

X 射線反射鏡簡介

蘇賢錫

國立臺灣師範大學物理系

一、X 射線望遠鏡

通常一聽到望遠鏡，我們就聯想到使用透鏡或反射鏡的細長筒。人的瞳孔大小，最多直徑 7mm 左右。然而，如果利用望遠鏡來使光線折射或反射，把進入大口徑的光線全部集中在瞳孔中，則直接用肉眼看起來是黑暗的星星，也可以看得清楚。電波天文學或太空通信所用的拋物面天線，直徑達數十公尺，其原理亦相同，使進入巨大口徑受光面的光線（電磁波）發生反射，將其焦聚在一點，以便增加強度，提高信號噪音比（signal-noise ratio）。

然則，X 射線望遠鏡是怎樣觀測 X 射線的？通常用以觀測 X 射線天體的望遠鏡，其構造多半完全不同於我們由光學或電波望遠鏡所聯想到的。因為觀測對象的 X 射線，其波長極短，大約 $100 \text{ \AA} \sim 0.1 \text{ \AA}$ ，亦即可見光的數十分之一到數萬分之一。在這種短波長帶中，光線幾乎不被物質所

反射或折射，只隨物質的質料或厚度而被吸收。因此，大多數 X 射線望遠鏡都利用 X 射線不容易透過（容易吸收）的物質來製作遮蔽器或平行光管。透過平行光管來看天空時，天空的一部分忽隱忽現。利用這種現象，可以求出 X 射線天體的形狀。換言之，不是利用反射或折射來直接「聚光」或「成像」，而是透過空間的濾器來接受變換過的信號，然後再用數學上的逆變換來合成實空間的像。

這種 X 射線望遠鏡純粹利用吸收作用，故其特長為：①裝置的基本構造簡單，②有效面積較大的望遠鏡容易製作，③即使高能 X 射線也能有效使用。然而，由於使用遮蔽器，其加工精密度必須講究，而且為了吸收 X 射線，必須略具厚度與寬度，因而角分辨率（angular resolution）較光學望遠鏡為差。此外，由於觀測數據的不完整，變換成為實空間的像時，容易出現鬼線（ghost line）。同時，與聚光系相較，這種非聚光系的最大缺點是，信號

噪音比不夠理想。

二、X射線的反射與折射

X射線是否不會被反射或折射？其實，X射線也是電磁波，故在介質的界面上，如同普通的光一樣，依照斯涅耳定律（Snell's law）來反射或折射。但是X射線光子的能量較高，在物質中的光電吸收機率頗高，因此，立刻遭受吸收，另一問題是，普通物質對X射線的折射率極近於1。因此，若要為X射線而製作透鏡，則其鏡片必須極薄，而且因為折射率幾乎等於1，故其焦距必定很長。為了克服這種困難，可以使用菲涅耳域片（Fresnel Zone Plate），靠干涉來成像。然而，這種方法只對單一波長始有效，而且在X射線的短波長帶中，要製作大小足夠實用的域片，非常困難。另一方面，物質對X射線的折射率比1稍小，表示X射線的相速度（Phase Velocity）在物質中較真空中為快，由真空中沿著比某特定角度（臨界角： θ_c ）為小的入射角（角度皆自界面算起）入射真空與物質的界面之X射線，將在界面上發生全反射（如圖1所示）。在X射線領域的折射率，可以下列近似公式表示：

$$n = 1 - \delta - i\beta$$

式中， δ 與 β 均為微量，而根據斯涅耳定律，臨界角為

$$\cos \theta_c = 1 - \delta$$

亦即

$$\theta_c = \sqrt{2\delta}$$

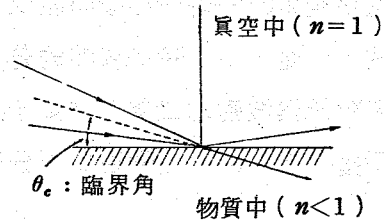


圖1

δ 值因物質而異，而且雖為同一物質，又因X射線的能量而異，大致上與能量成反比。無論如何， θ_c 很小，就1~2 keV的X射線而言， θ_c 為 $1 \sim 2^\circ$ 。以四種物質為例，圖2表示，入射X射線的反射率對能量的變化情形。一般而言，原子序愈大的物質，X射線的反射率愈高。此外，由於

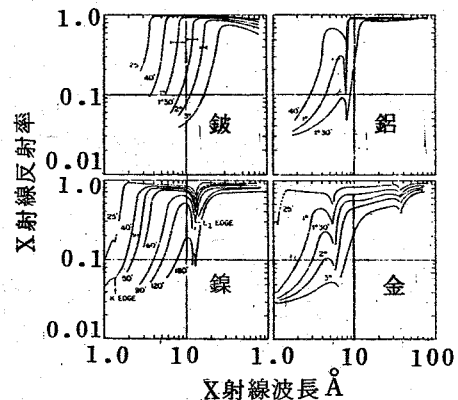


圖2

表面的吸收，即使是全反射，其反射率遠較100%為低。雖然如此，在這種非常困難的條件之下，只要利用X射線的全反射，即可製作X射線的反射成像系。

在光學中，幾何光學為波動光學的近似結果，在波長趨近於零時始正確。幾何光學的計算常因波動的干涉而受到困擾，X射線應該是單純的幾何光學頗能成立的理想領域，但是，令人啼笑皆非的是，替光子帶來粒子與波動的二象性之量子論在這領域干擾，使X射線光學變成十分複雜。

三、X射線的反射成像系

具體的反射成像系如何？事實上，這項研究早已開始。1948年克巴特瑞克（P. Kirkpatrick）與巴厄茲（A. Baez）利用圖3所示的截面為圓弧的一部分之兩組反射面，證明能在二維空間將X射線予以焦聚。然而，這是近似性聚光，平行光束正確聚在一點的條件沒有滿足，像差額大。

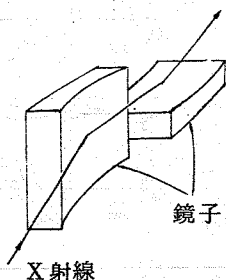


圖3

光或電波的反射鏡，利用迴轉拋物面中心部分，使光子幾乎垂直入射而發生反射。為了直接利用這種原理，只要使用拋物面一端的傾斜較大部分，以便滿足圖1所示臨界角的限制即可。如此，不必像克巴

特瑞克與巴厄茲那樣使用兩組面，亦可將X射線予以焦聚。然而，只用一個迴轉拋物面時，該系的焦距等於，曲面上反射處到焦面平行於光軸所測的距離，隨入射光距光軸的距離（ h ）而改變很大（如圖4所示）。因此，阿貝（Abbé）的正弦定

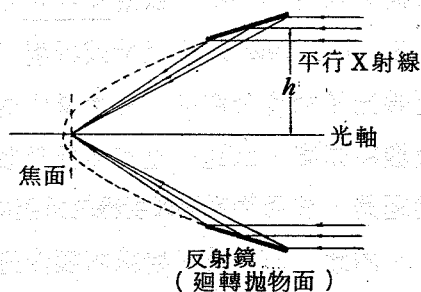


圖4

律不能成立，雖然平行於光軸的光束正確焦聚在一點，但是斜向入射的光束會產生第一級彗形像差（Primary Coma）。

1952年，渥爾特（H. Wolter）為了消除這種第一級彗形像差，提出迴轉拋物面與另外一個迴轉曲面所組成的光學系。圖5表示渥爾特所提出的三種光學系。入射X射線分別沿著箭頭的方向被反射後焦聚在F點。這些方式由上向下依次分別稱為渥爾特 I、II、III型。饒有趣味的是，渥爾特及該時期的研究人員，其目的完全不是為了開發X射線望遠鏡而是X射線顯微鏡，因為當時根本沒想到天體竟然會放出X射線。

渥爾特提出的這種組合方式，已經成為後來X射線反射望遠鏡的基礎。渥爾特

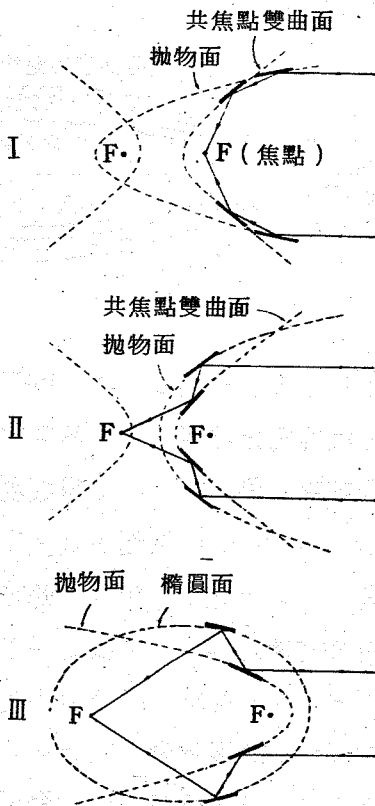


圖 5

III 型為迴轉拋物面與迴轉橢圓面的組合，但其口徑很小，對 X 射線望遠鏡而言，並不是有利的方式。渥爾特 I 與 II 型為迴轉拋物面與迴轉雙曲面的組合。尤其是渥爾特 I 型，假如設計得當，全系的焦距可以幾乎等於僅用迴轉拋物面時的 $\frac{1}{2}$ 。於是可得口徑比 (F 數) 小的明亮光學系，同時，整個尺寸可以縮短，裝置變成小型，重量減輕，故在 X 射線反射鏡的設計上廣泛採用渥爾特 I 型。反之，渥爾特 II 型的焦距變長，因此，希望焦面的角分辨增大時，普遍採用這種方式。

現在，就渥爾特 I 型來說明。這種型式的反射鏡，其詳細情形如圖 6 所示。這反射鏡的主要性質，由焦距 f (拋物面與雙曲面的交面到焦面的距離)，口徑 D ，以及

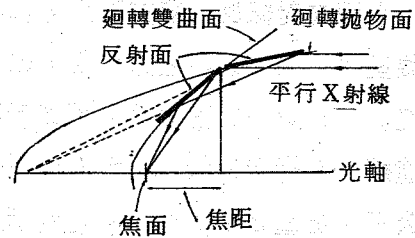


圖 6

各反射面的長度 ℓ 而決定。在設計時，通常使兩個曲面的長度幾乎相等，X 射線對各面的入射角 θ 也幾乎相等，這時

$$\theta = D/4f$$

另一方面，反射鏡對入射 X 射線的有效幾何面積 S 為

$$S = \pi D^2 \ell / 2f$$

在這種條件之下，望遠鏡的特長由這些基本參量的選擇來決定。例如，為了使有效面積增大，只要使 f 減小而 D 增大即可。然而，這時 θ 增大，而能夠反射的 X 射線，其能量上限勢必降低。同理， ℓ 增大時， S 會增加，像差當然增加，角分辨率欠佳， θ 也變大。因此，必須配合觀測的目的來決定這些參量，使各望遠鏡都能夠充分發揮其特長。

1978 年 11 月，美國國家航空及太空

總署 (National Aeronautics and Space Administration 簡稱 NASA) 發射大型 X 射線反射望遠鏡衛星「愛因斯坦」。在此之前，已有好幾個衛星或火箭利用中小型 X 射線反射鏡來觀測 (例如太空實驗室的太陽 X 射線望遠鏡)，但「愛因斯坦」才是第一個正式的大型 X 射線反射望遠鏡，其構造如圖 7 所示 (衛星總長 6.7 公尺，總重 3.2 公噸)。此處所用的

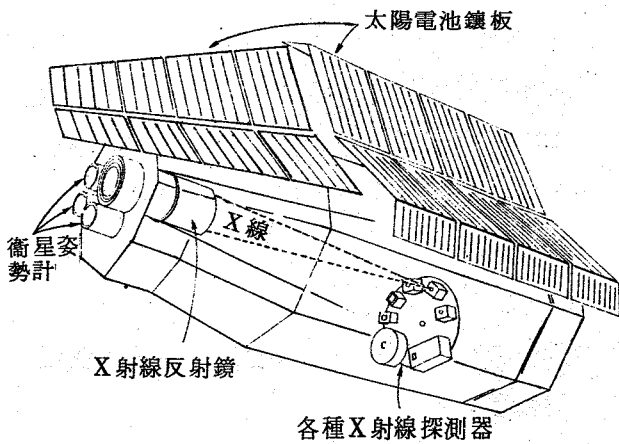


圖 7

反射鏡是渥爾特 I 型，最大口徑 60 公分，焦距 3.6 公尺。從前方觀看時，這種反射鏡的有效部分是鏡筒內側的極薄環狀部分，更內側部分完全沒有用處。爲了有效利用這空間來增加有效面積，在內部安裝幾層同樣的反射鏡，叫做巢形鏡面 (nesting)。如圖 8 所示，「愛因斯坦」衛星擁有四層安放鏡面。雖然如此，對全開口面積 2800 cm^2 而言，全部有效幾何面積不過其 $1/7$ ，亦即 400 cm^2 而已。「愛因斯

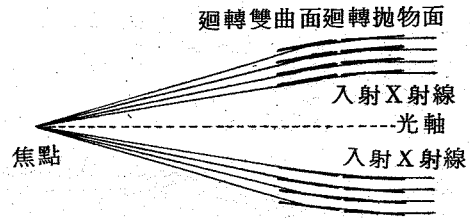


圖 8

坦」衛星觀測能的上限大約 4 keV ，而在光軸附近的角分辨率爲 4 秒角度左右。這個角分辨率比得上受到大氣閃爍現象 (Scintillation) 限制的地上光學望遠鏡之角分辨率。結果，與傳統的平行光管式 X 射線望遠鏡相較，靈敏度一下子提高 1000 倍左右。同時，首次由「愛因斯坦」衛星所得到的許多清晰的 X 射線源像，使 X 射線天文學實現劃時代的大發展。

圖 9 表示「愛因斯坦」衛星觀測的超新星殘骸仙后座 (Cassiopeia) A (CAS-A) 的 X 射線像。這天體擴展到

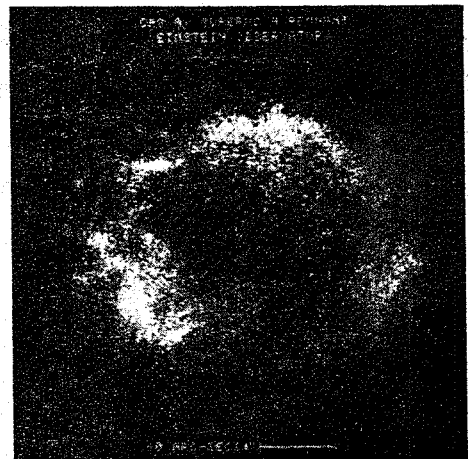


圖 9

大約 5.5 分角度的大小，像上各點代表來自各方向的 X 射線光子。

四、X 射線反射鏡的製作

光或電波的反射鏡，其形狀像碟盤般平坦。相反地，X 射線反射鏡的形狀好像無底的淺玻璃杯。要製作 X 射線反射鏡時，首先必須準備這種圓筒形的材料。材料必具的重要性質是，熱脹係數小，質料堅固，長期不生塑性變形，容易加工等等。一般採用熔融石英、ULE (Ultra Low Expansion：商品名稱)、Zerodur (商品名稱) 等當材料。金屬容易變形，只有特別場合始採用。圓筒形材料用大型切削機來削成規定的形狀後，開始研磨鏡面。問題在於研磨的過程。光的反射鏡，鏡面精確度要達到波長的數分之一。倘若 X 射線反射鏡的情形也是一樣，則 X 射線反射鏡的鏡面精確度必須達到固體原子間的距離以內。事實上，由於 X 射線幾乎沿著鏡面入射，鏡面的平滑不必要求如此嚴格。雖然如此，必須比光的反射鏡研磨得平滑許多倍，而且研磨部分是圓筒的內側，工作形態與傳統的反射鏡完全不同，加工十分困難。

將平行 X 射線照射在研磨完工的鏡面，測定焦點附近 X 射線的強度分布情形，通常可以圖 10 的曲線 c 來代表。曲線 c 可以視作比較尖銳的分布曲線 a 與比較緩

和的分布曲線 b 重疊而成。曲線 a 的成因是，實際鏡面的一部分形狀與設計值不符合，而不符合部分的後果在正確焦點附近分散。這種情形與光的反射鏡相同，只要把鏡面的形狀準確修正即可控制。曲線 b 是鏡面因微觀性平滑（粗糙）而發生的散射，像暈圈（halo）般分布在廣大範圍。控制的唯一方法是，儘量把鏡面研磨平滑。曲線 a 代表像的「清晰」，曲線 b 代表像的「襯比」。

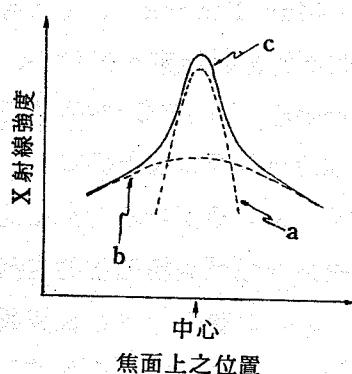


圖 10

要研磨成為平滑的 X 射線反射鏡面，非常困難，因為前面已經說過，精確度是固體原子間隔的數量級，而技術上完全未知的難點為數不少。專門製作 X 射線反射鏡的各廠商也感到這點最頭痛，各自保持秘訣，不願意公開其技術。磨料的材質可能有關係，但是，似乎多半要靠研磨技術人員多年的經驗與鍛練出來的高超技藝。西德卡爾柴斯 (Carl Zeiss) 公司的研磨廠商有意外的簡陋研磨裝置被磨料沾污著，前面牆上張貼一張牛頭犬的巨幅彩色

照片。據說意思是表示「X射線反射鏡的研磨人員要像這種猛犬一樣頑強，有耐心，而且心平氣和地去做」，並且「早晨在家裏跟太太吵架再上班的日子，不會磨出好成品」。要打開科學最尖端的最新觀測裝置，其製作全靠傳統的方法鍛練出來的高超技藝，實在饒有趣味。

研磨完成的鏡子，最後必須使用非常平行的X射線束來實際試驗其成像情形，然後再做必要的修正。目前，西德麥克斯·普朗克 (Max Planck) 研究所擁有真空導管 130m 的X射線束。NASA 的載人太空飛行中心 (MSFC, 在阿拉巴馬州) 也有大約 300m 的同樣X射線束，「愛因斯坦」衛星的X射線反射鏡就是在此試驗的。爲了將來開發更高精確度的X射線反射鏡，NASA 計畫把這X射線束延長到大約 1000m，經過這種檢查與修正之後，爲了提高X射線的反射率，在鏡面鍍上一層金或鎳等重金屬，反射鏡便告完成。

五、X射線的像探測器

在X射線反射望遠鏡中，與反射鏡一樣重要的是，X射線的像探測器。非常明亮的X射線天體，例如太陽，可以使用普通X光照片的軟片，但是一般X射線天體很暗，必須將聚集的X射線光子逐一計數，而且必須累積數分鐘到數小時後始能得像。因此，在整個成像面的範圍內，每一

個X射線光子到達時，探測器必須能夠逐一讀出其正確位置。

具有廣大視野 (面積) 而普受採用的探測器，首推成像比例計數管 (Imaging Proportional Counter 簡稱IPC) 在 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的範圍內，位置的分辨率大約 1mm 以內， $f=3.6\text{m}$ 的反射鏡，其視野大約 1.6° ，相當於角分辨率大約 1 分角度以內。在X射線反射鏡中，距光軸大約 10 分角度以內的範圍，角分辨率在 5 秒角度以內，但是，一旦離開光軸，角分辨率急遽降低，離開 1 度時，角分辨率變成 1 ~ 2 分角度左右。因此，廣大視野的觀測，IPC 最爲適合，但在視野中心附近欲看更詳細的像時，需要位置分辨率更高的像探測器。這種探測器之一是微頻道板 (Micro channel Plate)，簡稱 MCP)，在直徑 2 ~ 3 cm 的範圍，能以大約 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的精確度來決定X射線的位置。就 $f=3.6\text{m}$ 的反射鏡而言，這個精確度大約相當於 2 秒角度，能夠配合反射鏡的最大角分辨率來觀測。此外，最近正在進行一項研究，使電荷耦合裝置 (Charge Coupled Device 簡稱 CCD) 成爲X射線的實用探測器。將來利用 CCD 來探測X射線時，位置分辨率大約 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，同時，MCP 測不出來的各個X射線光子的能量也可以正確地測出來，觀測內容將有突破性發展。如此，反射鏡與X射線像探測器，猶如車輛的兩輪，必須同時進行研究。

六、將來的X射線反射鏡

最後，就現在的計畫中而最近的將來可能完成的一些X射線反射鏡，簡單介紹如下。

爲了提高X射線反射鏡望遠鏡的靈敏度，必須儘可能增大有效面積。然而，要把反射鏡的口徑（亦即焦距）增大得比「愛因斯坦」衛星大好幾倍，在各方面都有困難。於是，有人建議把許多個比較小的反射鏡匯集起來擴大有效面積。這就是LAMAR（Large Area Modular Array of Reflectors）計畫。然而，縱然是小型的，要做許多反射鏡，在技術上與經費上都有問題。1983年5月，歐洲太空機構（ESA）發射X射線觀測衛星EXOSAT，上面裝載中型X射線反射鏡。EXOSAT的X射線反射鏡其製作方法對LAMAR計畫的問題提供一個解決方法。EXOSAT的X射線望遠鏡中，使用兩組口徑28 cm，焦距110 cm的二層巢形鏡面。這個反射鏡，首先製作精密研磨的凸形心軸（mandrel），鍍上金後，在上面塗一層環氧基樹脂（epoxy resin），再蓋上凹形的鏡面基體。基體沒有經過研磨。整個隙縫都用環氧樹脂來填滿，等到環氧基樹脂凝固後，拔掉凸形心軸，則外側鏡面基體的內面留下鍍金的高精確度鏡面。這個凸形心軸可以再度鍍金反覆使用，因

此，一旦製作凸形心軸，以後可以簡單複製許多反射鏡。

爲了增加有效面積，X射線反射鏡採用巢形鏡面的辦法，但是，爲了保持各個鏡面的精確度，鏡子基本材料相當厚，大約2~3 cm，因此，不能安放較多的鏡面。NASA的余勒密索（P. Serlemitsos）打算儘可能減少各鏡面的厚度，以便增加有效面積。他的鏡子是，市面出售的0.13 mm厚鋁片表面塗上一層10 μm 厚的壓克力漆，再鍍上一層大約500 Å厚的金膜，可以說是在實驗室內自製的鏡子。他希望把這種鏡子100張安放在內徑大約20 cm，外徑大約40 cm的筒形部分，在 $f=3.8$ m的情形之下，獲得有效幾何面積大約650 cm^2 ，但是，這時渥爾特 I 型的兩個迴轉曲面以兩個圓錐面代替直線做近似處理，因此，像的分辨率最多2分角度左右，與其說是成像系，不如說是聚光系。雖然如此，因爲X射線幾乎與鏡面平行入射，所以其角分辨率極高。因此，聚光的最大能量高達10 keV 以上，實在令人驚奇。

繼「愛因斯坦」衛星，NASA 正在開發大幅度改良的大型X射線反射望遠鏡AXAF（Advanced X-ray Astronomy Facility），以配合1990年代的世界X射線天文學。其反射鏡是最大口徑120 cm，安放鏡面6層，焦距10 m，最大角分辨率0.5 秒角度，有效幾何面積1600 cm^2 ，最大觀測能量8 keV。因這望遠鏡的有效

面積較大，故角分辨較高，其靈敏度較「愛因斯坦」衛星高1000倍左右。AXAF或許能夠讓我們眺望宇宙的盡頭，使我們

看到宇宙開關初期的劇烈活動情況。

[取材自「數理科學」No. 244, October, 1983]

◎ 詞語淺釋 ◎

半 導 體

任何物質沒有絕對不導電的，只是程度有差異，而分為絕緣體與導體。絕緣體是指一般狀況下不導電，必須電壓很高時才能導電的，例如木材、塑膠、瓷。導體是指只需微小的電壓即能導電的，例如銀、銅、鐵。半導體的導電則是溫度越高，導電性越高，例如二極體、電晶體、積體電路，都有這種特性，都是半導體。

半導體分兩種。「本質半導體」或稱「純半導體」，是由一種半導體構成。在半導體中加入雜質，使它可以導電的，稱「外質半導體」或「雜質半導體」。「矽」和「鍺」是半導體最主要的材料。

半導體中，電晶體的出現取代真空管，使電子器材體積縮小，運作的電壓低電流小，並且因為能大量製造而價錢低廉。用現代方法，在小片的矽、鍺晶片上，做出許多電晶體或二極體，使體積變得更小的，就是積體電路，它已廣泛應用在電視、電腦上。

編輯室