

波長 480nm 青色周波数安定化レーザーを用いた ^{87}Rb 原子の Rydberg 原子間相互作用の研究

中川研究室 福泉 美穂

2009 年 3 月 12 日

1 背景・目的

我々の研究室では、シングルアトムやシングルフォトンをトラップし、個々の原子の内部及び外部状態を制御して、量子ビットなどといった量子情報処理への応用に向けての研究が行われている。

私は単一中性原子を量子ビット (Qubit) として用いて量子コンピュータ等の量子情報処理へ応用することを目指した研究を進めてきた。本研究の目標は、独立な光双極子トラップ中に Qubit として用意した単一中性原子を Rydberg 状態 (図 1) まで励起し、双極子-双極子相互作用により起る双極子ブロックードを用いて 2 量子位相ゲート操作を実現することである。そして、そのような Rydberg 原子を用いた 2 量子位相ゲート操作を実現するためにはまず、Rydberg 状態 (図 1) への励起と双極子ブロックードを確認する必要があり、私は光双極子トラップ中のリドベルグ原子の観測を行っている。このような 2 量子位相ゲート操作実現にむけて行うべきことを段階ごとに分けると次のようになる。

- (1) 高磁場勾配の磁気光学トラップ (MOT) を用いた単一原子トラップとその観測。
- (2) 単一原子を MOT から光双極子トラップへと移行させて、原子数と内部状態を保存。
- (3) ポテンシャル中に捕獲された数個の原子に 780nm、480nm の光を対向させて当てて、

基底状態と Rydberg 状態とのラビ振動の観測。

- (4) 独立に制御可能なポテンシャルに入った単一リドベルグ原子同士を接近させて、Rydberg 原子の励起が抑制される双極子ブロックードを観測。双極子-双極子相互作用により 2 個の原子に相関をもたせる。(2 量子ゲート操作)

(1)(2) はすでに確立されており (3)(4) は短期的な、(5) は長期的な目標である。(1) すでに高磁場勾配での磁気光学トラップ (MOT) は確立されており、単一原子をトラップして 6 個まで分離して観測することに成功している。この単一原子トラップを確立したのは私ではないので本論文では簡単に説明する。詳しくは [2] を参照して頂きたい。まず私がクリアしなければならないのは安定した単一原子トラップ、及びその観測である。これから行う実験ではより安定な光源で MOT を用いて原子を捕獲する必要がある。(2) MOT では時間とともに原子数と内部状態が変化してしまう。それを回避し、それらを一定に保つために保存力からなる双極子トラップへの移行が必要である。(3) Rydberg 状態に原子が励起されたことを確認する際には光双極子トラップ光 ($\lambda = 1080\text{nm}$) によるイオン化検出を行うので、検出を行う為の光としても光双極子トラップ光を用いる。Rydberg 状態への励起には $\lambda = 480\text{nm}$ 、 780nm の 2 つの光による 2 光子過程を用いる。実験に用いた

レーザーや磁場は μs オーダーで制御を行う必要があるためパルスジェネレーターで制御する。なお、波長 480nm の青色光源の開発およびその周波数測定も同時に行ってきた。(4) マイクロ光双極子トラップを用いて、トラップ半径 $2\ \mu\text{m}$ という狭い領域にトラップされた Rydberg 原子を互いに数 $\sim 1\ \mu\text{m}$ 程度近づけて、双極子-双極子相互作用による 2 量子ゲート操作を行う。

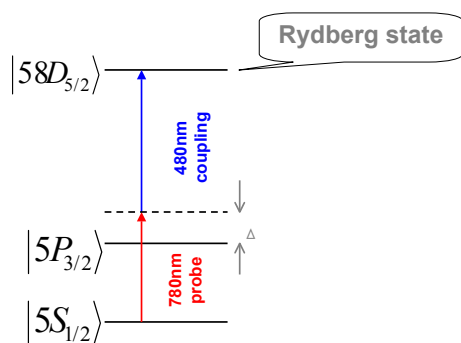


図 1 ^{87}Rb エネルギー順位

2 周波数安定化波長 480nm 青色レーザー開発

2.1 波長 480nm 周波数安定化レーザーの開発

私はまずパワー $\sim 25\text{mW}$ 程の外部共振器型半導体レーザーからの基本波 ($\lambda = 960\text{nm}$) を非線形結晶に入射してみたところ $\sim 1\ \mu\text{W}$ 程の倍波 ($\lambda = 480\text{nm}$) を得た。しかし、Rydberg 状態励起のためには少なくともパワー 10mW 以上の青色光源が必要になる。そこで、基本波をテーパアンプ (TA, tapered amplifier m2k Laser 社) で増幅した後、非線形結晶が配置された Buildup 共振器に s 偏光の光を入射した。

2.2 周波数安定化方法

実験でこの青色光源を使用するには数 MHz 以下に周波数を安定化しなくてはならない。私は図 3 のような装置を開発し、周波数安定化をした。

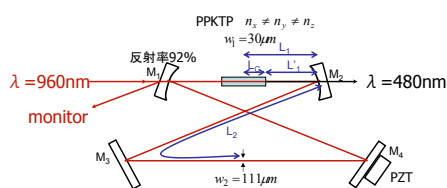


図 2 Buildup 共振器設計図

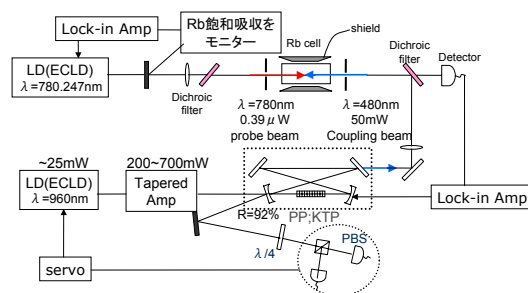


図 3 周波数安定化光源

周波数を安定化するには、

1. 共振器入射時の反射光の基本波 ($\lambda = 960\text{nm}$) を Hänsch-Couillaud の方法を用いてロック。
2. 5S-5P 共鳴線 ($\lambda = 780\text{nm}$) を飽和吸収分光法を用いてロック。
3. 最後に 2 光子遷移による EIT 信号を用いて Buildup 共振器の共振器長ををロック。

という段階を経て Rb 原子の基底状態 Rydberg 状態間の周波数を安定化した。

2.3 光周波数コムによる絶対周波数測定

^{87}Rb の Rydberg 原子による量子情報への応用に向けた研究はここ数年の間に注目されている。しかし、Rydberg 状態に関する分光学的データは乏しい。波長計による測定 [3] は報告されているが、絶対周波数測定は行われていない。そこで、私は光周波数コムを立ち上げて Rydberg 状態の絶対周波数測定を試みた。ここでの被測定周波数は coupling 光の基本波

($\lambda = 960\text{nm}$) である。

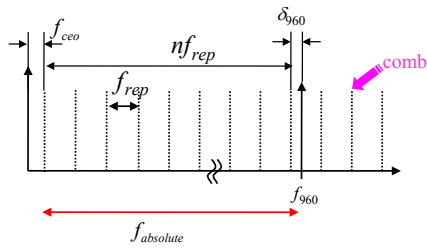


図 4 光周波数コムによる絶対周波数決定方法

図 4 は基本的な光周波数コムの図である。フェムト秒モードロック意レーザーから等間隔に出力されるスペクトルは櫛 (comb) 状である。光周波数コムが実際に存在する範囲を超えて仮想的に低周波数まで広げていくと、ちょうどゼロにはならず、キャリア・エンベロープ・オフセット周波数 f_{ceo} と呼ばれる余りの周波数がでてくる。すると絶対周波数は

$$f = \pm f_{ceo} + n f_{rep} \pm \delta \quad (1)$$

と表される。ただし、 n は数十万から数百万の整数、 f_{rep} は繰り返し周波数、 δ は被測定周波数と光周波数とのビートである。 f_{rep} が 100MHz ~ 1GHz の範囲であれば、モード次数 n を決定するのに必要な周波数測定精度は $10^{-7} \sim 10^{-6}$ であるので市販の波長計で十分対応できる。 f_{ceo} と δ は絶対値で与えられるので、 \pm を考慮すると 4 パターン考えられる。これを決定するには被測定周波数を上げたり下げたりしたときに、ビートがどちらへ動くか調べることで符号が決定できる。私は ^{87}Rb の Rydberg 状態の絶対周波数測定を 2 つの方法で測定した。

方法 図 4 に示した。波長 $\lambda = 960\text{nm}$ の絶対周波数を測定。

f_{rep} と f_{ceo} をロックして δ_{960} をスペクトラムアナライザー (Anritu 社) で測定

する。

$$f_{absolute} = \pm f_{ceo} + n f_{rep} \pm \delta_{960} \quad (2)$$

方法 波長 $\lambda = 780\text{nm}$ と $\lambda = 960\text{nm}$ の差周波数を測定。

f_{rep} をロックして、 δ_{760} と δ_{960} をスペクトラムアナライザーで測定する。この方法は分光学的データが揃っている波長 $\lambda = 780\text{nm}$ の光を基準に $\lambda = 960\text{nm}$ を測定するやり方である。

$$f_{difference} = n f_{rep} \pm \delta_{960} \pm \delta_{780} \quad (3)$$

測定結果は以下ようになった。

測定ライン	測定方法	絶対周波数 [MHz]
$ 5S \rangle \rightarrow 58D \rangle$	方法	1008997348.5 ± 0.15
$ 5S \rangle \rightarrow 54D \rangle$	方法	1008837306.4 ± 0.13

表 1 Rydberg 状態絶対周波数測定結果

3 実験

3.1 装置

MOT (磁気光学トラップ) は超高真空 ($\sim 10^{-10} \text{Torr}$) ガラスセルの中で行っている。Rb 原子源はディスペンサーから発生させている。ディスペンサーは 6 A の電流によりあたためられ、10 分間で 400 ~ 500 になる。光誘起脱離 (Light Induced Atom Desorption) 用 UV-LED ライト (400nm, 10mW) は 3 つ用意されている。波長 $\lambda = 780\text{nm}$ MOT ビームについては、cooling 光は DFB レーザーから、repump 光は外部共振器型半導体レーザーから周波数安定化された光を供給していて、 x, y, z の 3 次元 6 方向からセルに照射している。MOT ビームサイズはアイリスにより 2mm に調節している。冷却に用いる cooling 光は、 $|5^2S_{1/2}, F = 2 \rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F' = 3 \rangle$ の遷移から離調 $\sim 10\text{MHz}$ だけとった光である。repump 光は $|5^2S_{1/2}, F = 1 \rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F' = 2 \rangle$ に共

鳴した光を用いている。optical pump(OP) 光は、 $|5^2S_{1/2}, F = 2 \rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F' = 2 \rangle$ に共鳴した光を用いている。量子情報処理への応用を見据えて、 σ_+ 偏光の OP 光と直線偏光の repump 光を同時に原子に照射することで、 $|5^2S_{1/2}, F = 1, m_F = 2 \rangle$ に原子の内部状態を揃えることができる。私が用いているコイルは、MOT 用のコイル (quadrupole coil) と、磁場補正コイル (Bias field coil) の 2 種類である。MOT コイルは 4 重極磁場を作るためのコイルで、電流 ~ 8 A のとき 104G/cm の低磁場勾配を、電流 20A のとき 260Gauss/cm の高磁場勾配を作っている。私の実験では 1 個もしくは数個の原子をトラップしなければならない。そのため、この高磁場勾配は極めて重要である。磁場補正コイルはヘルムホルツコイルを x, y, z 軸上に、地磁気やイオンポンプの磁場をキャンセルし、量子化軸を決めるために使用している。原子数の観測には、数が多い時 (> 100 個) には冷却 CCD カメラを、単一原子のような少ない原子数の観測には、主にフォトンカウンティング用 Avalanche Photo Diode(以下、APD) を使用した。私が使用した冷却 CCD カメラは、Roper Scientific 社の Cascade650 である。APD (Avalanche Photo Diode) は PerkinElmer 社の Single photon counting module (SPCM-AQR-14) を用いている。なお、用いた APD はフォトンカウンティング用であるため、APD ではゲートタイムあたりに観測したフォトン数より原子数を見積もっている。真空セルの中には AR コートの非球面レンズ ($f=8\text{mm}, \text{NA}=0.5$) があり、CCD を用いて原子像を取り込んでいる。そして、高分解、高効率に原子数をカウントするために APD を用いて蛍光を観測している。

3.2 単一原子トラップ

まず、MOT を作る際には cooling 光と repump 光と 4 重極磁場を導入する。104Gauss/cm、8 A の低磁場勾配の条件下

では 10 個以下の MOT を得ることができ、325Gauss/cm、25A の高磁場勾配で単一原子トラップをすることができた。単一原子の状態は最大で数分間保つことができる。信号ノイズは 20 % であり、原子の位置やレーザーパワーの揺らぎによるものである。

MOT で捕獲した原子を光双極子トラップへ移行することで原子数、内部状態を保存する。さらに、Rydberg 原子の双極子ブロックードを行う際には原子イオン化光として用いる。まずはビームウェスト半径 $8 \mu\text{m}$ の比較的大きな半径で単一原子 ~ 数個の原子を捕獲することを行った。(図 5) さらに 2 量子ゲート操作

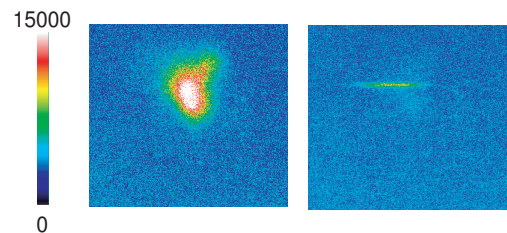


図 5 磁気光学トラップ (左)、光双極子トラップ (右) の様子 (原子サイズは $15 \mu\text{m}$)

を行う為にはさらに小さな領域に原子を捕獲し、かつ操作できなければならない。現段階で Rydberg 状態励起の際にはビームウェスト半径 $w_0 = 8 \mu\text{m}$ の光双極子トラップを行ったが、双極子ブロックードの実験をするためにはビームウェスト半径 $w_0 = 2 \mu\text{m}$ がより小さなトラップが必要になる。光双極子トラップ (以下、FORT : far off resonance optical dipole trap) 光としては無偏光の Ytterbium Fiber laser (マルチモード、 $\lambda = 1064\text{nm}$, Max10W) を使用した。マルチモード (コヒーレント長が数 cm と短い) なので、ミラーで折り返しての定在波は期待できないので 1way での使用に限定して用いた。FORT 光は y 軸に沿って MOT に照射している。FORT 光は AOM によりスイッチングされていて、 y 方向にセルに入射している。焦点距離 $f=75\text{mm}$ のレンズを使って

ビームウェスト半径 $8 \mu\text{m}$ 以下にしている。普段は 0.7W のレーザーパワーで使っていて、トラップの深さは 1mK 。動径方向、軸方向のトラップ周波数はそれぞれ $\omega_{x,z}/2\pi = 12.3\text{kHz}$ 、 $\omega_y/2\pi = 374\text{Hz}$ である。空間的光双極子トラップのサイズは $16 \times 16 \times 370 \mu\text{m}$ である。図 5 を見て分かるように光双極子トラップは軸方向に細長い形になっている。MOT から FORT に移行するときの実効的な離調は $\delta_{eff} = -63\text{MHz}$ となる。このとき MOT ビームは共鳴から外れるため原子は減る。しかし一方で、原子は MOT ビームの影響を受けなくなり内部状態は保存される。

3.3 Rydberg 状態への励起

次のステップとして、FORT で捕獲した冷却原子を図 1 のように Rydberg 状態へ励起する。

cooling 光 ($\lambda = 780\text{nm}$) と repump 光 ($\lambda = 780\text{nm}$) と FORT 光 ($\lambda = 1080\text{nm}$) に関しては前節で述べた通りである。probe 光 ($\lambda = 780\text{nm}$) と blue 光 ($\lambda = 480\text{nm}$) はそれぞれ AOM で 2-way 200MHz 周波数をシフトしている。probe 光は 2 光子吸収遷移の $5S-5P$ 遷移のための光であり、blue 光は $5P-5D$ 遷移のための光である。blue 光は $\lambda = 960$ の倍波により発生させている。図は基底状態 - Rydberg 状態間の Rabi 振動を観測したときのシーケンスである。基底状態 - Rydberg 状態間の原子分布確率を測定には、probe 光を照射する前と後の APD からの信号を高速デジタルオシロスコープ (DSO 6052A, Agilent Technologies 社) に取り込んで行った。2 回の測定では、probe 光の立ち上がりトリガーにして前と後それぞれ 500ms 間信号を取り込んでいる。この実験には μs オーダーで光を制御するために 8 チャンネルの BNC model 575 pulse/delay generator を使用した。(最小パルス幅 2ns) 図のように、まず 3 ~ 4 個の高磁場勾配中 MOT 原子をトラップし、MOT から FORT に移行。ここで最初の測定をしてい

る。FORT 光は Rydberg 状態への励起を行うのに十分長くかつトラップ原子を失わないくらい短くなるように、数 μs にする必要がる。FORT に原子を移行させた後は、原子を $m_F = 2$ のゼーマン分裂に原子を集めるため optical pump 光と bias field (補正磁場) を導入する。そして、Rydberg 状態へ励起するため FORT 光を切り、励起光 (blue 光と probe 光) を照射する。ここで、原子が Rydberg 状態にいと、長い寿命と残留速度のため原子はトラップから外れてしまう。FORT から MOT へ原子を戻し、再び基底状態の原子数を観測している。

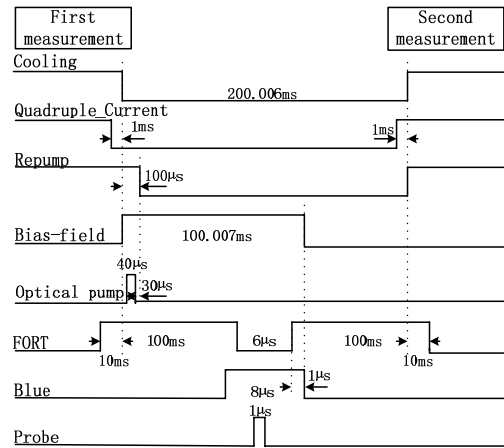


図 6 Rabi 振動観測時のシーケンス

図 7 は原子 3 ~ 4 個での基底状態 - Rydberg 状態間の Rabi 振動の様子である。基底状態にいる原子の存在確率は、

$$P_{\text{ground}} = \frac{N_{\text{final}}}{N_{\text{initial}}} = \frac{R_f}{R_i} \quad (4)$$

なお、初期原子数は $N_{\text{initial}} \sim 4$ で行った。 R_i は励起光照射前の光子数レート、 R_f は励起光照射後の光子数レートである。フィッティング関数は

$$y_0 + A \sin(\Omega t + \phi) e^{-t/\tau} \quad (5)$$

を使用した。また、エラーバーはデータの 10 %としている。probe 光 (励起光) の照射時間

を変えて基底状態原子の存在確率を計算している。減衰振動のフィッティングによって、Rabi 周波数 $\Omega_R = 2\pi \times 0.51\text{MHz}$ を得た。理論的には Rabi 周波数は以下のように与えられる。

$$\Omega_R = \frac{\Omega_{780}\Omega_{480}}{2\Delta} \approx 2\pi \times 0.44\text{MHz} \quad (6)$$

基底状態 Rydberg 状態間の原子の遷移効率は 40 %であった。これは原子間の衝突や相互作用が原因と考えられる。また、ノイズや低いコントラストや早い減衰は主に原子の空間的自由度やレーザー周波数のゆらぎが問題であると考えられる。今回の実験では原子数 3 ~ 4 で行っている。そのため各原子の Rabi 振動の違いも減衰の原因ではないかと考えている。

効率のよい Rydberg 状態への励起のため、blue 光を周波数挿入していき FORT 中の数個の原子によるスペクトラムの測定を行った。(図 8) 線幅は 6 MHz となった。このグラフから分かるように実験で使用するレーザーの安定度は MHz オーダーでなければならない。私が開発した Rydberg 状態励起用レーザーの周波数安定度は 100kHz 以内なので、実験に使用するのに十分な光源が開発できたことが確認できた。

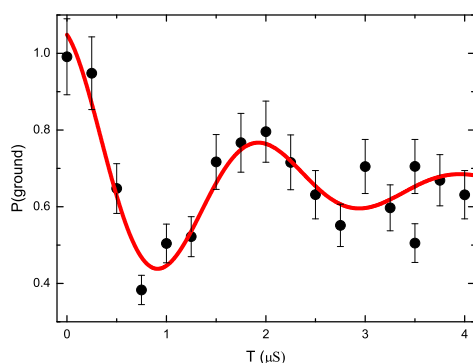


図 7 基底状態 Rydberg 状態間 Rabi 振動の観察

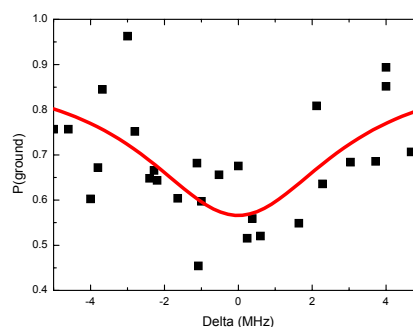


図 8 基底状態 Rydberg 状態間の共鳴スペクトラム

4 まとめと展望

4.1 周波数安定化波長 480nm 青色レーザー開発について

- 波長可変、周波数安定化青色光源を開発した。
- 光周波数コムを立ち上げた。
- 開発した青色光源の絶対周波数を 9 桁の精度で測定することができた。

4.2 Rydberg 原子間相互作用について

- 光双極子トラップ中で少数個 ^{87}Rb 原子の基底状態から Rydberg 状態へのコヒーレントな励起を確認した。
- Rydberg 原子の Rabi 振動を観測することができた。

参考文献

- [1] 細谷 暁夫 著, 『量子コンピューターの基礎』, サイエンス社
- [2] 中川 悠輔 修士論文 『単一原子トラップを用いた原子操作』 (2006)
- [3] B.P.Stoicheff and E.Weinberger Doppler-free two-photon absorption spectrum of rubidium Can.J.Phys.57,2143(1979)