

# 微小開口が作る光近接場による冷却原子の操作

清水研究室 宝来広康

## 1 背景と目的

中性原子気体の運動制御は、クーロン力やローレンツ力といった比較的強い力を作用させることのできる荷電粒子の場合と比べてその実現は容易ではない。しかし現在ではレーザー光の光子による散乱力を利用した原子操作をはじめとして、レーザー光の電場の双極子勾配力を利用するものや、電場や磁場との相互作用によるものなど(シュタルク効果, ゼーマン効果), 多種多様な中性原子の操作法が確立されている。レーザー冷却, トラッピング技術の発展により, 極低温の原子集団が比較的容易に得られるようになった。冷却された原子は極低温であり速度が遅いことから, 室温原子には全く通用しないような小さな力との相互作用も顕著なものとしてみる事ができる。磁気トラップや, 光双極子トラップなどがその典型的な例である。最初の光双極子トラップは 130GHz 離調された光をフォーカスし, 3次元的に冷却された原子をトラップした。トラップの深さは 10mK 程度であり, トラップ光は原子の遷移周波数と近い為, トラップ時間は運動量の拡散により数ミリ秒程度であった。

1994年, V.V.Klimovらは伝導性のスクリーン上に空いた円形状の開口に光が入射したときに形成される電場をシンプルな形で表現した [3]。同年, V.I.Balykinらはその電場を利用した中性原子のフォーカス実験を提案した。開口によって作られる電場は, 開口からの距離のほぼ2乗でその強度を変化させ, 開口の近傍では電場の集中がみられる。本実験は V.I.Balykinが提案した中性原子のフォーカス実験 [4] を実証することと, 開口近傍におけるポテンシャルを利用した光双極子トラップを実現することを目的とした。実験において, 開口は直径  $1\mu\text{m}$  の開口を  $8\mu\text{m}$  の周期で  $100\times 100$  個並べたホールアレイを使用した。

## 2 光双極子トラップ

2準位原子の場合, 空間的に不均一なレーザー中での原子の運動は, 一般に双極子勾配力, 放射圧力, 運動量の拡散によって支配される。大きく離調されたレーザー光の中で原子がゆっくりと運動している場合には光による励起は少ない。結果としてレーザー光の吸収による放射圧力と運動量の拡散によって発生する加熱は小さいものになる。それゆえに大きく離調された不均一なレーザー中での冷却原子の運動は, 基本的に双極子勾配力によって支配される。冷却原子のための最もシンプルな光双極子トラップは TEM00 のガウスビームをフォーカスすることによって成し遂げられる。負に離調したガウスビームの勾配力はレーザー光の焦点近傍で3次元のポテンシャルの井戸を形成する。

ダイポールトラップの特性は離調に大きく依存する。far-off-resonance dipole trap(FORT) において, 周波数の離調は均一幅よりも大きいと仮定されるが, レーザーの周波数は原子の遷移周波数に対してはそれほど遠くない。FORT 中での原子の運動は回転波近似によってよく記述することができる。離調を  $10\mu\text{m}$  と大きく選んだ場合, 双極子トラップはたびたび quasi-electrostatic trap(QUEST) と呼ばれる。

単一ビームの FORT において, 離調は  $|\delta| \gg \gamma, \Omega$  であると仮定される。このような状況下において放射圧の効果は, 勾配力と比較して無視することができる。負の離調の場合, ポテンシャルの井戸は次の式によって定義される。

$$U_{gr} = -\hbar \frac{\Omega^2(r)}{|\delta|} \quad (1)$$

井戸の深さは  $U_{gr} = U_0 = \hbar\Omega(0)/|\delta|$  である。典型的な実験においてポテンシャルの深さ  $U_0/k_B$  は 10mK を超えな

い程度の値である。トラップの寿命は

$$\tau_{diff} \approx \frac{2MU_0}{D(0)} \approx \omega_r^{-1} \frac{|\delta|}{\gamma} \quad (2)$$

中くらいの質量の原子の反跳周波数  $\omega_r = \frac{\hbar k^2}{2M}$  の逆数  $\tau_r = \omega_r^{-1}$  は、 $10^{-5} s$  のオーダーである。大きな離調の場合、トラップ時間  $\tau_{diff}$  は  $\tau_r$  よりもずっと長い。式から、レーザーの強度と離調を同時に増やすことによりポテンシャルの深さを一定に保ったままトラップ時間を増加させることができることがわかる。

### 3 微小開口での回折による電場

円形の開口による平面波の回折の問題の厳密な解は 50 年代に沢山の研究者たちによって得られた。解は楕円関数の級数の形や、超幾何多項式の形になり短波長の極限で計算されてきた。後に長波長の極限の場合にも計算されたが、式は大変複雑なものになった。単色波がスクリーン上に垂直に入射する場合、光は半径  $a$  の開口上で  $\exp(-i\omega t)$  で時間によって変化する。この場合、開口のまわりに散乱された電場を発生させる架空の磁気の流れがあると仮定する Bethe[1] のアプローチが使われる。コンピュータの数値的な解は Leviatan[2] によってなされ、解析的でありなおかつシンプルな表現は 1994 年に V.V.Klimov ら [3] によって計算された。図 1、2 は  $ka = 2$  の時の、開口が作る光近接場である。

$$\langle E^2 \rangle = \left( \frac{kaE_{OM}}{3\pi} \right)^2 (18\pi^2 \frac{\sin^2 kz}{(ka)^2} - 6\pi \frac{\sin kz}{ka} (2A+B) + A^2 + (A+B)^2 + C^2) \quad (z < 0)$$

$$\langle E^2 \rangle = \left( \frac{kaE_{OM}}{3\pi} \right)^2 (A^2 + (A+B)^2 + C^2) \quad (z > 0)$$

$$A = R^- \left( \frac{2a^2}{R^*} + 2 - \frac{z^2}{r^2} \right) + za \left( \frac{R^+}{r^2} - \frac{3}{a^2} \arctan \left( \frac{1}{R^+} \right) \right)$$

$$B = R^- \left( \frac{2z^2}{r^2} - \frac{2r^2 - z^2}{R^*} \right) + zR^+ a \left( \frac{1}{R^*} - \frac{2}{r^2} \right) + \frac{3zr - 2R^+}{aR^*(1 + R^{+2})}$$

$$C = \frac{2arR^+}{R^*(1 + R^{+2})}$$

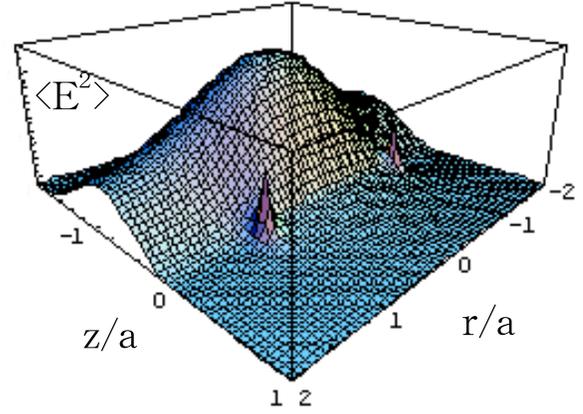


図 1 開口近傍の電場の様子

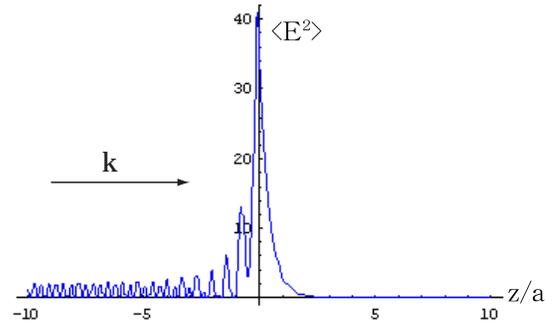


図 2 開口遠方の電場の様子

### 4 実験

本実験は大きく分けると、原子を高密度に捕捉する磁気光学トラップ (MOT) を生成する部分と、その MOT 中の原子を源としてトラップの実験を行う部分から構成される。MOT の生成には、Ne 原子の準安定状態への励起や、レーザー冷却の過程が必要となる。原子をレーザー冷却するには数万回のフォトン吸収、放出を繰り返す事のできる閉じた二準位が必要である。Ne 原子のレーザー冷却においては  $1s_5(J=2) \leftrightarrow 2p_9(J=3)$  の間の遷移をレーザー冷却、コリメーター、MOT 生成、後に説明するモラセス光のために利用する。レーザー光の波長は約 640nm で色素レーザー (DCM) から発振させられており、その波長はネオンガスの注入されたガラスセルで飽和吸収信号を検出し、その微分波形をエラーシグナルとして色素レーザーのコントローラーにフィードバックしロックしてい

る。レーザー光の離調は、ガラスセルの周りに巻いてあるコイルに流す電流値を変化させることによって調整する事ができる。

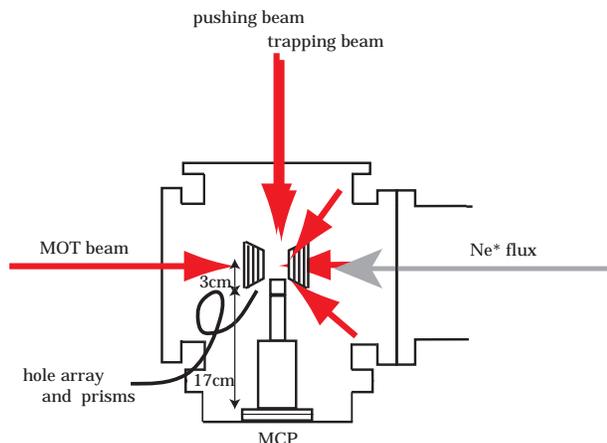


図3 実験装置図

実験装置の概要は図3に示した。装置の寸法は、原子が放電によって準安定状態に励起されてからMOTに捕捉されるまでの移動距離がおよそ105cm、MOTの位置からホールアレイの距離は垂直方向に約3cm、MOTからMCPまでの距離が約20cmである。真空度は実験中で $10^{-8}$ Torrの高真空状態が保たれている。

原子線を得るために、MOTに補足された原子を真上からpush光により押し出すか、もしくは自由落下させる。そのとき原子はpush光や重力によって加速されてしまうので、原子をホールアレイ付近で再冷却しなければならない。光双極子トラップ中で原子に働く力は保存力である。トラップ中に入射した原子はその初速度にかかわらずトラップから逃げ出してしまうため、トラップ中で原子になんらかの摩擦力が働くような機構がなくてはならない。その機構はホールアレイ付近に配置した四つのプリズムが担っている(図4)。

このプリズムに光を水平から10度の角度で入射させると、入射光は定在波を形成する設計になっている。それらの光と原子が相互作用することにより、原子はホールアレイ近傍で光モラセスを形成する。光モラセスは、光によって原子が強制的に閉じ込められている状態を指している。

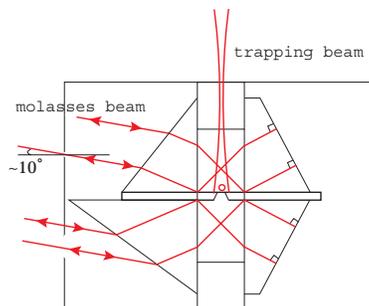


図4 プリズムと中の光線

閉じ込められた原子集団は、push光と同軸で入射しているトラップ光が作る近接場によってトラップされる。

測定はMCP(micro-channel plate)に入射した原子をStanford Reserch System社製のMultichannel Scalerを使ってカウントした。MCPは、イオンや電子などの高エネルギー粒子検出器である。本実験で使用しているNe原子は、放電によって基底状態から16eV上にある準安定状態にあるため、MCPで検出することが可能である。Multichannel Scalerは、MCPに入射した原子一つ一つの電気信号をある時間区分(binと呼んでいる)に分けてカウントしていく装置である。binの幅は最小で5ns、最大で10.5msにすることが可能であり、これは測定の時間分解能になる。binは1000から16000個並べることが可能である。これは5 $\mu$ sから160sの測定周期に相当し、典型的に実験は100msから1s程度の周期で行われた。

中性原子トラップを観測するためには、MOTを遮断すると同時にpush光を入射させ、原子をホールアレイまで送り出す。push光によって送り出された原子が到達する時刻までモラセス光は入射させたままにしておく。最後に、モラセス光を遮断してからトラップ光を遮断する。トラップ光を切るタイミングはモラセス光を遮断した時刻と、レーザーの離調で決まるトラップ時間の間で変化させる。Ne原子の場合、離調 $\delta = -100$ GHzでのトラップ時間は約30msと見積もられているので、トラップ光を遮断する時刻を0から30msの間で変化させればよい。この測定から、トラップ光を遮断した時刻にはかかわらず、常に遮断した時刻から一定の時間の後に原子が検出器にやってくるが予測される。

#### 4.1 マイクロホールアレイ

マイクロホールアレイによるトラップの実験をする場合、たった一つの開口だけで測定をすると検出は困難になる。実験では、12.5mm 角のシリコンの基板の中央の1mm 角の領域に微小開口が  $100 \times 100$  個並んだマイクロホールアレイを使用した。ホールアレイの部分は SiN でできており、厚さは 100nm で透明である。12.5mm 角の基板全体に反射膜として、金が 40nm 蒸着してある。

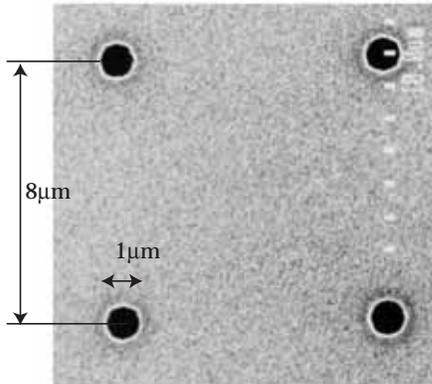


図5 ホールアレイ (電子顕微鏡写真)

#### 4.2 push 光による原子の速度

原子がホールアレイまで到達しているか、どの程度の速度の原子が MCP に到達するのかを確認をした。測定はモラセス光がない場合について行った。push 光については MOT に使われている共鳴光が使われており、push パワーは約 10mW 程度である。光は望遠鏡によりあらかじめ細くしてからレンズに入射させ MOT とホールアレイの中間辺りにフォーカスしている。あらかじめピールを細くしているのは、ビームを緩く絞り、MOT の下のピンホールをもビームが通過できるようにするためである。図6は原子の飛行時間の測定であり、積算回数は 155 回である。push 光が原子に入射し始めるのはグラフの 0ms の位置である。データから、原子が 5ms 経過した後 MCP に到達しているのがわかる。MOT から MCP までの距離は約 20cm なので、これを速度に換算すると 40m/s になり、温度にすると約 2K である。原子の集団は最初に鋭いピークとして現れ、そのあとは定常的な値となっている。これは MOT を push することで原子数が減少することに起因し

ており、その後は MOT の生成と push がバランスしていることを示している。この結果から原子は確かにホールアレイまで到達しているということが確認された。

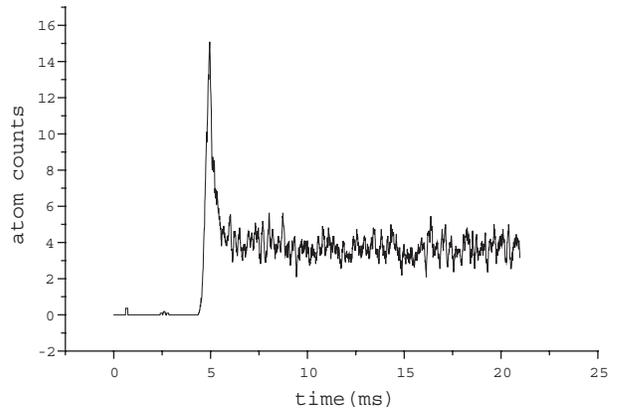


図6 原子の飛行時間

#### 4.3 モラセス光の効果

push 光によって MOT から押し出された原子に対してモラセス光を照射し、モラセス光が原子にどのように作用するかについて調べた。

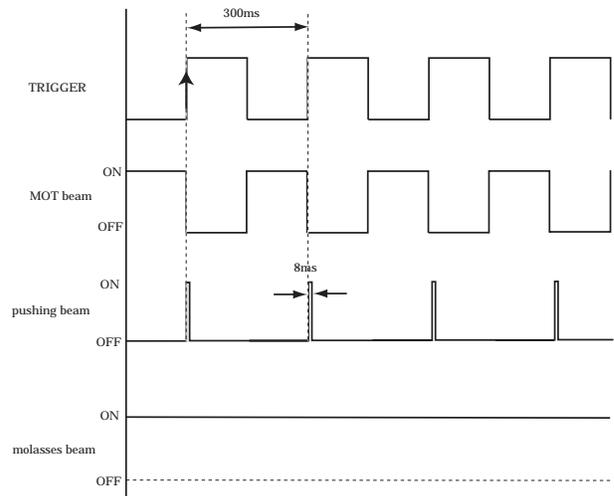


図7 実験のタイミング

図7は実験のタイミングである。タイミングは MOT を OFF した瞬間に push 光を照射し、モラセス光は常に ON の状態である。MOT を OFF にするのは MOT からの定常的なバックグラウンドをなくすためである。図8はモラセス光を入射させなかった時のデータであり、図9はモラ

セス光を入射させたときのデータである。それぞれ 2500 回積算した。モラセス光の強度はネオン原子の飽和光強度の 5 倍程度であり、push 光のパワーは数 mW と先の実験よりも弱くした。push 光のパワーを減らしたのは、トータルの原子数を減らし、モラセス光の効果をより顕著に見るためである。図 8, 9 を比べてみると、モラセス光があるときのグラフにはピークが 2 つあるのがわかる。左のピークは push 光により MOT から押し出され、モラセス光と相互作用しなかった原子集団であり、右のピークはモラセス光と相互作用をして遅れて MCP に到着した原子である。左のピークは先の実験同様、5ms の位置にピークが見られ、これは 40m/s の速度に相当する。右のピークは 23ms の飛行時間で、これは 8m/s に相当しており、確かにモラセス光は原子を冷却する役割を果たしている。図 8 から、155 回の積算の先の実験データよりも原子数が極めて少ないのがわかる。push 光のパワーを減少させると原子ビームの速度が遅くなることは式から予想され、なおかつ実験的にも T.Kohno(電気通信大学レーザー新世代研究センター)の実験により確かめられているが、本実験でそれが確認できないのは、MOT ビームをカットするのにメカニカルシャッターを用いているためである。メカニカルシャッターはビームの遮断に 10ms 程度の時間を必要とする。そのためビームをカットしている最中に原子を MOT ビームのそれぞれの方向に押し出してしまう。T.Kohno の実験において、MOT の光は AOM とメカニカルシャッター両方によって遮断されている。

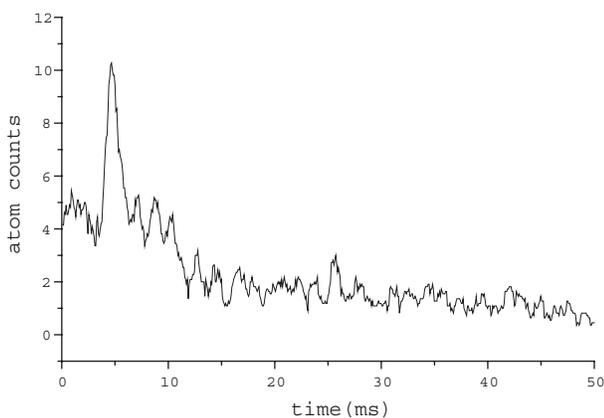


図 8 モラセス光なし

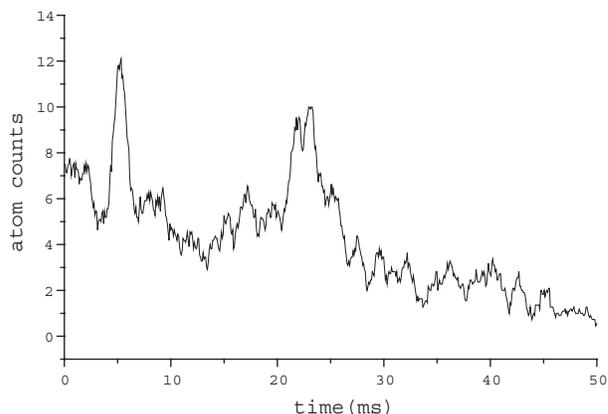


図 9 モラセス光あり

40m/s の原子の初速度はホールアレイ近傍でモラセスを形成するのに十分な速度であるかを考えてみる。図 9 から、原子はモラセス光で冷却されたものの、なおも 8m/s の速度を持っている事がわかる。これは原子がモラセスを形成していないということが言える。

原子とモラセス光が相互作用できる距離というのは、プリズムのマウントの構造上、最大 2.5mm までとることができる。しかしこれは全く理想的な場合である。すなわちプリズムとホールアレイが正しくマウントされていない場合や、ビームの形状が理想的ではない場合などには、その距離は最大距離よりも短いものになる。実際、プリズムよりも十分大きなビームを入射させることによって、最大の停止距離が得られると考えることもできるが、定在波を形成することのできない位置に入射したビームが原子を吹き飛ばしてしまうかもしれないので、それをやるのはあまり適当でない。

#### 4.4 MOT の解放

push 光による原子線は、40m/s という一定の速度を持ってしまっているためにモラセス光で十分に冷却することができない。勿論、相互作用距離を保ったままモラセス光の強度を上げれば停止させることも可能であるが、それは構成上現実的ではない。そのためさらに速度の遅い原子線が必要となる。速度の遅い原子線を得るための最も単純な方法として、MOT からの解放がある。MOT は 4 本の光と磁場によって形成されている。MOT のポテンシャルをなくすには、その 4 本の光を断ち切れればよい。しかし、

本実験において使われているシャッターはメカニカルであるため、これまで MOT の解放による TOF を観測することはできなかった。AOM を使用すれば観測は容易であるが、AOM を使うと光のパスが変わってしまい、なおかつパワーのロスもあるため、MOT の生成すらままなくなる可能性がある。そのため、本実験では MOT 光のパスの中にレンズを一組挿入し、レンズの焦点の位置でビームを遮断することにより  $20\mu\text{s}$  の遮断時間を得ることができた。このときの MOT の TOF を図 10 に示す。

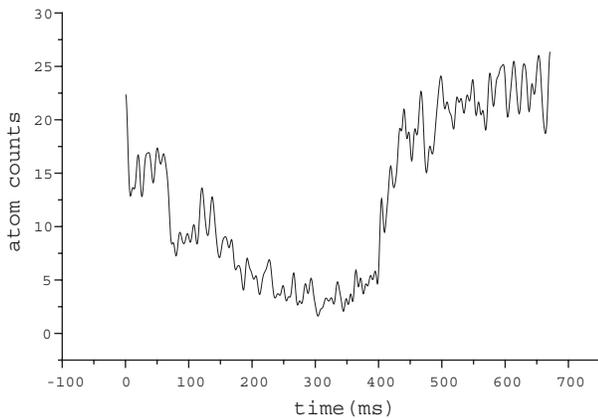


図 10 MOT の解放による TOF 測定

この図で、MOT 光は  $0\text{ms}$  の位置で遮断され、 $350\text{ms}$  の位置で再点灯されている。 $0\text{ms}$  から  $80\text{ms}$  の間と  $400\text{ms}$  以降にやってきた原子は、MOT からのバックグラウンドノイズである。図から約  $130\text{ms}$  の位置にピークが現れているのがわかる。この飛行時間は、原子が  $1\text{m/s}$  の初速度を持っている事に相当する。この初速度の時、モラセス光が飽和光強度の時の原子の停止距離は  $100\mu\text{m}$  であることがわかった。このことからモラセスの解放による原子の速度は十分に利用することのできる範囲にある。

## 5 まとめ

本実験においてトラップを成功させるにあたり最も重要となるのは 4 つの特別なプリズムである。プリズムは上下 2 つのペアになっており、水平から  $10$  度の角度でプリズムに光を入射させることによって、開口の近傍で 2 次元的光モラセスを生成することが可能になる。光モラセスとは、原子が光によって強制的にある空間に閉じ込められ

ている状態を意味する。光モラセスはトラップではなく、原子はモラセス中で光の吸収放出によるランダムウォークの状態にある。MOT から開口までロードされた原子集団は、ロードされている間に重力によって加速されてしまう。4 つのプリズムはこの重力による加速された原子を再冷却することと、原子を開口近傍に閉じ込めることを可能にする。実験ではモラセス光が原子を再冷却しているかについて調べた。実際  $40\text{m/s}$  で開口に入射した原子はモラセス光により  $8\text{m/s}$  まで減速されて検出器まで到達してきており、モラセス光の効果があることが確かめられたが、push 光により開口まで押し出された原子集団は push 光の強度にかかわらず  $40\text{m/s}$  の速度をもっており、push 光によって押し出された原子はプリズムのマウントの構成上、モラセス光により開口付近に閉じ込めることができないということを計算した。

次に、低速の原子集団を得るために、MOT に使われている光を遮断し、解放された原子を利用することを考え光学系を改良することにより従来の  $10\text{ms}$  の遮断時間を  $20\mu\text{s}$  まで向上させ、MOT に捕らえられていた原子集団の TOF 信号を得ることに成功した。そのときの原子の速度は  $1\text{m/s}$  であり、モラセス光により開口付近に閉じ込めるには十分な速度であることを計算した。

## 参考文献

- [1] H.A.Bethe  
Phys.Rev.66,163(1944)
- [2] Y.Leviatan  
J.Appl.Phys.60,1577(1986)
- [3] V.V.Klimov and V.S.Letokhov  
Opt.Comm. 106, 151(1994)
- [4] V.I.Balkin,V.V.Klimov and V.S.Letokhov  
J. Phys.II France 4, 1981(1994)
- [5] V.I.Balykin,V G Minogin and V.S.Letokhov  
Rep.Prog.Phys63 1492 (2000)