

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.01.01

纤维环境对星系恒星形成活动影响研究进展

杨思睿^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 由星系组成、延伸尺度可达数百秒差距的大尺度结构又被称为宇宙网, 根据形态和星系密度的不同被分为结点, 纤维, 墙, 空洞等环境, 其中靠近纤维的星系通常质量较高, 并且比空洞中的星系有更高比例的早型红色星系。观测和模拟提供的证据表明, 当星系接近纤维时, 其恒星形成活动下降。不过, 有几个因素可能带来不确定性: 不同算法找出的纤维结构可能存在差异; 对纤维结构几何性质有不同测量方法; 在纤维附近, 星系自身恒星质量较大, 局部环境星系密度较高, 宿主暗晕质量较大, 这些因素也会引起星系恒星形成活动的变化, 因此大尺度环境是否对于恒星形成活动产生独立的影响, 对哪些星系产生多大程度的影响以及背后的物理机制有待细致的研究。回顾用于研究宇宙网的算法, 探讨在控制恒星质量、星系密度、暗晕质量等因素情况下纤维对恒星形成活动的影响, 以期理解星系的恒星形成活动在纤维环境中受的影响。

关 键 词: 宇宙纤维; 星系淬灭; 恒星形成

中图分类号: P145.2

文献标识码: A

1 引 言

宇宙网是已观测宇宙中最大尺度的结构, 具有分形自相似性, 在不同尺度的范围上可以划分出不同的结构。通常人们把宇宙网中星系数密度较低的区域称为“空洞”, 把密度高的部分称为“结点”。以稀疏或完全没有星系为特征的“空洞”(voids)(或称“场”, field), 占据了几乎 95% 的宇宙空间^[1, 2]。“纤维”(filaments)和“墙”(sheets, walls)代表中等密度的区域, 长度从几十到几百 Mpc 不等。关于墙结构的直接观测较少, 著名结构比如 CfA2 长城^[3]、斯隆长城^[4]、赫克托长城^[5]。而宇宙纤维结构在低红移处, 有包括斯隆巡天 (SDSS)^[6]等在内的大量观测证据; 通过莱曼 α 辐射, 天文学家还可以描绘出高红移时宇宙纤维的形态和物理特性。Wang 等人^[7]发现了大爆炸后仅 8.3 亿年就存在的纤维结构, 它由明亮的类星体定位, 10 个星系组成, 延伸 300 万光年。

收稿日期: 2012-08-07; **修回日期:** 2012-11-29

资助项目: 国家自然科学基金 (10973028, 10833005, 10878003); 创新群体项目 (10821302); 973 项目 (2007CB815402/403)

通讯作者: 杨思睿, ysirui@shao.ac.cn

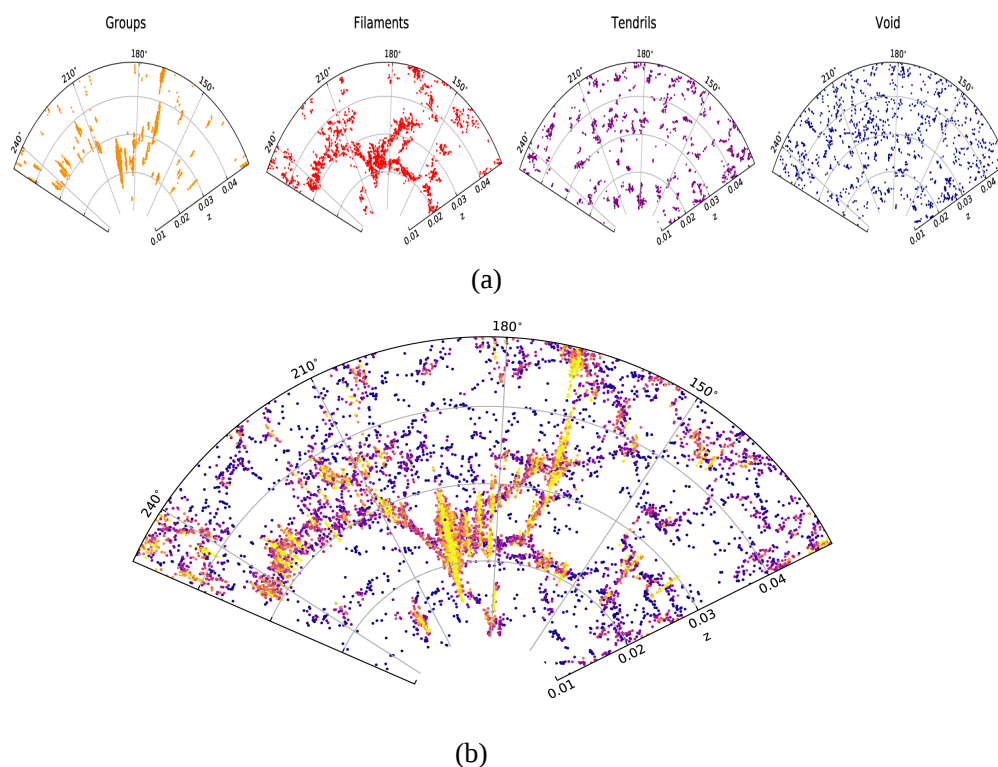


图 1 SDSS^[8] 北天区, 赤纬在 22° - 25° 之间的星系分布 (极轴分别为赤经和红移)。(a) 按星系群、纤维、卷须、空洞分组; (b) 展示了切片全部星系, 按局部密度上色。^[9]

研究宇宙大尺度结构, 对人们理解宇宙大爆炸、建立和修改宇宙学模型等基础问题有所帮助。一般认为宇宙暴胀产生微小的原初扰动, 并在引力作用下塌缩形成大尺度纤维。在冷暗物质和温暗物质等不同的宇宙模型下, 形成的纤维结构在形态上将具有明显差异。在观测和模拟中研究大尺度结构, 有助于限制如暗物质密度、暗能量密度和哈勃常数等宇宙学参数。多样的大尺度环境也为人们理解星系形成与演化过程提供了试验场。作为连接着星系和星系团, 由暗物质、重子物质 (星系、气体等) 组成的细长结构——纤维, 其附近的星系有几个明显区别于场星系的特性: (1) 纤维中的星系质量要高出纤维之外的星系。比如 Laigle 等人用 COSMOS 巡天^[10] 的数据研究了星系的质量剖面曲线, 发现大质量星系要比小质量星系的分布更靠近纤维中心^[11]。星系可能以并合的形式, 在沿着宇宙纤维进入星系团的过程中质量逐渐增加^[12]。(2) 靠近纤维的早型星系比例更高, 且星系颜色更红。Kuutma 等人^[13] 研究发现椭圆/漩涡星系比例 (E/S) 在靠近纤维时上升, 并且这一变化与 g-i 颜色变化同步; Salerno 等人^[14] 研究发现, 红星系的比例在星系团中最高, 在纤维结构中居中, 在场中比例最低。纤维环境在多大范围内影响到星系的恒星形成? 纤维是否起着输送重子物质的作用? 纤维的增长与演化是否与星系的并合与演化同步? 回答这些问题, 既对研究星系演化有所促进, 也可以增加对大尺度结构性质与形成过程的认识。

本文第二章列举了几种找纤维结构的算法, 第三章介绍了纤维环境对星系恒星形成活动影响研究进展, 其中 3.1 节概述了在观测和模拟中观察到的纤维附近星系形成活动下降的现象; 3.2 节讨论了控制暗晕质量、局部星系密度场等影响变量后对纤维环境淬灭机制的研究结果, 以及不同变量的重要性排序 (随机森林); 3.3 节介绍了宇宙网通过气体运输促进恒星形成活动的可能性。第 4 章进行总结与展望。

2 查找宇宙网结构的几种算法介绍

Liebeskind^[15] 在研究中总结了一些查找宇宙网的算法。作为补充, 这里回顾最为常用的 DisperSE 算法, 并列举了 Sconce、MCPM、Bisous 模型和简单连接网络等算法, 对算法优缺点作比较, 并在表 1 中总结。第三章中涉及相关算法的文献列出在表格最后。

表 1 查找纤维的算法比较

算法名称	输入数据类型	算法原理	优点	缺点	部分应用文献
DisperSE [16]	离散点(星系或暗物质粒子)坐标	拓扑方法; 以镶嵌方式构建密度场, 在流形上寻找纤维结构	快速有效地查找纤维结构和避免噪声	天球高赤纬区域恢复精度较低	[38], [62], [63], [65], [67], [70]
Sconce [19,20]	离散点(星系)(球面)坐标	对星系密度场作核密度估计, 迭代收敛找出密度脊	在天球坐标系下, 对各赤纬处纤维的恢复较均匀	运行较慢; 可能遗漏一些短纤维结构	
MCPM [24]	离散/稀疏点(星系/快速射电暴)坐标	受黏菌行为启发的概率模型	在星系低密度区域也能重建宇宙网	占用计算资源较大	[47]
Bisous [28]	离散点(暗晕)坐标	通过概率密度模型寻找方向一致的“小圆柱体”	不依赖密度场平滑, 恢复精度高	参数多, 算法较复杂	[13]
简单的连接网络 [29][31]	离散点(星系)坐标	设定基于几何的判断标准区分不同结构	不依赖密度场平滑, 快速	不能直接找出纤维点, 精度较低	[14]

2.1 DisperSE

常用的结构查找器 DisPerSE (Discrete Persistent Structures Extractor) 可以提取持久的拓扑特征, 如峰、空洞、墙, 并追踪连接它们的纤维^[16]。DisperSE 程序从场数据开始, 即一组离散点, 这些点可能来自星系坐标、暗晕位置, 或可以在模拟中使用暗物质粒子作为输入数据。接着, DisperSE 用 DTFE (Delaunay Tessellation Field Estimator)^[17] 对场进行镶嵌, 并在每个镶嵌顶点计算和相邻值 (取离该点最近的两个顶点) 的平均, 得到平滑的密度场。密度场中的结构被识别为莫尔斯·斯梅尔复形 (Morse-Smale complex) 上的函数。密度函数梯度为零的点为临界点, 由函数最大值、最小值和鞍点组成。在 DisPerSE 中, 纤维是一维结构, 是一个梯度上升或下降的单流形 (one-manifold), 由从给定鞍点出发并连接两个最大值点的两条积分线 (在每一点上与梯度场相切的曲线) 组成。

数据中的拓扑结构可能存在不稳定性。例如, 数据噪声可能会制造一些临时的结构, 而在不同尺度上的平滑处理可能导致这些结构的消失。DisperSE 通过测量结构的拓扑持久性 (Topological persistence)^[18] 来识别和量化这些结构的显著性。它计算一对临界点 (如极大值和鞍点) 之间的持久性比率, 并删除在随机场中出现概率小于设定阈值的点。通过设定较低的阈值, 可以发现更多的纤维结构。

2.2 Sconce

对于二维和三维的离散点坐标, Zhang 等人^[19, 20] 分别开发了两个 python 包 (DirSCMS, DirLin SCMS) 寻找纤维结构。Sconce 算法的原理是从等距放置的网格点开始, 首先以适应球面坐标系的方向密度核 (Directional kernel density estimator)^[21, 22] 和相应的平滑带宽参数 b (带宽越大, 密度场越平滑) 估出密度场公式; 接着类似于梯度上升算法, 在迭代过程中直接寻找出密度脊 (density ridges), 由 Hessian 矩阵定义的 (法方向上) 局部密度最大值组成。Sconce 算法可以避免在将红移换算为共动距离时, 上帝之指效应^[23] 引起的虚假纤维结构, 并且后者能够在三维空间中, 同时构建平行与垂直视线方向上的纤维。

Zhang 等人比较了与 DisPerSE 算法找出纤维结构的差异, 他们认为在天球的高赤纬区域, Disperse 找出的纤维结构不规则且可能含有许多虚假成分, 而 Sconce 对纤维的恢复精度更高。从图 2 可以看出, DisperSE 在寻找短纤维结构上更有优势, 可以用来查找“簇须” (Tendrils) 结构; Sconce 则相反, 在寻找长纤维结构时避免了重新连接短纤维结构可能出现的误差。

2.3 MCPM

蒙特卡洛绒泡黏菌算法 (Monte Carlo Physarum Machine, 简称 MCPM)^[24] 受到 Jones 等人^[25] 工作的启发, 灵感来自生物有机体聚绒泡黏菌在寻找食物时产生高效的互连网络^[26]。算法中, “黏菌” 沿着“引诱剂” 路径移动, 在每个时间步长释放自己的沉积物, 找到最佳的运输网络。MCPM 将这个模型调整到三维, 以概率的方式对可能的路径进行采样, 这样通向较小沉积物的路径仍然可能被遍历。这一算法的优势是可以对宇宙网中的低密度区域也进行合理的插值。MCPM 已被应用于分析星系和快速射电暴数据^[24, 27], 促进了对宇宙网中星系间中性氢和热电离气体的研究。

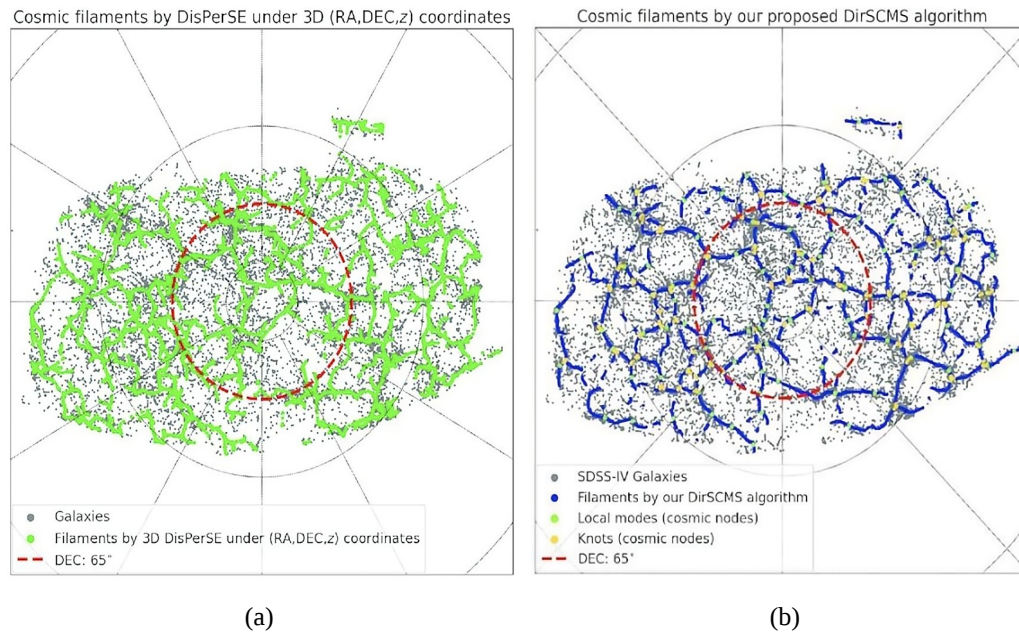


图 2 三维 (赤纬, 赤经, 红移) 坐标系下的宇宙纤维及其相关结点, 分别为 DisperSE(a) 和 Sconce(b) 找出的结构。^[19]

2.4 Bisous 模型与连接网络算法

一些算法通过宇宙网自身连接的几何特性, 再结合统计方法, 不需要对密度场作插值、平滑和估算就可以找出宇宙网结构。Tempel 等人^[28]提出的 Bisous 模型假设星系聚集在一个个小圆柱体里, 如果相邻的圆柱体以相似的方向排列就可以组合成纤维, 每个小圆柱体可以用中心点坐标、圆柱的高、底半径和方向矢量四个参数标记。模型接着计算概率密度场, 依照泊松分布的概率密度函数以系统的能量为主要参数 (在物理学中相当于系统的总吉布斯能量, 这里由星系场中圆柱体的位置, 对齐量和连接度决定), 最后在概率密度较高的区域提取纤维结构。Bisous 模型能够在考虑网络连通性的基础上精确提取纤维, 不过实现较为复杂。

Hong 等人^[29]提出, 当两个星系之间的距离小于给定的“连接长度”时, 它们被视为连通的。首先, 已知数据集较大的随机网络展现出泊松分布的特征^[30]。每次随机过程都是一次二项试验, 计算 n 次撒点在由长度 l 为半径的球形空间中的分布, 可以得到一个类似泊松分布的公式, 其均值可以用 l 和 n 表示; 因此可以通过构造泊松分布来确定连接长度, 并用于查找星系之间的连通性, 通过每个点上的连接度来划分空洞 (连接度最低), 墙和结点 (连接度最高) 几种结构。

Martínez 等人^[31]提出可以先找出纤维所连接的“结点对”, 再通过计算星系过密度筛选出纤维。具体来说, “结点对”需要满足两点之间的投影方向上的距离和视线方向上的距离分别小于一个给定的值, 同时投影距离要大于两个暗晕的维里半径之和, 以确保找出清晰的结

构；随后构建“结点对”之间的长方形（高沿视线方向，底在投影平面上）并计算其中星系的过密度（统计其中星系的数目，与场中同样空间和红移范围内的星系数目进行比较），过密度大于 1，则判定为纤维结构。这两种方法快速直观、对计算资源消耗很小，不过 Hong 等人的方法对参数（“连接长度”）的依赖性较大，并且无法直接构造纤维网络；Martínez 等人的方法依赖视线距离、投影距离的阈值参数，且对星系位置和红移的数据精度要求较高，误差可能影响结果，应用主要限于区分星系所在的宇宙网环境。

3 宇宙网环境下星系淬灭的研究

从恒星形成的“蓝星系”，到停止恒星形成的“红星系”，这一过程在宇宙时标上是较为迅速的；中间的过渡地带被称为“绿谷”（Green Valley），在颜色-光度图上是一个狭窄的分布^[32]。星系的恒星形成与淬灭机制是复杂的，受到星系内在性质比如质量、形态，外在环境比如暗晕、局部星系密度、大尺度结构等多种因素的影响。Dressler 提出著名的环境密度和星系形态的关系^[33]，星系团星系比场星系更可能具有椭圆形态，而后者通常是形成恒星的旋涡星系。Jaffé 等人将观测到的星系按是否探测到中性氢以及红蓝颜色分类绘制在速度-相位图上^[34]，研究了中性氢气体在星系团中的冲压剥离机制^[35]。Lotz 等人在模拟中研究星系在星系团中被“预处理”（pre-processing）的轨道^[36]，发现速度方向呈径向的卫星星系大多数在第一次下落时就因气体剥离效应^[37]被迅速淬灭。宇宙纤维作为密度低于星系团、高于空洞的环境，其中是否存在和上述研究类似的星系淬灭过程仍有待检验。

3.1 纤维中的星系淬灭：观测和模拟中的研究结果

不同观测和模拟都研究了靠近纤维时星系的恒星形成活动变化。衡量星系形成活动的变化，有几个常用的统计指标：（1）通过星系的颜色，比如 $u-r > 1.8$ 为红星系^[39]，也可以在 $g-r/u-g$ 图上作划分，比如 $(g-r) > -0.234(u-g) + 1.03$ ^[40]；（2）通过 sSFR（星系恒星形成率与星系恒星质量的比值）观察，sSFR 呈和颜色图高度一致的双峰分布^[41]，因此也可以为星系是否淬灭提供快速判断；（3）划分样本后，计算淬灭星系占总样本的比例（Quenched Fraction）作为统计量。这里介绍几篇应用不同统计指标，观察到星系形成活动随着不同宇宙环境变化的研究。

Kuutma 等人^[13]使用斯隆巡天第 10 次发布（SDSS Release10）^[42]的数据，采用星系动物园（Galaxy Zoo）对星系类型进行分类后统计了椭圆/漩涡星系比例（E/S）和星系的 $g-i$ 颜色从距离纤维 10Mpc h^{-1} 到 0.1Mpc h^{-1} 处的变化。如图 3 左面板所示水平线表示样本内所有环境下的星系在相应光度范围内的平均 $g-i$ 值，靠近纤维时较亮的星系趋向于变红，而较暗的星系在误差棒之外没有明显的变化。他们同时在研究中发现 E/S 随着靠近纤维而上升，与 $g-i$ 值的变化是同步的，因此形态的转变可能是造成颜色指数变化的原因。不过在图 3 右面板中，在对于较亮星系样本区分星系形态后，可以看到在靠近纤维时变红趋势依然存在，并且这一趋势对于漩涡星系更强。

Malavasi 等人^[38]使用 Illustris TNG^[43–45]模拟在红移 0 处的数据，研究了星系的恒星

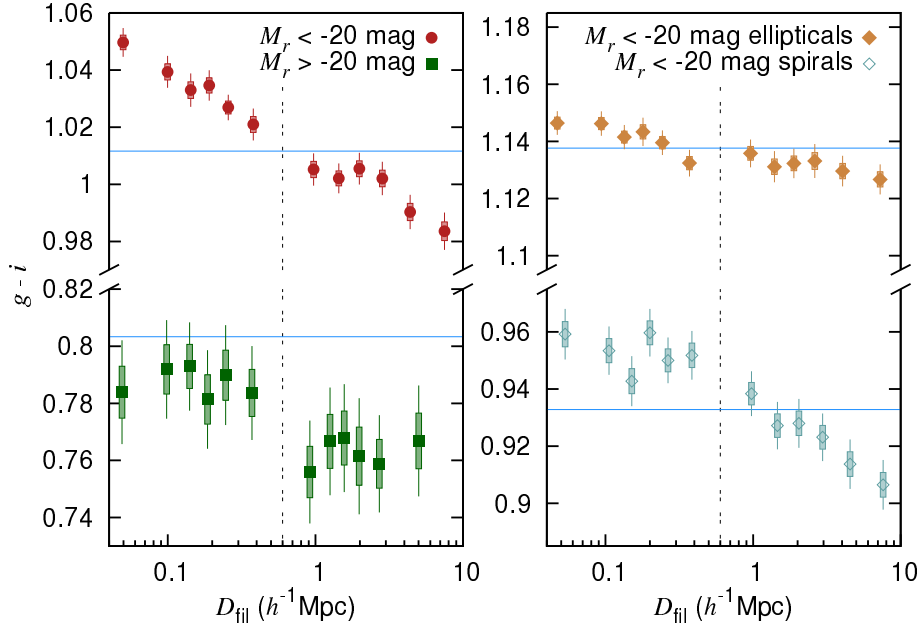


图 3 星系的 $g-i$ 颜色 (纵轴) 随着星系到纤维距离的变化, 左面板中, 星系按照亮度分类, 分别用红色 (较亮的样本) 和绿色 (较暗的样本) 图例标注, 右面板中控制了星系亮度, 按星系形态分类, 分别用黄色 (椭圆星系) 和蓝色 (漩涡星系) 图例标注。^[13]

质量、恒星形成率 SFR 和 sSFR 随着到纤维距离的依赖关系, 如图 4(a) 所示。他们在研究中用 DisperSE 算法找出宇宙网 (包括纤维段位置、结点位置等), 并考虑了星系到宇宙网的三个距离变量, 分别为: 星系到宇宙网上最近的结点 (DisperSE 找出的密度函数最大值点以及分岔点) 的距离 (d_{cp}); 星系到距离最近的纤维段中点之间的距离 (d_{fil}); 从离星系最近的纤维点 (即星系在最近纤维上的投影位置), 到该纤维连接的两个临界点之一的距离 (d_{skel})。如图左面板所示, 无论采取哪种计算方式, 三个星系的性质都对宇宙网距离变量表现出较强的依赖关系。类似地, Hasan 等人^[46, 47] 用 IllustrisTNG 的数据分析了星系 sSFR 和到纤维距离的关系, 他们将红移范围扩展到 4, 并区分了中心和卫星星系。研究显示宇宙网对 sSFR 的影响只从红移 2 开始, 在更高红移处几乎没有; 并且主要是卫星星系受到了环境淬灭的影响, 中心星系所受影响非常轻微。

观测上存在宇宙环境在较高的红移上影响星系淬灭的证据。如图 5, Salerno 等人^[14] 选取了 VIMOS 河外星系巡天^[48] 中红移范围为 0.43-0.89 的星系, 将它们按所处宇宙环境分为场星系、纤维中的星系、星系群附近各向同性下落区域的星系以及星系群里的星系几个组别, 分别统计淬灭比例随着星系质量的变化进行对比, 发现星系的淬灭比例在场和下落区域中最低, 在纤维环境居中, 在星系群中最高。不过, 这篇研究没有计算星系到纤维的距离, 也没从统计上把其他可能导致星系淬灭的因素作为控制变量进行考虑。

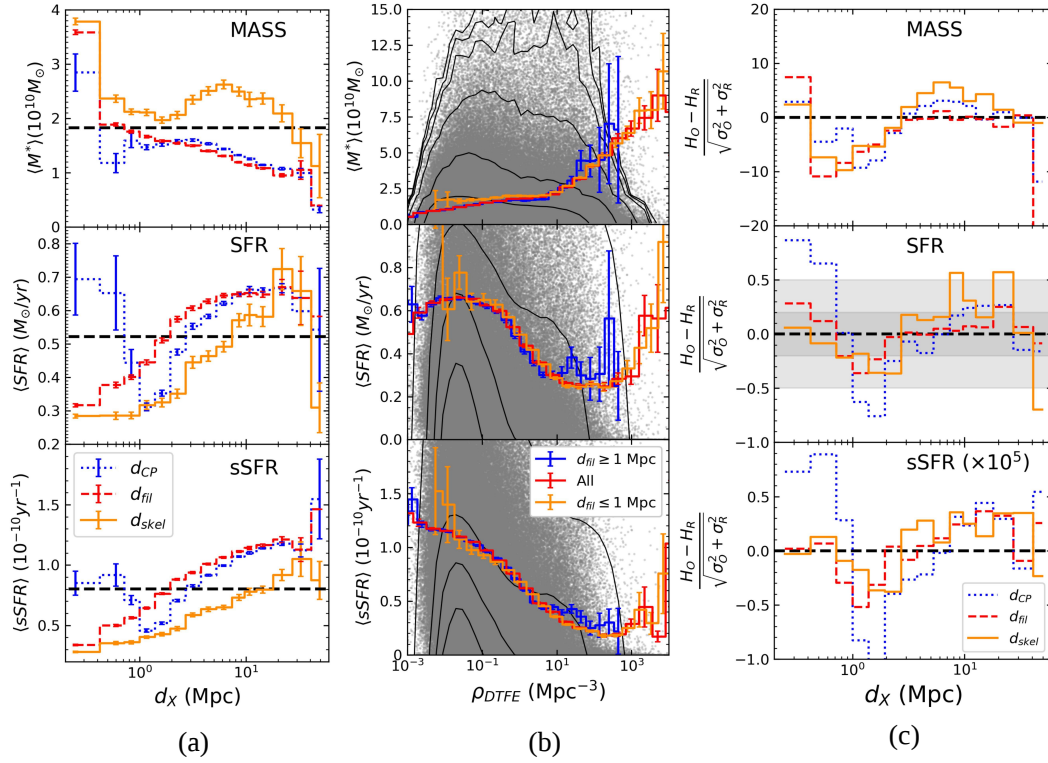


图 4 (a) 星系的恒星质量、SFR 和 sSFR 随着到纤维距离 (d_{cp} , d_{fil} , d_{skel}) 的变化; (b) 星系的恒星质量、SFR 和 sSFR 随着局部密度场的变化; (c) 星系的恒星质量、SFR 和 sSFR 在洗牌前 (H_0) 后 (H_R) 的差异 (用误差值的均方根归一化) 随着到纤维距离 (d_{cp} , d_{fil} , d_{skel}) 的变化。^[38]

观测和模拟中, 都见到了不同表征星系恒星形成活动下降的参数从距离纤维 $10 \text{Mpc} h^{-1}$ 到 $0.1 \text{Mpc} h^{-1}$ 变化的趋势, 模拟研究将这一影响的范围推广至红移 1-2。模拟同时表明这一趋势主要由卫星星系主导, 而观测中也发现这一趋势主要出现在亮度较低的星系上 (通常中心星系比卫星星系亮度更高)。卫星星系恒星质量较低、分布更靠近暗晕边缘, 因此可能更容易受到环境的影响。不过由于低亮度星系恒星形成率变化比较显著, 其中可能存在观测偏差, 研究需要进一步的证据来了解大尺度环境导致星系淬灭的范围与机制。

3.2 控制影响变量后对环境淬灭的研究结果

星系的恒星质量、星系所在局部环境——暗晕的质量, 以及潜在的局部星系密度场, 都对星系的恒星形成活动有影响, 并且这些参数之间存在一定简并性, 到纤维距离更近, 通常对应更高的恒星质量、暗晕质量及星系密度, 因此在研究中分离变量的影响十分重要。

星系的恒星形成率和恒星质量之间有紧密的联系^[49]。现代的流体数值模拟普遍认为, 超大质量黑洞 (SMBH) (或活动星系核 AGN) 的反馈是使得大质量星系达到淬灭的关键^[50, 51]。而 AGN 反馈可以在多种条件下被触发, 比如黑洞吸积物质, 星系并合等等^[52, 53], 通过产生快速喷流加热气体致使星系淬灭。大多数 (包括 3.1 节提到的) 对环境淬灭的研究都控制了

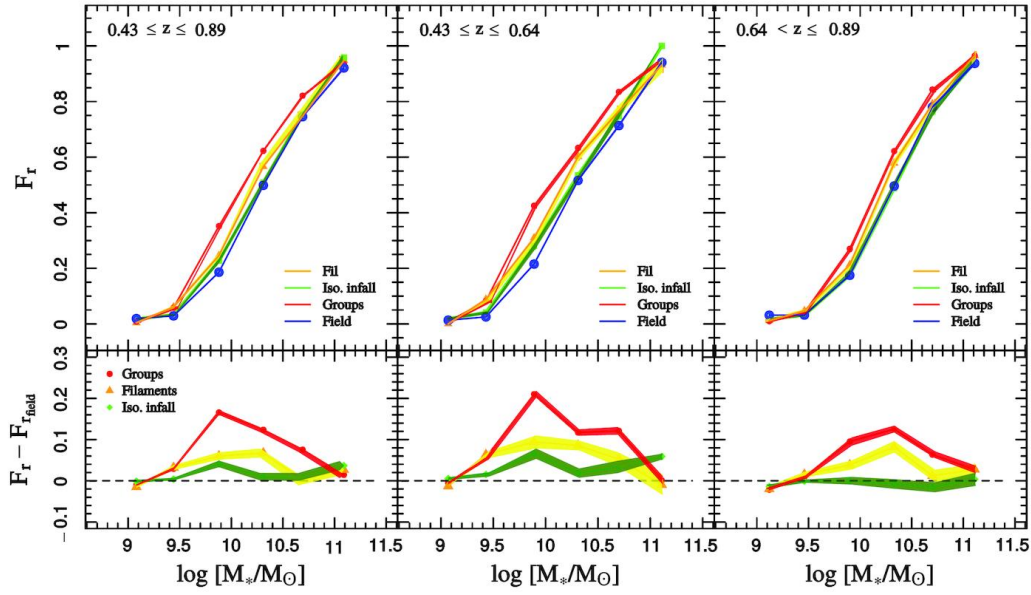


图 5 红色星系的比例作为恒星质量的函数。上排左面板对应于整个红移范围, 中间面板表示较低的红移区间, 右边面板表示较高的红移区间。颜色表示不同环境: 蓝色代表场星系, 绿色代表下落星系, 黄色代表纤维星系, 红色代表群星系, 误差棒用 bootstrap 重复采样计算。下排面板表示以场星系作为基准, 红星比例在其他环境下与场星系的差异, 这一差异对于群星系、纤维中的星系、下落区域的星系依次递减。^[14]

星系质量这一影响变量。

许多研究在观测^[54–56]和模拟^[57, 58]中都发现, 星系可能在大质量暗晕中变红或淬灭。暗晕质量影响星系淬灭的一种机制是, 在临界质量 $10^{12} M_{\odot}$ 以上的暗晕中, 维里激波加热 (virial shock heating) 来自星系间介质的流入气体, 阻止被吸积的气体直接为恒星形成提供燃料^[59]。此外, AGN 反馈的效率也和暗晕质量相关。Lin 等人^[60]使用 SDSS-IV MaNGA 巡天^[61]数据, 将星系淬灭分为由内而外和由外向内两种, 冲压压力剥离或气体消耗这样的外部机制, 通常导致由外向内的淬灭, 而 AGN 反馈将导致相反的趋势 (由内而外)。他们发现由内而外的淬灭占多数, 随着恒星质量 (在固定的暗晕质量下) 和暗晕质量 (在固定的恒星质量下) 增加, 由内而外淬灭的星系的比例也在增加。一些研究采取办法控制暗晕质量, 来了解纤维环境是否对星系形成有独立于暗晕这一局域环境的影响。Perez 等人^[62]使用 TNG300-1 数据, 将星系按照不同的暗晕质量分组, 如图 6 所示, 在低质量 ($<10^{12} M_{\odot} h^{-1}$) 的暗晕中停止恒星形成的红星系更有可能位于纤维附近区域, 在大质量暗晕 ($>10^{12.5} M_{\odot} h^{-1}$) 中则并不明显。

O’Kane 等人^[65]使用 SDSS DR8 数据研究了 SFR 在恒星形成主序 (star formation main sequence, MS) 的离差, 来衡量恒星形成活动被抑制的程度。在匹配了不同环境中星系的恒星质量后, 他们发现纤维中星系的恒星形成活动受抑制程度更高, 体现了环境的影响; 不过在同时匹配恒星质量和局部星系密度后, 这种影响几乎消失了, 这说明纤维环境的影响和局

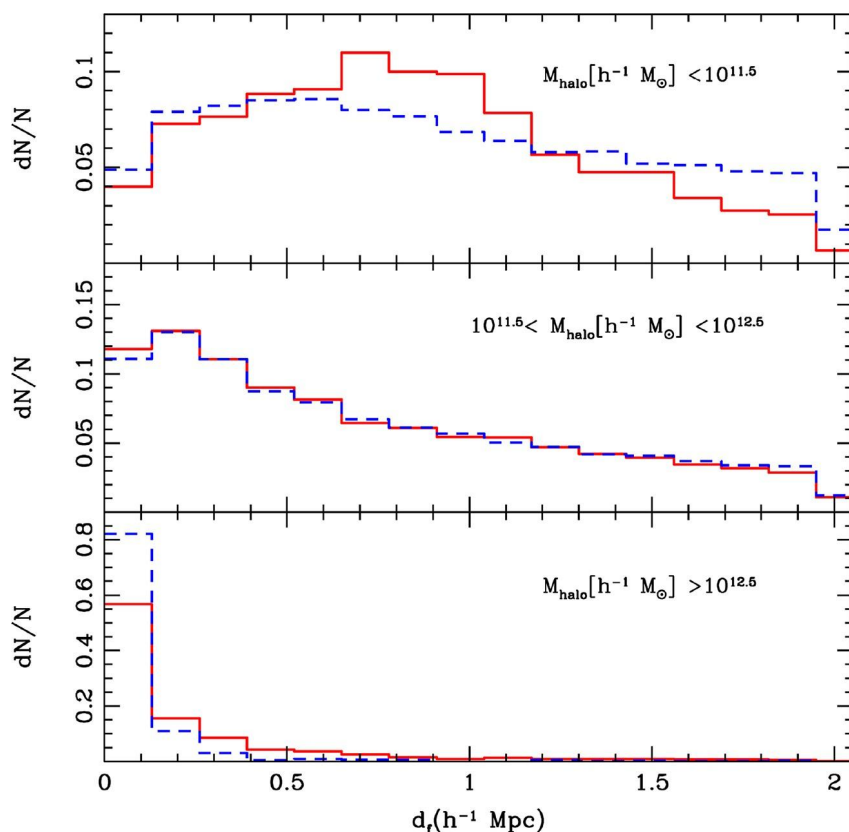


图 6 不同暗晕质量范围内星系相对于宇宙纤维的距离分布。从上到下面板按照暗晕质量从低到高划分，横轴是星系到纤维的距离，纵轴表示归一化后的星系数量比例。红色实线和蓝色虚线分别表示红色星系和蓝色星系的分布。^[62]

部密度场的影响是简并的。如图 4(b) 中，Malavasi 等人也分析了星系性质对于局部密度场的依赖，密度增加时出现星系质量增加，星系的 SFR 和 sSFR 下降，此时划分不同的星系到纤维距离对研究结果影响轻微。为了分离大尺度结构的影响和潜在局部密度场的影响，他们提出“洗牌”的方法，即将星系按照密度场的大小分成很多小区间，在这些小区间内，随机打散相关星系的性质（比如 SFR、星系质量等）1000 次，每次保留星系到纤维的距离（ d_{cp} ， d_{skel} ， d_{fil} ）不变，再将小区间按顺序组合起来；如此一来，每个小区间内相关星系的性质和星系到纤维距离的关系被随机打乱，同时就组合起来的样本来说，相关星系的性质和局部密度场之间的关系并没有改变，也就实现了对密度场变量的控制。他们计算了“洗牌”后结果的平均值（ H_R ）和原结果（ H_0 ）的差异，用原结果和洗牌后结果误差值的均方根归一化，如图 4(c) 所示，结果显示差异几乎在到纤维的不同距离上都大部分是 0，因此不能排除星系到纤维距离对淬灭起影响是局部密度场的作用。^①

^①我们需要注意的是，尽管上述观测和模拟中得到了相似的结论，两者对局部密度的估算方式是不同的；Malavasi 等人研究

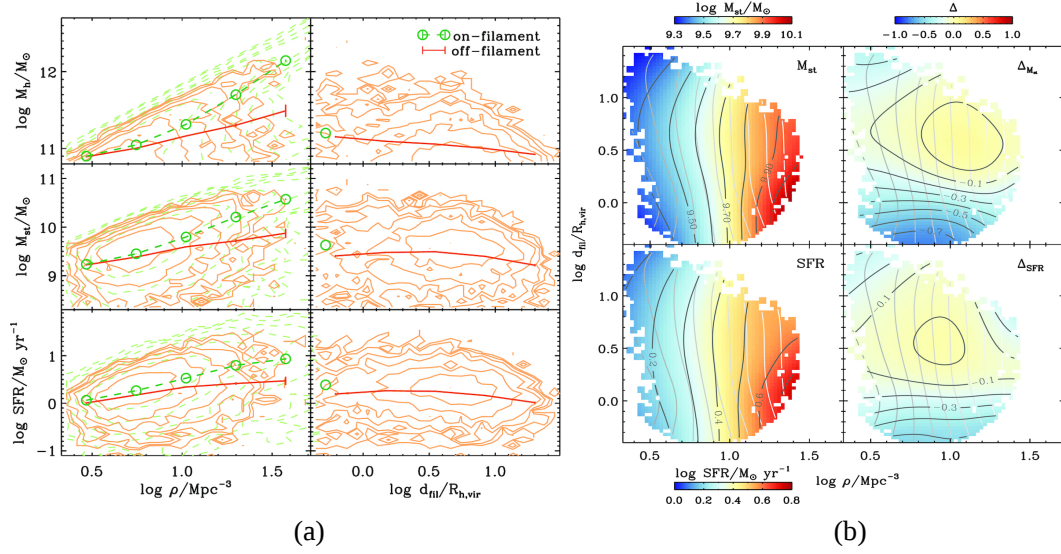


图 7 (a) “纤维外” (带误差棒的橙色实线) 和 “纤维上” (绿色圆圈虚线) 星系的平均暗晕质量 (上)、恒星质量 (中) 和 SFR (下) 分别作为局部密度 (左) 和到纤维距离 (右) 的函数, 等高线显示总体分布。 (b) $z=1.97$ 处, “纤维外” 星系的恒星质量 (左上)、SFR (左下) 及残差 (右) 在局部密度-距离平面上的分布, 灰度轮廓表示不同强度的纤维。^[63]

Song 等人^[63] 使用 HORIZON-AGN 数据, 同时考虑了局部密度场和暗晕质量的影响。他们按照 $d_{fil} = 0.4R_{h,vir} = d_{cut}$ 为标准区分了在纤维上和纤维附近的星系。如图 7(a), 在固定局部密度场的情况下, 他们发现在纤维上比纤维附近的星系的暗晕质量、星系质量和 SFR 普遍较高 (左), 在非常接近纤维时出现了一个跃变式的增加 (右)。为了去除暗晕的影响, 他们拟合 SFR 随暗晕质量变化的关系, 计算 SFR 和这一主要关系之间的残差 (Δ SFR)。从图 7 (b) 可以看到, SFR 残差值随着接近纤维先增加, 从大约 $10^{0.5}R_{h,vir}$ 处下降, 表明星系在纤维附近经历了淬灭的过程。

为了比较不同变量对星系淬灭的重要性, 找出对恒星形成活动最具预测意义的参数, 研究者可以采用随机森林方法。随机森林是一种用于对复杂数据进行分类的机器学习方法, 首先, 对数据划分训练集和测试集, 在训练集中有放回地随机抽样来构建多个子集。每个子集构建一棵决策树, 用于学习哪些特征参数最适合进行分类 (在星系淬灭的研究中为 “恒星形成” 与 “已淬灭” 两类), 每个节点处随机选择一类的概率可以用于计算基尼不纯度^[66], 越高的基尼不纯度表明特征参数分类能力越差。如果某一特征参数能有效地减少基尼不纯度, 说明该参数对星系淬灭较为重要, 对决策树中基尼不纯度的改变值作加权平均可以计算出变量的重要性。Bluck 等人^[40] 分析 MaNGA 观测数据发现, 核球质量是测光参数 (包括核球质

中用到的局部密度是从 DTFE 密度场直接计算得到 ($1 + \delta\rho = \rho_{DTFE} / \rho_{DTFE}$), 而 Okane 等人使用的是投影面上的局部星系密度指数 (projected local galaxy density index) $\Sigma_3 = M_3 / \pi R_3^2$, 其中 R_3 被定义为到第三最近的星系邻居的距离, M_3 是在以 R_3 为半径的圆中包含的星系质量。

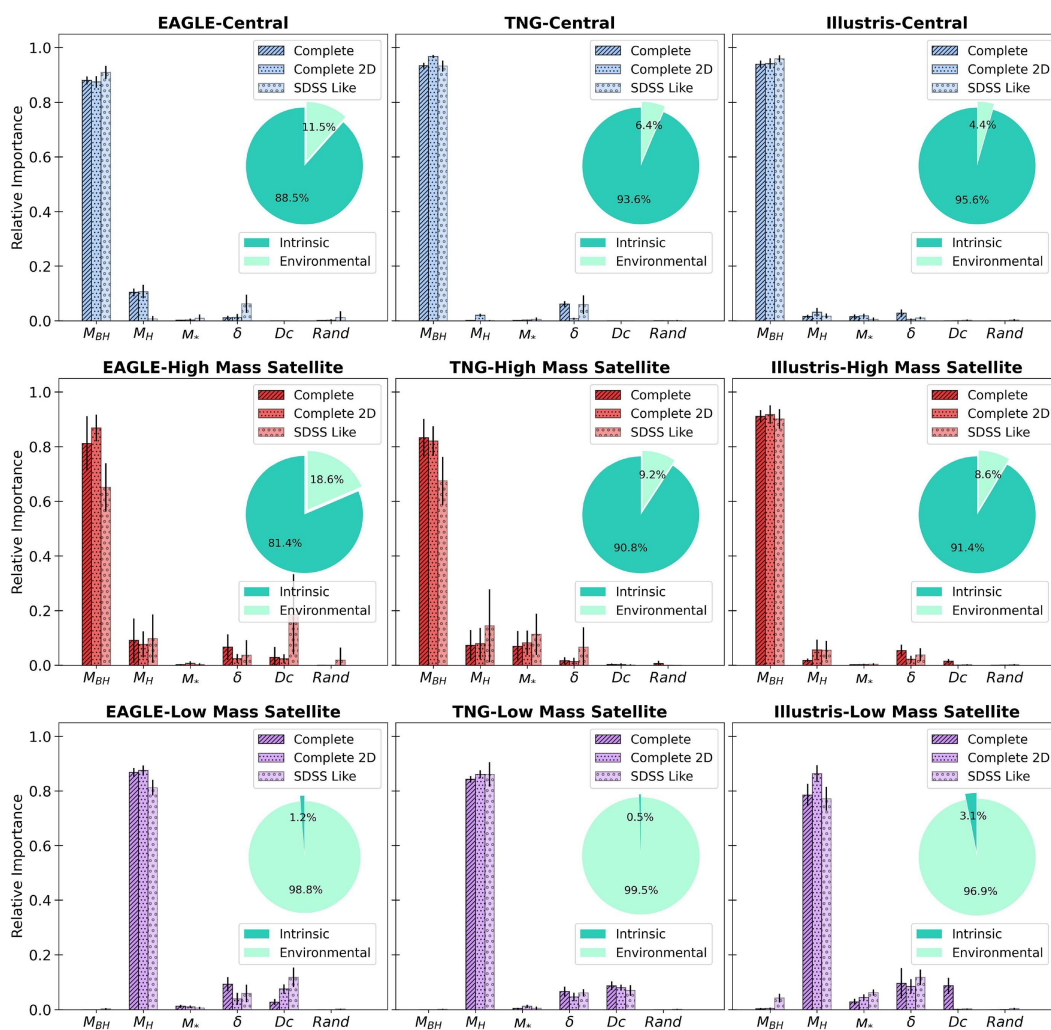


图 8 宇宙学模拟中星系淬灭的随机森林分析。用于训练随机森林的参数沿 x 轴列出, 从左到右依次为: 黑洞质量 (内部变量), 暗晕质量 (环境变量), 恒星质量 (内部变量), 最近邻星系密度 (环境变量), 到中央星系的距离 (环境变量) 和一个 0-1 范围内的随机数。对淬灭的重要性由 y 轴条高度表示。^[64]

量、盘质量、总恒星质量和 B/T 形态) 中最能预测星系淬灭的参数, 而当光谱数据可用时, 中心恒星速度色散更重要。Goubert 等人^[64] 比较了 TNG 模拟和 SDSS 观测的数据发现, 对于中心星系和大质量卫星星系, 中心黑洞质量是预测淬灭的最佳参数, 而对于卫星星系, 暗晕质量是最佳参数。不过随机森林算法也受到一些技术限制, 受到输入数据的质量和完整性的显著影响; 随机森林可能过拟合训练数据, 特别是在树的数量非常大, 或模型调整不当的情况下, 因此我们需要借鉴多种方法的结果来研究相关问题。

3.3 宇宙网促进星系形成活动的现象与机制

Galárraga-Espinosa 等人^[67]研究了 TNG50-1 模拟里质量在 $10^8 M_\odot$ 以上中心星系的“纤维连接度”, 也就是一个星系连接了几根纤维。如图 9(a) 所示, 为了同时控制恒星质量和局部密度场两个变量他们首先将星系分为 A-D 四组, 在图 9(b) 中分别绘制了 sSFR 随着纤维连接度的变化。从图中可以看出, A 组和 B 组 (恒星质量较低的组别) sSFR 随着纤维连接度的增加显著上升, 也就是更多的纤维促进了恒星形成活动增强; 他们认为这一效应可能可以用 Kereš 等人^[68]的工作解释, 这些低质量星系的宿主暗晕可能没有足够的质量维持激波带来的影响; 于是冷气体沿着纤维流入暗晕中心的星系。同时, C 组和 D 组星系在图中几乎不随纤维连接度变化, 这说明在大质量星系中, 恒星形成更可能由内部过程调节而非与通过纤维流入的冷气体有关。我们注意到这可能和 Gabor 等人^[69]的工作相关, Gabor 等人对模拟数据使用热气体淬灭模型时发现, 尽管红色星系往往生活在更密集的环境中, 但也存在很多孤立于大尺度环境的红色中心星系, 它们生活在热暗晕中。

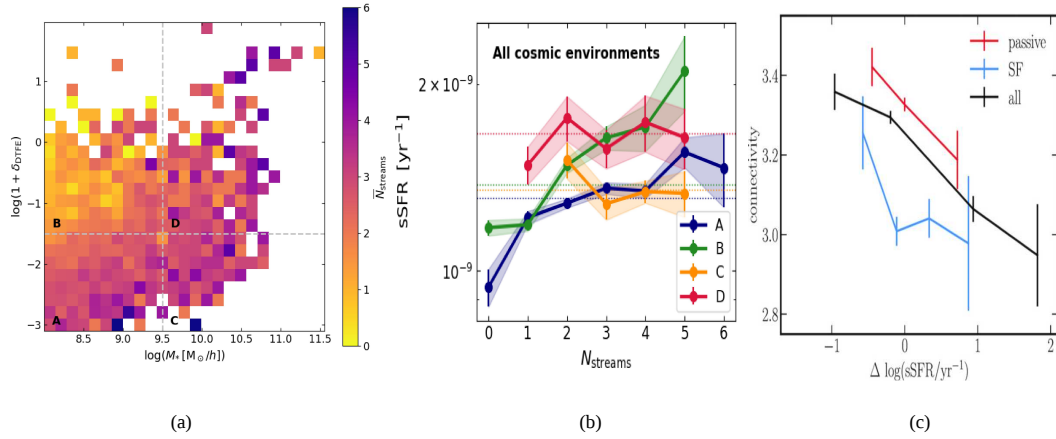


图 9 (a) 平均连通性在星系质量与局部密度平面的分布。像素颜色表示给定质量和 DTFE 密度区间内纤维流 (stream) 的平均数量。^[67] (b) 星系连通性对恒星形成的影响。曲线显示了 9(a) 中从 A 到 D 四组星系的平均 sSFR 作为连通性的函数。水平线表示给定组中所有星系的平均 sSFR。y 轴是对数尺度。^[67] (c) SDSS 中按恒星形成活动分类的不同星系群的平均连通性作为恒星质量的函数, 黑色实线表示所有星系在固定质量下的平均连通性。^[70]

这篇研究的结果和 Kraljic 等人^[70]研究的恒星形成与不活跃星系的纤维连接度对比发现有出入, Kraljic 等人发现不活跃星系的连接度更高 (见图 9 (c))。Galárraga-Espinosa 等人认为, Kraljic 等的研究只能说明不同星系已在的居住环境差异, 不能很好地刻画星系本身的性质如何随着居住环境变化而变化; 同时, 在模拟分辨率提升的助力下, 他们在研究中注重找出细小的纤维结构, 这是和之前研究的一大区别^①。

^①Kraljic 等人 and Galárraga-Espinosa 等人研究都使用了 DisperSE 算法查找纤维结构, Kraljic 等输入星系坐标, Galárraga-Espinosa 等输入暗物质粒子坐标, 后者可能更有利于查找细小纤维结构。

研究暗示的物理图景是否合理仍值得探讨。Bulichi 等人^[71] 用 Simba 模拟^[72] 数据发现, 虽然靠近纤维中心星系恒星形成活动的变化可以忽略不计, 但可用于恒星形成的 H_2 气体增加。Nelson 等人^[73] 指出, 暗晕内的气体运输 (即气体从 CGM 进入星系) 受到流体动力学模拟数值方案的强烈影响。不过, 已有一些观测为纤维结构储存冷气体提供潜在的证据。Kleiner 等人^[74] 对近邻宇宙中靠近纤维主干的星系中性氢含量 (中性氢质量占星系质量的比例) 进行了分析, 质量较大的星系 ($>10^{11} M_\odot$) 系统地表现出较高的中性氢含量。Odekon 等人^[9] 用 ALFAALFA 巡天^[75] 中的中性氢数据分析了质量范围在 $10^{8.5} M_\odot$ - $10^{10.5} M_\odot$ 的恒星形成星系的中性氢含量, 发现位于纤维和簇须环境中星系的中性氢含量要高于空洞中的星系。Sinigaglia 等人^[76] 使用了在 COSMOS 巡天中红移 0.37 处质量在 $10^{9.6} M_\odot$ 以上的恒星形成星系, 发现位于纤维环境星系的中性氢含量要显著地高于场星系和星系团中的星系。宇宙网结构可能会为中心星系输送冷气体, 延缓中心星系在暗晕质量和黑洞反馈等影响下的淬灭过程^[77]。

4 总结与展望

本篇文章回顾了关于宇宙网以及星系在纤维环境中淬灭的研究。包括 DisPerSE, Sconce, MCPM 和基于泊松分布的网络在内等多种算法, 被用来识别和量化宇宙网结构。尽管在红移 0-1 的观测和红移 0-2 的数值模拟数据中, 研究者们找到了纤维附近星系的颜色变红、sSFR 下降、淬灭比例增加等星系形成活动减弱的证据, 在划分中心与卫星星系、控制包括暗晕质量、局部 (星系) 密度场等变量后, 一些研究表明纤维对恒星形成活动的影响是较微弱或不明确的。几个模拟研究展现了更丰富的视角, 即纤维可能为附近的星系供应气体并引起 SFR 增加。不过由于模拟高度依赖数值方案, 直接对比模拟和观测在大尺度结构研究中关于气体及恒星形成活动的结果仍较为困难。

未来的研究可以通过新的模拟技术与高红移观测, 为以下几个问题提供更多答案:

(1) 纤维结构形成机制: 在韦布空间望远镜 (JWST), 大视场观测如 Euclid 任务和未来的广域红外巡天望远镜 (The Nancy Grace Roman Space Telescope) 等高红移观测项目的促进下, 研究星系在不同纤维环境中的分布和演化, 进一步探索纤维结构的起源和形成机制, 研究高红移时刻的宇宙环境;

(2) 纤维环境和星系演化的长期关联: 通过大型模拟如 Millennium TNG 等, 研究星系在宇宙纤维中的演化过程, 探寻不同纤维环境对星系演化的长期影响;

(3) 环境和星系内部恒星形成机制的关联: 借助高分辨率模拟如 FIRE (Feedback In Realistic Environments), 探索纤维环境对星系 AGN 反馈、星际周介质中冷气体流动等内部过程的影响, 研究宇宙纤维如何通过冷气体输送影响中心星系的恒星形成效率。

参考文献:

- [1] Kauffmann G, Fairall A P. MNRAS, 1991, 248: 313–324
- [2] Platen E, van de Weygaert R, Jones B J T. MNRAS, 2007, 380(2): 551–570
- [3] Geller M J, Huchra J P. Science, 1989, 246(4932): 897–903
- [4] Gott I, J. RICHARD, Jurić M, Schlegel D, et al. ApJ, 2005, 624(2): 463–484
- [5] Horvath I, Hakkila J, Bagoly Z. arXiv e-prints, 2013: arXiv:1311.1104
- [6] York D G, Adelman J, Anderson J, JOHN E., et al. AJ, 2000, 120(3): 1579–1587
- [7] Wang F, Yang J, Hennawi J F, et al. ApJ, 2023, 951(1): L4
- [8] Albareti F D, Allende Prieto C, Almeida A, et al. ApJS, 2017, 233(2): 25
- [9] Crone Odekon M, Hallenbeck G, Haynes M P, et al. ApJ, 2018, 852(2): 142
- [10] Scoville N. In: Baker A J, Glenn J, Harris A I, et al, eds. From Z-Machines to ALMA: (Sub)Millimeter Spectroscopy of Galaxies. 2007. . [S.l.]: [s.n.] , Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 375
- [11] Laigle C, Pichon C, Arnouts S, et al. MNRAS, 2018, 474(4): 5437–5458
- [12] Malavasi N, Arnouts S, Vibert D, et al. MNRAS, 2017, 465(4): 3817–3822
- [13] Kuutma T, Tamm A, Tempel E. A&A, 2017, 600: L6
- [14] Salerno J M, Martínez H J, Muriel H. MNRAS, 2019, 484(1): 2–7
- [15] Libeskind N I, van de Weygaert R, Cautun M, et al. MNRAS, 2018, 473(1): 1195–1217
- [16] Sousbie T, Pichon C, Kawahara H. MNRAS, 2011, 414(1): 384–403
- [17] Schaap W E, van de Weygaert R. A&A, 2000, 363: L29–L32
- [18] EDELSBRUNNER, LETSCHER, ZOMORODIAN. Discrete & computational geometry, 2002, 28: 511–533
- [19] Zhang Y, de Souza R S, Chen Y C. MNRAS, 2022, 517(1): 1197–1217
- [20] Zhang Y, de Souza R S, Chen Y C. SCONCE-SCMS: Spherical and conic cosmic web finders with extended SCMS algorithms. [S.l.]: [s.n.] , 2023
- [21] HALL P, WATSON G, CABRERA J. Biometrika, 1987, 74(4): 751–762
- [22] GARCÍA-PORTUGUÉS E. 2013
- [23] Jackson J C. MNRAS, 1972, 156: 1P
- [24] Burchett J N, Elek O, Tejos N, et al. ApJ, 2020, 891(2): L35
- [25] JONES J. Artificial life, 2010, 16(2): 127–153
- [26] ADAMATZKY A. Physarum machines: computers from slime mould. Vol. 74. [S.l.]: World Scientific, 2010
- [27] Simha S, Burchett J N, Prochaska J X, et al. ApJ, 2020, 901(2): 134
- [28] Tempel E, Stoica R S, Martínez V J, et al. MNRAS, 2014, 438(4): 3465–3482
- [29] Hong S, Dey A. MNRAS, 2015, 450(2): 1999–2015
- [30] ERDÖS P, RÉNYI A. Publ. Math. Inst. Flung. Acad, 1959, 3: 159–169
- [31] Martínez H J, Muriel H, Coenda V. MNRAS, 2016, 455(1): 127–135
- [32] Bell E, Balogh M, Gray M, et al. Environmental drivers of galaxy evolution: IR-derived star formation rates in the Abell 901/902 supercluster
- [33] Dressler A. ApJ, 1980, 236: 351–365
- [34] Jaffé Y L, Smith R, Candlish G N, et al. MNRAS, 2015, 448(2): 1715–1728
- [35] Gunn J E, Gott I, J. RICHARD. ApJ, 1972, 176: 1
- [36] Lotz M, Remus R S, Dolag K, et al. MNRAS, 2019, 488(4): 5370–5389
- [37] Annunziatella M, Mercurio A, Biviano A, et al. A&A, 2016, 585: A160
- [38] Malavasi N, Langer M, Aghanim N, et al. A&A, 2022, 658: A113
- [39] Kraljic K, Arnouts S, Pichon C, et al. MNRAS, 2018, 474(1): 547–571
- [40] Bluck A F L, Maiolino R, Brownson S, et al. A&A, 2022, 659: A160
- [41] Wetzel A R, Tinker J L, Conroy C. MNRAS, 2012, 424(1): 232–243
- [42] Ahn C P, Alexandroff R, Allende Prieto C, et al. ApJS, 2014, 211(2): 17
- [43] Nelson D, Pillepich A, Springel V, et al. MNRAS, 2018, 475(1): 624–647
- [44] Pillepich A, Nelson D, Hernquist L, et al. MNRAS, 2018, 475(1): 648–675
- [45] Springel V, Pakmor R, Pillepich A, et al. MNRAS, 2018, 475(1): 676–698
- [46] Hasan F, Burchett J N, Abeyta A, et al. ApJ, 2023, 950(2): 114

- [47] Hasan F, Burchett J N, Hellinger D, et al. *ApJ*, 2024, 970(2): 177
- [48] Franzetti P, Garilli B, Guzzo L, et al. *arXiv e-prints*, 2014: arXiv:1410.0465
- [49] Brinchmann J, Charlot S, White S D M, et al. *MNRAS*, 2004, 351(4): 1151–1179
- [50] Sijacki D, Springel V, Di Matteo T, et al. *MNRAS*, 2007, 380(3): 877–900
- [51] Feldmann R, Quataert E, Hopkins P F, et al. *MNRAS*, 2017, 470(1): 1050–1072
- [52] Di Matteo T, Springel V, Hernquist L. *Nature*, 2005, 433(7026): 604–607
- [53] Johansson P H, Burkert A, Naab T. *ApJ*, 2009, 707(2): L184–L189
- [54] Balogh M L, Navarro J F, Morris S L. *ApJ*, 2000, 540(1): 113–121
- [55] De Propriis R, Colless M, Peacock J A, et al. *MNRAS*, 2004, 351(1): 125–132
- [56] Blanton M R, Berlind A A. *ApJ*, 2007, 664(2): 791–803
- [57] Weinmann S M, van den Bosch F C, Yang X, et al. *MNRAS*, 2006, 366(1): 2–28
- [58] Kimm T, Somerville R S, Yi S K, et al. *MNRAS*, 2009, 394(3): 1131–1147
- [59] Birnboim Y, Dekel A. *MNRAS*, 2003, 345(1): 349–364
- [60] Lin L, Hsieh B C, Pan H A, et al. *ApJ*, 2019, 872(1): 50
- [61] Bundy K, Bershadsky M A, Law D R, et al. *ApJ*, 2015, 798(1): 7
- [62] Perez N R, Pereyra L A, Coldwell G, et al. *MNRAS*, 2024, 528(2): 3186–3197
- [63] Song H, Laigle C, Hwang H S, et al. *MNRAS*, 2021, 501(3): 4635–4656
- [64] Goubert P H, Bluck A F L, Piotrowska J M, et al. *MNRAS*, 2024, 528(3): 4891–4921
- [65] O’Kane C J, Kuchner U, Gray M E, et al. *MNRAS*, 2024, 534(3): 1682–1699
- [66] Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, et al. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, 12: 2825–2830
- [67] Galárraga-Espinosa D, Garaldi E, Kauffmann G. *A&A*, 2023, 671: A160
- [68] KEREŠ D, KATZ N, WEINBERG D H, et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, 363(1): 2–28
- [69] Gabor J M, Davé R. *MNRAS*, 2015, 447(1): 374–391
- [70] Kraljic K, Pichon C, Codis S, et al. *MNRAS*, 2020, 491(3): 4294–4309
- [71] Bulichi T E, Davé R, Kraljic K. *MNRAS*, 2024, 529(3): 2595–2610
- [72] Davé R, Anglés-Alcázar D, Narayanan D, et al. *MNRAS*, 2019, 486(2): 2827–2849
- [73] Nelson D, Vogelsberger M, Genel S, et al. *MNRAS*, 2013, 429(4): 3353–3370
- [74] Kleiner D, Pimblett K A, Jones D H, et al. *MNRAS*, 2017, 466(4): 4692–4710
- [75] Giovanelli R, Haynes M P, Kent B R, et al. *AJ*, 2005, 130(6): 2598–2612
- [76] Sinigaglia F, Rodighiero G, Elson E, et al. *ApJ*, 2022, 935(1): L13
- [77] Kotecha S, Welker C, Zhou Z, et al. *MNRAS*, 2022, 512(1): 926–944

Recent Advances in the Study of Effects of cosmic filaments on star formation activities

YANG Si-rui^{1,2}

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;* 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Large-scale structures of galaxies extending scales up to hundreds of parsecs are also known as the cosmic web. These structures are divided into voids, filaments, walls, and nodes according to the geometric features and galaxy number density. Compared with

the void environment, galaxies residing in the neighborhood of filaments usually have higher stellar mass and higher fraction of early-type red galaxies. Observations and simulations provide evidence that star formation activity declines as the distances from a galaxy to the filaments decrease. However, several factors might induce uncertainties: different algorithms result in differences among the reconstructed cosmic web; there are different methods to measure and quantify the geometric properties of filaments; in the vicinity of filaments, the stellar mass, the local galaxy density as well as halo mass are higher, which also induce variations in the star formation activity. Therefore, whether the large-scale filaments have an independent influence on the star formation activity of galaxies, which type of galaxies are affected to what extent, and the underlying physical mechanism need to be studied in detail. Algorithms for finding the cosmic web structures are compared, and when factors such as stellar mass, local galaxy density and halo mass are under controlled, the effects of filaments on star formation are reviewed, with the goal of understanding how star formation is affected by the filament environment.

Key words: cosmic filament; galaxy quenching; star formation