

# Delay-line 法による周波数オフセットロックと線幅の評価

丹治研究室 高橋圭太

## 1 背景・目的

量子情報科学においては特殊な量子状態を用いることで、大幅な計算の高速化や暗号通信の安全性の大幅な向上が可能となることが示されてきた。また、量子計測と呼ばれる分野の研究も近年進んできている。そこで、量子もつれ状態などの特殊な量子状態を用いれば、従来の測定精度や感度の限界が打破できることが明らかになってきた。このような中で光の量子状態を光子単位で精密に制御することの必要性が増している。本研究の目的はこのような光の量子状態制御に用いる原子を磁気光学トラップ(MOT)により冷却・捕捉するためのレーザーの安定化である。ここで原子を用いる磁気光学トラップに用いるレーザーを安定化するためには delay-line 法による周波数オフセットロックを行った。

本実験で MOT を行う予定である  $^{87}\text{Rb}$  原子の超微細構造を図 1 に示す。図 1 に示した  $^{87}\text{Rb}$  の遷移周波数に対して MOT に用いるレーザーを安定化するために図 2 のような機構を作る。この時、 $^{87}\text{Rb}$  の励起準位の自然幅である 6 MHz 以下の線幅のレーザーを用いる必要がある。そこで、本研究ではまず自然幅である 6 MHz と比較し、周波数オフセットロックの前の線幅を測定することで安定化できるかどうかを評価した上で実際に安定化を行うことを目的とした。

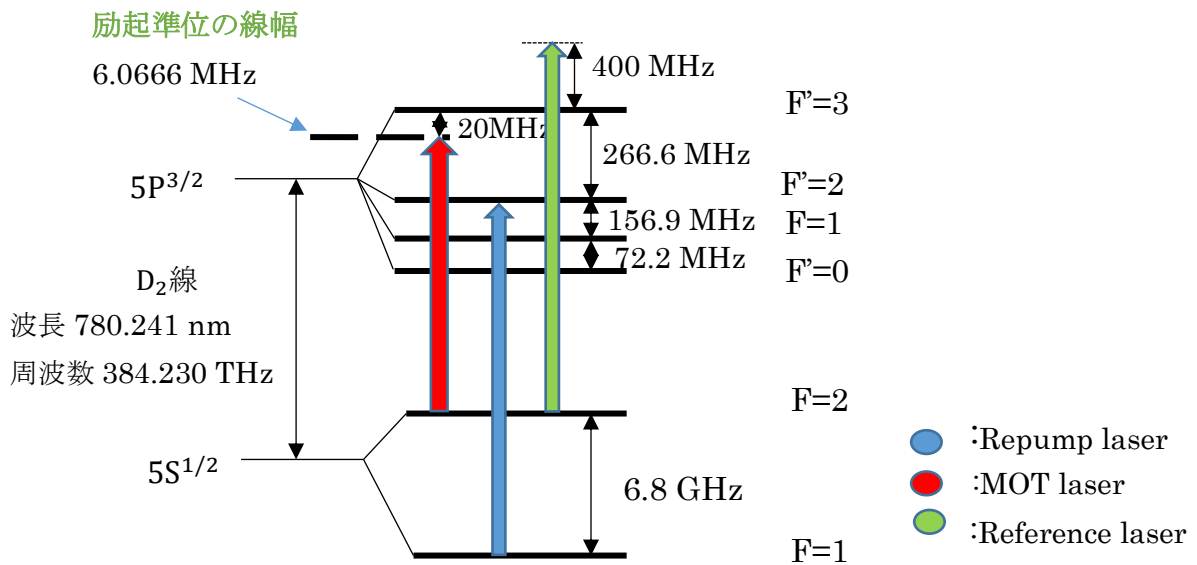


図 1  $^{87}\text{Rb}$  原子の超微細構造

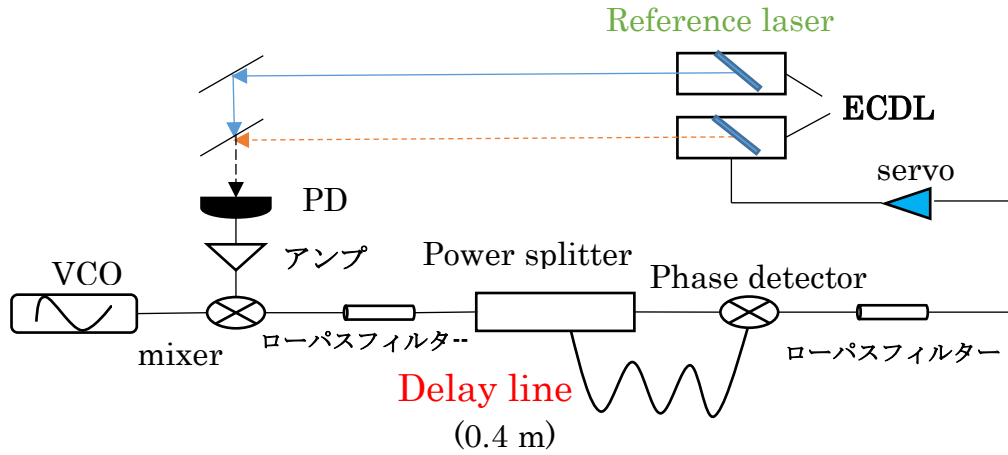


図 2 Delay-line 法

## 2 方法

まず、周波数オフセットロックによるレーザーの線幅を自己遅延ヘテロダイン法により観測した。Delay-line 法では基準となる reference 光と安定化したいレーザー光との間のビート信号を二つに分け、そのうち一方の信号を同軸ケーブルを用いて時間遅延させる。これにより、電気信号の間に位相差を作り出すことができる。その後、二つの信号を干渉させることでエラー信号を生成する。このエラー信号を用いて PI 制御によって 2 台のレーザーの周波数差を安定化させる。これにより既に原子の共鳴に対して安定化されている reference 光に対して MOT に用いる冷却光を安定化させる。まず、線幅の測定にするにあたり、実際に組んだ光学系を示す(図 3)。

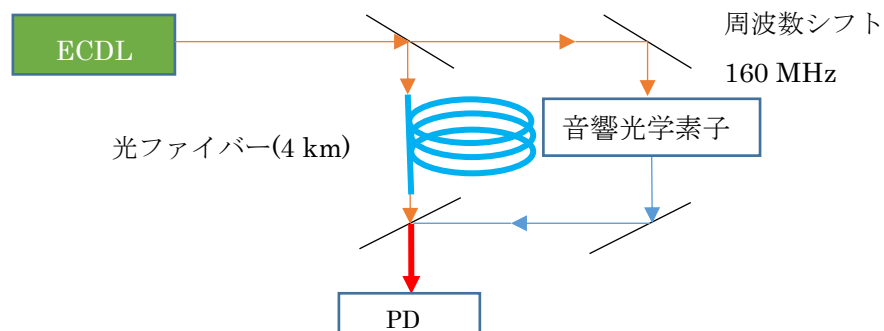


図 3 自己遅延ヘテロダイン法

実験で使用した長距離の光ファイバーを用いて、レーザー光のコヒーレンス時間よりも大きな時間遅延を与えることにより、二つのレーザー光の相関をなくすことができる。その結果、二つのレーザー光を重ね合わせることでビート信号を見ることができる。長距離 4 km の光ファイバーによる自己遅延ヘテロダイン法の分解能は以下の通りである。

$$\Delta\nu = \frac{c}{nL} = \frac{3.00 \times 10^8}{1.45 \times 4.00 \times 10^3} \approx 51.55 \text{ kHz}$$

次に、delay line に使用する同軸ケーブルの長さの計算を行った。

まず、reference laser と MOT laser の 二つのレーザーのビート信号を  $\cos(\omega_{BN}t)$  とした。

そのビート信号と VCO の出力信号である  $\cos(\omega_{vco}t)$  を mixer に入力すると

$$\begin{aligned} & \cos(\omega_{vco}t) \times \cos(\omega_{BN}t) \\ &= \frac{1}{2} \{ \cos(\omega_{vco} + \omega_{BN})t + \cos|\omega_{vco} - \omega_{BN}|t \} \end{aligned}$$

これより、 $\cos(\omega_{vco} + \omega_{BN})t$ 、 $\cos|\omega_{vco} - \omega_{BN}|t$  が出力される。ここで、ローパスフィルターを通すことで  $\cos|\omega_{vco} - \omega_{BN}|t$  のみの電気信号が得られる。この電気信号の振幅を  $A$  として計算する。その後 Splitter によって分けて、一方の信号を Delay-line に通し再び Phase detector で掛け合わせる。その結果、delay line による時間差を  $\tau$  とすると phase detector による出力は

$$\begin{aligned} & A \cos \omega t \times B \cos \omega(t + \tau) \\ &= \frac{AB}{2} [\cos \omega \tau + \cos \omega(2t + \tau)] \\ &= \frac{AB}{2} \cos \omega \tau \\ &= \frac{AB}{2} \cos |\omega_{BN} - \omega_{vco}| \tau \quad (\omega = |\omega_{BN} - \omega_{vco}|) \end{aligned}$$

VCO によってロックをかけるために、エラー信号の一周期を 500MHz とした。これより、遅延時間  $\tau$  は次のように計算できる。

$$\begin{aligned} |\omega_B - \omega_{vco} + 2\pi \times 500 \text{ MHz}| - |\omega_B - \omega_{vco}| &= \frac{2\pi}{\tau} \\ \tau &= \frac{1}{500 \text{ MHz}} = 2 \text{ ns} \end{aligned}$$

同軸ケーブルは 1m あたりの遅延時間が 5 ns である。そのため  $\tau = 2 \text{ ns}$  に対応する同軸ケーブルの長さ 0.4 m を使用した。

### 3 実験

#### 3.1 レーザー線幅評価

まず、自己遅延ヘテロダイン法によりロックをかけていない状態のレーザーの線幅を測定した。観測されるスペクトルの線幅は時間遅延させたレーザー光の線幅と周波数シフトさせたレーザー光の線幅の和となっている。実際にスペクトルアナライザによって測定されたスペクトルは図 3 になった。

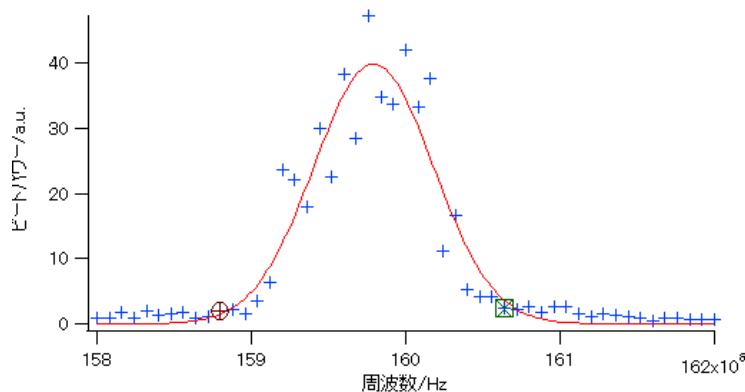


図 4 測定されたビート信号

フィッティングを図 4 のプロットに対して行い、フィッティングエラーを考慮すると線幅は約  $1550 \pm 100$  kHz であった。今回の線幅の測定には一つのレーザー光を二方向に分岐し、再び重ね合わせたものを用いた。そのため、レーザー光の線幅はスペクトルの線幅の  $1/2$  倍の  $750 \pm 50$  kHz であると求めることができる。この値は $^{87}\text{Rb}$ 原子の自然幅 6.066 MHz より十分小さい値であるため、ロックをかけることでレーザー光の安定化が可能であることがわかる。次に図 2 に示した delay-line 法を用いてレーザーのロックを試みた。この時観測されたエラー信号を図 4 に示す。

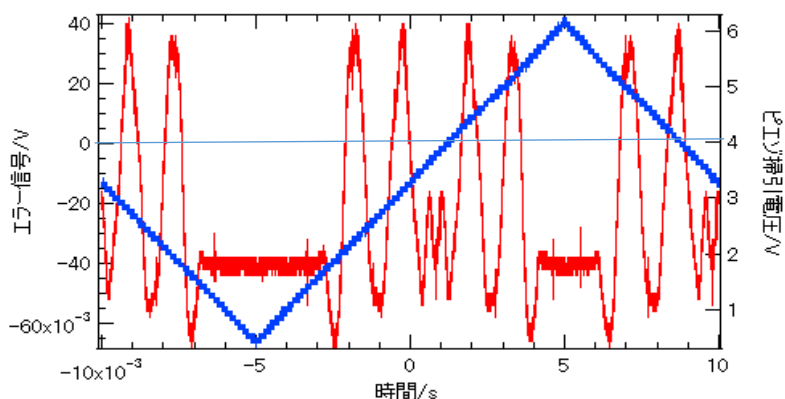


図 5 観測されたエラー信号

得られたエラー信号をピエゾコントローラーにフィードバックすることで周波数を安定化しようと試みたが作製した servo の不具合によりロックをかけることができなかった。

#### 4 まとめ・展望

MOT に用いるレーザー光の線幅の測定を行った。まずロックをしなかった時のレーザーの線幅は  $750 \pm 50$  kHz であった。これは原子の自然幅 6MHz より低い数値であるため線幅は十分に狭い線幅といえる。しかし、予想していた線幅の 100 kHz より大きい値になってしまった。レーザーがマルチモード発振していたことがその原因であると考えられる。また、オフセットロックした時の線幅は測定することができなかった。今後は servo の不具合を解消し、ロック時のレーザー線幅の測定を行う予定である。

#### 5 参考文献

- [1] Rubidium 87 D Line Data Daniel Adam Steck Oregon Center for Optics and Department of Physics, University of Oregon
- [2] U. Schunemann, a) H. Engler, R. Grimm, M. Weidemüller, b) and M. Zielonkowskic “Simple scheme for tunable frequency offset locking of two lasers” American Institute of Physics. @S0034-6748-99!00201-4# VOLUME 70(1999)