

# 空間分離型圧縮 MOT 技術の開発

量子・物質工学科 岸本研究室 森井浩太

## 1. 目的と背景

一般に、ボーズ凝縮体(BEC)を作り出す方法としては磁気光学トラップ (MOT)→圧縮 MOT (CMOT)→蒸発冷却→BEC という手順が用いられることが多い。これらの各操作は時間的に分けられており、同時に行うことが出来なかった。今回の実験では MOT と CMOT を空間的に分離することで、それらを同時に行うことを目指した。これが出来るようになると、将来、連続的に BEC を作り出すことに繋がると考えられる。

## 2. 実験の原理

### 2-1. 磁気光学トラップ(MOT)

今回の実験では、原子の冷却と捕獲を同時に行うことが出来る磁気光学トラップ(MOT)を用いた。図1のように一对のコイルに逆向きに電流を流すことにより、不均一磁場を作った。原子は磁場を受けると、エネルギー準位が分裂する(ゼーマン分裂)。このとき、下準位から上準位への遷移は、 $\sigma^+$ -偏光を入れた場合は  $\Delta m = +1$ 、 $\sigma^-$ -偏光の場合は  $\Delta m = -1$  の遷移しか起こらない。ここで負に離調をとった円偏光のレーザーを図1のように6方向から照射する。すると中心から離れようとする原子は、磁場により原点からの距離に依存したエネルギーシフトを起こすので、原子は離調をとったレーザーの周波数が共鳴周波数と一致したところで光子を吸収し、原点方向に戻される。これにより、原子の冷却と中心への捕獲が可能になる。

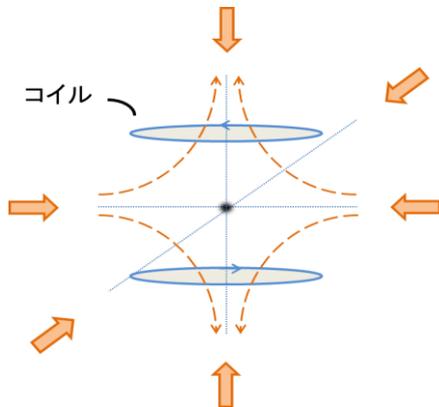


図1 磁気光学トラップ

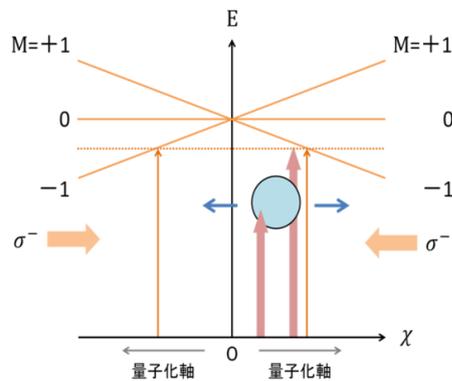


図2 磁場中の  $^{87}\text{Rb}$  のエネルギー準位

### 2-2. 圧縮 MOT (CMOT)

BEC を得るには、次式に示される位相空間密度が 1 程度になる必要がある。

$$\cdot \text{位相空間密度 } \rho = \frac{\hbar^3 n}{(2m\kappa_B T)^{3/2}} \left( \rho = n \lambda_{db}^3 \quad \text{ドブロイ波長 } \lambda_{db} = \frac{\hbar}{(2m\kappa_B T)^{1/2}} \right)$$

ここで、 $n$  は原子気体の密度、 $T$  は温度である。常温の原子気体で位相空間密度は  $10^{-16}$  程度であるが、MOT を行うことにより、位相空間密度が  $10^{-8}$  程度まで上がる。しかし、MOT で原子をある程度冷却すると原子が自然放出する光子を他の原子が受け取る光誘起衝突のレートが上がるので、原子気体の密度が

ある段階で上がらなくなる。そこで、離調を大きくした冷却光、強度を弱くしたりポンプ光を照射する CMOT を行う。これにより、光誘起衝突のレートを抑えられるので、位相空間密度を数桁上げることが出来る。上式より、温度を下げて密度を上げていくことにより位相空間密度が上がる事が分かる。

### 3. 空間分離型圧縮 MOT 技術

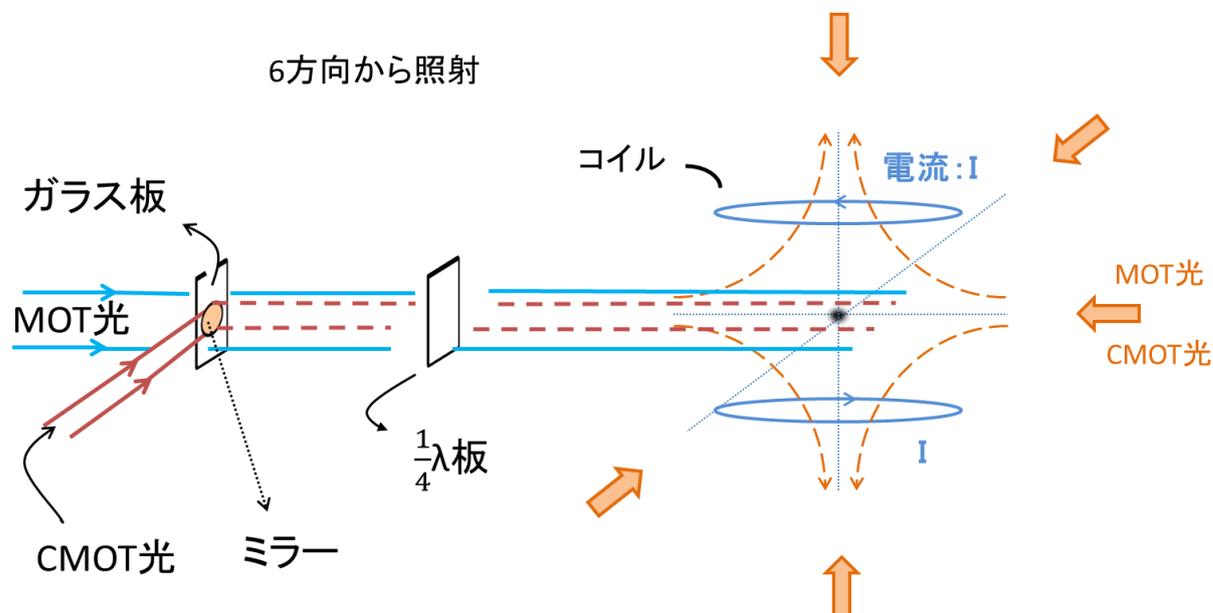


図3 空間分離型圧縮MOT技術

図3のように、中心にミラーをつけたガラス板(dot ミラー)に、ガラス板の裏側から MOT 光を照射させると、MOT 光の中心にレーザーの通らない場所(中心のミラーにより、MOT 光が遮られた部分)ができる。そのとき、dot ミラーの中心部分に対して CMOT 光を照射すると、空間的に MOT 領域と CMOT 領域を分離することができる。この方法により、原理的には MOT と CMOT を同時に行うことが可能だと考えた。

### 4. 実験の方法

以下の流れで実験を行うことにより、MOT と CMOT を同時に行うことを目指した

- 4-1. dot ミラーを MOT 光のパスに挿入しないで、通常の操作で MOT と CMOT が時間的に連続で行えるかを確認。
- 4-2. dot ミラーを MOT 光のパスに挿入して、dot ミラーの中心部分に照射する光の離調や強度を MOT と同じにする。その後、dot ミラーの中心部分に照射した光とガラス板の裏側より入射した MOT 光の全てを CMOT の条件に掃引することで、通常の CMOT と同じことが出来るかを確認。(理想的に考えるならば、上記の 4-1 と同じ条件になるので、同じ結果が得られるはず)
- 4-3. dot ミラーを MOT 光のパスに挿入して、それに入射する光の離調や強度を MOT と同じにする。その後、dot ミラーに照射した光だけを CMOT 条件に掃引することで、MOT と CMOT が同時に行えるのかを確認。

## 5. 実験の結果と考察、今後の展望

5-1. 通常の CMOT での、原子集団が 1~2mm 程度なので、それより少し大きい  $\phi=3\text{mm}$  の dot ミラーを実験で使用した。

まず

(i) 4-1

原子の温度測定には飛行時間測定(TOF)法を用いて見積もった。

その結果 MOT  $N \approx 10^8$ ,  $T \approx 400 \mu\text{K}$ , CMOT では  $N \approx 10^8$ ,  $T \approx 100 \mu\text{K}$  となった。

MOT と CMOT の位相空間密度  $\rho$  の値は MOT のとき  $\rho \approx 1 \times 10^{-9}$ , CMOT のとき  $\rho \approx 1 \times 10^{-6}$  となった。CMOT を行うことで、位相空間密度を数桁上げられることが分かったので、通常の操作による MOT 後の CMOT で、蒸発冷却に必要な位相空間密度が得られたことが確認できた。

次に

(ii) 4-2

こちらと同じく TOF 法を用いて原子の温度を測定した。

結果、MOT では  $N \approx 10^7$ ,  $T \approx 1\text{mK}$ , CMOT では  $N \approx 10^7$ ,  $T \approx 400\sim 500 \mu\text{K}$  となった。dot ミラーを MOT 光のパスに挿入したことにより、MOT が大きく乱されてしまったため MOT の温度が **mK** になってしまった。そのため、dot ミラーの中心部分に照射した光とガラス板の裏側より入射した MOT 光の全て CMOT の条件に掃引しても、通常の CMOT と同程度の位相空間密度が現時点では得られていない。

最後に

(iii) 4-3

4-2 において、dot ミラーの中心部分に照射した光とガラス板の裏側より入射した MOT 光の全てを CMOT の条件に掃引することで、通常の CMOT と同じことが出来ることが示せなかった。そのため 4-3 を行い MOT と CMOT が同時に行えるのかを確認したが、同様に位相空間密度の向上は見られなかった。

4-2 で MOT と CMOT を共存させたかったが、MOT のサイズ 7~8mm に対してミラーのサイズ 3mm とオーダーが同程度なことにより、MOT が大きく乱されてしまい(dot ミラーを MOT 光のパスに挿入したことにより、原子数が 20~30%程度となった)、空間分離型圧縮 MOT の優位な効果は観測できなかった。ミラーの直径( $\phi$  [mm])の値が大きすぎたため失敗したので、 $\phi$  の値の小さい dot ミラーを自作することにした。ここで注意すべきことがあり、照射するレーザーの大きさに対して dot のサイズが小さいとき、光の回折により同心円状の明暗のパターンの回折が起きてしまう。現在の装置の制約から Dot ミラーから MOT までの距離は  $\ell = 820\text{mm}$  となっている。その距離で光の回折による明の回折パターンが、CMOT 領域内で起こらないような  $\phi$  の値を選ぶ必要がある。そのため、次の式から明の回折パターンが起こる位置を計算し、適切な  $\phi$  の値を決定した。

$$\ell = \frac{r_i^2}{\lambda} \quad (\ell = \text{焦点} \quad \lambda = \text{波長} \quad r_i = \text{dot の半径})$$

この式より  $\phi = 2\text{mm}$  のとき  $\ell = \frac{(1\text{mm})^2}{780\text{nm}} = 1280\text{mm}$  となり

$\phi = 2\text{mm}$  ならば回折の位置が CMOT 領域と重ならない。

## 5-2. dot ミラーの作成方法

右の図にある分解能  $0.1\mu\text{l}$  の注射器と Norland Optical Adhesive65 という UV 硬化型接着剤、金蒸着をしたガラスを用いて dot ミラーの作成をした。①のガラスに適量の NOA65 をのせ、金蒸着をしたガラスにくっつけることで①のガラスに金膜を付着させた。ガラスにのせる接着剤の量をコントロールすることで、 $\phi=2\text{mm}$  の dot ミラーを作成することができた。

表 1 UV 硬化型接着剤の滴下量とミラーの直径  $\phi$  の関係

NOA65 [ $\mu\text{l}$ ]	1	0.5	0.3	0.2	0.1
$\phi$ [mm]	0.5	4	8	2	1~1.5



図4 dotミラー作成のために仕様した道具

## 5-3. 作成した $\phi=2\text{mm}$ の dot ミラーを用いた実験

$\phi=2\text{mm}$  の dot ミラーを用いて、 $\phi=3\text{mm}$  のとき大きく MOT を乱していたのが改善されたのかどうかを調べた。

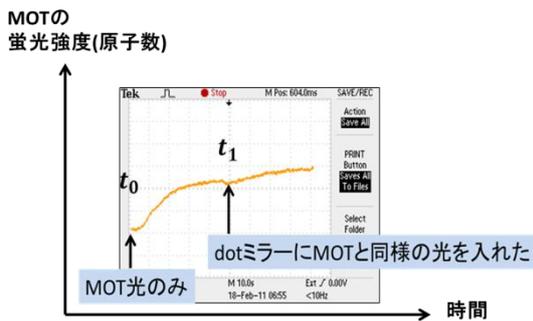


図5  $\phi=2\text{mm}$  のミラーのときの、冷却原子数と時間

$t=t_0$  のとき、dot ミラーを MOT 光のパスに挿入し、ガラス板の裏側より MOT 光を入射させた。このとき、dot ミラーの中心部分に対して光は照射しない。 $t=t_1$  のときにミラーの中心部分に対して MOT と同じ離調や強度の光を照射したところ、原子数を観測するための蛍光強度の急激な増加は見られなかった。このことから  $t_0 \sim t_1$  において dot ミラーによって darkMOT を形成しているわけではないことが分かる。darkMOT とは、光と相互作用をしない領域(暗領域)を中心部分に設け、冷却された原子を周辺から中心へ送り込むとい

う方法である。通常の MOT では、ある程度 MOT を進めていくと光誘起衝突レートが上がるので、ある段階で原子数密度が上がらなくなってしまう。これに対して、darkMOT では原子を暗状態( $F=1$ )へ遷移させて MOT 光( $F=2 \rightarrow F=3$ )の吸収を無くすことで光誘起衝突レートが抑えられ、より高い原子数密度を達成することが出来る。実験で使用する原子によって、darkMOT が出来るかどうかが決まる。例えば、Na 原子では上準位の超微細構造の間隔が準位の線幅に比べて狭いので darkMOT を行うことが出来るが、今回の実験で使用する  $^{87}\text{Rb}$  では、上準位の超微細構造の間隔が広いいため darkMOT を行うことが難しい。また、 $t=t_1$  のときにミラーの中心部分に対して MOT と同じ離調や強度の光を照射したところ、通常の MOT の時と同程度の時間で原子数の増加が観測されている。 $\phi=3\text{mm}$  の dot ミラーを MOT 光のパスに挿入したときは、原子数が 20~30%程度となったが、作成した  $\phi=2\text{mm}$  の dot ミラーでは原子数が 60~70%程度となり、MOT が大きく乱されていないことが確認出来た。これにより、 $\phi=3\text{mm}$  のとき MOT が大きく乱されていたのが、 $\phi=2\text{mm}$  にすることで改善されたことが示された。今後  $\phi=2\text{mm}$  の dot ミラーを用いて、再度 4-1~4-3 を試していく。またそのときに、原子を MOT の冷却サイクルから外してくれる depopulation laser( $F=2 \rightarrow F=1$ )を用いて、 $^{87}\text{Rb}$  原子で darkMOT が行えるかどうかを調べながら、MOT と CMOT を同時に行うことを目指す。