

无限风光在险峰

——为羊八井宇宙线观测站建立五周年而作

谭有恒

(中国科学院高能物理研究所)



自1990年元月10日一期阵列建成并于同年六月开始正式运行以来,羊八井宇宙线观测站已经问世五周年了。五年,在已有的高山站中是个很小的数字(见表1),然而羊八井已跻身国际超高能 γ 天文实验三大主力行列而名扬海外。是什么使得它如此神奇?扩大了四倍的羊八井二期阵列将会有何表现?羊八井三期发展计划将会给地面宇宙线实验和 γ 天文学科形势带来怎样的变化?这些不仅是羊八井实验的参与者也是所有关心羊八井事业、想了解羊八井立足我国自然优势发展国际合作推动学科发展的经验的人们所感兴趣的事情。

一、超高能宇宙线、EAS 和观测高度

超高能宇宙线,传统上指 10^{14} — 10^{18} eV的非地球起源的天然粒子流,以往主要是被当作“粒子炮弹”为研究微观粒子的超高能相互作用特征服务。其实,它们来自银河和河外空间,是一种送上门来的宇宙物质样品,携带着其产生地(“源”天体)及其经过的空间的宇观环境、微观过程乃至天体演化及宇宙早期的信息。所以随着加速器的进入 10^{14} 和 10^{15} eV能区,超高能宇宙线研究就越来越偏重其天文侧面,即其本身的性质和起源。前者主要指其能谱和成分,后者主要指其产生、加速、传播和相关的空间物理环境和宇宙学问题。(当然也必然要涉及到在源区和空间发生的种种超高能微观过程。)要能具体深入地研究超高能宇宙线的起源,首要的是去发现一个或一批产生它的天体——“点源”。由于 γ 光子是中性的,不受到星际磁场偏转的粒子,所以人们是通过超高能 γ 射线去寻找超高能 γ 点源(自然也会是超高能宇宙粒子源)的。这就是八十年代后期发展起来的超高能 γ 天文学。

超高能宇宙线粒子在大气层中多次作用产生的一种大尺度的多粒子现象,称为广延大气簇射。一个 10^{13} — 10^{20} eV的宇宙线粒子(质子,各种裸原子核或 γ),能在大气中发展成拥有数千到 10^{11} 个荷电粒子(主要是电子及 γ 等)组成的粒子群,以光速降落在数百到数千km尺度的地面上。用布设在地面的大型粒子探测器阵列作取样观测,可以测定其初粒子的到达方向、能量乃至性质。每个EAS在大气中都有其产生、发展和衰亡的过程,最佳的观测高度(即具有最高探测效率和测量精度的地方)是在EAS粒子群发展到极大的地方。 10^{14} — 10^{16} eV的

同时利用最小二乘法得到 $D_f = 1.238$,由此可见,中国海岸线维数为 1.25 ± 0.02 。

如果我们以地面上1公里为步长,在比例为1:6000000的地图上以步长 $r = (1/6)$ mm(实际在地图上是无法进行截取的),可得到 $N(r) = 1.763 \times 10^4$ 段,每段为 $(1/6)$ mm,每1mm实际距离为6公里,可得到中国的海岸线长为一万八千公里,与常见的资料相吻合,同时

也证实了上式的正确性。

如果我们以地面上1cm为步长即相当于地图上以 $r = 1\text{mm}/(6 \times 10^5)$ 为步长,则得 $N(r) = 3.812 \times 10^{11}$ 段,折合成381.2万公里,是常见资料给出数值的212倍!因此像海岸线之类的分形曲线只有用分数维表示,中国的海岸线维数为 1.25 ± 0.02 。

EAS 在羊八井高度(4310m)达到极大,因而可进行最精确的测量;还可以在羊八井以容许的精度和效率观测在低海拔处无法看到的能量低的小 EAS,从而获得巨大的事例产额。显然,高度能带来“多”和“精”的天然优势。

地球上不乏高的台地,然而并非任何高地都可以作为观测站址。EAS 阵列是一种野外环境下的大型的计数器实验,粒子探测器、光电器件、快电子学、计算机和大容量数据采集等高新技术设备在高山环境下的日夜不断常年运行,要求有专业人员的现场维护和必要的技术支持和后勤保障。因此,不只高度和纬度,而地形、气象、交通、电力、友邻环境和补给路线等都是选址所必须考虑的条件。国际上,已有的野外观测站中能较好满足这些条件者本不很多且多在 2200m 以下的地方,高度高的地方多有半年大雪封山、交通阻绝的情况,更不用说远离人群、孤岛似的生活所带来的心理问题。(见表 1)。笔者曾在某年四月间访问过前苏联的 Aragats 站,自其半山基地换乘雪地车(类似装甲运兵车)并有铲雪车开路,18km 行程花了半天时间;站上人员来往于实验室和宿舍食堂之间均用地道网;我因病下山时,雪地车几天未能突破雪封上来,只好动用直升飞机。在赤道附近的恰卡尔塔雅山没此麻烦,但其 5200m 的

高度毕竟不是常人可以正常工作和安全留宿的地方,粗放的管理必然最终限制阵列的规模和技术等级及运行质量,因而有碍其高山优势的发挥。而我国西藏的羊八井,是目前所知的既能全面满足上述条件又能使业务人员驻站运行高技术观测设备的海拔最高的地面宇宙线站址。

二、天生、人造,理想的高山站址

羊八井在自拉萨沿青藏公路西行 90km 的地方,是念青唐古拉山脉东南麓断陷谷地西南端的一个小盆地,海拔 7111m 的念青唐古拉主峰就耸立在其东北 50km 的地方。盆地平缓开阔,长约 20km 宽约 5km,高度在海拔 4250—4400m 之间,有青藏公路过其东沿,还有中尼公路横贯其间。这儿属高山草甸地带,有“藏布曲”(小河名)纳冰川雪水流经盆地南侧在羊八井镇旁汇入堆龙曲流向拉萨(所以自拉萨来羊八井,公路旁流着美丽的溪流,两旁多是开阔的庄稼地,全没一点通常“上山”的陡和险的感觉),因而也属西藏自然条件较好的雅鲁藏布流域。境内居民多以畜牧为业(绵羊、牦牛),也有成片的青稞、豌豆种植区。这里有羊八井地热发电厂、西藏地热开发公司、解放军蔬菜基地等单位,盆地内有上千的常住人口。

由于北面的高山屏障和南来的印度洋暖流

表 1 世界最高的几个宇宙线常年观测站条件比较

站址 (所在国)	海拔高度 和高序	地理纬度	公路及冬雪 状况	电力供应	管理人员	半山支持基地	近邻状况	建站 始于
恰卡尔塔雅山 (玻利维亚)	5200m 世界第一	16.3°S	旅游公路+专用,冬有雪但可上,夏有泥石流	自滑雪俱乐部接电缆	土著看守 1 名	人员住拉巴斯城。	冬有滑雪场	60 年代
羊八井 (中国西藏)	4310m 世界第二	30.1°N	主要干线旁,冬无积雪,常年畅通	有二电厂在附近,500m 专用线	阶段性住站负责人+技工 2—3 名	无 (距西藏大学 90km)	电厂、蔬菜基地、藏族农、牧民村落	1990
天山 (哈萨克斯坦)	3340m 世界第三	42.5°N	旅游+专用公路 11 月—4 月积雪 3m	自己发电	约 80 名,分拨轮换	阿拉木图管理处 (距站 40km)	无	不晚于 60 年代
阿拉嘎兹山 (亚美尼亚)	3200m 世界第四	40.18°N	20km 专用公路,11 月—4 月积雪 3m	18km 专用高压线,并备了三台柴油发电机	约 40 名,分拨轮换	Nor-Amberd 半山基地 (距站 18km)	无 (拟建滑雪场)	1942
乘鞍岳 (日本)	2770m 世界第五	36.1°N	旅游+专用公路 11 月—4 月积雪 2m	自己发电	9 人	铃兰联络所	对面山顶有一孤立的日冕观测站	1954

的作用,羊八井的气候显著好于一般的高山地区。年平均气温 2.5°C , 日平均温差 15.9°C , 最高记录 25°C , 最低 -25.7°C 。年平均降水量 328mm , 年平均日照 2832.9 小时。最为我们看重的是: 虽然冬季也下雪, 但多下在半山, 在盆地内多是触地而化或小雪, 迄今的最大积雪深度仅为 7cm 。这保证了道路的全年通畅和工作上的无季节差别, 也有助于实现业务人员的驻站运行。

自七十年代起, 经一代地质和电业工作者的艰苦开拓, 羊八井地热资源的开发已颇具规模, 并成为目前我国最大的地热能源基地。地热电厂装机容量已达 2 万千瓦, 因不受季节影响, 是西藏境内唯一有着稳定而充足的供电的地方。观测站靠近中尼公路, 距升压站仅 500m 之距, 这样好的交通和能源条件在世界所有高山站中是独一无二的。同时, 伴随热能的开发, 一些生活服务设施也相继建立, 这些都是我们在此工作和生活所必需的支持背景。例如靠近我们阵列南沿的邮电局、医务所、商店、饭馆, 引用水井和水塔; 马路南边的地热电厂和公司办公和生活区中的电视接收和差转设备, 招待所, 物资库, 机加工车间、拥有吊车等工作机械和格尔木转运站的车队, 包括工程师和各类技工的数百名电业职工以及常驻的外来建筑施工队等; 距站 3km 有羊八井兵站及民用加油站、水文站; 距站 10km 有公司和解放军的蔬菜基地 (约 55 亩地热温室), 和一个常年对职工和游人开放的地热游泳池。

在这样一个交通方便、人群活跃、电力充足、有如此多现存可利用的工作条件和生活服务设施, 且距拉萨市仅 2 小时汽车行程的地方建立观测站, 收到了事半功倍的效果, 也避免了远离人群带来的孤独感, 有利于观测站的建设 and 长久维持。在四千多米的高处有着这样的地方, 当然是自然的恩赐, 但同时又是当地居民、解放军、地热拓荒者们多年艰苦开发的结果。作为我国的宇宙线研究者的任务是, 充分认识羊八井的高度、纬度和上述得天独厚的条件可为我国带来的宇宙线地面实验上的优势, 并勇

敢地到那里去开发和实现这种科学优势。宇宙线是不分穷国富国普天同降的, 然而资金、技术 (可造成空间和地下观测的优势) 和高山条件的优势的发挥会造成各国在利用水平上的显著差异。应当依据我国的优势在高山地面这一突出的事实来看待羊八井和羊八井事业, 使这一天生人造的观测甚高能和超高能宇宙线的宝地能在人类的科学实践中发挥其应有的作用。

三、一期阵列, 羊八井优势的显露

1990 年建成的羊八井中日合作一期阵列, 仅由 49 个 0.5m^2 和 16 个 0.25m^2 闪烁探测器组成, 在当时正工作中的近 20 个 AS- γ 阵列中是规模较小的一个, 然而它的事例获取率竟居世界第一 (后因 CASA 阵列全部建成而退居第二)。从表 2 所列世界上产额居前三位的观测站的比较中可以清楚看到: 羊八井一期阵列的有效面积只是 CASA/MIA 的 $1/20$, 所用的闪烁体总面积不足后者的 $1/100$, 总的建设投资不到后者的 $1/10$ (由于通过国际合作吸收外来资金设备, 中方的投资不到后者的 $1/100$), 却能获得与之可相匹敌的事例积累量; 而刚建成正在试运行中的羊八井二期阵列, 在规模上仍只是 CASA 的 $1/5$, 却将能以每年 50 亿个事例的加速器量级的数据产率遥遥领先, 从而将彻底告别地面宇宙线实验的传统的小生产方式, 在羊八井开创“小规模大实验”的时代。

以上效率优势的取得, 直接受惠于羊八井的高度带来的阵列低能阈。正是它所开辟的 $10-40\text{TeV}$ 特色能区 (对蟹状星云这样的 γ 源是模型灵敏区, 还被认定为一个新的太阳活动监测窗口) 和上述巨大的事例统计量, 使得羊八井一期实验出现了许多特色或优势项目并将使二期实验在国际上取得数年期间的全面领先地位。前者如, 羊八井独家给出了 70 个河内高能天体和 15 个活动星系核的 10TeV 流上限, 并显示在所有 AS- γ 实验中羊八井是最有希望作出正结果的地方; 发现首次观测到了宇宙线的太阳阴影偏离与太阳和日地空间磁场间的联系 (独家课题); 独家找到存在 10TeV 的因而应是银河起源的 γ 暴的迹象 (置信水平

99.9%), 给出了在近日空间的宇宙原生小黑洞蒸发爆发率密度上限国际最小值; 测出了迄今最详细的宇宙线初能谱“膝”结构等。一个小阵列能在短期内取得这样的成功, 和一个中等阵列(羊八井二期)将有可能率先以蟹状星云和河外 MrK 421 为目标实现超高能 γ 源寻找上零的突破(否则也将导致对蟹状星云磁场强度或结构的修改及对星系际红外背景光子密度的更好估计), 要归功于人们对羊八井的高海拔(和合适的地理纬度)所蕴藏的物理优势的开发(见表 2)。

四、无限风光在前头

羊八井一期实验的成功和二期阵列将取得的全面优势是在探测器地面覆盖率(或粒子取样比)仅 3‰ 的情况下取得的。如果我们大胆设想, 把历来的多点取样阵列发展为全覆盖的“地毯”式阵列将簇射荷电粒子“一网打尽”, 那会在羊八井出现什么样的局面呢?

1. 实现超高能 γ 源寻找上的突破性进展。

在 TeV 以上能区, 可根据簇射粒子的横向分布梯度、方位对称度、心结构类型和粒子盘前锋面光滑度等去区分它是 γ 或是强子引起的

大气簇射, 从而有效压低宇宙线背景, 找到相对弱的超高能 γ 源。利用 Monte Carlo 模拟和神经网络技术的预先研究显示, 这是个可实现的梦想。

2. 实现广视场全天候的甚高能观测, 走向河外。

阵列探测阈能可降到 200GeV, 从而以粒子阵列高效率地覆盖传统上由大气切仑可夫望远镜独占的甚高能区, 这将能在很大程度上避开星系际红外光子对 γ 射线的吸收, 把阵列的视界扩大到银外之外的星系际空间(到达红移值 ~ 1 的范围), 去发现更多的甚高能 γ 源、宇宙 γ 暴, 去以全新的方式测定星系际红外光子密度谱和哈勃常数。其技术后果是迫使大气切仑可夫成像望远镜让位并搬家到 4000m 以上的高山站去填补它与卫星实验之间的空白(30—300GeV) 能区, 从而在羊八井实现连续 6 个量级广阔能区内的统一观测。这不仅对 γ 源的寻找, 而且对发现后的长期精细监测具体研究特别有利。

3. 对超高能宇宙线的研究将产生一些最令人向往的高精度和少二义性的结果。例如, 一

表 2 与两个最大的 AS- γ 阵列的比较

AS- γ 阵名	CASA/MIA	CYGNUS	羊 八 井	
			一期	二期
主持人	J. W. 克罗宁 (1981 年诺贝尔奖)	G. B. 约德 (California 大学终身教授)		
站址	美国犹他	美国洛斯阿拉莫斯	中国西藏	
海拔高度	1460m	2300m	4310m	
闪烁探测器 面积, 个数	地面: 1.48m ² , 1064 地下: 158m ² , 16	0.83m ² , 204 μ 探: LAMPF E-225 (加速器)	0.5m ² , 49 0.25m ² , 16	0.5m ² , 221
阵列面积	2.3 $\times$ 10 ⁵ m ²	8.6 $\times$ 10 ⁴ m ²	约 10 ⁴ m ²	6 $\times$ 10 ⁴ m ²
取样比	0.73‰		0.3‰	0.3‰
阈能	1.4 $\times$ 10 ¹⁴ eV	5 $\times$ 10 ¹³ eV	10 ¹³ eV	
事例率	30Hz(1990 年)	3Hz(1990 年)	20Hz	250Hz
投资额	$\geq$ 1000 万美元		$\approx$ 60 万美元	$\approx$ 200 万美元
开始运行	1989 年	1986 年	1990.6	1995.8
事例积累量	约 18 亿	约 5 亿	约 15 亿	约每年 50 亿

核武器的物理基础

南 秀 华

(石家庄军械工程学院)



利用能自持进行的核裂变或核聚变反应释放的能量,产生爆炸作用并具有大规模杀伤破坏效应的武器,总称为核武器。其中,利用铀 235 或钚 239 等重原子核的裂变链式反应原理制成的武器,叫裂变武器,通常称为原子弹。利用重氢 (${}^2\text{H}$, 即氘) 或超重氢 (${}^3\text{H}$, 即氚) 等轻原子核的热核反应原理制成的武器,叫热核武器或聚变武器,通常称为氢弹。以高能中子辐射为主要杀伤因素的低当量小型氢弹,称为中子弹。

一、原子弹

铀 235、钚 239 这类重原子核在中子轰击下,会分裂为两个中等质量数的核(称为裂变碎片),同时放出 2—3 个中子和约 $2.9 \times 10^{-11}\text{J}$ 的核能。放出的中子,有的损耗在非裂变的核反

~~~~~

应中或漏失到裂变系统之外,有的继续引起重核裂变。如果每一个裂变后能引起下一代裂变的中子数平均多于 1 个,裂变系统中就会形成自持的链式裂变反应,中子总数将随时间成指数增长。例如,当引起下一代裂变的中子为 2 个时,则在不到百万分之一秒内,就可以使 1 千克铀 235 或钚 239 内的约  $2.5 \times 10^{24}$  个原子核发生裂变,并释放出 1.75 万吨梯恩梯当量的能量。此外,在裂变碎片的衰变过程中,还会陆续

个包括精细的“膝”结构的原初宇宙线能谱 ( $10-10^5\text{TeV}$ ),可精细到别家无法企及从而成为“最后的实验”;可给出基本摆脱了与作用模型的纠缠的宇宙线原初成分测定,至少是对质子、 $\gamma$  和 Fe 核份额或能谱的测定。

4. 我们将用同一个“地毯”阵列同时开出三个太阳活动监测窗口:(1)在  $5-10\text{TeV}$ ,利用宇宙线的太阳阴影图通过太阳和行星际磁场的变化去监测太阳活动的月变化;(2)在  $200\text{GeV}$  到数千  $\text{GeV}$  间,利用对到达地球的宇宙线能谱的经常测量通过太阳对宇宙线谱的调制效应去监测太阳活动随时间的变化;(3)在  $200-300\text{GeV}$ ,开辟一个观测太阳粒子事件、研究恒星对甚高能宇宙线的可能的贡献的窗口。

人们会问:此计划需使用比二期阵列多百倍的探测器,经济上可能吗?诚然,我们不能用闪烁体来拼成“地毯”,但近年来发展起来并在

加速器实验中已有成功运用的 RPC (阻性板计数器)不仅具有很高的空间和时间分辨能力,而且几乎是全塑料、超薄型的,因而成本低、易于大规模生产。然而,这是一种流气式的计数器,若非羊八井这样条件优越的高地,是不敢大规模采用的。上述方案是专为羊八井设计的。

既然羊八井难得的自然和社会条件与适当的技术和规模相结合能如此神奇地调动高山优势开创宇宙线地面实验的新局面,我们就有了一种义不容辞的责任。首先有责任以科学的态度去宣传羊八井的科学价值,使羊八井的事业能得到更多的人的理解和社会的支持,其次是组织现场试验和更具规模的国际合作,化理想为现实。念青唐古拉峰的阳光能点燃亚运圣火,羊八井也应当能为通过“天外来客”宇宙线了解宇宙的努力打开新的一页——那里有无限风光。