

6 keV 付近に大有効面積を持つ X 線多層膜望遠鏡の開発

吉川 駿 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

本研究は天文学において重要な鉄輝線を含む 6 keV 付近の X 線に対して大面積を持つ望遠鏡開発を目標としている。鉄原子は存在量が多く、数千万 K のプラズマは強い鉄の特性 X 線を放射している。これを精密観測することでプラズマの温度、密度などがわかり、さらにドップラー効果を測定することで運動の様子も知ることができる。このように鉄輝線の測定は重要な意味を持つので、精密観測を行うには多くの X 線が必要となるため、大有効面積の望遠鏡が必要となる。X 線は透過力が強く屈折しにくいいため反射による集光を考える。これまでの望遠鏡では反射鏡として金属の全反射を利用してきた。現実的な焦点距離を 6 m として全反射を利用した望遠鏡の口径は 0.5 m 以下に限られる。これは臨界角による制限により大角度での反射ができないためである。つまり、限られた焦点距離でさらに大口径化するには大角度で入射する X 線を反射できる鏡が必要となる。そこで、重元素、軽元素を交互に積層することでブラッグ反射を利用して、大角度入射が可能な多層膜を用いることで X 線望遠鏡の大有効面積化が可能になる。今回は重元素に W、軽元素に C を用いた多層膜反射鏡を用いた望遠鏡を想定して有効面積の計算を行った。また、重元素の吸収端が 2 keV 付近であるため、この付近で急激な反射率の低下を引き起こす。2 keV 付近のエネルギー帯にはこれまでの X 線衛星の観測によりブラックホール吸着円盤にて見つかった硫黄、ケイ素輝線が含まれる。そのため、このエネルギー帯でも十分な有効面積を得られるようにする必要がある。本講演では、Ni を最上層にすることにより、全反射領域での重元素による吸収端の影響を最小限にとどめることができる多層膜の設計を行い、現状を報告する。

1 導入

本研究では天文学で重要な鉄輝線を含んでいる 6 keV 付近の X 線に大きな有効面積を持つ望遠鏡の開発を目標としている。いままでの X 線検出器の分解能は数 100 eV であったが、現在では技術向上し、数 eV の分解能を持つ X 線カロリメータが開発された。この検出器の性能を最大限利用するためには多光子数の測定を行い、統計を多くとる必要がある。そのためには大口径、大有効面積の望遠鏡が必要になる。従来の X 線望遠鏡は全反射を利用した集光を行ってきた。しかし、この方法では焦点距離に対する口径を大きく制限することになる。そこで、大口径化を行うために重元素、軽元素を交互に積層することでブラッグ反射を利用する多層膜反射鏡を用いる。

2 Wolter 光学系

X 線は透過力が強く、屈折しにくいいため、反射による集光を行う。斜入射光学系において、回転放物面などによる 2 回反射の光学系を用いる。その例として Wolter 光学系がある。Wolter 光学系には I 型、II 型、III 型の 3 種類がある。図に示すように、Wolter I 型、II 型は回転双曲面と回転放物面の組み合わせであり、Wolter III 型は回転楕円の組み合わせから成る。反射面のどこに光が入ってきても行路は一定の距離になり、アッペの正弦条件を近似的に満たしていることから光軸近辺の光はほぼ理想的に集光することが可能である。本研究では焦点距離が短い Wolter I 型の X 線望遠鏡を採用している。斜入射光学系では反射鏡 1 枚あたりの反射面が小さくなる。そこで図 4 に示すように半径の異なる共焦点の反射鏡を同心円状に配置することで限られた口径で大有効面積を確立している。

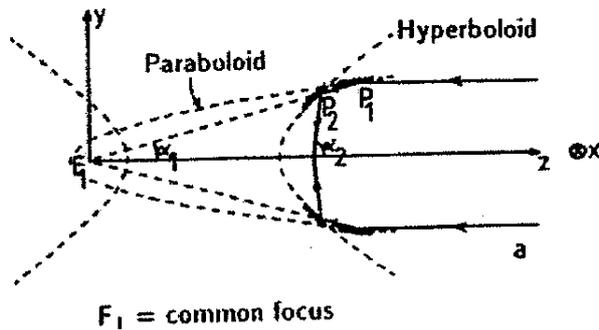


図 1: Wolter I 型

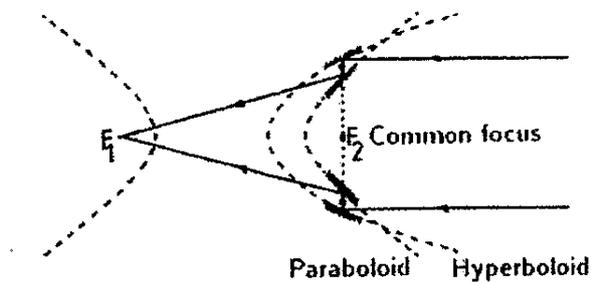


図 2: Wolter II 型

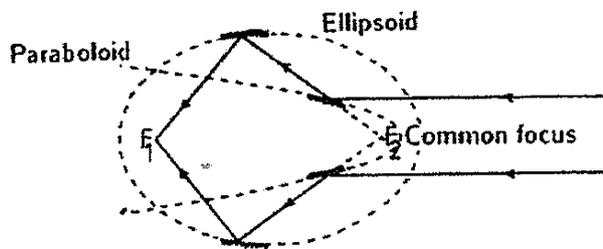


図 3: Wolter III 型

3 W/C 多層膜反射鏡

X 線の反射にはいままで 0.7° 未満の鋭い角度で鏡に入射させた金属の全反射による集光を行ってきた。これは臨界角の制限によるもので大角度の反射を行えないからである。そのため、人工衛星に搭載することを見込んだ現実的な焦点距離を 6 m とした場合、口径が 0.5 m 以下でないと全反射による集光が不可能になる。全反射を利用し、これまで実用化

された X 線観測衛星の ASCA の入射角は 1° 以下に抑えられており、焦点距離は 3.5 m 、口径は 0.35 m ほどである。そのため、限られた焦点距離で大口径化をするためには大角度で入射する X 線を反射できる鏡が必要となる。そこで重元素、軽元素を交互に積層することでブラッグ反射を利用し、大角度入射可能な多層膜を用いる。多層膜の元素の選定や、組み合わせには以下の条件がある。

1. 重元素には X 線を大きく散乱し、吸収の小さい元素を用いる。軽元素は重元素の間隔を保つ役割が大きいため X 線の吸収の小さい元素を用いる。
2. 観測エネルギー帯に元素の吸収端が存在しないものを用いる。吸収端付近では急激な X 線の反射率の低下を引き起こす。
3. 膜厚 10 \AA という薄膜状態における物理的、化学的な安定性が必要である。また、元素の組み合わせには相性があり、界面で相互拡散が少なく、界面が滑らかな組み合わせを選ぶ必要がある。

X 線の複素屈折率は $\tilde{n} = 1 - \delta + i\beta$ と表現される。は X 線の散乱、 β は吸収の起こりやすさを意味し、 β の値の小さな元素を候補に挙げてきた。重元素の候補として界面粗さが 0 になることが知られている W がある。今回は W が持つ理想的な界面に注目し、W/C 多層膜を用いた望遠鏡の有効面積を計算した。軽元素には X 線の吸収の少ない C を用いる。望遠鏡は焦点距離 6000 mm 、口径は 550 mm を想定し、反射鏡は口径内に 228 枚を密に設置した。図 7 に W/C 多層膜反射鏡を用いた望遠鏡の有効面積を示す。黒はすべての反射鏡が 6.7 keV の X 線を集光するように設計した場合の有効面積である。本研究の目的として、広帯域で大有効面積化をするため、複数のエネルギー帯で集光する反射鏡をいくつかの組にする。赤は $6.2, 6.4, 6.7, 6.9, 7.2\text{ keV}$ の X 線を集光する組み合わせをすることでピークに広がりをもたせた望遠鏡の有効面積を示す。黒と比べ広帯域で有効面積を確保することができた。緑は ASTRO-H SXT (Soft X-ray Telescope) の有効面積であり、複数の組み合わせのもの比べると、 6.7 keV で約 5 倍の有効面積を持たせることができた。

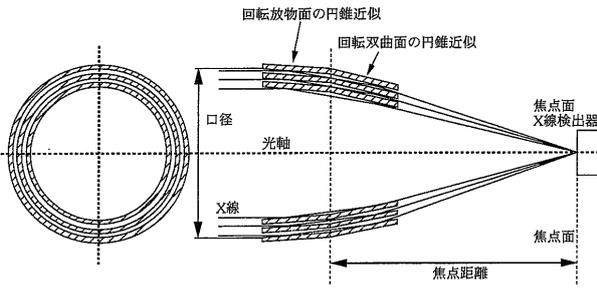


図 4: 反射鏡を多数同心円上に隙間なく並べ、大有効面積化する。本研究では 228 枚の反射鏡を並べた望遠鏡を想定して設計を行っている。

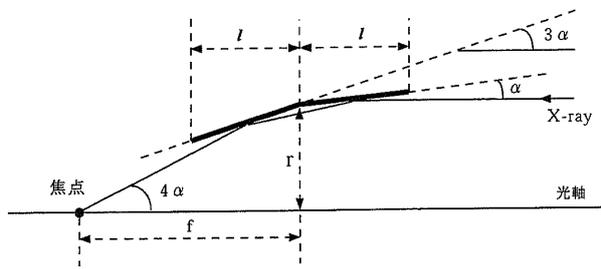


図 5: 焦点距離と口径の間には $r = f \tan 4\alpha$ の関係がある。

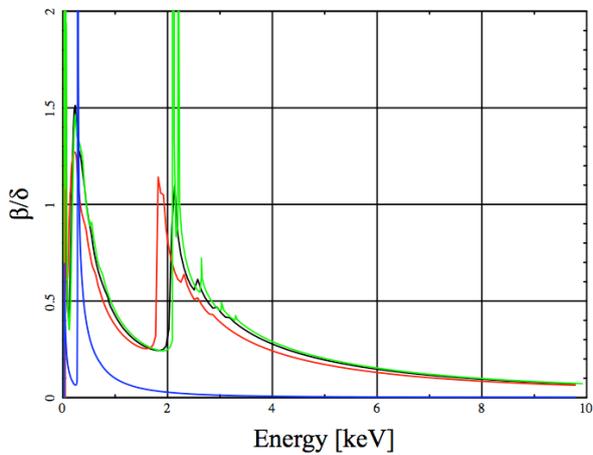


図 6: X 線エネルギーと β/δ の関係。赤は Ir、黒は W、緑は Pt、青は C を示す。

4 Ni トップコートによる重元素吸収端の影響緩和

本研究の観測対象は 6 keV 付近の X 線であるが、重元素の吸収端である 2 keV 付近で急激な反射率の

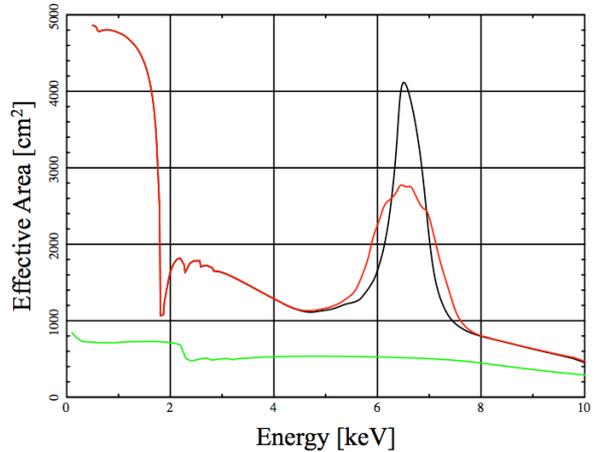


図 7: W/C 多層膜を用いた望遠鏡の有効面積。黒は 6.7 keV の X 線だけ検出器に集光するように設計したもの。赤はピークに広がりを持つように異なるエネルギー帯を集光する反射鏡を用いて設計をしたもので広帯域で大有効面積を得られている。緑は ASTRO-H SXT の有効面積。

低下を引き起こす。2 keV 付近のエネルギー帯に S、Si 輝線が含まれるため、このエネルギー帯でも十分な有効面積を得られるようにする必要がある。そのため、2 keV、6 keV 付近に吸収端の存在しない Ni をトップコートすることで 2 keV 付近の反射率の低下を抑えることにした。W 同様、大有効面積を持つ可能性がある Ir を用いた Ir/C 多層膜を例にする。図 7 に望遠鏡のモデルを用いた Ni をトップコートした Ir/C 多層膜とトップコートをしていない Ir/C 多層膜を用いて計算したエネルギーと有効面積の関係を示す。吸収端の 2 keV 付近のエネルギー帯で反射率の減少を抑えることができた。

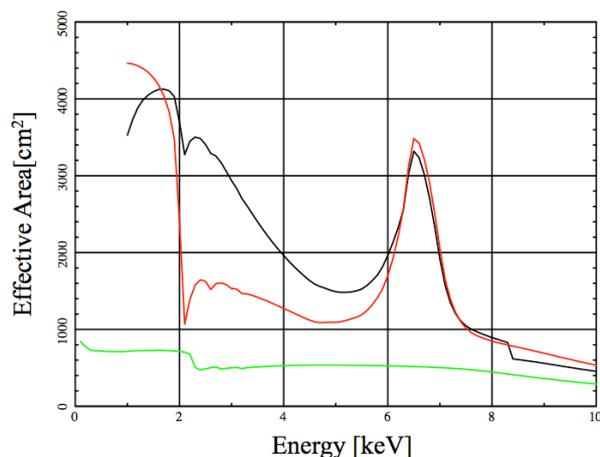


図 8: 黒は Ni をトップコートした Ir/C 多層膜の有効面積を表す。赤のトップコートのない Ir/C 多層膜と比べると、Ir の 2 keV 付近の吸収端の影響を緩和することを示唆している。緑は ASTRO-H の SXT の有効面積。

5 まとめ

理想的な界面を持つ W/C 多層膜望遠鏡に注目し、複数のエネルギー帯に対応した反射鏡を用いた場合の有効面積を計算した。その結果、6.7 keV で ASTRO-H SXT の 5.2 倍の有効面積を得ることができた。そして 2000 cm² の有効面積を超えるエネルギー幅は 1.2 keV ほどになった。反射鏡の上に Ni のトップコートを行うことで吸収端にて 3 倍以上の有効面積を確保することが可能である結果を得た。

Reference

佐竹 宏之 修士論文「次世代硬 X 線望遠鏡用多層膜スーパーミラーの広帯域化と高効率化」2002. 名古屋大学理学研究科