

我国 4300 m 高度上的高能宇宙线研究

谭 有 恒

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘 要

随着 γ 射线天文学的兴起, 10 年前在西藏高原海拔 4300 m 的羊八井谷地, 出现并成长着一个国际知名的宇宙线实验站。其中日合作的 AS γ 阵列在国际同类实验中, 首先观测到了蟹状星云的 Multi-TeV 稳定 γ 射线发射及活动星系核 Mrk 501 在 1997 年、Mrk 421 在 2000 年的 Multi-TeV γ 射线强爆发, 独家测出了反映太阳和行星际磁场状态的宇宙线太阳阴影的偏移并将之用于太阳活动变化的监测, 利用高海拔优势及乳胶室和 Burst 探测器与阵列的联合实验进行了超高能宇宙线能谱和成分的研究。以高阳板探测器 (RPC) 地毯式阵列迈入 ≈ 100 GeV 空白能区的中意合作 ARGO (Astroparticle physics Research at Ground-based Observatory) 计划, 已进入大规模安装调试阶段。欲牢固占领 Multi-GeV-TeV 能区和满足对高可变、大峰流、短时标河外 γ 源的观测所需的高海拔巨型大气契仑可夫光成像望远镜计划 5@YorG, 也正在酝酿之中。

关键词 天体物理学 — 宇宙线 — 综述 — γ 源 — 广延大气簇射 — 广延大气簇射探测阵列 — 大气契仑可夫光成像望远镜

分类号 P172.4

1 引 言

高能宇宙线是宇宙中高能天体活动的产物, 是来自宇宙远方的物质样品。人们相信它的起源与超新星爆发和大质量黑洞有关, 然而至今尚缺乏直接的实验证据。作为其次级粒子、稳定而电中性的高能光子 (γ 射线), 由于不受星系际、星际和行星际磁场偏转的影响, 是引领人们寻找宇宙线源头的好工具, 这促进了 γ 射线天文学的兴起。空间实验由于设备的尺寸、重量受到运载能力的严格限制, 迄今难以有效进入 10 GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) 以上能区。在地面, 对宇宙线和 γ 射线的观测只能通过它们在大气层中引发的广延大气簇射 (EAS) 来实现。由于 EAS 在大气中有其发生、发展和衰亡过程, 因而依赖于观测站的海拔高度, 只可能对某个能量以上的 EAS 进行观测。一般, 在近海平面的阵列很难观测到能量低于 100 TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12}$

eV) 的 EAS, 从而在空间和地面实验之间留下了一段空白。要降低 EAS 的探测阈能去填补此空白, 只有两个办法: 上高山以避免小 EAS 被大气完全吸收; 增加阵列探测器密度以提高 EAS 粒子的取样比。羊八井实验站是两者兼备, 以充分调动高海拔的物理优势去开拓此前 EAS 实验无法做或做不好的粒子天体物理学课题。

高海拔地面蕴藏的物理优势的发挥受到当地地形、气候、交通、能源、后勤支撑等自然条件、社会条件, 以及探测设备技术和规模的制约。与北半球其它近 3000 m 的高山站的坡陡地窄、气候恶劣、半年大雪封山、无有电源、远离公路、孤立山头等状况不同, 位于拉萨西北 90 km 的羊八井平坦开阔、冬无严寒、难有积雪、与地热电厂及数千同胞为邻、有青藏公路 (和在建的青藏铁路) 及兰青拉光缆相连, 实为目前所知的国际最佳永久性的宇宙线实验高山站站址。

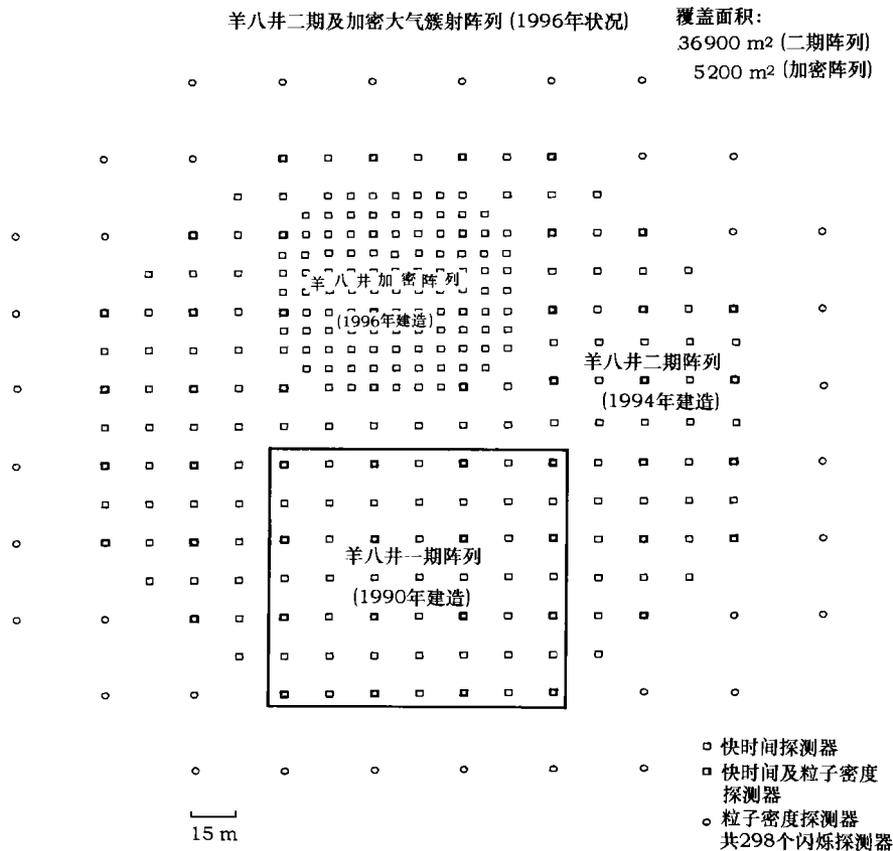


图 1 羊八井 AS γ -II 阵列

对其中的原 AS γ -I 和 HD 阵列部分作了标记。

以地面 γ 天文、超高能宇宙线膝区物理和用宇宙线监测太阳活动及其引起的地球环境变化为目标的“西藏计划”, 自 1984 年选点羊八井, 1986 年正式提议国际合作, 期间因经费筹措的耽延, 迟至 1990 年才与日本东京大学合作, 在羊八井约 8000 m² 地面上建成一个由 45 个野外探测器组成的小型 EAS 阵列——AS γ -I (见图 1), 首次把 EAS 的探测阈能自 100 TeV

降至 10 TeV。随后不久即测出了蟹状星云在 10 TeV 的 γ 流上限^[1]，填补了此能区的数据空白，为解释蟹状星云 γ 产生的 SSC (Synchrotron Self-Compton) 模型的确立提供了证据；还国际首次观测到了宇宙线太阳阴影相对于太阳几何位置的偏移，并显示了其与太阳行星际磁场变化乃至其扇区结构的关联^[2,3]，突显了高海拔实验的独特优势。从此 AS γ 阵列几乎两年一发展：1994 年扩建成 AS γ -II 阵列 (见图 1)，0.5 m² 闪烁探测器增至 221 个，覆盖面积 36900 m²；1996 年又在其中约 5000 m² 地面上增加了 77 个探测器，使探测器间距自原先的 30、15 m 缩小至 7.5 m (称 HD 阵列，见图 1)，进一步将探测阈能下降至 3 TeV，为后来对蟹状星云 ≥ 3 TeV γ 发射的正探测 (EAS 实验首次)^[4] 创造了条件；1999 年，又增加 255 个探测器使阵列全面加密，建成 AS γ -III 阵列 (见图 2)；2000 年和 2002 年又分别增加 133 个密度探头和 180 个快时间探测器，将 AS γ -III 加密区进行了扩张和完善，从而使得整个阵列拥有 733 个探测器，覆盖面积达 36900 m²，其中间距 7.5 m 的加密区面积达 32500 m²。此外，1996 年至 1998 年间还在阵列中心建立了 80 m² 高山乳胶室及配套的 80 m² Burst 探测器，与 AS γ -II 联合运行，研究超高能宇宙线原初成分；1998 年又分别自日本理化所和名古屋大学引进了一

组太阳中子监测器及太阳中子望远镜，以期在太阳活动极大期捕捉稀少的中子事件，研究耀斑爆发中的太阳高能粒子的加速产生机制。

在 AS γ 实验取得重要结果的同时，我们也注意到 CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory) 卫星载高能 γ 射线实验望远镜 (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope, EGRET)^[5] 1992 年上天后的大丰收 (发现了 270 个高能 γ 源) 和其中已识别源的绝大多数都为河外源的事实^[6]，进一步认识到在坚持全天候、宽视场观测模式的前提下，“降低阈能、提高灵敏和分辨 γ ” 是羊八井 γ 射线天文学实验的发展方向。于是在 1993 年提出了发展 EAS 粒子多点取样阵列为地毯式、全覆盖阵列的概念^[7]，并于 1998 年完成了 50 m² RPC (高阻平板探测器) 地毯式可行性试验^[8,9]，2000 年正式启动了中

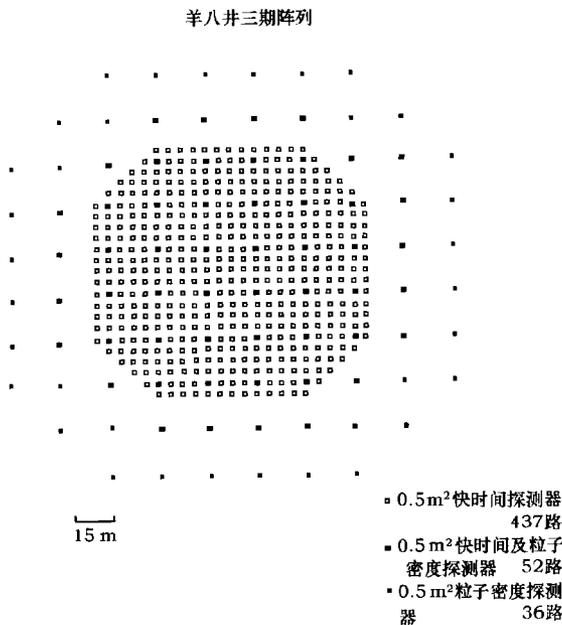


图 2 羊八井 AS γ -III 阵列 (1999 年 11 月 ~2001 年 9 月运行)

意合作羊八井 ARGO (Astroparticle physics Research at Ground-based Observatory) 计划的建设。现在，羊八井 AS γ 实验已持续运行了 12 年，陆续有重要成果产出；ARGO 建设正在稳步推进；更宏伟的未来计划也在酝酿之中。

2 AS γ 实验的主要成果

2.1 对蟹状星云的观测

1990 年, 中日合作的 AS γ -I 阵列在海拔 4300 m 的西藏羊八井建成。利用它自 1990 年 6 月到 1992 年元月的观测数据, 我们搜索了蟹状星云、Cygnus X-3 和 Hercules X-1 等河内高能天体 ≥ 10 TeV 的 γ 射线, 结果没能测到它们的直流超出, 只给出了它们在 > 10 TeV 和 > 30 TeV 的流强上限值^[1]。此上限值 ($1.2 \times 10^{-12}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 和 $1.8 \times 10^{-13}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) 正处在区分 γ 射线产生的强子模型和电子模型的灵敏能区, 又是当时在此能区唯一的实验数据, 故成了其后相当一段时间内引用率最高的数据之一。

1996 年秋, 新建成的 HD 阵列 (见图 1) 把探测阈能自 10 TeV 降到了 3 TeV, 一下子打破了地面阵列看不到 γ 源的僵局。利用其在 502.1 d 有效时间内收集到的 1.72×10^9 个有效 EAS 事例, 分别以 5.5 、 3.9 、 3.3 、 3.1σ 超出的统计显著性观测到了来自蟹状星云 ≈ 3 、 5 、 9 、 13 TeV 的 γ 射线, 并测出了相应的一段能谱^[4]: $dJ(E)dE = (4.61 \pm 0.90) \times 10^{-12} (E/3 \text{ TeV})^{-2.62 \pm 0.17} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{TeV}^{-1}$ 。此后又对 21 个较近的 (< 5 kpc) 超新星遗迹 (SNR) 作了搜索, 其中除了蟹状星云在 3 TeV 和 10 TeV 各有 5.47σ 和 2.88σ 超出外, 余者均无信号^[10]。

2.2 壳型 SNR GC40.5-0.5 可能的 multi-TeV γ 发射

人们一直相信, 超新星爆发和超新星遗迹 (即中子星和星云) 是甚高能和超高能银河宇宙线的故乡, 但迄今找到的高能和甚高能 γ 源的 γ 射线都能以被加速的高能电子在磁场中的同步辐射, 或者与源区的背景光子或自同步光子的逆康普顿散射所产生来解释, 所以至今还没有找到一个真正意义上的强子产生的 γ 源即宇宙线源。为寻找河内宇宙线源, 人们自然把目光投向壳型 SNR, 因为它的高速向外膨胀产生的强大冲击波可能把宇宙线离子加速到 $\approx 300 \text{ TeV}/n$ 或更高的能量。然而壳型 SNR 是扩展源, 用指向精确的大气契伦可夫成像望远镜 (IACT) 来观测它不太方便。最近日澳合作的 CANGAROO (Collaboration between Australia and Nippon for a Gamma Ray Observatory in the Outback) 组报导, 他们的 10 m IACT 以 14.3σ 超出观测到了南天壳型超新星遗迹 SNR RX J1713.7-3946 的 γ 发射, 其能谱谱形与 π^0 衰变模型所预期的结果相吻合, 因而称之为宇宙线质子源^[11]; 然而其绝对值却与此结论相悖。

银面附近有一个壳型超新星遗迹 GC40.5-0.5。这是一个发现于 1966 年的射电源, 1980 年被证实为壳型 SNR, 它距我们 $5.5 \sim 8.5$ kpc, 可能位于人马臂的内边缘附近。后来 EGRET 找到的 GeV γ 不明源 GeV J1907+0557 (在其第三版目录中称为 3EG J1903+0550) 位置与其相近。我们在 HD 子阵 (1996 年 11 月 \sim 1999 年 6 月) 的第 2、3、4 期数据中都在此壳型 SNR 近处看到了 $3 \sim 10$ TeV γ 信号的迹象 (最高点有 $2 \sim 4\sigma$ 超出), 但统计不足, 每期最高超出点的位置不重合, 各期数据叠在一起并不增加最高超出值。不过值得注意的是, 它们总是在约 2° 的范围内有着正超出, 显示出扩展源的特征。

利用 AS γ -III 在 2000 年 10 月至 2001 年 10 月的观测数据, 我们进一步搜索了不明源 3EG J1903+0550 近旁天区。用半径 1.4° 的搜索窗, 在 $l = 39.76^\circ$, $b = -1.12^\circ$ 处呈现高超出; 对阵列响应的方位角分布不均匀性作了修正之后, ≈ 3 TeV 的 AS 在此方向上的超出也达 4.5σ 。轮廓图显示, 以此为中心约 2° 范围内均呈现 $\geq 2\sigma$ 的事例超出。当然, 上述结果是初步的, 我们正等待更多的观测数据予以证实。同时此 SNR 所在地周围是否存在足以发生可观的核作

用的靶物质，也需射电实验提供数据。

2.3 活动星系核 Mrk 501 在 1997 年和 Mrk 421 在 2000 年的 TeV γ 射线强爆发

活动星系核 (AGN) Mrk 501 是一个 Blazer 型天体，1995 年被 Whipple 实验室 10 m IACT 发现为 TeV γ 射线源。观测流强呈多种时间尺度的变化，是这类天体的普遍特征。它们往往被认为与大质量黑洞的高相对论性粒子的喷流发射相关。1997 年 Mrk 501 突然进入了一个持续近 6 个月的极活跃的高态期，在其间 (4 月、5 月) 的几次爆发式活动中，IACT 测到了比其平时高 10 倍的 γ 流。利用此期间羊八井 HD 和 AS γ -II 阵列的观测数据，我们在 3 TeV 得到了 3.7σ 水平的信号和一段 γ 谱^[12]。它与 Whipple、HEGRA (High Energy Gamma Ray Astronomy) 和 TAP (Telescope Array Project) 等 IACT 实验结果在误差范围内吻合得很好。

1999 年秋，我们将 AS γ -II 阵列的加密区从 $\approx 5200 \text{ m}^2$ 扩至 22000 m^2 ，使其成为 AS γ -III 阵列。AS γ -III 阵列的工作可靠性经过了月亮阴影的检验 (316 d, -23σ)，主要性能为：探

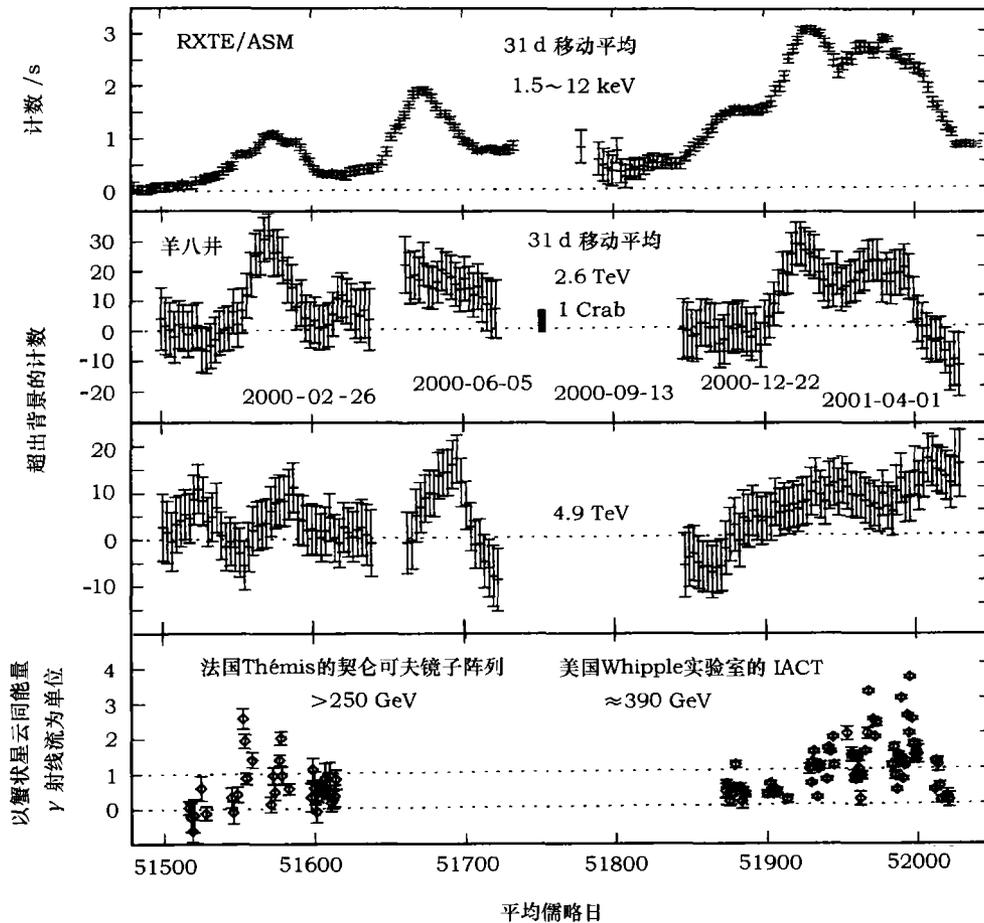


图 3 羊八井 AS γ -III 阵列在 2000 年和 2001 年春观测到的来自 Mrk 421 的 Multi-TeV γ 流的 3 次强增涨 (中间两列) 的卫星 X 射线 (上列) 和地面 IACT (下列) 观测之比较^[13]

测阈能 3 TeV, 角分辨 $0.87^\circ \pm 0.02^\circ$, 指向精度 0.1° , 事例率日变化的长期稳定性 $< \pm 5\%$, 触发率 680 Hz。它于同年 11 月投入观测, 不久就遇到 Mrk 421 爆发式活动的出现。Mrk 421 也是一个 Blazer 型天体, EGRET 于 1991 年确定其为高能 γ 源, 并以高度可变著名。2000 年, 又迎来了 Mrk 421 X 射线和 TeV γ 射线的增涨活跃期。基于 AS γ -III 在 2000 年 1 月至 2001 年 4 月期间观测记录的 EAS 事例, 根据阵列角分辨的能量依赖和信噪比最佳化原则, 选取向源及背源窗口的不同角半径 (分别为 1.4° 、 1° 、 0.5° 、 0.4°), 我们得到了 Mrk 421 方向 EAS 事例日超出的 31 d (也作过 7 d) 移动平均随时间的变化曲线 (如图 3 所示)^[13]。从图中可以看到, 羊八井 ≈ 2.6 TeV 和 4.9 TeV 的数据在 RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) 卫星 ASM (All Sky Monitor) 观测到的每个 X 射线活动期都呈现出明显的峰, 它们间的增涨有很好的 consistency。将这 3 个活动期 (2000 年元月 8 日 \sim 2 月 25 日; 2000 年 4 月 26 日 \sim 6 月 10 日; 2000 年 12 月 22 日 \sim 2001 年 4 月 13 日) 的相关事例挑出来, 一起作一个三维的超出事例的角距分布图 (图 4), 可以看出其峰正好在 Mrk 421 的中心位置上, 显著性达 6.9σ ^[13]。用这 3 个活动期联合数据推导出的 Mrk 421 在爆发期 2.6 \sim 40 TeV 间的一段 γ 微分谱, 是一谱指数为 $-3.65 + 0.50 / -0.55$ 的幂谱, 较 HEGRA IACT 的结果 (-2.94 ± 0.06) 更软, 但在误差范围内并无显著差别。

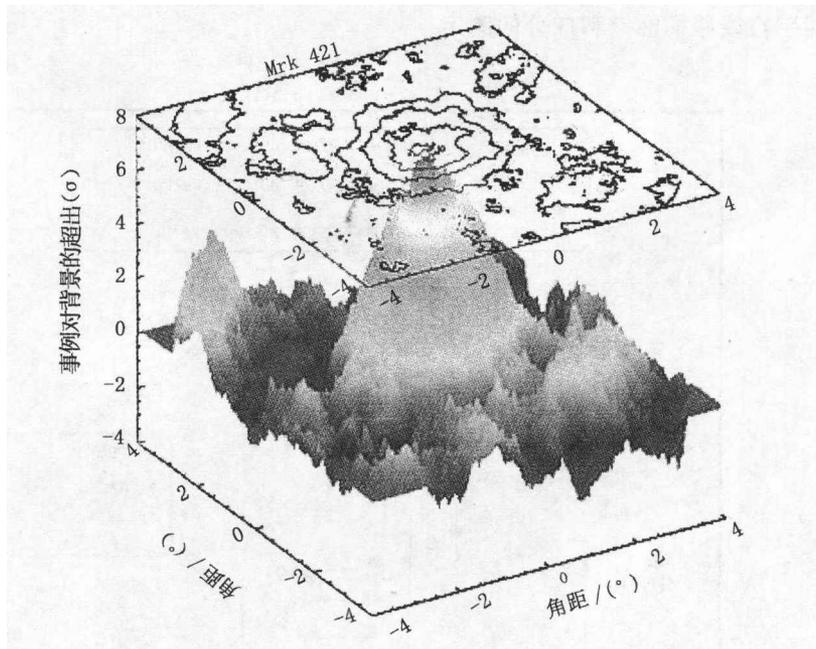


图 4 AS γ -III 阵列在 Mrk 421 的 3 个激烈活动期间观测到的来自此方向的 EAS 超出事例的二维与三维轮廓图^[13]

2.4 TeV 级宇宙 γ 暴的搜寻

在不同期间, 基于 AS γ -I、AS γ -II 及 HD 乃至 AS γ -III 的观测数据, 也曾把全天扫描和寻找空间实验观测到的 keV γ 暴 (GRB) 的高能对应体的方法, 广泛应用于 Multi-TeV γ 暴的搜寻中^[14~16]。但结果均没能获得有统计重要性的信号, 蒙特卡罗模拟估计此能区的 GRB 流

上限在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 光子 / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 左右。

要获取 TeV 级 γ 暴存在的确切证据 (它将对现在流行的 γ 暴产生模型和深宇宙起源提出挑战), 还需继续扩大阵列规模或提高 γ 探测的信噪比和灵敏度。

2.5 对来自银面的弥散 TeV γ 射线的观测

人们相信, 来自银道面的高能弥散 γ 射线起源于被加速的宇宙线强子, 或电子分别与星际介质 (ISM) 的核作用 (因而产生 π^0) 及与星际光子场 (ISPE) 的逆康普顿散射 (IC), 因而对其观测是示踪银河系内的宇宙线加速区域、了解 ISM 和 ISPE 空间分布的重要途径。EGRET 对此在 ≈ 1 GeV 处进行过测量 [17], 在 0.5~1 TeV 附近有几个 IACT 实验 [18,19], 在 100~1000 TeV 附近有大型复合 EAS 阵列 CASA-MIA 的贫 μ EAS 事例给出的上限值 [20], 在 Multi-TeV 能区尚缺乏数据。

利用 AS γ -III 和 AS γ -II 所获得的轴心落在阵列加密区的 6.59×10^9 个能量 ≥ 3 TeV 和 4.14×10^9 个能量 ≥ 10 TeV 的 EAS 事例, 对来自银面 ($|b| < 2^\circ$ 或 5°) 的 IG 区 ($20^\circ \leq l \leq 55^\circ$) 和 OG 区 ($140^\circ \leq l \leq 225^\circ$) 的弥散 γ 射线进行分析, 没有发现具有统计重要性的来自银道面的超出, 在 99% 置信水平上分别给出了 3 TeV 和 10 TeV 处内银道面和外银道面的 γ 流强上限值 [21]。

2.6 超高能宇宙线原初能谱和成分的测定

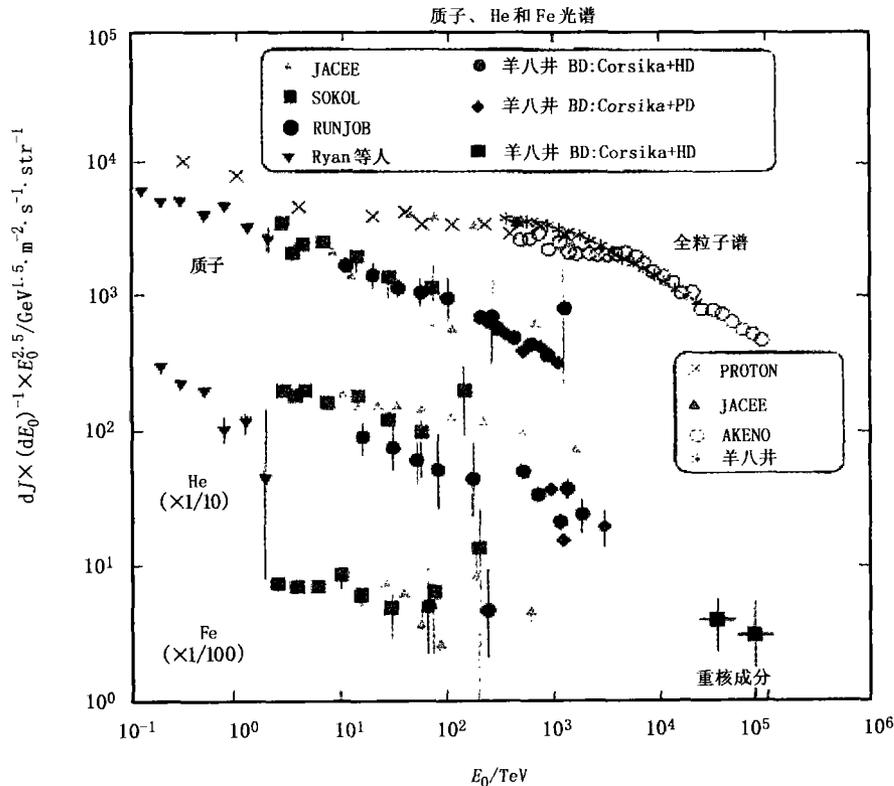


图 5 羊八井超高能宇宙线全粒子谱和成分谱与大型气球实验结果之比较 [23,24]

幂律型的原初宇宙线能谱在 $10^{15} \sim 10^{16}$ eV 处出现膝样拐折已成为普遍公认的事实, 这也是被高度关注的富含物理意义的地方。然而迄今各 EAS 实验的观测谱还很不一致, 难以给出准确的膝结构, 而且给出的也只是全粒子能谱, 很少有分成分的能谱问世。

羊八井海拔 4300 m, $\approx 10^{16}$ eV 宇宙线引起的 EAS 正好在这里发展到极大, 其粒子数多, 本征涨落小, 簇射大小对宇宙线原初成分的依赖弱, 有利于精确测量。因而当 1996 年羊八井膝区宇宙线全粒子谱 (见图 5 右上) 发表后 [22], 立即得到许多学者的认同。与原先引用率最高的日本明野 (Akeno) 谱的尖锐拐折不同, 这是一个逐渐变陡的膝结构, 更符合 SNR 激波加速的预期。当然最终的结论还有待更长期、更精细的观测。

1996 年 10 月, 中日合作在羊八井二期阵列中加入了 80 m^2 高山乳胶室和 80 m^2 Burst 探测器, 与 EAS 阵列进行联合实验, 以在伴随有 (乳胶室中的) 大 γ 族和 (Burst 探测器中的) 大 Burst 产生的 EAS 中对原初粒子的成分进行区分。基于 3 年的联合实验和蒙特卡罗模拟结果, 用人工神经网络 (ANN) 法按 Burst 分布的样式, 挑选出 820 个初能 $> 2 \times 10^{14}$ eV 的宇宙线质子引发的 EAS 事例, 得到了一段在 $2 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{15}$ eV 间的宇宙线原初质子微分谱 (见图 5 中的上起第二排实心点数据), 它可以用指数为 -2.97 ± 0.06 的幂谱来拟合 [23]。同时也得到一段宇宙线 He 核和 Fe 核谱 [23], 在图 5 中, 它们与此前唯一可在该能区测定宇宙线成分的大型气球实验的结果进行了比较。此外, 利用 ANN 法挑选出 11 例重核事例, 由此得到的宇宙线原初重成分在 $10^{16} \sim 10^{17}$ eV 能区的绝对流强值 [24] (见图 5 的右下部) 与膝上能区宇宙线重核增富的主张相一致 [24]。

3 ARGO 计划的实施

建造羊八井大型地毯式阵列的想法是在 10 年前 EGRET 大获丰收, 地面 γ 射线观测阵列长期观测不到 γ 源, 人们纷纷转向 IACT 实验的形势下提出的。它的创意是将传统 EAS 粒子多点取样阵列地毯化, 以充分发挥羊八井高海拔优势, 既保持其宽视场、全日制优点, 又把探测阈能下扩至 0.1 TeV 空白能区并大大提高灵敏度, 从而与下一代空间实验相衔接、与 IACT 实验相重叠地展开 γ 射线天文学研究 [25]。同时它还能弥补 IACT 指向跟踪和只能在晴朗无月夜晚观测的局限, 有利于对多个已知源的长期、连续监测和对未知源或非稳定源及爆发现象的发现和全程监测, 并通过所记录的每个 EAS 事例在观测面的空间、时间分布样式去获得从大量质子背景簇射中区分 γ 簇射的能力。此外, 它还肩负 IACT 难以涉足的超高能宇宙线和膝区物理研究的重任。与 AS γ 阵列 (3 TeV、 $Z \cong 0.03$ 、 ≈ 1 蟹状星云 γ 流) 相比, 它有阈能更低 (0.1 TeV)、看得更远 ($Z \cong 1.0$)、更加灵敏 (≈ 0.1 蟹状星云 γ 流) 和有一定的 γ/p 分辨能力等优点。在大气契仑可夫光成像望远镜新发展和下一代空间 γ 探测器 GLAST (Gamma ray Large Area Space Telescope) [26,27] 将于 2006 年升空等形势下, ARGO 有着巨大的紧迫感和独特的价值。

3.1 ARGO 设施的构成

图 6 为 ARGO (一期) RPC (高阻平板探测器) 阵列图, 其中每个小方块为一 RPC Cluster, 它由 12 个 RPC 探测器组成, 每个 RPC 的外部面积为 $2.85 \text{ m} \times 1.258 \text{ m}$, 内部有效面积 (厚 2 mm 的 Gas Volume 面积) 为 $2.786 \text{ m} \times 1.236 \text{ m}$ 。其上部和下部分别有同面积的金属膜感应读出

板, 一是用于对 γ 射线 (小 EAS) 的观测。它分为 10 个读出块 (PAD), 每个 PAD 又分 8 个读出条, 分别读取粒子到达时间和粒子数目; 二是为将来超高能宇宙线、膝区物理 (大 EAS) 的研究服务。它只分为两个 PAD, 供模拟信号输出以测定高达 $10^4 / \text{m}^2$ 的高粒子密度, 是为 ARGO 二期实验预留的输出口。ARGO 庞大的硬件构成 (见表 1) 和将产生的空前数据量 (见表 2) 将创造野外实验新记录。

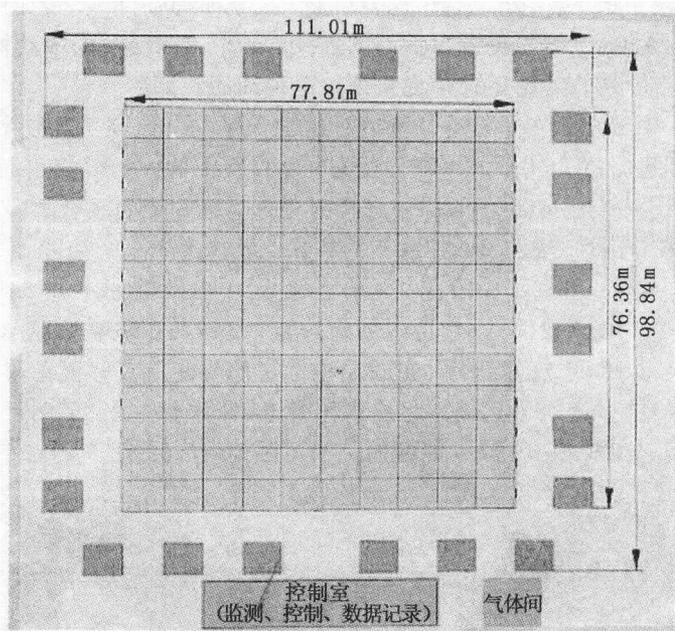


图 6 羊八井 ARGO 阵列的 RPC cluster 布置图

其内层 130 个 cluster 组成“地毯”, 外围 24 个 cluster 构成“保护圈”, 空白处是为 ARGO 二期将增加的 84 个 RPC cluster 精确预留的空位。

表 1 ARGO 探测器和电子学的主要部件数目

探测器		电子学		在线记录监测系统	
Cluster	154	FEE	18480	工作站	2
RPC	1848	地方站	154	PC	4
小 PAD	18480	Receiver	1848	终端	6
大 PAD	3696	DCS ¹⁾	1	磁带机 ²⁾	3
Strip	147840	TDC	616	局域网	1
Pb 板	6500 m ²	CCC	154		
地毯	5500 m ²	AMB	40		
外围	1000 m ²	中心站	1 (7 VME)		

1) 一个由众多温度、电流、气体流量、高压等传感器组成的探测器监测控制系统。

2) 采用 DLT 32 GB 磁带机或新式 Ultrium 100 GB 磁带机尚在商讨之中。

表 2 预期的事例率和原始数据产生率

触发条件 (同时有 M 个 PAD 被击中)	AS 事例率 /kHz	数据产生率 /MB·s ⁻¹	日数据产额 /GB
低多重数 ($M < 30$)	17.2	3.5	300
中多重数 ($25 < M < 70$)	7.9	2.7	233
高多重数 ($M > 60$)	1.3	1.1	95
总计	26.4	7.3	630 ¹⁾

1) 年产额 2×10^{14} Bytes, 相当于将在 3 年后建成的世界最大加速器 LHC (Large Hartron Collider) 年产额 7×10^{15} Bytes 的 1/35.

所有 ARGONIE 探测器及电子学设备将被安装在羊八井新近落成的万 m² 实验大厅内。为保证 RPC 这种气体探测器在日夜大温差的高山条件下稳定工作, 也为保证分布在不同地点的 RPC 工作环境的一致性, 我们特地修建了一个轻质、抗风、高保温的万 m² 实验大厅。大厅由轻钢骨架和加厚的聚氨脂彩钢夹心板构成。屋顶有约 600 m² 采光带以充分利用高原的太阳光辐射能。因此, 即使在寒冷的冬天, 室内自然温度 (除边角处) 也可维持在 1°C 以上, 日夜温差和水平位置非均匀度在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 之内。

目前, 已有 33 个 Cluster (396 个 RPC, 近 1400 m²) 安装到位。争取于 2004 年完成全部 5000 m² “地毯”, 2005 年完成外围 “保护圈”, 实现羊八井 ARGONIE 的全规模观测运行。

3.2 ARGONIE 的研究目标

根据 ARGONIE 阵列的特点, 及其在能量高于 10 TeV (在羊八井, 每个 EAS 平均有数千个带电粒子) 时可利用 EAS 粒子时空分布图像去逐事例地区分 γ 光子、质子和原初重核成分等能力, 下列项目将是羊八井 ARGONIE 的研究目标:

(1) ≥ 100 GeV γ 点源的寻找和监测。可同时对数百个河内外高能天体进行长期监测, 或全天搜寻不明源和暂态源, 测定其 γ 流时变和各个时期的能谱, 研究其粒子加速和 γ 射线的产生机制。特别关注河内壳型 SNRs, 寻找 γ 射线的强子起源即宇宙线源的证据。

(2) 对来自银面、分子云或 SNRs 的 ≥ 100 GeV 的弥散 γ 射线进行观测。获取它们在 100 GeV~TeV 能区的 γ 流数据。监视银心或较近的 AGN 方向的 γ 能谱, 寻找冷暗物质候选者超对称粒子 Neutralino 湮灭线信号。

(3) 把对宇宙 γ 暴的观测扩充到整个 10 GeV~TeV 能区。

(4) 在空间实验没法达到且又最少污染 (指原初小黑洞蒸发和暗物质等造成的复杂的背景) 和模型灵敏的 300 GeV—Multi-TeV 能区, 利用月球和地磁场组成的巨型空间 “磁谱仪”, 以宇宙线月亮阴影法测定宇宙线中的反质子丰度, 获取这些反质子是宇宙起源或地方性起源即微观世界是否严格地重子对称, 宇宙远方是否存在反物质星系的判据。

(5) 以高统计量测定 10~100 TeV (传统的大型气球宇宙线实验能区) 的原初宇宙线质子能谱和重核谱, 为 ARGONIE 二期实验主攻膝区物理开路。

(6) 将在 ≥ 14 GeV (6500 m² RPC 作为一个大的全向计数器使用) 和 Multi-TeV (用宇宙线太阳阴影) 等多个窗口对宇宙线变化的监测, 作为基本的日地环境参数, 长期持续地监测宇宙线及其反映的太阳活动和行星际大尺度磁场的变化, 并研究地球环境与太阳活动变化间的

关联。也特别留意对可能伴随太阳耀斑和日冕物质抛射 (CME) 出现的太阳高能粒子事件的捕捉, 研究那里的高能粒子加速过程。

4 向地面观测极限挑战

4.1 超高能宇宙线观测, 向 EAS 实验的精细极限挑战

研究超高能 (UHE) 宇宙线和膝区物理, 是最初发动羊八井实验的主要动机之一。原初宇宙线能谱在 $10^{15} \sim 10^{16}$ eV 处的膝样转折, 是 1958 年就为人知的事实, 可它的成因 (河内加速能力之终止? 约束机制之失效? 近处 SNs 的贡献? UHE 作用新过程的阈效应? 或干脆是由于

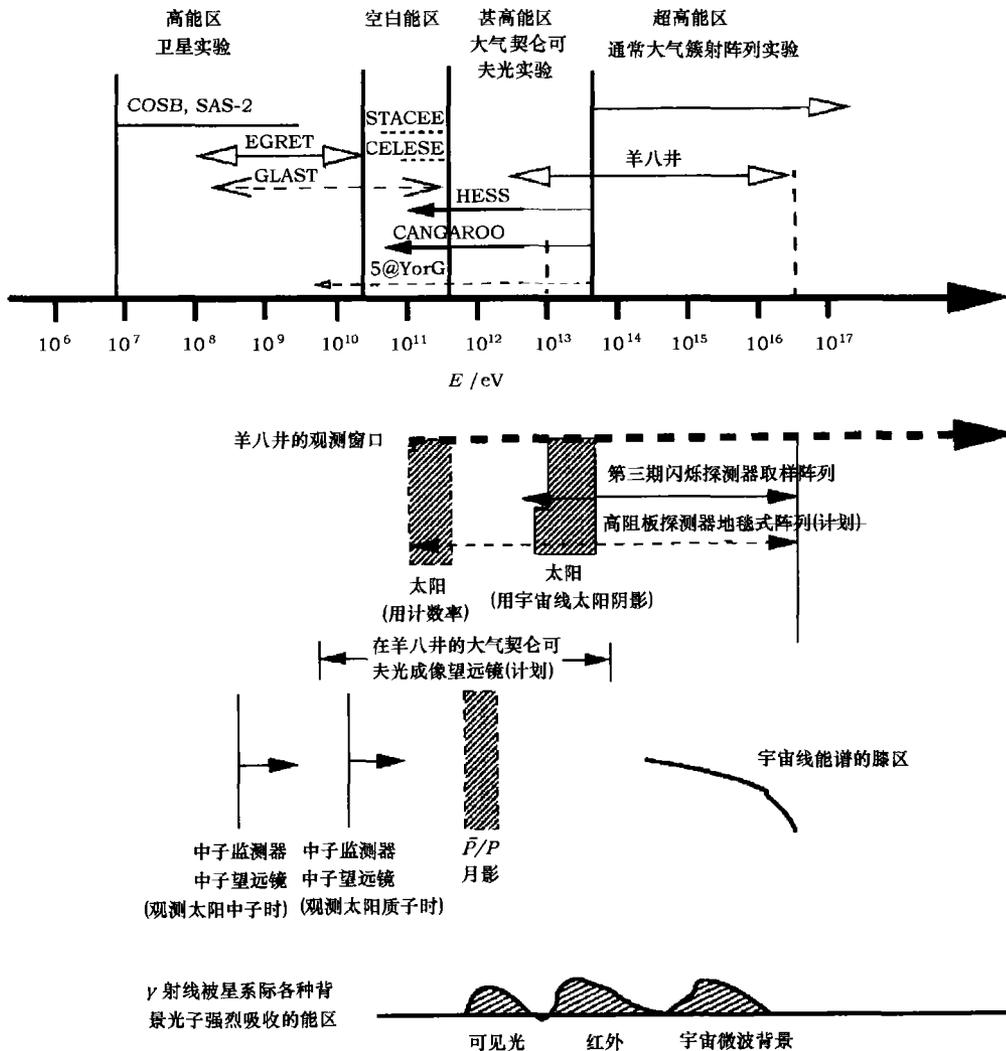


图 7 能区形势图 [25]

中部为羊八井的观测窗口。

EAS 阵列能量测定上的偏差?) 至今不甚了了。究其原因, 主要还在于实验能力和水准的不足, 具体表现为: (1) 各家的结果很不统一, 缺少一个权威的、公认的膝区能谱; (2) 迄今此能区只有全粒子谱, 没有完整可靠的分成分的能谱问世; (3) 迄今的主要结果都是在海平面或低海拔处得到的。在这里, 簇射大小存在大的涨落, 其与原初能量的关系也明显依赖于对宇宙线原初成分的假定, 因而 EAS 的能量测定误差较大。

羊八井占尽地利, $10^{15}\sim 10^{16}$ eV 的质子引起的 EAS 平均正好在此高度发展到极大(总荷电粒子数高达 10^6), 其粒子数最大、涨落最小、对 UHE 作用模型和原初成分的依赖最弱, 因而是研究膝区物理的最佳地点。而它的地毯式阵列又是迄今最精细的阵列, 只要加上大动态的读出系统就能为逐事例地(而不是统计平均地)分辨原初粒子的元素成分提供可能。为了实现这种可能, 我们还计划将羊八井 ARGO 的“地毯”部分扩充到 10000 m^2 , 并以此为中心建造一个包含有大面积 μ 子探测器的羊八井超级复合阵列^[28]。这些努力都是为膝区物理老大难问题的最终突破, 并使羊八井在整个学科能区形势图中的位置突显出来(如图 7 所示)。

4.2 γ 射线地面观测, 向低阈能、短时标挑战

在 EGRET 留下了 171 个未识别高能 γ 源, 在以下一代空间 γ 射线实验 GLAST(预计能发现 3000 个 γ 源)为代表的 γ 射线天文学新时代即将到来的今天, 地面 γ 射线天文实验应当抓住什么关键和发挥什么优势呢? 除了要以地面实验的大规模和可长期坚持的优势进入和主导当前尚为空间与地面实验间的空白、GLAST 即将进入但灵敏度有限的 Multi-10~Mult-100 GeV 能区之外, 挑战短时标的重担也应由下一代地面实验挑起来。

如上所述, 在已识别的 EGRET γ 源中, 大多数的宿主都是 Blazar 型天体, 其 γ 辐射以高可变、大峰流、短时标为突出特征。为了弄清这种联系于高相对论性粒子喷流的天体现象和 γ 射线产生机理, 呼吁更低阈能、更高灵敏、可捕捉更短时变的 γ 射线观测设备诞生。

一般说, EGRET Blazar 源的 γ 辐射存在以 d 为单位的时变; 实际上, Mrk 421 时变的最小小时标在 15 min~1 h 之间, HEGRA IACT 立体观测还显示 Mrk 421 的 TeV γ 发射不仅有时出现时标 ≈ 20 min 的快变化, 而且呈现能谱随 γ 流上升而变硬的趋势^[29]。Mrk 501 的 TeV γ 谱在强 outburst 之后走向宁静时的变软, 也早有报导。为了拥有对短时标 γ 射线变源的时间和能谱变化作仔细研究的观测能力, 要求探测设备具有空前的灵敏度, 这样才能在如此短的时间内积累足够多的事例数。对此, 空间探测器(在 <GeV 能区)和 EAS 地毯式阵列(在 >100 GeV 能区)都有无法克服的困难, 须寄期望于下一代的 IACT。20 世纪 80 年代, IACT 成像技术得到发展并走向成熟, 可有效区分原初 γ 光子与质子, 有效压制宇宙线背景, 使探测 γ 射线的灵敏度得以百倍地提高, 进而发现了近 10 个 TeV γ 源。为了研究 EGRET 未识别源, 第三代大气契伦可夫望远镜实验即 IACT 阵列实验计划得到了发展(见表 3)。然而它们还难以把阈能降至 GeV 能区, 也难以胜任短时标的测量工作。IACT 要达到上述能力, 最现实的途径是, 在充分利用高海拔降低阈能的条件下增大望远镜口径并实施多台成阵的立体观测(这也是在 <20 GeV 时从纷繁的背景中识别 γ 光子引发的 EAS 的必要手段)。于是有了 5@5^[30] 建议及在西藏羊八井或云南高美古建造直径 25~30 m、阈能 ≈ 5 GeV 的 IACT (4~5 台)阵列的中德合作计划的酝酿(下面暂以“5@YorG”称之)。

表 3 建设中的第三代 IACT 计划

名称	所在地	纬度	高度	望远镜的数	成像光电设	阈能	核心成员
				目和口径	备的光电倍		
			/m	/m	增管数目	/GeV	
CANGAROO-III	澳大利亚	31°S	160	4×10	512	80	日本、澳大利亚
HESS-I	纳米比亚	23°S	1800	4×13	960	40	德国 MPI 海德堡
MAGIC-I	La-palma 岛	29°N	2200	1×17	≈600	30	德国 MPI 慕尼黑
VERITAS	美国	32°N	1300	7×10	541/331	60	美国 Whipple 实验室

比较表 3 可知, 5@YorG 计划有两大特点: 一是工作于高海拔地区, 这里同一 EAS (在距轴心 100 m 之内) 的契伦可夫光子密度是海平面处的 3~5 倍 (依赖于 EAS 能量的高低), 有利于探测阈能的下扩; 二是与第三代的 10 m IACT 相比, 用于聚光的镜子面积增大 6~9 倍, 用于成像的光电设备的光电倍增管将逾千只, 是 γ 射线探测历史上最巨大、最灵敏的探测器。因而可以称为第四代 ACT (第一代为非成像型 ACT, 第二代为成像 ACT 即 IACT, 第三代为可进行立体观测的大型 IACT 阵列, 第四代应为巨型高海拔 IACT 阵列)。

与低海拔处的 10 m IACT 相比, 对同一 EAS 在羊八井的 25 m 口径和在高美古的 30 m 口径 IACT 能收集到数十倍多的契伦可夫光子, 从而可把阈能降至数 GeV, 把探测灵敏度提高到 0.5% 蟹状星云 γ 流的水平。这样, 直到红移值 $Z = 3$, 主要星系际介质都会变得透明; 许多弱源和河外高可变 Blazar 型天体的宁静期也能呈现在我们面前, 从而使我们可以看到更多的 γ 源并能仔细研究其时变和能谱结构的细节。这还意味着: 我们能以 ≤ 1 h 的典型观测时间看到几乎所有的北天 EGRET 源; 能使将会被下一代空间 γ 探测器 GLAST 发现的上千个北天 γ 源全都成为候选目标; 能观测或监测时标仅为几分钟的高可变源的约 100 s 时间尺度的能谱变化; 对在 5 GeV 能区、亮度 $\approx 10^{-16}$ J/cm²·s 的 GRB, 也可在约 1 s 的观测时间内完成 3σ 水平的观测 (在接到网络警报后 1 min 内完成向源)。当然所有这些观测只能一项接一项地而不能像 ARGO 那样同时进行。探测器有效面积近 1 m² 的 GLAST 的最高可测能量虽可达到 300 GeV, 但在 GeV 之后其一年观测的最小可测 γ 流已在 $\approx 10^{-10}$ cm⁻²·s⁻¹ 附近饱和, 而 5@YorG 则可用 50 h 的观测在 5~300 GeV 间以 5σ 超出测到 10^{-10} ~ 10^{-12} cm⁻²·s⁻¹ 的宇宙 γ 射线流。所以 GLAST 的高能段在北天的任何发现都将经受它的检验和证实, 并由它去进行更加深入细致的研究。它与 GLAST 间的这种互补和合作将对本世纪初 γ 射线天文学的发展产生重要的影响。

上述结论均基于 IACT 专家的蒙特卡罗模拟结果^[30]的推断。其可行性则可通过对下述 3 方面的考察来判断: (1) 可资立即启用的已有的高山站址。海拔 4300 m 的羊八井宇宙线观测站, 是北半球唯一的一个冬无积雪、有人为邻且交通、能源、地理条件优越的高山长年观测站址, 有逾 10 年的国际合作研究经验, 但其整个夏季多雨, 会使对某些 (在夏季才出现在羊八井夜空的) 重要的 γ 源的观测时间受限。目前, 一套来自德国 HESS (High Energy Stereoscopic System) 组的红外线云量自动监测仪已在羊八井安装到位, 现正在采集数据, 一年后即可作出对羊八井站址的评价。高美古海拔偏低 (3200 m), 但已经过国家天文台云南天文台多年的严格选址观测并通过鉴定, 其每年 ≈ 230 d 的可观测夜和云台新址在这里的建设将能显著降低本计划的实施成本和提高其运行效率, 同时光学望远镜的协同观测将会大大丰富获取的信息

和提高结果的可信度。(2) 可资立即借用的技术和经验。CANGAROO-III 的首台 10 m 口径 IACT 已投入正式观测; HESS 的首台 13 m IACT 也于 2002 年 9 月成功实现了 first light。这首先说明 IACT 在技术上是成熟的, 比起试验中的利用太阳能工厂的上千面镜子和高塔集光的契仑可夫光技术风险要小得多。其次说明它的光电成像装置是成功的, 可以立即借用; 也说明其镜子单元是完全满足要求的, 可以大量用来安装在更大口径的抛物面支架上; 同时它还说明建造 10 余 m 口径的支架和跟踪系统对已成功建造过数十米、上百米口径射电望远镜的许多先进国家的大公司来说没有什么技术困难。因此, 建造 20~30 m IACT 的技术已基本具备。(3) 问题归结到怎样方便地得到这些技术和解决所需经费。找到合适的合作伙伴就等于解决了此问题的大半。为此, 已与主持 HESS 计划的德国洪堡学会海德堡核物理研究所的学者开展了面对面的交流。对科学目标、学科形势认识上的默契促成了一拍即合的结果。一个新的大型国际合作项目的轮廓已呈现: (以羊八井或高美古的夜空条件及中方能组织起一支有实力的队伍承担基地建设和观测运行的主要责任为前提,) 中方提供基地、人力, 负责与土地、水泥、钢铁相关部分的建设; 德方提供镜子、成像装置及全套电子学和数据采集系统。这实际上意味着, 德方在完成 HESS 一期后将不再继续其 16 个 IACT 的下期计划而转向 5@YorG 的合作。具体步骤应是先建一台 IACT 以取得立竿见影的效果, 再向各自政府申请另 3 或 4 台 IACT 的建造经费。德方是有这个能力的 (≈ 3000 K\$), 问题在于中方能否筹集到启动经费并将基地建设和后勤服务费用压缩到最低限度, 使此启动阶段能在 2006 年 GLAST 上天前完成。相对它将带给我国 γ 射线天文学研究大发展的宝贵机会而言, 这是值得付出的代价。实际上已有人大胆预言 5 GeV 阈地面观测设备的出现将在可以预见的将来取代在 GeV 波段的 (空间) 轨道观测^[31]。这样的发展机遇我国若不抓住, 也是终会被他国在别的地方以类似的手段实现的。

5@YorG 的构想并不与当前羊八井的实验特别是 ARGO 相斥。如表 4, 未来羊八井的 3 大主力设备将形成各有侧重又相互补充之势, 从而使 γ 射线天文、膝区物理和宇宙线环境监测这 3 个预定的羊八井学科方向上的多项研究都能同时得以有效的开展。

表 4 将来的羊八井实验: 各有侧重, 相互补充

	AS γ	ARGO	5@YorG
主要方向	膝区物理 100 TeV~10 PeV 心区、成分、谱结构	γ 射线天文学 100 GeV~10 TeV 普天搜寻、长期监测	γ 射线天文学 5 GeV~TeV 短时标、高可变
特点	粗、广; 长、续	粗、广; 长、续	精、细; 短、灵
辅助方向	γ 射线天文学 TeV~100 TeV 太阳	下期主项: 膝区物理 (逐事例区分成分) 太阳、 \bar{P}/P 等	近水平方向观测: UHE 宇宙线成分能谱 ν_{τ} -EAS \rightarrow 中微子振荡

参 考 文 献

- 1 Amenomori M, Cao Z, Ding L K et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 69: 2468
- 2 Amenomori M, Cao Z, Ding L K et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, D47: 2675
- 3 Amenomori M, Cao Z, Ding L K et al. *ApJ*, 1994, 415: L147
- 4 Amenomori M, Ayabe S, Cao P Y et al. *ApJ*, 1999, 525: L93
- 5 Thompson D J, Bertsch D L, Fichtel C E et al. *ApJS*, 1993, 86: 629
- 6 Hartman R C, Bertsch D L, Bloom S D et al. *ApJS*, 1999, 123: 79
- 7 谭有恒. 见: 中国科学院基础研究所编. 中国科学院“九五”基础研究发展规划物理学(草案), 北京: 中国科学院, 1994: 125
- 8 卢红, 沈培若, 何会海等. *高能物理与核物理*, 1999, 23(5): 417
- 9 He H H, Bacci C, Bao K Z et al. *High Energ. Phys. Nucl. Phys.*, 2001, 25(1): 79
- 10 Amenomori M, Ayabe S, Cai D et al. In: Aharonian F A, Voelk H J eds. *High Energy Gamma-Ray Astronomy*, Heidelberg: American Institute of Physics, 2001: 558
- 11 Enomoto R, Tanimori T, Naito T et al. *Nature*, 2002, 416: 823
- 12 Amenomori M, Ayabe S, Cai D et al. *ApJ*, 2000, 532: 302
- 13 Amenomori M, Ayabe S, Cui S W et al. In: Simon M, Lorenz E, Pohl M eds. *Proc. 27th ICRC, Hamburg: Copernicus Gesellschaft e. V.*, 2001, 7: 2661
- 14 Amenomori M, Cao Z, Dai B Z et al. *A&A*, 1996, 311: 919
- 15 丁林垠, 扎西次仁, 扎西桑珠等. *高能物理与核物理*, 1997, 21(8): 673
- 16 Amenomori M, Ayabe S, Cui S W et al. In: Simon M, Lorenz E, Pohl M eds. *Proc. 27th ICRC, Hamburg: Copernicus Gesellschaft e. V.*, 2001, 7: 2753
- 17 Hunter S D, Bertsch D L, Catelli J R et al. *ApJ*, 1997, 481: 205
- 18 LeBohec S, Bond I H, Bradbury S M et al. *ApJ*, 2000, 539: 209
- 19 Aharonian F A, Akhperjanian A G, Barrio J A et al. *A&A*, 2001, 375: 1008
- 20 Borione A, Cataneese M A, Chantell M C et al. *ApJ*, 1998, 493: 175
- 21 Amenomori M, Ayabe S, Cui S W et al. *ApJ*, 2002, 580: 887
- 22 Amenomori M, Cao Z, Dai B Z et al. *ApJ*, 1996, 461: 408
- 23 Amenomori M, Ayabe S, Cai D et al. *Phys. Rev. D*, 2000, 62: 112002
- 24 Amenomori M, Ayabe S, Cui S W et al. In: Simon M, Lorenz E, Pohl M eds. *Proc. 27th ICRC, Hamburg: Copernicus Gesellschaft e. V.*, 2001, 1: 148
- 25 谭有恒. 见: 谭有恒编. *CCAST-WL Workshop Series 90*, 北京: CCAST, 1998: 1
- 26 Gehrels N, Michelson P. *Astroparticle Phys.*, 1997, 11: 277
- 27 Bloom E D. *Space Sci. Rev.*, 1996, 75: 109
- 28 谭有恒. *高能物理与核物理*, 1999, 23(2): 103
- 29 Aharonian F A, Akhperjanian A G, Beilicke M et al. *A&A*, 2002, V1: 0205499
- 30 Aharonian F A, Konopelko A K, Voelk H J et al. *Astroparticle Phys.*, 2001, 15: 335
- 31 Diego F T, Gustavo E R, Tomas M D et al. 2002, preprint (astro-ph/0209565)

High Altitude Cosmic Ray Research on Tibet Highland

Tan Youheng

(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Abstract

With the development of γ -ray astronomy, a cosmic ray observatory was founded in the Yangbajing valley of Tibet highland (4300 m.a.s.l.) 10 years ago. Its EAS array of China-Japan AS γ Collaboration detected successfully the steady emission of multi-TeV γ rays from the Crab Nebula, the strong outbursts from AGN Mrk 501 in 1997 and from Mrk 421 in 2000, which is the first detections in the EAS experiments. The deviation and movement of Sun shadow by cosmic rays induced by solar and interplanetary magnetic field, has been only observed and will be adopted to monitor the variations of solar activity. Taking the advantages of high altitude and the combination of experiments of EAS array and emulsion chambers + burst detectors, the primary energy spectrum and composition of ultra-high energy cosmic ray have been studied. For exploring the 100 GeV gap region between the space and ground-based experiments, the project of China-Italy ARGO Collaboration is under constructing. Finally, to challenge the 5 GeV low threshold and the highly variable extragalactic sources, a high altitude huge IACT project 5@YorG in the future is discussed.

Key words astrophysics—cosmic ray—review— γ ray source—EAS—EAS array—IAC