

将来ミッション搭載用X線望遠鏡の構想案

國枝 秀世, 松本 浩典, 田原譲、古澤 彰浩, 宮沢 拓也, 田村啓輔、宮田 祐介、(名古屋大学),
栗木久光(愛媛大)、石田学、前田良知、高橋 忠幸(宇宙航空研究開発機構)

§1. 研究の背景

ASTRO-Hの打上が2年後に迫っている現在、次のミッションへの検討を真剣に始める時期にきている。しかも、2020年頃に想定していた、国際X線天文台計画IXOが2028年以降になった状況が、日本のこれまでの取り組みの見直しを求めている。

これまでのX線天文学の歴史を振り返ると新しい観測システムによる、感度、分解能、効率の大幅な向上が、天文学の新しい地平を切り拓いて来た。ASTRO-Hでも、本格的に硬X線撮像と、高分解能分光観測が始まる。中でも、ASTRO-Hの高分解能分光観測は光子数不足で、明るい天体の観測に限られることが予想される。Post-ASTRO-Hミッションを考えると、TESカロリメータにより大きな有効面積の望遠鏡を組み合わせたミッションが有力となる。本論文では、その為のX線望遠鏡の可能性を検討する。

§2. Post-ASTRO-H X線衛星試案

(1) 目指すサイエンス

鉄輝線を、 $\Delta E/E \sim 1000$ (@6keV) で分光することにより、X線天体の運動学、プラズマ物理学、極限状態の物理解明が可能となる。しかし、6keV有効面積が225cm²であるため、輝線1本あたりの光子数が不足するなど、統計的に決定的な結果を出すことが難しい。ASTRO-Hの科学的成果を大きく拡大し完成させることが最大の課題となる。

(2) 求められるX線望遠鏡の性能

分光器は1台に限られる中で、1台の望遠鏡で、鉄輝線を含む6-8keVの有効面積をASTRO-H SXTの3倍以上達成するのが一つの目安となる。空間分解能としては、Newtonの15秒角が目標になる。0.15mmのピクセルサイズが実現できれば、6mの焦点距離で、3倍のOver samplingが実現できる。広がった天体の撮像を想定すると、視野は20分角程度が目標になる。

§3. 軟X線多層膜望遠鏡の設計

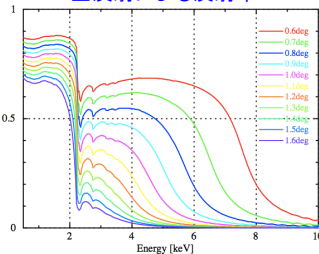
(1) 多層膜の反射率

ASTRO-HのSXTでは、入射角が0.15-0.54度に設定されている。その臨界エネルギー($R \sim 40\%$)は右図の様に8keVが上限に徐々に低下する。ASTRO-Hでは全反射で10 keVまでの有効面積を確保している。

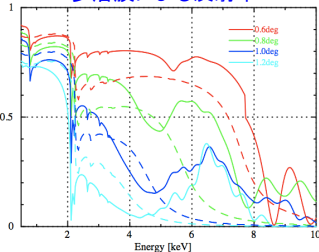
1°以上の入射角で鉄輝線構造を含む8keVを多層膜のBragg Peakで増強し、同じ焦点距離でもより大きな口径、大有効面積を得ることを考える。

下の図では、周期長4.2-14.5 nmのPt/C多層膜を、最大16層と最上層にNi層を積層した場合の反射率(実線)を示した。全反射のケースは破線で示され、同色2本の差が多層膜による利得である。特に0.8-1.2°では、全反射では得られない5keV以上で有効面積を与える。

全反射による反射率



多層膜による反射率



(2) ASTRO-H規模衛星+TESカロリメータ用光学系

2020年頃に実用可能なミッションの規模として、ASTRO-Hを一つの目安とする。そこで極低温検出器に集光するX線望遠鏡の境界条件は、固定光学台の場合、焦点距離は6mとなる。この条件の下で最大の口径の望遠鏡を設計する。異なる焦点距離に対し、それぞれの半径における入射角を下の表に与える。

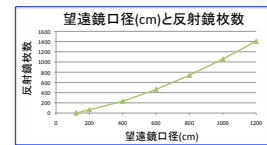
直径cm	12	45	60	80	100	120
FL=6m	0.14°	0.54°	0.72°	0.95°	1.19°	1.43°
FL=8m	0.11°	0.40°	0.54°	0.72°	0.89°	1.07°
FL=10m	0.09°	0.32°	0.48°	0.57°	0.72°	0.86°

(3) 焦点距離6mの場合の有効面積半径依存性

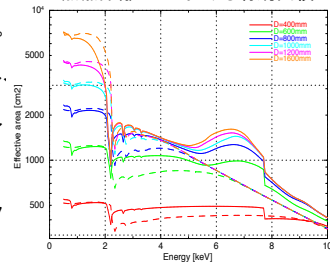
焦点距離を6mとした時、口径を広げた時の反射鏡の枚数を表に示す。ここでは反射鏡の光軸方向の長さは、円錐近似による像の広がりを抑えるため、SXTと同じ10cmを採用している。

その上に6-8keVの有効面積を増強する多層膜を積層した場合の有効面積を右図に示す。

ASTRO-H SXTでは全反射であるので、最下段の破線に相当し、6-7keVで約420cm²を与える。これに対し、口径を60cmに増やしても単層膜では直線に沿って急激に面積が減少する。それが多層膜では1000cm²を維持できる。口径1mまで広げると、7 keVでSXTの約4倍に広げることができる。



焦点距離6mにおける有効面積

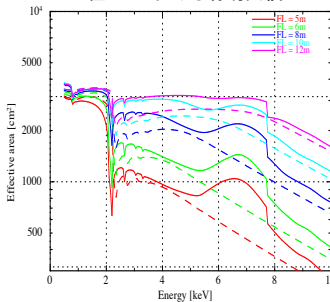


(4) 口径1mの場合の有効面積の焦点距離依存性

口径を1mに固定し、焦点距離を長くすると入射角が小さくなる分、高いエネルギー側へ、面積が広がる。右の図で6m, 8mでは、点線で示す多層膜のケースに比べ、実線で示す多層膜が6-8keVで大きな利得が得られる。

ここでは主に6-8keVの有効面積の増強に力点を置いたため、6keV以下および、8keV以上の面積減少が見られる。多層膜の最適設計によりこれらを解消をする必要がある。

口径1mにおける有効面積



< 本提案のX線望遠鏡の概要のまとめ >

口径: 12-100cm
焦点距離: 6m
反射鏡長さ: 10cm
反射鏡枚数: 1058枚
多層膜: Pt/C(Ni top coating)
周期長: 4.2-14.5 nm
有効面積: 1600cm²@7keV
空間分解能: < 30秒角

§4. 今後の課題

(1) 30°角を切る解像度の超軽量光学系の開発

求められる空間分解能30°角以下を、超軽量光学系で実現するには、現状ではガラス鏡NuStar)、アルミレプリカ鏡(ASTRO-H SXT)では難しい。栗木らが進めている、CFRPを基盤とし、円錐近似誤差を避けるため、回転二次曲面2段1体レプリカ方式などの開発の進行状況に注目したい。

(2) 多層膜設計の最適化

今回の試算では、まだ多層膜について最適化されていない。Niを最上層に付けてPtのM吸収端を埋める手法や、多層膜の最上部をTuningすることで、全反射から多層膜ピークの間を埋めるなどの手法が考えられる。更には、鉄輝線より高いエネルギーをどこまでカバーするか考える。

(3) 焦点距離の最適化

今回はASTRO-Hの当初の焦点距離6mを標準とし、長くすることでどこがどう得になるか検討した。衛星の規模と伸展機構によるリスク、経費の増大とのTrade offになる。また、伸展すると、その分、次項で述べる様に、巨大なアレイが必要となることも考慮すべきであろう。

(4) 大フォーマット検出器の開発

視野が入射角で決まるため今回の望遠鏡では、17-20分角までは大きな有効面積が得られる。これをカバーすべき検出器のサイズは6mで約30mmである。TESアレイでどこまで大フォーマット化できるか課題である。

(5) 世界のX線衛星Road Mapの検討

2022年頃に提案していたIXOが2028年以降に遅れることになった。これを受け、Post-ASTRO-HのX線天文学の衛星計画を、日米欧がミッション提案を分担し、実施を国際協力の枠組みを構築しようと考えている。