

# 準安定状態ヘリウム原子トラップの研究

量子・物質工学科 清水研究室

0313006 石田まり

## 1. 目的

本研究室では準安定状態ヘリウム原子を用いて量子反射の実験を行っている。ヘリウム原子を冷却・トラップしてボーズ・アインシュタイン状態 (BEC) の生成を目指しており、新たにディフレクターを作成した。それに伴い、高出力のレーザー光源が必要となった。

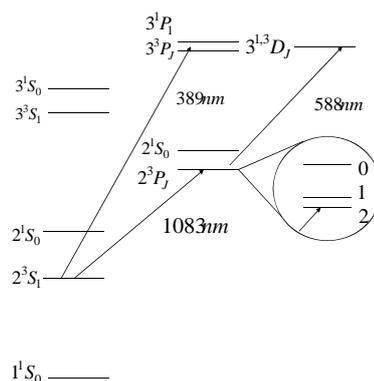
本実験では最大出力 300mW の高出力半導体外部型共振器レーザーの調整を行う。レーザーのモードを確認するためにファブリ・ペロー共振器を作成する。

まず He-Ne レーザーを用いて鏡の平行度を調整し、安定した波形が得られたところで光源を He\*用半導体レーザーに換え、発振周波数幅を見ながらレーザーの調整を行う。

## 2. 実験方法

### 2-1. 準安定状態ヘリウム原子の冷却

準安定ヘリウム原子(He\*)は  $2^3S$  と  $2^3P_1$  が準安定状態であり、レーザー冷却に用いる遷移は  $3^1S_1 \rightarrow 3^1P_2$  の閉じた遷移(遷移波長 1083nm)である。又、励起状態の寿命は  $\Gamma \sim 100\text{ns}$  (自然幅  $\gamma = 1.6\text{MHz}$ ) である。



ヘリウム原子のエネルギー準位図

### 2-2. ファブリ・ペロー共振器の設定

He\*用半導体レーザーの発振周波数  $\Delta f$  を He\*の自然幅  $\gamma = 1.6\text{MHz}$  のオーダーで観測するために、ファブリ・ペロー共振器を製作する。

ゆらぎと線幅の兼ね合いから、共振器長を  $L = 30\text{cm}$  とし、波長  $\lambda = 1083\text{nm}$  の光に対し、反射率  $R = 0.995$  の鏡を用いる。上記の条件から、共振器の自由スペクトルレンジ、フィネスは以下の値を得る。

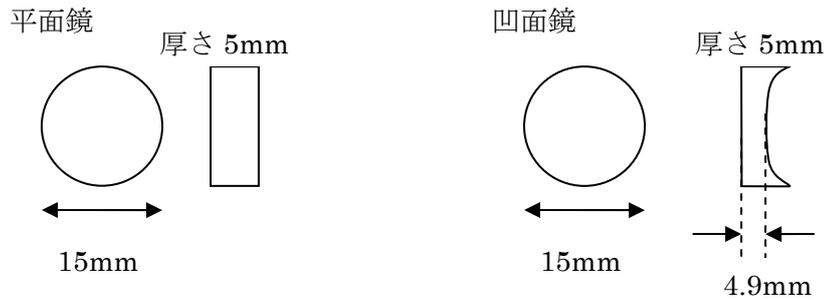
$$f_{FSR} = \frac{c}{2L} = 0.5\text{GHz}$$

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} = 600$$

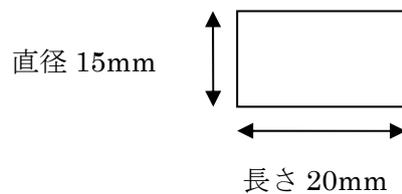
## 2-3. ファブリ・ペロー共振器の構成

### 2-3-1 鏡

平面鏡と凹面鏡(曲率半径 40cm)を用いる。(材質はともに BK7。使用波長  $\lambda = 1083\text{nm}$  に対し反射率  $R=0.995$  に設定。アライメントに用いる He-Ne レーザー [ $\lambda = 633\text{nm}$ ] に対する反射率は  $R=0.90$  以上に設定。)

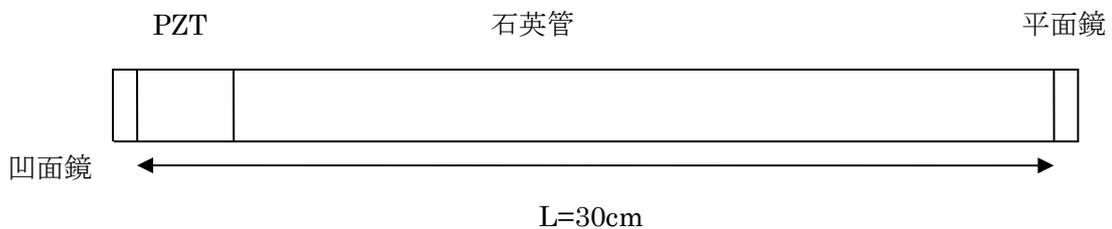


### 2-3-2 ピエゾ素子 (PZT)



電圧 100V をかけると  $11.6\mu\text{m}$  稼働する。

ファブリ・ペロー共振器の全体像は以下のようなになる。スペーサーに石英管を用いる。



## 2-4. ファブリ・ペロー共振器の特性

### 2-4-1 モードの安定性

以下の式を満たすとき、ファブリ・ペロー共振器は安定に共振する。

$$\text{安定性条件} \quad 0 \leq \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) \leq 1 \quad (L: \text{共振器長} \quad R: \text{鏡の曲率半径})$$

設定から  $L=30\text{cm}$ 、 $R_1=40\text{cm}$ 、 $R_2=\infty$  を代入すると

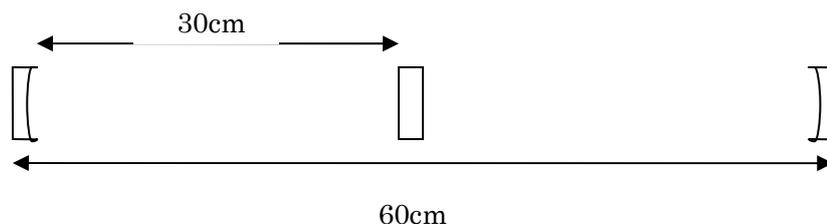
$$0 \leq 0.25 \leq 1 \quad \text{となり、安定に共振するといえる。}$$

## 2-4-2 横モード間隔 $\Delta \nu$

ファブリ・ペロー共振器の横モード間隔  $\Delta \nu$  は以下の式から求められる。

$$\Delta \nu = \frac{c}{2\pi L} \Delta(l+m) \left( \tan^{-1} \frac{z_2}{z_0} - \tan^{-1} \frac{z_1}{z_0} \right)$$

— $R_1=R=R_2=40\text{cm}$ 、 $L=60\text{cm}$  の共振器を仮定し、 $z_0$ を計算する。



$z_0$ は

$$z_0 = \sqrt{\frac{(2R-L)L}{4}} = 0.17\text{m} = 17\text{cm} \quad \text{と求められる。}$$

隣り合うモードの間隔を求めるので  $\Delta(l+m)=1$ 、条件から  $z_1=0$ 、 $z_2=30\text{cm}$ 、 $L=30\text{cm}$  を代入して、 $\Delta \nu = 170\text{MHz}$  と分かる。

## 2-5. モードマッチング

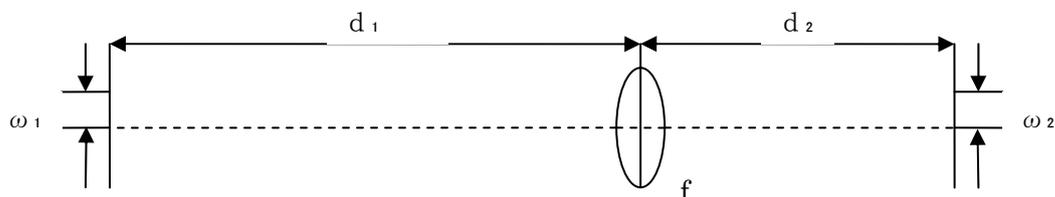
レンズを1つ使用してモードマッチングをすることを考える。

光源のビーム半径を  $\omega_1$ 、平面鏡上のビーム半径を  $\omega_2$  とすると、マッチングレンズ

$f$  は  $f_0 = \pi \frac{\omega_1 \omega_2}{\lambda}$  と計算される。光源とレンズの距離  $d_1$ 、レンズと平面鏡の距離  $d_2$  は以

下の式から求められる。

$$d_1 = f \left( 1 \pm \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \sqrt{1 - \frac{f_0^2}{f^2}} \quad d_2 = f \left( 1 \pm \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \sqrt{1 - \frac{f_0^2}{f^2}}$$



## 2-6. アライメント

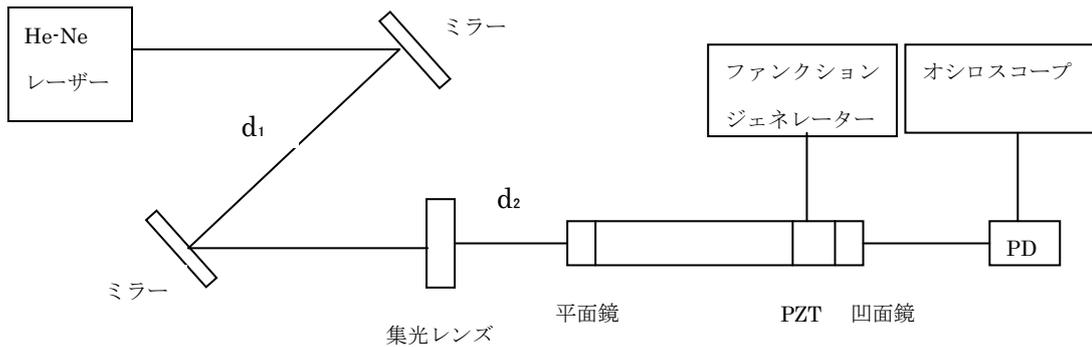
He-Ne レーザー ( $\lambda = 633\text{nm}$ ) を用いて、鏡の平行度を調整する。各ビーム半径、光源とレンズ、レンズと平面鏡の距離は以下に示す通りである。

$$\omega_1 = 0.24 \text{ mm} \qquad \omega_2 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}} = 0.19 \text{ mm}$$

$$f_0 = \pi \frac{\omega_1 \omega_2}{\lambda} = 23.3 \text{ cm} \qquad f = 30 \text{ cm}$$

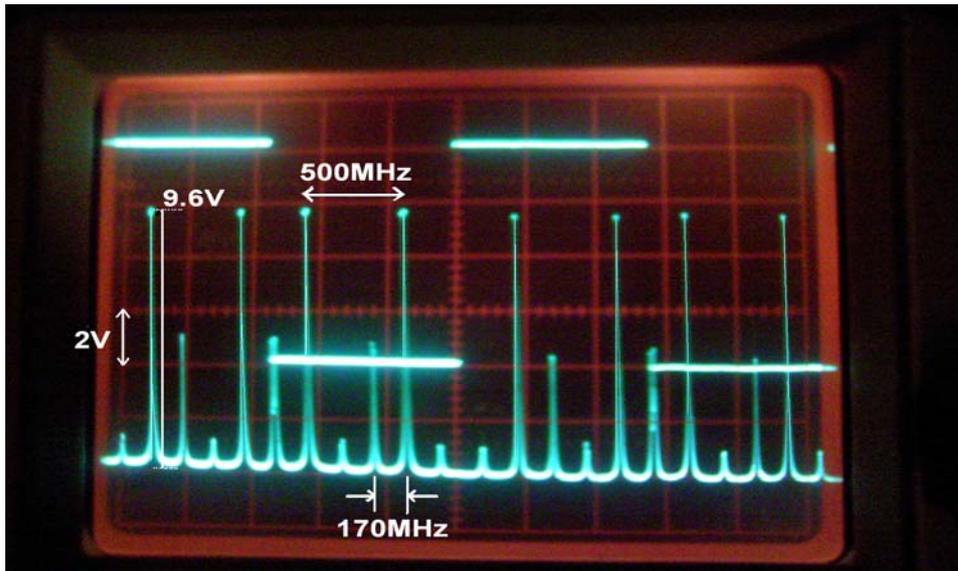
$$d_1 = 54 \text{ cm} \qquad d_2 = 44 \text{ cm}$$

求めた値に従って実験装置を配置した。



### 3 結果

ファブリ・ペロー共振器の鏡の平行度を調整し、以下の信号を得た。



自由スペクトルレンジ 500MHz に対し、170MHz の横モードが出ていることがわかる。

### 4 今後の課題

得られた信号には横モードが出ているので、さらに調整を行いシングルモードで共振するようにする。シングルモードになったら光源を He 用半導体レーザーに換え、レーザーの発振周波数幅を観測する。