doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2019.03.019

高海拔宇宙线观测站LHAASO概况*

曹臻^{1,2} 陈明君¹ 陈松战¹ 胡红波^{1,2} 刘 成¹ 刘 烨³
马玲玲¹ 马欣华^{1†} 盛祥东¹ 吴含荣¹ 肖 刚¹ 姚志国¹
尹丽巧¹ 查敏¹ 张寿山¹ (代表LHAASO合作组)

(1 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室 北京 100049)
 (2 中国科学院大学 北京 100049)
 (3 河北经贸大学管理科学与工程学院 石家庄 050061)

摘要 宇宙线发现百年以来,宇宙线起源仍然是一个谜.研究宇宙线起源主要在甚高能(VHE)伽马射线天文学和宇宙线物理学两个领域交叉展开.新一代高海拔宇宙线观测站(LHAASO)拥有高海拔、全天候和大规模优势,利用多种探测手段对宇宙线开展联合观测,大幅提升对伽马射线和宇宙线的鉴别能力.LHAASO将开展全天区伽马源扫描搜索以大量发现新伽马源,将获得30 TeV以上伽马射线探测的最高灵敏度,将在宽达5个数量级的能量范围内精确测量宇宙线分成份能谱,为揭开宇宙线起源谜团给出重要判据.系统介绍了LHAASO的探测器结构、性能优势和科学目标.

关键词 宇宙线, 甚高能伽马射线, 广延大气簇射, 高海拔宇宙线观测站 中图分类号: P172; 文献标识码: A

1 引言

广义的宇宙线是指来自地球外太空的粒子和射线,包括原子核、电子、正电子、反质子等带电粒子以及中子、高能伽马射线、中微子等电荷中性粒子.狭义的宇宙线是指占99%的原子核,包括从轻(如质子、氦核)到重(如铁核)的原子核.本文采用狭义的宇宙线定义.宇宙线能量跨度覆盖10⁹-10²⁰ eV (相比之下,人工产生的最高能量粒子是大型强子对撞机(LHC)实验产生的质子,单束流的质子最高只能加速到7 TeV,质子对撞产生的实验室系能量只能达到10¹⁷ eV).宇宙线的发现超过百年了,但是宇宙线的起源仍然是一个谜.研究宇宙线起源有两条重要的途径:

(1)精确测量宇宙线分成份能谱,通过研究能谱随能量、成份的变化来揭示宇宙线 产生、加速、传播的机制.宇宙线以接近光速的速度运动,受银河系磁场的约束而且偏 转运动方向,在银河系平均来说停留大约1000万年.宇宙线的观测方式有两种:一种方

 † maxh@ihep.ac.cn

²⁰¹⁹⁻⁰²⁻⁰²收到原稿, 2019-03-19收到修改稿

^{*}中国科学院国际合作局对外合作重点项目(113111KYSB20170055)、国家自然科学基金项目(11675187、11575203、U1731136、11505190、11635011)资助

式是直接测量,即由航天器或者高空气球搭载探测器到大气层外直接探测宇宙线.由于 探测器作为载荷却不能过重过大,飞行时间又有限,而在100 TeV以上宇宙线流强太低, 因此无法得到研究100 TeV及以上能谱所需的足够统计量.另一种方式是间接测量,即在 地面建造大型探测阵列,通过探测广延大气簇射(EAS),即宇宙线与地球大气层的原子 核碰撞产生的成千上万的电子(e⁻)、正电子(e⁺)、缪子(μ[±])、伽马射线(γ)、强子、切 伦科夫光、荧光、射电等次级粒子和辐射,来推出宇宙线的能量和成份.

(2)寻找伽马射线源,并且精确测量伽马射线源的能谱,研究伽马射线的辐射机 制,从而发现宇宙线源.研究伽马射线的优势是不受星际磁场的影响,通过精确测量伽 马射线的方向,直接找到产生伽马射线的天体.甚高能(VHE)伽马射线天文学(能量> 100 GeV)是研究最高能态天体物理过程的一门学科,已成为粒子天体物理的主要分支之 一,是目前的国际研究热点.VHE伽马射线产生于非热辐射,与加速机制模型紧密相关, 可以对理论模型进行很强的限制.同时,VHE伽马射线作为极端天体物理过程的研究 探针,对于我们研究伽马暴(GRB)的起源、极端环境中(中子星、超新星、活动星系核 等)的物理行为有着非常重要的作用.VHE伽马射线的实验观测还有助于研究一些更基 础的物理课题,比如寻找来自于星系中的暗物质粒子湮灭生成的高能伽马射线的信号.

中国长期以来致力于宇宙线起源的研究,积累了丰富的经验. 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,90年代又先后与 日本及意大利的合作者,在海拔4300 m的西藏羊八井成功开展了国际著名的地面EAS实 验. 羊八井实验在10¹⁴-10¹⁷ eV能量范围内精确测量了宇宙线能谱^[1-2],在10¹²-10¹⁵ eV 能量范围内精确测量了2维的宇宙线各向异性^[3-4],在10¹²-10¹³ eV开展了伽马射线观 测^[5],取得了重要的物理成果. 但是由于阵列规模有限,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,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. 在这些前期工作的基础上,针对相关领域的前沿课题,中国正在 建立高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO),联 合运用多种探测手段,对EAS展开全成份、立体观测,比以往的同类型实验大幅提升角 分辨率、能量分辨率、原初成份的鉴别能力等各项性能.本文对LHAASO的实验装置、 性能优势、物理目标做一概要介绍.

2 LHAASO实验装置

LHAASO选址在四川稻城海拔高达4410 m的海子山, 紧邻省道217, 离稻城亚丁 机场仅8 km, 交通便捷. LHAASO实验^[6]主要包含3个探测器阵列(图1): 分布面积最 大的阵列称为1平方公里地面粒子探测器阵列(KM2A), 在1.3 km²范围内均匀放置地 面电磁粒子探测器(ED)和地下缪子探测器(MD); 中心部分是全覆盖、低阈能、总面 积78000 m²的水切伦科夫光探测器阵列(WCDA); 还有可以机动布置以适应不同物理需 求的20台广角大气切伦科夫光望远镜(WFCT)组成的望远镜阵列(WFCTA). 以下对这 些探测系统分别进行介绍.

3期



Fig. 1 The layout of LHAASO detectors

2.1 KM2A

KM2A阵列由5195个ED和1171个MD以及后级的电子学、定时、数据采集、触发 判选、数据处理、标定等功能系统组成.ED (图2)是1 m²的塑料闪烁体探测器,塑料闪 烁体中产生的光子经光纤收集传输到1个1.5英寸光电倍增管(PMT)转化成电信号读出. ED表面覆盖5 mm厚的铅板,用于将EAS中的光子转化成电子以提高探测效率和角分辨 率.ED间采取正三角形排布,在1 km²的中心区域内间隔为15 m.外围区域内相邻ED间 距为30 m,用于判别簇射的芯位落在了阵列以内还是以外,总分布面积达到1.3 km². ED用于重建原初粒子的能量和方向.MD (图3)是36 m²的水切伦科夫探测器,用1个8英 寸PMT读出.MD表面覆盖2.5 m厚土层,土层用于吸收电子和光子,探测缪子的阈能 为1.3 GeV.MD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1所示,图中缺少的区域是因为地质条件限制,无法建造MD.因为强子宇宙线的次级 粒子中富含缪子,而伽马射线的次级粒子中缪子很少,所以可以用于区分伽马射线和宇 宙线.图4显示了KM2A对伽马和宇宙线观测到的缪子数与电子数,可以看到两者具有明 显区分度,在一定能区以上可以完全排除掉宇宙线^[7].

2.2 WCDA

WCDA (图5)分成3个水池,由3120个单元探测器以及后级的电子学、定时、数据 采集、触发判选、数据处理、标定等功能系统组成.单元探测器(图6)为5 m × 5 m的水 域,深度为4.4 m,两个单元之间用隔光帘隔开,从而避免来自同一次级粒子尤其是缪子 信号的串扰.WCDA共采用3120支大尺寸PMT (其中900支8英寸,2220支20英寸),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PMT (其中900支1.5英寸,2220支3英寸),小尺寸PMT放置在大尺寸PMT旁边,用于扩大簇射 粒子数测量动态范围,从而实现高能宇宙线的高精度测量.



图 4 KM2A阵列利用测量到的缪子数 (N_{μ}) 与电子数 (N_{e}) 对原初伽马射线(黑点)和宇宙线(蓝点)进行区分,黑线是两者的区分线(模拟计算结果)^[7]

Fig. 4 Separation between the primary gamma ray (black dots) and nuclei (blue dots) by using the number of electrons $N_{\rm e}$ and the number of muons N_{μ} , measured by KM2A. The black line is the separation line (from a simulation calculation)^[7]



图 5 WCDA整体布局效果与WCDA布局示意





Fig. 6 Schematic view of the WCDA detector

2.3 WFCTA

WFCTA (图7)最多由20台WFCT组成,每台WFCT由光学系统、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^[8-9].单台WFCT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°-90°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切伦科夫光或者激发的氮分 子退激发而发出荧光.而WFCTA正是通过探测这些光子实现对宇宙线探测的.簇射中的切伦科夫光或者荧光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阵列上形成切伦科夫光像或荧光像.每台WFCT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 m².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° × 0.5°,单台 望远镜的视场范围为16° × 16°.



Fig. 7 Schematic view of WFCTA

除了上述子阵列的各自结构, LHAASO具备以下整体特征:

(1)虽然LHAASO探测器单元数量达上万个,但是每个探测器都是将光信号通过光 敏器件(PMT或者SiPM)转化成电脉冲信号,信号类型单一、信号特征一致,便于进行统 一处理;

(2) LHAASO探测器单元均采用小白兔时钟系统记录每个信号的到达时间,精度达到0.5 ns以上,并且用光纤传输数据,保证了数据传输的可靠性;

(3) WCDA和KM2A均采用无硬件触发模式,即将所有的过阈信号传输到在线数据 平台作短暂的缓存,在那里及时进行软件上的触发判选,判选后的事例发送到离线数据 平台作永久储存.WFCTA在硬件的一级触发后也同样作在线软件触发.这样的方式使 得触发工作具有高度的灵活性和多样性,可以针对不同的物理目标进行触发设计,只保 留有用的数据,保证了对海量数据充分、高效、快速的利用.

3 LHAASO科学目标

LHAASO的核心科学目标是探索高能宇宙线起源并开展相关的高能辐射、天体演化、暗物质分布等基础科学的研究.LHAASO具体的科学目标如下:

(1)探索高能宇宙线起源. 通过精确测量伽马源宽范围能谱, 特别是寻找100 TeV以 上能区的宇宙加速器(Pevatron), 研究高能辐射源粒子的特征, 探寻银河系内重子加速 器的存在证据, 在发现宇宙线源方面取得突破; 精确测量宇宙线能谱和成分, 研究加速和 传播机制.

(2)开展全天区伽马源扫描搜索,大量发现新伽马源,特别是河外源,积累各种源的统计样本,探索其高能辐射机制,包括产生强烈时变现象的机制,研究以超大质量黑洞为中心的活动星系核的演化规律,捕捉宇宙中的高能GRB事例,探索其爆发机制.

(3)探寻暗物质、量子引力或洛仑兹不变性破缺等新物理现象,发现新规律.

下面对各个物理目标逐一进行介绍.

3.1 VHE伽马射线天文学

在过去的20 yr内, 大气切伦科夫成像望远镜(IACT)的应用在极大地提高角分辨的 前提下突破了宇宙线本底排除的瓶颈,开创了VHE伽马射线天文学, 惠普大气切伦科夫 望远镜(WHIPPLE)、高能立体大气切伦科夫望远镜系统(H.E.S.S.)、甚高能辐射成像 望远镜阵列系统(VERITAS)、伽马射线大气切伦科夫成像望远镜(MAGIC)等IACT实 验发现了大批伽马射线源,确定地指出了每一个超新星遗迹、脉冲星、星系中心的超 大质量黑洞、星暴星系等都是一个TeV宇宙加速器(Tevatron),至少电子肯定已经在这 些Tevatron中被加速到不低于100 TeV的能量. 然而,在GeV处电子只占通常的重子宇宙 线流强的1%,在TeV处为0.1%,而且伽马射线发射并不一定直接关联于源区宇宙线的加 速,已经发现的TeV伽马射线源适用于逆康普顿(IC)散射模型,即电子起源,H.E.S.S.实 验的能谱测量局限在100 GeV到几十TeV, 尚不足以最终确定宇宙线源. 目前VHE伽马 射线天文学领域的关键问题在于:一方面,尚未收集到足够多伽马射线源的样本,无法按 其加速行为进行分类: 对已知源的能谱和源区多波段详细观测的样本也太少, 难以在较 为普遍存在的规律性观测结果和特殊个体行为之间做出正确的判断.因此,目前需要的 是对整个天空的巡天观测以发现大批伽马射线源.另一方面,需要对伽马射线源做深度 成像观测、大范围的能谱测量和尽可能宽广的多波段观测研究, 彻底弄清伽马射线的辐 射机制, 判选出真正进行强子加速的天体源. 值得强调的是, 在电子加速机制中产生最高 能伽马射线的是电子在软光子上的IC散射,而这一作用过程几乎不可能产生100 TeV以 上的伽马射线,如果存在,就可以无歧义地确定为宇宙线的起源,因此对Pevatron的搜索 是VHE伽马射线天文学的新的热点.

早期的高海拔、全覆盖实验ARGO-YBJ (羊八井天体物理地面观测站)成功地把 伽马探测阈能降低到300 GeV,而MILAGRO (奇迹水切伦科夫望远镜)实验则由于采用 了水切伦科夫技术技术,既可探测簇射中的电子、伽马射线和缪子,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 (高海拔水体切伦科 夫天文台)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22500 m²的实验阵列,灵敏度比ARGO-YBJ和MILAGRO提高了15倍并很快发现 了10多个新的银河系伽马射线源^[10].

伽马射线源类型多样,数量众多,包括:

(1)超新星遗迹(SNR)是超新星爆发抛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. SNR长久以来被认为是银河系宇宙线的主要来源. 2013年Fermi-LAT (Fermi Large Area Telescope)通过200 MeV以下能谱特征证认出2个宇宙线核子 源IC443和W44^{11]},它们就属于这类SNR,这个发现被Science杂志评为2013年十大科学 突破之一.此外新星遗迹W51也被发现为宇宙线核子源. 但是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",此外,所证认出的核子源的数量还太少,远 不能解决银河系宇宙线的起源问题.

(2)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在各波段一直被认为是稳定的辐射

源,但是2010年蟹状星云(Crab Nebula)爆发现象^[12-13]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mGs的磁场强度估算,相应同步辐射电子能 量需要达到PeV量级,这么高能量电子对现有的加速机制是一个挑战.

(3)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π⁰的衰变和 电子对星际辐射场的逆康普顿散射,可用以研究银河系宇宙线的传播,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. H.E.S.S.观测到了银心附近的弥散伽马辐射^[14],认为找到了PeV宇宙线在银心附近的加 速证据,但是H.E.S.S.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.

(4)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VHE伽马射线源表现为扩展源.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柱密度形态进行比较,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.反之,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柱密度,因此可以测量银河系不同天区CO与分子氢的比例.

(5)已经发现的70多个能量大于100 GeV的河外源多数是活动星系核(AGN), 具有显著的流强随时间变化的特征, 了解这些非常活跃的星系核(通常是大质量黑洞)的演化和与周围物质的相互作用特性具有重要的意义. 由于源的距离非常遥远(通常>10⁸ pc), 通过与其他波段的联合观测, 其时变现象可以用于探索多个涉及大尺度物质分布、河外背景光分布(EBL)、量子引力效应等基本天体物理问题. 显而易见, 最佳的观测手段是具有较高灵敏度的能够24 h连续监测整个天空的大型探测器. 除了快速变化的伽马射线源外, 还存在一类空间上扩展的源. 以美国MILAGRO实验发现位于天鹅座方向的源为例, 它和Geminga都是天空中相当明亮的伽马射线源, 其流强都远远超出了切伦科夫望远镜所能探测的最低灵敏流强, 但他们并没有被这些窄视场的望远镜所发现. 这充分体现出宽视场扫描探测器在发现具有扩展特性源上的优势, 也给LHAASO或者HAWC等地面探测阵列留下了发现较强源的宽广空间, 而年龄较大的超新星遗迹往往具有较为扩展的辐射区域, 当然单位源区面积上的辐射流强也会相应降低, 要求探测器具有更高的灵敏度.

(6) GRB是宇宙中最剧烈的恒星级高能爆发现象, 在观测上, GRB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GRB持续时标为0.01-1000 s, 拥有非热形态 的拐折幂律谱^[15], 光变曲线复杂且快速变化, 有不规则的多脉冲形态. 一次GRB释放的 各向同性辐射能可以达到10⁴⁶ J的量级, 甚至更高. GRB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GRB. 有几个GRB的能量在10 GeV以上^[16-18], GRB130427A^[19]达 到94-126 GeV (经过红移修正后), 最近MAGIC就探测到GRB 190114C产生的伽马射

3期

线能量> 300 GeV^[20],表明GRB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GRB所产生的高能光子的能量最高能达到多高.而研究GRB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GRB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,探测到的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GRB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IACT只能在晴朗无月夜的晚上工作,观测时间只有10%左右,观测视场窄小,只能定点观测,即使出现GRB警报,转动其观测装置也需要一定的时间,因此对GRB这种瞬时爆发现象的观测存在不足.

此外,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 (反物质探测和轻原子核天体物理卫 星实验)、ATIC (高新薄电离量能器气球实验)、Fermi (费米卫星实验)和AMS02 (阿尔 法磁谱仪02)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"(DAMPE),其核心课题便是通过对5 GeV-10 TeV电子能谱进行高分辨 的测量来寻找暗物质的证据.

LHAASO的WCDA和KM2A组合将聚焦于VHE伽马射线天文学. LHAASO具有大 视场、全天候、低阈能及高灵敏度的特点,已知的伽马射线源中103个大于100 GeV源 和187个大于50 GeV源在LHAASO视场内(图8). WCDA将巡天观测100 GeV-30 TeV的 伽马射线天空,在TeV能区可以达到<1%蟹状星云流强的最佳灵敏度(图9),与欧洲的 下一代成像切伦科夫望远镜阵列(CTA)计划形成优势互补. 除银河伽马射线源观测外, WCDA将发现和监测诸如GRB和AGN这样的河外时变源,这对于研究宇宙线的起源加 速、GRB和AGN的多波段辐射机制、河外背景光、星系间磁场和星系演化等问题都 具有重要意义.同时,WCDA具有探测扩展源的优势,有望探测到更多CTA难以观测的 扩展源. KM2A阵列在> 30 TeV能区的灵敏度远远高于此前的IACT实验和未来的大型 阵列CTA项目(图9). KM2A将着重于开展30 TeV以上能量的伽马射线观测, 探测伽马 射线源的高能辐射行为,研究直到PeV能量的银河系宇宙线源的加速机制和高能天体 的演化.比如,从预期的KM2A对属于SNR的IC443和W51C的观测能谱可以看到(图10), 强子和轻子模型预期能谱在能量关键点50 TeV以上有5σ以上的高显著性差异. 另外, LHAASO通过测量几百GeV到上百TeV银河系弥散伽马射线以及电子的分布和能谱,将 把卫星实验Fermi和地毯式实验ARGO-YBJ、MILAGRO的测量结果延伸到更高的能 量,对银河系中宇宙线传播模型给出强限制.



图 8 已知> 0.1 GeV^[21]、> 50 GeV^[22]和> 100 GeV^[23]伽马射线源空间位置分布及LHAASO视场(FOV)

Fig. 8 The spatial distribution of the known gamma-ray sources with emission energy $> 0.1 \text{ GeV}^{[21]}$, $> 50 \text{ GeV}^{[22]}$, and $> 100 \text{ GeV}^{[23]}$. The shadow region shows the field of view of LHAASO



Fig. 9 Sensitivity of LHAASO compared with the other ${\rm experiments}^{[7,\,24]}$



Fig. 10 LHAASO expectation on the measurement of energy spectra of SNR IC 443 (left) and W51C $\rm (right)^{[25]}$

3.2 宇宙线物理

在跨越10多个量级的能谱上, 宇宙线的全能谱(不区分成份)基本服从随能量单调下降的幂律分布, 但是存在着4个明显的拐折: (1)约在4 × 10¹⁵ eV处有个变陡的拐折, 称为"膝"; (2)在300-400 PeV内有一个更陡的拐折, 称为"第2个膝"; (3)在4 × 10¹⁸ eV有个变缓的拐折, 称为"踝"; (4)在10²⁰ eV有个截断, 称为"GZK cutoff". 拐折的成因有多种宇宙线起源的理论假设, 这些假设对膝区宇宙线各成份的能谱(即分成份能谱)的拐折点、拐折前后的流强大小、幂律指数、各成份的占比、各成份的拐折点提出了不同的预期. 只有通过对分成份能谱进行精确测量, 才可以有效评判理论模型, 破解能谱拐折成因, 解开宇宙线起源的谜团.

世界上已有众多簇射地面观测阵列着重于探测宇宙线膝区能谱和成份^[26-31].这些 实验各自探测一种或者混合观测多种簇射次级粒子,有的实验规模小,高能宇宙线事例 统计量不够高;有的实验探测器较为粗糙,性能如能量分辨、原初成份区分等不够好;有 的实验技术手段单一,无法应付宇宙线多能量、多流强、多成份的复杂情况.目前实验 结果之间的系统性差异高达30%,无法对各种膝区成因的理论假设作出有效评判.情况 类似,在10¹⁷–10¹⁸ eV能量段内,AGASA (明野巨型空气簇射阵列)、Fly'eye (蝇眼宇宙 线实验)、HiRes (高分辨率蝇眼宇宙线实验)等都观测到了宇宙线能谱的"第2个膝",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个膝"的位置各不 相同.对极高能宇宙线的探测只能通过地面实验间接测量,无法对探测器进行绝对能量 定标,不同实验间也缺乏能量相对定标的手段,反映在能谱的测量上,便是大家都测量 到了相应的能谱拐折,但位置各异,结构不同,无法从中得到一致的结论.100 TeV以下 的空间直接测量能谱为所有地面实验提供了唯一的参考能量标准,与直接测量能谱相比 较,通过交叉定标将能标逐步传递到高能端是实现对极高能宇宙线连续一致测量的唯一 有效手段.

3期

60 卷

LHAASO充分发挥高海拔优势,拥有多种探测手段,对簇射的纵向发展和横向 发展开展完整、立体的观测,大幅提升宇宙线能量测量精度和成份鉴别能力,包括: WFCTA望远镜所测量到的总光子数Npe用于宇宙线能量测量;WFCTA望远镜所观测 到的EAS切伦科夫像的形状,包括像的长短轴比例以及像的质心到簇射到达方向的角距 离,与EAS纵向发展到极大时的位置密切相关;WCDA记录到的芯区能量记录了EAS发 展早期的强子信息;MD记录到的缪子成份反映了EAS中强子的信息.WFCTA是切伦 科夫/荧光望远镜阵列,采用可移动的设计理念,对不同的观测模式(切伦科夫观测模式 和荧光观测模式)、不同的观测能区,采用不同的阵列布局,实现10¹³–10¹⁸ eV分成份能 谱的精确测量以及从空间直接测量到极高能的能标传递工作.WFCTA共分以下4个阶 段来完成宇宙线分成份能谱测量,其中第1、2、3阶段为切伦科夫光模式,WFCTA迎 着EAS方向探测直接入射的切伦科夫光,第4阶段为荧光模式,WFCTA探测的是EAS侧 面的漫散射的荧光(图11).



图 11 左图:在第3阶段WFCTA在北天区的视场方位角90°在正北方.在高度角40°-50°之间的曲线组是月球1 yr中走 过的轨迹.右图:WFCTA在第4阶段的阵列排布

Fig. 11 Left: The field of view of WFCTA in the entire northern sky map at the third stage. The azimuth angle 90° is the due north direction. The curve group with elevation of 40–50 degree indicates the trajectories of the moon in one year. Right: The layout of WFCTA at the fourth stage

第1阶段,用6台WFCT测量10¹³-5×10¹⁴ eV宇宙线分成份能谱,把WCDA通过月影标定的能标传递给切伦科夫望远镜,与直接测量实验如DAMPE、AMS02、CREAM (宇宙线能量与质量实验)等的测量结果对比,研究能标传递的误差和验证能标传递的正确性.由于低能段宇宙线统计量足够大,所以只需要6台WFCT参与,临近WCDA中的一个水池布局,实现和直接测量能谱有效的重合并向高能延伸.

第2阶段,用6台WFCT测量10¹⁴-10¹⁶ eV宇宙线分成份能谱.WFCT临近WCDA一 个水池排布.对于能量在10¹⁴ eV以上的空气簇射,WFCTA联合WCDA一个水池的有效 接收度约为9000 m²·sr.WFCTA、WCDA和KM2A的组合可以实现挑选质子的纯度达 到90%,挑选质子和氦核的纯度达到95%,将得到高精度膝区轻成份能谱(图12左图),轻 成份膝的结构清晰可辨.

第3阶段,用18台WFCT测量5×10¹⁵-10¹⁷ eV宇宙线分成份能谱.WFCT中心都指向45°的天顶角,绕方位角摆成一圈,覆盖240°的方位角.18台望远镜放置在KM2A阵列的中心.这样布局的好处是可以充分利用ED和MD,且望远镜的有效空间覆盖面积达到最大(图11左图).此能量段的宇宙线产生的切伦科夫光子数巨大,为了避免PMT的饱和

在镜筒门口增加紫外波段滤光片,以减少进入望远镜内的光子数,同时也减少进入望远镜内的夜空背景光子数.值得强调的是,由于可以忽略SiPM的老化效应,而且甚至在满月的时候阈值都高于夜晚背景光,WFCT能够在除直视月亮外的所有情况下工作,因此可以在交替关闭直视月亮WFCT的同时全开启其他的WFCT,显著增加观测时间.对于能量在10¹⁶ eV以上的空气簇射,每台望远镜的有效接收度约为18000 m²·sr.按照每年10%的有效工作时间计算,18台望远镜每年共可以观测到500个100 PeV以上的宇宙线事例,将得到高精度膝区重成份能谱(图12右图),铁核的膝结构清晰可辨.



图 12 左图: 预期在第2阶段1 yr内观测到的纯轻成份能谱. 右图: 预期在第3阶段1 yr内观测到的纯重成份能谱

Fig. 12 Left: The expectation of pure light nuclei energy spectra at the knee region measured at the second stage in one year observation. Right: The expectation of pure heavy nuclei energy spectra at the third stage in one year observation

第4阶段,用20台WFCT测量10¹⁷-10¹⁸ eV之间的宇宙线分成份能谱.利用EAS中次 级粒子激发大气中的氮分子在退激发时所发射出的荧光进行观测.WFCTA 20台望远镜和LHAASO中心阵列之间的距离约为5 km (图11右图).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,提高对宇宙线方向和芯位的重建精度以及对簇射发展的极大位置X_{max}的测量精度.在荧光观测模式下,WFCTA可以观测到X_{max},而X_{max}是包含成份信息的参量.除此之外,WFCTA可以跟KM2A阵列联合观测.因此KM2A可以提供簇射中缪子的信息,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望远镜具有较平的接收度,约为79 km²· sr, 对应的事例率为每年2000个事例.

另外,多家地面宇宙线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,为研究银河系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 的信息. ASγ (羊八井宇宙线观测站)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2维分布,并利用300 TeV近乎消失的各向异性结果证明银河系宇宙线 与星际间气体物质和恒星共同围绕银河系中心旋转. 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,结果显示各向异性在4 TeV以下随能量增加而升高, 在10 TeV以上又逐渐下降. ARGO-YBJ对各向异性最新结果也扩展到了520 TeV,确认 了100 TeV以上各向异性结构发生了变化. 近年来, IceCube (冰立方中微子天文台)实验 和ASγ实验分别测量了南北天区里PeV能量范围的各向异性,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^[32]. KM2A有1 km²的探测面积,而且有大量地下 缪子探测器,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,这将为理解宇宙线各向异性成因提供重要的线索.

3.3 新物理现象

除了TeV伽马射线天文和宇宙线物理,LHAASO还能够凭借其优势在探索新物理现 象方面发挥特殊作用,包括:

(1)暗物质间接探测.目前世界上最为灵敏的大视场伽马射线探测器是Fermi卫星, 其角分辨能力和对于伽马射线的灵敏度都达到了前所未有的程度.但由于卫星实验 本身的限制,其体积探测器面积只有1 m²左右,因此其对于伽马射线最高只能探测到 约300 GeV.如果要探测更高的能量并达到更高的灵敏度,就必须建造更大规模的地面 探测器,LHAASO就是这样的一个探测器.LHAASO和Fermi具有能段互补的作用,而 且目前对于解释ATIC和PAMELA的结果一般要求暗物质粒子的质量在1 TeV左右,地 面探测器对于这么重的暗物质信号更有优势.

(2)利用瞬变现象探索量子引力或洛伦兹(Lorentz)对称破缺效应. 在相对论和量子 场论中, 洛伦兹对称性是一个基本的对称性. 但在普朗克标度的高能条件和量子引力条 件情况下, 洛伦兹对称性可能会有一定的破缺. 现代科学的发展已使实验的精度大大提 高, 同时宇宙学尺度的积累致使小的洛伦兹破缺成为可观测的效应, 这些发展已使洛伦 兹破缺的实验研究成为可能. 洛伦兹破缺的一个重要预言, 就是高能光子的传播速度相 对低能量的光子有所减小. 在某一点同时发射的两个不同能量的光子, 经过宇宙学尺度 的长距离传播, 洛伦兹破缺就会积累到使得高能量的光子以比低能光子延迟的时间到达 观测点. 因此, 在地球上观测宇宙学尺度的伽马射线源高低能量光子到达的时间差, 就 可以测量洛伦兹破缺效应的大小或者对相关理论参数给予约束.

(3) LHC能量以上新能标处粒子物理现象. 河内宇宙线源的发现将开启利用宇宙加速器研究粒子物理问题的新时代. 能量高达数百TeV的光子和中微子在宇宙加速器周围的靶物质上产生,并传播到我们的探测器,随着对源区及其临近区域的多波段观测日益丰富,其中物质和磁场的空间分布和辐射的时变行为也测量得越来越清晰,对相互作用的模型就会产生更加强烈的限制,从而对新能标处的粒子物理模型提供有效的实验检验.

4 结论与展望

2017年以来, LHAASO已经开始施工建设, 目前进展顺利, 预计2021年将全部建成. 通过运用多种探测手段联合观测, 并与平方公里的探测面积结合, LHAASO获得了史无 前例的伽马射线探测灵敏度, 有望发现银河系宇宙线的加速源, 并为高能天体辐射研究、 宇宙学和新物理学规律研究做出贡献. 同时, 由于高海拔全覆盖探测器的低阈能特点, LHAASO将实现从空间直接测量到极高能的能标传递, 为宇宙线能谱中两个"膝"的成 因给出重要判据. 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.

在LHAASO的基础上,多种新技术的研究工作正在展开,例如大口径广角水透镜 切伦科夫望远镜^{33]}、高能宇宙线热中子探测器^{34]}、射电天线阵列^{35]}、SiPM和微通道 板型光电倍增管(MCP-PMT)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, 是科学实验工作得以持续和长久发展的保证. 在LHAASO之后, 中国地面宇宙线事业的选项包括有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GRB. 目前LHAASO海拔4410 m, 不过是在青藏高原的 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, 符合实验场 地的要求. 较低海拔有助于观测最高能量的宇宙线. 而要想观测极其稀有的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.

参考文献

- [1] Amenomori M, Bi X J, Chen D, et al. ApJ, 2008, 678: 1165
- $[2]\;$ Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. PhRvD, 2015, 92: 092005
- $[3]\,$ Amenomori M, Ayabe S, Bi X J, et al. Science, 2006, 314: 439
- $\left[4\right]$ Amenomori M, Bi X J, Chen D, et al. ApJ, 2017, 836: 153
- $[5]\;$ Bartoli B, Bernardini P, Bi X J et al. ApJ, 2013, 779: 27
- [6] He H H, For the LHAASO Collaboration. RDTM, 2018, 2: 7
- [7] Cui S W, Liu Y, Liu Y J, et al. APh, 2014, 54: 86
- [8] Bai B Y, Zhang S S, Cao Z, et al. NIMPA, 2018, 899: 94
- [9] Zhang S S, Bi B Y, Wang C, et al. Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017, Singapore: Springer, 2018
- [10] Abeysekara A U, Albert A, Alfaro R, et al. ApJ, 2017, 843: 40
- [11] Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. Science, 2013, 339: 807
- [12] Tavani M, Bulgarelli A, Vittorini V, et al. Science, 2011, 331: 736
- [13] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. Science, 2011, 331: 739
- [14] Abramowski A, Aharonian F, Benkhali F A, et al. Nature, 2016, 531: 476
- [15] Band D, Matteson J, Ford L, et al. ApJ, 1993, 413: 281
- $\left[16\right]$ Ackermann M, Asano K, Atwood W B, et al. ApJ, 2010, 716: 1178
- [17] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. ApJS, 2009, 706: L138
- [18] Ackermann M, Ajello M, Asano K, et al. ApJ, 2011, 729: 114
- [19] Ackermann M, Ajello M, Asano K, et al. Science, 2014, 343: 42
- [20] Ravasio M E, Oganesyan G, Salafia O S, et al. arXiv:1902.01861v1
- [21] Acero F, Ackermann M, Ajello M, et al. ApJS, 2015, 218: 23
- [22] Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. ApJS, 2016, 222: 5
- [23] TeVCat. Online Catalog for TeV Astronomy. http://tevcat.uchicago.edu/
- [24] Bernlöhr K, Barnacka A, Becherini Y, et al. APh, 2013, 43: 171
- [25] Liu Y, Cao Z, Chen S Z, et al. ApJ, 2016, 826: 63
- [26] Haungs A, Antoni T, Apel W D, et al. NuPhS, 2006, 151: 167
- [27] Shibata M, Tibet AS gamma Collaboration. NuPhS, 2008, 175-176: 267
- [28] Iacovacci M, the ARGO-YBJ Collaboration. NuPhS, 2008, 175-176: 389
- [29] Bai X, the IceCube Collaboration. NuPhS, 2008, 175-176: 415

- [30] Tibet AS gamma Collaboration, Amenomori M, Ayabe S, et al. PhLB, 2006, 632: 58
- [31] EAS-TOP Collaboration, Aglietta M, Alessandro B, et al. APh, 2003, 19: 329
- $[32]\,$ Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. ApJ, 2018, 861: 93
- [33] Chen T L, Liu C, Gao Q, et al. Proceeding of the 34th International Cosmic Ray Conference, Busan, 2017
- [34] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. APh, 2016, 81: 49
- [35] Fang K, Álvarez-Muñiz J, Alves Batista R, et al. Proceeding of the 34th International Cosmic Ray Conference, Busan, 2017

Introduction to Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO)

CAO Zhen^{1,2} CHEN Ming-jun¹ CHEN Song-zhan¹ HU Hong-bo^{1,2} LIU Cheng¹ LIU Ye³ MA Ling-ling¹ MA Xin-hua¹ SHENG Xiang-dong¹ WU Han-rong¹ XIAO Gang¹ YAO Zhi-guo¹ YIN Li-qiao¹ ZHA Min¹ ZHANG Shou-shan¹ (On behalf of the LHAASO collaboration)

(1 Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049) (3 School of Management Science and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061)

ABSTRACT From the century discovery of cosmic ray, the origin of cosmic ray is still a mystery. Study on the origin of high energy cosmic ray is in a cross field between the very high energy (VHE) gamma ray astronomy and cosmic ray physics. The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) is a unique and new generation experiment with the advantages with an high altitude and a large effective area. It takes function of hybrid technology to detect cosmic ray, improving the separating power between gamma ray and cosmic rays. LHAASO is expected to survey full sky to find new gamma ray sources, to obtain the highest sensitivity to > 30 TeV gamma ray detection, and to make very high precision measurement in cosmic rays spectrum in energy range of 5 orders. LHAASO will provide a decisive judgement for unraveling the mystery of the origin of cosmic ray. This paper describes the structure, performances, and scientific motivation of LHAASO.

Key words cosmic ray, VHE gamma ray, extensive air shower, LHAASO