爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的X射线宇宙

袁为民^{1,2*}, 张臣^{1,2}, 陈勇³, 孙胜利⁴, 张永合⁵, 崔伟⁶, 凌志兴^{1,2}, 黄茂海^{1,2}, 赵冬华¹, 王文昕¹, 袁予雷¹, 刘柱¹, 潘海武¹, 蔡洪波¹, 邓劲松¹, 贾振卿¹, 金驰川¹, 孙惠¹, 胡海波¹, 刘飞飞¹, 张墨¹, 宋黎明³, 卢方军³, 贾淑梅³, 李承奎³, 赵海升³, 葛明玉³, 张娟³, 崔苇苇³, 王于仁³, 王娟³, 孙小进⁴, 金戈⁷, 黎龙辉⁷, 陈凡胜⁴, 蔡志鸣⁵, 郭彤⁵, 刘国华⁵, 刘华秋⁵, 冯骅⁶, 张双南³, 张冰^{8,9}, 戴子高¹⁰, 吴雪峰¹¹, 苟利军^{1,2}

1. 中国科学院国家天文台, 中国科学院空间天文与技术重点实验室, 北京 100012;
2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;
3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
4. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
5. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;
6. 清华大学天体物理中心, 北京 100084;
7. 北方夜视技术股份有限公司, 南京 211106;
8. Department of Physics and Astronomy, University of Nevada, NV 89154, USA;
9. 北京大学科维理天文与天体物理研究所和天文系, 北京 100871;
10. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210093;
11. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034

*联系人, E-mail: wmy@nao.cas.cn

收稿日期: 2017-10-27; 接受日期: 2018-01-04; 网络发表日期: 2018-01-26

中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA15052100, XDB23040000)资助项目

摘要 爱因斯坦探针(Einstein Probe, EP)是一颗面向时域天文学的、发现型的X射线天文探测卫星, 是中国科学院空间科学战略性先导专项十三五规划的空间科学卫星系列任务之一。展望未来十年, 时域天文学将进入一个前所未有的、多波段和多信使的大视场监测的黄金时代。在软X射线窗口, 灵敏且快速的全天监测为我们提供了一个难得的科学机遇。EP卫星将在这一能段窗口开展时域巡天监测, 旨在发现和探索宇宙中的X射线暂现源和爆发天体, 并发布预警以引导其他天文设备进行后随跟踪观测。EP的科学载荷包括一台宽视场软X射线监视器(3600平方度, 0.5–4 keV)和一台后随观测X射线望远镜(0.3–8 keV)。卫星具有快速机动反应能力以及暂现源警报的快速下传功能。由于采用了新颖的微孔龙虾眼X射线聚焦成像技术, 其探测灵敏度和空间分辨率比目前在轨运行设备提高了1个数量级, 将能监测更远、更大的宇宙空间范围。预期EP将在以下三方面做出贡献: 高能暂现天体的系统性巡天监测, 发现隐身的沉寂黑洞并测绘宇宙黑洞的分布、研究其形成演化和物质吸积过程, 搜寻来自引力波事件的X射线信号并精确定位等。此外, EP的探测目标还将包括从中子星、白矮星、超新星、宇宙早期伽玛暴、X射线闪到恒星耀发等众多的天体和现象, 涉及广泛的天体物理学分支。卫星计划于2022年底左右发射。运行寿命

引用格式: 袁为民, 张臣, 陈勇, 等. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的X射线宇宙. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039502

Yuan W M, Zhang C, Chen Y, et al. Einstein Probe: Exploring the ever-changing X-ray Universe (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 039502, doi: [10.1360/SSPMA2017-00297](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00297)

为3年, 目标5年.

关键词 X射线: 空间科学, X射线: 时域天文学, 空间科学卫星: 爱因斯坦探针

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

1 学科背景、研究现状和发展趋势

宇宙远非宁静的, 而是充满了各种剧烈的爆发和变化. 天体辐射的变化主要表现为两类: 一类是暂现和爆发源, 另一类是天体的持续辐射的变化. 已知暂现源和天体光变的时标跨越了很宽的范围, 从秒以内到年的量级或更长. 暂现源和天体的光变携带了关于天体本质、演化及其物理过程的丰富的信息. 时域天文学通过观测辐射的变化来研究宇宙和天体. 它与成像和光谱观测一起, 构成了人类认知宇宙的三大基本电磁波观测方法. 时域天文学的发展极大地丰富了人类对宇宙及其基本物理规律的探索和认知. 通过天体时变观测获得的天文学重要发现包括: 脉冲星(中子星)的发现(1974年诺贝尔奖), 通过探测大样本Ia型超新星观测发现了宇宙加速膨胀、促成了暗能量概念的提出(2011年诺贝尔奖), 宇宙最强的爆发现象伽玛射线暴的发现和认知, 等等.

20世纪天文学的巨大成就就是在多波段上描绘宇宙的全景图像. 进入21世纪, 天文学研究重点正在转向构成这些宇宙图像的天体如何随时间变化. 时域天文学正在成为天文学最新发展潮流. 美国“天文和天体物理十年规划(2012–2021)”将时域天文学列为孕育着发现机遇的5个前沿领域之一^[1].

作为时域天文学的重要研究领域, 暂现和剧烈爆发天体是宇宙中壮观而神秘的自然现象, 也最容易引起人们的好奇心. 它们主要源自两类天体物理过程. 一是天体自身的突变过程, 如恒星的塌缩(黑洞和中子星的形成)、致密星体(黑洞、中子星)之间的碰撞和并合. 另一类产生于极端物理条件和环境, 如黑洞和中子星附近的超强引力场、超强磁场等. 这些“宇宙实验室”所提供地面无法实现的极端物理环境和条件. 某些

类型(如伽玛暴)在爆发时产生的辐射如此之强, 以至于在极为遥远(早期)的宇宙也可以被探测到. 因而对早期宇宙、恒星、致密天体和星系的形成演化有着重要的研究意义. 宇宙暂现和爆发天体丰富多样, 因此该领域不断有新的天文发现产生. 例如, 美国的伽玛暴卫星Swift (2004–至今)的科学影响力多次位居美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)天文空间项目的前列. 暂现和爆发天体容易吸引公众的好奇心, 该领域的天文发现通常会产生广泛的社会影响.

由于暂现和爆发天体是突发性事件, 在时间和空间上都不可预测. 它们的发现需要具有较大瞬时视场的望远镜, 并开展较高的采样频率的监测. 而常规的天文望远镜因为视场较小而不适用于大视场监测. 因此, 在时域天文中需要建造大视场的所谓的“全天监视器”(All-Sky Monitor, ASM). “全天、全时、更远”一直是时域天文观测设备的终极追求. 美国“天文和天体物理十年规划(2012–2021)”在地面设备中首推的大口径全景巡天望远镜(Large Synoptic Survey Telescope, LSST), 实际上就是一个光学波段的大视场监视器. 到2020年左右, 随着以LSST, PTF和Pan-STARRS(光学), VISTA(红外), LOFAR和SKA(射电), SVOM(硬X射线和伽玛射线), CTA(甚高能)等为代表的一批地面和空间大视场观测设备相继投入使用, 时域天文学将步入一个多波段联合开展大视场监测的时代.

更为激动人心的是, 这一时期也将见证引力波天文学和多信使天文学的开创之初. 2015年激光干涉引力波探测器A-LIGO和A-VIRGO已经实现了引力波信号的直接探测^[1,2], 开启了探索宇宙的一个崭新的窗口. 随着最新的双中子星并合引力波及其电磁对应体的探测^[3], 天文学进入了一个多信使的时代^[3]. 到2020年左

1) “New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics”, 2010 Decadal Survey in Astronomy and Astrophysics, National Research Council, The National Academies Press, USA

右, A-LIGO和A-VIRGO将完成升级、其他几台在建探测器也将投入运行, 预期将探测到更多的引力波事件. 此外, 中微子探测器(如IceCube)也将持续监视大范围天空的中微子爆发事件. 人类对宇宙的监测将首次突破电磁波的范畴, 形成包括引力波以及中微子等其他信使的“多信使”立体监测的新局面. 时域天文学将迎来一个黄金时代, 有望获得重要的科学发现.

X射线是探索宇宙的重要窗口. 从X射线天文学诞生起, 天体的X射线时变监测一直是时域天文学的活跃领域. 由于涉及的物理过程能量巨大, 典型的暂现和剧烈变化天体的辐射的峰值在高频电磁波段——X射线和伽玛射线, 如超新星、伽玛暴、黑洞X射线双星(中子星或恒星级黑洞)、活动星系核(超大质量黑洞)等. 由于受地球大气的吸收作用, 来自天体的X射线只能被在几百公里高度轨道上的探测器观测. X射线天文学一直是空间科学的主力学科领域之一.

目前对高能暂现源和爆发天体的监测和研究主要还局限于亮源, 大部分是银河系内天体. 而来自银河系外的主要是伽玛射线暴(Gamma Ray Burst, GRB), 它们是短暂但瞬时峰值光度最高的天体. 目前在轨运行的X射线波段大视场监测设备有美国NASA的Swift卫星^[4]和国际空间站上日本宇航局的MAXI^[5]. 它们对伽玛暴、银河系内暂现源(恒星活动、激变变星、中子星、恒星级黑洞等)等天体的观测取得了重要成果. Swift和MAXI也探测到了其他类型的、稀有的河外暂现源(如红移6–8伽玛暴、超新星激波暴、相对论性潮汐瓦解恒星事件), 展示了宇宙暂现天体的丰富性^[6]. 但这些事件普遍要远比伽玛暴暗弱几个数量级. 要系统性地发现和研究它们需要更高探测灵敏度的新一代X射线全天监视器^[7–9]. 更高的灵敏度将使监测的范围延伸到更遥远的距离, 将能发现更为遥远和暗弱的暂现/爆发源(如高红移伽玛暴). 被监测的宇宙空间将拓展到更大的体积范围, 大大增加了发现稀有事件甚至新的暂现天体类型被探测的可能性.

在探测能段方面, 以往的X射线全天监测实验主要集中在中等和硬X射线波段(光子能量>几keV), 如RXTE/ASM, Swift/BAT, MAXI/GSC. 而在软X射线波段(光子能量<2 keV), 尚未有系统性的全天监测. 在这个能段能够探测到温度相对较低(十万-百万度)、能谱偏软的X射线源. 可以预期, 在该波段的系统性全天监测有可能发现前所未有的新型时变天体和现象.

综上所述, 未来的X射线全天监测对观测能力提出了新的需求. 在具有大视场的同时, 探测灵敏度和空间分辨率应比现有设备提高一个数量级以上, 探测能段能延伸至软X射线. 从未来多波段大视场时域天文观测的角度来讲, 高的灵敏度将能更好地与其他波段设备的灵敏度相匹配, 软X射线也将填补监测波段的空白.

天文和天体物理学是观测和理论驱动的科学. 几乎每一次在观测能力指标上提高一个数量级, 都会产生新的天文发现和学科的突破性进展. X射线全天监视涉及多个天体物理和宇宙学研究前沿领域. 更高灵敏度的X射线全天监视器将能够帮助回答其中的一些重要科学问题. 例如, 星系中心是否普遍存在大质量黑洞? 其参数分布如何? 有多少是双黑洞系统? 期待中的中等质量黑洞在哪里? 物质是如何落入黑洞的? 相对论性喷流是如何产生的? 引力波暂现源来自宇宙什么天体, 会产生怎样的电磁波辐射? 对小质量系统的并合, 如何区分双中子星与双黑洞? 宇宙早期的第一代恒星和黑洞是何时、何地形成的? 宇宙早期的金属是如何形成和演化的? 宇宙再电离是如何发生的? 目前我们理解的超新星爆发的瞬时过程的物理模型是否正确? 超新星的前身星是怎样的? 其周围环境如何? 强磁场中子星的剧烈X射线爆发是如何产生的?

在探测技术上, 目前的设备所采用的都是传统的非聚焦直线光学技术, 包括编码孔径(如Swift/BAT, SVOM/Eclair)、扫描准直器(如HXMT)和小孔成像(如MAXI). 其优势是技术相对简单、可靠性高, 但也有着先天的局限性. 其有效面积的增加需要相应地增大探测器面积, 而同时也增大了仪器本底和电子学部件相应的成本、重量和功耗. 角分辨率受视场大小制约(通常为度的量级), 由弥散X射线背景产生的入射本底也较高. 这些因素制约了探测灵敏度的进一步提升. 目前的非聚焦型监视器的探测器面积已经很大(MAXI/GSC为5350 cm², 每天的扫描探测极限约为2 mCrab). 而灵敏度要提高一个数量级, 所需要的探测器重量(10吨量级)^[10]和经费对航天任务来说是难以承受的. 非聚焦成像技术已成为X射线全天监视器发展的一个瓶颈. X射线天文观测中常用的聚焦望远镜为掠入射Wolter-I型. 但由于其光学设计本身的限制, 视场通常为度的量级, 无法实现真正的大视场. 未来的X射线全天监测需要另辟蹊径.

近十年来,一种可以实现广角成像的X射线聚焦光学技术——龙虾眼微孔光学技术日趋成熟.这使得大视场X射线聚焦成像观测成为可能.以英国Leicester大学为代表的国际上一些团队开始进行龙虾眼X射线望远镜研制的实验,并于2002年左右提出了国际空间站搭载的Lobster-eye-ISS及可能的卫星项目的概念.随后NASA成功进行了龙虾眼望远镜样机的火箭飞行实验,并用于探测外大气的电荷交换辐射产生的X射线.近几年国际上也有利用该技术研制X射线全天监视器计划的提案,包括美国NASA于2017年遴选进入概念研究的、基于国际空间站的ISS-TAO以及最新提出的卫星概念TAP,欧洲联合团队准备提交欧空局M5提案征集的卫星计划Theseus.

爱因斯坦探针(Einstein Probe, EP)^[8,9,11]是一颗由中国科学院主导、面向时域天文学和高能天体物理的小型天文探测卫星.其主要目的是在软X射线波段发现和探索宇宙中的高能暂现和爆发天体、监测天体的X射线光变.本文将介绍卫星的基本情况及其主要科学目标,并简要介绍所采用的X射线微孔成像技术,然后介绍卫星的载荷设计、科学性能以及任务的总体方案概述.关于该任务所涉及的大部分科学目标,将在本专刊的其他论文里详细论述.

2 任务背景和概述

国家天文台自2010年以来开展了龙虾眼微孔X射线成像光学应用技术的研发.目前已掌握其原理及应用技术.在此基础上,国家天文台响应中国科学院战略性先导专项空间科学背景型号(第二批)的项目征集,联合高能物理所等单位于2013年初提出爱因斯坦探针卫星概念.在空间科学先导专项背景型号项目的支持下,经过两年多的研究,完成了卫星概念、科学目标和关键技术研究以及核心原理样机研制.目前被列入中国科学院战略性先导专项“十三五”规划的空间科学任务之一.系统的工程研制阶段已经于2017年9月开始,研制周期为5年.

EP任务的主要目的是对软X射线的天空开展快速、高频度和系统性的时域巡天监测,旨在发现宇宙中的高能暂现天体和现象、监测天体的活动性,开展快速的深度X射线后随观测,以对暂现源进行更精确的定位,获得高质量的X射线流量和光谱数据.

EP的科学载荷由一台全天监视器型的宽视场X射线望远镜(Wide-field X-ray Telescope, WXT)和一台后随观测X射线望远镜(Following-up X-ray Telescope, FXT)组成. WXT具有3600平方度的无渐晕视场,探测能段为0.5–4 keV. WXT采用了微孔龙虾眼光学技术,以实现大视场的X射线聚焦成像,从而提高了探测的空间分辨率和灵敏度.相比Swift/BAT和MAXI, WXT的探测灵敏度提高了一个数量级以上.在2 keV以下能区,目前尚未有过系统性的全天时域监测.

FXT为常规的Wolter-I型掠入射X射线望远镜.它具有远高于WXT的聚光能力(灵敏度),设计性能与Swift-XRT相当.借助卫星平台的快速机动能力, FXT可以对暂现源开展深度的后随观测,以获得更为精确的定位,长时间追踪其演化、获得高信噪比的X射线光谱测量数据.

EP具有暂现源警报触发和信息快速下传功能,将及时向国际天文界发布暂现源警报,引导其他望远镜的多波段后随观测.这将使得新发现的X射线源的光学证认和红移(距离)测量成为可能.多波段后随观测有助于揭示暂现源的本质和物理过程.此外, EP还将具备信息快速上注能力,将开展对其他设备触发的多波段、多信使的机遇目标(Target of Opportunity, ToO)的快速后随观测.

3 科学目标

爱因斯坦探针将在软X射线这一新的监测窗口开展高灵敏度实时动态巡天监测,旨在系统性地发现和探索宇宙高能暂现天体,特别是更暗弱、遥远或稀有的剧变天体.其主要科学目标是:

- (1) 发现宇宙中的X射线暂现天体,监测已知天体的活动性,探究这些现象的性质及相关物理机制;
- (2) 发现和探索宇宙中沉寂黑洞的耀发,测绘黑洞的分布,进一步理解其起源、演化及物质吸积过程;
- (3) 搜寻来自引力波源的X射线信号,以增进对极端致密天体及其合并过程的认知.

科学目标主要针对黑洞和引力波源(爱因斯坦相对论的两个重要预言)以及其他天体中的极端物理过程.探测目标分布在从太阳系附近一直到遥远的早期宇宙,包括黑洞潮汐瓦解恒星事件、双致密天体并合、中子星、白矮星、超新星、宇宙早期伽玛暴、恒

星活动等. 预期EP也将为下一代大型天文设备提供机遇观测(ToO)的目标天体.

除暂现天体外, EP还将积累海量的时域巡天数据(如光变曲线), 可用来开展大样本天体的X射线时变监测, 研究天体的活动性及其背后的物理机制.

以下分别介绍EP的科学目标, 包括沉寂黑洞的耀发、引力波电磁对应体、以及其他几类具有代表性的高能暂现源.

3.1 发现和探索各种尺度上的沉寂黑洞及其耀发

作为广义相对论的预言之一, 黑洞是宇宙中最为奇特和神秘的天体. 黑洞本身不发光, 但可以通过吸积周围物质释放引力能而产生电磁辐射. 在吸积率较低时, 辐射极其微弱, 黑洞处于隐身的沉寂状态. 如果周围存在可吸积的物质, 黑洞系统会产生包括X射线的强烈辐射, 在特定的情况下还会产生相对论性喷流. 活动的黑洞基本上都是天空中的强X射线源, 观测上主要表现为活动星系核(活动的大质量黑洞, 10^{5-10} 太阳质量; 已探测到几十万个)、黑洞X射线双星(双星系统中的恒星级黑洞, 几到几十太阳质量; 已探测到20多个确定的系统及约50个候选体, 主要分布在银河系及最近的几个伴星系中), 某些极亮X射线源(中等质量黑洞, 10^2-4 太阳质量; 目前只探测到几个候选体, 分布在近邻星系中).

近年来的观测和理论研究提示, 宇宙中很可能存在着大量的黑洞; 而我们所观测到的只是冰山一角. 绝大部分黑洞的辐射极弱, 因而处于沉寂状态而不能被望远镜发现. 在突发性获得大量可吸积物质的情况下, 沉寂的黑洞也会产生耀发性的X射线辐射, 从而现身.

大质量黑洞: 通常情况下, 星系中心的大质量黑洞是沉寂的. 但当一颗被黑洞引力捕获的恒星进入到潮汐半径以内, 恒星将被潮汐力撕裂. 一部分物质将落入黑洞, 引起吸积率的突然增加, 然后随时间而衰减. 这一过程被称为黑洞潮汐瓦解恒星事件(Tidal Disruption Events, TDE). 早期的理论工作就预言了TDE会产生巨大的X射线辐射耀发^[12]. 通过捕捉和跟踪观测TDE事件, 可以使原本沉寂的黑洞现身, 并使得对其性质的研究成为可能. 对绝大多数宁静星系而言, TDE是探索其中心黑洞的几乎唯一的手段^[12].

最早的TDE事件是从ROSAT卫星全天巡天数据

中发现的^[13]. 目前在X射线波段已经找到20多个事件. 其中大部分是在回溯挖掘以往卫星的数据库数据中发现的, 包括ROSAT和XMM-Newton等^[14]. 此外, 还发现了几十个紫外和光学波段的TDE候选体. 但它们的TDE本质以及与X射线TDE的关系仍不清楚. 最近, Swift和MAXI探测到的两例相对论性TDE事件, 表明会有喷流产生^[15]. 此外, 理论研究指出, 星系中心如果存在双黑洞系统, 其产生的TDE事件的X射线光变曲线与正常TDE有显著的不同. 目前已经有一例TDE事件的光变曲线显示出双黑洞候选体的特征^[16].

TDE的研究正在成为一个活跃的新兴的领域. 其研究有着重要的科学意义. TDE的巡天探测可以用来对近邻宇宙的大质量黑洞进行普查. 结合模拟得到的对TDE事件发生率的估计, 人们有可能能试图回答“星系中心是否普遍存在大质量黑洞?”这一基本天体物理问题. 通过TDE观测, 还可以确定大质量黑洞的质量函数的低端截止、寻找中等质量黑洞, 为种子黑洞、黑洞和星系的形成和演化提供观测数据和限制. TDE还为研究黑洞吸积物理提供了一个有着吸积率完整演化过程的理想实验室.

目前观测到的此类X射线耀发事件还很少. 大多数事件观测采样不足, 而且已经处于爆发的后(晚)期, 时效性差. 这些因素都使得人们目前尚不能确定它们的本质是否就是TDE, 也不能对其物理过程进行详细研究. 因此, 该领域的进一步推进受限于缺乏大样本的TDE事件及深度的多波段后随观测. TDE耀发早期的观测也非常重要, 它包含了恒星刚刚瓦解之后的气体与黑洞相互作用的行为和过程, 也很可能蕴含着黑洞和前身恒星的某些物理状态和参数. 如果要求在耀发的极早期探测到TDE, 则需要大视场、高灵敏度的监视器以获得足够高的采样频率; 同时还需要具备数据实时处理和预警发布能力. 目前, 在X射线波段尚未有TDE的巡天探测计划开展. 德国的eROSITA卫星(预计2018年发射)具有一定的探测TDE的能力, 但不足之处在于采样频率较低(大部分天区一年4次).

在目前已经立项的计划中, EP是在X射线波段发现和研究的最佳设备. 发现和研究的最佳设备. 宽视场望远镜WXT的波段正好覆盖TDE耀发辐射的能谱的理论峰值. 它的大视场、高灵敏度和高采样频率(每天几次到二十几次)都满足发现近邻宇宙的TDE所需要的条件. 长时间的重复扫描可以获得较为

完整的耀发的测光和光谱数据. FXT和触发的多波段后随观测将对爆发过程进行更为深入的跟踪观测. 这些数据对最终确定这类耀发的辐射机制和事件的物理本质是非常重要的. 基于TDE的发生率, 我们估计EP有可能每年能发现几十到100例TDE事件, 包括具有相对论性喷流的事件. 其中相当一部分能观测到上升期和峰值. 这将使得TDE的样本有数量级的增长, 观测数据质量显著的提高. 可以预期, EP的运行将使TDE领域的研究产生突破性的进展(详见本专刊论文“星系中心大质量黑洞及潮汐瓦解恒星事件”^[17]).

恒星级黑洞和中等质量黑洞: EP也可以通过探测X射线耀发来发现银河系及邻近星系中的恒星级黑洞, 甚至是中等质量黑洞. 黑洞X射线双星(Black Hole X-ray Binary, BHXB)为恒星级黑洞与一颗恒星组成的双星系统, 通过吸积伴星物质产生以X射线为主的辐射. 已知的BHXB大部分属于软X射线暂现源; 它们长期处于较低光度的宁静态, 但在几年至几十年的时标上会跃迁至一个暂现的爆发态, 亮度增加3–5个量级以上, 持续时间为几十天^[18]. 这类隐身的黑洞只有在爆发时才能被大视场或快速巡天的望远镜发现. 理论研究倾向于认为银河系内的X射线双星远多于目前已知数目(20个确认的和几十个候选体). MAXI运行7年来共发现17颗X射线新星(X-ray Novae), 其中6颗为黑洞候选体^[19]. 平均每年有一个新的黑洞X射线双星爆发被发现. 这些源绝大部分应该能够被EP观测到. EP也能捕捉到近邻星系中的黑洞X射线双星的爆发.

极亮X射线源(Ultra-Luminous X-ray Sources, ULX)是指近邻星系中(非星系核心)的、表征光度大于 $10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ 的X射线点源. 由于其光度超过了10个太阳质量的爱丁顿光度, 有可能包含质量较大的恒星级黑洞甚至中等质量黑洞(100–10000太阳质量), 因而引起天文学家广泛的关注. 尽管绝大部分ULX被认为是恒星级黑洞的X射线双星, 但在个别源中确实发现了中等质量黑洞的观测证据^[20]. 一部分ULX表现为暂现源, 在爆发态时呈现ULX的光度或有数量级的增加^[21]. 通过对近邻星系的监测可以发现处于爆发态的新的ULX, 甚至有可能发现目前知之甚少的中等质量黑洞. 通过一个月左右的累积观测, EP可以探测到10 Mpc内的ULX. 预计每年探测到几个左右的ULX暂现源.

球状星团中是否存在黑洞? 这是一个极具争议的问题. 近年来, 人们在几个星团中发现了黑洞存在的证

据. 一些理论研究也表明, 一个星团中很可能存在至少10个左右的黑洞, 并且其中一部分存在于双星系统中^[22]. 银河系约有150个球状星团. 通过对球状星团的长期监测, 有可能发现处于爆发态的黑洞系统. 更多的观测将为理解球状星团中黑洞的存在性和普遍性提供数据.

3.2 搜寻引力波源的电磁对应体并精确定位

根据广义相对论, 引力等效为质量所造成的时空弯曲. 质量分布的变化将引起时空曲率的改变, 爱因斯坦预言这种扰动会以波的形式以光速自由传播. 引力波可理解为时空的“涟漪”. 2015年9月14日, LIGO直接探测到了人类历史上第一个引力波信号GW150914^[1,2]. 这一发现不仅是对广义相对论理论的一次直接验证, 更为重要的是, 它开启了人类探索宇宙和天体一个全新的窗口, 开启了一个引力波天文学的时代. 引力波的发现荣获2017年诺贝尔物理学奖. 更为激动人心的是, 很快又实现双中子星并合引力波GW170817及其几乎全波段的电磁对应体的探测. 这一发现震动了整个天文学界, 标志着天文学真正进入多信使的时代^[3]. 它证实了双中子星并合引力波伴随着强烈的电磁波辐射的理论预言^[23,24]. 随着A-LIGO和A-VIRGO完成升级以及其他几台引力波探测器的投入运行, 到2020左右将有能力探测~450 (~900)兆秒差距(Mpc)以内的双中子星(中子星-黑洞)并合引力波事件. 预期引力波的探测率将大大增加.

引力波源电磁对应体的探测有着重要的科学意义^[25]. 首先, 它将为引力波源精确定位, 这是证认引力波源对应天体的第一步. 这是因为目前的第二代引力波探测器的定位精度较差(最高可达10到几十平方度), 难以证认对应的寄主星系. 引力波产生过程及其引力波产生过程及并合后的留存天体所产生的电磁波信号中也包含了引力波数据中所没有的信息(如精确空间位置、天体红移、电磁辐射能量、光谱、光变等), 这些信息的测量可以帮助证认引力波源的本质和引力波产生的物理过程, 并为其前身星的本质的研究提供线索. 有些引力波信号本身很弱, 探测置信度不高, 如果能探测到来自同一时刻、同一方向的伴随电磁信号, 将提高引力波源探测的可靠性. 由于引力波测量可以直接给出源的光度距离, 而其电磁波对应体的探测可以测量红移, 因而可以通过研究一个样本事例的红移-

距离关系测量开展引力波宇宙学研究, 检验宇宙学模型^[26]. 有研究表明, 利用LIGO和Virgo可能探测的一定样本的双致密天体并合事件及其红移测量, 可以测量哈勃常数^[27].

第二代引力波探测器探测的目标引力波源都是短时标的暂现源. GW170817对应的电磁辐射在几乎全波段都能被探测到. 在伽玛射线波段表现为类似短伽玛暴的瞬时辐射(尽管比通常的短暴要暗三个量级), 而X射线只在并合后的较晚的时期(约10 d)才被探测. 但由于缺乏及时的X射线大视场后随观测, 不能确定在并合后的较短时间内是否有暂现的X射线辐射产生. 高灵敏、宽视场的X射线监视器将能对这一问题做出检验. 根据最新的理论模型研究, 对某些特定的中子星合并事件, 在早期有可能会产生近似各向同性但(比喷流)较为暗弱的X射线辐射^[28,29]. 探测到该辐射成分很有意义, 它有可能使得对中子星并合事件的高能辐射的探测不依赖于喷流的指向, 从而提高该类事件的探测率.

按照目前的设计, EP将具备快速ToO指令上传能力. 在获得引力波探测器提供的预警方位后, 可以快速利用将宽视场望远镜WXT指向目标天区进行后随观测. 相比其他窄视场望远镜, EP的视场优势非常明显. WXT的定位精度可达几十角秒甚至更好, 这将极大地提高对其寄主星系观测证认的成功率. 如果WXT探测到暂现源, 还可以利用FXT开展更高精度和灵敏度的进一步后随观测. 此外, EP的大视场也有可能直接探测到与引力波成协的X射线爆发辐射^[29](详见本专刊论文“引力波爆发事件的电磁对应体的探测”^[30]).

3.3 系统性发现和探索高能暂现天体

本小节简单介绍EP对其他几类重要暂现源的可能探测, 包括超新星激波暴、高红移伽玛暴、特殊伽玛暴和X射线闪、磁星、中子星双星、白矮星(激变变星)等.

超新星激波暴. 激波暴(Shock Breakout)是理论上预言的在超新星爆发时最早产生的电磁辐射, 持续时间非常短暂, 只有几秒到1000 s. 在恒星内核塌缩之后, 中心产生高温激波并从恒星内部向外传播; 当激波到达恒星表面并变为光学薄时, 会产生短暂但非常明亮的电磁波辐射, 其峰值在软X射线和紫外波段. 而通常在可见光波段的超新星爆发要在此一周之后才会

被观测到. 激波暴观测可用来验证超新星爆发的基本物理模型, 确定超新星的前身星半径和星周环境等重要物理参数, 研究激波暴产生的物理机制. 由于持续时间短、能谱较软、相对暗弱, 目前在轨的伽玛暴探测器很难捕捉到激波暴, 因此仅有几例候选事例的报告^[31]. EP的软X射线覆盖和高灵敏度, 使得探测到理论预言的激波暴成为可能. 通过EP的观测, 我们将很可能回答以下的科学问题: 是否存在超新星爆发理论所预期的爆发瞬时产生的激波暴X射线辐射? 超新星的前身星的参数如何? 尽管目前的观测数据非常少, 但对EP探测率的粗略估计为每年有可能探测到几个到十个超新星激波暴, 基本上为II-P型超新星. EP也有可能探测到类似于超新星2008D特殊的Ib/c型激波暴(详见本专刊论文“爱因斯坦探针卫星的核塌缩超新星激波暴探测”^[32]).

伽玛暴是宇宙中最为明亮的暂现源, 产生于大质量恒星塌缩或致密双星并合时, 新生成的黑洞或磁星沿相对论性喷流方向发出的强烈而短暂的伽玛及X射线的辐射. NASA的伽玛暴探测卫星Swift已在轨运行13年, 探测到了1000多个伽玛暴, 使其研究获得了极大的进展. 该领域未来的研究重点将关注高红移伽玛暴和特殊的伽玛暴. 由于探测能段为软X射线且灵敏度更高, 与Swift和SVOM卫星相比, EP在这些方向具有独特的优势.

高红移伽玛暴和早期宇宙. EP具有发现高红移伽玛射线暴的能力. 红移6–20之间的早期宇宙是宇宙演化的一段重要时期. 这些宇宙早期的爆发事件可以示踪那些照亮宇宙“黑暗时代”的第一、二代恒星, 并作为“灯塔”探索早期宇宙的黎明和再电离时期、第一代星系和早期星际介质. 第一代恒星很难被直接观测到. 研究表明, 它们在快速演化到终点时会产生类似伽玛暴的高能辐射^[33]. 通过探测这些爆发, 可以研究第一代明亮天体的性质, 测量高红移的恒星形成率, 研究宇宙再电离和金属增丰历史. 宇宙第一代的黑洞也有可能是通过第一代恒星塌缩形成的. 利用高红移伽玛暴作为标准烛光, 还可以限制暗能量和宇宙学参数. 目前已发现了7个红移在6–8.2的伽玛暴(Swift)^[6]. 理论研究预期, 未来的监视器应该能将红移前推至15以上(约为2%宇宙年龄的时期)^[34,35]. 探测如此高红移的伽玛暴极为困难, 要求极高的灵敏度(<1 mCrab@1000秒积分). EP刚好能达到这一指标, 有可能探测到高光度

的源. 预期在3年运行期内, EP有可能记录到约20个红移6以上的伽玛暴(其中~6个 $z>8$)的辐射信号. 但能否实时监测并及时并触发后随观测、证认对应天体和测量红移是一个关键. 这很大程度上依赖于大口径(~10 m或更大)光学/红外望远镜的快速后随观测. 因而这是一个极具挑战性的目标(详见本专刊论文“高红移爆发源作为早期宇宙和第一代天体的探针”^[36]).

特殊类型伽玛暴和X射线闪. Swift发现了一些特殊类型的伽玛暴, 包括低光度伽玛暴、超长伽玛暴和先兆辐射(Precursor). 与伽玛暴相关的还有一类短暂的X射线爆发——X射线闪, 尽管发现较早但其本质一直是一个谜团. 由于目前样本相对较小, 这些暂现源的特性还有待新的观测去刻画. EP预期将发现更多特殊类型的伽玛暴及X射线闪, 将有助于深入了解伽玛射线暴的爆发机制、前身星特征、宇宙恒星形成历史以及及与超新星爆发的关系及物理等(详见本专刊论文“特殊伽玛暴及伽玛暴的特殊辐射成分”^[37]).

低光度伽玛暴是指各向同性光度显著低于典型暴几个数量级的伽玛暴^[38]. 其研究有着重要的意义. 未来对观测的需求将是探测更大样本的低光度暴, 并跟踪观测其晚期可能的超新星成分. 这些数据将有助于理解伽玛暴的前身星、中心引擎以及大质量恒星晚期的演化. 低光度暴还是潜在的引力波、高能中微子及宇宙线辐射源. 由于低光度暴的高爆发率且发生在近邻宇宙, 使其成为引力波和高能中微子探测的重要对象. 预期EP每年将能探测到约3个低光度暴, 探测效率相比现有设备提高了几倍.

超长伽玛暴的持续时间可达几千秒以上. 尽管目前只发现了为数不多的事例, 但估计其爆发率不低^[39]. 只是由于光度比较低, 通常难以触发典型的伽玛暴探测器. 目前关于超长暴的理论模型包括, 蓝超巨星作为前身星大质量黑洞的潮汐瓦解事件或黑洞自转衰减提供能量等. 预期EP将显著提高超长暴的探测率, 获得较大的样本, 为揭示其前身星和爆发机制提供重要的观测数据.

某些伽玛暴具有先兆辐射^[40]. 目前的观测数据还不完善, 理论上也还没有普遍接受的模型. 先兆辐射的观测对理解伽玛暴的本质有重要意义. 由于先兆辐射相比主体辐射发生在离伽玛暴中心机器更近的距离上, 其观测结果可以为伽玛暴的爆发机制和中心机器给出更强的限制. EP卫星将为发现更多伽玛暴先兆辐

射提供重要设备.

X射线闪(X-ray Flashes, XRF). X射线波段探测到的短暂爆发, 但没有伴随的伽玛射线辐射^[41]. X射线闪的持续时间和普通伽玛暴相似, 但光子能量要软得多(特征光子能量通常低于10 keV). 在几个X射线闪的光学余辉中, 还发现了与超新星成协的可能证据. 目前只探测到几十个X射线闪, 其本质并不清楚. 目前有两种可能的模型: 被偏轴观测的伽玛暴; 或受重子物质污染较为严重的火球产生的伽玛暴, 即脏火球伽玛暴或不成功的伽玛暴. 这两种机制都和伽玛射线暴的本质有着密切的联系.

磁星(Magnetar). 磁星为具有超强磁场的孤立中子星^[42]. 由于其表面磁场高达约 10^{14} G, 它们是检验超强磁场环境中物理规律的实验室. 目前已探测到25颗磁星, 其中大多数都是通过它们强烈的X射线爆发被发现和认证的. 因而大视场X射线全天监视是发现磁星的最有效的手段. 目前的观测证据表明, 可能有大量的强磁星存在, 其大部分时间都处于宁静态. 预期EP平均每年将能发现一颗新强磁星, 同时可以监测已知强磁星的活动状况. 这将为强磁星的活动频率和它们在银河系的数目提供有效的观测限制(详见本专刊论文“探测磁星的爆发”^[43]).

激变变星. 激变变星(Cataclysmic Variables, CVs)为一颗白矮星和一颗正常恒星组成的双星系统, 是银河系, 尤其是太阳系附近重要的X射线辐射源^[44]. 研究激变变星中的吸积过程、白矮星的质量的分布以及增长过程对Ia型超新星(包含其前身星、爆发机制、诞生率等方面)、恒星形成和演化等问题有重要价值. 然而, 对上述问题的理解受限于激变变星、尤其是低X射线光度($L_X < 1.0 \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$)激变变星样本的不完备性. 另一方面, 对激变变星从宁静态到爆发态转换时吸积盘内区及边界层的物理过程的研究也要求对更多已知的激变变星进行长期监测. EP具有的大视场和高灵敏度是搜寻太阳系近邻激变变星的有力武器. 预计可以获得距离在300 pc之内, 光度在 $5.0 \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ 以上的激变变星的完备样本, 总数目可达1000颗(详见本专刊论文“爱因斯坦探针在激变变星探测中的应用”^[45]).

3.4 其他科学目标

天体X射线辐射的长期时变监测. EP的大视场可以每天对半个天球的大部分位置扫描约10–20次. 一

个天体在一年内可以被持续监测几个月. EP可以获得大样本天体的从秒到月的时标量级的X射线流强的变化(光变曲线). 对亮X射线源, 还可以获得其软X射线能谱及随时间的长期变化, 增进对天体X射线辐射变化的规律和辐射机制的认识. 这些结果可以测量天体的物理参数, 发现新的时变现象和规律, 进一步认识天体的本质、物理过程和演化. 大样本X射线源的长期监测数据是天文学长期积累的重要基础数据库的一部分. 因此EP将能提供重要的长期监测数据库数据.

EP卫星将主要开展以下的大样本天体X射线时变监测研究: (1) 各类的活动星系核/大质量黑洞; (2) 黑洞和中子星X射线双星, 激变变星(恒星级质量黑洞、其他致密天体); (3) 极亮X射线源.

活动星系核(AGN). 活动星系核是指那些具有强烈电磁辐射的星系核心, 其巨大能量是由中心大质量黑洞吸积周围物质, 将引力能转化为辐射而来的. 各种时标上的X射线光变是活动星系核的典型观测特征. 黑洞吸积系统的某些物理信息, 如黑洞辐射区的尺度, 吸积流的结构、变化及其不稳定性都会被烙印在X射线的流量和光谱变化曲线中. 因此活动星系核的X射线光变长期以来一直被用来作为研究活动星系核和大质量黑洞的探针^[46-48]. 从2009年至今, MAXI开展了对AGN在较宽时标上的监测, 但仅局限于少数几个X光度最亮的AGN. EP卫星能在从小时到月的采样频率上同时监测几百个AGN, 获得前所未有的大样本的光变数据. 对其中相当一部分亮的AGN还可以研究大样本的AGN长期光谱变化, 这是以前的设备所无法达到的. 这些数据将促进我们对AGN的X射线辐射, 大质量黑洞的吸积盘和喷流的结构、动力学和辐射等问题的进一步认识. (详见本专刊论文“EP在活动星系核研究领域的科学机遇”^[49]).

X射线双星. X射线双星为黑洞或中子星与一颗正常恒星组成的双星系统. 黑洞质量的精确测量对恒星演化和黑洞形成模型以及黑洞自旋测量有着重要意义. 目前, 通过动力学测得质量的恒星级质量黑洞只有20多例. 黑洞的动力学质量测量需要大口径望远镜进行多次采样光谱观测, 因而十分困难. 利用X射线光变监测获得黑洞的轨道周期, 会极大提高质量测量的效率. EP卫星将能对银河系及其近邻星系内的X射线双星系统进行长期、高频率、高灵敏度的观测, 有望测量一批黑洞双星的轨道周期. 此外, X射线双星的爆发

及光谱态的转变是研究黑洞吸积的关键物理过程. EP将及时捕捉这些过程, 并及时预警以引导开展多波段的深入观测(详见本专刊论文“X射线双星系统的探测”^[50]).

对于具有超软成分的极亮X射线源, 其X射线能谱为热辐射成分主导. EP也可以开展对较亮的ULX的长期监测.

除EP自身的观测运行之外, 与其他多波段、多信使的大视场时域天文设备的协同观测也将是EP的重要科学目标. 到2020年左右, 一批多波段的大型宽视场巡天监测设备已经或即将投入运行, 包括光学波段的LSST, 射电的LOFAR, SKA, 高能的Fermi, Swift和SVOM. 这些设备每天能发现大量的光学、射电等其他波段的暂现源, EP将能够提供其中部分暂现源的X射线辐射的信息. 可以考虑EP卫星与LSST, Fermi, Swift和SVOM等设备的多波段协同监测.

X射线巡天成像观测的科学. 作为长期扫描巡天监测的副产品, 在几年的数据累积后, EP将获得比ROSAT全天巡天(ROSAT All-Sky Survey, RASS)更深的软X射线全天图像、光谱以及全天软X射线源表. 这些深度的X射线图像和高信噪比能谱将为研究来自银河系及河外天体的弥散X射线辐射提供宝贵的数据. 值得关注的是, 近年来在一些星系团和星系的X射线能谱中发现了3.5 keV附近的疑似微弱发射线; 一些研究结果将它解释为很可能是来自于惰性中微子暗物质衰变所产生的信号. 由此, EP的巡天成像光谱数据也有可能能够用于探测暗物质或限制暗物质模型.

4 龙虾眼微孔光学

自20世纪60年代X射线天文学诞生至今, 所有的X射线宽视场监视器均利用非聚焦(直线光学)型的准直器、编码孔径或小孔成像技术. 其主要优势在于容易实现大视场、技术相对简单可靠、造价相对较低. 但有效面积的增加需要靠增大探测器几何面积, 导致本底噪声较大, 灵敏度相对较低, 只能用于亮源监测. 现有的大视场全天监测设备(Swift/BAT, Fermi/GBM, MAXI)几乎已经到了该技术的瓶颈. 由于重量和经费的限制, 很难通过增加探测器几何面积来大幅度提高灵敏度. 因此, 在X射线天文观测已经进入了聚焦光学时代的今天, 高灵敏度的聚焦型宽视场监视成为必然

的发展方向.

目前在天文学领域广泛应用的X射线聚焦光学成像是Wolter I型光学系统. 这是一个双曲面和一个抛物面组成的掠射系统. 虽然聚焦成像型的X射线望远镜可以获得高的灵敏度和高空间分辨率, 但Wolter I型掠入射式光学设计使得其视场通常不大于 1° (类似于光学望远镜), 不适合大视场监视器.

早在1979年, 天文学家Angel^[51]就提出了可以模仿龙虾眼睛的成像原理来设计一种宽视场聚焦X射线望远镜. 这种龙虾眼(Lobster-eye)成像光学构型是一个由很多方形微孔构成的球面, 所有微孔的轴线指向球心. 这样入射的X射线光子在两个相邻的孔壁上各发生了奇数次反射后会聚在焦面上($1/2$ 曲率半径的球面). 其光学原理如图1所示. 由于龙虾眼型的光学采用了直角对称的反射面排布, 理论上视场可以扩展到 4π 立体角, 使其能够应用于宽视场监视器. 但由于该成像器件的制作工艺极为困难而长期未能实现. 近年来, 随着材料加工技术的发展, 一种新型的X射线成像光学器件——微通道板光学(Micro-pore Optics, MPO)器件日趋成熟. 它使用含金属玻璃片制成, 通过微加工手段, 在垂直玻璃片表面法线方向制作了上百万个方孔微通道结构. 这些微孔壁十分光滑, 可以有效地反射X射线光子. 该器件具有重量轻、加工简单、可以大批量生产的优点, 是目前单位有效聚光面积上重量最轻的X射线成像器件. 由MPO光学成像系统构建的龙虾眼望远镜可以实现Angel提出的宽视场X射线聚焦成像^[52].

龙虾眼望远镜的点扩展函数(Point Spread Func-

图1 龙虾眼MPO光学对点源的聚焦成像原理示意图(常用的微孔尺寸在 $20\ \mu\text{m}$ 量级)

Figure 1 Illustration of light paths of focusing imaging for a point-like source by a lobster-eye MPO optics (the pores of commonly used plates have a size of the order of $20\ \mu\text{m}$).

tion, PSF)为中心焦斑加十字形, 由于大规模结构的统计特性控制难度较大, 其角分辨率只有角分量级. 即便如此, 该望远镜在毫米大小的中心焦斑上汇聚了垂直入射方向 $10\ \text{cm}^2$ 左右面积内的X射线光子, 具备优于准直型设备1个数量级的灵敏度. 在实际应用中, MPO龙虾眼光学系统可以在质量非常轻的情况下达到几千平方度的视场, 这对于宽视场X射线成像而言是独一无二的. 这也是目前唯一工程上在有限代价下可实现宽视场观测的X射线光学系统. 图2展示了龙虾眼MPO望远镜模型(a)以及其对点源探测的X射线成像结果(b).

5 载荷仪器设计

爱因斯坦探针卫星的科学载荷有两个仪器: 宽视场X射线望远镜用于全天监测, 后随X射线望远镜用于暂现源和爆发源的后随观测及机遇目标的观测.

宽视场X射线望远镜作为爱因斯坦探针卫星的核心载荷, 其相机采用龙虾眼型的MPO成像系统. WXT由12个焦距为 $375\ \text{mm}$ 的独立模块组成, 其中每个模块由 6×6 个MPO器件阵列拼接而成, 可以覆盖约 300 平方度的视场(单个模块的构成图见图3). MPO成像器件拟采用国家天文台与北方夜视联合开发的产品. 每个WXT模块由MPO光学组件、焦平面相机、主支撑结构和热控等组部件组成, 重量为 $17\ \text{kg}$. 在MPO器件前

图2 (a) 龙虾眼MPO望远镜原理样机(国家天文台X射线成像实验室研制); (b) 对X射线点源的成像, 其点扩展函数(PSF)具有十字形的特征(资料由国家天文台X射线成像实验室提供)

Figure 2 (a) A demonstration prototype of a lobster-eye MPO mirror assembly (developed at X-ray Imaging Lab, NAOC); (b) an X-ray image formed on its focal plane for a point-like source showing the characteristic cruciform PSF of the lobster-eye optics (credit: XIL, NAOC).

图3 宽场X射线望远镜WXT的单个模块设计. 主要由(从上至下)遮光罩、MPO光学组件和焦平面相机组成(资料由国家天文台X射线成像实验室提供)

Figure 3 Design of one module of the wide-field X-ray telescope (WXT), consisting mainly of an optical baffle, MPO plates and focal plane detectors (credit: XIL, NAOC).

面的遮光罩能有效阻隔太阳直射、月球直射与地球反射所产生的杂散光. 12个模块总共可以覆盖约3600平方度(~ 1.1 立体角)的天区. 图4显示了WXT和FXT的视场的示意图.

WXT单个模块焦面面积约为 $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$, 总焦面面积超过 1728 cm^2 . 探测器采用CMOS图像传感器. 单个模块使用 2×2 的CMOS阵列拼接作为WXT单个模块的焦平面探测器. 该款CMOS为新型探测器, 像素大小为 $4\text{ k} \times 4\text{ k}$ (像元大小为 $15\text{ }\mu\text{m}$), 尺寸为 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$. 目前正在由长光辰星公司与国家天文台联合开发. 相比于CCD, CMOS有着更快的读取速度(可以达到每秒几十帧)集成度更高的读出电子学, 能显著降低系统复杂度和电子学成本.

FXT为窄视场后随观测X射线望远镜. 光学系统采用Wolter I嵌套式X射线光学组件. 焦距为 1.6 m , 视场为 $38'$, 角分辨率优于 $2'$. 焦平面探测器拟采用pn-CCD探测器, 工作温度 $-70\text{--}100^\circ\text{C}$, 能量分辨率接近理论极限. FXT在 1 keV 附近的有效面积 $\geq 120\text{ cm}^2$. 探测能段为 $0.3\text{--}8\text{ keV}$, 重量为 100 kg . FXT的组件设计示意图见图5.

图6显示的是EP载荷的一种可能的配置. WXT由中国科学院上海技术物理研究所联合国家天文台负责研制; FXT由中国科学院高能物理所负责研制.

图4 WXT以及后随X射线望远镜FXT的视场示意图

Figure 4 Illustration of the field-of-views of WXT modules and FXT.

图5 后随X射线望远镜FXT组件示意图

Figure 5 Preliminary design of the follow-up X-ray telescope FXT.

6 仪器科学性能

本节介绍EP科学载荷的主要科学性能. WXT和FXT的部分参数见表1.

我们开发了基于Geant4的光线追踪模拟(Ray-tracing Simulations)软件, 用来对WXT的X射线光学系统和探测器性能进行模拟^[53]. 图7显示获得的WXT的有效面积曲线. 除了光学系统特性, 还综合考虑了探测器量子效率、遮光膜等因素造成的影响. WXT的探测能段为 $0.5\text{--}4.0\text{ keV}$. 在视场的任意方向上(除了MPO器件阵列边缘), 最大有效面积约为 $\sim 3\text{ cm}^2$ (在 1 keV 附近).

图 6 一种可能的EP载荷结构设计, 包括12个WXT模块以及位于中心的FXT望远镜(资料由中国科学院微小卫星创新研究院提供)

Figure 6 A possible configuration of the EP payload, with twelve WXT modules and the FXT telescope at the centre (credit: MicroSAT).

表 1 WXT和FXT的参数规格

Table 1 Specifications of WXT and FXT

参数	WXT	FXT
模块数	12	1
视场	3600 sq.deg.	~38'(直径)
角分辨率(FWHM)	5'	<2'
能段 (keV)	0.5–4.0	0.3–8.0
能量分辨@1 keV (eV)	170	170
有效面积@1 keV (cm ²)	~3	≥120

尽管在某一方向上的有效面积比较小, 但它在视场中任一方向都是等同的. 衡量一个望远镜巡天能力的指标通常是Grasp, 即有效面积与视场的乘积. 图8显示了WXT的Grasp参数. 在1 keV附件可达到~10000 cm² deg², 是目前已有X射线聚焦设备中最大的(包括已经立项的卫星).

我们模拟得到的WXT点扩散函数如图9所示. 中心焦斑的角分辨率约为~5' (FWHM). 这是由MPO组件在目前制作工艺下的精度所决定的, 主要受限于MPO器件制作过程中大规模结构成形的精度控制. 图10显示了模拟得到的WXT对一个400平方度天区在探测器上的X射线成像结果.

图 7 模拟得到的WXT有效面积曲线, 分别为焦面上的中心焦斑所对应的有效面积(红色)及焦斑加上十字臂所对应的有效面积(黑色). 其中MPO镜片微孔内壁表面镀膜材料为铱; 焦面探测器为背照式CMOS (灵敏区厚度20 μm, 表面镀200 nm的铝膜)

Figure 7 Simulated effective area curves of WXT for the central focal spot and plus the cruciform arms. The MPO arrays are coated with iridium. The focal plane detectors are back-illuminated CMOSs (layer thickness of 20 μm and the surface is coated with 200 nm-thick aluminum).

图 8 WXT的巡天能力指数Grasp与其他聚焦X射线望远镜的比较

Figure 8 Grasp of EP/WXT (effective area times field of view) and comparison with the current and future missions with focusing X-ray optics.

除了有效面积之外, 探测灵敏度还依赖于焦面探测器上产生的本底噪声. 总的本底噪声来源包括空间带电粒子产生的本底和入射的弥散X射线辐射(包括宇宙X射线背景和银河系前景弥散辐射). 我们利用Geant4软件模拟了卫星在轨运行时CMOS探测器上产生的粒子本底. 图11显示了模拟得到的各个本底成分

图 9 模拟得到的WXT在焦面上的点扩散函数的中心焦斑轮廓. PSF为 $\sim 5'$ (FWHM)

Figure 9 Profile of the simulated point-spread-function of WXT of the central spot on the focal plane. The PSF is $\sim 5'$ (FWHM).

图 10 模拟的WXT对于一个400平方度的X射线天空的成像结果, 积分时间10 ks (X射线源来自于ROSAT巡天亮源星表)

Figure 10 Simulated X-ray sky image of 400 squ.deg. observed by WXT with an accumulated exposure of 10 ks (based on the ROSAT All-sky Survey catalogue).

及总的本底的能谱曲线。

基于有效面积和探测器本底, 可以估计WXT对弱源的探测灵敏度。对典型X射线点源的探测灵敏度曲线见图12。在1000 s的积分时间内, 可探测的极限流量为 $\sim 1 \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (0.5–4 keV), 或 $\sim 0.3 \text{ mCrab}$ (源光子能谱指数为 -2 , 银河系吸收柱密度为

图 11 模拟的WXT在轨运行时在探测器上产生的本底的能谱, 包括入射的弥散X射线辐射和空间荷电粒子形成的本底 (CMOS探测器参数见图7图注)

Figure 11 Simulated background on the detector of WXT in orbit, including the incident diffuse X-ray emission and background generated by charged particles in space (see Figure 7 caption for the specification of the CMOS detectors).

图 12 WXT对典型的宇宙X射线源的探测极限流量(灵敏度)及其与积分时间的关系, X射线为光子谱指数分别为 -2 和 -3 的幂律谱(假设银河系吸星际介质柱密度为 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$). 阴影区代表ROSAT全天巡天典型的灵敏度

Figure 12 Detection limiting fluxes (sensitivity) of WXT and its dependence on accumulative exposure time for cosmic X-ray sources with typical spectral shape (power-law photon index of -2 and -3 , respectively, assuming a Galactic ISM absorption column density $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$). The shaded area indicates the typical sensitivity of the ROSAT All-sky Survey.

$3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$). 可见其探测灵敏度比MAXI和Swift/BAT等宽视场监视器要高出一个多数量级。

7 任务概述和观测模式

EP卫星轨道为高度550–600 km的近地圆轨道, 轨

道周期为 ~ 97 min, 轨道倾角小于 30° . 有部分轨道穿过南大西洋异常区(South Atlantic Anomaly, SAA)底端, 期间载荷将停止工作. EP任务的运行寿命为3年, 目标5年. 预期卫星将于2022年底完成研制任务, 择机发射.

EP的观测模式有巡天监测、自主后随观测、机遇目标观测和定标观测模式. 运行期间将采用快速巡天监测结合定点深度观测的模式. 同时, 可以将发现的暂现源的基本参数信息通过快速警报系统下传到地面科学运行中心, 以发布暂现源警报.

EP的巡天监测由一系列WXT的指向观测组成. 由于太阳是很强的软X射线源, 因此会对软X射线观测造成严重污染; 此外, 尽管表明镀了铝膜, CMOS探测器仍然会受强烈的紫外/光学辐射的影响. 因此WXT只对反太阳方向的夜天区进行监测, 并保证视场边缘和太阳的夹角不小于 90° . 按照目前的指向设计, 在一个轨道周期内, 通过卫星姿态的机动, WXT分别指向沿轨道坐标系纬度相同的3个天区(图13), 覆盖一条宽度约为 60° 的带状天区. 每次指向观测的积分时间约为20 min. 在接下来的两轨卫星将沿轨道坐标系纬度方向机动以调整指向, 同样在一轨内指向3个相邻的天区, 以分别覆盖剩下的两条带状天区. 这样, 在连续3轨所形成的一个巡天周期(约5 h)内, WXT可基本上完

图 13 EP巡天监测模式下的一个轨道周期内WXT的一系列定点观测示意图. 目前的设计为一轨3次定点观测, 每次观测时间约20 min. 连续3轨将覆盖反太阳方向的半个全天(黄色区域代表地球阴影区) (资料由中科院微小卫星创新研究院提供)

Figure 13 Illustration of the survey mode of EP in orbit as a series of (currently three) pointed observations for ~ 20 min exposure each. EP can cover the entire night sky (anti-solar direction) in three consecutive orbits (credit: MicroSAT).

成对半个天球的一次完整覆盖. 对大部分天区, 每年有约半年时间连续可见(受SAA区域影响的天区除外). 在巡天监测模式下, 每天的监测频率约为5–20次(某些天区有部分重叠), 每次积分时间约为20 min. 因而EP可以开展快速的时域巡天. 考虑到太阳在天球上的移动, 巡天指向中心每天将整体偏移 1° 左右. 每半年EP可以完成一次对全天的基本覆盖. WXT在一天运行时间内对(反太阳方向)不同天区的累积观测时间的分布

图 14 一天运行时间内WXT对天空中不同位置的累积观测时间的分布(由微小卫星创新研究院提供)

Figure 14 Distribution of the accumulated exposure time of WXT in the sky for one-day operation (credit: MicroSAT).

图 15 一天运行时间内WXT对天空中不同位置的观测采样次数统计的分布(资料由中科院微小卫星创新研究院提供)

Figure 15 Distribution of the number of observations with WXT in the sky for one-day operation (credit: MicroSAT).

见图14, 观测采样频次分布见图15.

EP卫星具有在轨实时数据处理和暂现源搜寻功能. 当WXT探测到X射线暂现源或爆发源之后, 星上计算机将实时确定源的位置坐标、流强及可能的粗略能谱. 如果达到触发阈值, 卫星将自主机动, 在4 min内使FXT的光轴指向暂现源目标, 并达到姿态稳定. FXT将获得高信噪比的X射线光变曲线和能谱. 同时, 卫星平台通过快速警报下传系统将暂现源的基本信息发送给地面科学中心, 以触发暂现源警报, 引导其他天文设备开展多波段后随观测. 警报数据下传时延将在分钟量级. 该功能将利用中国北斗卫星导航系统的短报文系统来实现(北斗3号将在2020左右实现全球覆盖). 备份方案是利用法国的VHF基站网. 图16为EP任务运行的

系统示意图.

暂现源的在轨探测和触发是EP研制中的关键技术之一. 其原理是星载计算机实时在整个视场中进行各个时标上(从秒以下到一次观测的最长积分时间)的X射线源的探测. 在探测到源之后, 测量其流量并与星载源表(全天X射线源表如ROSAT巡天、EP以往巡天累积获得的数据等)相比较, 估计光变幅度. 对于信噪比和光变幅度高于触发阈值的源, 可由光变曲线估计光变时标、由光子能量分布估计谱形或硬度比. 综合以上及其他信息(如位置、是否与邻近恒星或星系成协等)对暂现源进行可能的简单分类. 然后按照围绕EP科学目标事先制定的优先级, 判断是否作为重要暂现源触发, 并启动星载触发程序. 在实际运行中, 对于暂

图 16 EP任务运行的系统示意图

Figure 16 Illustration of the system in operation of the EP mission.

现源的触发(尤其是在轨触发), 可靠性是一个重要的考虑因素. 触发的阈值主要由暂现源的可靠性和统计信噪比决定. 既要尽可能完全地检测出探测器记录到的暂现源, 同时也要降低由于噪声或其他因素造成的假源的误触发. 因此, 具体的触发阈值和策略需要在卫星试运行一段时间以后, 根据真实的测量结果进行调整和优化.

根据目前的研究结果, 宇宙中的高能暂现源数目由短时标(小于几千秒)的所谓快速X射线暂现源(Fast X-ray Transients; 如伽玛暴、X射线闪、恒星X射线耀发等)主导. NASA Swift卫星上的BAT监视器对快速X射线暂现源的在轨触发率为平均每年约~170个, 其中伽玛暴约~100个, 其他类型暂现源约~50个, 误触发为20多个. EP WXT预期会有更多的暂现源触发. EP探索的是一个新的灵敏度参数空间, 有很多未知数, 因此暂现源的探测率难以准确地估计. 这仍是目前尚在研究的问题. 根据EP背景型号项目的研究结果, 我们给出一个粗略的估计. 按照WXT的理论灵敏度, 平均一天可探测到约10–20个快速X射线暂现源. 但考虑到星载数据处理能力的局限性和暂现源的可靠性, 作为初步参考的触发条件之一是源的平均流量要高于~10 mCrab. 这使得暂现源数目降低为约每天几个至10个左右. 去除其中的常规恒星X射线耀发, 粗略估计EP的暂现源触发率在每天几个的量级.

对WXT探测到并触发的X射线暂现源, 在满足一定的事先预设的条件下(主要是基于科学目标优先级的考虑所制定的观测策略. 其具体策略是卫星研制期间EP科学应用系统的重要研制内容之一), 卫星星载控制系统将发出指令, 进入FXT的后随跟踪观测模式. FXT后随观测的持续时间预设为几个轨道周期(可能在3–5轨之间; 具体待定). FXT观测的简单结果总结也可以通过快速信息下传系统下传至地面科学应用系统. 通过值班科学家或科学委员会判断是否需要提前终止或延长后随观测, 然后通过快速指令上注来实现. 由于WXT每天触发的暂现源数目较多, 有可能超出FXT进行后随观测的能力. 因此, 对暂现源进行简单分类以初步判断其可能的科学价值是很重要的环节. 这是一项复杂的任务, 目前尚在研究之中.

此外, EP卫星还具有机遇目标观测能力. 对重要而紧急的天文事件, 如引力波事件或其他暂现源事件, 快速指令数据上传非常重要. 目前的方案采用北

斗卫星导航短报文系统. 最快上传时间的目标在分钟量级. 大视场加上快速ToO功能将显著提高对引力波源的电磁波后随观测能力.

爱因斯坦探针卫星有效载荷的重量为340 kg, 功率为430 W. 整个卫星的重量和功率分别为~900 kg和~800 W. WXT由中国科学院上海技术物理研究所与国家天文台联合研制, 其中的微孔MPO器件由北方夜视公司研发. FXT由中国科学院高能物理研究所负责研制. 卫星总体设计、平台研制及集成测试由中国科学院微小卫星创新研究院负责. EP将采用CZ-2C运载火箭, 在西昌发射.

EP卫星的在轨运行和科学运行分别由EP地面支撑系统以及科学应用系统(EP科学中心)完成. 地面支撑系统由中科院国家空间科学中心建设, 将负责完成有效载荷在轨运行和科学探测任务的具体实施, 完成科学数据的接收、预处理和管理, 提供数据服务. 常规观测的数据通过X波段地面站接收包括中国科学院的三亚站和密云站.

EP科学中心由中国科学院国家天文台和高能物理所联合研制, 负责完成科学观测计划制定、指导科学探测的实施, 负责有关科学数据的处理, 负责组织、协调科学团队及领导研究工作的开展.

8 结论

展望2020, 以大视场巡天监测为观测手段的时域天文学将成为天文和天体物理学最为活跃的领域之一, 成为新的发展趋势. 而引力波天文学的开辟更将带动时域天文学进入一个多波段、多信使的黄金时代, 预期会产生重大的天文发现. 高灵敏度、大视场的软X射线全天监测是一个难得的科学机遇. 爱因斯坦探针任务将是未来该领域重要的观测设备之一.

EP卫星是中国科学院空间科学先导专项十三五规划的空间任务项目. 科学载荷包括一个大视场(3600平方度)的软X射线全天监视器和一个后随观测X射线望远镜. 通过采用新颖的微孔龙虾眼X射线聚焦成像技术, 监视器的探测灵敏度比目前在轨运行的同类设备提高1个数量级. 并将开辟一个新的全天监测窗口. EP具有快速反应、暂现源警报的快速下行和(可能的)上传能力. 目前项目已经进入工程研制阶段, 计划2022年底前发射. 运行寿命为3年(目标5年).

EP的科学目标是发现和探索宇宙中各种类型的X射线暂现源和爆发天体. EP有能力对目前尚知之甚少的暂现源类型进行详细的探测和大样本研究, 并发现理论预期但暗于目前设备探测极限的天体, 甚至发现新的天体类型和现象. EP将及时向国际天文界发布所探测的暂现源信息, 以引导下一代国内外大型天文设备开展机遇目标的观测.

预期EP将在以下研究领域做出贡献: 宇宙暂现天体的系统性巡天监测, 发现隐身的沉寂黑洞并测绘宇宙黑洞的分布、研究其形成演化及物质吸积过程, 搜

寻引力波源的电磁波对应体并精确定位等. EP的探测目标非常丰富, 涉及广泛的天体物理学分支, 包括各种尺度的黑洞、引力波源电磁对应体、中子星、白矮星、超新星、伽玛射线暴、早期宇宙和天体、恒星耀发等天体和现象.

EP卫星的研制和运行将进一步提升我国在高能天体物理和时域天文领域的研究水平和探测技术的发展. 其主要探测仪器的关键元器件是与国内相关技术公司联合研发, 这也将促进我国航天及探测技术的提升.

致谢 由于篇幅有限, 未能列出EP项目团队各个单位的所有参与人员, 在此一并表示感谢. 对长期以来对EP项目予以支持、帮助与合作的同事表示衷心的感谢. 感谢郝晋新、张晓宇、包聪颖、曹丽、王慎、胡景耀、马玉倩、薛随建、陶鹏、韦飞、范全林、曹松、任丽文、孙丽琳、郑建华、朱振才、陈雯、余金培、魏建彦、李晔、姚苏、杨雪、常进、王挺贵、周宏岩、R. Willingale, P. O'Brien, J. P. Osborne, M. Matsuoka, N. Gehrels, G. Fraser, B. Cordier, T. Mihara, S. Komossa, M. Feroci, L. Piro等人. 感谢与EP科学工作组成员的广泛而深入的讨论.

参考文献

- Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102, arXiv: [1602.03837](#)
- Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 241103, arXiv: [1606.04855](#)
- Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101
- Gehrels N, Chincarini G, Giommi P, et al. The *Swift* gamma-ray burst mission. *Astrophys J*, 2004, 611: 1005–1020
- Matsuoka M, Kawasaki K, Ueno S, et al. The MAXI mission on the ISS: Science and instruments for monitoring all-sky X-ray images. *Publ Astron Soc Jpn*, 2009, 61: 999–1010, arXiv: [0906.0631](#)
- Gehrels N, Cannizzo J K. How *Swift* is redefining time domain astronomy. *J High Energy Astrophys*, 2015, 7: 2–11, arXiv: [1502.03064](#)
- Gehrels N, Barthelmy S D, Cannizzo J K. Time domain astronomy with Swift, Fermi and *Lobster*. In: Proceedings of the International Astronomical Union, 2011
- Yuan W, Osborne J P, Zhang C, et al. Exploring the dynamic X-ray universe: Scientific opportunities for the Einstein Probe mission. *Chin J Space Sci*, 2016, 36: 117–138
- Yuan W, Amati L, Cannizzo J K, et al. Perspectives on gamma-ray burst physics and cosmology with next generation facilities. *Space Sci Rev*, 2016, 202: 235–277, arXiv: [1606.09536](#)
- Holt S S, Friedhorsky W. All-sky monitors for X-ray astronomy. *Space Sci Rev*, 1987, 45: 269–289
- Yuan W, Zhang C, Feng H, et al. Einstein Probe-A small mission to monitor and explore the dynamic X-ray universe. In: Proceedings of Swift: 10 Years of Discovery, Rome, 2015
- Rees M J. Tidal disruption of stars by black holes of 106–108 solar masses in nearby galaxies. *Nature*, 1988, 333: 523–528
- Komossa S, Bade N. The giant X-ray outbursts in NGC 5905 and IC 3599: Follow-up observations and outburst scenarios. *Astrophys*, 1999, 343: 775–787, arXiv: [astro-ph/9901141](#)
- Komossa S. Tidal disruption of stars by supermassive black holes: Status of observations. *J High Energy Astrophys*, 2015, 7: 148–157, arXiv: [1502.03064](#)

1505.01093

- 15 Burrows D N, Kennea J A, Ghisellini G, et al. Relativistic jet activity from the tidal disruption of a star by a massive black hole. *Nature*, 2011, 476: 421–424, arXiv: [1104.4787](#)
- 16 Liu F K, Li S, Komossa S. A milliparsec supermassive black hole binary candidate in the galaxy SDSS J120136.02+300305.5. *Astrophys J*, 2013, 786: 103–117, arXiv: [1404.4933](#)
- 17 Liu Z, Yuan W M, Sun H, et al. Massive black holes and tidal disruption events at the center of galaxies (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039503 [刘柱, 袁为民, 孙惠, 等. 星系中心大质量黑洞及潮汐瓦解恒星事件. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039503]
- 18 Remillard R A, McClintock J E. X-ray properties of black-hole binaries. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2006, 44: 49–92
- 19 Negoro H, et al. (MAXI team). Discovery of 17 X-ray transients with MAXI/GSC and their nature. In: Proceedings of 7 Years of MAXI Monitoring X-ray Transients, Saitama, 2017. 15–20
- 20 Feng H, Soria R. Ultraluminous X-ray sources in the *Chandra* and *XMM-Newton* era. *New Astron Rev*, 2011, 55: 166–183, arXiv: [1109.1610](#)
- 21 Middleton M J, Miller-Jones J C A, Markoff S, et al. Bright radio emission from an ultraluminous stellar-mass microquasar in M 31. *Nature*, 2013, 493: 187–190, arXiv: [1212.4698](#)
- 22 Sippel A C, Hurley J R. Multiple stellar-mass black holes in globular clusters: Theoretical confirmation. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 430: L30–L34, arXiv: [1211.6608](#)
- 23 Gehrels N, Sarazin C L, O'Brien P T, et al. A short γ -ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift $z=0.225$. *Nature*, 2005, 437: 851–854
- 24 Li L X, Paczyński B. Transient events from neutron star mergers. *Astrophys J*, 1998, 507: L59–L62
- 25 Fan X L, Hendry M. Multimessenger astronomy. *Physics*, 2015, 18: 1591–1595, arXiv: [1509.06022](#)
- 26 Schutz B F. Determining the Hubble constant from gravitational wave observations. *Nature*, 1986, 323: 310–311
- 27 Nissanke S, Kasliwal M, Georgieva A. Identifying elusive electromagnetic counterparts to gravitational wave mergers: An end-to-end simulation. *Astrophys J*, 2013, 767: 124, arXiv: [1210.6362](#)
- 28 Zhang B. Early X-ray and optical afterglow of gravitational wave bursts from mergers of binary neutron stars. *Astrophys J*, 2013, 763: L22, arXiv: [1212.0773](#)
- 29 Sun H, Zhang B, Gao H. X-ray counterpart of gravitational waves due to binary neutron star mergers: Light curves, luminosity function, and event rate density. *Astrophys J*, 2017, 835: 7, arXiv: [1610.03860](#)
- 30 Gao H, Fan X L, Wu X F, et al. Detection of electromagnetic counterpart for gravitational wave bursts (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039504 [高鹤, 范锡龙, 吴雪峰, 等. 引力波爆发事件的电磁对应体的探测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039504]
- 31 Soderberg A M, Berger E, Page K L, et al. An extremely luminous X-ray outburst at the birth of a supernova. *Nature*, 2008, 453: 469–474, arXiv: [0802.1712](#)
- 32 Deng J S, Wang X Y. On the detection of shock breakouts of core-collapse supernovae with the Einstein Probe satellite (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039506 [邓劲松, 王祥玉. 爱因斯坦探针卫星的核塌缩超新星激波暴探测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039506]
- 33 Bromm V, Loeb A. High-redshift gamma-ray bursts from population III progenitors. *Astrophys J*, 2006, 642: 382–388
- 34 Ciardi B, Loeb A. Expected number and flux distribution of gamma-ray burst afterglows with high redshifts. *Astrophys J*, 2000, 540: 687–696
- 35 Butler N R, Bloom J S, Poznanski D. The cosmic rate, luminosity function, and intrinsic correlations of long gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2010, 711: 495–516, arXiv: [0910.3341](#)
- 36 Wei J J, Wu X F, Wang F Y, et al. High redshift gamma-ray bursts as a probe of the early universe and first stars (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039505 [魏俊杰, 吴雪峰, 王发印, 等. 高红移爆发源作为早期宇宙和第一代天体的探针. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039505]
- 37 Li B, Sun H, Wang L J, et al. Special gamma-ray bursts and special radiation components from gamma-ray bursts (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039507 [李兵, 孙惠, 王灵俊, 等. 特殊伽玛暴及伽玛暴的特殊辐射成分. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039507]
- 38 Kaneko Y, Ramirez-Ruiz E, Granot J, et al. Prompt and afterglow emission properties of gamma-ray bursts with spectroscopically identified supernovae. *Astrophys J*, 2007, 654: 385–402
- 39 Levan A J, Tanvir N R, Starling R L C, et al. A new population of ultra-long duration gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2014, 781: 13–34, arXiv:

1302.2352

- 40 Hu Y D, Liang E W, Xi S Q, et al. Internal energy dissipation of gamma-ray bursts observed with *Swift*: Precursors, prompt gamma-rays, extended emission, and late X-ray flares. *Astrophys J*, 2014, 789: 145–157, arXiv: [1405.5949](#)
- 41 Heise J, Zand J, Kippen M, et al. X-ray flashes and X-ray rich gamma ray bursts. In: *Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era*. Heidelberg: Springer, 2001. 16–21
- 42 Olausen S A, Kaspi V M. The mcgill magnetar catalog. *Astrophys J*, 2014, 212: 6, arXiv: [1309.4167](#)
- 43 Wang Z X, Xu R X, Li X D, et al. Detecting magnetars with Einstein Probe (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039510 [王仲翔, 徐仁新, 李向东, 等. 探测磁星的爆发. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039510]
- 44 Pretorius M L, Knigge C. The space density and X-ray luminosity function of non-magnetic cataclysmic variables. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 419: 1442–1454, arXiv: [1109.3162](#)
- 45 Xu X J. Einstein Probe: Application on the observation of cataclysmic variables (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039511 [徐晓杰. 爱因斯坦探针在激变变星探测中的应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039511]
- 46 Mushotzky R F, Done C, Pounds K A. X-Ray spectra and time variability of active galactic nuclei. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1993, 31: 717–761
- 47 McHardy I M, Koerding E, Knigge C, et al. Active galactic nuclei as scaled-up Galactic black holes. *Nature*, 2006, 444: 730–732
- 48 Yuan W, Komossa S, Xu D, et al. Discovery of high-amplitude X-ray variability in the Seyfert-LINER transition galaxy NGC 7589. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 353: L29–L33
- 49 Xue Y Q, Shu X W, Zhou X L, et al. Einstein Probe’s scientific opportunities in the field of active galactic nuclei (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039508 [薛永泉, 舒新文, 周新霖, 等. EP在活动星系核研究领域的科学机遇. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039508]
- 50 Gou L J, Dong Y T, Wang Z X, et al. The X-ray binary system in the EP era (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039509 [苟利军, 董燕婷, 王仲翔, 等. X射线双星系统的探测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039509]
- 51 Angel J R P. Lobster eyes as X-ray telescopes. *Astrophys J*, 1979, 233: 364–373
- 52 Fraser G W, Carpenter J D, Rothery D A, et al. The mercury imaging X-ray spectrometer (MIXS) on bepicolombo. *Planet Space Sci*, 2010, 58: 79–95
- 53 Zhao D, Zhang C, Yuan W, et al. Geant4 simulations of a wide-angle X-ray focusing telescope. *Exp Astron*, 2017, 43: 267–283, arXiv: [1703.09380](#)

Einstein Probe: Exploring the ever-changing X-ray Universe

YUAN WeiMin^{1,2*}, ZHANG Chen^{1,2}, CHEN Yong³, SUN ShengLi⁴, ZHANG YongHe⁵,
CUI Wei⁶, LING ZhiXing^{1,2}, HUANG MaoHai^{1,2}, ZHAO DongHua¹, WANG WenXin¹,
QIU YuLei¹, LIU Zhu¹, PAN HaiWu¹, CAI HongBo¹, DENG JinSong¹, JIA ZhenQing¹,
JIN ChiChuan¹, SUN Hui¹, HU HaiBo¹, LIU FeiFei¹, ZHANG Mo¹, SONG LiMing³,
LU FangJun³, JIA ShuMei³, LI ChengKui³, ZHAO HaiSheng³, GE MingYu³,
ZHANG Juan³, CUI WeiWei³, WANG YuSa³, WANG Juan³, SUN XiaoJin⁴, JIN Ge⁷,
LI LongHui⁷, CHEN FanSheng⁴, CAI ZhiMing⁵, GUO Tong⁵, LIU GuoHua⁵,
LIU HuaQiu⁵, FENG Hua⁶, ZHANG ShuangNan³, ZHANG Bing^{8,9}, DAI ZiGao¹⁰,
WU XueFeng¹¹ & GOU LiJun^{1,2}

¹ Key Laboratory of Space Astronomy and Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

⁵ Shanghai Micro-Satellite Engineering Center, Shanghai 201203, China;

⁶ Tsinghua University, Center for Astrophysics, Beijing 100084, China;

⁷ North Night Vision Technology Group Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

⁸ Department of Physics and Astronomy, University of Nevada, NV 89154, USA;

⁹ Kavli Institute of Astronomy and Astrophysics and Department of Astronomy, Peking University, Beijing 100871, China

¹⁰ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

¹¹ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China

The Einstein Probe is a small mission dedicated to time-domain astronomy to monitor the sky in the soft X-ray band (0.5–4 keV). It will carry out systematic survey and characterisation of high-energy transients at unprecedented sensitivity, spatial resolution, Grasp and monitoring cadence. Its wide-field imaging capability, as provided by an X-ray monitor with a field of view of 3600 square degrees, is enabled by using established technology of micro-pore lobster-eye focusing optics. Complementary to this wide-field instrument is a follow-up X-ray telescope with a large effective area and a narrow field of view. It is also capable of real time triggering and downlink of transient alerts on the fly, in order to activate multi-wavelength follow-up observations by other astronomical facilities worldwide. Its scientific goals are concerned with discovering new or rare types of transients, particularly tidal disruption events, supernova shock breakouts, high-redshift gamma-ray bursts and, particularly, electromagnetic sources associated with gravitational wave events. The mission is planned for launch around end of 2022, with a lifetime of three years and five years as a goal.

X-ray: space science, X-ray: time-domain astronomy, space science mission: Einstein Probe

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

doi: [10.1360/SSPMA2017-00297](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00297)