

# 光誘起衝突を用いた光マイクロトラップ中の原子数制御

先進理工学専攻 中川研究室 田村光

## 1 研究背景

近年、光子・イオン・中性原子等の量子を利用し、量子情報処理への応用に向けた研究が盛んに行われている。その中でも中性原子はイオンや他の量子と比較すると、外界の影響が少なく、量子ビットである原子の内部状態のコヒーレンス時間を長く保つことが可能である。さらに、リドベルグ状態と呼ばれるエネルギーの高い励起状態間の大きな相互作用を用いることで、量子ゲート操作に必要な量子もつれ状態を  $5\ \mu\text{m}$  程度離れた原子間にも生成することができるため、個々の原子の制御や観測を容易に行うことが可能となる [1]。そして、量子情報処理を実現するためには、複数個の光マイクロトラップ内にそれぞれ単一原子を用意することが必要不可欠となる。

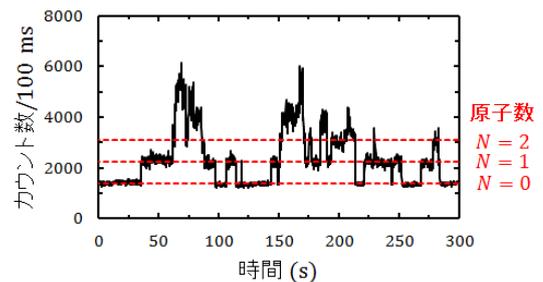
従来利用されている単一原子の用意方法として、赤方離調光による光誘起衝突を用いる方法が挙げられる [2]。しかし、この方法では1つの光マイクロトラップ内に単一原子を用意できる確率が50%となる。従って、光マイクロトラップ数  $N$  が増えるにつれ、単一原子を用意できる確率が  $(1/2)^N$  と指数関数的に減少することが問題点として挙げられる。これは衝突過程で光マイクロトラップ内の原子ペアに与えられる運動エネルギーに制限がないためである。一方、青方離調光による光誘起衝突を用いることで、その離調により原子ペアに与えられる運動エネルギーを制限することができる。M. F. Andersen らは、 $^{85}\text{Rb}$  原子のD1遷移に対し青方離調した光を用いて1つの光マイクロトラップ内に単一  $^{85}\text{Rb}$  原子を用意できる確率を91%まで向上させた [4, 5]。

そこで我々は、「複数個の光マイクロトラップ内にそれぞれ単一  $^{87}\text{Rb}$  原子を用意できる確率の向上化」を短期的な目標として研究を行った。そのために、まず磁気光学トラップ (Magneto Optical Trap: MOT) と1つの光マイクロトラップを空間的に重ね合わせ、MOT および光マイク

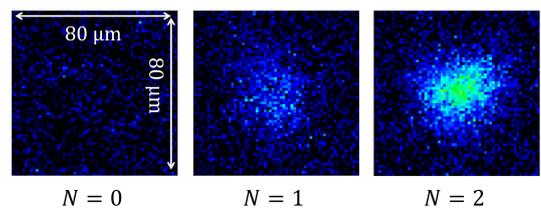
ロトラップ中の単一原子の蛍光観測を行った。次に、トラップ内に用意された単一原子を用いて、構築した光マイクロトラップの特性評価を行った。そして、 $^{87}\text{Rb}$  原子のD2遷移に対し青方離調した光による光誘起衝突を用いて、1つの光マイクロトラップ内に単一原子を用意できる確率の向上化を行った。本論文では、これらの研究結果について述べる。

## 2 MOT および光マイクロトラップ中の単一原子観測

本節では、MOT と光マイクロトラップを空間的に重ね合わせ、これらのトラップ内の原子からの蛍光観測を行った実験について述べる。観測系と光マイクロトラップの光学系を図1に示す。本研究では、非球面レンズ (焦点距離  $f = 8\ \text{mm}$ ,  $\text{NA} = 0.5$ ) を用いて、原子からの蛍光を集めている。この蛍光をビームスプリッター (Beam Splitter: BS) で分け、EM-CCD とアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photo Diode: APD) を利用して観測した。図2aは、高磁場勾配 ( $250\ \text{G}/\text{cm}$ ) MOT 内の原子からの蛍光をAPDで観測した蛍光信号である。MOT内の原子数に応じた離散的な蛍光信号を得ることができた。図2bは、APDの蛍光信号にトリガを設け、原子数  $N$  ごとの蛍光をEM-CCDで観測した結果である。



(a) APDで観測した蛍光信号



(b) EM-CCDで観測した蛍光画像

図2: MOT内の原子からの蛍光観測

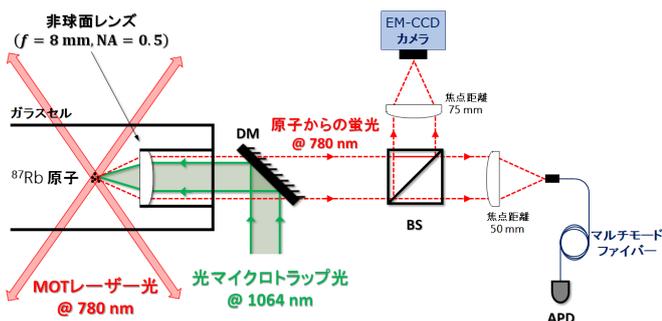
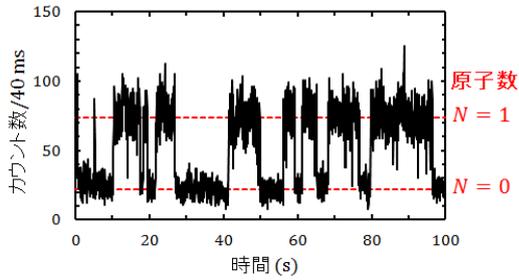
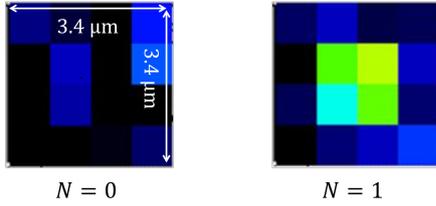


図1: 光マイクロトラップ光の光学系および観測系

光マイクロトラップ光は、観測系と同じ非球面レンズを用いて集光し、ダイクロイックミラー (Dichroic Mirror:



(a) APD で観測した蛍光信号



(b) EM-CCD で観測した蛍光画像

図 3: 光マイクロトラップ内の原子からの蛍光観測

DM) で原子からの蛍光とトラップ光を分離した (図 1)。図 3a は、光マイクロトラップ内の原子からの蛍光を APD で観測した蛍光信号である。赤方離調光による光誘起衝突レートが高く、2 個以上の原子がトラップ内に留まる時間が観測時間 40ms よりも十分に短くなるため、光マイクロトラップ内の原子数が 0 個もしくは 1 個のみとなっている。図 3b は、APD の蛍光信号にトリガを設け、原子数  $N$  ごとの蛍光を EM-CCD で観測した結果である。このように光マイクロトラップ内の原子からの蛍光を APD を用いてリアルタイムに観測し、単一原子を観測したと同時に MOT を切ることによって光マイクロトラップ内に単一原子のみを用意することができる。

### 3 光マイクロトラップの特性評価

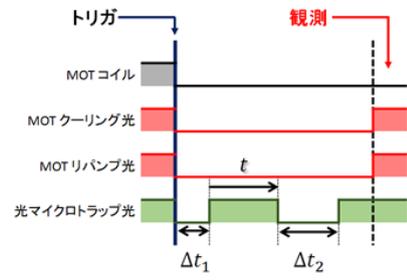
本節では、上述した方法で光マイクロトラップ内に用意された単一原子を用いて、光マイクロトラップの特性評価を行った実験について述べる。

#### 3.1 トラップ周波数の測定

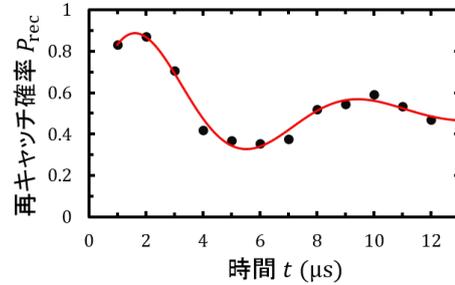
まず、トラップ光のパワー 49mW においてトラップ周波数を測定した。動径方向のトラップ周波数  $\omega_{\text{radical}}$  は以下の式で表すことができる。

$$\omega_{\text{radical}} = \sqrt{\frac{4U_0}{m\omega_0^2}} \quad (1)$$

ここで、 $m$  は原子の質量、 $U_0$  はトラップの深さ、 $\omega_0$  はスポット半径である。図 4a に、動径方向のトラップ周波数を測定した際の時間系列を示す。まず、光マイクロトラップ内で単一原子を観測した後に、MOT を切った。さらに、光マイクロトラップ光を  $\Delta t_1 = 4 \mu\text{s}$  だけ切り、単一原子を自由空間中でトラップの中心から移動させた。その後、 $t$  秒間だけ光マイクロトラップ光を照射し、単一原子をト



(a) 時間系列



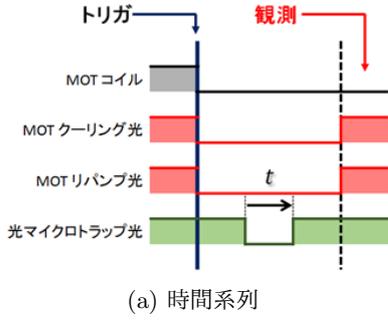
(b) 再キャッチ確率  $P_{\text{rec}}$  vs 時間  $t$

図 4: トラップ周波数の測定

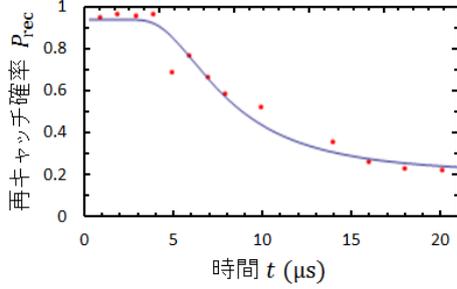
ラップ周波数  $\omega$  で振動運動させた。そして、 $\Delta t_2 = 12 \mu\text{s}$  だけ光マイクロトラップ光を切り、単一原子が再キャッチされる“1”か、再キャッチされない“0”かを APD を用いて測定した。以上の測定を 200 回行い、ブル値 (“1” or “0”) の平均値を時間  $t$  における単一原子の再キャッチ確率  $P_{\text{rec}}$  とした。単一原子がトラップポテンシャルを登り切った場合には、運動エネルギーが 0 となるため  $\Delta t_2$  秒間トラップを開放しても単一原子は移動せず、再キャッチ確率は 1 に近づく。一方、単一原子がトラップの中心に存在する場合は、トラップポテンシャルを下った分だけ運動エネルギーが大きくなる。従って、 $\Delta t_2$  秒間トラップを開放すると単一原子はすぐさま移動し、再キャッチ確率は 0 に近づく。ゆえに、再キャッチ確率  $P_{\text{rec}}$  は  $2\omega$  で振動することが考えられる。図 4b に、再キャッチ確率の測定結果を示す。黒点は測定値、赤線は関数  $A + Be^{-t/C} \sin(2\omega t)$  でのフィッティングである。得られた動径方向のトラップ周波数は、 $\omega_{\text{radical}}^{\text{measured}} \simeq 2\pi \times 64 \text{ kHz}$  となった。

#### 3.2 トラップ内の原子温度の測定

次に、光マイクロトラップ内の原子の温度の測定を行った。その時間系列を図 5a に示す。単一原子を光マイクロトラップ内で観測した後、MOT を切った。その後、光マイクロトラップ光も切り、この時の時刻を  $t = 0$  とした。その時の原子の速度は、マクスウェル・ボルツマン分布  $f(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{v^2}{\bar{v}^3} \cdot \exp\left(-\frac{v^2}{\bar{v}^2}\right)$  に従う。ここで、 $m$  は原子の質量、 $v$  は原子速度、 $T$  は原子温度、 $\bar{v} = \sqrt{2k_B T/m}$  は最確速度である。そして、時刻  $t$  に光マイクロトラップ光を照射し、単一原子が再キャッチされる“1”か、再キャッチされない“0”かを APD を用いて測定した。以上の測定を 100 回行い、ブル値 (“1” or “0”) の平均値を時間  $t$  における単一原子の再キャッチ確率  $P_{\text{rec}}$  とした。 $v_0$  より大きい速度を



(a) 時間系列



(b) 再キャッチ確率  $P_{\text{rec}}$  vs 時間  $t$

図 5: トラップ内の原子温度の測定

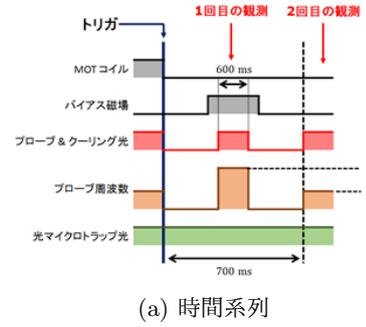
持った原子が再キャッチされる確率は  $P'(v_0) = \int_{v_0}^{\infty} f(v) dv$  となる。従って、 $v_0$  より小さい速度を持った原子が再キャッチされる確率は

$$P_{\text{rec}}(v_0) = 1 - P'(v_0) \quad (2)$$

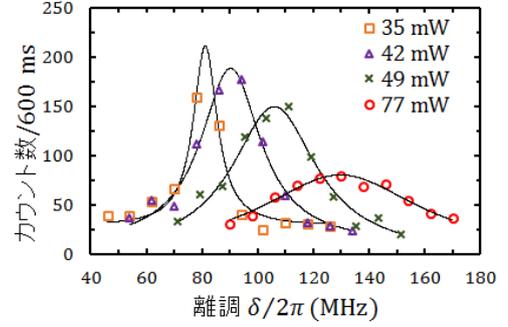
と表すことができる [3]。再キャッチ確率の測定結果を図 5b に示す。赤点は測定値、青線は式 (2) の関数によるフィッティング曲線を示す。なお、 $v_0$  をトラップ光のスポット半径を用いて  $v_0 = 2\omega_0^{\text{inferred}}/t$  とした。これよりトラップ内の原子の温度は  $T^{\text{measured}} \simeq 110 \mu\text{K}$  となった。

### 3.3 光シフトの測定

次に、光マイクロトラップ内の  $5S_{1/2} |F = 2\rangle$  から  $5P_{3/2} |F' = 3\rangle$  への遷移周波数に共鳴させたプローブ光を用いて、光シフトの測定を行った。その時間系列を図 6a に示す。まず、光マイクロトラップ内で単一原子を観測した後、MOT を切り、バイアス磁場を 230 mG 加えた。その後、プローブ光の離調を初期値  $\delta_i$  から  $\delta$  に変化させ 1 回目の蛍光観測を行った。この際、トラップ光とプローブ光の偏光は  $\pi$  偏光とした。そして、プローブ光の離調を  $\delta_i$  に戻し 2 回目の蛍光観測を行い、1 回目の蛍光観測中に単一原子がトラップから逃げていることを確認した。蛍光観測を行う際は、プローブ光による観測  $2 \mu\text{s}$  とクーリング光およびリパンプ光による冷却  $98 \mu\text{s}$  を交互に行い、プローブ光の吸収放出に伴う反跳により加熱され単一原子がトラップ内から逃げることを抑えた。トラップ光のパワー 35 mW, 42 mW, 49 mW, 77 mW における光シフトの測定結果を図 6b に示す。黒線はローレンツ関数  $\mathcal{L}(\delta - \delta_{\text{peak}})$  でのフィッティングである。得られた中心離調  $\delta_{\text{peak}}$  は、 $5S_{1/2} |F = 2, m_F = 0\rangle$  および  $5P_{3/2} |F' = 3, m_{F'} = 0\rangle$  の計算により得た光シフト量  $|\Delta_{F=2, m_F=0}^{\text{calculated}}|, |\Delta_{F'=3, m_{F'}=0}^{\text{calculated}}|$



(a) 時間系列



(b) 蛍光量 vs 離調  $\delta$

図 6: 光シフトの測定

を用いて  $\delta_{\text{peak}} \simeq |\Delta_{F=2, m_F=0}^{\text{calculated}}| + |\Delta_{F'=3, m_{F'}=0}^{\text{calculated}}|$  と近似すると、トラップの深さ  $U_0$  は  $U_0/\hbar \simeq \delta_{\text{peak}} - |\Delta_{F'=3, m_{F'}=0}^{\text{calculated}}|$  と表すことができる。トラップ光のパワー 49 mW においては  $U_0^{\text{measured}} \simeq k_B \times 1.3 \text{ mK}$  となった。

### 3.4 トラップ光のスポット半径の推測

光マイクロトラップ光のスポット半径  $\omega_0$  は、式 (1)、トラップの深さ  $U_0^{\text{measured}}$ 、トラップ周波数  $\omega_{\text{radical}}^{\text{measured}}$  を用いて、

$$\omega_0^{\text{inferred}} = \sqrt{\frac{4U_0^{\text{measured}}}{m\omega_{\text{radical}}^{\text{measured}2}}} \simeq 1.7 \mu\text{m} \quad (3)$$

と推測することができる。従って、 $\omega_0^{\text{inferred}} < 5 \mu\text{m}/2$  となり、 $5 \mu\text{m}$  間隔で並べることが可能なスポット半径の小さな光マイクロトラップであることがわかる。そして図 7 に、以上の測定結果より推測されるガウシアンポテンシャル形状とトラップ内の単一原子のエネルギー分布関数を示す。

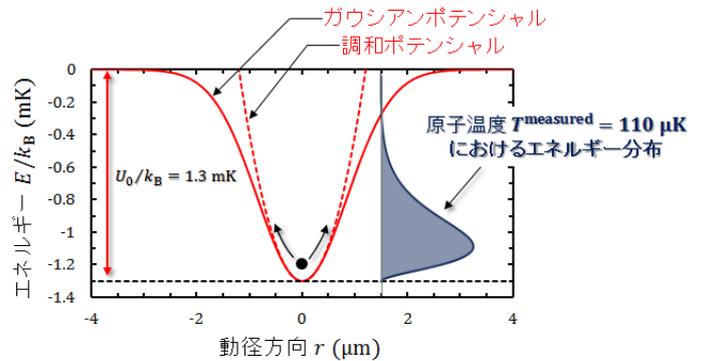


図 7: トラップ内原子のエネルギー分布

## 4 光誘起衝突を用いた

### 光マイクロトラップ中の原子数制御

本節では、まず光誘起衝突の概要 [6] について述べる。その後、光誘起衝突を用いて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の向上を目的として行った以下の実験について述べる。

#### 4.1 光誘起衝突の概要

光マイクロトラップ内の原子の遷移周波数に対し、共鳴近傍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。この衝突を光誘起衝突と呼ぶ。図 8 に、距離  $R$  離れた原子ペアに働く相互作用ポテンシャルを示す。ここで、 $U_g(R)$  は基底状態の原子間に働く相互作用、 $U_e(R)$  は基底状態の原子と励起状態の原子との間に働く相互作用を表す。 $R$  が大きい領域 ( $R \sim \lambda$ ) においては、 $U_g(R)$  は一定とみなすことができ、 $U_e(R) \simeq C_3/R^3$  が支配的となる。

##### 4.1.1 赤方離調光による光誘起衝突

まず、周波数  $\omega$  のレーザー光を原子の遷移周波数  $\omega_0$  に対し、赤方に離調 ( $\delta = \omega_0 - \omega > 0$ ) した場合について考える。この場合、原子ペアは原子間距離  $R_C = (C_3/h|\delta|)^{1/3}$  において、引力ポテンシャル  $U_e$  に遷移する確率が高くなる。従って、励起された原子ペアはお互いに近づく方向に加速され、原子間距離  $R_S$  において自然放出が起こると原子ペアは基底状態  $|S+S\rangle$  に戻る。この自然放出が起こった際、ポテンシャルエネルギーの差分  $\Delta E_{RE} = U_e(R_C) - U_e(R_S)$  が運動エネルギーとして原子ペアに与えられ、 $\Delta E_{RE}$  には制限がない。このように自然放出により運動エネルギーを得る過程は Radiative Escape: RE 過程と呼ばれている (図 8)。 $^{87}\text{Rb}$  の場合、微細構造が存在するため、 $|S+P_{3/2}\rangle$  の引力ポテンシャルに遷移した原子ペアが  $|S+P_{1/2}\rangle$  の斥力ポテンシャルに移る過程がある。この衝突過程は Fine structure changing collision: FCC 過程と呼ばれ、原子ペアに与えられる運動エネルギーは  $\Delta E_{FCC} = 341 \text{ K}$  となる。さらに超微細構造まで考慮し、 $|S+P_{3/2}, F=3\rangle$  の引力ポテンシャルに遷移した原子ペアが  $|S+P_{3/2}, F=2\rangle$  の斥力ポテンシャルに移る過程は Hyperfine structure changing collision: HCC 過程と呼ばれ、原子ペアに与えられる運動

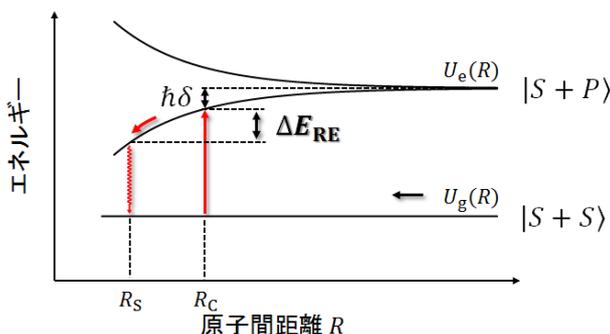


図 8: 赤方離調光による光誘起衝突

エネルギーは  $\Delta E_{HCC} = 12.8 \text{ mK}$  となる。従って、赤方離調光による光誘起衝突で1つの原子に与えられる運動エネルギー  $\Delta E_{RE}/2$ 、 $\Delta E_{FCC}/2$  および  $\Delta E_{HCC}/2$  は、トラップの深さ ( $\sim 1 \text{ mK}$ ) よりも十分に大きいため、トラップ内の原子ペアに赤方離調光を照射すると原子ペアはトラップから逃げる。従って、従来から利用されている赤方離調光による光誘起衝突を用いた単一原子の用意方法では、初期原子数が奇数個の場合のみトラップ内に単一原子を用意することができるため、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は 50% となる。ゆえに、光マイクロトラップ数  $N$  を増やすにつれ、その確率は  $(1/2)^N$  と指数関数的に減衰する。

##### 4.1.2 青方離調光による光誘起衝突

一方、青方離調した光を照射すると、原子ペアは原子間距離  $R_C = (C_3/h|\delta|)^{1/3}$  において、斥力ポテンシャル  $U_e$  に遷移する確率が高くなる (図 9)。遷移し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り、再び  $R_C$  に戻ってくる。この際、原子ペアは基底状態  $U_g$  に誘導放出する場合 (図 9a) と、斥力ポテンシャルを下りお互いに離れる方向に加速され、いつか自然放出する場合 (図 9b) が考えられる。前者は弾性衝突過程であるため原子ペアの運動エネルギーは衝突前と変化がない。後者は非弾性衝突過程であるため原子ペアには運動エネルギーが与えられる。自然放出した原子間距離を  $R_S$  とすると、その運動エネルギーは  $\Delta E_{BLUE} = U_e(R_C) - U_e(R_S) \leq h\delta$  と表すことができ、自然放出が起こらなければ  $\Delta E_{BLUE} = h\delta$  となる。従って、この非弾性衝突過程で原子ペアに与えられる運動エネルギーは、青方離調光の離調  $\delta$  等により制限することができる。ゆえに、青方離調光の離調  $\delta$  等のパラメータを最適化することにより、原子ペアの内1つの原子のみをトラップから逃がすことができる。よって、初期原子数に寄らずトラップ内に単一原子を残すことが可能となるため、トラップ内に 50% 以上の確率で単一原子を用意することが期待できる。

##### 4.2 単一原子を用意できる確率の向上化

ここでは、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に単一原子を用意できる確率の向上化

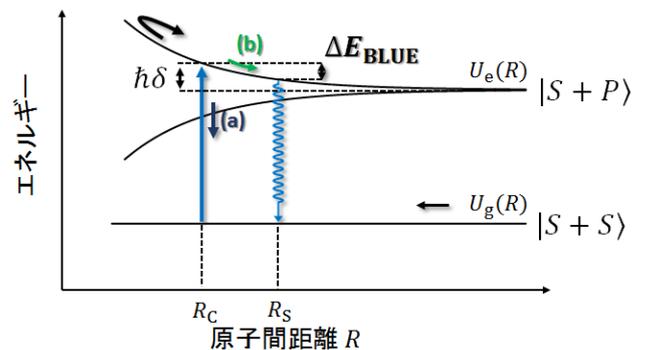
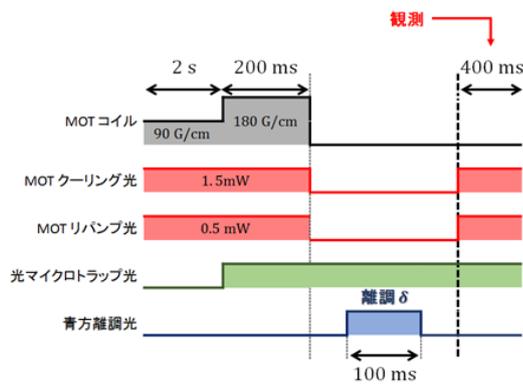
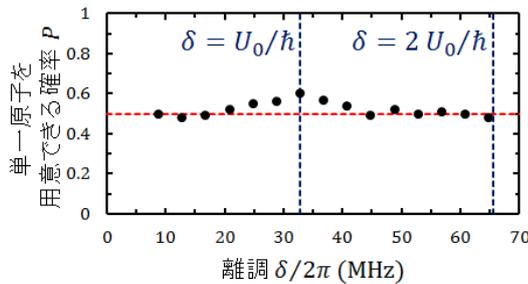


図 9: 青方離調光による光誘起衝突



(a) 時間系列



(b) 単一原子を用意できる確率  $P$  vs 離調  $\delta$

図 10: 青方離調光の離調依存性

を図った実験について述べる。青方離調光は、光マイクロトラップ光による光シフトを加味し、 $5S_{1/2} |F = 1\rangle$  から  $5P_{3/2} |F = 2\rangle$  の共鳴周波数から青方離調した光を用いた。

#### 4.2.1 青方離調光の離調依存性

まず、単一原子を用意できる確率の青方離調光の離調依存性を測定した。その際の時間系列を図 10a に示す。2s 間 MOT へのローディングを行った後に、磁場勾配を 90 G/cm から 180 G/cm まで高め原子密度を増加させた。同時に光マイクロトラップをオーバーラップさせ、MOT 内の原子をトラップの深さが  $U_0 = k_B \times 1.5 \text{ mK} = h \times 33 \text{ MHz}$  の光マイクロトラップ内へ移行させた。そして、光マイクロトラップ内の原子に 100 ms だけ離調  $\delta$  と設定した青方離調光を照射した。最後に、赤方離調光であるクーリング光およびリパンプ光を光マイクロトラップ内の原子に照射し、APD を用いて蛍光観測を行った。ここで、光マイクロトラップ内に単一原子が存在する “1” か、存在しない “0” かを測定した。以上の測定を計 100 回行い、ブル値 (“1” or “0”) の平均値を離調  $\delta$  における単一原子を用意できる確率  $P$  とした。単一原子を用意できる確率  $P$  の離調  $\delta$  依存性の測定結果を図 10b に示す。黒点は実測値、赤点線は確率 50% を示す。また、青点線は  $\delta = U_0/h, 2U_0/h$  を示す。

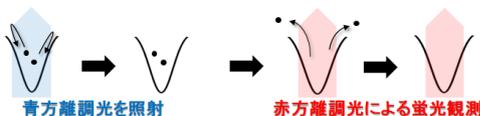


図 11:  $\delta \leq U_0/h$  の領域

まず、 $\delta \leq U_0/h$  の領域 (図 11) では、単一原子を用意で

きる確率  $P$  が 50% に近づいた。これは次のように解釈した。青方離調光による光誘起衝突過程により原子ペアに与えられる運動エネルギーの最大値  $h\delta$  がトラップの深さ  $U_0$  より小さいため、この衝突過程では原子ペアはトラップから逃げにくい。しかし、蛍光観測を行う際に赤方離調光を用いている。そのため、赤方離調光による光誘起衝突が生じ、原子ペアはトラップから逃げる。よって、最終的に単一原子が光マイクロトラップ内で観測される確率  $P$  は、初期原子数が奇数個か偶数個かの 50% に近づくことが考えられる。



図 12:  $\delta \geq U_0/h$  の領域

次に、 $\delta \geq U_0/h$  の領域 (図 12) でも単一原子を用意できる確率  $P$  が 50% に近づいた。この領域では、青方離調光による光誘起衝突過程で原子ペアに与えられる運動エネルギーの最大値  $h\delta$  がトラップの深さ  $U_0$  よりも大きくなる。従って、青方離調光を照射した時点で原子ペアがトラップから逃げる確率が高くなると思われる。よって、最終的に単一原子が光マイクロトラップ内で観測される確率  $P$  は、初期原子数が奇数個か偶数個かの 50% に近づくことが考えられる。



図 13:  $\delta = U_0/h$  の近傍

そして、 $\delta = U_0/h$  の近傍 (図 13) では、単一原子を用意できる確率  $P$  の向上がみられた。ここでは、光誘起衝突過程で原子ペアに与えられる運動エネルギーの最大値  $h\delta$  がトラップの深さ  $U_0$  となる。そのため、青方離調光を照射した際に原子ペアのうち 1 つの原子のみがトラップから逃げる確率が高くなり、その結果、単一原子を用意できる確率  $P$  が向上したと思われる。図 10b より、 $\delta/2\pi = 33 \text{ MHz}$  のときに単一原子を用意できる確率  $P$  は最大値  $P = 60\%$  となった。

#### 4.2.2 青方離調光の照射時間依存性

次に、青方離調光の離調を  $\delta/2\pi = 33 \text{ MHz}$  と設定し、単一原子を用意できる確率の青方離調光の照射時間依存性を測定した。その実験結果を図 14 に示す。照射時間が 90 ms 以下では、照射時間とともに存在確率が向上したが、照射時間が 90 ms 以上では、時間とともに存在確率が減少した。これは、図 15 に示すように光誘起衝突過程で原子ペアのうち 1 個の原子のみがトラップから逃げたととしても、残った単一原子が青方離調光の吸収放出に伴う反跳により加熱され、観測を行う前にトラップから逃げてしまったと思わ

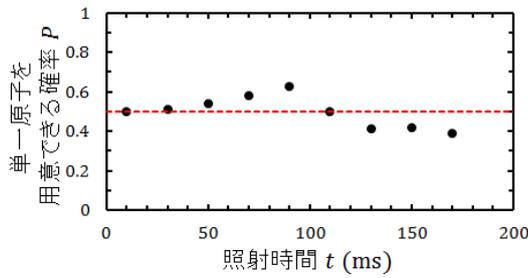


図 14: 青方離調光の照射時間依存性

れる。図 14 より、照射時間 90 ms のときに存在確率は最大値  $P = 63\%$  となった。

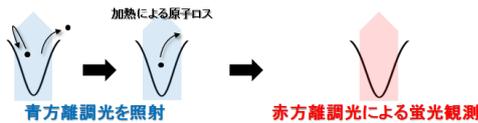


図 15: 加熱による原子ロス

### 4.3 単一原子を用意できる確率の制限要因

単一原子を用意できる確率が 63% 以上向上しない主な要因として、考えられる 3 つの点について述べる。

1 つ目は、「MOT から光マイクロトラップ内へのローディング効率が悪い点」である。青方離調光による光誘起衝突を用いて単一原子を用意できる確率を向上させるためには、2 原子以上の原子が光マイクロトラップ内へローディングされていることが必要条件である。そのため、2 個以上の原子が青方離調光照射前に光マイクロトラップ内に存在する確率が低いことが、単一原子を用意できる確率を制限する要因の 1 つとして考えられる。

2 つ目は、「原子の初期状態が揃っていない点」である。青方離調光による光誘起衝突を用いるためには原子の初期状態を  $5S_{1/2} |F = 1\rangle$  に揃える必要がある。本実験用いた時間系列 (図 10a) では原子の初期状態が  $5S_{1/2} |F = 1\rangle$  に揃っていなかったことが、単一原子を用意できる確率が向上しなかった要因の 1 つとして考えられる。

3 つ目は、「青方離調光による加熱の効果」である。青方離調光による光誘起衝突過程を経てトラップ内に残った単一原子が青方離調光の加熱効果によりトラップから逃げてしまうことが、単一原子を用意できる確率を制限する要因の 1 つとして考えられる。

## 5 まとめと今後の展望

我々は、まず MOT 内の原子からの蛍光観測を行い、APD および EM-CCD を用いて単一原子を観測することができた。次に、MOT と光マイクロトラップを重ね合わせ、光マイクロトラップ内にローディングされた原子からの蛍光観測を行った。そして、光マイクロトラップ内にローディングされた単一原子を用いて、光マイクロトラップの特性評価 (トラップ周波数、トラップ内の原子の温度、および

トラップの深さ) を行った。測定した動径方向のトラップ周波数  $\omega_{\text{radical}}^{\text{measured}}$  およびトラップの深さ  $U_0^{\text{measured}}$  より、光マイクロトラップのスポット半径は  $\omega_0^{\text{inferred}} \simeq 1.7 \mu\text{m}$  と推測することができ、 $5 \mu\text{m}$  間隔で並べることが可能なスポット半径の小さな光マイクロトラップであることを確認した。次に、複数個の原子を光マイクロトラップ内へローディングし、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化を図った。本実験では、青方離調光の離調と照射時間を最適化した。その結果、赤方離調光を用いた場合の 50% から 63% まで向上させることができた。そして、単一原子を用意できる確率を制限している主な要因として、考えられる 3 つの点を述べた。現在、MOT から光マイクロトラップへのローディングを改善し、平均 10 個の原子が光マイクロトラップ内にローディングされていることを確認でき、1 つ目の制限要因は解決できたといえる。しかし、2~3 つ目の制限要因の解決はまだ実現できておらず、今後の課題である。

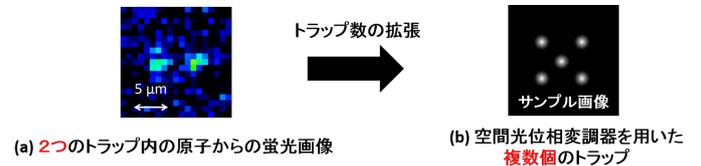


図 16: 光マイクロトラップ数の拡張

現在、光マイクロトラップ光の偏光の自由度を用いて、2 つの光マイクロトラップを実現できている (図 16a)。さらに光マイクロトラップ数を増やすために、我々は空間光位相変調器を利用した複数個の光マイクロトラップの構築 (図 16b) の準備も行っている。そして、トラップ数が増えた際の青方離調光の効果の検証も目標の 1 つである。

## 参考文献

- [1] M. Saffman et al. *Rev. Mod. Phys.* **82**, 2313 (2010).
- [2] N. Schlosser et al. *Nature* **411**, 1024 (2001).
- [3] W. Jun-Min et al. *Chin. Phys. B* **20**, 073701 (2011).
- [4] M. F. Andersen et al. *Nature Phys.* **6**, 951 (2010).
- [5] M. F. Andersen et al. *Laser Phys. Lett.* **10**, 125501 (2013).
- [6] J. Weiner. *Cold and Ultracold Collisions in Quantum Microscopic and Mesoscopic Systems*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. (2003).