

光双極子トラップ中のリドベルグ原子の双極子ブロッケード

量子物質工学専攻 中川研究室 玉木 嘉人

【研究背景】

現在、世界中で量子情報処理、特に量子コンピュータの実現に向けた取り組みが行われている。量子コンピュータとは量子力学の基本原則に基づく全く新しい計算機のこと、1985年頃概念が提案された。そして、1994年に P.W. Shor が発表した量子計算アルゴリズム (Shor のアルゴリズム) がきっかけとなって、全世界に広まった [?]。このアルゴリズムは、量子チューリングマシンを用いれば、現在の古典コンピュータでは対数時間かかると解くことが不可能な因数分解を、わずか数分で解けるというものであった。現在の暗号技術は因数分解を基礎として利用しているため、このアルゴリズムの出現が社会的・軍事的に与えたインパクトは大きく、現在の暗号技術の崩壊を示唆するものであった。

古典コンピュータが 0 と 1 の離散的なビットを用いて計算するのに対し、量子コンピュータは 0 と 1 の重ね合わせ状態がとれるビット (量子ビット: Qubit) を用いて量子並列計算を行うものである。実際に量子万能回路を作るためには、任意の 1Qubit のユニタリ変換 (1 量子ゲート操作) と 2Qubit の制御-NOT (C-NOT) ゲート (2 量子ゲート操作) があればよい。それには 1Qubit としての『原子数の確定』とその『独立な量子状態の制御および検出』が必要であり、さらに意味のある (古典コンピュータの性能を超える) 演算をするためには、少なくとも 1000Qubit 程度までの『拡張性』が求められる。これに対する実験的なアプローチも、世界中で様々な媒体 (液体分子、イオン、電子など) を Qubit に用いて行われており、今のところ核磁気共鳴 (NMR) を用いた 7Qubit での演算により、Shor のアルゴリズムを実証した成果が世界最先端であるといえる。しかし、どのアプローチにも一長一短があり、どんな媒体が一番適しているのかは決定されるに至っていない。

私の研究もこのような Qubit の操作を、中性原子を用いて行うという立場にいる。しかし、今のところ中性原子では任意の 1Qubit 操作はできていても、2Qubit 操作はまだ実現されていない。そこで、独立な双極子トラップ中にいる (単一) 原子同士に原子間相互作用を与える方法を用いて、2Qubit ゲート操作を行うことを目指している。しかし、基底状態間の相互作用力は弱く、また極低温にまで冷やさなければならぬので、私は大きな双極子モーメントを持つリドベルグ状態に励起させる方法を用いることにした [3]。これまでに我々の研究室では単一原子トラップが実現されており [1]、私はこの単一原子トラップを用いて 2Qubit ゲート操作の実現を目指して研究を進めてきた。

【研究目的】

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リドベルグ状態まで励起し、双極子-双極子相互作用により起る双極子ブロッケードを用いて 2 量子位相ゲート操作を実現することである。そして、そのようなリドベルグ原子を用いた 2 量子位相ゲート操作を実現するためにはまず、双極子ブロッケ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双極子ブロッケード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、近傍原子の励起が抑制される双極子ブロッケードを観測
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、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 操作)

(1)(2) はすでに確立されており (3) は短期的な、(4) 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 [1] 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。これまでの光学系では光源と実際にトラップするコイル等が同じ光学台にあることで実験中の振動や実験室の温度揺らぎによってレーザーの周波数ロックが頻繁にはずれるということがおきていた。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。そこで、冷却光としてこれまで使っていた半導体レーザーから温度ゆらぎや振動に強く安定度の高い DFB レーザーを用いた光源を開発した。

(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) リドベルグ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 ($\lambda = 1064\mu\text{m}$) 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。リドベルグ状態への励起には $\lambda = 480\text{nm}, 780\text{nm}$ の2つの光による2光子過程を用いる。(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リドベルグ原子を互いに数 $\sim \mu\text{m}$ 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。

【双極子ブロッケード】

2000年に *Lukin* らによって原子群をリドベルグ状態に励起することで高速な2量子位相ゲートを実現する提案がなされた[3]。そして、2005年に *M.Saffman* らによって、Rydberg原子の双極子-双極子相互作用を用いた量子ゲートの解析がなされた[4]。リドベルグ原子とは主量子数の非常に大きな電子状態であるリドベルグ状態に励起された原子のことである。リドベルグ状態に励起させることによって原子は大きな双極子モーメントを持つので ($\propto n^2$)、原子間相互作用は n^{11} 効いて、数 μm 程度離れた原子同士で相互作用が起こる。そして、ゲート操作時間はレーザーの励起等で決まる為、理論的に高速処理が可能になる。

双極子-双極子相互作用

独立なトラップ中に存在する単一リドベルグ原子を考える。この2原子間が距離 R だけ離れている場合の双極子-双極子相互作用 V_{dd} は

$$V_{dd} = \frac{C_6 D_\phi}{R^6} \propto n^{11} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 D_ϕ は固有値であり、 $C_6 \sim d^4/\hbar\delta, d = n^2 e a_0, \delta \propto 1/n^3$ である (n :主量子数、 e :電荷、 a_0 :ボーア半径)。

2量子ゲート操作

$\Omega_j \ll u$ を考える。このとき、独立に制御可能なトラップ中の原子1,2を用いる。原子1,2のラビ周波数はそれぞれ Ω'_1, Ω'_2 とし $\Omega'_1 \neq \Omega'_2$ である。そして原子1,2の離調 $\delta_1 = \delta_2 = 0$ とする。先ほどと同じように、3つのステップに分けて考える。

1. π パルスを原子1に照射。
2. 2π パルスを原子2に照射。
3. 再び π パルスを原子1に加える。

ここで、原子1,2の基底状態 $|f=1\rangle$ を $|0\rangle$ 、励起準位 $|f=2\rangle$ を $|1\rangle$ とし(1)、それぞれの2原子の状態4つに関して上の3ステップについて考えてみる(図2参照)。

原子1,2とも基底状態にある場合

$|00\rangle$ ではどちらの原子もパルス ($\Lambda = 780\text{nm} \ \& \ 480\text{nm}$) で励起されないで、3ステップ後も $|00\rangle$ となる。

原子1,2のどちらか一方が励起状態にある場合

$|01\rangle, |10\rangle$ では、励起準位にある原子 $|1\rangle$ が最初の π パルスによってリドベルグ状態 $|r\rangle$ に励起され、2回目の π パルスによって、励起準位 $|1\rangle$ に戻ってくる。このとき位相が $\pi/2$ づつシフトして、結果として $-|01\rangle, -|10\rangle$ という状態になる。

原子1,2とも励起状態にある場合

$|11\rangle$ では、これまでの場合と違い”双極子ブロッケード”が起る。まず最初の π パルスによって原子1がリドベルグ状態に励起される。しかし、次の 2π パルスでは原子2は原子1の双極子ブロッケードにより準位がシフトして励起が抑制される為、状態は変わらない。ここで、 $\tilde{\varphi} \approx \pi\Omega_2/2u \ll \pi$ の小さな位相差が蓄積される。そして、2回目の π パルスによって、リドベルグ状態に励起されていた原子1が元の状態 $|1\rangle$ に戻ってきて、 $e^{i(\pi-\tilde{\varphi})}|11\rangle$ の状態になる。そしてトータルで $\varphi = \pi - \tilde{\varphi} \approx \pi$ の位相シフトが起るので、結果として $-|11\rangle$ という状態になり図2のように $|00\rangle$ の時だけ位相が変わらない位相ゲートが出来る。ここで、さらに1量子ゲート(位相反転)と組み合わせることでC-NOTゲートも作ることが出来る。もしくはここでは分かり易い為 $5^2S_{1/2}, F=1$ を $|0\rangle$ 、 $5^2S_{1/2}, F=2$ を $|1\rangle$ と定義したが、0と1を初めから逆にしておくことで作ることも出来る。

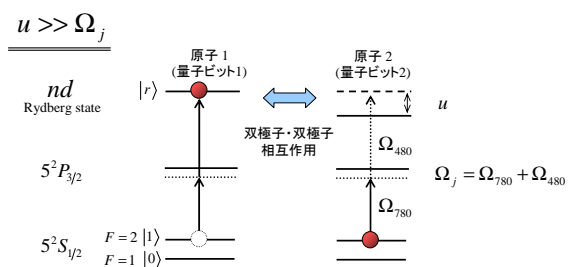


図1: 2量子ゲート操作

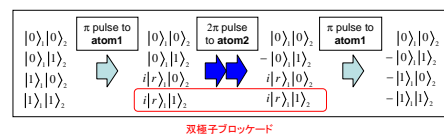


図2: 2量子ゲート操作(真理値表)

【実験装置 ~ 冷却光源 ~】

単一原子トラップの装置に関しては [1] を参考していただきたい。私は実験装置に関して主に装置の見直しを行い、MOT の冷却光源をこれまでの半導体レーザから温度揺らぎ・振動に強いDFB レーザーに変え、新たな光源を作成した。ここではその光源に関して説明する。

DFB レーザー : Distributed FeedBack Laser

DFB レーザーとは分布帰還形レーザーと呼ばれ、単一波長発振可能なレーザーである。単一波長発振を可能にしているのはN型半導体の回折格子である。N型半導体のそれぞれの山にレーザー光が当たり、山の周期の2倍の幅を持つ波長は進んできた光波と跳ね返ってきた光波が重なり合って強めあう(図3)。

私はこのDFB レーザーを用いて冷却用光源を開発した。

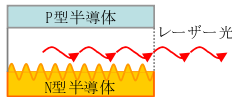


図 3: DFB レーザーの原理図

光学常盤などからの振動を回避するためにブレッドボード上にDFB レーザーを設置し、同じブレッドボード上で飽和分光、AOMでの離調を行っている。ブレッドボードのサイズは300mm × 300mm、AOMでの離調 Δ はダブルパスで-10MHzに設定している。これは通常($\Delta \sim 15$ MHz)よりも小さくすることで、SN良く観測し、散乱レートを高めるためである。そして、レーザーのロックに関しては半導体レーザーと違い電流にフィードバックしている。このDFB レーザーは温度安定度が高く、非常に安定である。図4に製作したDFB レーザー光源を、そして図??に製作したレーザー光源の温度による波長安定度のグラフを示した。このレーザーのチューニング定数は $2\text{pm}/\text{mA}$ であった。

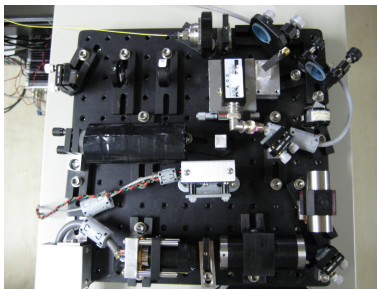


図 4: DFB レーザー光源 (Cooling)

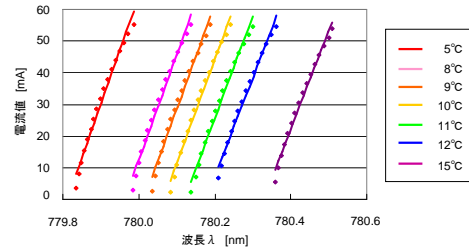


図 5: DFB レーザーの温度による波長安定度

【実験結果】

MOT を用いての原子の捕獲

まずは新しい光源を用いて MOT での捕獲を再現した。これまでのトラップでは最初は数 mm のビームにしておいて真空セル直前のアイリスで光をカットして迷光を抑え、直径約 1mm のビームで MOT を行っていた。この方法ではアイリスによって光路が変化してしまう為、調整が非常に困難であった。しかし、新たな光源では光源自体の安定度に加え、ファイバーで x, y, z の3方向に分ける非偏光 BS 直前まで持ってきたので最初からほぼ直径 2mm のビームにしておいてアライメントを行い、直前のアイリスで光がかけられない程度の直径 ($\sim 2\text{mm}$) のビーム径にして MOT を行った。その後、迷光を避けるためにあえてファイバーカップリングを悪くすることで光量を調節している。Repump 光に関しては ND フィルターを用いてアライメント中では光量を多くし、合っしまえば $0.5\mu\text{W}$ 程度まで下げている。この程度であれば迷光としての影響はほぼない。また、Repump 光程の精度は要求しないので、ND フィルターによりわずかに光路が変わることも問題ない。これにより調整も比較的容易になった。MOT の安定度に関してはこれまでよりも良く、一度合っしまえばほとんどアライメントをせずとも安定な MOT を行うことができた。MOT での単一原子状態は最長で2分以上、そして原子を6個まで分離して観測することが出来た図6。(Cooling 光は約 $3.98\text{mW}/\text{cm}^2$ 、Repump 光は約 $3.98 \times 10^{-2}\text{mW}/\text{cm}^2$)

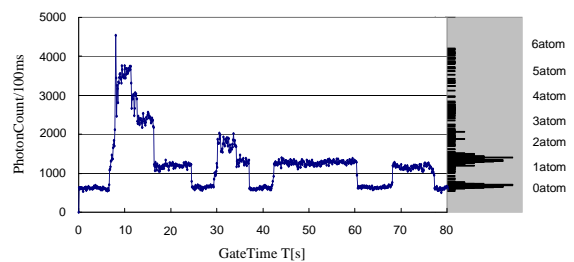


図 6: APD で観測した MOT からの蛍光

光双極子トラップ

次のステップとして、MOT から光双極子トラップ (FORT) へ移行する。現在、MOT から FORT へ移行することに成功しており、図 9 のようなタイミングで MOT→MOT+FORT の切り替えを行った。図 8 で MOT のみと MOT+FORT の結果を比較している。光双極子トラップポテンシャルを作る FORT 光として、Nd:YAG レーザーを SEED 光として、ファイバーアンプを用いて増幅しファイバー直後で 2.5W を得ている。そして、アイソレーター、AOM 等でのロスにより有効パワーとしてセル直前のレンズで 1.6W を得ている。

アライメントはリドベルグ励起用 $\lambda = 780nm$ の光を原子が吹き飛ばないように調整して、対向する向きで FORT 光が重なるように直前のミラーでラフに調整した (Dichroic ミラーを用いて重ねている。 $\lambda = 1064nm$: 反射、 $\lambda = 780nm$: 透過)。このラフな調整の段階で FORT 光がリドベルグ励起用 $\lambda = 780nm$ の光を ON/OFF している AOM 付近で一致するように合わせた (距離約 1~2m)。そして、微調整は x,y 方向はステップモーター、z 方向は手動のステージを用いた。ステップモーターはシグマ光機社”TSDM40-15X”を”SHOT - 602”2 軸ステージコントローラーを用いて PC から制御している (制御精度 $1\mu m$ /パルス)。そして、z 方向は $500\mu m$ /回転のステージを用いている。この微調整では APD 信号を見ながら、MOT から蛍光レベルが最小になるように FORT 光のアライメントを行った。これは FORT 光によるライトシフト (40 ~ 60MHz) の影響で MOT の Cooling 光の離調 δ が大きく、散乱レートが小さくなることによるものである。そして、図 8 からわかるように光双極子トラップポテンシャルは細長い形になるので、CCD 画像を見ながら微調整を行い、アライメント完了となる。

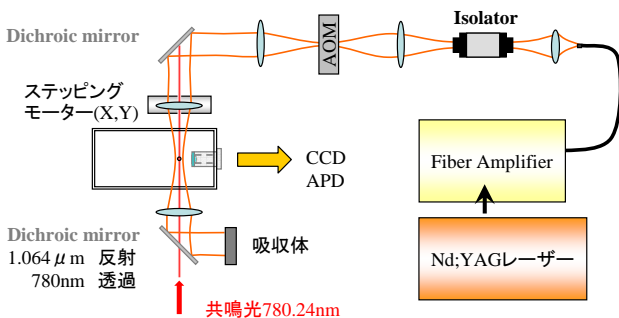


図 7: 光双極子トラップ光学系

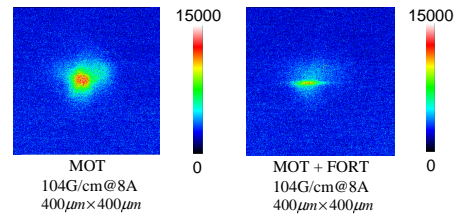


図 8: 光双極子トラップ中の原子 (右図: MOT 左図: MOT+FORT)

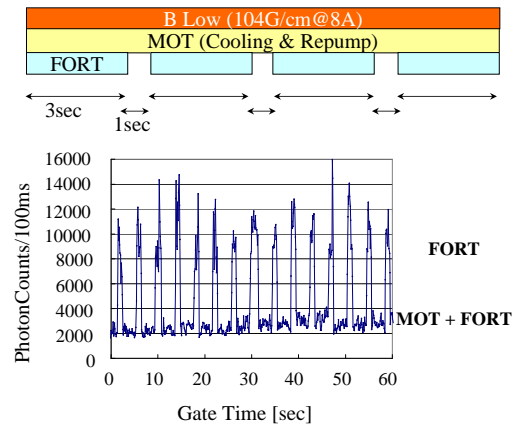


図 9: MOT(1sec)→MOT+FORT(3sec)

図 9 に MOT(1sec)→MOT+FORT(3sec) の繰り返しを行った際の結果を示した。FORT(Far Off Resonance Trap) 光による影響で原子準位がライトシフトを起こして、蛍光が減っていることが分かる。図 10 に FORT(1way) によって原子が誘起されるライトシフトを示した。この時、65.6MHz のライトシフトがある。しかし図 8 より FORT と MOT の共存が出来ているので、これまでの 40MHz まででなく 65.6MHz のライトシフトがあっても冷却効果が働くことが分かった。

現在、磁場勾配を変化させて単一原子~少数原子を捕

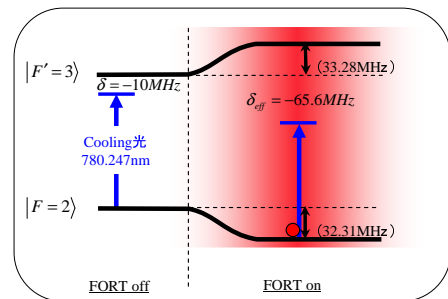


図 10: 光双極子トラップが誘起するライトシフト

獲するという方法を用いている。図??に磁場 Low の時と磁場 High の時の MOT, MOT+FORT の CCD 画像を示した。これから、ステッピングモーターで x,y 方向をスキャンすることで磁場 Low から x 方向に 33 μm , y 方向に -58 μm の所に磁場 High があることが分かった (図 11)。z 方向に関してはレイリー長 Z_R が

$$Z_R = \frac{\pi\omega^2}{\lambda} \quad (2)$$

と表せて 220 μm であること、また手動ステージが 500 μm /回転であることから広範囲で影響が出るので特定できていない。しかし、CCD 及び APD で確認する限り MOT, MOT+FORT の場合で十分に影響が出ているので実験を行うには問題ない。

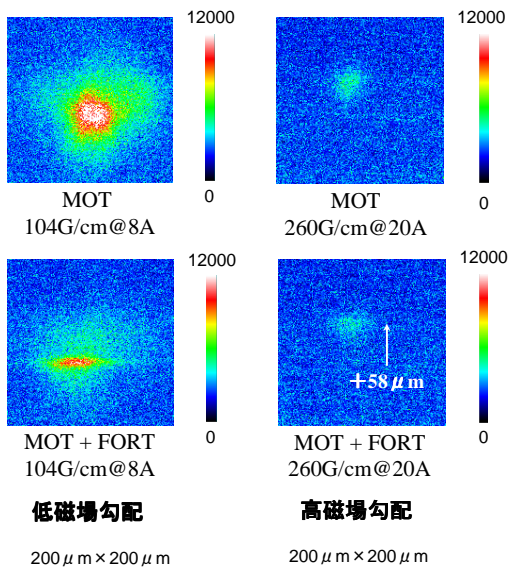


図 11: 磁場 Low→High による磁場中心のズレ

リドベルグ状態への励起

光双極子トラップ中の 1~数個の原子を 780nm, 480nm のレーザー光で 2 光子過程を用いてリドベルグ原子の双極子ブロックを確認する。その為の準備段階として、”リドベルグ状態への励起”を確認して”光イオン化による原子ロス”によって双極子ブロックを確認しようと考えている。現在、リドベルグ状態への励起を確認して光イオン化による原子ロスの実験を行っている最中である。まずは MOT 中の原子 (~10 個) に BLUE の光を当てて、原子ロスによってリドベルグ状態に励起されたことを確認する。Cooling 光は約 3.98mW/cm², Repump 光は約 3.98 × 10⁻²mW/cm², BLUE 光は 5 × 10⁶mW/cm² である。BLUE 光を EIT 信号を見ながら AOM での離調 $\delta = 80\text{MHz}$ 分がキャンセルされるように -80MHz シ

フトする位置にあわせて、54D 状態に励起するようにした。そして、BLUE を ON/OFF することで確認した。図 12 に結果を示した。結果から、BLUE の光自体がフィルターを透過して迷光になっている (赤丸部分) が、ローディングレートが非常に高いにも関わらず BLUE 光によって原子がリドベルグ状態に励起され、蛍光が減っていることが分かる。同時に CCD の画像でも原子ロスが確認できた。次に、この励起される範囲を BLUE 光の離調 δ_{BLUE}

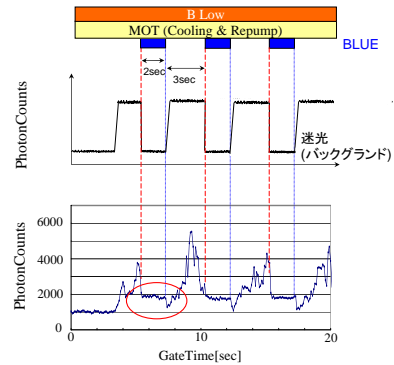


図 12: リドベルグ状態励起確認

を変化させることで探していった。そして、共鳴ライン (AOM での ON/OFF の 80MHz を考慮して) から赤方離調に 160MHz の範囲で共鳴により原子のトラップロスを確認した。これは BLUE レーザー波長からリドベルグ状態 (54D) 付近での共鳴であると思われる。また、青方離調もスキャンしたところ 5²P_{3/2}, F' = 2, 3 クロスオーバーから 32MHz 赤方に位置で自然幅程度 (6MHz) の共鳴を確認した。文献値から 56S 状態への共鳴ではないかと推測した。これは BLUE 光を入れたまま行った実験なので、原子が冷却サイクルから脱して加熱されることによる減衰であると考えられる。CCD 画面上でこの原子ロスを確認した。現在、BLUE 光の精密な周波数測定が出来ていないので、今後精密測定を行って共鳴ラインを明らかにしていく。

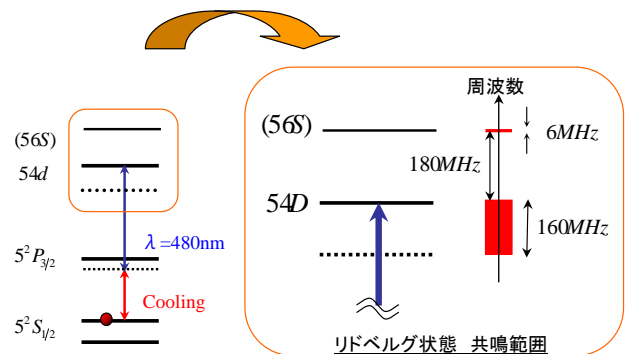


図 13: リドベルグ状態励起範囲

まとめと今後の展望

本研究の目的は、レーザー冷却技術を用いて冷却・捕獲した中性原子 (^{87}Rb) を光双極子トラップへと移行して、リドベルグ状態へと励起することで双極子ブロッケードを観測することである。この双極子ブロッケードによって単一原子を”量子ビット”として用いて、2量子ゲート操作(量子情報処理)を実現させることを目指して研究を進めてきた。その為に行った(もしくは行っている)主な取り組みは

1. Cooling 光源を半導体レーザーからDFBレーザーに変え、光源の安定化を行った。
2. MOT中の少数個原子郡にBLUEレーザー($\lambda = 480\text{nm}$)を照射し、2光子過程でリドベルグ状態に励起されたことを確認
3. 少数個原子にリドベルグ励起用レーザー($\lambda = 780\text{nm}, 480\text{nm}$)を照射し、双極子ブロッケードを観測

本格的に量子情報処理検証実験を行うにあたって、安定した冷却原子を容易する必要があった。(1)ではこれまで、常盤の振動等によってロックがしばしば外れていた光源の見直しを行った。ブレッドボード上に飽和分光、AOMでの離調(-10MHz)を全て行い x, y, z の3方向に分ける直前までファイバーでもっていった。これにより振動による影響をなくし、光学系のズレの影響を軽減することが出来た。また、ファイバーに光を通すことでファイバカップリング効率をあえて悪くすることでCooling光のパワーを抑えるようにした。これまではアイリスで迷光をカットしていたが為にアイリスで光がけられて光路がズレることがアライメントの際の障害となっていた。しかし、この新しい方法では迷光に効いてくるCooling光を光路を変えることなく自由にパワーを抑えることが出来るようになった。これによりアライメントの簡略化、MOTの安定化を達成した。

(2)ではMOTのCooling光とBLUE光の2光子過程を利用して、リドベルグ状態に励起することを確認した。また、BLUE光の離調 δ_{BLUE} を変えることで共鳴範囲のスキャンを行い54D,56Sへの共鳴を確認した。しかし、BLUE光の離調はオシロスコープの値からラフに見積もったものなので今後精度よくBLUE光の周波数測定を行おうと思う。(3)に関しては5つの光源のAOMでのON/OFF時間を測定し、現在実験中である。

今後の展望

今後の展望として考えている主な取り組みは

1. 定在波型光双極子トラップで原子1,2個を捕獲・操作
2. リドベルグ原子の双極子ブロッケード確認・2量子ゲート操作実証
3. マイクログ光双極子トラップで単一原子を捕獲・操作

(1)に関してはFORT中での寿命を稼ぎ、個々のポテンシャルに原子を捕獲することを目標にしている。現在、この定在波型光双極子トラップの実験を行っている最中である。(2)に関しては(1)を達成した後に行おうと考えている。現在各光源のAOMでのON/OFF時間を測定し、それからタイミングを考えて、BNC社の”MODEL 575 PULSE DELAY GENERATOR”を用いてPCからのトリガーでスタートさせ、実験を行う準備中である。(3)に関しては長期的な目標である。5章でも述べたが、まだまだ改良の余地があるので設計の段階から見直して、改良していこうと思う。

参考文献

- [1] 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)
- [2] T.A. Johnson, et al
Rabi flopping between ground and Rydberg states with dipole – dipole atomic interactions
arXiv:0711.0401v1 [quant-ph] 2 Nov 2007
- [3] D. Jaksch, et al
Fast Quantum Gates for Neutral Atoms
Phys.Rev.Lett.**85**,2208(2000)
- [4] M. Saffman and T.G. Walker
Analysis of a quantum logic device based on dipole – dipole interactions of optically trapped Rydberg atoms
Phys.Rev.A.**72**,022347(2005)