

X 射线天文望远镜的进展*

王凤丽 王占山[†] 张众 吴文娟 王洪昌 陈玲燕

(同济大学精密光学技术研究所 物理系 上海 200092)

摘要 综述了近年来 X 射线天文望远镜(如准直型望远镜、编码孔径望远镜、正入射周期多层膜望远镜、掠入射单层膜望远镜和掠入射非周期多层膜望远镜以及新型的“龙虾眼”型望远镜)的发展,阐述了各种 X 射线天文望远镜工作的原理和成像特点,指出各种 X 射线天文望远镜之间的性能是相互补充的,简要说明了国内近年来在 X 射线天文望远镜研究方面取得的进展,并展望了下一步工作。

关键词 天文望远镜, X 射线, 正入射, 掠入射, 多层膜

The development of X-ray astronomical telescopes

WANG Feng-Li WANG Zhan-Shan[†] ZHANG Zhong WU Wen-Juan
WANG Hong-Chang CHEN Ling-Yan

(Institute of Precision Optical Engineering, Department of physics, Tongji University, shanghai 200092, China)

Abstract The status of research on X-ray astronomical telescopes is reviewed. There are six types of such telescopes currently in use in outer space, the simple collimated, encoded aperture, normal incidence period-multilayer, grazing incident single coating, grazing incident aperiod-multilayer and lobster eye. The principle, features and application of these telescopes are introduced in detail. All these telescopes are complementary to each other. The development of X-ray telescopes and future research in China are discussed.

Key words astronomical telescope, X-ray, normal incidence, grazing incidence, multilayer

1 引言

1609 年,意大利物理和天文学家伽利略首次使用望远镜观测到了人眼看不到的宇宙中的一些天体,开创了天文学研究的新纪元。随着科学技术的不断进步,到牛顿时代,人们可以研制出更大更复杂的望远镜,使天文学研究进入了一个繁荣时期,发现了很多微弱的恒星并计算出恒星之间的距离。19 世纪后,人们利用光谱仪收集天体发出的光谱,得出了有关天体运动和化学成分的信息。进入 20 世纪后,人们研制出越来越大、性能越来越好的望远镜,可观测到更远距离的天体。在地面上使用光学望远镜观测时,天体发出的光经过大气层,会受到大气扰动的影响。为了减小这一影响,发展了自适应光学。当把光

学望远镜送到太空进行观察时,会得到更好的观测结果。1990 年发射成功的哈勃望远镜(Hubble Space Telescope)是至今为止成像分辨率最高的光学望远镜,其分辨率高达 0.1 角秒。

除发射可见光外,宇宙中还存在着很多能发射高能射线的天体,如恒星、黑洞周围空间和星云等。通过对这些天体的研究可以了解恒星的形成、黑洞现象和恒星爆炸后所引起的气体膨胀等现象。高能射线如:极紫外、软 X 射线、硬 X 射线和 γ 射线几乎全被大气层吸收而不能到达地面,要实现对这些高

* 国家自然科学基金(批准号 60178021)资助项目

2004-04-08 收到初稿 2004-08-24 修回

[†] 通讯联系人. Email wangzs@mail.tongji.edu.cn

能射线的观察只能使用太空望远镜. 由于这些高能射线与物质相互作用和可见光与物质相互作用有很大差别, 所以不能使用在可见光波段发展成熟的光学技术, 只能采用新的成像技术. 随着火箭、卫星技术的发展和薄膜技术、光学加工与检测技术的进步, 人们逐步开始用极紫外、软 X 射线、X 射线和 γ 射线望远镜来观测天体, 观测的能量最高达几十 GeV.

本文从 X 射线与物质相互作用的特点出发, 首先介绍了 X 射线望远镜的发展和分类, 其次阐述了准直型望远镜和编码孔径望远镜的原理和发展, 然后详细地描述了成像望远镜的发展, 最后对全文进行了总结.

2 X 射线与物质相互作用的特点和 X 射线望远镜分类

图 1 示出了电磁波谱^[1], 在波长小于 110nm 的真空紫外、极紫外、软 X 射线与 X 射线波段, 不存在没有吸收的材料. 表征有吸收物质光学特性的是材料的复折射率 $\tilde{n} = n - ik$, 式中 $n = 1 - \delta$ 是折射率, δ 是折射率小量, k 是消光系数. 在波长小于 20nm 时, 材料的折射率接近于 1, 消光系数不为零. 一般地, 材料在远离吸收边时的消光系数同入射光波长的三次方成正比, 即 $k \propto \lambda^3$, 折射率小量 δ 与入射波长的平方成正比 $\delta \propto \lambda^2$. 由此得出, 单层膜正入射的反射率非常低, $R \propto \lambda^4$, 如在 $\lambda = 6\text{nm}$ 时, 材料正入射反射率约为 10^{-5} . 在多层膜中, 由于大量的界面参与干涉, 增加了反射率. 理论上, 在 4.4—20.0nm 波长范围内的任何波长处都可以获得正入射反射率大于 10% 的多层膜. 在某些波段可得到大于 80% 的正入射反射率^[2], 因此, 在极紫外和软 X 射线波段可以制成正入射望远镜. 当波长进一步减小时, 由于工作于正入射的多层膜中每层膜的厚度逐渐变小. 当膜层厚度接近亚纳米水平时, 多层膜正入射反射率迅速减小, 无法进行正入射成像.

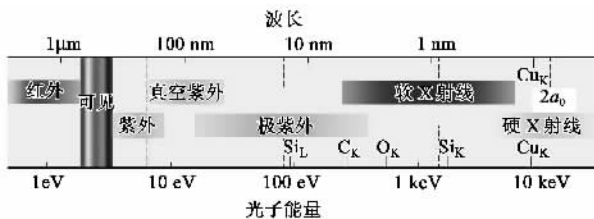


图 1 电磁波谱示意图

由于任何材料对 X 射线的折射率都小于 1, 因此, 当入射 X 射线以很小掠入射角入射到材料表面

时, 可发生全内反射. 利用这种全内反射现象, 开创了 X 射线掠入射光学. 目前, 在天文学中广泛采用的 Wolter I 型成像是 X 射线掠入射成像系统中的重要一种. 由于该系统采用了二次旋转对称非球面, 加工制备的困难是限制这种成像系统在其发明后没有马上得到实际应用的主要原因. 随着光学加工与检测技术的提高, X 射线掠入射系统才逐步进入实用阶段. 1978 年美国 NASA 发射的 Einstein^[3] (HEAO-2) 卫星首次装载了掠入射单层金属薄膜 Wolter I 型望远镜, 实现了 0.1—4keV 能段天体的直接成像观测. 经过努力, 人们又逐步把这种类型的望远镜的工作能段提高到 10keV. 当入射光子能量大于 10keV 时, 单层金属薄膜的全反射临界角很小, 实现掠入射成像比较困难. 在这个能段, 周期多层膜的带宽比较窄, 仅有 2keV, 实用价值不大. 受中子超反射镜成功应用的启发, 人们开始研究高能 X 射线超反射镜, 它可在较宽的能量范围内获得高的反射率, 为发展高能 X 射线成像望远镜带来了希望, 目前这种望远镜的研制已经取得成功.

在不能用直接成像望远镜获得 X 射线天体的成像观察时, 人们研究了非直接成像望远镜的技术, 主要有准直型望远镜和编码孔径成像技术.

根据成像方式的不同, X 射线望远镜分为非成像望远镜和成像望远镜两类. 准直型望远镜是技术最简单的一种非直接成像 X 射线望远镜, 编码孔径望远镜是使用比较广泛的一种非直接成像望远镜. 在编码孔径技术中, 由于编码方式和码盘的大小可根据观测能量范围的大小而改变, 所以得到了广泛的应用. 编码孔径望远镜也是最早用于 X 射线天文观测的 X 射线望远镜. 根据成像光学系统的不同, X 射线直接成像望远镜分为正入射周期多层膜望远镜、掠入射单层膜望远镜和掠入射非周期多层膜望远镜. 两类 X 射线望远镜相比, 非直接成像望远镜的最大优点是在技术条件限制不能用直接成像方法获取图像的情况下, 观测高能天体, 并且方法简单, 但成像质量差, 分辨率低, 获取图像的过程复杂. 而直接成像望远镜的图像质量比前者好. 但它的成像光谱范围窄, 最高能量仅达几十 keV, 而前者则可以高达几十 MeV.

3 非直接成像 X 射线望远镜

3.1 准直型望远镜

在硬 X 射线能段, 无法用折射和反射成像, 在硬 X 射线探测器前加准直器构成准直型 X 射线望

远镜,可以实现对准直器视场内局部天区的定向观测,但无法分辨出视场内的源,同时还必须分别对源区和背景天区进行交替观测.在探测器前放置两层或多层平行的吸收栅条可构成直线调制和旋转调制成像望远镜^[4,5].对扫描观测获得的周期性强度调制信号进行傅里叶分析或相关分析,可以对分离源定位.为了减小影像旁瓣、消除空间对称位置的假象、分辨多个源和实现对点源与弥散源的同时成像,需要多个调制探测系统组成复合型望远镜,限制了这一类扫描调制望远镜在宽视场、高灵敏度和高分辨率成像探测中的应用.我国学者提出用非线性约束迭代直接解成像方程以复还图像的方法^[6,7],对模拟数据以及空间实测数据的分析结果表明,直接解调方法比传统的成像法灵敏度高、分辨能力好.

在满足一定的灵敏度、角分辨和成像范围要求的条件下,直接调制望远镜的技术简单、重量轻、外形尺寸小,并且对姿态的要求低.用卫星或空间站载调制望远镜易实现高灵敏度高分辨率的硬 X 射线巡天观测.对不同波段的探测器用同一类型准直器进行强度调制,可以实现观测视场、灵敏度、角分辨等方面互相匹配的多波段空间观测.用不同指向的多个探测器还可以实现对某些高能爆发的定位观测.

我国正在开展硬 X 射线调制望远镜 HXMT 卫星的预先研究.应用我国高能天体物理工作者建立和发展的对象重建的直接解调方法,设计技术成熟、简单可靠的探测器,用价格低廉的非位置灵敏探测器实现宽视场高分辨成像,从而克服硬 X 射线成像的主要技术困难,实现高分辨、高灵敏度硬 X 射线巡天,指标可达到国际先进水平.

3.2 编码孔径望远镜

编码孔径望远镜是一种非聚焦成像望远镜.编码孔径成像技术是 1968 年 Ables^[8]等人首次提出的一种能用于 X 射线天文成像的方法.它采用的技术是通过编码方法来实现对入射光线的入射方向和强度进行采集,然后再通过探测器收集信息后解码成图像.图 2 是两个 X 射线源发出的束流照射到编码孔径望远镜进行成像的原理图,系统主要包括编码板和位置灵敏探测器.来自两个光源的束流照射编码板,位置灵敏探测器记录编码板图案的两个投影,投影的位移(光源正入射时位移为 0)对相应的点光源位置进行编码,投影的“强度”对相应点光源的强度进行编码.显然探测器的每一个部分都可以探测到所观测的范围内的任何位置发出的光子.经

过一定时间的探测后,探测器积累的图像就可以根据每一个可能的编码板图案的位移和强度进行解码得到图像.图像的质量取决于编码板图案的类型、相机的光学设计、探测器的响应与空间分辨率和解码方法.

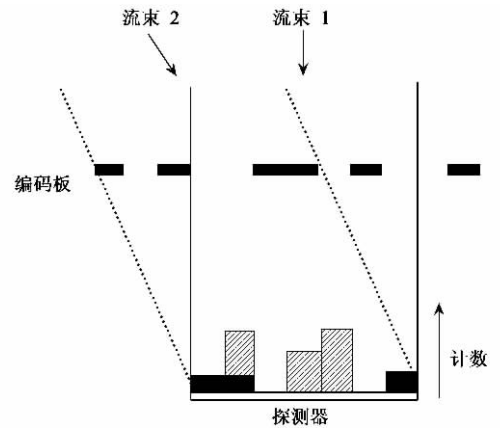


图 2 编码孔径成像基本原理图

1977 年 8 月 12 日 HEAO - 1(high astronomy observatories)成功发射^[9],首次完成了较高灵敏度的高银纬 X 射线巡天观测,测量出 3—50keV 范围内的 X 射线的背景辐射等,实现了天文望远镜发展史上的一次飞跃.目前正在使用的编码孔径望远镜的工作波段也已经扩展到 600keV(EXITE2)^[10].在未来的天文卫星项目中,人们试图通过改进编码孔径成像技术所需要的一些软硬件条件,如不同的编码方法,探测器的发展和排列方式等,计划提高望远镜的角分辨率和视场,同时把它的能量范围扩展到几十 MeV(如 INTEGRAL^[11])和几十 GeV(如意大利的研究项目 MAGIC^[11]). EXIST^[12]是美国 NASA 正在研制的工作能段为(约 5—600 keV)的宽视场编码孔径望远镜阵列,预计 2010 年发射,它将首次完成高灵敏度 X 射线巡天成像观测.

编码孔径技术的特点是在探测器探测信号以前先对入射线的方向进行编码,然后再对探测器探测到的信号通过解码重建图像.即首先采用空间编码进行入射 X 射线的位置和强度信息的数据积累,然后再把探测器探测到的这些积累数据进行解码,也就是说重建所观测到的那部分的物体,即是一种“两步”过程.编码孔径望远镜具有方法简单,可通过制备尽可能大的编码板来增加视场,用小而密的编码板提高带宽等优点.然而编码孔径技术中的编码板编码技术复杂,需要探测器的角度和空间分辨率都高且体积也大,图像中的每一个像点受到整个

探测器内所有探测到的光子的噪声的影响,并且由于反解成像,易出现孪像,有时相同的数据采用不同的算法会得到不同的图像,这时需要根据人们的认识和对图像的比较选取符合实际的图像作为最后的图像.为了获得直接准确的信息,需要研究 X 射线成像望远镜.

4 X 射线成像望远镜

4.1 正入射周期多层膜望远镜^[13-15]

20 世纪 80 年代后,随着软 X 射线多层膜技术的发展,出现了新一代软 X 射线多层膜正入射成像望远镜.正入射望远镜的反射光学元件是周期多层膜,其使用范围是在极紫外和软 X 射线波段,是目前使用的比较成熟的技术.1985 年 10 月,由美国 Lockheed Palo Alto 实验室和劳伦斯伯克利实验室合作研制的望远镜成功地进行了 Si VII 4.4nm 处太阳日冕的观测.该望远镜的反射元件是峰值反射率波长在 4.386nm 的 W/C 周期多层膜($d_w = 0.765\text{nm}$, $d_c = 1.45\text{nm}$).1987 年 10 月由美国马歇尔空间飞行中心和劳伦斯利弗莫尔国家实验室研制的正入射卡塞格林型 Mo/Si 多层膜($d_{\text{Mo}} = 3.68\text{nm}$, $d_{\text{Si}} = 5.52\text{nm}$)望远镜再次成功地进行了 17.1—17.5nm 处太阳日冕观测,Mo/Si 多层膜反射率为 35%,望远镜角分辨率达 1.2".美国 Lockheed Palo Alto 实验室和科罗拉多大学大气与空间物理实验室合作研制了 17.1nm 焦距为 0.75m、分辨率为 1.5"的正入射望远镜,其 Mo/Si 多层膜在 17.1nm 处具有 33% 的反射率.该望远镜于 1988 年 3 月发射,利用光电探测器记录到了日蚀前太阳软 X 射线图像.此卫星直至今现在还没有上天(其实后面已经提及).美国的 Los Alamos 和 Sandia 国家实验室正在研制低能 X 射线成像传感器阵列(ALEIS),工作波段为 17.7—11.3nm.由六个广角多层膜正入射望远镜组成,其聚光面积为 25cm²,分辨率为 30".美国斯坦福大学和利弗莫尔国家实验室研制的多光谱望远镜阵列(MSSTA)由 17 个软 X 射线多层膜正入射成像望远镜组成.美国自 1994 年开始研制过渡区和日冕探测器(TRACE)极紫外波段探测器,采用的是卡塞格林型望远镜.目前我国也研制了首台正入射极紫外波段太阳望远镜,其理论角分辨率比正在太空中飞行的 TRACE 角分辨率高一倍,这个极紫外波段的望远镜将作为太阳望远镜卫星的一部分正在进行立项.

4.2 掠入射单层膜望远镜

1952 年,德国科学家 Wolter 提出了基于二次旋转对称曲面的掠入射 X 射线成像系统设计原理,有三种结构,如图 3 是第 1 种结构,它是由一个旋转抛物面和一个旋转双曲面组成的同轴共焦系统,克服了单个旋转对称非球面反射镜因不满足阿贝正弦条件而引起轴外成像存在严重慧差的缺陷,可以获得较高的成像分辨率.但由于当时工艺水平和制造技术的限制,直到 20 世纪 70 年代这种掠入射成像系统才在 X 射线天文观测和研究中得到广泛应用.

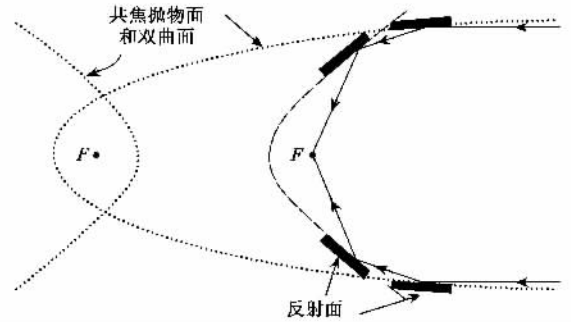


图 3 Wolter I 型掠入射光学系统

受薄膜设计和制备水平的限制,人们首先利用单层金属薄膜全反射原理和 Wolter I 型结构来设计 X 射线望远镜.在以后的几十年里,美国、日本、俄国等国家进行了一系列的 X 射线望远镜的研究项目,已经发射或研究结束的有 Einstein, EXOSAT^[16], ROSAT^[17], AXAF (Chandra)^[18], JET - X (SRG)^[17], ASCA (ASTRO - D)^[19], ASTRO - E^[20], XMM - Newton^[21],正在研究的有 XEUS^[22].

Einstein (HEAO - 2)^[3]卫星是美国 NASA 发射的,该卫星首次把掠入射 X 射线直接成像望远镜带入太空,其角分辨率、视场和灵敏度比以前的望远镜都有很大提高,特别是灵敏度较以前的编码孔径望远镜提高了几百倍.这个卫星有一个高分辨率望远镜和能够将焦平面定位在四个探测器之一的焦平面组件,不同的探测器相应的性能有一定差别.ROSAT (the Roentgen Satellite)卫星^[17]所载德国研制的 X 射线望远镜和 Einstein 的类似,其分辨率和灵敏度有所提高,是当时所能实现的最大的 X 射线成像望远镜,它首次实现了 X 射线巡天观测,提供了大量新的科学数据.美国 NASA 和日本共同研制的 ASCA^[19] (The advanced satellite for cosmology and astrophysics, 又称 ASTRO - D)首次把 X 射线望远镜的工作波段提高到 10 keV,并首次使用了紧密嵌套结

构掠入射反射式光学系统和在 X 射线天文观测中使用 CCD 探测器,为当时正在研究和将来研究的天文学项目,如 XMM^[21], XEUS^[22],提供了技术基础.后来美国发射的 AXAF^[18](advanced X-ray astrophysics facility)卫星是美国 NASA 发射的第三个重大的天文观测卫星,是当时最复杂最精细最大的 X 射线观测仪,成像质量好.欧洲航天局(ESA)主持研制的 XMM-Newton^[21]卫星有 3 个相同的高性能 X 射线望远镜,每个望远镜由嵌套在一起的 58 个 Wolter I 型望远镜组成,有效聚光面积高达 4650cm²,每个望远镜焦平面探测器不同. XMM-Newton 不但能够获得观察天体的图像,而且能谱分辨本领很高. ASTRO-E^[20]是日本研究的用于 X 射线天文研究的卫星.2000 年 2 月,由于火箭发动机故障而没有发射成功.但它的研究基础和技术条件为后续研究工作提供了很好的基础条件. SRG^[17](Spectrum-Roentgen-Gamma)是在莫斯科空间技术研究所领导下建立的一个国际高能天体物理观测仪,有 5 个望远镜. JET-X(the joint European X-ray telescope)是由两个相同的相互准直的单膜层 X 射线望远镜组成,是由英国、意大利和俄罗斯联合设计制作,工作波段在 0.3—10keV,该望远镜已经装调结束等待发射. XEUS^[22](the X-ray evolving universe spectrometer)是欧洲航天局计划中的 X 射线光谱学项目的基础,是 XMM-Newton 项目的继续.其灵敏度是 XMM-Newton 的 200 倍,并且可以长时间停留在太空中.表 1 显示出了上述各种望远镜的具体参数.

4.3 掠入射非周期多层膜望远镜

在 X 射线波段,反射镜全外反射的临界角和入射的光子能量成反比^[23]($a_c = \sqrt{2\delta} = \frac{\sqrt{4\pi\rho r_0}}{K}$,其中 ρr_0 为常量, $K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi E}{1.24}$)因此,金属单层膜的全反射临界角随着入射光能量的增加而减小,采用紧密排列内嵌式反射镜结构也仅仅使望远镜的工作波段提高到 10keV,即使采用最长焦距的望远镜也不能在 10—20keV 波段获得一定的反射(Wolter I 型望远镜的焦距公式为 $F = r/\tan(4\theta)$,其中 r 是反射镜外壳的半径, θ 是掠入射角).在入射光的能量大于 10keV 的范围内,晶体反射镜^[24]可以实现辐射的聚焦,但它的带宽比较窄,视场也特别小.后来人们发现在较大掠入射角时,周期多层膜可以反射 X 射线,并且带宽比弯晶大 10 倍,比平晶大 100

倍^[25].即便这样,其带宽仅达 2keV,使周期多层膜反射镜在硬 X 射线成像望远镜中的应用受到很大限制.

表 1 某些 X 射线成像望远镜的性能参数

望远镜名称	发射时间	膜层	性能参数
Einstein(HEAO-2)	1978 年 11 月	镍	波段 0.1—4keV 掠入射角 40—70' 分辨率:几个角秒 视场:几十角分 焦距 3.45m
EXOSAT-CE	1983 年 5 月	金	波段 0.1—2keV 掠入射角 90—110' 分辨率:18" 视场 2° 焦距 1.1m
ROSAT	1990 年 6 月	金	波段 0.1—2.5keV 掠入射角 1—2° 角分辨率 5" 视场 38'×38' 焦距 2.4m
ASCA(ASTRO-D)	1993 年 2 月	金	波段 0.4—10keV 掠入射角 0.25—0.71° 视场 50' 角分辨率 0.5' 焦距 3.5m
AXAF(钱德拉 X 射线望远镜)	1999 年 7 月	铱	波段 0.2—10keV 掠入射角 27—51' 视场 30'×30' 分辨率 0.5" 焦距 10m
XMM-Newton	1999 年 7 月	金	波段 0.15—12keV 视场 30' 掠入射角 30' 分辨率 5" 焦距 7.5m
ASTRO-E	2000 年 2 月	铂金	波段 0.2—10keV 掠入射角 0.19—0.64° 分辨率 5" 焦距 4.75m
JET-X	未发射	-	波段 0.3—10keV 视场 40'×30' 分辨率 10—20" 焦距 3.5m
XEUS	正在研究		

受到中子超反射镜的启发,人们开始研究掠入射非周期多层膜(即X射线超反射镜)对硬X射线的反射.在非周期多层膜中,通过调节每一个膜层对的厚度,在一定的掠入射角度(或入射能量)下,使上面的膜层反射能量比较低的入射线(在大角度时具有较高反射率),下面的膜层反射能量较高的入射线(在小角度时具有较高反射率),从而获得能带(角度)较宽且反射率比较平坦的X射线反射镜.1989年,Hayter^[26]等人在中子超反射镜的基础上,首次提出了X射线超反射镜的概念.1991年,Christensen^[27]等人初步设计了Ni/C梯度多层膜超反射镜,并得到了一定的设计结果.实验结果表明在15—40keV范围内,梯度多层膜的性能比单层金属膜的好,尤其是在高能区域,这在理论和实验上说明了X射线超反射镜可以实现X射线聚焦成像.1992年,Joensen^[28]等人把X射线超反射镜和中等尺寸的望远镜结构结合起来进行了研究.结果表明,X射线超反射镜具有增加掠入射光学系统掠入射角的特点,从而增加系统的集光面积,减小系统的尺寸,改善成像质量,更为重要的是它可以将X射线波段的掠入射光学系统从10keV的能量范围扩展到150keV^[28],这是用其他任何方法都无法达到的.这以后,世界各国特别是发达国家,如美国、日本、意大利等都在为X射线望远镜中的反射元件——X射线超反射镜的设计和制备技术展开广泛地研究,并把X射线多层膜成像望远镜作为了其航天发展中的一项实际任务.2001年夏天,日本和美国共同研制的InFOCUS卫星装载的掠入射Pt/C多层膜硬X射线成像望远镜成功发射,首次把20—40keV波段的物体图像传递到地面^[29].美国的哥伦比亚大学和丹麦的空间研究所及贝尔实验室共同研究了一个叫HEFT(high energy focusing telescope)^[30]气球实验项目.其所使用的反射元件是Joensen^[31]和Windt^[32]等人采用幂指数方法设计的W/Si梯度多层膜超反射镜,其工作波段为20—80keV.1997年开始,美国的研究人员也开始研究能够在6—40keV的工作波段范围内直接成像的星座式X射线望远镜项目^[33](the constellation X-ray mission).现阶段国外正在研究的X射线多层膜望远镜有日本和美国合作研究的预计2007年完成并于2010年发射的Astro-G卫星,欧洲航天局(简称ESA,European Space Agency)提出了XEUS^[22](the X-ray evolving universe spectriscopy)卫星,目的是要在1—40keV的能量范围有更大的有效集光面积;意大利航空航天局也正

在研究能在20—80keV波段使用的X射线望远镜项目HEXIT(the high-energy X-ray imaging telescope)卫星.

在极紫外、软X射线和X射线多层膜研究的基础上,我国也开展了非周期X射线超反射镜的设计与制作工作.在设计过程中,结合多层膜结构分析,构筑了好的初始膜系,用单纯形调优算法完成了宽角度和宽能段的X射线超反射镜的设计^[34,35].用超高真空磁控溅射方法进行了超反射镜的制作,相关结果正在进行测试.

5 “龙虾眼”型X射线望远镜

龙虾是通过在一个眼球上的许多小立方体阵列侧壁的反射来观察物体的.用“龙虾眼”这种成像方式可以建造X射线掠入射成像光学系统.1975年,Schmidt最早提出用两层互相垂直放置的玻璃片构建X射线天文望远镜^[36],1979年,Angel提出用正方形截面的柱体阵列掠入射反射来制作X射线天文望远镜^[37].在这样的望远镜中,每一个小立方柱体都按照同一个球面排列,通过小立方柱体相邻两个面反射的光线将会聚在一个焦球面上.只经过一次反射的光线将会聚成一条线,它在成像系统中形成渐缩的十字线的背景.没有反射进入系统的光线形成弥散的背景.每个小立方柱体的高度将产生一定的散焦,而探测器与每个立方柱体的倾角将限制成像系统的分辨率.这种望远镜的主要优点是观测范围广、灵敏度高、体积小、重量轻.

目前,世界上许多国家都在研究“龙虾眼”型望远镜,其中美国NASA研制的Lobster-ISS计划于2009年成为国际空间站的有效载荷,用于天体0.1—3keV X射线源的监控^[38].

6 结论

本文叙述了准直型望远镜、编码孔径望远镜、正入射周期多层膜望远镜、掠入射单层膜望远镜、掠入射非周期多层膜望远镜以及“龙虾眼”型望远镜的原理、特点、发展现状和前景.

准直型望远镜和编码孔径望远镜的方法简单,并且可以观测到直接成像望远镜所不能观测能段的天体,是当今世界X射线天文学发展必不可少的一个方向.如观测辐射能量大于100keV的物体,准直型望远镜和编码孔径望远镜是目前惟一可行的方

案.我国高能天体物理工作者建立和发展了基于准直型望远镜的对象重建的高分辨直接解调方法,并开始了硬 X 射线调制望远镜 HXMT 卫星的预先研究.“龙虾眼”型望远镜是一种新的仿生型望远镜,它观测范围广、灵敏度高、体积小、重量轻,已有一些国家研制这一类型的望远镜.

由于准直型望远镜和编码孔径望远镜的成像质量不高而且反解图像复杂,在技术条件许可的情况下,人们还是期望采用直接成像的方法获取高能天体物体的图像,所以不断研制出了各类成像望远镜.正入射周期多层膜望远镜的使用波段范围限制在 4.4—20nm,可以实现大气层外的太阳和非太阳软 X 射线、极紫外波段辐射源的观测.这是在多层膜技术进步情况下才能实现的一种直接成像的望远镜.我国也正在进行这种望远镜的预研.

随着 X 射线能量的提高,无法采用正入射多层膜望远镜.利用 X 射线在单层膜表面上掠入射条件下的全反射现象,发展了 X 射线掠入射反射望远镜系统.二次旋转对称曲面加工和检测技术的进步使掠入射单层膜成像望远镜成为可能,这种成像望远镜的工作能段可到 10keV.

当入射 X 射线能量进一步增加时,能够使用的成像望远镜只有掠入射非周期多层膜望远镜.InFOCUS 卫星的发射成功标志着非周期多层膜 X 射线成像望远镜在天文学研究中开始了成功的应用,也为以后的硬 X 射线天文卫星项目深入研究奠定了技术基础.从我国非周期多层膜的实际科研水平来看,要想发展我国自己的非周期多层膜 X 射线望远镜,还需对 X 射线超反射镜研究,尤其是制作和检测方法进行深入细致的研究.

参 考 文 献

- [1] Attwood D. *Soft X-Ray and Extreme Ultraviolet Radiation*, Cambridge University Press, 1999
- [2] Rosenbluth A E. *Rev. Phys. Appl.* 1988, 23 :1599
- [3] Giacconi R, Branduardi G, Briel U *et al.* *Astrophysical J*, 1979, 230 :540
- [4] Oda M. *Appl. Opt.*, 1965, 4 :143
- [5] Schnopper H W. *Space Sci. Res.*, 1968, 8 :534
- [6] Li T P, Wu W, Lu Z G *et al.* *Ap&SS*, 1993, 205 :381
- [7] Li T P and Wu M. *Ap&SS*, 1994, 215 :213
- [8] Ables J G. *Proc. Astron. Soc. Australia*, 1968, 1 :172
- [9] Rothschild R. *SpScInstr*, 1979, 4 :269
- [10] Blosler P F, Chou Y, Grindlay J E *et al.* *Astroparticle Physics*, 2002, 17 :393
- [11] Cocco G Di, Malaguti G. *Nucl. Instrum. Methods in Physics Research A*, 2003, 510 :158
- [12] Grindlay J E, Prince T A, Gehrels N *et al.* *Bulletin of the American Astronomical Society*, 1995, 27 :1386
- [13] Arthur B C, Walker J R, Joakin F *et al.* *SPIE*, 1991, 1494 :320
- [14] Hoover R B, Baker P C, Hadaway J B *et al.* *SPIE*, 1990, 1343 :189
- [15] 陈波, 尼启良. *光学 精密工程*. 2003, 11(4) :315 [CHEN B, Ni Q L. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4) :315(in Chinese)]
- [16] *X-ray Astronomy with EXOSAT, a special issue of Mem S A It.* 1988, 59(1—2)
- [17] Westergaard N J, Byrnek B P, Christensen F E *et al.* *Opt. Eng.*, 1990, 29 :658
- [18] Weisskopf M C. *Proc SPIE*, 2002, 4496 :1
- [19] Tanaka Y, Inoue H, Holt S S *et al.* *Publ. Astron. Soc. Jpn.* 1994, 46 :37 ; Serlemitsos P J, Jalota L, Soony Y *et al.* *Publ. Astron. Soc. Jpn.* 1995, 47 :105
- [20] Kunieda H, Ishida M, Endo T *et al.* *Appl. Opt.*, 2001, 40 :553
- [21] Bavdaz M, Peacock A, Beijeersbergen M *et al.* *Proc SPIE*, 2002, 4496 :94
- [22] Citterio O, Ghigo M, Mazzoleni F *et al.* *Proc SPIE*, 2002, 4496 :23
- [23] Als-Nielsen J, Memorrow D. *Elements of Modern X-ray Physics*, John Wiley & Sons, Ltd, New York, 2001, 63
- [24] Von Ballmoos P, Smither R K. *Astrophys J S*, 1994, 92 :663
- [25] Ziegler E. *Proc SPIE*, 1994, 2253 :248
- [26] Hayter J B, Mook H A. *J Appl Cryst.* 1989, 22 :35
- [27] Christensen F E, Hornstrup A, Westergaard N J *et al.* *SPIE*, 1991, 1546 :160
- [28] Joensen K D, Christensen F E, Schnopper H W. *SPIE*, 1992, 1736 :239
- [29] Tawara Y, Yamashita K, Ogasaka Y *et al.* *Adv Space Res.* 2002, 30 :1313
- [30] Hailey C J, Abdali S, Christensen F E *et al.* *Proc SPIE*, 1997, 3114 :535
- [31] Joensen K D, Hoghoj P, Christensen F *et al.* *Proc SPIE*, 1993, 2011 :360
- [32] Windt D L. *Proc SPIE*, 1998, 3448 :280
- [33] White N E, Tananbaum H D. *Nucl Instrum Methods in Physics Research A*, 1999, 436 :201
- [34] 张众, 王占山, 秦树基等. *光子学报*, 2003, 32 :253 [Zhang Z, Wang Z S, Qin S J *et al.* *ACTA PHOTONICA SINICA*, 2003, 32 :253]
- [35] 张众, 王占山, 王凤丽等. *光学 精密工程*, 2003, 11 :49 [Zhang Z, Wang Z S, Wang F L *et al.* *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11 :49]
- [36] Schmidt W H K. *Nucl Instrum Methods in Physics Research*, 1975, 127 :285
- [37] Angel J R P. *Ap J*, 1979, 364 :233
- [38] Black J K, Brunton A N, Bannister N P *et al.* *Nucl Instrum Methods in Physics Research A*, 2003, 513 :123