

中性原子の量子反射による回折の研究

電子物性工学科 磯村 章彦

1 目的

原子は波動性を持つがその波長は常温では極めて短く、その波動性に基づく干渉や回折の現象は簡単には観測できない。しかし、近年レーザートラップの技術が進歩し、ド・ブロイ波の長い原子が得られるようになった。そこで原子を波動と考え光学と対応させた、原子光学と呼ばれる研究分野が発展してきた。

我々の研究室では、レーザー冷却及びレーザートラップの技術をもちいて、約 $500 \mu\text{K}$ という超低温、つまり非常に低速な原子が得られる。そこで、本研究室では、トラップを原子源、自由落下する原子を原子線として今まで液体ヘリウム表面上での水素の反射により観測されてきた量子反射が、固体表面上でも観測できることと、現在使用できる技術を使い、色々な距離においての中性原子と固体表面の相互作用の研究により、波動性による表面反射を用いた原子光学素子の設計に有用な基本情報を得ることを目的とする

2・実験原理

原子の波長は、通常 オーダーであり、この時、原子は粒子性のためにファンデルワールス力により引きつけられ最終的には固体表面のポテンシャル壁に衝突して散乱又は吸着される。冷却により波長を nm オーダーとすると波動性を大きくすることができる。この結果原子の波動性が大きくなり反射が、起こる。これが、量子反射である。この時反射が起こる条件は、まず、波数ベクトルが固体表面で

$$k = \sqrt{\left\{ k_0^2 - \frac{2mu_{\text{int}}}{\hbar^2} \right\}}$$

である。ここで、 k は固体表面から無限に離れたときの波数ベクトル、 u_{int} は古典的吸引ポテンシャルを表す。この時、

$$f = \frac{1}{k^2} \frac{dk}{dr} > 1$$

の条件をみたすとき反射が起こる。ポテンシャルの公式が

$$u_{\text{int}} = -\frac{c_n}{r^n}$$

であるので、 f は有限の値 f_{max} をとる。このとき、反射位置は

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

となり、 $n > 2$ より、 $k_0 \rightarrow 0$ とすると f_{max} は無限大になるので、反射は、固体表面へ

の法線方向の衝突速度 $v_n = \frac{\hbar k_0}{m}$ がゼロに近づくのと同様に 1 に近づくことが期待できる。

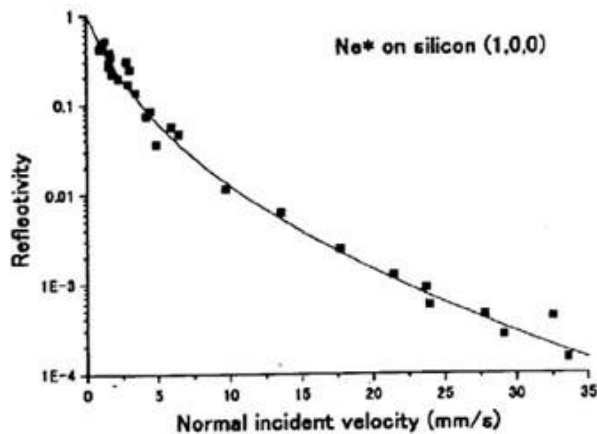


図1のグラフのように、速度が1mmのとき反射率は30%以上になる。この現象をふまえてシリコンの回折格子を使用し原子の回折を観測した。

図1. 速度と反射率の関係

3・実験方法

放電により準安定状態 $1S_5$ へ励起された Ne 原子は 640 nm のレーザーにより $1S_5$ と $2P_9$ との間の遷移でレーザー冷却、レーザートラップされる。トラップされた原子は 598 nm のレーザーによって $1S_5$ から $2P_5$ に励起され、自然放出により半分は $1S_3$ に落ちる。このとき $1S_3$ の原子はトラップのサイクルから外れ自由落下し始める。また、 $1S_3$ の準位は $J = 0$ であり、トラップコイルや磁場やその他の影響を受けずに、その軌道は初速度と重力のみにより決定される。装置の概略図は、図2に示す。トラップされた原子は 598 nm のレーザーによってトラップのサイクルから外れ、自由落下し始める。そして、トラップの位置から 46 cm 下にある回折格子に衝突して、反射及び回折が起こる。その後反射された原子は、トラップ位置から 112 cm 下にあるマイクロチャンネルプレート (MCP) 上に 0 次及び 1 次の回折像をつくる。実験で得られた回折像は図3で示す。

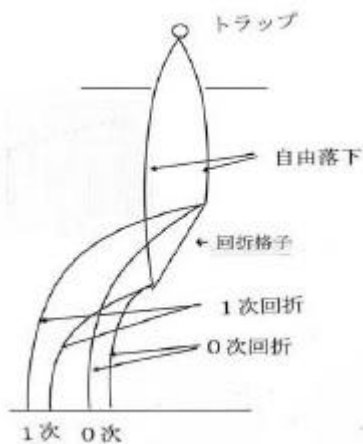


図2・実験装置

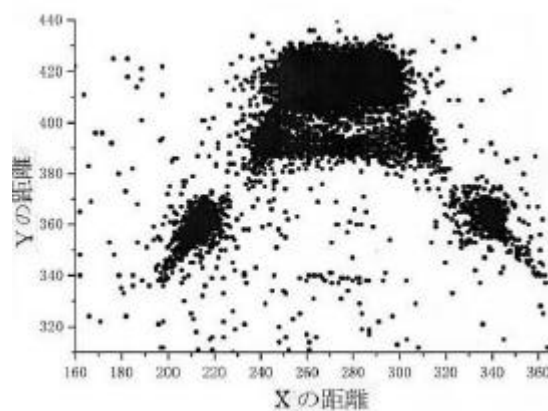


図3・回折像

今回反射が起こるような速度を得るために原子を回折格子になるべく浅く入射させることで、回折格子に法線方向に対して低速を得た。また、今回使用した回折格子は図4で示す。

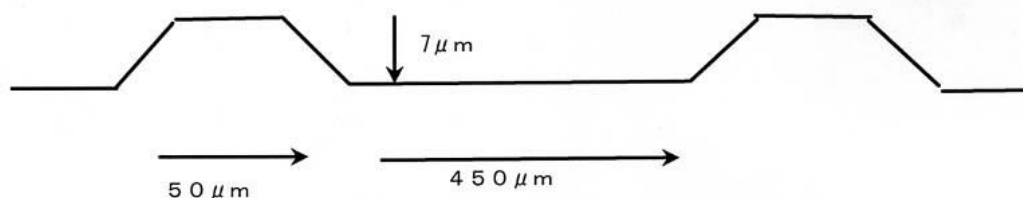


図4・回折格子

4・解析

トラップの位置からシリコンの回折格子までの飛行時間と速度

$$t_1 = 0.302 \text{ s}$$

$$v = 3.0 \text{ m/s}$$

トラップの位置からMCPまでの飛行時間

$$t_2 = 0.478 \text{ s}$$

回折格子からMCPまでの飛行時間

$$t_{2-1} = 0.172 \text{ s}$$

トラップ位置から0次回折像までの距離

$$l = 2000 \mu\text{m}$$

これより、入射角は 89.89° となる。

次に、1次の反射角を考える。回折格子における原子波の光路差は、図5のようになる。

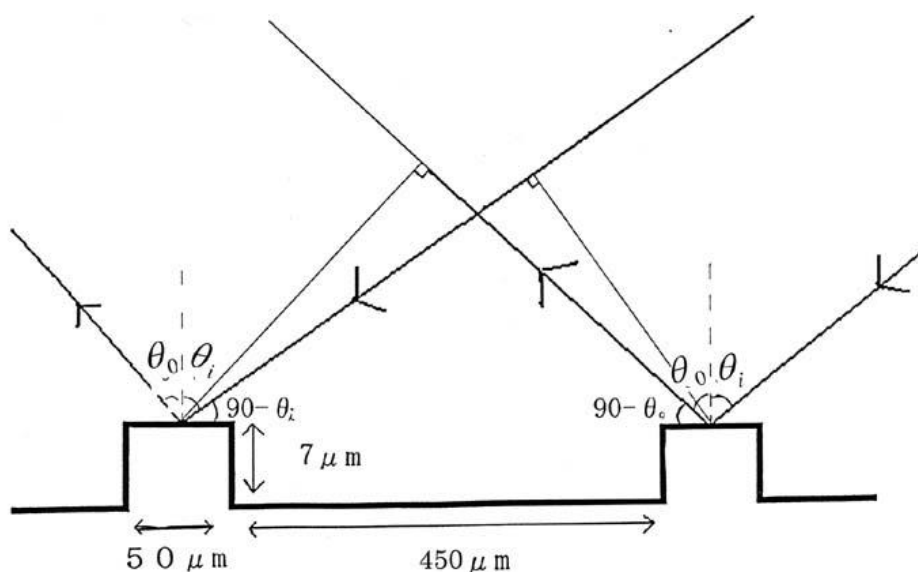


図5・回折格子における光路差

入射時の光路差

$$500\mu\text{ m} \times \cos(90 - q_i) = 500\mu\text{ m} \times \sin q_i$$

反射時の光路差

$$500\mu\text{ m} \times \cos(90 - q_0) = 500\mu\text{ m} \times \sin q_0$$

よって、全体の光路差

$$500 \times 10^{-6} (\sin q_0 - \sin q_i)$$

この式がネオンの波長と等しくなり、また、ネオンの波長は下の式より

$$l = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{\frac{20.18 \times 10^{-3}}{6.02 \times 10^{23}} \times 3.0} = 6.593 \times 10^{-9} (m)$$

ネオンの波長が 6.593 nm となるので、反射角は、89.68° となる。

これより、1次回折の計算値は 3963 μm となる。実測値は 3945 μm となっている。

5. まとめ

結果として、原子の波動性による回折像が観測され、原子波の波動性が確認できた。

今後、より良い回折格子の製作をすること、反射強度及び反射率を求めることが課題となる。