

1.5 μm 帯での光双極子トラップ^oへ向けた飽和吸収分光法による ⁸⁷Rb 原子の光シフト観測

量子・物質工学科 岸本研究室
0913067 高藤 寿人

1. 研究の背景

我々の研究室では、⁸⁷Rb を用いたボース・アインシュタイン凝縮(BEC)の研究を行っている。BEC の生成過程では、磁気光学トラップ(MOT)で捕獲した原子をから光双極子(ODT)へ移行する際に、圧縮磁気光学トラップ(CMOT)という手法を用いている。これにより、冷却と原子数密度向上を進めることが出来るが、CMOT を行うには MOT を切らなければならないため、定常的に新たな原子を捕獲出来ないという問題がある。

CMOT を用いないで ODT へ移行させる方法として、1.5 μm 波長帯レーザーによるシュタルクシフトの効果をを用いることを考えている。シュタルクシフトしている領域ではエネルギー準位の間隔が変化する。準位間隔が変化したことにより、MOT の冷却サイクルに用いる cooling 光や repump 光はその領域において共鳴波長から外れるために本来のサイクルを作らず原子は一つの基底状態に溜まっていくことが予想される。よって、この領域では高密度に原子を集めることが出来るので、ODT に原子を移行することができる。

2. 本研究の目的

本実験では、レーザーの波長 1.5 μm 帯でのシュタルクシフト観測を、飽和吸収分光法を用いて行う。それによって、レーザーの波長を変化させた時のシフト量変化や出力の変化によるシフト量変化を知ることができる。

3. 原理

3.1. 圧縮磁気光学トラップ

図 1 に ⁸⁷Rb の $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$ 間のエネルギー準位を示す。MOT 中のレーザー冷却には $|5S_{1/2}, F=2\rangle$ から $|5P_{3/2}, F'=3\rangle$ に励起させる cooling 光と、冷却サイクルから外れて $|5S_{1/2}, F=1\rangle$ に落ちた原子を $|5S_{1/2}, F=2\rangle$ に戻す repump 光を用いて冷却サイクルを作っている。

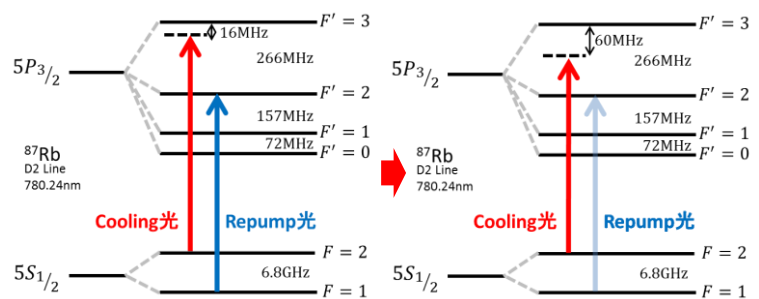


図 1：圧縮磁気光学トラップの手法

CMOT はこの cooling 光を赤方側に離調させることで冷却を進めると共に、repump 光の強度を弱めて F=2 に戻す原子を減らし F=1 に溜まる原子を増やすことで高密度状態を作っている。

3.2.シュタルクシフト

上記の手法の問題は、MOT の効果を切る必要があるために新たな原子のトラップには改めて MOT を行わなければならないことである。この問題の改善方法として MOT で捕獲した原子に、1.5 μm 波長帯のレーザーによるシュタルクシフトの効果を用いる。それによって MOT 中に暗状態の生成と原子を一つの基底状態に溜め込む作用が期待される。以下では、シュタルクシフトの原理と、1.5 μm 波長帯のレーザーによるシュタルクシフトの影響について説明をしていく。

ODT は原子がレーザー中に存在する時に受ける光双極子力と電場との相互作用によって原子が感じるポテンシャルでトラップを行う手法である。この相互作用によって起きたエネルギーシフトのことをシュタルクシフト(AC Stark Shift)と呼ぶのだが、この量を見積もる場合、 $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$ の二準位だけでなく、原子に存在する多数の準位からの影響も考慮に入れなくてはならない。多準位からの足し合わせを考えた場合、状態 i に起きるシュタルクシフトの値は以下の式で表すことができる[2][3]。

$$\Delta E_i = -\frac{\pi c^2}{2} \sum_{f \neq i} \frac{2J_f+1}{2J_i+1} \frac{A_{if}}{\omega_{if}^3} \left(\frac{1}{\omega_{if}-\omega} + \frac{1}{\omega_{if}+\omega} \right) I(r, z) \quad (3.1)$$

ここで、 A_{if} は Einstein の A 係数、 $\frac{2J_f+1}{2J_i+1}$ は状態 i, f の縮重度の比、 ω_{if} は各準位間の共鳴周波数であり、 ω と $I(r, z)$ はレーザーの周波数と光強度を示している。この式から、 ΔE は光の強度に比例し、 ω_{if} と ω の差に反比例することが分かる。

波長の変化によるシュタルクシフトを図 2 に示す。 $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$ に寄与する準位を足し合わせると、 ^{87}Rb には 1529nm の共鳴波長を持つ $5P-4D$ 準位が存在する為、この波長近傍の 1.5 μm 波長帯で二準位間のエネルギーが大きくシフトしていることが分かる。この範囲のエネルギー準位の模式図を図 3 に示す。前述のようにシュタルクシフトは光強度に依存するため、Gaussian の形をとる光の中心に向かうほど大きくなる。cooling 光や repump 光の周波数は一定のままなので、ODT 領域の中心付近ではこの二つの光は共鳴から大きく外れていく。結果、cooling 光は $F' = 2$ や $F' = 1$ に原子を励起させ、 $F = 1$ に落ちた原子をサイクルに戻す repump 光も効果が弱まるので、原子は $F = 1$ に溜まっていくことが予想される。つまり、MOT は定常的に機能しながらも、1.5 μm ODT 領域中心では高密度状態が作り出せるので、この領域では ODT へ移行を目指すことができる。

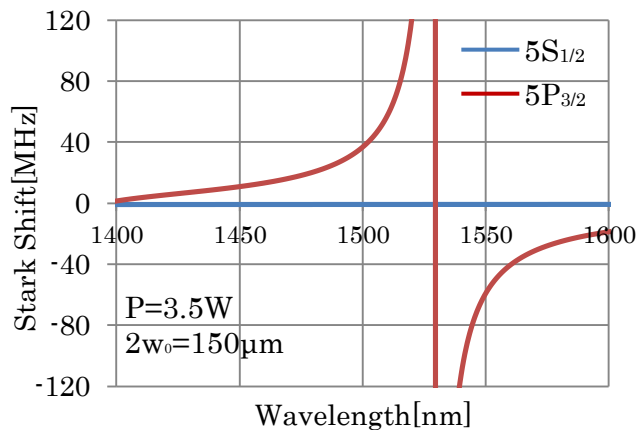


図 2 : シュタルクシフトの波長依存性

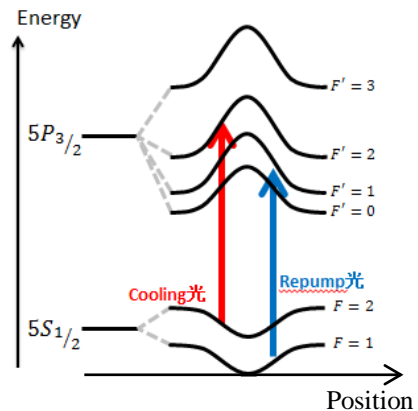


図 3 : シュタルクシフトした二準位系

4. 実験内容

今回測定に使用した実験光路を図4に示す。シュタルクシフトの影響を観測するのに、二つの⁸⁷Rbセルで780nm波長のレーザーを用いた飽和吸収分光法を行い、二つの信号を比較する。飽和吸収分光法では、原子に pump 光と probe 光という対向した光を入射させる。それにより probe 光の作るドップラー幅の吸収スペクトルの中に、pump 光と共鳴した原子が自然幅を持ったスペクトルとして現れるので精密な分光が可能になる。1.5 μ m波長帯の高出力光源(ECDL+ファイバー増幅器)を通したセル内の原子はシュタルクシフトの影響で共鳴周波数が変化するため、シュタルクシフトの量に応じた信号の変化量が観測されると考えられる。

初めに、二つの吸収信号を用意する。基準となる信号は、MOT用の実験系で飽和吸収ロックに用いているものを用いた。シュタルクシフトを起こした信号は、780nmのprobe光に1.5 μ m波長帯レーザーの光を重ねることで得られる。今回シュタルクシフト用のセルに入射させる780nm波長レーザーとファイバーレーザーの半径はそれぞれ45 μ mと70 μ mとして実験を行った。

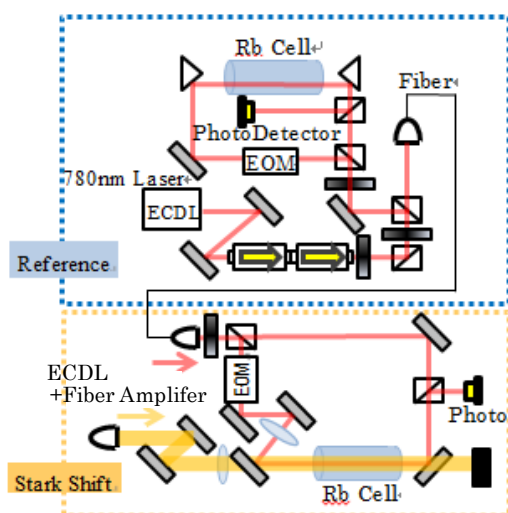


図4：実験系

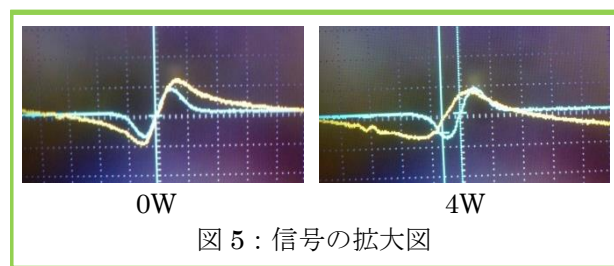


図5：信号の拡大図

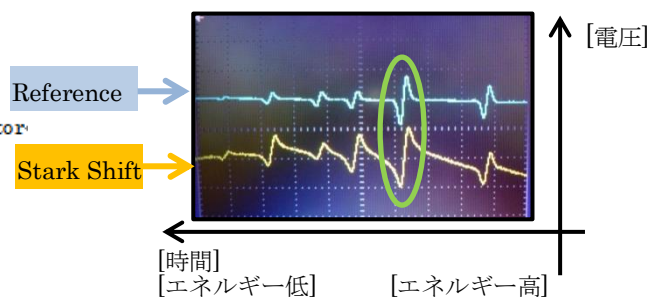


図6：観測された飽和吸収信号

5. 結果

図5は1.5 μ m波長帯レーザーの波長が1540nm、出力が0Wと4Wの時の波形を拡大したものである。シュタルクシフトを起こしていない(0W)場合、二つの波形は等しいため重なる。しかし、4Wの光を入射させると、波形が左にシフトしたのが分かる。これは、図5の拡大前である図6で考えると、図6の左がエネルギーの低い側に該当するので、原子のエネルギー準位は下がる方にシフトしたことになる。この結果は、式(3.1)を利用して1540nmの波長を用いたシュタルクシフトの符号と一致する。また、この時のシフト量は6.5MHzであった。これは、同じ波長と出力で式(3.1)からシフト量 $\Delta E_i(r=0, Z=0)$ を見積もった結果146MHzと比べると少ないシフト量である。ただし、この見積もりはレーザーの当たる位置に依存するシュタルクシフトのビーム強度の強い一点についてのみ考えた場合である。実際の計算には、位置に依存したシフト量変化とprobe光の当たった範囲で起きているシュタルクシフト全体に対して考える必要がある。

3.2の項で述べたように、シュタルクシフトは波長と強度に依存する。その依存性について調べた結果を図7、8に示す。

図7から、出力の増加に比例してシフト量が負に増加していることが分かる。

図8では、波長が伸びていくにつれてシフト量が減少している。この減少量は、1529nmの共鳴波長を持つ5P-4D準位の影響を考えると、この波長とレーザー波長との差に依存した結果になっていることが分かる。

以上の結果より、シュタルクシフトの光強度依存性と波長依存性を確認することが出来た。

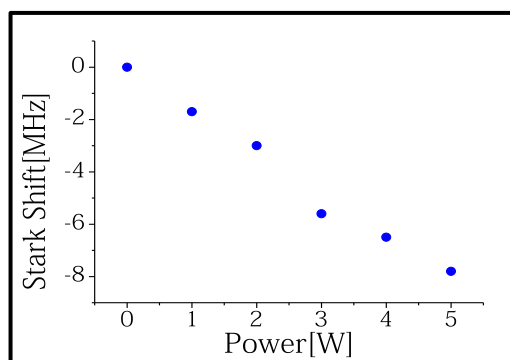


図7：強度変化に対するシフト量変化

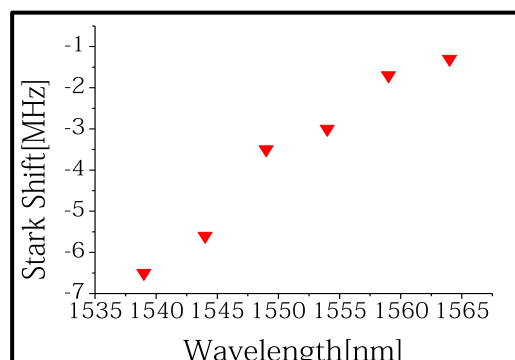


図8：波長変化に対するシフト量変化

6. まとめ

本研究で、1.5 μm 波長帯を使用したシュタルクシフトによる信号の変化を観測することが出来た。また、シュタルクシフトの光強度依存性と波長依存性についても確認することが出来た。

今後の展望として、実測値を正確に予測できる必要があると考えている。予測した見積もりが正確に求まる事は、今後の目標であるMOT中に組み込むODTの正確なポテンシャルを導くことに繋がる。その為にprobe光が検知する範囲を正確に見積もり、値を求めていこうと思う。

7. 参考文献

- [1] J. F. Clement et al , "All-optical runaway evaporation to Bose-Einstein condensation", Physical Review A 79,061406 (2009).
- [2] Rudolf Grimm and Matthias Weidemüller , "Optical Dipole Traps For Natural Atoms" , arXiv:physics/9902072v1(1999).
- [3] 修士論文 Paul F. Griffin, "Laser Cooling and Loading of Rb into A Large Period, Quasi-Electrostatic, Optical Lattice", Department of Physics Durham University (2005).
- [4] R. L. Kurucz and B. Bell atomic line database, <http://cfa-www.harvard.edu/ampdata/kurucz23/sekur.html>