

X線望遠鏡に用いる X線反射鏡の光学特性測定 Optical characterization of X-ray reflectors for X-ray telescopes

古澤彰浩^{1,*}, 倉嶋翔², 前田良知³, 佐藤寿紀², 菊池直道², Okajima Takashi⁴, 森英之⁴,
松本浩典¹, 石橋和紀¹, 宮澤拓也¹, 岩瀬 敏博¹, 前島将人¹, 吉川駿¹, 飯塚亮³, 林多佳由¹,
田村啓輔¹

¹名古屋大学, 〒464-8602 名古屋市千種区不老町

²首都大学東京, 〒192-0397 東京都八王子市 南大沢 1 丁目 1

³宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

⁴ NASA/Goddard Space Flight Center, MD 20771, USA

Akihiro Furuzawa^{1,*}, Sho Kurashima², Yoshitomo Maeda³, Toshiki Sato², Naomichi Kikuchi²,
Takashi Okajima⁴, Hideyuki Mori⁴, Hironori Matsumoto¹,

Kazunori Ishibashi¹, Takuya Miyazawa¹, Toshihiro Iwase¹, Masato Maejima¹,
Shun Yoshikawa¹, Ryo Iizuka³, Takayoshi Hayashi¹ and Keisuke Tamura¹

¹Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8602, Japan

² Tokyo Metropolitan University, Tokyo 192-0397, Japan

³ ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

⁴ NASA/Goddard Space Flight Center, MD 20771, USA

1 はじめに

我々は現在 JAXA や国内外の複数の大学、機関と共同で開発を行っている次期 X線天文衛星 ASTRO-H (2015 年度打ち上げ予定) [1]に搭載する X線望遠鏡の地上較正実験ならびに軌道上での性能予測評価を行っている。ASTRO-H には硬 X線望遠鏡(HXT)と軟 X線望遠鏡(SXT)が各 2 台搭載されるが、そのうち一台の軟 X線望遠鏡の焦点面にはエネルギー分解能 約 5eV を誇る X線カロリメータ(SXS)が世界で初めて搭載される。この軟 X線望遠鏡とカロリメータを組み合わせた X線撮像分光システムは、従来使用されて来た回折格子をもちいた分散型分光システムと異なり、空間的に広がった天体に対して詳細な分光観測を行うことが出来る画期的なシステムであり、X線天文学において X線望遠鏡が実用化された時に匹敵する革新的な進歩を天文学にもたらすものと期待されている。

天体からの X線スペクトルに見られる特性 X線の輝線は、温度や密度、重元素の存在量といった、天体の物理状態、化学的進化を解明する上で非常に重要な情報をもたらす。カロリメータは微弱な輝線の検出能力、近接した輝線を分離する能力が従来の検出器に比べて格段に高く、これまでこれらの物理量の測定が不可能であった非常に暗い天体や、非常に遠方の天体についても精密な測定が可能となる。

しかし、観測スペクトルに現れる、特に望遠鏡由来の吸収端などの構造を正確に把握しておかなければ、この構造付近の微弱な輝線の検出や輝線強度の測定が困難となり、カロリメータの性能を活かす

ことが出来ない。SXT に用いる反射鏡の鏡面には金の単層膜が使用されており、カロリメータの観測波長帯にはこの金の M 吸収端構造が含まれる。この吸収端付近ではケイ素、硫黄、アルゴンといった天文学上重要な輝線が観測されるため、X線反射率の正確な予測が特に要求される。

反射率は鏡面物質の光学定数と表面粗さによって決まる。また、この光学定数は密度の関数でもあるため、鏡面物質の深さ方向の密度分布にも依存する。表面粗さや密度分布は反射鏡基板や成膜法、成膜条件によって異なるため、実際に使用する反射鏡の反射率測定からこれらのパラメータを求める事が、反射率の正確な予測に不可欠となっている。実際に光学定数や吸収端のエネルギーが文献によって異なる事は良く知られている。本課題は SXT に使用されている反射鏡と同等のサンプルについて、金の M 吸収端付近の X線反射率の詳細測定を行い、光学定数を実験的に決定することを目的としている。



図 1: BL-11B に接続した真空槽。左が上流側。

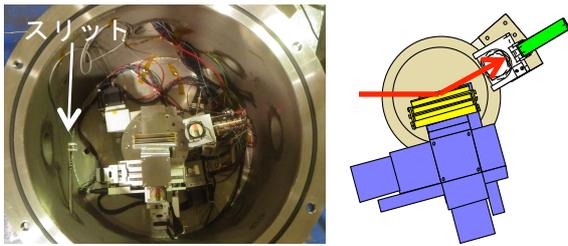


図 2：上から見た持ち込み真空槽内部。
 (右) 模式図 青：サンプル位置調整 XYZ ステージ、黄：サンプル、茶：2 軸回転ステージ、緑：電子増倍管、赤：光路)

2 実験

X 線反射率測定は BL-11B において 2014 年 11 月に実施した。ビームライン後端よりダクトを追加延長して持ち込んだ真空槽を接続し(図 1)、その内部に測定サンプルおよびサンプル位置合わせ用の平行移動ステージと電子増倍管(浜ホト製 R515)を取り付けた 2 軸回転ステージを設置して行った(図 2)。回転軸は鉛直方向となるため、P 偏光に対する反射率測定となっている。X 線のビームサイズは 2 結晶分光器の下流側備え付け 4 極スリットとチェンバー内に設置した 0.3 mm 幅のスリットにより成形した。実験は、エネルギー 5 点(2.1, 2.6, 3.0, 3.3, 4.1 keV)において角度スキャンおよび、入射角 5 点(0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 度)において波長スキャン(2.1 - 4.1 keV / 2 eV 刻み、2.2 - 2.35 keV / 0.2 eV 刻み)を行った。

3 結果および考察

エネルギースキャンによって得られた反射率(図 3)が示すように、 M_V , M_{IV} , M_{III} , M_{II} , M_I の各吸収端を含むエネルギー領域において詳細な構造を高い統計精度で得ることが出来ている。しかし、2 eV 刻み、0.2 eV 刻みとも複数回の測定で 5 ~ 10% 程度の食い違いが見られた。これまでのデータ解析から、実験中の電子増倍管の検出効率の低下や各スキャン中に検出強度の変動があったことが分かっており、原因と補正法について検討を行っているが、現時点ではこの食い違いが反射率の系統誤差となっている。

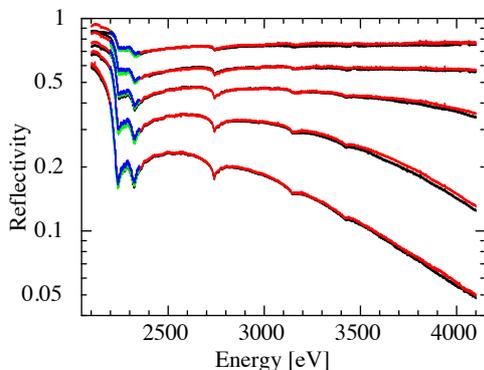


図 3：エネルギー反射率。反射率の高い方から入射角 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 度。赤・黒: 2eV 刻みスキャン、緑・青: 0.2 eV 刻みスキャン

また、エネルギー 5 点での角度反射率測定から、2 結晶の駆動に伴う入射角の変化を示唆する結果も得られており、現在それらを補正した上で光学定数の決定を試みている。補正法についてはまだ検討が続いており、最終的な結果ではないが、図 4 に反射率から得られた原子散乱因子 f_i を示す。なお、 f_i を決める際、 f_2 については本実験データのみでは決定精度が十分でないことから Henke et al. 1993 [2] の値を用いた。最終的にはこのようにして得た f_i を用いて SXT の有効面積等、性能予測を行う。

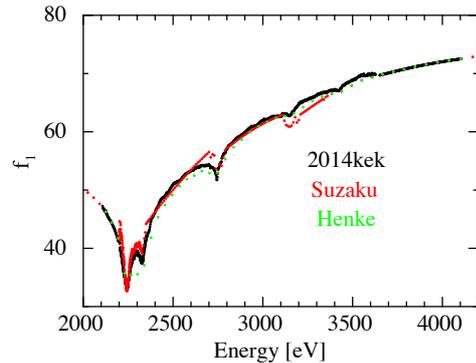


図 4：原子散乱因子 f_i 。黒：本実験データより導出、赤：Suzaku 衛星に用いられた金の反射鏡の反射率測定より得られた f_i (Tamura et al. 2006 [3])、緑：Henke et al. 1993

4 まとめ

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載の軟 X 線望遠鏡(SXT)に使用されている反射鏡と同等のサンプルについて反射率測定を行い、金の M 吸収端を含むエネルギー領域において、高い統計精度で反射率曲線を得ることができた。しかし、測定時の検出器出力変動、検出感度変化、分光器動作時のビーム変動の影響によると思われる系統誤差が無視できないため、その原因の究明と補正法の検討を行っている。最終的にはこの結果から得られた光学定数を SXT の性能予測に用いる予定である。

謝辞

実験にあたって、BL-11B 担当の北島義典先生をはじめ PF のスタッフの皆様にご多大のお世話になりました。末筆ながらお礼申し上げます。

参考文献

[1] T. Takahashi et al., Proc. SPIE, **7732**, 7732Z (2010).
 [2] B.L. Henke et al., At. Data Nucl. Data Tables, **54**, 181 (1993)
 [3] K. Tamura et al., Proc. SPIE, **6266**, 62663D
 * furuzawa@u.phys.nagoya-u.ac.jp