

# 一次元光格子中における $^{87}\text{Rb}$ 原子の Rydberg ブロッキングの実現

電気通信大学大学院 電気通信学研究科 量子・物質工学専攻

レーザー新世代研究センター 中川研究室 奥山大輔

## 1. 研究背景・目的

レーザー冷却技術によって少数個の原子を用意に冷却・トラップすることができる。そのようにして得られた原子の内部・外部状態を磁場やレーザーで操作することで、原子の内部状態を量子ビットとして用いた量子的演算及び量子コンピュータの実現を目標としている。

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。さらには実用的な意味で量子計算を行うには、1000 ビット程度が必要になると言われているため、量子ビットには拡張性が求められる。

そこで私は光双極子トラップによる一次元光格子中での量子的相関の観測を目標として研究を進めてきた。

一次元光格子を利用する利点として、格子間距離が原子の間隔に相当するため

任意の原子間距離を得ることができる。さらに、原子を一次的に並べることで原子数に拡張性を持たせることができるので将来的には複数個の原子間での量子的演算を期待することができる。

## 2. Rydberg 原子

Rydberg 原子とは主量子数  $n$  が大きな Rydberg 状態に励起された原子である。原子の軌道半径は  $n^2$  に比例するため  $n=75$  では軌道半径がおおよそ  $5600a_0$  となるので非常に大きな双極子モーメントをもつ。

原子間に相関をもたせるために原子間に働く相互作用を用いるが、中性原子の基底状態間に働く相互作用はとても小さく、数 100nm オーダーまで近づけないと十分な相互作用を得ることができない。しかし、Rydberg では大きな双極子-双極子相互作用が働くため、 $\mu\text{m}$  オーダーでも十分な相互作用を得ることができる。

図 1 のように原子が Rydberg 状態に励起すると双極子-双極子相互作用によって近傍にある原子のエネルギー準位がシフトする。励起に用いるレーザーの線幅がエネルギーシフトによって近傍にある原子の Rydberg 状態への励起が阻害される。これを **Rydberg Blockade** と言い、この効果を用いることで原子間に相関をもたせる。

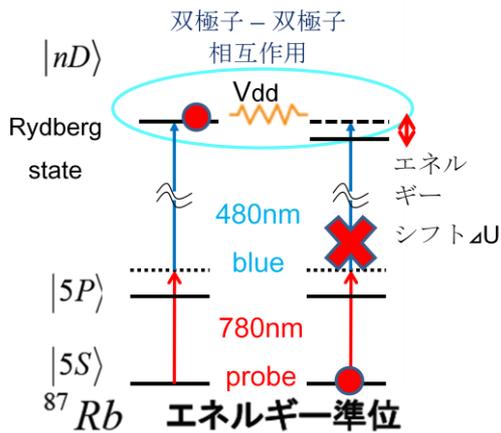


図1 Rydberg Blockade イメージ図

### 3. 定在波型光双極子による一次元格子

磁気光学トラップ(MOT)によって冷却・捕獲した原子を保存力である光双極子トラップ(FORT)に移行して Rydberg 状態への励起を行う。本実験ではガウシアンビームを対向させることで生じる定在波(一次元格子)型ポテンシャル中に原子をローディングしている。レーザーは波長 1064nm の YAG レーザーを使用しており、ポテンシャルは図 2 のようになっている。(beam waist:  $5\mu\text{m}$ 、power: 2W、z: ビームの進行方法、r: 動径方向)

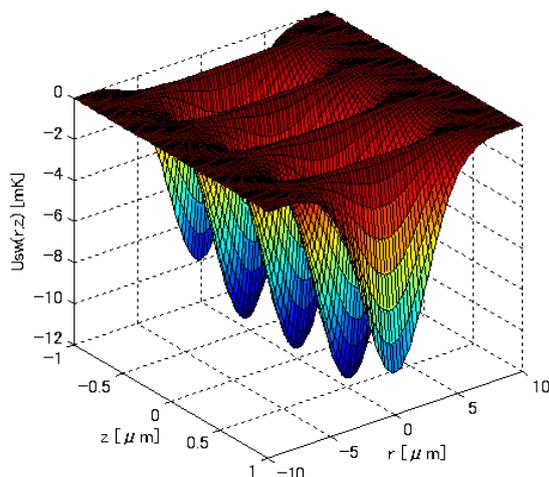


図2 一次元格子のポテンシャル

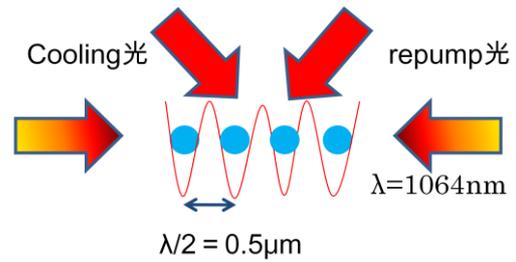


図3 一次元光格子

格子の間隔は波長 1064nm のレーザーを対向させて配置する場合、 $\lambda/2 \sim 0.5\mu\text{m}$  となる。しかし、図 3 のように cooling 光と repump 光を照射した状態で一次元格子中の原子の蛍光を観測したところ図 4 のように格子間隔より広がって原子が分布されることが確認された。そこで、最近接原子間を原子間距離と定義し、原子間距離についてのヒストグラムを取った(図 5)。  $3\mu\text{m}$  以下の部分は空間分解能の影響で原子間距離が判断できなかった部分ではあるが、  $5\mu\text{m}$  で頻度が高くなることがわかる。次に、原子間距離  $3\mu\text{m}$  以下での空間分布を確かめるために原子の蛍光強度についてのヒストグラムを取った(図 6)。

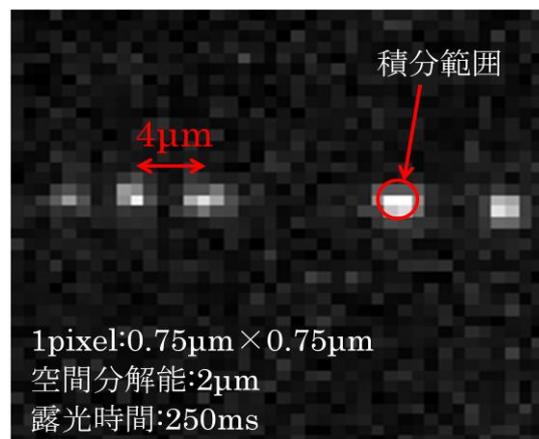


図4 一次元格子中の原子の空間分布

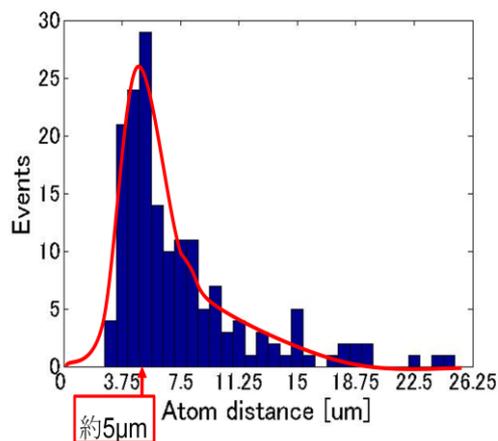


図5 原子間距離についてのヒストグラム

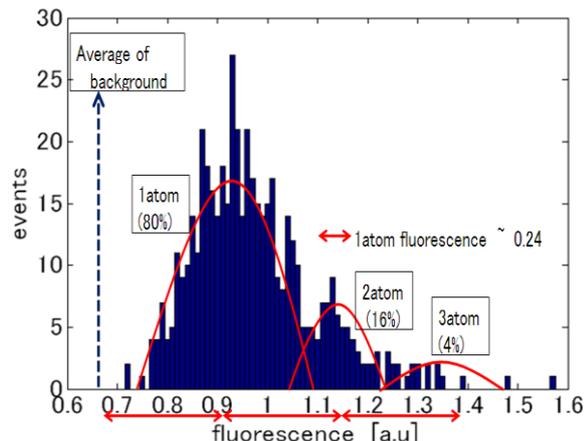


図6 蛍光強度についてのヒストグラム

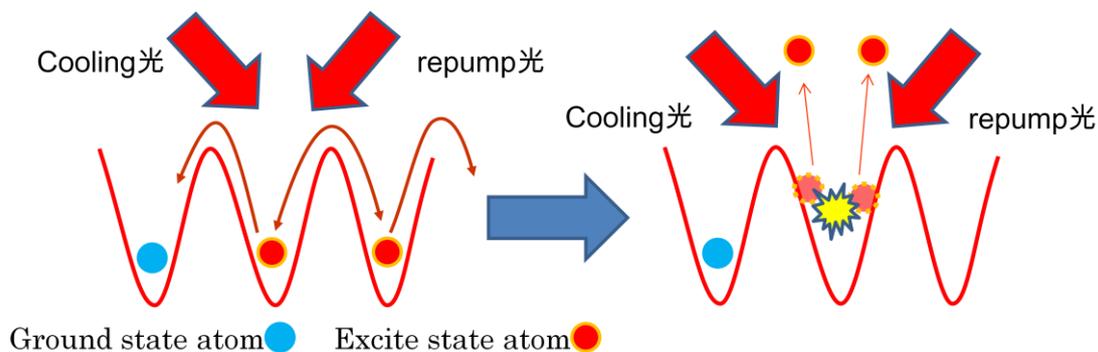


図7 Collisional Blockade イメージ図

図4の○印(3×3pixel)の部分で蛍光強度について積分し、ヒストグラムをとった。別の解析からバックグラウンドの蛍光強度の平均が0.66a.uと得られており、原子の数が蛍光強度で離散化されていることがわかる。この2つの解析結果から我々が使用している一次元格子では各ポテンシャル中で原子がそれぞれ1つずつローディングされていると考えることができる。我々は一次元格子中で Collisional Blockade(図7)[1]が起こると想定していたため、それを裏付ける結果となった。(Collisional Blockadeとは、一次元格子中の励起状態の原子が格子間をドリフト

することによって同一格子に2つの励起状態の原子がローディングされた際に、衝突によって加熱されトラップから外れるというものである。

#### 4. Rydberg 励起光源の狭線幅化

先にも述べた通り Rydberg 励起に用いる光源は双極子-双極子相互作用により周波数シフトよりも線幅が狭いレーザーを使用しなくてはならない。さらに、原子を Rydberg 状態に励起する際のパルス時間の逆数より線幅を狭くする必要がある。その二点の要請から Rydberg 励起光源である probe 光と blue 光の線幅の合

計を 250kHz 以下にすることを目標に狭線幅化を行った。

狭線幅化をするにあたって probe 光は cooling 光とのビートシグナル(図 8)をフォトディテクターで検波し、blue 光は基本波である 960nm 光を自己遅延ヘテロダイン法によるビートシグナル(図 9)を検波してそれぞれの線幅を測定した。測定結果より probe 光の線幅は 500kHz、blue 光の線幅は基本波の線幅 125kHz の二倍である 250kHz と見積もることができた。

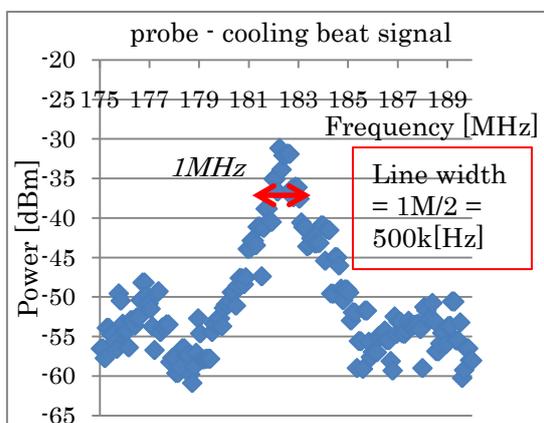


図 8 probe - cooling ビートシグナル

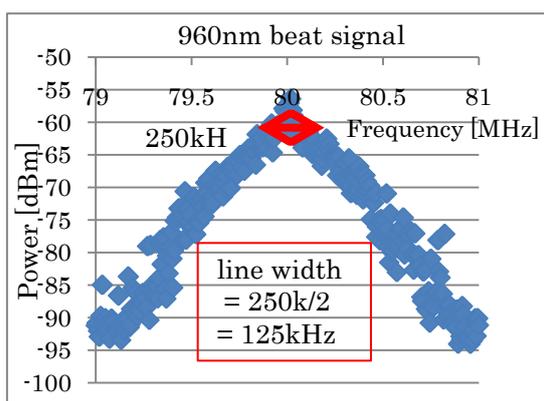


図 9 自己遅延ヘテロダイン法による 960nm 光ビートシグナル

1km のファイバーを使用したので分解能は 200kHz である。

狭線幅化には PDH 法(図 10)を用い、制御帯域を広げるために low-pass filter から出た信号の一部を位相補償フィルターを介して LD にフィードバックした。位相補償フィルターの設計に関しては改善前の probe 光と 960nm 光のノイズを RF スペクトルアナライザによって測定し、発振しかけていた部分の位相をプラスした。また、PDH 法には表 1 に示す共振器を用いた。blue 光に関しては前実験者が製作した SHG 生成用の共振器[2]を使ったので分解能は高くない。

結果として probe 光の線幅は 25kHz、blue 光の線幅は 125kHz まで狭く化することができ、probe 光と blue 光の線幅の合計を目標であった 250kHz 以下にできた。

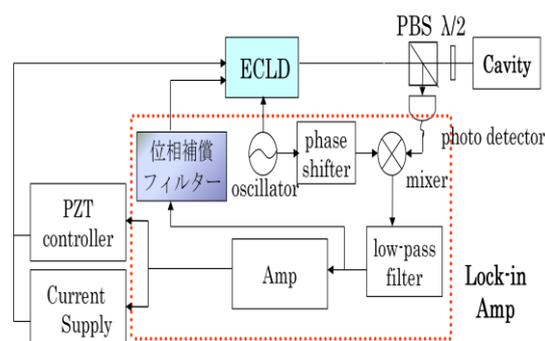


図 10 PDH(Pound-Drever hall)法

表 1 PDH 法に用いた共振器の性能

|       | FSR [GHz] | Finesse |
|-------|-----------|---------|
| probe | 1.5       | 200     |
| blue  | 0.86      | 38      |

## 5. Rydberg 励起の観測

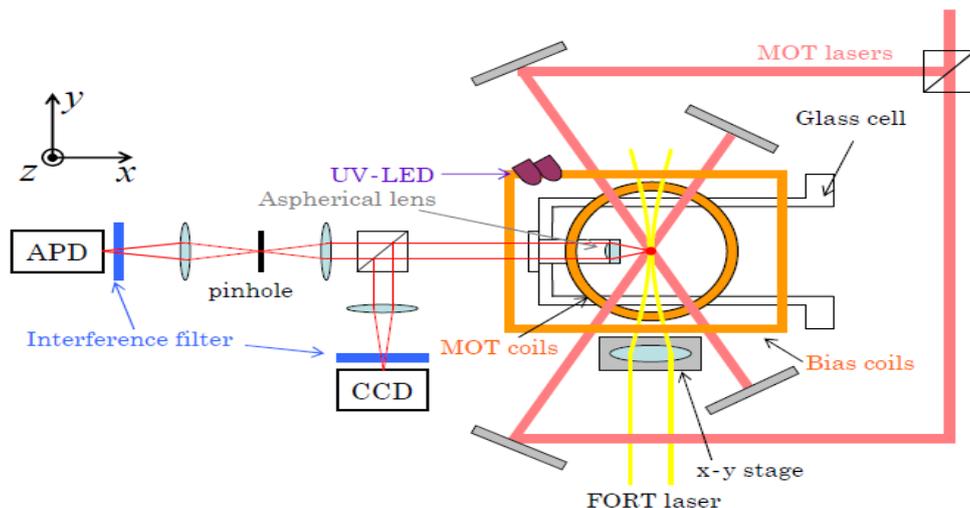


図 11 実験系

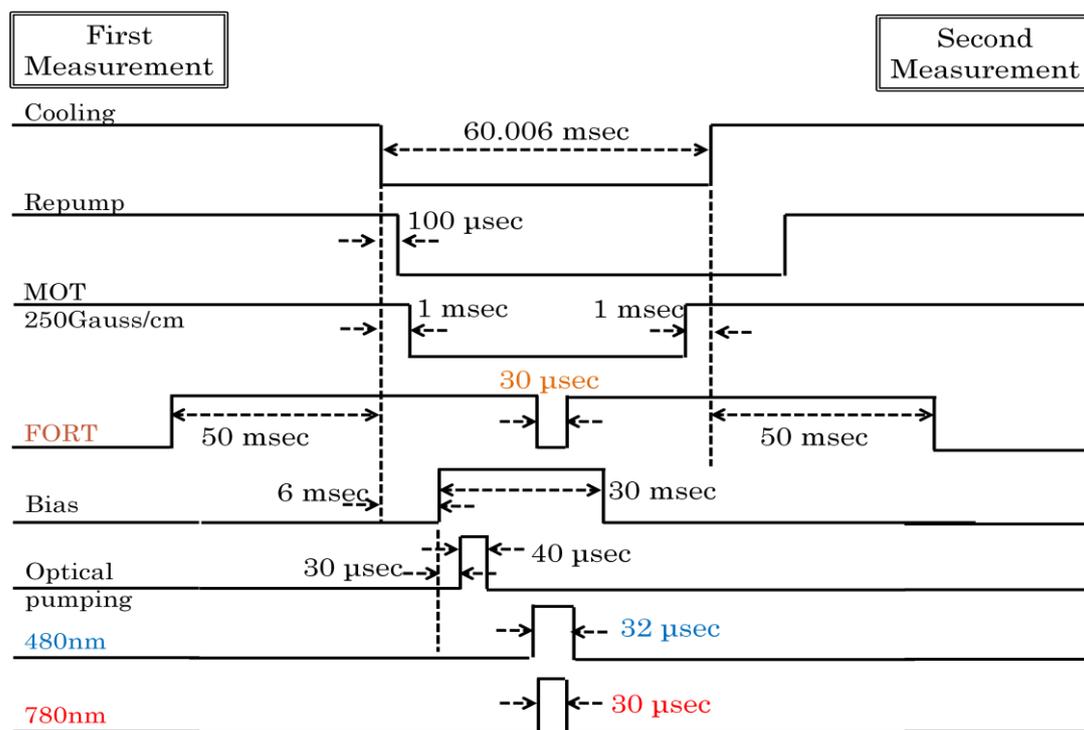


図 12 Rydberg 励起のタイムシーケンス

実験系は図 11 に示す通りで、ガラスセル内の  $^{87}\text{Rb}$  原子の蛍光を CCD カメラと APD で観測している。CCD カメラでは主に原子の空間分布を APD では原子の数をリアルタイムに観測している。原子

を Rydberg 状態へと励起するタイムシーケンスは図 12 となっており、始状態と終状態の原子数を APD によって確認することで励起確率を観測している。Rydberg 状態に励起された原子は一次元格子で再

トラップする際に正のポテンシャルを感じることでイオン化されトラップから外れ、蛍光が観測されなくなる。

Rydberg 励起の確率を精度よく観測するためには一次元格子への再トラップの確率が重要となるが、およそ 90%の確率で再トラップされる(図 13)ことを確認した。

その条件でバイアス磁場によるゼーマンシフトを打ち消すように 780nm の離調を変調させて原子を Rydberg 状態へと励起させた(図 14)ところ、約 70%の確率で Rydberg 状態への励起が確認できた。

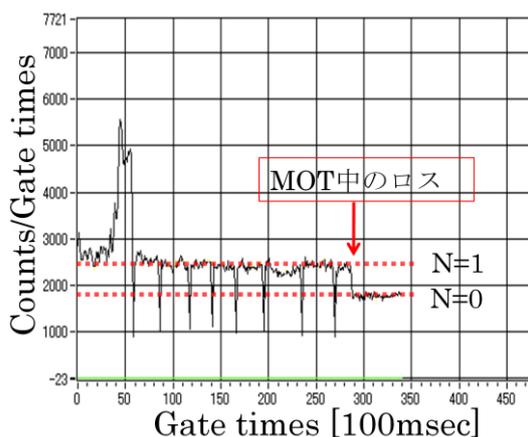


図 13 一次元格子への再トラップ

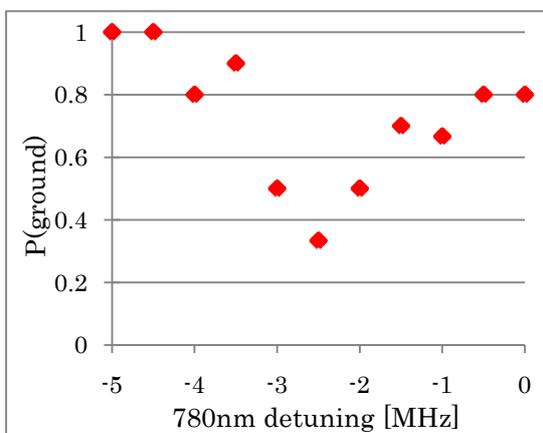


図 14 Rydberg 状態への励起

## 6. まとめと今後の展望

今回の研究で私が主に行ったものは

1. Rydberg 励起光源の狭線幅化
2. 一次元格子中の原子の空間分布の解析
3. 一次元光格子中における単一原子の Rydberg 励起

の3つである。

1については目標であった 250kHz(probe と blue の合計)を上回る 150kHz まで改善することができた。この光源を用いて Rydberg Blockade を観測し、先行研究における結果と比較する必要がある。

2については原子間距離と蛍光強度についてヒストグラムを取り、評価することで一次元格子中の原子が Collisional Blockade によって各格子中にそれぞれ独立にトラップされているであろう結果が示せた。

3については一次元光格子中にトラップされた原子が Rydberg 状態に励起されたことが観測された。これを足掛かりとして、1原子、2原子のラビ振動を観測していきたい。

さらに、チャンバーの上から波長 785nm のレーザーを交差して入射することで一次元格子の間隔を広げて CCD カメラでの観測精度の向上などを模索している最中である。

### 参考文献

- [1] N.Schlosser “Collisional Blockade in Microscopic Optical dipole Traps” (2002)PRL89 023005
- [2] 渡辺智貴、修士論文「Rb 原子の Rydberg ブロッキング実現のための高出力・高安定化 480nm 光源の開発」