

超高能宇宙线天文及西藏观测计划

谭有恒

宇宙射线作为地球不可分割的环境的一部分，为人们所知已有七十年了。由于它的能量高，可用来作揭露物质微观世界的探针；又由于它的产生和经历与天体演化、源区物理状态、空间物质分布及天体高能过程密切相连，所以它自身就携带着宝贵而丰富的宇观信息。可以认为，宇宙线研究对于人类知识视野的扩大如同地下矿藏之于人类物质生产一样，是一种极待进一步开发的自然财富。

超高能 γ 天文的出现及其意义

由于高能宇宙线是以宇观的空间和时间尺度（平均年龄约百万年）存在和运动的，所以至今仍存在一些未解开的谜。例如，它们来自哪里，是怎样维持 10^{41} 尔格/秒这样巨大的银河宇宙线输出功率的？它们怎样产生，又怎样被加速到统计加速达不到的超高能区甚至 10^{20} eV（电子伏）的？这些问题的背后都隐藏着某些耐人寻味的物理和天体演化问题，一直是科学家们致力探寻的目标。解谜的关键环节是寻找它的发生地——“源”。但是，由于低于 10^{17} eV 的宇宙线粒子（裸核）受到银河磁场的偏转，而高于 10^{18} eV 的宇宙线的记录统计量又很少，长期来都是依赖对其到达方向（非各向同性）的分析来寻找源的线索。至今，科学家们尚未能结束关于超高能宇宙线起源于银河系内或银河系外的争论。通过测定超高能 γ 射线的到达方向去直接搜寻源天体的想法在六十年代就有了，但由于当时尚无卫星实验提供的X射线和低能 γ 射线星的数据，加上那时对EAS方向测定的精度不佳，未能得到明确的结果。

1983年，西德Kiel组报导，在 $2 \times 10^{15} - 10^{16}$ eV能区，发现了来自CygX-3（天鹅座X-3）方向的以4.4倍标准偏差超过背景的宇宙线过剩，而且存在与其X射线波段一样的4.8小时时间周期结构。同年英国Leeds组也看到了CygX-3方向的EAS过剩，1984年澳大利亚的Adelaide组又探测到南天的Vela X-1（帆船座X-1）在 10^{15} eV附近的发射。能来自三万多光年远方而不改变方向的，一般只能是 γ 射线。这样，一门新学科，“超高能 γ 天文学”就应运而生了。一个世界性的寻找超高能 γ 源的热潮正在掀起。因为大家都预感到，如果它被证明确实存在，对超高能宇宙线的起源、加速和传播的研究将能沿此线索获得突破性的进展。按Kiel组的测量，CygX-3仅在 10^{15} eV— 10^{16} eV能量区间的 γ 亮度就达 10^{37} 尔格/秒。因此，如果银河系内有约30个这样的星体就可解释此能区的银河内宇宙线强度。另外，这样高能的 γ 不可能是较易于被加速的电子的同步辐射或逆康普顿效应的产物，而应是发生在源区的核作用（ $P + A \rightarrow X + \pi^0$ ）的次级产物。因此，CygX-3应是一个可将质子加速到 10^{17} eV的宇宙线源。这些强大的宇宙线源在银河内的具体分布及它们各自的具体特征将在很大程度上决定河内宇宙线的能谱、成分和非各向同性分布。它们的存在也同时提供我们以研究天体上的超高能过程和宇宙空间中的 $\gamma\gamma$

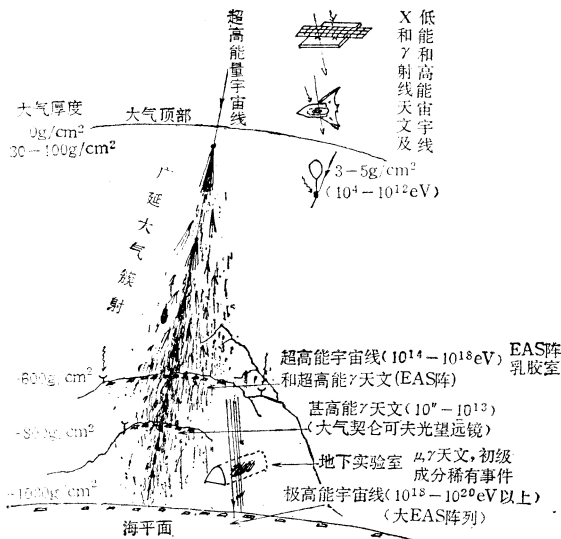


图 1

宇宙线研究的探测手段与核物理、高能物理研究手段相似，但它不是在实验室里，而是在地球上及其近空立体地展开，如图1所示。由于大气的吸收，能量不高的宇宙线及其次级粒子很难到达地面，因此需要使用气球等运载工具。超高能宇宙线的流强很弱，但可以利用其在大气层中引起的广延大气簇射（以下简称EAS），以大面积分布在地面上或浅地下的探测器群（以下简称“阵列”），其覆盖面积可从 10000m^2 观测之。

科学实验依赖于国家经济技术实力，而宇宙线到处都有，但要很好地利用它需要良好的高空运载工具或良好的高山或地下自然条件。就我国目前而论，高山地理条件是足以令国人自豪和令外国及学者羡慕不已。我们应当充分认识和积极利用这种自然赋予我国的优势，并沿此迅速打通进入世界前沿的道路。

(超高能 γ 与 2.7°K 宇宙黑体辐射背景光子的作用) 的机会。预期在 $2 \times 10^{15}\text{eV}$ 附近, $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 作用的截面达到极大。

为此, 当前最重要的事情是, 以更多的实验和更高的统计显著性进一步证实这项发现。然后则是在更广阔的天区寻找更多的超高能 γ 源, 同时对其中的一些作更精细的长期观测研究。

怎样观测超高能点源

与低能时的 X-射线、 γ -射线望远镜指向跟踪(某一特定天体)方法不同, 对超高能 γ 天体的观测是由地面 EAS 阵列随地球巡天的方式日夜连续扫描它视场内的天区, 再经事后分析来完成的。这是因为, 即使某颗 γ 星能发射超高能 γ , 随着能量增高亿倍, 其积分流量也要下降到亿分之一以下, 一般规模的设备根本无法看到它, 在气球等短期运载工具上就更是不可行了。只有在地球表面, 才能装备并长期维持一个庞大的探测记录系统, 以上万平米的有效收集面积和以年计算的有效观测时间去面对超高能弱流量的观测对象。这样附着于地表或浅地下的大型设备当然是不可能人为调节其指向的, 而且也不需要专门跟踪某指定的天体, 因为它能通过对 EAS 结构的观测确定每一个被记录的超高能初级粒子的到达方向, 因此, 精密的 EAS 阵列能把它伴随地球巡天时随时所见的任何天体发射来的超高能 γ 记录下来, 只是在地球不同纬度处的观测站有其各自不同的有效观测天区和最佳观测天体而已。

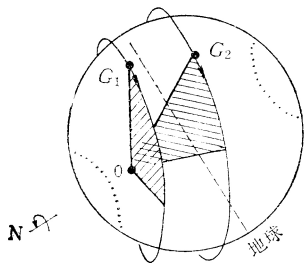


图 2

O: 地面观测站 G_1 : 源天体 1 G_2 : 源天体 2
 // 对 G_1 的有效观测区 // 对 G_2 的有效观测区

正如人们见到太阳每天有“日出”和“日没”一样, 在地球上某一 EAS 阵列看来任一宇宙线源也都每天有它自己的“源出”、“源没”和运行轨迹。不过, 只有当源天体运行到其轨迹的“上中天”前后的一区时才能被阵列(以近 100% 的效率)有效地探测。这个有效区的边界决定于阵列的触发阈所要求的最小 EAS 大小, 因而与 γ 能量、源的赤纬、观测站纬度和高度有关。源天体在天球上有着固定的赤道座标 (α_s, δ_s) , 而其赤纬 δ_s 关联于其相对于观测站的天顶角 ϑ 、方位角 φ 和观

测站的地理纬度 ψ ; 赤经 α_s 关联于 ϑ 、 φ 、 ψ 和地方恒星时 (因而关联于地方时 t 和观测站的地理经度 λ)。由于 λ 、 ψ 已知, 所以只要测出每个 γ -EAS 的轴方向 (ϑ, φ) 和到达时刻 t 就能知道此事例来自天球的何方 (即 α_s, δ_s), 从而找到其对应的天体 (因为 γ 稳定而不带电, 不受空间磁场偏转)。阵列同时需测出 EAS 的年龄和大小, 以便确定每个事例的能量。这样, 从一期观测数据中将能同时分离出若干组分属不同目标天体的事例去分别进行分析研究。如果候选源是脉冲星或双星系统, 可按其 X 射线或射电发射的已知周期参数 (或别的试验值) 沿时间轴进行周期折叠, 得到其超高能 γ 发射的“光曲线”, 看是否在某固定相位出现有统计意义的对背景的“超出”, 并从其时间结构窥视源区的物理过程。

西藏观测的优越性

由于历史的原因, 现有的关于超高能 γ 源的结果, 几乎都是来自近海平面的 EAS 阵列。超高能宇宙线在大气层中引起的广延大气簇射, 有它自己的产生、增殖和衰亡的过程。在低山和海平面, 只能看到一般 EAS 的衰老阶段, 在高山高度可看到它的全盛或轻度衰减阶段以下的一段纵向发展过程。由于在靠近 EAS 发展全盛期时, 它的涨落最小, 总粒子数 (N) 最多, 因而高山实验具有下列优点:

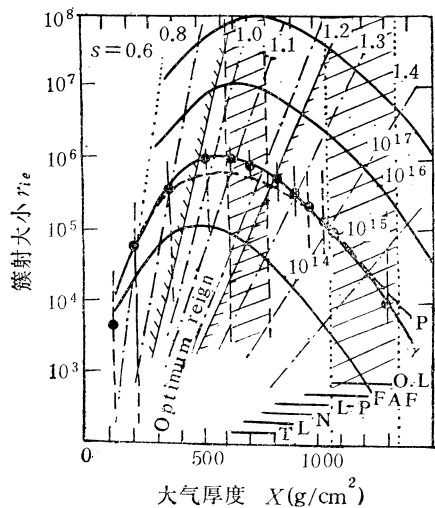


图 3

不同能量的 γ 引起的 EAS 的纵向发展曲线和不同观测站的有效观测区段, 其中 Y 代表羊八井, S, L 代表海平面。

1) 能量测定的相对误差小 如图示, 能量高于 10^{15}eV 的 EAS 在羊八井高度的平均发展状态, 全落在“最佳测量”区内, 簇射发展涨落造成的能量测定误差仅为 6.5%—12.1% (对比于海平面的 22.4%—40%)。

而精细测定 γ 能谱对追溯超高能宇宙线在源区的产生和加速过程是至关重要的。

2) 触发记录效率高、收集面积大 高的效率意味着更大的“最大有效观测天顶角 (θ_{max})”，因而更长的每日有效观测时间 ($t-\theta_{max}$ 关联如图 4 示)。一个 10^{15} eV 的 EAS 在羊八井的粒子数约为在海平面时的 10 倍，这样使得阵列的灵敏度提高，阈能下降(一个量级)，从而观测变得更容易和更精确。

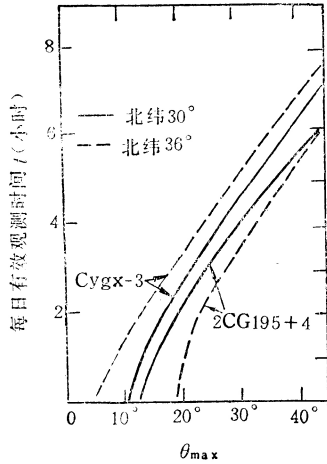


图 4

3) 特别有利于对 (γ -EAS) 的测量 从上图中 10^{15} eV 的质子

引起的簇射 (P -EAS) 和 γ 引起的簇射 (γ -EAS) 的发展曲线可知，在羊八井高度后者的大小约为前者的两倍(而在低处情形正好相反)。这使得信号 (γ -EAS) 比背景 (P -EAS) 有更高的触发记录效率，从而提高“信噪比”一倍以上。因此，超高能 γ 天文观测尤其需要到更高的地方去作。例如，某阵列在西藏羊八井工作一年所能获得的效果，在日本明野(海拔 900m)需要 5—6 年才能完成。

4) 有利于超高能宇宙线初级成分的研究 重核与空气的作用截面比质子要大得多，其 EAS 发达于更高的高空，到了低处因遭强烈衰减会导致探测效率降低。测定不高于 10^{16} eV 的宇宙线成分，只有在更高的

观测地点才能减少这种触发偏见，得到更近于真实的结果。

5) 有利于 EAS 现象及别的天文观测 由于在高处能更接近 EAS 发展的早期状态，因而明显有利于下述研究：EAS 高能强子成分，伴随有大“ γ 族”的 EAS (与高山乳胶室联合观测)；EAS 的纵向发展等。此外，由于西藏高原大气薄、污染轻、晴天多、湿度小，从大气透明度好和可观测时间长的角度考虑，这里还很适宜于 EAS 大气契伦科夫光和荧光的观测，也有利于射电天文(毫米波)、红外天文及太阳活动监测等常规天文观测。

EAS 观测以常年日夜连续进行为特点，其站址选择须考察下述条件：EAS 观测条件佳化所要求的高度及天文项目要求的纬度；布阵和着天所需的开阔地面；自动化、电子学设备所需的稳定供电；维持长期工作所需的道路、交通、生活设施及当地友邻单位等条件。EAS 光成分观测还要求气候干燥、晴天多、烟尘和城市灯光背景少。目前世界上还没有一个现存的观测站全面满足这些要求。北半球二千多米以上的观测站冬季常面临大雪封山交通阻绝的困境，且多需自己发电自己跑生活供给。可以想象在这种状况下要长年维持高质量工作是很困难的。世界上确有能全面满足上述条件的地方，它不在外国，就在我国的西藏地区。

拉萨，海拔 3650m，北纬 30°，比目前北半球最高的苏联天山 EAS 站 (3390 m) 略高。羊八井盆地，4300m，北纬 30°03' 在拉萨西北 90 公里的青藏和中尼公路交汇处，以地热而闻名，现有地热发电厂、地热工程处、地热研究所和解放军蔬菜基地在那里，有电车间、车队、施工安装队伍及室内暖气、蔬菜温室等生产生活设施，还备有专家招待所及专家食堂。二地的气候也较为理想，如表中摘录的平均和极端气象参数所示：

	年平均气温, °C	月平均气温, °C		多年极端气温, °C		平均相对湿度, %	平均日照时间和日照率
		一月	六月	最低	最高		
拉萨	2.5	-2.3	15.5	-16	29	43	2833 小时, 64%
羊八井	2.5	-5	19.8	-26	24	43	2833 小时, 64%

其地理纬度，对于搜寻宇宙线源正好处于最佳位置。在北纬 30°，以羊八井高度可实现的对天体的最大有效观测天顶角 45° 作的计算表明：赤纬 -14°—74° 的广阔天区都在我们阵列的有效视场之内，能对 0°—70° 赤纬带内的任何天体完成每天多于 4.7 小时的观测。它将比在日本和在意大利的 2000m 山上有更宽的视场和更长的每日观测时间。见图 5。

关于西藏计划的设想

我们建议开发西藏在科学观测上的特殊地理优

势，以加速我国实验科学进入国际前沿舞台的步伐，并促进西藏地区的文化建设。

总目标 利用西藏优越的科研地理条件，引进国际先进技术和设备，以超高能 γ 源的寻找为先导，以宇宙线超高能天文和超高能现象研究为主要内容，在西藏羊八井建成一个国际上不可缺少，也难以替代的宇宙线地面观测中心，并逐步与其它天文观测手段相结合，对一些高能天体多窗口、广波段地实行周期观测研究。它将一反过去小家分散或独家经营的弱点，集中国内外学者于一堂，以本学科当今敏感而重大的课题

为目标进行攻坚。它将为一代新人，也为理论界学者提供广阔的用武之地。

物理目标 研究超高能宇宙线本身及其起源、加速、传播和发生在源区及空间的超高能过程；研究 EAS 现象及宇宙线超高能作用特征。其具体观测任务是：

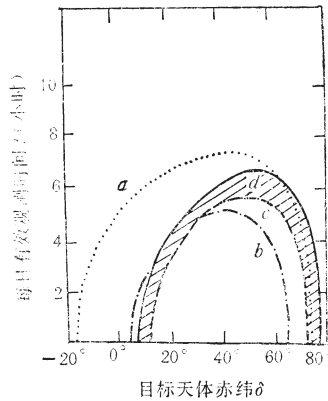


图 5

- a. 在羊八井(北纬 30° 高 4300m);
- b. 北纬 36°, 高 2000m;
- c. 北纬 42.45°, 高 200m;
- d. 北纬 42.45° 以北。

① 寻找和研究超高能 γ 点源，进一步验证 CygX-3 为超高能 γ 点源；研究其时间相位结构；以更高的统计性和精确度测定其流强和亮度；精确测定其能谱 (10^{14} — 10^{17} eV 段)，希望从中看到反映源区加速极限的能谱“截断”和反映超高能光子与充斥宇宙的 2.7°K 微波背景光子的相互作用 ($\gamma + \gamma' \rightarrow e^+ + e^-$) 效应，并推导源区的超高能 γ 谱和质子谱。同时在北天广泛寻找别的超高能 γ 源。见图 6

② 利用 γ -EAS 的少 μ 子或少强子特征观测北天的弥散性超高能 γ 源。

③ 测定超高能宇宙线的能谱和到达方向非各向同性度。

④ 利用富于 μ 子的 EAS 以挑选重核，利用含大 γ 族的小 EAS 以识别质子引起的事例。

⑤ 测定 EAS 结构及其次级粒子组成。

⑥ 研究超高能核作用特征及某些可能出现的新的或“反常”的现象。

⑦ 联合别的波段的共同观测，对某些高能天体的物理条件、高能活动和宇宙线的产生、加速机制进行广泛深入的研究。

基础设施 建议在第一阶段建造一个以 γ 天文为主但能兼顾上述诸项目标的中型 EAS 阵列。其野外探测器包括 60 多个灵敏面积 1m^2 的闪烁探测器，其中近 50 个装备有快时间功能，分布在 $120\text{m} \times 120\text{m}$ 地面，可以有约 1° 的角度分辨测定 EAS 的到达方向和约 10% 的相对误差测定簇射大小。还包括一个中心描述仪和八个 μ 子探测器，它们分别由七层和四层 25m^2 塑料流光管加 4 米厚水泥吸收体组成；即使在 EAS 近心区，它们也能将 μ 子与其他粒子区别开来，从而给我们以 γ -EAS 或重核-EAS 的判据，同时能对小 EAS 的到达方向给予精确测量，而使观测能区有效地降到 10^{14}eV ，利于对弱源的观测。除相应的电子学设备、计算机在线数据采集和自动管理系统外，设备中还包括一个微秒级的时钟系统和一个用激光和光纤模拟宇宙线信号的自动标定和检测系统。

将来发展 EAS 阵列向复合型多功能阵列发展，西藏站向综合性研究基地（不单是超高能宇宙线）发展。EAS 阵列将扩大到 1 平方千米覆盖面积，地表探测器增加到近 500 个，浅土埋设 μ 探测器 (4m^2 液体或 Acrylic 塑料闪烁体) 约 400 个，增加一个 100m^2 的强子量能器，放置 300m^2 或更多的厚型乳胶室及其相应的“暴探测器”实现与乳胶室的联合实验。建造两套大气契可夫望远镜在西藏站近旁，同时观测同一物体，它的 γ 天文研究就能覆盖 10^{11} — 10^{17}eV 的广阔能区。此外，空间所的太阳粒子监测项目，天文界的毫米波射电阵及红外和日冕观测计划也可能在羊八井展开。这样，西藏站就有了更广泛的学科背景、更雄厚的后勤支撑、更有效的国内、国际合作，因而不但有更多的机会为扩大人类知识视野作贡献，而且也有实际可能对西藏地区的科学文化发展发挥积极的作用。

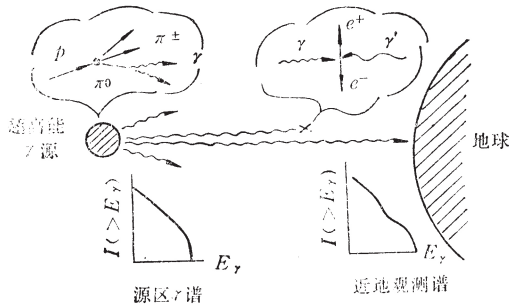


图 6