

星系团 Abell 2199 的恒星形成性质^{*,*}

袁启荣^{1†} 何莹莹¹ 李 峰² 张 立¹ 赵丽芳³

(1 南京师范大学物理科学与技术学院 南京 210097)

(2 江苏工业学院信息科学系 常州 213164)

(3 南京信息职业技术学院微电子系 南京 210046)

摘要 通过对近邻星系团 Abell 2199 中 290 颗成员星系进行形态分类,研究这些星系的恒星形成率及其与形态和相关物理特性之间的关系.该星系团中星系的特征恒星形成率与 $H\alpha$ 等值宽度、星系光谱在 $4000\text{\AA}$ 处的跃变程度以及星系所包含的恒星质量之间有较强的相关性.这些星系的恒星形成活动没有表现出明显的环境效应,表明该星系团仍处在剧烈的动力学演化阶段,远没有达到动力学平衡.

关键词 星系; 星系团; 个别, 星系: 基本参数, 星系: 运动学与动力学

中图分类号 P157.8; **文献标识码**: A

1 引言

研究星系的恒星形成性质已成为近十年来河外天体物理学最热门的研究领域之一.探索星系团中成员星系的恒星形成性质及其与星系形态、环境以及其他一些星系物理特性之间的关系,有助于我们了解星系的形成和演化,从而了解整个宇宙的形成和演化的历史^[1-3].恒星形成率(Star Formation Rate: SFR)是表征星系中恒星形成活动的重要物理参量,可以通过测量星系在光学波段的发射线($H\alpha$ 和 $[\text{OII}]$)或者紫外、远红外、射电等波段的光度来获得^[3-4].影响星系的恒星形成率的因素很多,包括星系的形态、光度、质量、环境以及星系间的相互作用和合并等等^[3].

以往的研究表明,晚型星系的恒星形成要比早型星系活跃,场星系比团星系的恒星形成率高,小质量星系比大质量星系的恒星形成率高^[3].根据宇宙大尺度结构的等级成团理论,星系团是随着时间不断吸积周围场星系而形成的,当场星系进入一个致密环境(如星系团)中,它们的恒星形成活动就会受到多种物理机制的制约而慢慢衰竭,如星系之间的引力相互作用^[4]、星系的气体/尘埃盘被剥离等^[5].有迹象表明,在一些高红移富星系团中,星系的恒星形成活动也受到抑制^[6].要清楚地了解抑制星系中恒星形成活动的各种机制,需要对不同环境中不同形态的星系样本进行多方面的研究.

近年来,Sloan Digital Sky Survey (SDSS) 的数据释放为研究星系的恒星形成活动

* 2006-11-3 收到原稿,2008-01-03 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目(10778618,10633020)

† yuanqirong@njnu.edu.cn

提供了一个很大的星系样本^[7]. 为了更准确地了解不同形态的星系在星系团形成过程中的恒星形成性质, 本文将研究处于星系团 Abell 2199 中的成员星系. SDSS 巡天完全覆盖了该星系团, 对所有落在星等范围 $14.5 < r < 17.77$ 内的星系进行了光谱观测. 本文将研究其中团星系的恒星形成率及其与形态、星系离团中心的投影距离以及相关物理特性之间的关系. 我们采用的宇宙学参数是 $\Omega_m = 0.3$ 、 $\Omega_\Lambda = 0.7$ 和 $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

2 数据获得和形态分类

星系团 Abell 2199 是邻近富星系团, 红移为 0.030, 其中心含有一颗 cD 星系. 该星系团所在的天区被 SDSS 覆盖. Kauffman 等利用 SDSS DR2 的数据, 对星系的恒星形成性质进行了大样本的研究^[1-2,8-12], 最近又对该星系样本进行了扩充和更新. 这些研究根据新的星族演化合成模型, 对几十万颗星系的恒星质量、恒星形成率、发射线流量和金属丰度等参量进行了估计, 得到每个参量的最或然值和误差范围. 本文的工作就是基于 SDSS 的成像和光谱数据, 使用他们估计的与星系的恒星形成性质有关的物理参数, 对 Abell 2199 中的成员星系的恒星形成性质进行详细地研究.

我们选取了距离星系团中心位置 ($16^{\text{h}}28^{\text{m}}37.0^{\text{s}}, +39^{\circ}31'28''$, J2000.0) 一个 Abell 特征半径 (对应于 $\sim 1.5 h^{-1} \text{ Mpc}$) 以内、红移在 $0.02 < z < 0.04$ 范围内的星系作为星系团的成员星系, 从 Kauffman 等^[8-10] 所研究的大样本中提取出这些星系的恒星形成性质的物理参量. 最后, 我们获得了 290 颗成员星系的恒星形成性质参量. 由于该样本来源于 SDSS 的光谱巡天观测, 该光谱巡天的选择效应必然会影响到成员星系样本的完备性. 首先, 该 SDSS 光谱巡天的星等范围是 $14.5 < r < 17.7$, 对星系团 Abell 2199 的成员星系而言, 对应的绝对星等处在 $-21^{\text{m}}.2 < M_r < -17^{\text{m}}.6$ 的范围内, 样本中包括了大量低光度成员星系. 其次, 由于 SDSS 光谱拍摄是通过光纤技术来完成的, 在每个半径为 1.49° 的视场中分布 640 根光纤 (其中大约 500 根光纤是用来定位星系), 相邻光纤的最小分离度为 $55''$, 因此在星系比较密集的区域光纤不能分配给每一颗星系. 尽管 A2199 是一个富星系团, 但它距离我们很近, 成员星系在天球上的分布还是比较松散的. 根据 Blanton 等^[13] 对每个局域天区的星系光谱巡天完备性的估算结果, 在星系团 Abell 2199 天区的完备程度约为 90%, 这种完备程度相对以往的星系团动力学研究样本还是较高的. 另外, 该成员星系样本数目较大, 且质量和光度的覆盖范围大, 非常适合开展星系团的恒星形成性质方面的统计性研究.

由于星系的恒星形成与星系的形态有关系, 我们将这些星系分为早型星系和晚型星系. 我们从 SDSS 中搜集了这些星系的图像和光谱, 以及与形态相关的一些测光参数, 如星系亮度分布的轮廓拟合概率值: de Vaucouleurs 模型 (L_{dev}) 和指数模型 (L_{exp})、星系连续光谱在 $4000 \text{ \AA}$ 处的跃变强度 (D_n) 以及星系形态聚度参数 ($C = R_{p,90}/R_{p,50}$). 进行形态分类最直接有效的方法是利用 SDSS 图像, 根据星系的形态特征 (如旋臂、棒、环结构以及尘埃带等) 来进行星系分类. 对于形态特征不太明显的星系, 可以利用星系的亮度分布轮廓来确定其形态. 一般说来, 椭圆星系的亮度轮廓可用 de Vaucouleurs 形式很好地拟合^[14], 而旋涡星系则基本满足指数形式. 对于两个概率值差别较大 (即满足 $|\ln L_{\text{dev}} - \ln$

$L_{\text{exp}}| > 150)$ 且其中一个概率值的自然对数大于 -75.0 的星系,形态分类是很可靠的.另外,规则的椭圆星系具有较高的聚度参数(即 $C=R_{p,90}/R_{p,50} > 2.6$)和较显著的连续光谱跃变(即 $D_n > 1.6$),所以 C 和 D_n 是可以作为星系分类的重要参考.星系对应的 SDSS 光谱特征(如连续谱的形状、 $H\alpha$ 发射线的强度等)^[15]可以帮助我们进行分类.最后,我们完成了星系团 Abell 2199 中 290 颗成员星系的形态的分类,其中含有 151 颗早型星系和 139 颗晚型星系.

3 结果分析

为了客观地表征不同质量的星系的恒星形成活动剧烈程度,通常对星系的恒星形成率进行恒星质量的归一化,该物理量(SFR/M_*)称为星系的特征恒星形成率(specific SFR).由于 $H\alpha$ 发射线的等值宽度(EW)可以用来测量特征恒星形成率^[3],所以 $\text{EW}(H\alpha)$ 与特征恒星形成率之间应该有明显的相关性.图 1 给出了 Abell 2199 中具有发射线的成员星系的特征 SFR 与 $H\alpha$ 等值宽度之间的关系(图中圆圈表示晚型星系,点表示早型星系),从图中可见早型星系中具有 $H\alpha$ 发射线的很少,这也正说明了晚型星系中恒星形成比早型星系活跃.图 1 中的虚线是对晚型星系的线性拟合,可以看出 $\text{EW}(H\alpha)$ 与 SFR/M_* 之间有很好的相关性,拟合的结果是 $\log(\text{SFR}/M_*) = 0.40(\pm 0.05)\log[\text{EW}(H\alpha)] - 10.45(\pm 0.07)$,其相关系数为 0.57, $\log(\text{SFR}/M_*)$ 的弥散度为 0.25.前面已介绍了可以通过测量发射线 $H\alpha$ 的光度来获得恒星形成率,在有恒星形成的星系光谱中有大量的氢云复合线,这些线与星系中形成的年轻星族直接相关,用星系的 $H\alpha$ 发射线光度确定的 SFR 是星系此时的恒星形成率,而和恒星形成的历史无关^[3].

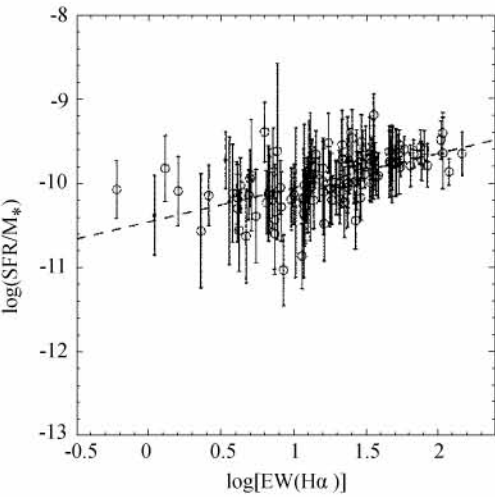


图 1 星系的特征恒星形成率与 $H\alpha$ 发射线强度的关系图.点表示早型星系,圆圈表示晚型星系,虚线是对晚型星系的线性拟合

Fig. 1 Relation between the specific SFR and the EW of the $H\alpha$ emission line

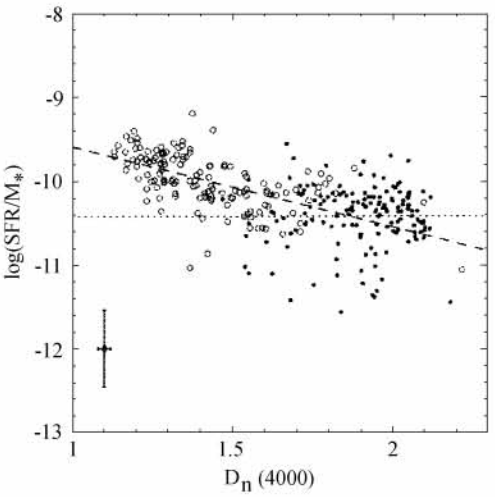


图 2 星系的特征恒星形成率和星系在 $4000 \text{ \AA}$ 处的跃变度 D_n 的关系图.标注同图 1,虚线表示对晚型星系的线性拟合

Fig. 2 Relation between the specific SFR and the Continuum break strength at 4000

D_n 是星系光谱在 $4000\text{\AA}$ 处跃变的强度,由一些金属线的累积吸收所致. 在热的年轻恒星中,这些金属元素被多次电离后会导致光深减少,所以这些年轻星族在 $4000\text{\AA}$ 处的连续谱跃变就会小些. 相反地,一些金属丰度高的年老星族会导致明显的 $4000\text{\AA}$ 跃变. 同时, D_n 通常随星系的演化而单调递增,因此 D_n 能较好地表征星族的特征年龄,一定意义上也反映了一个星系的形态信息. Kauffmann 等^[9] 发现 D_n 与星系中的恒星质量有很强的联系,低质量星系有大量的年轻星族,它们的 D_n 值小,而大质量星系中年老星族占主导,它们的 D_n 值则大些. 图 2 是星系团 A2199 成员星系的 D_n 和 SFR/M_* 的关系图,从图中可见早型星系(圆点)的相关性很弱,其 D_n 值一般大于 1.6. 与此形成鲜明对比的是,晚型星系(圆圈)的 D_n 值普遍较小,且与 SFR/M_* 有很好的相关性(虚线拟合): $\log(\text{SFR}/M_*) = -0.95(\pm 0.12) D_n - 8.64(\pm 0.17)$, 相关系数为 -0.57 , $\log(\text{SFR}/M_*)$ 的弥散度为 0.26 . Brinchmann 等^[2] 发现,对于具有 $\text{H}\alpha$ 、 $\text{H}\beta$ 、 $[\text{OIII}]$ 、 $[\text{NII}]$ 等发射线的恒星形成星系(star-forming galaxies),其特征恒星形成率与 D_n 之间有很强的相关性. 由于具有强发射线的恒星形成星系在富星系团中很少,所以这种相关性可以用来估计非恒星形成星系的特征恒星形成率.

图 3 是 Abell 2199 中成员星系的特征恒星形成率与恒星质量之间的关系图. 从图中可见,晚型星系(圆圈)的特征恒星形成率比早型星系(圆点)的高些. 早型星系的特征恒星形成率的弥散度比较大,相关性也很弱,点线是对其线性拟合,结果是 $\log(\text{SFR}/M_*) = 0.05(\pm 0.07)\log M_* - 10.94(\pm 0.68)$, 相关系数为 0.06 , 弥散度为 0.37 . 而晚型星系的特征恒星形成率随着质量增加有下降的趋势(虚线),线性拟合的结果为 $\log(\text{SFR}/M_*) = -0.29(\pm 0.05)\log M_* - 8.01(\pm 0.45)$, 相关系数为 -0.35 , $\log(\text{SFR}/M_*)$ 的弥散度为 0.30 .

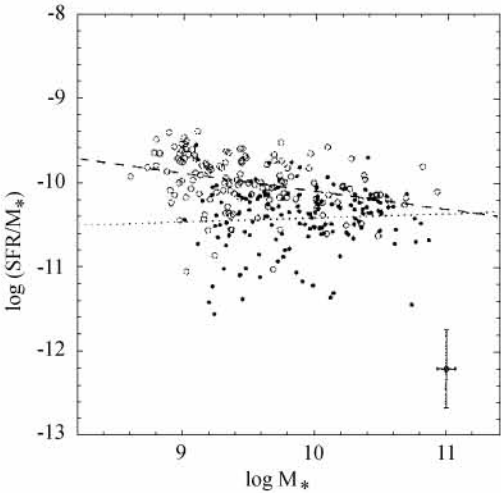


图 3 星系特征恒星形成率与恒星质量的关系线表示早型星系,细线表示晚型星系
Fig. 3 Relation between specific SFR and stellar mass

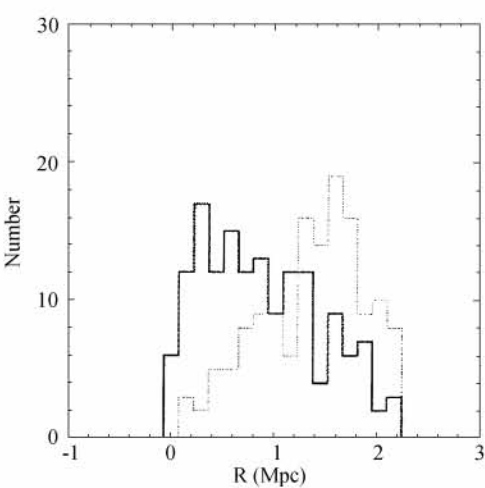


图 4 星系距离星系团中心投影距离的分布,粗图. 标注同图 2
Fig. 4 Distribution of projection distance to the cluster center

星系的恒星形成对于不同形态的星系表现出不同的性质,大质量的椭圆星系由于是

在星系碰撞合并等作用下形成,消耗了大部分的气体而慢慢停止了恒星的形成.团中大质量晚型星系相对于早型星系而言较少,或许这些晚型星系在掉入星系团后与其他的星系发生过相互碰撞和强引力相互作用等过程,使得它们停止了恒星形成活动,从而演变为大质量的早型星系.图4给出了A2199中早型星系(粗线)和晚型星系(细线)距离团中心的投影距离的分布,可以看出早型星系的投影密度随着半径 R 的增加而减少,而晚型星系则刚好相反,随着 R 的增加而增加,与Oemler^[16]得到的结论一致.

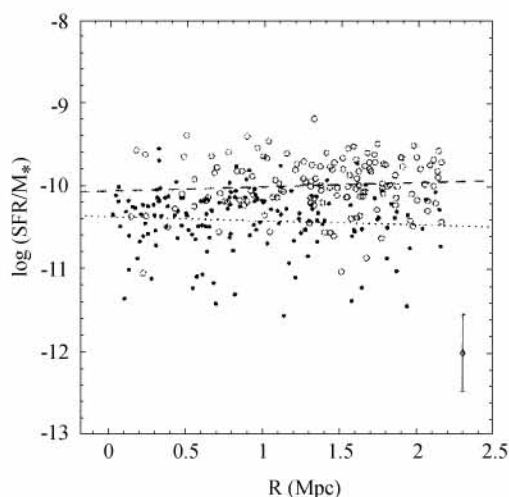


图5 星系的特征恒星形成率随着距离星系团中心的投影距离的分布,标注同图3

Fig. 5 Specific SFR as a function of the projection distance to the cluster center

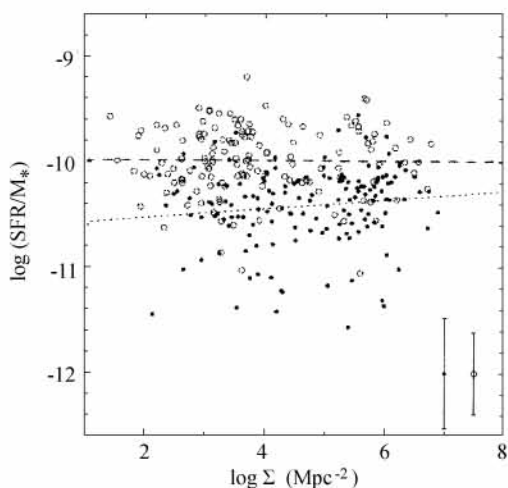


图6 星系的特征恒星形成率与 Σ 的关系,标注同图3

Fig. 6 Relation between the specific SFR and local surface density Σ

图5给出了不同形态星系的特征恒星形成率随星系在星系团中的投影距离的分布.可以看出,无论是早型星系还是晚型星系,它们的特征恒星形成率随着投影距离的不同没有明显的变化趋势.为了更好地表征成员星系的引力环境,我们引入局域星系面密度(Σ)的概念:对每一颗星系团中的成员星系而言,投影距离最近的第10颗星系定义了一个圆面积,用10除以这个圆面积就得到面密度 Σ ^[17].局域星系面密度 Σ 不受星系团本身大小、形状等性质的制约.图7给出了特征恒星形成率与 Σ 的关系图.同样,早型和晚型星系的特征恒星形成率没有表现出明显的随局域面密度变化的趋势.

4 讨论和结论

众所周知,cD星系一般都是出现在很致密的引力环境中,靠近寄主星系团或子星系团的中心,是整个星系团的引力中心,那些仅含有一颗cD星系的星系团往往具有较高的维里化程度^[18].但是,我们近期的研究表明,星系团A2199尽管中心只含有一颗cD星系,但仍然具有明显的动力学子结构,说明该星系团正处于并合阶段,远没有达到动力学平衡状态^[19].根据我们对正处在并合阶段的星系团Abell 2255的研究^[20],当子星系团正

在进行着大规模合并时, 星系团的引力势阱处于变化之中, 这时产生的潮汐冲击波会增加星系与星系之间碰撞的概率, 从而激发星系的恒星形成活动. 而在星系团维里化的晚期阶段, 大规模的碰撞已经结束, 中心密集处的大质量椭圆星系都已基本停止恒星形成活动, 一些小质量的晚型星系也慢慢随着气体尘埃等物质的剥离而逐渐停止其恒星形成活动, 表现为团中心附近的晚型成员星系较少, 且晚型星系的特征恒星形成率随投影距离减小而变低. 上面的研究表明, 星系团 A2199 中晚型星系的恒星形成活动没有表现出明显的密度演化效应, 说明该星系团远没有达到维里化的最后阶段, 从而佐证了文[17]中发现的动力学子结构.

通过对星系团 Abell 2199 中的 290 颗成员星系(151 颗早型星系和 139 颗晚型星系)的恒星形成性质的细致分析, 我们检验了团成员星系的特征恒星形成率与星系光谱在 $4000\text{\AA}$ 处的跃变程度(D_n)、星系所包含的恒星质量(M_*)、 $H\alpha$ 发射线等值宽度的相关性, 同时分析了恒星形成活动的环境效应. 我们发现, 星系团成员星系的恒星形成性质和星系团的动力学演化阶段密切相关, Abell 2199 尚处在剧烈的动力学演化阶段, 远没有达到动力学平衡.

参 考 文 献

- 1 Kauffmann G, Brinchmann J, Charlot S, et al. MNRAS, 2004, 353: 713–731
- 2 Brinchmann J, Charlot S, Kauffmann G, et al. MNRAS, 2004, 351: 1151–1179
- 3 Kennicutt R C. ARA&A, 1998, 36: 189–232
- 4 Moore B, Katz N, Lake G, Dressler A, Oemler A Jr. Nat, 1996, 379: 613–616
- 5 Koopmann R A, Kenney J D. 2004, ApJ, 613: 866–885
- 6 Balogh M L, Couch W J, Smail I, Bower R G, Glazebrook K. MNRAS, 2002, 335: 10–22
- 7 Hopkins A M, Miller C J, Nichol R C, et al. ApJ, 2003, 599: 971–991
- 8 Kauffmann G, Brinchmann J, Charlot S, et al. MNRAS, 2003, 341: 33–53
- 9 Kauffmann G, Brinchmann J, Charlot S, et al. MNRAS, 2003, 341: 54–69L10 Kauffmann G, Heckman T M, Tremonti C, et al. MNRAS, 2003, 346: 1055–1077
- 11 Tremonti C A, Heckman T M, Kauffmann G, et al. ApJ, 2004, 613: 898–913
- 12 Brinchmann J, Charlot S, Heckman T M, et al. 2004, astro-ph/0406220
- 13 Blanton M R, Schlegel D J, Strauss M A, et al. ApJ, 2005, 129: 2562–2578
- 14 de Vaucouleurs G. Annales d'Astrophysique, 1948, 11: 247–289
- 15 ennicutt R C. ApJS, 1992, 79: 255–284
- 16 Oemler A. ApJ, 1974, 194: 1–19
- 17 Dressler A. ApJ, 1980, 236: 351–365
- 18 ordán, A, C? té P, West M J, Marzke R O, Minniti D, Rejkuba M. AJ, 2004, 127: 24–47
- 19 李峰, 袁启荣. 南京师大学报(自然科学版), 2006, 29: 39–43
- 20 Yuan Q, Zhao L F, Yang Y B, Wen Z L, Zhou X. AJ, 2005, 130: 2559–2565

The Star Formation Properties of Galaxy Cluster Abell 2199

YUAN Qi-Rong¹, HE Ying-Ying¹, LI Feng², ZHANG Li¹, ZHAO Li-Fang³

(1 *School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097*)

(2 *Department of Information Science, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164*)

(3 *Microelectronics Department, Nanjing College of Information Technology, Nanjing 210046*)

ABSTRACT Based on the morphological classification for 290 member galaxies in the nearby galaxy cluster Abell 2199, relations of the star formation rates (SFRs) with morphology and relevant physical properties of cluster galaxies are studied. A tight correlation between the SFR normalized by stellar mass (SFR/M_*) and the $\text{H}\alpha$ equivalent width is found. The correlations of SFR/M_* with the continuum break strength at $4000\text{\AA}$ and stellar mass (M_*) are also confirmed. Recent finding of a significant substructure near the central cD galaxy indicates Abell 2199 possesses a group merger. These cluster galaxies show no significant environmental effect in their star formation activities, which suggests that Abell 2199 is still at an active stage of dynamical evolution, far from a state of dynamical equilibrium.

Key words Galaxies; Cluster; Individual, Galaxies; Fundamental Parameters, Galaxies; Kinematics and dynamics