

極低温リチウム原子の生成の研究

河野 託也 電子物性工学専攻

1. 研究の目標と目的

研究の目標は、リチウム7(${}^7\text{Li}$)原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC:Bose-Einstein condensation)の生成の実現である。1920年代、ボーズ粒子に対して、BECが起こることが予言されていた。これは、あるポテンシャル内に閉じ込められた粒子は、その最低エネルギー準位をしめる粒子数が、ある温度以下で巨視的な大きさになる現象である。1995年、6月にJILAのグループが ${}^{87}\text{Rb}$ 原子を用いて、さらに9月にはMITのグループが ${}^{23}\text{Na}$ 原子を用いて、それぞれボーズ凝縮体の生成に初めて成功した。これまでに、世界中で30前後のグループがアルカリ原子のBECに成功している。また、 ${}^7\text{Li}$ 原子気体のBECは、基底状態のs波散乱長が負であるために、長年BECが起こらないと予想されていた。しかし、1995年にRice大学のグループによって ${}^7\text{Li}$ 原子気体のBECの実現が報告された。このグループの磁気トラップは永久磁石を用いて構成されているため、得られた凝縮体を磁場から開放することができない。BECが成功した後に様々な応用実験を行う上では、磁場を完全に切ることができる磁気トラップを用いることが重要となる。本研究では、完全に磁場を切ることの出来る磁気トラップを用い ${}^7\text{Li}$ 原子気体のBECの実現を目指している。また、Li原子の同位体は、フェルミ粒子である ${}^6\text{Li}$ とボーズ粒子の ${}^7\text{Li}$ が存在する。その存在度はそれぞれ7.5%、92.5%である。したがって、量子統計性の違いが観測できる可能性がある。

2. BEC 生成の条件

ボーズ凝縮の生成実験で重要となるパラメータは、位相空間密度 ρ である。これは、あるポテンシャルに閉じ込められた原子密度 n と熱的ド・ブロイ波長 λ_{db} (Thermal de Broglie wave length)で次のように定義される。

$$\rho \equiv n \cdot \lambda_{db}^3$$

ここで、熱的ド・ブロイ波長 λ_{db} は、長さの次元をもつパラメータである。一般的に知られているド・ブロイ波長は、ある運動量を持った物質の物質波の波長を意味するが、熱的ド・ブロイ波長は、その物質波の広がりを表す量で $\lambda_{db} \equiv h/\sqrt{2\pi mk_B T}$ と表される。 T は原子集団の温度、 k_B はボルツマン定数である。

ここで理想原子気体が井戸型ポテンシャル内に閉じ込められている時、位相空間密度 ρ が、

$$n \cdot \lambda_{db}^3 \geq 2.612$$

となるとボーズ凝縮を起こす。これを定性的に言えば、原子の揺らぎ程度の大きさの空間内に2個以上の原子が存在すればBECへの相転移を起こすことを意味する。実験的には、得られたデータから位相空間密度を計算することでBECへの相転移を判断することになる。

3. BEC 生成の実験手法

我々が行なっている実験手法は、以下のようなプロセスである。

1. 磁気光学トラップ(MOT)により多くの原子を冷却・捕獲する。MOTは、レーザー光と磁場を使って原子を巧妙に冷却かつトラップする方法である。しかし、レーザー光を用いた原子の冷却では、原子が光子1個から受ける運動エネルギー量に相当する温度(反跳限界温度)以下に原子を冷却することができない。 ^7Li 原子の反跳限界温度は、約 $6\mu\text{K}$ である。また原子集団の密度が高くなると原子間衝突によるトラップからのロスが大きくなり、レーザー光のみを用いた原子のBEC実現は困難である。
2. MOTで集めた原子集団をレーザー光を全く用いずに磁場のみでトラップする四重極磁気トラップ(MT)で捕獲し直す。ここでMTの作る磁場極小値は、ゼロである。
3. MTからQUIC(quadrupole-Ioffe-configuration)トラップに移行する。QUICトラップは、MOTとMTの際に使う四重極磁場発生用コイル2つとIoffeコイルとよばれる第3のコイルから構成される磁気トラップである。この3つのコイルに適当な電流を流すことで、トラップの作る磁場極小値をコントロールでき、トラップ損失の1つとなるスピン-フリップ(Majorana)遷移を防ぐことができる。
4. QUICトラップ内で蒸発冷却を行う。これは、交流磁場(RF)をQUICトラップにかけ、運動エネルギーの高い原子を選択的にトラップから逃がし、残ったトラップ原子集団内での弾性衝突を通してエネルギーの再分配を起し、温度を下げる方法である。
5. 観測方法：QUICトラップを瞬間的に切り、トラップされていた原子集団を開放し、その空間分布を吸収イメージング法で観測し、相転移の確認を行う。

ここでは、磁気トラップ以下の段階の技術及び実験装置について簡単に説明する。

磁気トラップ

磁気トラップは、原子が持つ磁気モーメント μ と磁場 $\mathbf{B}(x, y, z)$ との相互作用エネルギーを用いて原子を空間的に捕獲する方法である。この相互作用エネルギー V_{mag} は、1次のゼーマンシフトによって、

$$V_{mag} = -\mu \cdot \mathbf{B}$$

と書ける。磁場の z 方向を量子化軸に取れば、磁気モーメント μ_z はボーア磁子 μ_B 、ランダウの g 因子、磁気副準位 m_F (F は超微細準位をあらわす。)を用いて $\mu_z = -g\mu_B m_F$ と表され、原子は次のような力を受ける。

$$F_z = -\nabla V_{mag} = \nabla(\mu B_z) = g\mu_B m_F \nabla B_z$$

よって、磁場の極小値を空間的に作れば、そこに磁場の弱い所を好む準位にある原子を捕獲できる。このように、スピン状態によって感じるポテンシャルが異なり、その状態によってトラップされることになる。この点が最後に行う蒸発冷却を考える上で重要となる。

次に実際の磁気トラップの構成について説明する。我々の実験装置では、コイルを真空槽内に配置することを考慮に入れ、Ioffe-pritchard型トラップのQUICトラップと呼ばれる磁気トラップを採用している。QUICトラップの構成がFig.3.1(a)に示してある。図中の矢印は電流の向きを表している。実際のコイルは、Fig.3.1(b)の写真のように配置され、四重極コイルに255A、Ioffeコイルに290Aの電流を流すと極小値が約1Gauss程度になる磁気トラップを作る。このバイアス磁場は、トラップロスとなるマヨナラ遷移を防ぐのに必要となる。

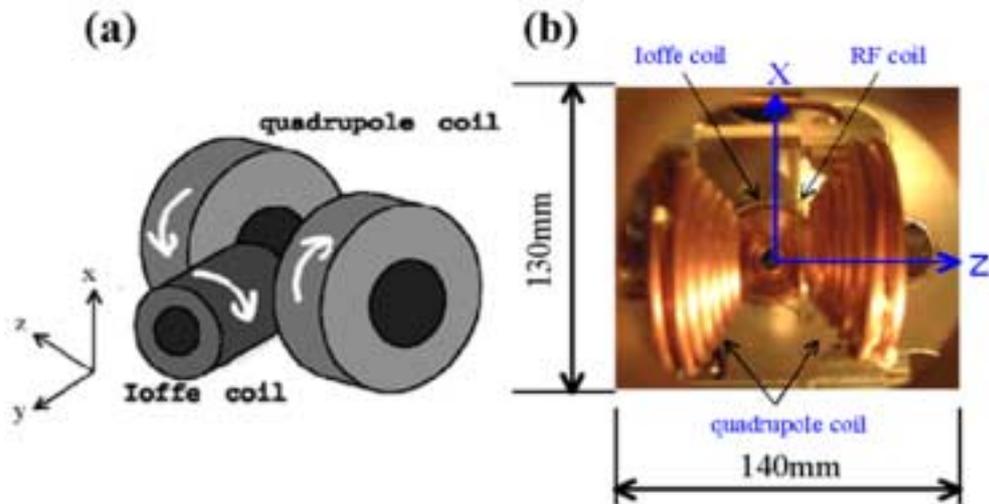


Fig.3.1:QUIC トラップの構成

蒸発冷却

蒸発冷却は、磁気トラップの性質を利用した冷却方法である。その原理は、トラップ原子集団の運動エネルギーの大きい原子、つまり高温の原子だけをトラップから取り除き、残った原子集団間での弾性衝突によって、熱の再分配でトラップ原子集団の温度を下げるというもので、イメージ的には湯のみに注がれたお茶がほおっておいても冷めるのと同じである。しかし実際の実験では、磁気トラップの寿命は、バックグラウンドガスなどにより制限されるため、積極的にトラップ内の運動エネルギーの大きい原子をトラップ内から排除する必要がある。この方法としては、磁気トラップにRF磁場を照射することで行なわれる。磁気ポテンシャル内で原子は振動していて、運動エネルギーの大きい原子ほど、ポテンシャルの高いところまで振動している。原子が受ける磁気ポテンシャルのエネルギーとRF磁場の周波数が共鳴するとスピン反転が生じ、原子はトラップされる磁気副準位からトラップされない磁気副準位に遷移し、トラップ内から排除される。したがって、RF磁場のエネルギーより大きい運動エネルギーを持った原子を選択的に取り除けば(蒸発させれば)、トラップに残された原子の平均エネルギーは減少し、その後の熱平衡化によって温度が下がる。このRF磁場の周波数を徐々に下げていくことと熱の再分配がセットになって繰り返されることでトラップ内の原子集団温度が下がり密度は上昇する。

観測方法

トラップの温度測定は、吸収イメージング法を用いている。その方法は、トラップ原子集団に共鳴プローブ光を入射しその共鳴吸収によりできたプローブ光の影をCCDカメラ上に結像し、その拡散を観測するものである。この時重要となるのが、磁気トラップの磁場が完全に切れていることである。そうでないと、場所によって原子がゼーマンシフトを受け共鳴周波数がずれてしまうため、完全に磁場が切れてからプローブ光を入射し、観測する。実際の実験では、トラップを切ってから1ms以降に約 $20\mu\text{s}$ のあいだ共鳴光($2^2S_{1/2}, F = 2 \rightarrow 2^2P_{3/2}, F = 3$, 光の直径は約2cm)を入射し、プローブ光の影は、カメラレンズによってCCD素子上に結像され、コンピューターに取り込まれる。このようにして得られた画像を画像処理した後に速度分布、温度、原子の個数などが見積もられる。

4. 実験結果

本研究では、Fig.4.1に示すタイムシーケンスで実験を行なった。まず、MOTに十分な原子を冷却・捕獲し、十分な原子が集まったことを確認した後、MOT用レーザー光を切り、同時にMOTの磁場勾配を約25倍に立ち上げ四重極磁気トラップを行なう。Ioffeコイルによる磁場は約2秒かけて所定の電流値まで立ち上げ、QUICトラップを構成する。また蒸発冷却用のRF磁場は、今回の実験では真空槽内に配置されたRFコイルが効果的に働くかを確認するためにある固定周波数を約2秒間トラップに照射した。トラップの観測は、磁気トラップを切ってから1から3ミリ秒後にプローブ光を入射し行なった。

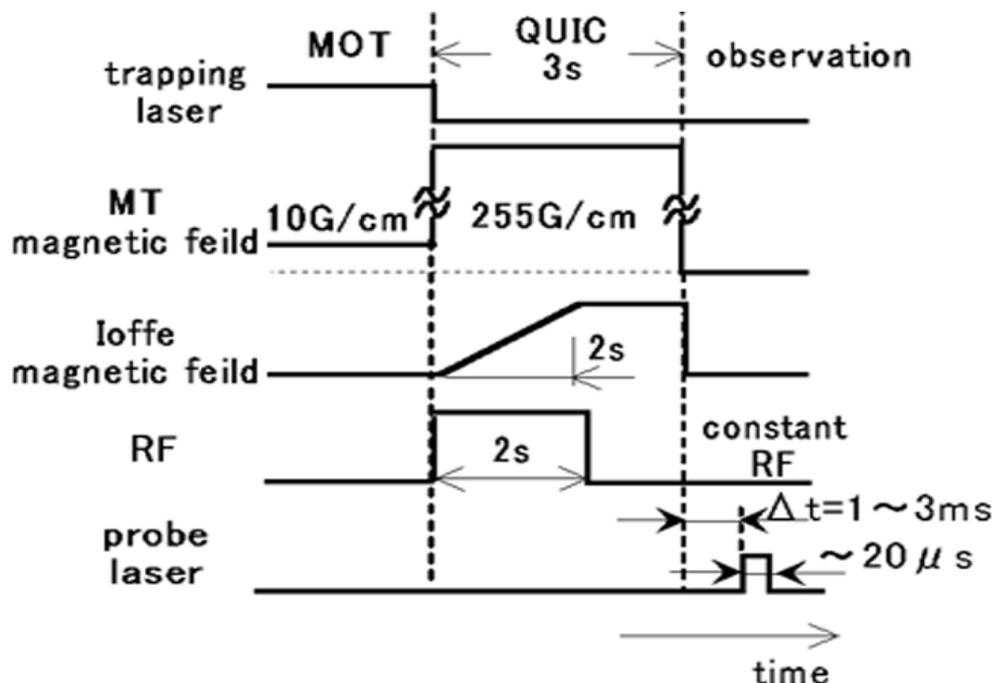


Fig.4.1:実験のタイムシーケンス

(1) MOT から QUIC トラップへの移行実験結果

MOT から MT, QUIC への移行実験の結果を示す. Fig.4.2 には, MOT, MT, QUIC トラップをそれぞれ切り, 1 ミリ秒後にプローブ光を入射して取られた吸収像である (これ以降に示す吸収像はすべてこのタイミングでプローブ光を入射している.). 画像は擬似カラーで表示している. この画像から分かるように, MOT と MT のトラップはほぼ一致しているが, QUIC トラップの中心は MT の中心と比べて Ioffe コイル側に約 5mm ほど移動していることが分かる.

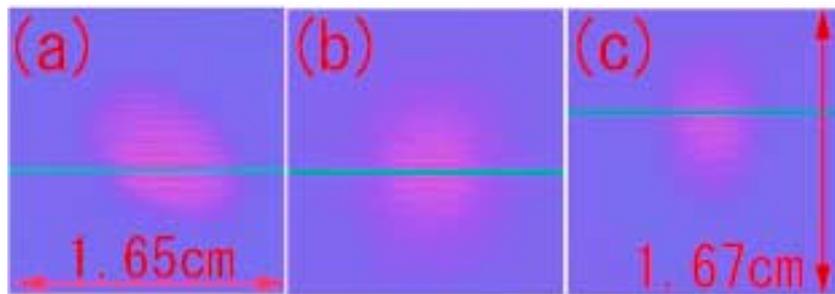


Fig.4.2: MOT, MT, QUIC の吸収像.
(a) MOT, (b) MT, (c) QUIC の吸収像を示す.

(2) QUIC 内での蒸発冷却予備実験結果

次に, 蒸発冷却を行うために製作した RF 発生コイルの動作確認を行った. Fig.4.3 に QUIC トラップに固定 RF 磁場を加えた時の吸収像を示す. 画像 (a) は, MT を 3 秒間行った後に取られた画像である. 画像 (b) は, QUIC を 3 秒行ったもの, 画像 (c) (d) は, QUIC 中に固定した RF, 50 MHz と 40 MHz を 2 秒間照射してから取られた像である. これから RF を照射したときの画像の方は, 原子雲の大きさが半分程度になっているのが分かる. これは, RF 磁場を照射したことによって QUIC 中の高温原子がトラップ内から排除されたためである.

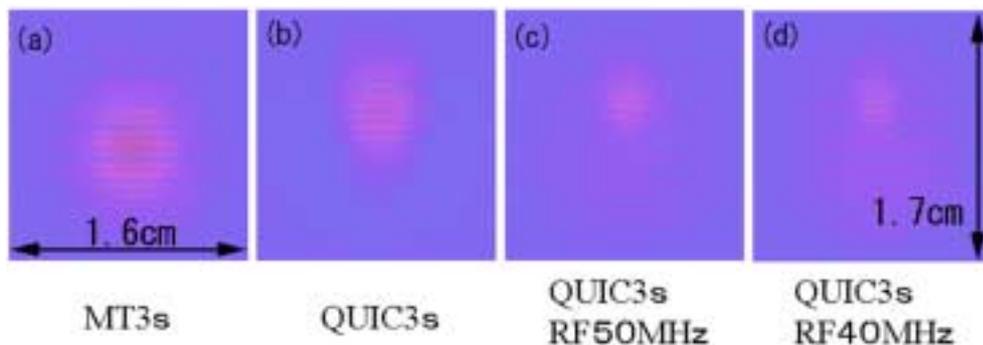


Fig4.3: QUIC 内での蒸発冷却

めである. このことから, 製作し真空槽内に配置したRF コイルからトラップ原子にパワーが十分伝わっていることがわかる. また, 50MHz の周波数は温度換算すると2.4mK に相当する. RF 磁場は信号発生器から出力をアンプに繋いで, RF コイルに約1W 程度のパワーを注いだ.

5. まとめと今後の課題

本研究では, リチウム原子気体のボーズ凝縮体を生成するための実験装置を構築し, 以下の結果を得た.

1. パーソナルコンピュータを制御器とするリチウム原子気体のボーズ凝縮体を生成するための実験装置を設計・製作した.
2. 1. の実験装置で以下の確認ができた.

MOT から MT, QUIC トラップへの移行実験を行い, 各トラップの温度測定を吸収イメージング法を用いて行った. MT, QUIC トラップを3秒間行った時の結果を Table.5.1 に示す.

Table.5.1 MOT から QUIC の諸特性.
MT 及び QUIC トラップを3秒間行なった時のデータ.

	温度 [mK]	原子数密度 [$1/\text{cm}^3$]	位相空間密度
MOT	1.0	1.3×10^{10}	$\sim 1.2 \times 10^{-7}$
MT (3s)	1.2	2.4×10^9	$\sim 1.7 \times 10^{-8}$
QUIC (3s)	1.0	1.1×10^{10}	$\sim 1.0 \times 10^{-7}$

3. 磁気トラップ内の原子に固定したRF 磁場をかけ, 蒸発冷却を行い製作したRF 磁場発生用コイルの動作確認を行った.

今後の課題は, QUIC トラップでの蒸発冷却の最適化を行い, リチウム原子気体のボーズ凝縮体を生成することである. また, 早急な課題として以下のことがある.

1. $2^2S_{1/2}, F = 1$ にポンピングを行ってから磁気トラップを行う.
2. 吸収イメージングシステムの改善を行う.
3. プローブ光の安定化を行う.
4. 原子源側の真空度の向上を行う.