

观测来自银道面的 TeV γ 射线*

徐春娴 张勇 何会林 何会海 陈永中 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 给出来自银经 79.3866° 的银道面的 TeV γ 射线的观测结果. 数据是在 1995 年 10 月至 1998 年 11 月间的晴朗无月夜, 用兴隆站的大气契伦科夫望远镜 ACT2 和 ACT3 以向源-背景 (ON-OFF) 观测方式取得的, 总观测时间为 224.4h. 在望远镜计数服从高斯分布的情况下, 导出了最大似然比 λ 的表达式, 它直接给出显著性水平的概率. 用它分析观测资料, 在统计误差范围内没发现有来自银道面的 TeV γ 射线.

关键词 TeV γ 射线 银道面 假设检验

1 引言

银道面有弥漫性发射是高能 γ 射线天空的重要特征, 它的空间分布和谱特性表明, 这种辐射基本上是由宇宙线和星际介质相互作用生成. 基于这种思想的弥漫发射模型能很好地解释 100MeV 以上的 γ 发射的角分布和能量分布^[1]. 然而, 同样的模型在解释被 GRO 卫星的 EGRET 装置测到的大于 1GeV γ 发射时却低估了约 40%.

Porter 和 Protheroe^[2] 建议, 轻宇宙线应该是银道面 TeV 量级的 γ 辐射的主要来源. 通过对某些超新星遗迹的同步辐射 X 射线的观察发现, 电子能被加速到 100TeV, 当这样的电子逃离它的加速地点在银河系弥散开时, 通过同步辐射和逆 Compton 散射产生 TeV γ 射线而逐渐冷却下来. 鉴于 TeV 弥漫 γ 射线在银河系中的分布不仅能给能量大于 TeV 的宇宙线的活动踪迹和星际介质的分布提供线索, 而且也只有弄清楚它在空间的分布详情, 才能确认空间某一辐射源的存在与否, 因此 70 年代以来, 有许多实验探查来自银道面及其附近低银纬天区的 TeV γ 射线发射^[3-12]. 早期的结果显示, 银道面是 TeV γ 射线强度的低谷, 但这些结果统计显著性不高^[3-8], 而且也未被我组早期 ACT1 的漂移扫描结果^[9] 和后来 Whipple 组的观测^[10-12] 所证实. 为进一步弄清银道面是不是 TeV γ 射线的源 (正源或负源), 用跟踪望远镜 ACT2 和 ACT3 对银道面的一个天区和邻近的两个背景天区做较长时间的向源、背景 (ON-OFF) 的跟踪观测.

2000-08-22 收稿, 2001-03-15 收修改稿

* 国家自然科学基金资助 (19575047, 19875058)

2 目标天区和背景天区的选取

要观测的是银道面上的某一天区,兴隆站的地理纬度 $\varphi = 40^\circ 23.6' N$,因此取目标天区的赤纬 $\delta = 40^\circ$ 会使观测有近 90° 的最大仰角.

据赤道坐标与新银道坐标的转换公式

$$\sin b = \sin \delta \cos 62.6^\circ - \cos \delta \sin(\alpha - 282.25^\circ) \sin 62.6^\circ, \quad (1)$$

$$\cos b \cos(l - 33^\circ) = \cos \delta \cos(\alpha - 282.25^\circ), \quad (2)$$

这里 l, b 是新银道坐标的银经和银纬, α, δ 是天体 1950 年的赤经和赤纬.

银道面 $b = 0$, 由(1)式得到 $\alpha = 20^h 32^m 7.674^s$. 又由(2)式得 $l = 79.3866^\circ$. 如此目标天区是 $(l = 79.3866^\circ, b = 0)$, 相应的赤道坐标为 $(\alpha = 20^h 32^m 7.674^s, \delta = 40^\circ)_{1950}$.

在选定了跟踪银道面天区(ON 源)和背景(OFF)的时间间隔为 34 分钟后,为使在 ON 和 OFF 的两段跟踪期间,跟踪的天顶角和方位角的路径完全相同,在取背景天区的赤纬与目标天区的赤纬相同的情况下,据地平坐标系仰角、方位角和天体时角的计算公式得出:

望远镜先向源后背景观测时,背景天区的赤经应取 $\alpha_1 = \alpha + 1.00274 \times 34m = \alpha + 0.5682h$;而在先背景后向源的观测时,背景天区的赤经 $\alpha_2 = \alpha - 0.5682h$. 这样选取保证了在两种情况下跟踪路径的相同,从而消除了大气厚度等因素对 ON 和 OFF 观测计数的影响.

总之,在先向源后背景的观测中,背景天区是 $(\delta_1 = 40^\circ, \alpha_1 = \alpha + 0.5682h)_{1950}$ 相应的银道坐标是 $(b = -5.0197^\circ, l = 83.5634^\circ)$. 在先背景后向源的观测中背景天区选为 $(\delta_2 = 40^\circ, \alpha_2 = \alpha - 0.5682h)_{1950}$ 相应的银道坐标是 $(b = 5.3956^\circ, l = 75.7089^\circ)$.

在观测时,根据输入的 $(\alpha, \delta)_{1950}$,微机自动计算出当前的跟踪方位并自动跟踪观测.

3 实验观测

用设置在北纬 $40^\circ 23.6'$,东经 $117^\circ 34.6'$,海拔 960m 的兴隆站大气契伦科夫望远镜 ACT2 和 ACT3,在 1995 年 10 月至 1998 年 11 月间的晴朗无月夜,银道面和背景天区被交替观测.望远镜的结构和性能已在文献[13]详细描述.主要指标如下:正对天顶时的收集面积为 $7 \times 10^8 \text{ cm}^2$,物理接收角为 $6.9 \times 10^{-4} \text{ sr}$.1998 年后,望远镜改用 GPS 计时系统,计时精度达到 $1\mu\text{s}$,死时间约为 $150\mu\text{s}$.该望远镜系统对于大于 1TeV 的 γ 射线的探测效率为 70%,等价于能量大于 3TeV 的宇宙线质子的探测.

在 1995 年 10 月至 1997 年 12 月观测以下述方式进行:ACT2 和 ACT3 同时跟踪银道面上的一个天区 $(l = 79.3866^\circ, b = 0^\circ)$ 进行 34 分钟的观测,即所谓向源观测(ON 模式),然后一起转向背景天区 $(l = 83.5634^\circ, b = -5.0197^\circ)$ 跟踪观测 34 分钟.

从 1998 年起观测方式稍有变动:当 ACT2 跟踪银道面天区时,ACT3 恰在跟踪一个背景天区 $(l = 75.7089^\circ, b = 5.3956^\circ)$,34 分钟后 ACT2 跟踪背景天区 $(l = 83.5634^\circ, b =$

-5.0197°), 这时 ACT3 处在向源状态. 这样做的好处是在整个观测期间目标天区总是被一个望远镜跟踪观测, 且又能降低气象变化对结果的影响. 观测期间应用阳极电流补偿系统, 以免计数受天空亮度和周围环境亮度变化的影响. 观测的天顶距在 89.6°—47°之间, 但绝大多数在 89.6°—53°间.

数据采集系统记录下每台望远镜在向源和背景观测中符合事例的到达时间(准到 1 μ s), 分析时将它们转变成每分钟的计数, 并去掉第 34 分钟的计数(因望远镜变换跟踪天区, 影响了最后一分钟计数). 这样便得到了分别含 33 个数的对应的向源-背景观测样本, 向源数组 $\{x\} = (x_1, x_2, \dots, x_{33})$, 背景数组 $\{y\} = (y_1, y_2, \dots, y_{33})$. 在 1995 年 10 月至 1998 年 11 月间, 共得到 198 对观测样本, 其中 ACT2 获 108 对, ACT3 获 90 对.

4 假设检验

在其高能 γ 天文观测中, 由于源强度极弱, 对于一个结果的认定必须做假设检验. 一个好的假设检验统计量, 应该是佳效、无偏的, 还必须知道它的概率分布才能给观察结果以明确的统计上的推断. 下面根据已有的假设检验定理, 稍做具体化, 便可推导出可供选择的假设检验统计量.

4.1 假设检验的 t 分布定理^[14]

$\{x\}, \{y\}$ 为两个容量分别为 n 和 m 的随机样本, 其母体的均值和方差分别为 $(\mu_x, \sigma_x^2), (\mu_y, \sigma_y^2)$, 又有 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, 但不知其值. 当 $\mu_x = \mu_y$ 为真时, 检验统计量 T 服从自由度为 $n+m-2$ 的 t 分布, 写作

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{y} - (\mu_x - \mu_y)}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 + \sum(y_j - \bar{y})^2}{n+m-2}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} \propto t_{n+m-2},$$

对于源强极弱的向源-背景观测, $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ 成立, 在向源、背源计数都服从泊松-高斯分布时(即期待值 $\mu \gg 1$ 的泊松分布可用期望值和方差均为 μ 的高斯分布来近似), 其共同方差估计值为 $\hat{\sigma}^2 = \frac{X+Y}{n+m}$, 这时

$$T = \frac{X - aY}{\sqrt{a(X+Y)}} \propto t_{n+m-2} \quad (3)$$

这里 $X = \sum_{i=1}^n x_i, Y = \sum_{j=1}^m y_j, \bar{x} = \frac{X}{n}, \bar{y} = \frac{Y}{m}, a = \frac{n}{m}$.

又据统计定理, 当自由度趋于无穷时, t 分布渐近服从标准正态分布. 实验中 $n = m = 33$, 已可把 T 当作标准正态分布了.

4.2 最大似然比渐近分布定理^[15]

若随机变量 x 的概率密度函数为 $p(x; \theta)$, 它的一个样本为 $\{x\} = (x_1, x_2, \dots, x_n), \theta = (\theta, \tau) = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_r, \tau_1, \dots, \tau_s)$, 对于统计假设

$$H: \epsilon = \epsilon_0, \quad H': \epsilon \neq \epsilon_0$$

的最大似然比为

$$\lambda = \frac{\max_{\nu} L(x|\theta)}{\max_{\Theta} L(x|\theta)} = \frac{L(x|\epsilon_0, \hat{\tau}_\nu)}{L(x|\hat{\epsilon}, \hat{\tau})}$$

$\hat{\epsilon}, \hat{\tau}$ 为参数 ϵ, τ 在全域 Θ 的最大似然估计值, $\hat{\tau}_\nu$ 为在子域 ν 上的最大似然估计值, 当 $N \rightarrow \alpha$ 在原假设 $\epsilon = \epsilon_0$ 成立时, $-2\ln\lambda$ 服从自由度为 r 的 χ^2 分布, 写作

$$p(-2\ln\lambda|\theta_0) \propto \chi^2(r).$$

据此定理, 在向源和背景数据满足泊松分布的假设下, 文献[16]导出了在样本容量 $N \rightarrow \alpha$ 时, 检验统计量 $\sqrt{-2\ln\lambda}$ 服从标准正态分布(取绝对值),

$$S = \sqrt{-2\ln\lambda} = \sqrt{2} \left\{ X \ln \left(\frac{1+\alpha}{\alpha} \cdot \frac{X}{X+Y} \right) + Y \ln \left[(1+\alpha) \cdot \frac{X}{X+Y} \right] \right\}^{1/2}. \quad (4)$$

由于泊松分布是只有一个参数的分布, 是对实验样本要求很严的一个分布. 我们曾对数据的泊松性做过检验(Gini 检验), 发现与之有相当的偏离. 考虑到影响实验结果的过程的多样性和复杂性, 具有两个参数的高斯分布可能更符合计数的实际分布.

假设 ON, OFF 数据 $\{x\}, \{y\}$ 分别服从高斯分布, 其均值和方差分别为 (μ_1, σ_1^2) 和 (μ_2, σ_2^2) , $L_{\Theta}(x, y|\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2)$ 为有源存在假设下, ON-OFF 观测 $\{x\}, \{y\}$ 的最大似然函数, $L_\nu(x, y|\mu, \sigma, \mu, \sigma)$ 为无源存在时, 观测 $\{x\}, \{y\}$ 的最大似然函数. 则最大似然比为

$$\lambda = \frac{L_\nu(x, y|\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\mu}, \hat{\sigma})}{L_{\Theta}(x, y|\hat{\mu}_1, \hat{\sigma}_1, \hat{\mu}_2, \hat{\sigma}_2)}$$

经计算得到它的具体表达式为

$$\lambda = \frac{\left[\sum \left(x_i - \frac{X}{n} \right)^2 / n \right]^{\frac{n}{2}} \left[\sum \left(y_j - \frac{Y}{m} \right)^2 / m \right]^{\frac{m}{2}}}{\left[\sum \left(x_i - \frac{x+y}{n+m} \right)^2 + \sum \left(y_j - \frac{x+y}{n+m} \right)^2 \right]^{\frac{n+m}{2}}}. \quad (5)$$

据定理, 当无源假设为真时, $-2\ln\lambda$ 渐近服从自由度为 2 的 χ^2 分布. 又知自由度为 2 的 χ^2 分布恰是指数分布, 其概率密度 $p(x^2; 2) = \frac{1}{2} \exp\left\{-\frac{x^2}{2}\right\}$, 而 χ^2 大于某值 $\chi_0^2 = -2\ln\lambda$ 的概率是

$$P(\chi^2 \geq -2\ln\lambda) = \int_{\chi_0^2}^{\infty} p(\chi^2; 2) d\chi^2 = \lambda.$$

综上所述, (3)式和(4)式定义的统计量, 都是大样本、泊松分布下适用的假设检验统计量, 且都服从标准正态分布. 它们是完全等价的, 但(3)式的计算要简便得多.

大气契伦科夫望远镜的计数率可写作下式

$$R = S_e \times N(E > E_0),$$

这里 S_e 是有效探测面积, 它受能量、入射天顶角和气象等诸多因素的影响, 不可能为常数. $N(> E_0)$ 为宇宙线的积分能谱, 是服从泊松分布的. 由于 S_e 不是常数, 我们观测到的

计数率 R 偏离泊松分布. 在对事例做适当判选的条件下, 我们认为 R 应服从高斯分布. 因此采用(5)式做为我们实验数据的假设检验统计量.

5 分析和结果

对1995—1998年间获得的198对银道面的向源-背景观测资料做统计分析, 获取的资料见表1.

表1 1995, 1997, 1998年度 ON-OFF 观测数据统计表

	ACT2(对)	ACT3(对)
1998年	29	29
1997年	46	39
1995年	31	24
小计	106	92
合计	198	

在33分钟内, 银道面 TeV γ 射线发射(或吸收)强度的最大似然估计值为: $N_s = N_{ON} - N_{OFF} = X - Y$, 再由(5)式算出背景涨落造成该估计值的概率 λ . 为了考查和对比, 也算出 T 和 S 的值. 由于篇幅所限, 表2只列出1998年的统计计算结果.

表2 1998年银道面观测数据统计表

文件名(*.gal)	N_s	T	S	λ	$-2\ln\lambda$
	80	1.472919	1.473010	0.196315	3.256069
280915	-36	-0.700384	0.700395	0.677421	0.778925
	16	0.345870	0.345872	0.818052	0.401659
	13	0.232924	0.232924	0.839842	0.349083
380915	-104	-2.004453	2.004702	0.038463	6.516117
	-63	-1.455699	1.455837	0.351830	2.089214
281015	-94	1.571037	1.571127	0.233082	2.912730
	-138	-2.415483	2.415843	0.031227	6.932944
381015	46	0.968046	0.968079	0.626920	0.933873
	32	0.505585	0.505588	0.599053	1.024810
281017	22	0.363649	0.363650	0.739195	0.604387
	55	1.095844	1.095887	0.072194	5.256797
381017	70	1.461508	1.461622	0.220847	3.020570
	2	0.033511	0.133511	0.968136	0.064765
281019	55	0.982927	0.982952	0.147456	3.828451
	79	1.741847	1.742061	0.063947	5.499402
381019	-61	-1.455271	1.455418	0.337895	2.170040
	71	1.094382	1.094408	0.606121	1.001351
281022	79	1.304939	1.304989	0.320621	2.274991

续表

文件名 (* .gal)	N_s	T	S	λ	$-2\ln\lambda$
381022	18	0.357718	0.357719	0.193527	3.284677
	- 42	- 0.892607	0.892634	0.468823	1.515060
281023	- 29	- 0.452188	0.452189	0.823024	0.389540
	- 4	0.067172	0.067172	0.944784	0.113598
381023	33	0.722013	0.722028	0.217593	3.050258
	- 19	- 0.476342	0.476347	0.920604	0.165451
281108	23	0.362531	0.362532	0.680428	0.770066
	78	1.339661	1.339720	0.018725	7.955791
381108	61	1.171994	1.172043	0.028950	7.084370
	- 35	- 0.716978	0.716991	0.754050	0.564593
281109	36	0.534405	0.534407	0.844728	0.337481
	0	0	0	0.625626	0.938005
	99	1.774376	1.774526	0.139285	3.942466
381109	15	0.299700	0.299701	0.715248	0.670252
	2	0.044432	0.044433	0.997343	0.005321
	- 53	- 1.468262	1.448440	0.048999	6.031911
281110	162	2.685124	2.685567	0.024074	7.453246
	199	3.753381	3.754951	0.000633	14.730081
381110	67	1.449348	1.449466	0.233326	2.910637
	- 13	- 0.330307	0.330309	0.596661	1.032812
281111	297	4.763752	4.766075	0.000051	19.767370
	- 294	- 5.048001	5.051169	0.000009	23.236572
381111	- 78	- 1.888448	1.888777	0.036952	6.596271
	45	1.249518	1.249643	0.451862	1.588757
281112	110	1.897680	1.897850	0.054443	5.821202
	- 21	- 0.386576	0.386577	0.920676	0.165294
381112	- 15	- 0.304604	0.304605	0.163382	3.623329
	66	1.473596	1.473729	0.300654	2.403590
281113	137	2.228010	2.228254	0.049456	6.013344
	- 10	- 0.180422	0.180422	0.859774	0.302171
381113	- 16	- 0.342525	0.342527	0.685677	0.754697
	- 22	- 0.544915	0.544923	0.854860	0.313635
281114	- 60	- 0.954186	0.954204	0.492628	1.416002
381114	- 28	- 0.601629	0.601637	0.814791	0.409647
	26	0.641633	0.641647	0.733891	0.618789
381116	- 5	- 0.094407	0.094407	0.988407	0.023321
	- 116	- 2.531327	2.531972	0.024847	7.390037
281119	51	0.879441	0.879458	0.182276	3.404467
	263	5.657549	5.664570	0.000006	24.047503

表中文件名的含意是:望远镜号,年月日,后缀为观测目标.例如:280915.gal 是 ACT2 1998 年 9 月 15 日对银道面的观测数据文件. T 、 S 和 λ 分别由(3)–(5)式所定义.从表中可以看出 T 和 S 是等价的,对所有事件都得到一致的结果.但由于我们的观测计数并不服从泊松分布,我们发现,误用(3)、(4)式会造成对置信水平做出过高估计,对于较显著的事件,这种过估尤其严重.图 1 给出全部观测的 T 分布图,纵坐标是每 0.5 间隔的事件数.图 2 给出全部观测的 $-2\ln\lambda$ 分布,纵坐标是每 2 间隔的事件数.

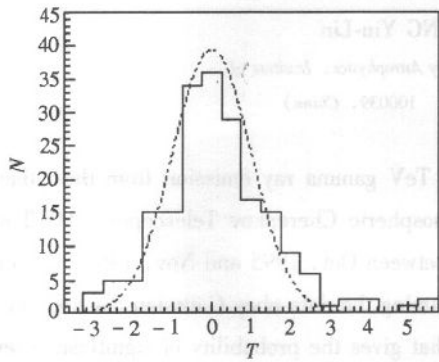


图 1 全部观测的 T 分布图

虚线为标准正态分布曲线,归一到实验样本数 198.

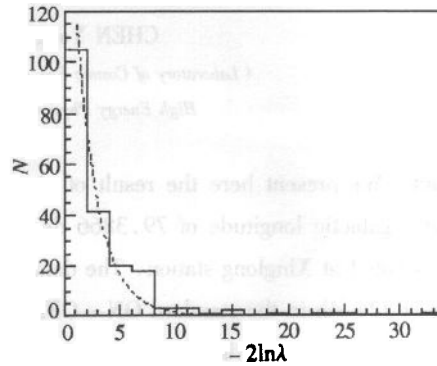


图 2 全部观测的 $-2\ln\lambda$ 分布图

虚线为指数分布曲线,归一到实验样本数 198.

最显著的过超事件发生在 1995 年 9 月 26 日 ACT2 的观测记录中,当时 ACT3 因故障没观测.它的 $N_s = 243$, 单次显著水平为 6.7×10^{-8} .考虑到多次观测效应,该估计值的最终置信水平为 99.9987%.这样的置信水平 ($\sim 4.2\sigma$) 尚不足以确认一个源的存在,即尚不能排除它是背景涨落造成的结果.因此从我们的观测不能得到银经 79.3866° 的银道面有 TeV γ 射线源的结论.

参考文献 (References)

- 1 Hunter S D et al. *Ap. J.*, 1997, **481**:205
- 2 Porter T A, Protheroe R J. *J. Phys.*, 1997, **G 23**:1765
- 3 Grindlay J F et al. *Ap. J.*, 1975, **201**(1):82–89
- 4 Fomin V P et al. 15th ICRC., 1997, **1**:12–16
- 5 Weekes T C et al. 16th ICRC., 1979, **1**:132–137
- 6 Stepanian A A et al. *Astrophys. & Space Sci.*, 1982, **84**:347
- 7 Douthwaite J C et al. *Astron. and Astrophysics*, 1985, **142**:55–58
- 8 Jiang Y L et al. 21st ICRC., 1990, **4**:220–223
- 9 Jiang Y L et al. 22nd ICRC., 1991, **1**:408–411
- 10 Weekes T C et al. *Proc. Very High Energy Gamma Ray Astronomy*, Edited by K. E. Turver, Published by D. Reidel Publish Company 1986, 169–172
- 11 Reynolds P T et al. 21th ICRC., 1990, **2**:383–386
- 12 LeBohec S et al. 26th ICRC., 1999, **OG 2. 1. 26**
- 13 Jiang Y L et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1997, **21**(3):1–7
- 14 Robert M B et al. *Statistical Methods for Engineers and Scientists*. New York: Marcel Dekker, INC, 1975

15 Wilks S S. *Ann. Math. Statist.*, 1938, **9**:60—62

16 Li Ti-Pei, MA Yu-Qian. *Ap. J.*, 1983, **272**(1):317—324

Observations of TeV Gamma Ray from the Galactic Plane*

XU Chun-Xian ZHANG Yong HE Hui-Lin HE Hui-Hai

CHEN Yong-Zhong JIANG Yin-Lin

(*Laboratory of Cosmic Ray and High Energy Astrophysics, Institute of
High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China*)

Abstract We present here the result of observation of TeV gamma ray emission from the galactic plane at a galactic longitude of 79.3866 deg. With Atmospheric Cherenkov Telescopes (ACT2 and ACT3) located at Xinglong station. The data was taken between Oct. 1995 and Nov. 1998 over a total time of 224.4h in the standard ON – OFF mode. Assuming the data obey Gaussian distribution, a formula of the maximum likelihood ratio λ was derived that gives the probability of significance level directly. Using the formula, we analysed the data and found that there is no evidence for TeV gamma ray emission from the galactic plane within statistic error.

Key words TeV gamma rays, galactic plane, hypothesis test

Received 22 August 2000, Revised 15 March 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19575047, 19875058)