高红移星系的结构与形态研究

范璐璐^{①*}, 方官文^②^① 山东大学空间科学研究院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 威海 264209;^② 大理大学天文与科技史研究所, 大理 671003

* 联系人, E-mail: llfan@sdu.edu.cn

收稿日期: 2016-06-29; 接受日期: 2016-07-22; 网络出版日期: 2017-01-05

国家自然科学基金资助项目 (编号: 11203023, 11303002, 11433005)

摘要 本文主要介绍近年来利用哈勃空间望远镜第三代宽场相机的近红外成像对高红移星系结构形态的研究. 对红移 1–3 区间内宁静星系的研究发现其结构较近邻等质量宁静星系更致密, 且有很显著的随红移演化趋势. 最近的观测证据建议高红移致密宁静星系可能遵循从内而外的演化图像, 千子并合可能在其演化过程中扮演了很重要的角色. 在红移 $z > 1$, 正常恒星形成星系的结构演化符合等级成团模型的预言. 高红移星暴星系, 包括极亮红外星系、尘埃遮蔽星系和亚毫米星系等, 多数显示了并合的形态特征, 表明主并合可能是触发高红移星暴星系中剧烈星爆活动的主要机制. 对高红移活动星系核宿主星系结构形态的研究显示了不同的结果: 中低光度 X 射线选活动星系核宿主星系与比较样本中的正常星系相比并不具有显著更高的并合比例; 而高光度类星体宿主星系却具有很高的并合比例. 该结果表明主并合可能只在高光度活动星系核的核活动触发过程中扮演主要角色. 诸多观测事实表明星暴星系、致密恒星形成星系、类星体和致密宁静星系可能处于同一演化序列之上, 是高红移大质量星系演化过程中的不同阶段.

关键词 星系形态, 星系结构, 星系演化, 高红移**PACS:** 98.52.Cf, 98.62.Ai

1 引言

星系是宇宙中的基本单元, 而星系的结构与形态是表征星系性质的重要物理量. 对星系结构与形态的研究具有悠久的历史, 最早可以追溯到近 100 年前人们开始认识到星系是河外天体, 并具有不同于恒星的分辨结构. 早期对星系结构与形态的研究

始于对观测的星系图像进行目视分类. 在此基础上, 美国天文学家、河外天文学开创者 Hubble^[1] 提出了星系形态的哈勃分类, 将星系按照形态分为椭圆星系和旋涡星系两大类, 该分类方法发展成现在所熟知的哈勃序列^[2], 时至今日, 仍是星系分类的常用方法. 随后, 应用电荷耦合设备 (Charge Coupled Device, CCD) 进行测光观测时对星系结构与形态的研究从

引用格式: 范璐璐, 方官文. 高红移星系的结构与形态研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 049808

Fan L L, Fang G W. Galaxy structure and morphology at high redshift (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 049808, doi: 10.1360/SSPMA2016-00315

定性描述发展到定量分析. 基于定量研究, 星系结构与形态被发现与星系的其他物理性质有关联, 比如星系的形态与星系所处的环境、星系的形态与星系中恒星的成分、星系的结构与星系的质量等. 而今, 星系的结构与形态研究不再仅是对星系进行分类, 而是研究整个星系形成和演化的物理过程中不可或缺的一环.

长期以来, 人们对近邻宇宙中星系的结构与形态开展了大量且细致的研究, 文献 [3, 4] 做了较为详尽的综述. 然而, 受诸多条件制约, 对遥远星系的结构与形态研究比较困难. 一方面, 由于宇宙暗弱效应 (Cosmological Dimming), 星系的面亮度反比于 $(1+z)^4$, 因而会随红移 z 的增加而急剧变暗. 另一方面, 遥远星系中恒星在光学波段的辐射被红移至近红外波段. 除了观测效应, 星系的结构还被发现随红移演化: 同等质量下, 越高红移处的星系平均物理半径越小. 特别是对宁静星系而言, 这种演化趋势最为明显: 平均而言, 红移 2 处的宁静星系会比同等质量的近邻星系的半径小 3–5 倍 [5–12]. 直到 2009 年, 哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 更换了第三代宽场相机 (Wide Field Camera 3, WFC3), 其具有高空间分辨本领的近红外成像能力, 从而使系统研究遥远星系的结构与形态成为可能. 尤其是主要利用哈勃空间望远镜 WFC3 相机开展的深场巡天项目, 如 Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey (CANDELS) (<http://candels.ucolick.org/>), Cluster Lensing And Supernova survey with Hubble (CLASH) (<http://www.stsci.edu/~postman/CLASH/Home.html>) 和哈勃前沿场巡天 (Hubble Frontier Fields, HFF) (<http://www.stsci.edu/hst/campaigns/frontier-fields/>), 极大地帮助人们了解遥远星系的结构与形态, 发现了一些新的现象和规律, 为星系形成和演化模型提供了重要的观测依据.

本文将着重介绍近几年利用哈勃空间望远镜 WFC3 相机近红外成像对高红移不同星系结构与形态研究的一些重要发现和结果, 以及这些发现和结果对理解高红移星系是如何形成和演化所提供的帮助. 本文的主要内容包括: 第 2 节将介绍一些描述星系结构与形态常用的方法和参数; 第 3 节将介绍高红移大质量宁静星系具有急剧的结构演化, 并阐述

其结构演化的物理机制; 第 4 节将侧重描述高红移恒星形成星系的结构与形态, 包括正常的恒星形成星系和星暴星系; 第 5 节将介绍活动星系核 (Active Galactic Nucleus, AGNs) 的形态, 以及其形态研究对活动星系核触发机制的暗示; 最后, 第 6 节对全文做一总结, 并对未来在高红移星系结构与形态研究的方向进行展望.

2 结构与形态参数

在这一节, 将介绍描述高红移星系结构与形态常用到的一些参数与方法, 包括对星系面亮度轮廓的模型拟合 (第 2.1 节), 对星系形态的非模型化参数描述 (第 2.2 节), 以及对星系形态的目视分类 (第 2.3 节).

2.1 结构参数

对星系结构使用数学形式进行定量描述的尝试最早可追溯到 Reynolds [13] 在 1913 年的工作. 随后, 人们尝试使用不同的数学形式描述不同类型的星系结构. 1948 年 de Vaucouleurs [14] 发现大质量的椭圆星系具有基本相同的光度分布, 可以用 $r^{1/4}$ 律来很好地描述 (称为 de Vaucouleurs 轮廓). 而盘星系通常都可以用指数盘模型描述 [15]. 1968 年 Sérsic [16] 给出了描述星系光度轮廓一般的形式

$$I(r) = I(0) e^{-b_n (r/r_e)^{1/n}}, \quad (1)$$

其中, $I(0)$ 是中心面亮度, r_e 为有效半径, n 是 Sérsic 指数. 参数 b_n 依赖于 n 的取值, 可被近似地描述为: $b_n = 2n - \frac{1}{3} + \frac{4}{405n} + \frac{46}{25515n^2} + O(n^{-3})$ [17]. 对经典的 de Vaucouleurs 轮廓, 对应的 Sérsic 指数为 $n = 4$; 而 $n = 1$ 时, 式 (1) 为指数盘轮廓. n 的大小直接反映了星系的形态: 椭圆星系通常具有较大的 n 值 ($n > 2.5$), 而盘星系则刚好相反 ($n < 2.5$) [18].

观测表明, 在近邻宇宙中, 几乎所有具有较精确测光的早型星系的面亮度轮廓都可以被式 (1) 拟合 [3]. 而在红移 $z > 1$, Sérsic 模型同样可以较好地拟合观测到的星系面亮度轮廓 [19].

2.2 形态参数

近年来, 人们相继提出了一些非模型化的星系形态参数用于描述星系形态并进行分类. 现在较为常用的测量非模型化的星系形态参数的方法有两套, 一套是 CAS 方法^[20], 另一套是 G - M_{20} 方法^[21,22]. 前者测量星系的聚集度指数 C 、不对称性指数 A 和团簇指数 S , 并利用它们对星系形态进行分类. 后者测量星系的基尼系数 G 和矩指数 M_{20} . 这些参数能够描述星系结构形态的一些主要特征, 而且不像 Sérsic 轮廓一样依赖于模型假设. 在较高红移处, 人们测量和使用非模型化形态参数的一个主要目的在于搜寻和证认星系中的并合信号. CAS 方法简化为只使用不对称性指数 A 对星系是否存在并合信号进行区分. 下面将简要介绍不对称性指数 A 、基尼系数 G 和矩指数 M_{20} 的定义和计算方法.

不对称性指数 A 描述星系的转动不对称性. 其具体计算方法是将星系图像绕中心旋转 180° , 计算旋转得到的图像与原始图像的差值

$$A = \frac{\sum_{i,j} |I_o(i,j) - I_{180}(i,j)|}{2 \sum_{i,j} |I_o(i,j)|}, \quad (2)$$

其中 $I_o(i,j)$ 是原始图像上像元 (i,j) 处的强度, $I_{180}(i,j)$ 是原始图像旋转 180° 后像元 (i,j) 处的强度, 求和是对彼得罗半径 (Petrosian Radius) 内的所有像元求和. 根据式 (2) 的定义, 不对称性指数 A 的范围在 $0-1$, 取值越大表明星系的不对称性越强. 利用不对称性指数 A 可以示踪星系间并合等信号. 对近邻星系的研究发现, 椭圆星系通常具有较低的 A 值 (0.02 ± 0.02), 旋涡星系的 A 值在 $0.07-0.2$, 而极亮红外星系和正在并合中的星暴星系具有较高的 A 值, 分别为 0.32 ± 0.19 和 0.53 ± 0.22 ^[20]. 对星系图像模拟的工作发现, 不对称性指数 A 依赖于红移, 红移越高, A 值将会系统地变低^[23].

基尼系数 G 最初是经济学上的一个统计工具, 用以描述综合考察居民内部收入分配差异状况的一个重要分析指标, 数值在 $0-1$, 数值越高, 表明财富在社会成员之间的分配越不均匀. Abraham 等人^[21]于 2003 年将该系数引入到天文学领域, 用于定量描述星系中各个像元中的流量相对分布情况: 如果星系中所有的辐射能量都在一个像元中, 则 G 取最大

值 1; 如果星系中各个像元中的流量相同, 则 G 取最小值. 为了便于计算, 星系中的每个像元均按照它的流量排序, 并通过如下公式计算:

$$G = \frac{1}{|\bar{f}|n(n-1)} \sum_i^n (2i-n-1)|f_i|, \quad (3)$$

其中 f_i 是第 i 个像元的流量, $\bar{f}$ 是所有像元的平均流量. 基尼系数 G 的一个特点是其数值只与星系中各个像元的流量相对分布有关, 而与这些像元的空间位置无关. 因此, 基尼系数 G 可以描述任意形状的星系形态, 这在分析研究高红移星系形态的时候将特别有用.

矩指数 M_{20} 用以描述星系中辐射能量的聚集程度^[22,24], 其意义是占星系总流量 20% 的最亮像元的归一化二阶矩. 具体的数学计算形式如下:

$$M_{20} = \log \left(\frac{\sum_i M_i}{M_{\text{tot}}} \right), \text{ while } \sum_i f_i < 0.2 f_{\text{tot}}, \quad (4)$$

其中, f_{tot} 是星系所有像元的总流量, f_i 是第 i 个像元的流量. M_{tot} 是总的二阶矩, 定义为 $M_{\text{tot}} = \sum_i^n M_i = \sum_i^n f_i [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2]$, x_c, y_c 为星系中心位置, x_i, y_i 为第 i 个像元的位置. 矩指数 M_{20} 很大程度上由星系中明亮区域的空间分布所决定, 并不显著依赖于星系中心位置的选择, 可用于示踪星系中亮核、棒和旋臂等结构的空间分布, 以及可较为敏感地示踪星系中的并合信号.

2.3 目视形态分类

按照现在的哈勃形态分类方法, 近邻星系的形态可被目视分类为椭圆星系、透镜星系、旋涡星系和不规则星系, 其中椭圆星系根据其椭率的大小细分为 E7-E0; 旋涡星系按照有无棒结构分为正常旋涡星系和棒旋星系, 并按其中核球的相对大小和旋臂的束缚程度等进一步分为 3 个子类 S(B)a, S(B)b 和 S(B)c^[1,4]. 而对高红移星系, 即使使用高空间分辨率的哈勃空间望远镜成像, 可分辨的物理尺度仍相当大, 使用目视形态分类方法不足以对高红移星系形态进行细致的分类, 仅能划分为椭圆星系、旋涡星系和特殊星系几个大类. 例如, 基于哈勃空间望远镜的 CANDELS 深场巡天图像, 中高红移正常星系和活

动星系核宿主星系被分类为盘星系 (Disk)、椭圆星系 (Spheroid)、特殊星系 (Peculiar) 以及点源 (Point-Like), 再按照其形态被扰动的程度划分为并合或相互作用星系 (Merger/Interaction)、扰动或不对称星系 (Disturbed/Asymmetric) 及非扰动星系 (Undisturbed) [25–27]. 另一种分类方法是针对活动星系核宿主星系, 目的是研究活动星系核宿主星系中的并合信号, 将星系按照形态分为 3 类: 第 0 类 (Dist 0) 为形态无扰动, 没有并合的迹象; 第 1 类 (Dist 1) 为具有一定程度的形态扰动, 暗示具有可能的子并合或者吸积; 第 2 类 (Dist 2) 表示具有强烈的形变及其他明显的并合信号 [28]. 通过对不同红移处的星系进行目视分类, 一方面可以研究不同形态星系随红移如何演化 [29], 另一方面可以研究活动星系核宿主星系中的并合信号的强弱 [25, 26, 28, 30, 31].

3 高红移宁静星系的结构

利用斯隆数字巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) 数据, 人们发现近邻大质量椭圆星系¹⁾ 的有效半径 r_e 在给定的星系光度或质量条件下按照对数正态分布, 并与星系的质量有紧密的相关性 [32, 33]: $r_e \propto M_*^{0.55}$, 其中 $\sigma_{\ln r_e} \sim 0.35$. 该 $r_e - M_*$ 相关性作为一个重要的观测事实, 需要星系演化模型提供相应的解释.

十多年来, 利用哈勃空间望远镜高空间分辨率成像, 人们开始研究中高红移处宁静星系的结构. 大量的研究工作发现宁静星系的有效半径随红移增加而急剧减小: 红移 2 处的宁静星系比具有相同质量的近邻椭圆星系的有效半径平均小 3–5 倍 [5–12].

结合近邻和中高红移处的观测事实, 人们提出了两个星系结构演化的关键问题. 一是在中高红移“小个头”、大质量的宁静星系如何形成; 另一个是何种物理机制驱动了大质量宁静星系急剧的结构演化. 下文中, 将在第 3.1 节介绍高红移宁静星系结构急剧演化的观测结果, 在第 3.2 节中阐述大质量宁静星系结构演化的主要物理机制, 以及最近的观测结果对

不同物理机制的检验.

3.1 观测到的急剧结构演化

给定星系的质量范围, 星系的有效半径演化可用一个幂律形式表述: $r_e \propto (1+z)^\alpha$. 不同的研究工作给出的幂指数 α 值也不尽相同. 在哈勃空间望远镜第三代宽场相机 WFC3 投入使用之前, Buitrago 等人 [34] 于 2008 年使用哈勃空间望远镜 NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) 近红外相机对 GOODS (Great Observatories Origins Deep Survey) 南场和北场中红移 1.7–3.0 的椭圆星系 (Sérsic 指数 $n > 2$) 进行成像研究发现 $\alpha = -1.48$. Damjanov 等人 [35] 在 2011 年的工作中收集了文献中利用哈勃空间望远镜多个相机开展的多个巡天场的成像数据对红移 0.2–2.7 的椭圆星系 (定义为 Sérsic 指数 $n > 2.5$) 的结构进行研究, 得出 $\alpha = -1.62$, 表明星系的有效半径随红移更快地演化. Cimatti 等人 [36] 汇总了前人的工作, 利用所有可获得的 (截止 2012 年) 数据研究了椭圆星系有效半径随红移的演化, 选取不同质量的星系样本, 给出了不同的演化关系, 如对 $M_* > 10^{10.5} M_\odot$ 的星系样本, $\alpha = -1.06$; $M_* > 10^{10.9} M_\odot$ 的星系样本, $\alpha = -1.24$. 利用哈勃空间望远镜对 CLASH 场的近红外成像数据选择了一个红移 1–3 的宁静星系样本, 与较低红移处星系样本比较, 得到一个较为平缓的演化 $\alpha = -1.06$ [10]. 大量的类似研究工作表明 α 的取值分布在 $-1.0 - 1.5$ [37–43].

利用 3D-HST 巡天 [44] 的光谱和多波段测光数据及 CANDELS 巡天 [45, 46] 的 HST WFC3 近红外成像, Van Der Wel 等人 [12] 选取了红移 0–3 的质量限星系样本, 以研究不同星系有效半径与质量的关系及其随红移的演化. 样本包含了超过 30000 个星系, 并按照静止 UVJ 颜色判据划分为恒星形成星系样本与宁静星系样本 [47, 48], 这是迄今为止研究高红移宁静星系有效半径与质量关系最大也最为均匀的样本. 对红移 0–3、质量为 $5 \times 10^{10} M_\odot$ 的宁静星系, 其有效半径随红移演化的幂指数 $\alpha = -1.48$ (见图 1 中红色数据点).

1) 文中对椭圆星系有几种不同的命名, 包括椭圆星系、早型星系、宁静星系和被动演化星系.

图1 (网络版彩图) 3D-HST/CANDELS 巡天中的星系结构随红移的演化 [12]. 红色和蓝色数据点分别代表宁静星系和恒星形成星系样本. 实线和虚线分别表示对观测数据拟合得到的星系有效半径与哈勃常数 $h(z)$ 及 $(1+z)$ 的最佳拟合关系

Figure 1 (Color online) Redshift evolution of the galaxy structure in 3D-HST/CANDELS survey [12]. Red and blue data points represent quiescent galaxy and star forming galaxy samples, respectively. Solid and dotted lines show the best fitting results, parameterized by $R \sim h(z)^\alpha$ and $R \sim (1+z)^\alpha$, respectively.

3.2 高红移大质量宁静星系致密结构的形成与演化机制

所有的观测证据都表明红移 0–3 的大质量宁静星系的结构随红移急剧演化: 在越高红移, 有效半径越小, 也即越致密. 近年来, 多种物理机制被提出, 试图解释高红移大质量宁静星系致密结构的形成以及朝向近邻大质量宁静星系 $r_e - M_*$ 关系的演化.

理论模型和数值模拟均发现气体的耗散过程可以产生致密星系. 一种可能是通过气体的耗散塌缩, 例如, 通过冷流 (Cold Stream) 触发星系中心星暴 [49–51]; 另一种是富气体盘星系并合, 触发中心星暴活动 [52–54].

对于前者, 可以将星系的有效半径表示成暗物质晕维里化半径 r_H 、暗物质晕质量 M_H 以及暗物质晕维里化处红移 z_{form} 的函数 [55]

$$r_e \approx \frac{S_s(n)}{f_\sigma^2} \frac{(M_* + M_{\text{gas}})}{M_H} r_H \approx 0.9 \frac{S_s(n)}{0.34} \frac{25}{m} \left(\frac{M_H}{10^{12} M_\odot} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{4}{1+z_{\text{form}}} \right), \quad (5)$$

其中 $S_s(n)$ 为依赖于 Sérsic 指数 n 的参数, 取值可见文献 [56], m 为恒星质量与暗物质总质量的比值, 正比于 $(1+z_{\text{form}})^{-0.25}$. 式 (5) 显示高红移大质量暗物质晕中气体的耗散塌缩会产生半径为 1–2 kpc 大小的星系, 且有效半径依赖于暗物质晕维里化处的红移: $r_e \propto (1+z_{\text{form}})^{-0.75}$.

富气体盘星系并合的情况较为复杂. 并合的结果将严重依赖于并合前身星系中的气体含量以及并合的细节. 文献 [52–54] 中给出一个估计值

$$r_e = \frac{r_{\text{dry}}}{1 + (f_{\text{gas}}/f_0)}, \quad (6)$$

其中 $f_0 \approx 0.25 - 0.30$, r_{dry} 是假设贫气体并合的遗迹半径, f_{gas} 反映了前身星系盘在并合前的气体比例. 由于高红移盘星系具有较高气体比例 ($f_{\text{gas}} > 50\%$), 式 (6) 表明富气体盘星系的并合遗迹半径可能会比前身星系更小.

高红移大质量宁静星系致密结构演化的一个可能机制是类星体和超新星的反馈作用将星系中的气体吹出星系, 从而使星系的结构“膨胀”变大 [57, 58]. 在该机制下, 星系半径变化取决于气体被吹出星系的时标长短以及被吹出气体占星系质量的比例. 类星体反馈的情况下, 可以认为气体被吹出的时标短于系统的动力学时标 $\tau_{\text{ej}} < \tau_{\text{dyn}}$, 星系最终的半径 R_f 与初始半径 R_i 的关系可表达为

$$\frac{R_i}{R_f} = 1 - \frac{M_{\text{ej}}}{M_f}, \quad (7)$$

其中, M_{ej} 是被抛出的气体质量, M_f 是星系最终的质量. 在超新星反馈的情况下, 气体被吹出星系的时标比动力学时间更长, 恒星轨道将会绝热膨胀

$$\frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{M_{\text{ej}}}{M_f}. \quad (8)$$

高红移大质量宁静星系致密结构演化的另一个可能机制是通过贫气体星系间的并合有效增加前身星系的半径. 先前的数值模拟研究发现任何贫气体星系间的并合都会导致前身星系半径增大, 并保留前身星系的质量轮廓 [53, 59]. 考虑两个质量分别为 M_1 和 $M_2 = fM_1$ ($f \leq 1$), 有效半径为 R_1 和 R_2 的贫气体星系通过并合形成具有质量 M 、有效半径 R 的星系. 干主并合 (Dry Major Merger) 的情况下, 质量比大于 1:4. 简单起见, 假设抛物线轨道的并合, 并忽略恒

星质量因为急剧的势能扰动而被抛出并合遗迹的影响以及忽略恒星传输给暗物质的能量, 可以得到

$$R = R_1 \frac{(1+f)^2}{(1+f^2 \frac{R_1}{R_2})}, \quad (9)$$

显而易见, 对等质量的贫气体星系并合而言, 并合后星系的有效半径是原前身星系的一倍 ($R = 2R_1$), 即 $\Delta R \propto \Delta M$. 相比较于等质量并合, 通过干子并合 (Dry Minor Merger, 并合星系质量比小于 1:4) 将更加有效增加星系的有效半径 [60,61]. 从维里定律和能量守恒方程, 可计算出干子并合前后的引力半径和速度弥散

$$\frac{R_{g,f}}{R_{g,i}} = \frac{(1+\eta)^2}{(1+\eta^{2-\beta})}, \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_f^2}{\sigma_i^2} = \frac{(1+\eta^{2-\beta})}{(1+\eta)},$$

其中, $\eta = M_a/M_i$, $\varepsilon = \sigma_a^2/\sigma_i^2$, i 和 a 指初始和被吸积的物质. 并合后的质量 $M_f = M_i(1+\eta)$. 如果 $r \propto M_*^\beta$, 维里定律给出 $\varepsilon = \eta^{1-\beta}$. 对近邻早型星系而言, $\beta \approx 0.56$ [32]. 一般情况下, $\Delta R \propto \Delta M^{-2}$.

不同的结构演化机制在有效半径 - 质量关系图上预言了不同的演化路径 [55] (见图 2). 干主并合等比例地增加星系质量和半径, 并不能有效地解释高红移致密宁静星系朝向近邻椭圆星系有效半径 - 质量关系上演化 (图 2 中蓝色箭头). 干子并合则可以有效地将高红移致密宁静星系朝向近邻椭圆星系有效半径 - 质量关系的演化 (图 2 中红色箭头). 通过干子并合, 只需要前身星系吸积一倍的质量, 则有效半径可增加 4 倍左右, 可解释观测到的有效半径演化 [60,62,63]. 通过式 (7) 和 (8), 图 2 中黑色箭头描述了类星体或超新星反馈机制所预言的结构演化路径. 不同于并合的演化路径, 类星体或超新星反馈机制所预言的结构演化路径一开始朝向星系总质量降低的方向演化, 后期的恒星被动演化 (减小星系质量, 图 2 中朝向左方的箭头) 或发生的干子并合 (增加星系质量, 图 2 中朝向右方的箭头) 再次增加星系有效半径.

大质量宁静星系的恒星质量面密度轮廓随红移的演化对不同的结构演化机制也提供了一个观测检验. 2013 年利用 VJL 颜色选 [64] 方法选择了 CANDELS-COSMOS 场中红移 $z \approx 3$ 的大质量宁静

图 2 (网络版彩图) 高红移宁静星系的有效半径 - 质量关系, 以及不同演化机制预言的结构演化路径 [55]. 黑色箭头描述了类星体或超新星反馈机制所预言的结构演化路径. 红色和蓝色箭头分别表示干子并合和干主并合预言的结构演化路径

Figure 2 (Color online) The R_e - M_* relation of high- z quiescent galaxies [55]. Colored arrows mark the evolutionary paths of different models: QSOs or supernovae feedback (black), dry minor merger (red) and dry major merger (blue).

星系. 利用 HST WFC3 F160W (H 波段) 的成像, 研究该宁静星系样本的平均恒星质量面密度轮廓, 并与同等质量的红移 $z \approx 1$ 和 $z \approx 2$ 处宁静星系样本 [65] 和近邻宁静星系样本 [66] 的结果相比较 (见图 3). 可以发现红移 $z \approx 0$, $z \approx 1$, $z \approx 2$ 和 $z \approx 3$ 处宁静星系样本的平均恒星质量面密度轮廓在星系内部区域 ($r_e < 2-3$ kpc) 非常类似, 暗示近邻大质量早型星系中内区的大部分恒星在红移 3 处就可能已经形成并存在于星系内区; 而在星系外部区域 ($r_e > 4$ kpc), 平均恒星质量面密度随红移的降低而逐渐增加. 这些结果与星系自内而外 (Inside-Out) 的演化图像相吻合, 即高红移致密宁静星系构成了近邻椭圆星系的内核, 并通过后期不断干并合和吸积形成了延展的外部区域, 最终演化成观测到的巨椭圆星系 [67,68]. 通过对近邻椭圆星系进行细致的结构分析, 文献 [66] 发现近邻椭圆星系的质量面密度轮廓可分解为三成分: 一个致密的内部结构, 一个中等大小的中间结构和一个延展的外部结构. 其中, 致密内部结构被认为是高红移致密宁静星系演化的对应产物, 延展的外部结构被认为是后期并合和吸积的结果. 其结果再次表明高红移致密宁静星系的演化可能遵循自内而外的演化

图像.

尽管不同红移处等质量选宁静星系样本间的比较对了解星系结构演化非常重要, 但星系在后期演化过程中会因恒星的被动演化、新的恒星形成以及并合事件的发生而改变质量, 不同红移处等质量选星系间并没有直接的演化关系. 利用累积数密度选择的方法, 人们认为可以选择在不同红移处具有相互演化关系的星系 [69]. 其依据是假设星系按质量的排序随红移并没有太大的变化. 文献 [70] 利用静止坐标系下 UVJ 颜色选方法 [47,48] 选择了 CANDELS-UDS 场中具有相同数密度的大质量宁静星系. 通过比较它们的质量面密度轮廓 (见图 4), 文献 [70] 得出与用等质量选宁静星系样本类似的结论: 星系内部区域在红移 $z \approx 2.5$ 左右即已经形成并位于星系内部, 星系外区随红移降低而逐渐增长. 该结果同样支持高红移致密宁静星系自内而外的演化图像.

尽管许多观测证据表明干子并合可能在致密宁静星系结构演化过程中扮演主要角色, 一些研究工作表明仅仅干子并合并不足以解释观测到的结构演化. 例如, 观测到的子并合率与解释致密宁静星系结构演化所需要的并合率相比过低, 尤其是在红移 $1.5-3.0$, 较短的时间间隔 (约 2 Gyr) 在考虑物理的并合时标的

图 3 (网络版彩图) 等质量选宁静星系样本的平均恒星质量面密度轮廓随红移的演化 [11]. 黑色、蓝色、绿色和红色线分别标示了红移 0, 1, 2 和 3 处的平均恒星质量面密度轮廓. 箭头标示了不同红移处的有效半径中值

Figure 3 (Color online) Median stellar mass surface density profiles of massive quiescent galaxies at redshift $z = 0$ (black), $z = 1$ (blue), $z = 2$ (green) and $z = 3$ (red). Colored arrows mark the median values of R_e at different redshift [11].

图 4 (网络版彩图) 等数密度选宁静星系样本的平均恒星质量面密度轮廓随红移的演化 [70]. 不同颜色线分别标示了不同红移处的等数密度选宁静星系样本的平均恒星质量面密度轮廓

Figure 4 (Color online) Stellar mass surface density profile of galaxies selected at a constant cumulative number density for different redshifts [70]. Different color lines represent the average stellar mass surface density profiles selected at a constant cumulative number density for different redshifts.

情况下, 不允许足够多次的并合事件发生 [40]. 利用 Keck 望远镜 MOSFIRE 近红外光谱仪, 文献 [71] 测量了 6 个红移 $2-2.5$ 大质量致密宁静星系的恒星速度弥散, 证实了大质量致密宁静星系存在剧烈的结构演化, 其在有效半径 - 质量关系图上的演化路径与多数干子并合数值模拟的预言并不一致, 说明单纯的干子并合或许并不能完全解释观测到的结构演化. 另外, 从数值模拟和模型的角度, 几个研究工作也表明单纯的干子并合 (随机的过程) 或许无法解释近邻大质量椭圆星系的有效半径 - 质量关系为何具有很小的弥散 [72-75].

上述对宁静星系结构演化的讨论都是基于不同红移处星系平均有效半径的对比得出的. 这种对比可能引入了一个观测效应. 举例来说, 对红移 $1.5-2.0$ 的宁静星系, 需要其在更高红移处形成 (如 $z_{\text{form}} \approx 3-5$). 而大部分近邻椭圆星系形成于 $1.5 < z_{\text{form}} < 2.5$. 一方面, 通过气体耗散过程形成的致密星系, 其形成时的有效半径依赖于红移, 相比较于在红移 $1.5-2.5$ 形成的星系, 在红移 $3-5$ 形成的星系被期待具有 $1.5-2$ 倍更小的尺寸 (见式 (5)). 另一方面, 恒星形成盘星系在越低红移具有越大的半径 [76], 其恒星形

成停止后, 这些半径较大的盘星系将演化为宁静星系, 使宁静星系的平均有效半径整体增大, 即所谓的前身星系选择效应 (Progenitor Bias). 有的研究工作发现前身星系选择效应可解释观测到的红移 $z < 1$ 宁静星系有效半径的增长^[77], 但另外一些工作得出了不同的结论^[71, 78].

4 恒星形成星系的结构形态

4.1 正常恒星形成星系的结构演化

在等级成团模型中, 盘星系的半径^[76]

$$R_d \approx 8.8h^{-1} \text{ kpc} \left(\frac{j_d}{m_d} \right) \left(\frac{\lambda}{0.05} \right) \left(\frac{V_c}{250 \text{ km s}^{-1}} \right) \times \left(\frac{H_0}{H(z)} \right), \quad (11)$$

其中, j_d 和 m_d 分别是盘的角动量和质量与暗物质晕的角动量和质量之间的比值, λ 为自旋参数, V_c 为圆速度, $H(z)$ 为红移 z 处的哈勃常数. 该式表明盘星系的半径近似反比于红移 z 处的哈勃常数 $H(z)$.

最近的工作研究了高红移拉曼断裂星系 (LBGs) 的结构, 发现其平均半径随红移的演化大体上与式 (11) 的理论预言相吻合^[79–81]. 但不同的研究工作, 由于诸如红移范围、星系光度选择范围、星系质量选择范围、样本选择大小、结构轮廓测量所用不同的设备和波段等不同的选择效应, 给出的有效半径-红移演化关系 ($r_e \propto (1+z)^\alpha$) 也不尽相同. 文献 [82] 利用哈勃极深场 (Hubble Ultra-Deep Field, HUDF) 数据研究了红移 7–12 的拉曼断裂星系结构演化, 发现其有效半径随红移演化较快 ($\alpha = -1.28$). 文献 [83] 利用哈勃前沿场 (Hubble Frontier Fields) 数据研究了红移 6–8 拉曼断裂星系的结构, 同样发现了一个较快演化 ($\alpha = -1.24$). 其他利用 HST CANDELS 巡天以及综合哈勃遗产数据研究得到了类似的结果: $\alpha = -1.0 - -1.2$ ^[84, 85]. 早先的工作利用地基望远镜和 HST NICOMOS 近红外相机研究了红移 $z < 3$ 的恒星形成星系结构演化, 其结果显示了一个较为缓慢的演化 ($\alpha = -0.6 - -0.9$)^[7, 48, 86, 87]. 文献 [12] 利用 3D-HST/CANDELS 数据, 按照静止 UVJ 颜色判断划分为恒星形成星系样本与宁静星系样本, 对红

移 0–3、质量为 $5 \times 10^{10} M_\odot$ 的恒星形成星系, 其有效半径随红移演化的幂指数 $\alpha = -0.75$ (见图 1 中蓝色数据点), 或者表示为有效半径和哈勃常数的关系: $r_e \propto H(z)^{-0.66}$. 该结果证实了恒星形成星系的有效半径在红移 $z < 3$ 演化较为缓慢. 这种在不同红移处观测到的演化差异主要是由于形态 K 改正的作用, 即观测所用近红外波段 (如 HST H 波段) 在红移 $z < 3$ 处对应静止光学波段, 而在更高红移 ($z = 4 - 12$) 对应静止紫外波段, 其所示踪的星族不同, 导致形态上的差异.

4.2 星暴星系的形态

二十多年前, 红外天文卫星 (Infrared Astronomical Satellite, IRAS) 发现了一类具有极亮红外光度的星系 ($L_{IR} \geq 10^{12} L_\odot$)^[88]. 高红外光度暗示该类星系中存在剧烈的恒星形成活动 ($SFR \geq 100 M_\odot \text{ yr}^{-1}$). 早期的研究发现近邻宇宙中极亮红外星系的数目相对稀少, 形态上多数具有并合和相互作用的信号^[89, 90], 故被认为是富气体盘星系间并合, 从而触发了星暴活动, 是星系演化过程中的重要一环, 可能是富气体盘星系、类星体与椭圆星系演化序列上的一个过渡阶段^[91].

利用 Herschel 和 Spitzer 卫星的红外观测数据, 近年来的研究发现极亮红外星系虽然在近邻宇宙中相对稀少, 但在高红移其存在相对普遍, 甚至在红移 $z > 1$ 主导了宇宙恒星形成率^[92–95]. 虽然高红移极亮红外星系具有与其低红移对应体类似的红外光度, 但是它们的形成环境不相同 (如高红移盘星系被发现具有比低红移对应体更高的气体比例^[96, 97]), 高红移极亮红外星系是否和其低红移对应体一样? 其星暴活动是富气体并合触发的, 并处于连接富气体盘星系并合和类星体之间的过渡阶段? 这些问题仍具争议. 高红移极亮红外星系形态的研究将有助于解答这些问题. 不过, 和研究高红移宁静星系一样, 在 HST WFC3 使用之前研究红移 $z > 1$ 极亮红外星系的形态是比较困难的. 一方面是由于宇宙学暗弱效应, 在高红移星系的面亮度变得很弱, 表征并合信号的潮汐尾和破碎盘等原本就较暗弱的形态特征将很难被识别; 另一方面为了示踪星系中年老的星族分布, 需要高空间分辨率的近红外成像.

利用地基自适应光学以及 HST NICMOS 和新一代 WFC3 相机的高空间分辨率成像, 不同的研究工作对采用不同的选择方法所产生的高红移极亮红外星系样本开展了一系列结构形态研究. 文献 [98] 使用 HST NICMOS 近红外成像对一个 Spitzer MIPS 24 μm 选择的红移 2 处极亮红外星系样本进行了形态研究. 结果发现过半星系的形态具有并合特征以及盘状轮廓. 该结果被后来的工作用一个更大的样本所证实 [99].

另一种选择高红移极亮红外星系的方法是利用 Spitzer MIPS 24 μm 和光学 R 波段流量比 [100]: $f_{\nu}(24 \mu\text{m})/f_{\nu}(R) \geq 1000$. 利用该方法选择的星系被称为尘埃遮蔽星系 (Dust-Obscured Galaxies, DOGs). 研究发现, 恒星形成主导的尘埃遮蔽星系具有盘状的面亮度轮廓 (Sérsic 指数中值为 0.9). 对该类星系的目视分类以及利用形态参数 $G-M_{20}$ 方法分类的结果暗示该类星系可能处于主并合的早期阶段 [101].

利用 GOODS-Herschel 巡天以及 CANDELS-GOODS 近红外成像, 文献 [102] 选取了一个红移 2 处体积限的极亮红外星系样本, 并研究了其形态. 他们的结果与先前的结果基本一致. 他们发现红移 2 极亮红外星系具有普遍的盘形态, 至少有近 50% 的星系具有明显的并合特征.

使用 Spitzer IRAC 相机 3.6, 4.5, 5.8 和 8.0 μm 4 个波段的测光数据, 文献 [103, 104] 发展了一套红移 $z \approx 2$ 处极亮红外星系的测光选择方法. 利用这套测光颜色选择方法, 文献 [105] 在 EGS 场 (Extended Groth Strip) [106] 中选择了 9 个红移 2 处的有 HST WFC3 H 波段成像的极亮红外星系 (见图 5). 对 H 波段图像的目视分类研究发现, 9 个星系中有 7 个显示了不同程度的并合特征, 比如多个亮核、潮汐尾和显著不对称形态等. 剩下 2 个星系的形态为椭圆. 目视形态分类的研究结果表明红移 2 处极亮红外星系多处于并合的不同阶段.

另一类具有更剧烈星暴活动的高红移星系是 20 世纪 90 年代人们利用 JCMT 望远镜所发现的亚毫米星系 (Submillimeter Galaxies, SMGs). 该类星系多数被发现具有较高的红移 $z \geq 2$ 、极高的红外光度 $L_{\text{IR}} \approx 10^{13} L_{\odot}$ 以及极端的星暴活动 $SFR \approx 1000 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, 被认为是大质量星系形成的早期阶段 [107–110]. 亚毫米

图 5 EGS 场中红移 2 处极亮红外星系的形态 [105]

Figure 5 Morphologies of ULIRGs at $z \approx 2$ in the EGS field [105].

星系具有几千秒差距大小的恒星形成区域, 作为比较, 近邻极亮红外星系恒星形成区域大小仅约数百秒差距 [111]. 恒星形成区域大小的差异可能源于恒星形成触发机制的不同. 亚毫米星系中极端的星暴活动被认为是通过富气体盘星系间主并合触发 [112] 或是孤立富气体盘星系的自身演化 [113, 114]. 对亚毫米星系结构形态的研究将可以帮助区分极端星暴活动的不同触发机制.

文献 [115] 利用 HST NICMOS H 波段成像对 25 个具有光谱红移的亚毫米星系进行了较为系统的定量形态研究. 他们发现亚毫米星系的有效半径、基尼系数和不对称性指数等与正常恒星形成星系样本相比并无显著不同. 不过, 该结果可能是由于 NICMOS 的表面亮度探测极限较浅所致. 利用 HST WFC3 较深的 H 波段成像对 GOODS 南场中 24 个亚毫米星系进行形态研究, 文献 [116] 发现他们样本中 95% 以上的星系轮廓与近邻盘星系的类似, 可以用指数盘模型来描述 (平均 Sérsic 指数 $\langle n \rangle \approx 1$), 并且只在极少数星系中发现主并合的迹象. 文献 [117] 利用 ALMA 高的空间分辨率优化了亚毫米源与光学近红外对应体之间的匹配, 分析了 10 个有 CANDELS 巡天区域覆盖的 ALESS 亚毫米星系的结构形态, 得出了与文献 [116] 类似的结论. 最近的研究使用较深的 HST WFC3 H 波段对 42 个 ALESS 亚毫米星系的成像研究了其形态和半径大小, 同样发现 H 波段的面亮度轮廓呈现盘状 (平均 Sérsic 指数 $\langle n \rangle \approx 1.2 \pm 0.3$), 有效半径的中值

为 $r_e = 4.4$ kpc, 但是对 H 波段图像的目视形态分类研究发现约 82% 的图像显示了扰动的形态, 暗示亚毫米星系是不规则或者是相互作用系统, 可能是主并合的中、早期阶段 [118].

4.3 高红移致密星系的演化序列

在前文的第 3 和 3.2 节中, 介绍了近年的研究发现高红移宁静星系相比较于近邻宇宙中等质量的椭圆星系具有更加致密的结构, 以及高红移致密 (恒星形成) 星系可以通过冷流或者富气体星系间的主并合触发的耗散过程而形成. 这种致密星系形成及演化的图像自然期待: (1) 在高红移同样存在与致密宁静星系结构类似的致密恒星形成星系; (2) 致密恒星形成星系通过某些机制停止恒星形成, 演化成致密宁静星系. 观测结果证实了模型的期待: 高红移的确存在结构致密的恒星形成星系 [119–123].

通过对 CANDELS-GOODS 和 CANDELS-UDS 场中红移 1.4–3.0 的大质量星系 ($M_* > 10^{10} M_\odot$) 的恒星质量、恒星形成率和有效半径的研究, 文献 [124] 建议较高红移处的致密恒星形成星系与较低红移处的致密宁静星系存在直接演化关系, 即在红移大于 2, 致密恒星形成星系通过恒星形成快速停止而演化成致密宁静星系. 进一步的研究发现红移 2–3 大质量致密恒星形成星系相比较于非致密恒星形成星系更倾向于宿主活动星系核, 并且在形态上与致密宁静星系类似: 高的 Sérsic 指数以及椭圆形态. 这些结果再次表明高红移致密恒星形成星系可能是致密宁静星系的前身星系 [125].

文献 [126] 在 CANDELS-COSMOS 和 GOODS 南场中选择了红移 2–3 的致密恒星形成星系, 第一次对该红移区间该类星系的形态参数进行了分析研究. 图 6 显示了致密恒星形成星系在基尼系数 G 与矩指数 M_{20} 关系图上的分布, 同时也显示了非致密恒星形成星系以及致密宁静星系的分布. 可以发现致密恒星形成星系在 G - M_{20} 关系图上的分布类似, 而非致密恒星形成星系的分布明显不同, 表明致密恒星形成星系与致密宁静星系间可能存在着物理联系. 另外, 还发现致密恒星形成星系的其他物理性质, 包括恒星质量、尘埃消光、有效半径、Sérsic 指数以及椭

图 6 (网络版彩图) 红移 2–3 不同星系的基尼系数 G 与矩指数 M_{20} 关系图 [126]

Figure 6 (Color online) G - M_{20} relation of different galaxies at $2 < z < 3$ [126].

率都与致密宁静星系非常类似, 支持文献 [124] 中提出的致密恒星形成星系通过快速地停止恒星形成而演化为致密宁静星系的图像.

致密宁静星系的前身星系应具有剧烈且致密的星暴活动, 剧烈的星暴将伴随大量尘埃的产生, 即其可能处于尘埃遮蔽的环境中. 因此, 最近的研究 [127] 指出亚毫米星系可能也是致密宁静星系前身星系的候选者. 通过红移 3–6 的亚毫米星系与光谱红移在 2 附近的致密宁静星系的物理性质比对, 文献 [127] 发现红移 3–6 的亚毫米星系的有效半径分布、恒星质量和内部速度弥散符合红移 2 附近致密宁静星系前身星系的期待, 为高红移亚毫米星系作为较低红移致密宁静星系前身星系提供了证据. 基于亚毫米星系与致密宁静星系之间直接的演化联系, 以及前人工作提出的尘埃遮蔽星系 – 颜色红 (尘埃遮蔽) 类星体 – 紫外亮类星体 – 椭圆星系演化序列, 文献 [127] 提出了高红移致密星系的演化序列: 富气体星系并合触发极端的致密星暴活动, 星暴活动产生了大量的尘埃, 年轻恒星在紫外光学波段的辐射被尘埃吸收并在红外波段再辐射, 呈现为红外/亚毫米波段亮的特征, 被在亚毫米波段所探测到, 即亚毫米星系; 伴随宿主星系的快速增长的同时, 中心超大质量黑洞也在以近爱丁顿率甚至超爱丁顿率吸积物质而快速增

长, 直至类星体的反馈作用终止了宿主星系的恒星形成活动以及清除了宿主星系中的大量尘埃, 呈现为紫外亮的类星体特征; 失去吸积物质的中心超大质量黑洞, 也很快停止活动, 呈现为致密宁静星系特征; 最后致密宁静星系通过干子并合或其他机制增加半径, 演化为观测到的近邻椭圆星系 (见图 7). 最近研究了红移 1–3 的致密星系的成团性, 并与亚毫米星系和类星体的成团性相比较, 发现红移 2.5 附近的致密恒星形成星系的成团性与类似红移处的亚毫米星系和类星体以及红移 1.5 处附近的致密宁静星系的成团性一致, 支持了致密恒星形成星系和亚毫米星系作为致密宁静星系前身星系的观点, 同时也支持了亚毫米星系 – 致密恒星形成星系 – 类星体到致密宁静星系的演化序列 [128].

5 活动星系核宿主星系的形态

活动星系核的触发机制一直是存在争论的课题. 主流的星系与中心超大质量黑洞共演化模型建议主并合是活动星系核触发的主要机制 [129]. 但另一些研究指出其他机制, 如子并合、盘和棒不稳定性以及超新星爆发等, 都可能为中心超大质量黑洞的吸积提供燃料, 从而触发活动星系核的活动 [130, 131]. 寻找区分活动星系核触发机制的证据是研究活动星系核宿主星系形态的主要动机.

利用 HST ACS 和 WFC3 相机, 人们分别研究了红移 $z < 1$ 以及 $z \approx 2$ 附近 X 射线选活动星系核

宿主星系的形态. 较早期对红移 1 以内 X 射线选活动星系核的研究发现其宿主星系主要呈现椭圆形态 [132, 133]. 但这些研究没有考虑活动星系核对宿主星系光度轮廓的贡献. 如果活动星系核的贡献比较显著, 其会使总的光度轮廓呈现椭圆形态 [134–136]. 一个解决办法是在对光度轮廓进行拟合时, 加入一个点源成分, 用以表征活动星系核的贡献. 一般做法是使用 GALFIT 软件 [137, 138], 用 Sérsic+PSF 模型来拟合, 前者表征宿主星系的成分, 后者代表活动星系核的贡献. 利用该结构分解的方法, 一些研究发现 X 射线选活动星系核宿主星系的形态呈现多样化: 大部分为盘主导的形态, 一部分为有椭圆成分的盘星系形态, 还有椭圆主导的形态; 通过与正常星系比较样本的形态进行比对, 发现活动星系核宿主星系与正常星系的结构形态没有显著区别; 同时宿主星系中具有并合或者相互作用特征的比例很低 [128]. 这些结果表明红移 1 以内的 X 射线选活动星系核可能并不是由主并合触发的. 对红移 $z \approx 2$ 附近 X 射线选活动星系核宿主星系的研究发现其形态主要呈现盘主导形态, 通过与正常星系比较样本的形态进行比较研究, 也没有发现活动星系核宿主星系与正常星系的结构形态有显著区别 [25, 139–143].

文献 [30] 利用 HST WFC3 H 波段成像研究了 CANDELS-COSMOS 场中红移 2 附近的 X 射线选活动星系核宿主星系的结构与形态, 并将之与同红移处质量匹配的正常星系样本做比较. 研究结果发现, 样本中 2/3 红移 2 附近的 X 射线选活动星系核宿主

图 7 (网络版彩图) 高红移致密星系的演化序列 [127]

Figure 7 (Color online) The evolutionary sequence of high- z compact galaxies proposed by ref. [127].

星系呈现盘状形态, 剩下约 1/3 的宿主星系为椭圆主导形态. 研究同时发现, X 射线选活动星系核宿主星系的结构参数 (Sérsic 指数和有效半径) 以及形态参数 (如基尼系数、矩指数、不对称性指数和聚集度指数) 与比较样本的参数分布一致 (见图 8, 实线表示活动星系核宿主星系样本, 虚线表示比较样本). 对样本中宿主星系的目视形态分类发现, 仅有不到 15% 的宿主星系具有明显的主并合迹象, 该比例与正常星系比较样本中的主并合比例一致. 到目前为止, 大部分红移 0 到 3 之间的研究表明中等光度的 X 射线选活动星系核 ($10^{42} \text{ erg s}^{-1} < L_X < 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$) 相比于正常星系比较样本并不具有更高的主并合特征, 暗示该类活动星系核的触发机制很可能不是富气体盘间的主并合, 而更可能是某些内部过程, 如引力不稳定性与动力学摩擦等.

不同于中等光度 X 射线选活动星系核宿主星系的形态显示较低的并合比例, 高光度 ($L_{\text{bol}} > 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$) 红类星体宿主星系样本显示有较高的并合比例. 文献 [144] 研究了 11 个红移 0.4 到 1 之间高光度尘埃遮蔽类星体的形态, 发现绝大部分 ($\sim 85\%$) 宿主星系的形态呈现出明显的并合特征. 最近, 文献 [145]

利用 HST WFC3 近红外相机成像研究了 11 个红移 2 附近极亮红类星体的形态, 通过目视形态分类得出极亮红类星体样本的主并合率约为 80%, 并估算出样本的中值热光度约为 $L_{\text{bol}} = 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$. 文献 [146] 同样利用 HST WFC3 近红外相机成像研究了 18 个红移 3 附近尘埃遮蔽类星体宿主星系的形态. 研究尘埃遮蔽类星体宿主星系形态的优势在于中心吸积盘的紫外光学辐射被尘埃遮蔽吸收并在红外再辐射, 在静止光学波段中, 观测到的形态主要呈现为宿主星系的形态, 而不受中心辐射的影响. 研究结果同样发现了该类高光度类星体 ($L_{\text{bol}} \approx 10^{47.4} \text{ erg s}^{-1}$) 具有较高的并合比例 ($\sim 62\%$). 这些高光度类星体的研究表明主并合可能在高光度活动星系核的触发过程中扮演了主要角色. 中低光度活动星系核宿主星系具有较低并合比例, 而高光度活动星系宿主星系的并合比例较高, 基于这些累积的观测证据, 文献 [147] 提出了一个简单的并合比率依赖活动星系核热光度的经验模型: 并合比例 $f_m = \frac{\log(L_{\text{bol}}) - 43.2}{4.5}$ 或者 $f_m = \frac{L_{\text{bol}}}{(3 \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1})^{0.4}}$. 综合最近文献中研究活动星系核并合比例与热光度关系的研究工作 [26, 148–151], 文献 [146] 中显示了活动星系核并合比例与热光度关系 (见图 9). 图 9 中观测到的并合比例随活动星系核热光度增加而增加的趋势, 可以用活动星系核光变模型解释 [152]. 图 9 中红色和蓝色实线分别为模型预言的红移 2 和 0.75 处的并合比例与活动星系核热光度关系.

图 8 红移 1–3 X 射线选活动星系核宿主星系 (实线) 以及比较样本 (虚线) 的形态参数分布 [30]

Figure 8 Distributions of four non-parametric morphological parameters of X-ray AGN host galaxies at $1 < z < 3$ (solid line) and compare sample (dashed line) [30].

6 总结与展望

本文对近年来利用哈勃空间望远镜高空间分辨率的近红外成像开展的高红移星系结构形态研究进行了系统的介绍. 首先描述了高红移星系结构与形态常用到的一些参数与方法, 包括对星系面亮度轮廓的模型拟合 (多为 Sérsic 模型)、多个星系形态参数 (基尼系数、矩指数、不对称性指数) 以及对星系形态的目视形态分类方法. 随后, 分别介绍高红移不同类型星系结构形态的观测研究工作, 包括宁静星系、恒星形成星系以及活动星系核宿主星系. 对红移 1–3 宁静星系的研究发现其结构较近邻等质量宁静星系

图 9 (网络版彩图) 合并比例与活动星系核热光度的关系^[146]. 红色和蓝色实线分别为文献[152]中模型预言的红移 2 和 0.75 处的合并比例与活动星系核热光度关系

Figure 9 (Color online) Merger fraction as a function of AGN bolometric luminosity [146]. Red and blue lines represent the predicted merger fraction and AGN bolometric relation at $z \approx 2$ and $z \approx 0.75$, respectively [152].

更致密, 且有很显著的随红移演化趋势. 对致密宁静星系的结构演化, 有几种主要解释机制, 包括干子并合、类星体和超新星反馈以及前身星系选择效应等. 最近的观测证据表明高红移致密宁静星系可能遵循从内而外的演化图像, 干子并合可能在其演化过程中扮演了很重要的角色. 在红移 $z > 1$, 正常恒星形成星系的结构演化相对于宁静星系的结构演化趋势较为平缓, 符合等级成团模型的期待. 而和高红移正常恒星形成星系较为规则的形态不同, 高红移星暴星系, 包括极亮红外星系、尘埃遮蔽星系和亚毫米星系等, 多数显示了并合的形态特征, 暗示主并合可能是触发高红移星暴星系中剧烈星爆活动的主要机制.

对高红移活动星系核宿主星系结构形态的研究给出了不同的结果: 中低光度 X 射线选活动星系核

宿主星系与比较样本中的正常星系相比并不具有更显著的并合比例; 而高光度类星体宿主星系却具有很高的并合比例. 该结果表明主并合可能只在高光度活动星系核的核活动触发过程中扮演主要角色. 累积的观测证据表明, 高红移致密宁静星系、致密恒星形成星系、星暴星系以及类星体之间可能存在相互演化关系. 一个流行的大质量星系演化模型提出, 富气体盘星系间的主并合同时触发了星暴和活动星系核活动, 剧烈的耗散过程产生致密星暴 (呈现为致密恒星形成星系或星暴星系), 最终经历类星体阶段, 类星体反馈作用停止了中心黑洞吸积以及星暴活动, 星系演化成为致密宁静星系, 随后通过干子并合以及其他机制, 演化至近邻椭圆星系有效半径 - 恒星质量关系上.

近年来对高红移星系结构形态得益于 HST 新一代的 WFC3 相机. 不过, 受限于 WFC3 近红外相机相对较小的视场, 现有的宽场巡天采取的巡天策略可以观测一个面积较小的深场, 如哈勃极深场和哈勃前沿场, 或者观测一个面积稍大但深度较浅的天区, 如 CANDELS 场. 结果是高红移星系的样本大小受有限巡天面积的严重制约. 文献[153]采用一种新的 HST WFC3 宽场近红外成像方法, 正在对 COSMOS 场开展 WFC3 H 波段巡天 (称为 COSMOS-DASH 计划), 巡天将与 2017 年底结束, 最终的巡天面积将达到 0.6 平方度, 是现有 CANDELS 场巡天面积的 3 倍. 丰富的数据将有助于进一步研究各类高红移星系的结构形态, 及其与环境、恒星形成率等物理因素的关系. 未来 5–10 年内, 如 WFIRST (<http://wfirst.gsfc.nasa.gov/>) 这样的下一代近红外宽场巡天望远镜的发射升空, 将为研究高红移星系的结构形态提供新的机遇.

参考文献

- 1 Hubble E P. Extragalactic nebulae. *Astrophys J*, 1926, 64: 321–369
- 2 Hubble E P. *Realm of the Nebulae*. New Haven: Yale University Press, 1936
- 3 Kormendy J, Fisher D B, Cornell M E, et al. Structure and formation of elliptical and spheroidal galaxies. *Astrophys J Suppl S*, 2009, 182: 216–309
- 4 Buta R J. *Planets, Stars and Stellar Systems*. Dordrecht: Springer, 2013
- 5 Daddi E, Renzini A, Pirzkal N, et al. Passively evolving early-type galaxies at $1.4 < z < 2.5$ in the Hubble ultra deep field. *Astrophys J*, 2005, 626: 680–697
- 6 Trujillo I, Feulner G, Goranova Y, et al. Extremely compact massive galaxies at $z \sim 1.4$. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 373: 36–40

- 7 Toft S, Van Dokkum P, Franx M, et al. Hubble space telescope and spitzer imaging of red and blue galaxies at $z \sim 2.5$: A correlation between size and star formation activity from compact quiescent galaxies to extended star-forming galaxies. *Astrophys J*, 2007, 671: 285–302
- 8 Van Dokkum P, Franx M, Kriek M, et al. Confirmation of the remarkable compactness of massive quiescent galaxies at $z \sim 2.3$: Early-type galaxies did not form in a simple monolithic collapse. *Astrophys J Lett*, 2008, 677: 5–8
- 9 Zirm A W, Toft S, Tanaka M. Internal structure of protocluster galaxies: accelerated structural evolution in overdense environments? *Astrophys J*, 2012, 744: 181–189
- 10 Fan L, Chen Y, Er X, et al. Large size scatter of passively evolving lensed galaxies at $z \sim 2$ in clash. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 431: 15–19
- 11 Fan L, Fang G, Chen Y, et al. The structure of massive quiescent galaxies at $z \sim 3$ in the CANDELS-COSMOS field. *Astrophys J Lett*, 2013, 771: 40–44
- 12 Van Der Wel A, Franx M, Van Dokkum P G, et al. 3D-HST+CANDELS: The evolution of the galaxy size-mass distribution since $z = 3$. *Astrophys J*, 2014, 788: 28–46
- 13 Reynolds J H. The light curve of the Andromeda nebula (NGC 224). *Mon Not R Astron Soc*, 1913, 74: 132–136
- 14 de Vaucouleurs G. Recherches sur les Nebuleuses Extragalactiques. *Ann d'Astrophys*, 1948, 11: 247–287
- 15 Hodge P W. Dwarf galaxies. *Annu Rev Astron Astr*, 1971, 9: 35–66
- 16 Sérsic J L. Atlas De Galaxias Australes. Cordoba: Observatorio Astronomico, 1968
- 17 Ciotti L, Bertin G. Analytical properties of the $R^{1/m}$ law. *Astron Astrophys*, 1999, 352: 447–451
- 18 Blanton M R, Hogg D W, Bahcall N A, et al. The broadband optical properties of galaxies with redshifts $0.02 < z < 0.22$. *Astrophys J*, 2003, 594: 186–207
- 19 Van Der Wel A, Bell E F, Häussler B, et al. Structural parameters of galaxies in CANDELS. *Astrophys J Suppl S*, 2012, 203: 24–35
- 20 Conselice C J. The relationship between stellar light distributions of galaxies and their formation histories. *Astrophys J Suppl S*, 2003, 147: 1–28
- 21 Abraham R G, Van Den Bergh S, Nair P. A new approach to galaxy morphology. i. analysis of the sloan digital sky survey early data release. *Astrophys J*, 2003, 588: 218–229
- 22 Lotz J M, Primack J, Madau P. A new nonparametric approach to galaxy morphological classification. *Astron J*, 2004, 128: 163–182
- 23 Mortlock A, Conselice C J, Hartley W G, et al. Deconstructing the galaxy stellar mass function with UKIDSS and CANDELS: The impact of colour, structure and environment. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 447: 2–24
- 24 Lotz J M, Davis M, Faber S M, et al. The evolution of galaxy mergers and morphology at $z < 1.2$ in the extended groth strip. *Astrophys J*, 2008, 672: 177–197
- 25 Kocevski D D, Faber S M, Mozena M, et al. CANDELS: Constraining the AGN-merger connection with host morphologies at $z \sim 2$. *Astrophys J*, 2012, 744: 148–156
- 26 Kocevski D D, Brightman M, Nandra K, et al. Are compton-thick AGNs the missing link between mergers and black hole growth? *Astrophys J*, 2015, 814: 104–115
- 27 Kartaltepe J S, Mozena M, Kocevski D, et al. CANDELS visual classifications: Scheme, data release, and first results. *Astrophys J Suppl S*, 2015, 221: 11–27
- 28 Cisternas M, Jahnke K, Inskip K J, et al. The bulk of the black hole growth since $z \sim 1$ occurs in a secular universe: No major merger-AGN connection. *Astrophys J*, 2011, 726: 57–70
- 29 Mortlock A, Conselice C J, Hartley W G, et al. The redshift and mass dependence on the formation of the Hubble sequence at $z > 1$ from CANDELS/UDS. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 433: 1185–1201
- 30 Fan L, Fang G, Chen Y, et al. Structure and morphology of X-ray-selected active galactic nucleus hosts at $1 < z < 3$ in the CANDELS-COSMOS field. *Astrophys J Lett*, 2014, 784: 9–13
- 31 Fan L, Han Y, Fang G, et al. The most luminous heavily obscured quasars have a high merger fraction: Morphological study of WISE-selected hot dust-obscured galaxies. *Astrophys J Lett*, 2016, 822: 32–37
- 32 Shen S, Mo H J, White S D M, et al. The size distribution of galaxies in the Sloan Digital sky survey. *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 343: 978–994
- 33 Hyde J B, Bernardi M. Curvature in the scaling relations of early-type galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 394: 1978–1990
- 34 Buitrago F, Trujillo I, Conselice C J, et al. Size evolution of the most massive galaxies at $1.7 < z < 3$ from GOODS NICMOS survey imaging. *Astrophys J Lett*, 2008, 687: 61–64
- 35 Damjanov I, Abraham R G, Glazebrook K, et al. Red nuggets at high redshift: Structural evolution of quiescent galaxies over 10 Gyr of cosmic history. *Astrophys J Lett*, 2011, 739: 44–49
- 36 Cimatti A, Nipoti C, Cassata P. Fast evolving size of early-type galaxies at $z > 2$ and the role of dissipationless (dry) merging. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 422: 62–66

- 37 Trujillo I, Conselice C J, Bundy K, et al. Strong size evolution of the most massive galaxies since $z \sim 2$. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 382: 109–120
- 38 Van Der Wel A, Holden B P, Zirm A W, et al. Recent structural evolution of early-type galaxies: Size growth from $z = 1$ to $z = 0$. *Astrophys J*, 2008, 688: 48–58
- 39 Newman A B, Ellis R S, Treu T, et al. Keck spectroscopy of $z > 1$ field spheroidals: Dynamical constraints on the growth rate of red “Nuggets”. *Astrophys J Lett*, 2010, 717: 103–107
- 40 Newman A B, Ellis R S, Bundy K, et al. Can minor merging account for the size growth of quiescent galaxies? New results from the CANDELS survey. *Astrophys J*, 2012, 746: 162–180
- 41 Szomoru D, Franx M, Van Dokkum P G. Sizes and surface brightness profiles of quiescent galaxies at $z \sim 2$. *Astrophys J*, 2012, 749: 121–131
- 42 Toft S, Gallazzi A, Zirm A, et al. Deep absorption line studies of quiescent galaxies at $z \sim 2$: The dynamical-mass-size relation and first constraints on the fundamental plane. *Astrophys J*, 2012, 754: 3–20
- 43 Bezanson R, Van Dokkum P G, Van De Sande J, et al. Tight correlations between massive galaxy structural properties and dynamics: The mass fundamental plane was in place by $z \sim 2$. *Astrophys J Lett*, 2013, 779: 21–27
- 44 Brammer G B, Van Dokkum P G, Franx M, et al. 3D-HST: A wide-field grism spectroscopic survey with the hubble space telescope. *Astrophys J Suppl S*, 2012, 200: 13–31
- 45 Grogin N A, Kocevski D D, Faber S M, et al. CANDELS: The cosmic assembly near-infrared deep extragalactic legacy survey. *Astrophys J Suppl S*, 2011, 197: 35–73
- 46 Koekemoer A M, Faber S M, Ferguson H C, et al. CANDELS: The cosmic assembly near-infrared deep extragalactic legacy survey—The Hubble space telescope observations, imaging data products, and mosaics. *Astrophys J Suppl S*, 2011, 197: 36–71
- 47 Wuyts S, Labbé I, Franx M, et al. What do we learn from IRAC observations of galaxies at $2 < z < 3.5$? *Astrophys J*, 2007, 655: 51–65
- 48 Williams R J, Quadri R F, Franx M, et al. Detection of quiescent galaxies in a bicolor sequence from $z = 0 - 2$. *Astrophys J*, 2009, 691: 1879–1895
- 49 Dekel A, Birnboim Y, Engel G, et al. Cold streams in early massive hot haloes as the main mode of galaxy formation. *Nature*, 2009, 457: 451–454
- 50 Dekel A, Burkert A. Wet disc contraction to galactic blue nuggets and quenching to red nuggets. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 438: 1870–1879
- 51 Wellons S, Torrey P, Ma C P, et al. The formation of massive, compact galaxies at $z = 2$ in the illustris simulation. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 449: 361–372
- 52 Covington M, Dekel A, Cox T J, et al. Predicting the properties of the remnants of dissipative galaxy mergers. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 384: 94–106
- 53 Hopkins P F, Cox T J, Hernquist L. Dissipation and the fundamental plane: Observational tests. *Astrophys J*, 2008, 689: 17–48
- 54 Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J, et al. Dissipation and extra light in galactic nuclei. IV. Evolution in the scaling relations of spheroids. *Astrophys J*, 2009, 691: 1424–1458
- 55 Fan L, Lapi A, Bressan A, et al. Cosmic evolution of size and velocity dispersion for early-type galaxies. *Astrophys J*, 2010, 718: 1460–1475
- 56 Prugniel P, Simien F. The fundamental plane of early-type galaxies: Non-homology of the spatial structure. *Astron Astrophys*, 1997, 321: 111–122
- 57 Fan L, Lapi A, De Zotti G, et al. The dramatic size evolution of elliptical galaxies and the quasar feedback. *Astrophys J Lett*, 2008, 689: 101–104
- 58 Damjanov I, McCarthy P J, Abraham R G, et al. Red Nuggets at $z \sim 1.5$: Compact passive galaxies and the formation of the kormendy relation. *Astrophys J*, 2009, 695: 101–115
- 59 Boylan-Kolchin M, Ma C P, Quataert E. Dissipationless mergers of elliptical galaxies and the evolution of the fundamental plane. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 362: 184–196
- 60 Naab T, Johansson P H, Ostriker J P. Minor mergers and the size evolution of elliptical galaxies. *Astrophys J Lett*, 2009, 699: 178–182
- 61 Hopkins P F, Bundy K, Hernquist L, et al. Discriminating between the physical processes that drive spheroid size evolution. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 401: 1099–1117
- 62 Oogi T, Habe A. Dry minor mergers and size evolution of high- z compact massive early-type galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 428: 641–657
- 63 Hilz M, Naab T, Ostriker J P. How do minor mergers promote inside-out growth of ellipticals, transforming the size, density profile and dark matter fraction? *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 429: 2924–2933
- 64 Guo Y, Giallisco M, Cassata P, et al. Rest-frame UV-optically selected galaxies at $2.3 < z < 3.5$: Searching for dusty star-forming and passively evolving galaxies. *Astrophys J*, 2012, 749: 149–168
- 65 Szomoru D, Franx M, Van Dokkum P G, et al. The stellar mass structure of massive galaxies from $z = 0$ to $z = 2.5$: Surface density profiles and

- half-mass radii. *Astrophys J*, 2013, 763: 73–83
- 66 Huang S, Ho L C, Peng C Y, et al. Fossil evidence for the two-phase formation of elliptical galaxies. *Astrophys J Lett*, 2013, 768: 28–32
- 67 Hopkins P F, Bundy K, Murray N, et al. Compact high-redshift galaxies are the cores of the most massive present-day spheroids. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 398: 898–910
- 68 Loeb A, Peebles P J E. Cosmological origin of the stellar velocity dispersions in massive early-type galaxies. *Astrophys J*, 2003, 589: 29–34
- 69 Van Dokkum P G, Whitaker K E, Brammer G, et al. The growth of massive galaxies since $z = 2$. *Astrophys J*, 2010, 709: 1018–1041
- 70 Patel S G, Van Dokkum P G, Franx M, et al. HST/WFC3 confirmation of the inside-out growth of massive galaxies at $0 < z < 2$ and identification of their star-forming progenitors at $z \sim 3$. *Astrophys J*, 2013, 766: 15–27
- 71 Belli S, Newman A B, Ellis R S, et al. MOSFIRE absorption line spectroscopy of $z > 2$ quiescent galaxies: Probing a period of rapid size growth. *Astrophys J Lett*, 2014, 788: 29–34
- 72 Nipoti C, Treu T, Auger M W, et al. Can dry merging explain the size evolution of early-type galaxies? *Astrophys J Lett*, 2009, 706: 86–90
- 73 Nipoti C, Treu T, Leauthaud A, et al. Size and velocity-dispersion evolution of early-type galaxies in a Λ cold dark matter universe. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 422: 1714–1731
- 74 Shankar F, Marulli F, Bernardi M, et al. Size evolution of spheroids in a hierarchical universe. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 428: 109–128
- 75 Sonnenfeld A, Nipoti C, Treu T. Purely dry mergers do not explain the observed evolution of massive early-type galaxies since $z \sim 1$. *Astrophys J*, 2014, 786: 89–96
- 76 Mo H J, Mao S, White S D M. The formation of galactic discs. *Mon Not R Astron Soc*, 1998, 295: 319–336
- 77 Carollo C M, Bschorr T J, Renzini A, et al. Newly quenched galaxies as the cause for the apparent evolution in average size of the population. *Astrophys J*, 2013, 773: 112–132
- 78 Keating S K, Abraham R G, Schiavon R, et al. Evidence for (and against) progenitor bias in the size growth of compact red galaxies. *Astrophys J*, 2015, 798: 26–50
- 79 Ferguson H C, Dickinson M, Giavalisco M, et al. The size evolution of high-redshift galaxies. *Astrophys J Lett*, 2004, 600: 107–110
- 80 Oesch P A, Bouwens R J, Carollo C M, et al. Structure and morphologies of $z \sim 7-8$ galaxies from ultra-deep WFC3/IR imaging of the Hubble ultra-deep field. *Astrophys J Lett*, 2010, 709: 21–25
- 81 Mosleh M, Williams R J, Franx M, et al. The evolution of mass-size relation for Lyman break galaxies from $z = 1$ to $z = 7$. *Astrophys J Lett*, 2012, 756: 12–17
- 82 Ono Y, Ouchi M, Curtis-Lake E, et al. Evolution of the sizes of galaxies over $7 < z < 12$ revealed by the 2012 Hubble ultra deep field campaign. *Astrophys J*, 2013, 777: 155–167
- 83 Kawamata R, Ishigaki M, Shimasaku K, et al. The sizes of $z \sim 6-8$ lensed galaxies from the Hubble frontier fields Abell 2744 data. *Astrophys J*, 2015, 804: 103–115
- 84 Holwerda B W, Bouwens R, Oesch P, et al. The sizes of candidate $z \sim 9-10$ galaxies: Confirmation of the bright CANDELS sample and relation with luminosity and mass. *Astrophys J*, 2015, 808: 6–15
- 85 Shibuya T, Ouchi M, Harikane Y. Morphologies of ~ 190000 galaxies at $z = 0-10$ revealed with HST legacy data. I. Size evolution. *Astrophys J Suppl S*, 2015, 219: 15–34
- 86 Franx M, Van Dokkum P G, Förster-Schreiber N M, et al. Structure and star formation in galaxies out to $z = 3$: Evidence for surface density dependent evolution and upsizing. *Astrophys J*, 2008, 688: 770–788
- 87 Kriek M, Van Dokkum P G, Franx M, et al. The Hubble sequence beyond $z = 2$ for massive galaxies: Contrasting large star-forming and compact quiescent galaxies. *Astrophys J Lett*, 2009, 705: 71–75
- 88 Sanders D B, Mirabel I F. Luminous infrared galaxies. *Annu Rev Astron Astr*, 1996, 34: 749–792
- 89 Mihos J C, Bothun G D. $H\alpha$ velocity mapping of ultraluminous infrared galaxies. *Astrophys J*, 1998, 500: 619–631
- 90 Colina L, Arribas S, Monreal-Ibero A. Kinematics of low- z ultraluminous infrared galaxies and implications for dynamical mass derivations in high- z star-forming galaxies. *Astrophys J*, 2005, 621: 725–737
- 91 Sanders D B, Soifer B T, Elias J H, et al. Warm ultraluminous galaxies in the IRAS survey—The transition from galaxy to quasar? *Astrophys J Lett*, 1988, 328: 35–39
- 92 Le Floc'h E, Papovich C, Dole H, et al. Infrared luminosity functions from the Chandra deep field-south: The Spitzer view on the history of dusty star formation at $0 < z < 1$. *Astrophys J*, 2005, 632: 169–190
- 93 Caputi K I, Lagache G, Yan L, et al. The infrared luminosity function of galaxies at redshifts $z = 1$ and $z \sim 2$ in the GOODS fields. *Astrophys J*, 2007, 660: 97–116
- 94 Magnelli B, Elbaz D, Chary R R, et al. Evolution of the dusty infrared luminosity function from $z = 0$ to $z = 2.3$ using observations from Spitzer. *Astron Astrophys*, 2011, 528: A35

- 95 Murphy E J, Chary R R, Dickinson M, et al. An accounting of the dust-obscured star formation and accretion histories over the last 11 billion years. *Astrophys J*, 2011, 732: 126–142
- 96 Tacconi L J, Genzel R, Smail I, et al. Submillimeter galaxies at $z \sim 2$: Evidence for major mergers and constraints on lifetimes, IMF, and CO-H₂ conversion factor. *Astrophys J*, 2008, 680: 246–262
- 97 Tacconi L J, Genzel R, Neri R, et al. High molecular gas fractions in normal massive star-forming galaxies in the young universe. *Nature*, 2010, 463: 781–784
- 98 Dasyra K M, Yan L, Helou G, et al. HST NICMOS imaging of $z \sim 2$, 24 μ m-selected ultraluminous infrared galaxies. *Astrophys J*, 2008, 680: 232–245
- 99 Zamojski M, Yan L, Dasyra K, et al. HST/NICMOS imaging of bright high-redshift 24 μ m selected galaxies: Merging properties. *Astrophys J*, 2011, 730: 125–153
- 100 Dey A, Soifer B T, Desai V, et al. A significant population of very luminous dust-obscured galaxies at redshift $z \sim 2$. *Astrophys J*, 2008, 677: 943–956
- 101 Bussmann R S, Dey A, Lotz J, et al. Hubble space telescope morphologies of $z \sim 2$ dust-obscured galaxies. II. Bump sources. *Astrophys J*, 2011, 733: 21–38
- 102 Kartaltepe J S, Dickinson M, Alexander D M, et al. GOODS-Herschel and CANDELS: The morphologies of ultraluminous infrared galaxies at $z \sim 2$. *Astrophys J*, 2012, 757: 23–38
- 103 Huang J S, Faber S M, Daddi E, et al. Infrared spectrograph spectroscopy and multi-wavelength study of luminous star-forming galaxies at $z \simeq 1.9$. *Astrophys J*, 2009, 700: 183–198
- 104 Fang G W, Huang J S, Willner S P, et al. Selection and mid-infrared spectroscopy of ultraluminous star-forming galaxies at $z \sim 2$. *Astrophys J*, 2014, 781: 63–75
- 105 Fang G W, Ma Z Y, Chen Y, et al. Morphology and structure of ultraluminous infrared galaxies at $z = 2$ in the EGS field. *Chin Astron Astrophys*, 2015, 39: 156–165
- 106 Davis M, Guhathakurta P, Konidaris N P, et al. The all-wavelength extended groth strip international survey (AEGIS) data sets. *Astrophys J*, 2007, 660: 1–6
- 107 Smail I, Ivison R J, Blain A W. A deep sub-millimeter survey of lensing clusters: A new window on galaxy formation and evolution. *Astrophys J Lett*, 1997, 490: 5–8
- 108 Barger A J, Cowie L L, Sanders D B, et al. Submillimetre-wavelength detection of dusty star-forming galaxies at high redshift. *Nature*, 1998, 394: 248–251
- 109 Hughes D H, Serjeant S, Dunlop J, et al. High-redshift star formation in the Hubble deep field revealed by a submillimetre-wavelength survey. *Nature*, 1998, 394: 241–247
- 110 Chapman S C, Blain A W, Smail I, et al. A redshift survey of the submillimeter galaxy population. *Astrophys J*, 2005, 622: 772–796
- 111 Ivison R J, Papadopoulos P P, Smail I, et al. Tracing the molecular gas in distant submillimetre galaxies via CO(1-0) imaging with the expanded very large array. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 412: 1913–1925
- 112 Baugh C M, Lacey C G, Frenk C S, et al. Can the faint submillimetre galaxies be explained in the Λ cold dark matter model? *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 356: 1191–1200
- 113 Cowley W I, Lacey C G, Baugh C M, et al. Simulated observations of sub-millimetre galaxies: The impact of single-dish resolution and field variance. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 446: 1784–1798
- 114 Narayanan D, Turk M, Feldmann R, et al. The formation of submillimetre-bright galaxies from gas infall over a billion years. *Nature*, 2015, 525: 496–499
- 115 Swinbank A M, Smail I, Chapman S C, et al. A Hubble space telescope NICMOS and ACS morphological study of $z \sim 2$ submillimetre galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 405: 234–244
- 116 Targett T A, Dunlop J S, Cirasuolo M, et al. The properties of (sub-)millimetre-selected galaxies as revealed by CANDELS HST WFC3/IR imaging in GOODS-south. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 432: 2012–2042
- 117 Wiklind T, Conselice C J, Dahlen T, et al. Properties of submillimeter galaxies in the CANDELS GOODS-south field. *Astrophys J*, 2014, 785: 111–129
- 118 Chen C C, Smail I, Swinbank A M, et al. An ALMA survey of submillimeter galaxies in the extended chandra deep field south: Near-infrared morphologies and stellar sizes. *Astrophys J*, 2015, 799: 194–221
- 119 Wuyts S, Förster-Schreiber N M, Van Der Wel A, et al. Galaxy structure and mode of star formation in the sfr-mass plane from $z \sim 2.5$ to $z \sim 0.1$. *Astrophys J*, 2011, 742: 96–115
- 120 Whitaker K E, Kriek M, Van Dokkum P G, et al. A large population of massive compact post-starburst galaxies at $z > 1$: Implications for the

- size evolution and quenching mechanism of quiescent galaxies. *Astrophys J*, 2012, 745: 179–186
- 121 Kaviraj S, Cohen S, Ellis R S, et al. Newborn spheroids at high redshift: When and how did the dominant, old stars in today's massive galaxies form? *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 428: 925–934
- 122 Stefanon M, Marchesini D, Rudnick G H, et al. What are the progenitors of compact, massive, quiescent galaxies at $z = 2.3$? The population of massive galaxies at $z > 3$ from NMBS and CANDELS. *Astrophys J*, 2013, 768: 92–105
- 123 Williams C C, Giavalisco M, Cassata P, et al. The progenitors of the compact early-type galaxies at high redshift. *Astrophys J*, 2014, 780: 1–22
- 124 Barro G, Faber S M, Pérez-González P G, et al. CANDELS: The progenitors of compact quiescent galaxies at $z \sim 2$. *Astrophys J*, 2013, 765: 104–114
- 125 Barro G, Faber S M, Pérez-González P G, et al. CANDELS+3D-HST: Compact SFGs at $z \sim 2 - 3$, the progenitors of the first quiescent galaxies. *Astrophys J*, 2014, 791: 52–74
- 126 Fang G, Ma Z, Kong X, et al. Physical properties of compact star-forming galaxies at $z \sim 2 - 3$. *Astrophys J*, 2015, 807: 139–150
- 127 Toft S, Smolčić V, Magnelli B, et al. Submillimeter galaxies as progenitors of compact quiescent galaxies. *Astrophys J*, 2014, 782: 68–79
- 128 Fan L, Lin X, Kong X. 3D-HST/CANDELS: Clustering of massive galaxies at $z > 1$. In: *Proceedings of IAU General Assembly*. Washington: American Astronomical Society, 2015
- 129 Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J, et al. A unified, merger-driven model of the origin of starbursts, quasars, the cosmic X-ray background, supermassive black holes, and galaxy spheroids. *Astrophys J Suppl S*, 2006, 163: 1–49
- 130 Kormendy J, Kennicutt R C. Secular evolution and the formation of pseudobulges in disk galaxies. *Annu Rev Astron Astr*, 2004, 42: 603–683
- 131 Jogle S. The fueling and evolution of AGN: Internal and external triggers. In: *Proceedings of Physics of Active Galactic Nuclei at All Scales*. Berlin: Springer, 2006
- 132 Grogin N A, Conselice C J, Chatzichristou E, et al. AGN host galaxies at $z \sim 0.4 - 1.3$: Bulge-dominated and lacking merger-AGN connection. *Astrophys J Lett*, 2005, 627: 97–100
- 133 Pierce C M, Lotz J M, Laird E S, et al. AEGIS: Host galaxy morphologies of X-ray-selected and infrared-selected active galactic nuclei at $0.2 \leq z < 1.2$. *Astrophys J Lett*, 2007, 660: 19–22
- 134 Gabor J M, Impey C D, Jahnke K, et al. Active galactic nucleus host galaxy morphologies in COSMOS. *Astrophys J*, 2009, 691: 705–722
- 135 Pierce C M, Lotz J M, Salim S, et al. Host galaxy colour gradients and accretion disc obscuration in AEGIS $z \sim 1$ X-ray-selected active galactic nuclei. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 408: 139–156
- 136 Böhm A, Wisotzki L, Bell E F, et al. AGN host galaxies at redshift $z \sim 0.7$: Peculiar or not? *Astron Astrophys*, 2013, 549: A46
- 137 Peng C Y, Ho L C, Impey C D, et al. Detailed structural decomposition of galaxy images. *Astron J*, 2002, 124: 266–293
- 138 Peng C Y, Ho L C, Impey C D, et al. Detailed decomposition of galaxy images. II. Beyond axisymmetric models. *Astron J*, 2010, 139: 2097–2129
- 139 Schawinski K, Simmons B D, Urry C M, et al. Heavily obscured quasar host galaxies at $z \sim 2$ are discs, not major mergers. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 425: L61–L65
- 140 Schawinski K, Treister E, Urry C M, et al. HST WFC3/IR observations of active galactic nucleus host galaxies at $z \sim 2$: Supermassive black holes grow in disk galaxies. *Astrophys J Lett*, 2011, 727: 31–36
- 141 Simmons B D, Urry C M, Schawinski K, et al. Moderate-luminosity growing black holes from $1.25 < z < 2.7$: Varied accretion in disk-dominated hosts. *Astrophys J*, 2012, 761: 75–84
- 142 Villforth C, Hamann F, Rosario D J, et al. Morphologies of $z \sim 0.7$ AGN host galaxies in CANDELS: No trend of merger incidence with AGN luminosity. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 439: 3342–3356
- 143 Rosario D J, McIntosh D H, Van Der Wel A, et al. The host galaxies of X-ray selected active galactic nuclei to $z = 2.5$: Structure, star formation, and their relationships from CANDELS and Herschel/PACS. *Astron Astrophys*, 2015, 573: A85
- 144 Urrutia T, Lacy M, Becker R H. Evidence for quasar activity triggered by galaxy mergers in HST observations of dust-reddened quasars. *Astrophys J*, 2008, 674: 80–96
- 145 Glikman E, Simmons B, Mailly M, et al. Major mergers host the most-luminous red quasars at $z \sim 2$: A Hubble space telescope WFC3/IR study. *Astrophys J*, 2015, 806: 218–241
- 146 Fan L, Han Y, Fang G, et al. The most luminous heavily obscured quasars have a high merger fraction: Morphological study of WISE-selected hot dust-obscured galaxies. *Astrophys J Lett*, 2016, 822: 32–37
- 147 Treister E, Schawinski K, Urry C M, et al. Major galaxy mergers only trigger the most luminous active galactic nuclei. *Astrophys J Lett*, 2012, 758: 39–43
- 148 Lanzuisi G, Ranalli P, Georgantopoulos I, et al. Compton thick AGN in the XMM-COSMOS survey. *Astron Astrophys*, 2015, 573: A137
- 149 Hong J, Im M, Kim M, et al. Correlation between galaxy mergers and luminous active galactic nuclei. *Astron J*, 2015, 804: 34–57

- 150 Mechtley M, Jahnke K, Windhorst R A, et al. Do the most massive black holes at $z = 2$ grow via major mergers? arXiv: 1510.08461
- 151 Moro A, Alexander D M, Bauer F E, et al. Mid-infrared luminous quasars in the GOODS-Herschel fields: A large population of heavily obscured, compton-thick quasars at $z \approx 2$. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 456: 2105–2125
- 152 Hickox R C, Mullaney J R, Alexander D M, et al. Black hole variability and the star formation-active galactic nucleus connection: Do all star-forming galaxies host an active galactic nucleus? *Astrophys J*, 2014, 782: 9–19
- 153 Momcheva I G, Van Dokkum P G, Van Der Wel A, et al. A new method for wide-field near-ir imaging with the Hubble space telescope. arXiv: 1603.00465

Galaxy structure and morphology at high redshift

FAN LuLu^{1*} & FANG GuanWen²

¹ *Shandong Provincial Key Lab of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Institute of Space Science, Shandong University, Weihai 264209, China;*

² *Institute for Astronomy and History of Science and Technology, Dali University, Dali 671003, China*

This review gives an introduction to the recent structural and morphological studies of high- z galaxies based on Hubble Space Telescope Wide Field Camera 3 (HST WFC3) near-infrared imaging. Quiescent galaxies at $1 < z < 3$ have been found to be more compact than their local counterparts and show a significant structural evolution on redshift. The recent observations show the evidences suggesting that the evolution of high- z compact quiescent galaxies follows an ‘inside-out’ scenario and the dry minor merger may play a major role. At $z > 1$, the structural evolution of normal star forming galaxies matches the expectation of hierarchical clustering model. Most of high- z starburst galaxies, including ultraluminous infrared galaxies (ULIRGs), dust-obscured galaxies (DOGs) and submillimeter galaxies (SMGs), show significant merging morphological features, suggesting that major mergers are probably the main triggering mechanism of starburst activities. Morphological studies of high- z active galactic nucleus (AGNs) host galaxies reveal a mixed result. X-ray-selected AGNs with moderate luminosities do not show an enhanced merger fraction than normal galaxies. However, luminous quasars seem to have a high merger fraction. Major mergers have been suggested to be responsible only for triggering luminous AGN activities. In final, based on available observational facts so far, an evolutionary sequence of high- z galaxies, involving starburst galaxies, compact star forming galaxies, quasars and compact quiescent galaxies, has been proposed.

galaxy morphology, galaxy structure, galaxy evolution, high redshift

PACS: 98.52.Cf, 98.62.Ai

doi: 10.1360/SSPMA2016-00315