

文章编号: 1000-8349(2008)02-0184-08



Blazar 喷流节点运动视速度的统计研究

潘艳平, 白金明

(中国科学院 国家天文台 / 云南天文台, 昆明 650011)

摘要: VLBI 观测表明, TeV 伽马射线 Blazar(耀变体) 的喷流运动视速度远小于 MeV/GeV 伽马射线 Blazar, 然而 TeV 伽马射线辐射流量的快速变化却要求这些 Blazar 的相对论喷流速度与 MeV/GeV Blazar 的相当。对于这一矛盾, 目前有多种解释。为了检验这些模型, 我们收集了 VLBI 对 Blazar 喷流运动的监测数据, 样本包括 86 个 FSRQs(平谱射电类星体)、22 个 BL Lac 天体, 共 108 个 Blazar; 从统计上研究了, 该样本中各 Blazar 最大视速度喷流节点的位置与射电光度相关关系。结果表明, Blazar 最大视速度喷流节点的位置与射电光度有较强的相关关系, 随着 Blazar 射电光度的减小, 喷流中最大视速度 VLBI 节点的位置到 VLBI 核的距离逐渐变小。这意味着: TeV 伽马源(低光度 Blazar) 的喷流减速区距离 VLBI 核较近, 喷流从高能辐射区到 VLBI 可分辨尺度已经减速, 支持减速喷流模型对 TeV 伽马射线 Blazar 上述矛盾的解释。

关键词: 天体物理学; Blazar; 喷流; 视超光速运动

中图分类号: P157.6 **文献标识码:** A

1 引 言

Blazar 是射电噪活动星系核的一个子类, 包括平谱射电类星体 (FSRQ) 和 BL Lac 天体, 其主要观测特征是高光度、高偏振、快速光变、视超光速运动等。解释这些奇特性质的公认模型是相对论喷流模型, 最早由 Blandford 和 Rees 于 1978 年提出, 后来不断被发展和丰富。该模型认为: Blazar 核区喷流的速度是相对论性的(即接近光速), 且喷流对我们观测者视线的夹角较小, 从而使在喷流中产生的非热辐射被相对论多普勒效应聚束、放大, 在 Blazar 的辐射中占主导^[1]。Blazar 的能谱在 $\lg(\nu F_\nu) - \lg\nu$ 平面上具有两个峰, 第一个峰通常认为是相对论电子的同步辐射产生的, 第二个峰是相对论电子逆康普顿散射过程

收稿日期: 2007-05-01; 修回日期: 2007-05-28

产生的。根据辐射能谱中同步辐射峰频大小不同, BL Lac 天体分为 LBL(低峰频 BL Lac 天体) 和 HBL(高峰频 BL Lac 天体)^[2]。20 世纪 90 年代后期, 随着新的 BL Lac 天体的不断地被探测到, 人们发现 BL Lac 天体的峰频并非两极分化的, 而是连续分布的, 许多 BL Lac 天体的峰频位于 LBL 和 HBL 之间, 称为 IBL。

Blazar 喷流的视超光速运动最早在 20 世纪 70 年代被 VLBI 观测发现^[3]。这一现象可用相对论喷流模型很好地解释。根据相对论喷流模型, 喷流运动的视速度为

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

其中, β_{app} 为观测到的横向速度, $\beta = v/c$, v 为喷流物质运动的真实速度, θ 为喷流与视线的夹角。如果喷流速度接近光速, 即 $\beta \simeq 1$, 则

$$\beta_{\text{app}} = \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta}. \quad (2)$$

可见, 当喷流与视线的夹角 θ 较小(但不接近于零), $\beta_{\text{app}} > 1$, 即产生视超光速运动。由式(1)可以看出, 当 β 小, 即喷流速度小时, 视速度也较小。

Jiang 等人^[4] 研究发现, 绝大多数 EGRET 伽马射线源有较大的多普勒因子、较大的洛仑兹因子以及较小的观测角; 并且推导出的多普勒因子与伽马射线光度有相关性。Jorstad 等人^[5] 对大样本 Blazar 的 VLBI 监测发现, 大多数 Blazar 的喷流具有很大的视超光速运动速度, 有的达到几十倍光速, EGRET 伽马射线 (MeV/GeV) Blazar 喷流的视速度明显大于普通的射电源, VLBI 核的流量密度与伽马射线流量有一定的相关性, 但相关系数不大(为 0.45)。Kellermann 等人^[6] 对 110 个类星体、射电星系以及 BL Lac 天体的 VLBA 观测发现 EGRET 伽马射线源喷流节点的视速度大于非 EGRET 源, 与 Jiang 等人研究所得到的伽马射线源有较大的多普勒因子一致。他们还发现某些射电节点几乎没有运动, 有的甚至具有负视速度, 认为可能是由于内部激波的碰撞或喷流的弯曲所造成。

近几年来, 人们发现, 虽然大多数 Blazar 的喷流具有较大视超光速运动速度, 但是也有一些 Blazar, 尤其是 TeV 伽马射线 Blazar, 视超光速运动速度较小(约为 c), 或者几乎没有视超光速运动^[7-10], 与 MeV/GeV 伽马射线 Blazar 有比较大的视超光速运动形成鲜明的差别^[7,11]。然而, TeV 伽马射线 Blazar 的快速伽马射线光变却要求这些源的多普勒因子 $\delta = \sqrt{1 - \beta^2}/(1 - \beta \cos \theta)$ 与 MeV/GeV 源相当, 即相对论喷流速度相当, 因为 θ 相当。

为了解释这一矛盾, Piner 等人^[7] 提出 TeV 伽马射线 Blazar 的喷流从 TeV 辐射区到 pc 尺度已经经过减速(目前 VLBI 分辨率为 pc 尺度, 因而在更小尺度的部分观测上还不能分辨), 这种减速可能是由于喷流中的内激波机制^[12], 也可能是由于喷流与外部环境发生相互作用造成^[13]。Ghisellini 等人^[14] 用具有横向速度结构分布的喷流对这一矛盾也进行了解释。他们认为 TeV 伽马射线 Blazar 的喷流的结构是由快速的内层和慢速的外层组成, VLBI

观测到的是这些源慢速的外层喷流,从而表现为具有较小的视速度。这两种解释都有合理性,并能解释一些其他现象,但究竟哪种解释符合实际,目前还无定论。

针对这一问题,我们收集了 86 个 FSRQs、22 个 BL Lac 天体的 VLBI 监测数据,从统计上研究了该样本中各 Blazar 最大视速度喷流节点的位置与射电光度相关关系。

2 样 本

我们收集了 Kellermann 等人^[6]、Ojha 等人^[15]、Jorstad 等人^[5,16]、Homan 等人^[12]、Piner 等人^[7,13]对 Blazar 的多历元 VLBI 监测数据。Kellermann 等人^[6]用观测到的 VLBA 流量密度作为主要的选择标准,在统计分析上比较了样本 15 GHz 的光度函数,利用了 K-S 检验,可以作为完备 VLBA 射电巡天数据。在这些数据中,如果源没有给出红移或径向位置有很大的不确定性,其数据点我们没有考虑在内。如果没有给出节点的径向位置,把几个历元观测(对少于三个历元的数据没有采用)的平均值作为径向位置。这样,便得到了一个由 86 个 FSRQs、22 个 BL Lac 天体组成的样本(见表 1)。

表 1 每个源中喷流节点的特征

天 体	别名	类型	红移	子源	$\langle R \rangle$ /mas	距离 /pc	β_{app} /c	$S_{15\text{GHz}}$ /Jy
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
0003-066	NRAO 005	LBL	0.347	B	1.1	5.4	-1.1	
				C	3.0	14.7	0.3	2.84
				D	6.2	30.5	-0.3	
0016+731	Mrk 1501	Q	1.781	Bb	0.8	6.8	5.7	0.98
		0026+346	RG	Cb	12.2	75.8	4.7	0.65
E	14.7			91.4	-4.8			
F	15.8			98.2	-0.6			
G	18.2			113.1	0.5			
0035+413		Q	1.353	Bb	1.5	12.61	6.3	0.53
0055+300	NGC 315	RG	0.016 5	Bb	0.9	0.3	0.16	0.82
				C	3.7	1.2	0.0	
				D	6.0	2.0	0.03	
0106+013		Q	2.107	Bb	2.4	20.0	23.3	2.97
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

我们对原始数据中的一些量进行了转换,统一把哈勃常数 $H_0 = 70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$, 暗物质项 $\Omega_M = 0.3$, 暗能量项 $\Omega_\Lambda = 0.7$ 。在宇宙学模型中,当 $\Omega_k = 0$ 时,即为平坦的宇宙时,光

度距离的表达式为^[17]:

$$D_L = \frac{c(1+z)}{H_0} \cdot E(\Omega_M, \Omega_\Lambda, z), \quad (3)$$

式中 D_L 为光度距离, c 为光速, z 为红移, $\Omega_M = 0.3$ 为暗物质项, $\Omega_\Lambda = 0.7$ 为暗能量项, $H_0 = 70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ 为哈勃常数. $E(\Omega_M, \Omega_\Lambda, z)$ 与宇宙中的暗物质项、暗能量项和红移有关:

$$E(\Omega_M, \Omega_\Lambda, z) = \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{(1+z')^2(1+\Omega_M z') - z'(2+z')\Omega_\Lambda}}. \quad (4)$$

角直径距离 D_A 与 D_L 的关系为:

$$D_A = \frac{D_L}{(1+z)^2}. \quad (5)$$

射电节点到其核心的距离:

$$D = D_A \langle R \rangle, \quad (6)$$

式中 $\langle R \rangle$ 为射电节点相对于核心的平均张角 (表 1 中第 6 列)。

因此只要给出红移 z , 我们便可计算出射电节点到核心的距离 D 。在 Ojha 等人^[15] 中的数据, 没有给出喷流节点运动的视速度, 我们根据公式^[18]:

$$\beta_{\text{app}} = \frac{\mu D_L}{c(1+z)}, \quad (7)$$

计算出视速度。其中, D_L 为上面的光度距离, μ 为径向角速度, z 为红移, c 为光速。

表 1 列出了一些源的数据 (由于数据太多, 故只列了一部分)。其中, 第 1 列为各源的 IAU 名; 第 2 列为常用名; 第 3 列为光学类型 (按照 Nieppola 等人^[19] 2006 年的星表划分); 第 4 列为源的红移; 第 5 列为各源喷流中的 VLBI 节点名; 第 6 列为喷流节点相对于 VLBI 核的平均角距离 (单位: mas); 第 7 列为喷流节点在天球平面上到 VLBI 核的投影距离 (单位: pc); 第 8 列为各节点运动的视速度 (单位: 光速 c); 第 9 列为各源的 15 GHz 流量 (单位: Jy)。

3 统计分析

利用表 1 中的数据, 我们作了各 VLBI 节点运动的视速度与各节点到 VLBI 核在天球平面上的投影距离的关系图 (见图 1(a)、(b)、(c)、(d))。虽然历史上曾认为 HBL 与 LBL 观测特征上的差别是由于 HBL 喷流视角比 LBL 大造成的, 但 20 世纪 90 年代后期以来, 人们逐渐认识到 HBL 与 LBL 视角都比较小, Blazar 各子类 (FSRQ、LBL、IBL 和 HBL) 的喷流轴向与视向夹角分布相同, 因此统计上, Blazar 各子类的喷流节点在天球平面上的投影距离的分布, 能代表各子类的喷流节点到 VLBI 核的真实距离分布 (以下的“距离”都指“在天球平面上的投影距离”)。

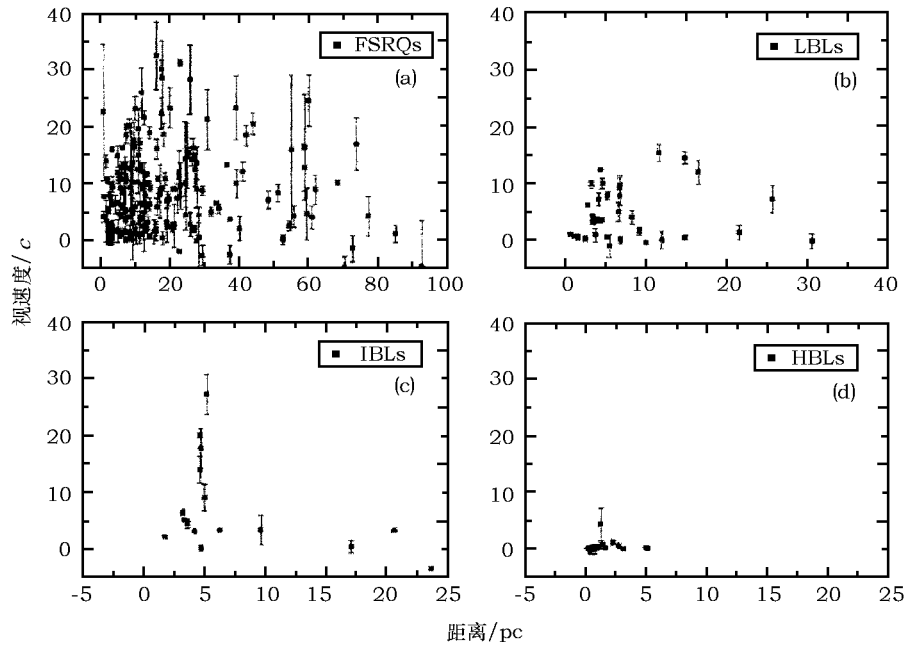


图 1 节点的视速度与其到核心的距离的关系

随着 Blazar 子类射电光度的逐渐减小，加速区域有逐渐减小的趋势

由图 2 可以看出，FSRQ、LBL、IBL 的节点运动随着节点与 VLBI 核之间距离的增大，存在一个加速和减速的趋势，但不同的子类加速区长度不同，FSRQs 加速区长达 20 pc 左右；LBL 次之，加速区长约 10 pc；IBL 的加速区长只有 5 pc 左右；从 FSRQ 到 LBL 到 IBL，喷流节点减速区距离 VLBI 核越来越远。由于从 FSRQ 到 LBL 到 IBL，平均射电光度

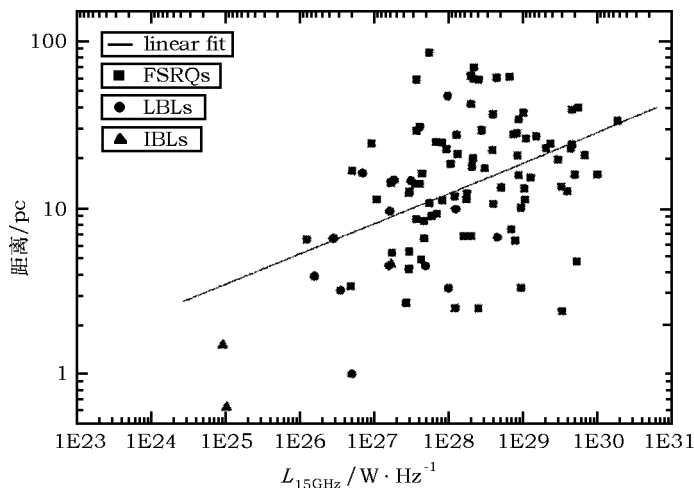


图 2 每个源的最大速度的节点到核心距离与 15GHz 光度的关系

此距离与源的 15 GHz 光度存在正相关。直线拟合为： $Y = -4.0 + 0.18X$ ，相关系数 $R=0.45$ ， $P < 0.0001$

逐渐变小, 我们分析了样本中各 Blazar 的喷流最大速度位置与射电光度的相关关系 (见图 2), 线性回归方程为

$$Y = -4.0 + 0.18X . \quad (8)$$

由图 2 可以看出, 样本中, 喷流最大速度位置与射电光度有较强的相关关系, 喷流最大速度位置随射电光度变小而变小。换句话说, 对于 FSRQ、LBL 和 IBL, 它们的喷流减速区到 VLBI 核的距离随射电光度变小而变近。

由图 1(d) 可以看出, 对于 HBL, 其视速度随距离没有明显的加速和减速趋势, 但视速度明显小于其他 Blazar。因为从 FSRQ 到 LBL 到 IBL 再到 HBL, 平均射电光度逐渐变小, 所以 HBL 很可能满足上述的喷流减速区到 VLBI 核的距离随射电光度变小而变近的趋势, 只是由于 HBL 的射电光度最小, 其加速区位于 VLBI 目前不可分辨的尺度内, 也就是说 HBL 喷流在 VLBI 目前不可分辨的尺度上已经减速, 从而视速度明显小于其他 Blazar。根据方程 (8) 和图 2, 我们可以看出, HBL (本文样本中都是 TeV Blazar, 射电光度小于 2×10^{24} W/Hz) 的最大速度位置距离 VLBI 核小于约 2 pc。

4 讨论和结论

Jorstad 等人^[12]对 10 个射电源中的喷流节点进行了多历元的 VLBI 监测, 发现有 22 个喷流节点有加速过程 (见表 2)。我们对这些节点的情况进行了分析, 发现除了射电星系的 3 个节点, 其余的 19 个节点中有 17 个 (89%) 位于其加速区域内 (表 2 第 6 列), 射电类星体的 14 个节点中有 12 个位于 20 pc 以内, LBL 的所有节点都位于 10 pc 以内。这表明我们统计分析结果: Blazar 喷流的加速区随射电光度变小而变短, 而喷流减速区到 VLBI 核的距离随射电光度变小而变近, 是可信的。

正如引言中所述, VLBI 观测表明, TeV 伽马射线 Blazar 的喷流运动视速度远小于 MeV/GeV 伽马射线 Blazar, 然而快速光变却要求 TeV 伽马射线 Blazar 的相对论喷流速度与 MeV/GeV 源相当。TeV 伽马射线 Blazar 都是 HBL, 它们的射电光度都较小 (小于 2×10^{24} W/Hz), 根据我们在第 3 章所作出的分析可知: 这些源的喷流最大视速度位置距离 VLBI 核小于约 2 pc。由于本文的样本中有不少非 HBL 源 (27 个源) 只测得一个节点的视速度, 这些源的最大视速度节点很可能位于这些节点与 VLBI 核之间, 在图 2 中位于对应点的下方, 也就是说真实的拟合线应下移, 从而 HBL 的喷流最大视速度位置距离 VLBI 核可能远小于约 2 pc, 即位于目前 VLBI 不可分辨的尺度以内。这样, HBL 的喷流在目前 VLBI 可分辨的尺度上很可能已经减速, 而它们的伽马射线辐射区很可能在目前 VLBI 不可分辨的尺度以内, 从而产生了伽马观测和 VLBI 观测对喷流速度要求不一致的矛盾, 支持 Piner 等人^[7]减速喷流模型对这一矛盾的解释。

表 2 节点的加速运动

天体	红移	光学分类	子源	$\langle R \rangle$ /mas	距离 /pc	$\dot{\mu}_{\parallel}$ /mas·a ⁻²	$\dot{\mu}_{\perp}$ /mas·a ⁻²
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
0420-014	0.915	Q	B1	0.32	3.55	0.07	0.02
3C 111	0.048	RG	c1	4.38	3.98	-0.22	-0.26
3C 120	0.033	RG	o1	3.28	2.06	0.29	0.16
			o2	1.85	1.16	-0.66	-0.12
0528+134	2.06	Q	B8	0.13	2.03	0.1	-0.07
			B6	0.34	5.32	0.06	-0.17
			B4	0.39	6.1	0.11	-0.09
3C 273	0.158	Q	B1	1.61	4.55	-0.14	0.1
			B2	1.16	3.28	0.04	0.26
3C 279	0.538	Q	C8	0.81	6.37	0.07	0.02
			C4	3.54	27.85	0.02	-0.05
3C 345	0.595	Q	C11	0.69	5.83	0.22	0.19
			C9	1.23	10.39	0.11	-0.08
			C8	1.54	13.01	-0.20	0.23
			C7	2.89	24.42	-0.07	-0.01
1803+784	0.68	LBL	B2	0.38	3.51	0.3	0.10
			B1	0.7	6.47	0.52	-0.29
BL Lac	0.069	LBL	S13	2.27	2.93	0.21	0.76
			S11	1.58	2.04	0.07	-0.62
			S10	2.2	2.84	0.32	0.71
3C 454.3	0.859	Q	B6	0.31	3.31	0.37	0.24
			B4	0.61	6.52	0.04	0.09

参考文献:

- [1] Urry C M, Padovani P. *PASP*, 1995, 107: 803
- [2] Padovani P, Giommi P. *ApJ*, 1995, 444: 567
- [3] Cohen M H, Linfield R P, Moffet A T, et al. *Nature*, 1977, 268: 405
- [4] Jiang D R, Cao X W, Hong X Y. *ApJ*, 1998, 494: 139
- [5] Jorstad S G, Marscher A P, Mattox J R, et al. *ApJS*, 2001, 134: 181
- [6] Kellermann K L, Lister M L, Homan D C. *ApJ*, 2004, 609: 539
- [7] Piner B G, Edwards P G. *ApJ*, 2004, 600: 115
- [8] Edwards P G, Piner B G. *ApJ*, 2002, 579: L67
- [9] Piner B G, Unwin S C, Wehrle A E, et al. *ApJ*, 1999, 525: 176
- [10] Giroletti M, Giovannini G, Feretti L M, et al. *ApJ*, 2004, 600: 127

- [11] Jorstad S G, Marscher A P, Lister M L, et al. *AJ*, 2005, 130: 1418
- [12] Homan D C, Ojha R, Wardle J F C, et al. *ApJ*, 2001, 549: 840
- [13] Piner B G, Bhattarai D, Edwards P G, et al. *ASPC*, 2006, 350: 163
- [14] Ghisellini G, Tavecchio F, Chiaberge M. *A&A*, 2005, 432: 401
- [15] Ojha R, Homan D C, Roberts D H, et al. *ApJS*, 2004, 150: 187
- [16] Jorstad S G, Marscher A P, et al. *ASPC*, 2003, 299: 111
- [17] 李宗伟, 肖兴华. *天体物理学*. 北京: 高等教育出版社, 2000: 445
- [18] Caproni A, Abraham Z. *ApJ*, 2004, 602: 625
- [19] Nieppola E, Tornikoski M, Valtaoja E, et al. *A&A*, 2006, 445: 441

Studying the Apparent Velocity of Blazar jet Statistically

PAN Yan-ping, BAI Jin-ming

(*National Astronomical Observatories / Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China*)

Abstract: VLBI observations show that the radio knots of TeV gamma-ray Blazar jets move much more slowly than MeV/GeV gamma-ray Blazar jets. But their violent variations of TeV fluxes require Lorentz factors of their relativistic jets similar to those of MeV/GeV Blazars. There are several models to explain this problem, for example, the deceleration jet model in which it is assumed that radio knots decelerate from the sub-parsec scale to the parsec scale in the jet, and the transverse structure model in which it is assumed that the jet is not a symmetrical structure but a transverse structure.

In order to test these models, we collect the VLBI observations for a sample of Blazars. Totally, the sample consists of 108 Blazars (86 FSRQs and 22 BL Lac objects). We calculate the apparent speed of all radio knots in the sample and statistically study the locations of knots with the maximum apparent speed of each Blazar in the sample. The results show that the location of the radio knots with the maximum apparent speed decreases with the decrease of the radio luminosity of Blazars, from FSRQs to LBLs to IBLs to HBLs, with the radio luminosity decreases, the distance of the radio knots with the maximum apparent speed from the core in the plane of sky gets shorter and shorter, implying that HBL jets have the shortest accelerate region. That is to say, the jet decelerating region locates near the core in Blazar with low luminosity, and the jet has decelerated from TeV-emitting region to the scale that VLBI can resolve, consistent with the deceleration model.

Key words: astrophysics; Blazar; apparent superluminal motion