

重力を利用した原子波の凸反射鏡の研究

量子・物質工学科 清水(富)研究室 坂井 一樹

【目的】

量子反射を利用して、原子ビームを集光させる凸反射鏡(凸レンズとしての役割をもつ平面反射鏡)をつくる。

【背景】

近年のレーザー冷却技術の飛躍的な発展により原子を極低温にまで冷却させることが可能になったため、原子の波動性を使ったさまざまな実験が行われている。その一つに、ファンデルワールス引力での急峻なポテンシャル変化で起こる量子反射がある。量子反射の研究により、表面を加工することで軽い原子に対しては実用的な反射鏡としての利用ができるほどの高い反射率を得られることが分かった。

原子は光と違い、重力の影響を受ける。従って、光を集光させるためには凹面鏡が必要だが、原子の場合は重力を利用することにより、平面鏡でも集光できることが予想された。

そこで今回、量子反射を使い、平面板で凸レンズの役割を果たす反射鏡の研究に取り組むことになった。

【実験装置】

実験に使用する装置を図1に示す。左側からきたネオン原子を磁気光学トラップ(MOT)し、そこに上からレーザーを当てることによってネオンをトラップから外し、落下させる。その原子を、角度をつけたシリコンプレートで反射させ、下にあるMCP(Micro Channel Plate)で検出するという仕組みになっている。

シリコンプレートは図2のように原子の反射する面(表)が加工されており、プレートの両側にはそれぞれ表は0.5mm、裏は50 μ mの幅をあけて、ナイフエッジが取り付けられている。

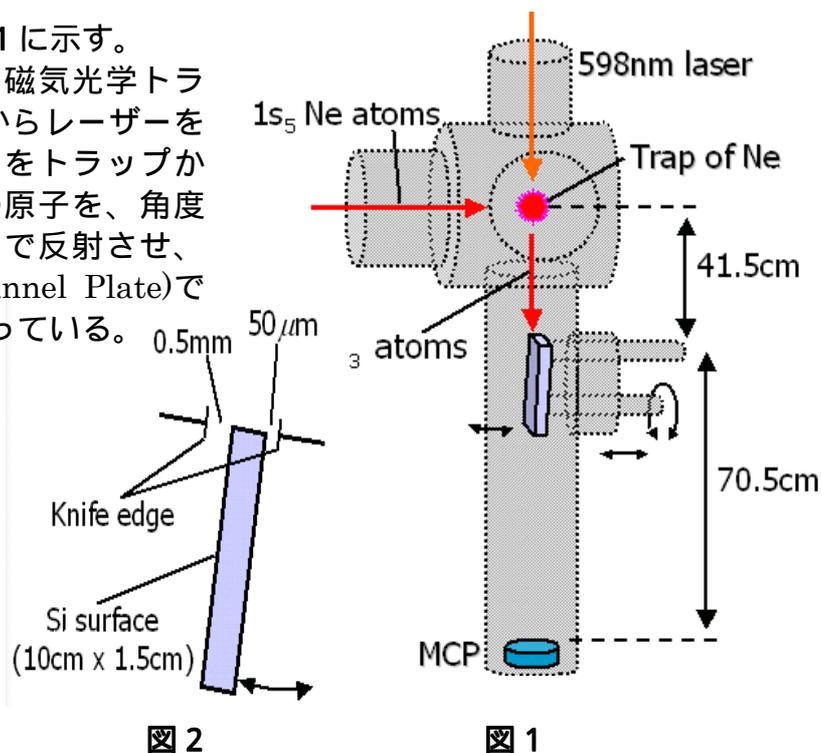


図2

図1

加工されたシリコンプレートの、角度と反射率の関係を図3に示す。

【実験】

ネオン原子を磁気光学トラップする。トラップされたネオン原子は、図4に示すように $50\mu\text{m}$ 程度の大きさがあり、平均的には0だが等方的に約 6cm/s の幅の速度分布をもっている。ここに上から 598nm のレーザーを当てると、ネオンは磁場の影響を受けない角運動量0の状態になり、トラップから外れて重力により落下し原子ビームとなる。しかし原子は速度分布を持っているため、落下する間に広がりが生じてしまう。そこで、落下中にわずかな角度をつけたシリコンプレートに反射させることにより、速度と高さの差を利用して原子を集光させる。

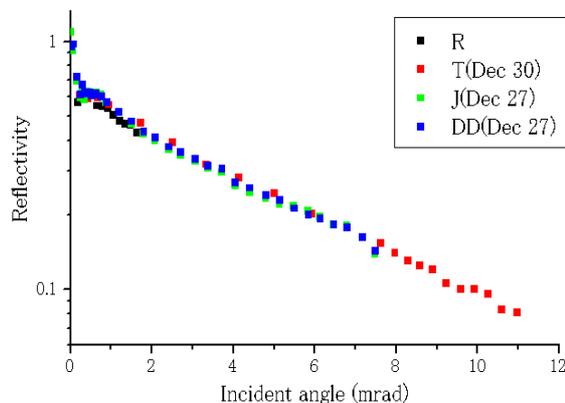


図3

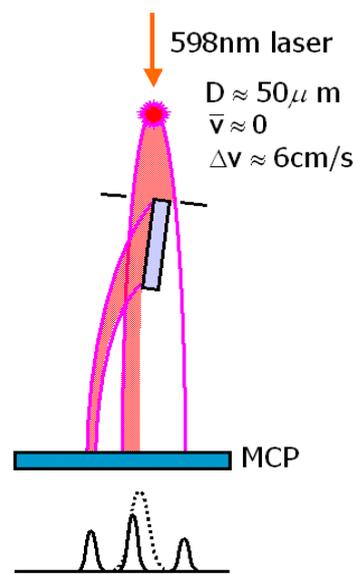


図4

【実験結果】

実験の結果を図5に示す。シリコンプレートの角度は $0\sim 10\text{mrad}$ 程度まで変えており、角度を変えていったときの、MCPで検出したネオン原子の位置と数を、色の違いで表してある。

矢印で示した部分がシリコンプレートの角度をつけない、つまりネオンを反射させないときの幅であり、角度をつけていくにつれて右側の方から反射していき、左へ落ちていることが分かる。

この図から、反射して落ちてきた原子は全て 0.5mm 程度の幅をもっており、角度による集光幅、および検出した数の違いはあまり見られないことが分かる。

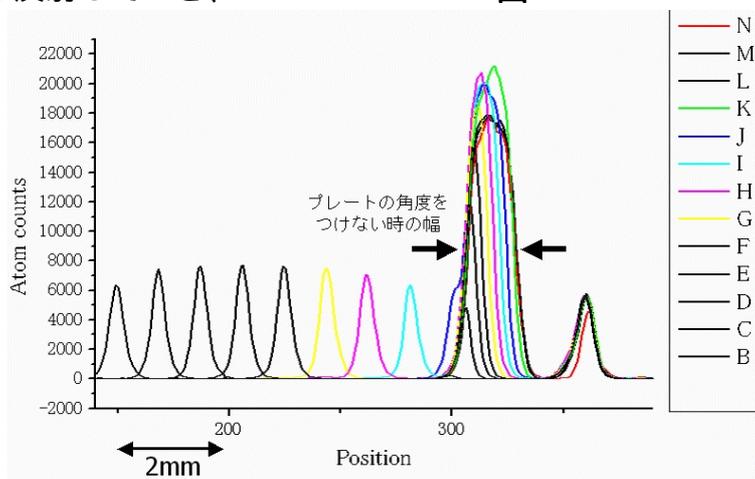


図5

【計算】

次に、計算上での値を、ニュートン力学を使って調べた。
点光源(トラップ)がプレート(中心)の真上にあると仮定して、**図6**のように各パラメータをとると、

$$|\vec{v}_1| = \sqrt{v^2 + 2gs} \quad , \quad |\vec{v}_2| = \sqrt{v^2 + 2g(s + x \cos \theta)}$$

$$\phi_1 = \theta - \tan^{-1} \left(\frac{v_{1x}}{v_{1y}} \right) \quad , \quad \phi_2 = \theta - \tan^{-1} \left(\frac{v_{2x}}{v_{2y}} \right)$$

$$\frac{v_{1x}}{v_{1y}} = - \frac{\sqrt{gr^2s + r^2v^2 + \sqrt{r^4(-g^2r^2 + 2gsv^2 + v^4)}}}{\sqrt{3gr^2s + 4gs^3 + r^2v^2 + 2s^2v^2 - \sqrt{r^4(-g^2r^2 + 2gsv^2 + v^4)}}$$

$$\frac{v_{2x}}{v_{2y}} = \frac{\sqrt{gr^2s' + r^2v^2 + \sqrt{r^4(-g^2r^2 + 2gs'v^2 + v^4)}}}{\sqrt{3gr^2s' + 4gs'^3 + r^2v^2 + 2s'^2v^2 - \sqrt{r^4(-g^2r^2 + 2gs'v^2 + v^4)}}$$

$$\left(r = \frac{1}{2} x \sin \theta, \quad s' = s + x \cos \theta \right)$$

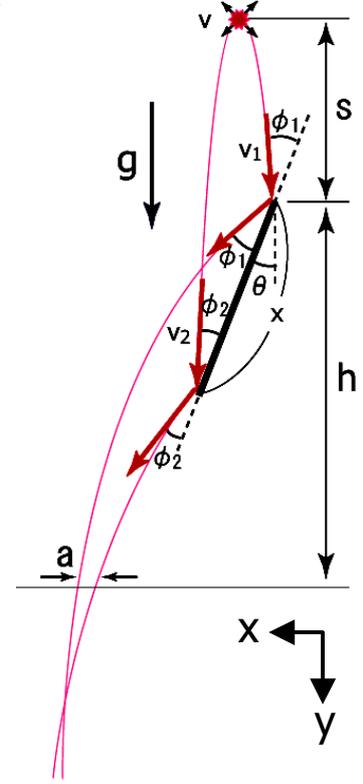


図6

以上の式を使って幅 a を求めると、

$$a = -x \sin \theta + \frac{1}{g} \left(-2gs \cos \phi_1 \sin \phi_1 - v^2 \cos \phi_1 \sin \phi_1 + \sqrt{2gs + v^2} \sqrt{2gh + 2gs \cos^2 \phi_1 + v^2 \cos^2 \phi_1 \sin \phi_1} \right) - \frac{1}{g} \left(-2gs \cos \phi_2 \sin \phi_2 - v^2 \cos \phi_2 \sin \phi_2 - 2gxc \cos \theta \cos \phi_2 \sin \phi_2 + \sqrt{2gs + v^2 + 2gxc \cos \theta} \times \sqrt{2gh - 2gxc \cos \theta + 2gs \cos^2 \phi_2 + v^2 \cos^2 \phi_2 + 2gxc \cos \theta \cos^2 \phi_2 \sin \phi_2} \right)$$

となる。

この式に、下に示した実験での値を代入し、角度 と高さ h を変数としてグラフを描くと、**図7**のようになる。

$$g = 9.8(m/s^2), \quad x = 0.1(m), \quad s = 0.415(m), \quad v = 0 \sim 6(cm/s)$$

赤いラインで示した部分は、実験の高さ($h = 0.715 \text{ m}$)での値である。

上のグラフは $v=1\text{cm/s}$ 、下のグラフは $v=6\text{cm/s}$ としたものであるが、2つのグラフにほとんど違いがないことが分かる。これは、初速に比べて重力の影響が十分に大きいためだと考えられる。

また、 $h=1.5\text{m}$ の辺りで角度によらず $a=0$ 、つまりフォーカスしていることが分かる。従って、今回の実験装置では高さを変えることはできなかったが、高さをかえることによって集光幅をより小さくすることができると予想される。

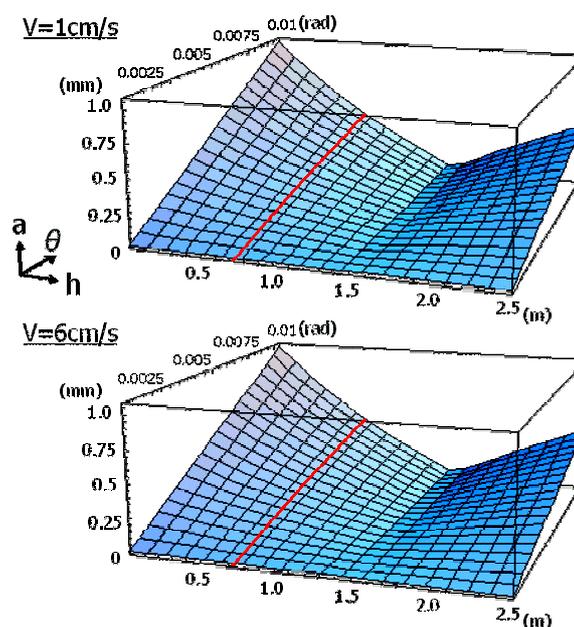


図 7

【考察】

実験の結果と比較すると、計算では角度をつけるにつれて幅が $0\sim 0.5\text{mm}$ 程度まで変化するのに対し、実験結果では角度によらず約 0.5mm の幅をもっていた。これは、計算では点光源を仮定したが実際には光源は有限の大きさ ($50 \mu\text{m}$) をもっていること、そして、光の回折による広がりのためだと思われる。

さらに、検出した数(図5での高さ)が角度によらない点については、角度をつけていくと反射率は落ちるが、その分プレートに当たる原子の数は増えるためだと考えられる。しかし、反射率は角度をつけるにつれて指数関数的に減少していくため、さらに角度をつけていくと、検出される原子の数は急激に減少していくと思われる。

【まとめ】

量子反射を使い、重力を利用することで、凸レンズとしての役割を果たす平面反射鏡をつくることができた。

高さの調整や、光源をより小さくすることができれば、さらに集光率を高めることが可能になるとと思われる。