

西藏羊八井宇宙线国家野外观测研究站的建设、运行与发展*

中国科学院高能物理研究所¹

中国科学院基础研究所²

(1 北京 100049 2 北京 100864)

关键词 宇宙线, 西藏羊八井宇宙线国家野外观测研究站

1 科学背景

宇宙线是来自宇宙深处的高能粒子流, 主要由质子和多种元素的原子核组成, 它携带着宏观宇宙、微观世界和空间环境的科学信息, 联系着宇宙的历史、天体的演化、空间的环境和许多未解的科学之谜。宇宙线能量越高, 数量就越稀少, 致使尺度很小的空间探测器难以捕捉, 因此以大型地面探测阵列来间接观测它就成为必然。目前, 人类能观测到的是宇宙线在地球大气层中引发的大规模粒子产生和增殖现象, 即广延大气簇射(EAS)。西藏羊八井宇宙线国家野外观测研究站(简称羊八井观测站)地处海拔4300米的高原, 由于其能源、交通、通讯的便利, 以及EAS在此发展到极大可进行精确测量等的优势, 是世界上高海拔宇宙线观测站的最佳站址, 在国际宇宙线观测研究领域占有重要地位。羊八井观测站以大型地面探测阵列为平台, 利用宇宙线观测结果展开对宇宙线起源问题、宇宙和高能天体演化规律等重大科学难题的研究, 尤其是对困扰人们近百年来的高能宇宙线起源问题的研究, 以及对大气物理、空间环境等相关交叉学科进行研究。

凭借高海拔、多学科的优势, 羊八井宇宙线观测站的研究全面涉及了宇宙线自身的宇观、微观和环境三大属性; 不仅可进行天体和粒子方面的基础研究, 也可利用宇宙线作为太阳活动和地球“空间天气”的“晴雨表”特征, 为航天安全和地球环境保护服务。10多年来宇宙线探测装置运行稳定良好, 取得了一批重要的物理成果: (1) 首度观测到宇宙线太阳阴影被地球磁场偏离的事实, 并证明它可能会成为监测太阳活动变化的一种新方法; (2) 在国际现存的地面阵列中, 第一个观测到蟹状星云的 γ 发射和活动星系核 Mrk501、Mrk421 的 γ 爆发; (3) 获取了第一个超高能宇宙线质子谱和有关成分的结果, 攻克了困扰国际学术界40多年的“老大难”问题——“膝区”物理研究, 并被认为是目前最权威的结果; (4) 率先测量了宇宙线到达方向的各向异性, 发现了宇宙线等离子体与太阳系一起绕银河中心共转的事实。

羊八井宇宙线观测站于2001年被列为国家首批25个试点野外台站之一, 2007年4月被正式授予国家地球物理野外台站称号, 2008年被列为国家对外科技合作基地, 是我国开展宇宙线研究及其相关交叉学科研究的重要实验平台。

目前, 升级后的羊八井宇宙线设备可为

* 收稿日期: 2010年6月15日



中国科学院

天体、空间、粒子、太阳、地球物理及环境方面的学者提供研究条件;羊八井的高度和位置对大气、地球物理、云雨雷电的研究及太阳能的开发示范活动极为有利;羊八井开阔的地形和宜居环境,使它具有较大的容纳度和发展空间及项目的可操作性;羊八井特殊的自然条件及地区建设的突飞猛进,使之已具备了接纳、建设和长期维持大规模、高技术设备进行现代化、全球化实验的条件。

2 宇宙线观测站概况

西藏羊八井宇宙线国家野外观测研究站位于北纬 $30^{\circ} 11'$ 、东经 $90^{\circ} 53'$ 处,距离拉萨市仅 90 公里,是北半球最高、世界第二高的宇宙线观测站,也是高海拔地面站中规模最大、最有发展前景的一个观测站。中日合作 AS γ 实验和中意合作 ARGO 实验是羊八井现有的两个最大型的实验;工作能区在 TeV(10^{12} eV),具有大视场、全天候的优点。加以较为简单的改造,就可以使之在 100TeV 能区有很高的灵敏度,从而可深入研究银河系宇宙射线源。羊八井观测站的高海拔,也有利于研究者把能区进一步降低几十倍从而可以观测宇宙深处的源,以开展天文学、宇宙学相关的研究。

中日合作 AS γ 阵列实验,建成于 1990 年,科学目标是宇宙线能谱“膝区”物理研究。实验通过采样式的塑料闪烁体探测器阵列获取次级粒子横向分布的信息,最终得到原初粒子的能量、方向等几何信息。从实验建成开始,AS γ 通过三次扩展加密和一次升级改造来提升阵列的物理指标:1994 年扩建 AS γ 二期阵列,野外探测器增至 221 个,覆盖 $36\,900\text{m}^2$;1996 年在其中的 $\sim 5\,000\text{m}^2$ 地面增加了 77 个探测器,使其探测器间距缩小至 7.5m,从而将探测阈能降至国际同类设备的最低值 3TeV($1\text{TeV}=10^{12}\text{eV}$),导致了对蟹状星云 $\geq 3\text{TeV}\gamma$ 射线的正探测;1999

年又增加了 255 个野外探测器,将阵列作了全面加密,2000 年和 2002 年又分别增加了 133 个测定粒子密度的探头和 180 个快时间探测器,使得 AS γ 三期阵列一共拥有了 733 个野外探测器,加密区的面积达到 $32\,500\text{m}^2$ 。其间,为了测定超高能宇宙线的成分,1996 年在阵列中心建造了 80m^2 的高山乳胶室及配套的地方簇射探测器。目前,中日 AS γ 阵列探测取样比约为 1%,平均每秒记录 1 700 个(每天 16GB)空气簇射事例。经过 10 多年的稳定运行,AS γ 在膝区能谱测量、大尺度各向异性、 γ 天文、稳定源的暂态爆发(Mrk421 和 Mrk501)、太阳物理等方面取得了多项重要成果。

中意合作全覆盖式探测阵列 ARGO 实验于 2006 年最终建成并开始运行。ARGO 实验大厅总面积为 $11\,200\text{m}^2$,由轻质、高保温的聚氨脂彩钢夹心板建成,在不使用空调的情况下,可以抑制高海拔地区较大昼夜温差对室内温度的影响,保证 RPC 探测器工作状态的长期稳定。ARGO 探测器由一个安装在上万平方米实验厅中的 $5\,000\text{m}^2$ 中心“地毯”和一个外围保护圈组成,共用 1 848 个 3.5m^2 的 RPC 探测器,拥有 18 480 个快时间和粒子数信号通道,近 2 000 个微电子学插件,154 个电子学子站和一个数据采集中心站。全部运行时其 EAS 触发率可达 26.4Hz,日产原始数据 $\sim 630\text{GB}$,是迄今非加速器物理实验中数据量最高的一个。用于运行状态监测的数据和 EAS 原始数据,通过 155MB 的宽带网实时传往北京;来自北京的远程操作命令也可通过宽带网送达现场的伺服机构。

由我国自主研制成功的两台广角契伦科夫望远镜于 2008 年通过安装测试,稳定运行至今。每台望远镜由镜体和机械系统、光收集系统、成像系统、电子学读出系统、标

定系统、慢控制与监测系统组成。两台样机的研制成功和稳定运行,标志着我国契伦科夫成像技术的发展成熟,也表明我们在探测器研制方面完全拥有自主创新能力。这一技术也是大型高海拔空气簇射观测站(LHAASO)实验实现多参数复合测量的重要技术基础。目前,两台样机已经与ARGO联合观测并获取70多万宇宙线事例。

此外,羊八井宇宙线观测站于1998年分别自日本理化所和名古屋大学引进了太阳中子监测器(由28只超级中子管组成)和太阳中子望远镜(由9m²厚闪烁体与正比管组成),以监测太阳活动对宇宙线的调制作用和捕捉太阳耀斑爆发中可能出现的高能粒子事件,并研究其产生加速过程。

羊八井观测站是由一个课题组以自由选题申请经费建立和自行管理并逐步发展的。历经20多年的发展,作为国家级的野外台站,羊八井宇宙线观测站在我国宇宙线学科的地位、国际国内开放的性质、建设多学科研究平台的任务和目前达到的规模,都突破了原先课题组站的职责和功能,客观上要求一种更高层次的、正规而有效率的管理。因此,在高能所领导的支持下,成立了以陈和生院士为主任的“西藏羊八井宇宙线国家野外科学观测研究站管理委员会”,负责观测站的宏观管理和决策,检查、监督观测站的建设、运行和管理,对观测站的重大问题,尤其是重大工程和重大事务包括人事、财务、新项目等进行政策性的决策和监督,并接受中科院、科技部有关部门的领导与指导。目前,羊八井宇宙线观测站已经形成了以北京作为运行管理和数据处理中心,以羊八井作为运行状态监测的数据接收点,以多学科交叉应用为共享平台的运行模式。

3 科研成果

一直以来,羊八井宇宙线观测站瞄准 γ

天文观测、“膝区”物理、交叉学科这3大研究方向和目标进行攻坚突破,并取得了一批重要的物理结果。

3.1 中日合作AS γ 阵列

中日合作AS γ 阵列最初只有45个野外探测器,经过三期扩建达到了现今800个的规模。它把传统EAS阵列实验的探测阈能降低了30倍,并获取了如下科研成果:

(1)于1996年首度观测到宇宙线太阳阴影被地球磁场偏离的事实,并证明它可能会成为监测太阳活动变化的一种新方法。

(2)在国际现存的地面阵列中,第一个观测到蟹状星云的 γ 发射和活动星系核Mrk501、Mrk421的 γ 爆发。

(3)获取第一个超高能宇宙线质子谱和有关成分的结果。

(4)发现了全天区高能宇宙线强度分布的各向异性,该研究结果发表在2006年10月20日出版的国际权威杂志*Science*上。

(5)2008年以高精度更新了全粒子能谱,发现能谱在“膝区”处拐折得非常快,表明宇宙线有相当的一部分可能来自于一个源或一类标准的源。

3.2 中意合作ARGO实验

2001年6月,ARGO实验厅建成,2006年6月ARGO中心地毯(5500m²)按设计指标建成并投入试运行,实现了宇宙线的全天候观测。到目前为止已经积累了几十亿个宇宙线事例。在运行取数阶段,中方提出了解决庞大的探测器单元定标的新方法(即特征面法);提出并实现了在线数据再编码。针对ARGO的海量数据,中方建立了羊八井到北京的155Mbps网络带宽,实现了原始数据的日同步传输;建立了以北京为中心的调试运行网络,承担了ARGO阵列的运行任务,掌握了运行和数据的主动权。在物理分析工作中,中方充分发挥及时掌握数据的优势,



中国科学院

迅速开展全天扫描寻找伽玛射线源、活动星系核时变现象监测、宇宙线反质子流强上限、宇宙线的大尺度各向异性、日地行星际磁场测量等物理课题的研究,并取得了重要的进展。其中,利用 ARGO 全天候扫描探测器特点,测量了 TeV 能区宇宙线的各向异性分布,并测到了位于 4TeV 附近存在极大的能谱特征,引起了国际同行的极大关注;此外,中方利用 ARGO 实验数据先于意方观测到了活动星系核 Mrk421 在 2006 年 7、8 月间的一次短期 γ 射线强爆发。

3.3 交叉学科

目前,与羊八井宇宙线观测站开展合作的国内单位有:西藏大学、山东大学、西南交通大学、云南大学、郑州大学、河北师大、中科院大气所、中科院国家天文台、中科院紫金山天文台、中科院空间中心、国家气象局、国家地震局等 12 个单位,合作内容在国内外均有很高的知名度。其中,2005 年与中科院大气物理合作开展了高原大气、雷电与宇宙线的联合观测实验;2008 年我们研制的中子- μ 子复合望远镜验收合格投入使用,与中子堆、中子望远镜数据一同向国家气象局等单位实现远程实时传输,为国家空间天气的研究、监测和预报事业发挥了作用;2008 年底,紫金山天文可移动式亚毫米波望远镜 POST 在羊八井试运行;2009 年 10 月国家天文台亚毫米波望远镜 KOSMA(德国/直径为 3 米)迁至羊八井,这是我国第一台可用于常规天文观测的亚毫米波望远镜;2009 年底国家地震局将置于羊八井的 4 个测量地震大地形变的角反射器安装到位。

羊八井宇宙线观测站正在统筹规划,有序开展上述各项研究工作,并将在以后的发展中取得更加重要的科研成果。

4 前景展望

在“平等互利、优势互补、共担经费、共

享成果”的原则下,羊八井宇宙线观测站通过国际合作获取信息、共享资源、培养和造就了具有竞争力和开拓能力的高素质科研队伍;在项目的若干重要方面实现跨越式发展,最终达到提高中方自主创新能力的目的。

针对羊八井的未来发展,我们依据不同需求提出了相应规划。具体包括:(1)基于 ARGO “地毯”的羊八井复合阵列;(2)AS γ 阵列的地下 μ 子探测器(12MD);(3)测量 EAS 芯区高能粒子分布的 Burst 探测器(CBD);(4)“十二五”期间建设 LHAASO 的计划。同时,相关的预先研究工作已逐步展开。

LHAASO 计划是基于羊八井已有的研究基础,综合考虑羊八井现有实验的发展瓶颈以及未来发展需求,以解决宇宙线国际重大物理难题为使命的前瞻性科学战略规划。LHAASO 计划的核心科学目标是探索高能宇宙线起源以及相关宇宙演化、高能天体演化和暗物质的研究。在探测器建设上,低能区探测器有效面积将达到美国 HWAC 计划的 4 倍,建成 9 万 m^2 水契伦科夫探测器,灵敏度比 ARGO 提高近一个量级;高能区有效面积达到 1 平方公里,比中日 AS γ 探测器大 4 倍,发展大面积 μ 探测器,面积达到 4 万 m^2 ,突破 γ/p 鉴别能力和成份确定的瓶颈,将宇宙线背景抑制到几乎为零,可将灵敏度提高两个量级即 100 倍,比契伦科夫望远镜未来计划 CTA 还要高 10 倍左右,与之形成高、低能区之间的良性互补。LHAASO 计划的实施将充分发挥羊八井宇宙线观测站的优势,全方位大幅提升包括 γ 射线天文和宇宙线物理的观测研究水平,使之成为举世瞩目的一流实验观测研究中心。

(相关图片请见封二、封三)