

2次元光格子中の ^{87}Rb 原子におけるリドベルグブロッケード

1433008 海上智行

指導教員: 中川賢一

1 研究背景

現在、光子・イオン・中性原子等を量子に用いた情報理論の実現に向けた研究が世界中で進められている。その中でも、中性原子はイオンなどと比較すると外場の影響を受けにくく、コヒーレンス時間を長くすることが可能である。また、リドベルグ状態と呼ばれる主量子数の大きな状態を用いることで、個々の原子の制御や観測が容易な数 μm 程度離れた原子間にも相互作用を働かせることが出来る。この相互作用を用いる事で、量子情報処理に必要な量子もつれ状態を生成することが出来る。我々の研究室では、中性原子のリドベルグ状態を用いた量子情報処理の実現、特に量子シミュレーターへの応用を目指して研究を行っている。

我々の研究室では、空間光位相変調器を用いて光トラップのアレーを生成することで、任意の格子形状に単一の原子 [1] を配置することを実現している。図1は格子間隔 $5 \mu\text{m}$ のカゴメ格子状に配置された原子からの蛍光を積算した結果である。

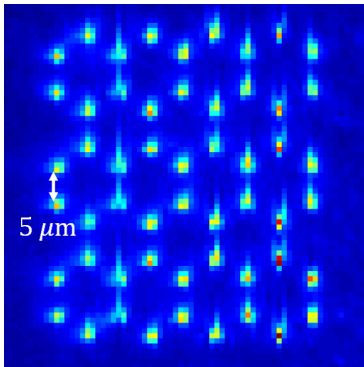


図 1: 単一原子の蛍光画像

2 研究目的

リドベルグブロッケード効果を利用することで、図1の様に離れた原子間に量子的な相関を作ることを目的に研究を行った。

原子をリドベルグ状態へ励起すると、リドベルグ状態間の大きな相互作用によって、隣の原子のエネルギー準位が図2の様にシフトする。例えば 75D のリドベルグ状態間の相互作用は距離 $4 \mu\text{m}$ で $\Delta E = h \times 10\text{MHz}$ のエネルギーシフトを発生させる。このシフトによってリドベルグ状態への励起が抑圧される効果のことをリドベルグブロッケードと呼ぶ。ブロッケードが働くためには、励起状態のラビ周波数 Ω が $\Omega \ll \Delta E/h$ である必要がある。また、リドベルグ状態間の相互作用を用いて実験を行うためには原子をリドベルグ状態へコヒーレンスに励起する必要がある。そのためには励起光源の線幅をラビ周波数に対して十分小さくする必要がある。今回は、ラビ周波数を $2\pi \times 1\text{MHz}$ 程度と見積もり、励起光源の線幅をラビ周波数に対して十分小さい 100kHz 以下にする事を目標にレーザーの周波数の安定化を行った。

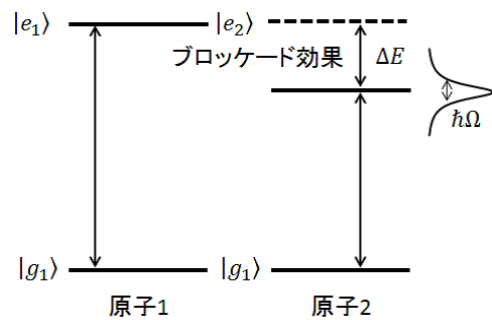


図 2: リドベルグブロッケード効果

3 トランスファー共振器による安定化

原子をリドベルグ状態へ励起するには、2光子励起を用いる。その時のエネルギー準位を図3に示す。励起光源には波長780 nmの光と波長480 nmの光を用い、中間状態への励起を防ぐために1 GHz程度の離調を付ける。780 nmの光源は基底状態と中間状態の遷移に安定化した後にAOMを用いて離調を付けたものを利用する。480 nmの光源は、トランスファー共振器[3]を用いて離調を付けた周波数に対して安定化を行う。原子の吸収線を利用した場合、安定化には数十 mW程度のパワーが必要になる[4]が、この方法では、安定化のために必要なパワーが数 mW 以下ですむため、実験に多くのパワーを振り分けることが出来る。また、原子の遷移に対して離調を付けた周波数を基準にする事で、AOM等によって周波数をシフトすることによるパワーのロスを少なくすることが出来る。図4にトランスファー共振器の実験の概略を示す。基準光源、励起光源ともにEOMを用いて変調される。変調周波数は励起光源は15.9 MHz、基準光源は6.9 MHzであり、基準光源の入射パワーは150 μ W、励起光源の入射パワーは3 mWである。

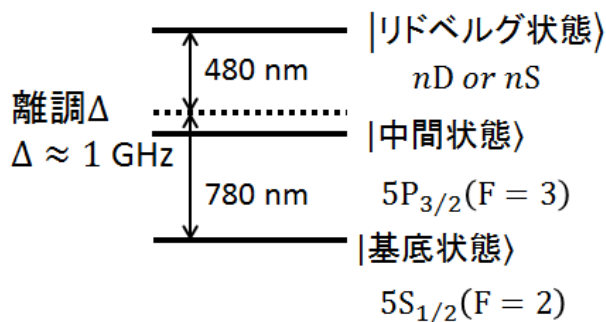


図3: ^{87}Rb 原子のエネルギー準位

3.1 共振器長の安定化

変調移行分光法を用いて ^{87}Rb 原子の吸収線に安定化された780 nmの光源[5]を基準光源として、トランスファー共振器の共振器長の安定化を行った。基準光源に対してPDH法[6, 7]を用いて誤差信号を取得し、トランスファー共振器のPZTにフィードバックを行うことで共振器長を安定化した。掃引する事で得られた誤差信号の形を図5に、安定化時の周波数雑音のパワースペクトル密度を図6に示す。図6から共振器長の制御の帯域は10 kHz程度だと分かった。

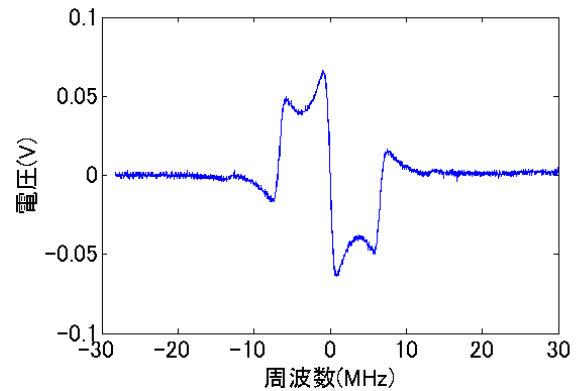


図5: 共振器長の安定化の誤差信号

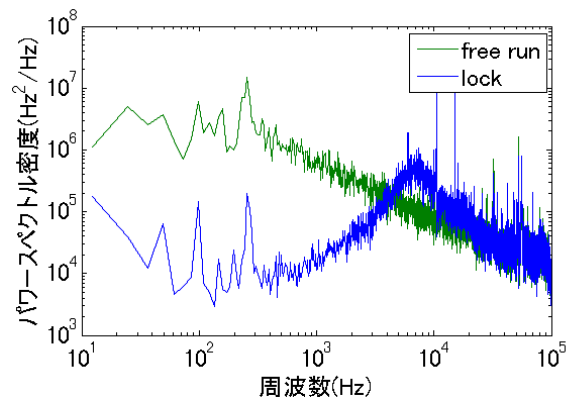


図6: 共振器長の安定化の周波数雑音

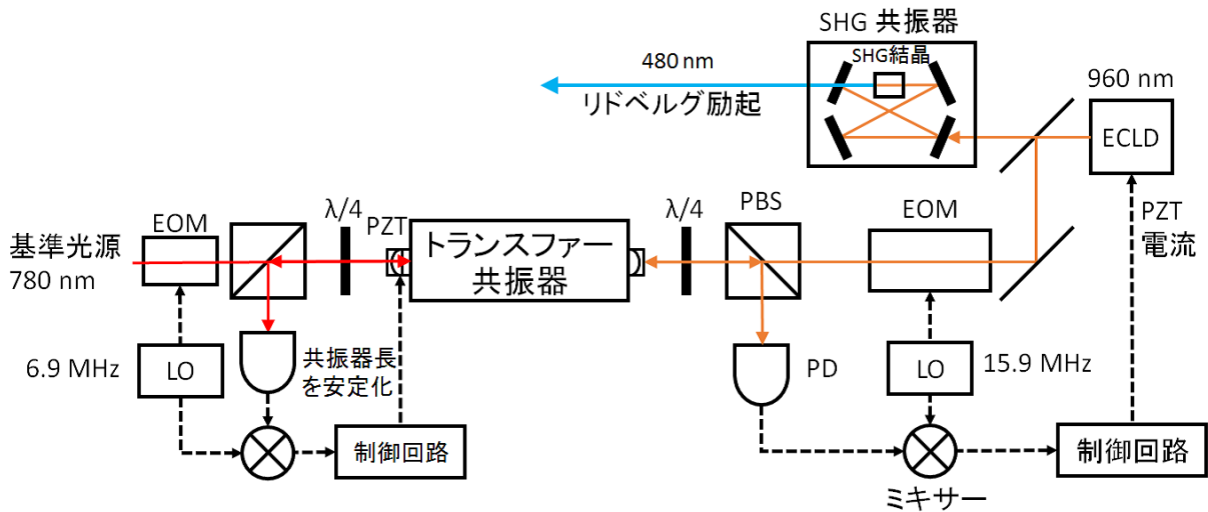


図 4: トランスファー共振器を用いた安定化

3.2 480 nm の励起光源の周波数安定化

次に、トランスファー共振器を用いて励起光源の周波数安定化を行った。480 nm の励起光源は、960 nm のレーザー光を倍波結晶の入った共振器に入射することで生成する。480 nm の光は可能な限り実験に利用したいため、960 nm のレーザー光を用いて周波数安定化を行うことで励起光源の周波数を安定化を行った。960 nm の光源には外部共振器型の半導体レーザーを使用した。通常 ECLD は数百 kHz 程度の線幅を持つため [8]、制御帯域を広く取るために PZT だけではなく電流に対してもフィードバックを行った。得られた誤差信号を図 7 に、安定化時の周波数雑音のパワースペクトル密度を図 8 に示す。制御帯域は 2 MHz 程度までとることが出来た。図 8 には、ローレンツ型の 100 kHz の線幅のレーザーの周波数雑音を赤い線で追加している。実験結果から、960 nm の光源の線幅は 100 kHz 以下だと分かる。励起光源には倍波を使用するため、実際の励起光源の線幅は 200 kHz になってしまうと考えられる。

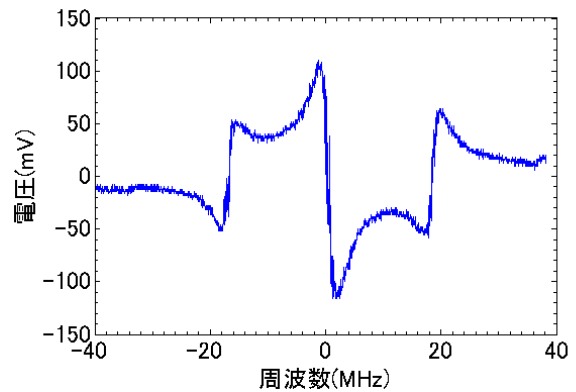


図 7: 励起光源の誤差信号

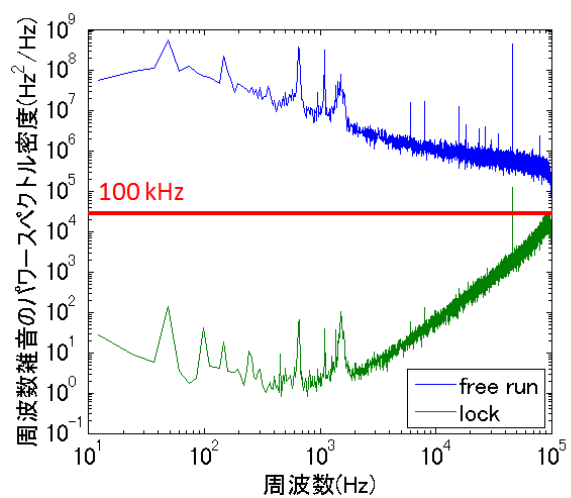


図 8: 励起光源の周波数雑音

4 光周波数コムを用いた周波数安定度の評価

長期の周波数の安定度を評価するために光周波数コムとのビート測定を行った。測定を行った結果を図9に示す。グラフの縦軸は光周波数コムとのビートの周波数のドリフトを示し、横軸は測定時間を示している。グラフの縦軸は、最初の測定点での周波数を0kHzとして、ビートの周波数の変化をドリフトとしたものである。グラフ中の大きな不連続箇所は、そこで光周波数コムのロックが外れてしまった事が原因である。共振器長の安定化、及び励起光源の周波数安定化は継続して行われていた。図9の結果から、周波数のドリフトは6時間で400kHzと分かった。

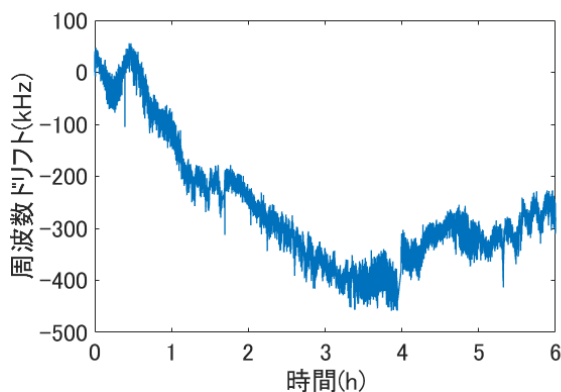


図 9: 光周波数コムを用いたビート測定

30分以内に最大で100kHz程度周波数がドリフトしていることも分かった。リドベルグブロッケードの実験では1回の測定に30分ほどかかるため、1回の測定の中に周波数が100kHz程度ドリフトすることになる。このドリフトも960nmの周波数のドリフトであるため、480nmの光源のドリフトに換算すると200kHz程度のドリフトとなり、1回の測定中に周波数が200kHz程度動くと考えられる。目標とするドリフト100kHz以下を達成できていないことが分かった。

5 EITを用いた絶対周波数基準

トランスファー共振器を用いた周波数の安定化では絶対周波数が分からない。そのため、EIT[9, 10]によってリドベルグ励起の遷移を観測することで原子を基準に周波数を決定する。EIT信号を観測するための実験系を図10に示す。SHG共振器によって生成された480nmの光はAOMによって制御され、その1次光をリドベルグブロッケードの実験に利用する。リドベルグ状態へ励起する時以外はこの光源は使用しないため、0次光を用いてEIT信号を観測することで絶対周波数を測定する。今回の実験では、基底状態に $5S_{1/2}(F=2)$ を、

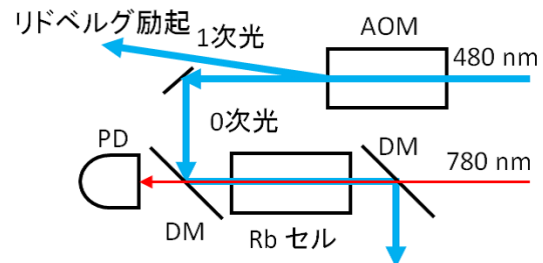


図 10: EIT 信号観測の実験系

中間状態には $5P_{3/2}(F=3)$ を使用し、 $77D_{5/2}$ の遷移を観測した。観測した $77D_{5/2}$ への遷移を図11、図12に示す。

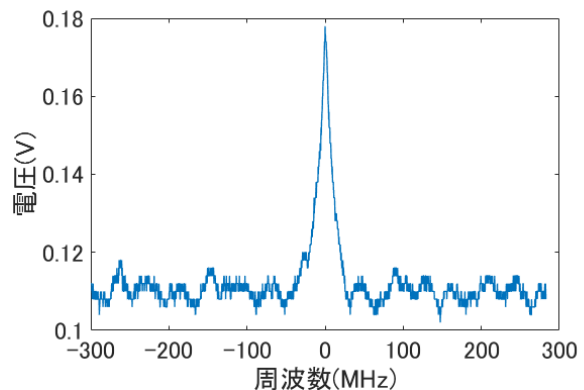


図 11: EIT 信号

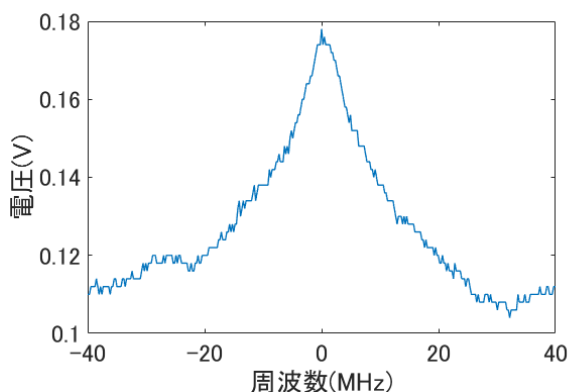


図 12: EIT 信号の拡大図

図 12 は図 11 を拡大した結果である。77D_{5/2} の隣に見える信号は 77D_{3/2} の遷移だと考えられる。横軸は、光周波数コムを用いて測定されたビートの周波数を用いて調整した。図 12 の結果から EIT 信号の線幅は 13 MHz 程度だと考えられる。

今回の測定では、プローブ光として利用した 780 nm 光が中間状態から 200 MHz の離調をとっているため、EIT 信号が弱くなってしまった。そのため、十分な信号を得るために 480 nm のカップリング光のパワーを多く入れているため EIT 信号の線幅が広がってしまっている。今回観測された EIT 信号を基準として用いる場合、780 nm の光の強度ノイズの影響を受けやすく、また吸収線の線幅が広く周波数の感度が低いいため、周波数基準としての精度を高くすることが出来ない。そのため、今回観測した EIT 信号では数 MHz 程度の精度で周波数を合わせることはできないと考えられる。

EIT の信号を用いて絶対周波数を合わせた後、光周波数コムを用いて、絶対周波数を測定した結果、1.5MHz 程度のズレが観測された。実際の実験に用いるには誤差が大きいため、より高い精度で周波数を補正する必要がある。

6 トランスファー共振器の掃引

トランスファー共振器の基準としている 780 nm の光源の周波数をシフトすることで、960 nm の基準とする共振器の周波数をシフトすることが出来る。そこで、図 13 に示すような実験系を構築することで、AOM を用いて基準光源の周波数をシフトして、トランスファー共振器の共振器長の掃引を行った。

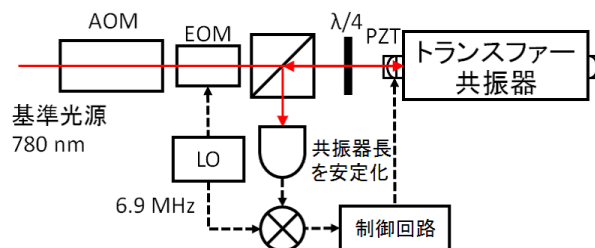


図 13: 共振器長の掃引のための実験系

共振器長の変化を観測するために、同時に EIT の信号も観測することで、周波数のシフトを観測した。図 14 は EIT 信号に対して共振器の共鳴周波数を合わせたときの実験結果であり、図 15 は 780 nm の周波数を 40 MHz シフトさせた時の実験結果を示している。780 nm の光を 40 MHz シフトさせると、960 nm の光は 32 MHz シフトした。よって、トランスファー共振器を介在させて周波数を掃引することが出来た。

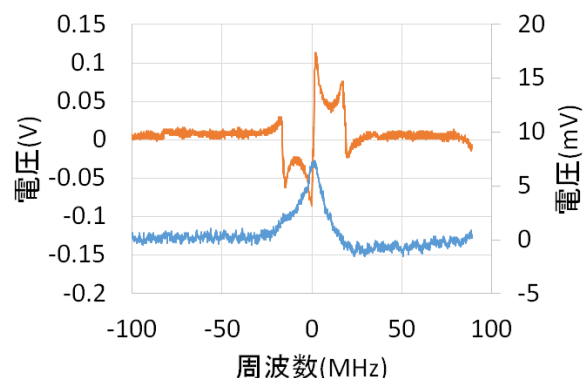


図 14: EIT 信号と誤差信号

780 nm のシフト量と 960 nm のシフト量を

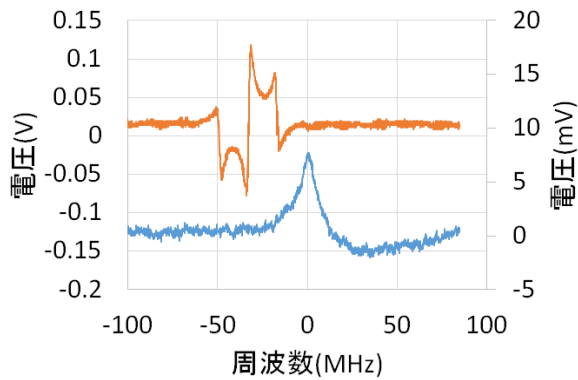


図 15: EIT 信号とシフトした誤差信号

プロットしたものが図 16 である。結果から、780 nm の波長を 1 MHz シフトさせると、960 nm の波長が 0.81MHz シフトしていることが分かる。これは、960 nm の周波数 ν_{960nm} と 780 nm の周波数 ν_{780nm} の比に等しい。そのため、780 nm の周波数のシフト量によって 960 nm の周波数を任意の周波数だけシフトすることが出来る。

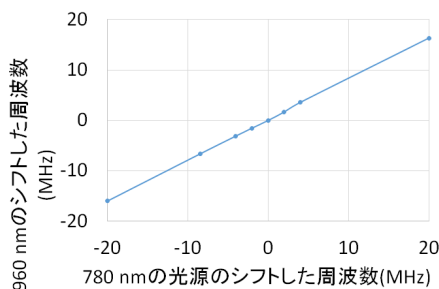


図 16: 780 nm と 960 nm の周波数のシフト量

7 まとめと今後の展望

今回の実験でトランスファー共振器を用いて、励起光源を任意の周波数に安定化することが出来た。トランスファー共振器を用いた安定化では、励起光源の線幅を 200 kHz 程度に、周波数ドリフトを 30 分で 200 kHz 程度、6 時間で 800 kHz 程度にすることが出来た。これは当初の予定である励起光源の線幅とドリフトを 100 kHz 以下にするという目標を達成することが出来ていない。また、リドベル

グ状態への励起には 2 光子励起を用いるため、480 nm と 780 nm の二つの励起光源の線幅の和を 100 kHz 以下にする必要がある。現在使用している 780 nm の光源の線幅も 100 kHz 以下にはなっていない。そのため、480 nm の励起光源だけではなく 780 nm の励起光源の周波数も安定化する必要がある。ドリフトの原因としては、温度変化による屈折率の変化が原因と考えられるため、トランスファー共振器を囲うことで空気の温度変化を抑える必要がある。また、780 nm の励起光源の線幅を狭くするために、780 nm の光源もトランスファー共振器に対して安定化を行う必要がある。トランスファー共振器は 780 nm のとき線幅 1.87MHz のため、原子の吸収線よりも高い安定度で安定化できる期待される。今後は安定度の更なる向上と、トラップされた単一の Rb 原子に励起光源を当てることでリドベルグブロッケードを観測することで、量子情報処理への応用を目指す。

参考文献

- [1] 田村 光, 電気通信大学大学院 平成 26 年度 修士論文, (2015).
- [2] M. Greiner et al. *Nature* **415**, 39-44, 2002.
- [3] P. Bohlouli-Zanjani et al. *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. **77**, 093105, 2006.
- [4] R. P. Abel et al. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. **94**, 071107, 2009.
- [5] D. J. McCarron et al. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. **77**, 105601, 2008.
- [6] Eric D. Black et al. *Am. J. Phys.*, Vol. **69**, 79-87, 2001.
- [7] R. W. P. Drever et al. Vol. **31**, 97105, 1983.
- [8] John L. Hall et al. *HANDBOOK OF OPTICS*, Vol. **2**, 22.1-22.27, 2009.
- [9] M. Fleischhauer et al. *Rev. Mod. Phys.*, Vol. **77**, 633, 2005.
- [10] K.-J. Boiler et al. *Phys. Rev. Lett.* Vol. **66**, 2593-2596, 1991.