

連続原子レーザー実現のための Rb 原子の BEC 生成

電子物性工学専攻 飯尾能將

1. 序論

1920年代、インドの物理学者 S.N.Bose が発表した光子の統計に関する論文の重要性に気づいた A.Einstein が理論的に指摘したのを発端として、ボース粒子における量子縮退、今日でいう ボース・アインシュタイン凝縮(Bose Einstein Condensate 以下 BEC) がこの二人の物理学者によって予言された。理想ボース気体においては、無限数の粒子が同一の一粒子状態を占めることができ、ある温度以下では最低エネルギー状態を占める粒子の数が巨視的な大きさになるとされていて、これこそが二人が予言した BEC という現象である。しかし、BEC は当時の冷却技術では実現が不可能であり、この予言は単なる数学上のもので現実には起こることはないと思われていたが、1995年に JIRA のグループが初めて気体原子の BEC 生成に成功した。2001年には W.Ketterle、E.Cornel、C.Wieman の三氏に「希薄なアルカリ原子気体でのボース・アインシュタイン凝縮の実現と基礎的な研究」でノーベル物理学賞が贈られた。

ある1つの状態に巨視的な数の原子が存在している BEC は、多くの原子の波動関数の位相状態が揃ったコヒーレントな原子集団である。これは光のレーザーと似ているため、原子レーザーと呼ばれることがある。1998年、マックス・プランク研究所の T.Esslinger のグループは rf 磁場を連続的に照射することで、擬似的に連続原子レーザーを実現した[1]。ここで「擬似的」と言ったのは磁気トラップ内の BEC が無くなってしまえば、原子を取り出せないからである。原子レーザーを使った応用は、これまで光のレーザーで行われていた実験を原子レーザーに置き換えて行うだけに留まらない。光子と違い質量と内部状態を持つ原子レーザーは、光のレーザーでは原理的に不可能であるような現象やデバイスを生み出す可能性を持っている。

我々中川研究室も ^{87}Rb 原子を用いて 2001年12月 BEC の生成に成功した。日本では現在までに3グループが BEC の生成に成功しているが、3グループとも磁気トラップにクローバリーフ型と呼ばれるコイルを用いているため、我々の QUIC 型の磁気トラップ[2]を用いての BEC の生成は国内では初めてである。BEC 生成後の応用実験として rf 磁場を連続的に照射して連続原子レーザーを実現させ、それを用いた実験を目指している。

2. BEC 生成の実験手法

以下は我々の研究室での BEC 生成までの手順である。

磁気光学トラップ(MOT)を用いて原子を冷却・捕獲する。中川研究室ではダブル MOT システムという方法を用い、1stMOT 側で原子を多数集めて 2ndMOT に送り、真空度の良い 2ndMOT 側で原子の寿命を長く保っている。2ndMOT では 3×10^8 個の原子をトラップし、温度 $116 \mu\text{K}$ まで冷却している。

偏光勾配冷却を行うことで原子をさらに冷却する。この時点で原子は $9 \mu\text{K}$ まで冷却される。さらに原子を冷却する蒸発冷却を行うために、磁気トラップで原子を再捕獲する。中川研究室では QUIC(quadrupole-Ioffe configuration)型磁気トラップを用いている。QUIC の長所として低電流で必要な磁場勾配が得られることが挙げられる。磁気トラップした時点では原子数は 1×10^8 個、温度は $304 \mu\text{K}$ に加熱される。また磁気トラップでの原子の寿命は 90s である。

40秒間 rf 磁場を照射することで蒸発冷却を行い BEC の生成を行う。25MHz から 910kHz まで rf 周波数を掃引した場合、原子数は 3.7×10^5 個で温度は 131nK になっている。

ここでは磁気トラップ以降の実験について説明をする。

3. 磁気トラップ

QUIC 型磁気トラップは2つの四重極コイルとイオフェコイルの3つのコイルで構成され図1のように配置されている。矢印は電流の流れる向きを示している。我々のコイルに電流 25A を流した時の磁気トラップのパラメータは次のような値になる。バイアス磁場 1.3G、動径方向の1次の磁場勾配 260G/cm、軸方向の2次の磁場勾配 314G/cm² となる。そして磁場勾配の値から動径方向のトラップ周波数 22.5Hz、軸方向のトラップ周波数 290Hz と計算できる。他のグループの磁気トラップの値と比較しても大きいため、BEC 生成に有利に働いている。

図2はQUIC 型磁気トラップによって作られる軸方向の磁場の形状をあらわしている。青線は四重極コイルのみに電流を流した時の磁場形状で赤線は3つのコイルすべてに電流を流した時の磁場形状である。四重極コイルのみでは磁場がゼロになる所があり、そこから原子がマヨナラ遷移をして逃げてしまう。そこでイオフェコイルに電流を流すことで磁場がゼロになる所をなくし、原子を完全にトラップできるようにする。この時、磁場のミニマムが四重極コイルにしか電流を流さない時に比べて、約 7.8mm イオフェコイル側に移動する。QUIC 型磁気トラップは axial 方向の磁場極率が radial 方向の磁場勾配に比べて小さいため、磁気トラップされる原子は axial 方向に長い「葉巻型」になる。

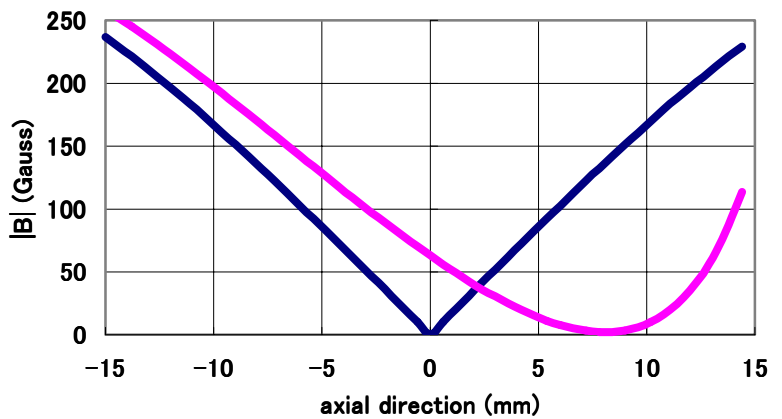
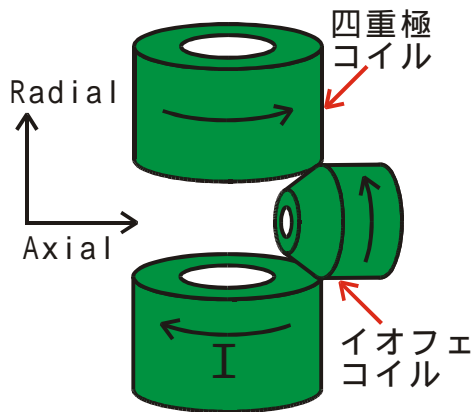


図1 QUIC 型磁気トラップのコイル配置

図2 QUIC 型磁気トラップによって作られる磁場の形状

4. 蒸発冷却

図3は蒸発冷却の原理を示したものである。磁気トラップポテンシャル中に閉じ込められた原子は、エネルギーの大きなものほど高い所まで振動する。そのような地点にでのエネルギー差に相当する周波数の rf 磁場を原子集団に照射すると、原子はスピンフリップを起こしてトラップから取り除かれる。運動エネルギーの大きな原子を選択的に取り除くことで、残った原子集団内でエネルギーの再分配が起こり、温度が下がる。

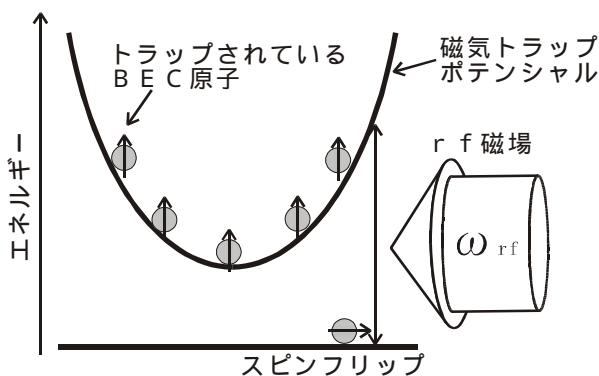


図3 蒸発冷却の原理図

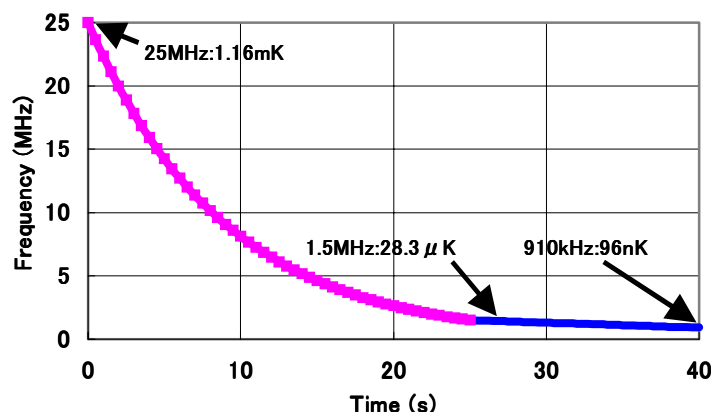


図4 rf 周波数の掃引曲線

図4はrf周波数の掃引曲線を示している。25MHzから1.5MHzまで指数関数的に掃引することで周波数を急激に下げいき、1.5MHzから910kHzまでは直線的に掃引することでゆっくりと下げいきBECの生成を目指した。25MHzでは原子集団の温度は1.16mKに相当し、910kHzでは96nKに相当する。下の図5はTOF9msで最終周波数を変えていったときの吸収像とその断面図である。TOFとはTime of flightの略で原子集団を磁気トラップから解放して吸収像を撮影するまでの時間のことである。TOFの時間が長くなると、もしBECが生成されていればBECになっている原子集団とサーマルな原子集団とで温度が異なるために、時間による広がりや異なってくる。断面図の赤線はガウスフィティングした時の曲線である。断面図を見ると930kHzでは原子の温度が高いためサーマルな原子集団のみなのでガウス分布でフィティングできるが、920kHzになると温度の高い原子とBECになった原子が両方存在するためガウス分布ではフィティングできなくなる。そして、910kHzではほとんどの原子がBECになっていると思われるためガウス分布をしていない。910kHzの吸収像から原子数 3.7×10^5 個、温度131nK、横方向の原子の大きさ $90 \mu\text{m}$ とわかった。

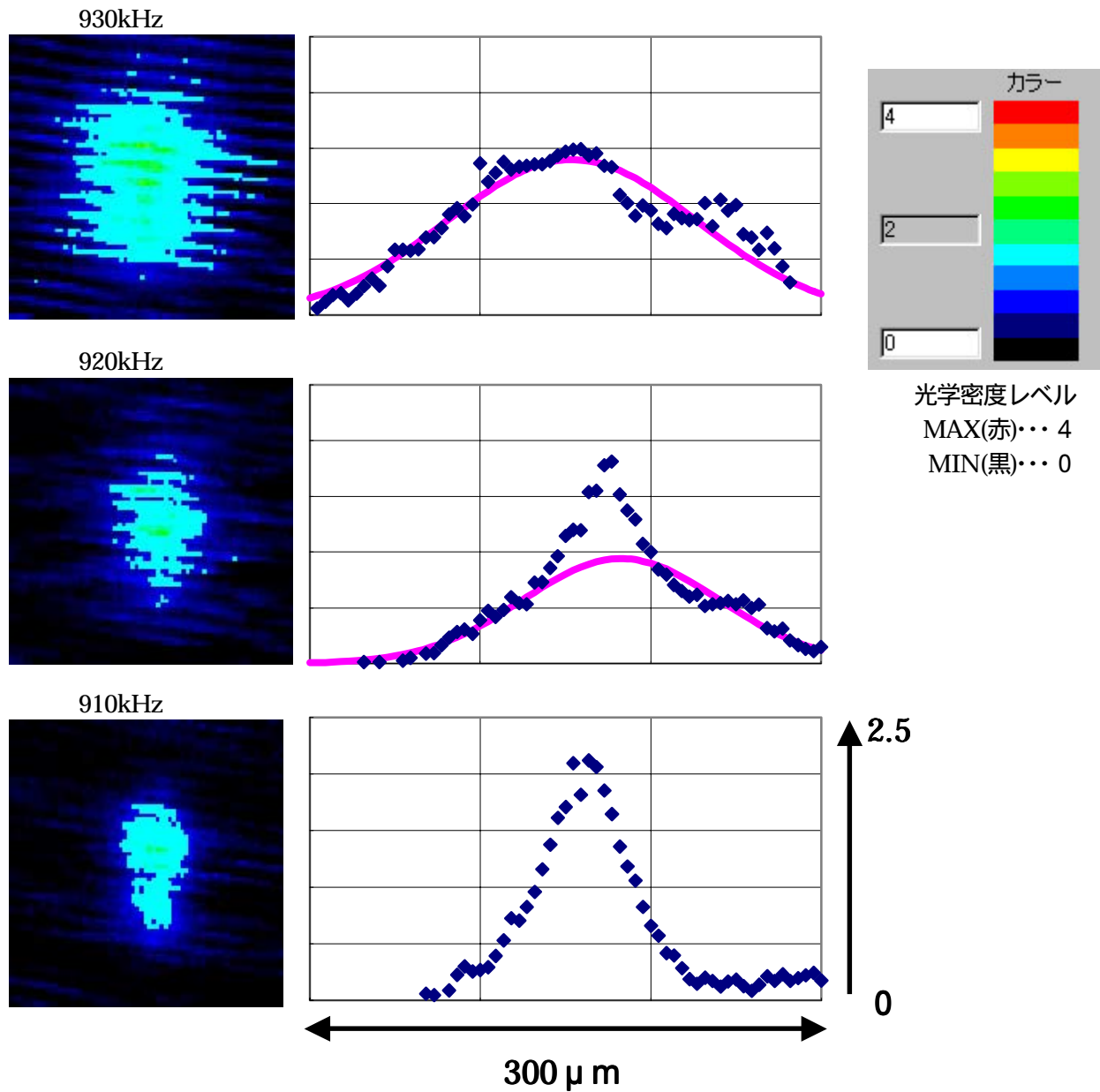


図5 最終周波数を変化させた時の吸収像と断面図 (TOF 9 m s)

910kHz で本当に BEC になっているかを確認するため臨界温度を計算した。3次元調和ポテンシャル中の BEC は次の式が成り立つ。

$$T < \frac{\hbar \bar{\omega}}{k_B} \left(\frac{N}{\zeta(3)} \right)^{1/3} = T_C \quad \bar{\omega} = \left(\omega_{axial} \omega_{radial}^2 \right)^{1/3} \quad (1)$$

ここで N は BEC になった原子数、 $\zeta(3)$ はリーマンのツェータ関数、 T_C は臨界温度である。910kHz での原子数 3.7×10^5 個がすべて BEC になっているとして計算すると、臨界温度は 400nK となり、測定した温度 130nK より高くなり式(1)を満たす。よって 910kHz の原子は BEC であり、生成に成功したといえる。

この吸収像の疑問点として原子集団が縦長になっていることがあげられる。吸収像は軸方向から撮影しているので吸収像の写真では縦横方向の磁場勾配は等しいことになる。そうすると磁気トラップから解放された原子は等方的に広がっていくのだが、実際には縦長になってしまっている。周波数が高いところ、すなわち BEC になるまえは円形になっているのだが転移温度に近くなると縦長になってしまう。図5でも 930kHz では円形に近い形をしているが、BEC が生成され始めた 920kHz では縦長になってしまっている。どうしてこのようになってしまうのか原因がいまだにわかってはいない。

図6は TOF 時間を変化させていった時の吸収像である。TOF 時間が長くなっていくと原子集団の像が徐々に薄くなっていく。原子集団の温度が高ければ、原子の像は広がって薄くなっていくことも理解できるが、それぞれの TOF 時間の吸収像を見ると横方向にはほとんど広がっていないことがわかる。それゆえ、原子は磁気トラップから解放されてから時間が経つにしたがって焦点の位置から移動しているのではないかと考えられる。原子の移動する原因としては、磁気トラップを切った時に原子が力を受けているのではないかとと思われる。現在は TOF 時間にあわせて焦点位置を変化させ、原子がはっきりと映るところを探して撮影をしているが、根本的に解決しなければいけない問題である。

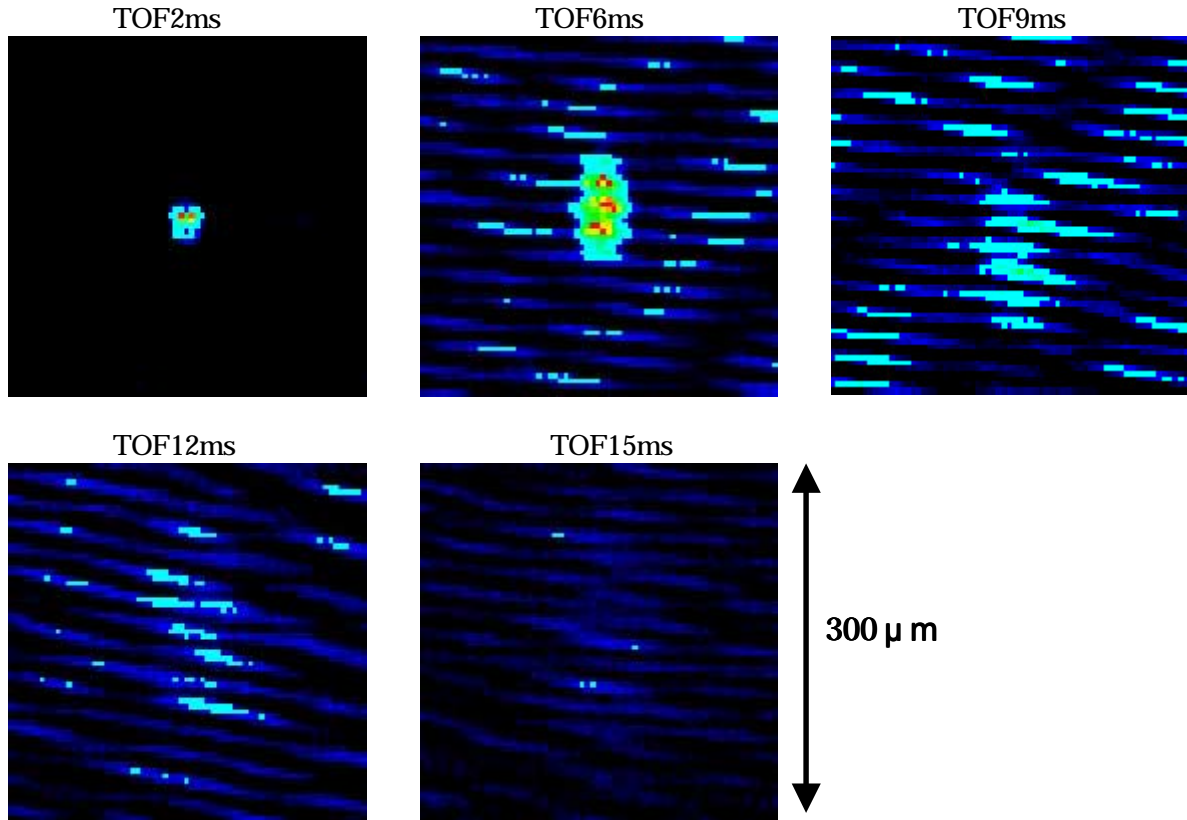


図6 TOF 時間を変化させた時の吸収像

5 . 連続原子レーザー実現のための磁気トラップ

連続原子レーザーの実現方法は基本的には蒸発冷却と同じである。磁気トラップポテンシャルがまったく変化しない理想的な磁気トラップに原子が閉じ込められている時、BEC になった原子集団に対して rf 磁場を連続的に照射すると原子数の減少にあわせて、BEC 原子の内部エネルギーも減少していく。それにあわせて rf 周波数を変化させることで、BEC 原子を一定量ずつ取り出すことにより連続原子レーザーの実現が可能になる。

先ほどの 910kHz の BEC 原子の化学ポテンシャルを計算してみる。化学ポテンシャルは以下の式で与えられる。

$$\mu = \frac{1.48 \left(N a \hbar^2 \omega^3 m^{1/2} \right)^{2/5}}{k_B} \quad (2)$$

ここで N は BEC 原子の数、a は散乱半径で 5.8nm、 ω は $2 \times 124\text{Hz}$ である。いま $N = 3.7 \times 10^5$ 個の原子がすべて BEC になっているとして化学ポテンシャルを計算すると、 $\mu = 191\text{nK}$ と求まる。そして、以下の関係式

$$k_B T = h \nu_{rf} = \frac{1}{2} \mu_B |B| \quad (3)$$

に温度 $T = 191\text{nK}$ を代入すると、rf 周波数 $\nu_{rf} = 4.0\text{kHz}$ 、磁場の大きさ $|B| = 5.7\text{mG}$ となる。これは連続原子レーザーを実現するために rf 周波数を 4kHz 変化させながら照射することができ、磁場の大きさに換算すると 5.7mG に相当することを意味している。

以上が理想的な磁気トラップを用いた場合の話であるが、実際には磁場がまったく変動しない磁気トラップを作ることは不可能なので、どの程度の変化なら実験を行うに問題がないかを考えてみる。掃引周波数の変化が 4kHz としてそれに相当する磁場の大きさが 5.7mG とすると、rf 周波数を掃引している間に磁場の大きさが 5.7mG 以上変化すると連続原子レーザーは実現できなくなる。よって連続原子レーザーを実現するには磁場の変動が 5.7mG の 10 分の 1 以下になるようにしなくてはならない。また再現性のある実験を行うためには磁場の再現性も重要になり、これも 5.7mG 以内におさまっていることが望ましい。我々が今まで使っていた磁気トラップは磁場の最小値が 1 分間で 0.45G 変動していた。これを rf 周波数を掃引する時間 100ms に換算すると 0.75mG に相当する。これでは先ほど述べた条件を満たしていないため連続原子レーザーの実現は困難である。そこで連続原子レーザーが実現可能な磁気トラップへの改良を行った。

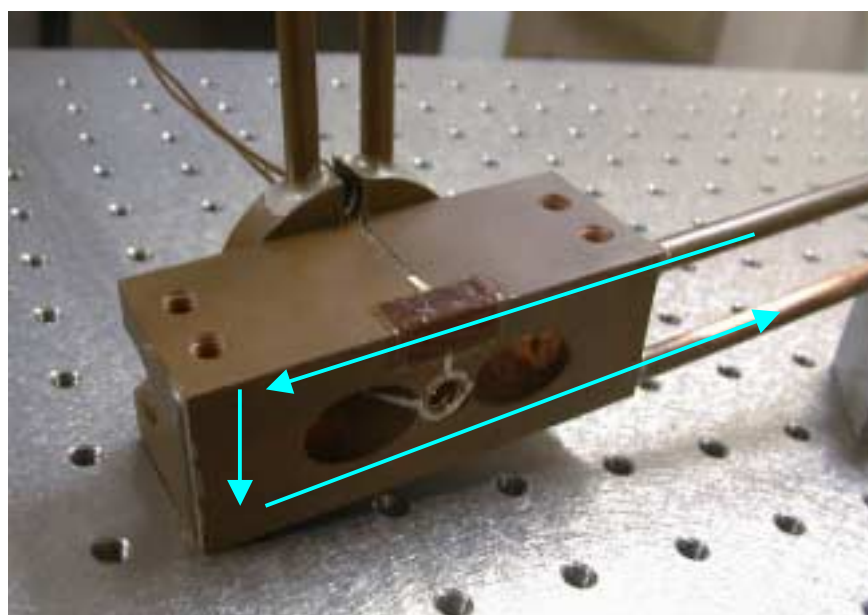


図7 イオフェコイルと冷却マウントの写真

QUIC 型磁気トラップはイオフェコイルがセルに近いために少しの熱膨張でも磁場が大きく変化してしまう。計算では 0.1mm 膨張すると 1.5G も変化してしまうことになる。そこで、イオフェコイルの先端部を集中的に冷却することで磁場の変動を抑えるように試みた。図6はイオフェコイルと冷却マウントの写真である。水色の矢印は冷却水の流れを示している。イオフェコイルの先端部の上下2箇所冷却水を流すことにより先端の熱膨張を抑え

るようにしている。またコイル間は空気では熱伝導が悪いので放熱用シリコンで埋めている。このような改良を行ったあとに再び磁場の安定度を測定した。図7のグラフはその結果を示したものである。測定は電流25Aを1分間流し続け、その後電流を1分間流さずにおき、再び1分間電流を25A流すという作業を30分間繰り返した。図7の15分より前はの時間は実験に失敗したために、磁場が大きく変化してしまっている。しかし15分以降は磁場の変動が1分間で30mG以内におさまっていることがわかる。これを100msに換算すると0.05mGになり、連続原子レーザー実現の条件を満たしていることがわかる。この結果、イオフェコイルの先端部の冷却の効果があつたことがはっきりとわかる。図8は図7の電流を流し始めた直後の磁場の値をプロットしたものである。図より15分より前では磁場が大きく変化しているが、15分より後では磁場の再現性は10mG以内におさまっていることがわかる。10mGは周波数に換算すると7kHzに相当し、この値は再現性は良いとはいえないが、実験を行ううえで大きな問題になる値でもない。

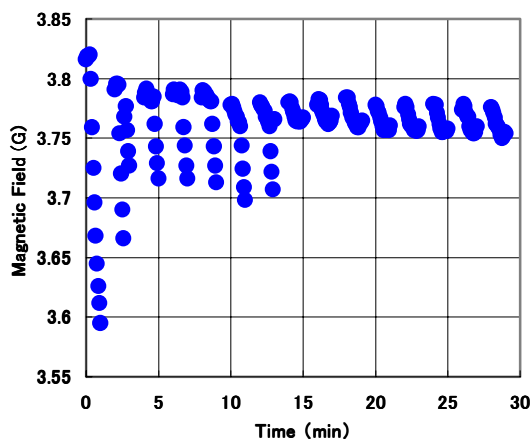


図8 改良した磁気トラップの磁場変動

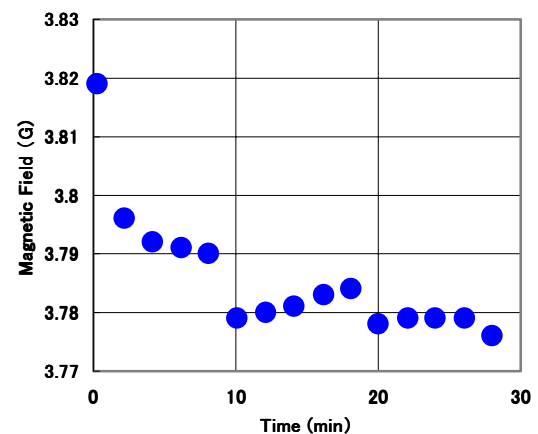


図9 改良した磁気トラップの磁場再現性

6. まとめ

我々は⁸⁷Rb原子を用いボース・アインシュタイン凝縮の生成、およびBEC原子を用いた連続原子レーザーの実現を目指して実験を行った。その結果、2ndMOTでは30秒間で 3×10^8 個の原子を捕獲することができ、温度が116 μ Kまで冷却することができた。偏光勾配冷却で9 μ Kまで冷却し、QUIC型磁気トラップに 1×10^8 個の原子を移すことができた。この時の原子の温度は304 μ Kだった。また、磁気トラップでの原子の寿命が蒸発冷却に必要な30秒以上の90秒得られていることが分かった。そして40秒間かけて25MHzから910Hzまで蒸発冷却を行うことで、BECの生成に成功した。残っている原子は 3.7×10^5 個で、温度は131nKまで冷却されていた。この時のBECへの臨界温度は400nKであり、BEC生成を確認できた。

連続原子レーザーの実験を行うために改良を行った。イオフェコイルの先端を冷却することで、磁気トラップは100ms間での磁場変動が0.05mGというすばらしい値を示した。これは連続原子レーザーの実験を行うのに十分な条件を満たしている。しかし、磁場の再現性という面では、10mGは周波数に換算すると7kHzに相当し、この値は再現性は良いとはいえないが、実験を行ううえで大きな問題になる値でもない。結果、磁場の変動の少ない安定な再現性のある磁気トラップの改良に成功した。

参考文献

- [1] Immanuel Bloch, Theodor W. Hansch, Tilman Esslinger, Phys.Rev.Lett, **82** 3008 (1999)
- [2] T. Esslinger I. Bloch, T. W. Hansch, Phys.Rev. A, **58** R2664 (1998)