

# 星系团的射电研究进展

韩 金 林      卞 毓 麟

(中国科学院北京天文台 北京 100080)

## 摘 要

我们从四个方面综述星系团的射电研究进展。首先介绍了星系团中的分立射电源,特别是 cD 星系研究的一些最新进展和结果。继而介绍了星系团中射电晕的分类、目前的观测结果和理论解释。星系团中的磁场主要由射电研究得出,在本文中对此也作了适当的介绍和讨论。最后还简介了在星系团射电观测中发现的 relic 射电源。

**关键词** 星系: 星系团 — 星系: cD 星系 星系: 磁场

## 1 前 言

1958 年 Abell 编制了北天星系团表之后, Mills 很快就发现<sup>[1]</sup>, 星系团与低频射电源在位置上有很强的相关性。后来, van der Bergh 通过研究 3C 源确认了这种相关性的存在<sup>[2]</sup>。

实际上, 星系团的射电辐射主要是由单个射电星系所贡献的。此外, 一小部分星系团还有晕状的弥漫射电辐射。所有这些射电辐射都是相对论性高能电子绕磁力线加速运动时发出的同步辐射。通过射电观测, 人们可以揭示其他波段无法观测到的星系际介质的特征, 如磁场, 温度为 10--100K 的中性气体及“超热”气体成分 ( $10^{13}$ K 的宇宙线气体)。射电观测能够以超常的分辨率和动态范围观测到团内介质的结构和细节, 为揭示团内物理过程提供重要信息。星系团的射电研究为星系团的团内介质、动力学及物理环境提供了观测资料。但同时也提出了很多有待解释的问题。根据目前的射电观测能力, 可以为探讨 cD 星系的本质和有关模型的判别提供更好的观测资料。低频端的高灵敏度射电观测, 可以在星系团的射电晕方面作出很有价值的发现, 并可能为研究星系团射电晕的起源及维持机制提供线索。虽然有关星系团的许多理论问题需要多波段观测资料, 但射电观测仍然是星系团整体性质研究中不可缺少的重要手段之一。

有关星系团射电研究的综述文章最近相对较少。在 Fabian 编的《Clusters and Superclusters of Galaxies》会议文集中, Jaffe 和 Sarazin 分别就星系团射电方面的研

---

本文据“星系团专题讨论会”(1993 年 10 月 20 日—23 日, 浙江镇海)上的综述报告修订、扩充而成  
国家自然科学基金资助项目

1994 年 4 月 17 日收到

究<sup>[3]</sup>和团内介质的研究<sup>[4]</sup>作了一些综述。在我们这篇文章中,主要通过四方面的内容介绍目前在星系团射电研究这个领域中已取得的成果和存在的问题:(1)星系团中的分立射电源;(2)星系团中的射电晕;(3)星系团中的磁场;(4)最后简介一种在星系(超)团内或其附近发现的一种特别的射电源,即所谓的 relic 射电源。

## 2 星系团中的分立射电源

### 2.1 形态和一般性质

星系团中的分立射电源都是团内射电星系。一般的射电星系通常具有一个与星系成协的致密射电源,其两边则有瓣状的由核心喷出的发射射电辐射的等离子体。团星系因为受星系团引力势的作用和位力化过程而具有一定的运动速度,这就使得团内射电星系的射电辐射具有特殊的观测形态,如具有头尾源(HT)或广角尾流源(WAT)的特征。头尾源是团星系在团内介质中高速运动时产生的<sup>[5]</sup>,而广角尾流源一般与在团内慢速运动的主导星系有关<sup>[6-7]</sup>。广角尾流源一般要比头尾射电源亮。值得注意的是,一般的星系团中能被观测到有射电辐射的星系为数相当少。

20世纪60年代发现低频高流量密度的陡谱射电源与富星系团成协之后,很多针对星系团的射电巡天都显示,富星系团环境对团内射电源的形成有很深远的影响。团内射电源除了比团外射电源更具有复杂结构之外,还有更陡的谱指数<sup>[8]</sup>。在B-MI型星系团中,射电星系比其他型星系团中的射电源更多且更强。另外在星系团方向上的平谱射电源很少<sup>[9]</sup>,稍强一点的射电源的谱都比较陡。这很可能与团中的气体密度环境有关。

### 2.2 射电源面密度超出

除了早期的统计工作之外,最近Robertson和Roach对南天星系团方向上的Molonglo射电源进行了统计分析<sup>[10]</sup>,发现越趋近星系团核心,射电源密度越高。这个结果被Unewisse和Hunstead<sup>[11]</sup>用全天Abell星系团和Molonglo射电源表以及Brown和Burns用南天星系团和Parkes射电源表所证实<sup>[9]</sup>。后来人们对射电源密度有明显超出的星系团中心区方向上的射电源进行光学证认,结果发现团中心50kpc以内方向上的射电源几乎都是cD星系或D星系<sup>[11]</sup>。

### 2.3 cD星系的射电辐射

由X射线观测已经知道<sup>[13]</sup>,cD星系正在以冷流(cooling flow)的方式吸积周围的大量气体,并且是X射线辐射最强的核心点。cD星系相对于星系团内的非主导椭圆星系而言,射电辐射活动性更强<sup>[13,14]</sup>。尽管Jones和Forman提出星系团内的冷流与射电辐射之间可能有很强的相关性<sup>[15]</sup>,但Zhao等人<sup>[16]</sup>发现这种相关性很小。Burns<sup>[17]</sup>发现X射线光度与cD星系在6cm的射电辐射几乎没有相关性。但他发现,71%有冷流的cD星系是射电活动强的,而23%无冷流的cD星系产生了可观测的射电辐射。这可能是由于冷流气体到达中心发动机区,为射电辐射提供了能量。当然也可能与宇宙线电子加热团中心气体,或者辐射致冷与磁场重联相平衡等过程有关。所以这个问题值得继续研究。

最近Ball等人<sup>[11]</sup>对Abell星系团中的91个cD星系做了系统的射电观测和分析。

发现有冷却核的 cD 星系的射电辐射谱更陡些<sup>[17,18]</sup>。这意味着, 冷却的核区中心压力束缚了发出射电辐射的等离子体, 这种束缚使同步辐射的能损率更大些, 并且使射电源的形态和尺度与通常的 HT 源和 WAT 源有一定的区别。另外他们还注意到, 有广角尾流射电辐射的 cD 星系没有正在冷却的核。这说明, 较强的延展射电源并非由内落的冷流所致。在低 BM 型的星系团中, cD 星系的射电探测率更高一些, 并且谱也更陡一些。

值得注意的是, 星系团富度与 cD 星系的射电活动性无关<sup>[18]</sup>。cD 星系的光学特性与射电特性也没有关系。

### 3 星系团的射电晕

#### 3.1 观测和结果

星系团的射电晕是星系团中一种特殊的弥漫的低表面亮度射电源, 其射电谱相当陡 ( $S \propto \nu^{-\alpha}$ ,  $\alpha > 1$ )。星系团中的射电晕有两类: 一类是具有 Mpc 尺度, 并且与无 X 射线冷流的星系团成协。这种晕在 Coma 团中观测得最清晰, 因而也称为类 Coma 晕。另一类只有 1%—20% 的星系团尺度, 与冷流的核成协, 仅仅集中于很强的射电星系周围<sup>[19]</sup>, 而不是弥漫地几乎充满整个星系团空间, 这种晕因尺度小而称之为小型晕 (mini-halo)。

##### (1) 类 Coma 晕

实际上, 低表面亮度的射电晕很难精确成像。在低分辨率观测时, 虽然在整个方向瓣内的累积效应能够增加延展射电晕的可探测性, 但真正的弥散辐射通常很难与一些弱的分立射电源区分开。鉴于观测的难度, 目前只在几个星系团中明确无误地探测到了晕型射电辐射。类 Coma 晕已在 Coma(A1656)、A2218、A2255、A2256、A2319、A3667 六个星系团观测到<sup>[20-25]</sup>。这里要说的是, A3667 是一个不规则富团, 其射电晕相对于星系团中心是不对称的<sup>[25]</sup>。A2218 是一个比较远的富团 ( $z = 0.174$ ), 其射电晕的亮度要比 Coma 的晕低 10 倍左右<sup>[21]</sup>。

由于 Coma 团是最近的规则富团, 且远离银道面, 其射电晕便于观测, 也被观测得最多 (参见文献 [26] 的介绍)。Giovannini 等人<sup>[27]</sup>最近的观测表明, Coma 团中的射电晕没有子结构。但有趣的是它的谱分布图。在离团中心  $8'$  半径以内, 谱指数几乎是常数 ( $\alpha = 0.8$ ), 而在晕的边缘附近则包围着一圈特别的陡谱区 ( $\alpha = 1.8$ )。

在其他几个星系团中, 也可能有射电晕。在 Coma 超团中的 A1367 中, 确实具有弥漫陡谱射电辐射<sup>[28,29]</sup>, 基本上可以称之为晕源。有人认为 A2142 中也有射电晕<sup>[29]</sup>, 但早期的射电观测太粗糙, 后来的马普星系团射电巡天已经确定它没有晕<sup>[30,31]</sup>。A1775 也是如此。另外, 在马普的星系团射电巡天中发现<sup>[31,32]</sup>、A665、A2152、A948、A1329、A2176 和 A2312 六个星系团中可能具有射电晕<sup>[31,32]</sup>。这些目标尚有待更深入的低频射电观测进一步确认。

##### (2) 小型晕

小型晕已在 Perseus(A426)、A2052(3C317) 及 PKS0745-191 三个星系团中观测到<sup>[19,33,34]</sup>。人们早就认识到 Perseus 有射电晕。但直到最近才注意到它的晕区集中于 NGC1275(即射电源 3C84) 附近<sup>[19]</sup>, 并且形状也不很规则, 其边缘与 Coma 团的晕一

样<sup>[27]</sup>，也有比较大的射电辐射强度突变。在这个突变圈之外，还有一些很弱的射电辐射，但各个方向上的延展程度不等。A2052 中的射电源 3C317 是与 UGC9799 这个主导椭圆星系成协的。射电源的亮核就是这个星系发出的。但奇怪的是，这个射电源没有明显的射电喷流和射电瓣特征，而在这个亮核周围有一个形状不规则的射电晕<sup>[17]</sup>，尺度约  $75\text{kpc} \times 45\text{kpc}$ 。Zhao 等人的 VLA 观测<sup>[33]</sup> 显示了这个小型射电晕中有丰富的子结构。在射电图上可以看出明显的纤维状、瓣状、羽状、脊状和环状的子结构。小型晕的谱也相当陡。3C317 的射电晕在 20cm/90cm 的谱指数为  $\alpha = -1.5$ ，6cm/20cm 的谱指数为  $\alpha = -1.9$ 。PKS0745-191 对应于一个  $z = 0.1028$  的冷流特别强 (约  $500M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ ) 的富团中的 cD 星系。与 3C317 相似，该射电源有一个陡谱核 ( $\alpha = 1$ ) 和一个陡谱 ( $\alpha = 1.5-2.3$ ) 的弥漫射电晕<sup>[34]</sup>，并且没有喷流、热斑和瓣等特征。

另外，A2052 可能有一个小型晕<sup>[16]</sup>。

在国内，密云的综合孔径射电望远镜已用于星系团的射电晕研究。王豫敏已对 A2256 的大尺度射电晕和 A426 的小型晕做了观测<sup>[35]</sup>。

### 3.2 射电晕的产生机制

目前对射电晕的起源及其稀有性还没有很好的理解。无论那种理论模型，除了能够解释晕的典型特征 (如 Mpc 尺度，与射电星系成协或不成协，陡谱) 之外，还必须解释射电晕的稀有性。过去对星系团射电晕的解释主要集中于讨论相对论性电子的来源，而不是讨论所需的磁场。相对论性电子有这么几种可能的来源：(1) Jaffe 认为相对论性电子是由各个分立射电源中扩散出来充满整个团空间<sup>[36]</sup>；(2) Dennison 认为来源于团内射电星系的相对论性质子与团内介质中的热质子碰撞，产生二级相对论性电子<sup>[37]</sup>；(3) Roland 则认为产生射电辐射的磁场和相对论性电子都是在团星系运动时形成的尾流中产生的<sup>[38]</sup>。这三种模型在解释观测事实时都有些困难<sup>[39]</sup>。另外有人提出相对论性电子可能是在局部的激波中、或者在湍流放大的磁感应加速中、或者受宇宙线质子碰撞而产生的。这样的相对论性电子有很长的辐射寿命<sup>[3]</sup>。但这个说法有待进一步定量的计算。

目前，星系团射电晕的理论解释已经从讨论相对论性电子的来源转移到讨论射电晕所需的磁场。这可能与星系团磁场研究的进展有关 (参见下一节)。Burns 等人<sup>[19]</sup> 认为是因为缺乏团尺度大小的磁场而不是缺乏相对论电子，使得像 A426 这样的星系团中难以形成大尺度晕。因而，在这种情况下只能形成小晕。磁场如果可以由团内介质的湍流放大<sup>[40]</sup> (见第 3 节)，并假设湍流能量与动力学能量的空间分布类似，那么团中心就应具有最强的磁场。如果团内介质的磁雷诺数足够小，核区磁场就会逐步向外扩散以致充满团内区域，产生类 Coma 晕。一旦有了内向的冷流的作用，这种磁扩散就会受到抑制，因而只能够在中心区产生一个小型晕。Tribble<sup>[41]</sup> 认为小型晕是因为冷流压缩磁场，并使老的相对论性电子在冷流压缩过程中再加速而形成的。

最近 Tribble 提出<sup>[41]</sup>，星系团的射电晕是一种暂态现象，认为它是星系团合并<sup>[42]</sup> 的产物。星系团完全合并后，射电晕会逐步暗淡下去。

Giovannini 等人<sup>[27]</sup> 根据 Coma 团射电晕的观测和谱指数分析提出，形成射电晕的相对论电子是由绕星系团中心转动的头尾射电源 (例 Coma 团中的射电星系 NGC4869) 提供的。相对论性电子在离开该星系后，受尾流中的弱激波作用而被再加速。他们认为

射电晕之所以稀少, 是因为只有很少的星系团内具有绕团中心转动的头尾射电星系。但这种说法仍需由其他晕型星系团的观测资料进一步确认。

## 4 星系团中的磁场

星系团中如果没有磁场, 就不会产生射电晕。毫无疑问, 对团内等离子体的完整描述需要团内磁场强度及其分布形态的信息。根据磁场的详细特征可以揭示出团内热气体的起源。另外磁场对于确定团内其他物理参数(如电子和中子的能量密度比)都是必不可少的。

### 4.1 观测证据

星系团内磁场存在的直接证据是探测到团内弥漫的射电辐射。另外, 星系团方向上背景射电源的法拉第旋转(Faraday Rotation, 简作 RM)的统计分析, 也很好地说明了团内大尺度磁场的存在。

如果假设了粒子与磁场能量分布的相互关系(比如能量均分), 那么由弥漫的射电辐射就可以确定团内空间以体积平均的磁场强度值。但这个假定有一些不确定性。如果有高能 X 射线辐射(HEX)的观测结果, 这种不确定性就可以被排除掉。因为 HEX 是宇宙微波背景辐射与团内介质中辐射射电波的相对论性电子进行康普顿散射的结果。遗憾的是, 现在并未确信无疑地探测到星系团 HEX。由 HEAO1 A4 的观测结果(即 HEX 的上限)推得了 6 个星系团平均磁场的下限约为  $0.1\mu\text{G}$ <sup>[43,48]</sup>。

磁场的强度和形态, 还可以通过星系团后面背景射电源的偏振辐射在穿过团内介质时产生的 RM 揭示出来。由于各个射电源内禀条件差异很大, 并且银河系磁场对 RM 有系统性的贡献, 团内磁等离子体引起的 RM, 只能通过背景射电源和非背景射电源的 RM 统计比较之后才能确定。这样的工作需要很多具有 RM 测量值的射电源样本。

Kim 等人<sup>[44]</sup>利用背景射电源的 RM 资料得到 Coma 团的磁场强度为  $1.7\pm 0.9\mu\text{G}$ , 相关长度为 7—20kpc。Giovannini 等人<sup>[27]</sup>根据能量均分原理得到 Coma 团的大尺度磁场强度为 0.5—0.7 $\mu\text{G}$ 。这可能是很多星系团内星系际大尺度磁场强度的典型值。

由多个背景射电源样本的 RM 值, 已统计出多个星系团的磁场强度平均值。Lawler 和 Dennison<sup>[45]</sup>比较了一个 RM 的控制样本和一个背景射电源的 RM 样本, 发现团内介质的 RM 贡献约为  $50\text{rad}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由此导出平均磁场  $B < 1\mu\text{G}$ , 相关尺度  $l \geq 20\text{kpc}$ 。但此结果可靠性较低。Hennessy 等人<sup>[46]</sup>得到团内介质 RM 贡献的上限为  $55\text{rad}\cdot\text{m}^{-2}$ 。他们假设磁场在星系团尺度( $l = 500\text{kpc}$ )上是均匀的, 得到磁场  $B$  的上限为  $6 \times 10^{-8}\text{G}$ 。但如果取相关尺度为 20kpc, 密度取  $3 \times 10^{-3}\text{cm}^{-3}$ , 那么磁场强度值上限为  $0.2\mu\text{G}$ (比 HEX 给出的下限  $0.1\mu\text{G}$  略大一些)。Kim 等人<sup>[47]</sup>将 152 个射电源分成三组(1/6 $R_c$  内的 30 个, 1/6 $R_c$ —1/3 $R_c$  内的 23 个, 以及控制样本 99 个), 比较其 RM 值的分布, 得到团内介质 RM 的贡献约为  $51\text{—}84\text{rad}\cdot\text{m}^{-2}$ 。他们的结果最近已被 Goldshmidt 和 Rephaeli 所证实<sup>[48]</sup>。最近, Carvalho<sup>[49]</sup>仔细分析了 Kim 等人<sup>[47]</sup>的资料, 发现如果尺度取 15kpc 量级, 团内磁场强度大约为  $0.3\mu\text{G}$ 。

Ge 发现在冷流中心的射电源有很大的 RM<sup>[50]</sup>, 其数值约有几千到几万  $\text{rad}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

Ge 和 Owen<sup>[51]</sup> 认为, 在 A1795 星系团中心区域有强于  $20\mu\text{G}$  的规则磁场。很大的 RM 是由团内磁等离子介质引起的。Soker 和 Sarazin<sup>[52]</sup> 认为这么强的磁场是冷流压缩冻结磁场造成的。

#### 4.2 星系团内磁场的起源

关于团内大尺度磁场的起源, 目前有几种说法 (参见文献 [49])。有一种说法认为, 团内磁场来源于星系。这种理论认为团内气体来源于星系, 冻结在正常团星系内星际介质中的磁场由于冲压剥落, 或者由于星系间的潮汐作用, 或由于蒸发, 或者被超新星驱动而一起被抛到星系际空间。支持这种说法的观测是团内介质中的宇宙金属丰度较高。

目前最时髦的一种说法是 Dynamo 放大机制<sup>[40]</sup>。星系在团内介质中运动能产生一些磁流体湍流, 这种湍流可以将很弱的种子磁场放大, 得到团内目前所观测到的磁场。Ruzmaikin 等人<sup>[53]</sup> 认真研究了这种机制, 认为它作用后会使得星系团内存在呈扭曲的细绳状的磁场。但这种磁场不可能产生所观测到的团内射电源或背景射电源的 RM<sup>[48]</sup>。

关于团内磁场的起源, 还有一种说法就是宇宙学起源 (即原初起源)。冻结在原初宇宙中的磁场在星系团形成时一起被压缩后放大, 并保留于团内至今。同样, 冷流可以将团内磁场压缩放大, 使之在冷流中心区得到增强<sup>[52]</sup>。下节中介绍的星系团或附近的弥漫射电源所具有的大尺度规则磁场结构, 可能支持了这种磁场起源的说法。

### 5 星系 (超) 团内的 Relic 射电源

在对个别星系团的高灵敏度观测以及 Effelsberg 的 Abell 星系团射电观测中, 发现不少陡谱射电源, 他们没有光学对应体<sup>[31,54,55]</sup>。这些射电源有人称之为 relic 射电源 (radio relic sources)。根据射电源谱的陡谱特征和星系团的热压力等信息判断<sup>[56]</sup>, 这种射电源很可能是嵌在星系团介质之中的 (从母星系中吹出来的) 辐射射电波的等离子体。不过, 对这种 relic 射电源目前还知之甚少, 也有人认为它们是背景射电源。

在星系团的射电观测中, 还发现了几个很奇怪的弥漫射电源。与一般的射电晕不同的是, 它们不在某一星系团内, 但具有很大的尺度和很规则的磁场分布。由于这种射电源没有光学对应体, 有人也称之为 relic 射电源。

最早发现的弥漫 relic 射电源是 Coma 团附近的 1258+275 射电源, 位于 Coma-A1367 超团中, 距 Coma 团中心约  $2.7\text{Mpc}$  ( $H_0 = 100\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ), 在 Coma 和 A1367 连线的垂直方向上有  $30' \times 10'$  (约  $600 \times 200\text{kpc}$ ) 的延伸, 并且具有很规则的大尺度磁场分布<sup>[57]</sup>。磁场的方向与射电源的延伸方向一致。最近 Giovannini 等人<sup>[58]</sup> 又对这个射电源进行了观测研究, 但它究竟是什么, 发出射电辐射的相对论性电子是从哪里来的, 为什么有这样规则的磁场, 以及其他一系列问题, 至今仍然是个谜。

另一个奇异射电源是 Rood27 号超星系团中的 relic 射电源 0917, 最近也被仔细观测过<sup>[59]</sup>。如果该射电源具有 Rood27 号超团的距离 ( $z = 0.125$ ), 那么它的最大尺度就有  $1.6\text{Mpc}$  ( $H_0 = 50\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ), 距 A786 的投影距离约  $5\text{Mpc}$ 。最新观测结果表明<sup>[59]</sup>, 射电源 0917 具有规则对称旋涡结构的磁场分布。

类似的 relic 射电源可能还有 1401-33<sup>[60]</sup>, IC2476<sup>[61]</sup>。不过, 射电源 1401-33 很像

是邻近的一个贫星系团中的射电晕<sup>[60]</sup>。而 IC2476 的射电源倒可能真是一个射电星系的 relic<sup>[61]</sup>。

## 6 结 束 语

上面已经基本全面地介绍了近年用射电手段在星系团研究方面取得的进展。目前, VLA 已经用于 20cm 的星系团巡天工作<sup>[16,62,63]</sup>, 以期在环境对射电星系的影响, 富团对射电星系的演化以及其他几个课题上取得进展。当然, VLA 对一些特别高 RM 的冷流星系也进行了仔细深入的研究<sup>[50,51,64]</sup>。意大利的一个研究组已用 WSRT 对一批星系团进行了观测, 其主要目的在于搜寻和研究射电晕。很多观测结果尚未发表。国内密云的综合孔径射电望远镜可以对选出的一些星系团进行较深入的观测, 利用射电晕的陡谱特征, 以在低频段有效地证实和测量星系团的射电晕。另外还可以发挥其大视场的优势, 在超星系团方向上进行较深入的观测, 以洞察星系团在密近相互作用时的射电表现。

## 参 考 文 献

- [1] Mills B Y. Aust. J. Phys., 1960,13: 550
- [2] van der Bergh S. Ap. J., 1961, 134: 970
- [3] Jaffe W. In: Fabian A C ed. Clusters and superclusters of galaxies. Dordrecht: Kluwer, 1992. 109
- [4] Sarazin C L. In: Fabian A C ed. Clusters and superclusters of galaxies. Dordrecht: Kluwer, 1992. 131
- [5] Miley G, Perola G, van der Kruit P, van der Laan H. Nature, 1972, 237: 269
- [6] Owen F N, Rudnick L. Ap. J., 1976, 205: L1
- [7] Owen F N, Rudnick L. Ap. J., 1976, 203: 307
- [8] McHardy I M. M.N.R.A.S, 1979, 188 : 495
- [9] Brown D L, Burns J O. A. J., 1991. 102: 1917
- [10] Robertson J G, Roach G J. M.N.R.A.S, 1990. 247: 387
- [11] Unewisse A M, Hunstead R W. Proc. Astron. Soc. Aust. 1991, 9(1): 100
- [12] Fabian A C, Nulsen P E J, Canizares C R. Astron. Astrophys. Rev. ,1991, 2: 191
- [13] Burns J O, White R A, Hough D H. 1981, A. J., 1981, 86: 1
- [14] Bijleveld W, Valentijn E A. Astron. Astrophys., 1983. 125: 223
- [15] Jones C, Forman W, Ap. J., 1984, 276: 38
- [16] Zhao J-H, Burns J O, Owen F N. A. J., 1989, 89: 64
- [17] Burns J O. A. J., 1990, 99: 14
- [18] Ball R, Burns J O, Loken C. A. J., 1993, 105: 53
- [19] Burns J O, Sulkenen M E, Gisler G R, Perley R A. Ap. J., 1992, 388: L49
- [20] Willson M A G. M.N.R.A.S., 1970, 151: 1
- [21] Birkinshaw M. M.N.R.A.S., 1986, 222: 731
- [22] Harris D E, Kapahi V K, Elkers R D, Astron. Astrophys. Suppl. , 1980, 39: 215
- [23] Bridle A H, Formallont E B. Astron. Astrophys., 1979, 52: 107
- [24] Harris D E, Miley G K. Astron. Astrophys. Suppl., 1978, 34 : 117
- [25] Goss W M, Ekers R D, Skellern D J, Smith R M. M.N.R.A.S., 1982, 198: 259
- [26] Venturi T, Giovannini G, Feretti L. A. J., 1990, 99:1381

- [27] Giovannini G, Feretti L, Venturi T, *et al.* *Ap. J.*, 1993, 406: 399
- [28] Gavazzi G, Jaffe W J. *Astron. Astrophys.*, 1987, 186: L1
- [29] Gavazzi G, Trinchieri G. *Ap. J.*, 1983, 270: 410
- [30] Andernach H, Siever A, Kus A, Schnaubelt J. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1986, 65: 561
- [31] Andernach H, Han Tie, Sievers A *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1988, 73: 265
- [32] Reuter H-P, Andernach H. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1990, 82 : 279
- [33] Zhao J-H, Sumi D M, Burns J O *et al.* *Ap. J.*, 1993, 416: 51
- [34] Baum S A, O' Dea C P. *M.N.R.A.S.*, 1991, 250: 737
- [35] Wang Yumin. PhD thesis. Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, 1992
- [36] Jaffe W J. *Ap. J.*, 1977, 212: 1
- [37] Dennison B. *Ap. J.*, 1980, 239: L93
- [38] Roland J. *Astron. Astrophys.*, 1981, 93: 407
- [39] Hanisch R J. *Astron. Astrophys.*, 1982, 116: 137
- [40] Jaffe W. *Ap. J.*, 1980, 241: 295
- [41] Tribble P C. *M.N.R.A.S.*, 1993, 263: 31
- [42] De Young D S. *Ap. J.*, 1992, 386: 464
- [43] Rephaeli Y, Gruber D E. *Ap. J.*, 1988, 333: 133
- [44] Kim K-T, Kronberg P P, Dewdney P E *et al.* *Ap. J.*, 1990, 355 : 29
- [45] Lawler J M, Dennison B. *Ap. J.*, 1982, 384: 73
- [46] Hennessy G S, Owen F N, Eiley J A. *Ap. J.*, 1989, 347: 144
- [47] Kim K-T, Tribble P C, Kronberg P P. *Ap. J.*, 1991, 379: 80
- [48] Goldshmidt O, Rephaeli Y. *Ap. J.*, 1993, 411: 518
- [49] Carvalho J C. *Astron. Astrophys.*, 281: 641
- [50] Ge Jingping. PhD thesis. New Maxico Institute of Mining and Technology, 1991
- [51] Ge Jingping, Owen F N. *A. J.*, 1993, 105: 773
- [52] Soker N, Sarazin C L. *Ap. J.*, 1990, 348: 73
- [53] Ruzmaikin A, Sokoloff A, Shukurov A. *M.N.R.A.S.*, 1989, 241 : 1
- [54] Righetti G, Giovannini G, Feretti L. *Astron. Astrophys Suppl.*, 74: 315
- [55] Vallee J P, Roger R S. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1989, 77 : 31
- [56] Harris D E, Dewdney P E, Costain C H *et al.* *Ap. J.*, 1988, 325: 610
- [57] Giovannini G, Feretti L, Andernach H. *Astron. Astrophys.*, 1985, 150: 302
- [58] Giovannini G, Feretti L, Strangghellini C. *Astron. Astrophys.*, 1991, 252: 528
- [59] Harris D E, Stern C P, Willis A G *et al.* *A. J.*, 1993, 105: 769
- [60] Goss W M, Meadam W B, Wellington K J *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1987 , 226: 979
- [61] Cordey R A. *M.N.R.A.S.*, 1987, 227: 695
- [62] Owen F N, White R A, Burn J O. *Ap. J. Suppl.*, 1992, 80: 501
- [63] Owen F N, White R A, Ge Jingping. *Ap. J. Suppl.*, 1993, 87: 135
- [64] Taylor G B, Perley R A. *Ap. J.*, 1993, 416 : 554

(责任编辑 刘金铭)



## Recent Progress of Radio Studies on Clusters of Galaxies

Han Jinlin    Bian Yulin

*(Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Bei jing 100080)*

### Abstract

Four aspects of recent progress in radio studies on clusters of galaxies are reviewed. Firstly, the new results of recent studies of discrete radio sources, especially cD galaxies in clusters are summarized: Secondly, both the observations of diffuse radio sources—radio halos in clusters and new efforts to understand halo emissions are described. Thirdly, magnetic fields in clusters, which is revealed by radio observations, are discussed. Finally, a brief introduction to the strange radio source population—radio relic which is probably associated with clusters is presented.

**Key words** galaxies: clusters of galaxies: cD galaxy · galaxies: magnetic fields