

X線で宇宙のはてを見るために —衛星搭載用 X 線望遠鏡の開発—

国 枝 秀 世

〈名古屋大学理学部 〒464-01 名古屋市千種区不老町〉

X線天文学は、これまで最も激しく活動する特殊な天体を探ることで天文学の重要な一角を担って来ました。ところが現在では、X線望遠鏡の登場により、ほとんどの天体をその観測対象として、視野に収めるようになりました。我々はその望遠鏡の感度を更に高めることで、宇宙のはてにまで迫ろうとしています。この稿では、来年2月打ち上げ予定のX線天文衛星 ASTRO-D のために準備中の超軽量、高効率 X 線望遠鏡を中心に X 線望遠鏡開発の様子をお話します。

0. はじめに

太陽以外の天体で最初に X 線が観測されたのはかの有名なさそり座 X-1 です。ときに 1962 年 6 月のこと。アポロ計画によって月を目指したアメリカは宇宙飛行士への影響を考え、月からの X 線放射を観測するためのロケット実験を行いました。この時、わずか数 cm² のガイガー計数管によって月の近くの方角にあったさそり座 X-1 が偶然発見された訳です。以来、人々はさまざまな検出システムを開発し、より遠くの暗い天体からの X 線を研究することを可能にして来ました。なかでも、大きな面積で X 線を焦点に集め、2 次元像を与える X 線望遠鏡は現代の X 線天文学の最も有力な武器となっています。我々日本の X 線天文グループでも、X 線望遠鏡を用いて宇宙のはてに迫ろうと考え、来年2月打ち上げの ASTRO-D 衛星、1999 年を目指した DUET 計画のための X 線望遠鏡の開発を進めています。ここでは、まず読者の皆さんが親しんでいる可視光の望遠鏡と大きな違いを持つ X 線望遠鏡の特徴を示し、次に日本の中小型衛星に適した、小型、超軽量で大面積を

実現できる薄板多重 X 線望遠鏡を従来型の X 線望遠鏡と対比させながら紹介して行こうと思います。

1. X 線望遠鏡の特徴

(1) 斜入射光学系

X 線天文学で、観測対象のパラエティーに最も富んだエネルギー帯域は 0.2-10 keV で、可視光の約一千分の一の波長に対応します。この領域ではほとんどの物質中の屈折率が 1 に極めて近く、鏡面からすれすれの入射角 $0.5-1^\circ$ を用いないと、有効な全反射は得られません (図 1)。このため、可視光のように鏡面にほぼ垂直に入射させる光学系は使えません。概念的には、円錐の内側でわずかに反射させ、回転軸の先の方に焦点を結ぶ方式が一般的です。もう少し光学的に忠実に言えば、回転放物面と双曲面を共焦点に置き、その内側で 2 回反射する Wolter Type がよく使われています (図 2)。これと同時に、集める光の波長が可視光の望遠鏡の一千分の一ですから、表面の粗さをその程度まで滑らかに仕上げなければなりません。

この斜入射光学系の最大の欠点は斜入射の角度が小さい為、入射側から見込んだ有効な面積に比

Hideyo Kunieda:

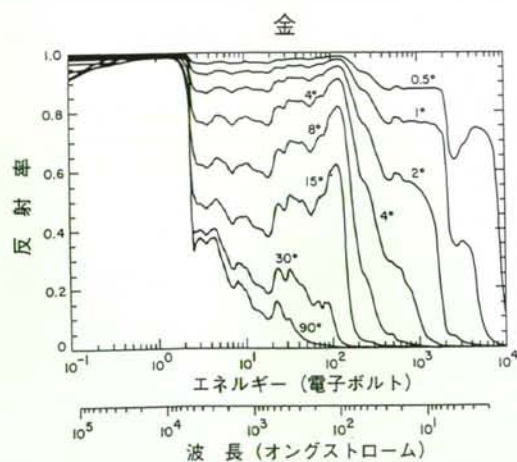


図1 X線反射率

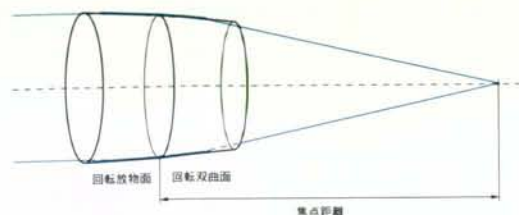


図2 斜入射X線望遠鏡

べ、鏡面の実面積が約100倍も余計に必要な事です。宇宙から来る微弱なX線(最も明るいX線源の一つである蟹星雲でも2 counts/秒/cm²)をなるべく沢山集めるためには、より大面積を効率良く実現しなければなりません。

(2)衛星搭載の諸条件

ここで注目しているX線(0.2-10 keV)は大気に吸収され、地上には到達しません。このためX線による天体観測はロケット等の飛翔体により、吸収のない高度200 km以上で行わねばなりません。X線天文学が始まったのも、こうした飛翔体が利用可能になった1960年代である訳です。

しかし、このため観測装置は重量、大きさに極めて厳しい制限が与えられ、尚且つ打ち上げ時の激しい振動、衝撃(>15 G)に耐え得る必要があります。唯でさえ、斜入射のため重量が必要になるX線望遠鏡に対して、より小さく、より軽く、

且つ丈夫に作るという、相矛盾する要求があり、これまでは太陽の様に極めて明るい天体(10⁵ counts/秒/cm²)か、比較的入射角を大きくできる2 keV以下の超軟X線領域でのみ、X線望遠鏡の観測が実現されて来ました。前者が“陽光”衛星であり、後者の例が“Einstein”衛星、“ROSAT”です。これに対し、昨年11月にその使命を終えた“銀河”衛星では、望遠鏡のかわりに4000 cm²という大面積比例計数管を用い、天文学的に重要な元素である鉄の特性X線(6.4-6.7 keV)を含む20 keVまでのスペクトルを詳細に観測し、数々の発見をもたらしました。このことから1990年代のX線天文学では少なくとも10 keVまでは集光できるX線望遠鏡の出現が切望されています。現在、我々は1993年2月打ち上げ予定のASTRO-D衛星でこれを実現すべく準備を進めています。以下の章ではこの計画で用いる方式を中心にX線望遠鏡の製作方法、性能、更に将来への展望をお話します。

2. X線望遠鏡の製作法

(1)研磨法

光学の望遠鏡でも用いられている、最も古典的な製作法が研磨法です。基板としては数cmの厚さのガラスの円筒の内側を切削し、その表面をピッチ等の研磨で滑らかにします。X線の反射率を低下させるような粗さとは、大まかに言ってX線の波長程度、すなわち数オングストロームの高さの凹凸に相当し、これを押さえ込むには大変な手間がかかります。またその凹凸の評価もミクロンの波長を持つ可視光では限界がありました。これらの限界を越える技術は極く最近の研究(科研費重点領域研究「X線結像光学」代表者山下広順、等)を待たねばならず、まさに今、進みつつあると言えます。

4 keV以下の軟X線に限られたとは言え、世界最初のX線撮像観測を可能にしたEinstein衛星を始めとし、現在観測を続けているROSAT衛

星、今世紀中の打ち上げを目指している AXAF 衛星の望遠鏡がこの研磨方式で作られています。いずれも 3-10 トンを越す大型の衛星で、重量、効率等を見捨てず、結像性能に重点を置いた設計になっています。鏡面形状は回転放物面と双曲面を組み合わせた、Wolter Type I 型を忠実に再現しており、AXAF では 1 秒角以下の空間分解能を達成して、可視光の望遠鏡（地上では大気の大擾乱のため 2-3 秒角）を越えようとしています。

(2)レプリカ法

中小型の衛星では研磨法による望遠鏡は重量的に不可能に近いので、鏡面形状はなるべく保存したまま軽くする工夫をしたのがレプリカ法です。この場合もまずガラス母型を X 線反射鏡と同程度まで研磨し、その外側に基板となる円筒（金属もしくは CFRP）をかぶせ、間にエポキシ樹脂を流し込んで固めます。予め研磨面に金を蒸着しておくので、金とガラス母型の間が剥がれ、基板側に母型の形状を写し取ることが出来ます(図 3)。基板/エポキシ合わせて 2-3 mm 程度に減らすことができ、研磨法そのものに比べ、はるかに密に同心円の積層が可能になりました。この方法では写し取りに伴う形状のずれが結像性能を 30 秒 - 1 分角に制限してしまいます。EXOSAT 衛星や XMM 計画では、この程度の空間分解能で我慢するかわりに、限られた重量の中で有効面積を稼ぐことを目的に、このレプリカ法を採用しています。

(3)薄板多重望遠鏡

日本の X 線天文衛星は 1979 年の「白鳥」、83 年の「天馬」、87 年の「銀河」で 3 つ（この他、太陽観測では 84 年の「火の鳥」、91 年の「陽光」）ですが、衛星全体の重量はそれぞれ、90 kg、220 kg、420 kg しかありません。次期の X 線衛星 ASTRO-D 計画でも 420 kg。更にその次に提案している DUET 計画で初めて 1 トンを越えることになりそうです(表 1)。いずれにせよ、前述の Einstein、AXAF に比べると 1 桁近くも軽い衛星であることが分かります。その一方で 10 keV までのより

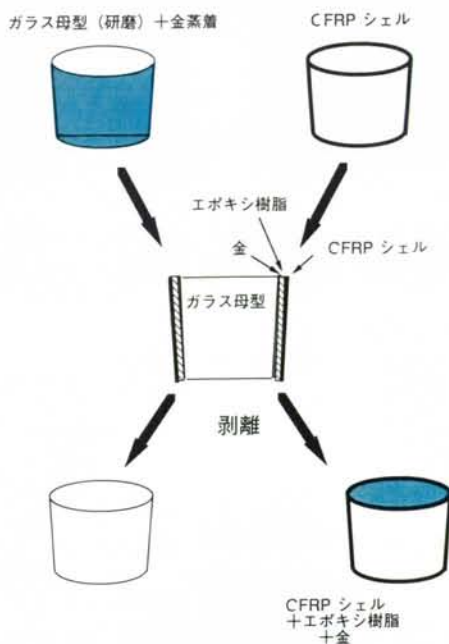


図 3 レプリカ法

高いエネルギーの X 線を集めたいと言う学問的欲求も高まっています。これらを両立させるためには、鏡面基板を極限まで薄くして、出来る限り多層の鏡面をつめこむしかありません。

この方法（薄板多重法）を最初に提案（1978）し、実現（1990）したのは NASA Goddard 研究所の Serlemitsos 博士です。基板としては 0.13 mm のアルミフォイルを使い、ローラーによる機械成型もしくは母型押しつけによる熱成型で円錐基板を作ります。アルミフォイルは薄くて研磨できないためアクリル 10-20 ミクロンをコーティングし、表面のミクロンオーダーの凹凸を滑らかにします。更に金 500 オングストロームを蒸着して X 線反射面にします(図 4)。こうしてできた基板を扇型をした箱に同心円状に並べます。これが円錐の 1/4 にあたり、上下 2 段重ねることで前述の回転放物面と双曲面を近似します。それぞれの箱の上下面には放射状にスポークが置かれ、そこに切られた溝にはまったフォイルの位置決めを行います(図 5)。実際に組み上げられた ASTRO-D 搭

載用望遠鏡の写真を図6（と表紙）に示します。この望遠鏡は現在、院生の多大な協力を得て、宇宙研のビームラインでX線特性の測定中です。

この方法の最大の特徴は、基板厚さを極限まで薄くして、望遠鏡の口径の大部分を有効面積としたところにあります。それに伴って、鏡面研磨を

アクリルコーティングで補い、回転2次曲面を円錐で近似するなどの工夫を行っています。一方、集光精度は薄い基板のうねりと成型時の歪みのため、研磨法より1桁以上悪く2-3分角程度の広がりを持っています。

以上3つの製作法で作られたX線望遠鏡の特徴を表1にまとめました。

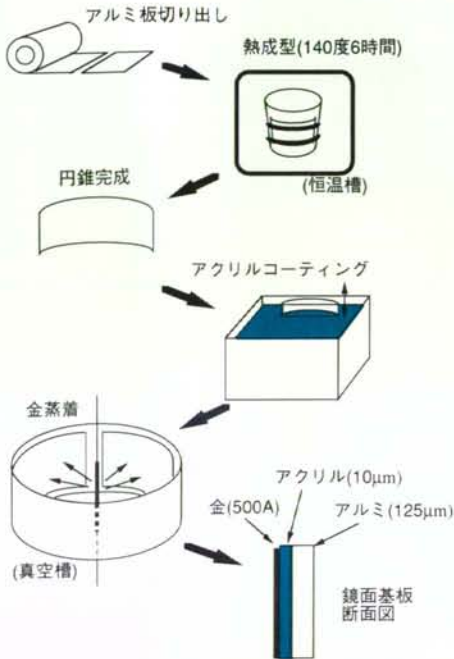


図4 薄板望遠鏡鏡面製作法

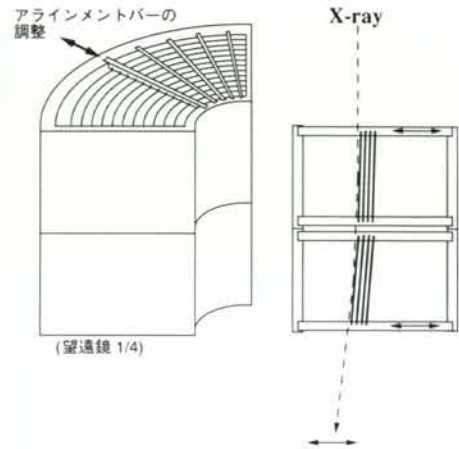


図5 鏡面基板の位置決め

表1 各種望遠鏡の比較

衛星名	ROSAT (ヨーロッパ)	AXAF (アメリカ)	ASTRO-D (日本)	XMM (ヨーロッパ)
打ち上げ	1990.5	1998	1993.2	1999
衛星重量	2400kg	10000kg	420kg	2400kg
有効面積(1keV)	300cm ²	900cm ²	1500cm ²	5500cm ²
有効面積(7keV)	-----	200cm ²	600cm ²	2500cm ²
製作法	研磨法	研磨法	薄板多重	レプリカ
口径	84cm	120cm	35cm(4台)	70cm(3台)
焦点距離	2.4m	10m	3.5m	7.5m
基板素材	ガラス	ガラス	アルミ+アクリル	CFRP+エポキシ
厚み	~30mm	~30mm	0, 13mm	0, 6-1, 4mm
積層数	4層	6層	120層	58層
像の広がり	~1秒角	<1秒角	2-3分角	30秒角

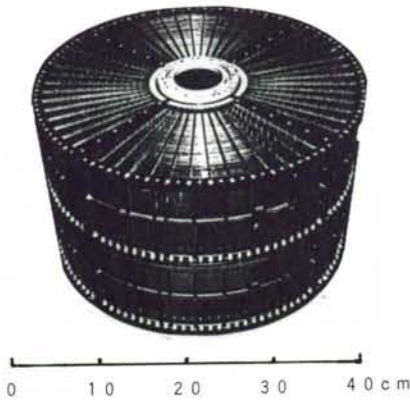


図6 ASTRO-D搭載用 X 線望遠鏡

3. X 線望遠鏡の集光特性

(1)有効面積

X 線望遠鏡では反射率が 1 に比べて急激に小さくなる臨界角付近の全反射を利用しているため、望遠鏡の効率が入射 X 線の波長に大きく依存することになります。図 7 には各種衛星用の X 線望遠鏡の有効面積を X 線の波長（エネルギー）に対して示してあります。ROSAT 衛星は 2 keV 以下の超軟 X 線にのみ注目したミッションです。それに比べ、これから 90 年代後半に向けて準備の進

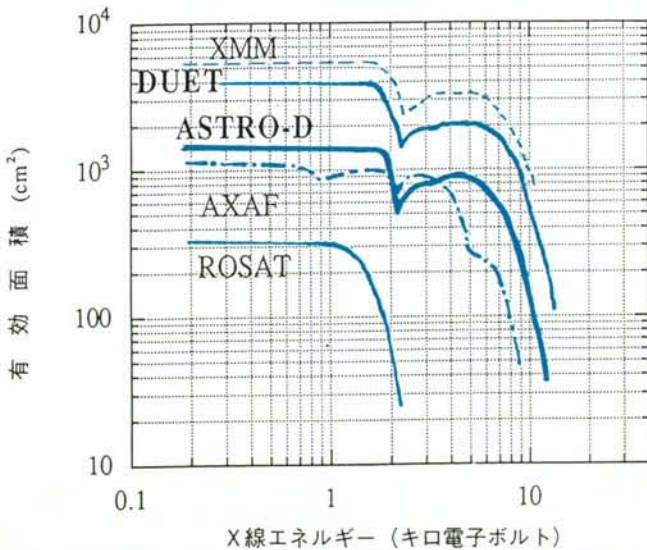


図7 X 線望遠鏡の有効面積

んでいるミッションはいずれも、より入射角を小さくしてより高いエネルギーの X 線を集めようとしています。それも 1000 cm²を越える大面積を目指しています。

入射角を 0.5° とすると、実際に必要な鏡面の面積は (1/sin 0.5°) 倍すなわち 100 倍です。2 回反射を考慮すると、数十平方メートルの X 線反射鏡を準備しなければなりません。これは口径 8 メートルクラスの光学望遠鏡と同じ面積で、その表面をオングストロームの精度で滑らかにするわけですから、どんな方法にせよ如何に大変かお分かり頂けると思います。しかも全体の重量をせいぜい 100 kg までにしないと日本の衛星では打ち上げられないとなると、我々は何かの性能、例えば次に述べる集光精度を少し犠牲にしても、なるだけ大面積を目指す方が得策と考えた訳です。

来年 2 月打ち上げ予定の ASTRO-D では、望遠鏡 40 kg で有効面積 600 cm² (@7 keV) を目指しています。1 mCrab (蟹星雲の千分の一) の X 線源から等価幅 100 eV の鉄輝線が出ていると、10000 秒の観測で 100 個の鉄輝線が検出されることとなります。しかし CCD の持つ高い波長分解能を活かして線幅や輝線エネルギーを精度よく決定するには更に大面積を実現し統計を上げる必要があります。ですから、ASTRO-D の次の衛星では、大型ロケットが使える様になるとするならば、是非数千 cm²の有効面積を目指したいものです。

(2)結像性能

各種の X 線望遠鏡の集光精度は表 1 にまとめてあります。図 8 には、現在我々が準備を進めている ASTRO-D の X 線望遠鏡の結像の例を示します。最初の 2 次元分布図 (図 8 a) は可視光で得られた点光源の焦点画像 (6×6 mm : mm~分角) です。4 箇所切れ込みは、望遠鏡を 1/4 ずつ組み上げている境界部による影です。中央のピークからの距離に対して

単位面積あたりの強度をプロットしたのが図9の輝度分布 (Ti-K:宇宙研で測定) です。中央に向かって鋭いピークを持つことがわかります。この形は普通の望遠鏡の像で見られる2次元ガウス分布とは全く違います。それを調べるため、1/4鏡だけの像 (図8b) を見てみましょう。この時、反射鏡は上側の90度分しかなく、その作る像が鏡面に垂直 (画面で上下) 方向に大きなばらつきを持ち、反対に平行 (画面で左右) 方向にはあまりばらつきを作らないことがわかります。

このような結像の特徴は、斜入射光学系特有なものです。直入射鏡の場合に、もし2次元方向どちらも同じ程度の凹凸があると、焦点面では2次元どちらも同じだけにじむこととなります。しかし、斜入射鏡では、光軸と平行方向 (円錐の母線) の凹凸は焦点距離を光の“てこ”として像を図8bの縦方向に大きくにじませます。光軸に垂直方向 (円錐の断面内) の凹凸は円錐の半径を光の“てこ”とするため、はるかに小さなにじみしか作りません (斜入射光学系では口径/焦点距離は $2 \times \tan(0.5^\circ \times 4)$ 程度すなわち 0.07)。望遠鏡全体ではこうした細長い像 (例えばガウス分布) を光軸中心で重ね合わせるため、強度分布は (ガウス分布/ r) の形になり、観測された中心部のカスプ的なピークが説明できます。

こうした像を特徴づける第一の方法は、近接した二つの点光源がどの間隔まで識別できるかです。図8cは直径12秒角の光源を36秒角離して置いたばあいの可視光像で、ASTRO-Dでは約30秒の間隔までは分解できそうです。第二の方法は、強度分布のピークを中心に描いた円内の積分強度で表す定量的方法です。図9は円の直径に対してこれをプロットしたものです。50%の光が3分角の円内に (Half Power Diameter), 10%が0.6分角に含まれている様子が分かります。これまで、ASTRO-Dの望遠鏡の結像性能を2-3分角として来たのはこの (HPD) 値のことですが、その内側は2次元ガウスではなく、鋭いピークがあって、

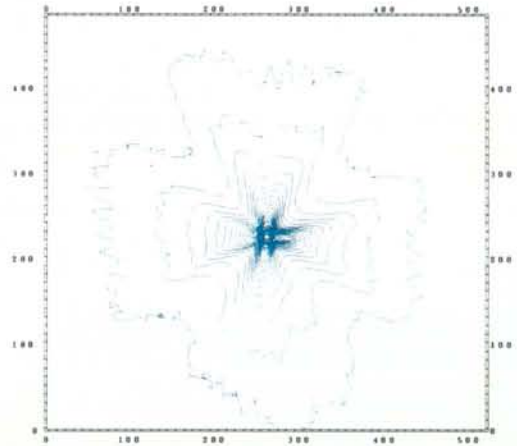


図8 a 望遠鏡全体による像

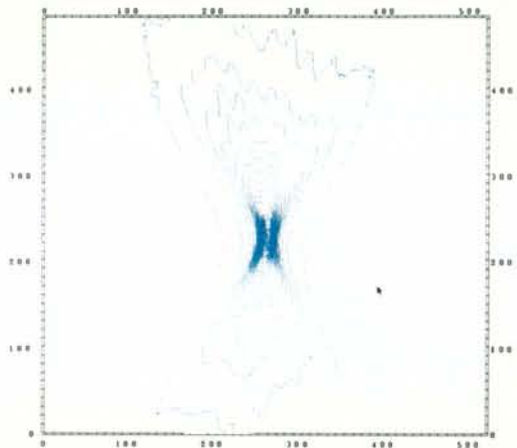


図8 b 望遠鏡1/4による像

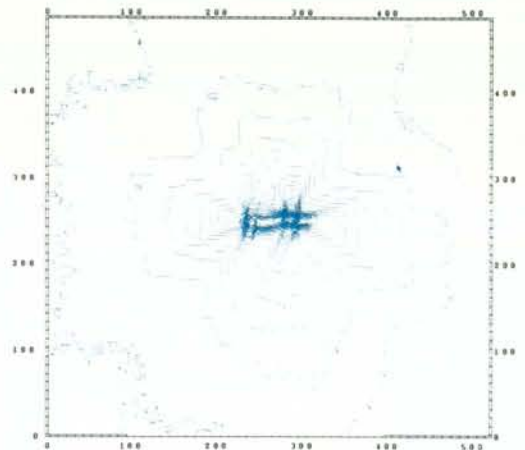


図8 c 2個の点源の全体像

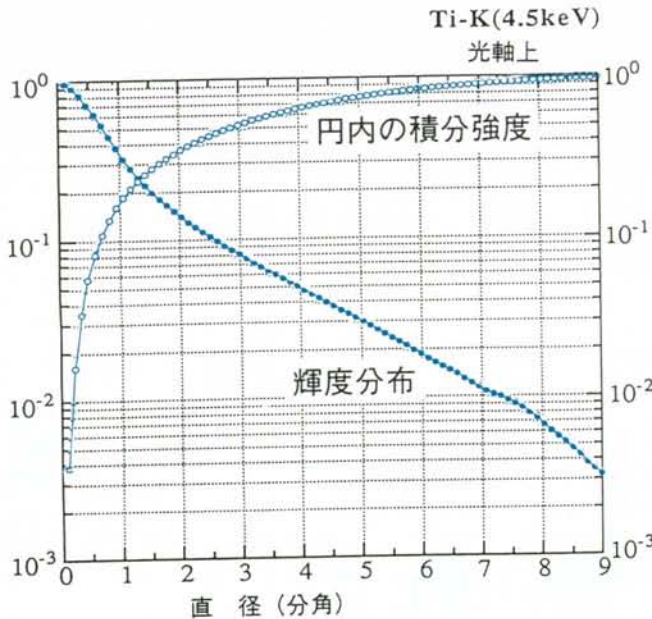


図9 結像精度

点源などの分解などには、数倍威力を発揮すると期待できそうです。

4. 次世代 X 線望遠鏡のために

(1) もっと光を！

ASTRO-D 衛星は確かに鉄輝線付近のエネルギーの X 線に対し 600 cm²の有効面積を持つ最初の望遠鏡衛星ではありますが、“銀河”衛星の 4000 cm²の有効面積に慣れた人々は統計の悪さに必ずがっかりするにちがいありません。CCD の高いエネルギー分解能を活かすためにも、望遠鏡の大面積化は不可欠です。

大面積化には台数を増やすか個々の望遠鏡を大きくするか二つの方法があります。しかし、台数を増やすと、検出器の台数も増え、相互の較正が難しくなります。一方望遠鏡を大きくする、すなわち口径を大きくするには、現在三つの問題があると考えています。第一は大口径の鏡面基板の機械的強度が極端に不足し、形状誤差が極めて大きくなることです。第二は入射角保存のため、焦点距離を長くする必要があるので、幸いロケ

ットの大型化の可能性があり、ASTRO-D の次では 4.5 m の長さが衛星に許され、2 m の伸展機構を用いれば 6 m の焦点距離が可能です。但し、伸展機構の信頼性、再現性が更に要求されます。第三は、焦点距離が 2 倍になると、同じ視野をカバーするには 2 倍の大きさの焦点面検出器が必要です。特に CCD は現在でも 4 個の素子を並べており、困難さはより深刻になります。

いずれの方法をとるにせよ、入射角が一定であれば、準備しなければならない鏡面の面積は 100 m²を越え、アルミ 0.13 mm 厚なら、基板重量だけで 100 kg になってしまいます。通常、基板と同程度の重量の鏡筒、両者を合わせたのと同じ程度の重量の光学台が必要となるため、望遠鏡全体の重量は 400 kg になってしまいます。そこで登

場するのは、比重がアルミの半分以下であるプラスチックフォイルの可能性です。最近の製品では、0.1-0.2 mm 程度の厚さでもかなりの強度を持ったものもあり、より滑らかで均質な素材に期待が寄せられています。但し、アルミのように塑性変形させられないので、成型法に工夫が必要です。例えば扇型に切ったフォイルの両端を接着して円錐を作ることができますが、円錐の円周長の精度が入射角を決めるので高い精度が必要なこと、ひとつつながりであるため組み上げが難しいことなどの問題があります。

(2) もっと高画質を！

ASTRO-D 衛星では有効面積を確保するために、Einstein 衛星や AXAF 計画の様な秒角の結像性能に対し、2-3 分角で我慢せざるを得ないことになっています。その最大の原因は、効率を高めるために採用した薄い基板のうねりが消しきれないことにあります。

一般に鏡面基板の凹凸は、その凹凸の表面波長により、大きく 3 つに分類されます。(1)最も短い、1~100 ミクロン程度の凹凸、すなわち面粗さは、

X線の散乱（表面波長と同じ周期の反射型回折格子による回折）を引き起こし、散乱強度は凹凸の深さの二乗に比例します。これは、研磨やプラスチックコーティングにより、平均二乗誤差で5オングストローム以下に押し込め込むことで解消します。(2)0.1～数ミリメートルの凹凸は基板自身の形状によるもので、法線方向のゆらぎのため、反射光のばらつき、すなわち像のにじみを作ります。研磨法等では、最初の基板切削の段階で消えますが、薄板多重法では、全体形状の成型時にも、コーティングによっても消すことができません。ここが結像性能劣化の最大の原因になっていると考えています。(3)ミリメートルより長く、基板の全長までの波長の凹凸は、基板のそりとか形状誤差と呼ぶことができます。研磨法では切削時、レプリカ法では剝離後の残留ひずみ、薄板多重法では円錐形状への成型時に問題が生じる場合があります。また最終的な組み上げ時の鏡面基板支持機構、相互調整などによる誤差もこの中に含まれます。

現在の空間分解能2-3分角を、秒角とは言わないまでも1分を切って30秒角を実現することが次世代の薄板多重X線望遠鏡開発の目標です。その為には、現在の分解能を決めている、長さミリメートル、深さサブミクロン程度の凹凸を解消することが第一です。この凹凸は基板自身の性質で決まりますから、より滑らかな素材（アルミ/プラスチック）を探しています。また、アルミフォイルでレプリカを取る方法も試していますが、これも中々有望です。これとは全く別に、直接薄い円錐を削り出すことで、より形状誤差の少ない基板を作ることを田原（名大）が（株）オークマの協力を得て試しています。特に近年著しく進歩した、超精密加工の技術を導入することで、口径20cm、長さ10cm、肉厚0.3ミリ程度のものが加工できるようになりました。小型の試作品では1.5分角程度の結像精度が得られる可能性が示唆されました。

(3) DUET 計画を目指して

日本のX線天文グループでは、ASTRO-Dの次、1999年の打ち上げを目指して、DUET(Deep Universe Exploring Experiment)計画を提案しています。最初の提案では、全重量1.5トン、全長4.5m、口径2.1mの衛星に、有効面積3000cm²のX線望遠鏡(口径60cm、焦点距離6m、4台)と、シンチレータと半導体検出器で20keV～1MeVをカバーする硬X線観測装置を搭載することを考えていました。

X線望遠鏡に関して最も重要な点は、有効面積を第一に考えるか、空間分解能を第一にするか、はたまた高い波長分解能の素子(例えば反射型回折格子、X線カロリメータ)を考えるかだと思われれます。また、如何に硬X線検出器と波長域をつなぎ、有機的に結びついたサイエンスが研究できるのかを真剣に考えねばなりません。日本も含めて不景気の影響で大型ミッションが遠退している現在、世界的な見地からも判断を下す必要があるでしょう。また、21世紀を目指す日本のX線天文学者にとって、日本国内の産業界が持つ最先端技術の活用も重要に思われます。

こうしたX線望遠鏡の進歩により、宇宙のはて例えば赤方偏移 z が1前後の遠方の活動的銀河核、銀河団等の天体からのかすかなX線を精密に観測できるようになって来ます。これまで闇の向こうにあって正体の分からなかったX線背景放射の内どれだけが $z \sim 1$ あたりまでで説明できるのか？ その残りは更にその遠方のどこにあるのか？ 我々は今ようやく宇宙開闢の神秘のベールに手をかけようとしています。より高感度のX線望遠鏡を開発することは、その暗闇に一歩でも近づくことだと信じ、努力を重ねているところです。