

# ナトリウム原子トラップの研究

電子物性工学専攻 清水研究室  
荒井裕

## ・研究の目的

我々は、ナトリウムの BEC の生成をめざして研究を行っている。世界各国でこれまで約 30 のグループが様々なアルカリ原子の BEC の生成に成功しており、ナトリウム原子でも既の実現されている。BEC の応用実験としては、原子波レーザーや原子リソグラフィの研究、BEC そのものの物性の研究など様々あるが、ナトリウム原子は原子波を使った干渉計の実験に向いているといわれている。それは、ナトリウム原子の質量が他の原子に比べると比較的小さく、そのためド・ブロイ波長が長くなるからである。原子を物質波と考えた時ド・ブロイ波長は

$$\lambda_D \equiv \frac{h}{2\pi mk_B T}$$

( $h$  はプランク定数、 $k_B$  はボルツマン因子、 $T$  は温度) で表される。原子波の波長は大体  $10^{-40}m$  のオーダーでありとても短いため、実際に検出することを考えると、波長が長いものに比べて短い方がより、実験が困難になる。そのため、我々は将来干渉計の実験を行うことを想定してナトリウム原子トラップの装置を設計した。

## ・BEC について

BEC は、多数の同種粒子が最低エネルギー準位を占めているときに各粒子の波動関数が重なり合って全体で一つの粒子のように振る舞う現象である。BEC の生成条件は、以下の式で表される。

$$\rho = n\lambda_D^3 \geq 2.612... \quad (1)$$

$n$  は原子の密度であり、 $\lambda_D$  は原子を物質波と考えた時の波束の広がりを表す物理量で、熱的ド・ブロイ波長と呼ばれる。BEC 生成のためにはこの熱的ド・ブロイ波長を長くし(つまり原子の温度を下げ)かつ原子密度を上げる必要がある。 $n = \frac{N}{V}$  ( $N$ : 粒子数、 $V$ : 体積) の  $V$  を  $\lambda_D^3$  程度と考えれば、(1) 式の条件は、原子の揺らぎ程度の空間内に 2.6 個以上の原子が存在する、ということの意味する。

## ・BEC 生成の手順

BEC を生成するのに、我々は光と磁場を用いる方法を選んだ。具体的に以下の手順で実験を行う。

1. 磁気光学トラップ (MOT) で大量の原子 ( $10^9$  個程度) を冷却しつつ捕獲する。MOT により原子は約  $240 \mu K$  まで冷却される。
2. 偏光勾配冷却で原子集団をさらに冷却する。これで約  $\mu K$  まで冷却される。
3. 磁気トラップで原子のポテンシャルの勾配を急にして、原子密度を高くする。
4. 蒸発冷却で温度の高い原子を選択的に取り除いていき、原子集団全体の温度を下げる。

我々は、最初の MOT を作る際に、ナトリウムのディスペンサーを用いることにした。ディスペンサーは、それに流す電流のオンオフで放出原子量を制御でき、また小さいのでトラップチャンバー内に入れることができる。実際に実験をする時にディスペンサーから出てくる原子は温度が  $500K$  程度なので低速原子の割合は小さいが、ディスペンサーをトラップの中心のすぐ側に配置して、原子数を確保する。

## ・ディスペンサー

ディスペンサーは図 1 のような形状をしている。 $Na_2CrO_4$  をニクロムに包んだもので、包みには  $0.1 mm$  程度の幅のスリットが入っており、両端に電流を流すことで化合物が分解し、純粋なナトリウムがスリットの部分から放出される。

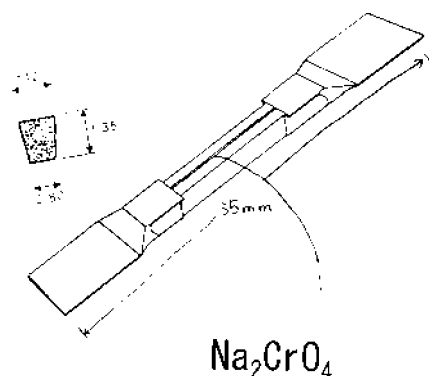


図 1: ディスペンサーの外見

この特徴は、ディスペンサーに流す電流量によって温度が決まり、放出される原子の量も決まることである。また、電流のオン・オフによって原子の流出量が操作できる。電流を 3.5A 流した場合原子の温度は大体 300~500 であり、原子の最速速度は 500m/s である。

ディスペンサーの電流をオフにした時原子が放出されなくなるおおよその時間を調べるための実験をした。まず MOT の光のみを用意しておき、時刻  $t=0$  にディスペンサーに 3.5A の電流を流し、原子の放出する蛍光をフォトディテクタで観測する。蛍光強度が飽和したら電流値をゼロにし、減衰の様子を調べた。

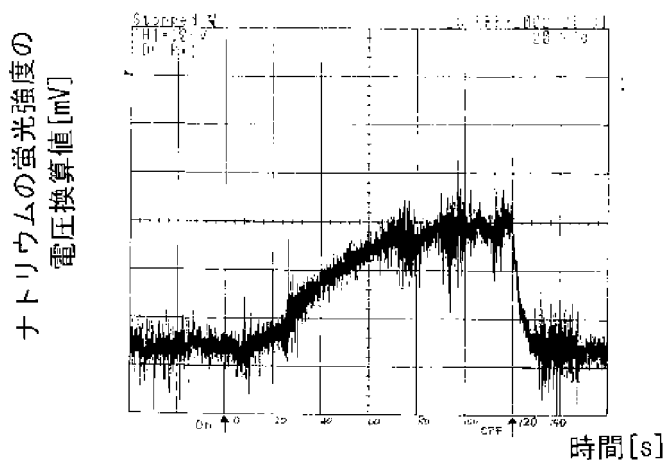


図 2: ディスペンサーのスイッチによる原子の蛍光強度の変化

電流をオンにしてから約 10 秒で原子の蛍光が見え始め、蛍光強度は約 100 秒で飽和し、また電流をオフにする約 10 秒で原子の放出が治まった。図??はナトリウムの蛍光の写真で、ディスペンサーのすぐ左にある光が蛍光である。また同じ実験を 4A の電流で行ったところ、7 分ほど経過しても蛍光は飽和しなかったがそこで電流をオフにしたところやはり減衰の様子は変わらなかった。

## MOT の実験

我々の実験では、励起用に  $Verdi^T MV - 8/V - 10$  と、色素レーザー 899-21 に Rhodamine6G を入れて使っている。色素レーザーの出力は大体 500~1000 mW である。真空ポンプは排気量 400l/s のターボ分子ポンプ一つと、排気量 600l/s のロータリーポンプ一つのみであり、普段の真空度は大体  $2 * 10^{-9}$  Torr である。また、原子の蛍光を観測はトラップチャンバーの下に置いたフォトディテクタで行った。

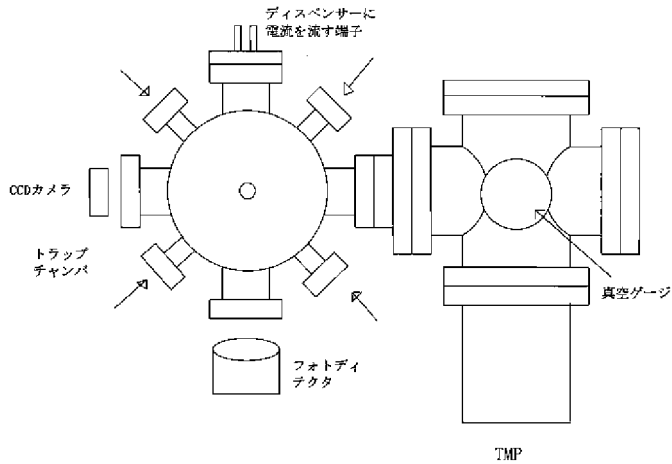
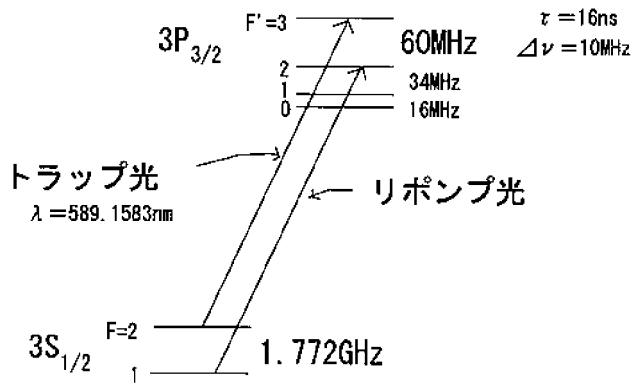


図 3: 真空装置

またナトリウムの MOT を作るにはトラップ光とリポンプ光が必要である。図 4 はナトリウムのエネルギー準位である。トラップ光は  $2s_{1/2}F=2$   $2p_{3/2}F=3$ 、リポンプ光は  $3s_{1/2}F=1$   $3p_{3/2}F=2$  の遷移の間隔に相当する周波数を持った光である。我々の実験ではトラップ光を 1.7GHz の AOM に通して周波数をシフトさせてリポンプ光を作った。



Naのエネルギー準位図

図 4: 原子のエネルギー準位図

#### ・ MOT のできる条件を調べる

この時はまだレーザー周波数のロックができていなかったため定量的な測定は行わなかった。まず、トラップ光の強度とリポンプ光の強度と、MOT コイルの磁場勾配とディスペンサーに流す電流を変化させ、MOT ができている範囲を調べた。

#### 結果

トラップ光強度：10～560mW/cm<sup>2</sup>  
 リボン光強度：5mW/cm<sup>2</sup> 以上  
 MOT コイルに流す電流：5～20A  
 ディスペンサーに流す電流：1～3.5A



図 5: ナトリウムの MOT

中央から右斜め上にのびているのがディスペンサーで、そのすぐ下に薄いオレンジ色に光っているのがナトリウムの MOT である。また下の定規は、MOT の蛍光を見ているレンズで、同じ焦点距離に置いた定規を見たものであり、このスケールで MOT の大きさを見積もれる。

次に、原子のおおよその個数を見積もるためにディスペンサーの電流を 3.5A、四重極コイルの作る磁場勾配を 15.2G/cm<sup>2</sup> とした時の原子の蛍光を観測した。また、トラップのサイズを測った。

#### 結果

MOT の原子個数：5.7 \* 10<sup>5</sup> 個  
 トラップのサイズ：直径 0.8mm

#### ・レーザー周波数のロック

常温でのナトリウム原子のドップラー幅  $\Delta$  は約 1.2GHz であり共鳴線の自然幅 ( $\Gamma$  は 10MHz) が埋もれているのでドップラー幅以下の分解能を持つサブドップラー分光法を用いた。我々は偏光分光法をもちいてレーザー周波数のロックを行った。

偏光分光法は、スピン偏極した原子に光を入射した時その光の偏光の向きによって異なる屈折率を示すことを利用して原子の共鳴線を見出す方法である。例えば簡単のために下順位と上順位に磁気量子数が異なる準位が 2 つずつある 4 準位原子を考える。上下準位間に相当する周波数を持った円偏光 (たとえば  $\sigma^+$  偏光) を入射すると、原子は光の吸収放出を繰り返して下の磁気量子数が大きい方の準位に偏る。このスピン偏極した原子に直線偏光 ( $=\sigma^+ + \sigma^-$ ) を入射すると、原子は  $\sigma^+$  光を吸収せず、 $\sigma^-$  光のみ吸収する。また、屈折率は共鳴周波数の前後で符号が反転するのでスピン偏極した原子を透過した光は、偏光方向が回転して出てきて、この回転角を検出することで屈折率の分散信号の形をした信号を得る。この信号を用いてレーザーの周波数を共鳴周波数にロックする。

図 6 のような光学系を組んだ。ナトリウムの入ったセルに円偏光を入射し、直線偏光を返し透過光を二つのフォトディテクタで検出する。この信号から得られた分散信号は、図 7 のようになった。

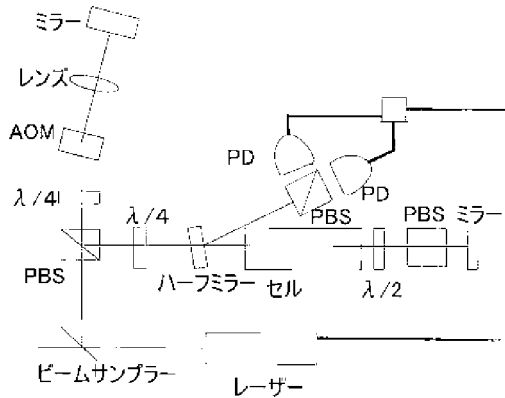


図 6: 周波数ロックのための光学系

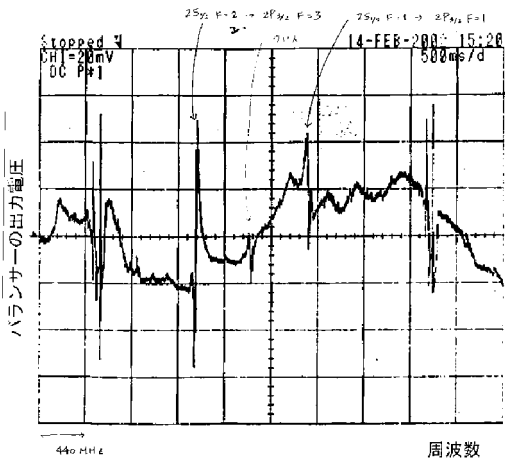


図 7: オシロスコープで観測した信号

図 7 は、レーザーの周波数を共鳴周波数の周りで掃引した時の分散信号をオシロスコープで観測したものである。横軸がレーザー周波数で 1 目盛が 440MHz、縦軸がバランスの出力で 1 目盛が 20mV となっている。共鳴周波数 ( $2s_{1/2}, F=2$   $2P_{3/2}, F=3$ ) は、グラフの中心から 1.5 目盛ほど左の位置にある信号の中心点である。また、中心から 0.8 目盛ほど右に、 $2s_{1/2}, F=1$   $2P_{3/2}, F=2$  に共鳴している信号がある。また、中心から 0.4 目盛左にある信号は、交差共鳴信号である。

ナトリウムの場合、冷却遷移に使うエネルギー準位のまわりの準位は比較的より固まっているので、このように多くのギャップが見られる。

レーザーを共鳴周波数の位置に持って来ておいてバランスの出力を増幅した信号をレーザーのコントローラの外部入力端子に戻してレーザー周波数をゆらぎをオシロスコープで観測した。

図 8 は横軸が時間で 1 目盛が 10 秒、縦軸はレーザー周波数で 1 目盛が 5MHz となっている。図の左から 2.7 目盛目までは、レーザーの周波数ロックがかかっていない状態である。この時の周波数ドリフトは約 6MHz ある。またそれ以降はロックをかけた状態であって、長期のドリフトは 1MHz 程度となっている。

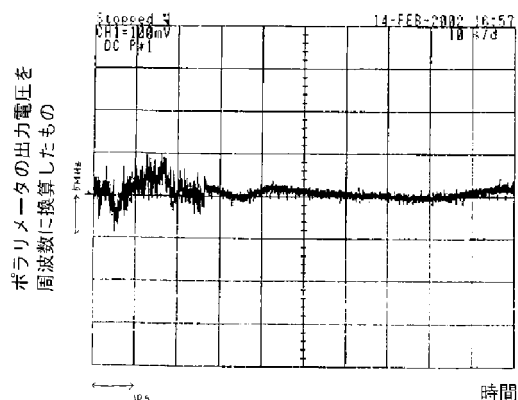


図 8: レーザー周波数の時間変化

#### ・まとめ

本研究では、ナトリウムのボーズアインシュタイン凝縮を生成するための実験装置を構築し、ナトリウムのディスペンサーを用いて磁気光学トラップまでを実現することができた。トラップできた原子数は  $5.7 \times 10^5$  個である。また、偏光分光法を用いてレーザー周波数をナトリウムの共鳴周波数にロックし、長時間の周波数ドリフトを 1MHz に押さえることができた。

#### ・今後の課題

- ・現在の原子の観測法は原子の蛍光を測定する方法であるが、温度の測定を行うのに TOF 法を用いた実験をするので、原子の吸収像を撮影する準備をする。そして MOT にトラップした原子の温度の測定を行う。
- ・また、次の偏光勾配冷却の段階に向けて、トラップ光と磁場をコンピュータで制御できるようにする。