

# 蟹状星云脉冲星的 TeV $\gamma$ 射线周期发射\*

徐春娴 何会林 何会海 陈永忠 李辉东 姜印琳

(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)

**摘要** 利用自行研制的两台大气切伦科夫望远镜(ACT2和ACT3),在1995年秋至1996年春的观测季节对蟹状星云脉冲星进行了168小时(ACT2)和126小时(ACT3)的跟踪观测.分析这些数据没有发现有月或天时间尺度稳定的33ms周期的TeV  $\gamma$ 射线发射,但发现两段持续几十分钟的暴发样本具有33ms周期.

**关键词** 蟹状星云脉冲星  $\gamma$ 射线源 TeV  $\gamma$ 射线

## 1 引言

蟹状星云脉冲星(Crab Pulsar)的周期性辐射(33ms)已在射电、光学、X射线和高能 $\gamma$ 射线等波段被确认.这暗示存在着能量从 $10^8\text{eV}$ 直到 $10^{15}\text{eV}$ 的相对论电子.近十年来随着甚高能 $\gamma$ 天文观测技术的发展,它又被确认为一个较稳定的TeV  $\gamma$ 射线直流源<sup>[1-6]</sup>,即它的TeV  $\gamma$ 发射不受脉冲星周期调制,不呈周期结构.此外还有关于它有33ms周期TeV  $\gamma$ 射线发射的报道.这大多数是关于在较短时间内(十几分钟至几十分钟)TeV  $\gamma$ 射线暴发期间所呈现的周期性<sup>[7-10]</sup>,也有持续一年的弱周期发射现象的报道<sup>[11]</sup>.在Crab Pulsar的TeV  $\gamma$ 发射是否具有周期性问题上也常有负结果报道.美国Whipple天文台上的切伦科夫成像望远镜就给出它有直流TeV  $\gamma$ 发射,但无周期结构的报道<sup>[1]</sup>.

关于Crab Pulsar的周期性 $\gamma$ 射线,通常认为它产生于中子星表面附近.这能方便地解释 $\gamma$ 射线的能量 $L_\gamma$ 的来源(由旋转能损 $\dot{E}$ 提供 $L_\gamma = \eta_\gamma \dot{E}$ ,  $\eta_\gamma$ 为转换系数)以及能量储存等问题. $\gamma$ 射线通过相对论电子的曲率辐射、Compton散射或同步辐射等非热辐射过程发射,这些过程可以发生在极冠区<sup>[12]</sup>或外gap区<sup>[13]</sup>.非周期性的 $\gamma$ 射线被认为是在星云中的逆Compton散射生成的<sup>[14,15]</sup>.另一种说法是<sup>[16]</sup>:在离中子星几个光速柱半径的磁层中,各向同性化了的次级电子经逆Compton散射和同步辐射产生了这些非周期性的 $\gamma$ 射线,这种说法还预计在 $\sim 10\text{TeV}$ 将有一截止.因此从观测和理论两个方面对Crab Pulsar进行深入

1997-02-17收稿

\* 国家自然科学基金(19135032)和中科院院长基金特别资助

研究是十分必要的.

## 2 观测及数据获取

在 1995 年 10 月至 1996 年 3 月的 Crab Pulsar 观测季节, 在天气晴朗的无月夜前后, 利用位于兴隆 (东经  $117^{\circ}34.6'$ , 北纬  $40^{\circ}23.6'$ , 海拔 960m) 的甚高能  $\gamma$  射线望远镜 (ACT2 和 ACT3), 对 Crab Pulsar 进行了约 168 小时的跟踪观测. 该望远镜组的结构和性能在文献 [17] 中有详细介绍.

每台望远镜的三路光探测器在 10ns 内的符合信号作为判选真实大气切伦科夫光的触发信号. 此时采集系统自动记下事例的到达时间和三路信号的幅度. 这样选到的事例绝大多数是由宇宙线质子引发的. 模拟计算表明, TeV  $\gamma$  射线比同样能量的质子更有效地产生大气  $\check{C}$  光, 且  $\check{C}$  光的空间分布也较均匀, 故探测效率较高. 但宇宙线质子是各向同性的且也无周期性.

事例到达时间用北京时间记录. 计时系统用中央电视台 1 台的标准时间和频率与本地恒温晶振钟比对, 使时间分辨达  $1\mu\text{s}$ , 绝对时间精度达  $20\mu\text{s}$ . 这样的计时精度足以满足 ms 脉冲星的研究需要.

为防止天气和观测天区的不同带来的不稳定性, 六个光补偿系统分别装在两台望远镜的六个光探头前端. 在望远镜正对天顶时, 其探测阈能为 1—3TeV (因天气而异), 收集面积  $\sim 7 \times 10^8 \text{cm}^2$ . 在较好的天气条件下, 得到阈能和天顶角的关系为  $\cos^{2.5}\theta$ , 这里  $\theta$  为天顶角. 对 Crab Pulsar 跟踪观测时, 其天顶角变化范围在  $20^{\circ}$ — $50^{\circ}$  间, 故对 Crab Pulsar 的平均观测阈能是 3.3TeV.

对于被记录的事例时间样本, 要做下述处理: 中央电视台到观测地的电波传输延迟修正, 其值为 0.42ms; 转换到世界时; 转换到地球中心系 (地球自转修正); 转换到太阳质心系 (地球公转修正), 这里要用到 JPL DE200 地球历表<sup>[18]</sup>和 Crab Pulsar 的天体方位; 最后再做相对论修正. 经这一系列修正的时间样本用来做时间分析的基本数据.

## 3 数据分析及结果

### 3.1 周期性检验

由于甚高能  $\gamma$  射线源的低流量、高时变性和实验探测的低信噪比, 使  $\gamma$  源的确定必须经过假设检验这一步骤. 检验是根据实验数据对下述两个假设做出选择:

原假设  $H_0$ : 不存在  $\gamma$  射线源;

备择假设  $H_A$ : 确有  $\gamma$  射线源.

在通过分析事例到达时间的周期性来确定一个  $\gamma$  射线源存在时, 用到一个基本定理——Poincare 定理<sup>[19]</sup>: 随机事件的到达时间差服从指数分布, 当事件的时间跨度较一个试探

周期  $p$  大得多时, 则这些事件在试探周期下的位相  $\theta_i = \text{Mod} \left[ \frac{t_i}{p} \right]$  是  $(0, 1)$  间的均匀分布随机变量. 这样就把周期性检验化为对位相分布的均匀性检验. 若把位相分布  $f(\theta)$  写作

$f(\theta) = \eta f_s(\theta) + (1 - \eta) / 2\pi$ , 这里  $f_s(\theta)$  是源的周期信号的位相分布,  $\eta$  为信号强度, 第二项是随机背景的位相分布, 这时原假设和备择假设可写为:

$$\begin{aligned} H_0: \eta &= 0; \\ H_A: \eta &\neq 0. \end{aligned}$$

### 3.2 位相分布的傅立叶展开和 $HZ_m^2$ 检验

一个位相分布函数  $f(\theta)$  可做傅立叶展开:

$$f(\theta) = \frac{1}{2\pi} \left[ 1 + 2 \sum_{l=1}^{\infty} (\alpha_l \cos l\theta + \beta_l \sin l\theta) \right],$$

展开系数  $\alpha_l, \beta_l$  的无偏估计式为:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_l &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos l\theta_i; \\ \hat{\beta}_l &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin l\theta_i. \end{aligned}$$

这里  $\{\theta_i\}$  是事例位相的观测样本,  $i = 1, 2, \dots, n$ . 定义  $k_l = n(\hat{\alpha}_l^2 + \hat{\beta}_l^2)$ , 由统计定理可知, 当  $H_0$  成立时,  $2k_l$  渐近服从 ( $n > 100$ ) 自由度为 2 的  $\chi^2$  分布, 写作

$$Pr = P(> 2k_l | H_0) = \chi^2(2) = e^{-k_l},$$

若取有限项的傅立叶展开作为光变曲线  $f(\theta)$  的估计式, 即

$$\hat{f}_m(\theta) = \frac{1}{2\pi} \left[ 1 + 2 \sum_{l=1}^m (\alpha_l \cos l\theta + \beta_l \sin l\theta) \right].$$

用下式定义新的统计量  $Z_m^2$ :

$$Z_m^2 = 2n\pi \int_0^{2\pi} \left[ \hat{f}_m(\theta) - \frac{1}{2\pi} \right]^2 d\theta = \sum_{l=1}^m 2k_l,$$

这里  $Z_m^2$  实际是估计式  $\hat{f}_m(\theta)$  与均匀分布之差的平方和. 当  $H_0$  成立时, 它服从自由度为  $2m$  的  $\chi^2$  分布, 写作:

$$Pr = P(> Z_m^2 | H_0) = \chi^2(2m).$$

均匀性的  $Z_m^2$  检验首先被 COS - B 组所采用<sup>[20]</sup>.

据 Hart 1985 年的研究<sup>[21]</sup>, 对于一组实验数据  $\{\theta_i\}$ , 选取使  $Z_m^2 - 4m$  取最大值的  $m$ , 能使  $\hat{f}_m(\theta)$  与真实  $f(\theta)$  的差最小, 这称为 Hart 定律. 用此定律便可以客观地找出最佳的展开谐波数. 以下称采用 Hart 定律的  $Z_m^2$  检验为  $HZ_m^2$  检验.

### 3.3 稳定周期信号的寻找

为寻找在较长时间内与射电周期相同的稳定 TeV  $\gamma$  射线发射, 对每晚的观测数据做  $HZ_m^2$  检验. 每个事例在射电频率下的位相, 从英国 Jodrell Bank 天文台发布的 Crab Pulsar 星历月报<sup>[22]</sup> 给出的每月 15 日的射电波段频率  $f, \dot{f}$  及该天子夜后的第一个主脉冲中心的到达时间  $t_0$  算出:

$$\theta(t) = \text{Mod} \left[ 0.2 + f(t_0)t + \frac{\dot{f}(t_0)}{2} t^2 + \frac{\ddot{f}(t_0)}{6} t^3 + \dots \right],$$

这里  $t$  是以  $t_0$  为零点的事例到达的时间, 并已取  $t_0$  时刻的位相为 0.2. 若位相分布 (即光变曲线) 的分道为  $M$ , 为了在忽略  $\ddot{f}$  项时不引起道漂, 对  $t$  的要求是:

$$t < \left( \frac{6}{M\ddot{f}} \right)^{1/3}.$$

由 Crab Pulsar 月报知, 在 1995 年 10 月至 1996 年 3 月间,  $\ddot{f}$  值在  $(0.74-1.72) \times 10^{-20} s^{-3}$  之

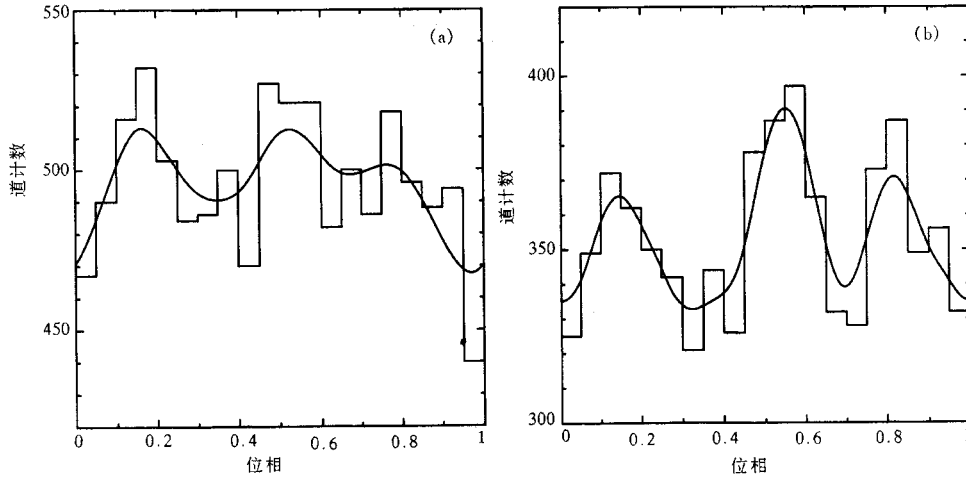


图 1 1995 年 11 月 27 日观测数据在预期射电频率下的位相分布

(a) 和 (b) 分别是 ACT2 和 ACT3 的结果.

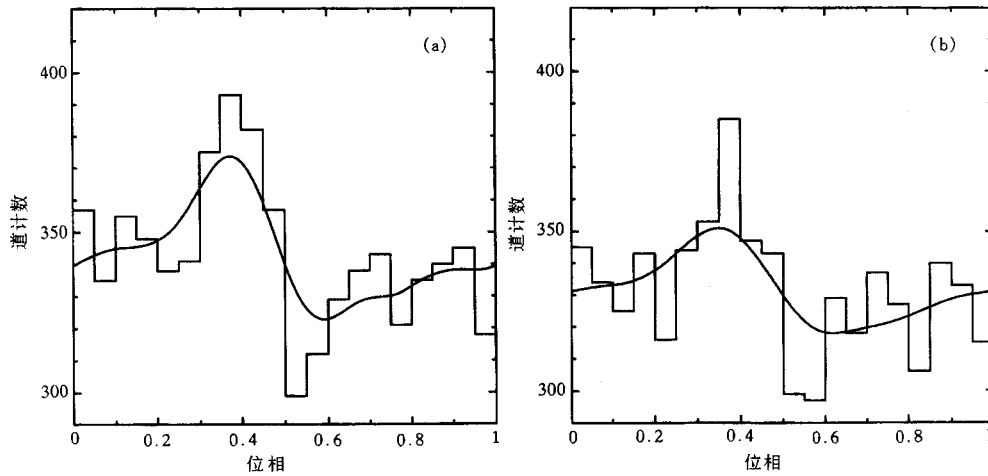


图 2 1996 年 2 月 10 日观测在预期射电频率下的位相分布

(a) 和 (b) 分别是 ACT2 和 ACT3 的结果.

间, 当取  $M = 100$  时, 得到  $t < 17.7$  天. 可见在分道数不多于 100 道的情况下, 一个月内的数据皆可取该月 15 日的  $t_0$  为零点并忽略  $f$  以上项算出所谓绝对位相. 这样得到的每晚事例的位相分布可以相加, 误差不超过 0.01.

用  $HZ_m^2$  检验, 对 39 个晚上约 294 小时的数据进行绝对位相分析, 发现 1995 年 11 月 27 日和 1996 年 2 月 10 日的数据存在周期发射的迹象. 图 1 和图 2 给出该两晚数据的位相分布, 图中的曲线是用 Swanepoel 核<sup>[23]</sup>的核心密度方法做出的. 对于 1995 年 11 月 27 日事件,  $HZ_m^2$  检验结果为  $Pr(\text{ACT2}) = 2.1 \times 10^{-2}$ ;  $Pr(\text{ACT3}) = 3.2 \times 10^{-3}$ . 1996 年 2 月 10 日的结果为  $Pr(\text{ACT2}) = 4.6 \times 10^{-3}$ ;  $Pr(\text{ACT3}) = 5.6 \times 10^{-2}$ . 以上  $Pr$  代表该事件为偶然涨落造成的概率. 若把 ACT2 和 ACT3 相同时间段的数据看作是同一事件的两次独立观测, 则 11 月 27 日事件的偶然涨落概率为  $4.4 \times 10^{-4}$ , 2 月 10 日事件为  $3.1 \times 10^{-3}$ . 但考虑到全部的观测样本数, 11 月 27 日事件为真源的置信水平为 0.983. 因此不能排除它们是背景涨落造成的. 对每晚的绝对位相相加, 也没有发现在更大时间尺度上的周期发射现象.

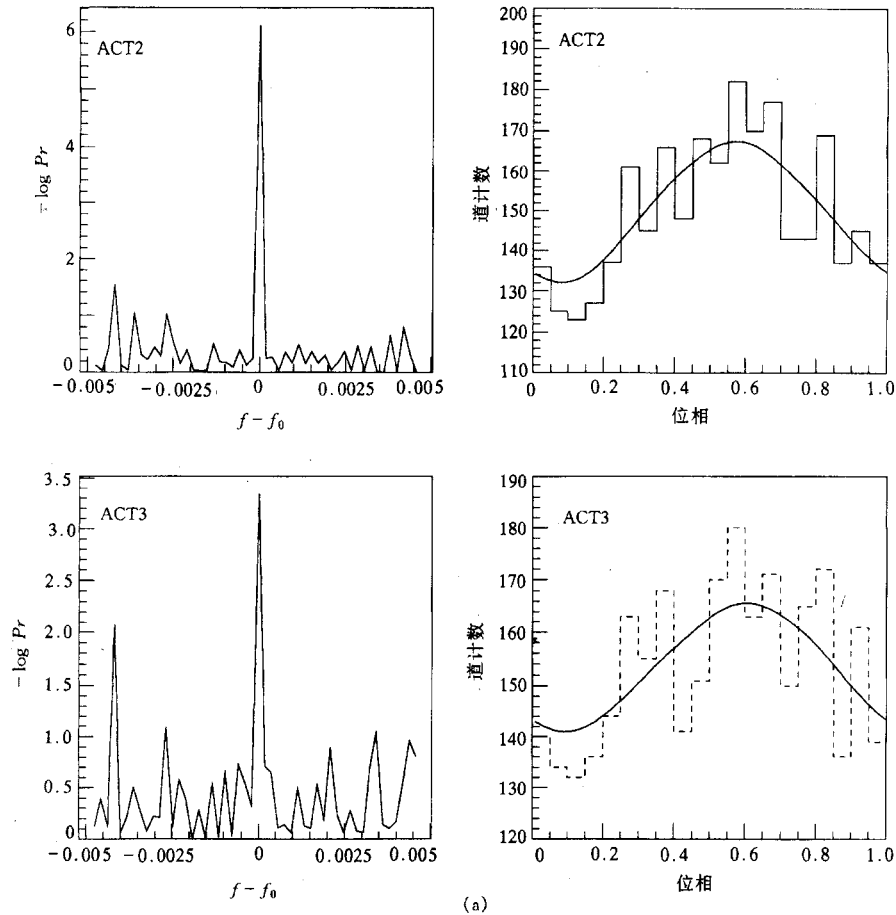
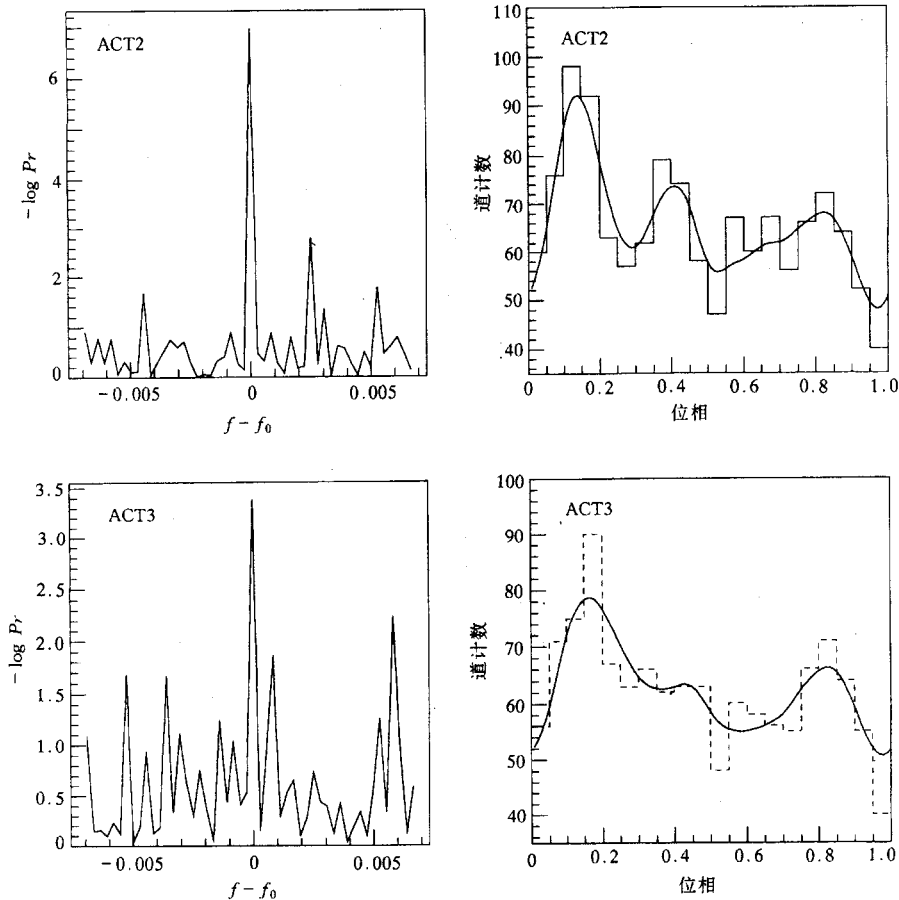


图 3 暴发样本的  $-\log Pr$   
(a)、(b) 分别与表 1

### 3.4 暴发现象的周期性

除寻找长期间的稳定 TeV  $\gamma$  发射外, 还分析了暴发现象的周期性, 即周期信号的流强在短时间内的上涨现象. 为确定暴发事件在时间序列上的位置和持续时间, 采用不同长度的时间窗口 (例如 20min, 40min 等) 以 4min 的步长在待分析的时间序列上滑动. 对于一系列落入窗口内的样本进行周期性检验. 考虑到有限长度的窗口给频率确定带来的误差, 以及脉冲星本身的准周期现象, 暴发样本的实际周期将与预期的射电周期不同. 为此需对落入窗口内的样本用射电频率附近的一系列试探频率 (110 个) 做  $HZ_m^2$  检验, 找出使  $Pr$  最小的窗宽和频率. 这是二维的筛选过程. 表 1 是用上述方法找到的两个候选的暴发样本的各种参数, MJD 为约简儒略日期, 它是以公元 1958 年 11 月 17 日世界时 0 时为零点起算的日期. 图 3 是候选暴发样本的单次概率 ( $-\log Pr$ ) 分布和光变曲线. 考虑到采样次数, 1995 年 10 月 30 日事例是真正源暴发的置信水平是 0.86, 而 1996 年 2 月 11 日事件的置信水平为 0.78.



(b)

分布和光变曲线  
中的样本对应.

表 1

样本 序号	日期	开始 时刻 (MJD)	持续 时间 (min)	发射 频率 $f_0$ (Hz)	预期射 电频率 $f_1$ (Hz)	$-\log Pr$ ( $HZ^2m$ 检验)		
						ACT2	ACT3	$m$
(a)	95.10.30	50019.7436	87	29.89901	29.89557	6.127	3.48	1
(b)	96.2.11	50124.5773	60	29.88135	29.89217	6.97	3.38	4

## 4 结 语

自 1972 年 Crab Pulsar 首次作为  $\gamma$  射线脉冲星报道<sup>[24]</sup>以来,就预示着另外一些脉冲星或高能天体也应该有高能  $\gamma$  射线发射,甚至更高能量——甚高能和超高能  $\gamma$  射线发射. 这种想法大大推动了有关的卫星和地面观测的发展,地面大 EAS 阵列和大气切伦科夫望远镜的建造以及多个  $\gamma$  射线天文卫星的发射,使  $\gamma$  射线天文研究步入蓬勃发展时期.

通常卫星上的  $\gamma$  射线探测阈能在 1GeV 以下,地面大气切伦科夫望远镜的探测阈在 0.25 到几个 TeV,地面 EAS 阵列的探测阈在  $10^{14}$ eV 左右. 近年来大气切伦科夫探测是唯一取得了正结果的地面观测,它以极高的置信水平确认了 Crab Pulsar / nebula 和 Mrk421 的直流 TeV  $\gamma$  射线发射<sup>[25,26]</sup>. 早期的  $\gamma$  天文卫星 SAS - 2 和 COS - B 成功地发现了许多银河系内的  $\gamma$  射线天体,九十年代以来, GRO 卫星实验以更高的探测灵敏度把  $\gamma$  射线天体的探测范围扩展到银河系外. 该卫星上的 EGRET 实验发现了许多活动星系核 (AGN) 有  $\gamma$  射线发射,并以极高的置信度给出了 Crab, Vela, Geminga, PSRB1706 - 44 (COS - B 源 2CG324 - 02) 和 PSRB1055 - 52 等五个  $\gamma$  射线脉冲星. 从这五个脉冲星还发现有下述规律: ①  $\gamma$  射线的转换效率  $\eta$ , 随脉冲星年龄  $\tau$  上升; ② 能谱指数随  $\tau$  的上升而下降. 若这两条在 TeV 能区也成立,则应有较高的 TeV  $\gamma$  射线流量,但实际并非如此. 对此有人解释为发射机制的截止现象所致. 在 EGRET 实验中也确实发现许多 AGN 的 GeV  $\gamma$  发射有截止现象,且不像是由于吸收造成的,并估计出截止发生在 10—100GeV. 但 Whipple 的大气切伦科夫望远镜却以极高的置信度确认了 Mrk421 的 TeV  $\gamma$  射线发射,而该望远镜的阈能  $\sim 250$ GeV. 看来并非全部 GeV  $\gamma$  射线天体均截止于一个能量下. 天体的多样性、物理过程的复杂多变性以及探测能段的广延性,给各种探测手段留下充分的活动空间. 全波段全方位的探测和分析,必定有利于揭示天体物理现象的本质,深化对自然界的认识.

感谢何泽慧院士、霍安祥先生对本工作的一贯支持.

## 参 考 文 献

- [1] Gillanders G H et al. 24th ICRC., 1995, 2:323
- [2] Weekes T C et al. Ap. J., 1989, 342:379
- [3] Akerlof C W et al. 21st ICRC., 1990, 2:135
- [4] Vacanti G et al. Ap. J., 1991, 377:467
- [5] Baillon P et al. Astroparticle Phys., 1993, 1: 341
- [6] Goret P et al. Astron, Astrophys., 1993, 227:401

- 
- [ 7 ] Gibson A. I. et al. *Nature*, 1982, **296**:833
- [ 8 ] Bhat P.N. et al., *Nature*, 1986, **319**:127
- [ 9 ] Acharya B. S. et al. *Astron. Astrophys.*, 1992, **258**:412
- [10] Jiang Y. et al. 23d ICRC., 1993, **1**:255
- [11] Douthwaite J.C. et al. *Ap.J.*, 1984, **286**:L35
- [12] Daugherty J.K., Harding A.K. *Ap.J.*, 1982, **252**:337
- [13] Cheng K.S., Ho C, Ruderman M. *Ap. J.*, 1986, **300**:500
- [14] Ress M.J., Gunn J.E. *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, 1974, **167**:1
- [15] de Jager D.C, Harding A.K. *Ap. J.*, 1992, **396**:161
- [16] Cheng W.M., Cheng K.S. *Ap. J. Suppl.*, 1994, **90**:827
- [17] Jiang Yenlin et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 1997, **21**:583  
(姜印琳等. 高能物理与核物理, 1997, **21**:583)
- [18] Standish M. *Astron. Astrophys.*, 1982, **114**:279
- [19] Mardia K.V. *Statistics of directional data*. New York: Academic Press, 1972
- [20] Buccheri R. et al. *Astron. Astrophys.*, 1983, **128**:245
- [21] Hart J.D. *J. Stat. Comp.*, 1985, **21**:95
- [22] Lyne A.G., Pritchard R.S. [http: / / www. jb.man.ac.uk~pulsar / crab.html](http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/crab.html)
- [23] Parzen E. *Annals of Mathematical Statistics*, 1962, **33**:1065
- [24] Browning R., Ramsden D., Wright P.J. *Nature*, 1971, **232**:99
- [25] Punch M. et al. *Nature*, 1992, **358**:477
- [26] Schubnell M. et al. Detection of time variability in the TeV Gamma Ray emission from the Blazar Markarian 421. In: *Towards a Major Atmospheric Cerenkov Detector III*. Edited by T. Kifune. Tokyo: Universal Academy Press, Inc., 1994. 91—94



## Pulsed Emission of Very High Energy Gamma – Rays From Crab Pulsar

Xu Chunxian He Huilin He Huihai  
Chen Yongzhong Li Huidong Jiang Yinlin

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

**Abstract** We present here the results of observation of very high energy(VHE) gamma – ray emission from Crab Pulsar with Beijing Atmospheric Cerenkov Telescopes, named ACT2 and ACT3, for the duration of the fall 1995—spring 1996 season. The data are based on 168 hours (ACT2) and 125 hours (ACT3) of exposure over the period of observation in tracking model. After conversion the event time to the solar barycenter, the data have been searched for evidence of pulsed emission at 33ms period of Crab Pulsar. We found no steady emission of VHE Gamma – ray with 33ms period at the scale of month or night. But there are two evidences of sporadic emission over an hour duration with the same period as the one at radio frequency.

**Key words** crab pulsar, gamma – ray sources, TeV gamma – rays