

耀变体喷流性质研究*

王雪品^{1,2} 毕雄伟³ 郑永刚^{1,2†}

(1 云南师范大学物理与电子信息学院 昆明 650500)
(2 云南省高校高能天体物理重点实验室 昆明 650500)
(3 红河学院物理系 蒙自 661199)

摘要 利用锥形喷流模型(conical jet model)拟合了55个费米耀变体的准同时性多波段观测数据,并研究了耀变体喷流的物理性质.通过卡方估计来找到模型的最优参数,与收集的其他参数进行统计分析.源的参数统计分析结果如下:(1)模型拟合得到的喷流功率要比利用延展射电光度得到的喷流功率大;(2)多普勒因子 δ 与磁感应强度 B 之间没有相关性;(3)喷流功率与吸积盘光度间存在相关性,Blandford-Znajek (BZ)机制能够很好地解释BL Lacs的喷流能量来源却不能解释平谱射电类星体(Flat Spectrum Radio Quasars, FSRQs);(4)喷流功率与黑洞质量之间有显著相关.

关键词 星系: 喷流, 辐射机制: 非热, 方法: 统计
中图分类号: 157; 文献标识码: A

1 引言

耀变体观测到来自相对论性喷流的非热辐射^[1],其能谱分布(Spectral Energy Distributions, SEDs)呈现双峰结构:低能峰位于光学到紫外或者软X射线波段之间,通常被认为是喷流内极端相对论性电子的同步辐射产生的;高能峰位于MeV到TeV能段^[2-4].轻子模型认为,高能峰是极端相对论性电子逆康普顿散射自身发射的同步辐射光子(Synchrotron Self-Compton, SSC)或来自喷流外部的低能光子(External Compton, EC)产生^[5-6].

根据放射线等值宽度(Equivalent width, EW)小于或大于 5 \AA ,耀变体通常被分为蝎虎天体(BL Lacs)和平谱射电类星体(Flat Spectrum Radio Quasars, FSRQs).一般地, BL Lacs天体只有很弱或是没有发射线^[7-9]. BL Lacs的高能峰由SSC过程产生, FSRQs的高能峰由EC过程主导^[10].然而,需要注意的是有些中能峰BL Lacs天体(Intermediate Energy Peaked BL Lac Objects, IBLs)、低能峰BL Lacs天体(Low Energy Peaked BL Lac Objects, LBLs)和高能峰BL Lacs天体(High Energy Peaked BL Lac Objects, HBLs)的 γ 射线辐射并不能用单区SSC模型解释^[11-13]. SED模型的辐射机制可以研究辐射区的内禀物理性质和喷流的物理环境—喷流的组成成分、能量载体以

2016-12-14收到原稿, 2017-03-13收到修改稿

*云南省自然科学基金项目(2013FD014)、云南省教育厅基金项目(2012Z016)、云南省高校高能天体物理重点实验室、云南省教育厅科研项目(2014Y463)资助

†ynzyg@ynu.edu.cn

及喷流功率^[14-18]. Celotti等人的研究认为喷流应该存在占主导的质子成分, 且只有一小部分的喷流, 每一个相对论辐射电子对应一个质子^[19]. Ghisellini等人发现费米宽线耀变体的喷流功率与吸积盘光度之间有明显的正相关, 确定了喷流应该为质子占主导^[20]. 但是喷流的形成在天体物理中是个未解决的问题^[21], 其中, 喷流产生的模型中有一种从旋转黑洞中抽出能量和角动量的喷流产生机制—Blandford-Znajek (BZ)机制. 本文的数据分析结果与该理论相一致^[22].

磁化等离子体以相对论速度沿着旋转黑洞的极轴准直流喷射的标准模型可以解释耀变体的观测特性^[23]. 在我们的研究中使用锥形的喷流模型来拟合已确定红移的BL Lacs和FSRQs, 模型中逆康普顿散射的种子光子来自喷流内的同步辐射和喷流外的辐射场. 控制模型参数来获得耀变体可靠结果, 通过卡方估计来找到模型的最优参数. 文中取哈勃常数 $H_0 = 75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 物质能量密度 $\Omega_M = 0.27$, 辐射能量密度 $\Omega_r = 0$, 无量纲宇宙学常数 $\Omega_\Lambda = 0.73$.

2 模型描述

我们的光子谱是在轻子起源模型下通过SSC和EC产生的. 我们的模型包含了喷流内的SSC成分, 还包含了种子光子来自于宽线区和尘埃环的EC成分, 关于模型的详细细节参见Zheng、Potter等人的研究^[24-25]. 我们仅对该模型进行简单描述.

2.1 SSC光子谱

我们采用长度相关的锥形喷流模型, 该模型假设在一个固定的被截去顶端的锥漏斗几何形状中, 相对论等离子体的体洛伦兹因子为 Γ , 在该模型中, 极端相对论性电子在喷流的基部注入并沿着喷流结构传播. 非热光子是由每一部分长度微元 dx 中喷流同步辐射和逆康普顿散射的同步光子和外部软光子产生的. 通过对每个小部分进行积分推导出总能量谱的作用. 利用源的射电观测数据, 我们可以确定喷流尺度 $L \sim 100 \text{ pc}$, 喷流底部磁场强度 $B_0 \sim 0.1 - 1 \text{ Gs}$. 假设喷流结构的稳定几何形状和适当的物理参数, 通过卡方估计, 控制模型参数来获得耀变体可靠结果. 规定 x 为流体坐标系下喷流轴的长度, $x = 0$ 时为喷流底部, $x = L$ 时喷流结束. 所以喷流的几何形状可用以下公式来表示:

$$R(x) = R(0) + x \tan \theta_{\text{open}}. \quad (1)$$

如图1所示, $R(x)$ 是喷流长度为 x 时圆锥的半径, $R(0)$ 为开始时的半径, θ_{open} 为沿 x 轴的半张角. 通过上述几何形状重现多波段光子谱, 首先要确定初始半径和最初注入电子分布, 其中初始半径为:

$$R_0 = \sqrt{\frac{2E_j A_{\text{equi}} \mu_0}{\Gamma^2 (\pi B_0^2) (1 + A_{\text{equi}})}}, \quad (2)$$

式中 E_j 是在实验坐标系下 x 轴方向宽度值为1 m的喷流能量, $E_j = W_j/c$ (W_j 是总的喷流功率), $A_{\text{equi}} = U_B/U_e$ (U_B 是磁场能量, U_e 是电子能量), B_0 是初始磁场强度, μ_0 是磁导率. 我们得到最初注入电子分布 $N_e(E_e, 0) \approx A_0 E_e^{-\alpha} e^{-E_e/E_{e,\text{cut}}}$, 其中 $E_{e,\text{cut}}$ 为电子截止能量, $A_0 \approx (2 - \alpha) E_j / [\Gamma^2 (1 + A_{\text{equi}}) (E_{e,\text{cut}}^{2-\alpha} - E_{e,\text{min}}^{2-\alpha})]$, 式中 $E_{e,\text{min}}$ 是最小电子能量, α 是电子谱指数, 根据激波加速理论得到它的范围在1-3之间^[26-28]. 现

根据 B_x 和 $N_e(E_e, x)$ 的演化特性, 我们可以用 $B(x) = B_0 R_0 / R(x)$ 和 $N_e(E_e, x + x dx) = N_e(E_e, x) - P_{\text{tot}}(x, dx, E_e) / (cE_e)$ 计算出喷流中每个 x 点的 B 值和 N_e , 式中 P_{tot} 为长度微元 dx 中的相对论性电子同步辐射和逆康普顿散射的喷流功率. 所以在喷流参考系中, 总 SSC 光子谱是全部 dx 的同步辐射和逆康普顿散射的总和.

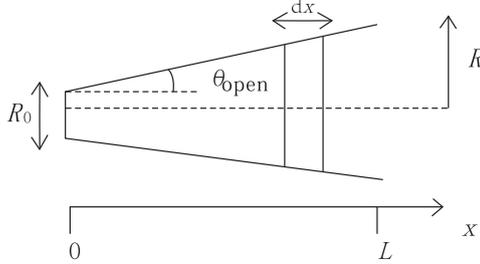


图 1 锥形喷流原理图, 表明了流体参考系下各参数的定义, 图片来自Potter等^[25].

Fig. 1 Schematic diagram of the conical jet, showing parameters defined in the fluid centre of momentum frame. This figure is from Potter et al.^[25].

2.2 外部辐射场

宽线区辐射 $u_{\text{BLR}}(r)$ 和红外尘埃辐射 $u_{\text{IR}}(r)$ 对外部辐射场有贡献, 喷流共动参考系中能量密度可通过以下2个式子分别得出^[29]:

$$u_{\text{BLR}}(r) = \frac{\eta_{\text{BLR}} \Gamma^2 L_{\text{disk}}}{3\pi r_{\text{BLR}}^2 c [1 + (r/r_{\text{BLR}})^{\beta_{\text{BLR}}}]}, \quad (3)$$

$$u_{\text{IR}}(r) = \frac{\eta_{\text{IR}} \Gamma^2 L_{\text{disk}}}{3\pi r_{\text{IR}}^2 c [1 + (r/r_{\text{IR}})^{\beta_{\text{IR}}}]}, \quad (4)$$

其中 η_{BLR} 和 η_{IR} 分别表示再次进入宽线区和尘埃环的红外光子占吸积盘总光度 L_{disk} 的比例, $r_{\text{BLR}} = 0.1(L_{\text{disk}}/10^{46} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1})^{1/2} \text{ pc}$, $r_{\text{IR}} = 2.5(L_{\text{disk}}/10^{46} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1})^{1/2} \text{ pc}$. 根据麦克斯韦分布, 外部辐射场光子能量为 $E_{\text{BLR}} \approx \Gamma \times 10 \text{ eV}$ 和 $E_{\text{IR}} \approx \Gamma \times 0.3 \text{ eV}$, 在我们的计算中采用辐射密度分布 $\beta_{\text{BLR}} = 3$ ^[30] 和 $\beta_{\text{IR}} = 4$ ^[29].

3 样本描述

为了获得合理的模型参数, 本文研究的Blazar样本满足下列条件: (1)有尽可能多的多波段同时性或准同时性观测数据; (2)有射电同时性或准同时性观测数据可以限制模型中喷流尺度参数和磁感应强度参数. 在上述标准的基础上, 我们拟合了从Giommi等^[31]、Yan等^[1]以及Abdo等^[32]的研究中得到的射电、光学、X射线到GeV–TeV波段的费米源多波段同时性SEDs. 对于BL Lacs, 使用SSC辐射模型进行拟合, 而FSRQs则加入EC辐射. 本文中我们总共有55个耀变体(其中36个FSRQs和19个BL Lacs), 而BL Lacs源又分为8个HBLs、8个IBLs、3个LBLs (分类标准是根据Ackermann等人的研究^[33]). 在FSRQs和一部分BL Lacs的SED分布图中, 红色实心圆为同时性数据; 绿色三角形为Fermi 2个月、Planck ERCSC (The Early Release Compact Source Catalog)准同时性数据和非同时地面观测数据; 蓝色方框为Fermi 27个月的数据; BL Lacs天

体的SED图中黑色五角星为Swift一天或几天数据、Fermi超过3个月的平均数据。最佳拟合模型参数列在表1-2中,另外,本文中收集的黑洞质量、宽线区光度和利用延展的射电光度得到的喷流功率都来自Xiong等人的研究^[34],相应的数据在表1-2中给出,最佳拟合的SED图展示在图2-4中。

表 1 FSRQs的相关数据
Table 1 Related data of FSRQs

Source name	z^a η_{IR}	W_j/w α	L/cm $\theta_{\text{open}}/^\circ$	B_0/Gs $\theta_{\text{obs}}/^\circ$	L_B/cm Γ	A_{equip} χ^2_{b}	$E_{\text{min}}/\text{MeV}$ δ^c	$E_{\text{cut}}/\text{MeV}$ $\lg(M_{\text{BH}}^c/M_\odot)$	$L_{\text{disk}}/(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1})$ $\lg(P_{\text{jet}}^c/(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}))$	$\lg(L_{\text{BLR}}^c/(\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}))$	η_{SLR}
III ZW 2	0.089	2.00×10^{38}	1.02×10^{20}	0.95	4.60×10^{19}	0.001	5.11	6.20×10^3	2.30×10^{45}		0.1
	0.3	2.1	3	2	6	1.50	11.43				45.32
S4 0133+47	0.859	7.55×10^{39}	1.28×10^{20}	0.1	4.11×10^{18}	0.045	10.11	2.11×10^3	6.11×10^{45}		0.1
	0.3	2.1	3.5	2.3	8.5	47.24	15.19	8.515	44.78		44.90
PKS 0202-17	1.74	1.90×10^{40}	3.00×10^{20}	0.15	1.90×10^{19}	0.015	5.11	9.00×10^3	6.51×10^{45}		0.8
	0.85	2.1	3	2	12	3.29	20.40				44.41
PKS 0215+015	1.715	3.10×10^{41}	3.00×10^{20}	0.4	1.00×10^{19}	0.1	11.11	8.00×10^3	2.20×10^{45}		0.1
	0.3	2.6	3	2	50	3.29	24.74				
4C 28.07	1.213	5.85×10^{39}	3.02×10^{21}	0.45	5.41×10^{18}	0.09	6.11	1.01×10^3	3.12×10^{45}		0.1
	0.5	2.1	3	2	14	16.98	22.59	9.22	45.59		45.36
PKS 0420-01	0.916	1.50×10^{40}	3.10×10^{20}	0.15	6.50×10^{19}	0.015	11.61	1.82×10^3	3.50×10^{45}		0.1
	0.3	2.1	3	2	16	4.74	20.40	8.81	45.24		46.43
PKS 0454-234	1.003	3.02×10^{39}	1.03×10^{20}	0.3	1.30×10^{18}	0.15	5.11	1.75×10^3	5.11×10^{45}		0.1
	0.3	2.1	3	2	10	29.79	17.80		45.82		45.78
PKS 0528+134	2.07	2.50×10^{40}	3.10×10^{21}	0.15	2.60×10^{18}	0.015	5.11	1.71×10^3	4.61×10^{45}		0.4
	0.5	2.1	3	2	10	2.29	17.79	9.8	45.92		44.58
1Jy 0537-286	3.104	4.70×10^{40}	3.25×10^{20}	0.2	5.50×10^{18}	0.04	5.14	1.10×10^3	6.30×10^{45}		0.3
	0.6	2.1	3	2	15	30.23	23.54		46.13		
4C 71.07	2.218	4.31×10^{40}	6.00×10^{20}	0.22	8.40×10^{18}	0.016	6.11	2.10×10^3	6.51×10^{45}		0.83
	0.86	2.1	3	2	12	3.76	20.40	9.36	45.97		45.77
S4 0917+44	2.19	8.70×10^{40}	6.27×10^{20}	0.32	8.10×10^{18}	0.1	5.11	1.10×10^3	5.80×10^{45}		0.01
	0.3	2.1	3	2	28	0.92	28.66	9.28	45.84		

^a 源的红移数据来自 <http://ned.ipac.caltech.edu/>.

^b $\chi^2 = \frac{1}{N - \text{dof}} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{\sigma_i} \right)^2$, N 是同时性观测数据点的个数, dof 是自由度, 即模型的自由参数, \hat{y}_i 是观测数据, y_i 是模型期望值, σ_i 是标准偏差, 我们取射电和光学波段观测流量的1%, 紫外和X射线波段观测流量的2%作为有误差数据点的可用误差^[35-36].

^c δ 是多普勒因子, M_{BH} 为黑洞质量, P_{jet} 是由源的延展射电光度得到的喷流功率, L_{BLR} 是源的宽线区光度, 其中 M_{BH} , P_{jet} , L_{BLR} 的数据来自文献^[34].

表 1 续
Table 1 Continued

Source name	z^a	W_j/w	L/cm	B_0/Gs	L_B/cm	A_{equip}	E_{min}/MeV	E_{cut}/MeV	$L_{disk}/(erg \cdot s^{-1})$	η_{SLR}
	τ_{HR}	α	$\theta_{open}/^\circ$	$\theta_{obs}/^\circ$	Γ	χ^2_b	δ^c	$\lg(M_{BH}^c/M_\odot)$	$\lg(P_{jet}^c/(erg \cdot s^{-1}))$	$\lg(L_{BLR}^c/(erg \cdot s^{-1}))$
4C 55.17	0.896	1.50×10^{39}	1.10×10^{20}	0.51	5.20×10^{18}	0.15	5.11	3.10×10^3	5.81×10^{45}	0.4
	0.4	2.1	3	2	10	14.46	17.79	8.34	45.56	44.68
PKS 1124-186	1.048	2.30×10^{39}	2.13×10^{20}	0.7	9.01×10^{17}	0.65	5.11	2.01×10^3	4.21×10^{45}	0.05
	0.3	2.1	3	2	9	6.96	16.35			44.91
PKS 1127-145	1.184	3.21×10^{39}	3.47×10^{20}	0.8	4.01×10^{18}	0.1	5.11	1.33×10^3	2.01×10^{45}	0.01
	0.88	2.1	1.15	1	10.5	204.07	20.27	9.18	45.62	45.54
4C 49.22	0.334	7.21×10^{38}	2.99×10^{20}	0.8	1.41×10^{19}	0.015	5.11	1.01×10^3	3.05×10^{45}	0.01
	0.8	2.1	3	2.5	9	3.46	15.57			
4C 29.45	0.725	5.21×10^{38}	7.21×10^{19}	0.4	7.11×10^{18}	0.01	5.9	1.01×10^3	1.11×10^{45}	0.1
	0.3	2.1	0.18	0.1	15	54.25	29.95	8.49	45.43	44.49
PKS 1219+04	0.965	4.01×10^{39}	3.04×10^{20}	0.5	5.21×10^{18}	0.015	7.11	1.51×10^3	1.01×10^{45}	0.08
	0.96	2.1	3	2	12	18.02	20.40	8.30	45.42	45.24
3C 273	0.158	1.91×10^{39}	5.01×10^{20}	0.9	3.51×10^{18}	0.015	5.11	1.01×10^3	2.01×10^{45}	0.1
	0.3	2.1	3	2	6	126.45	11.43	8.51	45.5	
PKS 1244-255	0.635	1.70×10^{39}	3.02×10^{20}	0.6	3.01×10^{18}	0.015	5.11	7.01×10^3	1.81×10^{45}	0.1
	0.3	2.1	3	2	8	5.24	14.79	9.04	45.14	45.75
3C 279	0.533	3.50×10^{39}	3.04×10^{20}	0.4	1.91×10^{18}	0.15	5.11	1.02×10^3	6.01×10^{45}	0.1
	0.3	2.1	3	2	7	41.74	13.16	8.50	45.73	
PKS 1502+106	1.839	3.32×10^{40}	1.50×10^{22}	0.29	6.20×10^{18}	0.15	5.11	1.20×10^3	9.00×10^{45}	0.1
	0.3	2.4	3	2	25	5.12	28.40	9.12	45.65	44.85
PKS 1502+36	0.408	8.50×10^{38}	3.01×10^{20}	0.75	1.01×10^{19}	0.06	4.11	1.01×10^3	1.01×10^{45}	0.05
	0.4	2.5	3	2	18	17.13	25.82			
4C 38.41	1.814	1.20×10^{40}	3.10×10^{20}	0.15	5.80×10^{18}	0.06	5.11	1.10×10^3	4.30×10^{45}	0.1
	0.97	2.1	3	2	13	4.025	21.55	9.37	45.62	
3C 345	0.593	4.80×10^{39}	3.00×10^{20}	0.4	4.20×10^{18}	0.15	1.11	3.00×10^3	3.00×10^{45}	0.1
	0.98	2.6	3	2	11	39.01	19.15			

表 1 续
Table 1 Continued

Source name	z^a	W_j/w	L/cm	B_0/Gs	B_0/Gs	$\theta_{obs}/^\circ$	Γ	χ^2_b	A_{equip}	E_{min}/MeV	E_{cut}/MeV	$L_{disk}/(erg \cdot s^{-1})$	η_{SLR}
	η_{IR}	α	$\theta_{open}/^\circ$	$\theta_{obs}/^\circ$	$\theta_{obs}/^\circ$	$\theta_{obs}/^\circ$	Γ	χ^2_b	δ^c	$\lg(M_{BH}^c/M_\odot)$	E_{cut}/MeV	$L_{disk}/(erg \cdot s^{-1})$	η_{SLR}
S5 1803+784	0.68	6.00×10^{39}	1.30×10^{20}	0.9	0.9	0.9	1.30×10^{19}	0.05	3.11	6.00×10^3	6.00×10^3	5.33×10^{45}	0.1
	0.3	2.6	3	2	2	2	18	15.70	25.82	8.26	8.26	44.88	
PKSB 1908-201	1.119	3.01×10^{39}	2.97×10^{20}	0.6	0.6	0.6	3.81×10^{18}	0.4	5.11	2.99×10^3	2.99×10^3	7.31×10^{45}	0.87
	0.88	2.1	2.5	2	2	2	8	21.17	14.79			45.77	
PMNJ 1923-2104	0.874	1.71×10^{39}	1.01×10^{20}	0.76	0.76	0.76	9.01×10^{18}	0.1	30	1.01×10^3	1.01×10^3	1.61×10^{45}	0.1
	0.3	2.1	3	0.5	0.5	0.5	18	19.44	35.11				
OV-236	0.352	3.00×10^{39}	3.01×10^{20}	0.15	0.15	0.15	7.01×10^{18}	0.015	8.11	1.51×10^3	1.51×10^3	2.13×10^{45}	0.1
	0.3	2.1	3	2	2	2	8	3.15	14.79				
PKS 2204-54	1.206	4.50×10^{39}	3.10×10^{21}	0.7	0.7	0.7	6.10×10^{18}	0.04	5.11	2.60×10^3	2.60×10^3	1.20×10^{45}	0.09
	0.8	2.3	3	2	2	2	13	17.59	21.55			45.20	
4C 06.69	0.99	9.60×10^{39}	3.10×10^{20}	0.12	0.12	0.12	2.80×10^{19}	0.009	8.11	6.20×10^3	6.20×10^3	1.10×10^{45}	0.1
	0.3	2.1	3	1	1	1	8	22.89	15.64	8.87	8.87	45.1	45.56
PKS 2149-307	2.345	4.80×10^{40}	3.10×10^{21}	0.22	0.22	0.22	1.30×10^{19}	0.0018	6.11	1.21×10^3	1.21×10^3	2.60×10^{45}	0.1
	0.72	2.1	3	0.8	0.8	0.8	19	18.42	35.48				45.75
4C 31.63	0.295	7.91×10^{38}	3.10×10^{20}	0.75	0.75	0.75	1.30×10^{19}	0.015	5.11	1.01×10^3	1.01×10^3	2.31×10^{45}	0.01
	0.7	2.1	3	2	2	2	8	69.05	14.79				45.59
PKS 2227-08	1.56	2.20×10^{40}	3.10×10^{20}	0.15	0.15	0.15	5.60×10^{18}	0.015	5.11	2.41×10^3	2.41×10^3	4.90×10^{45}	0.08
	0.9	2.3	3	2	2	2	11	62.76	19.15	8.79	8.79	45.17	
4C 11.69	1.037	7.01×10^{39}	7.11×10^{20}	0.15	0.15	0.15	6.31×10^{18}	0.06	7.11	3.41×10^3	3.41×10^3	5.41×10^{45}	0.08
	0.3	2.1	3	2	2	2	8	91.17	14.79	8.78	8.78	45.72	
3C 454.3	0.859	3.20×10^{40}	3.10×10^{20}	0.6	0.6	0.6	1.90×10^{18}	0.05	5.11	5.10×10^3	5.10×10^3	5.20×10^{45}	0.1
	0.3	2.1	3	2	2	2	12	5.09	20.40	8.83	8.83	45.86	
PKS 2325+093	1.843	2.50×10^{40}	3.10×10^{20}	0.5	0.5	0.5	9.60×10^{18}	0.02	5.11	1.10×10^3	1.10×10^3	5.50×10^{45}	0.1
	0.3	2.3	3	2	2	2	18	19.44	25.82	9.03	9.03	45.87	

表 2 BL Lacs 的相关数据
Table 2 Related data of BL Lacs

Source name	z^a	W_j/w	L/cm	B_0/Gs	A_{equip}	E_{min}/MeV	E_{cut}/MeV	α
	$\theta_{open}/^\circ$	$\theta_{obs}/^\circ$	Γ	χ^2_b	δ^c	$\lg(M_{BH}^c/M_\odot)^c$	$\lg(P_{jet}^c/(erg \cdot s^{-1}))$	$\lg(L_{BLR}^c/(erg \cdot s^{-1}))$
1H 1013+498	0.212	5.50×10^{38}	1.00×10^{19}	0.9	0.03	25.11	8.00×10^4	2.1
	3	2	25	7.08	28.40	8.3	44.55	
1RXS J003334.6-192130	0.61	3.00×10^{39}	3.00×10^{20}	0.35	0.006	25.11	8.70×10^4	2.1
	2.2	2	26	12.13	28.53			
PKS 0447-439	0.205	5.00×10^{38}	3.00×10^{20}	0.8	0.03	14.11	8.00×10^4	2.1
	2.5	2	19	1.55	26.39			
B3 2247+381	0.13	2.50×10^{38}	3.00×10^{19}	0.65	0.06	5.11	8.00×10^4	2.1
	9	2	29	9.94	28.67			
PKS 1215+303	0.13	5.00×10^{38}	3.00×10^{19}	0.45	0.02	5.11	2.00×10^4	2.1
	9	2	22	1.22	27.69	8.12	43.92	
RBS 0413	0.19	3.00×10^{38}	3.00×10^{19}	0.64	0.06	5.11	7.00×10^4	2.1
	9	2	29	2.19	28.67	8.1	44.11	
GB6J1058+5628	0.143	1.50×10^{38}	3.00×10^{20}	0.65	0.008	19.11	3.00×10^4	2.1
	2.7	2	17	2.71	25.15			
PKS 0048-09	0.634	6.30×10^{39}	3.00×10^{20}	0.85	0.007	19.11	9.00×10^3	2.1
	3	2	24	4.07	28.22			
PKS 0851+202	0.306	3.00×10^{39}	3.00×10^{20}	0.65	0.005	15.11	4.00×10^3	2.1
	5	2	18	0.62	25.82	8.56	44.17	43.21
S5 0716+714	0.26	2.00×10^{39}	1.00×10^{19}	0.55	0.1	20.11	2.70×10^4	2.1
	2.5	2	22	4.01	27.69	8.1	44.76	
W comae	0.103	1.20×10^{38}	3.00×10^{20}	0.65	0.006	19.11	4.00×10^4	2.1
	2.7	2	14	5.85	22.59	7.7	42.14	42.25

^a 同表1注释a, ^b 同表1注释b, ^c 同表1注释c

表 2 续
Table 2 Continued

Source name	z^a $\theta_{\text{open}}/^\circ$	W_j/w $\theta_{\text{obs}}/^\circ$	L/cm Γ	B_0/Gs χ^2_b	A_{equip} δ^c	$E_{\text{min}}/\text{MeV}$ $\lg(M_{\text{BH}}^c/M_\odot)$	$E_{\text{cut}}/\text{MeV}$ $\lg(P_{\text{jet}}^c/(\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}))$	α $\lg(L_{\text{BLR}}^c/(\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}))$
PG1424+240	0.16 3	3.00×10^{38} 2	3.00×10^{20} 13	0.86 2.52	0.009 21.55	5.11	2.00×10^4	2.1
PG1553+113	0.36 3	8.50×10^{38} 2	3.00×10^{20} 15	0.8 1.75	0.03 23.54	7.11	6.70×10^4	2.1
BL Lacertae	0.069 2.2	2.90×10^{38} 2	6.00×10^{21} 9	0.45 8.39	0.0005 17.80	25.11 8.21	4.00×10^3 43.45	2.1 42.52
PKS 0537-441	0.892 9.7	9.00×10^{40} 2.9	3.00×10^{20} 14	0.15 0.28	0.015 18.65	4.11 8.57	7.00×10^4 45.53	2.1 44.93
PKS 0735+17	0.424 3	2.70×10^{39} 2	3.00×10^{20} 20	0.35 1.43	0.0015 26.15	20.11 8.3	5.50×10^3 44.47	2.1
AP-Lib	0.048 3	1.00×10^{38} 2	3.00×10^{19} 8	0.55 7.07	0.001 14.80	5.11 7.65	4.00×10^3 43.57	2.1
Mrk421	0.031 3	1.70×10^{38} 2	1.00×10^{19} 35	0.8 7.23	0.08 28.11	28.11 8.15	8.50×10^4 43.28	2.1 41.69
Mrk501	0.034 9	4.00×10^{37} 2	3.00×10^{20} 17	0.8 2.81	0.05 25.15	28.11 8.84	6.00×10^4 43.2	2.1 42.20

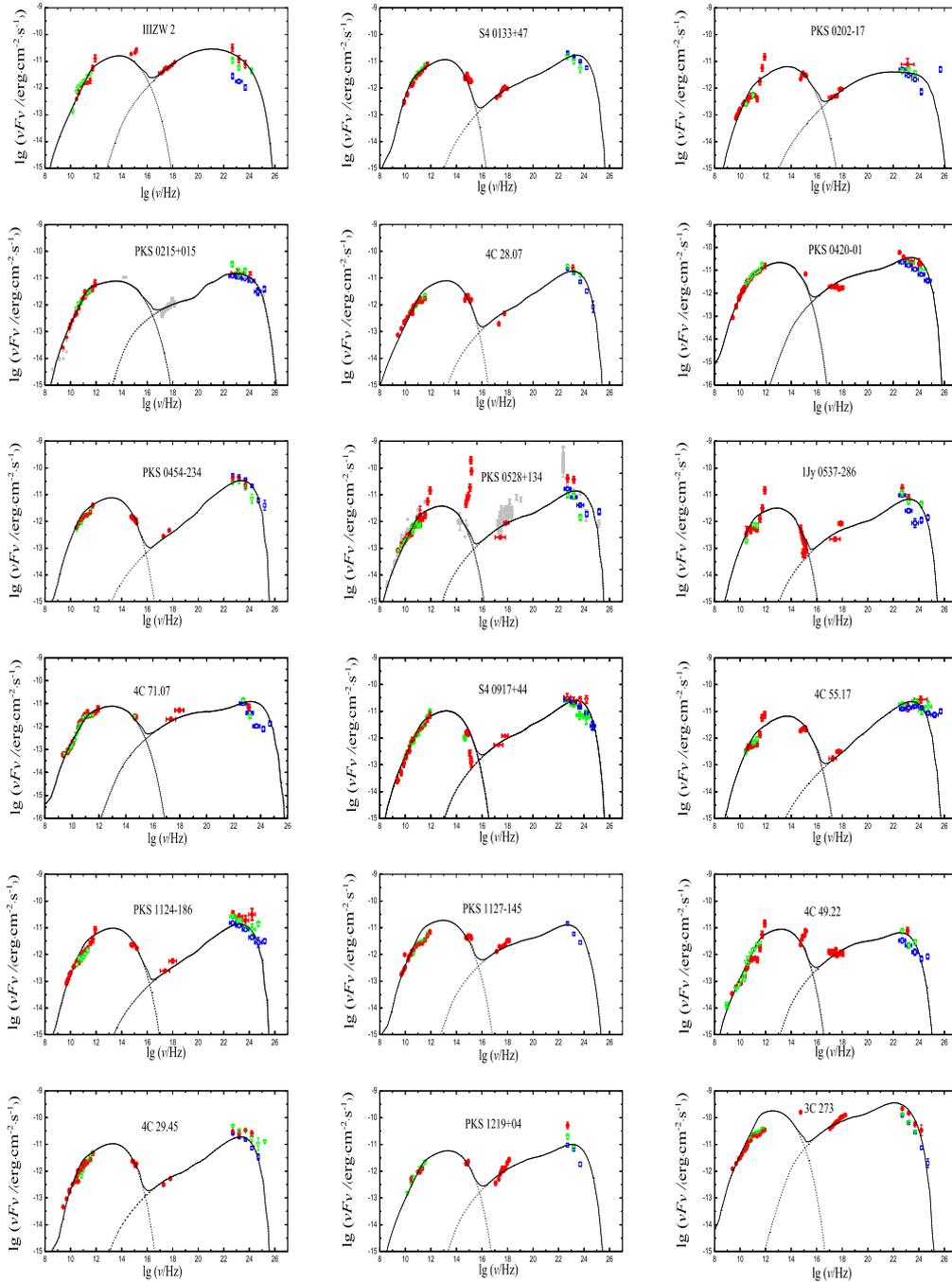


图 2 部分 FSRQs 的 SED 图。红色实心圆为同时性数据; 绿色三角形为 Fermi 2 个月、Planck ERCSC 准同时性数据和非同时地面观测数据; 蓝色方框为 Fermi 27 个月的数据。

Fig. 2 The SED of some FSRQs. Simultaneous data are shown with red solid circles; The quasi-simultaneous data, i.e. the Fermi data integrated over 2 months, the Planck ERCSC, and non-simultaneous ground based observations are shown with green triangles; The Fermi data integrated over 27 months are shown with blue squares.

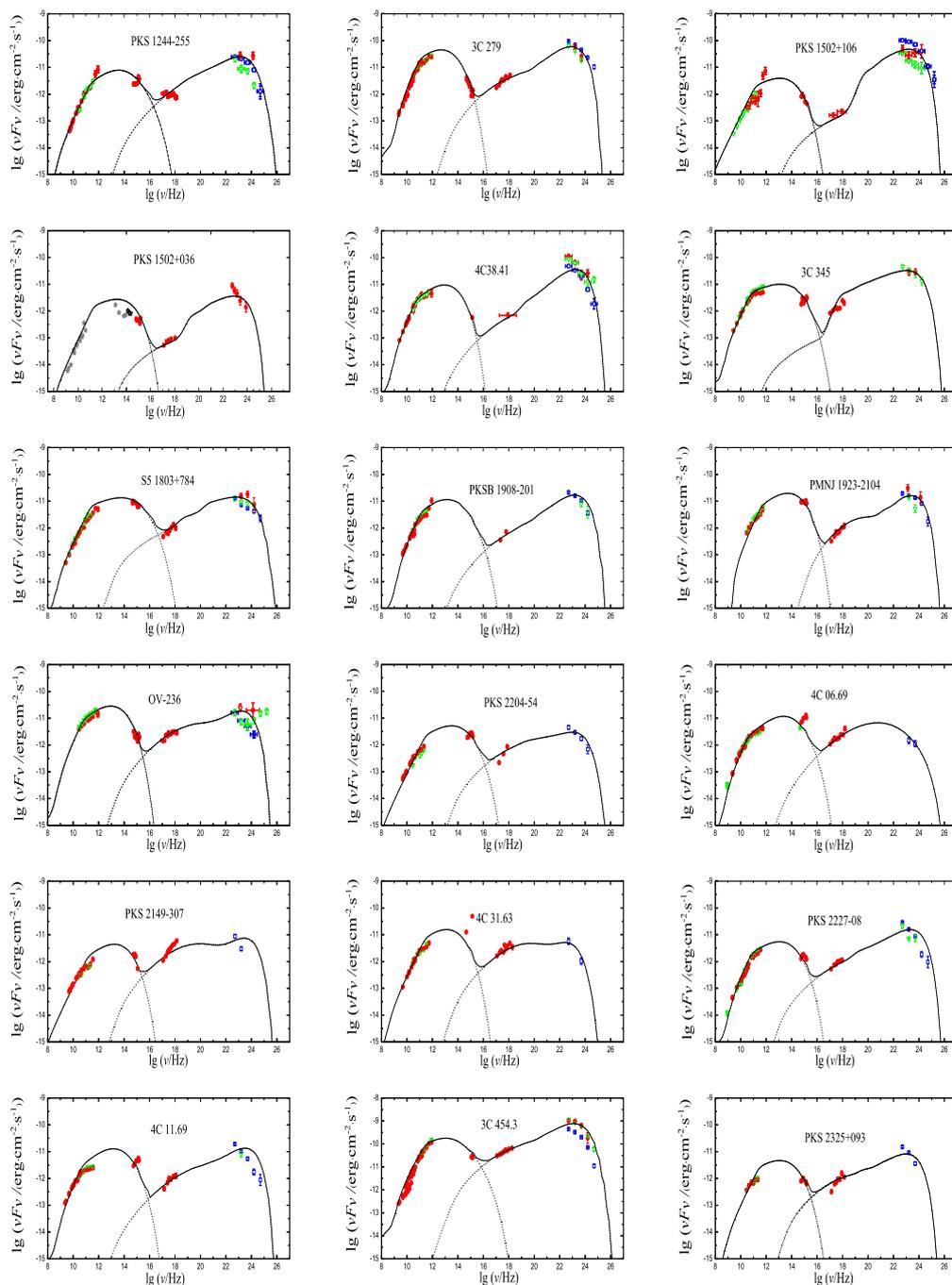


图 3 其余FSRQs的SED图. 红色实心圆为同时性数据; 绿色三角形为Fermi 2个月、Planck ERCSC准同时性数据和
非同时地面观测数据; 蓝色方框为Fermi 27个月的数据.

Fig. 3 The SED of remaining FSRQs. Simultaneous data are shown with red solid circles; The quasi-simultaneous data, i.e. the Fermi data integrated over 2 months, the Planck ERCSC, and non-simultaneous ground based observations are shown with green triangles; The Fermi data integrated over 27 months are shown with blue squares.

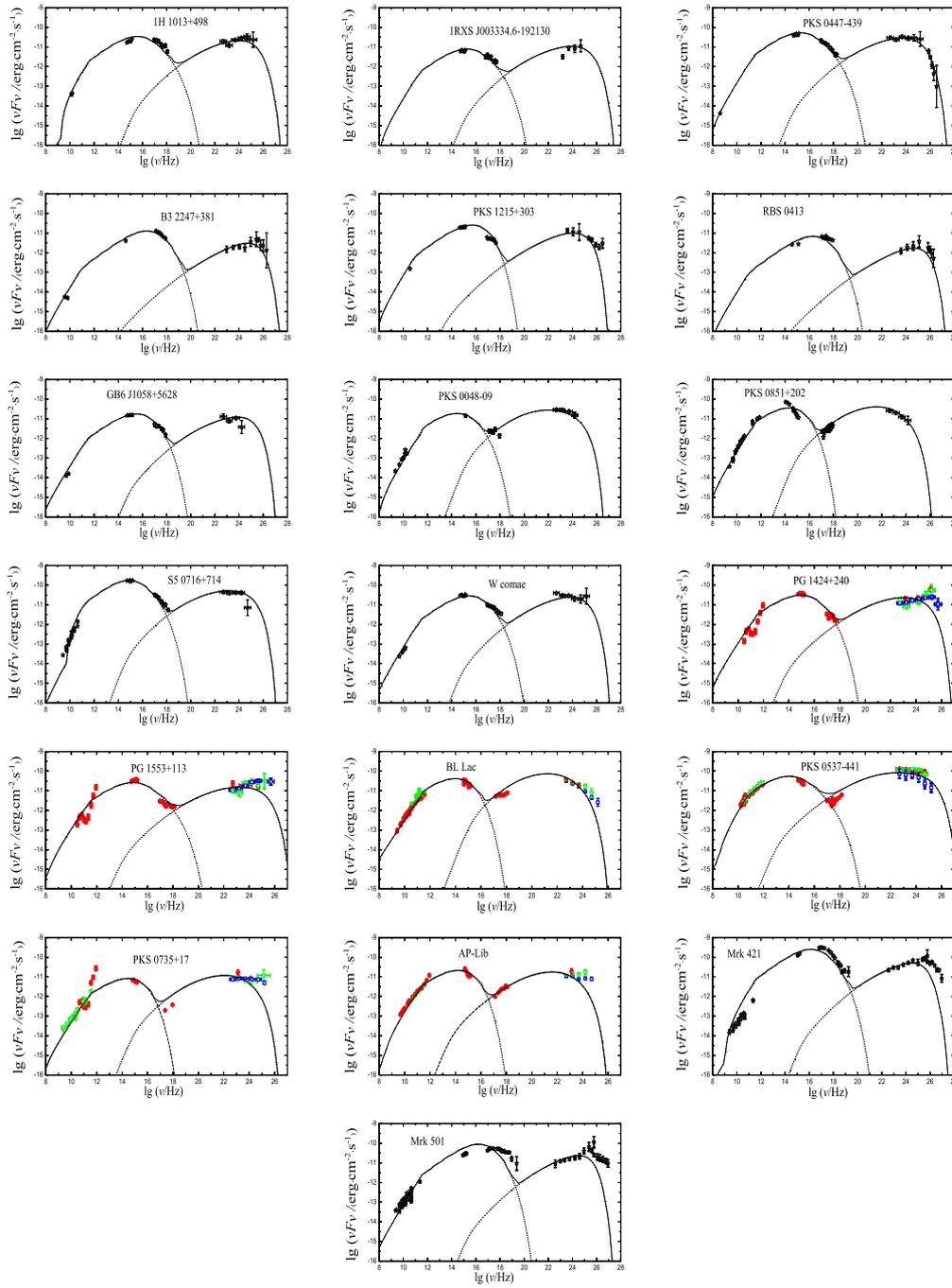


图 4 BL Lacs的SED图. 黑色五角星为Swift一天或几天数据、Fermi超过3个月的平均数据; 红色点为同时性数据; 绿色点为Fermi 2个月、Planck ERCSC准同时性数据和非同时地面观测数据; 蓝色点为Fermi 27个月的数据.

Fig. 4 The SED of BL Lacs. The black stars represent the data from Swift (the data are collected in one day, or several days) and Fermi-LAT (the data are collected after averaging over a period of more than three months); Simultaneous data are shown in red; The quasi-simultaneous data, i.e., the Fermi data integrated over 2 months, the Planck ERCSC, and non-simultaneous ground based observations are shown in green; The Fermi data integrated over 27 months are shown in blue.

4 结果和讨论

4.1 分布

图5给出了我们样本的红移分布,发现其与完整2LAC (2 Year LAT AGN Catalog)红移的分布是一致的,所有耀变体红移分布的范围是 $0 < z < 3.3$, BL Lacs和FSRQs的平均值分别为0.26和1.12. 通过Kolmogorov-Smirnov (K-S)检验, $p < 10^{-7}$, 可以从图中看到BL Lacs和FSRQs的红移分布是显著不同的. 与FSRQs相比, BL Lacs具有更小的红移值, 而FSRQs的红移分布比BL Lacs的红移分布广. 通过运用K-S检验, 对比我们的FSRQs和BL Lacs样本与3LAC (4 Year LAT AGN Catalog)源的红移分布, K-S检验的结果分别为 $p = 0.834$ 和 $p = 0.728$, 得出我们的样本与3LAC源的红移没有显著差异.

图6给出了黑洞质量分布, 所有耀变体黑洞质量分布的范围是 $10^{7.5} - 10^{10} M_{\odot}$, 通过K-S检验($p = 0.003$), 看出黑洞质量分布是不同的, FSRQs的黑洞质量要更大一些. Ghisellini等人认为费米耀变体有大的黑洞质量是因为具有更大光度的耀变体也许有更大的黑洞质量^[20], 我们的结果与Ghisellini等人的观点是一致的.

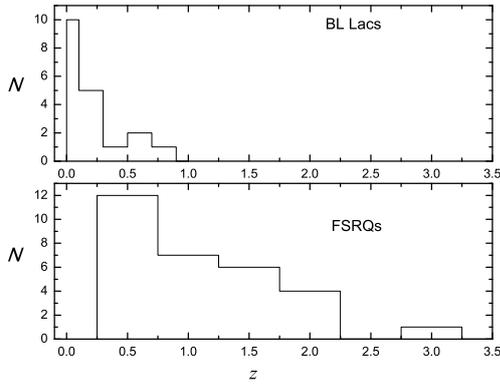


图 5 红移分布

Fig. 5 Redshift distribution

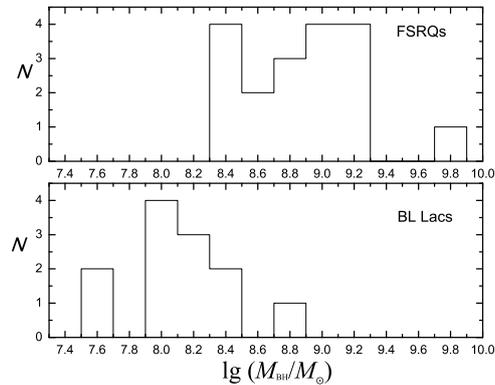


图 6 黑洞质量分布

Fig. 6 Black hole mass distribution

图7给出了通过模型计算得到的喷流功率分布, 在我们的样本中所有耀变体喷流功率分布的范围是 $10^{44} - 10^{48} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, FSRQs的平均值是 $10^{46.75 \pm 0.74} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, BL Lacs的平均值是 $10^{45.81 \pm 0.78} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2 SED拟合得到的喷流功率与利用延展射电光度得到的喷流功率

图8为SED拟合得到的喷流功率与利用延展射电光度得到的喷流功率间的相关性, 从图中可以明显的看到SED拟合得到的喷流功率 $\lg P$ 要比利用延展射电光度得到喷流功率 $\lg P_{\text{jet}}$ 大, 我们的结果与Xiong等人的研究结果是相似的^[34]. 图8中的实线代表两种方法得到的喷流功率相等.

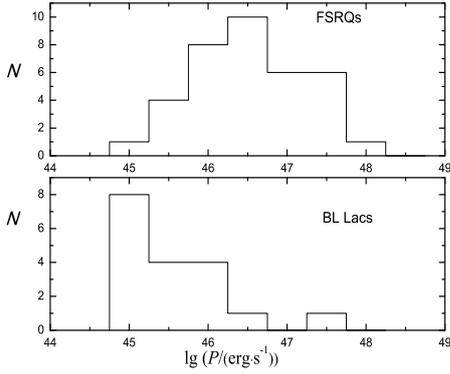


图 7 喷流功率分布

Fig. 7 Jet power distribution

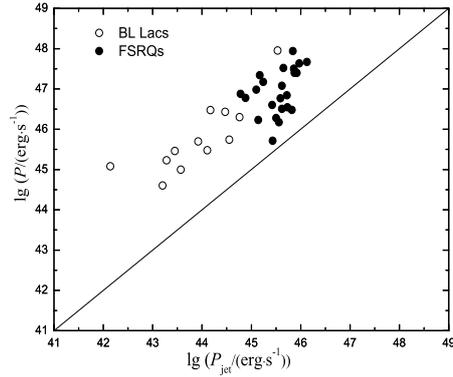
图 8 SED拟合的喷流功率 $\lg P$ 与通过延展射电光度计算得到的喷流功率 $\lg P_{\text{jet}}$ 相关关系

Fig. 8 The relation between the jet power by fitting the SED and the jet kinetic power calculated by extended radio power

4.3 辐射区域的物理条件

从表1-2中我们可以得到辐射区域磁感应强度值的范围在0.1-1 Gs之间, Ghisellini等人在研究中给出BL Lacs的 B 值是在0.1-1 Gs间, 而FSRQs的 B 值是在1-10 Gs间^[37], 我们的FSRQs的 B 值要小一些. 我们得到的多普勒因子值的范围在10-40之间. 根据SSC辐射模型, 多普勒因子和磁感应强度具有以下关系, 在Thomson区域^[1]:

$$B\delta \propto [\nu_s^2/\nu_C](1+z), \quad (5)$$

在Klein-Nishina (KN)区域:

$$B/\delta \propto [\nu_s/\nu_C^2]/(1+z), \quad (6)$$

其中 ν_s 和 ν_C 分别是同步辐射和逆康普顿散射的峰值频率. Abdo等人的研究认为低同步峰频耀变体(Low Synchrotron Peaked blazars, LSP)的逆康普顿散射发生在Thomson区域, 而高同步峰频耀变体(High Synchrotron Peaked blazars, HSP)的逆康普顿散射发生在KN区域^[32]. 相应的多普勒因子和磁感应强度的关系在图9中给出, 在图9中, 黑色的实心圆为FSRQs, Pearson相关分析的结果表明多普勒因子和磁感应强度间没有相关性($p = 0.35697$), 可能的原因是这些源的同步辐射峰值频率分布较广^[1], 而BL Lacs源包括了高、中、低频源, 所以没有相关性.

4.4 喷流功率与宽线区光度

根据当前吸积盘的理论, 宽线区的辐射场是由中央引擎光致电离而形成的, 中央引擎最有可能是来自吸积盘, 有 $L_{\text{BLR}} = 0.1L_{\text{disk}}$, $L_{\text{disk}} = 0.1\dot{M}c^2$ ^[38], 所以宽线区光度能很好地表征吸积, 因此, P - L_{BLR} 关系能支持喷流功率和吸积盘之间的关系. 耀变体的许多观测特性都和极端相对论性的喷流有关系, 而喷流产生的模型中有一种从旋转黑洞中抽出能量和角动量的喷流产生机制, 叫作BZ机制^[22]. 如果相对论喷流是由Poynting能流驱

动, BZ喷流功率为^[39]:

$$L_{\text{BZ, jet}} \approx \left(\frac{a}{m}\right)^2 \frac{R_S^3}{HR^2} \frac{\epsilon_B}{\eta} \frac{L_{\text{disk}}}{\beta_r}, \quad (7)$$

其中 $\frac{a}{m}$ 是黑洞的角动量, $R_S = 2GM_{\text{BH}}/c^2$ 是史瓦西半径, H 是盘的厚度, R 是半径, ϵ_B 是获得引力能的比例, η 是吸积效率, L_{disk} 是吸积盘的光度, β_r 是内流速度. 最大BZ喷流功率为 $L_{\text{jet}} \approx L_{\text{disk}}/\eta$, 此外 $L_{\text{disk}} \approx 10L_{\text{BLR}}$, 联合以上几个公式可得到^[34]:

$$\lg L_{\text{BLR}} = \lg L_{\text{jet}} + \lg \eta + \text{const}. \quad (8)$$

图10为我们通过模型计算得到喷流功率与宽线区光度间的相关性, 其中实心圆为FSRQs, 空心圆为BL Lacs. 使用线性回归分析, 从图中我们看到FSRQs呈现出无相关性, 而BL Lacs显示为显著相关, 我们得到 $\lg L_{\text{BLR}} \approx (0.89 \pm 0.14) \lg P$, 对于BL Lacs, 我们的结果和理论预测的一致. Foschini和Cavaliere等人的研究工作中认为BL Lacs和FSRQs的喷流产生机制是不一样的^[40-41], 对于BL Lacs来说, BZ机制足以解释其喷流能量来源机制, 适用于BL Lacs的BZ产能机制处于气体压强主导^[40-42]:

$$L_{\text{BZ, GPD}} \approx M_{\text{BH}}^{3/10} \dot{M}^{4/5} (J/J_{\text{max}})^2, \quad (9)$$

J 是黑洞的角动量; 对于FSRQs, 喷流功率随着吸积盘光度的增加而增加, 这时候理论上讲BZ机制的喷流能量将进入辐射压主导:

$$L_{\text{BZ, RPD}} \approx M_{\text{BH}} (J/J_{\text{max}})^2, \quad (10)$$

所以我们的结果支持Foschini和Cavaliere等人的观点^[40-41], BZ机制能解释BL Lacs的能量却不能解释FSRQs.

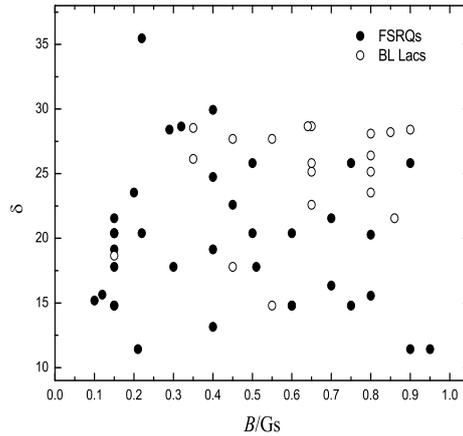


图 9 多普勒因子与磁感应强度关系图

Fig. 9 The Doppler factor δ versus magnetic field strength B

4.5 喷流功率与黑洞质量

我们分析了喷流功率和黑洞质量的关系(图11), Pearson相关分析的结果表明喷流功率和黑洞质量之间都有显著的相关性(相关系数 $\rho = 0.67$, $p = 1.8973 \times 10^{-5}$), 这与Xiong等人的结果^[34]是类似的. 从(9)式和(10)式中都得到无论是BL Lacs还是FSRQs, 在耀变体辐射过程中喷流和黑洞质量间有相关关系, 这表明在喷流的形成机制中, 黑洞质量与喷流的基本性质有密切的联系.

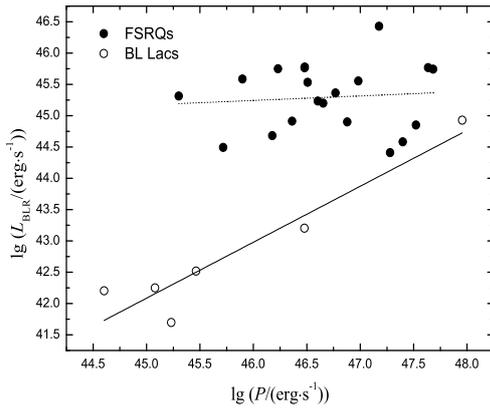


图 10 宽线区光度与喷流功率关系图

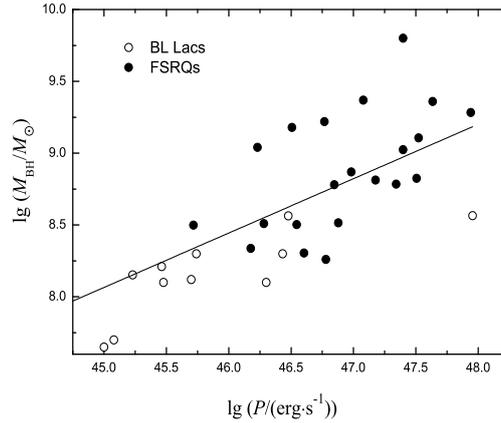


图 11 黑洞质量与喷流功率关系图

Fig. 10 Broad line luminosity versus the jet power Fig. 11 The black hole mass versus the jet power

5 结论

在本论文中, 我们用宽线区光度来表征吸积盘, 因此可以利用喷流功率与宽线区光度的线性相关分析得出耀变体的喷流性质. 我们发现: (1)喷流功率与吸积盘光度间存在相关性, BZ机制能够很好地解释BL Lacs的喷流能量来源却不能解释FSRQs; (2)喷流功率与黑洞质量之间有显著相关. 上述结果与利用耀变体的同步辐射峰值光度和多普勒因子来分别表征喷流功率和吸积功率的研究结果一致^[43-44]. 我们认为继续寻找更多的喷流功率表示或者吸积功率表示是一个值得研究的问题. BL Lacs天体由于只有弱的发射线, 且看不到光谱, 所以宽线区光度很难被估计, 导致BL Lacs天体样本较少, 在我们的样本中, 线性回归分析得出 $p = 0.00391$, $\rho = 0.8746$, 从而得到喷流功率与宽线区光度之间具有正相关性, 这个结果支持Foschini和Cavaliere等人的结论^[40-41]. 但是待BL Lacs天体光谱观测的数据质量提高后, 仍需扩大样本进一步验证.

参考文献

- [1] Yan D, Zeng H, Zhang L. MNRAS, 2014, 439: 2933
- [2] 康世举, 黄邦蓉, 康婷, 等. 天文学报, 2011, 52: 357
- [3] Kang S J, Huang B R, Kang T, et al. ChA&A, 2012, 36: 115
- [4] 熊定荣, 张雄, 郑永刚, 等. 物理学报, 2012, 61: 229801

- [5] Ghisellini G, Maraschi L. *ApJ*, 1989, 340: 181
- [6] Blandford R D, Levinson A. *AJ*, 1995, 441: 79
- [7] Scarpa R, Falomo R. *A&A*, 1997, 325: 109
- [8] 郑永刚, 杨卫国, 张皓晶, 等. *天文学报*, 2007, 48: 418
- [9] Zheng Y G, Yang W G, Zhang H J, et al. *ChA&A*, 2008, 32: 140
- [10] 胡文. FSRQs 3C 454.3的辐射模型. 昆明: 云南大学, 2012: 10-11
- [11] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. *ApJ*, 2010, 726: 43
- [12] Abdo A A, Ackermann M, Agudo I, et al. *ApJ*, 2010, 730: 10
- [13] Aliu E, Archambault S, Arlen T, et al. *ApJ*, 2012, 755: 118
- [14] Ghisellini G, Celotti A, Fossati G, et al. *MNRAS*, 1998, 301: 451
- [15] Ghisellini G, Tavecchio F. *MNRAS*, 2008, 387: 1669
- [16] Mankuzhiyil N, Ansoldi S, Persic M, et al. *ApJ*, 2012, 753: 154
- [17] 柴博, 曹新伍. *天文学报*, 2013, 54: 201
- [18] Chai B, Cao X W. *ChA&A*, 2014, 38: 1
- [19] Celotti A, Ghisellini G. *MNRAS*, 2008, 385: 283
- [20] Ghisellini G, Tavecchio F, Foschini L, et al. *MNRAS*, 2011, 414: 2674
- [21] Ghisellini G, Tavecchio F, Maraschi L, et al. *Nature*, 2014, 515: 376
- [22] Blandford R D, Znajek R L. *MNRAS*, 1977, 179: 433
- [23] Böettcher M, Harris D E, Krawczynski H. *Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei*. Weinheim: John Wiley and Sons, 2012: 1-16
- [24] Zheng Y G, Yang C Y. *MNRAS*, 2016, 457: 3535
- [25] Potter W J, Cotter G. *MNRAS*, 2012, 423: 756
- [26] Bell A R. *MNRAS*, 1978, 182: 147
- [27] Bell A R, Schure K M, Reville B. *MNRAS*, 2011, 418: 1208
- [28] Summerlin E J, Baring M G. *ApJ*, 2011, 745: 63
- [29] Hayashida M, Madejski G M, Nalewajko K, et al. *ApJ*, 2012, 754: 114
- [30] Sikora M, Stawarz L, Moderski R, et al. *ApJ*, 2009, 704: 38
- [31] Giommi P, Polenta G, Lähteenmäki A, et al. *A&A*, 2012, 541: A160
- [32] Abdo A A, Ackermann M, Agudo I, et al. *ApJ*, 2010, 716: 30
- [33] Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. *ApJ*, 2011, 743: 171
- [34] Xiong D R, Zhang X. *MNRAS*, 2014, 441: 3375
- [35] Zhang J, Liang E W, Zhang S N, et al. *ApJ*, 2012, 752: 157
- [36] Aleksić J, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. *A&A*, 2014, 567: A135
- [37] Ghisellini G, Tavecchio F, Foschini L, et al. *MNRAS*, 2010, 402: 497
- [38] Maraschi L, Tavecchio F. *ApJ*, 2003, 593: 667
- [39] Ghisellini G. *arXiv:astro-ph/0611077*
- [40] Foschini L. *A&A*, 2011, 11: 1266
- [41] Cavaliere A, D'Elia V. *ApJ*, 2002, 571: 226
- [42] Ghisellini G, Tavecchio F, Chiaberge M. *A&A*, 2005, 432: 401
- [43] Chen Z, Gu M, Cao X. *MNRAS*, 2009, 397: 1713
- [44] 杜雷鸣. 耀变体的喷流辐射研究. 北京: 中国科学院研究生院, 2012: 47-61

Study on the Properties of Blazar Jets

WANG Xue-pin^{1,2} BI Xiong-wei³ ZHENG Yong-gang^{1,2}

(1 School of Physics and Electronic Information Technology, Yunnan Normal University,
Kunming 650500)

(2 Key Laboratory of High Energy Astrophysics of University of Yunnan Province,
Kunming 650500)

(3 Department of Physics, Honghe University, Mengzi 661199)

ABSTRACT The multi-wavelength quasi-simultaneous data of 55 Fermi blazars are fitted by using the conical jet model, and the physical properties of blazar jets are also investigated. Through the χ^2 -minimization fitting procedure, the best-fitting parameters of the conical jet model are found. Combined with the other parameters we collected, a statistical analysis is performed. The results of statistical analysis are summarized as follows: (1) The jet power obtained by Spectral Energy Distribution (SED) fitting is larger than the jet kinetic power calculated by extended radio power; (2) There is no correlation between the Doppler factor δ and magnetic field strength B ; (3) There is a correlation between jet power and accretion disk luminosity, and the Blandford-Znajek (BZ) mechanism can well explain the energy source of BL Lacs jets rather than Flat Spectrum Radio Quasars (FSRQs); (4) The jet power is significantly correlated with the black hole mass.

Key words galaxies: jets, radiation mechanisms: non-thermal, methods: statistical