

A2142 星系团子结构中的星系演化*

刘登琦 余 恒†

(北京师范大学天文系, 100875, 北京)

摘要 系统整理了星系团 A2142 的光谱和测光数据, 利用花树算法得到的子结构, 将星系团视场中的星系分为非子结构、子结构和外围星系 3 类. 通过研究它们的分布、产星活动、 D_{n4000} 等物理信息, 发现了 A2142 星系团中的星系存在明显的径向演化趋势. 星系从星系团外围落入团中心的过程中, 其演化不仅受到星系团内介质的影响, 还受到子结构自身的调制.

关键词 星系团; 星系; 恒星形成率; 星系演化

中图分类号 P157.8

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021025

0 引言

星系团是宇宙中最大的引力束缚系统, 它是由早期宇宙密度微扰所形成的, 星系团广泛分布于宇宙大尺度纤维状结构的节点上, 尺度从几 Mpc 到几十 Mpc. 在不同波段对星系团的观测, 可以分析其不同的物理性质, 例如: 通过测量星系的视向速度分布, 可以分析星系团的动力学结构^[1]; 通过分析星系团成员的光谱数据, 有助于了解星系的性质及其演化特征^[2]; 通过弱引力透镜的研究, 可以探测星系暗物质晕^[3]; 在 X 射线波段可以观测高温气体组成的星系团内介质(ICM)的分布^[4]; 星系团并合后通常会留下射电遗迹, 这有助于追踪星系团活动的历史^[5].

星系团内部的物质密度更高, 这会影响其成员星系的演化, 并且能直接反映在星系的性质上, 如恒星形成率(r_{sf})、 D_{n4000} 、金属丰度等. 处于近域宇宙的星系, 根据颜色星等图(CMD)可分为 2 大类: 由早型、椭圆星系组成的红序列和由晚型、旋涡星系组成的蓝云^[6-7]. 研究者们还发现, 位于致密区域的星系大部分是红的早型星系^[8]. 目前主流星系演化理论认为, 晚型星系是通过星系间的相互作用(星系合并、潮汐剥离、冲压剥离等)演化为早型星系的^[9-10]. 然而大质量星系团中的星系从外围下落至星系团中心的过程中, 有可能因为星系间的干扰, 从而影响了自身的演化进程. 潮汐剥离在星系演化中扮演着重要角色, 这一物理过程会点燃星系的恒星形成^[11]; 冲压剥离是导致产星星系熄火的一个主要原因, 即当星系穿过热

的 ICM 时, 其中的冷气体会因为冲压力而被剥离出来^[12-14]. 也有研究者们认为, 冲压剥离有时也会引起 r_{sf} 的升高^[15]. 耗散是导致产星星系熄火的另一个原因, 当星系由于自身内部冷气体耗尽而又没有新的气体来源补充时, 恒星形成活动就会停止. 耗散这个过程所需的时标大概是 4.0 Ga^[16-17], 远大于冲压剥离的时标(0.5~1.5 Ga).

在星系团中, 局域星系密度是影响星系演化的一个重要因素. Meusinger 等^[18] 在英仙座星系团中发现了局域星系密度随投影距离(距团中心)增大而减小的趋势, 同时他们还发现了晚型星系的比例也随着投影距离增大而增大. 类似的结果在 A2029 星系团中也存在. 环境效应影响了 D_{n4000} , 研究者们发现 D_{n4000} 与投影距离成反比^[19]. 大多数富星系团都具有多个子结构^[20-22], 子结构通常出现在高星系密度区域. 更高的星系密度也可能会增加星系间干扰, 而星系间的相互作用会加速星系的演化^[23-24]. Einasto 等^[25] 统计了 576 493 个星系的形态类型、 r_{sf} 的分布, 发现了较致密区域息产星系通常占大多数. 这说明: 高密度环境会影响星系的演化, 而大质量星系团中存在着各种不同密度的环境, 研究其中的星系分布有助于人类了解星系的演化.

A2142 是一个红移处于 0.089 8 的超大质量星系团, 位于超星系团的中心, 与大尺度纤维结构相连^[26]. 它并未完全弛豫, 在 X 射线波段下, 能看到位于团中心区域的冷锋(可能是由小并合事件所导致的冷核冕

* 国家自然科学基金资助项目(U1731243); 中科院国际合作局项目(GJHZ1864)

† 通信作者: 余恒(1982—), 男, 博士, 副教授. 研究方向: 星系团、宇宙学. E-mail: yuheng@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-01-29

动). 在 r_{500} 附近还观测到正在经历冲压剥离的沉降群^[28]. 星系团外围有大量活跃的蓝星系, 团中心部分则是占主导的息产星系^[29]. A2142 星系团中心的致密环境对星系的演化造成了影响, 许多星系在落入星系团之前就已位于星系群或纤维等物质密度偏高的区域. 星系团如何影响星系的演化, 目前仍不清楚. 如果能将不同时期落入星系团的成员星系区分开, 再来检查它们的性质差异, 则将有助于追踪团内星系的演化过程.

2011 年 Owers 等^[27] 通过分析 A2142 中的星系红移数据, 检测到子结构的存在, 但他们所用的 DS 方法只能给出子结构的大概位置, 并未给出成员信息. 2018 年 Liu 等^[30] 利用层次聚类方法, 在 A2142 中找到了 19 个子结构, 并列出了各个子结构的成员. 这些子结构星系进入星系团不久, 受高密度环境影响的时间较短, 是研究星系随环境演化的理想样本. 本研究将基于这些子结构星系, 探讨星系团内环境对星系演化的影响.

本研究采用 WMAP 标准宇宙学模型^[31], 宇宙学参数 $\Omega_m = 0.272$ 、 $\Omega_\Lambda = 0.728$ 、 $H_0 = 70.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 星系团 A2142 的红移 $z=0.0898$. 在赤道坐标系下, 团中心坐标为赤经为 239.5833° , 赤纬为 27.2344° , 误差在 1σ 置信度区间获得.

1 数据样本

Liu 等^[30] 整理了 A2142 视场内 2 239 个具有光谱红移的星系数据, 他们对红移在 $[0.07, 0.11]$ 的星系进行了 3σ 筛选, 得到了 1 067 个视向速度空间的成员星系. 本研究将利用这 1 067 个星系进行再分析.

为了得到 A2142 成员星系的物理性质, 本研究使用了 Salim 等^[32] 光谱能量分布 (SED) 拟合星表 (GSWLC). 这个星表的星系数据是通过多个波段的测光数据拟合得到的, 包括 galaxy evolution explorer (GALEX) 卫星拍摄的紫外数据和 sloan digital sky survey (SDSS) 拍摄的光学数据, SED 拟合得到 r_{sf} , 恒星质量是基于 IMF^[33]. 设定星等限制为 $m_r < 17.9$, 在 A2142 视场内, 处于星等限制范围的星系有 384 个, 与 GSWLC 星表匹配后, 得到了 309 个含有 r_{sf} 恒星质量数据的星系.

恒星形成活动较低的星系在光谱线上 400 nm 的位置存在一个跳变, D_{n4000} 则表示这个跳变前后光谱流量的比值, 这个值与星系的平均恒星年龄息息相关, 一定程度上可以表示星系演化的年龄. 从 SDSS^[34] 的数据库中得到了有光谱数据星系的 D_{n4000} . 这样具有全部 r_{sf} 、恒星质量和 D_{n4000} 的星系一共有 309 个, 它们的 r 波段星等分布如图 1 所示. 在 $m_r < 17.9$ 时完备度达到 86% (图 2).

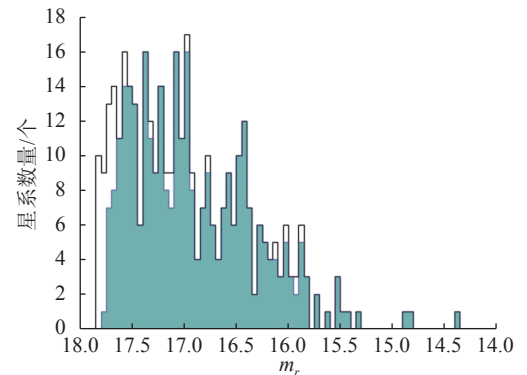


图 1 星等范围内视场中 384 个星系 (黑色) 的和 309 个数据完备星系 (青色) 的 m_r 分布

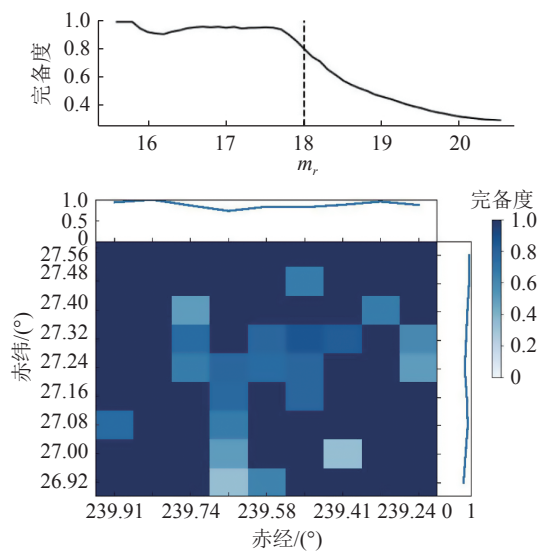


图 2 A2142 视场内星系中含有 r_{sf} 、恒星质量及 D_{n4000} 的完备度检验 ($m_r < 17.9$)

2 数据分析

2.1 子结构 Liu 等^[30] 在 2018 年使用层次聚类方法, 通过弥散速度平台来寻找 A2142 中的子结构及它们的成员星系. 该方法在选取速度平台时存在一定的主观性. 本研究根据 Yu 等^[35] 在 2018 年提出的改进版本——花树算法, 对数据进行重新分析. 新方法根据星系分布的致密程度自动提取结构, 而不需要手工选取弥散速度平台, 提高了结构探测的准确性和完备性. 另一方面, 花树算法在分析子结构过程中考虑了视向速度信息, 与只考虑星系投影密度相比较而言, 更准确地刻画物质密度的分布. 从 1 067 个星系中选出了 868 个团成员星系 (cluster galaxy) 和 18 个次级结构, 每个次级结构至少包含 10 个团成员.

表 1 列出了各个次级结构的基本特征, 次级结构的序号是按照成员数由多到少排列. 结构红移的误差为 $e_z = v_{\text{disp}}/c \sqrt{N_{\text{gal}}}$, 式中, v_{disp} 是各个结构的弥散速

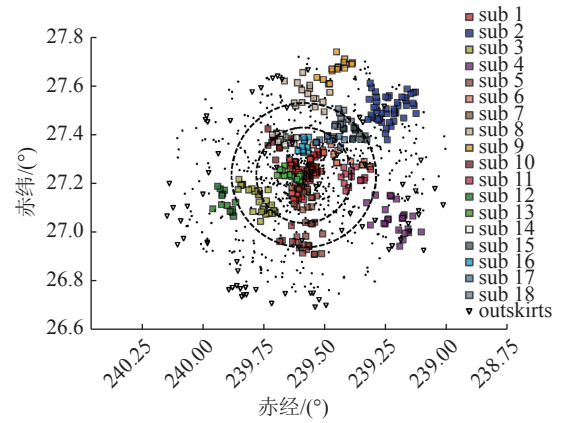
度,单位 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; N_{gal} 是各个结构所包含的成员数,单位个; c 是光速. 需要说明的是,这些次级结构并不都是物理上的子结构, sub 0 包含未表现出聚集性的星系团成员,即晕星系; sub 1 是星系团的核心, sub 2 及以上对应较晚进入星系团的并成分,即子结构. 视场内 1 067 个星系的空间分布如图 3 所示: 372 个次级结构成员以彩色方块表示; 496 个 sub 0 成员以黑色点表示; 未被花树算法认定为团成员的 199 个星系则是星系团的外围星系 (outskirts galaxy), 以黑三角表示. 图 3 中 2 个黑圈分别是 r_{500} (1.38 Mpc) 和 r_{200} (2.09 Mpc) 的范围^[36].

表 1 各个次级结构红移和弥散速度
(sub 0 表示晕星系)

Group ID	N_{gal} /个	z	$v_{\text{disp}}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$
cluster	868	0.089 8±0.000 1	902±20
sub 0	496	0.089 8±0.000 1	961±26
sub 1	79	0.090 7±0.000 2	625±50
sub 2	47	0.088 8±0.000 3	591±57
sub 3	26	0.089 4±0.000 3	471±59
sub 4	23	0.092 0±0.000 2	304±40
sub 5	22	0.091 3±0.000 4	573±54
sub 6	16	0.095 9±0.000 2	281±41
sub 7	17	0.084 2±0.000 2	187±24
sub 8	17	0.089 6±0.000 3	366±41
sub 9	15	0.088 8±0.000 5	560±82
sub 10	14	0.093 8±0.000 4	444±40
sub 11	13	0.087 2±0.000 4	404±92
sub 12	13	0.090 1±0.000 4	431±59
sub 13	12	0.089 4±0.000 3	270±44
sub 14	12	0.089 2±0.000 3	296±70
sub 15	12	0.087 3±0.000 4	447±72
sub 16	11	0.089 3±0.000 3	333±44
sub 17	11	0.090 9±0.000 2	240±37
sub 18	11	0.089 0±0.000 4	373±75

因为 sub 0 和 sub 1 在星系团内停留的时间较长,其形成和演化的可能与其他后落入的次级结构不同,因此把 sub 0 和 sub 1 的成员统称非子结构星系 (non sub galaxy), 把 sub 2~18 的成员称为子结构星系 (sub galaxy).

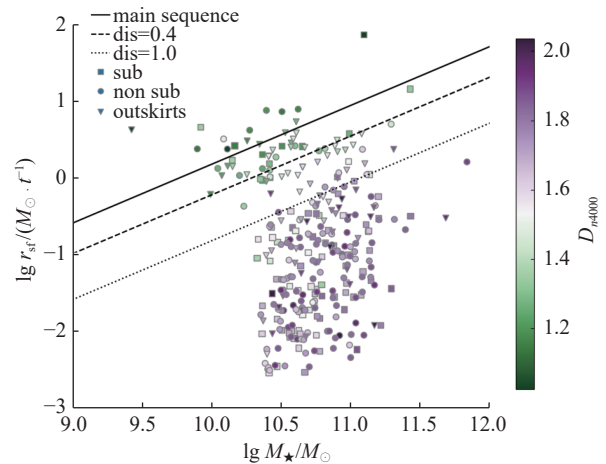
在 309 个数据完备的星系中,有 142 个属于非子结构星系 (sub 0 和 sub 1), 90 个属于子结构星系 (即 sub 2~18), 77 个为外围星系. 本研究主要围绕这 3 个样本来分析讨论.



注: 小黑点代表除次级结构星系之外的星系; 有颜色的方块代表各个次级结构中的星系; 黑色三角表示外围星系; 2 个黑色圈分别表示 r_{500} 和 r_{200} 的范围.

图 3 星系团 A2142 中 868 个团成员和 18 个次级结构以及外围星系的空间分布

2.2 产星星系与息产星系 低红移星系团中的星系通常会在恒星质量 M_{\star} - r_{sf} 图上呈现出两极分布. A2142 星系的恒星质量 M_{\star} - r_{sf} 分布如图 4 所示. 它们主要表现为 2 种类型: 1) r_{sf} 偏低、 D_{n4000} 较大的息产星系 (quenched galaxy); 2) r_{sf} 较高、 D_{n4000} 偏小的产星星系 (SF galaxy). 在 A2142 大质量星系团中, 大部分成员星系都是大质量的息产星系.



注: 方块代表着子结构星系; 圆圈代表非子结构星系; 三角代表外围星系; 黑实线表示 $z=0$ 时主序星系拟合线; 黑色虚线是距离主序为 0.4 的线; 黑色点划线是距离主序为 1.0 的线; 数据点的颜色表示 D_{n4000} .

图 4 视场内星系在 M_{\star} - r_{sf} 上的分布

在 M_{\star} - r_{sf} 图中, 恒星形成星系的分布呈现规律的线性分布, 这个关系叫作主序列. Elbaz 等^[37] 利用 SDSS 数据, 进行了主序列 $z=0$ 的拟合:

$$r_{\text{sf}}^{z=0} [M_{\odot} \cdot t^{-1}] = 8.7 \times [M_{\star} / 10^{11} M_{\odot}]^{0.77}. \quad (1)$$

式中, t 的单位是 a.

图 4 结果显示, 视场中的星系存在比较明显的 2 个分布. 对于 D_{n4000} 偏大的星系 (紫色), 它们的平均恒星质量略大于 D_{n4000} 偏小的星系 (绿色), A2142 被年老星系所主导. Gouin 等^[38] 给出了星系类型的划分方法: 在 M_* - r_{sf} 图上, 距主序列距离 $d \leq 0.4$ 的星系为活跃星系; $0.4 < d < 1.0$ 为过渡星系; $d \geq 1.0$ 为不活跃星系. 考虑到恒星质量也会影响星系的演化, $d=1.0$ 在 M_* - r_{sf} 图中对应的 $\lg r_m = -10.82$, $d=0.4$ 对应的 $\lg r_m = -10.22$. 按照这个方法, 把视场中数据完备的星系分为 2 类: 1) $d < 1.0$ 时的产星星系, 有 68 个; 2) $d > 1.0$ 的息产星系, 有 241 个. 其中产星星系中, 有 15 个子结构星系, 21 个非子结构星系, 32 个外围星系; 息产星系中, 有 75 个子结构星系, 121 个非子结构星系, 45 个外围星系.

如表 2 所示, 在 232 个团成员中, 子结构星系占了 39%, 产星和息产星系中, 子结构星系占比分别为 42% 和 38%. 在 77 个外围星系中, 产星星系占比为 41%, 远大于 232 个团星系中产星星系占比 (16%), 这意味着外围星系中的恒星形成活动较团成员更加活跃.

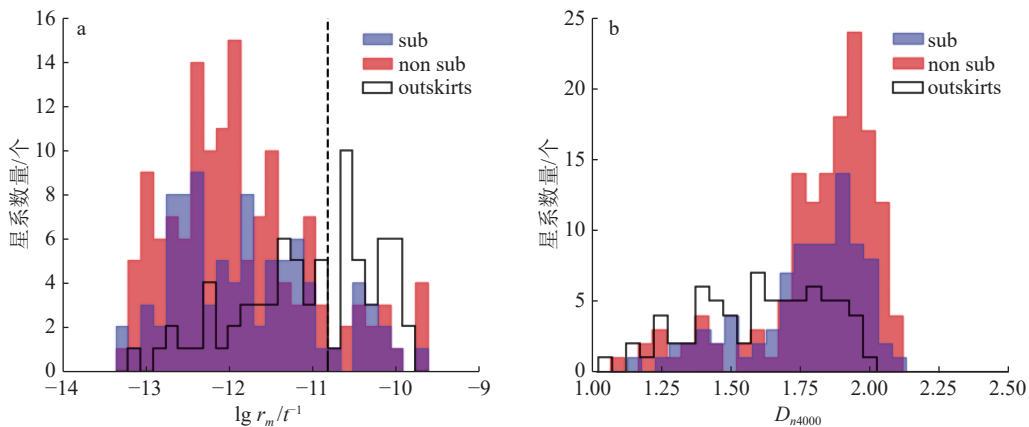
另外, 图 4 中有 2 个星爆星系 ($r_{sf} > 10M_{\odot} \cdot a^{-1}$), 均为子结构的中心星系. 其中 S1 ($\lg r_{sf} = 1.866$) 为 sub 10

表 2 各类型星系所包含的子结构星系成员数 个

星系	数量	产星星系	息产星系
子结构 sub	90	15	75
非子结构 non sub	142	21	121
外围 outskirts	77	32	45

的最亮星系, S2 ($\lg r_{sf} = 1.156$) 为 sub 4 中的最亮星系. 而 sub 10 是 Eckert 等^[39] 所证实的、正在发生冲压剥离的子结构 (高速向团中心下落).

2.3 星系性质的径向分布 为了研究星系类型比例, 绘制了各样本的比恒星形成率 (r_{sf}/M_*) 和 D_{n4000} 的直方分布图 (图 5). 对于星系团成员而言, 年老的息产星系占了绝大多数. 非子结构样本中, 年老的、恒星形成活动较低的星系数量比子结构中稍多, 这与非子结构星系在星系团环境中演化时间更久的判断相一致. 子结构星系进入星系团的时间较晚, 息产星系的的比例相应偏低. 外围星系中恒星形成星系偏多, 它们的气体含量高、 r_{sf} 较大. 因为外围星系的质量通常较小, 所以外围星系整体的 r_m 偏高, D_{n4000} 要低于团星系, 这说明外围星系未明显受到星系团高密度环境的影响.



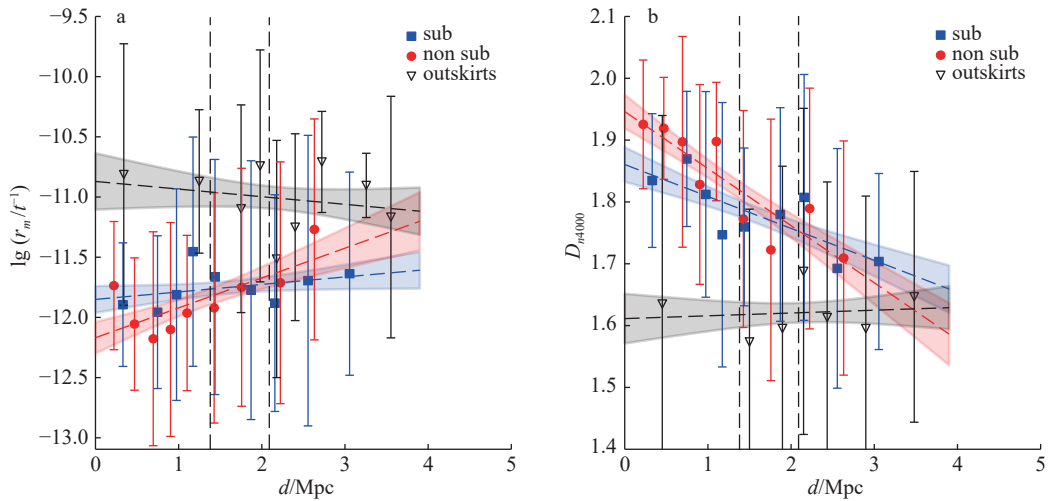
注: 中间黑色虚线是距主序列距离 $d=1.0$ 的线 ($\lg r_m = -10.82$); 红色直方图是非子结构星系; 蓝色直方图是子结构星系; 黑色阶梯直方图是外围星系.

图 5 3 个星系样本的比恒星形成率分布 (a) 及各样本星系的 D_{n4000} 分布 (b)

星系团内部星系的演化与星系所在环境的局部星系密度息息相关, 而局部星系密度随着团中心距离变化而变化^[18], 越靠近中心位置星系密度越大. 图 6 分别给出了 $\lg r_m$ 和 D_{n4000} 随投影距离的变化趋势. 为了减小数据点的随机误差, 把投影距离划分为多个区间, 将区间内所有星系取平均. 图中各个直线为数据点的线性拟合, 结果见表 3. 表 3 中, k 为各直线的斜率, b 为直线与纵轴的截距. 从图 6 可以看出, 外围星系样本中的星系属性分布较为均匀, 而非子结构和子结构星系则有明显的径向演化趋势. 非子结构星系

的演化趋势非常明显, 斜率更大, 说明它们受到星系团内物质分布的影响较大. 子结构星系更多受到局部物质密度的影响, 在 r_{200} 之外受到自身星系群高物质密度的影响, 提前结束了恒星形成活动, 表现出比非子结构星系更低的比恒星形成率. 而在 r_{200} 以内处于高密度区, 有机会重新获得来自团内的气体注入而重启恒星形成活动, 这种转化正是在 $r_{500} \sim r_{200}$ 完成的. 与团星系相比, 外围星系径向趋势演化十分微弱, 这说明外围星系受到星系团环境因素的影响很小.

为了验证结果的可靠性, 本研究对 3 个星系样本



注：直线是 3 个样本数据点的线性拟合结果；2 条竖线分别代表 r_{500} (1.38 Mpc) 和 r_{200} (2.09 Mpc) 的位置；阴影是 1σ 误差区间。

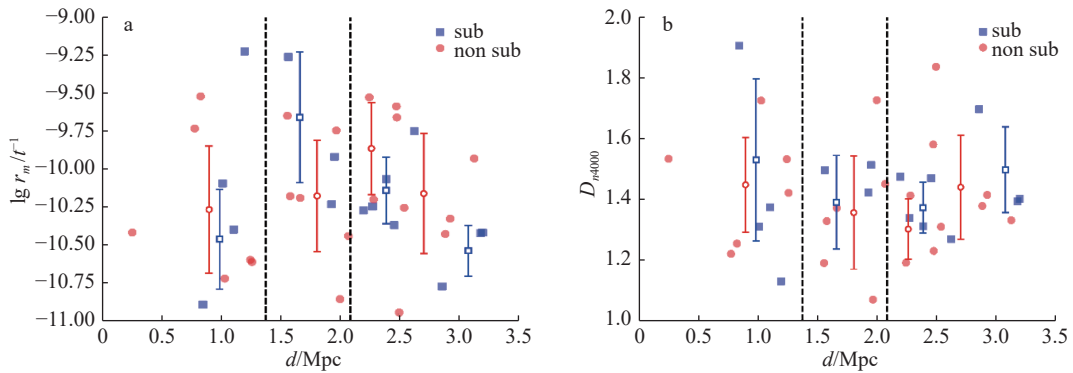
图 6 3 个星系样本的比恒星形成率随投影距离变化的趋势 (a) 及各样本的 D_{n4000} 随投影距离变化的趋势 (b)

表 3 3 个星系样本在图 6 中的拟合结果

指标	星系	$k \pm e_k$	$b \pm e_b$
$d - \lg r_m$	sub	0.06 ± 0.07	-11.85 ± 0.13
	non sub	0.25 ± 0.10	-12.17 ± 0.15
	outskirts	-0.04 ± 0.11	-10.89 ± 0.25
$d - D_{n4000}$	sub	-0.05 ± 0.02	1.86 ± 0.03
	non sub	-0.09 ± 0.02	1.95 ± 0.03
	outskirts	-0.01 ± 0.02	1.62 ± 0.05

各区间数据的分布进行了差异性检验。由于各星系样本性质不服从正态分布,因此选择非参数检验方法 (mann-whitney U test, MW 检验)^[40]。原假设“2 个星系样本的性质遵从一个分布”。通过计算,获得了子结构与非子结构星系与外围星系 r_m 的差异性 P , 分别是 2.6×10^{-4} 和 2.8×10^{-4} , 均 < 0.01 。因此,显著性水平为 99% 时,认为外围星系和团星系之间的 r_m 分布是有差异的。计算子结构星系与非子结构星系 r_m 的 P , 结果为 0.093, 这表明,2 个样本分布的差异性不强。在投影距离 $d < r_{500}$ 时,计算子结构星系与非子结构星系 r_m 的 $P=0.03$; 在投影距离 $d > r_{200}$ 时,计算子结构星系与非子结构星系 r_m 的 $P=0.42$ 。显著性水平为 95% 时,子结构和非子结构星系之间的 r_m 分布差异性集中于 $< r_{500}$ 的范围里。同样对 3 个星系样本 D_{n4000} 的差异性分布进行了 MW 检验,通过计算外围星系的 D_{n4000} 与子结构、非子结构星系 D_{n4000} 的分布, P 分别是 7.1×10^{-10} 和 8.2×10^{-10} , 显著性水平为 99%, 拒绝原假设。在投影距离 $d < r_{500}$ 时,计算子结构和非子结构星系的 D_{n4000} , $P=0.0061$; 在投影距离 $d > r_{200}$ 时,计算子结构与非子结构星系的 D_{n4000} , $P=0.04$ 。这与之前验证的 r_m 差异性结果一致。

团成员星系虽然存在明显的径向演化趋势,但由于星系样本中同时存在产星星系和息产星系,息产星系的 r_{sf} 与产星星系相差很大,导致了图 6 中数据点的误差很大。为了更精确地研究子结构对星系演化的影响,单独分析了产星星系的物理性质随投影距离的变化(图 7)。在图 7 中,比较了子结构和非子结构星系这 2 个星系样本中,产星星系的比恒星形成率随投影距离的分布情况,相同样本各个距离区间中所包含星系数基本相同。非子结构星系整体的 r_m 分布比较弥散,在不同投影距离处变化不大,但是子结构中的产星星系呈现出一些不一样的情况。在 r_{200} 之外,子结构星系的 r_m 小于非子结构。随着距团中心距离的减小,子结构样本的 r_m 逐渐上升,在 r_{500} 附近内超过非子结构星系;在星系团中心处,子结构星系的 r_m 出现陡降。由 D_{n4000} 随投影距离的分布图来看,这些星系的 D_{n4000} 并没有明显的涨落,说明这些 SF 星系的整体特征比较一致,其 r_m 的差别主要由不同的外部环境造成。对图 7 中产星星系的结果进行 MW 检验,设原假设为“2 个星系样本的性质服从 1 个分布”,把区间划分为 r_{500} 之内和 r_{200} 之外。在投影距离 $d < r_{500}$ 时,子结构星系的 r_m 与非子结构星系的 r_m 所计算得到的 P 为 0.41; 在投影距离 $d > r_{200}$ 时,子结构星系的 r_m 与非子结构星系的 r_m 所计算得到的 P 为 0.31; 用相同的方法对 D_{n4000} 的分布进行差异性检验,在投影距离 $d < r_{500}$ 时,子结构星系的 D_{n4000} 与非子结构星系的 D_{n4000} 所计算得到的 P 为 0.75; 在投影距离 $d > r_{200}$ 时,子结构星系的 D_{n4000} 与非子结构星系的 D_{n4000} 所计算得到的 P 为 0.66。检验结果显示,产星星系中子结构星系性质和非子结构星系性质之间的差异性并不显著,推测这是由于产星星系样本数量过少导致的。



注: 图中红色圆点是子结构星系; 蓝色方块是子结构星系; 空心点是在各个距离区间内对数据点取平均所得; 2条虚线分别代表 r_{500} (1.38 Mpc)和 r_{200} (2.09 Mpc)的位置。

图7 产星星系的比恒星形成率随投影距离分布 (a) 及图例一致、纵轴换为 D_{n4000} (b)

3 结论

本研究发现了 A2142 星系团中的星系存在明显的径向演化趋势, 星系在从星系团外围落入团中心的过程中, 其演化不仅受到星系团内介质的影响, 还受到子结构自身的调制。

1) 花树算法得到的 A2142 子结构成员星系是真实可信的, 其物理特征介于非子结构星系和外围星系之间。

2) A2142 团成员有明显的径向演化趋势, D_{n4000} 随着距团中心距离增大而迅速减小, 比恒星形成率则随着距离增大而增大。这说明高密度的团内介质直接影响星系的产星活动。

3) 子结构内部环境对星系团内的星系演化有调制作用。子结构在从团外围下落至中心的过程中, 其内部接近熄灭的星系重新开始了恒星活动。但非子结构星系的比恒星形成率分布则观察不到这个现象。

4 参考文献

- [1] BIVIANO A, GIRARDI M. The mass profile of galaxy clusters out to $\sim 2r_{200}$ [J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, 585(1): 205
- [2] NOESKE K G, WEINER B J, FABER S M, et al. Star formation in AEGIS field galaxies since $z=1.1$: the dominance of gradually declining star formation, and the main sequence of star-forming galaxies[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 660(1): L43
- [3] OKABE N, ZHANG Y Y, FINOGENOV A, et al. LoCuSS: calibrating mass-observable scaling relations for cluster cosmology with Subaru weak-lensing observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 721(1): 875
- [4] MARKEVITCH M, VIKHLININ A. Shocks and cold fronts in galaxy clusters[J]. *Physics Reports-review Section Of Physics Letters*, 2007, 443(1): 1
- [5] PAUL S, SALUNKHE S, SONKAMBLE S, et al. Radio relic and the diffuse emission trail discovered in low-mass galaxy cluster Abell 1697[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 633: A59
- [6] STRATEVA I, IVEZIĆ Ž, KNAPP G R, et al. Color separation of galaxy types in the sloan digital sky survey imaging data[J]. *The Astronomical Journal*, 2001, 122(4): 1861
- [7] BLANTON M R, HOGG D W, BAHCALL N A, et al. The broadband optical properties of galaxies with redshifts $0.02 < z < 0.22$ [J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, 594(1): 186
- [8] DRESSLER A. Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies[J]. *The Astrophysical Journal*, 1980, 236: 351
- [9] BEKKI K. Group-cluster merging and the formation of starburst galaxies[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 1999, 510(1): L15
- [10] TAYLOR J E, BABUL A. The evolution of substructure in galaxy, group and cluster haloes: I. basic dynamics[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, 348(3): 811
- [11] LARSON R B, TINSLEY B M. Star formation rates in normal and peculiar galaxies[J]. *The Astrophysical Journal*, 1978, 219: 46
- [12] GUNN J E, GOTT J R I. On the infall of matter into clusters of galaxies and some effects on their evolution[J]. *The Astrophysical Journal*, 1972, 176: 1
- [13] JABLONKA P, COMBES F, RINES K, et al. Cold gas in the inner regions of intermediate redshift clusters[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2013, 557: A103
- [14] TAYLOR R, KÖPPER J, JACHYM P, et al. Faint and fading tails: the fate of stripped HI gas in Virgo cluster galaxies[J]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159(5): 218

- [15] SAFARZADEH M, LOEB A. Explaining the enhanced star formation rate of Jellyfish galaxies in galaxy clusters[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 486(1): L26
- [16] PENG Y, MAIOLINO R, COCHRANE R. Strangulation as the primary mechanism for shutting down star formation in galaxies[J]. *Nature*, 2015, 521(7551): 192
- [17] DESHEV B, HAINES C, HWANG H S, et al. Mapping the working of environmental effects in A963[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 638: A126
- [18] MEUSINGER H, RUDOLF C, STECKLUM B, et al. The galaxy population within the virial radius of the Perseus cluster[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 640: A30
- [19] SOHN J, GELLER M J, ZAHID H J, et al. A complete spectroscopic census of A2029: a tale of three histories[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 872(2): 192
- [20] GELLER M J, BEERS T C. Substructure within clusters of galaxies[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1982, 94: 421
- [21] WEN Z L, HAN J L. Substructure and dynamical state of 2092 rich clusters of galaxies derived from photometric data[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 436(1): 275
- [22] ZARATTINI S, GIRARDI M, AGUERRI J, et al. Fossil group origins VII. galaxy substructures in fossil systems[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 586: A63
- [23] BEKKI K. Group-cluster merging and the formation of starburst galaxies[J]. *The Astrophysical Journal*, 1999, 510(1): L15
- [24] BOCO L, LAPI A, CHRUSLINSKA M, et al. Evolution of galaxy star formation and metallicity: impact on double compact object mergers[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 907(2): 110
- [25] EINASTO M, LIETZEN H, TEMPEL E, et al. SDSS superclusters: morphology and galaxy content[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2014, 562: A87
- [26] EINASTO M, DESHEV B, TENJES P, et al. Multiscale cosmic web detachments, connectivity, and preprocessing in the supercluster SCI A2142 cocoon[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 641: A172
- [27] OWERS M, PAUL E, WARRICK J. Minor merger-induced cold fronts in A2142 and RXJ1720.1+2638[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 741(2): 122
- [28] ECKERT D, MOLENDI S, OWERS M, et al. The stripping of a galaxy group diving into the massive cluster A2142[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2014, 570: A119
- [29] EINASTO M, GRAMANN M, PARK C, et al. Supercluster A2142 and collapse in action: infalling and merging groups and galaxy transformations[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 620: A149
- [30] LIU A, YU H, DIAFERIO A, et al. Inside a beehive: the multiple merging processes in the galaxy cluster A2142[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 863(1): 102
- [31] KOMATSU E, SMITH K M, DUNKLEY J, et al. Seven-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: cosmological interpretation[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 192(2): 18
- [32] SALIM S, LEE J C, JANOWIECKI S, et al. GALEX-SDSS-WISE legacy catalog(GSWLC) : star formation rates, stellar masses, and dust attenuations of 700 000 lowredshift galaxies[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2016, 227(1): 2
- [33] CHABRIER G, STELLAR G. Substellar initial mass function[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2003, 115(809): 763
- [34] AGUADO D S, AHUMADA R, ALMEIDA, et al. The fifteenth data release of the sloan digital sky surveys: first release of MaNGA-derived quantities, data visualization tools, and stellar library[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, 240(2): 23
- [35] YU H, DIAFERIO A, SERRA A L, et al. Blooming trees: substructures and surrounding groups of galaxy clusters[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 860(2): 118
- [36] JØRGENSEN I, CHIBOUCAS K, WEBB K, et al. The Gemini/Hubble space telescope galaxy cluster project: stellar populations in the low-redshift reference cluster galaxies[J]. *The Astronomical Journal*, 2018, 156(5): 224
- [37] ELBAZ D, DADDI E, BORGNE D L, et al. The reversal of the star formation-density relation in the distant universe[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 468(1): 33
- [38] GOUIN C, AGHANIM N, BONJEAN V, et al. Probing the azimuthal environment of galaxies around clusters. From cluster core to cosmic filaments[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 635: A195
- [39] ECKERT D, GASPARI M, OWERS M S, et al. Deep Chandra observations of the stripped galaxy group falling into A2142[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 605: A25
- [40] MANN H B, WHITNEY D R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other[J]. *Math & Statist*, 1947, 18: 50

Galaxy evolution in substructures of A2142

LIU Dengqi YU Heng[†]

(Department of Astronomy, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract A2142 is a massive galaxy cluster at low redshift, which contains a large number of galaxies at different stages of galaxy evolution. The spectral and photometric data of A2142 were systematically sorted out in this article. Substructure was obtained with Blooming tree algorithm, the galaxies in the field of A2142 were divided into three types: non substructure galaxies, substructure galaxies and outskirts galaxies. Their distribution, star formation activity, D_{n4000} and other physical properties were studied, the galaxies in the A2142 were found to have an obvious radial evolution trend. If the galaxies fall from the cluster outskirts to the cluster center, their evolution is not only affected by ICM in the galaxy cluster, but also modulated by the substructure.

Keywords galaxy clusters; galaxies; star formation rate; galaxy evolution

【责任编辑: 陆有忠】