

用羊八井 AS γ 实验数据寻找 TeV 能区的 γ 射线暴*

周勋秀^{1)†} 胡红波²⁾ 黄 庆¹⁾

1) 西南交通大学理学院, 成都 610031)

2) 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(2008 年 12 月 1 日收到, 2008 年 12 月 31 日收到修改稿)

γ 射线暴的 TeV 能区辐射对研究其起源、辐射机制等是非常重要的. 利用西藏羊八井 AS γ 实验三期阵列的重建数据, 通过在给定的小天区和时间间隔内寻找较高显著性事例团的方法对 TeV 能区的 γ 射线暴进行了寻找, 在计算过程中采用“等天顶角法”来估计背景. 工作中采用了两种途径来寻找 γ 射线暴, 一种是与卫星 γ 射线暴的符合寻找, 另一种是全天区独立寻找. 结果发现少量事例团对背景有明显超出, 考虑试验次数后, 其超出还不足以认定为 γ 射线暴. 通过 Monte Carlo 模拟, 给出了在 95% 置信水平下, 到达大气顶部流强上限的估计值为 $3.32 \times 10^{-9} - 1.24 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

关键词: γ 射线暴, TeV 能区, AS γ 实验, 宇宙射线

PACC: 9870R

1. 引 言

γ 射线暴是来自宇宙空间的 γ 射线在短时间内突然增强的一种天文现象. 自 1967 年美国的军事卫星 Vela 首次发现以来, 对 γ 射线暴的研究一直是天体物理中最活跃的领域之一^[1]. 卫星实验的观测结果表明, γ 射线暴的持续时间较短(一般在 0.01—1000 s 之间); 释放的能量巨大, 可达 $10^{44} - 10^{46} \text{ J}$; γ 射线暴的时间结构和能谱形状都很复杂. 虽然通过余辉的观测确定了一些 γ 射线暴是宇宙学起源的, 但有关 γ 射线暴的一些基本问题仍还存在激烈的争论, 如 γ 射线暴的起源是什么? 是否存在起源于银河系内的 γ 射线暴?

对于 γ 射线暴, 目前已积累了丰富的卫星观测资料. 美国 CGRO 卫星搭载的 BATSE 实验在其工作期间, 共观测到 2704 个 γ 射线暴, 其观测结果表明, γ 射线暴的空间分布是高度各向同性的, 这大大支持了宇宙学起源模型^[2]; 1997 年意大利-荷兰的 BeppoSAX 卫星升空, 陆续发现了一部分 γ 射线暴伴随有 X 射线余辉、光学余辉以及射电余辉, 现有的多个 γ 射线暴还被观测到谱线红移, 可以确定至少

这些被观测到红移的 γ 射线暴起源于宇宙学距离^[3]. 2004 年 11 月发射的 Swift 卫星, 其观测结果为 γ 射线暴的研究带来了新的突破, 实现了短暴余辉的测量, 同时 Swift 还凭借 GRB050904 的发现, 将 γ 射线暴的红移记录从先前的 4.5 刷新到了 6.29^[4,5]; 2008 年 6 月升空的 GLAST(后又命名为 Fermi)卫星, 其探测能量高达 300 GeV^[6,7], 在工作波段上可弥补当前卫星实验的不足, 还可实现和地面阵列的交叉观测. 目前, 正致力于 γ 射线暴研究的卫星有 Swift, AGILE, INTEGRAL 和 Fermi 等.

由于卫星探测器受空间实验条件的限制, 以前的 γ 射线暴观测能区大多在 $10^3 - 10^6 \text{ MeV}$, GLAST-Fermi 卫星探测器可以达到 300 GeV, 但对 TeV 能区 γ 射线暴无能为力.

探测 TeV 能区 γ 射线暴具有重要意义, 许多理论模型预言了有甚高能区 γ 射线暴的存在^[8]; 而该能区的 γ 射线在通过宇宙学距离时, 会受到星系际空间的红外背景光子和 2.75 K 微波背景光子的强烈吸收而不能到达大气顶部^[9]. 因此, TeV 能区的 γ 射线暴将对 γ 射线暴的产生机制和源距离给出重要的信息. 另一方面, 为了得到 γ 射线暴不同能段的完整图像, 为解决 γ 射线暴的基本问题提供重要信息,

* 西南交通大学青年教师科研基金(批准号 2008Q100)资助的课题.

† E-mail: zhoux@ihep.ac.cn

探测 TeV 能区 γ 射线暴也是非常重要的.

γ 射线暴的高能观测已有一些初步的结果, CGRO 卫星搭载的另一个实验 EGRET 观测到与 3 个 BATSE γ 射线暴(GRB910503, GRB930131 和 GRB940217)在时间和方向上相符合的 GeV 能区的光子^[10], 最近 Fermi-LAT 也观测到来自 GRB081024B 的高达 3 GeV 的光子^[11]. 这都说明卫星观测到的 γ 射线暴常常伴随有更高能量的 γ 射线暴发生. 另外, 一些地面实验(如 Milagro^[12])发现有 TeV 能区 γ 射线暴存在的迹象. 由于地面宇宙线观测实验有着广阔的天球视场和较宽的工作能区, 很适合探测 TeV 能区 γ 射线暴. 利用地面实验来寻找 TeV 能区 γ 射线暴的工作早已展开, 但目前都是负结果^[13, 14].

中日合作的 ASy 实验地点位于西藏羊八井镇(东经 90.53°, 北纬 30.11°, 海拔高度为 4310 m, 相应的大气深度为 606 g/cm²), 与其他地面宇宙线观测实验相比, 该实验具有宽视场、高簇射记数率(三期约为 680 Hz)和稳定连续运行的特点, 用来探测 TeV 能区 γ 射线暴有着独特的优势. 本文利用 ASy 实验三期(1999 年 11 月—2002 年 7 月)的重建数据, 对 TeV 能区 γ 射线暴进行了寻找.

2. 羊八井 ASy 实验

中日合作的 ASy 实验是采用塑料闪烁体探测器构建的广延大气簇射阵列. 闪烁体探测器主要由闪烁体、光导、光电倍增管和电子学系统组成, 闪烁体的面积为 0.5 m² (70.7 cm × 70.7 cm), 厚度为 3 cm, 放置在 1 mm 厚不锈钢板制成的光导箱内; 每个探测器上面覆盖有 5 mm 厚的铅板, 以提高探测器的灵敏度和探测效率.

自 1989 年开始建设以来, 为增加数据统计量、降低观测阈能, ASy 实验经过不断的改进、扩建和加密, 其中三期阵列(总面积达 36900 m²)由 533 个塑料闪烁体探测器构成, 如图 1 所示, 内部为 497 个快时间(FT)探测器(detector), 即每个探测器装有一个上升时间很快的光电倍增管(其型号为 Hamamatsu H1161), 主要用来测量粒子的到达时间, 其中的 185 个探测器还装置了一个测量粒子密度的动态范围很大的光电倍增管(D PMT, 其型号为 Hamamatsu H3178), 这种探测器既可精确测量粒子到达时间, 又可精确测量入射到探测器的粒子数目; 外围是 36 个密度探测器(density detector), 每个探测器装有一

个大动态范围的测量粒子密度的光电倍增管, 用于排除芯位偏离阵列的事例. ASy 实验通过测量粒子的到达时间和各探测器的粒子数密度, 从而重建出原初粒子的方向和能量. Monte Carlo 模拟表明, 三期阵列探测宇宙线粒子的阈能为 1.5 TeV, 角分辨(包含约 50% 的信号事例)好于 0.9^{d 15}].

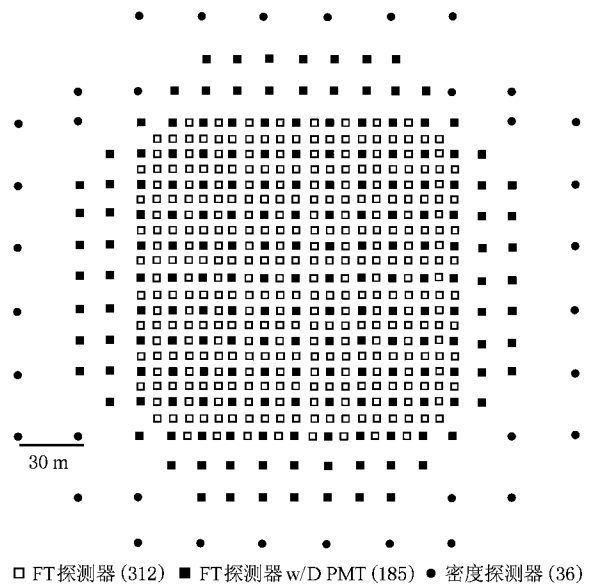


图 1 ASy 实验三期阵列探测器布局平面图

3. 数据处理方法

3.1. 事例团多重数 N_m 的统计

本工作中, 采用两种途径寻找 γ 射线暴: 一是与卫星观测到的低能 γ 射线暴在时间和方向上符合寻找 TeV 能区伴随 γ 射线暴; 二是全天区独立寻找 TeV 能区 γ 射线暴.

3.1.1. 与卫星 γ 射线暴符合寻找伴随 γ 射线暴

在 1999 年 11 月—2001 年 6 月期间, 卫星实验(考虑到 BATSE 卫星测定 γ 射线暴的方位误差很大, 本文暂不讨论与 BATSE 卫星 γ 射线暴相符合的情况)共观测到 50 个 γ 射线暴^[11], 其中有 8 个 γ 射线暴在羊八井视场内(天顶角小于 50°). 卫星实验可通过 γ 射线暴的 X 射线余辉位置而精确确定出 γ 射线暴的位置, 其误差(几个或几十个角秒)远小于 ASy 实验的角分辨, 所以在进行符合寻找时, 可能的伴随 γ 射线暴的位置就取卫星 γ 射线暴的位置. 考虑到高能 γ 射线暴的起始时间与低能 γ 射线暴的起始时间有可能不一致, 本工作在卫星 γ 射线暴触发

时间 T_{tr} 的前、后 1000 s 内寻找,即起始时间 T_s 从卫星 γ 射线暴的触发时间 T_{tr} 前 1000 s 开始,步长取 1 s 往后滑动,直到 T_{tr} 后 1000 s 为止,然后统计每个 T_s 之后的 Δt (文中对 Δt 尝试了一系列值:1, 5, 10, 15, 20, 40, 50, 60, 90 和 100 s)内,所有来自于以卫星 γ 射线暴的方向为轴、角半径为 0.9° ^[16] 的锥体(称“向源窗口”)内的事例,将它作为一个事例团,团内所有的簇射事例数记做事例团的多重数 N_{on} . 本文中,对这样的一个事例团的选择及其分析定义为一次试验.

3.1.2. 全天区独立寻找 γ 射线暴

在同一时刻,卫星的观测天区与羊八井阵列的观测天区常常不同,灵敏视场也不一样,另外 TeV 能区的 γ 射线暴与 10^3 — 10^6 eV 能区 γ 射线暴的产生机制未必相同,它们在到达时间上也未必个个相关. 所以全天区独立寻找 TeV 能区的 γ 射线暴是非常重要的和必须的^[9].

本文对所分析的重建事例逐一进行了全天区独立寻找^[9],即把每一个事例都作为一个事例团的起始事例,然后统计在第一个事例之后,在 Δt (文中对 Δt 尝试了一系列值:1, 10, 20, 50 和 100 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 0.9° 的锥体内的所有簇射事例,将它作为一个事例团,团内所有的簇射事例数记做事例团的多重数 N_{on} (N_{on} 中不包含领头的那一个事例).

对上述统计得到的多重数 N_{on} ,通过与预期的背景事例率比较,可估算出多重数 N_{on} 的显著性,从而找出可能的 γ 射线暴信号.

3.2. “等天顶角法”估计背景事例率

由于不同入射天顶角的簇射所经过的大气厚度不同,背景事例率对簇射轴的天顶角 θ 会有很强的依赖,因此必须针对不同的天顶角来进行背景分析^[9]. 本文采用“等天顶角法”来估计背景事例率 N_b ,即对任一事例团,取和它具有相同天顶角区内的事例数来估计本底. 考虑到统计涨落,在方位角环带上取 10 个背源窗口(其角半径大小与向源窗口一致),求出平均每个背源窗口在 Δt 内的计数,作为背景事例率 N_b . 图 2 为羊八井 ASy 实验三期数据的 N_b (Δt 取 1 s,角半径为 0.9°)随天顶角的分布,可见背景事例率 N_b 随天顶角的增大而明显下降.

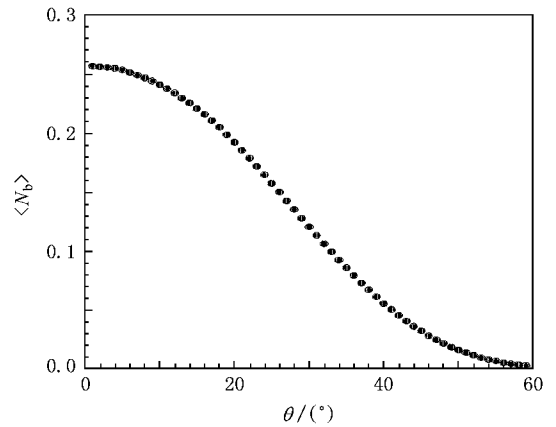


图 2 N_b 随天顶角 θ 的分布

3.3. 统计显著性的估计

时间间隔相同的完全随机的事例团,其多重数 N_{on} 的分布应该服从泊松分布. 对于一个给定的多重数 N_{on} ,由背景事例率 N_b 可求出 N_{on} 的泊松概率,即

$$P(N_{on}) = \frac{N_b^{N_{on}}}{N_{on}!} e^{-N_b}. \quad (1)$$

另外,定义 P_b 为判断一个候选 γ 射线暴作为本底涨落的概率,其值由下式决定^[17]:

$$P_b = \sum_{i=N_{on}+1}^{\infty} P(i) + \frac{1}{2} P(N_{on}), \quad (2)$$

其中 $P(i)$ 表示多重数 N_{on} 取 i 时的泊松概率. P_b 越小,说明其作为本底涨落的概率越小(即显著性越高),那么此事例团就越有可能是 γ 射线暴引起的事例团.

4. 数据处理结果

4.1. 与卫星 γ 射线暴符合寻找伴随 γ 射线暴的结果

对 8 个卫星 γ 射线暴分别按上述方法统计出不同时间窗口内所有事例团的多重数 N_{on} 和相应的背景事例率 N_b ,再由(1)和(2)式计算得到每个事例团的显著性 P_b ,结果如图 3 所示,其中纵坐标表示不同 P_b 所对应的试验次数.

由图 3 可知,显著性最高(即 P_b 最小)的是与 GRB991208 相符合的一个事例团(本文称之为候选 γ 射线暴 A). GRB991208 是由卫星 Ulysses, KONUS 和 NEAR 联合观测到的一个 γ 射线暴,其位置 $(\alpha, \delta) = (248.48^\circ, 46.43^\circ)$,触发时间 T_{tr} 为

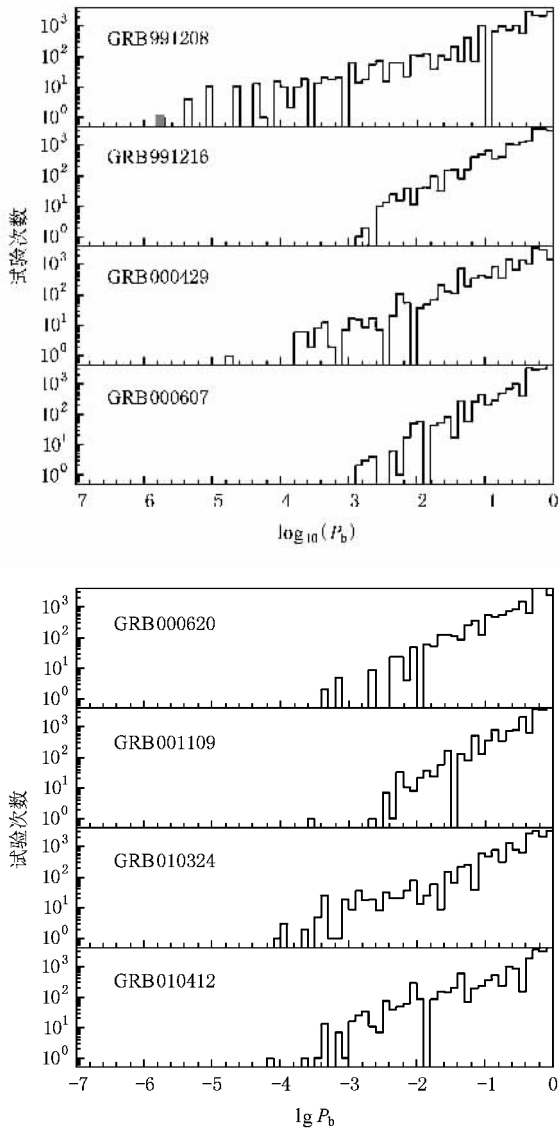


图3 与8个卫星 γ 射线暴符合寻找 TeV 能区伴随 γ 射线暴的 P_b 分布

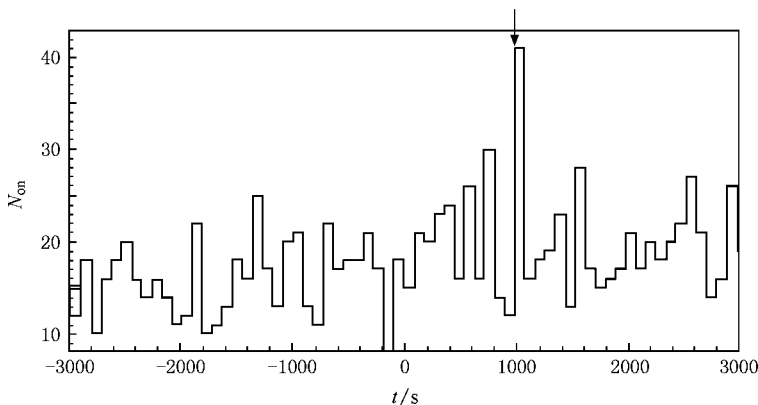


图4 在 ASy 实验数据中, 候选 γ 射线暴 A 的光变曲线(每格 90 s) 箭头处对应候选 γ 射线暴 A 的起始时间

51520.1922685(儒略日), 持续时间(T_{90})为 68 s, 在羊八井观测站的天顶角为 18.92° . 在 ASy 实验数据中, 候选 γ 射线暴 A 的起始时间 T_s 比卫星 γ 射线暴的触发时间 T_{tr} 延后 928 s, 持续时间 Δt 为 90 s, 观测到的多重数 N_{on} 为 41 个, 相应的背景事例率 N_b 为 18.0 个, 作为本底涨落的概率 P_b 为 1.64×10^{-6} .

图4给出了候选 γ 射线暴 A 的光变曲线示意图, 纵坐标表示事例团的多重数 N_{on} , 横坐标表示时间(以卫星 γ 射线暴的触发时间 T_{tr} 作为计时 0 点), 其中箭头处对应候选 γ 射线暴 A 的起始时间.

4.2. 全天区独立寻找 γ 射线暴的结果

对 ASy 实验三期的 1.45×10^{10} 个重建事例逐一按上述方法统计, 得到不同时间窗口下所有事例团的 P_b , 图5显示了对文献[17]改进后的结果.

图5可知, 显著性最高的是 P_b 为 7.23×10^{-12} 的一个事例团(本文称之为候选 γ 射线暴 B), 候选 γ 射线暴 B 的具体信息见表1.

图6给出了候选 γ 射线暴 B 的光变曲线示意图, 其中纵坐标表示事例团的多重数 N_{on} , 横坐标表示时间(以候选 γ 射线暴 B 中起始事例的儒略日 T_s 作为计时 0 点).

5. 讨 论

在与卫星 γ 射线暴进行符合寻找 TeV 能区伴随 γ 射线暴时, 最有可能是由 γ 射线暴引起的事例团为候选 γ 射线暴 A, 其作为本底涨落的概率 P_b 为 1.64×10^{-6} , 相当于高斯分布的 4.65σ , σ 为均方根差. 考虑试验次数 ($10 \times 1.9 \times 10^3$) 后, 概率为 0.0312,

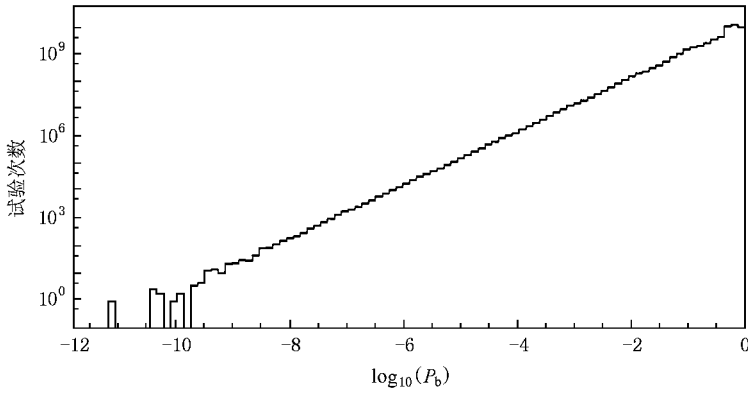


图 5 全天区独立寻找 TeV 能区 γ 射线暴中所有事例团的 P_b 分布

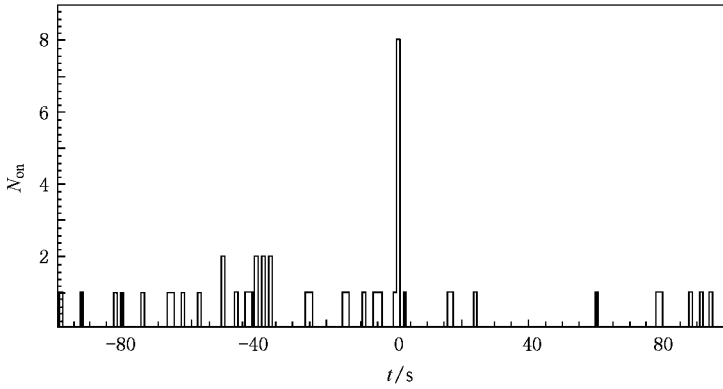


图 6 在 AS γ 实验数据中, 候选 γ 射线暴 B 的光变曲线 (每格 1 s)

相当于高斯分布的 1.88σ , 其显著性不足以认定为 γ 射线暴. 在全天区独立寻找 TeV 能区的 γ 射线暴时, 最有可能是由 γ 射线暴引起的事例团为候选 γ 射线暴 B, 其作为本底涨落的概率 P_b 为 7.23×10^{-12} , 相当于高斯分布的 6.75σ , 考虑巨大的试验次数 ($5 \times 1.45 \times 10^{10}$) 后, 概率为 0.52, 相当于高斯分布的 -0.12σ , 其显著性也不足以认定为 γ 射线暴. 为此, 本文对上述结果进行了流强上限 F_{\min} 的估计.

由事例团的多重数 N_{on} 和相应的背景事例率 N_b , 并通过插值法, 就可求出在 95% 置信水平下能够探测到的信号事例数的上限值 N_{95} , 其方法的描述见文献 [18]. 当能谱指数取 2, 能量在

1.5—800 TeV 之间, 探测器的有效面积 A_{eff} 随天顶角的分布见文献 [19]. 在 95% 置信水平下的流强上限 F_{\min} 可通过 $F_{\min} = N_{95} / (A_{\text{eff}} \Delta t)$ 来计算, 候选 γ 射线暴 A 和候选 γ 射线暴 B 的流强上限见表 1 所列.

卫星探测器 (Ulysses) 观测到 GRB991208 在 25—100 keV 之间的积分流强为 $4.9 \times 10^{-8} \text{ J/m}^2$, 能谱指数为 1.68 ± 0.19^{201} . 如果把其能谱延伸到 AS γ 实验能区 (1.5—800 TeV), 能谱指数不变时, 积分流强为 $7.62 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 比 AS γ 实验探测 GRB991208 所需要的流强上限值大得多, 而 AS γ 实验没有探测到此 γ 射线暴, 说明这个 γ 射线暴的能谱在 高能区变

表 1 候选 γ 射线暴 A 和候选 γ 射线暴 B 的具体信息

	T_{tr}	位置 ($^{\circ}$)	$T_s - T_{\text{tr}}$	θ ($^{\circ}$)	Δt / s	N_{on}	N_b	P_b	N_{95}	$F_{\min} / \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
A	51520.1922685	248.48, +46.43	928	18.92	90	41	18.00	1.64×10^{-6}	34.66	3.32×10^{-9}
B	51608.0167497	233.28, +24.68		23.94	1	8	0.17	7.23×10^{-12}	13.71	1.24×10^{-7}

得更陡.一种可能是 γ 射线暴的内禀辐射在 高能区存在截断,还有一种可能是空间传播的影响.当 TeV 能区 γ 射线在经过宇宙学距离时,受到红外背景光子的强烈吸收,使得 γ 射线暴的能谱在 高能区(TeV 能区)变陡(即能谱指数增大),其流强就会大大降低.计算发现,如果此 γ 射线暴在 TeV 能区的能谱指数大于 α 根据 Primack 等的 EBL 模型^[21],可估算出其红移值 $Z > 0.4$,其积分流强就会低于 AS γ 实验所需要的流强上限值.

6. 结 论

本文利用羊八井 AS γ 实验三期的重建数据对 TeV 能区 γ 射线暴进行了符合寻找(与卫星 γ 射线暴在时间、方向上符合)和全天区独立寻找,发现少

量事例团对背景有明显超出,但考虑试验次数后,其超出都不足以认定为 γ 射线暴.通过 Monte Carlo 模拟,对候选 γ 射线暴 A 和候选 γ 射线暴 B 的数据结果进行了流强上限的估计.在 95% 置信水平下,能量在 1.5—800 TeV 之间,能谱指数取 2 时,到达大气顶部的流强上限(即不考虑红外背景和微波背景的吸收)的估计值分别为 3.32×10^{-9} 和 $1.24 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

本文的观测结果支持 TeV 能区 γ 射线暴起源于宇宙学距离,同时也表明现有 AS γ 实验的灵敏度不够,需要提高探测器的灵敏度.

衷心感谢以日本东京大学宇宙线研究所为首的日方全体合作成员和以中国科学院高能物理研究所为首的中方全体合作成员.

- [1] Deng J G ,Huang R T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1285 (in Chinese)
[邓家干,黄仁堂 2008 物理学报 **57** 1285]
- [2] Meegan C A ,Fishman G J ,Wilson R B ,Paciesas W S ,Pendleton G N ,Horack J M ,Brock M N ,Kouveliotou C 1992 *Nature* **355** 143
- [3] Metzger M R ,Djorgovski S G ,Kulkarni S R ,Steidel C C ,Adelberger K L ,Frail D A ,Costa E ,Frontera F 1997 *Nature* **387** 878
- [4] Haislip J B ,Nysewander M C ,Reichart D E ,Levan A ,Tanvir N ,Cenko S B 2006 *Nature* **440** 181
- [5] Kawai N ,Kosugi G ,Aoki K 2006 *Nature* **440** 184
- [6] Ciprini S 2003 *Mem. S. A. It. Suppl.* **3** 238
- [7] Steinhilber H ,Bhat N P ,Briggs M S 2006 *Chin. J. Astron. Astrophys.* **6** 365
- [8] Ma X H ,Zhou X X ,Wu M ,Zhu Q Q 2003 *High Ener. Phys. Nucl. Phys.* **27** 973 (in Chinese) [马欣华,周勋秀,吴 枚,朱清棋 2003 高能物理与核物理 **27** 973]
- [9] Ding L K ,Zha X C R ,Zha X S Z 1997 *High Ener. Phys. Nucl. Phys.* **21** 673 (in Chinese) [丁林恺,扎西次仁,扎西桑珠 1997 高能物理与核物理 **21** 673]
- [10] Hurley K 1994 *Nature* **372** 652
- [11] <http://www.mpe.mpg.de/~jcg/grb081024B.html>
- [12] McEnery J E ,Atkins R ,Benbow W 1999 ArXiv 9910549v1 (Astro-ph)
- [13] Abdo A A ,Allen B T ,Berley D 2007 *Astrophys. J.* **666** 361
- [14] Albert J ,Aliu E ,Anderhub H 2007 *Astrophys. J.* **667** 358
- [15] Amenomori M ,Ayabe S ,Cui S W 2001 *Proc. 27th ICRC* **2** 573
- [16] Chen X ,Zhou X X ,Hu H B ,Liu K ,Yang Q Y ,Mu J 2004 *High Ener. Phys. Nucl. Phys.* **28** 1094 (in Chinese) [陈 欣,周勋秀,胡红波,刘 琨,杨群羽,木 钧 2004 高能物理与核物理 **28** 1094]
- [17] Zhou X X ,Huang Q 2003 *J. Southwest Jiaotong Univ.* **40** 621 (in Chinese) [周勋秀,黄 庆 2003 西南交通大学学报 **40** 621]
- [18] Protheroe R J 1984 *Astron. Expr.* **1** 33
- [19] Zhou X X 2003 *M. S. Dissertation* (Chengdu :Southwest Jiaotong University) (in Chinese) p50 [周勋秀 2003 硕士论文(成都 :西南交通大学) 第 50 页]
- [20] Hurley K ,Cline T ,Mazets E ,Aptekar R ,Golenetskii S ,Frederiks D ,Frail D ,Kulkarni S ,Trombka J ,McClanahan T ,Starr R ,Goldsten J 2000 *Astrophys. J.* **534** 23
- [21] Primack J R ,Bullock J S ,Somerville R S ,Macminn D 1999 *Astropart. Phys.* **11** 93

Search for TeV GRBs using Tibet AS γ data^{*}

Zhou Xun-Xiu¹† Hu Hong-Bo²) Huang Qing¹)

¹ *School of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*

² *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 1 December 2008 ; revised manuscript received 31 December 2008)

Abstract

TeV energy emission from gamma ray bursts (GRB) is very important for studying the origin and the radiation mechanism of GRB. Searching for TeV GRBs is carried out by using the Tibet AS γ data. A GRB candidate is a shower cluster appearing in a given small sky window and a given time interval. An equi-zenith-angle method is used to estimate the background. In this analysis, two methods are applied in searching for possible GRB's signals, one considers the coincidence with satellite GRB data and the other doesn't. No significant TeV GRBs is detected in either case. The upper flux limit on top of the atmosphere at the 95% confidence level is estimated to be about $3.32 \times 10^{-9} - 1.24 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ accordingly.

Keywords : γ -ray bursts , TeV energy region , AS γ experiment , cosmic ray

PACC : 9870R

^{*} Project supported by the Scientific Research Foundation for Young Teachers of Southwest Jiaotong University , China (Grant No. 2008Q100).

[†] E-mail : zhouxx@ihep.ac.cn