

追踪宇宙“信使” 冲击世纪谜题

——高海拔宇宙线观测站简介

查敏, 陈松战, 吴含荣, 马玲玲, 马欣华, 胡红波*

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

摘要 宇宙线的研究具有悠久的历史, 取得了许多划时代的发现性成果。但是人类对宇宙线的起源、加速和传播等问题仍存在诸多疑惑。大型高海拔空气簇射观测站(LHAASO)独具高海拔和大规模优势, 计划利用多种探测手段开展联合观测, 大幅提升对伽马和宇宙线粒子的鉴别能力。LHAASO有望获得史上最高的伽马探测灵敏度, 并在很宽的能量范围内精确测量宇宙线能谱, 为宇宙线物理、高能天体物理、宇宙学和新物理学规律研究做出贡献。介绍了LHAASO的探测器结构、性能优势和科学目标。

关键词 宇宙线; 伽马射线; 高海拔空气簇射观测站

自维克托·弗朗西斯·赫斯(Victor Francis Hess)1912年发现宇宙线以来, 宇宙线研究历经了100多年的历史, 为粒子物理、天体物理和宇宙学研究做出了许多贡献。在致力于研究宇宙线起源、加速和传播问题及基本物理学规律的过程中, 又孕育出了伽马天文学、中微子天文学和极高能天文

学, 宇宙线研究还为暗物质粒子探测提供了重要的手段。

作为一个前沿交叉领域, 宇宙线研究事业可谓宝刀未老, 方兴未艾。目前, 国际上的大型地面宇宙线实验大致可分为4类: 全天候的高海拔空气簇射实验; 对伽马射线灵敏的大气切伦科夫成像望远

收稿日期: 2018-08-31; 修回日期: 2018-09-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11675187, 11575203); 国家自然科学基金天文联合基金项目(U1731136); 国家自然科学基金青年科学基金项目(11505190); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(113111KYSB20170055); 国家自然科学基金重点项目(11635011)

作者简介: 查敏, 副研究员, 研究方向为高能宇宙线, 电子信箱: zham@ihep.ac.cn; 陈松战(共同第一作者), 副研究员, 研究方向为高能宇宙线, 电子信箱: chensz@ihep.ac.cn; 吴含荣(共同第一作者), 副研究员, 研究方向为高能宇宙线, 电子信箱: wuhr@ihep.ac.cn; 马玲玲(共同第一作者), 副研究员, 研究方向为高能宇宙线, 电子信箱: llma@ihep.ac.cn; 马欣华(共同第一作者), 研究员, 研究方向为高能宇宙线, 电子信箱: maxh@ihep.ac.cn; 胡红波(通信作者), 研究员, 研究方向为高能宇宙线, 电子信箱: huhb@ihep.ac.cn

引用格式: 查敏, 陈松战, 吴含荣, 等. 追踪宇宙“信使” 冲击世纪谜题——高海拔宇宙线观测站简介[J]. 科技导报, 2019, 37(21): 32-45; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.21.004

镜实验;南极冰下或地中海底的中微子实验;探测极高能宇宙线的实验。中国的高海拔宇宙线观测研究始于20世纪70年代,并为发展于90年代的羊八井国际宇宙线观测站奠定了良好的基础。羊八井实验在宇宙线各向异性、宇宙线成份能谱、强相互作用截面测量、监测活动星系核(AGN)高能伽马辐射爆发等方面取得了重要的物理成果,但在重要的伽马射线天文领域由于其探测器品种单一,难以鉴别原初粒子是伽马射线还是宇宙线,灵敏度不高,尚未能发现新的伽马射线源,高海拔实验的优势还没有全面发挥出来。

为解决银河宇宙线的起源、加速和传播问题,中国在四川海子山建立大型高海拔空气簇射观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO),将运用多种探测手段联合观测,注重对簇射的各个方面开展整体和立体观测,大幅提升对簇射原初成分的鉴别能力。

1 宇宙线研究背景

1.1 宇宙线的发现及其历史意义

自库仑18世纪开始研究静电间相互作用力开始,人类对于验电器内电荷的自发放电现象一直进行研究。测量结果表明,空气中存在电离的离子,其离子对产生率约为 $10\text{ cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$,但人们并不清楚是什么原因导致了这样的电离率。20世纪初,伴随着X射线和放射性的发现,人们猜测空气的电离现象可能与土壤和环境中的放射性物质有关,因而人们预期在高空应该存在电离现象并为此开展了许多实验研究,其中最具代表性的是奥地利物理学家维克多·弗朗西斯·赫斯的高空气球实验。

1911—1913年,赫斯带着验电器共开展了10次气球飞行实验。1912年8月7日的第7次气球飞行实验非常成功,他的最大飞行高度也达到海拔5350 m。与人们所预期的相反,他发现空气的电离度随海拔高度的增加而增加。在同年1个月后的会议上,赫斯报告说“这次观测结果最为合理的解释是,假设具有很强穿透能力的辐射自上而下进入了大气层,并进而导致大气底部密闭容器中

所观测到的部分电离”。同年,赫斯在《物理学杂志》发表题为《由7次气球飞行所作的穿透辐射观测》的论文^[1]。赫斯的实验结果标志着起源于地球之外的宇宙射线的发现,为此他获得了1936年的诺贝尔物理学奖。

在随后的研究中,人们观测到宇宙线强度具有东西方向的不对称性,并由此判断宇宙线主要为带正电荷的粒子(地磁场的偏转效应导致来自东西方向的宇宙线粒子轨迹发生了不对称的改变所致)。此后,人们还发现分布在不同位置上的探测器可以同时探测到宇宙线,由此意识到宇宙线具有广延的性质,并最终认识到这是原初宇宙线在大气中与空气发生了级联簇射反应引发的。人们在宇宙线中发现了正电子、 μ 介子、 π 介子、K介子、奇异重子,重核子等许多“基本粒子”,这些发现为粒子物理的发展奠定了基础。20世纪中至20世纪末,通过太阳中微子和大气中微子(由高能宇宙线在地球大气中反应而产生)实验,人们还发现了不同种类的中微子具有可以互相转化的性质(中微子振荡),这是宇宙线对粒子物理学研究所做出的最新贡献。

1.2 宇宙线研究中的重要科学问题

从成分上讲,宇宙线主要由原子核构成,86%为氢原子核(质子),12%为氦原子核,1%为碳、氮、氧及铁的原子核,还有1%的是电子。此外,还有很少量的高能伽马射线、中微子和反质子等。宇宙线以接近光速的速度运动,但受银河系磁场的约束,大多能在银河系停留1000万年的时间(宇宙线的寿命)。银河宇宙线的数量稀少,每 cm^3 仅有 10^{-9} 个,而且随能量的升高而快速下降。从 10^9 eV 能量起到 10^{20} eV 为止,能量每增加10倍,单位能量间隔内的宇宙线流强为原来的1/500(即 $10^{-2.7}$,图1)。根据现有数据推测,宇宙线刚被加速出来时的能谱接近-2次方的幂率(即能量每增加10倍,单位能量间隔内的数量变为原来的1/100),由于银河磁场对低能宇宙线的束缚更强,高能粒子更容易从银河系磁场的束缚中逃脱,从而造成现在观测到的能谱有更快的下降(-2.7次方的幂率)。

更仔细地来看,宇宙线能谱约在 $4\cdot 10^{15}\text{ eV}$ 处有个变陡的拐折,被称为“膝”,在 $4\cdot 10^{18}\text{ eV}$ 有个变

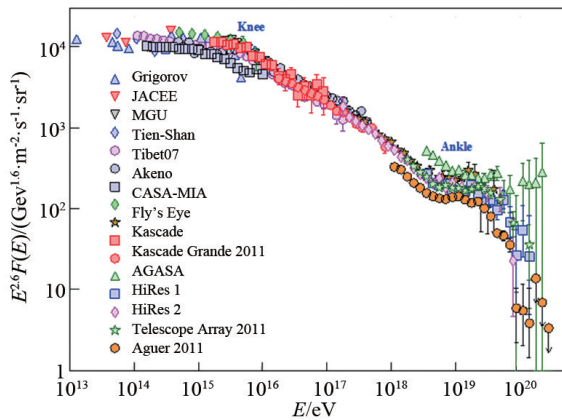


图1 宇宙线的全粒子能谱

Fig.1 The all-particle spectrum of Cosmic Ray

缓的拐折,被称为“膝”。考虑到银河系的磁场强度,“膝”区宇宙线的回旋半径约是1光年,人们认为“膝”以下的宇宙线主要来自银河系, 10^{15} eV 是银河宇宙线加速器的加速极限。而“膝”区宇宙线对应的回旋半径约1000光年,与银盘厚度相当,“膝”以上的宇宙线可能主要来自银河系外。值得一提的是,已知宇宙线粒子的最高能量(约 $3 \cdot 10^{20}$ eV)比目前粒子物理的最大加速器——大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)的能量(约 10^{13} eV)要大几千万倍,这样高能量的粒子是如何被加速出来的?在这样高的能量下,已知的物理学规律还正确吗?这些问题无疑使宇宙线研究具有非常重要的科学意义。2004年,美国国家科学技术委员会研究确定了新世纪科学研究的11个“世纪谜题”,其中包括宇宙线起源及其加速机制。

根据宇宙线的能谱和银河系的体积,人们可以估计出银河系宇宙线携带的总能量;再根据其寿命,人们可以估计出银河宇宙线的功率约为 10^{41} 尔格/秒(10^{34} J/s),比银河系超新星爆炸的功率略小,由此人们推测,超新星遗迹是银河宇宙线的主要加速源。由于银河系随机磁场的存在,宇宙线的方向在传播过程中不断被偏转,很快丢失掉其原初的方向信息,人们在地球上观测到的银河宇宙线强度具有高度各向同性的特征,通过测量宇宙线的方向很难获得其起源性质。近20年来,通过观测宇宙线在加速源附近和传播过程中所产生的高能伽玛射

线和高能中微子,我们获得了大量的有关宇宙线的起源、加速和传播的知识。截至目前,已观测到近5000个GeV伽玛源和超过200个TeV源,有3个超新星的遗迹被认定为很可能是宇宙线核子的加速源,但其他更多的源则表现出电子源的特点。宇宙线核子占宇宙线总数的99%,它们是在哪里被加速的?能否加速到人们猜想的 4×10^{15} eV 能量?以及随后又是如何传播的?这些问题都是宇宙线研究中的基本任务。

从物理学的发展史上,可以看出能谱的测量对于物理学基本规律的研究具有重要意义。例如,普朗克通过测量黑体辐射的能谱发现了能量的量子化。又如,从原子核贝塔衰变中电子能谱具有连续性,而非两体末态反应中所预期的单能谱,泡利预言了中微子的存在。宇宙线能谱除了包含宇宙线的加速和传播信息外,极可能还包含了有关暗物质粒子湮灭和衰变的重要信息,也可能包含了宇宙线粒子与暗物质粒子相互作用等重要信息。前者可以导致宇宙线粒子的超出现象,而后者可以导致宇宙线粒子的缺失现象,这两个过程都会导致宇宙线能谱发生意料之外的变化。随着引力波地发现,解决引力量子化问题的重要性越加重要和紧迫。目前的量子引力理论尚未成熟,其中一些研究认为,量子引力效应会破坏洛伦兹不变性,导致不同能量的光子在真空中具有不同的速度。通过对诸如高能伽玛暴这样的快速时变现象的观测,人们可以研究破坏洛伦兹不变性效应和量子引力。

太阳是离人类最近的宇宙线加速源,可以把带电粒子加速到 10^9 eV 能区。太阳活动导致的高能粒子爆发是很多灾害性空间环境事件的起因。监测太阳系宇宙线强度的变化、研究太阳宇宙线的加速过程,对于宇宙线加速和太阳物理研究具有重要的意义。此外,通过宇宙线监测行星际磁场的变化,不仅可以对磁暴作出预报,还有重要的研究价值。通过宇宙线与大气物理过程的同步观测,研究其间可能存在的关系,对于经济和人类社会发展及安全具有重要意义。

1.3 LHAASO项目的科学问题和意义

对宇宙线这个“宇宙信使”进行观测,就是针对

各种宇宙线粒子或辐射,测量它们的原初方向分布、时间分布和能量分布,从中寻找宇宙线的起源,研究宇宙线的加速机制和宇宙线的传播规律,探索天体物理和粒子物理的新现象。宇宙线研究的实验手段众多,这些观测大致可以分为两类:基于气球、卫星或空间站的直接探测和基于地面的间接探测。对于空间实验,受限于探测器的探测面积,工作在低能区。例如伽玛射线只能探测 10^{12} eV 以下能区,宇宙线核子则在 10^{15} eV 以下能区。对于地面实验,探测器的有效面积可以很大,有利于捕捉数量稀少的高能宇宙线,但由于宇宙线粒子会和空气发生作用,使原初的信息有所损失,逐事例确定宇宙线粒子的种类比较困难。另外,由于次级粒子为大气吸收,低能宇宙线难以被探测到,使得探测阈值比较高,能量测量精度也具有较大实验误差等,这两类实验具有非常好的互补性。

为解决探测阈值偏高的问题,实验最好能放置在高海拔的观测站上。例如 20 世纪 70 年代末,中国科学家联合日本科学家在海拔 >5000 m 的甘巴拉山开展宇宙线乳胶实验,20 世纪 90 年代又先后与日本及意大利的合作者,在海拔 4270 m 的西藏羊八井成功开展了国际著名的地面宇宙线大气簇射实验。由于大气的吸收效应相对减小,这些实验比国际上放在低海拔的同类实验具有更低的探测阈值和更好的能量分辨率。羊八井实验在 10^{14} ~ 10^{17} eV 能量范围内精确测量了宇宙线能谱^[2-3],在 10^{12} ~ 10^{15} eV 能量范围内精确测量了二维的宇宙线各向异性^[4-5],在 10^{12} ~ 10^{13} eV^[6]开展了伽玛射线观测,这些结果具有国际前沿水平的成果。

为解决宇宙线粒子原初成分的确定问题,地面实验最好能同时建造复合种类的粒子探测器。以羊八井的实验为例,中日合作的 AS γ 实验在 2010 年以前只有面积 >3 万 m^2 的表面闪烁体阵列,中意合作的 ARGONAT (Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at YangBaJing) 实验只有约 1 万 m^2 的全覆盖阻性板探测器 RPC (resistive plate chamber),它们都因此不能把伽玛射线与大量的宇宙线本底(这里指带电的宇宙线核子和电子)区分出来,观测伽玛射线的灵敏度一直都比较

低,在鉴别原初宇宙线核子种类问题上也存在相当程度的不确定性。2010 年后,AS γ 实验通过建造几千 m^2 的地下 μ 子探测器,开始具有了区分光子和宇宙线的能力。由于探测器规模的限制,AS γ 还不足以开展很高灵敏度的实验。ARGONAT 实验则通过增加广角大气切伦科夫望远镜,获得了宇宙线轻核(质子+氦核)和重核(碳、氮、氧核铁核)成分的区分能力,同样由于规模和精度的限制,较难开展更细致的成分和 PeV 以上能区的探测。

为解决能量测量的精度问题,最好同时建造覆盖不同能区且互相重叠的实验阵列,以进行相互的校验,减小能量测量的偏差。仍以羊八井实验为例,利用地球磁场对 10^{12} eV 能区宇宙线的方向偏转效应,中日和中意实验都以较高精度确定了 10^{12} eV 能区的能量测量精度,并以此为起点,把能量测量的有效范围成功推广到 10^{15} eV 以上的能区。

正是基于这些因素的考虑,并在成功开展了国际著名的西藏羊八井宇宙线实验的基础上,中国科学家提出了在组织实施和国际合作中“以我为主”的大型高海拔空气簇射观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)项目。LHAASO 项目在设计上充分考虑了上述问题,选址在四川稻城海拔高达 4400 m 的海子山,紧邻省道 217,离稻城机亚丁场仅 8 km,交通便捷。与西藏羊八井观测站相比,新观测站的纬度偏南约 1° ,观测视场基本一致。LHAASO 面积约 1 km^2 ,比羊八井的 2 个宇宙线实验分别大了数 10~100 倍,并采用多种探测器的复合观测,极大地提高了伽玛射线与宇宙线的鉴别率,这些改进使得 LHAASO 实验探测伽玛射线的灵敏度比羊八井的 2 个实验提高了几十倍至 100 倍(提高的程度与能量有关)。此外,LHAASO 结合羊八井 ARGONAT 实验全覆盖的低阈值特点以及 AS γ 取样实验和广角切伦科夫望远镜在甚高能具有大有效面积的优点,可实现 10^{12} ~ 10^{18} eV 能区的宇宙线能谱测量。

2 LHAASO 实验装置及其科学目标

LHAASO 实验^[7]主要包含 3 种探测器阵列,其

中最大的阵列称为平方公里阵列(KM2A),在约 1 km^2 范围内放置间隔 15 m 的表面闪烁体电子探测器和间隔 30 m 的地下水切伦科夫 μ 子探测器(MD)。LHAASO的中心部分是全覆盖的低阈能阵列,为一总面积约 7.8 万 m^2 的水契伦科夫光探测器(WCDA)。此外,还有可以机动布置、以适应不同物理需求的18台广角大气契伦科夫望远镜组成的望远镜阵列(WFCTA)。以下对这些探测系统分别进行介绍。

2.1 KM2A阵列及其性能

KM2A阵列包括5195个地面电磁粒子探测器(ED)和1171个地下 μ 子探测器。ED采用 1 m^2 的塑料闪烁体探测器,探测单元间采取三角形排布。在 1 km^2 的中心区域内ED间隔为 15 m ,外围区域以 $1/4$ 的密度排布,用于判别簇射的芯位来自阵列以内还是以外,实际分布面积将达到 1.3 km^2 。MD采用 36 m^2 的地下水切伦科夫探测器,探测单元间同样采取三角形排布,间隔为 30 m ,分布在中心区域。整个阵列布局如图2所示,图中缺少的区域是因为地质条件限制,无法建造MD。

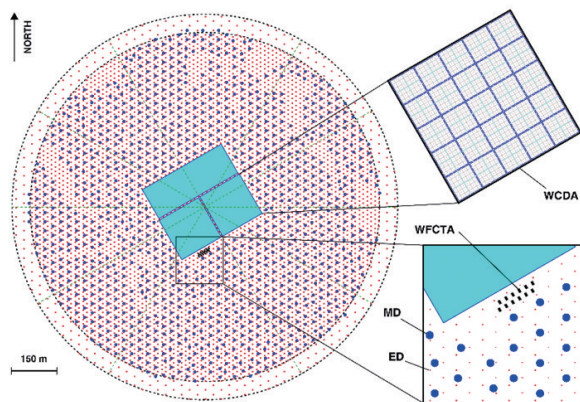


图2 LHAASO阵列布局

Fig. 2 The layout of LHAASO detectors

ED探测器主要探测宇宙线次级粒子中电磁成分粒子,用于重建原初粒子的能量和方向;MD主要用于探测 μ 子,因为强子宇宙线的次级粒子中富含 μ 子,而伽马射线的次级粒子中 μ 子很少,所以可以用于区分伽马射线和背景宇宙线。两种探测器的联合——KM2A阵列就实现了对伽马射线的

高灵敏度探测。图3显示了KM2A对伽马和宇宙线预期观测到的 μ 子数与电磁粒子数,可以看到两者具有明显区分度。在 100 TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$) 以上的能区可以基本上完全排除掉宇宙线的本底^[8]。图4显示了KM2A阵列的灵敏度随能量的变化,为了便于比较,图4也显示了目前国际著名的同类实验和未来计划。

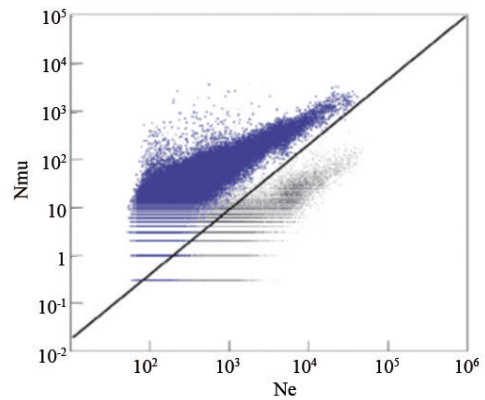


图3 KM2A阵列利用测量到的 μ 子数与电磁粒子数对原初伽马射线和宇宙线进行区分(模拟计算结果)^[7]

Fig. 3 Separation between primary gamma ray (small black dots) and nuclei (blue big dots) by using number of electrons N_e and number of muons N_{μ} . The black line is the separation line (from MC calculation)^[7]

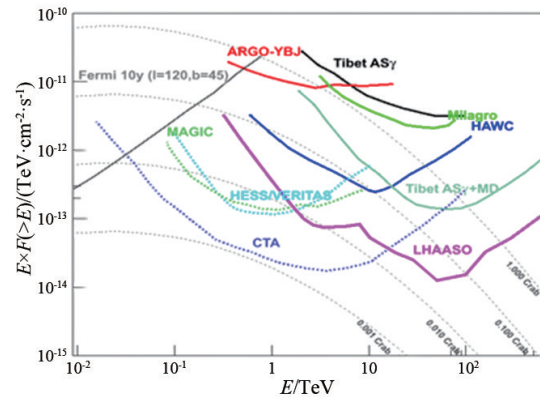


图4 LHAASO的灵敏度及与其它实验和计划的对比^[8-9]

Fig. 4 Sensitivity of LHAASO compared with the other experiments^[8-9]

可以看到,KM2A在 30 TeV 以上的灵敏度比现有的实验至少提高10倍,而且也明显优于著名的

未来大型切伦科夫望远镜阵列 CTA (Cherenkov telescope array) 项目^[9], 在 50 TeV 处约为 CTA 灵敏度的 10 倍, 在 100 TeV 以上能量区间将率先开展观测, 打开一个新的天文观测窗口。

2.2 KM2A 阵列的科学目标

KM2A 的核心科学目标是以前所未有的高灵敏度开展对 30 TeV 以上能量的伽马射线的观测, 探测伽马射线源的高能辐射行为, 研究直到 PeV (1 PeV=10¹⁵ eV) 能量的银河宇宙线加速源及其加速机制, 同时研究高能天体的演化, 研究包括暗物质粒子在内的新物理学前沿问题。作为一个传统的宇宙线测量装置, KM2A 对 100 PeV 以下宇宙线的收集能力和测量精度也是前所未有, 所以对宇宙线相关物理研究也会产生重要的影响。

KM2A 阵列具有大视场全天候的特点, 每天扫描 1 遍赤纬 -20°~80° 的天区, 占全天区的 2/3。若只使用天顶角小于 50° 的事例, 对于赤纬 -20°~80° 的天区, 每天有 1 h 到 8 h 的观测时间, 而若使用所有天顶角小于 65° 的事例, 银心 (赤纬为 -29°) 的观测时间可以达到每天 4 h。图 5 显示了已知 >0.1 GeV (1 GeV=10⁹ eV)^[10]、>50 GeV^[11] 和 >100 GeV^[12] 伽马射线源的空间位置分布, 其中 103 个 >100 GeV 源和 187 个 >50 GeV 源是在 LHAASO 视场内的。KM2A 阵列在 >30 TeV 能区的灵敏度远远高于此前的 IACT (imaging atmospheric Cherenkov telescope) 实验和未来的大型阵列 CTA 项目, 这些源为

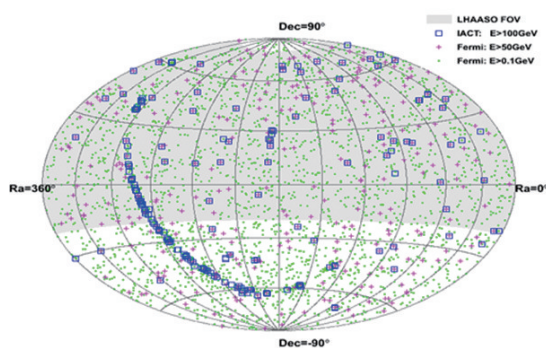


图5 已知>0.1 GeV、>50 GeV 和>100 GeV 源空间位置分布及 LHAASO 视场 (FOV)

Fig. 5 The spatial distribution of known gamma-ray sources with emission energy >0.1 GeV, >50 GeV.

The shadow region shows the field of view of LHAASO

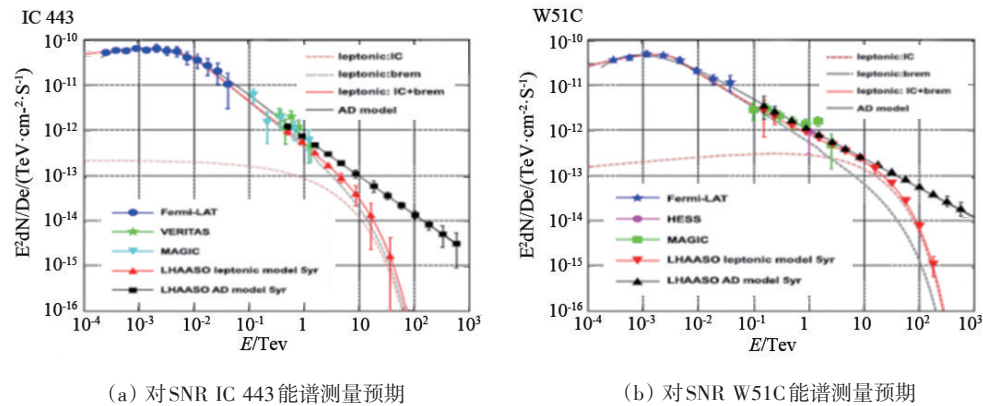
LHAASO-KM2A 观测的最佳候选源。另外, LHAASO-KM2A 也可能发现一些新的源或新的现象, 因为历史上的扫描观测总能给我们带来些意外惊喜。

超新星遗迹 (SNR) 是超新星爆发喷射物质在向外膨胀过程中与星际介质相互作用形成的延展天体, 超新星遗迹长久以来被认为是银河宇宙线的主要来源。2013 年 Fermi-LAT (fermi large area telescope) 通过 200 MeV (1 MeV=10⁶ eV) 以下能谱特征证认出 2 颗宇宙线核子源 IC443 和 W44^[13], 它们就属于这类 SNR, 此发现被《Science》杂志评为 2013 年十大科学突破之一。此外超新星遗迹 W51 也被发现为宇宙线核子源。但其伽马射线能量比较低, 所需宇宙线能量在 TeV 以下, 远低于“膝区” (PeV), 此外, 所证认出的核子源的数量还太少, 并没能彻底解决银河系宇宙线的起源问题。

目前统一模型 (例如袁强等^[14]) 认为, 在 SNR 中电子和强子被同时加速, 但是因为环境不同导致伽马辐射主导过程不同。宇宙线核子源的认证需要寻找强子获得加速的证据, 由于轻子过程在产生 100 TeV 能量伽马时的截面受到很强的抑制, 100 TeV 伽马辐射将是认证 PeV 强子源的一个重要判据。如果 LHAASO 实验能观测到 100 TeV 以上的伽马射线源, 无疑将为解决强子源问题做出重要贡献。图 6^[15] 显示了 KM2A 对 IC433 和 W51C 的预期观测能谱, 图中实线分别为强子和轻子模型预期能谱, 两者在 30 TeV 以上的差别才明显。

2016 年, HESS 在《Nature》杂志报道了银心附近的弥散伽马测量^[16], 认为找到了 PeV 宇宙线在银心附近的加速证据, 但是因为测量能量的限制, HESS 的测量能量主要在 30 TeV 以下, 需要在一定的能谱谱形 (指数截断模型) 假设前提下推断其截断能量, 未来 KM2A 的测量研究将可以直接测量到 100 TeV, 同时也将研究范围扩大至银心区域, 以研究这个源的加速性质并探索其加速能力是否超越了 PeV 的能量。

脉冲星风云 (PWN) 是 TeV 能段河内源中最多的一类, 目前在 TeV 能段观测到的 PWN 有 34 个, 其中 13 个在 LHAASO 视场内。PWN 在各波段一直被

图6 LHAASO对SNR IC 443和W51C的能谱测量预期^[15]Fig. 6 HAASO Expectation on the measurement of Spectra of SNR IC 443 and W51C^[15]

认为是稳定的辐射源,但是2010年蟹状星云(Crab Nebula)爆发现象^[17-18]的发现改变了人们看法,并成为最近PWN观测最重要的进展。在2011年4月份的大爆发中,其流强升高了30倍以上,最小的光变时标小于1 h,说明其辐射区非常小,以mG(1 mG=10⁻⁷ T)的磁场强度估算,相应同步辐射电子能量需要达到PeV量级,这么高能量的电子对现有的加速机制仍然是一个挑战。如果LHAASO-KM2A能够在>30 TeV观测类似爆发现象,不但是一个重要的新的天文现象,也将对理解其爆发机制研究提供重要的信息。

银河系弥散伽马辐射主要产生于宇宙线与星际介质气体强作用产生 π^0 的衰变和电子对星际辐射场的逆康普顿散射,可用以研究银河宇宙线的传播,研究不同区域的宇宙线和星际介质气体的分布及相互作用。Fermi-LAT和ARGO-YBJ在GeV到TeV的观测结果基本与宇宙线传播模型预期一致,其能谱也近似为幂律谱,未发现截断现象。KM2A的灵敏度预期可以测量高达亚PeV能区的银河系弥散伽马辐射能谱,为宇宙线在银河系内的加速和传播,以及理解宇宙线能谱“膝”的起源提供更多的信息。

电子在宇宙线中只占很小一部分,但是电子是已知的最基本的稳定粒子之一,是探测新物理的重要探针。2008年以来,PAMELA(payload for anti-matter matter exploration and light-nuclei astrophysics)、ATIC(advanced thin ionization calorimeter)、

Fermi Gamma-ray Space Telescope和AMS02(alpha magnetic spectrometer)等空间实验在1 TeV以下能区测量了电子谱,并发现了超出宇宙线传播模型预期的新现象,从而引发了暗物质研究的热潮。2015年12月17日中国发射的暗物质粒子探测卫星“悟空”,其核心课题便是通过对5 G~10 TeV电子能谱进行高分辨的测量来寻找暗物质的证据。而KM2A阵列在几十TeV可以实现99.99%的宇宙线本底排除,有望首次在几十TeV以上能区开展电子能谱测量,从而检验新物理现象或探测临近的电子加速源。

最近10年,多家地面宇宙线实验(如中日AS γ 实验、中意ARGO-YBJ实验、MILAGRO实验和位于南极的ICECUBE实验)测量到宇宙线的方向分布存在约1/1000强度的大尺度各向异性,为研究银河宇宙线传播及其与银河系磁场的相互作用提供了新的和重要信息。AS γ 实验在国际上率先观测到了北天区4~300 TeV宇宙线各向异性的二维分布,并利用300 TeV近乎消失的各向异性结果证明银河宇宙线与星际间气体物质和恒星共同围绕银河系中心旋转,其结果2006年发表在《Science》,并被誉宇宙线领域里程碑式的成果。2015年ARGO-YBJ实验也以高精度测量了1~30 TeV能区的宇宙线各向异性,结果显示,各向异性度在4 TeV以下随能量增加而升高,在10 TeV以上又逐渐下降。近年来,IceCube实验和AS γ 实验分别测量了南北天区里PeV能量范围各向异性,新研究显

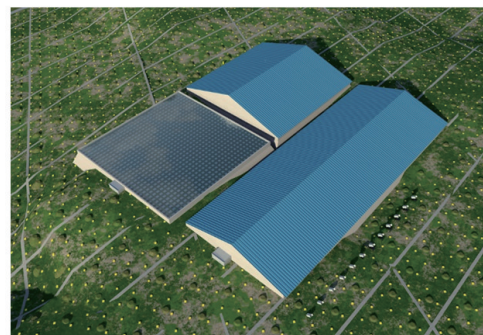
示,各向异性的空间分布在 100 TeV 处出现了显著的变化。KM2A 有 1 km² 的探测面积,而且有大量地下 μ 子探测器,可以区分不同成分宇宙线,因此未来 KM2A 可以测量几十 TeV 以上不同成分宇宙线的各向异性分布及其随能量的变化关系,这将为理解宇宙线各向异性成因提供重要的线索。

2.3 WCDA 阵列及性能

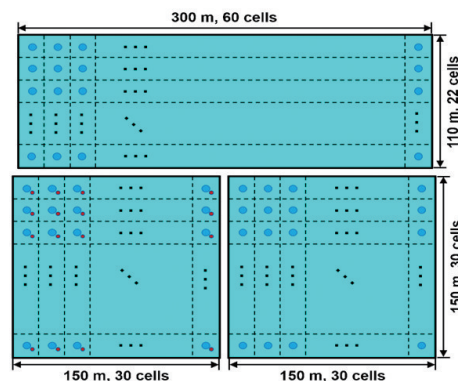
WCDA 阵列实验可谓结合了羊八井 ARGO-YBJ 实验和美国 MILAGRO 实验的优点。得益于高海拔和全覆盖,ARGO-YBJ 实验成功地把伽马探测阈能降低到 ~300 GeV,而使用水切伦科夫技术的 MILAGRO 实验则由于该技术既可探测簇射中的电磁粒子(原初宇宙线通过与大气的级联反应而产生的次级电子和伽马射线),又可探测簇射中的 μ 子,从而可以有效区分伽马簇射和宇宙线簇射事例。因此,建于高海拔的水切伦科夫实验可同时具有低阈能和高伽马射线探测灵敏度的优点。美国与墨西哥合作的 HAWC (high altitude water cherenkov experiment) 实验便是率先实践这样一个结合的范例,2013 年 HAWC 在 4100 m 海拔成功建造了 2.25 万 m² 的实验阵列,灵敏度比 ARGO-YBJ 和 MILAGRO 提高了约 15 倍并很快发现了 10 多个新的银河系伽马射线源^[9]。由于大视场、低阈能及高灵敏度的特点,WCDA 可在 TeV 能区(即 0.1~10 TeV)以很高的灵敏度实现北天区伽马源的巡天观测,除银河伽马射线源观测外,WCDA 也是发现和监测诸如伽马射线暴(GRB)和活动星系核(AGN)这样的河外时变源的重要实验。这对于研究宇宙线的起源加速,多波段研究 GRBs 和 AGNs 的辐射机制,研究河外背景光和星系间磁场,研究星系演化等问题都具有重要意义。

WCDA 的探测面积为 7.8 万 m²(图 7),深度为 4.4 m,为施工的方便,分割成 3 个水池,共 3120 个单元(图 7)。每个单元为 5 m×5 m 的水域,两个区域之间用隔光帘隔开,从而避免来自同一次级粒子尤其是 μ 子信号的串扰。3 个水池共采用 3120 支大尺寸光电倍增管(其中 900 支 8×2.54 cm,2200 支 20×2.54 cm),分别布设于每个单元的中央,置于水底,向上观测。另外还在水池中放置 3120 支小尺

寸光电倍增管(其中 900 支 1×2.54 cm,2200 支 3×2.54 cm),小尺寸光电倍增管放置在大尺寸 PMT (Photomultiplier Tube) 旁边,用于扩大簇射粒子数测量动态范围,从而实现高能区的伽马宇宙线与宇宙线的高精度测量。结合后级的电子学、DAQ (data acquisition)、触发判选、数据处理等功能系统,探测器可以达到 1.3% 蟹状星云流强的最佳灵敏度(图 8),在 TeV 能量区间里比羊八井的 ARGO-YBJ 实验提高约 30 倍。



(a) WCDA 整体布局效果



(b) WCDA 布局示意

图 7 WCDA 整体布局效果与 WCDA 布局示意

Fig. 7 Artist's impression and schematic view of the overall layout of WCDA

2.4 WCDA 的科学意义

高能粒子与星际物质或辐射场相互作用产生伽马辐射,而这些高能粒子是从加速区逃逸出来的,因此许多甚高能伽马射线源表现为扩展源。作为大视场的探测器,WCDA 具有探测扩展源的优势(图 8),当扩展角度超过约 0.15° 时,WCDA 的灵敏度高于下一代的成像切伦科夫望远镜实验,有望探

测到更多切伦科夫望远镜难以观测的扩展源,为回答银河宇宙线核子起源问题做出重要贡献。

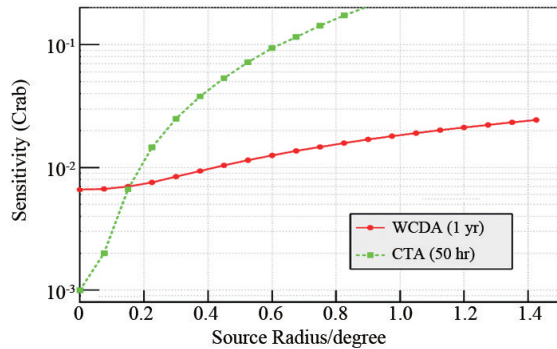


图8 WCDa及CTA实验对扩展源的灵敏度

Fig. 8 Sensitivity of WCDa and CTA to the extended sources as a function of size. The angular bin is optimized for the WCDa only

此外,银道面弥散伽马辐射大部分来自宇宙线与星际物质及辐射场相互作用产生的辐射,而伽马射线的观测是对宇宙线的流强和能谱探测的最直接的探针。宇宙线强子与星际介质相互作用产生中性 π 介子, π 介子衰变产生伽马辐射;宇宙线电子通过逆康普顿散射产生高能伽马辐射。通过银河系弥散伽马辐射与氢的体密度形态进行比较,可以得到分别来自这两类伽马辐射过程的贡献或给出相应的限制。反过来,给定一个银河系宇宙线分布的模型,中性 π 介子的组成可以用来探测分子云及氢的体密度,因此可以测量银河系不同天区CO与分子氢的比例。凭借其优势和特点,WCDa将有望在银河系宇宙线的研究中取得重要进展。

伽马射线暴是宇宙中最剧烈的恒星级高能爆发现象,在观测上,伽马暴表现为来自宇宙空间的伽马射线流量短时标的突增,典型的伽马暴持续时标为0.01~1000 s,拥有非热形态的拐折幂律谱^[20],光变曲线复杂且具备快速变化的特点,有不规则的多脉冲形态。一次伽马暴释放的各向同性辐射能可以达到 $\sim 10^{46}$ J的量级,甚至更高,这一数字远远超过超新星等其他天体爆发现象。伽马暴的高能辐射一般指的是几十到上百 MeV 能段之上的部分。Fermi 伽马射线空间望远镜2008年发射之后,陆续发现了近百个拥有高能辐射的伽马暴。有几

个伽马暴的能量在10 GeV以上^[21-23],能量最高的伽马暴GRB130427A^[24]达到94 GeV或126 GeV(经过红移修正后),表明伽马暴能产生甚高能的光子。但是我们仍然不知道能谱能延伸到什么地方,或者说还不知道伽马暴所产生的高能光子的能量最高能达到多高。而研究伽马暴的高能辐射对于全面了解这种剧烈爆发现象来说至关重要,它可以为黑洞和致密星相关物理、高能宇宙线和中微子的产生等问题提供线索,还能够用于限制伽马暴的洛伦兹因子、源区磁化度等关键参量。Fermi伽马射线空间望远镜受限于其有效面积,伽马射线的能量主要还是集中于低能段,高能辐射只占总能量的一小部分。由于对伽马暴的高能光子探测置信度不足,对于能谱等物理机制还不能得到确定的结论。而切伦科夫望远镜阵列(例如IACTs)只能在晴朗无月夜的晚上工作,观测时间只有10%左右,而且观测视场窄小,只能定点观测,即使出现伽马暴警报,转动其观测装置也需要一定的时间,因此对伽马暴这种瞬时爆发现象的观测也存在其不足之处。地面广延大气簇射阵列(例如LHAASO)具有宽视场(2个立体角)、全天候观测的特点,对伽马暴这种瞬时现象的观测不受观测时间和方向的限制,具有一定的优势。

2.5 WFCTA 望远镜阵列

LHAASO实验中的WFCTA有18台广角契伦科夫望远镜组成,每台望远镜包含光学系统、硅光电倍增管(SiPM)阵列、电子学读出系统、慢控制系统和检测系统、标定系统及机械系统6大部分组成^[25-26]。单台望远镜的各个组成部分都放置在1个海运集装箱内,并把集装箱放置在底盘上,使其便于移动并能够在仰角 $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间升降。

高能宇宙线进入大气层之后能够引发广延大气簇射,而簇射中的带电粒子能够进一步辐射出契伦科夫光或者激发大气中的氮分子,其退激发而发出荧光。而WFCTA正是通过探测这些光子实现对宇宙线探测的。簇射中的契伦科夫光或者荧光被由多面反射镜组成的光学系统收集并反射聚焦到SiPM阵列上,在SiPM阵列上形成契伦科夫光像或荧光像。被聚焦到SiPM上的光子通过电子学读出

系统读出并被记录到硬盘上。

每台望远镜的光学系统有 20 面边长为六边形的球面子镜及 5 块相应的半子镜拼接而成,总集光面积为 5 m^2 。每面反射镜的曲率半径为 5.8 m 。为了降低视场内光学系统像差引起的光斑能量分布的不一致性,通过光学优化,要求 SiPM 阵列至反射镜中心的距离为 2.87 m 。望远镜采用宽视场设计,其 SiPM 阵列共有 1024 个 SiPM 按照 32×32 的布局排列。每个 SiPM 对应的视场约为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,单台望远镜的视场范围为 $16^\circ \times 16^\circ$ 。

2.6 WFCTA 的科学目标

WFCTA 的主要物理目标就是利用其在能量估计和成分区分方面的优势并联合 LHAASO 中的 KM2A、WCDA 等,利用多参数精确地测量宇宙线各成分的能谱。实现对宇宙线 $10^{13} \sim 10^{18} \text{ eV}$ 近 5 个能量级范围内能谱的测量,研究宇宙线 $3 \sim 4 \text{ PeV}$ 的“膝”区成分,研究 $300 \sim 400 \text{ PeV}$ 的第 2 个“膝”,为回答宇宙线能谱两个“膝”的起源做出重要贡献。

在样机实验阶段,WFCTA 样机和 ARGONAT-2 实验通过联合观测,利用多参数分析,测量了宇宙线轻成分(质子和氦核)的能谱,并在 0.7 PeV 的能量位置处发现了轻成分的拐折。但受到望远镜有效面积的限制,在 0.8 PeV 之上只有 94 个事例,因此对“膝”的位置及谱指数的测量仍存在着很大的误差^[27]。LHAASO 实验的规模远远大于样机实验,并拥有多种类型的探测器,能够更好地开展多参数分析。

由于 WFCTA 所测量到的契伦科夫像或荧光像包含了空气簇射发展的纵向发展的信息,因此 WFCTA 不仅具有量能器的特征,在能量估计上较少依赖于成分和模型,而且还有很好的成分区分能力。在 LHAASO 实验中,WCDA 和 KM2A 的 μ 子探测器阵列(MDA)的信息可进一步提高不同核子间的鉴别能力。为了增大 WCDA 的动态范围,将在其中一个 WCDA 水池中增加安装 $1 \times 2.54 \text{ cm}$ 的光电倍增管,其拥有 4 个量级的动态范围,能够对能量在 100 GeV 至 10 PeV 的宇宙线进行测量。

WFCTA 望远镜所测量到的总光子数 N_{pe} (Size),与能量相关;WFCTA 望远镜所观测到的像

的形状,与 EAS(Extensive Air Shower)发展到极大时的位置相关,包括像长短轴的比例 P_e ,像的质心到簇射到达方向的角距离 P_s ;WCDA 记录到的芯区能量 PF ,与 EAS 发展早期的强子信息相关;MDA 记录到的 μ 子成份 P_μ ,反应了 EAS 中强子的信息。挑选质子的纯度可以达到 90%,质子和氦核的挑选纯度可以达到 95%。按照 WFCTA 每年 15% 有效观测时间计算,每年能够观测到的积分事例数如图 9 所示。

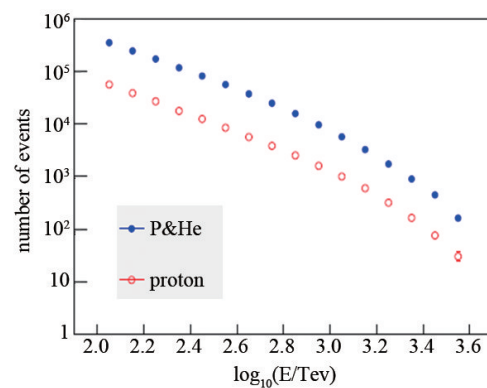


图9 四分之一阵列每年能够观测到的事例数
Fig. 9 Number of events observed per year by quarter LHAASO Array.

根据 Horandel 模型的预期,铁核/重核的能谱上的“膝”将出现在 $10 \sim 100 \text{ PeV}$ 之间。(1) 由于此能量段的宇宙线簇射发展到极大时对应的大气厚度在 $450 \sim 650 \text{ g/cm}^2$ 之间,因此在这个阶段需要调整望远镜的指向,考虑到观测地的大气厚度为 600 g/cm^2 ,我们将望远镜主轴指向天顶角 45° 。(2) 需要在望远镜的镜筒前安装滤光片。因为此阶段 EAS 中契伦科夫光子的数目巨大,为了避免望远镜饱和,需要在镜筒处增加滤光片,以减少进入到镜筒的契伦科夫光子,同时提高望远镜的光学品质和降低夜空背景的噪音。(3) 为了高效地实现和 KM2A 联合观测并能够实现有月亮的夜晚的观测,计划将望远镜分 2 部分摆放在 KM2A 阵列内。

在 KM2A 和 WFCTA 联合观测过程中,KM2A 能够对观测到的事例进行精确的方向和芯位的重建,重建精度分别能够达到 0.3° 和 4 m 。除此之外,KM2A 还具有世界上规模最大的电磁粒子探测器

和 μ 子探测器,能够对簇射中电子的数目、 μ 子的数目,以及它们的横向分布做详细测量。而这些都包含了宇宙线成分的信息。无论是电子的数目还是 μ 子的数目都严重依赖于宇宙线的原初能量,但是二者的比值能够有效地降低对能量的依赖,虽然能量依赖依然存在。图10展示了KM2A测到的簇射中电磁粒子数目和 μ 子数目的比值 P 与能量的关系。其中红色代表质子,而蓝色点代表铁核。通过联合观测得到的信息,纯铁核的鉴别纯度可以达到87%,而铁镁铝硅合在一起的鉴别纯度可以达到94%^[28]。

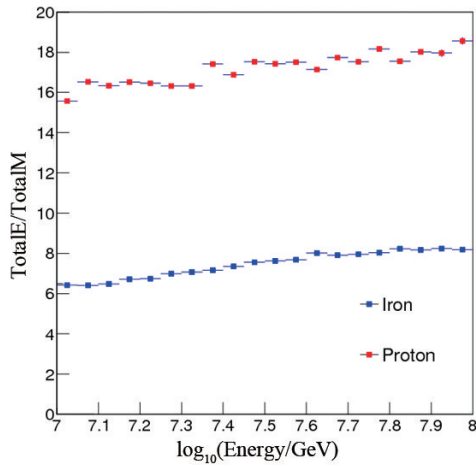


图10 KM2A测量到的簇射中电磁粒子数目和 μ 子数目的比值与能量的关系

Fig. 10 The relationship between the energy and the ratio of electromagnetic particles and Muons

在以前的宇宙线实验中如AGASA(Akeno Giant Air Shower Array)、Fly'eye、HiRes(High Resolution Fly's Eye)实验等都在 $10^{17} \sim 10^{18}$ eV能量段内观测到了宇宙线能谱的第2次拐折,但由于各个探测器之间缺乏相对的能量标定手段,使得所测量到的第2“膝”的位置各不相同。但是第2“膝”的测量包括其拐折位置,拐折前后谱指数、成分等,对宇宙线的银河系内成份到银河系外成分的过渡模型特别重要。

而LHAASO的物理目标之一就是要测量 $10^{17} \sim 10^{18}$ eV之间的宇宙线能谱,并在对探测器进行绝对标定的基础上确定第2“膝”的位置。在这个能

量段宇宙线流强极低,因此为了增大探测器的有效面,LHAASO-WFCTA要将望远镜放置在距离LHAASO中心阵列几km的地方,并切换到荧光观测模式。利用EAS中次级粒子激发大气中氮分子,而氮分子退激发时所发射出的荧光而进行观测。WFCTA望远镜和中心阵列之间的关系如图11所示。WFCTA望远镜和LHAASO中心阵列之间的距离约为5 km。其中包含一个4×4的主阵列,和两边的辅助阵列。这样可以实现对宇宙线荧光事例的立体观测,提高对宇宙线的方向和芯位重建精度,以及对 X_{\max} 的测量精度。

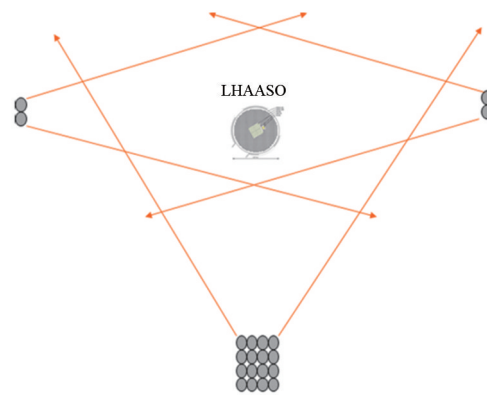


图11 LHAASO在荧光观测模式下的阵列排布

Fig. 11 The layout of LHAASO in the fluorescence mode

在荧光观测模式下,WFCTA可以观测到簇射发展的极大位置 X_{\max} ,而 X_{\max} 是包含成分信息的参量。除此之外,WFCTA可以跟KM2A阵列联合观测。因此KM2A可以提供簇射中 μ 子的信息,以提高鉴别宇宙线成份的能力。

初步模拟显示,在0.2 EeV以上WFCTA望远镜具有较平的有效面积,约为 $79 \text{ km}^2 \text{ sr}$,对应的事例率为每年2000个事例(图12)。因此结合KM2A的联合观测,以及在低能阶段对WFCTA望远镜的绝对能量定标,WFCTA能够实现对宇宙线能谱上第2“膝”的探测。

3 结论

LHAASO通过运用多种探测手段联合观测,并

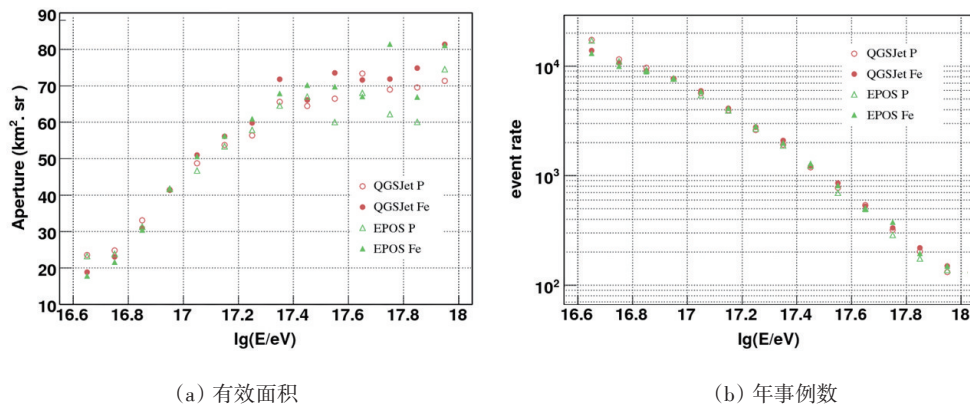


图12 利用不同相互作用模型得到的WFCTA在荧光观测模式下得到的有效面积和年事例数

Fig. 12 The effective aperture and the number of events per year obtained with WFCTA under the fluorescence mode according to different hadronic models

与平方公里的探测面积结合,使得LHAASO获得了史无前例的伽玛探测灵敏度,有望在不久的将来发现银河宇宙线的加速源,并为高能天体辐射研究,为宇宙学和新物理学规律研究做出贡献。此外,由于高海拔全覆盖探测器的低阈能特点,LHAASO将实现与气球和卫星等天基实验在能区上的无缝对接,为回答宇宙线能谱的两个“膝”的起源问题做出贡献。

通过LHAASO这个平台,中国的宇宙线事业将跨上一个新的台阶,为人类的科学事业做出新的重要贡献,并为未来的发展奠定坚实的基础。LHAASO之后,中国地面宇宙线事业的可能选项包括有100 GeV能区高能伽玛暴观测、中微子天文、极高能宇宙线等方面。中国疆域辽阔,地形变化多样,拥有实现这些计划的先天地理优势。更高海拔将使实验获得更低阈能,从而能够有效研究更低能段的领域,非常有利于观测100 GeV能区的伽玛暴。目前LHAASO海拔4400 m,是在青藏高原的边缘地带,而在青藏高原的纵深,海拔5000 m甚至6000 m的地方比比皆是,适合实验场地的要求。较低海拔有助于观测最高能量的宇宙线,不过由于越高能量宇宙线数量越少,因此这种探测阵列需要大面积的平坦地段,中国西北有多个可选区域。而要想观测及其稀有的 τ 中微子,就必须找到相对高度高、跨度大的山体作为转换体,比如新疆巴里坤山、天山。此外,地球的南北两极宇宙线垂直截止

刚度近为零,宇宙线几乎不受地磁场影响而长驱直入,在极区监测带电的太阳质子具有地理上的优势。而极地冰川更是已经证明了的非常可靠的探测介质,非常适合进行中微子天文观测。极地科考及其和平使用,对于一个国家来说也具有极为重要的战略意义。

除地理条件外,新探测技术的研发对于未来计划的实现至关重要。纵观世界科学史,科学进步无不是由技术进步驱动的。常规探测技术虽然容易实现规模扩大,但是新技术的产生往往能够促成实验在性能、成本、规模乃至成果上的质的飞跃。可喜的是,目前中国已经开展了多种新技术的研究,例如大口径广角水透镜切伦科夫望远镜^[29]、高能宇宙线热中子探测器^[30]射电天线阵列^[31]、SiPM和微通道板型光电倍增管(MCP-PMT)高量子效率的光敏器件等。依托大科学装置,投入少量的种子基金即可培育新技术,是中国科学院“一三五”战略的实践。新技术可谓“磨刀不误砍柴工”,是科学实验工作得以持续和长久发展的保障。

我们期待LHAASO项目的成功,期待LHAASO项目实施期间,新的技术得到发展,新的方案开始孕育,在LHAASO之后,中国宇宙线事业又能迎来另一轮的春天。

致谢 冯磊、白新华拨冗阅读此文并提出极有帮助的修改意见。

参考文献(References)

- [1] Hess V F. Ber Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten[J]. *Physikalischen Zeitschrift*, 1912, 13: 1084–1091.
- [2] Amenomori M, Ayabe S, Bi X J, et al. The all-particle spectrum of primary cosmic rays in the wide energy range from 1014 to 1017 eV observed with the Tibet-III Air-Shower Array[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 678(2): 1165.
- [3] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Knee of the Cosmic Hydrogen and Helium Spectrum below 1 PeV Measured by ARGO-YBJ and a Cherenkov Telescope of LHAASO [J]. *Physical Review D*, 2015, 92(9): 092005.
- [4] Amenomori M, Ayabe S, Bi X J, et al. Anisotropy and corotation of galactic cosmic rays[J]. *Science*, 2006, 314 (5798): 439–443.
- [5] Amenomori M, Ayabe S, Bi X J, et al. Northern sky Galactic Cosmic Ray anisotropy between 10–1000 TeV with the Tibet Air Shower Array[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 836(2): 153.
- [6] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J et al. TeV Gamma-ray survey of the northern sky using the ARGO-YBJ Detector [J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, 779(1): 27.
- [7] He H H. For the LHAASO collaboration, design of the LHAASO detectors[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2018, 2: 7 .
- [8] Cui S, Liu Y, Liu Y, et al. Simulation on gamma ray astronomy research with LHAASO-KM2A[J]. *Astroparticle Physics*, 2014, 54: 86–92.
- [9] Bernlöhner K, Barnacka A, Becherini Y, et al. Monte Carlo design studies for the Cherenkov Telescope Array[J]. *Astroparticle Physics*, 2013, 43: 171–188.
- [10] Acero F, Ackermann M, Ajello M, et al. Fermi Large Area Telescope third source catalog[J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, 218(2): 23.
- [11] Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. 2FHL: The second catalog of hard Fermi-LAT sources[J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2016, 222(1): 5 .
- [12] TeVCat[EB/OL]. [2018-07-30]. <http://tevcat.uchicago.edu/>.
- [13] Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants[J]. *Science*, 2013, 339(6121): 807–811.
- [14] Yuan Q, Liu S M, Bi X J. An attempt at a unified model for the gamma-ray emission of supernova remnants[J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 761(2): 133.
- [15] Liu Y, Cao Z, Chen S, et al. Expectation on observation of supernova remnants with the LHAASO project[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 826(1): 63.
- [16] Abramowski A, Aharonian F, Benkhali F A, et al. Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre [J]. *Nature*, 2016, 531(7595): 476–479.
- [17] Tavani M, Bulgarelli A, Vittorini V, et al. Discovery of powerful gamma-ray flares from the Crab Nebula[J]. *Science*, 2011, 331(6018): 736–739.
- [18] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Gamma-ray flares from the Crab Nebula[J]. *Science*, 2011, 331 (6018): 739–742.
- [19] Abeysekara A U, Albert A, Alfaro R, et al. The 2HWC HAWC observatory gamma-ray catalog[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 843(1): 40.
- [20] Band D, Matteson J, Ford L, et al. BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I-Spectral diversity[J]. *The Astrophysical Journal*[J]. 1993, 413(1): 281–292.
- [21] Ackermann M, Asano K, Atwood W B, et al. Fermi observations of GRB 090510: A short-hard gamma-ray burst with an additional, hard power-law component from 10 keV to GeV energies[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 716(2): 1178–1190.
- [22] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Fermi observations of GRB 090902B: A distinct spectral component in the prompt and delayed emission[J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 706(1): 138–144.
- [23] Ackermann M, Ajello M, Asano K, et al. Detection of a spectral break in the extra hard component of GRB 090926A[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 729(2): 114.
- [24] Ackermann M, Ajello M, Asano K, et al. Fermi-LAT observations of the gamma-ray burst GRB 130427A[J]. *Science*, 2014, 343(6166): 42–47.
- [25] Bai BY, Zhang S S, Cao Z. Performance of SiPMs and pre-amplifier for the wide field of view Cherenkov telescope array of LHAASO[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2018, 899: 94–100.
- [26] Zhang S S, Bi B Y, Wang C, et al. SiPM-Based camera design and development for the image air Cherenkov Telescope of LHAASO[C]//*Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017*, Singapore: Springer, Doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1313-4_4.
- [27] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Knee of the cos-

- mic hydrogen and helium spectrum below 1 PeV measured by ARGO-YBJ and a Cherenkov telescope of LHAASO[J]. *Physical Review D*, 2015, 92(9): 092005.
- [28] Ma L L. Expectation on observation of cosmic rays energy spectrum from 10 PeV to 100 PeV with LHAASO experiment[C]//Proceeding of The 34th International Cosmic Ray Conference, 2017, Busan, Korea, Doi: <https://doi.org/10.22323/1.301.0549>.
- [29] Chen T, Liu C, Gao Q, et al. Study on a wide field-of-view Cherenkov telescope with large dimensional refractive lens for high energy Cosmic Rays detection[C]//Proceeding of The 34th International Cosmic Ray Conference, 2017, Busan, Korea, Doi: <https://doi.org/10.22323/1.301.0420>.
- [30] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in Extensive Air Showers selected by the ARGO-YBJ experiment[J]. *Astroparticle Physics*, 2016, 81: 49–60.
- [31] Fang K, Alvarez-Muniz J, Alves Batista R, et al. The giant radio array for neutrino detection (GRAND): Present and perspectives[C]//Proceeding of The 34th International Cosmic Ray Conference, 2017, Busan, Korea, Doi: <https://doi.org/10.22323/1.301.0996>.

Tracking the "Messenger" of the universe, challenging puzzle of the century: A brief introduction to the Large High Altitude Air Shower Observatory

ZHA Min, CHEN Songzhan, WU Hanrong, MA Lingling, MA Xinhua, HU Hongbo*

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

Abstract A lot of epoch-making discoveries have been revealed by the century long study of cosmic rays. However, issues related to the origin, acceleration and propagation of cosmic rays remain to be mysterious. The large high altitude air shower observatory (LHAASO) is a unique experiment having both advantages of high altitude and large effective area. Besides, LHAASO will greatly improve the discrimination power between gamma ray and cosmic rays by using the hybrid detector technology. LHAASO is expected to obtain unprecedented gamma ray detection sensitivity and to make very precise measurement in cosmic ray spectrum in a very wide energy range. LHAASO will make important contribution to understanding fundamental problem of cosmic ray, to the research in high-energy astrophysics, cosmology and the exploration of new physics. This paper briefly describes the concept and structure of LHAASO detectors, the advanced performance, and scientific goal of LHAASO.

Keywords cosmic rays; gamma rays; LHAASO ●



(责任编辑 王志敏)