

^{39}K 安定化レーザーによる高フィネス光共振器の

^{87}Rb 原子に対する安定化の研究

丹治研究室 山口朋華

1 序論

量子情報科学においては少数光子に対する非線形な操作が重要であり、そのような操作を行う際には、光子と物質を強く相互作用させることが必要である。高フィネス光共振器中では、電磁場の強い閉じ込めにより、光子や真空場と物質を強く相互作用させることができるため、このような共振器は当該分野における標準的なツールの一つとして広く利用されている[1]。物質と場との結合を高度に活用するためには、結合強度を任意に操作できる機構の実現が不可欠である。原子を用いた共振器量子電気力学(QED)における光子と原子の結合強度は、共振器長やミラーの曲率半径および反射率などの光共振器のパラメータと、原子の位置により決定される。このうち、光共振器のパラメータは実験中に自由に変更することが困難である。そこで本研究では、共振器中の原子の位置による光子との結合強度の違いに着目し、原子の位置を共振波長以下の精度で操作することによる結合強度の操作を目指している。その実現のための第一歩として、 ^{87}Rb 原子の共鳴周波数に対して高フィネス光共振器の共振周波数の安定化をおこなう。この時、 ^{87}Rb 原子の共鳴周波数の光で共振器を安定化させると、入射する光が共振器中の原子に影響を及ぼしてしまう。そこで、本研究では、共振器ミラーの高反射帯域内かつ、 ^{87}Rb の共鳴からは十分に大きく離調された ^{39}K 原子

の D_2 線(波長 767 nm)にレーザーを安定化させ、このレーザーに対して高フィネス光共振器を安定化させる。

2 共振器の周波数安定化

本研究では、共振器を用いて光子と ^{87}Rb 原子の相互作用の増強を目指す。これを実現するためには共振器の共振周波数を ^{87}Rb 原子の遷移周波数に対して安定化させる必要がある。ここで利用する遷移は、 $5^2\text{S}_{1/2}$ 状態から $5^2\text{P}_{3/2}$ 状態への遷移(D_2 線; 波長 780 nm) である。

2.1 レーザーを用いた共振器の安定化

共振器を安定化させる方法として、 ^{87}Rb の遷移周波数に対して波長 780 nm のレーザー周波数を安定化させ、このレーザー周波数に対して共振器の共振周波数を安定化させる方法が考えられる。しかし、この方法では、共振器中に常に安定化用の波長 780 nm のレーザーが入射され、共振器中の原子に影響を及ぼしてしまう。つまり、 ^{87}Rb に共鳴するレーザーを直接安定化に用いることはできない。そこで、これまでは図 2.1 のように参照共振器を用いて共振器長の安定化をおこなっていた[2]。しかし、このシステムでは四回の安定化が必要となり、系全体の安定度が低くなるという問題点があった。

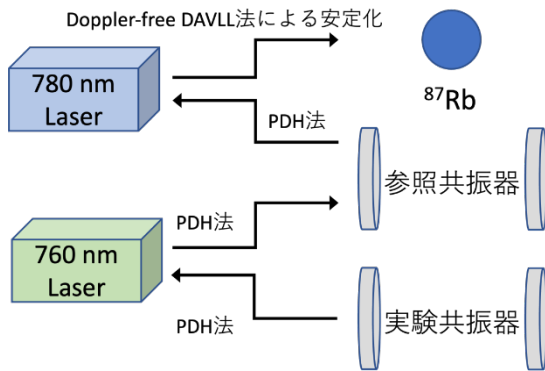


図 2.1 参照共振器を用いた共振器安定化

2.2 異原子種を用いた周波数安定化

前述で述べた、従来の安定化方式の問題を解決するために、本研究では、 ^{87}Rb とは異なる原子種を用いた共振器の安定化の方法を用いる。図 2.2 に示すように異原子種の遷移周波数に対してレーザー周波数を安定化させ、このレーザーに対して共振器の共振周波数を安定化させる。この方法を用いると、安定化が二回になり、系全体の安定度が向上する。

上述の方法で安定化を行うにあたり、安定化用レーザーが満たすべき条件が二つある。まず、この高フィネス光共振器を高い周波数安定度で安定化させるためには、安定化用レーザーの波長がミラーの高反射帯域内にある必要がある。本実験で使用する高フィネスミラーは 750~810 nm の範囲内が高反射帯域であるため、異原子種の共鳴波長がこの帯域内にある必要がある。また、前節でも述べたように、光共振器安定化用のレーザー光が共振器中の ^{87}Rb 原子に影響を及ぼしてはいけないためにレーザー光の波長は ^{87}Rb の共鳴波長とは十分離れている必要がある。以上のことを考慮した上で、利用可能な原子種を検討した結果、 ^{39}K の D_2 遷移 (波長 767 nm) がこれらの条件を満たすこ

とがわかったため、これにレーザーの周波数を安定化させる。

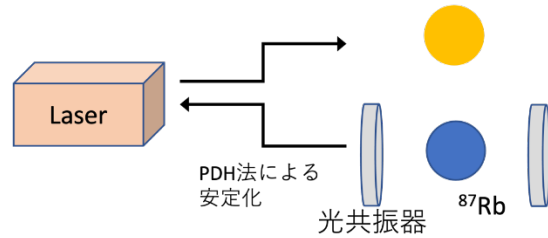


図 2.2 異原子種を用いた共振器安定化

2.3 必要な安定度

高フィネス光共振器の共振周波数は、 ^{87}Rb の自然幅 6 MHz より十分小さい周波数揺らぎで、 ^{87}Rb の遷移周波数に対して安定化されている必要がある。共振器に要求される波長 780 nm における周波数揺らぎが Δf_{780} であるとき、共振器を安定化させるための波長 767 nm のレーザーの周波数揺らぎ Δf_{767} に対する要請は、以下の式で表される。

$$\Delta f_{767} < \Delta f_{780} \times \frac{780 \text{ nm}}{767 \text{ nm}} \quad (2-1)$$

つまり、波長 767 nm のレーザーの周波数揺らぎの上限に対する要請は波長 780 nm に対するものとほぼ同等であることがわかる。

3 レーザーの周波数安定化

3.1 飽和吸収分光

図 3.1 のような光学系を構築し、カリウム原子の D_2 線スペクトルを観測した。probe 光と pump 光のパワー比を調整するためにビームサンプラー (BSF10-B, Thorlabs) を使い、probe 光にはさらに ND フィルター (ND10A, Thorlabs) を使用した。カリウム飽和ガスセルの両端には、ヒーター (HT10K,

Thorlabs)を巻き、温度コントローラー(TC300,Thorlabs)を用いて温度を 50°Cに安定化させた。カリウム飽和ガスセルの前後に 1/4 波長板を設置し、probe 光と pump 光の偏光をどちらも σ^+ 偏光となるようにした。フォトディテクター(PD; PDA8A2, Thorlabs)で probe 光を観測し、bias-tee (ZFBT-4R2GW-FT+, Mini-circuits)で取り出した DC 成分をオシロスコープで観測したものを図 3.2 に示す。ここではカリウム原子の $|4^2S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |4^2P_{3/2}, F'\rangle$ 遷移(A)、 $|4^2S_{1/2}, F = 1\rangle$ と $|4^2S_{1/2}, F = 2\rangle$ のクロスオーバー遷移(B)、及び $|4^2S_{1/2}, F = 1\rangle \rightarrow |4^2P_{3/2}, F'\rangle$ 遷移(C)の三つの遷移に対応するスペクトル構造が観測された。半値半幅は、A が 12.9 MHz、B が 15.9 MHz であった。

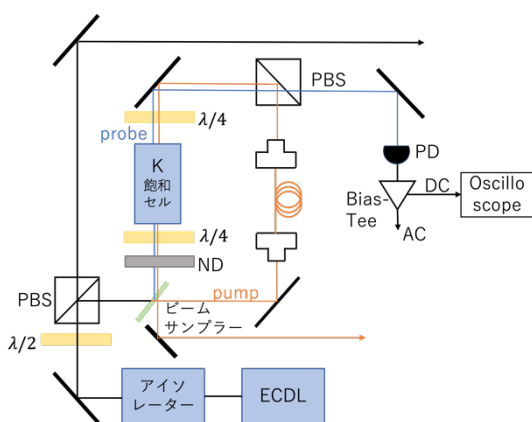


図 3.1 飽和吸収分光法の光学系

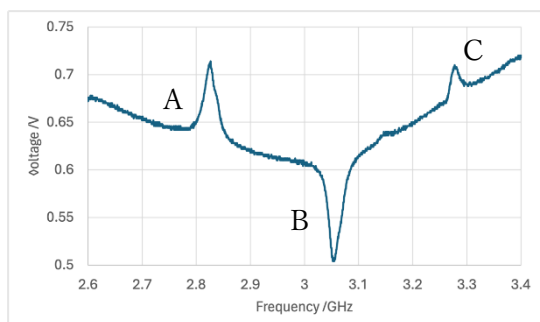


図 3.2 カリウムの飽和吸収スペクトル

3.2 Modulation transfer (MT) 法[3]

飽和吸収分光法を用いた誤差信号の生成法の一つである modulation transfer 法は、pump 光に電気光学変調器(EOM)を用いて加えた変調が、四光波混合[4]によって probe 光に移行することを利用した分光法である。

$$E = E_0 \sin \omega t \quad (3-1)$$

で表される pump 光を EOM に入射させ、角周波数 Ω で位相変調をかけることによりサイドバンドを立てる。EOM からの出射光は、

$$E = E_0 [\sin(\omega t + \beta \sin(\Omega t))] \quad (3-2)$$

となり、 n 次のベッセル関数 $J_n(\beta)$ を用いると、

$$E = E_0 \left[\sum_{n=0}^{\infty} J_n(\beta) \sin(\omega + n\Omega)t + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(\beta) \sin(\omega - n\Omega)t \right] \quad (3-3)$$

と表される。ここで、 β は変調指数を表す。 $\beta \ll 1$ の場合、高次の項は無視できるため、

$$E = E_0 [J_0(\beta) \sin \omega t + J_1(\beta) \sin(\omega + \Omega)t + J_{-1}(\beta) \sin(\omega - \Omega)t] \quad (3-4)$$

となる。

位相変調された pump 光とそれに対向する probe 光が飽和ガスセルに同軸に入射されると、四光波混合により pump 光の変調が移行した新しい光(signal 光)が probe 光と同じ方向に出射される。ここでは、probe 光は pump 光と同じ周波数を持つので、フォトディテクター(PD)で観測される probe 光と signal 光のビート信号は

$$S(\Omega) = \frac{c_0}{\sqrt{\Gamma^2 + \Omega^2}} J_0(\beta) J_1(\beta) \times \left[\begin{aligned} & \left(L_{-1} - L_{-\frac{1}{2}} + L_{\frac{1}{2}} - L_1 \right) \cos(\Omega t + \varphi) \\ & + \left(D_1 - D_{\frac{1}{2}} + D_{-\frac{1}{2}} - D_{-1} \right) \sin(\Omega t + \varphi) \end{aligned} \right] \quad (3-5)$$

となる。吸収を表すローレンツ関数 L_n と、分散を表すローレンツ関数 D_n はそれぞれ式(3-6)及び(3-7)で表される。

$$L_n = \frac{\Gamma^2}{\Gamma^2 + (\Delta - n\Omega)^2} \quad (3-6)$$

$$D_n = \frac{\Gamma^2(\Delta - n\Omega)^2}{\Gamma^2 + (\Delta - n\Omega)^2} \quad (3-7)$$

ただし、 φ は検出器位相、 c_0 は定数、 Γ は自然幅、 Δ は原子の共鳴線からの離調である。閉じた遷移においては、原子が遷移できる基底状態が限定されるので、四光波混合が効率的に起こり、この時に最も強い信号が得られる。また、変調移行はサブドップラー共鳴条件が満たされる時に強く起こり、誤差信号のバックグラウンドは0で平坦になる。

3.3 MT法による誤差信号の生成

実験のセットアップを図3.3に示す。ファイバーに通した pump 光をファイバーEOM(NIR-MPX800-0.1, exail)に入射させ、角周波数 Ω での位相変調によりサイドバンドを立てた。Bias-tee で分けられた PD からの信号の AC 成分は、まず 11 MHz のローパスフィルタ(LPF)(BLP-10.7+, Mini-circuits)で高周波成分が除去された後、アンプ(DCA-50-30, RF BAY)により増幅され、ミキサー(ZFM-3+, Mini-circuits)の RF ポートに入る。ミキサーの LO ポートには、ファンクションジェネレーター(FG)から

位相変調用の RF 信号と位相同期された信号を入力した。

誤差信号を生成するための最適なパラメータを見出すために、変調周波数と復調位相を変化させて測定を行った。この時の誤差信号を図3.4と図3.5にそれぞれ示す。これらの結果から、変調周波数が5 MHzで復調位相が30 degの時にS/N比が最大となることがわかったため、以降はこれらのパラメータを用いることとした。

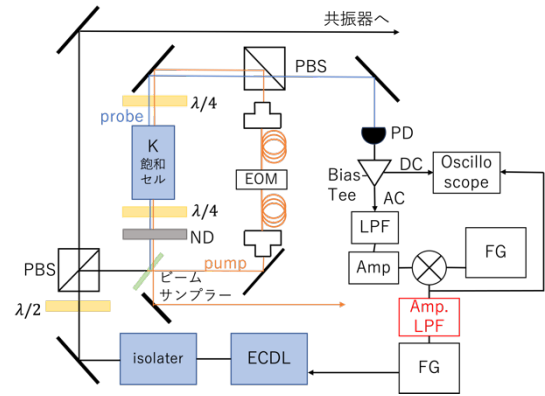


図 3.3 Modulation transfer 法の光学系

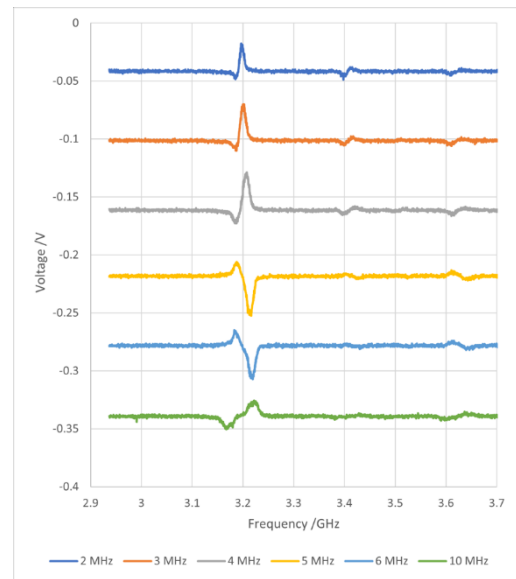


図 3.4 変調周波数による誤差信号の変化

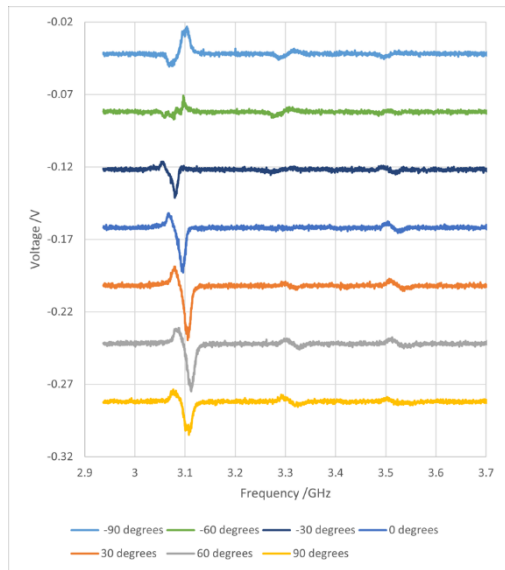


図 3.5 復調位相による誤差信号の変化

3.4 アンプ付きローパスフィルタ (LPF)の作製

誤差信号の S/N 比をさらに改善するために図 3.6 のようなアンプ付き LPF を自作した[5]。

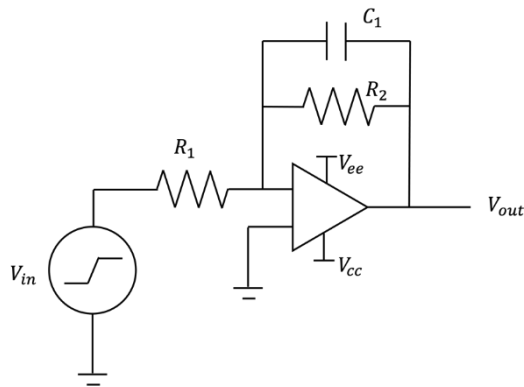


図 3.6 アンプ付き LPF の回路図

LPF のカットオフ周波数 f の設計値を、

$$f = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} = 1.4 \text{ kHz} \quad (3-8)$$

とし、パスバンドゲインは

$$\text{Gain} = \frac{R_2}{R_1} = 11 \quad (3-9)$$

とするために、抵抗 R_1 を $1 \text{ k}\Omega$ 、抵抗 R_2 を $11 \text{ k}\Omega$ 、コンデンサ C_1 を 14 nF とした。実際に作製したアンプ付き LPF の周波数特性を図 3.7 に示す。また、アンプ付き LPF を使用した際の誤差信号を図 3.8 に示す。

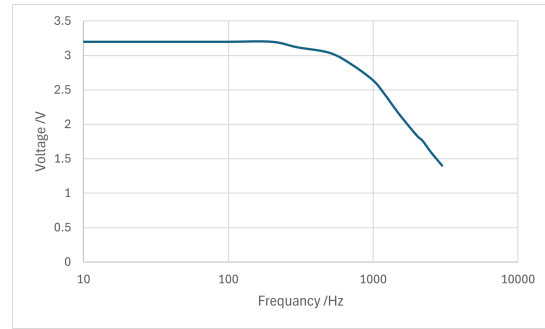


図 3.7 アンプ付き LPF の周波数特性

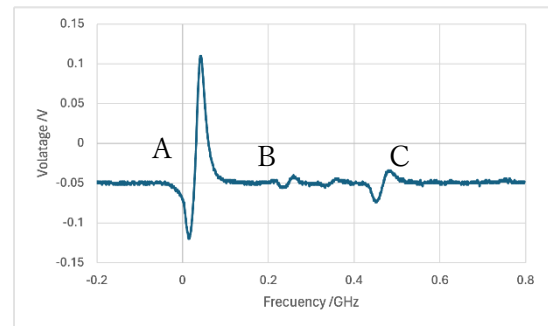


図 3.8 アンプ付き LPF を用いて作成した誤差信号

3.5 レーザー周波数の安定化

MT 法によって得られた $|4^2 S_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |4^2 P_{3/2}, F'\rangle$ 遷移(A)による誤差信号を PI 制御装置に入力し、レーザーにフィードバックを行うことで、レーザー周波数の安定化を行った。その際、ロック前後の誤差信号は図 3.9 のようになった。ここからロック後の周波数揺らぎを求める。

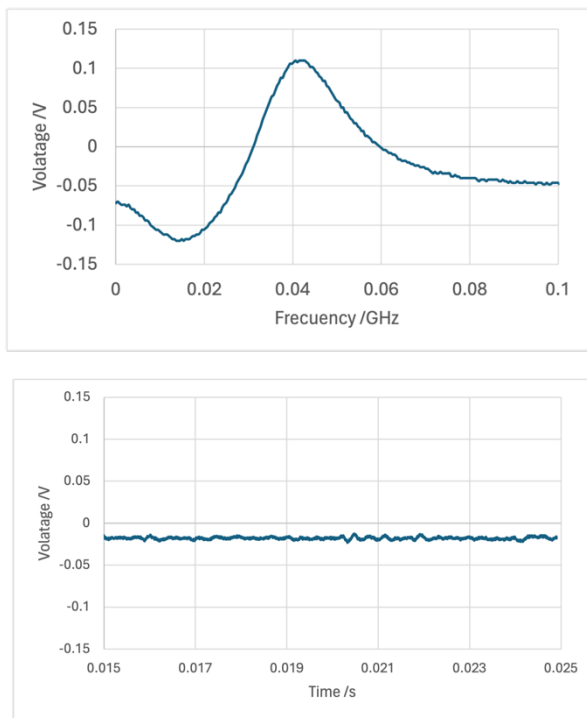


図 3.9 (上)ロック前の誤差信号
(下)ロック後の誤差信号

まず、ロック後の誤差信号の電圧値の標準偏差 ΔV は、

$$\begin{aligned} \Delta V &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \\ &= 0.00145 \\ &= 1.5 \text{ mV} \end{aligned} \quad (3-10)$$

である。この電圧揺らぎを飽和吸収スペクトルとロック前の誤差信号を用いて周波数揺らぎに変換する。図 3.2 に示した飽和吸収スペクトルのピーク(A)とディップ(B)の間の周波数が 230 MHz であることを用いると、

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= \frac{\Delta t_{p-p}}{\Delta t} \times 230 \text{ MHz} \times \frac{\Delta V}{\Delta V_{p-p}} \\ &= \frac{0.27 \text{ ms}}{2.2 \text{ ms}} \times 230 \text{ MHz} \times \frac{1.5 \text{ mV}}{0.23 \text{ V}} \\ &= 175.3 \text{ kHz} \end{aligned} \quad (3-11)$$

となった。ただし、 Δt はピーク(A)とディップ(B)との間の時間差、 ΔV_{p-p} 、 Δt_{p-p} はエラー信号の最大値を取る点と最小値を取る点の間の電圧差と時間差をそれぞれ表す。

以上の結果から、レーザーの周波数揺らぎが ^{87}Rb の自然幅である約 6 MHz より十分小さいという要請が満たせたといえる。

4 まとめと今後の展望

高フィネス光共振器による結合強度の増強と、対象物質の位置を共振波長以下の精度で操作することによる結合強度の操作の実現に向け、本研究では、高フィネス光共振器の周波数安定化に用いるレーザーの周波数を ^{39}K 原子の D_2 遷移に対して安定化させた。安定化後のレーザーの周波数揺らぎは 175 kHz であり、目標としていた 6 MHz よりも十分小さい周波数揺らぎを実現することができた。

今後は、本研究で周波数を安定化させたレーザーを用いて、共振器の周波数の安定化を行い、原子と光子の結合強度の制御を試みる。

参考文献

- [1] P. Forn-Díaz et al., Rev. Mod. Phys. 91, 025005 (2019)
- [2] 山崎 直樹 修士論文. 電気通信大学, (2019)
- [3] D J McCarron et al., Meas. Sci. Technol. 19 (2008) 105601
- [4] Raj R K. et al., 1980 Phys. Rev. Lett. 44 1251
- [5] TEXAS INSTRUMENTS “ローパス・フィルタ付き反転アンプ”