

河外低频射电变源

尹其丰

(北京大学地球物理系)

提 要

Hunstead在1972年发现的河外射电源的低频变化,对于阐明这类天体物理性质有着极重要的意义。本文评述了这方面研究所使用的仪器、观测方法以及所取得的主要研究成果。

本文指出,进一步观测以扩充变源星表并进行有关变源物理学的理论研究,对于更好地理解这一类河外天体将是十分重要的。

一、引 言

河外射电变源是当前河外射电天体物理研究的重要领域。我们在文献[1]中评述了这一领域的研究情况及所存在的问题。河外变源在观测和理论研究上,通常分为高频($f > 1000\text{MHz}$)和低频($f < 1000\text{MHz}$)。鉴于低频变源的特殊重要性以及我国有关的观测设备对此领域研究的前景,我们将在本文中作一评述。有关这方面的共同问题,已在文献[1]中谈到,故不在此重复。

河外射电源在低频段流量密度随时间变化的现象,首先是由Hunstead在1972年发现的。他所使用的频率是408MHz。比高频变源的发现迟。Hunstead的工作是开创性的,在文献上他的这一发现被评价为把人们引入到理解这种天体——低频变源——中物理过程的新纪元。

对低频变源的发现给以如此高的评价,有其物理学上的原因。根据同步加速器辐射理论,对于非扩张、膨胀的河外射电源,在非相干机制下,源的亮温度的上限应为 10^{12}K 。这是因为,若源的亮温度 $T_b \geq 10^{12}\text{K}$ 时,逆康普顿散射将起重要作用,使得射电源迅速致冷。对典型的河外源的理论模型计算表明,这种源的射电流量密度是应该随时间而变化,在低频段(波长 $\lambda \approx 1\text{米}$)变化应该很慢,时间尺度很长(几十年),流量密度的变幅也应该很小[2]。Van der Laan进一步对绝热膨胀模型作了计算,结果也表明,河外源的低频变化很慢,而且应与高频快速流量密度变化相对应[4]。在这样的理论研究的背景情况下,Hunstead在408MHz发现两个遥远的($z \approx 1$)的河外射电源CTA102和3C454.3的流量密度在几年之内发生很大变化,而且无任何高频活动相伴随。这一发现给河外射电源的理论研究提出了问题。原来的理论模型需要重新考查。

在发现低频变源的至今十年左右的时间里，已发表了大量的低频观测的文章。理论研究也很活跃。河外低频变源的研究，从实测到理论，都已成为河外射电天文的一个十分有趣的领域。

二、低频变源的观测及其所使用的设备

到目前为止，河外低频变源的观测都是在几个大型单天线射电望远镜或干涉仪上进行的。有关设备及所使用的观测频率列于表 1。在观测时仪器的性能和状态可参阅参考文献 [5]—[8]。在研究低频变源辐射性质的同时，需要参考高频资料，以便确定低频变化是否有高频变化相对应。因此，高频观测所使用的仪器也列于表 1 中。

表 1 所列的低频观测设备中，Bologna 和 Molonglo 两处的仪器性能相似。工作频率都是 408MHz，而且都是复合干涉仪。前者的分辨率在 408MHz 上为 2.6×5.6 角分，后者为 2.6×4.4 角分，两者十分接近。和表 1 中其他设备比较起来，这两个设备的性能和我国密云米波综合孔径射电望远镜更接近一些。因此，我们以 Bologna 十字复合干涉仪为例，说明同低频变源观测有关的一些问题。这或许会对我们将来使用密云射电望远镜进行低频变源研究有一些参考价值。表 1 中也列出了两个单天线大型射电望远镜，但它们的工作原理和综合孔径相差甚远。下面以 Bologna 复合干涉仪为例，在某些问题上结合笔者使用 NRAO300 英尺射电望远镜的体会，概述和讨论一下有关的问题。对大型单天线射电望远镜的使用方法，在此从略。读者可参阅例如文献 [5] 和 [6]。

表 1 低频变源观测所用的仪器

频 段	频 率 (MHz)	设 备	注
低 频	325, 365, 435	NRAO 300 英尺	美 国
	430, 318, 606	Arecibo 305 米	美 国
	408	Bologna 干涉仪	意 大 利
	408	Molonglo 干涉仪	澳 大 利 亚
高 频	1400	NRAO 300 英尺	美 国
	2695, 8085	NRAO 干涉仪	美 国
	7850, 15500	Haystack 120 英尺	美 国

Bologna 十字复合干涉仪是由东——西 6 面天线、南——北 8 面天线组成。两臂同时使用时，在 408MHz 上的分辨率为 $2.6' \times 5.6'$ ；仅使用东——西臂时，分辨率为 $4' \times 100'$ 。仪器是中星仪式的，所以只能在赤纬方向上变化指向。射电源在作周日视运动时扫过方向束。因此，一个目标射电源每 24 小时只能被观测一次，获得一个扫描记录(scan)。当仪器带有两个馈源时，则可得到两个扫描记录，这样可以互作比较。Bologna 干涉仪的指向精度可使其流量密度误差保持在 0.5% 以内。

对目标源的监视频次由望远镜的时间分配所决定。

仪器的稳定性对变源研究是至为重要的。Fanti 等人使用仪器的稳定性在几小时内优于 2%, 而仪器增益漂移却达 2—6%。为了进行相对测定, 需要比较频繁地观测比较源。

观测比较源是宇宙射电天文实测中不可缺少的一环。选取比较源的条件应是强而稳定的点源。为了减少定标误差, 自然要选取强源。所谓强源, 是相对于仪器的检测灵敏度而言。对于拥有非常高的分辨率的 VLA, 由于许多强源已不再是点源了, 只好选取某些不甚强的源 (例如 $S_{\nu} < 1 \text{ Jy}$) 作比较源, 因为 VLA 的灵敏度也非常高, 这些源也算强源了。对于分辨率和灵敏度都差一些的设备, 例如 Bologna 干涉仪, 点源的要求比较易于满足, 因而可选取满足点源要求的强源作为比较源。稳定(非变)源的要求, 在低频段易于实现, 因为在河外源中低频变源所占比例很小(在完备样品群中约占 2% 左右)。

比较源来源于各个射电观测台站自己的射电源(星)表。例如, NRAO 的 GB 星表 (Green Bank 站)、VLA 比较源表等。在 Bologna 也有他们自己的星表, Fanti 等人所用的星表称为 B2 星表。这些星表和比较源表一般只供内部使用, 不公开发表。但 Fanti 等所用的 24 个比较源资料, 可参见文献[9]中的表(1)。这 24 个比较源按时角均匀分布全天。经比较源校准后, 目标射电源流量测量的内部准确性优于 1%。但这不是指绝对流量测定。他们估计绝对流量测量精度可能会优于 5%。

由于变源研究的是射电源流量的变化, 因此只关心由于仪器指向误差和稳定性等因素对相对测量的影响, 而不甚关心绝对流量的测定。上述 5% 的精度是可以满足这一要求的。

Bologna 的观测表明, 太阳的干扰是很强的。这包括直接干扰和通过大气(电离层)的间接干扰。在 Green Bank 300 英尺天线上的观测也证明太阳的干扰很严重。有时不得不舍弃某些白天的观测资料。为此, 需要时隔半年的重复测定, 这样可排除这种干扰。

变源观测中干扰的另一个来源是人为干扰。在低频上的干扰一般比高频上更易发生。在河外低频变源观测中, 如何尽量消除干扰是一个迫切解决的问题。

观测资料处理及确定变源的判据, 是随各作者所用仪器的不同而不同。

三、主要观测结果

由于河外低频快变源的发现, 导致了有关理论模型必须作某些根本性修改, 因此, 在 1972 年以后开始执行一系列研究低频变源的计划, 以期寻找和监视低频变源。这类工作占用了相当多的大型射电望远镜的观测时间。由于这个领域中的问题并未得到很好的解决, 所以这些研究计划仍在执行中。

1. 样品选择与变源的检测结果

由于河外低频变源是长期的研究项目, 因此, 各个研究组都根据他们不同时期的观测结果发表非完备样品或完备样品的检测结果。样品的扩充虽然照顾到均匀性和完备性, 但是往往是有倾向性的。为此各个研究组之间在样品扩充方面, 也应互相参照彼此的最新观测结果。下面列举一些在低频变源观测方面比较系统的结果。

Cotton(1976)^{[10][11]}使用 NRAO300 英尺射电望远镜, 在 365MHz 上, 观测 816 个源组成的完备样品。发现 19 个变源, 约占总数的 2%。

Spangler 和 Cotton(1981)^[6]在 135 个河外源均匀样品中,发现 8 个低频变源和两个可能的低频变源。在 135 个源中包括 22 个高频上已确认的或可能的变源。这说明,低频变源所占比例比高频变源少。河外源的低频变化和低频变化在性质上不同,可能反映了不同的物理过程。他们提出,观测表明需要建立新的理论模型来解释河外源低频流量变化的现象。

Fanti 等人也给出了类似的结果,在 408MHz 上观测流量密度大于 0.4Jy 的 579 个河外源,发现 8 个变源和 12 个可能的变源^[7]。

Fanti 等人也发表了另外一组共 114 个射电源的观测结果,这组源不属于均匀样品,其中包括(a) Cotton 发现的 19 个低频变源;(b) 32 个小角径(小于 0".1)的源;(c) 45 个平谱($\alpha < 0.5$)源和(d)他们原来观测的 50 个源中(a)~(c)所不包括的 18 个源。观测结果为: 44 个低频变源和可能的低频变源。其中 8 个是来自(b)中,占小角径源总数的 1/4; 23 个低频变源来自(c),约占平谱源的 50%。

对于从实测角度开展对河外低频变源的研究来说,优先列入的源应是那些变幅大、时间尺度小的源。从目前已发表的资料中,大约可以选出 $|\Delta S| / \langle S \rangle > 10\%$, 变化时间尺度 < 15 个月的变源约 30 个。若将上述两种条件放宽为 5% 和 20 个月,则还可以有将近 20 个源入选。

2. 变源检测同源的平均流量密度 $\langle S \rangle$ 及相对变幅 $|\Delta S| / \langle S \rangle$ 之间的关系

对于任何给定的仪器,其灵敏度、稳定性、指向精度和工作波长等决定该仪器的检测阈值。以 Bologna 的复合干涉仪为例,把它观测到的 20 个变源和可能的变源按 $|\Delta S| / \langle S \rangle$ — $\langle S \rangle$ 作图,即得图 1。其中 $|\Delta S| / \langle S \rangle$ 是射电源的相对变幅, $\langle S \rangle$ 是射电源的平均流量密度。

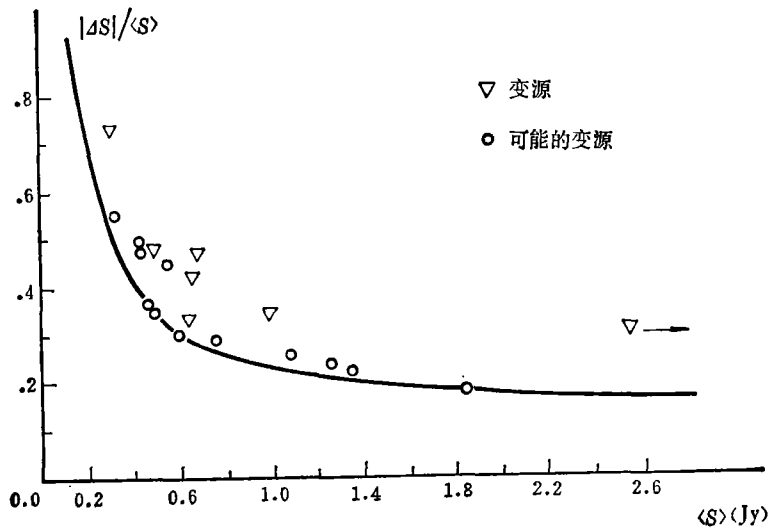


图 1 变源和可能的变源的相对变幅同平均流量密度的关系。

从图 1 中可以看出,为了确定射电源是低频变源,随着源的强度下降所需源的相对变化增大。即使对于强源,也要求其相对流量密度变化达 20%,对于较弱的射电源则要求相对变幅达 60% 以上才能确定是变源。从 Bologna 用了十年时间(1969 年——1978 年)所得到的观测

结果可以看出，在低频上观测变源比起高频更加困难。

3. 河外低频变源的谱特征

在宽频上研究低频变源的射电频谱特征是了解这种天体所不可缺少的，它对于了解哪种物理过程在辐射中占主导地位是十分重要的。从七十年代中期以来，人们就在很宽的频谱范围内，从米波到毫米波段观测某些河外低频变源。所得到的结果可概述如下。

(a) 平谱($\alpha < 0.5$)是低频变源的显著特征。图 2 给出 8 个变源和可能变源的射电谱。其中具有平谱的 6 个源都是肯定变源；2 个陡谱源都是可能的变源。Fanti 等人观测了 30 个平谱源，发现其中 $\geq 17\%$ 的源是变源和可能变源。与此相对照，在 550 个陡谱河外源中只有 0.5% 是变源和可能的变源。Condon 的观测发现，在他们的平谱源样品中约有 25% 是低频变源，和 Fanti 等人的结果接近。Spangler 和 Cotton 在 7 个频率上 (325 MHz—15500 MHz)

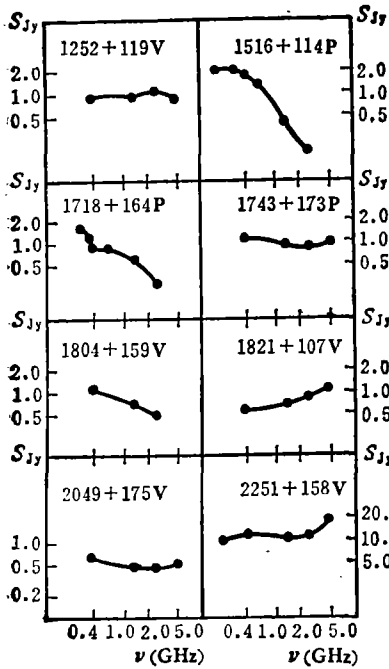


图 2 几个河外低频变源的射电谱。
(Fanti et. al. 1981)

对 135 个源进行观测。结果是除一个例外，全部低频变源都具有平谱，见图 3。因此可以得出结论，在低频段上，流量密度的变化是平谱射电源中相当普遍的现象。若考虑变源往往都有宁静相，上述的比例只能

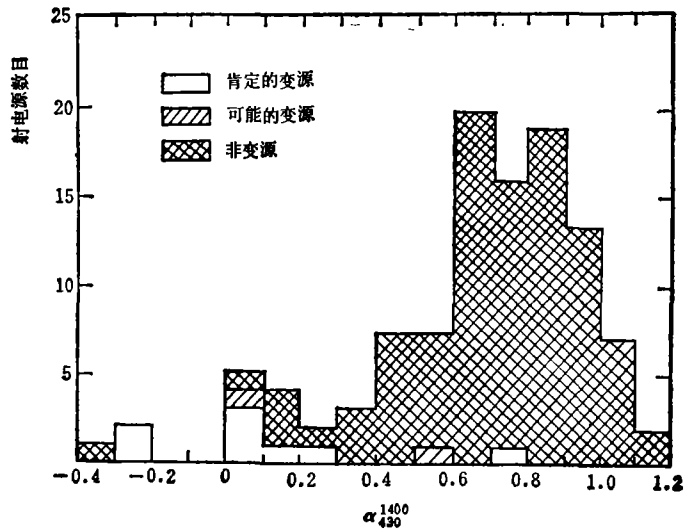


图 3 135 个河外射电源的频谱分布。

是下限，实际上平谱源中低频变源所占的比例应该更高。

(b) 低频变化的幅度同频率的关系

河外射电源低频流量密度变化的幅度随频率升高而快速降低。米波段的变化一般不与厘米波段上的变化相关。因此，有人提出低频变化可能是一种“低通滤波器”过程所致。

(c) 中频(厘米波)间隙现象

对某些河外低频变源进行 300MHz—90GHz 内多频监视。发现在 300—400MHz 上发生爆发时，在 15—90GHz 上有相应的爆发。但在 2—10GHz 上却看不到这种变化^[6]。在 Spangler 和 Cotton 所监视的 8 个低频变源中，目前已观测到有 5 个具有这种“中频间隙”现象。图 4 是

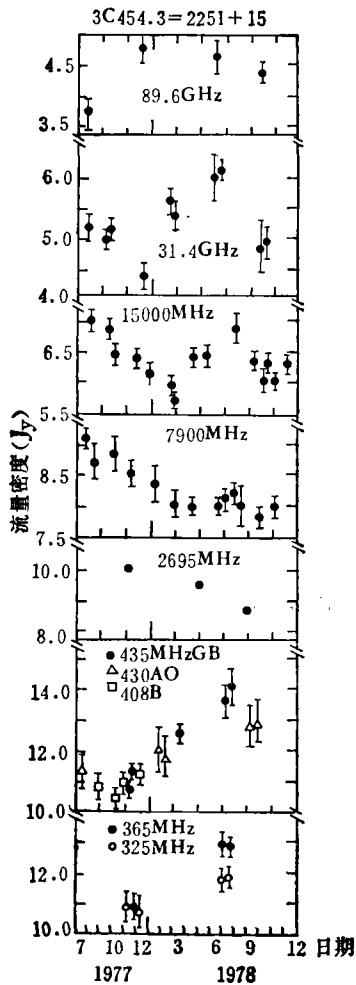


图4 3C454.3=2251+15的多频射电观测。低频和高频有很好的相关,但在中频却没有相应的变化,即存在一个“中频间隙”。

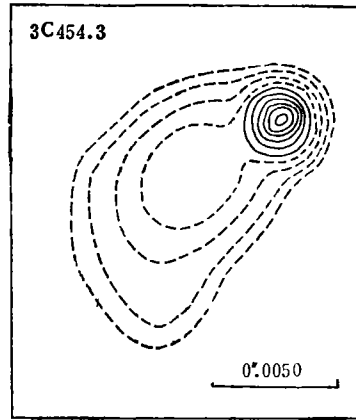


图5 3C454.3=2251+15在6厘米波长上的VLBI射电图。实线强度间距为10%,虚线分别为中心最强值的5%,2.5%,1%和0.5%。最强值(100%)相应的亮温度为 1.2×10^4 K。

这种事例之一。这是在325MHz—15500MHz上,用7个不同频率观测射电源2251+15,所得的结果具有明显的“中频间隙”特点。这个源又称为3C454.3,是Hunstead(1972)最初发现的两个低频变源之一。这是一个类星体($Z=0.859$),是一个致密射电源。图5是这个源在6厘米上的VLBI射电图^[2]。从这个图中可以看出,这个源可分为:①非常亮的致密核。VLBI频谱观测指出,这个核的谱指数 $\alpha \approx 2.4$;②核外围部分,又称为晕, $\alpha \approx 0$;③喷流部分是陡谱, $\alpha \approx 1.3$ 。

从上述这种中频间隙的谱特征以及其VLBI观测所得的信息可以看出,如果把低频变源作为总体来研究,需要和多频观测及VLBI观测结合起来,才能为理论模型提供可靠的依据。

四、理论模型工作

低频变源的观测工作开始得较迟,虽然观测资料已经不少(大部分是1975年以后发表的),但是建立理论模型的工作似乎仍很不成熟。不象高频变源理论那样有某一种理论模型能为大多数人所接受。

在构造理论模型中,需要的观测信息大致可分为如下三方面:

A. 时变和频谱特征,其中包括:流量密度变化的时间尺度、变幅,时变特征(周期形式还是大爆发形式),频谱(是否有米波反转?)等。

B. 变源结构、形态。来自 VLBI 观测。

C. 其它波段的信息, 尤其是空间 X 射线观测, 以确定这些低频变源是否有逆康普顿 X 射线辐射。

尽管这些观测资料给理论模型工作中的某些任意性施加了限制, 然而可对理论模型工作中的诸种可能性加以取舍。

对变源较全面的物理讨论, 早在 1974 年就已经进行了。Jones 等人比较系统地讨论了变源中可能的物理过程^{[13][14]}。他们把无电子各向异性和无高速膨胀过程的射电源称为规范非热源, 讨论了普通(非相干)同步加速器辐射理论对这种规范非热源的应用。在这种理论模型中, 所要求的观测量是: 红移量 Z 、源的角径 θ (来自 VLBI 观测)、圆偏振度 p 、低频扭转频率 ν_m 、流量密度谱 F_ν 及变化的时间尺度 t_v 等。理论计算可以给出电子的洛伦兹因子 γ_n 、磁场 B 、电子密度 n_e 、电子能量密度 u_e 和磁能密度 u_m 等。

把计算结果和大部分变源实测相比较, 发现修改这种规范模型需要引入两个因素: 电子运动的强各向异性和辐射源区的相对论性运动。修改后的理论模型可以解释低频变化时间尺度小于光传播时间等观测事实。Burbridge 等人(1974)用改进后的理论模型计算了 10 个河外变源的重要物理参量, 结果可参见文献[15]。

目前, 河外低频变源的理论研究工作在下列几个问题上仍在进行:

1) 低频扭转机制问题, 见图 6。大部分人认为是同步自吸收。若不是, 则米波段源呈光学薄, 这样则要求粒子能量过高。但若考虑源的相对论性整体运动, 这一困难则可以克服。

2) 源的真实角径问题。若考虑源的整体运动, 则视角径与真角径不同。可以把流量的快速变化理解为若干个小区域的爆发, 每个小区域的尺度都小于目前 VLBI 所能分辨的值(约为 10m.a.s.)

3) 关于引入源的相对论性宏观运动的问题^[16]。这一类模型的优点是可以解释变源的大部分观测事实而不必援引相干辐射, 其中包括视超光速现象。不很令人满意的是, 对于某些源它所要求的电子密度太高, 源的宏观运动速度似乎也太大, 对于个别源, 要求 $\gamma \sim 10^3$ 。

4) 对于中频间隙现象的解释问题。针对此问题 Cocke 和 Pacholczyk(1978)曾提出一种相干辐射模型^[17]。这种模型虽然可以解释中频间隙现象, 但它所需要的物理环境比较苛刻, 带有较强的人为性质。例如既要求高能($\gamma \sim 10^3$)电子和刚性磁层, 又要求尺度极小(8 公里)的磁场不均性。在一般情况下, 相干辐射的频谱很窄, 所发生的环境是高电子浓度, 这些因素限制了它的应用范围。相干辐射所预言的高亮温度($T_b \approx 10^{12}K$)到

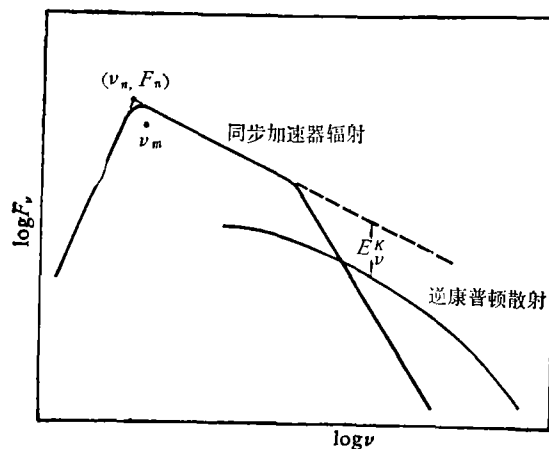


图 6 规范非热源射电光谱。 ν_n 为低频扭转频率, F_n 为流量密度。 E_ν^k 表示同步辐射与逆康普顿散射两种成分之比。

目前为止尚未被 VLBI 观测所证实。

从目前的研究结果来看,比较有前途的理论研究是考虑整体运动的非相干同步辐射模型。某些 VLBI 观测已直接证实这种源的整体运动的存在^[18]。但是研究工作仍然存在着困难,例如若解释河外源低频变化,在理论模型中需要假设这种宏观运动的速度太高,而要求星系际物质密度却非常的低。

另外,还有两种用于解释低频变化的模型,一种是用氢云对河外源射电辐射的自由——自由吸收,来形成低通滤波器,以期解释观测到的低频变化(Marscher, 1979)^[19]。另一种是把低频变化归结为银河背景的扰动效应(Shapirovskaia, 1978)^[20]。这两种模型都不太成功。

五、结 语

低频变源的研究历史不长,它是河外射电天文中较新的一个领域。目前积累的观测资料还不够丰富,低频变源的样品还很少。因此发现新的低频变源以扩充样品数目,是进一步研究低频变源所十分必需的。可以预期,密云综合孔径射电望远镜投入观测后,可以对此做出贡献。用新一代的 VLBI 对河外低频变源的结构及频谱进行观测,对于理解这种河外天体中的物理过程,也将会是十分重要的。理论研究方面,虽已有一定的基础,但仍有许多问题未得到解决。尽管如此,作为射电天体物理一部分的河外变源物理,仍然是大有可为的一个理论研究领域。

参 考 文 献

- [1] 尹其丰, 天文学进展, 1 (1983), 188.
- [2] Hunstead, R. W., *Ap. J. Lett.*, 12 (1972), 193.
- [3] Kellermann, K. I. and Pauliny-Toth, I. I. K., *Ap. J.*, 157 (1969), 1.
- [4] Van der Laan, H., *Nature*, 211 (1966), 1131.
- [5] Condon, J. J. et al., *A. J.*, 84 (1979), 1222.
- [6] Spangler, S. R. and Cotton, W. D., *A. J.*, 86 (1981), 5.
- [7] Fanti, C. et al., *A. & A.* 97 (1981), 251.
- [8] Cotton, W. D. and Spangler, S. R., *Ap. J., Lett.*, 228 (1979), L63.
- [9] Fanti, C. et al., *A. & A. Suppl.*, 45 (1981), 61.
- [10] Cotton, W. D., *A. J. Lett.*, 204 (1976), L63.
- [11] Cotton, W. D., *A. J. Suppl.*, 32 (1976), 467.
- [12] Pauliny-Toth, I. I. K. et al., *A. J.*, 86 (1981), 371.
- [13] Jones, T. W., O'dell, S. L. and Stein, W. A., *Ap. J.*, 186 (1974), 791.
- [14] Jones, T. W. et al., *Ap. J.*, 192 (1974), 259.
- [15] Burbidge, E. M. et al., *Ap. J.*, 193 (1974), 43.
- [16] Rees, M. J. and Simon, M., *Ap. J. Letters*, 152 (1968), L145.
- [17] Cocke, W. J. and Pacholczyk, A. G., *Ap. J.*, 226 (1978), 26.
- [18] Steielstad, G. A., *Ap. J.*, 193 (1974), 55.
- [19] Marscher, A. P., *Ap. J.*, 228 (1979), 27.
- [20] Shapirovskaia, N. Ya., *Astron. Zh.*, 55 (1978), 953.

Extragalactic Low Frequency Variable Radio Sources

Yin Qi-feng

(*Department of Geophysics, Beijing University*)

Abstract

It is widely realized that the low frequency variability of extragalactic radio sources discovered by Hunstead in 1972 is of vital importance in elucidating the physical nature of those objects. Instrumentations, the observational methods used and main results obtained are reviewed here.

It is indicated that further observations for enlarging the list of low frequency variable sources as well as theoretical studies of the physics of variable sources will be absolutely necessary if better insights into those extragalactic objects are expected.