

早型星系的恒星形成活动演化研究*

王 放^{1,2†} 郑宪忠¹

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 从观测上测定早型星系中恒星形成活动随红移的演化有助于理解这类星系的形成演化. 结合 GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and SEDs) 巡天的 HST/ACS (Hubble Space Telescope/Advanced Camera for Surveys) 高分辨图像和 CDFS (Chandra Deep Field South) 天区 Spitzer、GALEX (Galaxy Evolution Explorer) 等多波段数据, 基于形态、颜色和恒星质量选出一个 $0.2 \leq z \leq 1.0$ 红移范围的包含 456 个早型星系的完备样本. 利用 stacking 技术测量了样本星系紫外与红外平均光度, 估计早型星系的恒星形成率. 结果显示, 早型星系中的恒星形成率较低 ($< 3 M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$), 随红移递减而降低. 在红移 $z = 1$ 以来的恒星形成贡献的质量小于 15%. 星族分析亦肯定大质量早型星系的主体星族形成于宇宙早期 ($z > 2$).

关键词 星系: 椭圆和透镜, cD, 星系: 恒星形成, 星系: 演化

中图分类号: P 157; **文献标识码:** A

1 引言

近邻宇宙中早型星系 (或称红星系) 和晚型星系 (或称蓝星系) 的恒星质量、颜色、形态、恒星形成历史等物理特征分布显著不同^[1]. 与晚型星系相比, 早型星系的恒星质量通常大于特征转换质量 $3 \times 10^{10} M_{\odot}$, 颜色偏红, 恒星分布聚集度高, 在光学观测的颜色-光度图上的分布呈一序列 (red sequence). 早型星系是近邻宇宙恒星质量密度的主要贡献者, 理解其形成和演化是建立星系形成和演化完整物理图象的关键. 对近邻早型星系的光谱解析和对 Lick 指数、 α 元素丰度等参数的分析结果表明, 早型星系的主导星族形成于 $z = 2$ 之前 (参见文献 [2]). 而且, 质量越大的星系形成时间越早, 形成时标越短, 表现为降序演化模式^[3]. 对高红移宇宙的观测研究发现: 在 $z > 2$ 已经有大质量早型星系形成^[4]; 其数密度和质量密度随宇宙演化而增加^[5-6]; 在 $0 < z < 1$ 期间 (宇宙年龄的一半), 质量密度增加约 1 倍^[7]; 质量小于 $10^{11} M_{\odot}$ 的早型星系的演化比大质量星系更显著^[8]. 早型星系在 $0 < z < 1$ 的质量密度演化与宇宙平均恒星形成率密度演化同步, 伴随着晚型星系终止恒星形成活动而快速转变成早型星系的过程^[9-10]; 早型星系可经富气星系间湿合并形成^[11], 也可以通过贫气的红星系间干合并而增长^[12-13]; 大质量星系间的

2010-05-17 收到原稿

* 国家自然科学基金项目 (10773030 和 10833006) 资助

† fwang@pmo.ac.cn

主并合对大星系的最终形态形成有着决定性的影响^[14], 但似乎不足以解释早型星系的增长^[15]. 另一方面, 早型星系的尺度 (通常以半光半径来量度) 亦存在显著演化: $z = 2$ 的大质量早型星系的平均尺度只有近邻宇宙质量相同星系尺度的 $1/5 \sim 1/3$ 左右^[16-18]. 观测证据表明大质量早型星系的演化经历由内而外的增长过程^[19-20]. Bournaud 等^[21] 指出大质量早型星系可以经由多回的次并合形成; 而次并合可能对星系的尺度演化起关键作用^[22-23]. 一些研究工作在建立经验和理论的模型来解释观测事实方面做出有益的尝试^[24-28]. 而早型星系形成和演化的完整图景涉及早型星系质量增长历史、数密度、尺度、恒星形成率、形态演化等多方面内容, 还有待于更多观测和理论方面的努力来不断完善. 其中, 从观测上测定早型星系的恒星形成活动强度及随红移变化关系, 反映与恒星形成相关的湿并合或次并合等事件的贡献, 可以为探究不同宇宙时期驱动质量不同的早型星系演化的主要物理机制提供重要的观测限制.

对低强度恒星形成活动敏感的近紫外测光观测表明, 近邻宇宙中约有 30% 的早型星系中探测到年龄小于 1 Gyr 的近期恒星形成活动^[29-31]; 在 $0.5 < z < 0.7$ 红移范围的早型星系中也探测到近期恒星形成活动, 且可能与次并合事件有关^[32]. 然而, 近紫外探测到的年轻星族的年龄在数亿年以上, 而非正在形成的星族, 由此估计的恒星形成率会有较大不确定性. 另一方面, 恒星形成于气体和尘埃云中, 通常受尘埃消光影响严重. 由尘埃热辐射贡献的远红外光度是受尘埃遮蔽的恒星形成率的示踪. 结合紫外和红外观测可以比较准确地估计星系的恒星形成率. 再有, 早型星系中的恒星形成活动强度通常较低, 其紫外和红外光度亦不强. 采用 stacking 技术, 可以探测到比红外图象探测极限更弱的信号^[33]. 我们利用 Extended Chandra Deep Field South (E-CDFS) 深场巡天已有的 HST/ACS 高分辨图像、GALEX 紫外、Spitzer/MIPS (Multiband Imaging Photometer for Spitzer) 红外等多波段观测数据, 选出早型星系样本, 结合 stacking 技术估计紫外和红外光度, 测定早型星系在 $0.2 \leq z \leq 1.0$ 的恒星形成率.

2 数据和样本

2.1 数据

本研究工作使用从 GALEX^[34]、MUSYC^[35] (Multiwavelength Survey by Yale-Chile)、IRAC^[36] (Infrared Array Camera) 和 MIPS^[37] 得到的数据. 这些数据覆盖了观测参考系波长 $0.15 \sim 70 \mu\text{m}$ 的范围, 具体见表 1.

如果源有从 E-CDFS 中的光谱巡天得到的光谱红移, 我们则使用光谱红移, 如果没有则使用从 COMBO-17 得到的测光红移 ($\delta z / (1 + z) \sim 0.02$ ^[41]). 星系恒星质量估计来自 Borch 等^[7]2006 年的工作. 从 GEMS 巡天得到的哈勃望远镜 F606W 和 F850LP 成像覆盖了 800 arcmin^2 天区, 分辨率达到了 $0.07''$. 在 F850LP 图像上用软件 GALFIT 得到了 Sérsic 指数 n ^[42].

表 1 多波段数据

Table 1 The multi-band data

Band	$\lambda_c(\mu\text{m})$	$\Delta\lambda(\mu\text{m})$	Tele./Instru.	Exp.(s)	$F_{\text{limit}}(\mu\text{Jy})$	Comments
FUV	0.1515	0.0256	GALEX	44668	0.363	Morrissey et al. ^[38]
NUV	0.2267	0.0730	GALEX	44668	0.363	Morrissey et al. ^[38]
U	0.365	0.036	CTIO	42600	0.145	MUSYC ^[35]
B	0.458	0.097	CTIO	13200	0.132	MUSYC ^[35]
V	0.538	0.089	CTIO	10440	0.145	MUSYC ^[35]
R	0.648	0.16	CTIO	11700	0.174	MUSYC ^[35]
I	0.857	0.147	CTIO	6000	0.479	MUSYC ^[35]
J	1.26	0.2	CTIO/ISPI	4788	2.09	MUSYC ^[39]
K	2.22	0.51	CTIO/ISPI	3600	3.98	MUSYC ^[39]
ch1	3.6	0.75	IRAC	11000	0.758	SIMPLE survey ^[40]
ch2	4.5	1.01	IRAC	11000	0.832	SIMPLE survey ^[40]
ch3	5.8	1.42	IRAC	11000	5.753	SIMPLE survey ^[40]
ch4	8.0	2.93	IRAC	11000	3.630	SIMPLE survey ^[40]
24	23.8	5.3	MIPS	1378	83	MIPS GTO
70	71.4	19	MIPS	600	15000	MIPS GTO

注: 表中 F_{limit} 为 5 倍噪音水平 (5σ)

2.2 样本

早型星系都是核球占主导的, 一般呈红色. 所以我们首先根据静止 U-V 颜色和形态选择我们的早型星系样本. 静止 U 和 V 波段测光来自 COMBO-17 巡天结果^[41]. 我们采用 Borch 等^[7]2006 年的区分 red sequence 和 blue cloud 的标准, red sequence 满足: $(U - V)_{\text{rest}} > 0.227\lg M_* - 1.16 - 0.352z$. 形态标准为 Sérsic 指数 $n > 2.5$ ^[43-44]. 我们将样本局限于 $0.2 \leq z \leq 1.0$ 并选择恒星质量 $M_* > 10^{10.3} M_\odot$ 的星系. 在这一质量限, 样本是完备的 (见图 1). 然后, 我们在 GEMS 巡天的 F850LP 图像上查看了样本的形态以减少来自晚型星系的污染.

图 1 是样本选择图. 从图上可以清楚地看到 red sequence 与 blue cloud 的分离. 从右下方的图可以看到 $0.8 < z \leq 1.0$ 时, 由于星系视星等 $m_R < 24$ 的观测选择效应而很少有 red sequence 星系分布于恒星质量小于 $10^{10.3} M_\odot$ 的区域, 因此为保证完备性我们去掉样本中 $M_* < 10^{10.3} M_\odot$ 的早型星系, 在图 1 中用垂直虚线表示. 实线是 red sequence 与 blue cloud 在红移 0.3、0.5、0.7 和 0.9 的区分标准. 我们还去掉在 Chandra 250 ks 观测^[45]中探测到的 X 射线源, 在图上用叉号表示. 满足颜色、Sérsic 指数和质量标准但是通过查看形态被排除的星系用菱形表示. 最后样本包含 456 个星系, 用空心圈表示.

我们早型星系样本的 z 波段 (F850LP) 视星等都亮于 23 等. 它们是用软件 SExtractor 从 GEMS F850LP 图像上得到的^[46]. 这一波段的极限星等为 27.27^[46] (AB, 5σ , 点源). 全部样本都比极限星等至少亮 4 个星等, 所以形态测量是可靠的.

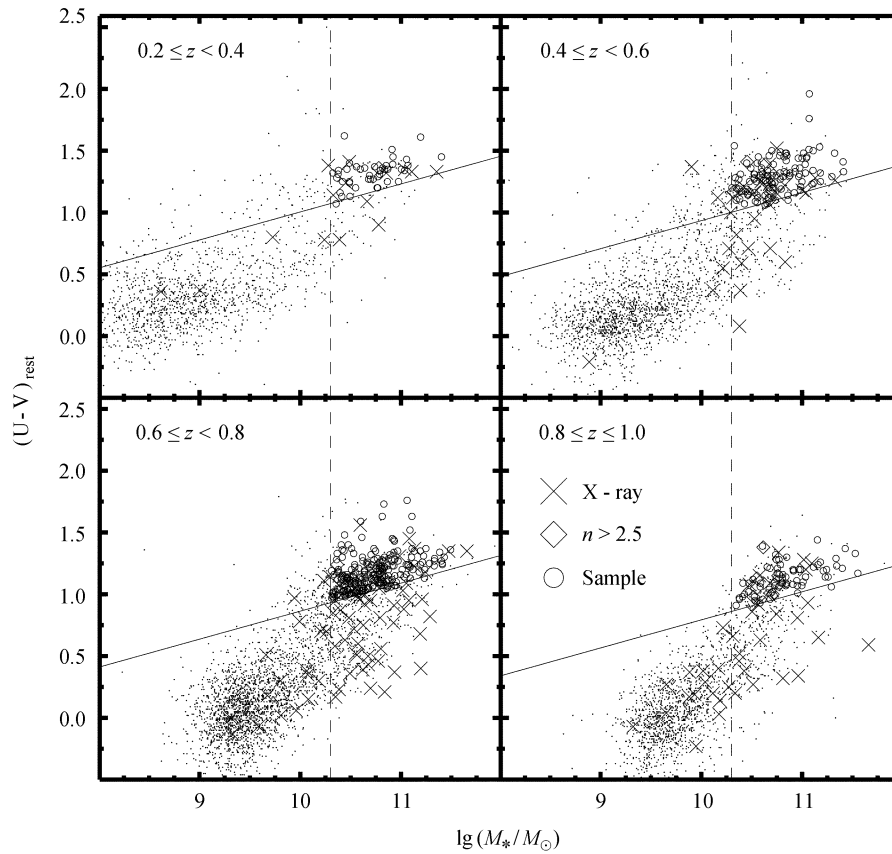


图 1 CDFS 天区中视星等 $m_R < 24$ 星系的静止 U-V 颜色 - 恒星质量图. 实线是 red sequence 与 blue cloud 在红移 0.3、0.5、0.7 和 0.9 的区分标准. 垂直的虚线是为了保证样本完备性加入的恒星质量标准. 点表示 COMBO-17 源表中的星系, 叉号表示可能是活动星系核的 X 射线发射源, 菱形表示 Sérsic 指数大于 2.5 但是通过查看形态被排除的源. 空心圈是我们样本选定的 456 个早型星系

Fig. 1 The rest-frame color U-V vs. stellar mass for galaxies with apparent magnitude $m_R < 24$ in the CDFS. Solid lines split red sequence and blue cloud. Dashed lines show the stellar mass cut above which our sample is complete up to $z = 1$. Dots represent galaxies in COMBO-17 catalogue. Crosses are X-ray detections, which are excluded from our sample. Diamonds mark galaxies with Sérsic index $n > 2.5$ but eliminated by visual check. Open circles show the final 456 early-type galaxies in our sample

3 结果和分析

我们的样本星系绝大部分都没有被 GALEX 和 MIPS $24 \mu\text{m}$ 单独探测到. 我们使用 stacking 技术得到紫外、红外流量以计算恒星形成率. 我们把样本分成 4 个红移区间: $[0.2, 0.4)$ 、 $[0.4, 0.6)$ 、 $[0.6, 0.8)$ 和 $[0.8, 1.0]$. 在不同的红移区间, 分别使用 stacking 技术以得到平均流量. 我们的 stacking 过程是在不同的红移区间, 分别以未探测到的源的位置为中心将它们的局部图像截取下来再作叠加, 由于随机涨落而使噪声降低, 从而可以测出它们的平均流量 (详细的描述参见文献 [33, 47]). 然后, 我们将单独探测到的源的流量和单独未探测到源的流量 (来自 stacking 估计) 相加再平均得到给定波段的平均流量. 这样, 我们得到从远紫外到中红外的宽波段能谱分布, 用来分析样本的星族组成.

3.1 恒星形成率

我们用紫外光度和红外光度来估计 4 个红移区间的平均恒星形成率. 这种恒星形成率计算方法包括了未受尘埃消光影响和被尘埃遮蔽的恒星形成活动. 总紫外光度是通过积分线性插值远紫外、近紫外、光学波段测光得到的静止参考系中 $1216 \sim 3000 \text{ \AA}$ 的能谱分布计算的. 根据观测 $24 \mu\text{m}$ 光度使用了 3 套红外 SED 模板 [48–50] 分别拟合, 再取平均得到总红外光度. 在早型星系中, 年老恒星 (如 AGB 星) 和星际介质会贡献一部分红外辐射, 这应该在计算恒星形成率时扣除. 所以我们基于下一小节的双成分 (年老、年轻星族) 拟合得到的年老成分, 从总红外光度中扣除与年老成分相联系的红外辐射. 我们假设年老成分具有和一个典型早型星系 (NGC 0584^[51]) 相同的红外与 $1 \mu\text{m}$ 波段流量比, 从而根据年老成分的 $1 \mu\text{m}$ 光度计算出相应的红外光度. 我们按照 Bell 等^[52]2005 年的公式计算恒星形成率. 这一公式假设初始质量函数为 Kroupa 形式得到的. 结果列于表 2 中.

表 2 不同红移的平均恒星形成率

Table 2 The average star formation rates for different redshifts

z	$\lg(L_{\text{UV}}/L_{\odot})$	$\lg(L_{\text{IR}}^{\text{total}}/L_{\odot})$	$\lg(L_{\text{IR}}^{\text{old}}/L_{\odot})$	$\lg(L_{\text{IR}}^{\text{young}}/L_{\odot})$	$\text{SFR}(M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1})$
0.2~0.4	9.08	9.82	9.02	9.75	0.8 ± 0.3
0.4~0.6	9.06	10.11	8.95	10.08	1.4 ± 0.5
0.6~0.8	9.24	10.14	9.06	10.10	1.6 ± 0.4
0.8~1.0	9.40	10.37	9.12	10.35	2.7 ± 1.0

在表 2 中, $L_{\text{IR}}^{\text{total}}$ 表示总红外光度, $L_{\text{IR}}^{\text{old}}$ 表示年老成分相应的红外辐射, $L_{\text{IR}}^{\text{young}} = L_{\text{IR}}^{\text{total}} - L_{\text{IR}}^{\text{old}}$. 可以看出, 年老星族贡献的红外光度所占比例较小 ($\lesssim 10\%$), 其不确定性对恒星形成率的估算影响较小.

3.2 星族分析

利用星族合成得到的星族模型, 我们拟合了从紫外到近红外观测的能谱分布来探索早型星系的星族本质. 太阳金属丰度的 Maraston 星族模型^[53] 被用来作为模型谱. 我们

采用 Kroupa 初始质量函数^[54].

很多证据已显示早型星系在高红移处形成, 所以早型星系中应该有一个年老星族成分. 另一方面, 根据近期的一些研究揭示早型星系中存在的少量恒星形成^[30] 以及一些早型星系是通过湿并合形成的, 因此占较小比例的年轻星族成分也应该存在于早型星系中. 由此, 我们假设早型星系的星族是由年老和年轻星族组成的, 其中年老星族占主要部分. 由于测定的能谱分布是一定质量范围的早型星系的平均结果, 我们进一步假设这年老成分的恒星形成历史都可以用指数衰减函数形式描述, 时标为 τ . 对于年轻星族, 选择简单星族和恒星形成率恒定的星族分别做拟合.

恒星诞生于富含气体和尘埃的区域中, 年轻恒星会受到尘埃消光影响. 通过假设被吸收的年轻恒星辐射都在红外波段被尘埃重新辐射出来, 我们计算得到消光后的能谱. 在计算中, 年轻星族对应的尘埃辐射是通过从总红外光度中扣除年老成分对应的红外光度得到的. 我们根据观测 $24 \mu\text{m}$ 光度使用了 3 套红外 SED 模板^[48-50] 分别拟合, 再取平均得到总红外光度. 在图 2 中用点划线表示这 3 套最佳拟合的平均总红外能谱分布. 年老成分的红外能谱分布使用 Dale 等^[49] 的模板, 假设它具有和一个典型早型星系 (NGC 0584^[51]) 相同的 $160 \mu\text{m}$ 与 $1 \mu\text{m}$ 波段流量比, 从而根据年老成分的 $1 \mu\text{m}$ 光度计算出来. 我们采用 Charlot 等^[55] 的消光曲线, 即 $\tau_\lambda \propto \lambda^{-0.7}$.

我们用最小二乘法拟合. 在拟合中, 假定不同红移范围的年老星族是同一星族成分, 这一星族被动演化依次历经不同红移范围. 年轻成分的年龄、比例和消光作为自由参数对每个红移范围的能谱分布作最佳拟合, 最优结果显示于图 2 中.

拟合得到的最优结果中年老成分的形成红移 $z_f = 7.0$; 年老成分指数衰减时标 τ 为 0.25 Gyr. 年轻成分为恒星形成率恒定的星族; 在红移范围 $[0.2, 0.4)$ 、 $[0.4, 0.6)$ 、 $[0.6, 0.8)$ 和 $[0.8, 1.0]$, 年轻成分年龄分别为 1.99 Gyr、0.07 Gyr、2.50 Gyr 和 1.58 Gyr, 所占比例分别为 0.6%、0.1%、1.8% 和 1.9%, 消光 A_v 分别为 0.87、1.10、1.08 和 1.07, 年轻星族对应的恒星形成率分别为 $0.4 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $1.4 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $0.9 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 和 $1.6 M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$. 拟合得到的恒星形成率普遍比按照 Bell 等^[52]2005 年的公式计算的恒星形成率要低, 这是因为 Bell 等的公式是通过一个年龄为 100 Myr、恒定恒星形成率的星族的紫外光定标的, 而年龄老于 100 Myr 恒星的紫外光没有被包括在内, 造成恒星形成率估算偏高.

4 结论

我们结合来自 GALEX、MUSYC、IRAC 和 MIPS 的测光和来自 COMBO-17 的红移研究 $0.2 \leq z \leq 1.0$ 红移范围早型星系的恒星形成活动和星族, 根据颜色、Sérsic 指数和恒星质量选择了一个完备早型星系样本. 我们把样本分为 4 个红移区间 ($[0.2, 0.4)$ 、 $[0.4, 0.6)$ 、 $[0.6, 0.8)$ 和 $[0.8, 1.0]$), 使用了 stacking 技术得到紫外和红外光度. 然后通过紫外 (示踪没被遮挡的恒星形成) 和红外 (示踪被遮挡的恒星形成) 光度计算恒星形成率. 4 个红移区间 ($[0.2, 0.4)$ 、 $[0.4, 0.6)$ 、 $[0.6, 0.8)$ 和 $[0.8, 1.0]$) 的平均恒星形成率分别为 $(0.8 \pm 0.3) M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $(1.4 \pm 0.5) M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $(1.6 \pm 0.4) M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$ 和 $(2.7 \pm 1.0) M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$.

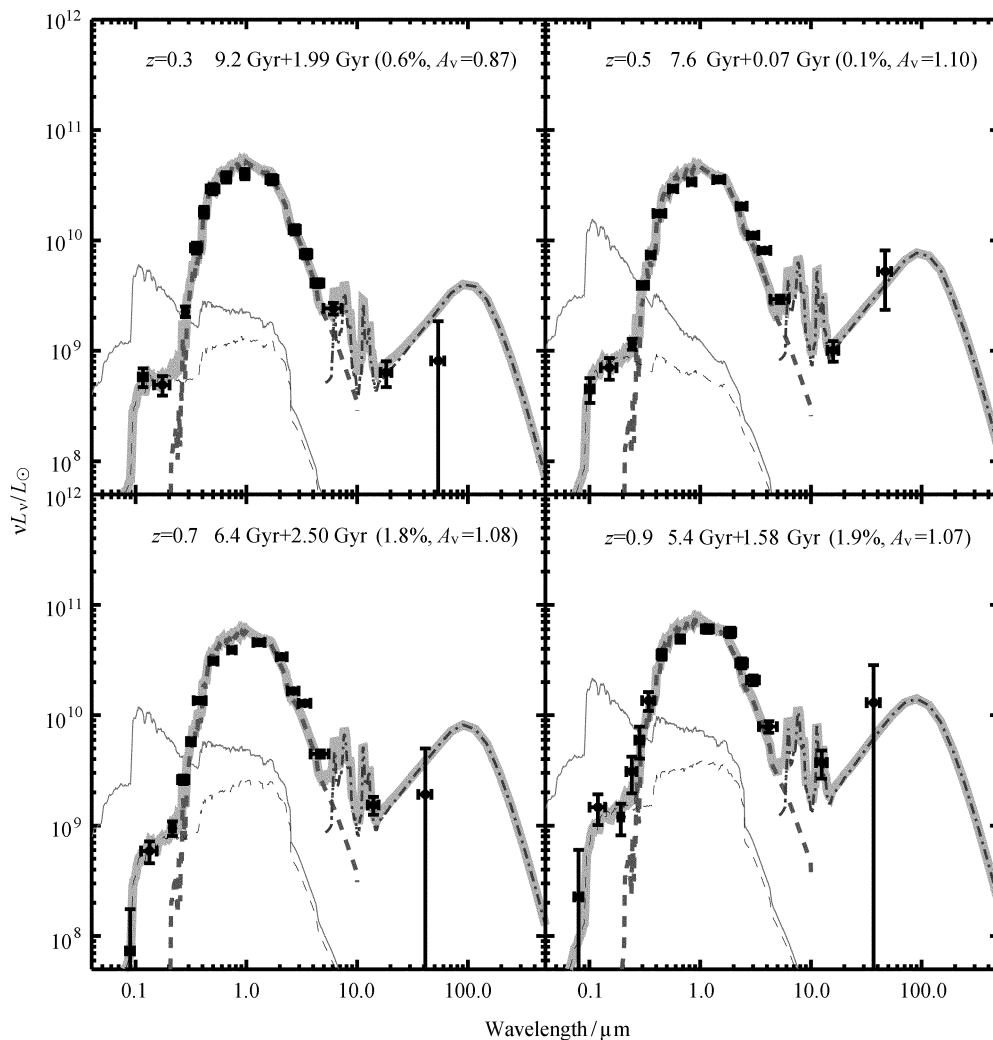


图 2 星族能谱分布分析结果. 带有误差棒的是观测值. 粗虚线表示年老成分. 细实线表示消光前的年轻成分, 细虚线为消光后的年轻成分. 点划线是尘埃辐射, 灰色粗实线是恒星与尘埃辐射之和

Fig. 2 The decomposition of average SEDs. Dots with error bars are the observed luminosities of early-type galaxies within $0.2 \leq z \leq 1.0$. Thick dashed lines indicate the old component. Thin solid lines and thin dashed lines represent the young component without extinction and after extinction, respectively. Dot-dashed lines show the dust emission. Grey thick solid lines are the combined spectra

而结合能谱分布星族分析给出的恒星形成率分别为 $0.4 M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $1.4 M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $0.9 M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 和 $1.6 M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。后者普遍比前者要低, 这归因于前者计算公式的定标中没有考虑年龄大于 100 Myr 恒星的紫外光。通过红外和紫外光度计算的恒星形成率从红移 $z = 1.0$ 以来逐渐递减。如果把恒星形成率对时间积分, 再考虑到一部分形成的恒星质量又会随恒星演化而损失, 我们估计的红移 1.0 以来恒星形成活动贡献的恒星质量小于 $M_{*} > 10^{10.3} M_{\odot}$ 早型星系恒星质量的 15%。所以, 来自于自身的恒星形成远不足以匹配早型星系的质量增长, 大质量富气星系的湿并合^[11]对早型星系的贡献不显著。Kaviraj 等^[56]2008 年亦得到类似的结果。然而他们使用的近紫外探测到的年轻星族的年龄在数亿年以上, 而非正在形成的星族, 由此估计的恒星形成率会有一定不确定性。我们的测量考虑了尘埃消光的影响, 结果更可靠。考虑到从红移 1 到 0, 处于红色序列星系中的恒星质量至少增加了 1 倍^[7], 应该是与大规模恒星形成活动关联弱的物理过程 (如干并合等) 驱动早型星系的增长。通过星族合成分析, 我们确认早型星系中的主体星族形成于高红移, 而后被动演化。

参 考 文 献

- [1] Blanton M R, Moustakas J. *ARA&A*, 2009, 47: 159
- [2] Renzini A. *ARA&A*, 2006, 44: 141
- [3] Panter B, Jimenez R, Heavens A F, et al. *MNRAS*, 2007, 378: 1550
- [4] Franx M, Labbé I, Rudnick G, et al. *ApJ*, 2003, 587: L79
- [5] Abraham R G, Nair P, McCarthy P J, et al. *ApJ*, 2007, 669: 184
- [6] Taylor E N, Franx M, van Dokkum P G, et al. *ApJ*, 2009, 694: 1171
- [7] Borch A, Meisenheimer K, Bell E F, et al. *A&A*, 2006, 453: 869
- [8] Cimatti A. *AIPC*, 2009, 1111: 191
- [9] Faber S M, Willmer C N A, Wolf C, et al. *ApJ*, 2007, 665: 265
- [10] Scarlata C, Carollo C M, Lilly S J, et al. *ApJS*, 2007, 172: 494
- [11] Genzel R, Tacconi L J, Rigopoulou D, et al. *ApJ*, 2001, 563: 527
- [12] van Dokkum P G. *AJ*, 2005, 130: 2647
- [13] Bell E F, Naab T, McIntosh D H, et al. *ApJ*, 2006, 640: 241
- [14] van der Wel A, Rix H W, Holden B P, et al. *ApJ*, 2009, 706: L120
- [15] Bundy K, Fukugita M, Ellis R S, et al. *ApJ*, 2009, 697: 1369
- [16] Trujillo I, Conselice C J, Bundy K, et al. *MNRAS*, 2007, 382: 109
- [17] van der Wel A, Holden B P, Zirm A W, et al. *ApJ*, 2008, 688: 48
- [18] van Dokkum P G, Franx M, Kriek M, et al. *ApJ*, 2008, 677: L5
- [19] van Dokkum P G, Whitaker K E, Brammer G, et al. *ApJ*, 2010, 709: 1018
- [20] Ferreras I, Lisker T, Pasquali A, et al. *MNRAS*, 2009, 395: 554
- [21] Bournaud F, Jog C J, Combes F. *A&A*, 2007, 476: 1179
- [22] Naab T, Johansson P H, Ostriker J P. *ApJ*, 2009, 699: L178
- [23] Hopkins P F, Bundy K, Hernquist L, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 1099
- [24] Khochfar S, Burkert A. *ApJ*, 2003, 597: L117
- [25] Drory N, Alvarez M. *ApJ*, 2008, 680: 41

- [26] Hopkins P F, Cox T J, Kereš D, et al. *ApJS*, 2008, 175: 390
- [27] Nipoti C, Treu T, Auger M W, et al. *ApJ*, 2009, 706: L86
- [28] van der Wel A, Bell E F, van den Bosch F C, et al. *ApJ*, 2009, 698: 1232
- [29] Yi S K, Yoon S J, Kaviraj S, et al. *ApJ*, 2005, 619: L111
- [30] Kaviraj S, Schawinski K, Devriendt J E G, et al. *ApJS*, 2007, 173: 619
- [31] Huang S, Gu Q S. *MNRAS*, 2009, 398: 1651
- [32] Kaviraj S, Tan K M, Ellis R S, et al. *arXiv:2010.2141*
- [33] Zheng X Z, Bell E F, Rix H W, et al. *ApJ*, 2006, 640: 784
- [34] Martin D C, Fanson J, Schiminovich D, et al. *ApJ*, 2005, 619: L1
- [35] Gawiser E, van Dokkum P G, Herrera D, et al. *ApJS*, 2006, 162: 1
- [36] Fazio G G, Hora J L, Allen L E, et al. *ApJS*, 2004, 154: 10
- [37] Rieke G H, Young E T, Engelbracht C W, et al. *ApJS*, 2004, 154: 25
- [38] Morrissey P, Schiminovich D, Barlow T A, et al. *ApJ*, 2005, 619: L7
- [39] Taylor E N, Franx M, van Dokkum P G, et al. *ApJS*, 2009, 183: 295
- [40] Damen M, Labbé I, Franx M, et al. *ApJ*, 2009, 690: 937
- [41] Wolf C, Meisenheimer K, Kleinheinrich M, et al. *A&A*, 2004, 421: 913
- [42] Häussler B, McIntosh D H, Barden M, et al. *ApJS*, 2007, 172: 615
- [43] Bell E F, McIntosh D H, Barden M, et al. *ApJ*, 2004, 600: L11
- [44] Pannella M, Hopp U, Saglia R P, et al. *ApJ*, 2006, 639: L1
- [45] Lehmer B D, Brandt W N, Alexander D M, et al. *ApJS*, 2005, 161: 21
- [46] Caldwell J A R, McIntosh D H, Rix H W, et al. *ApJS*, 2008, 174: 136
- [47] Zheng X Z, Dole H, Bell E F, et al. *ApJ*, 2007, 670: 301
- [48] Lagache G, Dole H, Puget J L, et al. *ApJS*, 2004, 154: 112
- [49] Dale D A, Helou G. *ApJ*, 2002, 576: 159
- [50] Chary R, Elbaz D. *ApJ*, 2001, 556: 562
- [51] Dale D A, Gil de Paz A, Gordon K D, et al. *ApJ*, 2007, 655: 863
- [52] Bell E F, Papovich C, Wolf C, et al. *ApJ*, 2005, 625: 23
- [53] Maraston C. *MNRAS*, 2005, 362: 799
- [54] Kroupa P. *MNRAS*, 2001, 322: 231
- [55] Charlot S, Fall S M. *ApJ*, 2000, 539: 718
- [56] Kaviraj S, Khochfar S, Schawinski K, et al. *MNRAS*, 2008, 388: 67

The Evolution of Star Formation in Early-type Galaxies

WANG Fang^{1,2} ZHENG Xian-zhong¹

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT How the star formation activity in early-type galaxies (ETGs) evolves over cosmic time provides observational constraints on the picture of the formation and evolution of ETGs. Using HST/ACS (Hubble Space Telescope/Advanced Camera for Surveys) imaging data from the GEMS (Galaxy Evolution from Morphology and SEDs) survey and multi-band data in the CDFS (Chandra Deep Field South), a complete sample of 456 ETGs within $0.2 \leq z \leq 1$ is selected based on morphology, color and stellar mass. With stacking technique, the UV and IR average luminosities are derived from GALEX (Galaxy Evolution Explorer) and Spitzer observations and the average star formation rates are estimated. Our results show that the star formation intensities of ETGs are low ($\text{SFR} < 3 M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$) and decline with decreasing redshift. The total stellar mass contributed by star formation since $z = 1$ is less than 15%. Stellar population modeling confirms that the bulk of stars in ETGs were formed at early time ($z > 2$).

Key words galaxies: elliptical and lenticular, cD, galaxies: star formation, galaxies: evolution