

文章编号: 1671-4229(2023)02-0077-10

# 基于多波段观测的耀变体能谱分析

黄宏任<sup>1</sup>, 袁聿海<sup>2\*</sup>

(广州大学 天体物理中心, 广东 广州 510006)

**摘要:** 文章采用了334个具有射电、中红外、近红外、光学到紫外波段数据的耀变体样本分析光谱特性和谱能量分布。计算出近红外光谱指数( $\alpha_N$ )、中红外光谱指数( $\alpha_M$ );基于能谱拟合获得了峰值频率( $\nu_p$ )、峰值光度( $L_p$ )和抛物线曲率( $b$ )。主要结果如下:①在中红外区域,光谱与亮度不存在相关性;在近红外区域,光谱与亮度呈弱反相关关系;在紫外区,光谱与亮度呈较强的反相关关系。②对于低频耀变体,抛物线曲率 $b$ 和 $\log \nu_p$ 具有强相关性;对于中频耀变体,抛物线曲率 $b$ 和 $\log \nu_p$ 不具有相关性;对于高频耀变体,抛物线曲率 $b$ 和 $\log \nu_p$ 具有强反相关性。③结果表明全部耀变体样本的谱指数 $\alpha_{RO}$ 、 $\alpha_{OU}$ 与 $\log \nu_p$ 之间具有很强的相关性。

**关键词:** 耀变体; 光谱; 能谱

中图分类号: P 157 文献标志码: A

## Analysis for the energy spectrum of blazars based on multi-band observation

HUANG Hong-ren<sup>1</sup>, YUAN Yu-hai<sup>2\*</sup>

(Center for Astrophysics, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In this paper, a sample including 334 UV selected blazars is built to analyze the spectral properties and the spectral energy distributions (SEDs). Most of sources have data cover from radio, middle-infrared, near-infrared, optical to ultraviolet band. We calculate the near-infrared spectral indices ( $\alpha_N$ ), and the mid-infrared spectral indices ( $\alpha_M$ ). Based on the SEDs fitting, we obtain the peak frequency ( $\nu_p$ ), peak luminosity ( $L_p$ ) and the parabolic curve ( $b$ ). Main results are as follows. ① At the mid-infrared region, the spectrum doesn't show correlation with brightness; at the near-infrared region, the spectrum show weak anti-correlation with the brightness; at UV region, the spectrum shows strong anti-correlation with brightness; ② For LSP, the parabolic curve  $b$  and  $\log \nu_p$  show strong anti-correlation; for ISP,  $b$  and  $\log \nu_p$  show no correlation; for HSP, the parabolic curve  $b$  and  $\log \nu_p$  show strong anti-correlation; ③ The result indicates that strong correlations lie between  $\alpha_{RO}$ ,  $\alpha_{OU}$  and  $\log \nu_p$  in the whole samples of blazars, respectively.

**Key words:** Blazar; spectrum index; SED

耀变体表现出非常极端的特性,比如超光速、剧烈光变、核主导,等等。这些特征的来源是由于喷流具有沿着人们视线方向的视角<sup>[1-2]</sup>和被解释为具有黑洞、吸积盘、喷流结构的相对论非热辐射<sup>[3]</sup>。

耀变体可以分为2个子类,即蝎虎座BL型天体(BL Lacs)和平谱射电类星体(flat spectrum radio quasars, FSRQs),前者具有无典型发射线和吸收线特征的光谱或弱发射线<sup>[4]</sup>,后者具有平谱射电光谱和典型的宽

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2022-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1531245, 11403006, 10633010)

作者简介: 黄宏任(1991—),男,硕士研究生, E-mail: 76356336@qq.com

\*通信作者. E-mail: yh\_yuan@gzhu.edu.cn

引文格式: 黄宏任,袁聿海. 基于多波段观测的耀变体能谱分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(2): 77-86.

发射线。一般来说,这两个子类之间的划分是基于发射线的等值宽度(equivalent width,EW),其中 BL Lacs 的等值宽度  $EW < 5 \text{ \AA}^{[3,5-7]}$ 。根据同步峰频的位置,Fan 等<sup>[8]</sup>将耀变体分为 3 个子类:低频耀变体(low synchrotron energy peaked blazars, LSPs),  $\log \nu_p < 14 \text{ Hz}$ ;中峰频耀变体(intermediate synchrotron energy peaked blazars, ISPs),  $14 \text{ Hz} < \log \nu_p < 15.3 \text{ Hz}$ ;高频耀变体(high synchrotron energy peaked blazars, HSPs),  $\log \nu_p > 15.3 \text{ Hz}$ 。Abdo 等<sup>[9]</sup>得出 BL Lacs 的峰频比 FSRQs 的峰频高的结果。依照峰值位置, BL Lacs 可分为低能峰蝎虎天体(low energy peaked blazars, LBLs)、中能峰蝎虎天体(intermediate energy peaked blazars, IBLs)和高能峰蝎虎天体(high energy peaked blazars, HBLs),而 FSRQs 可分为低能峰平谱射电类星体(low synchrotron energy peaked FSRQs, LFs)、中能峰平谱射电类星体(intermediate synchrotron energy peaked FSRQs, IFs)和高能峰平谱射电类星体(high synchrotron energy peaked FSRQs, HFs)。

耀变体的谱能量分布(spectral energy distribution, SED)分为两部分:第一部分峰值位于射电至 X 射线波段,可能的解释是相对论性电子的同步辐射形成;第二部分峰值位于 X 射线至伽马射线波段,主要解释为极端相对论性电子对低能光子的逆康普顿散射<sup>[10-13]</sup>。

耀变体的能谱已被许多论文研究过<sup>[9,13-22]</sup>,比如,Abdo 等<sup>[9]</sup>提出了射电流量密度( $f_{5\text{GHz}}$ )、同步峰值频率( $\log \nu_p$ )和同步峰值流量( $f_{\nu_p}$ )之间的经验关系。比如, $b = 0.5 \log \nu_p - 20.4 + 0.9 \log f_{5\text{GHz}}$ ,其中, $f_{5\text{GHz}}$ 是 5 GHz 流量密度, $\nu_p$ 是同步峰值频率, $\nu_p f_{\nu_p}$ 是同步辐射的峰值流量。基于耀变体的幂律模型: $f_{\nu} = k\nu^{a+b} \log \nu$ ,可以推导出一个抛物线函数,即  $\log \nu f_{\nu} = -b(\log \nu - \log \nu_p)^2 + \log \nu_p f_{\nu_p}$ ,其中, $b$ 是抛物线的曲率<sup>[23]</sup>。Fan 等<sup>[8]</sup>得到同步辐射的峰值频率和峰值光度之间存在明显地反相关结论。

关于能谱,Giommi 等<sup>[24]</sup>分析了 105 个耀变体得出结果:对于 FSRQs,  $\log \nu_p = 13.1 \pm 0.1 \text{ Hz}$ ,对于 BL Lacs,  $\log \nu_p \sim 15 \text{ Hz}$ 。Kapanadze 等<sup>[16]</sup>研究了 312 条 x 射线选 BL Lacs 并获得范围为 14.56 ~ 19.18 Hz 的对数峰值频率。基于 ASDC 能谱生成器工具,Mingaliev 等<sup>[25]</sup>计算出峰值频率并得到 FSRQs  $\log \nu_{(p|F)} = 13.4 \pm 1.0 \text{ Hz}$  和 BL Lacs  $\log L_{(p|B)} = 14.6 \pm 1.4 \text{ Hz}$ 。

许多耀变体的光谱指数与亮度之间的相关性已经被分析<sup>[26-41]</sup>。一般来说, BL Lacs 表现出当光源变亮时,光谱变硬,当光源变弱时,光谱变软。部分 FSRQs 与

BL Lacs 呈相似的相关性,其他 FSRQs 与 BL Lacs 无相关性。

## 1 样 本

基于来自多波段耀变体列表的耀变体(Blazar Catalog, BZCat)<sup>[42]</sup>,收集射电、中红外、近红外、光学和紫外数据,构建了 334 个耀变体样本(表 1),其中,包括 221 个 BL Lacs 和 113 个 FSRQs。射电数据从 NED 收集,包含 5 个射电波段,分别是  $R_1 = 10^{9.15} \text{ Hz}$ 、 $R_2 = 10^{9.69} \text{ Hz}$ 、 $R_3 = 10^{9.92} \text{ Hz}$ 、 $R_4 = 10^{10.57} \text{ Hz}$  和  $R_5 = 10^{11.35} \text{ Hz}$ 。中红外数据采集于 WISE。近红外(J、H 和 Ks)数据来自 2MASS,并由尘埃消光量修正。光学数据收集于 BZCat,紫外(FUV 和 NUV)数据来自 GALEX。利用尘埃消光对近红外、光学和紫外数据进行校正, $m_{\lambda} = m_{0\lambda} - A_{\lambda}$ ,  $m_{\lambda}$  是修正星等, $m_{0\lambda}$  是原始星等, $A_{\lambda}$  是来自 NED 得到的校正值。中红外数据和校正的近红外、光学、紫外数据被转换成流量密度。

## 2 光 度

采用关系式  $L_{\nu} = 4\pi d_L^2 \nu F_{\nu}$  来计算光度( $L_{\nu}$ ),这里, $\nu$  是频率, $F_{\nu}$  是在频率为  $\nu$  时的流量密度, $d_L$  为光度距离, $d_L = (1+z) \cdot \frac{c}{H_0} \cdot \int_0^z \frac{1}{\sqrt{0.29(1+x)^3 + 0.71}} dx$  (单位为 cm)<sup>[43]</sup>。对于没有红移的耀变体,用平均值  $z = 0.415$  来表示,样本和光度( $L_{\nu}$ ,单位为  $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ )已列于表 1 中。

平均光度(单位为  $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ )如下:

$$\overline{\log L_{R_1}} = 42.33 \pm 1.23,$$

$$\overline{\log L_{R_2}} = 43.17 \pm 1.21,$$

$$\overline{\log L_{R_3}} = 43.39 \pm 1.27,$$

$$\overline{\log L_{R_4}} = 44.29 \pm 1.07,$$

$$\overline{\log L_{R_5}} = 45.14 \pm 0.99,$$

$$\overline{\log L_{W_1}} = 45.03 \pm 0.95,$$

$$\overline{\log L_{W_2}} = 44.94 \pm 0.94,$$

$$\overline{\log L_{W_3}} = 45.11 \pm 0.80,$$

$$\overline{\log L_{W_4}} = 45.15 \pm 0.74,$$

$$\overline{\log L_K} = 45.19 \pm 0.71,$$

$$\overline{L_H} = 45.22 \pm 0.71,$$

$$\overline{L_J} = 45.21 \pm 0.71,$$

$$\overline{L_0} = 45.16 \pm 0.82,$$

$$\overline{L_{UN}} = 44.90 \pm 0.78,$$

$$\overline{L_{UF}} = 44.68 \pm 0.78.$$

为了研究多波段光度之间的关系,采用线性拟合方法进行分析, $y = (a \pm \Delta a)x + (b \pm \Delta b)$ , 这里  $a$  和  $\Delta a$

是斜率和误差, $b$  和  $\Delta b$  是截距和误差, $r$  是相关系数, $p$  为机遇概率, $r_{LL,z}$  为去除红移效应后的相关系数。紫外与其他波段的相关性如图 1 所示。对应的线性拟合列于表 2。

表 1 334 个耀变体样本  
Table 1 The sample of 334 blazars

Name	5BZCAT					...
	J0008 - 2339	J0018 + 2947	J0021 - 2550	J0032 - 2849	J0045 + 1217	
$z$	0.147	0.1		0.324		...
type	BL	BL	BL	BL	BL	...
$\log L_{R1}$	40.44	40.04	41.75	42.39		...
$\log L_{R2}$				42.84		...
$\log L_{R3}$				42.91		...
$\log L_{R4}$				43.52		...
$\log L_{R5}$						...
$\log L_{W4}$	43.28	42.97	44.64	44.56	44.81	...
$\log L_{W3}$	43.01	42.63	44.55	44.48	44.81	...
$\log L_{W2}$	43.42	42.89	44.79	44.67	45.12	...
$\log L_{W1}$	43.59	43.04	44.87	44.77	45.18	...
$\log L_K$	43.87	43.3	45.42	44.75	44.98	...
$\log L_H$	43.99	43.27	45.43	44.75	44.94	...
$\log L_J$	43.95	43.33	45.42	44.77	44.97	...
$\log L_O$	44.17	43.17	44.92	45.19	44.96	...
$\log L_{NU}$	43.62	43	44.6	43.72	44.41	...
$\log L_{FU}$	43.7	43.12	44.47	43.75	44.23	...

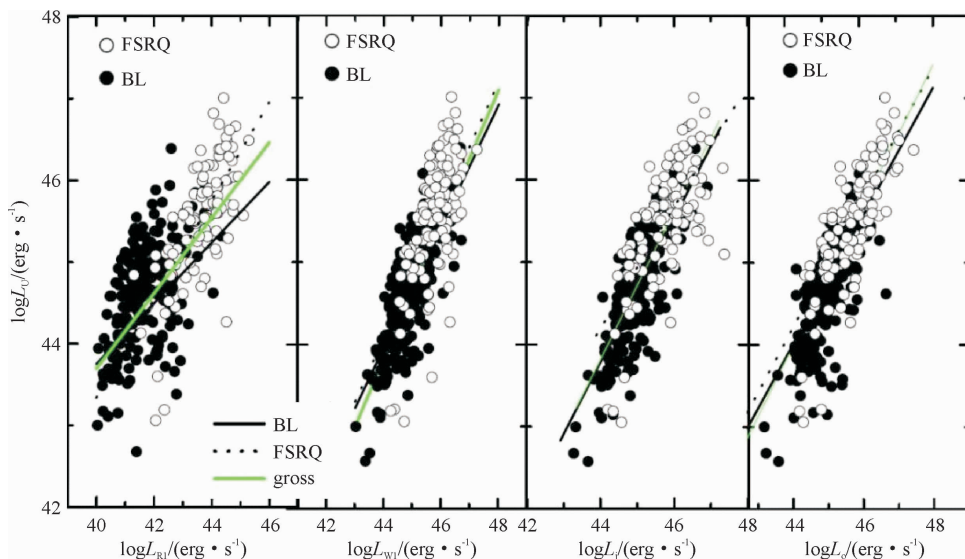


图 1 多波段光度之间的相关性

Fig. 1 The correlation among the multi-band luminosities

注:实心圆圈代表 BL Lacs,空心圆圈代表 FSRQ。点线、直线和绿线分别表示 BLs、FSRQs 和整个耀变体的  $\log L_{R1, W1, J, O}$  与  $\log L_U$  之间的线性拟合(表 2)。

表2  $\log L_U$  与  $\log L_{R_1, W_1, J, O}$  的线性拟合Table 2 The linear fitting between  $\log L_U$  and  $\log L_{R_1, W_1, J, O}$ 

$y$ vs $x$	sample	$a \pm \Delta a$	$b \pm \Delta b$	$r$	$p$	$r_{LL,z}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
$\log L_U$ vs $\log L_{R_1}$	BL	$0.37 \pm 0.04$	$28.96 \pm 1.85$	0.5	<0.01%	0.18
	FSRQ	$0.60 \pm 0.06$	$19.35 \pm 2.55$	0.71	<0.01%	0.39
	gross	$0.46 \pm 0.02$	$25.30 \pm 1.02$	0.73	<0.01%	0.36
$\log L_U$ vs $\log L_{W_1}$	BL	$0.74 \pm 0.04$	$11.40 \pm 1.94$	0.73	<0.01%	0.57
	FSRQ	$0.78 \pm 0.09$	$9.76 \pm 3.99$	0.65	<0.01%	0.31
	gross	$0.82 \pm 0.03$	$7.74 \pm 1.51$	0.79	<0.01%	0.54
$\log L_U$ vs $\log L_J$	BL	$0.74 \pm 0.04$	$11.40 \pm 1.94$	0.73	<0.01%	0.58
	FSRQ	$0.78 \pm 0.09$	$9.76 \pm 3.99$	0.65	<0.01%	0.28
	gross	$0.82 \pm 0.03$	$7.74 \pm 1.51$	0.79	<0.01%	0.53
$\log L_U$ vs $\log L_O$	BL	$0.87 \pm 0.05$	$5.31 \pm 2.12$	0.76	<0.01%	0.66
	FSRQ	$0.74 \pm 0.07$	$11.66 \pm 3.24$	0.71	<0.01%	0.42
	gross	$0.89 \pm 0.03$	$4.23 \pm 1.55$	0.81	<0.01%	0.60

### 3 光谱指数

样本数据包含5个波段,可分为5个区域:射电波段、中红外波段、近红外波段、光学波段和紫外波段。具体的划分如下:①射电:  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$ ; ②中红外:  $W_1, W_2, W_3, W_4$ ; ③近红外:  $J, H, K$ ; ④光学:  $O$ ; ⑤紫外:

$NUV, FUV$ 。

在中红外、近红外和紫外区域,有两个以上的波段光谱指数,可以通过公式  $\log F_\nu = -\alpha \log \nu + C$  计算,  $F_\nu$  是频率在  $\nu$  处的流量密度,  $C$  是常数。3个区域的光谱指数分别标记为  $M$  (中红外)、 $N$  (近红外) 和  $U$  (紫外), 列于表3。

表3 结果的最大值、最小值、平均值

Table 3 The maximum, minimum, and averaged value of our results

parameter	sample	maximum	minimum	average	parameter	sample	maximum	minimum	average
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
$\alpha_M$	BL	1.48	-0.28	$0.64 \pm 0.29$	$\alpha_{MN}$	BL	3.09	-1.29	$0.79 \pm 0.64$
	FSRQ	1.86	0.23	$1.21 \pm 0.25$		FSRQ	3.44	-2.93	$1.07 \pm 0.94$
	gross	1.86	-0.28	$0.82 \pm 0.39$		gross	3.44	-2.93	$0.87 \pm 0.76$
$\alpha_N$	BL	1.96	-0.3	$0.88 \pm 0.35$	$\alpha_{OU}$	BL	6.67	-0.26	$1.75 \pm 0.90$
	FSRQ	2.29	-0.74	$0.96 \pm 0.55$		FSRQ	6.91	-0.17	$1.95 \pm 1.19$
	gross	2.29	-0.74	$0.90 \pm 0.42$		gross	6.91	-0.26	$1.81 \pm 1.01$
$\alpha_{RM}$	BL	0.6	0.13	$0.34 \pm 0.09$	$\alpha_{MU}$	BL	3.32	0.35	$1.29 \pm 0.44$
	FSRQ	0.76	0.24	$0.55 \pm 0.11$		FSRQ	3.47	0.63	$1.47 \pm 0.57$
	gross	0.76	0.13	$0.41 \pm 0.14$		gross	3.47	0.35	$1.34 \pm 0.49$
$\alpha_{RO}$	BL	0.76	0.07	$0.42 \pm 0.12$	$\alpha_{Lp}$	BL	46.81	43.16	$45.03 \pm 0.61$
	FSRQ	0.79	0.31	$0.62 \pm 0.09$		FSRQ	47.47	44.48	$45.99 \pm 0.66$
	gross	0.79	0.07	$0.49 \pm 0.15$		gross	47.47	43.16	$45.33 \pm 0.77$

基于  $\alpha_M$  和  $\alpha_N$  这两个光谱指数,分析 BL Lacs 和 FSRQs 这两个子类之间的区别。  $\alpha_{M/B}$  和  $\alpha_{M/F}$  表现出不同的分布,如图2(a)所示,其差值  $d = 0.78$ ,  $\alpha_{N/B}$  和  $\alpha_{N/F}$  表现出相同的分布,其差值  $d = 0.20$ ,如图2(b)所示。基于样本,分析光谱和亮度之间的关系。在中红外区域

$\alpha_M = (-0.02 \pm 0.05) \log F_{\omega_1} + (0.78 \pm 0.13)$ , 其中,  $r = -0.02$ ,  $p = 73.7\%$ , 表现出无相关性;在近红外区域,  $\alpha_N = (-0.23 \pm 0.05) \log F_J + (0.22 \pm 0.16)$ , 其中,  $r = -0.22$ ,  $p < 10^{-4}$ , 表现出弱反相关性。

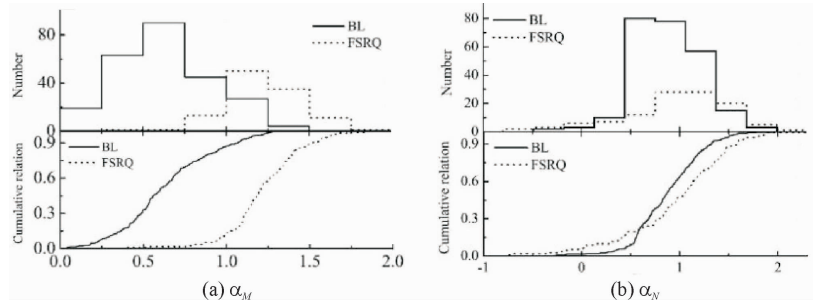


图 2 BL Lacs 和 FSRQs 中  $\alpha_M$  和  $\alpha_N$  分布和 KS 检验

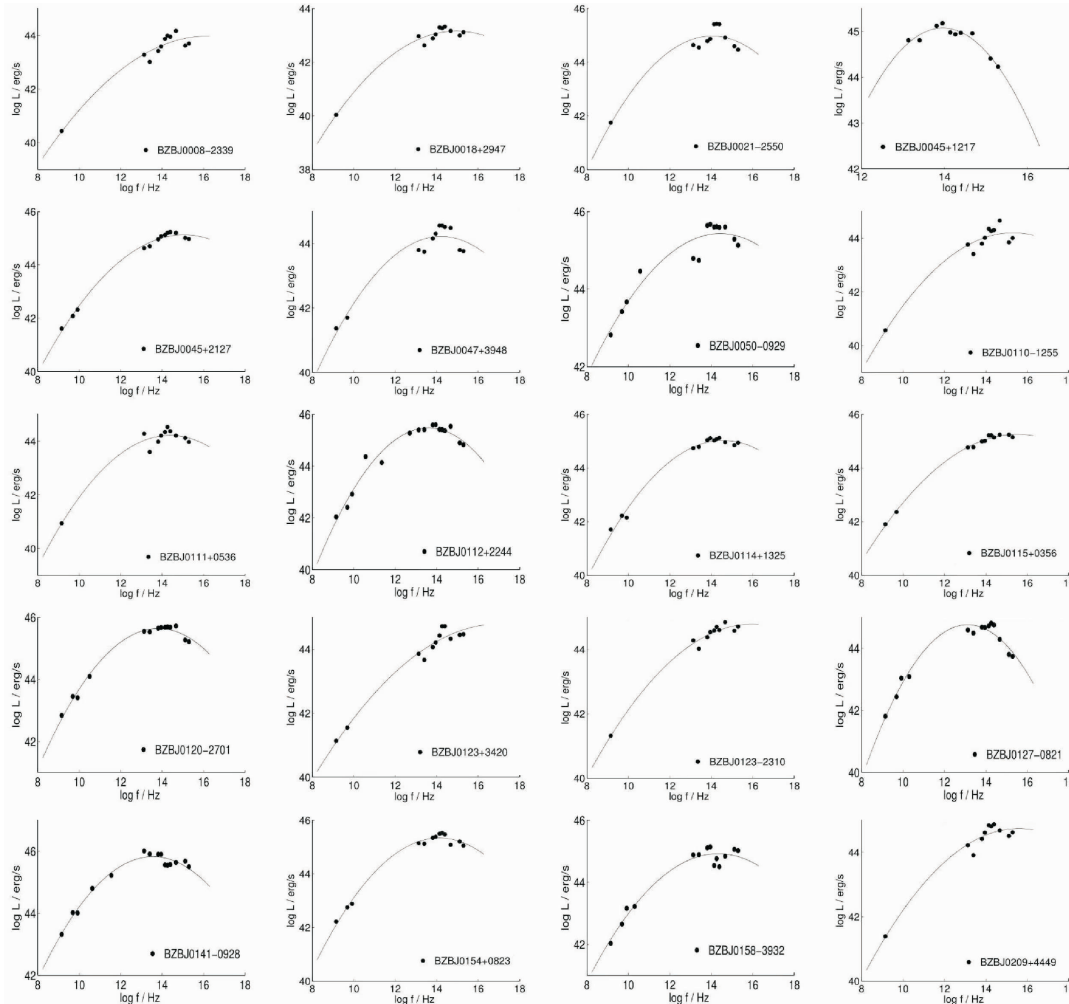
Fig. 2 The distribution and KS-test of  $\alpha_M$  and  $\alpha_N$  for the two subclasses-BLs and FSRQs

### 4 能 谱

用抛物函数来分析宽频能谱,比如  $\log v_f = -b(\log v - \log v_p)^2 + \log v_p f_v$ , 如果  $b > 0$ , 则峰频为  $v_p$ , 峰频光度为  $L_p = v_p f_v$ , 拟合曲线展示在图 3。图 3 对 32 颗源进行了分析,  $x$  轴为对数频率,  $y$  轴为对数光度, 曲线为抛物线。  $L_p$  已经被列在表 4 中, 其中, 列 1 为名称; 列 2 为  $b$ ; 列 3

为  $\log v_p$ ; 列 4 为  $\log L_p$ 。

$\log v_p$  的范围是 12.31 ~ 19.31 Hz, 其平均值  $\overline{\log v_p} = 14.27 \pm 1.43$  Hz。对于 BL Lacs, 平均值  $\overline{\log v_{(p|B)}} = 14.70 \pm 1.47$  Hz; 对于 FSRQs, 其平均值是  $\overline{\log v_{(p|F)}} = 13.43 \pm 0.87$  Hz。其结果显示  $\overline{\log v_{(p|B)}} > \overline{\log v_{(p|F)}}$ , BL Lacs 与 FSRQs 的分布与累加关系如图 4(a) 所示, 差异为  $d = 0.46$ , 相同分布的概率为  $p < 10^{-4}$ , 可见 BL Lacs 和 FSRQs 的峰值频率分布不同。



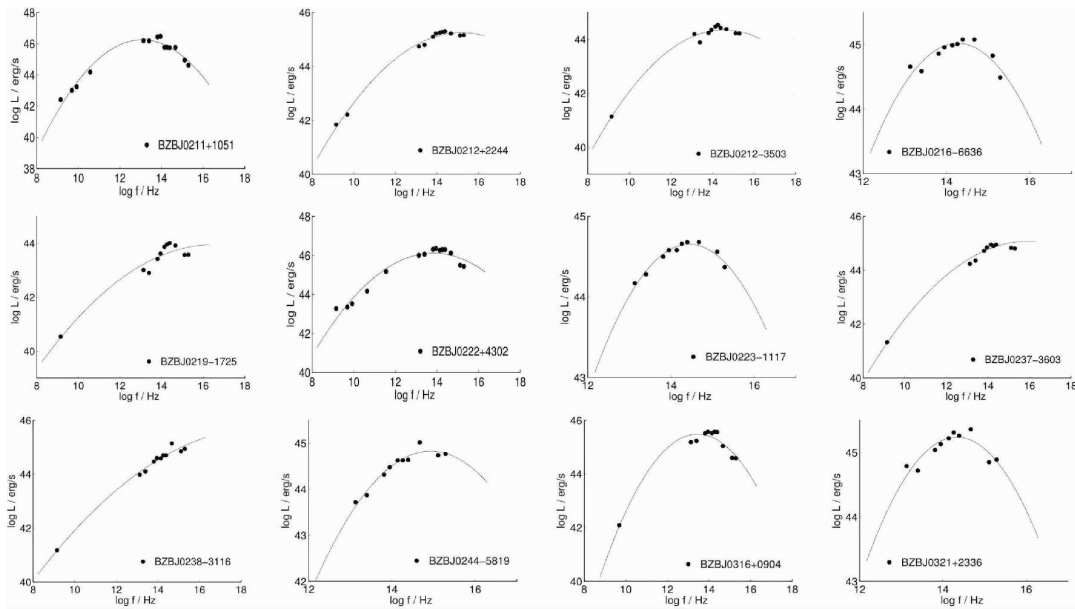


图 3 从 BZBJ0008 - 2339 到 BZBJ0321 + 2336 的拟合曲线

Fig. 3 The fitting curve of the sources from BZBJ0008 - 2339 to BZBJ0321 + 2336

表 4 峰值频率、峰值光度和 334 颗耀变体的曲率

Table 4 The peak frequency, peak luminosity and the curvature of the 334 blazars

Name	b	$\log \nu_p / \text{Hz}$	$\log L_p / (\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})$	Name	b	$\log \nu_p / \text{Hz}$	$\log L_p / (\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})$
BZQJ0004 - 4736	0.09	14.08	45.94	BZQJ1146 + 3958	0.25	12.73	46.59
BZQJ0005 + 3820	0.28	12.67	45.16	BZBJ1147 - 3812	0.23	12.58	46.57
BZBJ0008 - 2339	0.07	16.21	43.98	BZBJ1150 + 2417	0.16	13.53	45.65
BZBJ0018 + 2947	0.09	14.95	43.16	BZBJ1150 + 4154	0.10	15.66	45.25
BZBJ0021 - 2550	0.14	14.03	44.98	BZBJ1151 + 5859	0.09	14.95	45.16
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...

$\log L_p$  的范围是  $43.16 \sim 47.46 \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其平均值是  $\log L_p = 45.35 \pm 0.77 \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对于 BL Lacs, 平均值  $\log L_{(p1B)} = 45.02 \pm 0.61 \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 对于 FSRQs, 平均值  $\log L_{(p1F)} = 45.99 \pm 0.65 \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 结果表明  $\log L_{(p1B)} <$

$\log L_{(p1F)}$ . 这 2 个子类 (BL Lacs 和 FSRQs) 的分布和 KS 检验结果如图 4 (b), 其差值  $d = 0.61$ , 出自同一分布的概率是  $p < 10^{-4}$ , 结果表明  $\log L_{(p1B)}$  和  $\log L_{(p1F)}$  之间具有明显的差异。

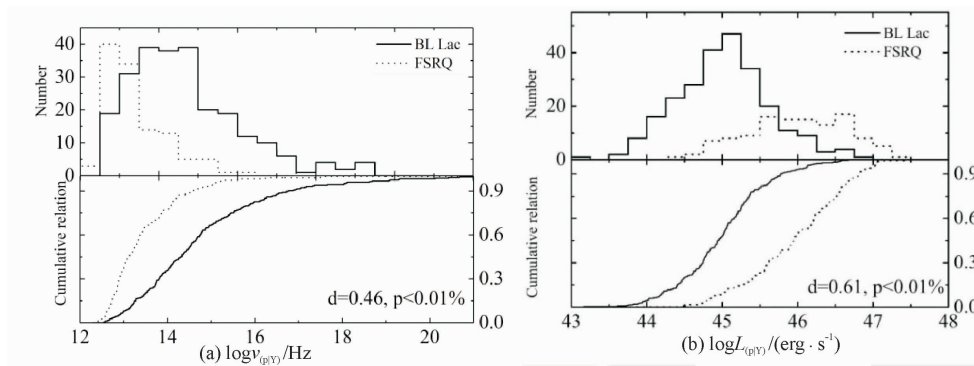


图 4 BL Lacs 和 FSRQs 的  $\log \nu_p$  和  $\log L_p$  分布

Fig. 4 The  $\log \nu_p$  and  $\log L_p$  distributions of BL Lacs and FSRQs

## 5 讨论和结论

本文获得的有效光谱指数如表 5, 两个区域光谱指标( $\alpha_M, \alpha_N$ )之间的相关性, 如表 6 和图 5。发现 BL Lacs

的  $\alpha_N$  和  $\alpha_M$  之间有很强的相关性, 全体耀变体的  $\alpha_N$  和  $\alpha_M$  之间也有很强的相关性, 其相关系数分别为  $r = 0.58$  和  $0.28$ , 但 FSRQs 的  $\alpha_N$  和  $\alpha_M$  之间没有相关性。结果表明, 在  $\alpha_M$  和  $\alpha_N$  两个光谱指数中, BL Lacs 的相关性强于 FSRQs。

表 5 样本的有效光谱指数

Table 5 The effectively spectral indices of sample

统计	类别	$\alpha_{RM}$	$\alpha_{RO}$	$\alpha_{MN}$	$\alpha_{OU}$	$\alpha_{MU}$
max	BL	0.6	0.76	3.09	6.67	3.32
	FSRQ	0.76	0.79	3.44	6.91	3.47
	gross	0.76	0.79	3.44	6.91	3.47
min	BL	0.13	0.07	-1.29	-0.26	0.35
	FSRQ	0.24	0.31	-2.93	-0.17	0.63
	gross	0.13	0.07	-2.93	-0.26	0.35
ave	BL	$0.34 \pm 0.09$	$0.42 \pm 0.12$	$0.79 \pm 0.64$	$1.75 \pm 0.90$	$1.29 \pm 0.44$
	FSRQ	$0.55 \pm 0.11$	$0.62 \pm 0.09$	$1.07 \pm 0.94$	$1.95 \pm 1.19$	$1.47 \pm 0.57$
	gross	$0.41 \pm 0.14$	$0.49 \pm 0.15$	$0.87 \pm 0.76$	$1.81 \pm 1.01$	$1.34 \pm 0.49$

表 6 参数的线性拟合

Table 6 The linear correlation between two parameters

$y$ vs $x$	sample	$a \pm \Delta a$	$b \pm \Delta b$	$r$	$p/\%$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\log \vartheta_p$ vs $\alpha_{RO}$	BL	$-0.05 \pm 0.004$	$1.11 \pm 0.06$	-0.63	<0.01
	FSRQ	$-0.04 \pm 0.01$	$1.21 \pm 0.13$	-0.42	<0.01
	gross	$-0.06 \pm 0.003$	$1.40 \pm 0.05$	-0.72	<0.01
$\log \vartheta_p$ vs $\alpha_{OU}$	BL	$-0.19 \pm 0.03$	$4.64 \pm 0.50$	-0.35	<0.01
	FSRQ	$-0.66 \pm 0.12$	$10.78 \pm 1.58$	-0.47	<0.01
	gross	$-0.21 \pm 0.03$	$4.86 \pm 0.44$	-0.35	<0.01
$\alpha_N$ vs $\alpha_M$	BL	$0.72 \pm 0.06$	$0.42 \pm 0.04$	0.58	<0.01
	FSRQ	$-0.31 \pm 0.23$	$1.34 \pm 0.28$	-0.13	17.00
	gross	$0.31 \pm 0.06$	$0.65 \pm 0.05$	0.28	<0.01
$\alpha_M$ vs $\log F_{W1}$	BL	$0.04 \pm 0.04$	$0.75 \pm 0.11$	0.07	29.30
	FSRQ	$-0.18 \pm 0.05$	$0.75 \pm 0.15$	-0.29	0.20
	gross	$-0.02 \pm 0.05$	$0.78 \pm 0.13$	-0.02	73.70
$\alpha_N$ vs $\log F_J$	BL	$-0.18 \pm 0.05$	$0.32 \pm 0.15$	-0.23	0.03
	FSRQ	$-0.31 \pm 0.14$	$-0.01 \pm 0.43$	-0.21	2.70
	gross	$-0.23 \pm 0.05$	$0.22 \pm 0.16$	-0.22	<0.01

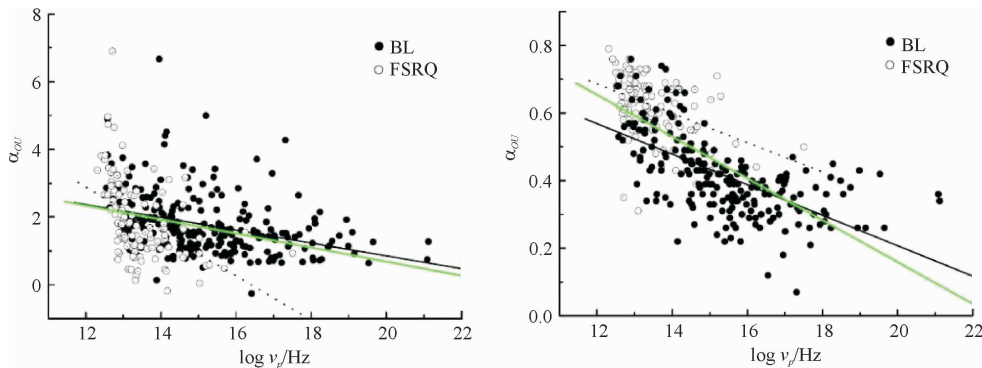


图 5  $\log \nu_p$  和  $\alpha_{OU}, \alpha_{RO}$  之间的相关性

Fig. 5 The correlations between  $\log \nu_p$  and  $\alpha_{OU}, \alpha_{RO}$

众多论文分析了光谱与亮度之间的关系。一般来说, BL Lacs 表现出当光源变亮时, 光谱变得平坦, 当光源变暗时, 光谱变得陡峭。但是 FSRQs 没有显示类似的属性, 并且发现, 随着频率的增加, 光谱与亮度的相关性越来越强。

进一步考虑这两个子类, 对于中红外、近红外和紫外区, 相关性分别为 0.07、-0.23 和 -0.65; 对于 FSRQs, 相关性分别为 -0.29, -0.21 和 -0.74, 与整个样本的结果保持一致。结果表明, 在中红外区域, 光谱与亮度的相关性不明显; 在近红外区域, 光谱与亮度呈弱反相关关系。在紫外区, 光谱与亮度呈较强的反相关关系。这一结果表明, 随着频率的增加, 其亮度与光谱的相关性越来越强, 这与 NGC1275<sup>[44]</sup> 的性质一致。

Abdo 等<sup>[9]</sup> 研究发现 BL Lacs 的峰值频率高于 FSRQs 的峰值频率。Giommi 等<sup>[24]</sup> 分析了 105 个耀变体的宽频带能谱获得 BL Lacs 和 FSRQs 的平均峰频分别为  $\log v_{(p)B} = 15$  Hz 和  $\log v_{(p)F} = 13.1 \pm 0.1$  Hz。

Mingaliev 等<sup>[25]</sup> 利用 ASDC 能谱创建工具分析峰值频率并获得 BL Lacs 和 FSRQs 的平均峰频分别为  $\log v_{(p)B} = 14.6 \pm 1.4$  Hz 和  $\log v_{(p)F} = 13.4 \pm 1.0$  Hz; 获得平均值  $\log v_{(p)B} = 14.76 \pm 1.58$  Hz,  $\log v_{(p)F} = 13.45 \pm 0.85$  Hz。其结果与 Giommi 等<sup>[24]</sup> 和 Mingaliev 等<sup>[25]</sup> 的结果保持一致。

$\log v_p$  和有效谱指数 ( $\alpha_{OU}$ ,  $\alpha_{RO}$ ) 的相关性已经被展示在图 5, 且线性回归结果列在表 6 中。BL Lacs、FSRQs 和整个耀变体的  $\alpha_{RO}$  与  $\log v_p$  之间都具有强相关性, 相关系数分别为  $r = -0.63$ 、 $-0.42$  和  $-0.72$ ; 在  $\alpha_{OU}$  和  $\log v_p$  之间也都具有强相关性, 相关系数分别为  $r = -0.35$ 、 $-0.47$  和  $-0.35$ 。结果表明,  $\log v_p$  和有效谱指数具有很强的相关性, 这与 Abdo 等<sup>[9]</sup> 提出的  $\log v_p$  和  $\alpha_{RO}$ 、 $\alpha_{OX}$  具有线性拟合关系的结论保持一致。

抛物线曲率  $b$  是一个非常重要的参数, 它可以反映能谱峰的曲率。Massaro 等<sup>[23]</sup> 指出加速效率与加速粒子的能量成反比, 因此峰值频率和  $b$  之间具有负趋势是

可以预期的。峰值频率  $p$  与曲率  $b$  之间的反相关已经被众多论文研究<sup>[14,22-23,45]</sup>。基于样本, 得到曲率  $b$  的范围为 0.04 ~ 0.39, 平均值  $\bar{b} = 0.12 \pm 0.07$ 。对数  $\log v_p$  与曲率  $b$  的分布如图 6 所示。

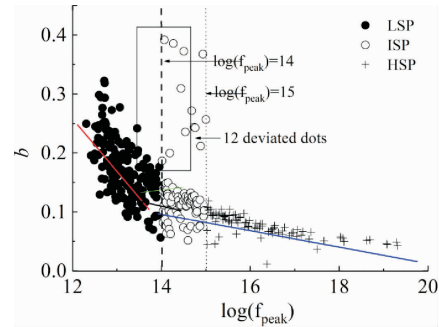


图 6 峰值频率和抛物线曲率  $b$  之间的相关性

Fig. 6 The correlation between the peak frequency and the parabolic curvature  $b$

根据低能峰的位置, Abdo 等<sup>[9]</sup> 将 blazar 分为 3 个子类:  $\log v_p < 14$  Hz, 低峰频耀变体 (LSP);  $14 \text{ Hz} < \log v_p < 15$  Hz, 中峰频耀变体 (ISP);  $\log v_p > 15$  Hz, 高峰频耀变体 (HSP)。在图 6 中, 填充的圆圈和红线代表 LSP, 空心的圆圈和绿色的线代表 ISP, 十字和蓝色的线代表 HSP。对于 LSP,  $b$  与  $\log v_p$  具有很强的反相关性,  $b = (-0.07 \pm 0.01) \log v_p + (1.11 \pm 0.09)$ , 相关系数  $r = -0.59$ ,  $p < 10^{-4}$ ; 对于 ISP,  $b$  与  $\log v_p$  没有相关性; 有 12 个点偏离了主要分布, 由矩形区域标出。若去掉 12 个偏差点,  $b$  与  $\log v_p$  呈弱反相关,  $b = (-0.01 \pm 0.01) \log v_p + (0.31 \pm 0.13)$ , 相关系数  $r = -0.17$ ,  $p < 14.4\%$ 。对于 HSP,  $b$  与  $\log v_p$  具有较强的反相关性,  $b = (-0.01 \pm 0.001) \log v_p + (0.26 \pm 0.02)$ , 相关系数  $r = -0.75$ ,  $p < 10^{-4}$ 。

LSP、HSP、ISP 的  $b$  与  $\log v_p$  之间存在不同的相关性。原因可能来自数据分布。对于 LSP、ISP 和 HSP, 分别有 2%、17.4% 和 1.5% 的耀变体缺乏射电观测数据。由于没有射电数据, 整个数据的频率范围较窄, 抛物线曲率  $b$  与其他源偏离, 使  $b$  与  $\log v_p$  的相关性减弱。特别是, 整个 12 个偏离点都没有无线电观测。

## 参考文献:

- [1] Angel J R P, Stockman H S. Optical and infrared polarization of active extragalactic objects[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1980, 18: 321-361.
- [2] Blandford R D, Rees M J. Some comments on radiation mechanisms in Lacertids[C]//BL Lac Objects. Pittsburgh: Pittsburgh, 1978: 328-341.
- [3] Urry C M, Padovani P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107: 803-845.
- [4] Stickel M, Padovani P, Urry C M, et al. The complete sample of 1 jansky BL Lacertae objects. I. summary properties[J].

- The Astrophysical Journal, 1991, 374: 431-439.
- [5] Ghisellini G, Tavecchio F, Foschini L, et al. The transition between BL Lac objects and flat spectrum radio quasars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, 414(3): 2674-2689.
- [6] Ghisellini G, Tavecchio F. Fermi/LAT broad emission line blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 448(2): 1060-1077.
- [7] Sbarrato T, Ghisellini G, Maraschi L, et al. The relation between broad lines and  $\gamma$ -ray luminosities in Fermi blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 421(2): 1764-1778.
- [8] Fan J H, Yang J H, Liu Y, et al. The spectral energy distributions of fermi blazars[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2016, 226(2): 20-37.
- [9] Abdo A A, Ackermann M, Agudo I, et al. The spectral energy distribution of fermi bright blazars[J]. The Astrophysical Journal, 2010, 716(1): 30-70.
- [10] Dermer C D. On the beaming statistics of gamma-ray sources[J]. The Astrophysical Journal, 1995, 446: 63-66.
- [11] Giommi P, Piranomonte S, Perri M, et al. The sedentary survey of extreme high energy peaked BL Lacs[J]. Astronomy & Astrophysics, 2005, 434(1): 385-396.
- [12] Marscher A P, Gear W K. Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273[J]. The Astrophysical Journal, 1985, 298: 114-127.
- [13] Padovani P, Giommi P. The connection between x-ray and radio-selected BL Lacertae objects[J]. The Astrophysical Journal, 1995, 444: 567-581.
- [14] Chen L. Curvature of the spectral energy distributions of blazars[J]. The Astrophysical Journal, 2014, 788(2): 179-194.
- [15] Fossati G, Maraschi L, Celotti A, et al. A unifying view of the spectral energy distributions of blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1998, 299(2): 433-448.
- [16] Kapanadze B Z. Catalog and statistical study of x-ray selected BL Lacertae objects[J]. The Astronomical Journal, 2013, 145(2): 31-58.
- [17] Landau R, Golisch B, Jones T J, et al. Active extragalactic sources: Nearly simultaneous observations from 20 centimeters to 1400 angstrom[J]. The Astrophysical Journal, 1986, 308: 78-92.
- [18] Nieppola E, Tornikoski M, Valtaoja E. Spectral energy distributions of a large sample of BL Lacertae objects[J]. Astronomy and Astrophysics, 2006, 445(2): 441-450.
- [19] Nieppola E, Valtaoja E, Tornikoski M, et al. Blazar sequence—An artefact of doppler boosting[J]. Astronomy and Astrophysics, 2008, 488(3): 867-872.
- [20] Padovani P, Perlman E S, Landt H, et al. What types of jets does nature make? A new population of radio quasars[J]. The Astrophysical Journal, 2003, 588(1): 128-142.
- [21] Sambruna R M, Maraschi L, Urry C M. On the spectral energy distributions of blazars[J]. The Astrophysical Journal, 1996, 463: 444-465.
- [22] Tramacere A, Giommi P, Massaro E, et al. SWIFT observations of TeV BL Lacertae objects[J]. Astronomy and Astrophysics, 2007, 467(2): 501-508.
- [23] Massaro E, Perri M, Giommi P, et al. Log-parabolic spectra and particle acceleration in the BL Lac object Mkn 421: Spectral analysis of the complete beppoSAX wide band x-ray data set[J]. Astronomy & Astrophysics, 2004, 413: 489-503.
- [24] Giommi P, Polenta G, Lähteenmäki A, et al. Simultaneous planck, swift, and fermi observations of x-ray and  $\gamma$ -ray selected blazars[J]. Astronomy & Astrophysics, 2012, 541: 160-218.
- [25] Mingaliev M, Sotnikova Y, Mufakharov T, et al. A study of the synchrotron component in the blazar spectral energy distributions[J]. Astrophysical Bulletin, 2015, 70(3): 264-274.
- [26] Brown L M J, Robson E I, Gear W K. Multifrequency observations of blazars. IV. The variability of the radio to ultraviolet continuum[J]. The Astrophysical Journal, 1989, 340: 150-161.
- [27] Carini M T, Miller H R. The optical variability of PKS 2155 - 304[J]. The Astrophysical Journal, 1992, 385: 146-150.
- [28] Dai B Z, Li X H, Liu Z M, et al. The long-term multiband optical observations and colour index for the quasar 3C 273[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2009, 392(3): 1181-1192.
- [29] Fan J H, Xie G Z, Pecontal E, et al. Historic light curve and long-term optical variation of BL Lacertae 2200 + 420[J].

- The Astrophysical Journal, 1998, 507(1): 173-178.
- [30] Fan J H. Infrared variability properties of the blazar 3C 279[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1999, 308(4): 1032-1036.
- [31] Fan J H, Kurtanidze O, Liu Y, et al. Optical monitoring of two brightest nearby quasars, PHL 1811 and 3C 273[J]. The Astrophysical Journal Supplement, 2014, 213(2): 26-37.
- [32] Gu M F, Lee C U, Pak S, et al. Multi-colour optical monitoring of eight red blazars[J]. Astronomy & Astrophysics, 2006, 450(1): 39-51.
- [33] Massaro E, Nesci R, Maesano M, et al. Fast variability of BL Lacertae at 1mum[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1998, 299(1): 47-50.
- [34] Nesci R, Maesano M, Massaro E, et al. Intraday variability of BL Lacertae in the great 1997 outburst[J]. Astronomy and Astrophysics, 1998, 332: 1-4.
- [35] Papadakis I E, Villata M, Raiteri C M. The long-term optical spectral variability of BL Lacertae[J]. Astronomy and Astrophysics, 2007, 470(3): 857-863.
- [36] Poon K, Fan J H, Fu J N, The optical microvariability and spectral changes of the BL Lacertae object S5 0716 + 714[J]. The Astrophysical Journal Supplement, 2009, 185(2): 511-525.
- [37] Speziali R, Natali G. BVI microvariability in BL Lacertae during the summer 1997 outburst[J]. Astronomy and Astrophysics, 1998, 339: 382-384.
- [38] Villata M, Raiteri C M, Kurtanidze O M, et al. The WEBT BL Lacertae campaign 2000[J]. Astronomy and Astrophysics, 2002, 390: 407-421.
- [39] Webb J R, Freedman I, Howard E, et al. Broadband optical observations of BL Lacertae during the 1997 outburst[J]. The Astronomical Journal, 1998, 115(6): 2244-2249.
- [40] Xie G Z, Li K H, Zhang X, et al. Optical monitoring sample of the GEV gamma-ray-loud blazars[J]. The Astrophysical Journal, 1999, 522(2): 846-862.
- [41] Xie G Z, Zhou S B, Dai B Z, et al. Photometric monitoring of 12 BL Lacertae objects[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2002, 329(4): 689-699.
- [42] Massaro E, Maselli A, Leto C, et al. The 5th edition of the Roma-BZCAT. A short presentation[J]. Astrophysics and Space Science, 2015, 357(1): 75-78.
- [43] Riess A G, Strolger L G, Tonry J, et al. Type Ia supernova discoveries at  $z > 1$  from the hubble space telescope: Evidence for past deceleration and constraints on dark energy evolution[J]. The Astrophysical Journal, 2004, 607(2): 665-687.
- [44] Yuan Y H, Fan J H, Pan H J, et al. Optical monitoring and spectral analysis of the seyfert galaxy NGC1275[J]. Astrophysics and Space Science, 2015, 360: 9-25.
- [45] Tramacere A, Giommi P, Perri M, et al. Swift observations of the very intense flaring activity of Mrk 421 during 2006. I. phenomenological picture of electron acceleration and predictions for MeV/GeV emission[J]. Astronomy and Astrophysics, 2009, 501(3): 879-898.

【责任编辑：陈 钢】