

Rb 原子冷却用レーザーの周波数安定化

中川研究室 学部4年 石川 悠

1. 序論

我々の研究室では ^{87}Rb 原子を用いた可搬型原子干渉計の開発を行おうとしている。原子干渉計は等価原理の検証、重力波検出、重力加速度測定といった精密測定への応用が期待されている[1]。

中川研究室では原子干渉計を用いた重力加速度測定を行おうとしている。現在実用化されている重力加速度計はコーナーキューブと呼ばれる鏡を落下させ、光学干渉計を用いて干渉の変化を測定することで重力加速度を測定している。この装置は可動機械部品の摩耗のために長期間連続的に重力加速度を測定することができない。原子干渉計による重力加速度測定では測定対象が原子であるために機械的な摩耗が存在せず、長期間連続的に重力加速度を測定することが可能になると考えられている[2]。

原子干渉計には冷却原子が必要になるため、卒業研究としては原理実験として磁気光学トラップによる ^{87}Rb 原子の冷却を行うこととした。この実験は同期の羽石と共同で行っており、私はその Cooling 光を将来的に原子干渉計の光源を安定化させるのに用いる方法である変調移行分光法を用いて周波数安定化した。

2. 原理

2.1 飽和吸収分光法

気体原子の速度は一般に Maxwell-Boltzmann 分布をしているため、原子に共鳴周波数に近い周波数の光を入射するとドップラー効果によって吸収線が広がりを持ち、原子の超微細構造による吸収線はその広がりに埋もれてしまう。

飽和吸収分光法はその超微細構造による吸収線を観測する手法の1つである。

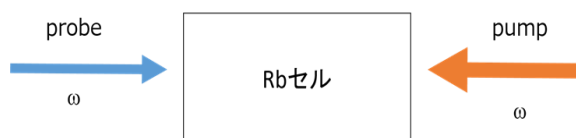


図 2.1 飽和吸収分光法の光配置

図2.1のように原子の入ったセルに同じ周波数 ω の光を対向して入射する場合を考える。pump 光と probe 光は対向して入射しているため、それぞれの光に対して速度 v の原子が感じる周波数はドップラー効果によってシフトする。

原子の飽和吸収強度より強い光を入射する場合を考える。光の周波数 ω が原子の共鳴周波数 ω_0 と異なるとき、pump 光と probe 光はそれぞれ異なる速度成分を持った基底状態の原子を励起するため、pump 光によって原子が励起されたために生じたディップを probe 光で観測することができない。一方、 $\omega = \omega_0$ のとき、pump 光と probe 光は共に速度成分0の原子を励起するため、pump 光によって生じたディップを probe 光で観測することができる。このようにして、原子の持つ超微細構造による吸収線を観測することができる。

2.2 変調移行分光法

変調移行分光法は飽和吸収分光法を利用した分光法であり、図2.2のように原子の入ったセルに pump 光と probe 光を入射し、その pump 光にのみ変調をかける。変調移行分光法では原子の分極を介して pump 光の変調が probe 光に移行する。そのために EOM で周波数変調をし

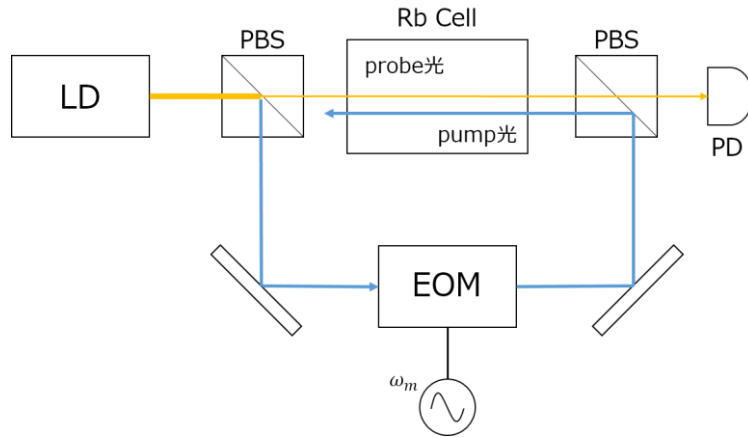


図 2.2. 変調移行分光法の光学系

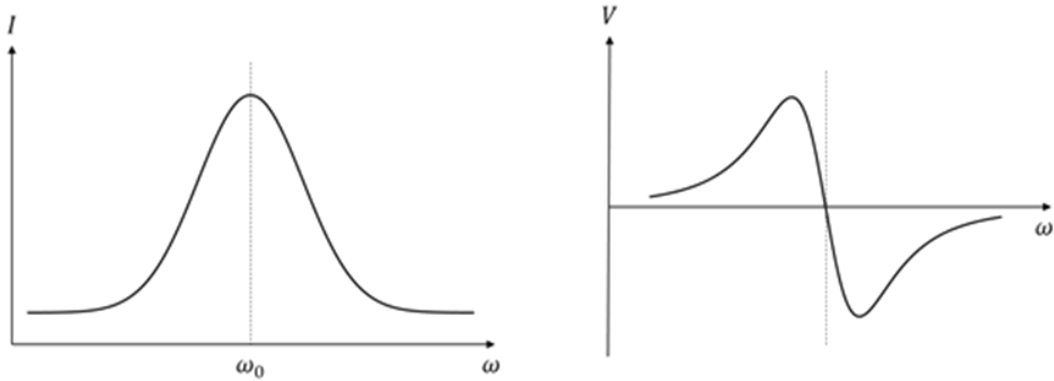


図 2.3 測定信号とその微分信号の様子、(左) 測定信号、(右) 微分信号

た際におこる強度変調が probe 光に乗らず、測定信号に影響を与えない。このようなことから、原理的に長期安定度が良いことが変調移行分光法の利点として挙げられる。

この測定信号を EOM に入力している変調信号とミキサーで掛け合わせ、ローパスフィルタを通すことで図 2.3 のような測定信号の周波数微分信号を得ることができる。この微分信号は原子の共鳴周波数 ω_0 のとき 0 になり、そこからずれるとその変位に応じた出力の電圧を得ることができる信号となっているため、周波数を安定化させるための信号として適している。本研究ではこの信号を誤差信号と呼ぶ。

この誤差信号を制御回路を通してレーザーの電流源とピエゾドライバーにフィードバッ

クすることによってレーザーの周波数を安定化している。

3. 実験

3.1 実験系

図 3.1、3.2 に示す実験系で周波数安定化の実験を行った。図 3.2 は図 3.1 の緑色の点線で囲まれた部分の拡大図であり、図においてオレンジ色と青色の線が光の経路、黒色の線が電気信号の経路を表している。実験に用いた外部共振器型半導体レーザー(ECLD)は内部の干渉フィルタで波長を変えられるようになっており、半導体レーザーとミラーとの距離をピエゾ素子(PZT)で微調整できるようになっている。ECLD

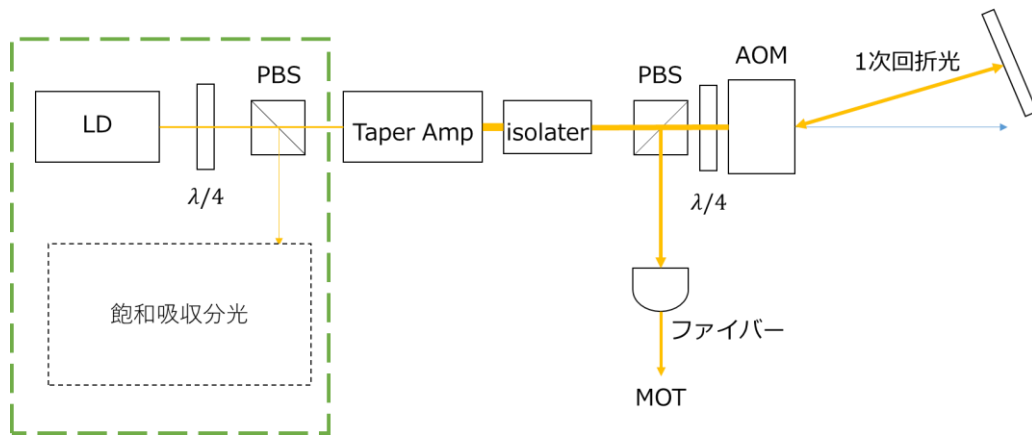


図 3.1 実験系の全体図

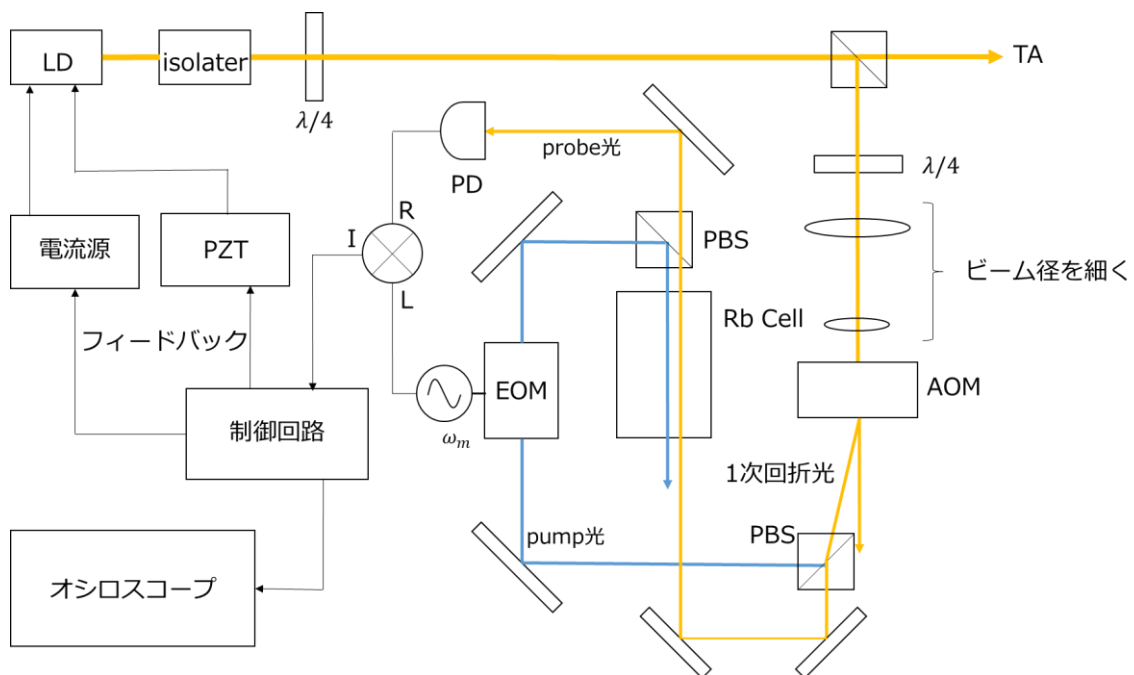


図 3.2 周波数安定化を行っている系の概略図

から出力された光の一部を周波数安定化に用い、他の部分は Taper Amp(TA)を通して AOM で周波数をシフトした後に MOT に送るようになってい

Rb 原子の超微細構造を図 3.3 に示す。変調移行分光法により、 $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F=3$ の遷移に周波数を安定化すると、変調移行分光法の系全体を AOM で 211.7 MHz シフトさせていることにより、LD から出る周波数は $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, CO(1,3)$ に安定化できる。この光を Taper Amp で増幅させた後 AOM で 197 MHz シフト

させることにより Cooling 光に要求されている $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F=3$ から 15 MHz 程度負に離調された光を作ることができる。

3.2 実験結果

観測した ^{87}Rb の吸収線を図 3.4 に、誤差信号を図 3.5 に、安定化時の様子を図 3.6 に示す。図 3.6 より、誤差信号の 0 点付近にロックできていることがわかる。今回の測定では周波数ゆらぎは 739 kHz であった。

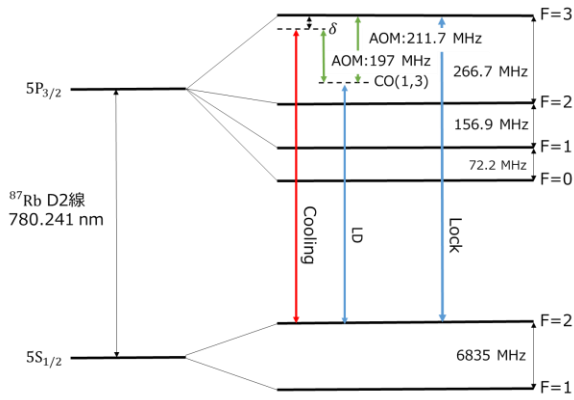


図 3.3 $^{87}\text{Rb}, 5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2}$ の超微細構造

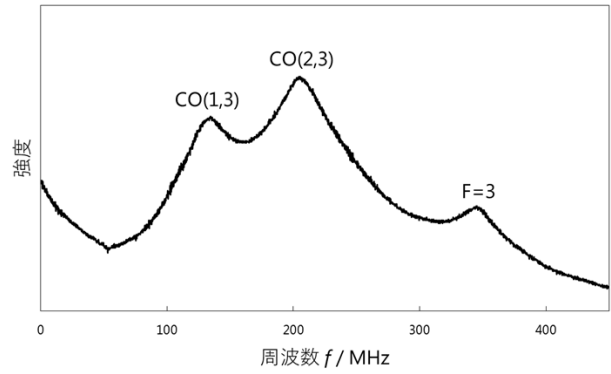


図 3.4 吸収線

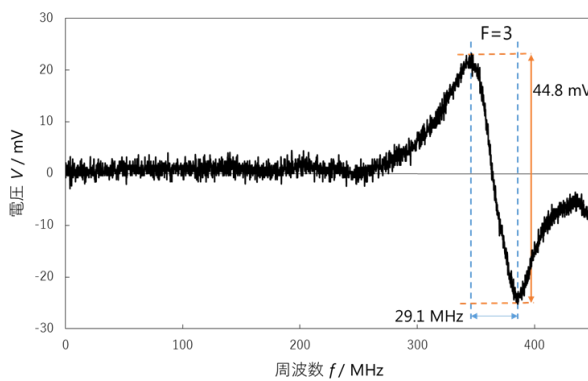


図 3.5 誤差信号

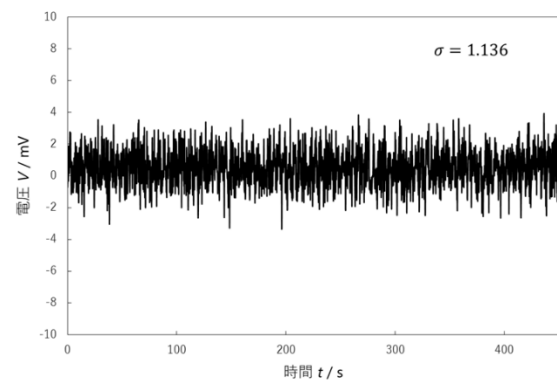


図 3.6 安定化時の様子

4. 結論

将来的に原子干渉計で用いる予定の方法である変調移行分光法を用いて磁気光学トラップのCooling光を周波数安定化することができた。周波数をより安定化するためには、Rbセルを温めて吸収線の感度を上げることや、ビーム径を広げることによってパワー広がりを抑えることなどが考えられる。

5. 参考文献

- [1] Xiaowei Zhang and Mingsheng Zhan, et al. “Compact portable laser system for mobile cold atom gravimeters” Appl. Opt. Vol. 57, No. 22 (2018) 6545
- [2] C. Freier and A. Peters, et al. “Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability” J. Phys: Conf. Ser. 723 (2016) 012050