

X射线聚焦望远镜光学设计

强鹏飞 盛立志 李林森 闫永清 刘哲 周晓红

Optical design of X-ray focusing telescope

Qiang Peng-Fei Sheng Li-Zhi Li Lin-Sen Yan Yong-Qing Liu Zhe Zhou Xiao-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 160702 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190709

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190709>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硬X射线调制望远镜低能探测器量子效率标定

Quantum efficiency calibration for low energy detector in hard X-ray modulation telescope satellite

物理学报. 2017, 66(11): 112901 <https://doi.org/10.7498/aps.66.112901>

一种X射线聚焦光学及其在X射线通信中的应用

X-ray focusing optics and its application in X-ray communication system

物理学报. 2016, 65(1): 010703 <https://doi.org/10.7498/aps.65.010703>

一种聚焦型X射线探测器在轨性能标定方法

A method of calibrating effective area of focusing X-ray detector by using normal spectrum of Crab pulsar

物理学报. 2018, 67(5): 050701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172352>

玻璃基底Wolter-1型X射线聚焦镜研制及测试

Development and testing of glass substrate Wolter-1 X-ray focusing mirror

物理学报. 2018, 67(20): 200701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181330>

Kinoform单透镜的硬X射线聚焦性能

Focusing performance of hard X-ray single Kinoform lens

物理学报. 2015, 64(16): 164104 <https://doi.org/10.7498/aps.64.164104>

低温退火的X射线W/Si多层膜应力和结构性能

Stress and structure properties of X-ray W/Si multilayer under low temperature annealing

物理学报. 2016, 65(8): 086101 <https://doi.org/10.7498/aps.65.086101>

X 射线聚焦望远镜光学设计*

强鹏飞¹⁾²⁾ 盛立志^{1)†} 李林森¹⁾²⁾ 闫永清¹⁾ 刘哲¹⁾ 周晓红¹⁾

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术重点实验室, 西安 710119)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2019 年 5 月 10 日收到; 2019 年 6 月 12 日收到修改稿)

X 射线聚焦望远镜是 X 射线空间观测的重要设备, 针对 X 射线聚焦望远镜光学设计工作, 采用掠入射原理对 X 射线进行聚焦, 利用蒙特卡罗算法仿真镜片面型和粗糙度对角分辨率影响, 并确定了不同分辨率水平对镜片面型的不同需求; 对 X 射线聚焦望远镜有效面积进行分析, 并确定了膜层结构、层数与有效面积的关系, 最终完成了焦距 5.25 m、嵌套层数 45 层, 有效面积为 842 和 563 cm²@6 keV 的 X 射线聚焦望远镜设计。

关键词: X 射线, 聚焦望远镜, 掠入射原理, 有效面积, 角分辨率

PACS: 07.85.Fv, 07.60.-j

DOI: 10.7498/aps.68.20190709

1 引言

X 射线聚焦望远镜^[1,2]是“时域天文学”研究的重要设备, 涉及并能帮助回答“时域天文学”领域物理和宇宙科学中的一些基本问题, 揭示宇宙科学的基本规律. X 射线空间观测旨在发现和探测各种尺度上、宇宙空间中存在的黑洞, 并验证宇宙中各种尺度上的黑洞是否存在; 与引力波探测设备联合探测引力波并定位引力波及物理事件的源头; 以及巡天发现各类 X 射线暂现源并对暂现源进行高灵敏度探测, 最终为解决一系列极端条件下的极端物理现象提供物理依据^[3,4].

在过去几十年中, X 射线望远镜^[5]在国际上受到广泛关注和研究, 而国内的聚焦望远镜研究主要局限在聚能方面^[6-8], 并应用于脉冲星导航^[9-11]. 国际方面较著名的 X 射线望远镜有 Chandra^[12], XMM-Newton^[13], Suzaku^[14,15], ASTRO-H^[16] 和 NICER^[17]. Chandra 望远镜发射于 1999 年^[18], 由四层微晶玻璃研磨后嵌套组成, 望远镜焦距为

10.07 m, 角分辨率为 0.5". XMM-Newton 由 58 层不同倾角的镜片嵌套而成, 镜片制作方法采用电铸镍镀金法^[2], 焦距长达 7.5 m, 其有效面积高达 4500 cm²@1 keV, 角分辨率为 13". Suzaku^[19]属于日本第五代 X 射线天文卫星, 于 2000 年成功发射, 反射镜片采用环氧复制法获得, 镜片厚度只有 0.22 mm, 其焦距为 10.15 m, 有效面积达 440 cm²@1.5 keV, 角分辨率为 120". 日本最新的 X 射线天文卫星 ASTRO-H^[20]发射于 2016 年, 角分辨率为 107"^[21], 但由于电子指令故障, ASTRO-H 成功发射 3 d 后与地面失去联系. NICER 属于 NASA 探测中子星计划, 由 56 个 $\varphi 100$ mm 的聚焦镜构成, 每个聚焦镜由抛物面镜片嵌套而成, 属单次反射式聚焦望远镜, NICER 总有效面积可达 1800 cm²@1 keV^[22].

继“慧眼 (insight hard X-ray modulation telescope, HXMT)”卫星发射以后, 我国在 X 射线空间观测领域规划了“爱因斯坦探针 (Einstein probe, EP)”和“增强型时变与偏振天文台 (enhanced X-ray timing and polarimetry mission, eXTP)”等一系列 X 射线专项卫星, 其中 eXTP 作

* 国家自然科学基金 (批准号: 61471357) 和空间科学先导专项 (批准号: XDA15020106-03) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lizhi_sheng@opt.ac.cn

为第一颗由中国主导、多国合作的 X 射线天文台, 受到广泛关注. 本文针对 eXTP 卫星载荷 X 射线聚焦望远镜的光学设计工作, 在光学原理、层间距选择、面型仿真、角分辨率和有效面积计算方面进行了仿真设计, 并最终完成了 eXTP 聚焦望远镜的光学设计工作.

2 X 射线聚焦望远镜光学设计

2.1 X 射线聚焦望远镜的光学原理

基于 X 射线波长短、光子能量大等特点, 一般可采用衍射、折射、反射的方式对 X 射线进行聚焦, 但衍射和折射式聚焦效率远小于反射式聚焦效率, 且反射式 X 射线聚焦望远镜具有较高的角分辨率, 更加适合 X 射线天文观测. X 射线聚焦望远镜基于掠入射反射原理研制而成, 标准 Wolter-1 型望远镜由抛物面和双曲面构成, 且二者为共焦结构, 见图 1. 入射光子经抛物面、双曲面两次反射后聚焦于双曲面另外一个焦点处, 标准 Wolter-1 型聚焦望远镜轴上无像差, 可实现完美成像. 聚焦望远镜镜片参数如 (1) 式所示, 但一般情况下, 因单层有效面积有限, X 射线聚焦望远镜均采用多层嵌套式设计结构以达到工程实用目的.

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (k + 1)c^2r^2}}, \quad (1)$$

其中, c 表示二次曲线顶点的曲率; k 为二次曲面系数, 当 $k = -1$ 时, 曲面为抛物面, 当 $k < -1$ 时, 曲面为双曲面; r 为径向坐标; z 为轴向坐标.

多层嵌套式聚焦望远镜的设计采用迭代方法进行, 即外层镜片的出口位置与内层镜片的入口位置直径相同, 根据 eXTP 卫星接口需求, 本文确定最外层镜片口径为 $\varphi 476$ mm, 镜片长度为 600 mm (300 mm 抛物面镜 + 300 mm 双曲面镜), 焦距为 5.25 m, 由 (1) 式可计算出 45 层镜片参数, 最内层

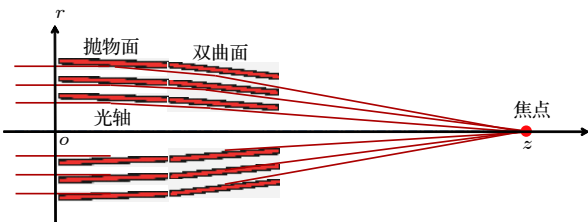


图 1 X 射线聚焦望远镜的光学原理

Fig. 1. Optical principle of X-ray focusing telescope.

镜片口径为 212.46 mm.

2.2 X 射线聚焦望远镜的角分辨率分析

角分辨率是衡量 X 射线聚焦望远镜成像质量的一个重要指标, 其物理意义为在 X 射线聚焦镜焦斑能量包围函数中, 能量为总焦斑能量 50% 的包含范围与焦距的比值. X 射线聚焦镜的角分辨率可由各部分公差代入的角分辨率平方和确定, 如 (2) 式所示:

$$\text{HPD} = \sqrt{\text{HPD}_P + \text{HPD}_A + \text{HPD}_\lambda + \text{HPD}_K}, \quad (2)$$

其中, HPD_P 代表镜片面型误差引入的角分辨率影响, HPD_A 代表镜片的装调误差引入的角分辨率影响, HPD_λ 代表镜片的粗糙度引入的角分辨率影响, HPD_K 代表镜片的其他环节引入的角分辨率影响.

本文从功率谱密度出发仿真了粗糙度对角分辨率的影响, HPD_λ 与空间频率的关系见 (3) 式, 而粗糙度与空间频率、功率谱密度关系的公式见 (4) 式. 公式中, θ_1 为掠入射角, f_0 为空间频率, $P(f)$ 为功率谱密度 (公式 (5)), 将 (3)—(5) 式联立求解后即可得到粗糙度对聚焦望远镜角分辨率的影响.

$$\text{HPD}_\lambda = \frac{2\lambda f_0}{\sin \theta_1 F}, \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \int_{f_0}^{\frac{2}{\lambda}} P(f) df, \quad (4)$$

$$P(f) = \frac{1}{L} \left| \int_0^L Z(x) e^{-2\pi i f x} dx \right|^2. \quad (5)$$

采用蒙特卡罗方法对聚焦望远镜镜片进行面型仿真, 并计算镜片面型和粗糙度对望远镜焦斑角分辨率的影响, 结果如图 2 所示, 图 2(a) 和图 2(b) 为较高精度的聚焦镜镜片得到的焦斑形状和能量包围函数, 图 2(c) 和图 2(d) 为低精度的聚焦镜镜片得到的焦斑形状和能量包围函数. 当聚焦镜镜片表面面型误差 PV 值为 $0.2 \mu\text{m}$, RMS 值为 $0.04 \mu\text{m}$, 粗糙度为 0.4 nm 时, X 射线聚焦镜角分辨率为 $6.3''$; 当聚焦镜镜片表面面型误差 PV 值为 $1 \mu\text{m}$, RMS 值为 $0.2 \mu\text{m}$, 粗糙度为 0.4 nm 时, X 射线聚焦镜角分辨率为 $30.6''$. 这是因为当 X 射线聚焦镜面型精度较高时, X 射线光子接近理想反射效果, 所有光子都会聚焦在焦平面上较小的一个范围, 从而焦斑尺寸较小; 但镜片面型精度较差时, X 射线光子会由于掠入射角度与设计值不符, 而导致光子被反

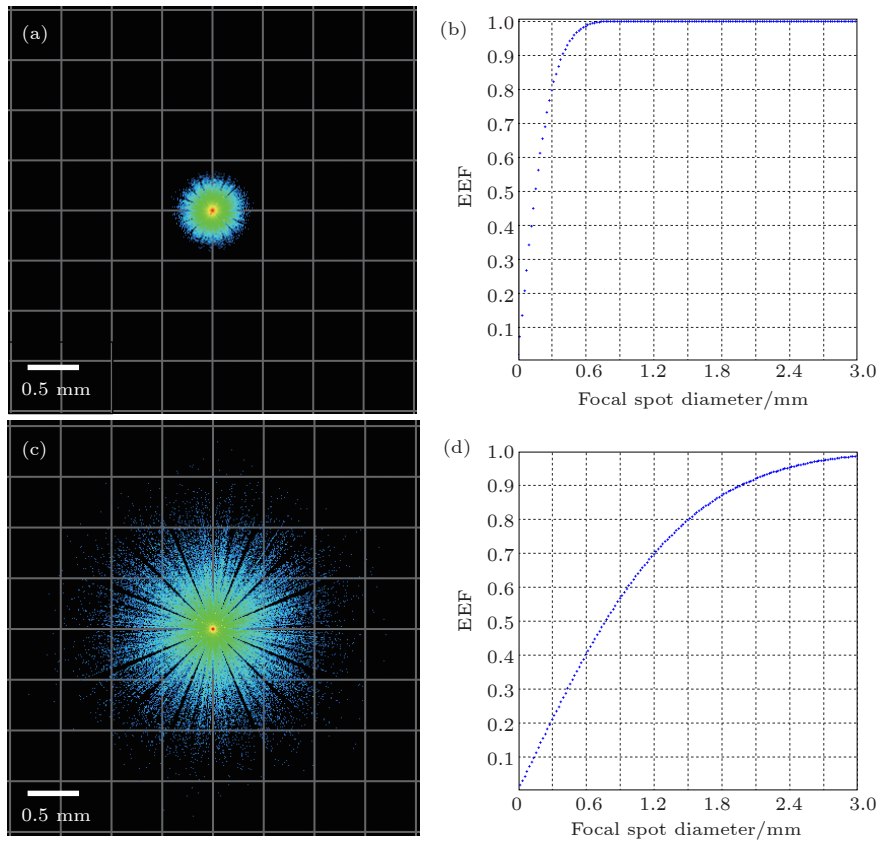


图 2 不同面型精度聚焦镜片的焦斑形状与能量包围函数 (a) RMS 0.04 为 μm , PV 为 0.2 μm , 粗糙度为 0.4 nm 镜片的焦斑形状尺寸; (b) RMS 为 0.04 μm , PV 为 0.2 μm , 粗糙度为 0.4 nm 镜片的焦斑能量包围函数; (c) RMS 为 0.2 μm , PV 为 1 μm , 粗糙度为 0.4 nm 镜片的焦斑形状尺寸; (d) RMS 为 0.2 μm , PV 为 1 μm , 粗糙度为 0.4 nm 镜片的焦斑能量包围函数

Fig. 2. Focal points and energy encircle functions obtained by mirrors with different profile: (a) Focal point obtained by mirror with profile of RMS 0.04 μm , PV 0.2 μm , roughness 0.4 nm; (b) energy encircle functions obtained by mirror with profile of RMS 0.04 μm , PV 0.2 μm roughness 0.4 nm; (c) focal point obtained by mirror with profile of RMS 0.2 μm , PV 1 μm roughness 0.4 nm; (d) energy encircle functions obtained by mirror with profile of RMS 0.2 μm , PV 0.1 μm roughness 0.4 nm.

射到以焦点为中心的一个较大范围内, 从而导致焦斑尺寸和角分辨率较大。

图 3 是 X 射线聚焦望远镜角分辨率与离焦距的关系, 从图 3 中可以看出, 对于 X 射线聚焦望远

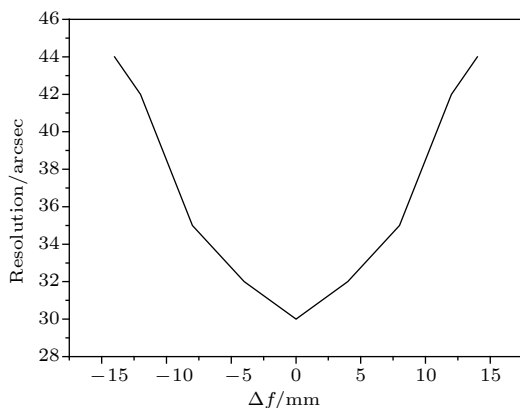


图 3 X 射线聚焦望远镜的角分辨率与离焦距的关系

Fig. 3. Relationship between angular resolution and defocus amount in focusing observatory.

镜, 焦距处的角分辨率最小, 当像面处于焦点之前或焦点之后时都会影响聚焦望远镜的角分辨率. 当离焦距为 5 mm 时, 角分辨率由 30.6" 降至 32"; 当离焦距为 10 mm 时, 角分辨率为 38". 所以, 要提高 X 射线聚焦望远镜的角分辨率, 增强其成像效果, 不仅要对其面型精度做精度要求, 而且要对焦平面探测器的离焦距做相应要求, 针对聚焦镜角分辨率要求, 最终提出的离焦距为小于 4 mm.

2.3 X 射线聚焦望远镜有效面积

X 射线聚焦望远镜的有效面积与其表面膜层材料有直接关系, 因 X 射线波长短、光子能量大, X 射线聚焦望远镜镜片表面必须溅射高原子序数的膜层才能增大其反射效率. 图 4 为两种不同的膜层结构对 X 射线的反射效率, 其中图 4(a) 是膜层材料为 Au 时, 不同角度下 X 射线的反射效率, 图 4(b) 为在 Au 膜上面制备 10 nm 的 C 时其对 X 射

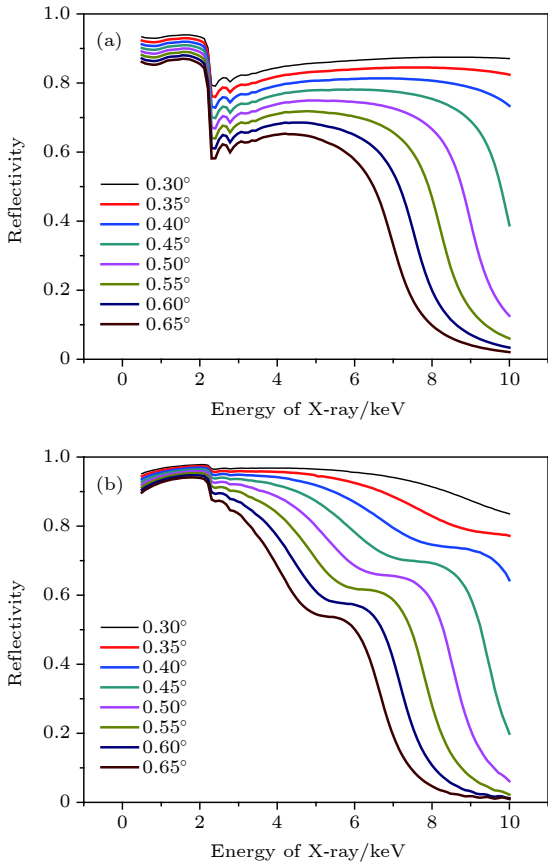


图 4 (a) 膜层材料为 Au 的 X 射线聚焦望远镜反射率与不同掠入射角的关系; (b) 膜层材料为 Au 加 C 复合膜的 X 射线聚焦望远镜反射率与不同掠入射角的关系
Fig. 4. (a) Relationship between reflectivity and degree of focusing mirrors with Au film; (b) relationship between reflectivity and degree of focusing mirrors with Au, C multi-layer film.

线的反射效率. 从图 4 中可以看出, 随着掠入射角的增大, X 射线反射效率降低, 而且 Au 和 C 的复合膜层反射效率明显大于 Au 膜的反射效率, 并且复合膜层能有效减弱 Au 膜在 2 keV 的吸收作用, 提高 X 射线反射率, 这是因为多层膜结构会对 X 射线光子产生相干叠加作用, 从而提高了 X 射线的反射率.

X 射线聚焦望远镜视场的定义是偏轴情况下, 有效面积为在轴有效面积 50% 时的偏轴角. 图 5 是 X 射线聚焦望远镜有效面积与入射光偏轴量的关系, 从图 5 可以发现, 当 X 射线聚焦望远镜在偏轴情况下时, 其有效面积随偏轴角增大而减小, 当偏轴角为 16' 时, 其有效面积将降至在轴有效面积的 50%, 所以文中设计的聚焦望远镜视场为 16', 而当偏轴角继续增大时, 由于光子已经聚焦在设置的探测器外, 所以其有效面积急速下降.

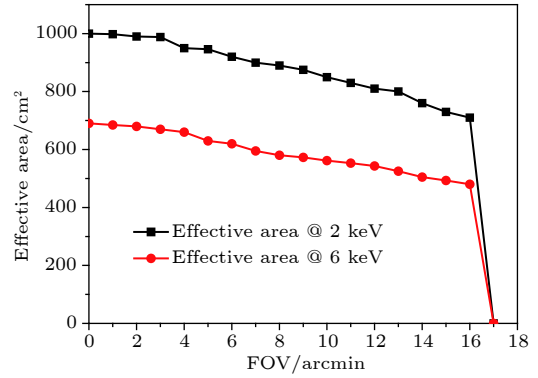


图 5 X 射线聚焦望远镜有效面积与偏轴角的关系
Fig. 5. Relationship between effective area and off axis in focusing observatory.

图 6 是 X 射线聚焦望远镜有效面积随层数、镜片质量的变化关系, 当增大 X 射线聚焦望远镜有效面积时, 在反射率一定的情况下, 只能通过增多其嵌套层数来解决. 从图 6(a) 中可以看出, 当嵌套层数增多时, X 射线聚焦望远镜有效面积逐渐增

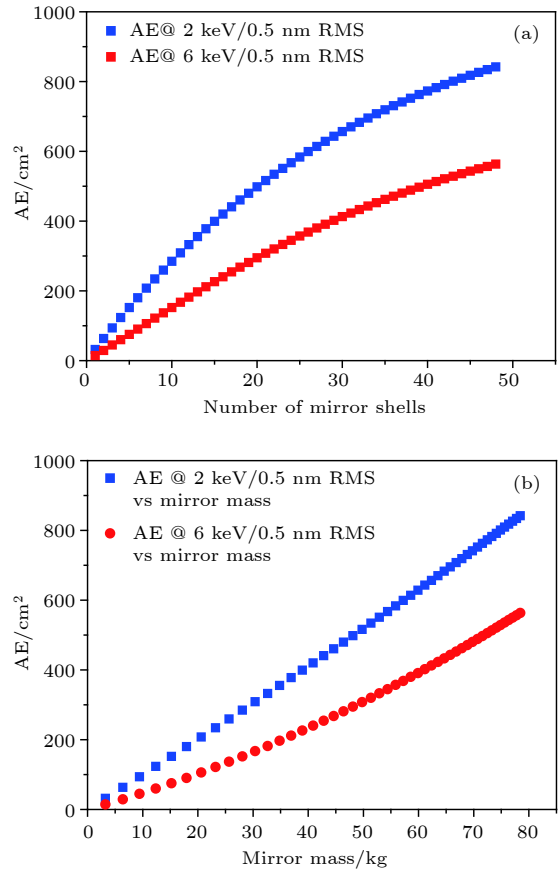


图 6 (a) X 射线聚焦望远镜有效面积与嵌套层数的关系; (b) X 射线聚焦望远镜有效面积与镜片重量的关系
Fig. 6. (a) Relationship between effective area and mirror layers in focusing observatory; (b) relationship between effective area and mirror weight in focusing observatory.

大,但其镜头质量也逐渐增大(图 6(b)),当镜片层数多于 45 层时,已完全满足 eXTP 聚焦望远镜有效面积需求,并且随着嵌套层数的增加,内层镜片有效面积贡献能力已非常小,但卫星总重的增加会提高卫星发射成本,所以综合考虑有效面积需求与卫星发射成本,最终确定 X 射线聚焦望远镜的嵌套层数确定为 45 层,其有效面积为 842 和 563 $\text{cm}^2@6 \text{ keV}$.

3 结 论

本文对 X 射线聚焦望远镜的光学设计工作进行了仿真研究,针对 eXTP 卫星要求,设计了最外层镜片口径为 $\varphi 476 \text{ mm}$,最内层镜片口径为 $\varphi 212.46 \text{ mm}$,镜片长度为 600 mm,焦距为 5.25 m 的 X 射线聚焦望远镜,并对影响其角分辨率、有效面积的因素进行了仿真分析研究,分别给出了角分辨率、有效面积与聚焦望远镜镜片面型、嵌套层数的关系,对 eXTP X 射线聚焦望远镜设计工作提供了研究基础.

参考文献

- [1] Yuan W M, Zhang C, Chen Y. 2018 *Sci. China: Phys. Mech.* **48** 3
- [2] Jeong S, Panasyuk M I, Reglero V 2018 *Space Sci. Rev.* **214** 25
- [3] Zhang S N, Santangelo A, Feroci M 2019 *Sci. China Phys. Mech.* **62** 25
- [4] Zand J J M, Bozzo E, Qu J L 2019 *Sci. China Phys. Mech.* **62** 029506
- [5] Camilo F, Scholz P, Serylak M 2018 *Astrophys. J.* **856** 11
- [6] Liu D, Qiang P F, Li L S, Su T, Sheng L Z, Liu Y A, Zhao B S 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 010703 (in Chinese) [刘舵, 强鹏飞, 李林森, 苏桐, 盛立志, 刘永安, 赵宝升. 2016 物理学报 **65** 010703]
- [7] Li L S, Qiang P F, Sheng L Z 2017 *Chin. Phys. B* **26** 100703
- [8] Li L S, Qiang P F, Sheng L Z, Liu Z, Zhou X H, Zhao B S, Zhang C M 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 200701 (in Chinese) [李林森, 强鹏飞, 盛立志, 刘哲, 周晓红, 赵宝升, 张淳民 2018 物理学报 **67** 200701]
- [9] Fang H Y, Cong S P, Sun H F, Li X P, Su J Y, Zhanf L, Shen L R 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 089701 (in Chinese) [方海燕, 丛少鹏, 孙海峰, 李小平, 苏剑宇, 张力, 沈利荣 2019 物理学报 **68** 089701]
- [10] Sheikh S I, Hanson J E, Graven P H 2011 *Navigation* **58** 165
- [11] Wang Y, Zheng W, Sun S 2013 *Adv. Space Res.* **51** 2394
- [12] Weisskopf M C, Brinkman B, Canizares C 2002 *Publ. Astron. Soc. Pac.* **114** 1
- [13] Starling R L C, Wildy C, Wiersema K 2017 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **468** 378
- [14] Devasia J, Paul B 2018 *Astrophys. Astron.* **39** 7
- [15] Bamba A, Puehlhofer G, Acero F 2012 *Astrophys. J.* **761** 80
- [16] Kelley R L, Nakazawa K 2018 *J. Astron. Telesc. Inst.* **4** 1
- [17] Balsamo E, Gendreau K, Okajima T 2016 *J. Astron. Telesc. Inst.* **2** 9
- [18] Rao K R 1999 *Curr. Sci. India* **77** 1125
- [19] Tsujimoto M, Morihana K, Hayashi T 2018 *Publ. Astron. Soc. Japan* **70** 14
- [20] Hagino K, Nakazawa K, Sato G 2018 *J. Astron. Telesc. Inst.* **4** 15
- [21] Eckart M E, Adams J S, Boyce K R 2018 *J. Astron. Telesc. Inst.* **4** 22
- [22] Keek L, Arzoumanian Z, Bult P 2018 *Astrophys J Lett.* **855** 6

Optical design of X-ray focusing telescope*

Qiang Peng-Fei¹⁾²⁾ Sheng Li-Zhi^{1)†} Li Lin-Sen¹⁾²⁾ Yan Yong-Qing¹⁾
Liu Zhe¹⁾ Zhou Xiao-Hong¹⁾

1) (*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an 710119, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 10 May 2019; revised manuscript received 12 June 2019)

Abstract

X-ray focusing telescope is one of the most important equipment for X-ray space observation, which is designed based on the grazing incidence principle. The purpose of x-ray observation is to detect the black holes of various sizes in outer space, and the data obtained by X-ray telescope conduces to investigating the basic physical law under the condition of extreme gravity and magnetic field, In this article, multi-layer telescope is designed to satisfy the demand for enhanced X-ray timing and polarimetry mission. in which the telescope is designed based on Wolter-I telescope. The Monte Carlo method and power spectral density are used when the relationship between mirror profile and roughness with angular resolution is investigated. We analyze the relationship between angular resolution and mirror profile, and the result shows that the higher mirror profile possesses higher angular resolution. When the root mean square(RMS) of mirror profile is 0.04 μm , PV is 0.2 μm and roughness is 0.4 nm, the mirror angular resolution is 6.3" and it will change to 30.6" when the RMS of mirror profile is 0.2 μm , PV is 1 μm and roughness is 0.4 nm. The angular resolution out of focus is also investigated in this article, and the more defocusing amount gives rise to the worse angular resolution because defocusing spot will be larger than that of focal plane. So the maximum defocusing amount of 5 mm is required when the focal plane detector is installed. The relationship between effective area with film structure and layers number is also investigated. The film with Au mixed with C has a higher reflectivity than the film with only Au, because the mixed film will generate an interference effect and enhance the intensity of reflecting X-ray. When the telescope layers increase, the effective area and telescope weight are both improved, the requirement for effective area of satellite can be satisfied when the number of nesting layers is 45. However, when the number of nesting layers further increase, the effective area will be improved with a low speed, but the weight of telescope will increase with a high speed. The field of view of this telescope is 16', which is more than the required value of 12'. Finally, the X-ray focusing telescope with 5.25 m focal length, 45 nesting layers, effective area 842 cm^2 at 2 keV, 563 cm^2 at 6 keV is obtained.

Keywords: X-ray, focusing observatory, grazing incidence principle, effective area, angular resolution

PACS: 07.85.Fv, 07.60.-j

DOI: 10.7498/aps.68.20190709

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61471357) and Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA15020106-03).

† Corresponding author. E-mail: lizhi_sheng@opt.ac.cn