

シリコン表面での原子の量子反射の測定

清水(富)研究室
溝井 弘子

1. 背景・目的

原子は粒子性ととも波動性を持っていることが知られている。数百 m/s(常温)で動き回っている原子にレーザー光を照射することにより、原子の速度を数 cm/s(数 μ K)に低下させることができ、また原子を狭い領域に閉じ込めることができる。このようなレーザー冷却・レーザートラップ技術の発達により、ド・ブロイ波長が長い(nm オーダー)原子が得られるようになり、原子を光ととらえた原子光学という分野が発展してきた。そこで本実験では、準安定状態 Ne 原子のシリコン表面に対する波動性による量子反射を観測し、反射率を測定した。

2. 原理

光が屈折率の異なる媒質の境界面に入射すると、その境界面において反射が生じる。原子も波動性を持つので、ポテンシャルが急激に変化する面で反射が生じると考えられる。

固体表面に原子が近づくと、固体表面にある原子との間にファンデルワールス力が働き、原子はこの引力によって固体表面に吸着またははね返される。しかし、原子を冷却することによって波長を nm オーダーとすると原子の波動性が大きくなり、ファンデルワールスポテンシャルの変化によって反射が生じる。そのためには、波長程度の長さで波数ベクトルが大きく変化するような急激なポテンシャル変化が必要である。

ポテンシャル中の波数ベクトルは

$$k = \frac{\sqrt{k_0^2 - 2mV}}{\hbar}$$

となる。 k_0 は固体表面から十分遠方での波数ベクトルで、 V はポテンシャルである。ポテンシャルの変化の急激さは波数ベクトルの変化で表される。

$$\phi = \frac{1}{k^2} \left| \frac{dk}{dz} \right| > 1$$

この時、原子は急激なポテンシャル変化を感じる。ポテンシャルを一般的なべき関数とする。

$$V = -\frac{C_n}{z^n} \quad (n > 2)$$

は最大値をとる。

$$\phi_{\max} = \frac{(n+1)(n-2)^{\frac{1}{2}}}{3^{\frac{1}{2}} n^{\frac{1}{2}}} \frac{1}{k_0 z_{\max}}$$

この時の固体表面からの距離は

$$z_{\max} = \left\{ \frac{(n-2)mC_n}{(n+1)\hbar^2 k_0^2} \right\}^{1/n}$$

であり、これは固体表面から z_{\max} 離れた距離で反射されることを示している。 $k_0 \rightarrow 0$ とすると $\phi_{\max} \rightarrow \infty$ となる。 ϕ_{\max} が無限大になるということは波数ベクトルの変化率が無限大になるということであり、反射率は 1 に近づく。つまり、固体表面への原子の入射速度 $v = \hbar k_0 / m$ が 0 に近づくると反射率は高くなると考えられる。また、ポテンシャル定数 C_n は固体表面の原子数密度に比例しており、密度を低くすると反射率は高くなると考えられる。

4. 実験

放電によって準安定状態 $1s_5$ に励起された Ne 原子に 640nm のレーザーを照射し、レーザー冷却、磁気光学トラップする。トラップされた原子に 598nm のレーザーを照射して $1s_5$ から $2p_5$ に励起させると、その半分は自然放出により $1s_3 (J=0)$ に落ちる。このとき $1s_3$ の原子は角運動量ゼロであるので、磁場の影響を受けずに自由落下し始める。落下した原子はトラップ位置から 45cm 下にあるシリコンプレートに入射し、反射が起こる。反射した原子はトラップ位置から 112cm 下にあるマイクロチャンネルプレート(MCP)上に落下し、その様子を CCD カメラで観察した。

反射率はシリコンプレートに対する原子の法線方向速度に依存している。シリコンプレートの角度をおよそ $0 \sim 16 \text{ mrad}$ 変化させることで、原子の法線方向速度を $0 \sim 42 \text{ mm/s}$ と変化させた。また、シリコンプレートは平面と凹凸面の 2 種類用いた。

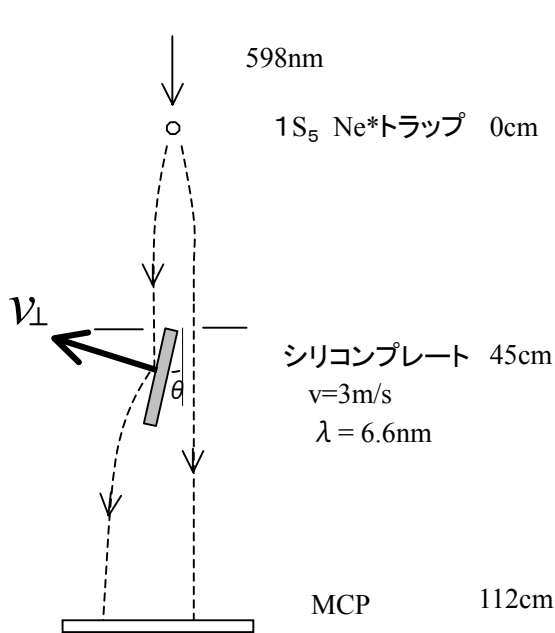


図 1 . 実験装置

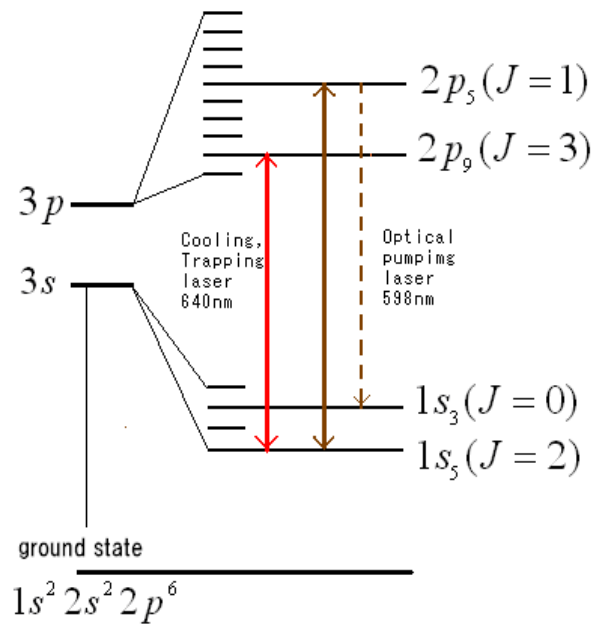
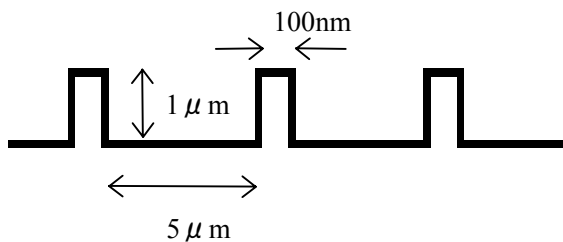


図 2 . Ne 準位図



4. 結果

マイクロチャンネルプレートを用いて検出した、シリコンプレートで反射し落下した原子の像である。図 4(a)はプレートの角度 θ が約 5mrad、図 4(b)は約 10mrad である。角度を大きくしていくと、反射した原子を表す θ のラインが読み取りにくくなった。

ポテンシャル変化で反射を起こさなかった原子は、最後には固体表面のポテンシャル障壁によって反射される。角度 θ が大きいと原子の法線方向速度が大きくなるので、ポテンシャル障壁で反射される原子が多くなる。その状態は図 4(b)で、反射された原子は MCP 上に落下していると思われるが、(b)からは読み取ることはできない。角度 θ を小さくし法線方向速度を小さくすると(b)ではない θ が現れる。これより θ はポテンシャル変化によって反射した原子を表すと考えられる。

θ と θ の比をとって反射率とした。

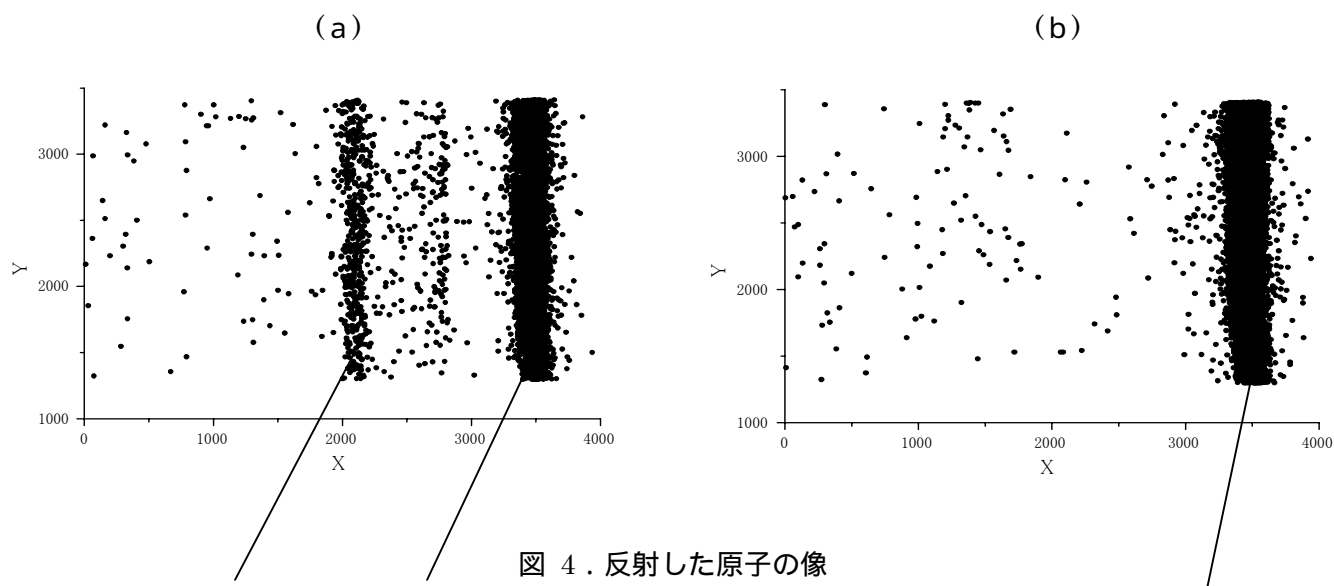


図 4 . 反射した原子の像

シリコンプレートで反射した原子 直接落下した原子

直接落下した原子

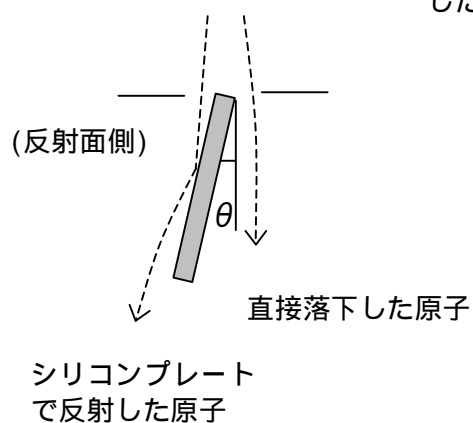


図 5 . シリコンプレート

図6は、平面と凹凸面のシリコンプレートにおける反射率である。角度 θ が小さくなるほど反射率は高くなる。また、平面より凹凸面のシリコンプレートの方が高い反射率であり、減少率が小さいことが読み取れる。

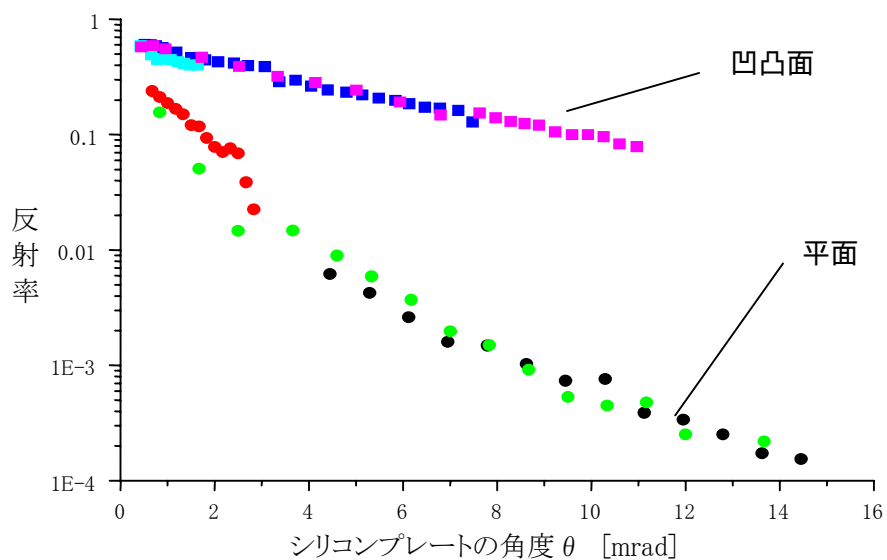


図6. 反射率

5. まとめ

波動性による量子反射を観測した。原子の速度が小さいほど反射率は高く、また固体表面の原子密度が小さい方が反射率が高い、という結果を得た。