

Tibet II / HD 阵列寻找来自蟹状星云的 TeV γ 射线*

许贤武¹ 丁林恺¹ 曹培园² 戴本忠³ 冯振勇⁴ 傅宇²
郭宏伟⁵ 何瑁² 黄庆⁴ 霍安祥¹ 贾焕玉⁴ 李金玉²
刘绍敏¹ 卢红¹ 陆穗玲¹ 罗光宣¹ 梅东明⁵ 孟宪茹⁵
木钧³ 彭朝然¹ 任敬儒¹ 史策¹ 施志政¹ 谭有恒¹
王承瑞² 王辉¹ 余光策⁴ 袁爱芳⁵ 张春生¹ 张慧敏¹
张吉龙¹ 张乃健² 张学尧² 扎西桑珠⁵ 扎西次仁⁵ 周文德³

- 1 (中国科学院高能物理研究所宇宙线和高能天体物理开放实验室 北京 100039)
- 2 (山东大学物理系 济南 250100)
- 3 (云南大学物理系 昆明 650091)
- 4 (西南交通大学物理系 成都 610031)
- 5 (西藏大学数理系 拉萨 850000)

摘要 羊八井二期阵列(Tibet II)和加密阵列 HD(High Density)分别从1995年和1996年成功地运行以来,已经积累了大量的数据.报道了利用Tibet II在1995年10月至1997年9月、HD阵列在1997年2月至8月收集的数据寻找来自蟹状星云(Crab Nebula)方向的10TeV和3TeV γ 射线稳定发射的初步结果.分析表明,来自Crab Nebula的3TeV γ 射线的累积信号事例数显示了稳定增长的趋势,显著性达到了 3.2σ ,但没有发现10TeV和30TeV γ 射线稳定发射的迹象.

关键词 宇宙射线 大气簇射 γ 射线天文学 γ 射线源

1 引言

Crab Nebula 的实验观测和理论研究对甚高能(VHE) γ 射线天文学的建立和发展起着十分重要的作用.1989年Whipple天文台利用大气C成像望远镜以高显著性探测到了来自Crab Nebula方向的VHE γ 射线发射^[1],并得到ASGAT^[2],HEGRA^[3],CAT^[4],CANGAROO^[5]等的证实.观测表明,在现有探测器灵敏度范围内(绝对流强测量误差约

1999-08-12 收稿

* 国家自然科学基金(19635030)和中国科学院基金资助

为20%),Crab Nebula的VHE流强不随时间变化.因此,Crab Nebula以其稳定的VHE γ 射线发射而成为甚高能(VHE)能区的“标准烛光”,用来检验探测器响应的稳定性和数据分析方法的可靠性.1993年,它作为VHE能区探测到的第一个 γ 射线源的地位得以最终确立.至今,Crab Nebula仍是多个波段上最明亮的天体之一.

最近几年,多波段联合的观测和研究受到了越来越多的重视.Crab Nebula在射电到X射线波段的辐射认为是带电粒子被脉冲星加速到相对论能量时发射的同步辐射光子.SSC模型^[6,7]在30多年前就预言了Crab Nebula的VHE γ 射线发射,认为TeV γ 射线起源于高能电子与同步辐射光子以及星云中的其它低能光子(如微波背景光子和红外光子)之间的逆康普顿散射(IC)过程.Crab Nebula的TeV能谱对初级电子谱、星云的磁场强度以及电子和磁场在星云中的空间分布很敏感,对其进行研究将为我们提供带电粒子和 γ 射线在Crab Nebula中的加速和产生机制的信息.200GeV至7TeV的 γ 射线能谱与SSC模型的计算结果符合很好.7TeV以上能区目前只有CANGAROO组使用大天顶角方法得到的直到50TeV的流强值,而各个大气簇射(EAS)阵列实验组至今只给出了一些流强上限,这些流强和上限都高于SSC模型计算的外推能谱.电子能量越高,它在星云磁场中的同步辐射能量损失将越大,IC过程产生的更高能量的 γ 射线的能谱将自然变陡,因此,基于电子过程的模型不能满意地解释7TeV以上的观测能谱.7TeV以上的 γ 射线能谱至今测量并不细致,不能对SSC模型参数和星云中的磁场强度给出更严格的限制.大气 γ 成像望远镜不能工作在更高的能区,因此,使用EAS阵列对此做进一步的观测和研究以期对这些问题的解决提供信息将是十分重要的.

2 实验装置

羊八井AS γ 实验站位于拉萨市西北90公里的羊八井镇(90.53°E,30.11°N),海拔

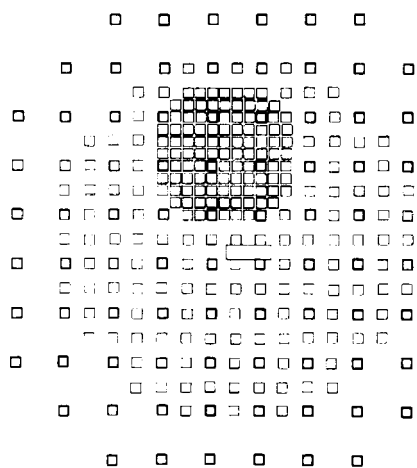


图1 Tibet II/HD阵列的探测器布置
□ 0.5m²闪烁探测器, □ 阵列控制室.

4300m,对应的大气深度为606g/cm².Tibet II阵列用185个0.5m²的快时间探测器(FT-D)测量簇射到达的时间和粒子密度,放置在间距为15m的格点上,它们被36个0.5m²,间距为30m的粒子密度探测器包围.HD阵列用109个0.5m²的FT-D测量簇射到达的时间和粒子密度,放置在间距为7.5m²的格点上.HD阵列包含在Tibet II之中,其中32个探测器既属于HD又属于Tibet II,两阵列各有自己的触发逻辑线路,彼此独立又共存.Tibet II/HD阵列的探测器布置如图1所示.为了提高探测器对集中在簇射前沿上的高能光子的探测效率,提高快时间探测器测时精度,从而达到改善阵列

角分辨率的目的,在Tibet II/HD阵列的每个探测器上面都加了一块面积为0.5m²、厚度为0.5cm的铅板.任意四路快时间探测器符合时,Tibet II和HD阵列的触发率分别约为

200Hz 和 110Hz, 系统的死时间约为 7%.

3 数据分析

在分析中共使用了 3 种数据样本用于寻找来自 Crab Nebula 的 3TeV、10TeV 和 30TeV 稳定的 γ 射线发射, 它们分别是 Tibet II 的 Phase I, Phase II 和 HD 阵列记录到的 EAS 事例, 数据样本如表 1 所述. 在重建这些事例时使用了 3 个判选条件: ①任意四路符合且粒子数大于 1.25; ②粒子数最多的 3 个探测器中至少有两个不是阵列最外围的探测器; ③天顶角小于 50° . 阵列角分辨率的高低, 可以由能否以高显著性观测到月亮阴影进行绝对检验. 分析表明, Phase I, Phase II 和 HD 阵列都以高显著性观察到了月亮阴影. 表明阵列在这 3 个观测周期运行正常, 收集到的数据可以用来寻找来自候选源的甚高能和超高能稳定的 γ 射线发射.

表 1 分析中使用的数据样本

阵列	观测日期	MJD	事例数 ($\times 10^6$)
Phase I	1995.10.2—1996.8.3	49992—50298	约 19.8
Phase II	1997.2.15—1997.9.23	50494—50714	约 14.4
Phase HD	1997.2.15—1997.8.26	50494—50686	约 7.9

γ 簇射湮没在大量各向同性分布的宇宙线背景簇射之中, 提高探测 γ 射线信噪比是地面 γ 射线天文学实验能否成功的关键. 有几种方法可以用来估计背景, 文中使用等天顶角方法来估计来自 Crab Nebula 方向的背景事例. 要使信噪比 $N_s/\sqrt{N_B}$ 达到最大, 设置向源窗口大小至关重要. 模拟计算表明, 在保留了 50% 的信号事例的条件下, 当向源窗口角半径等于阵列的角分辨率时, $N_s/\sqrt{N_B}$ 达到最大. 因此, 在本文所进行的数据分析中, 对于 10TeV (3TeV, HD) 和 30TeV (10TeV, HD) 的事例, 向源窗口角半径分别设置为 1.0° 和 0.5° , 背源窗口的个数取为 10, 此时相应的最小天顶角分别设置为 4.18° 和 2.09° .

4 结果和讨论

空气簇射的横向分布决定了阵列对簇射芯位在阵列中心区域附近、且天顶角较小的簇射有更高的定向精度. 因此, 在数据分析中, 除根据不同天顶角范围内 ($\Delta\theta = 2^\circ$) 方位角分布的不均度对每个事例进行方位角修正外, 还使用了不同的天顶角大小和芯距大小的限制条件, 以期提高探测 γ 射线信号的显著性. 分析结果表明, 由于在向源窗口左右各只选取了 5 个背源窗口, 方位角修正对于改善信号的显著性并不明显, 同时, 使用芯距大小限制条件的效果也不明显. 然而, 使用天顶角大小限制条件对于显著性有较明显的影响. 虽然 Phase I 和 Phase II 的 10TeV 和 30TeV 以及 HD 的 10TeV 稳定发射的统计显著性都小于 2σ , 但在 HD 的数据样本中, 3TeV γ 射线的累积信号事例数显示了稳定增长的趋势, 显著性达到了 3.2σ . 图 2 是 HD 阵列探测到的来自 Crab Nebula 的 3TeV γ 射线事例数的累积超出分布. 我们认为这是由于 HD 阵列探测阈能降低、角分辨率有所改善, 使得

探测 γ 射线的信噪比有一定提高. 随着积累更多的有效数据, 将有望用阵列方法探测到来自 Crab Nebula 的 3TeV γ 射线的正信号.

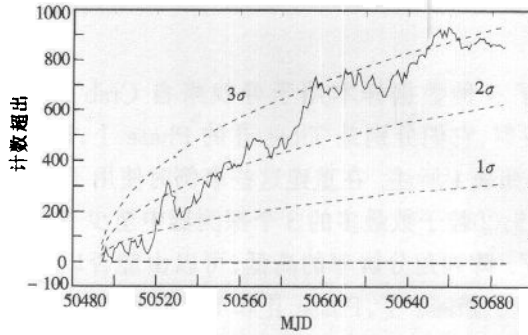


图2 Crab Nebula 3TeV γ 射线事例数的累积超出分布

通过模拟计算给出了 95% 置信水平下 Crab Nebula 发射 3TeV, 10TeV 和 30TeV γ 射线的流强上限. 模拟计算由 GENAS 软件包^[8]完成, 微分能谱指数取为 2.5, 阵列的触发条件与实际情况相同. 95% 置信水平下能够探测到的信号事例数的上限利用了 Protheroe^[9]的计算结果. 得到的流强上限与其它实验组的结果的比较如图 3 所示, 图中实线是 SSC 模型计算的结果. 从图中可以看出, 给出的 3TeV 的流强上限与 Whipple 的流强很接近, 表明羊八井 HD 阵列已经处于探测到 Crab Nebula 发射 3TeV γ 射线的灵敏区. 10TeV 以上能区的流强上限都高于 SSC 模型的计算结果, 进一步的观测和研究将为该能区 Crab Nebula 发射稳定的 γ 射线的机制给出更严格的限制, 同时, 强作用过程中产生的 π^0 衰变的贡献将更加重要.

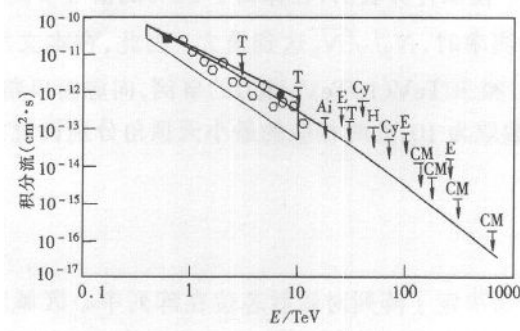


图3 Crab Nebula 的流强和流强上限

T 为本工作, 其它为别的实验组的相关数据

□ Whipple, ■ ASGAT, ● CANGAROO, CM: CASA-MIA, Ai: AIROBICC, Cy: Cygnus, E: EAS-TOP, ○: HEGRA(低能), △: HEGRA(高能).

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人员, 是中日双方合作者的共同努力完成了羊八井二期阵列的扩建和系统的成功运行.

参考文献 (References)

1 Weekes T C et al. *Astrophys. J.*, 1989, **342**: 379

- 2 Goret P et al. *Astro. Astrophys.* ,1993,**279**:401
- 3 Petry D et al. *Astron. Astrophys.* ,1996,**311**:L13
- 4 Barrau A et al. *Proc. 25th ICRC, Durban, 1997*,**3**:173
- 5 Tanimori T et al. *Astrophys. J.* ,1994,**429**:L61
- 6 Gould R J. *Phys. Rev. Lett.* , 1965,**49**:577
- 7 De Jager O C et al. *Astrophys. J.* ,1992,**396**:161; *Astrophys. J.* 1996,**457**:253
- 8 Kasahara K et al. *Computer Phys. Comm.* ,1991,**64**:109
- 9 Protheroe R J. *Astro. Expr.* ,1984,**1**:33

Search for TeV Gamma Rays from the Crab Nebula with Tibet II /HD AS Array *

XU XianWu¹ DING LinKai¹ CAO PeiYuan² DAI BenZhong³ FENG ZhenYong⁴ FU Yu²
 GUO HongWei⁵ HE Mao² HUANG Qing⁴ HUO AnXiang¹ JIA HuanYu⁴ LI JinYu²
 LIU ShaoMin¹ LU Hong¹ LU SuiLing¹ LUO GuangXuan¹ MEI DongMing⁵
 MENG XianRu⁵ MU Jun³ PENG ZhaoRan¹ REN JingRu¹ SHI Ce¹ SHI ZhiZheng¹
 TAN YouHeng¹ WANG ChengRui² WANG Hui¹ YU GuangCe⁴ YUAN AiFang⁵
 ZHANG ChunSheng¹ ZHANG HuiMin¹ ZHANG JiLong¹ ZHANG NaiJian²
 ZHANG XueYao² Zhaxisangzhu⁵ Zhaxiciren⁵ ZHOU WenDe³

1 (*The Key Lab. of Cosmic Ray and High Energy Astrophysics, Institute of
High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China*)

2 (*Department of Physics, Shandong University, Ji'nan 250100, China*)

3 (*Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China*)

4 (*Department of Physics, South West Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

5 (*Department of Mathematics and Physics, Tibet University, Lhasa 850000, China*)

Abstract A lot of data has been accumulated with Tibet II and HD AS array operated successfully since October of 1995 and 1996, respectively. The preliminary results of searching for steady TeV gamma ray emissions from Crab Nebula with these data were presented in this paper. Analysis shows that the accumulative excess events of steady 3TeV gamma ray emissions from Crab Nebula was increasing stably and the statistical significance reached 3.2σ , whereas no statistical significant evidence of steady 10TeV and 30TeV gamma ray emissions was found.

Key words cosmic ray, air shower, gamma ray astronomy, gamma ray source

Received 12 August 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19635030) and The Chinese Academy of Sciences