

アトムチップを用いた BEC 生成装置の開発

量子・物質工学専攻 中川研究室 杉江宏太

[背景]

1924年に Einstein によってボース凝縮体が予言され、1970年代後半にレーザー光により原子の運動を光との相互作用を介して制御する技術を用いてレーザー冷却や原子トラップの実験が行われ始め、1995年 JILA の C.E.Wieman と E.A.Cornell たちのグループで ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮がレーザー冷却技術によって実現した。

ボース凝縮体(BEC)の特徴は原子集団内の全ての原子が同じ基底準位の状態になり、原子集団全体が巨大な一つの波（熱的ド・ブロイ長が大きい）として振舞うことが大きな特徴である。この性質を用いて光格子状に原子をトラップして行うモット絶縁体、2重井戸型ポテンシャルでのジョセフソン接合のボース粒子での実現、BEC を用いた原子干渉計による重力加速度の精密測定、高感度ジャイロセンサーの実験を行えると考えられる。

これらの実験を行うためには、複雑なポテンシャルを生成する必要がある、原子に働くさまざまな力を利用した実験が行われている。

これらの実験は光を用いて原子を制御して行えるが、光だけでは制御性が良くないので、光以外にも磁場を用いて制御性が良い原子制御が行えると考えられる。磁場を用いた制御方法を応用したのがアトムチップであり、アトムチップに様々なワイヤパターンを作り、そこに電流を流すことにより様々な磁場のポテンシャルを生成することができ、原子をそのポテンシャルにトラップすることにより上の実験は可能であると考えられる。様々なワイヤパターンでの磁場を用いたアトムチップを用いて、原子操作技術を発展させれば量子力学、原子光学、低温物理学に貢献できると考えられる。

[本研究の目的]

本研究の目的は磁場を用いて原子をアトムチップへのローディングし BEC を生成することであり、アトムチップの特徴を活かした精密な原子操作を用いて原子干渉計、高感度ジャイロスコープの実験を行うのが最終的な目的である。

また、もう一つの目的が小型装置でのボース凝縮体の実験である。これはさまざまな環境、さまざまな条件での物理量測定を行うためには可搬型の装置が望ましいためである。このためにはチップ上に原子操作のためのポテンシャル生成源を集積させることで必要最小限な外部部品のみで実験が行えるようにし、細かい部分を考慮して実験装置全体の小型化を目指す。

[磁場トラップ]

磁場による力

中性原子は磁場中では、原子のスピンによる磁気モーメントと外部磁場との相互作用によるエネルギーシフト（ゼーマンシフト）を受ける。

シフトするエネルギー量 U_{mag} は以下のように表される。

$$U_{\text{mag}} = -\boldsymbol{\mu} \cdot \boldsymbol{B} = g_F \mu_B m_F |B| \quad (1)$$

ここで、 $\mu_B=9.27$ はボーア磁子であり定数、 g_F はランダウの g 因子であり、 m_F は磁気サブレベル。B は原子の位置でも磁場である。

g_F と m_F はそれぞれ原子のいる準位により正負両方の値をとりえる。したがって、 $g_F m_F > 0$ の場合は原子は磁場の極小点に集まる。このような準位を WFS(Weak-Field-Seeking State) と呼び、 $g_F m_F < 0$ の場合は磁場の極大点に原子が集まるので SFS(Strong-Field-Seeking State) と呼ばれている。ゼーマンシフトを用いて原子を捕獲するためには WFS の原子を用いた方が装置の設計の都合で簡便に行えるので、本研究においては WFS の原子を用いている。

磁場トラップとオプティカルパンプ

磁場トラップとは磁気光学トラップ(MOT)、偏光勾配冷却(PGC)の過程を経て冷却された原子をアンチヘルムホルツコイルの磁場のみに原子を捕獲する手法である。また MOT, PGC で冷却された原子はどの状態にいるのかわからないので、PGC と磁場トラップの間の過程において Optical Pump 光を照射して原子の状態を揃える必要がある。

具体的に説明すると、図 1(a) のような磁気サブレベルがあり、この中で静磁場により安定にトラップできるのは $5S_{1/2}, F=2, m_F=+2$ と、 $5S_{1/2}, F=1, m_F=-1$ の 2 つの準位である ($5S_{1/2}, F=2, m_F=+1$ は WFS であるが安定ではない)、本実験では $5S_{1/2}, F=2, m_F=+2$ を使用する。その理由は g_F の絶対値が同じ場合 m_F が大きいほど原子を閉じ込める力が大きくなるために磁気トラップのときにコイルの磁場によって原子にかかる力が大きくなるため有利になるからだ。

また、MOT, PGC で冷却された原子はどの状態にいるのかわからないので、この準位でトラップするために原子を $5S_{1/2}, F=2, m_F=+2$ へ PGC と磁場トラップの間の過程においてそろえる必要がある。そのための光を Optical pump 光と呼び、この光を原子へ照射すると図 1(b) のような働きをする。 $\sigma+$ は円偏光の光であり、オプティカルパンプコイル(1G 程度のバイアス磁場)によってゼーマン分裂した原子に照射する。遷移選択性により m_F が大きい方への遷移がおきるので、基底準位への自然放出を繰り返しながら、最終的には $5P_{3/2}, F=2, m_F=+2$ へパンプされる。その後、 $5S_{1/2}, F=2, m_F=+2$ へ自然放出したものはそれ以上光を吸収できなくなるのでこの準位にとどまる。

オプティカルパンプによって $5S_{1/2}, F=2, m_F=+2$ の状態になった原子は WFS なので磁場による力が働き磁場の極小点 (アンチヘルムホルツコイルの中心) に原子が集まり捕獲される。

また磁場トラップの仕組みを利用して磁場の極小点をコイルの電流値を変えることによって移動させることで原子も移動させることができる。本研究ではこのことを用いてアトムチップへ原子を輸送している。

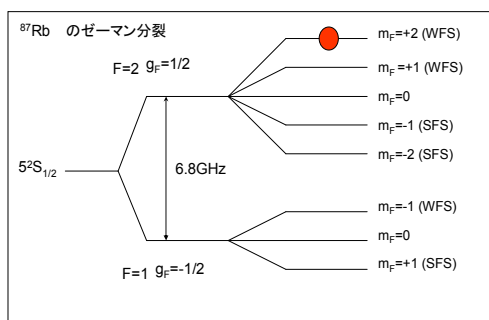


図1(a): 磁場トラップに使用する磁気サブレベル

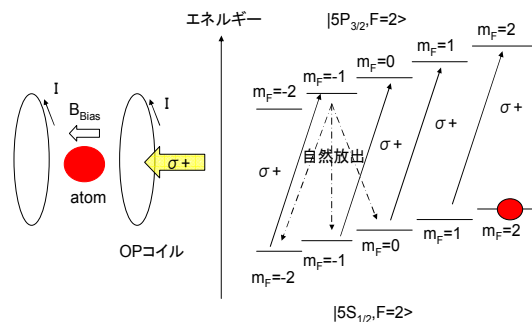


図1(b): OP時の遷移

磁場を用いた原子の輸送

アトムチップへの原子輸送はアンチヘルムホルツコイルの磁場ポテンシャルの合成磁場の磁場がゼロとなる点に WFS の ^{87}Rb 原子が力を受けることによって磁場トラップされ、その磁場のゼロ点をアトムチップへ 5cm 上方動かすことによって原子の輸送を行う。

MOT コイル、Transfer コイルの磁場ポテンシャルの計算より各アンチヘルムホルツコイルの電流値を変えたとき 2 組のコイルの合成磁場を計算し原子輸送の計算を行った結果を図 2(a)、図 2(b)に載せる。

図 2(a)は各コイルの電流値を変えて MOT コイルの中心から Transfer コイルの中心の位置へ磁場のゼロ点が 3cm 移動するような合成磁場を計算した結果である。

図 2(b)は各コイルの電流値を変えて Transfer コイル 1 の中心から Transfer コイル 2 の中心の位置へ磁場のゼロ点が 2cm 移動するような合成磁場を計算した結果である。

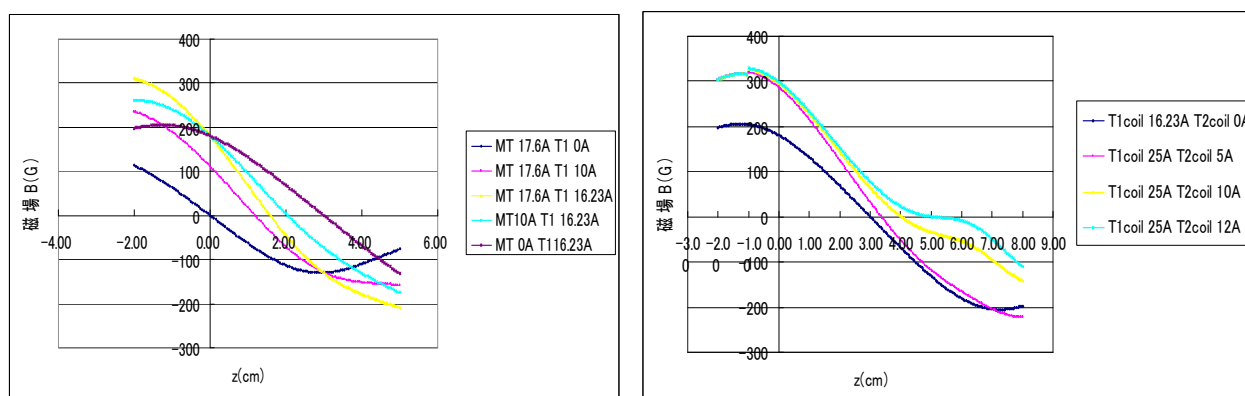


図2(a) 磁場ポテンシャルの移動
(磁場のゼロ点がMTコイル中心からT1コイル中心へ3cm移動)

図2(b) 磁場ポテンシャルの移動
(磁場のゼロ点がT1コイル中心からT2コイル中心へ2cm移動)

【実験装置】

コイル系

実際のコイル配置は図 3(a)のようになっている、図 3(b)は今後の装置配置図である。

MOT の出来る位置からアトムチップのある箇所へ輸送を行うため T1 コイルと磁場補正コイル、オプティカルパンプコイルからなる。

MOT コイルは磁気光学トラップに必要な磁場を生成するとともに、磁気トラップを行うために 100G/cm の磁場勾配が作れなければならない。MOT コイルの内側にオプティカルパンプ時に使用するヘルムホルツコイルが配置して、1G 程度の磁場を発生させる。

T1 コイルは輸送時に使用するコイルで、磁気トラップができるように設計してある。輸送は MOT コイルと T1 コイルの合成磁場によって原子がトラップから逃げないように磁場勾配を保ちつつ磁場のゼロ点を移動させることによって輸送させる。

Bx コイルと By コイルはチップトラップ時にバイアス磁場を発生させるコイルで、それぞれ 10G、60G の磁場を発生するヘルムホルツコイルを配置しなければならない。

この他に装置全体を包み込む磁場補正コイルがあり、これは PGC 時に地磁気やイオンポンプ等の磁場をキャンセルするために必要なコイルであり、PGC 時に磁場補正コイルを ON するように LABVIEW で制御できるようにしたほうがよいと考えられる。

全体的にコイル配置は光学系が遮断されない、なおかつ小型になるように配置する。

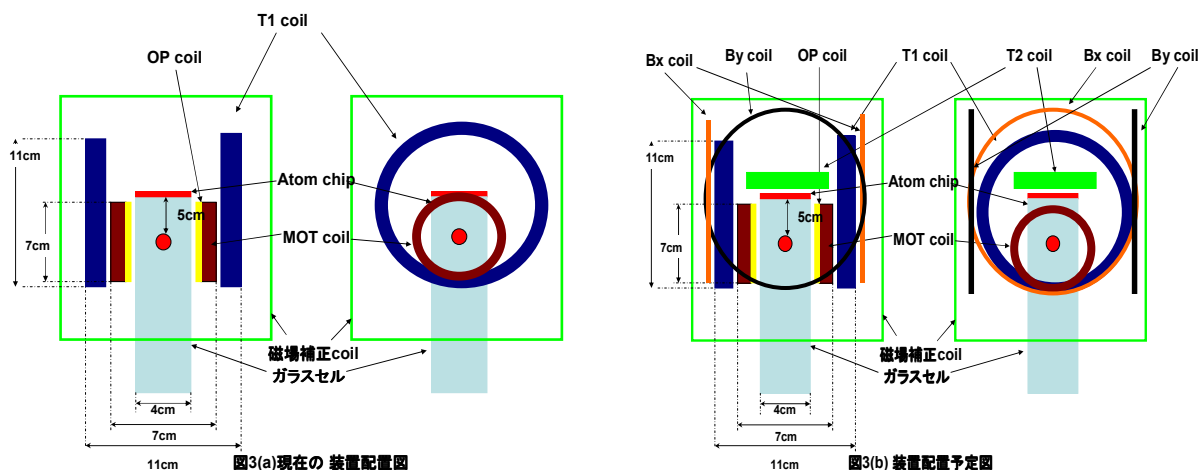


図3(a)現在の装置配置図

図3(b)装置配置予定図

アトムチップ

アトムチップ(atom-chip)とは、原子を操作、捕獲するようなポテンシャルを生成するためのワイヤ等を固定基板上に配置したものである。従来、原子を操作するためには磁場のポテンシャルを利用する場合は高磁場を発生させるコイル、光の双極子力を利用する場合は複数のレーザー等を必要としていた。しかし、これらの場合装置が巨大になってしまうため実用性にかけてしまう。またコイルやレーザーがつくるポテンシャルでは、その形状や大きさに制限が課せられてしまっており、自由に微細な原子操作のためのポテンシャルの生成が困難である。

アトムチップの場合は原子を操作するためのポテンシャルの生成源がシリコン等のチップ上に作り込まれており、複雑なポテンシャルによる原子操作が可能になっている。本研究において BEC を生成するにはワイヤートラップの仕組みを応用したアトムチップの表面近傍(表面からトラップの位置は数 $100 \mu\text{m}$)で原子を捕獲し、蒸発冷却を行う必要がある。

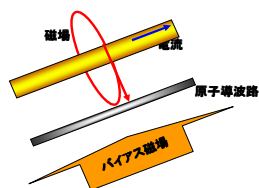


図4(a) アトムチップ

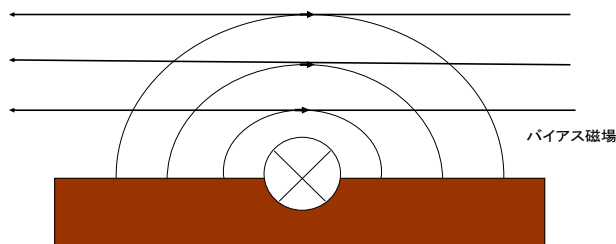


図4(b) :ワイヤートラップの仕組み

アトムチップはワイヤートラップの仕組みを応用した微細加工されたチップである (図 4(a),(b))。MATLAB を用いて H 型と Z 型の混合したパターンのアトムチップの作る磁場を計算した(図 5(a),(b))。

図 5(a)は MOT コイルから T1 コイル,T2 コイルを作って原子をアトムチップへ輸送後、アトムチップに原子をローディングするときに作る磁場を計算した結果である。

図 5(b)はアトムチップにおいて原子を蒸発冷却するときに発生させる磁場を計算した結果である。また蒸発冷却時に磁場のゼロ点があるとそこから原子がスピントリップしてしまい、チップトラップから原子が逃げてしまうため、磁場の極小点を 3(G)程度にする磁場ポテンシャルを生成する必要があるからである。

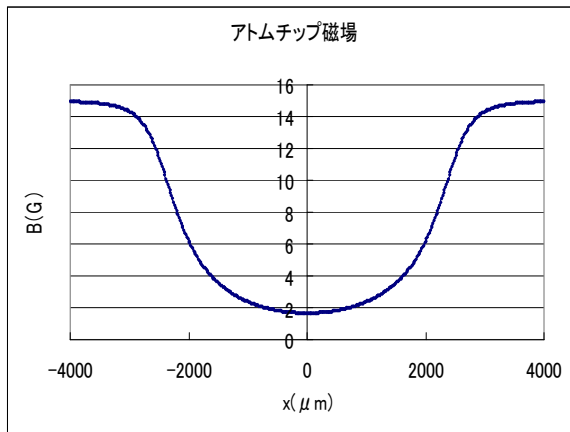


図5(a) アトムチップ磁場
($I_1=I_2=I_3=4(A), I_4=0(A), B_x=1(G), B_y=15(G), z=500(\mu m)$)

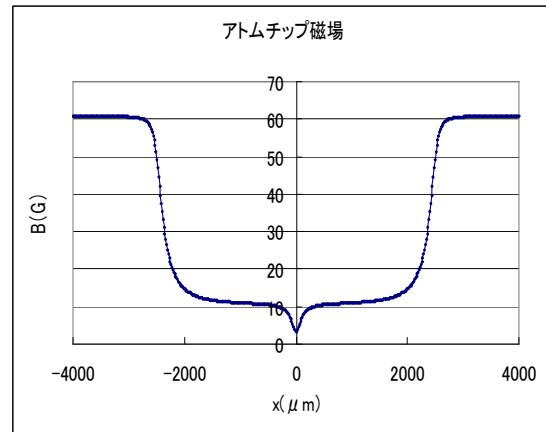


図5(b) アトムチップ磁場
($I_1=I_2=I_3=4(A), I_4=0.8(A), B_x=10(G), B_y=60(G), z=140(\mu m)$)

[実験結果]

磁場トラップ

図 6(a)は磁場トラップ前の吸収像、図 6(b)は 100ms の磁場トラップ後の原子を TOF 5ms で吸収像を撮った写真である。この画像データをガウシアンフィッティングすることにより原子の個数を見積もった。この画像から原子の個数は 2.0×10^6 個である。

磁場トラップ前である PGC における原子の個数と磁場トラップ後における原子の個数を比較することにより、原子の磁場トラップ移行効率を見積もった結果、移行効率は 25% だった。

また磁場トラップできる最大の時間は 2(s) までであった。

今回、OP 光を照射しないで実験を行った結果で、OP 光を正確に照射すると移行効率は 70% 以上になると考えられる。そのためには OP 光をファイバー後に正確に円偏光にする必要があり、LABVIEW 制御プログラムの OP 光照射のタイミングを見直す必要がある。

移行効率を上げるためには白色光が当たらないようにする必要があり、装置周辺に暗幕をかけ、実験室の蛍光灯も消灯させたほうがよいと考えられる。白色光が原子にあたると、原子が別に状態になってしまう可能性があり、別の状態になってしまった原子は WFS でなくなり磁場トラップから逃げてしまう可能性があると考えられる。

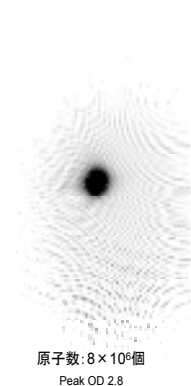


図6(a) 磁場トラップ前

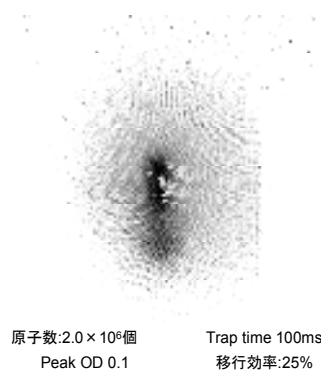


図6(b) 磁場トラップ後

磁場による原子の輸送

図 7(a)は原子輸送前の吸収像 7(b)は 2mm 輸送後の原子を 5ms の間 TOF させた時の吸収像の写真である。この画像データをガウシアンフィッティングすることにより原子の個数を見積もった結果、原子の個数は 1.5×10^6 個と見積もった。

コイル系の電流値を変化させることにより、原子の輸送を行ったが現在の実験プログラムでは 2mm 輸送するだけで原子の個数が減少してしまう。

磁場による原子輸送までの実験過程を図 7(c)に載せた。

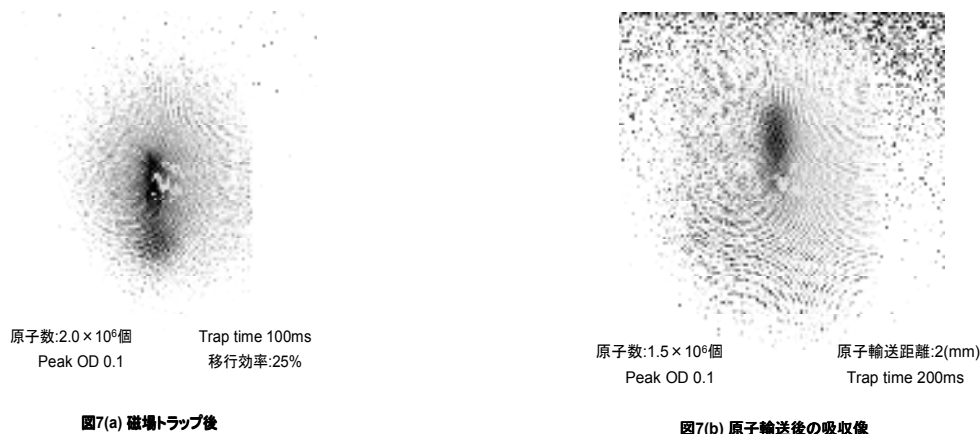


図7(c) 原子輸送の実験フローチャート

[まとめと今後の展望]

コイル系の製作を行い、装置に配置させて磁場トラップ、磁場を用いた原子の輸送の実験を行った。現在 OP 光を照射しないで磁場トラップを行っており、そのときの磁場トラップ前から磁場トラップへの移行効率は 25%であり、OP 光の調整して照射することができれば移行効率は格段に上がると考えられる。また原子の輸送実験においては MOT 中心から 2mm 上方へ輸送を行った吸収像を撮ったが、本来は磁場トラップ中心から 5cm 上方へ輸送しなければならず、現在の装置では最大で 3cm までしか輸送することができない。

今後の目標は磁場トラップの移行効率を上げ原子輸送を行うため最適化すること、輸送コイル 2 を設置しアトムチップで原子を捕獲するためにバイアスコイルの設計、製作、設置を行い、アトムチップに配線を行い、チップトラップを行い蒸発冷却を行いボーズ凝縮体生成を目指す。