

トランスファー共振器を用いた波長 1013nm レーザーの周波数安定化

中川研究室 学部 4 年 石橋裕生

1 序章

1.1 研究背景

現在、量子多体系に関する研究が世界で盛んに行われている。量子多体系の解析を古典計算機で行う場合、原子数の増加により必要となる計算機の性能や解析に要する時間は指数関数的に増大する問題点があった。この問題を解決するため、計算機自体に量子力学の法則に準ずる原子を用いて、これらの原子を実際に並べることで古典計算機より正確な計算や解析が行えることが提唱された [1]。これを量子シミュレーションと言い、量子シミュレーションを行うものを量子シミュレータという。中川研究室では、中性原子ルビジウムのリュードベリ状態を用いた量子シミュレータの開発が行われている。リュードベリ状態とは、原子内の電子が主量子数 n に遷移した状態のことを指しており、長距離における相互作用が強力になることから量子もつれ状態の解析に重要な役割を果たすと考えられている [2]。

1.2 本研究の目的

これまで、リュードベリ状態への励起には波長 780nm と波長 480nm レーザーを使用してエネルギー準位 $5P_{3/2}$ を中間準位としていたが、波長 480nm レーザーの出力が低く、シミュレーションで取り扱う粒子数を増やすことができないという欠点が存在していた。そのため波長 420nm レーザーと波長 1013nm レーザーを使用して、エネルギー準位 $6P_{3/2}$ を中間準位としてリュードベリ状態に励起することを目標としている。本研究では、すでに安定化が達成されている波長 420nm レーザーの安定度をトランスファー共振器を用いて波長 1013nm レーザーの周波数を安定化することを目標としている。

2 トランスファー共振器による安定化

今回、波長 1013nm レーザーの周波数を安定化する方法としてトランスファー共振器を用いた。トランスファー共振器とは、周波数を安定化したレーザーを利用して共振器の共振器長を安定化を行い、それ

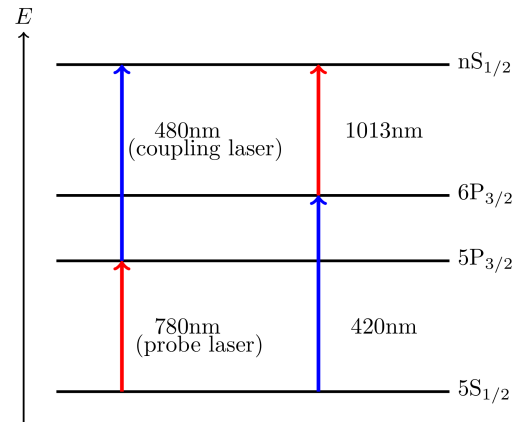


図 1: ルビジウム原子をリュードベリ状態へ励起する際のエネルギー準位図

を用いることでもう一方のレーザーの周波数を安定化するものである [3]。今回用いる共振器は、すでに周波数を安定化した波長 420nm レーザーを用いて共振器長を安定化している。これを用いて波長 1013nm レーザーの周波数を安定化する。

2.1 縦モード、横モードの周波数間隔

今回、共振器からの透過光の観測や解析を行うにあたって、縦モードと横モードの周波数間隔を見積もった。波数 k について、 c を光速、 ν を周波数、 n を屈折率、 L を共振器長としたときに $k = \frac{2\pi\nu n}{c}$ で表せることからモード-モード間における周波数間隔について、

$$\nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2nL} \quad (1)$$

と表すことができる。これを縦モード周波数間隔 (FSR) という。また、 $k = 2\pi\nu n/c$ を用いて gaussian beam における 2 つの自由度 l, m の和の変化分 $\Delta(l+m)$ に基づく共振周波数の変化 $\Delta\nu$ は、

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

で表すことができる。これを横モード共振周波数と言う。式 (2) における z_1, z_2 は図 2 より、それぞれの球面鏡の座標を表しており、 z_0 はレイリー長を表している。今回使用した共振器は、共振器長 L が 20cm、球面鏡の曲率半径 R は 50cm であることから縦モード周

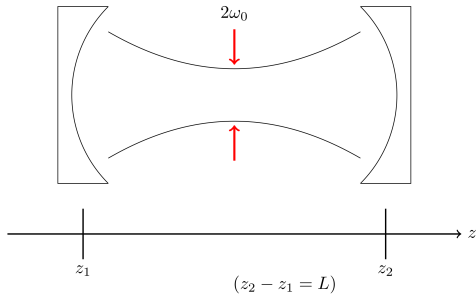


図 2: 共振器概念図。共振器の中心におけるビーム半径を ω_0 としている。

波数間隔は 749MHz、横モード周波数間隔は 221MHz と求められた。

2.2 Pound-Drever-Hall 法

今回の実験では、Pound-Drever-Hall 法 [4] を利用してレーザーの周波数安定化を行った。PDH 法では共振器からの反射光を観測し、反射光のスペクトルを変調周波数と合わせることで誤差信号を観測する。対称共振器において入射光電場を E_{inc} 、反射光電場を E_{ref} と表す。損失がない場合には反射率 $F(\omega)$ を

$$F(\omega) = \frac{E_{ref}}{E_{inc}} = \frac{r \left\{ \exp\left(i \frac{\omega}{\Delta\nu_{FSR}}\right) - 1 \right\}}{1 - r^2 \exp\left(i \frac{\omega}{\Delta\nu_{FSR}}\right)} \quad (3)$$

で表せる。式 (3) について $\Delta\nu_{FSR}$ は縦モード周波数間隔、 r はミラーにおける振幅の反射係数を表している。以上から、レーザー自体にける変調周波数 Ω が高い場合には誤差信号を、

$$\epsilon = -2\sqrt{P_c P_s} \operatorname{Im}\{F(\omega)F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega)F(\omega - \Omega)\} \quad (4)$$

と表すことができる。(但し、 P_c は伝搬波の強度、 P_s はサイドバンドの強度を表している。)

3 実験

レンズ 2 枚を用いて共振器の中心でビーム直径が水平方向 $495\mu\text{m}$ 、垂直方向 $445\mu\text{m}$ となるように調整を行い、共振器内に入射した。その後、透過光スペクトル観測した。透過光を観測した結果から、ローレンツ型関数に近似を行った。近似した結果を用いて 00 モードの線幅と共振器のフィネスを算出した。ま

た、反射光のスペクトルについて測定を行い、結合率を算出した。最後に誤差信号の測定を行った。線幅の測定と共振器のフィネスについては波長 420nm 測定結果と比較も行った。

3.1 波長 1013nm レーザーの透過光スペクトルの観測と 00 モードの線幅、フィネスの算出

まず、00 モードを観測して線幅とフィネスを算出した。使用した測定系を簡略的に表したのが、図 3 である。図 3 について、レーザー光に EOM を用いるこ

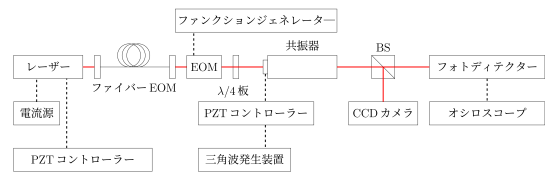


図 3: 00 モード透過光スペクトルの観測に用いた測定系

とで位相変調をかけてサイドバンドが現れるようにした。まず、共振器に入射したのちに透過光スペクトルを観測した。観測結果は図 4 の通りである。計

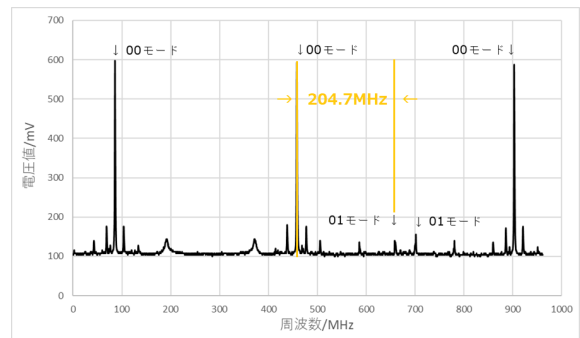


図 4: 01 モードを含めた透過光スペクトルの観測結果。250MHz から 300MHz と 650MHz から 700MHz の 01 モードの間に三角波の折り返しが存在している。

算上の縦モード、横モードの周波数間隔は、それぞれ 749MHz と 221MHz であったが、透過光のスペクトルより求められた横モード周波数間隔は 204.7MHz となり、計算値より小さい値になった。この原因を確かめるため、ファイバー EOM に通してレーザー光に変調をかけてサイドバンドを立てた。変調周波数を変化させることでサイドバンドを変化させ、00 モードと 01 モードに重なる変調周波数を探ることによ

て、縦モード周波数間隔と横モード周波数間隔を測定した。その結果、縦モード周波数間隔は 740.8MHz、横モード周波数間隔は 220.1MHz であった。以上の測定結果より、横モード周波数間隔が 204.7MHz となったのは、PZT のヒステリシスによって三角波が歪んだためであると考えられる。また、縦モード周波数間隔の測定結果 740.8MHz と横モード周波数間隔の測定結果 220.1MHz は、共振器長を 20.23cm と仮定した場合の計算結果と一致することから、周波数間隔を計算する際に PZT の長さ分を考慮していなかったことも分かった。

続いて、00 モードの観測を行った。共振器の透過光を観測して 00 モードの線幅を計算した。計算した線幅を利用して共振器のフィネスを算出した。線幅の算出は、00 モードをローレンツ型関数に近似を行った。そして、この近似した曲線の半値全幅とサイドバンドから 00 モードまでの距離の比率を利用して算出した。算出した線幅を用いてフィネスを計算した。ローレンツ関数の近似と実験値を併記したグラフは図 5 の通りである。図 5 よりローレンツ型関

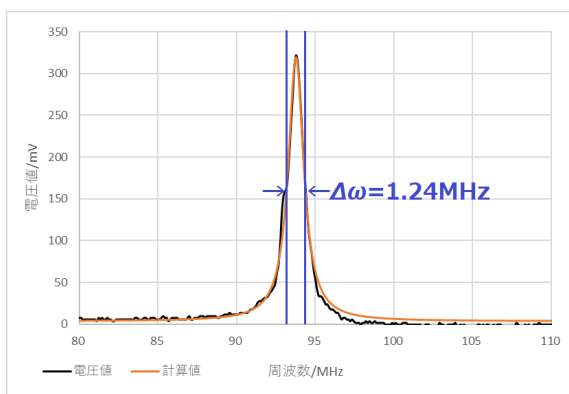


図 5: 波長 1013nm レーザーの透過光 00 モードの部分について、ローレンツ近似を行った時のグラフ。黒線が実験値であり、橙線がローレンツ近似を行った計算値である。半値幅は青線で示した区間の半値全幅としている。

数に近似した結果から 00 モードの線幅を算出した。計算の結果、線幅は $\Delta\omega = 1.24\text{MHz}$ となった。使用している共振器の FSR は、先程直接変調をかけることによって求められた 741MHz である。この結果を利用して、波長 1013nm レーザーに関する共振器のフィネスを計算すると、

$$Finesse = \frac{741}{\Delta\omega} \approx 598$$

となった。同じ共振器を利用して波長 420nm のレーザーについても同様の測定を行っており、波長

1013nm レーザーと同様に 00 モードに対してローレンツ型関数に近似を行い 00 モードの線幅とフィネスを計算すると線幅 $\Delta\omega$ は 0.57MHz、フィネスは 1314 となった。このことから波長 1013nm レーザーのフィネスが波長 420nm レーザーのフィネスに対して 45.5%程度になっていることが分かった。この原因は、使用しているレーザーがマルチモードであること、もしくは共振器内の反射鏡について反射率が低いことが考えられる。

3.2 00 モード反射光の測定結果

00 モードについて共振器からの反射光を観測した。観測に用いた系は図 6 の通りである。レーザー光を

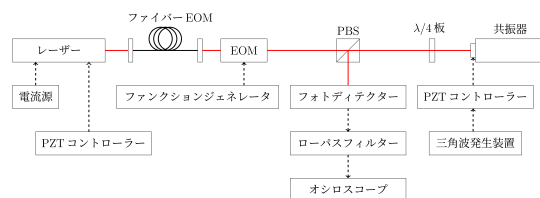


図 6: 反射光スペクトル測定系を簡易的に示した図である。

共振器に入れた後、反射光を PBS を経由してフォトディテクターに入れて観測を行った。フォトディテクターからの信号をオシロスコープで観測した。なお、雑音を除くためにローパスフィルターを用いている。反射光のスペクトルを測定した結果は、図 7 の通りである。次に、測定した反射光のスペクトルについて

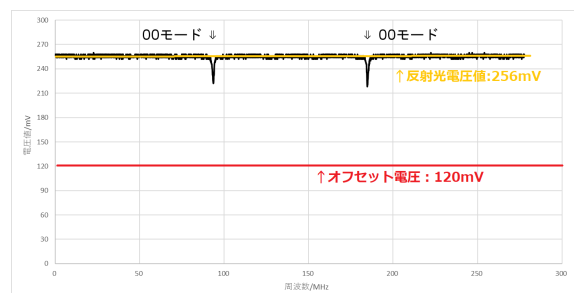


図 7: 反射光のスペクトルを測定した結果。矢印で示した部分が 00 モードのスペクトルである。00 モードで反射光の電圧値が減少していることが分かる。

電圧値の減少量と、もとの反射光電圧値との比率を利用して結合率を算出した。測定した反射光スペクトルの結果より、もとの信号値は 256mV であった。00 モードの部分における電圧値の低下は 38mV であ

り、レーザー光をフォトディテクターに入射していないオフセット電圧値が 120mV であった。このことから結合率を求めると、

$$\text{結合率} = 27.9\%$$

となった。

3.3 誤差信号の測定

Pound-Drever-Hall 法に準じて誤差信号の観測を行った。測定機材の配置については図 8 の通りであった。誤差信号が小さかったことから、Mini-Circuits 製 ZFL-500HLN+アンプをフォトディテクターからミキサーの間に 1 つ入れることで、反射光スペクトルの信号を増幅させた。EOM に入れる変調信号をロー

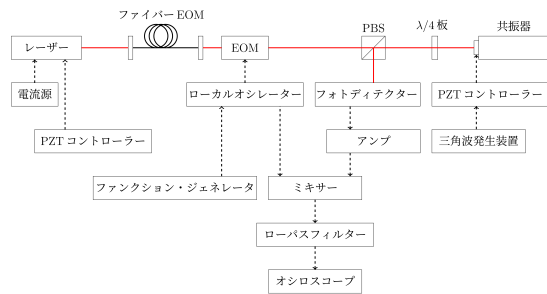


図 8: 波長 1013nm レーザーの誤差信号を測定するため用いた系 (簡略図)。

カルオシレーターに入れ、ミキサーを利用してフォトディテクターからの反射光スペクトルの信号とローカルオシレーターからの信号とを合わせることで誤差信号を観測した。誤差信号の測定結果は、図 9 の通りになった。今回、変調信号の周波数を 19.6MHz に設定した。誤差信号のピーク-ピーク電圧の値は 188mV であった。周波数 0MHz から 20MHz と 100MHz から 120MHz までの間に雑音が多くあるのは、非線形である三角波の折り返しにより雑音が多くなっているからであると考えられる。

4 まとめと今後の目標

今回の論文では、波長 1013nm レーザーをトランスファー共振器にて安定化することを目標とした。安定化を行うために波長 1013nm レーザーの 00 モードを観測し、00 モードの線幅とフィネスについて計算を行った。計算の結果、線幅は 1.24MHz となり、フィネスは 597 となった。また、波長 1013nm レー

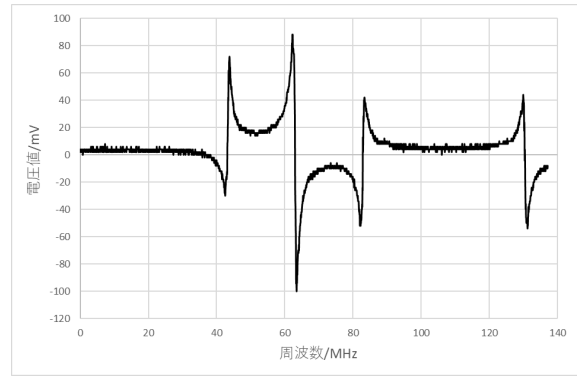


図 9: 誤差信号の測定結果。変調信号の周波数を 19.6MHz で設定して観測を行った。

ザーについて共振器からの反射光を観測して結合率を計算した。その結果は 27.9% であった。最後に、反射光を利用して誤差信号の測定を行った。

今後の目標としては、誤差信号を利用して周波数をロックして安定化する必要がある、そのための回路を作成する必要がある。また、リユードベリ状態に励起しているかどうかを確認する為の EIT 信号を観測し、線幅を評価することを目標とする。

参考文献

- [1] R. P. Feynman, Int. J. Theor. Phys. 21, 467 (1982).
- [2] Igor I Ryabtsev *et al*, 2005 J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38 S421
- [3] P.Bohlouli-Zanjani, K.Afrousheh, J.D.D. Martin, Rev. Sci. Instrum. 77, 093105 (2006)
- [4] Eric D. Black, Am. J. Phys., Vol. 69, No. 1, 79-87, (2001)