

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.03.02

大质量星系的尺度演化研究进展

方官文¹, 林泽森^{2,3}, 孔 旭^{2,3}

(1. 大理大学 天文与科技史研究所, 大理 671003; 2. 中国科学技术大学 天文学系, 合肥 230026; 3. 中国科学院 星系与宇宙学重点实验室, 合肥 230026)

摘要: 星系 (恒星质量 $M_* > 10^{10} M_\odot$) 的尺度 (r_e) 与 M_* 之间有着明显的 $r_e \propto M_*^\alpha$ 关系。已有的研究揭示晚型星系 (LTGs) 和早型星系 (ETGs) 的 α 值分别对应 0.22 ± 0.03 和 0.75 ± 0.05 。另外, 星系的尺度 r_e 与红移 z 之间存在演化关系: $r_e \propto (1+z)^\beta$ 。对于 $z < 3$ 的 ETGs 来说, 它们在静止光学波段的尺度随时间生长的指数 $\beta = -1.5 \sim -1.2$, 其在 LTGs 中对应 $\beta = -0.8 \sim -0.6$ 。介绍了星系形成理论模型, 星系尺度的测量, 星系恒星质量与星系尺度之间的关系, 不同类型星系的尺度演化, 以及阐述了该领域未来的研究方向。

关键词: 星系观测; 星系形态; 星系结构; 星系形成; 星系演化

中图分类号: P157.1 **文献标识码:** A

1 引 言

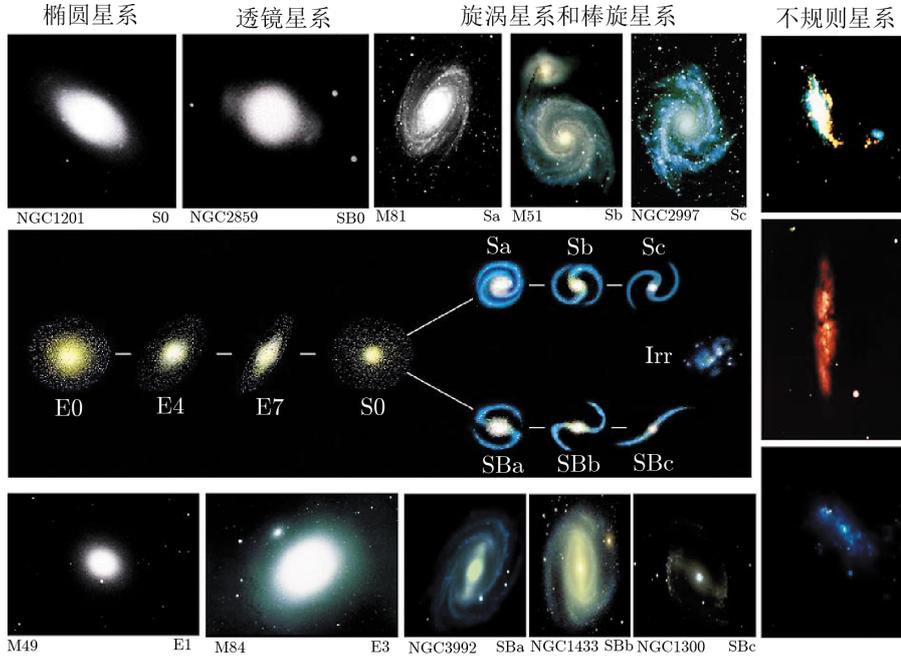
大质量 (恒星质量 $M_* > 10^{10} M_\odot$) 星系的观测和研究是星系天文学的一个热点, 它对于人们了解星系的形成和演化, 约束不同的星系形成模型等都至关重要。而关于星系的形成和演化现在还存在许多不清楚的地方, 比如: 星系物理特征与它们所在的环境有什么关系? 星系的尺度、形态、星族质量分布等物理特征是如何随红移演化的? 这些问题都需要我们深入研究和分析。检验星系形成和演化理论模型一个最直接的有效方法是研究大质量星系的尺度随红移演化关系。通过研究星系的结构随红移的演化, 人们可以了解宇宙早期的原初物质是如何通过引力作用逐渐坍缩形成原初星系, 以及高红移星系是怎样演变为现在能够观测到的各类星系, 从而了解近邻大质量星系以及宇宙的形成和演化。星系结构是反映星系物理性质的一个重要特征量, 它与星系的其他物理性质有一定的关系, 如晚型星系恒星质量面密度低、年轻、颜色蓝、尘埃消光强、多处于低密度区域、恒星形成率高, 而早型星系有着相

收稿日期: 2016-02-23; 修回日期: 2016-04-05

资助项目: 国家自然科学基金 (11303002, 11225315, 11320101002); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB09000000); 云南省应用基础研究计划项目 (2014FB155)

通讯作者: 方官文, wen@mail.ustc.edu.cn

反的特性^[1]。在近邻宇宙中,大质量星系的形态结构特征表现为哈勃星系形态序列分布。如图 1 所示,晚型旋涡星系具有富气体的指数盘结构,而早型星系表现出核球主导的椭圆形态且没有或很弱的恒星形成。在颜色星等图上,这两类星系分布在两个不同的区域:RS (Red Sequence) 和 BC (Blue Cloud)^[2, 3]。



注:星系从形态上可分为椭圆星系(E)、透镜星系(S0)、旋涡星系(S)和不规则星系(Irr);旋涡星系又可分为棒旋星系(SB)和正常旋涡星系(S);SB和S按其核球的相对大小和旋臂的松紧程度等可分为三个子类a、b、c。

图 1 哈勃音叉图和星系图像实例^[2, 3]

近邻宇宙中的哈勃星系形态序列是否也存在于中高红移处?这是天文学家非常关注的问题。随着多波段深场巡天的开展,特别是哈勃空间望远镜(HST)观测的高分辨率光学和近红外图像,为解决该类问题提供了重要原始数据。基于HST ACS (Advanced Camera for Surveys)、WFPC (Wide Field and Planetary Camera)、NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer)和WFC3 (Wide Field Camera 3)观测图像,天文工作者通过研究中高红移星系的静止紫外(UV)和光学波段形态,发现相比较于近邻大质量星系形态分类的哈勃序列,红移 $z \approx 1$ 和 $z \approx 2$ 处也有类似的形态结构分布^[4-8],而且中高红移($z \leq 4$)星系在静止坐标系的UVJ ($U - V$ 对 $V - J$)双色图上也呈现出不同的分布区域^[9, 10]。与此同时,研究者也发现,随着红移增大,星系的形态结构特征变得更加弥散和不规则^[11]。一个极其重要的结论是大质量星系的尺度与红移之间存在演化关系^[12-40]。也就是说,近邻大质量星系的物理尺度比中高红移同类型相似质量的星系要大。对于晚型星系(Late-Type Galaxies, LTGs)来说,近邻和高红移的星系尺度相差2到4倍,这种现象在早型星系(Early-Type Galaxies, ETGs)中表现得更加突出,大约是3到5倍。

本文第 2 章介绍了星系形成理论模型; 第 3 章描述了星系尺度的测量; 第 4 章阐述了大质量星系恒星质量 (M_*) 与星系尺度之间的关系; 第 5 章介绍了两类大质量星系的尺度演化: 早型星系 (ETGs) 和晚型星系 (LTGs); 第 6 章总结了本文的主要内容, 并对相关领域今后计划开展的工作进行了展望。除非有特殊说明, 本文所表述的星等和颜色都是 AB 星等。

2 星系形成理论模型

星系的形成与宇宙早期的密度扰动演化有密切关系。在宇宙大爆炸的过程中, 极早期就产生了原初物质密度涨落。由于引力不稳定性作用, 这些原初密度涨落不断加强, 从而使原来弥散的星系介质 (原始星云) 凝聚、坍缩而形成原星系, 再进一步演化为星系。White 和 Rees^[41] 简单描述了这样的过程, 开始时气体在暗物质晕中坍缩, 由于激波等机制而达到某个位力化状态, 然后由于各种冷却机制使得中心部分气体冷却很快, 从而继续坍缩形成星系盘, 外围气体继续内落使得星系增大。在这个物理过程中, 气体的冷却、恒星形成的具体机制和超新星爆发的反馈对星系形成非常重要。当前星系形成主要有两种模型: 纯光度演化模型和等级成团形成模型。

纯光度演化模型^[42]。该模型认为在 $z > 3$ 时, 大质量星系的大部分恒星已经形成, 恒星形成率是一个常量, 恒星形成时标约为 10^8 a, 并在随后的演化中是被动演化, 没有合并或者明显的尘埃消光特征。与观测比较, Kauffmann 和 Charlot^[43] 发现, 对于红移大于 1 的情况, 传统纯光度演化模型给出的星系计数大于观测值; 后来很多天文工作者对这种模型进行了改进, 加入了尘埃消光部分, 因为尘埃消光会遮蔽一些大质量星系。尽管纯光度演化模型在中高红移 ($z > 1.5$) 处预言的大质量星系数目和观测事实相差较大^[44], 但也有很多观测事实^[45-51] 与这个模型的理论结果是自洽的。例如: 相对于小质量星系来说, 大质量星系拥有比较年老的星族, 而且恒星金属丰度随红移增加而减小的幅度较小; 大质量星系的恒星质量函数随时间演化没有小质量星系剧烈; 随着红移的减小, 恒星形成星系的质量是减小的; 相同质量范围内星系的平均恒星形成率随红移增加而增大; 活动星系核 (AGNs) 的数密度在高红移处有个峰值, 其与模型预言相一致。

等级成团形成模型^[52]。这种模型认为大质量星系的形成是通过星系间的并合产生的。在 Λ CDM 宇宙模型下, 星系间的并合是伴随着暗物质晕的并合产生的, 对于这些大质量星系的形成其红移一般都比较低 ($z < 1.5$)。相比较纯光度演化模型来说, 该模型给出的亮星系数目在高红移处小于观测事实。另外, 按照并合星系之间质量比分类, 星系并合可以分成主并合 (major merge) 和微并合 (minor merge, 星系间质量比小于 0.25)。主并合对应的两个星系质量相近, 这时原初星系的盘状结构会被剧烈的弛豫过程摧毁, 导致椭圆星系的形成。星系并合又可以分成湿并合 (wet merge) 和干并合 (dry merge)。前者会有剧烈的恒星形成活动, 后者几乎没什么恒星形成, 但对星系尺度的演化有影响。Kitzbichler 和 White^[53] 对传统的星系等级成团模型进行了改进, 引入了星系群或星系团中心的“radio mode”反馈机制。他们给出了星系微分计数随星等、红移的分布关系, 同时也将观测数据与模型预言进行了比较, 结果显示, 模型预言的大质量星系数目高于实际观测值, 也就是说在等级成团模型中, 这些大质

量星系的聚集比现实宇宙中星系的演化要早,导致这种差异的原因可能是由于不完整或不准确的星系形成物理过程引起的。总之,这两种模型在星系是如何形成的解释和预言上各有优缺点,需要在未来工作中不断加以改进,同时观测上也需要提供更多可靠的证据来约束星系形成和演化理论模型。表征星系结构性质的一个重要参数是星系的尺度,将该量与其他物理参数相结合(如恒星质量、光度、恒星形成率和红移等),能有效帮助分析星系的形成和演化模式,了解星系形成的具体过程。

3 星系尺度的测量

尽管星系尺度是一个简单的概念,但测量过程比较复杂且受到多种因素影响(如观测源的信噪比、中心坐标位置、邻近源的光污染和图像分辨率等)。目前最常用的方法是对星系图像进行二维模型拟合^[38, 54-62],通过将各种星系面亮度二维分布的模型与 PSF (点扩散函数)作卷积后的图像与星系原始图像进行比较,利用 Levenberg-Marquardt 算法得到 χ^2 最小值,从而确定最佳拟合参数值。对于不同形态类型的星系,它们的面亮度分布 $I(r)$ 有很大差异^[2]。旋涡星系的核球部分和椭圆星系的面亮度轮廓可以较好地利用 $r^{1/4}$ 函数来拟合,星系盘部分可以用指数函数描述。在实际工作中,我们往往并不知道星系的面亮度轮廓具体满足何种形式的函数分布,所以通常利用 Sérsic 提出的面亮度轮廓函数^[63]来对星系面亮度分布进行拟合;面亮度 $I(r)$ 可表示为: $I(r) = I_e e^{-b(n)[(r/r_e)^{1/n} - 1]}$, n 称为 Sérsic 指数, $b(n) = 2.0n - 0.3$, I_e 是 $r = r_e$ 处面亮度大小, r_e 为有效半径(即半光度半径),它表明星系总光度的一半是来自 r_e 内部区域。Sérsic 公式的突出优点是不同的幂指数 n 代表不同的面亮度分布: $n = 4$ 对应于 $r^{1/4}$ 函数,而 $n = 1$ 对应于指数函数。对一个星系面亮度进行最佳拟合时,如果得到的 Sérsic 指数 n 较大(如 $n > 2.5$),则认为它是一个早型星系;反之,如果 Sérsic 指数 n 较小,则认为是一个晚型星系(如 $n < 2.5$)。另外一种方法是基于源的中心坐标位置计算圆孔径或椭圆孔径大小,具体孔径范围由测量者定义的流量比决定^[64-67]。例如:计算占星系总辐射流量 50% 的孔径大小。最近,也有研究者通过统计星系的像元数目推算星系尺度^[68, 69]。该方法的优点是无需定义星系的中心位置且对不规则星系测量比较有效。

星系的恒星质量与恒星形成历史有关,因此对不同红移处星系的恒星质量分布进行研究有助于了解星系质量聚集历史。而星系尺度又反映了星系中恒星整体分布情况,不同的观测波段(如静止紫外和光学图像)又牵涉到星系中不同的星族,同时受到尘埃消光影响也不尽相同。如何准确计算星系的尺度, GALFIT^[70] 软件很好地解决了这个问题,它是一个对星系图像进行二维模型拟合的程序。GALFIT 可以将 Sérsic 等模型与 PSF 作卷积后的图像与星系原始图像进行比较,通过算出的 χ^2 值来确定最佳拟合参数值。为了能准确反映星系不同区域(例如星系的核球和盘部分)的物理性质, GALFIT 也可以对一个星系的二维面亮度分布同时用不同模型成分进行拟合。该软件更详细的说明请参考 Peng 等人的工作^[70]。

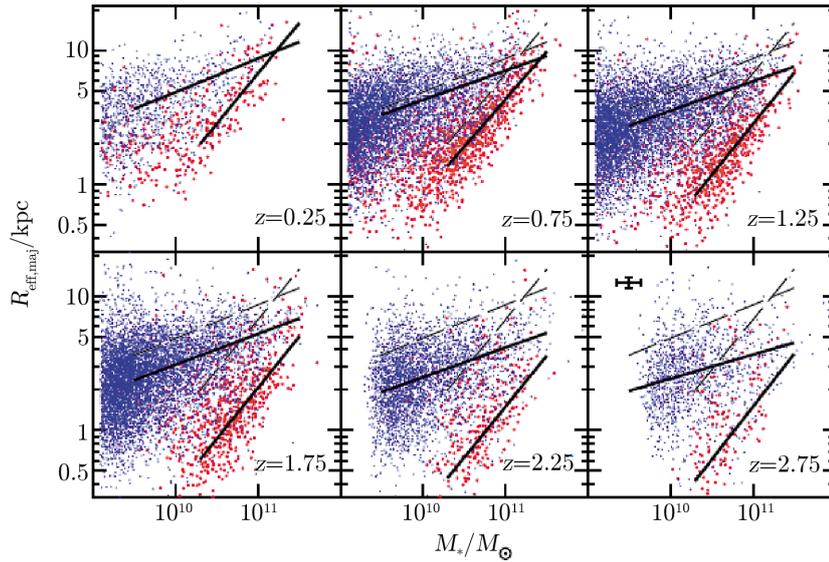
4 星系恒星质量与尺度之间的关系

为了研究星系的光度、恒星质量和形态类型对星系尺度分布的影响, Shen 等人^[71]

在 2003 年利用来自 SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 的光学波段观测数据, 测量了近 14 万个星系的有效半径 r_e ; 样本中星系红移主要分布在 $0.05 < z < 0.15$ 范围内, 其红移中值约为 0.1。基于观测的 z (9 130 Å) 波段图像, Shen 等人^[71] 采用 Sérsic 指数 $n = 2.5$ 标准, 将星系划分成早型星系 ($n > 2.5$) 和晚型星系 ($n < 2.5$), 分类的结果显示样本中有 36% 的源是早型星系。对于大质量的早型星系, 星系尺度与恒星质量之间满足如下关系: $r_{e,SDSS}(\text{kpc}) = 3.47 \times 10^{-5}(M_*/M_\odot)^{0.56}$ 。这明显不同于大质量的晚型星系 ($M_* > 10^{10.6}M_\odot$): $r_{e,SDSS}(\text{kpc}) = 0.1(M_*/M_\odot)^{0.14}(1 + M_*/3.98 \times 10^{10}M_\odot)^{0.25}$; 至于恒星质量低于 $10^{10.6}M_\odot$ 的 LTGs, 其星系尺度 $r_{e,SDSS} \propto M_*^{0.15}$ 。与此同时, 他们也发现在采用不同星系分类判据时 (如聚集度指数 $C = 2.86$ 和颜色 $g - r = 0.7$), 推导出 ETGs 和 LTGs 的恒星质量与星系尺度之间的关系与上述结论相一致, 而且不因光学观测波段 (g 、 r 和 i) 的变化产生明显的差异。另外, 在分析星系尺度与光度 (如 M_r) 之间关系时, 他们也证实了上述结论。

在 2006 年, 基于 VLT (Very Large Telescope) 的 ISAAC (Infrared Spectrograph and Array Camera) 近红外观测图像 (J_s 、 H 和 K_s), Trujillo 等人^[16] 测量了 262 个大质量高红移 ($1 < z < 3.2$) 星系在静止光学波段 (5 300 Å) 的有效半径。他们将星系样本分成 3 个红移区间: $1 < z < 1.5$ 、 $1.5 < z < 2.6$ 和 $2.6 < z < 3.2$, 不同红移范围内源的尺度测量所采用的观测波段图像依次是 J_s 、 H 和 K_s 。利用 $n = 1.5$ 判据, 他们将源分成早型星系和晚型星系, 结果发现高红移星系有着类似于近邻星系的恒星质量与尺度之间的关系, 但对于相同质量 (或相同光度) 同类型的星系, 高红移的源在静止光学波段图像上呈现出更小的物理尺度。Trujillo 等人^[18]、Zirm 等人^[19] 和 Toft 等人^[17] 也分别证实了上述结论, 他们采用的观测图像是分辨率更高的 HST ACS 光学和 NICMOS 近红外数据。对于那些静止紫外光度非常亮的恒星形成星系, Mosleh 等人^[57] 利用来自 Subaru 的近红外波段观测图像, 分析了这些星系在红移 $z \approx 1$ 、 $z \approx 2$ 和 $z \approx 3$ 处星系的恒星质量与尺度之间的关系, 计算的结果依次为: $r_e \propto M_*^{0.19}$ 、 $r_e \propto M_*^{0.30}$ 和 $r_e \propto M_*^{0.32}$ 。最近, 通过 CANDELS (Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey) 5 个深场巡天中的 HST WFC3 近红外观测图像, van der Wel 等人^[38] 测量了样本中星系的半长轴有效半径 $R_{\text{eff,maj}}$ 。他们基于 UVJ 双色图分类方法将源分类成早型星系和晚型星系, 并定量研究了在不同红移区间内这两类星系的 M_* 与 $R_{\text{eff,maj}}$ 之间的关系 (如图 2 和表 1 所示)。对于不同红移范围内恒星质量 $M_* > 3 \times 10^9 M_\odot$ 的 LTGs, 可得: $R_{\text{eff,maj}} \propto M_*^{0.22}$; 而在 $M_* > 2 \times 10^{10} M_\odot$ ETGs 样本中, 结果为: $R_{\text{eff,maj}} \propto M_*^{0.75}$ 。另外, 他们发现在相同红移和类似恒星质量条件下, 晚型星系比早型星系有着更大的物理尺度。与此同时, 从图 2 中我们可以看到, 中高红移区间内存在一定数量的大质量致密星系 ($r_e < 1 \text{ kpc}$), 对应的共动数密度约为 10^{-4} Mpc^{-3} , 且有着极高的恒星质量面密度 ($\lg(M_*/r_e^{1.5}) \geq 10.45 M_\odot \cdot \text{kpc}^{-1.5}$)^[72]。但在近邻宇宙中, 这样的大质量致密源非常少。

在更高红移处 ($z \geq 3$), 星系的有效半径与光度之间是否依然满足 $r_e \propto L^\alpha$, 这是天文研究者比较关心的问题。利用近红外 K 波段的观测图像, Akiyama 等人^[20] 测量了红移 $z \approx 3$ LBGs (Lyman Break Galaxies) 的尺度, 结果并未发现在静止光学 V 波段有明显的 $r_e \propto L_V^\alpha$ 关系存在。最近, Huang 等人^[58] 利用 HST ACS i_{775} 和 z_{850} 的光学波段图像, 分别研究了



注：蓝色点和红色点分别对应晚型星系和早型星系，不同红移区间内的黑色线是拟合这两类星系的结果。

图 2 星系的恒星质量与星系尺度之间的关系^[38]

表 1 星系恒星质量与尺度之间的关系^[38]

z	早型星系			晚型星系		
	$\lg A$	α	$\sigma(\lg R_{\text{eff,maj}})$	$\lg A$	α	$\sigma(\lg R_{\text{eff,maj}})$
0.25	0.60 ± 0.02	0.75 ± 0.06	0.10 ± 0.02	0.86 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.16 ± 0.01
0.75	0.42 ± 0.01	0.71 ± 0.03	0.11 ± 0.01	0.78 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.16 ± 0.01
1.25	0.22 ± 0.01	0.76 ± 0.04	0.12 ± 0.01	0.70 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.17 ± 0.01
1.75	0.09 ± 0.01	0.76 ± 0.04	0.14 ± 0.01	0.65 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.18 ± 0.01
2.25	-0.05 ± 0.02	0.76 ± 0.04	0.14 ± 0.02	0.55 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.19 ± 0.01
2.75	-0.06 ± 0.03	0.79 ± 0.07	0.14 ± 0.03	0.51 ± 0.01	0.18 ± 0.02	0.19 ± 0.01

注： $R_{\text{eff,maj}}(\text{kpc}) = A(M_*/5 \times 10^{10} M_\odot)^\alpha$ 。

红移 $z \approx 4$ 和 $z \approx 5$ 处 LBGs 的静止紫外 (1500 \AA) 尺度，他们发现的幂律关系对应的是 $r_e \propto L_{\text{UV}}^{0.22}$ 和 $r_e \propto L_{\text{UV}}^{0.25}$ 。类似的幂律关系在红移 $z \approx 7$ 处的 LBGs 样本中也被发现^[73]，星系尺度的测量是采用 HST WFC3 近红外波段观测数据 (F125W)，最终拟合的指数分布在 $0.3 < \alpha < 0.5$ 区间内。同样是采用 HST WFC3 F105W 和 F125W 近红外观测图像，Mosleh 等人^[29] 分别建立了红移分布在 $z \approx 4$ 和 $z \approx 5$ 附近 LBGs 的静止紫外 (2100 \AA) 尺度与恒星质量之间的关系，对应的幂律形式依次为 $r_e \propto M_*^{0.14}$ 和 $r_e \propto M_*^{0.17}$ ，这类似于近邻小质量的晚型星系 ($\alpha = 0.15$)。

综上所述并结合图 2，可归纳出星系的尺度与恒星质量之间主要存在如下性质：(1) 大质量星系有着明显的 $r_e \propto M_*^\alpha$ 关系，这样的幂律关系不因星系分类判据的不同而发生变化，指数 α 的差异取决于星系的形态类型；(2) 与早型星系相比，晚型星系的物理尺度与恒星质

量之间的相关性指数 α 偏小, 这表明大质量的 LTGs 比小质量的 LTGs 有更高的恒星质量面密度; (3) 与同类型的近邻星系相比, 中高红移星系有效半径整体偏小, 而且质量比较大的星系 r_e 偏大, 这点对于早型星系更加明显; (4) 在相同的红移和恒星质量条件下, 早型星系比晚型星系的物理尺度要小; (5) 在中高红移处, 不论晚型星系还是早型星系, 都存在极其致密的源 ($r_e < 1$ kpc); (6) 红移 $z \geq 3$ 的恒星形成星系, 静止紫外波段测量的尺度与光度之间依然存在 $r_e \propto L_{UV}^\alpha$ 关系, 其指数 α 主要分布在 0.3 附近。

5 星系尺度演化

正如第 4 章所陈述的那样, 中高红移大质量星系比近邻同类型相似质量的源有更小的物理尺度。观测上的这种尺度差异既不是星系表面亮度受到红移影响变暗导致的^[26, 33] (低流量辐射的边缘部分没能被观测到), 也不是由于星系的恒星质量可能偏低引起的^[74, 75] (已有工作证明多波段拟合的恒星质量与星系的动力学质量相一致)。不同类型的大质量星系其尺度与恒星质量之间存在不同的相关性, 这表明它们有着不同的形成和演化方式以及恒星质量聚集历史。下面将对早型星系和晚型星系的尺度演化分别进行阐述。

5.1 早型星系的尺度演化

高红移早型星系有致密的结构特征, 在 Daddi 等人^[15] 的早期工作中就已经被发现。他们利用哈勃极深场中的 HST 光学波段观测图像, 研究了 7 个带有光谱红移的 ETGs 尺度 (红移中值分布在 1.7 附近), 结果发现, 与近邻大质量椭圆星系相比, 这些源在静止紫外有着很小的物理尺度。Trujillo 等人^[18] 在 2007 年做了这样的工作, 他们在 EGS (Extended Groth Strip) 天区中选取了 831 个大质量星系 ($M_* > 10^{11} M_\odot$), 红移范围是 $0.2 < z < 2$, 星系质量的获得通过多波段能谱拟合得到。对于这样一个红移分布比较宽的样本, 他们采用 HST ACS I 波段图像测量了这些星系的有效半径 r_e 和 Sérsic 指数 n , 利用 $n = 2.5$ 这样的一个划分标准, 将星系分成两种类型: $n < 2.5$ 为晚型星系, $n > 2.5$ 是早型星系。在每一类型当中, 又根据红移大小将其划分成不同的区间。结果显示红移大的星系有效半径偏小, 而且在相同红移处, 质量比较大的星系具有的 r_e 偏大, 这点对于 $n > 2.5$ 的早型星系更加明显; 即大质量星系的有效半径随红移有很强的演化关系, 红移大的星系有效半径小, 而且早型星系的 r_e 随红移演化更快。在这个工作当中, 他们充分考虑了红移对星系表面亮度的影响, 经过多次数值模拟, 发现在 $K_{Vega} < 20$ 的情况下, 星系表面亮度随红移变暗对有效半径的测量影响非常小。类似于 Trujillo 等人^[18] 的研究结果, Buitrago 等人^[76] 利用 HST NICMOS 的 F160W 近红外观测数据, 采用质量选取标准 $M_* > 10^{11} M_\odot$, 找到了 82 个红移分布在 $1.7 < z < 3$ 区间内的 ETGs。他们同样采用了 $n = 2.5$ 的星系形态分类判据, 将样本中的星系分类成 ETGs 和 LTGs, 并结合 Trujillo 等人^[18] 测量的数据, 结果如图 3 所示 (红色虚线), 早型大质量星系 (形态类似椭圆状) 在静止光学波段的尺度随红移有很强的演化关系。通过归一化到近邻相同质量同类型星系样本中, 他们拟合得到的星系尺度与红移之间的关系是 $r_e/r_{e,SDSS} \propto (1+z)^\beta$, 其中 $\beta = -1.48 \pm 0.04$ 。类似的结论在 Damjanov 等人^[77] 工作中也得到证实, 他们测量的指数 $\beta = -1.62 \pm 0.34$, 且采用的星系质量选取下限为 $10^{10} M_\odot$ 。

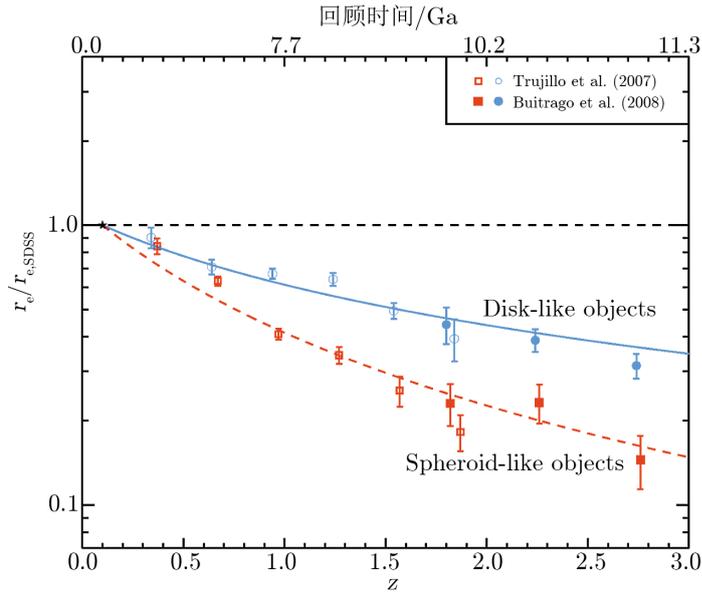


图3 大质量星系的尺度随红移演化关系^[76]

随着 HST WFC3 近红外巡天的开展, 很多研究者基于释放的高分辨率观测图像, 研究了高红移大质量星系在静止光学波段的形态结构特征。2013 年 Patel 等人^[36] 利用 WFC3 F125W 和 F160W 观测数据, 分析了红移分布在 $1 < z < 3$ 区间内大质量星系的尺度。考虑到星系形态结构性质对观测波长的依赖, 对于红移处在 $1 < z < 1.76$ 范围内的星系, 利用 F125W 波段观测图像研究它们的形态结构特征; 而对于红移分布在 $1.76 < z < 3$ 区间内的源, 尺度测量的数据来自 F160W 波段, 即样本中星系的形态性质研究对应静止坐标系的光学波段 ($5\ 200\ \text{\AA}$)。与此同时, 他们也通过 HST ACS I₈₁₄ 波段观测图像分析了红移处在 $0.25 < z < 1$ 区间内星系的尺度。利用 UVJ 双色图分类方法, 他们将星系分类成早型星系和晚型星系, 对于 $M_* > 10^{10.5} M_\odot$ 的 ETGs 来说, 存在 $r_e \propto (1+z)^\beta$ 关系, 其中 $\beta = -1.30 \pm 0.20$ 。这与早期 Franx 等人^[22] 和 Cimatti 等人^[78] 在相似红移和恒星质量范围内得到的结论相一致, 他们拟合的指数 β 依次为 -1.22 ± 0.15 和 -1.24 ± 0.15 。类似的结果在 Morishita 等人^[37] 工作中也被证实, 他们计算的 $\beta = -1.06 \pm 0.19$ 。另外, 他们也发现低质量 ($M_* < 10^{10.5} M_\odot$) 的 ETGs 在静止光学波段上的尺度随红移演化不明显。最近, van der Wel 等人^[38] 基于 CANDELS 5 个深场巡天中的 HST WFC3 近红外观测图像, 测量了样本中星系的半长轴有效半径 $R_{\text{eff,maj}}$ 。他们采用的星系分类方法也是 UVJ 双色图, 对于红移分布在 $0 < z < 3$ 区间内的大质量早型星系, $R_{\text{eff,maj}}$ 与红移 z 之间的关系满足 $R_{\text{eff,maj}} \propto (1+z)^{-1.48}$ 。尽管他们测量的 $R_{\text{eff,maj}}$ 与前述其他研究者计算的 r_e 有所不同 ($r_e = R_{\text{eff,maj}} \sqrt{b/a}$, b/a 对应星系的轴比), 但结果都表明大质量早型星系的尺度随红移减小存在剧烈的变化。在表 2 中, 我们整理了来自不同文献的 β 数据。

对于上述大质量早型星系的有效半径随红移演化关系, 纯光度演化模型是很难解释的,

表 2 大质量星系的尺度与红移之间的演化关系

红移范围	β (早型星系)	β (晚型星系)	参考文献
0.0~3.0	-1.48 ± 0.04	-0.82 ± 0.03	[76]
0.2~2.7	-1.62 ± 0.34	—	[77]
0.25~3.0	-1.30 ± 0.20	-0.80 ± 0.13	[36]
0.5~3.5	-1.22 ± 0.15	-0.59 ± 0.10	[22]
0.0~3.0	-1.24 ± 0.15	—	[78]
0.5~3.0	-1.06 ± 0.19	-0.56 ± 0.09	[37]
0.0~3.0	-1.48 ± 0.19	-0.75 ± 0.09	[38]
0.0~2.0	-1.17 ± 0.07	-0.92 ± 0.09	[27]

注: $r_e \propto (1+z)^\beta$ 。

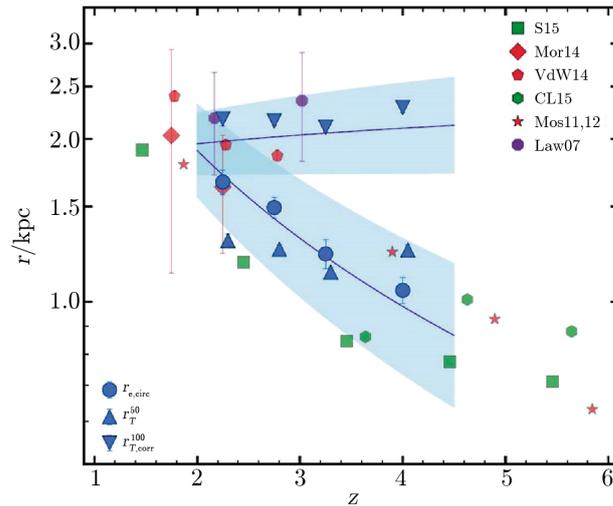
因为当星系的恒星形成结束之后, 它的尺度和恒星质量之间的关系应该不随红移减小发生明显的变化; 对于等级成团模型来说, 它就能很好地解释上述现象。富气体星系间的并合形成致密的椭球结构, 随后在恒星形成抑制机制 (如 AGN 反馈等) 作用下演化成恒星形成并不活跃的宁静星系; 通过后期 (红移 $z < 1.5$) 星系间无耗散的微并合可使星系外围区域得到有效增大, 并进而演化为近邻大质量的早型星系^[79, 80], 也就是所谓的由内而外的生长模式。与此同时, 早型星系的尺度生长也存在其他物理解释。例如: 在没有并合和气体吸积情况下, 星系中的 AGN 反馈和星风作用会导致星系中心的大量冷气体外流, 结果导致星系中的恒星分布向外扩张, 使得星系尺度变大^[81]; 早型星系可通过吸积卫星星系的气体, 并在星系外围不断形成恒星, 从而增大自身的物理尺度^[82]; 拥有较大尺度的晚型星系随着时间演化, 其恒星形成受到抑制, 因此演化成恒星形成不活跃的早型星系, 从而在观测上产生早型星系的尺度随红移减小而增大的现象^[83] (progenitor bias)。总的来说, 大质量早型星系尺度生长的物理解释还存在争议, 也许在星系形成和演化过程中有多种机制对其产生影响。

5.2 晚型星系的尺度演化

通过第 4 章介绍并结合图 2, 我们了解到晚型星系的有效半径分布在很宽的范围内 ($0.5 < r_e < 10$ kpc)。早期对红移分布在 $z = 2 \sim 6$ 区间内的 LBGs 静止紫外波段尺度研究发现, 其有效半径随红移减小发生快速生长^[14, 29, 65, 84], 满足 $r_e \propto (1+z)^\beta$, 对应指数 $\beta = -1.1$, 这接近于静止光学波段的早型星系尺度与红移的演化关系。与此同时, 也有研究者对红移低于 1 的盘主导星系在静止光学波段的尺度进行了分析, 发现星系尺度随时间演化并不剧烈^[54, 85, 86], 他们计算的 $\beta = -0.2$ 。上述两种结果存在如此大的差别, 主要原因是 LBGs 的有效半径测量来自静止紫外波段, 它表征的是星系中年轻恒星的分布情况。另外, 相比较于盘主导的晚型星系, LBGs 的质量小, 其典型的恒星质量 $M_* \approx 10^{10} M_\odot$ 。为了研究更高红移处 ($1 < z < 3$) 星系在静止光学波段的尺度, Trujillo 等人^[16] 利用地面望远镜的近红外观测数据, 拟合出大质量晚型星系的指数 $\beta = -0.4$ 。后来, 同样是基于地面观测设备的近红外观测图像, Franx 等人^[22] 和 Williams 等人^[27] 计算的结果分别是 -0.6 和 -0.9 。但通过地面的观测数据测量星系尺度容易受到地球大气视宁度影响。

2007 年, Toft 等人^[17] 利用 HST NICMOC 近红外观测图像, 测量了红移分布在 $2 < z < 3.5$ 范围内的大质量晚型星系尺度, 计算的指数 $\beta \approx -0.8$ 。最近, Patel 等人^[36] 和 Morishita 等人^[37] 利用 HST WFC3 F125W 和 F160W 波段高分辨率观测图像, 研究了红移处在 $1 < z < 3$ 区间内的大质量 LTGs 尺度与红移之间的相关性, 他们测量的 β 值依次为 -0.80 ± 0.13 和 -0.56 ± 0.09 。有别于其他研究者的分析方法, van der Wel 等人^[38] 提供了沿长轴方向的有效半径 $R_{\text{eff,maj}}$ 与红移 z 之间的幂律关系: $R_{\text{eff,maj}} \propto (1+z)^{-0.75}$ 。他们的结果并没有归一化到近邻大质量晚型星系在静止光学波段的尺度。但这样的工作在 Buitrago 等人^[76] 和 Conselice^[11] 的研究结果中有所体现, 正如图 3 所示 (见青色实线), 他们拟合出星系在静止光学波段上的尺度与红移之间的演化关系为: $r_e/r_{e,\text{SDSS}} \propto (1+z)^{-0.82 \pm 0.03}$ (红移 $z < 3$)。由此我们可以看到大质量晚型星系的尺度生长比早型星系缓慢, 物理机制可能是, 星系自身依靠吸积的冷气体形成恒星, 从而增大其物理尺度; 也有可能是因为星系的尺度在形成的时刻正比于暗晕的尺度 (R_{200}), 那么由于宇宙的膨胀, 使得宇宙平均密度下降, 同等质量的暗晕其 R_{200} 会随着红移减小而增大, 对应的关系为 $R_{200} \propto (1+z)^{-1}$ ^[87], 这类似于晚型星系观测到的 $\beta \approx -0.8$ 。

在红移 $0 < z < 3$ 范围内的大质量晚型星系, 它们的尺度 (对应静止光学波段) 与红移之间的演化关系指数 $\beta \approx -0.8$, 这与 $z = 2 \sim 6$ 区间内的 LBGs 在静止紫外波段得出 $\beta \approx -1.1$ 存在很大差别 (如图 4 所示)。最近, Ribeiro 等人^[69] 基于带有光谱证认的恒星形成星系样本, 其红移分布在 $2 < z < 4.5$ 区间内。在静止紫外波段, 他们利用 GALFIT 程序计算的星系尺度中值分别是: 1.67 kpc ($2 < z < 2.5$)、1.49 kpc ($2.5 < z < 3$)、1.23 kpc ($3 < z < 3.5$) 和 1.05 kpc ($3.5 < z < 4.5$), 对应图 4 中的 $r_{e,\text{circ}}$ 。他们拟合的指数 $\beta \approx -0.89 \pm 0.11$, 在一个标准偏差范围内这与前人在相同红移范围内得到的结论相一致。相比较于红移 $z < 2$ 的晚型星系 ($|\beta| < 0.8$), 这些源的有效半径随红移减小增长更快。从上述结果可知, 晚型星系的尺度生长在红移 2 前后存在两种不同的趋势, 这可能暗示星系中核球的形成对晚型星系尺度的生长有很重要的影响; 因为当核球形成后, 有助于维持星系盘的存在, 减缓星系物理尺度增大, 这就是星系的形态抑制过程。考虑到晚型星系在高红移处表现出明显的不规则结构, 他们重新定义了星系尺度的计算方法: $r_T^x = \sqrt{T_x/\pi}$, 其中源分布的面积大小 $T_x = N_x L^2 (2 \times 10^{-11} \text{ster} \cdot \text{arcsec}^2) D_A^2$, L 和 D_A 分别为像元大小和角直径距离, N_x 是像元的数目 (具体数值取决于所要计算源的流量比 $x\%$)。图 4 所示的 r_T^{50} 和 $r_{T,\text{corr}}^{100}$ (改正背景天光污染) 分别对应占源总流量 50% 和 100% 处的尺度。在与上述相同的 4 个红移区间内, 他们计算的 $r_{T,\text{corr}}^{100}$ (r_T^{50}) 中值依次为: 2.18 kpc (1.30 kpc)、2.16 kpc (1.25 kpc)、2.10 kpc (1.13 kpc) 和 2.29 kpc (1.25 kpc), 拟合的指数 β 分别对应 -0.23 ± 0.07 和 -0.19 ± 0.06 。这表明高红移 ($z > 2$) 晚型星系的静止紫外波段尺度与红移之间存在很弱的演化关系, 星系的物理尺度生长非常缓慢, 这和已有的结果 ($\beta \approx -1.1$) 存在明显的不同。这样的差异原因可能是多样的, 例如: 高红移 ($z > 3$) 恒星形成星系的恒星质量和恒星形成率的测量存在不确定性, 星系结构分析对波长的依赖, 红移非常高的源低面亮度区域没有被探测到, 或者是其他随红移变化的物理量对星系尺度演化产生了影响。



注: Mos12、Mor14、VdW14、Mos11、S15、CL15 和 Law07 分别对应来自文献 [29, 37, 38, 57, 62, 67, 68] 中的数据。

图 4 高红移恒星形成星系尺度随红移演化关系^[69]

6 总结和展望

星系形态结构是反映星系物理性质的一个重要特征量,它与星系的其它物理性质有一定的关系,如 LTGs 具有低恒星质量面密度、年轻、颜色蓝、尘埃消光强、多处于低密度区域、恒星形成率高等特点,而 ETGs 有着相反的特性。表征星系结构性质的一个重要参数是星系的尺度,将该量与其他物理参数相结合(如恒星质量、光度、恒星形成率和红移等),能有效帮助分析星系的形成和演化模式,了解星系形成的具体过程。对于大质量($M_* > 10^{10} M_\odot$)星系,其星系尺度与星系质量之间有着明显的 $r_e \propto M_*^\alpha$ 关系。指数 α 的差异取决于星系的形态类型,LTGs 和 ETGs 的 α 值分别对应 0.22 ± 0.03 和 0.75 ± 0.05 。另外,在相同的红移和恒星质量条件下,早型星系物理尺度比晚型星系的要小。已有观测结果表明,中高红移大质量星系存在一些不同于近邻星系的观测性质,并取得重大发现:大质量星系的尺度与红移之间存在演化关系 $r_e \propto (1+z)^\beta$ 。在静止光学波段,对于红移小于 3 的晚型星系和早型星系来说,指数 β 分别对应的范围是 $-0.8 \sim -0.6$ 和 $-1.5 \sim -1.2$,而且这样的演化关系不依赖于星系分类方法的选择。也就是说,近邻大质量星系的物理尺度比中高红移同类型相似质量的星系要大。对于晚型星系来说,近邻和高红移的星系尺度相差 2 到 4 倍,这种现象在早型星系中表现得更加突出,大约是 3 到 5 倍。早型星系和晚型星系的尺度随时间表现出不同的生长方式,这表明它们的形成和演化过程存在差异。红移 $z > 3$ 的晚型星系尺度演化研究还存在争议以及很多不清楚的问题,这在未来的工作中需要进一步去分析和讨论。

未来对星系尺度的研究工作可能主要从以下几个方面开展:(1)红移大于 3 的大质量星系的结构性质研究工作少(特别是在静止光学波段),这需要 JWST (James Webb Space

Telescope) 提供高分辨率近红外和中红外观测数据。(2) 晚型星系在静止紫外波段的尺度演化存在争议 (主要在红移 $z > 3$ 区域), 这需要大样本的极深场巡天数据提供统计分析, 了解其中的物理原因。(3) 星系尺度生长的物理解释存在多样化, 这需要大样本数据的统计结果进行理论解析。也许星系的形成和演化过程并不单一, 而是多种机制共同作用的结果。(4) 定量研究中高红移星系尺度与其他星系物理特性之间的关系 (如恒星形成率、尘埃消光、星系环境和颜色等)。(5) 完善星系形成和演化模型, 解释当前不同类型星系的尺度随红移的演化关系。(6) 在中高红移处不论晚型星系还是早型星系, 都存在极其致密的源 ($r_e < 1$ kpc), 这些源是如何形成和演化的, 以及它们有着什么样的物理特性? (7) 在近邻宇宙中, 为什么致密的大质量星系少, 这需要从观测和理论模型上进行分析研究。(8) 中高红移的低质量星系 ($M_* < 10^{10} M_\odot$) 的结构性质研究工作少, 关于它们的形成和演化还存在很多不清楚的地方。

参考文献:

- [1] Ball N M, Loveday J, Brunner R J. MNRAS, 2008, 383: 907
- [2] Blanton M R, Hogg D W, Bahcall N A, et al. ApJ, 2003, 594: 186
- [3] Baldry I K, Glazebrook K, Brinkmann J, et al. ApJ, 2004, 600: 681
- [4] Bell E F, McIntosh D H, Barden M, et al. ApJ, 2004, 600: L11
- [5] Papovich C, Dickinson M, Giavalisco M, et al. ApJ, 2005, 631: 101
- [6] Cassata P, Guzzo L, Franceschini A, et al. ApJS, 2007, 172: 270
- [7] Fang G W, Kong X, Chen Y, et al. ApJ, 2012, 751: 109
- [8] Lee B, Giavalisco M, Williams C C, et al. ApJ, 2013, 774: 47
- [9] Williams R J, Quadri R F, Franx M, et al. ApJ, 2009, 691: 1879
- [10] Skelton R E, Whitaker K E, Momcheva I G, et al. ApJS, 2014, 214: 24
- [11] Conselice C J. ARA&A, 2014, 52: 291
- [12] Bouwens R, Broadhurst T, Illingworth G. ApJ, 2003, 593: 640
- [13] Bouwens R J, Illingworth G D, Blakeslee J P, et al. ApJ, 2004, 611: L1
- [14] Ferguson H C, Dickinson M, Giavalisco M, et al. ApJ, 2004, 600: L107
- [15] Daddi E, Renzini A, Pirzkal N, et al. ApJ, 2005, 626: 680
- [16] Trujillo I, Förster Schreiber N M, Rudnick G, et al. ApJ, 2006, 650: 18
- [17] Toft S, van Dokkum P, Franx M, et al. ApJ, 2007, 671: 285
- [18] Trujillo I, Conselice C J, Bundy K, et al. MNRAS, 2007, 382: 109
- [19] Zirm A W, van der Wel A, Franx M, et al. ApJ, 2007, 656: 66
- [20] Akiyama M, Minowa Y, Kobayashi N, et al. ApJS, 2008, 175: 1
- [21] Cimatti A, Cassata P, Pozzetti L, et al. A&A, 2008, 482: 21
- [22] Franx M, van Dokkum P G, Schreiber N M F, et al. ApJ, 2008, 688: 770
- [23] van der Wel A, Holden B P, Zirm A W, et al. ApJ, 2008, 688: 48
- [24] van Dokkum P G, Franx M, Kriek M, et al. ApJ, 2008, 677: L5
- [25] Damjanov I, McCarthy P J, Abraham R G, et al. ApJ, 2009, 695: 101
- [26] Szomoru D, Franx M, van Dokkum P G, et al. ApJ, 2010, 714: L244
- [27] Williams R J, Quadri R F, Franx M, et al. ApJ, 2010, 713: 738
- [28] van der Wel A, Rix H W, Wuyts S, et al. ApJ, 2011, 730: 38
- [29] Mosleh M, Williams R J, Franx M, et al. ApJ, 2012, 756: L12
- [30] Newman A B, Ellis R S, Bundy K, et al. ApJ, 2012, 746: 162
- [31] Papovich C, Bassett R, Lotz J M, et al. ApJ, 2012, 750: 93

- [32] Ryan R E Jr, McCarthy P J, Cohen S H, et al. *ApJ*, 2012, 749: 53
- [33] Szomoru D, Franx M, van Dokkum P G. *ApJ*, 2012, 749: 121
- [34] Zirm A W, Toft S, Tanaka M. *ApJ*, 2012, 744: 181
- [35] Fan L L, Fang G W, Chen Y, et al. *ApJ*, 2013, 771: L40
- [36] Patel S G, van Dokkum P G, Franx M, et al. *ApJ*, 2013, 766: 15
- [37] Morishita T, Ichikawa T, Kajisawa M. *ApJ*, 2014, 785: 18
- [38] van der Wel A, Franx M, van Dokkum P G, et al. *ApJ*, 2014, 788: 28
- [39] Fang G W, Ma Z Y, Chen Y, et al. *RAA*, 2015, 15: 811
- [40] Fang G W, Ma Z Y, Chen Y, et al. *RAA*, 2015, 15: 819
- [41] White S D M, Rees M J. *MNRAS*, 1978, 183: 341
- [42] Larson R. *MNRAS*, 1975, 173: 671
- [43] Kauffmann G, Charlot S. *MNRAS*, 1998, 297: 23
- [44] Kitzbichler M G, White S D M. *MNRAS*, 2006, 366: 858
- [45] Cimatti A, Daddi E, Renzini A. *A&A*, 2006, 453: 29
- [46] Panter B, Jimenez R, Heavens A F, et al. *MNRAS*, 2007, 378: 1550
- [47] Noeske K G, Faber S M, Weiner B J, et al. *ApJ*, 2007, 660: 47
- [48] Maiolino R, Nagao T, Grazian A, et al. *A&A*, 2008, 488: 463
- [49] Trager S C, Faber S M, Dressler A. *MNRAS*, 2008, 386: 715
- [50] Vergani D, Scodeggio M, Pozzetti L, et al. *A&A*, 2008, 487: 89
- [51] Fontanot F, De Lucia G, Monaco P, et al. *MNRAS*, 2009, 397: 1776
- [52] White S D M, Frenk C S. *ApJ*, 1991, 379: 52
- [53] Kitzbichler M G, White S D M. *MNRAS*, 2007, 376: 2
- [54] Ravindranath S, Ferguson H C, Conselice C, et al. *ApJ*, 2004, 604: L9
- [55] Ravindranath S, Giavalisco M, Ferguson H C, et al. *ApJ*, 2006, 652: 963
- [56] Tasca L A M, Kneib J P, Iovino A, et al. *A&A*, 2009, 503: 379
- [57] Mosleh M, Williams R J, Franx M, et al. *ApJ*, 2011, 727: 5
- [58] Huang K H, Ferguson H C, Ravindranath S, et al. *ApJ*, 2013, 765: 68
- [59] Ono Y, Ouchi M, Curtis-Lake E, et al. *ApJ*, 2013, 777: 155
- [60] Stott J P, Sobral D, Smail I, et al. *MNRAS*, 2013, 430: 1158
- [61] Straatman C M S, Labbé I, Spitler L R, et al. *ApJ*, 2015, 808: L29
- [62] Shibuya T, Ouchi M, Harikane Y. *ApJS*, 2015, 219: 15
- [63] Sérsic J L. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 1963, 6: 41
- [64] Hathi N P, Malhotra S, Rhoads J E. *ApJ*, 2008, 673: 686
- [65] Oesch P A, Bouwens R J, Carollo C M, et al. *ApJ*, 2010, 709: L21
- [66] Ichikawa T, Kajisawa M, Akhlaghi M. *MNRAS*, 2012, 422: 1014
- [67] Curtis-Lake E, McLure R J, Dunlop J S, et al. *MNRAS*, 2016, 457: 440
- [68] Law D R, Steidel C C, Erb D K, et al. *ApJ*, 2007, 656: 1
- [69] Ribeiro B, Le Fèvre O, Tasca L A M, et al. *arXiv:1602.01840*, 2016
- [70] Peng C Y, Ho L C, Impey C D, et al. *AJ*, 2002, 124: 266
- [71] Shen S, Mo H J, White S D M, et al. *MNRAS*, 2003, 343: 978
- [72] Fang G W, Ma Z Y, Kong X, et al. *ApJ*, 2015, 807: 139
- [73] Grazian A, Castellano M, Fontana A, et al. *A&A*, 2012, 547: A51
- [74] Cappellari M, di Serego Alighieri S, Cimatti A, et al. *ApJ*, 2009, 704: L34
- [75] van de Sande J, Kriek M, Franx M, et al. *ApJ*, 2011, 736: L9
- [76] Buitrago F, Trujillo I, Conselice C J, et al. *ApJ*, 2008, 687: L61
- [77] Damjanov I, Abraham R G, Glazebrook K, et al. *ApJ*, 2011, 739: L44
- [78] Cimatti A, Nipoti C, Cassata P. *MNRAS*, 2012, 422: 62
- [79] Hopkins P F, Lauer T R, Cox T J, et al. *ApJS*, 2009, 181: 486
- [80] Hopkins P F, Bundy K, Hernquist L, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 1099

- [81] Fan L, Lapi A, De Zotti G, et al. *ApJ*, 2008, 689: L101
[82] Morishita T, Ichikawa T. *ApJ*, 2016, 816: 87
[83] Carollo C M, Bschorr T J, Renzini A, et al. *ApJ*, 2013, 773: 112
[84] Giavalisco M, Steidel C C, Macchetto F D. *ApJ*, 1996, 470: 189
[85] Lilly S, Schade D, Ellis R, et al. *ApJ*, 1998, 500: 75
[86] Barden M, Rix H W, Somerville R S, et al. *ApJ*, 2005, 635: 959
[87] Mo H J, Mao S, White S D M. *MNRAS*, 1998, 295: 319

Research Progress on Size Evolution of Massive Galaxies

FANG Guan-wen¹, LIN Ze-sen^{2,3}, KONG Xu^{2,3}

(1. *Institute for Astronomy and History of Science and Technology, Dali University, Dali, 671003, China;* 2. *Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Anhui, 230026, China;* 3. *Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Chinese Academy of Sciences, China*)

Abstract: The formation and evolution of massive galaxies ($M_* > 10^{10} M_\odot$) are hot topics in observational astronomy. Galaxies in the local universe present a bimodal distribution of colors, as introduced by the previous literature: the “Red Sequence” (RS), which is mainly composed of Early-Type Galaxies (ETGs) with older stellar populations, and the “Blue Cloud” (BC), which is composed of Late-Type Galaxies (LTGs) with extended structures. The bimodal distribution of colors of galaxies is confirmed to exist already at $z = 2 \sim 3$. Moreover, the remarkably tight mass-size correlation of galaxies has been confirmed ($r_e \propto M_*^\alpha$). At all redshifts the slope of the mass-size relation is shallow, $\alpha = 0.22 \pm 0.03$, for LTGs with $M_* > 10^{10} M_\odot$, and steep, $\alpha = 0.75 \pm 0.05$, for ETGs with $M_* > 10^{10} M_\odot$. Massive galaxies at high redshift have been observed to have properties which can be quite different from their counterparts at similar mass in the local universe. One of the most striking differences is the much smaller sizes observed for high- z galaxies. High- z ETGs (LTGs) are $3 \sim 5$ ($2 \sim 4$) times smaller than local ETGs (LTGs) with comparable mass. The average sizes of galaxies at fixed stellar mass show prominent evolutionary trends ($r_e \propto (1+z)^\beta$), with fast evolution for ETGs at $0 < z < 3$, $\beta = -1.5 \sim -1.2$, and moderate evolution for LTGs at $0 < z < 3$, $\beta = -0.8 \sim -0.6$. Physical mechanisms have been proposed to explain the smaller size at high redshift and the resulting size evolution, such as major merger, dissipationless (dry) minor merger, progenitor bias, and “puff-up” due to the gas mass loss by active galactic nucleus (AGN) or supernova feedback.

Key words: galaxy observation; galaxy morphology; galaxy structure; galaxy formation; galaxy evolution