

# 羊八井宇宙线实验的现状和未来

谭 有 恒

(中国科学院高能物理研究所 宇宙线与高能天体物理开放实验室 北京 100039)

**摘要** 概述了羊八井地理位置的物理优势和一期实验的显示性及其在日益激烈的国际竞争中面临的挑战和选择,提出了一个以RPC“地毯”、契伦可夫成像望远镜群和多成分复合阵列为手段,以亚甚高能 $\gamma$ 天文、宇宙反质子流测量、太阳活动短期变化的监测研究及膝区物理的突破性攻关为目标的羊八井将来计划。

**关键词** 宇宙射线 大气簇射(AS) 大气契伦可夫望远镜(ACT)  $\gamma$ 暴(GRB) 高阻平板探测器(RPC)

## 1 引言

宇宙线是来自宇宙空间的高能粒子流,是人类能够获得的来自太阳系以外的唯一物质样品。在 高能加速器问世之前,30—50 年代宇宙线研究经历了一个辉煌的时期。作为那时唯一可以利用的高能粒子源,在宇宙线实验中发现了正电子、 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子、K 介子、及  $\Lambda$ 、 $\Sigma$  和  $\Xi^-$  等一系列基本粒子,推动了早期粒子物理学和高能加速器的发展。随着加速器的能量进入 GeV 和 TeV 能区,加速器实验成了粒子物理的主角,宇宙线研究更加向其宇观测面倾斜。科学发展到今天,显露出粒子物理与天体物理和宇宙学相互依存和交叉的特征,宇宙线研究由于它与这三者的天然联系又显出它的特殊重要性。在空间、地面和地下(水下、冰下)三种宇宙线观测方式中,地面实验特别是高山实验在我国已有 40 多年历史,最有基础也适合我国国情并具潜在的天然地理优势。基于这种认识和 80 年代自力更生建立怀柔 AS 阵列的信心,我们于 1984 年进藏选点,1986 年正式提出“西藏计划”,1988 年开始中日合作,1990 年建成北半球最高(4300m)的羊八井宇宙线观测站和中日合作羊八井一期阵列,并坚持了下来和逐年有所发展。羊八井一期实验的一流成果向国人和世界显示了羊八井站址的科学价值和巨大的物理潜能,使我们能把学科方向瞄准地面宇宙线实验四个重大课题中的三项(即膝区物理、 $\gamma$ 天文和利用宇宙线对太阳活动和日地环境的监测研究),来抓羊八井的二期实验和规划其将来发展。

## 2 羊八井地理优势的物理潜能和一期实验的显示

地面实验可使用大型设备、易于维修和长期持续运行,因而是克服高能宇宙线低流强的最有效途径. 由于地球大气层的屏蔽,任何到达地球的原初宇宙线都不可避免地要遭致与大气原子核的碰撞从而引发一种称之为广延大气簇射(AS)的级联式的多粒子产生现象,人们正是通过对 AS 的测量间接地观测来自天外的高能宇宙射线. AS 在大气层中有其发生、发展和衰减过程. 而地面的 AS 探测阵列只能取样观测 AS 的某纵向发展阶段中的一个横剖面,并据此重建整个 AS. 因而其探测阈能和测量精确度依赖于观测站的高度以及 AS 发展的本征涨落和人们对 AS 现象的了解. 显然,在高海拔可以实现更低的探测阈能和更大的事例统计量,超高能 AS 的观测剖面则更接近于其发展极大,从而有更小的发展涨落和更精确的测定.

然而,地球上高海拔地区总是与地势险恶、空气稀薄、大雪封山、交通险阻、能源缺乏、远离人群和城市等困难相联系,并非任何国家都拥有可保证必要的工作条件和生存条件的高山站址资源. 因此,一个好的高山站址,将在某种程度上决定一个实验站能否建立和有效存在的命运;高山地理优势与大型现代化设备和人的驻站观测相结合,将能开展在低海拔难以实现的科研项目.

中日合作羊八井一期阵列<sup>[1]</sup>仅以 49 个  $0.5\text{m}^2$  闪烁探测器的小规模(只及诺贝尔物理学奖得主 J. Cronin 的美国 CASA 阵列的数十分之一),竟能在国际上争得阈能最低、相同能量下角分辨最好和事例收集率及综合品质指标第二的名次,并取得了国际上首先在  $\sim 10\text{TeV}$  能区测出蟹状星云<sup>[2]</sup>等 70 个高能天体的  $\gamma$  射线流强上限,得到了可能存在  $10\text{TeV}$   $\gamma$  暴的线索<sup>[3,4]</sup>,测出了与怀柔实验谱<sup>[5]</sup>相类似的超高能宇宙线能谱的平滑过渡型‘膝’结构<sup>[6]</sup>,独家观测到宇宙线太阳阴影对太阳几何位置的偏移并证明了它可成为监测太阳活动变化的一种新型的方便的手段等前沿成果<sup>[7,8]</sup>. 羊八井因此国际成名,它的地理优势所蕴含的物理潜力受到广泛重视,当我们与日本合作启动羊八井二期阵列计划(规模扩大到一期的 4 倍)时,按照 J. Cronin 的评判标准,(在 1995 年的第 24 届国际宇宙线会议上),羊八井阵列的品质指标被认为是当时的国际第一<sup>[9]</sup>.

## 3 羊八井面临的挑战和选择

然而,羊八井的领先地位立即面对严重的挑战,这主要表现在以下四个方面:

(1)  $\gamma$  天文的  $10\text{TeV}$  能区已非羊八井独家之天下. 1990 年羊八井开辟了  $10\text{—}50\text{TeV}$  观测窗口,在 1992 年我们最初公布蟹状星云等的  $10\text{TeV}$   $\gamma$  流强上限时,此敏感能区还只有我们一家有数据. 在 1993 年第 23 届国际宇宙线会议上,法国的 Themistocle 镜子阵列就在此能区公布了一组关于蟹状星云的数据,1994 年在拉萨国际宇宙线物理讨论会和第 24 届国际宇宙线会议上<sup>[10]</sup>他们把这组数据修正到了与 Whipple 和羊八井数据能平滑衔接的地方. 在澳洲的 CANGAROO 组的  $4\text{m}$  契仑可夫光成像望远镜一般工作于  $1\text{TeV}$  能区,但他们在大天顶角试着观测北天的蟹状星云时<sup>[11]</sup>,也以  $5\sigma$  以上的超出测到了它在  $7\text{—}$

50TeV 的稳定 $\gamma$ 发射. 这种以大天顶角观测覆盖更高能区的方法, 由于扩大了天区视野并有很大的收集面积, 将会为将来的各家 ACT 实验采用.

(2) 在 AS 大气契仑可夫光望远镜成像技术成功地解决了原初 $\gamma$ /P 分辨, 甚高能区找到 7 个稳定 $\gamma$ 源<sup>[12]</sup>的同时, 由于 AS 粒子阵列没有剔除核子引起的 AS 以提高信噪比的有效办法, 在超高能 $\gamma$ 源寻找上全为负结果. 为了摆脱这个困境, 寻找粒子阵列降低阈能、分辨原初成分的办法成了关键问题. 在 Los Alamos 的美国 SYGNUS 组, 率先尝试了水契仑可夫光探测器, 并改组为 MILAGRO 组, 自 1994 年起就在分期实施一个最终以 800 支光电倍增管把一个数千平方米的水池变成一个大的 AS 粒子探测器的计划<sup>[13]</sup>. 整个工程计划将于 1999 年建成, 届时其阈能可望降至 300GeV 且有好的 $\gamma$ /P 分辨能力, 而在 10TeV 能区也将对羊八井二期阵列构成直接而全面的挑战.

(3) 对膝区 ( $10^{15}$ — $10^{16}$ eV) 宇宙线的观测, 本来羊八井正处于最佳观测高度, 这里有最小的涨落、最大的 AS 粒子数目而可作最精确的测量. 然而由于现有阵列探测器品种单一和覆盖比很低 (目前 0.3%, 明年 1%), 已无法阻挡国际期望的目光自羊八井向新近建成的德国 CASKADE 阵列<sup>[14]</sup> (近海平面) 转移. 后者拥有 252 个电子/ $\mu$ 子探测器站, 320m<sup>2</sup>强子量能器以及中心区的高能 $\mu$ 子和远心区的 $\mu$ 子径迹探测器 (50m 隧道), 虽然其用多成分多参数测量弥补在 AS 衰减阶段进行观测的种种不足以较好地测定膝区宇宙线的原初成分和膝区能谱的期望有些过于乐观, 但羊八井实验虽占尽天时地利却设备不足的弱点将越来越使之竞争乏力则是我们必须面对的现实.

(4) 卫星实验与地面 ACT 争夺最后一块处女地“亚甚高能”区 (30GeV—300GeV) 的争夺战业已开始. 羊八井在这种机遇和竞争面前该作何打算? “顺其自然”的结局就是逐步“淡出”; “勇敢争先”的可能性和办法又在哪里? 这是拥有羊八井天然地利的强大的无形资产和在宇宙线、高能物理和天文研究上很有传统和基础的中国学界必须回答的问题.

## 4 计划和前景

实际上, 羊八井高山地利的物理潜能并未得到充分的开发. 例如, Monte-Carlo 计算和经验表明:

(1) 对于 10GeV、100GeV 和 1TeV  $\gamma$ 引起的 AS, 在羊八井高度的契仑可夫光子密度比在海平面分别高约 2.5 倍、4—6 倍和 7—14 倍. 因此, 为着降低阈能, 上山比增加反射镜面积更为经济有效.

(2) 100GeV  $\gamma$ 引起的 AS 垂直到达羊八井高度时平均还有近 10 个电子及数十个光子, 若考虑到其大的涨落, 一个盖有 5mm Pb 的 3600m<sup>2</sup>的地毯, 对之可有约 70m<sup>2</sup>的有效探测面积 (角分辨 $\sim 0.7^\circ$ ), 为下一代最大卫星探测器的数十倍. 如果是以 $\sim 4^\circ$ 角分辨去搜寻宇宙 $\gamma$ 暴, 则可把探测阈能降至 $\sim 15$ GeV 并保有 $\sim 10$ m<sup>2</sup>的有效面积.

(3) 在羊八井高度观测太阳中子显然更为有效, 例如, 在羊八井运行 28 支超级中子管 (今年计划), 将能获得平均  $1.06 \times 10^7$ /h 的计数率, 几乎为拥有 48 支中子管的加拿大 Deep River 站的 5 倍多.

试想, 如果我们在羊八井做下述三件事, 将能开发出具有怎样竞争力的物理潜能:

(1) 建成羊八井太阳中子监测器和太阳中子望远镜, 研究太阳耀斑中的高能粒子加速过程; 并与地毯的日影图相配合, 尝试测定太阳行星际磁场扇区边界的扫过, 研究其对地球环境可能的影响.

(2) 在 4300m 的羊八井设置 6 台 10m 口径的大气契仑可夫成像望远镜, 在  $\sim 20\text{GeV}$  的阈能与卫星实验相重叠地精细观测和寻找河外  $\gamma$  射线源. 这套在羊八井的望远镜在  $20\text{GeV} - 1\text{TeV}$  所具有的探测灵敏度将大大超过下一代卫星探测器 GLAST 和美国 Whipple 实验室的 (地面 ACT) VERITAS 计划 (见图 1), 加上有重叠覆盖  $100\text{GeV}$  以上能区的常日制、广视场的地毯式阵列的同时观测, 羊八井将成为世界唯一能在亚甚高能和甚高能区以两种手段同时观测一个源且能提供完全的时变和能谱信息的地面实验.

(3) 在 4300m 高度, 将 AS 阵列探测器的地面覆盖比 ( $\sim$  取样比) 自目前的  $0.3\% - 1\%$  加密到  $90\%$  以上 (成为“地毯”式阵列), 从而将 AS 中的荷电粒子“一网打尽”. 模拟计算显示, 这能使  $\gamma$  天文观测的阈能下降至  $10^{11}\text{eV}$  (对  $\gamma$  暴寻找还能更低) 从而与下一代卫星实验相重叠; 模拟计算<sup>[15]</sup>还表明, 利用  $5000\text{m}^2$  RPC“地毯”, 神经网络法可以在  $2 \times 10^{11}$ —

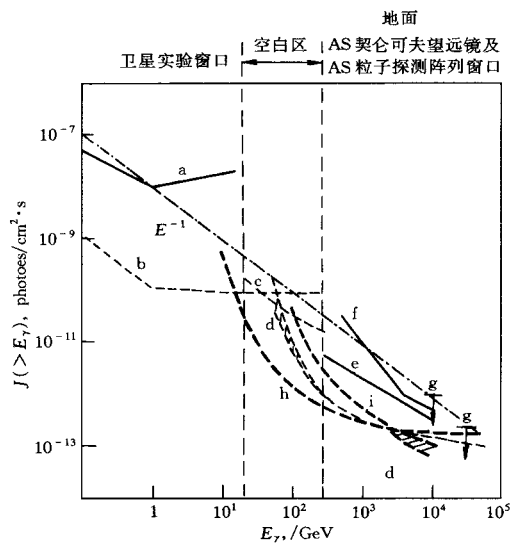


图 1 高能  $\gamma$  天文探测器的灵敏度的比较

实线为已有设备, 虚线为计划中的设备.  $E^{-1}$  标识的直线代表自现有最大卫星探测器的灵敏度按  $E^{-1}$  幂谱向高能侧的外推. a. 现有最大的卫星载  $\gamma$  射线望远镜 EGRET; b. 下一代最大卫星载  $\gamma$  射线望远镜 GLAST; c. 计划中利用太阳能工厂大量镜子的契仑可夫光计划 CELESTE 和 STACEE; d. 美国 Whipple 实验室的 9 个 10m 契仑可夫成像望远镜计划 VERITAS; e. 美国 Whipple 实验室现有 10m 望远镜; f. 美国 Los Alamos 的水池契仑可夫探测器计划 MILAGRO; g. 羊八井阵列目前灵敏度 (上限); h. 羊八井 6 个 10m 契仑可夫成像望远镜计划; i. 羊八井  $5000\text{m}^2$  RPC 地毯计划.

$5 \times 10^{12}\text{eV}$  能区甄别掉 94.6% 的质子引起的 AS; 而在  $10^{13}\text{eV}$  以上则可能更有效地区分  $\gamma$  和核子引起的 AS; 在  $10^{14}\text{eV}$  以上则可能辨别单个 AS 的原初成分并使能量测定达到前所未有的精确度, 从而促成“膝区物理”的突破性进展. 更能将宇宙线太阳阴影作到十分精细的程度并在数天之内取得一张阴影图, 以监测太阳活动的短期变化. 也能有效地观测到

$\sim 10^{12}$ eV 宇宙线荷电粒子被地磁场的偏转,从而可通过对其月亮阴影反向偏离的测定,在地面测定宇宙线中的反质子份额,为是否存在重子对称和宇宙中的反物质世界的推论提供实验判据。

## 5 具体建议

(1) 抢在第 23 周太阳黑子峰年(2000)之前,上中子堆(28 支 NM-64,与日本理化所合作)和太阳中子望远镜(9m<sup>2</sup>,与日本东京大学和名古屋大学合作),并将羊八井二期阵列全面加密以降低阈能至 2TeV 和改善太阳阴影图的精度。

(2) 争取用四年左右的时间,分阶段用(1000m<sup>2</sup>→3000m<sup>2</sup>→5000m<sup>2</sup>)RPC 在羊八井建成国际上第一个全覆盖式 AS 阵列(中意合作),并作出一些领先的物理结果,奠定羊八井成为国际地面宇宙线实验中心的基础。图 1 表示羊八井 5000m<sup>2</sup>地毯与国际上最具竞争力的一些 $\gamma$ 天文探测器(或计划)的灵敏度的比较。

(3) 以中方的策划和更多投入带动全方位的多边国际合作,建设羊八井多成分复合式 AS 阵列(见图 2),以在最佳的地点集中必要品种和规模的设备,以迄今最全面的次粒子品种和最详尽的次粒子时空分布的 AS 信息探索逐事例地分辨超高能宇宙线成分的办法,从而对“膝区物理”这个存在了 40 年的老大难进行突破性的攻关。

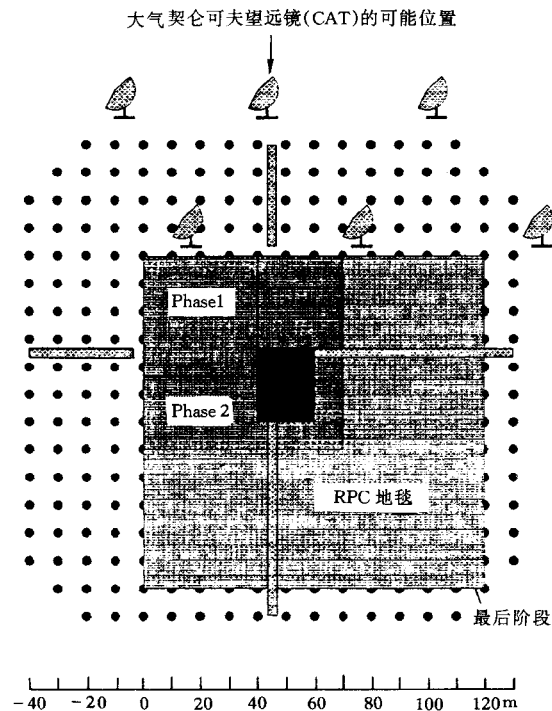


图 2 羊八井多成分复合式 AS 阵列计划

■ 隧道里的 840m<sup>2</sup>  $\mu$ 子探测器(RPC 或水契伦可夫); ● 闪烁探测器的预留位置; ■ 强子量能器的预留位置(地下室); ▨ RPC 地毯,分阶段实施:1400m<sup>2</sup>;5000m<sup>2</sup>;.....

(4) 若经费允许,采用国际成熟的技术建造 6 台 10m 成像 ACT 工作于羊八井,把探测阈能降至 20GeV,争取在占领 30GeV—300GeV 空白能区的国际争夺战中与下一代最大卫星探测器 GLAST 和已启动的国际最强大的 ACT 计划 VERITAS 可相较量和有所优势(见图 1).

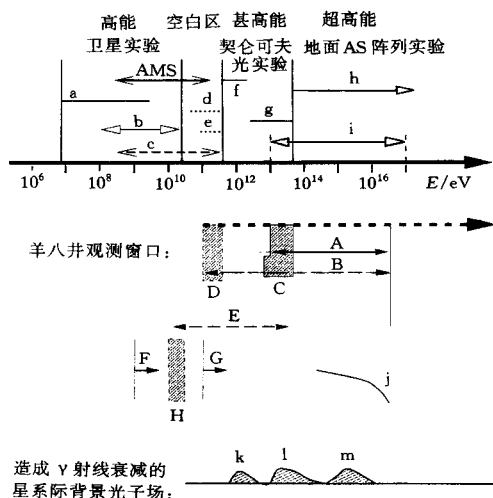


图 3 能区形势及羊八井将开辟的观测窗口

实线表示已有设备,虚线表示将来计划; AMS 阿尔法磁谱仪(如果用于 $\gamma$ 天文): a. Cos B 和 SAS-2 卫星; b. CGRO 卫星上的 EGRET 高能 $\gamma$ 射线望远镜; c. 计划中的下一代卫星大面积 $\gamma$ 射线望远镜 GLAST; d.e. 美国和法国太阳能工厂大量反射镜用作契伦可夫望远镜部件的计划(STACEE 和 CELESE); f. 大气契伦可夫成像望远镜; g. 契伦可夫光镜子阵列; h. 地面 AS 阵列实验; i. 羊八井阵列目前的工作能区; j. “膝区能谱”; k.l.m. 分别为星光、红外和微波背景光子对 $\gamma$ 射线吸收截面最大的能区. A. 地面 AS 阵列实验; B. 计划中的羊八井 RPC 地毯; C. 太阳阴影窗口; D. 用阵列计数率反映太阳活动的窗口; E. 羊八井大型契伦可夫望远镜计划; F. 羊八井中子监测器的太阳观测窗口(中子); G. 用羊八井地毯测量宇宙反质子流的窗口; H. 羊八井中子监测器的太阳观测窗口(质子).

以上计划,及一个羊八井超级复合阵列的实现,将在很大程度上改写现有的能区形势图(见图 3),其所能开拓的能力,足以使我们在二十一世纪的最初十年吸引国内外一大批高水平的学者来这里进行范围广泛的探索性研究,推动学科的发展并创造羊八井实验更光辉的未来.

## 参 考 文 献

- 1 Tan Y H. Proc. 1st International Symposium on Cosmic Ray Physics in Tibet (Lahsa), 1994, p25
- 2 Amenomori M et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**:2468
- 3 Amenomori M et al. A & A, 1996, **311**:919
- 4 Ding Linkai et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1997, **21**:673  
(丁林培等. 高能物理与核物理, 1997, **21**: 673)
- 5 Luo Guangxuan et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1995, **19**:769  
(罗光宣等. 高能物理与核物理, 1995, **19**: 769)
- 6 Amenomori M et al. Astrophys. J., 1996, **461**:408

- 7 Amenomori M et al. *Astrophys. J.*, 1996, **464**:54
- 8 Liu Shaomin et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 1997, **21**:865  
(刘绍敏等. 高能物理与核物理, 1997, **21**:865)
- 9 Cronin J W. *IL NUOVO CIMENTO*, 1996, **19c**:847
- 10 Djannati-Atai A et al. *Proc. 24th ICRC, Rome*, 1995, **2**:315
- 11 Tanimori T et al. *Astrophys. J.*, 1994, **429**:L61
- 12 Fegan D. J. *Phys.* 1997, **G23**:1013
- 13 Williams D A et al. *Proc. 22th ICRC, Dublin*, 1991, **2**:684
- 14 Klages H O. *Proc. 24th ICRC, Rome*, 1995, **1**:946
- 15 Kong Fanmin et al. *The Separation between primary Gamma-ray and hadron in YangBajing RPC Carpet Experiment. Contribution paper on the 5th High Energy Physics Meeting. Chengde: 1998*  
(孔繁敏等. RPC 实验中原初 $\gamma$  和强子的区分. 第五届高能物理会议文集. 承德:1998)

## Status and Prospect of Yangbajing Cosmic Ray Experiment

Tan Youheng

*(The Key Lab. of Cosmic Ray and High Energy Astrophysics, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)*

**Abstract** The geography advantages of Yangbajing, the results and significance of Tibet AS Array-I, the challenges and choices faced by us are summarized. A project aiming at the  $\sim 100\text{GeV}$   $\gamma$ -ray astronomy, the cosmic anti-proton measurement, the monitoring of solar activity and the breakthrough of the "Knee physics" barrier by means of RPC carpet, large air cherenkov telescopes and complex AS Array, was proposed.

**Key words** cosmic ray, air shower (AS), air cherenkov telescope (ACT); Gamma-ray burst (GRB), resistive plane chamber (RPC).