

木星大气对天体 X 射线源天蝎座 X-1 的掩食消光过程研究

何心怡^{1,2} 李海涛^{1,2,3}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(埃克塞特大学 埃克塞特 EX4 4QL)

摘要 木星作为太阳系中典型气态巨行星，其大气成分承载着太阳系早期演化的重要信息。本文基于 X 射线掩星探测原理，利用天蝎座 X-1 作为辐射源，研究 X 射线在木星大气中的消光过程。通过建立一维前向辐射传输模型，结合 Photochem 生成的大气密度廓线和 XCOM 数据库中的吸收截面，计算大气透过率，并采用 XSPEC 模拟天蝎座 X-1 的辐射光谱，系统分析了透射谱、光变曲线和能谱的衰减特征。研究表明，随着光子能量从 0.1 keV 增至 500 keV，X 射线穿透深度逐渐增加，光子最低可达 160 km。对光变曲线分析表明，高能光子消光的起始和结束高度均低于低能光子；对能谱分析表明，低能光子衰减更为显著，且衰减程度随高度降低而增强。基于 NICER 探测器响应矩阵的模拟表明，增加探测模块数量可以提高光子接收数，使用 4 个类 NICER 探测模块时，可探测到光子的最低高度降至 183.5 km。本研究为我国计划于 2030 年左右发射的“天问四号”木星系探测任务的载荷设计提供理论依据，并为木星高层大气探测开辟新的技术途径。

关键词 X 射线掩星；木星大气；辐射传输模型；X 射线衰减信号表征；

中图分类号 P185.4

A Study of the Occultation and Extinction of the Celestial X-ray Source Scorpius X-1 by Jupiter's Atmosphere

HE Xinyi^{1,2} LI Haitao^{1,2,3}

1 (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

3 (Department of Physics and Astronomy, Faculty of Environment Science and Economy, University of Exeter, EX4 4QL, UK)

* 基金项目：国家自然科学基金项目（12273043）和国家留学基金委（202404910139）共同资助

投稿日期：2025 年 11 月 3 日

E-mail: lihaitao@nssc.ac.cn

Abstract As a quintessential gas giant within the solar system, Jupiter possesses an atmospheric composition that carries critical information regarding the early formation and evolution of the solar system environment. Based on the principle of X-ray occultation detection, this paper utilizes the celestial X-ray source Scorpius X-1 as the primary background radiation emitter to systematically investigate the extinction processes of X-rays as they propagate through Jupiter's atmosphere. To achieve this, we established a 1-D forward radiative transfer model. By combining atmospheric density profiles generated by the Photochem model with absorption cross-sections sourced from the XCOM database, the specific atmospheric transmittance was quantitatively calculated. Furthermore, the radiation spectrum of Scorpius X-1 was simulated using XSPEC, enabling systematic analysis of the attenuation characteristics of transmission spectra, light curves, and energy spectra. The results indicate that as the photon energy progressively increases from 0.1 keV to 500 keV, the penetration depth of X-rays gradually increases. Under these conditions, the highest-energy photons are capable of penetrating to a minimum altitude of approximately 160 km. A detailed analysis of the simulated light curves shows that both the initiation and completion altitudes of high-energy photon extinction are lower than those of low-energy photons. Concurrently, energy spectra analysis reveals that the attenuation of low-energy photons is substantially more pronounced, and the overall degree of attenuation continually strengthens as the altitude decreases. Additionally, instrumental simulations executed based on the response matrix of the NICER detector demonstrate that increasing the total number of active detection modules can effectively enhance the photon count rate. Specifically, when utilizing an array consisting of four NICER-like detection modules, the minimum altitude at which photons can be reliably detected is reduced to 183.5 km. Ultimately, the findings presented in this study provide a robust theoretical basis for the payload design of China's Tianwen-4 Jupiter system exploration mission, scheduled for launch around 2030, and successfully open up a novel technological pathway for the advanced exploration of Jupiter's upper atmosphere.

Key words X-ray occultation, Jovian atmosphere, Radiative transmission model, X-ray attenuation signal characterization

0 引言

木星作为太阳系中体积最大、自转速度最快的气态巨行星，其大气成分与动力学过程一直是行星科学研究的重点领域。木星大气主要由氢和氦组成，还包含甲烷、氨、水等微量成分^[1]。这些化学成分的分布与变化记录了太阳系早期的物质构成和演化历史，为检验和完善太阳系起源理论提供了至关重要的约束条件。

自1973年先驱者10号(Pioneer 10)^[2]首次飞掠木星实现人类对木星的首次近距离探测以来，人类对木星的探测已走过五十余年的历程，先后共实施了9次探测任务，包括7次飞掠探测以及伽利略号(Galileo)与朱诺号(Juno)的两次环绕任务^[1-4]。此外，木星冰卫星探测(JUPITER ICy moons Explorer, JUICE)任务^[5]和欧罗巴快船(Europa Clipper)任务^[6]

也已相继进入实施阶段，开启了木星探测新纪元。这些探测任务采用了多种波段的观测技术，波段范围覆盖了微波、可见光、红外、紫外波段等，不断拓展对木星大气特性的认知边界。特别是紫外波段观测为研究木星极光现象^[7, 8]和高层大气成分提供了独特窗口^[9, 10]。

紫外波段掩星探测是获取木星高层大气结构的重要方法之一。1981年Festou等人^[9]使用旅行者2号(Voyager 2)探测到的木星掩食轩辕十二(α Leo)的数据，首次获得了木星氨云顶以上330-830 km完整的大气密度和温度剖面。之后，新视野号(New Horizons)在飞跃木星时，利用木星对东咸二(χ Ophiucus)的掩星事件，通过其搭载的Alice紫外光谱仪获得了高精度紫外光谱，反演得到木星高层大气中CH₄、C₂H₂、C₂H₆的密度^[10]。

虽然紫外波段可用于探测木星高层大气，但其吸收截面受温度影响显著，导致反演结果严重依赖于初始温度假设，存在较大不确定性^[10]。相比之下，X 射线吸收截面基本不受温度影响，可在未知大气温压廓线的情况下直接、可靠地反演大气密度，并显著简化辐射传输建模过程。X 射线掩星探测(X-ray Occultation Sounding, XOS)正是基于这一优势发展起来的大气探测手段，且已在地球大气研究中得到充分验证。Determan 等人^[11]通过反演 RXTE/PCA 观测到蟹状星云 (Crab Nebula) 掩星事件和 ARGOS/USA 观测到的 Cygnus X-2 掩星事件光变曲线数据反演得到地球大气密度，结果与 TIMED/SABER 的测量结果一致，证明它是探测地球中层大气顶层和低层热层大气 (70-150 km) 的有效工具。此后，Katsuda 等人^[12]通过分析 XIS/Suzaku 和 HXIs/Hitomi 在 2005 至 2016 年间记录的 219 次蟹状星云掩星事件，成功反演获得了地球 70-200 km 高度范围大气中氮和氧总和的密度。中国首颗 X 射线天文卫星“慧眼”(Insight-HXMT)的发射为该领域带来了新的数据与机遇。Yu 等人^[13-15]基于“慧眼”卫星(Insight-HXMT)观测到的蟹状星云掩星数据，发展了贝叶斯方法来分别处理掩星光变曲线和能谱，结果与 RXTE 反演结果定性一致，证明了“慧眼”卫星具备探测地球大气密度的能力。之后，Xue 等人^[16]通过分析 115 次掩星事件，采用联合模型同时拟合多个大气层的吸收特性，从而获得 55-100 km 内大气密度更精确的估算。在此基础上，Zhang 等人^[17]通过分析无辐射源时的数据发现宇宙 X 射线背景辐射对信号的影响可以忽略，利用了 2 - 6 keV 能段的低能 X 射线数据，从而将大气探测高度提高至 130 km。除研究如何测量更准确，高度范围更大的地球大气密度外，Katsuda 等人^[18]利用“慧眼”卫星在 2022 年汤加火山爆发前后的地球掩食超新星遗迹 Cassiopeia A 的数据，反演地球大气中层和低热层密度廓线，结果可以体现由于火山爆发引起的 Lamb 波和重力波造成的大气密度廓线出现典型长度尺度为 20km (垂直) 和 1000km (水平) 的波状结构。在辐射源方面，除恒星作为 XOS 光源外，Kishimoto 等人^[19]提出了利用宇宙弥散 X 射线 (CXB) 作为辐射源对地球大气进行连续层析观测的新方法。基于该原理，团队已推进 SUIM (Soipix for observing Upper atmosphere as Iss experiment Mission) 探测计划，将探测器搭载至国际空间站，以开展为期 6 个月的在轨观测实验^[20]。

除了用于探测地球大气，该 X 射线掩星探测已被用于地球以外的行星大气研究。在火星探测中，Rahmati 等人^[21]通过分析了 MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) 探测器上的太阳高能粒子探测器 (Solar Energetic Particle, SEP) 对天蝎座 X-1 的观测数据，揭示了将 X 射线掩星数据与光变曲线模型相结合可用于探测火星大气 50-100 km 高度范围内中性密度，这部分火星大气的密度廓线对于飞行器至关重要，却是当前探测数据的空白区域。该方法也被用于对卫星进行观测，例如，Mori 等人^[22]用钱德拉 X 射线天文台观测到的土卫六 (泰坦) 凌星蟹状星云事件，推导出了泰坦大气层的厚度约为 880 km。此外，该方法也同样适用于探测系外行星，Poppenhaeger 等人^[23]指出对系外行星 HD 189733b 进行 X 射线掩星观测，其凌星深度可达 6% - 8%，远优于光学波段的 2.41%，这表明 X 射线波段对研究其高层大气结构可能更为敏感。

尽管 X 射线掩星探测技术在地球与火星大气研究中已得到验证，但将其应用于木星大气探测的研究仍属空白。当前，我国在空间探测技术方面进展显著，已成功研制可监测高层大气的 X 射线-极紫外-远紫外空间载荷^[24]。同时，计划于 2030 年左右发射的“天问四号”木星系探测任务，亦考虑将 X 射线谱仪作为其有效载荷之一^[4]。深入研究木星大气对 X 射线的消光特性和探测器探测光子的能力，不仅可为拓展 X 射线掩星法至木星探测提供理论依据，也对“天问四号”科学载荷的优化设计与观测规划具有重要的参考价值。

1 模型构建

X 射线掩星探测是一种通过分析宇宙中遥远的 X 射线点源信号穿越行星大气时的衰减，以反演大气密度廓线的被动遥感技术。该过程的前向模拟流程如图 1 所示。首先，基于 Photochem 中的一维光化学模式模拟生成木星大气的密度廓线，同时，从 XCOM 数据库中获得木星大气主要成分的 X 射线总衰减截面，以及用万有引力定律和几何规律计算使用不同曝光时间时，不同时刻探测器对应的切点高度。其次，计算大气的光学厚度和透过率，再结合用 XSPEC 模拟生成的未衰减 X 射线源光谱计算透射谱。最后，结合探测器的响应矩阵计算其探测到的光变曲线和光谱。

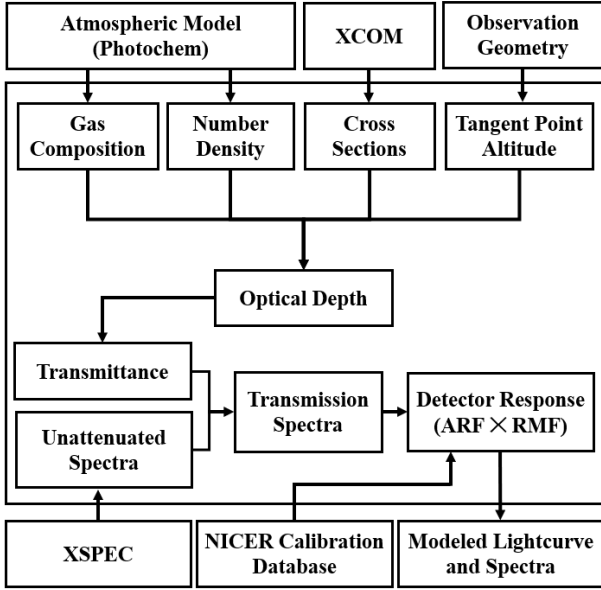


图 1 X 射线掩星探测木星大气辐射传输模型流程图

Fig. 1 Flowchart of X-ray Occultation Radiative Transfer Model for Jupiter

1.1 辐射传输模型

我们假设探测器位于与张磊等人^[25]提出的木星系内飞行方案一中环木飞行近木点高度一样的 4000 公里轨道高度的圆轨道，探测器通过 X 射线掩星得到的几何图像如图 2 所示。假设 X 射线源天蝎座 X-1 是一个点源，用比尔-朗伯定律计算经木星大气衰减后的辐射强度为：

$$I(E) = I_0(E)e^{-\tau(E)}, \quad (1)$$

式中， I_0 为未衰减光谱， τ 为光学厚度，其计算公式为：

$$\tau(E) = 2 \sum_s \int_0^\infty \sigma_s(E) n_s(z) dl, \quad (2)$$

式中， σ_s 为不同大气成分在不同能段的总衰减截面， n_s 为不同大气成分在不同高度的密度，消光路径 dl 由以下公式给出：

$$dl = d\sqrt{r^2 - (R_J + h)^2} = \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - (R_J + h)^2}}, \quad (3)$$

式中， r 为每层大气顶部到木星中心的距离， R_J 为木星半径（即 1 bar 处距离木星中心的距离 $R_J = 71492$ km^[25]）， h 为每层大气中间层到木星 1 bar 处的距离，其几何图形如图 2 所示。

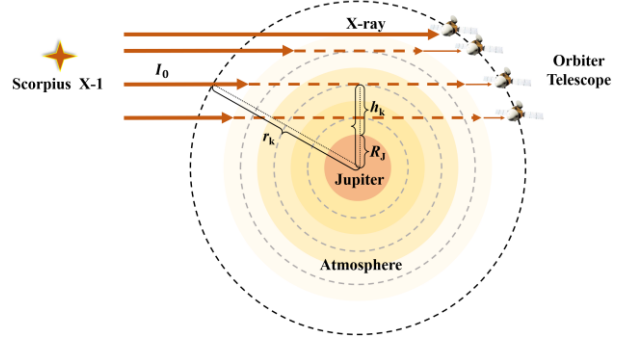


图 2 X 射线掩星观测木星大气的几何学模型及其大气层结

Fig. 2 The viewing geometry of the Jovian atmosphere observed by X-ray occultation and its atmospheric layers.

1.2 Scorpius X-1 光谱模型

天蝎座 X-1 是银河系中最亮的 Z 型源之一，是一个 X 射线双星系统，包含一颗中子星和一颗伴星，它们围绕着共同的质量中心运行。天蝎座 X-1 发出的强烈 X 射线被认为是由伴星吸积到中子星上的物质产生的。本研究使用 XSPEC^[26, 27] 计算从 0.1 keV 到 500 keV 的光谱（图 3），使用 Bradshaw 等人^[28] 拟合得到的 PL 模型，该光谱模型由幂律康普顿化分量（Power Law）、黑体辐射（Blackbody）、用于模拟反射的类黑体发射（Gaussian）以及星际和中子星吸收（PHABS）引起的分量组成。该光谱在 1.18 keV 处达最大值 84.92 photons cm⁻² s⁻¹ keV⁻¹。

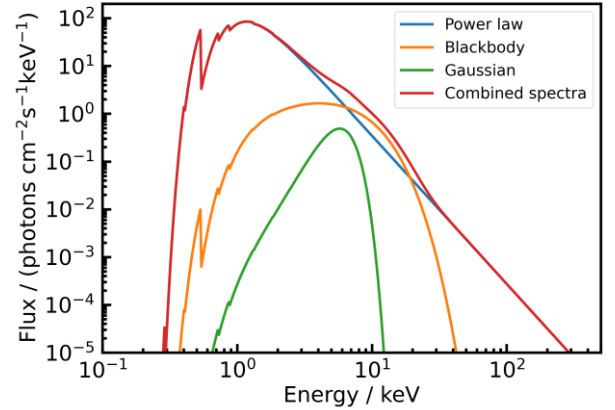


图 3 由 XSPEC 计算的天蝎座 X-1 光谱

Fig. 3 The spectrum of Scorpius X - 1 calculated by XSPEC

1.3 木星大气模型

目前可用于模拟木星大气的模型有很多，如 ExoREL^[29]、VULCAN^[30]、ARGO^[31, 32]、Photochem^[33-35] 等。基于软件的开源性以及 Photochem 在计算中在保持流体静力学平衡的同时严格遵循质量守恒，且其迎风格式进行数值求解维持了数值稳定性。本文使用 Photochem^[35] 中的一维

光化学模型和平衡化学求解器，以及用与 Tsai 等人^[30]类似的光化学设置，使用包含 C、N、H、O 的化学网络，PT 廓线和涡度扩散系数廓线如图 4 所示来计算木星大气的密度廓线。该模型的上、下边界条件^[35]如表 1 所示。计算得到的木星大气主要物质^[36]的密度廓线，结果如图 5 所示。

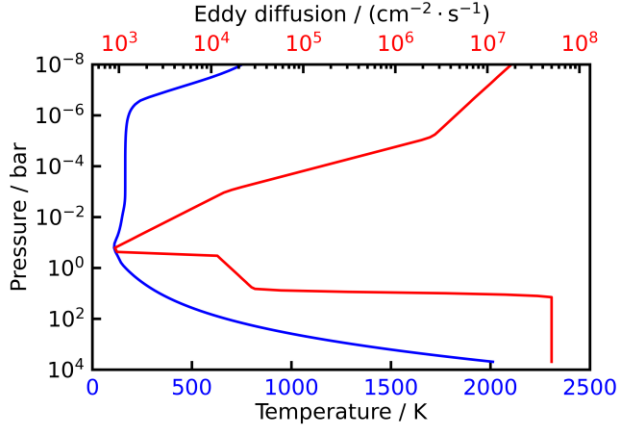


图 4 模型中使用的木星 PT 廓线和涡度扩散系数廓线

Fig. 4 The temperature, eddy diffusion profiles used for Jupiter model

表 1 模型中使用的木星的上、下边界条件

Table 1 Lower and upper boundary used for Jupiter model	
下边界条件 (1.0×10^4 bar)	
He/H	0.0785 ($0.92 \times \text{solar}$) ^[37]
C/H	1.2×10^{-3} ($4.4 \times \text{solar}$) ^[37]
O/H	2.6×10^{-4} ($0.5 \times \text{solar}$) ^[38]
N/H	2×10^{-4} ($2.9 \times \text{solar}$) ^[39]
上边界条件 (3×10^{-9} bar)	
成分	向下的通量 ($\text{molecules cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
H ₂ O	4×10^4
CO	4×10^4
CO ₂	10^4

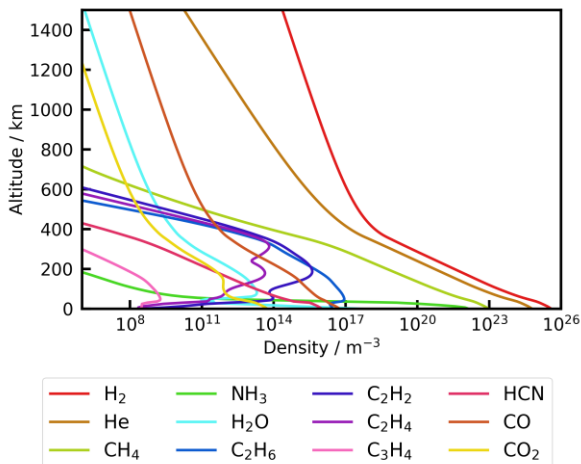


图 5 Photochem 计算得到的木星主要大气成分密度廓线

Fig. 5 The density profiles of Jovian main atmospheric components calculated by Photochem

1.4 X 射线吸收截面

从 XCOM 数据库^[40]中获得了木星大气中主要化合物和原子的 X 射线吸收截面数据。该数据库可提供 1 keV 至 100 GeV 能量范围内的光子截面，包括散射、光电吸收、电子对产生，以及总衰减系数。图 6 为木星大气主要成分的总衰减截面，可以看出，所有大气成分的 X 射线衰减截面均随入射 X 射线能量升高呈明显下降趋势，且在低能波段（能量小于 10 keV）下降速率更快。不同成分的截面在 0.1 keV 处差异显著，例如 CO₂ 的截面大于 10^9 barns / molecule，而 H₂ 截面不超过 10^5 barns / molecule。当能量超过 10 keV 后，各成分截面下降趋势逐渐趋缓并趋于平稳，且截面数值越低的物质，其达到平稳状态的能量区间越靠低能端。

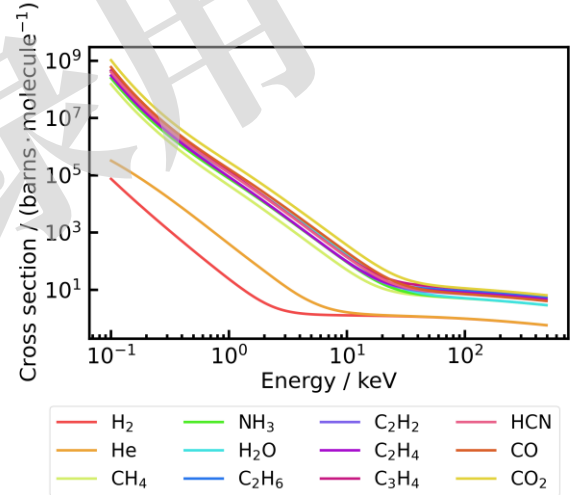


图 6 XCOM 数据库中木星主要大气成分截面数据

Fig. 6 Cross-section data of Jovian main atmospheric components in XCOM database

2 结果与讨论

2.1 木星大气的透射谱

图 7 展示了木星大气 X 射线透射率与切点高度及光子能量之间的关系，以 $e^{-0.1}$ 作为衰减开始的标志， e^{-4} 作为完全衰减的标志^[11]。从图中可以明显看出，衰减开始和结束所对应的高度随能量增加呈指数变化：能量越高，衰减开始和结束的高度越低，消光路径也越长，该变化趋势与图 6 展示的截面数据变化趋势一致。此外，X 射线波段在 0.1-500 keV 消光的最低高度可达 160 km，即 5.17×10^{-4} bar，处于木星平流层高层^[41]。

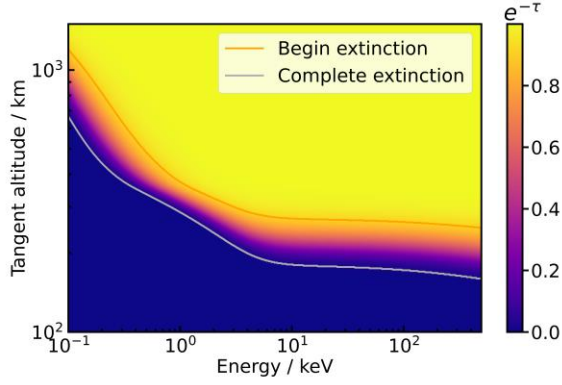


图 7 木星大气的 X 射线掩星透射率。橙色实线表示衰减开始($\tau = 0.1$), 灰色实线表示完全衰减 ($\tau = 4$)

Fig. 7 X-ray occultation transmittance of Jovian atmosphere. The orange line represents the beginning of attenuation ($\tau = 0.1$), and the gray line represents the complete extinction ($\tau = 4$)

2.2 木星掩食天蝎座 X-1 的 X 射线光变曲线

我们计算了三个不同能量范围内的光变曲线。从图 8 可以看出, 不同能量范围的消光高度存在差异: 能量越高, 由于总衰减截面越小, 消光高度也越低。因此, 与低能光子相比, 高能光子在更低的高度开始消光, 也在更低的高度消光完全, 这一趋势与 Determan 等人^[11]报告的结果一致。若以减少未消光光变曲线的 $e^{-0.1}$ 作为衰减开始的标志, 减少 e^{-4} 作为完全衰减的标志, 则 0.20–1.09 keV 光子约在 404 km 处开始消光, 至 291 km 处完全消光; 1.99–3.05 keV 光子约在 314 km 处开始消光, 至 224 km 处完全消光; 而 4.48–57.71 keV 光子约在 276 km 处开始消光, 至 185 km 处完全消光。

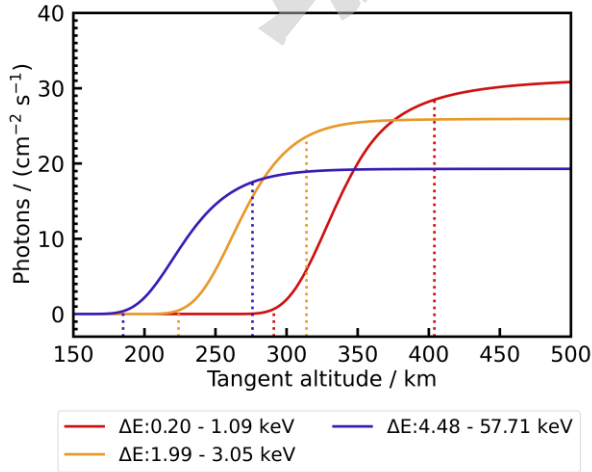


图 8 不同能量段的 X 射线掩星光变曲线。虚线表示开始 (光子计数率减少 $e^{-0.1}$) 和完全消光 (光子计数率减少 e^{-4}) 的高度。

Fig. 8 The X-ray occultation light curve of different channels. The dashed lines indicate the height of the beginning (photon count rate reduced by $e^{-0.1}$) and ending extinction (photon count rate reduced by e^{-4})

2.3 木星掩食天蝎座 X-1 的 X 射线能谱

图 9 展示了天蝎座 X-1 源在不同高度处衰减后的光子能谱以及未衰减的原始能谱。从图中可以看出, 随着高度降低, 大气密度逐渐增大, 相同高度间隔内被吸收的光子数目增多, 相邻能谱曲线之间的间隔也随之扩大。此外, 由于吸收截面随能量升高而减小, 在同样一大气层中, 能量越低的光子数目衰减越显著, 因此, 切点高度越低, 能谱的最大值越向能量增大的方向移动, 该规律与实测结果一致 [11-18]。

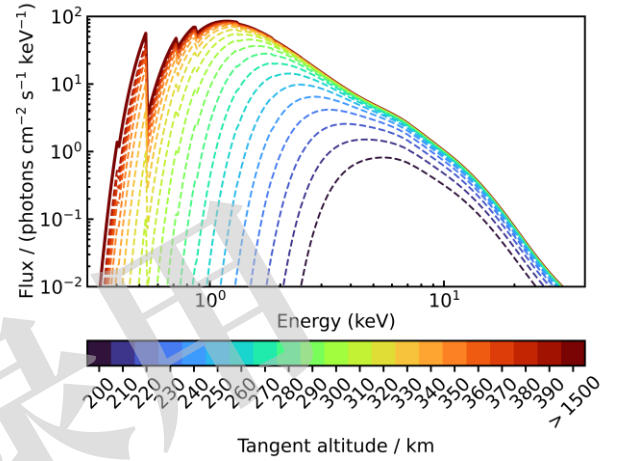


图 9 天蝎座 X-1 光子率在不同高度被木星大气衰减的能谱, 红色实线是未衰减的能谱。

Fig. 9 The energy spectra photons rate of Scorpius X - 1 attenuated by Jovian atmosphere at different tangent altitudes and the solid red line is the unattenuated energy spectrum flux

2.4 类 NICER 探测器探测模拟

为研究探测器探测 X 射线经木星大气消光后光子的能力, 我们开展了天蝎座 X-1 的 X 射线掩星探测木星大气过程的模拟研究。考虑到未来在木星轨道部署的可行性, 以及探测器性能, 模拟探测器实际接收到的信号, 我们选用中子星内部成分探测器 (Neutron Star Interior Composition Explorer, NICER^[42]) 的响应矩阵作为观测模拟的输入条件。NICER 是国际空间站 (International Space Station, ISS) 上的有效载荷, 致力于在 0.2 – 12 keV 开展高分辨率光谱观测, 以研究中子星的能谱特性、动力学行为与内部结构, 能够通过高精度时间标记与单光子光谱技术捕捉快速的亮度与能谱变化, 也已用于研究天蝎座 X-1 的准周期振荡^[43]。

我们将 NICER 的辅助响应文件 (Ancillary Response File, ARF) 与重分布矩阵文件

(Redistribution Matrix File, RMF) (图 10) 进行卷积, 生成了响应矩阵(Response Matrix, RSP), 之后, 将衰减能谱与 RSP 进一步卷积, 最终得到模拟的探测能谱。

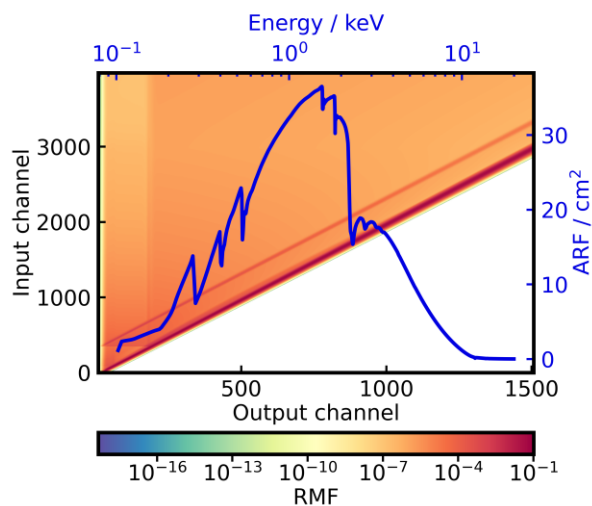


图 10 NICER 的一个模块的 ARF (蓝色实线) 和 RMF

Fig. 10 The ARF (the solid blue line) and RMF of one module of NICER

2.4.1 类 NICER 探测器探测到的光变曲线模拟

图 11 展示了利用不同数量模块 (1 至 4 个) 及

使用不同通道与曝光时间设置下, 类 NICER 探测木星掩星天蝎座 X-1 光变曲线的模拟结果。光变曲线的每个点即为模拟连续曝光下探测得到的数据点, 可以看出曝光时间越短, 数据点越密集, 高度分辨率越高。我们定义当光子计数相较于未衰减光变曲线低于 1 时的对应高度为 H_1 , 即能探测到大气吸收光子的最高高度, 光子数等于 1 时的高度为 H_2 , 即可探测到单个光子的最低高度, 并将 H_1 至 H_2 之间的高度范围定义为光子计数高度区。图中虚线分别对应不同探测条件下的 H_1 与 H_2 高度。模拟结果表明, 在仅使用一个模块的情况下, 选用 NICER 输出通道 101 - 110 (1.00 - 1.10 keV) 并设置曝光时间为 0.1 s, 光子计数高度区范围为 288.04 - 402.58 km 的大气; 使用通道 251 - 260 (2.50 - 2.60 keV) 与 0.5 s 曝光时间, 光子计数高度区范围为 237.14 - 319.68 km; 而使用通道 751 - 1501 (7.50 - 15.01 keV) 与 1.0 s 曝光时间, 则光子计数高度区范围为 205.16 - 268.99 km。对比四组结果可看出, 探测到的光子数与所用模块数量成正比。模块数量的增加不仅提高了信噪比, 也对光子计数高度区范围产生影响, 使 H_2 的变化小于 13 km, 而 H_1 的变化可达 75 km。

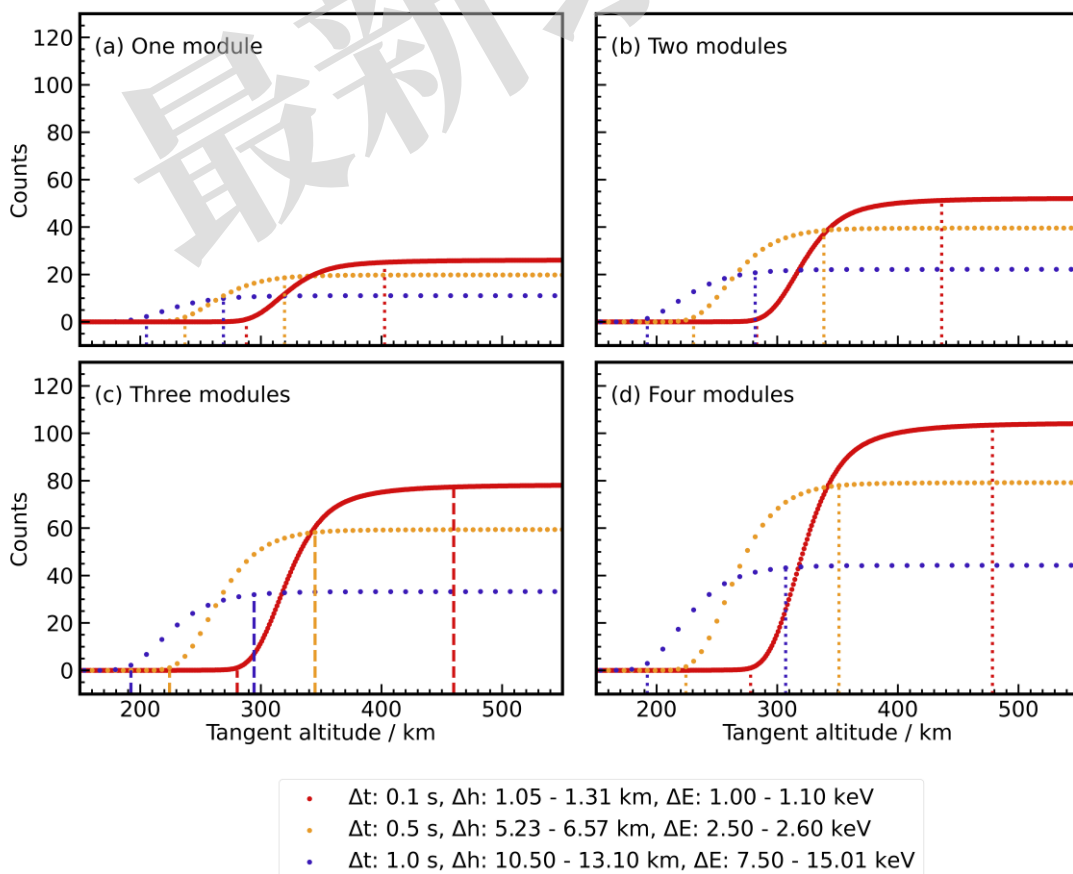


图 11 (a) - (d) 分别为使用 1 至 4 个 NICER 模块时, 针对不同通道与曝光时间所模拟的探测到的天蝎座 X-1 光变曲线。图中虚线为以 1 个光子计数为阈值所确定的消光开始与结束的高度。

Fig. 11 Simulation of extinction light curves of different channels and exposure times of Scorpius X-1, detected by (a) one, (b) two, (c) three and (d) four NICER modules. The dashed lines indicate the height of the beginning and ending extinction, with 1 counts as the threshold.

2.4.2 类 NICER 探测器探测到的能谱模拟

图 12 展示了模拟采用不同数量类 NICER 探测模块（一至四个）在其原始通道下探测到的能谱。图中顶部的淡黄色实线为未衰减的原始能谱, 其余实线为不同切点高度处经大气衰减后的能谱。切点高度定义为探测器在 1500 km 轨道上, 自图 2 所示顶端位置开始、曝光时间为 1 s 时所对应的切点位置。黑色虚线是计数率为 $1 \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ 的参考水平线。由于模型中引入了探测器响应矩阵, 模拟能谱的形态与图 9 存在差异, 整体谱形更为平滑。通过对比四组子图可知, 模块数量的增加显著提高了各高度处的计数率。

为进一步精确量化模块数量对可探测单个光子的最低高度的影响, 图 13 给出了计数率等于 $1 \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ 时所对应的高度值, 精度为 0.1 km。结果显示, 在单模块配置下, 计数率超过该阈值的最低高度为 191.6 km, 随着模块数量增至二、三和四个, 该阈值高度依次降低至 187.2 km、185.0 km 和 183.5 km。

2.4.3 类 NICER 探测器探测的信噪比估算

在实际的深空探测任务中, 掩星观测会受到宇宙 X 射线背景以及仪器本底噪声的干扰。为了更全面地评估深层大气的探测极限并指导未来的载荷设计, 本节对采用 4 个类 NICER 探测模块的信噪比进行了定量估算。

在建立噪声基准时, 本研究引入了 NICER 在轨实测本底数据。在地球轨道中, NICER 在 0.4 - 12 keV 能段内的背景计数率中位数为 $0.87 \text{ counts s}^{-1}$ ^[44], 该数值为经标准化处理, 50 个焦平面模块协同探测的总计数水平。这一本底基准提取于对 7 个无点源参考天区的长期观测, 综合了宇宙 X 射线背景及探测器自身的电子学噪声。若等比例缩减至本文模拟的 4 个类 NICER 探测模块, 其在理想空间环境下的噪声 (B) 约为 $0.07 \text{ counts s}^{-1}$ 。相比之下, 天蝎座 X-1 作为极高通量的连续 X 射线源, 4 个探测模块对其未衰减的初始接收计数率 S_0 约为 $9280 \text{ counts s}^{-1}$ ^[44]。在 1 s 的积分时间内, 依据包含光子噪声的信噪比公式为:

$$\text{SNR} = \frac{S}{\sqrt{S+B}}, \quad (4)$$

式中, $S = S_0 e^{-\tau}$ 。当 X 射线未进入大气层 ($e^{-\tau} = 1$) 时, 强源信号占据绝对主导, 本底噪声几乎可以忽略, SNR 可达约 96; 当 X 射线穿过中高层大气至透射过率减半 ($e^{-\tau} = 0.5$) 时, 有效信号衰减至 $4640 \text{ counts s}^{-1}$, 此时 SNR 约为 67; 而当掩星视线深入深层大气 (如 $\tau = 4$), 信号急剧衰减至约 $170 \text{ counts s}^{-1}$, SNR 降至约 13。

这一估算结果表明, 天蝎座 X-1 的极高通量特性保障探测器在中高层大气掩星过渡区获得较高的信噪比, 但随着探测高度降低 SNR 会随之降低。

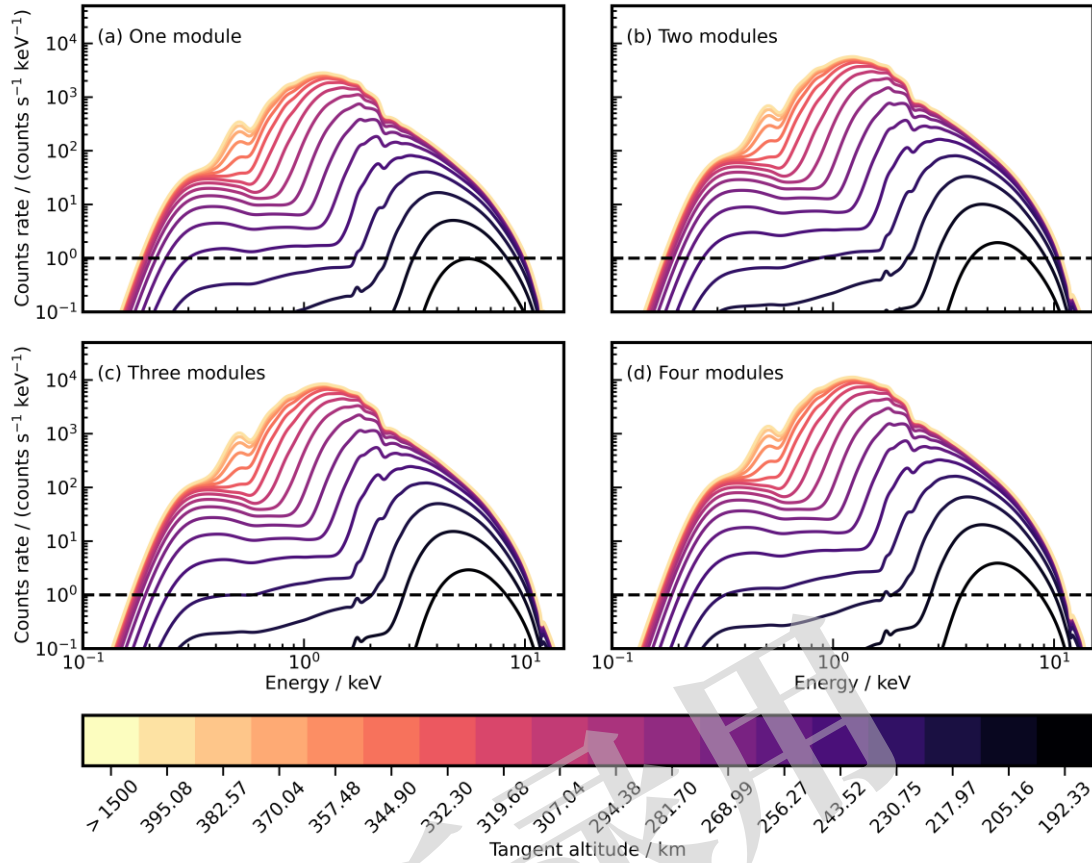


图 12 (a) 单模块、(b) 双模块、(c) 三模块及 (d) 四模块 NICER 探测天蝎座 X-1 时，各输出通道的衰减与未衰减能谱计数模拟。黑色虚线表示计数率为 $1 \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ 的阈值

Fig. 12 Simulation of attenuated and unattenuated energy spectra counts of Scorpius X-1, detected by (a) one, (b) two, (c) three and (d) four NICER modules on every output channels. The black dotted lines represent the counts rate equal to $1 \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$.

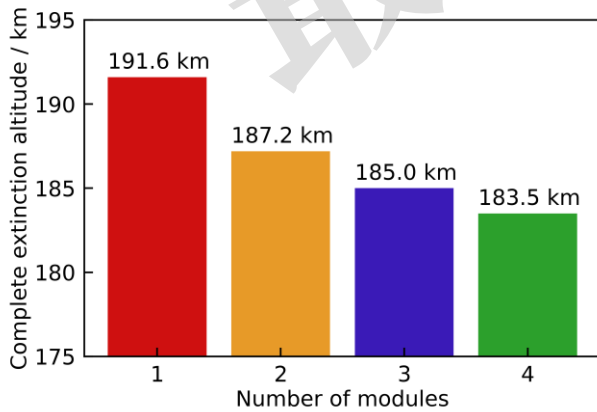


图 13 在不同模块数量下，最大计数率大于 $1 \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ 时的可探测光子最低高度

Fig. 13 The minimum detectable altitude of photons when the maximum count rate is greater than $1 \text{ counts s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ under different numbers of modules.

3 结论与展望

为研究 X 射线掩星探测木星大气的可行性，首

先研究了木星大气 X 射线波段的透过率，用 Photochem 模拟生成的木星大气密度廓线结合 XCOM 数据库得到的截面数据，以透过率等于 e^{-4} 作为判断完全消光的阈值，则 0-500 keV 能段的光子最低能到达 160 km。其次，结合使用 XSPEC 生成的天蝎座 X-1 光谱构建辐射传输模型，模拟生成光变曲线和能谱。对于光变曲线，与具有较低能量的光子相比，具有较高能量的光子开始和结束消光的高度更低；对于能谱，不同能量的光子在相同高度处经历不同程度的大气衰减，能量越低的光子衰减越快，并且随着高度的降低，大气密度变大，光子穿过相同高度，衰减增加。最后，模拟在木星掩食天蝎座 X-1 时用不同数量的类 NICER 探测器探测到的光变曲线和能谱，结果表明增加探测器模块的数量会使探测到的光子数量成倍数增加，能探测到光子的最低高度降低；对于探测光变曲线，使用四个探测模块，利用通道 751 - 1501 (7.50 - 15.01 keV) 并曝光 1.0 s，能探测到光子的最低高度为 192.33 km；

对于能谱, 使用 4 个探测模块, 最低能探测到光子的高度为 183.5 km。

需要指出的是, 本文在模拟时存在以下局限性。

首先, 在模拟木星大气时使用的是一维大气模型, 且假设木星大气是干净无云的, 而木星大气实际上存在显著的非均匀性, 包括多层次的云层结构(如氨冰云、硫化铵云、水冰云)、气溶胶层以及剧烈的动力学过程(如带状急流、涡旋、重力波)。根据 Yates 等人^[45]对木星高层大气环流模型的研究, 忽略三维动力学效应会导致对高纬度区域最高温度的估计产生高达约 200 K 的偏差, 且三维模型中极区向上的垂直物质输送速度可达二维假设的约 2.75 倍。这种强烈的非对称物质与热量输送会显著改变局地大气的密度廓线, 进而给透射谱的模拟引入不可忽视的误差量级。未来在构建三维辐射传输模型时, 必须克服几个关键的物理与计算难点: 一是极高的计算成本, 将高精度的光线追踪算法与三维大气模型进行完全自洽耦合, 在目前的计算开销上极其昂贵。二是需要处理木星极强的空间非对称性。木星的实际磁场相对于自转轴倾斜且结构极为复杂, 其高纬度区域的相互作用在地方时和半球之间均表现出高度的不对称, 这要求未来的三维射线传输模型必须具备处理非球对称几何与瞬态局地扰动的核心能力。

其次, 模拟时假设探测器轨道平面与天蝎座 X-1、木星、探测器三者形成的平面重合, 而实际观测中两个平面之间可能存在夹角。

再者, 本文只是在理论上预测使用 X 射线掩星探测木星大气时能接收到光子的最低高度, 未考虑噪声等因素的影响。

在未来的研究中, 我们将进一步考虑木星云层及大气的非均匀性, 构建三维辐射传输模型与更真实的轨道演化模型。此外, 还将引入更为复杂的噪声机制, 并通过反演大气密度廓线, 全面验证 X 射线掩星探测木星大气的实际效能。

本研究聚焦于单次掩星事件的前向模拟与探测器硬件性能的提升。而在实际任务规划中, 除了增加探测模块数量以提升单次观测的信噪比之外, 对多次掩星观测数据进行叠加与联合分析, 是一项无需硬件升级即可显著提升数据质量与结果统计显著性的关键方法。通过对各独立事件的光变曲线或能谱进行时间对齐与数据叠加, 不仅可以有效压制背景噪声, 还能进一步区分大气层的季节性变化与短期扰动, 从而获得更高置信度的垂直廓线^[16]。因此,

在任务设计中预先考虑多次掩星观测的轨道机会, 并进行长期、系统的数据积累与联合反演分析, 是以软件和策略创新挖掘硬件潜力的重要途径, 有望大幅提升科学回报。

参考文献

- [1] SONG Xinyi, YANG Jun, WEI Yong. A look-back to the 50-year exploration of Jupiter's atmosphere[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2025, **56**(1): 67-82 (宋心仪, 杨军, 魏勇. 岁星四纪——回望木星大气探测 50 年[J]. *地球与行星物理论评*(中英文), 2025, **56**(1): 67-82)
- [2] HALL C F. Pioneer 10 and pioneer 11[J]. *Science*, 1975, **188**(4187): 445-446
- [3] WEI Qiang, HU Yongyun. Spacecraft missions to Jupiter[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, **42**(4): 890-901 (魏强, 胡永云. 木星大气探测综述[J]. *大气科学*, 2018, **42**(4): 890-901)
- [4] ZOU Xin, PENG Jing, MIAO Yuanming. Research and prospect of scientific exploration for Jovian system[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, **43**(6): 1-10 (邹昕, 彭兢, 缪远明. 木星系科学探测研究与展望[J]. *中国空间科学技术*, 2023, **43**(6): 1-10)
- [5] GRASSET O, DOUGHERTY M K, COUSTENIS A, et al. Jupiter ICy moons Explorer (JUICE): an ESA mission to orbit Ganymede and to characterise the Jupiter system[J]. *Planetary and Space Science*, 2013, **78**: 1-21
- [6] PAPPALARDO R T, BURATTI B J, KORTH H, et al. Science overview of the Europa clipper mission[J]. *Space Science Reviews*, 2024, **220**(4): 40
- [7] PRYOR W R, STEWART A I F, ESPOSITO L W, et al. Cassini UVIS observations of Jupiter's auroral variability[J]. *Icarus*, 2005, **178**(2): 312-326
- [8] GILES R S, GREATHOUSE T K, EBERT R W, et al. Jupiter's UV auroral response to a magnetospheric compression event[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2025, **130**(6): e2025JE009012
- [9] FESTOU M C, ATREYA S K, DONAHUE T M, et al. Composition and thermal profiles of the Jovian upper atmosphere determined by the Voyager Ultraviolet Stellar Occultation Experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1981, **86**(A7): 5715-5725
- [10] GREATHOUSE T K, GLADSTONE G R, MOSES J I, et al. New Horizons Alice ultraviolet observations of a stellar

- occultation by Jupiter's atmosphere[J]. *Icarus*, 2010, **208**(1): 293-305
- [11] DETERMAN J R, BUDZIEN S A, KOWALSKI M P, *et al.* Measuring atmospheric density with X-ray occultation sounding[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A6): A06323
- [12] KATSUDA S, FUJIWARA H, ISHISAKI Y, *et al.* New measurement of the vertical atmospheric density profile from occultations of the crab nebula with X-ray astronomy satellites Suzaku and Hitomi[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(4): e2020JA028886
- [13] YU D C, LI H T, LI B Q, *et al.* New method for Earth neutral atmospheric density retrieval based on energy spectrum fitting during occultation with LE/Insight-HXMT[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(9): 3426-3434
- [14] YU D C, LI H T, LI B Q, *et al.* Measurement of the vertical atmospheric density profile from the X-ray Earth occultation of the Crab Nebula with Insight-HXMT[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, **15**(10): 3141-3159
- [15] YU Daochun, LI Haitao, LI Baoquan, *et al.* Methods of planetary atmospheric density retrieval based on X-ray occultation[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 661-669 (余道淳, 李海涛, 李保权, 等. 基于 X 射线掩星探测反演行星大气密度[J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(4): 661-669)
- [16] XUE W C, LI X B, XIONG S L, *et al.* Neutral atmospheric density measurement using insight-HXMT data by the earth occultation technique[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2023, **264**(1): 5
- [17] ZHANG H H, XUE W C, LI X B, *et al.* Measurement of neutral atmosphere density during the years of increasing solar activity using insight-HXMT data with the earth occultation technique[J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, **988**(2): 233
- [18] KATSUDA S, SHINAGAWA H, FUJIWARA H, *et al.* X-raying neutral density disturbances in the mesosphere and lower thermosphere induced by the 2022 Hunga-Tonga volcano eruption-explosion[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(20): e2024GL112025
- [19] KISHIMOTO T, NOBUKAWA K K, TAKEDA A, *et al.* Feasibility study of upper atmosphere density measurement on the ISS by observations of the CXB transmitted through the Earth rim[C]//Proceedings of SPIE 13093, Space Telescopes and Instrumentation 2024: Ultraviolet to Gamma Ray. Yokohama: SPIE, 2024: 130935J
- [20] NOBUKAWA K K, TAKEDA A, KATSUDA S, *et al.* SUIM project: measuring the upper atmosphere from the ISS by observations of the CXB transmitted through the Earth rim[C]//Proceedings of SPIE 13093, Space Telescopes and Instrumentation 2024: Ultraviolet to Gamma Ray. Yokohama: SPIE, 2024: 130932G
- [21] RAHMATI A, LARSON D E, CRAVENS T E, *et al.* MAVEN SEP observations of Scorpius X-1 X-rays at Mars: a midatmosphere occultation analysis technique[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(21): e2020GL088927
- [22] MORI K, TSUNEMI H, KATAYAMA H, *et al.* An X-ray measurement of Titan's atmospheric extent from its transit of the Crab Nebula[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **607**(2): 1065-1069
- [23] POPPENHAEGER K, SCHMITT J H M M, WOLK S J. Transit observations of the hot Jupiter HD 189733b at X-ray wavelengths[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **773**(1): 62
- [24] WANG Xiaodong, GONG Bowen, WANG Peng, *et al.* Space optical technology in X-ray, extreme ultraviolet, and far ultraviolet regions and its applications (Invited)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, **44**(24): 2400002 (王孝东, 龚博文, 王彭, 等. 空间 X 射线、极紫外、远紫外波段光学技术及应用(特邀)[J]. *光学学报*, 2024, **44**(24): 2400002)
- [25] ZHANG Lei, TIAN Baiyi, ZHOU Wenyan, *et al.* Research on Jovian system tour trajectory design[J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, **27**(1): 31-36 (张磊, 田百义, 周文艳, 等. 木星系多目标探测轨道设计研究[J]. *航天器工程*, 2018, **27**(1): 31-36)
- [26] ARNAUD K A. XSPEC: the first ten years[C]//Astronomical Data Analysis Software and Systems V. Charlottesville: Astronomical Society of the Pacific, 1996: 17
- [27] DORMAN B, ARNAUD K A, GORDON C A. XSPEC12: object-oriented X-ray analysis[C]//AAS/High Energy Astrophysics Division #7. Mont Tremblant: American Astronomical Society, 2003: 641
- [28] BRADSHAW C F, GELDZAHLE B J, FOMALONT E B. The X-ray spectral changes of Scorpius X-1[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, **592**(1): 486-497
- [29] HU R Y. Photochemistry and spectral characterization of temperate and gas-rich exoplanets[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **921**(1): 27
- [30] TSAI S M, MALIK M, KITZMANN D, *et al.* A comparative study of atmospheric chemistry with VULCAN[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **923**(2): 264

- [31] RIMMER P B, HELLING C. A chemical kinetics network for lightning and life in planetary atmospheres[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2016, **224**(1): 9
- [32] KNÍŽEK A, RIMMER P B, FERUS M. A full-atmosphere model of Jupiter[J]. *Icarus*, 2026, **444**: 116806
- [33] WOGAN N F, CATLING D C, ZAHNLE K J, *et al.* Origin-of-life molecules in the atmosphere after big impacts on the early Earth[J]. *The Planetary Science Journal*, 2023, **4**(9): 169
- [34] WOGAN N F, BATALHA N E, ZAHNLE K J, *et al.* JWST observations of K2-18b can be explained by a gas-rich mini-Neptune with no habitable surface[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, **963**(1): L7
- [35] WOGAN N F, BATALHA N E, ZAHNLE K, *et al.* The open-source Photochem code: a general chemical and climate model for interpreting (Exo)planet observations[J]. *The Planetary Science Journal*, 2025, **6**(11): 256
- [36] SCHAEFER L, FEGLEY JR B. Chemistry and composition of planetary atmospheres[M]//ZAIKOWSKI L, FRIEDRICH J M. Chemical Evolution across Space & Time. Washington: American Chemical Society, 2008: 187-207
- [37] ATREYA S K, HOFSTADTER M H, IN J H, *et al.* Deep atmosphere composition, structure, origin, and exploration, with particular focus on critical *in situ* science at the icy giants[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(1): 18
- [38] CAVALIÉ T, LUNINE J, MOUSIS O. A subsolar oxygen abundance or a radiative region deep in Jupiter revealed by thermochemical modelling[J]. *Nature Astronomy*, 2023, **7**(6): 678-683
- [39] MOECKEL C, DE PATER I, DEBOER D. Ammonia abundance derived from Juno MWR and VLA observations of Jupiter[J]. *The Planetary Science Journal*, 2023, **4**(2): 25
- [40] BERGER M J, HUBBELL J H. XCOM: Photon Cross Sections on A Personal Computer[R]. Washington: National Bureau of Standards, 1987
- [41] ELKINS-TANTON L T. Jupiter and Saturn[M]. New York: Infobase Publishing, 2006
- [42] GENDREAU K C, ARZOUMANIAN Z, ADKINS P W, *et al.* The neutron star interior composition explorer (NICER): design and development[C]//Proceedings of SPIE 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray. Edinburgh: SPIE, 2016: 99051H
- [43] LÓPEZ-MIRALLES J, MOTTA S E, MILLER-JONES J C A, *et al.* The NICER view of Scorpius X-1[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, **701**: A189
- [44] REMILLARD R A, LOEWENSTEIN M, STEINER J F, *et al.* An empirical background model for the NICER X-ray timing instrument[J]. *The Astronomical Journal*, 2022, **163**(3): 130
- [45] YATES J N, RAY L C, ACHILLEOS N, *et al.* Magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling at Jupiter using a three-dimensional atmospheric general circulation model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(1): e2019JA026792

作者简介



何心怡（第一作者）女，2001年11月出生于重庆市，中国科学院国家空间科学中心硕士研究生，主要研究方向为行星大气探测与系外行星搜寻。

E-mail:

hexinyi23@mailsucas.ac.cn



李海涛（通信作者）男，1982年9月出生于山东省济宁市，现为中国科学院国家空间科学中心副研究员，主要研究方向为（系外）行星探测与物理。

E-mail: lihaitao@nssc.ac.cn