

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.02.02

恒星形成星系主序关系的研究进展

高宇翔^{1,2}, 郭可欣^{1,2}, 郑宪忠¹

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 恒星形成星系的恒星形成率与其恒星质量的相关关系被称为恒星形成星系主序关系, 是描述星系演化的基本关系之一。准确测定不同红移处主序关系的斜率、弥散和零点能够对理解星系恒星形成活动的演化及其物理过程提供关键的观测限制。已有的研究揭示, 恒星形成星系的整体恒星形成率从 $z \simeq 2$ 到 $z \simeq 0$ 下降为原值的 1/30, 气体消耗时标却由 5 亿年增至 15 亿年; 主序关系的斜率在大质量和小质量星系段有变化, 反映出决定恒星形成活动的物理过程有系统差别; 而星系可能经历多个阵发性的恒星形成爆发活动, 有助于更好地解释主序关系的弥散。随着观测能力的提升, 对高红移宇宙 ($z \simeq 1 \sim 3$) 的恒星形成星系的研究也更加深入。恒星形成星系主序关系的特征随红移的变化规律为理解星系演化提供关键的观测约束。

关键词: 恒星形成; 星系演化; 气体吸积; 质量增长

中图分类号: P157.9

文献标识码: A

1 引 言

基于斯隆数字化巡天 (SDSS^[1]), 对近邻宇宙的星系进行大样本统计分析, 结果表明星系的颜色、形态、星族年龄、恒星质量、比恒星形成率等多方面特征均呈现系统性的双峰 (bimodality) 分布^[2, 3]。据此, 星系可以分为恒星形成星系和宁静星系两类, 研究这两类星系的形成是理解星系形成和演化的关键之一。早期光学窗口的大规模红移巡天 (例如 COMBO-17^[4] 和 DEEP2^[5]) 提供了遥远星系观测样本用于研究星系特征随时间演化的规律, 揭示了在宇宙约 67 亿年期间, 星系的颜色和比恒星形成率仍然具有双峰性分布, 而蓝星系的数密度自 $z \simeq 1$ 以来几乎保持不变, 红星系的数密度增加近一倍^[6, 7]; 而恒星形成活动主要发生在蓝星系一族中, 表明在演化过程中必须有蓝星系不断终止恒星形成 (quenching) 变成红星系^[11]; 红星系数目的增长不仅来自蓝星系经历特定物理过程 (如星系并合) 演变而来, 也可由低质量的红星系之间的干并合 (气体含量较少) 形成更大质量的红星系^[7]。基于近红外深

收稿日期: 2014-12-15; 修回日期: 2015-03-02

资助项目: 国家自然科学基金 (U1331110); 973 项目 (2013CB834900)

通讯作者: 高宇翔, yxgao@pmo.ac.cn

场巡天 (NEWFIRM Medium-Band Survey^[8]、CANDELS^[9]、UltraVISTA^[10]), 对更高红移星系特征进行大样本统计研究表明, 随红移增加 ($z < 3$), 宁静星系 (红星系) 的数密度迅速减少, 而恒星形成星系 (蓝星系) 在数目上占主导。高红移恒星形成星系富集气体和尘埃, 近半辐射能量在远红外波段, 因此远红外观测是准确测定高红移星系恒星形成率和研究星系形成和演化的关键^[12, 13]。Spitzer 红外望远镜河外巡天^[14]、Herschel 远红外巡天^[15]和地面亚毫米波巡天^[16]观测研究揭示了高红移星系中被尘埃遮蔽的恒星形成活动特征和大样本统计规律。多波段深场巡天研究表明, $z \simeq 2$ 以来的不同宇宙时期, 恒星形成星系的恒星质量 (M_*) 与恒星形成率 (SFR) 均呈现出紧密的相关关系 ($SFR \propto M_*^{0.6} \sim M_*^{1.0}$), 亦即恒星形成星系主序关系^[17-19]。

恒星形成星系主序关系作为星系天文学领域近年来建立的基本观测关系之一, 描述星系演化过程中通过恒星形成增长恒星质量的速率, 从而对不同类型星系的恒星形成历史乃至整个宇宙的恒星形成历史提供重要的观测约束^[20]。本文致力于总结恒星形成星系的主序关系方面的研究进展, 讨论这些进展在理解恒星形成星系与宁静星系之间的演化关联及星系 quenching 物理机制等方面的促进作用, 涉及驱动或影响星系演化背后的星系内部和外部环境等物理过程。这些机制具体在什么情况下起到多大的作用? 星系如何在主序关系上长期演化并迅速脱离主序关系? 而星系并合作用所导致的星暴星系是否在这一转变过程中起到关键作用? 如果不考虑相互作用, 星系自身又是如何演化? 本文亦会适当介绍涉及上述问题的研究进展。

本文第 2 章阐述恒星形成星系主序关系的测量结果和误差分析, 第 3 章讨论主序关系对星系形成与演化理论的限制, 第 4 章进行简单总结与展望。

2 恒星形成星系主序关系

特定红移处恒星形成星系的主序关系由斜率、弥散和零点等参数来描述。主序关系的斜率反映不同质量恒星形成星系间比恒星形成率的差别; 主序关系的本征弥散由相同质量星系之间恒星形成历史的差异造成; 而零点反映宇宙整体的恒星形成活动强度。准确测定不同红移处恒星形成星系主序关系是当前河外天文学的重要研究任务之一。此外, 星系恒星形成活动与星系结构的演化关联、星系 quenching 等过程对恒星形成星系主序关系均有影响。

2.1 主序关系测量结果

基于 AEGIS 巡天项目, Noeske 等人^[17]研究了 2905 个红移范围在 $0.2 < z < 1.1$ 间的场星系的恒星形成活动, 其完备样本的恒星形成率与恒星质量存在紧密的相关关系 ($SFR \propto M_*^{0.67}$); 给定红移区间和恒星质量, 星系恒星形成率的弥散在 $\pm 0.3 \text{ dex}$ 之内。他们注意到主序关系整体上随着红移增加不断往高恒星形成率方向移动; 认为 $z \simeq 1$ 以来宇宙中恒星形成活动的主要模式是星系平均恒星形成率的逐渐下降, 气体消耗可能是导致恒星形成率下降的主因。Elbaz 等人^[18]用 GOODS 巡天项目的多波段数据证实主序关系存在于 $0.8 < z < 1.2$ 的红移范围内。Daddi 等人^[19]把主序关系推广到 $z \simeq 2$ 左右。随后, 几个研究团队^[21-23]证实, 主

序关系在更高红移仍可能存在。

表 1 罗列了近 10 年来对 $0 \leq z \leq 7$ 范围内的恒星形成星系主序关系测量的主要结果, 图 1 比较了不同研究工作给出的不同红移处的主序关系。由这些结果可以看出, 主序关系的斜率范围大约是 0.6~1.0, 其中近邻星系的主序关系斜率较小, 但在 $z \approx 1$ 已经达到 0.9 左右^[18, 24], 不同 SFR 探针的测量结果可能存在系统差别^[25, 26]。红移在 0~2 范围内, 主序关系零点 ($10^{10} M_{\odot}$) 增加了将近 30 倍^[19], 红移在 2~4 范围内, 主序关系零点也逐渐增加^[27]。由于高红移星系 ($z \gtrsim 4$) 基于 UV 斜率的消光改正准确性有待检验, $z \approx 4$ 以后的零点数值或被低估^[21-23]。若考虑星云发射线的污染, 恒星质量或被高估, 在 $6 \leq z \leq 7$ 范围内可能有上升趋势^[28]。除此之外, 主序关系具有一定程度的弥散 ($1\sigma \lesssim 0.3$ dex), 随红移变化不明显^[29]。

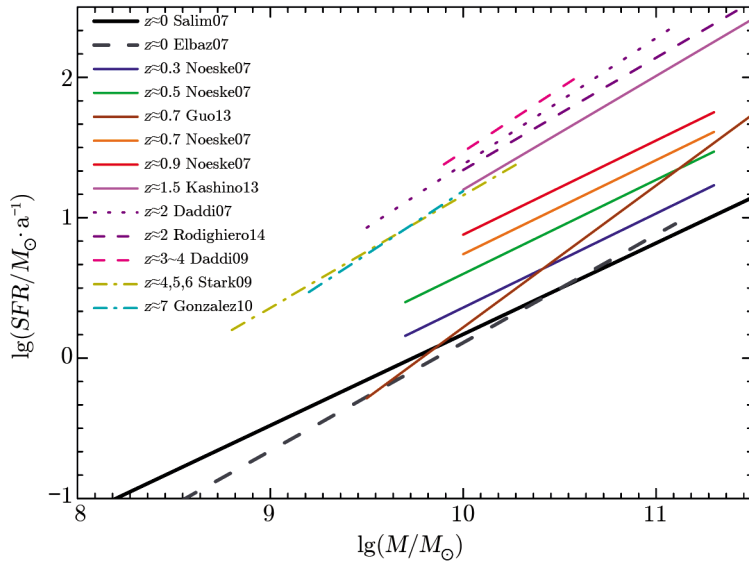


图 1 恒星形成星系主序关系斜率测量结果比较

上述观测结果及所显示的趋势并非完全一致, 原因诸多, 如样本选取的差异、数据深度的差异等; 除去主序关系的本征弥散, 实际观测到的主序弥散还不可避免地受到恒星形成率和恒星质量测量精度的影响。恒星形成率探针的选取对主序参数 (斜率和弥散等) 测定具有一定影响。星系的紫外辐射主要由大质量年轻恒星贡献, 很大程度上代表了星系整体恒星形成活动, 考虑到尘埃消光, 往往还要加入红外波段的信息, 否则会低估恒星形成率, 造成主序关系斜率偏小。星系恒星质量的跨度很大, 分布在 $10^8 \sim 10^{12} M_{\odot}$ 范围内, 简单讨论某个红移范围内所有质量的星系可能导致主序关系的结果误差较大。

近年来有一些研究表明, 恒星形成星系主序关系的参数有可能随星系恒星质量而变化。Karim 等人^[32]利用射电连续谱估计恒星形成率, 由低质量端得到的比恒星形成率 ($SSFR$) 与直接由高质量外推的结果偏差很大。Whitaker 等人^[29]随后指出主序关系需要由双幂律函数拟合。在确保质量完备度的情况下, 他们进一步证实 $0.5 < z < 2.0$ 红移范围内主序关系在高质量段和低质量段的斜率存在明显差异。Schreiber 等人^[33]在最新的工作中亦研究主

表 1 恒星形成星系主序关系主要测量结果

红移范围	质量区间 $\lg(M_*/M_\odot)$	主序斜率 α	主序零点 β	主序弥散 /dex	恒星形成率探针	参考文献
0.005~0.2	8.1~11.7	0.65	0.17	0.3	UV	[24]
0.015~0.1	8~11.1	0.77	0.11	—	UV+IR	[18]
0.0~0.5	8.5~10.6	0.67	0.31	0.34	UV+IR	[29]
0.20~0.45	9.7~11.3	0.67	0.36	0.3	H α +UV+IR	[17]
0.45~0.70	9.7~11.3	0.67	0.60	0.3	H α +UV+IR	[17]
0.5~1.0	9.0~10.8	0.60	0.83	0.34	UV+IR	[29]
0.5~1.0	8.4~10.2	0.94	0.92	—	UV+IR	[34]
0.5~1.0	10.2~11.1	0.14	1.08	—	UV+IR	[34]
0.6~0.8	9.5~11.5	1.01	0.22	0.18~0.31	UV+IR	[35]
0.70~0.85	10.0~11.3	0.67	0.74	0.3	H α +UV+IR	[17]
0.85~1.10	10.0~11.3	0.67	0.88	0.3	H α +UV+IR	[17]
0.80~1.20	9.3~11.1	0.90	0.83	—	UV+IR	[18]
1.0~1.5	9.4~11.0	0.54	1.24	0.34	UV+IR	[29]
1.0~1.5	9.1~10.2	0.99	1.11	—	UV+IR	[34]
1.0~1.5	10.2~11.3	0.51	1.21	—	UV+IR	[34]
1.4~1.7	10.0~11.6	0.81	1.20	0.22	H α	[30]
1.4~2.5	9.5~11.1	0.90	1.38	0.16	UV	[19]
1.5~2.5	10.0~11.5	0.79	1.43	0.24	UV	[25]
1.4~2.5	10.0~11.5	0.86	1.37	—	FIR	[26]
1.4~2.5	10.0~11.5	0.80	1.34	—	UV+IR	[26]
1.5~2.0	9.8~11.1	0.47	1.55	0.34	UV+IR	[29]
1.5~2.0	9.2~10.2	1.04	1.28	—	UV+IR	[34]
1.5~2.0	10.2~11.6	0.62	1.37	—	UV+IR	[34]
2.0~2.5	10.0~11.3	0.41	1.77	0.34	UV+IR	[29]
2.0~2.5	9.2~10.2	0.91	1.44	—	UV+IR	[34]
2.0~2.5	10.2~11.6	0.67	1.45	—	UV+IR	[34]
3.1~4.4	9.9~10.6	0.90	1.47	0.36	UV+IR+Radio	[21]
3.67~4.25	8.8~10.3	0.8	1.16	—	UV+IR	[22]
4.54~5.04	8.8~10.1	0.8	1.16	—	UV+IR	[22]
5.76~6.26	9.1~9.8	0.8	1.16	—	UV+IR	[22]
6.9~7.7	9.2~10.0	0.9	1.19	—	UV	[23]

注：表格中的主序关系满足 $\lg(SFR) = \alpha \lg(M_*/10^{10} M_\odot) + \beta$ ，其中 α 是斜率， β 是 $10^{10} M_\odot$ 处的主序零点。恒星质量和恒星形成率归算至 Chabrier IMF 后给出主序关系参数^[31]。

序高质量斜率变平的问题。如图 2 所示, 采用双幂律函数拟合主序斜率, 低质量段比高质量段有更陡峭的斜率^[34]。而郭可欣等人^[35]对主序关系的定量分析表明, 主序关系的弥散也随星系的恒星质量而变化——大质量星系相对于小质量星系具有更加弥散的主序关系。主序关系的参数与星系的恒星质量相关, 暗示主导星系恒星形成的物理过程和星系的恒星质量有关。

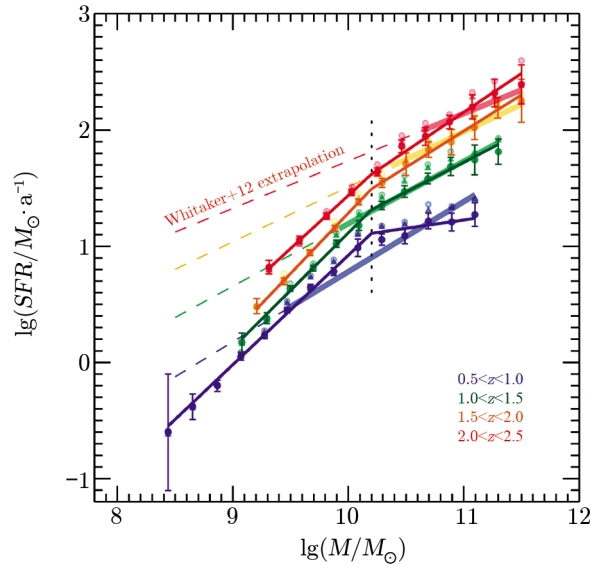


图 2 双幂律谱拟合主序关系^[34]

恒星形成星系主序关系在 $\lg(M_*/M_\odot)=10.2$ 前后具有不同的斜率。

2.2 “普通模式”与“星暴模式”

$SSFR$ 是星系相对恒星形成活动强度的量度, 经常用于比较不同星系类型间的恒星形成活动强弱。在各红移处, 大部分恒星形成星系都分布在主序关系上, 称为正常的恒星形成星系。而星暴星系因具有更高的 $SSFR$ 而偏离主序关系。广义上, 在短时间内快速形成大量恒星的星系被称为“星暴星系”, 在不同的文献中其定义不完全相同^[36]。此处所说的星暴星系, 是指相对具有更高的 $SSFR$ 且明显偏离恒星形成星系主序的恒星形成星系。从统计学角度来说, 这些星暴星系是主序关系的离群者 (outliers), 在 $SSFR$ 分布图中容易被辨识。低红移星暴星系的主要候选者是 (极) 亮红外星系, 高红移的亚毫米星系也具有星暴星系的特征。

Daddi 等人^[37]基于 CO 谱线观测的研究表明, 主序星系和星暴星系分属两种截然不同的恒星形成模式: (1) 长期稳定的普通模式; (2) 快速演化的星暴模式。星暴模式很可能发生在主并合期间, 具有近 10 倍于普通模式的恒星形成率以及相对更短的动力学时标。Elbaz 等人^[38]对赫歇尔空间天文台 (Herschel Space Observatory) 的远红外观测数据进行分析, 发现 $8 \mu\text{m}$ 热辐射改正因子 ($IR8 \equiv L_{\text{IR}}/L_8$) 整体上遵循高斯分布, 据此测定的主序关系不受红移和光度的限制, $IR8$ 可以用于区分两种恒星形成模式, $IR8$ 数值越高, 红外面亮度越高, $SSFR$ 也越高, 正是典型的星暴星系。Rodighiero 等人^[25]也对上述两种恒星形成模式展开研究, 发现在 $1.5 < z < 2.5$ 之间由星系并合引发的星暴星系数目很少, 仅占恒星形成星系样

本的 2%，对该红移范围恒星形成率密度的贡献仅有 10%。因此，对于 $z \simeq 2$ 的星暴星系来说，平均只在这一阶段停留 20 Ma 左右，可能是主序星系停止恒星形成和形态学变化的中间阶段。恒星形成星系主序关系的存在以及两种恒星形成模式并存，说明星系中恒星形成的主导模式应该是内禀的、温和的，而星系并合对大部分星系的恒星形成贡献很小。对并合星系样本恒星形成活动随红移演化的观测研究结果也支持这一结论^[39]。星系恒星形成主要发生在盘星系中^[40]，盘星系的长期演化 (secular evolution) 由缓慢而稳定的物理过程主导，与恒星形成的主导模式一致。盘星系内部由旋臂 (spiral arms) 和棒结构 (bars) 的运动驱动的演化过程是长期演化的重要组成^[41]。Cheung 等人^[42] 利用 Galaxy Zoo 项目研究具有棒状结构的盘星系，发现无论是经典核球还是长期演化所致的伪核球，均与棒状结构的形成与演化有关联，他们认为棒状结构的形成与演化是推动星系长期演化的关键因素之一。另一方面，星系长期演化也可以由外部物理过程驱动。盘星系受周围伴星系长时标的潮汐扰动 (harassment) 会引起不对称结构 (asymmetry)、翘曲 (swarps)、潮汐尾 (tidal tails)、盘不稳定而形成棒旋结构等，也会触发非星暴模式的恒星形成活动。星系的次并合 (minor merger) 显然也会触发恒星形成活动，增加星系恒星质量，驱动主星系的形态结构演化^[43, 44]。由于从观测上很难清晰证认次并合事件，这一机制对星系增长和演化过程中所起作用的重要性尚有待研究。

2.3 “数目主序”与“结构主序”

恒星形成星系在主序关系 $\lg(SFR) - \lg(M_*)$ 参数空间呈正态分布，直观上此恒星形成主序关系即为“数目主序” (Number MS)。而星系在质量增长不断演化的过程中，可能同时也伴随着形态结构的改变。有效半径和 Sérsic 指数 (n) 是用于刻画星系面亮度分布的两个基本参数，前者描述面亮度轮廓的特征大小，对应星系的物理尺寸 (size)；后者则描述面亮度轮廓的锐度 (cuspliness)，反映星光的聚集程度， n 值越大则星光聚集程度越大。一般来说，恒星形成星系光度的径向分布遵循 $n \simeq 1$ ，即指数盘的形式，而宁静星系通常有 $n \simeq 4$ ，即 de Vaucouleurs 形式。Wuyts 等人^[45] 首次分析恒星形成星系的主序关系与星系有效半径和 Sérsic 指数的相关关系，发现盘星系和恒星形成星系在 $SFR - M_*$ 平面上表现出相同的聚集，并将其称为恒星形成星系的“结构主序” (Structural MS)。图 3 显示 $SFR - M_*$ 关系，图中不同颜色表示不同位置处星系子样本的有效半径和 Sérsic 指数的中值。可以看出，恒星形成星系由盘星系主导，它们的有效半径整体上比宁静星系和星暴星系都要大；同时，越是偏离主序关系，星系的光度分布就越聚集。图 3 中每个小图的右下方是大质量宁静星系，通常具有 de Vaucouleurs 形式的亮度轮廓，分布于“结构主序”之下。研究表明，这样的“结构主序”在 $z \simeq 2.5$ 的时候就已经初步成形，可见抑制恒星形成活动的机制可能在早期宇宙中就发挥作用，使得星系分成两族，并伴随星形态和结构参数的变化。他们还注意到，横跨主序关系，从宁静星系到星暴星系，Sérsic 指数在恒星形成率达到极大值附近出现反转，和主序关系以下向宁静星系过渡位置的 Sérsic 指数相一致。综合研究同时发现，宁静星系的数密度随红移降低而增加，结果暗示主序星系向宁静星系的演化过程中可能存在剧烈恒星形成和质量迅速增长的阶段。

2.4 主序星系的分辨结构

对星系中恒星形成的研究，尤其是在亚星系尺度上的高分辨率研究，对我们理解星系

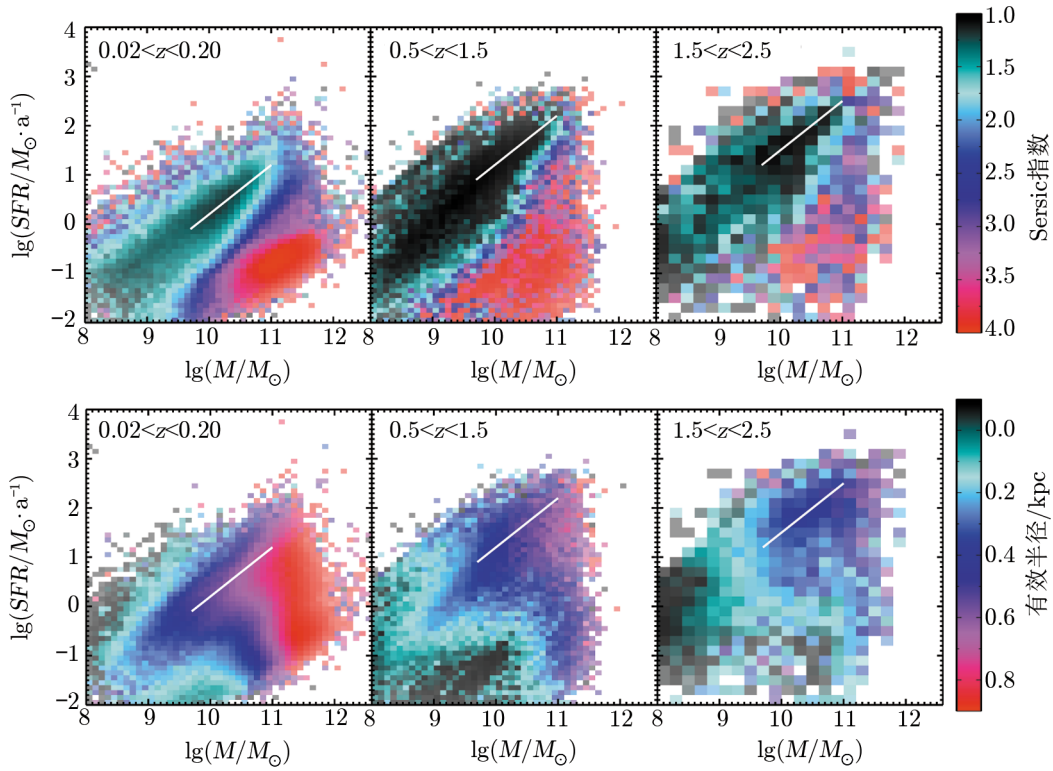


图 3 恒星形成星系的“结构主序”^[45]

结构的形成、星族的演化以及限制当前的宇宙学模型都具有重要的意义。SDSS-IV 巡天中的 MaNGA 项目^[46]计划获得 10000 个近邻星系的二维光谱, 系统研究近邻宇宙中星系的星族和动力学特征。在高红移宇宙, 星系中恒星形成活动更为剧烈。对高红移星系的直接观测研究, 是理解大质量星系的形成及其物理机制的关键。由于观测设备和技术手段的限制, 人们对高红移星系的认识很长一段时间都来自对星系整体的颜色、光度、质量、恒星形成率等性质的测量。对高红移星系基于哈勃空间望远镜 (HST) 的高分辨率近红外成像的研究, 在很长一段时期里局限于近红外摄影及多目标光谱仪 (NICMOS) 的小视场观测^[47, 48]。2009 年 HST 成功安装新一代广角照相机 (Wide Field Camera 3, WFC3), 提供大视场和高探测灵敏度近红外高分辨率成像。CANDELS 巡天项目利用这一观测仪器陆续对 GOODS-South、GOODS-North、COSMOS、UDS 和 EGS 五大深场进行持续不断的高分辨率成图观测^[9, 49], 提供的数据能够用于大样本、高红移、大质量星系进行亚星系尺度的颜色测量和星族分析。Wuyts 等人利用 ACS 和 WFC3 的多波段深场巡天图像分别获取 $0.5 < z < 1.5$ 和 $1.5 < z < 2.5$ 之间 323 和 326 个较大质量 ($M_* > 10^{10} M_\odot$) 恒星形成星系的测光信息, 据此构建高红移恒星形成星系的颜色、恒星质量、年龄、尘埃消光等随半径变化的解析图谱。他们发现高红移恒星形成星系普遍具有分布在中心以外区域的团块结构 (clumps)。这些结构具有相对星系其他结构偏蓝的静止波段 $U - V$ 颜色, 其近期的恒星形成活动贡献了星系整

体 19% 的恒星形成率, 但只占星系整体恒星质量的 7%。另外, 星系的表面恒星质量分布比亮度分布平滑得多, 可见这些年轻团块寿命较短 (约 100~200 Ma)。这不但与盘星系自内向外 (inside-out) 增长理论基本吻合, 也给团块在星系盘上迁移的可能时标提供了限制 (仅有 1~1.5 个星系动力学时标)^[50]。随后, Wuyts 等人^[51] 基于 HST 的近红外光谱观测 (3D-HST), 进一步对高红移恒星形成星系的 H α 二维图像进行叠加处理^[52, 53], 以更加准确地追踪星系盘上的局部恒星形成活动。结合恒星质量在星系盘上的分布, 他们发现, 可以分别以恒星质量面密度和恒星形成率面密度为横、纵坐标构建一条“解析的恒星形成星系主序”。如图 4 所示, “解析主序”与星系尺度上的恒星形成星系主序^[29]相一致, 即在亚星系 (kpc) 尺度上, 恒星形成活动与恒星质量也具有与整个星系相似的相关关系, 其恒星形成与质量积累的过程与整个星系相一致。高红移星系中相对于星系盘有更活跃的恒星形成表现的团块结构, 则可以认为其在“解析主序”上的表现与作为“outliers”的星暴星系在传统星系尺度的“数目主序”上的位置相吻合。

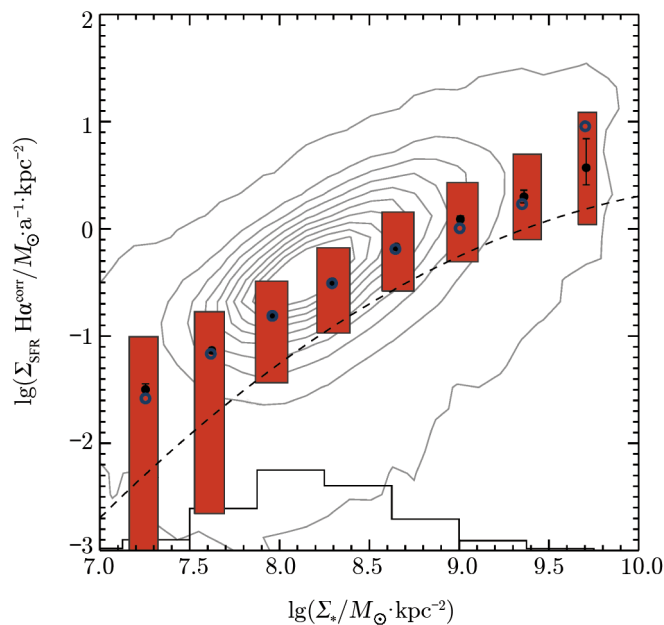


图 4 解析的恒星形成星系主序^[51]

虚线标记了 Whitaker 等人^[29] 所得到的星系尺度的恒星形成星系主序关系斜率。

2.5 主序关系的误差分析

2.5.1 恒星形成星系的选取

有恒星形成活动的星系, 光学颜色通常更蓝, 利用该特征可与宁静星系区别开来。因此, 通过连续谱的颜色特征来证认恒星形成星系, 是研究恒星形成星系主序关系时常用的样本选择方法。下面介绍几种常用的颜色选择法并讨论其选择效应。

Lyman-break 技术是搜寻高红移恒星形成星系 ($z \sim 3$) 的传统手段^[54], 基本原理是, 静

止波段下超出 Lyman 极限 912 Å 相应能量的连续谱辐射几乎都会被中性氢吸收从而产生截断效应^[55, 56]。星系能谱分布的截断特征从 $z \simeq 3$ 开始进入光学窗口, 被地面或空间望远镜捕获, 通过测量紫外和光学相邻波段的流量差异, 初步筛选出恒星形成星系。Lyman-break 技术大幅提升高红移恒星形成星系的巡天效率, 理论上可以搜寻 $z \simeq 4, 5, 6$ 甚至更高红移的恒星形成星系 (亦有少量 $z \simeq 7, 8, 9$ 的恒星形成星系被探测到^[57]), 但后续光谱观测的难度也随之增加。

BzK 颜色分类是区分 $1.4 < z < 2.5$ 范围内恒星形成星系和宁静星系的有效方法^[58]。Daddi 等人按如下方法定义 BzK 参数: $BzK \equiv (z - K)_{AB} - (B - z)_{AB}$ 。在 $(z - K)$ vs $(B - z)$ 的双色图中, 恒星形成星系满足 $BzK \geq -0.2$, 这个区域的星系具有恒星形成星系的 [O II] 发射线特征和 UV 连续谱特征, 宁静星系满足 $BzK < 0.2$ 以及 $(z - K)_{AB} > 2.5$, 这个区域的星系具有年老星系的谱线特征。

考虑到尘埃消光和红化效应, 单一的光学颜色并不能很好地体现星系的本质属性, 天文学家通过双色图 (color-color diagram) 以及拟合星系能谱分布 (SED fitting) 等方法有效区分恒星形成星系和宁静星系这两类在恒星形成活跃程度上差别明显的星系。 UVJ 颜色分类是区分 $z \simeq 2$ 至今恒星形成星系与宁静星系的新方法^[59]。从 $z \simeq 0$ 直到 $z \simeq 2$ 左右, 两类星系在 $(U - V)$ vs $(V - J)$ 的双色图各自成团。 $U - V$ 颜色偏红的星系可能是星族偏老的宁静星系或者被尘埃遮蔽的星暴星系; 而 J 波段已经进入红外, 不受尘埃影响的宁静星系 $V - J$ 颜色偏蓝, 恰好与由于尘埃遮蔽 $V - J$ 颜色偏红的活动星系区分开来。因此 UVJ 颜色分类方法能够有效地打破富尘埃恒星形成星系与宁静星系之间的简并关系。到了 $z \simeq 2.5$ 甚至更高红移处, 宁静星系较为稀少, 星系呈两团分布的特征逐渐消失。

2.5.2 SFR 测量误差的影响

星系的恒星形成率是指星系将气体转化为恒星的速率, 通常以太阳质量每年作为计量单位。星系光谱中涉及恒星形成的信息主要来自静止波段的紫外辐射 (UV)、红外辐射 (IR) 以及部分复合发射线^[60]。目前广为使用的估算星系整体 SFR 的探针包括以下几种。

- (1) 紫外连续谱: 主要来自大质量年轻星的辐射;
- (2) 远红外连续谱: 被尘埃吸收以后再辐射的星光主要集中在远红外波段;
- (3) 原子发射线: 主要是大质量年轻星附近电离气体中产生的复合发射线, 常见的有 $H\alpha$ 发射线、[O II] 发射线等;
- (4) 分子发射线: 高阶 CO 等分子发射线可以示踪致密分子气体;
- (5) 射电连续谱: 大质量恒星超新星爆发遗迹产生非热辐射;
- (6) X 射线: 大质量恒星超新星爆发及双星吸积产生 X 射线辐射。

当前多波段数据的联合诊断将 SFR 测量的准确性大大提高, 并在很大程度上降低了系统误差的影响^[36]。紫外连续谱是估算近期 SFR 最直接的探针, 它可以示踪过去 10~200 Ma 形成的恒星, 其最大局限是无法避免尘埃消光的影响, 宽波段观测中常用的方法是通过 $FUV - NUV$ 颜色以及紫外和红外的光度比来估计尘埃消光^[61]。红外连续谱来自恒星形成过程中被尘埃吸收后再辐射的光, 其光度示踪尘埃遮蔽的恒星形成活动强度。在亮红外星系

中, 红外光度主导星系总的热光度, 因而可以很好地示踪 SFR 。但对于一般的恒星形成星系, 需要同时估计受尘埃遮蔽的和未受尘埃遮蔽影响的恒星形成活动。仅仅基于红外光度估计 SFR , 会带来系统性的偏差。另一方面, 年龄超过 100~200 Ma 的星族 (evolved stars) 会引起尘埃加热效应, 对红外光度有贡献, 一定程度上带来 SFR 测量定标误差较大的问题。星系的尘埃加热比例受星族比例影响, 实际使用中还需引入转换因子, 而星暴星系和宁静星系之间转换因子的差别可能高达 2 倍^[62, 63]。IR 结合 UV 连续谱或者可见光波段的探针, 可以同时兼顾不受尘埃影响的部分, 从而更好地示踪尘埃加热的年轻星族辐射强度, 确定 SFR 。原子发射线主要来自大质量年轻星附近的电离气体, 可以示踪最近 3~10 Ma 的恒星形成, 其中 $H\alpha$ 发射线在不同红移处均能示踪恒星形成, 中等红移还可以采用 $[O II]$ 禁线 (3727 Å), 但由于不同星系中的 $[O II]/H\alpha$ 差异很大, 所以 $[O II]$ 导出的 SFR 不确定性远大于 $H\alpha$ 导出的 SFR , 但 $H\alpha$ 导出的 SFR 在低端会有较大的系统误差。另一条重要的发射线是 $Ly\alpha$ (1216 Å), 其强度在 Case B 复合过程中比 $H\alpha$ 大 8.7 倍, 但在实际星际介质环境中, $Ly\alpha$ 线受制于尘埃吸收, 难以得到准确的逃逸因子, 有些情况下会造成较大的系统误^[64]。Rodighiero 等人对同一批恒星形成星系采用不同 SFR 探针进行研究, 发现 FIR 探针估计 SFR 所得到的主序关系与 UV 探针 (或 $H\alpha$ 探针) 估计 SFR 所得到的主序关系具有不同的斜率, 原因是 FIR 探针所选中的 outliers 比 UV 探针少得多^[26]。总之, 对同一星系样本采用不同 SFR 探针势必造成系统误差, 对主序关系的测定产生影响; 除了斜率, 还会增加 SFR 的弥散, 因此在估计主序关系的本征弥散时须扣除 SFR 和星系质量测量 (2.5.3 节将讨论) 的误差。

2.5.3 样本星系的质量完备性

恒星形成星系样本的恒星质量完备性表示该样本在多大程度上可以反映出不同质量星系之间的真实比例, 是影响主序关系测定的重要因素之一。星系恒星质量的测定通常是将星系 SED 与星族模型匹配, 确定星系星族的质光比, 再由光度估算出星系的恒星质量^[65]。基于给定初始质量函数 (IMF), 星族模型假设星系的恒星形成历史, 考虑元素增丰和消光情况, 给出覆盖多个参数空间的 SED 模型。天体观测是记录天体在特定波段的亮度。对应于同一探测亮度极限, 相同红移处不同质光比的星系的质量完备度会有系统差别; 而高光度的天体可以在更远的距离仍能够被探测到 (通常被称为 Malmquist bias), 造成不同红移星系样本的均匀性和完备性不同。随着红移增大, 保证样本完备度达到 95% 的质量极限也逐渐增大, 全部星系的质量极限大于只考虑活动星系的质量极限^[32]。在单一波段亮度极限条件下选择的恒星形成星系样本, 包括更多的高 SFR 的低质量恒星形成星系 (这类星系的内禀光度更大, 容易被探测到)。基于质量完备度不高的样本测定的主序关系受这一选择效应影响, 低质量端的 SFR 被高估, 主序关系的斜率会变平。

3 恒星形成星系主序关系的相关讨论

3.1 星系恒星形成活动的终止

主序关系研究表明, 在星系演化过程中持续不断有星系 quenching 变成宁静星系^[66]。这

一转换过程应当快速完成, 否则会对主序关系的弥散产生显著影响。结合具体观测事实, 星系 quenching 可能由不同的物理机制导致 (或共同导致)。常见机制大致被分为外部机制和内部机制^[67]。

星系 quenching 的外部机制主要是阻止外部气体冷却进入星系。对近邻星系的统计表明, 恒星质量超过 $3 \times 10^{10} M_{\odot}$ 的星系恒星形成活动显著减弱, 年老星族比例突然增高, 形态和结构也与低质量星系有明显差异^[68, 69]。对星系特征随红移演化的分析研究指出, 星系可能在增长到特定恒星质量时, 恒星形成活动开始被有效终止^[70]。基于上述结果提出的暗晕质量机制 (halo mass quenching) 是指当星系的暗晕质量超过极限质量, 暗晕引力产生的激波会加热周围气体, 使其无法有效冷却吸积到星系中^[71, 72]。星系 quenching 的内部机制通常是驱散星系中已经存在的气体或者使之无法参与恒星形成, 例如星暴产生的反馈 (stellar feedback) 和活动星系核反馈 (AGN feedback)^[73]。星暴活动和活动星系核会消耗内部气体, 产生的超星风加热气体, 阻止进一步气体冷却和恒星形成。星系形态学 quenching 是指星系核球的存在使盘中气体坍缩变得困难, 降低了恒星形成效率, 也是一种内部过程^[74]。除此之外, 星系团等高密度环境中存在的热气体的冲压 (ram-pressure) 和潮汐作用足以剥离卫星星系的气体, 从而达到 quenching 效果^[75, 76]。

Peng 等人^[70]研究了质量和环境对星系 quenching 的影响, 证明两种因素对恒星形成活动造成的影响至少从 $z \simeq 1$ 以后都是相互独立的。大质量星系 ($M_{*} > 10^{10.5} M_{\odot}$) 的 quenching 由质量决定; 对低质量星系而言, quenching 的主导机制由在高红移 ($z > 0.5$) 时期的星系并合机制转为低红移 ($z < 0.5$) 时期的环境因素触发。Cheung 等人^[67]考察恒星质量的中心面密度 (1 kpc 内), 认为 quenching 与星系中心结构可能具有更紧密的物理联系。 $z = 2.2$ 以后恒星质量超过 $3 \times 10^{10} M_{\odot}$ 的星系, 尽管大多数宁静星系都有核球结构, 但同时具有盘结构的星系也不在少数; 部分盘主导的大质量星系甚至有剧烈的恒星形成活动, 故大质量核球结构 (而非星系整体的大质量) 很可能是 quenching 的关键因素^[77, 78]。

星系并合激发星暴甚至活动星系核导致的星系 quenching 是快速过程, 即时标一般只有 0.5~1 Ga。高红移星系则主要经历快速过程, 这是因为星系并合在高红移宇宙更加频繁, 更充足的气体供给也将激发更剧烈的星暴和活动星系核^[79]。近年来的一些研究揭示, 星系 quenching 还会经历慢速过程。多数低红移绿谷 (green valley) 星系经历慢速过程, 主要分成两个阶段: (1) 内部气体消耗殆尽; (2) 外部盘结构消逝 (与 halo mass quenching 有关)^[78]。大部分绿谷星系已经完成第一阶段演化, 处在第二阶段, 时标长达几十亿年, 可能与核球形成有关^[80]。

3.2 主序关系的模型分析

检验主序关系与星系整体演化的关联有助于建立星系演化的完整图景。许多研究揭示, 星系整体演化呈 downsizing 模式, 即大质量星系在宇宙早期以更短的时标形成, 而小质量星系在后期形成且具有更长的形成时标^[81, 82]。Noeske 等人^[83]主张用气体消耗来解释 $z \simeq 1$ 以来恒星形成星系在 $SFR - M_{*}$ 关系图中的整体迁移, 并认为星系的初始形成红移和演化时标是质量的函数。基于此获得的模型生成的主序关系与实际观测到的主序关系相当吻合, 与 downsizing 理论图景一致。他们把这种依赖于恒星质量的星系形成过程称为“阶段式星系形

成”(staged galaxy formation)。

Dutton 等人^[84]尝试用盘星系形成和演化的模型研究恒星形成星系主序关系的演化。借助半解析模型工具,他们把内流、外流、恒星形成率和金属丰度表示成半径的函数,追踪原子气体、分子气体和恒星在盘上的增长演化情况。该模型在 $z=0, 1, 2, 3, 4, 6$ 等红移处生成的主序关系与实际观测结果匹配度很高,零点随红移增加而逐渐增大,弥散不随红移变化,斜率在中低红移处趋近于 1,高红移处略微有所下降。他们还注意到主序关系的整体演化不受反馈机制的影响,主序关系的弥散反映出不同星系之间气体吸积历史的差异。

借助数值模拟可以检验驱动星系中恒星形成的物理过程。最新的宇宙学流体动力学模拟 Illustris 成功重演 $0 \leq z \leq 4$ 的恒星形成星系主序关系,低质量端的弥散与实际观测结果^[85]基本相同,但在中红移 ($0 \leq z \leq 2$) 得到的零点明显偏低。模拟结果还表明 $10^{12} M_{\odot}$ 左右的暗晕具有最高的恒星形成效率(与之对应的恒星质量范围大约是 $10^{10} \sim 10^{11} M_{\odot}$),这类星系在 $z \simeq 4$ 以下贡献了绝大部分恒星形成率密度,与此前多数研究结果保持一致^[86]。随着工具和方法的不断完善,数值模拟有望在研究并理解星系形成和演化物理过程方面发挥更大的作用。

3.3 分子气体与主序关系

恒星形成于分子云中。已有大量观测证据表明,至少在星系和亚星系尺度上,恒星形成率面密度与分子气体面密度之间存在紧密相关关系,即 Kennicutt-Schmidt 关系^[87, 88]。典型的恒星形成星系,分子气体的比例随着红移增大而迅速增加,在 $z \simeq 1.2$ 附近只有 33% 左右,在 $z \simeq 2.3$ 附近高达约 44%^[89]。高红移宇宙中星系富含气体,某些 BzK 星系中气体质量甚至与恒星质量相当,因而也触发非常高的恒星形成率^[90]。利用亚毫米干涉阵 PdBI 对 $z \simeq 1.2$ 和 $z \simeq 2.2$ 两个红移附近的大质量主序星系进行 CO 3-2 谱线观测(包括少量 CO 2-1 谱线观测),Tacconi 等人^[91]发现这些富含气体的恒星形成星系大部分(50%~75%)具有旋转的盘结构,随红移增加,越来越多星系出现明显的团块结构和非对称性,CO 发射线分布的区域大小与紫外及光学尺度相当,计算得到旋转速度与局部速度弥散之比大约是 7,比 H α 二维光谱成像观测结果略大,但足以说明高红移恒星形成星系普遍具有较大的速度弥散,与近邻宇宙的盘星系大不相同。另外,致密分子气体的比例与 SSFR 密切相关^[92],表明分子气体的储量(reservoir)是恒星形成星系 SFR 弥散的主要原因。据此有理由认为,气体吸积率的波动很可能是恒星形成星系主序关系产生弥散的主要原因。

4 总结与展望

本文主要阐述恒星形成星系主序关系近些年的研究进展。恒星形成星系主序关系是恒星形成星系的恒星质量与恒星形成率的相关关系($SFR \propto M_{*}^{0.6} \sim M_{*}^{1.0}$),主序关系整体上随红移演化,弥散有限($\lesssim 0.3$ dex)。主序关系的整体演化是宇宙气体消耗的自然结果,绝大多数星系的恒星形成是相对平缓的,相同质量的星系具有相似的恒星形成历史。星系的恒星形成除了长期稳定的普通模式,在一定条件下(如星系并合)还会触发异常剧烈的星暴活动,而显著偏离主序关系。星暴星系对宇宙恒星形成率密度的贡献有限,但可能是(至少部分)星系终

止恒星形成演变为宁静星系过程中的重要过渡阶段。大多数高红移恒星形成星系既有旋转的星系盘又有速度弥散, 星系形态和结构比近邻星系更复杂。星系盘上的恒星形成团块径向迁移可能在星系中心形成核球, 从而抑制恒星形成活动, 这或许是恒星形成星系转化为宁静星系的备选模型, 核球结构的形成过程可能反映出恒星形成星系与宁静星系的某种演化关联。

就当前的观测条件而言, 天文学家对 $M_* < 10^8 M_\odot$ 小质量星系的了解还非常有限, 这类星系具有以下特征: 暗晕质量低于 $10^9 M_\odot$, 引力势阱浅, 化学丰度低, 因此是检验星系中恒星形成理论的理想星系, 相信在未来的研究中会占据相当重要的地位。目前对 $z > 3$ 的恒星形成星系主序关系了解甚少, 有待于更深的近红外观测和 JWST/WFIRST^[93] 中红外观测进一步研究。大规模近红外光谱和测光巡天 (例如 Keck/MOSFIRE^[94] 和 Subaru/WFOS^[95]) 日趋完善, 红移将被精确证认, 测定星族特征和恒星形成历史, 进一步提高 SFR 和恒星质量的测量精度; 恒星形成星系的精细结构研究也将进入新的阶段, 将获得大样本不同类型星系的二维光谱 (VLT/KMOS^[96]), 测量运动学特征, 以及估计暗晕和气体及恒星的相关关系。在分子气体方面, ALMA 是亚毫米波窗口的旗舰观测设备, 可以揭示高红移宇宙星系中分子气体的分布和运动学特征, 对恒星形成提供关键观测约束; SKA 能够观测原子氢气体的空间分布, 是理解气体吸积的关键。

参考文献:

- [1] York D G, et al. AJ, 2000, 120: 1579
- [2] Strateva I, Ivezić Z, Knapp G R, et al. AJ, 2001, 122: 1861
- [3] Baldry I K, Glazebrook K, Brinkmann J, et al. ApJ, 2004, 600: 681
- [4] Wolf C, Meisenheimer K, Kleinheinrich M, et al. A&A, 2004, 421: 913
- [5] Davis M, Faber S M, Newman J, et al. SPIE, 2003, 4834: 161
- [6] Borch A, Meisenheimer K, Bell E F, et al. A&A, 2006, 453: 869
- [7] Faber S M, Willmer C N A, Wolf C, et al. ApJ, 2007, 665: 265
- [8] van Dokkum P G, Labbé I, Marchesini D, et al. PASP, 2009, 121: 2
- [9] Grogin N A, Kocevski D D, Faber S M, et al. ApJS, 2011, 197: 35
- [10] McCracken H J, Milvang-Jensen B, Dunlop J, et al. A&A, 2012, 544: 156
- [11] Bell E F, Zheng X Z, Papovich C, Borch A. ApJ, 2007, 663: 834
- [12] Lagache G, Puget J L, Dole H. ARA&A, 2005, 43: 427
- [13] Madau P, Dickinson M. ARA&A, 2014, 52: 415
- [14] Soifer B T, Helou G, Werner M. ARA&A, 2008, 46: 201
- [15] Lutz D. ARA&A, 2014, 52: 373
- [16] Casey C M, Narayanan D, Cooray A. PhR, 2014, 541: 45
- [17] Noeske K G, Weiner B J, Faber S M, et al. ApJL, 2007, 660: 43
- [18] Elbaz D, Daddi E, Le Borgne D, et al. A&A, 2007, 468: 33
- [19] Daddi E, Dickinson M, Morrison G, et al. ApJ, 2007, 670: 156
- [20] Leitner S N. ApJ, 2012, 745: 149
- [21] Daddi E, Dannerbauer H, Stern D, et al. ApJ, 2009, 694: 1517
- [22] Stark D P, Ellis R S, Bunker A, et al. ApJ, 2009, 697: 1493
- [23] González V, Labbé I, Bouwens R J, et al. ApJ, 2010, 713: 115
- [24] Salim S, Rich R M, Charlot S, et al. ApJS, 2007, 173: 267

- [25] Rodighiero G, Daddi E, Baronchelli I, et al. *ApJL*, 2011, 739: 40
- [26] Rodighiero G, Renzini A, Daddi E, et al. *MNRAS*, 2014, 443: 19
- [27] Pannella M, Elbaz D, Daddi E, et al. *arXiv1407.5072*, 2014
- [28] Stark D P, Schenker M A, Ellis R, et al. *ApJ*, 2013, 763: 129
- [29] Whitaker K E, van Dokkum P G, Brammer G, Franx M. *ApJL*, 2012, 754: 29
- [30] Kashino D, Silverman J D, Rodighiero G, et al. *ApJL*, 2013, 777: 8
- [31] Ilbert O, Salvato M, Le Floch E, et al. *ApJ*, 2010, 709: 644
- [32] Karim A, Schinnerer E, Martínez-Sansigre A, et al. *ApJ*, 2011, 730: 61
- [33] Schreiber C, Pannella M, Elbaz D, et al. *A&A*, 2015, 575: 74
- [34] Whitaker K E, Franx M, Leja J, et al. *ApJ*, 2014, 795: 104
- [35] Guo K X, Zheng X Z, Fu H. *ApJ*, 2013, 778: 23
- [36] Kennicutt R C, Evans N J. *ARA&A*, 2012, 50: 531
- [37] Daddi E, Elbaz D, Walter F, et al. *ApJ*, 2010, 714: 118
- [38] Elbaz D, Dickinson M, Hwang H S, et al. *A&A*, 2011, 533: 119
- [39] Jogee S, Miller S, Penner K, et al. *ApJ*, 2009, 697: 1971
- [40] Zheng X, Bell E F, Somerville R S, et al. *ApJ*, 2009, 707: 1566
- [41] Kormendy J, Fisher D B. *RMxAC*, 2005, 23: 101
- [42] Cheung E, Athanassoula E, Masters K L, et al. *ApJ*, 2013, 779: 162
- [43] Bournaud F, Jog C J, Combes F. *A&A*, 2007, 476: 1179
- [44] Naab T, Johansson P H, Ostriker J P. *ApJL*, 2009, 699: 178
- [45] Wuyts S, Förster S, Natascha M, et al. *ApJ*, 2011, 742: 96
- [46] Bundy K, Bershady M A, Law D R, et al. *ApJ*, 2015, 798: 7
- [47] Thompson R I, Storrie-Lombardi L J, Weymann R J, et al. *AJ*, 1999, 117: 17
- [48] Dickinson M, Hanley C, Elston R, et al. *ApJ*, 2000, 531: 624
- [49] Koekemoer A M, Faber S M, Ferguson H C, et al. *ApJS*, 2011, 197: 36
- [50] Wuyts S, Förster S, Natascha M, et al. *ApJ*, 2012, 753: 114
- [51] Wuyts S, Förster S, Natascha M, et al. *ApJ*, 2013, 779: 135
- [52] Nelson E J, van Dokkum P G, Brammer G, et al. *ApJL*, 2012, 747: 28
- [53] Nelson E J, van Dokkum P G, Momcheva I, et al. *ApJL*, 2013, 763: 16
- [54] Steidel C C, Adelberger K L, Shapley A E, et al. *ApJ*, 2003, 592: 728
- [55] Meier D L. *ApJL*, 1976, 203: 103
- [56] Meier D L. *ApJ*, 1976, 207: 343
- [57] Schmidt K B, Treu T, Trenti M, et al. *ApJ*, 2014, 786: 57
- [58] Daddi E, Cimatti A, Renzini A, et al. *ApJ*, 2004, 617: 746
- [59] Williams R J, Quadri R F, Franx M, et al. *ApJ*, 2009, 691: 1879
- [60] Kennicutt R C. *ARA&A*, 1998, 36: 189
- [61] Calzetti D, Kinney A L, Storchi-Bergmann T. *ApJ*, 1994, 429: 582
- [62] Kennicutt R C, Hao C N, Calzetti D, et al. *ApJ*, 2009, 703: 1672
- [63] Hao C N, Kennicutt R C, Johnson B D, et al. *ApJ*, 2011, 741: 124
- [64] Hayes M, Schaerer D, Östlin G, et al. *ApJ*, 2011, 730: 8
- [65] Bell E F, McIntosh D H, Katz N, Weinberg M D. *ApJS*, 2003, 149: 289
- [66] Leja J, van Dokkum P G, Franx M, Whitaker K E. *ApJ*, 2015, 798: 115
- [67] Cheung E, Faber S M, Koo D C, et al. *ApJ*, 2012, 760: 131
- [68] Kauffmann G, et al. *MNRAS*, 2003, 341: 33
- [69] Kauffmann G, et al. *MNRAS*, 2003, 341: 54
- [70] Peng Y J, Lilly S J, Kovac K, et al. *ApJ*, 2010, 721: 193
- [71] Dekel A, Birnboim Y. *MNRAS*, 2006, 368: 2
- [72] Birnboim Y, Dekel A. *MNRAS*, 2011, 415: 2566
- [73] Croton D J, Springel V, White S D M, et al. *MNRAS*, 2006, 365: 11

- [74] Martig M, Bournaud F, Teyssier R, Dekel A. ApJ, 2009, 707: 250
- [75] Peng Y J, Lilly S J, Renzini A, Carollo M. ApJ, 2012, 757: 4
- [76] Tal T, Dekel A, Oesch P, et al. ApJ, 2014, 789: 164
- [77] Bell E F, van der Wel A, Papovich C, et al. ApJ, 2012, 753: 167
- [78] Fang J J, Faber S M, Koo D C, Dekel A. ApJ, 2013, 776: 63
- [79] Yesuf H M, Faber S M, Trump J R, et al. ApJ, 2014, 792: 84
- [80] Lang P, Wuyts S, Somerville R S, et al. ApJ, 2014, 788: 11
- [81] Cowie L L, Songaila A, Hu E M, Cohen J G. AJ, 1996, 112: 839
- [82] Bundy K, Ellis R S, Conselice C J, et al. ApJ, 2006, 651: 120
- [83] Noeske K G, Faber S M, Weiner B J, et al. ApJL, 2007, 660: 47
- [84] Dutton A A, van den Bosch F C, Dekel A. MNRAS, 2010, 405: 1690
- [85] Behroozi P S, Wechsler R H, Conroy C. ApJ, 2013, 770: 57
- [86] Sparre M, Hayward C C, Springel V, et al. MNRAS, 2015, 447: 3548
- [87] Kennicutt R C. ApJ, 1998, 498: 541
- [88] Bigiel F, Leroy A, Walter F, et al. AJ, 2008, 136: 2846
- [89] Tacconi L J, Genzel R, Neri R, et al. Nature, 2010, 463: 781
- [90] Daddi E, Bournaud F, Walter F, et al. ApJ, 2010, 713: 686
- [91] Tacconi L J, Neri R, Genzel R, et al. ApJ, 2013, 768: 74
- [92] Daddi E, Dannerbauer H, Liu D et al. arXiv1409.8158, 2014
- [93] Spergel D, Gehrels N, Breckinridge J, et al. arXiv1305.5422, 2013
- [94] McLean I S, Steidel C C, Epps H W, et al. SPIE, 2012, 8446: 19
- [95] Simard L, Crampton D, Ellerbroek B, Boyer C. SPIE, 2012, 8446: 1
- [96] Sharples R, Bender R, Agudo B A, et al. SPIE, 2014, 9147: 6

Research Progress of the Main Sequence of Star-forming Galaxies

GAO Yu-xiang^{1,2}, GUO Ke-xin^{1,2}, ZHENG Xian-zhong¹

*(1. Purple Mountain Observatories, University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: The tight correlation between star formation rates (SFRs) and stellar mass among star-forming galaxies (SFGs) is often referred to as the main sequence of SFGs, which is one of the fundamental relations involved in galaxy evolution. Characterizing the slope, normalization and scatter of the main sequence provides key constraints on our understanding of the physical processes regulating star formation in galaxies. The global SFR drops by about a factor of 30 from $z \simeq 2$ to $z \simeq 0$, while the timescale of gas consumption increases from 0.5×10^9 to 1.5×10^9 years. The slope of the main sequence changes from the low-mass end to the high-mass end, indicating that the physical processes governing star formation are of dependence on galaxy stellar mass. The scenario of staged galaxy formation offers reasonable explanations for the scatter in specific SFR (SSFR). Starburst galaxies lying

off the main sequence with high SSFR contribute merely part of the cosmic star formation density, but probably play an important role in quenching star formation. Investigations of the main sequence of high- z SFGs requires much efforts with next generation observing facilities. The studies of the main sequence of SFGs thus provide key insights into galaxy formation and evolution.

Key words: star formation; galaxy evolution; gas accretion; mass growth

《天文学进展》征稿启事

一、本刊刊登反映国内外天文学研究的最新进展和作者见解的述评、研究论文、前沿介绍、专题讲座、研究快报。反映新思路、新手段、新成果的短评优先发表。

二、来稿须包括：题名、作者署名、作者单位及所在地与邮政编码、摘要、关键词、正文、参考文献、英文摘要、英文关键词等。

三、来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出，以利非本分支学科的读者阅读。

四、摘要应简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法，不用“本文”、“作者”等作主语。稿件如果以中文发表，英文摘要应有近一页的篇幅。

五、关键词请尽可能参照 ApJ、MNRAS 和 A&A 共同采用的关键词表选用，可适当扩充。

六、稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献（按文中出现顺序编码，在右上角用小方括号标出）。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献。

七、审定稿后需提供清稿样的电子文本。本刊采用中西文 Latex 系统软件排版，请从本刊网站 (<http://202.127.29.4/twxjz/index.htm>) 下载排版模版。

八、图、表务求精、简、规范，以配合文字阐明观点。公式务求精约，杜绝公式推导过程。

九、请勿一稿两投。来稿请通过 E-mail 发送至 twxjz@shao.ac.cn。

《天文学进展》编辑部

2015 年 5 月