

アルゴン原子のレーザー冷却・トラップの研究

量子・物質工学科 清水研究室
0413090 原田 恵介

1. 背景・目的

我々の研究室では、準安定状態のアルゴンの原子 (Ar^*) によるレーザー冷却またトラップの研究を行っている。トラップの生成が可能になれば、原子と固体表面の相互作用や原子干渉計などの研究に利用することができる。

本研究の目的は、 Ar^* ビーム偏向器を用いて Ar^* 原子を偏向し、ビームの広がりを集束させることである。

2. 偏向器の原理

図1のような凹面鏡と凸面鏡の間で原子に共鳴するレーザー光が多数回反射し、その中を Ar^* 原子が通っている。 Ar^* 原子の進行方向と凹面鏡から凸面鏡に向かうレーザー光が垂直に交わると、 Ar^* 原子は共鳴光を吸収し、放射圧が作用する。凹面から凸面鏡に向かう方向に力を受け偏向が起きる。放射圧の式は以下のようになる。

$$F(r) = -\hbar k \frac{\Gamma}{2} \frac{I(r)/I_0}{1 + I(r)/I_0 + [2(k\dot{r} + 2\pi\Delta\nu_L)/\Gamma]^2}$$

自然幅 $\Gamma = 5.9\text{MHz}$ (寿命 $\tau = 27\text{ns}$)、 k はレーザーの波数、飽和パワー $I_0 = 1.5\text{mW/cm}^2$ 、 $\Delta\nu_L$ はレーザー離調であり \dot{r} は動径方向の速度である。この放射圧力と遠心力 Mv^2/r_0 ($r_0 = 1016\text{mm}$) が釣り合うことで Ar^* 原子は連続的に進行方向を変えながらも凹面鏡から凸面鏡に向かうレーザー光に対して垂直に交わり続け偏向がおきる。またレーザー強度が飽和パワーより十分に強いとき、 Ar 原子の質量 $m = 6.64 \times 10^{-26}\text{kg}$ より限界速度 $v = \sqrt{r_0\hbar/(2m\tau\lambda)} = 482\text{m/s}$ が求まる。

3. 偏向器の構成

Ar^* ビーム偏向器は、遷移波長のレーザー光を反射する凹凸面鏡のペアを用いて、それぞれ曲率中心を一致させるように置かれている。偏向器の特性については表1に示している。図2のように、鏡のペアを2つ分用いて、互いのペアが垂直になるように上下左右に設置している。この偏向器による偏向角度は、鏡の長さ 100mm と曲率半径により計算でき $\sim 0.1\text{rad}$ 程度となる。

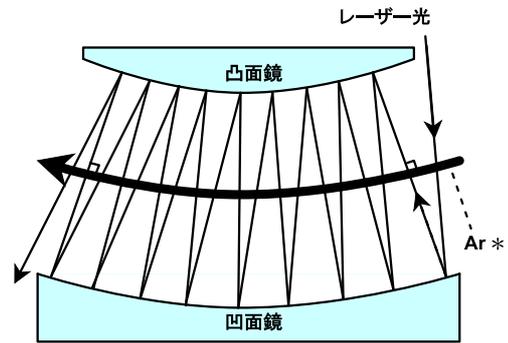


図1:凹凸面鏡の反射

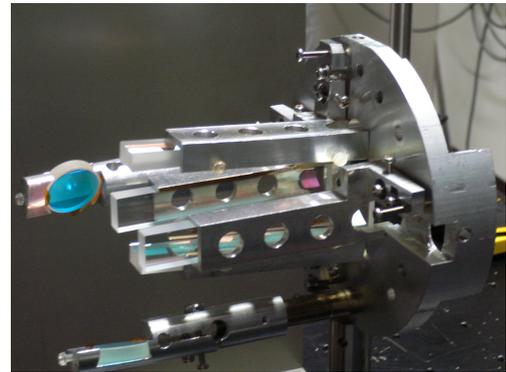


図2. 偏向器の構成

凸面鏡の曲率半径 $R_{\text{凸}}$	1000mm
凹面鏡の曲率半径 $R_{\text{凹}}$	1038mm
遷移波長 λ	811.754nm
鏡の大きさ	100mm × 15mm
偏向角度	$\sim 0.1\text{rad}$

表1. 偏向器の特性

偏向器に入るレーザー光は、図2で説明すると偏向器の右端の溝から入り、左右の鏡の奥側の凹面鏡に入射する。鏡の間をジグザグに通り、凸面鏡の端で反射された光は左の丸いミラーにあたる。その後、下の丸いミラーにあたり上下の鏡の上側の凹面鏡に入射してから、上下方向で反射を繰り返している。このときの反射の回数は左右、上下ともに14回反射させた。また原子の偏向により集束させた原子ビームをゼーマン同調用ソレノイドの軸方向に一致させるために鏡の角度やレーザー光の入射角度を計算し調節を行った。

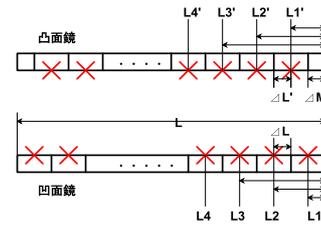


図3:反射位置

4. 角度計算について

図3のように鏡の上をレーザー光が等間隔に反射するものとした。図4で凹凸面鏡での等間隔の反射によって、中心角 θ の扇形の中には、それぞれの反射に対して分けた中心角 θ' の扇形を並べて考えることができる。これよりレーザー光の入射角度と、凹凸面鏡の傾きの角度計算が可能である。

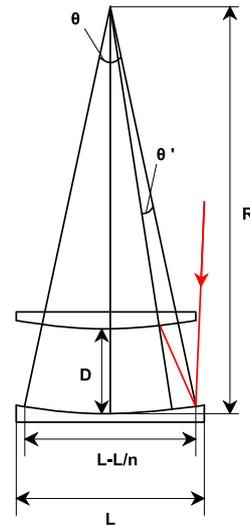


図4:鏡の配置

Ar*ビームは放電管から放出された後、広がりながら偏向器に入り、偏向器から出た後ソレノイドの軸に対して、ビームがまっすぐ出るようにする。これには偏向器での最後のレーザー光は軸に対して垂直に反射させる必要があり、この角度を考慮に入れて左右また上下の鏡において計算を行った。

下の図5,6は、左右また上下の凹凸面鏡の図である。赤い矢印の線がレーザー光を示している。図でいうと鏡の右側に鏡を固定する台が置かれる形になり、左右の鏡は Ψ だけ上下は Ψ' だけ、図と同じように傾けることになる。角度計算の結果については表2に示す。

鏡の角度調節は、計算結果の角度のついた定規を作成し、それに合わせるようにして鏡を固定する調節ねじを合わせ、レーザー光の反射回数を CCD カメラで確認しながら調節を行った。

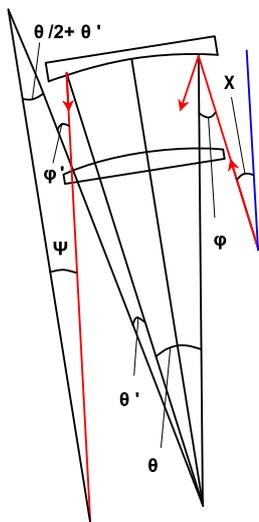


図5:左右の鏡

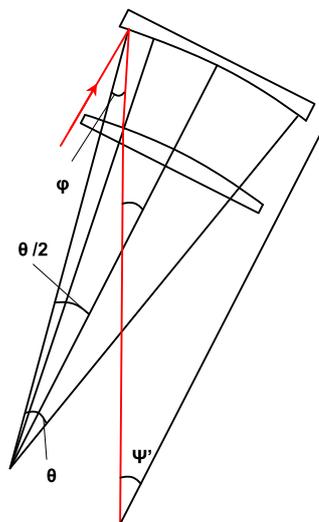


図6:上下の鏡

左右の鏡について	
レーザー光入射角度 χ	5 °
鏡の角度 Ψ	3 °
上下の鏡について	
レーザー光入射角度 2ϕ	10 °
鏡の角度 Ψ'	8 °

表2. 角度計算結果

5. 実験方法と装置について

5-1. 光学系

飽和パワーより十分強いレーザー強度が必要である。Master レーザーから出たレーザー光を 2 つの Slave レーザーに注入同期させ、レーザー光の偏光が互いに垂直になるように $\lambda/2$ 板を用いて偏光させ、PBS を通した後で重ねた。このときレーザー光強度は、ほぼ $120\text{mW}/\text{cm}^2$ となった。偏向器の鏡で多数回反射させると反射光の径が小さくなるので、曲率中心を一度焦点に合わせるように焦点距離 $f=1000\text{mm}$ のレンズを通してから偏向器に入射させた。

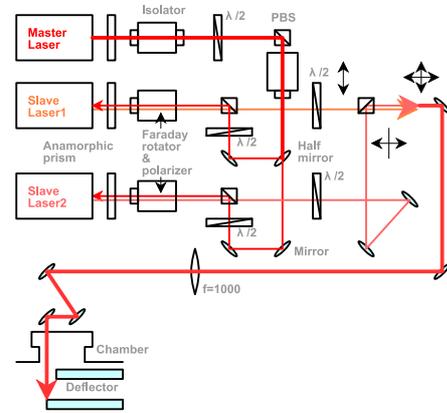


図 7:光学系

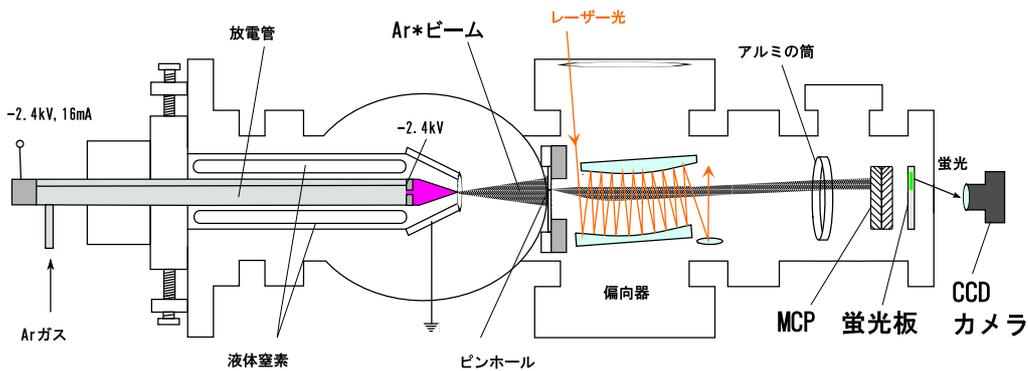


図 8:真空装置

5-2. 真空装置

Ar^* ビーム偏向器は真空装置内に設置されている。偏向器により Ar^* ビームが偏向・集束することを観測する方法について図 8 で説明する。

1. Ar ガスを放電管内に流し、電圧 -2.4kV 、電流 16mA で放電している。放電により熱が生じるため液体窒素を入れて冷却する。また Ar^* , Ar^+ , e^- が放電管の先端のピンホールから放出されるが、このとき電極に負の電圧をかけることで Ar^+ を放出しないようにする。

2. Ar^* 原子はピンホールを通った後、偏向器で偏向される。真空装置内の圧力は偏向器部分で $3.0 \times 10^{-6}\text{torr}$ 程度である。

3. 負に電圧をかけたアルミの筒を通り抜けることで放出された荷電粒子 (Ar^+ , e^-) が MCP に衝突することを避けている。

4. Ar^* が MCP に衝突し、衝突によって生じた電子は増幅されて蛍光板にあたる。MCP 表面を蛍光を CCD カメラで観測した。

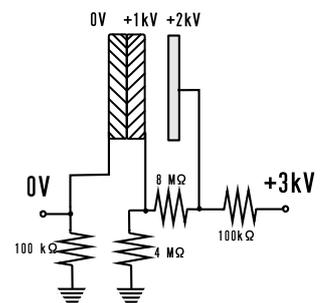


図 9:MCP

6. 実験結果

6-1. 一次元の偏向について

図 10 は左右の鏡だけを設置して一次元の偏向を行ったときに観測した MCP の蛍光板の画像である。右側の白い部分が準安定状態のアルゴンがいることを示し、左側の黒い部分は掃き寄せられていなくなった部分を示している。右側に偏向されたことがわかる。また図 11 は画像解析を行い、 Ar^* の強度分布を見たものである。青い線が Ar^* ビームに偏向器のレーザー光が作用していないときであり、一様に分布しているのがわかる。赤い線はレーザー光が作用しているもので偏向によっていなくなった部分と増加した部分がはっきりしている。これによると一次元だけでもほぼ 2 倍程度の Ar^* ビーム強度の増大がみられた。

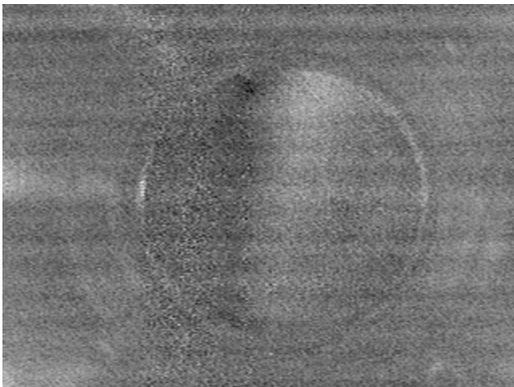


図 10:MCP 蛍光板

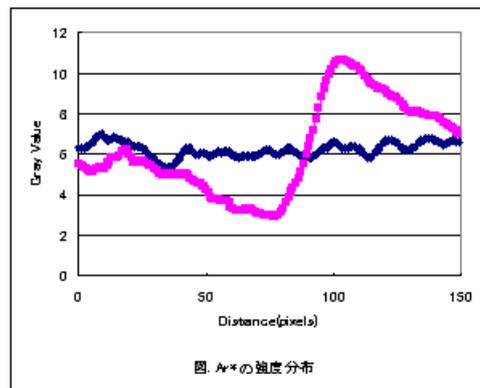


図 11: Ar^* の強度分布

6-2. 二次元の偏向について

上下左右に鏡を設置して二次元の偏向の実験も行ったが、画像解析によって得られる偏向の変化が小さく、画像において明確に結果を示すことができなかった。しかし CCD カメラでの映像をテレビ画面に映して見ながら、共鳴近くで掃引させて観測すると、上下左右の偏向がおきていることを確認できた。

7. まとめ・課題

実験結果からわかるように、 Ar 原子が偏向し Ar^* ビームの集束を確認できた。このとき一次元の偏向では、 Ar^* ビーム強度は 2 倍程度の増加をしていたことがわかった。また二次元での偏向では、偏向による変化が小さかったためビーム強度をもっと増大させて偏向・集束をみるのが課題である。