

X線望遠鏡のミラー系について

牧 島 一 夫*

1. はじめに

もしかりに、可視光が反射や屈折という現象をほとんど示さなかったとしたら、どうだろう。天体望遠鏡が作られないのみならず、鏡に自分の姿を写すこともできず、写真はピンホールカメラで撮影するしかない。なによりも、人間を含めた高等動物の「眼」そのものが成り立たなくなってしまうだろう……。

X線天文学の分野では、じつは上記の冗談めいた状態が、ごく最近まで現実のものだったのである。この分野のテクニックは多くの場合、X線の直進する「粒子」としての性質のみを利用してきた。これはX線を電波や光と比べた場合、波動としての性質より粒子としての性質が強いためである。それにもかかわらずこの若い天文学が急速に発展してこられたのは、ひとつにはX線領域でのバックグラウンドが、地球周辺でも宇宙空間でも、思いのほか低いという事情に負っていると言えるかもしれない。

ところが 1978 年末に打ち上げられた米国のアインシュタイン衛星はX線の全反射ミラーを積んでおり、名実ともに初のX線望遠鏡と呼ぶにふさわしい画期的な成果をあげつつある^[1]。ここではアインシュタインを例にとりつつ、X線用のミラーの原理、構造などを紹介しよう^[2]。

2. X線の全反射

物質中の電子のうち比較的内殻にあるものは、クーロン力で個々の原子核に縛られていると考えてよい。その結合エネルギーは多くの場合、およそ紫外線(波長 300~3000 Å ていど)の光子エネルギーに等しい。可視光の振動数は、この紫外域の共鳴振動数より少し低いから、可視光が物質中を進むときの位相速度は、いっばんに真空中より遅い。このため、屈折率(=位相速度の比)は 1 より大になり、豊富な屈折、反射、分散現象を示す。液体や固体では、屈折率は 1.3~1.9 程度である。

ところでX線の振動数は逆に紫外域の共鳴の振動数より少し高い。このためX線の伝わる位相速度は、物質中の方が真空中(即ち光速)よりわずかに速くなり、従って屈折率は 1 よりも小さくなる。(群速度は物質中の方が遅いから、相対論に反しているわけではない。)

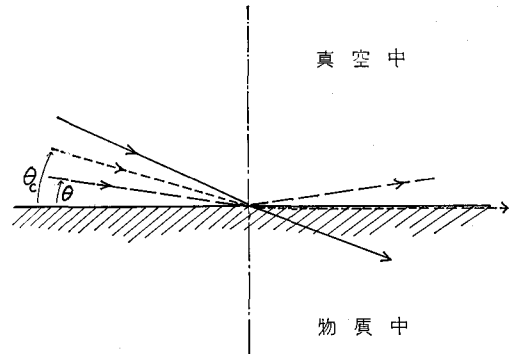


図 1 X線領域では、物質の屈折率は 1 よりごくわずか小さいので、X線が真空中から物質中にすれすれに入射するとき、その斜め入射角(図の θ)がある臨界値 θ_c より小さいと、全反射する。ここで言う θ は、ふつう屈折の法則を表現するときの入射角の余角になっている。

この性質を使って、「X線レンズ」を作れないわけではない。そのときは、凹レンズを通ったときX線が収束し、凸レンズでは発散することになる。ただし実際には、多くの物質で屈折率が 0.999 程度(1 keV で)ときわめて 1 に近いこと、X線がレンズで吸収されてしまうことのため、実用にはほど遠いであろう。

より現実的なのは、図 1 のようにX線の全反射を利用する方法である^[3]。ここでも可視光の場合とは逆で、X線が真空中から物質中に入射するときに、図中の角度 θ (斜め入射角)がある臨界角 θ_c より小さいと全反射する。 θ_c は反射面の物質によって異なり、同一物質ではX線エネルギーに反比例して小さくなる。数値的には、大ざっぱに

$$\theta_c \approx (1^\circ \sim 2^\circ) / E \quad (E \text{ は X線エネルギー, 単位は keV})$$

である。X線天文学で興味を中心となるのは $E=0.5 \sim 20 \text{ keV}$ 前後であるが、これを $E \approx 2 \text{ keV}$ に限定するとしても、斜め入射角はたかだか 1° 程度という厳しいものになる。図 2 は、いくつかの物質について斜め入射角と反射率の関係を示したものである。

3. 放物面ミラー

X線の全反射を利用すると、電波や光の望遠鏡の類推から、図 3 に示すような回転放物面ミラーをデザインすることができる。斜め入射でなければならないので、放物面のずっと先端のリング状の部分しか利用できないが、大きさの異なるリングをいくつか「入れ子」にする

* 東大宇宙研 Kazuo Makishima: Mirror Telescope in X-ray Astronomy

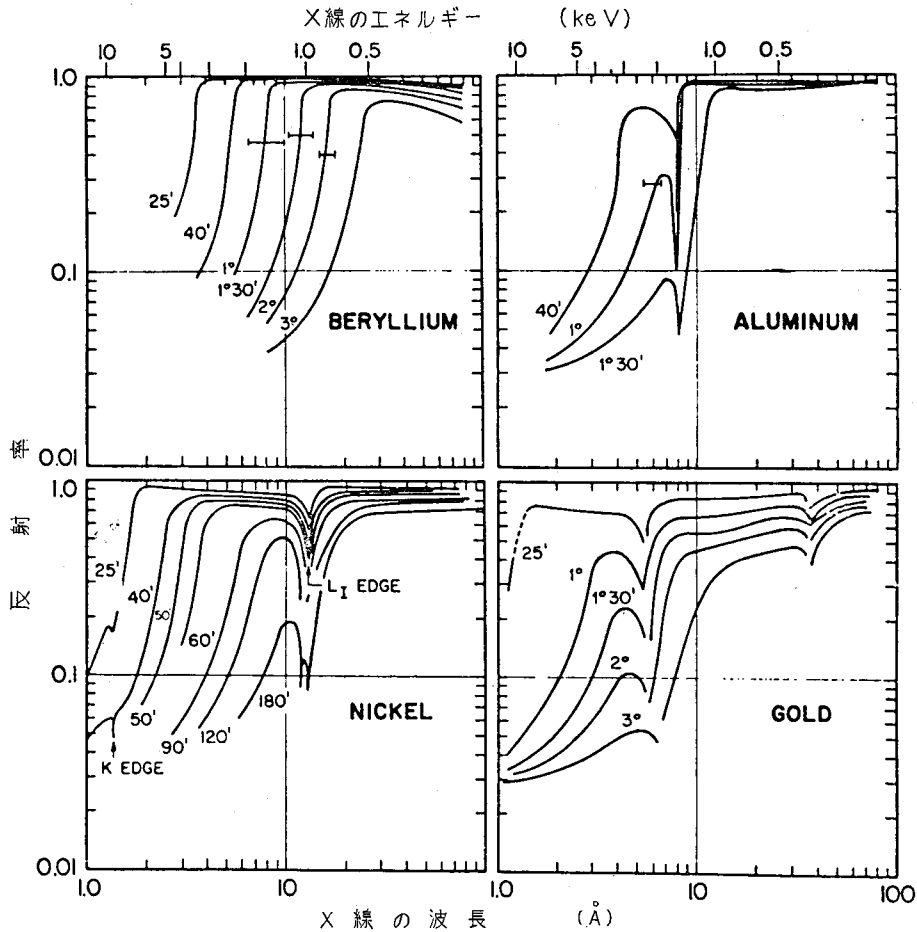


図 2 いろいろなエネルギーのX線に対する反射率を、ベリリウム、アルミニウム、ニッケル、金について示す。斜め入射角がパラメータになっている。全反射といっても、X線の吸収の効果のため、反射率は100%には達しない。

ことで面積を有効に増やすことができる。

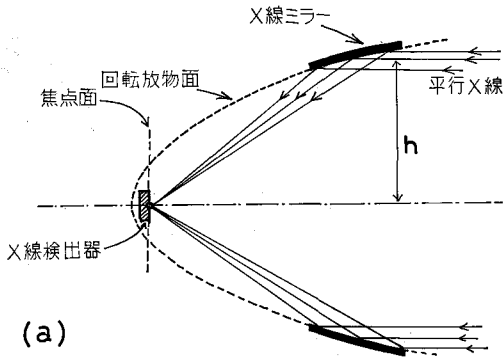
図3には、従来のミラーを使わないX線検出システムも比較のため示してある。ミラー系では集光されるためX線検出器はきわめて小さくてすむのに対し、非ミラー系では感度を上げるためには検出器自体を大きくしなければならない。しかしそれに伴って雑音が増すので、非ミラー系の検出感度はミラー系よりずっと低いと考えられる。さらにミラー系では文字通りX線源の位置や形状の像が得られるが非ミラー系では、コリメータの向きをスキャンするなどの方法が必要となる。このようにミラー系は、技術的な難かしさにもかかわらず、大きな利点をもっていると言えよう。

ところで図3の回転放物面は $y^2+z^2=4px$ という方程式で表わされ、 p は数学で言うところの焦点距離である。通常の光のミラーの場合にはこの p がそのまま光学系としての焦点距離になるのだが、X線の斜め入射ミラーでは、 p とまったく無関係な量(図3のミラーと焦

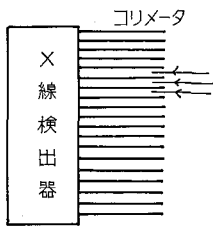
点面の距離)になる。困ったことにこの焦点距離 f は、じつは光線の光軸からの距離 h によって大きく変化し、アッペの正弦則が破れていることがわかる。結果として、狭い意味での球面収差は無い(光軸に平行なX線は1点に収束する)にもかかわらず、1次のコマ収差が生じてしまう。ここで1次と言うのは、点状X線星の位置が光軸の足から遠ざかるにつれ、その角距離にそのまま比例して、像のボケが生じてしまう、という意味である。

4. 放物面・双曲面ミラー

1 次のコマ収差を消すため、回転放物面と回転双曲面を組み合わせる方式が、H. ウォルターによって1952年に提案された^[4]。図4はその原理を示す。図3(a)の放物面の焦点に双曲面の一方の焦点を重ねて配置すると、X線ははじめ放物面で、次いで双曲面で全反射され、双曲面のもう一方の焦点に収束するわけである。放物面と双曲面の効果がキャンセルし、1次のコマ収差が消える。



(a)



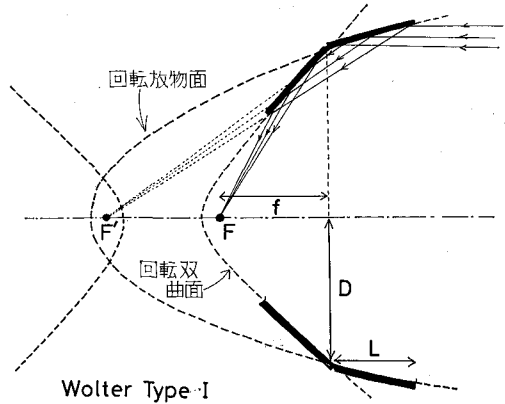
(b)

図 3 回転放物面の一部を用いると, (a) のような斜め入射型の X 線望遠鏡が作れる. ただしこのようなミラーはコマ収差が大きく, 実用には適さない. (b) はミラーを使わない X 線検出システムを比較のために示したもので, 大きな検出器が必要となる上, 像をかたんに得ることもできない.

それに加えて, ミラーの開口径および斜め入射角を一定に保った場合, 焦点距離が 1/2 に短くなる. つまり, F ナンバーの小さい (明るい) ミラーが作れることになる. ただ, X 線が 2 回反射するので, そのぶん X 線の損失が増えることは否定できない. (図 2 でわかるように, 全反射といっても, X 線の吸収のため反射率は 100% より小さい.)

アインシュタイン衛星に用いられているミラーは, この放物面・双曲面組み合わせタイプを 4 層入れ子にしたものである. 図 5 はその概形を示す. 現在アメリカで計画中の AXAF 衛星のミラーのスケッチもあわせて示してある.

放物面・双曲面ミラーはまた, ウォルター I 型とも呼ばれ, その主要なパラメータは図 4 の焦点距離 f , 開口半径 D , そしてミラー長 L の 3 つである. このとき, ノミナルな有効面積 (ミラーの反射率が 100% だとしたときの面積) はほぼ $\pi D^2 L / 2f$ また光軸に平行な光線の斜め入射角は $D/4f$ (ラジアン) で与えられる. また,



Wolter Type-I

図 4 回転放物面と回転双曲面を組み合わせたミラー (ウォルター I 型). 放物面の焦点と双曲面の一方の焦点を一致させておくと, 2 回反射した X 線は双曲面のもう一方の焦点に集まる. 図 3 (a) のミラーに比べてコマ収差がずっと改善されており, X 線望遠鏡の主流になりつつある.

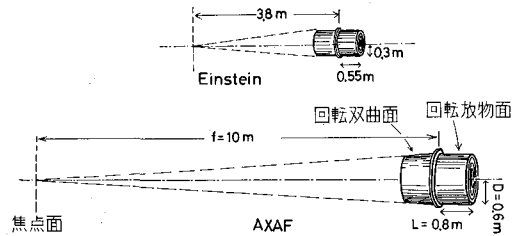


図 5 米国の X 線天文衛星アインシュタイン (現在稼働中) と AXAF (計画中) のミラーの概念図. どちらも図 4 と同じ方式である. アインシュタインのミラーは 4 層の入れ子で, ノミナルな面積は 200 cm², エネルギー上限は約 3 keV, 角分解能は 2~3 秒角. AXAF は 6 層の入れ子のミラーで, ノミナルな面積 1500 cm², エネルギー上限 10 keV, 角分解能 0.5 秒をねらっている.

焦点面の検出器の位置分解能を d とすれば, このミラーの角分解能は d/f (ラジアン) 程度になる. f は多くの場合, 打ち上げロケットの性能で決められてしまうが, もちろん角分解能を上げるには f が大なほどよい. 有効面積をかせぐため D を大きくすると, 斜め入射角が大になり, §2 の議論からわかるように, 観測できるエネルギーの上限が低くなってしまふ. 従って, D については適当な妥協点をみつけねばならない. また L についても, 有効面積の点からは L を大にしたいが, 大きくしすぎると 2 次の収差が発生して像がぼけてしまふ. アインシュタインや AXAF では, 図 5 に示すようにほぼ $D/f \sim 0.07$, $L/f \sim 0.1$ 程度になっている.

5. X線ミラーをどうやって作るか

X線ミラーの製造技術は米国やヨーロッパで開発されてきたが、まだそのノウハウが広く知られるには至っていないようである。母材はガラスの場合が主で、これを機械加工でくり抜いて凹面を作り、その表面を研磨して精度を上げる。そして最後にニッケル、金などの金属を表面に蒸着する。これとは別に、まず精度の良い凸面をつくり、その外側からエポキシ系プラスチックをかぶせてレプリカを得、レプリカの内面に金属を蒸着する方法もある。これだと、多数のミラーを同一の凸面から作れるので、ミラーのコストを下げる事ができる。

ところで、X線の波長は光の波長のおよそ $1/1000$ と短いので、ミラーの鏡面精度の問題はたいへん面倒である。例えばミラーの面に高さ 0.1 ミクロン程度の凹凸があった場合、光のミラーならばほぼ問題ない（光の波長の $1/4$ 以内におさまっている）。しかし例えば 1 keV のX線に対しては、この凹凸はその波長（約 10 \AA ）の 100 倍にもなっている。それでは、X線ミラーの表面は \AA のオーダー、即ち原子分子のレベルまで滑らかにしなければならぬのだろうか？ じつは斜め入射という配置のおかげで、波長の 10 倍程度の深さの凹凸が許されるのである。詳しい説明は省くが、読者の方々は手軽にできる実験をされるとよい。即ち、上質紙の表面、せともの、あまり磨かれていない金属の表面など、およそ鏡とは呼べないシロモノも、すれすれの斜め入射で見ると、意外なほどまともな鏡面反射を示すことがおわかり頂けよう。この効果のおかげで、X線ミラーの表面の凹凸の深さは、数百 \AA まで以内におさえれば良いようである。

6. 検出器

ミラーの焦点の位置に置くべきX線検出器について、インシュタインの場合を簡単に述べておこう。まず第1のグループは、光の望遠鏡では写真撮影に相当するも

の、即ち像検出である。これには、約 1 分角の分解能でおよそ $1^\circ \times 1^\circ$ の視野のX線地図を作る位置検出型比例計数管（一種のガス検出器）と、約 $2 \sim 3$ 秒角の分解能でおよそ $1' \times 1'$ の視野の像をつくるマイクロチャンネルプレート型検出器がある。第2のグループはX線のスペクトルを観測するもので、半導体検出器と、ブラッグ結晶分光器が搭載されている。（これらの分光器は、像検出はできない。）これらの検出器は回転テーブルにとりつけられており、地上からのコマンドで、特定の検出器がミラーの焦点に置かれるようになっている。この他にも、ミラーの前面に、対物回折格子を置くことができ、光の望遠鏡における対物プリズムと同様の使い方ができる。また AXAF では、X線ポラリメータも搭載される予定である。

7. 結 び

このように、インシュタイン衛星によって、X線ミラーの時代の幕が開かれた。この冬に打ち上げが予定されているヨーロッパのX線衛星 EXOSAT には、レプリカ方式の小型ミラーが載っている。アメリカはインシュタインに続く AXAF を計画中（打上げは 80 年代終わり頃）で、ドイツも独自のミラー衛星の開発を進めている。日本では、CXGT 計画という名称で、90 年代初めに米国との国際協力でX線ミラー衛星を打ち上げる事になった。この計画の詳細については、機会を改めて報告したいと考えている。

参 考 文 献

- [1] *Astrophysical Journal* **234**, No. 1, Part 2 (Letters) (1979) は、インシュタイン特集号である。
- [2] X線ミラーの一般的な解説は、R. Giacconi *et al.* *Space Science Reviews* **9**, 3 (1969) が詳しい。
- [3] P. Kirkpatrick and A. V. Baez, *J. of Optical Soc. America*, **38**, 766 (1948).
- [4] von H. Wolter, *Annalen der Physik* **10**, 94 (1952); **10**, 286 (1952).