

# $^{87}\text{Rb}$ 原子の 5S-6P 遷移を用いた CPT 共鳴に関する研究

岸本研究室 1513146 西山 透

## 1. 研究背景・目的

本研究室では、ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の連続的生成を目標としており、これを達成する技術要素の1つとして、Gray-Molasses 冷却という冷却手法を取り入れることが検討されている。

一般的な BEC の生成手順では、磁気光学トラップ(MOT)の後に圧縮 MOT を行う。しかしこれだと磁場勾配を変化させるため、連続性が失われてしまう。一方 Gray-Molasses 冷却を併用する場合は、MOT 磁場印加時でもその四重極磁場の中心近傍では磁場が十分小さいことを利用して冷却するため、連続性を失うことなく冷却を行うことが出来る可能性がある。この冷却法の特徴は冷却された原子を暗状態に落とすことで再加熱を防ぐため、位相空間密度の向上が期待できることにある。

本研究室では既に、 $^{87}\text{Rb}$ 原子の  $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$  遷移を用いた Gray-Molasses 冷却に成功している[1]。しかし、主量子数の異なる  $nS - (n+1)P$  遷移を用いた例はまだ報告されておらず、現在  $5S_{1/2} - 6P_{1/2}$  遷移を用いた Gray-Molasses 冷却が研究されているが、成功に至っていない。5S-5P より波長の短い 5S-6P 遷移を用いることが出来れば、吸収断面積は波長の二乗とブランチングレートに比例するためこれを抑えることができ、原子数密度の向上が期待できる。

本研究では 5S-6P 遷移を用いた Gray-Molasses 冷却の実現に向け、この遷移で暗状態を作ることが出来るのか検討を行った。

## 2. 原理

本研究では、コヒーレントポピュレーショントラッピング(CPT)という現象によって暗状態の観測を行う。

CPT とは、図 2.1 のような共通する励起準位を持つ  $\Lambda$  型の 2 つの吸収スペクトルを持つ原子に生じる現象であり、対応する 2 つのレーザー光(プローブ光とカップリング光)を照射するとき、これらの周波数差が 2 つの下準位間と非共鳴な条件下ではプローブ光は吸収されるのに対し、共鳴な条件下では図 2.2 のようにプローブ光は吸収されず、透過するという現象である。この原子と光が相互作用しなくなる状態は暗状態と呼ばれる。

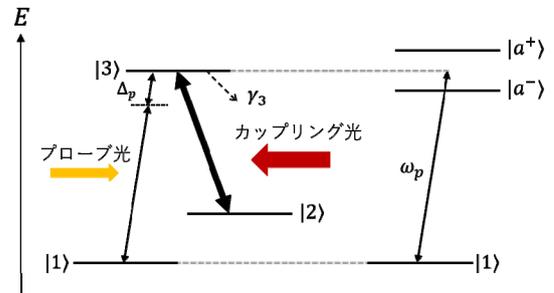


図 2.1  $\Lambda$ 型遷移を用いた CPT の概略図

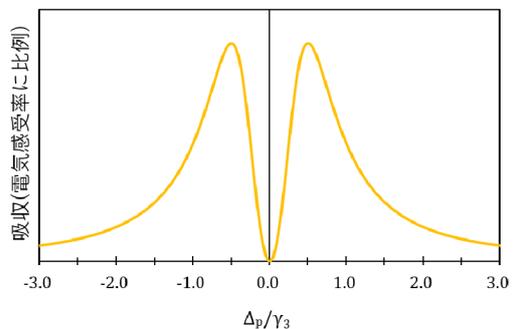


図 2.2 CPT 信号

### 3. 計算による予測

5S-6P 遷移における CPT では、5S-5P と異なり中間に複数の準位が存在し、緩和過程に影響してくる。これら中間準位がどのように CPT に影響するか、計算を行った。なお、計算は図 3.1 のように緩和に影響する複数の準位を中間準位として 1 つに簡略化してまとめ、行った。

計算は光学ブロッホ方程式を立て、プローブ光の吸収に比例する準位 |1〉 - |3〉間の密度行列を解いた。計算結果は図 3.2 のようになり、この結果から中間準位を考慮したほうが暗状態に落ちやすいことが分かった。

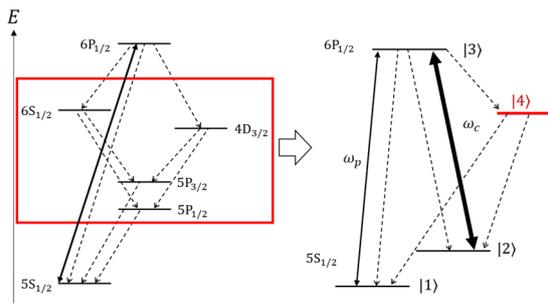


図 3.1 計算で用いたモデル

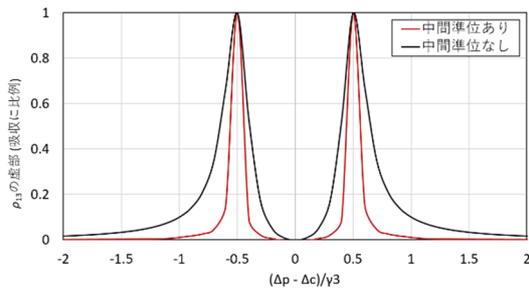


図 3.2 計算結果

### 4. 実験

実験は図 4.1 のような配置で行った。使用した準位を図 4.2 に示した。まず 5S-5P 遷移で CPT 信号を確認、実験系に問題がないことを確認した後、5S-6P 遷移にて CPT の観測を試みた。用いる光源はそれ

ぞれの遷移において 1 つで、どちらも  $F=1-F'=1$  にロックされた光を EOM (6.8GHz) に入射してサイドバンドを立て、キャリアをカップリング光として、片方のサイドバンドをプローブ光として用いた。また、サイドバンドの周波数掃引を行うため、EOM は外部クロックとしてファンクションジェネレータ (FG) を参照している。FG の発振周波数を掃引することで、サイドバンドを掃引する。EOM から出てきた光はウィンドウを介してファブリー・ペロー共振器にて観測し、キャリアとサイドバンドのパワー比の測定や FG の掃引によるサイドバンドの周波数変化の測定に使用した。Rb セルを通過した光は光検出器 (PD) によって検出し、CPT 信号を得た。

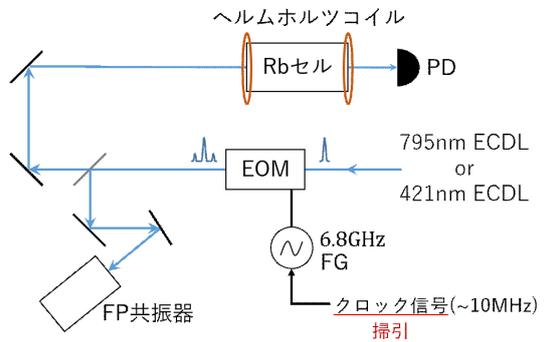


図 4.1 実験系

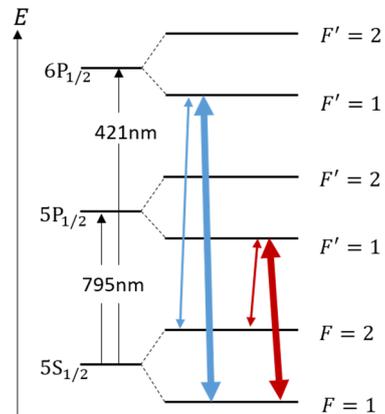


図 4.2 使用した  $^{87}\text{Rb}$  原子のエネルギー準位

## 5. 実験結果

### 5.1 CPT 信号の観測

5S-5P 遷移にて測定した CPT 信号を 図 5.1 に、5S-6P 遷移にて測定した CPT 信号を 図 5.1, 5.2 に示す。どちらも 図 4.2 で示すようにキャリアを  $F=1-F'=1$ 、サイドバンドを  $F=2-F'=1$  に合わせ、セルの温度は約  $47^{\circ}\text{C}$  にて行った。図 5.3, 5.4 より、5S-6P 遷移においても CPT 信号が確認できた。

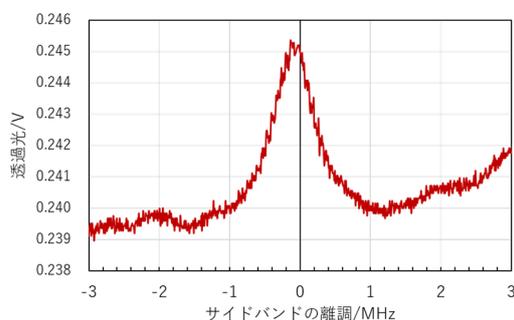


図 5.1 5S-5P での CPT 信号

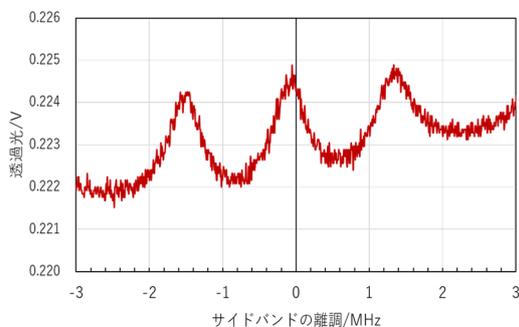


図 5.2 5S-5P での CPT 信号(磁場印加時)

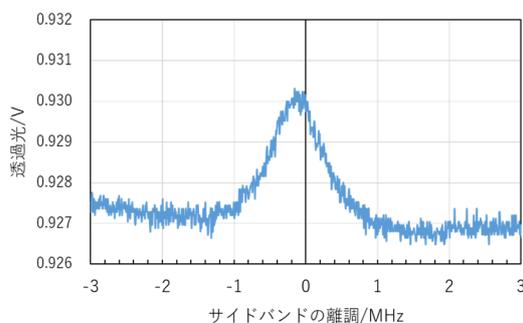


図 5.3 5S-6P での CPT 信号

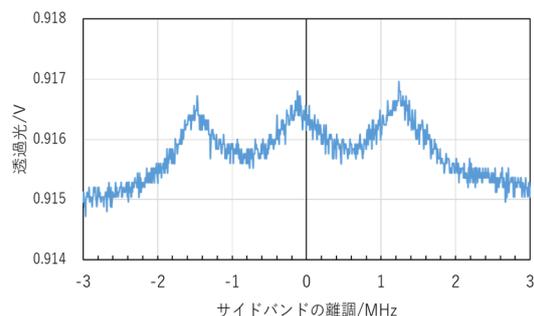


図 5.4 5S-6P での CPT 信号(磁場印加時)

### 5.2 CPT 信号強度の比較

5S-6P 遷移における CPT 信号がどれだけ立ちにくいのかを測定するために、キャリアとサイドバンドのパワー比・キャリア光強度・温度(原子数密度)を 5S-5P と 5S-6P で揃え、測定を行った。結果を表 5.1 に示す。このときのパワー比は 14.9%、キャリア光強度は  $41.4\text{mW}/\text{cm}^2$ 、温度は  $47^{\circ}\text{C}$  である。

表 5.1 信号強度の比較

遷移	信号高さ/mV
5S-6P	0.68
5S-5P	9.92

この結果より、同条件下では約 7% の信号強度しか得られないことが分かった。この原因として吸収断面積の違いが考えられる。1 節で述べたように吸収断面積は波長の二乗とブラントングレートに比例するため、5S-5P と 5S-6P の差は次のように見積もることができる。

$$\frac{\sigma_{5\text{S}-6\text{P}}}{\sigma_{5\text{S}-5\text{P}}} = \left(\frac{421\text{nm}}{795\text{nm}}\right)^2 \times \left(\frac{0.39\text{MHz}}{1.41\text{MHz}}\right) \approx 8\%$$

### 5.3 CPT 信号強度のガス圧依存性

5S-6P 遷移を用いた CPT 信号でも任意の大きさを得ることができるか確認するため、温度を変えることによってガス圧を変化させ、測定を行った。47°Cと 90°Cのときの CPT 信号をそれぞれ観測し、信号強度を比較した。結果を表 5.2 に示す。なお、温度と蒸気圧の関係は文献[2]を参照した。

表 5.2 CPT 信号のガス圧依存性[2]

温度/°C	蒸気圧/Torr	信号高さ/mV
47	$4.0 \times 10^{-6}$	0.68
90	$0.9 \times 10^{-4}$	1.58

結果より、ガス圧を 22.5 倍にすると 2.3 倍の信号強度が得られることが分かる。これも 5.2 節同様、吸収断面積が違うことによる結果だと考えられる。吸収断面積と原子数密度、蒸気圧は以下のような関係であるから、

$$\sigma(\omega) \propto \text{原子数密度}^{2/3} \propto \text{蒸気圧}^{2/3}$$

$22.5^{2/3} \approx 8$ 倍となり、これ以外にも信号強度が変化する要因がある可能性があるが、ガス圧の変化によって 5S-6P でも大きい CPT 信号強度が得られることがわかる。また、これらの原子数密度の条件では、線幅の大きな変化は見られていない。

### 6. まとめと今後の展望

本研究では、5S-6P 遷移を用いた CPT 信号の観測に初めて成功した。また、5S-6P 遷移では波長が短くなる分、CPT 信号強度が小さくなるが、ガス圧を上げることで 5S-6P でも大きい CPT 信号の強度を得られることが分かった。

これらの結果は 5S-6P 遷移でも暗状態の形成が可能であることを示しており、この遷移を用いた Gray-Molasses 冷却が可能であることを示唆している。

今回観測した CPT 現象は、周波数基準として用いられる原子時計への応用として非常に精力的に研究がなされている。そのため、nS-nP 系と比較した nS-(n+1)P 系における線幅の評価も重要と考えており、今後は CPT 信号の線幅の各パラメータ依存性の評価を行っていききたい。

### 7. 参考文献

- [1] 中村貴紀(2015)平成 27 年度卒業論文
- [2] Steck(2003)Rubidium 87 D Line Data
- [3] Michael Fleischhauer, Rev. Mod. Phys. **77**, 633 (2005)