

# 高フィネス ULE 共振器を用いた波長 729nm の半導体レーザーの 狭窄化

中川研究室 中井 良輔

平成 30 年 3 月 2 日

## 1 序論

### 1.1 背景

1953 年に W. Paul らによって考案された RF トラップのようなイオントラップのなかに閉じ込められたイオンに対して、このドップラー冷却を行うことで、トラップされたイオンの運動をさらに抑制することができるようになった。しかし、ドップラー冷却で冷却することが出来る温度には限界があり、イオンの振動基底準位まで冷却することができない。トラップされたイオンを振動基底準位まで冷却するには、ドップラー冷却されたイオンに、さらにサイドバンド冷却というレーザー冷却を使う必要がある。ドップラー冷却とサイドバンド冷却を併用して極低温まで冷却されたイオンの吸収スペクトルは、ドップラー効果による線幅の広がり等が無視できる安定な遷移として知られ、原子時計や精密周波数計測に用いられる他、これらの冷却手順で極低温まで冷却されたイオンを、同じく極低温まで冷却した原子集団と混合することでより多様な物理の研究に応用できる。

サイドバンド冷却を行うためにはレーザーの波長より狭い領域に束縛されたイオンと、イオンをトラップする周波数より十分狭い線幅を持つレーザーが必要になる。この条件を満たすレーザーを実現するためには、安定且つ狭線幅な周波数基準を参照するように LD に電氣的なフィードバックを行うことでレーザー線幅を制御しなくてはならない。この制御を行うための電氣的な信号の取り出し方として、1983 年に提案された PDH 法が多く用いられる。

### 1.2 目的

我々の研究室では、極低温に冷却された  ${}^6\text{Li}$  原子と  ${}^{40}\text{Ca}^+$  イオンを用いた研究を行っており、この 2 つを極低温下で混合し、電荷移動や分子の生成過程といった化学反応の素過程を観測している。 ${}^{40}\text{Ca}^+$  イオンをドップラー冷却限界温度まで冷却するための手法として、サイドバンド冷却や極低温原子を用いた共同冷却の導入に成功しており、量子領域でのイオン-原子混合物理の解析に向けて進んでいる。

本実験の目的は、 ${}^{40}\text{Ca}^+$  イオンのサイドバンド冷却を行うための実験系の問題点の検出及び改善である。その目的のため、 ${}^{40}\text{Ca}^+$  イオンのサイドバンド冷却を行う際に必要になる波長 729nm の挟線幅レーザーを新たにもう一台作製し、既存の同波長挟線幅レーザーとのビートを取ることで双方の性能評価を行った。既存の 729nm 挟線幅レーザーは既にサイドバンド冷却に成功しているため、要求される最低限の性能を満たしていることは保証されているが、具体的な線幅については不明瞭であったため、同じ構造の挟線幅レーザーを追加することで、ビートによる性能評価を行い、改善点の有無を調べた。また、新規に作成する挟線幅レーザーは周波数標準にフィネス 100,000 以上の超高フィネス共振器を用いることで、さらなる性能向上を目指した。

## 2 原理

### 2.1 サイドバンド冷却

図1にサイドバンド冷却の概略図を示した。調和ポテンシャル中に束縛されたイオンのエネルギー準位は、イオンの内部状態とトラップ周波数  $\omega_r$  で量子化された振動状態の2つで表される。この状態のイオンの吸収スペクトルは本来の共鳴周波数  $\omega$  の他に、調和ポテンシャルのトラップ周波数の整数倍離れた周波数  $\omega \pm n\omega_r$  に共鳴を持つ。本来の共鳴周波数の遷移をキャリア遷移と呼ぶのに対して、後者を  $n$  次のサイドバンド遷移と呼ぶ。

イオンに負のサイドバンド遷移 (レッドサイドバンド) を起こす周波数  $\omega - \omega_r$  の光を吸収させると、イオンの振動状態を変化させつつ励起させることができる。その後自然放出により  $\hbar\omega$  のエネルギーを失うとすると、イオンは初期状態から振動準位間分のエネルギー  $\hbar\omega_r$  を失い、振動準位が一つ下がる。これを繰り返すことで調和ポテンシャルの振動基底状態まで冷却することがサイドバンド冷却の原理である。

サイドバンド冷却を行うためには、レッドサイドバンド遷移のみを選択的に起こすことができるような、中心周波数が安定した狭線幅のレーザーが必要となる。

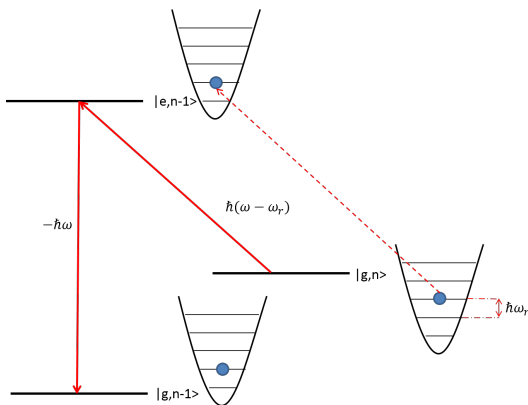


図 1: サイドバンド冷却の概略図

### 2.2 $\text{Ca}^+$ イオンの四重極遷移分光

先行研究として、 $\text{Ca}^+$  イオンのサイドバンド冷却に用いる  $S_{1/2} \rightarrow D_{5/2}$  遷移の分光を行った [4]。図2にその実験系の概略を記す。

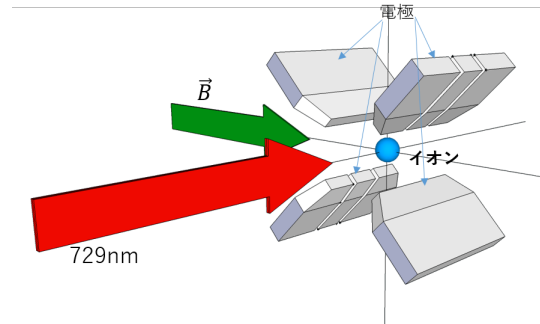


図 2: イオンの分光実験概略図

図2中の4つの電極はRFトラップのためのものであり、これにより単一イオンを捕獲している。外部から磁場を印加することでゼーマン分裂を促している。イオンに照射する波長729nmのレーザーの周波数を掃引しながら遷移確率を測定することで、図3のようなスペクトルを得た。

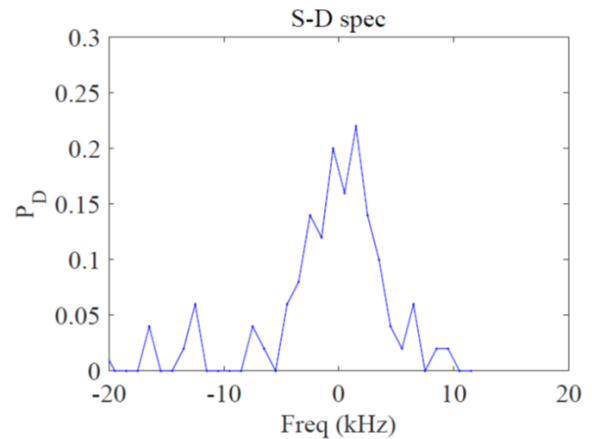


図 3: Ca イオンの分光スペクトル

図3は、 $S_{1/2}, m_F = -\frac{1}{2} \rightarrow D_{5/2}, m_F = -\frac{5}{2}$  のキャリア遷移を抜粋したものである。このスペクトルの半値幅は8kHzとなっており、本来の  $S_{1/2} \rightarrow D_{5/2}$  遷移の自然幅である1Hzと比べると大き

く広がっている。この原因として、用いたレーザーの線幅と磁場の揺らぎの2つが挙げられる。

### 2.3 PDH法による誤差信号作成

PDH法は周波数の基準となる試料(本研究では高フィネス ULE 共振器)の信号からレーザーロック等に用いられる誤差信号を生成する際に用いられる方法の一つである。PDH法を行う実験系を図4に記載した。

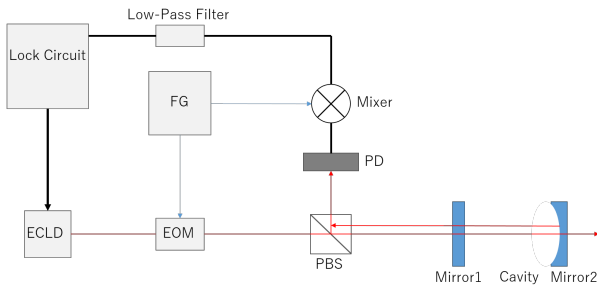


図4: PDH法の実験系

図4のミラー1,2の透過率を  $T_1, T_2$ 、反射率を  $R_1, R_2$  とすると、長さ  $l$  の共振器への入射光  $E_{in}$  と反射光  $E_{ref}$  の関係は次式のようにになる。

$$E_{ref} = \left[ \sqrt{R_1} - \frac{T_1 \sqrt{(1-L)R_2} e^{-2i\delta_l}}{1 - \sqrt{(1-L)R_1 R_2} e^{-2i\delta_l}} \right] E_{in} \quad (1)$$

ここで、 $L$  は光が共振器内を一往復した時のロス、 $\delta_l = \omega l/c$  は長さ  $l$  の距離を光が進んだ時の位相シフトである。また、振幅反射係数  $F(\omega)$  を次のように定義する。

$$F(\omega) \equiv \sqrt{R_1} - \frac{T_1 \sqrt{(1-L)R_2} e^{-2i\delta_l}}{1 - \sqrt{(1-L)R_1 R_2} e^{-2i\delta_l}}$$

共振器へと入射するレーザーの角周波数を  $\omega_0$  とすると、入射光  $E_{in}$  は、

$$E_{in} = E_0 e^{i\omega_0 t} \quad (2)$$

この光電場に対して電気光学変調器 (EOM) を用いて角周波数  $\Omega$  の位相変調を加え、フォトディテ

クタで信号を観測すると得られる信号は  $\Omega$  成分と  $2\Omega$  成分、DC 成分の3種に分けられる。PD信号に更にFGから生成した角周波数  $\Omega$  の信号  $V_0 \cos(\Omega t + \theta_0)$  をミキサーを用いて合成し、ローパスフィルタでDC成分のみを抽出することで次のようなエラー信号が得られる。

$$V_{error} \propto \Omega \cos \theta_0 \left. \frac{d|F(\omega)|^2}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (3)$$

式(3)より、エラー信号として振幅反射係数の微分が得られることがわかる。PDH法ではこのエラー信号をロック回路を通し、LDの発振電流へフィードバックを掛けることでレーザーの狭窄化を行う。

### 2.4 エラー信号のフィードバック回路

本研究では、PDH法で得られたエラー信号をLDの電流ドライバ、LD、PZT素子の、の三要素に対して送ることでレーザーの狭窄化を図った。電流ドライバのフィードバック機能だけでは、応答できるノイズの周波数に限界があるため、高い周波数のノイズに関してはLDへ直接フィードバックを返すことで対応した。また、PZT素子へのフィードバックは、ECLDの共振器長の揺らぎを補正し、中心周波数の安定性を高めるために行っている。エラー信号は図5のような微積分回路を通すことで、各素子にとって最適な周波数帯域の信号を増幅してフィードバックを行った。ただし、高周波数成分への補正を目的とするLDへの直接フィードバックについては、図5の回路では目的の周波数帯域に十分な利得を得られず、かつ位相遅れが増大してしまうため、エラー信号に対してハイパスフィルタのみを通した信号をフィードバックさせた。

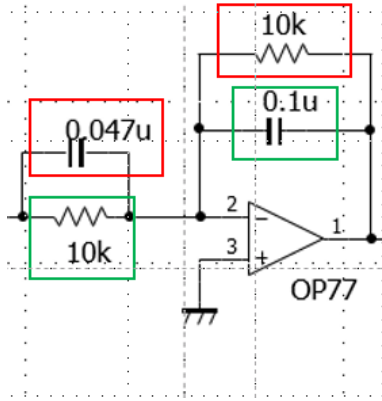


図 5: フィードバックのための微積分回路  
赤枠、緑枠はそれぞれ微分、積分応答

## 2.5 ビートによる線幅測定

狭線幅レーザーの線幅を測定する方法には、周波数が僅かに異なる光を重ねることで生じるビートから線幅を求める光ヘテロダイン法がある[?]. レーザーの周波数は、例えば今回波長 729nm のレーザーの場合だと 411THz と非常に高い周波数領域にあるため、一般的なスペクトラムアナライザで直接線幅を測定するといった事はできない。2つのレーザー  $\omega_1, \omega_2$  を重ね合わせるとそれらの和成分  $\omega_+ = \omega_1 + \omega_2$  と差成分  $\omega_- = |\omega_1 - \omega_2|$  が生じる。 $\omega_1 \approx \omega_2$  の場合は  $\omega_-$  が十分小さい周波数領域になるため、スペクトラムアナライザで計測することが可能になる。

2本のレーザーの周波数空間上の分布をそれぞれの半値幅  $\gamma_1, \gamma_2$  を用いて

$$E_1(\omega') = \frac{2\gamma_1}{(\omega' - \omega_1)^2 + \gamma_1^2}$$

$$E_2(\omega - \omega') = \frac{2\gamma_2}{\{(\omega - \omega') - \omega_2\}^2 + \gamma_2^2}$$

とおくと、スペクトラムアナライザで計測される信号は次の関数で書き表すことができる。

$$B(\omega) = \frac{2(\gamma_1 + \gamma_2)}{(\omega - \omega_-)^2 + (\gamma_1 + \gamma_2)^2} \quad (4)$$

このことから、スペクトラムアナライザで得られるビートの半値全幅は  $2(\gamma_1 + \gamma_2)$  となり、2本のレーザーの線幅の和が得られることがわかる。

光ヘテロダイン法には遅延ファイバー (長さ数 km) を用いた自己相関型と同じ波長のレーザーを2台用いた他己相関型の2つがある。他己相関型では双方のレーザーの線幅が異なる値をとるため、2本のレーザーのビート線幅だけでは各々の線幅まで読み取ることができない。一方で、遅延ファイバーを用いた自己相関型では、一つのレーザーだけでビート測定を行うことができるので、ビートの線幅は  $2\gamma$  となり、レーザーの線幅が一意に決まる。ただし、この方法は分解能  $\Delta\nu$  が遅延ファイバーによって制限され、ファイバー長  $L$ 、コア屈折率  $n$  とすると次式で表される。

$$\Delta\nu = \frac{c}{nL} \quad (5)$$

例えば、本研究で必要になるであろう 1kHz の分解能を得ようとする、コアの屈折率を 1.46 とすると (5) 式によると 205km もの長さのファイバーが必要となる。よって、今回は自己相関型での厳密な特定ではなく、既に研究室にある波長 729nm のレーザーとの他己相関を行い双方の線幅の概算を行うこととした。

## 2.6 ULE 共振器の温度安定化構造

真空度  $10^{-7}$ [torr] の真空中に図6のような構造で ULE 共振器を配置した。熱シールドの役割を担う 2重の銅箱の内、外側の銅箱に対してペルチエ素子による温度制御を行い、その輻射熱を ULE 共振器の温度制御に利用した。この構造の結果、ULE 共振器の温度揺らぎを数時間で 1mK 程度まで抑制することができた。

## 3 実験結果

### 3.1 ULE 共振器のゼロ点温度測定

波長 795nm のレーザーを用いて Rb の飽和吸収分光を行い、その信号と ULE 共振器の透過信

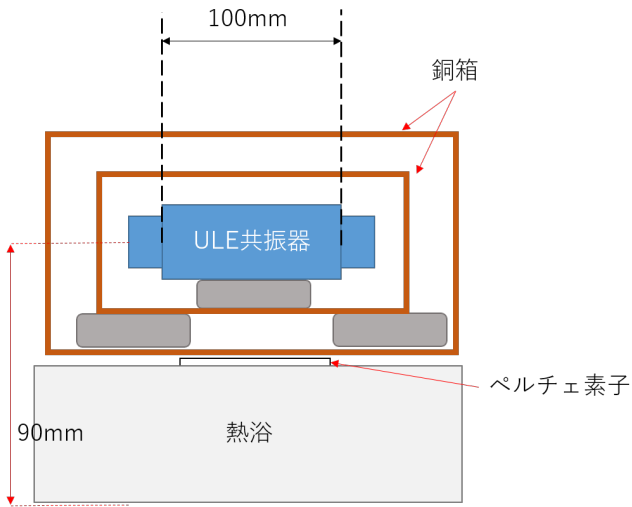


図 6: ULE 共振器の配置図

号の周波数差を ULE 共振器の温度を変化させて測定した (図 7)。

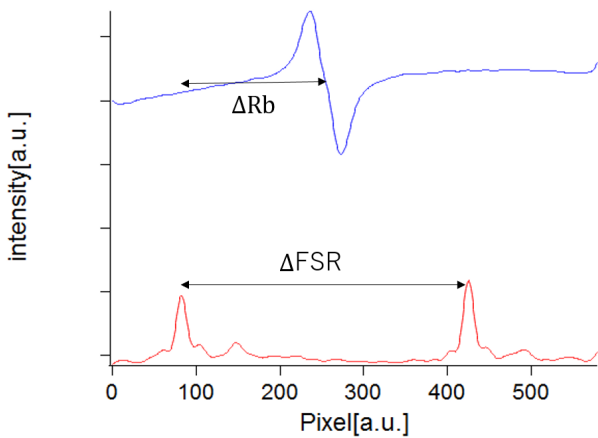


図 7: 平滑化処理を行った Rb と ULE スペクトル

この結果から図 8 を作製し、ゼロ点温度を求めたところ 33.03℃ となった。ULE 共振器の温度揺らぎが 1mK 程度であることから、中心周波数のドリフトは数時間に数 100Hz 程度と見積もることができた。この値は、サイドバンド冷却を行う上で問題のない値である。

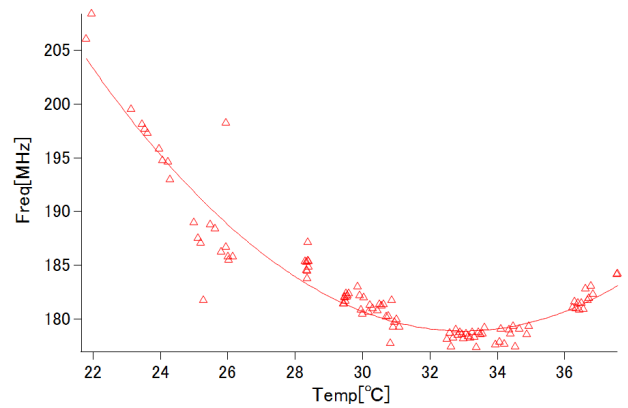


図 8: ゼロ点温度の測定結果

### 3.2 ULE 共振器のフィネス測定

リングダウン法により、今回用いた ULE 共振器のフィネスを測定した。図??に実測した ULE 共振器の減衰信号を記載する。赤のデータはレーザーのスイッチングに用いた AOM の TTL 信号の電圧値であり、 $V_{\text{switch}} = 0$  で ULE 共振器への入射光が消えたことを示している。青のデータの減衰部分に指数関数のフィッティングをかけて時定数を求めたところ、 $\tau_c = 26.3[\mu\text{s}]$  となった。(??) 式からフィネスを求めた結果、

$$F_c = \frac{\pi c \tau_c}{L} = 2.45 \times 10^5$$

という値が得られた。本 ULE 共振器の共振器長は 10cm であるため、ここから共振器の線幅が 6kHz とわかった。以上より、今回狭窄化を行ったレーザーの線幅は太くても 6kHz までは狭窄化がされているとわかった。

### 3.3 ビートによるレーザー線幅評価

図 9 に今回作製した波長 729nm ロックレーザーと以前から研究室で用いていた Moglabs 製の波長 729nm ロックレーザーのビート信号を添付する。図中青で描画したローレンツ関数フィッティングによると、このスペクトルの半値全幅は 1.5kHz となった。

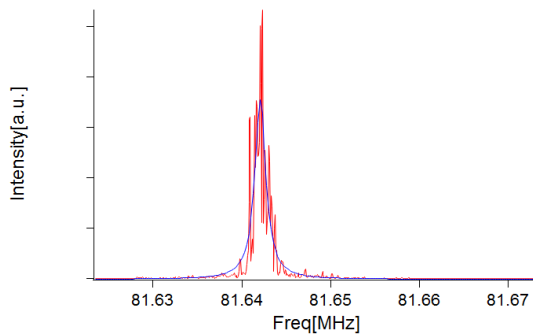


図 9: 双方のレーザーのビート測定

### 3.4 イオン分光による線幅測定との比較

先述の結果から、以前から用いていた波長 729nm のレーザー線幅は太くても 1kHz 程度であるということがわかった。すなわち、図 3 のスペクトル半値幅はレーザー以外の影響により 7kHz 程太っていることがわかった。レーザー線幅以外の外因のうち、最も大きな影響を及ぼしうる要素は外部磁場のゆらぎである。 $S_{1/2}, m_F = -\frac{1}{2} \rightarrow D_{5/2}, m_F = -\frac{5}{2}$  の準位間の共鳴周波数のゼーマンシフト量は磁場の大きさを  $B[\text{G}]$  とすると次のようになる。

$$\Delta\omega = 3.5 \times B[\text{MHz}] \quad (6)$$

6 式より、7kHz の周波数揺らぎを起こす磁場のゆらぎは、2mG と計算できた。磁場は定電流源からコイルに電流を流すことで発生させており、その電流と磁場の間では  $B = 3.1 \times I[\text{G}]$  の関係が成り立っているため、このときの電流のゆらぎは 0.6mA と予想される。この値は特別な安定化処置等を行っていない定電流源の揺らぎとしては十分起こりうる値である。このことから、定電流源の不安定さの影響が図 3 のスペクトルの拡がりに大きく影響していたことが確認できた。また、定電流源のゆらぎの他にも地磁気等の浮遊磁場の影響も少なからず受けている事が考えられるため、外部磁場の遮蔽についても行う

## 4 まとめと今後の展望

### 4.1 本研究のまとめ

高い温度安定性を持つ ULE 共振器をベースとした周波数基準の作製し、作製したレーザーの線幅を狭窄化した。2 台の狭線幅レーザーを用いることで、双方のレーザー線幅の凡その値を見積もり、過去の研究結果と照合することで磁場の不安定さという実験系の問題点を明確に示すことができた。

### 4.2 今後の展望

定電流源の安定化及び磁場の遮蔽を行い、実際に S-D 遷移のスペクトル線幅が狭くなっていることを確認し、サイドバンド冷却の効率向上を行いたい。また、今回狭窄化を行ったレーザーについても、フィードバック制御を最適化することでより狭線幅なレーザーを実現したい。

## 参考文献

- [1] W. Neuhauser et al., "Optical-Sideband Cooling of Visible Atom Cloud Confined in Parabolic Well" Phys. Rev. Lett. 41, 233(1978)
- [2] Eric D. Black, "An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization" , American Journal of Physics 69, 79 (2001)
- [3] G. C. Bjorklund et al., "Frequency Modulation (FM) Spectroscopy" Appl. Phys. B 32 145-152(1983)
- [4] 中井良輔 "カルシウムイオンの  $S_{1/2} - D_{5/2}$  遷移スペクトル測定及びキャリアとサイドバンドの特定" 卒業論文 電気通信大学