

射电展源与喷流现象

马 骥

(中国科学院北京天文台)

提 要

近年来宇宙喷流现象的普遍发现,对于展源形成的束模型给予了很大的支持。在此模型的理论框架下,主要传能机制是通过从星系中心喷射出的气流。根据这一模型,本文介绍了对喷流的能源,扩张,热斑形成和喷流弯曲等问题的研究情况;并从观测角度介绍了对展源性质的统计分析和喷流的一些观测性质。尽管喷流的物理状态还不很清楚,但不少观测事实显示着喷流中磁流体动力学不稳定性存在。这种不稳定性并不总使喷流瓦解,但能够改变喷流的形态,并通过对非热粒子的加速,增强喷流的光度。近几年来对喷流中不稳定性的研究所取得的较大进展,加深了我们对展源形成的理解。

一、射电展源的统计特性

河外射电展源是宇宙中最巨大,最遥远,包含着极大能量的天体。展源的尺度有的可与庞大的星系团相比;多数射电展源找不到光学对应体,这表明对应天体非常遥远,其光学亮度弱于目前的观测极限;展源所包含的总能量多达 10^{60} — 10^{62} 尔格,是宇宙中存在高能现象的最早期证据之一。目前,对展源及其形成演化的研究,是现代天体物理学的前沿之一。

1953年,当第一个射电星系天鹅A得到了光学证认之后,R. C. Jennison 和 M. K. Das Gupta 把在焦德雷耳班克制成的第一架射电干涉仪指向天鹅A的方向。他们惊讶地发现射电辐射并非来自射电星系本身,而是产生于星系的两侧。从那时以来,射电展源形成的原因,一直是对射电天文工作者的一个重要的挑战。

随着性能不断改进的各种类型的射电望远镜相继投入观测,射电展源的研究取得了很大的进展,多类形态的射电亮度分布图,使人目不暇接,令人难于把握其基本特征和形成机制。

根据G. Miley^[1]的分类方法,可以把展源的形态分成下述六种类型,即以天鹅A为代表的“狭长的边缘增亮的双源”或称经典双源;以3C31为代表的“狭长的边缘变暗的双源”,以室女A、半人马A为代表的“宽阔双源”;以NGC1265和3C129为代表的“头尾射电源”;以3C465, IC708为代表的“宽角带尾源”和以后发A为代表的“星系团晕”。

考察不同展源的某种性质,发现它们存在着某种变化序列。例如,根据展源边缘变亮的程度,可以构成经典双源、3C31型和宽阔双源的序列;从对称性质来看,有镜式对称(或称C型对称)和旋转对称(或称S型或Z型对称)之不同,后者又有旋转角度大小不同的序列。

是什么因素决定着射电展源的多种形态呢？各种不同的展源特性当中，又是什么最为重要呢？对展源性质的统计研究，能帮助我们回答这两个问题，进而理解射电展源的形成机制。目前这种统计研究，大致可分为两种类型：

1. 从源的内在性质入手

许多统计工作研究展源的光度与其他性质的统计关系。具有代表性的工作有：

Birskinslaw 等人^[2]在1978年研究了57个弱射电星系的射电功率与亮辐射区分离的线距离之间的关系。他们发现射电功率愈大，亮辐射区相互分离愈远。

Fanaroff等人^[3]在1974年研究了3C射电源中可以在1.4京赫(分辨率23")和5京赫(分辨率6")的观测中分解为两个以上子成份的源有50多个。他们定义两子源中最高亮度区之间距与源总大小之比为 R ，统计发现，以178兆赫的射电亮度 2×10^{25} 瓦·赫⁻¹·球面度⁻¹为明显分界，高亮度源的 R 值均大于0.5，即高亮度区处于展源的外侧，而低亮度源的 R 值小于0.5，且多数呈现复杂结构，只有在星系附近的区域才可看出物质也是从相反方向抛出的。

Ekers等人^[4]从B2射电源表中有光学证认且线大小大于50千秒差距的十七个样品得到了低亮度源的完全取样，统计研究表明：

①在这组样品中也有半数源 $R > 0.5$ ，但这时高亮度区并非热斑，从小于15千秒差距的区域内发出的射电流量小于总流量的五分之一，而与Fanaroff等人^[3]所用高光度样品不同。同时源的总体结构也有变化，高光度源中 $R > 0.5$ 的样品多为经典双源，而本组样品中多为宽阔双源。

②再次肯定^[5]所得的下述结论，即低光度源形态畸变的现象或说偏离轴对称性的现象比较普遍。

③低光度源中发现喷流的几率远高于3C源，即低光度源中喷流的相对亮度大。

④若把样品扩充到线大小小于50千秒差距的情况，则低光度源中包含较多的分离不大的双源。

以上一些统计工作表明，展源的射电光度可能是更基本的物理参量。如果承认展源的能量来自某个中心能源，则高的射电亮度连系着稳定的传能方向和较高的传能效率。低亮度源传能方向较不稳定，容易偏离轴向对称，线大小较小，形不成热斑，喷流的相对亮度也较大，即传能效率也较低。

2. 环境对源性质的影响

七十年代初期，在一些丰富星系团中发现了头尾射电源，它的形态可以自然地解释为射电星系在星系团介质中的高速运动，这一解释与星系团各星系间存在较大的弥散速度的事实一致，与星系团往往是强X射线源的观测事实也相吻合。由射电形态和由热X射线发射机制估出的星系际介质密度相当一致。这一发现促进了人们对展源形成的理解，也引起了人们对星系团环境的注意。

在研究头尾星系的过程中，人们发现冲压也能够把星系中的星际介质排挤出去，那么，这一过程会不会影响中心能源的燃料供应呢？会不会从根本上影响星系团中射电源的内在性质呢？

在星系团里，星系以近于每秒千公里的速度穿越星系团介质，沿着弓形激波波阵面所耗

散的能量可以达到 10^{44} 尔格/秒, 因此从能源来讲, 头尾星系不需要星系核心提供能量。头尾星系与一般射电展源本质上是否相同呢?

通常认为射电展源, 特别是其低表面亮度部份, 需要周围介质的热压和冲压约束才能维持, 那么源的性质会不会因源处于星系团内外而有明显不同呢?

在 Ekers 等人^[4]的统计研究中, 证明了头尾射电源和宽角带尾源多发生于 Abell 星系团中, 而经典双源多不在 Abell 星系团中。但没有发现星系团内外射电源极大线度有明显不同, 也没有发现低表面亮度区的极小内压有明显区别。

Lari 和 Perola^[5]1978年的研究表明, 贫星系团中射电源的光度函数, 特别是光度函数曲线陡变的位置, 与富星系团的情况相当类似。Burns 等人^[6]在 51 个贫星系团观测中, 在离团中心角距小于 $5'$ 的区域内发现 37 个射电源, 它们的平均谱指数为 1.3 ± 0.3 , 也与富星系团的结果一致。

事实上, 在一些星系团中, 也可以找到经典双源, 而且它们并不一定处于星系团的中心。把射电观测与 X 射线观测加以比较, 发现这些射电源的最小能量密度远大于由 X 射线观测推出的热压或冲压所能约束的量级。

这方面的统计工作, 目前存在着较大的分歧, 但上述结果似乎表明, 贫富星系团中介质的密度和温度的差别不会很大, 星系团对源的性质影响也不是决定性的。头尾射电源等形态可以单纯用星系团内诸星系有较大的弥散速度来解释, 而且这种横向冲压只能影响较低亮度的源, 这也许意味着头尾射电源与其他射电展源的基本形成机制可能并无明显不同。

二、喷流对展源形成机制的启示

针对低频射电观测的结果, 人们提出了三种可能的展源形成机制。一种认为, 星系核心在一次剧烈活动中, 直接抛射出包含大量相对论粒子和磁场的巨大等离子团, 这称为等离子团抛射模型。第二种认为, 星系核抛射出来的是大质量天体, 由于它的活动, 在其周围形成射电电子源, 这称为投石器模型。最后一种则认为, 展源的巨大能量是星系核在长时间内陆续提供的, 这就是束模型, 它与其他两种模型相比, 具有较多的优点, 如

- (1) 对中心能源的功率要求低, 因为展源的巨大能量是长时间积累起来的。
- (2) 致密源与相应展源的轴向往往相同, 且有桥状或尾状结构把两者连接起来。
- (3) 迄今没有在扩展子源中找到小于 $1''$ 的致密射电结构。
- (4) 多种观测表明, 需要高能粒子的连续供给, 不断加速或就地加速机制。

七十年代中期以来, 相继在一些 3C31 型和头尾射电源中发现了喷流现象, 这一发现是对束模型的极其有力的支持, 从而使束模型得到了普遍的承认。

根据束模型的考虑, 喷流可以看作是能量外传的渠道, 同时也是能量在传输中有耗散的表现。能量在喷流中转换为可见能量的机制, 可以是新老等离子体物质之间的碰撞, 可以是相对论束内的激波, 也可能是开尔文-亥姆霍兹不稳定性引起的耗散。

但是, 一般来说, 喷流本身的射电光度只占展源总光度的很小一部分, 而且低光度源中反而容易发现喷流, 这些事实和能量损失的理论考虑表明, 能量不只是由发出同步加速器辐

射的相对论粒子所携带。可能,最有效的传能形式是流体的高速流动动能。

若喷流内某处的物质密度为 ρ_j ,物质流速为 v_j ,喷流截面为 A_j ,相对论粒子能量、磁能和热能密度的总和为 u_j ,则通过该处喷流传输的能流为

$$F = A_j v_j \left(u_j + \frac{1}{2} \rho_j v_j^2 \right)$$

在能流近似保持恒定的情况下,射电源光度应与能流相等。因此,光度对源结构的重要意义,可能表明能流大小对其传播特性有着决定性的影响。

能流中流体动能项的存在,为粒子的再加速或就地加速提供了必需的能量来源。

一些喷流具有高度的准直性。未见喷流的一些经典双源的热斑位置也暗示着高度准直性的存在。高度超声速的自由喷流可能有较高的准直性,这时喷流将在很大的传播距离内,以不变开放角增大,喷流的马赫数 M 与开放角 θ 满足

$$M \sim 2(\tan\theta)^{-1}.$$

喷流是否是自由喷流,目前尚无定论,已发现一些观测结果与自由喷流的假定有矛盾。

若束形成处磁能与动能密度相当,则在束外传过程中,此比值维持不变。由于与轴向平行的磁场分量反比于束之面积,而与轴向垂直的磁场分量反比于束之半径,故在束变宽时磁场将以横向为主。若边界有剪切运动,则场可与边界平行。通常用此解释喷流中场的性质和束的偏振特性,但进一步的研究还正在进行。

喷流传播到一定距离处时,可能被星系际介质的冲压阻挡,形成一个工作面。工作面外传速度 v_w 与喷流内流速 v_j 的关系为

$$v_w = \frac{\eta^{\frac{1}{2}}}{\eta^{\frac{1}{2}} + 1} v_j$$

式中 $\eta = \rho_j / \rho_{ig}$,为喷流内物质密度与星系际介质的密度之比。当能量在工作面聚集并以某种形式转换为可见能量时,就可能形成热斑。

从热斑扩散开来的能量,或由于耗散和不稳定性等使喷流瓦解,就会形成扩展的低表面亮度的区域,它们可能与星系际介质处于静力学平衡的状态。星系团X射线观测表明,星系际可能存在着数密度 $n \sim 10^{-8}$ /厘米³和温度 $T \sim 10^8$ K的气体,其热能密度可达 1.4×10^{-11} 尔格/厘米³,星系在介质中运动产生的冲压的能量密度 $\rho v_w^2 \sim 1.7 \times 10^{11}$ 尔格/厘米³,这与某些低表面亮度区观测到的最小能量密度相当,这为展源的约束机制提供了线索。或许有效的约束可以解释星系团中源的谱指数较大这一事实。

总之,仅从以上简单考虑就可看出,喷流一端联系着中心能源,另外一端联系着热斑和扩展结构。因此喷流性质的研究,已成为当前理解展源结构和形成的关键课题之一。

三、喷流的某些性质与开尔文—亥姆霍兹不稳定性的作用

自从七十年代中期发现喷流现象以来,目前已在70多个源中发现喷流,其中用甚长基线干涉测量观测同时发现小尺度喷流的约占十分之一。这些喷流的大小,亮度和形态千差万别,

此处只侧重与开尔文-亥姆霍兹不稳定性有关的一些观测性质的描述。

首先讨论喷流的偏振性质。通常喷流都是高度线偏振的。例如 NGC315, 其辐射的线偏振度在核附近达20%, 进入扩展子源之前增加到50%, 扩展子源的线偏振度达20%。

根据不同频率偏振性质的变化, 即消偏振的研究, 可以得到喷流内热电子密度的估计, 用这种方法求出的 NGC1265, NGC6251, 3C465 等源的电子密度均在 10^{-5} /厘米³至 10^{-4} /厘米³之间。这种观测可以排除过低密度或过高密度的喷流模型。

通过偏振观测, 还可以确定喷流中磁场的结构。观测发现, 高光度的源如 3C219, 4C 32.69等, 其磁场平行于喷流的轴线; 在 3C280.1 中, 当喷流轴线弯曲时, 磁场方向也跟着一起弯曲。对于较低光度的源, 在较接近核心处磁场与轴线平行, 而在较远处磁场与喷流轴线垂直, 例如 NGC6251, 3C31, NGC315 等。

在许多源中观测到喷流方向在改变, 粗略地加以区分, 可以把喷流方向的改变分为三类:

- ① 束的方向在较短的距离尺度上来回摇摆, 如3C129所示。
- ② 在星系两侧喷流方向的改变呈现镜式对称性, 如 3C449 和 4C32.69。头尾射电源可以看作镜式对称的一种特殊情况。
- ③ 在星系两侧喷流方向的改变呈现反演对称性, 如NGC326, NGC315和4C26.03 (参看图 1(a)、(b)、(c))。

通常把头尾射电源解释为星系相对于介质的高速运动, 由此推出喷流内流速约为数千公里/秒。其他的镜式对称情况可解释为双星系的动力学相互作用, 这一作用的时标约为 10^8 年,

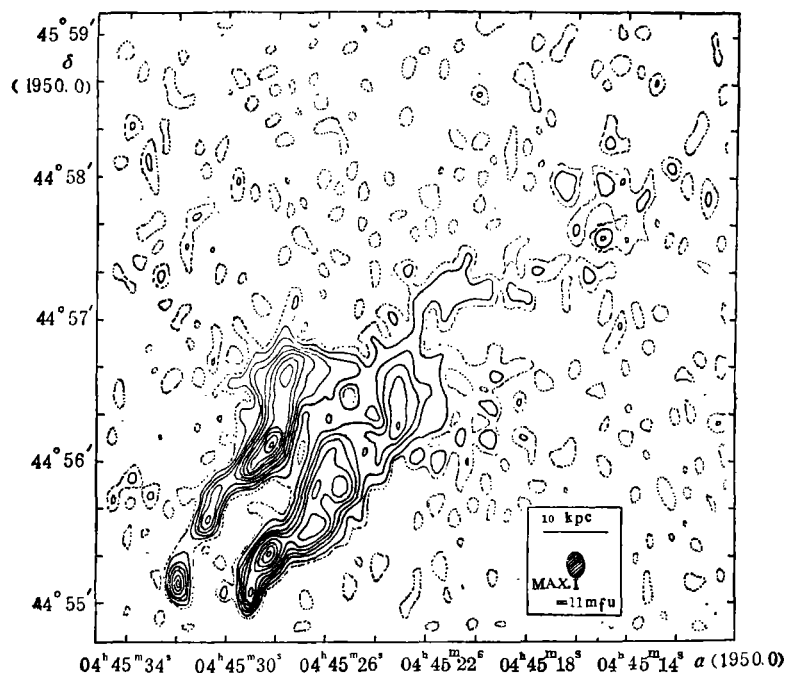


图 1(a) 3C129 喷流方面之摇摆

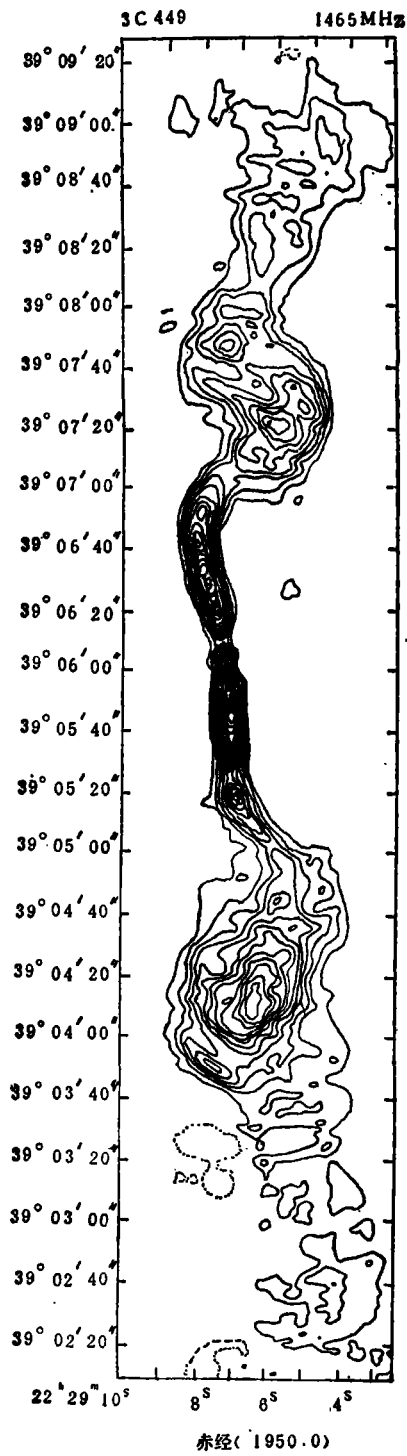


图1(b) 3C449的镜式对称结构

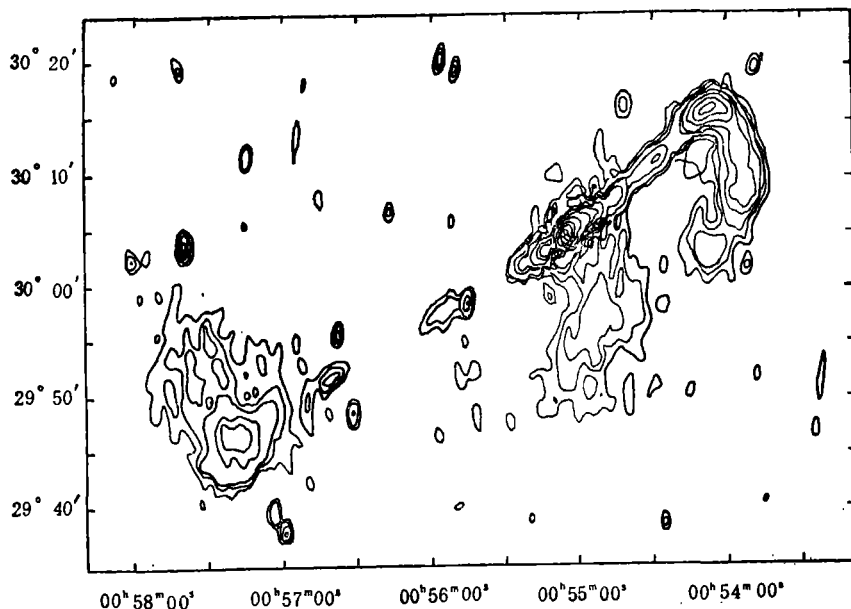


图 1(c) NGC315 的反演对称结构

由此推出喷流中物质流速约为500公里/秒。反演对称的情况往往解释为喷流方向的进动，由此推出喷流的特征流速约为万公里/秒。最近根据3C345毫角秒尺度的喷流方向的十年连续观测，直接发现了喷流位置角的变化，可能是喷流方向发生进动的一个直接观测证据^[7]。许多情况下，喷流只出现于星系一侧，而展源则基本上两侧对称。这常常解释为喷流中高速流动的相对论效应。因此不同的模型对喷流中流速的估计分歧很大，是目前喷流研究中的焦点之一。

喷流方向的摇摆，看来应该解释为流动的不稳定性。即使在NGC6251这一长距离喷流的情况下，仔细的观察表明喷流轴线并非直线，而且偏离直线的幅度随离开中心的距离增大而增大，这种摇摆至少存在有两个周期，波长大约为85千秒差距。这一现象对不稳定性在喷流中作用的研究，有着重要的意义(参看图2)。

喷流的亮度分布也受到广泛的注意。一般喷流与星系核之间有一个空缺，尺度为千秒差距的量级。这可能与喷流形成机制有关。在垂直轴线方向上喷流亮度的分布，多数表现为中心较强的单峰结构，不出现临边增亮现象。喷流亮度沿着轴向的分布，比理论预期的变化小很多。这意味着粒子的再加速或就地加速。喷流中往往存在许多小尺度的亮点结构，它们的普遍存在对理解能量外传过程也有着重要的意义。喷流一般以近于10度的开放角逐渐加宽，但开放角并非常数，而且在某些地方喷流可以突然变宽。在NGC1265的情况下，这一变宽发生在数十千秒差距处，而在NGC6251的情况下，喷流外传至数百千秒差距后，才突然变宽十倍以上。

对上述观测事实，存在着多种互相矛盾的解释。如喷流中的流速，喷流外围环境的影响等，都有很大的不确定性。但是，对于喷流中不稳定性所起作用的估计，近年来正在发生着显著的变化。早期工作中，不稳定性的存在是解释展源存在的一个理论困难。因此人们强调喷流的强偏振和不存在边缘增亮的观测事实，以否定不稳定性的存在；在理论上也用

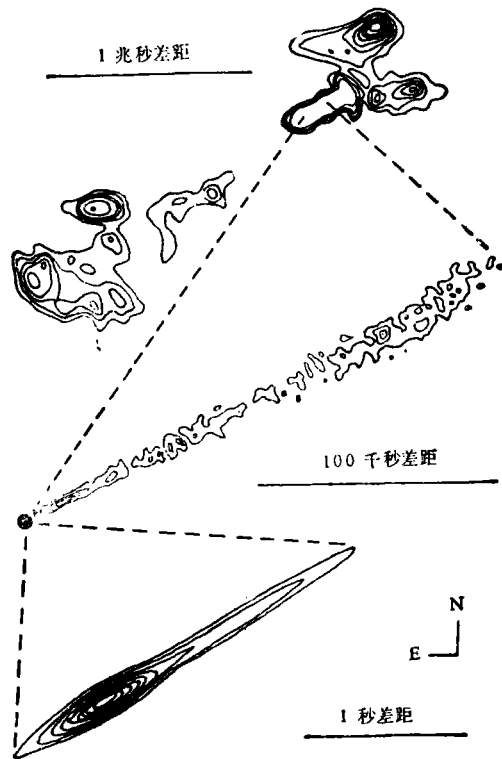


图2 NGC6251的不同尺度结构及其喷流

超相对论性的喷流，或喷流特有的某种磁结构或密度结构，把不稳定性稳定化，以避免这一理论困难。近年来这种情况已有显著的变化。

Jan Kuiper说明开尔文-亥姆霍兹不稳定性非线性增长的结果，不依赖于不稳定性产生的初始波长，最终总是大尺度结构占主要优势。这就解决了湍流存在与喷流偏振观测之间的矛盾。

Ferrari等人^[8]在详细研究了开尔文-亥姆霍兹不稳定性的发展以后明确指出，人们必须正视这一事实，即任何喷流，在本质上是开尔文-亥姆霍兹不稳定的。

目前已观测到喷流中有小尺度结构的存在，也有喷流传播方向的摇摆，但出现这些现象并不意味着喷流的立即瓦解，这一事实表明，可能存在着某种耗散机制，使不稳定性非线性发展，在相当一段时间内，可以限制在某种水平之下。因而不稳定性的发展并不一定破坏喷流，反而可以解释喷流的某些形态特征。

在各种可能的耗散机制中，可能小尺度湍流对高能粒子的加速最为重要。不稳定性的发生和粒子的就地加速本来是喷流理论中两个重要的理论困难。现在有可能利用一个困难去解决另一个困难。

总而言之，喷流现象的发现，对展源形成机制的研究起了很大的推动作用。但对喷流现象的研究，还只处于开始阶段，许多重要的问题都还没有比较一致的看法。特别是不稳定性在喷流中的作用问题，正在受到愈来愈广泛的注意。

参 考 文 献

- [1] Miley, G., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **18** (1980), 165.
- [2] Birskinshaw, M., et al., *M. N. R. A. S.*, **185** (1978), 39.
- [3] Fanaroff, B. L., Riley, J. M., *M. N. R. A. S.*, **167** (1974), 31.
- [4] Ekers, R. D., et al., *A. Ap.*, **101** (1981), 194.
- [5] Lari, C., Perola, G. C., 1978. *Proc. IAU Symp. 79: The large scale structure of the universe*, p.137, Reidel Publ. Co., Holland.
- [6] Burns, J. O., et al., *Ap. J.*, **83** (1980), 191.
- [7] Cohen, M. H., et al., *Ap. J.* **269** (1983), L1.
- [8] Ferrari, A., et al., *M. N. R. A. S.*, **196** (1981), 1051.

The Extended Radio Sources and Cosmic Jets

Ma Er

(Beijing Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In recent years the wide-spread existence of cosmic jets have been discovered, it strongly supported the beam model for the formation of the extended radio sources. In the frame-work of the beam model, the energy was transported by the streams of gas squirting out of the center of a galaxy. According to this model, the energy transportation, the formation of the hot spots, the widening and bending of jets were discussed. The statistical study of extended radio sources and the observational features of jets were briefly summarized. The observational data proved the existence of the MHD instabilities though many uncertainties existed for the physical conditions of jets. Rather than disrupting beams, these instabilities may alter the morphology of jets and enhance their luminosities through in-situ acceleration of non-thermal particles. The great progress made in recent years in the study of the instability of jets has shed much light on the formation process of the extended radio sources.