

超新星遗迹和活动星系核 10TeV γ 射线 发射的实验探索*

张吉龙¹ 丁林恺¹ 扎西桑珠² 扎西次仁² 木 钧⁴
王 辉¹ 卢 红¹ 刘绍敏¹ 冯振勇³ 任敬儒¹
余光策³ 许贤武¹ 周文德⁴ 拉巴次仁² 孟宪茹²
张春生¹ 张慧敏¹ 施志政¹ 贾焕玉³ 黄 庆³
梅东明² 谭有恒¹ 霍安祥¹

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 (西藏大学宇宙线研究所 拉萨 850000)

3 (西南交通大学应用物理系 成都 610031)

4 (云南大学物理研究室 昆明 650091)

摘要 利用羊八井一期阵列从1990年6月到1993年10月的数据,采用等天顶角方法估计背景,寻找包括蟹状星云在内的58个超新星遗迹和包括Mrk421和Mrk501在内的25个活动星系核的10TeV γ 射线稳定直流超出. 利用李-马的方法,计算了这些候选源直流超出的显著性,没有出现统计上有显著意义的直流超出. 采用Kolmogorov-Smirnov检验法,对这些候选源的数据样本偏离标准正态分布的程度进行了检验,没有发现显著偏离标准正态分布. 最后,给出了它们的流强上限.

关键词 广延大气簇射 γ 射线源 超新星遗迹 活动星系核

1 引言

高能宇宙射线的起源问题,是宇宙线物理和天体物理的一个基本问题. 对这个问题,至今只有一般的了解. 较为普遍被接受的观点是:宇宙线高能粒子的大部分(例如由GeV到100TeV能区的大部分粒子)应起源于银河系超新星爆发对星际介质中核粒子的激波加速;宇宙线能谱在 10^{15} eV到 10^{16} eV间所存在的“膝”,可能是激波加速的截止及银河禁闭的失效,也可能是河内或河外另一个宇宙线源的贡献; 10^{18} eV以上的宇宙线,则极可能来源

1998-03-02收稿

* 中国科学院、国家科委和国家自然科学基金资助

于河外。

但是,至今还未能确定一个具体的天体,确认它就是高能宇宙线的源。自八十年代后半期以来,在 TeV 能区采用大气切伦柯夫光观测技术,在 10TeV 以上能区采用广延大气簇射阵列,开展了宇宙 γ 射线源的寻找,其目的就是要找出作为高能宇宙线源的具体天体。

在 TeV 能区,采用成象切伦柯夫望远镜,Whipple 组、Cangaroo 组等找到了 6 个显著性在 6σ 以上的 γ 射线源^[1],其中有 3 个是银河系的超新星遗迹(SNR),2 个是河外的活动星系核(AGN),还有一个是河内的 microquasar。但是,所有这些源的能谱特征,都可以用高能电磁辐射过程作出满意的解释。具体地说,可以用自同步康普顿散射(SSC)模型作出满意的解释^[2],还没有涉及质子及核的过程。也就是说,目前只证明了这 6 个 TeV 能区的 γ 源是高能电子源,还没有证明它们是高能质子或原子核的源,而要寻找宇宙线源,还应进入比 TeV 更高一些的能区。

本工作利用西藏羊八井一期阵列的 6×10^8 个重建后的广延大气簇射(EAS)事例,对北天分布在赤纬 -10° — 70° 范围内的 58 个超新星遗迹和 25 个活动星系核可能的超高能 γ 射线发射进行了广泛的寻找。为了避免使用的分析方法中可能存在的系统误差对这 83 个天体的分析结果造成影响,还在这个天区内随机地选择了 100 个假想源作为对比,检查由这种可能存在的系统误差造成的影响,以保证分析结果的正确性。

2 实验简述

西藏羊八井广延大气簇射阵列位于东经 90.53° ,北纬 30.11° 的西藏羊八井平坦谷地中央。羊八井的海拔高度为 4300m,对应于 606gcm^{-2} 的大气深度。它的详细情况在其它文献中已经有所描述^[3,4],下面只给出阵列最主要的结构和特性。

一期阵列由位于阵列内部的 49 个 0.5m^2 的塑料闪烁体探测器和位于外围的 16 个 0.25m^2 的塑料闪烁体探测器组成。中心的 49 个探测器排列成间距为 15m 的 7×7 方阵,而外围的 16 个探测器在距离中心阵列 30m 处均匀排列。中心阵列的 45 个探测器是快时间探测器,每个探测器都装置了快时间光电倍增管(Hamamatsu H1949),这 45 个探测器中有 12 个还另外装置了一个测量粒子密度的光电倍增管(Hamamatsu H3178)(见图 1)。中心的 45 个探测器,既用于决定簇射事例的到达方向,又兼作粒子数测量。外围的 16 个探测器用于排除芯位偏离阵列的事例。一期阵列从 1990 年 7 月运行到 1993 年 10 月,在 45 路快时间探测器中有任意 4 路在 300ns 内记录到大于 1 个粒子的符合条件下,以 20—25Hz 的触发率采集数据。为了满足羊八井 EAS

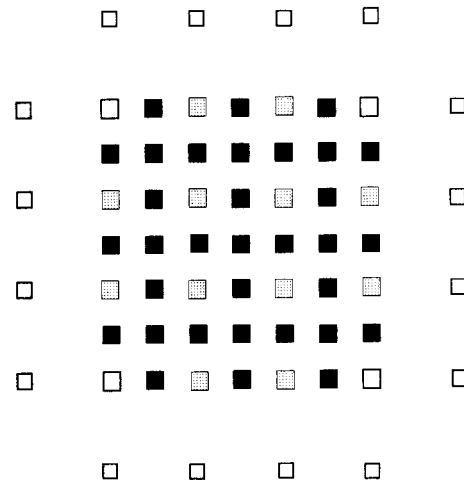


图1 羊八井一期阵列平面图

- ▣: 快时间和密度探测器;
- : 快时间探测器;
- : 密度探测器。

阵列寻找 γ 射线点源的要求,必须精确定出宇宙线粒子的入射方向,以提高 γ /质子的信噪比.为此,在对羊八井 EAS 阵列的原始数据进行离线处理时,加上以下几个判选条件:

(1) 对任意 4 路快时间探测器,每个探测器上记录的等效粒子数大于 1.25;

(2) 记录到最大粒子密度的 4 个快时间探测器中,有两个或两个以上位于阵列中心的 5×5 阵列内;

(3) 记录事例的芯位 $r_c \leq 25\text{m}$ ($r_c = \sum r_i \rho_i / \sum \rho_i$). 这里 r_i 是第 i 个探测器与簇射中心的距离, ρ_i 是第 i 个探测器的粒子数密度(单位 m^{-2}). 加上以上判选条件后,在总事例中挑选出 25% 的有用事例,得到大约 6×10^8 个重建后的数据. 利用 Monte Carlo 模拟,得到满足以上条件的事例,其最可几能量约为 7TeV,阵列对 10TeV 能量的质子和 γ 光子的探测效率分别是 18% 和 31%. 利用月亮阴影得到阵列的平均角分辨为 0.88° [4,5].

3 分析方法

探测来自点源方向的高能 γ 射线发射,需要在大量各向同性的背景粒子存在的情况下进行. 现已知道,信号比背景弱得多. 在这种情况下,正确估计背景的大小,对于弱信号的探测至关重要. 一般取与源区相邻,数倍于源区面积的一个天区统计背景计数. 来自背景天区的背景事例数 N_b 由公式^[6]

$$N_b = \int \int \varepsilon R(\theta, \phi, t) d\cos\theta d\phi dt$$

决定. 式中 θ 和 ϕ 是来自背景天区的簇射相对于观测点的天顶角和方位角, t 是背景事例到达的时间, $R(\theta, \phi, t)$ 是背景事例的探测效率, ε 是一个常数,当 θ, ϕ, t 所决定的事例来自所讨论的背景天区时, $\varepsilon = 1$; 否则 $\varepsilon = 0$, 积分对背景区的 θ, ϕ 范围进行,也对所考虑的时间间隔进行. 因为当 θ 不太大时,大气厚度大致随着 $1/\cos\theta$ 增加. 所以, $R(\theta, \phi, t)$ 很大程度上依赖于天顶角 θ . 而通常所取背景区域与源区域有不同的天顶角,这使背景估计产生一定的偏差. 为了避免这种偏差,采用等天顶角方法估计背景. 据 Monte Carlo 模拟,羊八井一期阵列的最佳源区大小为 1° 角半径的天区,当向源区域取这一尺寸时,将包含 50% 的信号,有最大的信噪比. 所以,取角半径为 1° 的小圆形区域作为向源区域,中心在源方向. 如图 2,在地平坐标系中,

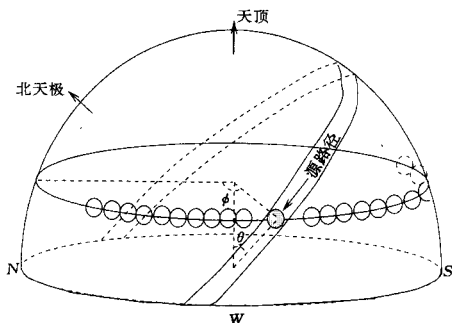


图2 等天顶角方法示意

所取背景区域位于与源区相同的天顶角环带上,在这条环带上,分别在源区的两边,各取 10 个与源区同样大小的圆形区域作为背景区. 考虑到所分析的超新星遗迹有许多属于扩展源,所以取背景区域与源区域有 2° 角半径的间隙. 当源区的天顶角比较小时,背景区域可能会相互交叠. 这种交叠会误使背景计数降低,最终导致错误的信号提高. 在分析中,当源区中心的天顶角小于 7.34° 时,背景区域开始交叠,这时必须对数据进行仔细的选择,去除那些天顶角小到会发生背景区域交叠的数据.

另外,还考虑了方位角不均匀带来的影响.入射的 10 TeV 以上的高能宇宙线粒子应该是方位角均匀分布的,理想的记录事例随方位角的分布也应该是均匀分布.图 3 给出了羊八井阵列在 3 年的运行时间里全部事例随方位角的分布情况,可明显看出记录事例随方位角的分布并不很均匀,变化大约在 $\pm 1\%$ 左右.虽然这一变化很小,但为了避免可能造成的影响,在数据分析中,对所有的数据都作了方位角不均匀修正.

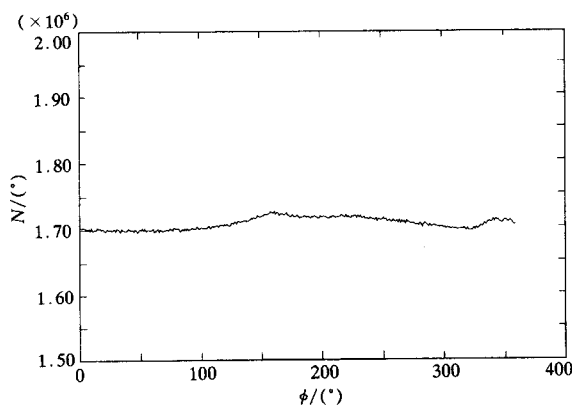


图3 记录事例随方位角的分布

根据实验得到的背景计数 N_{off} 和向源计数 N_{on} , 可以计算出向源区事例超出的显著性. 采用目前在 γ 天文普遍使用的李-马方法^[7] 计算显著性. 设 $\alpha = N_{\text{off}} / N_{\text{on}}$, 显著性

$$S = \sqrt{2} \left\{ N_{\text{on}} \ln \left[\frac{1 + \alpha}{\alpha} \left(\frac{N_{\text{on}}}{N_{\text{on}} + N_{\text{off}}} \right) \right] + N_{\text{off}} \ln \left[(1 + \alpha) \left(\frac{N_{\text{off}}}{N_{\text{on}} + N_{\text{off}}} \right) \right] \right\}^{1/2}$$

在本工作中, $\alpha = 20$. 按照文献 [7], 如果数据样本全由背景构成, S 应服从标准正态分布, 如果样本中存在有显著意义的信号, 它的 S 应偏离标准正态分布, 由 S 的值可以得到信号的显著性.

4 结果

据 Lang^[8] 提供的银河系超新星遗迹表, 选择了其中赤纬在 -10° — 70° 的 58 颗超新星遗迹作为候选源, 包括蟹状星云 Crab 这一最重要的 TeV γ 射线点源. 它们在赤道坐标系里的分布见图 4. 图中用实线画出了银道面的位置, 以显示这 58 颗超新星遗迹相对银道面的分布情况. 还选择了 25 颗活动星系核作为候选源 (见图 5), 其中包括了 Whipple 组探测到的 Mrk421 和 Mrk501 这两个高能 γ 射线点源. 其中有 10 颗活动星系核都有较小的红移 ($z \ll 0.1$), 离地球较近, 遭到与星系际间红外背景光子作用而造成的衰减较小, 最有希望探测到它们的高能 γ 射线发射.

还有一个问题必须考虑: 本文所使用的探测点源的方法对所选择的点源候选者, 是否存在系统偏见, 即是否会得到有偏差的结果. 为了考察这一因素对分析结果造成的影响, 还选取了 100 颗假想的点源来进行监测. 这 100 颗假想源根据以下考虑来选取:

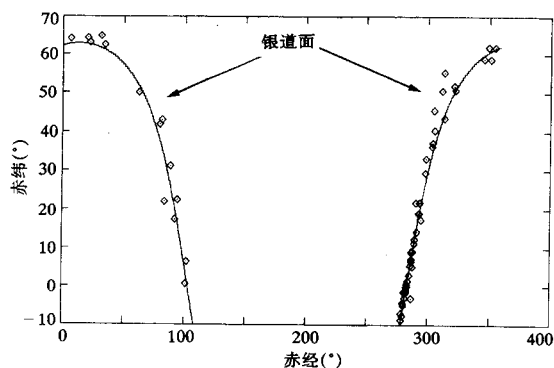


图4 58颗超新星遗迹在赤道坐标系里的分布

- (1) 假想源分布在高银纬区, 以避免分布在银盘附近的超新星遗迹;
- (2) 假想源必须避开正在研究的 25 颗活动星系核;
- (3) 用产生随机数的方法, 让这 100 颗假想源随机地散布在高银纬区。

这 100 颗假想源在赤道坐标系中的分布见图 6。

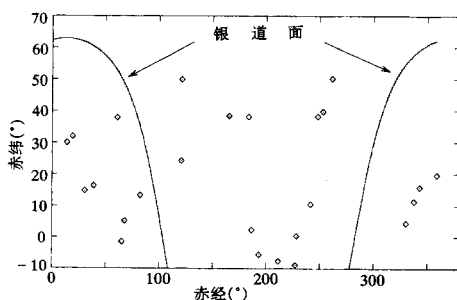


图5 25颗活动星系核在赤道坐标系里的分布

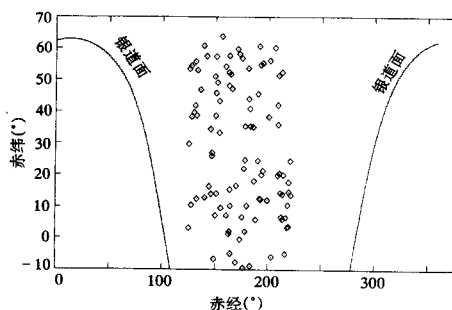


图6 100颗假想源在赤道坐标系中的分布

对 58 颗超新星遗迹的数据分析结果列于表 1 中。采用李-马的方法, 计算出每个源的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 。其中, Crab 的显著性为 0.86σ 。显著性在 2σ 以上的超新星遗迹是 W49B (2.15σ)、GC40.5-0.5 (2.20σ) 和 GC41.1-00.3 (2.61σ)。按照 γ 天文的惯例, 3 倍 σ 以下的显著性不能说明统计上存在有意义的直流超出, 所以结论是没有观测到来自这 58 颗超新星遗迹的有显著统计意义的 10TeV γ 超出。

利用向源区计数和背景区计数, 采用 Helene^[9]的方法计算出在 95% 的置信度下每个候选源的超出事例上限数, 所得结果列于表 1。为了由超出事例上限数估计这些候选天体发射 10TeV γ 的流强上限, 假设初级 γ 服从微分幂谱 $E^{-\gamma}$, γ 取为 2.4, 从 1TeV 到 300TeV , 利用程序包 GENAS^[10]进行 Monte Carlo 模拟, 产生的簇射事例在距离阵列中心 500m 范围内投点, 考虑了落到每个探测器的粒子数, 探测器的效率以及事例触发条件和选择标准。最后, 由投入事例数, 投入面积和立体角, 被记录事例数和事例上限数推出 10TeV γ 的流强上限。所得结果均列于表 1。

图 7 给出了 58 个超新星遗迹的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 的分布。直方图是将 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 按 0.25σ 的间隔分组

表 1 58 颗超新星遗迹的直流超出和流强上限

名 称	向源记数	背景记数	$\sigma_{\text{Li-Ma}}$	超出事例 上限数	95% c.l.流强上限 ($\times 10^{-13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
W44	51004	1023834	-0.81	345	6.46
Tycho	56760	1126823	1.72	823	13.44
W49B	73898	1465993	2.15	1056	12.07
HB3	61512	1233206	-0.58	408	6.36
Crab	104304	2080401	0.86	859	7.29
OA184	110244	2204943	-0.01	661	5.93
VRO42.05.01	109011	2176726	0.52	785	6.79
IC443	104312	2093192	-1.05	457	4.29
PKS0646+06	66568	1331997	-0.12	495	7.46
3C400.2	93831	1871095	0.88	821	8.64
CTB80	89631	1785251	1.20	888	7.63
CTB109	72152	1447328	-0.78	415	5.67
GC126.2+01.6	55771	1116797	-0.28	429	7.01
GC127.1+00.5	59862	1193298	0.79	636	9.10
GC74.9+01.2	106093	2111665	1.53	1066	8.03
GC89.0+04.7	94910	1889325	1.41	972	8.52
CasA	72388	1454360	-1.20	364	5.06
DR4	110412	2209623	-0.20	620	5.56
3C58	54715	1085077	1.93	856	14.82
GC152.2-01.2	96663	1928206	0.79	810	7.52
GC179.0+02.6	88035	1757444	0.54	710	6.55
GC192.8-01.1	94549	1895670	-0.74	480	5.01
GC211.7-01.1	49721	990672	0.82	586	9.56
Kes79	48867	979017	-0.38	390	7.65
GC36.6-00.7	55479	1110368	-0.16	445	8.01
3C396	62805	1258018	-0.37	442	6.52
GC40.5-0.5	66559	1319601	2.20	1013	13.13
GC42.8+0.6	73512	1462166	1.46	868	10.38
GC41.1-00.3	68375	1353586	2.61	1134	15.89
GC39.7-02.0	61488	1240137	-2.04	262	4.32
GC45.7-00.4	79142	1582211	0.11	583	7.64
GC46.8-00.3	81672	1635800	-0.40	499	6.01
GC55.7+03.4	102332	2044761	0.29	704	6.41
W51	86745	1729399	0.91	797	8.07
GC54.1+00.3	97241	1941522	0.52	741	7.66
GC54.4-00.3	96922	1942831	-0.69	495	5.16
GC57.2+00.8	102085	2047769	-0.94	470	4.62
DA491	85773	1721625	-1.03	418	4.34

续表

名称	向源记数	背景记数	$\sigma_{\text{Li-Ma}}$	超出事例 上限数	95% c.l.流强上限 ($\times 10^{-13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
GC73.9+00.9	98447	1964925	0.62	773	6.61
W63	104323	2082611	0.58	785	6.82
GC93.3+06.9	82040	1645926	-0.87	429	4.99
GC84.2-00.8	107718	2141200	1.96	1212	9.73
GC94.0+01.0	91297	1829135	-0.52	508	5.61
GC93.7-00.2	93909	1881964	-0.60	501	5.28
GC112.0+01.2	62827	1256653	-0.02	497	6.95
GC114.3+00.3	62781	1263687	-1.57	303	5.12
GC24.7+00.6	28194	562704	0.34	376	11.70
GC23.3-00.3	24237	483233	0.47	364	12.59
GC24.7-00.6	26287	534923	-2.75	142	5.07
GC27.8+00.6	35070	702723	-0.34	333	9.62
Kes73	33479	671839	-0.60	299	8.30
GC30.7+01.0	42915	856547	0.41	476	10.26
GC29.7-00.3	38601	774129	-0.52	329	8.26
3C391	44711	889676	1.05	598	11.23
GC31.5-00.6	42872	855569	0.44	480	10.29
GC32.8-00.1	46553	930993	0.02	433	8.63
GC33.2-00.6	47309	943232	0.66	542	11.50
GC32.0-04.9	38342	768553	-0.43	339	8.11

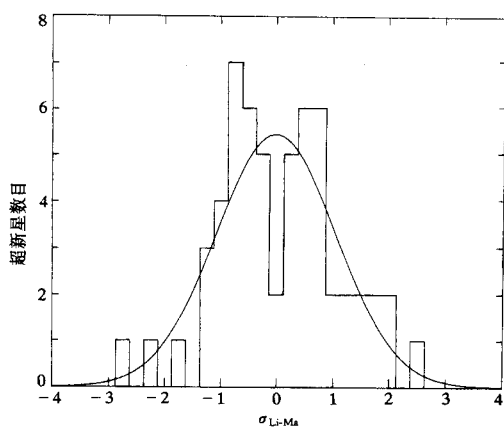


图7 58颗超新星遗迹的
 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 分布

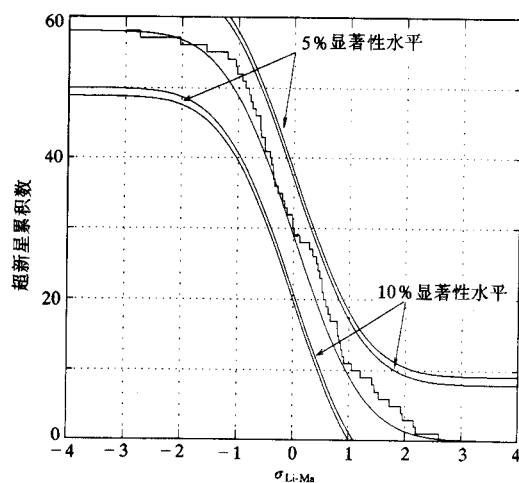


图8 58个超新星遗迹的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 的
Kolmogorov-Smirnov检验

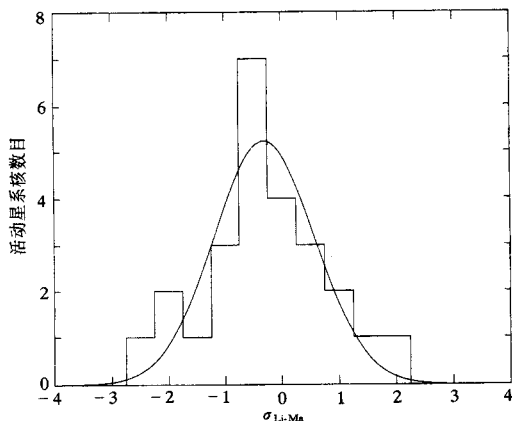


图9 25个活动星系核的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 的分布

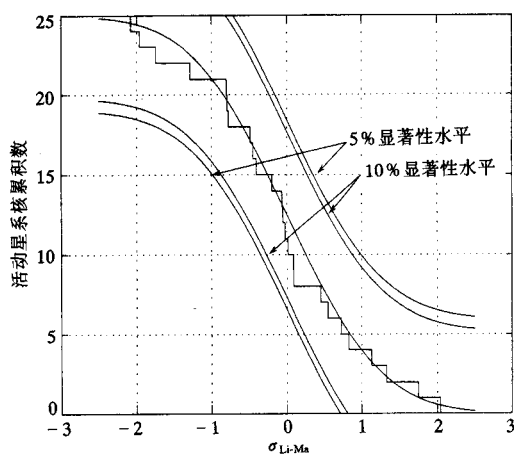


图10 25个活动星系核的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 的 Kolmogorov-Smirnov 检验

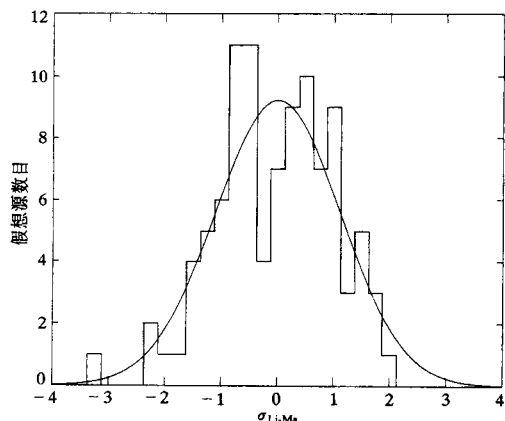


图11 100个假想源的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 的分布

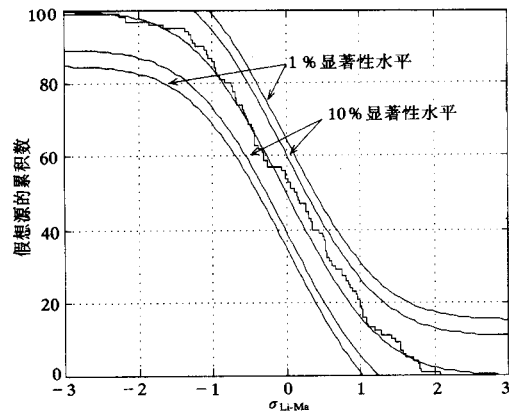


图12 100个假想源的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 的 Kolmogorov-Smirnov 检验

后作出的, 曲线是直方图的高斯分布拟合, 拟合的结果是:

$$f(x) = ae^{-0.5\frac{(x-b)^2}{c^2}},$$

其中 $a = 5.43$, $b = -0.02$, $c = 1.07$. 这与标准正态分布非常靠近, 期待值 b 与 0 相差很小, 可解释为背景随机涨落造成的偏离.

如前所述, 如果数据样本全由背景构成, 图 7 的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 应服从标准正态分布. 采用 Kolmogorov-Smirnov 检验法^[11], 对这 58 颗超新星遗迹的数据样本进行假设检验, 即检验“实验样本服从标准正态分布”的假设在多大程度上正确. 检验结果见图 8. 在图 8 中, 中间的曲线是标准正态分布的累积分布曲线, 两边的曲线分别给出服从标准正态分布的样本由于涨落, 以 10% 和 5% 的概率(或显著性水平)所能达到的范围, 直方图是数据样本的累积分布. 图 8 说明, 这 58 颗超新星遗迹的数据样本没有显著偏离标准正态分布.

25 颗活动星系核的数据分析结果列于表 2 中, 其中 10TeV 对应于按照第 2 节所述选

表2 25颗活动星系核的直流超出和流强上限

名称	红移	能量 (TeV)	向源记数	背景记数	σ_{Li-Ma}	超出事例 上限数	95% c.l.流强上限 ($\times 10^{-12} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
0202+149	0.833	≥ 10	89079	1784336	-0.46	513	0.69
(4C+15.05)		≥ 30	12148	240489	1.10	316	0.38
0235+164	0.940	≥ 10	92594	1854865	-0.48	518	0.66
(OD+160)		≥ 30	12472	249923	-0.21	208	0.24
0420-014	0.915	≥ 10	43883	877553	0.02	422	1.05
(OA+129)		≥ 30	6091	124093	-1.41	98	0.21
0528+134	2.07	≥ 10	85642	1715287	-0.41	510	0.73
(PKS)		≥ 30	11637	231732	0.46	251	0.32
0804+499	1.43	≥ 10	96283	1930849	-0.82	473	0.59
		≥ 30	13048	260457	0.22	245	0.26
1101+384	0.031	≥ 10	111878	2231902	0.83	880	0.81
(Mrk421)		≥ 30	14783	295527	0.05	247	0.20
1226+023	0.158	≥ 10	53792	1072391	0.73	591	1.28
(3C273)		≥ 30	7382	149554	-1.08	120	0.22
1253-055	0.538	≥ 10	32052	636897	1.13	519	1.50
(3C279)		≥ 30	4644	91997	0.63	168	0.41
1406-076	1.493	≥ 10	26582	531807	-0.05	320	1.00
		≥ 30	3898	77383	0.45	145	0.38
1510-089	2.1	≥ 10	23520	470586	-0.06	300	0.98
		≥ 30	3479	69420	0.13	123	0.33
1606+106	1.226	≥ 10	76528	1540442	-1.74	318	0.50
(4C+10.45)		≥ 30	10298	209188	-1.54	123	0.17
1633+382	1.814	≥ 10	112031	2226599	2.05	1265	1.17
(4C+38.41)		≥ 30	14829	294509	0.83	321	0.26
2230+114	1.037	≥ 10	79583	1596130	-0.77	436	0.67
(CTA102)		≥ 30	10746	215594	-0.32	186	0.25
2251+158	0.859	≥ 10	90783	1812859	0.45	701	0.91
(3C454.3)		≥ 30	12267	243277	0.91	299	0.35
2356+196	1.066	≥ 10	98729	1974719	-0.02	623	0.71
		≥ 30	13359	264276	1.23	345	0.36
0116+319	0.016	≥ 10	87539	1762667	-1.96	320	0.29
(NGC315)		≥ 30	11556	236052	-2.22	108	0.09
0402+379	0.055	≥ 10	114138	2270713	1.74	1175	1.08
(4C+3411)		≥ 30	15092	301832	0.00	245	0.20
0430+052	0.033	≥ 10	63341	1263929	0.56	607	1.18
(3C120.0)		≥ 30	8736	174924	-0.11	180	0.30
0055+300	0.017	≥ 10	86608	1731547	0.10	609	0.55
(NGC315)		≥ 30	11534	232556	-0.85	162	0.13
0802+243	0.06	≥ 10	91547	1830358	0.09	624	0.63
(3C192.0)		≥ 30	12269	244035	0.59	270	0.25
1214+381	0.062	≥ 10	111425	2229848	-0.20	624	0.57
(MS12143)		≥ 30	14811	294957	0.51	288	0.24
1514+004	0.053	≥ 10	47553	960350	-2.07	228	0.53
		≥ 30	6709	134396	-0.13	156	0.31
1652+398	0.033	≥ 10	110249	2210377	-0.79	510	0.48
(Mrk501)		≥ 30	14883	294560	1.24	366	0.31
1727+502	0.053	≥ 10	94361	1895290	-1.28	405	0.51
(IEW187)		≥ 30	12671	256637	-1.39	143	0.15
2201+044	0.028	≥ 10	60475	1202820	1.33	757	1.52
		≥ 30	8358	166220	0.50	216	0.37

择标准选入的全部事例, 30TeV 对应于所有着火的时间探测器所记录的粒子密度之和大于 100 的事例. 从表 2 可以看出, Mrk421 和 Mrk501 的显著性分别为 0.83σ 和 -0.79σ , 可以结论在 25 颗活动星系核中没有发现 10TeV 及 10TeV 以上 γ 发射的直流超出. 图 9 给出了 25 个活动星系核的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 的分布, 直方图是将 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 按 0.5σ 的间隔分组后作出的图, 曲线是直方图的高斯分布拟合, 拟合结果:

$$f(x) = ae^{\left(-0.5\frac{(x-b)^2}{c^2}\right)},$$

其中 $a = 5.23$, $b = -0.31$, $c = 0.88$. 期待值 b 比较大了一些, 但目前只能解释为背景随机涨落造成的偏离.

对 25 个活动星系核的数据样本用 Kolmogorov-Smirnov 检验法进行假设检验的结果见图 10. 由图 10 看出, 这 25 个活动星系核的数据样本没有显著偏离标准正态分布.

最后, 给出了 100 个假想源的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 的直方图(图 11). 这是按 0.25σ 的间隔分组后作出的图, 曲线是高斯分布拟合的结果:

$$f(x) = ae^{\left(-0.5\frac{(x-b)^2}{c^2}\right)},$$

其中 $a = 9.22$, $b = 0.001$, $c = 1.11$. b 等于 0.001, 是一个很小的值. 可认为这 100 个假想源的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 较好地服从标准正态分布, 这说明本工作所使用的分析方法中不存在明显的系统误差.

用 Kolmogorov-Smirnov 检验法检验了这 100 个假想源的 $\sigma_{\text{Li-Ma}}$ 的分布. 由图 12 看出, 这 100 个假想源的数据样本没有显著偏离标准正态分布, 也说明不存在明显的系统误差. 这就保证了在分析 58 个超新星遗迹和 25 个活动星系核时所得结果的可靠性.

5 结论和讨论

利用羊八井一期阵列从 1990 年 6 月到 1993 年 10 月的数据, 采用等天顶角方法估计背景, 选择了 58 颗超新星遗迹和 25 颗活动星系核作为候选源, 寻找它们的长期直流超出. 没有观察到有显著意义的直流超出. 用 Kolmogorov-Smirnov 检验法, 没有发现来自这 58 颗超新星遗迹和 25 颗活动星系核方向的数据样本显著偏离标准正态分布. 给出了这些候选源在 95% 置信度下的流强上限. 蟹状星云 Crab 是本工作研究的重点, 在图 13 中, 标出了本工作和其它实验组的结果以作比较, Whipple 组从 400GeV 到 3TeV 的结果用阴影区域表示, 图中实线是 SSC 模型的计算结果^[2], 本文的上限与 SSC 模型的预言不相矛盾. 图 14 给出了 Mrk421 的实验结果, Whipple 组从 400GeV 到 3TeV 的结果用阴影区域表示, 图中的两条曲线是分别考虑了星系际空间不同分布的红外背景光子对 10TeV 的 γ 光子的衰减后作出的^[12,13], 本文作出的上限与这些理论预言也不矛盾.

由于不能区分宇宙线质子形成的簇射和 γ 形成的簇射, 不能排除宇宙线质子形成的严重背景, 实验的信噪比很低, 这是利用 EAS 阵列寻找 γ 源的主要障碍. 羊八井二期阵列将成量级地提高计数率, 从而明显改善信噪比. 对二期数据的分析将另文报道.

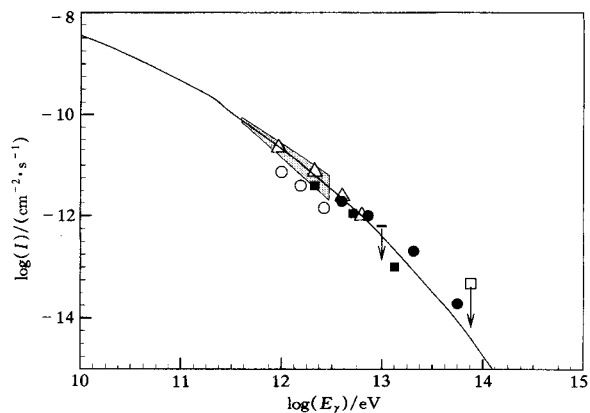


图 13 蟹状星云流强和流强上限

横坐标和纵坐标分别是 γ 光子能量和流强.

Δ : Whipple^[14]; \bullet : Cangaroo^[15]; \circ : HEGRA^[16]; \blacksquare : THEMISTOCLE^[17]; \square : CYGNUS^[18]; —: Tibet(本工作).

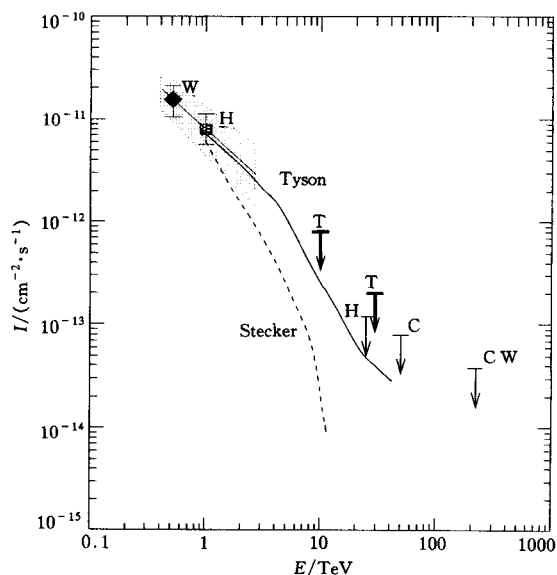


图 14 Mrk421 流强和流强上限

W: Whipple^[19]; H: HEGRA^[20]; C: CYGNUS^[21]; CM: CASA-MIA^[22]; T: Tibet(本工作).

感谢日本东京大学宇宙线所以汤田利典教授为首的日方合作组成员与我们的愉快合作. 所作的大量计算, 主要是利用日方提供的高速计算机完成的. 与日方坂田教授和盐见博士的多次讨论, 帮助澄清和解决了许多关键问题, 在此表示由衷的感谢.

参 考 文 献

- 1 Fegan D. J. *Phys.*, 1997, **G23**:1013.
- 2 De Jager O C, Harding A K. *Proc. 22th ICRC*, 1. Dublin: 1991. 572
- 3 Amenomori M et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**:2468
- 4 Amenomori M et al. *Phys. Rev.*, 1993, **D47**:2675
- 5 Amenomori M et al. *ApJ*, 1993, **415**:L147
- 6 Alexandreas D E et al. *Nucl. Instrum. Methods*, 1993, **A328**:570
- 7 Li T P, Ma Y Q. *ApJ*, 1983, **272**:317
- 8 Lang K R. *Astrophysical Data: Planets and Stars*. Springer-Verlag Press, 1991.
- 9 Helene O. *Nucl. Instrum. Methods*, 1983, **212**:319
- 10 Kasahara K, Torii S. *Computer Physics Communication*, 1991, **109**:64
- 11 Press W H, Flannery S A, Teukolsky W T et al. *Numerical Recipes*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- 12 Stecker F W, De Jager O C. *ApJ*, 1993, **415**:L71
- 13 Tyson J A. *The Galactic and Extragalactic Background Radiation*. In: Bowyer S, Leinert C ed. *IAU Symp*, 139. 1990. 245
- 14 Vacanti G et al. *ApJ*, 1991, **377**:467; Weeks T C et al. Appendix A. In: VERITAS proposal, 1996. 8
- 15 Sakurazawa K et al. *Proc. 25th ICRC*, 3. Durban: 1996. 165
- 16 Konopelko A et al. *Aph*, 1996, **4**:199
- 17 Djannati-Atai A et al. *Proc. 24th ICRC*, 2. Roma: 1995. 315
- 18 Alexandreas D E et al. *ApJ*, 1991, **383**:653
- 19 Mohanty G et al. *Proc. 23th ICRC*, 1. Calgary: 1993. 416; Schubnell M S et al. *ApJ*, 1996, **460**:644
- 20 Karle A et al. *ApJ*, 1995, **4**:1; Petry D et al. *A&A*, 1996, **311**:L13
- 21 Alexandreas D E et al. *Proc. 23th ICRC*, 1. Calgary: 1993. 416
- 22 Borione A et al. *Proc. 23th Icrc*, 1. Calgary: 1993. 424

Search for 10TeV γ -Ray Emission from Supernova Remnants and Active Galactic Nuclei *

Zhang Jilong¹ Ding Linkai¹ Zhaxisangzhu² Zhaxiciren² Mu Jun⁴
Wang Hui¹ Lu Hong¹ Liu Shaomin¹ Feng Zhenyong³ Ren Jingru¹
Yu Guangce³ Xu Xianwu¹ Zhou Wende⁴ Labaciren¹ Meng Xianru²
Zhang Chunsheng¹ Zhang Huimin¹ Shi Zhizheng¹ Jia Huanyu³ Huang Qing³
Mei Dongming² Tan Youheng¹ Huo Anxiang¹

¹ (*Laboratory of Cosmic Rays and High Energy Astrophysics, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

² (*Institute for Cosmic Ray Research, Tibet University, Lhasa 850000*)

³ (*Department of Physics, South West Jiaotong University, Chengdu 610031*)

⁴ (*Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091*)

Abstract A search for 10TeV γ - ray continuous emission from 58 Supernova Remnants which include Crab Nebula and 25 Active Galactic Nuclei which include Mrk421 and Mrk501 with the data of Tibet I air shower array from 1990 June to 1993 October is executed by the method of equi-zenith angle to estimate the background events. The significance of DC excess is calculated according to the Li and Ma prescription. No significant DC excess is observed from these candidates. The integral distribution of significances is checked by the Kolmogorov-Smirnov test which examines the divergence from a standard normal distribution. No significant deviation is found. Flux upper limit is obtained for each source at 95% C.L.

Key words extensive air shower, γ -ray sources, supernova remnant, active galactic nuclei

Received 2 March 1998

* Supported by the Chinese Academy of Sciences of China, the State Commission of Science and Technology and the Committee of the National Natural Science Foundation of China