

^{87}Rb 原子の $5\text{S}-6\text{P}$ 遷移におけるレーザー冷却に関する研究

先進理工学科

応用物理学コース

岸本研究室

1013009 石川 裕一朗

1. 研究背景と目的

本研究室では ^{87}Rb を用いた連続的なボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の生成を目的としている。連続的な BEC の生成のためには、まず連続的に極低温、高密度状態を作り出す必要がある。しかし、BEC を生成する過程において、圧縮磁気光学トラップ(CMOT)は磁気光学トラップ(MOT) の冷却条件であるレーザーの離調や冷却サイクルから外れた原子を冷却サイクルへ戻す Repump 光の強度、磁場勾配を時間的に掃引しなければならず、MOT と CMOT は同時に行うことができない。そこで、MOT のみで極低温、高密度状態を実現するために ^{87}Rb 原子の $5\text{S}-6\text{P}$ 遷移における MOT を行う。最近、 ^{40}K と ^6Li における $n\text{S} \rightarrow (n+1)\text{P}$ 遷移間の MOT[1][2] において、より低温に冷却しつつ圧縮できるとの報告があり、 ^{87}Rb においても $5\text{S}-6\text{P}$ 遷移間における MOT の実現が可能であると考えられる。

さらに、 $5\text{S}_{1/2}-6\text{P}_{3/2}$ 遷移間の励起状態と基底状態が等しい大きさで同じ方向にシュタルクシフトする波長(一般にマジック波長と呼ぶ)[3]による 光双極子トラップ(ODT)を行うことで ODT の中心領域で $5\text{S}-6\text{P}$ 遷移間のみで MOT を行い、中心領域以外では通常の $5\text{S}-5\text{P}$ 遷移間の MOT を行うことを目指している。これにより、極低温かつ高密度な原子集団を連続的に生成することができ、連続的に $5\text{S}-6\text{P}$ 遷移間の MOT から ODT への原子集団をロードが可能になると考えている。本研究では、マジック波長における光双極子トラップ中での $5\text{S}-6\text{P}$ 遷移間の MOT による ODT への連続的な原子集団のロードの前段階として、 ^{87}Rb 原子の $5\text{S}-6\text{P}$ 遷移を用いた MOT の評価を行う。 ^{87}Rb 原子の $5\text{S}-6\text{P}$ 遷移における MOT の極低温かつ高密度化に関する報告がまだないので、実際に冷却が可能か確かめる必要がある。実験では、通常の $5\text{S}-5\text{P}$ 遷移間の MOT で ^{87}Rb 原子を捕獲し、 $5\text{S}-6\text{P}$ 遷移間の MOT へ切り替えていくことにより ^{87}Rb 原子における $5\text{S}-6\text{P}$ 遷移間の MOT の評価を行う。

2. 原理

2.1 $5\text{S}-6\text{P}$ 間の遷移における磁気光学トラップ(MOT)

磁気光学トラップとは、ドップラー冷却を磁場勾配がある領域で 3 次元的に行うことにより効率的に原子を冷却、捕獲するレーザー冷却の手法である。MOT においてその冷却

限界温度はドップラー限界温度によって制限される。ドップラー限界温度は次の式であらわされる。

$$T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}$$

\hbar はプランク定数、 k_B はボルツマン定数、 Γ は自然幅を表わしている。つまりドップラー限界温度は自然幅に依存する。 $5P_{3/2}$ 準位の自然幅は、 $2\pi \times 6.0 \text{ MHz}$ 、 $6P_{3/2}$ 準位の自然幅は $2\pi \times 1.4 \text{ MHz}$ である。

また、MOTにおいて原子集団がある密度以上になると、ある原子が励起状態から基底状態へ遷移する際放出する光子を別の原子が吸収してしまうということが起こる。これを光誘起衝突という。今吸収断面積について考えてみる。吸収断面積は次の式であらわされる。

$$\sigma_{abs} = \frac{3\lambda^2}{2\pi}$$

吸収断面積は冷却光の波長に依存することが分かる。 $5S-5P$ 間の遷移に比べて、 $5S-6P$ 間の遷移の波長のほうが短い為吸収断面積が小さくなり、光誘起衝突を $5S-5P$ 間の遷移の波長に比べて小さくできる。また、 $6P_{3/2}$ 準位は $5S_{1/2}$ 準位だけではなく他の準位へ緩和するため、これも考慮するとさらに吸収断面積は小さくなる。このため、 $5S-6P$ 間の遷移における MOT を行うことで密度の向上が期待できる。

以上のことから従来の MOT に比べて、 $5S-6P$ 間の遷移における MOT は極低温化、高密度化が期待できる。

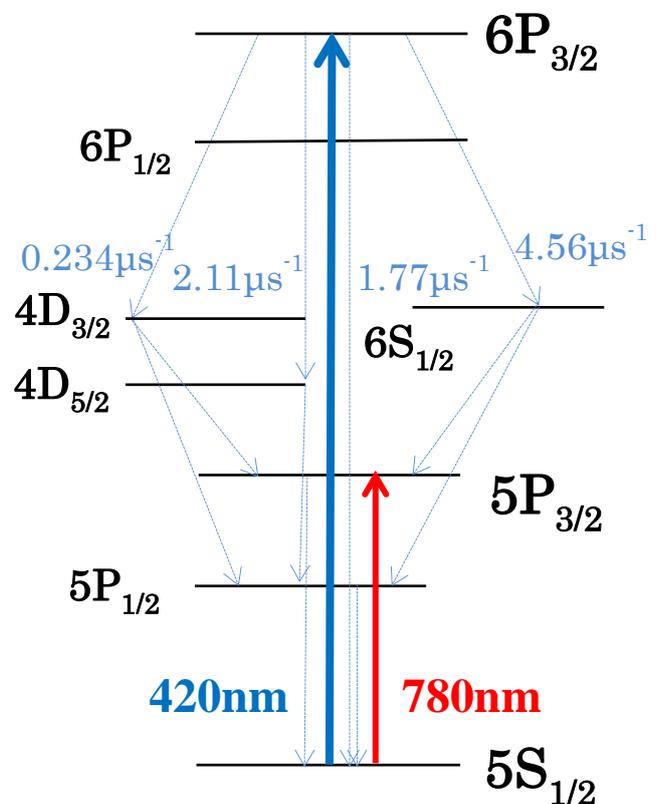


図 1. ^{87}Rb のエネルギー準位図[4]

3.実験 5S-6P 間の遷移における磁気光学トラップ(MOT)

今回の実験における MOT は $5S-6P$ 間の遷移に共鳴な 420nm のレーザーのみで行うのではなく、 $5S-5P$ 間の遷移に共鳴な 780nm のレーザーで原子をある程度捕獲した後、 420nm のレーザーの MOT へロードを行う。 780nm から 420nm のレーザーへとロードする際、 780nm のレーザーと 420nm のレーザーが重なる時間を設ける。この後に 420nm のみで MOT を行う。これから、それぞれ 780nm と 420nm のレーザーが重なる時間を「overlap time」とし、 420nm のみで MOT を行う時間を「blue MOT time」と

する。

この overlap time と blue MOT time を設ける理由だが、420nm のみの MOT では原子を捕獲する領域が 780nm に比べて小さく原子を捕獲、冷却することが難しいためである。また、Overlaptime は、780nm のレーザーの強度が 420nm のレーザーに比べ大きいため、overlaptime において 780nm のほうが支配的になる。そのため今回の実験においては overlap time の時間的な長さは影響は少ないものと考え、一定の値で固定した。

また、今後マジック波長における ODT 中で MOT を行う際、中心領域では 5S-6P 間の遷移における MOT だが、その外側では 5S-5P 間の遷移における MOT を行うことにより、この冷却条件を満たせると考えている。実験系としては、従来の MOT のレーザー波長である 780nm のレーザーの光軸に対して平行に重なるように 5S-6P 遷移に対して共鳴である 420nm のレーザーを入射させた。

4.実験結果

5S-6P 間の遷移における MOT の 1次元のみについて MOT を行った場合の結果を示す。図 3.に Blue MOT time における原子集団の様子を示した。

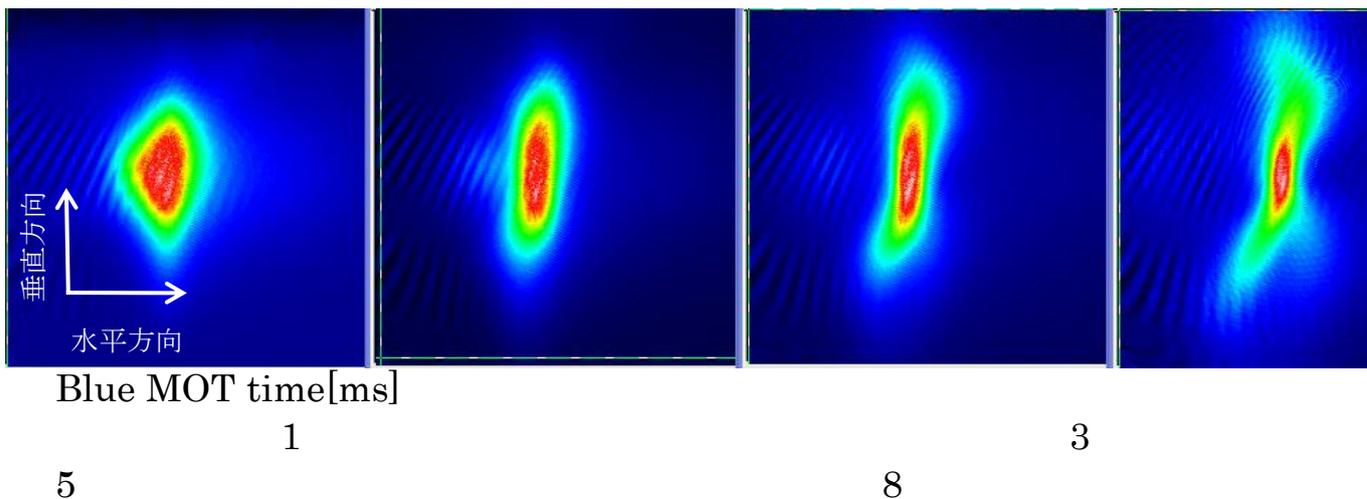


図 2.blue MOT time を変化させたときの MOT の様子

このデータはトラップ解放直後の原子集団を CCD カメラで撮像したものである。画像の縦方向が垂直方向(重力方向)であり、横方向が水平方向(対向するレーザーと同じ軸方向)である。またこのときの overlaptime は 1ms である。

水平方向のみについて 420nm の冷却光を対向照射した。ここで水平方向の原子集団の大きさを σ_x ($1/e^2$ 半径) とおくと blue MOT time を変化させたときの σ_x 変化は図 4.のようになる。

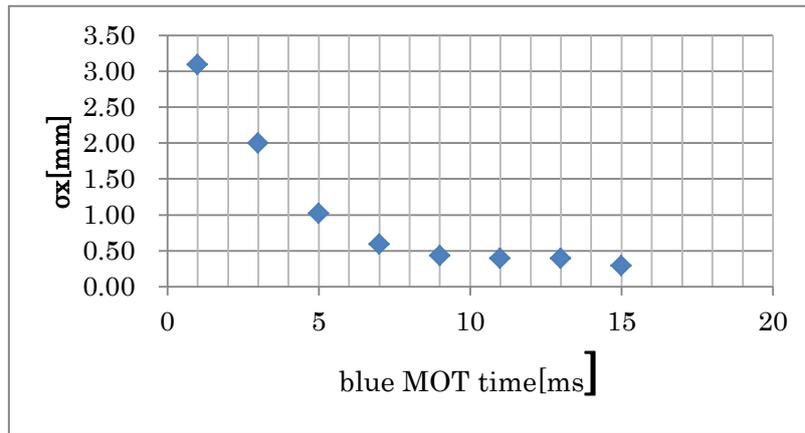


図 3. blue MOT time における σ_x の変化

中心での光学密度(OD)については blue MOT time を長くすると小さくなっていった。これは、水平方向のみから冷却光を対向照射しているため、垂直方向に原子が逃げていることが原因として考えられる。

この条件において σ_x についてのみ温度を測定したとき、780nm の MOT において 306 μ K であるが、今回の MOT において blue MOT time が 6ms の時に 135 μ K 程度まで冷却されていた。

1次元については冷却され、原子集団の圧縮が確認されたので次は3次元における5S-6P間の遷移におけるMOTの実現だが、これについては現在進行中である。3次元MOTにおいて1次元の時のような原子を減らすことなく、1次元のMOTと同程度の温度まで冷却され、1次元の σ_x の大きさまで原子集団が圧縮されたと仮定すると、従来のMOTの密度がおおよそ 10^9 atoms/cm³ 程度であるのに対して、3次元の5S-6P間の遷移におけるMOTを行うことで密度が 10^{11} atoms/cm³ 以上になると見積もることができ、位相空間密度について考えるとおおよそ2~3桁の向上が期待できる。また、現在420nmのMOT光を合わせ混む際にダイクロイックミラーを使用しており、これによって位相シフトが生じて楕円偏光になってしまっている。位相シフトをしっかりと補正することで、円偏光度を向上させ、さらに到達温度を下げる余地があると考えている。これらのことによって、ODTに捕獲する直前で必要となる位相空間密度を達成できると見積もられる。

5.今後の展望

連続的なBECの生成へ向けて、1.5 μ m のマジック波長におけるODT中で5S-6P遷移のMOTを行い、ODTへ原子集団をロードする必要がある。

そのためにまず3次元の5S-6P間の遷移におけるMOTで冷却されることを確認し、実際にマジック波長と推定される波長のODTへロードし、マジック波長の同定と、実際にODT中で冷却が行われることを確認する。

6.参考文献

[1] D. C. McKay, D. Jervis, D. J. Fine, J. W. Simpson-Porco, G. J. A. Edge, and J. H.

Thywissen, "Low-temperature high-density magneto-optical trapping of potassium

using the open $4S \rightarrow 5P$ transition at 405nm," Phys. Rev. A **84**, 063420 (2011)

[2] P. M. Duarte, R. A. Hart, J. M. Hitchcock, T. A. Corcovilos, T.-L. Yang, A. Reed, and R. G. Hulet, "All-optical production of a lithium quantum gas using narrow-line laser cooling," Phys. Rev. A **84**, 061406(R) (2011)

[3] Jun Ye, H. J. Kimble, Hidetoshi Katori , " Quantum State Engineering and Precision Metrology Using State-Insensitive Light Traps," Science **320**, 1734 (2008)

[4] 吉野悠太 黄表紙 " ^{87}Rb 原子の $5S-6P$ 遷移におけるマジック波長探索"(2012)