

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.

# 利用 JWST 观测的并合星系研究进展小结

童祎璐<sup>1,2</sup>, 戴 昱<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

## 摘要:

JWST 的发射升空为天文学家带来了大量星系观测数据, 特别是为星系并合的相关研究带来了重要进展。其红外观测能力为天文学家提供了独特的视角, 揭示了星系内部的气体动力学和恒星形成活动。并合事件在宇宙中普遍存在, 基于 JWST 观测数据的研究进一步证实了并合事件对星系演化的重要影响, 包括统计研究与个例研究, 以及理论模拟和实际观测的结合等。特别是 JWST 在观测发射线星系方面的独特视角, 在各个红移、特别是高红移星系的研究中取得了广泛进展。JWST 的高分辨率和灵敏度使其成为理想的研究并合星系的工具, 为天文学家深入理解星系演化提供了新的机会。

**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:** **文献标识码:**

## 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驱动的。暗物质晕以及星系之间的并合不断增加了它们的质量, 这促使了早期宇宙中团块状不规则的结构逐渐演化为我们今天所观测到的普遍的星系形态<sup>[9][11][14]</sup>。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。通过使用哈勃空间望远镜对存在于宇宙 52 亿年至 112 亿年之间的大质量星系进行观测, 研究人员发现了大量并合的证据。此外, 过往的部分研究认为, 并合事件的发生与星系内的星暴事件之间存在着一定的关联性。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, 为我们提供了对宇宙演化进行研究的宝贵机会。

关于并合星系中的恒星形成以及活动星系核 (Active Galactic Nuclei, AGN) 的研究对于星系物理领域有着极为重要的意义。随着对活动星系核的发现、观测以及研究, 人们认识

收稿日期: ; 修回日期:

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

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;当物质落入黑洞周围的吸积盘内时,大量的能量会在从 X 射线到红外的很大的波长范围内辐射,使得星系作为一个活动星系核在多个波段发光<sup>[18][19]</sup>。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<sup>[119][64][12][122]</sup>。

关于星系中心超大质量黑洞的吸积增长,人们提出了多个解释,其中之一就包括两个或多个质量相近的星系的并合<sup>[20][21][22]</sup>。数值模拟计算表明,两个星系的相互作用与并合的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。

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。相互作用星系之间的引力相互作用可以导致大量气体内流,从而增加恒星形成的速率。此外,一些研究发现,相互作用星系可能在星系尺度上产生恒星形成区的演变。

然而,从观测上来看,星系并合与活动星系核的触发之间的联系暂时还未完全明确,有相当一部分的研究工作得出了较为矛盾的结论。并合带来的恒星形成增强的程度等也在许多工作中得到了不同的结论。这表明了对于星系并合和活动星系核形成机制的理解仍然存在着挑战,需要进一步的观测和理论研究来揭示其内在的物理过程。

在理论上,两个质量相近且富含气体的盘状星系的并合被认为会导致气体迅速流入星系中心,引发星暴并触发类星体的活动。根据理论预测,在并合后的大部分时间内,类星体的活动会在光学和软 X 射线波段上被气体和尘埃所遮蔽,呈现出被遮蔽的 II 型类星体的特征。遮蔽物质可能会局限在星系的核心区域,并随着并合事件的发生而重新分配到星系内其他区域<sup>[49]</sup>。当黑洞增长到一定程度,其辐射功率足以将遮蔽物质抛射出去时,早期的遮蔽阶段就会过渡到相对较短暂的 I 型类星体阶段,此时类星体不再受到遮蔽并开始发光。并合后的星系残余物可能会表现为一个普通的星系,其中心可能有凸起和超大质量黑洞,而一些星系可能会保留或重新形成盘状结构<sup>[34]</sup>。

随着这一过程在星系群中不断发生,由于气体供应不断减少,星系并合后的形态往往会趋向于气体贫乏的椭圆星系。这一演化假设的关键在于,大星系并合被认为是超大质量黑洞增长的主要原因<sup>[49][23]</sup>。然而,尽管有理论支持,但由于观测证据的不足,这一结论目前尚未得到充分的支持。随着技术和观测手段的进步,未来更多的观测数据可能会为这一领域的研究提供更多的见解和证据。

图1总结了过往部分并合星系研究中,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,在红移低于 1.25 时,多数研究中的并合率有轻微的增加,Lopez-Sanjuan 等人(2014)<sup>[127]</sup>的趋势最为显著,但在红移高于 1.5 时,Dai 等人(2021)<sup>[80]</sup>则呈现出明显的下降。高红移时的不确定性是由于样本较少而产生的偏差。但根据理论,早期宇宙中的星系并合事件对于星系演化研究来说十分关键<sup>[9]</sup>。因此,并合星系的相关研究需要更大样本的高红移观测。

此外,通过数值模拟计算,在星系物理领域中,理论上认为星系的并合和相互作用能够在短时间内触发黑洞增长,增强 AGN 的活动<sup>[23][25]</sup>。这一理论基础源自对宇宙结构形成和演化的深入探索,认识到星系并合在宇宙演化中扮演着重要角色。然而,对于 AGN 与星系并

合之间确切联系的研究仍在不断深入。

在近邻宇宙中,许多 AGN 宿主星系呈现出与星系并合相关的形态特征,如扰动、潮汐尾等<sup>[27][29][30][32][33][36]</sup>。这些观测现象提供了重要线索,暗示着星系并合可能与 AGN 活动密切相关。一些研究通过对比孤立星系和并合星系对样本,发现后者中 AGN 的比例明显较高<sup>[37][38][39][40][41]</sup>。然而,并非所有的研究都得出了相同的结论,有些研究认为 AGN 与星系并合之间的联系并不明显<sup>[42][43][44][45][46][47][48]</sup>。然而,高红移的观测由于分辨率的限制,至今仍缺少足够的样本用于形态分析。

从恒星形成的角度来看,星系的并合和相互作用也被认为会影响恒星形成活动。数值模拟表明,星系并合可能导致恒星形成率的增加<sup>[50][51]</sup>。观测工作也发现,并合星系系统中的恒星形成率通常比孤立星系要高<sup>[52][53][54][55]</sup>。然而,并非所有的观测都得出了相同的结论,有些研究发现恒星形成率的增加相当有限<sup>[56][57]</sup>,或者在不同红移范围内,星系并合导致的恒星形成活动增强程度存在差异<sup>[58][59]</sup>。

综上所述,虽然在理论上认为星系并合和相互作用对 AGN 活动和恒星形成有重要影响,但观测结果的多样性表明了我们对于这一领域的认识仍然不完全。未来更长曝光和更高分辨率的观测和模拟研究已经成为该领域的研究大势,必将为我们揭示星系演化中这些关键过程的本质提供更为清晰的理解。韦布望远镜的出现,为这一领域提供了新的契机。

## 2 韦布空间望远镜概览

### 2.1 韦布空间望远镜的主要设备

韦布空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 是哈勃空间望远镜的继任者,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) 和近红外成像无缝光谱仪 (NIRISS) 等。

JWST 的各设备都帮助其在星系研究领域更有优势。关键科学仪器之一近红外摄像机 (NIRCam),为研究星系提供了独特的观测优势。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,为各种调查和研究提供了重要数据支持。NIRCam 的波长范围设计覆盖了从可见红光到中红外的范围,从 0.6 微米到 5 微米。这一广泛的波长覆盖使其能够捕捉到各种不同天体的光谱信息,为研究提供了丰富的数据来源。该仪器具有两个主要的视场,每个视场覆盖  $2.2 \times 2.2$  角分的区域。成像模式允许进行标准的数字摄影,捕捉各种发射或反射红外光的天体和物质。光谱模式下,NIRCam 可以进行宽场无缝光谱学,获取整个视场的整体光谱。这对于研究星系场、附近星系的一部分或多个星系非常有用。NIRCam 可以提供高分辨率的成像和光谱测量,为星系研究提供了丰富的观测优势。

中红外仪器 (MIRI) 专门设计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 在研究较冷天体和极端遥远星系中起着关键作用。MIRI 覆盖了中红外

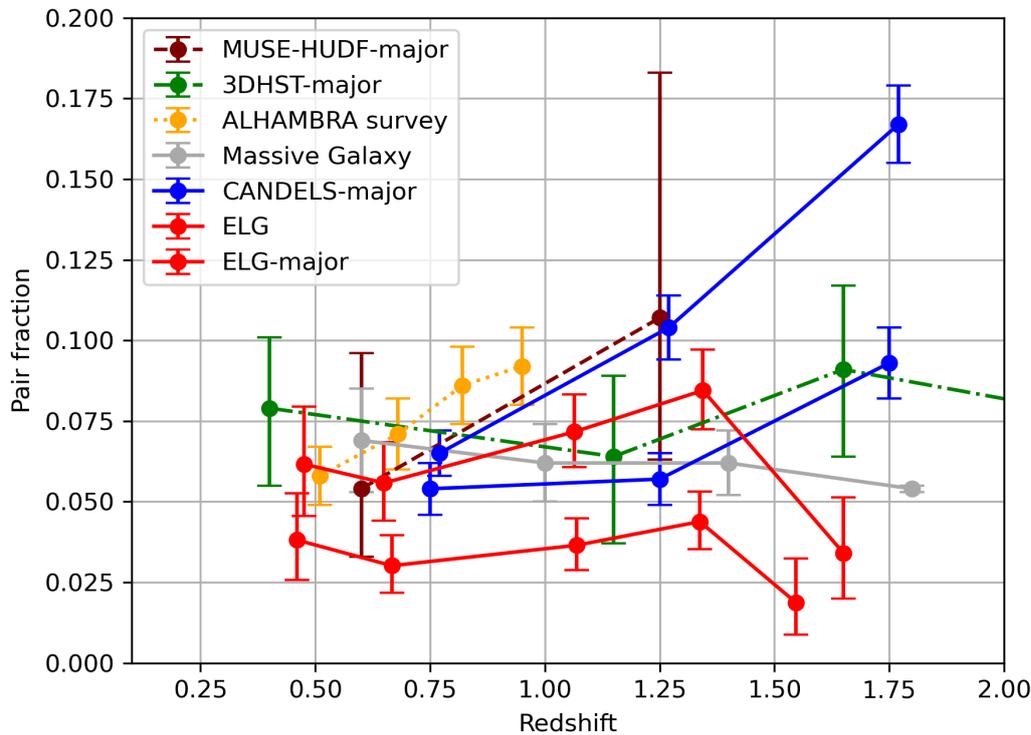


图 1 在过往有关并合星系的部分研究中并合率与星系红移的关系。MUSE-HUDF 来自 Ventou 等人 (2017)<sup>[125]</sup>, 3DHST 来自 Man 等人 (2016)<sup>[126]</sup>, ALHAMBRA 巡天来自 Lopez-Sanjuan 等人 (2014)<sup>[127]</sup>, 大质量星系来自 Williams 等人 (2011)<sup>[128]</sup>, CANDELS 来自 Duncan 等人 (2019)<sup>[129]</sup>, 发射线星系 (ELG) 来自 Dai 等人 (2021)<sup>[80]</sup>。

波段, 从 4.9 到 28.8 微米, 使得 MIRI 能够观测到许多星系中产生的中红外辐射。在视场和成像模式方面, MIRI 的主要视场为  $1.2 \times 1.9$  角分, 并提供了多种光谱模式, 包括单目无缝光谱、带狭缝光谱和积分场单元光谱 (IFU)。这些模式允许观测并分析单个天体的光谱, 如恒星、系外行星或遥远星系。特别地, IFU 观测允许调查不同区域的性质, 例如恒星场中的恒星或星系中的细节, 从而能够极大帮助星系并合的观测研究。MIRI 还支持时间序列成像和光谱学, 允许定期捕捉太空中天体或区域的光谱, 并观察其随时间的变化。

近红外光谱仪器之一 NIRSpec 专为研究星系而设计, 不仅能够获高分辨率光谱, 还具备多项先进功能, 使其在星系观测中具有显著的优势。NIRSpec 具有标准的单狭缝光谱学功能, 可以捕捉特定天体的光谱, 使得我们能够深入了解星系内部结构和组成, 从而探索它们的演化历史和物理性质。NIRSpec 还配备了微型光栅阵列和积分场单元功能。微型光栅阵列

能够同时捕捉多达 100 个天体的光谱,这种高效率的特性使得能够在同一时间内观测多个星系,尤其适用于研究遥远暗弱的星系。后者则可以提供更广阔的视场,帮助观测大范围的星系群或星系团,从而全面了解它们的性质和演化过程。另外, NIRSpec 的波长范围从可见光延伸到中红外,使其能够探索星系中不同物质的特征。NIRSpec 为深入探索星系的性质、演化历史和物理过程提供了强大支持。

近红外成像仪与无缝光谱仪 (NIRISS) 提供近红外成像和光谱测量能力。作为唯一能够进行光圈遮蔽干涉测量的仪器, NIRISS 具有捕获明亮天体目标图像的独特能力,其分辨率高于其他成像仪器。NIRISS 包含摄像机和光谱仪,摄像机捕获空间区域的二维图像,而光谱仪则观测光谱,测量每个单独波长的亮度。NIRISS 的波长范围从 0.6 微米到 5 微米。在观测星系时, NIRISS 具有广阔的视场,可覆盖大约  $2.2 \times 2.2$  角分的区域,提供了全面的星系图像。光谱方面, NIRISS 具有宽场无缝光谱学和单个物体无缝光谱学模式。前者适用于捕捉广泛视场的整体光谱,包括星场和多个星系;后者适用于捕捉单个明亮物体的光谱,如恒星。这些模式可以帮助深入了解星系的构成和性质的谱线信息。

## 2.2 韦布空间望远镜在星系领域的优势

JWST 已经展开了多个主要的巡天观测项目,其中包括 CEERS、PRIMER、JADES、COSMOS-WEB、PASSAGE、GLASS、PEARLS 等。CEERS 是 JWST 进行的首个深场星系巡天项目,全称为 Cosmic Evolution Early Release Science Survey。该项目利用 NIRCам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,全称为 JWST Advanced Deep Extragalactic Survey,利用 NIRCам和 NIRSpec 设备对 GOODS-S 和 GOODS-N 深场进行了红外成像和光谱观测,致力于研究从高红移到宇宙正午的星系演化。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  $13^{[24]}$ ,并且这一极限仍在不断推进),到巨型旋涡星系、椭圆星系等,分辨率达 0.1 角秒,相当于红移 3 处的 13.7pc。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。特别是,星系的相互作用是一个重要的研究领域,它可能可以导致星系的形态转变、星团形成以及黑洞活动的激增。相比之下,地面的观测限制在角秒量级的分辨率,在并合的中心区更小尺度的物理性质和过程只有 JWST 可以分辨。

一般而言,对于并合星系的证认,通常采用两种方式。首先是在天空中寻找投影距离较近、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即使较为微弱的特征,因此通过形态特征识别星系并合可以通过人眼识别来进行。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。除了人眼识别外,还可以使用形态参数的计算来辅助识别,并合星系,例如不对称度 (Asymmetry)、聚集度 (Concentration)、平滑度 (Smoothing)、Gini 系数、M20 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,在 Lotz 等人 (2004)<sup>[60]</sup>和 Lotz 等人 (2008)<sup>[61]</sup>的研究中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<sup>[16]</sup>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会较不明显导致被证认为早型星系,而其中的关键原因之一便是星系的光学发射由于红移的存在被部分转移。星系并合的证认与形态类型相似,也会受到同样的影响。因此,星系并合与相互作用的研究亟需更高分辨率、高灵敏度的近中红外成像巡天。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<sup>[17]</sup>,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。

JWST 作为重要的红外天文观测设备,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。红外波段的观测能够深入研究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,红外波段的穿透能力能够突破尘埃的阻隔,使得能够观测到更多细节。极高的分辨率和灵敏度使其能够捕捉到微弱信号,进一步揭示星系的性质和演化过程。这项能力使得 JWST 成为了研究并合星系的理想工具之一。红外观测能力使 JWST 能够突破可见光波段的限制,观测到红移较高的星系。在宇宙的早期阶段,星系并合事件更为频繁,而这些早期并合事件对于理解宇宙演化的早期阶段至关重要。JWST 能够探测到这些遥远星系中的并合现象,提供了独特的机会以深入了解宇宙早期并合事件对星系形成和演化的影响。

高分辨率观测能力使其能够捕捉到并合星系中细微的结构和特征。JWST 的观测结果显示,早期宇宙中许多星系实际上是复杂的相互作用系统,而之前的观测只能将它们视为单一对象。这种能力使得我们能够更深入地理解早期星系的形成和演化过程,尤其是在并合过程中。利用 JWST 的观测数据,科学家们可以研究并解释星系相互作用对于星系形成和演化的影响,推动天文学领域的不断发展。在并合过程中,星系内部的气体和恒星受到强烈的引力相互作用影响,导致形态的扭曲、气体的撞击和恒星的聚集。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,包括星系中的恒星形成与 AGN 活动等。图2为由 JWST 的 NIRCам 与 MIRI 仪器观测拍摄的星系群 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(2023)对这一星系群的 JWST 观测图像进行了研究,认为其中强烈的中红外  $H_2$  谱线主要是通过由激波后气体中致密冷分子云的破裂而产生的暖气体;同时,也期待能够利用中红外光谱观测进一步研究暖  $H_2$  的动力学等性质。

JWST 的多波段观测能力能够帮助研究星系内部、并合星系的子结构及不同物理组分。通过 NIRSpec、NIRCам、MIRI 等仪器,JWST 可以观测到并合星系中的恒星、气体和尘埃等不同成分的特征。例如,NIRCам 在早期星系研究中发挥着重要作用,其高分辨率和灵敏度使得天文学家能够更清晰地观测到早期星系的周围环境,特别是伴星系等微弱信号。以  $Ly\alpha$  发射线为例,在早期宇宙中, $Ly\alpha$  发射线的观测具有重要意义,因为它可以提供关于星系周围电离区域的信息。对于并合星系而言,伴星系的存在对于  $Ly\alpha$  发射具有一定影响,而 JWST 能够更准确地观测到这些伴星系。



图 2 由 JWST 拍摄的星系群 Stephan's Quintet, 由 NIRCам 与 MIRI 仪器观测。JWST 能够清晰地观测到其中星系分别的结构, 包括星暴、尘埃、激波等细节。JWST 的观测能力为并合星系领域带来了重要的研究机遇<sup>[31]</sup>。

### 3 JWST 的星系对研究实例

自 JWST 发射以来, 已经有一系列以 JWST 数据为基础进行的星系对研究, 涵盖了多样的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。这些研究不仅包括了理论模拟, 还结合了实际的观测数据, 为深入探索星系对的物理性质提供了丰富的信息。

在统计学研究方面, 研究人员利用 JWST 进行了多个大样本星系观测项目, 其中包括了上文提到的 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对研究提供了丰富的数据资源。通过分析这些数据, 研究人员可以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有了显著的进展。研究人员通过深入观测和分析单个星系对、双 AGN 以及星系群等特殊对象, 更深入地理解了星系并合过程中的物质是如何相互作用、恒星形成与 AGN 随并合的改变等, 以及它们对宇宙结构和星系演化的影响。

#### 3.1 JWST 的星系对统计研究

在并合星系的统计研究中, 模拟和观测两方面的研究都发挥着关键作用。模拟研究通过构建理论模型和数值模拟, 生成大量的虚拟星系对样本<sup>[62]</sup>, 并模拟它们在不同演化环境下的行为和性质。这些模拟研究能够促进对星系并合过程与星系性质演化关系的理解, 例如研究

并合是否促进星系中的 AGN 活动与恒星形成、是否提供一种快速增加质量但不影响星系大小的途径等, 验证观测结果的理论模型, 并预测未来的观测结果。

JWST 提供的高质量数据为模拟研究提供了宝贵的验证和支持, 因为它们能够与观测数据进行直接对比和匹配。通过模拟, 研究人员可以探索不同物理过程对星系演化的影响, 例如恒星形成、超大质量黑洞活动等。这些模拟研究的结果有助于解释观测到的现象, 并推动我们对星系形成和演化的理解向前迈进。

与模拟研究相辅相成的是观测研究。通过分析 JWST 观测数据, 研究人员可以直接观测到星系对的形态、光谱特征以及其他物理性质, 从而验证模拟结果, 并为模拟研究提供实际数据的基础。同时, 观测研究也能够发现新的现象和规律, 为模拟研究提供新的挑战和方向。目前认为, 星系并合会在星系发射线、活动星系核、恒星形成等方面产生影响, 围绕这些方面展开的研究已经有所收获。例如, Matthee 等人 (2023)<sup>[65]</sup>、Laishram 等人 (2024)<sup>[66]</sup>、Gupta 等人 (2024)<sup>[68]</sup> 分别对 [OIII] 发射线星系、[OII] 发射线星系和极端发射线星系 (Extremely Emission Line Galaxies, EELGs) 进行了星系并合与发射线之间的相关研究, 认为并合星系相互作用会引发 [OIII] 等发射线的增强, 并且并合率的增加也会触发 EELG 的活动; Bonaventura 等人 (2024)<sup>[63]</sup> 根据 JADES 巡天的数据对星系并合与 AGN 之间可能存在的关系进行了研究, 认为 AGN 宿主星系的并合率会随着红移和 AGN 光度的增加而上升; Asada 等人 (2024)<sup>[67]</sup> 研究了引力透镜星系团 MACS J0417.5-1154 后的  $z$  4.7-6.5 的受星系相互作用影响的低质量星系的恒星形成, 强调了并合星系相互作用对恒星形成活动的推动。

因此, 模拟研究和观测研究在理解星系对形成和演化过程中起着互补和重要的作用。它们的结合将为我们提供更深入、更全面地认识星系对的形成和演化提供重要支持。在以下部分具体展开讨论。

### 3.1.1 利用机器学习证认并合星系的研究

机器学习在星系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认证方面具有潜力, 并且相较于传统方法, 其在这一领域可能更具优势<sup>[6] [8] [7]</sup>。历史上, 星系形态的分类通常采用手动、视觉分类方法, 但随着望远镜技术的进步, 越来越多的研究转向使用机器学习算法进行形态分析, 尤其是面对大数据样本的情况<sup>[5] [4] [3]</sup>。在基于 JWST 数据进行的并合星系研究中, 机器学习也起到了重要的作用。

Rose 等人 (2023)<sup>[62]</sup> 的研究中, 对模拟中的 JWST 数据进行了并合星系的分类, 特别地包含了 0.5 至 4.0 的不同红移情况。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。研究采用了基于各种形态参数的方法, 利用模拟的 JWST 数据, 借助随机森林分类技术来识别模拟中的并合星系。首先, 从 TNG (IllustrisTNG) 和 Santa Cruz SAM (Semi-Analytic Models) 的模拟数据中生成图像, 并通过适当的修改以模拟 CEERS 观测结果。然后, 利用形态学程序 Galapagos-2 和 statmorph 来测量这些图像的形态参数, 并利用 TNG 模拟数据中提供的并合历史信息来训练随机森林模型。在红移范围 0.5 至 4.0 之间, 随

机森林的分类精度随着红移的增加而提高，而非并合星系的分类精度则随着红移的增加而降低。然而，当在接近无噪声的模拟图像上进行训练和测试时，随机森林的性能并不理想，这表明了噪声的影响以及模拟数据和实际观测之间的差异。

在对并合星系进行分类时，不同红移范围内的形态参数的重要性也有所不同。在低红移情况下，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。这表明了星系形态随着时间演化的不同阶段具有不同的特征，因此在不同红移范围内采用不同的形态参数进行分类是合理的。

尽管随机森林分类能够提供一定程度的精确度，但经过修正后得出的并合比例和并合率仍然存在一定的偏差。这项研究表明，在后续对 CEERS 星系数据的研究中，该算法可以提供合理的并合比例和并合率，但仍然需要进一步改进以提高准确性。

另外，Rose 等人 (2023)<sup>[62]</sup>认为在未来的研究中，如何将图像中的星系互相分开以便进行并合迹象的分析值得进一步探究；并且，通过训练卷积神经网络来直接从图像中识别并合现象，以进一步改进并提高分类的准确性和效率也是未来的研究方向之一。

### 3.1.2 并合星系与发射线星系的观测研究

JWST 以其红外波段的高灵敏度和高分辨率，成为观测发射线星系的重要工具。其能够捕捉红移较高的发射线特征，如 Ly $\alpha$  和 H $\alpha$  发射线，揭示星系内部气体动力学和恒星形成活动。通过红外光谱仪，JWST 提供高于 0.1 角秒的高分辨率的红外光谱观测，深入研究发射线星系的化学成分和星际介质性质。其广泛的红移覆盖范围使其能够观测到红移达到 9<sup>[35]</sup> 的发射线星系，从而更全面地理解宇宙的演化过程。

Matthee 等人 (2023)<sup>[65]</sup>通过对红移在 5.33~6.93 范围内的 117 个 [OIII] 发射星系样本进行详细研究，深入探讨了星系相互作用对星系形成和演化的影响。利用 JWST/NIRCam 宽场无缝光谱观测，研究团队发现了 133 个距离非常接近的 [OIII] 星系对。这些相互作用星系呈现出多个显著特征，例如：星系的光度范围广泛，紫外光度 MUV 约为 -19.6，而恒星质量大约在 108 个太阳质量左右；星系的 H $\beta$  和 [OIII]4960+5008 等效宽度 (Equivalent Width, EW) 可高达 850，甚至高达 3000，这在近邻宇宙中非常罕见，但在  $z\sim 6$  时似乎相对常见；光谱分析还显示了 H $\gamma$  和 [OIII]4364，表明这些星系通常是贫尘和贫金属的，并具有较高的电子温度和电离光子的产生效率。

值得强调的是，这些相互作用星系中存在着很强的质量-金属度关系。其中，金属度略高于同样为  $z\sim 6$  附近的 FIRE 模拟<sup>[15]</sup>中的结果，并且整体低于 Sanders 等人 (2021)<sup>[26]</sup>在  $z\sim 3.3$  处的金属度，而后者则整体低于 Sanders 等人 (2021)<sup>[26]</sup>在  $z\sim 0$  处的结论；Matthee 等人 (2023)<sup>[65]</sup>的结论延续了质量-金属度关系随红移变化的趋势。同时，Matthee 等人 (2023)<sup>[65]</sup>还发现了相当数量的 [OIII] 发射星系成对或聚集出现，通过对成对星系的距离和径向速度差进行分析，确定了它们之间的可能物理联系。这些发现表明，星系间的相互作用与并合可能导致恒星形成活动的迅速增加，从而引发了高效的 [OIII] 发射，进一步影响了星系的物理特性和演化过程。

除了 [OIII] 发射星系之外，也有研究对 [OII] 发射星系进行了分析。例如，Laishram 等

人 (2024) <sup>[66]</sup> 利用了来自 COSMOS-Web 巡天和 SHSC 的 JWST/NIRCam 数据, 对位于  $z \sim 1.5$  的 COSMOS 超深场中的 [OII] 发射星系进行了深入研究。报告指出, 这些星系在观测中显示出明显的大型纤维结构, 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。更令人惊讶的是, 这些结构的跨度超过了 50cMpc, 展现出了相当宏大的空间范围。

经过对恒星质量的匹配分析后, 研究发现, 这一区域内的星系相较于外围星系和整个场的星系, 更倾向于显示出扰动特征。具体来说, 在最内侧的区域 ( $\leq 1.5 \text{ arcmin}$ ), 核心区域的星系中有  $50 \pm 9\%$  显示出了扰动特征, 而这一比例在外围星系和整个场的星系中分别为  $41 \pm 9\%$  和  $21 \pm 5\%$ 。这一发现清晰地表明, 在这个特定的红移范围内, 星系间的相互作用更为频繁, 可能是由于并合等动力学过程的影响。

此外, 研究还发现, 在密度较高的环境中, 比恒星的形成率 ( $s\text{SFR} = \text{SFR}/M^*$ ) 较高, 这进一步表明了环境密度对恒星形成活动的驱动作用。特别是, 环境密度较高的部分星系可能正在经历并合过程, 这一过程在大质量星系的增长过程中扮演着重要角色。

然而, 值得注意的是, 尽管在相同的红移下, 每个星系团或高密度区域的发展阶段可能存在差异, 这可能会对研究结果产生影响。因此, 为了更全面地理解星系演化的机制, 需要在不同红移和不同环境下进行更广泛的观测, 并考虑到更多的变量, 如星系间的相互作用和 AGN 反馈机制等。这将有助于进一步推广这些结果, 并验证所观测到的形态学特征, 为我们理解宇宙中星系演化的复杂性提供更多的见解。

除此之外, 也有研究专注于极端发射线星系 (Extreme Emission Line Galaxies, EELGs), 对于它与星系相互作用的关系进行了探讨分析。在早期宇宙 ( $z > 6$ ) 中, EELGs 无处不在, 在某些测光波段中, 星云发射占总通量的 30-40%。根据流体力学模拟显示, 星系并合和星系间相互作用会导致环星系介质气体冷却, 从而使恒星形成率提高 30-40% <sup>[73][74]</sup>。一些研究还发现了 EELGs 中恒星形成历史的爆发和增加的证据 <sup>[75][76]</sup>。此外, 即使与恒星质量和比恒星形成率 ( $s\text{SFR}$ ) 匹配的样本相比, EELGs 周围伴星系的质量也相对较大, 这表明极端发射线产生的时间尺度可能比光谱能量分布 (Spectral Energy Distribution, SED) 模型估计的典型恒星形成率时间尺度 (约 100 百万年) 要短得多。强烈的相互作用或并合可能会导致气体冷却, 从而引发星暴事件, 进而产生极端发射线。

Gupta 等人 (2024) <sup>[68]</sup> 利用了 JWST/JADE 的深度 NIRCam 成像技术, 专注于红移在  $z \sim 3$  处的 EELGs 以及其周围的伴星系进行了深入研究。通过利用 NIRCam 仪器的深度测光和 JADES 巡天中获得的精确测光红移, 研究人员得以确定主并合和/或强相互作用可能是驱动极端发射线的重要因素。他们在红移范围为 2.5 至 4 之间, 对 19 个 EELGs 和 275 个对照星系周围的伴星系进行了性质分析。通过 TNG100 模拟的测试, 研究证实, 在红移 0 时, 几乎所有星系最终都会与至少一个伴星系发生并合。然而, 为了更深入地了解星系的状况, 尤其是确定星系是在进行主并合还是仅经历强烈的相互作用, 光谱数据是必不可少的。

在具体的研究过程中, 伴星系的定义采用了投影距离  $< 40 \text{ kpc}$ , 径向速度差  $< 10000 \text{ km/s}$  的标准。研究的基础是 TNG100 模拟的结果, 该模拟表明, 即使在红移为  $z=3$  的时候, 几乎所有的星系都会与在红移为  $z=0$  时使用相似参数选出的至少一个星系发生并合。这一发

现为理解 EELGs 的形成和演化提供了重要线索。

在这项研究中, 即使将 EELGs 与恒星质量以及 sSFR 匹配的控制样本进行比较, 发现 EELGs 最亮的伴星的质量比也比所有伴星的总质量比高出 3-5 倍。这一结果表明, 无论恒星质量或 sSFR 如何, EELGs 都更有可能正在经历强烈的相互作用和/或主并合。而主并合可能是触发 EELGs 产生极端发射线的主要原因之一。此外, 研究还指出, 并合率的增加可能是造成红移超过  $z>6$  处 EELG 过多的原因之一。

研究中的 EELGs 样本选自 Fourstar 星系演化巡天(ZFOURGE), 这个巡天由 Straatman 等人 (2016)<sup>[77]</sup> 进行。而 Forrest 等人 (2018)<sup>[78]</sup> 在钱德拉南深场 (CDFs) 进行了复合光谱能量分布拟合, 并发现了 76 个红移在 2.5 到 4 之间的 EELG。为了进行比较, 研究者从 ZFOURGE 中选择了相同红移范围内, 且 K 波段信噪比大于 10 的 1712 个星系作为对照样本。利用 JADES 的 DR1 提供的前所未有的观测深度, 研究者进行了对比分析。他们将在 F444W 滤光片中最亮的星系在 ZFOURGE 和 JADES 之间进行了小于 0.5" 的交叉匹配, 考虑到两个巡天中的天体测量偏移约为 0.3"。最终, 在 JADES DR1 中发现了 76 个 EELGs 中的 19 个和 1712 个对照星系中的 275 个。其中, 有 12 个 EELGs 和 66 个对照星系具有来自 MOSEF 巡天或 JADES DR1 的光谱红移; 对于没有光谱红移的情况, 使用了 JADES DR1 的测光红移数据。这一对比分析的结果为研究提供了更加全面和可靠的数据基础, 有助于更深入地理解 EELGs 的性质和演化。

在光谱研究中, 通常使用一定的投影距离和视向速度差来确认相互作用的星系对。例如, 根据 Patton 等人 (2000)<sup>[79]</sup> 和 Mantha 等人 (2018)<sup>[81]</sup> 的研究, 常用的标准是 20-50kpc 的投影距离和视向速度差小于 500km/s 的速度差。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, 在依赖于测光红移的研究中, 由于测光红移测量存在一定的不确定性, 研究者往往采用更多的统计方法来考虑这种不确定性。Lopez-Sanjuan 等人 (2015)<sup>[82]</sup> 和 Duncan 等人 (2019)<sup>[83]</sup> 的研究就提供了这方面的方法和技术, 以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, 比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 (2024)<sup>[68]</sup> 仅考虑了所有在 F444W 滤光片中检测到的信噪比大于 5 的星系, 可以确保在所有较短波长滤光片中都能够很好地探测到伴星系。特别地, 在实际研究中发现, 即使将投影距离限制改为 20-50kpc, 径向速度差限制为 5000-20000km/s, 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。在后续模拟中, 研究得出了一系列重要结论。首先, 他们发现 EELG 周围的伴星系数量的中位数是 2 个, 而对照样本中的星系则只有一个伴星系。这表明 EELG 周围伴星系的数量普遍较多。其次, 约 16% (3/19) 的 EELG 没有任何伴星系, 而对照样本中的比例则为 24%。这说明 EELG 更有可能孤立存在, 而对照样本中孤立存在的比例稍高。通过 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验, 研究者发现 EELG 周围的伴星系数量分布与对照样本没有显著差异。这意味着在伴星系的数量分布上, EELG 与对照样本没有明显的统计学差异。

此外, EELG 中, 星际介质和 sSFR 与最近的伴星系距离之间存在微弱的负相关, 而在对照样本中并不存在这种相关性, 表明 EELG 周围伴星系的存在可能与星系的物理特性有关, 例如, 星系间的相互作用可能会影响星系的星际介质和恒星形成率分布。并且研究也发现, EELG 更有可能被质量相近的恒星伴星所包围, 从而更有可能正在经历主并合或强相互作用过程<sup>[68]</sup>。

宇宙学模拟预测, 在红移为 0 至 6 之间, 星系并合率几乎会增长两个数量级。深度测光数据也证实了在红移为 6 之前, 星系并合率的单调增长<sup>[83]</sup>。研究人员推测, 并合率的增加可能是 JWST 在红移大于 6 时探测到的 EELGs 过多的原因<sup>[76][86][84][85]</sup>。因此, 在计算气体和恒星的物理性质, 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是非常重要的。

尽管这些结果非常有启发性, 但现有的观测也存在一些限制<sup>[68]</sup>, 例如样本量有限以及测光红移的不确定性可能会影响结果的准确性。因此, 未来的研究需要进一步扩大样本规模, 并结合更精确的光谱数据, 以验证这些发现并更深入地理解 EELG 周围伴星系的性质和影响。

### 3.1.3 并合星系与 AGN 的观测研究

在近年来的研究中, 许多项目都致力于探究近邻和中等红移的 AGN 宿主星系与星系相互作用之间的关系。例如, Kim 等人 (2017)<sup>[69]</sup>的研究涵盖了超过 200 个星系, 尽管在一些个别情况下对并合星系的认证存在分歧, 但总体上研究结果显示了广泛的一致性, 即 50% 的宿主星系呈现出扰动特征。大多数研究都集中在 I 型未遮蔽或轻度遮蔽的 AGN 上进行。

然而, SDSS 中的发现表明, 存在大量的 II 型 AGN, 这意味着可以对它们的宿主星系进行类似的观测。例如, Urbano-Mayorgas 等人 (2019)<sup>[70]</sup>在 41 个 II 型类星体样本中发现, 有 34% 的宿主星系受到扰动。Zakamska 等人 (2019)<sup>[71]</sup>在 10 个 ERQ (极端红星系) 和 6 个 II 型 AGN 的 HST 观测中分别发现了 2 个和 2 个宿主星系受到扰动。然而, 这些 II 型样本中并不包括遮蔽最严重、康普顿厚的 AGN。

要全面研究 AGN 遮蔽与宿主星系形态之间的关系, 确实需要借助多种 AGN 认证方法。其中, 基于红外的方法可以探测到在其他波长范围内被完全遮蔽的 AGN, 这为我们提供了一种突破传统观测限制的途径。之前的研究中, 使用了 HST 和 Spitzer 等设备, 通过不同的方法选出 AGN 并对它们的形态特征进行了研究。然而, 这些研究主要关注的是比较亮的 AGN, 而对于遮蔽最严重、康普顿厚的 AGN 等更难以观测的类型, 则需要更精细的方法和更先进的设备。因此, 要全面理解 AGN 和宿主星系之间的关系, 需要考虑到不同类型 AGN 的特征。除了光学和红外观测外, 还可以借助射电、X 射线等不同波段的观测数据, 以及利用数值模拟和理论模型进行分析。此外, 对于 AGN 的认证方法也需要不断地改进和完善, 以确保对 AGN 样本的准确鉴定。综合利用多种观测手段和认证方法, 可以更全面地揭示 AGN 与宿主星系之间的相互作用及其对星系演化的影响。

基于 JADES 巡天的 JWST/NIRCam 图像, 结合 JWST/MIRI 光度测量, 天文学家能够建立前所未有的完整 AGN 样本。例如, Bonaventura 等人 (2024)<sup>[63]</sup>建立了一个波段范

围为 0.9~25 微米的 AGN 样本，其中的数据能够对  $z \sim 1$  以上尽可能全面广泛的 AGN 宿主星系形态进行约束，包括此前研究中缺少的被严重遮蔽的例子。研究采用了人眼证认和计算机分类的方法，探讨了星系接近或并合与 AGN 活动之间可能存在的关系。

研究考虑了两个不同类型的 AGN 样本。一个由轻度到高度遮蔽的 X 射线选择 AGN 组成，另一个由 MIRI 观测的假定康普顿厚的中红外亮/X 射线暗的 AGN 样本。这两个样本都包含了相当一部分在所有红移下都具有扰动形态的宿主星系，并且随着红移和 AGN 测光光度的增加，有可能代表着并合的扰动形态的宿主星系越来越多。

在遮蔽程度不同的系统中，表现出强烈扰动的 AGN 比例也不同。遮蔽最严重的系统中，表现出强烈扰动的 AGN 比例最高，为  $95\% \pm 4\%$ ，其次为中度遮蔽和未遮蔽/轻度遮蔽的样本，比例分别为  $78\% \pm 6\%$  和  $63\% \pm 6.5\%$ 。这一发现表明，在被遮蔽的 AGN 中，并合现象十分常见，这可能意味着被遮蔽的 AGN 阶段可能标志着超大质量黑洞 (SMBH) 的显著增长阶段。这一结果与一些 AGN 供能机制的主要模型存在矛盾<sup>[72]</sup>。

### 3.1.4 并合星系与恒星形成的观测研究

恒星形成也是 JWST 在并合星系领域颇有优势的研究方向。Asada 等人 (2024)<sup>[67]</sup> 深入探究了星系相互作用与恒星形成之间的关系，尤其是在高红移范围内的低质量星系。通过利用 CANUCS JWST/NIRCam 对引力透镜星系团 MACS J0417.5-1154 后的星系进行成像，研究团队建立了一个包含 123 个样本的数据集。令人鼓舞的是，在这些样本中，有 60% 的星系的  $H\alpha$ -紫外线通量比显示出明显的偏差，这表明它们的恒星形成历史可能经历了爆发性的阶段。

值得关注的是，研究着重探讨了样本中相互作用星系与恒星形成之间的联系。结果显示，相互作用星系在样本中所占比例达到了 40%，这相对较高。更为引人注目的是，相互作用星系倾向于具有极低的  $H\alpha$ -紫外比率，这意味着星系间的相互作用可能会引发恒星形成的爆发性增长。此外，约 38% 的样本星系在 1 弧秒的范围内拥有一个红移相近的伴星系，这进一步强调了相互作用对于星系演化的影响。

综上所述，这些发现提示着星系间相互作用在驱动低质量、高红移星系中恒星形成爆发方面可能扮演着至关重要的角色。相互作用的频繁发生可能加速了恒星形成活动的增长，并导致恒星形成率的快速波动，这与低红移处的观测结果一致。因此，深入研究星系相互作用对于我们理解宇宙早期星系演化的机制和模式具有重要的意义，为我们提供了更加全面的视角来解释宇宙中的恒星形成历史。

## 3.2 JWST 的具体星系对研究

通过对大量星系的观测和分析，统计研究能够了解星系在宇宙中的分布、相互作用的频率以及可能的演化过程。这种全局性的研究提供了对星系群体行为的洞察，揭示了星系形成和演化的普遍规律。然而，要深入了解星系之间的相互作用以及其对星系演化的具体影响，个例研究也必不可少，研究人员需要深入探讨个别星系或星系对之间的相互作用过程。这些个例研究能够提供更具体、更详细的信息，帮助理解单个星系或星系对的演化轨迹，从而揭示星系演化的具体机制。利用 JWST 数据进行的具体个例星系对或相互作用星系的研究，能

论文来源	名称	天体类型	红移	已知成员数量	主要仪器
Evans 等人 (2022)	VV 114	星系	0.020	>2	MIRI
Wang 等人 (2022)	GLASS-Zgrad1	星系	3.06	2	NIRISS
Huang 等人 (2023)	EGS 11,14,22	星系	1.8~2.3	>=3,2,2	NIRCam
Perna 等人 (2023)	LBQS 0302-0019	类星体	3.3	>2	NIRSpec IFS
Marshall 等人 (2023)	DELS J0411-0907	类星体	6.82	未知	NIRSpec IFS
Marshall 等人 (2023)	VDES J0020-3653	类星体	6.86	未知	NIRSpec IFS
Ubler 等人 (2023)	GS_3073	类星体	5.55	2	NIRSpec IFS
Coogan 等人 (2023)	-	星系团	1.85	>=16	NIRCam

表 1 本文中涉及的部分基于 JWST 观测研究的相互作用星系个例分析

够帮助探讨它们所展现的独特特征和演化路径。

### 3.2.1 星系与并合的个例分析

JWST 对于星系的观测认证了许多以前认为的星系可能实际上是由并合系统构成, 包括 VV 114<sup>[87]</sup> 在内的红外亮星系等天体。JWST 能够帮助观测其中被遮蔽的红外亮区域, 从而提供星系并合的可靠证据。

在 Evans 等人 (2022)<sup>[87]</sup> 的研究中, JWST 的中红外成像仪所拍摄的亮红外星系 VV 114 提供了一个深入研究并合星系的绝佳机会。这个星系被观测到位于红移约 0.020 处, 由两个明显的部分组成: VV 114W 和 VV 114E。其中, VV 114W 在西侧富含着光学星团, 而 VV 114E 则在东侧拥有一个中红外发光核, 但在紫外和光学波长下被尘埃遮蔽。

研究对 VV 114E 进行了近红外成像技术的应用, 发现其星核主要分为两个明亮的核心, 位于东北和西南方向, 相距约 630 光年。这两个核心分别占据了 VV 114 15 m 光的 45%, 显示出明显的红外活动。东北核心曾被推测为可能具有活动星系核 (AGN) 的特征, 其红外颜色类似于星暴事件。而与之相比, VV 114E 西南部的核心也呈现出类似 AGN 的特征。在 VV 114 中, 还发现了大约 40 个恒星形成结构, 其红外亮度范围介于 0.02 至  $5 \times 10^{10} L_e$  之间。其中有 28% 的结构并没有在光学波段找到对应物体, 这可能表明这些结构处于高度遮蔽的环境中, 或者其形成阶段尚未完全成熟。此外, 研究还发现漫反射现象占据了中红外辐射的 40% 至 60%。而被紫外和光学光子随机激发的丝状多环芳烃 (PAH) 发射则占据了 VV 114 7.7 $\mu\text{m}$  发射的一半。这些发现突显了 JWST 在探测被遮蔽的多环芳烃发射方面的能力。

在 Wang 等人 (2022)<sup>[98]</sup> 对 GLASS-Zgrad1 的研究中, 也强调了星系相互作用的影响。从星系相互作用的角度出发关注 GLASS-Zgrad1 星系的特性, 可以发现一系列引人注目的现象。该星系位于红移  $z=3.06$ , 经 NIRISS 观测测得其测量特性。通过 Grizli 确定的红移表明, GLASS-Zgrad1 具有高度确定的红移。此外, 该星系的数据受邻近源污染较低的影响, 因此其光谱适合于测量发射线图。

GLASS-Zgrad1 与一个质量约为 100 倍的星系在投影中仅约 15kpc 的距离处呈现相互作用迹象, 且它们的红移相一致。这个巨大的伴星可能表现出螺旋结构, 这可能是由于与

GLASS-Zgrad1 的相互作用引起的。这种相互作用可能通过对气体的扭矩影响金属丰度梯度, 从而对 GLASS-Zgrad1 的化学结构产生影响。值得注意的是, 在 GLASS-Zgrad1 中观测到相对陡峭的正金属丰度梯度。这一现象有可能与其附近物体的引力相互作用有关, 导致远离中心的金属贫穷气体失去角动量并迁移到星系中心。先前的研究表明<sup>[99][100]</sup>, 近距离的引力相互作用在星系中正梯度形成中起着重要作用。此外, 金属丰度梯度的相关性对于星系反馈非常敏感。EAGLE 模拟预测显示了金属丰度梯度斜率的差异, 这表明星系的演化受到多种因素的影响。据 Tissera 等人 (2019)<sup>[101]</sup> 的研究, 这种差异可能与反馈机制有关。

通过 JWST/NIRISS 的观测, GLASS-Zgrad1 的空间分辨率达到了约 200 pc 尺度, 使得研究能够对其金属丰度径向梯度进行高分辨率的测量。这是 JWST 光谱学的第一个金属丰度图, 也是在  $z \approx 3$  时第一次测量的亚千秒分辨率的金属丰度梯度。据文献报道, 这一发现得到了广泛的测试验证, 并且金属的丰度随着星系中心半径的增加而增加。并且, GLASS-Zgrad1 的明显反转的金属丰度梯度可能源于与一个附近物体的近距离引力相互作用, 导致贫金属气体流入 GLASS-Zgrad1 的内部区域。这项工作标志着对宇宙午时段及以后的星系化学结构演变进行空间解析分析的新时代的开始。

Huang 等人 (2023)<sup>[90]</sup> 对一系列红移在 2 附近的极亮红外星系进行了深入观测, 从中发现了三个具有并合迹象的星系, 分别为 EGS 11, EGS 14 和 EGS 22。这些星系在 HST/WFC3 和 JWST/NIRCam 图像中呈现出复杂的结构和形态, 并且通过 Spitzer/IRS 光谱已确定它们的红移范围在 1.8 至 2.3 之间, 且所有系统的红外光度均高于  $10^{12.3} L_{\odot}$ 。

EGS 11 展现出的结构以及 EGS 14 与著名的触须星系 (Antennae Galaxies) 相似的形态都是并合过程中相互作用的明显结果。这些相互作用可能导致星系内部气体的压缩和恒星形成增加, 甚至可能促成星暴事件的发生。值得注意的是, EGS 11 与 EGS 14 的质量比以及它们的合并形态与高红移时期类似系统的特征相一致。这表明即使在宇宙的早期阶段, 星系间的相互作用与并合也可能会引发强烈的星系演化事件。EGS 22 系统的投影分离距离为 10.9 kpc, 略大于 EGS 11 和 EGS 14 的分离距离。虽然与其他并合系统相比距离较远, 但 EGS 22 显示出明显的并合迹象, 表明它可能处于并合的早期阶段。这些发现强调了并合星系相互作用在星系演化中的关键作用。另外, 研究结果还指出, 在高红移时期, 星系并合更可能发生在更高光度的系统中。此外, 即使是两个富含气体的星系的次并合也可能在高红移时期触发极端 ULIRG 的产生。

### 3.2.2 类星体与并合的个例分析

目前的宇宙学模型认为, 相当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<sup>[10][13]</sup>。例如, 距离接近的类星体对的发现可能成为这一理论的观测证据<sup>[88]</sup>。类星体作为极其明亮的 AGN, 其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红移大于 3 的类星体的观测显示, 伴星的存在是很普遍的。例如, ALMA 观测到了高红移类星体附近的亚毫米星系和  $Ly\alpha$  发射体<sup>[89][91][92]</sup>, 而 MUSE 也发现了高红移类星体的  $Ly\alpha$  发射体<sup>[93]</sup>。实际上, 迄今为止, 几乎所有由 JWST/NIRSpec IFS 和 JWST/NIRCam WFSS 进行的观测 (包括 LBQS 0302-0019<sup>[88]</sup>, DELS J0411-0907<sup>[95]</sup>, VDES J0020-3653<sup>[95]</sup>, GS\_3073<sup>[96]</sup> 等), 都显示了高亮度高红移类星体周围新发现的伴星。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的假设。

例如, LBQS 0302–0019 是一个红移约为 3.3 的蓝色类星体, 其宿主具有强大的外流, 并位于一个复杂的环境中, 包括一个被遮挡的 AGN 候选体和多个伴星, 所有这些都投影在距离不到 30kpc。Perna 等人 (2023)<sup>[88]</sup> 利用了 JWST NIRSpec 积分场光谱仪 (IFS) 观测来表征这个复杂的系统, 这些数据是作为 NIRSpec IFS GTO 计划 GA-NIFS 的一部分获得的; 这些数据涵盖了 QSO 的静止参考光学发射线, 具有  $\sim 0.1''$  的空间分辨率和  $0.05''$  的采样, 覆盖了  $\sim 3'' \times 3''$  ( $23 \times 23 \text{kpc}^2$ ) 的天空区域。研究清楚地检测到了距离 LBQS 0302–0019 不远处的八个伴星。对于其中两个, 检测到一个可能追踪旋转气体的正常速度场, 并推断出约为  $10^{10} M_{\odot}$  的个体动力质量。另一个伴星显示出与类星体宿主的引力相互作用的证据。光学线比证实了主类星体约 20 kpc 处存在第二个被遮挡的 AGN; 双 AGN 主导了整个 NIRSpec 视场的气体电离状态。研究结果支持了一种图景, 即并合可能会触发双 AGN, 并且可能是早期超大质量黑洞快速增长的重要推动因素。

尽管目前的数据难以确定八个伴星之间以及与类星体宿主之间的详细物理连接, 但值得注意的是, LBQS 0302–0019 周围的星系组成了一个引人注目的星系族群。这些星系位于距离类星体宿主约 20kpc 的投影距离, 且它们的速度与 QSO 宿主系统相差不超过约  $\pm 250 \text{kms}^{-1}$  的范围。根据预测计算, 在与伴星相关的狭窄红移范围 ( $z=3.286 \sim 3.290$ ) 内, 研究预期的星系数量约为  $5 \times 10^{-4}$  个。因此, Perna 等人 (2023)<sup>[88]</sup> 认为, LBQS 0302–0019 处于一个空间密度比一般场高几个数量级的密集环境中。

值得一提的是, NIRSpec IFS 凭借其高灵敏度和角分辨率 (在  $z \sim 3$  时, 在  $25 \times 25 \text{kpc}^2$  的视场中为  $\sim 0.8 \text{kpc}$ ), 能够清楚地揭示连接这些伴星的千秒差距尺度的潮汐桥和尾巴, 从而使得在这么高的红移处研究星系相互作用成为可能。

### 3.2.3 星系团与星系群个例分析

星系团和星系群也对并合星系研究至关重要。这些密集结构中的引力相互作用和物质交换塑造了星系的性质和行为。相互作用可导致气体压缩和恒星形成激增, 尤其在星系团和星系群中心区域更为显著。此外, 它还会引起星系形态的变化和内部结构的重塑, 包括形态的扭曲、撕裂和并合, 以及恒星族或星团的形成。物质交换还影响星系的恒星成分和化学物质循环, 可能导致新恒星形成和老恒星的损失, 进而影响星系的外观和化学元素的丰度。这些发现揭示了星系相互作用对于星系演化和宇宙结构形成的重要性。

除了星系本身之外, 星系团和星系群最重要和最独特的观测特征之一就是弥散的晕内光 (IHL)。IHL 是来自恒星物质的持续辐射, 填充了这些致密环境中星系之间的空间, 似乎与单个星系没有直接联系。IHL 的存在是星系团通过 (依赖于环境的) 星系吸积和相互作用进行分级组合的最显著特征之一<sup>[102][106][105]</sup>, 这种光是由相当一部分恒星组成的, 占地方星系团中恒星总数的 5-20%<sup>[108][109][110]</sup>。

然而, IHL 形成于星系团的哪个阶段, 以及产生 IHL 的过程都是非常不确定的。IHL 的一个可能来源是在星系并合过程中从星系中抛射出来的恒星物质。这可能发生在星系群中星系间相互作用的过程中, 导致潮汐流, 然后在星系群本身增生时与 IHL 混合, 或者来自增生

星系与星系团成员或星系团势能本身的直接相互作用<sup>[111][112][113][114][104]</sup>。此外,星系在星团核心的相互作用可能会导致恒星物质被抛射到弥漫的周围环境中,从而形成最亮星系团(或星系群)星系<sup>[115]</sup>。此外,如果冷气体也与恒星物质一起从星系中剥离出来,那么星团内介质中可能会发生原处的恒星形成,并影响 IHL<sup>[116][117]</sup>。

从观测角度看, IHL 在低红移星系团中无处不在,在红移范围  $0 < z < 0.5$  时, IHL 的特性(如颜色)演化相对较小<sup>[7]</sup>。据观测, IHL 的颜色表明恒星物质是经过再进化的,因此是在早期形成的,这与星团中宁静红星系的恒星特性相似。IHL 也被证明是追踪星系团中暗物质光环和质量的平滑轮廓的绝佳工具<sup>[109]</sup>, 这表明 IHL 本身也是在星系和光环不断增生的漫长过程中形成的。

另一方面,在中高红移时,情况就不那么明朗了,这使得预测 IHL 在形成初期的起源变得极具挑战性。不过,已经有研究尝试对星团复杂的吸积历史进行建模,试图做到这一点。Rudick 等人(2011)<sup>[120]</sup>利用无碰撞模拟对上述各种过程进行建模,并预测 IHL 所含的恒星质量将随着红移的增加而迅速减少,超过  $z=1$  时与本宇宙的相关性将大大降低,而在  $z > 2$  时则完全可以忽略不计。此外,Contini 等人(2011)<sup>[103]</sup>利用星系形成的半分析模型,结合从星系群和星系团的 N-体模拟中提取的并合树,得出了类似的结论,即 IHL 在  $z < 1$  时形成。Contini 等人(2018)<sup>[107]</sup>建立了 IHL 与最亮星团星系质量比与红移函数关系的模型,并预测如果并合星系和恒星剥离都对 IHL 有贡献,那么在  $z=1-2$  时 IHL 与最亮星团星系质量比将在 2-4% 左右。此外,Behroozi 等人(2019)<sup>[121]</sup>的 UNIVERSEMACHINE 预测,在  $z=0$  和  $z=2$  之间, IHL 质量占恒星总质量的比例随着红移的变化而变化。

在  $z > 1$  时,相关研究对这些过程的观测约束非常少,尤其是在比 HST 所能观测到的波长更长的波长上。不过,Joo 和 Jee 等人(2023)<sup>[123]</sup>根据深红外连续波数据研究了十个  $z \sim 1.8$  星团中的 IHL,发现平均 IHL 分数为 17%。在这些较高红移下探测到 IHL,并进一步准确描述恒星的特性(如年龄),对于我们了解 IHL 的形成年代和机制都是至关重要的。

Coogan 等人(2023)<sup>[124]</sup>利用了 CEERS (JWST/NIRCam) 观测数据,对位于红移为 1.85 的一个星系群展开了深入研究。这个星系群在 EGS 场中的星系密度超过 5.3,并且通过光谱学方法确定了 16 个星系成员中的 6 个,它们的恒星质量约为  $\log_{10}(M/M_{\odot})=8.5$ 。

NIRCam 图像揭示了一个仍在形成中的中心最亮群星系(BGG)的明显迹象,这个星系是由几个不同的星系并合而成。通过使用多个 NIRCam 滤光片和 HST 存档数据,研究人员得出了多波段 SED 以及 BGG 组成部分和所有成员星系的相应物理特性。BGG 成分在 SFR、形态和颜色方面呈现出巨大差异,其空间范围横跨约  $3.6''$ (相当于 30kpc)。BGG 占星系群中恒星总质量的 69%,其中一个质量较大的成员占据 BGG 总质量的 76%,其 SFR 超过  $1810M_{\odot}/\text{年}$ 。因此,我们对这个红移下的大质量星系形成有了深入的了解:在这个红移下,红外明亮的核心被更蓝、更弥漫的成分所包围。

另外,研究还观察到星系群中其他成员的性质,这些成员可能受到了星系相互作用或并合的影响。除了三个星系(其中两个在 BGG 中)之外,该星系群中的所有星系都位于恒星形成主序上或低于主序,这表明星系正处于熄灭过程中,它们在 UVJ 图上的位置也证实了这一点。这些星系显示了一系列的 sersic 指标,其中高值星系居多,这与星系群的演化程度

较高是一致的。这些发现强调了星系群环境对星系演化的重要性,特别是在恒星形成和星系停止形成恒星的方面。

## 4 总结与展望

在宇宙中,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。对于星系形态、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经历了至少一次关键的并合事件。这一发现深刻地影响了我们对星系乃至宇宙整体演化的理解。所谓的并合事件,简而言之,是两个或多个星系在引力作用下相互靠近、碰撞并最终并合成一个新的星系的过程。在宇宙中,这种现象相当普遍,特别是在大质量星系中尤为常见。通过哈勃空间望远镜对存在于宇宙 52 亿年至 112 亿年之间的大质量星系进行观测,研究人员发现了大量的并合证据。这些证据不仅体现在星系的形态和结构变化上,更反映在星系内部的恒星形成、星暴事件等多个方面。并合事件与星系内的星暴事件之间存在一定的关联性。星暴现象指的是星系内大量恒星在短时间内迅速形成,是星系演化过程中的一个关键节点。而并合事件作为能够从根本上改变星系结构和演化方式的重要因素,其与星暴事件之间的关联性显得尤为重要。天文学家认为,并合事件可能通过引发星系内部的气体压缩、增强星系内部的恒星形成等方式,间接或直接地促进了星暴事件的发生。在这一过程中,JWST 的观测数据为我们提供了前所未有的视角和工具,使我们能够更深入地探索并合事件对星系演化的影响,并为我们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对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,包括其中涉及的多样的统计学调查,以及对单个样本的深入研究,既包含理论模拟又结合了实际观测数据。基于 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 的红外观测能力提供了观测发射线星系的独特视角,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 在探测高度遮蔽发射的能力,并在研究中支持了星系并合作为超大质量黑洞增长关键因素的假设,以及在包括星系团和星系群在内的密集环境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,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很大进展,而 MIRI 和 NIRISS 在星系领域的收获也在不断增加,期待它们带来更多成果。JWST 可以研究并合星系中不同成分的特征,例如通过观测 Ly $\alpha$  发射线,帮助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。这种统计性分析可以帮助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] Blumenthal, G. R., Faber, S. M., Primack, J. R., et al. 1984, *Nature*, 311, 517. doi:10.1038/311517a0
- [2] Dayal, P. & Ferrara, A. 2018, *Phys. Rep.*, 780, 1.
- [3] Pearson, W. J., Wang, L., Trayford, J. W., et al. 2019, *A&A*, 626, A49. doi:10.1051/0004-6361/201935355
- [4] Bottrell, C., Hani, M. H., Teimoorinia, H., et al. 2019, *MNRAS*, 490, 5390. doi:10.1093/mnras/stz2934
- [5] Sreejith, S., Pereverzyev, S., Kelvin, L. S., et al. 2018, *MNRAS*, 474, 5232. doi:10.1093/mnras/stx2976
- [6] Snyder, G. F., Rodriguez-Gomez, V., Lotz, J. M., et al. 2019, *MNRAS*, 486, 3702. doi:10.1093/mnras/stz1059
- [7] Ferreira, L., Conselice, C. J., Kuchner, U., et al. 2022, *ApJ*, 931, 34. doi:10.3847/1538-4357/ac66ea
- [8] Ferreira, L., Conselice, C. J., Duncan, K., et al. 2020, *ApJ*, 895, 115. doi:10.3847/1538-4357/ab8f9b
- [9] White, S. D. M. & Rees, M. J. 1978, *MNRAS*, 183, 341. doi:10.1093/mnras/183.3.341
- [10] Colpi, M. 2014, *Space Sci. Rev.*, 183, 189. doi:10.1007/s11214-014-0067-1
- [11] Cole, S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., et al. 2000, *MNRAS*, 319, 168. doi:10.1046/j.1365-8711.2000.03879.x
- [12] Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., et al. 2008, *ApJS*, 175, 356. doi:10.1086/524362
- [13] Volonteri, M., Habouzit, M., & Colpi, M. 2021, *Nature Reviews Physics*, 3, 732. doi:10.1038/s42254-021-00364-9
- [14] Knapen, J. H., Cisternas, M., & Querejeta, M. 2015, *MNRAS*, 454, 1742. doi:10.1093/mnras/stv2135
- [15] Ma, X., Hopkins, P. F., Faucher-Giguère, C.-A., et al. 2016, *MNRAS*, 456, 2140. doi:10.1093/mnras/stv2659
- [16] Yeom, B.-S., Rey, S.-C., Kim, Y., et al. 2017, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 34, 183. doi:10.5140/JASS.2017.34.3.183
- [17] Shah, E. A., Kartaltepe, J. S., Magagnoli, C. T., et al. 2020, *ApJ*, 904, 107. doi:10.3847/1538-4357/abf59
- [18] Begelman, M. C., Blandford, R. D., & Rees, M. J. 1984, *Reviews of Modern Physics*, 56, 255. doi:10.1103/RevModPhys.56.255
- [19] Peterson, B. M., Wanders, I., Bertram, R., et al. 1998, *ApJ*, 501, 82. doi:10.1086/305813
- [20] Treister, E., Schawinski, K., Urry, C. M., et al. 2012, *ApJ*, 758, L39. doi:10.1088/2041-8205/758/2/L39
- [21] Menci, N., Gatti, M., Fiore, F., et al. 2014, *A&A*, 569, A37. doi:10.1051/0004-6361/201424217
- [22] Guolo-Pereira, M., Ruschel-Dutra, D., Storchi-Bergmann, T., et al. 2021, *MNRAS*, 502, 3618. doi:10.1093/mnras/stab245
- [23] Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., et al. 2008, *ApJS*, 175, 356. doi:10.1086/524362
- [24] Curtis-Lake, E., Carniani, S., Cameron, A., et al. 2023, *Nature Astronomy*, 7, 622. doi:10.1038/s41550-023-01918-w
- [25] Di Matteo, T., Colberg, J., Springel, V., et al. 2008, *ApJ*, 676, 33. doi:10.1086/524921
- [26] Sanders, R. L., Shapley, A. E., Jones, T., et al. 2021, *ApJ*, 914, 19. doi:10.3847/1538-4357/abf4c1
- [27] Urrutia, T., Lacy, M., & Becker, R. H. 2008, *ApJ*, 674, 80. doi:10.1086/523959
- [28] Chandar, R., Caputo, M., Linden, S., et al. 2023, *ApJ*, 943, 142. doi:10.3847/1538-4357/acac96
- [29] Koss, M., Mushotzky, R., Veilleux, S., et al. 2010, *ApJ*, 716, L125. doi:10.1088/2041-8205/716/2/L125
- [30] Koss, M., Mushotzky, R., Treister, E., et al. 2012, *ApJ*, 746, L22. doi:10.1088/2041-8205/746/2/L22
- [31] Appleton, P. N., Guillard, P., Emonts, B., et al. 2023, *ApJ*, 951, 104. doi:10.3847/1538-4357/accc2a
- [32] Bessiere, P. S., Tadhunter, C. N., Ramos Almeida, C., et al. 2012, *MNRAS*, 426, 276. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.21701.x
- [33] Cotini, S., Ripamonti, E., Caccianiga, A., et al. 2013, *MNRAS*, 431, 2661. doi:10.1093/mnras/stt358
- [34] Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., et al. 2009, *ApJ*, 691, 1424. doi:10.1088/0004-637X/691/2/1424
- [35] Whitler, L., Stark, D. P., Endsley, R., et al. 2024, *MNRAS*, 529, 855. doi:10.1093/mnras/stae516
- [36] Goulding, A. D., Greene, J. E., Bezanson, R., et al. 2018, *PASJ*, 70, S37. doi:10.1093/pasj/psx135
- [37] Woods, D. F. & Geller, M. J. 2007, *AJ*, 134, 527. doi:10.1086/519381
- [38] Silverman, J. D., Kampczyk, P., Jahnke, K., et al. 2011, *ApJ*, 743, 2. doi:10.1088/0004-637X/743/1/2
- [39] Lackner, C. N., Silverman, J. D., Salvato, M., et al. 2014, *AJ*, 148, 137. doi:10.1088/0004-6256/148/6/137
- [40] Weston, M. E., McIntosh, D. H., Brodwin, M., et al. 2017, *MNRAS*, 464, 3882. doi:10.1093/mnras/stw2620
- [41] Gao, F., Wang, L., Pearson, W. J., et al. 2020, *A&A*, 637, A94. doi:10.1051/0004-6361/201937178
- [42] Coldwell, G. V. & Lambas, D. G. 2006, *MNRAS*, 371, 786. doi:10.1111/j.1365-2966.2006.10712.x
- [43] Gabor, J. M., Impey, C. D., Jahnke, K., et al. 2009, *ApJ*, 691, 705. doi:10.1088/0004-637X/691/1/705

- [44] Cisternas, M., Jahnke, K., Inskip, K. J., et al. 2011, *ApJ*, 726, 57. doi:10.1088/0004-637X/726/2/57
- [45] Villforth, C., Hamann, F., Rosario, D. J., et al. 2014, *MNRAS*, 439, 3342. doi:10.1093/mnras/stu173
- [46] Mechtley, M., Jahnke, K., Windhorst, R. A., et al. 2016, *ApJ*, 830, 156. doi:10.3847/0004-637X/830/2/156
- [47] Marian, V., Jahnke, K., Mechtley, M., et al. 2019, *ApJ*, 882, 141. doi:10.3847/1538-4357/ab385b
- [48] Jin, G., Dai, Y. S., Pan, H.-A., et al. 2021, *ApJ*, 923, 6. doi:10.3847/1538-4357/ac2901
- [49] Hickox, R. C. & Alexander, D. M. 2018, *ARA&A*, 56, 625. doi:10.1146/annurev-astro-081817-051803
- [50] Lanz, L., Zezas, A., Brassington, N., et al. 2013, *ApJ*, 768, 90. doi:10.1088/0004-637X/768/1/90
- [51] Patton, D. R., Torrey, P., Ellison, S. L., et al. 2013, *MNRAS*, 433, L59. doi:10.1093/mnrasl/slt058
- [52] Lambas, D. G., Tissera, P. B., Alonso, M. S., et al. 2003, *MNRAS*, 346, 1189. doi:10.1111/j.1365-2966.2003.07179.x
- [53] Scudder, J. M., Ellison, S. L., Torrey, P., et al. 2012, *MNRAS*, 426, 549. doi:10.1111/j.1365-2966.2012.21749.x
- [54] Espada, D., Martin, S., Verley, S., et al. 2018, *ApJ*, 866, 77. doi:10.3847/1538-4357/aae07e
- [55] Pan, H.-A., Lin, L., Hsieh, B.-C., et al. 2018, *ApJ*, 868, 132. doi:10.3847/1538-4357/aaeb92
- [56] Barrera-Ballesteros, J. K., Sánchez, S. F., García-Lorenzo, B., et al. 2015, *A&A*, 579, A45. doi:10.1051/0004-6361/201425397
- [57] Brassington, N. J., Zezas, A., Ashby, M. L. N., et al. 2015, *ApJS*, 218, 6. doi:10.1088/0067-0049/218/1/6
- [58] Kaviraj, S., Crockett, R. M., Silk, J., et al. 2012, *The Spectral Energy Distribution of Galaxies - SED 2011*, 284, 460. doi:10.1017/S1743921312009623
- [59] Lofthouse, E. K., Kaviraj, S., Conselice, C. J., et al. 2017, *MNRAS*, 465, 2895. doi:10.1093/mnras/stw2895
- [60] Lotz, J. M., Primack, J., & Madau, P. 2004, *AJ*, 128, 163. doi:10.1086/421849
- [61] Lotz, J. M., Davis, M., Faber, S. M., et al. 2008, *ApJ*, 672, 177. doi:10.1086/523659
- [62] Rose, C., Kartaltepe, J. S., Snyder, G. F., et al. 2023, *ApJ*, 942, 54. doi:10.3847/1538-4357/ac9f10
- [63] Bonaventura, N., Lyu, J., Rieke, G. H., et al. 2024, arXiv:2401.07863. doi:10.48550/arXiv.2401.07863
- [64] McLure, R. J. & Dunlop, J. S. 2004, *MNRAS*, 352, 1390. doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08034.x
- [65] Matthee, J., Mackenzie, R., Simcoe, R. A., et al. 2023, *ApJ*, 950, 67. doi:10.3847/1538-4357/acc846
- [66] Laishram, R., Kodama, T., Morishita, T., et al. 2024, arXiv:2403.06369. doi:10.48550/arXiv.2403.06369
- [67] Asada, Y., Sawicki, M., Abraham, R., et al. 2024, *MNRAS*, 527, 11372. doi:10.1093/mnras/stad3902
- [68] Gupta, A., Trott, C. M., Jaiswar, R., et al. 2024, arXiv:2403.13285. doi:10.48550/arXiv.2403.13285
- [69] Kim, M., Ho, L. C., Peng, C. Y., et al. 2017, *ApJS*, 232, 21. doi:10.3847/1538-4365/aa8a75
- [70] Urbano-Mayorgas, J. J., Villar Martín, M., Buitrago, F., et al. 2019, *MNRAS*, 483, 1829. doi:10.1093/mnras/sty2910
- [71] Zakamska, N. L., Sun, A.-L., Strauss, M. A., et al. 2019, *MNRAS*, 489, 497. doi:10.1093/mnras/stz2071
- [72] Hopkins, P. F., Kereš, D., Oñorbe, J., et al. 2014, *MNRAS*, 445, 581. doi:10.1093/mnras/stu1738
- [73] Moreno, J., Torrey, P., Ellison, S. L., et al. 2019, *MNRAS*, 485, 1320. doi:10.1093/mnras/stz417
- [74] Sparre, M., Whittingham, J., Damle, M., et al. 2022, *MNRAS*, 509, 2720. doi:10.1093/mnras/stab3171
- [75] Cohn, J. H., Leja, J., Tran, K.-V. H., et al. 2018, *ApJ*, 869, 141. doi:10.3847/1538-4357/aaed3d
- [76] Endsley, R., Stark, D. P., Whitler, L., et al. 2023, *MNRAS*, 524, 2312. doi:10.1093/mnras/stad1919
- [77] Straatman, C. M. S., Spitler, L. R., Quadri, R. F., et al. 2016, *ApJ*, 830, 51. doi:10.3847/0004-637X/830/1/51
- [78] Forrest, B., Tran, K.-V. H., Broussard, A., et al. 2018, *ApJ*, 863, 131. doi:10.3847/1538-4357/aad232
- [79] Patton, D. R., Carlberg, R. G., Marzke, R. O., et al. 2000, *ApJ*, 536, 153. doi:10.1086/308907
- [80] Dai, Y. S., Malkan, M. M., Teplitz, H. I., et al. 2021, *ApJ*, 923, 156. doi:10.3847/1538-4357/ac2f96
- [81] Mantha, K. B., McIntosh, D. H., Brennan, R., et al. 2018, *MNRAS*, 475, 1549. doi:10.1093/mnras/stx3260
- [82] López-Sanjuan, C., Cenarro, A. J., Varela, J., et al. 2015, *A&A*, 576, A53. doi:10.1051/0004-6361/201424913
- [83] Duncan, K., Conselice, C. J., Mundy, C., et al. 2019, *ApJ*, 876, 110. doi:10.3847/1538-4357/ab148a
- [84] Tang, M., Stark, D. P., Chen, Z., et al. 2023, *MNRAS*, 526, 1657. doi:10.1093/mnras/stad2763
- [85] Rinaldi, P., Caputi, K. I., Costantin, L., et al. 2023, *ApJ*, 952, 143. doi:10.3847/1538-4357/acdc27
- [86] Cameron, A. J., Saxena, A., Bunker, A. J., et al. 2023, *A&A*, 677, A115. doi:10.1051/0004-6361/202346107
- [87] Evans, A. S., Frayer, D. T., Charmandaris, V., et al. 2022, *ApJ*, 940, L8. doi:10.3847/2041-8213/ac9971
- [88] Perna, M., Arribas, S., Marshall, M., et al. 2023, *A&A*, 679, A89. doi:10.1051/0004-6361/202346649
- [89] Trakhtenbrot, B., Lira, P., Netzer, H., et al. 2017, *ApJ*, 836, 8. doi:10.3847/1538-4357/836/1/8

- [90] Huang, J.-S., Li, Z.-J., Cheng, C., et al. 2023, *ApJ*, 949, 83. doi:10.3847/1538-4357/acc9c3
- [91] Venemans, B. P., Walter, F., Neeleman, M., et al. 2020, *ApJ*, 904, 130. doi:10.3847/1538-4357/abc563
- [92] García-Vergara, C., Rybak, M., Hodge, J., et al. 2022, *ApJ*, 927, 65. doi:10.3847/1538-4357/ac469d
- [93] Fossati, M., Fumagalli, M., Lofthouse, E. K., et al. 2021, *MNRAS*, 503, 3044. doi:10.1093/mnras/stab660
- [94] Wylezalek, D., Vayner, A., Rupke, D. S. N., et al. 2022, *ApJ*, 940, L7. doi:10.3847/2041-8213/ac98c3
- [95] Marshall, M. A., Perna, M., Willott, C. J., et al. 2023, *A&A*, 678, A191. doi:10.1051/0004-6361/202346113
- [96] Übler, H., Maiolino, R., Curtis-Lake, E., et al. 2023, *A&A*, 677, A145. doi:10.1051/0004-6361/202346137
- [97] Kashino, D., Lilly, S. J., Renzini, A., et al. 2022, *ApJ*, 925, 82. doi:10.3847/1538-4357/ac399e
- [98] Wang, X., Jones, T., Vulcani, B., et al. 2022, *ApJ*, 938, L16. doi:10.3847/2041-8213/ac959e
- [99] Kewley, L. J., Geller, M. J., & Barton, E. J. 2006, *AJ*, 131, 2004. doi:10.1086/500295
- [100] Torrey, P., Cox, T. J., Kewley, L., et al. 2012, *ApJ*, 746, 108. doi:10.1088/0004-637X/746/1/108
- [101] Tissera, P. B., Rosas-Guevara, Y., Bower, R. G., et al. 2019, *MNRAS*, 482, 2208. doi:10.1093/mnras/sty2817
- [102] Mihos, J. C. 2016, *The General Assembly of Galaxy Halos: Structure, Origin and Evolution*, 317, 27. doi:10.1017/S1743921315006857
- [103] Contini, M. & Goldman, I. 2011, *MNRAS*, 411, 792. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.17719.x
- [104] Contini, E., De Lucia, G., Villalobos, Á., et al. 2014, *MNRAS*, 437, 3787. doi:10.1093/mnras/stt2174
- [105] Contini, E. & Gu, Q. 2021, *ApJ*, 915, 106. doi:10.3847/1538-4357/ac01e6
- [106] Contini, E. & Gu, Q. 2020, *ApJ*, 901, 128. doi:10.3847/1538-4357/abb1aa
- [107] Contini, E., Yi, S. K., & Kang, X. 2018, *MNRAS*, 479, 932. doi:10.1093/mnras/sty1518
- [108] Krick, J. E. & Bernstein, R. A. 2007, *AJ*, 134, 466. doi:10.1086/518787
- [109] Montes, M. & Trujillo, I. 2018, *MNRAS*, 474, 917. doi:10.1093/mnras/stx2847
- [110] Martínez-Lombilla, C., Brough, S., Montes, M., et al. 2023, *MNRAS*, 518, 1195. doi:10.1093/mnras/stac3119
- [111] Rudick, C. S., Mihos, J. C., & McBride, C. 2006, *ApJ*, 648, 936. doi:10.1086/506176
- [112] Rudick, C. S., Mihos, J. C., Frey, L. H., et al. 2009, *ApJ*, 699, 1518. doi:10.1088/0004-637X/699/2/1518
- [113] Conroy, C., Wechsler, R. H., & Kravtsov, A. V. 2007, *ApJ*, 668, 826. doi:10.1086/521425
- [114] Purcell, C. W., Bullock, J. S., & Zentner, A. R. 2007, *ApJ*, 666, 20. doi:10.1086/519787
- [115] Murante, G., Giovalli, M., Gerhard, O., et al. 2007, *MNRAS*, 377, 2. doi:10.1111/j.1365-2966.2007.11568.x
- [116] Puchwein, E., Springel, V., Sijacki, D., et al. 2010, *MNRAS*, 406, 936. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.16786.x
- [117] Webb, T. M. A., Muzzin, A., Noble, A., et al. 2015, *ApJ*, 814, 96. doi:10.1088/0004-637X/814/2/96
- [118] Giallongo, E., Menci, N., Grazian, A., et al. 2014, *ApJ*, 781, 24. doi:10.1088/0004-637X/781/1/24
- [119] Marconi, A. & Hunt, L. K. 2003, *ApJ*, 589, L21. doi:10.1086/375804
- [120] Rudick, C. S., Mihos, J. C., & McBride, C. K. 2011, *ApJ*, 732, 48. doi:10.1088/0004-637X/732/1/48
- [121] Behroozi, P., Wechsler, R. H., Hearin, A. P., et al. 2019, *MNRAS*, 488, 3143. doi:10.1093/mnras/stz1182
- [122] Kormendy, J. & Ho, L. C. 2013, *ARA&A*, 51, 511. doi:10.1146/annurev-astro-082708-101811
- [123] Joo, H. & Jee, M. J. 2023, *Nature*, 613, 37. doi:10.1038/s41586-022-05396-4
- [124] Coogan, R. T., Daddi, E., Le Bail, A., et al. 2023, *A&A*, 677, A3. doi:10.1051/0004-6361/202346172
- [125] Ventou, E., Contini, T., Bouché, N., et al. 2017, *A&A*, 608, A9. doi:10.1051/0004-6361/201731586
- [126] Man, A. W. S., Zirm, A. W., & Toft, S. 2016, *ApJ*, 830, 89. doi:10.3847/0004-637X/830/2/89
- [127] López-Sanjuan, C., Cenarro, A. J., Hernández-Monteagudo, C., et al. 2014, *A&A*, 564, A127. doi:10.1051/0004-6361/201322474
- [128] Williams, R. J., Quadri, R. F., & Franx, M. 2011, *ApJ*, 738, L25. doi:10.1088/2041-8205/738/2/L25
- [129] Duncan, K., Conselice, C. J., Mundy, C., et al. 2019, *ApJ*, 876, 110. doi:10.3847/1538-4357/ab148a

**Abstract:**

The launch of JWST has brought a wealth of galaxy observation data to astronomers, particularly crucial in studies of galaxy mergers. Its infrared observation capabilities offer astronomers a unique perspective, 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 and actual observations. JWST also provides a unique perspective in observing emission-line galaxies, 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 challenges in understanding galaxy evolution at a deeper level.

**Key words:** Galaxies; Mergers; Space telescope; AGN; Star formation