

文章编号: 1007-4627(2001)03-0138-05

用羊八井加密阵列数据寻找 3 TeV 能区 γ 暴的初步结果

冯振勇, 王顺金

(西南交通大学现代物理研究所, 四川 成都 610031)

摘要: 报道了用 1996 年 10 月完成的羊八井 EAS 加密阵列探测器 (Tibet II 和 HD) 于 1997—1998 年进行的全天区观测数据, 对 3 TeV γ 暴进行寻找的结果. 发现了一批显著性明显超过 3σ 、少数显著性超过 4σ 的事例团.

关键词: 宇宙射线; 广延大气簇射; γ 暴

中图分类号: P172; O572 **文献标识码:** A

1 引言

宇宙 γ 射线暴发 (γ -ray Burst, 以下简称 γ 暴) 作为一个奇特的天文现象, 自发现至今已快 30 年了^[1], 其神秘面纱仍未被揭开. γ 暴的研究集中于以下两个方面: 第 1 是 γ 暴的起源; 第 2 是 γ 暴的产生机制、 γ 暴的起源问题, 即 γ 暴是发生在银河系内, 还是发生在宇宙学距离上, 有着至关重要的意义. 因为按观测数据推算, 暴的不同起源对应着不同的爆发能量, 其量值甚至可相差二十几个数量级^[2]. 不同量级的释放能量自然对应不同的物理过程. 所以, 没有 γ 暴源的距离的知识, 就不能准确地判断暴的产生机制.

γ 暴的无重复性 (其发生时间和空间位置完全随机) 造成难于对之作细致观测, 目前实验上还不能测出 γ 暴源的距离. 美国康普顿天文台 (CGRO) 卫星上的 BASTE 仪器自 1991 年开始, 在 20 keV—2 MeV 能区, 以每天一个暴的频率, 总共记录到了接近 3 000 个 γ 暴. 同时, 该卫星上的 COMPTEL 和 EGRET 仪器在 100 MeV—10 GeV 能区也观测到了一些 γ 暴, 但只能通过间接的方法判断这些暴的起源^[3]. 研究结果指出, γ 暴的空间分布呈高度各向同性, 其频率-大小谱 ($\log N(>S)-\log S$) 表明随距离增加弱暴数目有增多的趋势, 这显示了 γ 暴的宇宙学起源. 意大利-荷兰天文卫星 BeppoSAX

在 1997 年发现了 γ 暴的光学、射电、X 射线“余辉”^[4], 近二三年又有了新的发现^[5]. 由对应天体的观测表明, 有的暴在宇宙学距离, 如 γ 暴 GRB971214 的红移高达 3.418; 有的暴的距离很近, 如 γ 暴 GRB980425 的红移仅为 0.008 5. 并与超新星 SN1998bw 成协. γ 暴的确表现出了令人困惑的、形态各异的特点.

是否存在高能 (≥ 1 TeV) γ 暴是一个有意义的问题. 理论计算表明, 1—100 TeV 的宇宙 γ 射线在穿过宇宙学距离时, 将遭到宇宙红外背景光子和微波背景光子的强烈吸收 (通过电子对产生过程, $\gamma\gamma_e \rightarrow e^+e^-$). 因此, 如果找到了 1—100 TeV 的 γ 暴, 并且没有观察到吸收现象, 就可判定为银河系内起源. 如果探测不到, 也可给出 γ 暴源距离下限的信息. BASTE γ 暴的能谱指数在 2.0—2.6 之间, 从这些 γ 暴的能谱外推, 如果存在 1—100 TeV γ 暴, 高灵敏度的大面积宇宙线地面观测设施应可以看到它们.

目前已用地面契伦科夫望远镜数据和广延大气簇射 (以下简称 EAS) 阵列数据进行了 1—100 TeV γ 暴的寻找工作^[6]. 由于契伦科夫望远镜装置的接收面积小和观测时间短, 没有得到 γ 暴的正结果. EAS 阵列可长时间连续观测, 但由于其不能区分质子簇射和 γ 簇射, 只有靠大的数据量和好的角分辨

收稿日期: 2001-01-16; 修改日期: 2001-03-16

• 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (196351010); 教育部博士点基金资助项目

作者简介: 冯振勇 (1967—), 男 (汉族), 河北冀州人, 理学硕士, 讲师, 从事宇宙线物理学研究.

率来提高信噪比。西藏羊八井EAS阵列在世界同类装置中,有最低的观测阈能和有较好的寻找 γ 暴的条件。一些研究工作^[7-9]利用羊八井EAS数据,分别对10 TeV γ 暴进行了全天区独立寻找和与BASTEY暴的相符寻找,显示了存在10 TeV γ 暴的迹象,但尚不具有足以认证为 γ 暴的显著性。羊八井EAS阵列于1996年10月完成了对部分探测器的加密,其观测阈能已降至3 TeV。本文利用1997—1998年期间加密阵列的重建数据进行了3 TeV γ 暴的全天区独立寻找。

2 羊八井EAS加密阵列

西藏羊八井EAS阵列(中日合作)位于东经90.53°,北纬30.11°,海拔高度4300 m,相应的大气深度是606 g/cm²^[10]。该阵列于1990年开始采集数据,至1996年10月完成二期扩建和部分探测器加密(Tibet II和HD)^[11]。加密阵列是整个大阵列的一部分,由109个探测器组成,各探测器相距7.5 m,覆盖面积5157 m²。每个探测器都装有快时间光电倍增管(称快时间探测器),用于测量宇宙线次级粒子的到达时间,由此可推得簇射粒子的到达方向。加密阵列采用任意四路以上快时间探测器符合的触发方式,簇射触发率达110 Hz。加密阵列的原始数据的记录条件是:(1)4个被触发探测器都相当于至少被1.25个以上的粒子击中;(2)4个被触发探测器中,至少有两个粒子密度最高的探测器要位于阵列中心的9×9个探测器中。原始数据记录了簇射的触发时间、每路探测器的信号脉冲幅度和粒子到达的相对时间以及观测系统的标定数据等。原始数据经重建后可给出簇射事例的到达时间(儒略日, MJD)和方向(天顶角、方位角、赤经、赤纬)等信息。

对加密阵列性能的蒙特卡罗模拟表明^[12]:(1)阵列测得初级粒子的最可几能量,对光子约3 TeV,对质子约4.7 TeV;(2)阵列的角分辨率好于1°,对太阳阴影和月亮阴影的观测也证明了这一点;(3)把蟹状星云作为标准烛光,阵列对3, 4, 5 TeV的光子和质子的探测效率分别是19%, 35%, 47%和10%, 18%, 26%。

本文采用了1997年2月至1998年6月期间加密阵列的重建数据。在此期间,扣除探测器标定、仪器检修、停电等原因造成的死时间外,有效运行时间约412 d,簇射事例约25亿个。

3 3 TeV γ 暴的全天区独立寻找

宇宙线观测表明,在原初宇宙线粒子中质子、轻核等占99%以上,光子不到1%。这就造成了原初高能宇宙线经银河系磁场搅拌后,将完全随机且各向同性地到达地球大气顶部,只有光子能保持源的方向。这样,在地球大气顶部固定大小区域内、固定时间间隔内,到达的簇射粒子数目将遵守泊松分布。若确有 γ 暴存在,其光子将成团地到达大气顶部,其发生的概率将超出背景概率。这是文献^[8]采用方法的基本依据。本文仍采用这个方法对3 TeV γ 暴进行了全天区独立寻找,按以下两步进行。

3.1 用等天顶角方法估计平均背景簇射事例率

具体到EAS实验,在估计背景时,要考虑气象变化和天顶角位置变化对簇射事例率的影响。气象变化(主要是温度和气压)对簇射事例率的影响可达11%左右。具体到羊八井的天气情况,其早晚温差及季节间温差较大,而在一个月内的天气变化可以忽略。本文采用约20—30 d内的重建数据为一个时间区间(作为一次试验),统计出这个期间的平均背景簇射事例率。另外,由于EAS阵列对不同天顶角的簇射粒子有不同的探测效率,这造成了簇射事例数对天顶角的分布。图1为羊八井数据在不同天顶角入射的簇射事例数,图2为不同方位角入射的簇射事例数,采用数据的时间区间约30 d。

本文使用“等天顶角方法”^[13]估计背景平均簇射事例率,即对某个时间区间的EAS数据,对每个天顶角位置分别统计出其平均背景簇射率。对一固定的天顶角、方位角(θ_0, ϕ_0)任取一起始时刻,统计在 Δt 时间之内落入以该方向为轴,角半径为1.5°的小锥体内(相应的立体角 $\Delta\Omega = 2.15 \times 10^{-3}$ sr)的粒子数目 n 。将一次试验的整个时间区间依次按时间间隔 Δt 取至结束,可得到许多 n 值, n 的可能取值为0, 1, 2, 3, ……并服从泊松分布:

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

其中 $\langle n \rangle$ 即为本次试验中该天顶角位置的背景平均簇射事例率。角半径取为1.5°是考虑到羊八井阵列的角分辨率约为1°。这样的小锥体可保证大于70%的粒子为同一入射方向。

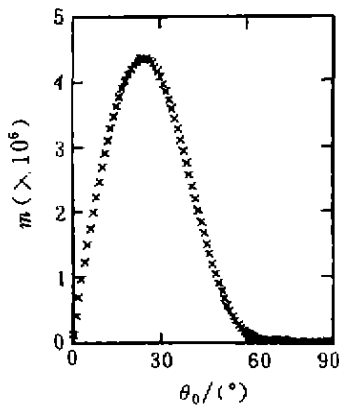


图1 事例数的天顶角分布

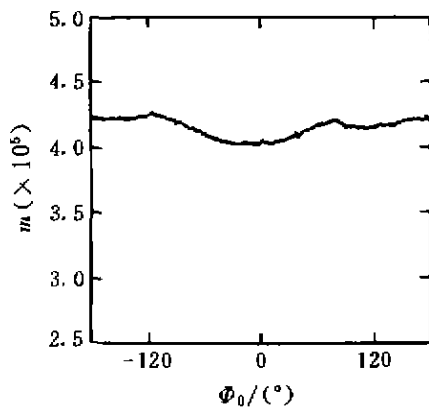


图2 事例数的方位角分布

3.2 γ 暴候选事例团的寻找

将一次试验中所记录的所有簇射事例都作为可能的候选事例团的时间、位置起点,统计在 Δt 时间内落入以该事例簇射方向为轴、与背景估计中相同

的锥体内的事例数 m (称为事例团多重数). 显然, m 的可能取值为 $1, 2, 3, \dots$. 已证明 $(m-1)$ 与背景估计中相同天顶角位置的 n 遵守同样的泊松分布^[2], 本文的统计结果也完全证明了这一点. 即

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

用(2)式估计候选事例团 m 的背景概率, 也即其作为偶然事件的期望概率 P_{expect} . 对一次试验中相同天顶角位置的事例团多重数 m , 求出其发生的概率 $P_{\text{this-test}}$, 作出其分布, 与背景概率分布作比较, 将明显超出背景概率的事例团作为 γ 暴的候选事例团, 并估计其显著性. 考虑到在一次试验中, 发生在该候选事例团所在小锥体天区内的簇射事例数为 N , 可将之作为本次试验的试验次数, 那么, 该事例团在本次实验中作为偶然事件的概率为

$$P_{\text{random}} = N \cdot P_{\text{expect}} \quad (3)$$

将概率 P_{random} 归算到高斯概率, 可求出其作为 γ 暴候选事例团的统计显著性.

4 寻找结果与讨论

考虑到 γ 暴的典型持续时间为数毫秒至数百秒, 本文分 $\Delta t = 1, 10$ 和 100 s 3种情况进行了寻找. 绝大多数事例团多重数 m 的分布与其背景概率分布一致, 尤其是 $\Delta t = 1$ s 的情况, 基本没有显示超

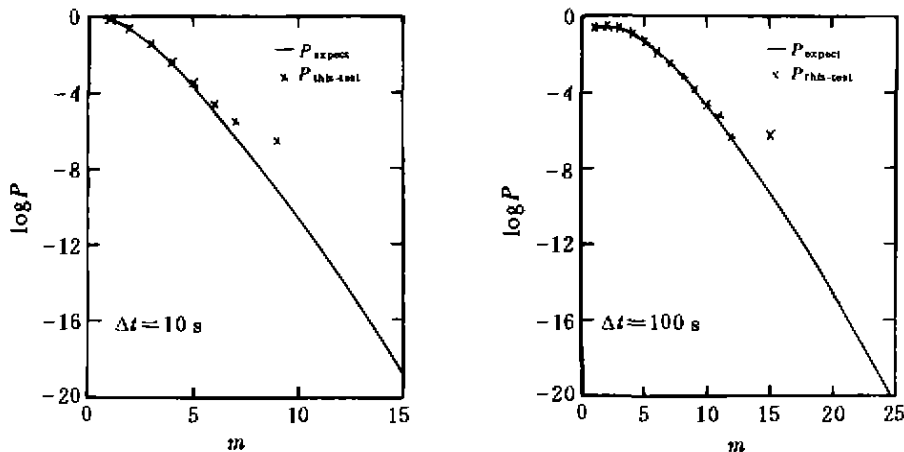


图3 m 对背景的超出

出。在 $\Delta t=10$ 和 100 s 的情况中, 有部分事例团显示了超出, 如图3所示。有超出的事例团的统计显著性一般在 3σ 左右, 有较多的显著性明显超过了 3σ , 有数个达到或超过了 4σ 。表1和表2列出了一些事例团的情况, 其中给出了事例团多重数 m 、起始事例的触发时间(MJD)和方向(天顶角和赤经、赤纬)以及

统计显著性等信息。

本文利用羊八井加密阵列数据对3 TeV γ 暴进行了全天区寻找, 其候选事例团的统计显著性高于对10 TeV γ 暴的寻找结果^[5,9], 这说明随观测阈能的降低, 阵列对 γ 暴的探测灵敏度有所提高。但显著性未达到 6σ , 还不能作为存在3 TeV γ 暴的证据。

表1 几个较高显著性事例团的情况($\Delta t=100$ s)

事例团(m)	儒略日	天顶角 ($^{\circ}$)	赤经 ($^{\circ}$)	赤纬 ($^{\circ}$)	P_{expect} ($\times 10^{-9}$)	$P_{\text{this test}}$ ($\times 10^{-7}$)	P_{random}	显著性(σ)
19	50 589.41	15.13	122.63	20.88	4.67	2.80	0.999 534	>3
15	50 599.05	46.26	281.30	17.25	0.677	5.84	0.999 971	>4
18	50 767.99	14.30	151.80	42.49	3.28	5.77	0.999 716	>3
18	50 862.03	32.65	286.76	26.30	130	7.38	0.999 257	>3
21	50 925.56	20.34	139.51	49.96	1.48	2.38	0.999 844	>3

表2 几个较高显著性事例团的情况($\Delta t=10$ s)

事例团(m)	儒略日	天顶角 ($^{\circ}$)	赤经 ($^{\circ}$)	赤纬 ($^{\circ}$)	P_{expect} ($\times 10^{-9}$)	$P_{\text{this test}}$ ($\times 10^{-7}$)	P_{random}	显著性(σ)
9	50 532.92	33.72	278.09	54.24	3.42	2.78	0.999 692	>3
8	50 680.72	41.18	9.29	40.45	2.82	4.41	0.999 839	>3
3	50 681.01	20.21	87.88	25.19	4.09	2.62	0.999 632	>3
6	50 683.30	53.55	110.91	21.21	2.39	18.7	0.999 967	>4
9	50 785.58	15.95	338.68	32.36	73.9	2.76	0.999 933	~ 4

西藏羊八井 EAS 阵列(中日合作)已于1999年10月完成了对整个阵列的加密, 其观测阈能可降至1 TeV 以下, 已获得了首批观测数据。另外, 目前在羊八井进行的中意合作 RPC(Resistive Plate Chamber, 高阻板室探测器)地毯宇宙线观测实验预计在2001年开始大规模仪器安装工作, 其探测器覆盖率将达95%以上, 观测阈能将降至100 GeV, 已接近卫星的工作能区, 对 γ 暴的探测灵敏度也将大大提

高。西藏羊八井宇宙线观测站具有得天独厚的观测位置和观测条件, 观测阈能的降低将使其具有与卫星相竞争的能力, 可开展利用地面设施观测 γ 暴的有益尝试, 其观测数据可望对 γ 暴的寻找作出有意义的结果。

致谢 作者衷心感谢西藏羊八井宇宙线观测实验中日合作组(Tibet ASY Collaboration)的全体成员。

参 考 文 献:

- [1] Klebesadel R W, Stroog I B, Olson R A. Observation of γ -ray Bursts of Cosmic Origin[J]. *ApJ Lett.* 1973, 182: L85-L88.
- [2] 陆 谈. 宇宙-物理学最大的研究对象[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1994. 143-145.
- [3] Fishman G L. γ -ray Bursts[J]. *AIP Conf Proc.* 1992, 265: 13-34; Meegan C A, Fishman G J, Wilson R B, *et al.* Spatial Distribution of γ -ray Bursts Observed by BASTE[J]. *Nature*, 1992, 355: 143-157; Schneid E J. On the Cosmological Origin of γ -ray Bursts[J]. *Astron Astrophys Lett.* 1992: 255: L13-L21; Fishman G J, Meegan C A, Wilson R B, *et al.* The First BASTE γ -ray Burst Catalog[J]. *ApJ Suppl Series*, 1994, 92: 229-283.
- [4] Paradijs J V, Groot P J, Galama T, *et al.* Transient Optical Emission from the Error Box of the γ -ray Bursts of 2 α February 1997[J]. *Nature*, 1997, 386: 686-689; Djorgovski S G, Metzger M R, Kulkarni S R, *et al.* The Optical Counterpart to the GRB of 8 May 1997[J]. *Nature*, 1997, 387: 870-875.
- [5] Castro-Tirado A J, Gorosabel J, Benitez N, *et al.* The Challenge of GRBs Observation[J]. *Science*, 1998, 279: 1 011

- 1 013; Kulkarni S R, Djorgovski S G, Ramaprakash A N, *et al.* Identification of a Host Galaxy at Redshift $Z=3.42$ for the GRB of 14 December 1997[J]. *Nature*, 1998, 393, 35-39.
- [6] Borione A, Catanese M, Kieda D, *et al.* Examination of γ -ray Bursts Source Distance Using 100 TeV γ -ray [C]. *Proc 23rd Int Cosmic Ray Conf*, 1993, 1, 57-60; Alexanders D E, Allen G E, Schnee R, *et al.* Search for Ultra-high Energy Radiation from γ -ray Bursts [C]. *Proc 23rd Int Cosmic Ray Conf*, 1993, 1, 65-68; Connaughton V, Akerlof C W, Chantell M, *et al.* TeV Counterparts of γ -ray Bursts [C]. *Proc 23rd Int Cosmic Ray Conf*, 1993, 1, 112-115; Padilla L, Funk B, Krawczynski H, *et al.* Status and Results of the Search for γ -ray Bursts Above 1 TeV with the HEGRA Experiment [C]. *Proc 25th Int Cosmic Ray Conf*, 1997, 3, 57-60; Boyle P J, Buckley J H, Burdett A M, *et al.* The Search for TeV Counterparts in γ -ray Bursts [C]. *Proc 25th Int Cosmic Ray Conf*, 1997, 3, 61-64; Dazeley S A, Edwards P G, Smith A G K, *et al.* A Southern Hemisphere Search for γ -ray Bursts at PeV and TeV Energies [C]. *Proc 25th Int Cosmic Ray Conf*, 1997, 3, 65-68.
- [7] Amenomori M, Cao Z, Dai B Z, *et al.* Search for 10 TeV Bursts-like Events Coincident with the BASTE Bursts using the Tibet Air Shower Array [J]. *Astron Astrophys*, 1996, 311, 919-926.
- [8] 丁林恺, 扎西次仁, 扎西桑珠, 等. 寻找 10 TeV 能区的 γ 射线暴 [J]. *高能物理与核物理*, 1997, 21(8), 673-679.
- [9] 傅宇. 羊八井宇宙线观测实验和 10 TeV γ 暴的寻找 [D]. 济南: 山东大学, 1998, 151-180.
- [10] Amenomori M, Cao Z, Ding L K, *et al.* Search for Steady Emission of 10 TeV γ -ray from the Crab Nebula. Cygnus X-3, and Hercules X-1 Using the Tibet Air Shower Array [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 69(17), 2468-2471.
- [11] Amenomori M, Ayabe S, Cao P Y, *et al.* Search for 10 TeV γ -ray from the Crab Nebula with the Tibet AS Array [C]. *Proc 25th Int Cosmic Ray Conf*, 1997, 3, 181-184.
- [12] Amenomori M, Ayabe S, Cao P Y, *et al.* Observation of Multi-TeV γ -rays from the Crab Nebula using the Tibet Air Shower Array [J]. *ApJ Lett*, 1999, 525, L93-L96.

A Primary Result to Search for 3 TeV γ -ray Bursts by using Data of Tibet HD Air Shower Array*

FENG Zhen-yong, WANG Shun-jin

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A search for γ -ray bursts at 3 TeV energy region was done by using the data of Tibet HD air shower array, which was obtained in the period of February 1997-June 1998. About 2.5×10^9 EAS events were analysed to search for the shower clusters appearing in a fixed time interval and small sky bin. An equal-zenith angle method is used to estimate the background and three different time intervals ($\Delta t=1, 10, 100$ s) were adopted in the research. A part of clusters show excess over the background and some significances are greater than 3σ obviously. Although a few clusters reach 4σ significance, the result of this work can not be considered to show the evidence of γ -ray bursts; instead it just indicates that the air shower array of Tibet HD now has higher sensitivity for γ -ray bursts compared to that of Tibet I and II. Much higher sensitivity in near future is expected to give clear evidence of 1-100 TeV γ -ray bursts.

Key words: cosmic ray; extensive air shower; γ -ray bursts