

リチウムトラップの研究

量子・物質工学科 9913068

田代 欣久

[背景]

室温付近において原子の物質波の波長は pm 程度である。ゆえに、これを利用して干渉計を組むことは非常に困難であった。しかし、現在、レーザー冷却技術を用いて原子を冷却することにより、物質波の波長を nm のオーダーにまで伸ばすことが可能になった。冷却原子を干渉計の光源として用いることで従来の干渉計と比べ飛躍的に大きい感度を得ることができる。

[目的]

本研究室ではLiのレーザー冷却について研究を行ってきた。今後、冷却Li原子を用いて原子干渉計を作成することを目標としている。

我々が目標としている原子干渉計は、現在までに実現されている原子の内部状態を用いた干渉計ではなく、透過型回折格子に冷却された原子を落とすことで実現される、つまり原子を空間的に干渉させる干渉計である。この原子干渉計を実現するためには、低温かつ高密度な原子源が必要となる。われわれは原子源として磁気光学トラップ(MOT)、原子としてより長いド・ブROI波長を得られるLiを用いることが決定している。

よって、原子干渉計のためのLi原子源生成が目的であり、本研究ではLi MOTの特性の測定を行った。

[8Beam-MOT]

実験配置図を図1に示す。

標準的なMOTは原子の共鳴遷移周波数から負にdetuningされた6本の円偏光レーザーと反ヘルムホルツコイルによる四重極磁場を用いたトラップである。

Liの冷却とトラップを行うエネルギー準位を図2に示す。

LiのMOTの場合、トラップ及び冷却に用いる準位に超微細構造が存在するため6本のレーザーの他にrepump用のレーザーが必要になる。この光は電気光学変調器(EOM)により、820(MHz)サイドバンド光を発生させトラップ光に付加した。

我々は、より多くの原子をトラップするために6本の円偏光のレーザーに2本のレーザーを追加した8Beam-MOTを用いた。(図3)

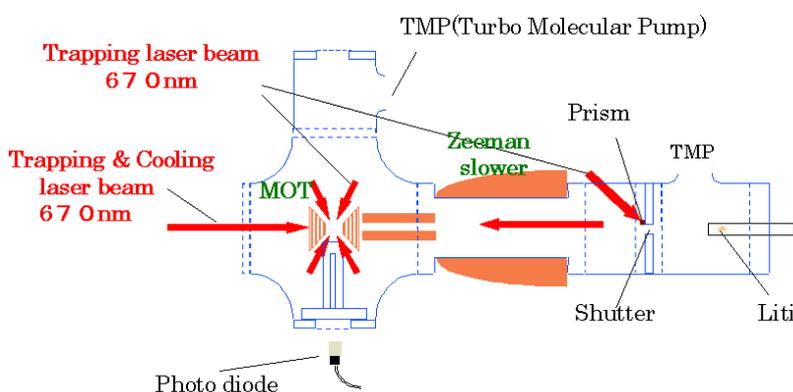


図1 Setup

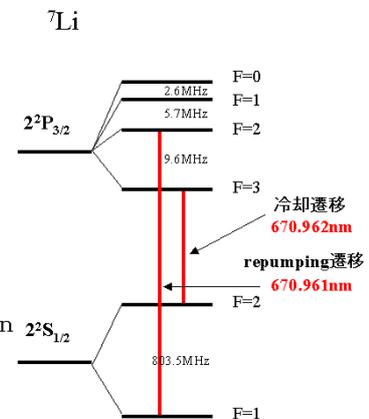


図2 ${}^7\text{Li}$ の準位

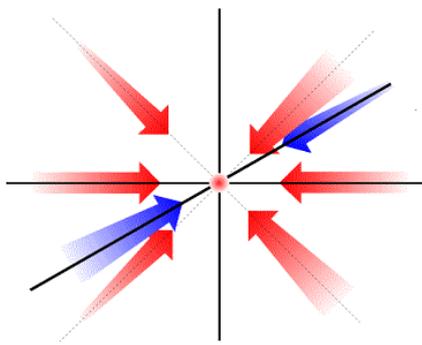


図3 8Beam

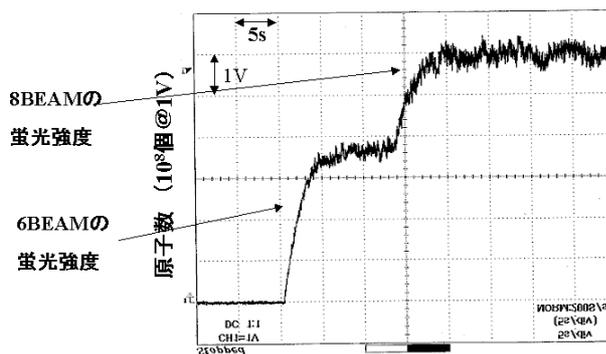


図4 MOTの蛍光強度

MOTのトラップレーザーを6本から8本に増やしたときのフォトディテクタの電圧値変化を図4に示す.ここで得られた値は,フォトディテクタの位置,レンズ,フォトダイオードの量子効率等によりMOT中の原子数と対応させることが出来る.我々が用いた装置では1(V)に対して約 10^8 (個)の原子と見積もれる.

図4よりトラップ光を2本新たに追加するとMOT中の原子数が増加することが確認できた.これは,トラップ光を8本にしたことによりトラップ光のある領域が大きくなって,トラップされる原子数が増加したためと考えられる.

[温度の測定]

MOTにトラップされた原子の温度の測定には,飛行時間測定法(Time of flight: TOF)を用いた.

TOFの概要を以下に示す.

- ・ MOT中の原子の速度はその温度に対応してMaxwell-Boltzman分布している
- ・ MOTのレーザーを切り原子を重力により自由落下させる
- ・ MOTから距離 x の位置に原子の共鳴周波数の光をシート状のprobe光として入射し原子の共鳴光をフォトダイオードで観測する
- ・ 蛍光強度を時間の関数として観測すると,これは原子のMOT中での速度分布を反映したものとなる

図5はMOTの温度が2.5(mK)としてMOTから3.5(cm)にprobe光を入射したときのTOF信号を計算したものである.

図6は $F=2$ に共鳴した光をprobe光としたときに実際に得られたTOF信号である.この場合のMOTの温度は約2.5(mK)と見積もれる.

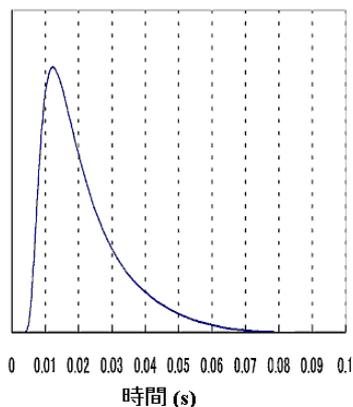


図5 TOF(計算)

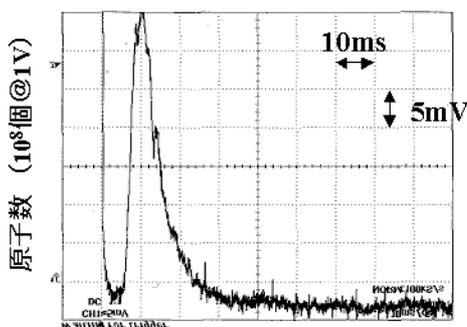


図6 TOF(F=2)

[MOT の密度の限界]

MOT の蛍光強度の時間変化は,

$$\frac{dI(t)}{dt} = \Gamma - \alpha I - \beta I^2$$

と表せる.

ここで, Γ は原子の供給レート, 第 2 項は Back-ground の原子との衝突, 第 3 項が MOT 中の原子同士の衝突による損失を表す.

よって, MOT の密度が限界に達しているかどうかは, Li-oven の Shutter を閉じて原子の供給を止めた後 ($\Gamma = 0$), MOT の蛍光強度の時間変化を測定することで確認できる.

図 7 に Li-oven の電流を 28 (A), トラップコイルの磁場勾配を 12 (G/cm) としたときの Decay を示す.

図 8 は図 7 の縦軸を対数としてプロットしたものである.

縦軸を対数として Plot すると Back-ground との衝突は直線で fit できるので, fit した直線からのズレを見れば MOT の密度が限界に達しているかどうか確認することができる.

図 8 よりこの場合 MOT の密度はあまり飽和していないと考えられる.

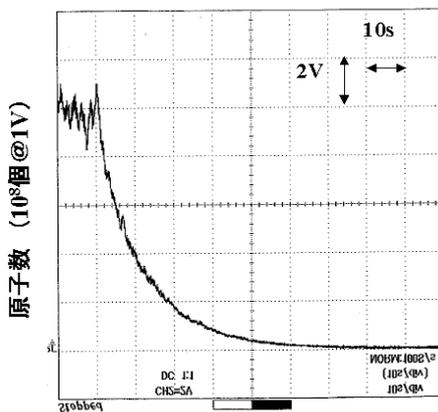


図 7 Decay

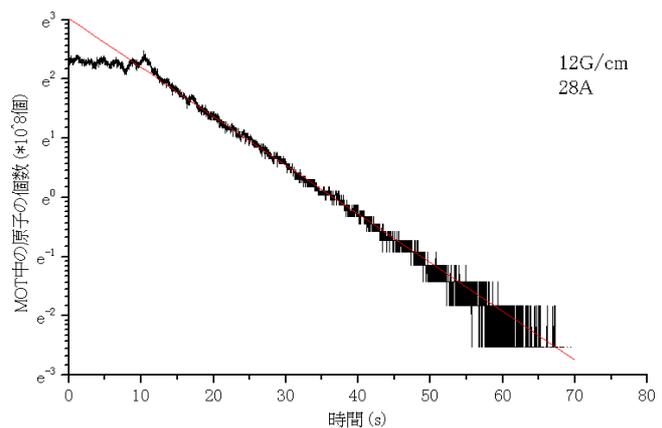


図 8 Decay (縦軸対数)

[Dark-MOT]

MOT の密度を上げるため, Dark-MOT の実験を行った.

Dark-MOT の概要を以下に示す.

repump 光がないと $F=1$ の基底状態に落ちた Li 原子はトラップ光と相互作用しないため落下するが, 周囲に repump 光とトラップ光が存在すれば, $F=1$ の原子は MOT の中心に押し込められ, 再びトラップされる.

このため, EOM で発生させたサイドバンドを切り, 他のレーザーを用いて $F=1$ から $F=2$ の遷移に対応する光を発生し, その光をドーナツ型にすることで, MOT の中心に repump 光が無い領域を作る必要がある.

我々は, ガラス板上に直径 2 (mm) の黒点をつくり, その像を MOT の中心に結像させることにより Dark-Spot を作った.

Dark-MOT の実験配置図を図 9 に示す.

Dark-MOT ができていれば TOF で $F=1$ の信号が相対的に増えるはずである.

Dark-Spot がないときの $F=1$ の TOF 信号を図 10 に, あるときの TOF 信号を図 11 に示す.

図 10 と図 11 を比較すると,定常的な MOT の蛍光強度はほぼ等しいのに対し,TOF 信号を見ると $F=1$ の原子数は増加していない。

よって,Dark-MOT は正常に出来ていないと考えられる。

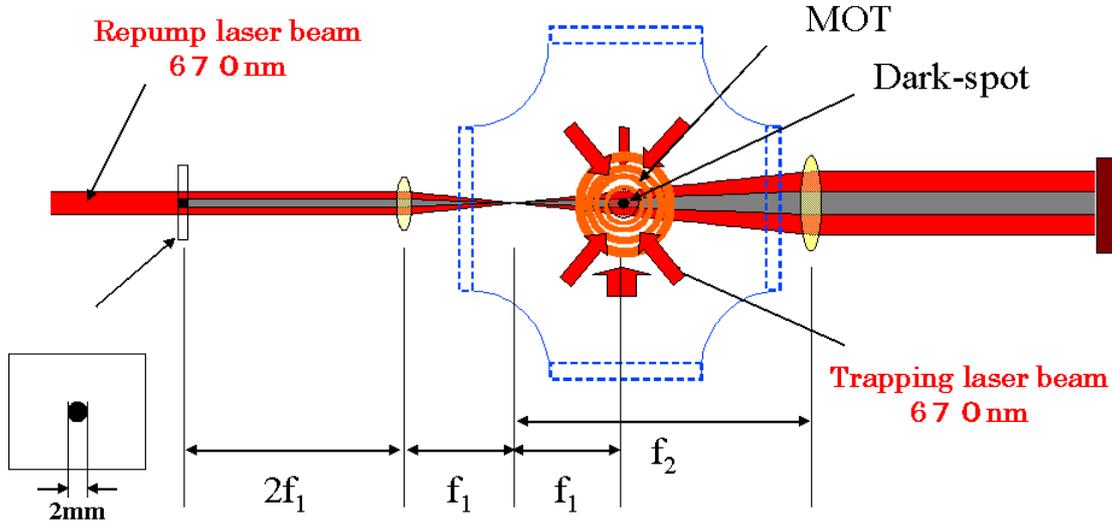


図 9 Dark-MOT の Setup

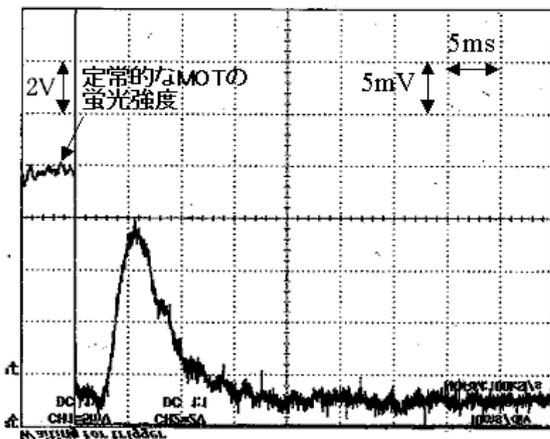


図 10 TOF ($F=1$, Spot なし)

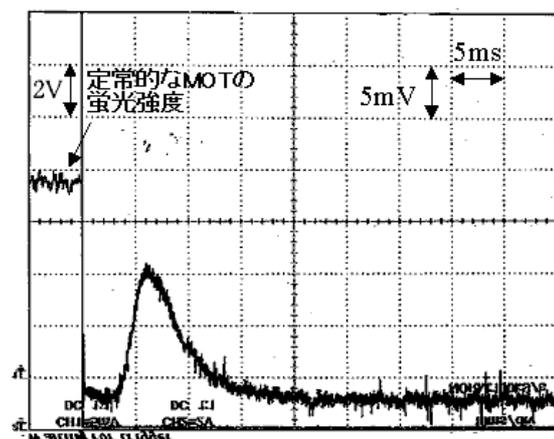


図 11 TOF ($F=1$, Spot あり)

[まとめ]

原子干渉計の原子源として 8Beam-MOT の実験を行い以下の結果を得た。

- ・ MOT の温度 : 3.5 (mK)
- ・ トラップされた原子数 : $\sim 10^9$ (個)
- ・ Decay time : 12 (s)

Dark-MOT の実験の結果, $F=1$ の原子数は増加しなかった。

理由として以下のことが考えられる。

- ・ 光のアライメントが悪く Dark-Spot がきちんと MOT の中心に結像出来ていない
- ・ Dark-Spot の周囲に十分な強度の repump 光が存在しない
- ・ Dark-Spot から落下する原子の速度が,周囲の repump 光とトラップ光で捕獲できる限界を超えている
- ・ repump 光の穴を横方向から入れているため, $F=1$ の原子がそこから逃げる