

河外射电源的低频研究进展

钱善璿 张喜镇 余 宁

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文中我们对河外射电源的低频研究的进展作一综述,内容包括:

1. 低频观测技术(行星际闪烁,月掩源技术,低频综合孔径和低频甚长基线干涉仪);
2. 河外射电源的低频结构(展瓣结构,致密源结构和低频变源)。

河外射电源的观测研究现已取得了很大进展,这主要是由于综合孔径射电望远镜和甚长基线干涉仪技术的应用和发展。但迄今这方面的工作比较多地集中在厘米波段和短分米波段(≥ 1.4 GHz)。因为在这些频段上,可以取得较高的分辨率来分解射电源的结构,而又不受严重的大气影响(毫米波段的 VLBI,可以提供的分辨率达到邻近星系中黑洞的尺度)。这些观测研究内容包括致密源中的毫角秒结构(核心-核喷流)和结构的变化(如视超光速分离运动),致密源的流量变化(特别是视超光速变化);展源结构中的大尺度喷流,展瓣以及展瓣中比较致密的热斑等等,提供的信息是极其丰富的。相形之下,河外射电源的低频(米波和长分米波)观测研究的进展却比较缓慢,这也是在最近几年内有了可观的进展的一个原因。本文将对河外射电源的低频(< 1 GHz)观测研究进展作一个评述。从总的方面来说,低频研究是射电源研究上必然的频谱延伸,在低频可以看到高频观测不到的特性,从而有助于全面地了解射电源中的物理过程。显然,在低频段的高分辨率、高灵敏度和高动态范围的综合孔径和长基线干涉仪技术的发展,即将带来可以期望的新前景。

一、低频射电观测技术

射电源的低频观测技术主要有四类,即闪烁技术、月掩射电源技术、综合孔径和长基线干涉仪。

1. 行星际闪烁技术(IPS)

行星际闪烁技术是通过测量行星际太阳风等离子体不均匀性所引起的射电源强度的不规则起伏,来获得射电源结构的信息,可测到的射电源内致密结构的角径在 $0.2-2.0$ 之间。利用这种技术最有成效的一个例子是英国剑桥大学 Hewish 领导的小组,他们从事射电源闪烁系统性的研究

工作已达 15 年之久。目前他们所使用的闪烁天线阵工作在 81.5 MHz, 天线阵面积为 9 英亩。他们曾发表过一个闪烁射电源表, 包括~1500 个 4 C 射电源^[1]($\delta = 12^\circ - +90^\circ$, 当时闪烁天线阵面积为 4.5 英亩), 提供了射电源中致密结构的角径和流量。其中~60% 有闪烁。闪烁技术方法的原理和内容可用图 1 扼要地说明。

射电源中的闪烁结构通常可能是热斑和致密核源。Readhead 和 Hewish(1976)^[2]从闪烁数据推论了射电展双源的形成和演化过程, 认为只在其中的某个阶段上(双源尺度 < 200 kpc 时)才出现热斑现象。

最近几年内, 由于仪器改进和灵敏度的提高, Hewish^[3]已对~5,000 多个源进行了闪烁测量。由于大多数源的红移 $Z > 0.6$, 这项工作对于研究射电源的宇宙学演化将提供重要信息(例如参见 Duffett-Smith, 1982)^[4]。Tsien 和 Duffett-Smith(1982)^[5]利用剑桥闪烁天线阵观测了天鹅座 A 的闪烁, 发现天鹅座 A 中热斑的视角径(在 81.5 MHz 上) $> 6''$, 比高频上热斑角径 $2''$ 大得多, 可能意味着在这个方向上存在着强的等离子体湍流, 引起热斑视角径的散射增大^[6]。

印度达塔研究所利用 Ooty 的月掩源射电望远镜在更高频率上(327 MHz)从事闪烁研究。这具望远镜有大的收集面积和连续跟踪能力, 可分解出小到~ $0''.02$ 的致密结构。最近 Banhatti 等人(1983)^[7]对从 Ooty 月掩射电源表(327 MHz)中选出的小角径米波源样品(30 个源, 平均流量为 1.75 Jy, 角径 $1'' - 4''$, 比这个流量水平上的平均角径小 2—3 倍)进行的闪烁观测表明, ~45% (327 MHz)流量来自 $0''.05 - 0''.5$ 结构, 这种结构成份与 5 GHz VLBI 测到的 $\leq 0''.02$ (占~25% 流量)的致密成份属于同一些物理结构。在这 30 个源中, ~ $2/3$ 的源中的致密成份是热斑或陡谱核心, 其余~ $1/3$ 可能是坦谱致密成份。在这种小角径米波源中, 核心 5 GHz 流量所占的百分比(由 VLBI 测得)比一般双源中的高得多, 所以它们可能是轴线靠近视线的双源, 因此核心的 5 GHz 流量是被相对论性束射效应所放大的^[8]。

闪烁技术的优点是, 可以大量搜集数据, 可以得到其他方法得不到的暗射电源的统计信息, 但只有当射电源具有比较简单的结构时, 才能取得致密结构的信息。因此, 它所提供的射电源结构信息比较有限。

2. 月掩射电源技术

这种技术利用月亮掩射电源来分解射电源中的结构细节, 一维分辨率可达到~ $1''$ (米波段)。

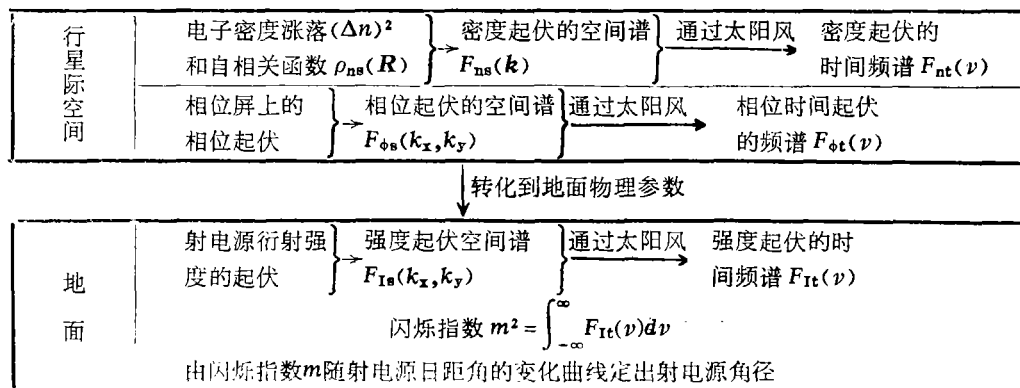


图 1 行星际闪烁方法决定射电源角径的示意图

每一次掩食过程可以得到射电源的一维亮度分布。如果射电源在不同方位角路径上被掩食多次,就可以描绘出射电源图^[9]。因而这种技术可以提供米波高分辨率($\sim 1''$)的描图,但只适用于月亮轨道附近的射电源。

系统地进行过月掩射电源观测工作的是印度达塔研究所的专用设备——Ooty 月掩食射电望远镜(327 MHz),已完成了9个月掩源表^[10],包括 ≥ 0.25 Jy 的711个射电源,分辨率在 $0.2''-10''$ 之间。表中给出射电源米波结构、流量、射电位置、光学证认、亮度分布和频谱特性等。

3. 低频综合孔径

英国剑桥的一英里综合孔径,在六十年代中期已在408 MHz上开始射电源描图和小天区深空巡天(5 C 星表),直到现在仍在继续工作(分辨率为 $67''$)。

在七十年代,主要的低频综合孔径射电望远镜有:荷兰 Westerbork 的1.6公里综合孔径,工作在0.61 GHz,用 $\sim 1'$ 分辨率作射电源描图和小天区巡天;英国剑桥151 MHz 1.4公里综合孔径,分辨率 $\sim 4'$,主要用于巡天(6 C 射电源表)^[11],但在这个巡天中发现了几个巨射电星系,特别是

表 1 低频综合孔径射电望远镜*

天文台	天线** 数目	单元大小 (米)	阵的大小(公里) 和结构	工作频率 (GHz)	分辨率	附注
中国北京天文台	28	9	1.2 EW	0.232	$\sim 3'$	正发展 408 MHz
英国剑桥穆拉射电天文台	3(2)	18	1.6 EW	0.408	$67''$	1英里综合孔径
	60		4.6 EW	0.151	$1:2$	
英国曼彻斯特大学 Jodrell Bank射电天文台	6	15,25,76	1-127	0.408	$0.9''$	
荷兰 Westerbork 射电天文台	14(4)	25	3.2 EW	0.609,0.327	$\sim 30''$ 和 $60''$	
意大利 Bologna 大学 射电天文台	2		1.0 EW, 0.4 NS	0.408	$\sim 3'$	
印度达塔理论研究所 Ooty 射电天文台	4	5,13.5,530	3.9 EW	0.327	$\sim 0.5'$	计划扩展成 9km EW \times 5 km NS 的综合孔径
澳大利亚 Molonglo 射电天文台			1.6 EW	0.843	$\sim 40''$	由米尔斯十字的 EW 臂改成综合孔径
美国加利福尼亚工学院 Owens Valley 射电天文台	3(3)	25,40	0.5 NS, 1.2EW	0.9		
美国国立射电天文台	27(27)	25	Y,0.7,3,7,21	0.327	$\sim 15''$	计划中
印度天体物理所	91		1.5 EW, 0.5 NS	0.0345	$\sim 30'$	90个 NS 单元和 1 个 EW 单元相关
美国马里兰大学 Clark Lake 射电天文台	48	100	3 EW, 1.8 NS	0.015-0.125	$3'-17'$	
苏联 Grakow 射电 天文台(UTR ₂)				0.010-0.025	$\sim 30'$	
美国得克萨斯大学 射电天文台	5	75,300	3.0 EW, 3.1 NS	0.365	$\sim 3.5'$ (中天,赤 纬 $\sim 10^\circ$ 时)	
(赤道射电天文台)	(15)	50 \times 2000 (1个)	14 EW, 12 NS	0.325	$\sim 10''$	拟议中为发展中国 家建造
		15 \times 50(14个)				

* 下列的一部份综合孔径,通常可工作在高频,但本表只列出 < 1 GHz的工作频率,材料主要取自参考文献[12,13]。

** 括号中为可以移动的天线数目。

NGC 6251。用 1 英里射电望远镜高分辨率观测, 探测到它的 NW 瓣内有一个长达 200 kpc 的射电喷流, 从而首先为射电源物理学提供了一个关键性的证据, 即星系核通过喷流所表达的“通道”向外部展源传送能量; 其他的低频综合孔径有意大利波洛尼亚的“北方十字”(工作在 408 MHz, 分辨率 $\sim 3'-4'$)和澳大利亚的米尔斯十字(408 MHz, 分辨率 $\sim 3'$), 两者都主要从事大规模巡天和编制射电源表。

低频(米波和长分米波)综合孔径射电望远镜的研制工作所取得的进展和计划中的工作列在表 1, 主要根据参考文献[12, 13]。这里有三具射电望远镜工作在十米波段, 即美国马里兰大学 Clark Lake 15—125 MHz 综合孔径; 苏联 Grakow 射电天文台低频 T-射电望远镜(UTR₂), 工作在 10—25 MHz; 印度天体物理研究所 34 MHz 的米尔斯十字型设备。除此以外, 主要的进展包括: (1) 英国曼彻斯特大学 Jodrell Bank 射电天文台的 MERLIN(多天线微波接力干涉仪网)已在 1980 年投入工作, 最大基线长度为 ~ 127 公里, 在 408 MHz 上获得 $\sim 1''$ 分辨率, 描图动态范围可达到 $\sim 1,000:1$; 这个网有可能和剑桥的一英里综合孔径联接起来, 那时分辨率可增高到 ~ 0.7 ; 这是目前世界上长分米波段的最高分辨率描图, 将来有可能配备 151 MHz 频率; (2) 英国剑桥 5 公里 151 MHz 综合孔径已在 1981 年开始观测, 以 1:2 角分辨率描图, 这对研究射电源低亮度区域是特别有效的设备; (3) 美国得克萨斯大学射电天文台的 365 MHz 综合孔径, 已取得了 $-35^\circ < \delta < +41^\circ$ 天区的巡天数据, 分辨率 ~ 3.5 ; (4) 荷兰 Westerbork 综合孔径基线已扩展到 3.2 公里, 从而使 0.6 GHz 上分辨率达到 $\sim 30''$, 计划要配备 327 MHz 频率; (5) 我国(北京天文台)于 1984 年建成 232 MHz 米波综合孔径射电望远镜, 开始巡天观测; (6) 印度 Ooty 月掩食射电望远镜将和新增添的天线单元构成综合孔径, 最后的目标是 9 km E/W \times 5 km N/S, 在 327 MHz 频率上的分辨率 $\sim 10''$; 中期工程完成后开始在 $\sim 30''$ 分辨率上工作; (7) 美国 VLA 计划增加一个频率 327 MHz, 在 A-构形时, 其分辨率到达 $\sim 15''$; (8) 澳大利亚 Molonglo 米尔斯十字的 EW 臂已改成综合孔径(利用扇束综合原理), 工作频率为 843 MHz, 分辨率 $\sim 40''$ 。此外, 澳大利亚 Culgoora 3.6 公里圆阵综合孔径, 原工作在 80 MHz 和 160 MHz, 现已关闭, 计划发展甚长基线干涉仪。

4. 低频长基线干涉仪技术

低频段上的长基线干涉仪工作, 在六十年代中期到七十年代中期曾进行过多次尝试, 例如文[14—17], 其目的是(在 400—500 MHz 上)利用干涉条纹测量致密源的细节结构($\sim 0.01-1''$)和低频频谱特性。Clarke 等人(1969)^[15]的观测(408 和 488 MHz), 利用了 4 个加拿大站和 1 个英国站(Jodrell Bank), 最长基线达到 6,833 公里($9.3 \times 10^6 \lambda$), 分辨率 ~ 0.01 ; 在这项工作中曾发现几个致密核源, 在非相干同步辐射机制下, 其逆康普顿散射损耗颇大于同步辐射损耗, 其中最严重的一个就是 3C 147。下面要谈到, 最近的 VLBI 观测(329 MHz)发现它的核源是个低频变源, 而且很可能是个视超光速运动源。

在比 150 MHz 还低的频率上的长基线干涉仪观测(米波 VLB), 例如有 Clarke 等人(1975)^[18]的工作, 频率在 74 MHz—197 MHz, 最长基线 $\sim 1.7 \times 10^6 \lambda$ (条纹间距 ~ 0.12)。

低频 VLBI 的射电源描图工作至今仍然不多。Readhead 等人(1977)^[19]和 Wilkinson 等人(1979)^[20]早已指出, 低频段上 VLBI 观测对于了解射电源现象的重要意义在于: (1) 致密源低频频谱的形式表明, 许多致密源在 < 500 MHz 上发生频谱反转, 通常认为这是同步辐射自吸收所引起

的,因此相应地应当存在 10—500 mas(毫角秒)的小尺度结构,并可以在低频 VLBI 上观测到;(2) 这些尺度的结构正处在高频 VLBI(~ 1 mas 细节结构)和低频综合孔径(一般 $\geq 1''$ 结构)之间,有助于了解最小尺度结构(星系核)和大尺度结构(展瓣和喷流)之间的物理联系和供能方式;(3) 低频变源现象由于它们有短的时间尺度(≤ 1 年)引起了理论解释上的困难。由于大部份视超光速运动源是快速低频变源,所以普遍地认为低频变源中存在着相对论性物质整体运动^[21];利用低频 VLBI 描图或 VLB 干涉仪观测来监视致密源中结构变化和流量变化是有必要的,特别是在那些需要把致密源从占有绝大部分流量的展源结构中区分出来的情况下更是如此。

第一批 609 MHz VLBI 射电源描图发表于 1977 和 1979 年^{[20],[22]}, 分辨率 ~ 5 mas, 第一批 329 MHz VLBI 射电源描图可见 Simon 等人的研究成果(1980)^[23], 分辨率 ~ 10 mas。无论早期的低频 VLB 观测还是近期的低频 VLBI 观测,主要选择低频变源或有特别的低频频谱的射电源。把最新发表的 3C 147 的 329 MHz VLBI 图和 6 年前的 329 MHz 图加以比较表明(Simon 等人, 1983)^[24], 3C 147 的核源是个变源,在 6 年内从 0.9 Jy 变到 2 Jy,而这个核源实际上只占整个展源流量的 $\sim 1\%$,这是用 VLBI 发现低频变源的一个事例。

目前世界上参与 609 MHz 和 329 MHz VLBI 描图的射电天文台,都利用厘米波段 VLBI 站的天线作短期使用。根据文献[20,24]中给出的材料,这些射电天文台包括:美国哈佛大学射电站(Fort Davis, Texas, 26 米);美国国立射电天文台(Green Bank, W. Va., 43 米);加里福尼亚大学(Hat Creek, Calif., 26 米);美国海斯塔克射电天文台(Westford, Mass., 37 米);美国依阿华大学(Iowa City, Iowa, 18 米);美国欧文斯谷射电天文台(Big Pine, Calif., 40 米);英国纳菲尔德射电天文实验室(Jodrell Bank, UK, 76 米)。其他有 610 MHz 或 329 MHz 设备可能会进行低频 VLBI 描图的射电天文台还有:西德马普射电天文研究所(Bonn, 100 米);美国阿雷西勃射电天文台(Arecibo P. R., 305 米);加拿大阿贡金射电天文台(ARO, Canada, 46 米);荷兰魏斯特堡射电天文台(等效 90 米);美国国立射电天文台(VLA, 等效 130 米);印度达塔研究所综合孔径(等效 ~ 140 米)等等。所以为低频研究的需要,世界上许多 VLBI 站已把 610 MHz 和 329 MHz 作为使用的频率(408 MHz VLBI 描图现在进行得较少)。在地球尺度限制下低频 VLBI 系统的分辨率只能比厘米波 VLBI 小一个数量级以上,所以为了进一步提高分辨率,空间的低频 VLBI 系统仍然是一个长远的目标。

考虑到有越来越多的证据,许多致密源有弱的延伸结构^{[25],[26]},它们常常具有比致密成份更陡的频谱,故在低频上更容易观测到,所以米波的 VLB 观测是有重要意义的。在米波 VLB 工作上最新的一个重要进展是英国剑桥在 81.5 MHz(3.7 米波长)上完成了 $< 1''$ 的描图的可行性试验(Hartas 等人, 1983)^[27]。他们把闪烁天线阵作为主站,并把一个可搬运的小天线(作为外站)放在英国本土和欧洲大陆临时观测点上,用了 11 条基线(0.5—1,500 公里)进行中天干涉观测(利用独立本振和磁带记录)。结果表明,81.5 MHz 上的 LBI 亚秒级描图是可以实现的。米波段长基线干涉仪技术过去一直被认为是个没有希望的“禁区”,主要问题是电离层可能使相距上千公里的两点上接收到的信号失去相关性。剑桥的这一试验,对电离层(和行星际介质)的消相关效应提供了一些实测数据和理论分析。这类消相关现象的实际内容是,电离层(和行星际介质)中电子密度不均匀性在波前上引起相位起伏。若不均匀性尺度 L 小于费涅尔尺度(即小尺度不均匀性情形),将出现强度闪烁;在不均匀性尺度大于费涅尔尺度时,在干涉仪测量的信号中引入乱相位偏离(相当于

乱折射), 但没有强度闪烁。引起相当大的消相关的就是这种相位起伏。这种消相关效应依赖于基线长度, 介质中电子密度不均匀性的功率谱, 观测的相关积分时间, 介质横截视线的运动速度等。电离层内的大尺度不均匀性(~ 100 公里)使射电源的视位置发生移动, 引起观测到的条纹速率偏离理论值, 剑桥观测到的条纹速率的变化大约相当于电离层在 15 分钟时间尺度上变化 1—10%。同样, 行星际介质中尺度比基线长度大的不均匀性也引起射电源视位置的移动和条纹速率偏离理论值。但是, 电离层和行星际介质引起的这种条纹速率偏离现象是比较有规律的, 可以用条纹搜索技术来加以消除, 即在积分时间(例如 100 秒)内在一个频率窗口(宽度可达 0.3 Hz)内搜索条纹频率, 然后用一个直线变化的条纹速率来补偿电离层(和行星际介质以及源相对于基线的几何关系)所引起的条纹速率的变化。

引起干涉仪信号严重消相关的是电离层内的小尺度不均匀性(~ 5 公里), 即引起电离层闪烁的不均匀性。由于通常电离层闪烁的相关距离只有 20 公里, 所以只能靠长基线两端点上电离层的宁静条件来保证信号的相关性。在剑桥的试验中, 有几次在最长基线上观测到信号完全消失, 这属于反常的电离层活动。据估计, 假设电离层为 100 公里厚, 电子密度不均匀性的自相关函数为高斯型, 则当电子密度变化超过 $\sim 10^9 \text{m}^{-3}$ 时, 点源的可见度(81.5 MHz)将下降 5%。行星际介质中起消相关作用的是尺度小于基线长度的不均匀性。根据行星际介质引起的相位起伏的估计, 对于 1,500 公里基线, 只有对日距角 $\leq 42^\circ$ 的射电源才可能出现 $> 5\%$ 的消相关(81.5 MHz)。电离层和行星际闪烁的另一个效应是增加噪声, 使条纹幅度的观测百分误差超过理论值。剑桥的试验表明, 在 100 秒内求平均时, 相应的消相关 $< 4\%$ 。

由于这个可行性试验的成功, 剑桥计划用原 4 C 系统的东西阵(9,000 m^2 抛物柱形天线)投入 81.5 MHz LBI 描图, 这个阵已改进了电扫描跟踪能力, 可以在中天前后各观测 3 小时, 从而可以取得更大的 UV 覆盖, 将用美国国立射电天文台 MK II VLBI 记录-回放系统, 以便更详细地研究致密源的延伸结构。不过由于只有一个大天线, 所以不能采用闭合相位技术。

从上面的叙述可见, 从分辨率方面来说, 低频研究已有了很大的进展, 长分米波段综合孔径分辨率已达到 $\sim 1''$ 。米波综合孔径已达到 $\sim 1'$, 将来的趋势是取得 $\sim 10''$ 。低频 VLBI 描图分辨率达到 5—10 mas, 不久, 3.7 米 LBI 可进行 $\sim 1''$ 级描图。

最后我们指出, 无论高频还是低频的综合孔径或 VLBI 描图中, 动态范围是另一个追求的重要目标, 以便研究强射电源直接附近区域内的暗弱辐射区。通常在高频高分辨率或 < 300 MHz 频率上, 要到达 500:1 的动态范围是相当困难的。为了改进动态范围, 需要利用更好的校准技术和数据处理方法, 更精确地监测对流层和电离层条件。目前比较成功的技术有: (1) 荷兰 Westerbork 射电天文台的望远镜自校准加多余量技术^[28], 利用这种技术得到了 3 C84 的 6 厘米和 21 厘米射电图, 动态范围达到 10,000:1, 显示了致密强核周围的低亮度结构; (2) 英国 Jodrell Bank 射电天文台 MERLIN 所使用的望远镜自校准技术, 在 408 MHz 描图上可以得到动态范围 $> 1000:1$ 的射电图^[29]; (3) 美国 VLA 的望远镜自校准技术^[30], 现已可以取得 6,000:1 的动态范围。

二、河外射电源的低频结构

虽然以前在低频段上曾经进行过大量的射电源巡天和射电源表的编制工作, 但目前这方面的

工作仍在进行,如美国得克萨斯大学射电天文台的 365 MHz 巡天工作^[31]。但本文中我们不打算叙述这方面的工作以及有关宇宙学研究方面的进展(例如[32]),也不讨论有关射电源低频频谱(总源特性)方面的研究进展(可参看[33,34]),而主要集中讨论射电源低频结构的研究进展。如上所述,低频段上高分辨的综合孔径和 VLBI 描图工作才开始不久。实际上,射电源结构的低频研究是和高频研究相平行的。低频段的主要优点是研究射电源中亮度比较低的陡谱区域,如老的射电双源的遗迹、射电晕等,这些成份通常在高频上观测不到。所以,低频研究和高频研究的结合,有助于更好地了解射电源各种尺度和不同演化阶段上的物理过程及它们的联系。

1. 展源的低频结构

高频综合孔径的观测已揭示典型的射电展源具有双结构,它包含三个基本成份,即中央致密源、喷流和展瓣(及其内的热斑)。

热斑

热斑的低频研究需要很高分辨率($1''-0.1''$),所以迄今观测不多。Winter(1980)^[35]曾利用长基线变距干涉仪观测得到了 151 MHz 上天鹅座-A 的分辨率为 $10'' \times 16''$ 的射电图。虽然由于分辨率太低不能区分出热斑,但得到了热斑的低频频谱指数 $\alpha = 0.60$ 。目前研究热斑最有效的手段是英国 Jodrell Bank 的 MERLIN,已利用 408 MHz 以 $\sim 1''$ 分辨率描绘了显示有热斑的强射电源的结构^{[36],[37]},取得热斑的角径、流量和频谱特性。Lonsdale 和 Morrison^[37]发现,在一些双源中,两侧的热斑、喷流和展瓣在低频上有明显的不对称性。两侧热斑性质不同表现在,一侧的热斑比较致密,比较亮,常有复杂结构,频谱较坦,如果有喷流的话,总是对向这个热斑,能量密度高,但总能量却低,这种热斑可能正在供能,称为 I 型热斑;另一侧的热斑较不致密,角径较大,频谱较陡,能量密度低得多,但总能量却高得多,被认为已停止供能,属于演化的后期,称为 II 型热斑。他们提出, I 型热斑可能不受冲压约束,而是处在自由膨胀的瞬时现象,或者有其他约束机制。

喷流

迄今大部份射电喷流都是在高频上发现和观测研究的,但对于喷流的物理性质(物质组成,能量转换和动力学)仍然不十分清楚。MERLIN 已在 408 MHz 上用 $\sim 1''$ 分辨率描绘了几个著名射电星系和类星体中的喷流,从而提供了将喷流的高频结构和低频结构加以比较的机会,加深了对喷流中物理过程的认识。在 M 87 喷流中^[38],408 MHz 上测到的各个节点的形态结构和角径,与高频上的结果非常相似,一个有意义的新事实是还测到一些比较弱的节点,特别是更清楚地揭示了喷流进入展瓣处的结构状态,这有助于理解喷流的扩散和与外部介质相互作用的过程。为了进一步分解 M 87 中的节点,需要有低频 VLBI 或 LBI,以便获得 $\sim 0.1''$ 分辨率,能和高频上相应分辨率的观测加以比较(Biretta 等人(1983)^[39]已在 15 GHz 上得到了 M 87 喷流的 $0.12''$ 分辨率的射电图)。从理论上讲,不论节点内的加速机制是激波加速或等离子团湍流加速,为了避免低频电子的积累引起陡的低频频谱,发射低频的电子必定从节点内向外逃逸,因此,在光学节点(或高频射电节点)周围有可能存在着低频晕一样的结构区域。所以在 $\sim 0.1''$ 分辨率上比较光学(高频射电)节点和低频射电节点的结构,可能对节点内的物理过程提供新的信息。

类星体 3 C 273 中喷流的 408 MHz 射电图表明^[40],沿喷流亮度向外增高,到外端部,亮度增加大于 100 倍,并发现喷流中有振荡结构。但在低频上,没有测到反喷流(比喷流弱 100 倍以

上), 同样在 M 87 中也未测到反喷流。但在某些射电星系中已测到弱的反喷流, 例如 NGC 6251。在高频观测上, 这个著名射电星系的西北瓣中有一个长达 200 kpc 的喷流, 但一直没有测到它的反喷流, 最近 Willis 等人(1982)^[41]在 610 MHz 上用 55" 分辨率测到了弱的反喷流。显然, 低频上反喷流的存在或不存在, 都对星系核的活动和供能方式提供了重要信息。目前关于反喷流不存在的理论解释主要有两种: 一种解释认为由于小视角下相对论性运动的多普勒效应, 使背向观测者发出的喷流(反喷流)隐没; 第二种解释认为星系核供能的束本身是交替向一边供能的。从这些方面来看, 在低频上搜索暗弱的反喷流将是一个重要课题, Jodrell Bank 的 MERLIN 和剑桥的 151 MHz 综合孔径在这方面将发挥重要作用。

在这里我们还要提到低频高分辨率观测的又一个重要的特点是进行偏振观测, 并和高分辨率偏振观测加以比较, 从而可以获得射电源内磁场分布和热电子密度分布的信息。因为在低频段上, 法拉第旋转效应和消偏振现象比较显著, 所以在测定这些参数上更加灵敏。

展瓣

将低频高分辨射电图和射电展瓣加以比较, 研究射电展瓣的结构和形成(展瓣内物理过程和展瓣与外部介质的相互作用), 一直是一个重要的课题。印度 Ooty 月掩源射电望远镜曾提供 327 MHz 上射电源结构信息^{[10], [42]}, 发现在展源的头(热斑)、尾、桥之间(指展尾到中央星系之间的辐射区域), 频谱指数有的变化大到 0.2—0.75, 而有些源中则没有什么变化, $\Delta\alpha < 0.2$ (Jenkins 和 Scheuer^[43]也曾指出, 在 3C 172 的东北瓣内, 米波低频尾巴和低频尾巴一样长)。从频谱指数分布的角度上看, 这是两类性质不同的展源。在频谱从热斑到尾巴变陡的情形下, 通常解释为相对论性电子从热斑逸出后经受同步辐射损耗所引起的(绝热膨胀不改变频谱指数); 在频谱不明显变陡的情形下, 则要求相对论性电子在展瓣内经受再加速。

在更低的频率上, 对一些特殊的射电源也进行过频谱指数分布的研究(例如 Cyg A 和 DA 240)。Winter 等人(1980)^[35]从 Cyg A 的 151 MHz 射电图得出, 沿主轴从热斑到尾端, 频谱指数 α (151—5,000) 由 0.6 增大到 1.5。从这种频谱变陡的分析得出 Cyg A 的年龄为 6×10^6 年, 热斑的平均运动速度为 $\sim 0.04c$ 。现有的 X 射线观测表明, Cyg A 的射电双源受热气体的约束, 所以低频观测和 X 射线观测的结合研究, 对于了解展瓣与外部介质的相互作用是有意义的。

Tsien^[44]在 $\sim 4'$ 分辨率上研究了 DA 240(巨射电星系)中的低频频谱指数分布, 发现在 NE 瓣内 α (151—1,400) 的变化 < 0.2 。在其边缘上也没有非常陡的区域, 这与其他一些大源(如 NGC 6251)不同, 在 NGC 6251 中存在着频谱指数 $\alpha > 1.3$ 的区域^[45]。在更高频率上, Strom 等人(1981)^[46]测到, 沿 DA 240 的主轴, $\alpha_{\frac{150}{100}} = 0.7$, 存在大片区域其内频谱指数 $> 1.0—1.2$, 表明存在频谱变陡现象。

像 DA 240 这样的巨射电星系的巨大展瓣结构和频谱指数分布, 可以用扩散模型加以解释: 从热斑逸出的相对论性电子在星系际磁场内扩散(计入同步辐射损耗和微波背景下的逆康普顿损耗)^[47]。巨射电星系的观测研究表明, 那里的外部介质密度很低, 可能比封闭宇宙的临界密度还要低^[48], 这大概是展瓣不受外部介质约束的原因。对于像 Cyg A 型射电双源展瓣的形成, 通常理解为: 从星系核发射出来的喷流冲击在外部介质上形成热斑区域, 从热斑流出的相对论性电子和磁场向后散逸形成被外部介质约束的展尾。最近 Wilson 和 Scheuer(1983)^[49]对这个问题作了计算, 计入了相对论性效应。

低频(特别是米波段)的高分辨观测,对于研究射电源的演化有特别意义。对于射电源的演化规律, **Baldwin**(1982)^[50]已利用 3 CR 的 166 个源样品作了一个初步分析,得到一个平均的演化轨迹(光度-线径关系,相当于射电天文学中的赫罗图)。

MERLIN 在展瓣(以及喷流和热斑)的低频研究上取得了有意义的进展,包括看到了一些射电星系和类星体中高频上未测到的一些新特点。例如在类星体 3 C 196 的 408 MHz 图上,测到了两块低亮度的辐射区域是过去两个热斑的遗迹,从而非常明显地显示出旋转对称结构^[50](后来高动态范围的 **VLA** 高频图证实了这种结构^[51])。而在 3 C 133 中, **Robson**(1981)^[52]测到了非常不对称的复杂展源结构,认为需要用束的交替供能、束的旋转和能量的滞后释放三种过程才能对它作出解释。这些事例表明,高频现象和低频现象通常反映了新生现象和老的遗迹之间的更替联系。所以这种比较研究对于了解射电源的演化(热斑、喷流和展瓣的演化)有很大意义。

对于在低频(以及高频)上观测到的喷流的不对称性现象,曾提出过两种可能的解释,涉及到活动星系中央机器内的供能方式。一种看法认为中央机器的供能是对称的,喷流的不对称性(反喷流的不存在)是由于小视角下的相对论性束射效应,使背向的喷流隐去,但这种解释必然导致观测到的展瓣应当是对称的(假设束供能和外部介质条件没有很大差别)。另一种看法认为,喷流的不对称性是星系核供能不对称性的结果。于是,单向供能必然导致观测到的热斑和展瓣结构也应当有相应的不对称性(对于展瓣来说,如果交替供能时间尺度比射电源寿命短得多,观测到的展瓣仍可以具有对称性)。从 **MERLIN** 低频观测到的热斑、喷流和展瓣的不对称性, **Lonsdale** 和 **Morrison**(1983)^[37]认为,交替供能的模型可能是更切合实际的模型,他们认为 **Christiansen** 等人(1977)^[53]提出的多重等离子团爆发模型能较好地解释展瓣结构和形态及能量转换。在这种模型中,可以提供能量滞后释放的解释。

在下面转到讨论致密源的低频结构之前,我们指出,在星系和星系团的射电晕观测和起源的研究以及它们与 X 射线晕的物理关系的研究上,低频观测也是有意义的,例如可参见[54—58]。

2. 致密源的低频结构

对于致密源(包括射电展双源中的中央致密源)的研究进展包括三方面:(1) ~1"分辨率描绘致密源周围的低频结构;(2) 用 **VLBI** 以 0.01 分辨率描绘致密源内的细节结构;(3) 低频变源的观测研究。

致密源周围结构

MERLIN 408 MHz 描图工作,发现许多致密源具有核心为主的结构:在坦谱强致密源周围有陡谱晕或延伸的低亮度结构(尺度~1"—10"的喷流和节点结构)^[50]。**Browne** 等人(1982)^[60]发现大多数视超光速运动源具有这种结构,而且这种~1"结构两边都有。**Schilizzi** 和 **de Bruyn**(1983)^[61]在高频高动态范围图上也发现了视超光速源周围的这种低亮度的秒级延伸结构。视超光速源的这种秒级延伸结构正好沟通着核心中 **VLBI** 毫角秒结构和大尺度喷流结构之间的联系,同时也反映了射电源的中间阶段的行为。显然,研究这种结构将会对了解毫角秒尺度和大尺度(>10")上的过程提供线索。

由于视超光速源被解释为小视角下的相对论性运动效应,有些作者^[50]认为,致密源的核心为主结构表明,这种致密源可能是小视角下的正常双源,其两个展瓣投影后成为核周围的晕,而相比之下核心亮得多,其原因是由于小视角下的相对论束射效应(展瓣没有相对论束射引起的增亮效

应)造成的。Orr 和 Browne(1982)^[62]曾从这种角度研究了秒级延伸结构相对于 VLBI 延伸结构的方向旋转。

由于 VLA 高频观测发现~40%致密源有秒级延伸结构^[63],所以对这种秒级延伸结构进行高、低频的比较研究是一种普遍的要求,它将对致密源物理提供新的线索。

这里还要提到的是关于低频陡谱致密源($\alpha > 1.1$)的研究,这类源的性质还不清楚^[64]。最近, Roland 等人(1982)^[65]用 MERLIN 观测了 6 个陡谱源($\alpha > 1.3$),发现它们是双源结构,他们把陡谱解释为中央机器活动的快速下降引起的。Cotton(1983)^[66]也研究过反转频率 $\leq 0.2-0.3$ GHz 的陡谱源(有些是低频变源),认为这类源中的磁场非常弱($\sim 10^{-3}$ G)。

致密源低频 VLBI 结构

正如在第一节(关于技术方法进展)中所叙述的,虽然用低频长基线干涉仪测量过许多致密源中的~0.01 级结构,但低频 VLBI 描图的射电源却只有少数几个,分辨率在~5—10 mas。这些描图表明,致密源低频 VLBI 的结构常常具有高频 VLBI 观测到的核心-喷流结构。但低频核喷流结构延伸到更大尺度,并表现出相对于高频喷流有旋转的现象。关于 327 MHz 和 609 MHz 上 VLBI 描图的结果,可参见文献[20],[22],[23]。最近,米波 VLBI 描图的一个重要进展是,在 329 MHz 发现 3 C 147 的核源是个变源,而且很可能是个视超光速运动源^[24]。显然,作为频谱和空间尺度上的延伸,低频 VLBI 无疑有助于了解致密源最内部发生着的物理现象,以及它们的演化。相隔一定时段,进行低频 VLBI 描图,可以发现致密源低频结构的变化和流量变化,但这方面的工作迄今非常少,因为只有少数几个射电源有经常性的低频 VLBI 监视观测,但看来这项工作必将有一个较大的发展,因为低频变源的搜索和监测有着重要的意义。

低频变源

低频变源研究的最近进展包括下述几方面。

(1) 经过多年观测和不同射电天文台观测结果比较,确定了低频变源的存在,现在已知有 100 多个(408 MHz)^{[67],[68]}。低频变源主要出现在坦谱致密源中,对于 408 MHz 的一个样品, Padrielli 等人(1982)^[69]发现 30—50%的源有>5—10%的变化;(2) 多频率的观测表明,一般低频变化和低频变化没有关系,可以是单纯的低频爆发^[70]。有些变源中,高频爆发和低频爆发同时出现,但存在分米波的间隙,那里没有爆发迹象。在 3 C 454.3 中已观测到两次这类爆发^{[71],[72]}。目前世界上有合作专业小组在进行低频变源的多频率监视观测,例如[73],[74],[75];(3) 低频变源和光学激变类星体(OVV)和 BLO 有高度的统计相关性^{[76],[77]},监测 OVV 和 BLO 的低频变化是一个有意义的课题;(4) 大部份视超光速运动源是快速低频变源,流量变化的最快时间尺度~3 个月^[78]。这样,在通常非相干同步辐射机制下,按变化时间尺度定出的角径上限推算出的亮度温度达到 $10^{14}-10^{16}$ K,从而会导致严重的康普顿困难。但 X 射线的观测却并未证实这一点;(5) Padrielli 和 Romney(1983)^[79]测量了 23 个低频变源的 VLBI 结构(在 $\lambda = 18$ cm 上,分辨率几个毫角秒),发现~40%具有核心-喷流结构,线尺度~10 pc;9%为双边对称结构,有 35%仍不能分解,16%为复杂结构,看来低频变源将成为毫米波、厘米波和米波 VLBI 联合观测的重点目标,以图理解其内的物理机制;(6) 最近的 329 MHz VLBI 描图发现,3 C 147 的中央致密核源是个变源^[24](3 C 147 是个典型的双源结构)。根据致密源的频谱和从流量变化时间尺度推论的角径上限,所推算出的自康普顿 X 射线强度比实际观测要高好几个数量级,这表明它很可能是个视超光速运动源,

如像 NRAO 140 那样。

在低频变源的理论解释上主要存在两个问题：(1) 流量变化的短时间尺度(1—2年，甚至1—3个月，属于视超光速变化)，从而遇到康普顿问题的困难。比较普遍的看法认为，低频变源中的快速时间变化可以用小视角下的相对论性运动效应来解释(参看[21])，即与视超光速分离运动属于同一类现象。但到目前为止，还没有进行过高频和低频 VLBI 的联合观测，以确定在某个具体事件上的这种联系。即使说需要对视光速运动源中参与视超光速运动的节点进行低频观测，同时又需要在发生快速低频变化的射电源中监测视超光速运动。这些问题现在已受到特别的重视；(2) 关于上述爆发的中频间隙的解释，目前已提出了两种理论，Cocke 等人(1978)^[71] 提出高频爆发和低频爆发起源不同机制，前者是相对论电子的小螺角同步辐射，而后者是相对论电子在起伏磁场内的“涟漪”(“Ripple”)辐射；最近 Marscher(1982)^[80] 提出另一种解释，认为这是活动星系核多次抛射的结果：一个新抛射的等离子团撞击到一个老的等离子团上，前者发射高频爆发，而碰撞产生的相对论性激波区域产生低频爆发。

结 语

从以上叙述我们可以看到，河外射电源的低频研究进展主要是：长分米波(408 MHz)~1" 级和米波(151 MHz)~1' 级射电源描图已进行常规工作，这些设备对于低亮度陡谱区域特别有效，可用在探测反喷流、射电双源遗迹等；和高频描图结合起来，可以对各种尺度上射电源现象提供更全面的信息，大大有助于理解星系核活动、供能方式和射电展源的演化。低频 VLBI 的观测研究可能即将出现一些新的发展。低频变源的研究具有特别的物理意义，因为它联系于河外射电源中最激烈的活动现象(如视超光速分离运动、视超光速流量变化和光学激变的统计相关性等等)。为了研究低频变源，需要流量变化的高分辨率的监视观测(特别对于那些有展源结构的变源)。监视致密源内的结构变化和流量变化，是解决变源物理机制的主要途径。同时也需要 X 射线和光学观测的配合，以探索这些现象和低频变源现象上的各种物理联系。

参 考 文 献

- [1] Readhead, A. C. S. and Hewish, A., *MNRAS.*, 78 (1974), Part 1.
- [2] Readhead, A. C. S. and Hewish, A., *MNRAS.*, 176 (1976), 571.
- [3] Hewish, A. et al., *Nature*, 296 (1982), 633.
- [4] Duffett-Smith, P. J., *IAU Symp.*, No. 97, p. 59.
- [5] Tsien, S. C. and Duffett-Smith, P. J., *MNRAS.*, 198 (1982), 941.
- [6] 钱善喆, *天文学报*, 24(1983), 19.
- [7] Banhatti, D. G. et al., *MNRAS.*, 205 (1983), 585.
- [8] Gopal-Krishna et al., *Nature*, 288 (1980), 344.
- [9] Gopal-Krishna et al., *MNRAS.*, 197 (1981), 1.
- [10] Joshi, M. N. and Singal, A. K., *Mem. Astr. Soc. India*, 1 (1980), 49.
- [11] Baldwin, J. E., *IAU Symp.*, No. 74, p. 3.
- [12] *Transactions of the IAU*, XVII A (1979), part 3, 139.
- [13] *Transactions of the IAU*, XVIII A (1981), 529.
- [14] Anderson, B. and Donaldson, W., *MNRAS.*, 137 (1967), 81.
- [15] Clarke, R. W. et al., *MNRAS.*, 146 (1969), 381.
- [16] Broderick, J. J. and Condon, J. J., *Ap. J.*, 202 (1975), 596.

- [17] Galt, J. A. et al., *MNRAS.*, 178 (1977), 301.
[18] Clarke, J. A., *A. J.*, 80 (1975), 923.
[19] Readhead, A. C. S. et al., *Ap. J.*, 215 (1977), L 13.
[20] Wilkinson, P. N. et al., *Ap. J.*, 232 (1979), 365.
[21] 钱善璿, 天文学进展, 2 (1984), 131.
[22] Wilkinson, P. N. et al., *Nature*, 269 (1977), 764.
[23] Simon, R. S. et al., *Ap. J.*, 236 (1980), 707.
[24] Simon, R. S. et al., *Nature*, 302 (1983), 487.
[25] Duffett-Smith, P. J., *MNRAS.*, 192(1980), 33.
[26] Perley, R. A., *A. J.*, 87(1982), 859.
[27] Hartas, J. S. et al., *MNRAS.*, 205(1983), 625.
[28] Noordam, J. E. and de Bruyn, A. G., *Nature*, 299(1982), 597.
[29] Cornwell, T. J. and Wilkinson, P. N., *MNRAS.*, 196(1981), 1067.
[30] Schwab, F. R., Proc. Int. Optical Computing Conf. SPIE, 230(1980), 18.
[31] Douglas, J. N. et al., Univ. of Texas Publications in Astronomy, No. 17, (1980).
[32] Gopal-Krishna and Steepe, H., *A. Ap.*, 113(1982), 150.
[33] Gregorim, L. et al., *A. J.*, 89(1984), 323.
[34] Gopal-Krishna et al., *A. Ap.*, 123(1983), 107.
[35] Winter, A. J. B. et al., *MNRAS.*, 192(1980), 931.
[36] Lonsdale, C. J. and Morrison, I., *Nature*, 288(1980), 66.
[37] Lonsdale, C. J. and Morrison, I., *MNRAS.*, 203(1983), 833.
[38] Davis, J. G. et al., *Nature*, 288(1980), 64.
[39] Biretta, J. A. et al., *Ap. J.*, 274(1983), L 27.
[40] Conway, R. G., *Nature*, 294(1981), 540.
[41] Willis, A. G. et al., IAU Symp., No. 97, p. 141.
[42] Gopal-Krishna and Swarwp, G., *MNRAS.*, 178(1977), 265.
[43] Jenkins, C. J. and Scheuer, P. A. G., *MNRAS.*, 174(1976), 327.
[44] Tsien, S. C., *MNRAS.*, 200(1982), 377.
[45] Waggett, P. C. et al., *MNRAS.*, 181(1977), 465.
[46] Strom, R. G. et al., *A. Ap.*, 100(1981), 220.
[47] Valtaoja, E., *A. Ap.*, 111(1982), 213.
[48] Saunders, R., *Observatory*, 102(1982), p. 128.
[49] Wilson, M. I. and Scheuer, P. A. G., *MNRAS.*, 205(1983), 449.
[50] Baldwin, J. E., IAU Symp., No. 97, p. 21.
[51] Laing, R. A., IAU Symp., No. 97, p. 161.
[52] Robson, D. W., *Nature*, 294(1981), 57.
[53] Christiansen, W. A. et al., *Nature*, 266(1977), 593.
[54] Dagkesamansky, R. D. et al., *MNRAS.*, 200(1982), 971.
[55] Hanisch, R. J., *A. Ap.*, 111(1982), 97.
[56] Vestrand, W. T., *A. J.*, 87(1982), 1266.
[57] Gubanov, A. G., *Астрофизика*, 18(1982), 177.
[58] Perola, G. C. et al., *A. Ap.*, 84(1980), 245.
[59] Browne, I. W. A. et al., *MNRAS.*, 198(1982), 673.
[60] Browne, I. W. A. et al., *Nature*, 299(1982), 788.
[61] Shilizzi, R. T. and de Bruyn, A. G., *Nature*, 303(1983), 26.
[62] Orr, M. J. L. and Browne, I. W. A., *MNRAS.*, 200(1982), 1067.
[63] Perley, R. A., *A. J.*, 87(1982), 859.
[64] Gopal-Krishna and Steppe, H., *A. Ap.*, 101(1981), 351.
[65] Roland, J. et al., *A. Ap.*, 116(1982), 60.

- [66] Cotton, W. D., *Ap. J.*, 271(1983), 51.
[67] Fanti, C. et al., *A. Ap. Suppl.*, 45(1981), 61.
[68] Fanti, C. et al., *A. Ap.*, 118(1983), 171.
[69] Padrielli, L., in *Low-frequency Variability of Extragalactic Sources*, p. 1, ed. by Cotton, W. D. and Spangler, S. R., (1982).
[70] Cotton, W. D. and Spangler, S. R., *Ap. J.*, 228(1978), L 63.
[71] Cocke, W. J. et al., *Ap. J.*, 226(1978), 26.
[72] Spangler, S. R. and Cotton, W. D., *A. J.*, 86(1981), 730.
[73] Spangler, S. R. and Cotton, W. D., in *Low-frequency Variability of Extragalactic Sources* p. 39, ed. by Cotton, W. D. and Spangler, S. R., (1982).
[74] Smith, A. G. et al., *ibid.*, p. 55.
[75] Aller, H. D. and Aller, M. F., *ibid.*, p. 127.
[76] Dennison, B. et al., *A. J.*, 86(1981), 1604.
[77] Dennison, B. et al., in *Low-frequency Variability of Extragalactic Sources*, p. 29, ed. by Cotton, W. D. and Spangler, S. R., (1982).
[78] Fanti, R. et al., *A. Ap. Suppl.*, 36(1979), 359.
[79] Padrielli, L. and Romney, J. D., in *Astrophysical Jets*, p. 81, ed. by Ferrari, A. and Pacholczyk, A. G., (1982).
[80] Marsher, A. P., in *Low-frequency Variability of Extragalactic Sources*, p. 83, ed. by Cotton, W. D. and Spangler, S. R., (1982).

(责任编辑 刘金铭)

On the Low-frequency Study of Extragalactic Radio Sources

Qian Shanjie Zhang Shanzhen Yu Ning

(Beijing Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper we review the progress of the low-frequency study of extragalactic radio sources. It contains:

- (1) Low-frequency observational techniques (IPS, lunar occultation technique, low-frequency aperture-synthesis and low-frequency VLBI);
- (2) Structure of extragalactic radio sources at low-frequencies (extended lobes, compact sources and low-frequency variables).