

光マイクロトラップアレーへの単一原子ローディング効率の向上

中川研究室 山口 裕介

1. 研究背景

近年、光子や原子などの量子の性質を利用した量子情報処理に関する研究が盛んに行われている。古典的なコンピューターでは計算が困難であった数学的問題を解くことができる量子コンピューター、自然界に存在する複雑な量子系を制御性の良い量子系を用いてシミュレートを行う量子シミュレーションなどが代表的な例である。

我々の研究室では、光マイクロトラップ内の単一中性原子を用いて量子もつれ状態を持った原子を複数個生成し、量子情報処理への応用を目指おり、すでに光マイクロトラップと空間光変調器(SLM)を組み合わせることで 50 個以上の光マイクロトラップの形成に成功している[1]。これにより任意の配置に単一原子を用意することが可能になった。しかし、形成するトラップの数が増えるほど、すべてのトラップに単一原子を用意できる確率は減少する。すべてのトラップに高効率に原子を用意することは今後量子情報処理への応用に向けて不可欠な要素である。

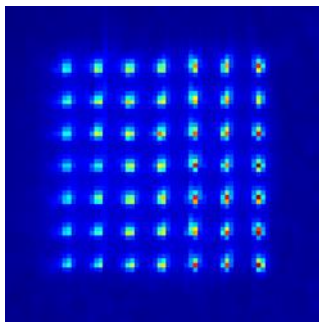


図 1 トラップされた原子の平均蛍光画像

高いローディング効率を実現する方法として光誘起衝突を利用してトラップ内の原子を 1 個にする方法が最も一般的である。これは、共鳴に近い光を照射し、トラップ内の原子ペアの衝突を誘起し、原子ペアに運動エネルギーを与えられることを利用してトラップから原子を逃がす方法である。従来の赤方離調光による方法の場合、1つの光マイクロトラップ内に単一原子を用意できる確率が約 50%となる。これは衝突過程で原子ペアに与えられる運動エネルギーに制限がないためである。この場合、例として 50 個のトラップにすべて単一原子ローディングする場合、その確率は $(1/2)^{50}$ となる。対して、青方離調光による光誘起衝突を用いる方法は共鳴に対して青方離調した光を用いる場合、原子ペアに与える運動エネルギーの上限を離調の大きさによって決めることができるため、離調を最適化することで単一原子を用意できる確率の向上を図ることができる。この方法を用いて他グループでは約 90%の確率を実現した[2,3]。我々はこれまで青方離調光による光誘起衝突を利用して単一原子を用意できる確率の向上を図ってきたが、同確率は 62%程度にとどまっていた。今回、私はトラップの深さなどいくつかの改善を行い、さらなる単一原子を用意できる確率の向上を図った。

2. 原理

2.1. 衝突ブロッケード

光双極子トラップ内の原子を1個にするために我々は光双極子トラップの光にビームウエストが約 $1\ \mu\text{m}$ の非常に小さなトラップ(光マイクロトラップ)を用いている。光マイクロトラップ内の原子は原子間の距離が非常に小さくなり、トラップからの原子ロスは衝突によるロスが支配的となる。

図2は赤方離調光下におけるMOTからトラップへのローディングレートとトラップ内原子数の関係を示した図である([4]より引用)。 $\omega_0 = 0.7\ \mu\text{m}$ のときを見ると $R_w < R < R_w$ の領域では、トラップ内平均原子数 $\langle N \rangle$ は上限を約 0.5 に制限される。これは、衝突レートが大きいため1個の原子がローディングされたトラップに2個目の原子がローディングされたとしてもすぐに2-0ロスが起こり、トラップ内の原子数が0個もしくは1個のみとなるためである。この効果は衝突ブロッケードと呼ばれている。

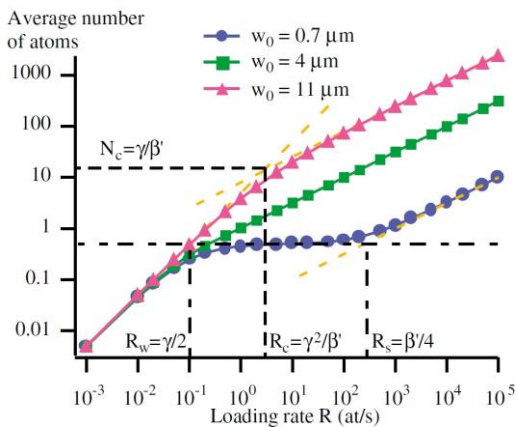


図2 ローディングレートに対するトラップ内原子数

2.2. 光誘起衝突

光マイクロトラップ内で起こりうる原子ロスには2-0ロス(a)、2-1ロス(b)、1体ロスの3つの過程がある。2-0ロス、2-1ロス過程は光によって誘起された衝突過程によるロスである。1体ロスはバックグラウンドガスとの衝突過程によるロス、あるいは温度上昇によるロスである。

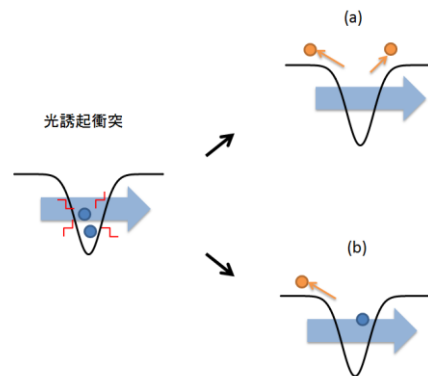


図3 光誘起衝突による原子ロス

トラップ内への単一原子ローディング効率を向上させるためには2-1ロスが起こる頻度を2-0ロスのそれに対して大きく上回る必要がある。赤方離調光下では2-0ロス、青方離調光下では2-1ロスが起こる確率が高くなるため、光誘起衝突を利用した単一原子ローディングには青方離調光を用いられる。

光マイクロトラップ内の原子の共鳴周波数に近い周波数のレーザー光を照射すると、励起状態Pの原子と基底状態Sの原子間衝突が支配的となる。図3、4のように原子間距離が小さくなると引力ポテンシャルと斥力ポテンシャルの2つに分裂する。

2.1. 赤方離調光による光誘起衝突

図 4 のようにトラップ内の原子の共鳴周波数から Δ だけ赤方離調した光をトラップ内の原子ペアへ照射した場合について考える。このとき、原子ペアは $R_c = (C_3 \hbar \Delta)^{1/3}$ で共鳴となり引力ポテンシャルへ遷移する。 C_3 は励起された原子ペアは、ポテンシャルの坂を下り R_s で自然放し $|S + S\rangle$ へと遷移する。この遷移は非弾性遷移なので、原子ペアにポテンシャルの坂を下った分の運動エネルギーが与えられる。この遷移により原子ペアに与えられるエネルギーは通常、トラップの深さより十分大きく原子ペアは両方ともトラップから逃げることになる。このことから、赤方離調光による光誘起衝突を用いると、トラップ内の初期原子数が奇数個のときのみ 1 個の原子が残り、偶数個のときは 0 個となってしまうことがわかる。よって、トラップ内に原子 1 個のみローディングできる確率は $1/2$ となってしまう。

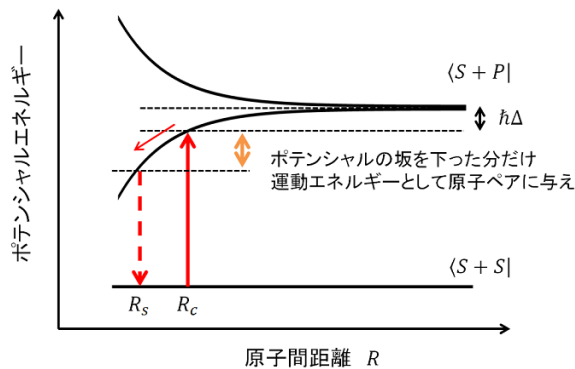


図 4 赤方離調光による光誘起衝突

2.2. 青方離調光による光誘起衝突

次に、図 5 のようにトラップ内の原子の共鳴周波数から Δ だけ青方離調した周波数の光をトラップ内の原子ペアへ照射した場合について考える。このとき、原子ペアは $R_c = (C_3 \hbar \Delta)^{1/3}$ で共鳴となり引力ポテンシャルへ遷移する。励起された原子ペアは、初期運動エネルギー分だけポテンシャルを登ったのち、再び R_c に戻る。ここで誘導放出が起こる場合と R_c を通り過ぎ、そのうち自然放出する場合が考えられる。前者の遷移は弾性遷移で原子のペアに与えられるエネルギーはない。対して後者の遷移は非弾性遷移なので、原子ペアに R_c からポテンシャルの坂を下った分の運動エネルギーが与えられる。ここで重要なのがこの時のエネルギーは $\hbar\Delta$ が上限となる点である。これにより離調の大きさ Δ で原子ペアに与えるエネルギーを上限のみだが決めることができる。

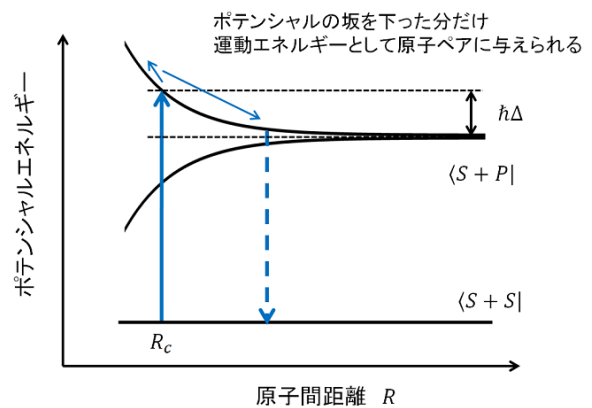


図 5 青方離調光による光誘起衝突

3. 実験系

3.1. 光学系

本実験では磁気光学トラップ、光双極子トラップなどに必要な光、加えてプッシュ光や観測光、青方離調光などの光が必要となる。各光の周波数設定を図 6 に示す。

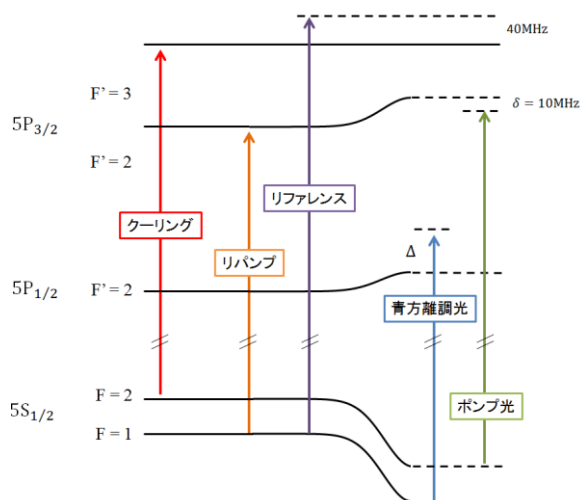


図 6 各レーザーの周波数設定

本実験では、青方離調光として D1 ラインの $F=1 \rightarrow F'=2$ から青方離調した光を用いている。外部共振器型半導体レーザーを光源とし、電流変調法を用いて D1 ラインの $F=1 \rightarrow F'=2$ の共鳴周波数に安定化している。

ポンプ光は、青方離調光照射時に基底状態の $F=2$ に原子が溜まり、青方離調光を吸収しなくなってしまうため、励起状態の $F'=2$ に励起するための光である。

3.2. 観測系

本実験では、光マイクロトラップ内の原子の蛍光を EM-CCD カメラで撮影し、トラップ内の原子数を測定することで単一原子ローディング効率を求める。

観測系の概略図を図 7 に示す。

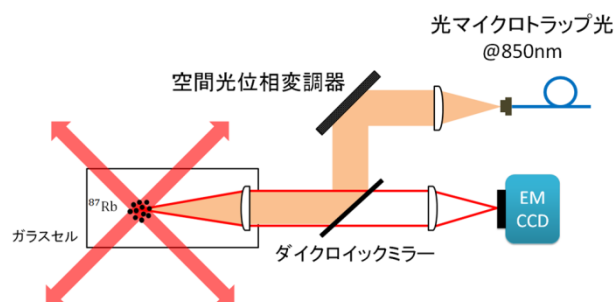


図 7 観測系

使用しているカメラは、Andor 社製「iXon Ultra 897」で画素数は 512×512 、ピクセルサイズは $16 \times 16 \mu\text{m}$ である。原子からの蛍光を焦点距離 8mm のレンズと 200mm のレンズによってカメラの受光面に集光している。画素分解能は $0.64 \mu\text{m}/\text{pixel}$ である。図 8 に示した画像はトラップ内の原子を 1000 回撮影して得られた 1000 枚の画像を平均化した画像である。この画像から図 9 のようなヒストグラムを作成し確率を求める。

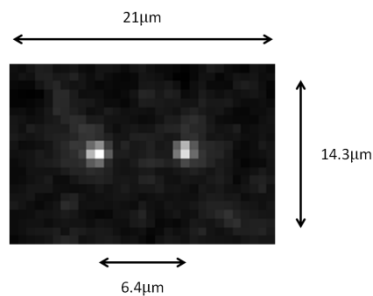


図 8 単一原子ローディング実験の CCD より得られる平均画像

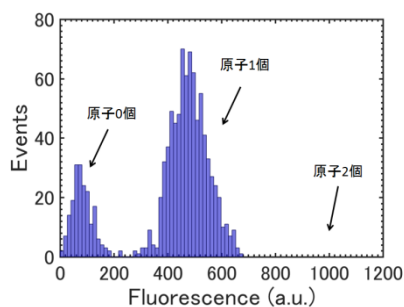


図 9 蛍光量ヒストグラム(1000 回測定)

4. 実験結果

4.1. トラップ内の光シフト測定

トラップ内の原子は、トラップ光によって内部エネルギー準位に光シフトが生じる。測定方法としては、トラップ内の原子の共鳴に近い光をプッシュ光として用いて、その周波数を掃引し最もトラップから原子が逃げる周波数を探すことで光シフト測定を行った。トラップの数は2個で行い、その結果を図10,11に示す。

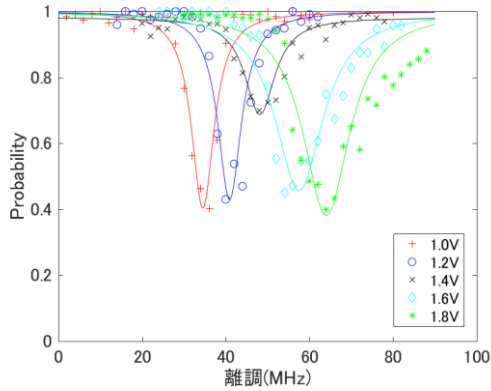


図10 離調に対する原子残留確率
トラップ1

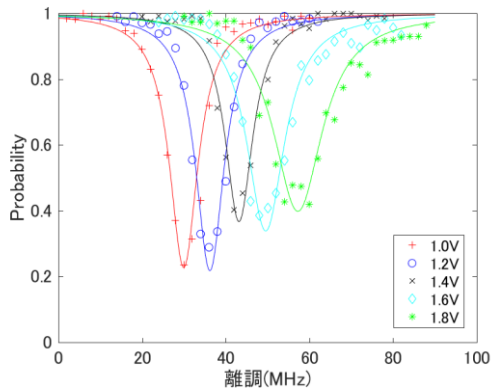


図11 離調に対する原子残留確率
トラップ2

電圧表記は光マイクロトラップのパワーをモニターしているフォトディテクターの電圧値を示している。

4.2. 単一原子ローディングの高効率化

青方離調光による光誘起衝突を用いて、光マイクロトラップ内に単一原子ローディング効率の向上を図った。ポンプ光のパワーは $350 \mu\text{W}$ に設定している。高効率化実験の時間系列を図12に示した。測定回数は1サイクルに1回で、これを1000サイクル行った。また、サイクル終了ごとにトラップ内の原子を初期化するためトラップを開放し、共鳴光を当てた。

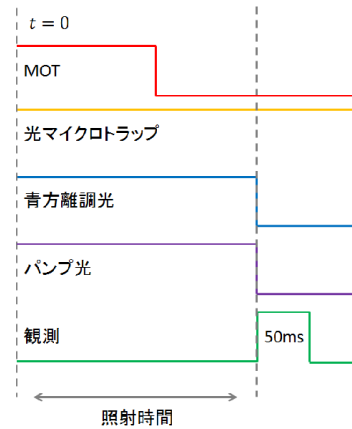


図12 高効率化実験の時間系列

4.2.1. 青方離調光のパワー依存性

まず、単一原子ローディング効率の青方離調光のパワー依存性について測定した。トラップの深さを 3.8mK 、青方離調光の離調を 80MHz 、照射時間を 200ms に設定して測定を行った。図13よりピーク確率は $450 \mu\text{W}$ で 76.3% となった。青方離調光のパワーが強いと輻射圧による加熱効果による原子ロスが生じる。対してパワーが弱いと加熱効果による原子ロスはあまり生じなくなるが、原子に与えるエネルギーが小さくなり原子ペアがトラップから逃げず、観測時の赤方離調光による原子ロスにより確率が下がっていると考えられる。

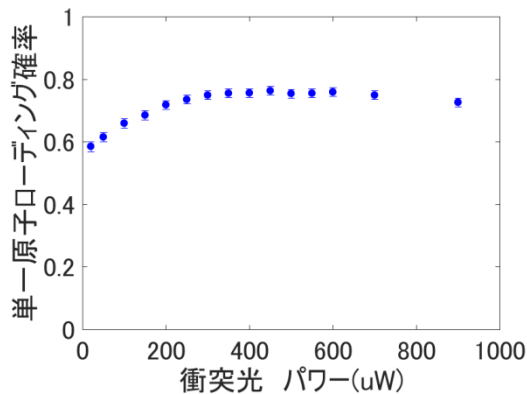


図 12 青方離調光のパワー依存性

4.2.2. 青方離調光の照射時間依存性

次に、単一原子ローディング効率の青方離調光の照射時間依存性について測定した。トラップの深さを 3.8mK 、青方離調光の離調を 80MHz 、パワーを $450\mu\text{W}$ に設定して測定を行った。図 13 の結果を見ると MOT を切り青方離調光のみ照射されている 150ms 以降、確率は大きく上昇し、ピーク確率は 230ms で 77.9% となった。赤方離調光と青方離調光の差は 2 個目の原子がトラップ内にローディングされ、衝突が生じている 100ms から 200ms の間の確率の変化から確認できる。

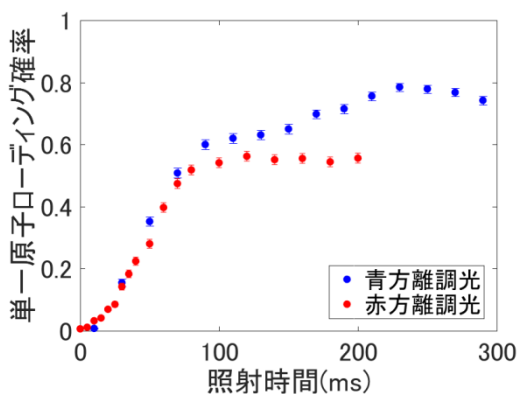


図 13 青方離調光の照射時間依存性

4.2.3. 青方離調光の離調依存性

次に、単一原子ローディング効率の青方離調光の照射時間依存性について測定した。青方離調光のパワーや照射時間は最適化した値に設定して測定を行った。図 14 より離調が 90MHz でピーク確率は 82.2% となった。

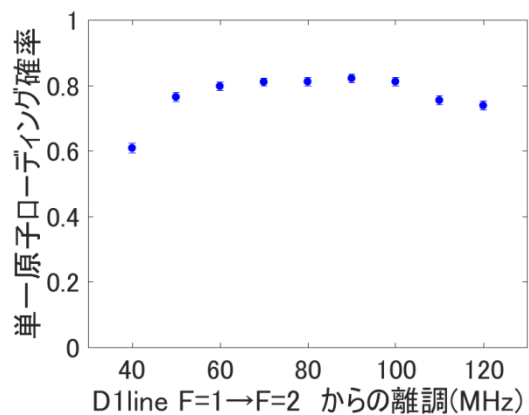


図 12 青方離調光の離調依存性

5. まとめ

本研究では、青方離調光による光誘起衝突を用いて光マイクロトラップ内の単一原子ローディング効率の向上を図った。今回、トラップの深さを 1.5mK から 3.8mK にし、青方離調光を D2 遷移から D1 遷移に変更を行い、また青方離調光の離調、照射時間、パワーを最適化した結果、 82.2% まで向上することができた。

参考文献

- [1] Hikaru Tamura, et al., OE.24.008132 (2016)
- [2] M. F. Andersen, et al., Laser Phys. Lett. 10, 125501 (2013)
- [3] B. J. Lester et al., Phys. Rev. Lett. 115, 073003 (2015)
- [4] N. Schlosser et al., Phys. Rev. Lett. 89, 023005 (2002).