

用地面阵列寻找 TeV 能区 γ 点源的方法探讨*

王保胜^{1,2;1)} 崔树旺^{1,3} 丁林恺¹ 苟全补¹ 胡红波¹
何会海¹ 卢红¹ 蓝春林¹ 沈培若¹ 盛祥东¹ 谭有恒¹
唐云秋¹ 王辉¹ 吴超勇¹ 吴含荣¹ 阎志涛¹
朱清棋¹ 张吉龙¹ 张慧敏¹ 张勇¹ 祝凤荣¹ 张毅¹

1 (中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心开放实验室 北京 100039)

2 (海军后勤学院 天津 300450)

3 (河北师范大学 石家庄 050016)

摘要 文中探讨搜寻 TeV 能区 γ 点源的方法, 讨论利用 student 变量 t 判断来自源区及背景区宇宙线事例的统计差别, 并由 Bayes 定理与 Monte Carlo 模拟相结合计算源区各能段的信号数, 推算蟹状星云在 TeV 能区的 γ 射线微分能谱.

关键词 γ 天文 蟹状星云 超新星遗迹 γ 点源

1 引言

宇宙线点源与宇宙线如何获得高达 10^{20} eV 的能量是宇宙线物理和粒子天体物理共同关心的一个基本课题. 从 80 年代开始人们就试图通过寻找超高能(UHE)宇宙线在源区所产生的甚高能(VHE) γ 射线源来寻找宇宙线源. 早在 1972 年就已报道过来自蟹状星云的 TeV 能区 γ 射线发射^[1], 但直到 1989 年这一发射才由 Whipple 合作组以 9σ 的显著性确认^[2]. 一般认为蟹状星云中的脉冲星将电子加速到相对论能量, 而这些电子在周围辐射场中发生逆康普顿散射而产生 TeV 能区的 γ 射线^[3]. 现在蟹状星云已成为北天 TeV 能区 γ 发射的标准烛光. Whipple 合作组给出蟹状星云 γ 发射的微分能谱^[4]为

$$J = (3.2 \pm 0.17 \pm 0.6) \times 10^{-7} \times \left(\frac{E}{\text{TeV}}\right)^{(-2.49 \pm 0.6 \pm 0.04)}, \quad (1)$$

此处流强 J 的单位为 $\text{photon}/(\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{TeV}^{-1})$. 随后许多合作组都成功地探测到来自蟹状星云的 TeV 能区 γ 发射^[5], 但是没有发现其在该能区有脉冲发射(33ms)的证据.

用地面阵列寻找 TeV 能区 γ 点源, 具有视场广和时间连续灵敏的优点; 但不能区分 γ 信号与宇宙线形成的背景是其最大缺点. γ 源的 γ 发射强度往往弱于背景, 即在给定观测窗口内信噪比远小于 1, 这样的 γ 点源在地面不容易被探测到, 加上二者都存在随机涨落, 这样的 γ 源只是“时隐时现”, 统计显著性不高, 不能确认其存在. 在地面阵列实验中, 常常看到被探测的客体多次存在较小的显著性(例如 1 到 2σ) 的现象, 总的显著性也不高. 例如羊八井 AS γ 二期加密及三期数据初步结果表明来自蟹状星云方向的宇宙线事例分别有 5.5σ ^[6] 和 4.8σ 超出^[7]. 对于同样的三期数据, 宇宙线各向同性全天区扫描也得到蟹状星云方向有 4σ 的事例超出^[8]. 但通常宇宙线实验确认一个新的 γ 点源的标准要求

2003-12-26 收稿

* 国家自然科学基金(10120130794)和中国科技部及中国科学院资助

1) E-mail: wangbs@mail.ihep.ac.cn

显著性为 6σ 以上, 而 5σ 左右的事例超出常常令人半信半疑. 本工作建议对这一类型的数据, 既要考虑多次不相关观测得出的事例总超出量, 也要考虑这些超出量的分布方差对整体显著性的贡献, 即利用服从 student 分布的统计量 t 来判断源区及背景区是否存在统计差别, 以提高探测灵敏度.

另一方面, 用地面宇宙线阵列推算原初 γ 射线能谱时, 需要将观测到的总粒子数转换成原初 γ 光子的初能 (E_0). 简单的处理是通过 Monte Carlo 模拟给出二者平均值之间的对应关系. 由于原初能谱是一个强度随能量陡降的幂律谱, 这种近似处理会导致能量确定的系统误差. 考虑到具有确定总观测粒子数的事例所对应初能 E_0 的分布概率, 本工作采用较简单的解谱方法, 即利用 Bayes 定理, 对上述方法作了改进.

2 羊八井 AS γ 实验

羊八井 AS γ 阵列位于西藏自治区拉萨市西北 90km 的羊八井盆地上 (90.53°E , 30.11° , 海拔 4300m). 大气深度为 $606\text{g}/\text{cm}^2$. 三期阵列由 497 个快时间探测器和 36 个密度探测器组成. 这些探测器分布在间距为 7.5m 的格点上. 每个探测器是由

面积为 0.5m^2 , 厚 3cm 的塑料闪烁体构成, 闪烁体上面覆盖同样大小, 厚为 0.5cm 的铅板, 以探测高能 γ 光子. 每个探测器配备 1 或 2 个光电倍增管. 对于原初质子簇射及原初 γ 光子簇射, 触发阵列阈值能分别为 1.5TeV 和 1TeV. 事例率为 680Hz. 触发条件为在门宽 300ns 内, 至少四路 (即 4 个探测器) 符合, 输出信号大于 0.8 个粒子. 快时间及粒子密度信号由 150m 的同轴电缆送到中心控制室. 数据采集系统用 TDC 来记录粒子到达的相对时间, 而由 ADC 来测量次级粒子在探测器内产生的电离电荷, 进而估算次级粒子密度. 由着火探测器的相对到达时间来拟合原初粒子的入射方向, 而用所测电荷数来计算簇射大小 $\sum \rho_{\text{FT}}$ (各个快时间探测器每平方米上次级粒子的总和), 显然原初粒子的能量 E_0 与 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 正相关. 阵列的角分辨由模拟得到为 0.87° , 并且为阵列所得实验数据做出的月亮阴影证实^[9].

本工作采用的数据处理方法为等天顶角方法^[10], 即在源区所处的等天顶角环带上于源区两侧的方位角方向上对称地各选 5 个背景区. 事例选择条件为天顶角小于 40° 的内部事例, 并且要求方向拟合残差小于 1.0m. 所用实验数据为 1999 年 11 月至 2002 年 7 月收集.

表 1 不同簇射大小 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 分区、角分辨及事例超出

$\sum \rho_{\text{FT}}$	γ 平均能量 / TeV	角半径 / ($^\circ$)	N_{on}	αN_{off} $\alpha = 0.1$	U_x	N_{SI}	$P_r(\sum \rho_{\text{FT}})$
15—20	2.4	1.3	320475	319787	1.16	688	0.160
20—24	2.7	1.2	212438	211450	2.04	988	0.230
24—28	3.0	1.1	157593	157494	0.24	99	0.023
28—33	3.3	1.0	137544	137197	0.89	347	0.081
33—39	4.0	0.9	107704	107048	1.91	656	0.153
39—48	4.7	0.8	94902	94721	0.56	181	0.042
48—62	5.9	0.7	75724	75315	1.42	409	0.095
62—83	7.2	0.6	48403	48093	1.34	310	0.072
83—134	9.6	0.5	35069	34694	1.91	375	0.087
134—500	18.7	0.4	20139	19889	1.68	250	0.058
合计			1209991	1205688	3.89	4303	1.000

3 统计量和显著性推断

由于地面广延大气簇射阵列不能分辨簇射的原

初粒子种类. 因而传统方法只是计算源区 (本工作只考虑蟹状星云, 赤经 83.6292° , 赤纬 22.0167°) 相对于背景区的事例超出. 此事例超出量可由李-马公式给出^[11]

$$u = \pm \sqrt{2} \left\{ N_{\text{on}} \ln \left[\frac{1 + \alpha}{\alpha} \left(\frac{N_{\text{on}}}{N_{\text{on}} + N_{\text{off}}} \right) \right] + N_{\text{off}} \ln \left[(1 + \alpha) \left(\frac{N_{\text{off}}}{N_{\text{on}} + N_{\text{off}}} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中 N_{on} 为源区计数, N_{off} 为背景区总计数, α 为源区与背景区曝光时间之比值. 若源区无 γ 信号, 则 u 应该服从标准正态分布, 即 $p(u) \sim n(u; 0, 1)$.

如前所述, 如果源信号极弱, 由式(2)得出的超出量 u 往往很小, 难以判断观测结果为信号. 文献[7]根据不同簇射大小 ($\sum \rho_{\text{FT}}$) 的事例具有不同角分辨, 将全部数据按 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 分为 5 个区间, 其最初目的是提高信噪比. 本工作则将全部数据按 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 分成包含近似相等事例数的 10 个区间(如表 1 所示). 考虑到对应于 10 个 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 区间, 源区事例超出量 u_x 有 10 个(表 1 中第 6 列). 再利用源区的 10 个背景区作为假想源(每个假想源分别有各自相应的多个背景区), 这 10 个假想源在 10 个 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 区间共对应 100 个可供对照的事例超出量 u_y . 假想源的超出量 u_y 应该服从标准正态分布, 而源区若无信号, u_x 也应服从标准正态分布, 因而选择服从 student 分布的 t 作为统计量来推断源区的 10 个 u_x 和假想源区 100 个 u_y 的统计差别. 统计量 t 的定义为^[12]

$$t = \frac{\langle u_x \rangle - \langle u_y \rangle}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{m_x} + \frac{\sigma_y^2}{m_y}}} = \frac{\langle u_x \rangle - \langle u_y \rangle}{\sqrt{\frac{S_x^2}{m_x} + \frac{S_y^2}{m_y}}} \quad (3)$$

其中 $\langle u_x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{m_x} u_x}{m_x}$, $\langle u_y \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{m_y} u_y}{m_y}$ 分别为源区和假想源区事例超出量的平均值, 且 $m_x = 10$,

$m_y = 100$. 而

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^{m_x} (u_x - \langle u_x \rangle)^2}{m_x - 1},$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{m_y} (u_y - \langle u_y \rangle)^2}{m_y - 1},$$

分别为 u_x, u_y 的样本方差. 根据统计学原理, t 服从自由度 $v = m_x + m_y - 2$ 的 student 分布. 由于 $v = 108 \gg 1$, 实际上 t 也已变为标准正态分布, 即 $p(t) \sim n(t; 0, 1)$.

4 数据处理与结果

4.1 源区和假想源区的超出量分布

图 1 给出 10 个 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 区间源区(蟹状星云)及假想源区的事例超出量 u_x 和 u_y 的分布与比较. 可见假想源的超出量 u_y 确实服从标准正态分布. 如果只考虑事例数的超出, 则由 $(\langle u_x \rangle - \langle u_y \rangle) / (S_y / \sqrt{10})$ 计算可得蟹状星云所在天区的事例超出为 4σ . 若再考虑源区的 10 个超出量 u_x 的分布宽度, 由于分布宽度明显变窄 ($S_x = 0.57$, 而 $S_y = 1.02$), 则统计量 $t = 6$. 以标准正态分布计算, 无源假设造成偶然涨落的概率为 2×10^{-9} , 所以本工作认为这一超出为信号所致.

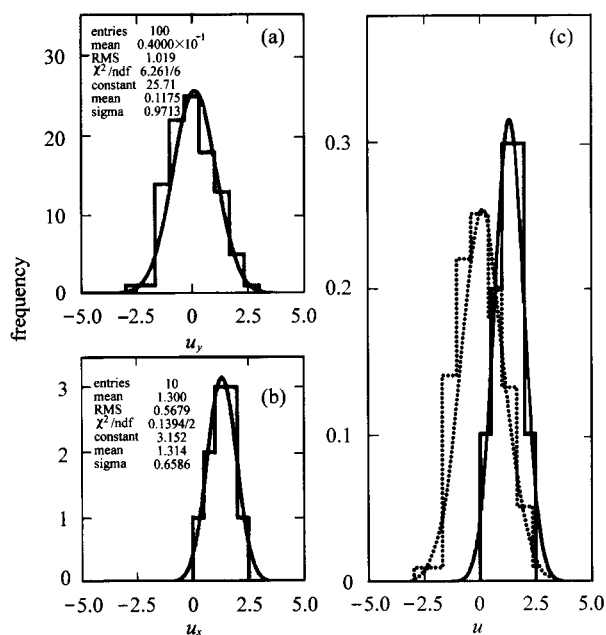


图 1 等天顶角方法中蟹状星云及 10 个假想源的事例超出量 u_x 和 u_y 分布与比较

其中(a), (b)图分别为假想源和蟹状星云不同 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 区间的 u_y 和 u_x 分布. (c)为两个分布的归一化比较.

4.2 蟹状星云的微分能谱

利用源区在各个能段相对于背景区超出的事例数、相应的曝光活时间及相应的有效面积, 可以得出蟹状星云 TeV 能区 γ 发射的能谱. 则微分流强可用下式计算,

$$J(E) = \frac{N_{S_2}}{S_{\text{eff}} T \eta_{\theta} \Delta E} \quad (4)$$

其中 N_{S_2} 为信号数(如表 2 第 12 列所示); T 为蟹状星云出现在有效观测区域的曝光活时间($T = 1.1 \times 10^7$ s); S_{eff} 为阵列对相应能段(表 2 第 1 列) γ 光子的平均有效面积(平均探测效率与阵列面积之积), 必须由 Monte Carlo 模拟才能得到; $\eta_{\theta} = 0.5$ (源区角窗口包含 50% 信号). 模拟所得原初 γ 光子平均能量与簇射大小 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 的关系列于表 1 中. 阵列平均有

表 2 不同 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 区间下不同原初 γ 光子能量分布几率 $P_r(E | \sum \rho_{\text{FT}})$

$\sum \rho_{\text{FT}}$ 能段	15—20	20—24	24—28	28—33	33—39	39—48	48—62	62—83	83—134	134—500	N_{S_2}
0.5—0.75	0.0814	0.0507	0.0404	0.0249	0.0143	0.0092	0.0030	0.0010	0.0000	0.0000	132
0.75—1.1	0.1223	0.1014	0.0876	0.0627	0.0443	0.0280	0.0153	0.0048	0.0009	0.0000	257
1.1—1.6	0.1724	0.1619	0.1344	0.1183	0.0837	0.0648	0.0314	0.0134	0.0031	0.0000	418
1.6—2.2	0.1857	0.1624	0.1593	0.1509	0.1211	0.1089	0.0667	0.0398	0.0083	0.0000	499
2.2—3.0	0.1603	0.1633	0.1577	0.1710	0.1585	0.1526	0.1100	0.0869	0.0358	0.0014	563
3.0—5.0	0.1882	0.2331	0.2544	0.2735	0.3125	0.2973	0.2794	0.2381	0.1472	0.0119	984
5.0—7.0	0.0584	0.0814	0.0956	0.1121	0.1348	0.1526	0.2013	0.2103	0.1883	0.0677	519
7.0—10.0	0.0221	0.0302	0.0467	0.0608	0.0807	0.1153	0.1724	0.2050	0.2595	0.1334	410
10.0—18.0	0.0092	0.0146	0.0223	0.0244	0.0438	0.0625	0.1057	0.1632	0.2827	0.4140	375
18.0—50.0	0.0000	0.0010	0.0016	0.0014	0.0064	0.0087	0.0149	0.0374	0.0743	0.3716	146
合计	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	4303

$P_r(E) = \sum P_r(E | \sum \rho_{\text{FT}}) P_r(\sum \rho_{\text{FT}})$ (5)
将 10 个 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 区间的超出事例数 N_{S_1} 转换成 10 个能段的信号数 N_{S_2} (如表 2 第 12 列所示). 式(5)中

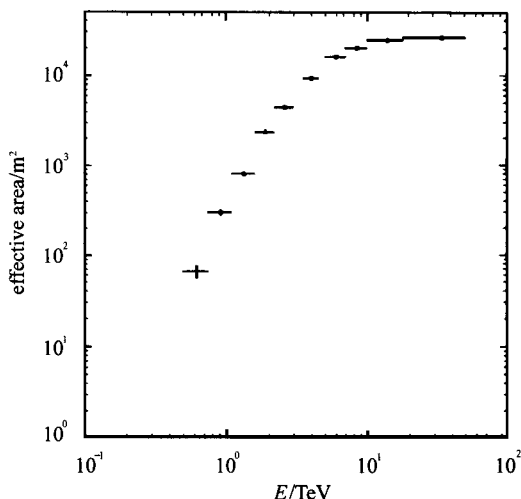


图 2 阵列相应于蟹状星云的有效面积
模拟过程中选择原初 γ 光子沿蟹状星云在地平坐标系的
轨迹均匀入射, 并且只挑选内部事例.

效面积随原初 γ 光子能量的变化如图 2 所示. 以往的工作只是简单地把 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 对应的原初 γ 光子平均能量作为式(4)中的 E , 其实每组信号数 N_{S_1} 是各能段原初 γ 光子 (N_{S_2}) 贡献的总和. 图 3 为对 $48 \leq \sum \rho_{\text{FT}} \leq 62$ 的观测事例有贡献的原初 γ 光子能量分布概率(409 个信号事例数实际为各能段的混合贡献). 其他的 N_{S_1} 也有类似的初能分布. 因此本工作利用 Bayes 定理

$P_r(\sum \rho_{\text{FT}})$ 表示观测事例落入某一 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 区间的几率(表 1 第 8 列). $P_r(E)$ 表示观测事例来自某能段 E 至 $E + \Delta E$ 的几率(表 2 第 12 列除以总信号数), 而 $P_r(E | \sum \rho_{\text{FT}})$ 是对给定的 $\sum \rho_{\text{FT}}$ 区间有贡献的原初 γ 光子能量 E 的分布几率(表 2 第 2 至 11 列所示, 为 Monte Carlo 模拟结果). 所得蟹状星云 γ 发射的能谱如图 4 所示. 与其他实验结果一致.

5 结论与讨论

(1) 本工作所使用由多个超出量 u_x 定义统计量 t 的方法来判断源区有无信号是可行的. 用同样方法对其他 58 个超新星遗迹进行计算, 所得统计量 t 与事例超出量 u 之间关系如图 5 所示. 可以看到蟹状星云方向的事例超出与其他超新星遗迹的结果存在明显差别.

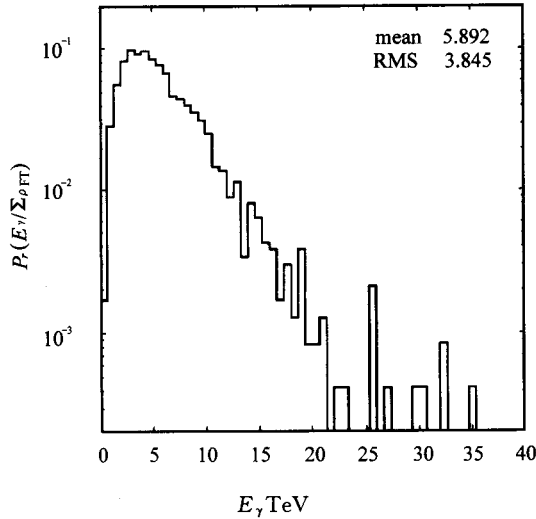


图 3 相应于 $48 \leq \sum \rho_{FT} \leq 62$ 时的原初 γ 光子的能量分布

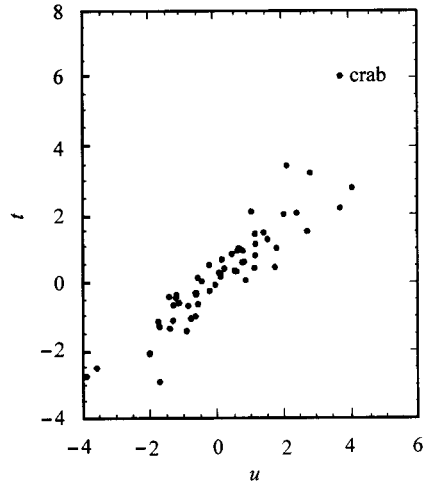


图 5 59 个超新星遗迹超出量 u 与统计量 t 的关系

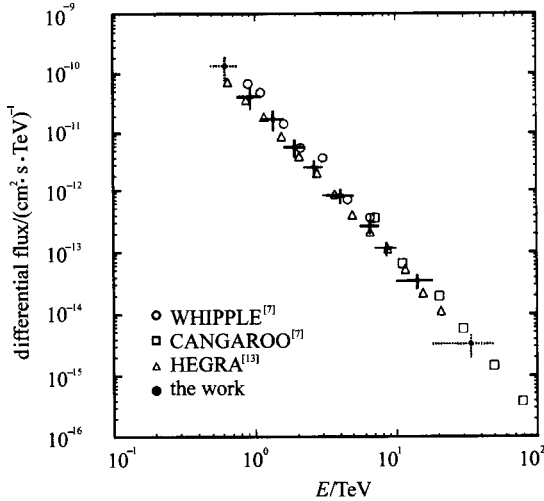


图 4 蟹状星云 TeV 微分能谱
对于能量最高与最低点, 能量间隔存在较大系统误差, 故用虚线表示误差.

(2) 羊八井三期数据已观测到来自蟹状星云 TeV 能区 γ 发射, 即 AS γ 阵列要探测到蟹状星云的 γ 发射需约 2 年的稳定运行. 然而微分流强的误差在 40% 左右, 要达到 20% 的误差共需要 8 年的运行时间.

(3) 本工作使用源区的 10 个背景区作为假想

源. 由于给定天顶角环带上的天区数据有限, 致使每两个相邻的假想源之间有些共同的背景区, 这样 u_y 可能会有微弱关联, 所以作为对照的假想源最好在与源区同赤纬的环带中但不同赤经上选取 (每个假想源的背景区仍在各自所在的天顶角环带中不同方位角上选取). 另一方面 u_x 的分布宽度与事例数的分组有关, 这可能导致 t 的不确定性. 数据分组方式还可采用其他方式, 即优化数据分组的问题尚需进一步研究.

(4) 模拟计算 $P_r(E | \sum \rho_{FT})$ 时, 假设 E 的谱指数为 -2.5 . 这可能导致 $P_r(E)$ 和谱指数的假设有关. 一种更好的办法应该是基于公式 $P_r(\sum \rho_{FT}) = P_r(\sum \rho_{FT} | E) P_r(E)$, 并且 χ^2 拟合的办法, 求得最佳参数 $P_r(E)$. 但是要求 $P_r(\sum \rho_{FT})$ 误差足够小, 以减小 $P_r(E)$ 的不确定性.

感谢羊八井 AS γ 合作组对本工作的支持和吴枚研究员、李立博士、M. Ohnishi 博士和 A. Shio-mi 博士对本工作的有益建议及讨论及羊八井观测站的陈文一、杨刚、赵成勇等在站值班人员对数据获取的贡献.

参考文献 (References)

- 1 Fazio G G et al. Ap.J., 1972, **175**:L117—L122
- 2 Weekes T C et al. Ap.J., 1989, **342**:379—395
- 3 De Jager O C, Harding A K. Ap.J., 1992, **396**:161—172
- 4 Hillas A M et al. Ap.J., 1998, **503**:744—759
- 5 Ong R. Physics Reports, 1998, **305**:93—202
- 6 Amenomori M et al. Ap.J., 1999, **525**:L93—L96
- 7 Amenomori M et al. Proceeding of 27th ICRC, Hamburg (Germany), 2001, 2395—2398
- 8 CUI S W et al. Proceeding of 28th ICRC, Tsukuba(Japan), 2003, 4:2357—2360
- 9 Amenomori M et al. Proceeding of 27th ICRC, Hamburg (Germany) 2001, 573—576
- 10 ZHANG Ji-Long et al. HEP&NP, 1999, **23**(1):22—34 (in Chinese)
(张吉龙等, 高能物理与核物理, 1999, **23**(1):22—34)
- 11 LI Ti-Pei, MA Yu-Qian. Ap.J., 1983, **272**:317—324
- 12 XU Chun-Xian et al. HEP&NP, 2001, **25**(9):799—806 (in Chinese)
(徐春娴等, 高能物理与核物理, 2001, **25**(9):799—806)
- 13 Aharonian F A et al. Ap.J., 2000, **539**:317—324

Discussions on the Method of Searching for TeV Gamma Point Sources for Ground Based EAS Array *

WANG Bao-Sheng^{1,2;1)} CUI Shu-Wang^{1,3} DING Lin-Kai¹ GOU Quan-Bu¹
 HU Hong-Bo¹ HE Hui-Hai¹ LU Hong¹ LAN Chun-Lin¹
 SHEN Pei-Ruo¹ SHENG Xiang-Dong¹ TAN You-Heng¹ TANG Yun-Qiu¹
 WANG Hui¹ WU Chao-Yong¹ WU Han-Rong¹ YAN Zhi-Tao¹
 ZHU Qing-Qi¹ ZHANG Ji-Long¹ ZHANG Hui-Min¹ ZHANG Yong¹
 ZHU Feng-Rong¹ ZHANG Yi¹

1(Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

2(Navy logistics college, Tianjin 300450, China)

3(Hebei Normal University, Shijiazhuang, 050016, China)

Abstract This paper discusses the method of searching for TeV gamma ray point sources and estimates the significance of statistical differences between on-source and off-source observations by using student variable t . Based on Bayes theorem, the number of observed signals, and the detection efficiency via Monte Carlo simulation, the differential energy spectrum of TeV gamma ray from Crab Nebula are calculated.

Key words gamma ray astronomy, crab Nebula, supernovae remnants, gamma ray point sources

Received 26 December 2003

* Supported by NSFC(10120130794), the Chinese Ministry of Science and Technology and the Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: wangbs@mail.ihep.ac.cn