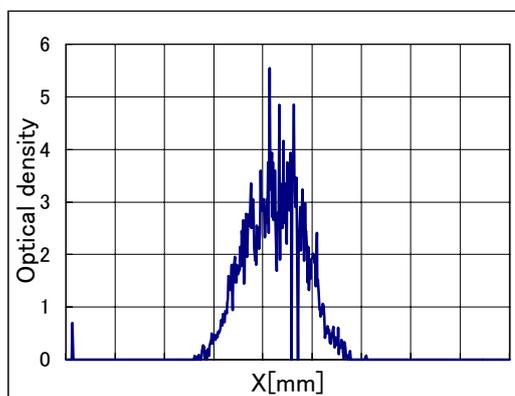
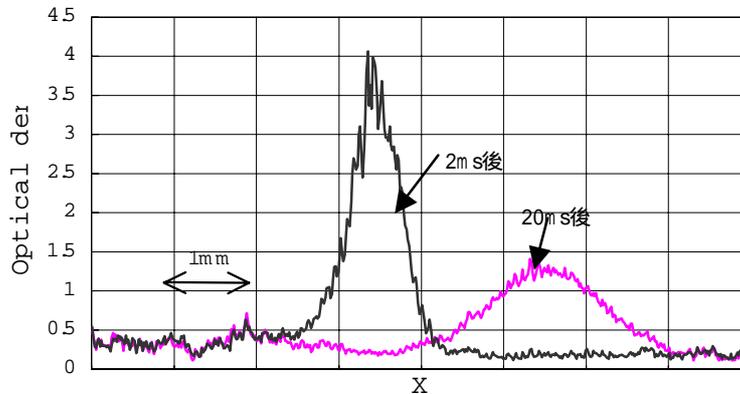


図 3 原子の像の断面図

### 2.3 偏光勾配冷却

2ndMOT でトラップされた原子をさらに冷却するために偏光勾配冷却を用いる。偏光勾配冷却を施すと温度をさらに数  $10\ \mu\text{K}$  まで冷却することができる。我々は偏光勾配冷却を施すために、まず MOT の四重極磁場を切りレーザーの離調を-25MHz から-90MHz まであげ、クーリング光の強度を  $2.5\text{mW}/\text{cm}^2$  から  $1.7\text{mW}/\text{cm}^2$  に下げこの状態で 4ms 待つことを行っている。図 4 は TOF 法を用いて原子集団の広がりを測定した断面図である。この事から原子

の速度は約 3.3cm/s であり温度に換算すると約 12 μK である。



原子の速度  $v = \text{約 } 3.3\text{cm/s}$       温度  $T = \text{約 } 12\ \mu\text{K}$

図 4 TOF による偏光勾配後の温度測定

## 2.4 磁気トラップ

磁気トラップとは、原子の持っているスピンの付随する磁気双極子モーメント  $\mu$  と、外部磁場  $\mathbf{B}$  との相互作用(ゼーマンシフト)を利用して原子を空間的に閉じこめるものである。

ゼーマン効果によって原子が光から受けるエネルギーというのは

$$U = - \boldsymbol{\mu} \mathbf{B}$$

と表される。そのためエネルギーは

$$U = - \mu_B m_F g_F \mathbf{B}$$

と表される。したがって原子が光から受ける力というのは

$$\mathbf{F} = - \mu_B m_F g_F \mathbf{B}$$

となる。ここで  $F < 0$  になるとき原子は磁場によってトラップされる。 $^{87}\text{Rb}$  の場合図 3.23 のようにゼーマン分裂するためトラップされる準位は  $|F=1, m_F=-1\rangle$  ,  $|F=2, m_F=2\rangle$  ,  $|F=2, m_F=1\rangle$  である。本実験では  $|F=2, m_F=2\rangle$  を採用した。

磁気トラップのための極小磁場を形成するに当たり我々は quic トラップ (quadropole ioffe configuration trap) というのをを用いた。この方法は 3 つのコイルを用いることで低電流 (30A) かつ低消費電力で必要な磁場勾配が作れるので安定な磁場を作ることができるという特徴がある。図 5 は磁気トラップ用コイルの配置図である。四重極コイルには直径 1.8mm のコイルを 160 回巻き、イオフコイルには直径 1.5mm のコイルを 150 回巻いている。

偏光勾配冷却が終わった後効率よく磁場トラップに移行するためにオプティカルパンピングを行う。これは  $F=2 \rightarrow F'=2$  に共鳴した光とリポンプ光を 0.3ms あて、原子集団を  $F=2$  へ光ポンピングする。その後、四重極コイルのみに電流 5A を流し徐々に磁場勾配をあげていく。磁場トラップへの移行効率を上げるために四重極子コイルのみに流す最初の電流の値も適切な物に設定する必要がある。図 6 は MOT から磁場トラップへの移行効率を測

定した結果である。MOT でトラップした原子を磁場トラップで 2 秒間トラップしその後また MOT でトラップしたときの原子から放出される蛍光の大きさを判断することで測定を行った。この事から移行効率は約 75%あることが分かる。四重極子磁気トラップへ移行し 1 秒間かけて 30A 流した後さらにイオフコイルに 1 秒間かけて 30A 流すことで原子をトラップしている。四重極磁気トラップからイオフコイルへはほぼ 100%移行している。

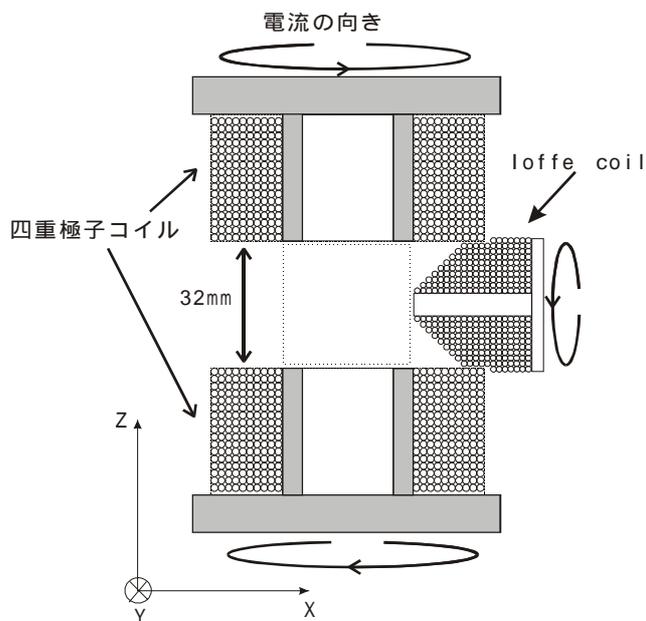


図 5 3 コイル磁気トラップ配置図

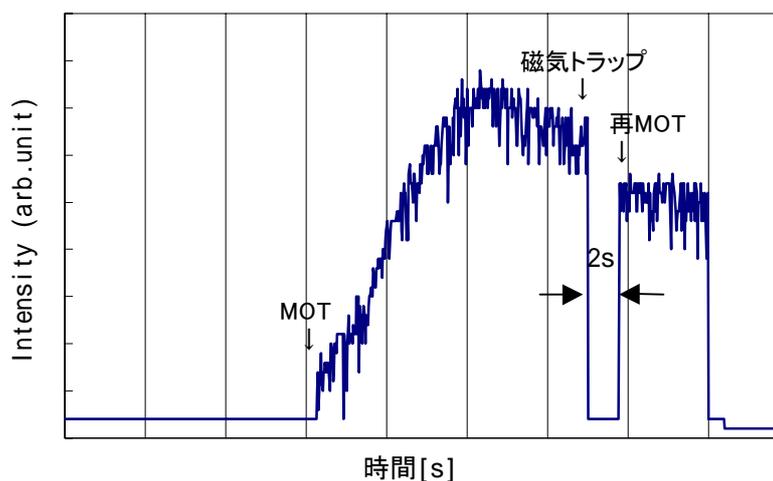


図 6 MOT から磁気トラップへの移行効率

図 7 は磁気トラップの寿命を表している。磁気トラップの寿命はこの後行われる蒸発冷却を行う際に約 30 秒ほどの時間を要するためこれ以上の寿命がなくてはならない。今回我々は磁気トラップを行う時間を伸ばしながら吸収によって撮影し、その時ある原子の数を測

定することで寿命の測定を行った。その結果我々の装置は磁気トラップの寿命は約 30 秒あることが分かる。

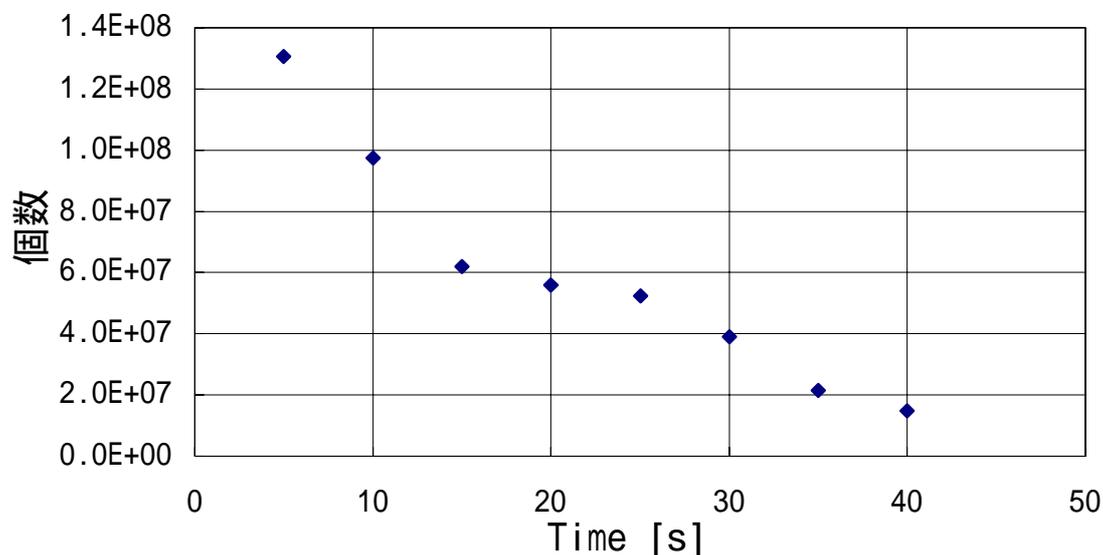


図 7 磁気トラップの寿命の評価

### 3. まとめ

ここまでの結果をまとめる。今回私はボーズアインシュタイン凝縮の生成を目的に実験を行った。半導体レーザー、ダブル MOT システム、磁気トラップ、の装置を構築し Rb 原子気体の冷却及びトラップを行った。その結果、2ndMOT で  $5 \times 10^8$  個の原子をトラップし、磁場トラップへの移行効率を 75%まであげること成功した。そして原子を逃がすことなく 3 コイル磁気トラップまで移行し約 30 秒の寿命を得ることができた。3 コイル磁気トラップ中には  $3 \times 10^8$  個の原子があると思われる。この時点での位相空間密度は  $1.7 \times 10^{-5}$  である。一般的に蒸発冷却では位相空間密度を 6 桁上げることができるといわれているため今後蒸発冷却を効率よく行うことでボーズアインシュタイン凝縮は達成されるだろう。

### 4. 考察

BEC を達成するために様々な条件を出してきたが、中で最も難しいのは多くの原子をトラップすることにある。我々は原子をトラップするためにダブル MOT という方法を用いたがこれにはさらに改良を加える必要がある。我々のシステムでは差動排気が 2 桁しか取れずトラップされた原子の寿命を長く保ち多くの原子をトラップするのが非常に困難である。そのため、これを 3 桁取れるように改良しトラップされた原子の寿命をあげればさらにボーズアインシュタイン凝縮を達成するのに有利な条件を得ることができるだろう。またこのことで磁気トラップの寿命をあげることもできるので、蒸発冷却も簡便に行うことができるようになると思う。