

爱因斯坦探针卫星 —— 揭秘激荡的X射线宇宙

邓劲松

(中国科学院国家天文台 100101)

在中国科学院空间科学战略性先导专项二期项目中,有一颗计划于2022年底发射升空的X射线天文卫星,命名为爱因斯坦探针(Einsteain Probe,简称EP)。它也是中科院主导的一个国际合作项目,有欧洲空间局和德国马普地外物理所等参加。光看规模的话,这是一颗并不起眼的中小卫星(图1)。那么,它究竟拥有怎样的发现潜力,又被国内外天文学家寄予着何等厚望,以致于要以向科学巨匠爱因斯坦致敬的方式命名呢?

2017年8月17日,天文界发生了一件大事。在费米伽马射线空间天文台上,专用于搜寻伽马射线

暴(宇宙中某处突然发生又转瞬即逝的伽马射线剧增)的GBM仪器被持续2秒的短暴触发;寥寥数秒之内,地面的激光干涉仪引力波天文台(LIGO)也捕获到一例引力波事件。是理论预言的双中子星并合吗?若能确证,就是首次用电磁波和其他信息载体探测到同一宇宙现象(太阳系之外),这标志着多信使天文学大门的开启!然而,对于事件的方位,GBM只能给出1100平方度的天区范围(约全地球1/37),LIGO和室女(Virgo)引力波探测器的联合定位也广至31平方度(见图2)。不过事件距离被限制在约1.3亿光年,不算太远,因此,地面望远镜通过

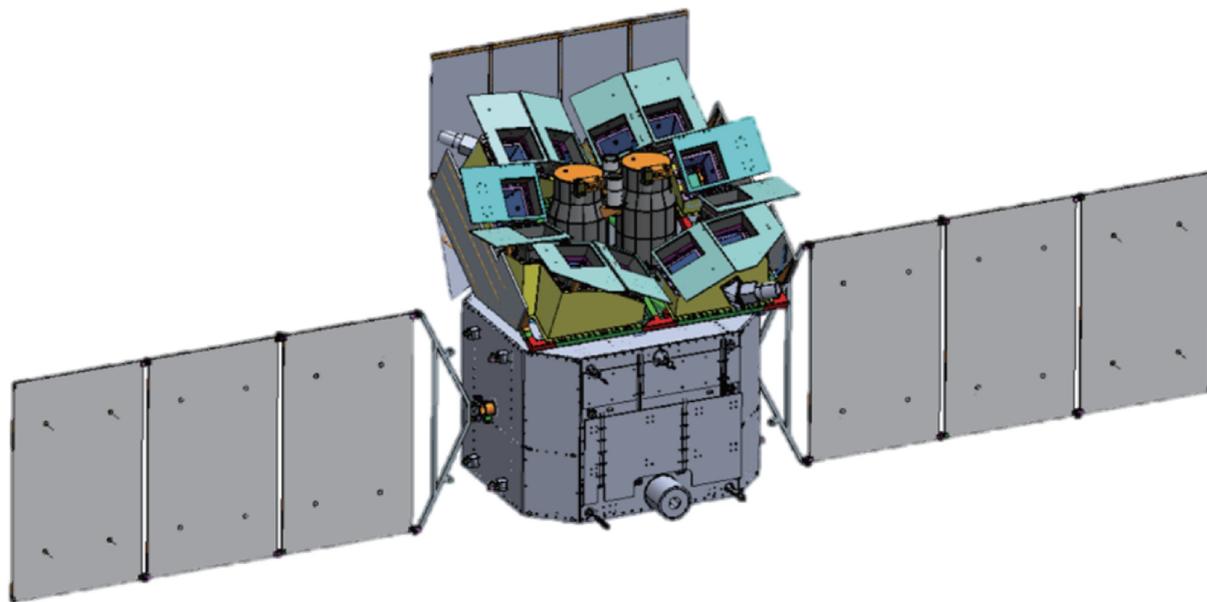


图1 爱因斯坦探针的卫星构型图。围绕中央两台后继X射线望远镜(FXT)、分成12个模块安装的是主科学载荷——宽视场X射线望远镜(WXT)

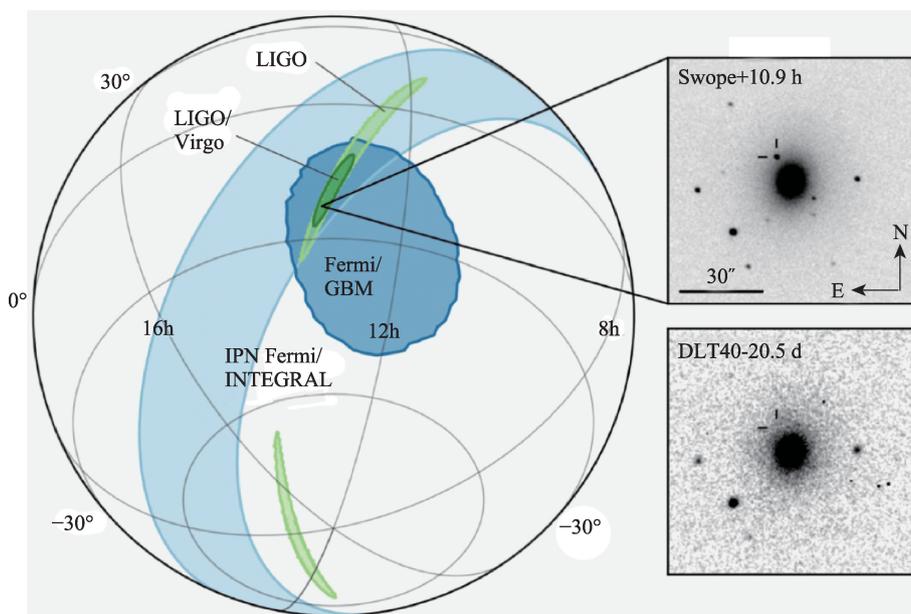


图2 引力波事件GW170817的天球定位(绿色)、伴随伽马射线暴的天球定位(蓝色)、地面望远镜发现的光学对应体(右图短划线)及寄主星系 (图片来源:LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, 2017, *Astrophysical Journal Letters*, 848, L12)

挨个搜索该距离附近的星系,终于在11小时后极其幸运地发现一亮度在急剧衰减的光学对应体,与理论预言双中子星并合导致的千新星(kilonova)现象正相符合——在光谱中探测到稀有的镧系元素;同样的快中子捕获过程也很可能在千新星合成了宇宙大部分的金元素。

众所周知,引力波被誉为爱因斯坦广义相对论皇冠上最耀眼的一颗明珠。随着灵敏度的进一步提升,引力波探测器在未来几年预计能实现双中子星并合事件的批量探测,但太过于粗糙的定位仍难有本质性改善。靠地面光学望远镜后随反应做逐一的星系搜索?千新星亮度足以被观测到的时间十分短暂,幸运未必能频繁降临在天文学家头上。那么,有没有更好的办法?

有的,这正是EP卫星最有希望大展宏图的地方:在X射线波段准实时捕获引力波事件暗弱的电磁波对应体,并实现精确的天球定位!早在七、八年前项目刚开始构思之时(第一个引力波信号尚未被探测到之前),天文学家们就前瞻性地选定其为重要科学目标之一。

这要归功于EP卫星的主科学载荷——宽视场X射线望远镜(WXT)的独特性能。它采用最新的龙虾眼微孔光学,将不小于3600平方度巨大的瞬时观测视场、聚焦型成像的高探测灵敏度和对探测目标优于角分的定位能力结合在一起,史无前例!作为一种高能电磁波,X射线光子在宇宙中常跟极端高温气体或是被加速到近乎光速的相对论性带电粒子联系在一起,双中子星的剧烈并合就被广泛预言伴随有X射线波段的暂现源。而根据EP卫星的运行设计,用不了几个小时,WXT敏锐且一览无余的宽广视野就能扫遍整个可观测天区(初步选定为反太阳方向即整个夜天区);当双中子星并合事件出现,高能电磁波的对对应体若相伴随,大概率将无处遁形。

现有高能天文(X射线或伽马射线)宽视场监测设备或采用编码遮罩技术、或采用准直器,成像只能说是相当模糊,探测效率也受到背景噪声的严重限制,实际上只能探测到极少数明亮的高能天体。要在X射线波段实现较高的空间分辨率和探测灵敏度,就应考虑跟普通的光学望远镜一样,设

法使入射光线在焦面会聚成像。然而,X射线光子对材料的穿透力强大,仅当入射方向与金属表面的夹角非常小时才能产生有效的反射,故称为掠射。以能量5 keV的典型X射线光子为例(作为比照,可见光的光子能量约为1.5~3 eV),假设镜面镀金,掠入射的角度不能大于1度(临界掠入射角反比于光子能量)。不难想见,一般的X射线掠射望远镜其观测视场十分有限,而且这些望远镜受传统工艺的限制,镜体的尺寸和重量都相当可观。

龙虾眼微孔光学,顾名思义是仿生自一些甲壳纲动物的眼睛结构和成像原理。如图3所示,龙虾的眼睛由密布排列成一个球面的大量微小方孔组成,来自远处观测目标的光线进入任何一个微孔,

只要在正交方向的两个内壁各反射一次,就可以会聚在后方1/2曲率的球形焦面上,实现成像。大自然中的龙虾眼,观看的是可见光世界。至于模仿龙虾眼结构的X射线望远镜,全体微孔的指向同样沿球面覆盖排列,理想情形下不存在严格意义上的光轴,来自任一方向的X射线,总能找到满足掠射聚焦成像条件的微孔,因此对非常大视场(由几何张角决定、甚至可能实现 4π 立体角)内的全部观测目标可同时聚焦成像。由于不是所有达到焦面的光线都经过了两次反射,点源的龙虾眼光学像是一个亮斑外加暗淡的十字臂(图3(d))。虽然后者多少会影响对天体特别是面源的成像质量,但中央亮斑足以保证能获得足够好的点源定位精度。

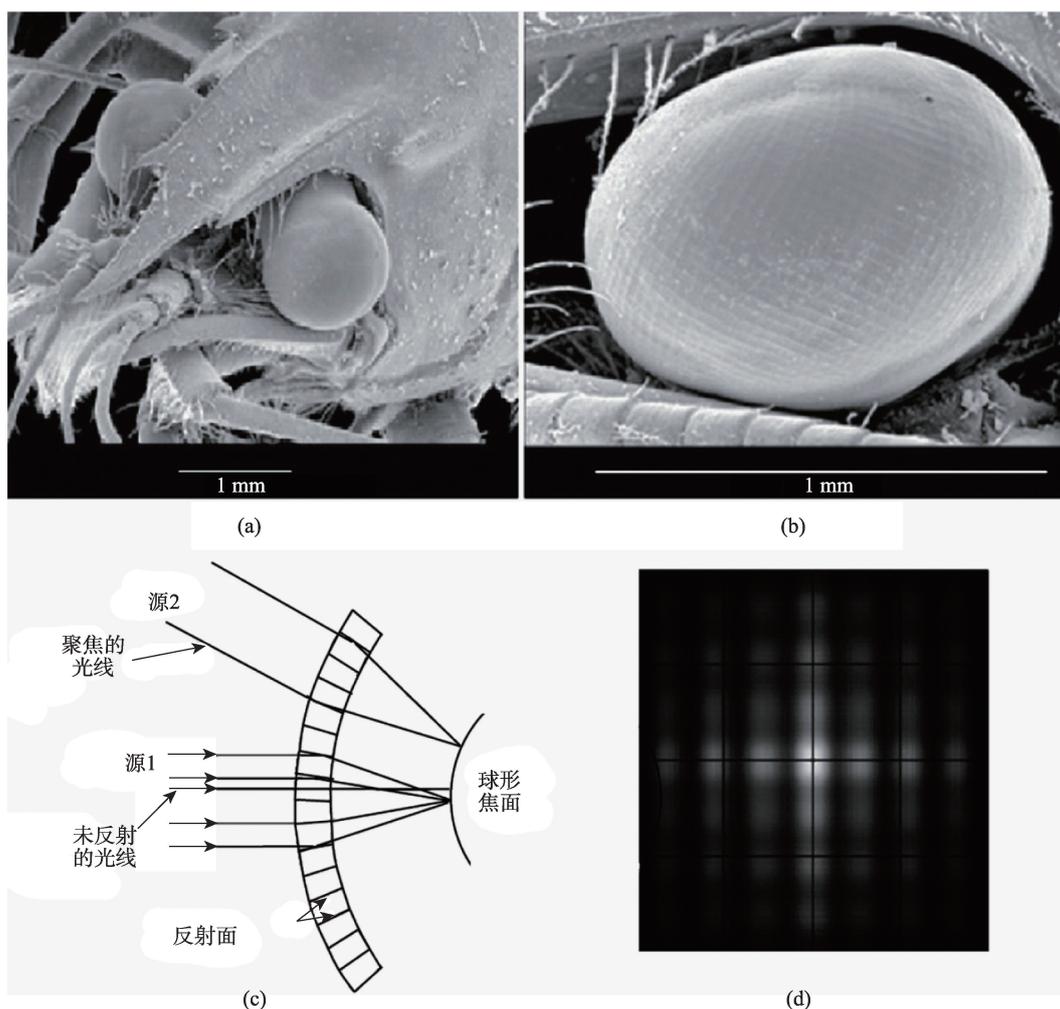


图3 龙虾眼及其显微结构(a)、(b);龙虾眼微孔光学的成像原理示意(c);对单个点源的模拟成像(d)

同样重要的是,龙虾眼X射线望远镜的微孔阵列体可以用玻璃等材料,基于制造微通道板的成熟工艺集成化生产(内壁镀金属以实现X射线掠反射),相比传统技术的X射线望远镜具有显著的轻量化优势。天文学家也不是没有考虑过,比如说在卫星平台上安放多台光学望远镜,将各自不同指向的视场拼接起来实现大视场监测,但计算表明,要足以探测到感兴趣的暂现源,全部望远镜的体积和重量巨大,不具备可行性。地面上建设有大视场的光学小望远镜阵,但严重受限于大气天光背景,探测灵敏度比较低。

回到EP卫星的预期科学发现,引力波事件的电磁波对应体远不是故事的全部。2019年4月10日,又一项惊人的天文成就引发全球轰动——人类首次“看见”了黑洞(更准确的说是其事件视界)。黑洞是爱因斯坦广义相对论最著名的理论预言,即便缺乏最直接的一锤定音的观测证据,天文学家们早已对黑洞在宇宙中的广泛存在深信不疑。事件视界望远镜项目在射电波段“看见”的,是近邻星系M87中央的超大质量黑洞。M87的核区存在大量

气体物质,在引力作用下向超大质量黑洞盘旋下落,环绕其形成巨大的吸积盘,即事件视界望远镜所公布图像的的主体。类似天文现象称为活动星系核,观测上表现为亮度极高且多变的核区、相对论速度的射电或光学喷流等,是超大质量黑洞存在的标识。然而,只有很小一部分星系存在活动星系核现象,那么其他星系是否也存在超大质量黑洞呢?以银河系为例,匮乏可“喂食”的核区气体,中央黑洞非常沉寂,但能从一些与之最近邻恒星的快速公转推断出它的存在。

要探测到可能占超大质量黑洞大部分的星系中央蛰伏黑洞,那些与之最近邻的恒星是关键。由于靠黑洞过近,它们的公转“舞步”险象环生,偶尔越雷池一步,就会走上万劫不复的堕落之路。在吞噬之前,黑洞先用巨大的引力潮汐力将恒星撕碎(图4),通过短暂的吸积释能过程造成一个明亮的暂现源。这就是潮汐瓦解事件,目前已经有一些机缘巧合下的观测实例,主要是在X射线波段(吸积释能导致高温气体和高速粒子),可持续数天。

EP卫星的宽视场X射线望远镜是系统性搜寻

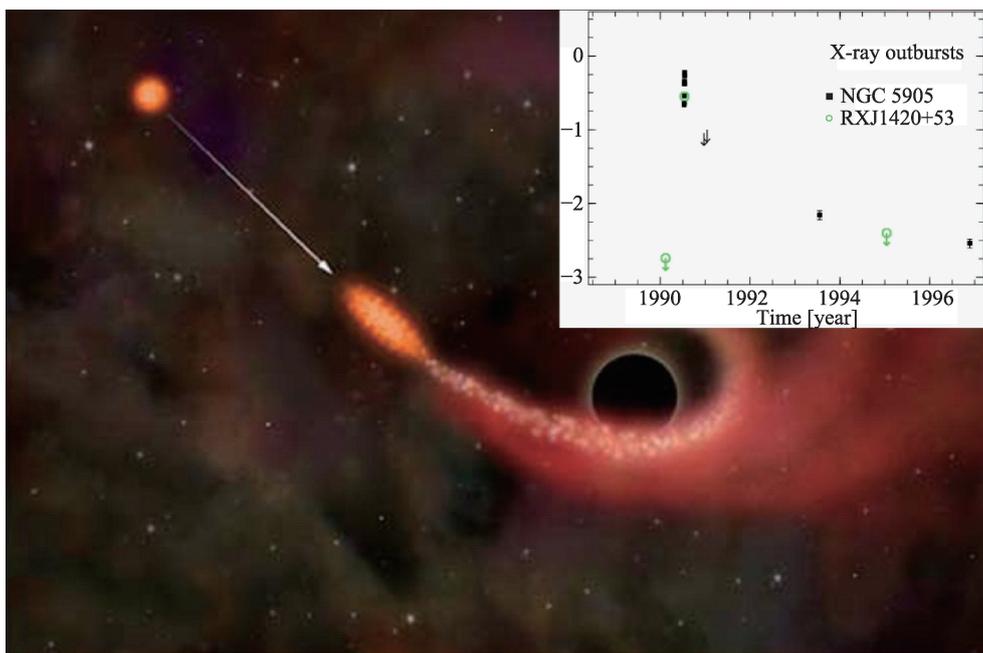


图4 黑洞潮汐瓦解事件的艺术想象图(图片来源:NASA)和1990年代的最早X射线观测事例(X射线流量为对数坐标)(图片来源 Komossa & Dahlem 2001)

潮汐瓦解事件的利器,预估每年或能发现近百例。通过潮汐瓦解事件成批揪出星系中暗藏的超大质量黑洞,将解决后者存在于何处的问题,还能对物质落入黑洞的具体过程开展研究,有助于更深刻地理解广义相对论及黑洞物理。

引力波事件的电磁波对应体,超大质量黑洞的潮汐瓦解事件,EP卫星将要为人类揭秘的就是这样一个激荡不安、瞬息万变的X射线宇宙。对那些尚有幸用肉眼凝视过暗夜繁星的世人而言,印象中的星空也许既深邃而又宁静,但如此广袤的宇宙无疑也充斥着变化。在高能的X射线或伽马射线波段,宇宙就更多呈现出动态万千甚至不乏狂暴的一面,这是因为高能光子通常产生于极端的天体物理环境之中,而这类环境往往非常不稳定,有些仅短暂存在于爆发或灾变性天文现象当中。实际上,大多数高能天体都有复杂的亮度变化行为,比如活动星系核,又比如X射线双星(一颗中子星或恒星级黑洞正在吸积伴星的物质)。而一些原本暗弱到难以探测的天体,有时会倏然增亮而暴露于观测者的视野之中,这就是所谓的高能暂现源,其中大部分又会再度消隐,踪迹从此难觅。

可以说,通过在不同波段全方位监测宇宙星空

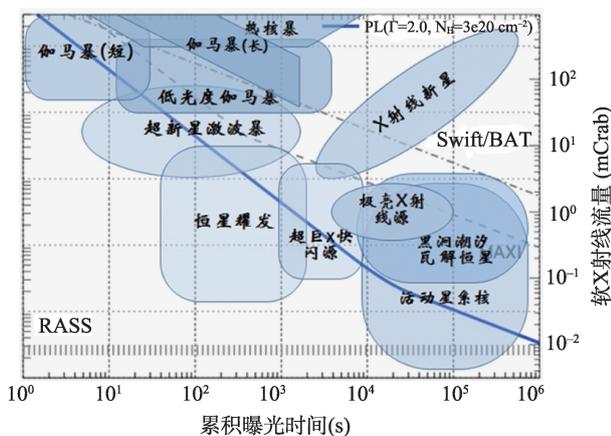


图5 标出典型亮度和时标范围的已知重要X射线暂现源或爆发源以及Swift卫星BAT(点虚线)、国际空间站MAXI(虚线)、EP卫星WXT(粗实线)在不同累积曝光时间下的探测灵敏度(X射线流量单位取标准源蟹状星云的千分之一)

和各类天体的变化,人类正在迈入时域天文学的黄金时代。比如,在地球轨道上运行有费米伽马射线空间天文台、盖瑞斯雨燕天文台(即主科学载荷为编码遮罩望远镜BAT的Swift卫星)、国际空间站上的X射线全天监视器MAXI等,地面上也即将建成LSST项目口径8.4米的光学巡天望远镜。而EP卫星的龙虾眼望远镜WXT工作于约0.5~4 keV的光子能段,将填补在软X射线波段开展全天时域监测的空白。

相比现有的高能大视场监测设备如Swift/BAT和MAXI,EP卫星WXT的探测灵敏度要深一到两个数量级,有望抓拍到各种已知类型的高能暂现源和爆发源(图5),特别是获得一批更遥远、更暗弱的样本。这部分可归功于软X射线能段的光子数优势,更是因为采用龙虾眼微孔光学实现了大视场聚焦成像。这些天体源都有着各自重要的研究价值。以图中伽马射线暴(长暴)为例,在近期各种设备中,EP最有希望获得一批来自宇宙极早期的高红移(即非常遥远的)长暴,它们是窥视早期宇宙的宝贵“探照灯”。又如某些恒星巨大的X射线耀发,比最强的太阳耀斑还要强成千上万倍,会对系外行星的大气和表面环境造成怎样的可怕影响?灵敏度的巨大提升,也暗示着很有可能发现全新类型的时变天文现象或暂现源,将科学探索引入广阔的未知空间。最后,通过对全天做经年累月、高频度、高灵敏度的重复观测,EP将积累各类天体海量的X射线亮度变化数据,全面加深人类对动态宇宙和极端天体物理过程的认识。

天文是技术革命带来驱动效应最为显著的基础学科之一。但要将一门全新的技术很好地应用于天文观测实践并非易事,EP卫星在研制道路上就面临不少关键性的技术挑战。就拿微孔光学镜片来说,原本只能依赖价格不菲的法国厂商定制产品。好在国内一家名为北方夜视公司的厂商开始发力,在同期研制成功微孔光学镜片,经中科院国

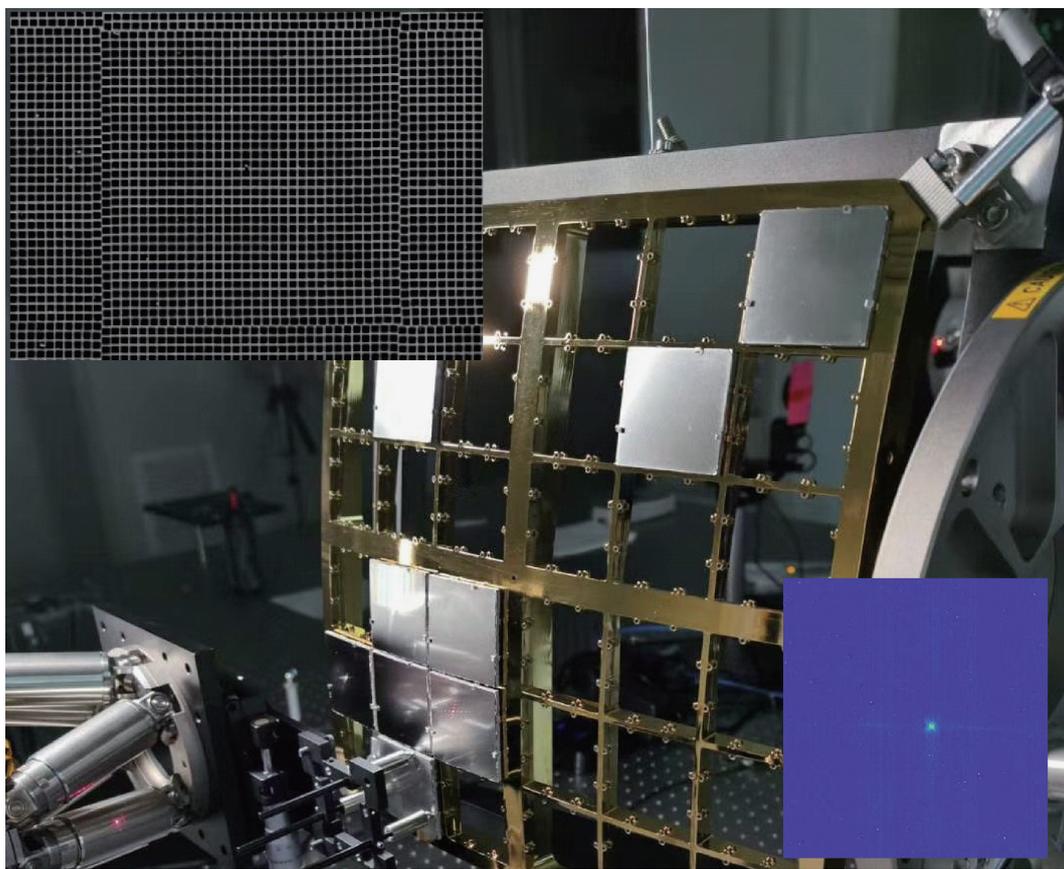


图6 国家天文台组装中的WXT光学系统的模块样机、其一个镜片的显微照片(左小图)、点源的成像测试结果(右小图)

家天文台X射线光学实验室组装测试(图6),对点源的成像质量特别是中心亮斑形状显著优于国外器件,这已得到国外技术权威的充分认可。

还有一个大麻烦是WXT焦面的光子探测器。如此大规模的聚焦成像焦面在高中能天文中绝无仅有,必须用大量高空间分辨率的面阵X射线探测器拼接覆盖。项目曾考虑采用国内大学研制的一种微气体室探测器,但很快认识到,像元网格的封装薄膜在空间面临大量微流星体的撞击,不久就会损失殆尽。传统技术的X射线掠射望远镜多采用X射线CCD做焦面探测器,因为观测视场小,一片或几片即可。遗憾的是,满足天文需求的科学级CCD只能从国外进口,每片都价格昂贵,而WXT需要好几十片,总成本令人咂舌,远远超出项目承受能力。

虽说CCD曾引发光学天文的革命,还在很大程度上改变了人类社会(故此赢得诺贝尔物理学奖),

但近几年无论是在工业领域还是民用如数码相机、手机摄像头等,同为硅半导体器件的CMOS已全面取代CCD,天文观测也许是后者最后一个重要阵地了(也是最早的)。能不能改造CMOS用来探测X射线光子呢?我们知道,X射线天文一般采用单光子计数方式以排除背景干扰,因此要求面阵探测器具有非常高的读出帧频,CMOS的寻址式读出相对CCD的电荷转移式读出无疑具备优势。然而,要有效探测到高材料穿透力的X射线光子,必须在硅半导体像元中生成很厚的载流子耗尽层,这跟CMOS在像元内集成读出微电路的工艺多少有所冲突。

带着部分专家的怀疑,在国家天文台的支持下,项目前期大胆协作和资助国内新起的一家科学级CMOS厂商开展技术攻关,力促X射线CMOS探测器试制成功,成像测试结果令人满意。这是EP卫星的又一项重大技术创新,有望在国际上成为

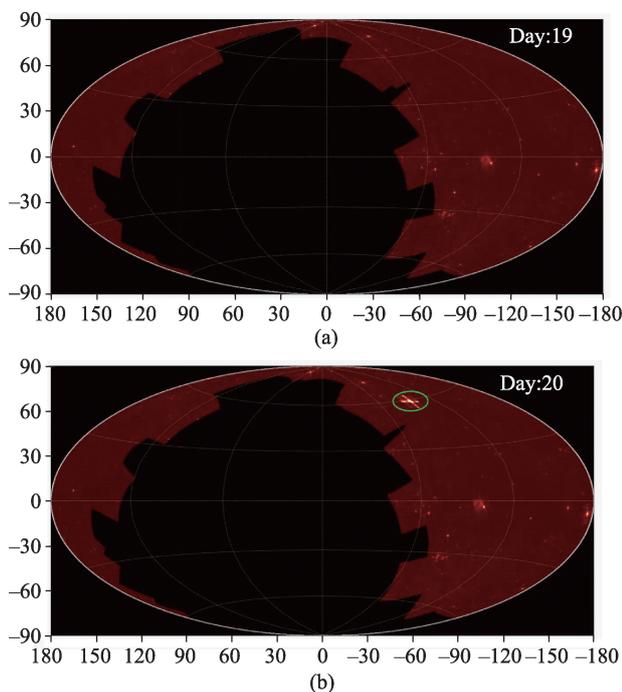


图7 计算机模拟的相邻两日的WXT单日巡天观测所得天图(银道坐标系)和一个明亮的X射线暂现源((b)绿圈所示)

CMOS探测器在空间的首例天文观测应用,具有标志性的意义。

EP卫星的宽视场X射线望远镜由上海技术物理所、国家天文台和北方夜视公司联合研制,参与单位还有国家空间科学中心。而负责卫星总体研制的是上海微小卫星创新研究院。卫星于2022年底发射升空后,将运行在高度600公里左右的近地轨道上,轨道面相对于地球赤道的夹角约30度不到一点。卫星设计寿命不少于3年,不出意外的话,实际应能正常工作至少5年以上。

作为一颗发现型的科学卫星,EP可视为一台全自动的空间机器人。如图1所示,在WXT之外,科学载荷还有两台窄视场的后随X射线望远镜(FXT),同时对准WXT的视场中心并互为备份。FXT是传统技术的掠射X射线望远镜(由中科院高能物理所负责,联合欧洲空间局和马普地外物理所共同研制,参与单位还包括中科院理化所),灵敏度比WXT更高,定位精度达到角秒级。在常规工作模式下,卫星平台携带着WXT逐个大面积天区做

较长时间凝视,每天完成数次对可观测夜天区的覆盖性巡查(见图7模拟图)。一旦发现X射线暂现源或爆发源,星载计算机实时计算源的天球位置,指挥卫星平台做指向机动,使FXT迅速对准新源开展后随观测。与此同时,卫星会在第一时间向地面和国际互联网发布突发天文事件预警,引导国内外的天文观测设备开展多波段、多信使的深度后随观测。为了提高实时性,预警信息既可以下传到一个沿赤道南北覆盖分布的VHF(甚高频)地面接收站网络,也将利用北斗卫星导航系统独特的短报文功能。对于非EP卫星发现的突发天文事件,比如不巧落在WXT瞬时视场之外的引力波事件,还可以借助北斗短报文将信息上传,引导卫星迅速开展机遇性的X射线后随观测。

从卫星提案公开之日起,爱因斯坦探针就引起时域天文和X射线天文方面国内外同行的广泛关注,也在中国科学院组织的专题国际论坛上获得了高度评价。欧洲空间局和欧洲一些天文研究机构主动与项目联系,希望通过技术和工程合作的方式参与,以期能分享部分科学产出。EP卫星已正式进入欧洲空间局和中国科学院的官方合作计划,如法国将为WXT的实时预警信息提供地面VHF通信网,德国马普地外物理所为FXT提供pnCCD焦面探测器,而英国莱斯特大学作为龙虾眼微孔光学的研发先驱提供技术经验支持,等等。

中国的空间天文观测虽然起步很晚,有姗姗来迟之憾,但在强大国力的支撑下,随着工业技术能力和天文研究水平的提升,正在迎头赶上。在EP卫星工作期间,预期在轨的还会有开展伽马射线暴探测的GECAM卫星和SVOM卫星,以及运行了数年的慧眼号X射线天文卫星。它们的观测对象虽各有异同,探测性能也各有所长,但都着眼于高能时域天文,有望开展协同工作,互补有无,届时势必成为国际上该领域的主力,为人类揭示宇宙激荡之相的更多奥秘。