解説

X 線天文衛星の挑戦

新たな展開を目指す伸展式光学系と編隊飛行

Challenges of X-ray Astronomy

Breakthrough with Extensible Optical Benches and Formation Flying

國枝 秀世

Hideyo KUNIEDA

◎1975 年名古屋大学理学部物理学科卒業。1977 年名古屋大学大学院理学研究科修士課程修了。1978 年名古屋大学大学院理学研究科博士課程中退。1979 年名古屋大学理学部助手。1982 年理学博士（名古屋大学）。1993 年名古屋大学理学部助教授。1999 年宇宙科学研究所教授。2005 年名古屋大学大学院理学研究科教授。現在に至る。
1986 年 2 月 - 1988 年 2 月 NASA ゴダード研究所客員研究員。2009 年 1 月。日本天文学会理事長
◎研究・専門テーマは、高エネルギー宇宙物理学、X 線結像光学
◎名古屋大学大学院理学研究科 教授
(〒464-8602 名古屋市千種区不老町)
／E-mail: kunieda@u.phys.nagoya-u.ac.jp)

1. はじめに

天文学は、古代人たちが空を見上げ、その美しさと不思議さにあこがれ、また正確な暦を作り上げるために始まった。その手段は、長らく目視によるもので進められてきたが、1609 年ガリレオが望遠鏡で宇宙を見る⁽¹⁾ ことで革命的に進歩した。2009 年はその 400 年を記念して、国連の定めた世界天文年として国内でもさまざまな催しが計画されている⁽²⁾。

ガリレオ以後も、観測技術の進歩とともに、新たな天体現象の発見が続けられた。私たちの先人たちは、力学の法則から始まり、相対性理論まで、多くの物理法則を天体現象から見だし、検証をしてきた。20 世紀は物理学が大躍進した時代であり、その物理法則をあてはめることで、多くの現象が理解されてきた。核融合で輝く星の一生が解明され、理論の産物であった中性子星、ブラックホールの存在が、観測により確認された。中でも、宇宙開闢の謎を記述する、ビッグバン理論の登場は、人類の宇宙観に再び、大きな衝撃を与えるものであった。

こうした天文学を前進させた、観測技術の進化は、本稿のテーマである、X 線天文学の分野でとくに著しい。大気の外からしか行えない X 線観測においては、衛星に搭載可能な観測技術の開発が、天文学の進歩と表裏一体で続けられた。通常の衛星に収まりきれない大型の X 線光学系により、21 世紀の X 線天文学をけん引するため、現在、伸展式の光学台方式と、2 機の衛星からなる編隊飛行の検

討が進められている。本稿では、X 線天文学の特徴、新たな波長域を目指す X 線望遠鏡、そして上に述べた大型光学系の二つの試みについて述べる。

2. X 線衛星が切り拓く天文学

2.1 天体観測に立ちちはだかる大気の「壁」

X 線は、可視光の約 1000 分の一の波長を持つ電磁波である。宇宙から降り注ぐ電磁波のうち、可視光を除くほとんどの電磁波は大気に吸収されてしまう。図 1 は、宇宙からの電磁波が、上空のどの高さまで降りて来ることができるかを示している。横軸は波長、縦軸は地上からの高さ、実線は、上空から入射した電磁波が 100 分の一になる高さを示している。1 μm 付近の狭い波長域の可視光のみが、空気や水を透過して地上に到達し、人類は唯一、この波長域で宇宙を観測してきた。いっぽう、X 線は、大気の圧力 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ に対応する酸素や窒素に吸収される。このため、X 線観測をするには、100km 以上の高度に上がって、「大気の壁」を乗り越えなければならない。

そのきっかけは、宇宙開発競争が与えてくれた。1957 年、旧ソ連によるスプートニク衛星の打ち上げ、1961 年のガガーリンの有人宇宙飛行に驚いたアメリカでは、ケネディ大統領が、「1960 年代に人類を月に送る」と宣言し、アポロ計画が始まった。この背景の中で、「月へ降り立つ人類に降り注ぐ X 線の強度」を調べるため、月が反射する X 線の観測を目的に、MIT のロッシとジャッコニ（2002 年度ノーベル賞受賞）が 1962 年にロケット実験を実施し

図 1 大気の壁

図2 X線星の分布図(銀河座標)

図3 カシオペア座超新星残骸のX線像

た⁽³⁾。驚くことに、太陽のX線放射の数億倍以上明るいX線天体が次々と発見され、その後の、華々しいX線天文学の幕開けとなった。図2は観測されたX線天体を銀河座標に書き込んだものである⁽⁴⁾。黒丸の大きさがX線の明るさを示し、普通の星と同じく、銀河面に集中していることがわかる。

2.2 X線で見えてくる宇宙

可視光の千倍のエネルギーを持つX線光子を、地上では、数万Vの電圧で加速した電子を金属にぶつけることで発生させる。宇宙では、数千万度を超す、高温ガスの熱運動や、電磁場による加速で高エネルギー電子が作られ、X線が放射される。X線で観測すると、宇宙の中でも、こうした高温、もしくは高エネルギー天体を選択的に見ることになる。たとえば太陽の光球は可視光で見えるものの、周辺の高温コロナはX線でしか見ることができない。これまでに、宇宙のさまざまな階層の天体からX線が発せられていることがわかってきており、X線でしか見られない、宇宙の新しい側面を人類に見せてくれることになった。その中から、熱い宇宙の代表として、超新星爆発の跡を、そして、宇宙の怪物、ブラックホール周辺からのX線放射について述べる。

2.2.1 超新星残骸 核融合のエネルギーで光り輝く恒星はその一生の最期に、星内部への崩壊とともに、高温のガスを周辺に放出する。そのエネルギーは 10^{44} Jに及び、そのばく大なエネルギーとともに、核融合で作られた重い元素を、星間空間へ供給する。私たちは、X線望遠鏡と

図4 超新星残骸のX線スペクトル

図5 X線望遠鏡の構造

CCDカメラなどの組み合わせで、超新星残骸のX線像(図3)とスペクトル(図4)を観測し、数百光年に広がった高温ガスの温度、密度、元素の分布を調べることができる。図4のスペクトルの中には、元素ごとに決まったエネルギーにピークが多数見られ、その強度から、元素存在量を決められる。これは、地上で行う、蛍光分析と同じく、元素の発する特性X線を用い、恒星が超新星爆発までに作った元素を、元素分析でひも解く手法である。観測された高温ガスの塊が、どんな恒星の爆発で作られたか、そして、どう星間空間に広がって行くのか、そして次の星の材料となっていく、宇宙の元素リサイクルの現場をわれわれは見ている。

2.2.2 ブラックホール 超新星爆発では、中心部が内部に崩壊するときの重力エネルギーが、爆発のエネルギー源であるが、同時に、中心に物質を押し縮めることで重いコアを作る。通常の星の内部で働く、ガス圧などでは支えられない高圧となり、フェルミ粒子である電子の縮退圧で支えることで白色矮星ができる。より高圧になると、中性子の縮退圧で支えられる中性子星が作られる。さらに高い圧力になると、支えきれずにブラックホールになると言われている。この運命を決めるのは、超新星爆発を起こした恒星の質量であり、太陽質量の30倍を越す大質量星がブラックホールの生みの親と考えられている。

ブラックホールに向けて物質が流れ込むと、強い重力場の位置エネルギーが解放され、強い放射を起こす。ブラックホールに取り込まれる前に、流入物質は静止質量のエン

ルギー ($E=mc^2$) の 10% 程度を放射に変換すると考えられている。最も良く知られているブラックホール天体、白鳥座 X-1 では、 $\sim 10^{14}$ kg/秒で物質が流れ込み、 10^{30-31} J/s の明るさで輝いている。落ち込むガスは角運動量を持つため、降着円盤を形作り、その温度は 1 000 万度を超える。その大部分は数 keV の X 線として放射されるため、われわれは X 線スペクトルの観測から、流入ガスが高階電離していること、光速の 10% 近くの高速で運動していること、そしてブラックホールの強い重力場で波長が長くなっていることを明らかにした⁽⁵⁾。

2.3 X 線望遠鏡と衛星計画

上に示した X 線の画像とスペクトルを得るには、光学望遠鏡とは異なる X 線光学系と検出器が必要となる。とくに集光撮像系を構成する X 線反射鏡は、可視光の 1 000 倍のエネルギーの光子を反射するため、斜入射角（反射鏡表面から測った入射 X 線の角度）を 1 度以下に小さくすること、表面粗さを 0.3nm rms 以下にすることが求められる。中でも、斜入射角が小さいことから、円すいの内面を反射面とする、斜入射光学系が用いられる（図 5）。この図からわかるように、最大入射角を決めると、望遠鏡の口径と焦点距離の比が決まる。すざく衛星（2005 年打上げ）では最大斜入射角を 10 keV の X 線の臨界角である 0.6 度と決め口径 40cm、焦点距離は 4.75m を選んだ⁽⁶⁾。

遠方の天体からの微弱な X 線を観測するためには、なるべく大きな面積で集光結像する必要がある。しかし、人工衛星に搭載して打ち上げるためには、小型軽量であること、打ち上げ時の振動／衝撃に耐えることが求められる。とくに、打上げ時にロケット頭胴部に収納できるサイズでありながら、上記、長焦点光学系を実現することが、中型衛星では問題となる。これを解決する、二つの方法を次章に示す。

3. 巨大望遠鏡へ向けて

長い焦点距離の光学系を実現するため、たとえば X 線望遠鏡を衛星の先端へ、焦点面検出器を衛星基部に搭載することは、衛星構造体に打ち上げに耐える大きな強度を要求する。通常、単純には、片持ちの梁構造の固有振動数を 10～15 Hz 以上に高めるだけの強度を目指して設計する。同じ変形量に抑えるには、梁の構造強度は長さの 3 乗で高める必要がある。すなわち、打上げ時の衛星の中の配置として、なるべく基部から近い（低い）ところに配置し、これを軌道上で伸展するか、望遠鏡と焦点面検出器を別の衛星として、編隊飛行をするか、二つの方法が求められることになる。

3.1 求められる精度

前の章に示した X 線望遠鏡と焦点面検出器の、相対位置と方向を保証する光学台の、必要精度を表 1 にまとめる。

表 1 要求される相対位置精度

項目	焦点距離 誤差	焦点面内 XY 制御	焦点面内 XY 計測	望遠鏡 方位角誤差
精度	10mm	1mm	0.1mm	1 分角

衛星搭載光学系は、地上と異なり、軌道上で特有の環境にさらされる。それは、重力がほぼゼロであること、衛星の前端と後端の重力の差（重力傾斜）が効くこと、そして、日照／日陰による温度環境の大きな変化があることである。これらの環境の変化のもとで、表 1 の精度を守ることが求められる。軌道上では、これらの精度を逐次モニタする計測系を搭載することもある。その情報を用いて、観測した像のずれを補正することも考えられる。

3.2 伸展式光学台

日本では、4 機目の X 線観測衛星「あすか」（1993 年打上げ）に、本格的 X 線望遠鏡を初めて搭載した。打上げロケット M3-S の頭胴部の許容領域が狭く、目標とした焦点距離 3.5m を収納することが困難であった。このため、鏡筒を 110cm スライドして伸展する機構を、初めて取り入れることにした。5 機目の「すざく」（2005 年打上げ）では同様の構造（図 6）で、点線で囲んだ部分を 154cm 伸展している。構造体は膨張係数の小さな CFRP（炭素繊維強化プラスチック）を主材とし、周囲を断熱材で覆った。ボールチェーンを巻き上げることで可動部を引き上げ、ラッチ機構で精度良く保持した。打上げ時の鏡筒の共振周波数はロケット本体の共振点を避け、約 20Hz を達成した。いっぽう、伸展後の鏡筒の共振点は、姿勢制御系の周波数帯域との干渉を避けるため、2Hz とした。また、無重力下での形状を、地上の重力の中で試験するため、鏡筒にかかる望遠鏡等の重量を相殺する工夫を加えて、調整を実施した。伸展後の位置決め精度、再現性は表 1 の仕様を十分満足するものであった。これは光学系として伸展式を用いた、世界でも初めての例となった。

さらに高いエネルギーの X 線を反射集光する望遠鏡では、さらに入射角が小さく（臨界角 $\propto 1/E$ ）、長い光学系が必要になる。2013 年の打上げを目指す Astro-H 計画では、収納効率が良い、マスト方式の採用が計画されている。パンタグラフのように、畳み込んだフレームを順番に繰り出して行く機構である（図 7）。一辺が 25cm の四角トラス 18 段で焦点面検出器を 5m 伸展し、焦点距離 12m を実現する⁽⁸⁾。鏡筒をスライドして伸展する方式に比べ、収納時のスペースが小さく、より長い伸展物に適している。これ

図 6 すざく衛星の構造と軌道上の姿

図7 Astro-Hの構造

図8 XEUS計画編隊飛行案

までも、軌道上で20mを超すブームを伸展した実績がある（「みどり」衛星の太陽電池展開）。Astro-Hでは100kg近い検出器部を多段の伸展物で精度良く保持できるかどうか心配し、試験機を作り、精度、強度、繰り返し再現性等について確認している。

3.3 編隊飛行

X線天文学のためには、2020年ごろの実現を目指して、大型国際X線天文台XEUSが計画され、そこでは35～50mの焦点距離が要求された。これを前述のスライド式の伸展機構で実現するには、多段が必要となり、そのリスクは、大きく増大する。収納効率の良い、マスト方式でも、数tの望遠鏡と焦点面検出器を35～50m離し、共振周波数を1～2 Hzに高める構造強度を、限られた重量で実現するのは容易ではない。そこで、X線望遠鏡と焦点面検出器を別々の衛星に組み込み、編隊飛行させる案が提案された（図8）。ある天体に望遠鏡衛星を向けたときには、検出器衛星をその焦点位置に移動させることになる。

検出器衛星の位置と方向を測定しながら、スラスタなど

で能動的に調整することで、望遠鏡としての指向方向と、焦点像の確保を保証する。しかし、近地球の軌道では、一方の衛星がケプラー軌道にあると、もう一方は、ケプラー軌道でないため、軌道制御が常時必要となる。6tに及ぶXEUSの重量と35～50mの焦点距離では、周回ごとの軌道制御のスラスタに大きな出力が必要となることと、消費燃料が衛星重量のかかなりの割合を占める問題があった。そこで、重力的な安定点（ラグランジュ点）に2衛星を置くことで、この問題は大幅に軽減された。（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、こうした編隊飛行のため、ETS-7のドッキングに用いられた、相対位置計測系とアクチュエータ系を基に、開発が進められている。

編隊飛行方式は、長い焦点距離が可能であること、複数の検出器の切り替えが容易であること、巨大で強度と精度の必要な構造物が不要であることなどの利点を持つ。いっぽう、常に相対位置保持のアクチュエータが必要で、さまざまな危機的モードが想定され、リスク軽減の十分な考え方とその実証が求められる。

4. X線天文学のこれから

現在、XEUS衛星は、日米欧三者の合同ミッションIXO（International X-ray Observatory）に統合された⁽⁸⁾。その中では、上記議論が行われ、焦点距離を20～25mに縮めること、伸展式を優先し、編隊飛行をバックアッププランとすることで検討が進められている。今後の宇宙におけるさまざまな衛星計画では、長い基線長を必要とする赤外線干涉計、重力波観測衛星、電場磁場の空間分布を実測するための衛星群などにおいて、伸展式光学系、編隊飛行の技術が想定されている。最近の衛星計画では、技術的成熟度を求めるあまり、先端的技術への挑戦がしにくくなっている。野心的な技術を小型衛星などで実証することで、計画的に開発し、夢の実現に結びつけていきたい。X線天文学はその最前線として挑戦し続ける。

最後に本稿の準備に協力頂いた、日本飛行機（株）阿部和弘さん、JAXA 河野功さんのご協力を感謝致します。

（原稿受付 2008年9月22日）

●文 献

- (1) ガリレオ・ガリレイ, 星界の報告, (1610).
- (2) 世界天文年 <http://www.astronomy2009.jp/>
- (3) Giacconi, Gursky, Paolini, and Rossi, Evidence for X Rays From Sources Outside the Solar System, *Phys. Rev. Lett.*, **9** (1962), 439.
- (4) Forman, ほか, The Fourth Uhuru Catalog of X-Ray Sources, *Ap. J. S.*, **38** (1978), 357.
- (5) Tanaka, ほか, Gravitationally Redshifted Emission Implying an Accretion Disk and Massive Black Hole in the Active Galaxy MCG-6-30-15, *Nature*, **375** (1995), 659-661.
- (6) Kunieda, ほか, X-Ray Telescope on Board Astro-E, -I. Optical Design and Fabrication of Thin Foil Mirrors, *Appl. Opt.*, **40** (2001), 553-564.
- (7) <http://www.astro.isas.jaxa.jp/future/NeXT/NeXT2008-J/>
- (8) <http://ixo.gsfc.nasa.gov/>