

爱因斯坦探针后随 X 射线聚焦镜的粒子污染仿真

吕中华¹⁾²⁾ 杨彦佺¹⁾ 祝宇轩¹⁾ 赵晓帆¹⁾ 杨雄涛¹⁾ 陈勇^{1)†}

1) (中国科学院高能物理研究所, 粒子天体物理重点实验室, 北京 100049)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2023 年 3 月 1 日收到; 2023 年 4 月 18 日收到修改稿)

X 射线聚焦镜是一种对粒子污染物颗粒极其敏感的设备, 通常依靠控制地面各流程的污染物积累来限制其影响. 本文根据粒子污染物的特点, 结合 Mie 散射理论构建了聚焦镜片上的粒子污染颗粒与入射 X 射线光子的相互作用模型. 在此基础上, 结合蒙特卡罗法进行光线追迹工作, 构建出爱因斯坦探针后随 X 射线聚焦镜的粒子污染仿真程序. 通过仿真计算得到入射 X 射线光子与粒子污染物相互作用时的反应截面与散射角分布函数. 这两个量与粒子污染物的尺度相关联, 本文将聚焦镜片样本上粒子污染颗粒尺度分布的测量结果进行拟合, 得到粒子污染尺度分布. 根据上述结果进行仿真计算, 得到粒子污染物密度与聚焦镜的有效面积和角分辨的关系, 并使用防污染监测数据和爱因斯坦探针后随 X 射线聚焦镜性能测试数据验证了仿真结果的可靠性. 对爱因斯坦探针后随 X 射线聚焦镜粒子污染的仿真实现了对粒子污染物影响的定量分析, 明确了粒子污染物对聚焦镜各方面性能的具体影响, 为防污染工作提供了理论支持.

关键词: 粒子污染, X 射线聚焦镜, 爱因斯坦探针, 后随 X 射线望远镜**PACS:** 07.85.Fv, 06.30.-k**DOI:** 10.7498/aps.72.20230301

1 引言

X 射线掠入射到反射面时具有极大的反射率. 1952 年, Wolter^[1] 提出了 Wolter-I, Wolter-II, Wolter-III 三种结构的 X 射线聚焦镜. 爱因斯坦探针卫星 (Einstein probe, EP)^[2] 上的后随 X 射线望远镜 (follow-up X-ray telescope, FXT)^[3] 是 EP 卫星的主要载荷之一, 采用了常见的 Wolter-I 结构. 整个 FXT 聚焦相机为双筒聚焦组件, 分别具有独立的聚焦镜和探测器. 两套聚焦镜各由 54 层镜片嵌套而成^[4], 分别由欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 和马克斯普朗克地外物理研究所 (Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, MPE) 提供, 能够对暂现源和瞬变源进行快速的深度后随跟踪观测, 以获得更为精准的定位和高信噪

比的 X 射线观测数据^[2].

X 射线聚焦镜的污染物种类分为两种: 粒子污染物和分子污染物. 其中粒子污染物指不同大小的聚集物, 包括灰尘、气溶胶和烟雾颗粒等. 粒子污染会降低聚焦镜的有效面积, 并使点扩展函数 (point spread function, PSF) 变差. 而分子污染物指各类有机化合物, 包括碳基化合物、硅化合物和水蒸气等. 分子污染也会影响有效面积, 会使有效面积增大或减小, 影响标定结果^[5]. 分子污染防治工作除地面真空测试和试验外, 还包括周期性的在轨标定. 粒子污染防治工作重点为地面各流程的污染量控制. 本文主要针对 EP 卫星发射前的粒子污染防治工作.

由于 X 射线聚焦镜中光子以很小的角度入射, 粒子污染物对聚焦镜片反射面的阴影遮挡面积远大于竖直投影面积, 会放大污染物对聚焦镜性能的

† 通信作者. E-mail: gaojh@sdu.edu.cn

影响. 在聚焦镜片的生产、测试、集成、安装和标定等流程中, 通过对环境中污染物含量的监测控制来减少污染对 X 射线聚焦镜性能的影响.

本文建立了 X 射线与聚焦镜片上粒子污染物相互作用的物理模型, 根据该物理模型仿真计算粒子污染物对聚焦镜性能的影响, 并使用防污染监测数据与 FXT 性能测试数据对仿真结果进行验证. 仿真结果能够定量分析粒子污染物密度与有效面积和角分辨等性能指标的关系, 明确粒子污染物的影响, 使相关的防污染工作和测试工作能够更有效地开展.

2 粒子污染特点

由于 FXT 的 X 射线聚焦镜, 掠射角 ω 很小, X 射线正入射时, 54 层镜片中反射面上的掠射角不超过 1.6° . 如图 1 所示, 自身尺度为 h 的污染物颗粒对镜面的遮挡尺度为 $s = 2h \cot \omega$, 其中系数 2 代表污染物颗粒除了吸收入射光子还可以吸收反射光子. 根据掠射角 ω 的取值范围, 污染物颗粒对镜面的遮挡尺度是自身的近百倍, 聚焦镜对粒子污染极其敏感.

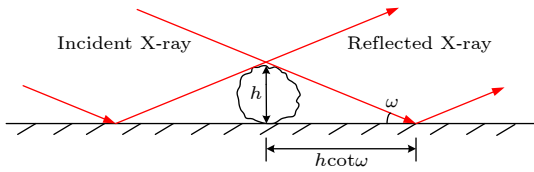


图 1 污染物颗粒在聚焦镜镜片上对 X 射线的遮挡
Fig. 1. X-ray shielding of contaminant particles on the surface of the focusing mirrors.

采用 AXAF (advanced X-ray astrophysics facility, 即 Chandra 望远镜) 对粒子污染影响进行评估时, 使用了理论公式 (1)^[6] 来估算粒子污染对聚焦镜有效面积的影响:

$$\frac{\delta A_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} = -\frac{4Q_{\text{ext}}F_{\text{dust}}}{\sin \omega} \approx -\frac{8F_{\text{dust}}}{\sin \omega}, \quad (1)$$

式中, A_{eff} 为聚焦镜的有效面积^[6], F_{dust} 为污染物颗粒对聚焦镜表面垂直投影的相对面积, 单位通常为 10^{-6} ($\text{m}^2/(\text{m}^2)$), Q_{ext} 为污染物颗粒的消光效率因子 ($Q_{\text{ext}} \approx 2$)^[6]. 其中 ω 值取 X 射线聚焦镜每层镜片的平均掠射角.

对于粒子污染的监测, 通常使用符合 ESA 标准的颗粒物监测器 (particle fall out photometer, PFO Photometer) 来监控生产测试各流程的粒子污染水平. 将 PFO 陪片与聚焦镜置于同一环境, 用 PFO 的污染物含量变化表征 EP-FXT 聚焦镜的污染物含量变化. 使用颗粒物监测器来读取 PFO 上的污染值. PAC (particle contamination) 陪片通过粘贴吸附处于相同环境的样本镜片来表征 EP-FXT 聚焦镜累积的污染物含量. 通常使用光学显微镜进行观察测量. 本文对粒子污染物含量的测量均来自于 PAC 的测量结果. 污染物颗粒的尺度分布通过 JOMESA HFD 清洁度自动分析系统测得, 该系统可通过显微分析法测量污染物颗粒. 通过对相同环境下的镜面样品进行测量, 得到污染物颗粒尺度分布.

3 粒子污染模型

3.1 EP-FXT 聚焦镜模型

EP-FXT 聚焦镜镜片由旋转对称的抛物面和双曲面组成^[7], 每层镜片同轴、共焦, 轴向长度相同, 实测有效面积达 360 cm^2 @1.49 keV.

组成聚焦镜镜片的共焦点抛物面和双曲面方程分别为

$$r_a^2 = r_0^2 \sum_{i=0}^1 a_i \left(\frac{z - z_0}{r_0} \right)^i,$$

$$a_0 = 1, \quad a_1 = 2 \tan \alpha;$$

$$r_b^2 = r_0^2 \sum_{i=0}^2 b_i \left(\frac{z - z_0}{r_0} \right)^i,$$

$$b_0 = 1, \quad b_1 = 2 \tan \beta,$$

$$b_2 = \frac{2r_0 \tan \beta}{f + r_0 \cot(2\alpha)}.$$

这里 z_0 和 r_0 是抛物面与双曲面交界处平面的坐标; α 和 β 分别为抛物面和双曲面在交界处切线与光轴的夹角, $\alpha = \arctan(r_0/f)/4$, $\beta = 3\alpha$ ^[7]; r 和 z 为方程的变量, r 为径向坐标, z 为光轴方向坐标 (焦点处 $z = 0$), f 为焦距. 聚焦镜方程中各参数对应位置参考图 2.

在焦平面上, 通过一块尺寸为 $28.8 \text{ mm} \times 28.8 \text{ mm}$ 的矩形 PNCCD (positive-negative charge-coupled device) 来接收成像光子.

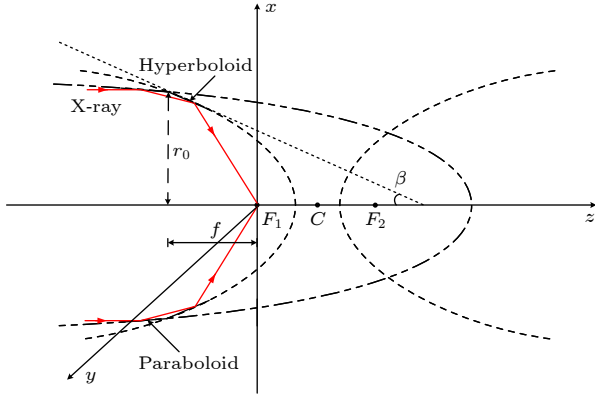


图 2 三维坐标系下的方程参数

Fig. 2. Equation parameters in a three-dimensional coordinate system.

3.2 污染物粒子与 X 射线相互作用

X 射线波长较短, 在与聚焦镜镜面相互作用时, 主要考虑其粒子性进行光线追迹. 但与污染物粒子相互作用时, 污染物尺度较小, 应考虑 X 射线的波动性才能准确计算出其与污染物颗粒产生的散射. 天体源发出的 X 射线近似为平行光, 为了简化计算污染物粒子可简化为均匀介质球. 球形粒子对光线散射特性的计算可使用成熟的理论方法——Mie 散射理论^[8]. 1908 年, Mie 根据麦克斯韦方程组得出平面电磁波入射到一个各向同性均匀介质球时其远场的精确解^[9].

Mie 散射理论中污染物颗粒粒径对消光效率因子 Q_{ext} 有影响. Q_{ext} 还与复折射率 m 有关, $m = 1 - \delta - i\beta$, 其中 δ 决定于 X 射线在吸收性介质中的传播速度, β 对应介质内 X 射线的衰减 (X 射线的 m 值接近 1). 通过对 Q_{ext} 的探究可以得出污染物颗粒大小对其与 X 射线相互作用的影响.

在 Mie 散射理论中 Q_{ext} 定义如下^[10,11]:

$$Q_{\text{ext}} = Q_{\text{abs}} + Q_{\text{scat}}, \quad (2)$$

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [\Re(a_n + b_n)], \quad (3)$$

$$Q_{\text{scat}} = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (4)$$

其中, Q_{abs} 为吸收效率因子, 为污染物颗粒对入射光线的吸收截面; Q_{scat} 为散射效率因子, 即散射截面; a_n 和 b_n 为 Mie 系数^[12]; \Re 表示右侧括号内的参数取实部; α 为尺度因子,

$$\alpha = 2\pi r / \lambda. \quad (5)$$

这里, r 为污染物颗粒半径, λ 为入射光波长.

Mie 系数中 a_n 和 b_n 的值^[12] 分别为

$$a_n = \frac{\Psi_n(\alpha) \Psi'_n(m\alpha) - m \Psi'_n(\alpha) \Psi_n(m\alpha)}{\xi_n(\alpha) \Psi'_n(m\alpha) - m \xi'_n(\alpha) \Psi_n(m\alpha)}, \quad (6)$$

$$b_n = \frac{m \Psi_n(\alpha) \Psi'_n(m\alpha) - \Psi'_n(\alpha) \Psi_n(m\alpha)}{m \xi_n(\alpha) \Psi'_n(m\alpha) - \xi'_n(\alpha) \Psi_n(m\alpha)}, \quad (7)$$

$$\Psi_n(x) = \left(\frac{\pi x}{2}\right)^{1/2} J_{n+1/2}(x), \quad (8)$$

$$\xi_n(x) = \left(\frac{\pi x}{2}\right)^{1/2} H_{n+1/2}(x), \quad (9)$$

式中, $J_{n+1/2}(x)$ 为第一类贝塞尔函数, $H_{n+1/2}(x)$ 为第二类汉克尔函数, 函数中的 x 表示自变量, 即 α 或 $m\alpha$. 根据 (3) 式、(4) 式、(6) 式和 (7) 式可见, 效率因子 Q (Q_{ext} , Q_{abs} , Q_{scat} 的统称) 与尺度因子 α 相关, 即污染物颗粒的粒径会影响入射光与其相互作用的截面, 即散射截面和吸收截面. AXAF 的镜片样本吸收截面测量值如表 1^[13] 所列.

 表 1 污染物平均吸收率^[13]

 Table 1. Average absorption rate of contamination^[13].

Energy/keV	Q_{abs}
1.49	0.800
2.98	0.728
4.50	0.586
4.95	0.544
6.40	0.430

经测试分析表明 Q_{abs} 对于污染物颗粒的化学组成并不敏感^[13]. 表 1 中的 Q_{abs} 为在不同的污染物化学组成下的平均吸收截面. 表中各能量下的平均 Q_{abs} 取值为 AXAF^[13,14] 的试验结果.

在 Mie 散射理论中, 入射光与粒子污染颗粒相互作用的散射相函数^[10]:

$$P_{\text{scat}} = \frac{2(|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2)}{\alpha^2 Q_{\text{scat}} \alpha^2}, \quad (10)$$

式中 θ 为散射角; $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 为散射幅度函数,

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n), \quad (11)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n), \quad (12)$$

其中 a_n 和 b_n 为 Mie 系数, π_n 和 τ_n 为散射角函数,

$$\pi_n = \frac{P_n^{(1)}(\cos \theta)}{\sin \theta}, \quad (13)$$

$$\tau_n = \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta), \quad (14)$$

$P_n^{(1)}$ 为一阶 n 次第一类缔合勒让德函数. 由此通过复折射率 m 、掠入射角大小和效率因子 Q , 便可以求出发生在污染物颗粒上的散射角分布函数, 从而计算出粒子污染对 EP-FXT 聚焦镜性能的影响.

4 聚焦镜粒子污染仿真流程

聚焦镜粒子污染影响的仿真包括两方面: 一方面为 X 射线与反射面的相互作用, 另一方面为 X 射线与污染物的相互作用. 粒子污染仿真流程如图 3 所示.

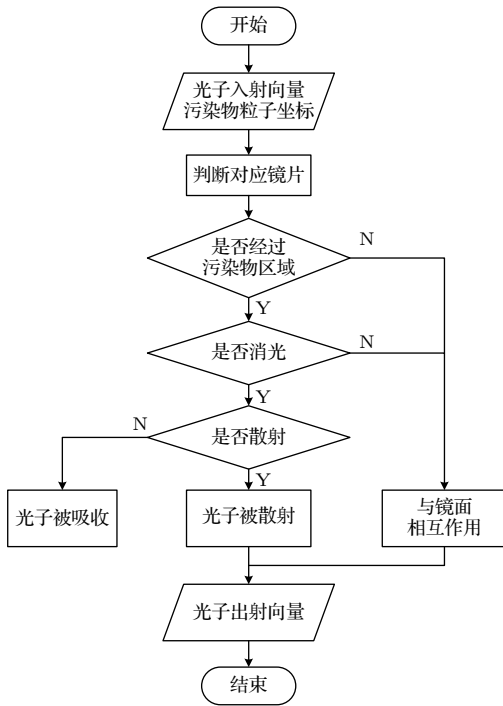


图 3 EP-FXT 聚焦镜粒子污染仿真流程图

Fig. 3. Flow chart of particle contamination simulation for EP-FXT focusing mirror.

1) X 射线与反射面相互作用仿真流程如下: 通过 FXT 的镜片参数构建出聚焦镜主体. X 射线能量较高, 掠入射至镜面时的光线追迹过程主要考虑粒子性进行模拟. 据此对入射光子束成像过程进行仿真, 光线追迹后排除杂散光光子并得到剩余入射光子的掠射角, 根据 X 射线光学中心 (center for X-ray optics, CXRO)^[15] 中的掠入射光子反射率数据库得到反射率, 通过 Debye-Waller 公式^[16] 计算

散射角分布函数 (此处考虑了 X 射线的波动性). 根据掠射角和散射角的计算对光线追迹进行修正, 根据反射率计算反射光子数量. 最终通过蒙特卡罗算法得到在焦平面上成像的光子数量与坐标, 通过焦平面光子数量与入射光子数量计算出有效面积^[17], 通过焦平面光子分布计算角分辨.

2) X 射线与污染物相互作用仿真流程如下: 首先将污染物颗粒在构建出的聚焦镜上按一定规律分布 (本文采用均匀分布), 得到每个污染物位置的坐标 (x_i, y_i, z_i) . 污染物颗粒尺寸根据实测数据的拟合结果分布. 在光子与镜面相互作用前, 比对光子与污染物坐标, 根据上文的粒子污染模型判断是否与污染物颗粒相互作用. 若没有, 则继续与镜面相互作用. 若与污染物颗粒相互作用, 则根据模型的相互作用截面, 判断是否消光. 若不发生消光, 则光子穿透污染物继续与镜面相互作用. 若消光则被吸收或散射, 之后进一步计算相互作用后的吸收或散射光线. 最后通过蒙特卡罗算法得到污染后的聚焦镜成像光子数量与坐标, 从而得出对应的有效面积与角分辨.

在粒子污染模型中, 消光系数 Q 及散射幅度函数等相关内容涉及级数计算, 级数次数 n 采用 Wiscombe^[18] 的经验公式确定. 在此公式下计算精度和计算机内存资源之间达到平衡, 表达式如下:

$$n = \begin{cases} x + 4x^{1/3} + 1 & (0.02 \leq x \leq 8), \\ x + 4.05x^{1/3} + 1 & (8 \leq x \leq 4200), \\ x + 4x^{1/3} + 2 & (4200 \leq x \leq 20000). \end{cases} \quad (15)$$

自变量 x 在计算 Q 和散射角函数等内容时为尺度因子 α .

5 粒子污染仿真结果

5.1 效率因子

从粒子污染模型中得知 Q 与尺度因子 α 和复折射率 m 相关. 通过对 Q 与 α 关系的探究可以了解污染物颗粒大小对聚焦镜的影响. 图 4 和图 5 为对 Q 与 α 关系的仿真结果.

图 4 的粒子污染物复折射率 m ($m = 1 - \delta - i\beta$) 中 $\beta = 0.1$, δ 从 0.02—0.1, 以步长 0.02 增大, 其中 Q_{ext} , Q_{abs} 和 Q_{scat} 随着增大收敛于定值. 由于考虑了 X 射线的衍射, 所以消光截面大于 1, 趋于定值 2. Q_{abs} 的 5 条曲线相同, 重合在一条趋于 1

的曲线上. 图 5 的粒子污染物复折射率 m ($m = 1 - \delta - i\beta$) 中 $\delta = 0.1$, β 从 0.02—0.1, 以步长 0.02 增大, Q_{ext} 和 Q_{scat} 相对于图 4 有明显的振荡, 振荡后仍趋于相同的定值. 由于粒子污染物成分复杂, 复

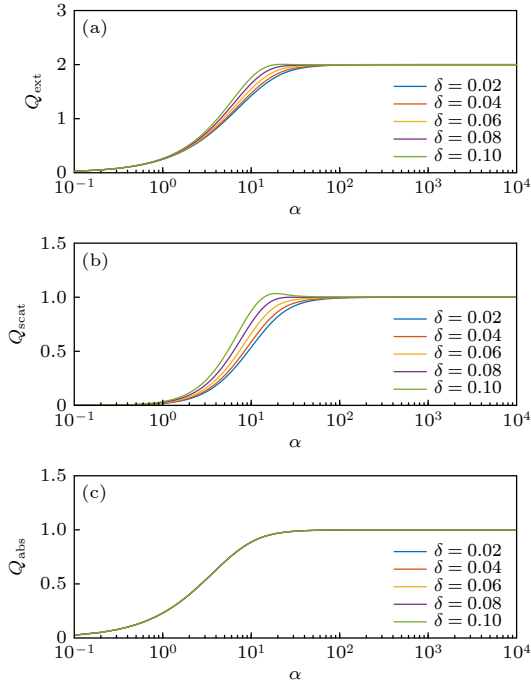


图 4 不同 δ 下效率因子 Q 与尺度因子 α 的关系

Fig. 4. Relationship between efficiency factor Q and scale factor α under different δ .

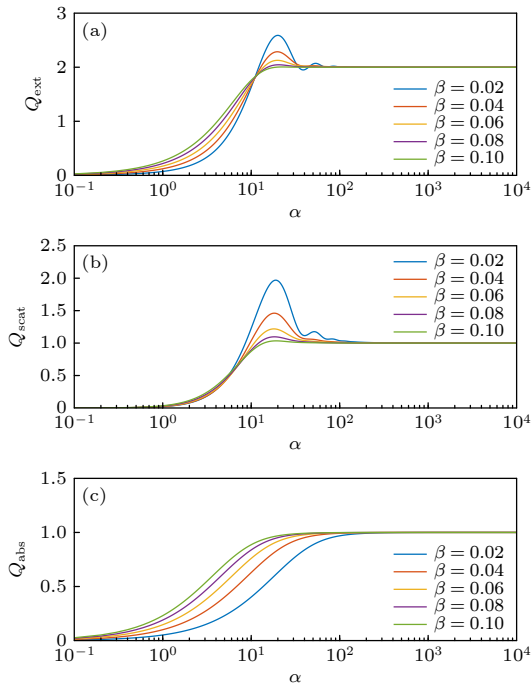


图 5 不同 β 下效率因子 Q 与尺度因子 α 的关系

Fig. 5. Relationship between efficiency factor Q and scale factor α under different β .

折射率 m 探测困难, 所以仿真了 m 中不同 δ 与 β 时的情况. 从对效率因子的仿真中可归纳出, 随着污染物颗粒尺度的增大, 无论 m 为多少, 各反应截面总会从振荡趋于定值 $Q_{\text{ext}} = 2$, $Q_{\text{abs}} = 1$ 和 $Q_{\text{scat}} = 1$. 在实际的粒子污染检测中, 污染物颗粒为微米量级, X 射线的波长为纳米量级, 对应的尺度因子 α 的数量级至少为 10^3 , 因此 Q 可按照定值进行计算.

5.2 污染颗粒散射函数

效率因子 Q 代表的各反应截面确定后, 可以判断入射光与污染物是否相互作用, 以及相互作用的种类. 其中光子被吸收则可以直接结束计算, 但散射过程需要进行进一步的复杂计算. 从推导的粒子污染模型中的 (10) 式可见, 污染物颗粒上的散射角 θ 的分布函数依然与尺度因子 α 和复折射率 m 相关. 由此进行相关仿真, 本文仿真计算出的散射角分布函数均作归一化处理, 即所有散射角发生的概率总和为 1.

图 6 为对于粒子污染物的复折射率 m ($m = 1 - \delta - i\beta$), 其中 $\beta = 0.1$, δ 从 0.02—0.1 以步长 0.02 增大时的散射角分布函数. 图 7 为散射角分布函数 90% 概率宽度随 δ 变化情况 ($\alpha = 10000$). 图 8 为对于粒子污染物的复折射率 m ($m = 1 - \delta - i\beta$), 其中 $\delta = 0.1$, β 从 0.02—0.1 以步长 0.02 增大时的散射角分布函数. 根据 X 射线与污染物颗粒的尺度关系, 在 $\alpha = 10000$, X 射线能量取 1.49 keV 时, 污染物颗粒尺寸为 $1.3 \mu\text{m}$. 相对于污染物颗粒尺寸, X 射线的散射为衍射散射, 所以散射光强的分布有振荡性. 根据图 7 和图 9 的概率宽度变化可

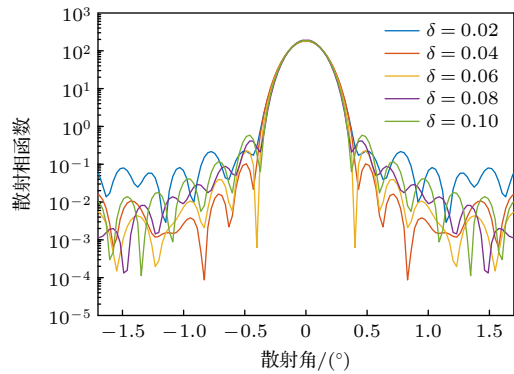


图 6 散射角分布函数随 δ 变化情况 ($\alpha = 10000$)

Fig. 6. Variation of scattering angle distribution function with δ ($\alpha = 10000$).

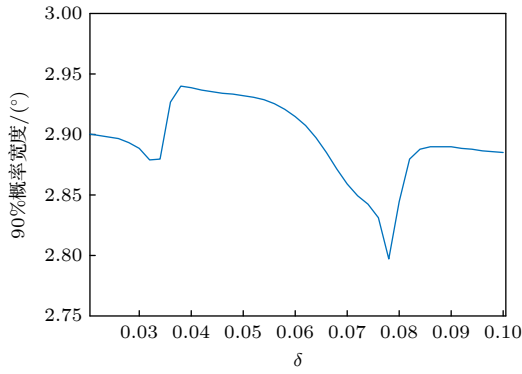


图 7 散射角分布函数 90% 概率宽度随 δ 的变化 ($\alpha = 10000$)

Fig. 7. Variation of 90% probability width of scattering angle distribution function with δ ($\alpha = 10000$).

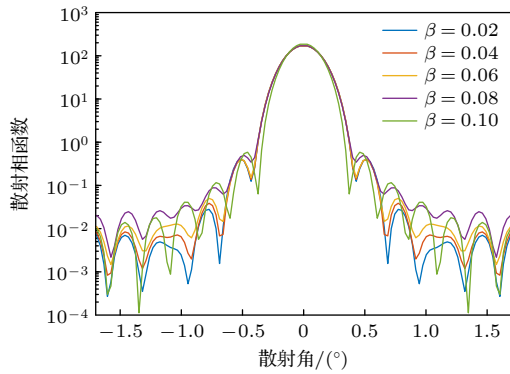


图 8 散射角分布函数随 β 的变化情况 ($\alpha = 10000$)

Fig. 8. Variation of scattering angle distribution function with β ($\alpha = 10000$).

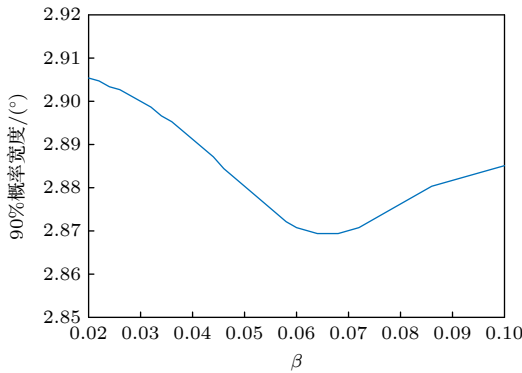


图 9 散射角分布函数 90% 概率宽度随 β 的变化 ($\alpha = 10000$)

Fig. 9. Variation of 90% probability width of scattering angle distribution function with β ($\alpha = 10000$).

见, 随着 β 或 δ 的变化, 函数的变化无明显规律, 且变化很小.

从图 10 可知, 随着污染物颗粒的尺度增大, 散射角分布函数越来越尖锐, 即散射角越来越小.

图 11 中 90% 概率对应宽度的变化亦证实了此结论. 这一结论与 Mie 散射的 Mie 效应^[19] 相吻合.

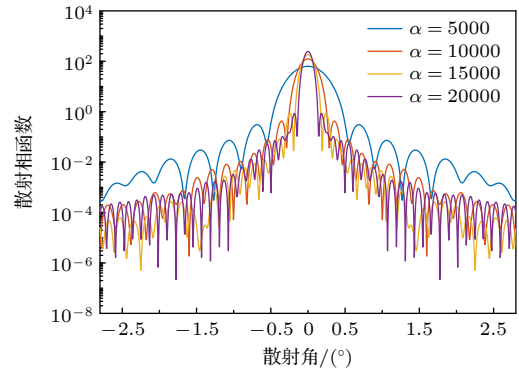


图 10 散射角分布函数随 α 的变化情况 ($\delta = 0.1$, $\beta = 0.1$)

Fig. 10. Variation of scattering angle distribution function with α ($\delta = 0.1$, $\beta = 0.1$).

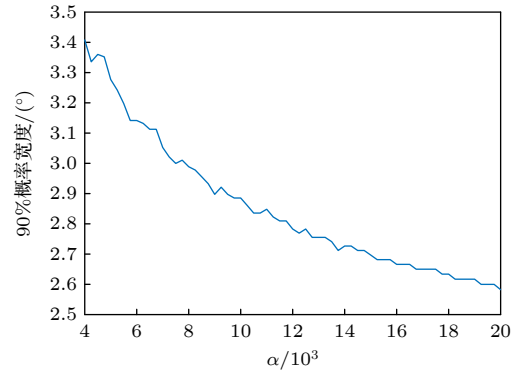


图 11 散射角分布函数 90% 概率宽度随 α 的变化 ($\delta = 0.1$, $\beta = 0.1$)

Fig. 11. Variation of 90% probability width of scattering angle distribution function with α ($\delta = 0.1$, $\beta = 0.1$).

虽然散射角分布函数的变化较为复杂, 但根据上文仿真结果, 散射角分布函数对复折射率 m 变化不敏感. 复折射率主要受污染物材料影响, 为了方便计算, 以下将粒子污染物成分简化为碳单质. 当尺度因子 $\alpha = 10000$, 入射的 X 射线能量取值为 1.49 keV 时, 得出的碳单质散射角分布函数如图 12 所示. 其中碳单质复折射率 m 中 $\delta = 0$, $\beta = 2.2 \times 10^{-5}$ ^[20].

通过污染物颗粒尺度分布的测量, 可以限定 α 的选值. 在对 ESA 提供的结构热控件 (structural and thermal model, STM) 聚焦镜^[21] 进行测试时, 通过 JOMESA HFD 清洁度自动分析系统得到 STM 镜片样本的污染物颗粒尺度分布, 分布结果如表 2 所列.

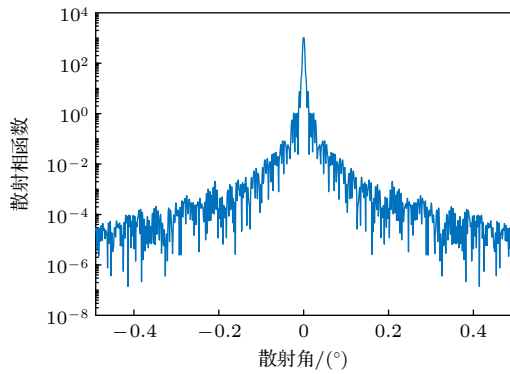
图 12 碳单质的散射角分布函数 ($\alpha = 10000$)

Fig. 12. Scattering angle distribution function of simple substance carbon ($\alpha = 10000$).

表 2 STM 的污染物颗粒尺度分布
Table 2. Particle size distribution of contamination on STM.

粒径范围/ μm	颗粒数
<25	220
25—50	156
50—100	71
100—150	59
150—200	37
200—400	12
400—600	4
600—1000	2

将分布结果使用罗辛-罗姆莱 (Rosin-Rammler, R-R) 分布理论进行相关拟合, R-R 分布是拟合某一环境下粉尘粒径分布的经典分布函数^[22], 函数表达式为

$$W = \sigma \frac{d^{(\sigma-1)}}{d_{50}^\sigma} e^{-\left(\frac{d}{d_{50}}\right)^\sigma}, \quad (16)$$

其中, W 为粉尘质量分布 (无量纲); d 为粒径尺寸 (μm); 参数 d_{50} 为粉尘质量分布 W 积分值为 0.5 时的粒径尺寸 (W 为归一化结果, 各粒径 d 下的积分总和为 1), 通常称为中位径; σ 为无量纲的拟合系数, σ 越大, 拟合的峰值越尖锐. 因为实际测量的结果为各粒径下粒子数的分布, 视粉尘密度一致得到 W 与粒子数的关系:

$$W = \frac{d_i^3}{\sum_{i=1}^N k_i d_i^3}, \quad (17)$$

式中 N 为粒子数, k 为与密度相关的系数. 可根据

R-R 分布和粉尘质量分布 W 与粒子数的关系, 求得不同粒径下粒子数概率分布函数. 在假设 STM 镜片样本的污染物颗粒尺度分布经历了两种环境时, 粒子数概率分布函数的拟合结果较好, 拟合结果如下:

$$P = 0.648P_1 + 0.352P_2,$$

$$P_1 = 1.8 \frac{d^{(1.8-1)}}{31^{1.8}} e^{-(d/31)^{1.8}},$$

$$P_2 = 2.2 \frac{d^{(2.2-1)}}{138^{2.2}} e^{-(d/138)^{2.2}},$$

其中 P 为最终的粒子数概率分布函数, P_1 和 P_2 分别为聚焦镜经历的两种污染环境对应的污染物粒子数概率分布, P_1 与 P_2 前的系数为归一化系数, 系数越大, 其所表示的粒子污染物堆积环境对镜片的影响越大. 在 P_1 所处环境中, 等效中位径 d_{50} 为 $(31.00 \pm 0.01) \mu\text{m}$, R-R 分布拟合系数 σ 为 1.80 ± 0.01 . 在 P_2 所处环境中, 等效中位径 d_{50} 为 $(138 \pm 0.01) \mu\text{m}$, R-R 分布拟合系数 σ 为 2.2 ± 0.01 . 具体拟合结果如图 13 所示.

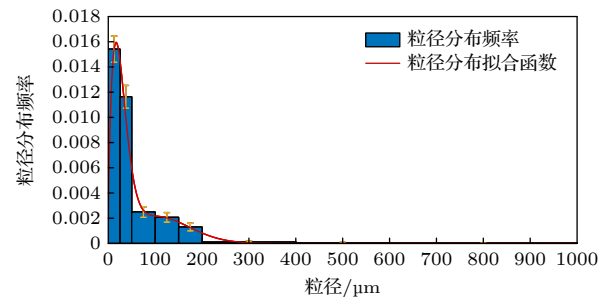


图 13 污染物颗粒的粒径分布

Fig. 13. Particle diameter distribution of contaminant particles.

从图 13 可以看出, 污染物颗粒尺寸主要分布在 $25 \mu\text{m}$ 以下. 图中左侧的峰受 P_1 所处环境影响, 峰右侧的平台实际为 P_2 所处环境的污染物堆积产生的第 2 个峰. 因为大尺度污染物颗粒数过少, 很难测量出其实际分布进行有效拟合. 所以如图 14 所示, 在污染物颗粒较大时, 拟合的误差较大. 但大尺度的污染物颗粒数量很少, 对最终结果影响较小. 根据该拟合结果可以判定入射光子与污染物颗粒发生相互作用时, 污染物颗粒各粒径尺寸的选取概率. 根据污染物颗粒的粒径分布和对应尺度的碳单质散射角分布函数, 可计算出 X 射线与污染物颗粒相互作用时的散射情况.

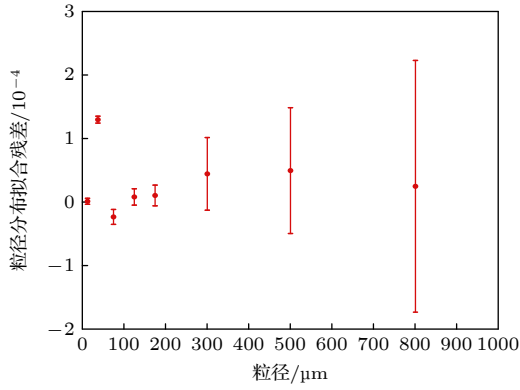


图 14 污染物粒径分布拟合残差

Fig. 14. Residual error of fitting particle diameter distribution of contaminant.

6 粒子污染仿真结果分析

6.1 污染颗粒对有效面积的影响

粒子污染对入射 X 射线的散射和吸收会影响聚焦镜的成像质量. 根据上文的仿真结果, 可以对整个焦平面的成像过程进行仿真. 按照图 3 所示流程, 令覆盖聚焦镜整个接收面积的入射 X 射线光子数为 10^7 , 光线均匀分布且沿光轴入射, 粒子污染颗粒在聚焦镜各层镜面均匀分布. 根据 PNCCD 探测器实际面积, 将焦平面限制为 $28.8 \text{ mm} \times 28.8 \text{ mm}$ 的矩形, 矩形质心与聚焦镜焦点重合. 通过对成像结果的分析可以计算出污染后聚焦镜的有效面积和角分辨. 虽然 STM 件有实测的污染物颗粒粒径分布, 但 STM 件仅有 6 层镜片 (第 1 层、第 24—27 层和第 54 层), 无法直观体现 FXT 聚焦镜的性能. 因此将包含 54 层镜片的鉴定件 (qualification model, QM) 与 STM 件共同进行仿真. 本文中 QM 件的污染物颗粒粒径分布使用与 STM 件相同的分布函数. QM 件的仿真结果如图 15 所示.

图 15 所示为污染量增大时, 相对有效面积 (受粒子污染影响的有效面积与未污染时有效面积之比) 的变化. 横坐标取值由 EP-FXT 的防污染目标 (1.1×10^{-3}) 限定. 由图 15 可以看出, 聚焦镜的有效面积随污染物密度增大而减小. 其中与 X 射线能量为 0.277 keV 和 1.49 keV 时明显不同的是, X 射线能量为 8.04 keV 时, 随着污染物密度增大, 聚焦镜有效面积减小的速率在不断降低. 这与上文理论公式 (1) [6] 中二者的线性关系不符. 由于入

射 X 射线能量为 8.04 keV 时, 镜片上较大掠射角的反射率很低导致平均掠射角相对更小, 从而对粒子污染物更加敏感. 由于对污染物粒子更加敏感, 所以污染物之间的相互影响也更加明显, 导致污染物密度增大时, 反应截面逐渐降低, 即有效面积随粒子污染密度变化的速率降低. 也是因为 X 射线能量为 8.04 keV 时对粒子污染物更加敏感, 其对应的曲线在图 15 的 3 条曲线最下方.

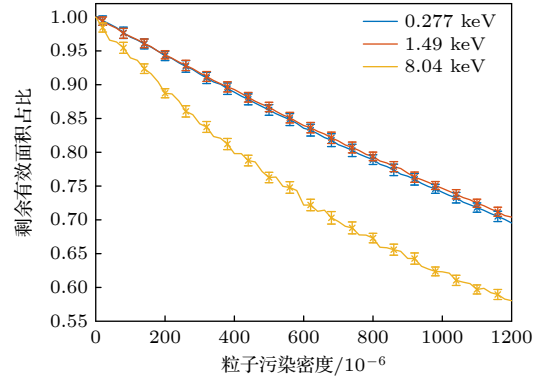


图 15 QM 件有效面积随粒子污染密度变化

Fig. 15. Effective area of the QM varies with particle contamination density.

根据 STM 件性能测试时各有效面积对应的能量对 STM 件进行仿真, 仿真结果如图 16 所示. 图 16 中 X 射线能量与聚焦镜有效面积的关系取决于不同能量下 X 射线的反射率. 粒子污染物与相对有效面积的关系与图 15 的 QM 仿真结果相似. STM 测试时, 其污染物含量经 PAC 测量约为 2×10^{-4} , 根据图 16 中的结果计算, 将 2×10^{-4} 时仿真得到的有效面积与实测的有效面积进行对比, 得到表 3.

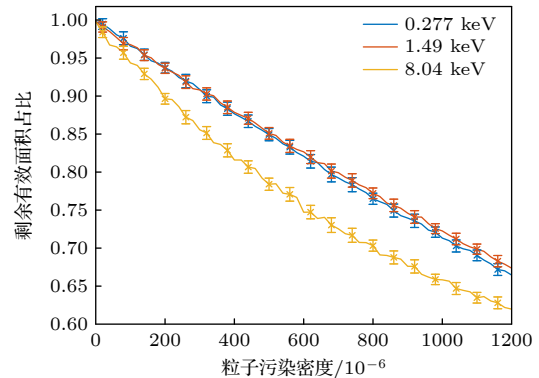


图 16 STM 件有效面积随粒子污染密度变化

Fig. 16. Effective area of the STM varies with particle contamination density.

根据表3可见有效面积的仿真结果与实测结果较为符合. 因此, 在测得聚焦镜的有效面积后, 可使用有效面积随污染物含量变化曲线来估计污染物的含量.

表3 STM件有效面积的仿真与实测结果
Table 3. Simulation and measurement results of effective area on the STM.

能量/keV	仿真结果/cm ²	实测结果/cm ²
0.277	42.43 ± 0.25	42.34 ± 0.19
1.49	41.57 ± 0.24	41.11 ± 0.55
8.04	0.91 ± 0.01	0.92 ± 0.01

6.2 污染颗粒对角分辨的影响

根据上文条件进一步仿真, 分析粒子污染对角分辨的影响. 一般使用 HEW 和 W90 来描述角分辨. HEW 是覆盖了焦平面 50% 能量的角直径, W90 是覆盖了焦平面 90% 能量的角直径. QM 件的仿真结果如图17和图18所示. 图17为 HEW 随污染物密度的变化, 图18为 W90 随污染物密度的变化. 随着入射能量的增大角分辨随污染量变化愈发敏感.

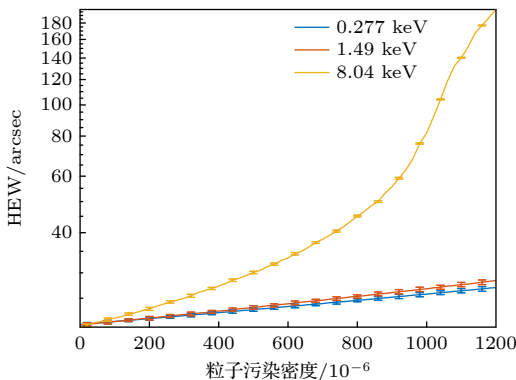


图17 QM件的HEW随污染物密度变化关系

Fig. 17. Relationship between HEW and contaminant density of the QM.

图18中 W90 和高能时的 HEW 随污染物密度变化关系有明显的转折. 这与散射光子占比有关, 散射光子主要受聚焦镜镜面的粗糙度和粒子污染物密度影响. 随着污染物密度增大, 粒子污染导致的散射光子数量增加. 以图17和图18中 8.04 keV 的黄色曲线为例, 随着粒子污染密度增大, 散射光子的占比增大. 在粒子污染密度接近 2×10^{-4} 时, 散射光子占比超过 10%, W90 的变化逐渐由外围散射光子的分布主导. 散射光子相较于焦点附近的

未散射光子分布更加弥散, 角直径的变化更明显, 使得图18中的黄色曲线斜率变大, 发生转折. 在粒子污染密度接近 6×10^{-4} 时, 散射光子占比愈发增大, 较大角度散射的光子占比也随之增大, 超过 10% 的光子散射出 PNCCD 的接收范围, PNCCD 的限制导致图18中黄色曲线的斜率在此之后降低. 在粒子污染密度接近 9×10^{-4} 时, 散射光子占比超过 50%, HEW 的变化也由散射光子主导, 使得

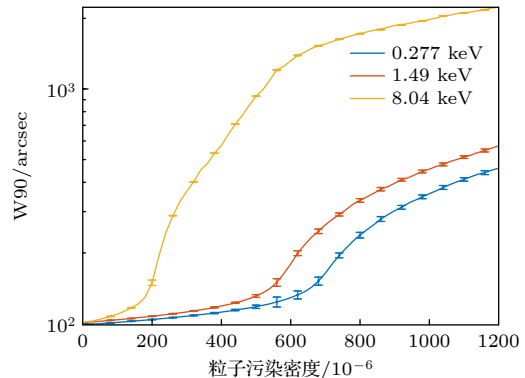


图18 QM件的W90随污染物密度变化关系

Fig. 18. Relationship between W90 and contaminant density of the QM.

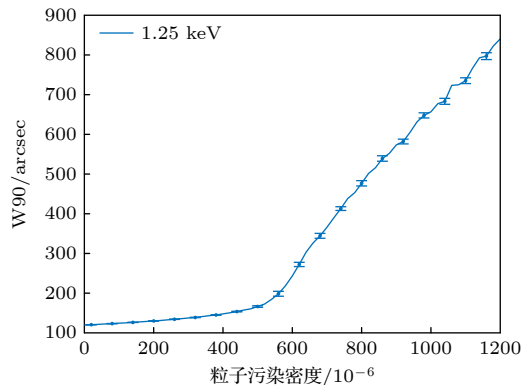
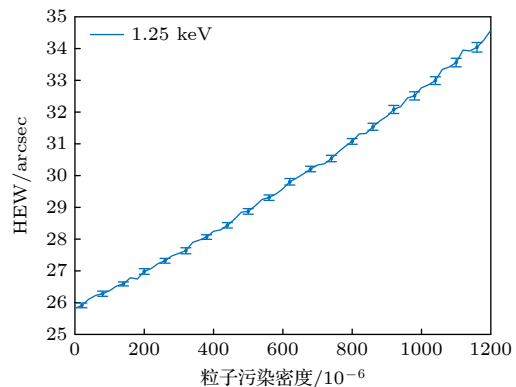


图19 STM件的角分辨随污染物密度变化关系

Fig. 19. Relationship between angle resolution and contaminant density of the STM.

图 17 中黄色曲线的斜率也开始变大. 图 17 中的误差通过蒙特卡罗法大量重复仿真得出, 由于转折点附近的变化涵盖了转折前后高斜率结果与低斜率结果的差值, 所以转折点附近误差相对较大.

图 17 的 HEW 在 8×10^{-5} 处结果与聚焦镜的实测结果符合较好, 这与 QM 件污染物含量未达到 1×10^{-4} 的实测结果相符. 但图 18 与实测结果差距较大, 因为影响 W90 的还有其它因素, 如聚焦镜本身不可逆的应力形变.

对于 STM 件, 仿真结果如图 19 所示. 在图 19 中入射的 X 射线光子能量为 1.25 keV (按 STM 件测试数据选取), 左侧的 HEW 仿真结果在 2×10^{-4} 时与实测结果相符, 与 STM 件测得的污染量有着很好的对应. 但图 19 右侧的 W90 与实测结果差距依然较大, 原因与 QM 件相同. 若能够将影响 W90 的其他因素结合数据加以建模仿真, 则能够更准确地预估聚焦镜的性能变化.

7 结 论

本文分析了粒子污染对 X 射线聚焦镜的影响. 通过对 Mie 散射理论在 X 射线入射条件下的推导, 得出污染物颗粒与入射光的相互作用关系, 二者的关系主要受颗粒物的复折射率 m 和尺度因子 α 影响. 由此关系进行基于 EP-FXT 聚焦镜的设计参数的仿真, 以及对粒子污染的反应截面和散射函数的计算. 本文选取碳单质的粒子污染散射函数, 来仿真粒子污染对 EP-FXT 聚焦镜的影响. 计算出有效面积、HEW 和 W90 这 3 个参量与粒子污染密度的关系, 由此表征粒子污染对聚焦镜性能的影响. 本文通过对 STM 件和 QM 件的同时仿真, 来将二者的测试数据充分利用. 通过对 STM 的有效面积仿真与实测结果对比, 可见有效面积的仿真结果较为准确. 在入轨时 (污染量不超过 1.1×10^{-3}), 有效面积和角分辨 (HEW) 满足 EP-FXT 的研制要求. 对于角分辨中 HEW 的仿真, 无论 QM 件还是 STM 件都能与实测结果较为符合. 可以将 HEW 与有效面积的仿真结果用于粒子污染对聚焦镜性

能影响的定量分析. 通过定量分析结果, 为 EP-FXT 的防污染要求提供理论依据.

参考文献

- [1] Wolter H 1952 *Ann. Phys.* **445** 94
- [2] Yuan W M, Zhang C, Chen Y, et al. 2018 *Sci. Sin.-Phys. Mech. As.* **48** 039502 (in Chinese) [袁为民, 张臣, 陈勇, 等 2018 中国科学: 物理 力学 天文学 **48** 039502]
- [3] Chen Y, Cui W W, Han D W, et al. 2020 *Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray*, December 13, 2020 p114445
- [4] Yang Y J, Wang Y S, Han D W, et al. 2023 *Exp. Astron.* DOI: 10.1007/s10686-022-09870-9
- [5] O'Dell S L, Elsner R F, Oosterbroek T 2010 *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray* San Diego, California, USA, July 29, 2010 p77322V
- [6] Elsner R F, Joy M K, O'Dell S L, Ramsey B D, Weisskopf M C 1994 *Advances in Multilayer and Grazing Incidence X-Ray/EUV/FUV Optics* San Diego, California, USA, November 11, 1994 p332
- [7] Zhu Y X, Lu J B, Yang Y J, et al. 2021 *Opt. Eng.* **60** 025102
- [8] Mie G 1908 *Ann. Phys.* **25** 377
- [9] Ke X J, Ma D D, Liu J N 2009 *Chin. J. Light Scatt.* **21** 104 (in Chinese) [柯熙政, 马冬冬, 刘佳妮 2009 光散射学报 **21** 104]
- [10] Ma J J, Chen J 2005 *J. Atom. Mol. Phys.* **22** 701 (in Chinese) [麻金继, 陈瑾 2005 原子与分子物理学报 **22** 701]
- [11] Bedareva T V, Sviridenkov M A, Zhuravleva T B 2014 *J. Quant. Spectrosc. Ra.* **146** 140
- [12] Su M Y 1987 *Inverse Problems in Optics* Hague, Netherlands, September 10, 1987 p112
- [13] Slane P O, McLaughlin E R, Schwartz D A, et al. 1989 *Reflective Optics II* Orlando, FL, USA, October 11, 1989 p12
- [14] Weisskopf M C, O'Dell S L, van Speybroeck L P 1996 *Multilayer and Grazing Incidence X-Ray/EUV Optics III* Denver, CO, USA, July 19, 1996 p2
- [15] Henke B L, Gullikson E M, Davis J C 1993 *Atom Data Nucl. Data* **54** 181
- [16] Aschenbach B 2005 *Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy II* San Diego, California, USA, September 8, 2005 p59000
- [17] O'Dell S L, Brissenden R J, Davis W N, et al. 2010 *Adaptive X-Ray Optics* San Diego, California, USA, October 22, 2010 p78030
- [18] Wiscombe W J 1980 *Appl. Opt.* **19** 1505
- [19] Shen J Q 1999 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology) (in Chinese) [沈建琪 1999 博士学位论文 (上海: 上海理工大学)]
- [20] Hagemann H J, Gudat W, Kunz C 1975 *J. Opt. Soc. Am. B* **65** 742
- [21] Friedrich P, Brauningner H, Budau B, et al. 2008 *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray* Marseille, France, July 15, 2008 p70112
- [22] Zheng G B, Kang T H, Chai Z Y, Yin Z H 2006 *J. Taiyuan Univ. Technol.* **3** 317 (in Chinese) [郑钢鏢, 康天合, 柴肇云, 尹志宏 2006 太原理工大学学报 **3** 317]

Particle contamination simulation of Einstein probe follow-up X-ray telescope focusing mirror

Lü Zhong-Hua¹⁾²⁾ Yang Yan-Ji¹⁾ Zhu Yu-Xuan¹⁾ Zhao Xiao-Fan¹⁾
Yang Xiong-Tao¹⁾ Chen Yong^{1)†}

¹⁾ (*Key Laboratory of Particle Astrophysics, The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

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

(Received 1 March 2023; revised manuscript received 18 April 2023)

Abstract

Particle contamination can greatly affect the performance of X-ray focusing mirror. In this paper, we analyze the influence of particle contamination on X-ray focusing mirror. The model of interaction between contaminant particles and incident light is established from Mie scattering theory in the wavelength range of X-ray. And the relationship between them is mainly influenced by the complex refractive index of the particles m and the scale factor α . Therefore, the reaction cross section and scattering function of particle contamination are calculated. Then, in order to obtain the effect of particle contamination on Einstein probe follow-up X-ray telescope (EP-FXT) focusing mirror, we carry out Monte Carlo simulation based on the design parameters of EP-FXT focusing mirror. Finally, the relationships among effective area, HEW, W90 and particle contamination density are calculated to characterize the influence of particle contamination on the performance of the focusing mirror. In this paper, structural and thermal model (STM) and qualification model (QM) are simulated simultaneously to make full use of their test data. By comparing the simulation results of STM effective area with the measured results, we find that the simulation results of STM effective area are accurate. When the EP-FXT is in orbit (the contamination amount is limited to less than 1.1×10^{-3}), the effective area and angle resolution (HEW) meet the development requirements of EP-FXT. For the simulation of HEW, both QM and STM are in good agreement with the test results. The simulation results of HEW and effective area can be used to quantitatively analyze the effect of particle contamination on the performance of the focusing mirror. These quantitative analysis results provide a theoretical basis for the contamination prevention requirements of EP-FXT.

Keywords: particle contamination, X-ray focusing mirror, Einstein probe, follow-up X-ray telescope

PACS: 07.85.Fv, 06.30.-k

DOI: 10.7498/aps.72.20230301

† Corresponding author. E-mail: gaojh@sdu.edu.cn



爱因斯坦探针后随X射线聚焦镜的粒子污染仿真

吕中华 杨彦佺 祝宇轩 赵晓帆 杨雄涛 陈勇

Particle contamination simulation of Einstein probe follow-up X-ray telescope focusing mirror

Lü Zhong-Hua Yang Yan-Ji Zhu Yu-Xuan Zhao Xiao-Fan Yang Xiong-Tao Chen Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 120701 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230301

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230301>

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

X射线聚焦望远镜光学设计

Optical design of X-ray focusing telescope

物理学报. 2019, 68(16): 160702 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190709>

EP-FXT聚焦镜真实表面状态的性能模拟方法

Simulation method of performance of X-ray focusing mirror under actual surface state used in FXT on board EP satellite

物理学报. 2022, 71(12): 120702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220017>

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>

一种快速估算聚焦型空间X射线仪器粒子本底水平的方法及应用

Method and application of fast estimating particle background level for space-based focusing X-ray instruments

物理学报. 2020, 69(15): 150701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200576>

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>

强场X射线激光物理

High field X-ray laser physics

物理学报. 2021, 70(8): 084101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210096>