

中国空间站高能宇宙辐射探测设施HERD

毕效军 董永伟

(中国科学院高能物理研究所 100049)

过去的—个世纪人类对自然的认识发生了深刻的变化,相对论和量子力学建立起来并成为描述物质运动的最基本的物理规律。随着技术手段的飞速进步,人类对组成物质的基本粒子的研究以及对宏观宇宙的观测都取得了重大的进展,发现在最小的微观尺度和目前人类观测到的最大尺度上相对论和量子力学都仍然成立,并逐渐发展出了描述物质基本组成的粒子物理标准模型和描述宇宙演化的宇宙学标准模型。人类对物质世界的研究也向着微观(基本粒子)和宏观(大尺度宇宙)两个极端不断延伸,并持续推动着人类文明的进步。深入的研究表明无穷小的微观粒子物理研究和无穷大的宇宙天文学研究存在着诸多互相关联的因素。随着人类知识和技术水平的提高,利用最微观的粒子物理研究方法开展空间实验,进行粒子天体物理研究成为极具前景的研究方向。

高能宇宙辐射探测设施HERD项目正是在这样的背景下提出的。HERD将利用我国载人空间站的应用资源和机遇,瞄准“极端能量”、“极端起源”和“极端天体”等三个极端问题展开更高灵敏度和更广参数空间的空间高能粒子探测。

1. 极端能量的宇宙线

宇宙线自1912年被发现以来已有超过一百年的历史。在人造加速器技术成熟并被广泛用于粒子物理研究以前,宇宙线在长达近半个世纪的时间里引领着基本粒子物理的发展。人们在宇宙线中

发现了一大批基本和复合粒子,例如正电子、 μ 轻子、 π 介子、K介子和其他奇异粒子,它们对于建立起微观世界及其相互作用的基本图景至关重要。现在,宇宙线研究已进入了一个新的黄金时代,主要由于它和以下领域有着密切的联系:1)最高能段的物理。宇宙线中已记录的最高粒子能量达到了 $\sim 3 \times 10^{20}$ eV,与一个宏观物体能量相当,是地球上最大加速器能量的几千万倍。宇宙线是检验在如此高能量极限下已知物理规律是否仍然成立的独一无二的探针。2)暗物质间接探测。占宇宙组分约1/4、丰度为重子物质5倍的神秘暗物质的本质,是现代物理学的一个重要问题。3)天体物理加速场所和加速机制。许多关于宇宙线自身的问题也非常吸引人,例如“它们是在哪儿产生的?”,“它们是怎么加速到这么高能量的?”,“它们是怎么在星系和宇宙传播的?”,如图1所示。

观测到的宇宙线能量跨越了11个数量级,强度则跨越了32个数量级。精确的测量发现宇宙线能谱上还有一些明显的结构,例如在大约4 PeV处的

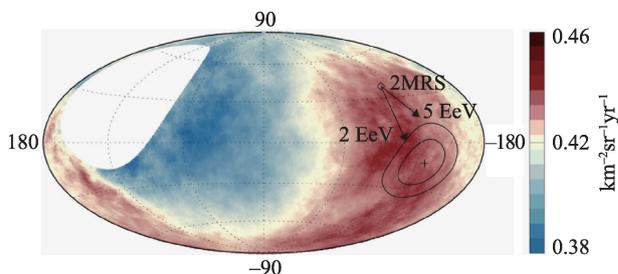


图1 皮埃尔·俄歇天文台观测的宇宙线各向异性分布(*Science*, 2017, 357, 1266)

“膝”,约 4 EeV 处的“踝”等。人们提出了几种理论上的模型,基于对宇宙线源、加速或传播过程,甚或是高能粒子物理相互作用的假设来试图理解这样的结构,但现在还远没有达成共识。特别是,膝区的起源是由于源加速宇宙线达到了最高能量还是银河系内的扩散过程发生变化所致目前仍无定论。

宇宙线间接测量可通过对广延大气簇射(EAS)的测量展开研究,但是由于探测器取样涨落、簇射涨落以及人们对在该能区强子簇射(又特别是超前区簇射)认识不足,存在无法避免的系统误差和较差的能量分辨率。宇宙线空间直接测量能给出最好的能量分辨和电荷分辨性能。然而目前的空间实验能够探测的能量范围较窄,还不能达到宇宙线能谱的“膝”,而这个拐折被认为是理解宇宙线的银河系还是河外起源的关键。HERD 预期可以直接测量宇宙线的膝,如图 2 所示。通过模拟计算可以看到通过 5 年的观测,HERD 探测器能够清楚看到宇宙线中质子成分(a)和氦核成分(b)能谱上在存在一个向下的“拐折“,这就是膝。

HERD 独特的载荷设计,结合前所未有的量能器深度和高分辨电荷探测器,将首次直接精确测量宇宙线的“膝”,因此可以准确地确定出不同成分“膝”的拐折位置,从而回答“膝”是起源于加速或者传播(电荷依赖的拐折)还是相互作用(核质量依赖拐折)的问题。HERD 还可以将硼碳比的高精度测量往高能扩展一个量级,硼碳比可以用来准确地确定宇宙线传播参数和星际介质的湍动性质。宇宙

线中的铁和超铁元素对于认识宇宙线的加速场所具有很重要的意义,现有实验对宇宙线铁元素的测量误差很大,对超铁元素则几乎没有测量。HERD 在超重元素的能谱测量方面也将起到重要的推动作用。图 3 显示了预期 HERD 通过 5 年观测能够得到的宇宙线铁的能谱,可以看到相比以前的观测结果,HERD 的测量在精度和能量范围都大大提高了。

2. 极端起源的暗物质

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(图 4),都表明宇宙中普遍存在大量的不发光、但是产生引力的暗物质。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。

近期暗物质探测最大的进展来自于间接探测,PAMELA 卫星和国际空间站的 AMS-02 实验都发现宇宙线中的正电子存在超出现象,后者更是精确测量了正电子能谱并将能量范围扩展到了约 700 GeV。这些超出的正电子很可能来自于暗物质湮灭,目前已经有很多理论研究来解释这些观测数据,然而这些高能正电子的起源现在仍然存在争议。另外一种可能的正电子来源是太阳系附近的脉冲星,它们同样可以很好地解释实验观测数据。为了确认高能电子/正电子是源自暗物质湮灭还是

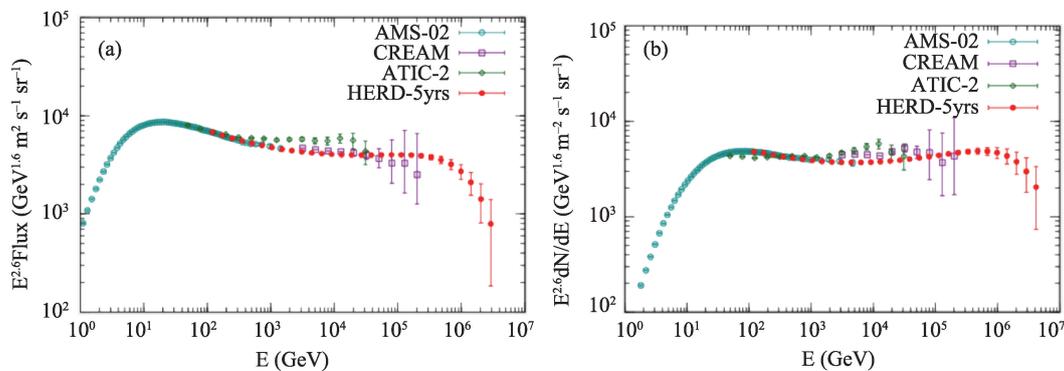


图 2 HERD 5 年的观测可以清楚看到宇宙线中质子成分(a)和氦核(b)能谱在膝区的“拐折”行为

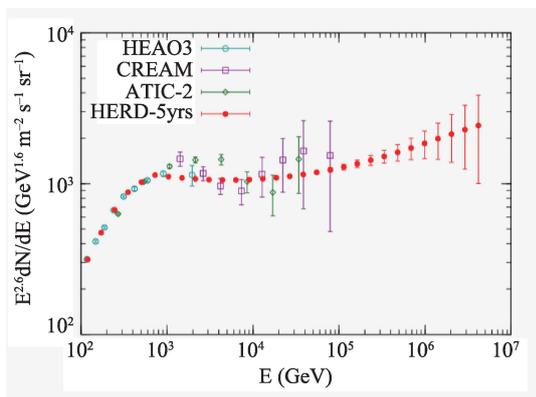


图3 HERD通过5年观测对宇宙线中铁元素的能谱测量

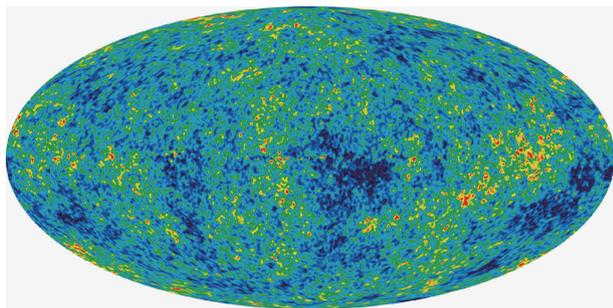


图4 威尔金森微波各向异性探测器对宇宙微波背景辐射的9年观测结果(Credit: NASA/WMAP)

天体的脉冲星起源,在更高精度和更高能量下测量电子/正电子能谱是十分重要的。2017年,暗物质探测“悟空”卫星合作组报道了电子/正电子能谱的首次测量结果,该结果展示了电子 TeV 能段附近的疑似“尖峰”结构。不同空间实验对宇宙线总电子能谱的测量也存在显著的差异。因此,这些观测结果远远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。如图5所示,可以看到HERD能够很容易检验“悟空”在电子能谱上看到的尖峰结构。

与其他实验相比,HERD具有更大的接受度和最高的灵敏度,更高的精度、更宽的能区(电子测量扩展到 100 TeV)、最好的各向异性测量能力,可以对高能电子谱异常的各种非暗物质起源假说做出判决性检验。HERD将以前所未有的灵敏度搜寻暗物质,运行1年的暗物质湮灭线探测灵敏度远超

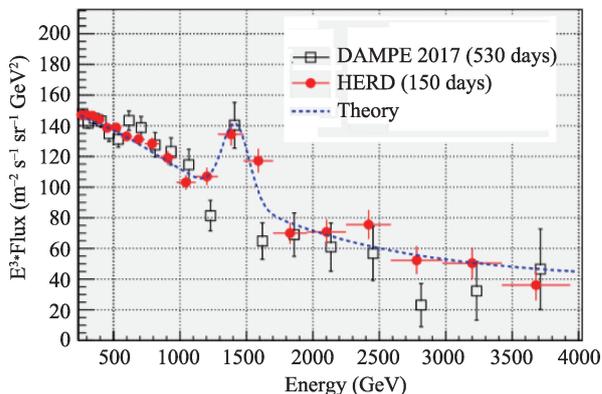


图5 HERD可以精确检验“悟空”在电子能谱中观测到的“尖峰”结构

同类实验运行5年以上的灵敏度。未来HERD的总电子谱测量对高能天体物理和暗物质研究非常重要。

3. 极端天体的伽马辐射

大型地面宇宙线探测实验 AUGER 发现了最高能量的宇宙射线的空间分布和宇宙的临近星系分布有关联,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。最近南极中微子天文台和费米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”(图6)。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。

HERD 是最灵敏的巡天观测仪,对于几十 GeV 和几个 TeV 之间的伽马射线具有非常宽的视场。HERD 可以进行银河系和河外星系伽马射线弥散辐射,未确认天体物理源分类,多种天体物理源的辐射机制、原初黑洞和宇宙学等研究,并可以与其他中微子、引力波等实验联合开展多信使天文学研究。

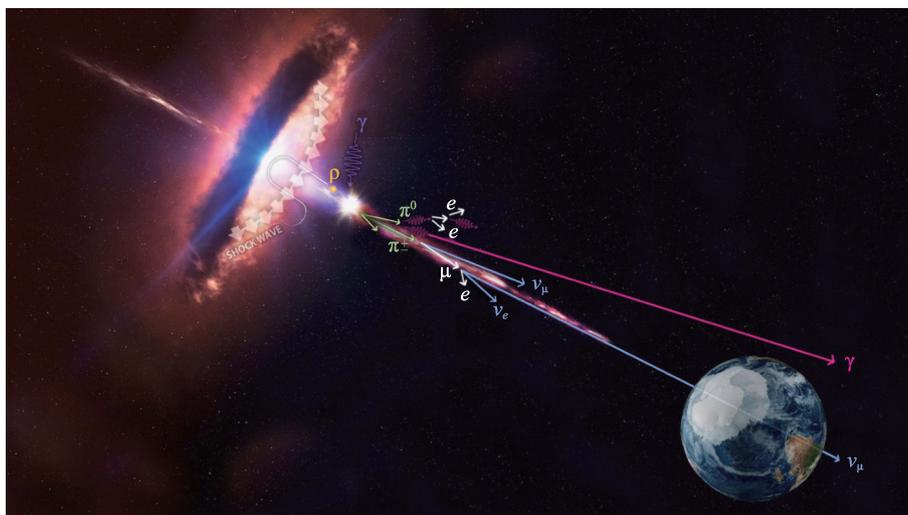


图6 南极中微子天文台探测到中微子事例可能来自某个耀变体(Credit:NASA/IceCube)

4. HERD 任务

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,预计在轨运行十年以上。借助我国空间站运行周期长、资源条件丰富、有人在轨操作和天地往返运输等有利的条件,HERD可以长期保持高效在轨运行。HERD是由中国提出并领导的重大国际合作项目,国内中科院高能所、西安光机所、广西大学、山东大学等单位参加硬件研制,意大利、瑞士、西班牙等多个空间科学发达国家实质性参加并贡献硬件设备。

HERD采用三维位置分辨五面灵敏量能器的创新设计,其主要技术指标超出其他实验一个数量级以上,其核心科学能力将长时间保持大幅度国际领先,甚至在可以预计的未来难以被超越,代表着空间高能宇宙辐射探测的革命性创新和跨越式发展,毫无疑问将成为中国空间站标志性的旗舰级重大科学实验和具有国际影响的大型国际合作项目。

HERD载荷主光轴指向天顶,视场好于 ± 70 度。载荷总重4吨,包络尺寸约 $3000\text{ mm}\times 2300\text{ mm}\times 1600\text{ mm}$ 。为保证HERD指向精度不受空间站自身振动影响,在载荷本体安装两台星敏感器用于指向实时精确测量。

5. 有效载荷

HERD载荷从内而外包括三维成像量能器、光纤径迹仪、塑闪探测器、硅电荷探测器和穿越辐射探测器等(图7)。

空间中的入射粒子分布是几乎各向同性的。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,只能接受探测器顶面小角度入射的事例,因此载荷利用率较低。为满足有效几何因子超出其他同类项目一个数量级以上,成为下一代的高能宇宙辐射探测设施,传统的方式是在保留前向窄视场的前提下增大量能器横向的几何面积。HERD项目创新性地选择了五面灵敏,具有三维成像能力的量能器方案,即用立方晶体小块组成具有等效55个辐射长度和3个核作用长度的三维晶体阵列。从顶面和侧面入射的高能粒子,都可以通过三维晶体阵列重建出粒子簇射轮廓,并根据每块晶体的能量信息重建入射粒子的能量。这样极大的提高了探测的有效接收度,在同样的时间内取得的观测显著度要比传统载荷高很多。HERD对电子和质子的有效几何因子分别达到 $3\text{ m}^2\text{Sr}@200\text{ GeV}$ 和 $2\text{ m}^2\text{Sr}@100\text{ GeV}$ 以上。三维簇射轮廓也保证了量能器对电子和质子的鉴别能力达 10^6 。

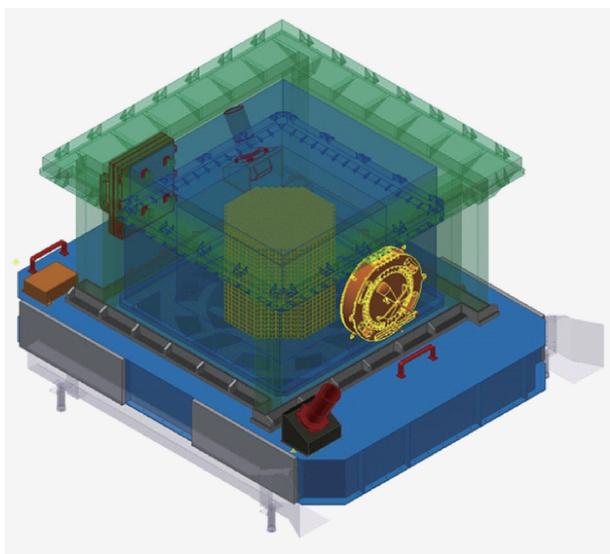


图7 HERD有效载荷

量能器由约7500块立方晶体块构成。每块晶体各引出低量程、高量程、触发三根波长转移光纤，分别由低、高量程增强相机子系统和触发子系统读取。两组增强相机共同实现近一千万倍动态范围的高能粒子能量测量。设计可调节稳定光源，通过既有光纤通路可实现对增强相机读出系统的快速标定。

为测量入射粒子径迹，在量能器有效视场的外围五面均覆盖多层光纤径迹仪。一般的，为具备伽马光子的高角分辨探测能力，需要在径迹仪内嵌伽马转换体。

在GeV能段，空间中伽马光子的流量要远小于质子、电子等带电粒子。为满足GeV能段伽马天文科学目标，配备塑闪探测器实现对低能伽马光子的在轨实时识别。由于宇宙线流强高，塑闪需要对量能器实现极高的有效覆盖率。HERD对伽马光子探测下限可达500 MeV。另外，良好的塑闪探测器设计还可以实现对入射宇宙线进行电荷测量。

高能宇宙线在物质中存在较严重的电荷碎裂效应，导致探测器对入射宇宙线核子的电荷测量不准确。HERD载荷在最外层五面铺设硅电荷探测器，可实现对电荷的精确测量和高精度流强重建。

空间高能粒子探测器一般利用最小电离能量

和地磁刚度实现较低能段的在轨能量标定。对于高能段尤其是大于400 GeV的能段，一般利用地面束流数据结果并做理论外推。导致蒙卡模拟在外推能区存在极大的不确定性。HERD选用穿越辐射探测器，可以根据高速带电粒子在介质界面易产生穿越辐射的成熟理论，实现TeV量级的宇宙线质子的绝对能量标定。

项目团队通过国际合作在欧洲核子中心圆满完成了多次束流验证实验，对中国学者提出的新型波长转移光纤匹配增强相机的技术方案、三维晶体阵列量能器工艺以及载荷主要性能指标进行了验证。量能器原理样机实测能量分辨率分别好于1.3%@200 GeV(电子)和20.7%@400 GeV(质子)，粒子鉴别能力达 10^5 。塑闪样机可识别 $Z>26$ 以上的电荷。硅径迹探测器样机大幅扩展了电荷测量能力。穿越辐射探测器样机可清晰识别穿越辐射信号。

6. 总结

HERD将以前所未有的灵敏度搜寻暗物质，探究并理解宇宙线起源的世纪之谜；开展高灵敏度的高能伽马射线全天巡天和监视，并探索脉冲星导航的新机制。HERD以创新的设计思想，较小的重量实现了国际领先的探测能力，在科学能力上具有不可替代性，预计在高能电子谱测量和暗物质信号搜寻、理解宇宙线起源问题、发现极端天体等前沿科学问题方面将取得一大批世界领先的重大成果。

