

# $^{87}\text{Rb}$ 原子のための誘導ラマン遷移用光源の開発

情報理工学域 物理工学プログラム 岸本研究室

1710006 秋山匡功

## 1. 研究背景と目的

本研究では、 $^{87}\text{Rb}$ において $5S_{1/2}$ 基底状態の  $F=1$  と  $F=2$  の間での $5P_{1/2}$ 励起状態を介した誘導ラマン遷移用 795nm 光源の開発を目的とする。本研究室は $^{87}\text{Rb}$ を用いたボースアインシュタイン凝縮体(Bose-Einstein Condensates : BEC)の連続生成を目的としていて、その目的の中で原子の冷却やコヒーレントな内部状態操作がポイントになっている。そのためには、二つの位相が同期された波長の光が必要である。方法としてはいくつか存在するが、これを一つの光源で解決するために今回は、電気光学変調機 (Electro Optical Modulator ,EOM)を用いて周波数変調をかけることで、効率的なサイドバンド生成により目標の実現を目指す。

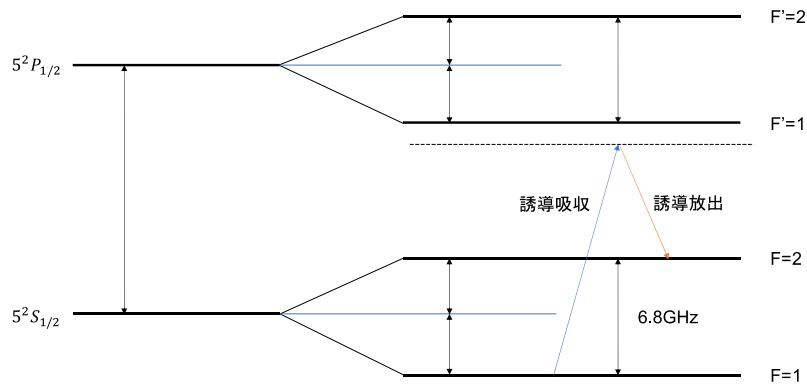


図1 エネルギー準位図[1]

原子を冷却する一般的な手法としてドップラー冷却が存在する。このドップラー冷却には原子系の温度を下げられる限界、つまり冷却限界温度が存在している。原子をドップラー冷却限界温度以下にするにはいくつかの方法があるが、その一つにラマン冷却という手法がありその原理になっているのが誘導ラマン遷移である。冷却原子に対して誘導放出光と誘導吸収光の二つをパルス的に逆の方向から照射し、それらの光はエネルギー準位図で見ると次のように原子を移動させる。原子に誘導吸収光を吸収させ、誘導放出光を放出させることにより  $F=1 \rightarrow F=2$  間に誘導ラマン遷移が起こる。つまり、誘導ラマン遷移には光が二つ必要でありこれらを同一光源で解決することを本研究の目的としている。そのため光源から出ている光に対して周波数変調をかけることでサイドバンドを生成し、キャリア光に追加してサイドバンド光というもう一つの光を生成する。

## 2. 周波数変調

本実験では周波数に変調をかけるため電気光学変調器 (EOM) を使用している。EOM は電気光学効果を示す結晶を用いており、結晶に交流電圧を印加することで屈折率を変化させ、レーザー光を通すことでレーザー光の位相や周波数を変調している。その変調されたレーザー光はもともとの周波数 $\omega$ の他に、サイドバンドと呼ばれる成分 $\omega + \omega_m$ 、 $\omega - \omega_m$ が形成される。本実験では 6.8GHz のサイドバンドの生成を目的としているため、ここでいう $\omega + 6.8\text{GHz}$ 、 $\omega - 6.8\text{GHz}$ のサイドバンド成分の形成を考えている。

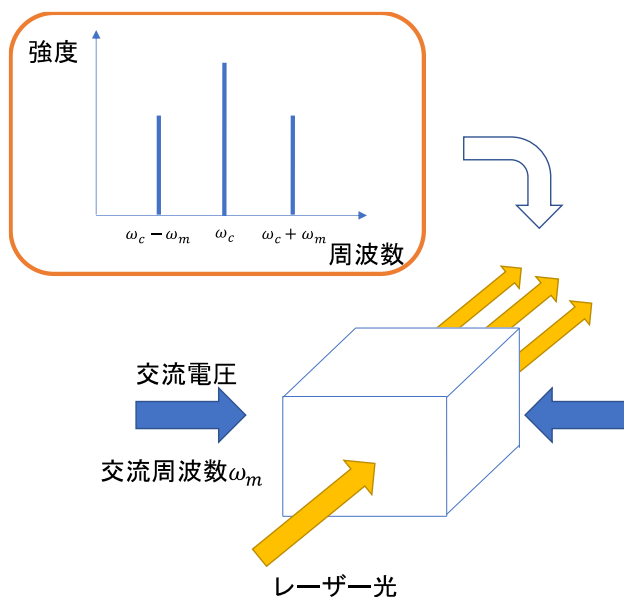


図2 EOM の仕組み

EOM を用いて周波数変調を行うには、EOM の結晶に高い電圧を加える必要がある。今回の実験で用いた EOM はファイバーEOM と呼ばれるもので iXblue 社の NIR-MPX800-LN-10-00-P-P-FA-FA を使用した。

ファイバーEOM の特徴としては通常の EOM と比較して、結晶が小さく周波数変調を行うのに必要な電圧が少なく済むという特徴がある。また、それに伴い、マイクロ波領域での変調が容易なため、通常の EOM と異なり高周波の変調をかけられることもあり、本実験で使用をする。今回の実験の目的は 6.8GHz のサイドバンドの生成なので高周波ということでファイバーEOM を使用した。

マイクロ波源で EOM に電圧をかけるが、マイクロ波の強度の見積りを行った。EOM のデータシートより EOM へインプットできるマイクロ波強度の最大値が 28dBm であった。また、ドライバのデータシートよりドライバによる増幅が 31dB と判断した。これらのデータからマイクロ波源から出力できる最大のマイクロ波強度を計算した。

$$31\text{dBm} = 10\log_{10}\left(\frac{28\text{dBm}}{x}\right) \quad (1)$$

$$x \cong -3\text{dBm}$$

(1)式よりマイクロ波源から EOM にかけるマイクロ波強度の最大値は-3dBm と見積もった。よって、-15dBm から強度を上げていき実験を行った。-15dBm ではキャリアに対して 20%程度のサイドバンドが確認でき、-10dBm ではキャリアに対して 40%程度のサイドバンドが確認できた。-8dBm では 120%程度、-6dBm では 200~300%程度、-5.0dBm ではサイドバンドの判別が難しい状態となっていることが確認できた。これより、サイドバンドの確認をするのにマイクロ波源の強度は-10dBm が良いと判断した。

### 3. 実験結果

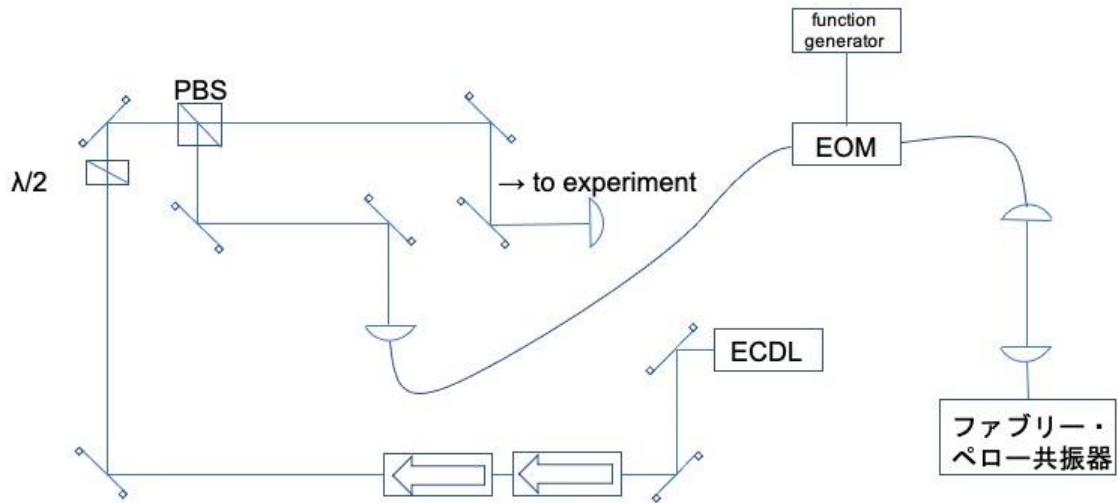


図3 実験系

本実験の実験系は図3のようになっており、レーザーのキャリアに対するサイドバンド形成の様子を確認するために、研究室で作成したFSR(フリースペクトルレンジ)が1GHzであるファブリー・ペロー共振器を用いた。これにより、キャリア間が1GHzとわかる。

図4が実験により得られたグラフであり、このグラフでは1つのキャリアに対して6.8GHz離れた場所に+1次のサイドバンドが生成されていることがわかる。よって目的のサイドバンドが生成されたことが確認できた。しかし、ファブリー・ペロー共振器のPZT素子に送る電圧のレンジの関係で1つのキャリアに対してプラスマイナス1次の両方をまとめて観測することができなかった。そのため、マイナス1次のサイドバンドについて考える必要がある。

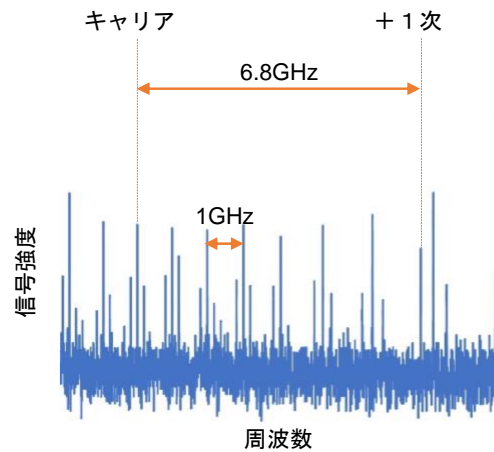


図4 サイドバンドの評価

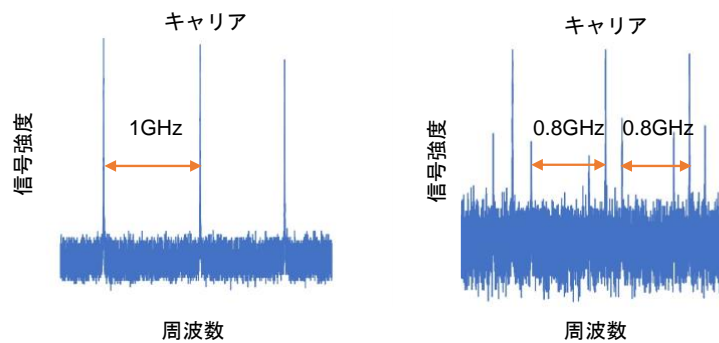


図5 -1次サイドバンドの評価

図5のように FSR が 1 GHz であるのに対してキャリアから-方向に 0.8GHz の位置でサイドバンドが確認できる。そして、それが周期的に繰り返されていることがわかった。このことからオシロスコープにプラスマイナス同時に見えずとも 1つのキャリアに対して 6.8GHz のサイドバンドが2つ生成されていることがわかる。

#### 4. まとめと今後の展望

本研究の目的は $^{87}\text{Rb}$ において $5S_{1/2}$ 基底状態の  $F=1$  と  $F=2$  の間での $5P_{1/2}$ 励起状態を介した誘導ラマン遷移用 795nm 光源の開発である。実験結果より目的のサイドバンド(6.8GHz)の生成は達成している。しかし、目的が誘導ラマン遷移に2つの光が必要で同一光源にしたいことであるのに対して、EOM で周波数変調をかけてサイドバンドを生成したが $\pm 1$ 次で生成されるためキャリア光と $\pm$ のサイドバンド光が2つで合計3つの光が生成されている。そのため、それを改善する今後の展望として、サイドバンドを1つにするため NLTL(Non-Linear-Transmission-Line)を用いて非対称なサイドバンドの生成を目指す。

そこで、1GHz までの帯域の NLTL を用いてデモ実験を行った。具体的には、EOM で 100MHz のサイドバンドを立てつつ現在ある NLTL で非対称なサイドバンドの生成を試みた。結果は図6のように非対称なサイドバンドの生成ができたため、6.8GHz の帯域においても可能であると考えている。

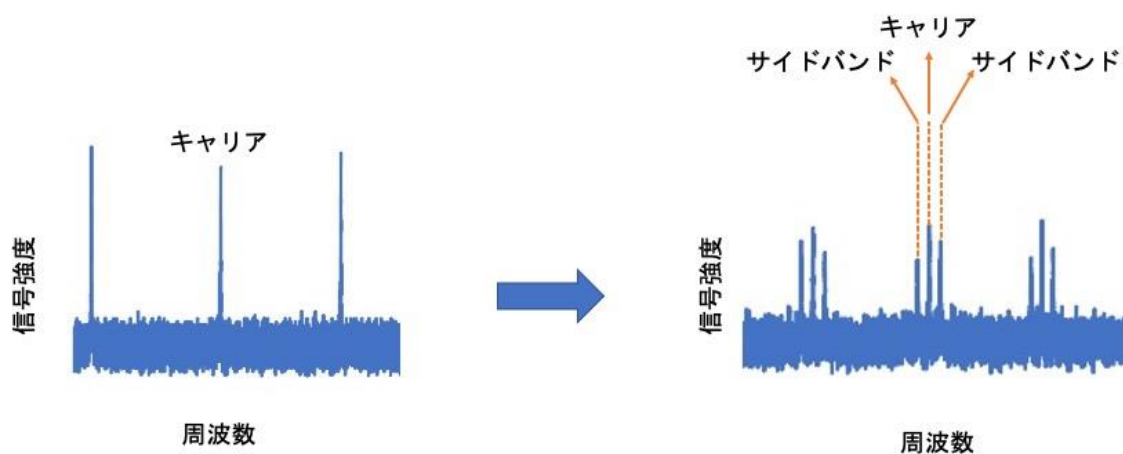


図6 100MHz での NLTL を用いたデモ実験

#### 5. 参考文献

- [1] Steck, Daniel A.(Los Alamos National Laboratory), “Rubidium 87 D Line Data” (2001).
- [2] C.J.FOOT, Atomic Physics, OXFORD UNIVERSITY PRESS(2005).
- [3] 岡本航, 室温原子を用いた  $^{87}\text{Rb}$  原子の特殊波長分光法, 電気通信大学 (2018).
- [4] 本田海斗,  $^{87}\text{Rb}$  原子の  $5S-6P$  遷移における光会合分光に向けて, 電気通信大学 (2018).
- [5] 久我隆弘, 量子工学, 朝倉書店 (2009).
- [6] 霜田光一, レーザー物理入門, 岩波書店 (2016).