

从乌蒙山到念青唐古拉

——百年宇宙线研究的中国故事

谭有恒[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2012-07-08 收到

[†] Email: tanyh@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20130102

摘要 百年前,宇宙线的发现曾极大地开阔了人们对宇观和微观世界的眼界,促成了粒子物理学的诞生.新中国成立之初,早年在国外在此领域业已成果卓著的几位前辈,组织起了中国本土第一支宇宙线研究队伍,在云南乌蒙山中建成了中国第一个宇宙线实验室,十年中收获了一系列高水平的实验成果.不幸,此后近20年的磋跎岁月扩大了中国与日新月异的国际新技术之间的差距,中国的宇宙线研究落到了自我边缘化的境地.幸好国家的改革开放政策为奋起直追提供了机会,中国第二代的宇宙线研究者经过种种摸索,选择了高海拔广延大气簇射观测的路线去实现我国宇宙线研究的复兴.20多年的埋头苦干,在海拔4300m的西藏念青唐古拉山脚下建成了一个现代化、国际化的宇宙线实验基地,完成了中国的宇宙线研究从云雾室、手工化向规模化、信息化的历史性转型,并以其特有的低阈能、高事例率、全天候、宽视场优势和国际合作,开展着多项前沿性的科研项目,迎来了丰收的季节.随着国家的日益富强,中国宇宙线研究的年青一代,必将从更高的起点出发,创造出中国宇宙线研究的更大的辉煌.

关键词 宇宙(射)线, γ 射线, 云雾室, 广延大气簇射, 闪烁探测器, 高阻板室, 地毯

From a Yunnan mountain to a Tibetan highland

——the story of a hundred years of cosmic ray research in China

TAN You-Heng[†]

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

Abstract The discovery of cosmic rays a hundred years ago opened a new field of view to the universe and the mysterious particle world, leading to the birth of particle physics. Cosmic ray research in China was started in the early 50's of the last century by several senior scientists who had already distinguished themselves abroad in this subject. The first cosmic ray observatory in China was built on a mountain in Yunnan province, and many high level results were obtained in the ensuing ten years.

Then after almost twenty years of political unrest, the national “Reform & Opening up” policy provided a good opportunity to stimulate development and to narrow the wide gap caused by long term stagnation. The second generation of Chinese cosmic ray researchers chose high altitude extensive air showers as their new target of observation, and embarked on twenty years of hard work to build a modern international cosmic ray experimental station at Yangbajing in Tibet, 4300m above sea level. The manually operated cloud chamber was transformed into a large-scale high-technology facility, capable of performing various international research programs with its unique low threshold energy, high trigger rate and wide field of view. The Yanbajing Observatory symbolizes that China’s cosmic ray research has started on a new march towards excellence.

Keywords cosmic ray, γ -ray, cloud chamber, extensive air shower (EAS), scintillation detector, resistive plate chamber (RPC), carpet

宇宙射线是来自宇宙深处的高能粒子流(少数来自太阳爆发事件), 其中能量最高者可达到现今最大人工加速器所产生粒子能量的百万倍。伴随着宇宙透明、天体演化, 它一直充斥在宇宙空间; 数十亿年来, 它还突破太阳和地球磁场的封锁而时刻普照着地球, 而在后来出现的地球生物却对此一直习以为常、浑然不觉。直到一百年前, 人们在大量热气球高空观测中才发现了它的存在(Victor Franz Hess 于 1912)。自此, 人类得知了这种自动送上门来的宇宙的物质样品和信息使者, 也找到了当时唯一能轰开原子核的“粒子炮弹”, 从而可以去打开微观世界神秘的大门, 促成了粒子物理学的诞生和人工加速器的发展; 并在今天人类活动范围日益扩大的背景下, 将它与地球的空间环境密切关联了起来。在庆祝宇宙射线这个身兼宇观、微观和环境三重属性的宇宙的使者被人类发现 100 周年之际, 全世界的相关学者都在盘点前辈们艰苦卓绝的探索历程和丰硕成果, 此时此刻, 国人一定想知道, 在人类百年宇宙线研究中, 我们中国人做过些什么, 占有何等的位置。正如大家知道的, 两年一届的国际宇宙线会议自 1947 年举办以来已经历 32 届, 终于因我西藏羊八井实验的崛起而打破了历来与中国无缘的局面, 并使第 32 届国际宇宙线会议于 2011 年 8 月在北京成功举行。让我们透过中国宇宙线

研究与羊八井结缘的因果故事, 一窥我国宇宙线研究的前世今生和美好未来。

1 大师们播下的种子

上世纪 60 年代, 张文裕先生曾告诉我们一段令人深感屈辱和愤慨的故事: 在一次国际宇宙线会议上, 有西方学者就中国的宇宙线研究情况问某位著名的苏联学者时(当时我们闭关锁国, 没有代表与会), 后者懒得说话, 只是举起双手比了一个大大的“零”字。当年张先生每每说到这里, 都激愤得难于言表, 连说:“我们不是零”! 可这个“零”的手势还是在我们心里留下了深深的刺痛, 并化作了后来奋发图强的持久鞭策。

早期的中国宇宙线研究的确不是零。这首先因为它的起点很高, 是大师们播下的种子。1951 年, 我国本土的首个宇宙线研究组在当时的中国科学院近代物理研究所成立时, 抗战时期就提出了证实中微子存在的新方法的王淦昌先生就是组长, 赵忠尧先生从美国带回国的一台 50cm 多板云雾室是当时我国宇宙线研究组的主要设备。赵先生 1930 年在美国加州理工学院(CIT)做密立根(R. A. Millikan)的博士生时, 就在硬 γ 射线散射实验中明确无误地发现了“反常吸收(anomalous absorption)”^[1]和波长相当于电子质量的“附加辐射(addi-

tional scattered rays)”^[2]。这其实就是高能 γ 光子的电子对产生和正负电子湮灭为 γ 光子的证据。此二过程是次级宇宙线中普遍存在的电磁级联，特别是我们在羊八井观测的广延大气簇射(EAS)得以生成的基础，所以虽然当年赵先生的实验是用放射源做的，它对宇宙线研究的贡献却十分巨大，并直接启发了他同门师弟安德森(C. D. Anderson, 1936年诺贝尔物理学奖得主)的思路，采用磁云雾室于1932年发现了正电子^[3]，甚至也触发了布兰克特(P. M. S. Blackett, 1948年诺贝尔物理学奖得主)和奥恰里尼(G. P. S. Occhialini)在英国的相关研究^[3]。只是由于它太超前了，没能引起他老师和当时的理论家们应有的重视，也由于后来布兰克特等用云雾室得到相关事例并对“反常吸收”和“附加辐射”做出正确解释时，对赵先生文章引用上的疏忽和年份错误^[4]，导致了诺贝尔奖的一个历史性遗憾^[5]。此外，赵先生四十年代末在麻省理工学院(MIT)的多板云雾室得到的簇射照片，曾被学界广泛引用(其中一例是在铅板中的核作用，伴随着两个穿透性次级粒子还有两个电磁簇射生成，后者很可能是源于一个中性 π 介子衰变成的一对 γ 光子)，这些曾是我们这一代人宇宙线入门的学习经典。

王淦昌先生在带领年青人用带回的多板云雾室做了电子光子簇射观测和寻找长寿命带电超子^[6]等实验后，奉调去苏联联合核子研究所，随后又去“两弹”工作。此后，在张文裕先生(因在云雾室中发现“ μ 原子”而闻名)借出访英国之机辗转

归国之前，曾是安德森学生的肖健先生担负起了我国宇宙线研究的实际领头人的职责。在肖先生的主持下，1954年在海拔3200m的云南东川落雪矿区建成了“中国科学院原子能研究所落雪实验室”，以赵先生带回国的那台50cm多板云雾室和他主持于1956年建成的一台30cm磁云雾室为主要设备，带领吕敏、郑仁圻、霍安祥、郑民等在50年代后半期开展“奇异粒子”的寻找工作，并指导我们这一批年青人于60年代初开展宇宙线高能核作用研究。其间共有500多个“奇异粒子”被找到，与当时的国际水平并无明显落差。问题出在这以后的蹉跎不前和脱离国际科技日新月异快速进步的形势。

1958年“大跃进”时期，选点于距落雪实验室9km一独立山头的大云雾室组计划(第二机械工业部311工程)启动，它计划以一个1.2m上云室作靶室并测初粒子的游离，以一个1.5m磁云室作中云室测粒子动量(最大可测动量小于0.1TeV)，以一个1.7m \times 2.0m多板室作下云室观测次粒子的次级效应以分辨其性质。在50年代，这应是国际上最大、最完善的一套云雾室组合了。但是经过“三年困难时期”的下马，拖到1965年下半年才建成，并由钱三强先生(所长)上山宣布了中国科学院原子能研究所云南站(以下简称“云南站”)的成立(见图1，图2)。不巧又遇上“文化大革命”十年动乱，除1972年的“一个可能的重粒子事例”外没有多少工作面世。与此同时，国际上

的高能加速器已逼近了我们大云雾室刚刚触及的TeV能区。随着“文化大革命”政治硝烟的逐渐散去，当我们回过头来关心研究工作时，已经与国际水平拉开了很大的差距，我国宇宙线研究正在自我边缘化的不安感就日益强烈了起来。要挽回颓势，实现复兴，就必须正视现实，在充分了解相关学科的国际发展态势、技



图1 上世纪60—70年代，“头顶青天脚踏云海”的中国科学院原子能研究所云南站



图 2 1965 年秋，钱三强所长(前排右4)等上山宣布中国科学院原子能研究所云南站成立

术进步状况和自身特长的基础上，找到新的主攻方向和实验手段，用 10 到 20 年时间的埋头苦干打基础，实现我国宇宙线研究的现代化和国际化，并重新站到学科的国际前沿。

2 发展方向的求索

发明于 1912 年的威耳逊云雾室(Wilson 因此获 1927 年诺贝尔奖)，以其径迹室的特点，在上世纪 30 至 50 年代为宇宙线观测立下了汗马功劳，人类最先知道的一批基本粒子的发现都直接与它相关。然而，由于它手工操作、接收度小、死时间长、效率低、难于维护和大型化等弱点，不仅使它在现代加速器实验面前失去竞争力，而且也在宇宙线实验的大型化、现代化改造中找不到自己的位置。在加速器能量直逼云南站的宇宙线高能核作用实验能区时，人们不能不为我国宇宙线研究的未来担心。于是利用奉命上山寻找可能存在的重粒子的时机，开始了对 EAS 实验的广泛调研，也用土办法对 EAS 大气切连科夫光信号做过尝试性的初步观测，试图窥探进入大于 100TeV 超高能能区的途径。同时，不少同事也在以各自的视角做着各自的思考。

改革开放前夕，酝酿已久的我国宇宙线研究的

自由辩论在中国科学院高能物理研究所三室展开。此时肖健先生已离开宇宙线研究领域，投身到加速器实验研究中去了。辩论没有达成统一的认识，倒是促进了思想的解放，打破了全室一个课题、自上而下分配任务的传统，开始了百花齐放、百家争鸣的新局面。此后，部分年青人跟着李惕碛转向了空间硬 X 射线天体物理研究；在林林总总的各宇宙线课题中，任敬儒、陆瑞苓夫妇领头，霍安祥、况浩怀等鼎力参加的高山乳胶室组最为红火，后来发展成为世界著名的中日合作西藏甘巴拉山(海拔 5500m)高山乳胶室。在 EAS 方面，陈映宣等也曾在楼顶布了 10 块闪烁体，但由于专业性不足，没法给出簇射的任何 EAS 基本参数，我们仍然只能被告知某时刻这附近来了一个 EAS，而全然不知道它来自哪个方向，是大是小，中心落在哪里，更不用说其具体形态了。因此认识到：要在祖国大地开展真正的 EAS 研究，首先必须创建具备基本功能的 EAS 实验平台。

1980 年初，我幸运地被公派到日本东京大学宇宙线研究所，参加新建成不久的当时国际上最先进的明野(Akeno)EAS 阵列的观测和数据分析工作。张文裕先生(时任中国科学院高能物理研究所(以下简称高能所)首任所长)还为我指定了一个导师，就是日

本核物理之父仁科先生的末代弟子、以电磁作用和NKG函数闻名的镰田甲一(K. Kamata)先生。在当时中日友好的气氛下,该所第一次有了我和沈培若两位中国学者,到处都是好奇和友善的目光。我因此很快溶入了这个国际学术环境,常有机会与当时日本的几位宇宙线头面人物三宅三郎、西村纯一和镰田甲一小聚,并与侯野恒夫(曾是印度科拉金矿地下实验的先驱, Chacaltaya EAS阵列与乳胶室联合实验的负责人)和EAS大气荧光实验先行者之一的棚桥五郎先生成了忘年交。加上与同组的永野元彦、木舟正等共事,与乳胶室组的汤田利典、笠原克昌、鸟居祥二、初级宇宙线组的山越和雄等中生代实力派人士经常碰面,十分有助于我对前沿信息的获取和科学视野的开阔和提升。对国际前沿的了解和对EAS实验的逐步熟悉,帮我明白了两件事:(1)在当时我国有限的国力和技术条件下,在宇宙线观测的空间、地面和地下(或水下)三种方式中,我国的优势只存在于地面。而在地面观测中,高山乳胶室虽正在势头上,然而其被动式的性质,手工化的处理,难以再扩大的曝光面积和事例统计量不足等根本性弱点,使其在自动化大生产的现代实验面前已难看到光明前景;而其天然有偏(偏向于记录质子引起的事例)的事例选择特性和没有时间信息的缺点,又使之很难被用于宇宙线天文观测。而传统的地面EAS阵列实验的宽视场、全日制、可长期持续高效工作、易于积木式地扩大、可覆盖很宽的能区、可容纳多种探测设备的特点,不仅使它可同时兼容宇观、微观和空间环境的观测,还便于采用现代电子学、计算机技术把宇宙线实验从手工化带到现代化。(2)我在日本明野的EAS阵列数据分析中得出的纵向发展过渡曲线^[7],与菅浩一先生用5200m高的Chacaltaya EAS阵列的数据得到的完全不能相接(我们同时在1981年日本物理学会广岛春季分科会上做了报告)。当时菅先生以超高能作用中存在某种未知重粒子来解释两个实验的分歧,由于那时只有他们一家能在超高能把曲线做到EAS发展极大处,高海拔数据独此一家的局面,使我品尝到了某种无助的苦恼。稍后,特别是回国与肖健先生畅谈后,才明确认识到了这种苦恼联系于EAS在发展中的涨落及各家EAS观测

站小农经济式的建设和运作方式所造成的各家实验数据的“归一化困难”(肖先生用语)。这又加重了EAS实验结果在解释上的二义性,使原初成分与作用模型互为因果的纠缠长期不能解脱。上高山和阵列精细化,应是解开此死结的方向之一。

恰巧就在这个时候,汤田利典因甘巴拉乳胶室实验访问西藏回来,带给我一个好消息:他顺便去参观羊八井地热电厂时,看到的那海拔四千多米的地方竟然又宽又平。一个以北京为起点以西藏为终点的我国EAS实验开拓计划,就越来越强烈地激荡在自己心头。

3 西藏计划的难产

1981年5月,当我兴冲冲地带着一批自购的集成电路器件回到高能所提出我的建议时,宇宙线室的所有经费和人力资源已经被分配一空。在向肖健先生吐露我的苦恼和计划时,他十分赞同中国宇宙线研究应以高山EAS为平台和突破口,但对我在缺乏上级支持的情况下要去西藏表示担心。还给我讲了当年搞第二机械工业部311工程时的困难和当时他就想建EAS阵列而未敢动手的故事。1981年8月,我以“EAS纵向发展的统一观测”为题向所里申请科研基金,并借我室计算机房的房间一角,在该组董玉琚、戴义方的部分参与下,从科研处借了少量资金,开始了EAS阵列用的原型闪烁探测器的手工试制,并实现了其与穿孔机简易记录系统的联动。

1983年4月17日,高能所学术委员会发文批准了毛振麟、李醒夫、谭有恒、唐孝威、顾以藩等申请的5个项目,我们的“EAS纵向发展的统一观测”项目获得了50万元的“巨额”资助,三室EAS研究组自此得以成立,正式开始了项目的第一阶段——在北京建造中国第一个EAS观测阵列的工作。除50个 0.25m^2 塑料闪烁探测器是和北京核仪器厂合作研制的外,百多台专用电子学插件等阵列设备都是采用国产元器件和材料自行制作而成的。1985年夏,又获中国科学院基金办公室(国家自然科学基金委员会的前身)27万元院内基金支持。1986年夏,以16个探测器和相应的数据采集



图3 1987年冬，建成不久的怀柔EAS阵列

系统组成的全功能试验性小阵列开始在高能所楼顶运行。1988年3月，由分布在 $120\text{m}\times 100\text{m}$ 地面的53个动态范围近 10^4 的 0.25m^2 探测器(其中9个有快时间功能)和相应配套系统组成的EAS阵列在怀柔中国科学院绿化基地里建成(见图3)，开始了EAS形态学及EAS Size谱等基础性观测研究。整个过程虽让我们备尝艰辛，但也因此初步形成了队伍，建立了信心，为“西藏计划”做了必要的技术和人才准备。

这期间，因1983年Kiel大学研究组的一个不实报道，触发了一个国际性的寻找超高能 γ 源的十年热潮，我们因此也为西藏实验增加了有关 γ 源的天文内容。1984年4月11—30日，筹划已久的西藏选址考察得以实现。为什么要日思暮想地去4000m以上的高山为EAS阵列找个安家之地呢？这还得从EAS现象说起：

进入地球大气层的高能宇宙线原初粒子不可避免会与空气中的原子核相碰撞，并通过一系列的相互作用微观过程，以大气为舞台，衍生出地球上最为壮观的多粒子事件——广延大气簇射(extensive air shower, EAS)。原则上，世界上各种微观作用和形形色色的基本粒子都有机会在此舞台上亮相，其中，强有力的核级联构成EAS的主干，庞大的电磁级联构成EAS的主体。电磁级联主要源于核作用过程中产生的中性 π ，它立即衰变成两个 γ 光子，然后 γ 光子产生正负电子对，正负电子在核场中又韧致辐射出 γ 光子和电子或正电子，如此雪崩式地发展下去，形成一个中心密集边上稀疏的扁盘状粒子团，并以光速自空而降(团中的粒子数目依赖于原初能量和观测面的高度。对一个能量为

1000TeV的EAS来说，到达羊八井高度时有约百万个带电粒子，分布在直径百多米的“扁盘”内)。如果我们在上万平方米的地面布置足够数量和不同类型的粒子探测器(称为EAS阵列)作符合取样，就可测定这个EAS的大小(总能量)、方向、电子和 μ 子等次粒子的时空分布，并由此倒推其原初粒子和最初几次核作用中的相关信息。然而，这个EAS粒子团在大气层中有其发生、发展、极大和衰亡的过程。在海拔四五千米的地方，1000—10000TeV(“膝区”)的EAS发展到极大，在这里粒子数最多，本征涨落最小，模型依赖最弱，是精细测量宇宙线成分和深入膝区物理的最佳位置(图4)。同时因为那儿空气稀薄因而衰减减小，许多较小的EAS还得以残存而被观测，从而可天然地降低阵列的探测阈能，以避免宇宙红外背景对 γ 光子的强吸收而延伸 γ 天文观测视界至许多河外天体。然而，并非任何4000m以上的高山都能成为这种大规模、高技术设备的家；我们奔赴“世界屋脊”，就是为了寻找最能发挥上述物理潜能的高海拔实验地，把它建成我国宇宙线研究落脚和起飞的地方。

前期准备中我们预定考察3个候选地：羊八井、浪卡子和那曲。然而，在念青唐古拉峰下，青藏公路近旁，拉萨西北90km处的羊八井，一下就吸引人吸引住了。这是一个当年造山运动形成的山间断陷小盆地，西北的大山挡住了北来的寒流，只东南方开一豁口，一条叫堆龙曲的小河由此流向拉萨，接通了印度洋暖湿气流入藏的雅鲁藏布江—拉萨河通道，从而造成这海拔4300m的盆地内气候温和、冬少积雪、宜牧宜耕的奇特景象。它宽阔平坦的地形，冬无积雪的气候，常年通畅的交通以及有地热电厂等友邻单

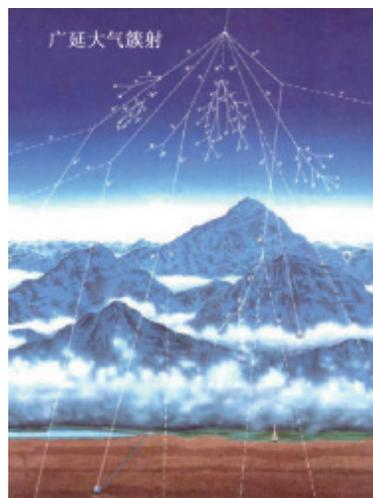


图4 EAS在大气层中的生成发展示意图

位和常住居民等条件，与国际上已知3000m以上的高山站的地势险峻、半年大雪封山、孤立山头、远离能源交通干线和人群等通病形成巨大反差，简直就是个上天恩赐的宇宙线观测福地。位于赤道附近的南美 Chacaltaya 站，虽高至 5200m，但只能建在一个陡坡上，地形严重受限，人员不能留宿，大型设备难以安置，数据质量难有保证。于是得出结论：羊八井是目前所知的全球最佳高山站址。同年 5 月，我向宇宙线室和高能所提交了《西藏考察报告》和去羊八井建站的请求。室里主张去云南站，所里、院里也普遍质疑“你们云南站都办不下还去西藏建站，谁来为你善后？”

所幸 1986 年 10 月，在丰台有个轮到中方主办的乳胶室方面的国际研讨会，在会议组织者丁林垵的支持和协助下，特意邀请了一些国际知名的 EAS 研究学者，组织了一个西藏计划研讨会(Tibet Project Workshop)，并参观了我们的楼顶试验阵列。我国 EAS 研究已然起步的事实和羊八井地理优势，使得在羊八井建造一个包含 μ 子探测器的复合型 EAS 阵列的方案得到了同行的认同。与会的日本汤田利典(代表日本富士山乳胶室合作组)、意大利的 B. D' Ettore Piazzoli 以及美国的 G. B. Yohd 等先后表态参加，会后还商定了分工，专等中方启动西藏建站工作。然而，虽有国际上的合作承诺和霍秉泉、王绶琯等前辈的亲笔信支持，上报中国科学院的《建立西藏宇宙线观测站的建议》仍是久无下文。由于我们迟迟不能启动，美方和意方的潜在合作者分别搞起了他们的 MILAGRO 和 EAS-TOP 计划。终于认识到，走云南站那样的建站路线已完全没有可能，必须寻求民间道路，先启动起来并以小步走的方式在成长中去逐步求得承认。

好事多磨，机会终于来了。1988 年 3 月，鸟居祥二带来了个好消息：汤田申请到 2 千万日元的科学基金。4 月 12—24 日，我与博士生戴宏跃就急急奔赴羊八井具体选址，并与羊八井地热开发公司和西藏大学分别签署了“协助建站意向书”，又在成都与西南交通大学物理系草签了“合作意向书”。不久，叶铭汉所长欣然决定将处理云南站金属材料所得的 20 万元作为所长基金拨给我组作建站之资。7 月下旬，日方甲南大学坂田通德教授专程访华，在他参

观怀柔站期间，我们敲定了起步阵列的初步方案。次年 5 月，羊八井观测站正式破土动工。而日方的探测器、电子学设备订货也已陆续到达东京大学宇宙线所乳胶室组。

4 跋涉在念青唐古拉峰脚下

为了赶在 8 月份开始羊八井安装布阵，1989 年 5 月 19 日我与王辉前往东京大学宇宙线所参与设备的系统检验和包装发运。不幸，由于政治原因，我们毅然于 6 月 9 日飞回北京。巨大的科学热情促使双方达成绝不放弃一丝希望的默契。10 月份，当国际接触刚被解禁就组织海陆联运并坚持立即施工。近 20 名中日科技人员不畏冬寒在海拔 4300m 的野外实施电缆布设、探测器组装测试和安装调试等野外作业，一鼓作气建成了由 45 个 0.5m^2 、16 个 0.25m^2 闪烁探测器组成的小型 EAS 阵列 AS γ -I。小阵列于 1990 年 1 月 10 日开始试观测，并在当时西藏自治区副主席图道多吉的见证下宣布了“羊八井宇宙线观测站”的问世(图 5)。得益于羊八井的高山优势，在当时国际上十来个 γ 天文阵列中，它的规模虽小，却以最低的阈能、次高的触发率挤身世界次席，仅次于诺贝尔奖得主 J. W. Cronin 主持的美国 CASA-MIA 阵列。

1990 年 3 月初，来自高能所、西藏大学(赵春华等)、西南交通大学(焦善庆等)、云南大学(木均等)的相关学者在成都集会，介绍羊八井实验，组织 γ 射线天文学讲座，宣告了羊八井实验中方合作委员会的成立。不久，山东大学张乃健等、郑州大学孙洛瑞等、云南大学高晓宇等也相继加入。一个没有行政班子、由科技人员自发组织、低成本运作的体制初步建立了起来。同时随着观测站的巩固及初期成果的出现，羊八井得天独厚的高海拔优势，在赢得国际关注的同时，也获得了领导的认可。在 1988 年民间意向协议的基础上，1992 年，中日羊八井合作备忘录为中国科学院高能物理研究所和日本东京大学宇宙线研究所双方所长正式签署。自 1991 年 6 月国家自然科学基金委数理学部主任王鼎盛等专程访问羊八井观测站以来，我们连续几期获得基金委重点课题支持。虽然那时中日双方的经费



图5 1990年1月10日，前来祝贺羊八井观测站诞生的西藏自治区有关领导和阵列建设者在阵列控制室前的合影。后排居中高者为图道多吉副主席

投入比低至1:8，增加了掌握实验主导权的困难，却也使观测站从此步入了稳步良性发展的轨道：1994年的AS γ 阵列二期扩建，1996年80m²乳胶室的加入和阵列探测器的局部加密，1998年太阳中子监测器和中子望远镜分别自日本理化所和名古屋大学的引入，1999—2001年AS γ 阵列的三期扩建和完善等跑步前进似的动作，构成了十年持续发展的大好局面(见表1)。它把传统的EAS工作能区向下拓宽了近百倍，创造了EAS观测历史上最高的事例收集率。其在宇宙线太阳阴影、Crab、Mrk501、Mrk421 γ 辐射及宇宙线膝区能谱等方面重要成果陆续出现，更证明了当初选择EAS手段和羊八井站址的正确。

其中1994年的扩建虽已将探测器间距15m的区域扩展至28000m²，彻底排除了Kiel组报道的Cygnus-X3为超高能 γ 源的“发现”，但直到10TeV时，也没能看到已被大气切连科夫成像望远镜

(IACT)在0.1TeV能区看到的蟹状星云(Crab)的稳定 γ 发射。我们主张进一步加密阵列和日方坚持在阵列中加入乳胶室的分歧，终于在1996年杭州会议上达成和解：二者同时并进。当年就以77个新探测器将阵内一块约5000m²的区域加密至探测器间距7.5m(粒子取样比由0.4%增至1%)，称之为高密度阵列。不久，就在3TeV得到了Crab为 γ 源的确切结果(国际EAS阵列的首次)。这次加密的立竿见影效果，坚定了我们启动羊八井地毯式阵列计划^[8]的决心。

实际上，当中日合作AS γ 阵列刚于上世纪90年代初投入观测不久，就传来了空间探测器(CGRO卫星上的EGRET高能 γ 望远镜) γ 源大丰收的消息。一时间国际上许多热极一时的超高能 γ 天文阵列陆续退出舞台，人们纷纷转向空间，转向以IACT为手段的地面高能 γ 天文。只有美国MILAGRO计划和我们羊八井还坚持在EAS粒子阵列战线上，以各自不同的改革思路降低阈能、发挥粒子阵列全

天候宽视场的优势，力争在甚高能区与下一代空间实验相衔接、相补充地参与 γ 天文研究。与MILAGRO计划以池中水为切连科夫光产生体来充分利用EAS中的高能光子成分的路线不同，依仗羊八井的高海拔并顾及到除 γ 天文外的多项物理目标，我们提出了将传统的粒子多点取样阵列发展为全覆盖(即“地毯”)式阵列，

表1 羊八井中日合作AS γ 阵列的逐年扩展

阵列名/ 建成于	探测器数目	阵列覆盖面积 阈能/ 低阈能国际排序	事例率/国际排序
AS γ -I/1990.10 AS γ -II/1994.10	45个 221个	8000m ² 10TeV/第一 36900m ²	20Hz/第二 230Hz
AS γ -II+HD/1996.11	298个	36900m ² 10TeV/第一 (HD:5200m ² 3TeV)	230Hz 105Hz/第一
AS γ -III+HD/1999.11	533个	36900m ² (HD:22000m ² 3TeV)/第一	680Hz/第一 20GB/天
AS γ -III+HD/2002.11	733个 789个	36900m ² (HD:33000m ² 3TeV)/第一	1.4kHz/第一 1.7kHz/第一

以大幅降低阈能、提高探测灵敏度的建议，并与意大利学者合作于1993年开始了将其RPC(高阻平板室)探测技术用于建造羊八井地毯式阵列(ARGO计划)的7年未经立项的预先研究。1997年冬至1998年春，在羊八井成功进行了50m² RPC地毯的可行性试验后，终于在2000年12月获得了国家立项及3400万元的巨额支持，正式启动了“地毯”建设工程。在克服了诸如2003年的“非典”停顿和遭一个巨大EAS的超高密集粒子群轰击而导致的返工等困难后，5000m²的ARGO一期地毯(见图6)于2006年年中投入正式运行。它把传统的EAS阵列小于1%的取样比一举提高到93%，从而在超高能端为逐个事例地精细测定EAS粒子分布以攻坚“膝区物理”提供了可能；同时又大幅度降低了探测阈能，为实现与IACT和大型空间高能 γ 实验直接对接创造了条件。曾是羊八井弱项的通信困难(最初连电话也不通，通信靠电报联络，数据靠磁带空运)，也随着2005年羊八井与高能所之间8MB和2006年155MB宽带网的开通而成为历史，ARGO阵列的远程监控及其海量数据的远程在线传输得以完全实现。一个现代化、国际化的宇宙线实验平台就此成形，标志着我国的宇宙线研究自云雾室、手工化向规模化和信息化转型并跻身世界前列的历史任务基本完成。

通过20多年的持续努力，羊八井作为中国宇宙线研究的新一代承接地和国际上在常年运行的、海拔最高的现代化宇宙线观测平台终于成型^[9](见图



图6 万平米ARGO实验厅(上)和厅内的RPC“地毯”(下)

7)，并自2002年、2004年以来逐步实现了队伍的新老交替。羊八井二阵列关于活动星系核Mrk421多次 γ 爆发的完整的观测(它们与空间X射线观测相同步，与空间 γ 射线实验在0.3TeV能区的观测相衔接、相补充)，以及基于AS γ 阵列多年事例积累的、迄今最精细的宇宙线各向异性分布天图及其导致的宇宙线流与太阳一道绕银心公转的结论(曾获2005年度中国科学院十大创新成果殊荣)等优异成果^[10-14]的不断涌现，羊八井的知名度正在提高，在这个国际级的平台上，中方的人才正在快速成长。然而，即使在国家富强、盛名远播的当今，历史的轨迹也须被知晓和尊重，从中可以总结经验教训、汲取精神力量，激发传承和发展的历史使命感。回顾在念青唐古拉峰下的这段跋涉，有几点体会愿与大家分享：

(1)羊八井得天独厚的高海拔优势是天赐的科学资源，其宽阔平坦的地形、畅通的公路铁路、现代的通信、就近的电厂和既有的设施是开发这些科学资源的优越条件，而为世界上4000m以上高山所绝无仅有。20多年前，EAS实验还只能在100TeV以上的超高能区进行，羊八井的出世彻底改变了这种局面。正是依靠羊八井的地理优势和密集型阵列，才将EAS传统的工作能区向下扩展了数百倍(事例触发记录率比云南站时期提高了万倍)，实现了与IACT乃至大型空间 γ 实验的无缝衔接，并使利用宇宙线月亮阴影的地磁偏移成为可能，从而为阵列的方向测定的标定和宇宙线反质子丰度的测量，找到了简易公正的新方法。羊八井既代表我们特有

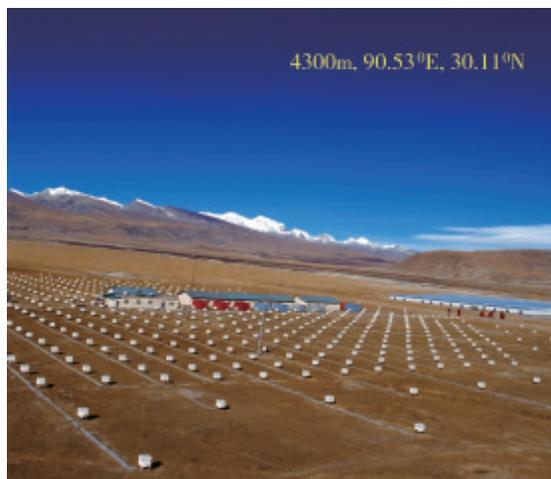


图7 羊八井观测站全景：羊八井观测站的两大阵列(望向东北)

的优势，也是个潜力未尽的科学“矿藏”，是我们藉以在国际较量中获取相对优势和吸引国际合作、调动国际资源做大做强的重要物质基础。因此在学科方向和具体课题选择上要紧紧扣住羊八井的高海拔特点，着力进一步开发其相应的物理潜能，并倍加爱护羊八井这个品牌。

(2)宇宙线观测，特别是与天文和空间环境相关的观测，具有天文台那样的长期持续的特性，对许多目标天体的日常监测要世代地做下去。观测站可以托一个课题而生，而不能随一个课题而死。许多天文现象和环境变化具有突然性(爆发现象)，EAS阵列的宽视场和全日特性相对于指向跟踪的望远镜有无可争辩的优势，问题是科研人员要耐得住性子，持之以恒，而不可以急功近利、打一枪换一个地方；主管领导也要对此有足够的认识，对羊八井观测站应给予天文台那样的日常待遇。

(3)羊八井平台创建的成功得益于羊八井的地理优势、国家和西藏的现代化进程、国际国内合作、变而不散的队伍。早期的国际合作在解决资金、高技术设备和中方人员在国际环境中的成长上起过重要作用(每年都有十几人次的人员派出)。即使在中国已成世界老二的今天，利用国际合作调动国际优质资源和发挥地方积极性，仍是快速发展的必要举措。

(4)作为大国，从战略上讲，宇宙线三大属性(宇观、微观和环境)我们都应涵盖。羊八井的高海拔优势和我国航天事业的快速发展，使我们在攻克“膝区物理”这一老大难问题以及太阳粒子与空间环境变化的监测上有了不可推卸的责任。构建以ARGO地毯为中心的精密复合阵列最终是要提上日程；而以稳定的经费和人员坚持现有的太阳中子监测器、中子望远镜和自制的中子 μ 子复合望远镜的常年运行，则是眼前的事。同时也不能忘记2003年路甬祥院长视察时的期望，向多学科交叉研究和有应用前景的方向探索。这许多工作自然不可能由一个研究组完成，而应将羊八井作为全国和国际共同利用的实验中心。为此，它的主阵列须是基础型、通用型的，既能提供各种EAS参数，又便于积木式的扩展和为不同课题添加专用设备。如此将不愁没有八方神仙到来。

(5)在羊八井事业蒸蒸日上的时候，我们自然

想起了为我们播种、引我们入门的前辈大师；想起在高海拔条件和出国大潮反复冲击下坚持长期艰苦奋斗(直到2006年，站里连一辆汽车都没有)的同事；想起20年长期留守山上、干着高级工程师和副站长份内的工作、享受着农民工一样的待遇的合同工陈文一和他的三位同事，尊敬和感激油然而生。正是包括他们在内的群体奉献，促成了羊八井站的横空出世和中国宇宙线研究春天的到来。

在庆祝宇宙线发现一百年也是我国本土宇宙线研究60年的时候，我们可以告慰张文裕等前辈科学家：后辈们没有忘记您们的遗愿，如今已再没有人说中国宇宙线研究是零了；大师们早年在国内播下的种子，业已在雪域高原生根开花；跋涉在念青唐古拉峰下的脚步，定会永远向前。

参考文献

- [1] Chao C Y. Proc. Nat. Acad. Sci. Ammer., 1930, 16: 431
- [2] Chao C Y. Phys. Rev., 1930, 36: 1519
- [3] Li Bing An, Yang C N. International Journal of Modern Physics, 1989, A14: 4325. 文中引用的安德森1983年在《The Birth of Particle Physics》书中的话“...Dr. Chung-Yao Chao, working in a room close to me, was using an electroscope to measure the absorption and scattering of Gamma rays from THC”. His findings interested me greatly...”,及早川幸男1980年在日本《自然》杂志上转述的奥恰里尼和他的谈话：“Occhialini spoke highly of Chao's achievements and mentioned how his study of the anomalous absorption of THC” Gamma-rays triggered off their related research even in England.”
- [4] Blackett P M S, Occhialini G P S. Proc. Roy. Soc., 1933, A139: 699. 该文在引用赵先生的文献[2]时，错误地将其发表日期推迟了一年，并放在关于“反常吸收”的别的引文的后面。实际此文说的是发现“附加辐射”(即 γ 的电子对产生)，且测出此附加辐射射线的波长正好相当于他们两年后测得的一个电子的质量
- [5] 1999年，前诺贝尔奖评奖主席 Ekspong 再次访华时说：“疏漏了赵忠尧先生的历史功绩是一件令人不安、无法弥补的事。”——高能所《粒子天体物理重点实验室简史》
- [6] 王淦昌，郑仁圻，吕敏. 物理学报, 1955, 11: 421
- [7] Tan Y H *et al.* ICR-Report-99-82-2; Apr. 20, 1982
- [8] 谭有恒. 高能物理和核物理, 1999, 23(2): 103
- [9] 谭有恒. 天文学进展, 2003, (4): 318
- [10] Ameromri M *et al.* APJ, 2003, 598: 242
- [11] Aielli G *et al.* APJ, 2010, 714: L208
- [12] Bartoli B *et al.* APJ, 2010, 734: 110
- [13] Chen S Z *et al.* Proc. 32nd ICRC, 'ICRC 1007.div', 2011, Beijing
- [14] Amenomori M *et al.* Science, 2006, 314: 439