

5S-6P 遷移による ^{87}Rb の レーザー冷却に向けた 420nm 光源の開発

量子・物質工学科 岸本研究室
0813015 上杉 太亮

1 目的と背景

私たちの研究室では、 ^{87}Rb を用いたボース・アインシュタイン凝縮(BEC)の生成を目指している。BEC は位相空間密度を 2.61 以上にすることで達成され、その為には原子の密度を上げ、冷却をする必要がある。現在の実験系では $5\text{S}_{1/2}$ - $5\text{P}_{3/2}$ の遷移を冷却サイクルとして利用しているが、冷却過程で生じる自然放出光の再吸収などにより、高密度化には限界がある。すなわち、この問題を解決するには、現在の実験系に光の再吸収を抑える新しい手法を導入する必要がある。その方法として、今回は $5\text{S}_{1/2}$ - $5\text{P}_{3/2}$ 遷移とは別の遷移を利用することを考える。先行研究において、 ^{41}K の $4\text{S}_{1/2}$ - $5\text{P}_{3/2}$ 遷移や ^6Li の $2\text{S}_{1/2}$ - $3\text{P}_{3/2}$ 遷移を利用した磁気光学トラップに成功したという報告があるため[1,2]、本実験では ^{87}Rb の $5\text{S}_{1/2}$ - $6\text{P}_{3/2}$ 遷移を利用し、さらなる高密度化・冷却をするための光源を開発するのが目的である。

2 原理

2.1 位相空間密度

ボース気体は、位相空間密度を 2.61 以上にすることでボース・アインシュタイン凝縮を起こす。位相空間密度とは、一量子状態あたりの平均的粒子数を表し、次式で与えられる。

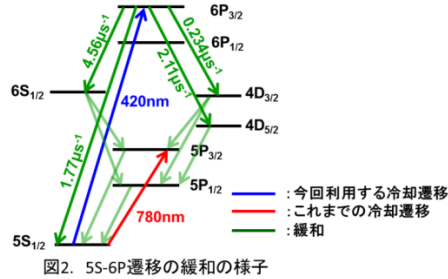
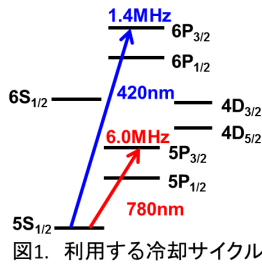
$$\text{位相空間密度 } \rho_{PSD} = n\lambda_{dB}^3 = \frac{nh^3}{(2\pi mk_B T)^3} \quad (1)$$

ここで、 n は原子密度、 λ_{dB} は熱的ド・ブロイ波長(h はプランク定数、 m は原子の質量、 k_B はボルツマン定数、 T は原子集団の温度)である。常温の原子気体の位相空間密度は 10^{-16} 程度であるが、(1)式から、原子密度を上げ、温度を下げることによって位相空間密度が上がる事がわかる。

2.2 ^{87}Rb のエネルギー準位

図 1 に、これまで利用していた冷却遷移(以下、 5S - 5P 遷移とする)と、今回利用する冷却遷移(以下、 5S - 6P 遷移とする)のエネルギー準位図を示す。 5S - 5P 遷移の共鳴波長は 780nm、自然幅は約 6.0MHz と見積もられている。一方、 5S - 6P 遷移の共鳴波長は 420nm、

自然幅は約 1.4MHz と見積もられている。続いて、5S-6P において 6P_{3/2} に励起された原子が緩和する様子を図 2 に示す。6P_{3/2} に励起された原子は 5S_{1/2}、6S_{1/2}、4D_{3/2}、4D_{5/2} に緩和する。これらのことから、420nm の光を吸収する原子の割合が減り、光誘起衝突が抑えられる。ところで、6S_{1/2}、4D_{3/2}、4D_{5/2} に緩和した原子も、さらに緩和して最終的には 5S_{1/2} に戻るため、5S-6P 遷移は冷却サイクルとして成り立っていることがわかる。



2.3 吸収断面積

高密度化を達成するに当たり、自然放出光の再吸収を抑える必要がある。原子の吸収断面積は、原子が光を吸収する割合を示しており、次式で与えられる。

$$\text{吸収断面積 } \sigma_{abs} = \frac{3\lambda^2}{2\pi} (\lambda: \text{波長}) \quad (2)$$

表 1 に 5S-5P 遷移と 5S-6P 遷移での吸収断面積の計算結果を示す。

この結果から、5S-6P 遷移では吸収断面積が小さくなるため、光誘起衝突が抑えられ、密度の上昇が期待できる。

2.4 ドップラー冷却限界

MOT の冷却原理はドップラー冷却と呼ばれるものである。これは、原子に 2 本の対向するレーザーを当てた場合、原子は運動方向と対向するレーザーからより大きな輻射圧を受けて減速、つまり冷却されるというものである。この冷却の限界温度は次式で与えられる。

$$\text{ドップラー冷却限界 } T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B} (\Gamma: \text{自然幅}) \quad (3)$$

よって、ドップラー冷却限界は自然幅で決定することがわかる。表 2 に 5S-5P 遷移と 5S-6P 遷移でのドップラー冷却限界の計算結果を示す。

この結果から、5S-6P 遷移ではドップラー冷却限界が下がるため、冷却が期待できる。

表 1. 吸収断面積の計算結果

	5S-5P	5S-6P
波長(nm)	780	420
吸収断面積(μm ²)	0.29	0.082

表 2. ドップラー冷却限界の計算結果

	5S-5P	5S-6P
自然幅(MHz)	6.0	1.4
ドップラー冷却限界(K)	2.3 × 10 ⁻⁵	5.3 × 10 ⁻⁶

3 実験

3.1 作成した光源

リトロー型の外部共振器型レーザーを作成した。 $\lambda=420\text{nm}$ 付近で発振させるため、ブラッグの条件を用いてグレーティングを $d=1/1800\text{mm}$ 、回折角を 22.5° に設定した。

図 3 に実際に作成した光源を示す[3,4]。PZT 素子に電圧をかけることで共振器長を制御し、波長を調整している。また、サーミスタで温度を検知し、ペルチェ素子で温度制御を行っている。そして LD から出た光はコリメーションレンズによって平行光となり、外部共振器で発振する。この時の 1 次光の回折効率は 19.5%であった。

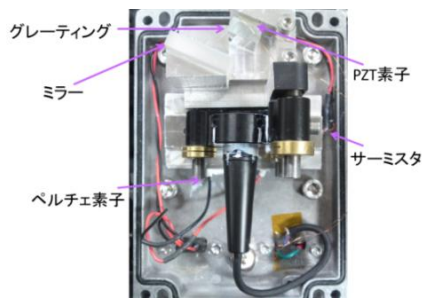


図 3. 作成した光源

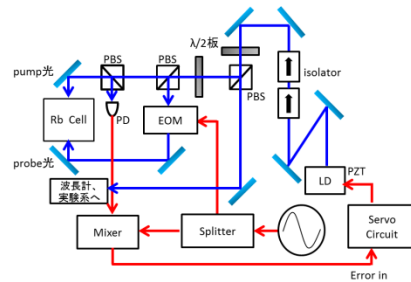


図 4. 光学系のブロック図

3.2 飽和吸収分光

作成した光源を図 4 のような光学系を組み、飽和吸収分光を行った。

まず、Rb のセルの中に、ポンプ光を照射して光の吸収を飽和させる。そこに反対方向からプローブ光を照射すると、飽和している周波数で吸収が減る。このとき、レーザーの周波数と原子の共鳴周波数が一致しており、原子の速度は 0 となる。そして、プローブ光をフォトディテクターで検出して得られた信号から飽和吸収信号を観測する。

図 5 に観測した飽和吸収信号を示す。左側の信号が ^{87}Rb のもの、右側の信号が ^{85}Rb のものである。 ^{87}Rb の信号を拡大したものを図 6 に示す。今回は ^{87}Rb の、 $F'=2,3$ クロスオーバーにロックをした。その時のセルの様子を図 7 に示す。実験条件は、ポンプ光のパワーが 2.6mW 、プローブ光のパワーは 0.13mW で行った。また、セルの温度は、約 90°C に設定した。そして、波長計 (WS-6, High Finesse) の値をもとに、 $5S_{1/2}-6P_{3/2}$ 遷移の波長を $420.3031\text{nm}(\text{vac})$ と見積もった[5,6]。

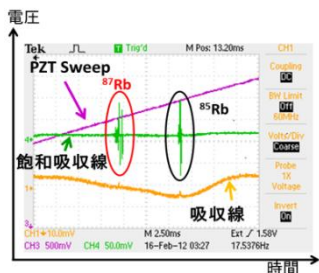


図 5. 飽和吸収信号

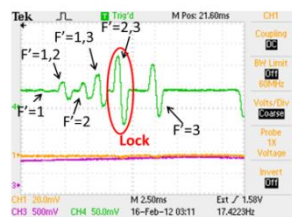


図 6. ^{87}Rb の飽和吸収信号



図 7. Rb のセルの様子

4 まとめと今後の展望

本研究では 420nm 外部共振器型光源を作成し、 $5S_{1/2}-6P_{3/2}$ 遷移と $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移の波長を観測し、それぞれ 420.3031nm と 421.6738nm と見積もった[5,6]。今後はまず、この光源の冷却効果を確認したいと考えている。前述のように、これまで利用していた遷移よりも線幅が狭くなっているためドップラー冷却限界が下がり、より温度を下げるができると考えられる。また、本来の目的である、光の再吸収が抑えられているかを確認する必要がある。そこで、現在の実験系の光双極子トラップ(ODT)中にこの光を照射し、冷却効果を見るとともに、密度の変化を確認する予定である。

5 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] A. S. Arnold, J. S. Wilson, and M.G. Boshier, "A simple extended-cavity diode laser," *Rev. Sci. Instrum.* **69** 1236 (1998).
- [4] C. J. Hawthorn, K. P. Weber, and R. E. Scholten, "Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam," *Rev. Sci. Instrum.* **72** 4477 (2001).
- [5] A.D. Shiner, A.A. Madej, P. Dubé and J.E. Bernard, "Absolute optical frequency measurement of saturated absorption lines in Rb near 422 nm", *Appl. Phys. B: Volume* **89**, 595 (2007).
- [6] NIST database(http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)によると、 ^{87}Rb の $5S_{1/2}-6P_{3/2}$ 遷移の共鳴波長は 420.29538nm(vac)であり、WS-6(High Finesse)を用いた今回の測定値(420.2376nm)と約 0.058nm だけ異なっている。この原因を確認するために、 $5S_{1/2}-6P_{1/2}$ 遷移の測定を行った。[5]に記載されている光周波数コムを用いた絶対周波数から波長を計算すると、この遷移の $5S_{1/2}-F''=2$ から $6P_{1/2}-F''=2$ 遷移の共鳴波長は 421.6737917nm(vac)である。実際にこの遷移の飽和吸収信号を今回の実験系で観測すると、波長は 421.6083nm(vac)であり、約 0.0655nm の差があった。このことから、今回波長の測定に用いた WS-6 には 0.0655nm のオフセットが乗っていると考え、前述のような値を見積もった。
- [7] Kazuhiro Hayasaka, "Frequency stabilization of an extended-cavity violet diode laser by resonant optical feedback", *Elsevier Optics Communications* **206**, 401 (2002).