星系中的恒星形成活动的熄灭过程

李成^{1,2*}

1. 清华大学物理系, 清华大学天体物理中心, 北京 100084;

2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030

* 联系人, E-mail: cli2015@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2017-01-08; 接受日期: 2017-02-06; 网络出版日期: 2017-03-03

国家自然科学基金(编号: 11173045, 11233005, 11325314, 11320101002)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857004)资助项目

摘要 宇宙平均恒星形成率密度在 $z \sim 2$ 达到峰值后持续下降, 这意味着平均而言, 星系中的恒星形成活动在逐渐减弱甚至“熄灭”, 这种减弱和熄灭的过程主导着过去上百亿年的星系演化历史, 百亿年前占据主导地位的星爆星系在今天的宇宙中已不多见, 而红星系的比例则上升为百亿年前的两倍有余. 到底是哪些物理机制造成星系中恒星形成活动的熄灭? 这些机制在不同的星系、环境以及宇宙时期所起的作用有何不同? 这些是当前星系形成领域的关键科学问题, 21世纪以来的大规模多波段图像和光谱巡天观测极大地促进了对这些问题的认识. 本文试图对当前研究结果稍作总结, 考虑到中央星系和卫星星系的显著区别, 先对两类星系分别讨论, 然后将二者综合起来, 总结了导致恒星形成活动熄灭的三个主要物理过程: 大质量暗物质晕中的Halo Quenching效应(下落气体激波加热、潮汐力和冲压导致的气体剥离)、棒状结构和次并合驱动的星系自演化(Morphology Quenching、活动星系核反馈)、以及中小质量星系的主并合(早型星系和经典核球的形成). 需要强调的是, 这种对现有观测现象的总结只能是经验性的和阶段性的, 下一步既要从观测上继续深入研究(更大样本、更多波段、更高红移), 以改进和完善观测结果, 更重要的还要及时和充分地利用最新观测结果来检验和限制星系形成的物理模型(如半解析模型和流体动力学数值模拟).

关键词 星系形成, 星系演化, 恒星形成熄灭, 暗物质晕, 星系结构, 巡天观测

PACS: 98.62.Ai, 98.62.Gq, 98.62.Hr, 98.62.Js

1 引言

人类对星系的认识在过去十多年获得了显著提升, 很大程度上归功于21世纪以来实施的多项大规模红移巡天项目, 尤其是Sloan Digital Sky Survey (SDSS)^[1], 自实施以来已获得全天三分之一天区的

光学图像以及300多万天体的光谱数据, 包括约一百万星系, 为研究星系提供了前所未有的大规模高质量数据. SDSS一个主要的发现是星系的双模分布(Bimodality), 即近邻宇宙中的星系按照颜色、星族年龄等基本性质可分为两大类. 第一类星系具有光学颜色红、恒星形成率低、冷气体含

引用格式: 李成. 星系中的恒星形成活动的熄灭过程. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 049810

Li C. Star formation quenching in galaxies (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 049810, doi: 10.1360/SSPMA2017-00006

量少、形态由核球主导等性质, 它们的颜色与质量(或光度)呈现明显的正相关性, 且弥散小, 因而这一类被称为“红序”(Red Sequence). 另一类星系颜色蓝、正在形成恒星、富有冷气体、具有旋涡或不规则形态, 在“颜色-质量”关系图上分布范围大, 被称为“蓝云”(Blue Cloud). 基于SDSS早期图像数据, Strateva等人^[2]最早从光学颜色的分布上发现了星系的双模性. 随后, Kauffmann等人^[3]分析了SDSS星系的光谱性质(如 D_{4000})和结构参数(如表面恒星质量密度 μ_*), 也发现了类似的双模分布. 同样基于SDSS数据, Baldry等人^[4]研究了星系的光学颜色与光度的二维分布, 发现在给定的光度范围, 颜色的分布可以用两个高斯轮廓描述, 并且两个高斯轮廓的中心、宽度以及相对面积都随光度呈现系统性的变化, 并给出了星系数密度在光度和颜色空间的函数关系. 除了“红序”和“蓝云”这两个主类外, 还有一类“绿谷”(Green Valley)星系, 数目少, 性质介于红、蓝星系之间. 通常认为“绿谷”是星系从“蓝云”向“红序”演化的过渡阶段, 但并不是所有研究者都这么认为^[5].

Keck, VLT等地面大望远镜和哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope, HST)对高红移星系的多波段观测也发现同样现象, 星系颜色的双模分布在红移 $z > 2$ 就已经存在^[6-10]. 随着红移减小, 红序星系比例持续增加, 当前的红序星系比例是 $z = 1$ 时的两倍左右, 意味着过去上百亿年来星系的恒星形成活动在逐渐减弱和“熄灭”(Quenching)¹⁾. 可以说, 正是这种“熄灭”过程主导了 $z = 1 - 2$ 的星系演化和宇宙平均恒星形成历史. 导致星系熄灭的物理机制有哪些? 这些物理机制在不同红移和不同环境下所起的作用是否相同? 这些都是近年来星系形成领域的关键问题.

目前主流的星系形成理论认为星系在暗物质晕中形成和演化^[11], 其基本图像为: 早期宇宙中均匀分布的冷暗物质在局域引力不稳定的作用下形成质量不同的冷暗物质晕, 热气体落入暗物质晕中心冷却和凝聚成高密度的分子云, 分子云分裂形成恒星

乃至星系, 此过程中的超新星爆发、活动星系核等反馈机制可以有效影响气体冷却和化学元素增丰过程. 在这个框架下, 星系形成之初都位于暗物质晕中央, 称为“中央星系”. 根据等级成团的结构形成理论, 暗晕通过相互并合而形成较大质量暗晕. 当星系所在的暗晕落入另一个更大质量的暗晕后, 该星系成为一个卫星星系(Satellite Galaxy), 寄主暗晕则成为一个子晕(Subhalo), 它们与其他的子结构一起围绕着位于主暗晕中心的最大质量星系运动, 就像观测图像中看到的星系群和星系团. 从中央星系到卫星星系的转变过程中, 星系及其暗晕受到剧烈的环境效应影响, 因此中央星系和卫星星系的演化过程必定有很大不同, 有必要对二者分别进行研究. 鉴于这一课题涉及面广, 且新的研究进展不断涌现, 本文综述内容难以全面概括, 遗漏或不妥之处在所难免.

2 中央星系

2.1 “Halo Quenching”与活动星系核反馈

中央星系的形成和演化依赖于寄主暗晕对热气体的吸积, 因此中央星系的质量 M_* (或光度)与暗晕质量 M_{halo} 应该存在很好的相关性, 近年来研究者使用各种观测统计量对此进行了广泛研究, 例如星系成团性、弱引力透镜、星系群运动学等, 证实中央星系 M_* 和 M_{halo} 存在紧密关系, 该关系可以用双幂律函数描述, 平均弥散度仅 $\sim 0.16 \text{ dex}$ ^[12-23]. 这充分说明了中央星系的演化与暗物质晕之间的密切联系, 更重要的是, 由此关系得到的星系恒星质量与暗晕质量之比(M_*/M_{halo})仅在暗晕质量 $\sim 10^{12} M_{\odot}$ 时达到极大值, 随着暗晕质量的增大或减小该比值迅速降低. 如果将 M_*/M_{halo} 看作星系(恒星)形成效率的度量, 很显然在小质量和大质量暗晕中的恒星形成效率由于某些物理机制而被抑制. 在目前星系形成的半解析模型中^[24-29], 造成小质量端恒星形成效率降低的主要原因是超新星爆发导致的能量反馈, 在大质量暗晕中则是活动星系核的能量反馈. 根据

1) “Quenching”原意指快速的停止过程, 用“淬灭”一词似乎更为合适, 但本文试图讨论星系中恒星形成活动停止的一般过程, 并不仅限于快速停止的情况, 因此选用含义更广的“熄灭”一词. 特此说明, 以免误解.

形成机制的不同, 活动星系核能量反馈又分为射电模式(Radio Mode)和类星体模式(Quasar Mode)两种情况.

活动星系核能量反馈机制的研究可追溯到20世纪70年代, 当时的理论计算和后续的数值模拟都表明 [30–36], 热气体在下落到维里半径过程中可产生激波并加热气体, 从而降低气体的冷却效率乃至恒星形成效率, 当暗晕质量超过某个临界值, $\sim 10^{12} M_{\odot}$, 该效应开始变得显著. 由于该效应直接由暗物质晕质量所导致, 因此被许多研究者称为“Halo Quenching”. 然而, 近期的研究发现单靠“Halo Quenching”本身不足以完全解释大质量暗晕中央星系的熄灭现象. 例如, Mandelbaum等人 [37]发现在给定恒星质量(M_*)的情况下, 早型中央星系和晚型中央星系的暗晕质量没有显著区别; More等人 [19]对比了宁静的中央星系和正在形成恒星的中央星系, 发现二者具有相似的暗物质晕质量. 这意味着, 除了激波加热导致的“Halo Quenching”效应外, 大质量暗晕中央星系的熄灭还需要别的物理机制. 在半解析模型中, 这一机制正是射电模式的活动星系核反馈. 根据 M_*-M_{halo} 关系, 大质量暗晕的中央星系也是大质量的, 星系中心往往有超大质量黑洞. 由于“Halo Quenching”效应, 大质量暗晕的气体冷却效率低, 暗晕内充满着热气体“大气”, 黑洞可直接吸积暗晕中的热气体而成为活动星系核, 产生类似于射电星系的观测现象, 其能量反馈将进一步阻止气体吸积和冷却, 从而大大减缓恒星形成和星系形成效率. 借助这一机制, 半解析模型现在可以很好地解释观测的星系质量函数和 M_*/M_{halo} 在大质量端的快速下降, 如图1所示 [38–40].

活动星系核反馈的另一个模式是类星体模式, 主要由富含冷气体的星系之间的主并合(Major Merger, 即质量接近的星系之间的并合)所导致, 伴随着星系的并合, 星系中心的黑洞也并合, 数值模拟显示该过程可以同时触发星系中心的恒星形成率和黑洞吸积率的爆发式增长. 这一过程早在20世纪70年代就有理论研究和预期 [41], 而Springel等人 [42]利用现代大型计算机模拟做了系统性的研究, 其主要结果如图2所示, 在星系发生剧烈碰撞和并合的时刻, 恒星形成率和黑洞吸积率同时剧增, 活

图1 (网络版彩图)星系的恒星质量函数 [38]. 图中黑色星号和蓝色三角均为基于SDSS巡天的测量结果, 分别来自文献[39, 40], 红色和绿色线条为半解析模型预言, 模型与观测在所有质量范围均符合良好

Figure 1 (Color online) Galaxy stellar mass function [38], where black stars and blue triangles are estimated from SDSS galaxy samples as obtained by refs. [39, 40] respectively, and the red and green lines are predictions of the semi-analytic model. As can be seen, the model matches the data very well at all masses probed.

图2 (网络版彩图)计算机模拟的星系并合过程及其对恒星形成率和黑洞吸积率的影响. (a) 3个时刻的星系气体分布; (b) 恒星形成率和黑洞吸积率随时间的演化情况, 图中3个红色符号对应于(a)的3个时刻 [42]

Figure 2 (Color online) Mergers of two disc galaxies in numerical simulations and the effects on star formation rate (SFR) and black hole accretion rate (BHAR). (a) The gas distribution in the galaxies at three merging stages; (b) the evolution of the SFR and BHAR with the three stages being marked by the three red symbols [42].

动星系核的能量反馈很快“吹散”气体, 因此恒星形成率和黑洞吸积率在达到峰值后迅速下降, 数个Gyr后都下降3个量级以上, 恒星形成和活动星系核现象都终止. 观测显示当前宇宙中的星系并合率很低, 可能导致主并合星系对的比例仅 $\sim 4\%$ [43–46], 因此类星体模式在低红移并非主导模式. 相对而言, 射电模式对低红移星系应该更为重要, 但如前文所述, 该模式仅对大质量暗晕中的大质量星系有效. 半解析模型中, 两种模式联合起来制约着核球的增长和恒星形成活动的熄灭过程, 从而使模型可同时重现观测的核球质量-黑洞质量关系和星系质量函数(详细讨论见文献[38]). 然而, 活动星系核的这两种反馈模式的观测证据并不多, 对冷核星系团的中央星系拍摄的X射线图像似乎为射电模式提供了一些支持, 但至今仍很难获得类星体模式的直接观测证据(参见文献[47]对活动星系核反馈的综述).

2.2 “Morphology Quenching”与“两步走”的熄灭模式

对中央星系而言, 还有一个所谓的“Morphology Quenching”机制, 近些年的观测和理论研究表明这有可能也是一个重要的过程. 简单而言, 过去十多年的多波段图像观测发现: 位于星系中心的核球结构似乎是星系熄灭的必要(但非充分)条件. 早期的SDSS星系研究就发现, 相对于恒星质量而言, 星系的表面恒星质量密度(μ_*)能更好地划分恒星形成星系和熄灭的星系, 熄灭星系具有更高密度的恒星质量分布 [48], 暗示星系的内部结构对恒星形成的熄灭起重要作用. Bell [49]采用恒星表面亮度轮廓的Sersic指数 [50]刻画核球的显著度, 研究了星系颜色的双模分布特性与核球的联系, 发现绝大部分“红序”星系有很大Sersic指数($n > 3$), 表明其存在明显的核球, 另一方面, 具有显著核球结构的星系的颜色分布在一个很宽的范围. 也就是说, 核球的存在是星系颜色变红的必要条件, 但不是充分条件. 对高红移星系的观测也得到同样结论, 例如DEEP2巡天($0.5 < z < 0.8$) [51]、CANDELS巡天($z \sim 2.2$) [52]、以及GOODS巡天的CDF-South场($z \sim 3$) [53]. 最近Fang等人 [54]使用SDSS的星系群表 [15] 重新研究

了低红移中央星系, 使用中心1 kpc以内的恒星表面质量密度(Σ_1)和恒星运动速度弥散(σ_1)表征核球的显著度, 再一次定量地证实了上述结论.

理论上对上述观测现象有一个自然的解释, Martig等人 [55]利用流体动力学数值模拟证明, 如果星系中央有一个核球结构, 核球从动力学上将使星系盘转动得更为稳定, 从而降低气体坍缩和恒星形成的效率. 该理论的一个必然推论是, 熄灭星系可以富含冷气体, 但这似乎与星系冷气体的观测结果相悖. 例如, Fabello等人 [56]通过堆叠(Stacking)ALFALFA的中性氢巡天数据, 研究了SDSS的大质量星系的中性氢气体含量, 得到了相反的结论. 类似的, GASS和COLD GASS巡天观测了数百个大质量星系的中性氢气体含量和分子气体含量, 通过足够长的时间观测将单个星系气体质量含量的探测极限推至数个百分点, 发现大质量红星系的气体含量总是相对较低. 因此, 无论何种机制导致星系熄灭, 这些机制必须同时导致冷气体含量的下降, 可见单靠“Morphology Quenching”这一个机制还不足以完成熄灭星系的所有工作. 基于这个思路, Fang等人 [54]提出了“两步走”(Two-Step)的熄灭过程: 首先是Morphology Quenching起作用, 核球的动力学作用促使星系盘稳定; 当暗晕质量超过临界值后Halo Quenching开始发挥作用, 通过阻止冷气体的吸积来阻止星系内的恒星形成.

这里需要提一下与上述讨论有关的一个争论话题: Wake等人 [57]测量SDSS星系的成团性, 用1 Mpc以上的成团幅度作为暗晕质量的度量, 对比了暗晕质量对恒星质量 M_* 和恒星运动速度弥散 σ_* 的依赖性, 发现在给定 M_* 时暗晕质量和 σ_* 仍有相关性, 但在给定 σ_* 后暗晕质量与 M_* 无关. 据此得出结论: 相对于 M_* 而言, σ_* 与暗晕质量联系更为紧密. 如果这一结论成立, 那么一个自然的问题就是: 与核球相关的Morphology Quenching和与暗晕相关的Halo Quenching会不会源于同一个物理过程? 如果答案肯定, 那么Fang等人 [54]提出的“两步走”的熄灭过程实质上是同一个物理过程的两个阶段. 此外, 由于众所周知的核球质量-黑洞质量关系, 这是不是进一步意味着由黑洞吸积驱动的活动星系核反馈其实也是由暗物质晕控制的?

答案是否定的. 为说明这个问题, Li 等人 [58] 直接测量中央星系所在暗晕的平均质量并分析了暗晕质量随 M_* 和 σ_* 的变化关系, 如图 3 所示, 暗晕与这两个参数都正相关, 但明显与 M_* 的相关性更强, 图 3(a) 表明若将 M_* 限定在较窄范围则暗晕质量几乎不随 σ_* 变化, 而图 3(b) 中即使 σ_* 限制到小的范围后暗晕质量仍然表现出较大弥散, 该弥散是由于 M_* 不同而引起的. 该文之所以得出与 Wake 等人 [57] 相反的结论, 有 3 个原因: (1) 利用了 Li 等人 [23] 发展的方法直接测量暗晕质量而不是用成团性幅度作间接度量; (2) 将卫星星系从样本中剔除而只研究中央星系; (3) 在 M_* 和 σ_* 空间选取子样本时取更为合理的划分区间. 在后续的研究中, Wang 等人 [59] 进一步分析暗晕质量与星系颜色、表面恒星质量密度等参数的关系, 再次证实 M_* 与暗晕的联系最为紧密. 既然表征核球大小的 σ_* 与暗物质晕的关系并非最为基本的关系, 核球导致的“Morphology Quenching”和暗晕导致的“Halo Quenching”自然就不是同一回事.

2.3 核球和棒: 谁是“王者”?

前文提到, 对中央星系而言, 绝大部分红星系都有显著的核球结构(或致密的中心恒星质量分布), 核球的存在似乎是这些星系中恒星形成活动熄灭的必要条件, 最近 Bluck 等人 [60] 甚至戏称核球为主导星系演化的“王者”. 虽然还不清楚背后的物理机制到底是“Morphology Quenching”还是活动星系核反馈, 但前者直接由核球导致, 后者由核球中心的黑洞导致, 看起来核球的“王者”身份已无疑问. 然而, 这里至少有两个问题需要回答: (1) 是什么导致了核球的形成和成长? (2) 或许核球只是星系熄灭过程的附带结果而不是驱动星系熄灭的原因?

对于第一个问题, 主要有两个机制可促进核球的成长, 一是星系相互作用和并合时的潮汐力, 由前文可知, 潮汐力导致星系盘不稳定而使盘上的冷气体落入星系中央, 触发或强化核球区域的恒星形成活动 [61–63]. Li 等人 [61] 在研究 SDSS 星系的恒星形成率与相互作用时发现, 与平均情况相比, 由于相互作

图 3 (网络版彩图)暗晕质量与星系的恒星质量 M_* (a) 和恒星速度弥散 σ_* (b) 的关系. 图中实线连接的实心三角形是给定 M_* 或 σ_* 的平均暗晕质量, 彩色空心圆则是按照 M_* 和 σ_* 选取的子样本 [58]

Figure 3 (Color online) Dark matter halo mass as a function of stellar mass M_* (a) and stellar velocity dispersion σ_* (b). Filled triangles connected by the solid line are the average halo masses at given M_* or σ_* , while colorful open circles are subsamples selected by both M_* and σ_* [58].

用而增强了恒星形成活动的星系具有更大的中心致密度, 表明这些星系中央有致密的恒星分布, 暗示着相互作用所导致的恒星形成活动也同时在促使核球增长. 这一结果可从图 4 中看到, 位于图中左上角的星系具有中等偏小的质量和很高的比恒星形成率(SFR/M_*), 然而它们的中心致密度却反常的高.

第二个可促使核球增长的因素是星系的棒状结构. 棒结构普遍存在于旋涡星系中, 光学观测统计发现在低红移宇宙中三分之一的旋涡星系含有显著的棒结构, 如果包括较弱的棒或从近红外图像来看, 棒星系比例高达 50% – 70% [64–69], 该比例随红移增加而减小, 在 $z \sim 0.8$ 明显有棒的星系比例约为 10% [70]. 理论计算和数值模拟表明棒状结构在驱动星系自演化(Secular Evolution)方面起着至关重要的作用. 棒将星系角动量转移到外盘从而促使自身成长, 角动量的转移导致盘上部分气体外流而在外围形成环状结构, 另一部分气体则内流而在星系中央触发恒星形成 [65, 71–77]. 研究者普遍相信正是棒所驱使的气体内流和恒星形成导致了星系的伪核球(Pseudo-Bulge)的形成和增长(详见 Kormendy 和 Kennicutt 的综述文章 [78]).

图 4 (网络版彩图)SDSS 星系在比恒星形成率 SFR/M_* 与恒星质量 M_* 关系图上的分布, 图中颜色代表了星系的致密度 [61]

Figure 4 (Color online) Distribution of SDSS galaxies in the plane of specific star formation rate (SFR/M_*) vs. stellar mass (M_*), color-coded by the concentration parameter as indicated [61].

观测上确实看到了棒促进核球增长的证据. Wang 等人 [79] 使用 SDSS 图像和光谱数据研究了星系恒星形成率的中心密集度, 即 SDSS 光纤光谱测量的中心区域的恒星形成率与星系整体恒星形成率的比值(SFR_{fib}/SFR_{global}), 发现该比值最大的星系有一半以上是棒旋星系, 如图 5 所示. 最近 Lin 等人 [80] 研究了基于积分场单元光谱巡天的 CALIFA [81, 82], 他们分析了 57 个面向的旋涡星系的恒星形成历史的二维分布, 发现其中 17 个星系中心在最近 1 – 2 Gyr 发生了新的恒星形成过程, 有趣的是这些星系绝大部分(15/17) 都有棒结构, 但它们只占该样本中所有棒旋星系的一半. 得益于积分场单元光谱技术, 这项研究为核球增长和棒结构的联系提供了直观证据. Lin 等人和 Wang 等人的研究成果结合起来为棒促进核球增长提供了很好的观测证据. 但由于 Lin 等人研究的样本中没有包括相互作用和并合星系系统, 因此目前还不能简单地认为棒结构是中心恒星形成增强(和核球增长)的必要条件. Wang 等人的样本包含了相互作用的情形, 中央恒星形成率聚集度最大的星系中只有一半有棒结构, 是什么造成另一半星系中央的恒星形成活动增强? 正如该文作者提出的, 星系之间的相互作用或并合是积分场单

图 5 (网络版彩图)SDSS 星系在恒星形成率中心密集度与 M_* 关系图上的分布, 图中颜色代表棒旋星系的比例 [79]

Figure 5 (Color online) Distribution of SDSS galaxies in the plane of star formation rate concentration vs. stellar mass, color-coded by the fraction of barred galaxies [79].

极为可能的机制. 正在实施的更大规模的元光谱巡天MaNGA^[83]为检验这个猜测提供了绝佳数据, 可以预期该问题将很快获得解答.

如果旋涡星系的(伪)核球是由棒或相互作用促成的, 那么上述第二个问题的提出就是很自然的事情了, 即: 核球有没有可能只是星系熄灭过程的附带结果而不是驱动星系熄灭的原因? 尽管最终回答这个问题还需更多努力, 或许可以根据上述观测现象想象一个自洽的图像: 位于暗晕中央的旋涡星系在棒或次并合造成的不稳定作用下, 盘上的冷气体流入到星系中心触发恒星形成活动乃至伪核球的形成, 增长到足够显著的核球造成“Morphology Quenching”, 或者核球中心的黑洞引起活动星系核反馈, 再加上“Halo Quenching”的助推, 导致星系恒星形成活动最终熄灭. 在这副图像中, 核球并不是星系熄灭的第一推动者, 棒和次并合驱动的自演化可以自然地导致星系恒星形成活动的熄灭, 而核球只是星系演化的必然“产品”. 当然, 这副图像虽然可以基本上解释上述观测现象, 但实际情况是否如此, 需要更多研究工作.

3 卫星星系

原则上讲中央星系的大部分熄灭过程对卫星星系也适用, 但都不是最重要的. 卫星星系的恒星形成活动熄灭的主导因素应该是各种外部环境效应. 潮汐剥离(Tidal Stripping)就是一个剧烈的环境效应, 周边星系和物质的潮汐力可以剥去星系内部冷气体甚至一部分恒星成分^[41, 84]. 另一个普遍存在的环境效应是冲压剥离(Ram-Pressure Stripping)^[85, 86], 卫星星系及其子暗晕在热气体的“海洋”中运动, 外部热气体的“拖拽”可以有效地剥夺子暗晕携带的热气体, 致使星系因为缺乏气体来源而停止形成恒星, 即所谓的“窒息”效应(Strangulation). 冲压剥离的程度与星系相对于热气体的运动速度和星系内部物质密度有关, 快速运动星系的低密度成分(如冷气体)尤其容易被剥离. 观测

上已直接看到某些星系的中性氢气体被冲压剥离的壮观景象^[87-89]. 对SDSS星系群内的卫星星系的颜色轮廓和表面亮度轮廓的研究表明, 星系群内的剥离效应相对于星系团更为“温和”, 主要以剥离热气体的“窒息”效应为主^[90]. 另一方面, 对中等红移 $0.2 < z < 0.8$ 星系团和星系群的研究却显示, 星系群内卫星星系的熄灭主要由星系并合导致, 而“窒息”更倾向于发生在星系团里^[91]. 最近Peng等人^[92]分析了SDSS星系的恒星金属丰度, 认为“窒息”是低红移宇宙中的中小质量星系($M_* < 10^{11} M_\odot$)的主要熄灭机制.

HIPASS^[93]和ALFALFA^[94]等中性氢谱线巡天为统计上研究星系气体剥离效应提供了数万个星系的较大样本. 例如, 研究者使用HIPASS^[95]和ALFALFA^[96, 97]对比了富含气体的星系和气体含量正常星系的两点相关函数, 发现前者成团性更弱, 符合理论预期, 因为在成团性强的区域里环境对气体的剥离效应更为显著, 因此处于低密度环境下的星系才能保有更多冷气体. 为了克服现有中性氢谱线巡天太浅的困难, Fabello等人^[98]采用堆叠技术(Stacking)将同类星系的大量观测数据累积起来, 从而大大提升了星系气体含量的平均探测极限. 该研究发现中小质量星系($M_* \lesssim 3 \times 10^{10} M_\odot$)的中性氢气体比例(M_{HI}/M_*)和比恒星形成率(SFR/M_*)都跟环境密度有关, 但前者受环境的影响更为显著, 这个结果被认为是星系外围冷气体被冲压剥离的观测证据.

为了使用更大的样本获得更好的统计结果, 有研究者利用星系中性氢含量与光学性质的标度关系来估算星系的气体质量^[99, 100], 从而可以利用像SDSS这样的大规模星系样本来研究环境对星系气体的剥离效应. 例如, Li等人^[99]将他们新发展的估算方法应用到SDSS/DR7的星系, 第一次研究了成团性与星系中性氢气体比例的依赖关系²⁾, 发现冷气体剥离效应不仅与星系的质量 M_* 有关(小质量星系更易被剥离), 还跟星系的表面恒星质量密度 μ_* 有关(μ_* 越小越易于剥离), 甚至后者更为显著. 随

2) 由于中性氢谱线巡天样本的限制, 前人只能研究成团性与星系中性氢气体总含量 M_{HI} 的依赖关系. 相比而言, 气体与恒星质量的比值更能直接地反映气体吸积或剥离情况.

后Zhang等人^[100]研究了300个低红移星系团内的气体剥离效应, 进一步证实了上述结论: 随着到星系团中心的距离减小, 星系冷气体含量显著减少, 但在星系团给定半径处, 气体减少量更大程度上依赖于 μ_* 而非 M_* (参见文献^[101]中图4).

目前的半解析模型无法定量重现以上观测结果^[38,102], 这是因为模型中造成卫星星系熄灭的机制是“窒息”, 而跟星系的内部结构参数(如 μ_*)无关. 通过对比Fu等人^[102]和Guo等人^[38]的半解析模型与COLD GASS巡天^[103]的分子氢气体观测结果, Kauffmann等人^[104]证明了半解析模型确实存在这个问题. 最近, Luo等人^[105]在Fu等人^[102]的半解析模型基础上对气体剥离过程做了一定的改进. 其他的半解析模型研究小组也在做类似尝试, 文献^[106]对此做了详细评述(关于气体剥离效应参见该文第3.3节).

4 总结

平均而言, 星系中的恒星形成活动正在“熄灭”, 但我们对驱动星系熄灭的具体物理过程仍不清楚,

这是当前星系形成和演化领域正在研究的关键问题之一. 本文试图对近些年的研究结果稍作总结, 分别对中央星系和卫星星系的熄灭过程做了简要讨论. 对中央星系, 讨论了大质量暗晕的Halo Quenching和活动星系核反馈、核球主导的Morphology Quenching、以及棒状结构在其中扮演的重要角色. 对卫星星系, 则简要讨论了各种环境效应的作用. 如果从物理机制来看, 本文讨论的各种“熄灭”途径或可简单地归纳为三种: Halo Quenching、自演化、主并合(见图6):

- 第一个途径借用“Halo Quenching”一词, 指由暗物质晕主导的恒星形成活动的熄灭, 包括大质量暗晕中的激波加热效应(主要影响中央星系)、发生在暗晕中的各种环境效应如潮汐力和冲压力造成的气体剥离(针对卫星星系).

- 第二个途径是星系自演化(Secular Evolution), 棒状结构或次并合引起冷气体内流, 触发或增强星系中心的恒星形成活动, 促使(伪)核球形成和增长, 核球主导的Morphology Quenching或核球中心的黑洞主导的活动星系核反馈均可能导致星系停止形成恒星, 星系因此从“蓝云”阶段演化到“绿谷”阶段、

图6 (网络版彩图)星系的恒星形成活动熄灭的三种主要途径(从上到下): Halo Quenching, Secular Evolution和Fast Quenching, 详见文中第4节

Figure 6 (Color online) Three channels of the star formation quenching process in galaxies (from top to bottom): Halo Quenching, Secular Evolution and Fast Quenching. See sect. 4 for detailed description.

最后到“红序”, “绿谷”或“红序”星系有可能获得新的冷气体而回到“蓝云”阶段(即所谓的“返老还童”), 但气体消耗完后仍会继续演化到“红序”的最终结局.

• 第三个途径可称之为“快速熄灭”(Fast Quenching). 质量相当的两个星系的主并合(Major Merger)直接形成(经典)核球, 该过程伴随着极高的恒星形成率和黑洞吸积率, 短时期内冷气体被消耗完, 或因为星爆和活动星系核反馈而加热或吹散. 快速熄灭也可发生在孤立星系中, 近期对高红移的观测显示, 足够多冷气体可触发极高的恒星形成率(每年数百太阳质量), 使得星系不需要并合就可在数千万年内消耗完气体而熄灭. 考虑到主并合和星爆星系主要发生在高红移宇宙($z > 1$), 快速熄灭在低红移不是主要途径, 尽管低红移星系也不乏观测证据 [107, 108].

可以看到, 受数据和方法所限, 目前对星系熄灭的研究仍处于较为初步的阶段, 同时受笔者知识所限, 本文的讨论和总结肯定有片面甚至错误的地方. 但毋庸置疑的是, 星系熄灭涉及极为复杂的物理过程, 这些过程与星系内部结构和外部环境均有密切联系, 要全面认识星系熄灭过程, 至少需要如下几个方面的数据:

(1) 多波段图像和积分场光谱的星系样本—覆盖足够宽的质量和颜色范围, 用于测量处于不同演化阶段的星系内部的恒星和电离气体成分, 例如MaNGA巡天;

(2) 各种环境效应的准确刻画—样本和体积足够大, 能够很好地量化星系所处的多尺度环境密度、大尺度结构形态、暗物质晕质量和形成历史, 以及选取星系群(团)和划分中央星系和卫星星系, 例如SDSS星系光谱样本;

(3) 冷气体巡天—中性氢谱线巡天、分子气体谱线巡天, 最好要有与光学数据相当的空间分辨率, 目前最大规模的21 cm谱线巡天ALFALFA的空间分辨率和探测深度都无法与光学巡天匹配, 只能提供富气体星系的总体气体含量, 对于研究星系熄灭作用很有限.

文献中常用Mass Quenching和Environment Quenching对星系熄灭的机制分类, 源于Peng等人 [109] 对SDSS大样本星系数据的研究, 他们发现红星系比例与星系的质量和局域环境密度都有关, 但对大质量星系而言环境因素不重要, 而在小质量端的红星系比例由环境密度决定. 作者认为, 小质量的Environment Quenching可归入上述Halo Quenching范畴; 而大质量星系的Mass Quenching可由Halo Quenching和Secular Evolution两个途径导致. 因此, 这些不同的分类方法并不冲突, 且都与观测现象相符, 只是从不同的角度考虑.

星系形成活动熄灭过程的研究已经成为本领域的热门课题, 正受到越来越多研究者的关注, 近些年不断有新的数据和结果. 最近Li等人 [110] 利用MaNGA早期数据研究了十多个SDSS星系内部恒星形成历史的二维分布, 尝试了如何利用积分场光谱数据来研究星系熄灭, 得到了很有意思的结果. 随着MaNGA和SAMI等巡天持续提供大规模积分场光谱数据、高分辨率21 cm星系图像巡天(如WALLEBY (<http://www.atnf.csiro.au/research/WALLABY/>)) 即将开始实施、以及下一代高红移星系光谱巡天的紧张筹备(如Subaru/PFS(<http://pfs.ipmu.jp/>)), 相信在不久的将来, 我们对星系的熄灭过程会有一个更为全面而深刻的认识.

参考文献

- 1 York D G, Adelman J, Anderson J J E, et al. The sloan digital sky survey: Technical summary. *Astron J*, 2000, 120: 1579–1587
- 2 Strateva I, Ivezić Ž, Knapp G R, et al. Color separation of galaxy types in the sloan digital sky survey imaging data. *Astron J*, 2001, 122: 1861–1874
- 3 Kauffmann G, Heckman T M, White S D M, et al. Stellar masses and star formation histories for 10^5 galaxies from the sloan digital sky survey. *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 341: 33–53
- 4 Baldry I K, Glazebrook K, Brinkmann J, et al. Quantifying the bimodal color-magnitude distribution of galaxies. *Astrophys J*, 2004, 600: 681–694

- 5 Schawinski K, Urry C M, Simmons B D, et al. The green valley is a red herring: Galaxy zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early- and late-type galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 440: 889–907
- 6 Bell E F, McIntosh D H, Barden M, et al. GEMS imaging of red-sequence galaxies at $z \sim 0.7$: Dusty or old? *Astrophys J*, 2004, 600: L11–L14
- 7 Bundy K, Ellis R S, Conselice C J, et al. The mass assembly history of field galaxies: Detection of an evolving mass limit for star-forming galaxies. *Astrophys J*, 2006, 651: 120–141
- 8 Faber S M, Willmer C N A, Wolf C, et al. Galaxy luminosity functions to $z \sim 1$ from DEEP2 and COMBO-17: Implications for red galaxy formation. *Astrophys J*, 2007, 665: 265–294
- 9 Martin D C, Wyder T K, Schiminovich D, et al. The UV-optical galaxy color-magnitude diagram. III. Constraints on evolution from the blue to the red sequence. *Astrophys J Suppl S*, 2007, 173: 342–356
- 10 Brammer G B, Whitaker K E, Van Dokkum P G, et al. The dead sequence: A clear bimodality in galaxy colors from $z=0$ to $z=2.5$. *Astrophys J*, 2009, 706: L173–L177
- 11 White S D M, Rees M J. Core condensation in heavy halos—A two-stage theory for galaxy formation and clustering. *Mon Not R Astron Soc*, 1978, 183: 341–358
- 12 Van Den Bosch F C, Norberg P, Mo H J, et al. Probing dark matter haloes with satellite kinematics. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 352: 1302–1314
- 13 Wang L, Li C, Kauffmann G, et al. Modelling galaxy clustering in a high-resolution simulation of structure formation. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 371: 537–547
- 14 Wang L, Li C, Kauffmann G, et al. Modelling and interpreting the dependence of clustering on the spectral energy distributions of galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 377: 1419–1430
- 15 Yang X, Mo H J, Van Den Bosch F C, et al. Galaxy groups in the SDSS DR4. I. The catalog and basic properties. *Astrophys J*, 2007, 671: 153–170
- 16 Yang X, Mo H J, Van Den Bosch F C. Galaxy groups in the SDSS DR4. III. The luminosity and stellar mass functions. *Astrophys J*, 2009, 695: 900–916
- 17 Yang X, Mo H J, Van Den Bosch F C, et al. Evolution of the galaxy-dark matter connection and the assembly of galaxies in dark matter halos. *Astrophys J*, 2012, 752: 41
- 18 More S, Van Den Bosch F C, Cacciato M, et al. Satellite kinematics—II. The halo mass-luminosity relation of central galaxies in SDSS. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 392: 801–816
- 19 More S, Van Den Bosch F C, Cacciato M, et al. Satellite kinematics—III. Halo masses of central galaxies in SDSS. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 410: 210–226
- 20 Behroozi P S, Conroy C, Wechsler R H. A comprehensive analysis of uncertainties affecting the stellar mass-halo mass relation for $0 < z < 4$. *Astrophys J*, 2010, 717: 379–403
- 21 Moster B P, Somerville R S, Maulbetsch C, et al. Constraints on the relationship between stellar mass and halo mass at low and high redshift. *Astrophys J*, 2010, 710: 903–923
- 22 Guo Q, White S, Li C, et al. How do galaxies populate dark matter haloes? *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 404: 1111–1120
- 23 Li C, Jing Y P, Mao S, et al. Internal kinematics of groups of galaxies in the sloan digital sky survey data release 7. *Astrophys J*, 2012, 758: 50
- 24 White S D M, Frenk C S. Galaxy formation through hierarchical clustering. *Astrophys J*, 1991, 379: 52–79
- 25 Kauffmann G, White S D M, Guiderdoni B. The formation and evolution of galaxies within merging dark matter haloes. *Mon Not R Astron Soc*, 1993, 264: 201–218
- 26 Kang X, Jing Y P, Mo H J, et al. Semianalytical model of galaxy formation with high-resolution N -body simulations. *Astrophys J*, 2005, 631: 21–40
- 27 De Lucia G, Springel V, White S D M, et al. The formation history of elliptical galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 366: 499–509
- 28 Bower R G, Benson A J, Malbon R, et al. Breaking the hierarchy of galaxy formation. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 370: 645–655
- 29 Croton D J, Springel V, White S D M, et al. The many lives of active galactic nuclei: Cooling flows, black holes and the luminosities and colours of galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 365: 11–28
- 30 Rees M J, Ostriker J P. Cooling, dynamics and fragmentation of massive gas clouds—Clues to the masses and radii of galaxies and clusters. *Mon Not R Astron Soc*, 1977, 179: 541–559
- 31 Silk J. On the fragmentation of cosmic gas clouds. I—The formation of galaxies and the first generation of stars. *Astrophys J*, 1977, 211: 638–648
- 32 Blumenthal G R, Faber S M, Primack J R, et al. Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter. *Nature*, 1984, 311:

517–525

- 33 Birnboim Y, Dekel A. Virial shocks in galactic haloes? *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 345: 349–364
- 34 Kere D, Katz N, Weinberg D H, et al. How do galaxies get their gas? *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 363: 2–28
- 35 Dekel A, Birnboim Y. Galaxy bimodality due to cold flows and shock heating. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 368: 2–20
- 36 Cattaneo A, Dekel A, Devriendt J, et al. Modelling the galaxy bimodality: Shutdown above a critical halo mass. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 370: 1651–1665
- 37 Mandelbaum R, Seljak U, Cool R J, et al. Density profiles of galaxy groups and clusters from SDSS galaxy-galaxy weak lensing. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 372: 758–776
- 38 Guo Q, White S, Boylan-Kolchin M, et al. From dwarf spheroidals to cD galaxies: Simulating the galaxy population in a Λ CDM cosmology. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 413: 101–131
- 39 Li C, White S D M. The distribution of stellar mass in the low-redshift universe. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 398: 2177–2187
- 40 Baldry I K, Glazebrook K, Driver S P. On the galaxy stellar mass function, the mass-metallicity relation and the implied baryonic mass function. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 388: 945–959
- 41 Toomre A, Toomre J. Galactic bridges and tails. *Astrophys J*, 1972, 178: 623–666
- 42 Springel V, Di Matteo T, Hernquist L. Modelling feedback from stars and black holes in galaxy mergers. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 361: 776–794
- 43 Patton D R, Atfield J E. The luminosity dependence of the galaxy merger rate. *Astrophys J*, 2008, 685: 235–246
- 44 Kitzbichler M G, White S D M. A calibration of the relation between the abundance of close galaxy pairs and the rate of galaxy mergers. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 391: 1489–1498
- 45 Bundy K, Fukugita M, Ellis R S, et al. The greater impact of mergers on the growth of massive galaxies: Implications for mass assembly and evolution since $z \approx 1$. *Astrophys J*, 2009, 697: 1369–1383
- 46 Jiang F, Van Dokkum P, Bezanson R, et al. A nearby analog of $z \sim 2$ compact quiescent galaxies with a rotating disk. *Astrophys J*, 2012, 749: L10
- 47 Fabian A C. Observational evidence of active galactic nuclei feedback. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2012, 50: 455–489
- 48 Kauffmann G, Heckman T M, De Lucia G, et al. Gas infall and stochastic star formation in galaxies in the local universe. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 367: 1394–1408
- 49 Bell E F. Galaxy bulges and their black holes: A requirement for the quenching of star formation. *Astrophys J*, 2008, 682: 355–360
- 50 Sersic J L. Atlas De Galaxias Australes. Cordoba: Observatorio Astronomico, 1968
- 51 Cheung E, Faber S M, Koo D C, et al. The dependence of quenching upon the inner structure of galaxies at $0.5 \leq z < 0.8$ in the DEEP2/AEGIS survey. *Astrophys J*, 2012, 760: 131
- 52 Bell E F, Van Der Wel A, Papovich C, et al. What turns galaxies off? The different morphologies of star-forming and quiescent galaxies since $z \sim 2$ from CANDELS. *Astrophys J*, 2012, 753: 167
- 53 Franx M, Van Dokkum P G, Schreiber N M F, 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
- 54 Fang J J, Faber S M, Koo D C, et al. A link between star formation quenching and inner stellar mass density in sloan digital sky survey central galaxies. *Astrophys J*, 2013, 776: 63
- 55 Martig M, Bournaud F, Teyssier R, et al. Morphological quenching of star formation: Making early-type galaxies red. *Astrophys J*, 2009, 707: 250–267
- 56 Fabello S, Catinella B, Giovanelli R, et al. ALFALFA H I data stacking—I. Does the bulge quench ongoing star formation in early-type galaxies? *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 411: 993–1012
- 57 Wake D A, Franx M, Van Dokkum P G. Which galaxy property is the best indicator of its host dark matter halo properties? arXiv: 1201.1913
- 58 Li C, Wang L, Jing Y P. Stellar mass versus stellar velocity dispersion: Which is better for linking galaxies to their dark matter halos? *Astrophys J*, 2013, 762: L7
- 59 Wang L, Li C, Jing Y P. Clustering properties and halo masses for central galaxies in the local universe. *Astrophys J*, 2016, 819: 58
- 60 Bluck A F L, Mendel J T, Ellison S L, et al. Bulge mass is king: The dominant role of the bulge in determining the fraction of passive galaxies in the sloan digital sky survey. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 441: 599–629
- 61 Li C, Kauffmann G, Heckman T M, et al. Interaction-induced star formation in a complete sample of 10^5 nearby star-forming galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 385: 1903–1914
- 62 Li C, Kauffmann G, Heckman T M, et al. Interactions, star formation and AGN activity. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 385: 1915–1922

- 63 Patton D R, Ellison S L, Simard L, et al. Galaxy pairs in the sloan digital sky survey—III. Evidence of induced star formation from optical colours. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 412: 591–606
- 64 De Vaucouleurs G. Revised classification of 1500 bright galaxies. *Astrophys J Suppl*, 1964, 8: 31
- 65 Knapen J H, Shlosman I, Peletier R F. A subarcsecond resolution near-infrared study of seyfert and “normal” galaxies. II. Morphology. *Astrophys J*, 2000, 529: 93–100
- 66 Marinova I, Jogee S. Characterizing bars at $z \sim 0$ in the optical and NIR: Implications for the evolution of barred disks with redshift. *Astrophys J*, 2007, 659: 1176–1197
- 67 Eskridge P B, Frogel J A, Pogge R W, et al. The frequency of barred spiral galaxies in the near-infrared. *Astron J*, 2000, 119: 536–544
- 68 Masters K L, Nichol R C, Hoyle B, et al. Galaxy zoo: Bars in disc galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 411: 2026–2034
- 69 Lee G H, Park C, Lee M G, et al. Dependence of barred galaxy fraction on galaxy properties and environment. *Astrophys J*, 2012, 745: 125
- 70 Sheth K, Elmegreen D M, Elmegreen B G, et al. Evolution of the bar fraction in COSMOS: Quantifying the assembly of the hubble sequence. *Astrophys J*, 2008, 675: 1141–1155
- 71 Athanassoula E. The existence and shapes of dust lanes in galactic bars. *Mon Not R Astron Soc*, 1992, 259: 345–364
- 72 Sellwood J A, Wilkinson A. Dynamics of barred galaxies. *Rep Prog Phys*, 1993, 56: 173–256
- 73 Piner B G, Stone J M, Teuben P J. Nuclear rings and mass inflow in hydrodynamic simulations of barred galaxies. *Astrophys J*, 1995, 449: 508
- 74 Sheth K, Vogel S N, Regan M W, et al. Molecular gas and star formation in bars of nearby spiral galaxies. *Astron J*, 2002, 124: 2581–2599
- 75 Athanassoula E. What determines the strength and the slowdown rate of bars? *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 341: 1179–1198
- 76 Regan M W, Teuben P J. Bar-driven Mass Inflow: How bar characteristics affect the Inflow. *Astrophys J*, 2004, 600: 595–612
- 77 Zurita A, Pérez I. Where are the stars of the bar of NGC 1530 forming? *Astron Astrophys*, 2008, 485: 5–20
- 78 Kormendy J, Kennicutt J R C. Secular evolution and the formation of pseudobulges in disk galaxies. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2004, 42: 603–683
- 79 Wang J, Kauffmann G, Overzier R, et al. Quantifying the role of bars in the build-up of central mass concentrations in disc galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 423: 3486–3501
- 80 Lin L, Li C, He Y, et al. Bar-induced central star formation as revealed by integral field spectroscopy from CALIFA. arXiv: 1609.05287
- 81 Sánchez S F, Kennicutt R C, Gil De Paz A, et al. CALIFA, the calar alto legacy integral field area survey. I. Survey presentation. *Astron Astrophys*, 2012, 538: A8
- 82 Sánchez S F, Garcacutefa-Benito R, Zibetti S, et al. CALIFA, the calar alto legacy integral field area survey. IV. Third public data release. *Astron Astrophys*, 2016, 594: A36
- 83 Bundy K, Bershady M A, Law D R, et al. Overview of the SDSS-IV MaNGA survey: Mapping nearby galaxies at apache point observatory. *Astrophys J*, 2015, 798: 7
- 84 Moore B, Katz N, Lake G, et al. Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies. *Nature*, 1996, 379: 613–616
- 85 Gunn J E, Gott J R I. On the infall of matter into clusters of galaxies and some effects on their evolution. *Astrophys J*, 1972, 176: 1
- 86 Abadi M G, Moore B, Bower R G. Ram pressure stripping of spiral galaxies in clusters. *Mon Not R Astron Soc*, 1999, 308: 947–954
- 87 Vogt N P, Haynes M P, Giovanelli R, et al. M/L, $H\alpha$ rotation curves, and H I gas measurements for 329 nearby cluster and field spirals. II. evidence for galaxy infall. *Astron J*, 2004, 127: 3300–3324
- 88 Chung A, Van Gorkom J H, Kenney J D P, et al. VLA imaging of virgo spirals in atomic gas (VIVA). I. The atlas and the H I properties. *Astron J*, 2009, 138: 1741–1816
- 89 Merluzzi P, Busarello G, Dopita M A, et al. ACCESS - V. Dissecting ram-pressure stripping through integral-field spectroscopy and multiband imaging. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 429: 1747–1773
- 90 Weinmann S M, Kauffmann G, Van Den Bosch F C, et al. Environmental effects on satellite galaxies: The link between concentration, size and colour profile. *Mon Not R Astron Soc*, 2009, 394: 1213–1228
- 91 Lin Y, Sodi B C, Li C, et al. The environment of barred galaxies in the low-redshift universe. *Astrophys J*, 2014, 796: 98
- 92 Peng Y, Maiolino R, Cochrane R. Strangulation as the primary mechanism for shutting down star formation in galaxies. *Nature*, 2015, 521: 192–195
- 93 Zwaan M A, Meyer M J, Staveley-Smith L, et al. The HIPASS catalogue: H I and environmental effects on the H I mass function of galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 359: L30–L34
- 94 Giovanelli R, Haynes M P, Kent B R, et al. The Arecibo legacy fast ALFA survey. I. Science goals, survey design, and strategy. *Astron J*, 2005, 130: 2598–2612
- 95 Meyer M J, Zwaan M A, Webster R L, et al. The weak clustering of gas-rich galaxies. *Astrophys J*, 2007, 654: 702–713

- 96 Passmoor S S, Cress C M, Faltenbacher A. Clustering of H I galaxies in the H I parkes all sky survey and arecibo legacy fast ALFA survey. [Mon Not R Astron Soc](#), 2011, 412: L50–L54
- 97 Papastergis E, Giovanelli R, Haynes M P, et al. The clustering of ALFALFA galaxies: Dependence on H I mass, relationship with optical samples, and clues of host halo properties. [Astrophys J](#), 2013, 776: 43
- 98 Fabello S, Kauffmann G, Catinella B, et al. ALFALFA H I data stacking—III. Comparison of environmental trends in H I gas mass fraction and specific star formation rate. [Mon Not R Astron Soc](#), 2012, 427: 2841–2851
- 99 Li C, Kauffmann G, Fu J, et al. The clustering of galaxies as a function of their photometrically estimated atomic gas content. [Mon Not R Astron Soc](#), 2012, 424: 1471–1482
- 100 Zhang W, Li C, Kauffmann G, et al. Gas depletion in cluster galaxies depends strongly on their internal structure. [Mon Not R Astron Soc](#), 2013, 429: 2191–2198
- 101 Wang J. An atomic hydrogen view of low redshift galaxies (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2017, 47: 049809 [王菁. 低红移河外星系中性氢原子气体观测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 049809]
- 102 Fu J, Guo Q, Kauffmann G, et al. The atomic-to-molecular transition and its relation to the scaling properties of galaxy discs in the local universe. [Mon Not R Astron Soc](#), 2010, 409: 515–530
- 103 Saintonge A, Kauffmann G, Kramer C, et al. COLD GASS, an IRAM legacy survey of molecular gas in massive galaxies—I. Relations between H₂, H I, stellar content and structural properties. [Mon Not R Astron Soc](#), 2011, 415: 32–60
- 104 Kauffmann G, Li C, Fu J, et al. COLD GASS, an IRAM legacy survey of molecular gas in massive galaxies—III. Comparison with semi-analytic models of galaxy formation. [Mon Not R Astron Soc](#), 2012, 422: 997–1006
- 105 Luo Y, Kang X, Kauffmann G, et al. Resolution-independent modelling of environmental effects in semi-analytic models of galaxy formation that include ram-pressure stripping of both hot and cold gas. [Mon Not R Astron Soc](#), 2016, 458: 366–378
- 106 Fu J. Cold gas in the models of galaxy formation and evolution (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2017, 47: 049802 [富坚. 星系形成演化模型中的冷气体成分. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 049802]
- 107 Guo R, Hao C N, Xia X Y, et al. The role of major gas-rich mergers on the evolution of galaxies from the blue cloud to the red sequence. [Astrophys J](#), 2016, 826: 30
- 108 Guo R, Hao C N, Xia X Y. The evolution of advanced merger (U)LIRGs on the color-stellar mass diagram. [Res Astron Astrophys](#), 2016, 16: 011
- 109 Peng Y, Lilly S J, Kovač K, et al. Mass and environment as drivers of galaxy evolution in SDSS and zCOSMOS and the origin of the schechter function. [Astrophys J](#), 2010, 721: 193–221
- 110 Li C, Wang E, Lin L, et al. P-MaNGA: Gradients in recent star formation histories as diagnostics for galaxy growth and death. [Astrophys J](#), 2015, 804: 125

Star formation quenching in galaxies

LI Cheng^{1,2*}

¹*Physics Department & Tsinghua Center for Astrophysics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;;*

²*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*

The cosmic star formation rate density is peaked at $z \sim 2$ and declines continuously since then, implying that the quenching of star formation has been the dominating process in galaxy evolution in the past ~ 10 Gyr. As a result, the present day universe does not contain many star-bursting galaxies, which were the dominating population at $z \sim 2$. What physical processes drive the star formation quenching? What are the different roles of proposed processes in different galaxies and environments? Our understanding in this regard has advanced dramatically thanks to multi-band image and spectroscopic surveys conducted in the past one and a half decade. In this review I attempt to summarize the main findings, mainly but not limited to observational results. Considering the large difference between central and satellite galaxies, I will firstly discuss the two types of galaxies separately, and then try to include the different mechanisms into an empirical picture in which the star formation in galaxies gets shut down through three distinct channels: halo quenching (gravitational shock-heating and various environmental effects occurring in massive halos), secular evolution (driven by disk instability induced by galactic bars or minor mergers, which leads to bulge growth and bulge-related morphology quenching and/or AGN feedback), and fast quenching (major mergers and/or fast depletion of cold gas due to extremely high star formation rates). This picture, however, can be biased or even wrong in some aspects due to my limited knowledge of the literature. A full picture of galaxy quenching requires spatially resolved measurements of both stellar and gaseous components to be obtained in large samples, covering wide ranges of galaxy mass and color, with various environmental effects being well determined. More importantly, the updated observational results should be considered in theoretical studies, timely and substantially, in order to constrain current models of galaxy formation, e.g. semi-analytic models and hydro-dynamical simulations

galaxy formation, galaxy evolution, star formation quenching, dark matter halo, galaxy structure, photometric and spectroscopic surveys

PACS: 98.62.Ai, 98.62.Gq, 98.62.Hr, 98.62.Js

doi: [10.1360/SSPMA2017-00006](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00006)