

星系团的发现和星系团及成员星系的物理性质

韩金林^{1,2*}, 文中略¹, 袁中升¹, 洪涛¹

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: hjl@nao.cas.cn

2019-01-29 收稿, 2019-01-30 修回, 2019-01-31 接受, 2019-04-04 网络版发表

国家自然科学基金(11473034, U1731127)资助

摘要 星系团是宇宙中质量最大的引力束缚天体, 是宇宙大尺度结构中密度相对比较高的节点. 因此星系团是研究宇宙学的重要示踪天体之一, 也提供了星系多样的寄居环境. 基于公开的巡天数据, 我们证认出了数目最多的星系团, 显著扩展了星系团发现的红移范围. 根据星系团在宇宙空间中的成团性, 探测到了显著的宇宙重子声波振荡信号. 通过查看星系团图像, 发现许多星系团作为强引力透镜使背景星系呈现巨大的光弧. 根据星系团中成员星系的分布, 我们计算了最多星系团的动力学状态参数, 并发现只有约1/3的星系团处于弛豫状态. 我们还发现, 在越弛豫的星系团中, 最亮团星系的光学光度越大, 其他亮成员星系越少. 随着国际上在多个波段更深巡天数据的发布, 星系团的研究将会有多方面的突破.

关键词 星系团, 数据表, 宇宙大尺度结构, 动力学, 射电辐射

星系在宇宙中的分布是不均匀的, 它们在几十Mpc(百万秒差距, 1 Mpc=326万光年)尺度上的分布呈现多种结构特征, 如纤维状结构、巨墙和空洞等. 星系团位于宇宙纤维结构的节点处, 是星系分布最密集的区域. 星系团是宇宙中由星系、热气体和暗物质组成的最大的引力束缚系统, 它们的典型质量为 $10^{14}\sim 10^{15} M_{\odot}$. 它们的成分由暗物质主导(~80%), 15%~17%为星系团内介质(ICM), 剩下的只有极少部分(3%~5%)的质量存在于成员星系中. 根据目前的宇宙结构形成的理论框架, 星系团是在等级结构形成过程中形成的: 小的结构(星系、星系群、小星系团)先形成, 随后在宇宙学时标下由于引力作用形成越来越大的结构. 宇宙中物质稠密的区域逐步形成纤维状结构, 星系团就形成于这些纤维状结构的交汇处.

不同波段的观测相结合可以更全面地揭示星系

团物理特征: 光学波段的观测可以很容易地证认出星系团^[1], 并获得星系团的动力学结构^[2]; X射线波段的观测可以得到星系团内部热气体的性质和质量估计^[3,4]; Gamma射线辐射则可能来自于暗物质湮灭^[5]; 在毫米波段, 可以看到星系团内部热气体对宇宙微波背景光子散射的Sunyaev-Zel'dovich(SZ)效应^[6,7]; 在射电波段可以探测到少量星系团内部的相对论性电子在弥漫磁场中的辐射^[8]. 近年来各种大规模的光学巡天(例如, 斯隆数字巡天(The Sloan Digital Sky Survey, SDSS), CFHT(Canada-France-Hawaii Telescope)), X射线卫星(Chandra, XMM-Newton和Suzaku等望远镜)和Planck卫星的观测, 使得星系团研究进展突飞猛进. 天文学家基于光学观测可以发现星系团并研究星系团的成员星系, 通过X射线和毫米波段观测可以研究团内高温热气体, 基于射电观测可以研究团内少量的非热相对论电子和磁场的性

引用格式: 韩金林, 文中略, 袁中升, 等. 星系团的发现和星系团及成员星系的物理性质. 科学通报, 2019, 64: 1583–1597

Han J L, Wen Z L, Yuan Z S, et al. Identification of clusters of galaxies and physical properties of clusters and their member galaxies (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 1583–1597, doi: 10.1360/N972019-00095

质. 星系团不仅是探索宇宙大尺度结构的重要示踪天体^[9], 还是研究暗物质和星系演化的天然实验室^[10]. 因此星系团一直是许多大型天文望远镜的重点观测对象.

星系团研究主要有3个方向: (1) 着眼于更大尺度的宇宙学研究, 因为星系团是宇宙大尺度结构的重要示踪天体, 其空间分布能够反映出宇宙结构, 表现出重子声波振荡(Baryon Acoustic Oscillations, BAO)特征^[11], 其质量函数可用于检验不同的宇宙学模型、限制暗能量状态方程和宇宙学参数^[12~15]; (2) 以星系团本身作为目标进行研究, 包括用不同波段的观测数据证认星系团, 研究星系团的整体性质及其演化, 研究星系团内星系的空间结构分布、质量和气体分布乃至暗物质分布^[16]以及星系团的动力学并合特征等; (3) 研究星系团内环境对星系的影响, 包括最亮成员星系的性质、星系团内星系的性质随星系团内密度的变化、蓝星系比例随红移演化效应等.

基于国际上公开的数据, 在最近10年中, 我们在星系团研究方面完成了一系列工作, 本文就是这些工作的总结. 论文第一节介绍我们证认星系团方面的工作结果; 第二节介绍星系团整体性质的研究结果; 第三节介绍成员星系性质的研究结果.

1 大样本星系团的证认

发现星系团是开展星系团相关研究的基础. 星系团可以从光学、X射线和毫米波数据中证认出来^[17~19]. 在光学波段, 星系团最显著的特征是星系密度相对于周围区域有明显的超出. 基于这个特点, Abell等人^[1,17]从光学巡天图像中证认出了4073个星系团, 其著名Abell星系团表是过去几十年被使用最多的星系团表. 因为星系在三维空间里的分布要投影到二维图像上, 当年他们从光学照片上直接找星系团很明显会受到投影效应的影响. 原则上, 应该根据星系在三维空间中的成团分布证认出星系团^[20,21], 但这需要知道所有星系的距离或红移. 考虑到哈勃定律, 即星系的距离与红移成比例关系, 利用光谱红移数据证认星系成团的方法确实非常可靠, 但要获得大量星系的光谱现实上很困难. 在X射线波段, 因为星系团中含有大量弥漫的热气体, 温度高达 $10^7\sim 10^8$ K, 使得星系团成为宇宙空间中最明亮的X射线延展源, 所以可以从图像数据上有效地被识别出来, 但需要好的X射线望远镜做巡天观测. 目前国

际上最大的X射线星系团样本是基于ROSAT (Roentgen Satellite)卫星数据中证认的两千多个近邻宇宙的星系团^[22~24], 尽管部分X射线辐射较弱的星系团^[25,26]可能在观测或数据处理中遗漏. 从图像中可以看出, 一些X射线光度比较低的星系团可能正处于并合状态^[27]. 目前仍在运行的X射线望远镜有Chandra和XMM-Newton, 两个卫星经十余年的观测已积累了丰富的数据. 在毫米波段, 人们可以观测到星系团内高温热气体对宇宙微波背景辐射谱的扭曲, 即SZ效应. 截至目前, 从Planck卫星第二期数据发现了1653个低红移的SZ星系团^[28], 地面的ACT (Atacama Cosmology Telescope)和SPT(South Pole Telescope)项目也发现了几百个更高红移的SZ星系团^[29,30].

近十多年来, SDSS的五色测光和光谱数据为星系团的证认提供了重大机遇^[31]. 利用SDSS的5个波段(ugriz)的光学测光巡天数据和后续的光谱巡天数据, 国际上多个研究团队藉星系在天空中的成团性和星系颜色或者星系测光红移来证认星系团^[32~35]. 目前基于多色测光数据证认星系团已经成为最主要的星系团发现方法, 并可以推广到较高红移^[36]. 最早从SDSS光谱数据或多色测光数据证认星系团的有Yang等人^[21]和Koester等人^[34]. 目前最大的星系团样本是本研究组^[37,38]从SDSS 14000平方度天区证认的158103个星系团. 在SDSS天区之外, Wen等人^[39]在2018年从2 μ m全天巡天(Two Micron All-Sky Survey, 2MASS)、广角红外巡天探索者(Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE)和SuperCOSMOS巡天共同覆盖的28000平方度天区(扣除银道面后的全部天区)还证认出了47600个星系团, 目前它也是世界上在SDSS天区之外最大的星系团样本. 很多呈现SZ效应的星系团是我们在WHL12星系团表中证认的星系团^[30].

1.1 从SDSS数据证认星系团

基于多色测光数据, 传统的星系团证认方法是根据星系颜色图上的成团性确定星系团的成员星系^[32]. 2009年以前, 从SDSS测光数据中证认的最大星系团样本是maxBCG的星系团表^[34], 它包含13823个星系团, 红移范围在 $0.1 < z < 0.3$. 实际上, SDSS测光数据可以探测到红移大于0.6的星系, 因此大量星系当时未被识别出来. SDSS发布测光数据时已经对每

一个星系团都估计了测光红移. 据此, 我们发展了基于星系测光红移证认星系团的方法: 找出分布在一个测光红移层中星系密度显著超出的区域. 从SDSS第六期发布的数据^[40]中, 我们证认出了39668个星系团^[35], 这个星系团样本是当时最大的maxBCG样本的近3倍, 星系团样本的红移分布从0.3的上限扩展到0.6. SDSS第八期发布后, 我们进一步改进了星系团证认的方法, 又从星系测光红移数据^[41]中证认出132684个星系团^[37](国际上都标记为WHL12), 红移范围为 $0.05 < z < 0.8$. 具体的证认步骤是:

(1) 仅仅选择亮成员星系, 并进行星系数计数: 假设每一个星系(红移为 z)处于一个星系团候选体中, 计算该星系周围0.5 Mpc半径、测光红移层 $z \pm 0.04(1+z)$ 范围内亮于 $M_r^c = -20.5$ 等(演化改正后的星系绝对星等)的星系数目, 计为 $N_{0.5 \text{ Mpc}}$.

(2) 获得星系团候选体: 应用friend-of-friend算法^[20]将以上的星系链接起来, 其中与视线垂直的横向方向上的链接长度为0.5 Mpc, 视线方向的链接长度为 $0.06(1+z)$. 被链接的星系中, 具有最大 $N_{0.5 \text{ Mpc}}$ 的星系被当成星系团候选体的临时中心.

(3) 估计星系团候选体的红移: 把星系团候选体临时中心1 Mpc半径、测光红移层 $z \pm 0.04(1+z)$ 范围内亮于 $M_r^c = -20.5$ 等的星系当成成员星系, 星系团候选体的测光红移定义为成员星系测光红移的中值.

(4) 确定星系团候选体的中心: 找出临时中心0.5 Mpc半径、测光红移层 $z \pm 0.04(1+z)$ 范围内最亮的星系作为候选星系团的最亮团星系(Brightest Cluster Galaxy, BCG). 因为最亮团星系通常处于星系团的引力势井中心, 因此把它的位置当成星系团的真正中心.

(5) 估计星系团候选体的半径和富度: 首先计算星系团候选体周围1 Mpc范围内的总光度 $L_{1 \text{ Mpc}}$, 即所有成员星系候选体光度相加减去一个平均的光度背景, 这个背景是从相同红移层但在半径为2~4 Mpc范围内的星系数据估计得到的. 然后利用事先确定的 $L_{1 \text{ Mpc}}-r_{200}$ 标度关系估计星系团半径 r_{200} (定义为该半径内星系团的平均密度为宇宙临界密度的200倍). 再计算 r_{200} 内的总光度 L_{200} , 最后将它除以星系特征光度(L^*)^[42]并定义它为星系团富度, 即 $R_{L^*} = L_{200}/L^*$.

(6) 星系团筛选: 要求证认的星系团具有富度 $R_{L^*} \geq 12$. 根据事先确定的质量与富度的标度关系, 要求星系团在 r_{200} 半径内的质量为 $M_{200} \geq 0.6 \times 10^{14} \text{ M}_\odot$.

值得指出的是, 低富度的星系团候选体很容易受到少数测光红移被高估的场星系的投影效应的影响. 为了避免误判, 还要求星系团 r_{200} 半径、测光红移层 $z \pm 0.04(1+z)$ 范围内成员星系的数目大于8个, 这样可以保证得到的星系团样本同时具有高完备性和低误判率.

经过以上步骤, 再应用friend-of-friend算法去除可能重复证认的星系团. 如果两个星系团候选体的红移差小于 $0.06(1+z)$, 且投影距离小于 r_{200} , 那么认为它们是同一个星系团, 只选取其中富度更大的一个. 最后, 还人工检查了所有星系团候选体的合成彩色图, 去除了大约5000(3.6%)个可能由于观测数据误判(例如靠近饱和亮恒星或近邻大星系)造成的假星系团. 从SDSS第八期发布的14000平方度数据中, 得到132684个红移范围为 $0.05 < z < 0.8$ 的星系团, 其分布如图1所示. 将使用的测光红移与光谱红移数据相比较, 发现利用测光红移筛选出的星系团成员星系的完备率约为90%, 成员星系的误判率为10%~20%^[35]. 基于蒙特卡洛模拟, 估计出最后得到的星系团误判率约为4%. 在红移范围 $0.05 < z < 0.42$ 内, 质量 $M_{200} \geq 1 \times 10^{14} \text{ M}_\odot$ 的星系团完备率大于95%. 在红移 $z > 0.42$ 时, 由于成员星系不完备, 星系团的富度可能被系统性低估, 因此证认的星系团不完备, 但判出的星系团可信度更高. 因为测光红移是根据所有波段的测光数据估计的, 适用于更宽的红移范围, 使得获得的星系团样本的红移范围比基于颜色方法得到的星系团(如GMBCG^[33])红移范围更大, 样本也更加完备.

为了提高星系团在高红移的完备率和改正高红移星系团的富度, 2015年从文献中搜集质量和半径已经确定好的星系团, 重新校准了星系团在1 Mpc范围内的光学总光度与星系团半径的关系, 以及 r_{500} 范围内的总光度与星系团质量的关系. 这些标度关系经过红移改正后, 新定义的星系团富度与红移无关. 利用SDSS第十二期发布的光谱红移^[43], 更新了WHL12星系团表中所有星系团的红移数值, 并补充证认了一批更高红移的星系团, 使得从SDSS证认的星系团总数达到158103, 其红移分布如图1所示. 它是目前最大的星系团样本^[38].

1.2 从全天数据证认星系团

在SDSS未能覆盖的天区, 由于缺乏观测数据,

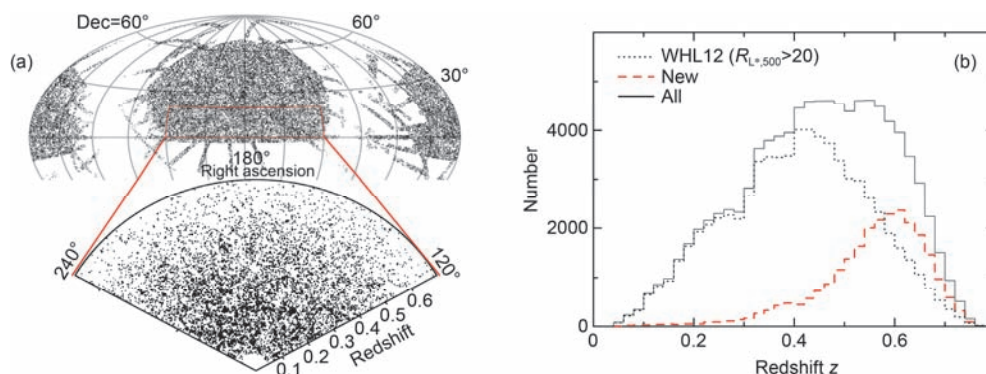


图 1 (网络版彩色)Wen和Han^[38]从SDSS数据中发现的星系团. (a) Wen等人^[37]证认的星系团在天球上的分布和一个薄层天区在纵深方向分布; (b) 星系团的红移分布图. 其中, 点线表示WHL12中丰富度大于20的星系团^[37], 虚线表示后续补充的高红移星系团^[38], 实线表示二者之和
Figure 1 (Color online) Clusters of galaxies discovered from SDSS data by Wen and Han^[38]. (a) The sky coverage and radial distribution of the clusters identified by Wen et al^[37]. (b) The redshift distribution of the clusters: The clusters^[37] of richness greater than 20 in dotted line, supplementary clusters at higher redshift in dashed line, and the solid line is for all clusters

过去只证认出几千个已知的低红移的星系团, 包括光学、X射线和SZ星系团^[1,24,28]. 我们最近利用2MASS, WISE和SuperCOSMOS星系的测光红移数据^[44,45]从28000平方度天区证认出47600个红移范围 $0.02 < z < 0.4$ 的星系团(除去银道面的全部天区, 见图2), 其中26125个星系团是首次证认出来的^[39]. 证认的具体步骤是: 首先通过星系颜色和星等挑选出最亮团星系候选体, 然后计算最亮团星系候选体周围的星系密度超出平均密度的信噪比, 信噪比 >4 的高密度区域被认为是星系团. 在红移范围 $0.025 < z < 0.3$ 内, 对于质量 $M_{500} \geq 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ 的星系团的探测率达90%. 用蒙特卡洛模拟后发现, 该星系团样本的误判率为4.5%. 需要强调的是, 在SDSS以外的区域,

过去只有3337个已知星系团, 我们从2MASS, WISE和SuperCOSMOS巡天数据中证认出20897个新的星系团, 也确实是目前国际上全天空最大的星系团样本.

1.3 从深场数据中证认星系团

高红移星系团对研究宇宙学和星系团演化有重要意义. 目前已知的高红移星系团数目很少, 主要是从一些小天区范围的深场巡天数据中证认的. 利用星系测光红移, Wen和Han^[46]从CFHT宽场观测数据中证认出了631个星系团, 从CFHT深场观测数据中证认出了202个星系团, 从COSMOS(Cosmic Evolution Survey)观测数据中证认出了187个星系团, 从

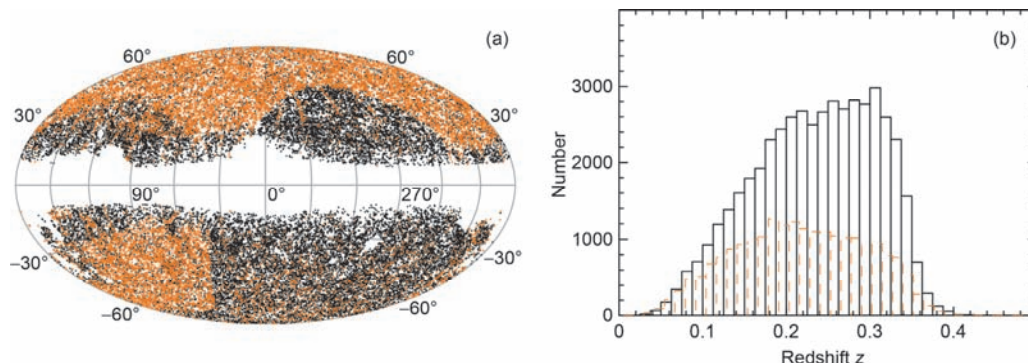


图 2 (网络版彩色)Wen等人^[39]新发现的星系团. (a) 从2MASS, WISE和SuperCOSMOS巡天数据中证认的47600个星系团在天空上的分布(银道坐标), ×表示21475个已知的星系团(主要也是Wen和Han^[38]从SDSS证认的星系团), +表示26125个新证认的星系团; (b) 证认的星系团的红移分布, 虚线表示已知星系团的红移分布. 摘自文献[39]

Figure 2 (Color online) New discovered clusters of galaxies by Wen et al^[39]. (a) Sky coverage of 47600 clusters identified from survey data of the 2MASS, WISE and SuperCOSMOS. Among them 21475 known clusters are indicated by ×, and 26125 new clusters are indicated by +. (b) The redshift distribution of the clusters with the dashed line for the known clusters. The figures are from Ref. [39]

SWIRE(Spitzer Wide-area InfraRed Extragalactic survey)观测数据中证认出了737个星系团, 这些星系团分布在很宽的红移范围内($0.1 < z < 1.6$). 合并这4个样本中重复的星系团后得到1644个星系团, 其中1088个是新证认的, 该样本有228个星系团的红移 $z > 1$, 其中191个是新发现的^[46]. 最亮团星系的颜色演化显示一些最亮团星系的颜色 $g-z$ 和 $b-m_{3.6\mu\text{m}}$ 比星系被动演化模型预计的更蓝, 表明其中可能有恒星正在形成. 最近, Wen和Han^[47]还结合SDSS数据和WISE数据, 剔除红移小于0.65的前景星系和恒星目标之后, 证认出了1959个大质量($> 2.5 \times 10^{14} M_{\odot}$)的星系团, 红移分布范围是 $0.7 < z < 1.0$. 该工作使红移大于0.75的星系团中有75%是我们新发现的.

1.4 强引力透镜的发现

作为宇宙中最大的引力束缚系统, 星系团是宇宙中最强的引力透镜, 可以使背景星系呈现巨大光弧或多重像. 只有引力透镜和背景星系几乎处于同一视线时才会发生强的引力透镜效应, 因此宇宙中强引力透镜系统是相对罕见的. 尽管SDSS数据不是很深, 我们在查看大量星系团图像时新发现了一批强引力透镜系统, 这部分工作分三次完成. 第一部分工作是查看了星系团表^[35]中39668个星系团的

SDSS合成彩色图像, 我们新发现4例强引力透镜系统(图3)和9例强引力透镜系统候选体^[48]. 目前这13例中的12例被后来的光谱观测证实^[49,50]. 第二部分工作是在查看132684个星系团^[37]的合成彩色图像时, 除了以前已知的引力透镜系统之外, 我们新发现了13例强引力透镜系统、22例很可能的、31例可能的强引力透镜系统候选体和2个奇特的光弧系统^[51]. 第三部分工作是查看SDSS更高红移星系团图像, 新发现8例强引力透镜系统、3例很可能的和6例可能的强引力透镜系统候选体^[52]. 统计表明, 在SDSS观测深度的星等极限条件下, 富度为10的星系团成为强引力透镜系统的概率为 10^{-4} , 富度为100的星系团成为强引力透镜系统的概率则为 10^{-2} . 星系团成为强引力透镜系统的概率与星系团的富度有很强的相关性(图4).

2 星系团的分布和性质研究

基于证认的星系团和文献中的观测数据, 我们分析了星系团在宇宙中的分布、星系团的动力学状态和弥漫射电辐射等性质.

2.1 星系团的空间分布

根据宇宙学原理, 宇宙中的物质分布在极大尺

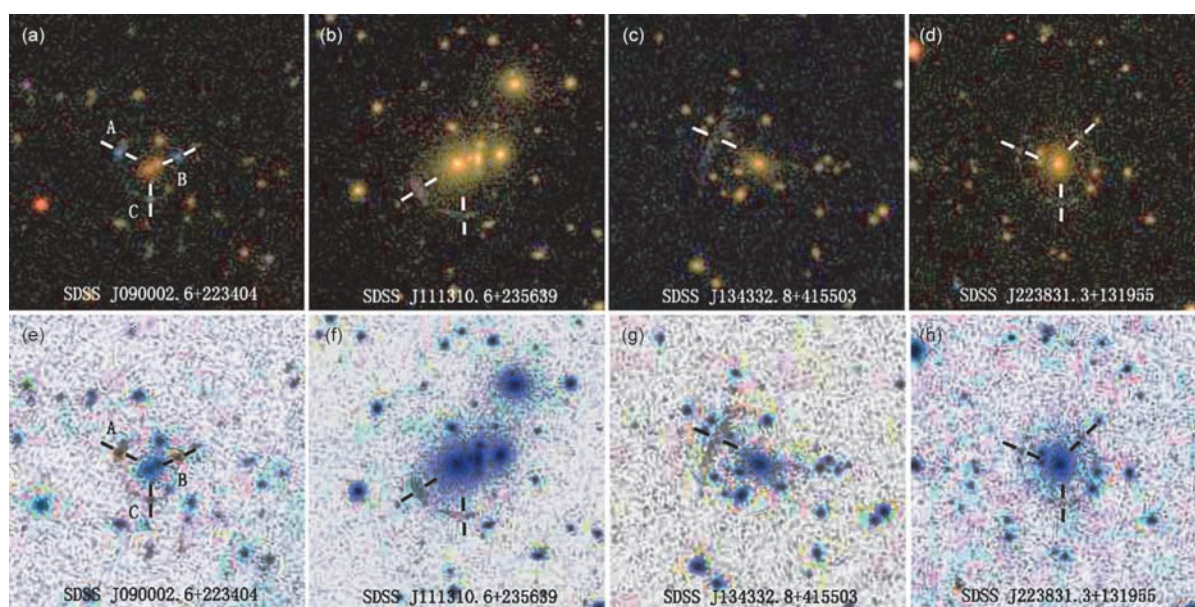


图3 (网络版彩色)从SDSS图像发现的部分强引力透镜系统, (a~d) 三色(gri)合成图; (e~h) 颜色反转图(为了更清楚显示光弧). 每个图的视场为 $1.2' \times 1.2'$. 摘自文献[48]

Figure 3 (Color online) SDSS color (a~d) and negative (e~h) images of four samples of strong lensing systems. The field of view of the each image is $1.2' \times 1.2'$. The figures are from Ref. [48]

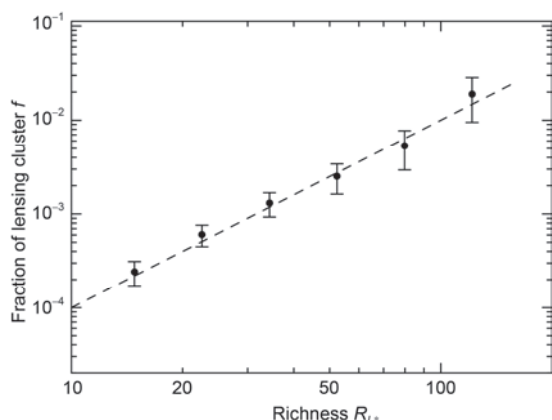


图4 星系团发生强引力透镜的概率随富度的变化. 摘自文献[51]
Figure 4 The fraction of clusters as being strong lenses varies with cluster richness. The figure is from Ref. [51]

度上是均匀且各向同性的. 但是, 当观测尺度减小到 $\leq 100 h^{-1}\text{Mpc}$ 时, 宇宙大尺度结构开始在三维空间的物质分布场中显现不均匀性. 重子声波振荡(BAO)是宇宙早期扰动遗留下的印迹, 其特征尺度可以作为宇宙中的标准尺. Eisenstein等人^[53]和Cole等人^[54]分别使用SDSS和2dF星系红移巡天(2dF Galaxy Redshift Survey, 2dFGRS)的星系红移数据首次探测到了BAO的信号. 此后SDSS数据^[55]和其他星系巡天^[56,57]有了较高的距离测量精度, 得到了BAO信号更高的探测精度. 莱曼 α 森林可以作为高红移处BAO探测的示踪天体, 已经在红移 $z \sim 2.3$ 处探测到了BAO信号^[58].

星系团是宇宙中物质分布的高密度峰, 它们比星系更好地示踪宇宙大尺度结构中物质分布比较集中的区域. 早先通过计算13823个maxBCG星系团样本的两点相关函数和功率谱, Estrada等人^[59]和Hutsi^[60]分别发现了比较微弱的BAO信号. 我们利用13904个有光谱红移且红移范围 $z \leq 0.4$ 的星系团, 探测到了置信度为 1.9σ 的BAO信号^[11]. Veropalumbo等人^[61]使用Wen等人^[37]更新过的星系团表数据, 将探测BAO的置信度提高到约 2.5σ . 最新的结果是, 我们^[38]从星系团表中挑选出79091个有光谱红移且红移范围 $z \leq 0.5$ 的星系团, 在计算其两点相关函数时引入了与星系团质量以及样本完备率相关的权重, 矫正了星系团证认过程中产生的偏差, 增强了最终相关函数上BAO的信号(图5). 我们在大约 $r \sim 105 h^{-1}\text{Mpc}$ 的尺度上探测到了BAO峰, 探测置信度为 3.7σ . 这是第一次使用星系团样本实测得到明确的BAO信号. 使用该BAO信号来拟合, Lambda CDM模型所得的对宇

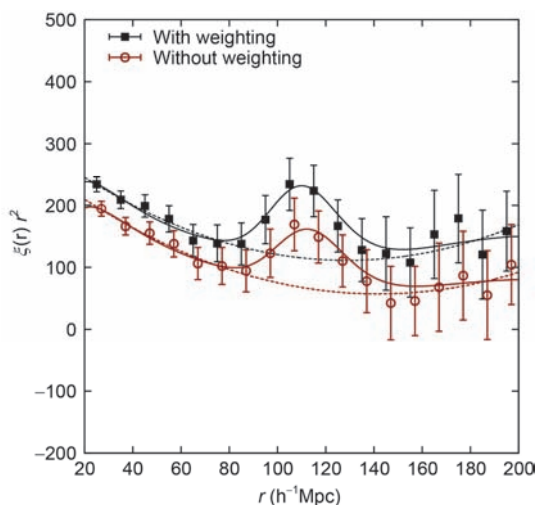


图5 (网络版彩色)基于79091个星系团得到的相关函数. 方块表示使用了与富度相关的权值然后计算得到的结果, 圆圈表示不使用权值的计算结果(为显示清晰向右平移了 $2 h^{-1}\text{Mpc}$). 实线和虚线分别表示考虑和没有考虑重子成分的Lambda CDM模型最佳拟合曲线. 摘自文献[63]

Figure 5 (Color online) The correlation functions of 79091 clusters. The squares and circles (shifted to right by $2 h^{-1}\text{Mpc}$ for clarity) present the results with and without taking richness weights during the calculations, respectively. The solid lines and dashed lines indicate the best-fit Lambda CDM curves with and without considering acoustic feature. The figure is from Ref. [63]

宙学参数的限制与Planck Collaboration^[62]的结果相符. 总体来说, 先通过测光数据来证认出星系团, 然后对规模小得多的BCG样本进行光谱红移观测来探测BAO, 可以大大提高BAO探测项目中望远镜的使用效率.

2.2 星系团动力学状态的研究

动力学状态描述的是星系团是否达到动力学平衡. 星系团动力学状态会影响星系团多波段性质. 星系团的动力学状态过去被简单粗略地区分为弛豫和不弛豫(或并合)两种状态. 星系团并合过程在星系际介质中形成激波随后传播到热介质中, 使得星系团在光学和X射线波段的图像上表现出子结构和温度梯度. 并合星系团X射线温度系统偏高^[64], 可能产生大尺度弥漫射电辐射^[8]. 如果热气体在团中心区域密度很高, X射线辐射冷却时标反而变得很短, 辐射使得中心气体的能量大量损失, 使得星系团中心温度看起来下降很多, 很像有一个“冷核”. 在X射线图像上表现出有冷核的星系团已经非常接近动力学弛豫^[65], 因此被认为是弛豫星系团. 动力学弛豫的星

系团与正在并合的星系团具有不同的X射线标度关系^[4].

目前已有大约300个近邻星系团在文献中给出了动力学状态信息^[65,66]. 在X射线波段, 有上百个星系团的动力学状态已经从X射线图像数据定量估计了, 并定量地利用X射线图像的“畸变”功率比(即图像多级展开的功率比^[67,68])、不对称性^[69]和X射线辐射的聚集程度^[70], 或X射线辐射的中心偏移^[71]等参数描述星系团的动力学状态^[72]. 在光学波段, 成员星系三维分布的子结构能够标示星系团动力学状态^[2], 包括投影到一维的红移分布和光学图像上的成员星系分布. 星系团成员星系红移分布中表现的结构是判断动力学状态的有力证据^[2,73]. 然而, 对大样本星系团的成员星系进行光谱观测通常不容易做得很完备. 从星系团光学图像得到的成员星系二维分布可以用来判别星系团投影到二维天球面上的子结构^[74,75].

为了确定大样本星系团的动力学状态, Wen和Han^[76]发展了基于光学图像的测光数据来定量估计星系团的子结构和动力学状态的方法. 具体步骤是: 首先, 根据星系光谱和测光红移选出星系团的成员星系; 然后将成员星系的分布按星系光度加权卷积一个高斯函数, 生成平滑的星系团光学图像. 弛豫星系团应该具有非常对称的图像, 而非弛豫星系团包含很多子结构. 为此计算了3个参数: 一是星系团光学平滑图像的对称性 α , 二是平滑图像对理论模型的

相对偏离 δ , 三是平滑图像“脊”方向相对其他方向的平坦度 β . 基于这3个量, 我们定义了星系团的弛豫参数 Γ , 见图6(a), 来量化星系团的动力学状态. 为检查这个动力学状态定义方法的有效性, 从文献中收集了已知星系团动力学状态的检验样本, 包括35个弛豫星系团和63个并合的星系团. 利用上面的3个参数, 两组不同弛豫状态的星系团可以有效分开在两个区域, 见图6(a).

利用这样经过检验的方法, 计算了2092个在WHL12星系团表中富度大于50的星系团的动力学弛豫参数. 很明显, 动力学状态的参数是在-2~0.6之间连续分布的(图6(b)). 如果定义 $\Gamma \geq 0$ 的星系团是处于弛豫状态的话, 这些星系团占28%, 即大约1/3. 我们也发现, 星系团动力学弛豫参数与最亮团星系的绝对星等相关, 也与第一第二最亮团星系的星等差相关(见图7).

2.3 星系团中的弥漫射电辐射研究

不弛豫的星系团非常容易使得团内星系际介质发生大尺度的扰动和激波. 星系团的弥漫射电辐射很可能与星系团内扰动的等离子体和激波有关. 观测表明, 在约100个星系团中发现了在几百kpc到几Mpc尺度上、不与特定星系成协的弥漫射电源, 它们同步辐射起源, 表明星系团内弥漫着大尺度磁场和一定数量的相对论电子. 根据弥漫射电源的特征和

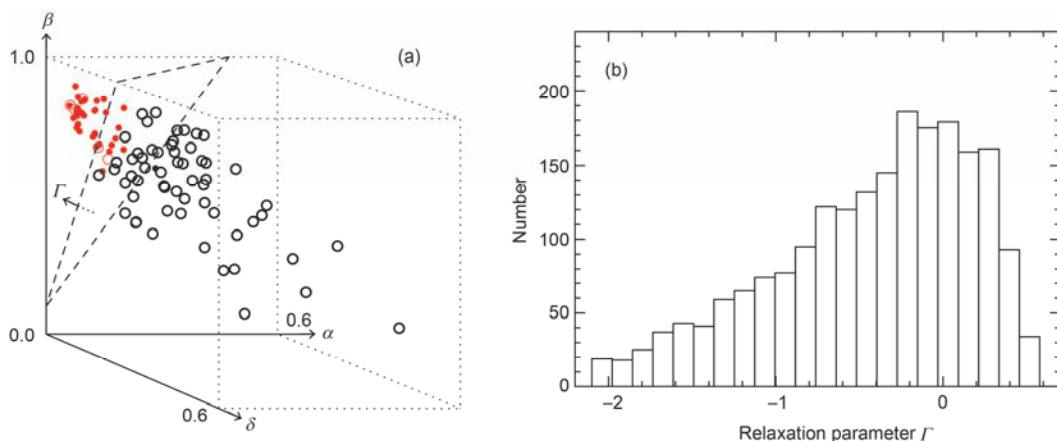


图6 (网络版彩色)利用星系团光学测光数据做出的星系团动力学弛豫参数. (a) 从星系团测试样本的光学图像计算出来的3个参数(α , β , δ)在三维空间中的分布: 实心点表示已知的弛豫星系团, 圆圈表示已知的并合星系团, 虚线三角形表示分离弛豫星系团和并合星系的最佳平面. 星系团的动力学弛豫参数 Γ 定义为它在三维空间中的位置到最佳平面的距离; (b) 2092个富星系团的动力学弛豫参数分布. 摘自文献[37]

Figure 6 (Color online) The parameters calculated from the photometric data in optical band. (a) The space distribution of the parameters (α , β , δ) calculated for the test sample of clusters: Relaxed clusters are shown by dots, and unrelaxed by open circles. The dashed triangle represents the best plane to separate the relaxed and unrelated clusters. The relaxation parameter is defined as the distance to this inclined plane. (b) The histogram of the relaxation parameter for 2092 rich clusters. The figures are from Ref. [37]

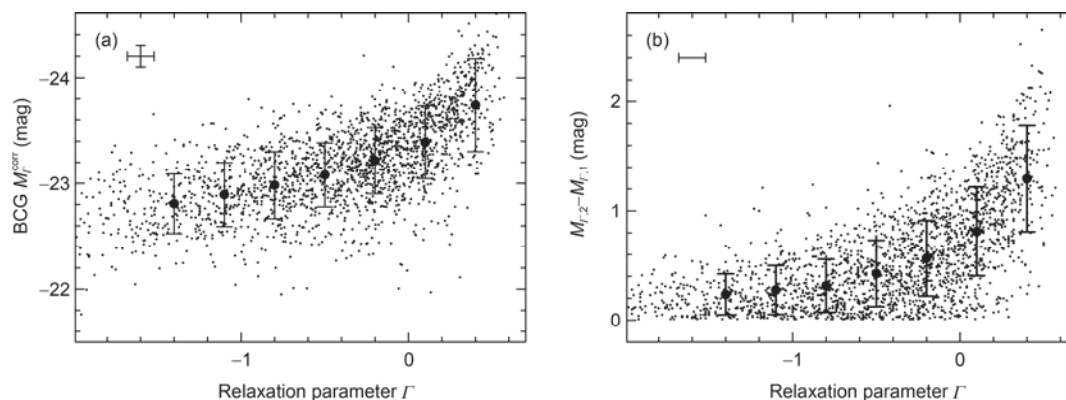


图7 星系团的动力学弛豫参数与最亮团星系的关联。(a) 星系团的动力学弛豫参数与最亮团星系的绝对星等相关; (b) 弛豫参数也与第一、第二最亮团星系的星等差相关。摘自文献[37]

Figure 7 The dependence of relaxation parameter on the brightness of BCGs. (a) The relaxation parameter clearly varies with the absolute magnitude of BCGs. (b) The relaxation parameter also depends on the magnitude difference between the first BCG and second BCG. The figures are from Ref. [37]

性质, 这些射电辐射可以分为射电晕(radio halo)、射电遗迹(radio relic)和小型射电晕(radio mini-halo)^[8]。星系团的射电晕和小型射电晕一般处于星系团中心, 弥漫的射电晕延展达Mpc尺度, 小型射电晕延展达50 kpc甚至300 kpc, 频谱非常陡($\alpha < -1$), 面亮度特别低(小于1 $\mu\text{Jy}/\text{arcsec}^2$ 量级)。目前探测到射电晕的星系团有57个^[77], 探测到了小型射电晕有16个星系团。射电晕没有探测到偏振, 估计是星系团的热气体和磁场构成了法拉第消偏振的效果^[78], 或者是磁场本身就是湍流随机性的。有人认为射电晕一般出现在有并合迹象的星系团中, 与星系团并合引起的湍流和激波加速有关^[79]。小型射电晕出现在比较弛豫(或X射线冷核)星系团中。一般预计, 星系团的射电晕不仅与星系团晕区的质量有关^[80], 还与星系团中星系的动力学弛豫特征有关^[72]。因此, 观测星系团的弥漫射电辐射提供了研究星系团内Mpc尺度星系际介质的独有机会。射电晕有两种可能的形成机制: 次级电子模型和再加速模型。次级电子模型认为团内产生弥漫射电辐射的相对论电子源于寿命更长的相对论质子的衰变过程; 而再加速模型则认为这些相对论电子来源于磁流体扰动的再加速过程。这两种模型目前还有明显的不足: 次级电子模型难以解释射电晕与星系团并合之间的关系, 而再加速模型预计的电子加速效率明显高于实际观测得到的数值。

相比于射电晕, 射电遗迹有更加清楚的物理图像^[81]。目前人们普遍认为射电遗迹与星系团并合过程中形成的大尺度激波有关^[82], 出现在星系团的边

缘。目前已经有52个星系团探测到射电遗迹^[83]。最近的X射线观测数据^[72,84]表明, 正在进行并合或刚有过并合的星系团在介质碰撞时形成激波面, 在激波面上有电子加速, 这些电子在星系团磁场中的同步辐射就形成了我们看到的射电遗迹^[85]。最有名的是CIZA2242边上的星系团射电遗迹^[82], 它具有非常强的偏振, 并且磁场沿遗迹的长轴方向。观测发现射电晕和射电遗迹通常位于并合星系团中, 而小型射电晕只存在于弛豫星系团中^[72,82,86], 对它们的形成机制还知之甚少, 可能与团内冷核的晃动加速相对论电子形成弥漫射电辐射有关^[87]。

在收集大量文献数据之后, 我们发现: (1) 弥漫射电源的射电功率与星系团的质量呈明显的正相关, 即星系团质量越大, 弥漫射电源的功率越大; (2) 弥漫射电源的形成可能与星系团动力学状态有关, 射电晕和射电遗迹存在于有明显子结构的并合星系团中, 而小型射电晕位于有冷核的弛豫星系团中。利用搜集到的所有射电晕、射电遗迹和小型射电晕在1.4 GHz, 610 MHz和325 MHz 3个频率处的流量计算了它们的射电功率^[88]; 搜集了这些星系团的质量参数, 如X射线总光度 L_X , r_{500} 范围内的X射线光度 L_{500} , 基于SZ效应得到的星系团质量 $M_{SZ,500}$ 以及基于X射线数据得到的质量 M_{500} 。另外, 还基于光学数据计算了动力学参数 Γ ^[76], 基于X射线数据计算了聚集度 c ^[70]、中心偏移 ω ^[89]和多级展开功率比 P_3/P_0 ^[67,68]。基于这些数据, 发现射电晕、射电遗迹和小型射电晕的射电功率都和质量参数 L_{500} 有良好的相关, 其中射电晕的

相关关系最为显著, 射电遗迹和小型射电晕的相关关系弥散更大. 对于射电晕的两种不同质量参数 L_{500} 和 M_{500} , 它们与射电功率的相关关系的指数是相互自洽的(即大致满足理论公式 $\alpha_{M_{500}} = \alpha_{L_{500}} \times 1.64$). 射电晕和小型射电晕很好地符合相同的射电功率与质量参数 M_{500} 的相关关系.

还发现, 动力学参数确实对这些弥漫射电辐射有所影响, 对射电晕的影响最为显著. 一旦引入动力学参数, 在三维参数空间中的相关关系相比二维的相关关系的数据弥散更小. 换句话说, 对于射电晕和射电遗迹, 引入动力学参数 Γ 可以最有效地减小相关关系的弥散; 而对于小型射电晕, 表征星系团X射线子结构的 P_3/P_0 可以使得数据弥散最小. 因此, 星系团弥漫射电辐射不仅与它们的质量相关, 还和它们的动力学状态有关. 射电晕和射电遗迹的射电功率、星系团的质量或代理量及星系团动力学参数构成的三维空间中, 星系团的数据集中到一个基本面上(见图8). 因此, 星系团X射线图像的子结构或者成员星系的亮度分布不规则性可以量化地反映团内介质激波和扰动再加速粒子过程.

3 星系团中成员星系性质的研究

星系团是检验星系在致密环境中演化的重要实验室. 星系团最亮成员星系一般是宇宙中质量最大的一类星系, 处于星系团中心, 它跟星系团的形成演

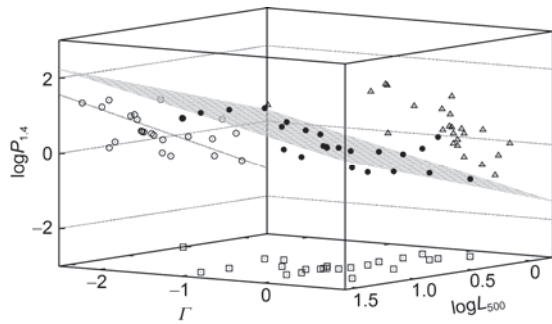


图 8 星系团在X射线光度、动力学参数和射电晕功率三维空间中的分布(黑点表示 24 个星系团), 灰色平面表示拟合的最佳基本面, 空心圆圈、三角形、正方形分别表示投影在 3 个平面上表示它们在二维参数空间的分布. 摘自文献[88]

Figure 8 The distribution of 24 galaxy clusters with radio halos in the 3D parameter space of the X-ray luminosity of clusters L_{500} , optical relaxation factor Γ and power of radio halos $P_{1.4}$. The best fitted plane is shown as the gray plane. Data are projected onto the three projected planes and are shown as open circles, triangles and squares, respectively. The figure is from Ref. [88]

化过程紧密相关^[90]. 近邻宇宙中, 星系团星系由颜色较红的椭圆星系主导. 有人意识到, 高红移星系团中有更多恒星形成的蓝星系^[91,92].

3.1 成员星系光度函数与星系团动力学状态的联系

星系团中有各种亮度的成员星系, 通常越亮的星系数目越少, 中央存在一个非常亮的主导星系. 成员星系的亮度分布可以用光度函数来描述, 即单位绝对星等内星系数密度随光度的函数. 它通常可以写成Schechter函数^[93]:

$$\Phi(M)dM = 0.4 \ln 10 \Phi_* 10^{-0.4(M-M_*)} (\alpha+1) \exp[-0.4(M-M_*)] dM, \quad (1)$$

其中, α 是暗端斜率, M_* 是特征绝对星等, Φ_* 是归一化因子.

最亮团星系的光度函数不同于其他成员星系, 它可用高斯函数描述^[94]

$$\Phi(M)dM = \Phi_0 / \sigma_0 \exp[-(M-M_0)^2 / (2\sigma_0^2)] dM, \quad (2)$$

其中, Φ_0 表示归一化因子, M_0 和 σ_0 分布表示绝对星等的平均值和弥散.

过去很多学者研究了成员星系的光度函数. 但由于采用的星系团样本比较小, 成员星系光度函数与星系团动力学状态的联系表现得不够明确, 不同的工作甚至得出相反的结论^[95,96]. 我们将已经估计好动力学参数的2092个富星系团分成3个不同动力学状态的子样本^[97], 计算了成员星系的合成光度函数. 结果表明, 成员星系光度函数与星系团动力学状态有关(图9). 越弛豫的星系团中最亮团星系越亮, 而其他亮星系就越多. 这表明在星系团动力学演化过程中, 星系团内的亮星系被中心星系吞噬, 使得亮星系变少, 而中心最亮星系变得更亮.

3.2 最亮团星系的射电光度函数

最亮团星系的核心包含一个超大质量黑洞^[98]. 超大质量黑洞吸积物质的同时还向旋转轴方向喷射物质, 产生射电喷流. 高速喷流在有磁场的情况下产生射电辐射. 因此, 射电喷流可以反映中心超大质量黑洞的活跃性, 这个过程也是中央星系对团内介质重要的反馈机制^[99]. 最亮团星系相比一般的星系有更高的射电活跃性^[100,101]. 射电光度函数是研究星系空间演化的重要工具, 恒星形成星系(star-forming galaxies, SF)

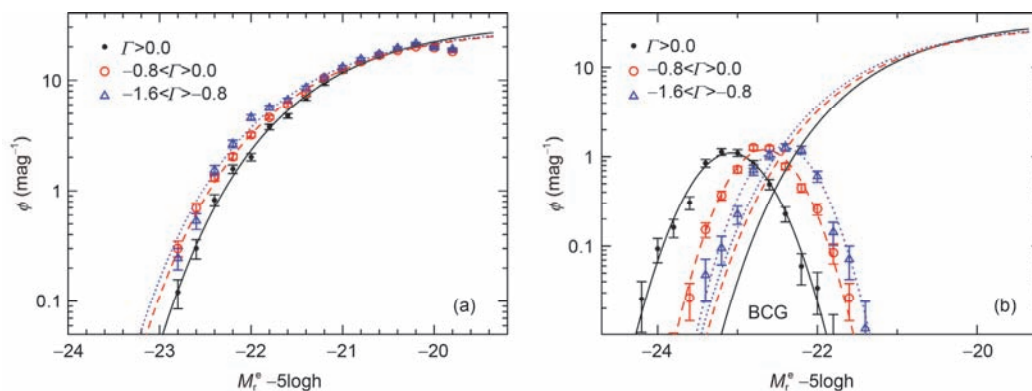


图9 (网络版彩色)不同动力学状态星系团的成员星系(a)和最亮团星系(b)的合成光度函数. 摘自文献[97]

Figure 9 (Color online) Composite luminosity functions depending on different dynamical state clusters, for non-BCG member galaxies in (a) and BCGs in (b). The figures are from Ref.[97]

和活动星系核(active galactic nuclei, AGN)的射电光度函数已经得到了很好的研究^[102].

影响最亮团星系中心超大质量黑洞活跃性的因素有哪些? 研究发现最亮团星系的射电活跃性和它们中心黑洞的质量有关, 质量越大, 射电噪的比率越高^[100]. Ball等人^[103]早先基于91个最亮团星系得到了它们射电光度函数的大致轮廓, 但由于样本太小, 所得的射电光度函数误差很大. Kale等人^[86]发现最亮团星系的射电辐射与星系团的动力学状态有关, 即弛豫的星系团相比并合的星系团射电辐射很强(radio-loud)的比率更高.

Yuan等人^[104]利用最大的光学星系团目标^[38]与射电巡天(美国国家射电天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)的甚大阵(Very Large Array, VLA)巡天(Sky Survey, SS), NVSS; 利用美国VLA做的Faint Images of the Radio Sky at Twenty-centimeters, FIRST)的观测数据进行交叉来找出最亮团星系的射电辐射. 我们得到了7138个射电辐射很强的最亮团星系, 建立了目前世界上最大的流量和质量均完备的射电辐射最亮团星系样本(红移范围 $0.05 < z \leq 0.45$). 基于这些数据, 发现大多数射电很强的最亮团星系的光谱型为AGN, 少部分是恒星形成的星系. 基于所得到的最大的完备射电BCG样本, 得到了最亮团星系的射电光度函数(图10), 并发现射电光度函数会受到最亮团星系光度和星系团动力学状态的影响^[104]. 虽然最亮团星系的射电功率与其自身质量参数、星系团质量参数以及星系团动力学参数之间未发现显著的相关关系, 数据分布有较大的弥散, 但发现最亮团星系射电辐射强的比率是随着

最亮团星系的绝对星等以及星系团富度增加而增加(图10(a)). 最亮团星系的绝对星等和所处星系团的动力学状态都能显著影响最亮团星系的射电光度函数. 射电活动最强烈的最亮团星系往往有更大的光学绝对星等, 同时倾向存在于更弛豫的星系团中. 最亮团星系的射电光度函数在红移范围 $0.05 < z \leq 0.45$ 内没有明显的演化.

4 结论和展望

过去10年, 我们抓住机遇, 利用国际上公开的巡天数据在星系团方面做了一系列工作. 从SDSS的14000平方度数据中证认出158103个红移范围为 $0.05 < z < 0.75$ 的星系团, 是目前世界上最大的星系团样本. 在SDSS天区以外, 从2MASS, WISE和SuperCOSMOS数据中证认出20897个新的星系团. 通过查看星系团的合成彩色图像, 发现了许多强引力透镜系统. 分析了星系团的空间成团性, 首次用星系团样本探测到明显的宇宙重子声波振荡信号. 根据星系团成员星系的二维分布, 定量计算了最大星系团样本的子结构和动力学状态参数, 发现弛豫星系团占28%, 还发现星系团动力学状态、质量和射电辐射组成一个基本面关系. 研究了星系团的成员星系的性质, 发现成员星系的合成光度函数与星系团动力学状态相关, 越弛豫的星系团中最亮团星系的光学光度越大, 射电活动性也越强, 而其他亮星系越少.

目前国际上很多波段的巡天正在向宇宙的纵深方向大大扩展, 具体表现在各个波段的观测星等都比原先有所提高. 在不久的将来, 只要联合多个波段的巡天数据, 星系的测光红移可以估计得更精确, 星

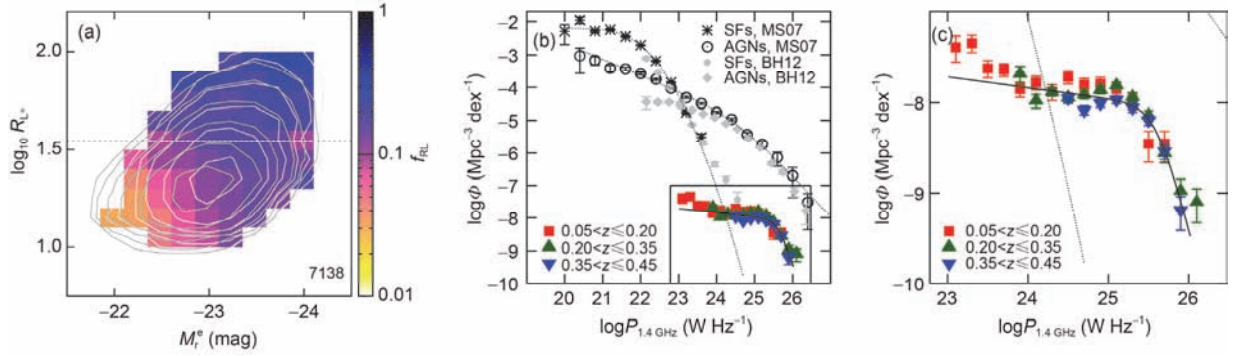


图 10 (网络版彩色)星系团中最亮团星系的射电辐射性质. (a) 最亮团星系射电噪比率(f_{RL})在最亮团星系光学绝对星等——星系团富度图中的分布. 细高线表示 7138 个射电流量大于 5 mJy 的射电噪最亮团星系的数密度分布, 粗等高线表示 62686 个母样本最亮团星系的数密度分布情况. 高于虚线的部分表示在红移小于 0.45 范围内质量完备的星系团. 这里只画出了包含多于 10 个射电噪最亮团星系的像素点; (b) 展示了 3 个红移范围内的最亮团星系的射电光度函数, 并与恒星形成星系^[102]及 AGN^[105]的射电光度函数相比较. 实线为所有数据点的最佳拟合线, 虚线和点线分别为恒星形成星系和 AGN 的最佳拟合线; (c) 最亮团星系射电光度函数的放大图像

Figure 10 (Color online) The properties of radio emission of BCGs. (a) The fraction of radio-loud BCGs, f_{RL} , varies with the r-band absolute magnitude of BCG and cluster richness. The thin contours stand for the distribution of 7138 BCGs with radio fluxes larger than 5 mJy, while thick contours present the distribution for the parent sample with 62686 galaxies. Above the dash line is a complete BCG sample of massive clusters of $z \leq 0.45$. A pixel is shown only if there are more than 10 radio BCGs. (b) Radio luminosity functions of BCGs derived for sub-samples in three redshift ranges, compared with radio luminosity functions of star formation galaxies (SF) and AGNs obtained^[102,105]. The solid line is the best fitting to radio luminosity functions of all BCGs, and dash and dotted lines stand for the fitting to the function for AGNs and SF^[102]. (c) An enlarged part for radio luminosity functions of BCGs

系团的证认和发现的误报率可以更低. 更重要的是, 星系团的发现空间可以大大延伸到更高红移, 即延伸到宇宙更早的阶段. 这样, 不仅可以发现更多的星系

团, 还可以更好地研究宇宙结构的形成和星系团的演化以及星系在星系团环境内的演化. 完全可以预期, 与星系团研究相关的多个领域都将取得突破性进展.

参考文献

- Abell G O, Corwin Jr H G, Olowin R P. A catalog of rich clusters of galaxies. *Astrophys J Suppl*, 1989, 70: 1–138
- Dressler A, Shectman S A. Evidence for substructure in rich clusters of galaxies from radial-velocity measurements. *Astron J*, 1988, 95: 985–995
- Wu X P, Xue Y J, Fang L Z. The LX-T and LX- σ relationships for galaxy clusters revisited. *Astrophys J*, 1999, 524: 22–30
- Chen Y, Reiprich T H, Bohringer H, et al. Statistics of X-ray observables for the cooling-core and non-cooling core galaxy clusters. *Astron Astrophys*, 2007, 466: 805–812
- Hektor A, Raidal M, Tempel E. Evidence for indirect detection of dark matter from galaxy clusters in Fermi γ -ray data. *Astrophys J*, 2013, 762: L22
- Planck Collaboration. Planck 2013 results. XXIX. The Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources. *Astron Astrophys*, 2014, 571: A29
- Zhang P, Pen U L, Wang B. The Sunyaev-Zeldovich effect: Simulations and observations. *Astrophys J*, 2002, 577: 555–568
- Feretti L, Giovannini G, Govoni F, et al. Clusters of galaxies: Observational properties of the diffuse radio emission. *Astron Astrophys Rev*, 2012, 20: 54
- Allen S W, Evrard A E, Mantz A B. Cosmological parameters from observations of galaxy clusters. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2011, 49: 409–470
- Wetzel A R, Tinker J L, Conroy C. Galaxy evolution in groups and clusters: Star formation rates, red sequence fractions and the persistent bimodality. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2012, 424: 232–243
- Hong T, Han J L, Wen Z L, et al. The correlation function of galaxy clusters and detection of Baryon Acoustic Oscillations. *Astrophys J*, 2012, 749: 81
- Vikhlinin A, Burenin R A, Ebeling H, et al. Chandra cluster cosmology project. II. Samples and X-ray data reduction. *Astrophys J*, 2009, 692: 1033–1059
- Wen Z L, Han J L, Liu F S. Mass function of rich galaxy clusters and its constraint on σ_8 . *Mon Not Roy Astron Soc*, 2010, 407: 533–543

- 14 Yu H, Zhu Z H. Combining optical and X-ray observations of galaxy clusters to constrain cosmological parameters. *Res Astron Astrophys*, 2011, 11: 776–786
- 15 Fan Z, Chiueh T. Determining the geometry and the cosmological parameters of the universe through Sunyaev-Zeldovich effect cluster counts. *Astrophys J*, 2001, 550: 547–553
- 16 Xu H, Jin G, Wu X P. The mass-temperature relation of 22 nearby clusters. *Astrophys J*, 2001, 553: 78–83
- 17 Abell G O. The distribution of rich clusters of galaxies. *Astrophys J Suppl*, 1958, 3: 211
- 18 Abramopoulos F, Ku W H M. X-ray survey of clusters of galaxies with the Einstein observatory. *Astrophys J*, 1983, 271: 446–460
- 19 Sunyaev R A, Zeldovich Y B. The observations of relic radiation as a test of the nature of X-Ray radiation from the clusters of galaxies. *Comments Astrophys Space Phys*, 1972, 4: 173
- 20 Huchra J P, Geller M J. Groups of galaxies. I. Nearby groups. *Astrophys J*, 1982, 257: 423–437
- 21 Yang X, Mo H J, van den Bosch F C, et al. Galaxy groups in the SDSS DR4. I. The catalog and basic properties. *Astrophys J*, 2007, 671: 153–170
- 22 Bohringer H, Voges W, Huchra J P, et al. The Northern ROSAT All-Sky (NORAS) galaxy cluster survey. I. X-ray properties of clusters detected as extended X-ray sources. *Astrophys J Suppl*, 2000, 129: 435–474
- 23 Bohringer H, Schuecker P, Guzzo L, et al. The ROSAT-ESO flux limited X-ray (REFLEX) galaxy cluster survey. V. The cluster catalogue. *Astron Astrophys*, 2004, 425: 367–383
- 24 Piffaretti R, Arnaud M, Pratt G W, et al. The MCXC: A meta-catalogue of X-ray detected clusters of galaxies. *Astron Astrophys*, 2011, 534: A109
- 25 Wang L, Yang X, Shen S, et al. Measuring the X-ray luminosities of SDSS DR7 clusters from ROSAT All Sky Survey. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2014, 439: 611–622
- 26 Xu W W, Ramos-Ceja M E, Pacaud F, et al. A new X-ray-selected sample of very extended galaxy groups from the ROSAT All-Sky Survey. *Astron Astrophys*, 2018, 619: 162
- 27 Popesso P, Biviano A, Bohringer H, et al. RASS-SDSS galaxy cluster survey. V. The X-ray-underluminous Abell clusters. *Astron Astrophys*, 2007, 461: 397–410
- 28 Planck Collaboration. Planck 2015 results. XXVII. The second Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources. *Astron Astrophys*, 2016, 594: A27
- 29 Bleem L E, Stalder B, Brodwin M, et al. Galaxy clusters discovered via the Sunyaev-Zel'dovich effect in the 2500-square-degree SPT-SZ survey. *Astrophys J Suppl*, 2015, 216: 27
- 30 Hasselfield M, Hilton M, Marriage T A, et al. The atacama cosmology telescope: Sunyaev-Zel'dovich selected galaxy clusters at 148 GHz from three seasons of data. *J Cosmol Astropart Phys*, 2013, 7: 008
- 31 York D G, Adelman J, Anderson J E J, et al. The Sloan Digital Sky Survey: Technical summary. *Astron J*, 2000, 120: 1579–1587
- 32 Gladders M D, Yee H K C. A new method for galaxy cluster detection. I. The algorithm. *Astron J*, 2000, 120: 2148–2162
- 33 Hao J, McKay T A, Koester B P, et al. A GMBCG galaxy cluster catalog of 55,424 rich clusters from SDSS DR7. *Astrophys J Suppl*, 2010, 191: 254–274
- 34 Koester B P, McKay T A, Annis J, et al. A MaxBCG catalog of 13,823 galaxy clusters from the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys J*, 2007, 660: 239–255
- 35 Wen Z L, Han J L, Liu F S. Galaxy clusters identified from the SDSS DR6 and their properties. *Astrophys J Suppl*, 2009, 183: 197–213
- 36 Gladders M D, Yee H K C. The red-sequence cluster survey. I. The survey and cluster catalogs for patches RCS 0926+37 and RCS 1327+29. *Astrophys J Suppl*, 2005, 157: 1–29
- 37 Wen Z L, Han J L, Liu F S. A catalog of 132684 clusters of galaxies identified from Sloan Digital Sky Survey III. *Astrophys J Suppl*, 2012, 199: 34
- 38 Wen Z L, Han J L. Calibration of the optical mass proxy for clusters of galaxies and an update of the WHL12 cluster catalog. *Astrophys J*, 2015, 807: 178
- 39 Wen Z L, Han J L, Yang F. A catalogue of clusters of galaxies identified from all sky surveys of 2MASS, WISE, and SuperCOSMOS. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 475: 343–352
- 40 Adelman-McCarthy J K, Agueros M A, Allam S S, et al. The sixth data release of the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys J Suppl*, 2008, 175: 297–313
- 41 Aihara H, Allende P C, An D, et al. The eighth data release of the Sloan Digital Sky Survey: First data from SDSS-III. *Astrophys J Suppl*, 2011, 193: 29
- 42 Blanton M R, Hogg D W, Bahcall N A, et al. The galaxy luminosity function and luminosity density at redshift $z=0.1$. *Astrophys J*, 2003, 592: 819–838
- 43 Alam S, Albareti F D, Allende P C, et al. The eleventh and twelfth data releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final data from SDSS-III. *Astrophys J Suppl*, 2015, 219: 12

- 44 Bilicki M, Jarrett T H, Peacock J A, et al. Two micron all sky survey photometric redshift catalog: A comprehensive three-dimensional census of the whole sky. *Astrophys J Suppl*, 2014, 210: 9
- 45 Bilicki M, Peacock J A, Jarrett T H, et al. WISE $\times$ SuperCOSMOS photometric redshift catalog: 20 million galaxies over $3/\pi$ steradians. *Astrophys J Suppl*, 2016, 225: 5
- 46 Wen Z L, Han J L. Galaxy clusters at high redshift and evolution of brightest cluster galaxies. *Astrophys J*, 2011, 734: 68
- 47 Wen Z L, Han J L. A sample of 1959 massive galaxy clusters at high redshifts. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 481: 4158–4168
- 48 Wen Z L, Han J L, Xu X Y, et al. Discovery of four gravitational lensing systems by clusters in the SDSS DR6. *Res Astron Astrophys*, 2009, 9: 5–10
- 49 Diehl H T, Allam S S, Annis J, et al. The sloan bright arcs survey: Four strongly lensed galaxies with redshift > 2 . *Astrophys J*, 2009, 707: 686–692
- 50 Bayliss M B, Wuyts E, Sharon K, et al. Two lensed Lyman- α emitting galaxies at $z \sim 5$. *Astrophys J*, 2010, 720: 1559–1568
- 51 Wen Z L, Han J L, Jiang Y Y. Lensing clusters of galaxies in the SDSS-III. *Res Astron Astrophys*, 2011, 11: 1185–1198
- 52 Liang S M, Wen Z L, Han J L, et al. Discovery of eight lensing clusters of galaxies. *Sci China Phys Mech Astron*, 2014, 57: 1809–1815
- 53 Eisenstein D J, Zehavi I, Hogg D W, et al. Detection of the baryon acoustic peak in the large-scale correlation function of SDSS luminous red galaxies. *Astrophys J*, 2005, 633: 560–574
- 54 Cole S, Percival W J, Peacock J A, et al. The 2dF galaxy redshift survey: Power-spectrum analysis of the final data set and cosmological implications. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2005, 362: 505–534
- 55 Anderson L, Aubourg E, Bailey S, et al. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Measuring DA and H at $z=0.57$ from the baryon acoustic peak in the data release 9 spectroscopic galaxy sample. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2014, 439: 83–101
- 56 Blake C, Davis T, Poole G B, et al. The wigglez dark energy survey: Testing the cosmological model with baryon acoustic oscillations at $z=0.6$. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2011, 415: 2892–2909
- 57 Beutler F, Blake C, Colless M, et al. The 6dF galaxy survey: Baryon acoustic oscillations and the local Hubble constant. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2011, 416: 3017–3032
- 58 Delubac T, Bautista J E, Busca N G, et al. Baryon acoustic oscillations in the Ly α forest of BOSS DR11 quasars. *Astron Astrophys*, 2015, 574: A59
- 59 Estrada J, Sefusatti E, Frieman J A. The correlation function of optically selected galaxy clusters in the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys J*, 2009, 692: 265–282
- 60 Hutsi G. Power spectrum of the maxBCG sample: Detection of acoustic oscillations using galaxy clusters. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2010, 401: 2477–2489
- 61 Veropalumbo A, Marulli F, Moscardini L, et al. An improved measurement of baryon acoustic oscillations from the correlation function of galaxy clusters at $z \sim 0.3$. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2014, 442: 3275–3283
- 62 Planck Collaboration. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2016, 594: 13
- 63 Hong T, Han J L, Wen Z L. A detection of Baryon Acoustic Oscillations from the distribution of galaxy clusters. *Astrophys J*, 2016, 826: 154
- 64 Smith G P, Kneib J P, Smail I, et al. A Hubble Space Telescope lensing survey of X-ray luminous galaxy clusters-IV. Mass, structure and thermodynamics of cluster cores at $z=0.2$. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2005, 359: 417–446
- 65 Bauer F E, Fabian A C, Sanders J S, et al. The prevalence of cooling cores in clusters of galaxies at $z \sim 0.15$ – 0.4 . *Mon Not Roy Astron Soc*, 2005, 359: 1481–1490
- 66 Weißmann A, Bohringer H, Suhada R, et al. Studying the properties of galaxy cluster morphology estimators. *Astron Astrophys*, 2013, 549: A19
- 67 Buote D A, Tsai J C. Quantifying the morphologies and dynamical evolution of galaxy clusters. I. The method. *Astrophys J*, 1995, 452: 522
- 68 Bohringer H, Pratt G W, Arnaud M, et al. Substructure of the galaxy clusters in the REXCESS sample: Observed statistics and comparison to numerical simulations. *Astron Astrophys*, 2010, 514: A32
- 69 Hashimoto Y, Bohringer H, Henry J P, et al. Robust quantitative measures of cluster X-ray morphology, and comparisons between cluster characteristics. *Astron Astrophys*, 2007, 467: 485–499
- 70 Santos J S, Rosati P, Tozzi P, et al. Searching for cool core clusters at high redshift. *Astron Astrophys*, 2008, 483: 35–47
- 71 Mohr J J, Evrard A E, Fabricant D G, et al. Cosmological constraints from observed cluster X-Ray morphologies. *Astrophys J*, 1995, 447: 8
- 72 Cassano R, Ettori S, Giacintucci S, et al. On the connection between giant radio halos and cluster mergers. *Astrophys J*, 2010, 721: L82–L85
- 73 Yu H, Diaferio A, Agulli I, et al. The unrelaxed dynamical structure of the galaxy cluster Abell 85. *Astrophys J*, 2016, 831: 156
- 74 West M J, Oemler A J, Dekel A. Subclustering in rich clusters of galaxies and their environs. *Astrophys J*, 1988, 327: 1–24
- 75 Flin P, Krywult J. Substructures in Abell clusters of galaxies. *Astron Astrophys*, 2006, 450: 9–14

- 76 Wen Z L, Han J L. Substructure and dynamical state of 2092 rich clusters of galaxies derived from photometric data. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2013, 436: 275–293
- 77 Giovannini G, Bonafede A, Feretti L, et al. Radio halos in nearby ($z < 0.4$) clusters of galaxies. *Astron Astrophys*, 2009, 507: 1257–1270
- 78 Bonafede A, Govoni F, Feretti L, et al. Fractional polarization as a probe of magnetic fields in the intra-cluster medium. *Astron Astrophys*, 2011, 530: 24
- 79 Govoni F, Feretti L. Magnetic fields in clusters of galaxies. *Int J Mod Phys D*, 2004, 13: 1549–1594
- 80 Basu K. A Sunyaev-Zel'dovich take on cluster radio haloes. I. Global scaling and bi-modality using Planck data. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2012, 421: L112–L116
- 81 Brunetti G, Jones T W. Cosmic rays in galaxy clusters and their nonthermal emission. *Int J Mod Phys D*, 2014, 23: 1430007
- 82 van Weeren R J, Rottgering H J A, Bruggen M, et al. Particle acceleration on megaparsec scales in a merging galaxy cluster. *Science*, 2010, 330: 347
- 83 Nuza S E, Hoeft M, van Weeren R J, et al. How many radio relics await discovery? *Mon Not Roy Astron Soc*, 2012, 420: 2006–2019
- 84 Cuciti V, Cassano R, Brunetti G, et al. Occurrence of radio halos in galaxy clusters. Insight from a mass-selected sample. *Astron Astrophys*, 2015, 580: A97
- 85 Donnert J, Dolag K, Brunetti G, et al. Rise and fall of radio haloes in simulated merging galaxy clusters. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2013, 429: 3564–3569
- 86 Kale R, Venturi T, Giacintucci S, et al. The extended GMRT radio halo survey. II. Further results and analysis of the full sample. *Astron Astrophys*, 2015, 579: A92
- 87 ZuHone J A, Markevitch M, Brunetti G, et al. Turbulence and radio mini-halos in the sloshing cores of galaxy clusters. *Astrophys J*, 2013, 762: 78
- 88 Yuan Z S, Han J L, Wen Z L. The scaling relations and the fundamental plane for radio halos and relics of galaxy clusters. *Astrophys J*, 2015, 813: 77
- 89 Poole G B, Fardal M A, Babul A, et al. The impact of mergers on relaxed X-ray clusters. I. Dynamical evolution and emergent transient structures. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2006, 373: 881–905
- 90 De Lucia G, Blaizot J. The hierarchical formation of the brightest cluster galaxies. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2007, 375: 2–14
- 91 Butcher H, Oemler J A. The evolution of galaxies in clusters. I. ISIT photometry of C1 0024+1654 and 3C 295. *Astrophys J*, 1978, 219: 18–30
- 92 Butcher H, Oemler J A. The evolution of galaxies in clusters. V. A study of populations since z approximately equal to 0.5. *Astrophys J*, 1984, 285: 426–438
- 93 Schechter P. An analytic expression for the luminosity function for galaxies. *Astrophys J*, 1976, 203: 297–306
- 94 Hansen S M, McKay T A, Wechsler R H, et al. Measurement of galaxy cluster sizes, radial profiles, and luminosity functions from SDSS photometric data. *Astrophys J*, 2005, 633: 122–137
- 95 De Propriis R, Philipps S, Bremer M N. Deep luminosity functions and colour-magnitude relations for cluster galaxies at $0.2 < z < 0.6$. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2013, 434: 3469–3486
- 96 Ribeiro A L B, Lopes P A A, Rembold S B. NoSOCS in SDSS. III. The interplay between galaxy evolution and the dynamical state of galaxy clusters. *Astron Astrophys*, 2013, 556: A74
- 97 Wen Z L, Han J L. Dependence of the bright end of composite galaxy luminosity functions on cluster dynamical states. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2015, 448: 2–8
- 98 Rafferty D A, McNamara B R, Nulsen P E J, et al. The feedback-regulated growth of black holes and bulges through gas accretion and starbursts in cluster central dominant galaxies. *Astrophys J*, 2006, 652: 216–231
- 99 McNamara B R, Nulsen P E J. Heating hot atmospheres with active galactic nuclei. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2007, 45: 117–175
- 100 Best P N, von der Linden A, Kauffmann G, et al. On the prevalence of radio-loud active galactic nuclei in brightest cluster galaxies: Implications for AGN heating of cooling flows. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2007, 379: 894–908
- 101 Burns J O, White R A, Hough D H. Radio emission in the directions of cD and related galaxies in poor clusters. III. VLA observations at 20 cm. *Astron J*, 1981, 86: 1–15
- 102 Mauch T, Sadler E M. Radio sources in the 6dFGS: Local luminosity functions at 1.4 GHz for star-forming galaxies and radio-loud AGN. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2007, 375: 931–950
- 103 Ball R, Burns J O, Loken C. The radio properties of cD galaxies in Abell clusters. II-The VLA sample. *Astron J*, 1993, 105: 53–66
- 104 Yuan Z S, Han J L, Wen Z L. Radio luminosity function of brightest cluster galaxies. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2016, 460: 3669–3678
- 105 Best P N, Heckman T M. On the fundamental dichotomy in the local radio-AGN population: Accretion, evolution and host galaxy properties. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2012, 421: 1569–1582

Summary for “星系团的发现和星系团及成员星系的物理性质”

Identification of clusters of galaxies and physical properties of clusters and their member galaxies

Jinlin Han^{1,2*}, Zhonglüe Wen¹, Zhongsheng Yuan¹ & Tao Hong¹

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: hjl@nao.cas.cn

Clusters of galaxies are the largest gravitationally bound systems in the Universe and are located at the knots of cosmic web. They provide powerful constraints on galaxy evolution, the formation of large scale structure of the Universe and many astrophysical processes. This paper summarizes the results we obtained in the last decade on identification of galaxy clusters, studies of the properties of clusters and cluster member galaxies.

We developed a method to identify galaxy clusters by using photometric redshifts of galaxies. The method was applied to the survey data of Sloan Digital Sky Survey (SDSS), and we identified 39668 clusters from the sixth data release of SDSS, and later identified 158103 clusters from the twelfth data release of SDSS, which doubles the number of known clusters and extends the redshift range of clusters from 0.3 to 0.8. Recently, we identified 47600 clusters from all sky data of Two Micron All-Sky Survey (2MASS), Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) and SuperCOSMOS, which significantly enlarge the number of clusters outside of the SDSS sky region. More high-redshift clusters were also recently identified from SDSS×WISE and the deep survey data, which significantly enlarge the number of cluster at high redshift. By inspecting the SDSS color images, we found many clusters showing giant arcs, acting as the lensed system for background galaxies.

Many following-up studies have been done to understand the properties of galaxy clusters, including their spatial distribution in the Universe, the dynamical state and diffuse radio emission. The two point correlation function of 79091 clusters was calculated to detect the Baryon Acoustic Oscillations (BAO) signal with 3.7σ confidence, which is the first significant detection of the BAO signal by using galaxy clusters as tracers. Based on optical photometric data, we developed a method to quantify the dynamical state of clusters and calculated the relaxation parameter for 2092 rich clusters. We found that the cluster dynamical state is significantly correlated with the absolute magnitude of Brightest Cluster Galaxy (BCG) and also depends on the magnitude difference between the first BCG and the second BCG. The diffuse radio emission of galaxy clusters detected in merging clusters is related to dynamical state, so that the radio power of diffuse radio emission, cluster mass proxy and dynamical parameters form a fundamental plane.

The properties of cluster member galaxies have been investigated in several aspects. By using 2092 clusters with dynamical states, we calculated the composite luminosity function of member galaxies. We found that more relaxed clusters have fewer bright member galaxies, but host a brighter BCG. By cross-matching the largest optical cluster sample with radio data obtained by the Very Large Array (VLA) of National Radio Astronomy Observatory (NRAO) through the NRAO VLA Sky Survey (NVSS) and Faint Images of the Radio Sky at Twenty-centimeters (FIRST), we got the largest complete sample of radio loud BCG. We obtained the radio luminosity function of BCGs, and found that it is related to the optical luminosity of BCG and dynamical state of clusters. BCGs with larger optical luminosity have higher fraction of radio loud. BCGs in more relaxed clusters have higher radio power.

It is great era now as more deeper sky surveys on many bands are going on. We expect many breakthroughs in the research areas related to galaxy clusters.

clusters of galaxies, catalog, large scale structure, dynamical state, radio emission

doi: 10.1360/N972019-00095