

BL Lac 天体的 γ 射线和射电辐射的统计特性^{*}

李为虎[†] 袁 蓉

(西藏农牧学院公共教学部, 林芝 860000)

(2008 年 12 月 30 日收到 2009 年 3 月 5 日收到修改稿)

给出了一个带有射电 5.0 GHz 8.4 GHz 和 γ 射线辐射流量密度的 22 个 γ 噪 BL Lac 天体的样本, 研究了它们在 1 GeV 处的 γ 射线辐射流量密度最大值、平均值及最小值与射电 5.0 GHz 8.4 GHz 辐射流量之间的可能关系. 结果表明: 1) 射电 5.0 GHz 8.4 GHz 辐射与 γ 射线辐射在低态时没有相关, 但在高态和平均态时都存在较强的相关, 最大相关系数 $r = 0.85$, 置信度均好于 10^{-4} ; 2) γ 射线谱指数和射电谱指数之间也有一个弱相关关系存在. 因此, 认为 γ 射线的辐射主要是同步自康普顿辐射.

关键词: BL Lac 天体, γ 射线, 射电辐射, 谱指数

PACC: 9850R, 9530G

1. 引 言

大部分 Blazar (Flat Spectrum Radio Quasars-FSRQs 和 BL Lacertae-BL Lacs) 天体在高能 γ 射线波段 ($E > 100$ MeV) 有较强 γ 射线辐射, γ 射线辐射能量超过 100 MeV, 辐射能带从 $3 \times 10^{37} - 10^{42}$ J/s^[1]. 但是, 这一发现不能被现有的天体物理理论模型所检验和预言, 天文学家为此提出了一些理论模型来解释这一重要的天文发现. 目前, γ 射线辐射的几种典型模型有: 1) ECS 模型^[2-5]; 2) PIC 模型^[6-8]; 3) SSC 模型^[9, 10]. 近年来, 虽然有大量的辐射模型来讨论和解释 Blazar 天体辐射高能 γ 射线这一重要观测结果, 但在众多解释 γ 射线辐射机理的模型中, 并没有哪一种模型占居主导地位. 由于 γ 射线的辐射可能受到很多因素的影响, 因而 γ 射线和射电辐射的关系仍是难以确定的. 当前, AGN 的辐射机理与起源的研究正受到广泛的关注, 天文工作者正从不同的角度探索 AGN 之谜^[11-16], 正对 Blazar 的辐射机理进行努力研究, 但还没有形成一致的结论.

本文试图用 22 个 BL Lac 天体的样本来研究 γ 射线辐射流量密度与低频射电辐射流量密度之间的关系, 从而依据这些关系进一步来分析 Blazar 天体的 γ 射线辐射机理.

2. 研究方法

在研究有 γ 噪 BL Lac 天体的流量密度相关性时, 流量密度的观测结果应该具有同时性. 但由于具有多波段同时性观测结果的 EGRET 源数量非常少^[17], 因而在同一波段内寻找最大或最小流量密度是非常有用的^[18]. 天体具有最小流量密度时应处于宁静态即低态 (Min), 具有最大流量密度时天体应处于爆发态即高态 (Max). 根据长期对 Blazar 天体的观测, 天体处于宁静态的时间较处于爆发态的时间要长得多^[19].

本文用线性回归的方法来研究 γ 射线源分别在高态、平均态 (Ave) 和低态时的流量密度与 5.0 GHz, 8.4 GHz 射电流量密度之间的关系. 由于所选择样本源的 γ 射线流量密度是大于 100 MeV 的光子流量密度的积分值, 因此, 首先我们将 γ 射线的光子流量密度转换成在 1 GeV 处以 Jy 为单位的流量密度, 又考虑到天体辐射是幂律的, 我们再把观测到的以 Jy 为单位的流量转换成其真值, 并取对数. 相关关系表示为 $\lg F_\gamma = b \lg F_R + b_0$. 式中 F_γ 为 1 GeV 处的 γ 射线流量密度真值, 单位为 Jy; F_R 为 5.0 GHz 或 8.4 GHz 射电辐射流量密度的真值; b 及 b_0 为常数, 通过数据的线性回归来求得.

^{*} 国家自然科学基金 (批准号 30760122), 教育部“新世纪优秀人才支持计划” (批准号: NCST-05-0826), 教育部科学技术研究重点项目 (批准号 208136) 资助的课题.

[†] E-mail: XZLZLWH@126.com

将以 $10^{-8} \text{ photon} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 为单位的 γ 射线光子流量密度转换成以 Jy 为单位的流量, 换算公式推导结果如下:

$$f = 6.64 \times 10^{-(12+\alpha_G)} \alpha_G N^{ob}, \quad (1)$$

式中 f 为 γ 射线流量(Jy), α_G 为 γ 射线谱指数, $\alpha_G = \alpha_{ph} - 1$, α_{ph} 为 γ 射线光子谱指数, 在文献 [20] 中查得; N^{ob} 为 γ 射线大于 100 MeV 光子流量积分值 ($10^{-8} \text{ photon} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 将 (1) 式计算值转换成真值 (K 改正) 用如下公式:

$$F = f(1+z)^{\gamma_G-1}, \quad (2)$$

$\log F_\gamma$ 的误差用 $\Delta(\log F_\gamma)$ 表示, 根据偶然误差的传递规律有

$$\Delta(\log F_\gamma) = \frac{\Delta N_\gamma}{N_\gamma \ln 10}. \quad (3)$$

由于 5.0 GHz 和 8.4 GHz 辐射流量有误差的数据较少, 因此本文不考虑射电辐射的误差.

3. 样本选择与研究结果

本文选择了 22 个 BL Lac 天体样本(见表 1). 每

个源的 γ 射线流量都是大于 100 MeV 的光子流量密度积分值. 高态、低态及平均值均来自 EGRET 第 3 表^[20], 平均流量为 3EG(EGRET 第 3 表)中标有 P1234 的值, 但 J0215 + 1123 : $N_{\gamma_{ave}} = \text{P1234}/2$; J0852 - 1216 : $N_{\gamma_{ave}} = \text{P1}$. 射电 8.4 GHz 流量来自文献 [21], 射电 5.0 GHz 流量来自文献 [1, 22]. 所有源及其流量列于表 1. 表 1 中各列意义如下: 第 1 列 3EG Name : EGRET 第 3 表所给源名称; 第 2 列 z : 源的红移; 第 3 列 $F_{5.0 \text{ GHz}}$: 射电 5.0 GHz 辐射流量密度(单位 Jy); 第 4 列 $\alpha_{5.0 \text{ GHz}}$: 射电 5.0 GHz 辐射谱指数; J0237 + 1635 及 J0852 - 1216 的谱指数为所有谱指数的平均值; 第 5 列 $F_{8.4 \text{ GHz}}$: 射电 8.4 GHz 辐射流量密度(单位 Jy); 第 6 列 $\alpha_{8.4 \text{ GHz}}$: 射电 8.4 GHz 辐射谱指数; 第 7、9 和 11 列 $N_{\gamma_{max}}$, $N_{\gamma_{min}}$ 和 $N_{\gamma_{ave}}$ 分别为 γ 射线流量(大于 100 MeV 的光子流量密度积分值)的高态、低态和平均值, 单位为 $10^{-8} \text{ photon} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 第 13 列 α_G : γ 射线谱指数; 第 14 列 $\Delta\alpha_G$: α_G 的误差; 第 8、10 和 12 列, 分别为 $N_{\gamma_{max}}$, $N_{\gamma_{min}}$ 和 $N_{\gamma_{ave}}$ 的误差. J0215 + 1123 的 $\Delta N_{\gamma_{ave}}$ 为 $N_{\gamma_{ave}}$ 的 1/3.

表 1 BL Lac 天体样本

3EG Name	Z	$F_{5.0 \text{ GHz}}$	$\alpha_{5.0 \text{ GHz}}$	$F_{8.4 \text{ GHz}}$	$\alpha_{8.4 \text{ GHz}}$	$N_{\gamma_{max}}$	$\Delta N_{\gamma_{max}}$	$N_{\gamma_{min}}$	$\Delta N_{\gamma_{min}}$	$N_{\gamma_{ave}}$	$\Delta N_{\gamma_{ave}}$	α_G	$\Delta\alpha_G$
J0215 + 1123	0.250	0.439	-0.9	0.164	-0.1	18.0	5.0	18.0	5.0	4.6	1.5	1.03	0.62
J0222 + 4253	0.440	1.098	0.0	0.728	0.17	25.3	5.8	14.8	4.5	18.7	2.9	1.01	0.14
J0237 + 1635	0.940	2.85	0.07	5.453	-0.5	65.1	8.8	12.0	4.6	25.9	3.7	0.85	0.12
J0530 - 3626	0.055	8.18	-0.7	5.000	0.63	31.9	7.2	20.2	10.7	15.8	3.5	1.63	0.42
J0721 + 7120	0.300	0.81	0.0	0.594	0.09	45.7	11.1	9.3	4.7	17.8	2.0	1.19	0.11
J0737 + 1721	0.420	2.146	0.1	2.942	-0.1	29.3	9.9	20.4	8.6	16.4	3.3	1.60	0.28
J0828 + 0508	0.180	2.105	0.7	1.225	-0.0	33.5	16.3	20.2	9.9	15.7	4.8	1.47	0.40
J0852 - 1216	0.566	0.834	0.07	0.625	-0.37	44.4	11.6	44.4	11.6	14.0	4.4	0.58	0.58
J0853 + 1941	0.306	2.617	0.1	2.997	-0.3	15.8	6.9	11.3	4.5	10.6	3.0	1.03	0.35
J0958 + 6533	0.368	1.419	0.6	1.269	-0.3	18.0	9.4	14.6	4.3	6.0	1.5	1.08	0.24
J1009 + 4855	0.200	0.283	-0.2	0.252	0.21	12.9	7.8	6.8	3.8	4.8	1.4	0.90	0.37
J1052 + 5718	0.410	0.256	0.3	0.189	0.09	16.1	10.1	7.5	3.7	5.0	1.4	1.51	0.46
J1104 + 3809	0.031	0.712	-0.1	0.631	-0.0	27.1	6.9	9.0	3.6	13.9	1.8	0.57	0.15
J1222 + 2841	0.102	0.968	0.0	1.217	-0.2	53.6	14.1	10.8	3.9	11.5	1.8	0.73	0.18
J1255 - 0549	0.538	11.192	-0.1	15.600	-0.2	267.3	10.7	9.3	4.1	74.2	2.8	0.96	0.04
J1339 - 1419	0.539	2.838	0.6	3.850	-0.21	20.2	11.6	11.8	3.9	5.5	1.9	1.62	0.42
J1517 - 2538	0.049	2.013	0.0	1.930	0.02	37.2	18.3	24.2	13.0	8.4	2.8	1.66	0.43
J1605 + 1553	0.357	0.497	-0.2	0.224	0.56	42.0	12.3	17.1	9.2	12.8	4.1	1.06	0.41
J1733 - 1313	0.902	6.991	0.8	5.110	0.07	104.8	34.7	35.8	8.7	36.1	3.4	1.23	0.10
J2036 + 1132	0.601	0.867	0.1	0.463	0.46	35.9	15.0	21.8	11.0	13.3	3.1	1.83	0.26
J2158 - 3023	0.117	0.407	0.3	0.204	0.44	30.4	7.7	15.3	7.0	13.2	3.2	1.35	0.26
J2202 + 4217	0.069	3.571	-0.2	3.321	0.31	39.9	11.6	18.4	10.2	11.1	3.1	1.60	0.28

首先对表 1 中的样本数据用 (1) (2) 和 (3) 式进行处理, 再对以下 8 对量做线性回归分析, 8 对量为 $\log F_{5.0\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{max}}$, $\log F_{5.0\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{min}}$, $\log F_{5.0\text{ GHz}}-$

$\log F_{\gamma\text{ave}}$, $\log F_{8.4\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{max}}$, $\log F_{8.4\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{min}}$, $\log F_{8.4\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{ave}}$, $\alpha_{5.0\text{ GHz}}-\alpha_G$ 和 $\alpha_{8.4\text{ GHz}}-\alpha_G$, 所得结果见表 2 和图 1—8.

表 2 线性相关分析结果

ts	C_0	ΔC_0	C_1	ΔC_1	r	p
$\log F_{5.0\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{max}}$	-10.53	0.11	0.85	0.14	0.80	$\leq 8.86 \times 10^{-6}$
$\log F_{5.0\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{min}}$	-11.16	0.05	0.02	0.10	0.05	0.82
$\log F_{5.0\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{ave}}$	-11.00	0.08	0.71	0.12	0.79	$\leq 1.08 \times 10^{-5}$
$\log F_{8.4\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{max}}$	-10.50	0.09	0.72	0.11	0.84	$\leq 1.05 \times 10^{-6}$
$\log F_{8.4\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{min}}$	-11.03	0.06	-0.07	0.12	0.13	0.57
$\log F_{8.4\text{ GHz}}-\log F_{\gamma\text{ave}}$	-10.96	0.07	0.63	0.09	0.84	$\leq 8.14 \times 10^{-7}$
$\alpha_{5.0\text{ GHz}}-\alpha_G$	1.01	0.05	0.30	0.16	0.39	0.07
$\alpha_{8.4\text{ GHz}}-\alpha_G$	1.21	0.08	0.54	0.24	0.45	0.03

注： $\log F_{\gamma}=(C_1\pm\Delta C_1)\log F_{\text{R}}+(C_0\pm\Delta C_0)$ 和 $\alpha_G=(C_1\pm\Delta C_1)\alpha_{\text{R}}+(C_0\pm\Delta C_0)$.

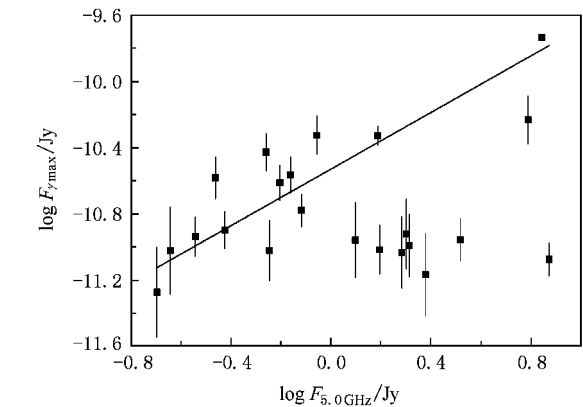


图 1 $\log F_{5.0\text{ GHz}}$ 与 $\log F_{\gamma\text{max}}$ 关系

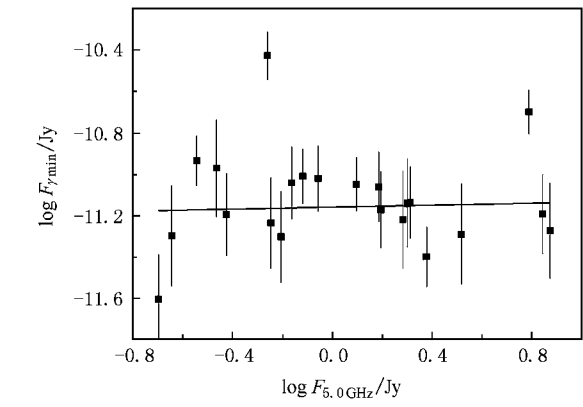


图 2 $\log F_{5.0\text{ GHz}}$ 与 $\log F_{\gamma\text{min}}$ 关系

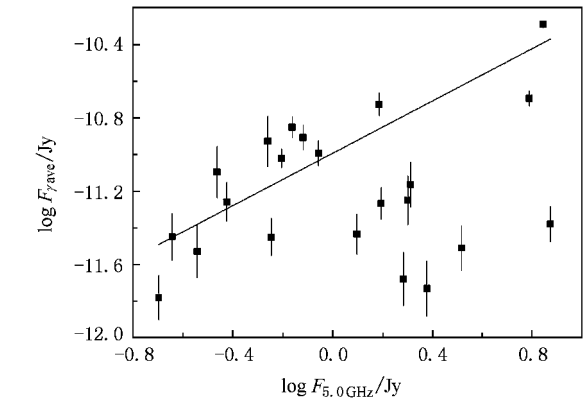


图 3 $\log F_{5.0\text{ GHz}}$ 与 $\log F_{\gamma\text{ave}}$ 关系

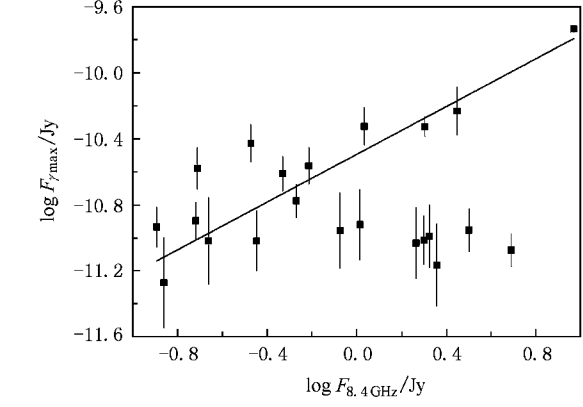


图 4 $\log F_{8.4\text{ GHz}}$ 与 $\log F_{\gamma\text{max}}$ 关系

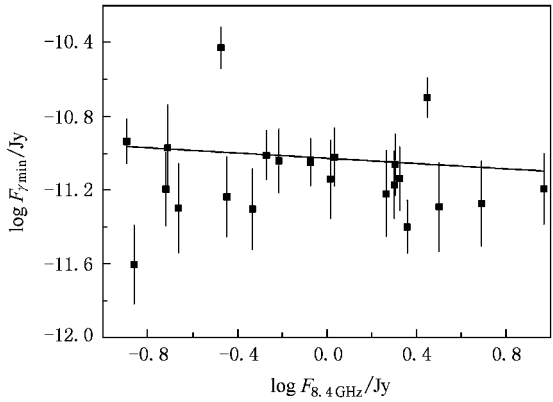


图 5 $\log F_{8.4 \text{ GHz}}$ 与 $\log F_{\gamma \min}$ 关系

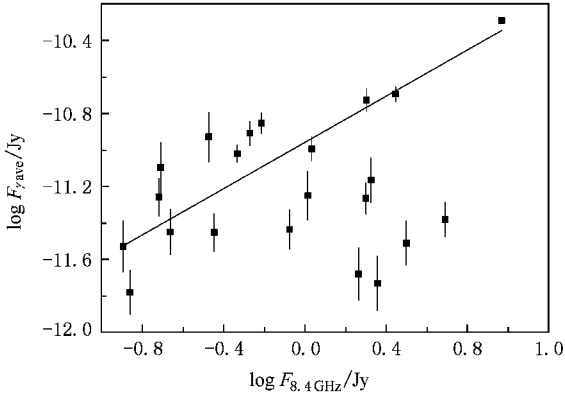


图 6 $\log F_{8.4 \text{ GHz}}$ 与 $\log F_{\gamma \text{ ave}}$ 关系

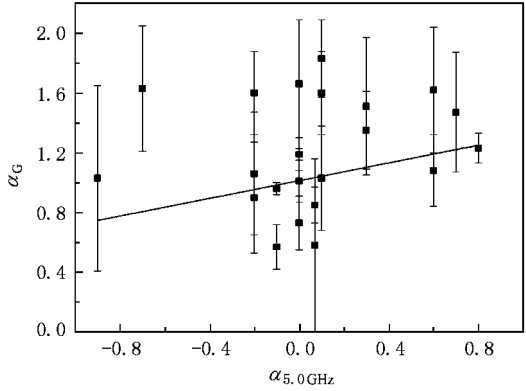


图 7 $\alpha_{5.0 \text{ GHz}}$ 与 α_G 关系

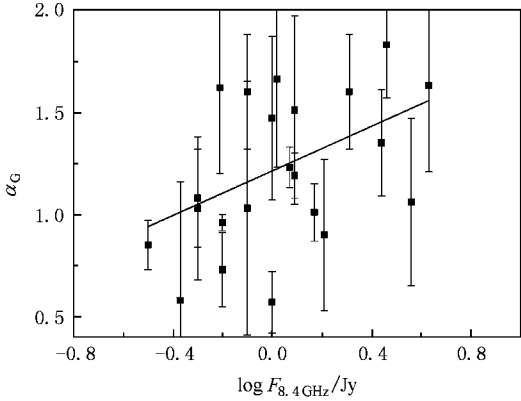


图 8 $\alpha_{8.4 \text{ GHz}}$ 与 α_G 关系

4. 讨论与结论

众所周知,辐射模型随不同的波段有不同的变化.由此所获得的辐射机理也就有其相对应的解释. Dondi 等人直接用 EGRET 观测数据研究了 γ 射线辐射和射电、光学、X 射线波段辐射的相关性^[23],他们发现 γ 射线光度与射电光度的相关较其与其他波段(如光学光度和 X 射线波段)光度的关系更好. Xie 等人^[24]收集了 16 个有 γ 射线噪的 Blazar 天体的近红外和 γ 射线辐射流量,对其辐射机理进行了研究,发现近红外光度与 γ 射线有较好的相关性.并且, γ 射线光度与近红外光度的相关性比 γ 射线光度与 X 射线光度的相关性好. γ 射线光度与近红外光度的相关系数 $r = 0.98$,置信度为 $p = 4.68 \times 10^{-10}$. Fair^[25]利用多路回归分析的方法研究了 γ 射线和较低能量波段辐射之间的关系,发现 γ 射线流量和射电流量有相关存在,但 γ 射线流量与光学流量或 X

射线流量却没有相关,那么 γ 射线和射电辐射之间的关系可能是由于它们都是强束流引起的.虽然一些文献报道了 γ 射线与射电辐射有关系,但是 Mücke 等人^[26]的研究却没有发现 γ 射线与射电辐射相关.

观测显示 γ 射线噪 AGNs 明显地与致密平谱射电源有联系,这些天体显示了高光变性质.由于 Blazar 的射电辐射和 γ 射线辐射都是强束流,这意味着在喷流中 γ 射线和射电数据应该有相关.如果 γ 射线辐射来自 SSC 模型的辐射,那么在高态时 γ 射线流量与射电流量应该有关系.我们认为目前之所以存在不同的研究结果和不同的辐射模型,其原因可能是:1)光度依赖于红移,而有些研究没有考虑红移的影响;2)低频段的射电辐射不全来自于喷流;3)数据选择的不同,由于没有同时多波段观测数据,自然导致结果的不同.

Blazar 包含两类类星体,即 BL Lac 天体和平谱射电类星体(FSRQ),它们的辐射线有明显的差异,

说明它们的辐射机理和物理本质是不同的,因此,本文仅考虑用 BL Lac 天体的流量相关来研究其辐射机理,这应是一种有效的方法.

通过对 22 个 BL Lac 天体的 γ 射线和射电 5.0 GHz 8.4 GHz 的辐射相关的研究,结果有:

1) 在低态时, γ 射线和射电 5.0 GHz 8.4 GHz 射电辐射均没有相关. 相关系数分别为 $r = 0.05$ 和 $r = 0.13$.

2) 在高态和平均态时, γ 射线辐射和射电 5.0 GHz 8.4 GHz 射电辐射都有较好的线性相关. 线性回归方程和相关系数分别为 $\log F_{\gamma_{\max}} = (0.85 \pm 0.14) \log F_{5.0 \text{ GHz}} - (10.53 \pm 0.11)$, $r = 0.80$; $\log F_{\gamma_{\text{ave}}} = (0.71 \pm 0.12) \log F_{5.0 \text{ GHz}} - (11.00 \pm 0.08)$, $r = 0.79$; $\log F_{\gamma_{\max}} = (0.72 \pm 0.11) \log F_{8.4 \text{ GHz}} - (10.50 \pm 0.09)$, $r = 0.84$; $\log F_{\gamma_{\text{ave}}} = (0.63 \pm 0.09) \log F_{8.4 \text{ GHz}} - (10.96 \pm 0.07)$, $r = 0.84$. 置信度均好于 10^{-4} , 表明 γ 射线和

射电辐射之间虽然没有简单的一一对应关系,但两者确有相关.

3) 22 个 BL Lac 天体 γ 射线谱指数和射电 5.0 GHz 8.4 GHz 谱指数都有一个弱相关关系存在. 相关系数分别为 0.39 和 0.45, 线性回归方程为 $\alpha_G = (0.30 \pm 0.16) \alpha_{5.0 \text{ GHz}} + (1.01 \pm 0.05)$ 和 $\alpha_G = (0.54 \pm 0.24) \alpha_{8.4 \text{ GHz}} + (1.21 \pm 0.08)$, 这与样本源太少有关.

从以上的讨论和我们的研究结果,可得出如下结论: 本文中,我们收集了一个有 γ 射线辐射的 BL Lac 天体样本,并研究了该样本的高能伽玛射线与射电流量密度以及两者谱指数之间的关系,发现两者在高态和平均值时,均有正相关,这种相关意味着高能伽玛射线可能是同步自康普顿辐射过程所致. 我们的研究支持了 γ 射线辐射的 SSC(同步自康普顿辐射)模型^[9].

- [1] Fan J H, Adam G, Xie G Z, Cao S L, Lin R G, Copin Y 1998 *A&A* **338** 27
- [2] Cappi M, Comastri A, Molendi S *et al* 1994 *MNRAS* **271** 438
- [3] Dermer C D, Schlickeiser R, Mastichiadis A 1992 *A&A* **256** 27
- [4] Sikora Marek, Begelman Mitchell C, Rees Martin J 1994 *ApJ* **421** 153
- [5] Blandford R D, Levinson A 1995 *ApJ* **441** 79
- [6] Mannheim K, Biermann P L 1992 *A&A* **253** 21
- [7] Mannheim K 1993 *PhRv D* **48** 2408
- [8] Cheng K S, Ding W K Y 1994 *A&A* **288** 97
- [9] Maraschi L, Ghisellini G, Celotti A 1992 *ApJ* **397** 5
- [10] Zdziarski Andrzej A, Krolik Julian H 1993 *ApJ* **409** 33
- [11] Li J, Fan J H, Yuan Y H 2007 *Chin. Physics* **16** 0876
- [12] Yuan Y H, Fan J H, Huang Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1526
- [13] Cheng Y, Zhang X, Wu L *et al.* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 987 (in Chinese) [程 勇、张 雄、伍 林等 2006 物理学报 **55** 987]

- [14] Qin Y P 2009 *Chin. Phys. B* **18** 0825
- [15] Fan J H, Kurtanidze O M, Nikolashvili MG *et al* 2004 *ChJA A* **4** 133
- [16] Lainela M, Takalo L O, Sillanpaa A *et al* 1999 *ApJ* **521** 561
- [17] Ramanamurthy P V, Bertsch D L, Dingus B L *et al* 1995 *IAUC* **6147** 2
- [18] Burbidge G, Hewitt A 1987 *A J* **93** 1
- [19] Xie G Z, Li K H, Liu F K 1992 *ApJS* **80** 683
- [20] Hartman R C, Bertsch D L, Bloom S D *et al* 1999 *ApJS* **123** 79
- [21] Yang J H, Fan J H 2005 *Ch JA A* **5** 229
- [22] Mattox J R, Hartman R C, Reimer O 2001 *Ap&SS* **135** 155
- [23] Dondi Laura, Ghisellini Gabriele 1995 *MNRAS* **273** 583
- [24] Xie G Z, Zhang Y H, Fan J H 1997 *ApJ* **447** 114
- [25] Fan J H 1997 *Ap&SS* **246** 119
- [26] Mücke A, Pohl M, Reich P *et al* 1997 *A&A* **320** 33

Statistical characteristics of gamma ray and radio emission of BL Lac object^{*}

Li Wei-Hu[†] Yuan Rong

(*Tibet Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China*)

(Received 30 December 2008 ; revised manuscript received 5 March 2009)

Abstract

A sample including 22 BL Lac objects was collected. The possible correlations between the γ -ray emission at 1 GeV and the radio emission at 8.4 GHz or 5.0 GHz were investigated. Main results are as follows : 1) for minimum γ -ray data , there is no correlation between γ -ray and radio flux density. For maximum and average data , there are good correlations between γ -ray and radio emissions , with the maximum correlation coefficient reaching 0.85 , and the chance probability $p < 10^{-4}$; 2) there are weak correlations between γ -ray spectral index and the radio spectral index. Therefore , the γ -ray radiation was the SSC process.

Keywords : BL Lac , γ -ray , radio emission , spectral index

PACC : 9850R , 9530G

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 30760122) , the New Century Excellent Talents from the Ministry of Education of China (Grant No. NCHT-05-0826) , the Research Foundation from Ministry of Education of China (Grant No. 208136).

[†] E-mail : XZLZLWH@126.com