

光双極子トラップによる BEC の操作

中川研究室 鈴木裕介

1 序論

1995年に初めて Rb と Na ボーズアインシュタイン凝縮体が生成されて以来、ボーズ凝縮体を用いた応用実験が行われている。近年では、ボーズ凝縮体を自由に操作、原子同士の相互作用を利用してボーズ凝縮体のスピン状態を量子情報処理や量子コンピュータに利用する研究が行われている、ボーズ凝縮体を操作する際は原子と相互作用する外場を用いるが、代表的には電磁場、磁場、電場などがある、電場や磁場はチップ上に超微細なパターンを作りそこに電圧や電流を流すことによりできるポテンシャルで原子のトラップや操作を行う。光に関しては原子と光の相互作用を用いて原子をトラップする、電場や磁場ではチップ上に微細なパターンを作るためポテンシャル操作は比較的簡単になるが、光ではポテンシャル操作は難しい。しかし、光の場合は原子のデコヒーレンスが光との相互作用による散乱レートのみで決まるので非常に長いコヒーレント時間が得られる。さらに3次元的な定在波を用いる事により、各サイトに1個ずつ原子をトラップする単一原子状態やスピンに依存したポテンシャルを作ることができ、これは量子コンピュータ実現に必要な量子ビット (Q-bit) の用意と状態に依存した原子操作が可能になる、量子情報や量子コンピュータには非常に有用な方法と考えられています。

そのため本研究では「双極子トラップが容易な BEC 生成装置の開発」と「双極子トラップによる原子操作」を目的として実験を行う。 ^{87}Rb の BEC 生成装置の開発は従来のダブル MOT システムでは 2nd のセルでも MOT を行うために双極子トラップ用の光を照射する際に非常に困難となる、そのため磁気トラップによる 2nd への移行を考えた。2nd へはリニアアクチュエータを用いてコイルを物理的に動かすことにより実現している。また、ダブル MOT システムではローディングの際に1分ぐらいかかるので非常に実験の効率が悪いので、新たに光誘起脱離により時間的に真空をコントロールして 15s 程度での 2nd へのローディングを実現する。そして3次元的に光のアクセスの良い BEC 生成装置を開発する。その後、双極子トラップや三次元的な光格子への BEC のロードを行う。

2 磁気トラップ

磁場中に原子が存在している時、原子の持っている磁気モーメントと外からの磁場による相互作用により

$$U = -\mu \cdot \mathbf{B} \\ = g_F \mu_B m_F |B| \quad (1)$$

のエネルギーシフトを感じる。ここで m_F は原子の磁気副量子数、 g_F はランデの g ファクター、 μ_B はボーア磁子を表している。我々の用いている ^{87}Rb は基底状態 ($5S_{1/2}$) には $F=2 (g_F = \frac{1}{2})$ と $F=1 (g_F = -\frac{1}{2})$ の微細構造をもっているが $F=2$ の準位は外から磁場がかかると $m_F = -2, -1, 0, 1, 2$ とゼーマン分裂を起こす、(1) 式において μ_B は正の値を持つので $g_F m_F$ の符号によって原子の感じるポテンシャルが変化することが解る。 $g_F m_F < 0$ の場合は磁気ポテンシャル U が正の値を取るので磁場が大きければ大きいほどポテンシャルが大きくなるので原子は磁場の小さい場所に近づくように力を感じる。そのため、アンチヘルムホルツコイルにより三次元的なゼロ点を作ればその場所に原子をトラップ出来て、コイルを物理的に動かしゼロ点を動かせば原子を移送することが可能になる。

3 光双極子トラップ

中性原子が電磁場 (レーザー場) 中にあると散逸力と保存力を感じる。散逸力は光子の自然放出・吸収や緩和による運動量変化を生じさせるために原子の冷却に用いられている。原子の双極子トラップは保存力を用いているが、この力は電磁場中にある原子が原子-光相互作用により原子中に双極子モーメントが誘起されポテンシャルエネルギーがシフトすることから生じる。このシフトはライトシフト (Light Shift) と呼ばれている。二準位系において二準位間の共鳴周波数 ω_0 から離調 $\Delta = \omega - \omega_0$ のレーザーを原子が感じると $V_{dip}(\mathbf{r})$ のライトシフトが起こる。これによる双極子ポテンシャル $V_{dip}(\mathbf{r})$ とライトシフトが起こった時の散乱レート $\Gamma_{sc}(\mathbf{r})$ は回転波近似を用いることにより

$$V_{dip}(\mathbf{r}) \approx \frac{3\pi c^2 \Gamma}{2\omega_0^3 \Delta} I(\mathbf{r}) \quad (2)$$

$$\Gamma_{sc}(\mathbf{r}) \approx \frac{3\pi c^2}{2\hbar\omega_0^3} \left(\frac{\Gamma}{\Delta}\right)^2 I(\mathbf{r}) \quad (3)$$

(2) 式で与えられる光双極子ポテンシャル $V_{dip}(\mathbf{r})$ はレーザーの強度 $I(\mathbf{r})$ に比例して、レーザーの離調 Δ に反比例することになるので単純に考えてポテンシャルの深さを大きくする場合はレーザーの強度を強くして離調を小さくすれば良いことになる。しかし、(3) 式から解るように散乱レート Γ_{sc} はレーザーの強度 $I(\mathbf{r})$ に比例してレーザーの離調 Δ の 2 次で反比例するので、原子の寿命を長くしたいと考えるならばレーザーの強度を弱めて、離調を大きく取れば良いがこの場合はポテンシャルの深さが小さくなってしまいます。そのため一般的に散乱レートはレーザーの離調の 2 次で効いてきてしまうので離調は大きくとり、レーザーの強度はポテンシャルを深くするために強い状態にする。

また、(2) 式は離調を正に取るか、負に取るかに依存している。青方離調 ($\Delta > 0$) の場合はポテンシャルは正になり斥力ポテンシャルになり、赤方離調 ($\Delta < 0$) の場合はポテンシャルは負になり引力ポテンシャルになる。一般的に双極子トラップする場合は離調を負にとりビームを集光させてその部分にトラップする、離調が正の場合はあまり使われないがリング型のビームを作り、その中央部分のビーム強度の弱い部分にトラップする。

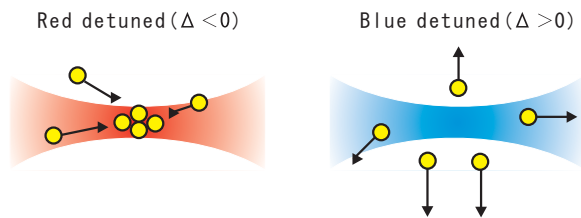


図1 離調に対する双極子トラップ

4 実験装置

磁気トラップにより 1st セルから超高真空の 2nd セルに冷却原子を移送するために図 2 のような装置を設計しました。1st のセルではなるべく多くの原子を MOT によりトラップしたいので真空度を $10^{-9} Torr$ 程度にしてある。Rb 原子は 1st セルの近くに設置してある Rb リザーバの温度を上げて Rb の供給を行っている。2nd のセルは BEC 生成のためには 60s 程度の寿命が必要になってくるので 50l/s のイオンポンプとチタンサブリメーションポンプを用いて真空度を 10^{-11} という超高真空状態を作って

ある。

新しい装置ではコイルを物理的に動かすことによって原子の移送を行うが、コイルを動かすアクチュエータは (株)THK のアクチュエータ VLA 型 (VLA-ST-45-R-500) を利用している。このリニアアクチュエータは最高速度 680[mm/s]、最高加速度 2.942[m/s²]、繰り返し位置決め精度 ± 0.020 [mm] の性能を持っており、制御は外部トリガーによって指定した場所まで動かすことが可能である。

このリニアアクチュエータの上に MOT コイルを設置して磁気トラップにより原子を 2nd セルまで移行する。2nd の Quadrupole-Ioffe-configuration (QUIC) コイルは四重極コイルとイオフエコイルに直流で電流を流しているので、QUIC により出来る磁場は四重極とイオフコイルの位置関係によって決まる、また 100A という大電流を流すので水冷が必要になってくるので 1st の MOT コイルをそのまま 2nd の QUIC コイルの一部として使うのは好まれない。Transfer コイルは中心からの距離が 5.8[cm] で遠く必要な磁場勾配を得るには 100A 程度流しているが、MOT コイルや QUIC コイルのように長い時間電流を流さず、2 分おきに 1s 程度しか流していないので熱的な問題は考えなくて良い。

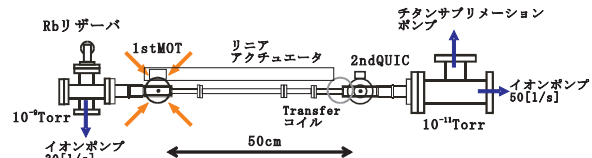


図2 実験装置

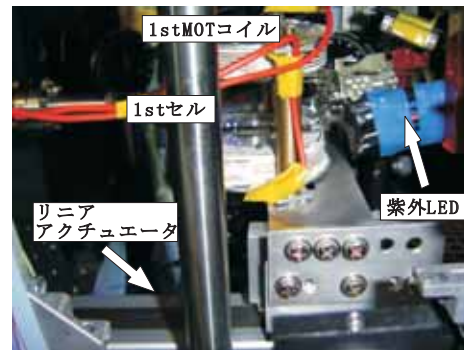


図3 実際の実験装置 (1st 側)

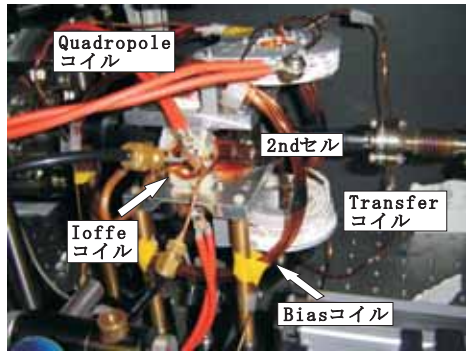


図 4 実際の実験装置 (2nd 側)

5 実験

今回の新しい装置での BEC 生成までは図 5 の様に大きく分けて 5 つの段階がある。

1, 1st 磁気光学トラップ (MOT)

今までの装置はダブル MOT システムを行っていたので、1st セルの Rb 圧力を上げて多くの原子を 1st の MOT にトラップして、それを 2nd に Push 光で送っていたが、今回は 1st のセルで MOT と MT を行うので MT 時の原子のロスなどを考え非常に多くの原子をトラップする必要がある。そのため今回は光誘起脱離という方法で効率の良い原子のローディングを行った。

2, 1st 磁気トラップ (MT)

磁気トラップで原子を移送するために MOT の原子を偏光勾配冷却 (PGC) で冷却して、磁気トラップに入れる際の加熱やロスが少ないような磁場勾配で磁気トラップに移行する。

3, リニアアクチュエータによる原子の移送

1st で磁気トラップした原子をコイルを物理的に動かすことにより磁場のゼロ点を移動させ、それに追従して原子は 1st セルと 2nd セルの間の管を約 50[cm] にわたって移送している。移送中のロスやアクチュエータの振動による温度上昇を考慮して、原子の移送を行っている。

4, 2nd QUIC コイルトラップ

2nd 近くまで来た原子は Transfer コイルを経由して、初めに 2nd 四重極コイルにトラップする、それからゆっくりと Ioffe コイルに電流を流して IP 型の磁場を作る。

5, 蒸発冷却

QUIC コイルにトラップされた原子に RF 磁場を与える事により熱い原子から選択的にトラップから取

り除き、原子を冷却して BEC を目指す。

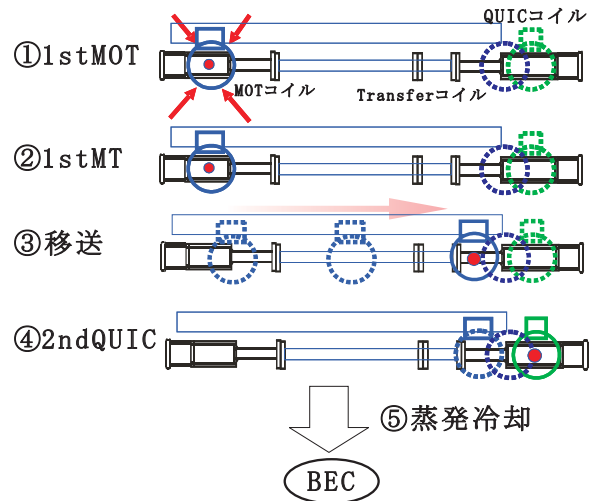


図 5 BEC 生成までの実験手順

この実験では 2nd のセルに磁気トラップで移送しなければならないので磁気トラップへの移行ロスやバックグラウンドの衝突によるロスがあるので数多くの原子を 1st の MOT にトラップしなければならない。数多くの原子を 1st の MOT にトラップするには Rb の圧力を高くすれば自然とトラップされる原子数は増えるが真空度が悪くなり磁気トラップした際の寿命が悪くなり、1st のセルを抜け出すまでにロスが多くなり個数が減少してしまう。

そのため MOT をローディングする際は Rb の圧力を上げて、MT の際は Rb の圧力を下げて真空度を上げるといふ、1st セルの真空度の時間的なコントロールが必要になってくる。

これを実現するために我々は光誘起脱離という方法を用いている。Rb ガスはセルの中に浮遊していると同時にガラスセルの内側の壁に吸着している原子も存在している。真空度はもちろん浮遊している原子で決まっている。普通に原子をトラップするとセルの中で浮遊している原子によって決まる原子数しかトラップできないが、外から光をガラスセル全体に照射することにより原子は壁に吸着しているエネルギーを破るエネルギーを光から貰いセルの中に飛び出してくる。これにより Rb の圧力が上がり (真空度は下がり) MOT にトラップされる原子数は増加する。その後、光を切る事によりトラップされなかった原子は再度壁に吸着して Rb の圧力は下がり、MT を行う際は真空度の良いものとなる。

用いている光は紫外域の波長が出る紫外 LED を用いている。これは一個あたり 10[mW] の電力が必要

でそれを 50 個程度一つの基板上に集積化して、それを 2 つ、LED を計 100 個使いセルから MOT の位置から約 5[cm] 離れた場所からセル全体に照射されるように配置している。

MOT 時の Cooling 光の離調は-21MHz、パワー密度 [mW/cm²]、ビーム径 2.5[mm]、軸方向の磁場勾配 15[Gauss/cm] で行っており、同時に入れている Repump 光は全パワー 5.7[mW] でそれを Cooling 光に重ねて x,y の二方向から対向して入れている。図 6 は紫外 LED を ON にした時の 1stMOT から出ている蛍光を検出している、蛍光量は原子の個数に比例しているため蛍光量が増えれば原子の個数も増えている事になる。MOT が ON の状態から LED を ON にすることにより蛍光量が約 10 倍に増えていることが分かる。吸収撮影方を用いて原子の個数を見積ると紫外 LED を使わない場合は 3.5×10^7 個の原子しかトラップされないが、紫外 LED を用いることによりトラップされる個数を 3.0×10^8 個にまで上げることが可能になった。

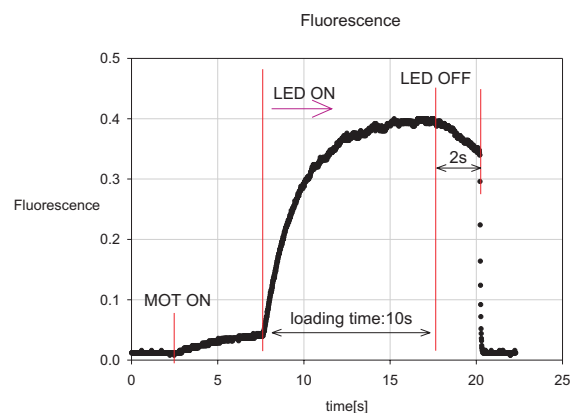


図 6 紫外 LED を用いた時の原子からの蛍光量変化

個数と同じくらいに重要な真空度だが、多くの原子を壁から出してもそれが長い間セルの中に浮遊して再吸着が起こる確率が低い場合は MOT の寿命によりトラップしている原子が少なくなり、磁気トラップする時まで真空度が悪いままではバックグラウンドの衝突が多く、原子のロスが大きくなってしまふ。これは紫外 LED を消してからある程度時間が経過した後の磁気トラップの寿命を計れば解る。

磁気トラップまでは MOT を行った後に Cooling 光の離調を-51[MHz]、磁場勾配を 30[Gauss/cm]、Repump 光のパワーを 50[μW] にして CMOT(Compression MOT) を 20[ms] 行い、その後磁場を瞬時に切り、光の離調を-71[MHz] まで下

げて PGC(偏光勾配冷却) を 7[ms] 行い 2.2×10^8 個の原子を 22[μK] まで下げている。PGC 終了後に約 400[μs] かけて OP コイルを立ち上げて 1[Gauss] 程度のバイアス磁場を作りその後 0.5[μW] の OP 光を 10[μs] 照射して原子の状態 $|5S_{1/2}, F=2, m_F=2\rangle$ に揃える。その後、OP コイルを残しながら MT の磁場勾配を立ち上げてスピンを追従するようにして磁気トラップに移行する。磁気トラップでキャッチする際は磁場勾配 60[Gauss/cm] で行い、50[ms] 後に 150[ms] かけて断熱的に磁場勾配 100[Gauss/cm] まで断熱圧縮を行う。圧縮することにより移行の際の加熱も抑えられる。圧縮後 300[ms] 待機した後の個数は 1.2×10^8 個、温度が 95[μK]、位相空間密度が $\rho_{PS} = 5.8 \times 10^{-8}$ になっている。

図 7 は 1st の寿命を LED を使わなかった時と LED を使い原子をローディングした後に LED を OFF にして 2s 経過した後の寿命である。LED を OFF にしてから 2s 経過した後の寿命は使わない時の寿命 2.7s とほぼ等しく光誘起脱離により Rb の圧力を上昇させてもすぐに壁に吸着して元の真空に戻る事がわかる。これより光誘起脱離による MOT のローディング法は MOT と MT を同一のセルで行う際には非常に有用であることがわかる。

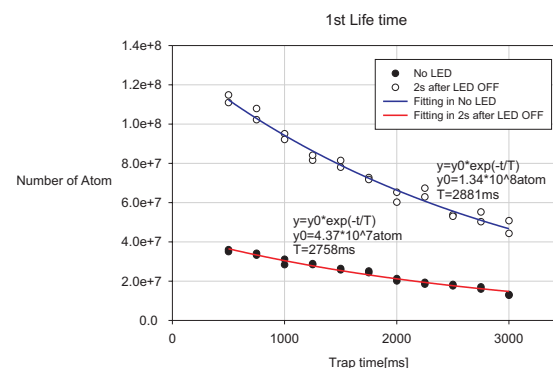


図 7 1stMT の寿命 (○: LED を OFF にしてから 2s 経過した時の寿命 ●: LED を使わなかった時の寿命)

1st セルから 2nd セルに移行の際はリニアアクチュエータでコイルを物理的に動かすことで磁気トラップによって移送を行っている。この方法は磁気トラップさえすればコイルを動かすだけで磁場のゼロ点に追従して簡単に原子を移送できる。しかし、移送の際にアクチュエータの振動や加速度の変化により原子は力を受けて加熱されてしまふ。図 8 はコイルを動かした時と動かさない時の吸収像を表して

いるが、動かした場合は動かした方向に加熱が起きて広がりが早くなっていることが分かる。加熱を無くす為には加速度を落として加熱を減らす方法があるが、これは 1st セルから抜け出す時間がかかり衝突によるロスが大きくなる個数の減少が著しくなってしまう。また、移動の際の最高速度を変えても原子の加熱は等しいことから加熱は加速度のみにより引き起こされていることも解っている。現在は 2nd に移送する原子数を多くするため加熱はあるが加速度 $2.0[m/s^2]$ 、速度はアクチュエータの最高速度 $0.6[m/s]$ で行っている。

コイルを動かさない場合 コイルを動かした場合

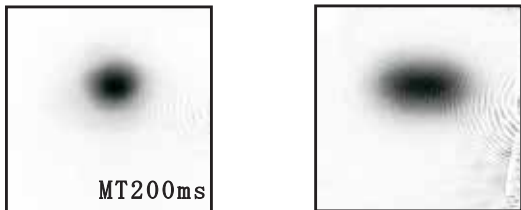
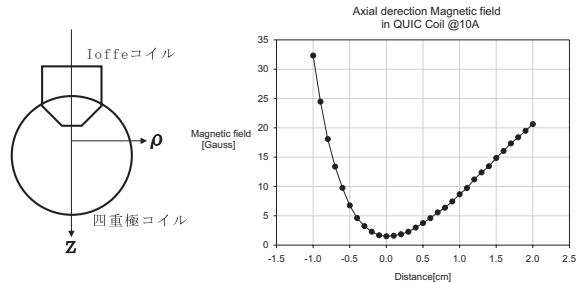


図 8 コイルを動かした際の加熱の様子 (TOF5ms の吸収像)

アクチュエータで Transfer コイルの前まで MOT コイルを移動したら $500[ms]$ かけて Transfer コイルの電流を立ち上げて、その後 $500[ms]$ かけて MOT コイルの電流を切る。その後は前述と同様の手順で原子を 2nd の四重極コイル移行する。2nd 四重極コイルにトラップされた時は移送時の磁場勾配 $100[Gauss/cm]$ なので $1.5[s]$ かけて軸方向の磁場勾配を $276[Gauss/cm]$ まで断熱圧縮する。その後 $1[s]$ かけて徐々に Ioffe コイルに電流を流して 2ndQUIC コイルに移行する。2ndQUIC コイルによって出来る IP 型磁場のパラメータは図 9 のようになっている。このようなトラップ周波数では一般的に蒸発冷却の時間は約 $60[s]$ 程度かかるが、本実験での 2nd セルでの寿命は $75[s]$ となり、BEC 生成には十分な長さだと考えられる。

2ndQUIC コイルにトラップした後は蒸発冷却を行い、原子の温度を下げながら密度を上げて BEC 生成を目指す。蒸発冷却の RF 周波数掃引は図 10 のように $30MHz$ ($20s$) $10MHz$ ($15s$) $2MHz$ ($7s$) $1MHz$ ($7s$) $625kHz$ として RF 周波数のパワーは強い場合はパワーローディングが起こり広い幅で原子を遷移させるので蒸発冷却の初めは強くして後半に進むにつれてパワーを弱くして狭い幅で原子を遷移させるようにしている。蒸



半径方向1次の磁場勾配: $\alpha=276[Gauss/cm]$
 軸方向2次の磁場勾配: $\beta=286[Gauss/cm^2]$
 半径方向トラップ周波数: $\omega_r=2\pi \times 314[Hz]$
 軸方向トラップ周波数: $\omega_z=2\pi \times 20[Hz]$
 オフセット磁場: $B_0=0.5[Gauss]$

図 9 2ndQUIC コイルによる IP 型磁場

蒸発冷却中の原子の様子を図 10 の下に示してある、 $10MHz, 2MHz$ では原子の温度が高いので原子雲が広がっているのが分かるが $1MHz$ や $700kHz$ では原子の吸収像が濃く写り、密度が上昇して温度が下がっている事が分かる。 $700kHz$ では原子の個数 2.5×10^5 個、温度が $1.5[\mu K]$ 、位相空間密度が 0.03 まで上昇している。

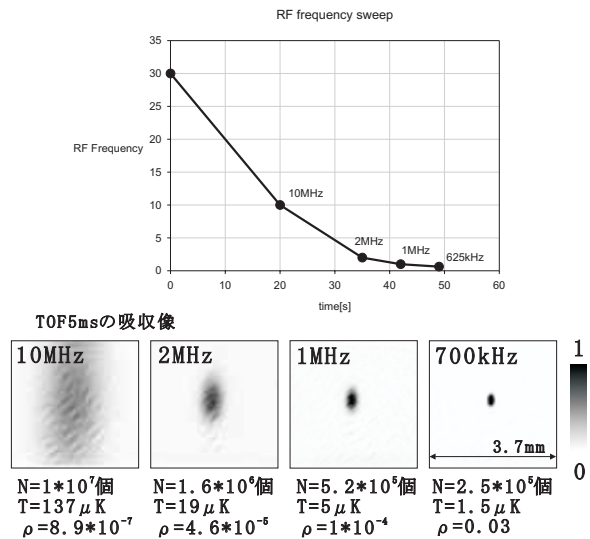


図 10 蒸発冷却過程での RF 周波数掃引と原子の冷却

$700kHz$ 以下の $625kHz$ までの掃引を行い、BEC への相転移の様子を TOF20[ms] の吸収像で図 11 に示してある。 $660kHz$ まで掃引した場合はサーマルな原子集団だが温度が $480[nK]$ まで下がり、位相空間密度も 0.21 まで上がっている。個数が 1×10^5 個の時の相転移温度は $260[nK]$ なので BEC 生成の直前まで来ている事がわかる。 $645kHz$ まで掃引するとサーマルな原子集団の中に密度の濃い BEC 成分が現れてサーマルな原子と BEC 成分の混合状態に

なっている。625kHz まで掃引するとサーマルな原子は無くなり、すべて BEC 成分になっている事がわかる。生成された BEC の個数は 4×10^4 個で温度が 177[nK] である。サーマルな原子集団の場合は TOF20ms 後の吸収像は丸くなっているが、トラップから開放された後の BEC はトラップされていたポテンシャルの形状によって広がり方が決まるので本実験のような葉巻型のポテンシャルでは TOF20ms 後の吸収像は横長になっている。

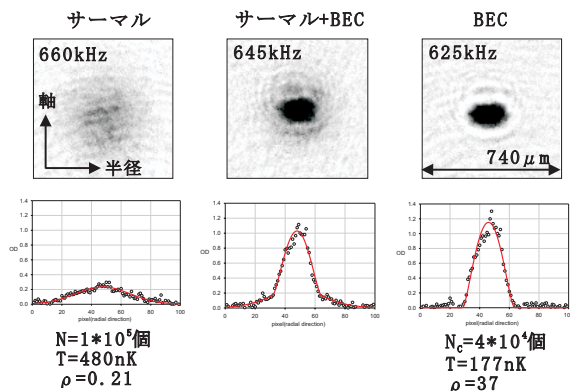


図 11 ポーズ凝縮体への相転移 (TOF20ms の吸収像)

図 12 は 1stMOT から BEC 生成までの間の原子の中心密度と温度の関係、図 13 は原子の個数と位相空間密度の関係を表したものである。2nd に移行した直後の原子の温度や個数は現在の吸収像を撮影する際の光学系の関係で定まった値を測定できていないのでグラフの中では点線で表している。BEC 生成後に行う光双極子トラップは Nd:YAG レーザーの 1064nm を QUIC コイルの軸方向から入れている、パワー 300[mW]、ビーム径 $2w_0 = 40\mu\text{m}$ まで絞り、ポテンシャルの深さは $64[\mu\text{K}]$ になっている。現在は双極子トラップへの BEC のロードは出来ていないが、アライメントなどを中心に調整を行い次元の光双極子トラップへの BEC のロードを目指したいです。

6 まとめと今後の展望

光双極子トラップが容易な BEC 生成装置実現のためにリニアアクチュエータによってコイルを物理的に動かし 2nd のセルに磁気トラップを用いて原子の移行を行いました。また、光誘起脱離により今まで 1 分ほどかかっていた 2ndMOT へのローディングを 15s ほどに短縮でき実験スピードの効率化が可

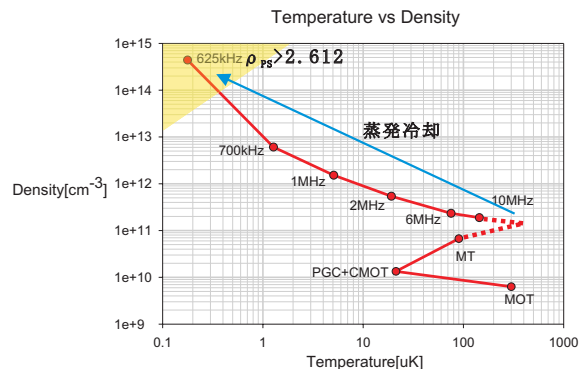


図 12 BEC 生成までの原子の中心密度と温度の関係

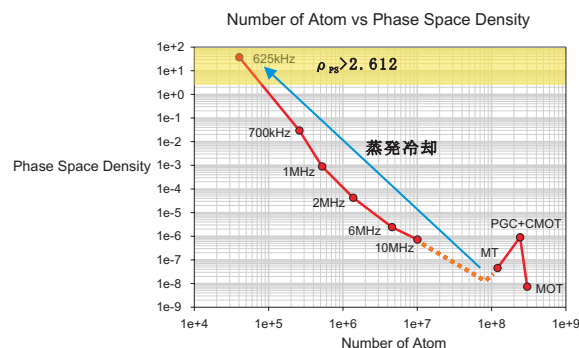


図 13 BEC 生成までの原子の個数と位相空間密度の関係

能になりました。さらに 2nd の QUIC コイルを中空の銅線を使い銅線の内部に水を流してコイルを水冷するようにしたので、コイルの熱抵抗によるオフセットの揺らぎが以前よりは小さくなったと考えられます。

現在の状況は 1stMOT に 3×10^8 個、 $300\mu\text{K}$ の原子をトラップして PGC で 2.2×10^8 個、 $22\mu\text{K}$ まで原子を冷却して 1stMT に 1.4×10^8 個、 $95\mu\text{K}$ の原子をトラップしています。この原子を 2nd のセルにリニアアクチュエータにより移送して蒸発冷却を行うことにより 4×10^4 個、 $T=177[\text{nK}]$ の BEC 生成に成功しました。今後は YAG レーザー (1064nm) を用いた次元での双極子トラップへの BEC のロードを目指したいです。