

室温原子を用いた⁸⁷Rb原子の tune-out 波長分光法

先進理工学科 岸本研究室

1213039 岡本航

1.背景と目的

tune-out 波長と呼ばれる特殊な波長の光を用いると、例えば光格子中にトラップされた原子のうち 1 サイト中の原子だけにアクセスが可能になる。実際に先行研究でこの手法を用いて 2 次元的な局所操作が実現されている[1]。この実験では、励起状態だけ光シフトを与えることで、位置による共鳴周波数の変化をつけ、マイクロ波に共鳴した位置だけに操作を与えている。

これまで、この tune-out 波長を同定する方法として、BEC や冷却原子が用いられてきた[2]。本研究では、室温原子を用いてもこの波長が同定可能なことを示すことを目的としている。

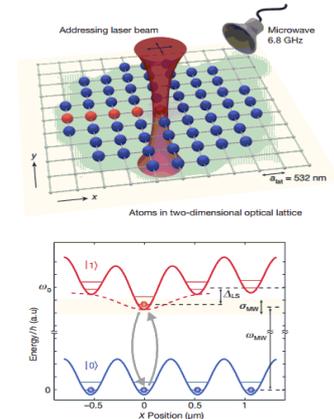


図 1. 2 次元的な局所操作[1]

2.原理

⁸⁷Rb原子の場合、電子スピンおよび核スピンを持つため、図 2 のように超微細構造分裂を起こし、磁場を印加すると磁気副準位がさらに分裂する。また、原子に光を照射すると、光と原子の相互作用によりエネルギーシフトが生じる。これを光シフトと呼ぶ。

本実験では、特に D1 遷移($5S_{1/2} - 5P_{1/2}$)と D2 遷移($5S_{1/2} - 5P_{3/2}$)の間の波長の σ^+ 円偏光の光シフト光を入射する。このとき、着目する基底状態の各準位の光シフトに寄与する準位は光学遷移の選択則から図 2 のようになる。ここで、光シフト量は以下の関係式のようなため、着目する準位と光シフト光の条件によっては、分極率の式において和が 0 となり、光シフトがキャンセルされる。その時の波長を tune-out 波長と呼ぶ。

$$U \propto -\alpha I$$

$$\alpha|5S_{1/2}, F=1, M_F=1\rangle \propto \frac{1}{\omega_{12}^2 - \omega_L^2} + \frac{1}{\omega_{13}^2 - \omega_L^2}$$

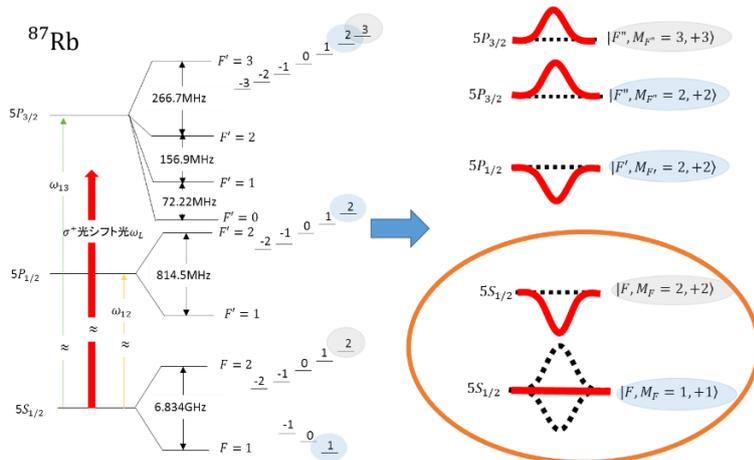


図 2. ⁸⁷Rb原子のエネルギー分裂と光シフトによる寄与

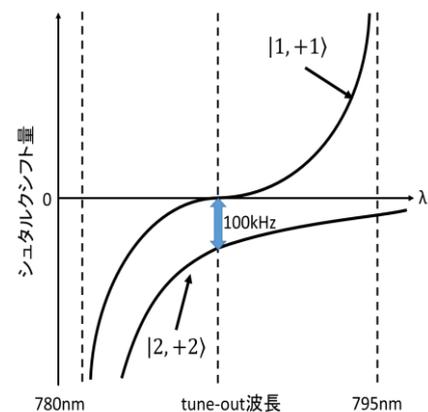


図 3. シュタルクシフトの見積もり

図 2 の橙色の丸で囲まれた 2 準位間の光シフト差の光シフト光波長依存性を調べると図 3 のように見積もられ、Tune-out 波長近傍では 100kHz 程度の光シフト差が生じると予想した。

3.分光方法

本研究ではシンプルな系で実験できるマイクロ波を用いた分光と暗状態を用いた分光の 2 つの手法を採用した。マイクロ波を用いた分光ではマイクロ波が共鳴である場合、電子は $5S_{1/2}, F = 2$ に励起され、それに追従して、probe 光により電子は $5P_{3/2}, F' = 3$ に励起される。その時 ^{87}Rb 原子は probe 光を吸収するために、probe 光の強度が小さくなる。これを利用し、マイクロ波を掃引することで強度の変化を見ることで分光する[3]。

暗状態を用いた分光では、2 本のコヒーレントな光を原子に入射し、その 2 本の光の周波数差が $5S_{1/2}, F = 1, 2$ 間の 6.834GHz であるとき暗状態になり 2 本の光を吸収しなくなることを利用し、pump 光の周波数を掃引し、その時の光の吸収量の変化を観測する。図 4 は磁気副準位まで考慮した場合の掃引周波数と probe 光の透過強度の関係を示したものである。

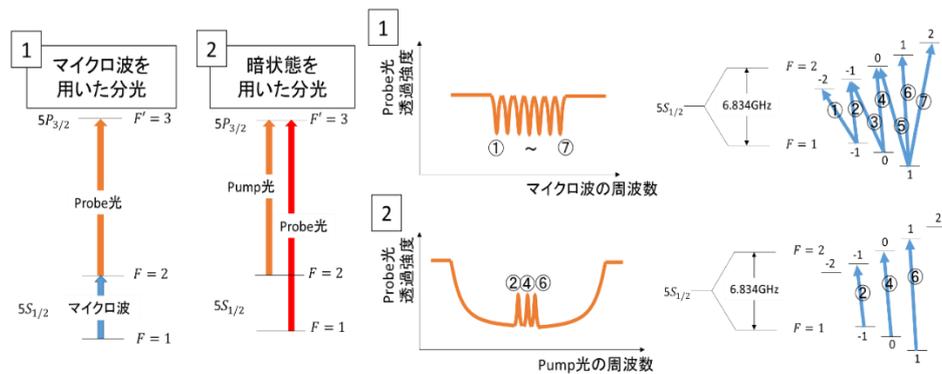


図 4.周波数掃引による probe 光の透過強度の変化図

暗状態を用いた分光法での光源の準備として先行研究[4]にならって Pump 光を飽和吸収分光にて D2 遷移の吸収線に安定化し、Probe 光に関しては LD に 6.834GHz のマイクロ波を入れ、それによってできたサイドバンドに Pump 光を注入同期をすることで用意した。この手法の利点として、Probe 光と Pump 光 2 つの光は常に 6.834GHz の周波数差が保たれ、かつ、Probe 光の線幅が狭線幅のマイクロ波にのみ依存することである。そこでスペクトラムアナライザーにて 2 つの光の beat 信号を観測することで、相対線幅を確認した。

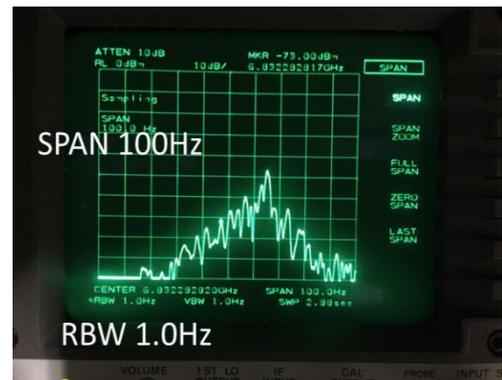


図 5.Probe 光と Pump 光の beat 信号

4.実験準備

理想的には、室温原子のドップラー広がりによる 9kHz の半値全幅（バッファガス注入によるさらなる狭帯化が可能）に対して、100kHz 程度の光シフトは測定可能と考えられる。ただし、実際の実験では測定分解能を下げる要因があるために解消に取り組んだ。

a. レーザーがガウシアン分布を持つことによる光シフトの不均一性

光シフトは光の強度に比例するためガウシアン分布を持つ光シフト光ではビーム径の位置によってシフトの量が異なる。また、ガウシアン分布に従った probe 光のビーム径によって、光シフト光のどの範囲までの寄与を得るか決めることになる。ビーム径によるシフトの不均一さを図 6 にプロットした。また、暗状態を用いた分光では probe 光と Pump 光の入射角度が 10^{-3} rad異なるだけで、ドップラー効果によって約 400kHz の広がりが見込まれる。そこで、今回の実験では図 7 のように測定系に行く前に光を合わせ込む方法を取った。

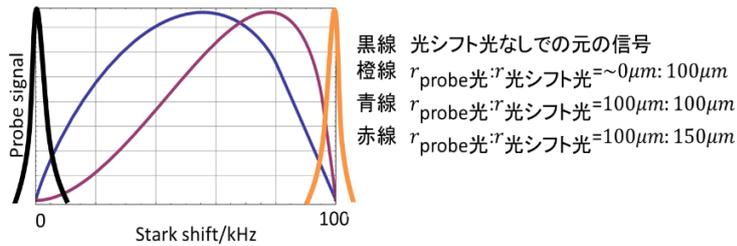


図 6.各光のビーム径の違いによるシフトの不均一さ

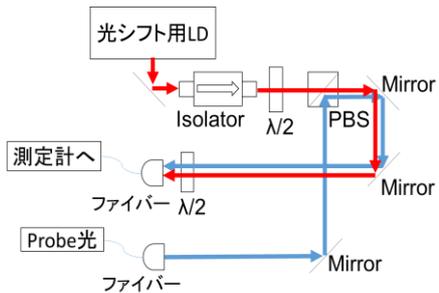


図 7.光学系

b. 不均一磁場によるゼーマンシフトの不均一性

地磁気及びゼーマンシフト用のコイルの磁場が不均一である場合、測定分解能が低下してしまう。そのために 3 重磁気シールドを用意し、その中にソレノイドコイルと補正コイル、Rb ガスセルを用意した。補正コイルを使うことで不均一磁場を 0.5% まで抑制できたため、一番磁場に感度の高い図 4 の①⑦準位に対して線幅 3.5kHz 以下の分解能が期待される。光シフト 100kHz と比較すると十分な分解能であると言える。

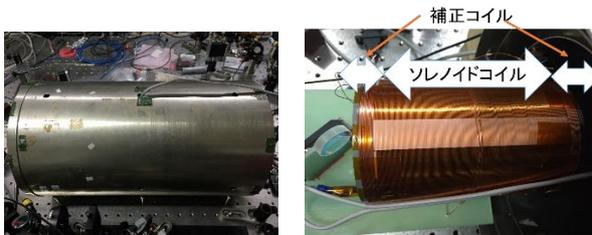


図 8.磁気シールドとゼーマンシフト用コイル

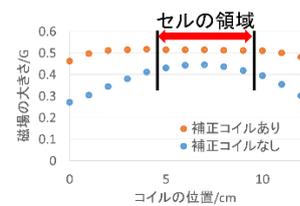


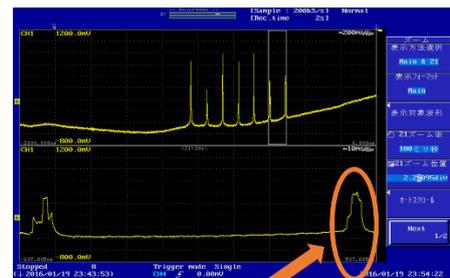
図 9.コイルの位置と磁場強度の関係

5. 実験結果

① マイクロ波を用いた分光

まずは光シフト光を入射せずに線幅の測定を行った。磁場測定器の精度の低さによって半値全幅が広がってしまっているが、20kHz までは抑制することができた。十分測定可能であるとして光シフト光を光学系に入射して測定を行ったが、結果としては変化を観測することができなかった。この結果から以下のような考察を行った。

図 10 のようにマイクロ波は Rb ガスセル全域に照射されているため、光シフト光照射領域以外の部分でマイクロ波遷移し



半値全幅にして20kHzの線幅

図 10.マイクロ波による線幅測定

た原子も観測時に観測域に入ってきて、その寄与の方が大きい
 ために、光シフトした原子の信号がほとんど埋もれて見えなく
 なっている可能性が考えられる。そこで、すべての測定を光で
 行うことのできる暗状態を用いた測定を次に行った。

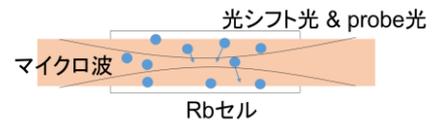


図 11.Rb セルと光の入射範囲

2]暗状態を用いた分光

同様な線幅の測定をビーム半径 $r=0.5\text{mm}$ の Pump
 光、probe 光を π 偏光にして行った。 π 偏光にて 3 つの
 遷移を測定したところ磁場の寄与の小さい④では
 2.1kHz、②⑥では 20kHz 程度の線幅を観測した。さら
 に、信号の信憑性を高めるために、図 14 のように 0-0'
 時計遷移の磁場に対する変化を観測した。Breit-Rabi の
 公式から見積もると $\Delta f \sim 575\text{Hz}/\text{G}^2$ であり、観測結果で
 は $\Delta f \sim 587\text{Hz}/\text{G}^2$ であり、磁場の 2 次
 の寄与を確認した。

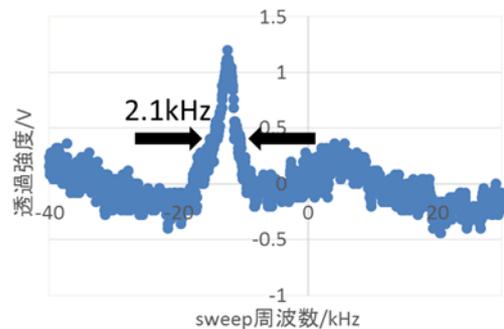


図 12.0-0'時計遷移④における信号

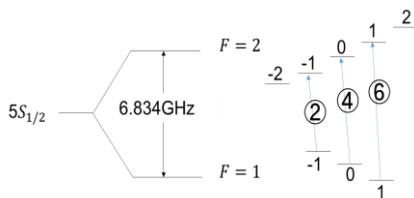


図 13.暗状態を用いた分光での遷移

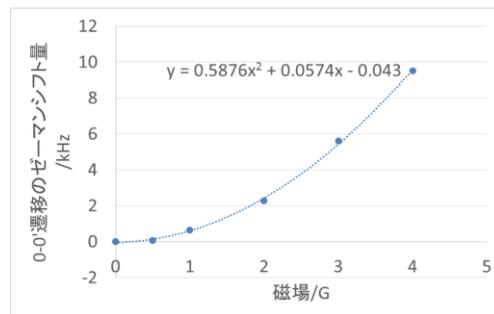


図 14. 0-0'時計遷移における磁場とゼーマンシフトの関係

6.まとめと展望

不均一磁場を大幅に抑制し、0-0' 時計遷移に対して kHz 程度の分光を実現できた。また、光シフト
 分光に向けて、 π 偏光と円偏光を入射することで、3 つの遷移を観測が可能になった。ただし、現
 状ではフォーカスレンズを入れていない状態での観測であるために、入れたときに観測できるように
 する必要がある。

今後、Pump 光の強度が安定でないことによる S/N の悪さを対策することでノイズに埋もれてしま
 っている他の遷移 (①、⑦) が見えるのではないかと考えている。将来的にはこの波長を同定して、
 量子気体中の 3 次元局所操作の実現を目指したい。

参考文献

- [1] C. Weitenberg et al., Nature **471**, 319–324 (2011).
- [2] R. H. Leonard et al., PRA **95**, 052501 (2015).
- [3] T. Bandi , Double-resonance studies on compact, high-performance rubidium cell
 frequency standards,博士論文(2013)
- [4] S. E. Park et al., IEEE Trans. Instrum. Meas. **52**(2), 277 (2003).