

星系团 Abell 2255 的恒星形成性质

赵丽芳 袁启荣

(南京师范大学物理科学与技术学院 210097 江苏 南京)

[摘要] 研究了星系团 Abell 2255 中 184 颗成员星系的恒星形成性质. 通过对这些星系的形态分类, 发现星系光谱在 $4 \times 10^{-7} \text{ m}$ 处的跃变程度对区分星系类型非常有效. 该星系团中星系的恒星形成活动和星系所处的环境有关, 并且不同形态的星系随投影距离的变化趋势遵循不同的规律. 此外还确认了团星系的金属丰度与恒星质量之间的相关性, 并推断星系团 Abell 2255 是在单个星系形成后, 经过引力相互作用而形成的, 这一结果支持了等级成团理论.

[关键词] 星系团, 星系, 恒星形成率, 恒星质量, 金属丰度

[中图分类号] P157.8, [文献标识码] A, [文章编号] 1001-4616(2005)04-0046-04

Star Formation Properties of Galaxy Cluster Abell 2255

Zhao Lifang, Yuan Qirong

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

Abstract The star formation properties of 184 galaxies in the galaxy cluster Abell 2255 are studied. Based on a morphological classification of these galaxies, the strength of spectral continuum break at $4 \times 10^{-7} \text{ m}$ is found to be an effective quantity for galaxy classification. The star formation activity of the galaxies in this galaxy cluster is related with their environment, and the galaxies with different morphologies follow different trends along the projected radial distance. The correlation between metallicity and stellar mass of cluster galaxies is also confirmed. It is concluded that galaxy cluster Abell 2255 is formed by the gravitational interaction after the individual galaxies are formed, which supports the hierarchical model of cluster formation.

Key words galaxy cluster, galaxy, star formation rate, stellar mass, metallicity

0 引言

研究星系的恒星形成率(SFR)及其随环境变化的规律,有助于我们了解星系的形成和演化^[1,2]. 恒星形成率主要通过测量光学波段的发射线($\text{H}\alpha$ 和 OII)或者紫外、远红外、射电等波段的光度来获得,文献[2,3]对各种估计 SFR 的方法作了较全面的述评. 以往的研究表明,团星系比场星系的恒星形成率低,晚期星系要比椭圆星系活跃. 近年来, Sloan Digital Sky Survey (SDSS) 的数据释放给我们研究星系的恒星形成活动提供了一个很大的星系样本. 随着星族合成模型越来越成熟^[4-6], 我们有望在邻近星系的恒星形成性质的研究中得到更为准确的结果^[7].

尽管邻近星系的恒星形成性质已经被广泛研究,但大部分研究的星系样本是混杂的(包含了属于各类星系团的成员星系和场星系). 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 2255 中的成员星系,重点研究这些团星系的恒星形成率及其与相关物理特性之间的关系,从而找出正确的物理机制来解释我们所看到的现象. 我们在本文中使用的宇宙学参数是 $\Omega = 0.3$, $\Lambda = 0.7$ 和 $H_0 = 70 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

收稿日期:2005-05-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10273007).

作者简介:赵丽芳,女,1981—,硕士研究生,主要从事天体物理的学习与研究. E-mail: lizhao404@yahoo.com.cn

通讯联系人:袁启荣,1968—,教授,主要从事天体物理的教学与研究. E-mail: yuanqirong@njnu.edu.cn

1 数据获得和形态分类

星系团 Abell 2255 是富度为 2 的中等红移 ($z = 0.0806$) 星系团, 已经被 Beijing-Arizona-Taiwan-Connecticut (BATC) 多色测光巡天观测过, Yuan 等^[8]确定了这个团的成员星系. 这个天区也正好被 SDSS 覆盖, Kauffmann 等利用 SDSS 第二次释放的数据, 对星系的恒星形成性质进行了大样本研究^[7,9–12]. 这些研究根据新的星族演化合成模型^[4], 对 2×10^5 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. 由于在参量估计时运用了 Bayesian 方法来计算每种模型的概率, 他们不仅能得到每个参量的最或然值, 同时还能得到比较准确的误差范围.

进行星系形态分类最直接、最有效的方法是用肉眼检查 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)来进行分类. 对于形态特征不太明显的星系, 我们可以利用星系的亮度分布轮廓来确定其形态. 一般来说, 椭圆星系的亮度轮廓可用 de Vaucouleurs 形式很好的拟合^[13], 而旋涡星系则基本满足指数形式. 由于 SDSS 的测光数据中分别给出了采用这两种形式拟合星系亮度轮廓的概率值(即 l_{dev} 和 l_{exp}), 在本研究中我们将这两个概率值作为确定星系形态类型的重要参考. 对于两概率值差别较大(即满足 $|\ln l_{\text{dev}} - \ln l_{\text{exp}}| \geq 150$) 并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. 在上述方法无法准确辨别形态时, 其对应的 SDSS 光谱特征(如连续谱形状、发射线强度等)可以帮助我们进行分类. 最后, 我们完成了星系团 A2255 中的 184 颗成员星系(红移范围是 $0.0700 < z < 0.0967$) 的形态分类, 其中含有 132 颗早型星系和 52 颗晚型星系. 这些星系在 r 波段的绝对星等处处在 $-23^m.3 < M_r < -20^m.0$ 的范围内^[14].

2 恒星形成性质的分析

我们先对上述成员星系的发射线性质作一个分析. 在我们的成员星系样本中, 其 SDSS 光谱中的发射线 $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 $[\text{OIII}]$ 和 $[\text{NII}]$ 的信噪比均大于 3 的星系只有 48 颗, 包括 11 颗早型星系和 37 颗晚型星系. 图 1 是经典的线强比率图^[11,15], 图中实线和虚线将星系的发射线类型分成了三种: 实线以下的星系被称为 star-forming 星系, 表明其发射线主要来自恒星形成的区域; 虚线以上的星系被称为活动星系核 (AGN), 其发射线主要来自核区; 两线之间的则是一个混合 (composite) 区域. 对于处在该区域的星系, 我们不能很好地辨别这些发射线辐射是来自恒星形成区还是核区. 由于大多数早型星系的发射线较弱, 信噪比太低, 因此没有出现在图中. 从图 1 中可以发现, 晚型星系集中在实线以下, 表明发射线主要来自星系的恒星形成区. 另外, 大多数的早型星系落在混合区域和 AGN 区域, 这些星系的发射线很有可能是来源于 AGN, 而不是恒星形成区.

我们通常看到一些早型星系的光谱在 $4 \times 10^{-7} \text{ m}$ 处会有一个明显的跳跃, 这是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, 所以这些年轻星族的 $4 \times 10^{-7} \text{ m}$ 跳跃就会小些. 相反地, 一些金属丰度高的年老星族的 $4 \times 10^{-7} \text{ m}$ 跳跃则会比较显著. 星系光谱在 $4 \times 10^{-7} \text{ m}$ 处的跃变程度可以用流量比 D_n 来表示, D_n 能较好地表征星族的特征年龄, 一定意义上也反映出了一个星系的形态信息. Padmanabhan 等^[16]曾经把 $D_n > 1.6$ 作为选取椭圆星系的一个重要判据. 图 2 给出了这些成员星系的光谱跃变程度和恒星质量之间的关系. 对于星系团 Abell 2255 中的成员星系, D_n 是区分星系形态的有效参量, 根据 $D_n > 1.6$ 的标准, 我们能够选出 128 颗 ($\sim 97\%$) 早型星系, 而只有 23% 的晚型星系被错分为早型星系.

从图 2 还能发现, 早型星系的恒星质量 (M_*) 具有较大的动态范围, 晚型星系的恒星质量的典型值要比早型星系的小 2.5 倍. 在 Abell 2255 中恒星质量超过 $10^{11} M_\odot$ 的晚型星系只有 2 颗, 大质量星系基本上都是椭圆星系. Kauffmann 等曾发现, 当 $M_* > 3 \times 10^{10} M_\odot$ 时, 年老星族的星系比率有一个很快的上升^[10], 图 2 正好反映了这一特征.

为了更加客观地表征不同质量星系的恒星形成活动的激烈程度, 我们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_*) 被称为星系的特征恒星形成率 (specific SFR). 图 3 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 (R) 的分布. 我们发现不同形态的星系遵循着不同的变化规律. 对于早型星系, 我们得到的线性拟合是 $\log(\text{SFR}/M_*) = 0.05(\pm 0.07)R(\text{Mpc}) - 11.10(\pm 0.09)$, 其相关系数为 0.058, $\log(\text{SFR}/M_*)$ 的弥散度是 0.522. 尽管早型星系的特征恒星形成率误差较

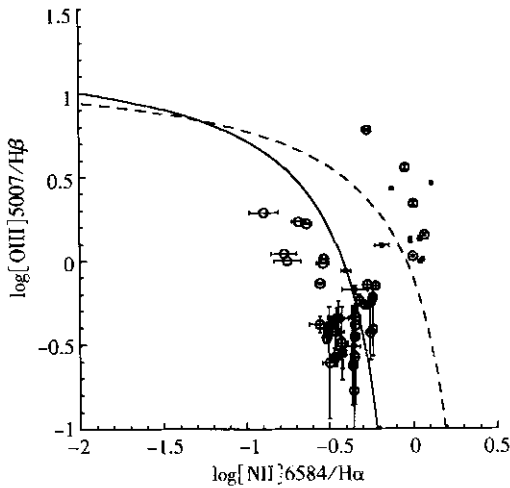


图 1 发射线强度比率图

圆圈表示晚型星系,点表示早型星系

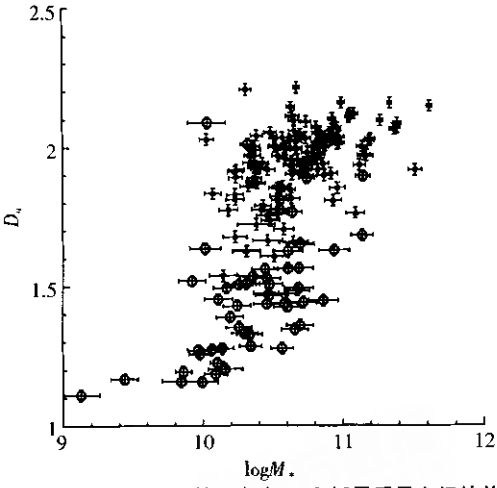


图 2 星系在 4×10^{-7} m 处的跃变度 D_4 和恒星质量之间的关系

圆圈表示晚型星系,点表示早型星系

大,但仍然可以看到早型星系在靠近星系团中心时,恒星形成活动有受到抑制的迹象.然而,对于晚型星系我们得到了一种相反的趋势,即越靠近星系团中心的越表现出活跃的恒星形成活动.我们的线性拟合结果是 $\log(\text{SFR}/M_*) = -0.17(\pm0.08)R(\text{Mpc}) - 9.79(\pm0.12)$,其相关系数为 -0.312 , $\log(\text{SFR}/M_*)$ 的弥散度是 0.399 ,这种相关性比早型星系更加显著.

图 3 表明,对于星系团 Abell 2255 中不同形态类型的成员星系,其特征恒星形成率随空间密度环境的变化趋势各不相同.最令我们感兴趣的是,这种现象是否在星系团中普遍存在?还是只在处于某一特定动力学演化阶段的星系团中存在?我们曾发现了 Abell 2255 存在着子团并合的动力学证据^[8,17],这些成员星系内部恒星形成活动的形态可能与该星系团的并合历史有着密切的联系.这种子团的并合过程可能对不同形态的星系的恒星形成性质产生过不同的作用.这些推论尚有待于我们的后续研究加以佐证.

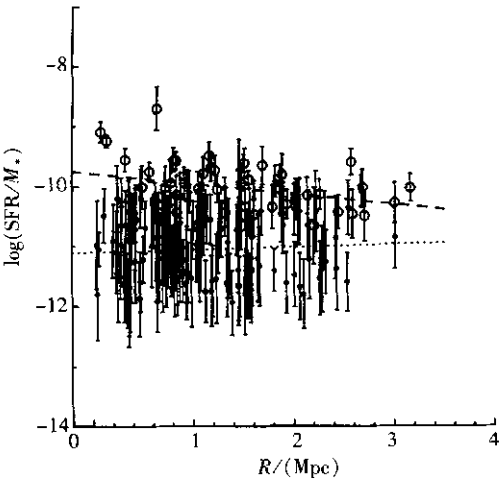


图 3 星系的特征恒星形成率随距离星系团中心的投影距离的分布

圆圈表示晚型星系,点表示早型星系

港澳线和点线分别是对晚型星系和早型星系的线性拟合

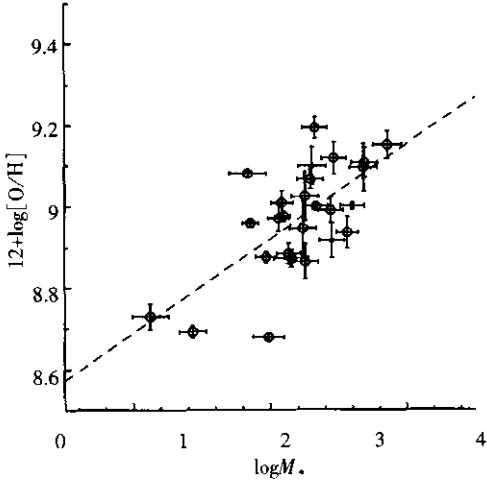


图 4 金属丰度与恒星质量之间的关系

圆圈表示晚型星系,点表示早型星系

虚线是所有测得金属丰度的星系线性拟合的结果

在星系团 Abell 2255 中只有 3 颗早型星系和 25 颗晚型星系的光谱适合作金属丰度估计.我们将这些星系构成了一个子样本,来检验团星系中的金属丰度和恒星质量之间的相关性.这些星系的氧元素的相对丰度和恒星质量之间的关系如图 4 所示,其最佳线性拟合的结果是

$$12 + \log[\text{O}/\text{H}] = 6.498(\pm0.555) + 0.2415(\pm0.054)\log M_*,$$

其相关系数为 0.643 ,元素丰度的弥散度是 0.098 ,和 Kauffmann 等人从星系大样本(含有大量的场星系)中得出的结果^[12]非常一致.他们拟合的曲线在 $M_* \sim 10^{10} M_\odot$ 处的斜率是 0.2418 ,弥散度是 0.10 (参见文[12]中的图 6).应该指出,星系团 Abell 2255 中成员星系的金属丰度-恒星质量相关性与场星系高度一致,这恰好表明这些星系是各自形成之后通过引力作用相聚成团的,正在该星系团发生的子团并合过程尚没有改变成员星系的金属丰度-恒星质量相关性.可以想象,如果该星系团是由一团原始星云破碎后演化

产生的,那么成员星系从一个共同的初始元素丰度开始演化,必然导致这批成员星系具有比场星系样本更强的金属丰度-恒星质量相关性.因此,我们的结果正好支持了大尺度结构的等级成团理论.

3 结论

我们对星系团 Abell 2255 中的 184 颗成员星系(132 颗早型星系和 52 颗晚型星系)的恒星形成性质进行了研究.发现大部分晚型星系有明显的恒星形成活动.该星系团的早型星系越靠近星系团中心区域,其恒星形成活动就越不显著.而晚型星系的恒星形成的活跃程度与投影距离(或本地的星系密度)的变化趋势和早型星系相反.越靠近团中心的晚型星系表现出越剧烈的恒星形成活动.这一有趣现象的普适性有待进一步研究.另外,我们检验了这个星系团的成员星系的金属丰度-恒星质量相关性,发现与以场星系为主的星系大样本保持完全一致的相关性.此外,我们还发现星系光谱在 $4 \times 10^{-7} \text{ m}$ 处的跃变程度可以作为区分星系团成员星系类型的重要观测参数.

[参考文献]

- [1] Kauffmann G, Brinchmann J, Charlot S, *et al.* The environmental dependence of the relations between stellar mass, structure, star formation and nuclear activity in galaxies [J]. *Monthly Notes of Royal Astron Society*, 2004, 353(3): 713—731.
- [2] Kennicutt R C. Star formation in galaxies along the hubble sequence [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1998, 36: 189—232.
- [3] Hopkins A M, Miller C J, Nichol R C, *et al.* Star formation rate indicators in the sloan digital sky survey [J]. *Astrophys Journal*, 2003, 599(2): 971—991.
- [4] Charlot S, Longhetti M. Nebular emission from star-forming galaxies [J]. *Monthly Notes of Royal Astron Society*, 2001, 323(4): 887—903.
- [5] Bruzual G, Charlot S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003 [J]. *Monthly Notes of Royal Astron Society*, 2003, 344(4): 1000—1028.
- [6] Fioc M, Rocca-Volmerange B. PEGASE: a UV to NIR spectral evolution model of galaxies. Application to the calibration of bright galaxy counts [J]. *Astron and Astrophys*, 1997, 326: 950—963.
- [7] Brinchmann J, Charlot S, Kauffmann G, *et al.* The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe [J]. *Monthly Notes of Royal Astron Society*, 2004, 351(4): 1151—1179.
- [8] Yuan Q R, Zhou X, Jiang Z J, *et al.* Multicolor photometry of the galaxies in A2255 by the Beijing-Arizona-Taiwan-Connecticut Survey and Sloan Digital Sky Survey [J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2003, 149(1): 53—66.
- [9] Kauffmann G, Brinchmann J, Charlot S, *et al.* Stellar masses and star formation histories for 10^5 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey [J]. *Monthly Notes of Royal Astron Society*, 2003, 341(1): 33—53.
- [10] Kauffmann G, Brinchmann J, Charlot S, *et al.* The dependence of star formation history and internal structure on stellar mass for 10^5 low-redshift galaxies [J]. *Monthly Notes of Royal Astron Society*, 2003, 341(1): 54—69.
- [11] Kauffmann G, Heckman T M, Tremonti C, *et al.* The host galaxies of active galactic nuclei [J]. *Monthly Notes of Royal Astron Society*, 2003, 346(4): 1055—1077.
- [12] Tremonti C A, Heckman T M, Kauffmann G, *et al.* The origin of the mass-metallicity relation: insights from 53 000 star-forming galaxies in the sloan digital sky survey [J]. *Astrophys Journal*, 2004, 613(2): 898—913.
- [13] de Vaucouleurs G. Recherches sur les nebuleuses extragalactiques [J]. *Annales d'Astrophysique*, 1948, 11: 247—289.
- [14] Strauss M A, Weinberg D H, Lupton R H, *et al.* Spectroscopic target selection in the Sloan Digital Sky Survey: the main galaxy sample [J]. *Astronomical Journal*, 2002, 124(3): 1810—1824.
- [15] Baldwin J A, Phillips M M, Terlevich R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1981, 93: 5—19.
- [16] Padmanabhan N, Kauffmann G, Brinchmann J, *et al.* Stellar and dynamical masses of ellipticals in the Sloan Digital Sky Survey [J]. *New Astronomy*, 2004, 9(5): 329—341.
- [17] Miller N A, Owen F N. Abell 2255: Increased star formation and AGN activity in a cluster-cluster merger [J]. *Astronomical Journal*, 2003, 125(5): 2427—2446.

[责任编辑:丁蓉]