

高红移射电星系的研究进展

蔡正东 南仁东
(中国科学院北京天文台 北京 100080)

摘 要

本文介绍了高红移射电星系近年来的研究进展。新的天文观测手段和技术方法的发展,导致了一批高红移射电星系的发现。多波段的联合研究,揭示出高红移射电星系光学/红外辐射与射电结构之间的成协现象。开展这些亮而远的射电星系研究有助于我们了解早期宇宙的演化以及星系活动的内在原因。

1 引 言

高红移射电星系及其母星系可以认为是宇宙中最使人感到困惑的天体之一。研究高红移射电星系的意义在于这类天体提供给天文学家研究早期宇宙的一种可能。天文学家通过对它的研究来检验现有星系演化和宇宙模型,为这些模型提供新的观测证据和约束,以对它们进行修正与完善。这些观测有助人们认识早期宇宙射电星系活动的特征与发生机制,探索它与类星体之间的关系。此类研究由于受到仪器和技术的限制,起步较晚。

近年来,由于采用新的技术和方法,高红移射电星系的研究日趋活跃。光学波段的CCD成像、红外波段的InSb阵、射电波段的高灵敏度、高分辨率孔径综合技术,以及相应数据处理软件的发展,使得我们观测与证认高红移天体的能力大大提高,进而揭示了一些高红移星系中特殊的天体物理现象。最有代表性的是Chambers小组^[1]和McCarthy小组^[2]独立研究发现高红移射电星系光学/红外连续辐射与射电轴之间的成协效应。这种成协效应不同于低红移射电星系里的情况。

本文主要介绍高红移射电星系观测方面的研究进展以及由此相继产生的各种假说。

2 高红移射电星系巡天样本

目前寻找高红移射电星系主要手段是陡谱射电源样本的光学证认。射电选源证认方法的优点是:(1)射电巡天覆盖天区大;(2)射电选源证认可以避免光学巡天中的诸多选择效应。射电源证认方法的主要缺点是仅仅根据射电性质无法获得红移信息,因此最

终证认还必须依赖光学观测。另外,射电选源也有自身的选择效应,如大尺度源谱指数计算的不确定性和由于受仪器灵敏度影响导致陡谱源的误证认等。常用的射电巡天样本有:

2.1 3CR 样本

3CR 样本是目前唯一较完整且有光学证认的样本。该样本的选源条件是选择那些 178MHz 射电流量密度大于 9Jy 的源。在 3CR 样本中,现已发现了 30 个红移大于 1 的

源。其中最遥远的 3CR 星系是 3C257, 红移 $Z=2.474^{[3]}$ 。

2.2 4C 甚陡谱样本

Chambers^[4] 选择 4C 甚陡谱样本的准则是, 178MHz 流量密度大于 2.0Jy, 谱指数 $\alpha < -1.0(S \propto \nu^\alpha)$ 。在 33 个样本源中, 31 个源取得了光学证认。其中 16 个源红移 $Z > 0.5$, 且具有强的发射线。8 个源红移 $Z > 2$, 其中有目前已知的最遥远射电星系 4C41.17, $Z=3.8^{[5]}$ 。

图 1 为 4C48.48——一典型高红移射电星系的光谱图。它的红移值为 2.344。从图 1 中看到, 4C48.48 具有强的 Ly α 发射线和 C IV1549 和 He II 1640 线^[3]。

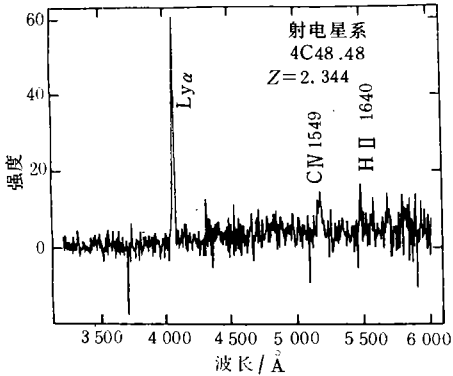


图 1 一个典型高红移射电星系 (4C48.48, $Z=2.344$) 的光谱^[3]

2.3 B3 星表的 1Jy 样本

B3 星表 (Bologna 第三星表) 的 1Jy 样本的选取条件为: (a) 源的 407MHz 流量密度大于 1.0Jy; (b) 408MHz 谱指数小于 $-0.9(S \propto \nu^\alpha)$; (c) Palomar 巡天探测极限内无光学证认^[6]。取得了 8 个源的光谱资料, 其中 4 个源的红移 $Z > 1$, 两个源具有强的 Ly α 辐射。红移值大于 2 的星系有 0731+438 ($Z=2.429$) 和 0744+464 ($Z=2.926$)。

2.4 Molonglo 星表的 0.95Jy 样本

McCarthy 等人^[7] 给出了 Molonglo 样本中的 18 个源的 VLA6cm 射电图像、光学证认和红移值。发现 10 个源红移 $Z > 1$, 其中 3 个源红移值 $Z > 2$ 。Molonglo 选源的条件为: 流量密度大于 0.95Jy, 低频谱指数小于 $-0.9(S \propto \nu^\alpha)$ 。0.95Jy 样本源的形态结构不同于 3C 样本, 具有较强的射电核和射电喷流 (jets)^[7]。

2.5 MG 样本

MIT/Greenbank(MG) 星表样本的选取条件为: 源的角尺度较小, 射电形态为典型的 double 和 triple 结构。流量密度限制为大于 VLA 快拍模式限制的流量密度值, 谱指数小于 $-0.7(S \propto \nu^\alpha)^{[8]}$ 。平均来说, MG 样本的流量密度为 3CR 样本的五分之一。红移平均值为 1.12, 红移最大的星系为 MG2141+192, $Z=3.594$ 。

其他样本还有: LBDS 样本^[9] 和 Parkes 样本^[10] 等, 在这里不一一列举。

到 1992 年底观测到的高红移射电星系的数量明显增加。已发现 60 多个星系红移值 $Z > 2$ 。其中红移最大值已达到 3.8(4C41.17)。Hubble 空间望远镜对 4C41.17 成图结

果表明，HST 可用于红移 Z 接近 4 的星系成像^[11]。届时希望发现更大红移的射电星系。另外，从发展的趋势看，随着目前正在进行的诸巡天计划的逐步完成，预计几年之内，高红移射电星系的数目还将有较大幅度的增加。

3 成 协 效 应

3.1 射电 / 光学连续辐射之间的成协现象

Chambers 小组 (1987)^[1] 和 McCarthy 小组 (1987)^[2] 分别在研究 4C 和 3CR 射电源时，独立发现高红移射电星系的光学辐射主轴与射电结构成协。图 2 是一个典型高红

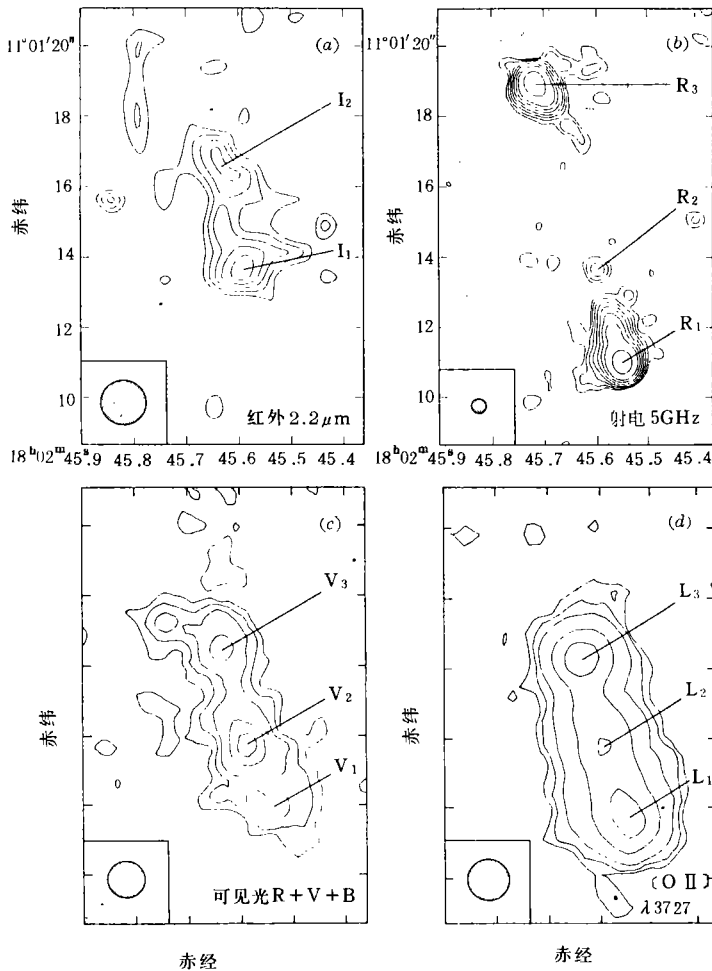


图 2 3C368 成协图像 ($Z=1.13$)^[13]

图中源射电结构的轴线与红外、光学连续谱以及光学谱线图像的轴线有相似的位置

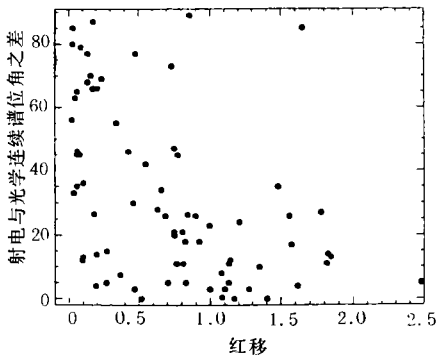


图 3 3CR 样本中不同红移值成协现象的差异^[15], 纵轴表示射电与光学连续谱位角之差^[15], 触发星暴活动^[40], 形成射电、光学成协图像。关于成协效应的各种可能的解释, 下文还将进一步介绍。

3.2 射电 / 光学线辐射之间的成协现象

大多数高红移、强射电星系都有延展的线发射区。几乎所有这些线发射区的延伸方向都平行于射电轴^[14]。某些射电星系如 3C435A ($Z=0.461$) 延伸的光学线辐射区位于射电热斑 (hotspot) 外^[15]。射电轴方向上热斑的外端出现发射线气体的一般解释为在沿着射电轴方向上射电星系核可能有一个各向异性的电离源^[15]。

大多数高红移射电星系呈现如上所述的成协现象, 但也有个别例外。如 3C294 中所探测到延伸的 $\text{Ly}\alpha$ 线辐射^[15], 延伸方向不与其射电轴平行。3C294 的射电形态为 S 型。这种 S 型射电结构的可能解释为 3C294 的喷射轴, 由于某种原因 (如进动), 喷射方向发生了变化。进动现象在其他射电星系和类星体中也有发现。这种现象可能与星系合并的早期阶段, 双黑洞的形成和演化有关^[16]。

4 不对称性

高红移射电星系的射电瓣和发射线气体特性极不对称。这里指的不对称性包括: 瓣距比、瓣流量比、发射线亮度比和消偏振量比等^[17-20], 这种不对称性随着红移的增大而愈加明显。射电瓣不对称性与有无发射线气体有关。在那些有延伸光学发射线的星系中, 不对称性表现得更显著。高红移射电星系射电瓣距与发射线气体的不对称性呈强相关^[17]。图 4 为 3C280 ($Z=0.998$) 射电 6cm 图像和 $[0 \text{ II}]\lambda 3727$ 发射线图^[15]。

曾经有许多研究者相继提出各种假说来解释这种不对称性的本质。如 Ryle^[21] 提出的光传播效应, Rudnick^[22] 提出的 flip-flop 效应和 van Breugel^[15] 提出的非均匀气体环境等。迄今仍未取得一致看法。

移射电星系光学、射电成协图像。高红移射电星系红外图像同样显示出与射电结构成协 (见图 2)^[12]。

值得一提的是, 高红移射电星系成协现象截然不同于低红移星系中的情况。在低红移星系中, 光学亮的射电源往往与巨椭圆星系的短轴成协^[13]。图 3 是不同红移值时, 星系成协现象的差异。

大多数高红移射电星系呈现偏蓝的光学颜色和 IR 色。这种颜色被推测为星系正经历着大尺度星暴活动。可能的物理图像是高红移射电星系核喷出的射电喷流 (jets) 在传播途径上

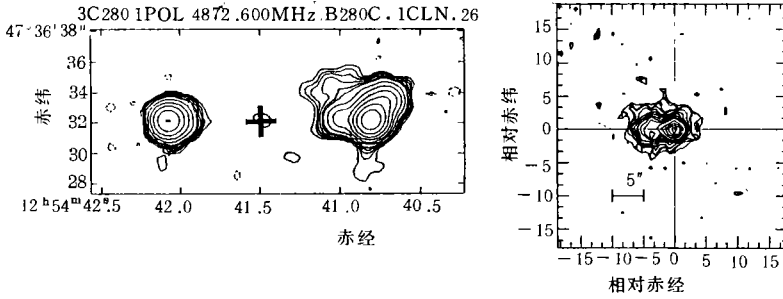


图 4 不对称性的一个例子 3C280($Z=0.998$)

左图为 6cm 射电图像, 右图为 $[O II] \lambda 3727$ 图像, 十字叉为星系核^[15]

5 有关成协效应的各种假说及其有效性

在发现成协效应之后的五年中, 很多研究者提出了各种假说, 以解释成协发生的原因。如引力透镜、非热机制、电子散射、尘埃散射、大质量星、老星族 + 小规模星暴、年轻星族等。下面将就这些假说的主要论据及其局限性作简要介绍。

5.1 引力透镜

引力透镜解释由 Le Fevre^[23] 以及他的合作者首先提出, 认为引力透镜的多重图像和放大作用对高红移射电星系的光度和形态有直接影响。Chambers^[3] 在进一步核实这个解释时认为, 观测到的星系形态与多重引力透镜图像不符。有些源观测到射电核, 但没有观测到射电核的多重图像。此外, 尺度大且延伸的射电瓣不可能是多重图像, 也没有理由要求多重图像沿着射电轴方向分布。另外, Djorgovski 发现有些光学谱线显示出空间分布的速度梯度和不同谱线有不同的速度梯度分布^[24]。由于透镜作用是消色差的, 这一发现给引力透镜模型带来了困难。诚然, 有些高红移射电星系有前景星系存在的可能性, 这或许能对它们的光学光度有一定的放大作用。因而不能完全排除引力透镜对个别高红移射电星系的影响, 但用它来解释成协原因是不充分的。

5.2 非热机制

非热机制的提出是基于下述一个事实: 某些邻近星系如 M87、3C273 和 3C66, 在红外、光学和 X 射线波段都观测到射电同步加速器谱在高频波段的延伸^[25]。可是, 通过外插获得的光度值将太小(小几个数量级), 无法解释高红移射电星系的光学/红外辐射。再者, 从静止框架中的谱能分布来看, 高红移射电星系的谱远偏离非热功率谱。非热机制也无法解释射电和光学形态之间的差别^[3]。

5.3 电子散射

该模型由 Fabian^[26] 首先提出, 作者认为来自被遮挡的类星体核的电子散射导致成协效应。Rawlings 和 Eales^[27] 用此机制成功地解释了他们的观测数据。电子散射机制同样存在不少问题。首先, 电子散射效应不改变射电核的谱能分布形状。但是, 观测到

的谱能分布形状完全不同于类星体的连续功率谱^[28]。此外,如果用此物理图像来解释成协效应,那么在拟合观测曲线时,还需加入一个非常大的电离氢质量,或者说,类星体的理论光度将远大于观测到的光度值^[29]。

5.4 尘埃散射

由于成协高红移射电星系的 Ly α 光度非常大,因此天体周围应排除有大量尘埃存在的可能性。然而,如果辐射气体以完全不同于尘埃分布方式成堆,那么尘埃将有可能散射来自被遮挡核的辐射光,产生成协的蓝光。di Serego^[30]对 3C368 偏振蓝光的观测,提供了有关尘埃散射的证据。可是由于尘埃对红光散射的低效性,难以解释红外的成协原因。为了解释红光和蓝光的成协性,就必须提出两种不同的成协过程。那些所有试图用射电亮类星体的方向性(包括各种散射图像)来解释成协效应都会遇到一个同样的困难,即无法说明射电星系红外 Hubble 图分布的连续性和低弥散性。

5.5 大质量恒星

Chambers^[13]和 Bithell 等人^[37]试图用一族红巨星来解释观测到的红外连续辐射。但模拟结果显示,用一族大质量星来拟合观测到的谱能分布是困难的。用大质量恒星来解释成协效应的另一个困难是,不能解释观测到的红外 Hubble 图上的连续性和低弥散性。

5.6 老星族 + 小规模星暴

该解释由 Lilly^[32]提出, Rigler 等人^[38]对该模型作了改进,认为谱能分布曲线上的“红肩”是由一族老年恒星产生,剩余的紫外光来自小规模星暴活动。该物理图像为:在持续了一亿年连续星暴后,形成一批恒星,然后恒星形成活动停止,星族开始演化。在以后的某个观测时刻,发生了第二次恒星爆发,该次星暴也许与射电活动有关。第二次恒星爆发对谱能分布的贡献主要是形成平坦的紫外谱。Lilly 的模型里,老星族的年龄有一定要求,即年龄必须大于 1.3 亿年。

老星族模型有两个困难:(1)高红移天体的年龄问题给这些星系的形成时间和宇宙学模型设置了一个很强的限制。举例来说,如果 Lilly 模型是正确的话,那么射电源 4C41.17($Z=3.8$)的年龄将大于 1.3 亿年。这与 $H_0=50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, $q_0=0.5$ 的宇宙年龄相矛盾;(2)老星族模型不能解释红外成协的原因。在这个模型里,星系的年龄远大于一个射电源存在的合理值。于是有研究者断言,射电喷注对质量分布很敏感。又有人猜测红外成协是选择效应引起等^[29,3]。最近, Hammer 等人^[39]报告了 10 个高红移 3CR 星系 ($0.75 \leq Z \leq 1.1$) 的分光结果,没有找到任何有关老星族假说中预言的谱特性证据。

5.7 年轻星族

Chambers 和 Charlot^[33]提出用一个较短时间尺度上恒星形成图像来解释观测到的谱能分布。在该图像里, Chambers 和 Charlot 用 Scalo^[34]给出的初始质量函数(IMF),运用 van Bruzual^[35]的星族合成规则,拟合了谱能分布曲线。所求得恒星年龄为 $\sim 10^8$ 年。有趣的是 Chambers 和 Charlot 获得的恒星形成时间尺度与星系的自由下落时间的可比性。换言之,这些星体比较年轻,我们正是在大部分星体刚刚形成时观测它们。这类星系的形成年代应当覆盖相当宽的红移值 ($Z=1-5$)^[3]。

年轻星族图像是目前唯一能同时解释红外成协效应、Hubble 图的连续性和小弥散性，这个图像也能与 Chambers 和 McCarthy^[36] 观测到的紫外恒星吸收特性相符合。

6 结 束 语

射电选源的星系观测研究，发现了一批高红移射电星系，最大红移记录已达 3.8。揭示出早期宇宙的一些未知特性。如高红移射电星系光学 / 红外辐射与射电结构成协。这对研究星系演化和宇宙学模型带有重要的参考价值，深化了人们对星系活动的认识。

本文还简单介绍了目前射电选源的各种高红移射电星系的巡天工作，从中看到技术和方法的改进对寻找高红移天体的重要性。在已观测到的 60 多颗红移 $Z > 2$ 的星系中，大部分是近几年中发现的。

目前，虽然对高红移射电星系光学 / 红外连续辐射与射电轴成协效应还没有定论，但是对谱能分布研究表明，高红移射电星系延伸的光学和红外连续辐射可能主要来自星光。成协效应较为合理的解释为射电活动引发恒星形成。年轻星族模型是目前唯一能较好解释观测事实的模型。

这一热门的前沿课题正吸引越来越多的研究者，各天文窗口的选源研究将提供更多新的观测资料，多频段不同分辨率的射电观测正在给出高红移射电星系更完整的谱特征以及不同尺度源的结构。北京天文台与上海天文台也在近年加入了这类天体的 VLBI 国际合作研究，并有了可喜的进展，其结果将使人们有可能第一次看到远宇宙星系 kpc 尺度的基本结构，进而推断它们与邻近射电星系共性与差异。本文工作得到国家自然科学基金和攀登计划的支持。

参 考 文 献

- [1] Chambers K C, Miley G K, van Breugel W *et al.* *Nature*, 1987, 329: 604
- [2] McCarthy P J, van Breugel W, Spinrad H *et al.* *Ap. J.*, 1987, 321: L29
- [3] Chambers K C, Miley G K. In: Kron R G ed. ASP conf. ser. No.10: Evolution of the universe of galaxies, The Edwin Hubble centennial symposium, San Francisco: Astron. Soc. Pac., 1990: 373
- [4] Chambers K C, Miley G K, van Breugel W. *Ap. J.*, 1988, 327: L47
- [5] Chambers K C, Miley G K, van Breugel W. *Ap. J.*, 1990, 363: 21
- [6] McCarthy P J. *A. J.*, 1991, 102: 518
- [7] McCarthy P J, Kapahi V K, van Breugel W. *A. J.*, 1991, 102: 522
- [8] Spinrad H, Dickinson M. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1991, 23: 951
- [9] Windhorst R A. In: Kron R G ed. APS conf. ser. No.10: Evolution of the universe of galaxies, The Edwin Hubble centennial symposium, San Francisco: Astron. Soc. Pac., 1990: 389
- [10] Dunlop J P, Peakcock J A, Savage A *et al.* *M. N. R. A. S.*, 1981, 238: 1171
- [11] Miley G K *et al.* *Ap. J.*, 1992, 401: L69
- [12] Chambers K C, Miley G K, Joyce R R. *Ap. J.*, 1988, 329: L75
- [13] Palimaka J J *et al.* *Ap. J.*, 1979, 231: L7
- [14] McCarthy P J. *Ap. J.*, 1987, 321: L29

- [15] van Breugel W, McCarthy P J. In: Kron R G ed. ASP conf. ser. No.10: Evolution of the universe of galaxies, The Edwin Hubble centennial symposium, San Francisco: Astron. Soc. Pac., 1990: 359
- [16] Roos N. *Ap. J.*, 1988, 334: 95
- [17] McCarthy P J, van Breugel W, Kapahi V K. *Ap. J.*, 1991, 371: 478
- [18] Laing K A. *Nature*, 1988, 331: 149
- [19] Garrington S T *et al.* *Nature*, 1988, 331: 147
- [20] 蔡正东. 博士论文, 北京: 中国科学院北京天文台, 1992
- [21] Ryle M, Longair M S. *M. N. R. A. S.*, 1984, 136: 123
- [22] Rudnick L, Edger B K. *Ap. J.*, 1984, 279: 74
- [23] Le Fevre O, Hammer F, Nottale L *et al.* *Ap. J.*, 1988, 324: L1
- [24] Djorgovski S, Spinrad H, Pedelty J *et al.* *A. J.*, 1987, 93: 1307
- [25] Miley G K. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1980, 18: 165
- [26] Fabian A C. *M. N. R. A. S.*, 1989, 238: 41
- [27] Rawling S, Eales S A. In: Hollebach D J, Thronson Jr H A eds. The interstellar medium in external galaxies: summeries of contributed papers., Wyoming: [s.n.], 1990. 389
- [28] Lilly S J. *Ap. J.*, 1988, 340: 77
- [29] McCarthy P J. Ph D. These. Berkeley: University of California, 1989
- [30] di Serego Alighieri S, Fosbury R, Tadhunter C. *Nature*, 1989, 341: 307
- [31] Lilly S J. In: Kron R G. ASP conf. ser. No.10: Evolution of the universe of galaxies, The Edwin Hubble centennial symposium, San Francisco: Astron. Soc. Pac., 1990. 344
- [32] Lilly S J. *Ap. J.*, 1988, 333: 161
- [33] Chambers K C, Charlot S. *Ap. J.*, 1990, 348: L1
- [34] Scalzo J M. *Fundamentals of Cosmic Physics*, 1986, 11: 1
- [35] Bruzual G. *Ap. J.*, 1983, 273: 105
- [36] Chambers K C, McCarthy P J. *Ap. J.*, 1990, 354: L9
- [37] Bithell M, Rees M J. *M. N. R. A. S.*, 1990, 242: 570
- [38] Rigler M A, Lilly S, Stockton A. *Ap. J.*, 1992, 385: 61
- [39] Hammer F, Le Fevre O, Angonin M C. *Nature*, 1993, 362: 324
- [40] Rees M J. *M. N. R. A. S.*, 1989, 428: 1

(责任编辑 舒似竹)

Progress in the Studies of High Redshift Radio Galaxies

Cai Zhengdong Nan Rendong

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

Abstract

In this review the progress in the studies of high redshift radio galaxies was described. With the development of technique and method, a large number of high redshift radio galaxies were found. The association between optical/IR radiation and radio structure of the high redshift radio galaxies was uncovered because of the multi-frequency study. The study of such luminous and distant radio galaxies will be helpful to the exploration of the early universe and to the knowledge about the intrinsic cause of the galaxy activity.