



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

相互作用星系中的活动星系核

作者姓名: 金高翔

指导教师: 戴昱 研究员

中国科学院国家天文台

学位类别: 理学硕士

学科专业: 天体物理

培养单位: 中国科学院国家天文台

2022 年 6 月

Active Galactic Nuclei in the Interacting Galaxies

**A thesis submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Natural Science
in Astrophysics
By
Gaoxiang Jin
Supervisor: Professor Yu Dai**

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

June, 2022

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：金高翔

日期：2022年5月31日

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延期后适用本声明。

作者签名：金高翔

日期：2022年5月31日

导师签名：张晓

日期：2022年5月31日

摘要

关于活动星系核（AGN）在星系并合中的作用，以及其如何影响宿主星系的恒星形成，现有的研究仍然存在争议。我们基于视向速度差、投影距离、以及形态从 MaNGA 巡天中选出了 1156 个处于星系对和并合系统（后文统称并合系统）中的星系，并进一步把它们分为四种并合阶段。我们利用发射线判定在并合星系中选出了 61 个 AGN (5.5%)。相比孤立星系 (5.0%)，各个并合阶段中 AGN 的比例没有明显区别。并合星系，特别是并合早期，样本中年老星系更多，这与并合星系所处的环境密度更大有关。并合 AGN 和孤立 AGN 宿主星系的总恒星质量、恒星形成率、以及中心 [O III] 面亮度的分布没有明显区别。并合 AGN 的比恒星形成率由内向外增高， $D_{\mathrm{n}4000}$ 由内向外降低，和孤立 AGN 的径向分布一致。这和我们在恒星形成星系中的发现完全不同。在并合系统中，恒星形成星系的比恒星形成率有着明显提高。我们又使用五百米口径球面射电望远镜（FAST）观测了样本中 6 个并合系统的中性氢 21 厘米谱线。在这六个系统中，我们发现了一个贫 H I、高恒星形成效率的系统 (8254-12701)，以及一个出现强 H I 吸收特征的 AGN (9507-12704)。这些并合系统的 H I 谱线表现出不同于一般孤立星系的特征。IFU 观测的 $\mathrm{H}\alpha$ 数据可以示踪电离气体，单镜射电望远镜观测到的 H I 谱线可以示踪原子气体。我们在四个系统中比较了用 MaNGA 数据重构得到的 $\mathrm{H}\alpha$ “谱线”和中性氢谱线，并一一描述了它们的特征、差异、以及可能的出现原因。这是对结合 MaNGA 的空间分辨 $\mathrm{H}\alpha$ 谱线和 FAST 的中性氢谱线分析不同气体成分动力学的首次尝试。我们的发现支持以下物理图像：AGN 可能处于由内向外熄灭恒星形成的阶段；并合对 AGN 的影响不如对恒星形成星系的影响明显；并合过程中，电离气体和原子气体的动力学可能有着明显的差异。

关键词：活动星系核，星系并合，星系演化，恒星形成，星际介质

Abstract

The role of active galactic nuclei (AGNs) during galaxy interactions and how they influence the star formation in the system are still under debate. We use a sample of 1156 galaxies in galaxy pairs or mergers (hereafter ‘mergers’) from the Mapping Nearby Galaxies at APO survey (MaNGA). This merger sample is selected by the velocity offset, projected separation, and morphology, and is further classified into four cases along the merger sequence based on morphological signatures. We then identify a total of 61 (5.5%) AGNs in mergers based on the emission-line diagnostics. No evolution of the AGN fraction is found, either along the merger sequence or compared to isolated galaxies (5.0%). We observe a higher fraction of passive galaxies in galaxy mergers, especially in the pre-merging cases, and associate the higher fraction to their environmental dependence. The isolated AGN and AGN in mergers show similar distributions in their global stellar mass, star formation rate (SFR), and central [O III] surface brightness. AGNs in mergers show radial profiles of increasing specific SFR and declining Dn4000 from center to outskirts, and no significant difference from the isolated AGNs. This is clearly different from star-forming galaxies (SFGs) in our merger sample, which show enhanced central star formation. We used the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope to observe the atomic gas 21-cm line in a subsample of six mergers. Among the subsample, we find an H I-poor and high star formation efficiency system (8254-12701), and an AGN with strong H I absorption features (9507-12704). The H I line profiles are distinguished in our merger subsample. We compare the re-constructed MaNGA-H α line profiles with the H I line profiles for four merger systems, and describe their features, difference, and possible reasons. This is the first try to combine the H α from IFU observation, which can trace the ionized gas, with the H I line from single-dish radio telescope, which can trace the atomic gas, to investigate different gas kinematics. Our findings suggest the following scenario: AGNs likely follow an inside-out quenching. The merger impact on the star formation in AGNs is less prominent than in SFGs. Ionized gas and atomic gas possibly have distinguished kinematics during the

merger.

Keywords: active galactic nucleus, galaxy merger, galaxy evolution, star formation, interstellar medium

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 本文使用的模型参数	5
第 2 章 光学积分视场单元研究	7
2.1 数据与样本选择	7
2.1.1 MaNGA 简介	7
2.1.2 星系对与并合星系选源	7
2.1.3 并合阶段分类	8
2.1.4 对照样本	9
2.2 AGN 认证	10
2.2.1 发射线选择 AGN	10
2.2.2 各并合阶段的 AGN 比例	13
2.3 AGN 宿主星系的总体性质	17
2.3.1 恒星质量与恒星形成率	17
2.3.2 恒星质量与 [O III] 面亮度	17
2.4 空间分辨性质	21
2.4.1 样本各性质的径向梯度：AGN 宿主星系从内向外“熄灭”	22
2.4.2 并合对星系的影响：AGN 与 SFG 和年老星系的对比	23
第 3 章 中性氢观测	29
3.1 样本与观测	29
3.2 数据处理	30
3.2.1 提取 ON、OFF 观测并去除时域 RFI	30
3.2.2 温度定标	32
3.2.3 ON-OFF 得到中性氢谱线	33
3.2.4 对比 H I-MaNGA	34
3.3 中性氢含量与恒星形成效率	36

3.4 FAST 的 H I 谱线与 MaNGA 的 H α 对比	39
第 4 章 结论与展望	45
4.1 本文主要结论	45
4.2 对未来工作的展望	46
附录 A AGN 对计算恒星形成率的影响	49
附录 B 使用 Dn4000 估计 sSFR	51
参考文献	53
致谢	61
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	63

图形列表

图 1.1 星系演化研究中的关键问题	1
图 2.1 并合阶段分类示例.....	9
图 2.2 样本在 BPT 图、WHAN 图和颜色星等图中的位置	11
图 2.3 不同并合阶段以及孤立星系中各类星系比例	14
图 2.4 不同环境密度下的各类星系的比例.....	16
图 2.5 各并合阶段的星系环境密度分布与孤立星系的比较	16
图 2.6 不同环境密度下的各类星系比例	18
图 2.7 AGN 核区面亮度-总恒星质量关系	20
图 2.8 不同质量区间 AGN 的 sSFR、巴尔末消光、Dn4000 随半径的变化	24
图 2.9 不同并合阶段 AGN 的 sSFR、巴尔末消光、Dn4000 随半径的变化	25
图 2.10 并合对星系径向梯度的影响: AGN 对比 SFG	26
图 2.11 并合对星系恒星形成径向梯度的影响: AGN 对比年老星系	27
图 3.1 FAST 数据处理流程示例	31
图 3.2 FAST 观测到的并合系统 H I 谱线	35
图 3.3 FAST 观测的 rms-时间关系与 GBT 的比较	36
图 3.4 样本的中性氢含量	37
图 3.5 样本的原子气体恒星形成效率	38
图 3.6 中性氢与电离氢的速度流量对比: 9194-12701	40
图 3.7 中性氢与电离氢的速度流量对比: 8978-12705	41
图 3.8 中性氢与电离氢的速度流量对比: 8241-12705	42
图 3.9 中性氢与电离氢的速度流量对比: 8725-9101	43
图 A.1 AGN 对发射线的贡献在 BPT 图中的分布	49
图 B.1 MaNGA 像素光谱的 Dn4000 与 sSFR 的关系	52

表格列表

表 2.1 本章所用的分析子样本和其对照样本的基本信息	10
表 2.2 不同并合阶段的各类星系比例。	15
表 3.1 FAST 观测的 6 个并合系统基本信息	30
表 3.2 FAST 观测结果	34

符号列表

字符

Symbol	Description	Unit
c	the speed of light	$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
z	redshift	1
ν	frequency	Hz
d	distance	Mpc
v	velocity	$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
T	temperature	K
F	flux density	mJy
M_*	stellar mass	solar mass
M_{HI}	atomic gas mass	solar mass

算子

Symbol	Description
Δ	difference
Σ	surface density
$\log()$	the base 10 logarithm

缩写

AGN	Active Galactic Nucleus
ALFALFA	Arecibo Legacy Fast ALFA
DAP	MaNGA Data Analysis Pipeline
Dn4000	4000Å break
DR	Data Release
EW	Equivalent Width

FAST	Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope
GASS	GALEX Arecibo SDSS Survey
IFU	Integral Field Unit
IMF	Initial Mass Function
MaNGA	Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory
MILES	Medium-resolution Isaac Newton telescope library
pPXF	Penalized pixel-fitting
R_e	Effective radius
RG	Retired Galaxy
RFI	Radio Frequency Interference
rms	Root Mean Square (for radio spectra)
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
SFE	Star Formation Efficiency
SFG	Star-forming Galaxy
SFR	Star Formation Rate
SNR	Signal-to-Noise Ratio

第1章 引言

1.1 研究背景

星系如何将星际介质转化为恒星增长质量，以及质量增长如何停止，是星系演化研究需要回答的重要问题。上世纪以来，利用不断扩大的样本和不断提高分辨率的观测，科学家已经勾勒出了星系演化的大体图像，如图 1.1 所示。星系在小质量时，一般气体含量高，恒星形成活动强，星族成分年轻，颜色偏蓝，有旋臂或者不规则的特征，动力学以旋转盘主导且角动量较大；而最大质量的星系，即演化末端的星系，一般缺少恒星形成，气体成分少，主要由年老恒星组成，颜色较红，呈现规则的椭圆形态，动力学由速度弥散主导，角动量较小。关于演化过程中的细节，还有诸多的问题亟需人们回答，例如星系内部的演化顺序，演化时标、星系并合与中心超大质量黑洞对演化的作用，等等。

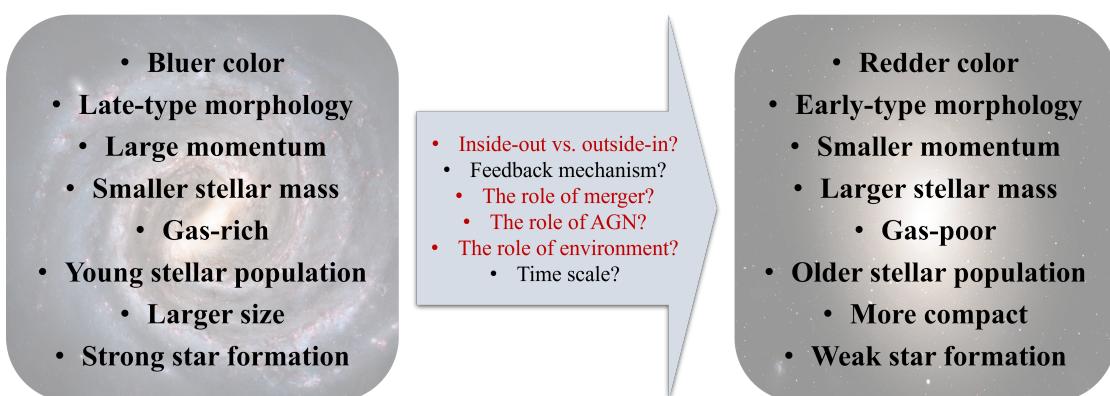


图 1.1 星系演化研究中的关键问题

Figure 1.1 The key questions about galaxy evolution

图注：人们对年轻星系（右）到年老星系（左）演化的现有认识。箭头中列出了亟需深入研究的关键问题。本文主要涉及到了其中标红的问题。

在现有的宇宙学模拟中，星系并合是星系增长质量和损失角动量的重要途径，而活动星系核（AGN）的反馈效应被认为是星系“熄灭”并停止增长的关键原因（例如 Springel 等, 2005）。在一对富气体星系并合的多体数值模拟中（例如 Hopkins 等, 2006），潮汐作用和角动量损失会造成气体内流，促进恒星形成活动以及中心超大质量的吸积（即 AGN）。这些物理过程会导致气体被快速消耗或吹散，从而导致星系演化为缺乏气体尘埃和恒星形成的年老星系。

观测中对这一演化图景的检验主要包括两方面，一是估计星系并合对恒星形成的促进程度，二是衡量 AGN 和星系并合的相关性。对于前者，已有的观测结果广泛证实了星系并合可以促进恒星形成。早期的研究受限于分辨率的限制，其分析主要关注星系的总体恒星形成增强与星系并合的关系。通过比较孤立星系对照样本，研究发现并合种的恒星形成星系 (SFG) 一般有整体更蓝的颜色(例如 Patton 等, 2005)，更亮的红外光度(例如 Hwang 等, 2011)，或更强的 H α 发射(例如 Dai 等, 2021)，表明其总体恒星形成率 (SFR) 更高。而恒星形成的增强幅度可能与并合质量比，星系间距，以及星系的形态有关(Ellison 等, 2008; Xu 等, 2010)。

相比恒星形成，星系并合与 AGN 的关系更加复杂。关于并合能否产生 AGN，不同研究的结论互有争议。争议可能与 AGN 的认证方法，红移区间，以及并合星系的选择方法有关。Veilleux 等 (2009) 使用哈勃空间望远镜的高分辨率图像发现多数高亮度光学类星体有被扰动的特征，表明其中的 AGN 活动可能与之前的并合有关。从另一个角度来看，如果星系相互作用与并合能够促进 AGN 的活动，那我们预期在通过星系的视向速度差与投影距离构建星系对样本中，AGN 的比例应当更高。在观测中，如果通过中红外颜色选择 AGN，多数研究发现星系对中的 AGN 比例比孤立星系更高(例如 Satyapal 等, 2014; Gao 等, 2020)。而如果通过光学发射线或 X 射线光度选择 AGN，不同样本的结论互有争议。Silverman 等 (2011) 发现在星系对中 X 射线 AGN 比例增加了约 0.9 倍，但近期更大的样本并未在星系对中发现更多的 X 射线 AGN(Shah 等, 2020)。光学谱线选择的 AGN 样本一般位于较低红移，支持 AGN 与并合相关的工作展示了 AGN 的比例随星系间距的减小而增大(Ellison 等, 2011)，但也有工作表明当控制样本选择条件时，AGN 的比例与星系是否处于并合状态无关 (Ellison 等, 2008)。射电 AGN 被发现更倾向于位于星系团环境 (Argudo-Fernández 等, 2016)，但其所处的黑洞吸积阶段和产生机制可能与其他波段 AGN 有区别 (Heckman 等, 2014)。近期综合了各个波段 AGN 选源的工作发现星系对中 AGN 的比例并未有明显增强 (Silva 等, 2021)。一系列争议的结论反映了可能并合引起的 AGN 活动的时标、阶段与星系并合过程不一致。一些研究还讨论了并合对 AGN 强度的影响，其中有观测证据支持并合对 AGN 强度的促进作用，例如增高的 [O III] 光度 (Liu 等, 2012; Alonso 等, 2018)，或者更高的 X 射线探测率 (Hou 等, 2020)。上述关于并合星系观测研

究表明，并合对恒星形成活动和对活动星系核的促进作用不完全一致，表明并合过程中黑洞吸积增强和恒星形成增强可能发生在不同阶段(例如 Li 等, 2008)。

随着观测设备和技术的不断进步，目前对近邻星系($z < 0.1$)的研究已经进入到亚星系尺度，其中光学波段最重要的技术进展之一就是积分视场单元(IFU)技术。积分视场单元可以同时获得观测目标在视场内各个位置的光谱，极大地提高了光谱观测的效率，并且补充了过去单光纤光谱巡天遗漏的、近邻星系外围区域的光谱。近期的 IFU 巡天项目提供了一批低红移并合星系系统与 AGN 的空间分辨光谱，使我们能够在亚星系尺度上研究并合对恒星形成的影响，以及 AGN 的宿主星系性质。MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory) 是目前样本最大的 IFU 巡天项目，已经观测了约一万个近邻星系的积分视场单元光谱(Bundy 等, 2015)。一些工作已经利用 MaNGA 中的恒星形成星系(SFG)对样本，研究了并合对恒星形成的影响随星系半径的变化。Thorp 等(2019)发现并合后星系(Post-Merger)中，恒星形成的增强和金属丰度的降低随半径的减小而增加。相似的增强-半径规律在星系对的样本中也被发现，而且与并合阶段(Pan 等, 2019)、投影距离以及质量比(Steffen 等, 2021)有关。Li 等(2021)发现星系对中的星系还会倾向于出现恒星-气体速度场方向不一致。

此外，MaNGA 还适合被用来研究中等-低光度 AGN 的宿主星系性质。一方面，Wylezalek 等(2018)发现 IFU 数据能更精确地识别窄线 AGN。另一方面，过去的单光纤巡天光谱只能代表这些 AGN 核区的性质，而 MaNGA 可以向外补充到约 1.5 倍半光半径(R_e)处的光谱信息。早期 MaNGA 数据已经揭示了这些中低光度窄线 AGN 对其宿主星系的性质有一定的影响。Bing 等(2019)发现 AGN 宿主的中心区域恒星形成有一定程度的降低。Chen 等(2019)的研究表明 AGN 能够光致电离核心周围的气体而产生类窄线区的发射线，并且电离范围与 AGN 的光度有关。然而目前仍缺少对星系对中 AGN 宿主的空间分辨性质的统计分析，仅有 Fu 等(2018)首次分析了 MaNGA 中的 14 对双 AGN 系统，并分析了这些系统中的 AGN 相互作用。

上述的观测研究主要从统计上关注星系并合对星系的恒星形成或黑洞吸积的影响。人们需要高分辨率的多波段观测来研究其背后的物理机制细节。数值模拟表明并合过程中气体的内流可能是促进恒星形成以及黑洞吸积的关键(Kauffmann 等, 2000)。气体，主要指氢元素，在星际介质中主要以原子气体(即中性

氢, H I)、分子气体(即氢分子、H₂)、和电离气体(即电离氢、H II)存在。氢分子作为恒星形成的直接原料, 其丰度和恒星形成有很好的相关性, 但一般只能通过 CO 的分子谱线来示踪 (Wilson 等, 1970), 因而需要(亚)毫米波的观测。而原子气体和电离气体都能产生可直接观测的发射线。H I 的发射线产生于基态氢原子的两种不同自旋态的转变, 位于 1420.4MHz, 一般被称为中性氢 21cm 谱线, 可利用射电望远镜来观测 (Roberts, 1975)。电离氢的能级跃迁可以产生一系列发射线, 其中在 MaNGA 光谱范围中最强的是巴尔末线系的 H $\alpha_{\lambda 6563}$ 。研究并合对宿主星系影响的细节需要理解气体在并合中的行为, 因而需要高空间分辨率的气体成图。MaNGA 的光学空间分辨光谱提供了大量红移 $z > 0.01$ 星系的电离气体的面密度和速度分布。但对原子气体和分子气体的成图需要大型射电干涉阵的长时间观测。由于昂贵的成本, 现有的对并合星系的气体成图大多以个源为主(例如 Xu 等, 2021)。

高空间分辨多波段成图的一种替代方法是, 比较光学 IFU 提供的速度分布信息和大口径单镜射电望远镜获得的未分辨谱线。大口径单镜可以相对高效的获得整个并合系统的未分辨中性氢谱线, 牺牲了空间分辨率但提高了观测效率, 且保持了很高的谱线速度分辨率。基于大型中性氢巡天项目, 如 ALFALFA (The Arecibo Legacy Fast ALFA, Giovanelli 等, 2005) 和 GASS (The GALEX Arecibo SDSS Survey, Catinella 等, 2010), 的数据, 已有研究发现并合星系的中性氢谱线更加不对称(例如 Bok 等, 2019; Zuo 等, 2022)。这表明并合过程中, 原子气体的动力学受到了一定的影响。结合 MaNGA 的发射线强度分布及速度分布信息, 我们可以比较并合过程中电离氢和中性氢的运动学差异。

本文基于 MaNGA 项目的数据, 构建了首批位于星系对和并合星系中 AGN 的 IFU 样本, 以补充对 AGN、宿主星系演化与星系并合相互关系的空间分辨研究。通过利用 IFU 数据带来的光谱的高空间分辨率优势, 我们可以更准确地认证并合星系系统以及窄线 AGN。我们还分析了并合星系中 AGN 的恒星形成率(SFR), 尘埃消光、星族年龄等性质随半径的变化, 并进一步研究了这些性质的径向分布与并合阶段、星系类型的关系。我们还使用了五百米口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescop, FAST, Nan 等, 2011) 观测了六个不同并合阶段、星系类型的并合星系系统的中性氢, 首次尝试比较了 IFU 获得的电离氢分布信息与射电单镜获得中性氢谱线信息, 为后续的 FAST 河

外中性氢观测和大样本研究提供了参考。

本文的主要结构如下：第一部分1是本文的研究背景，并介绍了全文统一使用的初等质量函数、消光改正模型、以及速度坐标。第二部分2的主要内容是基于 MaNGA 数据的样本构建、性质分析、以及统计结论。第三部分3介绍了 FAST 的观测设置、数据处理、以及基于中性氢谱线的科学分析。第四部分4总结了本文的主要结论，并展望了未来可延申的工作。

1.2 本文使用的模型参数

本文所有的星族相关性质（如恒星质量、恒星形成率）都采用了 Kroupa 初等质量函数 (Kroupa, 2001)。所有分析所用距离尺度基于假设了哈勃常数 $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1}$ ($h = 0.7$)、 $\Omega = 0.3$ 以及 $\Lambda = 0.7$ 的冷暗物质宇宙模型 (ΛCDM)。所有星等均改正到了 AB 星等系统 (Oke 等, 1983)。

计算恒星形成率等物理量所使用的 $\text{H}\alpha$ 和 $[\text{O III}]$ 光度均经过巴尔末尘埃消光改正。改正假设的气体环境消光曲线取自 (Li 等, 2006)，假设 $R_V = 3.1$, $\text{H}\alpha/\text{H}\beta = 2.86$ 的光致电离模型 (Osterbrock 等, 2006)。其中改正后的 $\text{H}\alpha$ 和 $[\text{O III}]$ 的光度可以表示为公式 1.1：

$$L_{\text{line}} = 4\pi d^2 S_{\text{line}} 10^{0.79 k_\lambda \log(\frac{\text{H}\alpha}{2.86 \times \text{H}\beta})}, \quad (1.1)$$

其中 d 是光度距离； S_{line} 是 $\text{H}\alpha$ 和 $[\text{O III}]$ 的观测流量； k_λ 是 Calzetti 等 (2000) 消光曲线给出的改正常数，对 $\text{H}\alpha$ 是 2.4，对 $[\text{O III}]$ 是 3.5。

本文所有的谱线速度均使用 $c \times z$ 表示，其中 c 为真空中光速， z 为基于波长或频率的红移，计算自 $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = (f_0 - f)/f$ ，其中 λ 和 f 分别为观测波长和观测频率， λ_0 和 f_0 分别为谱线在真空中的波长和频率。

第 2 章 光学积分视场单元研究

本章介绍了并合星系的选源与分类和 AGN 的认证，比较了不同子样本的总恒星形成率和恒星质量、[O III] 面亮度，分析了各样本恒星形成率、巴尔末消光、 4000\AA 截断 (D_n4000) 随半径的变化。

2.1 数据与样本选择

2.1.1 MaNGA 简介

MaNGA 是斯隆数字巡天 (Sloan Digital Sky Survey) 四期 (SDSS-IV, Blanton 等, 2017) 的主项目之一，使用安装在 2.5 米斯隆望远镜 (Gunn 等, 2006) 上的特制 IFU(Drory 等, 2015) 观测了红移 0.01-0.15 区间内约一万个近邻星系。五种 IFU 的直径从 $12''$ 到 $32''$ 不等，可以覆盖所选星系约 $1.5R_e$ (有效半径) 以内的区域，对部分源的覆盖可达 $2.5R_e$ (Yan 等, 2016a)。每只光纤的直径为 $2''$ ，此分辨率在样本的主要红移 $z \sim 0.03$ 下对应的物理尺度约为 $\sim 1 \text{ kpc}$ 。MaNGA 可以观测从 3600\AA 到 10300\AA 的光谱，这一范围在样本红移区间下可以覆盖线比诊断图 (BPT 图, Baldwin 等, 1981) 所需要的所有发射线。MaNGA 的谱分辨率 $R \sim 2000$ (Yan 等, 2016b)，相应的速度分辨率足够拟合强发射线的中心速度。MaNGA 的星系样本选自 NSA 星表 (Nasa-Sloan-Atlas catalog¹)，选源偏向于 $\log(M_*/M_\odot) > 9$ 的星系，详细的选源策略可以参考 (Wake 等, 2017)。我们的样本选自 MaNGA 第六次数据发布 (MPL-6)，即 SDSS DR15，包括了 4691 个 IFU 观测。发射线和光谱分析使用了 MaNGA 的官方程序 DAP (data analysis pipeline) 的处理结果 (Belfiore 等, 2019; Westfall 等, 2019)。DAP 使用了 MILES 星族模板 (Sánchez-Blázquez 等, 2006; Falcón-Barroso 等, 2011)，光谱拟合使用了 pPXF(penalized pixel-fitting, Cappellari, 2017) 算法。本文的尘埃消光改正的恒星质量使用了 Pipe3D 得到的结果 (Sánchez 等, 2016a,b)。

2.1.2 星系对与并合星系选源

MaNGA 星系和其附近的大部分星系都有 SDSS 单光纤巡天得到的光谱红移。因此我们首先通过限制投影距离和视向速度差来选择真实的星系对系统。在

¹M. Blanton, <http://www.nsatlas.org>

此步骤中，我们和其它相似的工作保持一致，使用的限制为 $\Delta d < 50 \text{ kpc h}^{-1}$ ，以及 $\Delta v < 500 \text{ km s}^{-1}$ (Patton 等, 2002; Lin 等, 2004)。此方法会遗漏一些并合末期的系统，因为很多并合后星系只有一个红移和位置信息。另一些并合晚期星系对虽然有两个位置信息，但由于单光纤不能间距过近从而只有一次光谱观测，即只有一个红移信息。因此我们在第一步选源之后对其他源进行了形态学认证，补全了这些被遗漏的并合晚期系统。结合两种方法，理论上我们可以选出从并合开始前的星系对阶段到并合后阶段的所有系统。

我们最终在 4622 个 IFU (不含重复观测) 中选出了 1156 个位于星系对或并合系统的星系 (后文简称并合星系或并合系统)。这些并合系统分为以下几种情况：有 46 个系统中的两个星系各有一次 IFU 观测；有 116 个系统的两个成员被同一个 IFU 覆盖；125 个系统是并合后星系，故只由一个星系组成；剩下的 707 个系统只有一个成员星系被 MaNGA 观测。故此 1156 个星系位于共计 994 个并合系统中 (无重复)。

2.1.3 并合阶段分类

对星系并合的 N 体数值模拟表明，两个星系在并合前会经历多次近交会 (Barnes 等, 1992)，所以两个星系的投影距离不能完全代表该系统所处的并合阶段。为了区分并合阶段，我们参考 Toomre 序列 (Toomre 等, 1972; Toomre, 1977)，定义了四种并合阶段：

- Case1：相隔的没有形态学扰动的星系对，包括距离较近但没有扰动的星系对 (可认为是并合开始前阶段)。
- Case2：间距很近的相互作用星系，有较强的形态学扰动，可以看到潮汐尾、潮汐桥等结构 (正在近交会阶段)。
- Case3：距离比 Case2 稍远的星系对，但有较明显的扰动，可能正在交会后远离阶段或第二次相遇过程中。
- Case4：并合晚期的系统，两个星系高度重合或仅剩并合遗迹，有明显相互作用特征，光学图像上只有一个星系核或者两个核心很近。

我们提醒读者，四种阶段仅能粗略代表并合阶段。可以认为 Case1 和 Case4 分别近似代表了并合的早期和晚期。但由于星系可能多次近交会，Case2 和 Case3 并不能代表确切的并合先后顺序。此外，星系的一些自身性质会影响扰动特征的明显程度，例如视向角度 (Di Matteo 等, 2007)、星系质量比 (Cox 等, 2008)、星系

自身的哈勃形态 (Cao 等, 2016) 等。这些性质可能会影响我们对阶段的判断, 但由于样本大小的限制, 本文没有进一步进行这些区分。

我们有四位分类经验丰富的研究人员分别独立地按照上述标准进行分类, 结果以多数为准。如果有等票的争议情况, 我们会再次讨论决定最终结果 (争议情况仅占总样本 5% 左右)。相关工作已发表在Pan 等 (2019)。最终我们的并合星系样本被分为 441 个 Case1 系统、119 个 Case2 系统、265 个 Case3 系统、以及 169 个 Case4 系统。图 2.1 展示了每个阶段的例子, 图中灰色箭头代表近似的并合序列。图像是样本星系的 SDSS-*gri* 波段三色图, 其中紫色的六边形代表 MaNGA 观测的视场范围。

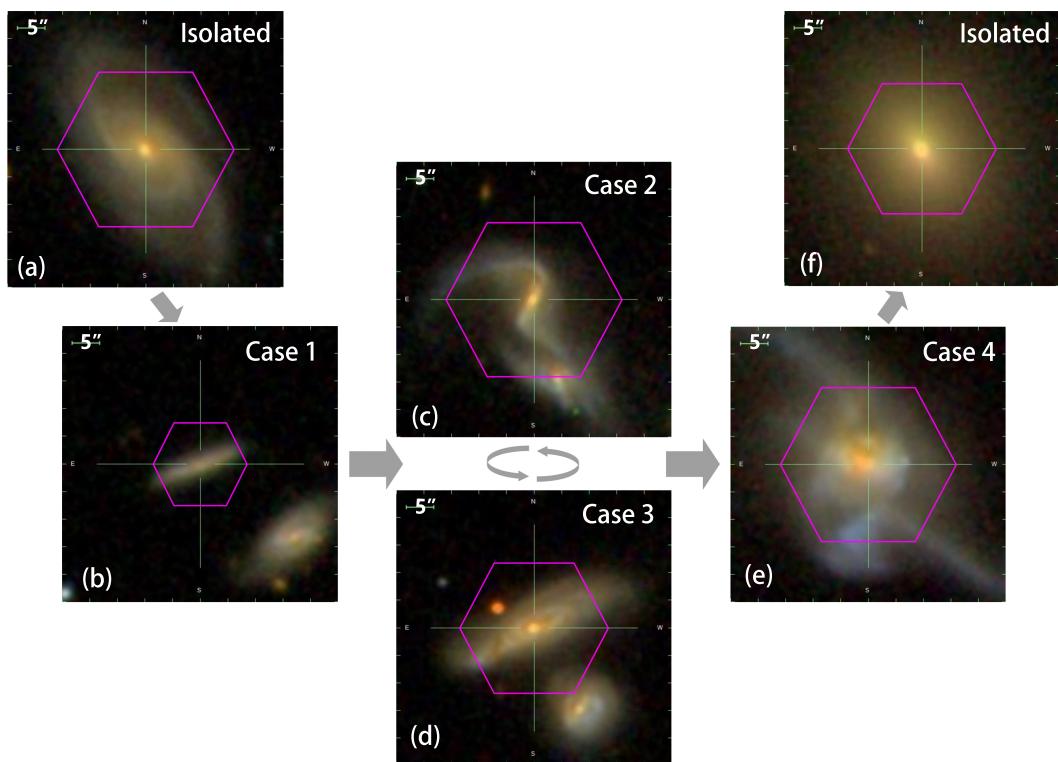


图 2.1 并合阶段分分类示例

Figure 2.1 Illustration of the possible merger sequence

图注: (b), (c), (d), (e) 是四个阶段示例系统的 SDSS *gri* 波段三色图。各图对应的 MaNGA 编号分别为 (a): 9500-12702, (b): 8485-3704, (c): 8241-12705, (d): 8082-9102, (e): 9507-12704, (f): 8984-9101。图中的紫色六边形代表了 MaNGA 的 IFU 视场, 灰色箭头代表了可能的并合序列。

2.1.4 对照样本

为了衡量并合对星系性质的影响，我们需要构建并合星系的对照孤立星系样本进行比较。首先我们从 MaNGA 中选择出附近没有邻居星系的孤立 MaNGA 星系，选择条件为 $\Delta d > 150 \text{ kpc h}^{-1}$ ，以及 $\Delta v > 500 \text{ km s}^{-1}$ 。有 2317 个 MaNGA 星系满足此条件，因此成为我们孤立星系的母样本。我们后续的分析主要关注宿主星系的恒星形成率，而与其最为相关的物理量是星系的恒星质量 (Noeske 等, 2007)。为了合理地比较星系的恒星形成率，我们进一步控制了对照样本的恒星质量分布。

后文的分析主要基于星系核心区域的黑洞活动和恒星形成的种类（相关分类见2.2），因此我们对不同核区性质的并合星系各构建了控制质量的孤立星系对照，即孤立 AGN、孤立 SFG、孤立年老星系（passive galaxies）。表2.1总结了各样本及其对照样本的信息，包括数量、质量区间、以及质量分布的 K-S (Kolmogorov-Smirnov) test 结果。不同组的质量区间有区别是因为 AGN 和年老星系与 SFG 的质量分布有较大差异，即缺少大质量 SFG 和小质量年老星系，所以不同的比较需要在不同的质量区间进行。

表 2.1 本章所用的分析子样本和其对照样本的基本信息

Table 2.1 Information of the various subsamples and their relevant control samples

Related figure(s)	Subsample	Number	Mass range	Median mass	K-S test p
		(total)	$\log(M_*/M_\odot)$	$\log(M_*/M_\odot)$	
Paired AGN vs. Isolated AGN (Figure 2.6, 2.7, 2.8, 2.9)	AGNs in pairs	61	9.77–11.37	10.76	/
	Isolated AGNs	116	9.76–11.53	10.63	0.05
AGN vs. SFG (Figure 2.10)	AGNs in pairs	34	9.94–10.80	10.56	/
	Isolated AGNs	36	9.94–10.80	10.56	0.99
	SFGs in pairs	50	9.94–10.80	10.51	0.38
AGN vs. passive galaxy (Figure 2.11)	Isolated SFGs	101	9.95–10.80	10.49	0.40
	AGNs in pairs	61	9.77–11.38	10.76	/
	Isolated AGNs	71	9.94–11.23	10.67	0.33
	Passive in pairs	311	9.78–11.38	10.83	0.50
	Isolated Passive	352	9.77–11.38	10.77	1.00

2.2 AGN 认证

2.2.1 发射线选择 AGN

由于电离环境的不同，AGN 的窄线区（narrow line region）产生的发射线的线流量比和 H II 区恒星形成产生的不同。这种差异被广泛用于 AGN 的认证。本文结合了三种发射线判定标准来选择 AGN，利用了 MaNGA 光谱覆盖到的几条最强发射线：使用的判定包括基于 $[\text{O III}]_{\lambda 5007}/\text{H}\beta$ vs. $[\text{N II}]_{\lambda 6584}/\text{H}\alpha$ 的经典 [N II]-BPT 图 (Baldwin 等, 1981)；基于 $[\text{O III}]_{\lambda 5007}/\text{H}\beta$ vs. $[\text{S II}]_{\lambda\lambda 6716, 6731}/\text{H}\alpha$ 的 [S II]-BPT 图 (Veilleux 等, 1987)；以及被用来去除 BPT 图中 AGN 区域的非 AGN 年老星系 (Retired Galaxy, RG) 的 $\text{H}\alpha\text{EW}$ vs. $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ 图 (WHAN, Cid Fernandes 等, 2010)。

超大质量黑洞 (Supermassive Black Hole, SMBH) 一般位于星系的光学中心，因此我们选择了光学中心周围的 3×3 像素 ($1.^{\prime\prime}5 \times 1.^{\prime\prime}5$) 的区域光谱作为认证谱线。因此本文的 AGN、SFG 和 Passive Galaxy 分类只代表星系核心的性质，例如一个星系的中心没有恒星形成但外围盘上仍有较高的 SFR，它依然会被认证为 Passive Galaxy。

图 2.2 展示了本文使用的 BPT 图和 WHAN 图。在 [N II]-BPT 图中，紫色虚线 (公式 2.1, Ke01a) 取自 Kewley 等 (2001)，代表了电离模型中星暴活动的极限情况。紫色实线 (公式 2.2, Ka03) 取自 Kauffmann 等 (2003)，是区分恒星形成和 AGN 分支的经验判定。SFG 位于 Ka03 以下而 AGN 位于 Ke01a 以上。二者之间的区域一般被认为代表恒星形成和 AGN 活动对发射线的贡献相当，其中的星系被称为 composite galaxy。我们的样本表明，大多数 composite galaxy 在 [S II]-BPT 图中都位于恒星形成区域。为了使我们对 AGN 的分析尽可能不受恒星形成的污染，我们后文的 AGN 样本不包括 composite galaxy。BPT 图中分界线的对应公式如下：

$$\log([\text{O III}]/\text{H}\beta) = \frac{0.61}{\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) - 0.47} + 1.19 ; \text{ Ke01a} \quad (2.1)$$

$$\log([\text{O III}]/\text{H}\beta) = \frac{0.61}{\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) - 0.05} + 1.30 ; \text{ Ka03} \quad (2.2)$$

$$\log([\text{O III}]/\text{H}\beta) = \frac{0.72}{\log([\text{S II}]/\text{H}\alpha) - 0.32} + 1.30 ; \text{ Ke01b} \quad (2.3)$$

近年来对一些 BPT 图选出的低光度低电离度 “AGN”的研究表明，其核区的类似 AGN 发射线比的辐射并非来自于中心超大质量黑洞的吸积，可能是来自于大量热的晚型恒星 (Yan 等, 2012)，例如后渐进巨星支恒星 (post-AGB star)。

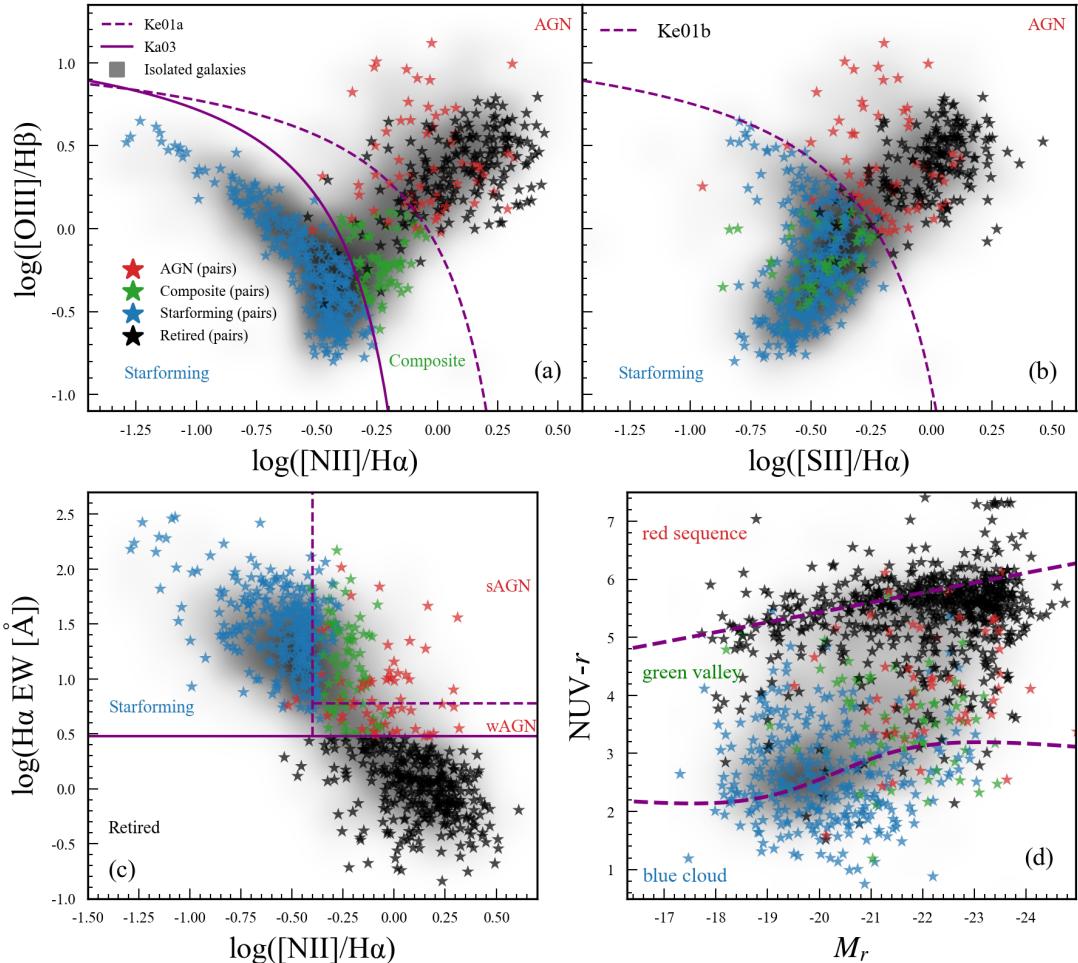


图 2.2 样本在 BPT 图、WHAN 图和颜色星等图中的位置

Figure 2.2 The (a) original and (b) modified BPT

diagrams. (c) The WHAN diagram, and (d) NUV- r vs. M_r color-magnitude diagram

图注：图中星点代表并合系统中的星系，颜色代表其 BPT 图分类（判定标准见2.2.1）。灰色背景代表孤立星系的数密度（高斯平滑后）。BPT 图的分界线来自 Kewley 等 (2001) 和 Kauffmann 等 (2003)；WHAN 图的分界线来自 Cid Fernandes 等 (2011)。(a)、(b)、(c) 图的结果基本一致。根据 Wyder 等 (2007) 提供的红星系和蓝星系的分布（紫色线）近似关系，AGN 在 (d) 图中倾向位于“绿谷”区域。

因此我们进一步利用 WHAN 图去除这些 BPT 图错选的 AGN。WHAN 图基于 H α 的等值宽度 (EW)，因为模型表明年老星族贡献的发射线的等值宽度一般不会超过 3 \AA ([Cid Fernandes 等, 2011](#))。我们将这些 H α EW < 3 \AA 的星系分为 retired galaxy (属于年老星系)。

综上所述，我们的 AGN 判定标准如下：

1. 我们要求所有用到的发射线信噪比大于 5。若一个星系的中心区域有信噪比足够的连续谱且没有信噪比足够的发射线，我们将其分为 lineless galaxy (属于年老星系)。
2. 若一个星系的中心 H α EW < 3 \AA ，我们将其分为 retired galaxy (RG, 属于年老星系)，无论其在 BPT 图的位置如何。
3. 对于中心 H α EW $\geq 3\text{\AA}$ 的星系，如果其位于 [N II]-BPT 图和 [S II]-BPT 图的任一 AGN 区域，我们判定其为 AGN。在我们最终的 61 个 AGN 并合星系样本中，43 个位于两个 AGN 区域，6 个仅位于 [N II]-BPT 图的 AGN 区域，其余 12 个仅位于 [S II]-BPT 图的 AGN 区域。
4. 最后，我们用 [N II]-BPT 图区分 SFG 和 composite galaxy。

图 2.2展示了我们的判定结果。[N II]-BPT (a), [S II]-BPT (b), 和 WHAN (c) 图中的区域划分互相大体相同 (88% 结果一致)。我们还展示了颜色星等图 (d), 作为核区分类的检验，并标注了[Wyder 等 \(2007\)](#)的颜色分类线来辅助判断。我们的 SFG 和 RG 分别主要位于蓝星系和红星系区域，而 AGN 和 composite galaxy 的分布更加弥散，倾向位于“绿谷星系”的位置。这表明我们的 AGN 样本可能处于由蓝向红演化的阶段。我们在此提醒读者，该 AGN 样本和其它 BPT 选择的 AGN 样本一样，由于 BPT 图判定要求会遗漏发射线受到严重尘埃遮蔽的 AGN，以及遗漏通常没有光学发射线的射电 AGN (详见 [Padovani 等, 2017](#))。

2.2.2 各并合阶段的 AGN 比例

本小节对 BPT 的分类结果进行分析，着重比较了不同并合阶段的 AGN 比例。如2.1.2所提到的，我们总计分析了 4736 个星系核区光谱来对其分类。其中，187 个核区光谱由于前景恒星影响、红移无法认证、或程序拟合失败等问题不能被用来科学分析。去除这些源后，我们总计对 4549 个星系进行了分类，其中 1115 个位于并合系统中。根据2.2.1中的判定标准，总样本被分为 239 个 AGN(5.3%)，385 个 AGN-星暴 composite 星系 (8.5%)，1654 个 SFG(36.4%)，1267

个 RG(27.8%)，以及 1004 个无发射线星系 (22.1%)。其中 1115 个并合星系样本被分为 61 个 AGN(5.5%)，74 个 composite 星系 (6.6%)，310 个 SFG(27.8%)，313 个 RG(28.1%)，以及 357 个无发射线星系 (32.0%)。

我们的 AGN 比例结果 ($\sim 5.3\%$) 与之前采用类似判定方法的 MaNGA 研究 (Rembold 等, 2017; Wylezalek 等, 2018) 的结果一致。Comerford 等 (2020) 利用匹配的红外 (来自 WISE)、射电 (来自 NVSS/FIRST)、和 X 射线 (来自 Swift-BAT) 数据选择了 MaNGA 中的 AGN。和他们的结果相比，我们的样本缺少了 222 个 AGN，其中 206 个是缺少发射线的射电 AGN，仅有 16 个是红外或 X 射线 AGN。这表明射电 AGN 和其它波段选择的 AGN 重合度很低，因为其缺少发射线且大多是年老星系 (Best 等, 2005)。

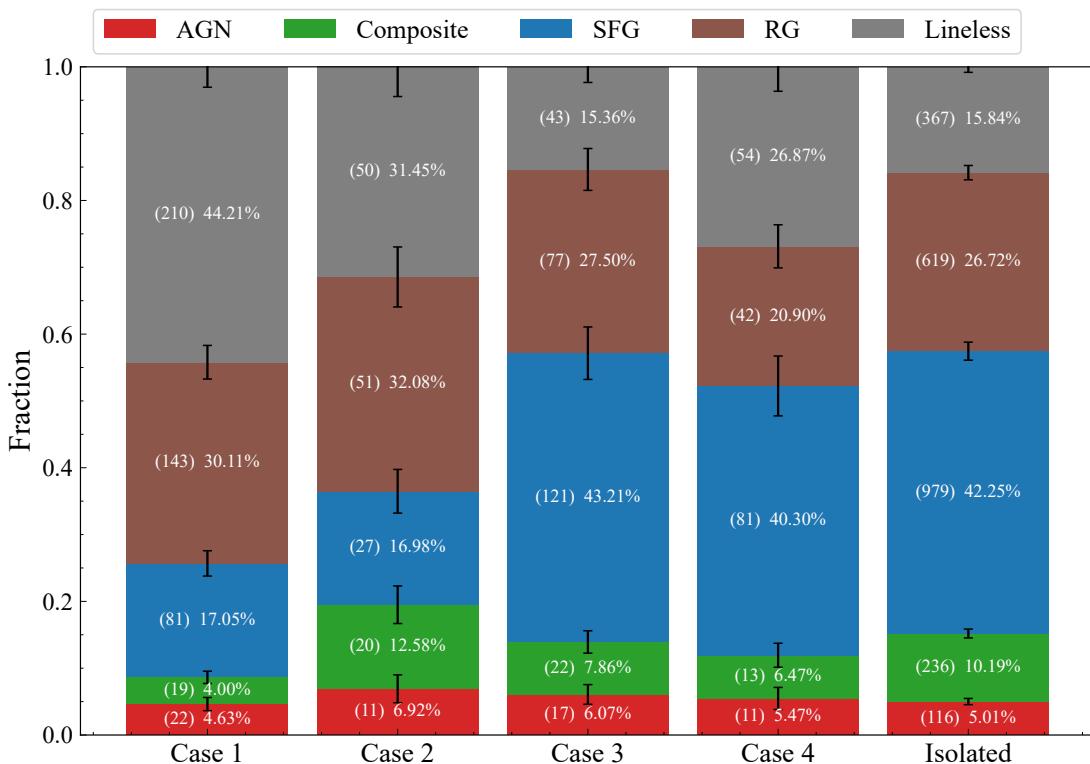


图 2.3 不同并合阶段以及孤立星系中各类星系比例

Figure 2.3 The fractions of the five galaxy types for pairs in the 4 merger cases

图注：图中各颜色代表不同 BPT 分类的星系，各栏代表不同的并合阶段及孤立星系对照。误差棒代表其下方比例的泊松误差。AGN 的比例 (红色) 在不同并合阶段以及孤立星系中变化不大。Case1 和 Case2 中的年老星系 (棕色与灰色) 比例较高。

表 2.2列出了各并合阶段以及孤立星系的不同类型星系的比例，图 2.3是相应的柱状图。无论哪种并合情况，我们没有发现明显的 AGN 比例的变化。Case1 的

表 2.2 不同并合阶段的各类星系比例。

Table 2.2 Galaxy fractions based on emission-line classifications for different merger cases

Case	AGN	Composite	SFG	RG	Lineless	Total
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Case1	4.6±1.0% (22)	4.0±0.9% (19)	17.1±1.9% (81)	30.1±2.5% (143)	44.2±3.1% (210)	475
Case2	6.9±2.1% (11)	12.6±2.8% (20)	17.0±3.3% (27)	32.1±4.5% (51)	31.5±4.4% (50)	159
Case3	6.1±1.5% (17)	7.9±1.7% (22)	43.2±3.9% (121)	27.5±3.1% (77)	15.4±2.3% (43)	280
Case4	5.5±1.7% (11)	6.5±1.8% (13)	40.3±4.5% (81)	20.9±3.2% (42)	26.9±3.7% (54)	201
Isolated	5.0±0.5% (116)	10.2±0.7% (236)	42.3±1.4% (979)	26.7±1.1% (619)	15.8±0.8% (367)	2317
MPL-6	5.3±0.3% (239)	8.4±0.4% (382)	36.2±0.9% (1649)	27.8±0.8% (1267)	22.1±0.7% (1004)	4549

Note: Column 1: Case name, ‘Isolated’ represents these galaxies without a physical companion nor can be identified as merger (see Sec. 2.1.3). Column 2-6: The fraction and its binomial error for each galaxy type in percentage, with the actual number of galaxies (AGN, composite, SFG, retired and lineless galaxies) listed in bracket. Column 7: The total number of galaxies for each case.

AGN 比例最低 (4.6±1.0%), Case2 的 AGN 比例最高 (6.9±2.1%)。四个阶段和孤立星系的 AGN 比例在 3σ 范围内保持一致。如果加上 composite 星系，结论依旧没有明显变化，仅有 Case2 表现出略高的 AGN+composite 比例 (19.5±3.5%)。

我们还发现 Case1 和 Case2 的 SFG 比例 ($\sim 17\%$) 明显比 Case3、Case4、和孤立星系的 ($\sim 40\%$) 小。同时，年老星系的比例也表现出相应的规律，即 Case1 和 Case2 中比例更高。这是因为我们的并合阶段分类中，不同的阶段倾向于选择不同环境和不同形态的星系。首先，年老的椭圆星系更倾向于被分为 Case1 和 Case2，因为其缺少旋臂等容易被相互作用扰动的结构，所以在不连接时会被分为 Case1，连接时被分为 Case2，很难满足 Case3 或 Case4 的条件。另一方面，整个并合星系样本的年老星系也更多，这是因为并合星系，由其定义决定的，整体倾向于位于高密度环境。

为了衡量环境的影响，我们使用 MaNGA-GEMA 表格 ([Argudo-Fernández 等, 2015](#)) 中的局域环境密度 (ρ , local density) 对样本进行了分析。如图 2.4 所示，高密度环境下的年老星系更多而恒星形成星系更少，与之前的工作的结论一致 ([Li 等, 2006](#))。而图 2.5 则表明，我们的并合星系样本确实有更高的环境密度。AGN 的比例随环境变化不大，因此可以认为前文关于 AGN 的结论不受环境影响。

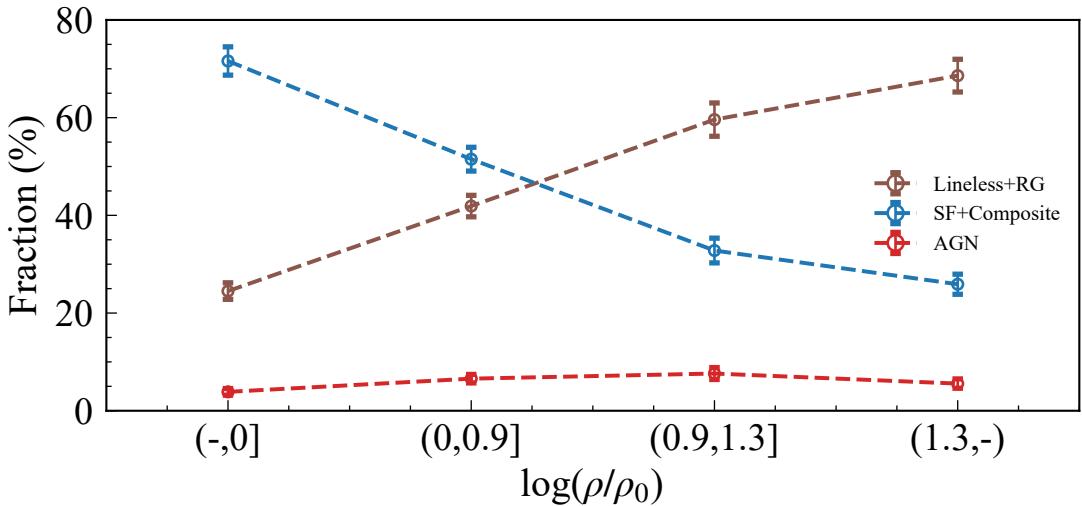


图 2.4 不同环境密度下的各类星系的比例

Figure 2.4 Fractions of isolated galaxies dividing into four local density bins

图注：红色代表 AGN，蓝色代表恒星形成星系（包括 composite），棕色代表年老星系。恒星形成星系的比例随环境密度增大而降低，年老星系则相反，而 AGN 的比例随环境密度变化不大。 ρ_0 是近似宇宙平均密度，值为 $3.51 \times 10^{10} M_\odot \text{Mpc}^{-3}$ 。每种星系的具体数量可参见表 2.2。

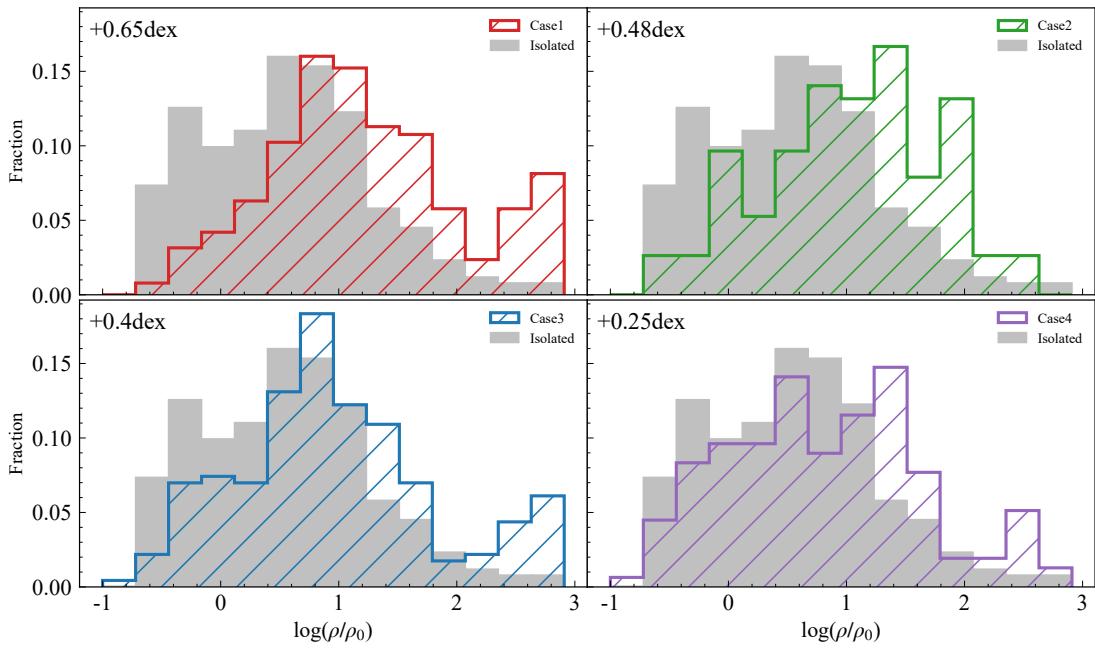


图 2.5 各并合阶段的星系环境密度分布与孤立星系的比较

Figure 2.5 Histograms of the local mass density among different merger cases

图注：四幅图分别比较了四个阶段的星系样本所处环境密度的分布（已归一为比例）和孤立星系的环境密度分布（灰色）。分布的中值差异在左上角标出。

2.3 AGN 宿主星系的总体性质

本节分析了选出的 AGN 样本宿主星系的总恒星质量、总恒星形成率和 [O III] 面亮度。重点比较了并合系统和孤立系统中 AGN 的整体性质。

2.3.1 恒星质量与恒星形成率

我们使用了 Pipe3D 表格中尘埃改正后的恒星质量和恒星形成率，因此可以更好地与使用同样数据得到的恒星形成主序 (Cano-Díaz 等, 2019) 进行比较。图 2.6 展示了 MPL-6 样本的整体分布（灰色等高线背景，高斯平滑后的结果，颜色代表星系的数密度），以及 AGN 样本的位置和其误差（红星：并合系统 AGN，蓝圈：孤立 AGN）。SFR 的一般误差大概为 0.08 dex，恒星质量的一般误差约 0.07 dex。从数密度等高线图中可以清楚看到总样本中主序星系和年老星系占据的位置。我们的 AGN 样本的恒星质量都在 $10^{9.6} M_{\odot}$ 以上。AGN 的 SFR- M_* 关系比主序更陡：在低质量端，AGN 大多低于主序，而高质量端接近主序。AGN 在恒星形成主序图中的位置和在图 2.2 颜色星等图中的位置相似，大致处于恒星形成星系和年老星系之间的位置。这表明 BPT 选出的低红移 AGN 可能处于从主序演化到年老星系的过程中。作为对比，低红移的射电 AGN 宿主一般已经成为年老星系 (例如 Best 等, 2005)；而通过中红外颜色选出的尘埃遮蔽 AGN，特别是在中高红移，宿主星系往往还有极高的恒星形成率 (例如 Dai 等, 2012)。

在图 2.6 的直方图中比较孤立 AGN 和并合系统 AGN 可以看出，二者的分布高度重合。其 SFR 和 M_* 的分布没有明显区别（中值仅差 0.04 dex, 0.13 dex）。结果表明整体上并合没有明显改变 AGN 宿主星系的恒星形成。AGN 的恒星质量分布和总样本相比明显偏大，这和过去单光纤光谱选择的窄线 AGN 的样本质量特征一致 (Kauffmann 等, 2009)。

2.3.2 恒星质量与 [O III] 面亮度

AGN 的窄线区会产生较强的 [O III]，所以 [O III] 的亮度一般被用来近似代表 AGN 的总光度 (例如 Heckman 等, 2014)。过去的大样本分析都是基于单光纤光谱得到的 [O III] 流量。现在利用 IFU 的数据，我们可以得到更小范围的 [O III] 强度。更小范围的 [O III] 面亮度不容易受到恒星形成活动的污染，故与活动星系核的强度相关性可能更好。和我们的 AGN 判定时选择的区域保持一致，我们使用星系中心 $1.^{\prime\prime}5 \times 1.^{\prime\prime}5$ 的区域来计算 [O III] 的面亮度 ($\Sigma[\text{O III}] = [\text{O III}]/\text{area}$)，

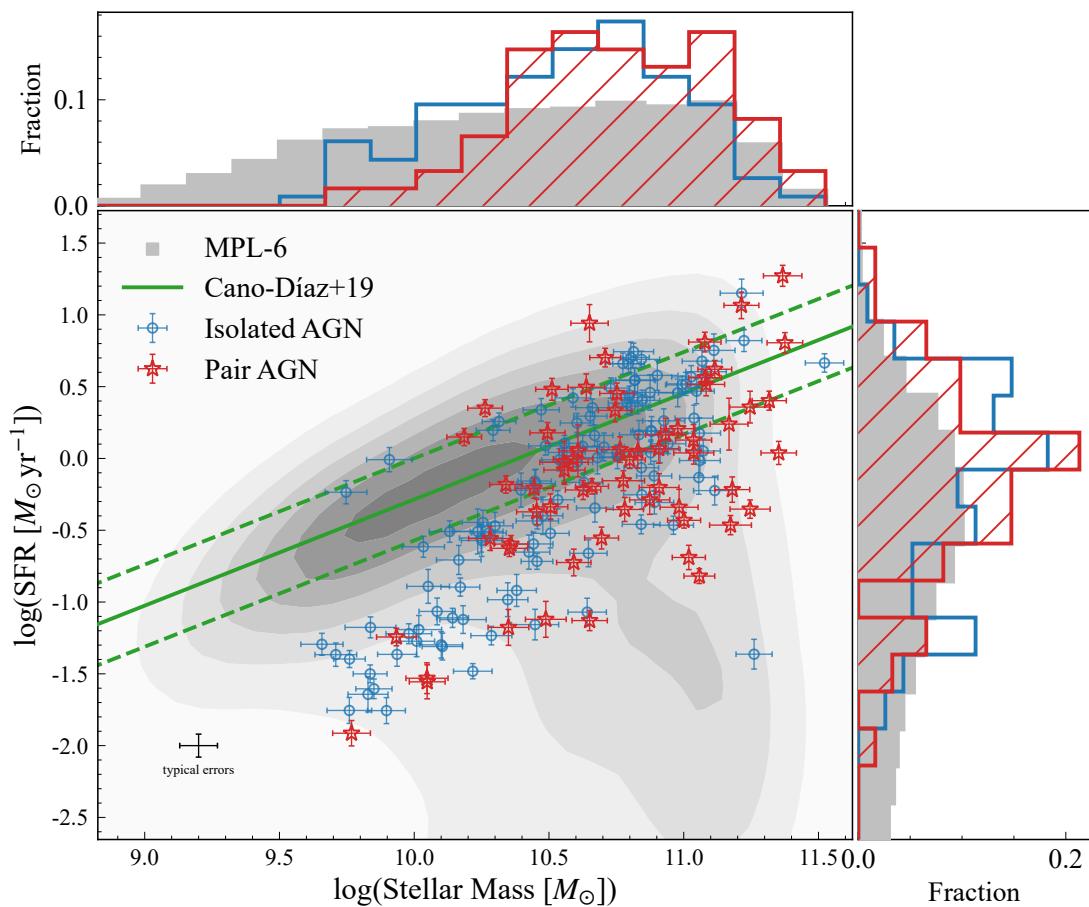


图 2.6 AGN 相对恒星形成主序的位置

Figure 2.6 AGNs in the SFMS diagram

图注：灰色背景是总 MaNGA 样本的数密度分布（高斯平滑后），绿线标出了恒星形成主序及其弥散（来自Cano-Díaz 等 (2019)）。红星和蓝圈分别代表并合系统中的 AGN 和孤立 AGN，二者的分布没有明显差异。

并利用 $H\alpha/H\beta$ 对其进行消光改正（见1.2）。

我们比较了并合系统 AGN 和孤立 AGN 的核区 $\Sigma[\text{O III}]$ -总恒星质量关系。图2.7展示了并合系统 AGN（红色）和孤立 AGN（蓝色）的分布。并合系统 AGN 的 $\Sigma[\text{O III}]$ 中值比孤立 AGN 稍高 0.13 dex（典型误差为 0.06 dex）。和过去利用单光纤光谱的分析相比，我们的结论和[Li 等 \(2008\)](#)一致，即并合对 AGN 的 [O III] 光度影响不大。但与[Liu 等 \(2012\)](#)利用单光纤光谱分析得到的结果不符，他们的统计表明总星系对中 AGN 的 [O III] 总光度要比孤立 AGN 高 0.5-0.7 dex。我们分析矛盾的可能原因有二。一是在[Liu 等 \(2012\)](#)中，[O III] 的总光度是没有经过消光改正得到的。这一点也符合我们在2.4.2的发现，即并合星系 AGN 的巴尔末消光比孤立星系小，所以未作尘埃消光时，孤立星系的 [O III] 光度相对更低。二是单光纤光谱的覆盖区域和我们所选的区域有差异，引起了结论的不同。

总体来看，我们的 AGN 样本的中心 $\Sigma[\text{O III}]$ 基本小于 $10^{41} \text{ erg s}^{-1} \text{kpc}^{-2}$ 。这说明我们的样本主要是中等光度-低光度的 AGN (参考 [Kauffmann 等, 2003](#))。缺少高光度 AGN 也与 MaNGA 的选源策略相符，因为 MaNGA 选源时会回避过亮的 AGN，以免其中心辐射影响了对宿主星系的观测。

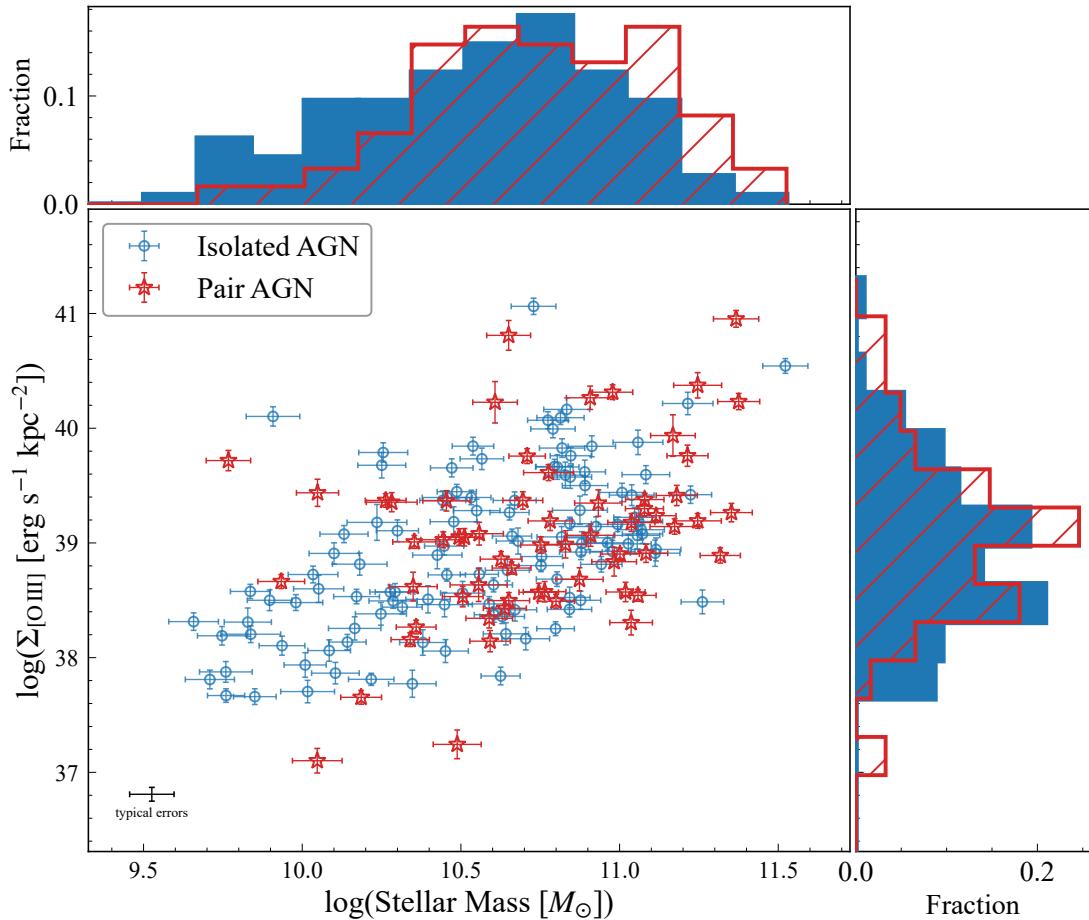


图 2.7 核区 [O III] 面亮度-总恒星质量关系

Figure 2.7 [O III] luminosity surface density vs. M_*

图注：同图 2.6，纵轴换为星系中心区域的 [O III] 面亮度 ($1.5'' \times 1.5''$)。AGN 样本属于中等-低光度 AGN，并合系统 AGN 比孤立 AGN 的 [O III] 面亮度略高 +0.13 dex。

2.4 空间分辨性质

我们在本节研究了孤立星系和并合星系的各种空间分辨性质，包括 sSFR、巴尔末消光、以及 Dn4000 沿星系半径方向的变化。恒星质量越大的星系（或区域），其形成的恒星的总速率一般也越快。sSFR，即比恒星形成率，定义为恒星形成率与恒星质量比值，因此可以去除掉恒星质量与恒星形成率的简并。所以我们使用 sSFR 来比较不同质量星系形成恒星的相对速率。巴尔末消光，定义为观测到的 H α 和 H β 的流量比值。根据电离模型假设，二者的本征比值在一定的电离环境下应为常数 (Osterbrock 等, 2006)。由于 H β 波长更短，因此观测到的比值越大代表消光越严重。因此巴尔末消光一般被用来衡量尘埃消光的程度。由于对河外星系的观测一般选择高银纬天区，系内消光不大，并且光在星系际介质传播过程中的消光一般可以忽略不记，因此巴尔末消光主要代表辐射在宿主星系内部传播时受到的消光。Dn4000 一般可以用来衡量星族年龄。Dn4000 直接代表了星系的在约 400 纳米处的“巴尔末截断”的强度，定义为 400 纳米-410 纳米和 385 纳米-395 纳米两个波长范围内积分流量的比值。由于星系在 400 纳米附近更短波长上的流量主要是由大质量年轻恒星贡献的，因此 Dn4000 越小代表年轻恒星多，星族整体更年轻，反之代表星族更年老。

各种空间分辨性质在本节用 Σ_x 表示，单位是 $\text{M}_\odot \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}$ 。质量面密度 (Σ_{M_*}) 由拟合各位置的消光改正后的连续谱得到。 Σ_{SFR} 由消光改正后的 H α 光度得到，SFR 的计算公式 (Kennicutt 等, 2012) 为：

$$\log\left(\frac{\text{SFR}}{\text{M}_\odot \text{yr}^{-1}}\right) = \log\left(\frac{L_{\text{H}\alpha}}{\text{erg s}^{-1}}\right) - 41.27. \quad (2.4)$$

这一尺度关系成立的前提是所有的 H α 都是由 H II 区中的年轻恒星产生。因此对于受到 AGN 窄线区辐射影响的区域，直接使用这一关系会高估 SFR，我们在此介绍对 AGN 贡献的去除方法。

为了更准确的计算 SFR，我们利用发射线的线流量比估计 AGN 对 H α 的贡献，记为 f_{AGN} 。通过假设恒星形成电离模型和单一的 AGN 电离模型 (例如 Kewley 等, 2002)，Ji 等 (2020) 展示了三组发射线线比的结合可以用来估计 AGN 和恒星形成对 H α 的比例。他们基于大量 MaNGA 空间分辨光谱得到的 AGN 电

离模型，给出了 f_{AGN} 与三组线比 (P_1) 的关系：

$$f_{AGN} = \begin{cases} 0, & P_1 \leq -0.53 \\ 0.14P_1^2 + 0.96P_1 + 0.47, & -0.53 < P_1 < 0.51 \\ 1, & P_1 \geq 0.51 \end{cases} \quad (2.5)$$

其中 $f_{AGN} = H\alpha_{AGN}/H\alpha_{total}$, $P_1 = 0.63 \log([N\text{ II}]/H\alpha) + 0.51 \log([S\text{ II}]/H\alpha) + 0.59 \log([O\text{ III}]/H\beta)$. 我们用这一关系计算出所有信噪比足够的像素的 f_{AGN} , 然后用去掉 AGN 贡献后的 $H\alpha_{SF}$ 代入公式 (2.4) 来计算 Σ_{SFR} 。我们在附录 A 中检验了这一算法。我们将 MPL-10 足够信噪比的所有像素光谱进行 BPT 诊断, 发现在 BPT 图的恒星形成区域, f_{AGN} 的值接近基本为 0, 而 f_{AGN} 沿着 AGN 分支方向逐渐增大, 在边缘处约等于 1。因此我们的改正和预期一样, 仅改正了 AGN 区域的 SFR 计算。

而对于缺少发射线的年老星系, 我们没有可靠的 $H\alpha$ 流量。前人的工作发现 Dn4000 和 sSFR 有一定的相关性 (例如 Brinchmann 等, 2004), 而年老星系也有可靠的基于连续谱的 Dn4000 测量。因此我们利用 MaNGA 数据中大量可靠的 $H\alpha$ 和 Dn4000 测量的像素构建二者的关系, 再用所得关系估算年老星系 (像素) 的 sSFR。关于此关系和其分析, 详见附录 B。

本节计算所用到的各像素的 Dn4000 与发射线流量都来自于 DAP 的结果。对于每个星系, 我们采用的等效半径 R_e 以及椭圆模型是基于 SDSS 的 r 波段图像得到的。本节所构建的径向变化是对 $0-1.5R_e$ 以内 (MaNGA 的可靠覆盖范围) 6 个等分段半径区间 (各 $0.25R_e$) 内的性质分别作加权平均之后得到的。

2.4.1 样本各性质的径向梯度: AGN 宿主星系从内向外“熄灭”

Belfiore 等 (2018) 表明, sSFR 的径向梯度与星系的总恒星质量有关。小质量星系的 sSFR 高而梯度小, 大质量星系的 sSFR 低而梯度大。因此我们首先将样本分为三个质量区间来检查质量对我们梯度分析的影响。三个质量区间分别为 $\log(M_*/M_\odot) < 10.3$ 、 $10.3 < \log(M_*/M_\odot) < 10.8$ 、以及 $\log(M_*/M_\odot) > 10.8$ 。三个质量区间分别有 32、64、53 个 AGN。我们将所有星系自身的 sSFR、巴尔末消光、以及 Dn4000 沿径向的规律用细线标注在图 2.8, 并将每个区间内的中值和标准差用点线标出。其中红色代表并合系统中的 AGN, 蓝色代表孤立 AGN。标准差较大是因为样本数量较小。这些径向梯度表明:

(a) 并合系统 AGN 与孤立 AGN 的 sSFR 梯度在所有质量区间都没有明显区别。在最小质量区间 ($\log(M_*/M_\odot) < 10.3$)，并合星系的 sSFR 径向梯度略小。在较大质量区间 ($\log(M_*/M_\odot) > 10.3$)，两种 AGN 的 sSFR 随着半径增大而增加，表明星系可能正在从内到外“熄灭”。

(b) AGN 的巴尔末消光从内到外减小，表明内部区域的尘埃消光更严重。并合系统 AGN 的巴尔末消光比孤立 AGN 略小 ($<1\sigma$)。

(c) Dn4000 总体随着半径增大而减小，表明 AGN 宿主星系的外围恒星可能比内部的更年轻。和 sSFR 与巴尔末消光类似，小质量区间的梯度最小。这表明小质量 AGN 的内外演化更不明显。

(d) 当质量大于 $10^{10.3} M_\odot$ 时，sSFR、巴尔末消光、以及 Dn4000 的径向分布似乎不再随质量的增加而变化。

AGN 样本中的这些现象和 SFG 有显著不同：SFG 的 sSFR 在并合系统中有明显的增强，特别是在小半径区间 (例如 Pan 等, 2019; Steffen 等, 2021)。并且大质量的 SFG 有明显更低的 sSFR(例如 Belfiore 等, 2018)。

接下来我们按并合阶段分类，进行了类似的分析。图 2.9 和图 2.8 类似，只是各列不再按质量区分而是按照并合阶段区分（包括孤立星系），并且图 2.9 中蓝色代表的是 SFG 而红色代表的是 AGN。不同阶段的 AGN 性质梯度没有明显区别，表明并合没有显著改变 AGN 的内外演化。对于 AGN 整体来说，径向分布和前文得到的结论一致，即 sSFR 随半径增大增加，巴尔末消光和 Dn4000 随半径增大而减小。相比同阶段的 SFG，AGN 的 sSFR 更低且 Dn4000 更高，表明其相比 SFG 正在停止恒星形成。特别是中心区域，AGN 的 sSFR 降低程度更大，支持 AGN 从内到外“熄灭”恒星形成的演化图像。巴尔末消光强度基本一致，表明 AGN 和 SFG 的消光程度区别不大。因为此处没有控制 SFG 和 AGN 样本的恒星质量，所以我们在 2.4.2 进行进一步的详细对照比较，衡量并合对 AGN 和 SFG 影响的区别。

2.4.2 并合对星系的影响：AGN 与 SFG 和年老星系的对比

在本小节中，我们将 AGN 和 SFG 以及年老星系进行比较，分析并合对三种星系的径向性质分布的影响有何区别。和 2.4.1 类似，我们计算了每个样本星系的径向梯度，并用中值来代表样本的整体径向梯度。我们使用用各半径区间的标准

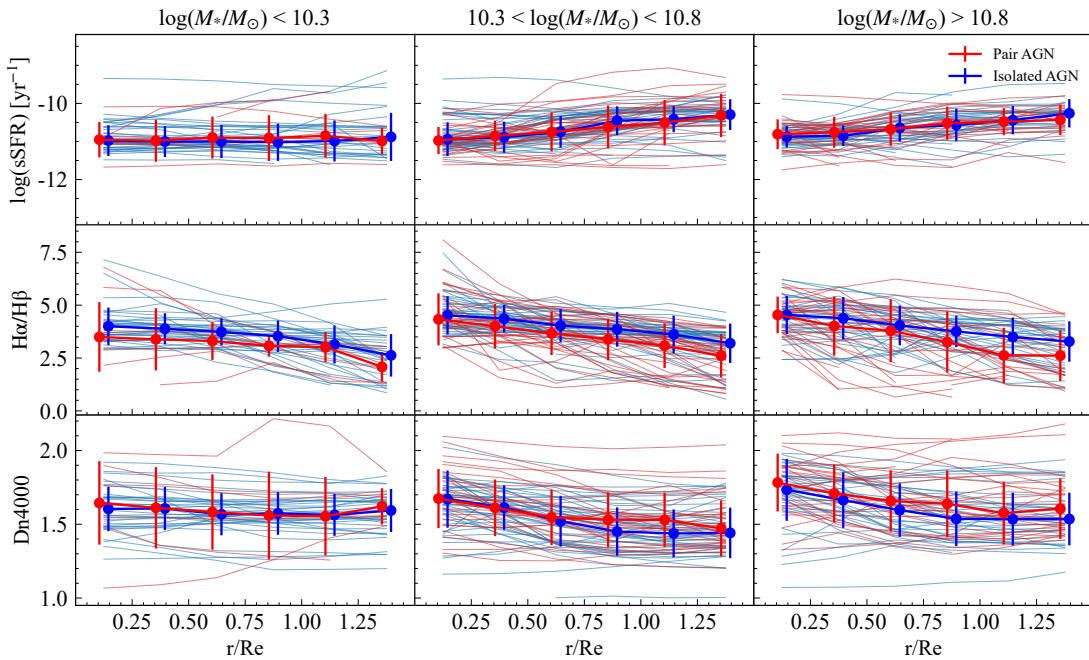


图 2.8 不同质量区间 AGN 的 sSFR、巴尔末消光、Dn4000 随半径的变化

Figure 2.8 The radial

profiles of sSFR, Balmer decrement and Dn4000 for AGNs with different stellar masses

图注：从上到下依次为 sSFR、巴尔末消光、Dn4000 随半径的变化，从左到右为从低到高三个质量区间。图中浅颜色的线代表每个 AGN 宿主星系的径向性质（红：并合系统；蓝：孤立星系）。深色点线代表样本的中值，误差棒用该半径区间中的标准差表示。所选半径范围为 0.00 to 1.50 R_e ，数据点代表其中 6 个等间距半径区间。

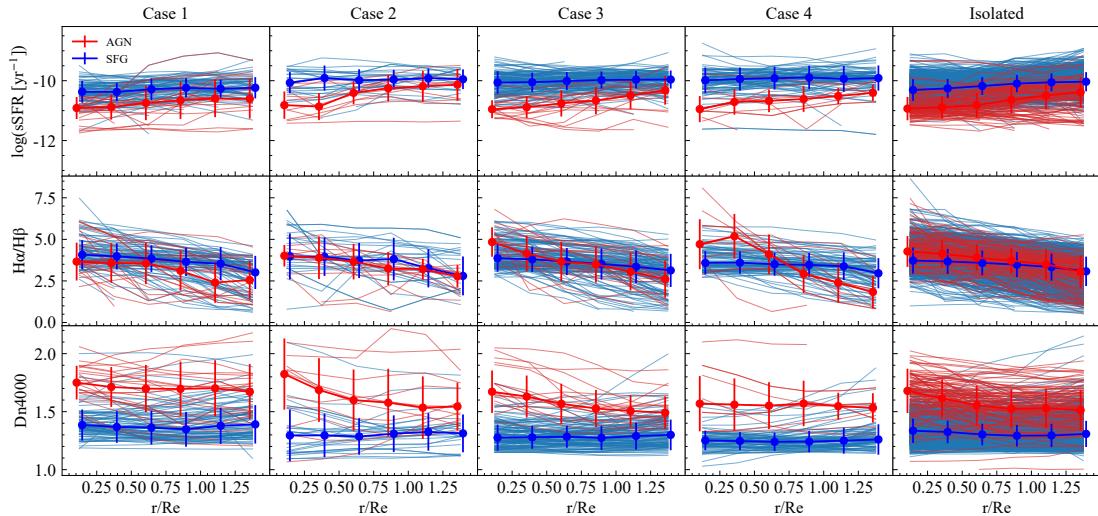


图 2.9 不同并合阶段 AGN 的 sSFR、巴尔末消光、Dn4000 随半径的变化

Figure 2.9 The radial

profiles of sSFR, Balmer decrement, and Dn4000, for galaxies in different merger cases

图注：同图 2.8，按照不同并合阶段重新分组并加入了恒星形成星系作为比较。

误 (error of the mean, σ/\sqrt{N}) 来代表中值的误差，其中 σ 是标准差，而 N 是用于计算中值的相应样本数量。本小节所用的对比样本均是在 2.1.4 中定义的控制了恒星质量的对照组 (详见表 2.1)。

首先我们比较了并合对 SFG 和 AGN 的影响，如图 2.10 所示。在图 2.10 中，红色代表 AGN，蓝色代表 SFG，三角代表并合系统中的星系，圆点代表孤立星系。左栏展示的是样本 sSFR、巴尔末消光、和 Dn4000 的值随半径的变化；右栏展示的是用并合系统样本减掉对应孤立对照后的相对梯度，代表并合对该类型星系的影响。我们发现：

(a) 无论是否位于并合系统，在所有半径下 SFG 的 sSFR 都比 AGN 要高。这说明这些中等光度窄线 AGN 整体已经开始离开恒星形成主序。而越靠近核心，AGN 的 sSFR 降低的越多，表明 AGN 的恒星形成可能是从内到外停止。sSFR 的梯度和 Dn4000 相符，即越强的恒星形成对应越年轻的星族。AGN 的星族比 SFG 更老， $1R_e$ 以内 Dn4000 与半径呈负相关。

(b) AGN 的巴尔末消光比 SFG 略小，梯度接近。这可能代表 AGN 的尘埃消光更低，也可能代表 AGN 宿主星系的电离气体电子密度更高、温度更高 (Osterbrock 等, 2006)。

(c) 并合显著提高了 SFG 的 sSFR (约 +0.2 至 +0.4 dex)，而没有提高 AGN

的 sSFR。SFG 中 sSFR 的增强随半径的减小而增大，而 AGN 中各个半径处的 sSFR 变化都接近于 0。 $\Delta Dn4000$ 梯度也有相应的规律。并合降低了 SFG 各个半径处的 Dn4000，且在中心区域最为明显。但并合没有降低 AGN 的 Dn4000，在 $\sim 1 R_e$ 以外的区域还有略微的提高。

(d) 半径越大的区域，并合 AGN 的巴尔末消光相比孤立 AGN 更低。而并合 SFG 的巴尔末消光和孤立 SFG 在各个半径处接近。

这些结果表明，并合对 AGN 各区域的恒星形成产生的影响有限，这与并合对 SFG 的恒星形成增强作用明显不同。

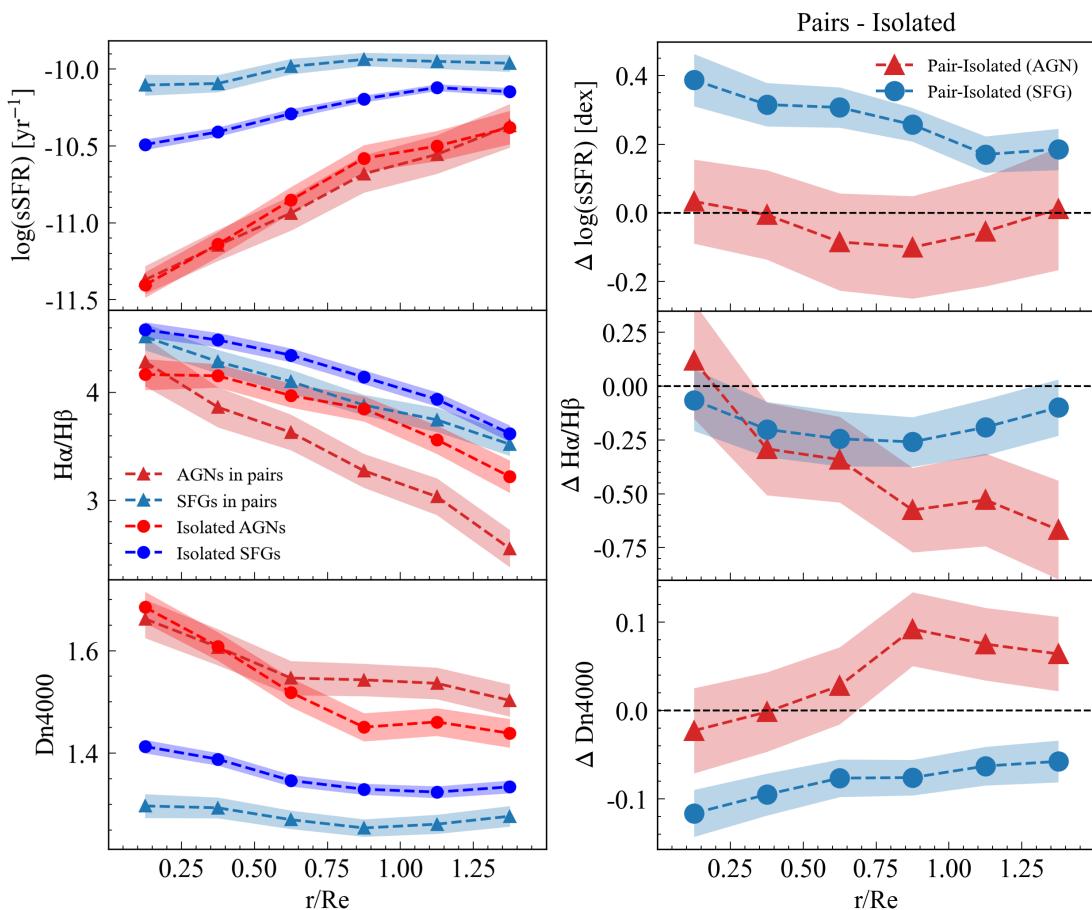


图 2.10 并合对星系径向梯度的影响：AGN 对比 SFG

Figure 2.10 Comparison of the radial profiles between mass-controlled AGNs and SFGs

图注：左栏：各样的 sSFR、巴尔末消光、Dn4000 中值随半径的变化。蓝色代表 SFG，红色代表 AGN。右栏：左栏中并合样本减去孤立样本的差，代表并合的影响。

随后我们对 AGN 和年老星系进行了相似的分析。我们没有将三类星系一并分析的原因是年老星系和 SFG 的质量分布区间差异过大，难以构建二者的控制

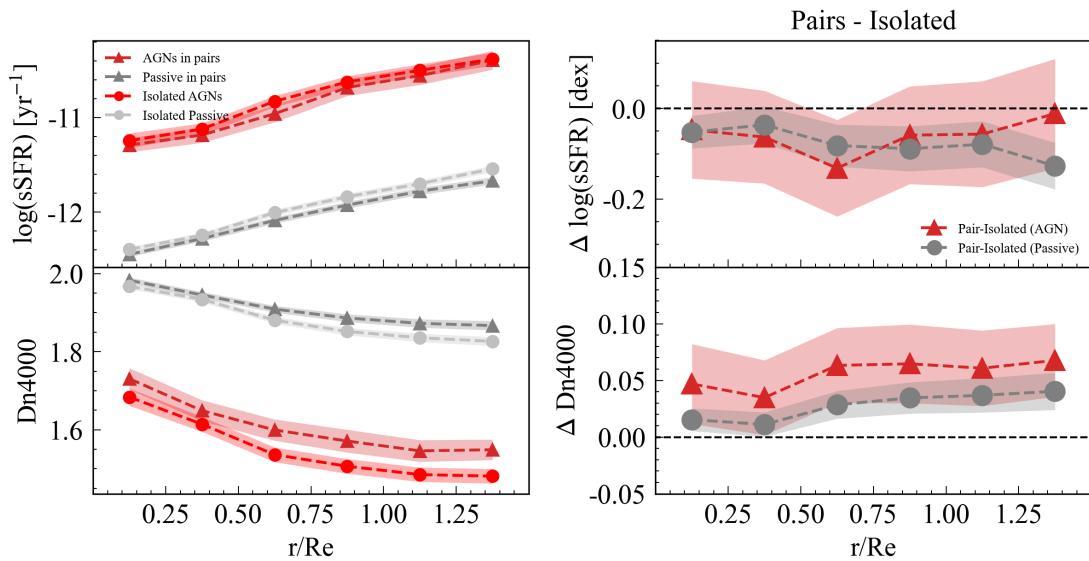


图 2.11 并合对星系恒星形成径向梯度的影响: AGN 对比年老星系

Figure 2.11

Comparison of the radial profiles between mass-controlled AGNs and passive galaxies

图注: 同图 2.10, 对照样本为年老星系。灰色代表年老星系, 红色代表 AGN。

质量对照样本。年老星系的恒星形成率由于过低而很难估计。一系列工作采用了 Dn4000 或 D4000 来估计年老星系的 sSFR, 包括基于单光纤光谱的研究(例如 Brinchmann 等, 2004; Rosario 等, 2016)和近期基于 IFU 的研究(例如 Wang 等, 2019; Bluck 等, 2020)。受此启发, 图 2.11 的年老星系的 sSFR 是由 Dn4000 的经验关系得到的(详见附录 B)。同时, 因为这些星系的大多缺少 H α 和 H β 的发射, 我们不再分析其巴尔末消光的梯度。

图 2.11 展示了 AGN 对比年老星系的结果。其中红色是 AGN, 灰色是年老星系, 同样的, 三角代表并合系统而圆点代表孤立系统。从左栏可以看出年老星系和 AGN 有类似的“从内向外熄灭”的 sSFR 趋势, 即 sSFR 随半径的减小而降低。但 AGN 的 sSFR 要明显比年老星系更高。结合前文的分析, AGN 的 sSFR 在各个半径处都位于 SFG 和年老星系之间, 表明 AGN 宿主星系可能处于 SFG 到年老星系的转化过程中, 且核区“熄灭”的更快, 盘上“熄灭”的较慢。从右栏可以看出, 并合对 AGN 和年老星系的恒星形成都没有促进作用。由于并合系统中的星系环境密度更大(见 2.2.2), 并合系统中的 AGN 和年老星系还表现出略微的 sSFR 降低, 但是降低都在误差范围之内。

总结来说, 星系并合能够增强 SFG 的 $1.5R_e$ 以内各处的恒星形成, 而且越

靠核区的增强越强。但并合其对 AGN 和年老星系则没有这一效果。可能是缺少气体原料或者其它相关的物理过程阻止了并合 AGN 中的恒星形成被增强。

第3章 中性氢观测

中性氢是星际介质和恒星形成原料的重要成分。其分布一般比较弥散而延展，特别是在并合星系系统中。FAST 是目前世界上最大的单镜射电望远镜，其主要工作波段 L 波段可以覆盖中低红移星系的中性氢谱线，故可以用来高效地观测 MaNGA 星系的中性氢。FAST 的空间分辨率约为 3 角分，不能分辨大多数 MaNGA 星系，但其速度分辨率可达 $\sim 1.7 \text{ km s}^{-1}$ ，有助于我们分析获得的中性氢谱线的形状轮廓。本章介绍了我们使用 FAST 对 6 个并合系统的观测结果，结构如下：首先是子样本的信息和观测设置，对于我们的观测设置，由于 FAST 还没有官方的 H I 谱线 pipeline，所以我们详细介绍了数据的处理；随后我们分析了样本中性氢的丰度并比较了其它 H I 巡天的结果；最后我们比较了 H I 的谱线和 MaNGA 的 IFU 数据提供的 $\text{H}\alpha$ 信息。

3.1 样本与观测

我们的观测样本是从上一章的 BPT 分析后的并合系统样本中选择的。为了更可能探测到中性氢，我们要求并合星系的红移小于 0.03 且都是恒星形成主序上的星系。系统名称用主星系的 MaNGA 名称 (Plate-IFU) 表示。6 个源中，9194-12701 和 8254-12701 是 Case1 中的较早期的并合系统，8978-12705 和 8241-12705 是相互作用明显的 Case2 和 Case3 星系，9507-12704 和 8725-9101 是 Case4 的并合后星系。其中，8254-12701 是 SFG+ 年老星系对，9194-12701 是 SFG+SFG 星系对，8978-12705 是 AGN+ 年老星系对，8241-12705 是 composite+SFG 星系对，9507-12704 是并合后 AGN 而 8725-9101 是并合后的 SFG。样本的性质总结见表 3.1。

我们的观测采用了 ON-OFF (源上-源外) 模式，每次 ON 和 OFF 观测五分钟，每个并合系统进行 8 组 ON-OFF 观测。定标噪声在每次 ON 或 OFF 的前 20 秒注入。观测所用波段为 L 波段，L 波段以 7.63kHz 的谱分辨率覆盖了 1.05GHz 到 1.45GHz 的范围。7.63kHz 在我们的观测红移对应的速度分辨率约为 1.6 km s^{-1} 。FAST 的 19 波束接收机在 L 波段的性能可以参考 [Jiang 等 \(2020\)](#)。中心波束 (M01) 在观测频率的半功率束宽 (half-power beamwidth) 约 2.9 角分，远大于我们的并

表 3.1 FAST 观测的 6 个并合系统基本信息

Table 3.1 Information of the 6 merger systems observed by FAST

ID	<i>z</i>	BPT Class	Total M_*	Total SFR	Merger Case
			$\log(M_\odot)$	$\log(M_\odot \text{ yr}^{-1})$	
9194-12701	0.0287	SFG+SFG	10.24	0.19	Case1
8254-12701	0.0258	SFG+Passive	10.38	-0.46	Case1
8978-12705	0.0286	AGN+Passive	10.88	0.25	Case2
8241-12705	0.0269	Composite+SFG	10.37	-0.14	Case2
9507-12704	0.0182	AGN	10.49	-0.14	Case4
8725-9101	0.0073	SFG	8.77	-0.89	Case4

合系统尺度（约 1 角分），因此足够观测到系统的绝大多数中性氢成分。考虑到波束较大，我们在选源时要求并合系统周围约 2 角分内没有其它低红移星系。

ON 观测的位置设置在并合系统的接近中心的位置。随后我们在 ON 位置外约数十角分的位置选取 OFF 位置，保证选取的 OFF 观测的位置约 2 角分内没有低红移星系，以免影响谱线处理。6 个源的观测在 2021 年下半年完成，具体时间见表 3.2。

3.2 数据处理

本节介绍了我们得到中性氢谱线的数据处理过程和结果。对 FAST 的调试和优化还在进行当中，目前还没有 FAST 的 ON-OFF 模式观测河外中性氢的处理程序。我们的数据处理参考了 Jiang 等 (2020) 和 Cheng 等 (2020) 的测试和思路，并对去除射频干扰 (Radio Frequency Interference, RFI)、拟合基线等步骤根据我们的观测设置和观测结果进行了优化。图 3.1 总结了我们数据处理的所有步骤并给出了相应的例子。由于星系的中性氢辐射应当是无偏振的，所以我们分别处理了两个偏振的结果，用其中信噪比高的偏振的结果进行分析。详细的步骤如下。

3.2.1 提取 ON、OFF 观测并去除时域 RFI

图 3.1(a) 是一个源的观测的原始数据“瀑布图”(时间-频率图，流量用颜色代表)。我们选取了中心频率(由光学红移得到)周围 16MHz 的区域(横轴)作为数据处理的部分，纵轴代表观测时间，颜色代表观测到的流量强度。红色代

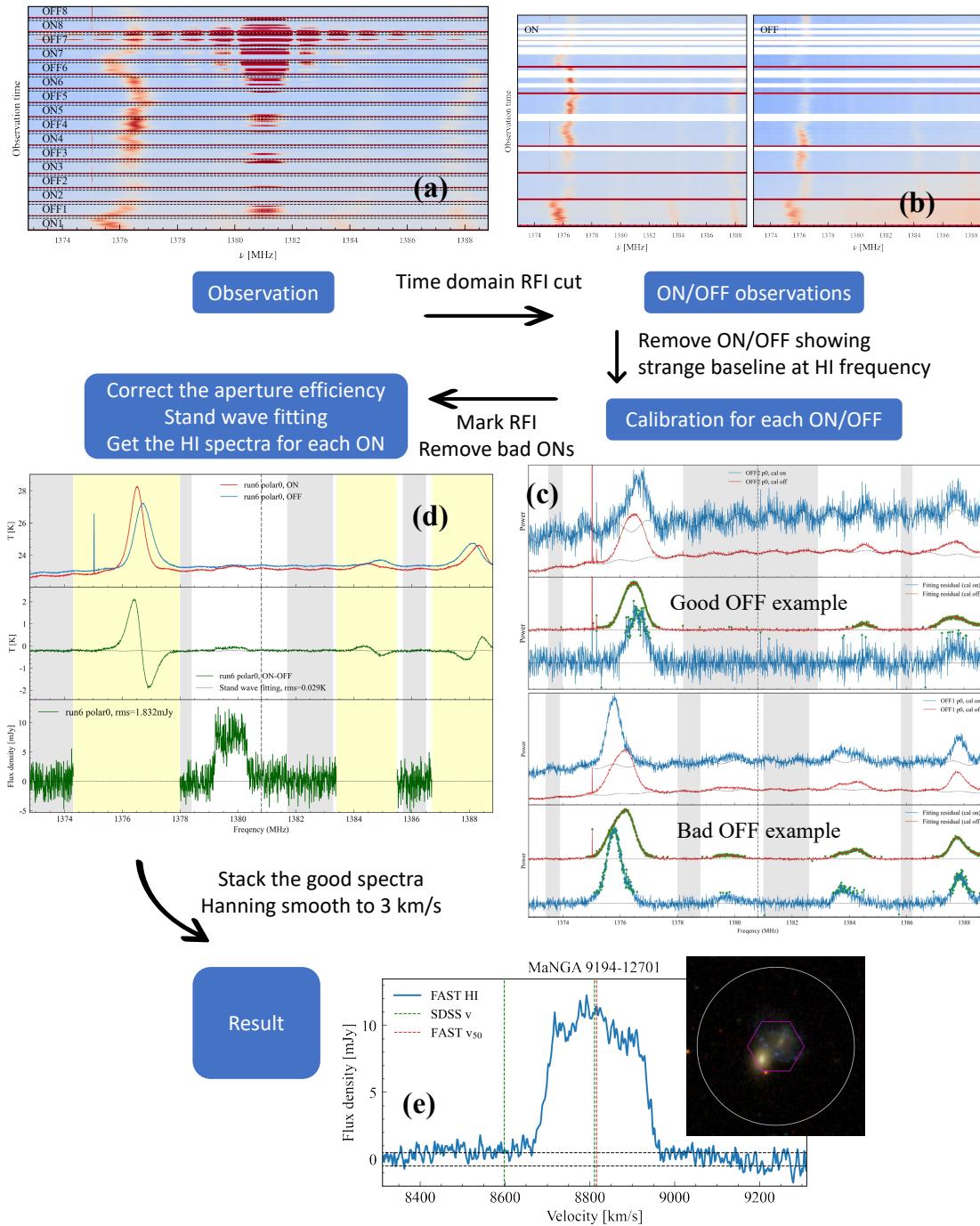


图 3.1 FAST 数据处理流程示例

Figure 3.1 Illustration of the data reduction

图注：图中的观测数据以及谱线处理选自 9194-12701。箭头代表处理的先后流程，文字描述了各步骤的工作。

表强流量，蓝色代表弱流量。我们标出了 8 组 ON-OFF 观测的区域，每组 ON 或 OFF 开始的 200s 深红色代表打开强定标噪声的时段。每组 ON、OFF 的观测之间有一分钟或半分钟的切换时间（取决于 OFF 的距离）。除了这些高强度定标噪声，其余深红色区域即为 RFI。可以看出 RFI 由两部分组成。时域 RFI 会突然出现或消失，强度很强，在很大频率范围内都出现，频率方向呈 sinc 函数形状。而频域 RFI 略弱，强度随时间以及频率的变化较为连续，出现的频率范围不大。我们在提取 ON-OFF 观测的同时，根据强度标记时域 RFI 并手动去除。提取的 ON、OFF 观测和去除时域 RFI 的结果如图 3.1(b) 所示。

3.2.2 温度定标

得到了每一次的 ON 或 OFF 观测后，为了减少系统温度变化的影响，我们对其分别定标温度，用于下一步的谱线流量处理。定标的过程如下：

(1) 我们首先对开噪声管的和关噪声管的时段进行平均，得到相应的频谱，在图 3.1(c) 第一行中分别用蓝色和红色表示（二者纵轴方向的间隔被手动调整，以便比较，不代表流量强度的差）。无 RFI 区域类似正弦函数的波动是 FAST 观测的驻波，由镜面和波束之间的反射造成，频率周期稳定在约 1.08MHz。

(2) 接下来我们对开关噪声管的频谱进行驻波基线拟合。FAST 的驻波的振幅在我们处理所用的 16MHz 的范围内基本不变，因此我们使用多项式加三角函数来拟合驻波与基线。拟合所用函数可用公式3.1表达：

$$p = A + B \times v + C \times v^2 + D \times v^3 + E \times \sin(F \times v + G), \quad (3.1)$$

其中 A-G 为拟合参数。拟合的范围选取没有 RFI 或 HI 信号的频率范围，且需要大于 3 个驻波周期，以保证能够可靠地拟合驻波和基线。所用拟合区间在图 3.1 中用灰色背景表示。图 3.1 拟合得到的曲线用黑色虚线标出。

图 3.1(c) 第二行展示了扣掉了基线和驻波的结果。高出零点的区域即是受到频域 RFI 影响的区域。此步骤还可以用来判定 HI 信号是否受到了 RFI 影响。我们用拟合的结果相减作为定标温度的流量差，这样可以去掉 RFI 的影响。根据已知的噪声管温度 $\overline{T}_{\text{noise}}$ ，流量强度 \bar{f} 可以转换为温度，单位为开尔文 (K)，如公式 3.2 所示：

$$\overline{T}_{\text{cal off}} = \overline{T}_{\text{noise}} \times \frac{\overline{f}_{\text{cal off}}}{\overline{f}_{\text{cal on}} - \overline{f}_{\text{cal off}}}, \quad (3.2)$$

其中 $\overline{f_{\text{cal off}}}$ 是关噪声管平均频谱的流量（红线）， $\overline{f_{\text{cal on}}}$ 是开噪声管平均频谱的流量（蓝线）。

此步骤中我们只会保留部分可靠的 ON 或 OFF 观测。舍弃的观测分为以下几种情况：如果开噪声管的时段受到时域 RFI 的影响，我们舍弃本次 ON 或 OFF 观测。如果 HI 信号区域可以看出受到频域 RFI 的影响，我们舍弃本次 ON 或 OFF 观测。如果 OFF 观测的 HI 信号区域明显出现高于基线的流量，如图 3.1(c) 后两行所示，我们舍弃本次 OFF 观测。

3.2.3 ON-OFF 得到中性氢谱线

接下来我们使用定标过的 ON 和对应的 OFF 处理出中性氢信号的谱线。每个 ON 的对应 OFF 是其前后 OFF 的叠加得到的（如果有），例如 ON2 的对应 OFF 是由 OFF1 和 OFF2 得到。我们首先按照公式 3.3：

$$T_{\text{line}}(\nu) = (T_{\text{ON}}(\nu) - T_{\text{OFF}}(\nu)) \times \overline{T_{\text{OFF},\text{line}}}, \quad (3.3)$$

得到未去除驻波和系统温度差的谱 $T_{\text{line}}(\nu)$ ，并标记频域 RFI（图 3.1(d) 黄色区域）。

再用公式 3.1 拟合剩余的、除去 RFI 和信号频段（图 3.1(d) 灰色区域）的基线并扣除，我们保证基线拟合的区域在信号两侧都有至少约两个周期的范围，以保证拟合结果可靠。再去除 RFI 的部分，根据 M01 在约 1.4GHz 处的天线增益（采用 Jiang 等 (2020) 的结果，约 16.02KJy^{-1} ），换算为相应的 ON 观测的谱线（单位 mJy）。FAST 在对天顶角大于 26.4 度的源观测时会损失增益，因此我们根据 Jiang 等 (2020) 给出的测试关系，对增益进行改正。至此我们得到了每次 ON 的去除基线后的 HI 谱线（单位 mJy），图 3.1(d) 第三行展示了其中一个例子。

最后，我们将所有 ON 观测的 HI 谱线按照信噪比加权叠加，再进行一次 hanning 平滑将速度分辨率平滑到约 3.3 km s^{-1} ，并将频率换算到对应的速度（单位 km s^{-1} ，见 1.2），得到每个源的最终 HI 谱线（单位 mJy），如图 3.1(e) 所示。观测的基线噪声 rms 由所有用于拟合基线频段的交集区域算得。真实观测时间由参与得到最终结果的所有谱线时间总计得到。我们在表 3.2 总结了观测信息和观测结果。其中 v_{50} 是 HI 的中心速度，由对 HI 谱线的两侧进行线性拟合，再按照两条拟合直线的流量等于 0 时的平均速度得到。 F_{max} 是 HI 谱线的最大流量密度，单位为 mJy。我们在图 3.2 中展示了所有谱线。有 5 个系统都有高信噪比

的 H I 探测，包括 1 个出现了明显 H I 吸收的系统。8254-12701 没有探测到 H I，后文的分析给出了 H I 流量（质量）的上限。

表 3.2 FAST 观测结果

Table 3.2 Results of the FAST observations

Plate-IFU	Date	ON R.A.	ON Decl.	Exposure time	rms	F_{\max}	$\log(M_{\text{HI}})$	v_{50}
				s	mJy	mJy	$\log(M_{\odot})$	km s^{-1}
9194-12701	2020-11-21	03:06:14.39	-00:20:37.9	1482.9	0.499	12.262	9.96	8816.0
8254-12701	2020-09-14	10:44:40.76	+44:03:59.5	599.4	0.503	1.456	<8.26	
8978-12705	2020-09-14	16:38:14.44	+41:56:33.2	2018.2	0.340	5.509	9.42	8518.3
8241-12705	2020-09-16	08:30:31.53	+18:12:16.1	2377.5	0.290	4.207	9.50	8135.6
9507-12704	2020-11-06	08:38:24.12	+25:45:15.0	299.0	0.658	6.828	>8.71	5553.5
8725-9101	2020-11-21	08:27:18.32	+46:02:09.8	2400.0	0.464	17.384	8.40	2194.5

3.2.4 对比 H I-MaNGA

H I-MaNGA 是基于 MaNGA 样本的中性氢巡天项目，计划观测红移 0.05 以下的 MaNGA 星系的中性氢。已经发布的 H I-MaNGA 数据由两部分组成。一部分是来自 ALFALFA(Giovanelli 等, 2005) 巡天的数据，由 ALFALFA 巡天范围内的 MaNGA 星系和 ALFALFA 结果匹配得到。另一部分是使用绿岸望远镜(GBT)对没有 ALFALFA 观测的 MaNGA 星系的补充观测。我们在此将 H I-MaNGA 最新发布的数据作为参考样本和验证观测。

在图 3.2 中，我们比较了 FAST 和 H I-MaNGA 的结果。可以看出，FAST 新观测的信噪比有了显著提升，能够使我们更准确地研究 H I 较弱的源 (8978-12705、8241-12705、9507-12704) 的谱线形状。另一方面，两次观测的谱线速度符合得很好，证明了我们后文对 H I 和 H α 基于谱线速度的分析是可靠的。

我们在图 3.3 中比较了 FAST 和 GBT 的性能。一般近似认为射电谱线观测的 rms 与观测时间的平方、望远镜等效面积成反比，与谱分辨率的平方成正比（不考虑系统温度等因素的影响下）。图中黑色实线是 GBT 在谱分辨率约 10 km s^{-1} 的性能估计，蓝点是 H I-MaNGA 的实际观测结果。红星是本次 FAST 的观测结果，谱分辨率约 3.3 km s^{-1} 。黑色虚线是约 3.3 倍 GBT 敏感度的近似关系。因此我们估计按照本文的观测设置，FAST 的灵敏度约为 GBT 的 5 倍。

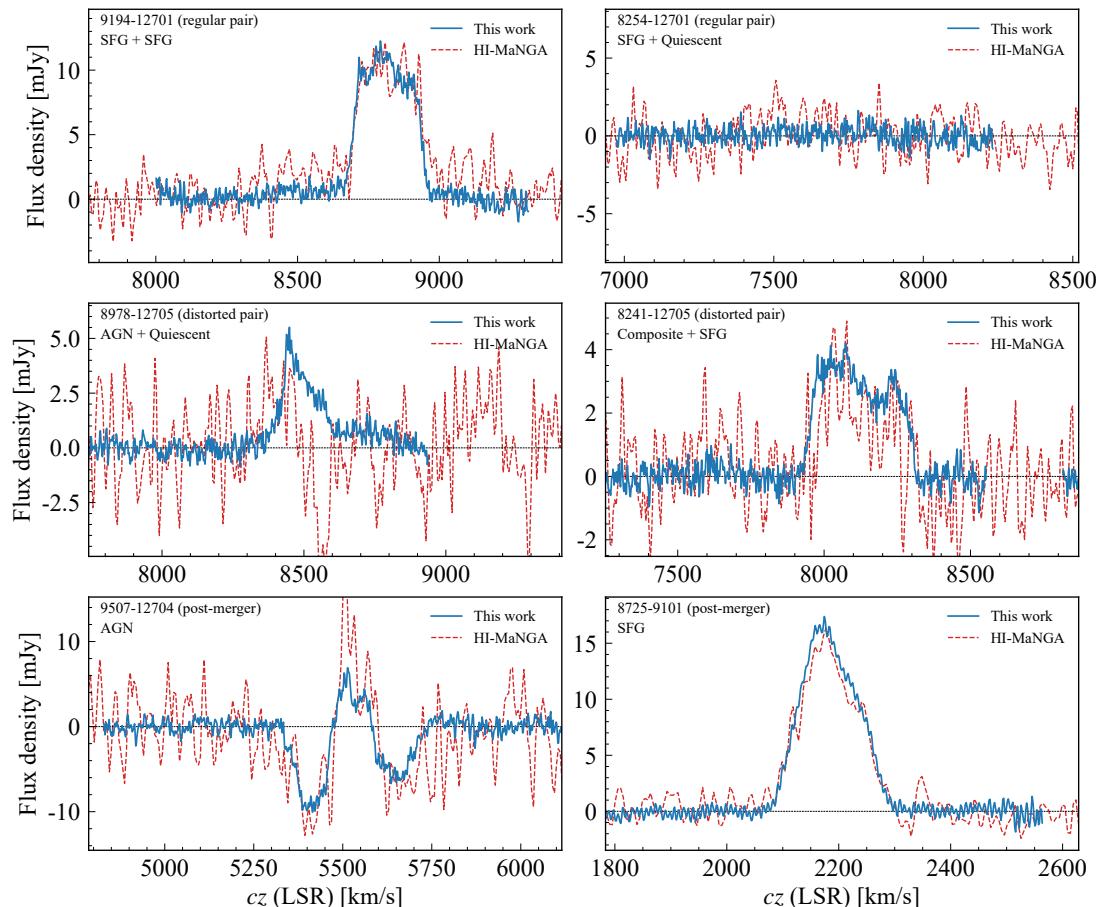


图 3.2 FAST 观测到的并合系统 H I 谱线

Figure 3.2 The H I spectra of all six merger systems

图注：红色为 H I-MaNGA 巡天的数据。FAST 的观测速度分辨率更高且信噪比更高。两次观测的在速度方向高度一致。

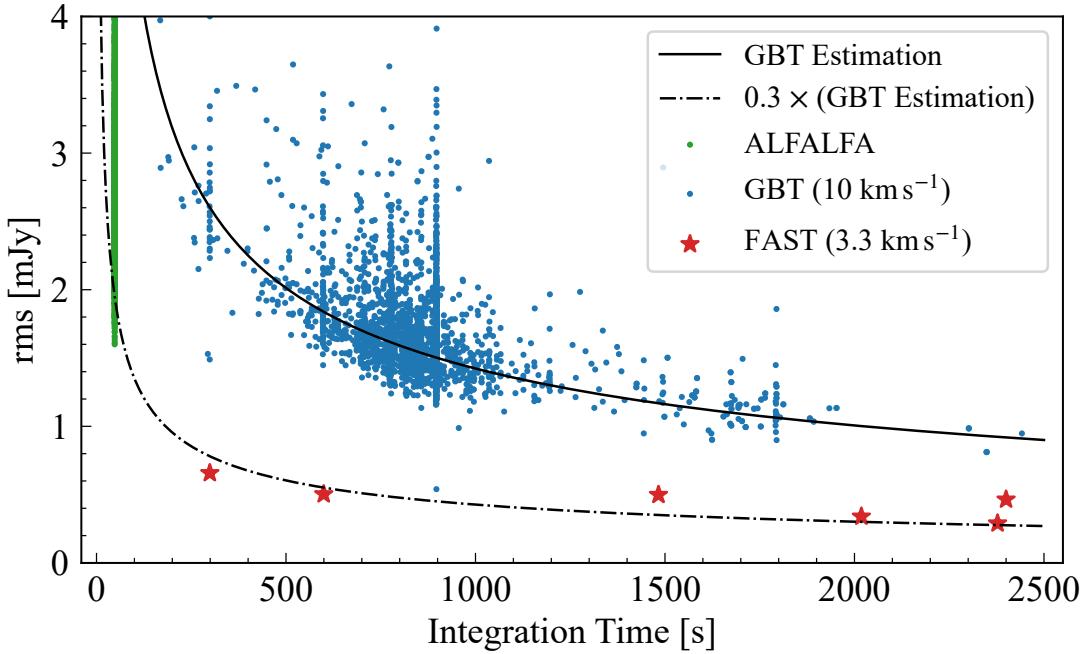


图 3.3 FAST 观测的 rms-时间关系与 GBT 的比较

Figure 3.3 The rms-t relation of our observation

3.3 中性氢含量与恒星形成效率

我们根据上节得到的 H I 谱线计算系统中性氢的总质量。我们使用的公式和 Stark 等 (2021) 保持一致：

$$\frac{M_{\text{HI}}}{M_{\odot}} = \frac{2.36 \times 10^5}{(1+z)^2} \left(\frac{D}{\text{Mpc}} \right)^2 \int S(v) dv, \quad (3.4)$$

其中 $S(v)$ 是谱线流量密度，单位是 Jy beam^{-1} ； D 是星系的基于光学红移得到的光度距离。此公式是由 Roberts (1975) 首先推导的。推导假设 H I 是光学薄的，并且考虑了 H I 的自吸收。

6 个系统的 H I 质量 (M_{HI}) 已在表 3.2 中列出。其中上限是由于没有足够信噪比的探测。9507-12704 的下限是由于出现了 H I 吸收，因此我们的计算只包括了谱线区域高于 0 的流量。

星系的中性氢的比例 (含量) 一般随着恒星质量增大而减小，即 H I-scale relation。首先我们检查了 6 个系统的中性氢含量 $\log(M_{\text{HI}}/M_*)$ 的相对丰度。图 3.4 展示了 FAST 观测的 6 个并合系统的中性氢含量以及其与其它大样本巡天的结果对比。蓝色点代表没有 AGN 的并合系统，红色点代表含有 AGN (或 composite galaxy)。绿点和灰点是 H I-MaNGA 的样本分布，其中灰色代表信噪比足够的探

测，绿色的探测上限由信噪比小于 3 的谱线给出的 M_{HI} 上限算得。各黑色虚线是由其它大样本巡天给出的中值关系，从上到下依次为：[Huang 等 \(2012\)](#) 给出的早期 ALFALFA 巡天的观测结果，可以近似代表富 H I 星系的关系；[Catinella 等 \(2018\)](#) 给出的更深的 xGASS 巡天的结果，关系考虑了无探测源的贡献；[Cortese 等 \(2011\)](#) 给出的室女座星系团中星系得到的关系，代表了星系团环境下的中性氢含量关系。

总的来看，两个含 AGN 的并合系统的中性氢含量处于正常水平。出现吸收的 AGN 并合系统在此不作讨论。三个不含 AGN 的并合系统分布区间较大，包括一个富 H I 系统、一个正常系统和一个 H I 含量极低的系统。其中没有探测的 8254-12701 是由一个 SFG 和一个年老星系组成，位于恒星形成主序且不在星系团环境中，但其中性氢含量甚至低于星系团环境的平均关系。

原子气体恒星形成效率 SFE，定义为 SFR 和 M_{HI} 的比值，代表星系将原子气体气体转化为恒星的效率。GASS 巡天的结果显示表明低红移星系的原子气体 SFE 与恒星质量相关性不强 ([Schiminovich 等, 2010](#))。我们在图 3.5 中比较了 FAST 样本（红蓝方形）和 H I-MaNGA 中有探测的星系（灰色点）的 SFE。黑色虚线是 GASS 样本的中值。H I-MaNGA 样本的 SFE 和恒星质量由微弱的负相关，均值比 GASS 样本 ([Schiminovich 等, 2010](#)) 更低，可能与观测更深有关。过去的研究表明，星系对中的原子气体恒星形成率和孤立星系接近 ([Zuo 等, 2018](#))。我们样本 6 个并合系统的恒星形成效率总体比 H I-MaNGA 平均稍高，在 GASS 样本的中值上下。其中没有探测的 8254-12701 是一个 SFE 很高的系统，其缺乏原子气体但仍然保持了主序程度的 SFR。三个 AGN 的 SFE 没有偏离总体样本。

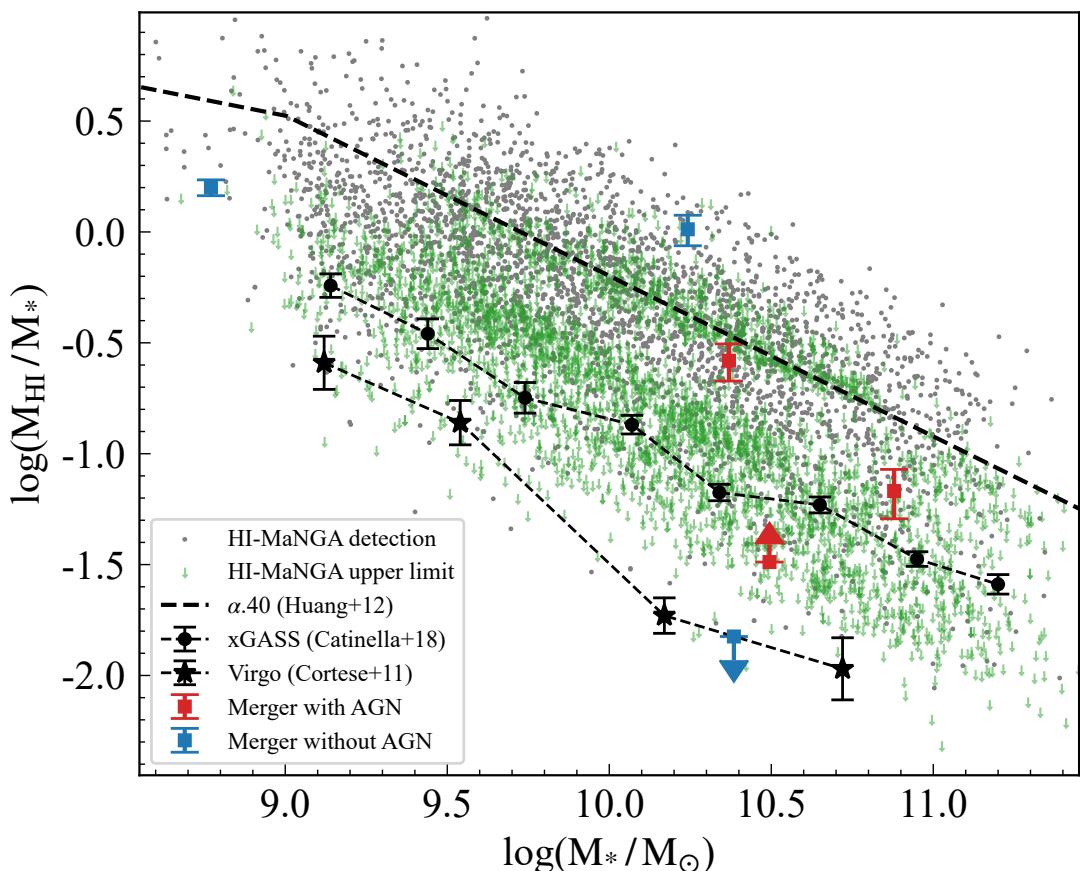


图 3.4 样本的中性氢含量

Figure 3.4 The atomic gas fraction of our sample

图注：样本的中性氢含量与恒星质量的关系。红色点为 FAST 观测的含 AGN 的并合系统，蓝色点为 FAST 观测的不含 AGN 的并合系统。灰色点代表 H I-MaNGA 有探测的星系，绿色代表探测上限的源，其中较高的绿色序列是 ALFALFA 的观测，较低的为 GBT 观测。三条虚线分别代表其它巡天的平均结果。

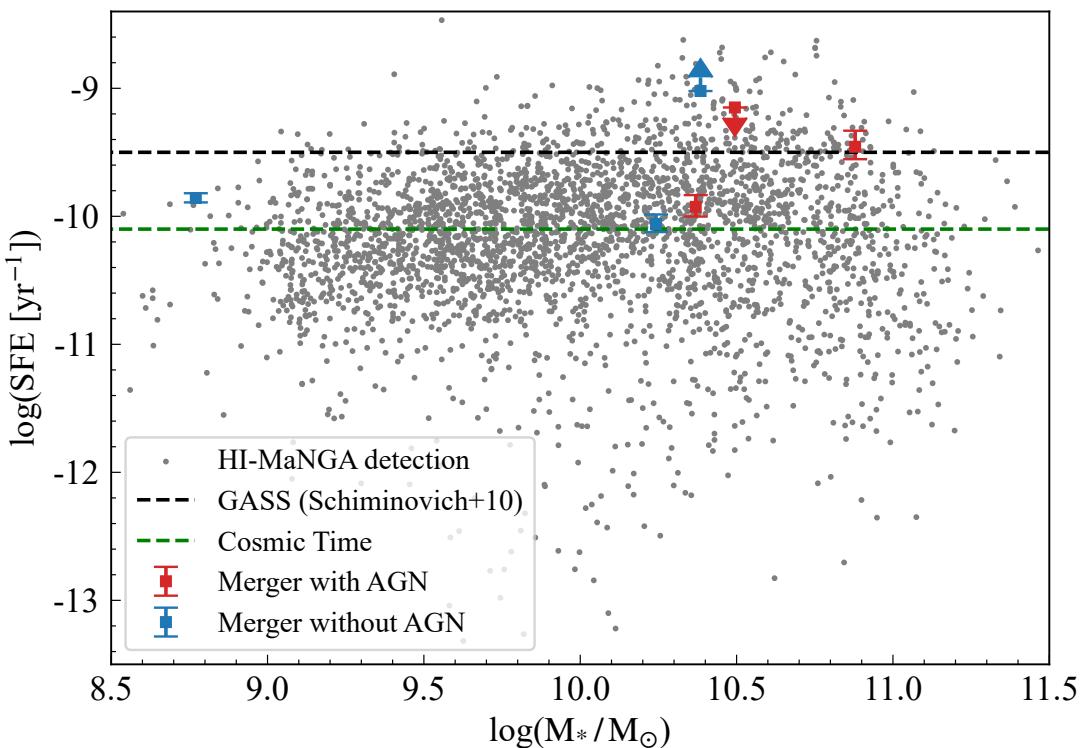


图 3.5 样本的原子气体恒星形成效率

Figure 3.5 The atomic gas SFE of our sample

图注：红色为含 AGN 的并合系统，蓝色为不含 AGN 的并合系统。灰色为 H I-MaNGA 的探测样本分布。黑色虚线是 GASS 巡天结果的 SFE 中值。

3.4 FAST 的 H I 谱线与 MaNGA 的 $H\alpha$ 对比

H I 谱线相当于整个星系未分辨的中性氢发射线的流量在速度方向上的分布。由于星系的旋转速度曲线在一定半径后基本不再增加，并且中性氢集中在星系附近，所以一个旋转的 H I 盘的谱线经常呈现双峰形状。对于电离气体，大部分 $H\alpha$ 光谱都是光纤得到的，因此仅代表空间区域很小、速度范围也很小的电离气体发射。光学光谱的谱分辨率一般也不足以探测到 100 km s^{-1} 左右宽的 $H\alpha$ 的细节结构。这两个原因导致目前基本没有对比单镜望远镜 H I 谱线和 $H\alpha$ 谱线的研究。我们在本节尝试用 IFU 数据来克服上述困难，比较了 4 个系统的 H I 谱线和 $H\alpha$ 谱线分布。因为 IFU 数据覆盖了星系尺度的区域，提供了整个星系的 $H\alpha$ 速度场以及流量分布，弥补了光学光谱观测覆盖面积不足的问题。同时，不同像素上光谱高斯拟合得到的 $H\alpha$ 中心速度可以用来近似此处的电离气体速度，克服了光学光谱谱分辨率不足的问题。我们叠加整个 IFU 视场内位于相应速度区间的 $H\alpha$ 的流量，即可得到与 H I 类似的，整个 IFU 视场内的 $H\alpha$ 流量密度-速度谱线。

图 3.6、3.7、3.8、3.9展示了上文描述的 H I- $H\alpha$ 流量密度-速度谱线比较。图中主体部分展示了 H I 谱线（蓝线）和 $H\alpha$ “谱线”（红线），二者纵轴尺度不同，为了方便比较相对强度进行了归一处理，流量密度值分别在左右纵轴标明。主图中还附上了 IFU 得到的速度场。红色代表红移，蓝色代表蓝移，颜色条沿主图的横轴标出，代表了速度场中的颜色与横轴的速度值一一对应。速度场图中的黑色虚线等高线是 $H\alpha$ 的流量等高线图。主图的上方是沿横轴对流量密度的累积比例统计。蓝实线代表 H I，红虚线代表 $H\alpha$ 。形状差异代表 H I 和 $H\alpha$ 流量在某速度上的集中程度不同；50% 处横向差异代表二者的流量加权的中心速度的差异，可近似示踪总原子气体和总电离气体在视向方向的质心速度偏移。

接下来我们对六个并合系统的 H I 谱线分别进行讨论，着重比较了 FAST 观测的 H I 和 MaNGA 得到的 $H\alpha$ 的速度分布之间的差异。

9194-12701: 该系统是一个并合特征不明显，投影距离较近的并合系统，由两个 SFG 组成。从图 3.6 中的 $H\alpha$ 谱线可以明显看出两个星系的双峰成分。FAST 的 H I 总体比较对称，接近一个成分，整体与红移端的星系（速度场图右上）对应。而蓝移端的星系（速度场图右下）的速度范围内没有明显的 H I 探测。一种可能的解释是，不同于分别集中在各自星系盘上的电离气体，此系统的原子气体

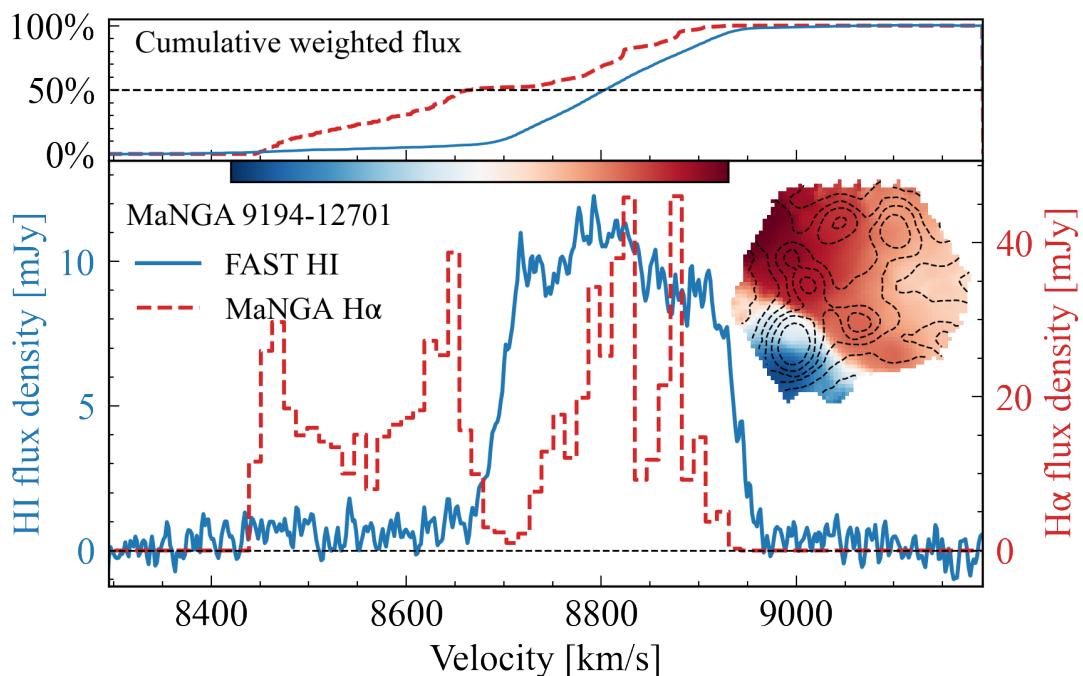


图 3.6 中性氢与电离氢的速度流量对比：9194-12701

Figure 3.6 Atomic gas vs. ionized gas: 9194-12701

图注：主图展示了 FAST 观测的 H I 谱线（蓝色、左轴）和 IFU 视场内所有像素的速度-流量结合得到的 H α 谱线（红色，右轴）。谱线旁给出了 MaNGA 观测的速度场（颜色与横轴速度对应）以及流量等高线图（黑色虚线）。主图上方给出了沿速度的累积流量，可以比较两种谱线的视向速度差异。

已经混合为一个整体，并且在视向速度上与红移端的星系成协。

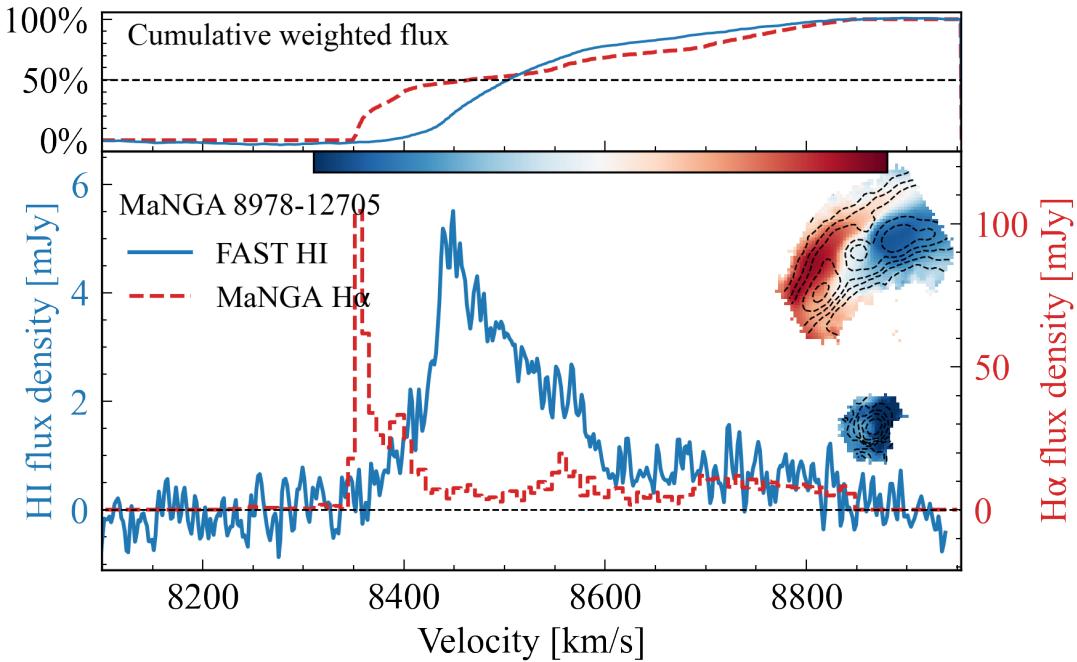


图 3.7 中性氢与电离氢的速度流量对比：8978-12705

Figure 3.7 Atomic gas vs. ionized gas: 9194-12701

8254-12701: 该系统是一个没有扰动特征的星系对，由一个 SFG 和年老星系组成。两个星系的总恒星形成率和总恒星质量仍然在主序附近，但该在很深的观测下依然没有探测到中性氢，是一个贫 H I 的系统。

8978-12705: 该系统是一个有明显相互作用特征的并合中星系，由一个大质量 AGN 和小质量年老星系组成，且两个星系都有 MaNGA 观测。图 3.7 中的 H α 谱线表明电离气体主要集中在蓝端比较窄的速度范围内，对应 AGN 的盘上蓝移端的强 H II 区，年老星系贡献的 H α 可以忽略不记，其余部分呈现出多峰状态，且速度宽度很大，是样本中唯一一个单星系 H α 速度范围大于 H I 速度范围的星系，表明并合可能会增加盘的旋转速度或旋转角度。H I 谱线呈现不对称双峰形状，在红端还微弱的延伸了约 200 km s^{-1} 。高峰和 H α 的流量峰位于同一速度方向，但有约 100 km s^{-1} 的速度偏移；低峰与 H α 在约 8550 km s^{-1} 处的流量弱峰对应。H I 和 H α 红移端的延伸范围符合的很好。此延伸代表该系统的气体成分在并合的影响下已经不是标准的对称旋转盘。未来的干涉阵 H I 成图可能能揭示这两个成分在空间上是否也成协。

8241-12705: 该系统是一个有明显潮汐桥和潮汐尾的并合中星系，由两个质

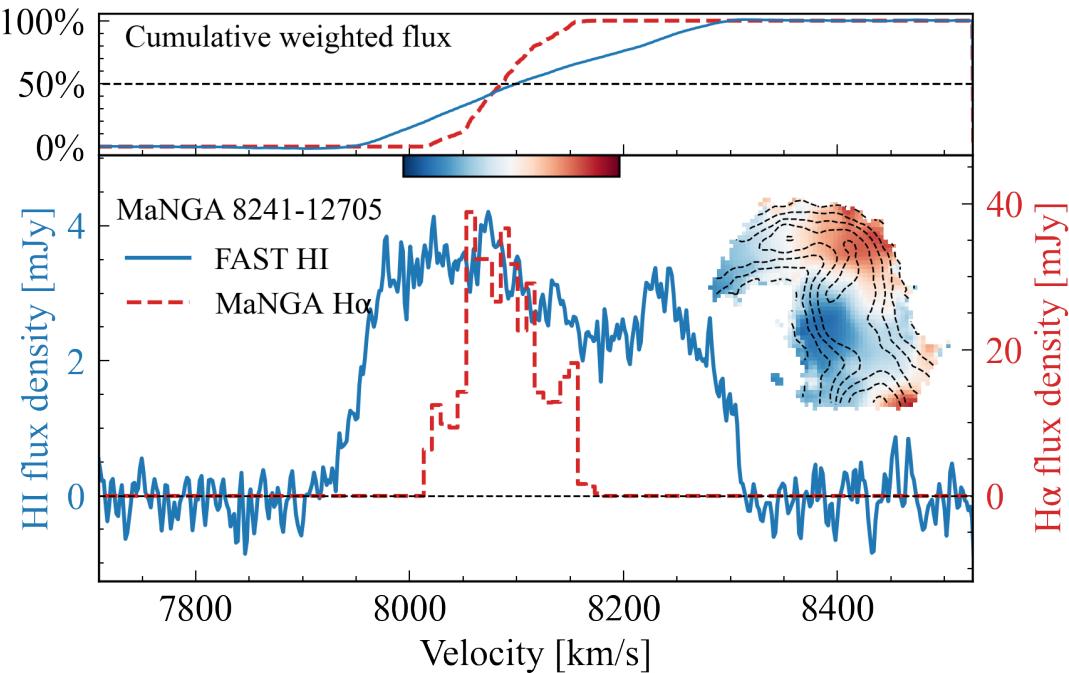


图 3.8 中性氢与电离氢的速度流量对比：8241-12705

Figure 3.8 Atomic gas vs. ionized gas: 8241-12705

量相当的星系组成，位于 IFU 视场中心的星系是一个 composite galaxy，外侧的是一个 SFG。MaNGA 只覆盖到了外围星系的部分区域。两个星系的视向速度接近，图 3.8 中的 $\text{H}\alpha$ 谱线表明电离气体集中在比较窄的速度范围内，没有出现旋转盘的双峰结构，速度场图也表明其旋转明显受到了并合作用的影响。对应 AGN 的盘上蓝移端的强 H II 区，年老星系贡献的 $\text{H}\alpha$ 可以忽略不计 HI 谱线的主要特征是速度宽度很大，超过 400 km s^{-1} ，远高于该红移一般星系的 HI 速度宽度。 HI 的谱线宽度远大于 $\text{H}\alpha$ 谱线宽度，可能与 MaNGA 没有覆盖到红移蓝移远端的区域有关；也可能说明在并合中由于引力作用， HI 改变了旋转方向，或者其引力势能被转化为了视向的动能。

9507-12704：该系统是一个很长潮汐尾的并合后星系，中心是一个窄线 AGN，其同时也是一个亮红外星系。MaNGA 覆盖了其中心并合遗迹的区域。该源的 HI 谱线见图 3.2，是一个 HI 吸收加发射的源。大多数出现吸收的河外星系 HI 谱线都只有一个明显的吸收特征（例如 Geréb 等, 2015; Zhang 等, 2021），但其在发射的两侧都出现了很强的吸收。如果将其两侧的吸收看作一个，那其吸收的速度宽度也达到了 400 km s^{-1} 以上，并且吸收流量很高。这一吸收说明该系统的 HI 成分有着复杂的温度和速度分布，可能与 AGN 活动以及并合过程密切相关。

关。对于这一特殊的谱型，我们需要空间分辨的 H I 观测来确认吸收的来源和位置，进而分析其与 AGN、并合过程的关系。

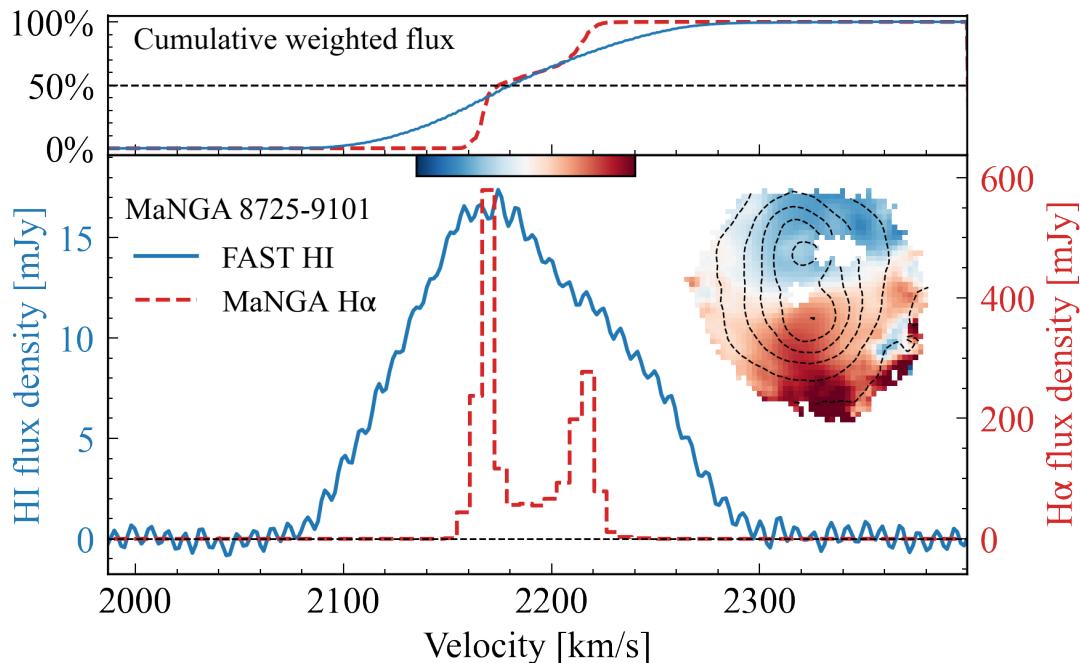


图 3.9 中性氢与电离氢的速度流量对比：8725-9101

Figure 3.9 Atomic gas vs. ionized gas: 8725-9101

8725-9101：该系统是一个低质量并合后星系，两个光学图像可见的核心都是 SFG，没有 AGN 活动的特征。两个光学核心对应图 3.9 中 H α 流量等高线图的两个峰值，同时也对应 H α 谱线上的两个流量密度峰。H I 的谱线宽度大约是 H α 的三倍，但二者中心速度吻合，峰值速度也符合的很好，H α 较低的流量密度峰也对应于 H I 谱线的红移端斜率变化的位置。H I 的谱线和正常的面向星系的接近，表明两个星系的 H I 成分应当已经充分混合。红移端的谱线斜率变化可能与在光学上还未完全并合的两个质量中心有关。

总结来说，并合系统的电离氢与 H I 的速度分布可能普遍有较大差异，相比电离氢，H I 有可能在更早期的并合阶段就开始混合，且在并合过程中更容易受到引力的作用。这些现象与 H I 在星系中的分布更加弥散的性质相符合。

第4章 结论与展望

4.1 本文主要结论

在本文中，我们从 MaNGA 巡天中构建了一批有并合阶段分类和积分视场单元观测的相互作用星系系统，共计 1156 个近邻星系。我们在这一样本中选出了首批 61 个有积分视场单元观测的、处于并合系统中的窄线活动星系核样本。我们计算了不同并合阶段的 AGN 比例和这些 AGN 核区 [O III] 的面亮度；分析了 AGN 宿主星系相对恒星形成主序的位置；以及比恒星形成率、巴尔末消光、和 4000 \AA 截断沿星系半径方向的分布和梯度，并将这些性质和恒星形成星系、年老星系、孤立星系分组进行比较。

我们还使用 FAST 望远镜对 6 个并合系统进行了后续的中性氢观测，给出了相应观测模式的数据处理参考。我们根据观测结果评估了 FAST 的性能，并将这 6 个并合系统的中性氢含量、原子气体恒星形成效率和其它河外中性氢巡天项目结果进行了比较。我们首次尝试比较了积分视场单元观测的电离氢发射线和单镜射电望远镜观测的中性氢谱线，对 6 个系统分别进行了分析讨论。

我们的主要结论总结如下：

1. 在各个并合阶段以及孤立星系中，发射线线比选出的窄线 AGN 的比例基本保持不变，在 MaNGA 样本中的占比约为 5%。这一基于 IFU 数据的现象与基于单光纤光谱的一些工作的结论一致 (Alonso 等, 2007; Ellison 等, 2008; Alonso 等, 2007; Darg 等, 2010)。并合星系中，恒星形成星系的比例比孤立星系中更低，而年老星系的比例更高。此现象在并合早期阶段更加明显，一方面是因为形态学认证的选择效应，另一方面是因为并合星系更倾向位于更致密的环境中，而高密度的环境中年老星系更多。

2. 窄线 AGN 宿主星系的 SFR- M_* 关系比主序更陡：在低质量端，AGN 大多低于主序，而高质量端接近主序。结合其在颜色星等图中类似“绿谷”星系的颜色分布，我们认为这些 AGN 可能处于离开主序向年老星系演化的过程中。而星系的相互作用对 AGN 宿主星系的 SFR- M_* 关系没有有明显影响。

3. 并合系统中的 AGN 和孤立系统中的 AGN 的尘埃消光改正后的 [O III] 面亮度没有明显差异，表明并合不能显著增加 AGN 的窄线区发射线的强度。

4. 星系相互作用在各个半径处都显著增强了恒星形成星系的比恒星形成率（特别是在核区），但在所有半径下都没有增强 AGN 和年老星系的比恒星形成率。同样的，并合 SFG 中的 Dn4000 在各个半径都有降低，而并合年老星系的 Dn4000 和孤立年老星系没有区别。并合 AGN 的外盘表现出更高的 Dn4000，但相比误差不显著，可能代表了并合 AGN 外盘的星族更老。

5. 并合系统中的 SFG 和 AGN 的巴尔末消光在所有半径下都略低，但差异不明显。考虑到并合星系的半径定义误差更大，该现象不一定代表并合系统中的尘埃更少或更弥散。

6. AGN 的 sSFR 和 Dn4000 在各个半径下都位于 SFG 和年老星系之间。和其整个星系的总性质的表现一样，这表明 AGN 宿主星系可能处于 SFG 和年老星系的过渡阶段。

7. AGN 的 sSFR 随半径的减小而降低，核区的降低最明显，表明 AGN 宿主星系符合“从内向外熄灭”(inside-out quenching) 恒星形成的演化图景。

8. 相比大型河外中性氢巡天项目，在我们的观测中性氢的并合星系子样本中，3 个有 AGN 的系统中性氢含量处于正常或更高水平，原子气体恒星形成效率也在其它样本的平均水平左右。我们发现了一个主序 SFG (8254-12701) 的中性氢含量异常低、恒星形成效率异常高。

9. 5 个并合系统的中性氢谱线都呈现一定的不对称。部分谱线表现出特殊的现象，如谱线宽度大 (8241-12705)、速度方向上有微弱的延展流量 (8978-12705)。我们还在一个 AGN 并合后星系中发现了强的中性氢吸收 (9507-12704)。

10. 我们比较 4 个并合星系的单镜射电望远镜的 H I 谱线和 MaNGA-IFU 得到的 H α 流量密度-速度“谱线”。两种谱线在 4 个系统中都差异明显，具体的分析可参考3.4。这些个源表明电离气体和原子气体在星系并合过程中的动力学行为可能有明显不同。

4.2 对未来工作的展望

对于并合中活动星系核的空间分辨研究，我们还需要更大的样本来提高结论的统计显著性。其次，MaNGA 的空间分辨率在近邻星系的距离上对应的物理尺度（约 1 kpc）仍然远大于 AGN 的尺度（小于 100 pc）。IFU 技术的进步，即更高空间分辨率、更大视场、更多波段，能够继续提高我们对并合星系中活动星

系核的理解。未来使用更高分辨率 IFU 设备的巡天，如 CSST-IFS，能够帮助我们更细致地理解 AGN 宿主的性质梯度，甚至分辨 AGN 的窄线区结构的影响范围；更大视场的 IFU 设备则可以用来研究并合、AGN 对星周介质（circumgalactic medium）的影响；而扩展到近红外的 IFU 设备（如 JWST-NIRSpec IFU，[Purll 等, 2017](#)）能显著拓展样本的红移到 ~ 3 以上。

随着机器学习在星系形态判别领域的不断进步，未来的算法可能能够替代人眼认证，更准确、细致、完备地选择并合星系样本和分类并合序列。目前仍然亟需算法对并合星系的区域进行区分，以替代传统测光方法得到的半径定义。对并合星系更准确的区域划分有助于进一步揭示星系的不同区域在并合过程中如何演化。

另一方面，基于本文的思路，通过对现有的 IFU 观测和单镜 H I 观测进行匹配，我们可以快速构建一批粗略比较中性氢和电离氢的星系样本。这样的样本可以用来分析星际介质中气体成分的组成，并提供电离氢与中性氢不匹配的特殊样本，以供高分辨率射电干涉阵高效进行后续观测。结合亚毫米波的分子气体观测，未来能够继续完善并合星系中气体循环的“生态系统”模型。

基于其它波段的数据，我们还可以进一步扩充 AGN 的样本。通过对比红外颜色选择的尘埃遮蔽 AGN、宽线与窄线 AGN、射电 AGN 样本的性质差异，分析其与环境的联系，我们希望能够在将来揭示 AGN 自身的演化以及其对环境的影响反馈。

总结来说，目前对低红移星系演化规律的相关研究已经进入到亚星系尺度。我们希望在未来能够构建更准确的样本，将现有的观测证据扩充到更多波段、更高空间分辨率、更高的红移，最终全面理解星系的并合、超大质量黑洞吸积、星际介质等与星系演化的关系。

附录 A AGN 对计算恒星形成率的影响

本章展示了我们在文中所使用的对尘埃改正后的 $\text{H}\alpha$ 去除 AGN 的贡献的具体情况。首先我们要求所使用的像素光谱的以下发射线: $[\text{O III}]_{\lambda 5007}$ 、 $\text{H}\beta$ 、 $[\text{N II}]_{\lambda 6584}$ 、 $\text{H}\alpha$ 、以及 $[\text{S II}]_{\lambda\lambda 6716, 6731}$ 的信噪比大于 5。将这些发射线的流量代入公式 2.5 (Ji 等, 2020), 我们可以得到 AGN 产生的 $\text{H}\alpha$ 在总 $\text{H}\alpha$ 流量中的比例 ($\text{H}\alpha_{\text{AGN}}/\text{H}\alpha_{\text{total}}, f_{\text{AGN}}$), 同时假设剩下的部分即为恒星形成的贡献。

我们在图 A.1 中展示了所有满足信噪比条件的 MaNGA 像素光谱在 BPT 图中的位置, 并用颜色表示其 f_{AGN} 。从两种 BPT 图中可以看出, 在位于恒星形成区域的像素中, AGN 的贡献几乎可以忽略不记。而 f_{AGN} 沿着 AGN 分支的方向逐渐增大。在 $[\text{N II}]\text{-BPT}$ 图中的星暴极限 (黑色虚线) 沿线, AGN 对 $\text{H}\alpha$ 的贡献大约是 40%, 这和 Kauffmann 等 (2009) 用单光纤光谱得到的值, $\sim 50\%$, 基本一致。比较二图还可以看出, 100%AGN 贡献的边界在 $[\text{S II}]\text{-BPT}$ 图中比 $[\text{N II}]\text{-BPT}$ 图中更清晰。

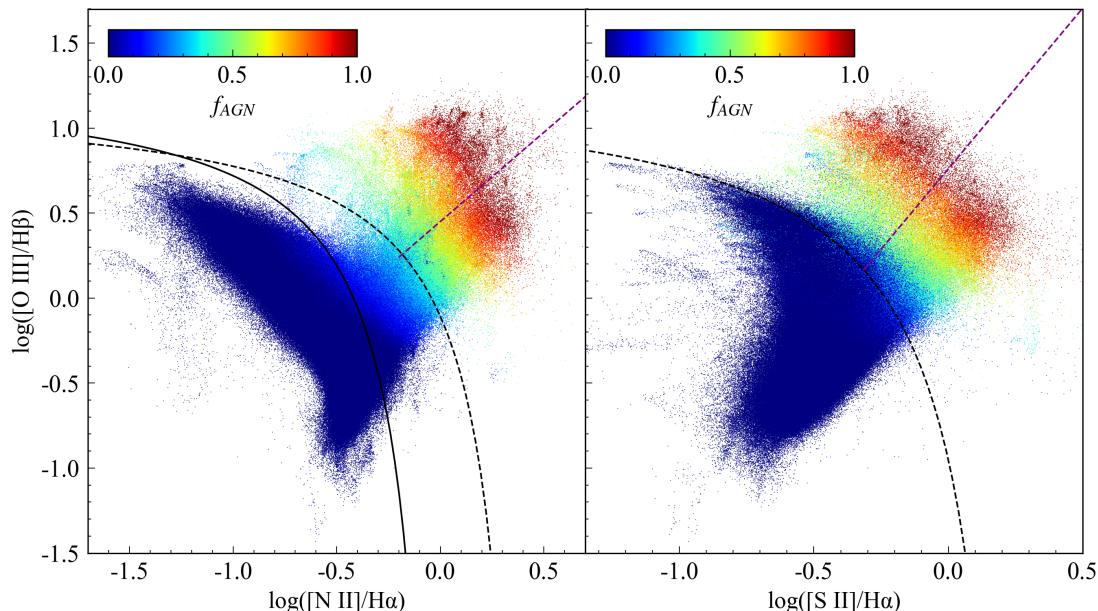


图 A.1 AGN 对发射线的贡献在 BPT 图中的分布

Figure A.1 AGN's contribution to emission lines in the BPT-diagram

图注: 所有主要发射线信噪比足够的像素光谱在 BPT 图中的位置, 颜色代表 AGN 的贡献。

AGN 贡献沿 AGN 分支的方向逐渐增大。和预期一致, Starforming 像素中的 AGN 贡献几乎可以忽略不记。

附录 B 使用 Dn4000 估计 sSFR

对于 $\text{H}\alpha$ 太弱而信噪比不足以用于计算的 MaNGA 的像素光谱，我们不能再用其来估计恒星形成率。受 Spindler 等 (2018), Wang 等 (2019)，和 Bluck 等 (2020) 的启发，我们用不受发射线信噪比限制的 Dn4000 来估计 sSFR。我们使用的 sSFR-Dn4000 关系基于 MaNGA 样本中所有满足：有可靠的 Dn4000 测量、恒星质量可靠、有足够的信噪比 $\text{H}\alpha$ 和 $\text{H}\beta$ （用于得到消光改正后的 SFR）这三个条件的像素光谱，并且不限制宿主星系的类型。图 B.1 中的灰度六边形统计图展示了所有满足上述条件的光谱得到的真实值的分布，颜色深度代表对数坐标下的数密度。蓝色实线是对真实分布的中值拟合得到的 sSFR-Dn4000 关系，所用的中值是在 Dn4000 方向上每 0.05 单位间隔得到的。蓝色虚线代表了拟合所用中值对应区间的标准差。我们用五阶多项式来拟合各区间的中值，拟合结果可以表达为 $y = 19.0x^5 - 145.0x^4 + 473.5x^3 + 651.9x^2 + 478.1x - 147.3$, y 是 sSFR, x 是 Dn4000. 此关系在 sSFR 方向上的误差约为 0.6 dex。我们提醒读者此关系仅适用于 Dn4000 在 1.0 和 2.1 之间的数据，因为更大更小的 Dn4000 区间缺少足够的可靠数据，且 Dn4000 和 sSFR 的负相关开始变弱。

我们的结果和过去的工作一致，都发现了 sSFR 和 Dn4000 呈现负相关。具体关系的数值差异可能与使用的光谱数据不同有关，也可能是恒星质量计算的误差导致。本文使用的是光学光谱拟合得到的恒星质量以及经过了尘埃消光改正、去除 AGN 影响后的恒星形成率。

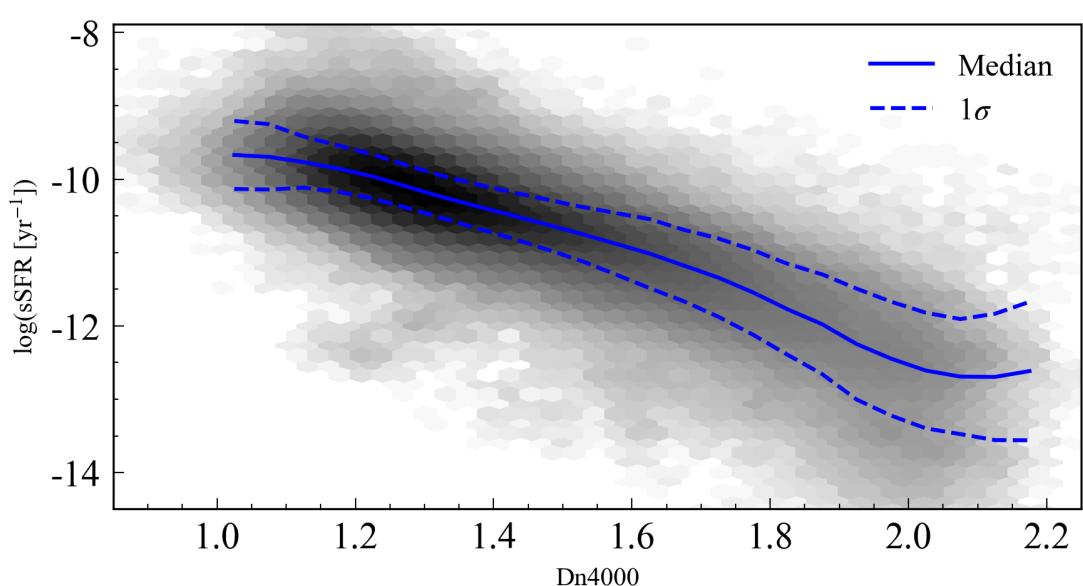


图 B.1 MaNGA 像素光谱的 Dn4000 与 sSFR 的关系

Figure B.1 The Dn4000-sSFR relation of MaNGA spaxels

图注：灰色背景是 MaNGA 所有 Dn4000 和 sSFR 信噪比足够的像素光谱的二维直方图。蓝色实线为 Dn4000 与 sSFR 的中值关系，虚线代表 1 个标准差的误差范围。此关系可被用来使用 Dn4000 来估算年老星系（像素）的 sSFR。

参考文献

- Alonso M S, Lambas D G, Tissera P, et al. Active galactic nuclei and galaxy interactions [J/OL]. MNRAS, 2007, 375(3): 1017-1024. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.11367.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11367.x).
- Alonso S, Coldwell G, Duplancic F, et al. The impact of bars and interactions on optically selected AGNs in spiral galaxies [J/OL]. A&A, 2018, 618: A149. DOI: [10.1051/0004-6361/201832796](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832796).
- Argudo-Fernández M, Verley S, Bergond G, et al. Catalogues of isolated galaxies, isolated pairs, and isolated triplets in the local Universe [J/OL]. A&A, 2015, 578: A110. DOI: [10.1051/0004-6361/201526016](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526016).
- Argudo-Fernández M, Shen S, Sabater J, et al. The effect of local and large-scale environments on nuclear activity and star formation [J/OL]. A&A, 2016, 592: A30. DOI: [10.1051/0004-6361/201628232](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628232).
- Baldwin J A, Phillips M M, Terlevich R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. [J/OL]. PASP, 1981, 93: 5-19. DOI: [10.1086/130766](https://doi.org/10.1086/130766).
- Barnes J E, Hernquist L. Dynamics of interacting galaxies. [J/OL]. ARA&A, 1992, 30: 705-742. DOI: [10.1146/annurev.aa.30.090192.003421](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.30.090192.003421).
- Belfiore F, Maiolino R, Bundy K, et al. SDSS IV MaNGA - sSFR profiles and the slow quenching of discs in green valley galaxies [J/OL]. MNRAS, 2018, 477(3): 3014-3029. DOI: [10.1093/mnras/sty768](https://doi.org/10.1093/mnras/sty768).
- Belfiore F, Westfall K B, Schaefer A, et al. The Data Analysis Pipeline for the SDSS-IV MaNGA IFU Galaxy Survey: Emission-line Modeling [J/OL]. AJ, 2019, 158(4): 160. DOI: [10.3847/1538-3881/ab3e4e](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab3e4e).
- Best P N, Kauffmann G, Heckman T M, et al. A sample of radio-loud active galactic nuclei in the Sloan Digital Sky Survey [J/OL]. MNRAS, 2005, 362(1): 9-24. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.09283.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09283.x).
- Bing L, Shi Y, Chen Y, et al. Mildly suppressed star formation in central regions of MaNGA Seyfert galaxies [J/OL]. MNRAS, 2019, 482(1): 194-205. DOI: [10.1093/mnras/sty2662](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2662).
- Blanton M R, Bershady M A, Abolfathi B, et al. Sloan Digital Sky Survey IV: Mapping the Milky Way, Nearby Galaxies, and the Distant Universe [J/OL]. AJ, 2017, 154(1): 28. DOI: [10.3847/1538-3881/aa7567](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa7567).
- Bluck A F L, Maiolino R, Sánchez S F, et al. Are galactic star formation and quenching governed by local, global, or environmental phenomena? [J/OL]. MNRAS, 2020, 492(1): 96-139. DOI: [10.1093/mnras/stz3264](https://doi.org/10.1093/mnras/stz3264).

- Bok J, Blyth S L, Gilbank D G, et al. Enhanced H I profile asymmetries in close galaxy pairs [J/OL]. MNRAS, 2019, 484(1): 582-594. DOI: [10.1093/mnras/sty3448](https://doi.org/10.1093/mnras/sty3448).
- Brinchmann J, Charlot S, White S D M, et al. The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe [J/OL]. MNRAS, 2004, 351(4): 1151-1179. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07881.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07881.x).
- Bundy K, Bershady M A, Law D R, et al. Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory [J/OL]. ApJ, 2015, 798(1): 7. DOI: [10.1088/0004-637X/798/1/7](https://doi.org/10.1088/0004-637X/798/1/7).
- Calzetti D, Armus L, Bohlin R C, et al. The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies [J/OL]. ApJ, 2000, 533(2): 682-695. DOI: [10.1086/308692](https://doi.org/10.1086/308692).
- Cano-Díaz M, Ávila-Reese V, Sánchez S F, et al. SDSS-IV MaNGA: effects of morphology in the global and local star formation main sequences [J/OL]. MNRAS, 2019, 488(3): 3929-3948. DOI: [10.1093/mnras/stz1894](https://doi.org/10.1093/mnras/stz1894).
- Cao C, Xu C K, Domingue D, et al. Herschel Observations of Major Merger Pairs at $z = 0$: Dust Mass and Star Formation [J/OL]. ApJS, 2016, 222(2): 16. DOI: [10.3847/0067-0049/222/2/16](https://doi.org/10.3847/0067-0049/222/2/16).
- Cappellari M. Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss-Hermite functions [J/OL]. MNRAS, 2017, 466(1): 798-811. DOI: [10.1093/mnras/stw3020](https://doi.org/10.1093/mnras/stw3020).
- Catinella B, Schiminovich D, Kauffmann G, et al. The GALEX Arecibo SDSS Survey - I. Gas fraction scaling relations of massive galaxies and first data release [J/OL]. MNRAS, 2010, 403(2): 683-708. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.16180.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16180.x).
- Catinella B, Saintonge A, Janowiecki S, et al. xGASS: total cold gas scaling relations and molecular-to-atomic gas ratios of galaxies in the local Universe [J/OL]. MNRAS, 2018, 476(1): 875-895. DOI: [10.1093/mnras/sty089](https://doi.org/10.1093/mnras/sty089).
- Chen J, Shi Y, Dempsey R, et al. The spatial extension of extended narrow line regions in MaNGA AGN [J/OL]. MNRAS, 2019, 489(1): 855-867. DOI: [10.1093/mnras/stz2183](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2183).
- Cheng C, Ibar E, Du W, et al. The atomic gas of star-forming galaxies at $z \sim 0.05$ as revealed by the Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope [J/OL]. A&A, 2020, 638: L14. DOI: [10.1051/0004-6361/202038483](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038483).
- Cid Fernandes R, Stasińska G, Schlickmann M S, et al. Alternative diagnostic diagrams and the ‘forgotten’ population of weak line galaxies in the SDSS [J/OL]. MNRAS, 2010, 403(2): 1036-1053. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.16185.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16185.x).
- Cid Fernandes R, Stasińska G, Mateus A, et al. A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN? [J/OL]. MNRAS, 2011, 413(3): 1687-1699. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.18244.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18244.x).

- Comerford J M, Negus J, Müller-Sánchez F, et al. A Catalog of 406 AGNs in MaNGA: A Connection between Radio-mode AGNs and Star Formation Quenching [J/OL]. *ApJ*, 2020, 901(2): 159. DOI: [10.3847/1538-4357/abb2ae](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abb2ae).
- Cortese L, Catinella B, Boissier S, et al. The effect of the environment on the H I scaling relations [J/OL]. *MNRAS*, 2011, 415(2): 1797-1806. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.18822.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18822.x).
- Cox T J, Jonsson P, Somerville R S, et al. The effect of galaxy mass ratio on merger-driven starbursts [J/OL]. *MNRAS*, 2008, 384(1): 386-409. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.12730.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12730.x).
- Dai Y S, Bergeron J, Elvis M, et al. A Population of Dust-rich Quasars at $z \sim 1.5$ [J/OL]. *ApJ*, 2012, 753(1): 33. DOI: [10.1088/0004-637X/753/1/33](https://doi.org/10.1088/0004-637X/753/1/33).
- Dai Y S, Malkan M M, Teplitz H I, et al. Spectroscopically Identified Emission Line Galaxy Pairs in the WISP Survey [J/OL]. *ApJ*, 2021, 923(2): 156. DOI: [10.3847/1538-4357/ac2f96](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2f96).
- Darg D W, Kaviraj S, Lintott C J, et al. Galaxy Zoo: the properties of merging galaxies in the nearby Universe - local environments, colours, masses, star formation rates and AGN activity [J/OL]. *MNRAS*, 2010, 401(3): 1552-1563. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.15786.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15786.x).
- Di Matteo P, Combes F, Melchior A L, et al. Star formation efficiency in galaxy interactions and mergers: a statistical study [J/OL]. *A&A*, 2007, 468(1): 61-81. DOI: [10.1051/0004-6361:20066959](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066959).
- Drory N, MacDonald N, Bershady M A, et al. The MaNGA Integral Field Unit Fiber Feed System for the Sloan 2.5 m Telescope [J/OL]. *AJ*, 2015, 149(2): 77. DOI: [10.1088/0004-6256/149/2/77](https://doi.org/10.1088/0004-6256/149/2/77).
- Ellison S L, Patton D R, Simard L, et al. Galaxy Pairs in the Sloan Digital Sky Survey. I. Star Formation, Active Galactic Nucleus Fraction, and the Mass-Metallicity Relation [J/OL]. *AJ*, 2008, 135(5): 1877-1899. DOI: [10.1088/0004-6256/135/5/1877](https://doi.org/10.1088/0004-6256/135/5/1877).
- Ellison S L, Patton D R, Mendel J T, et al. Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - IV. Interactions trigger active galactic nuclei [J/OL]. *MNRAS*, 2011, 418(3): 2043-2053. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.19624.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19624.x).
- Falcón-Barroso J, Sánchez-Blázquez P, Vazdekis A, et al. An updated MILES stellar library and stellar population models [J/OL]. *A&A*, 2011, 532: A95. DOI: [10.1051/0004-6361/201116842](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116842).
- Fu H, Steffen J L, Gross A C, et al. SDSS-IV MaNGA: Galaxy Pair Fraction and Correlated Active Galactic Nuclei [J/OL]. *ApJ*, 2018, 856(2): 93. DOI: [10.3847/1538-4357/aab364](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab364).
- Gao F, Wang L, Pearson W J, et al. Mergers trigger active galactic nuclei out to $z \sim 0.6$ [J/OL]. *A&A*, 2020, 637: A94. DOI: [10.1051/0004-6361/201937178](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937178).
- Geréb K, Maccagni F M, Morganti R, et al. The HI absorption “Zoo” [J/OL]. *A&A*, 2015, 575: A44. DOI: [10.1051/0004-6361/201424655](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424655).
- Giovanelli R, Haynes M P, Kent B R, et al. The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey. I. Science Goals, Survey Design, and Strategy [J/OL]. *AJ*, 2005, 130(6): 2598-2612. DOI: [10.1086/497431](https://doi.org/10.1086/497431).

- Gunn J E, Siegmund W A, Mannery E J, et al. The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey [J/OL]. AJ, 2006, 131(4): 2332-2359. DOI: [10.1086/500975](https://doi.org/10.1086/500975).
- Heckman T M, Best P N. The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe [J/OL]. ARA&A, 2014, 52: 589-660. DOI: [10.1146/annurev-astro-081913-035722](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-035722).
- Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J, et al. A Unified, Merger-driven Model of the Origin of Starbursts, Quasars, the Cosmic X-Ray Background, Supermassive Black Holes, and Galaxy Spheroids [J/OL]. ApJS, 2006, 163(1): 1-49. DOI: [10.1086/499298](https://doi.org/10.1086/499298).
- Hou M, Li Z, Liu X. A Chandra X-Ray Survey of Optically Selected AGN Pairs [J/OL]. ApJ, 2020, 900(1): 79. DOI: [10.3847/1538-4357/aba4a7](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aba4a7).
- Huang S, Haynes M P, Giovanelli R, et al. The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The Galaxy Population Detected by ALFALFA [J/OL]. ApJ, 2012, 756(2): 113. DOI: [10.1088/0004-637X/756/2/113](https://doi.org/10.1088/0004-637X/756/2/113).
- Hwang H S, Elbaz D, Dickinson M, et al. GOODS-Herschel: the impact of galaxy-galaxy interactions on the far-infrared properties of galaxies [J/OL]. A&A, 2011, 535: A60. DOI: [10.1051/0004-6361/201117476](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117476).
- Ji X, Yan R. Constraining photoionization models with a reprojected optical diagnostic diagram [J/OL]. MNRAS, 2020, 499(4): 5749-5764. DOI: [10.1093/mnras/staa3259](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3259).
- Jiang P, Tang N Y, Hou L G, et al. The fundamental performance of FAST with 19-beam receiver at L band [J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20(5): 064. DOI: [10.1088/1674-4527/20/5/64](https://doi.org/10.1088/1674-4527/20/5/64).
- Kauffmann G, Haehnelt M. A unified model for the evolution of galaxies and quasars [J/OL]. MNRAS, 2000, 311(3): 576-588. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2000.03077.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03077.x).
- Kauffmann G, Heckman T M. Feast and Famine: regulation of black hole growth in low-redshift galaxies [J/OL]. MNRAS, 2009, 397(1): 135-147. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.14960.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14960.x).
- Kauffmann G, Heckman T M, Tremonti C, et al. The host galaxies of active galactic nuclei [J/OL]. MNRAS, 2003, 346(4): 1055-1077. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x).
- Kennicutt R C, Evans N J. Star Formation in the Milky Way and Nearby Galaxies [J/OL]. ARA&A, 2012, 50: 531-608. DOI: [10.1146/annurev-astro-081811-125610](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125610).
- Kewley L J, Dopita M A. Using Strong Lines to Estimate Abundances in Extragalactic H II Regions and Starburst Galaxies [J/OL]. ApJS, 2002, 142(1): 35-52. DOI: [10.1086/341326](https://doi.org/10.1086/341326).
- Kewley L J, Dopita M A, Sutherland R S, et al. Theoretical Modeling of Starburst Galaxies [J/OL]. ApJ, 2001, 556(1): 121-140. DOI: [10.1086/321545](https://doi.org/10.1086/321545).
- Kroupa P. On the variation of the initial mass function [J/OL]. MNRAS, 2001, 322(2): 231-246. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x).

- Li C, Kauffmann G, Jing Y P, et al. The dependence of clustering on galaxy properties [J/OL]. MNRAS, 2006, 368(1): 21-36. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.10066.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10066.x).
- Li C, Kauffmann G, Heckman T M, et al. Interactions, star formation and AGN activity [J/OL]. MNRAS, 2008, 385(4): 1915-1922. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13023.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13023.x).
- Li S I, Shi Y, Bizyaev D, et al. The impact of merging on the origin of kinematically misaligned and counter-rotating galaxies in MaNGA [J/OL]. MNRAS, 2021, 501(1): 14-23. DOI: [10.1093/mnras/staa3618](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3618).
- Lin L, Koo D C, Willmer C N A, et al. The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: Evolution of Close Galaxy Pairs and Major-Merger Rates up to $z \sim 1.2$ [J/OL]. ApJL, 2004, 617(1): L9-L12. DOI: [10.1086/427183](https://doi.org/10.1086/427183).
- Liu X, Shen Y, Strauss M A. Active Galactic Nucleus Pairs from the Sloan Digital Sky Survey. II. Evidence for Tidally Enhanced Star Formation and Black Hole Accretion [J/OL]. ApJ, 2012, 745(1): 94. DOI: [10.1088/0004-637X/745/1/94](https://doi.org/10.1088/0004-637X/745/1/94).
- Nan R, Li D, Jin C, et al. The Five-Hundred Aperture Spherical Radio Telescope (fast) Project [J/OL]. International Journal of Modern Physics D, 2011, 20(6): 989-1024. DOI: [10.1142/S0218271811019335](https://doi.org/10.1142/S0218271811019335).
- Noeske K G, Weiner B J, Faber S M, et al. Star Formation in AEGIS Field Galaxies since $z=1.1$: The Dominance of Gradually Declining Star Formation, and the Main Sequence of Star-forming Galaxies [J/OL]. ApJL, 2007, 660(1): L43-L46. DOI: [10.1086/517926](https://doi.org/10.1086/517926).
- Oke J B, Gunn J E. Secondary standard stars for absolute spectrophotometry. [J/OL]. ApJ, 1983, 266: 713-717. DOI: [10.1086/160817](https://doi.org/10.1086/160817).
- Osterbrock D E, Ferland G J. Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei [M]. 2006.
- Padovani P, Alexander D M, Assef R J, et al. Active galactic nuclei: what's in a name? [J/OL]. A&A Rv, 2017, 25(1): 2. DOI: [10.1007/s00159-017-0102-9](https://doi.org/10.1007/s00159-017-0102-9).
- Pan H A, Lin L, Hsieh B C, et al. SDSS-IV MaNGA: Spatial Evolution of Star Formation Triggered by Galaxy Interactions [J/OL]. ApJ, 2019, 881(2): 119. DOI: [10.3847/1538-4357/ab311c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab311c).
- Patton D R, Pritchett C J, Carlberg R G, et al. Dynamically Close Galaxy Pairs and Merger Rate Evolution in the CNOC2 Redshift Survey [J/OL]. ApJ, 2002, 565(1): 208-222. DOI: [10.1086/324543](https://doi.org/10.1086/324543).
- Patton D R, Grant J K, Simard L, et al. A Hubble Space Telescope Snapshot Survey of Dynamically Close Galaxy Pairs in the CNOC2 Redshift Survey [J/OL]. AJ, 2005, 130(5): 2043-2057. DOI: [10.1086/491672](https://doi.org/10.1086/491672).
- Purll D J, Lobb D R, Barnes A R, et al. The integral field unit for the James Webb space telescope's near-infrared spectrograph [C/OL]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)

- Conference Series: volume 10565 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 2017: 105650J. DOI: [10.1117/12.2309221](https://doi.org/10.1117/12.2309221).
- Rembold S B, Shimoia J S, Storchi-Bergmann T, et al. The first 62 AGNs observed with SDSS-IV MaNGA - I. Their characterization and definition of a control sample [J/OL]. MNRAS, 2017, 472(4): 4382-4403. DOI: [10.1093/mnras/stx2264](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2264).
- Roberts M S. Radio Observations of Neutral Hydrogen in Galaxies [M]. 1975: 309.
- Rosario D J, Mendel J T, Ellison S L, et al. Local SDSS galaxies in the Herschel Stripe 82 survey: a critical assessment of optically derived star formation rates [J/OL]. MNRAS, 2016, 457(3): 2703-2721. DOI: [10.1093/mnras/stw096](https://doi.org/10.1093/mnras/stw096).
- Sánchez S F, Pérez E, Sánchez-Blázquez P, et al. Pipe3D, a pipeline to analyze Integral Field Spectroscopy Data: II. Analysis sequence and CALIFA dataproducts [J]. RMxAA, 2016, 52: 171-220.
- Sánchez S F, Pérez E, Sánchez-Blázquez P, et al. Pipe3D, a pipeline to analyze Integral Field Spectroscopy Data: I. New fitting philosophy of FIT3D [J]. RMxAA, 2016, 52: 21-53.
- Sánchez-Blázquez P, Peletier R F, Jiménez-Vicente J, et al. Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra [J/OL]. MNRAS, 2006, 371(2): 703-718. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.10699.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10699.x).
- Satyapal S, Ellison S L, McAlpine W, et al. Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - IX. Merger-induced AGN activity as traced by the Wide-field Infrared Survey Explorer [J/OL]. MNRAS, 2014, 441(2): 1297-1304. DOI: [10.1093/mnras/stu650](https://doi.org/10.1093/mnras/stu650).
- Schiminovich D, Catinella B, Kauffmann G, et al. The GALEX Arecibo SDSS Survey - II. The star formation efficiency of massive galaxies [J/OL]. MNRAS, 2010, 408(2): 919-934. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.17210.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17210.x).
- Shah E A, Kartaltepe J S, Magagnoli C T, et al. Investigating the Effect of Galaxy Interactions on the Enhancement of Active Galactic Nuclei at $0.5 < z < 3.0$ [J/OL]. ApJ, 2020, 904(2): 107. DOI: [10.3847/1538-4357/abbf59](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbf59).
- Silva A, Marchesini D, Silverman J D, et al. Galaxy Mergers up to $z < 2.5$. II. AGN Incidence in Merging Galaxies at Separations of 3-15 kpc [J/OL]. ApJ, 2021, 909(2): 124. DOI: [10.3847/1538-4357/abdbb1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abdbb1).
- Silverman J D, Kampczyk P, Jahnke K, et al. The Impact of Galaxy Interactions on Active Galactic Nucleus Activity in zCOSMOS [J/OL]. ApJ, 2011, 743(1): 2. DOI: [10.1088/0004-637X/743/1/2](https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/1/2).
- Spindler A, Wake D, Belfiore F, et al. SDSS-IV MaNGA: the spatial distribution of star formation and its dependence on mass, structure, and environment [J/OL]. MNRAS, 2018, 476(1): 580-600. DOI: [10.1093/mnras/sty247](https://doi.org/10.1093/mnras/sty247).
- Springel V, Di Matteo T, Hernquist L. Modelling feedback from stars and black holes in galaxy mergers [J/OL]. MNRAS, 2005, 361(3): 776-794. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.09238.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09238.x).

- Stark D V, Masters K L, Avila-Reese V, et al. H I-MaNGA: tracing the physics of the neutral and ionized ISM with the second data release [J/OL]. MNRAS, 2021, 503(1): 1345-1366. DOI: [10.1093/mnras/stab566](https://doi.org/10.1093/mnras/stab566).
- Steffen J L, Fu H, Comerford J M, et al. SDSS-IV MaNGA: The Radial Profile of Enhanced Star Formation in Close Galaxy Pairs [J/OL]. ApJ, 2021, 909(2): 120. DOI: [10.3847/1538-4357/abe2a5](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abe2a5).
- Thorp M D, Ellison S L, Simard L, et al. Spatially resolved star formation and metallicity profiles in post-merger galaxies from MaNGA [J/OL]. MNRAS, 2019, 482(1): L55-L59. DOI: [10.1093/mnrasl/sly185](https://doi.org/10.1093/mnrasl/sly185).
- Toomre A. Mergers and Some Consequences [C]//Tinsley B M, Larson D C, Richard B. Gehret. Evolution of Galaxies and Stellar Populations. 1977: 401.
- Toomre A, Toomre J. Galactic Bridges and Tails [J/OL]. ApJ, 1972, 178: 623-666. DOI: [10.1086/151823](https://doi.org/10.1086/151823).
- Veilleux S, Kim D C, Rupke D S N, et al. A Deep Hubble Space Telescope H-Band Imaging Survey of Massive Gas-Rich Mergers. II. The QUEST QSOs [J/OL]. ApJ, 2009, 701(1): 587-606. DOI: [10.1088/0004-637X/701/1/587](https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/1/587).
- Veilleux S, Osterbrock D E. Spectral Classification of Emission-Line Galaxies [J/OL]. ApJS, 1987, 63: 295. DOI: [10.1086/191166](https://doi.org/10.1086/191166).
- Wake D A, Bundy K, Diamond-Stanic A M, et al. The SDSS-IV MaNGA Sample: Design, Optimization, and Usage Considerations [J/OL]. AJ, 2017, 154(3): 86. DOI: [10.3847/1538-3881/aa7ecc](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa7ecc).
- Wang E, Lilly S J, Pezzulli G, et al. On the Elevation and Suppression of Star Formation within Galaxies [J/OL]. ApJ, 2019, 877(2): 132. DOI: [10.3847/1538-4357/ab1c5b](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1c5b).
- Westfall K B, Cappellari M, Bershady M A, et al. The Data Analysis Pipeline for the SDSS-IV MaNGA IFU Galaxy Survey: Overview [J/OL]. AJ, 2019, 158(6): 231. DOI: [10.3847/1538-3881/ab44a2](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab44a2).
- Wilson R W, Jefferts K B, Penzias A A. Carbon Monoxide in the Orion Nebula [J/OL]. ApJL, 1970, 161: L43. DOI: [10.1086/180567](https://doi.org/10.1086/180567).
- Wyder T K, Martin D C, Schiminovich D, et al. The UV-Optical Galaxy Color-Magnitude Diagram. I. Basic Properties [J/OL]. ApJS, 2007, 173(2): 293-314. DOI: [10.1086/521402](https://doi.org/10.1086/521402).
- Wylezalek D, Zakamska N L, Greene J E, et al. SDSS-IV MaNGA: identification of active galactic nuclei in optical integral field unit surveys [J/OL]. MNRAS, 2018, 474(2): 1499-1514. DOI: [10.1093/mnras/stx2784](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2784).
- Xu C K, Lisenfeld U, Gao Y, et al. NOEMA Observations of CO Emission in Arp 142 and Arp 238 [J/OL]. ApJ, 2021, 918(2): 55. DOI: [10.3847/1538-4357/ac0f77](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0f77).

- Xu C K, Domingue D, Cheng Y W, et al. Local Benchmarks for the Evolution of Major-merger Galaxies—Spitzer Observations of a K-band Selected Sample [J/OL]. *ApJ*, 2010, 713(1): 330-355. DOI: [10.1088/0004-637X/713/1/330](https://doi.org/10.1088/0004-637X/713/1/330).
- Yan R, Blanton M R. The Nature of LINER-like Emission in Red Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2012, 747(1): 61. DOI: [10.1088/0004-637X/747/1/61](https://doi.org/10.1088/0004-637X/747/1/61).
- Yan R, Bundy K, Law D R, et al. SDSS-IV MaNGA IFS Galaxy Survey—Survey Design, Execution, and Initial Data Quality [J/OL]. *AJ*, 2016, 152(6): 197. DOI: [10.3847/0004-6256/152/6/197](https://doi.org/10.3847/0004-6256/152/6/197).
- Yan R, Tremonti C, Bershady M A, et al. SDSS-IV/MaNGA: Spectrophotometric Calibration Technique [J/OL]. *AJ*, 2016, 151(1): 8. DOI: [10.3847/0004-6256/151/1/8](https://doi.org/10.3847/0004-6256/151/1/8).
- Zhang B, Zhu M, Wu Z Z, et al. Extragalactic H I 21-cm absorption line observations with the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope [J/OL]. *MNRAS*, 2021, 503(4): 5385-5396. DOI: [10.1093/mnras/stab754](https://doi.org/10.1093/mnras/stab754).
- Zuo P, Xu C K, Yun M S, et al. H I Observations of Major-merger Pairs at $z = 0$: Atomic Gas and Star Formation [J/OL]. *ApJS*, 2018, 237(1): 2. DOI: [10.3847/1538-4365/aabd30](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aabd30).
- Zuo P, Ho L C, Wang J, et al. Massive Galaxy Mergers Have Distinctive Global H I Profiles [J/OL]. *ApJ*, 2022, 929(1): 15. DOI: [10.3847/1538-4357/ac561f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac561f).

致 谢

三年的硕士生活即将进入尾声，值此毕业论文完成之际，首先要感谢导师戴昱研究员对我的悉心指导。戴老师明求学之迷惘、解生活之困惑，帮助我在学习和科研中不断进步。其次还要感谢南美天文研究中心的黄家声老师、徐聪老师、程诚老师对我的关心和指导，以及中心的其他各位老师同学无私的帮助。最后，感恩父母多年来对我的辛勤培育与照顾，学业的每一次进步都离不开他们的支持。

林俐暉老师、潘璽安老师、李成老师、沈世银老师、袁芳婷老师、冯帅老师对本文的工作贡献良多，在此对他们的帮助和指导致以衷心的感谢。

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历：

2015 年 9 月-2019 年 6 月：南京大学，天文与空间科学学院，理学学士，天文学专业。

2019 年 9 月至今：中国科学院国家天文台，中科院南美天文研究中心，理学硕士，天体物理专业。

已发表的学术论文：

1. **Jin G**, Dai Y, Pan H A, et al. An IFU View of the Active Galactic Nuclei in MaNGA Galaxy Pairs. *The Astrophysical Journal*, 2021, 923(1): 6.
2. Dai Y, ..., **Jin G**, et al. Spectroscopically Identified Emission Line Galaxy Pairs in the WISP survey. *The Astrophysical Journal*, 2021, 923(2): 156.
3. Cheng C, ..., **Jin G**, et al. Searching for low-redshift faint galaxies with MMT/Hectospec. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, 256(1): 4.
4. Cheng C, Huang J S, Xu H, **Jin G**, et al. Spectral energy distribution similarity of the local galaxies and the 3.6 um selected galaxies from the Spitzer Extended Deep Survey. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, 21, 10, 260.
5. Huang J S, ..., **Jin G**, et al. A Complete 16 μm Selected Galaxy Sample at $z \sim 1$: Mid-infrared Spectral Energy Distributions. *The Astrophysical Journal*, 2021, 912(2): 161.

获得的望远镜时间：

1. **PI**, TAP2020B, 1 nights, Palomar 200-inch Hale Telescope, PCWI Study of a Special Group of Merging AGNs with Signs of Star Formation Suppression. (Not scheduled due to the pandemic.)
2. **PI**, TAP2022B, 4 nights, Palomar 200-inch Hale Telescope, Complete the Integral Field Spectroscopy Coverage for MaNGA Merging AGNs.
3. **CoI**, FAST2020, 14.4 hours, Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Tele-

scope, A FAST Survey to Study the Effect of Galaxy Interaction on HI Gas. (Results ready for submission.)

4. **CoI**, FAST2021, 11.5 hours, Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, HI kinematics and baryonic Tully-Fisher relation in low surface brightness galaxies. (Observations in progress.)
5. **CoI**, JCMT2022A, 33.0 hours, James Clerk Maxwell Telescope, The molecular gas content in edge-on low surface brightness galaxies. (Observations in progress.)
6. **CoI**, GMRT cycle 42, 20.0 hours, Giant Metrewave Radio Telescope, Spatially Resolved HI Kinematics of Spiral+Elliptical and Spiral+Spiral Major-merger Galaxy Pairs. (Observations in progress.)

获奖情况：

1. 中国科学院大学三好学生, 2021 年 6 月
2. 中国科学院大学国家奖学金, 2021 年 12 月