

# 宇宙 X 線望遠鏡

常 田 佐 久

## 1. 天文学と X 線望遠鏡

太陽や星のコロナは、温度 100 万～1000 万 °C の加熱されたプラズマである。フレアとよばれる爆発現象が発生すると、さらに数千万～数億 °C の高温プラズマや～数十 MeV に達する高エネルギー電子が大量に生成される。また、われわれの銀河面にそって 1 億 °C 近い広がったプラズマがあり、銀河団（数十～数千個の銀河が重力により束縛され、密集した領域をいう）には数千万～数億 °C のプラズマが大量に存在することが明らかになっている。銀河団の高温プラズマの量は、それを構成する銀河、つまり星の集合の質量の合計より大きく、宇宙を構成する物質のうちかなりの部分は高温の広がったプラズマである。冷たい宇宙で高温のプラズマがどのように生成されかつ維持されているかは、天文学の重要な問題のひとつである。これらの高温プラズマは、ほぼその温度で決まる波長の電磁波を放射しており、その波長  $[\lambda \text{ (cm)} \sim 0.29/T \text{ (deg)}]$  は、200 万 °C で軟 X 線（ $\sim 15 \text{ \AA}$ ）、1 億 °C では硬 X 線（ $\sim 0.3 \text{ \AA} \sim 40 \text{ KeV}$ ）となる。

これらの高温プラズマの発する波長で画像観測を行い、高温プラズマの加熱や維持の機構を解明することが宇宙 X 線望遠鏡の任務である。このためこれまで、スカイラブ（太陽観測, 1972）、アインシュタイン（宇宙観測, 1978）、「ようこう」（太陽観測, 1991）、「あすか」（宇宙観測, 1993）などの衛星が打ち上げられ<sup>1)</sup>、大きな成果を上げてきた。現在では、X 線天文学は、可視赤外線天文学、電波天文学と並んで天文学になくってはならない位置を占めている。本稿では、X 線光学系を天文学に応用する立場から、宇宙 X 線望遠鏡について述べてみたい。

## 2. X 線望遠鏡に要求される性能

天文学は、空間分解能と感度の向上により発展してきたといっても過言でない。X 線天文学の進展が要求する空間分解能は、時代とともに急速に高くなっており、まもなく打ち上がるミッションでは、太陽観測で 1 秒角（ $\sim 5 \mu\text{rad}$ ）以下、宇宙観測でも 1～10 秒角オーダーが必要となっている。可視光領域では、国立天文台の「すばる」望遠鏡が近赤外での試験観測で 0.3 秒角を達成し、最終的には近赤外で 0.1 秒角を切る分解能をねらっているが<sup>2,3)</sup>、X 線望遠鏡は本稿で述べる制約のため、このレベルの空間分解能には達していない。

望遠鏡の結像性能が高くても、1 画素あたりの光子の数が十分ないと、光子雑音のために画質が悪くなり、高い結像性能をもつ意味がなくなる。深宇宙からの微弱な信号をとらえるには、大口径の X 線望遠鏡が要求されるのである。例えば AXAF (Advanced X-ray Astrophysics Facility) のミラーの外形は 120 cm あり、後述する「あすか」のネストミラーでも 35 cm ある<sup>4)</sup>。また、宇宙における爆発的現象は数億 °C に達する超高温のプラズマを生み出す<sup>5)</sup>が、これの発する（ $\sim 5 \text{ KeV}$  以上のエネルギーの高い）X 線の結像は、波長が短くなるほど難しくなる。このように、X 線望遠鏡は、高い結像性能、高感度、短い波長の X 線の結像という、3 つの条件を満たす必要がある。

## 3. 軟 X 線望遠鏡

われわれは、10 Å より長い波長をおおむね軟 X 線領域と呼んでいる。一方、数 Å より短い硬 X 線・ $\gamma$  線波長領域では、エネルギー KeV を単位に用いることが多い。軟 X 線と硬 X 線に明確な境目があるわけではないが（1 keV は波長  $\sim 12 \text{ \AA}$  に対応する）、軟 X 線領域と硬 X 線領域で波

文部省国立天文台太陽物理学研究系（〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1）

E-mail: tsuneta@sxt2.mtk.nao.ac.jp

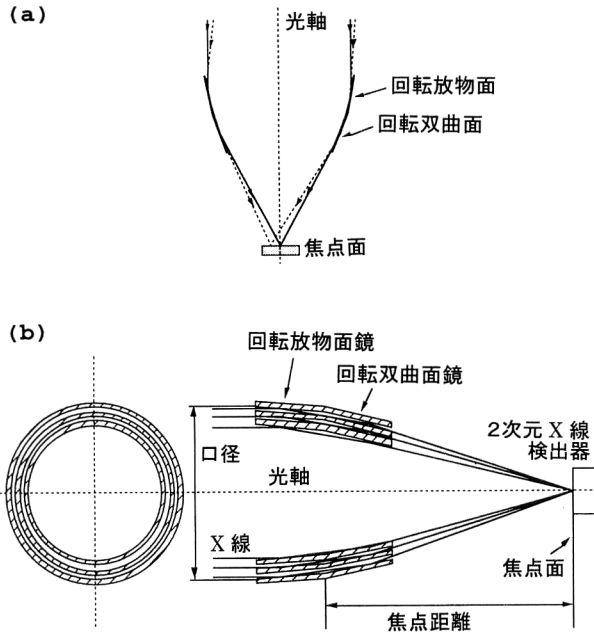


図1 (a) 斜入射 X 線光学系, (b) 同心円状にネストした斜入射 X 線光学系. 内側のミラーは, 斜入射角が小さく, より短波長側まで感度をもつ.

長とエネルギーを自然と使い分けているのは, 軟 X 線は波として観測する (結像する) のに対して, 硬 X 線・ $\gamma$  線は光子として観測する (結像しない) ことにも関連している. 軟 X 線領域では, 斜入射光学系や多層膜を用いた直入射光学系を用いた結像光学系, 硬 X 線領域では, 非結像光学系であるすだれコリメーターが広く使用されてきた. 本章では, まず軟 X 線結像光学系について述べることにする.

### 3.1 X 線の反射

軟 X 線領域では物質の吸収が強いため, レンズは使用できず反射光学系となる. X 線のエネルギーが十分高いため, 物質中の束縛電子も自由電子とみなしてよく, 金属・誘電体とも屈折率は,

$$n^2 = 1 - (\omega_p / \omega)^2 = 1 - (\lambda / \lambda_p)^2 \quad (1)$$

で表される. ここで,  $\omega_p^2 = ne^2 / m\epsilon_0$  ( $\lambda_p$  は  $\omega_p$  に対応する波長) は, プラズマ物理で出てくる電子のプラズマ振動数である. 例えば, ガラスでもアルミでも電子密度は,  $n = 60 \sim 78 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  程度であるので, X 線領域での光学的性質は全く同等である<sup>5)</sup>. 屈折率  $n$  は, 1 よりごくわずかに小さく, また波長が短いほど屈折率は 1 に近くなるので, 結像しにくくなる. 屈折率が 1 より小さいことを利用して, 全反射により高い反射率で, X 線を反射させることができる. 全反射の臨界角  $\theta_c$  (面からの角度で表す) は, スネルの法則から

$$\theta_c \sim \omega_p / \omega \sim \lambda / \lambda_p \quad (2)$$

で表されるので, 波長が短いほど, より斜めから入射させ

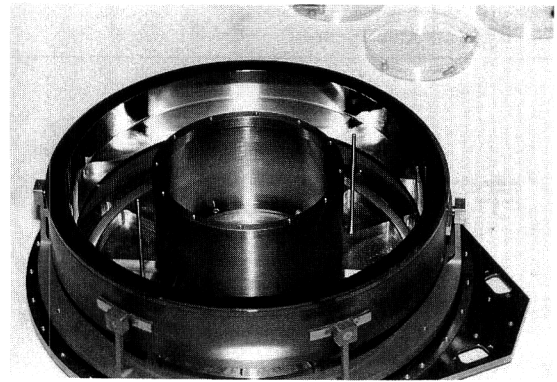


図2 太陽観測衛星「ようこう」に搭載した斜入射 X 線ミラー. 2つの双曲面が1つの Zerodure 製シリンドラー内面に作られている<sup>4,5)</sup>.

る必要がある. 反射物質としてガラスをとると, 波長  $8 \text{ \AA}$  での全反射の臨界角は,  $\theta_c \sim 1.1^\circ$  と大変小さい角度になる. このため図 1 (a) のように, 円筒に軸方向から X 線を入射させることにより結像できることが, 直観的に理解できよう. これまで打ち上げられた軟 X 線望遠鏡のほとんどが, このような斜入射望遠鏡である.

可視光望遠鏡では, 球面収差を除くため, 放物面鏡と双曲面鏡を組み合わせたカセグレン形式が用いられている. Wolter は, 斜入射光学系でも回転 2 次曲面を 2 枚組み合わせると, 収差性能を大幅に改善できることを発見した<sup>6)</sup> (図 1). 可視光望遠鏡ではさらに, 双曲面と双曲面を組み合わせることで, コマ収差を除き視野を広くできる (リッチクレチアン光学系). この類推から, 国立天文台の成相<sup>7)</sup> は, 双曲面・双曲面の斜入射望遠鏡を提案し, 太陽観測衛星「ようこう」の軟 X 線望遠鏡<sup>8)</sup> に採用された (図 2). しかし, 斜入射望遠鏡の収差の主要項は像面湾曲によるもので, しばしば高い空間分解能を広い視野で得ることを困難にしている. AXAF 衛星では, 最良像面に複数の CCD 検出器をおいて, この問題を解決している<sup>1)</sup>.

### 3.2 軟 X 線望遠鏡の設計

地球の大気は太陽や宇宙からの X 線を完璧にさえぎっているため, X 線望遠鏡は飛翔体に搭載し大気圏外に運んでやる必要がある. このため, 衛星の大きさや重量は打ち上げロケットにより決まってしまう, 望遠鏡設計の強い拘束条件となる. 例えば, 斜入射望遠鏡の焦点距離は, 衛星の長さ程度しかとれない. このため, 設計自由度は口径と 2 次曲面の長さ (セグメント長) のみとなる. 望遠鏡の有効面積は反射面の面積の  $\theta_c$  倍  $\sim 50 \sim 100$  分の 1 程度になってしまうため, 光学系の見かけの大きさに比べて有効面積は非常に小さい. 口径を大きくすると, 焦点距離が拘束されているので斜入射角が大きくなり, 観測波長が長波長の

みに限定されてしまう [式(2)]. 逆に, 観測上重要なエネルギー域まで全反射できるよう, (口径を大きくしないで) セグメント長のみを長くして, 有効面積を稼ごうとすると, 広視野で結像性能を維持することが難しくなる. このように斜入射望遠鏡は, 有効面積と観測エネルギーの上限, 角分解能と視野を両立させることが困難な難しい光学系である<sup>9)</sup>.

このため有効面積を確保しかつ短い波長まで観測できるようにするべく, 口径の異なる複数のミラーを同心円上にネストする方式が用いられてきた(図1(b)). AXAF では, 4個の巨大なミラーを使用している. これを極限まで推し進め, 120層の反射鏡をネストさせたのが「あすか」搭載の望遠鏡である<sup>4)</sup>. 1層あたりの反射面は極力薄くする必要があり, 130  $\mu\text{m}$  のアルミホイルを使用している. 面精度を出すことが難しいため, 面形状は単純な円錐形としてよく, 角分解能は3分角程度しかないが, 集光力が大きい. 「あすか」では, 観測上重要な輝線のある7 KeV 付近まで観測することを最優先したため, 斜入射角が0.2~0.7°しかないが, 多数の反射鏡により有効面積を確保することができた. しかし, 斜入射角が小さいため, 焦点距離が3.5 mと衛星の全長よりはるかに長くなってしまい, 軌道上で望遠鏡の全長を衛星より長くのばす伸展機構をもっている. まもなく打ち上げられる AXAF 衛星の全長は, 約10 mもある超大型衛星となっている<sup>1)</sup>.

### 3.3 多層膜 X 線望遠鏡

斜入射望遠鏡のほかに, X 線多層膜<sup>10,11,12,13)</sup>を使用した望遠鏡も打ち上げられている(図3(a)). 多層膜は, 基盤上に原子番号の大きい物質(反射物質)と小さい物質(スペーサー)を交互に周期  $d$  で積層したもので, Bragg 条件

$$m\lambda = 2d\sin\theta \quad (3)$$

を満たす波長で X 線を反射することができる. モリブデン

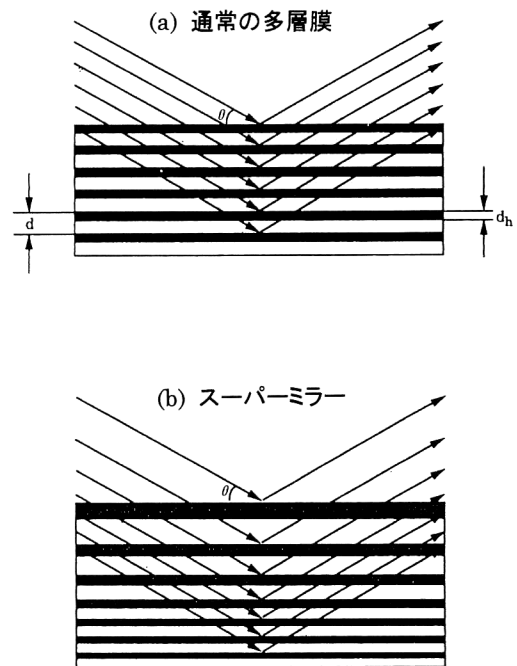


図3 X線多層膜ミラー. (a) 通常多層膜, (b) スーパーミラー.

とシリコンの組み合わせなどがよく使用される. 高温プラズマは温度に対応した輝線を放射するので, その波長に周期  $d$  を制御することにより, 撮像光学系が可能となる. 面の乱れが周期長  $d$  に比べて十分小さい必要があり, あまり周期長  $d$  を小さくすることができず, 実用的には  $\sim 50 \text{ \AA}$  より長い波長に限られる. 反射率は, 数十%以上のものが実用化されており, 2枚鏡の光学系も可能である. 反射の波長幅  $\Delta\lambda$  は,  $\lambda/\Delta\lambda \sim mN$  で与えられる<sup>11,14)</sup>. ここで,  $N$  は反射に寄与する実効層数である(回折格子との類推で考えるとわかりやすい). X線を直反射できることから, 可視光望遠鏡のようにカセグレン光学系(図4)を組むことができ, 斜入射望遠鏡に比べて小型で結像性能のよい望遠鏡

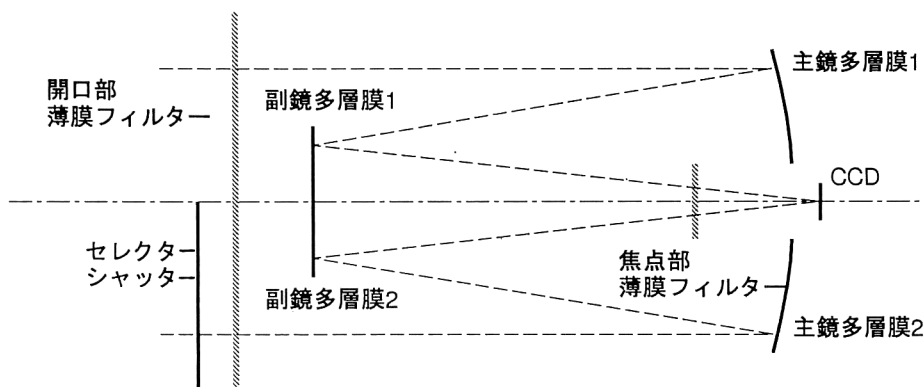


図4 X線多層膜を利用した X 線ドップラー望遠鏡. X 線多層膜を使用するとカセグレン光学系が可能となる<sup>12)</sup>.



図5 打ち上げ直前のチェック中のX線ドップラー望遠鏡。1997年1月31日に宇宙科学所の発射場から打ち上げられ、高度200 km以上で5分間太陽コロナの観測に成功した<sup>15,17)</sup>。



図6 X線ドップラー望遠鏡が撮影した太陽コロナのX線画像<sup>15,17)</sup>。

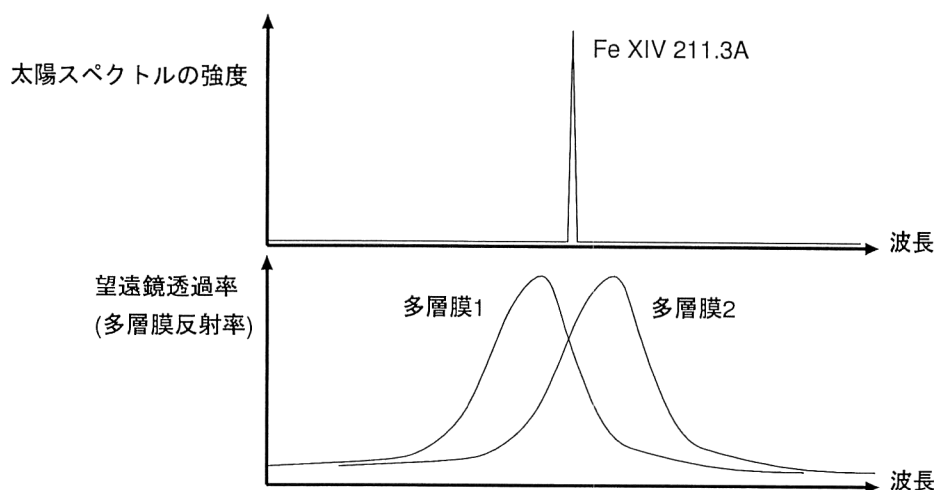


図7 X線ドップラー望遠鏡による速度検出の原理。高温プラズマが運動していると放射される輝線の波長がドップラー遷移し、“red band”と“blue band”の強度に差がでる<sup>15,17)</sup>。

を構成できる。

われわれのグループは、多層膜のバンドパス特性を利用して太陽のコロナの速度場を検出するドップラー望遠鏡<sup>15)</sup>を開発、1998年に打ち上げた(図5, 6)。多層膜の反射のピーク波長を太陽のコロナの発する輝線のred側とblue側にわずかにずらしておく(図7)。高温プラズマが運動していると放射される輝線の波長がドップラー遷移し、“red band”と“blue band”の強度に差がでることを利用して速度のマップを求める。実際は、ミラーを分割してシャッターで切り替えて使用する(図8)。ミラーの口径は15 cmと大きいですが、反射波長はミラー全面で1 Å以内に収まっており<sup>16,17)</sup>、放射光を利用して求めた反射率プロファイルを図9に示す。

### 3.4 斜入射光学系と鏡面精度

反射面のでこぼこは波面を乱すので、結像性能に大きな影響を与える。X線は可視光に比べて波長が20~100分の1しかなく、鏡面精度に対する要求も可視光に比べて、格段に厳しいと予想される。波面の乱れの許容限度としてたとえば $\lambda/4$ (レイリーの限界)をとると、観測波長が $\lambda \sim 10 \text{ \AA}$ の場合、鏡面の形状精度は、原子のサイズに比べて無視できず現実的でないと思われる。これにもかかわらず、斜入射X線光学系が実用になっているのはなぜだろうか？これは、斜入射光学系では、反射面のでこぼこに伴う光路差(でこぼこの山を反射するX線と谷を反射するX線の光路差)が、直反射光学系の $\sin\theta \sim 50 \sim 100$ 分の1になることによる。簡単な実験により、この効果をみてみよ

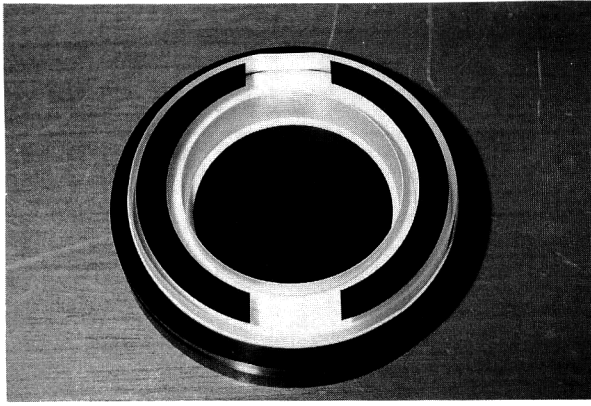


図8 X線ドップラー望遠鏡の多層膜主鏡。2つの半月部分が多層膜が成膜された部分で、それぞれ“red band”と“blue band”に対応する。口径15 cmでピーク波長のむらはミラー全面にわたり1 Å以内に収まっている<sup>15)</sup>。

う。天井の蛍光灯からの光を「光学」の誌面に十分斜めに入射させて反射光を覗いてみると、斜入射させるほど蛍光灯がくっきり見え、誌面が意外によい反射面となっていることがわかる。斜入射光学系は、X線を全反射させるために導入された。同時に、斜入射により表面の凹凸の影響が大幅に軽減されるという偶然の幸運により、ミラーの製作が可能となっているのである。

### 3.5 回折限界 X線望遠鏡

では、X線望遠鏡で、可視光望遠鏡のような回折限界の観測が可能であろうか？ 結像性能のよい多層膜カセグレン望遠鏡を例にとり、許容される形状誤差をあたってみよう。収差が入射瞳による回折に比べて無視できる場合を、回折限界望遠鏡という。ここでは、光学系通過後の球面波のrms波面乱れが $\lambda/14$ 以下なら回折限界光学系ということにする(マーシャルの条件)。面形状のrms乱れは、反射面であるので $\lambda/28$ 以下であり、さらに2枚の光学面があるので、1枚あたりの面精度はさらに厳しくなる。ここでは、2枚の面が同じ波数領域の乱れをもっているとしてrms近似でよいとすると、回折限界X線望遠鏡は、ミラーの全面にわたって面精度(理想面からのずれ)を $\lambda/40$  rms以下にする必要がある。観測波長を $\lambda \sim 200$  Å、ミラーの大きさを $D \sim 10$  cmとすると、面精度は5 Å程度と驚くべき精度となるが、 $\lambda \sim 200$  Åなら回折限界ミラーは可能ではないかと考えている人々がいる。この場合の角分解能は、 $\lambda/D \sim 0.04$  秒角となり、観測しきわめて魅力的である。

現在軌道上にある多層膜カセグレンX線望遠鏡(SOHO, TRACE)の幾何光学分解能は、これより悪く1~2秒角程度である<sup>13)</sup>。近い将来には0.5秒角以下が現実的な目標となるだろう。

回折限界に及ばないこれらの望遠鏡では、どの程度の鏡

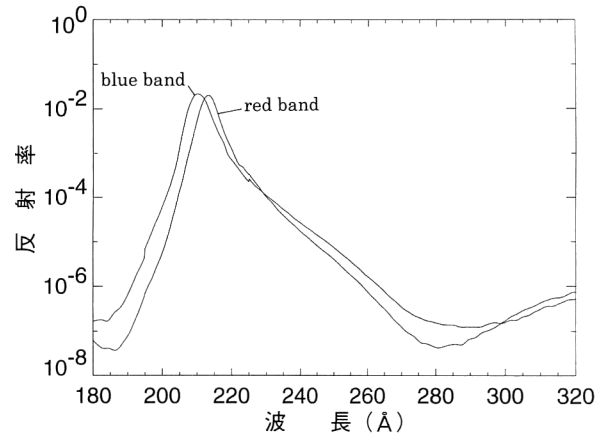


図9 分子科学研究所の放射光を用いて実測した“red band”と“blue band”の反射率プロファイル<sup>17)</sup>。

面精度がいろいろあるのだろうか？ X線反射面を多数の小さいミラーの集合よりなり、一つ一つのセグメントは回折限界の結像能力をもつと考える。入射瞳上のセグメントサイズ $\sim l$ (ここではコヒーレント長と呼ぶ)でこの条件が満たされていれば、回折の影響は $l/\lambda$ 程度になる。たとえば上記のX線ドップラー望遠鏡は、口径15 cmの球面鏡を使用しており、約5秒角の幾何光学収差をもつ。観測波長は $\lambda \sim 211$  Åであるので、回折の影響が同じ5秒角程度になるコヒーレント長は $l \sim 0.8$  mmである。言い換えれば、この望遠鏡は、0.8 mmサイズのセグメントミラーに対しては回折限界となっているのである。つまり、0.8 mmスケールサイズで、反射面の形状誤差が $\lambda/40 \sim 5$  Å程度であることになる。鏡面の乱れの主要項はミラー全面にわたる波長の長い成分とすると、15 cmのミラーでは、 $\sim 1000$  Å以内に収まっていればよいことになる。このため、可視光(6330 Å)で $\lambda/8$ 程度の面精度があれば、この望遠鏡の場合十分である、という予想外の結論となる。非球面を用いて幾何光学結像性能が高い場合でも、同様の考え方で必要な面精度の見当をつけることができる。可視光で $\lambda/40$ の面精度があれば、波長200 Åで観測を行う口径15 cmのX線望遠鏡は0.5秒角の結像性能をもてると考えてよい。X線では回折の影響が小さいため、現在目標としている角分解能程度では、面精度要求が可視光の回折限界望遠鏡と同程度となるのである。

## 4. 硬X線望遠鏡

### 4.1 スーパーミラー

斜入射光学系は、10 KeV以上になると斜入射角が極端に小さくなり、光学系の有効面積の減少・焦点距離の増大から現実的でなくなる。直反射の多層膜望遠鏡も、観測波長が50 Åより小さくなると、反射率の低下のため現実的

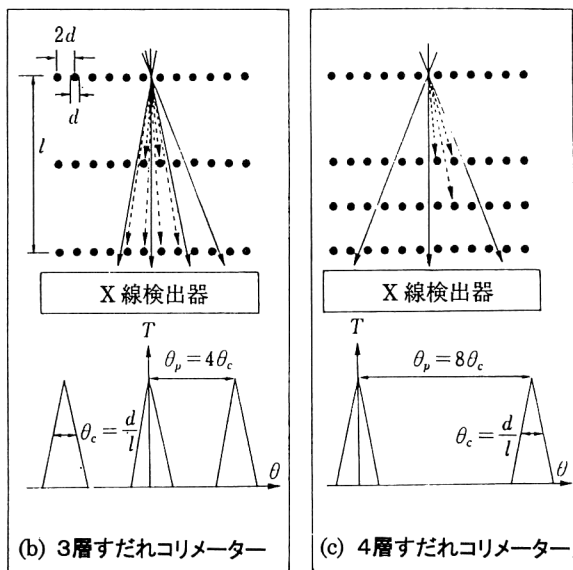
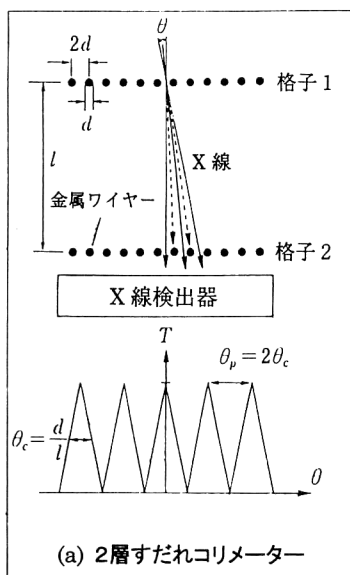


図10 すだれコリメーターの構造とすだれが天球面につくパターン<sup>20)</sup>。

でなくなる。しかし多層膜ミラーに斜入射でX線をあてれば、ブリッグ条件から高い反射率で硬X線を反射できる(式(3))。このため、斜入射光学面に多層膜を成膜すれば、実用的な硬X線望遠鏡となると予想される。式(3)のBragg条件より、斜入射の場合、

$$\theta \sim \lambda/2d \quad (4)$$

となり( $m=1$ とする)、斜入射角は全反射の場合(式(2))と同じ波長依存性をもつ。しかし、ガラスでもアルミでも $\lambda_p \sim 400 \text{ \AA}$ 程度であり、多層膜の周期長 $d$ はそれよりずっと小さくできるので( $2d \leq 50 \text{ \AA}$ ;  $\lambda_p \gg 2d$ )、硬X線では全反射を利用するより、多層膜を成膜してBragg反射させたほうが、斜入射角が大きく有利なわけである。実際、斜入射角を $\lambda p/2d \geq 10$ 倍程度にできるので、斜入射光学面に多

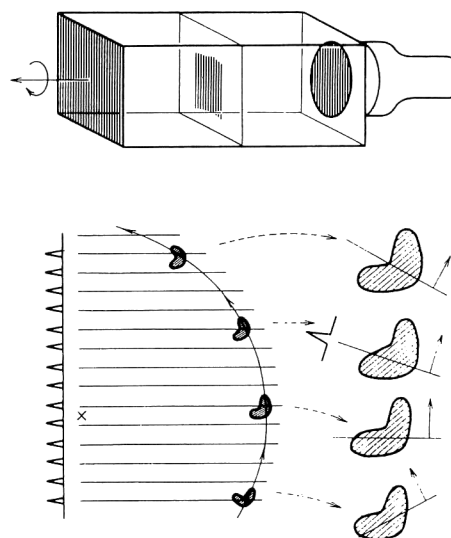


図11 回転式すだれコリメーターによるX線源の1次元スキャン<sup>20)</sup>。

層膜を成膜できれば、有効面積のはるかに大きく、かつ衛星に搭載可能な現実的なサイズの硬X線望遠鏡が可能となる。硬X線では物質の透過力が高いため、深さ方向に周期長を変えていくと、全反射面のように広い波長範囲で反射率を高めることができる(スーパーミラー)。しかし、斜入射光学系に多層膜を成膜することは容易でなく、最近になって名古屋大学の山下らは、世界にさきがけて高性能のスーパーミラーを開発・実証した<sup>18,19)</sup>。

#### 4.2 すだれコリメーター

さらにエネルギーの高い硬X線や $\gamma$ 線では、多層膜斜入射光学系を用いても斜入射が小さくなりすぎ(式(4))、現実的な光学系が構成できなくなる。もはやX線の波としての性質を利用して結像することは現実的でなくなり、「すだれコリメーター」(modulation collimator)の出番となる。小田は、1965年にApplied Opticsに掲載された半ページにわたる論文で、すだれコリメーターの概念を提案した<sup>20)</sup>。この装置が、X線望遠鏡として活躍するとは、当時は予想できなかったに違いない。すだれコリメーターは、一見望遠鏡に見えないが、わが国が世界に誇るすぐれたX線光学系である。すだれコリメーターは、図10のように2層のすだれ(グリッド)よりなる。すだれの下部にはシンチレーターなどの硬X線検出器がおかれており、光子の到来を一つ一つ検出する。2層のすだれコリメーターを通して光子が検出器に到来できる方向と、下層のすだれに遮られて到達できない方向ができる。これを天球面に投影すると、図のような帯状の三角波の空間レスポンスとなる。すだれの太さを $d$ 、周期間隔を $2d$ 、上下のすだれの間隔を $l$ とすると、三角山の周期 $2d/l$ が望遠鏡の角分解能に対応する。すだれの層数を増やして3層、4層とすると、はぬけ

のパターンとなる。

すだれコリメーターは、スピンする観測ロケットや衛星にのせて観測を行う。これを回転式すだれコリメーター (rotation modulation collimator) と呼んでいる。宇宙に X 線を発する点光源があれば、すだれコリメーターの感度のある部分とない部分が交互に点光源上をスキャンしていくので、検出される光子数はモジュレーションを受ける。衛星の姿勢は姿勢センサーから刻々知ることができるので、宇宙にある未知の X 線源の位置を精度よく決めることができる。1966 年には、この方法により初めて SCO-X1 と呼ばれる X 線源の位置が決定され、その後の X 線天文学の爆発的発展の基礎を築いた。

小田・村中らは、引き続いてこの装置が撮像にも使えることを指摘した<sup>21)</sup>。衛星の回転により、硬 X 線源は 1 次元スキャンされる (図 11)。衛星が半周するうちに、いろいろな角度で見た X 線源の 1 次元投影プロフィールのセットができる。これがもとの 2 次元像の情報を含んでおり、2 次元像を再構成できる。これは、電波干渉計における像合成、あるいは医学の CT スキャンによる人体断面の像合成と数学的に同等である。1 次元投影からの 2 次元像再生の原理は、「ある方位角方向の 1 次元 (投影) スキャンのフーリエ変換が、2 次元画像のフーリエ空間 (UV 空間という) で同じ方位角のフーリエ成分を与える」ことを示した Bracewell らの定式化によると理解しやすい<sup>22)</sup>。

#### 4.3 フーリエ型すだれコリメーター

わが国の衛星姿勢制御技術が未熟であった 1980 年代初めまで、科学衛星はほとんどスピンのにより慣性系空間に対して姿勢を維持する方式を採用していた (走る自転車は倒れないのと同じ原理である)。これは、すだれコリメーターによる観測に非常に都合がよかった。実際 1981 年に打ち上げられた「ひのとり」衛星は小型ながら、この方法により 15 秒角という高い解像度で、太陽フレアの硬 X 線 2 次元画像の取得に世界ではじめて成功したのである<sup>23)</sup>。しかし、1990 年代になり軟 X 線ミラーによる撮像観測が可能となってくるとともに、衛星も 3 軸安定化されるようになった。牧島らは、2 層のすだれが天球上に作るパターンがサイン波に近いことを指摘し、フーリエ合成型硬 X 線望遠鏡を提案した<sup>24)</sup>。慣性系に静止した衛星に、いろいろな周期 (ピッチ) と方位角のすだれ望遠鏡を多数搭載する。このようなすだれ望遠鏡の収集する情報について考えてみる。天球面上のある方位角での 1 次元強度分布を  $T(x)$ 、すだれの三角山パターンをサイン波で近似し  $B(x) \sim \sin(kx)$  とすると、X 線検出器がすだれを通して得る天球からの信号強度は、

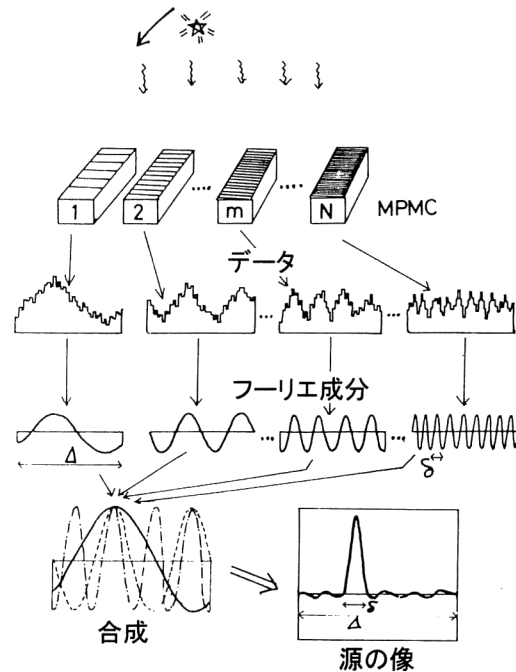


図 12 フーリエ型すだれコリメーターによる像合成<sup>24)</sup>。

$$\int B(x) T(x) dx \sim \int \sin(kx) T(x) dx \quad (5)$$

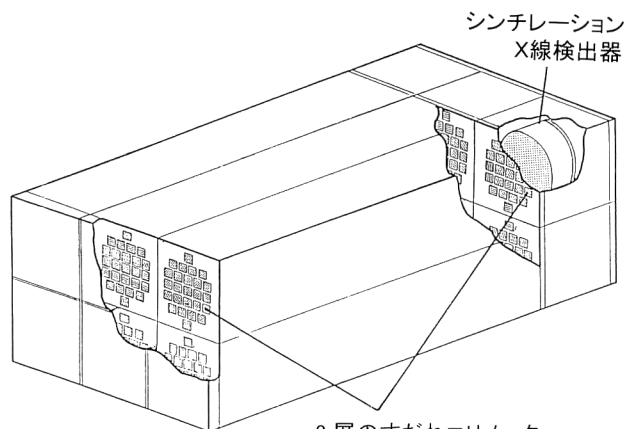
で表される。これは、ある方位角での 1 次元 (投影) 強度分布のフーリエ変換に他ならない。回転式すだれコリメーターが実空間の情報を得るのに対して、フーリエ型すだれコリメーターは天球面の 1 次元投影のフーリエ成分を直接得るのである。あとは、Bracewell らの定式化と 2 次元フーリエ逆変換により、原画像を求めることができる (図 12)。(すだれパターンは実際は三角波であるので、おのこのすだれ遠鏡は高周波成分も受信してしまうが、これを考慮したデータ処理を行うことができる。) 1991 年に打ち上げられた「ようこう」衛星は、64 個のすだれコリメーターよりなる硬 X 線望遠鏡を搭載しており (図 13)、50 KeV 以上で空間分解能  $\sim 5$  秒角という画期的な観測を世界にさきがけて行ったのである<sup>25)</sup>。

これらの非結像型望遠鏡による撮像には、回転式・フーリエ式を問わず、フーリエ変換が重要な役割を果たしている。しかし、実際の観測データは光子数が必ずしも多くなく、単純なフーリエ変換では良好な像を得ることができない。「ひのとり」「ようこう」では最大エントロピー法<sup>23,26)</sup>を駆使して良好な 2 次元画像を得ることに成功し、多くの科学的成果をあげた。

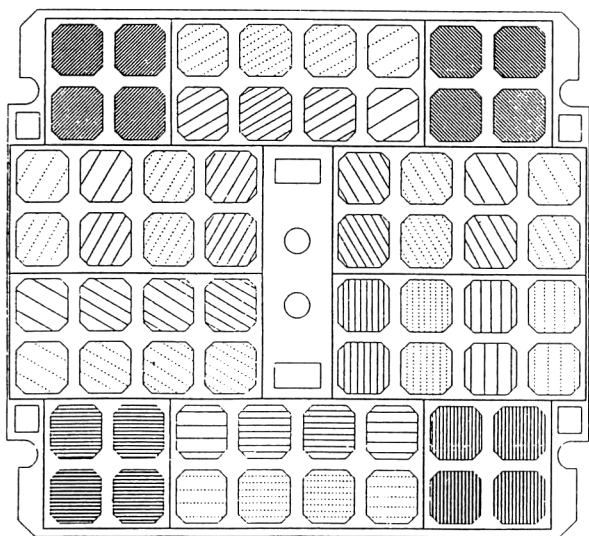
#### 5. X 線検出器

非結像光学系のすだれコリメーターの X 線検出器には、空間分解能をもたない X 線検出器を使用するので、特別の困難はない。一方、結像光学系の焦点面には 2 次元検出





2層のすだれコリメーター  
(a)



(b)

図13 (a)「ようこう」搭載のフーリエ型すだれコリメーター。64個の異なるピッチと方位角のすだれよりなる。各すだれの背後にはそれぞれシンチレーション検出器がある。(b)上面のすだれの配置<sup>24,25)</sup>。

器を必要とし、10 KeV 程度までの撮像には、ピクセルサイズ 9~20  $\mu\text{m}$ 、画素数 ~2000 $\times$ 2000 程度の CCD が使われている<sup>27)</sup>。CCD は、シリコンのバンドギャップエネルギー ~1.1 eV に対応する 11300  $\text{\AA}$  より短い波長に感度がある。通常の CCD は空乏層が 5  $\mu\text{m}$  程度しかないため、数 keV より高エネルギーの光子は通り抜けてしまい量子効率が落ちる。このため、素子の比抵抗をあげ空乏層を厚くして、10 keV 程度でも高い量子効率をもった CCD が使用されているが、一般には利用可能にはなっていない。10 KeV 以上では CCD の使用は現実的でなくなり、テルル化カドミウム検出器 (CdTe)<sup>28)</sup> などの 2 次元化が検討されている。

一方、~20  $\text{\AA}$  より長い波長では、表面の MOS (metal-oxide semiconductor) 電極、電極保護のための酸化膜によ

る吸収のため、感度が落ちる。CCD の裏面を 10  $\mu\text{m}$  程度の厚みに削り、空乏層が CCD の裏面近傍にある状態にした CCD を裏面照射 CCD という。X 線を裏面からあてることにより、数百  $\text{\AA}$  まで高い量子効率をもつ (しかし 1000~3000  $\text{\AA}$  では裏面の自然酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ ) により感度をもたない)。裏面照射 CCD は可視光 (青色) でも高い量子効率を得られるため需要があり、すでに市販されている。このように観測波長帯域により、表面照射、裏面照射 CCD、高比抵抗 CCD を適切に選択する必要がある。

1 回の露出時間中に、CCD の 1 ピクセルに 1 個の光子しか入らなければ、その電子数から入射光子のエネルギーを知ることができる。X 線では、光子のエネルギーが高く、1 KeV の光子 1 個で約 300 個の電子・正孔ペアができるため、このようなことが可能となる (可視光領域ではこのようなことはできず、分光のための光学素子が CCD の前に必要となる)。このように CCD は、6 keV で  $\lambda/\Delta\lambda \sim 50$  程度の X 線分光素子としても使用されており、特別の分光素子なしで imaging spectroscopy が可能である。

## 6. おわりに

この 30 年間に X 線天文学は、全反射を利用した斜入射 X 線望遠鏡により格段の進歩をとげた。最近では、高い空間分解能が比較的コンパクトな光学系で得られることから、多層膜反射鏡を使用したカセグレン望遠鏡も、主として太陽コロナの観測に使用されている。すだれコリメーターを用いた硬 X 線画像観測はわが国のお家芸で、太陽フレアの観測を中心として多くの観測成果が得られてきた。大集光力をもつ多層膜斜入射ミラー (スーパーミラー) が硬 X 線望遠鏡として、まもなく実用化されようとしている。

日本の宇宙科学研究所 (ISAS) の ASTRO-E, Solar-B, ESA (European Space Agency) の XMM (X-ray Multimirror Mission), NASA の AXAF が、今後次々と打ち上げられる。ASTRO-E, XMM は、集光力を重視し、薄いフォイルを多数ネストした斜入射鏡である。NASA の AXAF (宇宙観測), ISAS の SOLAR-B (太陽観測) は結像性能を重視し正当派斜入射ミラーを搭載し、1 秒角を切る結像能力をもつ。これらの新しい観測装置群により、天文学に新しい展開が期待される。一方、観測装置の性能の向上、すなわち、大型化による高感度化、ミラーの形状精度の向上による結像性能の向上、より短い波長での結像は、まもなくひとつの区切りをむかえると思われる。次世代の宇宙 X 線望遠鏡には、新しいブレイクスルーが求められている。そのようなブレイクスルーが、本稿の読者から



生まれることを念じつつ筆をおく。

## 文 献

- 1) 各衛星搭載の X 線望遠鏡については、以下の Internet Web で最新情報をえることができる。AXAF : <http://chandra.harvard.edu/>, <http://acis.mit.edu/>, XMM : <http://astro.estec.esa.nl/XMM/>, 「ようこう」 : <http://www.solar.isas.ac.jp/>, 「あすか」 : <http://www.astro.isas.ac.jp/xray/mission/asca/asca.html>
- 2) 海部宣男：“すばる望遠鏡のファーストライト”，日本物理学会誌，**54** (1999) 245-251.
- 3) 大坪政司，家 正則：“ファーストライトを迎えた 8 メートルすばる望遠鏡”，光学，**28** (1999) 192-201.
- 4) P. J. Serlemitsos, L. Jalota, Y. Soong, H. Kunieda, Y. Tawara, Y. Tsusaka, H. Suzuki, Y. Sakima, T. Yamazaki, H. Yoshioka, A. Furuzawa, K. Yamashita, H. Awaki, M. Itoh, Y. Ogasaka, H. Honda and Y. Uchibori: “X-ray telescope onboard ASCA,” *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **47** (1995) 105-114.
- 5) 鶴田国夫：“光の鉛筆”，23 章および 26 章 (新技术コミュニケーションズ，1984)。
- 6) von H. Wolter: “Mirror systems with glancing incidence on image producing optics for X-rays,” *Ann. Phys. (Leipzig)*, **10** (1952) 94-114.
- 7) K. Nariai: “Geometrical aberration of a generalized Wolter type I telescope,” *Appl. Opt.*, **26** (1987) 4428-4432.
- 8) S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner, J. Lemen, W. Brown, R. Carvalho, R. Catura, S. Freeland, B. Jurcevich, M. Morrison, Y. Ogawara, T. Hirayama and J. Owens: “The soft X-ray telescope for the Solar-A mission,” *Sol. Phys.*, **136** (1991) 37-67.
- 9) L. P. VanSpeybroeck and R. C. Chase: “Design parameters of paraboloid-hyperboloid telescopes for X-ray astronomy,” *Appl. Opt.*, **11** (1972) 440-445.
- 10) J. H. Underwood and T. W. Barbee: “Soft X-ray imaging with a normal incidence mirror,” *Nature*, **294** (1981) 429-431.
- 11) J. H. Underwood, T. W. Barbee: “Synthetic Multilayers as Bragg diffractors for X-rays and extreme ultraviolet,” *Proc. AIP Topical Conference on Low Energy X-ray Diagnostics* (1981) pp. 170-178.
- 12) 山下広順：“多層膜 X 線光学系の開発”，日本物理学会誌，**47** (1992) 293-299.
- 13) J.-P. Delaboudiniere, *et al.*: “EIT: Extreme-ultraviolet imaging telescope for the SOHO mission,” *Sol. Phys.*, **162** (1995) 291-312.
- 14) S. Nagata, S. Tsuneta, T. Sakao, T. Yoshida, H. Hara, R. Kano, W. Ishiyama, K. Murakami and M. Ohtani: “High wavelength resolution XUV multilayer mirror,” *Appl. Opt.*, **36** (1997) 2830-2838.
- 15) T. Sakao, S. Tsuneta, H. Hara, T. Shimizu, R. Kano, K. Kumagai, T. Yoshida, S. Nagata and K. Kobayashi: “The XUV doppler telescope (XDT),” *Sol. Phys.* (1999) in press.
- 16) K. Murakami, T. Oshino, H. Nakamura, M. Ohtani and H. Nagata: “Schwartzchild microscope for carbon K $\alpha$  radiation,” *Appl. Opt.*, **32** (1993) 7057-7061.
- 17) H. Hara, S. Nagata, R. Kano, K. Kumagai, T. Sakao, T. Shimizu, S. Tsuneta, T. Yoshida, W. Ishiyama, T. Oshino and K. Murakami: “Narrow passband multilayer mirrors for XUV Doppler telescope,” *Appl. Opt.* (submitted).
- 18) K. Yamashita, *et al.*: “Supermirror hard X-ray telescope,” *Appl. Opt.*, **37** (1998) 8067-8073.
- 19) 山下広順，国枝秀世，田原 譲：“スーパーミラーの最前線”，レーザー研究，**25** (1997) 362-366.
- 20) M. Oda: “High resolution X-ray collimator with broad field of view for astronomical use,” *Appl. Opt.*, **4** (1965) 143.
- 21) M. Oda, N. Muranaka, M. Matsuoka, S. Miyamoto and Y. Ogawara: “The design and construction of modulation collimators,” *Space Sci. Instr.*, **2** (1976) 141-158.
- 22) R. N. Bracewell and A. C. Riddle: “Inversion of fan beam scans in radio astronomy,” *Astrophys. J.*, **150** (1967) 427-434.
- 23) S. Tsuneta: “Image processing software system of the X-ray telescope aboard the HINOTORI spacecraft,” *Ann. Tokyo Astronomical Observatory*, **20** (1984) 1-50.
- 24) K. Makishima, S. Miyamoto, T. Murakami, J. Nishimura, M. Oda, Y. Ogawara and T. Tawara: “Modulation Collimator as an Imaging Device, New Instrumentation for Space Astronomy,” eds. K. van der Hucht and G. S. Vaiana (Pergamon Press, Oxford, 1978) pp. 277-289.
- 25) T. Kosugi, K. Makishima, T. Murakami, T. Sakao, T. Dotani, M. Inda, K. Kai, S. Masuda, H. Nakajima, Y. Ogawara, M. Sawa and K. Shibasaki: “The hard X-ray telescope (HXT) for the SOLAR-A mission,” *Sol. Phys.*, **136** (1981) 17-36.
- 26) B. R. Frieden: “Restoring with maximum likelihood and maximum entropy,” *J. Opt. Soc. Am.*, **62** (1972) 511-518.
- 27) 常田佐久：“X 線撮像素子としての CCD”，光学，**16** (1987) 513-519.
- 28) C. Matsumoto, T. Takahashi, K. Takizawa, R. Ohno, T. Ozaki and K. Mori: “Performance of a new Schottky CdTe detector for hard X-ray spectroscopy,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **45** (1998) 428-432.

(1999 年 4 月 20 日受理)