

探索极端宇宙

张双南 卢方军 徐玉朋 董永伟 刘红薇

(中国科学院高能物理研究所 100049)

国际物理和天文界最近半个多世纪的最重大成果就是建立了基于量子力学和相对论的粒子物理标准模型和大爆炸宇宙学标准模型。从此,人类对物质世界的研究就一直向着无穷小的微观—基本粒子和无穷大的宏观—宇宙这两个极端不断地延伸。对于物质结构的研究就是逐步逼近“无穷小”,也就是通过在加速器对撞机中产生和加速的高能粒子的碰撞打碎物质,对越深层次、越小尺度的研究,需要的粒子碰撞的能量就越高,这是物理研究的高能量前沿。对于宇宙的研究就是逐步逼近“无穷大”,也就是探索的尺度越来越大,距离越来越远,时间越来越逼近宇宙大爆炸的时刻,对应的宇宙的温度就越来越高,这是天文学研究的高温度前沿。高能量必然对应高温度,高温度必然对应高能量。因此,加速器对撞机高能实验实际上就是重现宇宙早期高温度的微观物理过程,而对宇宙早期的研究则可以观测到宇宙早期高温度和高能过程所产生的宇宙效应。对无穷小和无穷大的研究密不可分,相互促进。

当今对于宇宙的研究,已经超越了早期只能利用地面望远镜观测可见光和射电信号的阶段,进入了观测携带宇宙各种信息的全波段电磁波和各种非电磁波载体的多信使时代,比如X射线、伽马射线、宇宙线、中微子和引力波等。随着空间技术的快速发展,空间X射线、伽马射线和宇宙线天文台为宇宙的研究带来了全新的信息,揭示了宇宙的一系列极端过程、极端天体以及极端物理效应,同时又提出了一系列重大的“极端宇宙”科学问题,亟待

利用更先进的空间天文仪器开展研究。研制更加先进的空间粒子探测和空间X射线天文台,有望在暗物质粒子的搜寻、高能宇宙线的加速机制以及产生高能宇宙线的天体源等方面取得新的进展,并且精确检验广义相对论、量子电动力学和量子色动力学在宇宙极强引力、极强磁场和极高密度下的理论预言,发展基础物理理论。

1. 极端宇宙科学问题

目前有六个亟待解决的“极端宇宙”的重大科学问题,涉及暗物质、高能宇宙线、黑洞和中子星等。

(1) 极端起源:大量的天文观测事实,比如对大量星系外围的恒星和气体的旋转曲线的观测研究、对星系团的动力学和引力透镜的观测研究以及对宇宙微波背景辐射各向异性的观测研究,都表明宇宙中普遍存在大量不发光但是产生引力的暗物质,暗物质和“正常”的发光物质的比例大约是6:1。宇宙结构的形成依赖于在宇宙大爆炸的“极端起源”之后很快产生的这些暗物质,然而,非常成功的粒子物理标准模型中则没有暗物质粒子,表明我们对于宇宙的“极端起源”还缺乏最基本的认识。找到暗物质粒子并且确定暗物质粒子的性质是解决宇宙“极端起源”问题的关键之一。然而,目前对暗物质粒子搜寻和探测的各种方法和实验都没有成功地找到暗物质粒子,只有一些空间粒子探测实验找到了一些“疑似”暗物质粒子的“迹象”,比如国际空间站的AMS-02实验探测到正电子“超出”信号和我国的“悟空”号暗物质粒子探测实验DAMPE所发现

* 代表HERD和eXTP项目团队

的高能电子谱的疑似“尖峰”结构。但是仅仅根据这些观测结果并不能确认暗物质粒子的存在,更不能确定暗物质粒子的性质,迫切需要下一代精度更高的空间高能粒子实验为解决宇宙“极端起源”问题提供前所未有的新观测数据。

(2) 极端能量:1913~1914年,海斯利用热气球携带的辐射探测器发现了来自于地球以外的辐射,也就是宇宙射线。一个世纪以来的宇宙线观测研究不断地促进粒子物理的大发展,而且发现了宇宙射线的最高能量可以达到 10^{20-21} 电子伏,远远超过人类在地球上建造的最高能量的粒子加速器所能产生的 10^{13} 电子伏的能量。宇宙中什么样的高能粒子加速器通过什么机制能够产生这么高能量的宇宙射线?这就是“极端能量”的宇宙射线世纪之谜。通过地面或者高山的大气级联簇射宇宙线间接探测实验,可以探测到最高能量的宇宙射线,然而很难确定宇宙射线的成分;通过空间的宇宙线直接探测实验,可以区分不同成分的宇宙线,然而目前的空间实验能够探测的能量范围较窄,还不能覆盖宇宙线能谱的 10^{15-16} 电子伏之间的“膝”,而这个“膝”被认为是理解宇宙线的银河系还是河外起源的关键。因此需要下一代的空间宇宙线直接探测实验覆盖到膝区,通过对“膝”的精确能谱形状和成分的测量理解宇宙线起源和加速机制。

(3) 极端天体:大型地面宇宙线探测实验 AUGER 最近发现最高能量的宇宙射线的空间分布和宇宙的星系分布有关联,表明最高能量的宇宙射线来自于银河系之外的星系,然而并不能确定是哪一种“极端天体”通过什么方式产生了高能宇宙射线。最近南极的 IceCube 中微子天文台和费米空间伽马射线天文台发现了一个中微子很可能来自于一个活动中的超大质量黑洞——产生伽马射线辐射的耀变体,表明活动的超大质量黑洞很可能是产生高能宇宙射线的“极端天体”。然而目前只有这么一个事例,而且探测的显著性也没有达到科学发现标准的5倍标准偏差,需要未来更灵敏的伽马射线巡天仪器发现更多的能够产生高能宇宙射线的

“极端天体”,并且理解超大质量黑洞的活动如何产生高能宇宙射线。

(4) 极端引力:科学家利用地球实验室、太阳系和双脉冲星对爱因斯坦一百多年前建立的广义相对论引力理论进行了检验,未发现实验/观测和理论预言的任何偏离。然而这些检验都是在弱引力势和弱空间曲率的条件下进行的。黑洞能够提供更强的引力势和更显著的空间曲率,因此对广义相对论理论的检验将更加严格。黑洞附近的物质由于其高温、高密度和高速度,会产生强烈的X射线辐射(这也是发现黑洞的最佳手段之一)。目前的空间X射线望远镜虽然已经发现了很多黑洞并且探测到一些广义相对论效应,但是仍然不能精确地检验广义相对论。未来高精度的X射线时变、能谱和偏振观测有望对广义相对论做出精确的检验。

(5) 极端磁场:真空涨落是量子力学的基本预言之一,目前已经得到了一些实验的验证。根据海森堡不确定原理,在极短的时间内,真空涨落的能量变化可以产生有质量的正反粒子对,比如正负电子对。在一般的情况下,所产生的正负电子对会立刻湮灭。但是在极强的“极端磁场”中,真空涨落产生的电荷相反的正反粒子对将会被磁场约束并且沿相反方向运动,使真空具有类似于晶体的结构,这就使得在这种真空中传播的X射线将会产生特殊的真空双折射偏振效应,类似液晶的显示原理。宇宙中的中子星表面具有宇宙中最强的磁场,其中“磁中子星”的表面磁场比实验室中人造最强的稳定磁场还要强百万亿倍,是检验这一量子电动力学预言的最佳宇宙实验室,而高灵敏度的空间X射线偏振望远镜将是进行这种检验的最佳实验仪器。

(6) 极端密度:由于其非微扰计算的困难,对描述强相互作用的量子色动力学的理解仍然不够完备,这主要体现在关于重子物质的“密度-温度”相图(或者核物质的“状态方程”)的实验数据不够完备方面。宇宙早期对应于最高温度,高能质子对撞机能够产生的是稍低一点的温度(但是很低的密度),重离子对撞机对应更低的温度但是稍微高一些的

密度,而宇宙中目前的“极端密度”(但是最低温度)只存在于中子星的内部。但是所谓的“中子星”内部到底主要是由中子物质还是由夸克物质组成的,目前仍然存在很大的争议,也被称为是中子星物理的“终极问题”。通过对具有“极端密度”的中子星的X射线高精度时变、能谱和偏振观测,有望在理解非微扰量子色动力学的关键问题的同时,回答中子星到底是“中子”星还是“夸克”星这个重要科学问题。

宇宙中涉及以上六个“极端宇宙”的重大科学问题的大部分现象、过程和机制都和引力、磁场以及粒子加速过程有关。近年来兴起的交叉学科“粒子天体物理”或者“高能天体物理”所关注的大部分重大科学问题都和这些问题有关,因此研究这些重大科学问题的研究方向和从事这些研究的科学家有很多交叉,也有很多科学家同时关心上述多个甚至全部的科学问题。

“极端起源”的核心科学问题是暗物质粒子的性质,不但可以通过在空间探测暗物质粒子湮灭或者衰变产生的次级粒子进行搜寻,而且也可以通过X射线观测进行研究,两者互为补充。“极端能量”的核心科学问题是高能宇宙射线的加速机制,不但可以通过在空间对宇宙线的直接探测进行研究,而且可以通过X射线和伽马射线的观测找到高能宇宙线产生的“极端天体”。回答“极端引力”的科学问题,不但需要通过X射线观测黑洞附近的时空性质,也需要研究从黑洞附近抛射出的相对论喷流的行为,喷流内部的激波以及喷流和外围物质的作用就极可能是产生高能宇宙线的基本过程。中子星作为宇宙“极端磁场”和“极端密度”科学研究的天然实验室,也能够产生大量的高能电子和正电子。尽管AMS-02和“悟空”号发现了正电子和总电子谱的“异常”,但是这些“异常”到底是脉冲星的贡献还是来自暗物质粒子的湮灭,目前存在很大的争议,其主要原因之一就是对于中子星的理解还不够完善。

所以十分有必要通过学科交叉和融合,充分利

用来自宇宙和天体的高能粒子(如高能电子、高能质子和各种原子核以及高能伽马射线)和X射线辐射的时变、能谱和偏振等多波段和多信使的丰富信息,系统地研究和回答上述六大“极端宇宙”科学问题。

为了系统地研究和回答上述六大“极端宇宙”科学问题,中国科学院高能物理研究所于2007年同时提出了放置于中国空间站的高能宇宙辐射探测设施(HERD)和增强型X射线时变与偏振(eXTP)空间天文台两个项目概念。前三个“极端问题”的研究主要基于HERD的空间高能粒子探测,eXTP的空间X射线观测能够提供重要的补充和完善;而后三个“极端问题”的主要研究手段是空间X射线观测,空间高能粒子探测则能够做出重要的补充和完善。相比于国际上以往的类似项目,HERD和eXTP的综合科学性能指标有数量级的提升,并可长期保持国际领先。

2. 国内外发展现状

2.1 空间粒子和高能辐射观测研究现状

在空间高能宇宙线和暗物质探测领域,国际竞争非常激烈,实施了一系列球载、星载和国际空间站上的高能粒子探测项目。如以电子、宇宙线核子为主要科学目标的球载ATIC和CREAM实验;以伽马射线观测为主要科学目标的CGRO/EGRET和FERMI卫星实验;以反物质、暗物质搜寻为主要科学目标的PAMELA谱仪卫星和国际空间站上的AMS-02谱仪实验,国际空间站上的CALET和ISS-CREAM宇宙线探测器;以及中国的暗物质粒子探测卫星DAMPE。

作为探测极端宇宙的另一条途径,空间X射线天文观测一直以来就是国际竞争激烈的前沿学科领域。1970年NASA发射了自由号(“Uhuru”)X射线天文卫星,标志着天文学进入了卫星观测的时代。经过五十多年的发展,X射线天文学的空间探测设备从简单的巡天型的探测器发展为复杂、昂贵和大型的天文观测平台,相关的观测目标和科学主

题也日渐丰富。1999年美国 and 欧洲先后发射了 Chandra X-Ray 天文卫星和 XMM-Newton X-Ray 天文卫星,这两台迄今为止最为先进的 X 射线望远镜仍在运行,和其他后来发射并仍在运行的卫星一起,为 X 射线天文学带来了空前的繁荣。我国也于 2016、2017、2020 和 2024 年分别发射了 POLAR 伽马射线偏振仪、慧眼 X 射线天文卫星、GECAM 伽马射线全天监视器和爱因斯坦探针 X 射线卫星,2024 年中还将发射中法合作空间多波段天文卫星 SVOM,步入了国际空间 X 射线和伽马射线的观测研究前沿。

2.2 空间粒子和高能辐射观测研究的科学规划

美国天文界每十年制订一个中长期发展规划,推荐应该优先研究的科学主题以及为实现这些目标需要建造的地面和空间望远镜。2010 年 8 月发布的第 6 个“天文十年调研报告”《New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics》中,提出的三个首要科学目标是:1) 恒星、星系和黑洞的起源;2) 发现太阳系外宜居类地行星;3) 宇宙的基本物理

规律。

根据报告建议,NASA 批准实施了 X 射线天文项目,包括“中子星内部组成探测器”(NICER,2017 年发射)和成像型偏振探测器 IXPE(2021 年 12 月发射)。原计划与欧洲、日本合作的大型项目“国际 X 射线天文台”(IXO)则逐渐演变为欧洲主导、美国主要参加的 ATHENA 项目,目前计划 2038 年发射。

2015 年,美国启动第 7 个“天文十年调研报告”(2020 Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics,简称 Astro2020),并于 2021 年 11 月初发表了本轮“天文十年调研”报告《Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s》。报告指出未来 10 年(2023~2032)三个优先发展的天文学和天体物理学方向:1) 太阳系外宜居星球;2) 新信使和新物理;3) 宇宙生态系统,即恒星与星系的产生与演化。在空间天文方面,建议遴选一个旗舰级空间望远镜项目作为哈勃望远镜的真正继任者,另外遴选若干中型空间项目,聚焦时域和多信使天文学研究。三个科学主题和大、中型项目部署计划见图 1 Astro2020 委员会建议的未来 10 年天文学和天体物理学领域的三大主题和大型及中型项目部署计划。

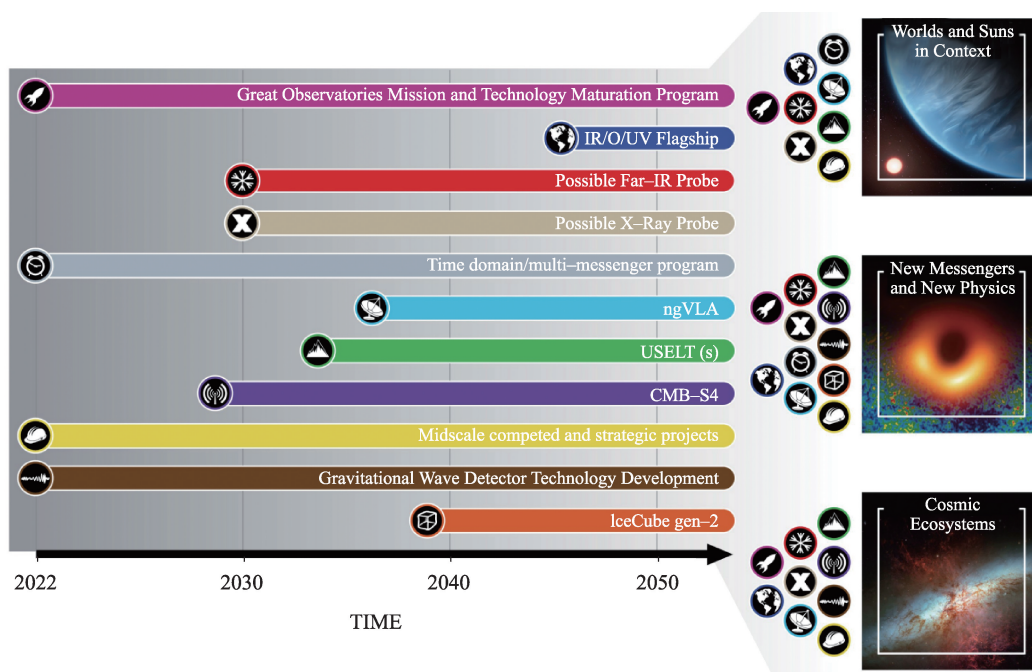


图 1 Astro2020 委员会建议的未来 10 年天文学和天体物理学领域的三大主题和大型及中型项目部署计划

Astro2020 报告中,关键词“extreme”出现了 86 次,其中大约一半是极端引力,极端能量,极端密度,极端磁场,极端加速器,极端爆发等涉及“极端宇宙”的科学问题。具体的研究对象方面,“black hole”出现了 325 次,“neutron star”出现了 114 次,“cosmic ray”出现了 86 次,凸显出对“极端宇宙”的科学问题的极其高度的重视。

eXTP 项目的提出使我国在“极端宇宙”重大问题研究中占有了先机。Astro2020 的“致密天体与高能现象”委员会提出了四个重大问题,其中一个 eXTP 的核心科学问题:“中子星和黑洞的质量以及自旋如何分布?”,两个是 eXTP“天文台科学”的重要科学问题:“什么驱动横跨电磁波波段的各种爆发现象?”和“致密天体如何产生接近光速的喷流以及喷流的物质成分是什么?”。这个报告还把这些大问题分解为若干 eXTP 能够重点研究的具体科学问题,包括“从中子星和黑洞的自旋和质量分布如何知道这些天体的形成和演化?”“极端密度物质的状态方程是什么?”“喷流如何发射和加速?”“喷流的组成以及粒子在喷流中是如何加速的?”等。

具体项目方面,Astro2020 指出需要填补中小探索任务卫星(3~5 亿美元)和大型战略任务卫星(~100 亿美元)之间的“探针”任务(即中型任务,约 10 亿美元),补充 ESA 的 ATHENA 任务在研究极端条件下基本物理规律方面能力的不足,因此把与 eXTP 科学目标和项目方案十分相似、但是提出较晚的 STROBE-X 推荐为候选 X 射线卫星项目,形成了对 eXTP 的直接竞争。STROBE-X 项目在其公开发表的科学白皮书中声称,不能把该重要科学研究领域的领导权拱手让给中国。

Astro2020 报告中进一步指出,“自从上一次十年调研以来,四种探测手段(引力波、中微子、伽马射线和宇宙线)的巨大进步构成了新信使天文学。”“观测极端加速器具有高优先级”,建议“第一步就是建设功能强大的新信使天文台”,但是“(美国)已有设备正在寿命末期……美国将会失去领导权”。报告把 HERD 列为 GeV-PeV 能量范围唯一批

准的未来空间实验,因此未推荐新的实验和 HERD 竞争。

欧洲航天局 ESA 的 Voyage 2050 规划委员会中的“极端宇宙”研究组也指出:对极端引力场、极端电磁场中的高能粒子和光子,以及超高密度和压力下物质状态的研究,是基本物理规律取得突破的主要途径之一。

由中国科学院牵头组织完成的国家空间科学中长期发展规划(2023~2045)把“极端宇宙”列为五大科学主题之一,其优先任务方向之一是“暗物质与极端宇宙”。具体内容为:

- 至 2027 年,实施高能宇宙辐射、X 射线、太赫兹等协同观测任务,探测暗物质候选粒子,揭示宇宙线起源和传播特征,确定中子星内部结构和组成,精确检验极端磁场条件下量子电动力学理论,首次太赫兹探测暂现源;

- 2028~2035 年,实施紫外时域天文、空间高能、X 射线观测任务,精细刻画致密天体诞生过程,精确检验黑洞视界附近广义相对论,探究宇宙重元素起源;

- 2036~2045 年,实施空间甚大面积伽马射线、大型光学观测任务、超轻暗物质探测任务,发现暗物质粒子信号。暗物质粒子间接探测及理解宇宙各种剧烈爆发现象,需要多波段观测及引力波等多信使手段。

这是我国积极主动应对美欧“探索极端宇宙”战略部署的重要举措。可以预期,HERD 和 eXTP 两个探索极端宇宙项目的实施将全面提升我国在空间天文、粒子天体物理等相关领域的科技创新实力,同时,将对粒子物理和宇宙学基础理论、量子色动力学、量子电动力学等其他领域产生突破性贡献。

3. 探索极端宇宙项目 HERD 和 eXTP 简介

探索极端宇宙科学研究计划将针对“极端宇宙”的六大科学问题,研制 HERD 和 eXTP 两台国际领先的大型空间科学观测研究设备。这两个项目

的主要研究内容分别简要描述如下。

3.1 HERD 项目简介

高能宇宙辐射探测设施(HERD)项目是计划安装在中国空间站上的空间天文和粒子天体物理实验。HERD 计划于 2027 年左右发射并安装在中国空间站上正式运行 10 年以上,其核心科学能力将长时间保持大幅度国际领先,代表着空间高能宇宙辐射探测的跨越式发展,将成为中国空间站标志性的旗舰级重大科学实验和具有重大影响的空间科学研究项目。

2021 年,国际宇宙线大会总结报告中,HERD 被列在未来重要宇宙线实验第一位,强调 HERD 将测量高能电子能谱到数十 TeV 从而发现临近源能谱的重要特征,指出 HERD 的宇宙线测量可达 3 PeV 从而首次直接测量宇宙线的“膝”的形状和成分,把空间实验和地面实验的测量范围连接起来,消除目

前不同实验之间系统误差所造成的测量结果的混乱局面。这是理解银河系宇宙线的起源和加速的关键之一。

如图 2 所示,HERD 有效载荷包含三维成像量能器、硅径迹仪、塑闪探测器、硅电荷探测器和穿越辐射探测器等五种探测器。HERD 计划与多功能舱一起发射入轨,安装位置如图 3 所示。

HERD 项目的主要科学研究内容包括:精确测量宇宙线电子能谱及可能的暗物质信号寻找;宇宙线原子核能谱的测量和宇宙线物理研究;伽马射线巡天和监视等前沿科学研究。

3.2 eXTP 项目简介

eXTP 是硬 X 射线调制望远镜(HXMT)——“慧眼”卫星之后我国下一代旗舰级 X 射线天文卫星。综合考虑核心科学目标的科学需求和资源约束,eXTP 卫星将配置以下两种主要载荷:1) 能谱测量

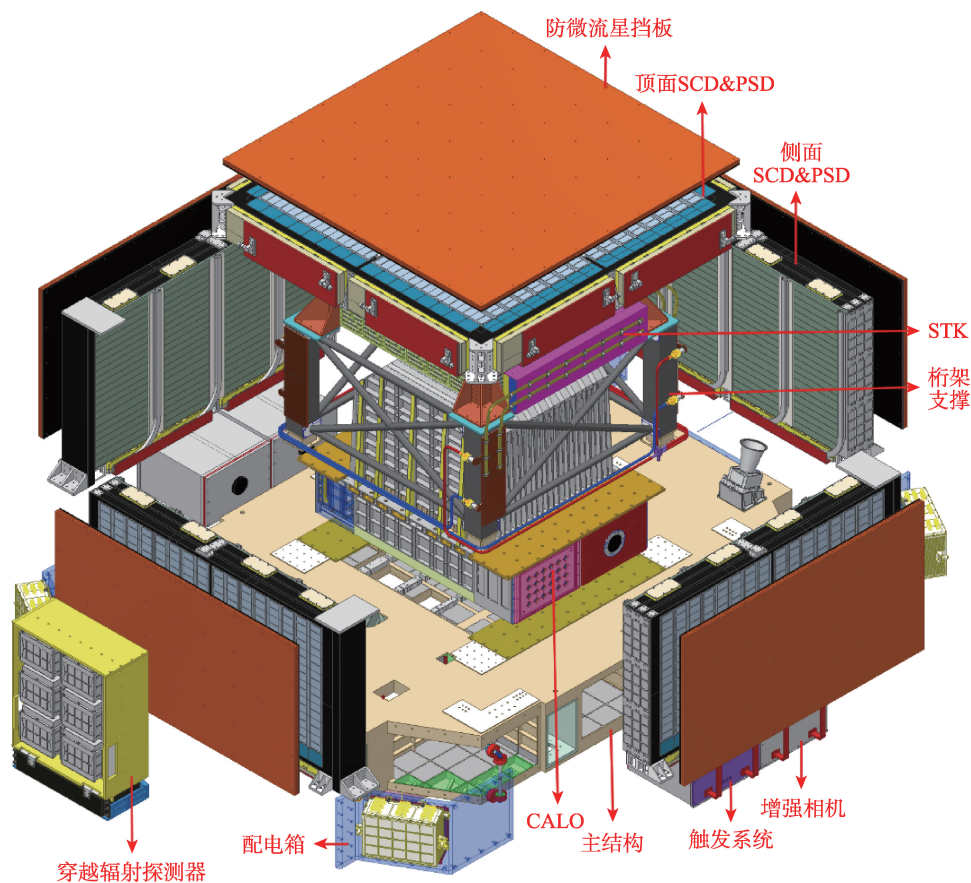


图 2 HERD 载荷整体组成示意



图3 HERD安装位置示意图

X射线聚焦望远镜阵列(SFA);2) 偏振测量X射线聚焦望远镜阵列(PFA)。另外,为了进一步丰富eXTP的其他科学目标,将安装1~2个宽视场X射线变源监测器宽视场相机(WFM)及若干高能X射线探测模块。

2018年3月,中国科学院宣布启动eXTP背景型号研究之后,美国的*Science*杂志随即以“中国为

一个雄心勃勃的X射线天文台磨刀(China hones plans for ambitious X-ray Probe)”专文报道了eXTP项目的科学意义;这篇文章的副标题是“项目将稳固中国在X射线天文领域领导者之一的地位(Mission would firm up China’s status as a leader in X-ray astronomy)”。这说明,eXTP项目及其研究的极端宇宙科学问题,引起了国际科学界的高度关注。

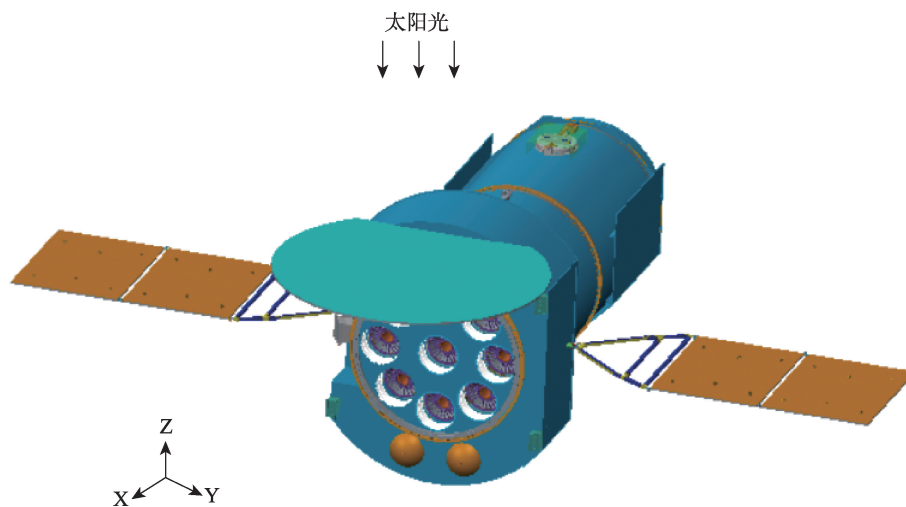


图4 eXTP卫星在轨展开状态示意图

eXTP天文台计划于2028年左右发射,将运行在远地点高度110 000 km、周期48小时的大椭圆轨道上,对黑洞、中子星或夸克星等天体进行高时间分辨、高能量分辨、高精度偏振观测,揭示宇宙极端引力、极端磁场和极端密度下的基本物理规律。

4. 结论

人类对物质世界的研究向着微观—基本粒子和宏观—宇宙研究两个极端不断延伸,取得了巨大的成就。然而,目前仍然有关于宇宙极端条件下物理规律的6个重大科学问题亟待解决:1) 极端起源:宇宙大爆炸的极端过程产生的暗物质和普通物质的比例是大约6:1,但是目前还没有发现暗物质粒子;2) 极端能量:高能宇宙线的能量比人造加速器产生的粒子能量高至少一亿倍,但是其极端粒子加速过程还不清楚;3) 极端天体:宇宙中的高能伽马射线源很可能是宇宙极端高能粒子加速器,但是仍未得到充分证认;4) 极端引力:黑洞提供了宇宙中最强的引力场,但是在这种极端引力条件下会发生什么现象还没有精确的观测结果;5) 极端磁场:中子星提供了宇宙中最强的磁场,但是在这种情况下真空涨落会产生什么还没有直接的观测结果;6) 极端密度:中子星内部的物质密度在宇宙中最高,但是物质是以中子还是夸克状态存在仍然是未解之谜。

为了系统地研究和回答上述六大“极端宇宙”科学问题,目前计划在2027~2028年前后将已经从2007年开始并且完成了概念研究、科学目标优化、关键技术攻关以及方案设计的中国空间站HERD实验和eXTP空间天文台发射入轨。前三个“极端问题”的研究主要基于HERD的空间高能粒子探测,eXTP的空间X射线观测能够提供重要的补充和完善;而后三个“极端问题”的主要研究手段是空间X射线观测,空间高能粒子探测则能够做出重要

的补充和完善。相比于国际上以往的类似项目,HERD和eXTP的综合科学性能指标有数量级的提升,并可长期保持国际领先。

致谢:本综述主要内容来自《探索极端宇宙国际大科学计划战略研究》《中国空间站高能宇宙辐射探测设施(HERD)有效载荷实施方案》和《增强型X射线时变与偏振空间天文台(eXTP)实施方案》等三个报告,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 美国第6个“天文十年调研报告”《New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics》, National Research Council (U.S.). Committee for a Decadal Survey of Astronomy and Astrophysics, 2010.
- [2] 美国第7个“天文十年调研”报告《Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s》, the National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2021.
- [3] Voyage 2050, Final recommendations from the Voyage 2050 Senior Committee[EB/OL].[2021-10-12].
- [4] 国家空间科学中长期发展规划(2023~2045),中国科学院,2023年9月.
- [5] 探索极端宇宙国际大科学计划战略研究报告(内部,经评审通过),2009年4月.
- [6] 中国空间站高能宇宙辐射探测设施(HERD)有效载荷实施方案(内部,经评审通过),2023年12月.
- [7] 增强型X射线时变与偏振空间天文台(eXTP)实施方案(内部,经评审通过),2024年2月.

