

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.04.04

耀变体射电喷流的相对论性束流性质

米立功^{1,2}, 谢 泉¹, 张 利¹, 吴忠祖¹, 张志斌³, 鲁军旺², 骆娟娟²

(1. 贵州大学 大数据与信息工程学院/物理学院, 贵阳 550025; 2. 黔南民族师范学院 物理与电子科学学院, 都匀 558000; 3. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 利用 MOJAVE 数据库 15 GHz 的总流量密度变化的监测数据, 分析了一个大样本耀变体射电喷流的相对论性束流性质, 计算了源的亮温度、多普勒增亮因子、洛伦兹因子、视向角与光变指数等。研究发现, 该样本中多数耀变体是多普勒增强的, 且平谱射电类星体整体上比蝎虎天体具有更强的多普勒增亮效应。洛伦兹因子与光变指数的计算表明, 与平谱射电类星体相比, 蝎虎天体有较小的洛伦兹因子和光变指数。通过视向角的计算分析发现, 89% 的耀变体的视向角小于 21° 。此外, 还分析了耀变体的亮温度与光变指数的关系, 发现它们具有较显著的相关性。

关键词: 耀变体; 蝎虎天体; 亮温度; 光变

中图分类号: P158 **文献标识码:** A

1 引 言

耀变体 (blazar) 是一类具有高光度、高偏振、快速光变、视超光速运动、非热连续辐射、强伽马射线辐射等观测特征的活动星系核 (active galactic nucleus, AGN)^[1-14]。根据光谱中发射线的差异, 耀变体分为平谱射电类星体 (flat spectrum radio quasar, FSRQ) 与蝎虎天体 (BL Lacertae object, BL Lac) 两个子类, 前者有强的宽发射线, 后者发射线较弱或没有发射线。根据能谱分布 (spectral energy distribution, SED) 峰频的位置^[15], 耀变体又可分为 SED 低峰频 (low-spectral peaked, LSP; $\lg \nu_p \leq 14$) 耀变体、SED 中峰频 (intermediate-spectral peaked, ISP; $14 < \lg \nu_p \leq 15$) 耀变体、SED 高峰频 (high-spectral peaked, HSP; $\lg \nu_p > 15$) 耀变体。根据线性光学偏振的大小, 平谱射电类星体又可以分为低偏振类星体 (偏振度小于 3%, LPQ) 与高偏振类星体 (偏振度大于等于 3%, HPQ)。

收稿日期: 2020-03-02; 修回日期: 2020-04-20

资助项目: 贵州省教育厅青年科技人才成长项目 (黔教合 KY 字 [2018]433/119); 贵州省百层次人才项目 (黔科合人才 [2015]4015); 贵州大学引进人才科研基金 (贵大人基合字 [2018]60 号); 国家自然科学基金 (11963003, 11763002, U1431111, 1703067); 贵州省科技计划项目 (黔科合平台人才 [2017]5788 号); 天文学本科专业建设项目 (2016XBJKX0202); 中国科学院太阳活动重点实验室开放课题项目 (KLSA201805)。

通讯作者: 米立功, miligong@foxmail.com

根据活动星系核的统一模型^[16]，耀变体的中心为一超大质量黑洞 (supermassive black hole, SMBH)，其能量主要源自 SMBH 对周围物质的吸积，且耀变体的辐射主要来自于黑洞附近喷流中相对论电子的非热连续辐射。同时基于相对论喷流模型^[17]，耀变体的喷流接近光速，且喷流方向与观测者的视线方向接近，从而使耀变体辐射具有显著的多普勒增亮效应。在 AGN 的统一模型中，视向角 θ 是一个基本参量^[18]，对 AGN 统一模型的一个关键性的检验就是以某种方式获得不同 AGN 类型的视向角，但通常视向角不是一个直接的观测量，在相对论喷流模型中，利用喷流的速度与多普勒增亮因子可以估算视向角，即

$$\beta_{\text{app}} = \frac{\beta \sin \theta_{\text{var}}}{1 - \beta \cos \theta_{\text{var}}} \quad , \quad (1)$$

$$D_{\text{var}} = \frac{1}{\Gamma_{\text{var}}(1 - \beta \cos \theta_{\text{var}})} \quad . \quad (2)$$

这里， β , β_{app} 分别是喷流的内禀速度与视速度， θ_{var} 为视向角， D_{var} 为多普勒增亮因子， Γ_{var} 为洛伦兹因子。通过对式 (1) 和 (2) 求解，视向角与洛伦兹因子表示为：

$$\theta_{\text{var}} = \arctan \frac{2\beta_{\text{app}}}{\beta_{\text{app}}^2 + D_{\text{var}}^2 - 1} \quad , \quad (3)$$

$$\Gamma_{\text{var}} = \frac{\beta_{\text{app}}^2 + D_{\text{var}}^2 + 1}{2D_{\text{var}}} \quad . \quad (4)$$

通过 VLBI (very long baseline interferometry) 观测，能够获取源的喷流视速度^[19, 20]。多普勒增亮因子能够通过不同的方法估算^[21-24]，例如：通过比较观测流量与预测流量，利用同步自康普顿 X 辐射流量估算多普勒增亮因子，亦可以通过假设辐射粒子与磁场之间的能量均分来估算多普勒增亮因子。

在本文中，我们利用 MOJAVE (monitoring of jets in AGN with VLBA experiments) 15 GHz 的总流量密度变化的监测数据^[25, 26]，分析了 123 个耀变体射电喷流的相对论性束流性质，估算了源的亮温度、多普勒增亮因子、洛伦兹因子和视向角等。

2 数据样本

MOJAVE 是一个主要研究 AGN 喷流结构与演化的长期的射电监测项目^[28]，该观测项目利用美国甚长基线阵 (very long baseline array, VLBA)，从 1994 年开始，在 2 cm 波段对北天 (J2000.0 赤纬 $\delta \geq -20^\circ$ ，银纬 $|b| \geq 2.5^\circ$) 数百个 AGN 进行了长期观测，积累了丰富的 VLBI 观测数据，为研究 AGN 射电喷流特征提供了良好的机会。为了研究耀变体喷流的相对论性束流性质，我们从 MOJAVE 数据库中挑选了一批红移已知的耀变体源，为了约简样本，我们选取观测历元数目大于 8，总流量密度变化显示明显振荡的耀变体源，最终得到 123 个耀变体，包括 24 个蝎虎天体和 99 个 SED 低峰频平谱射电类星体。在表 1 中，我们列出了耀变体在 15 GHz 波长处的特征参量的均值。表中第 1 和 2 列分别为源的类型与耀

变体及其子类的数目, 包括 4 个 SED 高峰频蝎虎天体 (HSPB)、4 个 SED 中峰频蝎虎天体 (ISPB)、16 个 SED 低峰频蝎虎天体 (LSPB)、13 个 SED 低峰频低偏振类星体 (LLPQ) 与 44 个 SED 低峰频高偏振类星体 (LHPQ), 有 42 个 SED 低峰频类星体 (LSPQ) 没有可用的偏振数据, 所以不能判断它属于 HPQ 还是 LPQ。第 3—7 列分别表示源的亮温度 (对数尺度)、多普勒增亮因子、洛伦兹因子、喷流视向角与光变指数的平均值。

表 1 耀变体在 15 GHz 波段上的特征参量的均值

类型	数目	$\lg(T_b/K)$	D_{var}	Γ_{var}	θ_{var} /($^\circ$)	V /%
HSPB	4	9.04	0.40	20.04	31.56	21.13
ISPB	4	10.15	0.95	20.80	20.83	27.60
LSPB	16	11.11	1.83	43.74	18.04	30.49
BL Lac	24	10.60	1.45	35.97	20.76	28.45
LLPQ	13	11.73	2.40	43.70	11.83	25.61
LHPQ	44	12.19	3.86	68.36	7.29	33.90
LSPQ	42	11.89	3.04	44.77	11.53	29.33
FSRQ	99	12.01	3.32	55.11	9.69	30.87
BLAZAR	123	11.73	2.95	51.38	11.85	30.40

对于射电源的辐射, 亮温度 T_b 是一个重要的参量。在 VLBI 观测中, 通过对源的观测数据进行模型拟合, 可得到不同源的 VLBI 成分流量与角尺寸, 进而可估算其亮温度: $T_b = 1.22 \times 10^{12} S_c / \nu^2 a^2$, 其中, S_c 是 VLBI 喷流成分的流量密度 (以 Jy 为单位), ν 是观测频率 (以 GHz 为单位), a 是模型拟合的 VLBI 高斯成分的 FWHM (full width at half-maximum) 轴尺寸 (以 mas 为单位)。根据光旅行时间的限制, 辐射区的角尺寸: $a \leq (1+z)^2 c\tau / d_L$, 其中, c 是光速, z 是红移, τ 是光变时标, d_L 是光度距离。进一步, 可将亮温度表示为光度距离与时标的函数: $T_b \propto S_c \lambda^2 d_L^2 / \tau^2$, λ 是观测波长。对于源的辐射, 如果认为是由同步辐射主导的, 文献 [21] 推导出辐射区的亮温度: $T_s \propto \sigma_T K l / B \propto F / \nu_p^2 l_c^2$, 其中, l 是源的尺寸, σ_T 是电子的散射截面, B 是磁场, K 是相对论电子的归一化值, ν_p 是峰值频率, F 是峰值频率上的同步辐射流量, l_c 是核的角尺寸。通过射电源的流量变化, 可以发现很多源都经历了一系列的射电爆发, 从这些射电爆发, 我们能估算观测的光变时标^[29, 30]:

$$\tau_{\text{obs}} = \frac{dt}{d(\ln S)} \quad (5)$$

我们采用文献 [29] 给出的方法, 利用 MOJAVE 数据库在 15 GHz 波长处的观测数据, 分析每个源的总流量密度变化, 获取源的流量爆幅与时标。具体的操作步骤如下: 首先, 通过源的总流量密度变化, 选出那些比较完整的爆发 (在总流量密度变化曲线上表现为既有上升过程又有衰减过程); 然后, 从那些比较完整的爆发中挑出流量变化幅度最大的爆发进行分析, 进而获取最大流量爆幅与时标。利用源的最大流量爆幅与时标值, 源的亮温度通过式

(6) 求出^[31] (在源的固有参考系中):

$$T_b = 5.87 \times 10^{21} h^{-2} \frac{\lambda^2 S_{\max}}{\tau_{\text{obs}}^2} (\sqrt{1+z} - 1)^2 . \quad (6)$$

其中, λ 以 m 为单位, S_{\max} 是最大流量爆幅 (以 Jy 为单位), τ_{obs} 是光变时标 (以 d 为单位), 我们采用 Lister 等人^[26] 给出的源的红移值, 且哈勃常数采用: $H_0 = 71 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 相应地, 数值因子 h 取 0.71。

进一步, 已知亮温度, 多普勒增亮因子可由式 (7) 得到^[32, 33]:

$$D_{\text{var}} = \left(\frac{T_b}{T_{\text{int}}} \right)^{1/3} . \quad (7)$$

其中, T_{int} 为源的内禀亮温度, 取 $T_{\text{int}} = 5 \times 10^{10} \text{ K}$ 。

利用式 (6) 与 (7), 我们分别估算了每个源的亮温度和多普勒增亮因子, 见表 2。由式 (3) 与 (4) 可知, 估算源的洛伦兹因子与视向角须已知多普勒增亮因子与喷流视速度, 其中, 多普勒增亮因子由式 (7) 给出, 喷流视速度采用文献 [26] 中的最大喷流速度 (maximum jet speed), 即对源的 VLBI 数据进行多分量、多历元模型拟合后得到的不同喷流成分的速度的最大值。假设喷流的内禀速度 (以光速为单位) 是恒定的, 且喷流视向角: $0 < \theta_{\text{var}} < \pi/2$, 由式 (1) 可知, 当 $\cos\theta_{\text{var}} = \beta$ 时, 喷流的视速度有最大值 β_{max} , 即: $\beta_{\text{max}} = \beta/\sqrt{1-\beta^2} = \Gamma\beta$ 。可见, 当计算时采用观测到的最大喷流视速度时, 将得到较大的洛伦兹因子。

我们使用调制指数 V 描述射电源的光变幅度, 调制指数的定义如下:

$$V = \frac{\sigma_s}{\langle S_{\text{obs}} \rangle} \times 100\% , \quad (8)$$

这里, $\sigma_s, \langle S_{\text{obs}} \rangle$ 分别表示流量密度的标准差与平均流量密度。

3 结果与分析

在表 1 中, 我们分别列出了耀变体子类的亮温度 (对数尺度)、多普勒增亮因子、洛伦兹因子、视向角、光变指数的平均值。由表 1 可知, 对于蝎虎天体子类, 从 HSPB 到 LSPB, SED 峰频依次减小, 而亮温度、多普勒增亮因子与光变指数皆依次增大, 说明它们之间存在着反相关; 同时, 视向角依次减小, 暗示它与 SED 峰频存在正相关。对于平谱射电类星体子类, 与 LLPQ 相比, LHPQ 具有较大的亮温度、多普勒增亮因子、洛伦兹因子与光变指数, 说明它们与光偏振存在着正相关。与蝎虎天体相比, 平谱射电类星体有较高的亮温度、多普勒增亮因子和洛伦兹因子。

在我们的样本源中, 93% 的耀变体的射电喷流是视超光速的, 包括 98 个平谱射电类星体和 16 个蝎虎天体。通过对具有视超光速喷流运动的射电源的观测数据进行分析, 得到蝎虎天体和平谱射电类星体的喷流视速度 (以光速为单位)、多普勒增亮因子、洛伦兹因子的

对数平均值分别为: 0.95, 0.11, 1.55 与 1.06, 0.44, 1.50。由结果可知, 具有视超光速喷流运动的平谱射电类星体具有较大的多普勒增亮因子。Ghisellini 等人^[21]分析了 11 个具有视超光速喷流运动的蝎虎天体, 并估算了其喷流视速度、多普勒增亮因子、洛伦兹因子的对数平均值, 通过比较发现, Ghisellini 等人^[21]给出的蝎虎天体的喷流视速度与洛伦兹因子的对数平均值分别小于 0.95, 1.55, 而多普勒增亮因子的对数平均值大于 0.11。我们采用的 MOJAVE 数据库提供的最新的喷流视速度大于 Ghisellini 等人^[21]给出的值, 这能够用来解释两者分析结果的差异。假设 $\beta \cos \theta_{\text{var}} = A$, 其中 A 为一恒量, 则根据式 (1) 推知, 较大的喷流视速度对应着较大的喷流内禀速度, 根据洛伦兹因子的定义: $\Gamma_{\text{var}} = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, 可知较大的喷流内禀速度, 对应着较大的洛伦兹因子, 进一步, 根据式 (2) 推知, 较大的洛伦兹因子对应着较小的多普勒增亮因子。

我们给出了耀变体数据的分析结果, 如表 2 所示, 1—11 列分别为: (1) 源名; (2) 红移; (3) 源的类型; (4) 最大喷流视速度 (以光速为单位); (5) 时标 (以 a 为单位); (6) 最大流量爆幅 S_{max} (以 Jy 为单位); (7) 亮温度 (以 K 为单位); (8) 多普勒增亮因子; (9) 洛伦兹因子; (10) 喷流的视向角 (以度为单位); (11) 光变指数; (12) MOJAVE 观测数据的时间跨度 (以 a 为单位)。

表 2 耀变体的数据分析结果

源名	红移	类型	视速度 /光速	时标 /a	S_{max} /Jy	$\lg(T_{\text{b}})$ /K	D_{var}	Γ_{var}	θ_{var} /(°)	V /%	时间跨度 /年份
0003-066	0.347	LSPB	7.08	3.40	1.716	11.13	1.39	19.09	15.5	28.1	1995—2012
0016+731	1.781	LLPQ	7.64	5.90	1.357	11.78	2.30	14.06	13.7	40.7	1994—2019
0059+581	0.644	LSPQ	8.62	2.46	2.883	12.12	2.98	14.12	11.9	35.4	1995—2013
0106+013	2.110	LHPQ	26.6	2.57	2.902	12.95	5.64	65.64	4.1	39.8	1995—2013
0119+115	0.571	LSPQ	18.61	2.44	2.092	11.90	2.51	70.44	6.0	42.5	1998—2011
0133+476	0.859	LHPQ	16.54	5.87	4.223	11.75	2.24	62.41	6.8	30.5	1994—2013
0202+149	0.405	LHPQ	15.88	2.11	0.479	11.11	1.37	93.08	7.2	35.4	1995—2019
0202+319	1.466	LLPQ	10.5	4.84	1.745	11.93	2.57	22.93	10.3	30.2	1995—2010
0212+735	2.367	LHPQ	6.64	10.02	1.667	11.61	2.01	12.22	15.7	18.4	1994—2019
0215+015	1.715	LHPQ	25.3	2.47	1.934	12.67	4.53	73.03	4.4	44.4	1998—2012
0219+428	0.340	HSPB	11.49	2.97	0.480	10.67	0.98	68.36	9.9	20.0	2003—2013
0224+671	0.523	LSPQ	11.64	1.80	0.541	11.51	1.86	37.62	9.6	29.4	1995—2013
0234+285	1.206	LHPQ	24.6	3.30	1.896	12.16	3.06	100.58	4.6	32.1	1994—2019
0235+164	0.940	LHPQ	26.2	0.71	1.703	13.26	7.12	51.84	4.1	38.0	1996—2009
0241+622	0.045	LSPQ	1.549	1.48	1.795	10.15	0.66	2.91	59.4	37.8	2003—2012
0333+321	1.259	LLPQ	12	2.65	1.893	12.38	3.63	21.79	8.8	27.9	1995—2019
0336-019	0.852	LHPQ	24.5	3.33	1.761	11.86	2.43	124.93	4.6	18.3	1995—2012
0355+508	1.520	LSPQ	2.51	3.35	8.058	12.94	5.57	3.44	7.9	31.6	1995—2017
0403-132	0.571	LHPQ	20.79	3.45	0.674	11.10	1.37	158.80	5.5	28.5	1998—2012
0414-189	1.536	LSPQ	4	4.14	0.526	11.57	1.96	5.32	23.0	23.4	2006—2013
0420-014	0.916	LHPQ	5.46	2.21	9.011	12.98	5.75	5.55	10.0	39.3	1995—2012

(续表)

源名	红移	类型	视速度 /光速	时标 /a	S_{\max} /Jy	$\lg(T_b)$ /K	D_{var}	Γ_{var}	θ_{var} /($^{\circ}$)	V /%	时间跨度 /年份
0422+004	0.268	ISPB	0.68	1.06	0.712	11.54	1.91	1.34	23.6	42.8	1999-2012
0446+112	2.153	LSPQ	6.72	8.50	0.824	11.38	1.69	14.50	16.0	28.5	1998-2010
0458-020	2.286	LHPQ	6	6.56	0.626	11.53	1.89	10.73	17.3	33.1	1995-2013
0528+134	2.070	LHPQ	18.59	3.74	1.996	12.45	3.84	47.05	5.9	72.4	1995-2019
0529+075	1.254	LSPQ	22.8	3.07	0.425	11.60	1.99	131.86	5.0	11.9	2002-2011
0529+483	1.160	LSPQ	19.8	1.86	0.142	11.50	1.85	107.15	5.7	31.1	1995-2013
0552+398	2.363	LSPQ	1.256	9.06	1.280	11.58	1.96	1.64	29.6	17.2	2003-2019
0605-085	0.870	LSPQ	32	3.88	1.799	11.75	2.24	229.91	3.6	30.7	1995-2012
0607-157	0.323	LSPQ	0.57	3.32	5.083	11.56	1.94	1.31	20.3	35.4	1995-2012
0642+449	3.396	LSPQ	8.52	10.05	2.226	11.97	2.65	15.21	12.2	21.8	1995-2011
0730+504	0.720	LSPQ	16.09	2.73	0.366	11.22	1.49	87.96	7.1	31.2	2002-2013
0736+017	0.190	LHPQ	11.9	2.56	1.097	10.68	0.99	72.52	9.5	33.0	1996-2013
0738+313	0.631	LSPQ	10.7	5.98	1.043	10.89	1.16	50.36	10.6	23.7	1995-2019
0745+241	0.409	LHPQ	6.3	1.13	0.347	11.52	1.88	11.76	16.6	19.7	1995-2013
0748+126	0.889	LSPQ	15.04	6.44	3.622	11.63	2.04	56.71	7.5	26.6	1995-2012
0754+100	0.266	LSPB	14.4	1.05	0.854	11.62	2.03	52.34	7.8	23.8	1995-2019
0804+499	1.436	LHPQ	1.02	2.13	1.010	12.39	3.66	2.11	8.6	40.0	1995-2010
0805-077	1.837	LHPQ	41.5	1.06	1.719	13.40	7.92	112.75	2.7	43.6	2002-2013
0808+019	1.148	LSPB	13.7	3.97	0.422	11.31	1.60	59.77	8.2	32.6	1995-2011
0823+033	0.505	LSPB	12.11	1.06	0.685	12.04	2.80	27.77	9.0	31.3	1995-2012
0827+243	0.940	LHPQ	19.8	0.40	0.546	13.27	7.20	30.89	5.1	32.1	2002-2012
0829+046	0.174	LSPB	10.2	2.08	0.590	10.52	0.87	60.80	11.1	31.0	1995-2012
0836+710	2.218	LLPQ	21.51	4.71	1.498	12.17	3.10	76.34	5.2	20.5	1995-2019
0838+133	0.680	LSPQ	10.65	4.38	1.187	11.28	1.56	37.45	10.5	31.8	1998-2014
0851+202	0.306	LSPB	15.14	0.95	7.812	12.79	4.97	25.65	6.8	51.8	1995-2019
0917+449	2.188	LSPQ	14.5	13.48	1.050	11.09	1.36	78.35	7.8	26.3	1995-2013
0917+624	1.447	LSPQ	13.9	3.18	0.280	11.49	1.83	53.98	8.1	18.6	2003-2019
0923+392	0.697	LLPQ	2.64	16.36	3.450	10.62	0.94	4.71	37.6	14.2	1994-2012
0945+408	1.250	LLPQ	16.55	2.91	0.887	11.96	2.63	53.58	6.8	26.2	1995-2019
0953+254	0.708	LLPQ	10.02	4.20	0.727	11.13	1.39	37.17	11.2	21.5	1995-2011
1015+359	1.229	LSPQ	34.2	2.49	0.283	11.59	1.98	296.61	3.3	26.9	1995-2011
1038+064	1.265	LSPQ	5.02	8.03	0.185	10.41	0.80	16.78	22.0	14.5	1998-2011
1055+018	0.893	LHPQ	7.24	1.84	3.842	12.75	4.82	7.95	11.0	30.8	1995-2018
1101+384	0.031	HSPB	0.218	1.20	0.385	9.34	0.35	1.67	27.7	23.4	1995-2013
1124-186	1.048	LHPQ	8.3	6.48	0.941	11.16	1.43	25.15	13.4	23.4	1998-2011
1127-145	1.184	LSPQ	19.8	0.64	3.467	13.82	11.01	23.35	4.4	29.7	1995-2013
1128+385	1.741	LSPQ	4.66	2.43	0.215	11.74	2.22	6.23	20.0	26.2	1995-2013
1144+402	1.089	LSPQ	1.28	2.41	0.800	11.98	2.67	1.83	18.2	41.6	1995-2019
1150+812	1.250	LSPQ	10.08	10.16	0.792	10.83	1.10	47.19	11.2	31.7	1997-2019
1156+295	0.725	LHPQ	24.6	1.22	2.960	12.83	5.14	61.53	4.5	46.7	1995-2012

(续表)

源名	红移	类型	视速度 /光速	时标 /a	S_{\max} /Jy	$\lg(T_b)$ /K	D_{var}	Γ_{var}	θ_{var} /(°)	V /%	时间跨度 /年份
1219+285	0.102	ISPB	8.2	2.35	0.276	9.63	0.44	77.77	13.9	25.2	1995-2013
1222+216	0.433	LHPQ	21.8	4.35	2.503	11.25	1.53	156.40	5.2	38.4	1996-2019
1226+023	0.158	LLPQ	14.91	2.10	21.883	12.00	2.72	42.41	7.4	33.5	1995-2019
1253-055	0.536	LHPQ	20.5	2.31	20.747	12.89	5.38	41.84	5.2	26.5	1995-2019
1308+326	0.997	LHPQ	27.5	2.57	2.029	12.26	3.32	115.70	4.1	38.8	1995-2019
1334-127	0.539	LHPQ	21.9	2.84	5.017	12.10	2.93	83.48	5.1	27.4	1995-2013
1406-076	1.494	LHPQ	22.77	1.48	0.212	12.05	2.83	93.19	5.0	25.1	2002-2013
1413+135	0.247	LSPB	1.72	1.02	1.066	11.69	2.14	1.99	27.8	32.4	1995-2011
1417+385	1.831	LSPQ	15.4	0.67	1.191	13.64	9.57	17.23	5.4	41.1	2002-2013
1418+546	0.152	LSPB	0.93	1.82	0.465	10.42	0.81	1.56	74.4	19.9	1995-2019
1502+106	1.838	LHPQ	17.32	3.80	2.287	12.41	3.73	42.21	6.3	40.0	1997-2019
1510-089	0.360	LHPQ	28	0.34	5.092	13.62	9.40	46.46	3.7	48.5	1995-2013
1514-241	0.049	LSPB	6.21	8.35	1.367	8.60	0.20	99.01	18.3	12.8	1997-2012
1532+016	1.425	LSPQ	6.72	4.65	0.867	11.64	2.06	12.23	15.5	35.0	1995-2010
1538+149	0.606	LSPB	8.73	5.32	0.396	10.54	0.89	43.82	12.9	26.4	1997-2011
1546+027	0.414	LHPQ	12.3	2.05	3.934	12.07	2.86	28.05	8.8	43.0	1995-2019
1548+056	1.417	LHPQ	11.6	11.00	0.690	10.79	1.07	63.88	9.8	7.5	1995-2012
1606+106	1.232	LSPQ	17.97	1.93	1.072	12.39	3.66	46.08	6.1	31.3	1995-2010
1611+343	1.400	LLPQ	31.1	6.20	2.249	11.79	2.31	210.72	3.7	21.4	1995-2012
1622-297	0.815	LSPQ	12	2.43	1.130	11.90	2.52	30.03	9.1	27.3	1998-2013
1633+382	1.814	LHPQ	30.8	2.08	1.770	12.82	5.08	96.01	3.6	28.6	1995-2019
1637+574	0.751	LLPQ	11.15	4.63	1.111	11.28	1.56	40.95	10.1	25.0	1995-2019
1638+398	1.672	LSPQ	16.6	2.69	1.143	12.35	3.54	40.83	6.6	24.5	1995-2015
1641+399	0.593	LHPQ	19.35	4.03	3.028	11.65	2.07	91.72	5.9	21.2	1995-2019
1642+690	0.751	LHPQ	14.54	2.16	1.658	12.11	2.96	37.36	7.6	57.5	1994-2012
1652+398	0.034	HSPB	0.89	4.11	0.485	8.45	0.18	5.07	84.4	25.9	1995-2019
1655+077	0.621	LHPQ	14.8	2.52	1.429	11.77	2.27	49.60	7.6	25.8	1995-2013
1725+044	0.293	LSPQ	10.79	1.54	0.756	11.32	1.61	37.27	10.4	28.9	2003-2013
1726+455	0.715	LHPQ	2.31	2.53	1.072	11.75	2.24	2.53	26.3	46.6	1995-2013
1730-130	0.902	LHPQ	27.31	2.46	4.793	12.60	4.30	88.99	4.1	46.9	1995-2019
1749+096	0.322	LSPB	6.85	0.80	7.060	12.93	5.55	7.09	10.1	42.3	1995-2016
1749+701	0.770	LSPB	0.99	2.51	0.418	11.40	1.71	1.43	34.3	25.9	1996-2019
1758+388	2.092	LSPQ	2.11	3.29	0.595	12.04	2.80	2.37	20.5	17.8	1995-2011
1800+440	0.663	LSPQ	16.9	1.98	1.079	11.91	2.53	57.91	6.6	33.5	1995-2013
1803+784	0.680	LSPB	9.1	4.46	1.691	11.42	1.73	25.09	12.1	16.5	1994-2019
1807+698	0.051	ISPB	0.0846	7.41	0.644	8.41	0.17	3.05	10.0	25.4	1994-2019
1823+568	0.664	LSPB	21.9	4.47	0.691	11.01	1.27	189.85	5.2	22.7	1994-2012
1849+670	0.657	LSPQ	22.1	1.17	2.557	12.73	4.77	53.69	5.0	44.8	2003-2011
1908-201	1.119	LSPQ	4.4	0.78	2.025	13.38	7.81	5.21	6.3	31.7	1995-2011
1928+738	0.302	LLPQ	7.7	3.85	3.423	11.20	1.47	21.24	14.3	27.0	1994-2019

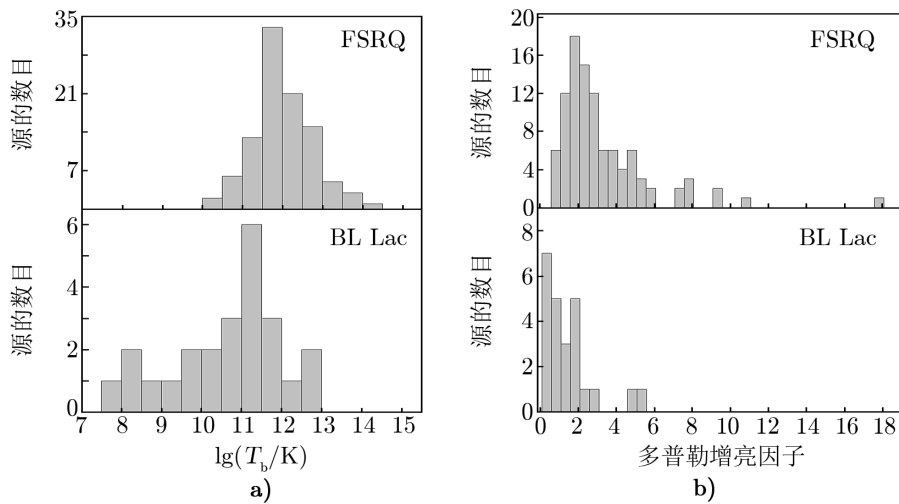
(续表)

源名	红移	类型	视速度 /光速	时标 /a	S_{\max} /Jy	$\lg(T_b)$ /K	D_{var}	Γ_{var}	θ_{var} /(°)	V /%	时间跨度 /年份
1958-179	0.652	LSPQ	1.32	0.43	1.585	13.39	7.88	4.11	2.4	37.3	1998-2010
2005+403	1.736	LSPQ	9.76	4.84	2.085	12.12	2.99	17.59	10.7	25.2	1995-2012
2007+777	0.342	ISPB	0.243	2.01	0.469	11.01	1.27	1.05	35.9	17.0	1994-2019
2013+370	0.859	LSPQ	14.52	2.41	2.773	12.34	3.53	31.77	7.4	31.5	2002-2012
2021+317	0.356	LSPB	4.68	8.05	0.575	9.92	0.55	21.10	23.8	38.9	1995-2013
2022-077	1.388	LSPQ	19.26	2.02	0.787	12.30	3.42	56.09	5.8	38.4	2002-2012
2121+053	1.941	LHPQ	35.1	8.36	2.145	11.74	2.22	278.81	3.3	24.0	1997-2019
2131-021	1.283	LHPQ	19.9	11.94	0.685	10.64	0.96	207.26	5.7	20.6	1995-2012
2145+067	0.999	LLPQ	3.078	2.50	4.811	12.66	4.51	3.42	12.1	27.5	1995-2013
2155-152	0.672	LHPQ	20.8	1.31	2.566	12.65	4.48	50.64	5.3	35.5	1997-2019
2200+420	0.069	LSPB	10	3.96	10.205	10.41	0.80	63.53	11.4	51.5	1995-2019
2201+171	1.076	LSPQ	18.6	1.52	0.561	12.21	3.20	55.81	6.0	21.1	2003-2012
2201+315	0.295	LLPQ	8.45	1.50	1.449	11.63	2.04	18.77	12.8	17.3	1995-2019
2209+236	1.125	LSPQ	1.35	1.16	1.072	12.77	4.89	2.73	6.2	34.1	1995-2019
2223-052	1.404	LHPQ	17.7	7.95	3.526	11.77	2.28	70.06	6.4	32.4	1995-2013
2227-088	1.560	LHPQ	11	1.75	1.236	12.70	4.66	15.42	8.8	40.4	1997-2012
2230+114	1.037	LHPQ	20	1.99	3.698	12.77	4.92	43.21	5.4	30.6	1995-2014
2251+158	0.859	LHPQ	14.34	0.58	21.19	14.46	17.94	14.73	3.1	53.4	1995-2019
2320-035	1.411	LHPQ	30.6	1.44	0.464	12.38	3.63	130.93	3.7	17.0	2006-2012
2331+073	0.401	LSPQ	7.9	1.59	0.792	11.57	1.95	17.23	13.6	22.8	2002-2013
2344+514	0.044	HSPB	0.037	3.78	0.043	7.70	0.10	5.06	4.3	15.2	1999-2019
2345-167	0.576	LHPQ	11.46	1.95	1.149	11.84	2.39	28.88	9.6	16.6	1995-2013

3.1 亮温度与多普勒增亮因子

对于平谱射电类星体,亮温度的平均值为 7.10×10^{12} K,多普勒增亮因子的平均值为 3.32;对于蝎虎天体,亮温度的平均值为 7.62×10^{11} K,多普勒增亮因子的平均值为 1.45。在图 1 中,我们分别绘出了平谱射电类星体和蝎虎天体的亮温度(对数尺度)和多普勒增亮因子的分布,并通过高斯函数拟合得到亮温度分布的峰值。结果显示:对于平谱射电类星体,亮温度的分布峰值为 8.51×10^{11} K,高于蝎虎天体的亮温度的分布峰值 1.74×10^{11} K。对 99 个平谱类星体和 24 个蝎虎天体的亮温度分布进行 K-S 检验,结果表明在 95% 的置信度上,两种分布没有显著差异。对平谱射电类星体的多普勒增亮因子的分布进行高斯函数拟合,得到其分布峰值为: 2.15 ± 0.07 。由图 1b) 可以看出,蝎虎天体的多普勒增亮因子的分布峰值应小于 2,低于平谱射电类星体的多普勒增亮因子分布峰值。对于 99 个平谱类星体与 24 个蝎虎天体的多普勒增亮因子分布进行 K-S 检验,结果表明在 95% 的置信度上,两种分布没有显著差异。

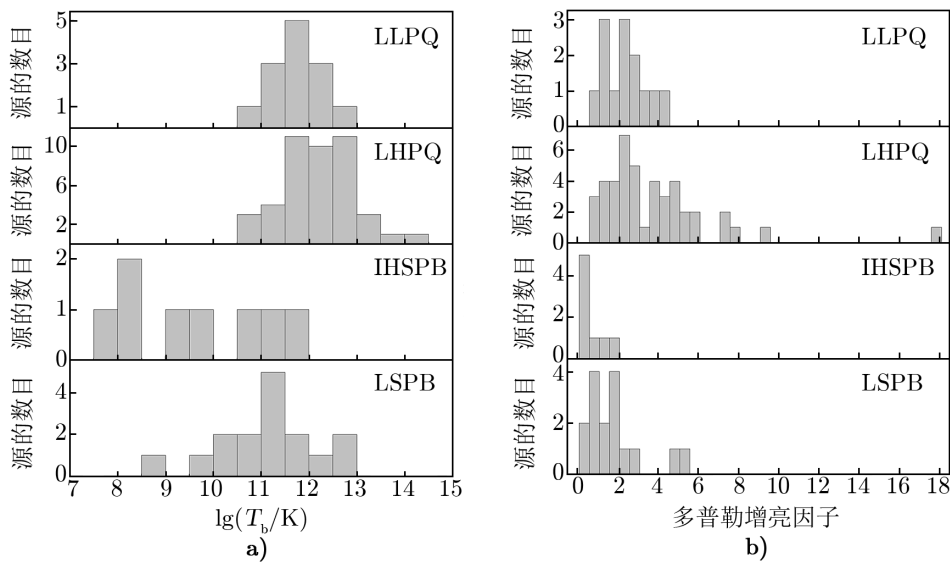
在图 2 中,我们分别绘出了平谱射电类星体及蝎虎天体子类的亮温度(对数尺度)和多普勒增亮因子的分布。对于亮温度分布,通过高斯峰值拟合,得到 LLPQ, LHPQ, LSPB 的分布峰值分别为: 5.62×10^{11} K, 1.58×10^{12} K, 1.74×10^{11} K。可见,与 LLPQ 相比,



注: a) 亮度温度 (对数尺度) 分布; b) 多普勒增亮因子的分布。

图 1 平谱射电类星体与蝎虎天体的亮度温度 (对数尺度) 与多普勒增亮因子的分布

LHPQ 有较大的亮度温度分布峰值, 暗含着光偏振高的类星体, 具有较高的峰值亮度温度。对于 IHSPB (ISP+HSPB) 的亮度温度分布, 通过高斯函数拟合无法得到可靠的峰值, 但从图 2 中可以看出, 与 LSPB 相比, IHSPB 有较小的亮度温度分布峰值, 暗含着 SED 峰频高的蝎虎天体具有较低的峰值亮度温度。

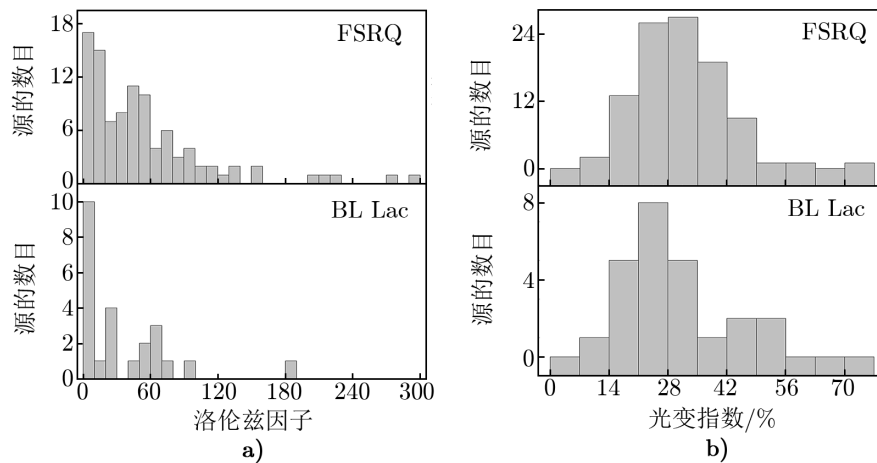


注: a) 亮度温度 (对数尺度) 分布; b) 多普勒增亮因子分布。样本中, 由于 ISP, HSPB 的数目较少, 分别为 4 个, 故在图中将其合到一起, 记为 IHSPB, 因此图中蝎虎天体仅分为两个亚类: IHSPB 与 LSPB。

图 2 耀变体子类的亮度温度 (对数尺度) 与多普勒增亮因子分布

3.2 洛伦兹因子与光变指数

洛伦兹因子反映射电源喷流内禀运动速度的大小，光变指数用来表征射电源的光变强度。在图 3 中，我们绘出了平谱射电类星体和蝎虎天体的洛伦兹因子与光变指数的分布。FSRQ 与 BL Lac 的洛伦兹因子的均值分别为 55.11 与 35.97，前者明显大于后者，说明 FSRQ 的射电喷流具有更大的内禀速度。FSRQ 与 BL Lac 的光变指数的均值分别为 30.87% 与 28.45%，前者略大于后者。通过 K-S 检验发现，在 95% 的置信度上，两种耀变体子类的光变指数分布无显著差异。但通过高斯函数拟合发现，在我们的样本中，FSRQ 的光变指数分布峰值为 $(29.80 \pm 0.39)\%$ ，而蝎虎天体样本的光变指数分布峰值为 $(24.54 \pm 0.85)\%$ ，前者明显高于后者。

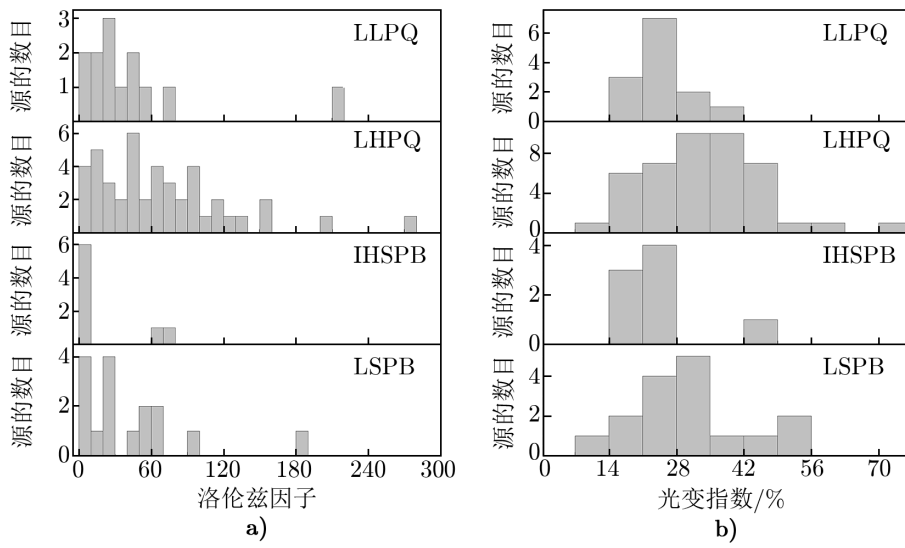


注：a) 洛伦兹因子分布；b) 光变指数的分布。

图 3 平谱射电类星体和蝎虎天体的洛伦兹因子与光变指数的分布

在图 4 中，我们分别绘出了平谱射电类星体和蝎虎天体子类洛伦兹因子与光变指数的分布。LLPQ, LHPQ, IHSPB, LSPB 的洛伦兹因子的均值分别为：43.70, 68.36, 20.42, 43.74。可见，LLPQ 与 LSPB 的洛伦兹因子的均值几乎相等，而 LLPQ 与 LHPQ 的洛伦兹因子均值相差较大。对于光变指数，LLPQ, LHPQ, IHSPB, LSPB 对应的均值分别为：25.61%, 33.90%, 24.4%, 30.49%。可见，LLPQ 与 IHSPB 的光变指数均值相差不大，而 LHPQ 与 LSPB 的光变指数均值接近，LHPQ 的光变指数比 LLPQ 的均值大。通过高斯峰值拟合，得到 LLPQ, LHPQ, LSPB 的光变指数的分布峰值分别为： $(23.87 \pm 0.33)\%$, $(33.19 \pm 1.07)\%$, $(28.20 \pm 1.18)\%$ 。可见，与 LLPQ 相比，LHPQ 有较大的光变指数分布峰值。对于 IHSPB，通过高斯函数拟合并不能得到可靠的光变指数分布峰值。通过 K-S 检验，对于 FSRQ 的两个子类：LLPQ 与 LHPQ，在 95% 的置信度上，其光变指数的分布没有显著的差异。

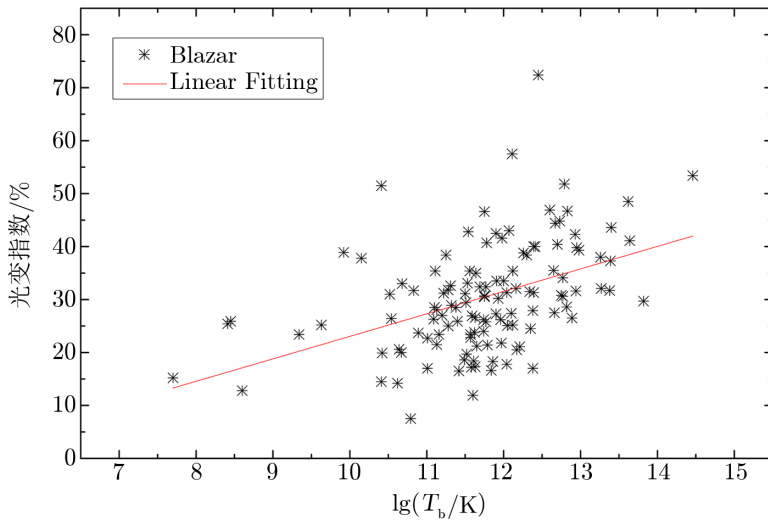
在图 5 中，我们绘出了耀变体的光变指数与亮温度的关系图，相关分析表明：两者的 Pearson 相关系数为 0.44，置信度 $\gg 99.99\%$ ，说明光变指数与亮温度具有较为显著的相关



注: a) 洛伦兹因子分布; b) 光变指数分布。

图 4 耀变体子类的洛伦兹因子和光变指数的分布

性, 暗含着光变强度较大的源具有较为显著的多普勒增亮效应。



注: 线性拟合给出 $V = (-19.42 \pm 9.19) + (4.25 \pm 0.78)\lg T_b$ 。

图 5 耀变体的亮温度和光变指数的关系

4 总结

本文研究了 123 个耀变体, 包括 99 个 SED 低频平谱射电类星体和 24 个蝎虎天体的射电喷流的相对论性束流性质。利用 MOJAVE 数据库提供的 15 GHz 的观测数据, 分析了每个源的总流量密度变化, 估算了源的亮温度与多普勒增亮因子, 进而利用文献 [26] 给出的源的最大喷流速度值计算了每个源的洛伦兹因子和视向角, 并对耀变体及其子类的射电喷流的相对论性束流性质进行了统计分析, 同时, 我们也研究了源的光变指数, 分析了亮温度与光变指数的关系。我们的主要结论如下:

(1) 在我们的样本中, 平谱射电类星体和蝎虎天体的多普勒增亮因子的平均值分别是 3.32 与 1.45, 前者较大。通过对具有视超光速喷流运动的射电源的观测数据进行分析, 得到具有视超光速喷流运动的平谱射电类星体的多普勒增亮因子比蝎虎天体的大的结论。89% 的耀变体的多普勒增亮因子大于或等于 1.0, 且 97% 的平谱射电类星体的多普勒增亮因子大于或等于 1.0。多数耀变体是多普勒增亮的, 且平谱射电类星体比蝎虎天体整体上具有更强的多普勒增亮效应。对于平谱射电类星体与蝎虎天体的子类, LHPQ 的多普勒增亮效应整体上比 LLPQ 更强, HSPB, ISPB, LSPB 的多普勒增亮效应整体上依次增强。通过 K-S 检验, 平谱射电类星体与蝎虎天体的亮温度与多普勒增亮因子分布没有显著的差异, 且 LHPQ 和 LLPQ 的亮温度与多普勒增亮因子分布也没有显著的差异。特别地, 对于蝎虎天体, 通过与 Ghisellini 等人^[21]的分析结果比较发现, 我们给出的喷流视速度与洛伦兹因子的对数平均值较大, 而多普勒增亮因子的对数平均值较小。这是由于我们采用的 MOJAVE 数据库提供的最新的喷流视速度大于 Ghisellini 等人^[21]给出的值。

(2) 与蝎虎天体相比, 平谱射电类星体有更大的洛伦兹因子, 对于其子类耀变体, LHPQ 的洛伦兹因子比 LLPQ 的大, LSPB 的洛伦兹因子比 IHSPB 的大。

(3) 耀变体视向角的均值为 11.85° , 可见整体上具有较小的视向角。除 HSPB 之外, 其他耀变体子类的视向角平均值都小于 21° 。

(4) 平谱射电类星体的光变指数整体上比蝎虎天体更大, 对于其子类耀变体, LHPQ 的光变指数整体上比 LLPQ 更大, LSPB, ISPB, HSPB 的光变指数整体上依次增大。通过 K-S 检验, 平谱射电类星体与蝎虎天体的光变指数分布没有显著的差异, 且 LHPQ 与 LLPQ 的亮光变指数分布也没有显著的差异。

(5) 在我们的样本中, 亮温度与光变指数具有较显著的相关性, 这说明光变强度较大的源具有较强的多普勒增亮效应。

致谢

感谢审稿专家为提高文章质量提出的宝贵意见与建议。

参考文献:

- [1] Maraschi L, Ghisellini G, Celotti A. *ApJ*, 1992, 397: L5

- [2] Bai J M, Xie G Z, Li K H, et al. *A&AS*, 1998, 132(1): 83
- [3] Fan J H, Huang Y, Yuan Y H, et al. *RAA*, 2009, 9(7): 751
- [4] Fan J H, Lu Y, Qian B C, et al. *RAA*, 2010, 10: 1100
- [5] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. *ApJS*, 2010, 188: 405
- [6] Gu M F, Li S L. *A&A*, 2013, 554: A51
- [7] Gu M F. *JApA*, 2014, 35(3): 369
- [8] Liu X, Mi L G, Liu J, et al. *A&A*, 2015, 578: A34
- [9] Liu X, Yang P P, Liu J, et al. *MNRAS*, 2017, 469: 2457
- [10] Telescope L & IceCube Collaboration. *Science*, 2018, 361(6398): 1378
- [11] 樊军辉. *天文学进展*, 2001, 19(02): 257
- [12] 潘艳平, 白金明. *天文学进展*, 2008, 26(02): 184
- [13] 潘凯琳, 付建宁. *天文学进展*, 2009, 27(04): 358
- [14] 郭晓通, 王建成. *天文学进展*, 2018, 36(01): 45
- [15] Fan J H, Yang J H, Liu Y, et al. *ApJS*, 2016, 226(2): 20
- [16] Urry C M, Padovani P. *PASP*, 1995, 107: 803
- [17] Blandford R D, Rees M J. *Phys*, 1978, 17: 265
- [18] Unwin S C, Cohen M H, Biretta J A, et al. *ApJ*, 1989, 340: 117
- [19] Lister M L, Aller M F, Aller H D, et al. *AJ*, 2013, 146(5): 120
- [20] Lister M L, Aller M F, Aller H D, et al. *AJ*, 2016, 152(1): 12
- [21] Ghisellini G, Padovani P, Celotti A, et al. *ApJ*, 1993, 407: 65
- [22] Readhead A. *ApJ*, 1994, 426: 51
- [23] Lähteenmäki A, Valtaoja E. *AJ*, 1999, 117: 1168
- [24] Lähteenmäki A, Valtaoja E, Wiik K. *ApJ*, 1999, 511(1): 112
- [25] Lister M L, Aller M F, Aller H D, et al. *ApJS*, 2018, 234(1): 12
- [26] Lister M L, Homan D C, Hovatta T, et al. *ApJ*, 2019, 874(1): 43
- [27] Komatsu E, Dunkley J, Nolta M R, et al. *ApJS*, 2009, 180: 330
- [28] Lister M L, Homan D C. *AJ*, 2005, 130(4): 1389
- [29] Terasranta H, Valtaoja E. *A&A*, 1994, 283: 51
- [30] Valtaoja E, Lähteenmäki A, Teräsraanta H, et al. *ApJS*, 1999, 120(1): 95
- [31] Lähteenmäki A, Valtaoja E. *ApJ*, 1999, 521(2): 493
- [32] Hovatta T, Valtaoja E, Tornikoski M, et al. *A&A*, 2009, 494(2): 527
- [33] Fan J H, Huang Y, He T M, et al. *PASJ*, 2009, 61(4): 639

Relativistic Beaming Properties of Radio Jets in Blazars

MI Li-gong^{1,2}, XIE Quan¹, ZHANG Li¹, WU Zhong-zu¹,
ZHANG Zhi-bin³, LU Jun-wang², LUO Juan-juan²

(1. College of Big Data and Information Engineering/College of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. School of Physics and Electronics, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun 558000, China; 3. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: We have calculated the variability brightness temperatures by analyzing the light curves for a large sample of blazar using total flux density monitoring data at 15 GHz from

the MOJAVE database, and determined the Doppler boosting factors by assuming the same intrinsic brightness temperature for each source. We have calculated the Lorentz factors and viewing angles of 123 blazars, which include 99 flat spectrum radio quasars and 24 BL Lacertae objects, using new apparent jet speed data. We have divided the flat spectrum radio quasars and the BL Lacertae objects into different subclasses, and analyzed the variability brightness temperature, the Doppler boosting factor, the Lorentz factor, viewing angle and variability index of each subclass. We find that most of blazars in our sample are Doppler-boosted and Doppler boosting factors of flat spectrum radio quasars are higher than those of BL Lacertae objects, and the high-polarization flat spectrum radio quasars have the greatest Doppler boosting, while the low-polarization flat spectrum radio quasars and low-spectral peaked BL Lacertae objects are less boosted. The Lorentz factor and variability indexes of BL Lacertae objects are smaller than those of flat spectrum radio quasars. It is also found that 89% of the sources have a small viewing angle of less than 21 degrees. We also analyzed the relationship between the brightness temperature and the variability index, and find that they have a significant correlation.

Key words: blazar; BL Lacertae objects; brightness temperature; variability