

# 探索极端宇宙

## ——从HXMT到eXTP和HERD

徐玉朋 陈 勇 董永伟

(中国科学院高能物理研究所 100049)

历经24年,经过几代人的传承和不懈努力,2017年6月15日我国第一颗X射线天文卫星——“硬X射线调制望远镜(HXMT)”发射成功,并被命名为慧眼<sup>①</sup>。得益于其大面积、宽能区、高能量分辨率和高时间分辨率等设计,“慧眼”作为一个小型X射线天文台在引力波事件、快速射电暴等高能爆发现象以及X射线双星的快速时变观测等方面都拥有独特的优势,并已取得了一系列显著成果,成为探索极端宇宙的利器。在研制“慧眼”卫星的同时,我国也启动了下一代旗舰级高能天文台的概念研究和关键技术攻关,包括增强型X射线时变与偏振天文台(eXTP)和高能宇宙辐射探测设施(HERD),提出了中国主导的“探索极端宇宙(EXU)”国际大科学计划,将在更宽的能量范围和更高的精度下进一步探测极端宇宙,回答关于物质深层次结构和宇宙大尺度物理规律方面的一系列基础科学问题。

### 1. 慧眼-HXMT卫星

#### 1.1 科学目标

HXMT卫星在1993年提出时,其主要科学目标是用直接解调方法以好于5角分的分辨率实现硬X射线能区的首次成像巡天,发现大批被尘埃遮挡的超大质量黑洞和其他高能天体,观测仪器设计以当时国内技术基础较好的基于闪烁晶体的硬X射线探测器为主<sup>②</sup>。在随后的关键技术研究及立项论证过程中,根据国际上高能天文发展态势以及国内探测技术的发展,设计不断优化,最终形成了

1~250 keV宽能量覆盖,并采用准直器组合视场实现空间调制的方案,使得HXMT除了可以进行大天区巡天观测,又能通过宽波段时变和能谱观测研究X射线双星等天体的高能过程,其核心科学目标如下<sup>③</sup>:

1) 对银道面进行经常性的扫描观测,如果发现新的X射线源或监测到已知的变源进入爆发态,可以启动深度定点观测,同时协调其他空间和地面天文望远镜进行多波段联合观测。

2) 对X射线双星的快速光变进行宽波段观测,研究其在强引力场和磁场条件下的动力学过程和辐射机制。

3) 在数百keV到数MeV能区进行伽马射线暴探测,寻找引力波暴的电磁对应体。

#### 1.2 慧眼天文台的观测仪器配置

X射线也是电磁波的一种,可以利用其波动特性进行聚焦成像或通过色散获得高分辨能谱。但由于其波长非常短(1~250 keV对应的波长是1.24~0.005 nm),聚焦或色散对光学系统的精度要求非常高,技术难度大,而且光收集的效率非常低,扩大有效接收面积的代价非常大。因此,“慧眼”主要利用X射线的粒子性,采用准直器(由一组平行的栅格构成)限制视场,即只允许目标天体及其附近的X射线辐射通过,并用大面积探测器阵列直接记录每个X射线光子的能量和到达时间,统计其能量分布和单位时间内的光子数即可得到能谱和时变信息。进一步通过卫星的姿态控制可以对全天或特定的天

空区域进行扫描观测,采用直接解调的算法完成成像观测。

为了实现宽能量范围覆盖,“慧眼”的观测仪器由3个采用不同探测器技术的望远镜系统构成<sup>④</sup>:高能X射线望远镜(HE),中能X射线望远镜(ME)和低能X射线望远镜(LE)。如图1所示,3个望远镜相互独立,准直器视场的轴线指向相同,具体配置详见表1。天体的辐射一般是幂律谱,光子数随能量的增加而减少,因此为了获得大致相同的统计量,LE、ME和HE的有效面积分别设计为384、952和5100 cm<sup>2</sup>。各望远镜准直器视场均以长条形为主,并按一定角度分组排列实现空间调制(见图2)。部分准直器采用了“全遮挡设计”,即采用金属盖板封闭其视场,对应的探测器仅用于空间带电粒子引起的仪器本底的测量,以便得到准确的本底模型,提高观测灵敏度。

在低能端,天体辐射往往有“线谱”,因此LE采

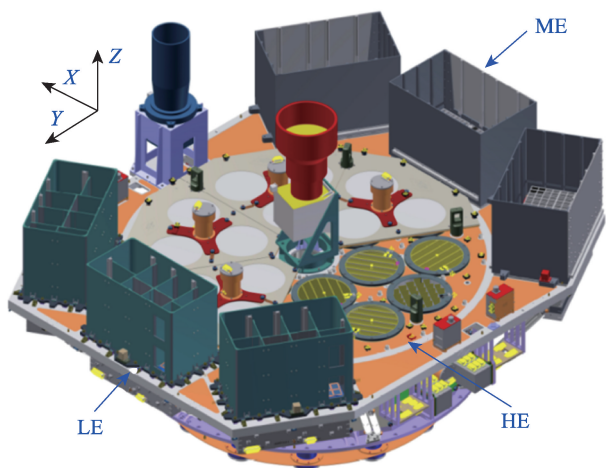


图1 慧眼卫星观测仪器构型(所有望远镜准直器轴线互相平行,并指向图中+Z方向)

用了高能量分辨的半导体探测器——专门为高时间分辨应用设计的扫式电荷转移器件(SCD)实现1~15 keV的能量范围<sup>⑤</sup>。高能端光子数则相对少得多,而且通常没有窄谱线,因此HE主探测器采用大面积的NaI(Tl)/CsI(Na)复合晶体探测器,其中前端3.5 mm厚的NaI用于接收目标天体的X射线光子,设计能量范围为20~250 keV。安装在NaI背面的CsI,以及安装在主探测器正面和侧面的18个塑料闪烁体探测器,可以感知高能带电粒子以及背面入射的高能光子,并进行标记,实现主动式反符合屏蔽,排除背景的影响<sup>⑥</sup>。CsI除了用做NaI的主动屏蔽,本身可以作为一个大面积探测器阵列,构成伽马射线暴监视器,其能量范围为40~600 keV(普通模式),或200 keV~3 MeV(低增益模式)。ME主要工作在5~30 keV,与HE和LE的能区有一定覆盖,一方面是为了不同仪器之间的交叉定标,另一方面又可以更精确地测量10~30 keV之间宇宙X射线背景谱的形状,根据能量分辨和有效面积的综合考虑,选用了由厚度1 mm硅构成的PIN型探测器<sup>⑦</sup>。

探测器阵列采用分布式读出,即分组独立设置读出电路。每一组探测器的计数率均较低,处理一个光子占用的“死时间”内,新的光子出现的概率比较低,信号丢失或堆积的概率大大降低,观测强源的时候不会像聚焦型望远镜那样被“亮瞎”。

### 1.3 卫星在轨运行情况

HXMT卫星姿态的基本控制模式是惯性空间三轴稳定,即望远镜的视轴(即准直器的轴线)指向目标天体并保持不动进行定点观测(“凝视”)。在此基础上可以让望远镜视轴在整个天球上或银河系

表1 慧眼卫星观测仪器配置

探测器	面积(cm <sup>2</sup> )	实际工作能量范围	能量分辨	时间分辨	准直器视场
HE NaI(Tl)/CsI(Na) (18组)	5100	NaI: 20~350 keV; CsI: 40~600 keV(普通模式), 200 keV~3 MeV(低增益模式)	17%@60 keV	10 μs	1.1°×5.7°; 5.7°×5.7°; 全遮挡
ME Si-PIN (1728路)	952	8~35 keV	15%@20 keV	255 μs	1°×4°; 4°×4° 全遮挡
LE SCD (96路)	384	1~12 keV	2.5%@6 keV	1 ms	1.6°×6°; 4°×6°; 2.5°×60°;全遮挡

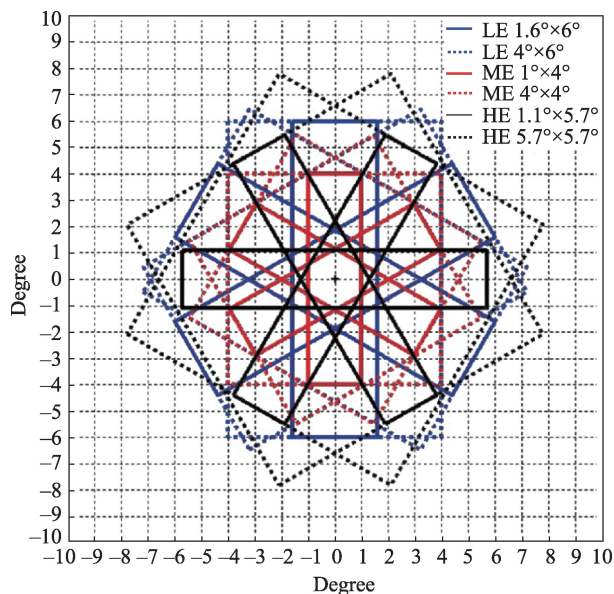


图2 慧眼天文台望远镜的视场设计

中心等重点区域进行扫描,通过这种“扫视”可发现新的天体源或监测已知的天体源是否进入活跃状态。另外,还可以在一个比较小的天区内按预定的路径进行慢扫,用于对新天体定位或监视该天区内已知天体流量的变化。此外,在开展上述观测的同时,HE的CsI探测器可以持续监视伽马射线暴。

慧眼卫星于2017年6月15日11:00在酒泉卫星发射中心用长征4号乙火箭发射进入预定轨道,任务概况如表2所示<sup>⑧⑨</sup>。卫星入轨后首先开展了为期10天左右的卫星平台功能测试,包括测控、数传、

表2 慧眼卫星任务概况

项目	设计指标
轨道	高度550 km,倾角43°
重量	2500 kg
观测模式	准直探测器:定点(凝视)、扫描 非准直CSI探测器:大天区监视
源定位能力(1 $\sigma$ )	精度1',分辨5'
灵敏度	0.5 mCrab
扫描速度	0.01°/s, 0.03°/s, 0.06°/s
姿态控制精度(3 $\sigma$ )	≤0.1°(实测达到0.02°)
姿态测量精度(3 $\sigma$ )	≤0.01°
姿态稳定度	≤0.005°/s(实测0.0005°/s)
临时观测(ToO)响应时间	~5 h
数据下传码速率	120 Mbps
寿命	4年

姿态控制和轨道高度控制等功能。接下来对3个X射线望远镜进行了详细的测试、标定和试运行,于2018年1月30日正式交付。

## 2.“慧眼”对极端宇宙的初步探索

回顾近5年《自然》(*Nature*)和《科学》(*Science*)杂志评选的年度重大科学发现和科学突破,与天文学相关的新发现多次上榜:首次直接探测到引力波、发现太阳系外行星(2016),双中子星并合引力波事件(2017),南极“冰立方”探测器(IceCube)首次发现宇宙中高能中微子来源(2018),“事件视界望远镜”获得首张黑洞照片(2019),首次确定快速射电暴来源(2020)。除了系外行星,这些发现都与天体的极端状态或过程有关,慧眼卫星在其中的双中子星并合引力波事件联合观测和快速射电暴来源论证中都起到了非常关键的作用。

曾轰动一时的双中子星并合引力波事件GW170817(按发生时间2017年8月17日命名)是质量分别为0.86和2.26倍太阳质量的两颗中子星相互绕转并不断靠近最终发生碰撞产生的。美国的激光干涉引力波天文台(LIGO)和欧洲的室女座引力波天文台(Virgo)同时探测到了引力波,费米(Fermi)伽马射线卫星独立探测到约1.7 s之后发生的伽马射线暴GRB170817A<sup>⑩</sup>。全球有几十台天文设备对GW 170817开展了后随观测,确定这次的引力波事件发生在距离地球1.3亿光年之外的NGC 4993星系中。“慧眼”在这个时刻成功监测了引力波源所在的天区,但没有显著地测量到有效信号,说明其在高能区(0.2~5 MeV)的辐射不会超过仪器的噪声水平,因此对其伽马射线电磁对应体(简称引力波闪)的辐射性质给出了严格的限制,为全面理解该引力波事件和引力波闪的物理机制做出了重要贡献<sup>⑪</sup>。

快速射电暴(简称FRB)是2007年才发现的一种神秘天文现象,即出现在射电波段持续时间仅毫秒量级但极其明亮的爆发现象。观测表明绝大多数FRB来自银河系之外,有的会重复出现,但很多

仅是一闪而过,其产生机制目前还没有定论,天文爱好者甚至猜测是外星人发送的信息。2020年4月28日的一个FRB除了被两个射电望远镜观测到,包括“慧眼”在内的多个高能天文卫星也同时观测到其X射线对应体。在这次观测中“慧眼”发挥了面积大、能量覆盖范围宽、时间分辨好,同时具有比较好的定位能力的优势,获得了最为丰富、精细的时变和能谱信息,首先证认其来自于银河系内的一颗磁星,与国际上其他望远镜一起破解了FRB200428的起源之谜<sup>⑩</sup>。

此外,慧眼卫星在轨运行4年以来还获得了银道面扫描巡天、黑洞、中子星、太阳耀发等大量观测数据,平均每年也观测到100个左右的伽马射线暴。从中产生的有代表性的科学成果有:首次以高于 $5\sigma$ 的统计显著性测量到了能量超过80 keV的中子星磁场中的电子回旋吸收线,为迄今测量到的宇宙最强磁场 $\sim 10^9$ 特斯拉;发现了高于200 keV的黑洞双星系统的准周期振荡(QPO)现象,将对QPO观测研究的能区从低于30 keV扩展到了 $\sim 200$  keV的非热辐射能区,开拓了新的窗口,提供了全新的信息;发现了黑洞双星向外高速运动的等离子体流,并且首次在黑洞双星中观测到冕的速度演化;发现了中子星的单个I型核爆对吸积盘冕的冷却现象;对银盘的扫描监测到大量X射线天体的宽波段爆发活动并且发现了多个新变源的候选体;完成了脉冲星导航试验,定位精度可达到10 km ( $3\sigma$ )。上述成果的详细介绍请参考本专题其他文章。

虽然在轨运行已4年,但慧眼卫星的健康状况仍然非常好,计划开展更多的观测,预期取得更多成果。慧眼卫星的官方网站(<http://www.hxmt.cn>)刚刚在2021年4月初发布了第4轮提案征集公告,其中客座观测向全球科学界开放。

### 3. 中国下一代旗舰级高能空间天文台

#### 3.1 探索极端宇宙计划

2005年,《Science》杂志为纪念其创刊125周年,列出了最具挑战的125个科学问题<sup>⑪</sup>。其中第一个

问题就是“宇宙是由什么构成的?”<sup>⑫⑬</sup>这是伴随人类文明产生的一个古老而深刻的问题,是推动科学发展和进步的主要驱动之一。时至今日,人类在对这个问题的认识上向物质世界的两极不断拓展,在物质深层次结构方面建立了粒子物理标准模型,包括了所有已知基本粒子及其相互作用,而宇宙大尺度结构及其起源方面则建立了大爆炸宇宙学标准模型。这两个模型在各自的领域都非常成功,但近年更精确的实验和观测结果也不断提出新的挑战,例如粒子物理标准模型还无法解释中微子的质量来源,也无法解释宇宙学模型中必须存在的暗物质粒子。最新的 $\mu$ 子反常磁矩测量结果也可能揭示“新物理”的存在<sup>⑭</sup>。宇宙学方面也出现了“哈勃常数危机”,即根据微波背景辐射推算的哈勃常数和本地测量结果并不一致<sup>⑮</sup>。因此,这些“标准”模型还需要进一步完善,作为其理论基础的广义相对论和量子色动力学等基本物理规律也需要进一步检验,尤其是在宇宙起源和演化过程中存在的高密度、高温、强引力等一系列极端状态下是否仍然成立。

我国在“慧眼”等X射线天文卫星的建造和在轨观测过程中,积累了经验和技術,拓展了科学研究领域。在此基础上,我国学者瞄准物理和天文领域中一系列与暗物质、粒子加速、超大质量黑洞、强引力场、强磁场和极高密度相关的6个重要科学问题,即:极端起源、极端能量、极端天体、极端引力、极端磁场和极端密度,提出了“探索极端宇宙”(Explore eXtreme Universe,简称EXU)计划。以上每一个问题的解决都可能带来人们对物质世界基本规律的突破性认识,也会将人类对宇宙的演化和极端天体及其活动的认识推进到一个新高度。

EXU除得到我国多个部门和支持,也得到意大利、德国、西班牙和瑞士等国家科学家的支持并积极参加合作,形成了一个中国领导的国际大科学计划,并根据实现手段的不同分解成两个具体任务:将放置于中国空间站的高能宇宙辐射探测设施(HERD)项目<sup>⑯⑰⑱</sup>和基于大型卫星平台的增强型X射线时变与偏振空间天文台(eXTP)项目<sup>⑲⑳㉑</sup>。

其中 HERD 主要通过直接探测宇宙线核子和伽马光子来研究前三个问题,兼顾其他问题,而 eXTP 工作在 X 射线波段,以研究后三个问题为主。这两个项目的主要性能指标见表 3,HERD 的能量范围与其他宇宙线实验项目的比较见图 3,eXTP 有效面积与现有 X 射线天文台的比较见图 4。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均有数量级的提升,并可长期保持国际领先。

表 3 HERD 与 eXTP 主要性能指标

性能	HERD 指标	eXTP 指标
探测范围	高能粒子、伽马光子	X 射线光子
能量范围	10 GeV ~ 100 TeV (电子); 0.5 GeV ~ 100 TeV (光子); 30 GeV ~ 3 PeV (宇宙线核子)	0.5 ~ 30 keV
能量分辨	1% @ 200 GeV (电子/光子) 20% @ 100 GeV-PeV (质子)	≤ 180 eV @ 6 keV
角分辨	0.1°@10 GeV (光子)	30"(成像偏振探测)
电荷分辨 (核子)	0.1~0.15 c.u.	-
电子-质子鉴别能力	10 <sup>6</sup>	-
时间分辨/精度	1 μs (时间同步精度)	分辨 10 μs, 绝对精度 2 μs
最小可测偏振度	-	~1.6%
有效面积、几何因子	≥ 3 m <sup>2</sup> sr @ 200 GeV (电子) ≥ 2 m <sup>2</sup> sr @ 100 TeV (质子)	≥ 0.4 m <sup>2</sup> @6 keV (聚焦) ≥ 3 m <sup>2</sup> @6 keV (准直) ≥ 380 cm <sup>2</sup> @ 3 keV (偏振) ≥ 3 sr (宽视场监测)

### 3.2 探索极端宇宙计划的主要科学目标

(1) 极端起源:暗物质在宇宙学标准模型中扮演着极其重要的角色,产生于大爆炸之后仅仅 10<sup>-10</sup> (一百亿分之一)秒的“极端状态”,决定着宇宙的结构和演化过程。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。暗物质粒子与普通物质有可能发生“弱相互作用”,但截面非常小(即发生概率非常小),国际上开展的数十个直接探测实验有效探测介质已经达到数吨的水平,但都没有结果。另一种独立的方法是

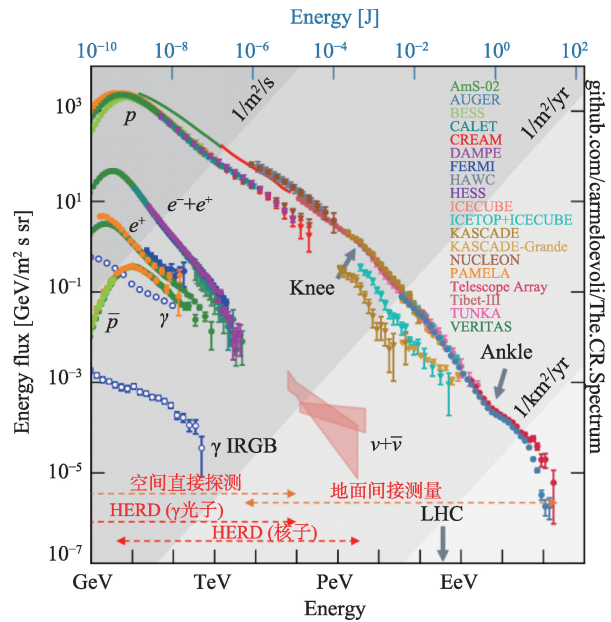


图 3 原初高能宇宙能谱(2000~2020年各实验项目测量结果,源自文献<sup>③</sup>),包括各主要成分及所有粒子的总流量随能量的变化。横坐标为粒子能量,用两种单位来表示,即微观上常用的电子伏(eV)和宏观上常用的焦耳(J)。图中标出了 LHC 加速器质子-质子对撞的固定靶等效能量,以及 HERD 能够覆盖的能量范围

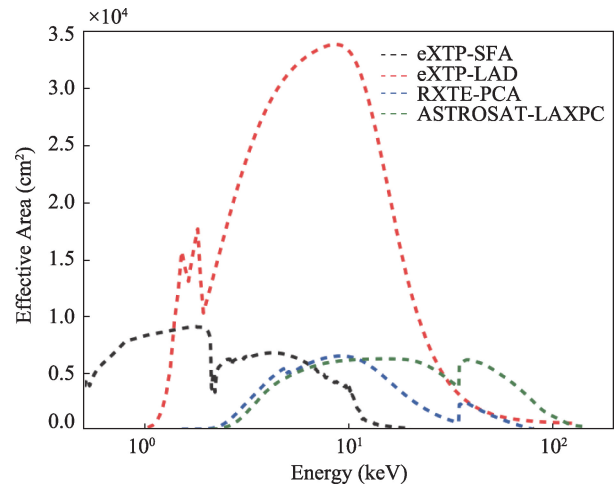


图 4 eXTP 的有效探测面积<sup>④</sup>

探测暗物质粒子湮灭或衰变后产生的伽马射线或反物质粒子(正电子和反质子),通过其特异的能谱结构来寻找暗物质存在的证据。近些年,暗物质的间接探测已经取得了一定进展,但也只是找到了一些“疑似”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 所发现的高能电子潜在

1.4 TeV附近的疑似“尖峰”结构<sup>⑤</sup>。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。HERD可以在相同以及更高的能量范围内进行更高统计量和更精确的测量,以前所未有的高灵敏度通过能谱结构和方向分布确认暗物质存在的证据。

(2) 极端能量:粒子物理学起源于对宇宙线的研究,正电子、 $\mu$ 子、K介子、 $\pi$ 介子等粒子都是从宇宙线中发现的。早期探测到的这些宇宙线粒子,其实主要是来自宇宙空间的原初宇宙线与大气中原子核作用产生的各种次级粒子。如果次级粒子的能量仍然很高,将通过级联反应产生更多的次级粒子并分布在更大的空间范围,形成广延大气簇射。利用这一机制可以在地面或高山布置大范围的探测器阵列来测量原初宇宙线的能量。原初宇宙线的主要成分是质子和氦原子核,以及少量碳和铁等原子核,广义的宇宙线还包括电子、正电子、反质子和高能伽马射线等。图3给出了2000年之后各实验项目测量到的原初宇宙线中各种成分及所有粒子的总流量与能量的关系,即宇宙线能谱。单个粒子的最高能量已经达到 $10^{20}\sim 10^{21}$  eV,即几十焦耳。包含所有粒子的总能谱曲线形状看起来像一条伸开的腿,在 $10^{15}$  eV和 $10^{18}$  eV附近的拐点则被形象的称为“膝”和“踝”。这些拐点预示着不同能量的宇宙线的产生、加速和传播机制可能不同。要彻底回答这些问题需要精确测量宇宙线的能谱和成分。由于取样涨落和模型依赖等原因带来的系统误差,地面和高山上间接测量的误差较大,从图3中可以看出,不同实验项目给出的质子流量存在明显的不一致。要获得精确的宇宙线能谱和成分必须到大气层之外的空间进行直接测量。目前的空间探测器能力仅能达到 $10^{14}$  eV。HERD的探测能力将提高一个数量级以上,达到3 PeV( $1\text{ PeV}=10^{15}$  eV),可以直接覆盖到“膝”区,破解宇宙线的极端能量来源之谜,同时加深对恒星与星系的形成和演化、超新星爆发、脉冲星喷流、中子星或黑洞合并等极端高能过程的理解。

(3) 极端天体:带电荷的宇宙线在传播过程中会被磁场偏转,无法追踪其源头,但高能宇宙线与分子云发生碰撞会产生 $\pi$ 介子,随后衰变为能量为原初能量十分之一左右的 $\gamma$ 光子或中微子。这些中性粒子不受磁场影响,可以为极高能宇宙线的来源提供线索。位于南极的IceCube中微子天文台在2017年9月22日探测到一个能量高达290 TeV的中微子<sup>⑥</sup>,几天后费米伽马射线空间望远镜等探测器在其给出的方向上确认了一个特别明亮的耀变体(Blazar),但这两个事件成协的显著性只有 $3\sigma$ ,没有达到科学发现标准的 $5\sigma$ 要求。耀变体属于活动星系核的一种,是由星系中央的巨大质量黑洞“吞噬”大量物质过程中产生的喷流导致的剧烈天文现象。耀变体可以产生极高能的中微子和伽马射线,也就有可能产生极高能的质子,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”。最近中日合作西藏AS $\gamma$ 实验在银河系的银盘上发现了几十个弥散分布的高能伽马射线光子,表明银河系内部存在将宇宙线加速到PeV能量的机制<sup>⑦</sup>。要确认对应的天体,则需要更高统计量的观测。HERD将在GeV-TeV能区发挥灵敏度高和视场大的优势开展伽马射线巡天探测,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等天体的活动如何产生高能宇宙射线。

(4) 极端引力:目前利用地球实验室、太阳系和双脉冲星等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,但是尚未发现实验/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强空间曲率(如图5),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能够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。eXTP可以对黑洞同时进行高精度时变、能谱和偏振观测,有望对广义相

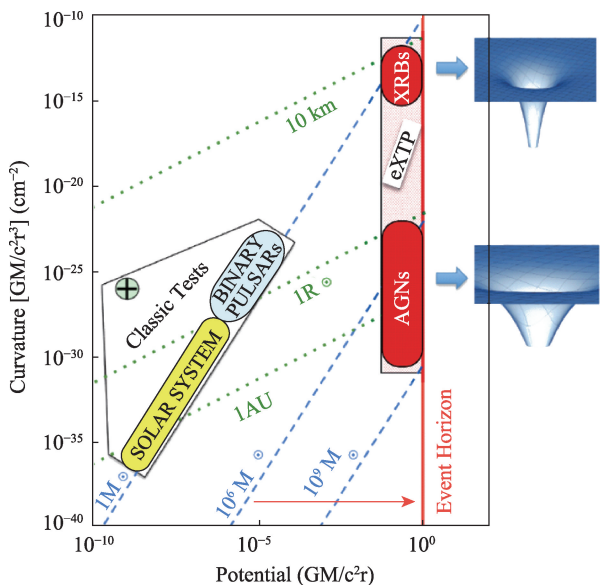


图5 检验广义相对论天体的引力势以及时空曲率的比较。eXTP将通过观测X射线双星(XRB)中的中子星或黑洞以及活动星系核(AGN)中的超大质量黑洞来研究极端引力条件下的物理规律

对论做出精确的检验。<sup>②</sup>

(5) 极端磁场:脉冲星是旋转的磁化中子星,其周期性辐射就是中子星自旋调制导致的,不同类型的脉冲星具有不同的自旋周期及其导数。如图6所示,有一类中子星它们的自转周期较长、周期导数较大,由磁偶极辐射假定可知磁场可能超过临界磁场,磁场强度可达 $10^{10}\sim 10^{11}$  特斯拉,被称为超磁星(Magnetar)。超磁星的X射线辐射光度远超其自转能损,而且超磁星在X射线能段表现出较强的活动性(巨耀发、爆发和周期跳变)。这些剧烈的活动包含了极为丰富的信息,不仅对我们理解这些现象的能量起源、爆发机制有重要的意义,并且有助于研究致密物质的物态等基础物理问题。超磁星有两类候选体:反常X射线脉冲星(AXP)和软伽马射线重复暴(SGR)。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会被磁场约束并且沿相反方向运动,在真空中形成类似于晶体的结构,让经过的X射线发生“双折射偏振”效应。eXTP可以用其高灵敏度偏振X射线望远镜通过观测这一现象来检验“极端磁场”条件下量子电动力学关于真空涨落的预言。<sup>②</sup>

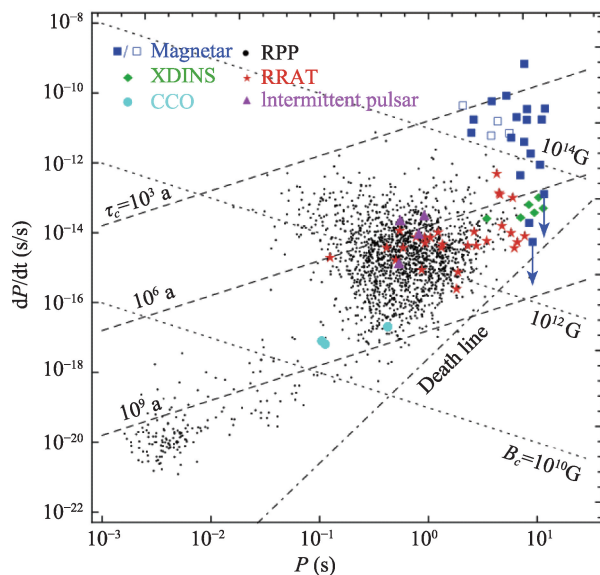


图6 中子星的自旋和自旋导数分布,蓝色实心方框表示的是超磁星<sup>③</sup>

(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,这主要体现在对重子物质的“密度-温度”相图(或者核物质的“状态方程”,图7)的实验数据的不完备方面。重离子加速器和高能质子对撞机的研究可以接近宇宙早期的高温,但对应的密度低得多,而宇宙中目前的“极端密度”只存在于中子星的内部。但是所谓的“中子星”,其内部密度高达 $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup>,是原子核密度的数倍,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,也回答中子星到底是“中子”星还是“夸克”星这个重要科学问题。<sup>③</sup>

### 3.3 高能宇宙辐射探测设施(HERD)

空间中的入射粒子分布是接近各向同性的。传统的空间高能粒子载荷,主要使用顶面入射的量能器(或者加上磁谱仪)的模式,只能接收探测器顶面小角度入射的事例,如FERMI, AMS-02 以及DAMPE,因此载荷利用率极低。HERD项目创新

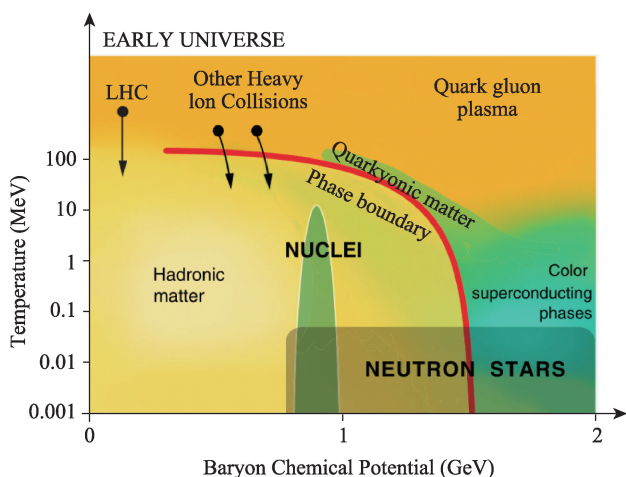


图7 重子物质的物态空间。横坐标的化学势1~2 GeV大致对应1~6倍的原子核密度,其中右下角的阴影区域是可以通过eXTP的X射线观测研究的中子星物态<sup>®</sup>

性地选择了五面灵敏,有三维成像能力的量能器方案,极大地提高了探测的有效接收度,在同等的时间内取得的观测显著度要比传统载荷高很多。在轨观测5年可以完全覆盖宇宙线能谱的“膝区”,实现精确的成分测量,回答其起源与传播等基本问题。

如图8所示,HERD有效载荷从内到外由5种不同的探测仪器构成:(1)位于中心由7500个LYSO晶体立方块构成的三维立体量能器(CALO),等效深度达3个核作用长度,55个辐射长度。与广延大气簇射作用类似,宇宙线粒子在量能器中也会发生

级联簇射产生大量次级粒子。通过波长转移光纤和增强型CMOS相机收集每块晶体的信号可重建入射粒子的三维簇射轮廓,从而实现高能量分辨率的能量测量。(2)包裹量能器除底面外5个面的光纤径迹仪(FIT),通过多层X/Y闪烁光纤紧密排布实现对伽马光子径迹测量。(3)覆盖5面的塑料闪烁体反符合探测器(PSD),对伽马光子实时触发识别并兼具电荷测量功能。(4)为避免宇宙线的电荷碎裂效应,在最外围包裹硅电荷探测器(SCD),采用多层X/Y硅微条密排实现宇宙线高精度电荷测量和方向测量。(5)位于一侧的穿越辐射探测器(TRD),用于TeV量级宇宙线粒子的能量标定。

HERD有效载荷重约4吨,将安装到中国空间站,并以大视场巡天观测模式随空间站长期运行在倾角 $42^\circ$ ,高度400 km左右的圆轨道上,设计寿命10年以上。

### 3.4 增强型X射线与偏振天文台(eXTP)

检验极端引力、极端磁场和极端密度条件下的基本物理规律,可以通过高精度、多手段(时变、能谱、偏振)的X射线观测实现。eXTP采用小口径聚焦望远镜阵列以较低成本实现低本底和大有面积,满足高灵敏度要求,同时利用造价和重量都更低的准直型探测器阵列进一步扩大有效面积,满足

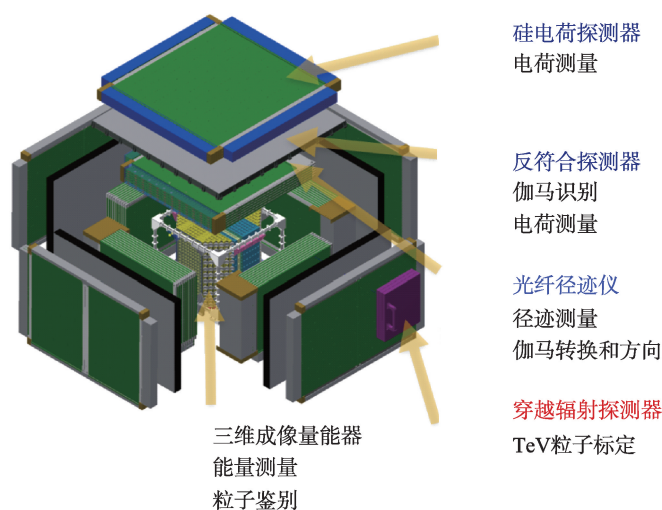
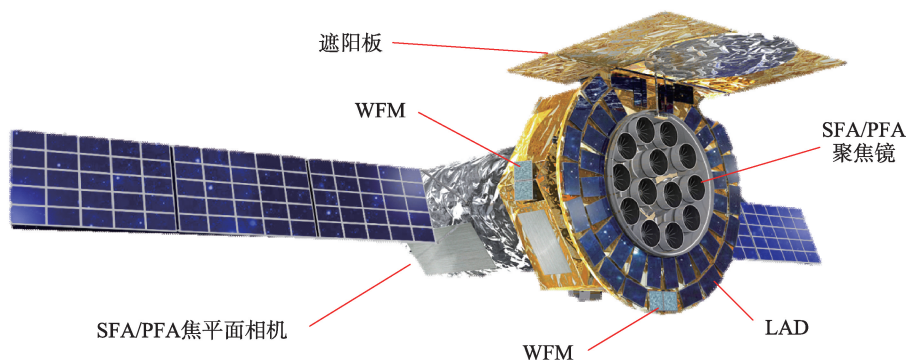


图8 HERD有效载荷探测仪器布局示意图



图9 eXTP卫星构型示意图<sup>④</sup>

短时标时变测量要求。eXTP计划配置如下四种观测仪器：

(1) 能谱测量X射线聚焦望远镜阵列(SFA),包括9组口径500 mm焦距5.25 m的望远镜,焦平面采用高能量分辨的硅漂移探测器(SDD)阵列,有效探测面积不小于 $0.4 \text{ m}^2@6 \text{ keV}$ ,探测能量范围0.5~10 keV,能量分辨率优于 $180 \text{ eV}@6 \text{ keV}$ ;

(2) 偏振测量X射线聚焦望远镜阵列(PFA),包括4组口径500 mm焦距5.25 m的望远镜,焦平面采用高分辨成像型气体探测器(GPD),有效探测面积不小于 $380 \text{ cm}^2@3 \text{ keV}$ ,探测能量范围2~8 keV,能量分辨率优于 $1.8 \text{ keV}@6 \text{ keV}$ ,最小可测偏振度1.6%;

(3) 大面积X射线准直望远镜(LAD),采用大面积硅漂移探测器和铅玻璃毛细管准直器阵列实现探测面积不小于 $3 \text{ m}^2 @ 6 \text{ keV}$ ,探测能量范围2~30 keV,能量分辨率优于 $200 \text{ eV}@6 \text{ keV}$ ;

(4) 广角监视器(WFM),采用位置灵敏型大面积硅漂移探测器配合二维编码板,用类似二维码识别的方式对爆发天体进行定位。探测能量范围2~50 keV,视场 $3.0 \text{ Sr}$ ,能量分辨率优于 $500 \text{ eV}@6 \text{ keV}$ ,定位精度好于 $1'$ 。

eXTP卫星构型如图9所示,其中心为13个聚焦望远镜(9个用于高分辨能谱探测,4个用于偏振探测),周围为40个准直型探测器模块和6个宽视场相机,总重量约5吨。其中三种窄视场望远镜SFA、PFA和LAD指向相同,可以对选定的天体目

标同时观测,获取其能谱、时变和偏振等多种信息。WFM为广角监视器,能够同时对多个感兴趣天体进行长期监测,并能对视场内出现的爆发源(如伽马射线暴)自动触发和定位,定位精度好于1角分。WFM的定位信息可用于引导卫星自动调整主光轴指向,对爆发源进行深度后随观测,也可以利用我国北斗卫星导航系统的“短报文”功能将爆发方向和时间信息及时传送给科学数据中心,用于组织其他空间或地面望远镜进行多波段联合观测。eXTP将运行在高度550 km,倾角 $0^\circ$ 左右(即赤道上空)的圆轨道上,设计寿命5年。

慧眼卫星见证了中国高能天文学从20世纪70年代艰难起步到蓬勃发展的过程,在“多信使天文学”时代竞争激烈的国际前沿领域已经占据了有特色和优势的“一席之地”。在此基础之上提出的下一代旗舰级高能天文台eXTP和HERD的实施将使中国在相关领域全面领先,领导国际“探索极端宇宙”。

#### 参考文献

- ① 卢方军,从球载实验到慧眼卫星. 现代物理知识, 2021, 34(2)
- ② 李惕碛,吴枚. 空间硬X射线调制望远镜. 物理, 2008, 37, 648.
- ③ 卢方军,张双南. 硬X射线调制望远镜——中国第一颗X射线天文卫星. 物理, 2017, 46, 341.
- ④ Shuang-Nan Zhang(张双南), TiPei Li(李惕碛), FangJun Lu(卢方军), et al. Overview to the Hard X-ray Modulation Telescope (Insight-HXMT) Satellite. Sci. China-Phys. Mech. Astron., 2020, 63, 249502.
- ⑤ Yong Chen(陈勇), WeiWei Cui(崔苇苇), Wei Li(李炜), et al. The

- Low Energy X-ray telescope (LE) onboard the Insight-HXMT astronomy satellite. *Sci. China- Phys. Mech. Astron.*, 2020, 63, 249505.
- ⑥ CongZhan Liu(刘聪展), YiFei Zhang(张翼飞), XuFang Li(李旭芳), et al. The High Energy X-ray telescope (HE) onboard the Insight-HXMT astronomy satellite. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2020, 63, 249503.
- ⑦ XueLei Cao(曹学蕾), WeiChun Jiang(姜维春), Bin Meng(孟斌), et al. The Medium Energy X-ray telescope (ME) onboard the Insight-HXMT astronomy satellite. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2020, 63, 249504.
- ⑧ 潘腾, 卢方军, 倪润立, 等. 硬X射线调制望远镜卫星系统设计与技术成就. *航天器工程*, 2018, 27(5), 1.
- ⑨ 张龙, 倪润立, 顾荃莹, 等. 硬X射线调制望远镜卫星总体方案及技术特点. *航天器工程*, 2018, 27(5), 9.
- ⑩ Abbott et al. Multi-messenger Observation of a Binary Neutron Star Merger. *Astrophys. J. L.*, 2017, 848, L12.
- ⑪ TiPei Li(李惕碛), ShaoLin Xiong(熊少林), Shuang-Nan Zhang(张双南), et al. Insight-HXMT observations of the first binary neutron star merger GW170817. *Sci. China- Phys. Mech. Astron.*, 2018, 61, 249502.
- ⑫ C.K. Li(李承奎), L. Lin(林琳), S.L. Xiong(熊少林), et al. HXMT identification of a non-thermal X-ray burst from SGR J1935+2154 and with FRB 200428. *Nature Astronomy*, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01302-6>
- ⑬ Donald Kennedy, Colin Norman. What Don't We Know? *Science*, 2005, 309, 75.
- ⑭ Charles Seife. What Is the Universe Made Of? *Science*, 2005, 309, 78.
- ⑮ 张鹏杰. 宇宙是由什么构成的? *科学通报*, 2016, 61, 1754.
- ⑯ B. Abi et al. (Muon g-2 Collaboration) Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm. *Phys. Rev. Lett.* 2021, 126, 141801.
- ⑰ 王建民, 宋盛雨央, 上官晋沂. 类星体宇宙学距离: 光学干涉测量. *现代物理知识*. 2020, 32(4), 3.
- ⑱ S. N. Zhang(张双南), O. Adriani, S. Albergo, et al. The High Energy cosmic-Radiation Detection (HERD) Facility onboard China's Future Space Station. *Proc. of SPIE*, 2014, 9144, 91440X.
- ⑲ Yongwei Dong, Shuangnan Zhang, Giovanni Ambrosi for the HERD Collaboration. Overall Status of the High Energy Cosmic Radiation Detection Facility Onboard the Future China's Space Station. *PoS(ICRC2019)062*.
- ⑳ 毕效军, 董永伟. 中国空间站高能宇宙辐射探测设施HERD, *现代物理知识*, 2020, 32 (5), 40.
- ㉑ S.N. Zhang(张双南), M. Feroci, A. Santangelo, et al. eXTP: enhanced X-ray Timing and Polarimetry Mission. *Proc. SPIE* 2016, 9905, 99051Q.
- ㉒ ShuangNan Zhang(张双南), Andera Santangelo, Marco Feroci, et al. The enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission — eXTP. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2019, 62, 029502.
- ㉓ 刘红薇, 纪龙. 探索极端宇宙——增强型X射线时变与偏振空间天文台. *现代物理知识*, 2020, 32 (5), 34.
- ㉔ Evoli, Carmelo. (2020, December 1). The Cosmic-Ray Energy Spectrum. *Zenodo*. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4396125>
- ㉕ G. Ambrosi, Q. An(安琪), R. Asfandiyarov, et al. (DAMPE Collaboration) Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons. *Nature*, 2017, 552, 63.
- ㉖ IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, 等团队. Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science*, 2018, 361, eaat1378.
- ㉗ M. Amenomori, Y. W. Bao(包逸炜), X. J. Bi(毕效军), et al. (Tibet AS $\gamma$  Collaboration) First Detection of sub-PeV Diffuse Gamma Rays from the Galactic Disk: Evidence for Ubiquitous Galactic Cosmic Rays beyond PeV Energies. *Phys. Rev. Lett.*, 2021, 126, 141101.
- ㉘ Alessandra De Rosa, Phil Uttley, LiJun Gou(苟利军), et al. Accretion in strong field gravity with eXTP. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2019, 62, 029504.
- ㉙ Andrea Santangelo, Silvia Zane, Hua Feng(冯骅), et al. Physics and astrophysics of strong magnetic field systems with eXTP. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2019, 62, 029505.
- ㉚ Hao Tong(仝号). Pulsar braking: magnetodipole vs. wind. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2016, 59, 619501.
- ㉛ Anna L. Watts, WenFei Yu(余文飞), Juri Poutanen, et al. Dense matter with eXTP. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2016, 59, 619503.
- ㉜ Anna L. Watts, Nils Andersson, Deepto Chakrabarty, et al. Colloquium: Measuring the neutron star equation of state using x-ray timing. *Rev. Mod. Phys.*, 2016, 88, 021001
- ㉝ Wen Chen(陈雯), Zhencai Zhu(朱振才), Yupeng Xu(徐玉朋), et al. Mission analysis and preliminary spacecraft design of the enhanced x-ray timing and polarimetry observatory. *Proc. of SPIE*, 2020, 11444, 114442E.