

Rb 原子の Rydberg ブロッキング実現のための

高出力・高安定 480nm 光源の開発

中川研究室 渡邊 智貴

2010 年 3 月 1 日

1. 研究背景・目的

我々の研究室では、レーザー冷却技術により原子を一個レベルでトラップし、その内部及び外部状態を制御することで、単一中性原子を量子ビットとした量子コンピュータへ応用する事を考えている。

古典コンピュータが 0 と 1 の離散的なビットであるのに対し、量子コンピュータでは個々のビットは量子状態（ベクトル）であり、重ね合わせ状態が許される。量子コンピュータではこの重ね合わせ状態を利用して量子並列計算を行う。実際に任意の量子計算を行うためには、1 量子ビットのユニタリー変換（1 量子ゲート操作）と 2 量子ビットの C-NOT ゲート（2 量子ゲート操作）があればよいことが知られている。これらのことから、量子コンピュータの実現には、任意に操作可能な量子ビット（量子二準位系）と量子ビット間の量子的相関が必要不可欠となる。さらに実用的な意味で量子計算を行うには、1000 量子ビット程度が必要になると言われている。

中性原子は、レーザー冷却技術によって精密にその量子状態を制御できるほか、量子ビットの拡張性や長いコヒーレンス時間など量子計算に求められる条件を備えており、量子コンピュータへの応用に向けた研究が進んでいる。

私は単一中性原子を用いた量子コンピュータの実現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量子ビットとして用意した単一 Rb 原子を μm オーダーで近接して捕獲し、その原子間相互作用によるブロッキング効果を利用して 2 量子位相ゲートを実現することである。

2 量子位相ゲート実現に向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) 単一または少数個の原子を光双極子トラップし、その原子数と内部状態を保存する。

(3) 光双極子ポテンシャル中の単一原子に波長 780nm、480nm のレーザーを照射して、基底状態と Rydberg 状態間のラビ振動を観測する。

(4) 光双極子ポテンシャル中の少数個の原子に対して (3) と同様の操作を行い、近接した Rydberg 原子が励起を抑制する Rydberg ブロッキング効果を観測する。

(5) μm オーダーで接した独立な光双極子トラップ中に単一原子を捕獲し、Rydberg ブロッキング効果を用いてそれらに量子的相関を持たせる (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。

実験を行うには、安定な単一原子トラップ及び単一原子のコヒーレントな Rydberg 励起を行う必要がある。これまでは同じ光学台に実験装置（真空ガラスセルやコイルなど）とレーザー光源が配置してあり、光学台の振動や実験装置からの電流ノイズがレーザー光源に影響を与えてしまい、原子のトラップや Rydberg 励起が不安定となっていた。私はレーザー光源を別の光学台に移動させることでこの問題を解消した。

(3) のラビ振動の観測は単一原子をコヒーレントに Rydberg 励起するために必要な操作である。

(4) に関して、ブロッケード効果を観測するためには原子間相互作用が及ぼし合うように原子を近接させなければならない。そのために、光双極子トラップの領域を狭くして原子を近づけると、これまでより大きな主量子数の Rydberg 状態に励起して相互作用を大きくすることが必要である。そこで、私はより高出力で高安定な Rydberg 励起用波長 480nm レーザー光源を開発した。

私は (5) の 2 量子ゲート操作を目標に、(4) の Rydberg ブロッケードの観測を実現するための実験装置の開発を研究テーマとした。

2. Rydberg 原子

Rydberg 原子とは、主量子数 n が非常に大きな電子状態である Rydberg 状態に励起

された原子のことである。

原子の軌道半径は n^2 に比例するため、例えば主量子数 $n = 50$ の Rydberg 状態であれば、その軌道半径は $2500a_0$ ($\approx 0.13\mu\text{m}$) となる。また、Rydberg 原子の分極率は n^7 に比例し、双極子モーメントは n^2 に比例する。これらは Rydberg 原子間に強い双極子-双極子相互作用をもたらす、基底状態では原子同士を数百 nm にまで近づけなければ相互作用は起こらないが、Rydberg 原子を用いることでそのオーダーを数 μm にすることができる。

1 個の原子が Rydberg 状態に励起すると、双極子-双極子相互作用により近傍の原子のエネルギー準位がシフトする。このエネルギーシフトが Rydberg 状態の線幅よりも大きければ、近傍の原子の Rydberg 励起が抑制される『Rydberg ブロッケード』が起こる (図 1)。

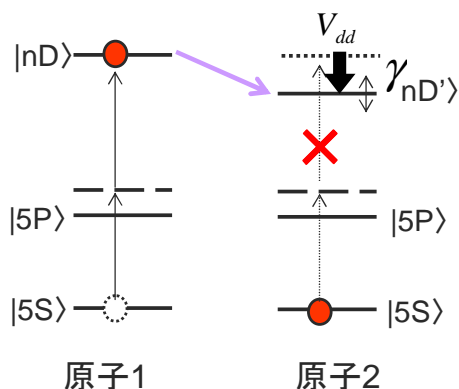


図 1. Rydberg ブロッケード概念図

3. Rydberg 励起用波長 480nm 光源

本研究では、 ^{87}Rb 原子を Rydberg 状態に励起するために、波長 780nm と 480nm のレーザーによる二光子吸収遷移を用いている (図 2)。

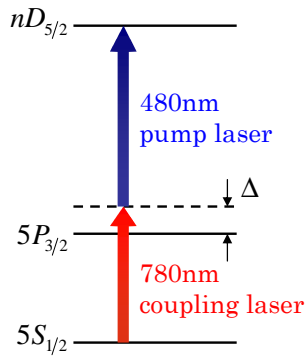


図 2.⁸⁷Rb のエネルギー準位図

480nm レーザー光源は数十 mW 以上の出力が必要で、任意の主量子数 n の Rydberg 状態に励起するために波長可変でなくてはならない。そのため、波長 960nm の外部共振器型半導体レーザー (ECLD) の出力をテーパアンプで増幅した後、非線形結晶 PPKTP で波長変換して第二次高調波発生 (SHG) である波長 480nm のレーザーを出力している。

Rydberg ブロッキング効果による原子のエネルギーシフトは MHz オーダーであるため、Rydberg 励起用光源はそれ以下の線幅で周波数安定化されている必要がある。周波数安定化は図 3 のような構成で、次の手順で行っている。

- (1) 共振器からの反射光を用いて Pound-Drever-Hall 法で 960nm の LD の周波数をロック。
- (2) 飽和吸収信号を用いて 780nm の LD の周波数を 5S-5P 共鳴線にロック。
- (3) 二光子吸収遷移による EIT 信号を用いて Build-up 共振器の共振器長をロック。

480nm レーザー光源の出力特性と周波数安定度をそれぞれ図 4、図 5 に示す。出力は 100mW 以上、周波数安定度は 400kHz 以内が得られた。

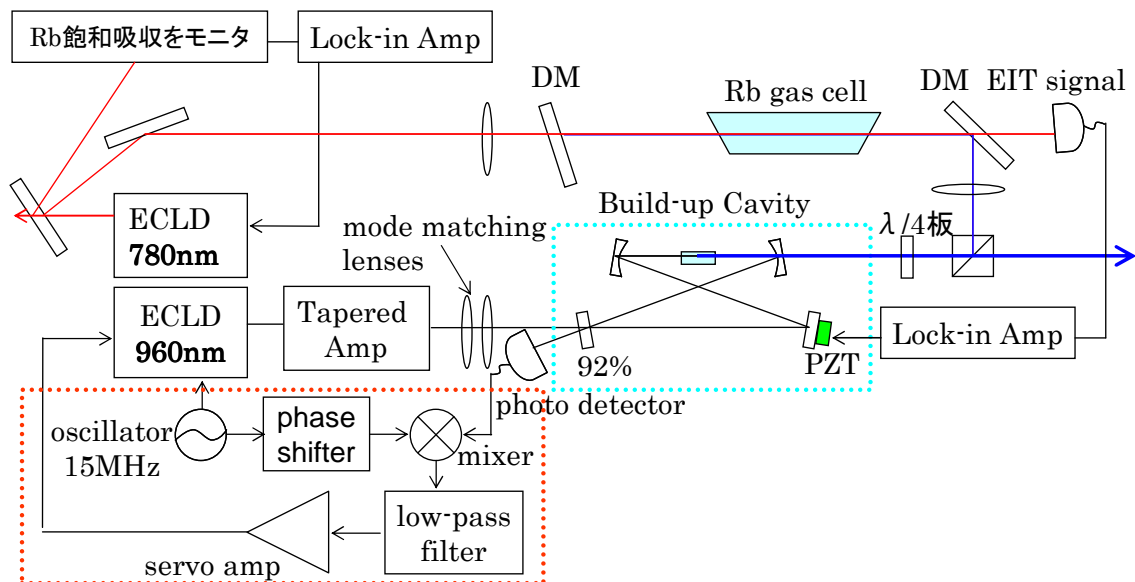


図 3.波長 480nm レーザー光源の周波数安定化

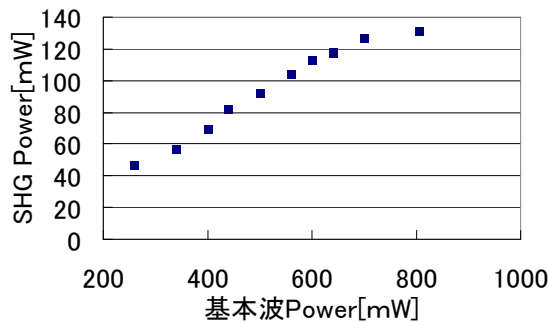


図 4.波長 480nm 光源の出力特性

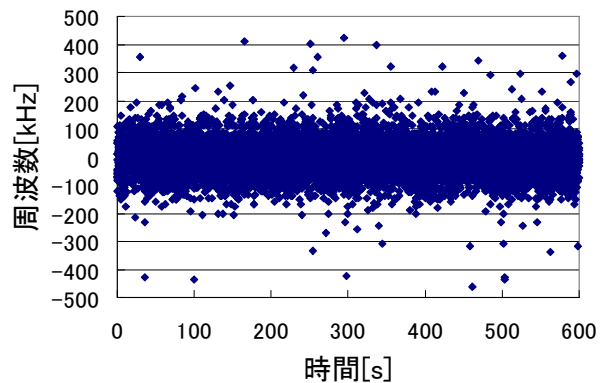


図 5.波長 480nm 光源の周波数安定度

4.実験

4-1.単一原子トラップ

実験装置の概略図を図 6 に示す。

Avalanche Photo Diode(APD)で原子からの蛍光を検出し、その離散的な信号により MOT でトラップされている原子の個数を知ることができる。

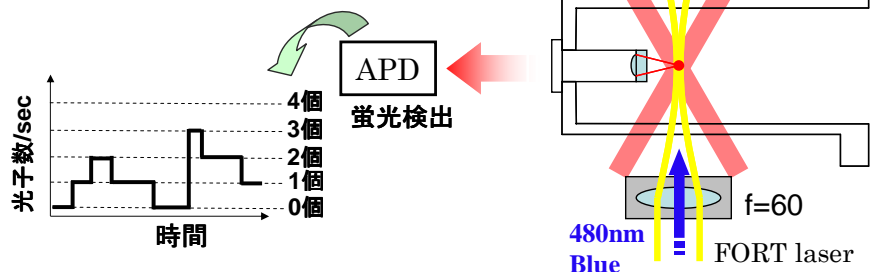


図 6.実験装置概略図

4-2. 単一原子の Rydberg 励起

主量子数 $n=43$ の Rydberg 原子を用いて実験を行った。レーザー (780nm&480nm) によって Rydberg 状態に励起した原子は光双極子トラップポテンシャルによりイオン化する。この光イオン化による基底状態からのロス測定することにより、原子の Rydberg 状態への励起を確認する。

この測定タイムシーケンスを図 7 に示す。

pump レーザーの離調を掃引して、

高い磁場勾配 (325Gauss/cm \sim) の MOT を用いることで、1 個または少数個の原子をトラップすることができる。また、MOT 中では原子数や内部状態が変化してしまうため、光双極子トラップ (FORT) に原子を移行する。

Rydberg 状態の分光を行った (図 8)。スペクトルの線幅は 0.5MHz 程度であるから、Rydberg 励起レーザーの線幅を 1MHz 以下にできたことが分かる。

次に coupling レーザーのパルス幅を変えながら測定を行い、基底状態と Rydberg 状態間のラビ振動の観測を行った (図 9)。

ラビ周波数 $\Omega_r \approx 2\pi \times 0.5MHz$ が得られ、理論値 $\Omega_r = 2\pi \times 0.56MHz$ と良く一致した。

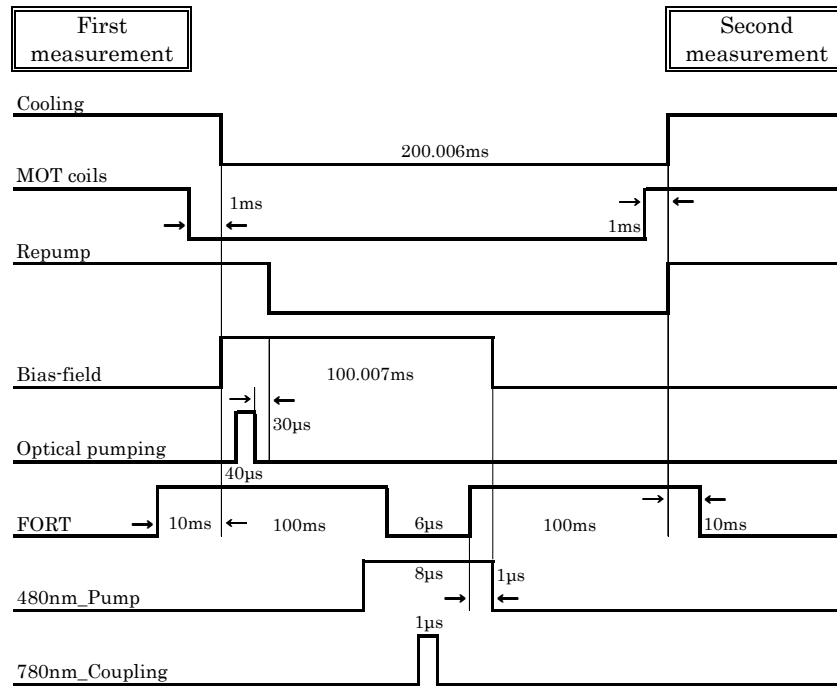


図 7. 実験のタイムシーケンス

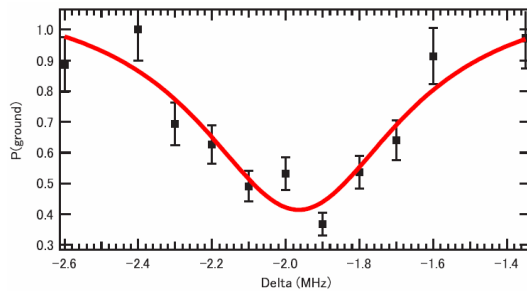


図 8. 基底状態と Rydberg 状態 (n=43) 間の共鳴のスペクトル

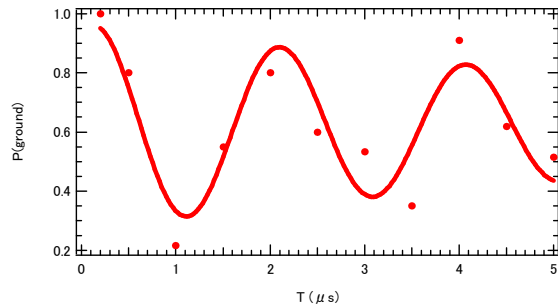


図 9. 基底状態と Rydberg 状態 (n=43) 間のラビ振動

4-3. Rydberg ブロッキングの観測

単一原子の実験に続き、MOT で原子を 2 個トラップして前節と同様の実験を行った。もし Rydberg ブロッキングが起これば 2 個の原子が同時に Rydberg 状態に励起されることはないで、その振幅は 1/2 になる。また、ブロッキングが起こった場合、 N 個の原子からなる原子集団の状態は、

$$|\psi_e\rangle = 1/\sqrt{N} \sum_{i=1}^N |g_1, g_2, g_2 \dots e_i \dots g_N\rangle$$

と表され、そのラビ周波数は $\sqrt{N}\Omega_R$ となる [1]。

実験結果を図 10 に示す。単一原子のラビ振動と比べて振幅は約 0.7 倍、周波数は約 1.1 倍 ($\Omega'_R \approx 2\pi \times 0.55 \text{ MHz}$) となっていて、Rydberg ブロッキング効果と考えられる励起の抑制が確認できたが、予想していた結果 (振幅 0.5 倍、周波数 1.41 倍) とは一致しなかった。これは相互作用が小さく、ブロッキング効果が十分働いていないこと

が原因と考えて、主量子数の大きな Rydberg 状態を使って相互作用を大きくして実験を行うことにした。

主量子数 $n=75d$ の Rydberg 状態での実験結果を図 11 に示す。2 個の原子によるラビ振動の振幅は単一原子の場合の半分であった。また、ラビ周波数は単一原子 ($\Omega_R \approx 2\pi \times 0.37\text{MHz}$) のときの $\sqrt{2}$ 倍 ($\Omega'_R \approx 2\pi \times 0.52\text{MHz}$) であった。これらのことから、Rydberg ブロッキング効果が確認できたと言える。

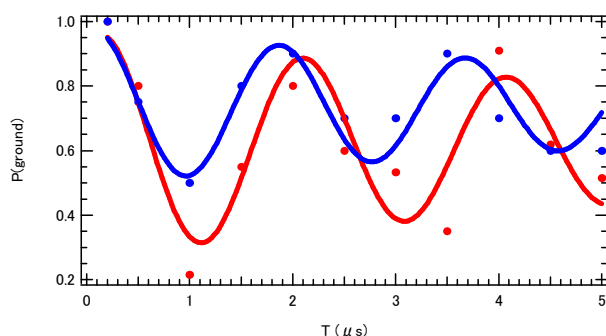


図 10.基底状態と Rydberg 状態 ($n=43$) 間のラビ振動 (赤: $N=1$ 、青: $N=2$)

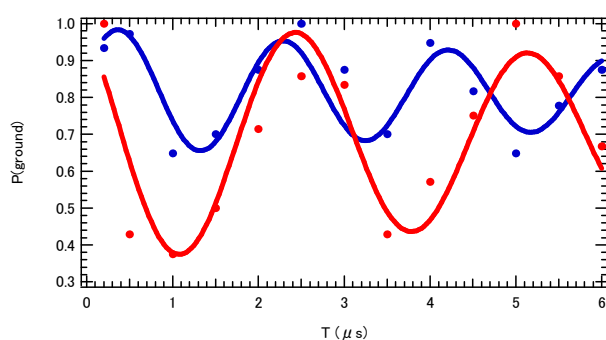


図 11.基底状態と Rydberg 状態 ($n=75$) 間のラビ振動 (赤: $N=1$ 、青: $N=2$)

5.まとめと今後の展望

本研究で私が行ったのは、

- 高出力・高安定な波長 480nm レーザー光源の開発
- 単一原子のラビ振動の観測
- Rydberg ブロッキング効果の観測

である。

波長 480nm レーザー光源は、非線形結晶を以前使用していたものより 1.5 倍長い結晶を使うことで 100mW を超える出力が得られた。また、マスターレーザーの周波数安定化方法を Hänsch-Couillaud 法から Pound-Drever-Hall 法に変更することで、周波数ロックをよりロバストにすることができた。さらに、Build-up 共振器全体を密閉したケースに納めることで、結晶の結露を防止して主量子数 $n>70$ の Rydberg 状態への励起を可能にした。

主量子数 $n=75d$ の Rydberg 原子を準備し、トラップする原子数を変えてラビ振動を観測することで、Rydberg ブロッキング効果が確認できた。

参考文献

- [1] Rolf Heidemann , Ulrich Raitzsch , Vera Bendkowsky , Björn Butscher , Robert Löw Luis Santos , Tilman Pfau “Evidence for Coherent Collective Excitation in the Strong Blockade Regime ” (2007) PRL 99 , 163601