

多層膜スーパーミラー硬 X 線望遠鏡の開発と 日米共同気球実験 (InFOC μ S)

岡 島 崇, InFOC μ S チーム

<Code 662, Laboratory for High Energy Astrophysics, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA>
e-mail: okajima@milkyway.gsfc.nasa.gov

現在、X 線天文学の分野では Chandra, XMM-Newton 衛星が活躍している。しかし、これらに搭載された X 線望遠鏡は 10 keV 以上の硬 X 線領域に感度を持っていない。このため硬 X 線領域での高感度撮像観測は難しく、軟 X 線領域に比べ、大きく立ち遅れているのが現状である。名古屋大学と NASA Goddard Space Flight Center は共同で、多層膜スーパーミラーを用いた硬 X 線望遠鏡を世界に先駆けて開発した。これを気球に搭載し、はくちょう座 X-1 の硬 X 線撮像観測に成功した。本稿では、学位論文(岡島 崇, 名古屋大学, 2002 年)に基づいて、硬 X 線望遠鏡の原理とその性能、また、気球実験の結果、将来の衛星搭載を目指した取り組みについて紹介する。

1. はじめに

2002 年度ノーベル物理学賞受賞の Giacconi らが 1962 年に始めた X 線天文学によって、以来約 40 年間にわたり数多くの気球、ロケット、衛星による観測が行なわれ、現在知られている X 線放射天体の数は実に 10 万個以上にもおよぶ。なかでも、1978 年にアメリカの X 線天文衛星 Einstein¹⁾に初めて搭載された X 線望遠鏡は、3 キロ電子ボルト (keV) までのエネルギー領域で、検出感度を従来 の 1000 倍にまで飛躍的に向上させた。そして数々の新しい発見をし、天文学全体に大きな貢献をはたした。1993 年に打ち上げられた日本の「あすか」衛星に搭載された X 線望遠鏡は、エネルギー領域を 10 keV まで伸ばすことに成功した。鉄の K 輝線のエネルギー (6 keV) まで感度をもつことにより、鉄輝線を用いた詳細な研究が可能となり、天体の物理状態の理解を深めることができた。1999 年に、アメリカは、0.5 秒角という優れた解像度をもつ Chandra 衛星²⁾を、ヨーロッパは、3300 cm² (6 keV) という大有効面積を有する XMM-Newton 衛星³⁾を打ち上げた。また、2005 年に打ち上げ予定の日本

の ASTRO-E2 衛星は、6 eV という優れたエネルギー分解能を持つことで、Chandra, XMM-Newton 衛星とともにこれまでにない詳細な天体観測を実現しようとしている。望遠鏡観測の利点は、(1) 撮像観測、(2) 検出器の小型化とスカイバックグラウンドの低減によって高い S/N (ノイズに対するシグナルの比)、つまり高感度を実現できることにある。しかしながら、これらの衛星はいずれも 10 keV 以上の硬 X 線領域には感度を持っていない。これは、より透過力の高い硬 X 線を集光結像する望遠鏡の開発が困難だったためである。そのため、従来は大面積検出器とコリメータなどによる、非撮像で低感度の測光観測しか行えず、観測によって得られる情報は限られていた。

10 keV 以下の X 線領域では、放射とイオン、電子が十分相互作用して熱的な平衡状態にある高温領域からの放射が支配的である。その放射の強度分布、時間変化、エネルギースペクトルなどの観測から、温度、密度、元素組成比とその分布を求めることで、放射体の物理状態、放射機構、進化を解明して来た。しかし、宇宙は大変希薄なため、非平衡が現れたり、加速が一方的に少数の高エネ

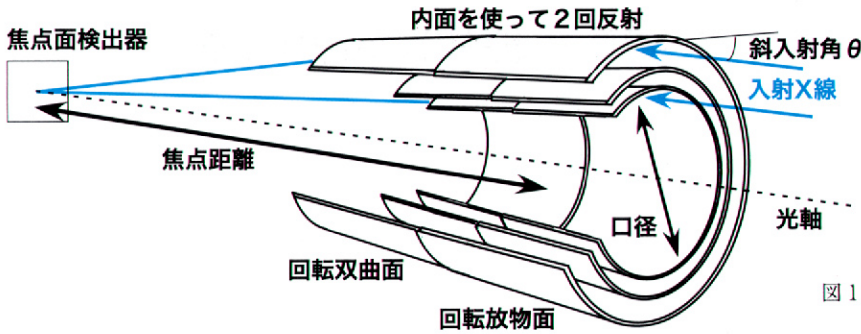


図1 ウォルター1型斜入射光学系の概念図

ルギー粒子を作り出すことが分かって来た。もし10 keV以上の硬X線領域で高感度観測をすれば、熱的放射や輝線放射はほとんど寄与しなくなり、非熱的放射だけを取り出した観測を行うことができる。非熱的放射過程は、高エネルギー荷電粒子と磁場の相互作用によるシンクロトロン放射、高エネルギー電子からの制動放射、高エネルギー電子と光子の相互作用による逆コンプトン放射など、極めて多様であるが、いずれもその元となる高エネルギー粒子の加速過程を必要とする放射である。硬X線領域で星形成領域や超新星残骸、活動銀河中心核、銀河団などからの非熱的放射のスペクトルと強度分布を観測することによって、これらの高エネルギー粒子の起源、宇宙における加速機構、非熱的エネルギー総量の解明が期待される。また、強い吸収によって隠されていた天体の観測、バックグラウンドとしての熱的放射の除去で新たな天体発見も大いに期待できる。硬X線領域で高感度、撮像観測を実現する硬X線望遠鏡は、こうした新しい研究の方向を大きく切り拓くものである。

名古屋大学の宇宙物理学研究室X線天文グループとアメリカのNASA Goddard Space Flight Center (GSFC)は共同で、反射鏡面に白金と炭素の「多層膜スーパーミラー」を用い、40 keVまで感度のある硬X線望遠鏡の開発に世界で初めて成功した。この望遠鏡を用いて2001年気球実験を行い、実際にはくちょう座X-1の硬X線イメージの取得に成功した。本稿では、硬X線望遠鏡の原理と性能、気球実験の結果について述べる。

2. X線望遠鏡

X線領域では物質に対する屈折率が1よりもわずかに小さいため、可視光の望遠鏡で使われているようなレンズを作ることができない。また、透過力が強いので、直入射(反射鏡面の法線方向)による反射も非常に難しい。そこで、金属の鏡面に極端な斜入射角(θ —反射鏡面からの角度—が1度以下)でX線が入射した場合に全反射する性質を利用する。このためX線望遠鏡の製作にはウォルター1型斜入射光学系という特殊な光学系を用いる。X線望遠鏡は、知らない人にはとても望遠鏡とは思えない形をしている(表紙写真)。図1のように回転放物面と回転双曲面を共焦点で配置し、X線をそれぞれの内面、反射鏡面で2回反射させて、焦点面に集光結像させる。しかし、極端な斜入射であるため、光軸より反射鏡面を見込む面積(幾何学的面積)は非常に小さくなり、望遠鏡の有効面積を大きくすること(光をたくさん集めること)が難しい。そこで、反射鏡を同心円状に多数配置することによって、有効面積を大きくする工夫をしている。また、全反射の臨界角(臨界エネルギー)は、X線のエネルギー(入射角)の増加とともに小さくなっていく。このため望遠鏡のエネルギー範囲は、その入射角の範囲で決まる。反射鏡への斜入射角は焦点距離と口径の比で決まり、もし入射角を小さくしてエネルギー領域を拡大しようとするれば、焦点距離を長くし、口径を小さくする必要がある。しかし、焦点距離を長くす

表1 代表的なX線望遠鏡の性能

	光学系	口径	焦点距離	入射角	反射鏡枚数	鏡面	有効面積 (6 keV)	解像度
Chandra	ウォルター1	165 cm	10 m	0.45-0.95 度	4 枚	イリジウム	300 cm ²	0.5 秒角
XMM-Newton	ウォルター1	60 cm	7.5 m	0.30-0.67 度	58 枚	金	3300 cm ²	10 秒角
ASTRO-E2	円錐近似	40 cm	4.75/4.5 m	0.18-0.60 度	175 枚	金, 白金	400 cm ²	120 秒角

距離を長くすれば装置が大きくなるし、入射角を小さくすれば幾何学的面積は小さくならざるを得ない。

このような光学系を用いて、(1) 高解像度をもち、(2) より有効面積が大きく、さらに、(3) 広いエネルギー範囲にわたって感度をもつ望遠鏡の開発が課題である。表1に全反射鏡を用いて開発された代表的なX線望遠鏡の性能についてまとめた。Chandra衛星は忠実なウォルター1型反射鏡面を再現し、高解像度を達成しているが、4枚の非常に厚い反射鏡(20~30 mm)を使っているために、開口効率(=反射鏡の幾何学的面積/望遠鏡の開口面積)が悪く、大きいわりに有効面積が小さい。XMM-Newton衛星は比較的薄く(1~3 mm)大型の反射鏡を58枚用いているため、大有効面積を達成している。しかし、各反射鏡に対する入射角がChandra衛星よりも小さいものの、まだ比較的大きいためエネルギー領域を10 keV以上に拡大することができない。ASTRO-E2衛星⁴⁾は、さらに薄い0.17 mmの反射鏡を175枚用い、多少解像度を犠牲にしているものの、開口効率が高く、わずか20 kgの重量でChandra(1.5トン)とほぼ同じ有効面積を達成している。さらに、0.18~0.60度という比較的小さな入射角範囲をもつ。エネルギー領域の拡大という課題にたいし、ASTRO-E2衛星は、(1) 小さな入射角をもち、かつ、(2) 大きな幾何学的面積(高開口効率)を持つという点で、硬X線望遠鏡にもっとも適したタイプである。しかし、全反射鏡を用いている以上、やはり10 keVが上限であった。そこで、多層膜スーパーミラーの登場である。

3. 多層膜スーパーミラー

これまでに開発されたX線望遠鏡は、金、白金またはイリジウムを反射鏡として「全反射」を利用して開発された。これをそのまま硬X線に応用すると、その焦点距離は長く、口径は小さくならざるを得ず、全反射を利用した硬X線望遠鏡は現実的に不可能であった。臨界角(臨界エネルギー)を超えると反射率は急激に減少して、X線は反射鏡内部に侵入する。そこで、図2(上)の様に反射鏡面に、重元素と軽元素、ここでは白金と炭素のある一定の周期長 d (オングストローム(Å)レベル; 1千万分の1ミリ)で交互に層を積みあげ、反射鏡面の深さ方向に周期構造を作る。ここに侵入したX線は各界面で反射され、ある特定のエネルギーのX線は干渉し強めあつて反射率が增加する。つまり、ブラッグ条件 $2d\sin\theta = m\lambda$ (λ :波長, m :次数)を満たすとき、反射率は増大する。これは結晶などによる「ブラッグ反射」と同じ原理である。これを多層膜反射鏡と呼ぶ。図2(下)は反射鏡の反射率をX線のエネルギーに対して表したものである($\theta = 0.18$ 度)。全反射鏡は臨界エネルギーを超えると急激に反射率が低下するのに対し、多層膜反射鏡は臨界エネルギーを超えたエネルギー領域で、非常に高い反射ピークを持つことがわかる。また、多層膜の周期長を調整することで、反射ピークのエネルギー(角度)を自由に選ぶことができる。しかし、多層膜反射鏡のピーク幅は狭く、このままでは観測できるエネルギー範囲が限られ、様々な波長をカバーすべき天体観測

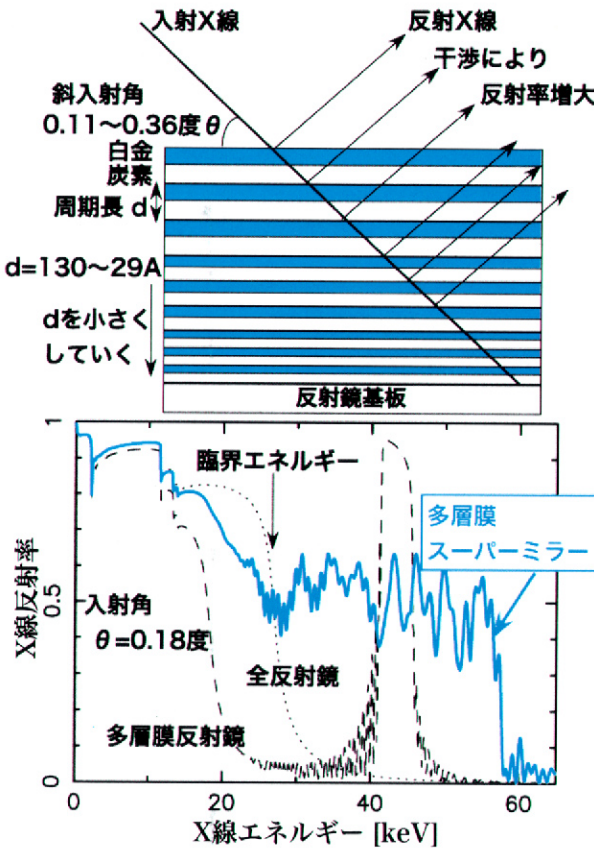


図2 多層膜スーパーミラーの概念図(上)と反射鏡の反射率の比較(下)
 実線: 多層膜スーパーミラー (白金/炭素, $d=106 \sim 38 \text{ \AA}$, $N=41$, $\Gamma=0.4$)
 破線: 多層膜反射鏡 (白金/炭素, $d=50 \text{ \AA}$, $N=50$, $\Gamma=0.4$)
 点線: 全反射鏡 (白金)

には適していない。そこで、図2の様に反射面の深さ方向に d を変化させることによって、異なるエネルギー(波長)の X 線を反射し、1枚の反射鏡で広いエネルギー範囲に渡って高い反射率を持たせるようにする。これが、「多層膜スーパーミラー」である。図2の様に、多層膜スーパーミラーは臨界エネルギーを超えた広いエネルギー領域で、高い反射率を実現できることがわかる。また、この設計は、表面の白金の厚さを少し厚くすることによって、全反射領域からブラック反射領域まで連続して高反射率をもっている。多層膜の

設計パラメータは、周期長 d の他に、積層数 N 、重元素と軽元素の比 Γ である。入射角とエネルギーを決めると d が決まる。例えば、 $\theta = 0.3$ 度の時、30 keV で多層膜の反射ピークを得るには、 $d = 40 \text{ \AA}$ である。また、エネルギーが高い X 線ほどより深く反射鏡面内に侵入できるので、深さ方向に d の値を小さくしていく。そして、 N を増やすことによって、反射率を上げることができる。しかし、X 線は反射鏡内部で減衰するため、反射率は N の単調増加関数とはならず、ある N 以上では反射率一定となる。例えば、 $\theta = 0.3$ 度で、30 keV の X 線に対し、 $(d, N) = (40, 30)$ の時、反射率 90% であるが、この値はすでに飽和している。このため、広いエネルギー範囲で高反射率を得るには、十分な最適化が必要になる。多層膜スーパーミラーでは、低エネルギーは表面の全反射で、高エネルギーは内部の周期構造で反射することにより、従来の X 線望遠鏡をほとんど同じ焦点距離、口径で硬 X 線望遠鏡に変身させることができる。

4. 硬 X 線望遠鏡の設計・製作と性能評価

ここではまず、ASTRO-E2 の望遠鏡の口径 40 cm をそのままにして、焦点距離のみ 8 m に延ばすことにした。これにより、入射角の設計値は 0.11 度から 0.36 度となった。一般に、多層膜スーパーミラーのエネルギー範囲の上限は、入射角と最小周期長で決まる。今回の設計では最大入射角が 0.36 度で、当時の最小周期長が 25 \AA であったので、エネルギー範囲を 40 keV までと決めた(ブラッグ条件の式から)。また、多層膜の重元素は、X 線の反射に寄与するため、密度の高い白金を採用した。軽元素はスペーサーとしてのみ働く、つまり、吸収の少ない物質が適しており、炭素を採用した。実際にはこれらの物理的性質だけでなく、オングストロームレベルの薄膜を形成できるか、安定した界面を形成できるかなど、化学的側面の研究を様々な元素の組み合わせで行い、その中で硬 X 線の反射

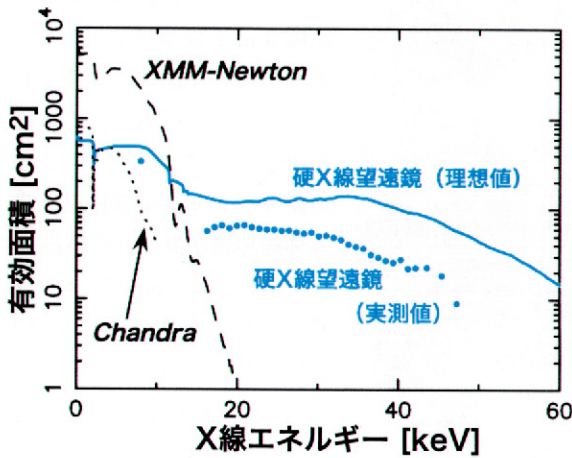


図3 X線望遠鏡の有効面積の比較

鏡としてもっとも適しているものを探した^{5, 6)}。これらの条件の下で、40 keVまで感度を持つように多層膜スーパーミラーの設計を個々の反射鏡ごとに最適化した。この設計による望遠鏡全体の有効面積を計算した結果が図3である。この設計では、多層膜の1次ピークを用い、 $d = 29 \sim 130 \text{ \AA}$ 、 $N = 25 \sim 65$ 層である。また、 Γ の値は1次ピークの反射率をもっとも大きくなる0.4に固定した。図3の実線のように、従来のX線望遠鏡がほとんど感度をもたない硬X線領域で、理想的な場合、40 keVまで 100 cm^2 以上の有効面積をもっていることがわかる。

硬X線望遠鏡の反射鏡枚数は255枚、実際には8分割して製作するので全部で2040枚の多層膜スーパーミラーを、名古屋大学とNASA/GSFCで1020枚ずつ製作した。製作には、DCマグネトロンスパッタリング装置を用いて行った。アルゴンガス圧が約0.1 Pa程度のチェンバー内で、ターゲット(今回は白金または炭素の板)を陰極として500～800 Vの電圧をかけ、アルゴンプラズマを作る。アルゴンイオン(プラスに帯電)は陰極であるターゲットに衝突し、その際に運動量を得た白金または炭素原子が飛び出す。この現象をスパッタリングと呼ぶ。この飛び出した原子を反射鏡基板上に成膜し、

層を形成する。白金と炭素を交互に成膜することによって多層膜が完成する。ここで、層の厚さ、つまり、周期長を 1 \AA のレベルで制御する必要がある。かつ、大きな反射鏡基板(高さ10 cm, 半径5～20 cmの円筒の90度分)上に均一に成膜しなければならない。もし周期長がずれたり、場所によってばらつくとも層膜ピークの位置が動いてしまい、設計通りの有効面積を得ることができない。また、基板は熱に弱いので、プラズマによって簡単にダメージを受けてしまう。これらの問題をクリアし、実用に耐え、かつ、同一の多層膜スーパーミラーを1020枚製作するために、大変な努力と時間を費やした。製作した反射鏡の内、250枚をサンプルしてそれぞれX線反射率を測定したところ、入射角0.2度でも40%以上の反射率(40 keVまで)が得られた。また、反射鏡面上での膜厚のばらつきを $\pm 3\%$ 以下に抑え、反射鏡ごとに5%以内の再現性を実現し、90%以上の歩留まりで生産できた。この大量生産は、名古屋大学の大学院生、ポスドクを中心に、総力を挙げてお正月も返上で進められ、約9ヶ月後の2001年3月、ついに世界で最初の硬X線望遠鏡を完成させた。(表紙写真)

完成した硬X線望遠鏡は、宇宙科学研究所とNASA/GSFCで性能評価が行われ、図3の青い点で示すように、有効面積は20, 30, 40 keVでそれぞれ66, 50, 27 cm^2 であることが確認できた。また、解像度は8 keV、20～40 keVでともに2.4分角であった。視野は、多少エネルギーに依存するものの、10分角で予想どおりの値になった。有効面積は、理想的な場合の計算値に比べ60%程度低下していたが、この理由は以下の3点に起因するものとして説明ができる⁷⁾。

- (1) 反射鏡面、多層膜の界面の粗さ(平均 3.8 \AA)
- (2) 反射鏡自身の形状精度
- (3) 反射鏡間の位置決定精度

現在の技術では反射鏡の表面、界面には数 Å 程度の凸凹が残ってしまうが、X線はこれにより容易に散乱され、反射率が低下してしまう(1)。また、



図4 InFOC μ S 気球搭載観測装置 (ゴンドラ)

反射鏡基板製作時の母型の形状が完璧でなく、さらに薄い基板であるため、完全な形状（この場合は円錐近似）の反射鏡を製作できない(2)。さらに、10 ミクロン程度の反射鏡の位置のばらつきがあるため(3)、X線が1点に集光しなかったり、隣りの反射鏡に邪魔されたりする。これらの理由により、有効面積の低下と解像度の劣化が生じる。

5. 気球実験 InFOC μ S と はくちょう座 X-1 の観測結果

1999年から名古屋大学とNASA/GSFCは共同で、The International Focusing Optics Collaboration for μ Crab Sensitivity (InFOC μ S (インフォーカス), PI: Jack Tueller 博士 (NASA/GSFC)) という気球プロジェクトを行っている。この実験は、硬X線望遠鏡を搭載し繰り返し気球フライトを行って、銀河団や超新星残骸などを観測し、上記のような研究を行うのが目的である。InFOC μ Sの第1回目のフライトは、2001年の7月5日現地時間午後8時、アメリカのテキサス州にあるNational Scientific Balloon Facility (NSBF) から行われた。図4は気球搭載観測装置

(ゴンドラ)で、真ん中に焦点距離8 mを保つ光学ベンチがあり、その左端に望遠鏡、右端のチェンバー内部に焦点面検出器として、カドミウム=亜鉛=テルルの位置検出型半導体検出器が置かれている⁸⁾。検出器は 2×2 mm (1×1 分角)のピクセルが、 12×12 個配置されており、検出器サイズは 25×25 mmで望遠鏡の視野10分角をカバーする。また、エネルギー分解能は60 keVにて4 keVである。ゴンドラの姿勢制御は、方位角方向と仰角方向の2軸制御、経緯台方式である。また、

ゴンドラ自身の姿勢は、スターカメラ(望遠鏡の隣)、ジャイロなどの装置によってモニターされる。ゴンドラの重量は1.6トンで、重さ大きさともに最大級である。ゴンドラは、パラシュートを介して直径130 mの巨大な気球に吊り下げられて飛揚を行う(表紙写真)。真夏のテキサスに1ヶ月半滞在し、打ち上げまでの間、望遠鏡、姿勢系などの各種機器の試験を繰り返し行った。深夜にスターカメラの較正のためにゴンドラを空に向けた。その姿を見たとき、「これまでの5年間このために実験をやってきたんだ」と感動したものである。

打ち上げ後、気球は順調に高度を上げてゆき、4時間後、予想通りの高度40 kmに到達した。この高度では、残留大気の影響が 3 gf/cm^2 で、30 keVのX線の透過率は20%である。このため、実際には25~40 keVのエネルギー領域での観測になる。そして約3時間の観測を行い、合計7時間のフライト後、ゴンドラは気球から切り離された。この間、気球は時速100 kmで移動しており、NSBFから700 km西方で回収した。ちなみに、筆者は、NASA/GSFCからNSBFまで3日間かけて車で望遠

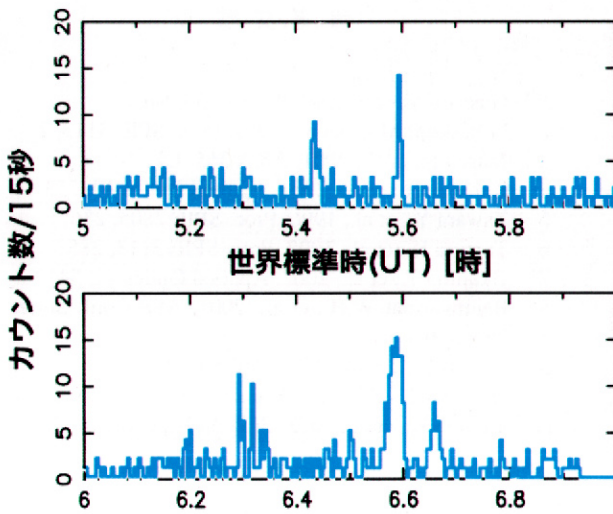


図5 はくちょう座 X-1 観測時のカウント数の変化 (20–40 keV)

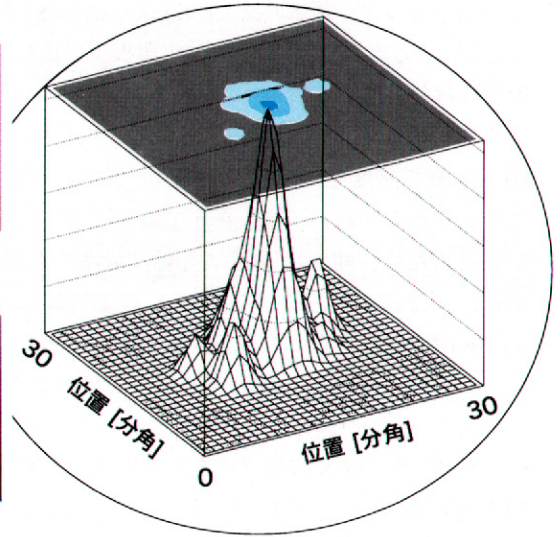


図6 InFOCUSで得られたはくちょう座 X-1 の硬 X 線イメージ (20–40 keV)

鏡を運んだだけでなく、フライト中気球を追いかけて西へ車で疾走し、ジェット機、ヘリコプターと乗り継いで、テキサスの猛暑から無事に望遠鏡を回収した。ゴンドラ等その他の機器もほぼ無傷で回収でき、繰り返し気球観測に用いることができる。

第1回のフライトでは、風速が強かったため予想以上にゴンドラ姿勢の揺らぎが大きく、定常的な観測ができなかったため、はくちょう座 X-1 のみの観測となった。姿勢制御の最大の問題は、気球の上下運動と強い風により、方位角と仰角方向ではない方向、つまり、制御系を搭載していない方向の揺れが大きく、十分な姿勢制御ができなかったことである。はくちょう座 X-1 の観測中のデータの解析により、図5のようなカウント数の変化が見られた。すなわち、有意なカウント（ピーク）が得られている時刻には、はくちょう座 X-1 を視野にとらえていたことが分かる。実際 5.6 と 6.6 時 (UT) 付近のピークカウント数は、はくちょう座 X-1 からの予想値と同じである。また、ジャイロとスターカメラのデータを用いた姿勢解析により、その時間に実際にはくちょう座 X-1 方向を向いていたことも分かった。さらに姿勢データの解析から X 線像の再合

成を行い、実質たった2分間の観測時間ながら、はくちょう座 X-1 の硬 X 線イメージを得ることに成功した (図6)。この像は4分角の広がりをもっているが (角分解能よりも大きい)、姿勢補正の不定性を考慮すると、はくちょう座 X-1 の広がりについては議論することができない。解析結果からはくちょう座 X-1 の X 線強度は、 $4.7 \times 10^{-9} \text{ ergs/cm}^2/\text{sec}$ (20 ~ 40 keV) と求まり、時間変動を考慮すれば、過去の衛星に搭載された大面積検出器による観測結果と一致する⁹⁾。また、硬 X 線領域でのバックグラウンド ($7 \times 10^{-4} \text{ counts/sec/keV/cm}^2$) が大幅に低減され、従来の100倍以上の高感度を実現できた¹⁰⁾。

6. まとめと今後

名古屋大学と NASA/GSFC は、世界で初めて多層膜スーパーミラーを用いて、40 keV まで感度を持った硬 X 線望遠鏡の開発に成功し、気球実験ではくちょう座 X-1 を観測することによって、その性能を実証した。硬 X 線望遠鏡は、日本の次期 X 線天文衛星 NeXT, アメリカの Constellation-X 衛星に搭載を提案されている。現在衛星搭載を目指し

て、(1) エネルギー領域の拡大、(2) 反射鏡の粗さ低減などによる有効面積の増大、(3) 薄板反射鏡の空間角分解能の改善を行っている。多層膜スーパーミラーのデザインを改良することによって、すでに 80 keV まで感度を持たせる設計はできている¹¹⁾。このようなより高いエネルギーでは粗さがより深刻になるため、粗さの改善は重要な課題である。また、すでに述べたように、硬 X 線望遠鏡には ASTRO-E2 と同タイプの薄板反射鏡がもっとも適している。このため、反射鏡基板の母型の改善、位置決め方法の改善により、薄板反射鏡で 30 秒角以下を目指す。硬 X 線望遠鏡を衛星に搭載すれば、10 ~ 100 keV のエネルギー領域で従来の 1000 倍の感度を達成でき、Einstein、「あすか」衛星が登場した時と同様、X 線天文学に新しい窓を開くことで非常に多くの成果が期待できる。

第 2 回目の InFOC μ S フライトは 2003 年 9 月、アメリカのニューメキシコ州で予定されている。今回のフライトでは、問題であった姿勢制御系を重点的に改善する。また、観測時間も約 12 時間確保できる予定である。InFOC μ S は回数を重ねるとともに、望遠鏡の台数を増やし、より長時間のフライトを行い、銀河団、活動銀河核からの硬 X 線、超新星残骸の核ガンマ線の観測などを行う。NeXT などが打ち上げられるまでの 7 年間、こうした一連の気球実験により、数々の発見とともに、一足先に新しい宇宙像が見え始めるだろう。

7. おわりに

本研究は、名古屋大学を始めとした InFOC μ S チーム全ての人の協力によって行われ、第 1 回の気球実験を成功させることができました。また、文部科学省科学研究費補助金特別推進研究によって行われたものです。

InFOC μ S チーム：山下広順、田原 譲、小賀坂康志、田村啓輔（名大院理）、J. Tueller、P.J. Serlemitsos、岡島 崇（NASA/GSFC）、國枝秀世（宇宙研）他

参考文献

- 1) Giacconi R., et al., 1979, ApJ 230, 540
- 2) Weisskopf M.C., et al., 1997, Proc. SPIE 3113, 2
- 3) Jansen F., et al., 2001, A&A 365, L1
- 4) Kunieda H., et al., 2001, Applied Optics 40, 553
- 5) Tawara Y., et al., 1996, Proc. SPIE 2805, 236
- 6) Tamura K., et al., 1997, Proc. SPIE 3113, 285
- 7) Okajima T., et al., 2002, Applied Optics 41, 5417
- 8) Baumgartner W.H., et al., 2001, ASP Conf. Series 251, 520
- 9) Di Salvo T., et al., 2001, ApJ 547, 1024
- 10) Okajima T., 2002, Ph.D. Thesis, Nagoya University
- 11) Tamura K., et al., 2003, Proc. SPIE, in press

The Development of a hard X-ray imaging telescope with multilayer supermirrors and the InFOC μ S balloon-borne experiment
Takashi OKAJIMA and the InFOC μ S team
Laboratory for High Energy Astrophysics, NASA Goddard Space Flight Center

Abstract: Today the Chandra and XMM-Newton satellites play an active part in X-ray astronomy. However, these satellites have a limited energy range of only up to 10 keV, and cannot observe in the astronomically interesting hard X-ray band above 10 keV. Nagoya University and NASA's Goddard Space Flight Center have collaborated to successfully develop a balloon-borne supermirror hard X-ray telescope called InFOC μ S capable of astronomical imaging and spectroscopy above 10 keV. InFOC μ S has successfully flown and obtained a hard X-ray image of Cyg X-1 in July 2001. This article explains the principle and performance of the InFOC μ S hard X-ray mirror, the results of the first balloon flight, and prospects for future hard X-ray satellite missions.