

## DIOS/FXT 鏡面物質の設計

中道 蓮 (名古屋大学大学院 理学研究科)

## Abstract

小型衛星 DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) は、 $10^5 - 10^7$  K 程度の銀河間中高温プラズマ (WHIM: Warm-Hot Intergalactic Medium) の観測を目的としている。面輝度が低く、数十平方度に広がったこの天体を観測する上で  $100 \text{ cm}^2 \text{ deg}^2$  の高い  $S \cdot \Omega$  (有効面積  $\times$  視野) が要求される。そこで開発されたのが 4 回反射型 X 線望遠鏡 (FXT: Four-stage X-ray Telescope) である。4 回反射を用いることで実現される短焦点距離、大口径の望遠鏡が  $S \cdot \Omega$  を向上させる。

本研究は、これまでの X 線望遠鏡に用いられてきた Au や Pt の表面に、別の物質を成膜することで DIOS 衛星の観測波長帯 0.3 – 1.5 keV での反射率を向上させることを目的とする。この候補として、0.6 keV 付近で高い反射率を持つ Ni に注目した。しかし、今回用いる磁気スパッタ法で強磁性体を成膜する事は難しい。そこで、Ni の強磁性を緩和させるために、バナジウムを 10% 混ぜた NiV を成膜した。また、NiV の表面に炭素を成膜することで、Ni の L 吸収端 (830 eV) による反射率の低下を抑えた。こうして作製したサンプルの、8 keV の X 線に対する反射率の入射角依存性を測定することで、各層の界面、表面粗さと膜厚を間接的に測定した。この結果から、0.3 – 1.5 keV での反射率を計算し、Au または Pt の単層膜と比較すると、入射角が  $2.9^\circ$  となる最も外側の反射鏡では、Ni が臨界エネルギーを迎える 0.8 keV よりも高いエネルギーでは反射率が低下した。しかし、入射角が  $1.0^\circ$  となる内側の反射鏡では全観測波長帯に渡って反射率が向上した。特に、0.6 keV 付近の酸素の輝線領域では 10% の向上が期待される。

## 1 Introduction

## 1.1 DIOS 衛星

現在の宇宙のエネルギー密度は、約 70% のダークエネルギーと約 30% の物質から成り、また物質全体の約 80% はダークマターと呼ばれる直接観測する事ができない未知の粒子であるとされている。ダークエネルギーとダークマターを除いた残りが通常の物質 (バリオン) であり、宇宙のエネルギー密度のたった 4% を占めるにすぎないことがわかっている。しかし、バリオンの観測こそがダークマターやダークエネルギーの存在とその性質をわれわれに提示してきたのであり、今後もバリオンの観測から多くの情報がもたらされるだろう。ところが、理論的に予想されるバリオンの 60 ~ 80% は未だ観測されていない。これらのダークバリオンの大部分は銀河間中高温プラズマ (WHIM) と呼ばれる  $10^5 \sim 10^7$  度の高温のガスであると考えられている。この WHIM から放射される赤方偏移を受けた酸素の輝線から、比較的存在

量の多い Mg の輝線までの 0.3–1.5 keV の軟 X 線観測を目的として、小型衛星 DIOS の開発が進められている。

$S \cdot \Omega$ (視野 $\times$ 有効面積)	100 $\text{cm}^2 \text{ deg}^2$ at 0.6 keV
空間分解能	5 分角以下
X 線撮像分光素子	
エネルギー範囲	0.3–1.5 keV
エネルギー分解能	2 eV
検出器サイズ	10 mm $\times$ 10 mm 以上
ピクセル数	12 $\times$ 12 以上

表 1: DIOS 衛星計画の要求性能

## 1.2 4 回反射型 X 線望遠鏡

WHIM から放射される軟 X 線は面輝度が低いためほとんど観測されておらず、この観測のためには

広視野・大有効面積の光学系が求められる。DIOS 衛星に適した光学系として、広い視野と大有効面積が実現可能な 4 回反射型 X 線望遠鏡が採用された。一般に X 線領域では屈折率が 1 よりもわずかに小さいため、全反射を利用した集光系が用いられる。また、鏡の反射率が低い場合反射回数の少ない光学系を選ぶ。しかし、DIOS 衛星は 0.3–1.5 keV の軟 X 線を観測対象とするため、反射鏡への X 線入射角、反射率をともに大きくとることができる。この反射鏡面には現在試作段階として、大きな角度・高いエネルギーでも X 線を反射可能な Pt の単層膜が使われている。10 keV までの X 線を観測対象としたすざく衛星と異なり、0.3 keV から 1.5 keV までの X 線を観測対象とする DIOS 衛星の望遠鏡には、臨界角が小さいが、反射率の大きい元素を鏡面に用いることが可能となる。4 回反射の望遠鏡では、有効面積は 1 枚の鏡の反射率の 4 乗で効いてくるため、わずかでも反射率を上げることができれば、有効面積という点で大きな利益となる。

実際に新たな反射鏡面を考えていく。WHIM は、比較的存在量の多い酸素が高階電離状態にあり、OVII(561,568,574 eV) や OIII(653 eV) の X 線を放射する。新たな反射膜として、このエネルギー帯で反射率の高い Ni に注目した。まず、メインの反射鏡面となる物質には平滑な鏡面を作ることができる Au や Pt とする。さらに、酸素輝線のエネルギー帯での反射率が優れている Ni をこの表面に薄く成膜する。しかし、Ni は 830eV に L 吸収端を持つ。この反射率の低下を抑えるために C をさらにその表面に成膜する。本研究ではこのような複合膜について実際に製作し、反射鏡としての性能を評価する。

## 2 Methods

### 2.1 磁気スパッタ法

成膜には磁気スパッタ法を用いた。主に Ar 等の不活性ガスの中でターゲット物質を陰極として高電圧をかけると、イオン化した Ar がターゲットに向かって加速される。加速されたイオンが固体に衝突するとき、表面近傍で電界放射された電子により中和され電氣的には中性となるが、運動量はそのまま保存

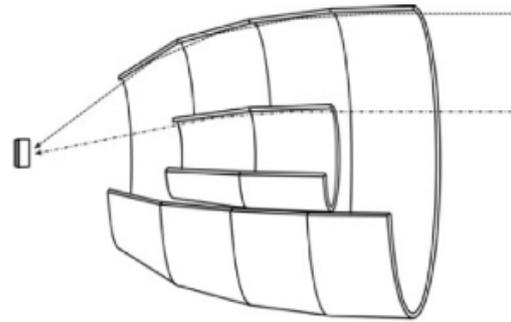


図 1: DIOS/FXT の外径。内側は反射率の低下を抑えるため 2 段鏡になっている。

し固体に突入する。固体内部 (表面近傍) では構成する原子や分子と衝突しながら徐々にエネルギーを失い停止する。固体はこの異粒子の突入により結晶に損傷を受けるとともに、結晶格子を構成する原子が相互に衝突を繰り返す、ついには表面の原子や分子が外部に放出される。こうして、放出されたターゲット物質はその組成を保ったまま試料表面に堆積する。このようにターゲット物質である固体表面から固体を形成する物質が叩き出される過程をスパッタリングと呼び、この現象を利用して薄膜を生成する方法をスパッタ法と呼ぶ。スパッタ法は、基板に対する付着力の強い膜の作成が可能であり、時間制御だけで精度の高い膜厚の制御が可能であるなどの優れた特徴をもつ。

さらに、ターゲットの裏側に永久磁石を配置することで電子をターゲット表面の磁場内にとじ込めて高効率、高真空での良質な成膜を可能にしたものが、磁気スパッタ法である。ここで、Ni をターゲット物質に使うことに一つの障害が生まれる。Ni の強磁性により、磁場が打ち消され、ターゲット表面に現れることができないためである。これを解消するために、Ni にバナジウムを 10%混ぜ、合金とすることで Ni の磁性を抑えた。

### 2.2 フォイルレプリカ法

反射鏡面を製作する工程として、フォイルレプリカ法がある。これは、表面が平滑な薄板ガラスに反射鏡金属を成膜し、エポキシ (接着剤) を塗布した基

板を接着する事で X 線反射面を基板に転写する技術である。これにより、平滑なガラスの表面を反映した反射鏡面を実現することが可能となる。この技術は、NASA/GSFC(Goddard Space Flight Center)で開発されたもので、すざくや ASTRO-H 衛星搭載用望遠鏡の反射鏡製作にも用いられている。磁気スパッタ法を用いて 0.20 mm 厚の薄板ガラスに成膜した物をフロートガラスの基板にレプリカすることでサンプルを作成した。主となる反射鏡面には、これまで「あすか」や「すざく」の X 線望遠鏡に使われてきた Au の他に、ASTRO-H/HXT に用いられた Pt を使用したサンプルも用意した。今回は Au、Pt をレプリカ法を用いてフロートガラスに成膜し、その表面に磁気スパッタ法を用いて NiV および C の単層膜を成膜していく。

### 2.3 X 線反射率測定

製作した反射鏡の評価は X 線反射率の斜入射角依存性を測定することで行った。測定方法を以下に示す。X 線発生装置のターゲットには Cu を用いて  $K_{\alpha}$  線 (8.05 keV) を使用する。Cu の特性 X 線と同時に制動放射による連続成分が発生するが、二結晶分光器を用いることで単色化した。この X 線をサンプル直前で直径 1 mm のピンホールと幅 0.15 mm のスリットで絞る。サンプルへ入射した X 線は反射されて CdTe 半導体検出器へ入射する。サンプルステージと検出器を回転させる事で入射角に対するスキャンを行った。

## 3 Results

X 線測定の結果を図 2 に示す。X 線反射鏡は表面や界面の粗さ によって反射率が低下する。

$$\frac{R}{R_0} \propto \exp[-\sigma^2] \quad (1)$$

ここでの粗さとは、Å スケールで表面に顕れる凹凸の Peak to Valley 値で定義される。粗さによる反射率の低下や、各層での反射光による干渉による効果をもとにして、膜厚と粗さを推定した。粗さのモデルとして Nevot-Croce モデルを採用し、Henke の光

学定数から反射率を計算して、測定値と比較した。この測定は各元素を成膜する度に行っているが、各層の界面粗さは、元素同士の相性で良くも悪くもなり得る。製作した複合膜のフィッティング時には、3 つの層の膜厚と粗さをフリーパラメータとした。こうして、それぞれのサンプルについて、各層のパラメータが推定できた。

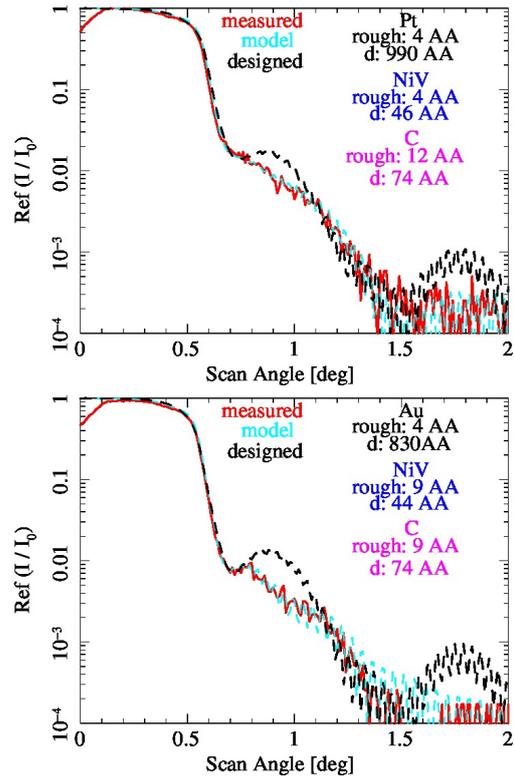


図 2: 製作したサンプルの反射率曲線。横軸は斜入射角を表す。上が Pt、下が Au のものとなっている。黒の設計した反射鏡の反射率に対して赤が測定値、水色の破線がモデルの反射率である。

表 2: 製作した反射膜のパラメータ

設計値	膜厚	粗さ	膜厚	粗さ
50 Å	C	74 Å	9 Å	C
50 Å	NiV	44 Å	9 Å	NiV
1000 Å	Au	830 Å	4 Å	Pt

## 4 Discussion

X線測定結果から得られた反射鏡のパラメータを用いて DIOS 衛星の観測波長帯での反射率を計算する。4 段鏡を採用する最内径の反射鏡への光軸光に対する斜入射角 1.0 deg と最外径の 2.9 deg に対する反射率を計算した。図 3 を見ると、0.3 keV 付近では C による吸収端で反射率が落ちるが斜入射角 1.0 deg であれば、Au、Pt とともに観測波長帯ほぼ全域にわたって反射率の向上が期待できることが分かる。一方で、斜入射角が 2.9 deg となる外側の反射鏡では、特に Ni の臨界エネルギー 0.8 keV を超えると大きく反射率が低下してしまう。4 回反射の光学系を用いることを考えると外側の反射鏡でこの複合膜を用いることはできないだろう。

今後は反射鏡の径ごとの、つまり斜入射角ごとに最適な反射鏡を考える必要がある。また、膜厚によって吸収の影響も変化するので、これも設計しなければならない。今回は Cu の  $K_{\alpha}$  線 8.05 keV を用いて評価したが、C の反射率はこのエネルギーで非常に低く、数%程度しかない。厳密な入射角ごとの反射鏡を設計するには DIOS 衛星の観測波長帯、特に酸素の輝線 0.6 keV 付近での X 線で反射鏡の評価をする必要がある。

## 5 Summary

DIOS 衛星の観測波長帯 0.3–1.5 keV での有効面積向上のため、Au、Pt の表面に薄く NiV および C をコーティングした複合膜の設計と評価を行った。製作方法としては、フォイルレプリカ法を用いて Au、Pt の単層膜をガラス基板に成膜する。その表面に観測波長帯 0.3–1.5 keV での反射率を向上させるために NiV をコーティングする。また、Ni の L 吸収端 (830 eV) での反射率の低下を抑えるために、NiV の表面にさらに C をコーティングする。こうして作成した反射鏡の 8 keV の X 線に対する反射率の入射角依存性を測定することで各層のパラメータを推定できる。このパラメータでの反射率のエネルギー依存性を計算すると入射角が 1.0 deg となる内側の反射鏡では、観測波長帯ほぼ全域にわたって反射率の向上が期待できる事が分かった。

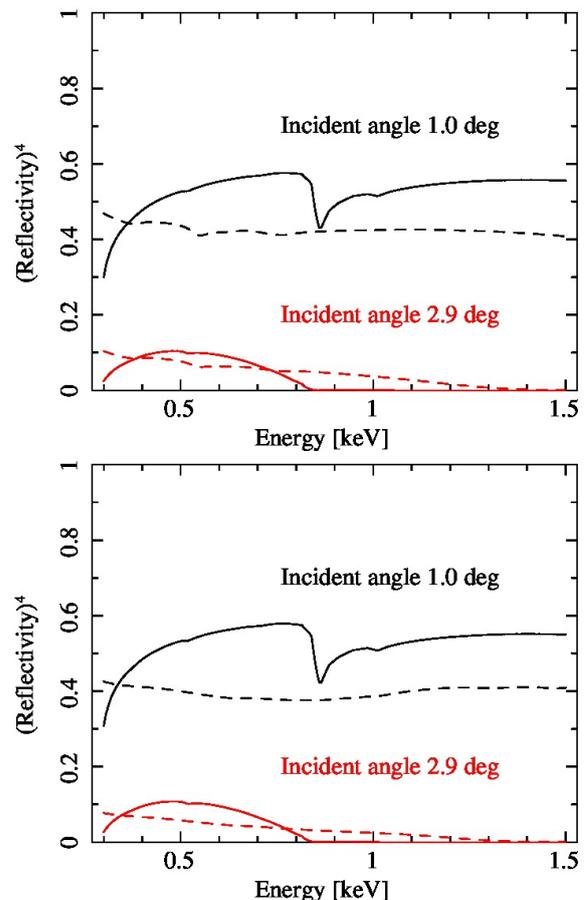


図 3: 得られた反射鏡のパラメータから計算したエネルギー反射率。上が Pt、下が Au を用いた場合。破線が Au または Pt の単層膜、実線が複合膜を示す。また、黒は斜入射角 1.0 °、赤は 2.9 ° に対する反射率である。有効面積への影響を見るため反射率の 4 乗で示した。

## Reference

- [1] 「X線結像光学」波岡 武 山下広順. 1999. 培風館