

固体表面における超低速準安定状態ヘリウム原子ビームの反射

電気通信大学大学院 電気通信学研究科 量子・物質工学専攻 清水研究室

南 聖子

背景

波動の基本的性質には回折、干渉に加えて屈折率の境界面での反射がある。これはインピーダンス不整合に起因する反射である。質量を持った粒子の場合、ポテンシャルが急激に変化する面で粒子波が反射を起こすことを意味するが、この種の反射が独立して観測にかかる現象として議論されることは、近年まで全くなかった。これは原子波は凝縮体中をコヒーレントに透過しないため、また室温原子の波長は pm 程度であるため、波長程度の距離で波数ベクトルが大きく変化するような急峻なポテンシャル変化を自由空間に作る事が全く不可能なためであった。ところが 1970 年代ごろから超流動液体ヘリウム表面の物性、特に表面における素励起過程を研究する目的でヘリウムあるいは水素原子の反射率を測定する研究が行われている。その過程で充分低速な原子に対しては、液体表面近くに働くファンデルワールス引力によって反射が起こってもよいことが認識された。その後ヘリウム原子や水素原子の反射係数や吸着係数の衝突速度依存性の実験から、この種の反射の存在が確認され量子反射と呼ばれるようになった。

レーザー冷却技術の進歩により極低温の中性原子集団を得られるようになり、原子波の波長を nm 程度まで伸ばすことが可能となった。この技術を利用して、F.Shimizu らは極低温の準安定状態ネオン原子の量子反射が固体表面でも起こることを初めて実証した。従来の研究で粒子の波動性は回折と干渉により検証されてきたが、量子反射が観測されたことで波動の基本的性質である回折、干渉、反射の全てにおいて粒子の波動性が検証できた。量子反射による反射率は粒子の速度が速くなると急速に減少するので、通常は実用的な反射鏡として使うことはできず反射率を大きくする必要があった。その後 F.Shimizu らはファンデルワールスポテンシャルの係数が小さくなるほど反射率が大きくなることに気づき、固体表面を平坦面ではなく回折格子状に ridge をつけ、実効的な表面密度を小さくすることで反射率を格段に改善できることを実証した。さらに H.Oberst らは質量が小さいと高い反射率が得られることに気づき、原子線源を準安定状態ネオン原子(Ne*原子)から準安定状態ヘリウム原子(He*原子)に変え、約 10 倍速い速度で入射してきた原子に対して Ne*原子の場合と同様な反射率を得ることができた。ヘリウム原子はネオン原子と同様に希ガスであるため、固体表面に吸着せず表面のポテンシャルが変化しないので繰返し同じ条件で測定できる利点がある。

本研究の目的

我々はレーザー冷却技術を使い準安定ヘリウム原子を超低速にし、波長を数ナノメートル程度まで伸ばすことで、固体表面における超低速準安定状態ヘリウム原子の原子波反射を観測している。これまでにシリコンプレート表面に ridge をつけて表面の実効的な密度を下げたところ強い反射が観測できた。本実験ではさらに高い反射率を得るために量子反射だけではなく磁気ポテンシャルによる反射に注目した。そこで固体表面に金属膜を蒸着しさらに強い反射を得ることを目的とした。本研究では量子反射に加え磁気ポテンシャルによる反射について報告する。

測定に使用したプレート

本実験では図:1 の様な 6 種類のサンプルを用意した。サンプル番号 a、b、c を一枚のシリコンプレート表面に加工したものを『プレート A』、サンプル番号 1、2、3 を一枚のシリコンプレート表面に加工したものを『プレート B』とした。これらのシリコンプレートは幅 2cm、長さ 10cm、厚み 0.5mm の大きさである。

プレート名	ニッケル蒸着回数(回)	サンプル番号	L(μm)	d(μm)
プレート A	1	a	400	200
		b	600	300
		c	800	400
プレート A'	2	a'	400	200
		b'	600	300
		c'	800	400
プレート B	0	1	3	0.5
		2	1と3を210μmづつ繰り返したもの	
		3	6	0.1
プレート B'	1	1'	3	0.5
		2'	1'と3'を210μmづつ繰り返したもの	
		3'	6	0.1

図 1:プレートの説明

プレート A はフォトレジストを使用し自主製作した。プレート A の表面は周期 L の回折格子状パターンにニッケルを蒸着してある。ニッケルの膜厚は 10nm である。さらにプレート A の全面にニッケルを蒸着したものを『プレート A』とし、サンプル番号 a、b、c はサンプル番号 a'、b'、c'とした。プレート A とプレート A'の断面を図:2、図:3に示す。プレート A の加工してある表面を真上から見ると、図:4 のように $L=2\delta$ が 400 μm, 600 μm, 800 μm の 3 種類のパターンがある。製作方法は図:9 に示す。プレート B の製作は ridge は数百 nm 程度の精度が必要なため、NEC の協力を得て電子線リソグラフィーで行ったもらった。プレート B の全面にニッケルを蒸着したものを『プレート B』とし、サンプル番号 1、2、3 はサンプル番号 1'、2'、3'とした。プレート A とプレート B を一緒にニッケル蒸着したので、プレート A'とプレート B'には

同量のニッケルが蒸着している。膜厚は 10nm である。プレート B、プレート B' の表面は周期 L の回折格子状に ridge を加工してある。この ridge 構造は図:5、図:6 に示すようにトタン屋根の様なものであり、写真を図:7、図:8 に示す。プレート B の加工してある表面を真上から見ると、プレート A のように 3 種類の ridge がある。

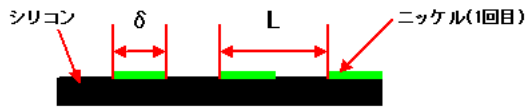


図 2:プレート A の断面図

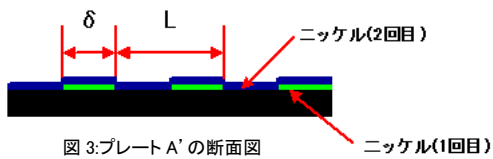


図 3:プレート A' の断面図

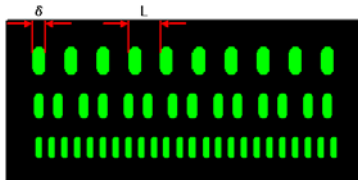


図 4:プレート A の鳥瞰図

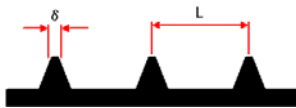


図 5:プレート B の断面図

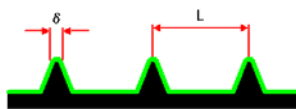


図 6:プレート B' の断面図

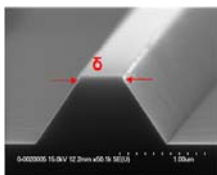


図 7:サンプル番号 1

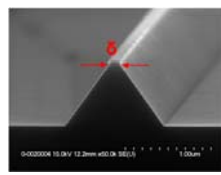


図 8:サンプル番号 3

シリコンプレート上のパターンの製作方法

フォトレジストでシリコンプレート表面を加工しその上にニッケルを真空蒸着した。パターンの製作方法を図:9 に示す。

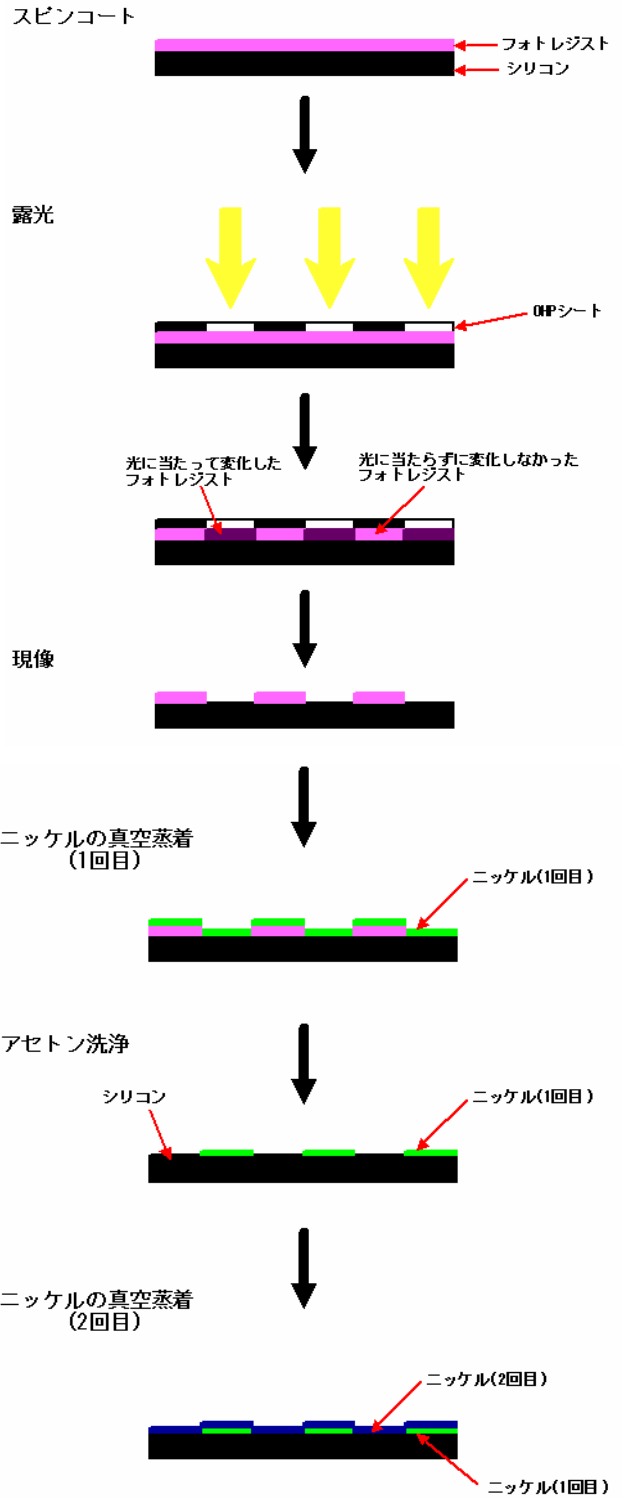


図 9:パターンの製作方法

実験方法

MOT に push 光を入射することで取り出された原子を用いて観測チャンバーで量子反射の実験を行った。図:10 は量子反射の測定系である。測定の手順は以下のようである。

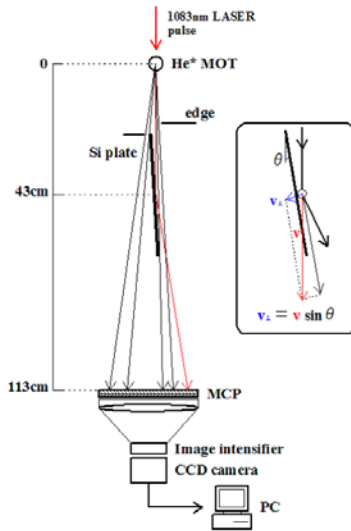


図 10:量子反射の測定系

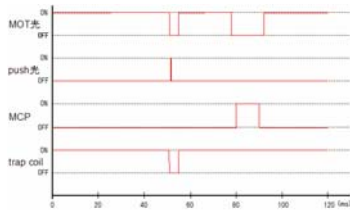


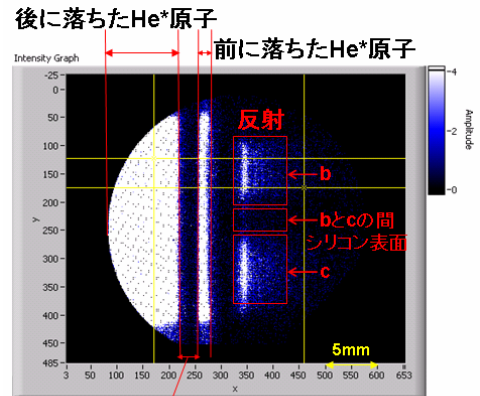
図 11:タイミングチャート

1. He*原子を磁気光学トラップ(MOT)する。
2. push 光を当て MOT から He*原子を取り出す。パルス時間 Δt は 0.1~1ms である。
3. He*原子はプレート表面で量子反射される。He*原子とプレートのなす角を θ とすると、プレートに対する法線方向入射速度は $v_{\perp} = v \sin \theta$ である。プレートに入射した原子の法線速度は、プレートを設置する角度、He*原子のMOTから押す光の強度と照射時間で決まり、さらにMCPのゲートを開けるタイミングとゲート時間を制御し速度と速度広がり制御している。この一連の測定のタイミングを図:11 に示す。
4. マイクロチャンネルプレート(MCP)で He*原子の位置を検出し、加速された電子が蛍光板に衝突して生じる蛍光を Image intensifier で増強し CCD で取り込み位置を記録し、多数回の積算を行う。He*原子の内部エネルギーは 19.8eV と大きい、プレートに当たると内部エネルギーが MCP では検出できないくらい小さくなるため、MCP では He*原子のみ観測できる。量子反射の実験を行プレートの上にはプレートのフォルダーとは独

立に移動が可能であるエッジがあり、プレートの前に落ちた原子とプレート近傍で反射された原子を区別できるようになっている。

実験結果

図 11~13、17、18 は MCP による観測結果を CCD カメラで取り込み PC で積算した画像である。画像の見方は図:12 に示した。円の左端から、プレートを通った原子、プレートの影、プレートの前に落ちた原子、反射、回折...である。また He*原子の強度分布は図:12 の右端のメーターのように色分けして示している。ここで白く見えるところに He*原子が多く来たことを示している。結果をプレート A、A'、B、B' の順に示す。



後に落ちたHe*原子

前に落ちたHe*原子

プレートの影

図 12:プレート A の MCP 画像

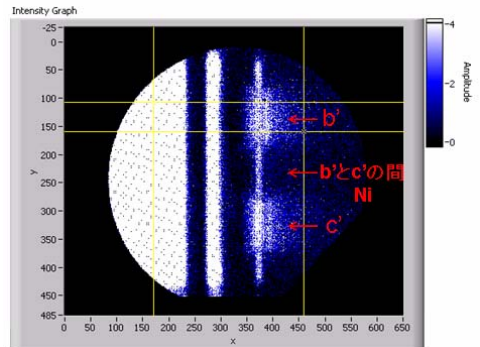


図 13:プレート A' の MCP 画像

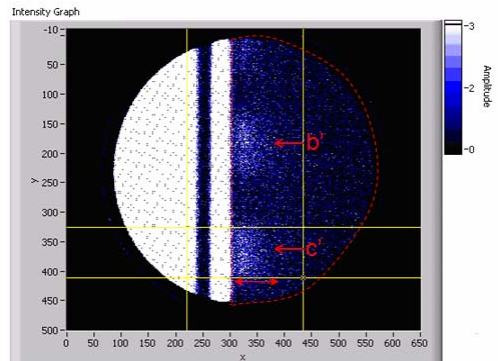


図 14:プレート A' の 14ヶ月後の MCP 画像

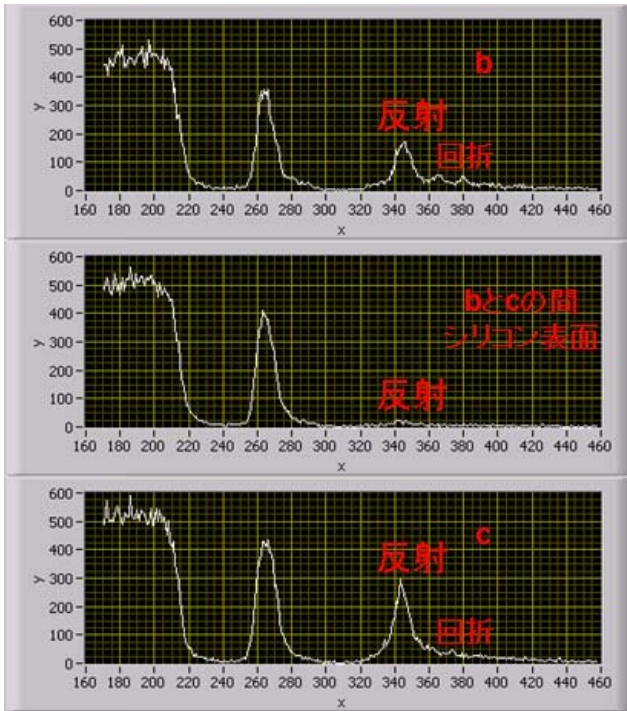


図 15:プレート A の強度分布

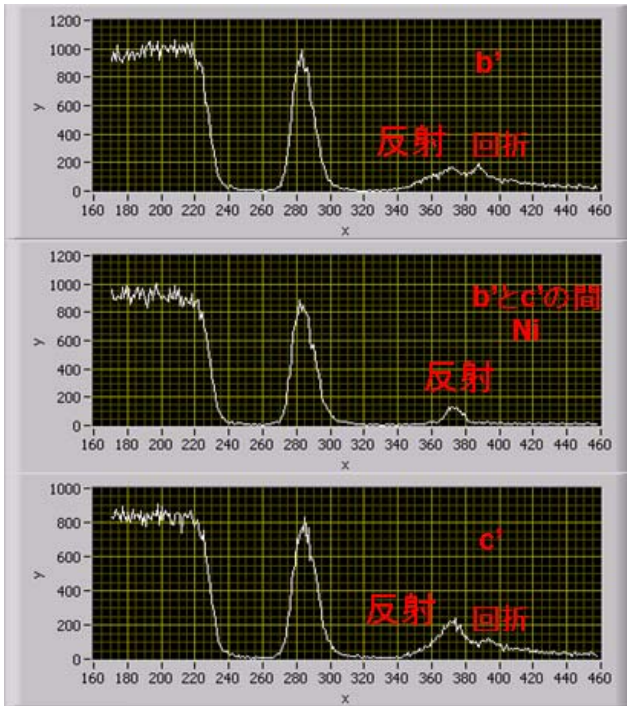


図 16:プレート A' の強度分布

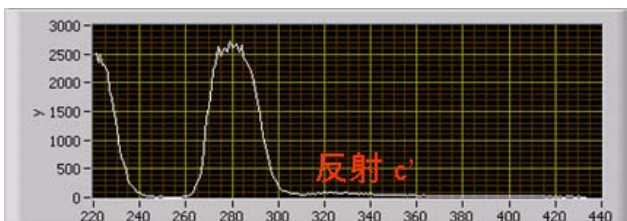


図 17:プレート A' の 14 か月後の強度分布

図:15～図:17はそれぞれ図:12～図:14を黄色の4本カーソルで囲んだ部分のみをy軸方向に積算した強度分布である。例えば図:15(b)においてx軸は図:12のx軸と同一であり、MCPの位置を示している。図:15(b)のy軸は図:12の黄色いカーソルで囲んだ部分についてy軸方向に積算した強度を示している。図:12のプレートの前に落ちたHe*原子による幅は図:10のエッジの位置により決まる。エッジをプレートに対して平行にセットできていないとプレートの前に落ちたHe*原子による幅は図:12の様に長方形ではなく、エッジの陰の影響により図:18の様に欠けてしまう。そこで反射の強さは図:15のプレートの前に落ちたHe*原子の強度ではなく、プレートの上に落ちたHe*原子の強度と比較することでエッジ設置状況によらずに、各パターンからの反射の強さを比較することができる。またa,b,cの3つのパターンの間隔は広く、一度にMCPで観測できなかったため反射の強いbとcの現象がよく分かるようにbとcをMCPの中央に来るようにフォルダーを移動して観測した。プレートA'蒸着後のデータを観測した後、MCPでMOTの生成が確認できなくなった。そこでMCPの画像をモニターしながらMOTの生成を目指した。ただし現在はMOTが生成されていても位置が悪いとMCPで確認できなくなることが近赤外カメラで確認できているが、当時は近赤外カメラがなかったためMOTの生成はMCPでしか確認することができなかった。その結果、MOTチャンバーとDetectチャンバーの周りにコイルを巻き電流を流してガイド磁場をつくりMOTから取り出されてHe*原子が効率よくDetectチャンバーに行くようにしないとMOTができていてもMCPでは検出できないことがわかった。またMCPでMOTが観測できるようにMOTの4本ビームの強度、偏光、周波数、位置を変えてMOTが有効に働くようにした。従来、プレートAやプレートA'蒸着直後は図:11のような測定条件で、積算時間が1～2時間でMCP全面で検出した総He*原子数は $10^5 \sim 10^6$ 個程度であった。しかし、再度MOTができてから図:11と同様の測定条件ではMCPで検出した総He*原子数が激減し、プレートの位置を変化させても反射が観測できなかった。そこでpush光のパルス幅を1～20ms程度まで長くし、MOT光をCWに変えて測定した。

プレート A

L=0.4～0.8mm のニッケルパターンが蒸着しているところから強い反射が観測できた。bよりもパターンの細かいcから強い反射が得られた。またbは2次回折、cは1次回折まで見ることができた。パターン構造の上にニッケルを蒸着したことで固体表面には不均一磁場が生じ、磁気ポテンシャルの勾配により

磁気反射したと考えられる。

プレート A' 蒸着直後

パターン構造の上ではなく平面上に蒸着されているニッケルは、一様な磁場をつくと予測していたため磁気反射は起きないと考えていた。しかし磁化反射が観測されたのでプレート A' ではニッケルは磁化がばらばらな方向に向いて蒸着されている不均一磁場が生じたと推察される。

プレート A' 14 ヶ月後

固定状況は変えずにプレート A' を試料チャンバーの中に入れておいた。蒸着直後に比べ、反射が弱く、反射の幅が広く、反射の近くのバックグラウンドが高くなった。またパターン構造の上ではなく平面上に蒸着されているニッケルからの磁気反射が観測できなくなった。以上の結果から、ロータリーポンプの油が表面に付着した等のことにより、ニッケルは安定な金属ではあるが膜厚が 10nm と非常に薄いためにニッケル層の酸化が進み完全に酸化して磁気反射が起きなくなったと考えられる。また表面を覆っている酸化膜が成長し、10nm のニッケル層より厚くなったため、表面近傍での磁気ポテンシャルが弱くなり磁気反射が起きなくなったとも考えられる。その他の可能性としては MOT の個数や位置が変わって反射が弱くなったとも考えられる。

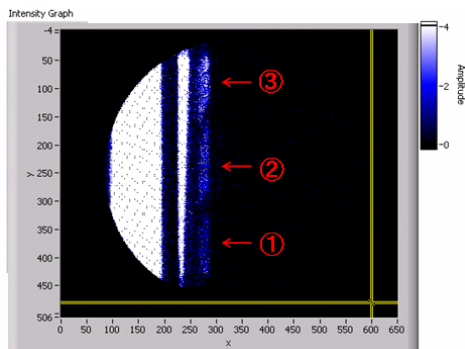


図 18: プレート B の MCP 画像

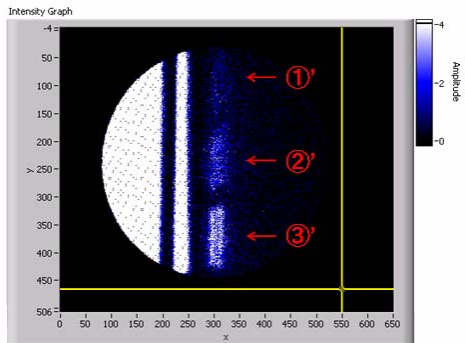


図 19: プレート B' の MCP 画像

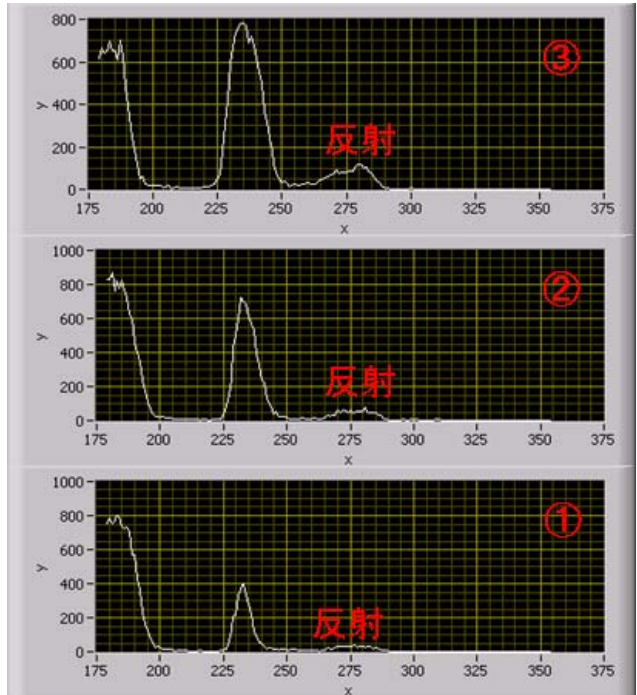


図 20: プレート B の強度分布

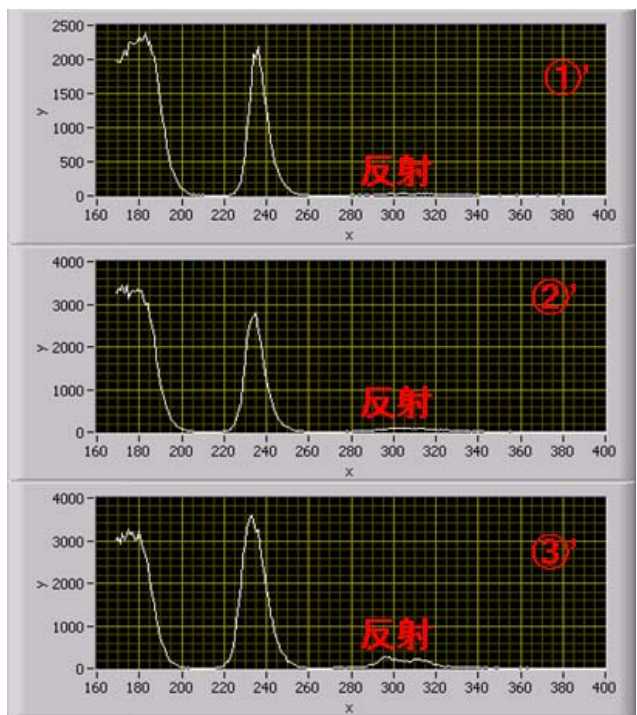


図 21: プレート B' の強度分布

プレート B はプレート A の測定以前に測定したので、測定条件は図:11 である。プレート B' はプレート A' と同時に真空蒸着した。プレート B' はニッケル蒸着 18 ヶ月後に MOT 光と四重極磁場を CW にし、push 光のパルス幅を 1ms にして測定を行った。図:18 のプレートの前に落ちた He* 原子の画像 (X 軸の 230 あたり) が ③ から ① の方向に行くにつれ細くなっている。これは図:10 のエ

ツジがプレートに対して平行に設置できていなかったためである。そこで、プレートの後に落ちた He*の強度をもとに各 ridge による反射の強さを比較する。

プレート B

実験結果から①より③から強い反射を観測した。①と③について、 L と δ の比から表面の実効的な密度を比べてみると① $\delta/L=0.5/3$ 、③ $\delta/L=0.1/6$ である。表面の実効的な密度は δ/L に比例するので、①より③の表面の実効的な密度が小さいと言える。理論より表面の実効的な密度が小さくなると強い量子反射が起きることが予測されていて、今回実験的にも表面の実効的な密度が小さいプレートからは強い量子反射が得られることがわかった。なお②においては $210\mu\text{m}$ ごとに①の ridge と③の ridge が並んでいるので、③の影響を受けて①より反射が強くなったと考えられる。また反射の形が長方形ではなくひし形になっている。

プレート B'

プレート B'の反射の強度はプレート B(ニッケルがついていないとき)と比べて 8 割程度であり、反射の幅も 1mm 未満ではあるが広がった。プレート A、プレート A'はニッケルパターンがあることで強い磁気反射が確認できたのに対しプレート B の反射はあまりにも弱く、期待していたニッケルによる反射率の向上はなかった。プレート A'の結果からパターン構造の上ではなく平面上に蒸着されているニッケルは磁化がばらばらな方向に向いて蒸着されているために不均一磁場が生じ、磁気反射が起るはずだが確認できなかった。以上のことから、表面の状態が変化してニッケルの効果がなくなり磁気反射は起きなくなったと考える。プレート B'は Detect チャンバー内に長時間入れていなかったため、ロータリーポンプによる油膜はついていない。そこで酸化膜が表面を覆っているために表面近傍での磁気ポテンシャルが弱くなり磁気反射が起きなくなったと考えられる。またプレート B よりも反射が弱くなったのはニッケルと酸化膜により表面で急峻なポテンシャルをつくっていた ridge が滑らかになり量子反射の効果が弱くなったと考えられる。また反射の形が長方形ではなくひし形になっていて、プレートを固定し直したところひし形の向きが変わり歪みの程度も変化した。このことからプレートがフォルダーからストレスを受け歪んでいることが疑われる。

まとめ

量子反射について

回折格子状の ridge をつけ表面の実効的な密度を小さくすることで理論からの予測通り反射が強くなることがわかった。固体シリコン表面に ridge を加工したプレートからは、安定した反射得られたため、原子波に対して実用的な反射率を持つ鏡の開発に繋がるのが充分期待できる。

磁気反射について

周期が $0.4\sim 0.8\text{mm}$ のニッケルパターンによる不均一磁場から磁気反射が観測できた。このとき 0 次の反射以外にも 2 次までの回折が観測された。またニッケルがパターン構造の上ではなく平面上に蒸着されているときでも、磁化反射が観測されたので、ニッケルは磁化がばらばらな方向に向いて蒸着されていると推察される。しかし長時間、真空中または空気中にニッケルを蒸着したプレートを置いておくとニッケルは安定な金属ではあるが膜厚が 10nm と非常に薄いため、ニッケル層の酸化が進み完全に酸化して磁気反射が起きなくなると考えられる。また別の解釈では表面を覆っている酸化膜が成長し、 10nm のニッケル層より厚くなったため、表面近傍での磁気ポテンシャルが弱くなり磁気反射が起きなくなったとも考えられる。そこで「ニッケル層の上にできたであろう酸化膜を除去する手段を確立し測定する」、または「ニッケル層の充分厚い試料を制作し測定する」ことでなぜ磁気反射しなくなったのか検証する必要がある。さらに今回測定した表面に ridge を加工しニッケルを蒸着したプレートはニッケル蒸着後から実験をするまでに時間が経っていたので、改めてプレートを作成し直しニッケル層の新鮮な状態で測定を行ない、磁性体による磁気ポテンシャルと固体表面による引力ポテンシャルがどのように反射に影響を及ぼすのか検証したい。また、ニッケル以外の磁性体でも同様の測定をして磁気反射に違いが起きるか検証してみたい。今後、シリコンプレートに磁性体を蒸着したプレートから、強い磁気反射が長期間において安定して得ることができれば、原子波に対して実用的な反射率を持つ鏡の開発に繋がるのが期待できるばかりではなく、磁区構造を観測する手段としての応用も期待できる。