

# <sup>87</sup>Rbの Gray Molasses 冷却へ向けたマイクロ波分光による残留磁場の測定

岸本研究室 1413032 太田 大貴

## 1. 研究背景・目的

ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)生成が実現した1995年から今日までに、種々の原子でBEC生成が実現された。最初にアルカリ金属(Na, K, Rb)のBECが生成され、技術の発達に伴い、現在ではアルカリ土類金属や希ガスなどのBECの生成も実現されている[1]。先行研究のように、BEC生成の手法は確立されたが、BECの連続生成の手法は確立されていない。このBECの連続的生成こそ、本研究室の目的である。

BECの連続的生成のために用いる要素技術として本研究室が検討しているものの1つに、5S-6P間の遷移を用いたGray Molasses冷却がある。この冷却手法の特徴は、原子を暗状態に落ち込ませ、光の再吸収を防ぐことである。これにより、冷却された原子の再加熱を防ぐことが出来、位相空間密度の向上につながる事ができる。しかし、主量子数の異なる遷移を用いての実験成功例は未だ存在しない。このGray Molasses冷却では全ての磁気副準位が縮退していることが重要なので、残留磁場を最小限に抑制する必要がある。そこで、本研究の目的は、残留磁場を最小限に抑制することで、全ての磁気副準位が縮退した状態を作り、冷却の可能性を向上させることである。また、残留磁場の抑制の定量的評価をしながら冷却実験を行うことで、将来なおGray Molasses冷却が実現できない場合でも、冷却の妨げになる要因から残留磁場を外すことが可能となる。

## 2. 実験方法

Gray Molasses 冷却のセットアップは

Fig.1の通りであり、 $B = 0$ の状態では $\sigma^+$ と $\sigma^-$ の光を対向させて原子に照射する必要がある。今回、Gray Molasses冷却の予備冷却として磁気光学トラップ(MOT)による冷却・捕獲を行うため、本研究における残留磁場とは、MOTで冷却・捕獲された原子が存在する位置における磁場を指す。そして、本研究では、狭線幅な超微細構造遷移(Fig.2,  $5S_{1/2}$ の  $F=1, 2$  間)を用いて分光を行うことで残留磁場の抑制を図るため、より弱い磁場まで追い込むことが可能である。

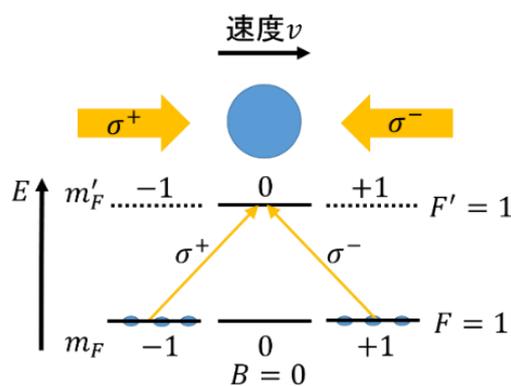


Fig.1. Gray Molasses 冷却のセットアップ

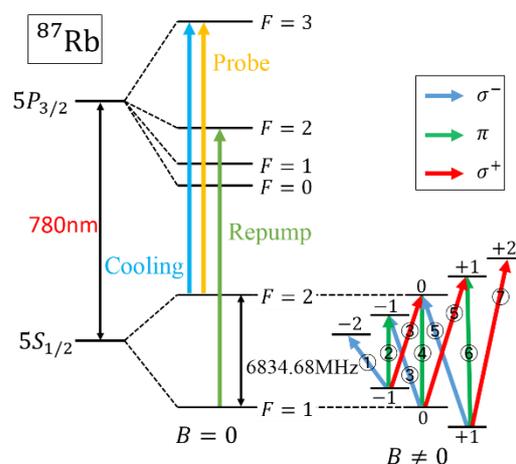


Fig.2. 実験で使用する遷移

実際の実験手順について説明する。まず、Fig.2 の Cooling 光、Repump 光を用い MOT で原子を冷却・捕獲する。ここで捕獲された原子は、 $|5S_{1/2}, F = 1, 2\rangle$  に存在する。そして、これらの原子は、Repump 光を切ることで、 $|5S_{1/2}, F = 1\rangle$  にポンピングされる。この原子に対してマイクロ波分光を行うことで、残留磁場の測定を行う。

次に、マイクロ波分光について詳細に説明する。MOT コイルを切ると、原子のエネルギー準位は残留磁場の大きさに依存してゼーマンシフトする。この原子に対して各周波数でマイクロ波を照射し、吸収イメージングによって  $F=2$  に遷移した原子数を求めると、Fig.3 の通りになると考えられる。ここで、原子数のピーク間隔は、磁場が小さい領域では残留磁場の大きさに比例する。そして、このピーク間隔が  $0.7\text{MHz/G}$  であるという関係性を利用することで、残留磁場を同定することが可能である。なお、本研究では、 $6.8\text{GHz}$  のマイクロ波を出力するために、自作したヘリカルアンテナを使用した。

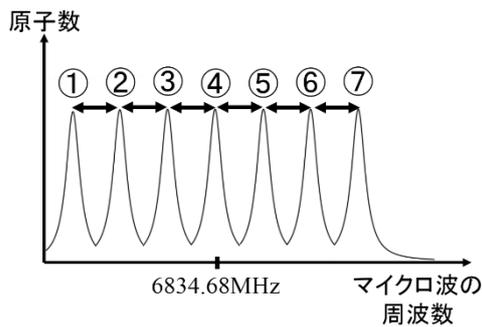


Fig.3. マイクロ波の周波数と原子数

前述した手順で残留磁場を評価後、残留磁場の最適化を行う。その際は、MOT コイルの周囲に配置された 3 対の Bias コイルを用いる。この Bias コイルの電流値を調整す

ることで残留磁場を変化させる。また、本研究では、Hall 素子を用いて電流値を読むことで、 $1\text{mA}$  の精度での電流値の制御を可能にしている。これは磁場に換算しておよそ  $2\text{mG}$  に相当する。

### 3. 実験結果

#### 3.1. ゼーマンシフトの確認

意図的に大きな磁場をかけることで大きくゼーマンシフトさせ、各遷移のピークを確認した。Fig.4 がその結果である。この結果から、理論通り 7 つのピークを確認することが出来、ゼーマンシフトが等間隔であること、そして、磁気副準位間のポピュレーションに偏りがあることが分かった。また、 $10\text{Hz}$  程度だと考えていた線幅(FWHM)がおおよそ  $200\text{kHz}$  になっていることが確認できた。この広がりについては、3.3 節で考察する。

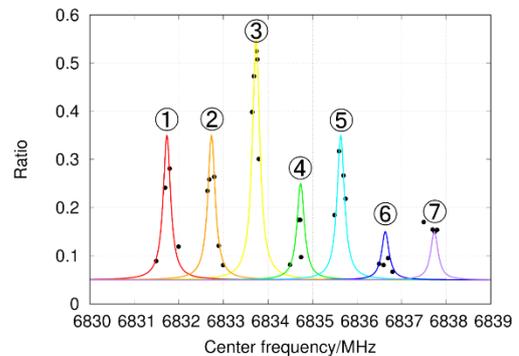


Fig.4. ゼーマンシフトの確認

#### 3.2. Bias コイルの最適化

この時点では  $200\text{kHz}$  の線幅が原因で、弱い磁場における分光が出来ない状態である。そこで、まずは磁場の大きい領域で磁場を測定し、fitting によって磁場の極小点を求めることを試みた。実際の実験の手法としては、1 軸のみ Bias コイルの電流値を変化させ、シフト量(Fig.4 のピーク間隔)を測定し

た。

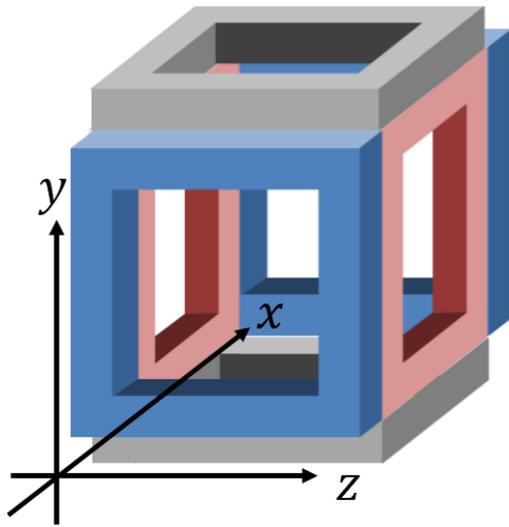


Fig.5. Bias コイルの模式図

先ず、y 軸 Bias コイル(Fig.5 の灰色のコイル)の電流値のみを変化させ、測定を行った。その結果を Fig.7 に示す。

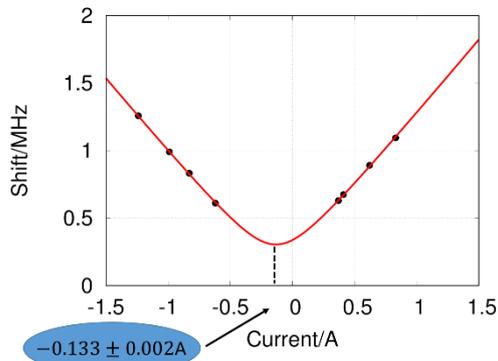


Fig.6. y 軸 Bias コイルの電流値最適化

この結果から、y 軸 Bias コイルの電流値が-0.133A のとき、シフト量(残留磁場)が最小となることが分かった。その後、y 軸 Bias コイルの電流値を-0.133A に設定し、z 軸 Bias コイル(Fig.5 の赤色のコイル)、x 軸 Bias コイル(Fig.5 の青色のコイル)に対して同様の測定を行った。その結果を Fig.7, Fig.8 に示す。

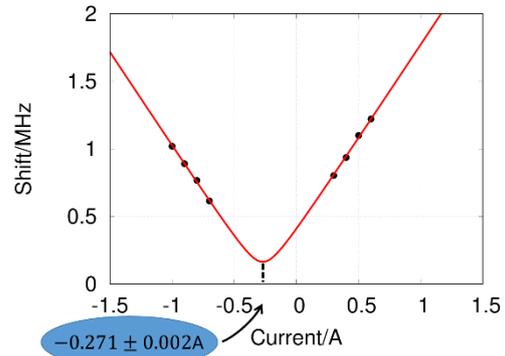


Fig.7. x 軸 Bias コイルの電流値最適化

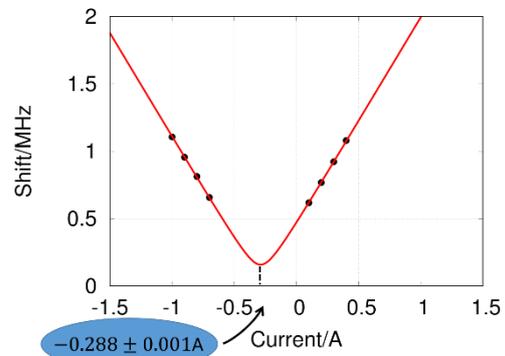


Fig.8. z 軸 Bias コイルの電流値最適化

この結果、x 軸 Bias コイルの電流値が-0.288A のとき、そして、z 軸 Bias コイルの電流値が-0.271A のとき磁場が最小となることが分かった。今まで Fig.2 の遷移を用いて MOT を行う際に使用していた電流値は Table 1 の通りであるため、今回の Bias コイルの電流値の最適化により、およそ 363mG 磁場を変化させたことに相当する。

Table 1. Bias コイルの電流値

	今までの値/A	最適化後/A
y 軸	-0.2	-0.133±0.002
z 軸	-0.4	-0.288±0.001
x 軸	-0.2	-0.271±0.002

この結果から、先行研究[2][3]において、Gray Molasses 冷却で許容される磁場は 100mG 程度とされているため、今までの補正磁場条件では不完全で、Gray Molasses 冷

却が効かない状態であったことが明らかになった。

### 3.3. 線幅の狭窄化

200kHz という広い線幅を持つ原因として考えられるのは、磁場勾配及び電流ノイズ、そして、強度広がりによる影響である。この3つの原因の内、強度広がりによる影響を調べるために、マイクロ波のパワーを変えて0-0遷移を分光することとした。この遷移を分光した理由は、今回のような弱い磁場領域においては磁場に鈍感な遷移であり、磁場の影響と強度広がりによる影響を切り離して考えることが出来るからである。まず、マイクロ波源の出力パワーを-29dBmに設定し、線幅を確認したところ30kHz程度であった。そして、マイクロ波のパワーを4.5dBm下げ、線幅を確認すると20kHzであった(Fig.9)。これは強度広がりによる理論式とも一致する。

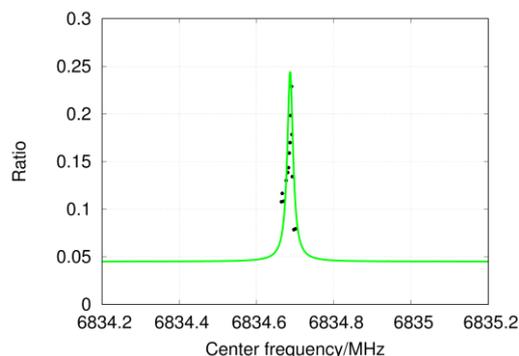


Fig.9. 0-0 遷移の線幅の狭窄化

理論的には、遷移の線幅はドップラー広がりより10Hz程度なので、マイクロ波のパワーをより下げることで、より線幅を狭めることが可能である。しかし、現状の20kHzの線幅で30mG程度の弱い磁場まで分光できることから、今後は、残る0-0遷移以外の線幅の広がりによる要因として考えられる電流

ノイズや残留磁場勾配等の抑制を図ることで、これらの遷移の狭窄化も図っていく所存である。

### 4. まとめと展望

今回の実験の結果、今までの電流値では残留磁場は最適値から360mG以上ずれており、Gray Molasses冷却が効かない状態であったということが確認できた。しかし、広い線幅が原因で残留磁場の絶対評価が出来ていないため、残留磁場が100mG以下になっているということは直接的には確認が出来ていない。そこで今後は、線幅が広がっている原因を究明し、0-0遷移以外の線幅を狭窄化する予定である。そして、残留磁場が100mG以下であると確認できた暁には、Gray Molasses冷却を試し、冷却効果が表れるか確認したい。

### 5. 参考文献

- [1] 町田一成, ボーズ・アインシュタイン凝縮, 吉岡書店(2005)
- [2] Grier, Andrew T., et al., Phys. Rev. A **87**, 063411(2013)
- [3] Colzi, Giacomo, et al., Phys. Rev. A **93**, 023421(2016)