

活動的宇宙の観測を目指した硬 X 線撮像システムの気球による実証実験

粟木久光(愛媛大)、松本浩典(大阪大)、高橋弘充(広島大)、
斎藤芳隆(ISAS/JAXA)、鈴木浩文(中部大)

概要

20 世紀の観測技術の進歩により、宇宙には様々な活動的な現象が溢れていることが明らかとなった。しかし、活動性の現場や活動性を作り出す天体がどのように作られたのかは謎が多い。特に、超高エネルギー粒子や銀河中心の巨大ブラックホールは良い例であろう。この謎を解明するためには、硬 X 線帯での詳細観測が有効であるが、硬 X 線帯での撮像システム、特に硬 X 線望遠鏡の製造は難しく、この技術的な困難さがこの帯域での詳細観測を阻んできた。我々はこれまでに X 線反射鏡の基材として有望な CFRP(炭素繊維強化プラスチック)に着目し、X 線反射鏡の開発を行ってきた。本研究では、開発中の X 線反射鏡技術を飛翔体搭載技術に発展させるために、60 秒角を切る過去最高の角度分解能を持つプロトタイプの X 線望遠鏡を製作し、気球実験にて「かに星雲」を観測し、その可能性を実証する。

1 はじめに

宇宙は活動的な現象に満ちており、X 線を使った宇宙観測はこの解明に大きく貢献してきた。近年の観測で、ほとんど全ての銀河の中心には巨大ブラックホール(BH)が存在し、しかも巨大 BH の質量は母銀河のバルジの質量と比例することがわかってきた[1]。しかし巨大 BH の成長過程、さらに巨大 BH と母銀河の共進化のメカニズムはよくわかっていない。一方、宇宙線の中には 10^{20} eV を超えるエネルギーを持つものが発見され、人類が到達した最高エネルギーの 1 億倍以上ものエネルギーを生み出す加速機構が宇宙には存在することも明らかとなっている[2]。しかし、よく知られたフェルミ加速機構にしても、初段のエネルギー注入機構や、衝撃波と磁場の非線形相互作用など、詳しいところはよくわかってない。これらを解明するには、硬 X 線帯での高感度観測が最も有効である。しかし、これまでの硬 X 線望遠鏡の角度分解能は 1~2 分角であった。

X 線望遠鏡の開発が難しい主な理由は、X 線が全反射を起こす斜入射角が数度以下と小さく、X 線望遠鏡の光学系が斜入射光学系にならざるを得ないことである(図 1)。

このため X 線の集光面積は鏡面の表面積のわずか数%程度となる。10 keV 以上の硬 X 線帯では、鏡面に多層膜を成膜することで、全反射に加え、ブラッグ反射を利用した反射となるが、斜入射角が 0.5 度以下であり 1%より小さくなる。例えば、「ひとみ」衛星に搭載した硬 X 線望

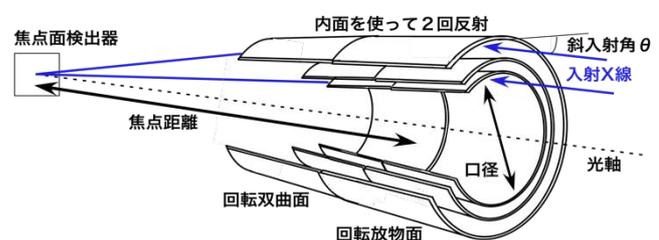


図 1 斜入射光学系(Wolter I 型光学系)の概念図

遠鏡では、反射鏡の総表面積が「すばる」望遠鏡の主鏡に匹敵するにも関わらず、30 keV での有効面積がわずか 300 cm² 程度である[3]。有効面積を増加させるには、反射鏡基板を薄くし、図 1 の多層構造を増やす必要がある。しかし、基板の薄板化と高角度分解能化に必要な基板の形状高精度化は相反するものであり、このため、硬 X 線望遠鏡の角度分解能は米国 NuSTAR 衛星の 60 秒角が最高であり[4]、日本の「ひとみ」衛星では 100 秒角に留まっている(図 2)[5]。

我々は、大面積高角度分解能硬 X 線望遠鏡の実現を目指して、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を基材とした軽量薄板 X 線反射鏡の開発を行ってきた。CFRP は比重が 2 と小さく、比強度がアルミよりも約 10 倍高く、金型に合わせた成形が可能である。宇宙望遠鏡として本技術を実証するには、1 枚の反射鏡ではなく、望遠鏡として組み上げた時の性能が不可欠であり、気球等の飛翔体での天体観測はその技術を実証するものとなる。我々は、CFRP 加工専門業者と開発する CFRP 反射鏡を用いて NuSTAR を超える 60 秒角を切る過去最高角度分解能の硬 X 線望遠鏡の実証試験(気球実験)を実施する。

この気球実験は、本格的な飛翔体実験に向けてのプロトタイプ実験であり、将来、大面積望遠鏡による実証試験(国外気球実験)を経て、FORCE, XL-Calibur[6]などのような国内外の飛翔体実験へと発展させたいと考えている。

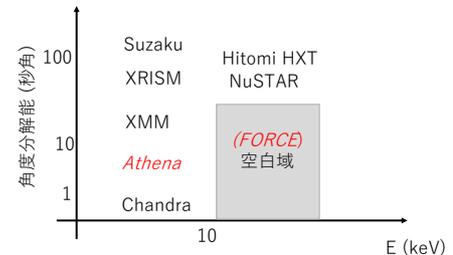


図 2 主要な X 線天文衛星のエネルギー帯域と角度分解能(赤字の斜体は計画中)

3 実験計画

本申請で開発する望遠鏡のプロトモデルは、反射鏡枚数 15 層~20 層のものである。焦点距離 8m において、30keV の X 線の有効面積が最大となる反射鏡の半径が約 100 mm となるので、この半径付近で反射鏡を積層する。1 段あたりの反射鏡長さが 100 mm の反射鏡を半径 100mm から内側に 20 層重ねた時の有効面積が図 3 である。本気球実験では、「JAXA が提供する飛翔機会を利用した気球実験計画」のうち、**北海道の大樹航空宇宙実験場で実施する国内気球実験計画**を目指す。気球実験のパイロードは、望遠鏡・検出器を搭載する 8 m の光学ベンチ、光学ベンチを天体に向ける経緯台、それらを支える Gondola ベースから構成される。通信、電源などは Gondola ベース上に搭載される(図 4)。

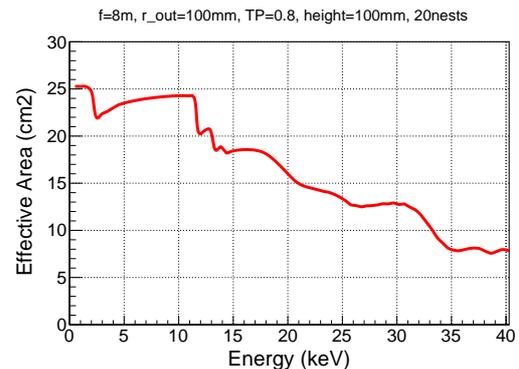


図 3 気球実験で使用する望遠鏡の有効面積 (f= 8m, 鏡1段の長さ=100 mm, 外側半径=100 mm, Throughput=0.8 を仮定)

観測予定天体は X 線で明るく標準光源としてしばしば使用される「かに星雲」である。大樹町での「かに星雲」の最大高度は 70 度であり、地球大気の影響を受けにくい天体である。我々が気球実験実施日として希望している 8 月 20 日頃では朝 7 時頃に最大高度に達する(図 5)。かに星雲は、25-35 keV のエネルギー帯で 0.08 photons/s/cm² の光子数を持つので、パイロードを高度 39 km 前後に飛翔させた場合 X 線透過率が約 1/3 となり、我々のプロトタイプ望遠鏡で得られるカウント数は 540 counts/1800s と予想される。ここで、1800 秒は飛翔可能時間 1 時間の 50% に相当する。このカウント数は高角度分解能のデモンストレーションが可能光子数となる。なお、基板の長さを 150 mm とした場合、反射鏡 1 枚あたりの有効面積は 1.5 倍となり、15 層で目標とする有効面積に達する。基板長は CFRP 成型で用いる精密金型の加工サイズから決める予定である。

4 開発項目

本実験を実現するための開発項目は X 線望遠鏡、検出器、姿勢系、通信・電源・その他、Gondola、解析ソフトである。各項目の開発スケジュールを線表 1 に示す。以下、主要な開発項目について紹介する。

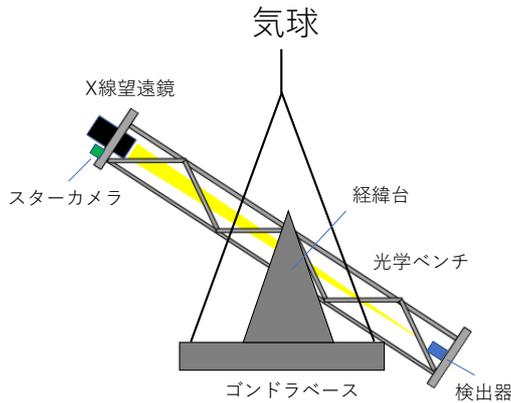


図4 気球実験ペイロードの概念図

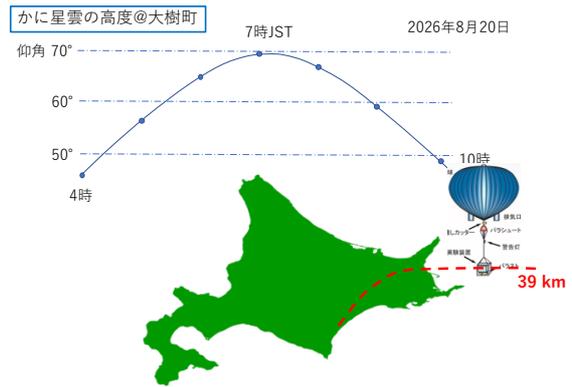


図5 2026年8月20日の大樹町から観測できる「かに星雲」の高度

4-1 X線望遠鏡(栗木、松本、鈴木)

CFRPの持つ成形性の高さは放物面と双曲面を有する Wolter 光学系反射鏡を一体で成形することを可能とし、2つの反射面の配置誤差による結像性能の劣化(約 60 秒角)を大幅に軽減する。しかし、CFRP 素材の表面は粗く、X線反射鏡とするには平滑化が必要である[7]。愛媛大学では平滑法として超薄板ガラスを CFRP 表面に貼り付ける方法を研究しており、昨年7月に、1層の Wolter 型反射鏡(1段の基板長 150 mm)で Half Power Diameter (HPD)約 150 秒角 (20 keV の X 線)のところに来た。結像性能劣化の主な原因は反射鏡表面に見られる凹凸($\sigma \sim 1 \mu\text{m}$)である。現在、CFRP 成型直後にガラスを貼り付けるのではなく、レプリカ処理[8]で CFRP 表面の凹凸を減らした後にガラスを貼り付ける方法を試している。開発途中であるが、ガラスの貼り付けがうまく行えた箇所では2回反射で約 60 秒角(HPW)の結果を得ている。R3 年度から、CFRP 成型で高い技術力を持つ業者が本開発に加わっており、試作期間内に高角度分解能 Wolter 型反射鏡の製作に必要な技術を修得する。

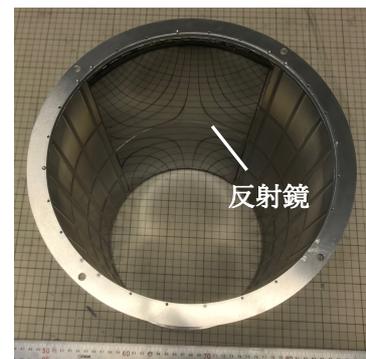


図6 望遠鏡の外観
反射鏡1枚をハウジングに装着した例である。ハウジングは 1/4 周を 1 セグメントとした4セグメントから構成される。

CFRP 成形には金型が重要であり、熱膨張係数が $0 \sim 60^\circ\text{C}$ の範囲で $< 1 \times 10^{-6}$ であるインバー材 IC-ZX を使用した超精密金型を製作する。この金型の加工精度は上の 150 秒角を得た金型よりも 1 桁高いものであり、超精密加工で高い実績をもつ中部大学が開発を担当する[9]。なお、ガラス表面への X 線反射膜の形成は大阪大学、または、ISAS/JAXA で実施する予定である。

4.2 検出器(高橋)

検出器は、宇宙 X 線の画像をとる撮像部とバックグラウンド除去のためのアクティブシールド部から構成される。検出器部の構造を図7に示す。新規開発要素ができるだけ少なくなるように撮像部には ADVAPIX TPX3 を用いている。この開発で利用する素子、読み出し ASIC は加速器実験用に製造されてお

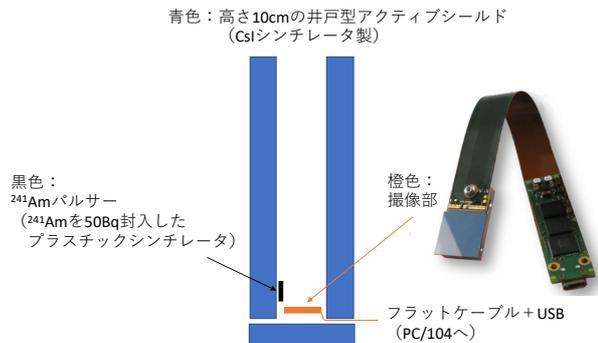


図7 今回、組み上げる検出器。検出器はフラットケーブルで接続され、その先端には USB 端子が付属している。USB 端子経由で宇宙用の PC である PC/104 と接続する。

り、宇宙線への放射線耐性および真空での動作も問題ない。

4.3 姿勢系(松本、粟木)

硬 X 線撮像では視野中心から数分角天体の位置が離れるだけで有効面積が 50%程度に低下する。このため、1分角以下の姿勢制御精度が求められ、姿勢制御が本気球実験の中で最も重要かつ難しい技術の1つとなる。

2000年代中頃の硬 X 線観測気球実験 SUMIT[10]で採用された、経緯台方式(方位角と仰角を制御)を参考に姿勢制御系を開発する。

線表1 開発スケジュール

項目	R3以前	R4	R5	R6	R7	R8
マスタースケジュール		試作	FM製作 & 試験		地上較正 組み上げ	8月放球 ▲
望遠鏡	反射鏡の開発	反射鏡の試作 ▲ SP-8試験	SP-8試験	FM製作 & 試験 ▲ SP-8試験	地上試験@SP-8	
検出器		検出器の試作	▲ SP-8試験	FM製作 & 試験 ▲ SP-8試験	地上試験@SP-8	
姿勢系		デザインの検討		FM製作 & 試験		
ゴンドラ		デザインの検討	試作	FM製作		
通信系,電源系他				FM製作 & 試験		
気球		▲ 長尺ゴンドラの試験				製作
地上系ソフト&解析					地上系、解析ソフトの準備	解析

R5 年度に若狭湾エネルギー研究センターにて宇宙線を模擬した検出器への陽子照射実験を、

R6 年度に熱真空試験を実施予定

まとめ

現在開発中の CFRP を用いた軽量高角度分解能 X 線反射鏡を実証するために、プロトモデルを製作し、国内実験場から気球実験を行う。この実証実験が成功することで、CFRP に新たに光学部品としての使用法が加わることになり、その特徴を生かして X 線反射鏡をはじめとして多くの波長で光学部品としての用途が拡大するであろう。

現在、来年度から開発を進められるように、気球実験の体制を整えるとともに、立ち上げメンバーを中心に詳細検討を進めている。これと並行し、一番困難である望遠鏡の開発を外部資金を活用して進めている。これまでは、実験室での開発であったが、気球実験という明確な目標を持つことで、技術者の方に興味を持っていただけるとともに、学生の研究意欲の向上につながると考えている。

参考文献

- [1] Marconi, A., and Hunt, L. K., *Astrophys. J.*, 589, L21-L245 (2003)
- [2] Bastista, R. A., et al. *Front. Astron. Space Sci.* (2019)
- [3] Awaki, H., et al. *ApOpt.* 53, 7664 (2014)
- [4] Harrison, F. A. et al. *Astrophys. J.* 770, 103 (2013)
- [5] Matsumoto, H., et al. *JATIS*, 4, 011212 (2018)
- [6] Abarr, Q., et al. *Astroparticle Phys.* 126, 102539 (2021)
- [7] Sugita, S., et al., *JATIS*, 2, 014002 (2016)
- [8] Utsunomiya, S., Kamiya, T. and Shimizu, R., *Proc. SPIE*, 8837, 88370P (2013)
- [9] Suzuki, H., et al. *Int. J. of Automation Technology Vol.10 No.4*, Au10-4-7972 (2016)
- [10] Ogasaka, Y., et al. *Proc. SPIE*, 6688, 668803 (2007)