

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.01.03

JWST 观测星系并合的研究进展

童祐璐^{1,2}, 戴 昱¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 星系的并合事件在宇宙中普遍存在。JWST 的发射升空在光学红外波段打开了新的观测窗口, 为深入理解并合在星系演化过程中的作用提供了新的观测机会。JWST 的高分辨率和高灵敏度有助于认证和研究星系并合的物理性质和规律, 为更高红移和高分辨率的并合星系的观测提供了气体动力学、恒星形成和超大质量黑洞活动的信息, 并进一步证实了并合是星系演化中普遍存在的重要阶段。重点介绍了 JWST 对多个并合星系样本的统计及个例研究, 结合了观测和理论模拟的进展, 总结了在各红移处, 特别是中高红移处的并合星系相关研究中取得的新进展。

关 键 词: 星系; 并合星系; 空间望远镜; 活动星系核; 恒星形成

中图分类号: P157 **文献标识码:** A

1 星系并合的研究意义

在现代宇宙学的框架下, 星系的形成是由暗物质的互相聚集和并合过程所驱动。暗物质晕以及星系之间的并合使它们的质量不断增加, 这促使了早期宇宙中团块状不规则的结构逐渐演化为现代天文学家观测到的星系形态^[1-3]。值得注意的是, 即使在当前的宇宙中, 星系间的碰撞并合过程仍在继续进行。例如, 据研究显示, 银河系与 M31 将在数十亿年后发生碰撞。此外, 部分研究认为, 并合事件的发生与星系内的星暴事件之间存在一定的相关性^[4]。这些持续的并合事件将进一步塑造和改变星系的结构和演化轨迹, 为宇宙演化研究提供了宝贵证据。

理论结果表明, 并合星系与恒星形成以及活动星系核 (active galactic nuclei, AGN) 关系密切。随着对活动星系核的发现、观测以及研究的深入, 人们认识到星系中心普遍存在着超大质量黑洞。这些黑洞通过吸积过程增长; 当物质落入黑洞的吸积盘内时, 会在 X 射线波段到红外波段范围内辐射出大量的能量, 使星系作为活动星系核在多个波段发光^[5, 6]。一些研究也表明, 这些超大质量黑洞的增长与星系可能存在共同演化的密切联系^[7-10]。关于星

收稿日期: 2024-03-28; 修回日期: 2024-04-24

资助项目: 国家重点研发计划 (2022YFA1605300); 国家自然科学基金 (12273051, 11933003)

通讯作者: 戴昱, ydai@nao.cas.cn

系中心超大质量黑洞的吸积增长, 人们提出了多种解释, 其中就包括两个或多个质量相近的星系的并合^[11-13]。数值模拟计算表明, 两个星系的相互作用与并合过程会带来强大的引力扭转, 导致星系中的气体失去大部分角动量, 并发生向星系中心区域的内流, 从而促进了中心黑洞的吸积, 由此可能触发活动星系核的形成^[14]。除了影响活动星系核的形成外, 星系并合还在一些研究中被认为会增强星系中的恒星形成活动。星系受到相互作用引发的潮汐力影响, 会导致大量气体内流, 从而增加恒星形成的速率^[15, 16]。

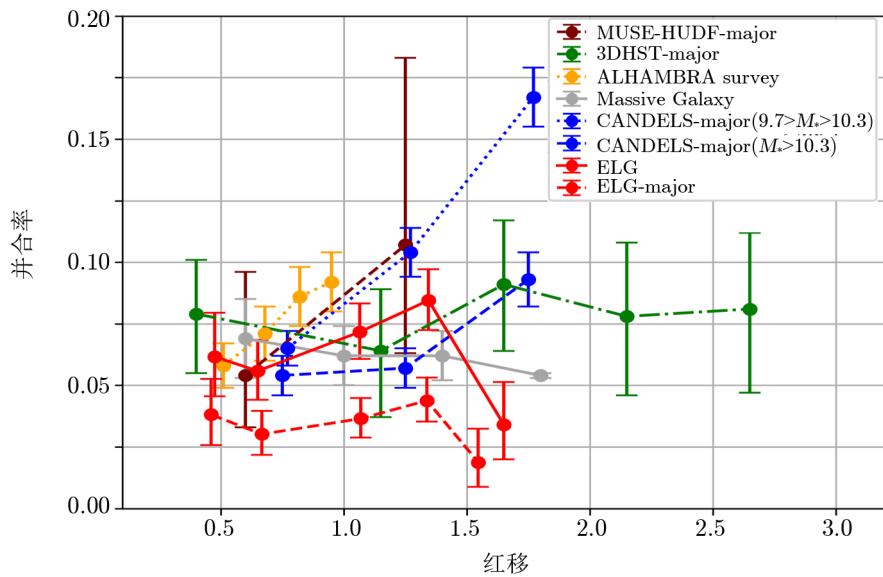
然而, 由观测结果可知, 星系并合与 AGN 触发之间的联系尚未完全明确, 有相当一部分研究工作得出了矛盾的结论。并合带来的恒星形成增强的程度也在许多研究中存在差异。这表明对星系并合中 AGN 与恒星形成机制的理解仍面临挑战, 需要进一步观测和理论研究来确定其内在物理过程。

在近邻宇宙中, 许多 AGN 宿主星系展现出与星系并合相关的形态特征, 如扰动、潮汐尾等^[17-22], 这些观测现象为揭示星系并合可能与 AGN 活动密切相关提供了重要线索。一些研究通过对比孤立星系与并合星系对样本, 发现后者中 AGN 的比例明显较高^[23-27]。并非所有的研究都得出了相同结论, 有些研究认为 AGN 与星系并合之间的联系并不明显^[28-34]。由于分辨率的限制, 至今仍缺少足够的高红移样本用于形态分析。

从恒星形成的角度来看, 星系的并合和相互作用也会影响恒星的形成。数值模拟表明, 星系并合可能导致恒星形成率的增加^[35, 36]。观测工作也发现, 并合星系中的恒星形成率通常比孤立星系高^[37-40]。然而, 并非所有的观测都得出相同的结论, 有些研究发现恒星形成率的增加相当有限^[41, 42]; 有些工作发现, 在不同红移范围内, 星系并合导致的恒星形成活动增强程度存在差异^[43, 44]。

在不同红移处, 通过观测发现了并合现象普遍存在。图 1 总结了部分并合星系比例与红移的关系。一方面, 相较于较高的红移, 较低红移范围内不同研究得到的并合率较为接近。另一方面, 红移低于 1.25 时, 多数研究中的并合率有轻微的增加, Lopez-Sanjuan 等人^[45]发现的趋势最为显著; 但在红移高于 1.5 时, Dai 等人^[46]则发现并合率呈现出可能的下降趋势(见图 1)。然而, 由于样本的数量限制, 高红移的不确定性很可能是来自于小样本产生的偏差。尽管根据理论预言, 早期宇宙中的星系并合事件对于星系演化十分关键^[1], 但之前的研究中, 由于红外数据的限制, 红移大于 1 的并合星系统计样本仍相当欠缺。因此, 并合星系的相关研究目前亟需更深的红外观测来获取更高红移的大样本。

综上所述, 虽然在理论上认为星系并合和相互作用对 AGN 活动和恒星形成都有重要影响, 但观测结果的多样性表明我们对于这一领域的认识仍然不全。更高红移、更小质量和更高分辨率的观测和模拟研究已经成为该领域的研究热点, 必将为我们揭示星系演化中的关键过程提供更清晰的理解。韦布空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 的出现, 为此领域提供了新的研究契机。



注: MUSE-HUDF 样本 (主并合星系) 来自 MUSE 在 HDF-S 与 HUDF 的观测 ($0.2 < z < 6$)^[47]; 3DHST 样本 (主并合星系) 来自 3DHST 星表, 由 HST 在 CANDELS 巡天的 5 个天区获得 ($0.1 < z \leq 3$)^[48]; ALHAMBRA 样本来自 ALHAMBRA 巡天 DR1, 由 $M_B \leq -20$ 选出 ($0.4 < z < 1$)^[45]; 大质量星系样本来自 UKIDSS UDS DR8, $\lg(M/M_\odot) > 10.8$ ($0.4 < z < 2$)^[49]; CANDELS 样本 (主并合星系) 来自 CANDELS 巡天 ($0.5 < z < 6$)^[50], 实线与虚线分别表示 $9.7 < \lg(M/M_\odot) < 10.3$ 及 $\lg(M/M_\odot) > 10.3$ 的情况; ELG 样本来自 WISP 巡天中的 $H\alpha$ 或 $[O\ III]$ 发射线星系^[46], 实线和虚线分别表示所有并合情况与主并合情况。

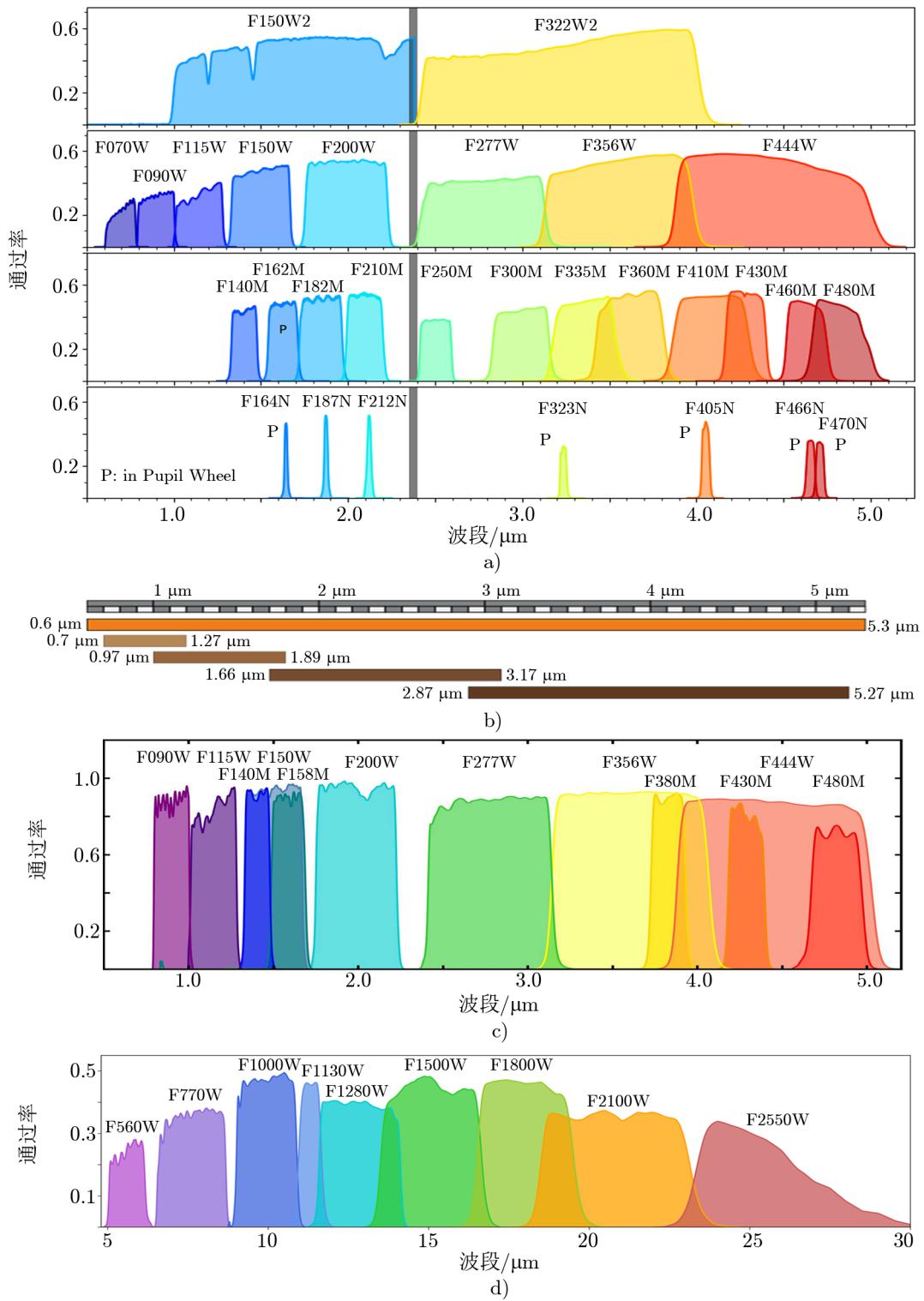
图 1 在过往有关并合星系的部分研究中并合率与星系红移的关系

2 JWST 概览

2.1 JWST 的主要设备

JWST 是斯皮策空间望远镜 (Spitzer Space Telescope) 和哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 的继任者, 于 2021 年 12 月 25 日发射。JWST 的任务是研究早期宇宙、星系演化、恒星演化、系外行星等领域, 旨在为人类理解宇宙、理解自身起源做出卓越贡献。其搭载的主要设备包括近红外相机 (NIRCam)、近红外光谱仪 (NIRSpec)、中红外设备 (MIRI) 和近红外成像和无缝光谱仪 (NIRISS) 等 (见图 2)。

JWST 的各设备都使其在星系研究领域具有强大优势。作为主要的近红外成像仪, NIRCam 能够提供高分辨率的成像和光谱测量, 为各种巡天和研究提供重要数据支持。NIRCam^[51]的波长范围设计覆盖 $0.6 \sim 5 \mu\text{m}$, 即可见红光到中红外的多波段范围, 因此它能够捕捉到各种天体的光谱信息, 为研究提供了丰富的数据来源。在较短波段的范围内, NIRCam 的空间分辨率达到 $0.03''$, 较长波段则为 $0.06''$ 。在拍摄曝光 1×10^3 s 的图像时, 灵敏度可以达到 $M_{AB} = 28.9 \text{ mag}$ (信噪比约为 10)。NIRSpec 专注于光谱观测, 光谱分辨率可达 2700, 能够提供包括光谱红移在内的精确光谱信息。NIRSpec^[52]配备了多目



注: a) NIRCam 观测波段; b) NIRSpec 观测波段; c) NIRISS 观测波段; d) MIRI 观测波段。

图 2 NIRCam、NIRSpec、NIRISS、MIRI 观测波段

标光谱仪 (MOS) 和积分场单元 (IFU)。前者能够在同一时间观测多个星系，从而提高观测效率，为大样本星系研究奠定数据基础；后者则可以提供星系内部或附近更准确的二维信息，从而为空间分辨性质的研究提供可能，特别是并合星系演化过程中星系性质的改变。NIRISS^[53]包含相机和光谱仪，同时提供近红外成像和光谱测量，能够高效地将图像与光谱相结合。宽视场无缝光谱仪 (WFSS) 适用于获取某天区多个星系的整体光谱，单天体无缝光谱仪 (SOSS) 分别适用于获取如恒星等单个天体的光谱，MIRI^[54]主要用于中红外波段的成像和光谱测量。作为 JWST 唯一的中红外仪器，MIRI 覆盖了 $4.9 \sim 27.9 \mu\text{m}$ 的中红外波段。结合成像和光谱，MIRI 在研究红移大于 7 的极端遥远星系中起着关键作用，既能看到宇宙诞生之初的高红移星系，也能利用中分辨率光谱观测能力研究这些遥远天体的具体性质。JWST 各设备观测波段见图 2。

2.2 JWST 在星系领域的优势

JWST 已经开展了多个巡天观测项目，如 CEERS (Cosmic Evolution Early Release Science survey)^[55]、JADES (Advanced Deep Extragalactic Survey)^[56]、COSMOS-WEB (JWST Cosmic Origins Survey)^[57]、PASSAGE (Parallel Application of Slitless Spectroscopy to Analyze Galaxy Evolution)^[58]、PEARLS (Prime Extragalactic Areas for Reionization and Lensing Science)^[59]、PRIMER (Public Release IMaging for Extragalactic Research)^[60] 等。CEERS 是 JWST 进行的首个深场星系巡天项目，利用 NIRCam 设备，能够探测到比 HST 更高红移的结构特征。另一个重要的巡天项目是 JADES，利用 NIRCam 和 NIRSpec 设备对 GOODS-S 和 GOODS-N 深场进行了红外成像和光谱观测，致力于从高红移到宇宙正午的星系演化研究。这些观测项目使天文学家能够观测到从最暗弱、最遥远的早期星系（目前能观测研究的最遥远星系红移超越了 $13^{[61]}$ ，并且这一极限仍在不断推进），到巨型旋涡星系、椭圆星系等，分辨率高于 $0.1''$ ，相当于红移为 3 处约 0.8 kpc 的尺度。这些深度和分辨率，为研究星系的形成与演化提供了海量信息。这些观测不仅有助于解开宇宙早期的谜团，还能够揭示星系的形成和演化过程，以及宇宙中各种天体的相互作用。

一般而言，对于并合星系的证认，通常采用两种方式。首先寻找投影距离较近且红移上也接近的星系对，它们可能在未来某个时候进行并合。其次是根据形态上的扰动进行证认，例如潮汐尾等特征。人眼通常能够在复杂的图像中捕捉到较为微弱的特征，因此人眼识别仍是利用形态特征识别星系并合的主要方法。然而，这种识别方式相对主观且耗时，特别是在大型巡天中的应用场合较为有限。此外，也可以通过计算形态参数来辅助识别并合星系，例如不对称度 (Asymmetry)、聚集度 (Concentration)、平滑度 (Smoothing)、Gini 系数、 M_{20} 等。这些参数能够在一定程度上与星系相互作用产生的潮汐尾、星暴特征、多星系核等特征相关联。例如，Lotz 等人^[62, 63]提出了与形态参数相关的并合星系证认标准。

然而，对于较高红移的星系而言，使用这些定量参数进行分类的效果受到限制。Yeom 等人^[64]在基于模拟进行的有关高红移星系形态参数的研究中指出，在较低红移处（如 $z = 0$ 或 $z = 0.9$ ）星系图像较为清楚；但在较高红移处（如 $z > 2.4$ ），一些旋涡星系的特征不太明显，导致被证认为早型星系。与此相似，星系并合的证认也会受到红移的影响，需要更高分辨率、高灵敏度的近中红外成像巡天数据。此外，高红移星系的形态可能存在比低红移星

系更疏松且不规则的趋势^[65], 从而与星系并合特征混淆。因此, 相关研究也需要更精确的观测数据。

作为重要的红外天文观测设备, JWST 观测基本不受尘埃的影响。细致观测星系的内部结构和组成, 尤其是对于并合星系这样复杂的系统而言, 红外波段受到尘埃消光的影响较少, 可以观测到更多细节, 与其他望远镜在可见光、紫外、射电或 X 射线波段的观测形成了互补。目前, 只有 JWST 可以在红外波段分辨出红移大于 1 的并合星系中心区域的小尺度(如小于 1 kpc)的物理性质。极高的分辨率和灵敏度使得 JWST 成为研究并合星系的理想工具, 不仅能直接观测更多细节, 同时也可以观测到更暗弱和更高红移的星系。JWST 提供了独特的机会, 有助于人们深入了解宇宙早期并合事件对星系形成和演化的影响。

通过高分辨率观测, JWST 目前已经观测到了并合星系中细微的结构和特征。并合过程中, 星系内部的气体和恒星受到强烈的引力相互作用影响, 导致形态扭曲、气体碰撞和恒星形成等。JWST 能够捕捉到这些微妙的变化, 帮助科学家们理解并合过程中的物理机制, 以及这些过程如何影响星系的结构和演化。同时, 结合 JWST 的近、中红外观测能力, 能够研究星系的不同物理组分, 比如, 通过 NIRSpec、NIRCam、MIRI 等仪器, JWST 可以分别观测到并合星系中的恒星、气体和尘埃等不同成分。图 3 为由 JWST 的 NIRCam 与 MIRI 仪器拍摄的星系群 Stephan's Quintet, 清晰地展现了星系中的尘埃、激波等结构, 以及星暴区域等。Appleton 等人^[66]对这一星系群的 JWST 观测图像进行了研究, 认为其强烈的中红外 H₂ 谱线主要来自于激波后气体中致密冷分子云的破裂而产生的暖气体。对这一系统的中红外光谱观测将进一步揭示这些暖 H₂ 的动力学性质。此外, 在较高红移处, JWST 也能观测到并合星系中的复杂结构; Boyett 等人^[67]通过 NIRCam 的观测图像识别出了红移高于 9 的并合星系系统 Gz9p3 中心区域的双核、潮汐尾等部分, 此研究将在 3.2.1 节讨论。



注: 由 NIRCam 与 MIRI 仪器观测。NIRCam 清晰地观测到了其中的恒星与星暴, 为白色和蓝色的部分; MIRI 则观测了星系中的尘埃与并合星系之间的激波, 由黄色与橙色区分。JWST 的观测能力为并合星系领域带来了重要的研究机遇。

图 3 由 JWST 拍摄的星系群 Stephan's Quintet^[66]

3 JWST 的星系并合研究实例

自 JWST 发射以来, 已经有一系列以 JWST 数据为基础进行的星系并合研究, 涵盖了统计学研究以及针对单个样本 (如星系对、双 AGN、星系群等) 的个例研究。这些研究不仅展示了新的观测数据, 还有一些工作结合了理论模拟, 为深入探索星系并合的物理性质提供了丰富的信息。

在统计学研究方面, JWST 进行了多个大样本星系观测项目, 如上文提到的 CEERS、PRIMER 等测光和光谱巡天。这些大样本的星系观测项目为星系并合研究提供了丰富的数据资源, 帮助我们从整体上了解星系对的分布、性质和演化趋势, 揭示宇宙中星系相互作用和并合的统计规律。

与此同时, 针对单个样本的个例研究也取得重要的进展。通过深入观测和分析单个星系对、双 AGN 以及星系团等特殊对象, 具体研究了星系并合中的物质是如何相互作用, 恒星形成与 AGN 在并合星系中的特征, 以及并合现象在各类星系中的普遍存在性。

3.1 JWST 的星系并合统计研究

JWST 数据对于并合星系的统计研究具有重大意义。

一方面, JWST 的观测优势有助于建立中高红移并合星系大样本。NIRCam 仪器能够提供空间分辨率高达 $0.3''$ 的观测图像, 覆盖波段 $0.6 \sim 5.0 \mu\text{m}$, 从而使星系并合的细节特征不被遗漏^[68], 建立更完整的并合星系样本。

目前认为, 星系并合会在包括恒星形成、活动星系核在内的多方面产生影响。例如, 在对并合星系的发射线与恒星形成现象进行比较研究时发现, 星系的相互作用会引发一系列发射线的增强, 并合率的增加也会同时触发星系中的发射线^[69-71]; 在研究星系并合与 AGN 之间可能存在的关系时, Bonaventura 等人^[72]利用 JADES 巡天数据发现了 AGN 宿主星系的并合率随着红移和 AGN 光度的增加而提高, 并特别强调了 JWST 在补全 AGN 样本方面的优势。

另一方面, JWST 的高质量数据也为模拟研究提供了宝贵的验证和支持, 可将观测与模拟数据进行直接对比和匹配。通过构建理论模型和数值模拟, 可以生成较大的虚拟星系对统计样本^[73], 并得到它们在不同演化环境下的行为和性质, 如并合是否促进 AGN 活动与恒星形成, 是否是一种快速增加质量但不影响星系大小的途径等。此外, 更全面的观测图像也能够与机器学习相结合, 从而更快地建立并合样本, 并在形态、光谱特征及其他物理性质方面与模拟结果相比较。

3.1.1 利用 JWST 数据证认并合星系

星系演化研究中, 对并合星系的鉴定是一项关键且具有挑战性的任务。历史上, 无论是对星系形态, 还是对并合星系的特征进行分类, 最主要的方法都是通过视觉进行证认。在较大的数据样本中, 类似 Galaxy Zoo 等的全民项目也有一定的应用。随着计算机技术的不断发展, 较复杂的机器学习算法也在不断被开发。然而, 传统的分类方式具有一个关键的优势, 不会像算法一样过于依赖对整体的约束, 而是更能注意到个别星系中不可忽略的细微特

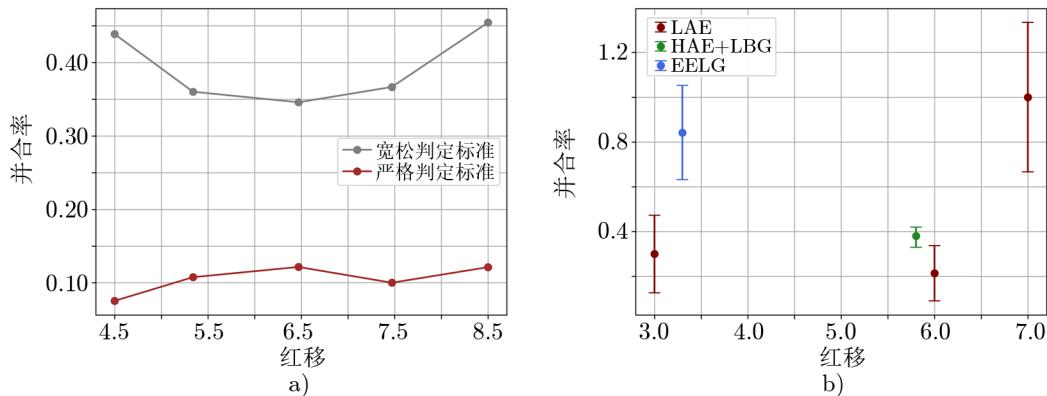
征。在进行最终的形态确认之前, 通常使用一定的投影距离和视向速度差来筛选可能存在相互作用的星系对。例如, 根据 Patton 等人^[74]和 Mantha 等人^[75]的研究, 常用的标准是 20~50 kpc 的投影距离和小于 500 km/s 的视向速度差。这些标准有助于确定星系之间是否存在相互作用的可能性。然而, 在依赖测光红移的研究中, 研究者往往采用额外的方法将测光红移测量存在的不确定性考虑在内。例如, Duncan 等人^[50]通过证认高分辨率图像中的光学形态, 从而去除数据中可能存在的恒星等非星系源; Lopez-Sanjuan 等人^[76]考虑了星系测光红移的概率分布函数, 以及由红移推算角直径距离时产生的误差, 从而确保对伴星系的选择和分析更加准确和可靠。采用更严格的筛选标准, 如进行信噪比的约束和滤光片的选择等, 也可以提高伴星系证认的准确性和效率。例如, Gupta 等人^[71]仅考虑了所有 F444W 信噪比大于 5 的星系, 可以确保在所有较短波段中都能够很好地探测到伴星系; 并且在实际研究中发现, 即使适当改变投影距离与径向速度差的限制, 主要结论也没有发生大的变化。这表明, 采用更严格的证认标准在对星系相互作用进行分析时, 具有一定的可靠性。

JWST 在成像方面的优势突出, 相关研究能够借助 NIRCam 的成像能力, 来准确证认并合星系形态中的扰动特征。例如, Laishram 等人^[68]利用来自 COSMOS-Web 巡天的高分辨率 NIRCam 数据, 对位于 $z \approx 1.5$ 的 1 449 个 [O II] 发射星系样本进行了环境与形态的相关研究。该样本在 0.54° 的目标区域内, 获得了 5σ 下 $27.5 \sim 28.2$ mag 的高灵敏度 NIRCam 观测, 发现了目标星系周围跨度超过 50 Mpc 的大尺度纤维结构。这些结构环绕着一个密度极高的核心区域, 其星系数密度比场平均高出 11 倍。这意味着星系的聚集, 可能表征了处于初始阶段的星系团形成。

为了研究处于不同环境中星系的形态特征, 并将其与星系并合相关联, 星系样本被分类为处于核心区域、结构外围区域和周围天区这三类。对它们的人眼检查能够初步显示不同环境中星系形态结构的区别。位于密度较高核心区域的星系显示出最显著的形态扰动特征, 后两个区域中星系的扰动特征程度以此递减。为了量化不同环境中星系的形态差异, Laishram 等人^[68]根据 NIRCam 的拍摄图像进行了 Gini 系数和 M_{20} 的计算^[62, 63], 并采用了 Snyder 等人^[77]的判定标准。结果显示, 核心区域 $50\% \pm 9\%$ 星系显示出扰动迹象, 而外围区域和天区中星系的比例分别为 $36\% \pm 7\%$ 和 $27\% \pm 4\%$ 。根据 K-S 检验, 核心区域星系与其他区域的星系之间形态发生扰动的比例存在统计学上的显著差异, 这表明, 环境对星系的相互作用和并合可能存在影响。这一结论与在密度更高区域中所得的星系并合更活跃的结果相一致^[63]。处于核心区域的星系更容易受到影响, 导致能够观测到更多的形态扰动; 外围区域则是高密度环境与低密度环境之间的过渡区域, 因此扰动的比例中等。这与密度更高的环境能够促进星系并合的理论预期相符合。

NIRCam 的高分辨率观测图像, 也首次使得系统性地利用图像形态参数对较大红移范围内的星系并合进行认证成为可能。Dalmasso 等人^[78]对红移为 4.0~9.0 的 675 个星系进行了 Gini 系数、 M_{20} 和不对称度的形态参数计算。判定并合星系时使用了两种方法^[63], 较宽松的标准 (仅满足 $G + 0.14M_{20} > 0.33$) 得出了 0.39 ± 0.06 的并合率, 较严格的标准 (同时满足 $G + 0.14M_{20} > 0.33$ 和 $A \geq 0.35$) 得出了 0.11 ± 0.04 的并合率。不同红移的并合率如图 4 所示。与图 1 相比, 在相对严格的标准 (图 4 棕线) 下, 并合率更加稳定, 且与较低红移

星系接近；在不考虑不对称性的较宽松的标准（图 4 灰线）下，高红移处星系的并合率（约 40%）显著高于低红移处的数值（见图 1，5% ~ 20%），但与高红移处的 ELG 可比拟（详见 3.1.2 节）。



注：a) 是 Dalmasco 等人^[78]在 675 个红移为 4.0 ~ 9.0 的星系用形态参数得到的并合率，其中宽松（灰色）和严格（棕色）的判定标准分别利用了 Gini 系数、 M_{20} 和不对称度的方法对并合星系进行认证。b) 展示了利用 ELG 得到的小样本中的并合率，在高红移处，有相当数量的 LAE、HAE、LBG、EELG 等发射线星系都拥有伴星系，暗示着宇宙早期并合的重要作用。

图 4 利用 JWST 的 NIRCam 和 NIRSpec 数据得到的 $z > 3$ 的星系并合率

另一方面，在理解并合星系的形成和演化中，模拟与观测研究起到了互补的作用。机器学习在星系模拟研究中扮演着日益重要的角色，尤其是在证认和分类星系形态以及并合事件方面。近期研究表明，机器学习方法在高红移并合星系证认方面具有潜力，与传统方法相比，其在这一领域可能更具效率和建立大样本的优势^[79-84]。如 Rose 等人^[73]在较大红移范围内 (0.5 ~ 4.0) 对并合星系形态参数的研究中，比较了 TNG (IllustrisTNG) 和 Santa Cruz SAM (Semi-Analytic Models) 的模拟与 CEERS 数据后得出，低红移情况下不对称性参数显得更为重要；而在高红移情况下，核球等参数更加关键。这表明在时间演化的不同阶段星系形态具有不同的特征，因此在不同红移范围内应该采用不同的形态参数进行并合星系分类。机器学习给出了与低红移观测数据一致的并合比例和并合率（如图 5 所示，在红移低于 2 的区间内并合率低于 0.2，与图 1 一致），但分类的准确性仍有待提高。通过训练卷积神经网络来直接从图像中识别并合现象，改进并提高分类的准确性和效率，可能是未来的主要研究方向之一。

3.1.2 恒星形成星系中的并合观测研究

由于红外波段具有高灵敏度和高分辨率，JWST 可以有效地观测和探测到中高红移的以发射线星系为代表的恒星形成星系。JWST 的红外相机和光谱仪不仅能捕捉揭示星系内部气体动力学和恒星形成活动的重要发射线特征，还能进行高于 $0.1''$ 的高空间分辨率观测，将图像与光谱相结合，深入且高效地研究发射线星系的化学成分和星际介质性质。广泛的红移覆盖范围使其能够观测到红移为 9^[85] 的发射线星系，从而更全面地理解宇宙的演化

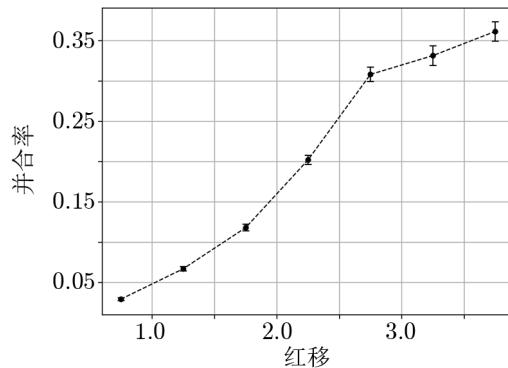


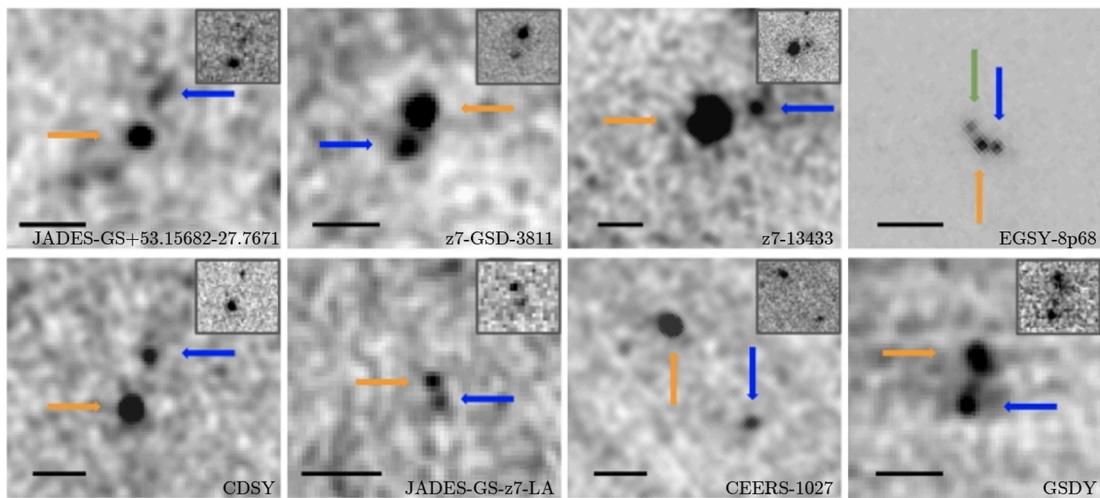
图 5 红移在 0.5 ~ 4.0 范围内并合星系形态参数的模拟结果^[73]

过程。目前, 使用 JWST 进行的相关研究已经涉及 LAE (Ly α emitter)^[69, 86, 87]、HAE (H α emitter)^[70]、LBG (Lyman break galaxy)^[70]、EELG (extreme emission line galaxy)^[71] 等多种恒星形成星系中的星系并合现象及比例。

Ly α 发射线是最重要的发射线之一, 通常认为它们形成于年轻的恒星形成星系。理论预测, Ly α 发射只能存在于再电离时期的末期, 即大爆炸后约 10 亿年左右才能被观测到。这是因为, 再电离时期的星系富含气体, 恒星形成区会被大量中性氢遮蔽^[88, 89], 不利于通过共振散射产生的 Ly α 发射逸出。但一些天文学家在再电离时期的早期仍探测到了 Ly α 发射线^[90]。对此, 一些理论提出, 当星系位于由 AGN 或增强辐射场驱动的巨大星系际介质电离泡中时, Ly α 发射能够通过中性星系际介质逃逸。对早期恒星形成星系中明亮的 Ly α 发射提供解释, 特别是环境对其产生机制的影响, 是星系研究领域的重大挑战。

在对星系环境密度与 Ly α 发射是否存在直接关联的研究中, JWST 仪器的高分辨率和高灵敏度图像的优势得以体现。Witten 等人^[69]使用 NIRCam 对 9 个红移高于 7 的 LAE 样本观测后发现, 所有星系存在多个成分, 且每个源都拥有距离接近的与目标星系测光红移一致的伴星系^[69] (见图 6)。其中 6 个源位于已知的高密度环境^[91–95], 且 3 个可能存在黑洞吸积^[96–98]; 另外 3 个源位于非高密度环境中, 鉴于其自身无法产生足够大的电离泡, 导致 Ly α 发射逃逸^[93], 它们周围很有可能存在其他星系, 观测结果也确实如此。

为了确保结果的可靠性, 该工作在同一红移范围下进一步比较了没有 Ly α 发射线的星系样本^[99], 并计算了其中的伴星系比例。这一样本是通过 JADES 巡天在 GOODS-S 区域发布的 NIRSpec 和 NIRCam 观测所得, 认证了 7 个红移高于 7 的没有 Ly α 发射线的星系, 其中伴星系比例约为 43%。这一比例在没有 Ly α 发射线约束的较大样本 (包含 30 个星系, 其 $\lg(M/M_{\odot})$ 为 $7.4 \sim 9.3$)^[95, 100–102] 中得到了证实, 其中只有 47% 在中心星系附近的 5'' 内存在测光候选伴星系。这两项结果, 都与 9 个 LAE 周围 100% 存在近距离伴星系的比例明显不同, 侧面认证了星系并合在高红移 LAE 中可能普遍存在。在较低红移处, 利用 JWST 对 LAE 的观测, 发现了不同的伴星系比例: Ning 等人^[87]在红移约为 6 的 LAE 样本中发现超过 20% 的源存在伴星系; Liu 等人^[86]在红移 3 附近的 LAE 中, 也发现了至少 30% 的



注: 不同星系采用不同的滤波段: F182M 的 GSDY 和 z7-GSD-3811, F200W 的 EGSY8p68, F115W 的 CEERS-1027、JADES-GS-z7-LA 和 COSY, F150W 波段的 JADES-GS+53.15682-27.7671 和 z7-13433。图像均经过平滑处理, 每张图右上角的小图为未处理图像, 表明 NIRCam 的直接观测图像即可分辨伴星系。橙色箭头指出主要观测目标星系, 蓝色和绿色则为伴星系。

图 6 使用 JWST 的 NIRCam 仪器观测的图像^[69]

源存在伴星系。这一比例随红移降低而变小, 可能说明了并合在更高红移处的重要性。

结合近期 Boyett 等人^[67]对红移高于 9 的并合系统 Gz9p3 开展的新研究工作, Witten 等人^[69]强调了伴星系的存在对于再电离时期 Ly α 的发射是必要但不充分的。Gz9p3 的 sSFR 约为 10^{-8} a^{-1} , 与 LAE 的高 sSFR 一致^[86], 尽管前者并未探测到 Ly α 发射。在模拟中, Witten 等人^[69]发现观测角度对 LAE 的观测存在影响, 在一些角度下, 从星系中逃逸的 Ly α 发射是扩散的, 因此不能被观测到。此外, 如果没有大型电离泡的存在, 中性星系际介质也不会促进 Ly α 的发射。因此, 此结论与并合系统 Gz9p3 中未观测到 Ly α 发射线不矛盾。但是, 由于 Witten 等人^[69]的样本过小, 现在要确定 LAE 与并合之间的必要或充分关系为时尚早。

利用发射线研究恒星形成历史与星系并合的关系也是 JWST 颇有优势的研究方向, 特别是对于高红移星系。Asada 等人^[70]利用 CANUCS 巡天 (Canadian NIRISS Unbiased Cluster Survey) 的 NIRCam 和 NIRISS 的观测数据, 在引力透镜星系团 MACS J0417.5-1154 天区建立了一个包含 123 个星系的样本, 红移在 $4.7 \sim 6.5$ 之间, 质量约为 $10^8 M_\odot$, 均为 HAE 或是 LBG。其中的相互作用星系通过结合距离计算与人眼识别证认, 占比达到了 38%, 显著高于低红移星系的典型并合比例 (如图 1 所示), 表明了星系并合率随红移的变化。在这个样本中, 相较于稳定的恒星形成历史的 η_{1500} (H α /UV) 标准值, 有 60% 的星系 η_{1500} 更高 (大于 1σ), 表明它们的恒星形成历史可能经历过爆发性的阶段。这其中的相互作用星系表现出更为迅速的星暴和猝灭过程。

除此之外, 也有研究专注于极端发射线星系 (extreme emission line galaxy, EELG), 对

于它与星系相互作用的关系进行了探讨分析; EELG 被定义为发射线强度较高的发射线星系, 通常要求 $[\text{O III}]5007 + \text{H}\beta$ EW 高于一定值 (如 $400 \text{ \AA}^{[103]}$ 、 $600 \text{ \AA}^{[104]}$ 等)。流体力学模拟显示, 星系并合会导致环星系介质气体冷却, 使恒星形成率提高 $30\% \sim 40\%^{[105, 106]}$, 并且一些研究发现了 EELG 中恒星形成历史的星暴证据^[107, 108]。基于 JADES 巡天, Gupta 等人^[71]对红移在 $z \approx 3$ 处的 EELG 以及其周围的伴星系进行了深入研究。JADES 巡天提供了前所未有的观测深度, 在 F444W 波段中 5σ 限制的流量探测极限达到了 $4.5 \times 10^{-6} \text{ Jy}$ (即 M_{AB} 极限为 29.77 mag)^[109], 并覆盖了哈勃超深场 (Hubble Ultra Deep Field, HUDF) 中约 $25'' \times 25''$ 的天区。研究样本选自 ZFOURGE (FourStar Galaxy Evolution Survey)^[110] 中 76 个红移在 $2.5 \sim 4$ 之间的 EELG^[103], 以及相同红移范围内且 K 波段信噪比大于 10 的 1712 个对照星系; 通过 ZFOURGE 与 JADES 的交叉匹配, 得到 19 个有 JADES 观测数据的 EELG, 及对应的 275 个对照星系。没有光谱红移的星系使用了 JADES DR1 的测光红移数据。通过比较发现, 约 16% 的 EELG 没有伴星系, 约 24% 的对照星系没有伴星系。

研究也发现, EELG 的 sSFR 与最近的伴星系的距离之间存在微弱的负相关, 但这一关系不存在于对照星系中。总体而言, 样本数量有限以及测光红移的不确定性可能使得这些结论产生偏差。为了进一步确定星系间相互作用的强弱, 或主并合与次并合的占比, Gupta 等人^[71]计算了每个星系系统中, 最大伴星系的质量与所有伴星系质量总和的比值。对于 EELG, 最大伴星系质量占全部伴星系质量和的比例中位数约为 0.65, 对于对照星系来说, 中位数仅有 0.04。这意味着主并合和/或强相互作用可能是驱动极端发射的重要因素。

总之, 由星系并合过程产生的气体冷却可能会促进星暴, 从而促进 EELG 的形成。宇宙学模拟预测, 在红移 $0 \sim 6$ 之间, 星系并合率几乎增长两个数量级^[111, 112]; 也有研究者证实红移 $2 \sim 6$ 之间, 星系并合率都会随红移增长^[50]。如果红移高于 6 时并合率仍有增加, 那么与 JWST 在红移大于 6 时探测到大量 EELG 的现象一致^[95, 108, 113, 114]。因此, 研究星系中气体、恒星等物理性质, 特别是它们在早期宇宙中的运动学和形态时, 适当考虑星系并合的情况非常重要。

图 4 总结了上述几项 JWST 展开的工作得到的恒星形成星系中的并合率, 高红移处有相当比例的 LAE、HAE、LBG、EELG 等恒星形成星系都拥有伴星系, 暗示着宇宙早期并合的重要作用。尽管目前 JWST 已在发射线星系的并合研究中取得了多项进展, 但现有观测还存在一些限制, 例如样本数量有限^[69, 71]、测光红移的不确定性^[71]等, 这些都可能影响结果的可靠性。因此, 未来的研究需要进一步扩大样本规模, 并结合更准确的光谱红移数据, 以验证这些发现并更深入地理解发射线星系中星系并合的性质和影响。

3.1.3 AGN 宿主星系中的并合观测研究

在近几年来的研究中, 由于受到观测分辨率的限制, 大部分项目都集中于探究中低红移的 AGN 宿主星系与星系并合的关系。例如, Jin 等人^[34]在低红移 AGN 样本中发现星系并合不会显著提高 AGN 的比例; Steffen 等人^[115]、Goulding 等人^[22]对低红移的研究发现, 星系并合会更大程度触发 AGN 活动。

根据理论分析结果, 在大部分星系并合过程中, AGN 在光学和 X 射线波段上都被气体

和尘埃遮蔽，表现为 II 型 AGN^[116]；在此之后，会转变为相对较短暂、明亮的不被遮蔽的 I 型 AGN，当黑洞的辐射功率增加到将尘埃和气体抛射的程度，星系会以正常演化的非 AGN 形式出现^[117]。目前的大部分研究都集中在演化过程中的 I 型 AGN 上。少量的工作讨论了尘埃与气体遮蔽较严重的 II 型 AGN 的情况。比如关于 SDSS 的 II 型 AGN 与星系并合的小样本研究中发现，在 41 个 II 型类星体中，有 34% 的宿主星系受到扰动；在 10 个极端红星系 (ERQ) 和 6 个 II 型 AGN 的 HST 观测中，都分别发现了 2 个宿主星系受到扰动^[118]。这些结果表明，II 型 AGN 中可能存在更高的并合率，尽管这些 II 型样本并不包括尘埃和气体遮蔽最严重的 AGN。

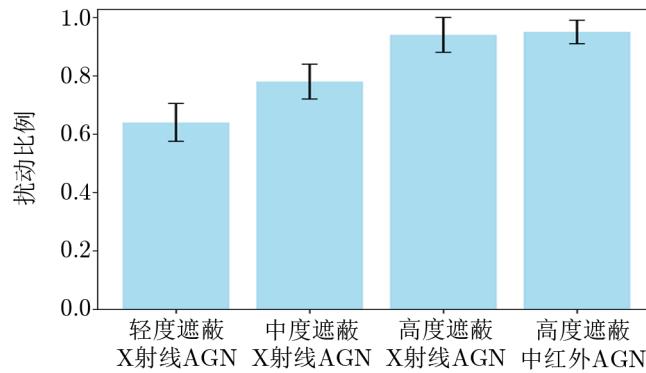
对 AGN 宿主星系并合的研究，建立较为完备的 AGN 样本是非常必要的。JWST 的 NIRSpec 和 NIRCam 可以认证红移为 10 的 AGN^[119, 120]；但是，尽管 MIRI 覆盖了 $4.9 \sim 27.9 \mu\text{m}$ 的观测波段，可以有效增加 $8 \mu\text{m}$ 以上 SED 模型的约束，但被尘埃和气体遮蔽的 AGN 的认证需要的中红外或更长波段的深度观测数据目前仍有限。尽管如此，相较于之前同样能提供 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 中红外观测数据的 Spitzer/IRAC (仅有约 $2''$ ^① 的空间分辨率)，MIRI 的空间分辨率达到了 $0.2''$ ，拥有更强的分辨能力，能够发现更加暗弱的 AGN；模拟研究认为，MIRI 能够探测到红移 $1 \sim 2$ 范围内爱丁顿比率 $\lambda_{\text{Edd}} \approx 0.01$ 的 AGN^[121]。

GOODS-S 中心区域的 MIRI 观测认证了 217 个 AGN^[122]，与以往覆盖同一区域的 X 射线、射电或中红外 AGN 认证结果相比^[123, 124]，80% 为新发现的 AGN；并且，其中包含了 20 个红移高于 4 的 AGN，最高红移达到 8.5。而此前，同天区中 Lyu 等人^[123]认证的 900 多个 AGN 中仅有 2 个红移高于 4。MIRI 的能力将 AGN 样本显著拓展到了更高的红移。此外，Lyu 等人^[122]通过比较 Spitzer 与 JWST 认证的 AGN 样本结果，发现了许多之前被认为是恒星形成星系的源实际上也有重要的 AGN 成分，例如 SMILES 1691。基于 Spitzer 观测数据的拟合中，这个源并未被认证为 AGN；在加入 MIRI 数据后，拟合表明这是一个中心在中红外被尘埃和气体遮蔽的 AGN 恒星形成星系。以上均表明 JWST 拥有增加 AGN 样本完备性的潜力。

基于 Lyu 等人^[122]在 GOODS-S 中心区域使用 MIRI 得到的 AGN 选源，Bonaventura 等人^[72]建立了一个波段覆盖为 $0.9 \sim 25 \mu\text{m}$ 的 AGN 样本，对 $z > 1$ 的不同类型的 AGN 宿主星系形态进行了约束。样本中的 138 个中红外亮且 X 射线暗 AGN，是由 NIRCam、MIRI 和 HST 的数据进行的 SED 拟合认证所得^[122]；另外 151 个 AGN 则由 X 射线/射电光度比 ($L_{0.5 \sim 7 \text{ keV}}/L_{1.4 \text{ GHz}} \leq 1.2 \times 10^{19}$) 选出^[125]。对于 X 射线 AGN，计算 H 吸收柱密度 N_{H} 来表征它们的气体遮蔽程度，分为无/轻度气体遮蔽 ($N_{\text{H}} < 10^{22} \text{ cm}^{-2}$)、中度气体遮蔽 ($10^{22} \text{ cm}^{-2} < N_{\text{H}} < 10^{23} \text{ cm}^{-2}$) 和高度气体遮蔽 ($N_{\text{H}} > 10^{23} \text{ cm}^{-2}$) 三类。同时，由于相同区域所有的中红外 AGN 此前均未被 X 射线观测认证，均假定其存在高度气体遮蔽 ($N_{\text{H}} > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$)。人眼认证与形态参数计算的结合表明，X 射线 AGN 与中红外 AGN 中都有相当大部分的宿主星系具有可能代表着并合的扰动形态，扰动的比例也随着红移和 AGN 光度的增加而增加。此外，气体遮蔽程度似乎对展现出强烈扰动的比例也有影响。气

^①<https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irac/>

体遮蔽最严重的系统中, 表现出强烈扰动的 AGN 比例最高, X 射线 AGN 和中红外 AGN 分别对应的比例为 $94\% \pm 6\%$ 和 $95\% \pm 4\%$; 之后为中度气体遮蔽和无/轻度气体遮蔽的样本, 比例分别为 $78\% \pm 6\%$ 和 $63\% \pm 6.5\%$, 如图 7 所示。这一发现表明, 与前文所述的强发射线星系相似, 在气体遮蔽的 AGN 中, 并合现象十分常见。Kocevski 等人^[126]先前的研究也表明, AGN 的形态扰动比例随着 H 吸收柱密度的增加而升高。这证实了被气体遮蔽的 AGN 可能对应着超大质量黑洞在星系并合事件后显著增长阶段的存在。



注: 扰动比例的增加代表了在这些系统中更可能存在或曾经发生过并合事件, 这与低红移处的观测结果一致。

图 7 对不同气体遮蔽程度 (使用 H 吸收柱密度表述) 的 AGN 受到扰动的比例^[72]

3.2 JWST 对星系并合的具体研究

通过对大量星系的观测分析, 统计研究能够了解星系并合的比例以及可能的普遍演化过程。然而, 对于星系并合与星系演化的具体关系, 个例研究也必不可少。这些个例研究能够提供更具体的信息, 展现星系系统演化过程中的特定阶段。利用 JWST 数据进行的星系并合的个例研究涉及多种天体, 包括独立星系和星系对、类星体、星系团等 (见表 1)。

表 1 部分基于 JWST 观测的星系中的并合现象个例总结

名称	天体类型	红移	已知成员数量	主要仪器	参考文献
VV 114	星系	0.020	>2	MIRI	[127]
GLASS-Zgrad1	星系	3.06	2	NIRISS	[128]
EGS 11, 14, 22	星系	1.8~2.3	$\geq 3, 2, 2$	NIRCam	[129]
Gz9p3	星系	9.3	2	NIRSpec	[67]
LBQS 0302-0019	类星体	3.3	>2	NIRSpec IFS	[130]
DELS J0411-0907	类星体	6.82	未知	NIRSpec IFS	[131]
VDES J0020-3653	类星体	6.86	未知	NIRSpec IFS	[131]
GS_3073	类星体	5.55	2	NIRSpec IFS	[132]
—	星系团	1.85	≥ 16	NIRCam	[133]

3.2.1 独立星系和星系对的并合个例分析

从近邻到高红移, JWST 已经对多个独立的并合星系系统进行了观测。JWST 突出

的观测能力, 例如 MIRI 在中红外的观测能够观测被遮蔽的恒星活动、PAH (polycyclic aromatic hydrocarbon) 发射等亮红外区域细节, 为星系并合提供了可靠证据。

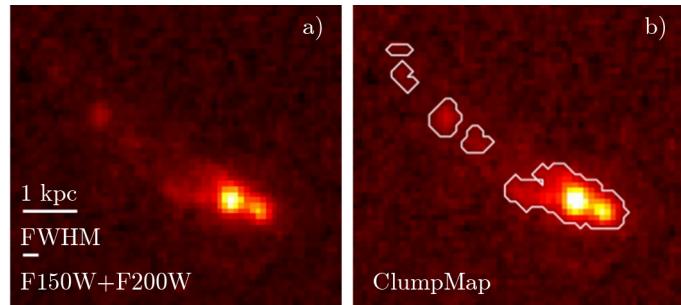
在 Evans 等人^[127]的研究中, MIRI 拍摄了红移约 0.02 的并合星系 VV 114, 区分出了 VV 114W 与 VV 114E 这两个明显的部分; 位于西侧的 VV 114W 富含光学星团, 位于东侧的 VV 114E 的核心区域在中红外波段亮, 但在紫外和光学波段下被尘埃遮蔽。在中红外波段观测中, VV 114E 的星核分为 VV 114E NE 和 VV 114E SW 两个部分。此前的中红外波段^[134]和 X 射线^[135]观测认为 VV 114E SW 的核心含有 AGN, 但新的中红外波段观测显示出星暴的特征; 通过新的 PAH 观测, 学者推测 VV 114E SW 可能为 AGN。研究者在 VV 114 中还发现了大约 40 个恒星形成区域, 红外亮度范围为 $(0.02 \sim 5) \times 10^{10} L_{\text{Edd}}$ 。28% 的结构并没有光学对应体, 可能处于高度尘埃遮蔽的环境中, 或者正在形成过程中。MIRI 图像中 40%~60% 辐射来自散射。PAH 和尘埃连续发射的 $7.7 \mu\text{m}$ 处, 存在从中红外恒星形成区域延伸出的纤维结构。对并合星系 VV 114 观测体现了 JWST 在中红外波段的观测能力, 成功探测到被尘埃遮蔽的红外亮恒星形成区, 以及这个 AGN 和星暴星系并合系统中的 PAH 发射。

在中等红移处, 亮红外星系的并合研究也可以借助 JWST 的观测展开。基于 NIRCam 观测, Huang 等人^[129]分析了 4 个红移约为 2 的极亮红外星系, 发现其中 3 个星系具有并合迹象 (EGS 11、EGS 14 和 EGS 22)。特别是 EGS 11 与 EGS 14 在图像中表现出明显的并合特征。EGS 14 的标准恒星形成率 $\lg(SFR/SFR_{\text{MS}}) = 0.92$, 远高于该红移处的恒星形成主序星, 而 EGS 11 与 EGS 27 分别略高于主序的上限。EGS 22 系统中两个星系的投影距离为 10.9 kpc, 略大于 EGS 11 和 EGS 14, 恒星形成率略高于主序星, 但明显的并合特征表明它可能处于并合的早期阶段。这表明星系的并合可能压缩星系内部气体并增加恒星形成, 甚至可能促进星暴, 从而产生亮红外星系。

在较高红移处, NIRISS 的无缝光谱观测与引力透镜技术的结合表现出研究星系的金属丰度等性质的能力。Wang 等人^[128]利用 NIRISS 无缝光谱仪对 GLASS-Zgrad1 的研究中, 也强调了星系并合的影响。GLASS-Zgrad1 的红移为 3.06, 并且受邻近源影响较小, 适合测量光谱发射线。尽管自身未表现出明显的并合特征, 但在投影上 GLASS-Zgrad1 与一个大质量星系仅相距 15 kpc, 且红移一致; 后者表现出可能为相互作用导致的旋涡特征。NIRISS 对 GLASS-Zgrad1 观测的空间分辨率约为 200 pc, 能够对其金属丰度径向梯度进行高分辨率测量。这是 JWST 光谱研究中的第一张星系金属丰度图, 也是 $z \approx 3$ 处的金属丰度梯度测量首次达到百秒差距分辨率。GLASS-Zgrad1 中观测到自内而外快速增加的金属丰度梯度, 表明远离星系中心的贫金属气体可能因星系相互作用而失去角动量, 最后落入星系中心。此前有研究表明, 相互作用在星系金属丰度梯度形成中起着重要作用^[136, 137], 与 GLASS-Zgrad1 的观测相符。

JWST 对极高红移并合星系的研究也有所突破。Boyett 等人^[67]对一个红移高于 9 的星系系统 Gz9p3, 进行了高分辨率光谱和空间分辨研究, 该系统显示出两个星系正在相互作用的典型形态。Gz9p3 最早由 HST 发现, 而后由 NIRCam 确认可能为一个红移高于 9 的源^[138], 通过光谱观测中的 Lyman-break 以及发射线确认红移为 9.3127 ± 0.0002 。空间分辨

观测研究表明, Gz9p3 可能是一个正在或近期刚刚经历主并合的系统, F150W 与 F200W 图像相结合, 较为明显地展现出中心区域内的双核结构, 并通过算法识别出可能是潮汐尾组成部分的几个团块 (见图 8)。同时, Gini 系数、 M_{20} 和不对称度分别为 0.61、-1.29 和 0.35, 根据 Lotz 等人^[63] 给出的形态参数判定标准判断, Gz9p3 可能是一个红移为 9 的并合星系。



注: 两张图均为 F150W+F200W 的直接成像图像。a) 展示出中心区域内的双核结构和一可能为潮汐尾的部分; b) 结合算法识别出可能为潮汐尾组成部分的几个团块。

图 8 Gz9p3 的形态^[67]

此系统在 SED 拟合过程中, 测光和光谱两种方式均计算出很高的恒星形成率, 达到了 $(9 \sim 19) M_{\odot} \cdot a^{-1}$ 。基于光谱的建模显示星系中心区域存在年龄为 (120 ± 20) Ma 的较老星族, 表明恒星形成可能早在红移高于 15 时就已经开始; 相比之下, 基于测光的建模则得到相对较小的年龄, 星系总体测光给出的年龄约为 25 Ma, 并且空间分辨观测也证认到了年龄小于 10 Ma 的区域。高分辨率光谱测得了 [O II] 双峰发射线, 由此能够估算星系际介质的电子数密度和电离参数, 均比低红移模拟星系更高。光谱中证认的 Si、C 和 Fe 的吸收线推进了对 Gz9p3 星族的认识, 金属吸收特征表明星系内气体并非形成之初的原始气体, 而是来源于较老的星族, 这也与 SED 拟合过程中得到的星系中心区域年龄较大的结论一致。多成分的吸收线轮廓表明吸收气体存在湍流, 这可能是星系并合事件的特征。结合光谱分析和成像数据, Boyett 等人^[67] 认为, 存在于大爆炸后 510 Ma 的明亮星系系统 Gz9p3 可能是一个正在处于相互作用中的系统, 并且质量高于预期, 表明该系统可能存在于一个非常罕见的暗物质晕中, 否则可能是由于当前的星系中恒星形成理论在宇宙早期阶段存在严重的缺陷。

3.2.2 类星体中的并合个例分析

目前的宇宙学模型认为, 相当一部分星系中多个超大质量黑洞的存在是由于先前的并合事件导致的^[139, 140], 双类星体可能成为这一理论的观测证据^[130]。类星体中心黑洞吸积周围物质时, 会在全波段上发出能量。包括地面和空间观测在内的对红移大于 3 的类星体的观测结果显示, 伴星系普遍存在。例如, ALMA 观测到高红移类星体附近的亚毫米星系和 Ly α 发射体^[141-143], 而 MUSE 也发现了高红移类星体的 Ly α 发射体^[144]。至今几乎所有由 NIRSpec IFS 和 NIRCam WFSS 进行的观测 (包括 LBQS 0302-0019^[130]、DELS J0411-0907^[131]、VDES J0020-3653^[131]、GS_3073^[132] 等), 都说明高亮度、高红移类星体周

围存在伴星系。这些结果明确支持了并合可能是早期超大质量黑洞快速增长的关键因素这一假设。

NIRSpec 的 IFS 仪器凭借其高灵敏度和高角分辨率（在 $z \approx 3$ 时， $25 \text{ kpc} \times 25 \text{ kpc}$ 的视场角分辨率约为 0.8 kpc ），能够对较高红移类星体周围星系的并合特征进行观测，使得与类星体相关的星系并合研究成为可能。LBQS 0302-0019 是一个红移约为 3.3 的蓝色类星体，其宿主星系具有强大的外流，位于一个尘埃遮蔽的 AGN 候选体与多个伴星系组成的复杂环境中，它们的投影距离不超过 30 kpc。Perna 等人^[130]利用 NIRSpec，清楚地观测到距离 LBQS 0302-0019 不远处的 8 个伴星系。对于其中两个，他们检测到一个可能追踪旋转气体的正常速度场，并推断出其动力学质量约为 $10^{10} M_{\odot}$ ；另一个伴星系显示出与类星体宿主星系的引力相互作用的证据。光学线比证实了主类星体约 20 kpc 处存在第二个被尘埃遮蔽的 AGN，双 AGN 主导了整个 NIRSpec 视场的气体电离状态。尽管目前的数据难以确定 8 个伴星系之间以及与类星体宿主之间是否存在物理关联，但 LBQS 0302-0019 周围的星系组成了一个密度较高的环境。这表明星系并合可能会触发双 AGN，并且推动早期超大质量黑洞快速增长。

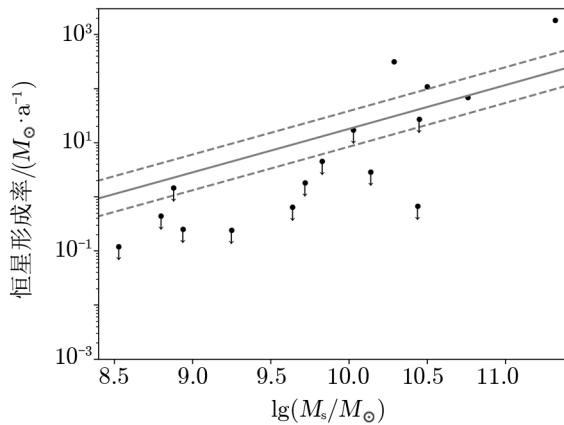
3.2.3 星系团和星系群的并合个例分析

星系团和星系群也对并合星系研究至关重要。这些密集结构中的并合、引力相互作用、物质交换等会对星系的性质产生影响。例如，并合导致气体压缩以及恒星形成激增，尤其在星系团和星系群中心区域更为明显。此外，相互作用也会引起星系形态的变化。物质交换可能改变恒星的年龄分布，进而影响化学元素丰度等性质。在近邻宇宙中已经证实，星系团与星系群环境会促进星系加速演化^[145]，但为了理解这种现象的来源，需要更多红移高于 1 的星系团与星系群研究。

最亮星系团星系 (BCG)/最亮星系群星系 (BGG) 通常位于大质量暗物质晕中心，由早期数个大质量星系并合而成，因此是星系团/星系群结构与暗晕的理想研究对象。低红移处，晕内光被证明能够追踪星系团或星系群内的暗晕质量轮廓^[146]，表明与星系演化相关。晕内光的形成阶段和产生过程尚不明确，一个可能来源是星系并合过程中抛射出的恒星等物质；因此，晕内光是致密环境导致星系并合的特征之一^[147-149]。星系群成员数量增加时，新成员也可能与原成员星系以及晕内光相互作用^[150-152]。此外，如果冷气体也与恒星一起离开星系，那么可能会在星系间形成恒星，并影响晕内光^[153, 154]。

中高红移处，一些研究通过模拟得出结论，晕内光在红移约小于 1 时形成^[155, 156]；红移低于 2 时，晕内光质量与星系总质量的比例会随着红移变化^[157]。红移高于 1 的研究较少，尤其是在超过 HST 观测能力的波段上。Coogan 等人^[133]利用 CEERS 巡天的 NIRCam 多个波段观测数据，结合以往的 HST 观测，对一个包含 16 个成员星系、红移为 1.85 的星系群展开了研究。NIRCam 图像展示了它拥有一个正在形成的 BGG，空间跨度约为 $3.6''$ ，质量占星系群中所有恒星的 69%，由几个星系并合而成。NIRCam 多个波段观测和 HST 数据发现，BGG 中各成员在 SFR、质量等方面差异巨大。其中，质量最大的成员星系占 BGG 总质量的 76%，SFR 超过 $1810 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ ，表明此星系群有一个被更蓝和更弥散的成分包围的红外亮核心。如图 9 所示，此群大部分星系都位于恒星形成主序附近或低于主序，表明

星系正处于恒星形成停止的过程中, 而这可能是星系并合导致的结果。Sersic 指数较高的星系居多, 与星系群较高的演化程度是一致的。



注: 图中的点对应这个星系群中的 16 个成员星系, 实线为根据 Sargent 等人^[158]的研究计算得到的红移为 1.85 的恒星形成主序, 虚线分别表示 0.3 附近的离散。标注箭头的值为上限。

图 9 一个红移为 1.85 星系群的恒星形成率与质量的关系^[133]

4 总结与展望

星系作为宇宙的基本组成单位, 一直是天文学家们关注的核心。对星系形态、结构和演化过程的深入研究揭示了一个重要事实: 几乎所有大质量星系在其漫长的生命周期中都至少经历了一次关键的并合事件。这些并合事件可能通过引发星系内部的气体压缩、增强恒星形成等方式, 间接或直接地促进了星暴事件的发生。在这一过程中, 基于 JWST 的观测数据, 天文学家从全新的视角深入地探究了并合事件对星系演化的影响, 为理解宇宙演化提供了更多的线索。

自 JWST 发射以来, 基于其数据展开的一系列星系并合研究, 揭示了星系间相互作用在宇宙演化中的重要性。本文总结了一系列基于 JWST 数据的并合星系研究进展, 包括涉及的统计学调查以及对单个样本的深入研究, 其中一些工作既包含理论模拟又结合了实际观测数据。JWST 数据的机器学习方法的应用, 使得对星系形态和并合事件的识别更加高效, 为解读星系演化提供了新的途径。JWST 的红外观测能力为观测发射线星系提供了独特视角, 一些研究凭借其前所未有的能力揭示了星系内部气体动力学和恒星形成活动。在近邻和中等红移的星系中, JWST 观测到了并合星系和双 AGN 等特殊对象, 凸显了 JWST 在探测高度尘埃遮蔽发射方面的能力, 并在研究中支持了星系并合为超大质量黑洞增长关键因素的假设, 以及密集环境(包括星系团和星系群)对星系恒星形成等性质产生的影响。

作为关键的红外天文观测设备, JWST 在红外波段的观测能力、高分辨率和高灵敏度, 以及对早期星系的深入研究, 使其成为探索并合星系和早期宇宙的重要工具。其红外观测能

力为理解宇宙早期并合事件的重要性提供了关键观测数据，高分辨率观测能够捕捉并合星系中微小的结构和特征，有助于深入探究并合过程对星系形成和演化的影响。

目前，利用 NIRCam 和 NIRSpec 仪器的研究已经取得了诸多进展，而 MIRI 和 NIRISS 在星系领域的收获也在不断增加，有望在近期带来更多研究成果。JWST 可以研究并合星系中不同成分的特征，例如通过观测 Ly α 发射线，研究星系内部的电离区域及其演化过程。并且，JWST 的观测数据不仅有助于深入理解单个并合事件的物理过程，还可以通过对比不同并合事件的特征，探讨并合星系的统计性质和普遍规律。这种统计性分析有助于天文学研究建立并合星系的理论模型，从而更好地理解星系演化的整体过程。

参考文献：

- [1] White S D M Rees M J. MNRAS, 1978, 183: 341
- [2] Cole S, Lacey C G, Baugh C M, et al. MNRAS, 2000, 319: 168
- [3] Knapen J H, Cisternas M, Querejeta M. MNRAS, 2015, 454: 1742
- [4] Barnes J E, Hernquist L. ApJ, 1996, 471:115
- [5] Begelman M C, Blandford R D, Rees M J. Reviews of Modern Physics, 1984, 56: 255
- [6] Peterson B M, Wanders I, Bertram R, et al. ApJ, 1998, 501: 82
- [7] Marconi A, Hunt L K. ApJ, 2003, 589: L21
- [8] Kormendy J, Ho L C. ARA&A, 2013, 51: 511
- [9] McLure R J, Dunlop J S. MNRAS, 2004, 352: 1390
- [10] Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J, et al. ApJS, 2008, 175: 356
- [11] Treister E, Schawinski K, Urry C M, et al. ApJ, 2012, 758: L39
- [12] Menci N, Gatti M, Fiore F, et al. A&A, 2014, 569: A37
- [13] Guolo-Pereira M, Ruschel-Dutra D, Storchi-Bergmann T, et al. MNRAS, 2021, 502: 3618
- [14] Hopkins P F, Somerville R S, Hernquist L, et al. ApJ, 2006, 652: 864
- [15] Di Matteo P, Bournaud F, Martig M, et al. A&A, 2008, 492: 31
- [16] Moreno J, Torrey P, Ellison S L, et al. MNRAS, 2015, 448: 1107
- [17] Urrutia T, Lacy M, Becker R H. ApJ, 2008, 674: 80
- [18] Koss M, Mushotzky R, Veilleux S, et al. ApJ, 2010, 716: L125
- [19] Koss M, Mushotzky R, Treister E, et al. ApJ, 2012, 746: L22
- [20] Bessiere P S, Tadhunter C N, Ramos Almeida C, et al. MNRAS, 2012, 426: 276
- [21] Cotini S, Ripamonti E, Caccianiga A, et al. MNRAS, 2013, 431: 2661
- [22] Goulding A D, Greene J E, Bezanson R, et al. PASJ, 2018, 70: S37
- [23] Woods D F, Geller M J. AJ, 2007, 134: 527
- [24] Silverman J D, Kampczyk P, Jahnke K, et al. ApJ, 2011, 743: 2
- [25] Lackner C N, Silverman J D, Salvato M, et al. AJ, 2014, 148: 137
- [26] Weston M E, McIntosh D H, Brodwin M, et al. MNRAS, 2017, 464: 3882
- [27] Gao F, Wang L, Pearson W J, et al. A&A, 2020, 637: A94
- [28] Coldwell G V, Lambas D G. MNRAS, 2006, 371: 786
- [29] Gabor J M, Impey C D, Jahnke K, et al. ApJ, 2009, 691: 705
- [30] Cisternas M, Jahnke K, Inskip K J, et al. ApJ, 2011, 726: 57
- [31] Villforth C, Hamann F, Rosario D J, et al. MNRAS, 2014, 439: 3342
- [32] Mechtley M, Jahnke K, Windhorst R A, et al. ApJ, 2016, 830: 156
- [33] Marian V, Jahnke K, Mechtley M, et al. ApJ, 2019, 882: 141

[34] Jin G, Dai Y S, Pan H-A, et al. *ApJ*, 2021, 923: 6

[35] Lanz L, Zezas A, Brassington N, et al. *ApJ*, 2013, 768: 90

[36] Patton D R, Torrey P, Ellison S L, et al. *MNRAS*, 2013, 433: L59

[37] Lambas D G, Tissera P B, Alonso M S, et al. *MNRAS*, 2003, 346: 1189

[38] Scudder J M, Ellison S L, Torrey P, et al. *MNRAS*, 2012, 426: 549

[39] Espada D, Martin S, Verley S, et al. *ApJ*, 2018, 866: 77

[40] Pan H-A, Lin L, Hsieh B-C, et al. *ApJ*, 2018, 868: 132

[41] Barrera-Ballesteros J K, Sánchez S F, García-Lorenzo B, et al. *A&A*, 2015, 579: A45

[42] Brassington N J, Zezas A, Ashby M L N, et al. *ApJS*, 2015, 218: 6

[43] Kaviraj S, Crockett R M, Silk J, et al. *The Spectral Energy Distribution of Galaxies - SED 2011, 2012, 284: 460*

[44] Lofthouse E K, Kaviraj S, Conselice C J, et al. *MNRAS*, 2017, 465: 2895

[45] López-Sanjuan C, Cenarro A J, Hernández-Monteagudo C, et al. *A&A*, 2014, 564: A127

[46] Dai Y S, Malkan M M, Teplitz H I, et al. *ApJ*, 2021, 923: 156

[47] Ventou E, Contini T, Bouché N, et al. *A&A*, 2017, 608: A9

[48] Man A W S, Zirm A W, Toft S. *ApJ*, 2016, 830: 89

[49] Williams R J, Quadri R F, Franx M. *ApJ*, 2011, 738: L25

[50] Duncan K, Conselice C J, Mundy C, et al. *ApJ*, 2019, 876: 110

[51] Beichman C A, Rieke M, Eisenstein D, et al. *Proc. SPIE*, 2012, 8442:84422N

[52] Jakobsen P, Ferruit P, Alves de Oliveira C, et al. *A&A*, 2022, 661:A80

[53] Doyon R, Hutchings J B, Beaulieu M, et al. *Proc. SPIE*, 2012, 8442:84422R

[54] Rieke G H, Wright G S, Böker T, et al. *Technical Report JWST-STScI-000001*, 2015

[55] Finkelstein S, Bagley M B, Ferguson H C, et al. *ApJ*, 2023, 946: L13

[56] Eisenstein D J, Willott C, Alberts S, et al. *arXiv:2306.02465*, 2023

[57] Casey C M, Kartaltepe J S, Drakos N E, et al. *ApJ*, 2023, 954: 31

[58] Malkan M A, Alavi A, Atek H, et al. *JWST Proposal Cycle*, 2021, 1: 1571

[59] Windhorst R A, Cohen S H, Jansen R A, et al. *AJ*, 2023, 165: 13

[60] Dunlop J S, Abraham R G, Ashby M L N, et al. *JWST Proposal Cycle*, 2021, 1: 1837

[61] Curtis-Lake E, Carniani S, Cameron A, et al. *Nature Astronomy*, 2023, 7: 622

[62] Lotz J M, Primack J, Madau P. *AJ*, 2004, 128: 163

[63] Lotz J M, Davis M, Faber S M, et al. *ApJ*, 2008, 672: 177

[64] Yeom B-S, Rey S-C, Kim Y, et al. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2017, 34: 183

[65] Shah E A, Kartaltepe J S, Magagnoli C T, et al. *ApJ*, 2020, 904: 107

[66] Appleton P N, Guillard P, Emonts B, et al. *ApJ*, 2023, 951: 104

[67] Boyett K, Trenti M, Leethochawalit N, et al. *Nature Astronomy*, 2024, 8: 657

[68] Laishram R, Kodama T, Morishita T, et al. *arXiv:2403.06369*, 2024

[69] Witten C, Laporte N, Martin-Alvarez S, et al. *Nature Astronomy*, 2024, 8: 384

[70] Asada Y, Sawicki M, Abraham R, et al. *MNRAS*, 2024, 527: 11372

[71] Gupta A, Jaiswar R, Rodriguez-Gomez V, et al. *ApJ*, 2023, 957: L35

[72] Bonaventura N, Lyu J, Rieke G H, et al. *arXiv:2401.07863*, 2024

[73] Rose C, Kartaltepe J S, Snyder G F, et al. *ApJ*, 2023, 942: 54

[74] Patton D R, Carlberg R G, Marzke R O, et al. *ApJ*, 2000, 536: 153

[75] Mantha K B, McIntosh D H, Brennan R, et al. *MNRAS*, 2018, 475: 1549

[76] López-Sanjuan C, Cenarro A J, Varela J, et al. *A&A*, 2015, 576: A53

[77] Snyder G F, Lotz J, Moody C, et al. *MNRAS*, 2015, 451: 4290

[78] Dalmasso N, Calabro A, Leethochawalit N, et al. *arXiv:2403.11428*, 2024

[79] Pearson W J, Wang L, Trayford J W, et al. *A&A*, 2019, 626: A49

[80] Bottrell C, Hani M H, Teimoorinia H, et al. *MNRAS*, 2019, 490: 5390

[81] Sreejith S, Pereverzyev S, Kelvin L S, et al. *MNRAS*, 2018, 474: 5232

[82] Snyder G F, Rodriguez-Gomez V, Lotz J M, et al. MNRAS, 2019, 486: 3702

[83] Ferreira L, Conselice C J, Kuchner U, et al. ApJ, 2022, 931: 34

[84] Ferreira L, Conselice C J, Duncan K, et al. ApJ, 2020, 895: 115

[85] Whitler L, Stark D P, Endsley R, et al. MNRAS, 2024, 529: 855

[86] Liu Y, Dai Y S, Wuyts S, et al. arXiv:2309.11559, 2023

[87] Ning Y, Cai Z, Lin X, et al. ApJ, 2024, 963: L38

[88] Heintz K E, Watson D, Brammer G, et al. arXiv:2306.00647, 2023

[89] De Barros S, Pentericci L, Vanzella E, et al. A&A, 2017, 608: A123

[90] Endsley R, Stark D P, Bouwens R J, et al. MNRAS, 2022, 517: 5642

[91] Leonova E, Oesch P A, Qin Y, et al. MNRAS, 2022, 515: 5790

[92] Tacchella S, Eisenstein D J, Hainline K, et al. ApJ, 2023, 952: 74

[93] Witstok J, Smit R, Saxena A, et al. A&A, 2024, 682: A40

[94] Jung I, Finkelstein S L, Larson R L, et al. arXiv:2212.09850, 2022

[95] Tang M, Stark D P, Chen Z, et al. MNRAS, 2023, 526: 1657

[96] Laporte N, Nakajima K, Ellis R S, et al. ApJ, 2017, 851: 40

[97] Larson R L, Finkelstein S L, Kocevski D D, et al. ApJ, 2023, 953: L29

[98] Maiolino R, Scholtz J, Witstok J, et al. Nature, 2024, 627: 59

[99] Jones G C, Bunker A J, Saxena A, et al. A&A, 2024, 683: A238

[100] Laporte N, Zitrin A, Dole H, et al. A&A, 2022, 667: L3

[101] Harikane Y, Ouchi M, Oguri M, et al. ApJS, 2023, 265: 5

[102] Bouwens R, Illingworth G, Oesch P, et al. MNRAS, 2023, 523: 1009

[103] Forrest B, Tran K-V H, Broussard A, et al. ApJ, 2018, 863: 131

[104] Gupta A, Tran K-V, Mendel T, et al. MNRAS, 2023, 519: 980

[105] Moreno J, Torrey P, Ellison S L, et al. MNRAS, 2019, 485: 1320

[106] Sparre M, Whittingham J, Damle M, et al. MNRAS, 2022, 509: 2720

[107] Cohn J H, Leja J, Tran K-V H, et al. ApJ, 2018, 869: 141

[108] Endsley R, Stark D P, Whitler L, et al. MNRAS, 2023, 524: 2312

[109] Rieke M J, Robertson B, Tacchella S, et al. ApJS, 2023, 269: 16

[110] Straatman C M S, Spitler L R, Quadri R F, et al. ApJ, 2016, 830: 51

[111] Hopkins P F, Bundy K, Croton D, et al. ApJ, 2010, 715: 202

[112] Rodriguez-Gomez V, Genel S, Vogelsberger M, et al. MNRAS, 2015, 449: 49

[113] Rinaldi P, Caputi K I, Costantin L, et al. ApJ, 2023, 952: 143

[114] Cameron A J, Saxena A, Bunker A J, et al. A&A, 2023, 677: A115

[115] Steffen J L, Fu H. Research Notes of the American Astronomical Society, 2022, 6: 192

[116] Hickox R C, Alexander D M. ARA&A, 2018, 56: 625

[117] Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J, et al. ApJ, 2013, 691: 1424

[118] Zakamska N L, Sun A-L, Strauss M A, et al. MNRAS, 2019, 489: 497

[119] Maiolino R, Uebler H, Perna M, et al. arXiv:2306.00953, 2023

[120] Goulding A D, Greene J E, Setton D J, et al. ApJ, 2023, 955: L24

[121] Kirkpatrick A, Alberts S, Pope A, et al. ApJ, 2017, 849: 111

[122] Lyu J, Alberts S, Rieke G H, et al. arXiv:2310.12330, 2023

[123] Lyu J, Alberts S, Rieke G H, et al. ApJ, 2022, 941: 191

[124] Luo B, Brandt W N, Xue Y Q, et al. ApJS, 2017, 228: 2

[125] Alberts S, Rujopakarn W, Rieke G H, et al. ApJ, 2020, 901: 168

[126] Kocevski D D, Brightman M, Nandra K, et al. ApJ, 2015, 814: 104

[127] Evans A S, Frayer D T, Charmandaris V, et al. ApJ, 2022, 940: L8

[128] Wang X, Jones T, Vulcani B, et al. ApJ, 2022, 938: L16

[129] Huang J-S, Li Z-J, Cheng C, et al. ApJ, 2023, 949: 83

[130] Perna M, Arribas S, Marshall M, et al. A&A, 2023, 679: A89

- [131] Marshall M A, Perna M, Willott C J, et al. A&A, 2023, 678: A191
- [132] Übler H, Maiolino R, Curtis-Lake E, et al. A&A, 2023, 677: A145
- [133] Coogan R T, Daddi E, Le Bail A, et al. A&A, 2023, 677: A3
- [134] Le Floc'h E, Charmandaris V, Laurent O, et al. A&A, 2002, 391: 417
- [135] Grimes J P, Heckman T, Hoopes C, et al. ApJ, 2006, 648: 310
- [136] Kewley L J, Geller M J, Barton E J. AJ, 2006, 131: 2004
- [137] Torrey P, Cox T J, Kewley L, et al. ApJ, 2012, 746: 108
- [138] Castellano M, Fontana A, Treu T, et al. ApJ, 2023, 948: L14
- [139] Colpi M. Space Sci. Rev., 2014, 183: 189
- [140] Volonteri M, Habouzit M, Colpi M. Nature Reviews Physics, 2021, 3: 732
- [141] García-Vergara C, Rybak M, Hodge J, et al. ApJ, 2022, 927: 65
- [142] Trakhtenbrot B, Lira P, Netzer H, et al. ApJ, 2017, 836: 8
- [143] Venemans B P, Walter F, Neleman M, et al. ApJ, 2020, 904: 130
- [144] Fossati M, Fumagalli M, Lofthouse E K, et al. MNRAS, 2021, 503: 3044
- [145] Kauffmann G, White S D M, Heckman T M, et al. MNRAS, 2004, 353: 713
- [146] Montes M, Trujillo I. MNRAS, 2018, 474: 917
- [147] Mihos J C. The General Assembly of Galaxy Halos: Structure, Origin and Evolution, 2016, 317: 27
- [148] Contini E, Gu Q. ApJ, 2021, 915: 106
- [149] Contini E, Gu Q. ApJ, 2020, 901: 128
- [150] Contini E, De Lucia G, Villalobos Á, et al. MNRAS, 2014, 437: 3787
- [151] Rudick C S, Mihos J C, McBride C. ApJ, 2006, 648: 936
- [152] Conroy C, Wechsler R H, Kravtsov A V. ApJ, 2007, 668: 826
- [153] Puchwein E, Springel V, Sijacki D, et al. MNRAS, 2010, 406: 936
- [154] Webb T M A, Muzzin A, Noble A, et al. ApJ, 2015, 814: 96
- [155] Contini M, Goldman I. MNRAS, 2011, 411: 792
- [156] Rudick C S, Mihos J C, McBride C K. ApJ, 2011, 732: 48
- [157] Behroozi P, Wechsler R H, Hearin A P, et al. MNRAS, 2019, 488: 3143
- [158] Sargent M T, Daddi E, Béthermin M, et al. ApJ, 2014, 793: 19

Recent Research Progress on Galaxy Pairs and Mergers with JWST Observations

TONG Yilu^{1,2}, DAI Yu¹

(1. National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The launch of JWST has brought astronomers a wealth of observational data on distant galaxies, which is particularly crucial in the study of galaxy interaction and galaxy mergers. JWST's infrared observation capabilities offer a unique perspective to astronomers, revealing the gas dynamics and star formation activities within galaxies. Merger events are prevalent throughout the universe, and research based on JWST observation data further confirms the significant impact of mergers on galaxy evolution. Significant progress has been

made in the study of galaxies associated with JWST, including both statistical studies and individual case studies, as well as the integration of theoretical simulations with actual observations. JWST also provides a unique perspective for observing emission-line galaxies, and it is widely applied in studies across various redshifts, especially in high-redshift galaxy research. JWST plays a vital role in merger galaxy research, with its infrared observation capabilities providing unprecedented advantages in exploring galaxy structure and composition. Its high resolution and sensitivity make it an ideal tool for studying galaxy mergers, offering astronomers new opportunities and posing challenges in understanding galaxy evolution at a deeper level.

Key words: galaxies; mergers; space telescope; AGN; star formation

.....

《天文学进展》2025年征订启事

《天文学进展》是天文学类中文核心期刊。刊物为季刊，2025年本刊于3、6、9、12月30日出版，每期定价100元，全年400元（含邮寄费和包装费）。凡需订阅2025年《天文学进展》，请至所在地邮局进行订购。

统一刊号：CN 31-1340/P

邮发代号：4-819

欢迎订阅！谢谢支持！

《天文学进展》编辑部

2025年3月