

视超光速射电源

沈志强

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

提 要

视超光速射电源的发现被认为是用 VLBI 技术获得的一项重大天体物理成就。本文较系统地叙述了对该类源的研究进展, 内容包括: 视超光速源的发现和证认方法、视超光速源的观测特征、对视超光速源的理论解释及其遇到的困难、一些著名的巡天观测和统计工作以及对90年代视超光速源研究前景的简要展望。

一、引 言

1971年, 人们首次报道^[1]用 VLBI 观测, 在类星体 3C279 中, 发现了视超光速运动现象。

在过去的 20 余年间, 对视超光速射电源的研究, 无论是在理论模型方面, 还是在观测统计方面, 都已取得很大进展。这一研究, 由早期的着重在观测上证实射电源中视超光速运动的真实存在而发展到今天的探究天体物理中许多悬而未决的问题, 吸引着世界各地的天文学家。围绕着这一课题, 在不同的时期, 已举办过多次国际学术研讨会, 对每个研究阶段予以总结和评论^[2,3,4]。

本文力图就视超光速源的发现、证认及其观测特征和理论解释, 以及一些著名的 VLBI 巡天与统计工作逐一进行介绍和评述, 最后对视超光速源的研究前景作个概述。

为了叙述的简便, 作者采用吴盛殷和朱含枢^[5,6]的写法, 文中以后都将视超光速源略写为 SLS。

二、SLS 的发现

在 1970—1971 年间发现的视超光速源是利用 VLBI 技术获得的一大成果, 它证实了 Rees^[7]在 1966 年提出的预言: 对遥远的观测者而言, 以相对论性速度朝向某一适当方向运动的天体, 其视横向速度是可以超过光速的。

表 1 中列出了 SLS 的发现及证实前后的一些有关事件。关于这些事件的详细内容, 可参阅所给出的文献。

表 1 视超光速源的发现及证实

时间	事件及其主要内容	参考文献
1965	发现类星体 3C273 的流量有快速变化现象, 对同步加速辐射提出质疑(逆康普顿灾变)。	[8]
1966	预言以相对论性速度膨胀的射电源, 可被观测到视超光速运动现象。	[7]
1967	独立本振、磁带记录的 VLBI 实验在加拿大和美国分别获得成功。	[9, 10, 11]
1968—1970	用 VLBI 观测, 首次发现一些源的结构变化*。	[12]
1970—1971	发现类星体 3C273 和 3C279 都不是点源, 可见度分布显示它们具有双源的特征。	[13]
	首次报道 VLBI 观测发现, 3C279 的子源分离速度是视超光速的。	[1, 14]
1977—1978	发展了自校准成图方法, 获得第一张射电源的混合图。	[15, 16]
1979	提出相对论喷流模型。	[17]
1981	获得第一张视超光速源(3C273)的完整图像, 令人信服地说明了视超光速源的存在。	[18]

* 对 3C279, 将可见度变化与总的流量强度变化结合起来分析, 发现在 1969 年观测到的一个分量至少以 2 倍光速的速度在膨胀。这一实验, 在事后被认为是视超光速膨胀的第一个干涉测量^[19]。

三、SLS 的证认

1. SLS 的定义

早期的研究者 Cohen 等定义^[2]: 视超光速运动是用来描述视横向速度超过光速时射电源的结构变化, SLS 是指那些被观测到视超光速运动的源。

2. SLS 的证认

(1) β_{app} 的计算 由定义, 证认 SLS 的关键是要确定源的视横向速度 v_{app} 是否大于光速 c , 即计算 $\beta_{app} = v_{app}/c$ 是否大于 1。

在标准的 Friedmann 宇宙学模型下, 若已知源的红移值 Z 和自行值 μ , 则可求出 β_{app} :

$$\beta_{app} = \mu \times 47.4 \times \frac{Zq_0 + (q_0 - 1)(\sqrt{1 + 2q_0Z} - 1)}{hq_0^2(1 + Z)} \quad (1)$$

式中 μ 的单位是 mas/yr, h 是为表征哈勃常数 H_0 的不确定性而引入的无量纲参数, 而 q_0 是宇宙学中的减速因子, 其取值尚未定, 0.5 和 0.05 是 SLS 文献中常选用的值。可以检验, 对相同的 μ 和 Z , 总有

$$\beta_{app}(q_0 = 0.05) > \beta_{app}(q_0 = 0.5) \quad (2)$$

因此, 本文计算 β_{app} 时均选用 $q_0 = 0.5$, 这时(1)式可简化为:

$$\beta_{app} = \mu \times \frac{94.8}{h} \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + Z}}\right) \quad (3)$$

(2) μ 的测量法 常用的方法有模型拟合法与混合成图法。模型拟合法是设法使用简单的模型分量拟合测得的可见度的幅度变化, 由不同历元模型分量间距的改变便可定出其间的相对运动。1971 年发现第一颗 SLS 所用的方法就是模型拟合。到 1977 年, 获得第一张混合图后^[15], 混合成图法开始成为测量自行的主要手段, 通过比较不同历元的 VLBI 观测所

得的等强度图上同一分量的运动就可测定自行。目前, 更为常用的测自行方法是上述两种方法的混合使用。

近来, 还有的研究者^[20-22]采用一种差分图来定自行。差分图是对两个历元的 VLBI 观测得到的 (u, v) 数据进行相减, 用其剩余的差分数据作常规成图后获得的等强度图, 在该图上可以看出源结构的变化。在利用差分图数据测量其中显现的运动时, 需用到一个所谓的差分—梯度图(Difference—Gradient Graph)(见图 1)。这里的差分指的是差分图数据中某节(knot)四周的差分元(cell)的流量值, 而梯度则是指较后的一次观测数据与前述差分元对应的数据点在东西方向上的两个邻近数据元间的流量差。对这些数据点用直线拟合得到的斜率就给出了两历元间该节所运动的距离, 自然也就求出了该节的自行。

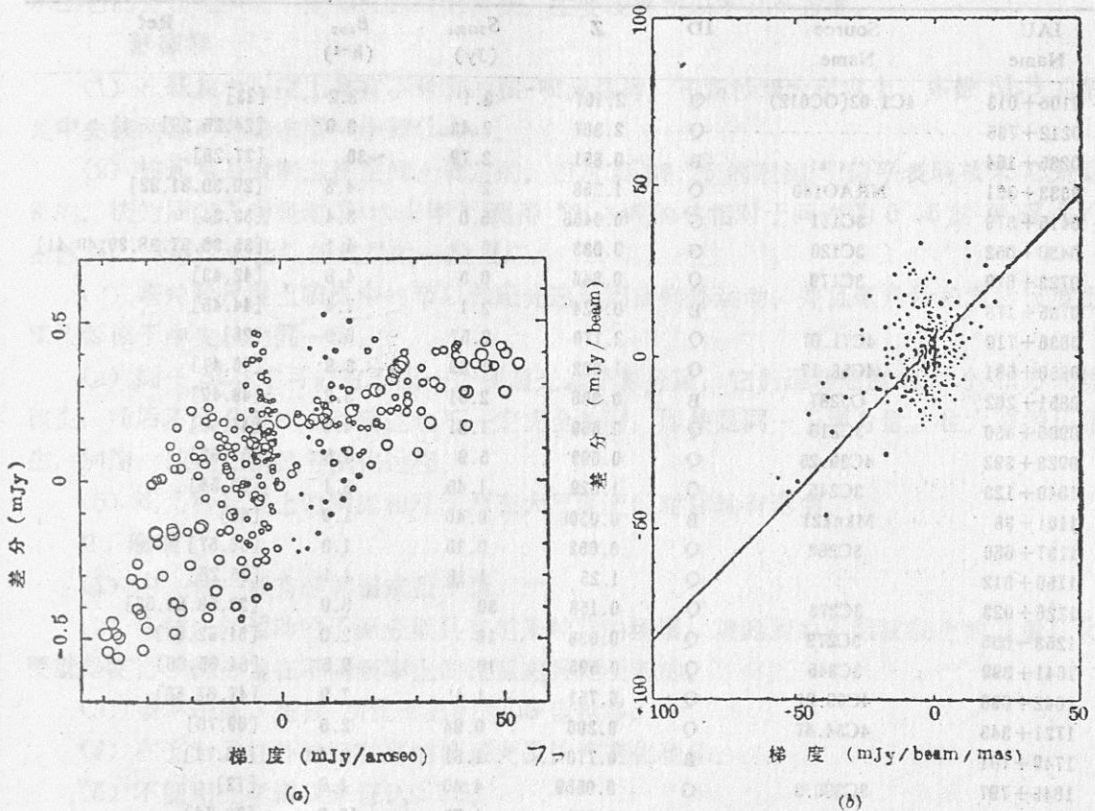


图 1 差分—梯度图
(a)3C120^[21] (b)3C273^[22]

该方法是对用模型拟合法和混合成图法定自行的补充, 在讨论距核较远处的视超光速运动时较为有用。Walker 等^[21]用此法定出 3C120 在距核约 2kpc 处仍存在视超光速运动, $\beta_{\text{app}} = (3.7 \pm 1.2)h^{-1}$ (见图 1(a))。而 Davis 等^[22]则求出在离核 120pc 处, 3C273 仍有 $\beta_{\text{app}} = (2.2 \pm 0.3)h^{-1}$ (见图 1(b))。

(3) 讨论 为了提高 SLS 证认的可靠性, 对 VLBI 观测有如下要求:

(i) 地面的观测必须是多历元(至少两历元)VLBI 观测, 且要求不同历元的时间间隔取

足够长使得可测出自行, 同时又要足够短以利于子源的证认, 还要求不同历元的观测最好能有相同的 (u, v) 覆盖及动态范围。

(ii) 在被观测期间, 射电源必须是活动的, 但变化相对于监测周期又不宜太快。其中作为核的分量不能太强, 否则因受现有动态范围的限制, 会妨碍别的较弱子源分量的确认; 而别的子源分量不能太平滑, 应有较明显的峰值存在, 以利于不同历元间的相互比较。

3. SLS 表

表 2 给出了已测得 $\beta_{app}(q_0 = 0.5) > 1$ 的 32 颗 SLS。对每颗 SLS 的详尽描述可参阅表 2 中给出的文献及文献中所引用的参考资料。

表 2 视超光速源表

IAU Name	Source Name	ID	Z	S_{5GHz} (Jy)	β_{app} (h^{-1})	Ref
0106+013	4C1.02(OC012)	Q	2.107	3.1	8.2	[23]
0212+735		Q	2.367	2.43	3.9	[24,25,26]
0235+164		B	0.851	2.79	~30	[27,28]
0333+321	NRAO140	Q	1.258	2	4.8	[29,30,31,32]
0415+379	3C111	G	0.0458	5.0	3.4	[33,34]
0430+052	3C120	G	0.033	10	4.1	[35,36,37,38,39,40,41]
0723+679	3C179	Q	0.846	0.3	4.8	[42,43]
0735+178		B	0.424	2.1	7.4	[44,45]
0836+710	4C71.07	Q	2.170	2.57	6.3	[26]
0850+581	4C58.17	Q	1.322	1.39	3.9	[46,47]
0851+202	OJ287	B	0.306	2.61	3.2	[48,49]
0906+430	3C216	Q	0.669	1.81	4.9	[47,50]
0923+392	4C39.25	Q	0.699	5.9	3.5	[51,52]
1040+123	3C245	Q	1.029	1.45	3.1	[53,54]
1101+38	Mkn421	B	0.0308	0.46	1.9	[55]
1137+660	3C263	Q	0.652	0.15	1.3	[56,57]
1150+812		Q	1.25	1.18	4.1	[25,26]
1226+023	3C273	Q	0.158	30	8.0	[22,58,59,60]
1253-055	3C279	Q	0.538	16	2.0	[61,62,63]
1641+399	3C345	Q	0.595	10	9.5	[64,65,66]
1642+690	4C69.21	Q	0.751	1.4	7.9	[47,67,68]
1721+343	4C34.47	Q	0.206	0.94	2.5	[69,70]
1749+701		B	0.770	1.81	2.4	[26,71]
1845+797	3C390.3	G	0.0569	4.45	1.9	[72]
1901+319	3C395	Q	0.635	1.75	13.2	[73,74]
1928+738	4C73.18	Q	0.302	3.23	7.0	[26,47,75]
1951+498		Q	0.466		1.3	[76]
2007+777		B	0.342	1.26	3.9	[26,71]
2200+420	BL Lac	B	0.0695	5	3.7	[77,78,79]
2223-052	3C446	B	1.404	5	3.4	[80,81]
2230+114	CTA102	Q	1.037	3.65	<14.2	[82,83]
2251+158	3C454.3	Q	0.859	12	8.8	[84,85]

表 2 中, ID 是指源的光学证认体, B、G 和 Q 分别代表蝎虎 BL 型天体、射电星系和类星体; Z 是源的红移量; S_{5GHz} 表示该源在 5GHz 时的流量值, 对多数源而言, 该值是变化

的; β_{app} 给出了 q_0 取 0.5 时子源的分离速度, 单位是 h^{-1} , 若有多个子源分量的分离速度是超过光速的, 表 2 只给出了最大的; 所有前述参量值都可在 Ref 一栏中给出的参考文献中查到。

除了表 2 中给出的 SLS 外, 还有些尚需进一步观测证实的候选 SLS, 它们是 0454 + 844^[80], 0538 + 498(3C147)^[15,87,88] 和 1823 + 568^[86] 等。

四、SLS 的观测特征

表 2 中列出的 SLS, 具有各自的形态和特征, 对这类源的长期观测、分析和比较, 揭示出它们普遍地具有一些相似的观测特征, 主要表现在以下几个方面。

1. 形态学

(1) 在毫角秒尺度上具有不对称的核-喷流结构, 在角秒级大尺度上, 多数 SLS 的形态是中央核两侧对称分布着一个瓣(lobe)。

(2) 核通常是致密且在空间上固定的。但对 4C39.25 的观测^[89]似乎表明核未必是最致密的。核的固定不动是对 Bartel 等^[90]测得“3C345 的核相对于间隔为 $0^\circ.5$ 的更遥远的致密源 NRA 0512 静止”的结果的一般推广。

(3) 毫角秒尺度上喷流中的节以视超光速远离核向外运动, 并且毫角秒和角秒尺度上的喷流都位于中央核的同一侧。

(4) 同一 SLS 中可以有不止一个视超光速子源分量, 它们运动速度的大小和方向均有改变; 前后不同分量的运动轨迹也不一定完全相同; 即使是同一子源分量, 也大都经历着产生、加速、减速和消退等演化过程。

(5) 毫角秒尺度上的喷流相对于源在大尺度上的对称轴有弯曲。

2. 频谱

(1) 中央核一般有逆转谱或是平谱。

(2) 离核向外运动的子源分量具有越来越陡的频谱, 观测到的不同波段上的流量变化主要就是陡谱子源分量在不同频率上的流量差异而引起的。

(3) 频率越高, 呈核-喷流形态的 SLS 也越多。

(4) 在光学及红外波段有高的偏振度及快速变化现象。

(5) 不能用光学谱线来证认 SLS。

3. 偏振

对 SLS 的 VLBI 偏振观测才开始不久^[91,92], 只对约 10 个 SLS 有偏振成图, 关于 SLS 偏振的一般结论还不多。

(1) SLS 中, 尤其是在喷流中, 有较高的线偏振度, 而圆偏振则很少。

(2) 当 SLS 中有新的子源分量出现时, 线偏振成分有明显增加。

(3) 在朝向观测者的喷流的反方向上观测到明显的强于喷流方向的消偏振效应。

4. 一些统计结果

(1) 已观测到的多数 SLS, $\beta_{app} \geq 3.0h^{-1}$,

- (2) 核优势源的平均视超光速速度($\bar{\beta}_{app} \approx 5.0h^{-1}$)是大于瓣优势源的($\beta_{app} \approx 2.7h^{-1}$)。
- (3) 在核优势源、致密陡谱源及经典双源(三重源)中都观测到 SLS, 但从未在致密双源中找到过 SLS。
- (4) 只观测到视超光速膨胀而没有收缩。
- (5) SLS 的 β_{app} 与其核在 10GHz 的谱功率有关联。
- (6) 随着红移量的增加, 自行值呈预期的下降。

至此, 我们总结了 SLS 在形态、频谱及偏振方面的观测特征, 并给出了一些统计性的结论。对于某些 SLS(如 3C454.3 和 4C39.25 等)中的特殊情形, 可参阅表 2 Ref 栏中所给的文献。下面简要介绍一下解释 SLS 的理论模型。

五、SLS 的理论模型

自 SLS 被发现以来, 人们已经提出了各种各样的理论模型^[93]。发展到今天, 较为大家普遍接受的一种理论解释是相对论喷流模型。

1. 相对论喷流模型

这一模型是由 Rees^[7,94]首先提出, Blandford 和 König^[17]将其发展成现在的相对论喷流模型。

由此模型, 观测者看到的喷流的视横向速度 β_{app} 与其真实运动速度 $\beta = v/c$ 之间有如下关系:

$$\beta_{app} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} \quad (4)$$

其中 θ 是喷流方向与观测者视线的夹角。

对公式(4)的分析、讨论和运用, 几乎在任何一篇论及 SLS 模型的文献中可找到, 如文献[6]和[93]等, 本文不再赘述。这里, 主要罗列些该模型所能解释的 SLS 的观测现象, 或者说是支持相对论喷流模型的证据, 而不叙及具体的解释细节。它们是:

- (1) 给出存在视超光速运动($\beta_{app} > 1$)的自然解释。
- (2) 多数 SLS 有 VLBI 单边喷流。
- (3) 朝向观测者的喷射物质有较高的视光度(即多普勒增强效应)。
- (4) 观测到较高的线偏振, 而圆偏振则很小, 近乎没有。
- (5) 在瓣优势源中观测到消偏振的不对称性^[95,96]; 与大尺度喷流同侧的法拉弟消偏振较另一侧要小。
- (6) 观测到的 X 射线辐射比理论预期值低。

2. 相对论喷流模型的困难

相对论喷流模型确已取得较大的成功, 但还有一些尚未克服的困难。归纳起来, 主要是以下几个问题:

- (1) SLS 四周的延伸结构太大^[48,97-100]。
- (2) 喷流的弯曲^[101]。中央发动机的轴进动, 源与外部环境介质作用及投影效应等都还

不能给出令人信服的解释。

(3) 喷流相对论性速度的减速。在 pc—kpc 尺度上喷流的单侧连续性^[102]要求大尺度喷流也是相对论性的, 但这与观测结果不符。

(4) 在强射电源中观测到有双边喷流的 SLS 太少^[103]。

这些问题说明简单的相对论喷流模型需作重大的修改^[103], 人们也一直在试图发展更完善的模型, 寻求一种更具普遍性的理论解释。这样的工作一直在进行中^[101, 104-108]。SLS 理论研究的最终目的是将对 SLS 的认识纳入到对活动星系核的理论解释之中, 具体的研究方法包括喷流中激波的数值模拟等, 可参阅有关的文献。

六、SLS 的巡天观测

在已证实的 SLS 中, 有不少的 SLS 是通过巡天观测发现的。随着 SLS 研究的进展, SLS 的巡天工作正日益显出其重要性。无论是对一些典型的 SLS 的分析和比较, 还是对 SLS 的统计研究, 都需要有大的 SLS 样本。此外, 对 SLS 理论模型的检验也要求作大样本的巡天观测, 系统的巡天对决定视超光速运动的发生频率及速度分布都是非常必要的。表 3 给出了一些著名的巡天观测。

表 3 著名的视超光速源巡天观测一览表

巡天观测组	巡天选源标准	观测源数	参考文献
Pearson, Readhead 等	$\delta > 35^\circ$ $ b > 10^\circ$ $S_{50\text{MHz}} \geq 1.3\text{Jy}$	65	[103, 109, 110, 111]
Witzel, Eckart 等	$\delta > 70^\circ$, $ b > 10^\circ$ $S_{50\text{MHz}} \geq 1.0\text{Jy}$ $\alpha_{(2.7-50\text{MHz})} > -0.5$	13	[26, 112, 113, 114, 115]
Hough, Readhead 等	$\delta > 10^\circ$ $ b > 10^\circ$ $S_{178\text{MHz}} > 10\text{Jy}$	26	[53, 54, 116]
Zensus, Porcas 等	$S_{966\text{MHz}} \geq 0.7\text{Jy}$ $m_b < 19$ 延伸大小 $> 10''$	30	[42, 56, 57, 76]
Fanti 等	致密陡谱源(CSS)	~10	[117, 118, 119, 120, 121, 122]
Wardle, Roberts 等	VLBI 偏振观测		[91, 92, 123]
Cohen, Wehrle 等	强变源	37	[124]

对表 3 中的巡天观测分别说明如下:

(1) Pearson 和 Readhead 等的 Caltech 巡天观测始于 1978 年, 其主要目的是寻找新的 SLS。他们对 65 颗源中已成图的 45 颗进行了形态分类^[125, 126], 发现其中 25 颗属非常致密的源或核-喷流型, 7 颗是陡谱致密源, 7 颗是致密双源, 6 颗尚无法分类。这 45 颗中, 有 8 颗 SLS(3C179, 4C58.17, 3C216, 3C273, 3C345, 4C69.21, 4C73.18 和 BL Lac), 约占成图样本的 18%。从 1984 年起 Lawrence 等^[127]对该巡天样本作光学观测, 测得其中约 54 颗源的红移值。

(2) Witzel 和 Eckart 等^[20]对 NRAO—MPfIR 5GHz 巡天中的 13 颗强平谱源进行多波段的 VLBI 观测, 发现在有重复观测的 12 颗源中, 有 6 颗是 SLS(0212+73, 0836+71, 1150+81, 1749+70, 1928+73 和 2007+77), 占样本的一半。

(3) Hough 和 Readhead 等^[53]从 1980 年开始观测 3CR 中的 26 颗双瓣类星体, 其中有 16 颗源的中央分量的 5GHz 流量大于 30mJy, 可进行 VLBI 成图分析。他们选择了 5GHz 核流量超过 75mJy 的 6 个源在 10.7GHz 上作 Mk III 成图观测, 发现的 SLS 有: 3C245 和 3C263, 占样本数的 33%。

(4) Zensus 和 Porcas 等^[76]的巡天样本与 Hough 和 Readhead 等的有重复。他们从 1982 年起开始研究英国 Jodrell Bank 966MHz 巡天的 68 个类星体中的 30 个, 这些都是较弱的源, 延伸结构超过 10"。观测发现, 29 个显示出对称的双源结构, 24 个在 5GHz 上有致密、平谱的中央分量。对其中 5 个源组成的子样本作 10.7GHz Mk III 成图观测, 发现 3C179、3C263 和 1951+498 等 3 颗 SLS, 占该子样本的 60%。

(5) Fanti 等^[128]对致密平谱源进行了长期的观测统计研究, 表明该类源属于真实的小尺寸射电源族, 可能处在致密双源和延展双源的中间演化阶段^[129]。其中 3C216 已被证实为 SLS, 3C147 还需进一步观测证实。

(6) Brandeis 大学的 Wardle 和 Roberts 等^[92]从 1981 年起就专门进行 VLBI 偏振观测的研究。偏振测量对确定源内的辐射机制、源结构、相对论性粒子谱及磁场等都是极为重要的。他们已对一些 SLS, 如 3C120, 3C345 和 OJ 287 等, 作过 VLBI 偏振成图。

(7) Cohen 和 Wehrle 等^[124]于 1984 年开始用 VLBI 观测 37 颗强变源, 目的在于确定这些源的自行 μ ^[130], 然后通过 μ - Z 关系图, 对宇宙学模型进行约束。在用满足 $S_{10.7\text{GHz}} > 9\text{Jy}$ 的 12 个源组成的子样本中, 至少有 9 颗 SLS(3C120, OJ287, 4C39.25, 3C273, 3C279, 3C345, BL Lac, 3C446 和 3C454.3), 占子样本的四分之三。

这里只是列举了部分著名的巡天观测, 还有不少巡天观测也值得一提, 如 Browne 等^[99,131]对 17 颗 SLS 的延展结构进行了观测统计; 而 Padrielli 等^[132-134]则对约 50 颗低频变源作了多频观测, 发现其中有些源, 显示从高频到低频变化的连续性, 是真正的内在性变源, 存在视超光速运动, 如 3C120, 3C179, 3C345 和 BL Lac 等。文献[136]中对 VLBI 巡天给出了较为详细的介绍。

七、SLS 的统计工作

随着已被证实为 SLS 的数目的增加, 对 SLS 的统计工作便成为可能, 且具有极重要的意义。近年来, 对 SLS 的出现频度、 β_{app} 与源的形态和红移 Z 的相互关系等的统计工作已在进行^[111,114]。下面主要介绍两个重要的统计工作。

1. β_{app} 和 P_{10} 的关系

吴盛殷等^[137]证明, 已知 SLS 的表观速度 β_{app} 与其核在 10GHz 的谱功率 P_{10} 是相关的。他们将 SLS 分为两类: “大”源和“小”源。“大”源指的是单侧延展瓣的外沿与核的距离大于 20kpc 的源, 而“小”源则是指无延展辐射或延展瓣外沿距核小于 20 kpc 的源, 尽管这

定义在某种程度上有很大的任意性,但它还是给出了对统计分析有用的分类。对 15 颗“大”源和 10 颗“小”源分别进行 β_{app} 和 P_{10} 的相关分析,得到:

$$\text{“大”源, } \log \beta_{\text{app}} = 0.1262 \log P_{10} - 2.688 \quad (5)$$

$$\text{“小”源, } \log \beta_{\text{app}} = 0.077 \log P_{10} - 1.598 \quad (6)$$

图 2 给出了这两种相关的示意图,实线是指对 15 颗“大”源的线性回归,虚线是对 10 颗“小”源的线性回归。

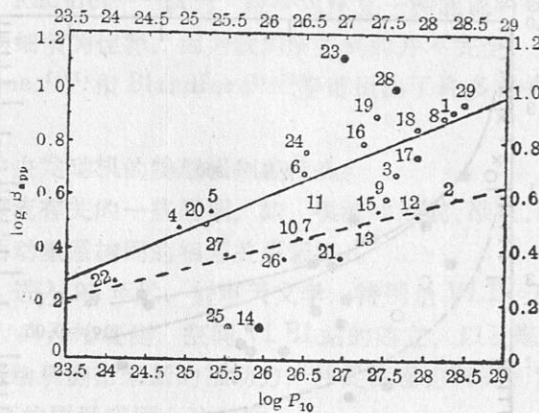


图 2 $\log \beta_{\text{app}} - \log P_{10}$

吴盛股等也用理论模型讨论了上述相关分析得到的结论,认为 $\log \beta_{\text{app}} - \log P_{10}$ 关系在一定程度上为 Z 是距离的标定及相对论喷流模型提供了某种支持,“小”源比“大”源呈现较低的 β_{app} 是与源的相对观测者的指向有关的,而喷流的洛伦兹因子 γ 则与源的固有光度有关,这些见解对我们理解 SLS 的内在本质是有帮助的。

2. $\mu - Z$ 图

这一工作最先是在 1979 年由 Yahil^[138] 提出。Yahil 用偶极场模型,确定出自行 μ 的下限边界,

$$\mu_{\text{min}}(H_0, q_0, Z) = \frac{\beta H_0 (1+Z) q_0^2}{q_0 Z + (q_0 - 1)(\sqrt{1+2q_0 Z} - 1)} \quad (7)$$

由于当时仅知四颗 SLS,所以该统计工作是较粗略的。

到了 1987 年, Cohen^[130] 对 28 颗 SLS 作 $\mu - Z$ 图,并讨论了三种解释,其中第二种被广泛认可,即红移 Z 是反映距离的, SLS 中存在相对论波束,这种解释给出 μ 的上限边界,

$$\mu \simeq \frac{\gamma H_0 (1+Z) q_0^2}{q_0 Z + (q_0 - 1)(\sqrt{1+2q_0 Z} - 1)} \quad (\gamma^2 \gg 1) \quad (8)$$

式中已假定 $\gamma^2 \gg 1$ 。当选取 $\gamma H_0 = 900 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, $q_0 = 0.5$ 时,该曲线位于数据点之上,拟合得很好。

1988 年, Cohen 等^[139] 给出了对 32 个源作的 $\mu - Z$ 图。 μ 的上界公式同 (8) 式,拟合曲线参数也与 1987 年的结果相同。这以后, Cohen 等^[140] 又对 $\mu - Z$ 图作了详细分析,首先确证 μ 与 Z 是统计相关的,然后逐一考查五种不同的解释,认为 Cohen 在 1987 年提出的第

二种解释与数据相符合，较为合理。

图3是 Wehrle, Cohen 和 Unwin^[124]给出的 28 个 SLS 的最新的 μ - Z 图，对每个源，只用了子源分量中自行最大的 μ 值。从图3容易看出， $\mu(Z)$ 对 q_0 的灵敏度，要求有高红移源的观测。图中破折线代表 $\theta = 60^\circ$ 时的 $\mu(Z)$ ，大多数数据点明显位于该曲线的上方，意味着这些源中显示自行的子源是明显地朝向观测者，也就是说 SLS 中有波束效应。图上最下方的直线代表在约十年的时间间隔内所能观测到的最低的自行值。

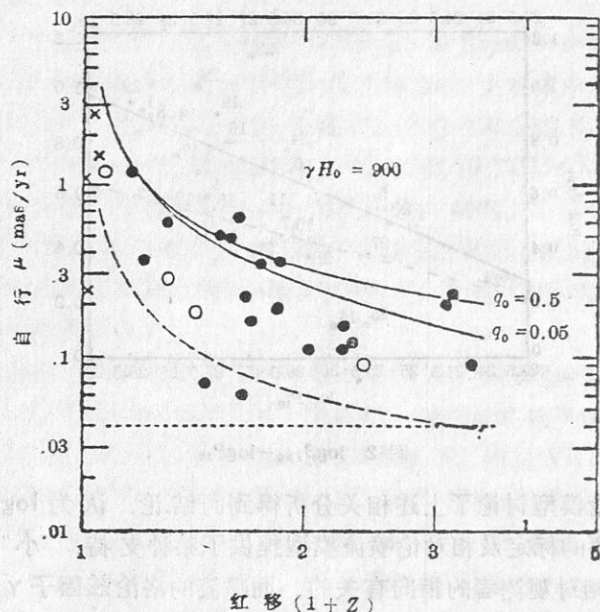


图3 28颗SLS的 μ - Z 图^[124]

Pelletier 和 Roland^[141]认为，由于目前只对极少数的高红移源测到了自行，所以还不足以确定减速因子 q_0 。但若假定 $q_0 = 0.5$ ，则可定出哈勃常数 $H_0 \approx 3.3 \times 10^{-18} \text{s}^{-1} \approx 100 \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。

3. 讨论

μ - Z 图上的源是根据不同的选择标准(如流量强度、谱、变化性等)而观测证认出来的，但从不根据红移来证认，这种选择更侧重于大的自行。许多别的因素，诸如自行的测量方法，观测的波段与次数，以及源结构的复杂程度等，使自行 μ 的测量误差各异，无法给出统一的误差棒。要进一步分析和利用 μ - Z 图，就需增加源的数目，特别是要设法测量红移大于3的源的自行，这对定出 q_0 ，并最终定 H_0 是很重要的，这也正是 VLBA 和空间 VLBI 工作的一个目标。

八、SLS研究的展望

第一颗 SLS 的发现距今已有 20 余年了，尽管人们已认识到视超光速运动可能是活动星

系核中较为普遍的特征, 但对此还缺乏更深刻的认识, 这主要表现在理论研究和观测两个方面。理论研究方面, 对观测到的 SLS, 还未能建立一种可以全面地解释它所具有的特征的理论模型; 观测方面, 目前的 VLBI 观测仍不够系统, 即使是一些著名的巡天, 也存在着样本不完全的问题, 并且这类观测总是要受到现有 VLBI 技术的限制。SLS 的研究正处在一个交叉口, 可以期待今后 SLS 的研究将主要在理论模型的完善和观测巡天的完整上有新的进展, 而这又都将与 VLBI 技术的发展相密切联系。

在理论模型方面, Rudnick^[142]认为, 应寻求建立一种能说明 SLS 实质的自洽模型, 而不只是那些对观测到的细节的诠释。因为我们所见到的并不完全, 可能会把我们引上歧途。Pearson 等^[125], Scheuer^[101]和 Blandford^[108]等都提出了许多有关 SLS 研究的理论问题, 归纳起来有:

- (1) 活动星系核中央发动机的物理机制是什么?
- (2) 如何解释与喷流有关的一些问题, 如, 喷流的形成、准直、弯曲及其速度的变化等。
- (3) 各种类型的活动星系核间的相互关系怎样?

在观测巡天方面, 进入 90 年代, 射电天文学, 特别是 VLBI 天文学, 也进入了一个蓬勃发展的时期, VLBA 的开始观测, 空间 VLBI 站的建立, 以及毫米波 VLBI 和 VLBI 偏振观测的常规化, 都将给观测带来新的推动力, 并促使理论研究的发展。毫无疑问, 我们应当对更多的 SLS 以更高的质量成图, 这包括:

(1) 继续对个别的 SLS 进行系统监测, 以探索各子源的运动和演化等细节。当前, 对某些源进行多波段流量监测且与 VLBI 成图相结合, 已成为深入研究 SLS 的一个重要方法, 正日益引起射电天文学家的关注。

(2) 对更多的 SLS 进行 VLBI 偏振观测。

(3) 进行更大样本, 更长时间, 高分辨率(如毫米波)及高动态范围的 VLBI 成图观测。在样本的选择中, 可以加入对红移的约束条件。另外, 要加强对南天射电源的搜寻和监测, 以期发现更多的 SLS, 这必将有利于对 SLS 的分类和统计。

此外, 我们更应当设计一些观测, 去突破一些更基本的难题(如上面提及的理论问题)。人们有理由相信^[143], 在今后的十年中, VLBI 将取得类似 VLA 所已获得的成就, 而 SLS 的研究也将进入一个新的阶段。

致谢: 作者对万同山先生和蒋栋荣老师给予的指导和帮助, 表示衷心谢意。

参 考 文 献

- [1] Whitney, A. R. et al., *Science*, 173 (1971), 225.
- [2] Cohen, M. H. et al., *Nature*, 268 (1977), 405.
- [3] Porcas, R. W., *Nature*, 302 (1983), 753.
- [4] Porcas, R. W., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 12. (1987).
- [5] 吴盛殷, 朱含枢, *天文学进展*, 6 (1988), 295.
- [6] 吴盛殷, 朱含枢, *天文学进展*, 6 (1988), 307.
- [7] Rees, M. J., *Nature*, 211 (1966), 468.
- [8] Dent, W. A., *Science*, 148 (1965), 1458.
- [9] Broten, N. W. et al., *Nature*, 215 (1967), 38.
- [10] Bare, C. et al., *Science*, 157 (1967), 189.

- [11] Clark, B. G., Cohen, M. H., and Jauncey, D. L., *Ap. J.*, 149 (1967), L151.
- [12] Gubbay, J. et al., *Nature*, 224 (1969), 1094.
- [13] Knight, C. A. et al., *Science*, 172 (1971), 52.
- [14] Cohen, M. H. et al., *Ap. J.*, 170 (1971), 207.
- [15] Wilkinson, P. N. et al., *Nature*, 269 (1977), 764.
- [16] Readhead, A. C. S., and Wilkinson, P. N., *Ap. J.*, 223 (1978), 25.
- [17] Blandford, R. D., and Königl, A., *Ap. J.*, 232 (1979), 34.
- [18] Pearson, T. J. et al., *Nature*, 290 (1981), 365.
- [19] Moffet, A. T. et al., in IAU Symposium No. 44, p. 228, (1972).
- [20] Masson, C. R. et al., *Ap. J.*, 302 (1986), L27.
- [21] Walker, R. C. et al., *Ap. J.*, 335 (1988), 668.
- [22] Davis, R. J., Unwin, S. C., and Muxlow, T. W. B., *Nature*, 354 (1991), 374.
- [23] Wehrle, A. E., Cohen, M. H., and Unwin, S. C., *Ap. J.*, 351 (1990), L1.
- [24] Antonucci, R. R. J., et al., *A. J.*, 92 (1986), 1.
- [25] Eckart, A. et al., *Astron. Astrophys.* 168 (1986), 17.
- [26] Witzel, A., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 83, (1987).
- [27] Scheuer, P. A. G., *M. N. R. A. S.*, 117 (1976), 1.
- [28] Impey, C., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 233, (1987).
- [29] Marscher, A. P., and Broderick, J. J., *Ap. J.*, 247 (1981), L49.
- [30] Marscher, A. P., and Broderick, J. J., *Ap. J.*, 249 (1981), 406.
- [31] Marscher, A. P., and Broderick, J. J., *Ap. J.*, 255 (1982), L11.
- [32] Marscher, A. P., and Broderick, J. J., *Ap. J.*, 290 (1985), 735.
- [33] Gotz, M. M. A. et al., *Astron. Astrophys.*, 176 (1987), 171.
- [34] Presuss, E. et al., in Parsec-Scale Radio Jets, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 120, (1990).
- [35] Seielstad, G. A. et al., *Ap. J.*, 229 (1979), 53.
- [36] Readhead, A. C. S. et al., *Ap. J.*, 231 (1979), 299.
- [37] Walker, R. C. et al., *Ap. J.*, 257 (1982), 56.
- [38] Benson, J. M. et al., *Ap. J.*, 334 (1988), 560.
- [39] Walker, R. C., Benson, J. M., and Unwin, S. C., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 48, (1987).
- [40] Walker, R. C., Benson, J. M., and Unwin, S. C., *Ap. J.*, 316 (1987), 546.
- [41] Muxlow, T. W. B., and Wilkinson, P. N., *M. N. R. A. S.*, 251 (1991), 54.
- [42] Porcas, R. W., *Nature*, 294 (1981), 47.
- [43] Shone, D. L. et al., *Nature*, 314 (1985), 603.
- [44] Baath, L. B., in IAU Symposium No. 110, p. 127, (1984).
- [45] Zhang, F. -J. and Baath, L. B., *M. N. R. A. S.*, 248 (1991), 566.
- [46] Barthel, P. D. et al., *Ap. J.*, 310 (1986), L7.
- [47] Pearson, T. J. et al., in IAU Symposium No. 119, p. 163, (1986).
- [48] Roberts, D. H., Gabuzda, D. C., and Wardle, J. F. C., *Ap. J.*, 323 (1987), 536.
- [49] Gabuzda, D. C., Wardle, J. F. C., and Roberts, D. H., *Ap. J.*, 336 (1989), L59.
- [50] Barthel, P. D., Pearson, T. J., and Readhead, A. C. S., *Ap. J.*, 329 (1988), L51.
- [51] Shaffer, D. B. et al., *Ap. J.*, 314 (1987), L1.
- [52] Marcaide, J. M. et al., *Astron. Astrophys.*, 211 (1989), L23.
- [53] Hough, D. H., and Readhead, A. C. S., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 114, (1987).
- [54] Hough, D. H., and Readhead, A. C. S., *Ap. J.*, 321 (1987), L11.
- [55] Zhang, F. -J., Baath, L. B., *Astron. Astrophys.*, 236 (1990), 47.
- [56] Zensus, J. A., Hough, D. H., and Porcas, R. W., *Nature*, 325 (1987), 36.
- [57] Zensus, J. A., and Porcas, R. W., in IAU Symposium, No. 119, p. 167, (1986).
- [58] Cohen, M. H. et al., *Ap. J.*, 315 (1987), L89.
- [59] Zensus, J. A., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 26, (1987).
- [60] Zensus, J. A. et al., *Nature*, 334 (1988), 410.
- [61] Cotton, W. D. et al., *Ap. J.*, 229 (1979), L115.
- [62] Unwin, S. C., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 34, (1987).
- [63] Unwin, S. C. et al., *Ap. J.*, 340 (1989), 117.

- [64] Cohen, M. H. et al., *Ap. J.*, 206 (1976), L1.
- [65] Wittels, J. J. et al., *Ap. J.*, 206 (1976), L75.
- [66] Biretta, J. A., Moore, R. L., and Cohen, M. H., *Ap. J.*, 308 (1986), 93.
- [67] Perley, R. A., Fomalont, E. B., and Johnston, K. J., *A. J.*, 85 (1980), 649.
- [68] Pearson, T. J. et al., *Ap. J.*, 300 (1986), L25.
- [69] Barthel, R. D. et al., *Astron. Astrophys.* 148 (1984), 243.
- [70] Barthel, P. D. et al., *Ap. J.*, 336 (1989), 601.
- [71] Stickel, M., Fried, J. W., and Kuhr, H., *Astron. Astrophys., Suppl.*, 80 (1989), 103.
- [72] Alef, W. et al., *Astron. Astrophys.*, 192 (1988), 53.
- [73] Waak, J. A. et al., *A. J.*, 90 (1985), 1989.
- [74] Simon, R. S. et al., *Ap. J.*, 326 (1988), L5.
- [75] Eckart, A. et al., *Ap. J.*, 296 (1985), L23.
- [76] Zensus, J. A., and Porcas, R. W., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 126, (1987).
- [77] Phillips, R. B., and Mutel, R. L., *Ap. J.*, 257 (1982), L19.
- [78] Mutel, R. L., and Phillips, R. B., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 60, (1987).
- [79] Mutel, R. L. et al., *Ap. J.*, 352 (1990), 81.
- [80] Simon, R. S. et al., *Ap. J.*, 290 (1985), 66.
- [81] Antonucci, R. R. J., *Ap. J.*, 304 (1986), 634.
- [82] Baath, L. B., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 206, (1987).
- [83] Wehrle, A. E., and Cohen, M. H., *Ap. J.*, 346 (1986), L69.
- [84] Pauliny-Toth, I. I. K., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 55, (1987).
- [85] Pauliny-Toth, I. I. K. et al., *Nature*, 328 (1987), 778.
- [86] Gabuzda, D. C. et al., *Ap. J.*, 347 (1989), 701.
- [87] Simon, R. et al., *Nature*, 302 (1983), 487.
- [88] Alef, W. et al., in *IAU Symposium No. 129*, p. 95, (1988).
- [89] Shaffer, D. B., and Marscher, A. P., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 67, (1987).
- [90] Bartel, N. et al., *Nature*, 319 (1986), 733.
- [91] Roberts, D. H., and Wardle, J. F. C., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 193, (1987).
- [92] Wardle, J. F. C., and Roberts, D. H., in *IAU Symposium No. 129*, p. 143, (1988).
- [93] Pearson, T. J., and Zensus, J. A., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 1, (1987).
- [94] Rees, M. J., *M. N. R. A. S.*, 135 (1967), 345.
- [95] Garrington, S. T. et al., *Nature*, 331 (1989), 147.
- [96] Laing, R. A., *Nature*, 331 (1989), 149.
- [97] Schilizzi, R. T., and De Bruyn, A. G., *Nature*, 303 (1983), 26.
- [98] De Bruyn, A. G., and Schilizzi, R. T., in *IAU Symposium No. 119*, p. 203, (1986).
- [99] Browne, I. W. A., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 129, (1987).
- [100] Barthel, P. D., *Ap. J.*, 336 (1989), 606.
- [101] Scheuer, P. A. G., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 104, (1987).
- [102] Barthel, P. D., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 148, (1987).
- [103] Readhead, A. C. S., Pearson, T. J., and Barthel, P. D., in *IAU Symposium No. 129*, p. 65, (1988).
- [104] Scheuer, P. A. G., in *IAU Symposium No. 110*, p. 197, (1984).
- [105] Rees, M. J., in *IAU Symposium No. 110*, p. 207, (1984).
- [106] Phinney, E. S., in *Astrophysics of Active Galaxies and Quasi-Stellar Objects*, ed. by J. S. Miller, p. 453, (1985).
- [107] Blandford, R. D., in *IAU Symposium No. 110*, p. 215, (1984).
- [108] Blandford, R. D., in *Superluminal Radio Sources*, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 310, (1987).
- [109] Pearson, T. J., and Readhead, A. C. S., *Ap. J.*, 248 (1981), 61.
- [110] Pearson, T. J. and Readhead, A. C. S., in *IAU Symposium No. 110*, p. 15, (1984).
- [111] Pearson, T. J., and Readhead, A. C. S., *Ap. J.*, 328 (1988), 114.

- [112] Eckart, A. and Witzel, A., in IAU Symposium No. 110, p. 65, (1984).
- [113] Eckart, A. et al., *Astron. Astrophys. Suppl.*, 67 (1987), 121.
- [114] Witzel, A. et al., *Astron. Astrophys.*, 206 (1988), 245.
- [115] Schalinski, C. J. et al., in IAU Symposium No. 129, p. 71, (1988).
- [116] Hough, D. H., and Readhead, A. C. S., *A. J.*, 98 (1989), 1208.
- [117] Fanti, C. et al., *Astron. Astrophys.*, 143 (1985), 292.
- [118] Fanti, C. et al., *Astron. Astrophys.*, 170 (1986), 10.
- [119] Fanti, C. et al., *Astron. Astrophys.*, 217 (1989), 44.
- [120] Fanti, C. et al., in IAU Symposium No. 129, p. 111, (1988).
- [121] Spencer, R. E. et al., *M. N. R. A. S.*, 240 (1989), 657.
- [122] Fanti, R. et al., *Astron. Astrophys.*, 231 (1990), 333.
- [123] Roberts, D. H. et al., in Parsec-Scale Radio Jets, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 110, (1990).
- [124] Wehrle, A. E., Cohen, M. H., and Unwin, S. C., in Parsec-Scale Radio Jets, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 49, (1990).
- [125] Pearson, T. J., Readhead, A. C. S. and Barthel, P. D., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 94, (1987).
- [126] Pearson, T. J., in Parsec-Scale Radio Jets, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 1, (1990).
- [127] Lawrence, C. R. et al., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 260, (1987).
- [128] Fanti, C., and Fanti, R., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 174, (1987).
- [129] Hodges, M. W., and Mutel, R. L., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 168, (1987).
- [130] Cohen, M. H., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 306, (1987).
- [131] Browne, I. W. A. et al., *Nature*, 299 (1982), 788.
- [132] Fanti, R. et al., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 200, (1987).
- [133] Padrielli, L. et al., *Astron. Astrophys. Suppl.*, 67 (1987), 63.
- [134] Mantovani, F., Muxlow, T., and Padrielli, L., in IAU Symposium No. 129, p. 125, (1988).
- [135] Padrielli, L. et al., in IAU Symposium, No. 129, p. 297, (1988).
- [136] 康连生, 吴盛殷, 南仁东, 天文学进展, 6 (1988), 204.
- [137] 吴盛殷, Qurrenbach, A., and Witzel, A., 中国科学(A辑), 7 (1992), 743.
- [138] Yahil, A., *Ap. J.*, 233 (1979), 775.
- [139] Cohen, M. H. et al., in IAU Symposium No. 129, p. 23, (1988).
- [140] Cohen, M. H. et al., *Ap. J.*, 329 (1988), 1.
- [141] Pelletier, G. and Roland, J., in Parsec-Scale Radio Jets, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 323, (1990).
- [142] Rudnick, L., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 217, (1987).
- [143] Wilkinson, P. N., in Superluminal Radio Sources, ed. by J. A. Zensus and T. J. Pearson, p. 211, (1987).

(责任编辑 林一梅)

Superluminal Radio Sources

Shen Zhiqiang

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

The discovery of superluminal radio sources has been considered as one of the most important astrophysical achievements obtained by means of the VLBI technique. In this paper, the author briefly reviews the recent progress in the various aspects concerning observational and theoretical researches on superluminal sources.

In the first three parts, methods of superluminal source identification (in the 3rd part) are presented as well as the discovery (in the 2nd part) and the importance (in the 1st part) of study about superluminal sources. The general characteristics of superluminal sources in many aspects (such as, morphology, spectrum, polarization and statistics) are summarized in the 4th part. In the 5th part, a widely accepted theoretical model (i. e. the relativistical beaming model) and its problems are briefly discussed. Some VLBI surveys and two statistical works are introduced in the 6th and 7th parts separately. Finally the prospects of observations and study of superluminal source are outlined.