

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.03.019

利用 ARGO 实验寻找 GRBs 的本底研究

高兰兰, 闫瑞瑞, 赵 兵, 周勋秀

(西南交通大学现代物理研究所, 成都 610031)

摘要: 位于西藏羊八井宇宙线观测站(海拔 4300 m)的 ARGO-YBJ 实验具有高海拔、大视场、全覆盖特点,其阈能约几百个 GeV,在探测高能 GRBs 方面具有独特的优势. ARGO-YBJ 实验不能分辨光子和质子,要在大量的宇宙线事例中找出光子信号,就必须正确地估计背景事例率,这是寻找高能 GRBs 的关键. 本文采用“等天顶角法”对 ARGO 实验中寻找 GRBs 的宇宙线本底进行了分析. 由于地球的自转,天顶角随着时间的变化而变化. 本文重点分析了长暴在其持续时间内天顶角的变化,从而更加准确地进行了本底估计.

关键词: GRBs; 等天顶角法; ARGO-YBJ 实验

中图分类号: O572.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)03-0495-05

The background event study of search for GRBs with the ARGO experiment

GAO Lan-Lan, YAN Rui-Rui, ZHAO Bing, ZHOU Xun-Xiu

(Institute of Modern Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: ARGO-YBJ, located at the Yangbajing cosmic ray Observatory (4300 m *a. s. l.*, Tibet, china), has a threshold energy of about several hundred GeVs. It is particular useful in searching for high energy GRBs because of its unique advantages of high altitude, wide field of view, and full coverage. ARGO-YBJ experiment can not distinguish between photons and protons. To find photon signals in a large number of cosmic ray events, we must correctly estimate the background event rate, which is the key to search for high-energy GRBs. In this paper, the “equi-zenith-angle” method is used to analyze the cosmic ray background of GRBs in ARGO experiment. Due to the rotation of the earth, the zenith angle varies with time. We focuses on the analysis of the change of zenith angle in the duration of the long GRBs, so that the background estimation is more accurate.

Keywords: GRBs; The “equi-zenith-angle” method; The AGRO-YBJ experiment

1 引言

γ 射线暴(Gamma Ray Burst,简称 GRBs)是一种来自宇宙空间某一方向的 γ 射线(其波长短于 0.1 nm 的电磁波)强度在短时间内(0.1~1000s)突然增强、随后又迅速减弱的天文现象,是自宇宙大爆炸以来人们所能观测到的宇宙中最剧烈的爆

发现象^[1]. 自 1973 年 Vela 卫星首次探测到 GRBs 以来,许多卫星实验和地面实验投入到了对 GRBs 的探测与研究中. 50 多年来,卫星实验共观测到 5000 多个 keV~MeV 能区的 GRBs^[2-5],其中约 500 个 GRBs 被观测到红移,现在至少可以确定这些被观测到红移的 GRBs 起源于宇宙学距离^[6]. E-GRET 和 Fermi-LAT 卫星观测到约 80 个 GRBs

收稿日期: 2017-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(11475141); 中央高校基本科研业务费专项资金(2682014CX091)

作者简介: 高兰兰(1991-),女,汉族,四川绵阳人,硕士,主要研究领域为天体物理.

通讯作者: 周勋秀. E-mail: zhouxx@ihep.ac.cn

伴随有 GeV 能区的光子辐射,这说明 GRBs 的能谱可扩展到 GeV 及以上能区。

由于空间条件的限制,卫星实验通常只能探测低能段(keV~MeV 能区)的 GRBs,而地面实验的接收面积大、天球视场广、工作能区宽,很适合探测 GeV 及以上能区的 GRBs. 很多地面实验如 AS γ ^[7]、ARGO^[8-9]、MILAGRO^[10]、HESS^[11]、MAGIC^[12,13]、HEGRA^[14]、EAS-TOP^[15]、HAWC^[16]对高能 GRBs 进行了寻找,但迄今还没有观测到显著性足够高的高能 GRBs. 位于西藏羊八井的 ARGO (Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at Yangbajing) 实验是由中国和意大利合作的地面宇宙线观测实验,该实验主要通过探测广延大气簇射中次级粒子的相关信息来获得一些关于宇宙线的原初信息. ARGO 实验具有高海拔、大视场等特点,其阈能约几百个 GeV,在探测高能 γ 暴方面具有独特的优势。

在利用地面宇宙线观测实验寻找中,本底估计非常重要. 固定窗口法寻找候选 GRBs 就是逐一寻找在一个固定的小天区(称为向源窗口)和一个固定时间内到达的,具有高统计显著性的事例团. 在对长暴进行本底分析时,由于地球自转,天顶角发生变化,导致用“等天顶角方法”对长暴的本底估计进行分析时,引起的误差较大. 通过与 Fermi 卫星观测到的 GRB130116415 的数据进行对比,进一步证实了天顶角随时间变化引起的本底估计误差较大. 因此,我们在用“等天顶角方法”对长暴进行本底估计时应注意考虑随着地球自转天顶角发生改变的因素,于是我们采用加权求平均的方法来减小误差,以便更准确地对长暴的本底进行分析。

2 ARGO 实验

ARGO^[8-9]实验位于我国西藏的羊八井,东经 90.53°,北纬 30.11°,海拔 4300 m,大气深度为 606 g/cm². ARGO 实验的探测器 RPC 即阻性板计数器是一个由意大利罗马大学的 Santonico R 等研制出的一种新型气体探测器. ARGO 实验阵列是由 RPC 组成的“地毯式”阵列,把传统的粒子取样观测发展到“全覆盖”观测,对小簇射的事例给出更精密的观测,降低了探测器的阈能,提高了实验的灵敏度. 如图 1 是 ARGO 实验阵列由 130 个 Cluster(1560 个 RPC)覆盖在中心的“地毯”阵列(74 m \times 78 m)和 24 个 Cluster(288 个 RPC)覆盖在四周的“保护圈”阵列(99 m \times 111 m)组成. 一个 Cluster

(5.7 m \times 7.6 m)主要包含 12 个 RPC(2.80 m \times 1.25 m)探测器. 一个 RPC 被人为的划分为 10 个 0.56 m \times 0.62 m 的信息读出单元(Pad),每个 Pad 上有 8 个 Strip 读出条。

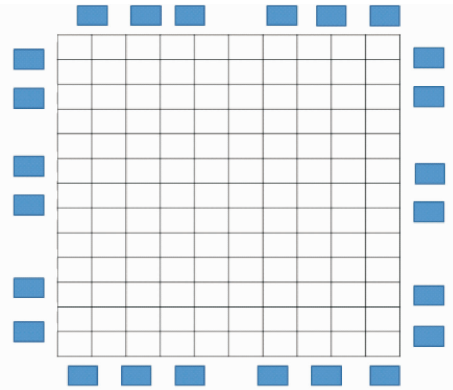


图 1 ARGO 阵列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ARGO array

3 等天顶角法估计本底

由于探测器所探测到的绝大多数事例是宇宙空间传播的其它粒子事例,即本底事例. 而中性粒子如 γ 射线在传播过程中,不被星际磁场偏转,可以保持其源的方向信息. 若确有 γ 射线暴发生,则该方向观测到的事例数将明显地超出本底的事例统计. 通过统计落入源区和背景区的事例 N_{on} 和 N_{off} ,则可以用如下公式计算来自 γ 信号源的显著性,并找出可能的 γ 暴信号. 本底估算的准确与否,将直接影响信号的显著性。

$$P_{N_{on}} = \frac{N_{off}^{N_{on}}}{N_{on}!} e^{-N_{off}} \quad (1)$$

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

$$P_{N_{off}} = \int_s^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (3)$$

(1) 式 $P_{N_{on}}$ 表示若没有 γ 射线暴发生,则在固定小天区,固定时间间隔内,完全随机到达的事例团多重数 N_{on} 服从泊松(Poisson)分布的泊松概率. (2) 式中 $P_{N_{off}}$ 是判断一个候选 γ 射线作为本底涨落的几率, $P(i)$ 表示多重数 N_{on} 取 i 时的泊松分布. 若有 γ 射线暴发生,其概率将远远超出背景概率, $P_{N_{off}}$ 越小,显著性越高. 对(2)式中的 $P_{N_{off}}$ 转换成式高斯分布的显著性 S 如(3)式所示. 一般认为显著性大于 5σ 表示有 γ 信号。

分析 ARGO 实验数据可得到宇宙线事例率随天顶角和方位角的分布如图 2 和 3 所示. 由图 2 可

知, 宇宙线事例数对天顶角的依赖很大. 当天顶角小于 20° 时, 事例率随着天顶角的增大而增大, 是因为天顶角越大对应的立体角越大, 导致事例有增长的趋势; 而当天顶角大于 20° 时, 事例数随着天顶角的增大反而减小, 是因为天顶角越大穿过的大气厚度在增大, 大气层的吸收越强, 使得探测到的事例数有下降的趋势. 图 3 则反应了触发事例数在方位角分布中有小的不均匀性, 约 $2\% \sim 3\%$, 这对 γ 射线暴寻找的影响不大, 所以在估计本底时忽略这一影响. 基于以上原因, 在 GRBs 的本底估计中, 本文采用“等天顶角方法”.

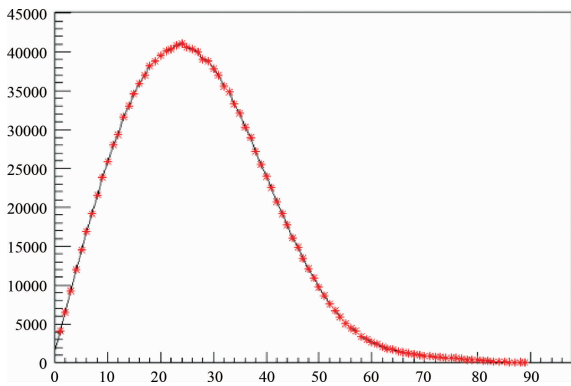


图 2 事例数随天顶角的分布

Fig. 2 The event number as a function of the zenith angle

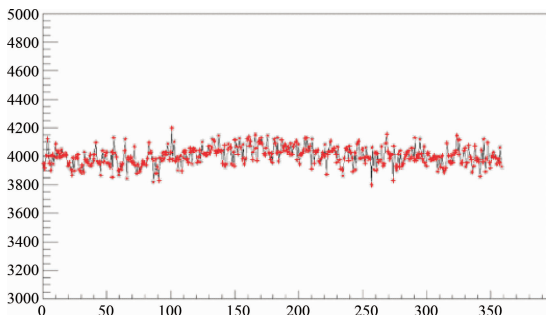


图 3 事例数随方位角的分布

Fig. 3 The event number as a function of the azimuth angle

由于簇射事例对天顶角有很强的依赖关系, 我们采用“等天顶角法”估计本底. 图 4 为“等天顶角法”的示意图, 需逐个计算不同天顶角下的背景事例率. 在任意天顶角下任取 10 个不同的方位角窗口作为背源窗口(背源窗口的角半径大小与向源窗口 N_{on} 一致), 计算出平均每个背源窗口内的事例数, 作为该天顶角下的背景事例率, 记作 N_{off} . 源区和背景区域选在同一天顶角环带上, 因此向源窗口与各个背源窗口的观测时间相同, 不受系统因停

电、标定或其它不规则停机造成的影响, 进而从根本上解决了不同天顶角对事例探测率的影响. 另外, 在同一天顶角环带上, 气压、温度等环境因素对向源窗口和背源窗口的影响基本上是一致的.

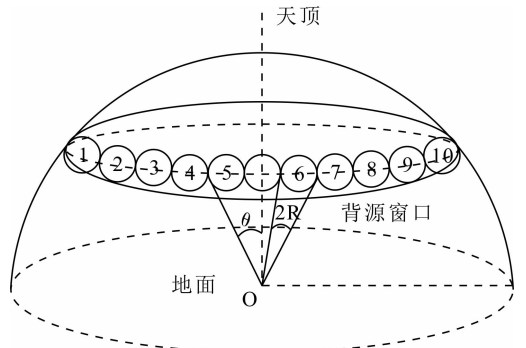


图 4 等天顶角方法示意图

Fig. 4 The schematic of “equi-zenith-angle” method

图 5 是 ARGO 实验阵列 154 个 Cluster 运行时, 小天区的立体角 (0.00646921 sr) 内的事例率随天顶角的分布. 由于事例率对天顶角的依赖很大, 本文每隔 0.1° 的天顶角间隔对本底进行统计, 排除探测器接收到的事例有突然涨落的情况. 由图可见, 随着天顶角的增大, 小天区内的事例率明显下降, 如天顶角 10° 时, 事例率是 18.8; 天顶角为 45° 时事例率为 2.8; 当天顶角大于 45° 时, ARGO 的探测效率已经很低.

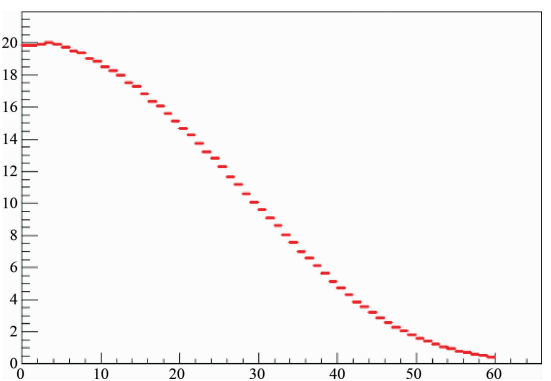


图 5 背景事例率随天顶角的变化

Fig. 5 The background event rate as a function of the zenith angle

4 对于长暴的本底估计

根据 γ 射线暴的时间分布特征可知, γ 射线暴的持续时间(通常用 T_{90} 来定义)在 $0.1 \sim 1000 \text{ s}$ 之间, 大致分为长暴(持续时间 $> 2 \text{ s}$)和短暴(持续时间 $< 2 \text{ s}$)两类. 但是以 Fermi γ 暴研究为例, 我们通

过统计分析发现观测到的所有 GRBs 中,长暴远远多于短暴^[17]. 因为“等天顶角法”估计本底中是以地平坐标系为参照系,在某 t 时刻的某一瞬间源可以认为是静止在天区的某一小区域,而这一小区域可以看作是中心的一点,对于这一源区相应背景取天顶角相等处其他所有点作为背景区域. 我们把卫星探测器接收到 γ 信号的时间作为 γ 信号源的触发时间,并以此时对应的天顶角对羊八井视场的卫星 γ 暴进行本底分析. 但是由于地球的自转等原因,随着时间的改变,天顶角是变化的. 短暴时,天顶角变化不大,用传统的等天顶角就足以估计本底;而对于长暴,持续时间较长,传统的等天顶角法估计本底误差较大,需要用加权求平均优化“等天顶角法”对其加以修正. 图 6 是 Fermi 卫星观测到的 γ 射线暴 GRB130116415,其赤经为 38.2° ,赤纬为 15.7° ,触发时间 T_{tr} 为 56 308.415 442 35(儒略日). 假设该暴的持续时间为 1000 s,对应的天顶角是变化的;通过图 6 我们可以看到该暴的天顶角在持续时间 1000 s 的过程中由 41.1° 变到了 37.6° ;持续时间大约 300 s 天顶角就变化 1° . 因此我们将触发时间所对应的天顶角来估计本底误差较大,将采用 4.1 节加权平均法对此进行修正.

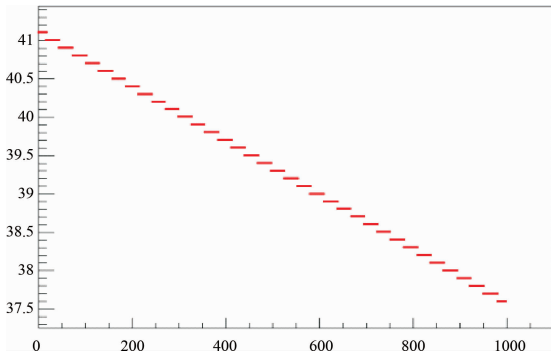


图 6 GRB130116415 对应的天顶角随时间的变化
Fig. 6 The zenith angle as a function of time for GRB130116415

4.1 加权平均数论述

对于等精度的一组观测样本 $(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k)$, 此样本可能是不同实验仪器对同一物理量 μ 的测量,也可能是同一实验仪器在不同的工作状态下对同一物理量的测量结果. 若 n 个测量数据中, x_1 出现 f_1 次, x_2 出现 f_2 次, \dots , x_k 出现 f_k 次, 那么 $(x_1 f_1 + x_2 f_2 + \dots + x_k f_k) / (f_1 + f_2 + \dots + f_k)$ 叫做 x_1, x_2, \dots, x_k 的加权平均数, f_1, f_2, \dots, f_k 是 x_1, x_2, \dots, x_k 的权. “权”可理解为各组测量结果相对的可信赖程度. 一般用符号 p 代表“权”,故加权

平均数 $\bar{\chi}_p$ 可写为:

$$\bar{\chi}_p = \frac{p_1 \bar{\chi}_1 + p_2 \bar{\chi}_2 + \dots + p_m \bar{\chi}_m}{p_1 + p_2 + \dots + p_m} \quad (4)$$

这里的 $\bar{\chi}_p$ 为加权平均值,因为参与计算总的平均值(即 $\bar{\chi}_p$)的各 $\bar{\chi}_i$,都考虑了其“权”的相对大小,因此比较合理^[18].

4.2 加权平均法应用于本底分析

由于伽马射线暴的持续时间不一样,用触发时间对应的天顶角来分析本底事例是有一定的误差的,因此本文对伽马射线在触发时间 1000 s 以内天顶角的变化所对应的本底进行加权求平均值来减小实验的误差. 如图 7 是 GRB130116415 在触发时间持续 1000 s 内对应的本底事例率的变化. 假设取随机到达的事例团多重数 N_{om} 为 19, 可以看到在触发时间处的背景事例率 N_{off} 为 4.3, 根据第 3 节(1~3)式得到 γ 信号的显著性为 5σ . 1000 s 时的背景事例率 N_{off} 为 6.1, γ 信号的显著性为 4.1σ . 而 1000 s 持续时间内的加权平均背景事例率 N_{off} 为 5.2, γ 信号的显著性为 4.6σ . 可见,若本底估计过低就有可能误判有 γ 信号,估计过高就又有可能会湮灭掉可能的 γ 信号.

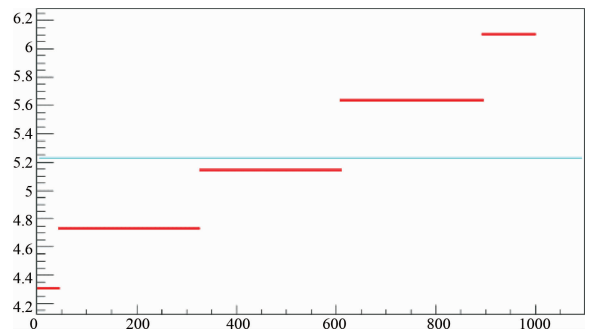


图 7 GRB130116415 本底事例率随时间的变化
Fig. 7 The background event rate as a function of the time for GRB130116415

5 结 论

本文对“等天顶角法”估计本底进行了分析,发现在对长暴进行本底估计时,由于地球自转,天顶角发生变化,导致用“等天顶角法”对长暴的本底进行分析时,引起的误差较大. 而且与 Fermi 卫星观测到的 GRB130116415 的数据进行对比,进一步证实了天顶角随时间变化引起的本底估计误差较大. 因此在用“等天顶角法”对长暴进行本底估计时,应注意考虑随着地球自转天顶角发生改变的因素. 所以我们采用加权求平均的方法来减小误差,以便更

准确的对长暴的本底进行分析, 而短暴由于持续时间很短, 天顶角几乎不变, 利用“等天顶角法”估计本底时就不需考虑此因素. 本底估计的准确将直接影响 γ 信号的显著性, 本底估计过高将湮灭 γ 信号, 而本底估计过低就会错误判断有 γ 信号. 因此认为在“等天顶角法”估计本底中对长暴应考虑天顶角变化的因素, 并用加权求平均来进行修正是可行的、必要的.

参考文献:

- [1] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, *et al.* Search for gamma-ray bursts with the ARGON-YBJ detector in shower mode [J]. *Astrophys J*, 2017, 842: 31.
- [2] Gamma ray astrophysics at the NSSTC [EB/OL]. [2017-08-23]. <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/>.
- [3] GRBs localized with BSAX or BATSE/RXTE or ASM/RXTE or IPN or HETE or INTEGRAL or Swift or AGILE or Fermi or MAXI [EB/OL]. [2017-08-24]. <http://www.mpe.mpg.de/~jcg/grbgen.html>.
- [4] Nation aeronautics and space administration goddard space flight center [EB/OL]. [2017-08-24]. http://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table/.
- [5] FERMIGTRIG-Fermi GBM trigger catalog [EB/OL]. [2017-08-24]. <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/fermi/fermigtrig.html>.
- [6] Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A. Observations of gamma-ray bursts of cosmic origin [J]. *Astrophys J*, 1973, 182: L85.
- [7] 周勋秀, 胡红波, 黄庆. 用羊八井 AS γ 实验数据寻找 TeV 能区的 γ 射线暴 [J]. *物理学报*, 2009, 58: 5879.
- [8] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, *et al.* Search for GeV gamma-ray bursts with the ARGON-YBJ detector: summary of eight years of observations [J]. *Astrophys J*, 2014, 794: 82.
- [9] Aielli G, Bacci C, Bartoli B, *et al.* ARGON-YBJ constraints on very high energy emission from GRBs [J]. *Astropart Phys*, 2009, 32: 47.
- [10] Abdo A A, Allen B T, Berley D, *et al.* Milagro constraints on very high energy emission from short-duration gamma-ray bursts [J]. *Astrophys J*, 2007, 666: 361.
- [11] Collaboration H, Abramowski A, Aharonian F, *et al.* Search for TeV Gamma-ray Emission from GRB 100621A, an extremely bright GRB in X-rays, with HESS [J]. *Astron Astrophys*, 2014, 565: A16.
- [12] Albert J, Aliu E, Anderhub H, *et al.* Flux upper limit on gamma-ray emission by GRB 050713a from magic telescope observations [J]. *Astrophys J Lett*, 2006, 641: L9.
- [13] Aleksic J, Ansoldi S, Antonelli L A, *et al.* MAGIC upper limits on the GRB 090102 afterglow [J]. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 437: 3103.
- [14] Padilla L, Funk B, Krawczynski H, *et al.* Search for gamma-ray bursts above 20 TeV with the HEGRA AIOBICC Cherenkov array [J]. *Astron Astrophys*, 1998, 337: 43.
- [15] Aglietta M, Alessandro B, Antonioli P, *et al.* Search for gamma-ray bursts at photon energies $E >= 10$ GeV and $E >= 80$ TeV [J]. *Astrophys J*, 1996, 469: 305.
- [16] Abeysekara A U, Alfaro R, Alvarez C, *et al.* Search for gamma-rays from the unusually bright GRB 130427A with the HAWC gamma-ray Observatory [J]. *Astrophys J*, 2015, 800: 78.
- [17] 张宇, 章桓, 苏晋峰, 等. Fermi γ 暴在 ARGON-YBJ 和 AS γ 实验中的流强研究 [J]. *四川师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 40: 94.
- [18] 杨晓丹, 王运锋, 张小琴. 基于卡尔曼滤波的动态权值融合 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2017, 54: 947.

引用本文格式:

中文: 高兰兰, 闫瑞瑞, 赵兵, 等. 利用 ARGON 实验寻找 GRBs 的本底研究 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 495.

英文: Gao L L, Yan R R, Zhao B, *et al.* The background event study of search for GRBs with the ARGON experiment [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2019, 56: 495.