

特集：放射光利用の広がり(2)

多層膜望遠鏡による EUV 領域での太陽観測

原弘久

国立天文台太陽物理学研究系*

Solar Observations with a Multilayer Telescope in EUV Ranges

Hirohisa HARA

Solar Physics Division, National Astronomical Observatory

Abstract

Multilayer optics has been used for astrophysical observations to obtain high-resolution images of the extra-terrestrial objects. We have developed an EUV telescope to observe the solar corona in a moderate spatial resolution as application of the multilayer technology for a future high-resolution observation, and it was successfully launched with a Japanese sounding rocket. The normal incidence multilayer optics has a promising capability for a higher-resolution observation with resolution less than 1 arcsec.

1. はじめに

天体観測では、地上の実験室のように測定対象の条件を変えることができないため、観測する手法を変えることにより天体より飛来するさまざまな情報を取得して観測を行い、その場所で起きている現象を理解しようとする。電磁波による観測では、これまでに電波からガンマ線にいたるまで幅広い波長域で観測が行われてきており、新しい波長域の観測が行われると、新しい現象が発見されたり、さらに理解が深まったりというように発展が続き、可能な天体観測の窓が覆われてきている。この中で一部の電磁波は地上に届かないため、このような波長域については、気球、ロケット、人工衛星まで使用して観測が行われてきている。通常はいったんある波長域の観測がなされても、観測装置の性能の向上によって新しい世界が見えてくる。その中でも解像力の向上が天文の世界に与えるインパクトは大きく、解像力を増して細かいものが見えてくると、それまで仮定していたものが一つ一つ外されて直接現象の本質が見えてくる。

望遠鏡の角分解能 $\delta\theta$ は、理想的な光学系が得られるのであれば基本的に光の回折によって決まっており、観測波長 λ と望遠鏡の口径 D の比、

$$\delta\theta \sim \lambda/D \quad (1)$$

で表すことができる。たとえば、口径10 cmの望遠鏡で5000 Åの可視光波長で観測をする場合、約1秒角の角分解能をもっていることになる。観測波長を大きく変えると見えてくるものが変わってしまうため、通常は口径を大きくすることで高い角分解能を得ようとする。ただし、遠方の天体からくる微弱なシグナルを捉えなければならない分

野においては、集光力を増やすことが先決で、大きな鏡を理想的な曲面に保つことで口径に見合う角分解能を出すというのが一般的である。可視光による地上観測の場合は、大気のゆらぎによって天体からくる光の波面が乱されてしまい、大口径望遠鏡の口径に見合った角分解能が出せなくなる。最近では鏡面を大気に乱された波面の変化に合わせてリアルタイムに変形させるという技術を用いて分解能の向上が行われてきている。数年前にハワイに建設された日本のすばる望遠鏡はこの手法で大気ゆらぎの効果を抑えており、公開された鮮明な画像を見て感動したことは記憶に新しい。

私が専門にしている太陽の研究では、その近きゆえに光子を集めるために大型望遠鏡を必要としないと考えられる方がおられるかもしれない。黒点が観測される可視光領域では十分な光があると考えてよいが、観測対象がその上層の遷移層やコロナとなってくると、フレア爆発中に観測される連続光成分が卓越してくる状況を除いては、様々な電離状態にあるイオンから放射される軟X線からUV領域に渡る輝線スペクトルが主となり、それぞれの輝線の情報を変化のタイムスケールに合わせて短時間に取得することが容易であるほどには光子数は十分ではない。これらの波長領域の観測は地上から行うことができないため、大気圏外に装置を展開しなければならないこともあり、実質上の大型化は容易ではない。

今回ここで話題にのぼる多層膜が使用できる以前では、極紫外線領域(EUV領域; 100–800 Å)を観測する望遠鏡の鏡のコーティング材は金属で、主に反射率が高く酸化などの化学反応に対して安定な金が使用されてきた。その直入射反射率はEUV領域でも長波長側では10%程度あるが、コロナ輝線の豊富な100–300 Å領域では数%程度であ

* 国立天文台太陽物理学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1
TEL: 0422-34-3705 FAX: 0422-34-3700 E-mail: hara@solar.mtk.nao.ac.jp

る。そのためこの領域で使用される望遠鏡は、太陽光を大面積の直入射鏡で集光するタイプか、全ての輝線情報を焦点面に集める斜入射型のいわゆる Wolter タイプ II 型が使用されてきた。どちらにおいても様々な輝線情報が混ざってしまうため、前者では集光鏡自体に回折格子を使用し、後者では望遠鏡焦点後に回折格子を入れて各輝線に対応する像を取得するという方法がとられた。いずれにしても分散方向の情報が画像にのってしまうという状況は避けられない。一方、多層膜では狭帯域の波長領域の反射率を上げることができるため、これを集光鏡として用いればある卓越した輝線からの画像を得ることができる。このような望遠鏡が太陽観測の分野で出現したのは1980年代の後半くらいからで、初期はロケット観測でその性能が実証され、その後1990年代の後半には太陽観測衛星の SOHO や TRACE に搭載されて太陽コロナの観測がなされ、太陽コロナ研究のための貴重なデータが取得され続けている。本稿では、この多層膜についての簡単な解説、我々国立天文台のグループが行ったロケット実験、多層膜技術を使った今後の観測についてふれることにする。

2. 多層膜反射鏡

多層膜は大きな原子番号をもつ反射層と、小さな原子番号をもつスペーサをそれぞれ厚さ d_A , d_B で交互に周期的に積み重ねた膜である (Fig. 1)。この2層の和 $d (=d_A + d_B)$ を周期長と呼び、これを複数層重ねて基板上に形成すると、EUV 領域の光に対して直入射条件でも高い反射率をもつ反射鏡ができあがる。反射される光の波長 λ は、

$$m\lambda = 2d \sin \theta_m [1 - \delta(2 - \delta) / \sin^2 \theta_m]^{1/2} \quad (2)$$

で表される^{1,2)}。 m は回折の次数、 θ_m は回折角、 δ は複素屈折率 $n = 1 - \delta - i\beta$ の実数部に現れるパラメータである。この式から分かるように、結晶による X 線回折と同じであり、多層膜は人工結晶とみなすことができよう。

多層膜が反射率のピークとなる波長を中心にとどの範囲の波長域の光を反射するかの目安を与えるのが、波長分解能

$$\lambda / \Delta\lambda \cong mN_{\text{eff}} \quad (3)$$

である。 $\Delta\lambda$ は反射率の半値幅、 N_{eff} は反射に寄与する周期長数である。通常達成可能であるスペクトル分解能は10-50程度である。例えば回折の次数を1、スペクトル分解能 $\lambda / \Delta\lambda = 20$ の鏡を作ったとすれば、中心波長200 Å のとき幅10 Å のフィルターつきの反射鏡ができたことになる。

どの応用分野でも反射率の高い鏡が望まれる。天文分野で多層膜鏡を使う場合も当然たくさん光子を集めるために、多層膜鏡の反射率を高くするようにしたい。反射率 R は、

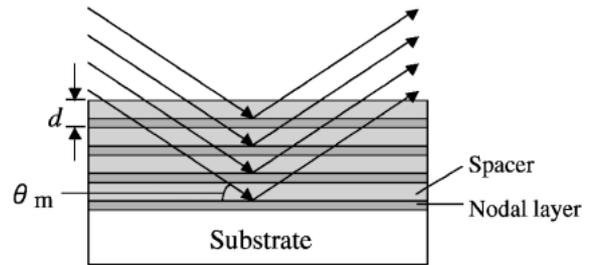


Figure 1. Schematic view of a multilayer mirror with a uniform spacing d on a substrate.

$$R \propto N_{\text{eff}}^2 (\delta_r - \delta_s)^2 \quad (4)$$

と書ける (δ_r , δ_s はそれぞれ反射層、スペーサ層の δ) ので、有効周期長数が大きくなるように、物質の吸収係数の差が大きいペアを選ぶことが重要である。太陽コロナ観測用望遠鏡でよく使用されているのは、反射層として Mo、スペーサ層として Si のペアである。反射層幅と周期長との比 $\Gamma = d_A / d$ も一つのパラメータで、 Γ を小さくして周期長単位での吸収を抑えることで実効的に反射に寄与する層を増やせば、波長分解能と反射率を同時に上げることができそうに思えるが、製作上反射層を薄く積むには限界があるので、実際にはそのようにはならない。

これまで製作された直入射多層膜鏡の中心波長は40-300 Å であり、120-140 Å 領域では反射率60%を越えるものが報告されている。これより短波長側では界面粗さが効いてくるために反射率は次第に下がっていき、長波長側に行くと複素屈折率中の β が効くために高い反射率を実現するのは難しくなってくる。

3. 太陽観測における多層膜光学系の応用例

3.1 直入射型多層膜鏡の太陽観測への応用

一般的に Wolter タイプの斜入射鏡は高価であり、可視光領域で使用されるような直入射鏡の鏡面への多層膜成膜で高い反射率と波長分解能を得られれば、比較的安価にまた斜入射光学系では得られない有効面積の大きな光学系を組むことができる。太陽観測に限ると、1990年くらいまでは米国のグループを中心にして数多くの望遠鏡が製作されロケットに搭載され、

- ~50 Å という軟 X 線領域での直入射光学系観測³⁾
- 2 枚鏡構成の収差補正光学系による空間分解能の高い広視野観測⁴⁾

という2つの光学系による観測がなされた。前者は斜入射光学系でのみ可能であった領域を比較的安価な光学系で可能とした点で新しい。ただこのくらい短い波長になると、反射率が低いために、太陽といえども実際には一枚鏡の直焦点にカメラを置くような状況となっている。後者は、多層膜によって反射率が大幅に向上したため、2枚の鏡を使って収差を補正し良像の得られる視野範囲を広げ

ることができるようになった点で新しい。また後者では、可視光望遠鏡と同様に短い筒長で長焦点距離をもつ望遠鏡が実現できるため、限られたスペースで高い空間分解能をもつ望遠鏡を可能にした点で注目すべきである。このようなロケット実験の後、後者の2枚鏡を使用した多層膜望遠鏡 EIT (EUV Imaging Telescope)⁵⁾が SOHO 衛星に搭載されて2002年5月現在も観測を続けている。この時点で太陽観測用の多層膜望遠鏡の空間分解能は1秒角レベルまで上がっており、反射率についてはピーク反射率が最大になるように最適化したものが使われた。これに対して、私を含む国立天文台のグループは、多層膜鏡をこれまでと少し質の異なる形で使用した多層膜望遠鏡を開発し、4年前にロケット観測を行ったのでそれについて次にふれることにする。

3.2 多層膜ドップラー望遠鏡

国立天文台の太陽研究グループは、1998年1月に宇宙科学研究所の観測ロケットに多層膜光学系で構成した EUV 領域観測用の望遠鏡を搭載して、太陽コロナの観測を行った⁶⁾。この望遠鏡観測で選択した波長帯は、13個の電子が剥ぎ取られた鉄原子からのコロナ輝線 Fe XIV 211 Å が卓越する波長帯である。この領域を選択したのはいくつか理由があった。一つは、このロケット観測を行った時期には日本のようこう衛星が地上600 km 上空から軟 X 線望遠鏡で太陽コロナの観測を行っており、この望遠鏡が高い感度をもつ温度領域とは異なるコロナ像を取得してコロナ生成についての相補的なデータを取得することである。もう一つは、新しいタイプの望遠鏡開発という意味ではこちらが主であったのだが、Fe XIV 211 Å 輝線の両側にわずかに中心波長をずらした2つの直入射多層膜光学系を一つの望遠鏡内に持ち、前方に置いた半円形のシャッターを動かすことで2つの波長帯を交互に観測して、2つの観測から輝線のドップラーシフトを検出しようという野心的な試みである。この観測の背景には、太陽コロナを加熱する一つの機構として考えられている磁気リコネクションからの高速流(1000 km/s 程度)を、太陽コロナ全面の速度情報を数十秒程度の時間で同時に取得することでとらえようという発想から来ている (Fig. 2)。これまでの分光器を使った観測では、太陽のごく一部の限られた領域の速度情報を得るのに1時間程度かかっていて観測効率が悪かったからである。多層膜光学系によるこの速度観測を行うには、近傍の波長に目的の輝線以外に寄与の大きい輝線成分がなく孤立しているという条件が必要であり、それになかったのが Fe XIV 211 Å だったというわけである。

我々が開発した望遠鏡 (XDT; XUV Doppler Telescope⁶⁾) の模式図を Fig. 3-a に、ロケットのフェアリングに納められた概観写真を Fig. 3-b に示す。入射フィルターで可視光をカットし、15 cm 口径の球面多層膜主鏡、直径9.6 cm 平面多層膜副鏡で折り返した EUV 光を 0 °C 程

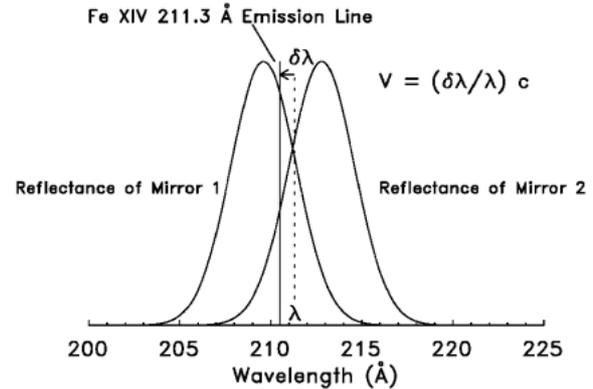


Figure 2. Principle of Doppler velocity measurement.

度に冷却した裏面照射型 CCD カメラ上に結像するというのがこの望遠鏡の光学系である。望遠鏡内全体が真空容器になっており、高度100 km 程度上昇後にドアを開けて観測を開始した。使用したロケットでは0.1°程度の姿勢制御しかできなかったため、副鏡を共有化する別の可視光光学系で太陽の動きを検知して、副鏡の駆動によって CCD 上の EUV 太陽像の運動を止める設計となっている。

XDT プロジェクトでは、5秒角程度の結像性能をゴールとしたので球面鏡で十分である。鏡の表面粗さを小さくして反射率の低下の原因にならないようにするという点で、球面鏡でよいというのはたいへん都合がよかったといえる。口径をさらに大きく、また望遠鏡長を短くまとめなければならない状況下では非球面鏡光学系が必須となる。

211 Å で5秒角の望遠鏡をつくるにはどのくらいの口径が必要だろうか。(1)式から約1 mm 程度の口径があればこの輝線領域の観測を5秒角の分解能で行うには十分であることが分かる。この鏡面上にわたって面の凹凸(理想的な反射面からのずれ)が $\lambda/16$ 、すなわち13 Å 以下になっていれば、口径で決まる回折限界の像が得られる。しかしこれでは光量が不足するため、必要なだけ口径を増大させる必要があり、我々の場合15 cm 口径とした。このとき15 cm 口径の EUV 多層膜望遠鏡で5秒角分解能をもつ望遠鏡を作るといえるときは、約1 mm 口径の望遠鏡の集まりとみなすことができる。より高い角分解能をもつ多層膜望遠鏡の可能性については後で述べることにする。

我々の多層膜望遠鏡では、鏡面に塗布する多層膜に対していくつかの条件を課した:

- (1) 15 cm 口径の望遠鏡で十分な光子数を集めるため、211 Å 近傍にくる多層膜ピーク反射率については10%を越えること。
- (2) ヘリウムの一電離した原子からの輝線 He II 304 Å は強い輝線のため、これを抑制するために304 Å 位置での反射率は反射鏡1枚あたり211 Å での反射率の1%以下にすること。
- (3) 強い他の輝線の寄与を除くために望遠鏡のバンドパ

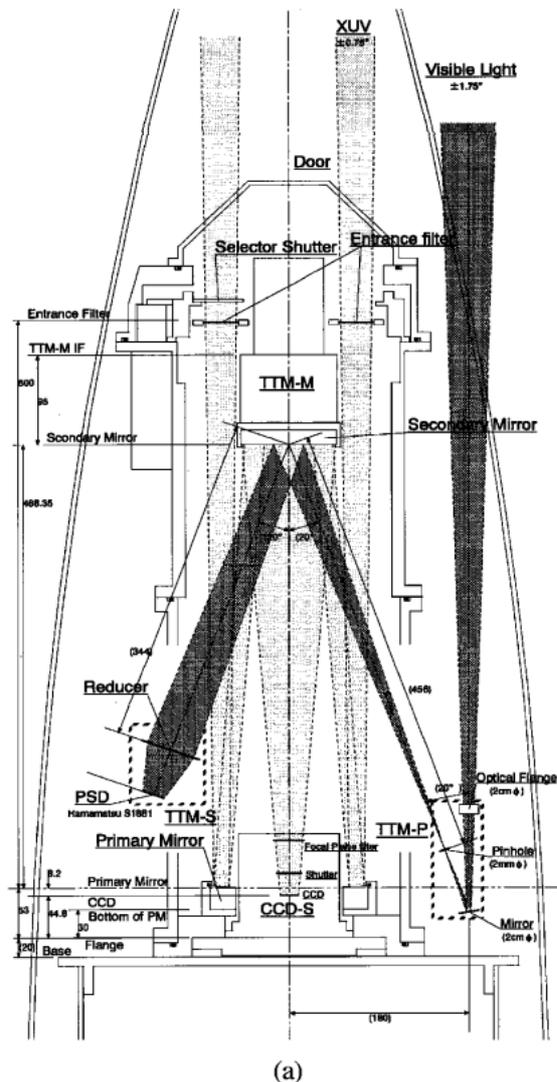


Figure 3-a. Schematic view of XUV Doppler Telescope.

スとして $\Delta\lambda = 5 \text{ \AA}$ を満たすこと。

(4) Fe XIV 211 \AA 輝線の短波長側に 209.6 \AA を中心とする観測波長帯を、また長波長側に 212.8 \AA を中心とする観測波長帯を 1.0 \AA の波長位置精度で設定すること。

(5) 多層膜成膜後、半年程度経過しても反射率の波長依存性が安定していること。

(1), (2), (3)の条件は、Fe XIV 211 \AA 輝線を観測するという要請からきており、(4)はドップラー観測を可能にするという要請からきている。(5)は製作・測定後に実際のロケット観測までには時間がかかるために安定性が不可欠である。(1), (3), (5)は多層膜を構成する材料の選択と関連している。(2)では特定波長の反射抑止技術が必要である。(4)では多層膜の膜厚制御と関連しており、一番厳しいのは 15 cm にわたる鏡全体に対してこの条件が適用されることである。このロケット観測プロジェクトの多層膜鏡は、ニコンとの共同研究を通して開発された。



(b)

Figure 3-b. XDT.

我々は様々な材料のペアの場合でシミュレーションを行い、最終的に(1), (3)を満たす解として MoSi/Si, SiC/Al という反射/スペーサ層の組み合わせを見出し、サンプル多層膜鏡を製作することにした。MoSi/Si サンプルミラーでは、(2)の条件を満たすため、最上層の Si 層の膜厚のみ変更して反射防止膜としての機能も施した。この反射防止膜は ALEXIS XUV Imager で採用されたもの⁷⁾よりも構造的には簡単になっている。反射抑止領域を作る方法としては、SOHO EIT で採用されたような、多層膜層の膜厚を少しずつ変化させて実現する方法もある⁸⁾。製作されたサンプルミラーの反射率測定は、分子化学研究所 UVSOR の BL5B ビームラインで行った。波長分解能はほぼシミュレーションどおりの性能が出たが、反射率については理論的なものの 1/3 程度で、10% の目標反射率をようやく満たせる程度だった (Fig. 4)。MoSi/Si 多層膜に施した反射防止膜の効果をみると、波長位置はいくらか長波長側に最低反射率がきているが、これを 300 \AA 位置にもってくることができれば、反射率比の要求条件 $R_{211 \text{ \AA}} / R_{300 \text{ \AA}} > 100$ を満たすことができることがわかる。

最終的に多層膜の材質の選択は、製作した多層膜鏡の安定性から決定された。多層膜鏡を加熱した後に周期長 d と一次の反射率 R を測定してそれらの変化をみたところ、MoSi/Si 鏡ではピーク反射率波長が 1 \AA 程度変化した程度であったが、SiC/Al 鏡では反射率が激減してしまうということが分かった。変化を加速するために実際の観測時には経験しないような高温下で試験したためかもしれない

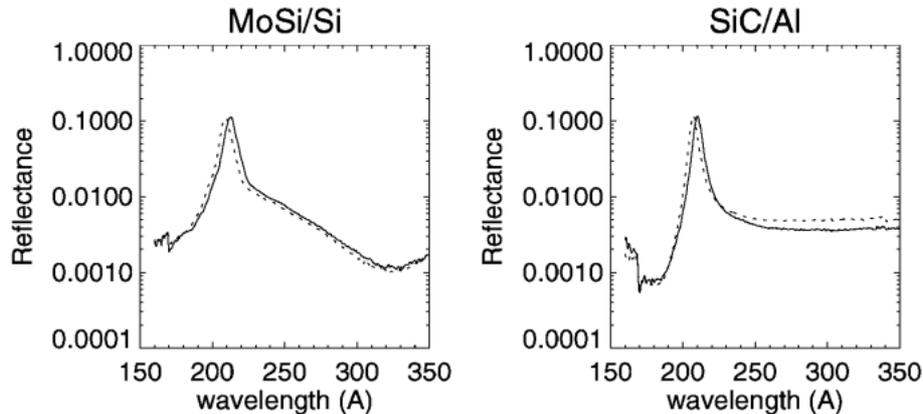


Figure 4. Reflectance of MoSi/Si and SiC/Al sample multilayer mirrors. Solid (dotted) line shows the reflectance at an incidence angle of 89 (80) deg. MoSi/Si multilayer mirror has an anti-reflection coating at the top layer to reduce the reflectance near 300 Å.

が、これをもって飛行に使用する多層膜としては MoSi/Si がより望ましいとした。MoSi/Si サンプル鏡はフライト鏡と同様に実験室内に保存され、シンクロトロン光実験の際にはその反射率を逐次測定して半年間その安定性をモニターしたところ、ピーク反射率やその波長位置はそれぞれ 0.003, 0.3 Å という測定精度内で一致していたので、フライト鏡の多層膜として使用することに決定した。

フライト鏡の製作に入る前には、フライト鏡の鏡表面位置に相当するところに多数の小さなシリコンウエハーサンプル基板を敷き詰められるようなジグを作り、代表点におけるピーク反射率の波長を測定し、この波長が鏡の周方向、半径方向に勾配をもたないような条件を整えた後にフライト鏡に成膜するという方法がとられた。この条件出し作業中に製作された数多くのシリコンウエハー多層膜鏡は、製作現場での斜入射 X 線による周期長の測定とシンクロトロン光での反射率測定とで絶対的な周期長—ピーク反射率波長位置の対応関係を見出す際に使用された。

このようにして製作されたフライト用多層膜主鏡 (Fig. 5 参照)、副鏡のピーク反射率波長、ピーク反射率、分解能を鏡の半径方向、周方向に多数のセグメントに分けてその代表点で測定した。測定点数は主鏡で 40 点、副鏡で 60 点である。反射鏡内のピーク反射率位置波長は 1 Å 以内におさめることができています。

多層膜鏡の反射率・幾何面積、フィルターの透過率、そして検出器の効率の積である有効面積を Fig. 6 示した⁹⁾。望遠鏡全体として、211 Å の両側に観測波長帯が形成されていることが分かる。望遠鏡全体のピークとなる波長位置は目的とする鉄輝線の短波長側、長波長側でそれぞれ 210.2 Å, 213.3 Å であり、設計値である 209.6 Å, 212.8 Å 近傍に設置することができた。また $R_{211\text{Å}}/R_{300\text{Å}} \sim 2 \times 10^5$ が達成されており、He II 304 Å 輝線の除去には十分である。この望遠鏡は 1998 年 1 月 31 日 13 時半に鹿児島内之浦にある宇宙科学研究所の発射場から打ち上げられ、

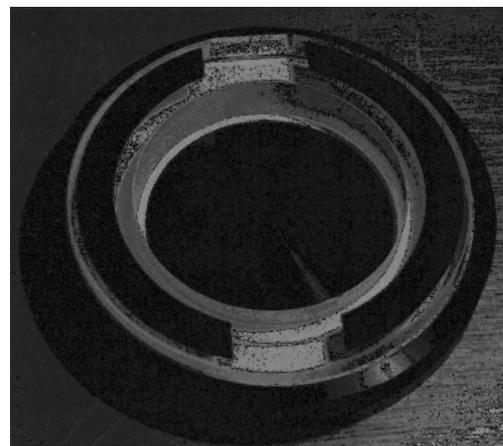


Figure 5. Flight primary mirror of XDT.

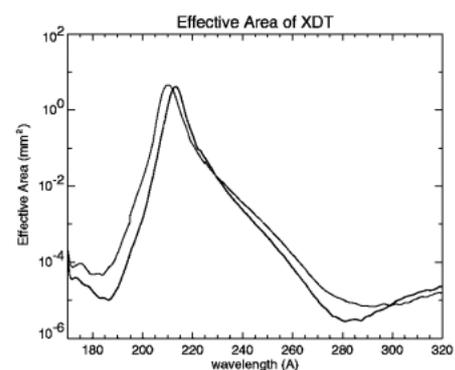


Figure 6. Effective area of XDT.

5 分間の飛行中に Fig. 7 にあるような太陽像を取得した。短い観測時間中にはフレアが発生せず、高速のプラズマの運動はこのデータからは確認されなかったが¹⁰⁾、同時に行われた「ようこう」衛星の X 線望遠鏡、SOHO 衛星の EUV 望遠鏡との共同観測から、コロナの加熱領域に



Figure 7. Solar corona observed in Fe XIV 211 Å with XDT.

ついでの研究が行われた^{11,12)}。

4. EUV 領域高空間分解能望遠鏡

我々のグループが製作した EUV 望遠鏡は、限られたコストと使用できるロケットのスペースから 5 秒角程度の空間分解能をもつものとなったが、太陽コロナには大型望遠鏡を使った日食時の瞬間的な観測からより細かい構造が存在することが知られている。このような細かい構造の変化をその構造の生成原因であるより低層でのプラズマの運動とをつなげて長時間にわたって見るためには大気圏外からの観測が必要であるが、このような微細構造の観測を 2 枚鏡構成の直入射多層膜望遠鏡で実現するのはどのくらい難しいものなのだろうか。

まず、EUV 領域での回折限界分解能はどの程度になるだろうかを考えてみる。口径 20 cm、波長 200 Å の望遠鏡があり、この望遠鏡の鏡面全体で光路差が小さくなるようにできたとして、(1)式から 0.02 秒角とひじょうに高い分解能をもつことができることがわかる。しかし、このためには鏡面全体に渡る鏡面の形状誤差（いわゆる PV）が、 $\lambda_{200\text{Å}}/16 (=13\text{Å})$ 程度とするようなことになるので簡単に実現できるレベルではないことがわかるだろう。観測波長と口径で決まる空間分解能までは狙わずに、現在達成されている 1 秒角程度の分解能よりもいくらかよい 0.5 秒角の分解能をもつ望遠鏡を目標とすると、局所的には 0.8 cm 程度の口径で回折限界となるようにすればよい。この空間スケールに渡って、形状誤差が $\lambda_{200\text{Å}}/16 (=13\text{Å})$ となっていれば 0.5 秒角分解能の回折限界条件が満たされる。太

陽分野といえども 0.8 cm の口径では光量が足りないので、XDT 同様に光量を増やす意味で口径を増大させることになる。この場合、鏡は 0.8 cm の小さな鏡の集まりとみなすことができ、幾何光学的に個々の焦点位置が小さな鏡の分解能以内に集まるように鏡全体の形状が決まっていればよいことになる。20 cm の開口があれば、可視光領域で 0.5 秒角の分解能が達成できるので、全体の鏡面形状は、可視光で回折限界の望遠鏡が達成できるように決めればよく、十分製作可能である。また、望遠鏡として組み上げた後の光学系の性能は、可視光領域の干渉計やテストパターンなどで 0.5 秒角の分解能が達成されるかを確認すればよいことになる。

EUV 領域ともなると、界面の粗さによる光の散乱が効いてくるために、表面はスムーズな面となっていなければならない。反射面の rms 粗さ σ の散乱によって、反射率 R は表面粗さのない理想的な面での反射率 R_0 に対して、

$$R = R_0 \exp \{ - (4\pi\sigma \sin \theta / \lambda)^2 \} \quad (5)$$

というように減少する。直入射光学系 ($\theta \sim 90^\circ$) で EUV 領域の波長 $\lambda = 200\text{Å}$ 程度では、 $\sigma = 3, 5, 10, 20\text{Å}$ のとき反射率比 $R/R_0 = 0.97, 0.91, 0.67, 0.21$ となるため、多層膜鏡の初期の基板は超研磨のしやすい球面で、2 枚鏡で構成されるカセグレンタイプも主鏡、副鏡ともに球面が使用されていた⁴⁾（通常のカセグレンは主鏡が放物面鏡で副鏡が双曲面）。最近の衛星観測に搭載された多層膜望遠鏡では非球面鏡を使った光学系で、視野の中心から端まで良像が

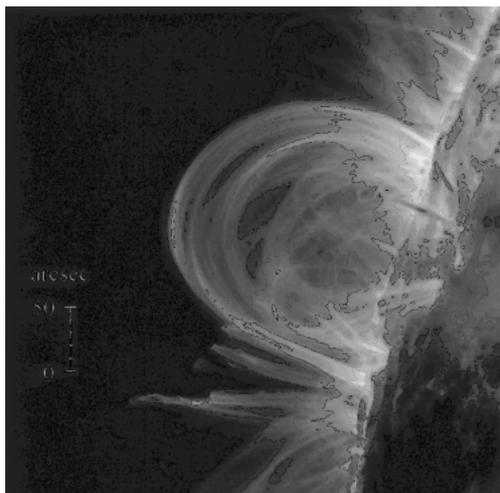


Figure 8. TRACE observations of the solar corona.

得られるような望遠鏡が登場している。その中で現在飛翔中の SOHO に搭載されている EIT (EUV Imaging Telescope) という望遠鏡⁵⁾では、基板そのものは球面で、超研磨されたこの球面基板に対して金属膜をコーティングすることにより非球面鏡基板を形成後、Mo/Si 多層膜を塗布して広視野で良像を得られる Ritchey-Chretien 光学系(主鏡を双曲面、副鏡を双曲面として球面収差とコマ収差をゼロにする光学系)用の多層膜鏡が開発された¹³⁾。その後打ち上げられた TRACE 衛星の EUV 望遠鏡では、まず基板の研磨時に Ritchey-Chretien 光学系を形成し、この表面を超研磨して表面粗さを減らすという方法で $\sigma = 7 \text{ \AA}$ 程度の基板に仕上げた後、 $\text{Mo}_2\text{C}/\text{Si}$ 多層膜を塗布した多層膜鏡が製作された¹⁴⁾。現在の最高空間分解能 1 秒角をもつこの望遠鏡で観測された太陽コロナ像を Fig. 8 に示す。スケールから判断できるように、非常に細かい構造がとらえられている。太陽観測用の今後の多層膜望遠鏡では、これを凌ぐような性能が求められている。

既に実現されている 1 秒角レベルの高空間分解能 EUV 望遠鏡や更に空間分解能を上げたような EUV 望遠鏡では、鏡の製作が難しくなるだけでなく、ロケットの打ち上げ時の振動・衝撃に耐え、軌道上での熱変形まで考慮した鏡の支持方法にも工夫が必要である。我々が打ち上げた EUV 望遠鏡の場合には、鏡全体を包むような支持構造としたため、鏡の接着時に導入されるストレスや支持構造を望遠鏡に取り付ける際の機械的ストレスのために鏡面が歪むということを干渉計によるテスト鏡の組み付け試験を通して経験した。フライト鏡ではテスト鏡でのノウハウをもとに組み付けを行い、鏡の支持構造への接着後や支持構造の望遠鏡への組み付け後の鏡面形状を干渉計で確認しながら目的の鏡面形状へと追い込んでいる。TRACE の望遠鏡では光路としてあけた主鏡中央部を INVAR 構造で挟み込み、その構造を望遠鏡構造に取り付けることで、この問題

を回避している¹⁵⁾。

5. 多層膜光学系による太陽観測の今後

現在進行中の、または提案されている太陽コロナの観測計画で直入射多層膜光学系を使う計画は多数ある。我々が 2005 年に打ち上げを予定している宇宙科学研究所の太陽観測衛星 Solar-B では、英国、米国と共同して多層膜鏡、多層膜回折格子を搭載した EUV 領域分光撮像装置 (EUV Imaging Spectrometer) を搭載して、太陽遷移層、コロナの分光観測を予定している。同時期に米国では、地球から互いに反対方向に離れていく 2 つの衛星に多層膜望遠鏡を載せて太陽コロナのステレオ観測を予定している。また、米国ではその次期計画として、多数の EUV 多層膜望遠鏡を搭載してコロナを高速撮像する計画を進めようとしている。一方ヨーロッパでは、多層膜望遠鏡を搭載した衛星を太陽に近づけ、実効的に空間分解能を上げてコロナの高分解能観測を行おうとしている。このように、20 世紀後半に確立した多層膜技術を使用して、21 世紀初頭には多くの太陽観測計画が実施されようとしている。これらの観測により新しい知見が得られていくのをひじょうに楽しみにしている。

参考文献

- 1) A. G. Michette: *Optical Systems for Soft X Rays*, Plenum, New York, (1986).
- 2) 山下広順: 日本物理学会誌 **47**, 293 (1992).
- 3) L. Golub, M. Herant, K. Kalata, I. Lovas, G. Nystrom, F. Pardo, E. Spiller and J. Wilczynski: *Nature* **344**, 842 (1990).
- 4) A. B. C. Walker, Jr., T. W. Barbee, Jr., R. B. Hoover and J. F. Lindblom: *Science* **241**, 1781 (1988).
- 5) J. P. Delaboudiniere, G. E. Artzner, J. Brunaud, et al.: *Solar Phys.* **162**, 291 (1995).
- 6) T. Sakao, S. Tsuneta, H. Hara, T. Shimizu, R. Kano, K. Kumagai, T. Yoshida, S. Nagata and K. Kobayashi: *Solar Phys.* **187**, 303 (1999).
- 7) B. W. Smith, J. J. Bloc and D. Roussel-Dupre: *SPIE* **1160**, 171 (1989).
- 8) J. P. Delaboudiniere, J. F. Hochedez, J. P. Chauvineau and L. Valiergue: *SPIE* **1742**, 296 (1992).
- 9) H. Hara, S. Nagata, R. Kano, K. Kumagai, T. Sakao, T. Shimizu, S. Tsuneta, T. Yoshida, W. Ishiyama, T. Oshino and K. Murakami: *Appl. Opt.* **38**, 6617 (1999).
- 10) K. Kobayashi, H. Hara, R. Kano, S. Nagata, T. Sakao, T. Shimizu, S. Tsuneta, T. Yoshida and R. Harrison: *PASJ* **52**, 1165 (2000).
- 11) R. Kano, H. Hara, K. Kobayashi, K. Kumagai, S. Nagata, T. Sakao, T. Shimizu, S. Tsuneta and T. Yoshida: *Adv. Space Res.* **25**, 1739 (2000).
- 12) S. Nagata, Ph.D. Thesis, University of Tokyo (2000).
- 13) J. P. Chauvineau, J. Y. Clotaire, G. Colas, O. Lam, J. C. Manneville, J. P. Marioge, M. Mullot, A. Raynal, G. Tissot, L. Valiergue and J. P. Delaboudiniere: *SPIE* **1546**, 576 (1991).
- 14) B. N. Handy, L. W. Acton, C. C. Kankelborg, et al.: *Solar Phys.* **187**, 229 (1999).
- 15) P. Cheimets, J. Bookbinder, W. Davis and L. Golub: *SPIE* **3445**, 28 (1998).