

ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡用反射鏡の M 吸収端付近での反射率測定

倉嶋 翔 (首都大学東京大学院 理工学研究科)

Abstract

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H には軟 X 線帯の集光を担う軟 X 線望遠鏡 (SXT) が 2 台搭載される。天体から得られる X 線の情報を正しく取り出すためには SXT の応答を正しく理解し、正確な応答関数を構築することが必要不可欠である。SXT の反射鏡はレプリカ法によって制作した金の単層膜反射鏡が用いられる。そのため、SXT の応答関数には金の反射率が急激に変化する M 吸収端が含まれる。そこで、高輝度で安定した X 線が供給され、高分解能の二結晶分光器で X 線の単色化を行うことができる高エネルギー加速器研究機構 (KEK) Photon Factor BL11-B に SXT の反射鏡のサンプルを持ち込み、反射鏡の M 吸収端付近での反射率のエネルギー依存性を測定した。反射率測定の測定結果から応答関数へ組み込むパラメータである光学定数のエネルギー依存性を測定で得られた反射率曲線にモデルフィットを行うことで算出した。

1 X 線望遠鏡

1.1 軟 X 線望遠鏡 (SXT)

ASTRO-H において軟 X 線帯 (0.3-12 keV) の X 線の集光を担うのが軟 X 線望遠鏡 (SXT) である。ASTRO-H には SXI (軟 X 線撮像器) と組み合わせられる SXT-I、SXS (軟 X 線分光器) と組み合わせられる SXT-S の 2 台が搭載される。SXT の反射鏡にはスパッタリングでガラス円筒母型表面に成膜した金の薄膜をアルミニウム基板に接着転写するレプリカ法によって制作された金の単層膜反射鏡を用いている。有効面積を向上させるため上記の反射鏡を多数積層する多重薄板型を採用しており、SXT では反射鏡を 203 枚積層している。また、Wolter I 型斜入射光学系による 2 回反射を用い集光を行うため、小型かつ軽量で大有効面積を実現している。

口径	450 mm
焦点距離	5600 mm
反射鏡積層数	203 枚
反射膜	Au

表 1: SXT の設計パラメータ

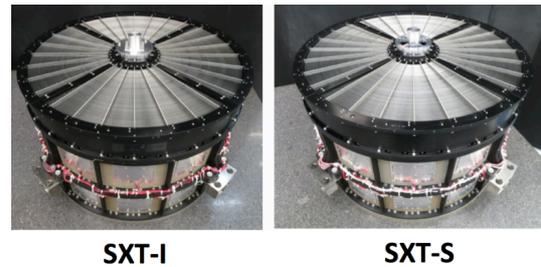


図 1: ASTRO-H 搭載 軟 X 線望遠鏡 (SXT)

1.2 X 線の反射

極端な斜入射光学系の反射鏡による X 線の反射において反射率は偏光によらないので、反射率 R は

$$R = |Fr_p r_s| \quad (1)$$

と表せる。(1) 式では r_p, r_s はフレネル係数、 F は表面粗さのモデルである Nevot croce 因子である。

$$r_p = \frac{\sin \theta_r - \tilde{n} \sin \theta_i}{\sin \theta_r + \tilde{n} \sin \theta_i}, \quad r_s = \frac{\sin \theta_i - \tilde{n} \sin \theta_r}{\sin \theta_i + \tilde{n} \sin \theta_r} \quad (2)$$

であり、 θ_i は入射角、 θ_r は屈折角、 \tilde{n} は複素屈折率である。

$$\tilde{n} = n + i\beta = 1 - \delta + i\beta \quad (3)$$

(3) 式の δ と β は原子散乱因子 $f(E) = f_1 + if_2$ を用いて

$$\delta = 1 - n = \frac{e^2 \hbar^2}{2\epsilon_0 m_e E^2} f_1 = \frac{N_a r_e}{2\pi} \lambda^2 f_1 \quad (4)$$

$$\beta = \frac{e^2 \hbar^2}{2\epsilon_0 m_e E^2} f_2 = \frac{N_a r_e}{2\pi} \lambda^2 f_2 \quad (5)$$

と表される。 r_e は電子の古典半径、 λ は電磁波の波長である。 $N_a = (N_0/A)\rho$ であり、 N_0 はアボガド数、 A は原子質量数、 ρ は原子密度であり定数のため、 f_1, f_2 はともに波長 (エネルギー) にのみ依存する。つまり、反射率は f_1, f_2 , 入射角, エネルギー, 表面粗さの 5 つで決まるといえる。このうち入射角とエネルギーは測定対象によるものであるため望遠鏡 (反射鏡) 由来の要素は原子散乱因子と表面粗さである。

2 反射率測定

2.1 測定目的

天体の観測を行った検出器の出力には実際の天体の情報に SXT の応答が入り込んでしまう。したがって、天体が発する情報を正確に観測するには SXT の正確な性能を調べ、応答を表す応答関数を構築しなければならない。応答関数を構築する上で重要となるパラメーターのひとつが反射鏡の反射率である。SXT が集光を担う軟 X 線帯 (0.3-12 keV) には反射鏡の表面物質である金の M 吸収端が含まれ、金の M 吸収端付近のエネルギー (2-4 keV) で反射率が急激に変化し、複雑な構造を持つ。2006 年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星すざくに用いられる応答関数では、M 吸収端付近のエネルギーでスペクトルフィットする際にモデルとの残差が残っていた。さらに SXT の焦点面検出器の 1 つであり、6 keV の X 線を 7 eV 以下という過去最高のエネルギー分解能で分光する軟 X 線分光器 (SXS) の性能をフルに発揮させるためにも、M 吸収端付近での反射鏡の反射率の複雑な構造を詳細に把握する必要がある。

2.2 測定環境

M 吸収端付近の SXT 反射鏡の反射率を細かいエネルギーピッチで測定するという目的の下、2014 年 11 月 16 日から 21 日にかけて反射率測定を高エネルギー加速器機構 (KEK) Photon Factory BL11-B で行った。このビームラインは高輝度で安定した X 線が供給されることに加え、ビームライン備え付けの高分解能の二結晶分光器を用いることで X 線を単色化することができる。測定サンプルは SXT の反射鏡と同様の方法で作成された反射鏡サンプルを用いた。また、ビームラインに測定用のチェンバー、ビームを細くするための 0.3 mm スリット、 θ - 2θ ステージ、検出器である光電子増倍管を持ち込み測定を行った。

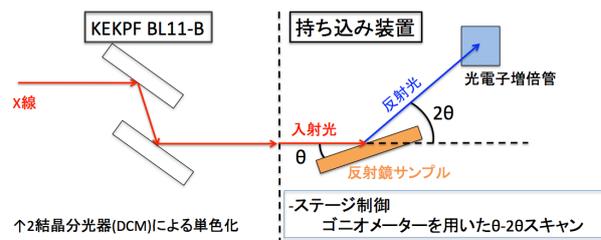


図 2: 実験での配置

2.3 測定内容

SXT 反射鏡の金の M 吸収端付近での反射率のエネルギー依存性の測定を行った。測定は、2100-4100 eV のエネルギー領域の 2 eV ピッチでのエネルギー スキャン、さらに吸収の深い金の M4, M5 吸収端付近 (2200-2350 eV) の 0.25 eV ピッチという細かいエネルギーピッチでのエネルギー スキャンの 2 種類を行った。これらの条件のもと、再現性の確認の意味で同じ条件下での測定を 3 回行った。X 線のサンプルへの入射角は、3.5 keV における全反射臨界角が 1.2° であるので、 $0.5^\circ, 0.8^\circ, 1.0^\circ, 1.2^\circ, 1.4^\circ$ の 5 つの角度で固定した。また、反射率を求める際に必要なダイレクト光の取得をエネルギー スキャンの合間に行った。

3 結果

3.1 反射率

反射率とは、反射光の強度をダイレクト光の強度で割ったもので表すことができる。今回の測定システムでは、反射鏡とダイレクト光を同時に測定することができないため、反射率測定の間反射鏡を検出器の前から移動させて測定した。今回は、ビームの強度変動を BL11-B 既設 I0 モニター (I_s) で取得し、強度変動を打ち消すために反射光、ダイレクト光をそれぞれ I_s で割ったものを使用する。つまり、反射率は

$$Ref = \frac{I_1}{I_s} \times \frac{I_s^d}{I_1^d} \quad (6)$$

で表すことができる。ここで I_1 は反射光の光電子増倍管の出力、 I_s はエネルギースキャン時の I_s の値、 I_1^d はダイレクト光の光電子増倍管の出力、 I_s^d はダイレクト光測定時の I_s の値である。測定で得られたエネルギー反射率曲線を図 3 に示す。黒が take2、赤が take3 を表しており、take1 はダイレクトの取得がうまくできず、反射率を算出できなかった。入射角は上から 0.5° , 0.8° , 1.0° , 1.2° , 1.4° である。

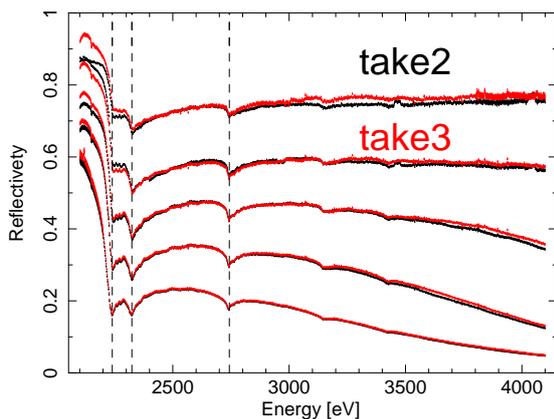


図 3: 2 eV ピッチエネルギースキャンの反射率

3.2 光学定数の導出

今回行った反射率測定の結果から、光学定数に組み込むパラメータである光学定数を導出した。エネルギー反射率曲線のあるエネルギーで抜き出し、5 点の角度で並べることであるエネルギーでの角度反射率曲線にする。光学定数は入射 X 線のエネルギーにのみ依存するので、ある一定のエネルギーの角度反射率曲線をモデルフィットすることで光学定数を算出した。このモデルフィットにおいて、反射鏡面の粗さと光学定数の 1 つである f_2 を固定することで f_1 を算出した。 f_2 は X 線の吸収を表しており、本測定条件下 (エネルギー、入射角) では反射率に大きな寄与はないとして光学定数のテーブルとして用いられる henke の値で固定しモデルフィットを行った。得られた光学定数 (f_1) を図 4 に示す。図 4 では、黒は測定から得た f_1 であり、赤は現在すぐで用いられている f_1 、緑が henke の f_1 である。すぐのものと比較すると、吸収端の深さは M3 吸収端 (~ 3300 eV) は測定結果から得た f_1 の方が浅いが、他はほぼ同様である。また、今回得た f_1 では X 線微細構造 (XAFS 構造) を確認することができる。

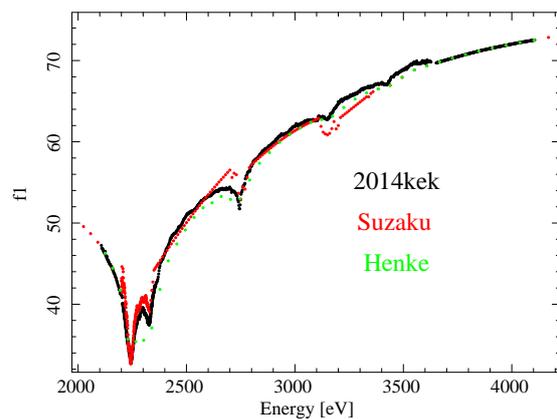


図 4: 導出した f_1

4 考察

4.1 すざくで用いられる光学定数との比較

前章で今回測定した反射率から算出した光学定数 (f_1) とすざくで用いられている f_1 の比較を行ったが、本章では測定で得た f_1 とすざくで用いられている f_1 の 2 つの反射率ファイルから arf file を作製することで、実際に天体の発するスペクトルをフィッティングするに際し、M 吸収端付近でどのような違いが現れるかを検証した。arf file とは望遠鏡と検出器の性能を元に、測定したデータから天体の発するフラックスに変換するためのものであり、応答関数の構築は正確な arf file を算出するため行われている。2 種類の arf file の違いを示すため、3 つの統計の大きな明るい天体をスペクトル源として採用した。天体はブラックホール候補星である X1630、X 線望遠鏡の衛星軌道上校正で線源として用いられるかに星雲 (crab nebula) と BL Lac 天体 PKS 2155-304 の 3 つを採用し、各 arf file を用いスペクトルフィットを行った。その結果、(表 2) で示すとおり、3 つの天体すべてで Reduced χ^2 が向上する結果であった。一例として X1630 のスペクトルフィットの結果を(図 5)に示す。(図 5) は上がスペクトルとフィット曲線、下がスペクトルとフィット曲線の割合を示している。また、赤の点線が M1-5 吸収端の位置を示しており、最も吸収の深い M4, M5 吸収端 (左 2 つ) とすざくの f_1 と大きく異なった M3 吸収端でフィットの向上が見られるのがわかる。この結果から、すざくに用いられている f_1 に比べ、精度の高い光学定数を算出することができたといえる。

表 2: 3 つの天体のスペクトルフィット結果

天体	モデル	arf	χ^2
X1630	wabs(disk bb)	すざく	1.637
X1630	wabs(disk bb)	2014kek	1.308
PKS2155	pegpwlw	すざく	1.355
PKS2155	pegpwlw	2014kek	1.157
crab	phabs(powerlaw)	すざく	3.455
crab	phabs(powerlaw)	2014kek	2.159

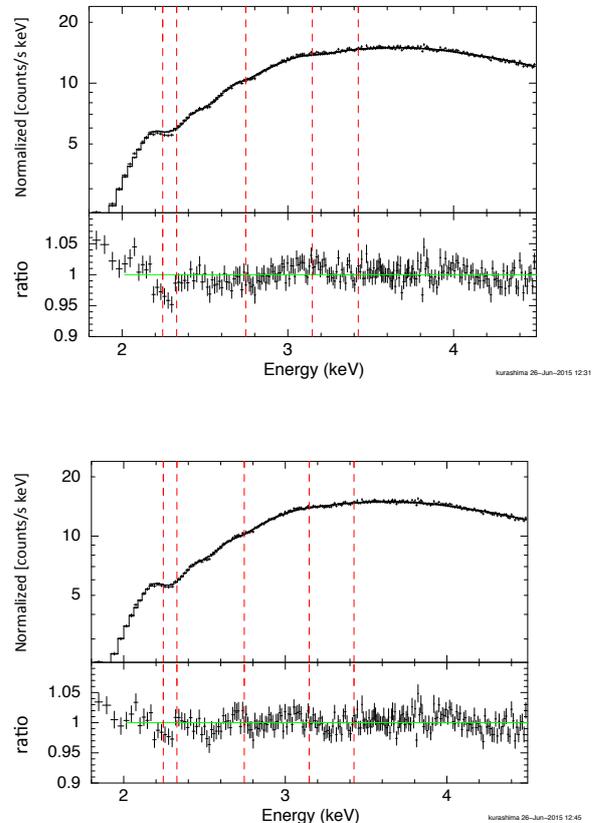


図 5: arf の異なる X1630 のスペクトルフィット結果 (上: すざく f_1 、下: 2014 f_1)

Reference

横山裕士 「Astro-E2 搭載用 X 線望遠鏡の背面反射による迷光のモデル化とその検証」2004, 中央大学大学院理工学研究科

波岡武, 山下広順 「X 線結像光学」1999, 培風館