

極低温中性原子—イオン混合系実現のための Li 原子の 磁気光学トラップ

量子物質工学科 0813104 山口智穂

<背景・目的>

極低温中性原子とイオンの混合系の実験は現在盛んに行われている。先行研究では2010年に Michael Köhl らによって BEC(87Rb) と単一イオン(174Yb+)の混合系の実験が初めて実現された⁽¹⁾。この実験では混合系が熱平衡に至るまでの過程やイオンや原子のロスなどがわかった。それ以降、原子やイオンのロスの過程の詳細が研究されている。⁽²⁾我々の研究室では、極低温における Li 原子と Ca イオンの混合系の実現を目指している。この系で探究できることは極低温分子イオン生成、中性原子を冷媒としたイオンの共同冷却、イオンを用いた原子気体の局所物性評価である。現在イオンと原子の混合系の実験では原子数とイオン数の減少の過程や原因、イオンを不純物と考えた場合の超伝導体の解明などに応用が利くと期待されている。今回の卒業研究では Li 原子を捕獲するために必要な磁気光学トラップを作成した。

<原理>

(1)磁気光学トラップ

MOTとは6本の円偏光レーザー光と不均一磁場を組み合わせたトラップで、原子の磁気副準位の磁場によるシフト量(ゼーマン効果)と磁気副準位の吸収遷移確率とを利用したものである。図1(a)のように一对のコイルに逆向きに電流を流し四重極磁場を作る。このとき、原点付近での磁場の大きさはほぼ位置座標に比例するので、原子のエネルギー準位は図1(b)のようにゼーマン分裂を起こす。ここで量子化軸を磁場の方向にとると、 z 軸上の原点以外の点では磁気量子数 M が1増える遷移の周波数は上がり、逆に減る遷移の周波数は下がる。この条件下で、レーザー光の周波数を共鳴周波数よりも低くとり、円偏光にして $\pm z$ 軸の両方から照射する。そしてその円偏光の向きを、原点に向かうレーザー光が $\Delta M = -1$ の遷移を起こすように決めると気体原子が原点から離れて z_0 の位置に来たとき、その原子には中心に向かう輻射圧が強く働く。同じレーザー光が原点を通り過ぎて原点から離れた方向に進む時は $M = +1$ が許容遷移になるため、共鳴からは遠くなっており、このレーザー光により原子が力を受ける確率は小さい。このように磁気副準位のゼーマンシフトを利用した吸収遷移により、原点方向に向かう復元力を生み出すことが出来、原子を捕獲することができる。

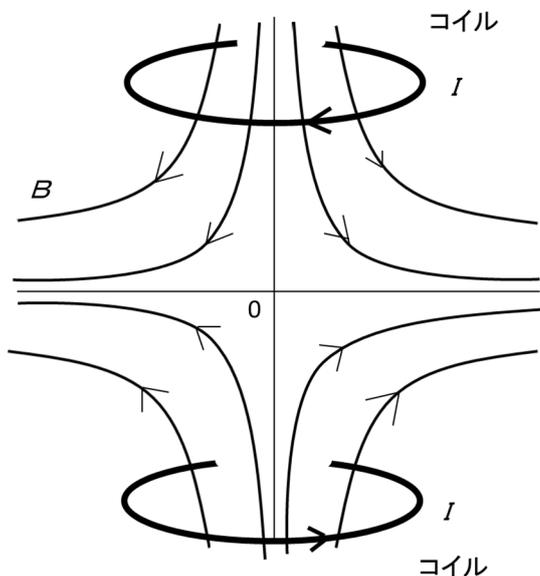


図1(a) : 磁気光学トラップの四重極磁場

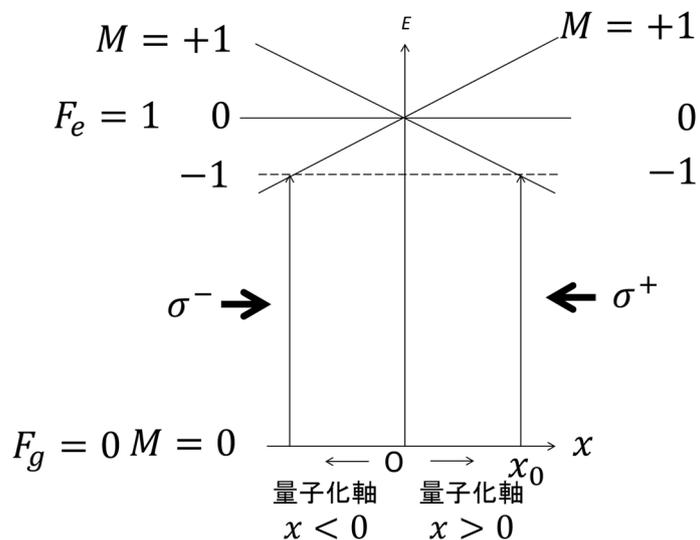


図1(b) : 四重極磁場中の原子のエネルギー遷移

(2)光源

図2はLi原子のエネルギー準位図である。MOTに必要な光はゼーマンスローワーに用いるゼーマン光、Li原子を捕獲するのに必要なMOT光、および原子の準位が下がった場合に準位を上げるリポンプ光である。これらの光は図2が示すように周波数がわずかに違うため、それぞれ適切に周波数をシフトさせる必要がある。

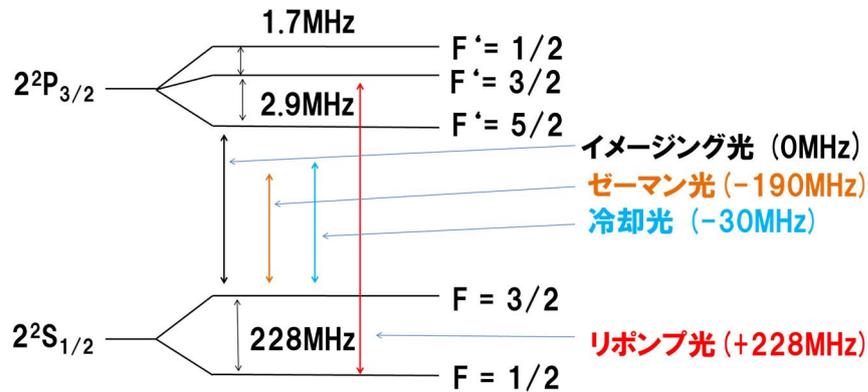


図2：Li原子のエネルギー準位

おおもとの光源は市販の波長が671nmのLDを用いた。LDから出たレーザーはテーパアンプによって強度を230mW程度に増幅された後、波長安定化システム用(3mW程度)、ゼーマンスローワー用(47mW程度)、MOT光(180mW程度)の3つに分ける。MOT光は再びテーパアンプによって500mW程度に増幅されたのちに、音響光学変調器(AOM)を通すことによってMOT光の波長へシフトさせる。そして位相変調器(EOM)を用いてリポンプ光とMOT光の両方の周波数のピークが出るように変調させ、シングルモードファイバーに入れた。EOMを通した後の光の強度は120mW程度、ファイバーを通した後の強度は20mW程度であった。

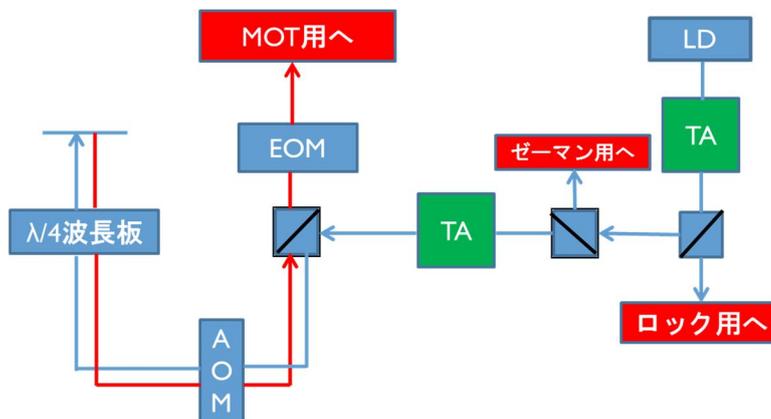


図3：光源の概要

(3)波長安定化のためのロックシステム

波長安定化のシステムには飽和吸収分光法を用いて共鳴周波数にロックした。今回は分岐させてきた光の強度が3mWと弱かったため、新たに波長が同じLDを注入して強度を増強し、さらにそのLDに直接変調をかけた。この方法により元の光源に影響なくロックシステムに必要な光だけに変調をかけることができた。飽和吸収分光を見るためにLi原子をたいて吸収セルに入れ、そこへ図4のようにプローブ光とポンプ光の2つの光を入れ、プローブ光の透過光をフォトダイオードで検出した。原子は共鳴周波数の光を吸収し励起されるが、速度を持った原子はドップラー効果によって感じるレーザーの周波数が共鳴周波数よりずれるため透過光強度は図5(a)のようになる。しかしポンプ光を入れ二方向からレーザーを原子に当てると、レーザーの入射方向の速度が0の原

子はドップラー効果の影響を受けず、共鳴周波数のポンプ光を吸収して励起されるため、プローブ光が透過し、透過光強度が上がり、図 5 (b) のようにわずかにくぼみができる。15 MHz の変調成分を検出することによってくぼみ部分の信号の微分信号を生成し、これを用いて共鳴周波数にレーザーを安定化させている。

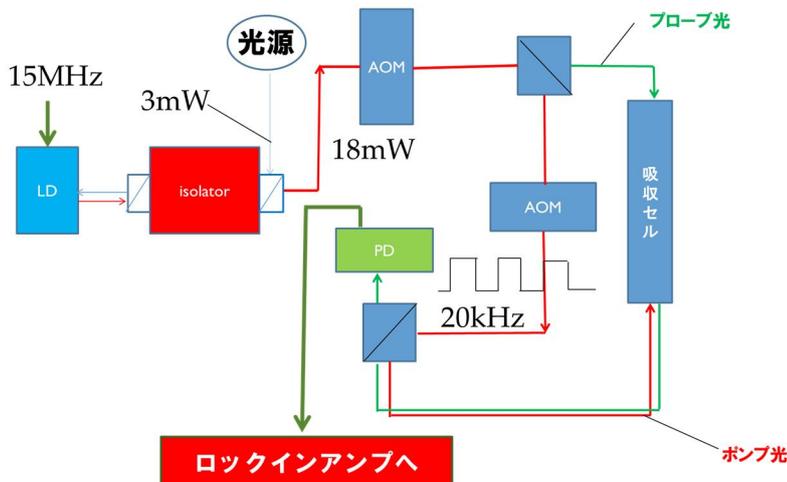


図 4 : ロックシステムの概要図

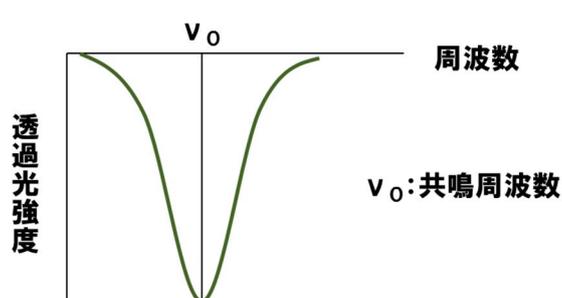


図 5 (a) : プローブ光の透過強度(ポンプ光なし)

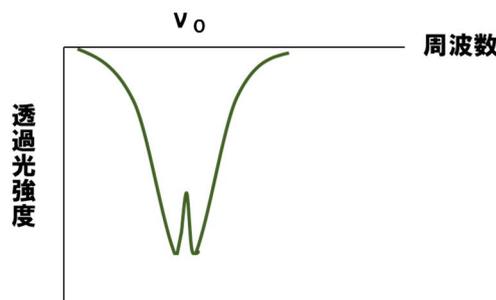


図 5 (b) : プローブ光の透過強度(ポンプ光あり)

今回の実験ではフォトダイオードで検出した信号はノイズが大きく形がわかりづらかったため、さらにロックインアンプに入れた。ロックインアンプは変調させ周波数をシフトした成分を復調する装置である。検出した信号に 20 kHz をかけてノイズの少ない高周波数成分へシフトさせて信号成分を取り出した後にさらに 20 kHz かけて低周波数成分に戻し、欲しい信号だけを取り出すことができた。ロックインアンプに入れた場合と入れなかった場合の信号はそれぞれ図 6 (a)、図 6 (b) のようになった。ロックインアンプに入れることによって少ない原子で効率的に信号を見ることができた。

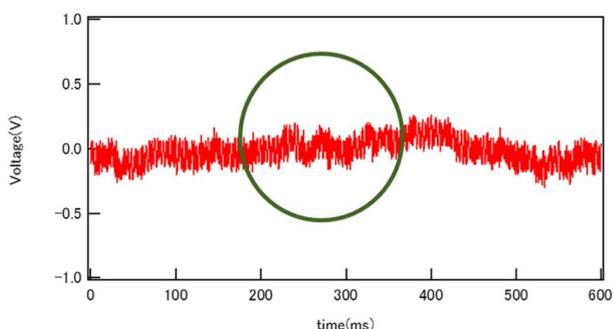


図 6 (a) : ロックインアンプ OFF の場合

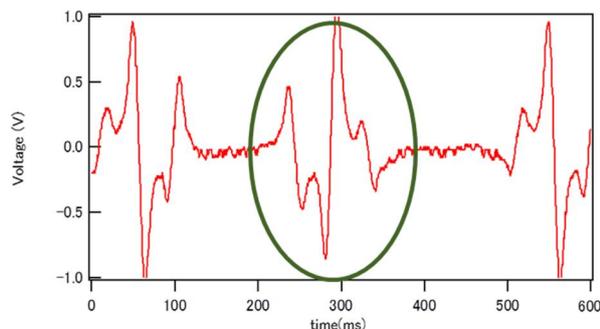


図 6 (b) : ロックインアンプ ON の場合

<まとめ・課題>

今回、図 7 のようなチャンバー内で作成した磁気光学トラップを用いて Li 原子の捕獲はできなかった。

改善すべき点として考えられるのは

- (1) MOT用のレーザーの強度が弱い
- (2) 四重極場用のコイルの配置、磁場勾配が良くない

MOT用の光の強度は20mw程度で、この強度ではLi原子の捕獲に必要な強度に足りていない可能性がある。そのため本研究室の別のグループが全く同じ光源を用いて実験しているのを借りて(1)について検証する予定である。また、磁場勾配の計算を再び行い、コイルの位置が正しく、磁場勾配が適切かどうか検証する予定である。

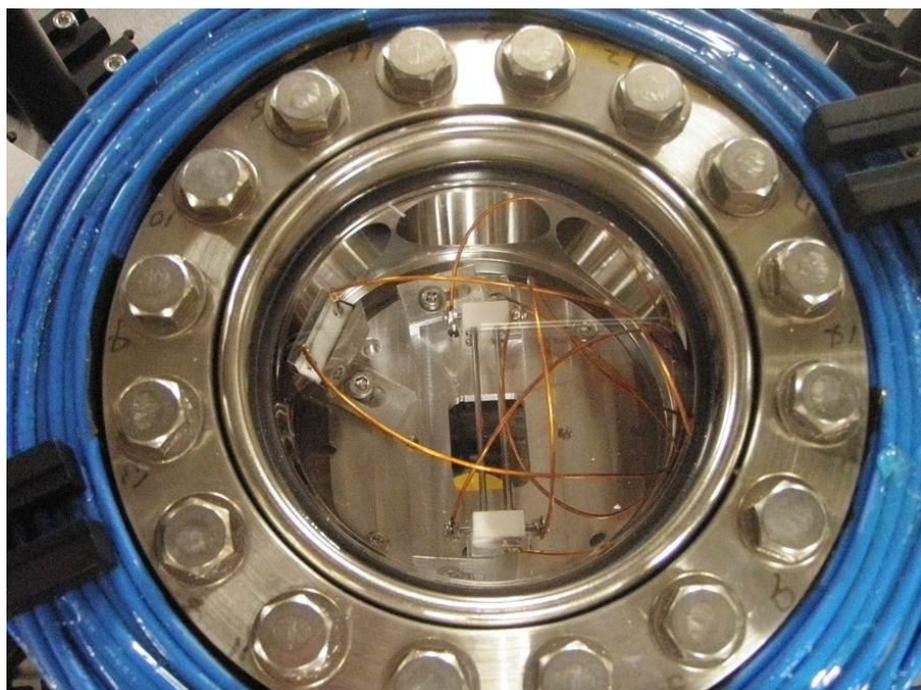


図7：チャンバー内部の写真

- (1) C. Zipkes, S. Palzer, C. Sias, and M. Köhl, “A trapped single ion inside a Bose-Einstein condensate”, Nature 464, 388 (2010)
- (2) F. H. J. Hall, M. Aymar, N. Bouloufa-Maafa, O. Dulieu, and S. Willitsch, “Light-Assisted Ion-Neutral Reactive Processes in the Cold Regime: Radiative Molecule Formation versus Charge Exchange”, Phys. Rev. Lett. 107, 243202 (2011).

参考文献

量子光学 久我隆弘 朝倉書店