

DOI: 10.3724/SP.J.1224.2010.00053

西藏羊八井宇宙线国家科学观测研究站： 历程、成就及建议

卢红, 赵琳

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 本文回顾了西藏羊八井宇宙线国家科学观测站的建立以及中日合作 AS γ 探测阵列和中意合作 ARGO 阵列实验项目的建设历程和所取得的科研成果。介绍了改进现有设备和引进多种探测手段, 建设大型高海拔空气簇射观测站(LHAASO)开展交叉学科研究的未来设想。从研究目标的选择、国际合作、多学科交叉、敬业精神及科学工程对科学研究的意义等方面总结了观测站的示范意义与经验, 并提出了观测站存在的问题和政策建议。

关键词: 羊八井; 宇宙线; AS γ ; ARGO; 多学科交叉; LHAASO

中图分类号: Q57

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2010)01-0053-12

1 引言

西藏羊八井宇宙线国家野外观测研究站, 位于北纬 30°11' 东经 90°53' 处, 距离拉萨市仅 90 公里, 拥有中日合作 AS γ 和中意合作 ARGO 两个大型实验项目, 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、最有前景的一个。观测站的建设及运营经历了逾 20 年的运筹, 数十人 20 多年的埋头苦干, 凭着开拓者们锲而不舍的持续努力和各级政府的支持, 迎来了羊八井宇宙线实验大发展的历史机遇。但是, 在观测站逐年发展并取得一系列重要成果的同时, 其宽视场、全时段扫描 γ 射线源的探测手段, 已经不敌以定点观测为特长的窄视场契伦科夫(Cherenkov)望远镜探测技术, 这样, 在激烈的国际竞争中, 两大实验都失去了发现新的 γ 源的机会。观测站何去何从? 这一历史性的课题又一次摆在了人们的面前。本文旨在回顾历史, 总结、梳理经验教训, 以

期获得有益的启示。

2 羊八井宇宙线观测站的建站条件: 得天独厚的观测地理优势

20 世纪 70 年代末, “文革”已经结束, 科学研究开始步入正轨, 我国宇宙线研究应向何处去的思考和辩论亦随即展开。当时加速器能量已覆盖了云南站云雾室的工作能区(100GeV - TeV), 历来以寻找奇异粒子和研究宇宙线高能核作用为目标且曾取得过辉煌战绩的我国宇宙线研究, 因为其云雾室的手工操作、死时间长、事例率低而无法与现代化的加速器实验相竞争。利用宇宙线在大气层中引发 EAS 跃到超高能区(>100TeV)去探索粒子相互作用中的新特征, 或在甚高能区(~TeV)去萃取宇宙线带来的宇观信息, 就成为必然的选择。而在与 EAS 有关的两种实验手段(高山乳胶室和 EAS 阵列)中, 如要有长远的竞争力, 则非大规模、全自动、高事例率的广延大气簇射 EAS 阵列

收稿日期: 2010-01-09; 修回日期: 2010-01-27

作者简介: 卢红(1963-), 男, 广西百色人, 博士, 研究员, 西藏羊八井宇宙线国家野外观测研究站站长, 主要从事羊八井宇宙线物理实验, 以及利用这些探测设备的数据进行与太阳活动相关的交叉学科的研究工作。E-mail: luh@ihep.ac.cn
赵琳(1958-), 女, 北京人, 工程师, 主要从事科研管理工作。

实验莫属。

那么, 什么是宇宙线? 我们又为何选择羊八井来观测宇宙线呢?

宇宙线是来自宇宙深处的高能粒子流。它主要由质子和多种元素的原子核组成, 元素丰度分布与银河物质基本相同, 能量分布很宽, 最高可达到最大人工加速器的十万倍以上。但是能量越高, 粒子就越稀少, 使尺度很小的空间探测器难以捕捉。因此以巨型地面探测阵列来间接地观测它, 就成为必然的选择。来自天外的高能粒子携带着宇宙历史、天体演化、空间环境等诸多科学信息, 有助于人类破解许多未解的科学之谜。其中最基本的一个用途, 是它有助于人类建构宇宙起源模型。理论上, 人们相信这些高能粒子是一些天体进化晚期的产物, 如源于超新星爆发及其遗迹、黑洞等。然而, 由于多数宇宙线带电, 它们在百万年以上的漫长旅行中, 早已被宇宙空间的微弱磁场“搅拌”得各向同性, 失去了其源天体位置的信息。因而, 至今人们还没有真正找到宇宙线产生源的确切证据。我们在羊八井设站观测的主要目标之一, 就是利用其中稀少但不带电的高能 γ 射线来寻找宇宙线源, 破解宇宙线起源之谜。空间实验和地面契伦科夫光成像望远镜已经在天上找到了近 300 个较低能的 γ 射线源, 可以确认这些 γ 射线都是高能电子的次级产物, 因此找到的只是高能电子的产生源。寻找真正产生和加速质子或原子核的宇宙线源, 并持续监测其高能活动的变化, 藉此天体的具体物理条件来展开的相关粒子天体物理学研究, 是实现我们的科学梦想和创建羊八井观测站的主要动因之一。

大气对宇宙线的大量吸收和衰减迫使人们只能在空气稀薄的高山上去研究宇宙线。赫斯 (Victor Hess) 在 1912 年乘热气球升空 5000 米时发现了宇宙线, 而安德生 (Cecil Anderson) 发现正电子、奥杰 (Pierre Auger) 发现大气簇射、鲍威尔 (Cecil Powell) 等发现 π 介子以及罗切斯特 (G. D. Rochester) 发现 K 介子, 都是在高山站观测实现

的。如今, 我们的观测目标是宇宙线在地球大气层中引发的一种被称之为广延大气簇射 (EAS) 的大规模粒子的产生和增殖现象。任何来自于地球之外能量足够高的宇宙线粒子一旦进入大气层, 都不可避免地会与空气原子核相碰撞, 经过核级联、电磁级联、弱作用等一系列微观过程, 产生一个百米尺度的扁盘状的粒子群, 以近光速自天而降。不难想象, 这种 EAS 粒子群有其生长、极盛和衰亡的过程。只有能量大于百万亿电子伏特的 EAS 才能到达海平面。为了能在地面上测到能量更低因而数量更多的 EAS, 或者在 EAS 正当壮年的时候较精确地测到它, 我们就必须上高山。能量出现在 10^{15} — 10^{16} eV (一电子伏特约等于一个太阳光光子的能量) 的超高能宇宙线能谱中的“膝”样拐折, 是存在了 45 年的又一个谜, 它可能联系着宇宙线起源地的更替, 河内粒子加速和存储能力的局限, 甚至是在超过人工加速器能量时粒子相互作用中可能出现的新过程。此能区的宇宙线所产生的 EAS, 在距地面四、五千米的大气层中、即羊八井所在的高度处, 正好达到其发展的极大值 (带电粒子总数有百万之众), 是实施精确测量的最佳高度。为了获取这量多而质精的天然物理研究的绝佳条件, 吃点苦把大型的 EAS 阵列建到高山上去, 既有科研必要, 又有可持续发展的长期效益。

再看一看羊八井, 它是喜马拉雅造山运动形成的断陷小盆地, 长约 75 公里, 宽约 10 公里, 盆底海拔 4300 米左右。北面的念青唐古拉山脉, 像一堵巨墙, 为之遮挡着北来的寒流; 连接拉萨河和雅鲁藏布江的堆龙河谷, 又为之接通了印度洋暖湿气流。上百万年的造山运动, 使羊八井拥有了巨大的地热储存和独特的自然地理条件。它开阔平坦, 高而不寒, 冬无积雪, 宜牧宜耕也宜居。这里有地热电厂, 有数千居民, 有青藏、中尼公路和兰青拉光缆, 有羊八井火车站, 距拉萨仅 90 公里的车程。优越的自然和社会条件汇集在羊八井, 为在这里进行大型设备的安装、运行和科

研究人员长期驻守提供了可能，给我国的宇宙线观测研究预置了一种独特的优势。我们决定开发这种优势，为破解宇宙线起源之谜、膝区物理之谜和尝试用宇宙线监测太阳活动变化及其对地球环境的影响作出贡献。

相比之下，国外高于 2700 米的观测站都是孤立山头、远离人群、地势险恶、往来不便；它们纵有盘山专用车道，沿途也是山高路险，满目荒凉，给人以缺乏生机、与世隔绝之感。相形之下，更加凸显了羊八井作为国际化、现代化的高科技实验基地的得天独厚的优势，这就是我们选择羊八井开展宇宙线实验的重要原因。

3 羊八井宇宙线国家科学观测研究站的建设及运行

1979 年，当时国际上最先进的日本明野 (Akeno)EAS 复合阵列建成，在中科院高能所所长张文裕先生的推荐下，谭有恒先生于 1980 年 3 月被公派到东京大学宇宙线所 EAS 部进修。在那里，他从参与西藏甘巴拉山乳胶室合作的日本人处知道了羊八井这个地方，从而构思了一个以北京和羊八井为基地联合开展 EAS 纵向发展研究的方案，以期“膝区物理”老大难问题寻找一个突破口，进而实现我国宇宙线 EAS 实验的起步。当时，国际上在西德基尔大学一项“发现”的引导下，掀起了以 EAS 阵列寻找超高能 γ 点源的热潮，于是老一辈科学家们也与时俱进，把 γ 天文与膝区物理并列为学科的两大方向^[1]。

“西藏计划”自 1984 年选点羊八井启动，1986 年提议国际合作，1990 年元月宣布建站，1990 年 10 月由 45 个 0.5 m^2 闪烁探测器组成的中日合作一期阵列投入观测。羊八井得天独厚的高海拔优势立即得以显现，在当时世界上十来个 EAS γ 观测阵列中，综合指标名列第二，仅次于诺贝尔奖得主克罗宁 (J.W.Cronin) 主持的大型且有大量 μ 子探测器的美国 CASA-MIA 阵列^[1]。

此后，羊八井观测站规模几乎每两年就有一

次扩展：1994 年扩建 AS γ 二期阵列，野外探测器增至 221 个，覆盖 36900 m^2 ；1996 年又在其中的 5000 m^2 地面增加了 77 个探测器，使这里的探测器间距缩小至 7.5 m，从而将探测阈能降至国际同类设备的最低值 3 TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$)，导致了对蟹状星云 3 TeV γ 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 32500 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 80 m^2 的高山乳胶室及配套的地方簇射探测器^[1]。

考虑到国家发展的战略需要，作为世界最佳高山站址的羊八井，不能仅进行天体和粒子方面的基础研究，也应把宇宙线作为太阳活动和地球“空间天气”的“晴雨表”加以利用，为航天安全和地球环境保护服务，从而把监测太阳活动的变化和对其对地球环境的影响作为羊八井的第三个学科方向。这样，羊八井的工作就全面涉及宇宙线自身的宇观、微观和环境三大属性。为落实这个思想，1998 年还分别自日本理化所和名古屋大学引进了一组由 28 只超级中子管组成的太阳中子监测器和由面积 9 m^2 闪烁体与正比管组成的太阳中子望远镜，以监测宇宙线的太阳调制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。

目前，中日 AS γ 阵列探测取样比约为 1%，平均每秒记录 1700 个(每天 16GB)空气簇射事例。在建设中日 AS γ 阵列的同时，新的情况出现了。1991 年，星载 0.1 m^2 γ 射线探测器 EGRET 上天，一举发现了 270 多个低能和中能 γ 源天体，研究人员为之一振。我们立即认识到：羊八井观测站要有所作为就必须在降低探测阈能、分辨 γ 、P 簇射上下工夫。从工程的角度讲，我们必须与时俱进地将传统取样约 1%的观测尽可能扩展为全覆盖地毯式 90%的观测——形成地毯式阵列。这样，

中意合作全覆盖式探测阵列 ARGO 实验呼之欲出。

接着,原有的十来个阵列纷纷自动退出舞台,剩下美国的 MILAGRO 在 Los Alamos 的水池契伦科夫光探测和我们在羊八井的 RPC 地毯式阵列,企图在数百 GeV 能区拓宽视场、全日制之优点,与空间和大气契伦科夫成像望远镜(IACT)实验互相衔接、互相补充地开展 γ 天文研究。除了上述,羊八井地毯式阵列概念的提出和实施,还得益于意大利 RPC 技术(含批量生产能力)与羊八井高海拔优势的结合。否则,把传统的多点取样式阵列发展为全覆盖式的“粒子一网打尽”,就没有那么大的吸引力,也没有足够的经费来实现。

中日 AS γ 的成果,证明了高海拔研究的确具有巨大的科学潜能,这种潜在羊八井观测站是可以得到低成本的有效开发的,条件是要有成规模的高技术设备和一支相对稳定的科研队伍在这里坚持工作。这个认识促成了中意合作 RPC 全覆盖式阵列即 ARGO 项目的最终立项。2001 年 6 月,ARGO 实验厅建成;2006 年 6 月,ARGO 中心地毯(5500 m²)建成投入试观测,羊八井作为上规模、上档次的大型高海拔宇宙线实验基地的风貌,已初步显现。

ARGO 本是希腊神话中的一个巨兽,他周身都是眼睛,从不休息,以此形象地表征我们的观测设备是宽视场全天候持续运行;同时,ARGO 也是“Astroparticle Physics Research at Ground Based Observatory”的缩写。ARGO 大厅,11200 m²,全用轻质、高保温的聚氨酯彩钢夹心板建成,以在不用空调的情况下,平复高海拔巨大日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约 10000m² 实验厅内的一个 5000 m² 的中心“地毯”和一个外围保护圈组成,为此将共用 1848 个 3.5 m² 的 RPC 探测器。它将拥有 18480 个快时间和粒子数信号通道,近 2000 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 26.4 Hz,日产原始数据达 630 GB,是迄今非加速器物理实验中数据量最高的一家,用于运行状态监测的数据和 EAS 原始数据,通过经由 155MB 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。这是一种国际化、现代化、大科学实验的运作模式。兰青拉通讯光缆和拉萨-北京宽带网的开通,使羊八井以最现代化的方式运行任何现代化大型科研设备。正在建设中的“中欧格点网”更将大大延伸其后期处理的支撑能力,使羊八井观测站成为可优化整合和利用国际计算机资源的国际化、现代化的高海拔实验基地。

4 羊八井宇宙线国家科学观测研究站的科研成果及前景展望

中日合作 AS-GAMMA 阵列最初只有 45 个野外探测器,经过三期大的扩建,达到了今天 800 个探测器的规模。它把传统 EAS 阵列实验的探测阈能降低了 30 倍,从而取得了一批重要的物理成果:

(1) 1996 年,因地球、太阳和行星际磁场而偏离的宇宙线太阳阴影得以首度被观测,并证明它可能成为监测太阳活动变化的一种新方法,这一成果被国际同行多次引用^[5]。

(2) 在地面阵列中独家观测到蟹状星云的 γ 发射和活动星系核 Mrk501 和 Mrk421 的 γ 源爆发,以及一次非常稀有的太阳中子事件^[6]。

(3) 获得了第一个超高能宇宙线质子谱和有关成分的结果。此结果,在国际上存在 40 多年的“老大难”问题——“膝区”物理问题的研究中被频繁引用,认为这是目前最权威的结果^[4]。

(4) 以 400 亿 EAS 事例和历史上最高的精度测量了宇宙线到达方向的非各向同性,发现了宇宙线等离子体与太阳系一道绕银河中心共转。这一发现被评为中国科学院 2006 年度十大创新成果之一。这个实验结果由于其在宇宙射线研究中

的重要意义，发表在2006年10月20日的《科学》杂志上^[2]。同期《科学》杂志上还发表了宇宙线各向异性研究领域的权威人士杜勒迪希(Marc Duldig)博士专门对我们工作的评述和期望。他希望我们能尽快改进升级“西藏大气簇射探测器阵列”，从而进一步推进这一前沿研究，扩大战果^[4]。目前羊八井的两个实验都具有大视场、全天候的优点，工作在TeV(十的十二次方电子伏特)能区，经较简单的改造就可以使之在100TeV能区有很高的灵敏度，可以深入研究银河系宇宙射线源^[4]。羊八井观测站的高海拔也有利于我们在将来把能区进一步降低几十倍，从而可以观测宇宙深处的射线源，以开展天文学、宇宙学相关研究^[3]。

(5) 2006年6月，ARGO实验5600平米的中心地毯建成投入试观测，立即幸运地发现了Mrk421在TeV能区的又一次 γ 射线强爆发。目前，它的性能测试和对北天已知 γ 源的检验性观测正在进行，正式的观测研究业已展开，人们正期待着它出色地完成其科学使命^[7]。

此外，羊八井站在野外观测台站中发挥了良好的示范作用。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年列为国家对外科技合作基地。同时，该站也为西藏大学等国内6个合作单位培养了一批人才，是西藏科技发展、社会文明进步、对外开放的窗口和西藏大学的教学科研基地。中央电视台、西藏电视台和中国科技报等多家媒体都有过关于羊八井观测站的报道。2006年作为中欧科技年的重要内容，在北京天文馆、科技部、基金委、北京世纪坛专门举办了羊八井宇宙线观测的科普展览。

羊八井观测站每年都接待一批批前来参观考察的专家学者、领导干部以及普通群众。每年日方来访20人次，意大利来访25人次，包括意大利驻华大使、意大利国家核物理研究院院长和我国全国人大副委员长在内的知名人士都曾前来参观指导。目前，国内合作单位有：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、中科空间中心、国家气象局、国家地震局等12个单位，在国内外均有很高的知名度。

然而，尽管取得了一系列成果，由于尚不能有效地区分探测到的质子和 γ 射线，灵敏度不及契伦科夫望远镜探测技术，在激烈的寻找 γ 射线源的国际竞争中，目前的观测能力相形见绌。但在进一步扩大源的数目、挑战宇宙线起源的核心问题方面，契伦科夫望远镜探测技术也面临着越来越多的困难。这项艰巨的任务最终还是需要大视场的扫描探测技术来完成，而亟待解决的问题是大幅提高扫描探测器的灵敏度。朝着这一方向，人们已经迈出了第一步，取得了重要进展，如水契伦科夫实验(美国的Milagro实验)经过7年多的观测积累，已经发现了3颗新 γ 源。因此，在新一轮 γ 天文观测的热潮中，应该加强我国特有的高海拔观测基地在扫描观测中的重要地位，应该强调与契伦科夫探测技术的互补性，在契伦科夫探测技术难以发挥作用的高能区($>30\text{TeV}$)和扩展源探索(角半径 $>2^\circ$)方面寻求突破点，探测灵敏度要远高于未来的契伦科夫探测器，如欧洲的CTA计划。同时，借助大规模实验研究基础设施的建设，吸引最先进的契伦科夫探测技术，也应成为未来实验的一部分。这就要求我们瞄准最有希望取得突破的 γ 射线天文观测领域，大力加强我国在该领域的研究力量，形成高水平的国际合作，在以我为主的原则下，共建世界甚高能 γ 射线天文观测研究中心。

在这样一个大背景下，针对羊八井的发展，许多不同类型的“十一五”课题和“十二五”课题规划被提了出来。其中有：

(1) 中美合作4万 m^2 水契伦可夫光探测器(HAWC)即下一代的美国MILAGRO；

(2) 基于ARGO“地毯”的羊八井超级复合阵列(YSCA)；

(3) $AS\gamma$ 阵列的再加密($AS\gamma$ -4HD Array);

(4) 测量 EAS 芯区高能粒子分布的 Burst 探测器(CBD);

(5) “十二五”期间建设大型高海拔空气簇射观测站(LHAASO)的计划等。

(6) 宇宙线 τ 中微子望远镜(CRTNT)

其中的(1) HAWC 因美国人嫌路途遥远往来不便投票选择了墨西哥;(6)CRTNT 由于需在低海拔选址新疆已被叫停,这是高能所凝练科学目标做出的正确决策,已经研制完毕的两台 CRTNT 望远镜搬离羊八井作未来计划的预研用,而基于羊八井两大实验的改进项目得到了认可。经过一系列研讨,大家达成以下共识:

水契伦科夫探测技术是首选技术路线,要用较小的投入改进现有设备,进一步发挥好其拥有的潜力,多出成果。同时研究新型探测技术,发展有高性价比的具有原创性的探测器。如果 LHAASO 立项顺利,就抓紧建设,最终使现有实验的灵敏度提高 100 倍。在立项和论证需要较长时间的情况下,利用水契伦科夫光探测器抓紧改进现有的两大阵列,将现有的灵敏度提高 10 倍,以此推进 LHAASO 的立项工作。

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。为此在探测器建设上,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 1km^2 ,比中日 $AS\gamma$ 探测器大 4 倍,并且下大决心发展大面积 μ 探测器,达到 4万 m^2 ,突破 γ/p 鉴别能力和成分确定的瓶颈,将宇宙线背景抑制到几乎为零,因此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。

5 羊八井宇宙线国家科学观测研究站的示范意义

羊八井的历史表明,在宇宙线领域的国际竞争主要表现在对诸多前沿研究领域的观测能力的突破上。没有羊八井高海拔的物理优势与规模化且不断扩大加密的装置的相互结合,就没有降低 30 倍阈能的能力去获取 γ 射线天文和“膝区”物理的重要成果;没有这些装置十多年稳定良好的运行所产出的 400 亿个高质量 EAS 事例,就没有率先发表在《科学》杂志上精度最高的宇宙线二维各向异性的重要成就;没有 $AS\gamma$ 研究成果带来的启示,就没有 ARGO 实验的建设与升级,就没有未来计划建设的设想。

对宇宙线研究而言,挑战学科前沿的科学思想和适合国情的研究目标,决定着 we 选择怎样的技术路线和方案去建设观察台站,而观测台站则是科学思想种子成长的沃土、是展示研究才能的舞台,也是架在科学家和科技资源之间的一座桥梁。可以说,台站科研工程的建设就是平台的建设。平台既是科学研究的基础,也是衡量一个国家科学研究水平的标杆,是攀登者脚下的天梯,是开拓者手中的利剑,决定着我们在相关科学领域的核心竞争力。羊八井观测站的成功运行,对于我国其他科学工程具有示范意义。

(1) 选择国际上前沿科学研究目标

在羊八井观测站的发展中,不难看出我国地面宇宙线实验的工程建造路线:从手工操作的云雾室、乳胶室,到正确选择有独特优势和可持续发展的站址,建设自动化、规模化、高计数率的 EAS 阵列,再到阵列的不断加密和扩大,直到覆盖率达到 90%的地毯式阵列,最终提出未来更大规模、多种探测手段、疏密有致的超精确的复合阵列,直接进行引领国际宇宙线实验研究的前沿探索。这是一条羊八井走过的、被实践证明是正确的阶梯式逐步登顶的发展道路。

而这一条道路，是针对 γ 射线天文观测、“膝区”物理、交叉学科这三大研究目标进行攻坚突破并滚动发展的必然结果。瞄准学科最前沿，挑战宇宙线起源之谜——突破 γ 射线天文的探测局限是我们孜孜不倦的追求；做出世界上最权威、最精确的测量，一举解决45年老大难问题——攻克“膝区”物理是宇宙线学界寄予我们的厚望；面向国家需求，发挥基地作用，孕育学科新增长点——倡导与环境相关的交叉学科研究是我们持续发展的重要保证。三大研究方向和目标，既是支撑羊八井发展的基石，也是引领羊八井奔向未来的引擎。

2009年2月18-19日，香山科学会议在北京香山饭店召开了以“宇宙线物理的若干前沿问题”为主题的第342次学术讨论会，陈和生、赵光达、李惕碛院士和张双南教授担任会议执行主席，全国近40位专家学者出席了会议。与会专家在广泛深入调研的基础上做了高水平的学术交流，进行了认真深入的讨论，一致认为我国应该大力发展近期最有可能取得突破的 γ 射线天文学，把羊八井宇宙线观测站建成国际 γ 射线天文观测研究中心，冲击宇宙线起源这一世纪之谜，充分发挥高海拔优势，积极开展强相互作用朝前区、膝区宇宙线成分和能谱的观测研究，同时建设宇宙线相关多学科交叉研究平台。与会专家指出，在国际上，一个具体科研项目兴建的专用设施，5年后用毕报废是十分正常的事。可羊八井站与此不同：它虽然也是以自由选题为名申请课题经费一点一点建设起来的，但一开始，它就是一个基于学科发展趋势和国内研究基础，并占据国际研究前沿而精心选择的发展基地。因此，它不能撤，更不能垮，必须发展，否则将毁了我国宇宙线研究的比较优势和发展大计。

(2) 国际合作与人才流动的成功做法

要想利用自己国家的高海拔站址优势去及时实现任何有创意的物理目标，通过国际合作及时获取资金和高技术设备是一条必由之路。实际上，

只要选对了合作伙伴，资金和技术问题就解决了一多半，而一个在国际上有竞争力的实验，就有了成功的把握。但是，任何国际合作成功必须具备三个共性条件，即共同的兴趣和思路、互补的优势、领头人或主要成员间的默契和友谊。当然，国际合作的成功从根本上说更离不开上级领导单位和国家层面的决策与支持。

无论是中日或中意实验，与外方的合作都是基本的方式。国际合作的意义在于：在“平等互利、优势互补、共担经费、共享成果”的原则下，通过在合作中获取信息、共享资源，可以培养和造就具有竞争力和开拓能力的高素质队伍；力争主动，担当重要角色，在项目的若干重要方面实现跨越式发展，最终能够达到提高中方的自主创新能力，实现我方利益最大化的目的。

外方先进的探测技术，加上羊八井高海拔基地的优势，这两点的结合所能产生的物理成果是我们的创新。国际合作对项目起到了先导的作用，在项目的立项、实施、物理分析及运行三个阶段均具有重要意义。

项目立项阶段。国际合作对实验的科学目标的前沿性、设计方案的先进性和可操作性的认同起了关键作用；对国内相关部门下决心支持项目起了推动作用；合作的基本方式、经费的投入比例和投入方向是项目得以立项的重要基础；双方合作的探测器预先研究，既是对合作各方面工作的综合检验，也是项目得以顺利立项的保证。

项目实施阶段。双方的人员交流，特别是我方人员的派出，为今后的安装、调试、取数、物理分析等工作奠定了良好基础。这是中方培养人才掌握技术的重要方式。通过双方的合作，中方已从现场安装中的辅助配合的地位，逐步过渡到平等协商，最终独立安装，从而主导了项目的建设进程。在技术上引进、消化吸收方面，通过派遣学习，引进技术，逐步实现国产化。国际会议、双边会议、视频会议是解决项目执行过程中各种

问题的有效途径,也是锻炼我方人才队伍、促进工作进展、展现我方成果、提高我方研究地位的平台。由于中方人员频繁活跃于国际舞台,一些重要的国际会议(如2006年的威海会议、2011年的国际宇宙线会议)已开始由中方主办。

物理分析和探测器运行阶段。通过国际合作实现后来居上、以我为主。合作是相对的,竞争是绝对的,合作的最终目的是强化自身的竞争力,提高创新能力,实现我方利益的最大化。以ARGO实验为例,在运行取数阶段,中方提出并解决了庞大的探测器单元定标的新方法(特征面法);提出并实现了在线数据再编码。可以说,重大的实验问题几乎都是由中方发现并圆满解决的。针对ARGO的海量数据,中方建立了羊八井到北京的155 Mbps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,迅速开展包括月亮阴影测量、全天区扫描、宇宙线能谱、质子与核相互作用截面和暴跟踪搜索等多项物理课题研究,并先于意方观测到活动星系核Mrk421在2006年7、8月间的一次短期 γ 射线强爆发。这些都是通过双方合作实现后来居上、以我为主的成功例子。

国际合作也是解决运行经费的重要途径。羊八井实验每年的运行经费,目前中方约需300万元人民币,意方约40万欧元,日方2万美元。离开国际合作,中方很难独立承担如此高额的运行经费。

为什么羊八井观测站能20年长盛不衰?是因为我们有幸遇上了天时、占得了地利、构建了人和。羊八井的高山地利归功于喜马拉雅隆起中的奇遇,是自然的造物。改革开放、中华崛起的天时是人类文明的近代佳话,历史发展的必然。它们都是业已存在且将继续存在的外部大环境,而人和是动态的小环境,会随行为者的行为而变

化,需要用心经营。正因为找到了羊八井,遇上了好时代,育成了奋发的科研团队和有效的国际合作,才成就了今天羊八井观测站的繁荣。要走好前方的路,重点是要经营好“人和”环境。队伍的团结是人和的核心,好的国际合作是人和的重要内容。要使一项科研活跃于国际前沿,就必须让人流、物流、信息流在国际层次上有效流动起来;而好的国际合作正是促进此种流动的有效渠道。早期的羊八井国际合作虽曾招致过许多非议,的确也并不完美,但总体而言,它毕竟帮我们渡过了经费和物资困难期,完成了从无到有、从小到大的发展,帮我们免费派出过约60人次的访问学者和一批博士后。虽然也有人才流失的问题,但毕竟利用了当时只有外方才有的计算设备和灵通的信息,使我方的多数人员得到了训练,密切了双方具体工作人员间的直接交流。在全球化的今天,只有整合国际优质资源才能成长出具有国际竞争力的大科研项目。共同的创意、互补的优势和良好的个人关系是达成和维持良好的国际合作的三大要素;为我为主则是顺利运作和保障国家利益的要求。在中方条件大为改善的今天(与外方的经费投入比,已自早年的1:8提高到了1:1),我们有能力把国际合作搞得更好,把队伍建设得更加和谐^[8]。

(3) 多学科交叉的研究方法

宇宙线是地球不可摆脱的一种外部环境,太阳风对它的调制,使它可被用作观测太阳活动变化的方便的晴雨表。从瞬态暴发的灾害预警角度而言,需要监测工作做到时时刻刻、分秒不漏;从太阳活动长期变化来研究地球气候的长期变化的角度,宇宙线变化的数字化记录是比太阳黑子数更忠实,比用古树中的 C^{14} 考古更直接、更方便的太阳活动变化坐标,因此更需要长期记录下来。它们不仅是现在的记录,而且更是永世传承的宝贵科学资料。站上别的实验都可以暂停,唯独几个宇宙线强度监测设备要尽可能永不停工。监测

天体活动，无论从数据的完整性和对暴发事件的捕捉角度，也都要求设备风雨无阻、随时待命。这是 EAS 地面实验不可取代的优点，也是它对环境监测和天体研究的不可推卸的责任。

羊八井是极佳的高海拔多学科站址。这是因为：现有及升级后的羊八井宇宙线设备，可吸引或联络天体、空间、粒子、太阳、地球物理及环境方面的学者开展合作；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，特别有利；羊八井的开阔地形和宜居环境，使它具有大的容纳度和发展空间及项目的可操作性；羊八井的特殊自然条件加地区建设的突飞猛进，使之已具备了接纳、建设和长期维持任何大规模、高技术设备，进行任何现代化、全球化实验的条件。

羊八井宇宙线观测站得天独厚的优势在交叉学科研究中可以有三种表现形式：一是利用多种天文波段和实验手段的帮助，在天文、粒子物理、宇宙学的配合下，共同开展宇宙线和粒子天体物理前沿课题的研究；二是利用观测站获得的世界一流的宇宙线观测数据，供其他学科领域进行相关研究来获得重要的科学结果或应用成果；三是利用羊八井宇宙线观测站的地理优势，开展其他学科领域重要的科学观测或研究。通过羊八井平台交叉学科研究，可以建立一支高水平的交叉学科科研团队，并进一步推动我国交叉学科研究的发展。

不过，宇宙线只是地球环境要素之一，要弄清多因素间的内在联系，找出普遍的规律并达到实用，不是单一学科所能办到的。2003 年 7 月，中科院路甬祥院长视察羊八井观测站时，提出了建立多学科平台、开展多学科交叉研究的思想。2004 年 7 月，首届“基于羊八井平台的多学科研讨会”在拉萨召开，为活跃思想、增进联络、初步尝试多学科合作起到了有力的推动作用。

2005 年中科院大气物理所与我们合作开展了

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，这是我们第一个自主研发的装置，它与中子堆、中子望远镜一道，可向国家气象局等单位实现远程实时数据传输，为国家空间天气的研究、监测和预报事业发挥作用。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，国家天文台将德国 3 米直径的亚毫米波望远镜 KOSMA 迁移羊八井的奠基仪式举行，这将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 4 个测量地震大地形变的角反射器安装到位。羊八井交叉学科基地的雏形已经展现，其方式可为其他科学工程所借鉴。

(4) 艰苦科研条件下的敬业精神

羊八井站的建设经历了 20 多年的艰苦历程。有人曾经质疑：“云南站都办不下去，去西藏能待得住吗？”然而，在羊八井建站，可使探测器阈能降低，灵敏度大大提高，能够从事许多在海平面无法进行的工作，所花经费则只有海平面的 1/100 左右。因此其特殊的物理科研价值，一旦被科学地预见，便坚定了我们的选择。

能立足西藏并逐年发展，要归功于灵活的组织管理和核心成员的奉献精神。为了轻装上阵和不致留下个难以善后的大摊子，我们放弃了云南站或苏联的管理方式(几十人、全工种配备)，而代之以课题组加西藏宇宙线实验中方合作组委员会的管理模式——没有专职的管理人员，每人都身兼数职；为了集中财力于基地建设，大家曾忍受了长至半年或三个月的轮换制度和长期无车辆、无室内厕所的非现代生活；为了事业不断、队伍不散，我们顶住了一波又一波出国大潮的冲击。终于，大家看到了一个充满活力的、拥有现代化大规模设备的羊八井观测站，悄然地出现在念青唐古拉山脚下。

大家知道，海拔 4300 米的羊八井，空气含氧

量只及北京的 58%，冬天低温达 -25 ，环境之恶劣令人生畏。前些年，科研人员每年都有穿越海拔 5000 多米的“生命禁区”押运设备的任务，纵然经历过几次翻车的险象，也从不畏惧去挑战这一极限。初到高原，每人都会有强烈的高原反应，但我们每年至少有十多人到山上工作，最长的一呆就是半年，临时工则是常年驻守，各种假期甚至春节都在山上度过。有时定标工作要在夜间温差较小时进行，我们忍受着高原深夜的寒冷，仰望天空眨眼的星星，大口大口地喘气，别有一番悲壮的情怀。

由于科研经费紧张，前些年没有发过一份额外奖金，为了事业发展的大局，没有人发出过一声怨言。久在山上工作的同志，总是照顾刚上山的同志，为其搬行李，洗衣服，尽量减少其体力劳动适应高原环境。干活时一块上，受伤时互相救助。而在家的同志则把上山、出国及出差同志的工作兼顾起来，甚至关照他们家属的生活，使其安心在外。在如此艰苦的环境中，没有吃苦耐劳的精神、坚忍不拔的毅力和团结协作的团队精神是无法完成任务的。

这个能攻坚的团队，既得益于老一辈科学家拼搏开拓的勇气和献身精神的熏陶，也有赖于年轻学子的奉献精神。老同志以身作则，年年坚持上山，并甘当铺路石和人梯，把年轻同志扶持上来；年轻的同志中有几位有不同程度的疾病，也都能服从大局的需要，上山工作。在没有一位专职行政干部的情况下，既要处理好中日合作关系、中意合作关系；又要协调好团对内部和有国内 5 所大学参加的合作组内部的关系；既要安排好科研，又要组织好后勤。仅靠十几名科研人员、学生和临时工，我们竟然能把试验台站管理好，应该算是一个奇迹。

6 羊八井宇宙线国家科学观测研究站的问题及建议

羊八井站是由一个课题组以自由申请课题经

费建立起来、自行管理并逐步发展起来的，在没有配套人员和经费的情况下，不是靠“自上而下”而是靠“自下而上”的决策而起步的。它既具有大科学装置的特点，又有天文台观测的性质和一般野外台站观测的特点，是一个复杂的新型科学工程综合体，也是一个留待决策和管理部门共同研究的新课题。地处雪域高原，它有其独特的困难和问题，也有与其他科研实验站一样存在的共性问题，诸如：“基础薄弱，经费匮乏”，“重建设、轻运行”，“重实物、轻人才”等问题。

尤为突出的是运行经费问题。至今，羊八井每年明确用于运行的专项经费仅落实一部分。为了顺利运行，我们只好拆东墙补西墙，或者以新的项目带动旧项目的运行，这虽然不完全妥当，但实在是无奈之举。稳定运行出成果与不断上项目的矛盾，已经引起有关部门和领导的重视，希望能够尽快落实具体措施。

值得一提的还有管理模式。历经 20 年的发展，作为国家级野外台站，羊八井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，要求一种层次更高的、正规而有效率的管理。它应是由中科院高能物理研究所直接管理的室行政级别的国家站，应有独立的编制和基本预算，有学术或顾问委员会掌握学科方向、审查合作项目、制订发展规划，有专职的精干管理班子来统一管理站上的日常运行、设备维护、生活后勤及站区建设和施工项目。如此，才能形成高层次的统一决策，职责分明的务实性管理；才能使搞研究的能专心于研究，搞服务的能专职高效的服务。因此，在中科院高能所领导的支持下，特别成立了以陈和生所长为主任的“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、新项目等进行决策和监督，并接受科学院、科技部有关部门的领导与指导。这样，这个已经设备现代化、研究国际化，还将学科多样化的科研基地，才可能避免种种变故，维持其正常运行，保证其继续发展。

在此，根据羊八井观测研究站的经验，我们建议：

(1) 将规模和创新突破能力到达一定水准的野外大观测装置，纳入基本建设和大科学工程的范畴去规范化管理。

(2) 野外台站是开展野外观测、试验、研究和示范的科研平台，在学科发展和满足国家需求方面，都具有与实验室同等重要的地位和不可替代的作用。国家级的重点野外台站应该得到与国家重点实验室相当的经费、人员和政策上的支持。其运行经费应根据不同的规模、投入和产出给以适当比例的拨付，确保后续科学成果的获取。

(3) 地处西藏的野外台站，由于是政治敏感地区，外国人的进藏许可历来非常棘手。建议参考冷战时期西欧核子中心给予苏联科学家签证便利的做法，给予十多年来进藏留下良好记录的外方专家一年多次入藏的特别许可，保证其及时往来解决试验中出现的问题。其实，这些外国专家也是宣传西藏开放、进步和中国文明发展的活广告。

(4) 尽快完善和落实国家野外台站的发展规划、管理机制、人员配备、考核评估、开放共享和绩效激励等政策法规，使这些台站稳定、健康地发展以回馈社会。

(5) 多学科交叉研究的困难多，风险大、牵扯面广。建议给以必要的政策和专项经费支持，建立一个高于具体课题组的、有更大的包容性和支撑、接纳能力的交叉学科平台，这是多学科交叉

应用研究得以顺利开展和取得成功的必要条件。

总之，20多年来，羊八井站见证了西藏从交通落后、能源短缺、通讯困难、物质匮乏，到现在的欣欣向荣、市政建设几乎与内地无异的巨变。无论是基于羊八井站的来之不易的历史，还是基于未来更加理想的外部环境，都使我们不能放弃这个已投入多年心血、打下了良好基础、具有极好发展前景的高海拔实验基地。

致 谢

作者衷心感谢谭有恒先生和羊八井站的全体同仁们，是他们辛勤的劳动和长期的努力才有了撰写本文的源泉和动力。感谢关心和支持羊八井的所有领导与专家，没有他们的决策和呵护，就没有羊八井的今天！

参考文献

- [1] 谭有恒. 一个与宇宙对话的地方: 羊八井宇宙线观测站巡礼[J]. 天文爱好者, 2007(4): 28-31.
- [2] Amenomori M, Ayabe S, Bi X J, et al. Anisotropy and corotation of galactic cosmic rays[J]. Science, 2006(314): 439.
- [3] Aharonian F. The very-high-energy gamma-ray sky[J]. Science, 2007 (315): 70-72.
- [4] Duldig M. Astronomy: Cosmic rays track the rotation of the milky way[J]. Science, 2006 (314): 429-430.
- [5] Amenomori M, Ayabe S, Cui S W. Flux upper limits of diffuse TeV gamma rays from the Galactic plane using the effective area of the Tibet-II and -III arrays[J]. Advances in Space Research, 2006, 37 (10): 1932-1937.
- [6] Amenomori M, Ayabe S, Chen D. Are protons still dominant at the knee of the cosmic-ray energy spectrum[J]. Phys. Lett. B, 2006, 632 (1): 58-64.
- [7] Aielli G, Bacci C, Bartoli B. The status of the ARGO experiment at YBJ[J]. Nuclear Physics B- Proceedings Supplements, 2007, 166: 96-102.
- [8] 谭有恒. 立足高原雪域 登攀科学高峰: 为西藏计划 20 年而作[J]. 现代物理知识, 2007, 19(2): 7.

Yangbajing National Cosmic Ray Observatory in Tibet: History, Accomplishment and Suggestions

Lu Hong, Zhao Lin

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: This paper reviews the establishment of National Cosmic Ray Observatory in Yangbajing Tibet, Asy experiment (Sino-Japanese Cooperation) with increasing density of detector year by year, and the development history and scientific achievement of ARGO experiment (Sino-Italian Cooperation) which has developed the traditional sampling observation to a full coverage array. This paper introduces the idea of upgrading the present facilities, introducing a variety of new detectors and building the Large High Altitude Air Shower Observatory(LHAASO) for interdisciplinary study in the near future. The paper also summarizes the meaning and experience of the observatory from the aspects of the choice of the researching goal, international collaboration, interdisciplinary, professional dedication and the significance of engineering to research. And at last, the paper puts forward some problems and suggestions for the observatory.

Key words: Yangbajing; Cosmic Ray; Asy; ARGO; interdisciplinary; LHAASO

责任编辑：王佩琼