

寻找 10TeV 能区的 γ 射线暴 *

丁林恺¹ 扎西次仁² 扎西桑珠² 木 钧⁴ 王 辉¹
冯振勇³ 任敬儒¹ 余光策³ 周文德⁴ 拉巴次仁²
孟宪茹² 孟 烈¹ 张春生¹ 张慧敏¹ 施志政¹
贾焕玉³ 梅东明² 黄 庆³ 谭有恒¹ 霍安祥¹ 戴本忠⁴

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2(西藏大学宇宙线研究所 拉萨 850000)

3(西南交通大学应用物理系 成都 610031)

4(云南大学物理研究室 昆明 650091)

1996-08-06收稿

摘 要

利用西藏羊八井大气簇射实验数据,开展了对 10TeV 能区 γ 暴的全天区搜寻.分析了 4 亿个簇射事例,找出在给定的时间间隔和给定的小天区内出现的簇射事例团.采用等天顶角方法来估计背景.有少量事例团显示了对背景的超出,但它们的显著性还不够高,尚不足以认定为 γ 暴.讨论了羊八井二期阵列实验对寻找 10TeV γ 暴所具有的高灵敏度.

关键词 宇宙线, 大气簇射, γ 射线暴.

1 引 言

自从二十多年前发现 γ 射线暴(以下简称 γ 暴)以来,它的起源一直不清.近年来,Compton GRO 天文卫星搭载的 BATSE 探测器以接近一天一个事例的频度在 20keV 到 2MeV 探测到一大批 γ 暴^[1].在较高能区(0.1 至 10GeV),COMPTEL 和 EGRET^[2]也观察到一些 γ 暴,它们与 BATSE 的 γ 暴或者同时到达或者有所延迟.至今的观测表明^[3]: γ 暴的空间分布是各向同性的,不能找到对应的天体;某些 γ 暴的能谱是指数在 2.0 到 2.6 之间的幂谱,在 1MeV 的强度值约达到 1 光子 / $\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}$.这说明,如果 γ 暴的能谱可延伸至更高的能区,例如 1 至 100TeV,采用高灵敏度的大面积地面探测装置,应能探测到它们.

* 中国科学院、国家科委和国家自然科学基金资助。

1—100TeV γ 暴的探测具有重要的意义. 因为这个能区的宇宙 γ 射线穿过宇宙学距离时会被星系际空间的红外背景光子以及微波背景光子吸收, 因此, 如果探测到了此类 γ 暴, 将是对 γ 暴河内起源说的有力支持; 如果探测不到, 也将对 γ 暴的产生机制或 γ 暴源的距离给出信息. 除此, 高能 γ 暴与低能 γ 暴到达地球的时间差还将提供 γ 射线在源区产生的有关信息.

已经有几个工作致力于利用地面宇宙线观测装置在1—100TeV能区寻找 γ 暴^[4], 但都没有获得正结果. 很显然, 在TeV能区采用大气切伦科夫望远镜寻找 γ 暴的工作受到望远镜的窄口径以及短的有效观测时间的限制. 广延大气簇射实验在这两个方面比切伦科夫望远镜具有显著的优势, 但由于它不能区分质子簇射和 γ 簇射, 只有靠大的统计量来提高信噪比, 而已有的在100TeV能区采用大气簇射阵列寻找 γ 暴的工作, 又往往受限于不够高的簇射计数率.

位于西藏羊八井的广延大气簇射阵列在同类装置中具有最低的观测阈能(约10TeV)^[5]和最高的簇射计数率(过去几年为20—30Hz, 最近已达到250Hz). 所以, 利用羊八井阵列来探索10TeV能区的 γ 暴现象是具有优势和特色的.

2 羊八井实验

西藏羊八井广延大气簇射阵列位于东经 90.53° , 北纬 30.11° , 海拔高度4300m, 相应的大气深度是 $606\text{g}/\text{cm}^2$. 用于本工作的一期阵列只是目前整个阵列的一部分, 由49个面积各为 0.5m^2 的闪烁体探测器组成, 排成 7×7 方阵, 彼此相距15m, 覆盖面积 8100m^2 . 其中的45个探测器安装了快时间光电倍增管, 用以测量簇射的到达方向. 本工作采用了1990年6月至1992年9月的数据, 在这期间, 该系统以任意4路以上快时间探测器符合的方式, 以20Hz的触发率记录了 9×10^8 个事例, 有效运行时间598.6天.

本实验采用以下条件选出数据样本: 1)任一触发探测器的输出信号相当于1.25个有效粒子穿过; 2)在触发探测器中, 粒子密度最高的那两个要位于阵列中心 5×5 方阵内; 3)每个簇射的平均横向扩展小于25m. 此类事例称之为内含事例, 意思是簇射的轴心被认为落在阵列之内. 在上述 9×10^8 个簇射事例中, 有大约 4×10^8 个事例符合这些条件.

对阵列的性能进行了Monte Carlo研究^[6]. 已经知道, 对内含事例: 1)其初级粒子的最可能能量对质子约为7TeV, 对光子约为8TeV; 2)对10TeV的质子和光子引起的簇射, 阵列的探测效率分别为26%和42%; 3)对月亮的10TeV宇宙线阴影观测^[6]证明, 阵列对簇射到达方向的角度分辨好于 1° .

3 寻找方法

可以采用两种可能的途径来寻找10TeV的 γ 暴. 一种, 是寻找与BATSE γ 暴在时间和方向上相符合的10TeV事例团. 由于在某一时刻, BATSE观测的天区与羊八井阵列观测的天区常常不同, 两个探测器的灵敏视场也不同, 估计只有大约四分之一的

BATSE γ 暴适合于作这种符合检验.

另一种方法基于以下考虑: TeV 能区的 γ 暴与 MeV—GeV 能区的 γ 暴在到达时间上并不一定个个相关, 因此 TeV γ 暴的寻找可以独立进行. 考虑到两类实验有一半以上的时间在观测不同的天区, 这种独立寻找也是必须进行的.

本工作主要采用后一种方法, 集中于寻找在一个小的天区和一个短的时间间隔内到达的、具有高的统计显著性的事例团. 所采用的程式是:

1) 每一个内含簇射都被取作一个可能的事例团的起始事例, 都检验它作为一个 γ 暴的起始事例的可能性;

2) 统计在第一个事例之后, 在 0.002 天 ($\Delta t = 17.28\text{s}$) 时间间隔内, 出现在以第一个事例的入射方向为轴、角半径为 1.5° 的一个锥体内 (相应的立体角 $\Delta\Omega = 2.15 \times 10^{-3}\text{sr}$) 的所有簇射事例, 将它定义为一个事例团. 由于阵列的角分辨约为 1° , 这样一个大小的锥体可以列入来自源方向 (设第一个事例准确来自源方向) 的约 70% 的信号事例. 时间间隔 0.002 天的选取只是为了方便, 并考虑了 BATSE γ 暴的典型持续时间约为 10s. 显然, 这个数值是可以改变的.

3) 设一个事例团所包含的事例数为 m (以下将称 m 为事例团的多重数), 显然, m 将取值 $1, 2, 3, \dots$. 作出多重数 m 的分布, 并估计那些具有高多重数的事例团的统计显著性.

4 背景簇射事例率的“等天顶角”估计

为了寻找可能存在的 γ 暴事件, 需要进行背景分析. 由于入射天顶角不同的簇射穿过不同厚度的大气层, 因此背景事例率对簇射轴的天顶角 θ 有很强的依赖. 对羊八井数据的分析表明, 在上述 $\Delta\Omega$ 和 Δt 内, 当 $\theta = 0^\circ$, 平均簇射事例数为 0.25 个; 随着 θ 增加, 平均事例数下降; 到 $\theta = 55^\circ$, 下降到 0.01 个 (见图 1). 在估计事例团的显著性时, 必须考虑这一因素. 我们采用“等天顶角方法”, 即, 对任一事例团, 取和它具有相同天顶角天区的所有事例来计算平均事例率并估计背景. 羊八井阵列的正方形导致触发事例率在方位角分布中具有小的不均匀性, 约为 2%—3%, 我们忽略这一效应. 另外, 由于气压、气温等随时间变化的因素, 对相同天顶角的小天区其平均事例率也会有变化. 对羊八井数据的分析表明, 这一变化的幅度最大为 $\pm 11\%$. 为了减小这一效应的影响, 取 10—20 天为一个时间区间, 逐段统计出平均背景事例率.

现在的问题是: 按照上一节介绍的事例团寻找程式 (为方便, 以下将这一程式简称

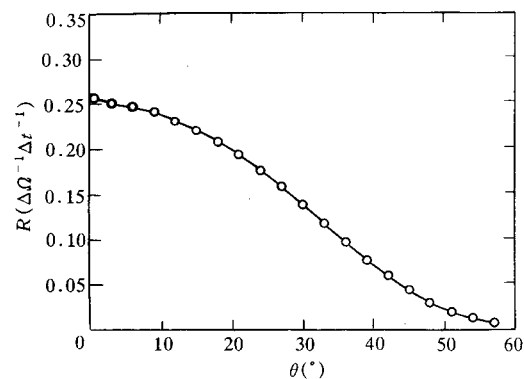


图 1 由羊八井数据得到的平均背景事例率 (R) 和事例天顶角 (θ) 的关系

为方法 A), 背景事例团多重数 m 服从什么分布?

首先考虑另一种方法, 并称之为方法 B: 对一定的天顶角 θ_0 , 随机选取一个起始时刻 t_0 , 每个时间间隔 Δt 一个接一个取下去, 天区大小仍然是 $\Delta\Omega$. 显然, 对完全随机到达的背景事例, 这样得到的事例团的多重数 n 取值为 $0, 1, 2, \dots$, 并服从 Poisson 分布:

$$f(n) = \frac{\langle n \rangle^n}{n!} e^{-\langle n \rangle}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (1)$$

其中期待值 $\langle n \rangle$ 依赖于天顶角 θ_0 . 而对方法 A, 因总是把领头的一个事例的到达时间选作起始时刻, 背景事例团的多重数 m (取值为 $1, 2, 3, \dots$) 将不会服从 Poisson 分布. 但是, 如果忽略不计领头的那一个事例, 预期随机变量 $m-1$ (取值为 $0, 1, 2, \dots$) 仍将服从 Poisson 分布. 这是因为, 一个时间上随机到达的事例序列, 其相邻两事例的时间差服从指数分布, 而已知服从指数分布的随机变量与变量值起始点的选择无关. 所以, 由方法 A 得到的 $m-1$ 与由方法 B 得到的 n 应该服从同一个 Poisson 分布, 即:

$$f(m-1) = \frac{\langle n \rangle^{m-1}}{(m-1)!} e^{-\langle n \rangle}, \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (2)$$

显然, 取 $n = m-1$, (2) 与 (1) 完全相同.

为了进一步证实这一点, 用 Monte Carlo 方法产生一个在时间上完全随机到达的事例样本, 然后分别采用上述两种方法寻找事例团. 这个样本包含 5000 万个 Monte Carlo 事例. 得到由方法 A 产生的 $m-1$ 和由方法 B 产生的 n 的分布后, 对它们用同一个 Poisson 分布进行 χ^2 检验. 在表 1 列出 χ^2 量以及相应的自由度. 检验结果表明, $m-1$ 与 n 具有类似的显著水平服从同一个 Poisson 分布. 因此, 以下就用 (2) 式来计算由方法 A 得到的事例团的背景概率.

5 分析结果

分析了由 1990 年 6 月 18 日至 1992 年 9 月 29 日所获得的 3.993×10^8 个天顶角小于 60° 的内含簇射事例. 在每个时间段, 对每一个天顶角区间, 找出在 $\Delta\Omega$ 和 Δt 内出现的事例团, 得到每个团的多重数 m . 结果表明, $m-1$ 基本上服从背景的 Poisson 分布, 但在某几个时间间隔及某几个天顶角区间, 在高多重数区, 实验数据显示了对背景的某些超出.

采用下述条件挑出那些比较突出的超出背景的事例团, 以便作进一步的分析:

表1 对 Monte Carlo 数据作 Poisson 分布的 χ^2 检验

Poisson 分布 期待值 $\langle n \rangle$	(A)		(B)	
	自由度	χ^2 量	自由度	χ^2 量
0.30	5	2.397	6	2.752
0.20	4	2.316	5	1.636
0.10	3	1.412	4	0.611
0.05	3	0.299	3	1.324

注 (A) 事例团由方法 A 产生, 用分布 (2) 检验 $m-1$;

(B) 事例团由方法 B 产生, 用分布 (1) 检验 n .

$$\begin{aligned}
 m &\geq 7, && \text{所有 } \theta; \\
 m &= 6, && \text{当 } \theta > 31^\circ; \\
 m &= 5, && \text{当 } \theta > 43.5^\circ; \\
 m &= 4, && \text{当 } \theta > 53^\circ.
 \end{aligned} \tag{3}$$

在所分析的全部数据中, 一共找到 $m = 8$ 的团 1 个, $m = 7$ 的团 28 个, $m = 6$ 的团 19 个和 $m = 5$ 的团 3 个.

多重数最大的一个团是 $m = 8$, 出现在儒略日 (MJD) 48198.15993196643, 天顶角 $\theta = 12.7^\circ$, 赤经和赤纬分别是 185.87° 和 18.02° . 在这个事例团出现的那一段时间, 对这个天顶角, 在 $\Delta\Omega$ 和 Δt 内的平均事例数 $\langle n \rangle = 0.22$. 由 (2) 式算得这个团的背景概率是 3.95×10^{-9} . 图 2 给出在 $\theta = 10.5^\circ$ 到 13.5° , 由 1990 年 9 月至 11 月约 60 天内获得的 2040144 个事例团的 m (圆圈) 以及背景事例团 m (实线) 的分布. 可以看到, $m = 8$ 时, 数据显著超出了背景.

在全部所分析的事例样本中, 出现在 $\theta = 10.5^\circ$ 到 13.5° 的一个小天区的事例所占比例为 1.83×10^{-3} , 所以在这样一个小天区的试验次数应为 7.35×10^5 . 考虑了试验次数, 推得 $m = 8$ 的这个事例团作为偶然事件的概率为 2.90×10^{-3} . 如果采用高斯概率, 这相当于大约三倍标准偏差的显著性.

对 $m = 7$ 的 28 个事例团, 它们的天顶角各不相同, 因而 $\langle n \rangle$ 也各不相同. 逐个计算每个团的背景概率 P_i 和试验次数 N_i ($i = 1, 2, \dots, 28$), 然后用它们的试验次数 N_i 作为权重因子来计算这一组事例团作为偶然事件的平均概率, 得到

$$P_{\text{bk}} = \frac{\sum_{i=1}^{28} P_i N_i}{\sum_{i=1}^{28} N_i} = 6.93 \times 10^{-2}. \tag{4}$$

用同样的方法计算 19 个 $m = 6$ 的事例团和 3 个 $m = 5$ 的事例团作为偶然事件的平均概率, 结果分别为 5.68×10^{-2} 和 7.74×10^{-2} .

以上分析说明, 在羊八井一期实验的 10TeV 簇射样本中, 存在着少量具有较高多重数的在 $\Delta\Omega$ 和 Δt 中到达的事例团, 显现了高于背景的概率. 但是, 它们的显著性仅为二至三倍标准偏差, 尚不足以构成 10TeV γ 暴存在的证据.

6 讨 论

按照 γ 天文观测中惯用的标准, 若一个 γ 源候选者具有三至五倍标准偏差的显著性,

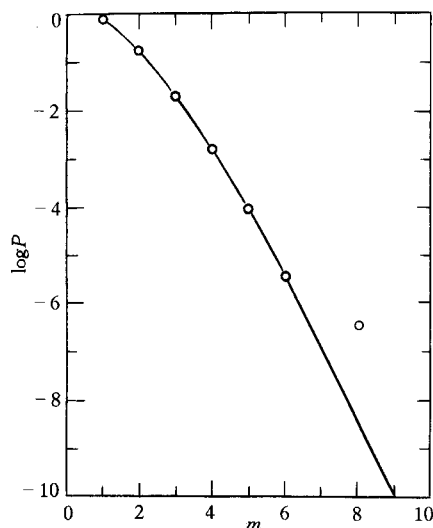


图 2 1990 年 9 月至 11 月, 天顶角由 10.5° 到 13.5° , 数据事例团以及背景的概率 P 和多重数 m 的关系

只能认为是迹象, 还不能无可置疑地被认定为 γ 源. 为了方便讨论, 本工作假设要认定一个 γ 源需要具有六倍标准偏差以上的显著性. 对于本工作给出的 $m = 8$ 的那个事例团的天顶角区, 假如观察到一个 $m = 12$ 的事例团, 则背景概率为 1.17×10^{-15} , 乘以 7.35×10^5 的试验次数, 这个团作为偶然事件的概率仍可低于 9×10^{-10} , 其显著性已高于六倍标准偏差. 这样, 可以把是否能探测到在 $\Delta\Omega$ 和 Δt 内出现概率为 10^{-15} 的事例团作为衡量一个实验装置的灵敏度是否达到可探测 10TeV γ 暴的标准. 按照这个标准, 羊八井一期阵列的灵敏度还差一些.

利用宇宙线大气簇射阵列探测 10TeV γ 暴的主要障碍, 在于存在大量不能被区分的质子簇射, 它们形成严重的背景. 如果确有 10TeV γ 暴, 它们在羊八井一期阵列中出现为 $m = 4, 5, 6$ 的团, 则已完全被大量的背景事例团掩盖. 但以上分析也说明, 对于 γ 暴这样一种在一个短的时间间隔内有大量 γ 射线到达的现象, 增大探测装置的有效接收面积对提高信噪比, 从而对提高探测灵敏度有很重要的意义.

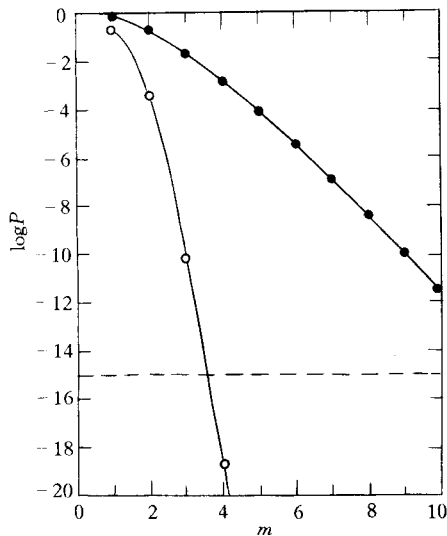


图3 一期阵列背景事例团的概率 P , 阵列对探测 10TeV γ 暴的灵敏度以及在二期阵列中 10TeV γ 暴被从背景中分离的可能性

详见正文.

其中, $m = 1, 2, 3, 4$ 的概率是用二期阵列的 $m = 1, 9, 17, 25$ 并对 $\langle n \rangle = 1.76$ 求出的. 图3的虚线给出实验装置探测 10TeV γ 暴的灵敏度. 由图3看出, 在一期阵列的 $m \geq 4$ 的事例团中被背景掩盖的 γ 暴(如果存在), 二期阵列对它们都具有探测灵敏度.

除本工作外, 还利用羊八井一期阵列的数据寻找了与 BATSE γ 暴相符合的 10TeV γ 暴, 所得结果已另文发表^[7].

本文作者感谢以日本东京大学宇宙线研究所汤田利典教授为首的日方全体合作成员, 是他们与中方合作者的共同努力促成了在西藏羊八井的成功观测.

羊八井二期阵列已开始获取数据, 它的有效接收面积已扩大为一期阵列的八倍. 作为例子, 考虑一期阵列获得的 $m = 4$ 的事例团. 在已分析的数据集中, 有 800 万个以上 $m = 4$ 的团. 假设其中只有一个是 γ 暴, 则它在二期阵列中将出现为 m 大约为 25 的事例团, 此时平均背景事例率 $\langle n \rangle = 8 \times 0.22 = 1.76$, $m = 25$ 的团的背景概率为 2.2×10^{-19} . 对大量 $m = 4$ 的背景团, 按照 Poisson 概率, 它们在二期阵列的数据中将出现为 m 约为 7 的事例团. 这时, 那个 $m = 25$ 的团已具有足够高的显著性可被认定为 γ 暴.

在图3里, 圆点表示一期阵列不同 m 的团的背景概率, 圆圈则表示一期阵列不同 m 的团中的 γ 暴(如果存在)在二期阵列里作为

背景事件的概率. 其中, $m = 1, 2, 3, 4$ 的概率是用二期阵列的 $m = 1, 9, 17, 25$ 并对 $\langle n \rangle = 1.76$ 求出的. 图3的虚线给出实验装置探测 10TeV γ 暴的灵敏度. 由图3看出, 在一期阵列的 $m \geq 4$ 的事例团中被背景掩盖的 γ 暴(如果存在), 二期阵列对它们都具有探测灵敏度.

参 考 文 献

- [1] G. L. Fishman, *Gamma Ray Bursts*, AIP Conf. Proc., **265**(1992)13; G. L. Fishman *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Series*, **92**(1994)229; C.A.Meegan *et al.*, *Nature*, **335**(1992)143.
- [2] R. M. Kippen, 23th ICRC, **OG1** (1993) 85; E. J. Schneid, *Astron. and Astrophys.*, **255**(1992)L13; M. Varendorff, 23th ICRC, **OG1**(1993)81.
- [3] K. Hurley, *Gamma Ray Bursts*, AIP Conf. Proc., **265**(1992)13.
- [4] M. Aglietta, *Il Nuovo Cimento*, **15C**(1992)441; D. E. Alexandreas *et al.*, 23th ICRC, **OG1**(1993)65; A. Borione *et al.*, 23th ICRC, **OG1**(1993)57; V. Connaughton *et al.*, 23th ICRC, **OG1**(1993)112.
- [5] M. Amenomori *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992)2468.
- [6] M. Amenomori *et al.*, *Phys. Rev.*, **D47**(1993)2675; M. Amenomori 等, 高能物理与核物理, **17**(1993)385.
- [7] M. Amenomori *et al.*, *Astronomy and Astrophysics*, **311**(1996)919.

Search for 10 TeV Gamma-Ray Bursts

Ding Linkai¹ Zhaxiciren² Zhaxisanzhu² Mu Jun⁴ Wang Hui¹
 Feng Zhenyong³ Ren Jingru¹ Yu Guangce³ Zhou Wende⁴
 Labaciren² Meng Xianru² Meng Lie¹ Zhang Chunsheng¹
 Zhang Huimin¹ Shi Zhizheng¹ Jia Huanyu³ Mei Dongming²
 Huang Qing³ Tan Youheng¹ Huo Anxiang¹ Dai Benzong⁴

¹ (*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

² (*Cosmic Ray Institute, Tibet University, Lhasa 850000*)

³ (*Department of Applied Physics, South West Jiaotong University, Chengdu 610031*)

⁴ (*Physics Laboratory, Yunnan University, Kunming 650091*)

Received 6 August 1996

Abstract

A search for gamma-ray bursts at 10TeV energy region was made using data of Yangbajing air shower experiment in Tibet. About 4×10^8 events were analysed to search for shower clusters appearing in a given time interval and a given small sky bin. An equal-zenith angle method is adopted to estimate the background. Some clusters show excesses over the background but with less significance as the evidence of gamma-ray bursts. The much higher sensitivity of the Yangbajing second phase array to the detection of 10TeV gamma-ray bursts is discussed.

Key words cosmic rays, air showers, gamma-ray bursts.