

BL Lac的光学多普勒因子估算*

黄家伟¹ 潘树蓉¹ 吴健¹ 叶旭鸿² 曹健鸿¹ 樊军辉^{3,4,5†}

(1 广州大学物理与材料科学学院 广州 510006)

(2 帕多瓦大学“G. Galilei”物理与天文学院 帕多瓦 35131)

(3 广州大学天体物理中心 广州 510006)

(4 国家天文科学数据中心大湾区分中心 广州 510006)

(5 广东省高等学校天文观测与技术重点实验室 广州 510006)

摘要 蝎虎天体(BL Lacertae object, BL Lac)是一类特殊的活动星系核, 表现出极端的观测特征, 如高光度和偏振、快速光变、超光速运动、射电核主导、极高能辐射等, 极端观测特性可能都与喷流效应有关, 而表征喷流效应的物理量是多普勒因子(Doppler factor). 多普勒因子有助于了解BL Lac的辐射物理和本征特性. 基于BL Lac和Fanaroff-Riley type I/Fanaroff-Riley type II (G)的统一模型思路, 提出BL Lac的本征视星等与红移(哈勃图)的分布应该与FRI/FRII (G)的观测视星等与红移的分布相似, 并提出了估算BL Lac的光学多普勒因子的方法. 该方法所估算的多普勒因子与前人的光学多普勒因子比较具有很好的相关性, 说明该光学波段估算BL Lac多普勒因子的方法是可靠的.

关键词 蝎虎天体: 普通, 星系: 活动, 星系: 距离和红移, 星系: 喷流

中图分类号: P157; **文献标识码:** A

1 引言

活动星系核(active galactic nucleus, AGN)是一类特殊的星系, 其核区表现出剧烈的活动现象^[1]. 它们所表现的观测性质可以由“黑洞+吸积盘+喷流”模型解释^[2-3]. 耀变体(blazar)是AGN的子类之一, 它们表现出极端的观测特征: 如高光度、快速光变、高偏振、射电核主导、视超光速运动和高能辐射等^[4-10]. 耀变体有两个子类, 一类为平谱射电类星体(Flat Spectrum Radio Quasar, FSRQ), 其发射线的等值宽度大于5 Å; 另一类为蝎虎天体(BL Lacertae object, BL Lac), 其发射线的等值宽度小于5 Å^[2, 11-12]. 在黑洞+吸积盘+喷流模型中,

blazar的相对论性喷流的方向朝向观测者, 观测到的流量密度(F^{ob})与本征的流量密度(F^{in})可以用 $F^{\text{ob}} = \delta^q F^{\text{in}}$ 来表示, 其中 δ 为多普勒因子, $q = 3 + \alpha$ 或者 $q = 2 + \alpha$ 分别对应球状喷流或连续喷流的情况(为了便于区分本文球状喷流用 q_1 代替、连续喷流用 q_2 代替), α 为能谱指数; 流量密度(F_{ν})与能谱指数(α)关系为 $F_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}$, ν 为频率^[1, 13-15]. 多普勒因子(δ)是一个重要的物理量, 取决于喷流的视向角(θ)和喷流的相对论性速度(β): $\delta = 1/\Gamma(1 - \beta \cos \theta)$, 其中 $\Gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$; 由于 θ 和 β 难以从观测中直接获得, 多普勒因子的方法无法直接测量, 只能间接估算^[7, 9, 13, 16-18].

2023-06-12收到原稿, 2023-08-01收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U2031201、11733001), 科技部国际交流司中保交流项目(国科外[2020]16号), 中国载人航天工程项目(CMS-CSST-2021-A06), 广东省自然科学基金项目(2019B030302001)资助

†fjh@gzhu.edu.cn

射电星系(radio galaxy)也是AGN的子类之一。在1974年, Fanaraoff和Riley仔细研究亮双瓣型射电星系^[19], 根据射电星系的形态与178 MHz处的光度分布进行划分: 将178 MHz的射电光度 $L_{178 \text{ MHz}} < 2 \times 10^{25} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的亮度边缘递减型射电星系称为I型射电星系(Fanaroff-Riley type I), 其在观测上表现为窄的双边喷流, 并且喷流的大尺度结构准直性很差; 将178 MHz的射电光度 $L_{178 \text{ MHz}} > 2 \times 10^{25} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的亮度边缘递增型射电星系称为II型射电星系(Fanaroff-Riley type II), 它们的最高光度集中于热斑, 且有准直性很好的单边喷流^[20]。根据FRII光学波段的能谱性质, FRII可再细分成两个子类: 一类称为FRII (G), 它们的光学光谱类似于普通星系的光学光谱; 另一类则称为FRII (Q), 它们的光学光谱类似于类星体的光学光谱^[21-22]。射电星系的光学核区辐射同样受到喷流的影响^[23-24]。Arshakian等人收集了20个射电星系样本的射电15 GHz和核区的5100 Å光学辐射数据并进行分析, 发现两者密切相关, 提出射电星系的光学辐射受到相对论性喷流的影响^[23]。Verdoes Kleijn等人分析了21个近邻FRI的射电和光学核区辐射, 发现这两个波段的辐射有很强的相关性, 它们可能都来自于星系内部喷流的同步辐射^[24]。

许多学者通过研究耀变体和射电星系的光度函数、延展射电辐射、窄发射线、寄主星系和环境等性质, 提出FRI是BL Lac最可能的母体(parent population), 即当FRI的喷流指向观测者时表现为BL Lac, FRII是FSRQ最可能的母体, 即当FRII的喷流指向观测者时表现为FSRQ^[2-3, 25-26]; 此外, 许多学者也发现FRII中有部分源的观测性质和BL Lac相似, 提出部分FRII应该也被视为BL Lac母体的一部分^[16, 22, 27-30]。如Falomo等人使用哈勃太空望远镜对52个BL Lac的寄主星系进行光学成图和分析, 发现BL Lac样本的寄主星系平均光度介于FRI和FRII的光度之间, 提出FRII有可能成为BL Lac天体母体的一部分^[30]; Xie等^[22]、Fan等^[27]分别在光学和红外波段用红移和视星等关系对BL Lac、FRI和FRII (G)的统一模型进行讨论, 发现FRII (G)哈勃图分布与BL Lac和FRI的哈勃图分布符合

得非常好, 因此提出BL Lac与FRI的统一模型可以延展到FRII (G)这类天体。Ye等人收集297个BL Lac和128个FRI/FRII (G)的射电5 GHz延展光度数据, 通过使用Wilcoxon rank-sum和Kolmogorov-Smirnov统计方法来支持BL Lac、FRI和FRII (G)是同一类天体^[16]; Zeng等人通过分析177个BL Lac以及74个FRI/FRII (G)的X波段延展谱指数, 发现74个FRI/FRII (G)和177个BL Lac的平均延展谱指数相似, t检验(Student's t test, 是一种统计方法)的结果支持FRII (G)也应该被考虑为BL Lac母体的一部分^[28]。

由于喷流方向的影响, BL Lac观测到的光学辐射被相对论效应所放大; FRI/FRII (G)的喷流方向被认为是远离观测者, 喷流放大较弱, 故其光学辐射表现为本征辐射。若BL Lac和FRI/FRII (G)被认为是同一类天体^[16, 22, 27-30], 那么BL Lac和该类射电星系之间观测到的光学辐射差异可能是多普勒因子所造成的。因此本工作基于统一模型思路, 通过研究BL Lac与FRI/FRII (G)的哈勃图, 提出一种方法来估算BL Lac的光学多普勒因子。本文的结构如下: 第2节为BL Lac和FRI/FRII (G)样本的描述; 第3节是多普勒因子的估算方法; 第4、5节分别为讨论与结论。

2 样本

从Xie等^[22]、谢照华等^[31]、Véron-Cetty & Véron^[32]、Zirbel & Baum^[33]的工作中, 我们共收集了491个BL Lac以及95个FRI/FRII (G)具有V波段的星等(m_V)和红移(z)数据, 相应数据列在表1中。因为受到银河系尘埃影响, 所观测到的星等值会变大, 因此我们从NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)上找所对应天体坐标系的V波段银河消光, 然后用观测的V星等减去银河消光值来获得天体真实的星等值^[34]。其中BL Lac的红移 $z \in [0.027, 5.03]$, 平均值为 $\langle z_{\text{BL}} \rangle = 0.461 \pm 0.496$; 491个BL Lac样本的红移分布如图1紫色区域所示。从图1可见, 本样本数据中的大部分BL Lac的红移 $z < 1$, 大部分是近邻星系。

表 1 BL Lac、FRI和FRII (G)的样本示例
Table 1 An example sample of BL Lac, FRI and FRII (G)

| Name (1) | C (2) | z (3) | m_V (4) | Refs. (5) | $\delta(q_1 = 3 + \alpha)$ (6) | $\delta(q_2 = 2 + \alpha)$ (7) |
|-------------------|----------|------------|--------------|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| SDSS J00019-1031 | B | 0.252 | 19.21 | VC10 | 0.85 | 0.80 |
| RXS J00031-1805 | B | 0.054 | 13.28 | VC10 | 1.58 | 1.88 |
| 3EG J0004+2019 | B | 0.677 | 20.81 | VC10 | 0.96 | 0.95 |
| RX J00079+4711 | B | 0.28 | 18.3 | VC10 | 1.16 | 1.23 |
| MCG +00.01.036 | B | 0.059 | 15.6 | VC10 | 0.94 | 0.92 |
| MS 00117+0837 | B | 0.162 | 17.5 | VC10 | 1.13 | 1.18 |
| SDSS J00176+1451 | B | 0.303 | 18.06 | VC10 | 1.24 | 1.35 |
| SDSS J00217-0900 | B | 0.648 | 19.54 | VC10 | 1.29 | 1.42 |
| RXS J00220+0006 | B | 0.306 | 19.63 | VC10 | 0.84 | 0.78 |
| RXS J00271-2709 | B | 0.14 | 20.3 | VC10 | 0.46 | 0.35 |
| RXS J00274+2607 | B | 0.36 | 19 | VC10 | 1.08 | 1.11 |
| SDSS J00286+0035 | B | 0.687 | 19.81 | VC10 | 1.23 | 1.33 |
| 1WGA J0032.5-2849 | B | 0.324 | 18.8 | VC10 | 1.06 | 1.08 |
| KUV 00311-1938 | B | 0.61 | 16.3 | VC10 | 2.76 | 4.00 |
| RXS J00352+1515 | B | 1.09 | 16.99 | VC10 | 3.28 | 5.07 |
| SDSS J00409-0915 | B | 5.03 | 22.4 | VC10 | 1.91 | 2.41 |
| 0055-01 | I | 0.0448 | 14.56 | Xie05 | | |
| 0104+32 | I | 0.0167 | 12.15 | Xie05 | | |
| 0123-01 | I | 0.018 | 13 | Xie05 | | |
| 0219+42 | I | 0.0215 | 15 | Xie05 | | |
| 0043-424 | II (G) | 0.053 | 14.86 | Z95 | | |
| 0106+693 | II (G) | 0.06 | 14.52 | Z95 | | |
| 0013+790 | II (G) | 0.8404 | 24 | Xie93 | | |
| 0038+328 | II (G) | 0.482 | 20.52 | Xie93 | | |
| 0106+130 | II (G) | 0.0595 | 15.22 | Xie93 | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

The first column is source name (name); the second column is class (Class), where B corresponds to BL Lac, I corresponds to FRI, II (G) corresponds to FRII (G). The third column is redshift (z), the fourth column is apparent magnitude of optical V band (m_V); the fifth column is reference (Ref), where VC10 corresponds to data of Véron-Cetty & Véron^[32], Xie05 corresponds to data of Xie et al.^[31], Z95 corresponds to data of Zirbel & Baum^[33], Xie93 corresponds to data of Xie et al.^[22]. Please feel free to contact author to acquire whole sample data.

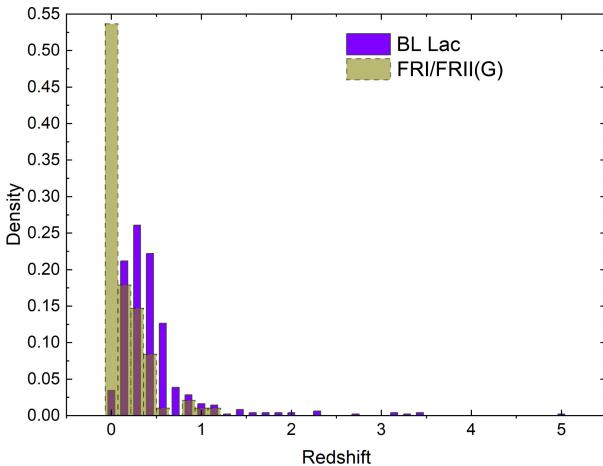


图1 491个BL Lac和95个FRI/FRII (G)的红移分布情况. 其中紫色区域为BL Lac样本, 红移 $z_{\text{BL}} \in [0.027, 5.03]$, 平均值为 $\langle z_{\text{BL}} \rangle = 0.461 \pm 0.496$; 深黄色区域为FRI/FRII (G)样本, 红移 $z_{\text{FR}} \in [0.002, 1.175]$, 平均值为 $\langle z_{\text{FR}} \rangle = 0.16 \pm 0.22$.

Fig. 1 The redshift distribution for 491 BL Lac and 95 FRI/FRII (G). The purple area is for the BL Lac, the redshift $z_{\text{BL}} \in [0.027, 5.03]$ with $\langle z_{\text{BL}} \rangle = 0.461 \pm 0.496$; the deep yellow area is for FRI/FRII (G), the redshift $z_{\text{FR}} \in [0.002, 1.175]$ with $\langle z_{\text{FR}} \rangle = 0.16 \pm 0.22$.

FRI/FRII (G)的红移 $z \in [0.002, 1.175]$, 红移的平均值为 $\langle z_{\text{FR}} \rangle = 0.16 \pm 0.22$; 红移分布如图1深黄色区域所示. 从图1可见, 绝大部分的FRI/FRII (G) 红移较小, 平均红移为0.16, 原因可能是射电星系的光学辐射较弱, 受到光学望远镜灵敏度的影响, 距离较远的射电星系难以被我们探测到.

491个BL Lac及95个FRI/FRII (G)的视星等分布如图2所示; 其中BL Lac的光学V波段视星等 $m_V \in [13.58, 24.91]$, 平均值为 $\langle m_V \rangle = 19.0 \pm 1.42$. FRI/FRII (G)的光学V波段视星等 $m_V \in [7.53, 23.4]$, 平均值为 $\langle m_V \rangle = 15.7 \pm 3.12$.

3 研究方法

由于BL Lac的喷流方向朝向我们, 其光学辐射被相对论效应所放大; 而FRI/FRII (G)的喷流方向与观测者方向有较大夹角, 其光学辐射喷流效应较弱, 可以认为是本征辐射. 基于BL Lac和FRI/FRII (G)的统一模型思路, BL Lac的本征光学视星等与红移的关系应该与FRI/FRII (G)的观测光学视星等与红移关系是一致的, 因此我们可以结合FRI/

FRII (G)和BL Lac的哈勃图关系来研究BL Lac的喷流效应; 我们用多普勒因子(δ)来描述喷流强弱情况. 假设做相对论运动的分立气体云辐射源的观测辐射流量 F^{ob} 与其本征的辐射流量 F^{in} 的关系为:

$$F^{\text{ob}} = \delta^q F^{\text{in}}, \quad (1)$$

其中 δ 为多普勒因子, q 为喷流形态. 本文讨论喷流是以分立的球状形式向外辐射($q_1 = 3 + \alpha$)或是连续形式向外辐射($q_2 = 2 + \alpha$)^[13, 35], α 为光学谱指数.

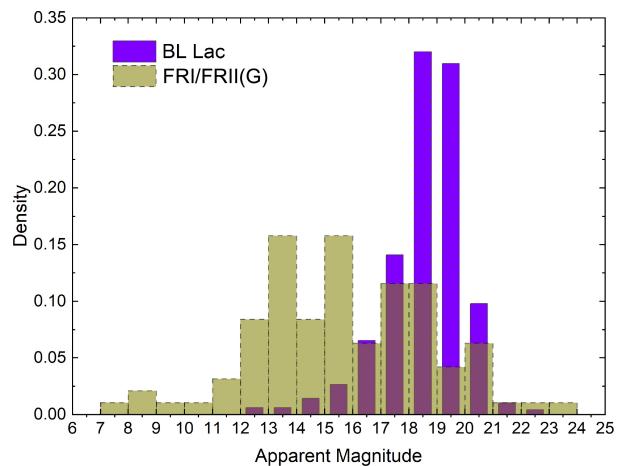


图2 491个BL Lac及95个FRI/FRII (G)的光学V波段视星等的分布情况. 其中紫色区域为BL Lac样本, 视星等 $m_V \in [13.58, 24.91]$, 平均值为 $\langle m_V \rangle = 19.0 \pm 1.42$; 深黄色区域为FRI/FRII (G), 视星等 $m_V \in [7.53, 23.4]$, 平均值为 $\langle m_V \rangle = 15.7 \pm 3.12$.

Fig. 2 The apparent magnitude distribution in optical V band for 491 BL Lac and 95 FRI/FRII (G). The purple area is for the BL Lac, the apparent magnitude $m_V \in [13.58, 24.91]$ with $\langle m_V \rangle = 19.0 \pm 1.42$; the deep yellow area is for FRI/FRII (G), the apparent magnitude $m_V \in [7.53, 23.4]$ with $\langle m_V \rangle = 15.7 \pm 3.12$.

光学V波段的流量密度与对应的光学视星等满足如下关系^[1]:

$$F^{\text{ob}} = F_0 10^{-0.4 m_{\text{BL}}^{\text{ob}}}, \quad (2)$$

$$F^{\text{in}} = F_0 10^{-0.4 m_{\text{BL}}^{\text{in}}}, \quad (3)$$

其中 $m_{\text{BL}}^{\text{ob}}$ 为BL Lac的观测视星等, $m_{\text{BL}}^{\text{in}}$ 为BL Lac的本征视星等. F_0 为对应光学V波段的常数^[36]. 通过将(2)-(3)式代入(1)式, 消去初始参数 F_0 并且推导

出BL Lac的观测视星等和本征视星等关系:

$$m_{\text{BL}}^{\text{ob}} = m_{\text{BL}}^{\text{in}} + 2.5q \lg \delta. \quad (4)$$

基于BL Lac和FRI/FRII(G)的统一模型^[22, 27, 29], BL Lac的本征视星等-红移分布应该与FRI/FRII (G)的观测视星等-红移关系一致: $m_V = (4.99 \pm 0.16) \lg z + (21.40 \pm 0.21)$; 再结合(4)式, BL Lac的观测光学视星等被多普勒因子所放大, 我们便可以推导出一个估算多普勒因子的公式:

$$\lg \delta = (m_{\text{BL}}^{\text{ob}} - 4.99 \lg z - 21.40) / (2.5q). \quad (5)$$

我们假设BL Lac光学谱指数 $\alpha = 0.72$, 并且通过获得BL Lac的V波段观测视星等和红移来估算BL Lac球状喷流($q_1 = 3 + \alpha$)和连续喷流($q_2 = 2 + \alpha$)时的光学波段多普勒因子。所得到的多普勒因子列在表1的第(6)–(7)列中。

4 讨论

在膨胀宇宙模型中, 在红移很小时, 若同一类天体具有相似的绝对星等, 那么视星等-红移关系应该满足一条斜率为5的直线^[1]; 如方励之等人收集大样本的双瓣结构的射电噪类星体, 并假定它们有相同的绝对星等, 最后的统计结果是斜率为4.6的视星等-红移关系^[34]。本样本中, 我们收集95个FRI/FRII (G)视星等样本, 其视星等-红移的关系为: $m_V = (4.99 \pm 0.16) \lg z + (21.40 \pm 0.21)$, 如图3所示, 线性拟合的斜率系数为 4.99 ± 0.16 , 与理论预期斜率5非常接近, 说明这类射电星系的红移是宇宙学红移, 它们的光学绝对星等是相似的, 这类天体可以被视为标准烛光。491个BL Lac的视星等-红移关系也展示在图3中, $m_V = (2.04 \pm 0.17) \lg z + (19.57 \pm 0.10)$, 其最佳的线性斜率系数为 2.04 ± 0.17 , 与5的理论斜率有明显差距, 其主要原因可能是由于BL Lac的光学辐射有很强的喷流效应^[22], 导致所观测到的光学辐射放大, 因此部分BL Lac的光学视星等值变小, 从而表现出 2.04 ± 0.17 的斜率。

BL Lac表现出极端的观测特征可能是相对论性喷流导致的, 其光学辐射被喷流的相对论性效应放大, 而FRI/FRII (G)的光学辐射则表现为本征的

辐射特征。BL Lac在全波段有明显的光变, 而快速光变是使流量(视星等)发生明显变化的原因, 所以该方法主要是描述所观测时刻BL Lac天体光学波段的喷流情况。基于BL Lac和FRI/FRII (G)的统一模型思路, 我们估算了491个BL Lac的光学多普勒因子, 球状喷流情况($q_1 = 3 + \alpha$) $\delta \in [0.32, 4.45]$, 平均值为 $\langle \delta \rangle = 1.21 \pm 0.56$; 连续喷流情况($q_2 = 2 + \alpha$) $\delta \in [0.21, 7.71]$, 平均值为 $\langle \delta \rangle = 1.36 \pm 0.94$, 其分布情况如图4所示。当BL Lac天体的喷流是朝向观测者运动, 且其喷流夹角较小, 此时满足 $\delta \approx \Gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2} \geq 1$ ^[9, 37], 因此从图4中可见有一部分BL Lac的光学多普勒因子 $\delta < 1$ 可能是由于该方法的局限性导致的。 $\delta \approx 1$ 时, $\beta \approx 0$, 因此该类BL Lac的相对论效应比较弱; 如Xie等^[38]通过光变估算耀变体多普勒因子的方法中, 在耀变体的相对论效应比较弱时, 取 $\delta = 1$ 。

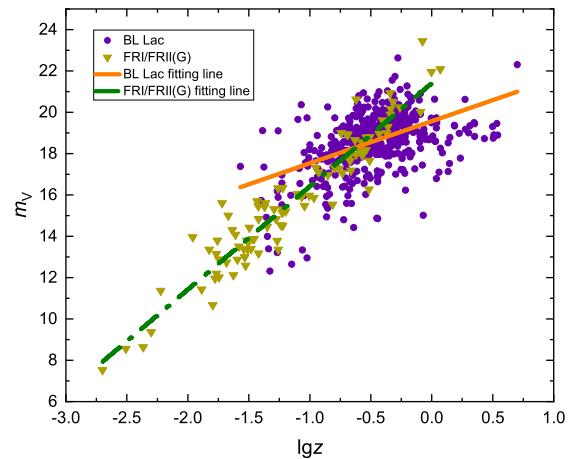


图3 491个BL Lac和95个FRI/FRII (G)的哈勃图。其中紫色圆形为BL Lac样本, 橘色实线为BL Lac样本的最佳线性拟合结果, $m_V = (2.04 \pm 0.17) \lg z + (19.57 \pm 0.10)$; 黄色三角形为FRI/FRII (G)样本, 其中绿色点虚线为FRI/FRII (G)样本的最佳线性拟合结果, $m_V = (4.99 \pm 0.16) \lg z + (21.40 \pm 0.21)$ 。

Fig. 3 The Hubble diagram for 491 BL Lac and 95 FRI/FRII (G). The purple circle is for BL Lac, the orange solid line is the best fitting regression for BL Lac, $m_V = (2.04 \pm 0.17) \lg z + (19.57 \pm 0.10)$; the yellow triangle is for FRI/FRII (G), the green dot-dashed line is the best fitting regression for FRI/FRII (G), $m_V = (4.99 \pm 0.16) \lg z + (21.40 \pm 0.21)$.

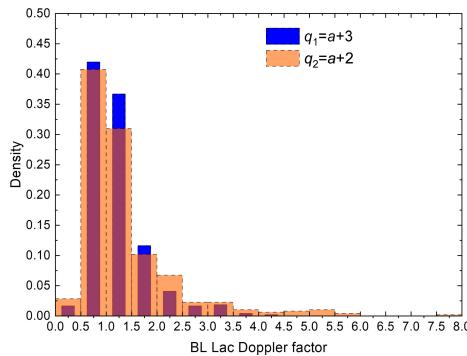


图 4 491个BL Lac的多普勒因子的分布图, 球状喷流情况($q_1 = 3 + \alpha$)多普勒因子 $\delta \in [0.32, 4.45]$, 平均值为 $\langle \delta \rangle = 1.21 \pm 0.56$; 连续喷流情况($q_2 = 2 + \alpha$)多普勒因子 $\delta \in [0.21, 7.71]$, 平均值为 $\langle \delta \rangle = 1.36 \pm 0.94$.

Fig. 4 The Doppler factor distribution of 491 BL Lac, the Doppler factor $\delta \in [0.32, 4.45]$ with $\langle \delta \rangle = 1.21 \pm 0.56$ for $q_1 = 3 + \alpha$; the Doppler factor $\delta \in [0.21, 7.71]$ with $\langle \delta \rangle = 1.36 \pm 0.94$ for $q_2 = 2 + \alpha$.

Xie等人收集23个BL Lac的光学视星等和最小光变时标来计算观测的能量转化效率(η_{ob}), 通过比较观测的能量转化效率和本征的能量转化效率($\eta_{\text{in}} = 0.05$)的差异来估算光学多普勒因子^[22] (为了简便起见文献[22]在图5及下文简称Xie93). 我们样本也包含Xie93的23个BL Lac; 因此, 我们比较本方法和Xie93方法估算的多普勒因子情况, 比较结果如图5所示: Xie93所估算的BL Lac多普勒因子 $\delta_{\text{Xie93}} \in [1, 3.56]$, 平均值 $\langle \delta_{\text{Xie}} \rangle$ 为 1.78 ± 0.77 . 我们计算的球状喷流($q_1 = 3 + \alpha$)情况下BL Lac多普勒因子 $\delta_{\text{TW}} \in [0.64, 2.57]$, 平均值 $\langle \delta_{\text{TW}} \rangle = 1.23 \pm 0.53$; 连续喷流($q_2 = 2 + \alpha$)情况下的BL Lac多普勒因子 $\delta_{\text{TW}} \in [0.55, 3.49]$, 平均值 $\langle \delta_{\text{TW}} \rangle = 1.35 \pm 0.78$. 球状喷流($q_1 = 3 + \alpha$)情况下, 本方法估算的多普勒因子和Xie93的多普勒因子的相关系数为 $r = 0.939$, 最小二乘法的概率为 $p \sim 10^{-11}$ (最小二乘法用于评估线性回归模型中系数的显著性, 若 $p < 0.05$ 则认为系数显著不为零, 下文概率均使用该方法), 连续喷流($q_2 = 2 + \alpha$)情况下的相关性和概率则为 $r = 0.941$, $p \sim 10^{-11}$. 多普勒因子的分布情况和线性结果说明我们方法所估算的多普勒因子与Xie93通过光学光变所估算的多普勒因子是相关的, 并且如图5所示, 连续喷流情况下的多

普勒因子线性拟合与 $y = x$ 的等值线非常接近, 说明我们估算的 $q_2 = 2 + \alpha$ 和Xie93光学波段估算的多普勒因子非常相似, 说明该方法来描述BL Lac的光学辐射和喷流特征是可靠的.

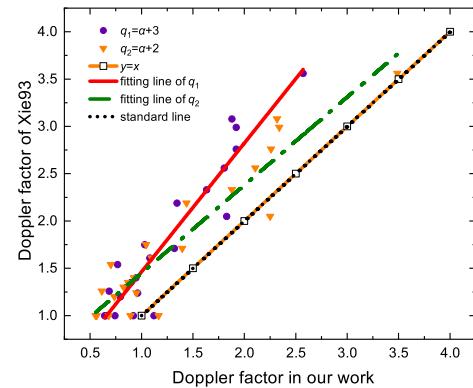


图 5 本样本的多普勒因子(δ_{TW})与Xie等^[22]的多普勒因子(δ_{xie93})的比较, 其中紫色圆形和红色实线分别为本方法球状喷流($q_1 = 3 + \alpha$)情况下的多普勒因子和Xie93多普勒因子的线性拟合结果($r = 0.939$, 概率 $p \sim 10^{-11}$); 黄色三角形和绿色点虚线分别为本方法连续喷流($q_2 = 2 + \alpha$)情况下的多普勒因子和Xie93多普勒因子的线性拟合结果($r = 0.941$, 概率 $p \sim 10^{-11}$); 正方形和点线为 $y = x$ 的等值线.

Fig. 5 The comparison between the Doppler factor in this work (δ_{TW}) and the Doppler factor from Xie et al.^[22] (δ_{xie93}), in which the purple circle and red solid line are the results of the linear fitting of the spherical jet ($q_1 = 3 + \alpha$) model of our work's Doppler factor and Doppler factor from Xie93. ($r = 0.939, p \sim 10^{-11}$); the yellow triangle and green dot-dashed line are the results of the linear fitting of the continuous jet ($q_2 = 2 + \alpha$) model of our work's Doppler factor and Doppler factor from Xie93 ($r = 0.941, p \sim 10^{-11}$). The square and the dotted line are the contour line of $y = x$.

Liodakis等人基于能量均分的前提下, 提出利用射电光变对多普勒因子进行估算的方法^[7] (为了简便起见文献[7]在图6及下文简称Liodakis18). 他们利用OVRO (Owens Valley Radio Observatory) 40 m射电望远镜收集了1029个AGN长达8–10 yr的射电波段流量变化, 根据Bayesian分类中的Magnetron方法进行光变曲线的拟合并计算观测亮温度, 再通过比较AGN的观测亮温度与本征亮温度来估算AGN的射电多普勒因子. 我们将本样本与Liodakis18的BL Lac样本进行匹配, 最后共筛选出32个相同的BL Lac天体源, 它们的多普勒因子的比

较如图6所示。从图中可见, Liodakis18的射电多普勒因子可高达45, 整体射电多普勒因子明显要比光学多普勒因子大一个量级, BL Lac的射电辐射由喷流所主导。射电和光学多普勒因子似乎存在着一个趋势, 即射电的多普勒因子越大, 光学的多普勒因子也越大。球状喷流($q_1 = 3 + \alpha$)情况下, 线性拟合得出相关系数为 $r = 0.362$ 、概率 $p = 0.057$; 连续喷流($q_2 = 2 + \alpha$)情况下 $r = 0.356$ 、 $p = 0.062$ 。该拟合结果说明射电喷流效应与光学波段的喷流效应相关性较弱, 可能是因为BL Lac的光学波段辐射不仅受到核区喷流效应的影响, 同时还会受到寄主星系或吸积盘的影响。如Hyvönen等人研究了18个低红移BL Lac寄主星系R、H以及部分源的V波段数据, 其中有3个源在本文中有进行多普勒因子的估算, 分别是1ES 0229+200 ($\delta = 0.85$)、I Zw 187 ($\delta = 0.77$)、1H 0706+591 ($\delta = 0.62$), 它们的寄主星系V波段的辐射比其核区亮1–2 mag, 其寄主星系的热辐射贡献可能会稀释BL Lac的光学多普勒因子和射电多普勒因子的相关性^[39]。

5 结论

多普勒因子对研究Blazar天体的喷流效应有至关重要的作用。多普勒因子的测量需要准确获取喷流与观测视线的夹角以及喷流的速度; 而这两个量从观测上难以获得, 所以有很多近似估算多普勒因子的方法。本文基于BL Lac和FRI/FRII (G)的统一模型, 提出FRI/FRII (G)的哈勃图关系应该与BL Lac的本征哈勃图关系表现是一致的, 再结合BL Lac的观测视星等受到喷流放大效应的事实, 提出一个公式来估算BL Lac的光学多普勒因子。FRI/FRII (G)的哈勃图关系中, 其斜率4.99与哈勃图理论斜率5一致, 支持FRI/FRII (G)的绝对星等是相似的, 可视为标准烛光。本方法所估算的球状喷流情况下的多普勒因子与Xie93估算的光学多普勒因子相比, 其分布相似, 且连续喷流情况下的多普勒因子线性拟合与 $y = x$ 的等值线非常接近, 说明我们估算的 $q_2 = 2 + \alpha$ 和Xie93光学波段估算的多普勒因子非常相似, 说明该方法描述BL Lac的光学辐射和喷流特征是可靠的。更大的样本数据会减少样本的偏差, 以后可以扩充数据样本以获得更准

确的光学波段多普勒因子, 这将有助于我们理解耀变体的喷流辐射特征和本征性质。

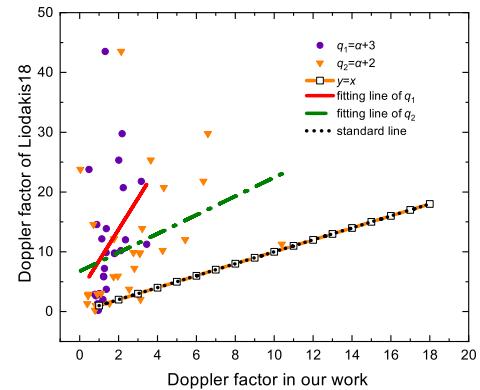


图 6 本样本的多普勒因子(δ_{TW})与Liodakis等^[7]的多普勒因子(δ_{L18})的比较, 标签与图5一致。球状喷流($q_1 = 3 + \alpha$)模型下的多普勒因子与Liodakis18多普勒因子的线性拟合结果为 $r = 0.362$, $p = 0.057$; 连续喷流($q_2 = 2 + \alpha$)模型的多普勒因子与Liodakis18多普勒因子的线性拟合结果为 $r = 0.356$, $p = 0.062$ 。正方形和点线为 $y = x$ 的等值线。

Fig. 6 The comparison between the Doppler factor in this work (δ_{TW}) and the Doppler factor from Liodakis et al.^[7] (δ_{L18}), the labels are same as Fig. 5. The coefficient $r = 0.362$ and probability $p = 0.057$ are for the linear regression between our Doppler factor in case of the spherical jet ($q_1 = 3 + \alpha$) model and Doppler factor from Liodakis18. $r = 0.356$ and $p = 0.062$ are for the linear regression between our Doppler factor in case of the continuous jet ($q_2 = 2 + \alpha$) model and Doppler factor from Liodakis18. The square and the dotted line are the contour line of $y = x$.

致谢 本文感谢广州市天文观测与技术重点实验室的支持。叶旭鸿感谢来自中国国家留学基金委的支持和资助。黄家伟感谢中国科学院上海天文台郑振亚研究员及吉祥博士、林如秋博士、朱帅儒博士的悉心指导。

参 考 文 献

- [1] 黄克谅. 类星体与活动星系核. 北京: 中国科学技术出版社, 2005, 491: 189
- [2] Urry C M, Padovani P. PASP, 1995, 107: 803
- [3] 谢光中, 刘碧芳, 刘富坤, 等. 天文学进展, 1991, 9: 201
- [4] Agarwal S, Banerjee B, Shukla A, et al. MNRAS, 2023, 521: 53
- [5] Kramarenko I G, Pushkarev A B, Kovalev Y Y, et al. MNRAS, 2022, 510: 469

- [6] Liidakis I, Marscher A P, Agudo I, et al. *Nature*, 2022, 611: 677
- [7] Liidakis I, Talvikki H, Huppenkothen D, et al. *ApJ*, 2018, 866: 137
- [8] Pei Z Y, Fan J H, Bastieri D, et al. *RAA*, 2019, 19: 70
- [9] Zhang L X, Chen S N, Xian H B, et al. *ApJ*, 2020, 897: 10
- [10] Ajello M, Baldini L, Ballet J, et al. *ApJS*, 2022, 263: 24
- [11] Zhang L X, Liu Y, Fan J H. *ApJ*, 2022, 935: 19
- [12] Xiao H B, Ouyang Z H, Zhang L X, et al. *ApJ*, 2022, 925: 40
- [13] Ghisellini G, Padovani P, Celotti A, et al. *ApJ*, 1993, 407: 65
- [14] Lind K R, Blandford R D. *ApJ*, 1985, 295: 358
- [15] Ye X H, Zeng X T, Yang W X, et al. *Ap&SS*, 2021, 366: 110
- [16] Ye X H, Fan J H. *PASJ*, 2021, 73: 775
- [17] Hovatta T, Valtaoja E, Tornikoski M, et al. *A&A*, 2009, 494: 527
- [18] Nemmen R S, Georganopoulos M, Guiriec S, et al. *Science*, 2012, 338: 14
- [19] 叶旭鸿. BL Lac天体的喷流效应研究. 广州: 广州大学, 2022: 12
- [20] Fanaroff B L, Riley J M. *MNRAS*, 1974, 167: 31
- [21] Laing R A, Riley J M, Longair M S. *MNRAS*, 1983, 204: 151
- [22] Xie G Z, Zhang Y H, Fan J H, et al. *A&A*, 1993, 278: 6
- [23] Arshakian T G, Torrealba J, Chavushyan V H, et al. *A&A*, 2010, 520: 62
- [24] Verdoes Kleijn G A, Baum S A, De Zeeuw P T, et al. *AJ*, 2002, 123: 1334
- [25] Urry C M, Padovani P, Stickel M. *ApJ*, 1991, 382: 501
- [26] Bai J M, Lee M G. *ApJ*, 2001, 548: 244
- [27] Fan J H, Okudaira A, LIN R G, et al. *AP&SS*, 1997, 253: 275
- [28] Zeng X T, Zhang Z, Pei Z Y, et al. *Ap&SS*, 2022, 367: 36
- [29] Owen F N, Ledlow M J, Keel W C. *AJ*, 1996, 111: 53
- [30] Falomo R, Kotilainen J K. *A&A*, 1999, 352: 85
- [31] 谢照华, 张雄, 刘洪涛, 等. 天文研究与技术, 2005, 2: 209
- [32] Véron-Cetty M P, Véron P. *A&A*, 2010, 518: A10
- [33] Zirbel E L, Baum S A. *ApJ*, 1995, 448: 540
- [34] 方励之, 周又元, 程福臻, 等. 天文学报, 1976, 17: 134
- [35] Lin C, Fan J H, Xiao H B. *RAA*, 2017, 17: 66
- [36] Mead A R G, Ballard K R, Brand P W J L, et al. *A&AS*, 1990, 83: 183
- [37] Xiao H B, Zhu J T, Fan J H, et al. *MNRAS*, 2022, 517: 3
- [38] Xie G Z, Liu F K, Liu B F, et al. *A&A*, 1991, 249: 65
- [39] Hyvönen T, Kotilainen J K, Falomo R, et al. *A&A*, 2007, 476: 2

Optical Doppler Factor Estimation for BL Lac

HUANG Jia-wei¹ PAN Shu-rong¹ WU Jian¹ YE Xu-hong² CAO Jian-hong¹
FAN Jun-hui^{3,4,5}

(1 Department of Physics and Material Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

(2 Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei", Universitàdi Padova, Padova 35131)

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

(4 Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, National Astronomical Science Data Center, Guangzhou 510006)

(5 Key Laboratory for Astronomical Observation and Technology, Higher Education School of Guangdong Province, Guangzhou 510006)

ABSTRACT BL Lacertae object (BL Lac), a subclass of Active Galactic Nucleus (AGN), exhibit extreme observational properties: such as high luminosity and polarization, rapid variability, superluminal motion, radio core dominance, and highly energetic emission. These observational properties are related to the beaming effect, which is quantified by Doppler factor. Doppler factor is helpful to understand the radiation physics and intrinsic characteristic of BL Lac. Based on the unified scheme of BL Lac and Fanaroff-Riley I/Fanaroff-Riley II (G), the author proposed that the distribution of intrinsic apparent magnitude vs redshift (Hubble diagram) for BL Lac should be similar to that of the observed apparent magnitude and redshift of FRI/FRII (G), and provided a method to estimate the optical Doppler factor of BL Lac. The researchers compared this Doppler factor estimation with the optical Doppler factor of the predecessor and found a close correlation between them. This result suggests that the method to estimate Doppler factor is reliable for depicting the beaming effect in the optical band of BL Lac.

Key words BL Lacertae objects: general, galaxies: active, galaxies: distances and redshifts, galaxies: jets