

トランスファー共振器を用いた Rb 原子 Rydberg 状態励起用

レーザーの開発

中川研究室 修士 2 年 奥野央志

1 研究背景

近年、中性原子やイオン、光などの量子を用いた量子情報の研究が世界中で行われており、我々の研究室では中性原子である Rb の Rydberg 状態を用いて原子間に相関を持たせることで量子もつれの解析を行う量子シミュレータの開発を行っている。Rydberg 状態では励起した原子がその近傍の原始の励起を抑制する Rydberg Blockade という現象が起こる。これを利用し、光格子トラップを用いて隣り合う原子が Rydberg Blockade の効果範囲に入るよう配列し意図的に量子もつれの状態を再現することができる。このシミュレーションに用いる原子数を増やしていくことでより複雑な量子もつれ状態の解析が期待できる。[1][2]

2 本研究の目的

我々の研究室では現在 Rb を Rydberg 状態に励起するために $5P_{3/2}$ 準位を中間準位とし、波長 780nm, 480nm の二台のレーザー光を用いて二光子吸収を行っている。中間準位は $5P_{3/2}$ 準位であり、寿命(自然幅 6MHz)からの自然放出などによってコヒーレンス時間は数 μs 程度に制限されるという問題がある。そこで、420nm, 1013nm の二台のレーザーを用いた二光子吸収に変更することで、より寿命の長い $6P_{2/3}$ 準位(自然幅 1.4MHz)を中間準位に利用しようとしている。この変更を行うことでシミュレータの改善が期待できる。また、480nm のレーザーは最大出力が低い($\sim 200mW$)ため、原子数が制限されていたが、1013nm のレーザーはテーパーアンプを用いて増幅することで 1W 以上の出力が得られる。実際に Harvard 大学の Lukin などのグループによって $6P_{3/2}$ 準位を中間準位とした Rydberg 状態への励起を利用した量子シミュレータの報告がある[3]。

従って、本研究では量子シミュレータに用いる励起用光源の開発を目的としている。より優れた量子シミュレータの開発には、Rydberg 励起用光源が長いコヒーレンス時間を持つことが求められる。コヒーレンス時間は量子多体系のシミュレーションにおいてシミュレーションの精度に大きく影響するからである。そのため Rydberg 励起用光源が長いコヒーレンス時間を持つことが求められる。Rydberg 励起用光源である波長 420nm と 1013nm のレーザーは周波数安定化を行わなければならない。昨年度までに 420nm レーザーにおいては $Rb5S_{1/2}-6P_{3/2}$ の吸収スペクトルを基準とした周波数安定化を、変調移行分光法を用いて行った。本論文では安定化した 420nm レーザーを用いたトランスファー共振器による 1013nm レーザーをふくめた Rydberg 励起用光源の周波数安定化について報告する。

3 Rydberg 励起光源の周波数安定化

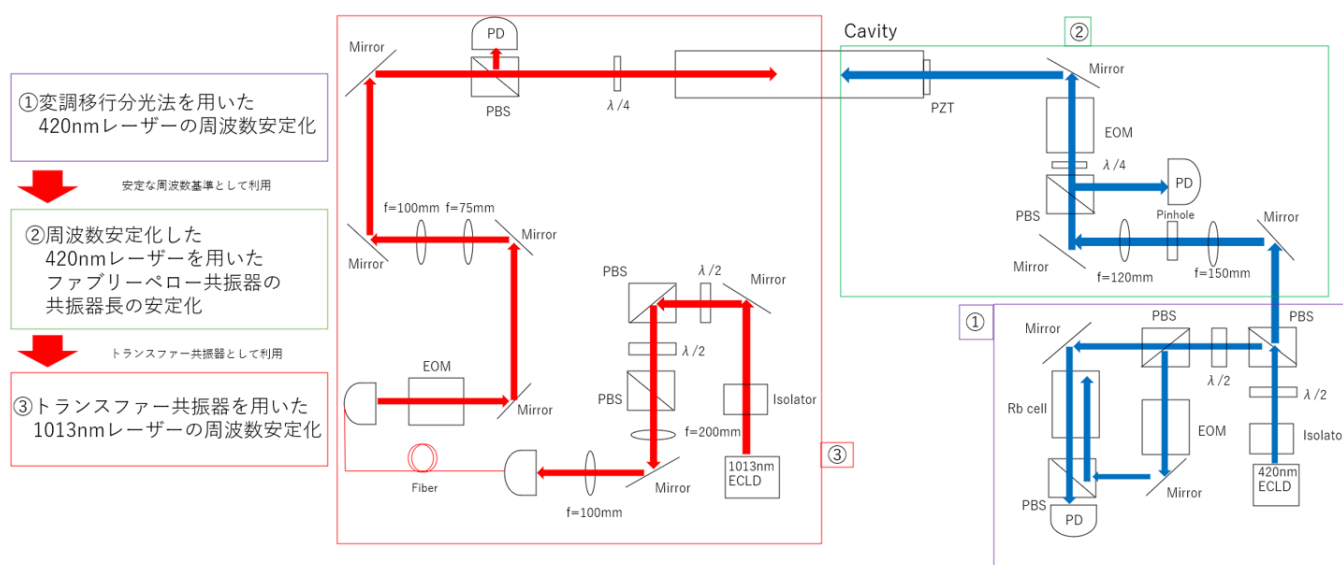


図1 Rydberg 励起光源の周波数安定化

Rydberg 励起光源の周波数安定化は図のような流れで行われる。昨年度までに変調移行分光法を用いて 420nm レーザーの周波数安定化を行った。しかし、Rb 原子を Rydberg 状態に励起するためには先述したように 1013nm レーザーの周波数安定化も必要となる。これにはトランスファー共振器を用いる。まず安定化した 420nm レーザーを用いてファブリーペロー共振器の共振器長を安定化させる。この安定化した共振器をトランスファー共振器として用いて 1013nm レーザーを周波数安定化するというものである。

4 420nm レーザーの周波数安定化

Rydberg 励起光源の周波数安定化の第一段階として、先述したように 420nm レーザーを $Rb5S_{1/2}-6P_{3/2}$ の吸収スペクトルを基準とし、周波数安定化を行った。これは昨年度の時点で達成しており、周波数揺らぎ 4.85kHz であった[1]。しかし、今年度に入ってからレーザーが故障したため別のものに交換、新たに光学系を組みなおし再度実験を行ったところ、周波数揺らぎ 14.8kHz となった。これは昨年度達成できた周波数ゆらぎ 4.85kHz より大きな値であるが、目標値 100kHz を達成できているので問題はないと考える。したがって 420nm レーザーの周波数安定化は達成できた。

5 420nm レーザーによるトランスファー共振器の性能評価

次に 420nm レーザーを用いて使用するファブリーペロー共振器がトランスファー共振器として用いるのに十分であるか性能評価を行った。420nm レーザーをファブリーペロー共

振器に入射し、モードマッチングを行い、線幅の測定と Finesse の評価を行った。

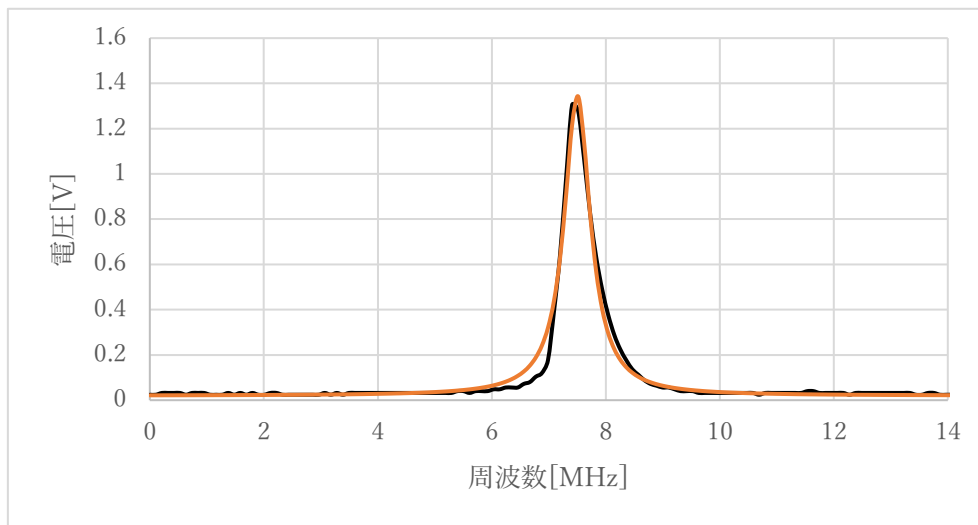


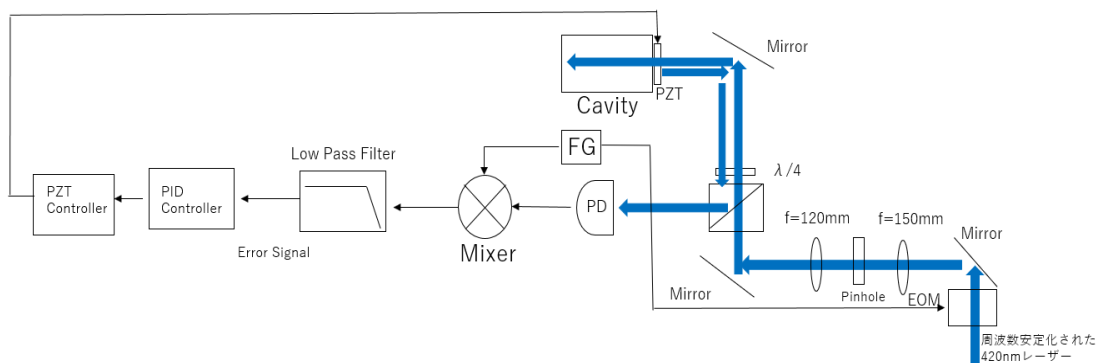
図 2 420nm レーザーの線幅

線幅をローレンツ型関数で近似すると、556kHz となった。FSR は 749MHz であるので Finesse は 1345 となり、1000 を超える高い値を示した。このことからこのファブリーペロー共振器はトランスファー共振器として問題ない性能を持っていることが分かった[4]。

6 フィードバック制御の設計と作成

ファブリーペロー共振器の共振器長を安定化させるにあたり、フィードバック制御の制御回路がなかったので PID 制御による制御回路の設計と作成を行った。

フィードバック制御とは、任意の設定値に保つ必要がある系において、現在の測定値と比較し、自動的に適切な制御信号を各コントローラに送り制御を行うことを示す。PID 制御は、フィードバック制御の一種であり、比例と積分と微分を用いる負帰還制御である。エアコンの温度制御など、一般的に広く使われており、基準信号と出力信号の差である偏差に対してゲインをかけて偏差を小さくする制御を行う。



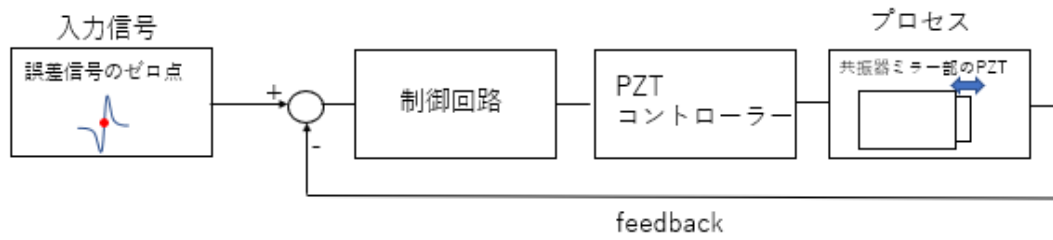


図3 電気系&光学系のフィードバック

今回制御回路を含めた電気系全体のゲインとして $G=1000$ を超えるように設計した。また、全体のゲインは制御回路のゲイン G_A とその他のゲイン G_B により

$$G = G_A + G_B$$

と表せる。またその他のゲインは

$G_B = (\text{誤差信号の傾き}) \times (\text{共振器を振って } 1\text{FSR 変化するときの PZT コントローラー電圧の変化}) \times (\text{PZT コントローラーのゲイン})$

であり、計算すると、

$$G_B = 27\text{dB}$$

であり、

従って作成する制御回路のゲイン G_A は 33dB 以上あればよいとわかり、これに従って回路を作成した。

7 誤差信号と共振器長の安定化

作成した回路を利用して誤差信号を確認した。

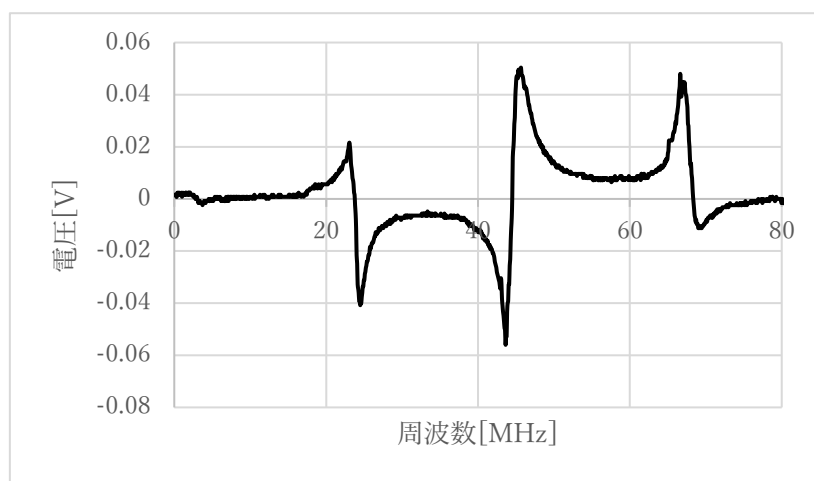


図4 420nm の誤差信号

なおこの時サイドバンド 20.7MHz である。これより誤差信号の傾きは 19.7MHz/V

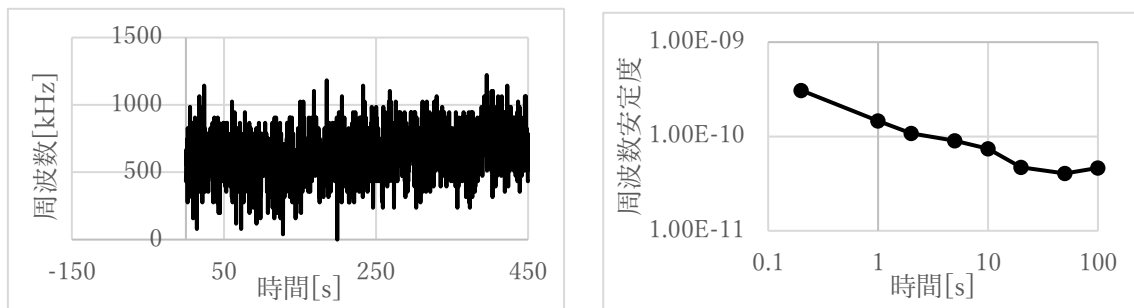


図 5 420nm の周波数揺らぎ

アラン分散より周波数ゆらぎは 33.1kHz である。420nm レーザーの周波数安定化と同様目標値 100kHz を達成できた。

8 1013nm レーザーの周波数安定化

前章でトランスファー共振器の共振器長の安定化が達成できたので共振器に 1013nm レーザーを入射し、その特性を評価した。

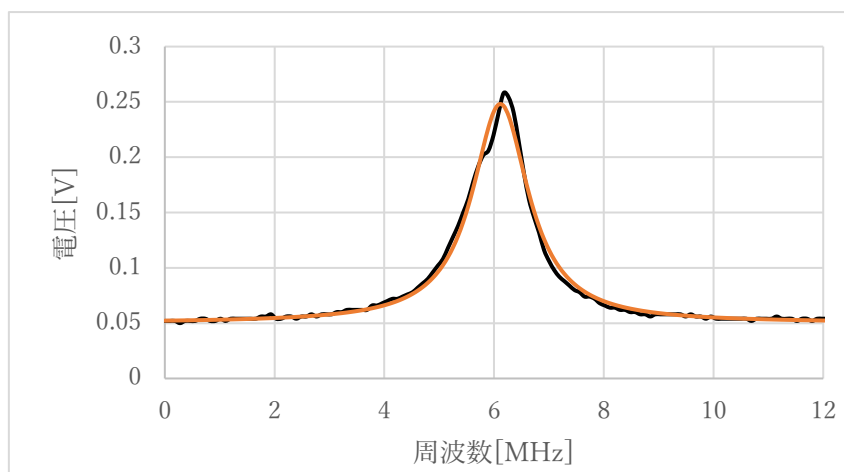
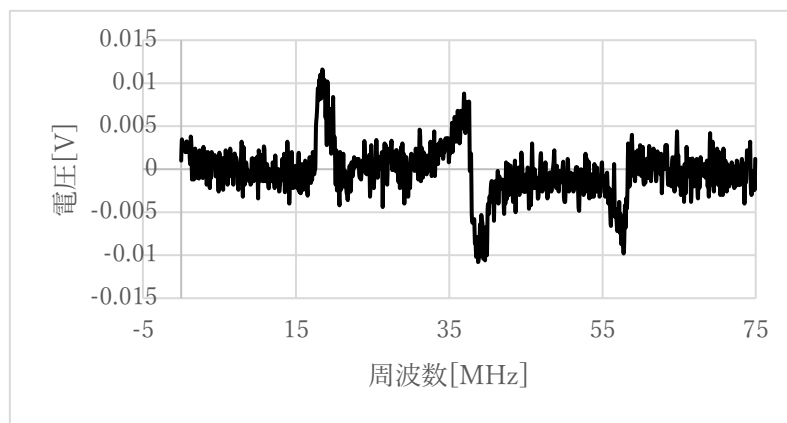


図 6 1013nm の線幅

420nm レーザーと同様、線幅を校正、ローレンツ型関数で近似したところ 1.253MHz となった。これにより Finesse は 598 となり、1000 を下回った。このようになった原因としてはレーザーがマルチモードで発振していることが考えられる。現在使用している 1013nm レーザー固有の問題としてマルチモードで発振しやすく、シングルモードでの出力が非常に難しいという問題があった。そこで CCD カメラで共振器のレーザー光を確認しながら電流源と PZT コントローラーの値を微調し、シングルモードで出力していることを確認しながら線幅の観測を行った。しかし、図の線幅の測定値をみると、ディップの左側に凹んでいる部分が確認できる。これは一つのディップだと思っているものが、高い山のディップと低い

山のディップが重なってできていて完全に重ならなかった部分だけが凹んでいるように見えているのではないかと考える。つまりシングルモードで出力できるよう調整していたが、いまだマルチモードで複数の周波数を出力してしまっている状態だと思われる。したがって線幅がより細く Finesse の高い値を得るためにはさらに PZT コントローラーの値を微調し、シングルモードで出力するよう調整する必要があると考える。



1013nm の誤差信号

これより誤差信号の傾き 0.01601V/MHz が得られた（周波数揺らぎを求めるときの傾きとは分母分子が逆）。これをもとに 1013nm レーザー周波数安定化のための制御回路を設計し、作成する予定であるが、図を見てもわかる通り、SN 比が悪い（ノイズが大きく信号が小さい）。誤差信号の傾きも小さいために、これでロックをかけられるほど十分なフィードバックをかけることは難しいと考えられる。従ってまずモードマッチングを改善して縦モードのパワーを上げることが先決であると思われる。

まとめ

変調移行分光法を用いた 420nm レーザーの周波数安定化再度達成でき、ファブリーペロー共振器の共振器長の安定化も達成できたが、1013nm の周波数安定化に関しては線幅観測にとどまった。

参考

- [1] 高瀬直美「Rb 原子の Rydberg 状態励起用波長 420 nm 干渉フィルタ安定型半導体レーザーの開発」修論,電気通信大学(2020)
- [2] 海上智行「二次元光子中の 87Rb におけるリドベルグブロッケード」修論,電気通信大学, (2016)
- [3] H.Bernein et al “ Probing many-body dynamics on a 51 atom quantum simulator” Nature 551,579(2017)
- [4] 「Rb 原子のリドベルグ状態励起用周波数安定化レーザーの開発」修論、豊沢一海 2018