



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

## 博士学位论文

利用 MaNGA 积分视场光谱巡天研究蓝致密矮星系的演化

作者姓名: 居梦婷

指导教师: 郝蕾 研究员 中国科学院上海天文台

尹君 副研究员 中国科学院上海天文台

侯金良 研究员 中国科学院上海天文台

学位类别: 理学博士

学科专业: 天体物理

培养单位: 中国科学院上海天文台

2023 年 6 月



**The Evolution of Blue Compact Dwarf Galaxies Studied with the**  
**Integral Field Spectroscopic Survey — MaNGA**

**A dissertation submitted to**  
**University of Chinese Academy of Sciences**  
**in partial fulfillment of the requirement**  
**for the degree of**  
**Doctor of Philosophy**  
**in Astrophysics**

**By**

**Mengting Ju**

**Supervisor: Professor Lei Hao**

**Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences**

**June, 2023**



## 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。承诺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享有著作权的研究成果，未在以往任何学位申请中全部或部分提交。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

## 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大学有关收集、保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则，保留并向国家指定或中国科学院指定机构送交学位论文的电子版和印刷版文件，且电子版与印刷版内容应完全相同，允许该论文被检索、查阅和借阅，公布本学位论文的全部或部分内 容，可以采用扫描、影印、缩印等复制手段以及其他法律许可的方式保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：



## 摘要

蓝致密矮星系 (BCDs) 是金属丰度较贫的一类恒星形成星系。这类星系被认为是较高红移处探测到的亮、紧凑、恒星形成星系的本地对应体。BCD 星系内的恒星形成机制是这类星系研究的一个热点。利用积分视场光谱项目 MaNGA 巡天的数据, 我们发现了 8313-1901 这一个引人注目的 BCD 星系。在该星系的光学图像中, 我们发现一个轮廓清晰且偏离星系中心的蓝色团块, 我们将之命名为 NE 团块。NE 团块的光谱发射线明显强于星系中心, 它呈现出强烈的恒星形成和低金属丰度性质。同时, 星系的  $H\alpha$  速度场图像模型显示, 该 NE 团块的运动与寄主星系的旋转盘很可能是分离的。我们认为, NE 团块的起源很可能和气体吸积等星系外部原因有关。去除 NE 团块内寄主星系的光谱, 我们发现, “纯” NE 团块光谱与年轻的模型光谱 ( $\leq 7$  Myr) 非常吻合。因此, 该星系可能经历了气体吸积过程, 而非与年老星系发生了星系并合导致了 NE 团块。

探究星暴成分掩盖下的 BCD 星系的寄主星系特性, 以及其与其他类型矮星系的演化关系, 也是一个有意思的问题。受到 8313-1901 的启发, 我们按照“蓝”、“致密”、“矮星系”的标准从 MaNGA 巡天中筛选出 52 个 BCD 星系候选体, 并探索了这些星系的星暴起源和星暴前的寄主星系成分。我们发现这些 BCD 星系的年老星族的  $g$  波段图像比相应波段的观测图像要更对称, 且在具有偏心团块的星系中更为明显。我们既而从 52 个 BCD 星系候选体中选择了五个具有具有偏心团块的星系, 包括 8313-1901, 进行更细致的探讨。我们对这五个星系利用星族合成软件 FADO 得出他们的寄主星系在不同年龄段内的光谱, 以及由这些光谱合成得到的  $g$  波段图像, 来探究这些星系的可能演化趋势和这五个星系的团块年龄。我们首先将光谱星族按四个不同的年龄区间划分并构造相应的图像, 我们发现年长于 1 Gyr 的星族图像对称性普遍更好。年轻年龄区间 (如 10 Myr-100 Myr) 的图像体现不同于年老星族图像的结构形态, 部分星系中不同年龄区间内的团块位置会有很大的差异。接着我们比较了年长于四个年龄节点的星族构造的图像, 以研究这五个星系的寄主星系性质。我们发现这些星系中心面亮度随时间演化逐渐变亮, 大部分星系随时间演化有效半径变大, 而 Sérsic 指数变化不大。与矮椭圆星系 (dEs) 和矮不规则星系 (dIrrs) 相比, 这五个 BCD

星系的结构特征整体介于 dEs 和 dIrrs 之间，8313-1901 和 8615-1901 更接近于 dEs，而 9894-9102 更像 dIrrs。再然后，我们探索了年轻于九个年龄节点的星族图像的成团性，发现五个星系中大部分团块形成于数百兆年前。8257-3704 除了  $\leq 100$  Myr 的星暴团块外，还有一个约为 500 Myr-1 Gyr 的星暴活动。这五个星系的空间可分辨的星族分析，可以应用于更大的星系样本，有助于我们了解寄主星系和团块的演化历史。

**关键词：**近邻星系，蓝致密矮星系，星族合成，星系演化

## Abstract

Blue Compact Dwarf galaxies (BCDs) are a type of star-forming galaxies with extremely low metallicities. These galaxies are considered as local counterparts of bright and compact star-forming galaxies detected at higher redshifts. Studying the mechanism of star formation in BCDs is a hot issue. Using data from the Integral Field Spectroscopic Survey - MaNGA, we found an interesting BCD galaxy, 8313-1901, which has a clear off-centered blue clump with a distinctive contour in its optical image, which we named as the NE clump. The emission lines from the NE clump are much stronger than those from the center of the galaxy. The NE clump shows high star-forming activity and low metallicity. In addition, the  $H\alpha$  velocity field model indicates the NE clump seems to be kinematically detached from the rotating disk of the host galaxy. We speculate that the origin of the NE clump is likely related to external mechanisms such as gas accretion. Removing the spectra of the host galaxy in the NE clump region, we found that the "pure" spectrum of the NE clump matches well with young model spectra ( $\leq 7$  Myr), suggesting that the galaxy may have experienced gas accretion rather than mergers with old galaxies.

Exploring the properties of the host galaxies in the BCDs and their evolutionary relationships with other types of dwarf galaxies is also an interesting issue. Inspired by this galaxy, we selected 52 candidate BCD galaxies from the MaNGA survey based on the criteria of "blue", "compact", and being "dwarf", and explored the starburst origins and host galaxy components of these galaxies. We found that the  $g$ -band images of the old stellar population in these BCD galaxies are more symmetric than the corresponding observed images, and the differences are more significant in galaxies with off-centered clumps. We selected five galaxies with off-centered clumps from the 52 BCD galaxy candidates, including 8313-1901. Using the stellar population synthesis software FADO, we obtained the spectra of these galaxies in different ages and the  $g$ -band images synthesized from these spectra to explore the evolution of these galaxies and their clumps. Firstly, we divided the spectral BCDs into four different age intervals

and constructed corresponding images. We found that the images of the stellar population older than 1 Gyr are generally more symmetric. Images of the younger age intervals (such as 10 Myr-100 Myr) show structures different from those of the old ages. The positions of the clumps in different age intervals vary in some galaxies. We then compared the images of the stellar populations older than four age nodes to study the host galaxy properties of these five galaxies. We found that the central surface brightnesses of these galaxies gradually become brighter with time, and the effective radii of most galaxies slightly increase as they evolve, while the Sérsic indices remained more or less constant. We compared the structural characteristics of these host galaxies with those of dwarf elliptical galaxies (dEs) and dwarf irregular galaxies (dIrrs), and found that their structural characteristics were generally between dEs and dIrrs, with 8313-1901 and 8615-1901 being more similar to dEs and 9894-9102 more similar to dIrrs. Finally, we calculated the clumpiness of the images with the stellar populations younger than nine age nodes. We found that most of the clumps in these five galaxies were formed within hundreds million years. 8257-3704 seems to be an exception, exhibiting an additional starburst activity appeared at  $\sim 500$  Myr-1 Gyr. The spatially resolved stellar population analysis of five BCD galaxies can be applied to larger galaxy samples to help us understand the evolution history of the host galaxies and the clumps in more starbursting galaxies.

**Key Words:** Nearby galaxies, Blue Compact Dwarf galaxies, Stellar population synthesis, Galaxies evolution

## 目 录

<b>第 1 章 引言</b> .....	<b>1</b>
1.1 蓝致密矮星系 (BCDs) .....	1
1.2 BCDs 的寄主星系性质和星暴原因 .....	5
1.2.1 星系的一般演化图景 .....	5
1.2.2 寄主星系形态特征 .....	12
1.2.3 星暴成因 .....	14
1.3 BCDs 的研究方法 .....	17
1.3.1 形态特征 .....	17
1.3.2 光谱分析 .....	21
1.3.3 积分视场光谱 .....	24
1.4 本文概览 .....	27
<b>第 2 章 MaNGA 8313-1901</b> .....	<b>29</b>
2.1 8313-1901 基本特征 .....	29
2.2 结构特征 .....	33
2.3 物理性质 .....	36
2.3.1 SFR .....	36
2.3.2 气相金属丰度 .....	37
2.3.3 气体速度场 .....	39
2.4 NE 团块的形成原因 .....	41
2.5 小结 .....	47
<b>第 3 章 MaNGA 中 BCD 星系样本选择及特性分析</b> .....	<b>49</b>
3.1 BCD 星系样本选择 .....	49
3.2 BCD 星系的星族合成 .....	55
3.2.1 FADO 星族合成软件 .....	56
3.2.2 光谱拟合 .....	56
3.3 BCD 星系的星族分析 .....	58

3.3.1	平均年龄分布 .....	58
3.3.2	星族成分图像 .....	58
3.4	BCD 星系的发射线分析 .....	62
3.5	小结 .....	64
<b>第 4 章</b>	<b>五个 BCD 星系寄主星系结构演化和团块性质 .....</b>	<b>67</b>
4.1	具有团块图像的代表性星系介绍 .....	67
4.2	星族合成及金属丰度分析 .....	70
4.2.1	光谱拟合 .....	70
4.2.2	五个 BCD 星系的发射线性质 .....	72
4.3	寄主星系结构演化 .....	75
4.3.1	不同年龄区间内图像 .....	75
4.3.2	星系结构演化 .....	77
4.4	偏心团块演化 .....	82
4.5	小结 .....	85
<b>第 5 章</b>	<b>总结和展望 .....</b>	<b>89</b>
5.1	总结 .....	89
5.2	展望 .....	91
<b>附录 A</b>	<b>五个 BCD 星系的的不同星族图像 .....</b>	<b>95</b>
A.1	五个星系的年老星族不同年龄段内的结构拟合 .....	95
A.2	五个星系的年轻星族不同年龄段内的图像 .....	102
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>107</b>
<b>致谢</b>	<b>.....</b>	<b>125</b>
<b>作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果 ..</b>	<b>.....</b>	<b>127</b>

## 图目录

图 1-1	星系分类：哈勃序列的修改方式 (Sparke 等, 2007)。 .....	2
图 1-2	IZw 18 图像。 .....	3
图 1-3	左图：IZw 18 的 $F606W$ ( $\sim$ 宽 $V$ ) 观测图像。右上图：星系不同区域内的恒星空间分布。右下表：不同区域内根据颜色星等图得到的不同年龄段内的恒星质量分布 (Annibali 等, 2013)。 ....	4
图 1-4	一种典型的星系形成的逻辑流程图 (Mo 等, 2010)。 .....	6
图 1-5	恒星形成率面密度和气体面密度关系 (Kormendy 等, 2004)。 ...	7
图 1-6	吸积的气体来源 (Putman, 2017)。其中红色代表热气体，蓝色代表较冷的气体。a) (左上) 吸积 IGM 中的物质，其中外部被加热，而内部则能够冷却。也指示了来自晕中的热气体，因混合于更密集的气体而在星系盘面附近冷却。b) (右上) 当反馈物质靠近盘面时可以被吸积，这里热气体来自于恒星反馈并升起、冷却然后重新降落。中心外流的气体将与现有的晕混合，这也可能导致冷团块的吸积。c) (底部) 伴星系在穿越弥散的晕介质时会失去气体，而这些热气体将以温云块的形式向盘面降落。随着气体与更致密的反馈物质混合，它可以在靠近盘面的位置冷却。 .....	8
图 1-7	星系周介质示意图 (Tumlinson 等, 2017)。该星系的红色中央隆起和蓝色气体盘由来自 IGM (蓝色) 的丝状吸积物提供。外流从盘中涌出，呈粉红色和橙色，而之前被喷出的气体被回收。不同色调的紫色“弥散气体”晕包括可能由所有这些来源贡献的气体，并随着时间的推移混合在一起。 .....	10
图 1-8	HE2243-60 星系-类星系对，黑点为类星体位置 (Bouché 等, 2016)。从左到右分别为星系的运动学、类星体位置的气体运动学和模型的运动学。盘运动学 (圆形轨道) 显示为红色，而气体流入模型显示为黑色。 .....	10

- 图 1-9 沿左图中红色箭头方向金属丰度（红方块）和恒星形成率面密度（蓝线）分布，J0944+54 (Sánchez Almeida 等, 2015)。 ..... 11
- 图 1-10 BCDs 寄主星系与其他类型星系形态参数的关系 (Amorín 等, 2009)。黑圆圈和黑线代表 BCDs 寄主星系和一阶线性拟合；绿色的菱形和线条以及红色的十字和线条分别表示 dIrrs 和 dEs 数据和一阶线性拟合；三角形表示 E-S0 星系，而小圆点表示旋涡星系。 ..... 13
- 图 1-11 dIs, dEs, BCDs 之间各种演变情况的示意图，由 Papaderos 等 (1996) 总结。 $\mu_{E,0}$  是指数盘中心面亮度， $\alpha$  为标长。 $P_{25}$  是盘成份面亮度为  $25\text{mag/arcsec}^2$  处的星系半径， $E_{25}$  为指数盘成份面亮度为  $25\text{mag/arcsec}^2$  处的星系半径。 ..... 14
- 图 1-12 两富气体矮星系并合模型不同时刻的不同成分分布 (Bekki, 2008)。洋红色表示星系自身携带的年老恒星，黄色表示并合后形成的年轻恒星，青色表示气体成分。 ..... 15
- 图 1-13 IZw 18 H<sub>I</sub> 气体分布以及气体速度场 (Lelli 等, 2012)。上层图展示了 VLA-C、VLA-B 和 VLA-A 阵观测数据，橙色背景图像为 H $\alpha$  发射线流量图，黑色实线和虚线为 H<sub>I</sub> 气体分布，左上角数字分别表示为空间分辨率为 20"、5" 和 2"。下层子图展示了相应视场内的 H<sub>I</sub> 气体速度场。 ..... 16
- 图 1-14 室女座星系团中 dE 星系 VCC753 的 V 波段面亮度轮廓 (Sparke 等, 2007)。 ..... 18
- 图 1-15 IC4710 的 GALFIT 二维拟合图像 (Peng 等, 2010)。其中，a 至 i 表示原始数据、最佳单成分 Sérsic 函数拟合（嵌入从 m=1 到 m=10 的傅里叶转换）、最佳两成分 Sérsic 函数拟合（模型中还加入了不同的傅里叶模型）、最佳两成分拟合的残差、最佳两成分拟合模型中的第一个成分、最佳两成分拟合模型中的第二个成分、传统的单成分椭圆体拟合、椭圆拟合得到的残差、以及一维面亮度轮廓。虚线代表两成分拟合得到的两个成分，而实线为两个成分之和，即最佳拟合结果。在下方子图中，展示了数据-模型的残差。 ..... 19

- 图 1-16 Lian 等 (2015) 利用测光数据研究 BCD 星系的寄主星系结构。图中展示的 BCD 星系为 GOODS 南天区, 作者编号为 3 的 BCD 星系。上一列子图分别为该星系  $F435W$  图像、 $F160W$  图像和一维拟合结果, 蓝色点和拟合线为  $F435W$  的一维面亮度轮廓, 红色点和拟合线为  $F160W$  的。下层子图展示了这些 BCD 星系的形态参数与其他类型矮星系的比较, 前两张图的横坐标为  $B$  波段的绝对星等, 后两张图为  $H$  波段的绝对星等。..... 20
- 图 1-17 左图为不同类型恒星的光谱。右图为星暴星系的光谱 (Henkel 等, 2022)。..... 22
- 图 1-18 MaNGA 观测示意图, 以及 127 根光纤组成的光纤束。..... 26
- 图 2-1 8313-1901 的复合图像、典型观测光谱、 $H\alpha$  发射线流量及其等值宽度的分布。洋红色六边形代表了 MaNGA 光纤束覆盖范围。红色实线圈和橙色虚线圈分别表示 2.2 节和 2.3 节中定义的 NE 团块和 SW 团块的位置。左上图中标注为红色、黑色和橙色斜交叉点处三个 spaxel 光谱分别以展示在第二张图中。左下方是  $H\alpha$  发射线尘埃改正后的流量二维分布, 右下方是  $H\alpha$  的等值宽度 (EW) 二维分布图。灰色点虚线表示主轴和次轴, 该位置角度取自 NASA-Sloan Atlas 目录, 沿东北向西南方向的虚线为主轴。本章节所有图片中, 未明确标注的洋红色六边形、红色实线圈、橙色虚线圈、灰色点虚线表示的含义与本图相同。 31

- 图 2-2 使用 GALFIT 对 8313-1901 寄主星系进行二维面亮度轮廓拟合结果。从左到右分别展示了 BASS 巡天项目的  $g$  波段观测图像、GALFIT 得到的寄主星系最佳拟合图像、残差图像和一维面亮度轮廓。图片空间分辨率为  $0.06''$ ，PSF FWHM 为  $1.68''$ 。黑色方框为寄主星系的拟合区域。灰色方框为 NE 团块拟合区域 ( $\sim 3'' \times 6''$ )，中心位于 NE 团块  $H\alpha$  流量峰值处。前三张图中的颜色棒均相同，范围为  $-0.25$   $20$  nanomaggies/arcsecond<sup>2</sup>。最右侧的子图显示了寄主星系 (黑色)、NE 团块 (红色) 和 PSF 模型 (黄色) 的一维面亮度轮廓。带误差棒的点表示观测数据，线表示最佳 GALFIT 模型的一维分布。该子图下方展示分别展示了寄主星系 (黑色) 和 NE 团块 (红色) 的一维表面轮廓残差。..... 35
- 图 2-3  $H\alpha$  获得的 SFR、通过 O3N2 指针计算的气相金属丰度和金属丰度误差图。..... 36
- 图 2-4 星族合成软件 MEGACUBE 得到的光度加权和质量加权平均年龄图。..... 37
- 图 2-5 左图：金属丰度的径向分布。中图：横坐标为各个 spaxel 到  $H\alpha$  发射线流量最高位置的直线距离，纵坐标为金属丰度。该图中有两个分支，由绿色虚线分割。右图：MaNGA 数据获得的  $g$  波段面亮度图像。该图中黑色线表示位于中图上下两分支之间的在图像中的分界线。左图和中图中的红色、橙色和黑色数据点分别代表 NE 团块区域内的 spaxel、SW 团块区域内的 spaxel 和除团块以外的 spaxel。..... 38
- 图 2-6 R23 指针获得的金属丰度、直接测量法计算金属丰度和直接测量法与 O3N2 方法之间的比较。红色点为 NE 团块区域内的 spaxel 数据，黑色点为区域外的 spaxel 数据，灰色实线为 1:1 线。..... 39
- 图 2-7  $H\alpha$  速度场、速度场模型和残差。..... 40

- 图 2-8 NE 团块区域内的各成分的光谱、构造的模型光谱和残差。上层图中展示了 NE 团块的观测光谱，呈浅蓝色。浅橙色线表示 NE 团块中估计的寄主星系成分。“纯” NE 团块光谱（黑色）则为两条光谱的差异，即观测光谱（浅蓝色）-寄主星系光谱（浅橙色）。黄色虚线光谱显示了 Prospector 构建的模型光谱（详见正文）。下方的面板展示了“纯” NE 团块光谱与模型光谱之间的残差。蓝色阴影区域显示观测光谱的  $3\sigma$  误差范围。 ..... 42
- 图 2-9 NE 团块区域内三条光谱的特定波长处的特征对比。蓝色线为观测光谱，橙色线为寄主星系成分光谱，黑色线为“纯” NE 团块光谱 ..... 44
- 图 2-10 HSC 项目观测  $i$  波段图像。白圈标记了人为选择的团块区域。 46
- 图 3-1 在 MaNGA MPL-11 版本中选出的 52 个 BCD 星系候选体的  $gri$  复合图像。 ..... 51
- 图 3-2 52 个 BCD 星系候选体的物理性质。蓝点为 BCD 星系，灰色点为 MaNGA 项目中的其他星系。 ..... 54
- 图 3-3  $H\alpha$  速度场的不对称度，蓝色点为 BCD 星系候选体。 ..... 55
- 图 3-4 FADO 拟合结果中的一个例子，左边为光谱信息，橙色线为观测光谱。蓝色线为最佳拟合连续谱，包括恒星连续谱（黑色）和星云连续谱（紫色）。右上为 150 条 SSPs 在年龄-金属丰度平面上的恒星质量分数，右下图为恒星形成历史。 ..... 57
- 图 3-5 FADO 拟合得到的 52 个 BCD 星系中共 47001 条光谱的平均年龄在不同分类的 BCD 星系中的占比。上层子图将星系根据 52 个 BCD 星系  $NUV-r$  颜色的平均值分为  $NUV-r$  值小于等于平均值的偏蓝星系和  $NUV-r$  值大于平均值的偏红星系。下层子图将 BCD 星系人为分成有团块星系和无团块星系。左列图为光度加权的平均年龄，右列图为质量加权的平均年龄。 ..... 59
- 图 3-6 根据 FADO 拟合结果，获得不同年龄段内模型光谱的例子。左图为 SSPs 的质量分数，右图橙色线为观测光谱，黑色线为恒星连续谱，绿色和红色分别为尘埃衰减后  $\geq 10$  Myr 和  $\geq 100$  My 的模型光谱。 ..... 59

图 3-7	BCD 星系的 $g$ 波段观测图像和 $\geq 100$ Myr 的图像, 颜色棒都为 20 至 25mag。每个星系上层图像为观测图像, 下层图像为 $\geq 100$ Myr 的中等至年老星族的图像 .....	61
图 3-8	左图: $\Sigma_*$ - $Z$ 关系, 颜色棒表征数密度。灰色数密度轮廓图为 MaNGA 中所有恒星形成区的 spaxel 的 $\Sigma_*$ - $Z$ 关系。右图: $\Sigma_*$ - $\Sigma_{SFR}$ 关系, 颜色棒表征数密度。黑色线为 Cano-Díaz 等 (2016) 工作中对此关系的拟合线。 .....	63
图 3-9	金属丰度梯度斜率和 sSFR 梯度斜率关系, 颜色棒表示 $H_I$ 气体百分含量。 .....	64
图 4-1	五个 BCD 星系的 $gri$ 图像、光谱合成 $g-r$ 颜色图像、连续谱 ( $\lambda < 7500\text{\AA}$ ) 信噪比图像和两个代表位置处光谱。从上至下分别为 8257-3704、8313-1901、8563-3704、8615-1901 和 9896-9102。最后一列中红色光谱选取 $gri$ 图像 (第一列) 中红色斜十字交叉点处, 表征星系中特征团块位置的光谱, 黑色光谱选取黑色斜十字交叉点处的 spaxel, 表征星系中心的光谱 .....	69
图 4-2	8313-1901 中“纯” NE 团块采用 FADO 软件的拟合结果。 ....	71
图 4-3	针对五个星系 FADO 拟合结果示例, 每个星系均展示一条团块处光谱的拟合, 左边为光谱信息, 右侧为星族信息。 .....	73
图 4-4	五个星系的气相金属丰度、金属丰度径向分布、SFR 和 $H\alpha$ 速度场。不同颜色的圈和点代表星系中 SFR 高的区域。金属丰度和 SFR 通过 FADO 拟合得到的发射线流量计算获得, $H\alpha$ 速度场由 MaNGA DAP 数据提供。 .....	74
图 4-5	五个星系在不同年龄段内的平滑后的 $g$ 波段图像, 从左到右分别为观测时刻, 恒星连续谱, 年轻星族 (0, 10 Myr], 中等-年轻星族 (10 Myr, 100 Myr], 中等-年老星族 (100 Myr, 1 Gyr) 和年老星族 [1 Gyr, 15 Gyr]。 .....	76
图 4-6	old2 ( $\geq 100$ Myr) 的星族图像的 GALFIT 拟合结果。 .....	78
图 4-7	五个星系在中心面亮度, 有效半径和 Sérsic 指数的演化关系。 .....	79

图 4-8	五个 BCD 星系观测时刻图像、恒星连续谱图像和年老于四个年龄节点的图像的形态参数与其他类型矮星系形态参数之间的比较。 .....	81
图 4-9	五个星系的年轻于九个年龄节点的星系图像成团性变化, 以及恒星连续谱图像和观测图像的成团性展示。 .....	83
图 4-10	8257-3704 在不同年龄段内的质量图像。 .....	84
图 4-11	五个星系采用第三章中的 SSPs 拟合后得到年轻于九个年龄节点的星系图像成团性变化。 .....	85
图 5-1	利用 FAST 观测 8313-1901 周围的 H <sub>I</sub> 气体 .....	92
图 A-1	观测时刻 <i>g</i> 波段图像的 GALFIT 拟合结果, 主轴次轴采用 old2 的拟合结果。 .....	97
图 A-2	恒星 <i>g</i> 波段图像的 GALFIT 拟合结果, 主轴次轴采用 old2 的拟合结果。 .....	98
图 A-3	old1 ( $\geq 10$ Myr) 的星族图像的 GALFIT 拟合结果, 主轴次轴采用 old2 的拟合结果。 .....	99
图 A-4	old3 ( $\geq 500$ Myr) 的星族图像的 GALFIT 拟合结果, 主轴次轴采用 old2 的拟合结果。 .....	100
图 A-5	old4 ( $\geq 1$ Gyr) 的星族图像的 GALFIT 拟合结果, 主轴次轴采用 old2 的拟合结果。 .....	101
图 A-6	8257-3704 年轻于九个年龄节点星族图像、恒星连续谱图像和观测图像, 未经过平滑处理。 .....	103
图 A-7	8313-1901 年轻于九个年龄节点星族图像、恒星连续谱图像和观测图像, 未经过平滑处理。 .....	103
图 A-8	8563-3704 年轻于九个年龄节点星族图像、恒星连续谱图像和观测图像, 未经过平滑处理。 .....	104
图 A-9	8615-1901 年轻于九个年龄节点星族图像、恒星连续谱图像和观测图像, 未经过平滑处理。 .....	104
图 A-10	9894-9102 年轻于九个年龄节点星族图像、恒星连续谱图像和观测图像, 未经过平滑处理。 .....	105



## 表目录

表 2-1	MaNGA 8313-1901 基本信息 .....	32
表 2-2	DESI legacy 图像巡天深度 .....	34
表 3-1	MaNGA 中 52 个 BCD 星系候选体在 NASA-Sloan Atlas 星表中 部分参数。 .....	52
表 3-2	续上表 .....	53
表 4-1	五个星系的基本信息 .....	68
表 A-1	拟合得到不同年龄段内寄主星系的结构参数 .....	96



## 符号列表

## 字符

<b>Symbol</b>	<b>Description</b>	<b>Unit</b>
$n$	Sérsic index	1
$R_e$	effective radius	arcsec
$S$	smoothness (also called clumpiness)	1

## 缩写

BCD	Blue Compact Dwarf
IFU	Integral Field Unit
SFR	Star Formation Rate
IGM	InterGalactic Matter
CGM	CircumGalactic Medium
ISM	InterStellar Medium



## 第1章 引言

### 1.1 蓝致密矮星系 (BCDs)

现今，“星系”一词被广泛应用，人们已知除了银河系外，还存在着其他星系。但实际上，直到20世纪20年代才明确存在河外星系。星系的形态和结构千变万化。随着观测到的星系数量的增多，人们可以通过拍摄到的星系图像对它们进行分类。1936年，哈勃在他的著作《星云世界》中提出了一种分类方法，后来进行了修改和补充，这种分类方法一直被广泛运用（如图1-1所示）。

通常情况下，哈勃分类系统将星系分为三种主要类型：椭圆星系（E）、透镜星系（S0, SB0）和旋涡星系（S, SB）。此外，还有一种类型被归为不规则星系（Irr），它无法归入前三种类型之一。在图1-1中，cD星系是一种巨椭圆星系。椭圆星系外观光滑且对称，没有其他结构。通常，椭圆星系缺乏冷气体（ $< 1\%$ ），因此没有年轻的星族，颜色偏红。相比之下，透镜星系更扁，除了中央的椭圆形核球外，还有一个旋转盘，但是该盘没有旋臂或者突出的尘埃带。旋涡星系的主要特征是存在明显的旋臂结构，在旋臂上存在大量年轻的OB型星，因此在星系图像中呈现出明亮的蓝光。正常旋涡星系（S）包含一个类似于椭圆星系的核球，并从其中延伸出两条或更多条旋臂。棒旋星系（SB）在星系中心呈现出棒状结构，并从两端延伸出旋臂。不规则星系没有明确的形态，在外观上混乱，既没有核心隆起，也没有任何旋臂结构的痕迹。一些不规则星系曾经是旋涡或椭圆星系，但由于不均匀的外部引力作用，它们的形态被破坏和改变。尽管不规则星系可能包含大量气体和尘埃，但矮不规则星系（dIrr）不一定如此（Walter 等, 2007）。

光度较暗（ $M_B \geq -18 \text{ mag}$ ）或者质量较低（ $M_* < 10^9 M_\odot$ ）的星系被称为矮星系。这类星系相对其他星系来说体积更小、光度更低，且其形状并不规则，常常带有延伸的亚结构。矮星系的结构异常复杂。在矮星系中，最显著的区别是星系内气体含量和分布的不同。相对于“早型星系”——矮椭圆星系（dE）和矮椭球星系（dSph）——而言，“晚型星系”——矮不规则星系（dIrr）——的系统中，含有大量气体且正在形成恒星。矮不规则星系周围的大量星际介质以中性氢（HI）最为丰富（Karachentsev 等, 2019）。部分矮星系的形态呈现延伸的情况，例如小麦哲伦星系（SMC）就有可能是近期与另一个星系相互作用的结果。矮不规则

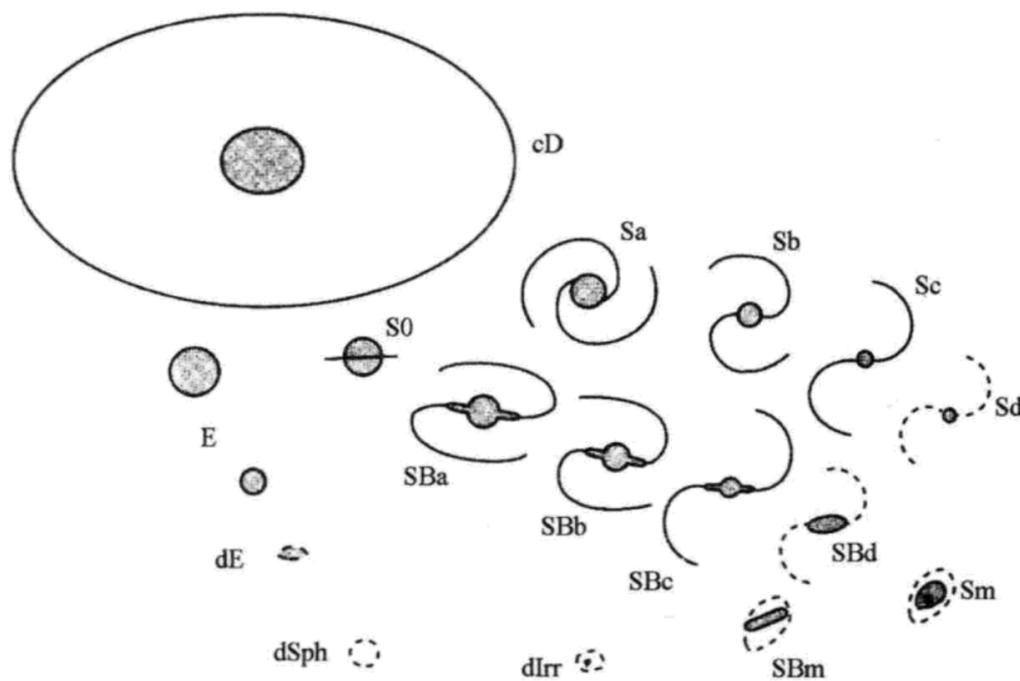


图 1-1 星系分类：哈勃序列的修改方式 (Sparke 等, 2007)。

星系和矮椭圆星系所处的环境也有不同的偏好，矮不规则星系更倾向于处在场环境中，而矮椭圆星系则容易在团中发现。

蓝致密矮星系 (Blue Compact Dwarf galaxy, BCD) 是矮不规则星系中较为亮眼的一类，它们通过近期或正在进行的大量恒星形成活动导致其表面亮度较高。广泛使用的 BCD 星系定义来源于 Gil de Paz 等 (2003) 年提出的：

$$\begin{aligned} \langle \mu_B \rangle - \langle \mu_R \rangle &\leq 1 \text{ mag/arcsec}^2, \\ \langle \mu_B \rangle &< 22 \text{ mag/arcsec}^2, \\ M_K &> -21 \text{ mag}. \end{aligned} \quad (1-1)$$

IZw 18 作为著名的 BCD 星系备受研究者关注 (详见图1-2)。

这类星系周围存在着相当多的  $H_1$  气体，SFR 也比矮椭圆星系更高。实际上，BCD 星系所独有的特征不仅仅是其极高的恒星形成率，而且还拥有较低的金属丰度。目前为止，在近域宇宙中，这类星系可以算作金属丰度最低的星系之一。例如，IZw 18 的金属丰度为  $12+\log(O/H)=7.18$  (Izotov 等, 2004)，约太阳丰度的 1/50。而在近域宇宙中，大多数恒星形成星系的金属丰度都大于 8 (Tremonti 等, 2004)。因其极低的金属丰度并伴有星暴过程，常常认为 BCD 星系可能是刚刚形成的星系，很可能类似于宇宙第一代恒星的形成。因而这类星系也常被看作是高

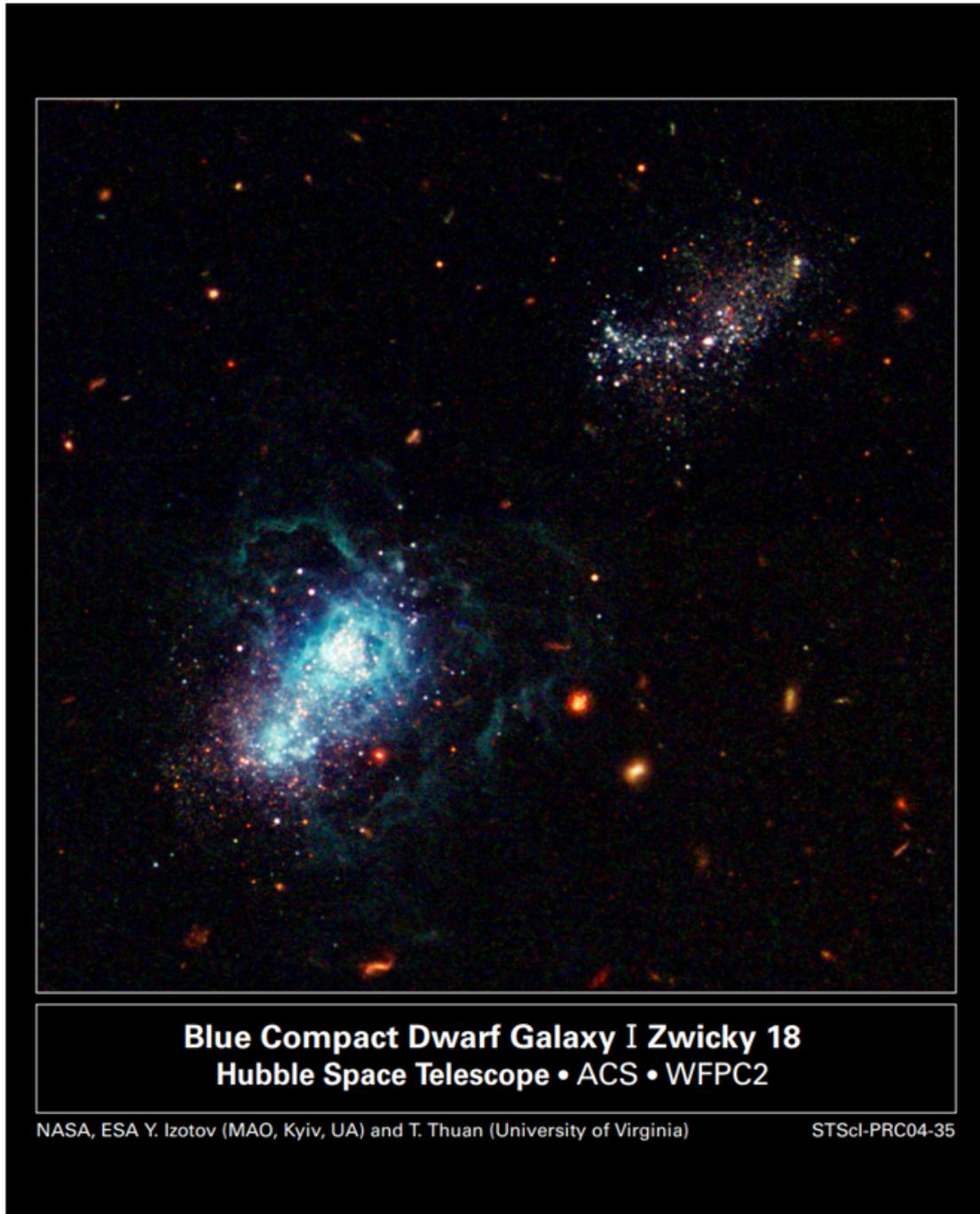


图 1-2 IZw 18 图像。

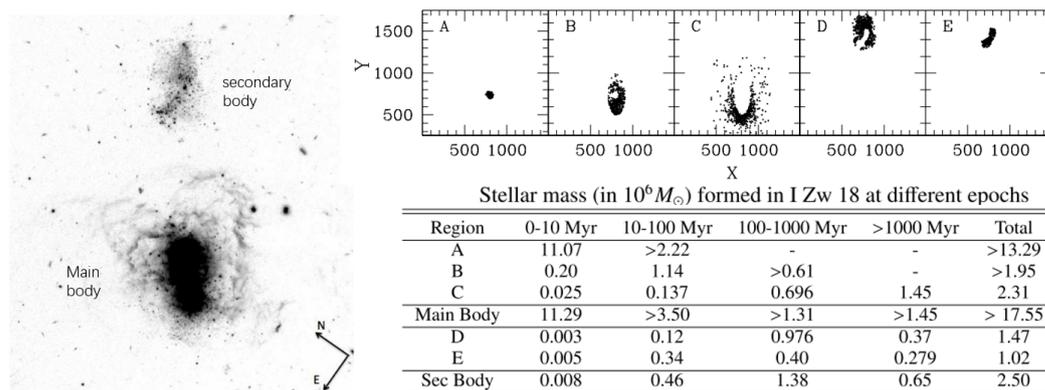


图 1-3 左图: I Zw 18 的  $F606W$  ( $\sim$  宽  $V$ ) 观测图像。右上图: 星系不同区域内的恒星空间分布。右下表: 不同区域内根据颜色星等图得到的不同年龄段内的恒星质量分布 (Annibali 等, 2013)。

红移星系在近域宇宙中的对应体。

此外, 从这些星系的光谱上来看, 可以发现它们的星族都十分年轻。但随着研究的深入, 在许多 BCD 星系中都发现了年老星族。同样以 I Zw 18 为例, 在图 1-3 中展示了该星系不同区域内的星族年龄分布情况。左图是 HST 观测到的 ( $V$  波段) 图像, 右上的子图展示了星系的五个区域以及这些区域内的恒星, 通过颜色星等图可以得出这五个区域内的恒星年龄分布, 如右下的表格所示 (Annibali 等, 2013)。从表格中可以看出, 只有星系主体区域的中心位置 (区域 A 和 B) 没有大于 1 Gyr 的年老星族, 在其他区域内都发现了年老恒星族群的存在。

尽管 BCD 星系的判断标准中要求它们是致密的, 但在观察多个 BCD 星系的形态时, 人们发现它们之间还是存在差别的。因此, Loose 等 (1986) 提出了一种基于星暴区和寄主星系形状的分类方案:

- (1) i0BCDs 没有证据表明存在寄主星系, 是真正年轻天体的候选者。
- (2) nEBCDs 为一个有核的星暴成分嵌入到一个规则的、椭圆的寄主星系中。
- (3) iEBCDs 也有一个椭圆的寄主星系, 但是星暴部分是不规则的。
- (4) iIBCDs 为一个不规则星暴成分嵌入不规则寄主星系中。这一类可以进一步细分为:
  - (4.a) iICBCDs 或彗星型 BCDs, 它们有非常细长的寄主星系, 星暴形成发生在其中一个末端附近。
  - (4.b) iIMBCDs, 它们显示出明显的合并迹象。

## 1.2 BCDs 的寄主星系性质和星暴原因

### 1.2.1 星系的一般演化图景

星系的形成和演化，是由内部和外部环境共同作用的结果。如图1-4展示了星系形成的一种典型的流程图。引力不稳定等产生一定角动量，当重子物质冷却效率高而角动量小时，重子物质损失能量而向中心收缩。在角动量守恒的情况下，物质不停靠近星系中心，自转速度会加快，从而形成一个更紧密的气体圆盘。当圆盘开始冷却，气体引力不稳定，部分气体冷却形成为恒星，这就出现了恒星形成的盘星系。假如两个或多个星系靠太近或者发生碰撞时，他们之间相互作用，就出现了星系并合。根据相互作用星系之间的质量关系可以分为主并合和次并合，根据星系周围的气体含量可以分为湿并合和干并合。气体含量多时，容易发生星暴，部分并合星系之间还会出现潮汐尾等。随着气体的消耗，并合后的星系逐渐出现球状形态，最终就呈现出我们当前看到的椭圆星系。但是如果吸积周围的气体，冷却触发恒星形成，这些球状形态系统也可能再次呈现出盘状结构。

需要特别注意的是，星系形成的过程是复杂的，其中的一些过程是相互交错的，例如在主并合发生之前，冷气体盘有可能还未完全形成。星系的大部分质量是通过与小且多的天体进行并合获得的。气体云的塌缩过程的不同可能会导致椭圆星系和旋涡星系的形成。当气体含量较低时，气体可以有效地形成恒星而无需耗费额外的能量，气体运动也会转化为恒星的随机运动，因此可以轻松地形成椭圆星系。然而，当气体的含量足够高时，由于某些反馈机制的作用如星风等，气体无法被完全转化为恒星。气体云会继续缩小，直到达到角动量平衡，从而形成一个旋转的盘状结构 (Eggen 等, 1962)。目前，也有一些理论认为，星系的质量可能很大程度上来自于吸收弥散气体，尤其是沿着冷气体流的方向 (Dekel 等, 2009; Ocvirk 等, 2008)。作为高红移星系的良好对应体，近域的矮星系也在其外围显示出了各种恒星形成的迹象 (Papaderos 等, 2012)。一些近邻的矮星系显示出延展的紫外盘，这表明它们的外围可能存在恒星形成现象 (Thilker 等, 2007)。相对于并合过程的研究，关于气体吸收方面的工作研究相对较少。因此，接下来我们将主要介绍气体吸积的相关内容。

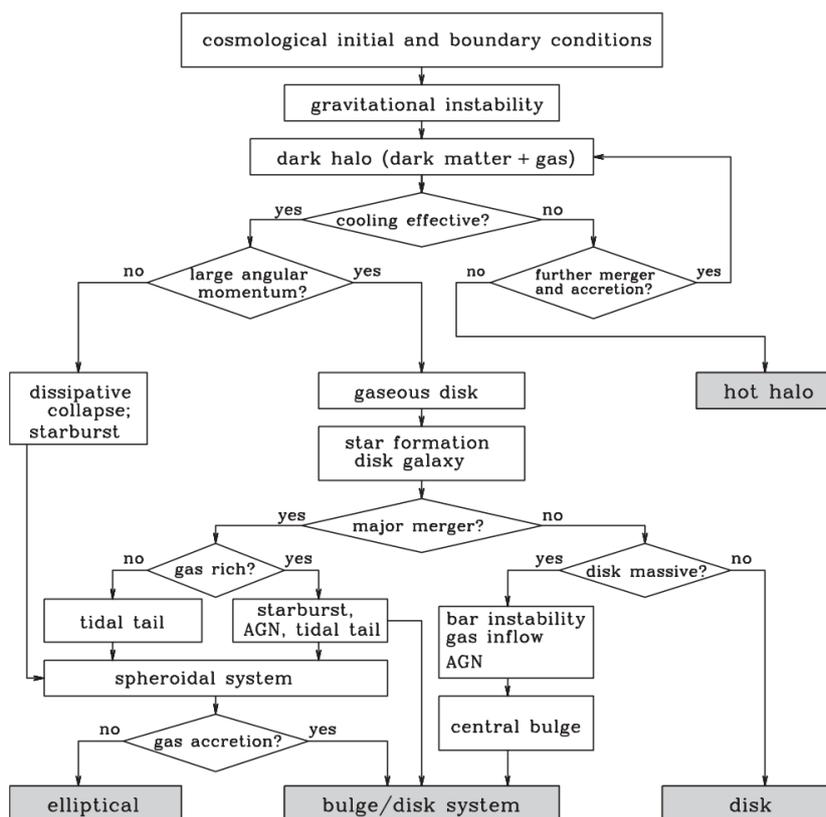


图 1-4 一种典型的星系形成的逻辑流程图 (Mo 等, 2010)。

### 原初气体吸积

气体吸积最早提出大概是在 60 年前。当时，人们通过观测银河系中的高速氢云，经过研究后认为这些内落的云块很可能是银河系生长的原料 (Muller 等, 1963; Oort, 1970)。这些云块内落之后影响银河系的恒星形成和金属丰度分布 (van den Bergh, 1962)。通过对宇宙中其他星系的研究，也发现了很多重子物质存在于这些星系周围，这些物质可能就是恒星形成的原材料。

Kennicutt (1998) 的研究表明，恒星形成率 (SFR) 与气体总质量之间存在着紧密的关系，也就是所谓的 K-S 定律。然而，在许多恒星形成的星系中，气体质量除以目前观察到的 SFR 所得到的耗尽时标比星系存活时间短。这表明，在它们的演化历程中，有可能曾经气体被补充过。恒星形成率面密度和总气体含量面密度的关系如图1-5所示。图中的直线从上至下分别表示气体耗尽的时间尺度为 0.1、1 和 10 Gyr，实心方块为环核心恒星形成区 (H II 区)，实心圆形为正常旋涡星系盘区，空心圆形为正常旋涡星系中心区。因此，我们可以看到正常旋涡星系的盘区域气体耗尽时标约为 2 Gyr，而环核心恒星形成区的耗尽时标则更短，约

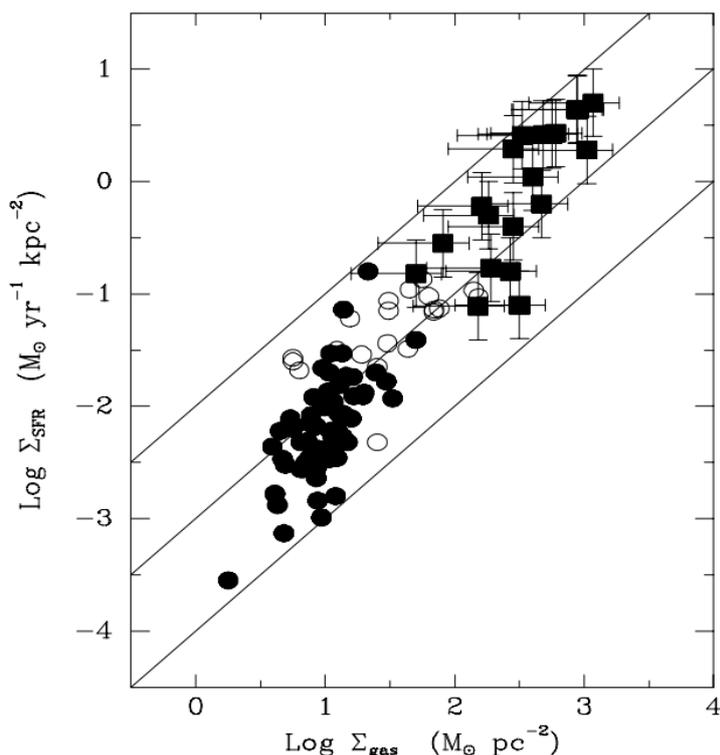


图 1-5 恒星形成率面密度和气体面密度关系 (Kormendy 等, 2004)。

为 0.2-1 Gyr, 这显然比星系形成的时间短, 因此在星系演化过程中需要持续补充气体。在高红移 ( $z > 1$ ) 星系中, 也有测量到的气体耗尽时标不到 1 Gyr (Tacconi 等, 2013)。有证据表明, 星系在高红移时经历了更为高效的恒星形成, 导致耗尽时间更短, 在早期需要更快速地吸收气体 (Scoville 等, 2016)。这也可能是高红移星系中相比于低红移星系更容易观测到团块状结构的原因。气体吸积过程可能是调节星系 SFR 的关键因素, 如果没有它, 很多星系在气体耗尽后的死亡和衰退就不可避免了。

此外, 银河系中存在着 G 矮星问题和 H I 含量问题也可以作为气体吸积存在的证据。在太阳附近, 观测到的贫金属 G 矮星比封闭模型 (close-box 模型, 无内落或外流) 所预言的贫金属星要多, 即所谓的 G 矮星问题 (van den Bergh, 1962; Pagel 等, 1975)。仅有在演化过程中注入一些新鲜的气体, 观测到的太阳附近 G 矮星金属分布函数才能与模型预言相匹配。

在数值模拟中, 贫金属气体的吸积通常是推动盘状星系形成的常见过程之一 (Finlator 等, 2008; Stewart 等, 2011; Altay 等, 2013)。数值模拟生成的星系最初非常不稳定, 但随着时间的推移, 它们进入一个准稳定阶段, 在这个阶段, 气体

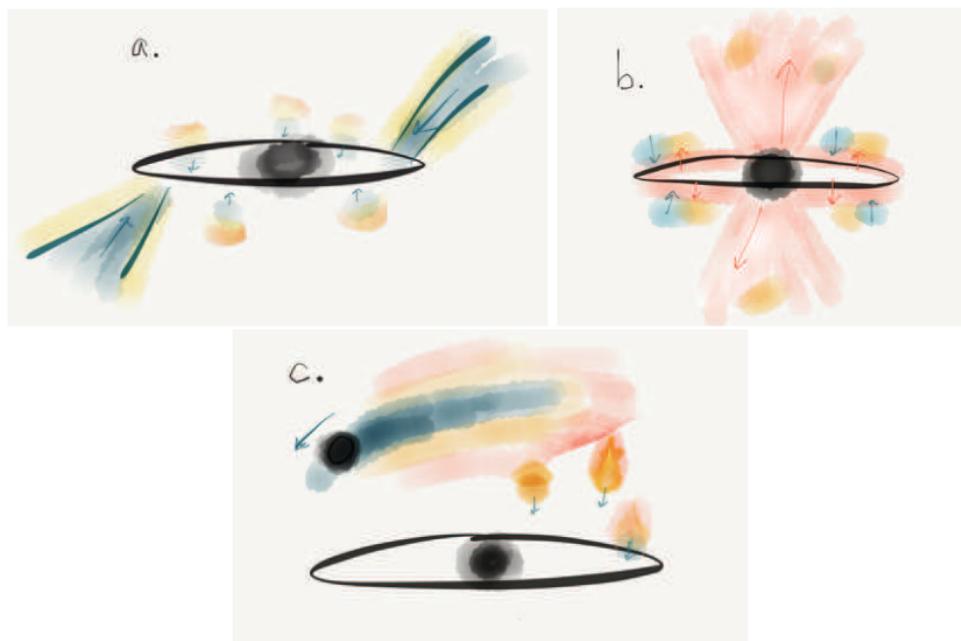


图 1-6 吸积的气体来源 (Putman, 2017)。其中红色代表热气体，蓝色代表较冷的气体。a) (左上) 吸积 IGM 中的物质，其中外部被加热，而内部则能够冷却。也指示了来自晕中的热气体，因混合于更密集的气体而在星系盘面附近冷却。b) (右上) 当反馈物质靠近盘面时可以被吸积，这里热气体来自于恒星反馈并升起、冷却后重新降落。中心外流的气体将与现有的晕混合，这也可能导致冷团块的吸积。c) (底部) 伴星系在穿越弥散的晕介质时会失去气体，而这些热气体将以温云块的形式向盘面降落。随着气体与更致密的反馈物质混合，它可以在靠近盘面的位置冷却。

流入，气体流出和 SFR 达到平衡。

## 气体来源

从理论上讲，持续的气体吸积是星系形成所必需的，它主要是通过吸积 IGM 和卫星星系中的气体。星系反馈也是星系形成模型的一个重要组成部分。深入了解吸积和反馈机制之间的相互作用非常重要。一些观测数据支持了 IGM、卫星气体和反馈物质都是未来恒星形成的燃料来源的理论。

吸积的气体主要来源有三种：星系际介质、反馈机制和卫星星系（见图1-6a、b、c）。星系晕中的大部分气体是电离的。观测到星系盘中的电离气体质量小于冷气体 ( $< 10^4\text{K}$ ) 的质量，所以晕气体在吸积时应迅速冷却了。气体可能以大型冷云块的形式进入，也可能从较小的温云块中滴落到圆盘上，或优先进入星系的边缘。理论上这三个来源都是可以预期的，而从观测上也有证据证明这三个来源的存在，尽管很多证据都是间接的。例如，利用类星体吸收线，发现了从星系晕

中连续分布到星系际介质中的气体，这很可能就是因为星系际介质中的气体被吸积而产生的痕迹 (Chen 等, 2001; Tumlinson 等, 2013)。从理论上讲，预计星系际介质是星系持续吸积的最大来源 (Joung 等, 2012)。同时，模拟结果还表明，大部分正在进行的星系际介质吸积发生在星系的边缘，以避免来自中心区域的反馈影响 (Fraternali 等, 2008)。

在观测工作中，根据观测到的反馈机制的运动学特征，人们发现反馈机制会将气体传输到星系晕中，而晕中气体有可能会被大量囤积而导致辐射增强，最终冷却下落至星系盘中 (Shapley 等, 2003; Weiner 等, 2009)。在模拟工作中，经常会要求星系释放大量的金属物质，但是这些物质往往会有一部分仍被束缚在星系晕中，大量囤积导致冷却下落 (Tumlinson 等, 2011; Werk 等, 2014)。因此，这些结果表明丰富的恒星形成燃料已经成为星系演化过程中的重要组成部分。尽管如此，星系中恒星的金属丰度也表明反馈机制并非主要的燃料来源。

卫星星系的气体在主星系晕内被剥离已经被观测所证明了。例如，离主星系更为接近的卫星星系通常更缺乏气体，同时也更显红 (Geha 等, 2012)。研究认为，主星系的星系周介质 (CGM) 的冲压是最主要的气体剥离机制 (Marasco 等, 2016)。在气体剥离的过程中，气体被加热，但尚不清楚它最终如何冷却以支持星系内的恒星形成 (Fox 等, 2014; Tepper-García 等, 2015)。有一种猜想认为气体随着远离卫星星系，速度会变慢，在主星系晕中囤积，接下来如反馈机制类似，大量囤积导致局域的辐射增强，气体冷却下降至星系盘中从而刺激恒星形成 (Heitsch 等, 2009; Joung 等, 2012)。

## 直接证据

直接观测到气体吸积的证据非常罕见。根据星系周介质的图像 (图1-7)，吸积来的气体主要发生在距离星系中心很远的地方。通过观测气体运动学来证明气体吸积的存在非常困难。以银河系为例，在距离银盘面 1-15 kpc 的位置，可以观测到明显的气体内落现象。气体吸积率的实际结果取决于气体的三维运动以及吸积层的范围。冷气体的吸积率计算结果为 0.1-0.4  $M_{\odot}/\text{yr}$ ，而如果包括电离气体，则接近 1  $M_{\odot}/\text{yr}$  (Lehner 等, 2011)。目前最好的例子是在本星系团中的小漩涡星系 M33。Zheng 等 (2017) 使用 M33 盘中的紫外光谱作为探针。他们在 Si IV ( $\lambda 1393$ ) 吸收线中发现了穿越恒星形成盘的流入的气体运动特征。

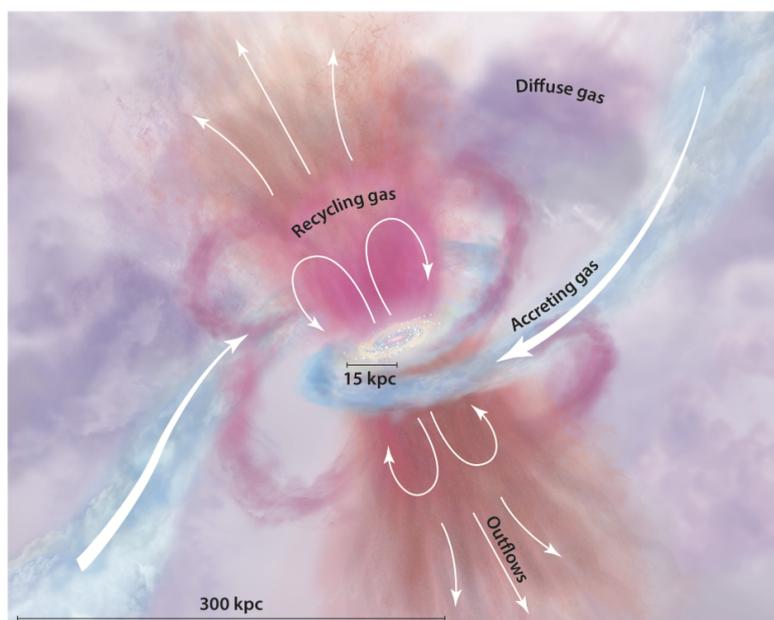


图 1-7 星系周介质示意图 (Tumlinson 等, 2017)。该星系的红色中央隆起和蓝色气体盘由来自 IGM (蓝色) 的丝状吸积物提供。外流从盘中涌出, 呈粉红色和橙色, 而之前被喷出的气体被回收。不同色调的紫色“弥散气体”晕包括可能由所有这些来源贡献的气体, 并随着时间的推移混合在一起。

### 间接证据

气体吸积的间接观测证据则相对更容易观测到。可以利用背景中的类星体吸收线气体 (如低电离  $\text{Mg II } \lambda\lambda 2796, 2803$  双线) 相对于星系空间位置分布进行分析 (Bouché 等, 2016)。虽然气体的实际位置并不清楚, 但是当吸收的气体在位置-速度空间接近星系时, 更可能捕捉到吸积的过程。在图1-8中, 展示了 HE2243-60 星系-类星体对的数据, 从左到右分别是气体速度场 (黑点为类星体) 类星体位置的气体运动学, 以及模型运动学。盘的运动学以红色表示, 流入气体模型以黑

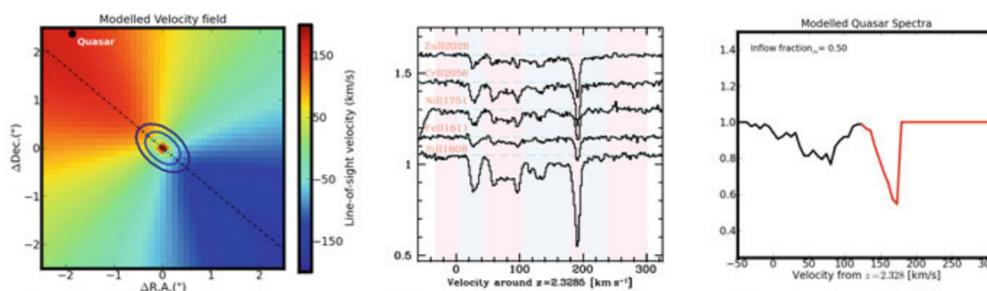


图 1-8 HE2243-60 星系-类星体对, 黑点为类星体位置 (Bouché 等, 2016)。从左到右分别为星系的运动学、类星体位置的气体运动学和模型的运动学。盘运动学 (圆形轨道) 显示为红色, 而气体流入模型显示为黑色。

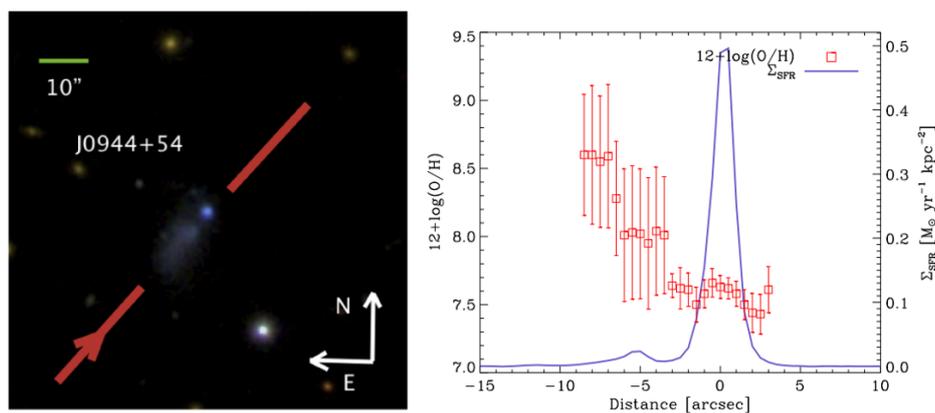


图1-9 沿左图中红色箭头方向金属丰度(红方块)和恒星形成率面密度(蓝线)分布, J0944+54 (Sánchez Almeida 等, 2015)。

色表示。可以看出，有流入气体的模型与观测结果相一致。

气体吸积与寄主星系晕中的暗物质质量有关 (Dekel 等, 2009)。在本地宇宙中，质量最大的晕 ( $M_{\text{halo}} > 10^{14} M_{\odot}$ ) 通常具有良好的维里化。由于压强梯度与引力的竞争，使得冷气体很难落入这些晕中。相比之下，气体很容易落入质量较小的晕中，从而直接为星系中的恒星形成提供冷气体 (Fumagalli 等, 2011; Genel 等, 2012; Liu 等, 2019)。与周围环境相比，吸积而来的气体通常具有较低的金属丰度。这可能在星系的早期生长中占主要地位 (Finlator 等, 2008)。对于银河系、M31 和 M33 等挨得很近的星系，原始气体吸积也是解释观察到的金属丰度径向梯度的一种理论 (Yin 等, 2009; Kang 等, 2012)。相对于大质量星系，矮星系中气体质量与恒星质量的比值更高，因此在矮星系中发现气体吸积过程更容易。气相金属丰度分布也可用作气体吸积的证据 (Crain 等, 2009)。例如在一些 BCD 星系中观察到的金属丰度分布的不均匀性，特别是金属丰度下降与强烈星暴现象形成耦合，这可能是冷流吸积的证据 (Sánchez Almeida 等, 2015; Mannucci 等, 2010; Lassen 等, 2021)。图1-9展示了一个例子，图中左侧是星系 J0944+54 的光学图像，右侧是沿主轴方向的金属丰度分布 (红方块) 和 SFR 面密度 (蓝线) 的分布情况。可以观察到蓝色区域的金属丰度较低，SFR 较高，这很可能是气体吸积的一个证据。这一猜测已被一些模拟工作证实，即寄主星系吸积的外部气体可以降低气体的金属丰度，并触发恒星形成 (Yates 等, 2012)。

在低红移星系中，延伸的  $\text{H I}$  发射线已被广泛认为是气体吸积的证据 (Sancisi 等, 2008; Kreckel 等, 2012)。检测到的气体最终会被吸积到附近的星系上，但气

体的来源和目前的移动方向通常是不确定的。随着 JVL A (Fernández 等, 2016)、SKA (Duffy 等, 2012) 等对 H<sub>I</sub> 发射线进行观测, 这将得到改善。使用 ALMA 对 CO 进行观测也是理解宇宙冷气体含量演化的重要组成部分。

### 1.2.2 寄主星系形态特征

矮不规则星系展现出明显的恒星形成活动, 因此利用光学波段观测恒星形成可作为区分不同类型矮星系的手段, 特别是在气体观测数据不充足时。然而, 当矮不规则星系无明显恒星形成时, 区分它与矮椭圆星系就变得更加困难。BCD 星系作为矮不规则星系中的一种, 有明显的星暴现象。然而, 在星暴形成之前, BCD 星系的寄主星系性质尚未被明确, 因此寄主星系的性质是否与其他类型的矮星系有关备受关注。要研究在恒星形成掩盖下的 BCD 星系寄主星系形态, 需要有可靠的方法和数据的支持。

许多工作在研究 BCD 星系的寄主星系形态特征方面做出了贡献。利用测光数据研究矮星系结构特征参数与星系基本特征之间的关系是很多工作对 BCDs 寄主星系特征的主要研究方式。为避免近期的星暴过程对形态测量的影响, 一些工作采用近红外数据等能够体现年老星族成分的图像来测量形态参数 (Janowiecki 等, 2014; Lian 等, 2015)。同时, 有些工作主要通过拟合扣除恒星形成区后的图像来避免星系中心的星暴过程对结果的干扰 (Janowiecki 等, 2014; Amorín 等, 2009)。

Amorín 等 (2009) 对 20 个 BCD 星系的图像进行了非恒星形成区的二维面亮度轮廓拟合, 得到了寄主星系的形态参数并与其他类型矮星系作比较 (图1-10)。图1-10中的黑圆圈和黑线代表 BCDs 寄主星系和一阶线性拟合; 绿色的菱形和线条以及红色的十字和线条分别表示 dIrrs 和 dEs 数据和一阶线性拟合; 三角形表示 E-S0 星系, 而小圆点表示旋涡星系。结果显示, BCD 星系的寄主星系更加紧凑。寄主星系的性质随光度变化的总体趋势与 dIrrs 和一些 dEs 所显示的参数相似。虽然大多数紧凑和较红的寄主星系在结构上类似于一些 dEs, 但整个寄主星系样本的紧凑程度大约是 dIrrs 的两倍, 并且显示出中心表面亮度比 dIrrs 要亮两个星等。

不同的工作研究 BCD 星系的寄主星系形态特点与其他类型矮星系作比较会得到不一样的结果。在研究他们之间的相关性时, 人们往往会联想是否 BCDs 的寄主星系与其他类型的矮星系之间有演化关系。图1-11总结了前人工作中关于 BCDs 及其他矮星系之间的演化关系 (Papaderos 等, 1996), 包括以下三种可能性:

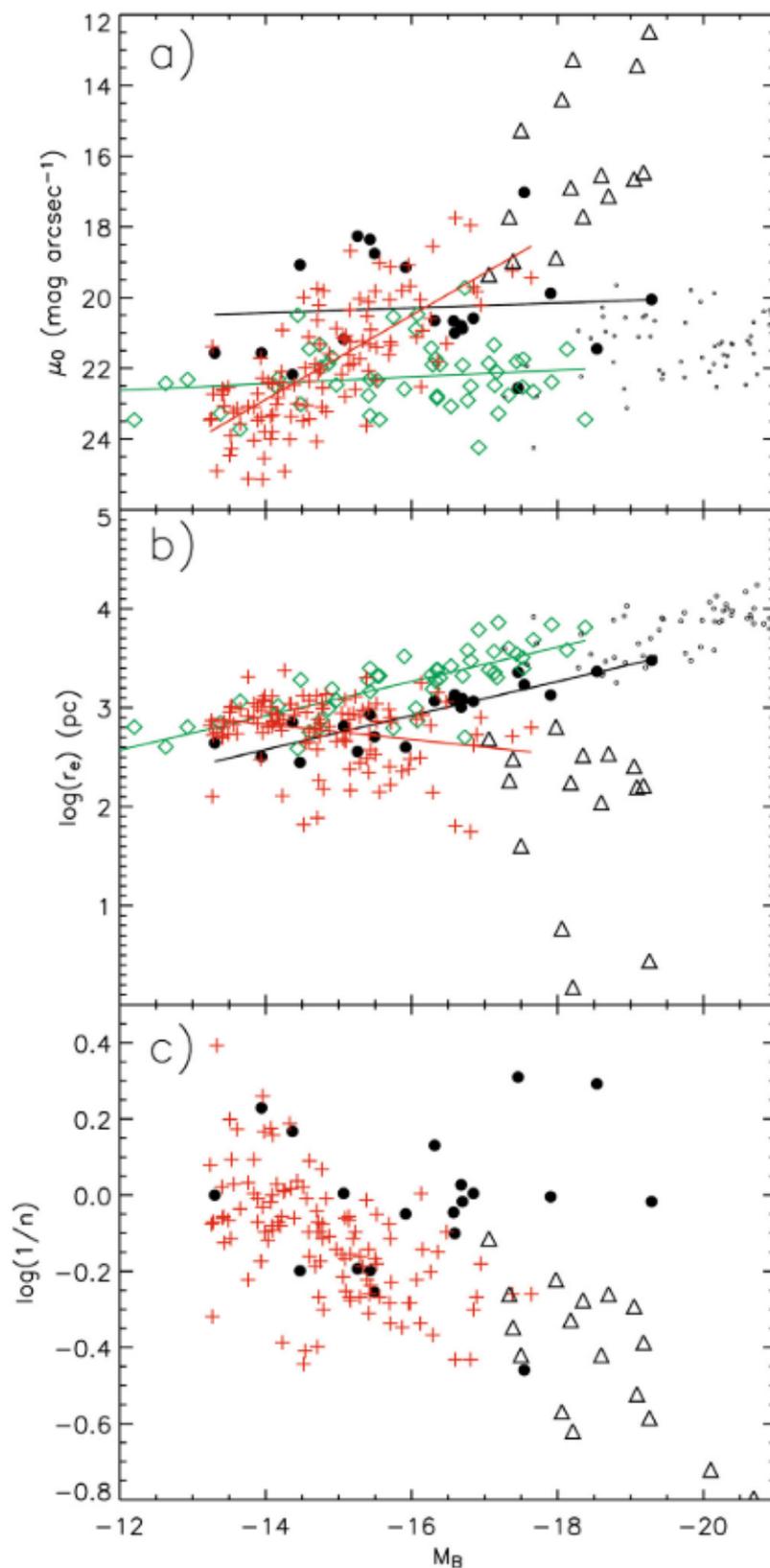


图 1-10 BCDs 寄主星系与其他类型星系形态参数的关系 (Amorín 等, 2009)。黑圆圈和黑线代表 BCDs 寄主星系和一阶线性拟合；绿色的菱形和线条以及红色的十字和线条分别表示 dIrregs 和 dElls 数据和一阶线性拟合；三角形表示 E-S0 星系，而小圆点表示旋涡星系。

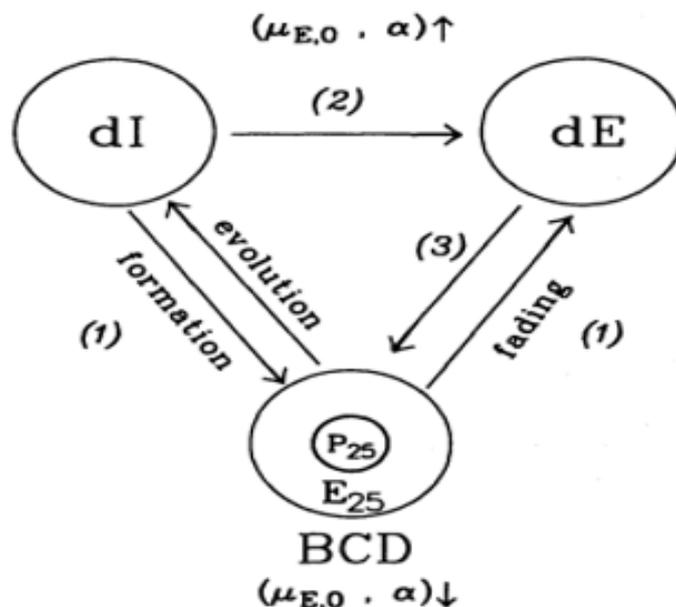


图 1-11 dIs, dEs, BCDs 之间各种演变情况的示意图, 由Papaderos 等 (1996) 总结。 $\mu_{E,0}$  是指数盘中心面亮度,  $\alpha$  为标长。 $P_{25}$  是盘成份面亮度为  $25 \text{ mag/arcsec}^2$  处的星系半径,  $E_{25}$  为指数盘成份面亮度为  $25 \text{ mag/arcsec}^2$  处的星系半径。

(1) dIrrs  $\rightleftharpoons$  BCDs  $\rightarrow$  dEs: 经历多次星暴事件后, 矮不规则星系演化为 BCD 星系, 周围星际介质得到富集, 等到气体耗尽后, 演化为不含气体的矮椭圆星系 (Thuan, 1985; Davies 等, 1988)。(2) dIrrs  $\rightarrow$  dEs: 受到冲压压力的矮不规则星系剥离了周围气体, 无法进行恒星形成直至演化为矮椭圆星系 (Lin 等, 1983; Jaiswal 等, 2020)。(3) dEs  $\rightarrow$  BCDs: 星系群中的气体被压缩、冷却并被吸积到缓慢移动的矮椭圆星系上, 形成 BCD 星系 (Silk 等, 1987)。然而, Papaderos 等 (1996) 认为在统计学上这些演化关系不明显。

### 1.2.3 星暴成因

已经有人提出并研究了 BCD 星系中多种近期星暴的触发机制。这些机制可以分为两大类: 外部机制和内部机制。外部机制包括潮汐作用引发的星暴, 可能是因为与大质量伴星系的潮汐作用 (Brinks 等, 1988; Campos-Aguilar 等, 1993; Noeske 等, 2001)、与其他富含气体的矮星系的合并 (Östlin 等, 2001; Bekki, 2008), 或是贫金属的冷气体落入 BCD 星系等原因导致的 (Gordon 等, 1981; Verbeke 等, 2014; Sánchez Almeida 等, 2015)。而内部机制则包括团块的移动 (Elmegreen 等, 2012) 和运动学的不稳定引发的星暴 (Koleva 等, 2014) 等。

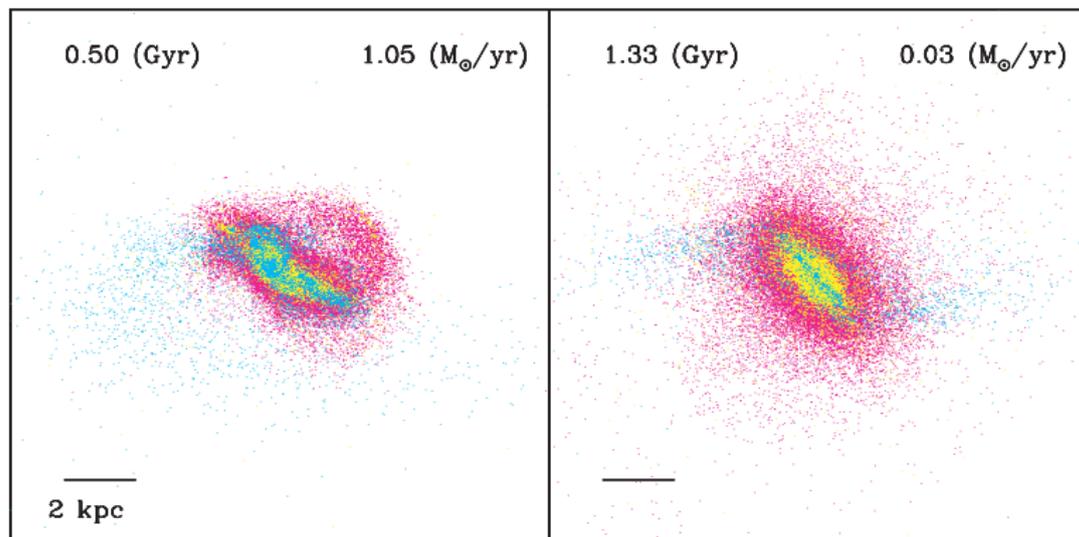


图 1-12 两富气体矮星系并合模型不同时刻的不同成分分布 (Bekki, 2008)。洋红色表示星系自身携带的年老恒星，黄色表示并合后形成的年轻恒星，青色表示气体成分。

### 1.2.3.1 星系间的相互作用

潮汐力会对星系的运动状态和物质分布产生影响 (Toomre 等, 1972)。除了影响星系的结构，如产生潮汐尾等特殊结构，潮汐作用还会影响气体的运动。为了使角动量守恒，星系中的气体会向星系中心聚集。而这些外围的气体往往比星系中心的气体的金属丰度低，因此会降低星系中心的金属丰度，并随着中心气体密度的增加而提高中心恒星形成率。在 Noeske 等 (2001) 的工作中，研究了 98 个 BCDs/H II 星系，其中约 30% 存在伴星系。通过比较具有和缺少伴星系的星系的  $H\beta$  等值宽度 (EW)，可以看出携带伴星系的主星系的  $EW(H\beta)$  比另一种星系的宽度大约大了  $26.2 \text{ \AA}$ 。但由于观测数据的局限性，无法完全确定带伴星系的主星系一定比另一种星系的恒星形成更为强烈。

星系的并合是星系质量增长的主要来源，在大质量星系中，它们很可能经历过多次并合才形成。通过数值模拟的结果发现，即使是小质量的星系也可以通过并合形成。Bekki (2008) 提出了 BCD 星系很可能是由两个富气体矮星系合并形成的。数值模拟中可以得到两个富气体矮星系的合并。图1-12展示了两个时刻不同成分分布的富气体矮星系合并的结果。洋红色表示星系自身携带的年老恒星，黄色表示并合后形成的年轻恒星，青色表示气体成分。可以看出，在星暴后，年轻恒星的分布从原来的延展形态变为主要聚集在星系的中心，并且在贫金属气

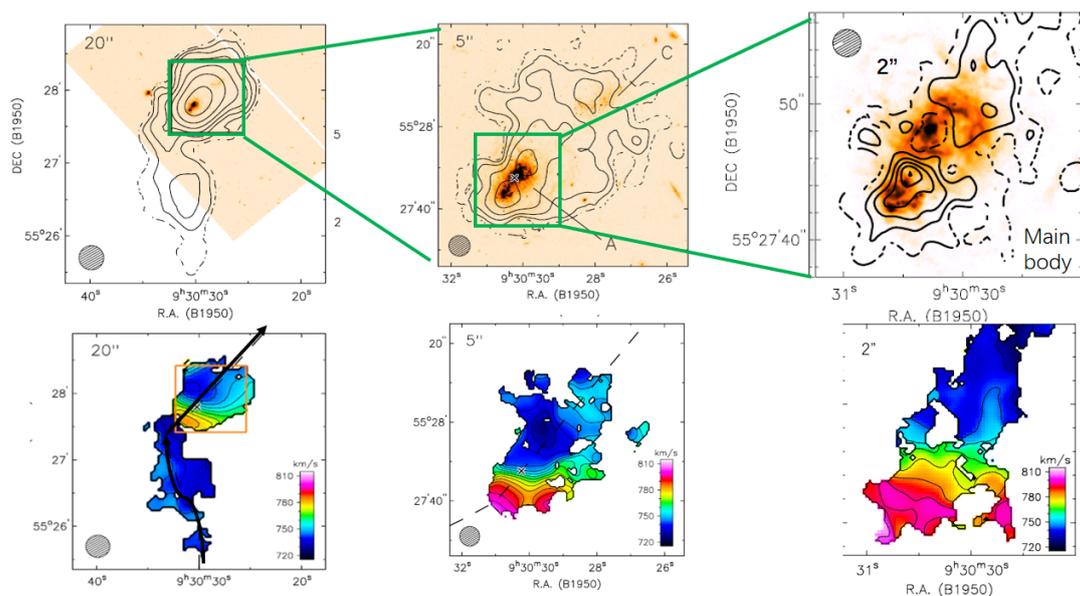


图 1-13 IZw 18  $H_I$  气体分布以及气体速度场 (Lelli 等, 2012)。上层图展示了 VLA-C、VLA-B 和 VLA-A 阵观测数据，橙色背景图像为  $H\alpha$  发射线流量图，黑色实线和虚线为  $H_I$  气体分布，左上角数字分别表示为空间分辨率为  $20''$ 、 $5''$  和  $2''$ 。下层子图展示了相应视场内的  $H_I$  气体速度场。

体参与的星暴中，年轻恒星的增加使得整体的颜色偏蓝。此外，数值模拟还可以探讨星系在不同时间点的形态问题。该例子中展示了最终形成的 BCD 星系中存在低面亮度的延展成分，与之前对 BCD 星系形态分析的结果类似 (Amorín 等, 2007)。

此外，BCD 星系周围存在大量的  $H_I$  气体 (Warren 等, 2006)。在数值模拟中，也可以看到，这些富气体星系合并后依然存在大量延展的  $H_I$  气体。这些原初气体包围在年轻恒星附近，这也可能是在观测中发现 BCD 星系的金属丰度非常低的原因。同时，Bekki (2008) 也提出，对于由富气体合并形成的 BCD 星系，因为恒星反馈效应还不足以吹走  $H_I$  气体，它们周围的气体很难被完全剥离，并最终演化为矮椭圆星系。此外，在之前提到的 BCD 星系分类系统中，由此类星暴触发机制形成的 BCDs，其形态在不同时间观测时可能会呈现出“iI”型或“nE”型等不同形态。

$H_I$  气体观测对研究星暴产生的原因十分有帮助。Lelli 等 (2012) 收集了关于 IZw 18 的 VLA 观测的  $H_I$  气体数据。图 1-13 展示了  $H_I$  气体分布和速度场分布。上图显示了气体分布，背景为  $H\alpha$  的图像，黑色实线和虚线表示  $H_I$  气体分布，从左到右分别是 VLA-C 阵观测数据（分辨率为  $20''$ ）、B 阵观测（ $5''$ ）和 A 阵观

测 (2’’)，下图则显示了对应视场的气体速度场分布情况。根据  $H_I$  在不同视场内的分布，IZw 18 星系的气体分布非常广泛且不对称，并且在恒星形成区域存在大量气体。在对速度场进行分析和建模之后，发现  $H_I$  气体平面似乎倾向于内流或外流行为，而不是单一的旋转。此外，在最大视场范围内 (C 阵观测数据) 的  $H_I$  气体分布图中，可以看到在星系南面有一条非常延伸的  $H_I$  气体“尾巴”。这条“尾巴”的空间和速度上似乎与 IZW 18-C 部分存在联系。在这些数据的支持下，他们认为富含气体的矮星系之间可能发生相互作用/合并，是解释星暴的最有可能原因。

### 1.2.3.2 气体吸积

在前文 1.2.1 中，我们对气体吸积进行了详细介绍。与具有大质量晕的星系相比，BCD 星系晕质量较小，因此更容易吸积气体。此外，BCD 星系具有强烈的星暴活动和低金属丰度等特点，这为我们研究气体吸积事件提供了潜在的线索。如图1-9所示的 BCD 星系，其中偏离星系中心的蓝色团块相比于星系的其他区域而言呈现出金属丰度较低、恒星形成率较高等特征，这可能是气体吸积事件的一个信号。

## 1.3 BCDs 的研究方法

### 1.3.1 形态特征

进行定量研究星系形态的必要步骤是测量星系的恒星面亮度轮廓，从而得到描述星系形态特征的基本结构参数。光学天文学家通常将面亮度以每平方角秒星等为单位进行测量，根据不同波段的测量结果采用不同的简写，例如 B 波段的面亮度写作  $\mu_B$ 。椭圆星系的面亮度轮廓非常平滑，从中心到外侧面亮度呈连续平滑下降，因此常认为其一维径向面亮度轮廓可以通过一种简单函数进行描述。早期 de Vaucouleurs(1948) 提出了  $R^{1/4}$  率，如以下公式：

$$I(R) = I_e \exp \left\{ -7.67 \left[ \left( \frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right] \right\} \quad (1-2)$$

其中  $R_e$  是面亮度分布的有效半径，在这个半径内星系的积分光度应占总光度的一半。 $I_e$  代表了面亮度在有效半径处的值。后来人们改进了这个公式，增加了更多的参数，比  $R^{1/4}$  定律适用于更多的星系。

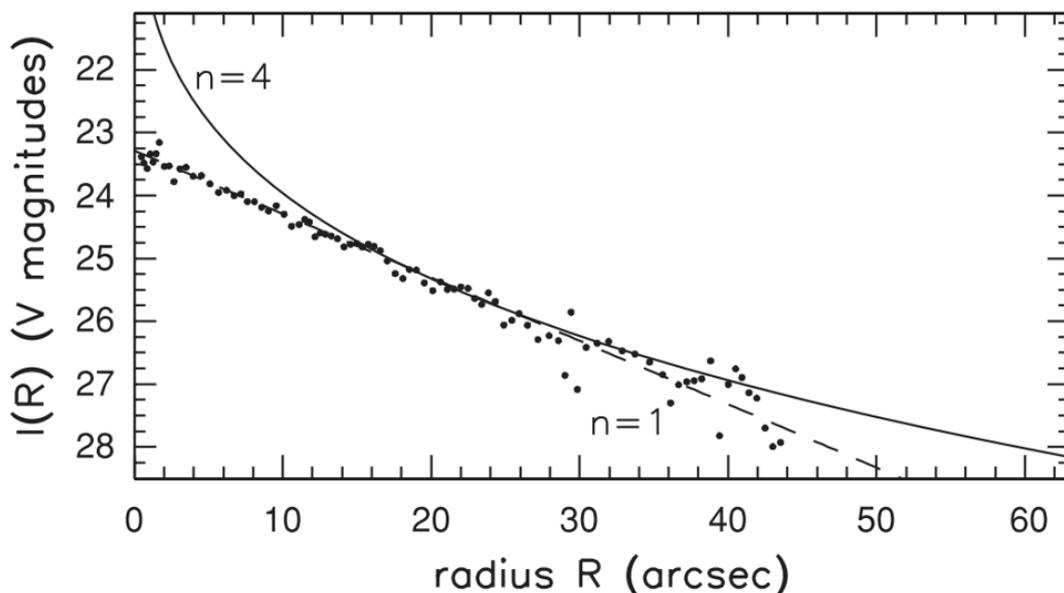


图 1-14 室女座星系团中 dE 星系 VCC753 的  $V$  波段面亮度轮廓 (Sparke 等, 2007)。

$$I(R) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[ \left( \frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right\} \quad (1-3)$$

这便是广义 De Vaucouleurs 率，也就是 Sérsic 公式。Sérsic 指数  $n$  表示轮廓的形状。变量  $b_n$  不是一个自由参数，当  $n > 1$  时， $b_n \approx 1.9992n - 0.3271$ 。值得注意的是，公式中的  $I(R)$  单位并不是实际中更常用的星等  $\text{mag}/\text{arcsec}^2$  的单位，而是流量单位。图 1-14 展示了室女座星系团中一颗矮椭圆星系 (dE) 星系 VCC753 的  $V$  波段面亮度轮廓。图中的点代表实际观测点，实线和虚线分别表示  $n=4$  和  $n=1$  的 Sérsic 曲线。

盘状星系比椭圆星系更为复杂。椭圆星系被认为是近似透明的，观测到的光来自各种各样的恒星并且没有被尘埃遮蔽。然而，盘状星系受到严重的尘埃消光影响。盘状星系由中心核区和旋转的盘区组成，因此无法用单一函数形式描述其面亮度轮廓。例如，MacArthur 等 (2003) 对晚型星系 UGC9908 的面亮度轮廓采用了两个成分进行拟合。盘成分使用了 Sérsic 指数  $n=1$  的函数形式，而核球成分则没有明确的  $n$  值。另一种可靠的核球-盘分解方法是直接对二维图像进行拟合，而不是根据等轮廓线得到一维数据进行拟合。

目前有众多二维拟合软件，其中 GALFIT 是被广泛应用的主流软件之一 (Peng 等, 2002, 2010)。该软件可同时拟合多种函数形式的测光成分，数量不限，并且在 3.0 版本中还可以拟合非轴对称的结构成分 (例如旋臂等)。在拟合 Sérsic

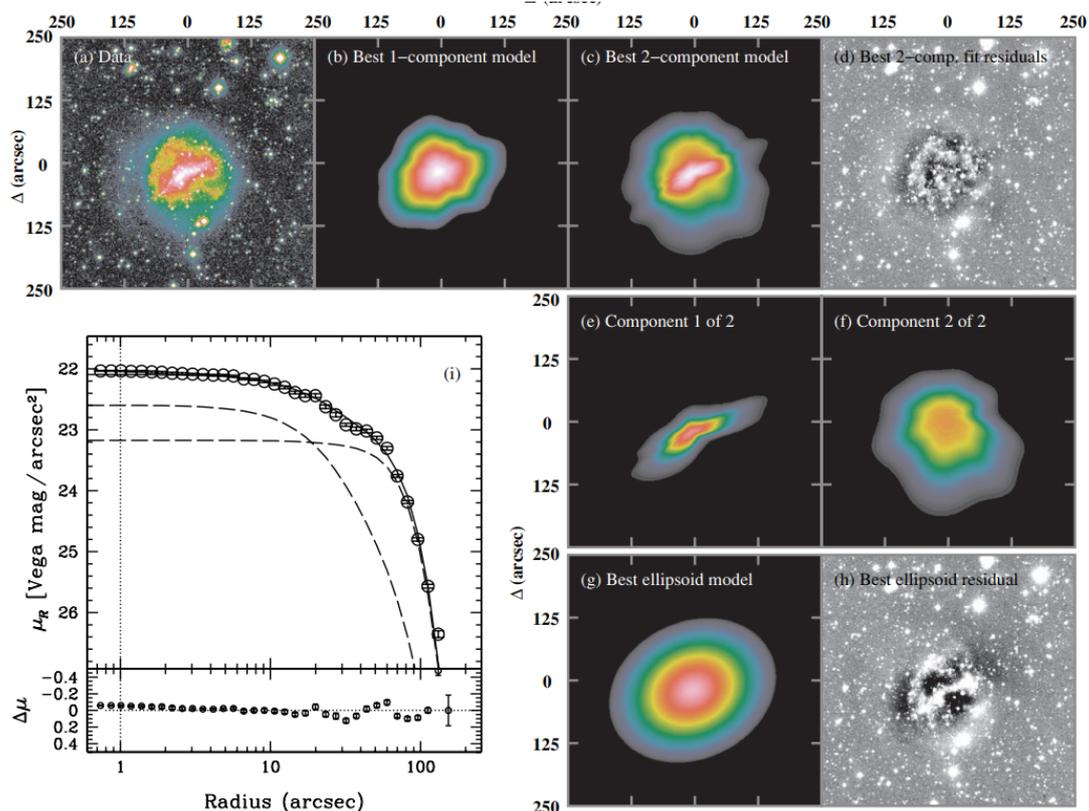


图 1-15 IC4710 的 GALFIT 二维拟合图像 (Peng 等, 2010)。其中, a 至 i 表示原始数据、最佳单成分 Sérsic 函数拟合 (嵌入从  $m=1$  到  $m=10$  的傅里叶转换)、最佳两成分 Sérsic 函数拟合 (模型中还加入了不同的傅里叶模型)、最佳两成分拟合的残差、最佳两成分拟合模型中的第一个成分、最佳两成分拟合模型中的第二个成分、传统的单成分椭圆体拟合、椭圆拟合得到的残差、以及一维面亮度轮廓。虚线代表两成分拟合得到的两个成分, 而实线为两个成分之和, 即最佳拟合结果。在下方子图中, 展示了数据-模型的残差。

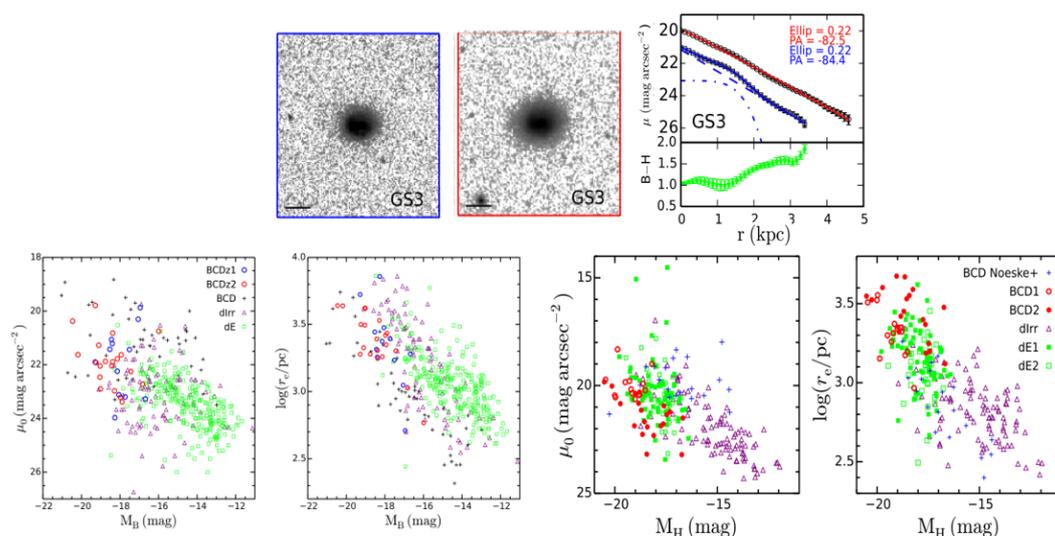


图 1-16 Lian 等 (2015) 利用测光数据研究 BCD 星系的寄主星系结构。图中展示的 BCD 星系为 GOODS 南天区，作者编号为 3 的 BCD 星系。上一列子图分别为该星系  $F435W$  图像、 $F160W$  图像和一维拟合结果，蓝色点和拟合线为  $F435W$  的一维面亮度轮廓，红色点和拟合线为  $F160W$  的。下层子图展示了这些 BCD 星系的形态参数与其他类型矮星系的比较，前两张图的横坐标为  $B$  波段的绝对星等，后两张图为  $H$  波段的绝对星等。

函数 (公式 1-3) 时，需要调整 7 个参数，除了公式中提及的参数外，还需要中心位置的  $x_0$  和  $y_0$ 、轴比  $b/a$  和方位角  $PA$  等参数。若模型拟合过程中能够提供点扩散函数 (PSF)，则效果最佳。GALFIT 会将模型图像与 PSF 图像卷积，从而得到与实际观测最吻合的拟合结果。在这里展示了使用 GALFIT 拟合出来的两成分面亮度轮廓，具体见图 1-15。

在 1.2.2 小节中我们展示了 (Amorín 等, 2009) 的工作结果，BCDs 的寄主星系与其他类型星系之间的关系，这些寄主星系参数则是通过 GALFIT 拟合非恒星形成区获得。Lian 等 (2015) 的工作并没有采用 GALFIT，他们通过拟合近红外波段一维面亮度轮廓来获得寄主星系结构参数。他们选择了 GOODS 南北天区中 34 个 BCD 星系样本，对这些星系的光学波段 ( $F435W$ ) 和近红外波段 ( $F160W$ ) 图像。使用 Sérsic 函数进行了面亮度轮廓拟合，当单成分拟合效果不佳时，则采用两个成分分别拟合外围指数盘成分 ( $n=1$ ) 和内层 Sérsic 成分。

图 1-16 展示了其中一个 BCD 星系的形态拟合结果。上图从左到右显示了  $F435W$  图像、 $F160W$  图像和一维径向面亮度轮廓的拟合结果，其中蓝色表示  $F435W$  数据的双成分拟合结果，红色表示采用单成分拟合的  $F160W$  数据的拟

合结果。通过星等转换，得到了这些星系的  $B$  波段和  $H$  波段的星等，并在该子图的下方显示了其  $B-H$  颜色。此外，拟合还得到了 BCD 星系寄主星系成分的形态参数。下排显示了 BCD 星系与其他类型矮星系在  $B$  波段和  $H$  波段的结构参数的比较。前两图显示了 BCDs 的寄主星系和其他矮星系在  $B$  波段的结构参数比较。蓝色圆圈代表红移在 0.09–0.15 的 BCDs，标记为“BCDz1”。红色圆圈则代表我们红移在 0.15–0.25 的 BCDs，标记为“BCDz2”。黑色十字线则表示来自其他工作的 BCD。紫色三角形表示 dIrrs，绿色方框则表示 dEs。后两张图比较了 BCD 星系和其他类型矮星系在  $H$  波段的结构参数。空心红色圆圈表示采用单成分拟合的 BCDs，标记为“BCD1”。实心红色圆圈则表示采用双成分分解的 BCDs，标记为“BCD2”。蓝色十字线表示其他研究得到的 BCD 星系样本，紫色三角形表示 dIrrs，绿色方框则表示 dEs。

他们认为，通过比较不同类型的矮星系的结构特征，可以探究它们之间可能的进化联系。在  $B$  波段中，BCDs 的寄主星系的有效半径 ( $R_e$ ) 小于 dEs 和 dIrrs 的。这种差异与以前许多研究的结论相似。然而，当我们比较近红外  $H$  波段的结构特征时，BCDs 和其他矮星系之间的差异似乎不明显。事实上，在  $H$  波段中，寄主星系和 dEs 之间存在着明显的一致。此外所有的矮星系，似乎都遵循类似的光度-半径关系，这可能说明矮星系的结构演化是统一的。

### 1.3.2 光谱分析

#### 星族合成

一条星系的光谱包含了各个年龄段和金属丰度的恒星以及气体的信息。通过分析这些信息，我们可以得到星系的恒星形成历史和化学丰度演化。星族合成简单来说就是通过组合不同的已知年龄和金属丰度的单星族光谱模板来获得星系中星族的分布情况 (Conroy, 2013)。单星族的光谱是指特定年龄和金属丰度下的恒星光谱。它需要结合恒星光谱库 (如图1-17的左图)、恒星演化等龄线和初始质量函数等来建立。目前已经开发出许多单星族模板库，其中包括从理论计算得出的单星族模板库和在观测中得到的单星族模板库，如 starburst99 (Leitherer 等, 1999, 2014)、BC03 (Bruzual 等, 2003)、Vazdekis/Miles (Sánchez-Blázquez 等, 2006b) 以及 Mapping Nearby Galaxies and Apache Point Observatory survey (MaNGA; Bundy 等, 2015) 观测到的一组恒星光谱 Mastar 作为单星族模板 (Yan 等, 2019) 等。

在非星暴星系中，星云辐射出的气体连续谱对于星族合成和星族分布的影

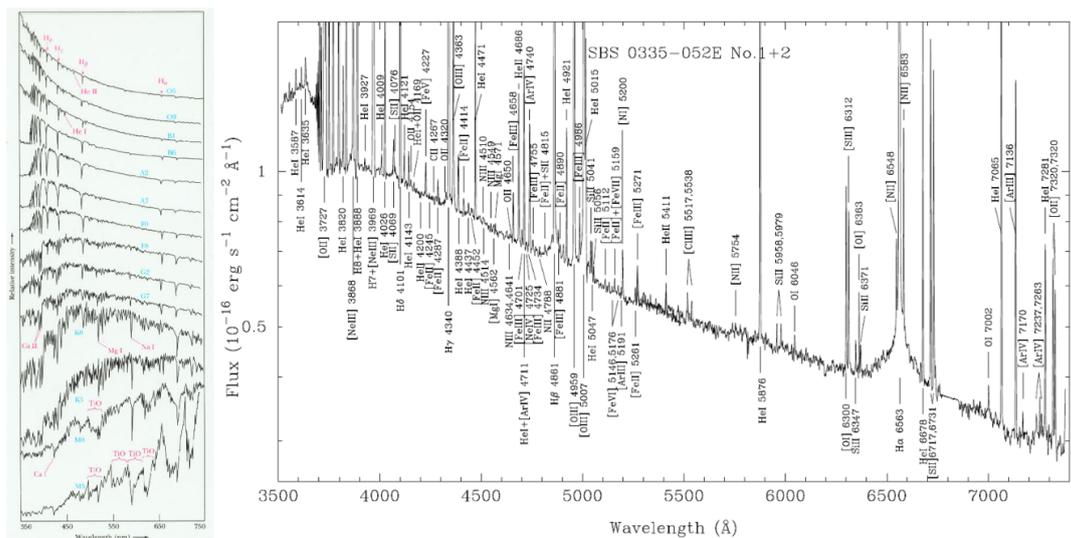


图 1-17 左图为不同类型恒星的光谱。右图为星暴星系的光谱 (Henkel 等, 2022)。

响较小。但是对于像 BCD 星系这样的星暴星系，如图1-17的右图所示，星云发射线很强，连续谱谱形显示非常年轻，同时恒星连续谱中的吸收坑和谱指数等信息很难区分，这些都会对星族合成造成很大的不利影响。在强星暴星系中，星云发射的连续谱会影响只用恒星星族模板拟合连续谱时的结果。Izotov 等 (2011) 的研究指出，在对这些星暴星系进行拟合时，如果忽略星云连续谱，则会高估年老星族的贡献，从而系统性地高估恒星质量。

### 气相金属丰度

恒星形成区的光谱中具有显著的发射线，通过研究发射线信息可以得到恒星形成区的气体性质。恒星形成区中存在大量 OB 型恒星，这些 OB 型恒星的温度很高，可达 35000–50000K。在如此高温的环境下，气体中的原子和离子会吸收更多的紫外光子，从而形成光致电离区。恒星作为电离源，导致周围氢原子电离形成 H II 区。在丰度测定中，电子温度是表征电离气体的两个主要物理条件之一，该参数在气相金属丰度的直接测量方法中起着重要作用。气相金属丰度的直接测量法是通过测量 H II 区的电子温度，结合光致电离模型的假设，得到金属丰度。

直接测量法，是基于电子温度 ( $T_e$ ) 的测量方法，又称为电子温度测量法。通常情况下，这种方法的探测依赖于弱发射线，如 [O III]  $\lambda$ 4363、[N II]  $\lambda$ 5755、[S II]  $\lambda$ 6312 和 [O II]  $\lambda$ 7320, 7330 等。该方法通常分别在高电离区和低电离区估算不同区域内的电子温度，之后整合两个区域内的丰度，得到 H II 区的气相金属丰度。Pérez-

Montero (2014) 开发的 Python 程序 HII-CHI-mistry 便是基于电子温度的方法测量金属丰度，其光致电离模型的构建基于 CLOUDY 软件 (Ferland 等, 2013)，目前该代码已经开发了多种程序，能够利用光学、紫外、红外发射线来计算化学丰度和电离参数。

对于光谱中弱发射线并不明显的情况，直接测量法并不适用。相对地，间接测量法则运用强发射线来获得气相金属丰度经验公式。间接测量法种类繁多，已广泛应用于众多工作中，有着密集的数据支持，因此也有人根据强发射线方法开发出机器学习技术以测量气相金属丰度 (Ho, 2019)。以下列举了几种常见的强发射线指针：

1)

$$R23 = \log \frac{[\text{O II}]\lambda\lambda 3727, 9 + [\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007}{H\beta} \quad (1-4)$$

该方法最初由 Pagel 等 (1979) 提出，许多工作通过光致电离模型计算 O/H，然后与 R23 进行比较以获得关系式。其他一些工作则使用电子温度等方法计算金属丰度，并将其与 R23 进行比较 (Kewley 等, 2002; Kobulnicky 等, 2004)。R23 与金属丰度的对应关系呈现双值关系。在低金属丰度支，R23 与金属丰度呈现正相关，而随着金属丰度升高，星际介质冷却效应更加明显，导致 R23 与金属丰度负相关，拐点约为  $12+\log(\text{O}/\text{H}) \sim 8$ 。因此，使用该指针时会出现金属丰度两个值：上分支（高金属丰度）和下分支（低金属丰度）。为了解决这个问题，通常需要第二发射线比率作为参考，例如  $[\text{N II}]/[\text{O II}]$  比率 (Kewley 等, 2008)。

2)

$$N2 = \log \frac{[\text{N II}]\lambda 6584}{H\alpha} \quad (1-5)$$

这个指针的优点十分明显，只需要使用两根强线。由于  $[\text{N II}]$  与  $H\alpha$  波长较为接近，因此它们的比值相对于波长依赖的尘埃红化比较不敏感。然而， $[\text{N II}]$  线对电离参数非常敏感，并且在高金属丰度条件下表现出饱和趋势 (Storchi-Bergmann 等, 1994; Denicoló 等, 2002; Kewley 等, 2002)。与 R23 方法不同，随着金属丰度的升高，N2 值会增加。但是，当金属丰度过高 ( $12+\log(\text{O}/\text{H}) \sim 9$ ) 时，N2 值反而会下降。

3)

$$O3N2 = \log \frac{[\text{O III}]\lambda 5007/H\beta}{[\text{N II}]\lambda 6584/H\alpha} \quad (1-6)$$

与 N2 类似, O3N2 也利用了波长接近的发射线比值, 以减小尘埃消光的影响。由于在高金属丰度条件下它不会饱和, 与金属丰度的关系始终是单调的, 因此它被提议作为 N2 指针的替代品。在一些工作中, N2 指针的关系和 O3N2 指针与金属丰度的关系会同时被给出 (Pettini 等, 2004; Marino 等, 2013; Curti 等, 2017)。然而, 强发射线流量比还依赖于星际介质其他物理条件, 而不仅仅是金属丰度。具体来说, 需要区分金属丰度、电离参数和电离谱线硬度的影响 (Kewley 等, 2013)。相比于 N2 指针, O3N2 更敏感于电离参数的变化 (Kewley 等, 2019)。

4)

$$N2S2 = \log \frac{[N_{II}]\lambda 6584}{[S_{II}]\lambda \lambda 6717, 31} \quad (1-7)$$

N2S2 与金属丰度之间存在单调递增的关系。该方法与 R23 方法相似, 基于光致电离模型将线比转换为金属丰度, 在 Dopita 等 (2016) 的研究中确定了该关系。由于这三条线的波长非常接近, 因此尘埃对线比的影响很小。然而, 与 O3N2 一样, 该方法对电离参数也很敏感。

5) "R" 指针和"S" 指针

$$\begin{aligned} R_2 &= [O_{II}]\lambda 3727, 9/H_\beta, \\ R_3 &= [O_{III}]\lambda 4959, 5007/H_\beta, \\ N_2 &= [N_{II}]\lambda 6548, 84/H_\beta, \\ S_2 &= [S_{II}]\lambda 6717, 31/H_\beta. \end{aligned} \quad (1-8)$$

这种方法是用来对应直接测量法, 由 Pilyugin 等 (2016) 提出。根据  $\log N_2$  是否小于 -0.6, "R" 和"S" 指针均被分为上下两支进行计算。"R" 指针使用  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $N_2$  的线比与金属丰度的关系式, 而"S" 指针采用的线比为  $S_2$ ,  $R_3$ ,  $N_2$ 。

### 1.3.3 积分视场光谱

积分视场光谱仪 (Integral Field Spectrograph, IFS) 是一种结合了积分视场单元和长缝光谱仪的设备, 通过多次曝光获得星系和星际介质等二维空间信息和一维光谱信息。其工作原理是在输入端将二维视场内待观测的天体划分成若干单元, 并在输出端按照一定顺序重排后送入光谱仪, 经过分光系统, 能够同时获取待观测天体的三维数据信息。经过数据提取和重构后, IFS 获得的三维光谱数据包含了同时具备空间延展信息和光谱信息的特点。在具体应用中, 任何空间位置都有对应的光谱信息, 也可以在任何波长处获取该波长处不同空间位置的

光强信息。因此，IFS 获得的三维光谱数据不仅具有波长分辨率，还具有空间分辨率，是长缝或多目标光谱仪无法替代的。特别是对于星系这类延展天体，IFS 的空间分辨率具有重要意义。

IFS 已成为大多数地面光学/近红外天文望远镜的标配设备。实现 IFU 的方式主要有三类：图像切分器、微透镜阵列、光纤/微透镜阵列 + 光纤。例如凯克望远镜 (Keck Telescope) 中的 OSIRIS 近红外积分光谱仪采用了微透镜阵，MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer) 是甚大望远镜 (Very Large Telescope, VLT) 二代积分视场光谱仪，采用是像切分器技术。GEMINI Multiobject Spectrographs (GMOS) 上的 IFU 是首次安装于 8-10m 望远镜上的积分视场光谱仪，采用的是微透镜阵列 + 光纤束的方式。目前，在建的三座光学极大望远镜——Giant Magellan Telescope (GMT)、Thirty Meter Telescope (TMT) 和 European Extremely Large Telescope (ELT) 都计划在自适应光学的支持下配备 IFS 设备。TMT 第一代光谱仪中近红外光谱仪 Infrared Imaging Spectrograph (IRIS) 采用了两种方式，像切分器和微透镜阵列。中国丽江积分视场单元 (CHILI) 是国内首个用于夜间天文观测的积分视场光纤光谱仪，并安装于丽江 2.4 米光学望远镜上。CHILI 光谱仪的前端设计采用的方式为光纤 + 微透镜阵列，因而其观测视场可达  $71'' \times 65''$ ，其波长覆盖范围约为  $3500 \text{ \AA} - 7200 \text{ \AA}$ 。目前，IFS 设备在地面望远镜中广泛运用，但在空间望远镜上应用的设备仍属少数。例如 2021 年发射的 James Webb Space Telescope (JWST) 上的 Near Infrared Spectrograph (NIRSpec) 采用了像切分器方式，其空间采样达到  $0.1''$ ，视场为  $3'' \times 3''$ 。未来，中国巡天空间望远镜也将配备 IFS 设备 (CSST-IFS)，拟采用图像切分器的方法，光谱可覆盖紫外、可见和近红外谱段  $0.35-1.0 \mu\text{m}$ ，谱分辨率  $R \sim 1000$ 。当前设计空间分辨率为  $0.2'' \times 0.2''$ ，视场为  $6'' \times 6''$ 。当前在空间望远镜中的 IFS 设备主要观测波段为近红外波段，通常应用在对高红移 ( $z \sim 1 - 2$ ) 星系的空间可分辨观测，这时静止波段常用的解析星系物理特性的若干特征谱线，如  $H\alpha$  (静止波长为  $6563 \text{ \AA}$ )，才进入近红外的波段覆盖，CSST-IFS 的光学波段观测可以与之形成良好的互补关系。CSST-IFS 的核心科学目标对应的主要观测天体是近邻星系 (红移小于 1)、银河系内展源以及这些目标源的部分区域。

Mapping Nearby Galaxies and Apache Point Observatory survey (MaNGA; Bundy 等, 2015) 巡天项目则是基于光纤束技术，如图1-18所示 (MaNGA; Bundy 等, 2015)。

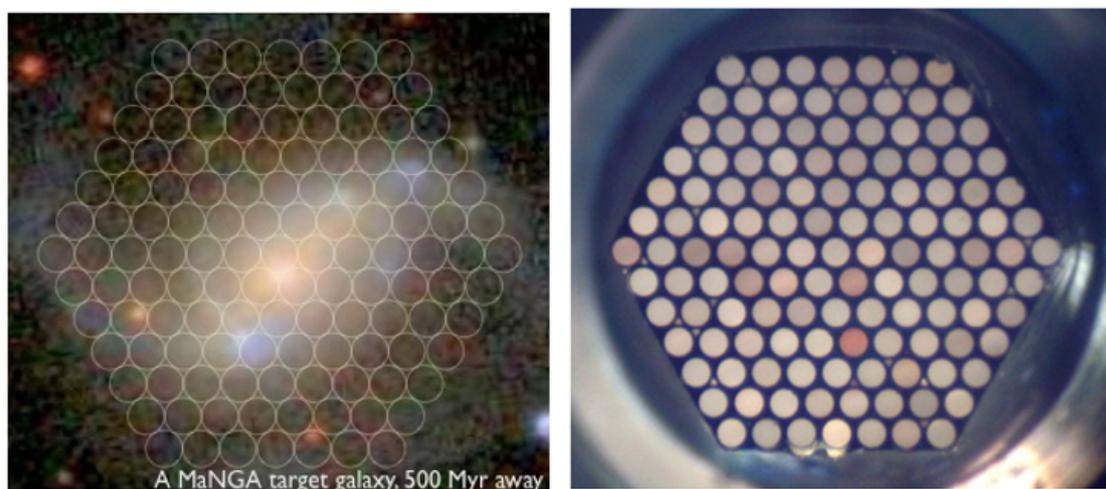


图 1-18 MaNGA 观测示意图，以及 127 根光纤组成的光纤束。

左图为 MaNGA 观测示意图，光纤束中不同的光纤观测不同的位置，传输到输出端后再重组成实际观测数据，右图则展示了一个光纤束的输入端口。作为第四代 SDSS-IV 的组成部分，MaNGA 已完成了所有目标源的观测大约为 10000 个近邻星系，其红移范围大约为  $0.01 < z < 0.15$  (SDSS-IV; Blanton 等, 2017)。该光谱仪使用不同大小的六边形光纤束<sup>1</sup> (参见图1-18)，每种尺寸都有特定数量的光纤，最小的六边形有 19 根光纤，直径为  $12.5''$ 。其他尺寸包括：37 根光纤 ( $17.5''$ )、61 根光纤 ( $22.5''$ )、91 根光纤 ( $27.5''$ )、127 根光纤 ( $32.5''$ )、169 根光纤 ( $37.5''$ )、217 根光纤 ( $42.5''$ ) 等等 (Drory 等, 2015)。为了提高空间采样率，每个源至少被观测三次，并且光纤位置错开 (Law 等, 2015)。所有光纤装置在 BOSS 光谱仪上 (Smee 等, 2013)，通过 SDSS 的 2.5 米望远镜进行观测 (Gunn 等, 2006)。现场视宁度约为  $1.5''$ ，通常使用圆形高斯分布来描述典型 MaNGA 数据的 PSF，其半高全宽 (FWHM) 约为  $2.5''$  (Law 等, 2015; Yan 等, 2016a)。光谱数据的波长覆盖范围从  $3600 \text{ \AA}$  到  $10300 \text{ \AA}$ ，光谱分辨率约为  $R \sim 1100 - 2200$  (Law 等, 2016, 2021; Yan 等, 2016b)。

星族合成得到了观测光谱中不同年龄段内的星族质量，而积分视场光谱仪的观测则提供了星系不同区域内的光谱。因此，我们可以结合这两个特点，得到星系在不同时间段内的图像信息。例如，利用 MaNGA 的观测数据，我们可以获取星系不同位置处的光谱。通过对这些光谱进行星族合成拟合，我们可以得到不同位置处的星族分布情况。通过星族分布，我们可以重新利用单星族模板，还

<sup>1</sup><https://www.sdss4.org/surveys/manga/>

原不同年龄段内的光谱，包括大于 1 Gyr 的恒星光谱。将这些模型光谱与相应波段的滤波器进行卷积，例如  $g, r$  波段，可得到该模型光谱在该波段内的流量和星等。由于使用了 MaNGA 数据，因此我们可以获得星系不同位置处的波段流量，从而构建该年龄段内的波段图像。这思路是本文第四章工作的核心。

## 1.4 本文概览

综上所述，BCD 星系的形成和演化仍存在许多未解之谜。随着技术的不断进步，对于矮星系的观测相对于以前变得更加容易。利用 IFU 巡天项目的数据，也有助于人们更好地理解 BCD 星系。

首先，我们在 MaNGA 项目的 BCD 候选体中发现了一个引人注目的 BCD 星系，即 MaNGA 8313-1901 星系。SDSS  $gri$  合成图像中，我们发现偏离该星系中心位置东北方向有一个轮廓清晰且尺寸不小的蓝色团块。其蓝色特征表明，在该团块中极有可能存在非常年轻的恒星，这些恒星很可能是近期形成的。由气体吸积导致的强大恒星形成活动可以产生明亮的偏心团块，而这种偏心团块在高红移星系中非常常见 (Mannucci 等, 2010; Rauch 等, 2011; Elmegreen 等, 2013)。同时，这种形成方式也会导致金属丰度降低的情况出现。在 MaNGA 数据的基础上，已有不少工作试图通过金属丰度梯度的变化来研究气体吸积过程。例如，Hwang 等 (2019) 通过对 MaNGA 数据的分析，发现一些偏离中心的异常低金属丰度 (ALM) 区域，这些区域可能是由气体吸积导致的，他们容易在蓝色小质量星系中找到。Pace 等 (2021) 基于一个简单而直观的内流模型，发现带有 ALM 区域的低质量且不相互作用的星系的金属丰度梯度可以由大量的气体内流引起，表明 ALM 现象也与气体内流有密切关系。在探讨气体内流引起的恒星暴过程时，一些空间上的  $\alpha$  斑点和通过分析 IFU 数据得到的空间分布以及运动学信息也可以用于识别该过程 (Chen 等, 2016; Jin 等, 2016; Lin 等, 2017; Pan 等, 2020; Ji 等, 2021)。由此，我们想知道 BCD 星系 8313-1901 的蓝色团块是否是由吸积了原始贫金属气体引起的恒星形成。在本文的第二章中，我们将深入分析该星系星暴的成因。

在 MaNGA 项目中，我们选出了一批 BCDs 候选体。在第三章中，我们罗列出了这些 BCD 星系，并简单分析了他们的物理性质。在这些星系样本中，我们发现有些 BCD 星系如 8313-1901 那样也存在明显的偏心团块，因此我们挑选出了另外四个偏心团块形态与 8313-1901 不同的星系。结合星族合成的方法和面亮

度轮廓测量的技术，在本文的第四章中，对这五个 BCD 星系进行了分析。我们研究了它们的星族成分，并探究了它们寄主星系形态变化，以及其形成原因和演化历史。

第五章为总结和展望，我们首先总结了前几章的主要工作。展望部分主要分两个方面，首先对当前已有的 8313-1901 的 H<sub>I</sub> 气体数据做了简单的总结，将来结合光学和射电观测，对该星系的形成有更深刻的认识。其次对未来的工作的展望。在本文中，我们采用的宇宙学参数是： $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$ ,  $\Omega_M = 0.3$ , 和  $\Omega_\Lambda = 0.7$ 。

## 第 2 章 MaNGA 8313-1901

相比于本地星系,高红移星系通常表现出更为不规则和结块的特征 (Elmegreen 等, 2004; Conselice 等, 2005), 这些团块被认为是密度较大的宇宙中的星系合并、气体吸积或富气体星系的盘不稳定 (Bournaud 等, 2009; Law 等, 2009; Kartaltepe 等, 2012) 导致。我们研究 BCD 星系这样贫金属的矮星系, 有助于更好地理解高红移星系中常见团块的形成原因。金属丰度是检测气体吸积的重要参数之一, 也是解释高红移星系中团块形态的关键因素之一 (Dekel 等, 2009)。贫金属气体的吸积可以触发恒星形成, 同时在光学图像中, 我们也可以通过寻找具有明亮的偏心蓝色团块的星系来发现这些恒星形成区的存在。Sánchez Almeida 等 (2015) 提出, 近域宇宙中的蓝色团块可能是最近落入的贫金属气体造成的, 它们具有较高的恒星形成率 (SFR) 和金属丰度在空间分布上的不均匀性。大型积分场单元 (IFU) 项目可提供了空间可分辨的光谱数据, 可用于研究潜在的气体吸积过程 (Lagos 等, 2018; Kashiwagi 等, 2021)。在 MaNGA 巡天中, 我们发现一个非常引人注目的星系 8313-1901, 其 *gri* 合成图像中, 东北方向有一个明显的轮廓清晰的蓝色大团块 (图2-1左上子图), 该年轻团块的形成原因激发了我们的好奇心。本章节主要探讨该团块的形成原因。

### 2.1 8313-1901 基本特征

8313-1901 中的蓝色团块偏离星系中心, 非常引人注目。在本论文中, 将这个团块命名为 NE 团块。8313-1901 是一个低红移为 0.02425 的星系。尽管在不同的星表中提供的质量不同, 但都不算是一个非常高质量星系。在 NASA-Sloan Atlas 星表中, 它的恒星质量为  $\log(M_*/M_\odot) = 8.88$ , 而 Max Planck for Astrophysics (MPA) -Johns Hopkins University (JHU) 星表则提供的该星系质量为  $\log(M_*/M_\odot) = 9.28$  (Kauffmann 等, 2003b)。该星系的主要属性已列于表2-1中。在半光度半径  $r_{50}$  内, 8313-1901 表现出很高的平均面亮度  $\mu_{g,r_{50}} = 19.89 \text{ mag/arcsec}^2$  (Wake 等, 2017)。这些特征符合 BCD 星系的性质。

图2-1左上图是 SDSS *gri* 复合图像, 边长为  $15'' \times 15''$ , 在星系所在的红移处相当于  $7.56 \text{ kpc} \times 7.56 \text{ kpc}$ 。洋红色六边形标志着 MaNGA 巡天覆盖的范围, 共包

含 19 根光纤，而红圈和橙圈则表示了两个恒星形成团块，分别命名为 NE 团块和 SW 团块（详见 2.2 节和 2.3 节介绍）。图 2-1 右上图显示了三个空间相元（spaxel）的光谱，其中红色光谱对应左上图中的红色斜十字交叉点处，黑色光谱对应黑色斜十字交叉点处，橙色光谱则对应橙色 x 处。波长为非静止波长。该星系的观测数据 PSF 的 FWHM 在 g 波段是  $2.59''$ ，每个 spaxel 为  $0.5'' \times 0.5''$ 。在三条光谱中均显示出了强烈的发射线，其中 NE 团块处的发射线最强。然而，连续谱的形状略有差别，尤其是红色谱和黑色谱，例如星系中心的连续谱  $4000 \text{ \AA}$  跃变大于 NE 团块出的连续谱。此外，通过比较 NE 团块的发射线非静止波长和星系中心的发射线的中心波长，可以排除该团块是星系前景的可能性。本论文中所展示的数据主要来自于 2018 年释放的 MPL-8 版本。

MaNGA 项目团队提供了经过科学处理的数据集 (DAP 数据、data-analysis pipeline) (Westfall 等, 2019; Belfiore 等, 2019)。数据分析软件包分析了原始光谱，并将其转化为可用于科学研究的星系数据。该软件包目前提供了空间叠加光谱、恒星动力学、星云发射线属性以及光谱指数。在该版本中，对  $1 < S/N < 10$  的光谱做了三种不同的处理方式：(1) SPX: 不进行光谱叠加，直接对所有信噪比  $> 1$  的光谱进行拟合；(2) VOR10: 通过 Voronoi 叠加算法 (Cappellari 等, 2003) 将信噪比低于 10 的光谱并合成大于等于 10 的光谱，并进行科学处理；(3) HYB10: 类似于 VOR10 的方法叠加光谱，获得恒星连续谱特征，之后利用该叠加连续谱对单个 spaxel 进行发射线测量。在本研究中，我们采用了 HYB10 的数据集。

我们从数据中挑选出  $H\alpha$  发射线流量信噪比高于 5 的 spaxel 来进行后续的科学分析，共有 376 个 spaxel 被选中，约占总数据量的 80%。通过多条发射线的流量比对比，这些光谱都落在 Baldwin-Phillips-Terlevich (BPT) 图中的恒星形成区 (Baldwin 等, 1981; Kewley 等, 2001; Kauffmann 等, 2003a)，因此我们推断这些发射线是由恒星形成产生的。在图 2-1 的第二行中，我们分别展示了  $H\alpha$  发射线流量和等值宽度 (EW)。流量图显示了两个显著的峰值，其中较强的  $H\alpha$  峰位于 NE 团块，而另一个则在宿主星系的中心。在 EW 图中，除了 NE 团块的 EW 值显著高于其他区域，在西南方向还有另一个明显的峰值。该峰值尽管比 NE 团块的峰值低，但仍高于星系中心的值。EW 描述了星系的比恒星形成率 (sSFR) 特征，因此表明该区域星族成分较为年轻，在近期可能也经历了强恒星形成过程。

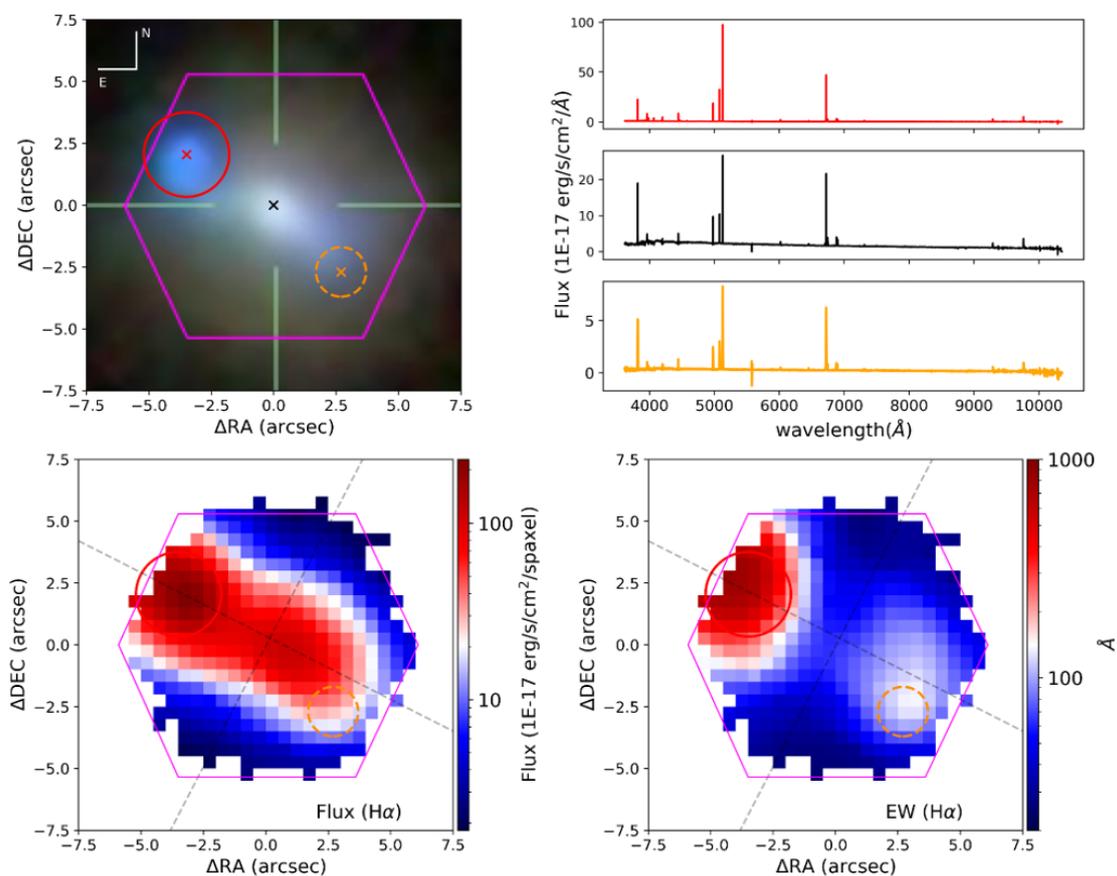


图 2-1 8313-1901 的复合图像、典型观测光谱、 $H\alpha$  发射线流量及其等值宽度的分布。洋红色六边形代表了 MaNGA 光纤束覆盖范围。红色实线圈和橙色虚线圈分别表示 2.2 节和 2.3 节中定义的 NE 团块和 SW 团块的位置。左上图中标注为红色、黑色和橙色斜十字交叉点处三个 spaxel 光谱分别以展示在第二张图中。左下方是  $H\alpha$  发射线尘埃改正后的流量二维分布，右下方是  $H\alpha$  的等值宽度 (EW) 二维分布图。灰色点虚线表示主轴和次轴，该位置角度取自 NASA-Sloan Atlas 目录，沿东北向西南方向的虚线为主轴。本章节所有图片中，未明确标注的洋红色六边形、红色实线圈、橙色虚线圈、灰色点虚线表示的含义与本图相同。

表 2-1 MaNGA 8313-1901 基本信息

MaNGA 8313-1901 = SDSS J160108.90+415250.7		
Parameters	Data	
MaNGA ID	1-248352	
RA (J2000)	16:01:08.90, 240.28712°	
DEC (J2000)	+41:52:50.77, 41.88075°	
$z^a$	0.02425	
$d$ [Mpc]	103.932	
$M_{\text{NUV}}$ [mag] <sup>a</sup>	-17.46	
$M_g$ [mag] <sup>a</sup>	-18.64	
$M_r$ [mag] <sup>a</sup>	-18.86	
$M_z$ [mag] <sup>a</sup>	-19.03	
$\log(M_*/M_\odot)^a$	8.88	
$\log(M_*/M_\odot)^b$	9.28	
$\log(M_{\text{HI}}/M_\odot)^c$	9.37	
$\log(M_{\text{halo}}/M_\odot)^d$	11.03	
	the host galaxy	the NE clump
sersic index <sup>e</sup>	$1.46 \pm 0.04$	$0.19 \pm 0.04$
effective radius <sup>e</sup> [kpc]	$1.23 \pm 0.13$	$0.29 \pm 0.01$

<sup>a</sup> The NASA-Sloan Atlas catalog: <http://www.nsatlas.org>

<sup>b</sup> The MPA - JHU catalog (Kauffmann 等, 2003b)

<sup>c</sup> Masters 等 (2019)

<sup>d</sup> Yang 等 (2007, 2012)

<sup>e</sup> See more details in Section 2.2

## 2.2 结构特征

为了更准确地测量 NE 团块的大小，我们采用了观测更深的 DESI (The Dark Energy Spectroscopic Instrument) 的  $g$  波段测光数据。DESI legacy 图像巡天<sup>1</sup> (Dey 等, 2019) 提供了三个波段的观测数据： $g$ ,  $r$  和  $z$  波段，图像覆盖总天区约 14000 deg<sup>2</sup>。其中包括三个公共项目：(1) The Beijing-Arizona Sky 巡天提供了  $32^\circ \leq \text{DEC} \leq 84^\circ$  的  $g$  和  $r$  波段 (BASS; Zou 等, 2017); (2) Mayall  $z$ -band legacy 巡天提供了与 BASS 相同区域的  $z$  波段图像 (MzLS; Silva 等, 2016); (3) The Dark Energy Camera Legacy 巡天观测了约 9350deg<sup>2</sup> 区域的  $g$ ,  $r$  和  $z$  波段数据 (DECaLS; Blum 等, 2016)。BASS 和 MzLS 项目都位于基特峰国家天文台站观测，BASS 采用 Bok 2.3 米望远镜上的 90Prime 相机观测，而 MzLS 则采用毗邻 Bok 望远镜的 Mayall 4 米望远镜上的 Mosaic-3 相机观测。DECaLS 巡天观测则采用位于托洛洛山美洲际天文台上的 4 米 Blanco 望远镜 (表格2-2)。BASS 的探测极限  $5\sigma$  内中位值是  $g = 23.48, r = 22.87$  AB mag，比 SDSS 图像的探测极限深了约  $\sim 1$  mag。

在 SDSS 图像 (图2-1左上图) 和 BASS 的  $g$  波段图像中 (图2-2左图，第八版本数据，DR8)，都可以清晰地观察到 NE 团块。NE 团块与寄主星系在结构上可能有所分离，因此在本节中我们试图从形态上将 NE 团块和寄主星系分解。

我们采用 GALFIT v3.0.5 (Peng 等, 2002, 2010) 来拟合面亮度轮廓。根据 NASA-Sloan Atlas 星表中的方位角和轴比，在图2-2中用灰色虚线勾画出主轴和次轴所在方向，并选择了黑框区域作为寄主星系的拟合区域，以避免 NE 团块对寄主星系面亮度拟合结果的影响。黑框的边长与主次轴平行。在实验过程中，我们发现寄主星系的方位角拟合结果变化不大，与 NASA-Sloan Atlas 星表提供的结果十分接近，因此我们在拟合过程中将方位角固定。我们的拟合采用单成分 Sérsic 模型，PSF 图像选用位于 8313-1901 附近的高信噪比不饱和恒星图像 (DR8 星表中 ID391)。拟合结果展示在图2-2和表格2-1中。从左到右，图2-2展示了  $g$  波段观测图像，寄主星系最佳面亮度拟合的二维模型，观测图像与模型图像的残差以及一维表面亮度轮廓曲线。黑色点为寄主星系观测数据点，黑色线为模型线，下方是观测数据与模型数据的残差。这三张图片的颜色棒范围相同，为  $-0.25$ - $20$ (nanomaggies/arcsec<sup>2</sup>)，nanomaggies 为流量单位<sup>2</sup>。寄主星系最佳

<sup>1</sup><https://www.legacysurvey.org/>

<sup>2</sup>定义可以查看 <https://www.sdss.org/dr17/algorithms/magnitudes/>

表 2-2 DESI legacy 图像巡天深度

0-6 survey name	Telescope/Instrument	Area deg	Location	Single-Frame Depths (AB mag)			Galaxy Depth		
				PSF Depth	PSF Depth	PSF Depth	PSF Depth	PSF Depth	PSF Depth
				<i>g</i>	<i>r</i>	<i>z</i>	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>z</i>
DECaLS	Blanco/DECam	9000	NGC(Dec $\leq$ +32deg)+SGC	23.95	23.54	22.50	23.72	23.27	22.22
BASS	Bok/90Prime	5000	NGC(Dec $\geq$ +32deg)	23.65	23.08		23.48	22.87	
MzLS	Mayall/Mosaic-3	5000	NGC(Dec $geq$ +32deg)			22.60			22.29

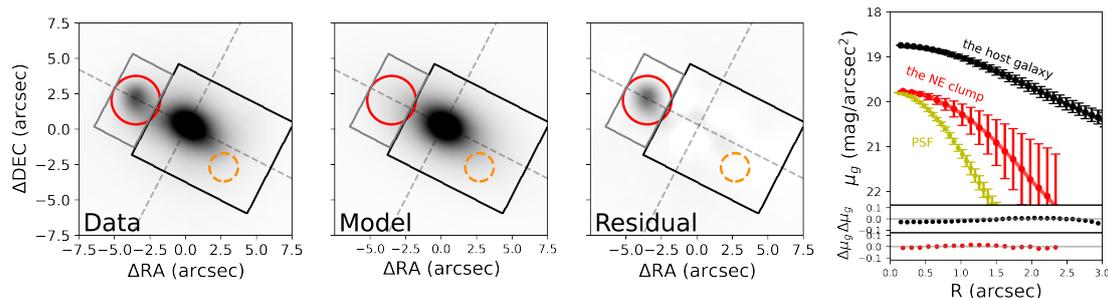


图 2-2 使用 GALFIT 对 8313-1901 寄主星系进行二维面亮度轮廓拟合结果。从左到右分别展示了 BASS 巡天项目的  $g$  波段观测图像、GALFIT 得到的寄主星系最佳拟合图像、残差图像和一维面亮度轮廓。图片空间分辨率为  $0.06''$ ，PSF FWHM 为  $1.68''$ 。黑色方框为寄主星系的拟合区域。灰色方框为 NE 团块拟合区域 ( $\sim 3'' \times 6''$ )，中心位于 NE 团块  $H\alpha$  流量峰值处。前三张图中的颜色棒均相同，范围为  $-0.25$  到  $20 \text{ nanomaggies/arcsecond}^2$ 。最右侧的子图显示了寄主星系 (黑色)、NE 团块 (红色) 和 PSF 模型 (黄色) 的一维面亮度轮廓。带误差棒的点表示观测数据，线表示最佳 GALFIT 模型的一维分布。该子图下方展示分别展示了寄主星系 (黑色) 和 NE 团块 (红色) 的一维表面轮廓残差。

拟合结果的 Sérsic 指数和有效半径分别为  $n = 1.46 \pm 0.04$  和  $re = 1.23 \pm 0.13 \text{ kpc}$  ( $2.44'' \pm 0.26''$ )。这两个参数接近于 BCD 星系的典型值 (Amorín 等, 2009)。

在扣除寄主星系后，我们继续使用 GALFIT 分析 NE 团块的结构。根据图 2-2 中的残差图，我们发现在减去宿主星系的最佳拟合后，残留的图像中存在明显的 NE 团块。因此，我们选择灰色框区域 ( $\sim 3'' \times 6''$ ) 作为 NE 团块的拟合区域，利用单成分 Sérsic 模型和相同的 PSF 图像拟合残差图像。NE 团块的最佳拟合 Sérsic 指数和有效半径分别为  $n = 0.19 \pm 0.04$  和  $re = 290 \pm 12 \text{ pc}$  ( $0.57'' \pm 0.24''$ )。如图 2-2 右侧的一维面亮度轮廓所示，红色的点和线表示 NE 团块的轮廓，而黄色的点则显示了 PSF 的轮廓。我们可以看到，NE 团块的尺寸比 PSF 更加延展，因此我们所测量到的大小是真实的。NE 团块的直径为  $580 \text{ pc}$ ，明显大于本地团块的直径，并与高红移时团块的典型尺寸 ( $1 \text{ kpc}$ ) 相当 (Lagos 等, 2007; Elmegreen 等, 2013; Wuyts 等, 2014; Meng 等, 2020)。

在图 2-2 中，我们以 GALFIT 拟合得到的 NE 团块的中心为圆心，以 NE 团块有效半径的 3 倍 (即  $1.71''$ ) 为半径绘制了一个红色圆圈。我们将该区域定义为 8313-1901 星系中的 NE 团块区域。在本章中的所有图片中，未特别标注的红色圈都表示 NE 团块区域。

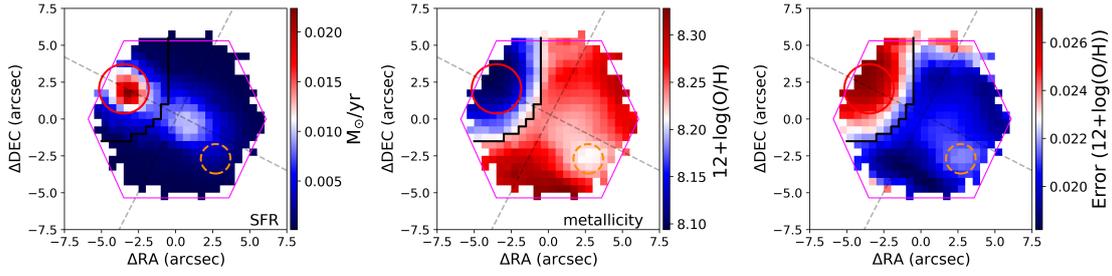


图 2-3  $H\alpha$  获得的 SFR、通过 O3N2 指针计算的气相金属丰度和金属丰度误差图。

## 2.3 物理性质

### 2.3.1 SFR

利用 MaNGA 所提供的数据，我们能够测量每个 spaxel 内的 SFR 和气相金属丰度，进而构建出整个星系的 SFR 和金属丰度二维分布图。值得一提的是，我们所分析的每个 spaxel 都处于 BPT 图中的恒星形成区内，因此我们得以采用公式 2-1 来计算每个位置处的 SFR (Hao 等, 2011; Kennicutt 等, 2012)。在公式的运用过程中，我们借助氢复合线流量，尤其是  $H\alpha$  发射线，以估算 SFR 的数值。由于 OB 型恒星（生命周期约 10 Myr）是主要的电离源， $H\alpha$  线很好地提供了几乎瞬时（ $\sim 10$  Myr）的 SFR 测定。因为存在尘埃消光，我们利用 Calzetti 等 (2000) 的消光曲线对  $H\alpha$  发射线流量进行消光改正后，计算了每个 spaxel 内的 SFR 强度：

$$\log\left(\frac{\text{SFR}}{M_{\odot}/\text{yr}}\right) = \log\left(\frac{L_{H\alpha}}{\text{erg/s}}\right) - 41.27 \quad (2-1)$$

从图 2-3 的左图呈现的 SFR 二维分布图像可以看出，NE 团块与星系其他区域相比的恒星形成显著增强情况。在 NE 团块区域内，SFR 值几乎是星系中心的两倍。将 NE 团块区域内的 SFR 值相加，得到团块区域内总的 SFR 为  $0.417 \pm 0.013 M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ ，NE 团块区域以外的总 SFR 为  $0.829 \pm 0.017 M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ 。

借助 MaNGA 的数据和 MEGACUBE 软件，我们获取了该星系的空间可分辨的星族信息 (Mallmann 等, 2018; Riffel 等, 2021)。MEGACUBE 软件是基于 STARLIGHT (Cid Fernandes 等, 2005) 开发而成，可应用于 IFU 数据，在这一软件的帮助下，我们能够获得每个 spaxel 处的恒星质量和年龄。NE 团块区域内的恒星质量与区域外的恒星质量分别为  $3.33 \times 10^8 M_{\odot}$  和  $3.72 \times 10^9 M_{\odot}$ 。综合而言，NE 团块区域和其余区域的比恒星形成率 (sSFR) 分别为  $1.24 \times 10^{-9} \text{yr}^{-1}$  和  $2.23 \times 10^{-10} \text{yr}^{-1}$ 。

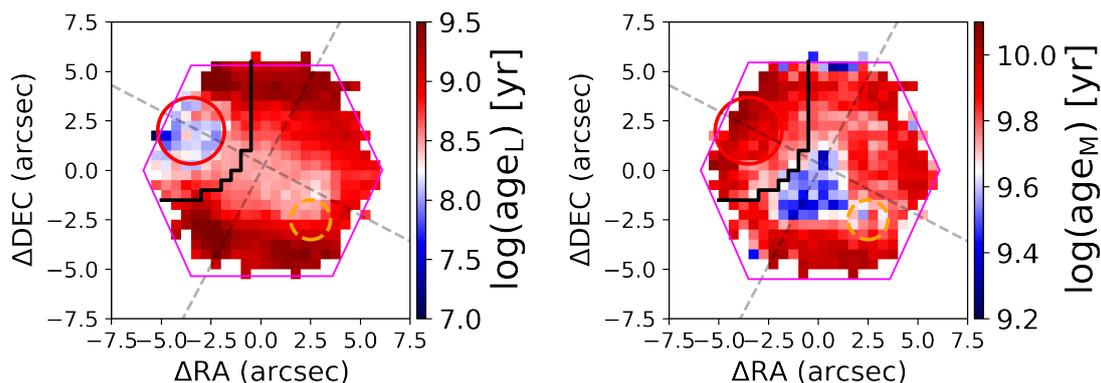


图 2-4 星族合成软件 MEGACUBE 得到的光度加权和质量加权平均年龄图。

在图2-4中，我们呈现了从 MEGACUBE 软件中获得的光度加权年龄图（左图）和质量加权年龄图（右图）。显然，年轻星族对光度的贡献明显高于对质量的贡献。因此，若年轻恒星在星族中所占比例较大，那么光度加权的恒星年龄将会明显低于质量加权的年龄。在图2-4中，NE 团块区域的两张年龄图呈现出显著的差异，进一步表明了 NE 团块区域中年轻星族占比较高。

NE 团块恒星形成活动的明显增强表明该区域存在大质量星团近期形成的可能性。我们观察到团块处的  $H\beta$  发射线光度非常明亮 ( $\log L(H\beta)=40.32[\text{erg/s}]$ )，同时考虑到该团块的有效半径较大，我们推测该 NE 团块可能是由多个未被解析的大质量星团结合而成，而非单独一个大质量星团 (Lagos 等, 2011; Telles 等, 2018)。

### 2.3.2 气相金属丰度

金属丰度是星系特征的重要参数，对于我们理解星系的形成具有重要作用。对于星系和星际介质而言，通常会采用 O 元素丰度 ( $12+\log(\text{O}/\text{H})$ ) 来指代气相金属丰度。在测量恒星形成区的金属丰度方法方面，已有许多研究提出或讨论过 (Pagel 等, 1979; 梁艳春 等, 2006; Arellano-Córdova 等, 2020)。

在上一章中我们介绍了多种金属丰度的测量方法，在本工作中我们使用 O3N2 指针，并采用 Marino 等 (2013) 提供的丰度定标公式来计算 O 元素丰度：

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.533[\pm 0.012] - 0.214[\pm 0.012] \times \text{O3N2} \quad (2-2)$$

该计算方法已被广泛用于计算恒星形成区的金属丰度 (Lima-Costa 等, 2020; Ji 等, 2021)。在图2-3的中间和右边，我们显示了使用公式2-2计算得到的该星系气相金

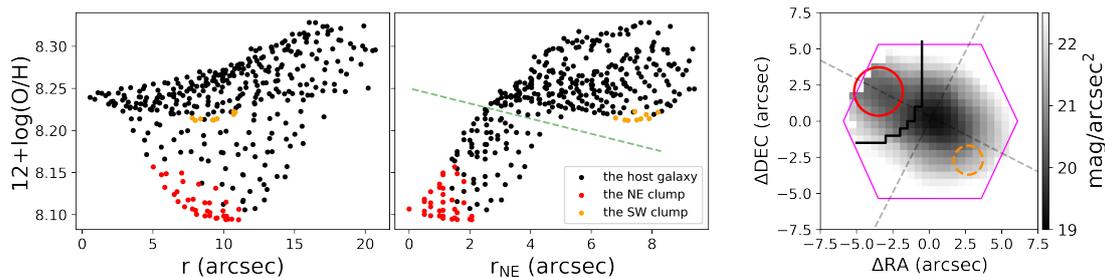


图 2-5 左图：金属丰度的径向分布。中图：横坐标为各个 spaxel 到  $H\alpha$  发射线流量最高位置的直线距离，纵坐标为金属丰度。该图中有两个分支，由绿色虚线分割。右图：MaNGA 数据获得的  $g$  波段面亮度图像。该图中黑色线表示位于中图上下两分支之间的在图像中的分界线。左图和中图中的红色、橙色和黑色数据点分别代表 NE 团块区域内的 spaxel、SW 团块区域内的 spaxel 和除团块以外的 spaxel。

属丰度及其误差的二维分布图。我们可以看到，在 NE 团块区域，金属丰度明显下降。同时可见，在星系的西南方向还有一个区域的金属丰度略低于寄主星系，但结合误差图像可见该区域的金属丰度处于寄主星系误差范围内。我们将该区域标记为 SW 团块，在图中由半径为 1” 的橙色虚线圆圈。

依据第 2.2 节得出的寄主星系结构参数 ( $PA$ , 椭率等)，我们能够计算出每一 spaxel 与星系中心的距离。在图 2-5 的左侧，我们呈现了 8313-1901 的金属丰度径向分布，每个数据代表一个 spaxel。该图揭示了某些地方金属丰度明显偏低。为了检查这些低金属丰度位置是否都与 NE 团块有关，我们以  $H\alpha$  发射线流量最高位置为中心，以各个 spaxel 到它之间的直线距离作为横坐标，绘制了另一幅金属丰度径向分布图，显示在图 2-5 的中间。在该图中，NE 团块和 SW 团块区域内的点以红色和橙色的点标记，并在右侧 MaNGA 数据获得的  $g$  波段面亮度图像中用相应颜色的圈标记出这两个位置。在中间图中，我们注意到存在两个不同的群体，可用绿色虚线很好地分割。绿色虚线的下方的 spaxel 在空间位置上对应于右侧图中黑色折线的东北方区域，绿色虚线上方的 spaxel 空间上位于星系的其它区域。从右图可见，贫金属属性区域（黑折线东北方向）与 NE 团块在空间上密切相关。我们还观察到，在黑线东北方向的区域比形态学上定义的 NE 团块区域更大。这可能是由于贫金属气体的分布比形态学所能识别的区域更广泛，导致其扩散到更远的区域内。

除了我们使用的 O3N2 方法之外，还有多种方法可用于估算金属丰度。因此我们又使用了 R23 方法和直接测量法来检测金属丰度的二维分布特征。在图 2-

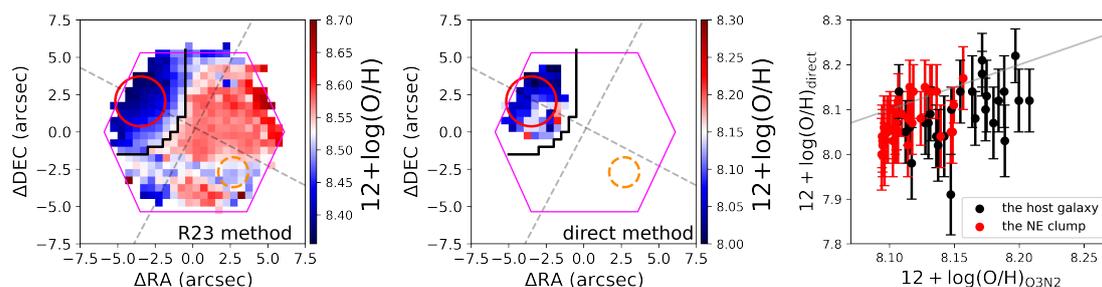


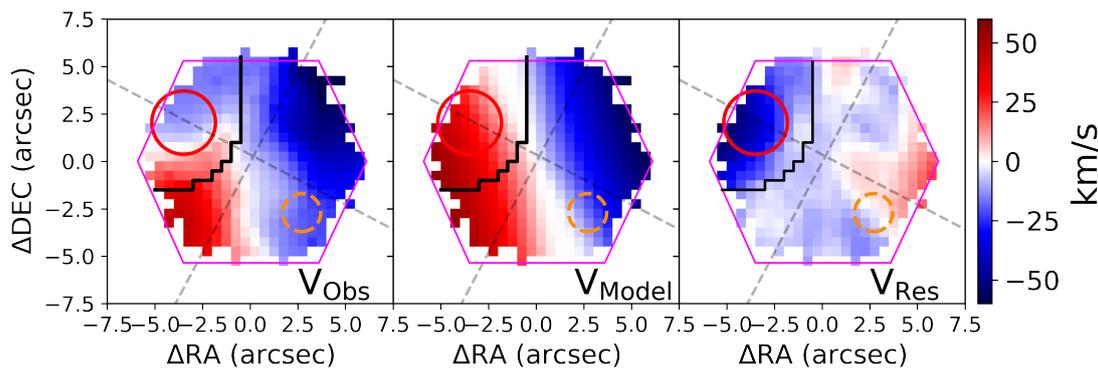
图 2-6 R23 指针获得的金属丰度、直接测量法计算金属丰度和直接测量法与 O3N2 方法之间的比较。红色点为 NE 团块区域内的 spaxel 数据，黑色点为区域外的 spaxel 数据，灰色实线为 1:1 线。

6 的左侧，我们显示了使用 R23 方法 (Tremonti 等, 2004) 得到的金属丰度图。我们可以看到，该金属丰度图具有与图 2-3 中使用 O3N2 方法得到的金属丰度图类似的特征。NE 团块的金属丰度总体上低于主星系的金属丰度。SW 团块的金属丰度也略低于周围的 spaxel。

在 MaNGA 的数据中，某些区域还可以观测到  $[\text{O III}]\lambda 4363$  发射线，从而可以使用直接测量法来测量金属丰度。我们使用 MaNGA pipe3D (Sánchez 等, 2016b,a) 提供的  $[\text{O III}]\lambda 4363$  发射线的流量。选择发射线流量信噪比大于 5 的 spaxel，并人为检查这条线的流量是否可靠，最终选中了 61 个 spaxel。我们使用基于贝叶斯模型的代码 HII-CHI-mistry v5.1 计算了这 61 个 spaxel 的金属丰度。在图 2-6 的中间图中，我们展示了这 61 个 spaxel 的空间位置和它们的金属丰度。可以看出，这 61 个 spaxel 主要位于低金属丰度区域 (黑色实线的东北方向)。在右图中，我们比较了两种方法得到的金属丰度，横坐标为 O3N2 方法，纵坐标为直接测量法，灰色的线是 1:1 线，红色的点代表 NE 团块，黑色的点代表团块以外区域。可以看到，使用直接测量法得到的金属丰度总体上比 O3N2 方法低约 0.1 dex 左右，这可能是不同方法之间的系统差所致。总体而言，O3N2 方法、R23 方法和直接测量法都表明 NE 团块的金属丰度始终低于寄主星系。

### 2.3.3 气体速度场

在图 2-7 的左侧，我们呈现了从 DAP 数据中获得的  $\text{H}\alpha$  速度场。星系内的气体速度场由一个明显的旋转盘主导，旋转方向由东南到西北，NE 团块靠近星系的主轴。NE 团块似乎在运动学上脱离了寄主星系的旋转盘。在图 2-7 的中间，我们对寄主星系的  $\text{H}\alpha$  速度场进行了建模。我们使用的旋转曲线 (Andersen 等, 2013)


 图 2-7  $H\alpha$  速度场、速度场模型和残差。

如下：

$$V(R) = v_{rot} \tanh(R/r_{rot}), \quad (2-3)$$

其中  $r_{rot}$  为旋转半径，在此半径内，旋转速度随半径  $R$  增加，直到  $r_{rot}$  处达到最大速度  $v_{rot}$ 。利用公式2-3，可以得到二维速度场为

$$V_{obs}(R, i) = V_{sys} + V(R) \cdot \sin i \cdot \cos \phi, \quad (2-4)$$

其中  $V_{sys}$  是系统退行速度， $V(R)$  是由公式2-3定义的内在旋转曲线， $i$  是旋转盘的倾角， $\phi$  是星系的方位角。我们用 emcee 软件来拟合速度场 (Foreman-Mackey 等, 2013)。为了避免 NE 团块的污染，贫金属区域即黑色实线的东北方向区域并不参与拟合。

在图2-7的中图展示了最佳拟合的模型速度场，残差显示在右图。最佳拟合模型的参数为： $i = 75.3^\circ \pm 14.4^\circ$ ， $\phi = -161.5^\circ \pm 9.8^\circ$ ， $v_{rot} = 90.7 \pm 32.5$  (km/s)，和  $r_{rot} = 6.9'' \pm 1.6''$ 。误差代表 67% 的置信区间。通过观察残差图，我们发现 NE 团块相对于寄主星系具有朝向我们的系统速度，这可能意味着这个团块是一个运动上独立的组成部分。然而，西南角的 SW 团块周围的扰动微弱且不明显。

通常情况下，星系中心的棒也会对气体运动学产生影响。然而，形态上来看，这个星系中心没有明显的棒结构。此外，NE 团块区域的  $H\alpha$  视向速度残差相当明显，约为 25 km/s，与观测速度场中气体的最大旋转速度几乎相当，且最大的残余速度倾向于向星系的边缘分布，而不是围绕中心。因此，我们推断 NE 团块气体的速度扰动不太可能是由星系中心的棒结构引起的，如果中心棒结构真实存在的话，也只是非常微弱。

## 2.4 NE 团块的形成原因

形成强恒星形成区的方式有多种,包括星系间相互作用或气体的吸积,星系自身演化形成的棒状结构也能引发恒星形成。从光学合成图像中看,该星系中心并没有明显的棒结构,而且在 Galaxy Zoo2 星表中,该星系也被归类为无棒的类别 (Willett 等, 2013)。因此,可以基本排除该星系 NE 团块是因为棒结构形成的可能性。此外,盘的不稳定性也可能导致强恒星形成区的产生。Richards 等 (2014) 报道了一个类似于 8313-1901 的矮星系 GAMA J141103.98-003242.3。他们使用 Sydney- Australian-Astronomical-Observatory Multi-object Integral- Field Spectrograph (SAMI; Croom 等, 2012; Allen 等, 2015) 进行了观测。该星系存在一块偏离中心的蓝色团块,具有较低的金属丰度和较高的 SFR,这些物理性质与 8313-1901 相似。然而,与 8313-1901 不同的是,该星系的  $H\alpha$  速度场没有明显的扭曲。因此,他们认为这个强恒星形成区只是寄主星系引力不稳定导致的随机团块。相比而言,8313-1901 的 NE 团块中的电离气体运动学表现出与寄主星系分离的特点如图 2-7 所示。加上 NE 团块中金属丰度的明显下降,我们更倾向于认为 8313-1901 的 NE 团块是由外部原因引发的,如星系相互作用或气体吸积过程,而非内部恒星暴发事件。此外,与近域宇宙中的星暴区相比,NE 团块的体积要大得多,这也进一步暗示了它可能由外部原因导致的。

NE 团块的外部来源成因,可能由气体吸积过程所致,亦或由星系相互作用引起。如果 NE 团块是由气体吸积引起的,那么吸积的气体可能来自于星系际介质和/或伴星系,例如富含气体的卫星星系 (Hwang 等, 2019)。原初的冷气体有可能流入星系的盘中,甚至直接流入星系的中心。在小质量的星系中,这种情况更容易发生 (Joung 等, 2012; Peng 等, 2014)。根据 Wang 等 (2016, 2018) 的星表,8313-1901 可能位于一个大的丝状结构中,该结构的冷气体含量可能比团状结构中更丰富。根据 Yang 等 (2007, 2012) 的估计,其晕质量约为  $M_{halo} = 10^{11.03} M_{\odot}$ 。相比于大质量晕,这样的晕中冷气体更容易落入星系中 (Dekel 等, 2009)。因此,8313-1901 的环境有利于气体吸积触发的恒星形成。NE 团块也可能因与星系相互作用所致,那么在团块区域可能存在额外的年老恒星。因此,我们将通过分析团块中的星族成分来探索 NE 团块的起源。

我们将红圈内所有星系的观测光谱积分,以得到 NE 团块整体的观测光谱。然后,根据银河系消光曲线和 MaNGA 数据提供的  $E(B-V)$ ,对其进行了银河系

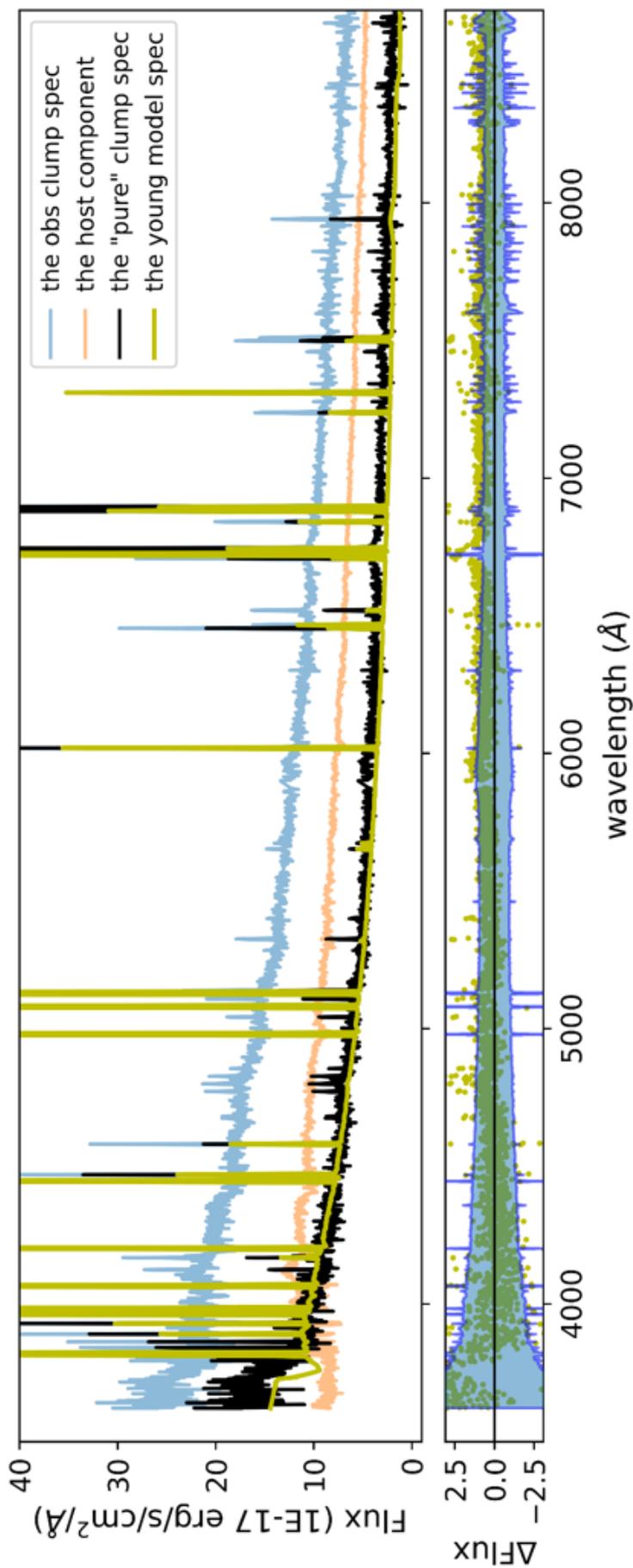


图 2-8 NE 团块区域内的各成分的光谱、构造的模型光谱和残差。上层图中展示了 NE 团块的观测光谱，呈浅蓝色。浅橙色线表示 NE 团块中估计的寄主星系成分。“纯”NE 团块光谱（黑色）则为两条光谱的差异，即观测光谱（浅蓝色）-寄主星系光谱（浅橙色）。黄色虚线光谱显示了 Prospector 构建的模型光谱（详见正文）。下方的面板展示了“纯”NE 团块光谱与模型光谱之间的残差。蓝色阴影区域显示观测光谱的  $3\sigma$  误差范围。

消光改正 (Fitzpatrick, 1999), 在图2-8中以浅蓝色显示。该观测光谱包括 NE 团块的贡献以及被团块掩盖住的寄主星系的贡献。因此, 要评估 NE 团块的星族, 我们需要剔除潜在的寄主星系影响。

我们假设 NE 团块中寄主星系成分的光谱与寄主星系中心相同, 使用从面亮度最佳形态拟合的 Sérsic 模型中估计出的寄主星系在 NE 团块处的流量来调整寄主星系中心光谱的强度。具体做法如下:

我们借助之前的面亮度轮廓拟合结果 (2.2节) 来推算了 NE 团块中寄主星系的  $g$  波段光度贡献。依据寄主星系单 Sérsic 模型下的拟合参数, 我们还还原了  $g$  波段内禀面亮度二维分布, 并将其与 MaNGA 数据的 PSF 卷积后, 得到相应的  $g$  波段观测图像。最后, 我们从该图像中估计出 NE 团块区域寄主星系  $g$  波段贡献的光度为:  $\text{flux}_{\text{host\_in\_clump}}=10.83 \times 10^{-17} \text{ erg/s/cm}^2$ 。

假设 8313-1901 的谱型在每个位置都是相同的, 即不会随着半径的变化而产生变化。这个假设是因为在低质量星系中, 质光比 (M/L) 在从星系中心到外围的变化并不明显, 也就是说寄主星系的星族在里面和外面是相似的 (Ge 等, 2021)。我们对星系中心直径为 2.5" 的圆圈内的光谱进行叠加, 以得到寄主星系的模型光谱形状。结合 NE 团块内寄主星系的  $g$  波段光度  $\text{flux}_{\text{host\_in\_clump}}$ , 我们就可以定量构建出 NE 团块区域内潜在的寄主成分的光谱, 并对其进行银河系消光处理。这在图2-8中显示为浅橙色光谱。

我们从观测光谱 (图2-8中浅蓝色光谱) 中减去构建的底层寄主星系成分光谱 (图2-8中浅橙色光谱), 得到“纯”NE 团块光谱, 并在图2-8中以黑线显示。可以看到, “纯”NE 团块光谱较蓝且存在弱的巴尔末跳变, 这表明“纯”NE 团块的星族是年轻的 (Guseva 等, 2007)。

此外, “纯”NE 团块光谱几乎没有吸收线。图2-9中我们放大了观测光谱 (浅蓝线)、寄主星系光谱 (浅橙线) 和“纯”NE 团块光谱 (黑线) 中一些常用于表征星族的吸收线。在观测光谱和寄主星系的光谱中,  $H\beta$ 、 $H\delta$ 、 $\text{Ca II } \lambda 3933, 3968$  和  $\text{Ca II } \lambda 8500, 8544$  等吸收线清晰可见, 但在“纯”NE 团块的光谱中, 这些吸收线并不明显。特别是, 在图2-9第一幅子图中黑色光谱的一系列高阶巴尔末线和  $He$  吸收线都不明显。值得注意的是, 我们的橙色光谱并不是拟合得到的模型光谱, 而是根据星系中心的观测光谱和图像分析中所获流量建立的光谱。这两个信息都是独立于 NE 团块的观测光谱的。在这种情况下, 黑色的“纯”NE 团块光

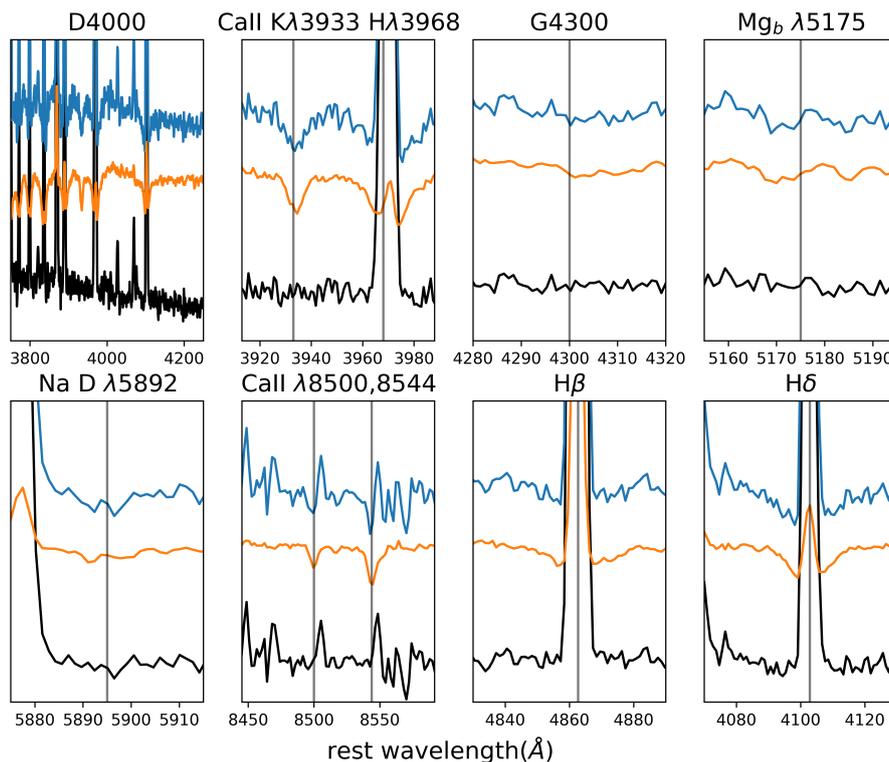


图 2-9 NE 团块区域内三条光谱的特定波长处的特征对比。蓝色线为观测光谱，橙色线为寄主星系成分光谱，黑色线为“纯”NE 团块光谱

谱仍然没有明显的吸收线，表明“纯”NE 团块光谱确实是由年轻星族主导。

为了定量评估“纯”NE 团块光谱的年轻程度，我们将其与年轻星族的模型光谱进行比较。我们使用 Prospector 软件来构建光谱 (Johnson 等, 2021)。该软件能够结合单星族的光谱模型和星云发射模型，基于一组给定参数生成同时包含恒星连续谱、星云连续谱和发射线的模型光谱。这些参数包括年龄、尘埃参数以及气体和恒星的金属丰度等。以下是模型详细说明。

- 单星族模型来自 FSPS 软件 (Conroy 等, 2009, 2010)，该软件通过 python-fsps (Foreman-Mackey 等, 2014) 连接到代码 Prospector。我们使用的单星族光谱库、等龄线模型和恒星初始质量函数分别是 MILES (Sánchez-Blázquez 等, 2006a)、MIST (Choi 等, 2016) 和 Salpeter 初始质量函数 (Salpeter, 1955)。我们根据寄主星系区域的金属丰度的中值，将金属丰度  $[Z/H]$  固定为  $-0.4$ 。

- 使用 CLOUDY 软件 (Ferland 等, 2013; Byler 等, 2017) 来模拟星云发射。气体的金属丰度  $[Z/H]_{gas}$ ，则根据 NE 团块区域的金属丰度图的中值设定为  $-0.6$ 。

- 我们使用的尘埃消光模型由两部分组成 (Kriek 等, 2013)：年轻恒星周围诞生云中的尘埃和星际介质中的弥漫尘埃。弥漫尘埃的光深  $\tau_{diff}$  是 0.001。我

们使用诞生云尘埃与弥漫尘埃的光深比的默认值  $\tau_{bc}/\tau_{diff} = 1$ ，以及弥漫尘埃指数的默认值  $n_{diff} = 0$ ，它用来调节了消光曲线的形状。

我们设定了这些参数后，使用 *Prospector* 生成了一个仅包含 7 Myr 的星族的光谱。在图2-8中，我们用黄色显示了这个模型的结果。该模型假设在 0-7Myr 内 SFR 持续不变，形成的恒星总质量为  $1.8 \times 10^6 M_{\odot}$ 。“纯” NE 团块光谱与合成的模型光谱非常匹配，两者之间的残差非常小，展示在图2-8的下层子图中。蓝色阴影区域显示的是  $3\sigma$  范围内的观测光谱误差，由红圈内的所有 spaxel 光谱的观测误差估算得出的，并考虑了星系的协方差 (Law 等, 2016)。由图可见，大部分的残差落在观测光谱误差范围内。

与极年轻的模型光谱良好匹配表明，“纯” NE 团块中占主导地位的星族非常年轻，而年老星族贡献极低。该结论表明 NE 团块是由气体吸积引发的，而非由星系相互作用所产生。

当然，上述分析并不能完全排除年轻矮星并合带来的富气体的可能性。因此我们评估“纯” NE 团块中年老星族的贡献。我们发现，“纯” NE 团块的光谱与 7 Myr 模型光谱相比存在一定的偏移，这种偏移在较长波长处看似更加明显。如果这种偏移是真实存在的，则可能是由于一部分年老星族所致。我们利用模型光谱和“纯” NE 团块中的  $z$  波段流量差异来估计这个可能存在的年老星族的质量。模型光谱为  $1.57 \times 10^{-17} \text{ erg/s/cm}^2$ ，“纯” NE 团块光谱为  $1.98 \times 10^{-17} \text{ erg/s/cm}^2$ ，即年老星族在  $z$  的流量约为  $0.41 \times 10^{-17} \text{ erg/s/cm}^2$ 。我们选择了一个年龄为 10 Gyr、 $[Z/H]_{star} = 0$  的年老单星族模板来进行估计，以避免低估质量。这个年老星族在  $z$  波段的 M/L 比为 1.72 ( $M_{\odot}/L_{\odot,z}$ )，因此我们估计该年老星族可能的质量约为  $3.89 \times 10^7 M_{\odot}$ ，仅占红圈中寄主成分质量的  $\sim 20\%$ ，占寄主星系质量的  $\sim 1\%$ 。然而，由于“纯” NE 团块光谱（图2-8中的黑色光谱）是通过简单的减法得出的，可能存在很多不确定因素，这可能会导致质量误差达到 20%。总的来说，即使年老星族真实存在，与寄主星系相比其影响也是微不足道的。

MaNGA 8313-1901 的 H I 气体的质量为  $\log(M_{HI}/M_{\odot}) = 9.37$  (Masters 等, 2019)，而其恒星质量为  $\log(M_{*}/M_{\odot}) = 8.88$  (见表2-1)。该星系中气体与恒星的质量比约为 3，接近于与其恒星质量相似的星系的典型值。这表明在该星系中不存在明显的气体过剩。由于 NE 团块的金属丰度比寄主星系的金属丰度低 0.1–0.2dex (见图2-3和图2-5)，如果存在气体吸积的情况，我们推测被吸积的气体是极贫金

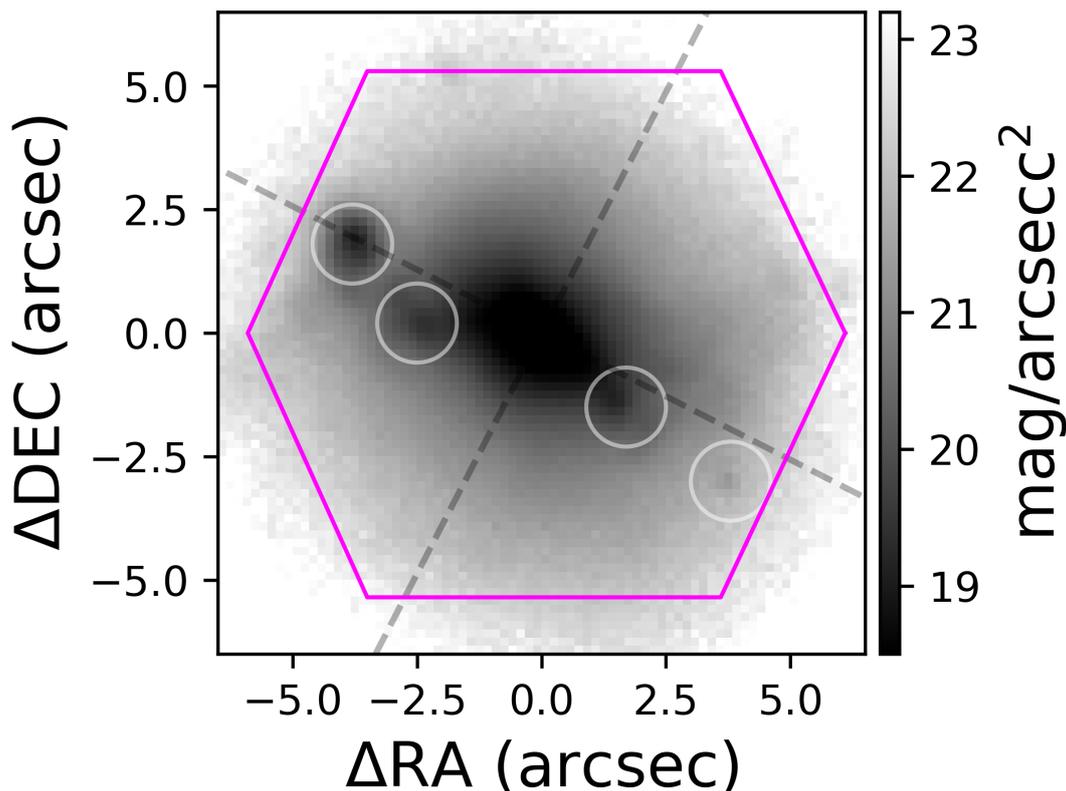


图 2-10 HSC 项目观测  $i$  波段图像。白圈标记了人为选择的团块区域。

属的。假设吸积气体的金属丰度是寄主星系的十分之一 ( $Z_{\text{gas}} = Z_{\text{host}}/10$ ), 为使 NE 团块区域的金属丰度降低 0.15 dex, 吸积气体的质量应该是 NE 团块区域已有气体的一半左右。考虑到该星系中没有观察到明显的气体过剩, 因此被吸积的气体的金属丰度应远远低于宿主的金属丰度, 甚至可能是原初气体。

既然 NE 团块可能来自于气体吸积, 并且位于星系的主轴上, 这可能意味着气体是沿着主轴方向被吸积进来。由于投影效应的影响, 我们无法确定吸积方向是沿着盘面还是有一个角度与盘面垂直。然而, 有趣的是, 在金属丰度图中提到的 SW 团块 (本文显示的所有二维图像中的橙色圆圈区域) 也是在主轴上发现的。虽然 SW 团块的金属丰度 (图2-3的中图)、EW( $H\alpha$ ) (图2-1的右下子图) 和运动学 (图2-7) 都与周围区域只有微小的不同, 但我们认为 SW 团块与 NE 团块相似, 他们可能具有同一个外部起源, 而不是来自于星系的一部分。一个暗示性的线索来自于图2-10, 我们展示了来自 8.2 米 Subaru 望远镜上 Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic 项目的  $i$  波段图像 (HSC-SSP; Aihara 等, 2018, 2022)。与 SDSS 或 DESI Legacy 的图像相比, 该图像更深, 空间分辨率更高。图像显示, 沿着星系

的主轴可能存在多个团块，包括 NE 和 SW 团块，我们用白色圆圈标记它们。它们可能都是同一个吸积事件的一部分。我们需要更高的空间分辨率的图像来进一步研究这个问题。

## 2.5 小结

MaNGA 8313-1901 是一个引人注目的 BCD 星系。该星系在东北方向上有一个明显的蓝色偏心团块，我们称为 NE 团块。我们使用 GALFIT 来获取寄主星系和 NE 团块的结构信息。通过利用单 Sérsic 模型卷积 PSF 来拟合寄主星系和 NE 团块的结构，我们得出以下结果：寄主星系的有效半径和 Sérsic 指数分别为  $r_e = 1.23 \pm 0.13$  kpc 和  $n = 1.46 \pm 0.04$ ，NE 团块的有效半径和 Sérsic 指数分别为  $r_e = 290 \pm 12$  pc 和  $n = 0.19 \pm 0.04$ 。NE 团块的大小明显大于本地星系中的典型 H II 区，但与高红移星系中的星暴团块更为相似。

在这个星系中的 H $\alpha$  发射线-SFR 图和气相金属丰度图中可以发现，相对于寄主星系，NE 团块呈现出极强的恒星形成率和偏低的金属丰度。此外，不同的金属丰度指针都显示 NE 团块的金属丰度较低。我们对从 H $\alpha$  发射线中测量到的气体速度场进行了进一步研究，建立了一个 H $\alpha$  气体运动学模型，发现 NE 团块在运动上与其宿主星系的旋转盘相分离。这些低金属丰度、高恒星形成率以及运动学分离的特性，都表明 NE 团块很可能不是盘内自然形成的一部分，而更有可能是外部来源的结果。例如，气体吸积或星系相互作用等过程都可能形成这种类似于 NE 团块的大型团块。我们进一步分析了 NE 团块中的星族特征，以确定其中是否存在年老星族，从而探讨起源于气体吸积还是携带有年老星族的星系相互作用。

为了探究 NE 团块本身的星族特点，我们需要剔除该区域内寄主星系成分贡献。我们假设 NE 团块中寄主星系成分的光谱与寄主星系中心相同，使用从面亮度最佳形态拟合的 Sérsic 模型中估计出的寄主星系在 NE 团块处的流量来调整寄主星系中心光谱的强度。图2-8中的浅橙色曲线描绘出了 NE 团块区域中潜在寄主星系成分的光谱信息。观测光谱（浅蓝色）与寄主光谱（浅橙色）之间的差异为“纯”NE 团块光谱（图2-8中的黑色曲线）。我们对所有用于分析恒星族的光谱数据都进行了银河系消光修正。此时，“纯”NE 团块光谱呈现出了明显的年轻星族特征，如连续谱偏蓝，几乎不含吸收线。

我们使用 Prospector 构建了一条只包含年轻星族 ( $\leq 7$  Myr)、尘埃、星云连续谱和发射线的光谱模型, 该模型在图2-8中以黄色线显示。“纯” NE 团块光谱(图2-8中显示为黑色)与该模型光谱非常相似, 这表明“纯” NE 团块光谱确实由年轻恒星主导。在 NE 团块中, 我们没有探测到明显的年老星族, 这进一步证实了气体吸积的假设, 即 NE 团块可能是由近期吸积贫金属气体而形成的。当然, 我们不能排除富含气体的矮星合并的可能性, 这些矮星系可能一开始就没有明显的年老星族。

除了 NE 团块外, 在寄主星系的西南方还存在一个低金属丰度区域, 我们将其称之为 SW 团块。SW 团块在 SFR、金属丰度和运动学方面表现出与 NE 团块相似的特征, 但相对于 NE 团块而言, 其程度稍微小一些。这两个团块都位于寄主星系的主轴上。我们推测, NE 团块和 SW 团块可能具有类似的外部来源。

本研究的结果有助于我们更好地了解高红移星系中的气体吸积活动。未来, 中等深度红外观测有望提高我们对 NE 团块中年老恒星族的诊断能力。利用 500 米球面射电望远镜 (FAST) 的观测或未来平方公里射电阵 (SKA) 进一步研究该星系中的  $H_{\text{I}}$  气体含量可以说是非常关键的。此外, 未来使用中国空间站望远镜 (CSST-IFU) 进行光学 IFU 观测也可以帮助我们进一步剖析该团块。综合更多的 BCD 星系, 对 8313-1901 的寄主星系属性进行更为详细的研究, 也可以加深我们对 BCD 星系演化过程的了解。事实上, 在筛选 MaNGA 巡天中的 BCD 候选体时, 我们发现至少还有两个 BCD 星系中存在偏离星系中心的蓝色团块, 尽管这些团块不像 8313-1901 中那样显著。

### 第3章 MaNGA 中 BCD 星系样本选择及特性分析

受上一章中对 BCD 星系 8313-1901 的研究启发,如果能找到更多的 BCD 星系,我们可能可以系统地研究这类星系的演化图景。虽然 MaNGA 巡天并不是以矮星系为观测目标,但其观测母样本大(10010 个星系),且星系都具有二维光谱信息。因此,我们将从 MaNGA 星系中寻找 BCD 星系,这些 BCD 星系的二维光谱信息可以让我们结合星族合成和面亮度轮廓测量的方法,获得它们寄主星系的形态特征。本章中,我们介绍在 MaNGA 巡天中的 BCD 样本选择。

#### 3.1 BCD 星系样本选择

由 BCD 星系命名可知 BCD 星系一般具有以下特性:足够蓝,足够致密且为矮星系类型,这意味着 BCD 星系的选取需要在颜色、面亮度、光度或质量等特征上做相应的判定。[Gil de Paz 等 \(2003\)](#) 根据这三个特征,提出了 BCD 星系定义(公式1-1)。本章将采用类似的方法。[Gil de Paz 等 \(2003\)](#) 采用的是 Johnson 光度系统,也就是  $UBV$  测光系统([Johnson 等, 1953](#))。而 SDSS 测光项目使用不同于 Johnson 系统的滤光片,即  $ugriz$  测光系统([Fukugita 等, 1996](#))。尽管在部分波段上二者之间的差别并不明显,两者的测光波段并不完全相同。因此,为选取 MaNGA 项目中的 BCD 星系样本,我们需要将 [Gil de Paz 等 \(2003\)](#) 中的判定标准转换为  $ugriz$  测光系统。根据 [Smith 等 \(2002\)](#) 提出的 Johnson 测光系统和 SDSS 测光系统之间的转换关系,我们将公式1-1中前两个选择判据(蓝、致密)如下转换,而“矮”星系的判定条件由恒星质量决定,最终采用以下三点标准选取 MaNGA 巡天项目中的 BCD 星系:

$$\begin{aligned} \langle \mu_g \rangle - \langle \mu_r \rangle &\leq 0.43 \text{ mag/arcsec}^2, \\ \langle \mu_g \rangle &< 21.83 - 0.47(\langle \mu_g \rangle - \langle \mu_r \rangle) \text{ mag/arcsec}^2, \\ M_* &< 10^9 M_\odot. \end{aligned} \quad (3-1)$$

平均表面亮度  $\langle \mu \rangle$  由  $R_{50}$  内平均面亮度计算得来([Blanton 等, 2001](#))。

MaNGA 项目目标源星表中的参数主要由 NASA-Sloan Atlas 星表提供。我们采用星表中提供的椭圆 Petrosian 光度测量的数据计算平均面亮度。恒星质量由星表中提供的根据椭圆 Petrosian 参数得到的恒星质量。最终我们在星表中 10010

个星系中挑选出 79 个 BCD 星系候选体。MaNGA 项目组提供了有关 DRP 数据质量的位掩码值  $DRP3QUAL$ 。当该值不为 0 时, 说明 DRP 数据存在问题, 例如: 流量校准失败、天光未被完全消除或在观测中出现差光纤等。为确保数据准确性, 我们排除了星系数据的  $DRP3QUAL$  不为 0 的星系, 最终选出了 52 个 BCD 星系候选体。这些源的  $gri$  复合图像如图 3-1 中所示, 图中洋红色六边形为 MaNGA 不同光纤束的观测覆盖范围。具体信息展示在表格 3-1 中, 包含红移, 星系质量、Sérsic 指数等。

从这些星系的  $gri$  组合图像来看, 我们很容易注意到 8313-1901 星系的东北方向存在着明显的蓝色结构, 类似的蓝色结构还出现在 11013-6102、8257-3704 等星系中。而一些星系则没有明显的团块结构, 但整体颜色偏蓝, 例如 10226-1901 等。另外, 我们也发现了一些星系的颜色相对而言偏红, 比如 9001-9102 等。样本中既包含了几乎面向的 8313-1901 星系, 但也包括了一些侧向星系如 7992-12703 等。在图 3-2 的左上图中, 我们比较了 BCD 星系候选体和 MaNGA 项目中其他星系的大小。横坐标为星系的恒星质量, 纵坐标为半光度半径 ( $R_{50}$ ), 蓝点为 52 个 BCD 星系, 灰色点为 MaNGA 观测的其他星系。半光度半径由 NASA-Sloan Atlas 星表提供, 表中的值利用单 Sérsic 函数拟合星系  $r$  波段图像得到。可以看出 BCD 星系为小质量星系中半径较小的星系。

MaNGA 项目组对 MaNGA 巡天中红移小于 0.05 的星系利用 Green Bank Telescope (GBT) 共观测并处理得到了 2108 个星系  $H_I$  气体性质, 并结合 Arecibo Legacy Fast ALFA (ALFALFA) 项目获得的星系  $H_I$  气体性质 (Haynes 等, 2018), 汇总得到 MaNGA 巡天中 3669 个星系的  $H_I$  气体星表 (Masters 等, 2019; Stark 等, 2021)。在 52 个 BCD 星系中有 37 个星系拥有  $H_I$  测量, 他们的  $H_I$  气体质量罗列在了表 3-1 中。在图 3-2 中, 我们展示了 BCD 星系和 MaNGA 星系的  $H_I$  气体百分含量。

MaNGA 提供了一份可用于科学分析的星表文件, 提供了每个星系星系中心、1 倍有效半径和总视场范围内的多条发射线信息。我们先用这一星表中的数据对这些星系的 SFR 和金属丰度等性质进行简单的分析。首先我们采用一倍有效半径内的各发射线总流量判断这些星系在 BPT 图中的位置, 发现所选的 BCD 星系都位于恒星形成的区域。接着我们利用一倍有效半径内  $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 $[O III]\lambda 5007$  和  $[N II]\lambda 6584$  发射线流量以及公式 2-1 和公式 2-2 分别计算了他们的 SFR 和金属

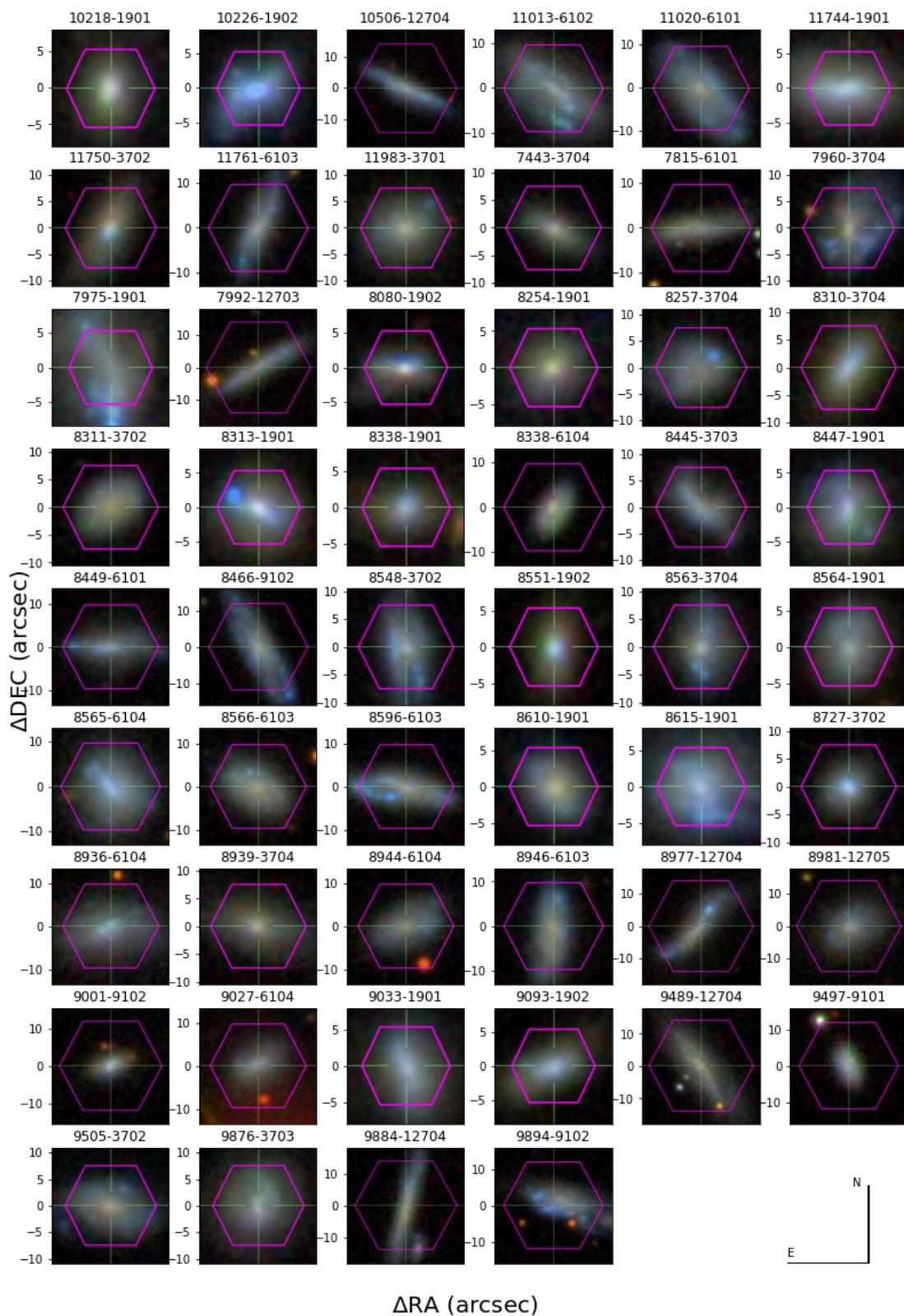


图 3-1 在 MaNGA MPL-11 版本中选出的 52 个 BCD 星系候选体的 *gri* 复合图像。

表 3-1 MaNGA 中 52 个 BCD 星系候选体在 NASA-Sloan Atlas 星表中部分参数。

	plateifu	RA (J2000) °	Dec (J2000) °	$z$	$\log(M_*)$ ( $M_\odot$ )	$\log(M_{\text{HI}})$ ( $M_\odot$ )	$M_g$ (mag)	$n$
1	10218-1901	118.03	17.93	0.02226	8.98	9.42	-17.86	2.59
2	10226-1902	38.20	0.68	0.02283	8.66	9.66	-18.85	2.92
3	10506-12704	139.14	35.16	0.01728	8.69	9.54	-17.60	0.93
4	11013-6102	206.81	55.57	0.01555	8.93	-	-18.06	1.06
5	11020-6101	203.29	54.83	0.01768	8.95	9.37	-18.15	0.93
6	11744-1901	120.12	15.45	0.01527	8.82	9.11	-17.94	1.76
7	11750-3702	191.10	40.70	0.01798	8.96	-	-17.46	2.50
8	11761-6103	192.58	53.59	0.02299	8.91	9.56	-18.05	1.60
9	11983-3701	256.24	63.81	0.01618	8.95	9.19	-17.44	1.53
10	7443-3704	231.48	41.91	0.02265	8.81	-	-17.13	1.64
11	7815-6101	316.54	10.35	0.01716	8.60	8.66	-17.03	0.91
12	7960-3704	258.81	31.39	0.02396	8.94	9.37	-18.33	1.51
13	7975-1901	323.66	11.42	0.02201	8.95	9.75	-19.31	2.48
14	7992-12703	254.57	64.71	0.01601	8.83	8.98	-17.50	0.74
15	8080-1902	47.79	-1.05	0.03837	8.97	9.59	-18.87	3.05
16	8254-1901	163.62	45.69	0.01922	8.86	9.37	-17.19	3.46
17	8257-3704	165.55	45.30	0.02022	8.72	9.36	-17.49	0.70
18	8310-3704	179.38	21.23	0.01355	8.86	-	-17.35	2.01
19	8311-3702	203.97	23.76	0.01686	8.83	-	-17.00	0.60
20	8313-1901	240.29	41.88	0.02425	8.88	9.37	-18.52	6.00
21	8338-1901	172.16	23.67	0.02148	8.84	-	-17.44	4.36
22	8338-6104	173.77	22.52	0.02245	8.99	-	-17.48	1.24
23	8445-3703	206.55	36.43	0.02346	8.87	9.37	-17.75	1.10
24	8447-1901	205.25	39.06	0.02022	8.79	9.18	-17.92	1.67
25	8449-6101	169.24	23.19	0.02118	8.85	9.50	-17.74	1.60
26	8466-9102	170.58	46.70	0.01748	8.78	9.40	-18.02	1.47
27	8548-3702	243.33	48.39	0.01990	8.74	9.86	-17.91	1.25

表 3-2 续上表

	plateifu	RA (J2000) °	Dec (J2000) °	$z$	$\log(M_*)$ ( $M_\odot$ )	$\log(M_{\text{HI}})$ ( $M_\odot$ )	$M_g$ (mag)	$n$
28	8551-1902	234.59	45.80	0.02135	8.79	-	-17.24	3.04
29	8563-3704	242.08	49.80	0.01924	8.65	-	-17.68	1.64
30	8564-1901	239.54	48.30	0.01959	8.80	-	-17.25	1.21
31	8565-6104	242.80	48.33	0.00944	8.57	-	-17.17	1.70
32	8566-6103	113.90	41.96	0.01034	8.64	-	-16.81	0.70
33	8596-6103	230.21	49.51	0.01515	8.58	-	-17.61	0.86
34	8610-1901	258.76	60.22	0.02012	8.86	9.43	-17.35	1.20
35	8615-1901	321.07	1.03	0.01974	8.76	9.64	-18.59	1.25
36	8727-3702	54.55	-5.54	0.02215	8.53	9.54	-17.98	2.38
37	8936-6104	117.93	30.45	0.01424	8.92	9.34	-18.24	3.51
38	8939-3704	125.85	24.67	0.01556	8.73	9.30	-17.19	2.69
39	8944-6104	150.56	34.33	0.02009	8.95	9.42	-17.55	0.97
40	8946-6103	169.36	47.85	0.01575	8.85	9.42	-17.31	0.69
41	8977-12704	116.98	34.04	0.01587	8.83	9.36	-17.91	1.01
42	8981-12705	187.90	36.01	0.00575	8.23	8.13	-15.58	1.37
43	9001-9102	166.62	52.31	0.02143	8.95	-	-17.42	2.07
44	9027-6104	245.69	32.22	0.02209	8.73	9.11	-17.38	1.38
45	9033-1901	222.54	47.32	0.01852	8.83	9.06	-17.58	1.89
46	9093-1902	241.00	27.21	0.02196	8.77	9.27	-17.72	2.14
47	9489-12704	125.00	21.07	0.01410	8.95	8.81	-17.75	1.54
48	9497-9101	116.57	20.75	0.01687	8.73	8.74	-17.26	0.81
49	9505-3702	138.32	29.12	0.02206	8.98	9.58	-17.86	1.27
50	9876-3703	194.92	27.58	0.01671	8.89	-	-17.74	1.69
51	9884-12704	205.39	52.30	0.01507	8.79	9.34	-17.30	0.98
52	9894-9102	251.61	19.77	0.02317	8.82	9.76	-18.71	1.27

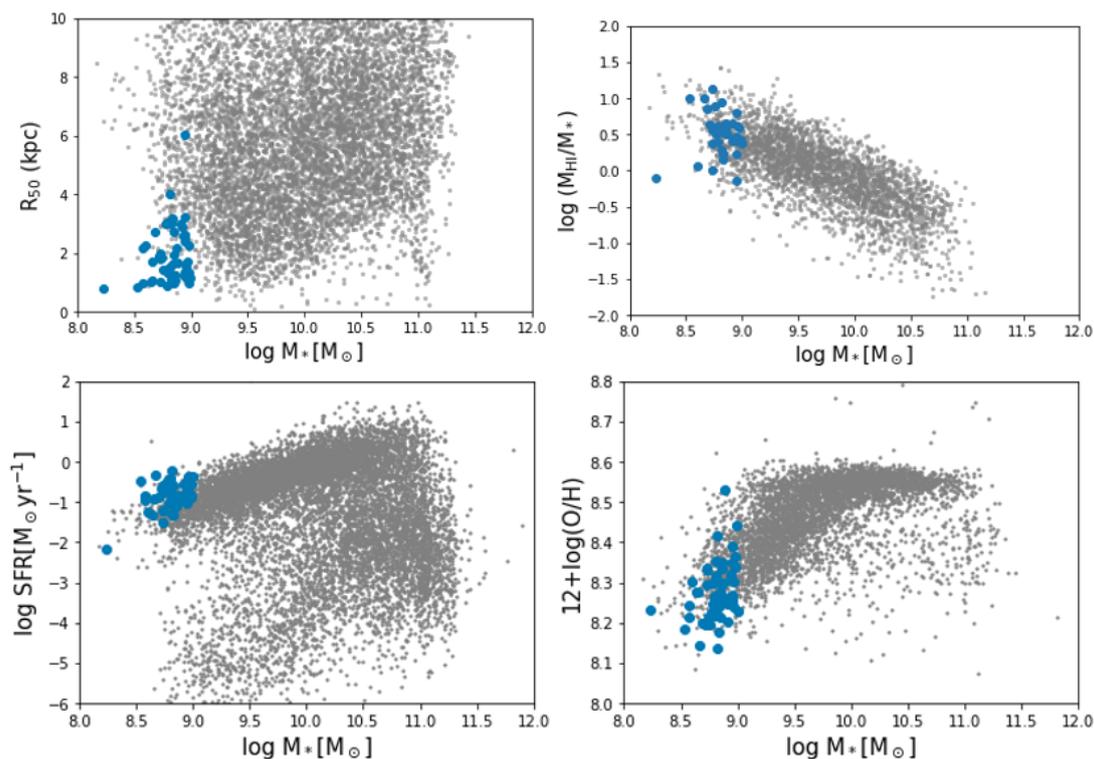


图 3-2 52 个 BCD 星系候选体的物理性质。蓝点为 BCD 星系，灰色点为 MaNGA 项目中的其他星系。

丰度，并在图3-2的下面两张子图展示了 SFR 和恒星质量的关系以及金属丰度和恒星质量的关系。相比于其他小质量星系，BCD 星系的 SFR 略高，金属丰度较低。

对于一个理想的旋转支撑的盘状星系，有规律的旋转运动会导致速度场中出现对称的图案。星系显示不对称的速度场时，表明这些类型的星系含有更强烈的非旋转运动，例如潮汐扰动、中心棒驱动的气体流入、AGN 驱动的气体流出等 (Shapiro 等, 2008; Liu 等, 2013)。基于 IFU 的三维光谱观测，气体速度场较容易获得，这更有助于人们理解星系的非旋转运动 (Bloom 等, 2018)。最近，Feng 等 (2022) 发布了 5353 个 MaNGA 星系中  $H\alpha$  气体速度场的不对称度 ( $V_{asym}$ )， $V_{asym}$  值越大，速度场越不对称，则星系中非旋转运动贡献越高。在图3-3中，我们展示了  $H\alpha$  气体速度场不对称性与恒星质量的关系。蓝色点为 52 个 BCD 星系，黑色点为 MaNGA 中所有星系在不同质量范围内的中值，灰色阴影区域表示不对称性的  $1\sigma$  弥散。我们可以看到大多数 BCD 星系都落在  $1\sigma$  范围内，只有个别几个星系的  $V_{asym}$  值特别高，即速度场极不对称。我们将这六个星系用黑色方框标出，并将其 *gri* 复合图像展示在右侧上层图中。另外，有一个星系的质量很小，

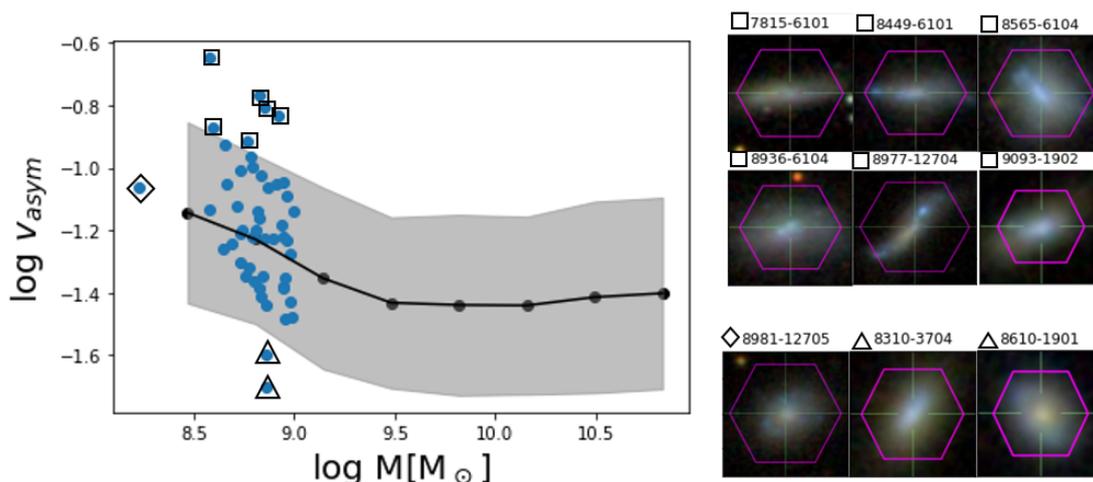


图 3-3  $H\alpha$  速度场的不对称度，蓝色点为 BCD 星系候选体。

其不对称度落在该质量范围的中值附近，我们用菱形框选出 (8981-12705)，并在右侧下层图中展示了其 *gri* 复合图像。还有两个星系的不对称度极小，我们用三角形做了标记，将其复合图像展示在右侧下层后两张图中。上层六张图中可以看到部分星系存在明显的团块结构，在将来的工作中，我们会进一步分析这些速度场的不对称性，从而理解这些星系的运动学性质，例如气体的流入是否与团块的形成有关等。

MaNGA 数据提供了星系不同位置处的光谱数据，因此我们可以结合星族合成的方法和积分视场的特点，分析星系不同位置处的星族年龄，并得到不同星族成分的星系图像。接下来我们将对这些 BCD 星系候选体进行进一步的分析。

### 3.2 BCD 星系的星族合成

星暴星系的光谱中呈现出强烈的星云辐射。在进行光谱拟合时，考虑电离气体的作用对恒星形成区的光谱分析至关重要。据目前研究，强烈的恒星活动或长期高强度 sSFR 会产生大量恒星。虽然恒星活动是一个持续时间很短的现象，仅约为数亿年 (Tosi, 2009; McQuinn 等, 2010)。在星暴星系中，星云发射对光学和近红外发射贡献很大，范围占比在 30%-70% (Krueger 等, 1995)。在 BCD 星系、 $H II$  区以及高红移星系如绿豆星系 (Green Pea) 的能谱分布 (SED) 研究中，都证明了星云发射的影响很明显 (Salzer 等, 1989; Jaskot 等, 2013)。如果研究这些星系的能谱时忽略星云发射，可能会高估年老恒星族的比例 (Izotov 等, 2011)。

### 3.2.1 FADO 星族合成软件

Fitting Analysis using Differential evolution Optimization 拟合软件, 简称 FADO (Gomes 等, 2017), 是一种新型的光谱星族合成工具。它最重要的特点是能够重构恒星形成星系中的星云辐射, 从而自然地引入星云和恒星发射。与目前所有可用的星族合成代码相比, FADO 最重要的创新是: a) 在光谱拟合中包括了星云连续谱发射; b) 观察到的星云特征 (氢的巴尔末发射线的流量和等值宽度, 连续谱的谱型中巴尔末跳变和帕邢跳变) 与最佳拟合恒星模型的恒星形成和化学演化历史之间是一体考虑的。此外, FADO 使用的算法也是其他星族合成方法未采用的。它采用了遗传差分进化优化算法的高级变体形式, 确保快速收敛到帕雷托最优解, 从而使得运行更加高效, 对于大型光谱数据集也具有更好的应用性。FADO 的另一个特点是对最佳拟合的星族分布进行了不确定性分析, 并将结果输出到模型的所有次级产物中, 包括: a) 星系光谱的各种物理和演化特征 (例如, 光度和质量加权的恒星年龄和金属丰度); b) 发射线流量和等值宽度等。

Pappalardo 等 (2021) 探讨了 FADO 和另两种光谱星族合成工具在估计星系演化中的局限性和可靠性, 主要关注平均恒星年龄和平均恒星金属丰度这两个参数。其中, 两种不考虑星云辐射的星族合成工具 STECKMAP 和 STARLIGHT 分别通过不同的方法来模拟恒星形成。STECKMAP 引入惩罚函数对星族模板库的矩阵解进行规范化, 并通过添加高斯爆发来重新产生多种恒星形成事件 (Ocvirk 等, 2006a,b; Iyer 等, 2019)。STARLIGHT 假设有一个给定的消光法和恒星速度的高斯分布, 并用几个年龄和金属度的简单恒星星族 (SSP) 的线性组合来拟合观测光谱 (Cid Fernandes 等, 2005)。他们首先构建了一组同时具有恒星和星云发射的模型星系光谱, 然后利用这三个星族合成工具分别拟合这些模型光谱, 最后比较拟合得到的每条光谱的平均年龄与实际年龄之间的差别。结果表明如果不考虑星云发射而进行拟合, 当星系实际年龄小于 100 Myr 时, STECKMAP 和 STARLIGHT 得到的质量加权的平均年龄会被高估  $\sim 2$  dex, FADO 与他们相比, 拟合得到的平均年龄更接近实际年龄。

### 3.2.2 光谱拟合

我们使用 FADO(v.1B) 来获取选取的 52 个 BCD 星系中共 47001 条光谱的星族分布和发射线信息。参考 Pappalardo 等 (2021) 中使用的 BC03 (Bruzual 等,

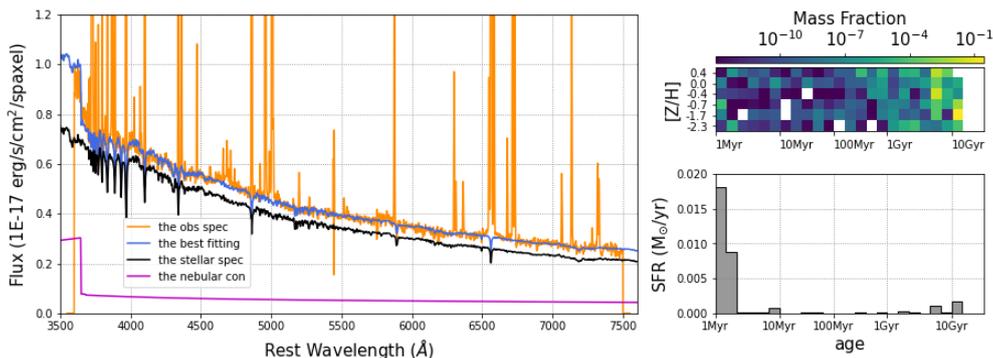


图 3-4 FADO 拟合结果中的一个例子，左边为光谱信息，橙色线为观测光谱。蓝色线为最佳拟合连续谱，包括恒星连续谱（黑色）和星云连续谱（紫色）。右上为 150 条 SSPs 在年龄-金属丰度平面上的恒星质量分数，右下图为恒星形成历史。

2003) 恒星模板, 我们在他们的基础上又添加了两组金属丰度, 共 150 条 SSPs, 分别对应 25 个年龄段 ( $\text{age}=0.001, 0.00209, 0.00316, 0.00501, 0.00661, 0.00871, 0.01, 0.01445, 0.02512, 0.04, 0.055, 0.10152, 0.1609, 0.28612, 0.5088, 0.90479, 1.27805, 1.434, 2.5, 4.25, 6.25, 7.5, 10, 13, 15\text{Gyr}$ ) 和 6 种金属丰度 ( $Z=0.0001, 0.0004, 0.004, 0.008, 0.02$  和  $0.05$ )。另外, 我们采用 Padova 1994 恒星演化轨迹和 Chabrier 初始质量函数。

我们首先对输入 FADO 的光谱进行了银河系消光改正, 色余  $E(B-V)$  由 MaNGA 数据提供, 并采用 Fitzpatrick (1999) 的消光曲线。另外, 我们对光谱进行了红移修正, 使用的是 NASA-Sloan Atlas 星表中的红移 (表 3-1 的第五列)。这些处理过的光谱被称为观测光谱, 在对  $3500 \text{ \AA}$  到  $7500 \text{ \AA}$  的光谱进行拟合时, 我们采用了 FADO 默认的 Calzetti (2001) 的消光曲线。我们在拟合过程中, 不考虑一个星系中邻近 spaxel 光谱之间可能的相关性, 每个光谱的拟合是独立事件。事实上这些 BCD 星系采用 IFU 观测, 从原始观测数据处理到科学分析可用的数据时, 不同 spaxel 中的科学分析数据是有连续性的。将来我们将发展一些方法, 对 IFU 数据光谱进行星族合成时考虑这些 spaxel 之间的相关性。

在图 3-4 中, 我们展示了 FADO 拟合结果的一个示例。其中橙色的光谱为观测光谱, 而最佳拟合光谱 (蓝色) 由恒星和星云的连续谱 (黑色和紫色) 组成, 这些谱都已经受到尘埃消光的影响。右图显示了最佳拟合光谱在年龄-金属丰度平面上的恒星质量分数分布和恒星形成历史 (SFH)。基于该 SFH、BC03 的 SSPs、由 FADO 获取的星系自身  $E(B-V)$  以及 Calzetti (2001) 提供的消光曲线, 我们可以

重建了恒星的连续谱，即左图中的黑色光谱。

### 3.3 BCD 星系的星族分析

#### 3.3.1 平均年龄分布

NASA-Sloan Atlas 星表除了提供  $g$  波段的绝对星等外，还提供了  $NUV$  和  $r$  波段的绝对星等。因此我们可以计算  $NUV - r$  的颜色。我们计算得到 52 个 BCD 星系的  $NUV - r$  颜色的平均值为 1.83 mag，于是我们将这 52 个 BCD 星系分成了两组，一组颜色偏蓝 ( $NUV - r \leq 1.82$ )，共 26 个，另一组颜色偏红 ( $NUV - r > 1.82$ )，共 26 个。

FADO 拟合光谱获得了 47001 条光谱光度加权和质量加权的平均年龄。在图3-5的上层图中我们展示了这些星系的光谱的平均年龄，纵坐标为不同年龄段内光谱数目的占该分类星系总光谱数目的百分比。左图为光度加权的平均年龄，右图为质量加权的平均年龄，蓝色虚线表示颜色偏蓝的星系，橙色实线则为颜色偏红的星系。我们发现这些光谱光度加权的平均年龄主要集中在 1 Gyr-5 Gyr 之间，质量加权的平均年龄则更集中于大于 5 Gyr 的年龄段内。这两张图中，都可以看到平均年龄小于 5 Gyr 的年龄区间内，偏蓝的 BCD 星系占比普遍要大于偏红的 BCD 星系。但是在大于 5 Gyr 的年龄区间内，偏红的 BCD 星系的光谱占比都高于偏蓝的 BCD 星系。

在图3-1中展示的  $gri$  复合图像中，我们看到部分 BCD 星系存在团块状结构，于是我们将这 52 个 BCD 星系分为两组，一组有明显的蓝色团块，另一组的团块并不明显。我们人为挑选出了 18 个有团块的 BCD 星系，剩余的 34 个 BCD 星系则为无团块星系。在图3-5的下层图中同样展示了光谱的平均年龄在有团块星系和无团块星系中的占比，蓝色虚线表示有团块的星系，橙色实线表示无团块的星系。可以看到这两类星系的平均年龄分布与上层子图中的结果类似，而且有团块的星系在平均年龄小于 5 Gyr 的年龄区间的占比，也要普遍高于没有团块的星系，无论是在光度加权的平均年龄（左图）还是质量加权的平均年龄图（右图）中。

#### 3.3.2 星族成分图像

年龄-金属丰度平面上的恒星星族分布使我们能够分离不同年龄区间内的光谱。我们在图3-6中展示了不同年龄段内的光谱。左图为以某条光谱为例，展示

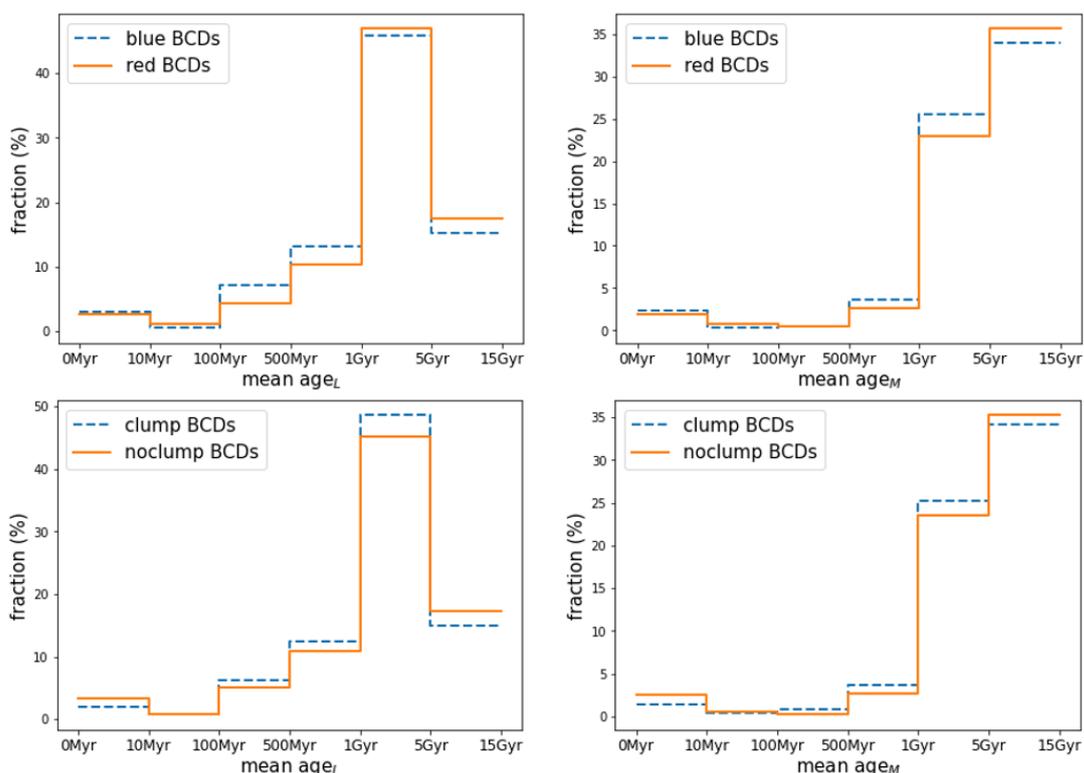


图 3-5 FADO 拟合得到的 52 个 BCD 星系中共 47001 条光谱的平均年龄在不同分类的 BCD 星系中的占比。上层子图将星系根据 52 个 BCD 星系  $NUV - r$  颜色的平均值分为  $NUV - r$  值小于等于平均值的偏蓝星系和  $NUV - r$  值大于平均值的偏红星系。下层子图将 BCD 星系人为分成有团块星系和无团块星系。左列图为光度加权的平均年龄，右列图为质量加权的平均年龄。

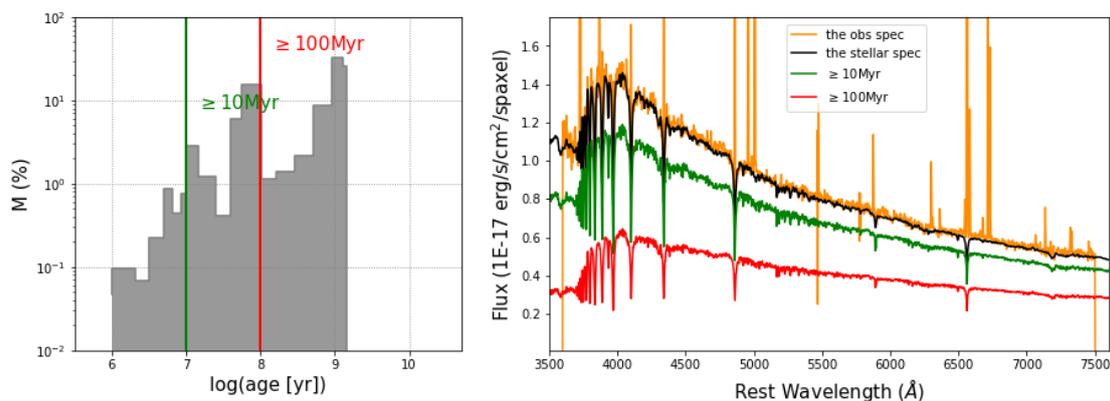


图 3-6 根据 FADO 拟合结果，获得不同年龄段内模型光谱的例子。左图为 SSPs 的质量分数，右图橙色线为观测光谱，黑色线为恒星连续谱，绿色和红色分别为尘埃衰减后  $\geq 10$  Myr 和  $\geq 100$  My 的模型光谱。

了其不同年龄的恒星成分质量占比，右图为光谱信息。橙色为观测光谱，黑色为恒星连续谱。我们选取出年龄  $\geq 10$  Myr 和  $\geq 100$  Myr 的 SSPs，根据这些 SSPs 的质量分数，结合 FADO 获得的 E(B-V) 和 Calzetti (2001) 的消光曲线，分别还原出尘埃消光后年龄  $\geq 10$  Myr 和  $\geq 100$  Myr 的模型光谱，如图中绿线和红线所示。接着，我们使用 Python 代码 sedpy (Johnson, 2019) 将尘埃消光后的模型光谱卷积  $g$  波段滤波片获得了模型光谱的  $g$  波段流量，并以 nanomaggy 作为流量单位来构建  $g$  波段图像。最终，我们得到了这些星系不同年龄段内的  $g$  波段图像。

在图3-7中，我们展示了 BCDs 样本的  $g$  波段观测图像（每两行中的上行）和  $\geq 100$  Myr 的中等至年老星族的图像（每两行中的下行），所有图像的颜色棒范围都是从 20 mag 到 25mag。相比于观测图像，大多数星系的  $\geq 100$  Myr 图像看上去结构都变得更加平滑对称了。最明显的是那些  $gri$  复合图像中有偏心团块的星系，在观测图像中其结构有向团块延展的趋势。例如 7960-3704 在星系南面有两个明显的蓝色团块，在观测图像中也可以看到整体结构有向南延伸的趋势，但是在  $\geq 100$  Myr 的图像中这个趋势就不明显了，星系图像更加对称。这可能是因为在  $\leq 100$  Myr 的某个时间点形成的。更明显的例子是 8313-1901。在观测时刻看到了 NE 团块，观测图像中我们看到星系存在 NE 团块，经上一章分析我们认为该星系的 NE 团块形成时间约是 7 Myr，而对于星系  $> 7$  Myr 的图像理论上应该看不到 NE 团块。事实也确实如此，从  $\geq 100$  Myr 的图像中也确实没有看到这样不对称的结构在，这也反应了 NE 团块的年龄应该要小于 100 Myr。对于  $gri$  复合图像中没有明显偏心团块的星系，其不同时刻的结构变化并不明显。这些结构变化特征，我们将在以后的工作中继续研究。

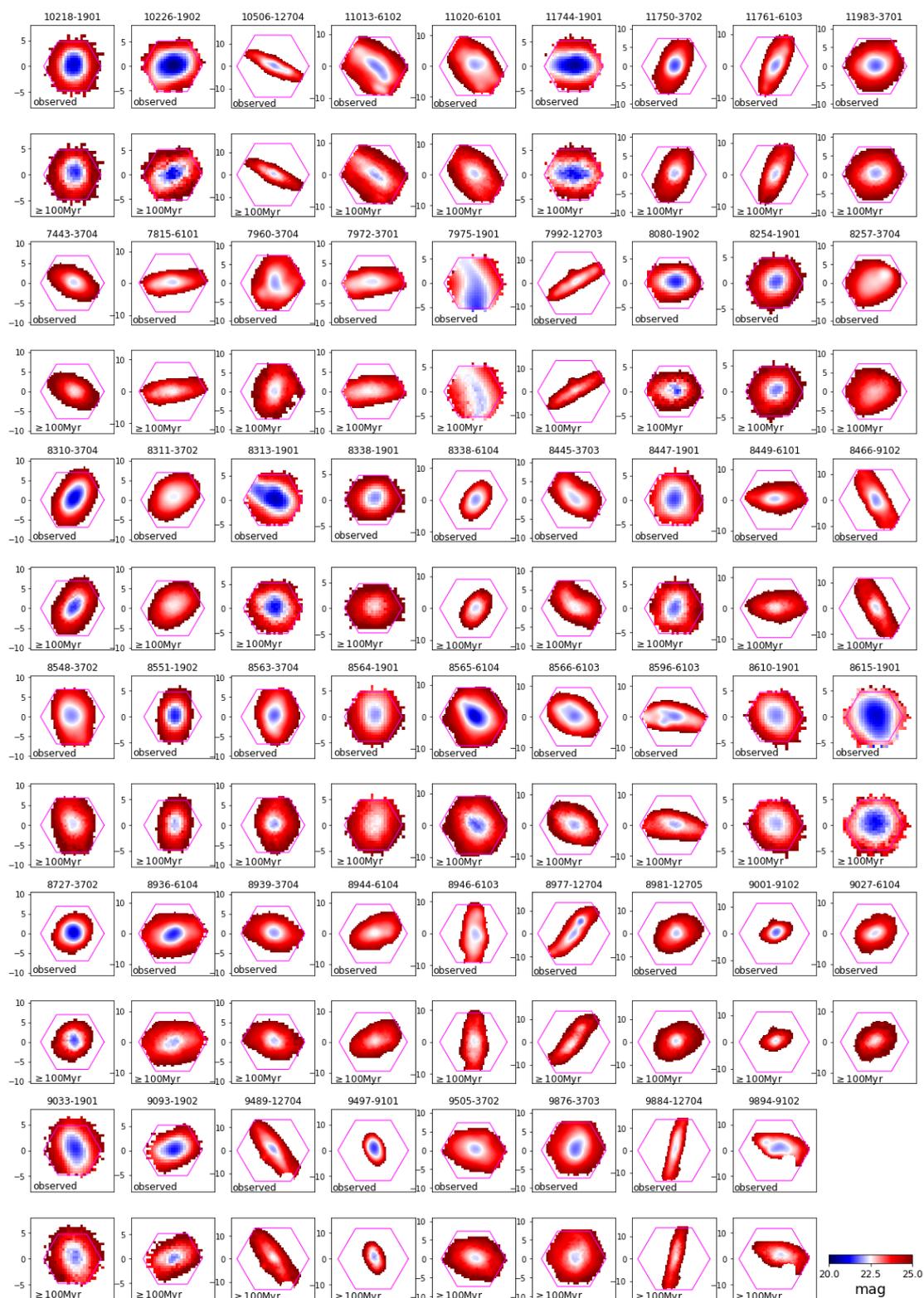


图 3-7 BCD 星系的  $g$  波段观测图像和  $\geq 100$  Myr 的图像，颜色棒都为 20 至 25mag。每个星系上层图像为观测图像，下层图像为  $\geq 100$  Myr 的中等至年老星族的图像

### 3.4 BCD 星系的发射线分析

FADO 的次级产物中提供了发射线的流量，这使得我们可以像 8313-1901 一样计算这 52 个 BCD 星系的 SFR 和气相金属丰度。为了计算其物理特性，我们选择了具有  $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 $[O\text{ III}]\lambda 5007$  和  $[N\text{ II}]\lambda 6584$  的流量信噪比都高于 5 且属于 BPT 图中恒星形成区域的 spaxels。由于这些发射线的流量已经在 FADO 拟合中进行了消光改正，因此我们直接使用公式 2-1 进行计算 SFR；类似地，金属丰度的计算也采用公式 2-2。

从 FADO 的结果中，我们还可以获得每个 spaxel 中光谱的恒星质量。因此，在图 3-8 的左图中，我们展示了这些恒星形成区域的 spaxel 的局部金属丰度与恒星质量面密度密切相关（称作  $\Sigma_* - Z$  关系；Rosales-Ortega 等 (2012); Barrera-Ballesteros 等 (2016)），其中颜色棒表示 spaxel 的数密度。在这张图中，灰色线表示 MaNGA 观测数据中所有恒星形成区内 spaxel 的  $\Sigma_* - Z$  关系。他们的质量和气体发射线流量是从 MaNGA pipe3D (V3.1.1)(Sánchez 等, 2016b,a) 中获得的，金属丰度也是通过公式 2-2 计算得到的。我们可以看到，BCD 星系候选体主要落在贫金属区域。但值得注意的是，在这张图中，我们并未标记出星系整体质量分布的情况。实际上，在前人研究  $\Sigma_* - Z$  时已经发现，小质量星系的金属丰度相比大质量星系要低，因此，对于 BCD 星系候选体，但其局部金属丰度是否更低，我们需要在未来的研究中继续探讨。

局域金属丰度与局域气体分数和局域逃逸速度相关，这在包含吸积和外流的简单化学演化模型中是可以预期的 (Barrera-Ballesteros 等, 2018)。例如 8313-1901 的 NE 团块就出现了明显的金属丰度降低且强恒星形成增强的现象，具有相似特征的贫金属星系也被其他工作发现并观测过 (Sánchez Almeida 等, 2015)。从观测结果来看，似乎存在这样一种趋势：具有较大 SFR 的恒星形成区拥有较低的金属丰度 (Cresci 等, 2010; Richards 等, 2014; Sánchez Almeida 等, 2008)。这些金属丰度的下降通常归因于最近的气体吸积事件引发的恒星形成。

在图 3-8 的右图中，我们展示了恒星形成面密度与恒星质量面密度关系（称作  $\Sigma_* - \Sigma_{SFR}$  关系；Sánchez 等 (2013); Cano-Díaz 等 (2016)），图中颜色棒也表示 spaxel 的数密度，黑色线为 Cano-Díaz 等 (2016) 中得到  $\Sigma_* - \Sigma_{SFR}$  关系的拟合线。 $\Sigma_*$  和  $\Sigma_{SFR}$  在很多的工作中也发现存在很强的相关性 (Cano-Díaz 等, 2016)。从我们的图中也可以看到数密度高的区域与黑线几乎平行，而且 MaNGA 中的

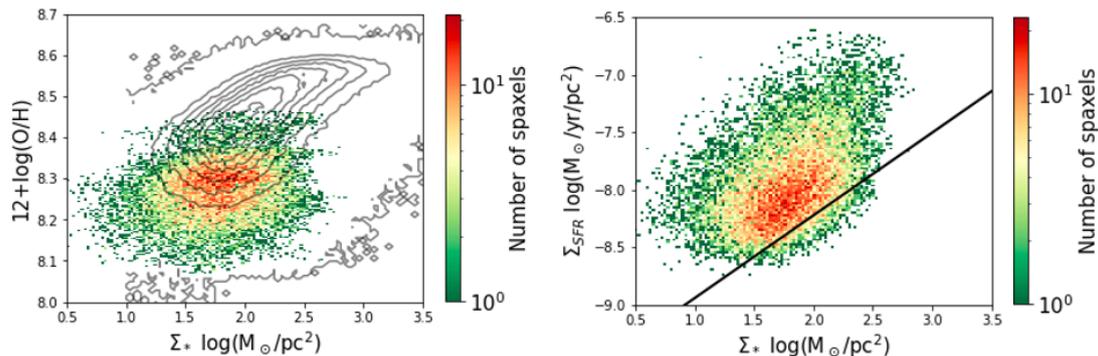


图 3-8 左图:  $\Sigma_*$  -  $Z$  关系, 颜色棒表征数密度。灰色数密度轮廓图为 MaNGA 中所有恒星形成区的 spaxel 的  $\Sigma_*$  -  $Z$  关系。右图:  $\Sigma_*$  -  $\Sigma_{SFR}$  关系, 颜色棒表征数密度。黑色线为 [Cano-Díaz 等 \(2016\)](#) 工作中对此关系的拟合线。

BCD 星系样本  $\Sigma_{SFR}$  比黑色拟合线高, 也就意味着 BCD 星系在同样的恒星质量面密度情况下, 恒星形成面密度更大。结合左图中  $\Sigma_*$  -  $Z$  关系, 这与恒星形成较强并伴随金属丰度降低的趋势相似。在将来的工作中我们会与 MaNGA 中的其他星系相比较, 并更细致地讨论这些性质之间的相关性。

事实上, 现在有越来越多的证据表明, 恒星质量、金属丰度和 SFR 之间的整体关系 ( $M_* - Z - SFR$ ) 可能来自局部尺度的关系 ( $\Sigma_* - Z - \Sigma_{SFR}$ ) ([Sánchez 等, 2013](#); [Cano-Díaz 等, 2016](#); [Hsieh 等, 2017](#))。虽然星系整体的  $M - Z$  关系与 SFR 之间的依赖关系 (即 fundamental metallicity relation, FMR) 已经基本明确, 但是局部的  $\Sigma_* - Z$  与  $\Sigma_{SFR}$  之间的关系虽然有很多工作试图研究找到结论, 但目前都还没有定论。[Barrera-Ballesteros 等 \(2016\)](#) 利用 MaNGA 数据发现  $\Sigma_* - Z$  与 sSFR 之间只有很弱的相关关系, 但是 [Sánchez-Menguiano 等 \(2019\)](#) 也利用 MaNGA 数据, 通过研究  $\Delta SFR - \Delta Z$  的斜率和各种星系参数之间的关系, 发现  $\Sigma_*$ 、 $Z$  与  $\Sigma_{SFR}$  之间存在与 FMR 类似的反相关关系。

我们利用 MaNGA DAP 数据提供的每个 spaxel 与星系中心的椭圆距离, 得到这些 BCD 星系的 sSFR 和金属丰度径向分布。然后对这些径向分布数据进行线性拟合, 得到 sSFR 径向分布斜率和金属丰度径向分布斜率。我们在图3-9中展示了这两个斜率的相关性, 并用线性拟合, 在图中为黑线表示。我们发现这些斜率呈现出很好的线性负相关关系。这样的相关性可能与  $\Sigma_*$ 、 $Z$  与  $\Sigma_{SFR}$  之间的关系有一定的关联, 我们将在今后的工作中更加细致地分析。值得注意的是, 在图3-9的右图中, 颜色棒展示了 BCD 星系的 H I 气体百分含量。在 52 个 BCD 星

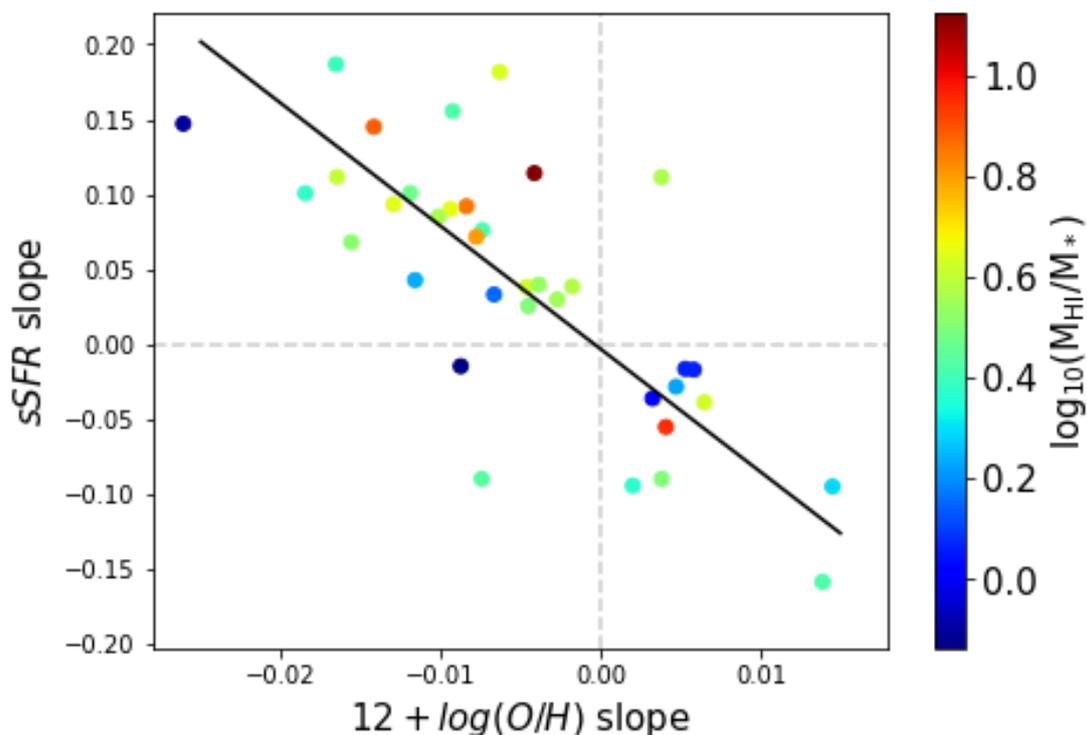


图 3-9 金属丰度梯度斜率和 sSFR 梯度斜率关系，颜色棒表示 H I 气体百分含量。

系中，并没有发现斜率关系的变化与 H I 气体百分含量之间明显的关系。今后的工作中，我们还将对 H I 气体展开深入分析讨论。

### 3.5 小结

我们从 MaNGA MPL-11 版本的数据中，通过其蓝、致密、矮的三个特点，利用 NASA-Sloan Atlas 星表提供的椭圆 Petrosian 系列参数，共筛选出 52 个 BCD 星系候选体。这些星系有的有明显的偏心蓝色团块，但是也有一部分 BCD 星系颜色相对而言偏红，且有些星系几乎是侧向的。从 NASA-Sloan Atlas 星表中提供的  $R_{50}$  数据中可以看到，BCD 星系为矮星系中尺寸偏小的一类。MaNGA 项目组提供了一批不同范围内的星系发射线流量信息。我们采用了一倍有效半径内的发射线流量计算每个 BCD 星系的 SFR 和金属丰度。这些星系的 SFR 在小质量星系中属于偏高的一类，但是金属丰度在小质量星系中并没有明显的偏低，虽然相比于大质量星系来说，这些 BCD 星系金属丰度更低。

BCD 星系具有很强烈的恒星形成，因而在星族合成时需考虑星云发射的影响，从而避免高估年老星族成分。FADO 是一款新颖的星族合成软件，它在拟合时自洽地考虑了星云发射，包括星云连续谱和发射线。我们用 FADO 拟合 BCD

星系中每个 spaxel 内的光谱，拟合时并没有考虑相邻 spaxel 之间的关系，都是独立拟合的。参考了 FADO 提供 SSPs 模板，我们又额外增加了两组贫金属丰度的 SSPs 模板，最终从 BC03 的模板库中选取了 150 条 SSPs 参与拟合。

FADO 共拟合了 52 个星系中 47001 条连续谱信噪比大于 3 的光谱，其平均光度加权的平均年龄主要分布在 1 Gyr-5 Gyr 之间，质量加权的平均年龄则大于 5 Gyr。从 FADO 拟合得到的星族分布，我们可以重构出不同年龄段内的光谱。结合 IFU 的特点，我们就可以构建出星系在不同年龄段内的图像。通过分析不同年龄段内的结构变化，可帮助我们理解 BCD 星系的寄主星系演化历程。我们构建了  $\geq 100$  Myr 的  $g$  波段图像，相比于  $g$  波段观测图像，这些中等至年老星族构建的图像更加对称。尤其是当星系有偏心团块时，如果团块形成时间晚于 100 Myr (例如 8313-1901)，则可以看到结构上明显的区别，观测时刻的图像会出现明显的子结构，但是在  $\geq 100$  Myr 的图像中子结构并不明显，甚至没有。在将来的工作中，我们会对这些星系的寄主星系结构演化做更深入的研究。

从 FADO 拟合得到的发射线流量，我们可以计算出每个 spaxel 内的金属丰度，即得到局域金属丰度。局域金属丰度与恒星质量面密度有着密切关系 ( $\Sigma_* - Z$  关系)，在前人很多工作也已经证实了，而且星系整体的  $MZ$  关系有可能是  $\Sigma_* - Z$  关系的积分效果。我们发现相对于大质量星系而言，BCD 星系的局域金属丰度主要落在贫金属段。但是与矮星系之间的关系，目前还不清楚，我们会在将来的工作中对这方面问题进行更细致地研究。星系整体的质量-金属丰度-SFR 关系已经基本明确了，但是局域的相关性目前还没有定论。我们计算了这些 spaxel 中的 sSFR，并得到他们的径向分布。对 sSFR 的径向梯度和金属丰度的径向梯度分别做线性拟合，得到其梯度的斜率。我们发现这些 BCD 星系两个参数的梯度斜率关系图中，两者斜率呈负相关，例如当金属丰度随半径降低时，sSFR 随半径增加；当金属丰度随半径升高时，sSFR 随半径降低。这样的关系可能与  $\Sigma_* - Z$  有关。而且通过检查这些星系的  $H_I$  气体百分含量，气体百分含量与斜率变化之间没有明显的关系。在将来的工作中，我们会更详细地分析 BCD 星系的  $\Sigma_* - Z$  关系，以及金属丰度斜率与 sSFR 斜率和  $H_I$  气体之间的关系。

从  $\geq 100$  Myr 的  $g$  波段图像中，仍有部分星系可观测到团块状结构，这可能与团块的形成时间有关。在下一章中，我们选取了五个有偏心团块的 BCD 星系，通过其化学性质和不同年龄段内的结构变化，来获得团块的形成时间和形成原

因，以及寄主星系的演化过程。

## 第4章 五个BCD星系寄主星系结构演化和团块性质

在上一章中，我们使用 FADO 星族合成软件对 BCD 星系的光谱进行拟合，获得了 MaNGA 中 BCD 星系观测时刻和  $\geq 100$  Myr 的  $g$  波段图像。研究发现在这两个时间段内星系图像存在显著的差异，总体而言， $\geq 100$  Myr 的图像比观测时刻的图像更加对称，尤其是那些在  $gri$  复合图像中出现明显偏心的蓝色团块的星系，上述现象更加突出。这一现象非常有趣，使我们意识到可能能够通过星系结构的变化来研究团块可能的形成时间和寄主星系结构的演化。在本章中，我们从 BCD 星系候选体中随机选择了五个具有偏心团块的源，包括 8313-1901，分析了它们的结构变化及物理性质。

### 4.1 具有团块图像的代表性星系介绍

我们从 52 个 BCD 星系候选体中选择了具有不同团块形态的五个 BCD 星系，包括在第二章中深入研究的 8313-1901。在图4-1的第一列中，我们展示了这五个星系的 SDSS  $gri$  复合图像，洋红色的六边形标记了 MaNGA 巡天不同光纤束的覆盖范围。这些星系的团块相似但不完全相同。8257-3704 在西北方向有一个明显团块， $gri$  复合图像覆盖了  $22'' \times 22''$  ( $9.23 \text{ kpc} \times 9.23 \text{ kpc}$ )。8313-1901 有一个大团块， $gri$  复合图像覆盖了  $17'' \times 17''$  (相当于  $8.58 \text{ kpc} \times 8.58 \text{ kpc}$ )。8563-3704 的南北两端有两个蓝色团块，它们的边界不像前两个源那样清晰，该星系的  $gri$  复合图像覆盖范围是  $21'' \times 21''$  ( $8.38 \text{ kpc} \times 8.38 \text{ kpc}$ )。8615-1901 有一个覆盖整个星系的蓝色团块，8615-1901 的  $gri$  复合图像范围为  $16'' \times 16''$  ( $6.55 \text{ kpc} \times 6.55 \text{ kpc}$ )。9894-9102 有一连串的多团块，这些团块位置接近，而不是像 8563-3704 那样两个团块分布在星系的南北两端，该星系的  $gri$  复合图像覆盖了  $32'' \times 32''$  ( $15.43 \text{ kpc} \times 15.43 \text{ kpc}$ )，是五个 BCD 星系中视场最大的。表4-1列出了这些星系的坐标、红移、恒星质量、 $\text{H I}$  气体质量、 $g$  波段绝对星等、 $NUV - r$  颜色和环境信息。星系的坐标和红移都由 NASA-Sloan Atlas 星表提供。第五列的恒星质量、和  $g$  波段绝对星等为 NASA-Sloan Atlas 星表中椭圆 Petrosian 系列参数之一。 $NUV - r$  颜色则根据 NASA-Sloan Atlas 星表中椭圆 Petrosian 参数中  $NUV$  和  $r$  波段绝对星等计算而得。第六列的恒星质量由 MPA-JHU 星表提供，该星表参数根据 SDSS

表 4-1 五个星系的基本信息

plateifu	RA (J2000)	Dec (J2000)	redshift <sup>a</sup>	$\log(M_*)^a$ ( $M_\odot$ )	$\log(M_*)^b$ ( $M_\odot$ )	$\log(\text{MH}_1)^c$ ( $M_\odot$ )	$M_g^a$ (mag)	$NUV - r^d$	environment <sup>d</sup>
8257-3704	165.5536	45.3039	0.0202	8.72	-	9.36	-17.19	2.76	group (N=3)
8313-1901	240.2871	41.8807	0.0243	8.88	9.28	9.37	-18.52	1.40	isolated
8563-3704	242.0838	49.8007	0.0192	8.65	8.79	-	-17.57	1.70	isolated
8615-1901	321.0722	1.0284	0.0197	8.76	8.95	9.64	-18.59	1.30	isolated
9894-9102	251.6052	19.7696	0.0232	8.82	-	9.76	-18.71	1.99	isolated

Notes: <sup>a</sup> the NASA-Sloan Atlas catalog: <http://www.nsatlas.org>

<sup>b</sup> The MPA-JHU catalog ([Kauffmann 等, 2003b](#))

<sup>c</sup> [Masters 等 \(2019\)](#); [Stark 等 \(2021\)](#)

<sup>d</sup> [Zheng 等 \(2022\)](#)

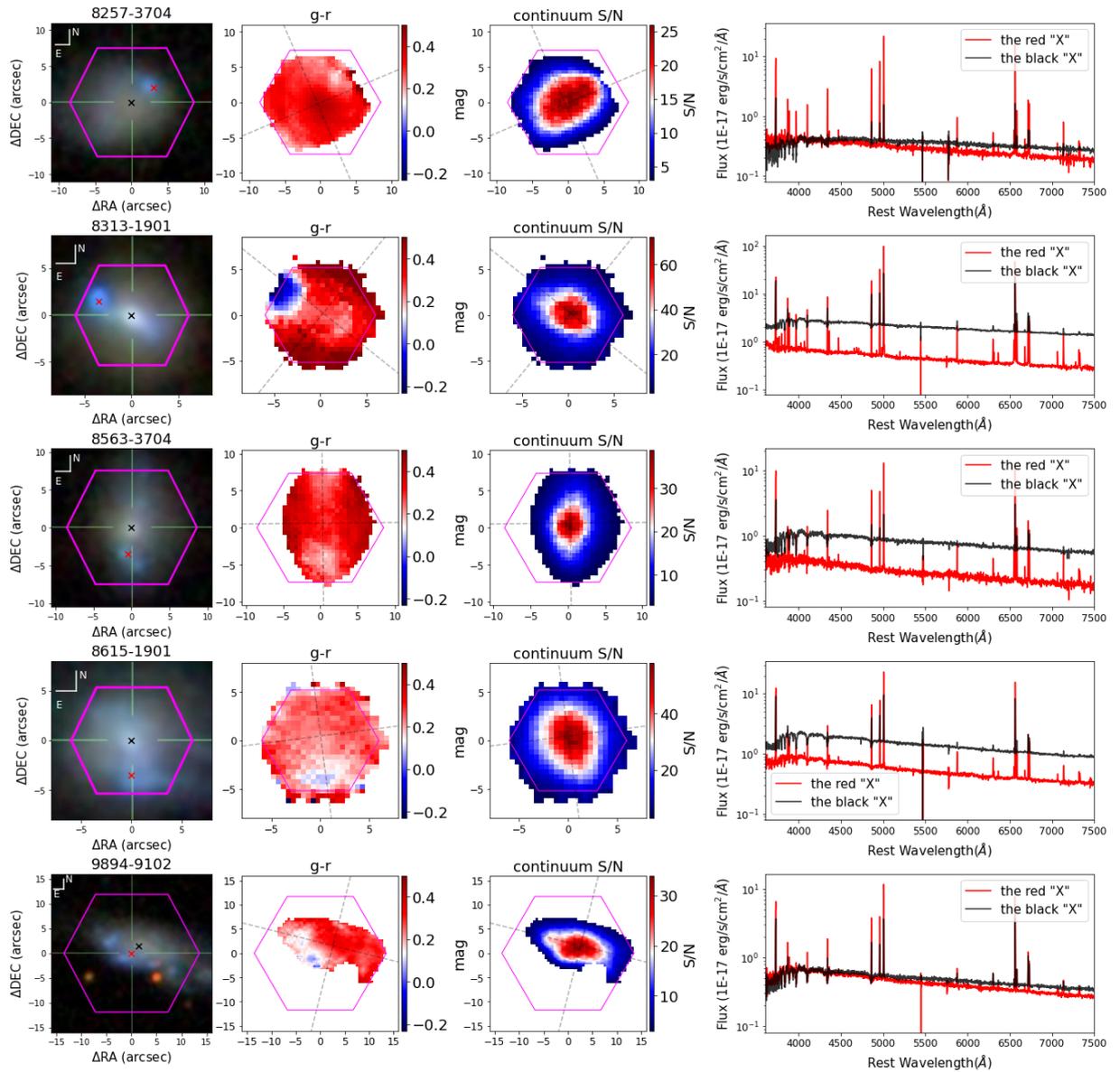


图 4-1 五个 BCD 星系的  $gri$  图像、光谱合成  $g-r$  颜色图像、连续谱 ( $\lambda < 7500\text{\AA}$ ) 信噪比图像和两个代表位置处光谱。从上至下分别为 8257-3704、8313-1901、8563-3704、8615-1901 和 9896-9102。最后一列中红色光谱选取  $gri$  图像 (第一列) 中红色斜十字交叉点处, 表征星系中特征团块位置的光谱, 黑色光谱选取黑色斜十字交叉点处的 spaxel, 表征星系中心的光谱

观测得光谱信息计算而得 (Kauffmann 等, 2003b)。MaNGA 项目组使用 GBT 观测了一批星系的 H<sub>I</sub> 气体, 并从 ALFALFA 项目中收集到了部分 MaNGA 星系的 H<sub>I</sub> 气体信息, 最终汇总得到了 3669 个星系的 H<sub>I</sub> 气体星表, 表格4-1中 H<sub>I</sub> 气体质量则由该星表提供。星系环境则是通过星系投影在天球上最小包络圆的 3 倍张角半径内有没有其他的星系来确定, 该信息由 Zheng 等 (2022) 提供的星表获得。

在图4-1的第二列中, 我们展示了 MaNGA 给出的利用这五个 BCD 星系 IFU 光谱合成的  $g-r$  颜色二维分布图, 其星等为利用观测光谱卷积滤波片计算得出。我们发现, 团块区域的颜色比星系其他区域更加蓝色, 这一点也可以从图4-1的第一列  $gri$  三色图中看出。灰色虚线表示星系的主轴和次轴, 这是在寄主星系进行二维面亮度轮廓拟合后 (4.3.2节) 得出的方位角。在本章其他二维图像中如果不特殊标明, 其灰色虚线都代表星系的主次轴。连续谱 ( $\lambda < 7500\text{\AA}$ ) 信噪比中位值显示在图4-1中的第三列, 在星系中心光谱信噪比有的可以达到几十。这两列图像中都只展示了连续谱信噪比大于 3 的 spaxels, 可以看到这些 spaxels 覆盖在观测视场中占比并不小, 这些信噪比大于 3 的 spaxels 内的光谱都参与后续的光谱拟合。在第四列中, 我们展示了星系中两个 spaxels 的光谱, 分别标记为  $gri$  图像中的红色和黑色斜十字叉点。红色斜十字叉点标记团块位置, 黑色斜十字叉点表示星系中心。从光谱数据中可以看出部分星系这两个位置的连续谱谱型有显著差别。

## 4.2 星族合成及金属丰度分析

### 4.2.1 光谱拟合

对这五个星系我们使用 FADO(v.1B) 软件重新拟合其光谱。与上一章相比, 主要对恒星模板库中的年龄选择进行了调整。由于 BCD 星系具有很强的星暴, 所以在选择 SSPs 年龄分布时, 我们选择了更多的年轻星族。初始质量函数不再采用第三章中使用的 Chabrier 初始质量函数, 而是采用恒星形成时小质量恒星比例较大的 Salpeter 初始质量函数。我们依旧选用 BC03 (Bruzual 等, 2003) 的模板库, 并从基于 Padova 1994 恒星演化轨迹得到的 SSPs 模板库中选取了 96 条 SSPs, 其中包括 16 个不同年龄 (age = 1 Myr, 3.02 Myr, 5.01 Myr, 6.92 Myr, 10.00 Myr, 30.00 Myr, 50.00 Myr, 71.87 Myr, 101.52 Myr, 321.03 Myr, 508.80 Myr, 718.70 Myr, 1.01519 Gyr, 5 Gyr, 10 Gyr 和 15 Gyr) 和 6 种金属丰度 ( $Z=0.0001$ ,

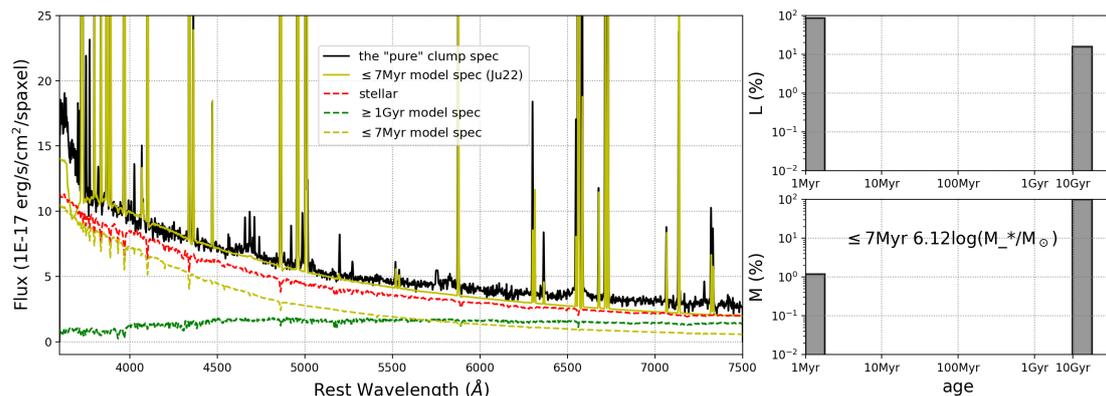


图 4-2 8313-1901 中“纯”NE 团块采用 FADO 软件的拟合结果。

0.0004, 0.004, 0.008, 0.02 和 0.05)。

在第二章中，我们分析了 8313-1901 中的 NE 团块可能主要是由于气体吸积诱发恒星形成所致。在本节中，我们用 FADO 软件来拟合“纯”NE 团块的光谱（已改正了银河系尘埃消光，参考 2.4 节），以对比第二章中得到的星族结果。拟合波长的范围为  $3500 \text{ \AA}$  到  $7500 \text{ \AA}$ ，利用 Calzetti (2001) 消光曲线进行消光改正后，由 FADO 进行星族成分拟合。在图 4-2 中，黑色光谱表示“纯”NE 团块的光谱（同图 2-8 中的黑色光谱），黄色光谱为 2.4 节中构建的 Prospector 年轻模型光谱（年龄  $\leq 7 \text{ Myr}$ ），而红色光谱则为 FADO 所拟合的最佳恒星连续谱。去除了寄主成分后，“纯”NE 团块光谱显示出非常年轻的特征。“纯”NE 团块的光谱与 Prospector 年轻模型光谱非常相似，该模型光谱包含了恒星和星云辐射。

图 4-2 的右侧则揭示了各个年龄的星族成分在光度（上）和质量（下）的贡献百分比。从右图中星族分布中看出该光谱主要由两个年龄成分组成，一个为  $\text{age} = 1 \text{ Myr}$  年轻星族，另一个为大于  $10 \text{ Gyr}$  的 SSPs 的年老星族。因此我们基于 FADO 的星族分析结果将恒星谱分解为两条光谱，一条为年老光谱（绿色虚线，年龄  $\geq 1 \text{ Gyr}$ ），另一条为年轻光谱（黄色虚线， $\leq 7 \text{ Myr}$ ）。总的来说，FADO 获得的恒星连续谱的谱型也显示出较年轻的特征。从分出的两条年轻和年老光谱中可以看出（分别表示为黄色虚线和绿色虚线），年轻星族在蓝波段上占主导地位，在红波段上，年老星族产生了比年轻星族更多光。

Prospector 年轻模型光谱（如图 4-2 中的黄线所示）与“纯”NE 团块光谱在误差范围内似乎还存在一些系统偏差。这种偏差被 FADO 拟合为一个年老星族成分，这些年老星族与 2.4 节用太阳丰度  $10 \text{ Gyr}$  的 SSP 来估计的年老星族相似。值

得注意的是, FADO 中年轻光谱的质量 ( $\log(M/M_{\odot})=6.12$ ) 与 Prospector 年轻模型光谱的质量 ( $\log(M/M_{\odot})=6.26$ ) 非常接近。可以看出, 以 8313-1901 为例, FADO 拟合结果及其选用的 SSPs 是合理的。我们对这五个星系每个 spaxel 内的光谱都做类似的拟合。

同上一章一样, 我们将 MaNGA 每个 spaxel 内的光谱, 修正银河系消光 and 红移, 并称之为观测光谱。在图4-3中, 我们展示了针对这五个星系 FADO 拟合结果。从上至下分别为 8257-3704、8313-1901、8563-3704、8615-1901 和 9894-9102 中的各选取团块位置处的一条光谱拟合结果。其中橙色的光谱为观测光谱, 最佳拟合的连续谱在图中由蓝色线所示, 该连续谱由恒星和星云的连续谱 (黑色和紫色分别表示) 组成, 并引入了尘埃消光 Calzetti (2001) 的影响。右图显示了最佳拟合光谱在年龄-金属丰度平面上的恒星质量分数分布和恒星形成历史 (SFH)。

#### 4.2.2 五个 BCD 星系的发射线性质

同样的, FADO 拟合同时给出了发射线的流量 (参考3.4节)。我们利用 FADO 拟合得到的  $H\alpha$  等发射线结果, 结合公式2-1和公式2-2分析这五个 BCD 星系的 SFR、金属丰度和气体运动特征等。首先我们选择了具有  $H\alpha$  谱线信噪比高于 15 且属于 BPT 图中恒星形成区域的 spaxels, 来分析他们的物理特征。

SFR 的二维分布展示在图4-4的第一列中。这些星系至少存在一个偏离星系中心的高恒星形成区。我们以 SFR 最高的 spaxel 为圆心, 用直径为  $2.5''$  的黑色圆圈标记高恒星形成区域。对于 8563-3704 和 9894-9102 这两个星系, 我们不止看见了一个偏离星系中心的高恒星形成区, 因此, 对于次高的恒星形成区我们用  $2.5''$  的橙色圈表示。在 9894-9102 中, 除了黑色圈和橙色圈标记出的恒星形成区, 我们还可以看到第三个高恒星形成区, 对于第三个区域, 我们用红色圈标记。我们发现这些高恒星形成区与图4-1中第一列 *gri* 复合图像中呈现的偏离星系中心的蓝色团块位置都十分接近。气相金属丰度图在图4-4的第二列中展示金属丰度的径向分布展示在第三列中, 其距离是根据在下一小节中拟合寄主星系的参数计算得到的。在金属丰度二维图中, 我们也标记了这些高恒星形成区的位置, 以及在径向分布上将不同颜色圈内的 spaxels 都根据其颜色标记成不同颜色的点。我们可以看到这些高恒星形成区 (黑色圈、橙色圈和红色圈) 都呈现出贫金属的特征。值得注意的是, 8615-1901 的北部有一片低金属丰度区域, 但是它没有展示出高的 SFR。图4-4的第四列显示了从 MaNGA 的 DAP 数据中获取

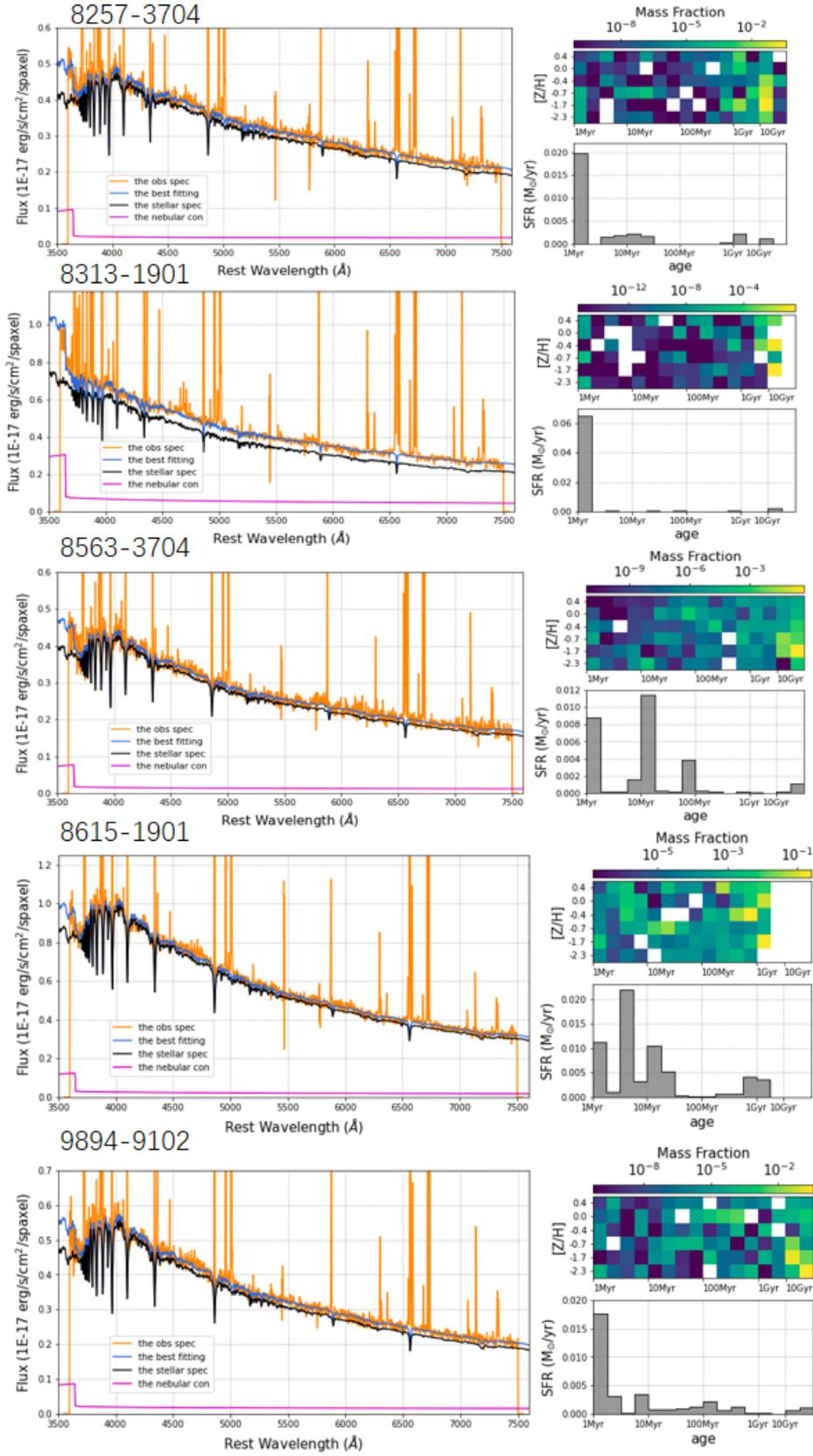


图 4-3 针对五个星系 FADO 拟合结果示例，每个星系均展示一条团块处光谱的拟合，左边为光谱信息，右侧为星族信息。

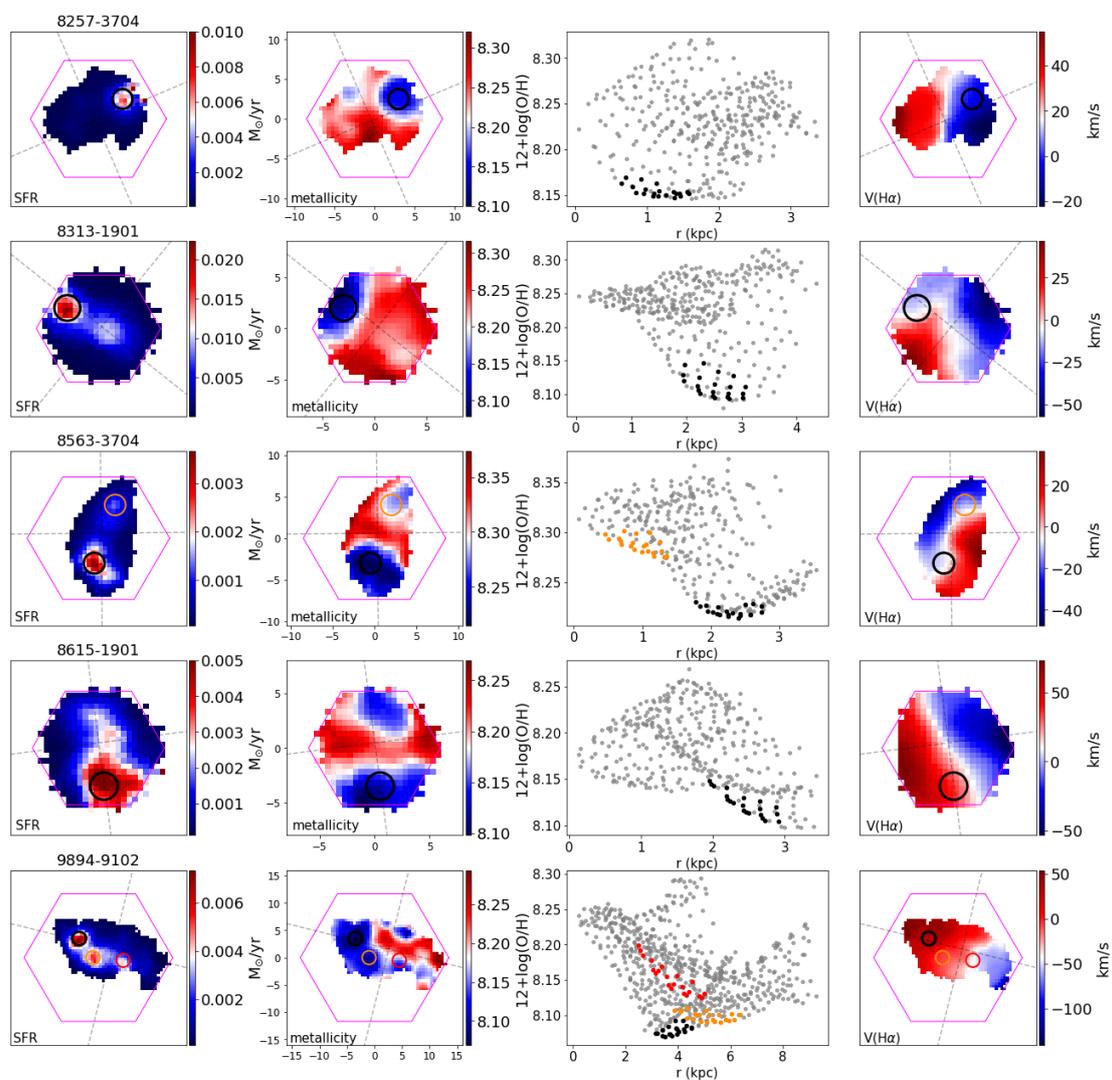


图 4-4 五个星系的气相金属丰度、金属丰度径向分布、SFR 和  $H\alpha$  速度场。不同颜色的圈和点代表星系中 SFR 高的区域。金属丰度和 SFR 通过 FADO 拟合得到的发射线流量计算获得， $H\alpha$  速度场由 MaNGA DAP 数据提供。

的  $H\alpha$  气体速度图。这些星系基本上都能看到有一个旋转盘主导的速度场，但是在团块的位置存在扰动，这可能和气体吸积有关。

### 4.3 寄主星系结构演化

#### 4.3.1 不同年龄区间内图像

FADO 得到的年龄-金属丰度平面上的恒星星族分布使我们能够分离不同年龄区间内的光谱。我们选择了四个年龄区间：年轻 (0, 10 Myr]，中等-年轻 (10 Myr, 100 Myr]，中等-年老 (100 Myr, 1 Gyr) 和年老 [1 Gyr, 15 Gyr]，并使用 FADO 获得的  $E(B-V)$  和 Calzetti (2001) 的消光曲线，将尘埃消失后的模型光谱重构出来。此外，我们使用 Python 代码 `sedpy` (Johnson, 2019) 计算出每个 spaxel 中的消光后的模型光谱的  $g$  波段流量，并以 `nanomaggy` 作为流量单位来构建  $g$  波段图像。最终，我们得到了五个星系在四个年龄区间内的  $g$  波段图像，如图4-5所示。

为更好地比较这五个星系在不同年龄段内的图像，我们在图4-5中也展示了观测光谱的  $g$  波段图像（第一列）和 FADO 提供的恒星连续谱图像（第二列）。观测光谱和恒星连续谱之间主要的差别就是星云辐射，包括星云连续谱和星云发射线。考虑到视宁度以及每个 spaxel 都独立拟合的影响，我们使用 FWHM 为  $2.5''$  的高斯曲线对所有  $g$  波段图像进行平滑处理。由于我们主要关心这些星系的结构变化，并不考虑流量的变化，这张图中的 30 个子图的颜色棒都是独立的，没有统一。

我们通过观测每个星系的图像结构变化发现，年轻成分呈现明显的团块化。相比之下，年老  $g$  波段图像更规则，没有明显的子结构。有些星系的中等-年老图像也存在子结构，这些子结构的位置与它们年轻图像中子结构的位置有显著差异（如 8257-3704、8615-1901 和 9894-9102）。相比于年老图像，观测图像和恒星连续谱图像中都能看到子结构。这可能是因为  $g$  波段中心波长约为  $4770 \text{ \AA}$ ，在光学波段也属于偏蓝段，相比于波长更长处对年轻星族更为敏感。恒星连续谱图像相比于观测图像更规则，这可能是因为观测图像的光谱与恒星光谱之间主要的区别在于星云辐射。观测图像中明显受到发射线流量和气体连续谱的影响，而在恒星连续谱图像中只有恒星辐射，没有星云辐射的影响。

- 8257-3704 的恒星图像呈现出对称的形态，峰值在星系中心且未见其他子结构。而其年轻图像则呈现出蝌蚪状的形态，峰值位于星系西北方向（见图4-5，

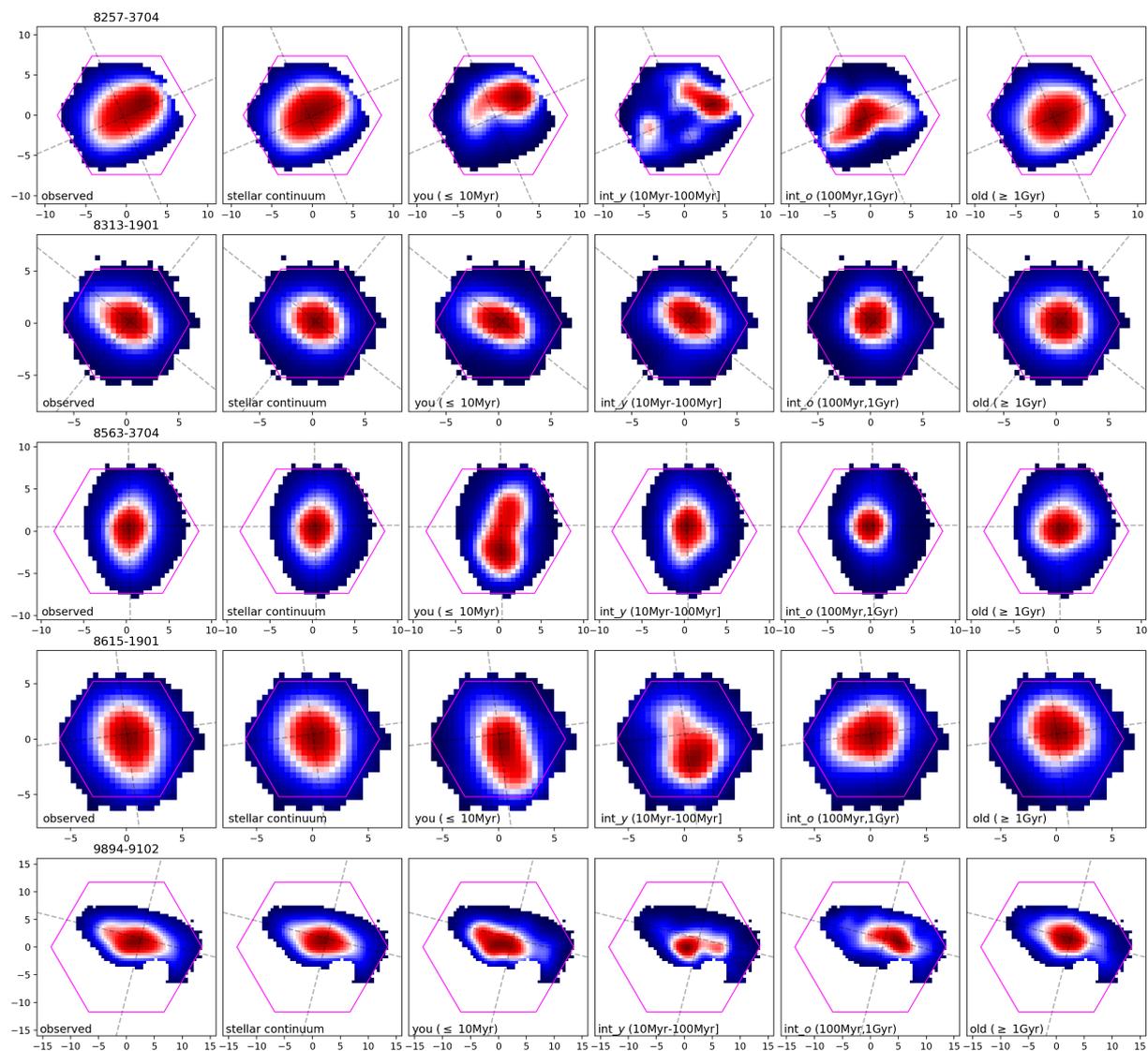


图 4-5 五个星系在不同年龄段内的平滑后的  $g$  波段图像，从左到右分别为观测时刻，恒星连续谱，年轻星族 ( $0, 10 \text{ Myr}$ ]，中等-年轻星族 ( $10 \text{ Myr}, 100 \text{ Myr}$ ]，中等-年老星族 ( $100 \text{ Myr}, 1 \text{ Gyr}$ ) 和年老星族 [ $1 \text{ Gyr}, 15 \text{ Gyr}$ ]。

第三列, 第一行)。中等-年轻图像表现出两个团块, 一个位于西北方向, 另一个位于东南方向。西北方向的团块呈向北延伸的趋势。中等-年老的图像则呈现出中央峰值, 但向主轴两端延伸, 且向东南方的延伸更为明显。年老星族则呈现出高度对称的形态, 与恒星图像相似, 但椭率更大, 更接近于圆形。

- 在 8313-1901 的后五张图像中, 只有年轻图像和中等-年轻图像不规则。其余三张, 恒星图像、中等-年老图像和年老图像都很对称, 而且图像上看椭率都接近 1。结合第二章分析得到的 NE 团块及年轻的星族结果, 我们认为该星系在近期发生气体吸积活动前都没有剧烈的结构变化, 直到近期发生了剧烈的星暴。

- 8563-3704 呈现出南北两个蓝色团块的形态, 且两个团块间没有明显的边界。其五张图像与 8313-1901 的图像十分相似, 恒星图像、中等-年老图像和年老图像都呈现出高度对称的形态。年轻图像和中等-年轻图像中则出现了团块化不对称结构。值得注意的是, 年轻星族的图像峰值并不在星系中心, 而是位于星系南部靠近南端团块的附近。

- 8615-1901 的蓝色团块非常延展, 几乎覆盖了整个寄主星系, 最蓝的位置位于星系南部。在五张恒星光谱的  $g$  波段图像中, 仅最年老的星族图像相对较为对称, 其余图像的团块化方向也不完全相同。最年轻的图像峰值位于星系中心区域, 并向南延展; 中等-年轻图像的峰值位于南端; 中等-年老图像的峰值虽然也在星系中心附近, 但整体结构朝东有所突出。另外观测图像和恒星图像类似, 都受到星系南面团块的影响而使图像不对称。

- 9894-9102 星系中有多个团块, 从  $gri$  图像来看, 这些团块位于星系东部。恒星图像和年老图像整体呈现出对称的形态。年轻图像、中等-年轻图像和中等-年老图像的形态都不规则。中等-年老星族的图像峰值位于星系的西南方向, 而且受到了东南方向团块的影响。而中等-年轻图像和年轻图像则位于东南方向, 且年轻图像整体更延展。

通过这些图像的结构变化, 我们可以推断星系的结构演化以及近期星暴活动发生的位置和大致时间。下一步, 我们将尝试对寄主星系的结构演化关系进行分析。

### 4.3.2 星系结构演化

研究被星暴成分所掩盖的寄主星系性质, 以探索不同类型矮星系之间的演化关系, 一直是本领域的一个热点问题。这一工作的难点是将星系中通常是近期

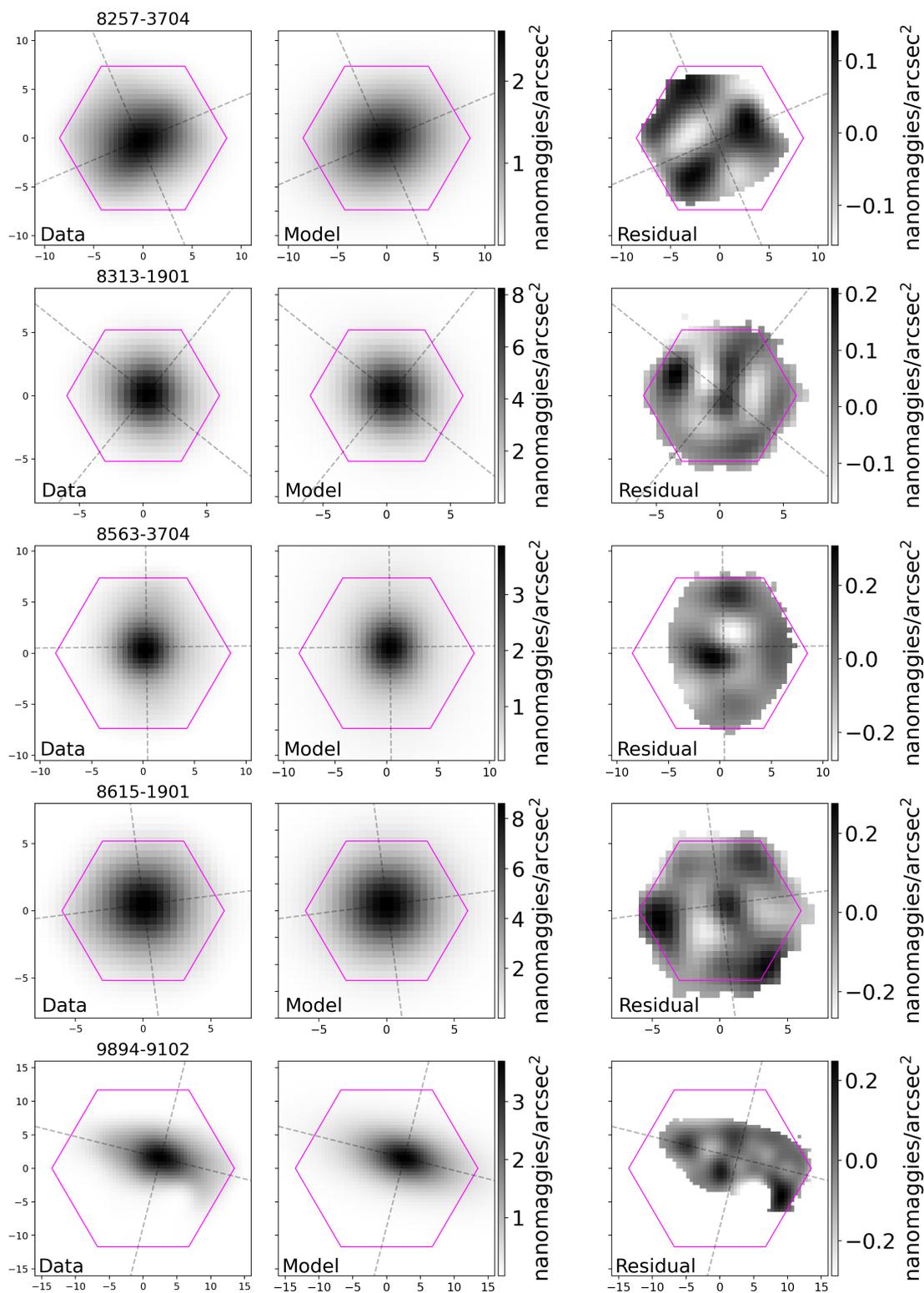


图 4-6 old2 ( $\geq 100$  Myr) 的星族图像的 GALFIT 拟合结果。

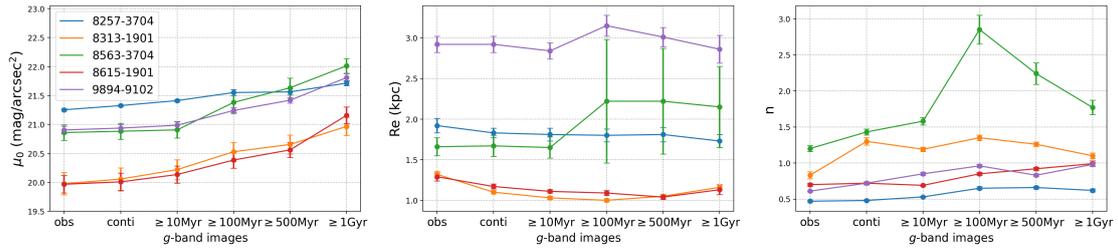


图 4-7 五个星系在中心面亮度，有效半径和 Sérsic 指数的演化关系。

形成的星暴团块从寄主星系中有效地扣除。许多研究人员已尝试通过测光观测研究寄主星系结构参数，获得其可能地形态特征 (Amorín 等, 2009; Lian 等, 2015)。这些工作通常采用面亮度轮廓分解的方式将星暴团块扣除，或采用近红外波段观测图像示踪年老成分。在本章中，我们将相关工作提升一个维度。MaNGA 光谱数据的星族分析让我们可以获得目标星系中老于一定年龄的星族成分测光图像，而这样的信息正可以让我们探究 BCD 星系的寄主星系特征。在本次研究中，我们选择了年老于四个年龄节点的图像，分别为 old1 ( $\geq 10$  Myr)、old2 ( $\geq 100$  Myr)、old3 ( $\geq 500$  Myr) 和 old4 ( $\geq 1$  Gyr)，以展示寄主星系形态结构的演化关系。利用 GALFIT 对高斯 ( $\text{FWHM}=2.5''$ ) 平滑处理后的  $g$  波段图像结构拟合，我们可探索这些 BCD 星系在不同年龄时期的结构演化。在拟合寄主星系面亮度轮廓时，我们选取了连续谱信噪比高于 3 的 spaxels，参考前人对 BCDs 寄主星系面亮度轮廓的拟合，我们选用单 Sérsic 函数来拟合图像。

我们使用 MaNGA 数据中 DRP 数据提供的 PSF 图像，并将它也进行了高斯 ( $\text{FWHM}=2.5''$ ) 曲线平滑处理。同时，为了与观测时刻比较，我们还针对观测时刻的  $g$  波段图像以及恒星连续谱图像（即图4-5的前两列图像）进行了 GALFIT 面亮度拟合。我们在表格A-1中展示了最终的拟合结果，并在图4-6中呈现了 old2 ( $\geq 100$  Myr) 的拟合结果。观测图像、恒星连续谱图像、old1、old3、old4 的拟合图像放在了附录A.1中。图4-6中从左到右分别展示了原始图像、模型图像和残差。其中灰色虚线代表主轴和次轴，方位角和星系中心均由 GALFIT 对该年龄段内的图像拟合得出。这组主轴和次轴已应用于本章中所有的二维图像。

我们在图4-7中展示了五个 BCDs 年老于不同年龄节点的寄主星系的结构参数演化，这些结构参数包括星系  $g$  波段的中心面亮度 ( $\mu_0$ )、星系有效半径 (Re) 和 Sérsic 指数 ( $n$ )。总体来说，中心面亮度  $\mu_0$  随时间演化逐渐变小，表明星系中心逐渐变亮，而且这五个 BCD 星系从 1Gyr 演化到观测时刻，面亮度变化值

接近。五个 BCD 星系的有效半径随时间演化不明显，有轻微的逐渐变大的趋势。Sérsic 指数反映了星系面亮度轮廓的形状，五个 BCD 星系随时间演化大多变化不大。8563-3704 在这五个星系较为特别：在有效半径图中， $\geq 10$  Myr 的星系尺寸比更年老时候的更小；在 Sérsic 指数图中，在  $\geq 100$  Myr 有个明显的拐点，这些现象可能是受到星系中团块的影响。

矮星系在宇宙中非常普遍，许多研究探讨了 BCDs 与其他星系（如矮椭圆星系 (dEs) 和矮不规则星系 (dIrrs)）之间的演化关系可能性 (Caon 等, 2005; Amorín 等, 2009; Micheva 等, 2013; Janowiecki 等, 2014; Lian 等, 2015)。在图4-8中，我们将这些寄主星系的结构参数与其他工作中的  $B$  波段 dEs 和 dIrrs 进行了比较。斜十字叉点是矮椭圆星系 (Binggeli 等, 1993; Graham 等, 2003)，黑色三角形是矮不规则星系数据 (van Zee, 2000)。我们还测量了这些星系在  $r$  波段的中心面亮度和总星等，并根据 Smith 等 (2002) 中不同星等的转换关系得出了不同年龄段内寄主星系的  $B$  波段系统下的中心面亮度和总星等。在图中，这五个 BCD 星系用不同颜色的五角星表示。对于一个星系来说，绝对星等值从小到大依次为观测图像、恒星图像、old1 图像、old2 图像、old3 图像和 old4 图像。我们将它们与 dEs 和 dIrrs 的中心表面亮度 ( $\mu_0$ ) 和有效半径与  $B$  波段绝对星等的关系进行了比较。这五个星系的寄主星系中心亮度和有效半径都正好介于 dEs 和 dIrrs 之间。9894-9102 看上去更接近 dIrrs，而 8313-1901 和 8615-1901 的寄主星系中心面亮度和有效半径等性质更接近 dEs。

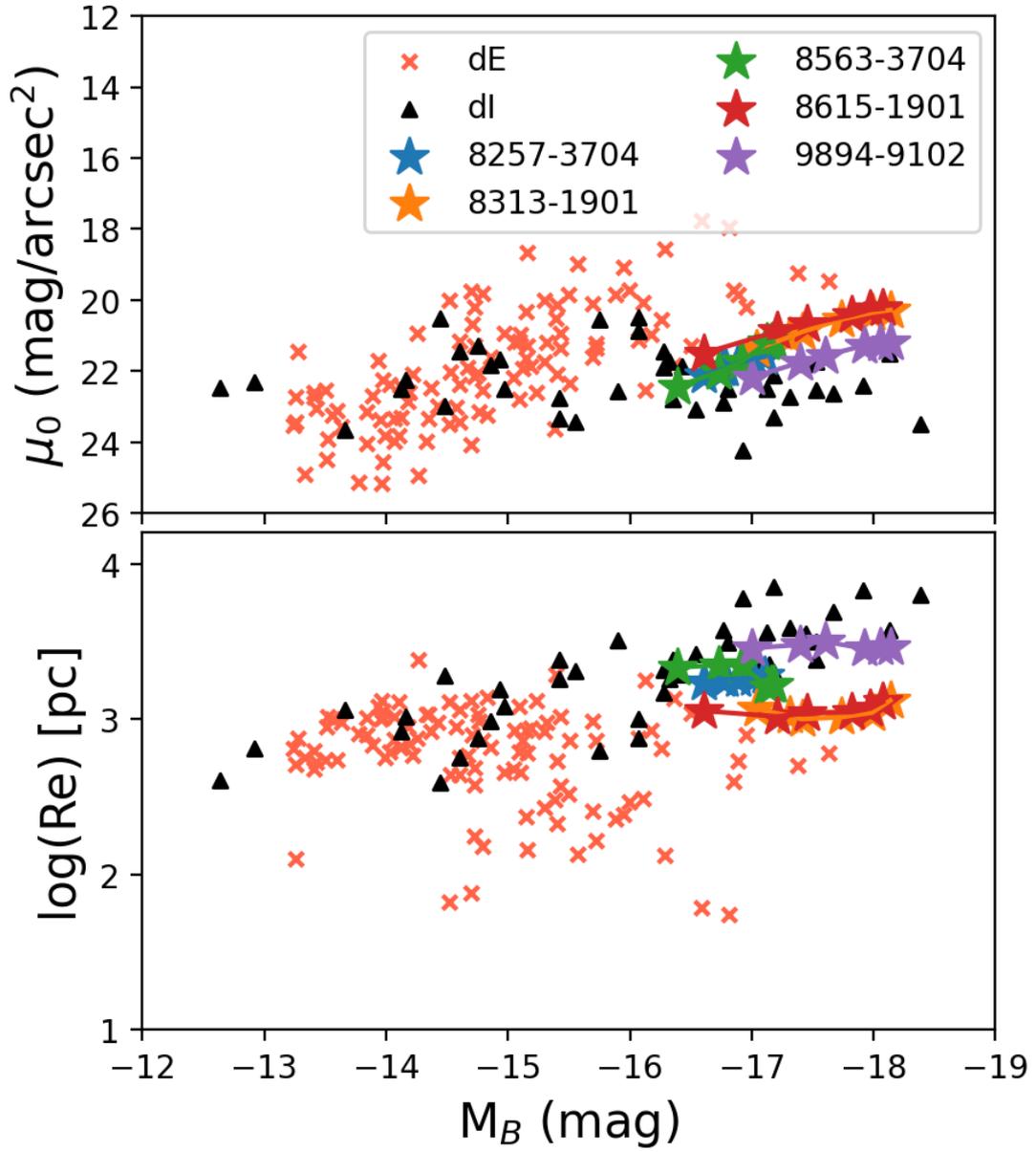


图 4-8 五个 BCD 星系观测时刻图像、恒星连续谱图像和年老于四个年龄节点的图像的形态参数与其他类型矮星系形态参数之间的比较。

#### 4.4 偏心团块演化

从图4-5我们看到不同年龄区间的  $g$  波段图像的结构是不同的。在非年老星族的图像中部分星系可以看到偏心团块的子结构，这表明这些偏心团块可能在这些时期内形成。因此，我们试图利用星系图像在不同时间内的形态变化来推测这五个 BCD 星系中团块的演化。因为星暴团块是近期形成的，为了把团块的性质从寄主星系中分离出来，我们利用星族分析结果，构建一系列年轻于不同年龄节点的星系图像。这和上一节对寄主星系研究构建一系列年老于不同年龄的图像的研究思路有所差别。

根据我们选用的 SSPs 的年龄分布，我们选择了 9 个年龄节点 ( $t_p$ ): 10 Myr、30 Myr、50 Myr、70 Myr、100 Myr、300 Myr、500 Myr、700 Myr 和 1 Gyr。和前一节类似，我们构建了星族年龄年轻于这些时间节点的星族图像 ( $\leq t_p$ )，这些图像都展示在了附录A.2中。

测量星系亮度分布的一种非参数方法是采用聚集度、不对称性和成团性 (CAS) 系统 (Conselice, 2003; Lotz 等, 2004)。成团性用于描述星系图像中小结构的分布情况，计算方法是通过将原始图像  $I(i, j)$  的空间分辨率降低来计算一个新的图像  $I_S(i, j)$ 。

$$S = \frac{\sum_{i,j} |I(i, j) - I_S(i, j)|}{\sum_{i,j} |I(i, j)|} - B_S, \quad (4-1)$$

其中  $B_S$  是背景天光等的平均成团性，我们使用星族合成光谱后的星系图像，所以  $B_S = 0$ 。如果  $S$  指数接近 0，这意味着该星系的子结构很少。在本章中，我们将运用星系在年轻于不同年龄节点时 ( $\leq t_p$ ) 图像的成团性变化来评估其内部子结构的变化，以此估计偏心团块形成的时间。

参考 Lotz 等 (2004) 的分析方法，我们在运用公式4-1时只对  $0.25R_e$  到  $1.5R_e$  范围内的 spaxels 进行相加操作，平滑图像则采用宽度为  $0.5R_e$  的 box-car 对星系进行平滑处理以得到 (Lotz 等, 2004)。  $R_e$  和星系中心值采用上一节中得到的 old2 ( $\geq 100$  Myr)  $g$  波段图像拟合结果。在进行成团性测量时，我们还排除了连续谱信噪比小于 3 的 spaxel。我们在图4-9中显示了年轻于九个年龄节点 ( $\leq t_p$ ) 的  $g$  波段图像、恒星连续谱图像和观测图像的成团性变化。

8313-1901 东北方向有个明显的蓝色团块。该星系的成团性曲线较为平缓，这可能意味着该星系在 1 Gyr 到 10 Myr 之间没有明显的子结构产生。由于我们

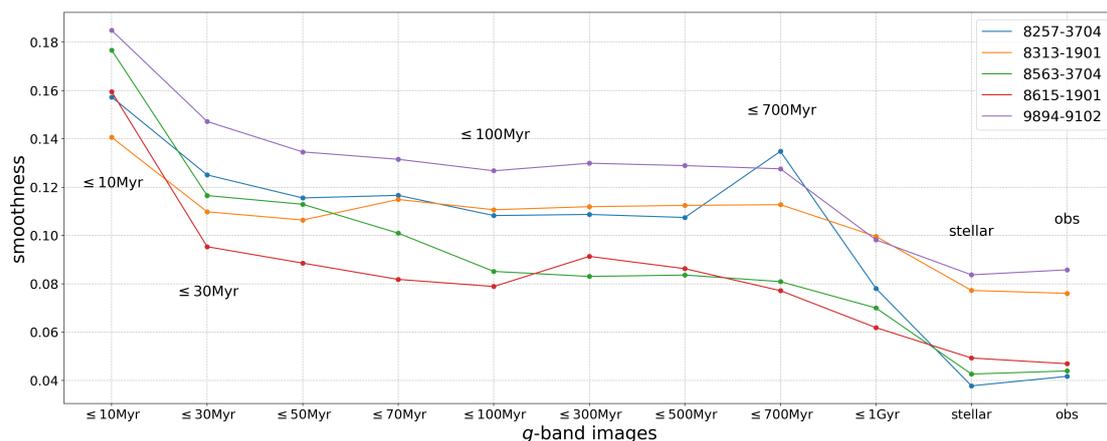


图 4-9 五个星系的年轻于九个年龄节点的星系图像成团性变化，以及恒星连续谱图像和观测图像的成团性展示。

的成团性计算是从 10 Myr 开始的，这可能意味着 NE 团块应该是在 10 Myr 之前形成的，与在第二章中认为该团块的年龄在 7 Myr 附近的结论相一致。8563-3704 的两个团块位于星系的南北两段。在大约  $\leq 100$  Myr 左右，该星系成团性发生了显著变化，100 Myr 之后，该星系的成团性变化趋势较平稳。因此团块的形成时间极可能在 100 Myr 左右。8615-1901 的团块已经弥散开，几乎覆盖了整个星系。其成团性变化在  $\leq 300$  Myr 附近有上升，在  $\leq 100$  Myr 又下降，结合图 4-5 中不同年龄区间的星系图像，该星系的团块有可能在星系的外围在数百兆年前产生。9894-9102 在南边有一连串的蓝色团块。该星系的成团性在年轻于九个年龄节点的图像中的变化与 8313-1901 很相似，都较为平缓，因此该星系可能也如 8313-1901 一样，在 1 Gyr 到 10 Myr 之间没有明显的子结构产生。

8257-3704 的成团性变化在五个星系中比较特殊。该星系在约 700 Myr 左右有一个明显的拐点，显示在这个时间段可能图像中的子结构特征有所变化。在图 4-5 中，该星系的恒星图像和年老图像是对称的，无明显团块。而中等-年老和中等-年轻图像都显示在星系的东南方有一个子结构，但是这个子结构在最年轻的图像中却不可见，相反在最年轻的图像中只能看到西北方向的偏心团块。

为了深入研究这个星系的演化过程，我们在图 4-10 中绘制了从 10 Myr 至 1 Gyr 8257-3704 这一星系每个年龄 SSPs 的质量二维分布图。结合图 4-5 和图 4-9 我们认为该星系可能经历了两次星暴，分别分布在星系的两侧。第一次出现在东南方向，可能发生在大约 500 Myr-1 Gyr 之间。第二次则在西北方向，可能发生在大约 100 Myr 之后。在图 4-5 中，在中等-年轻图像中也可以看到在东南和西

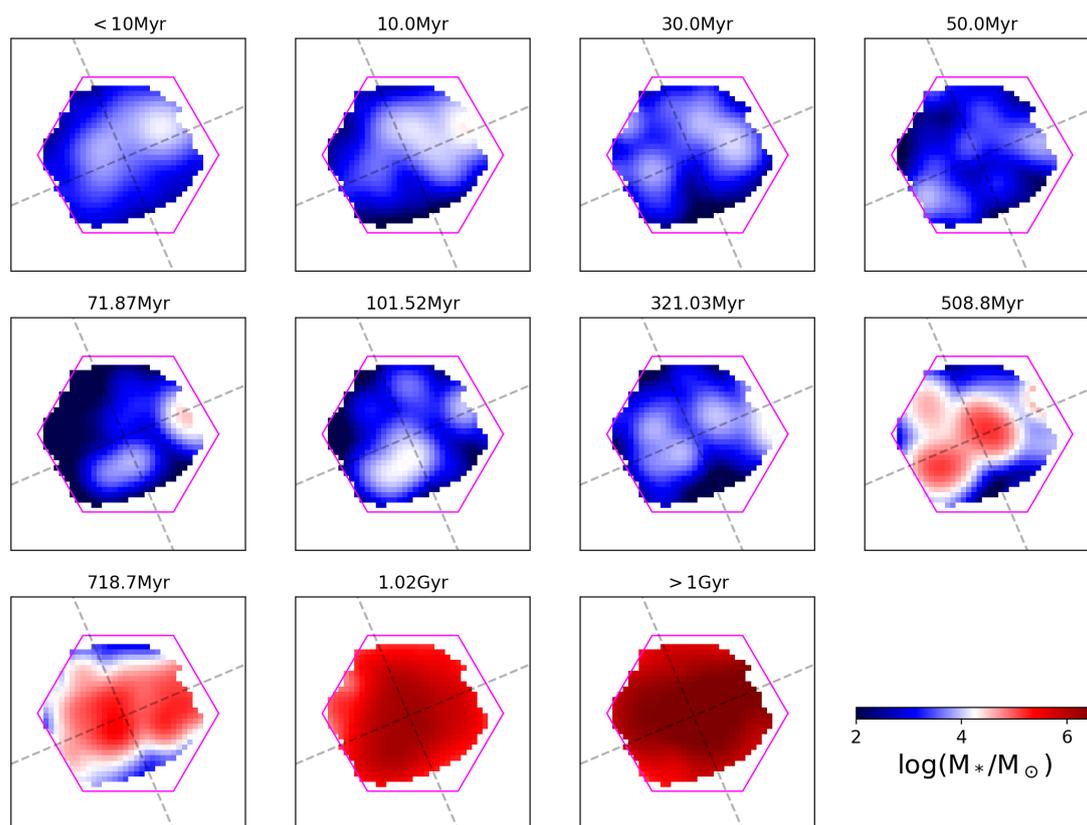


图 4-10 8257-3704 在不同年龄段内的质量图像。

北之间有一些子结构，似乎也反映了该星系发生了两次星暴过程。

为探索以上结果的可靠性，特别是探索图4-9中所反映的成团性变化与光谱拟合时所选择的 SSPs 是否有关。我们使用另一套 SSP 重新对这些星系进行拟合。我们采用第三章中的 FADO 拟合参数，重新构造了年轻于九个年龄节点的图像，并采用与图4-9相同的年龄分布绘制成团性变化（图4-11）。与图4-9相比，这些星系成团性变化总体趋势类似：从 10 Myr 到 100 Myr，成团性的变化曲线呈现的下降趋势，随后变化趋于平缓。因此，我们认为之前对每个星系成团性变化的分析仍然是可靠的。在 8257-3704 的成团性变化曲线中与图4-9略有不同，图4-11的拐点出现在 1 Gyr，而图4-9的拐点出现在 700 Myr。这可能是因为 SSPs 的年龄选择并不相同，在图4-9在 500 Myr 至 1 Gyr 中选用了 508.80 Myr、718.70 Myr 和 1.02 Gyr，而在图4-11中选择了 508.80 Myr、904.79 Myr 和 1.28 Gyr。因此对于图4-11中， $\leq 500$  Myr 的图像和  $\leq 700$  Myr 的图像是一样的，所以这两个值的成团性相同，便不会出现在 700 Myr 的拐点。

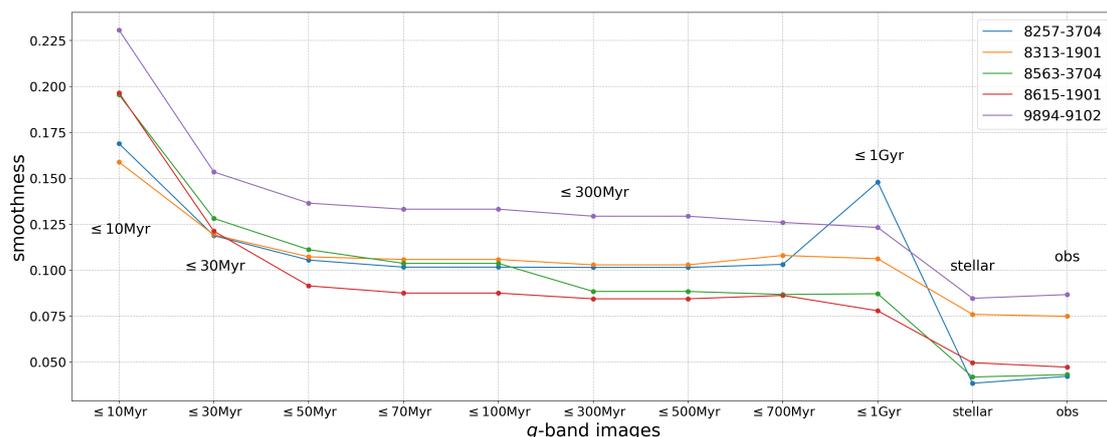


图 4-11 五个星系采用第三章中的 SSPs 拟合后得到年轻于九个年龄节点的星系图像成团性变化。

#### 4.5 小结

在上一章中我们对 MaNGA MPL-11 版本的 52 个 BCD 候选星系中每个 spaxel 内的光谱进行了星族合成。发现通过空间可分辨的星族分布，获得不同年龄段内的星系图像，其图像结构在不同年龄会有明显的不同，这个现象在具有偏心团块的星系中尤为明显。所以在本章中，我们从候选体中选取了五个具有偏心团块的 BCD 星系，其中包括 8313-1901。这些团块相似但不完全相同。8257-3704 在西北方向有一个相对于寄主星系较小的蓝色团块。该星系处于  $N=3$  的星系群中。8313-1901 在东北方向有一个明显的蓝色团块，该星系处于孤立环境中。该蓝色团块在第二章中我们已经通过其 SFR、金属丰度和星族特点等性质，认为该团块极可能是由于气体吸积而产生的。8563-3704 具有南北两个团块，但是团块的轮廓并没有 8313-1901 那么清晰，该星系也处于孤立环境中。处于孤立环境的 8615-1901 有一个几乎覆盖了整个观测视场的蓝色团块，其最蓝的区域位于星系的南面。9894-9102 的团块分布与前四个星系并不相同，它有一连串的多个团块，且这些团块位置接近，该星系也处于孤立环境中。

考虑到这些星系都是星暴星系，所以我们针对这五个星系光谱拟合时，单星族模板 SSPs 年龄选择方面，选用了更多的年轻星族，初始质量函数选择恒星形成时小质量恒星比例较大的 Salpeter 初始质量函数，并从基于 Padova 1994 恒星演化轨迹得到的 BC03 模板库中选取了 96 条 SSPs，其中包括 16 个年龄和 6 个金属丰度。通过 FADO 拟合 8313-1901 中“纯”NE 团块光谱（光谱获取细节在 2.4 节），我们发现 FADO 拟合得到的星族分布，主要集中在  $\text{age} = 1 \text{ Myr}$  的

SSPs 和  $\text{age} > 10 \text{ Gyr}$  的 SSPs 中，这和在第二章中估计的“纯”NE 团块光谱的星族分布相类似，而且年轻星族的质量估计也很接近。我们认为 FADO 拟合结果和选用的 SSPs 都是合理的，因此对于这五个星系每个 spaxel 内的光谱我们也做了类似的拟合。

FADO 除了得到星族分布以外，还会给出发射线流量。基于此，我们可以计算每个星系的 SFR 二维分布和金属丰度的二维分布图。结合 MaNGA 提供的发射线速度场，我们发现这些团块都出现了 SFR 增强，金属丰度降低的现象，而且这五个星系都能看到旋转的速度场，并在团块位置处有轻微扰动。对于多团块的星系来说，大部分团块也出现了上述的现象。8615-1901 比较特殊，其的团块几乎覆盖整个观测视场，它最蓝的位置在南面出现了金属丰度降低并伴有 SFR 增高的现象，但是在星系的北面金属丰度略低的位置处没有明显的 SFR 增大的现象。

根据 FADO 拟合得到的光谱星族年龄分布 (0-15 Gyr)，我们对每条光谱切分四个年龄区间，年轻 (0, 10 Myr]，中等-年轻 (10 Myr, 100 Myr]，中等-年老 (100 Myr, 1 Gyr) 和年老 [1 Gyr, 15 Gyr] 的光谱。结合二维光谱自带的空间信息，我们构建出星系在四个年龄区间内的  $g$  波段图像。比较了每个星系四个年龄区间的  $g$  波段图像、观测时刻  $g$  波段图像和恒星连续谱  $g$  波段图像后，我们发现这些星系在不同年龄区间内的结构变化并不相同。总体而言，年老星族图像 [1 Gyr, 15 Gyr] 都比较对称，中等-年老图像 (100 Myr, 1 Gyr) 在部分星系中可以看到一些子结构，而且这些子结构与观测图像中的偏心团块的位置并不一定一致。在中等-年轻图像和年轻图像中，星系的子结构非常明显，而且大部分接近观测的偏心团块的位置。对于部分星系来说，在这些年龄区间内，星系流量的峰值并不在星系的中心，有可能是因为在子结构位置处有近期恒星形成，例如 8563-3704 的年轻图像出现了团块化不对称结构，团块位置处的 SFR 较高。

为了探究被近期星暴成分所掩盖的寄主星系性质，我们划分出了年老于四个年龄节点的星族，old1 ( $\geq 10 \text{ Myr}$ )、old2 ( $\geq 100 \text{ Myr}$ )、old3 ( $\geq 500 \text{ Myr}$ ) 和 old4 ( $\geq 1 \text{ Gyr}$ )，并获得这些星族的图像。通过 GALFIT 拟合星系图像面亮度轮廓，我们就可以得到这些年老于四个年龄节点的星系图像、观测时刻的星系图像和恒星连续谱的图像的结构参数，从而了解其演化历程。总的来说，星系中心面亮度随时间演化逐渐变亮，有效半径随时间有轻微增大的趋势，Sérsic 指数随

时间演化没有明显的变化。但是 8563-3704 比较特别，它的有效半径在  $\geq 10$  Myr 时比更年老时候要小，它的 Sérsic 指数在  $\geq 100$  Myr 时，有可能是受到了团块的影响，数值增大。

我们还将这些寄主星系的结构参数与 dEs 和 dIrrs 进行了比较。我们发现，这五个 BCD 星系的年老于四个年龄节点的星系图像、观测时刻的星系图像和恒星连续谱的图像的结构参数中心面亮度和有效半径主要介于 dEs 和 dIrrs 之间。其中 8313-1901 和 8615-1901 更偏向于 dEs，9894-9102 更偏向于 dIrrs，在绝对星等和有效半径关系图中，这个现象更明显。8257-3704 和 8563-3704 由于绝对星等主要集中在 dEs 和 dIrrs 分界处，因此不易判断其寄主星系是否更接近 dEs 还是 dIrrs。

从四个年龄区间内的  $g$  波段图像中，我们发现这些图像的结构并不相同，这可能与团块的形成时间有关。而团块主要出现在年轻图像和中等-年轻图像这些较年轻的图像中。有别于探究寄主星系特征，为了研究这些星系团块的演化，我们将年轻于九个年龄节点的星族划分出来 ( $\leq t_p$ )，九个年龄节点分别为 10 Myr、30 Myr、50 Myr、70 Myr、100 Myr、300 Myr、500 Myr、700 Myr 和 1 Gyr。通过探究这些  $\leq t_p$  图像的成团性变化，来探索星系图像中团块（子结构）的演化。我们发现五个星系中大部分团块形成于数百兆年前。另外还发现 8257-3704 星系图像的成团性在  $\leq 700$  Myr 这一图像中有显著的拐点，这可能说明在这个时间点附近有团块产生。于是，我们检查了该星系 10 Myr 至 1 Gyr 之间每个 SSPs 的质量二维分布图。我们认为该星系很可能发生了两次星暴过程：第一次发生在 500 Myr-1 Gyr，产生的星暴团块的星系东南方向，第二次则在  $\leq 100$  Myr，产生的星暴团块在星系的西北方向，这一团块也是观测时刻发现的偏心团块位置。

通过星族合成得到星系不同年轻段内的光谱信息，结合 IFU 可获得星系空间可分辨的光谱，我们可以获得星系在不同年龄段内的光谱图像。从这五个星系中，我们发现这样的方法可以使我们获得更多关于 BCD 星系寄主星系和团块的特征和演化历史。在将来该方法可以运用于更大的样本中，从而对星系演化有更深刻的了解。如果有更高空间分辨率的 IFU，例如 CSST-IFU，我们可以对小团块在不同年龄段内的成团性变化可以有更为准确的估计。



## 第 5 章 总结和展望

### 5.1 总结

BCD 星系的研究对于我们了解星系的形成和演化具有重要的意义。这一类型的星系近期具有强烈的恒星形成活动，而且在近地宇宙中属于金属含量极低的一类星系。因此，这类星系也经常被视为高红移星系在近地宇宙中的对应体。随着技术的进步，IFU 数据逐渐增多，这使得我们可以在 kpc 尺度上研究这类星系。

8313-1901 是一个引人注目的 BCD 星系。在其东北方向，有一个明显轮廓清晰的蓝色团块，我们将其命名为 NE 团块。通过光谱红移检测，我们认为 NE 团块不是前景源。该团块处的光谱具有非常强的发射线，恒星连续谱的谱型与星系中心的明显不同，特别是在蓝波段，星族显著偏年轻。我们对该团块做了面亮度轮廓拟合，发现该团块并不是点源，拟合得到该团块的大小约为 1 kpc，比近地宇宙中的 H II 区要大，更接近于高红移星系中的蓝色团块。通过空间可分辨的 IFU 数据，我们计算了该星系的 SFR 和金属丰度，发现团块处的恒星形成率较高且金属丰度较低。通过对 H $\alpha$  速度场的建模，我们发现 NE 团块的速度场和寄主星系的旋转盘有明显的分离。结合这三点性质，我们推测 NE 团块极有可能是由外部原因诱发的恒星形成，而不是由星系自身原因（如盘的不稳定性）导致的恒星形成。气体吸积和星系之间的相互作用都有可能形成这样的团块。这两种形式主要的区别在于 NE 团块中是否存在年老的星族。因此，我们对 NE 团块内的光谱进行了简单的星族分析。我们利用寄主星系的面亮度轮廓，推测 NE 团块内的寄主星系的光度，再假设该矮星系的星族并不随半径的变化而变化，最终可以得到 NE 团块内寄主星系成分的光谱。在观测光谱中扣除寄主星系成分的光谱，我们可以得到“纯”NE 团块的光谱。利用 Prospector 工具，我们构造了一条既考虑年轻恒星族又有星云辐射的光谱。该年轻模型 ( $\leq 7$  Myr) 与“纯”NE 团块光谱吻合得很好，因此“纯”NE 团块极有可能没有年老的恒星族，是由气体吸积产生的。

基于 8313-1901 的研究结果，我们对 BCD 星系的演化图景产生了兴趣。因此我们在 MaNGA MPL-11 版本数据中，我们筛选出了 52 个 BCD 星系候选体，

探究他们的寄主星系演化特点和 SFR、金属丰度等性质。考虑到这类星暴星系的光谱受到星云辐射的影响很大，我们采用 FADO 这款新型的星族合成软件来拟合光谱。FADO 是目前为止第一款自洽地拟合星云发射和恒星发射的星族合成软件，而且它采用了合适的算法更快更高效的获得大型光谱数据集的星族特征。我们参考 FADO 提供的 SSPs，增加了两组贫金属恒星光谱，共 150 条 SSPs 参与拟合。

FADO 拟合得到的星系信息结合二维光谱自带的空间信息，我们可以构建出观测光谱的  $g$  波段图像和  $\geq 100$  Myr 的  $g$  波段图像，总体而言， $\geq 100$  Myr 的图像比观测图像更对称，子结构更不明显。尤其是对于像 8313-1901 一样有偏心团块的星系而言，观测图像中可以看到一个子结构。但是在  $\geq 100$  Myr 的图像中，这样的结构就不明显了，星系图像更对称。FADO 的次级产品中包含了发射线流量信息，因此我们还计算了每个 spaxel 内的金属丰度，从而可以分析  $\Sigma_* - Z$  关系。BCD 星系的金属丰度整体处于整个 MaNGA 数据的贫金属端，但是与小质量端星系的比较还需要将来更细致的研究。另外通过计算每个 spaxel 内的 sSFR，我们可以对  $\Sigma_* - Z - \Sigma_{SFR}$  之间的相关性得到更深刻的理解。我们线性拟合了 sSFR 的径向分布和金属丰度的径向分布，发现拟合得到的两斜率之间存在紧密的负相关，也就是金属丰度随半径变大时，sSFR 也变小；金属丰度变小时 sSFR 变大。对于金属丰度随半径变小的星系。经过查看这些星系的  $H_I$  气体百分含量，总体而言  $H_I$  气体百分含量的变化并不明显。对于金属丰度梯度斜率与 sSFR 梯度斜率关系、 $H_I$  气体和  $\Sigma_* - Z - \Sigma_{SFR}$  关系之间的联系我们会在以后的工作中更详细得研究。

相较于观测图像， $\geq 100$  Myr 的图像更加对称，尤其是那些具有偏心团块的 BCD 星系，差异更加明显。这使我们意识到可能能够通过星系结构的变化来研究团块可能的形成时间和寄主星系结构的演化。因此，我们从这些 BCD 星系候选体中选取了五个具有偏心团块的 BCD 星系，其中包括 8313-1901，这些团块相似但又有所不同。针对这五个星系，重新选取了一组 SSPs 共 96 条，利用 FADO 拟合其光谱，获得每个 spaxel 中的发射线流量和星族分布。星族合成的方法与 IFU 二维数据结合，得到了不同年龄段区间的星系图像。我们发现年老星族 [1 Gyr, 15 Gyr] 图像普遍比较对称，在不同年老区间内图像的结构有明显的差异，在年轻图像和中等-年轻图像中大多数星系都能看到团块状子结构。

另外我们还利用 GALFIT 拟合了星系在年老于四个年龄节点 ( $\geq 10$  Myr、 $\geq 100$  Myr、 $\geq 500$  Myr 和  $\geq 1$  Gyr) 的  $g$  波段图像, 从而获得参数化的星系结构演化以及与其他类型矮星系之间的关系。我们发现这个五个星系中心面亮度随时间演化逐渐变亮, 有效半径变化不大, 只有轻微增大的趋势, Sérsic 指数变化并不明显。8563-3704 比较特别, 它在  $\geq 10$  Myr 时有效半径比更年老时候要小很多, 在  $\geq 100$  Myr 时, 其 Sérsic 指数可能会受到团块的影响而增大。与 dEs 和 dIrrs 相比, 从  $\geq 1$  Gyr 到观测时刻, 这五个星系的有效半径和中心面亮度都介于 dEs 和 dIrrs 之间, 8313-1901 和 8615-1901 更偏向于 dEs, 而 9894-9102 更倾向于 dIrrs。

年轻于九个年龄节点 ( $\leq t_p$ ) 的星系图像结构变化可以帮助我们理解这五个星系中团块的演化。我们测量了这些星系图像的成团性, 以确定图像中子结构的是否存在。从每个星系的成团性变化确实上看, 大多数星系都只有一个偏心团块位置处的子结构存在, 但也不排除空间分辨率对测量结果的影响。8257-3704 星系图像的成团性在  $\leq 700$  Myr 有显著的升高, 这可能是因为在图像中存在有明显的团块。经过检查 10 Myr 至 1 Gyr 之间每个 SSPs 的质量二维分布图, 我们认为该星系可能经历了两次在不同位置处的恒星形成活动。第一次在 500 Myr 以前的星系东南方向, 第二次则在 100 Myr 之后星系的西北方向, 即在观测时刻发现的偏心团块位置。

## 5.2 展望

### BCD 星系候选体寄主星系及金属丰度研究

在第四章中, 我们只对五个 BCD 星系的寄主星系结构变化做了详细的研究, 该方法可以应用到整个 BCD 星系候选体中。我们在将来也会对这 52 个 BCD 星系的寄主星系结构演化做更细致的分析。

在第三章中, 我们已经展示了 52 个 BCD 星系候选体的  $\Sigma_* - Z$  关系, 以及通过其 sSFR 的性质探索, 有助于理解  $\Sigma_* - Z - \Sigma_{SFR}$  之间的依赖关系。在将来的工作中, 我们需要将详细讨论 BCD 星系在  $\Sigma_* - Z$  关系上与其他矮星系之间的异同, 以及  $H_I$  气体对这些性质的影响。

另外星系环境很可能是影响星系中团块形成的因素之一。在将来我们会结合这些星系的环境特征, 以及光学性质等详细讨论这些 BCD 星系近期恒星形成的原因。

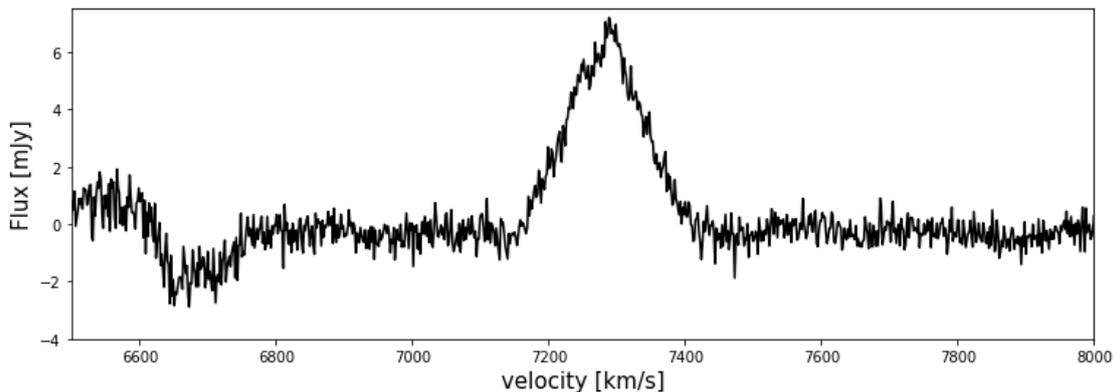


图 5-1 利用 FAST 观测 8313-1901 周围的 H I 气体

### 针对 8313-1901 中性氢气体分析

正如前几章所说，矮星系周围的气体含量比例要比大质量星系的高，8313-1901 的 H I 气体质量与恒星质量的比值约为 3。气体观测对于理解该星系的星暴原因非常有利。因此我们对 8313-1901 申请了 H I 观测。

$$M_{HI} = 2.36 \times 10^5 \times S_{21} \times D^2 \quad (5-1)$$

我们已获得针对 8313-1901 的 FAST 射电观测，观测时长约一小时。我们采用了 8 个循环的 on-off 模式进行观测。该模式的优点是可以获得较长的积分时间，但缺点是无法做精确的旁瓣修正。我们使用波束 8、波束 1 和波束 14 的观测数据。由于前两个循环的噪声数据不准确，我们在数据处理时仅使用了后 6 个循环的数据，总共使用了 33 分钟。最终处理出的数据如图 5-1 所示，其中横坐标表示速度，纵坐标表示气体流量。我们可以看出该星系有 H I 气体，于是根据公式 5-1，我们计算出该星系的 H I 气体质量为  $\log(M_{HI}/M_{\odot})=9.37$ 。在此公式中， $D$  表示源的距离，单位为 Mpc， $S_{21}$  表示 H I 的积分流量。FAST 观测 H I 气体，视场约为 3 角分，我们检查了 8313-1901 周围的环境，我们认为在以 8313-1901 为圆心，半径 1.5 角分范围内没有其他的星系等，因此该 H I 气体的质量应该都由 8313-1901 的 H I 气体提供。在第二章中，我们初步用过 H I 气体质量，用于估计 NE 团块金属丰度的上限，但还没有详细分析该星系的中性氢气体。将来我们将详细对比 H I 含量和光学光谱之间的关系，并与其他类型的矮星系作比较。

我们还成功获得了针对 8313-1901 的 H I 气体的 GBT 和 VLA 的观测时间。GBT 提供了总共 8 小时的观测时长，而 VLA 的观测时长为 2 小时。我们还未对

这些数据进行处理及分析，将来我们会利用这些射电数据以及之前 MaNGA 数据的分析结果，我们能够深入了解 NE 团块的起源。

### 星系中的团块 (clumps) 研究

星系中的团块起源一直是很有意思的课题。高红移星系往往会呈现出更为不规则和结块的特征，并且带有一个较延展的盘。高红移星系中团块以及盘结构的形成和演化与近域宇宙中的星系形态和恒星形成是否有相似性或者关联性，一直都是人们好奇的问题。

相较于高红移星系，近邻星系中的团块并不普遍存在。而且在近邻星系中发现的团块尺寸普遍要比高红移星系中的要小，但是星系中的团块性质随红移的变化并没有详细的研究。即将发射升空的中国巡天空间望远镜 (CSST) 的主巡天项目将对  $17500 \text{ deg}^2$  天区进行至少六个波段的巡天观测，其空间分辨率可达到  $\sim 0.15''$ 。这对于系统性的了解不同红移处的星系团块的性质，例如形态大小等，有至关重要的作用。另外 CSST 上还配备有 IFS 设备，因此，对于部分有特殊意义的团块可以申请 CSST-IFU 的观测。

正如第二章所说，在 8313-1901 中的 NE 团块可能是由多个未被解析的大质量星团组成。通过对研究贫金属蓝色团块中的星团，有助于我们了解不同恒星质量分布情况。贫金属环境有助于我们理解宇宙早期星系的形成和演化，因此利用贫金属团块中的星团探究初始质量函数，可以帮助我们理解恒星形成过程小尺度中的性质。



## 附录 A 五个 BCD 星系的不同星族图像

### A.1 五个星系的年老星族不同年龄段内的结构拟合

表 A-1 拟合得到不同年龄段内寄主星系的结构参数

plateifu	$M_g$	$R_e$ (kpc)	n	q	PA	age
8257-3704	$-16.98 \pm 0.01$	$1.73 \pm 0.08$	$0.62 \pm 0.02$	$0.84 \pm 0.01$	$-64.60 \pm 1.21$	old4 ( $\geq 1$ Gyr)
	$-17.12 \pm 0.01$	$1.81 \pm 0.09$	$0.66 \pm 0.02$	$0.76 \pm 0.01$	$-68.23 \pm 0.71$	old3 ( $\geq 500$ Myr)
	$-17.14 \pm 0.01$	$1.80 \pm 0.08$	$0.65 \pm 0.02$	$0.76 \pm 0.01$	$-66.83 \pm 0.73$	old2 ( $\geq 100$ Myr)
	$-17.23 \pm 0.01$	$1.81 \pm 0.08$	$0.53 \pm 0.01$	$0.72 \pm 0.01$	$-65.01 \pm 0.64$	old1 ( $\geq 10$ Myr)
	$-17.33 \pm 0.01$	$1.83 \pm 0.06$	$0.48 \pm 0.01$	$0.70 \pm 0.01$	$-61.43 \pm 0.50$	stellar
	$-17.42 \pm 0.01$	$1.92 \pm 0.09$	$0.47 \pm 0.01$	$0.64 \pm 0.01$	$-60.69 \pm 0.55$	observed
8313-1901	$-18.44 \pm 0.03$	$1.16 \pm 0.03$	$1.10 \pm 0.04$	$0.81 \pm 0.01$	$59.81 \pm 1.04$	old4 ( $\geq 1$ Gyr)
	$-18.29 \pm 0.02$	$1.05 \pm 0.02$	$1.26 \pm 0.03$	$0.81 \pm 0.01$	$53.59 \pm 0.80$	old3 ( $\geq 500$ Myr)
	$-18.08 \pm 0.01$	$1.00 \pm 0.02$	$1.35 \pm 0.04$	$0.82 \pm 0.01$	$51.16 \pm 0.83$	old2 ( $\geq 100$ Myr)
	$-17.80 \pm 0.01$	$1.03 \pm 0.02$	$1.19 \pm 0.03$	$0.73 \pm 0.01$	$61.35 \pm 0.56$	old1 ( $\geq 10$ Myr)
	$-17.71 \pm 0.01$	$1.10 \pm 0.02$	$1.30 \pm 0.05$	$0.62 \pm 0.01$	$63.67 \pm 0.48$	stellar
	$-17.46 \pm 0.01$	$1.32 \pm 0.04$	$0.83 \pm 0.05$	$0.50 \pm 0.01$	$63.59 \pm 0.57$	observed
8563-3704	$-17.50 \pm 0.04$	$2.15 \pm 0.50$	$1.77 \pm 0.10$	$0.92 \pm 0.01$	$-14.18 \pm 1.21$	old4 ( $\geq 1$ Gyr)
	$-17.48 \pm 0.04$	$2.22 \pm 0.65$	$2.24 \pm 0.15$	$0.77 \pm 0.01$	$1.54 \pm 1.30$	old3 ( $\geq 500$ Myr)
	$-17.44 \pm 0.05$	$2.22 \pm 0.76$	$2.85 \pm 0.20$	$0.73 \pm 0.01$	$0.55 \pm 1.06$	old2 ( $\geq 100$ Myr)
	$-17.27 \pm 0.01$	$1.65 \pm 0.13$	$1.58 \pm 0.05$	$0.61 \pm 0.02$	$-5.15 \pm 0.4$	old1 ( $\geq 10$ Myr)
	$-17.10 \pm 0.01$	$1.67 \pm 0.13$	$1.43 \pm 0.04$	$0.58 \pm 0.01$	$-5.17 \pm 0.39$	stellar
	$-16.79 \pm 0.01$	$1.66 \pm 0.11$	$1.20 \pm 0.04$	$0.55 \pm 0.01$	$-6.14 \pm 0.38$	observed
8615-1901	$-18.33 \pm 0.03$	$1.13 \pm 0.06$	$0.99 \pm 0.04$	$0.82 \pm 0.01$	$44.70 \pm 1.39$	old4 ( $\geq 1$ Gyr)
	$-18.23 \pm 0.02$	$1.04 \pm 0.03$	$0.92 \pm 0.02$	$0.93 \pm 0.01$	$-89.08 \pm 2.37$	old3 ( $\geq 500$ Myr)
	$-18.10 \pm 0.02$	$1.09 \pm 0.03$	$0.85 \pm 0.02$	$0.88 \pm 0.01$	$-82.57 \pm 1.25$	old2 ( $\geq 100$ Myr)
	$-17.76 \pm 0.02$	$1.11 \pm 0.02$	$0.69 \pm 0.02$	$0.89 \pm 0.01$	$37.46 \pm 1.24$	old1 ( $\geq 10$ Myr)
	$-17.54 \pm 0.01$	$1.17 \pm 0.03$	$0.72 \pm 0.02$	$0.82 \pm 0.01$	$27.54 \pm 0.90$	stellar
	$-16.97 \pm 0.01$	$1.29 \pm 0.05$	$0.70 \pm 0.02$	$0.74 \pm 0.01$	$22.00 \pm 0.71$	observed
9894-9102	$-18.41 \pm 0.04$	$2.86 \pm 0.17$	$0.98 \pm 0.03$	$0.45 \pm 0.01$	$72.53 \pm 0.36$	old4 ( $\geq 1$ Gyr)
	$-18.32 \pm 0.04$	$3.01 \pm 0.12$	$0.83 \pm 0.02$	$0.42 \pm 0.01$	$74.25 \pm 0.24$	old3 ( $\geq 500$ Myr)
	$-18.21 \pm 0.04$	$3.15 \pm 0.13$	$0.96 \pm 0.02$	$0.40 \pm 0.01$	$75.83 \pm 0.19$	old2 ( $\geq 100$ Myr)
	$-17.92 \pm 0.04$	$2.84 \pm 0.10$	$0.85 \pm 0.02$	$0.42 \pm 0.01$	$76.78 \pm 0.22$	old1 ( $\geq 10$ Myr)
	$-17.73 \pm 0.01$	$2.92 \pm 0.10$	$0.72 \pm 0.01$	$0.42 \pm 0.01$	$77.78 \pm 0.23$	stellar
	$-17.35 \pm 0.01$	$2.92 \pm 0.10$	$0.61 \pm 0.01$	$0.41 \pm 0.01$	$77.41 \pm 0.26$	observed

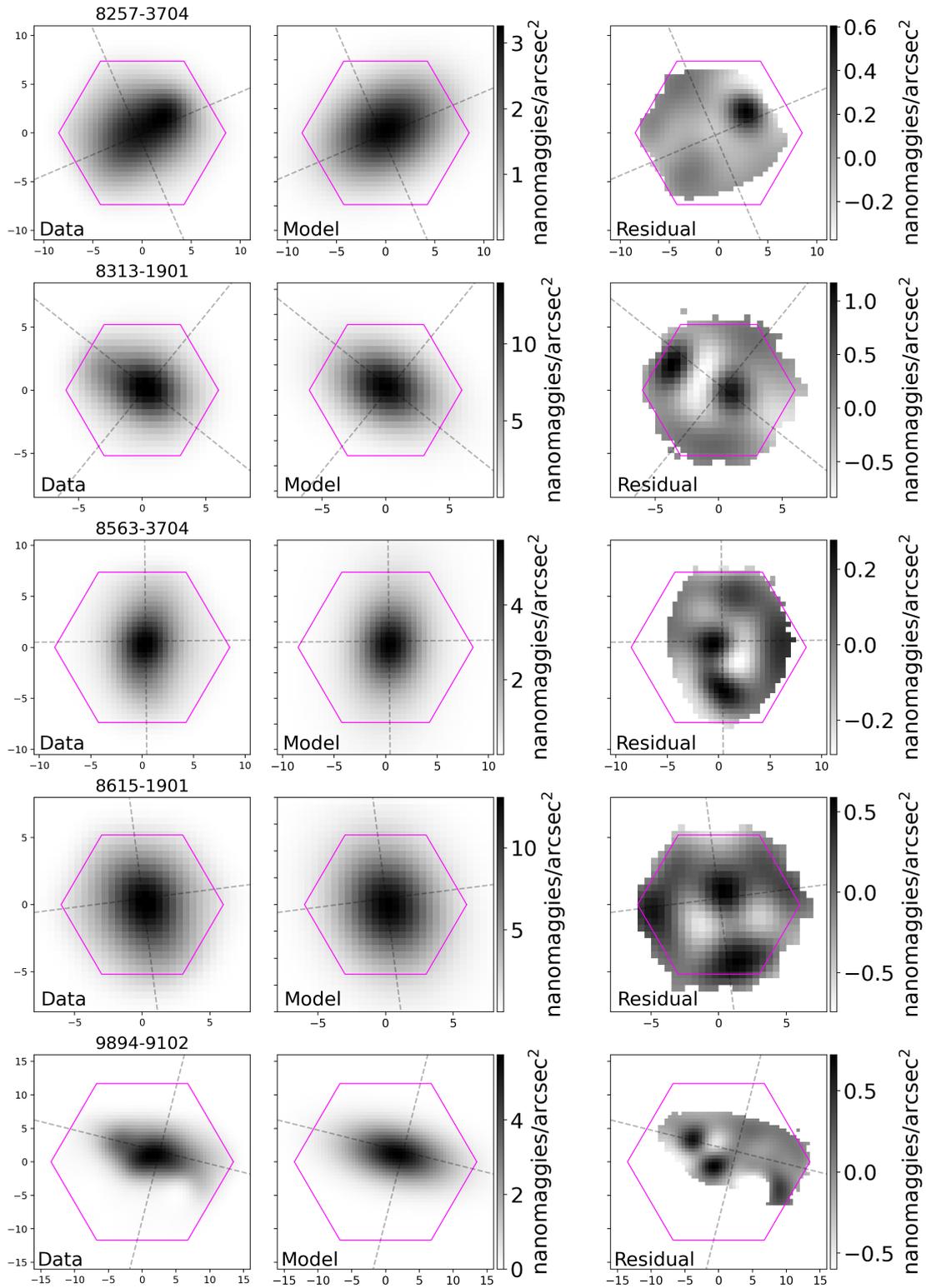


图 A-1 观测时刻  $g$  波段图像的 GALFIT 拟合结果，主轴次轴采用 old2 的拟合结果。

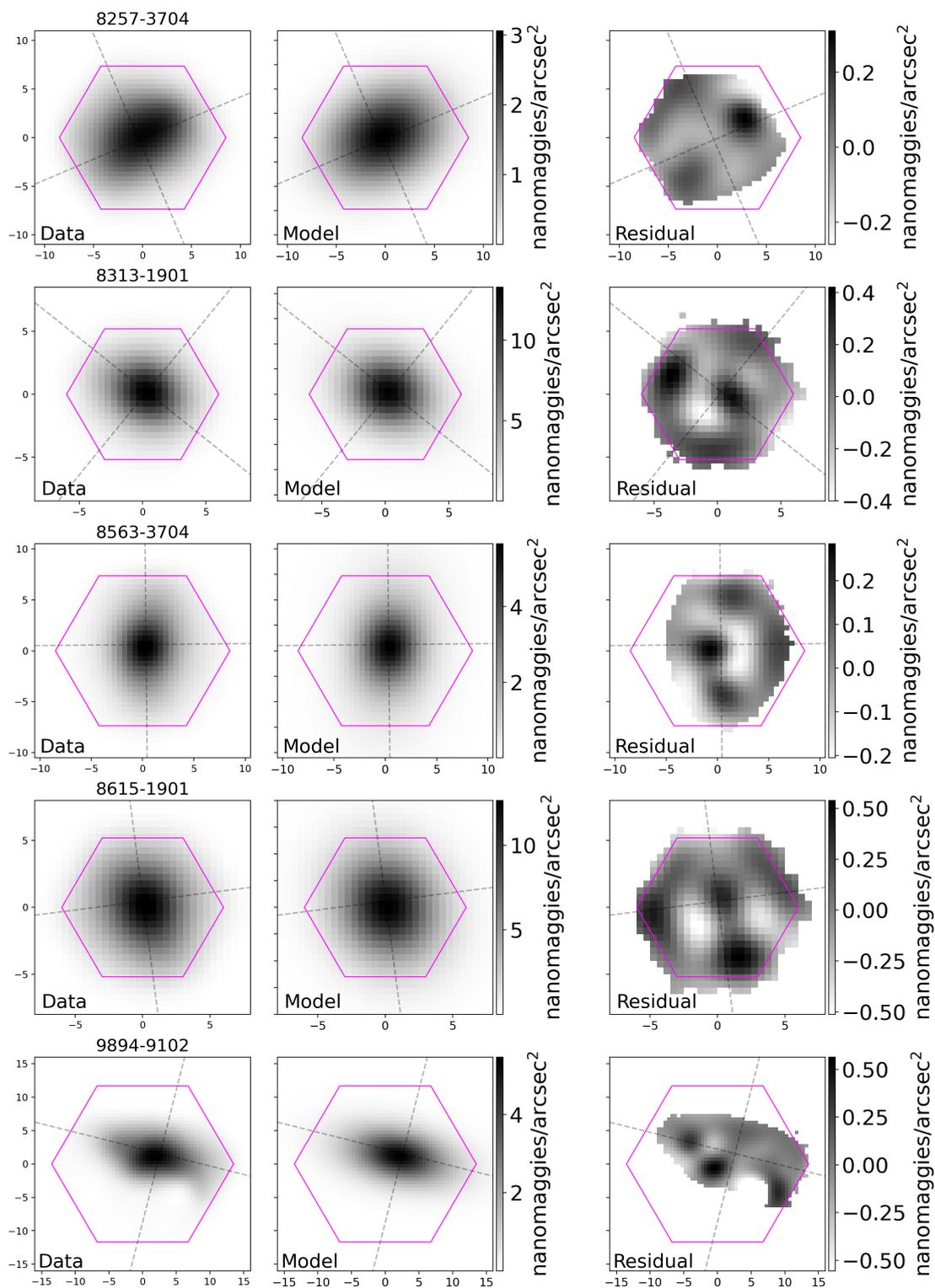


图 A-2 恒星  $g$  波段图像的 GALFIT 拟合结果，主轴次轴采用 old2 的拟合结果。

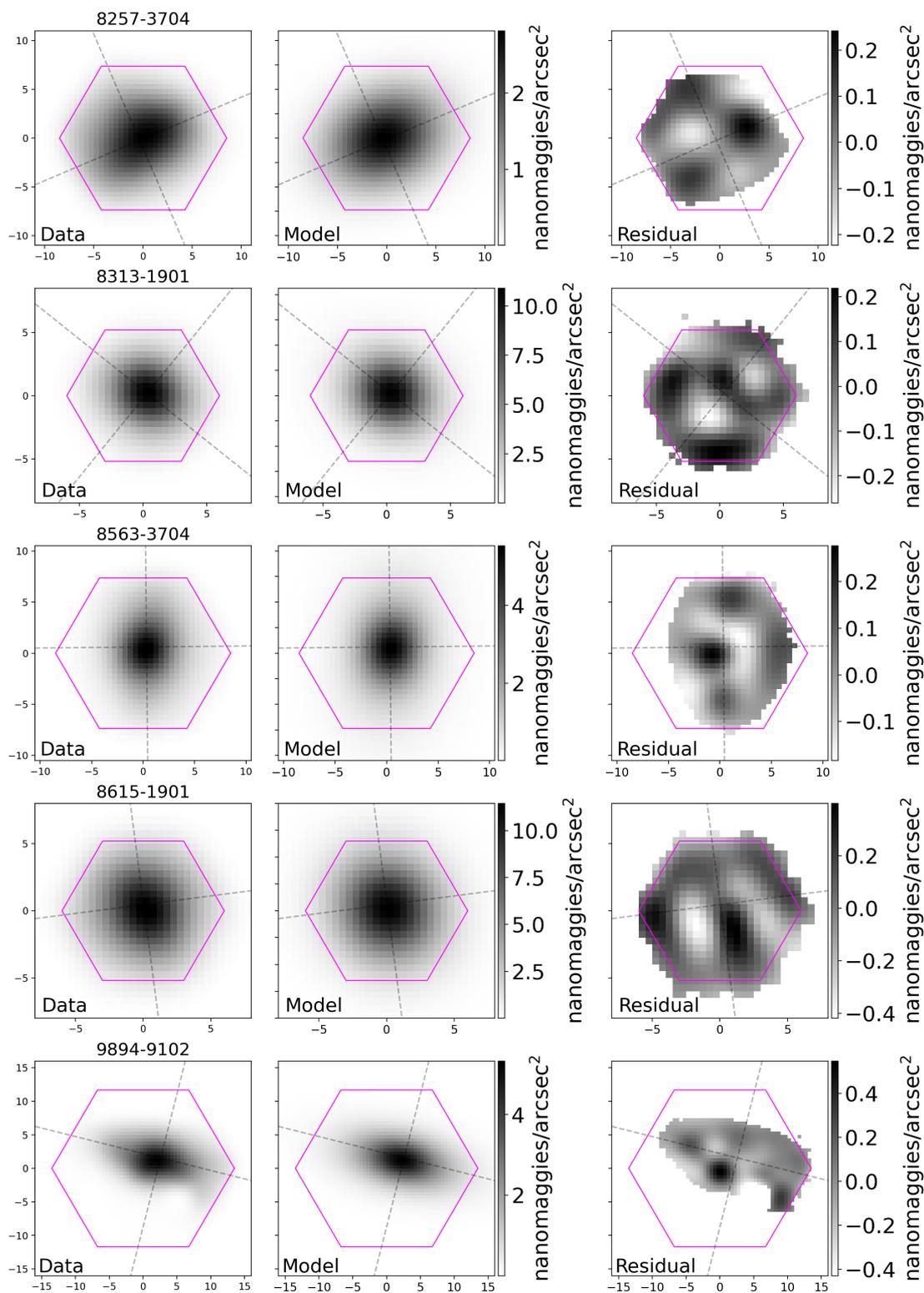


图 A-3 old1 ( $\geq 10$  Myr) 的星族图像的 GALFIT 拟合结果，主轴次轴采用 old2 的拟合结果。

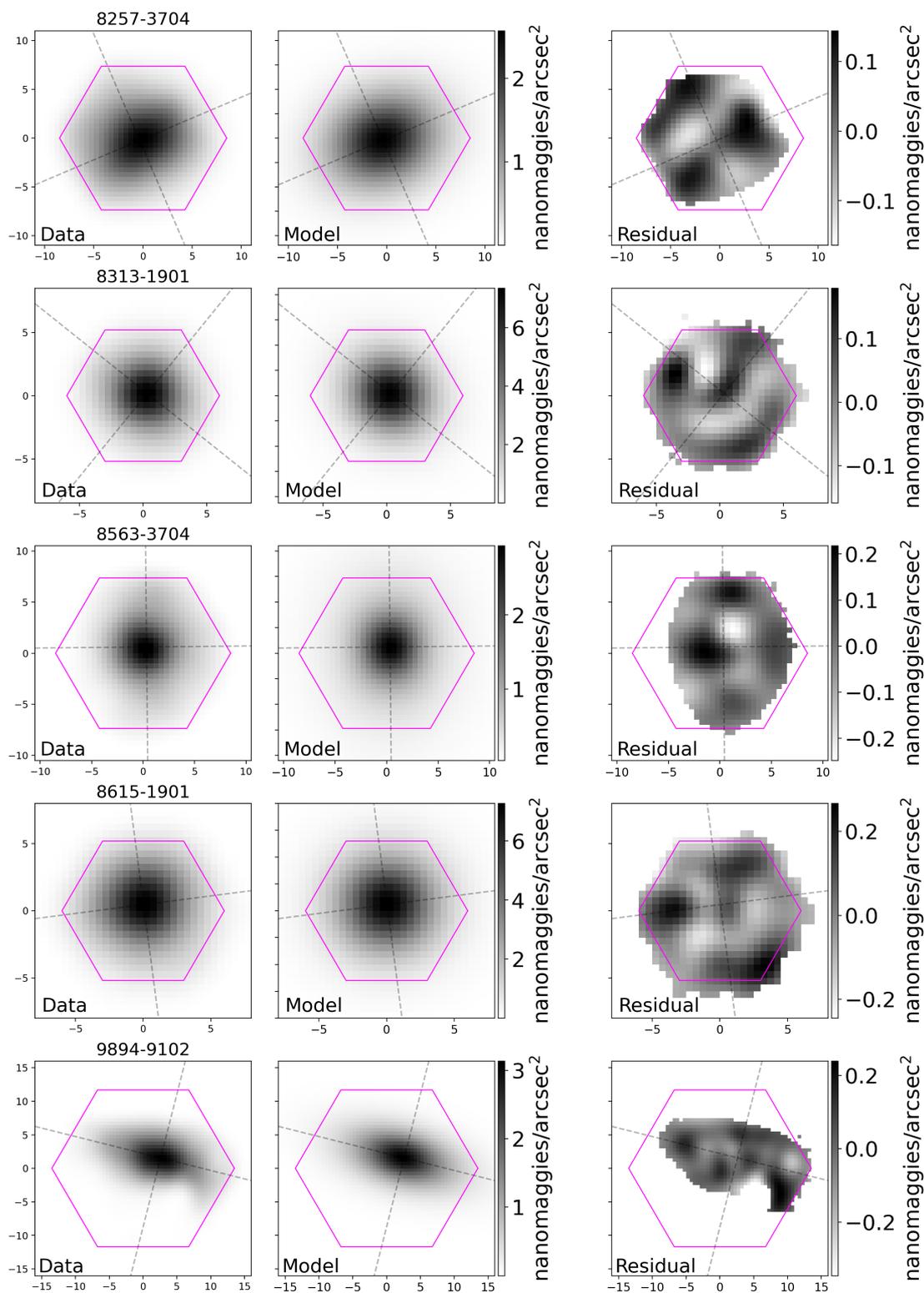


图 A-4 old3 ( $\geq 500$  Myr) 的星族图像的 GALFIT 拟合结果，主轴次轴采用 old2 的拟合结果。

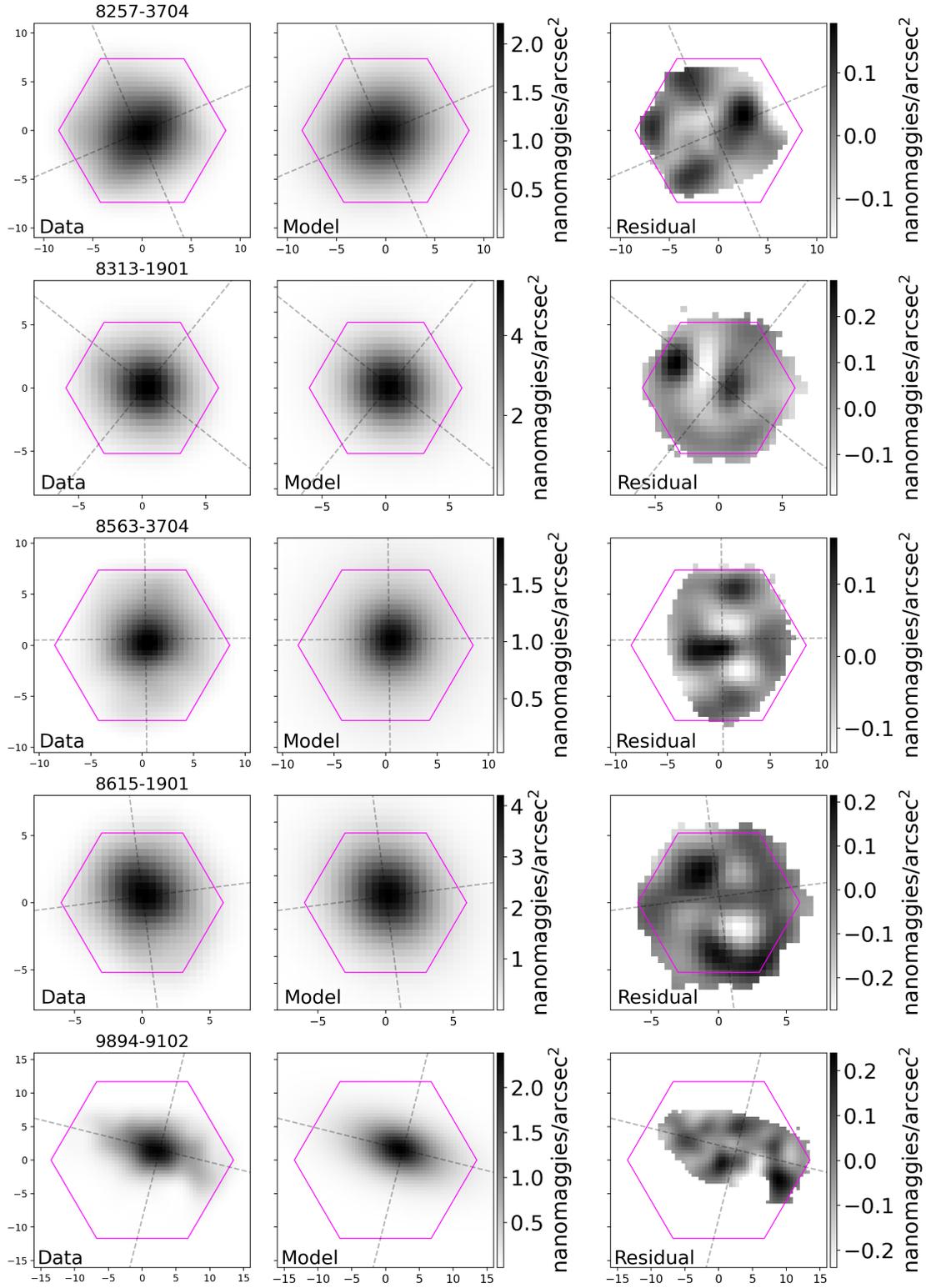


图 A-5 old4 ( $\geq 1$  Gyr) 的星族图像的 GALFIT 拟合结果, 主轴次轴采用 old2 的拟合结果。

## A.2 五个星系的年轻星族不同年龄段内的图像

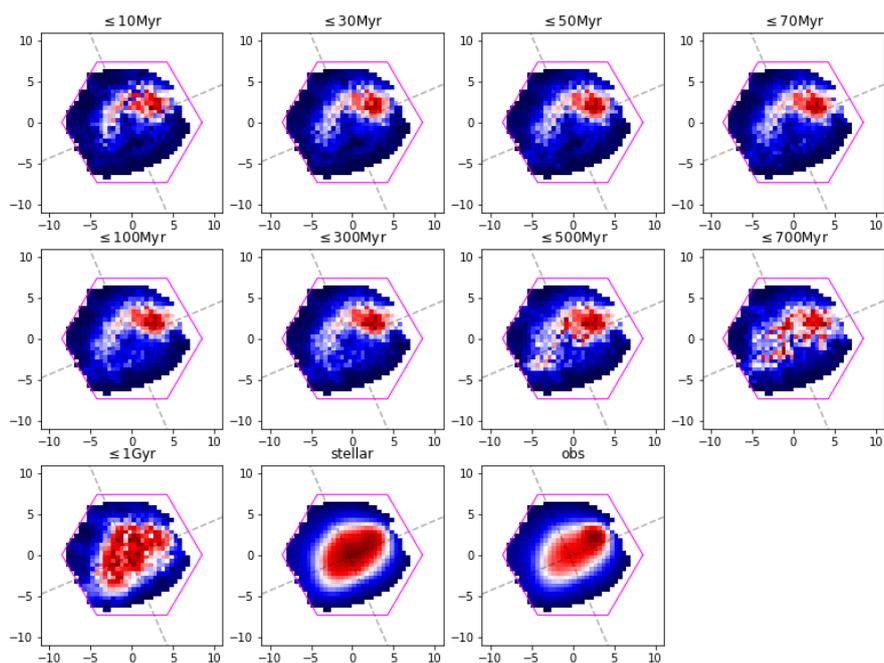


图 A-6 8257-3704 年轻于九个年龄节点星族图像、恒星连续谱图像和观测图像，未经过平滑处理。

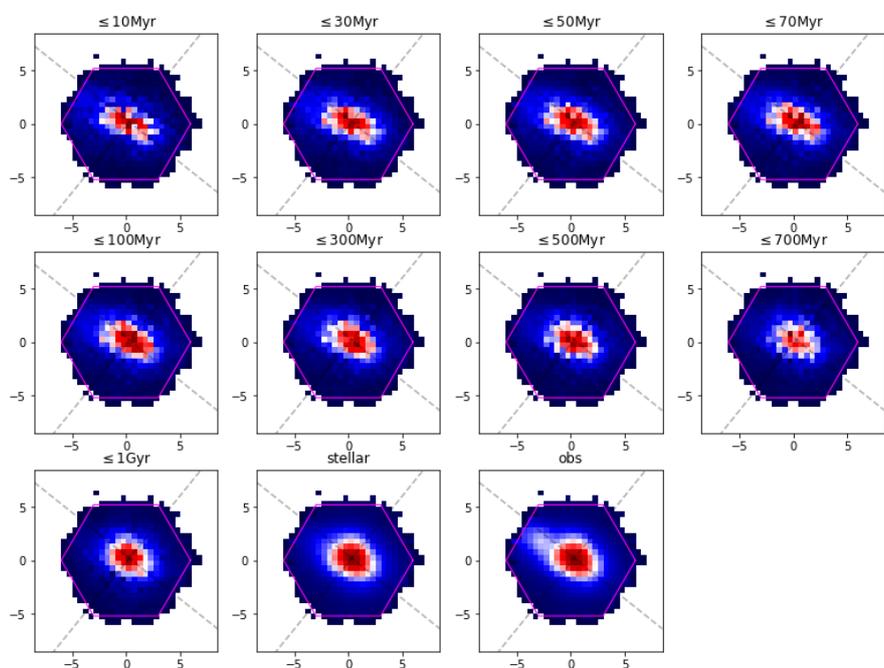


图 A-7 8313-1901 年轻于九个年龄节点星族图像、恒星连续谱图像和观测图像，未经过平滑处理。

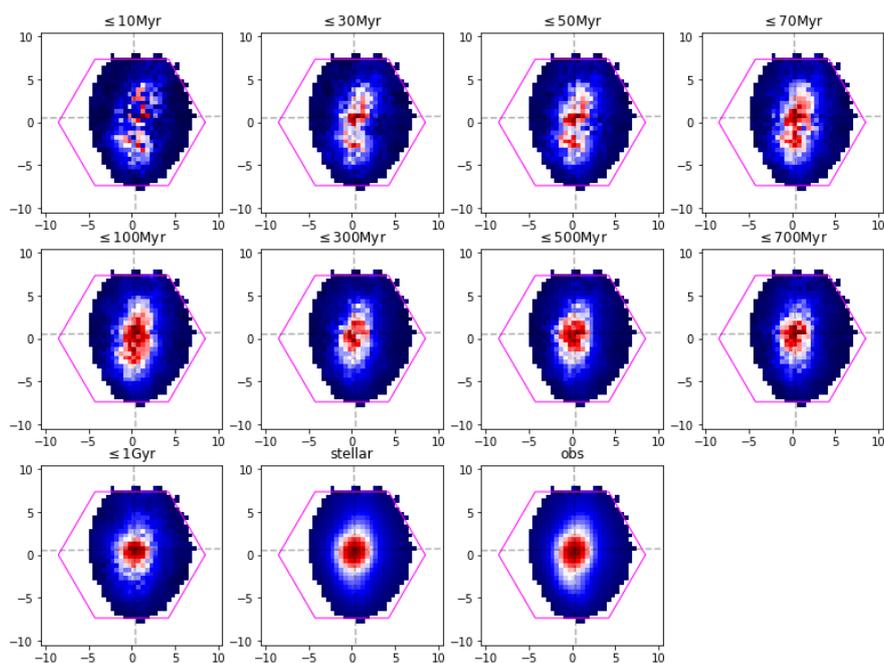


图 A-8 8563-3704 年轻于九个年龄节点星族图像、恒星连续谱图像和观测图像，未经过平滑处理。

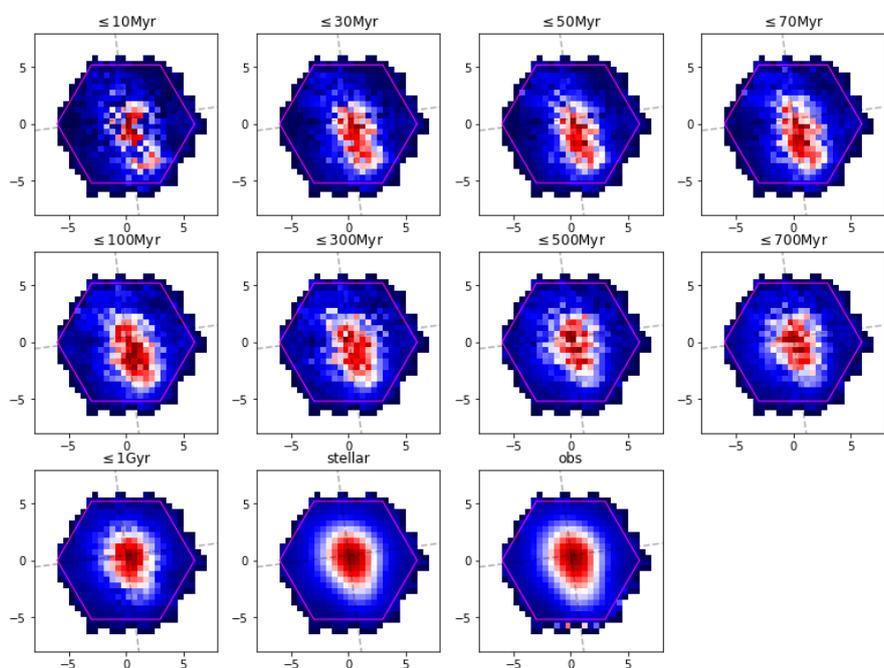


图 A-9 8615-1901 年轻于九个年龄节点星族图像、恒星连续谱图像和观测图像，未经过平滑处理。

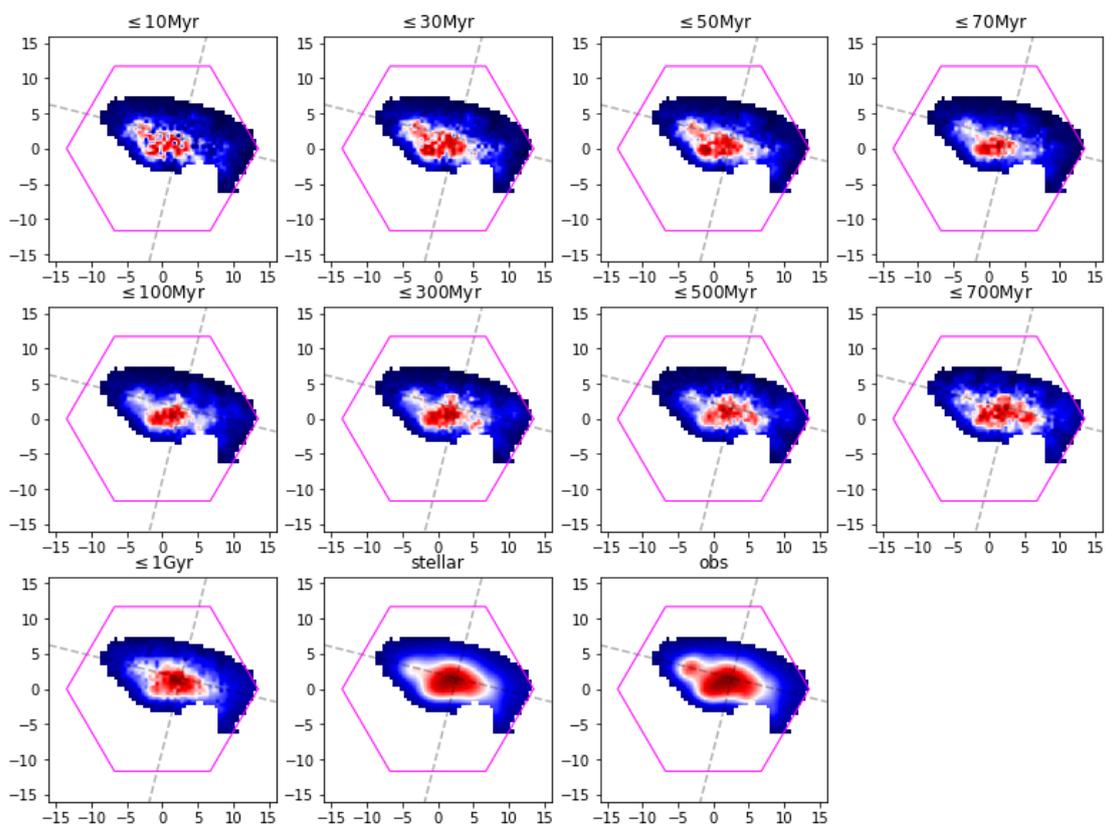


图 A-10 9894-9102 年轻于九个年龄节点星族图像、恒星连续谱图像和观测图像，未经过平滑处理。



## 参考文献

- 梁艳春, Francois H, 邓李才, 等. 星系金属丰度的研究进展 (I) 定标方法 [J]. 天文学进展, 2006, 24(4): 335-361.
- Aihara H, Arimoto N, Armstrong R, et al. The Hyper Suprime-Cam SSP Survey: Overview and survey design [J/OL]. PASJ, 2018, 70: S4. DOI: [10.1093/pasj/psx066](https://doi.org/10.1093/pasj/psx066).
- Aihara H, AlSayyad Y, Ando M, et al. Third data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program [J/OL]. PASJ, 2022, 74(2): 247-272. DOI: [10.1093/pasj/psab122](https://doi.org/10.1093/pasj/psab122).
- Allen J T, Croom S M, Konstantopoulos I S, et al. The SAMI Galaxy Survey: Early Data Release [J/OL]. MNRAS, 2015, 446: 1567-1583. DOI: [10.1093/mnras/stu2057](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2057).
- Altay G, Theuns T, Schaye J, et al. The impact of different physical processes on the statistics of Lyman-limit and damped Lyman  $\alpha$  absorbers [J/OL]. MNRAS, 2013, 436(3): 2689-2707. DOI: [10.1093/mnras/stt1765](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1765).
- Amorín R, Aguerri J A L, Muñoz-Tuñón C, et al. The host in blue compact galaxies.. Structural properties and scaling relations [J/OL]. A&A, 2009, 501(1): 75-88. DOI: [10.1051/0004-6361/200809591](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200809591).
- Amorín R O, Muñoz-Tuñón C, Aguerri J A L, et al. The stellar host in blue compact dwarf galaxies. The need for a two-dimensional fit [J/OL]. A&A, 2007, 467(2): 541-558. DOI: [10.1051/0004-6361:20066152](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066152).
- Andersen D R, Bershadsky M A. The Photometric and Kinematic Structure of Face-on Disk Galaxies. III. Kinematic Inclinations from H $\alpha$  Velocity Fields [J/OL]. ApJ, 2013, 768(1): 41. DOI: [10.1088/0004-637X/768/1/41](https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/1/41).
- Annibali F, Cignoni M, Tosi M, et al. The Star Formation History of the Very Metal-poor Blue Compact Dwarf I Zw 18 from HST/ACS Data [J/OL]. AJ, 2013, 146(6): 144. DOI: [10.1088/0004-6256/146/6/144](https://doi.org/10.1088/0004-6256/146/6/144).
- Arellano-Córdova K Z, Rodríguez M. The  $T_e$ [N II]- $T_e$ [O III] temperature relation in H II regions and the reliability of strong-line methods [J/OL]. MNRAS, 2020, 497(1): 672-686. DOI: [10.1093/mnras/staa1759](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1759).
- 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).
- Barrera-Ballesteros J K, Heckman T, Sánchez S F, et al. SDSS-IV MaNGA: What Shapes the Distribution of Metals in Galaxies? Exploring the Roles of the Local Gas Fraction and Escape Velocity [J/OL]. ApJ, 2018, 852(2): 74. DOI: [10.3847/1538-4357/aa9b31](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa9b31).

- Barrera-Ballesteros J K, Heckman T M, Zhu G B, et al. Do galaxy global relationships emerge from local ones? The SDSS IV MaNGA surface mass density-metallicity relation [J/OL]. *MNRAS*, 2016, 463(3): 2513-2522. DOI: [10.1093/mnras/stw1984](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1984).
- Bekki K. Formation of blue compact dwarf galaxies from merging and interacting gas-rich dwarfs [J/OL]. *MNRAS*, 2008, 388(1): L10-L14. DOI: [10.1111/j.1745-3933.2008.00489.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2008.00489.x).
- 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).
- Binggeli B, Cameron L M. Dwarf galaxies in the Virgo cluster. II. Photometric techniques and basic data. [J]. *A&AS*, 1993, 98: 297.
- Blanton M R, Bershadsky 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: 28. DOI: [10.3847/1538-3881/aa7567](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa7567).
- Blanton M R, Dalcanton J, Eisenstein D, et al. The Luminosity Function of Galaxies in SDSS Commissioning Data [J/OL]. *AJ*, 2001, 121(5): 2358-2380. DOI: [10.1086/320405](https://doi.org/10.1086/320405).
- Bloom J V, Croom S M, Bryant J J, et al. The SAMI Galaxy Survey: gas content and interaction as the drivers of kinematic asymmetry [J/OL]. *MNRAS*, 2018, 476(2): 2339-2351. DOI: [10.1093/mnras/sty273](https://doi.org/10.1093/mnras/sty273).
- Blum R D, Burleigh K, Dey A, et al. The DECam Legacy Survey [C]//American Astronomical Society Meeting Abstracts: volume 228 American Astronomical Society Meeting Abstracts #228. 2016: 317.01.
- Bouché N, Finley H, Schroetter I, et al. Possible Signatures of a Cold-flow Disk from MUSE Using a  $z \sim 1$  Galaxy-Quasar Pair toward SDSS J1422-0001 [J/OL]. *ApJ*, 2016, 820(2): 121. DOI: [10.3847/0004-637X/820/2/121](https://doi.org/10.3847/0004-637X/820/2/121).
- Bournaud F, Elmegreen B G. Unstable Disks at High Redshift: Evidence for Smooth Accretion in Galaxy Formation [J/OL]. *ApJL*, 2009, 694(2): L158-L161. DOI: [10.1088/0004-637X/694/2/L158](https://doi.org/10.1088/0004-637X/694/2/L158).
- Brinks E, Klein U. Dark matter in the dwarf galaxy II Zwicky 40. [J/OL]. *MNRAS*, 1988, 231: 63P-67. DOI: [10.1093/mnras/231.1.63P](https://doi.org/10.1093/mnras/231.1.63P).
- Bruzual G, Charlot S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003 [J/OL]. *MNRAS*, 2003, 344(4): 1000-1028. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06897.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06897.x).
- Bundy K, Bershadsky 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: 7. DOI: [10.1088/0004-637X/798/1/7](https://doi.org/10.1088/0004-637X/798/1/7).

- Byler N, Dalcanton J J, Conroy C, et al. Nebular Continuum and Line Emission in Stellar Population Synthesis Models [J/OL]. *ApJ*, 2017, 840(1): 44. DOI: [10.3847/1538-4357/aa6c66](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6c66).
- Calzetti D. The Dust Opacity of Star-forming Galaxies [J/OL]. *PASP*, 2001, 113(790): 1449-1485. DOI: [10.1086/324269](https://doi.org/10.1086/324269).
- 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).
- Campos-Aguilar A, Moles M, Masegosa J. Empirical Characterization of Blue Dwarf Galaxies [J/OL]. *AJ*, 1993, 106: 1784. DOI: [10.1086/116764](https://doi.org/10.1086/116764).
- Cano-Díaz M, Sánchez S F, Zibetti S, et al. Spatially Resolved Star Formation Main Sequence of Galaxies in the CALIFA Survey [J/OL]. *ApJL*, 2016, 821(2): L26. DOI: [10.3847/2041-8205/821/2/L26](https://doi.org/10.3847/2041-8205/821/2/L26).
- Caon N, Cairós L M, Aguerri J A L, et al. Unveiling the Nature of the Low Surface Brightness Stellar Host in Blue Compact Dwarf Galaxies [J/OL]. *ApJS*, 2005, 157(2): 218-227. DOI: [10.1086/428286](https://doi.org/10.1086/428286).
- Cappellari M, Copin Y. Adaptive spatial binning of integral-field spectroscopic data using Voronoi tessellations [J/OL]. *MNRAS*, 2003, 342(2): 345-354. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06541.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06541.x).
- Chen H W, Lanzetta K M, Webb J K. The Origin of C IV Absorption Systems at Redshifts  $z < 1$ : Discovery of Extended C IV Envelopes around Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2001, 556(1): 158-163. DOI: [10.1086/321537](https://doi.org/10.1086/321537).
- Chen Y M, Shi Y, Tremonti C A, et al. The growth of the central region by acquisition of counterrotating gas in star-forming galaxies [J/OL]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13269. DOI: [10.1038/ncomms13269](https://doi.org/10.1038/ncomms13269).
- Choi J, Dotter A, Conroy C, et al. Mesa Isochrones and Stellar Tracks (MIST). I. Solar-scaled Models [J/OL]. *ApJ*, 2016, 823(2): 102. DOI: [10.3847/0004-637X/823/2/102](https://doi.org/10.3847/0004-637X/823/2/102).
- Cid Fernandes R, Mateus A, Sodré L, et al. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method [J/OL]. *MNRAS*, 2005, 358(2): 363-378. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.08752.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.08752.x).
- Conroy C. Modeling the Panchromatic Spectral Energy Distributions of Galaxies [J/OL]. *ARA&A*, 2013, 51(1): 393-455. DOI: [10.1146/annurev-astro-082812-141017](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082812-141017).
- Conroy C, Gunn J E. The Propagation of Uncertainties in Stellar Population Synthesis Modeling. III. Model Calibration, Comparison, and Evaluation [J/OL]. *ApJ*, 2010, 712(2): 833-857. DOI: [10.1088/0004-637X/712/2/833](https://doi.org/10.1088/0004-637X/712/2/833).
- Conroy C, Gunn J E, White M. The Propagation of Uncertainties in Stellar Population Synthesis Modeling. I. The Relevance of Uncertain Aspects of Stellar Evolution and the Initial Mass Func-

- tion to the Derived Physical Properties of Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2009, 699(1): 486-506. DOI: [10.1088/0004-637X/699/1/486](https://doi.org/10.1088/0004-637X/699/1/486).
- Conselice C J. The Relationship between Stellar Light Distributions of Galaxies and Their Formation Histories [J/OL]. *ApJS*, 2003, 147(1): 1-28. DOI: [10.1086/375001](https://doi.org/10.1086/375001).
- Conselice C J, Blackburne J A, Papovich C. The Luminosity, Stellar Mass, and Number Density Evolution of Field Galaxies of Known Morphology from  $z = 0.5$  to 3 [J/OL]. *ApJ*, 2005, 620(2): 564-583. DOI: [10.1086/426102](https://doi.org/10.1086/426102).
- Crain R A, Theuns T, Dalla Vecchia C, et al. Galaxies-intergalactic medium interaction calculation - I. Galaxy formation as a function of large-scale environment [J/OL]. *MNRAS*, 2009, 399(4): 1773-1794. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.15402.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15402.x).
- Cresci G, Mannucci F, Maiolino R, et al. Gas accretion as the origin of chemical abundance gradients in distant galaxies [J/OL]. *Nature*, 2010, 467(7317): 811-813. DOI: [10.1038/nature09451](https://doi.org/10.1038/nature09451).
- Croom S M, Lawrence J S, Bland-Hawthorn J, et al. The Sydney-AAO Multi-object Integral field spectrograph [J/OL]. *MNRAS*, 2012, 421: 872-893. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.20365.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.20365.x).
- Curti M, Cresci G, Mannucci F, et al. New fully empirical calibrations of strong-line metallicity indicators in star-forming galaxies [J/OL]. *MNRAS*, 2017, 465(2): 1384-1400. DOI: [10.1093/mnras/stw2766](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2766).
- Davies J I, Phillipps S. The evolution of dwarf galaxies. [J/OL]. *MNRAS*, 1988, 233: 553-559. DOI: [10.1093/mnras/233.3.553](https://doi.org/10.1093/mnras/233.3.553).
- Dekel A, Birnboim Y, Engel G, et al. Cold streams in early massive hot haloes as the main mode of galaxy formation [J/OL]. *Nature*, 2009, 457: 451-454. DOI: [10.1038/nature07648](https://doi.org/10.1038/nature07648).
- Denicoló G, Terlevich R, Terlevich E. New light on the search for low-metallicity galaxies - I. The N2 calibrator [J/OL]. *MNRAS*, 2002, 330(1): 69-74. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2002.05041.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2002.05041.x).
- Dey A, Schlegel D J, Lang D, et al. Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys [J/OL]. *AJ*, 2019, 157(5): 168. DOI: [10.3847/1538-3881/ab089d](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab089d).
- Dopita M A, Kewley L J, Sutherland R S, et al. Chemical abundances in high-redshift galaxies: a powerful new emission line diagnostic [J/OL]. *Ap&SS*, 2016, 361: 61. DOI: [10.1007/s10509-016-2657-8](https://doi.org/10.1007/s10509-016-2657-8).
- 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: 77. DOI: [10.1088/0004-6256/149/2/77](https://doi.org/10.1088/0004-6256/149/2/77).
- Duffy A R, Meyer M J, Staveley-Smith L, et al. Predictions for ASKAP neutral hydrogen surveys [J/OL]. *MNRAS*, 2012, 426(4): 3385-3402. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21987.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21987.x).
- Eggen O J, Lynden-Bell D, Sandage A R. Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed. [J/OL]. *ApJ*, 1962, 136: 748. DOI: [10.1086/147433](https://doi.org/10.1086/147433).

- Elmegreen B G, Zhang H X, Hunter D A. In-spiraling Clumps in Blue Compact Dwarf Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2012, 747(2): 105. DOI: [10.1088/0004-637X/747/2/105](https://doi.org/10.1088/0004-637X/747/2/105).
- Elmegreen B G, Elmegreen D M, Sánchez Almeida J, et al. Massive Clumps in Local Galaxies: Comparisons with High-redshift Clumps [J/OL]. *ApJ*, 2013, 774(1): 86. DOI: [10.1088/0004-637X/774/1/86](https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/1/86).
- Elmegreen D M, Elmegreen B G, Hirst A C. Discovery of Face-on Counterparts of Chain Galaxies in the Tadpole Advanced Camera for Surveys Field [J/OL]. *ApJL*, 2004, 604(1): L21-L23. DOI: [10.1086/383312](https://doi.org/10.1086/383312).
- Feng S, Shen S Y, Yuan F T, et al. The Velocity Map Asymmetry of Ionized Gas in MaNGA. I. The Catalog and General Properties [J/OL]. *ApJS*, 2022, 262(1): 6. DOI: [10.3847/1538-4365/ac80f2](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac80f2).
- Ferland G J, Porter R L, van Hoof P A M, et al. The 2013 Release of Cloudy [J]. *RMxAA*, 2013, 49: 137-163.
- Fernández X, Gim H B, van Gorkom J H, et al. Highest Redshift Image of Neutral Hydrogen in Emission: A CHILES Detection of a Starbursting Galaxy at  $z = 0.376$  [J/OL]. *ApJL*, 2016, 824(1): L1. DOI: [10.3847/2041-8205/824/1/L1](https://doi.org/10.3847/2041-8205/824/1/L1).
- Finlator K, Davé R. The origin of the galaxy mass-metallicity relation and implications for galactic outflows [J/OL]. *MNRAS*, 2008, 385(4): 2181-2204. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.12991.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.12991.x).
- Fitzpatrick E L. Correcting for the Effects of Interstellar Extinction [J/OL]. *PASP*, 1999, 111(755): 63-75. DOI: [10.1086/316293](https://doi.org/10.1086/316293).
- Foreman-Mackey D, Sick J, Johnson B. python-fsps: Python bindings to FSPS (v0.1.1) [M/OL]. Zenodo, 2014. DOI: [10.5281/zenodo.12157](https://doi.org/10.5281/zenodo.12157).
- Foreman-Mackey D, Hogg D W, Lang D, et al. emcee: The MCMC Hammer [J/OL]. *PASP*, 2013, 125(925): 306. DOI: [10.1086/670067](https://doi.org/10.1086/670067).
- Fox A J, Wakker B P, Barger K A, et al. The COS/UVES Absorption Survey of the Magellanic Stream. III. Ionization, Total Mass, and Inflow Rate onto the Milky Way [J/OL]. *ApJ*, 2014, 787(2): 147. DOI: [10.1088/0004-637X/787/2/147](https://doi.org/10.1088/0004-637X/787/2/147).
- Fraternali F, Binney J J. Accretion of gas on to nearby spiral galaxies [J/OL]. *MNRAS*, 2008, 386(2): 935-944. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13071.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13071.x).
- Fukugita M, Ichikawa T, Gunn J E, et al. The Sloan Digital Sky Survey Photometric System [J/OL]. *AJ*, 1996, 111: 1748. DOI: [10.1086/117915](https://doi.org/10.1086/117915).
- Fumagalli M, Prochaska J X, Kasen D, et al. Absorption-line systems in simulated galaxies fed by cold streams [J/OL]. *MNRAS*, 2011, 418(3): 1796-1821. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.19599.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19599.x).
- Ge J, Mao S, Lu Y, et al. SDSS-IV MaNGA: Stellar M/L gradients and the M/L-colour relation in galaxies [J/OL]. *MNRAS*, 2021, 507(2): 2488-2499. DOI: [10.1093/mnras/stab2341](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2341).

- Geha M, Blanton M R, Yan R, et al. A Stellar Mass Threshold for Quenching of Field Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2012, 757(1): 85. DOI: [10.1088/0004-637X/757/1/85](https://doi.org/10.1088/0004-637X/757/1/85).
- Genel S, Dekel A, Cacciato M. On the effect of cosmological inflow on turbulence and instability in galactic discs [J/OL]. *MNRAS*, 2012, 425(1): 788-800. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21652.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21652.x).
- Gil de Paz A, Madore B F, Pevunova O. Palomar/Las Campanas Imaging Atlas of Blue Compact Dwarf Galaxies. I. Images and Integrated Photometry [J/OL]. *ApJS*, 2003, 147(1): 29-59. DOI: [10.1086/374737](https://doi.org/10.1086/374737).
- Gomes J M, Papaderos P. Fitting Analysis using Differential evolution Optimization (FADO): Spectral population synthesis through genetic optimization under self-consistency boundary conditions [J/OL]. *A&A*, 2017, 603: A63. DOI: [10.1051/0004-6361/201628986](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628986).
- Gordon D, Gottesman S T. H I observations of blue compact galaxies. [J/OL]. *AJ*, 1981, 86: 161-177. DOI: [10.1086/112870](https://doi.org/10.1086/112870).
- Graham A W, Guzmán R. HST Photometry of Dwarf Elliptical Galaxies in Coma, and an Explanation for the Alleged Structural Dichotomy between Dwarf and Bright Elliptical Galaxies [J/OL]. *AJ*, 2003, 125(6): 2936-2950. DOI: [10.1086/374992](https://doi.org/10.1086/374992).
- 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: 2332-2359. DOI: [10.1086/500975](https://doi.org/10.1086/500975).
- Guseva N G, Izotov Y I, Papaderos P, et al. Balmer jump temperature determination in a large sample of low-metallicity HII regions [J/OL]. *A&A*, 2007, 464(3): 885-893. DOI: [10.1051/0004-6361:20066067](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066067).
- Hao C N, Kennicutt R C, Johnson B D, et al. Dust-corrected Star Formation Rates of Galaxies. II. Combinations of Ultraviolet and Infrared Tracers [J/OL]. *ApJ*, 2011, 741(2): 124. DOI: [10.1088/0004-637X/741/2/124](https://doi.org/10.1088/0004-637X/741/2/124).
- Haynes M P, Giovanelli R, Kent B R, et al. The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The ALFALFA Extragalactic H I Source Catalog [J/OL]. *ApJ*, 2018, 861(1): 49. DOI: [10.3847/1538-4357/aac956](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac956).
- Heitsch F, Putman M E. The Fate of High-Velocity Clouds: Warm or Cold Cosmic Rain? [J/OL]. *ApJ*, 2009, 698(2): 1485-1496. DOI: [10.1088/0004-637X/698/2/1485](https://doi.org/10.1088/0004-637X/698/2/1485).
- Henkel C, Hunt L K, Izotov Y I. The Interstellar Medium of Dwarf Galaxies [J/OL]. *Galaxies*, 2022, 10(1): 11. DOI: [10.3390/galaxies10010011](https://doi.org/10.3390/galaxies10010011).
- Ho I T. A machine learning artificial neural network calibration of the strong-line oxygen abundance [J/OL]. *MNRAS*, 2019, 485(3): 3569-3579. DOI: [10.1093/mnras/stz649](https://doi.org/10.1093/mnras/stz649).

- Hsieh B C, Lin L, Lin J H, et al. SDSS-IV MaNGA: Spatially Resolved Star Formation Main Sequence and LI(N)ER Sequence [J/OL]. *ApJL*, 2017, 851(2): L24. DOI: [10.3847/2041-8213/aa9d80](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9d80).
- Hwang H C, Barrera-Ballesteros J K, Heckman T M, et al. Anomalously Low-metallicity Regions in MaNGA Star-forming Galaxies: Accretion Caught in Action? [J/OL]. *ApJ*, 2019, 872: 144. DOI: [10.3847/1538-4357/aaf7a3](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf7a3).
- Iyer K G, Gawiser E, Faber S M, et al. Nonparametric Star Formation History Reconstruction with Gaussian Processes. I. Counting Major Episodes of Star Formation [J/OL]. *ApJ*, 2019, 879(2): 116. DOI: [10.3847/1538-4357/ab2052](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2052).
- Izotov Y I, Thuan T X. Deep Hubble Space Telescope ACS Observations of I Zw 18: a Young Galaxy in Formation [J/OL]. *ApJ*, 2004, 616(2): 768-782. DOI: [10.1086/424990](https://doi.org/10.1086/424990).
- Izotov Y I, Guseva N G, Thuan T X. Green Pea Galaxies and Cohorts: Luminous Compact Emission-line Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey [J/OL]. *ApJ*, 2011, 728(2): 161. DOI: [10.1088/0004-637X/728/2/161](https://doi.org/10.1088/0004-637X/728/2/161).
- Jaiswal S, Omar A. H I imaging of dwarf star-forming galaxies: masses, morphologies, and gas deficiencies [J/OL]. *MNRAS*, 2020, 498(4): 4745-4789. DOI: [10.1093/mnras/staa2420](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2420).
- Janowiecki S, Salzer J J. The Unique Structural Parameters of the Underlying Host Galaxies in Blue Compact Dwarfs [J/OL]. *ApJ*, 2014, 793(2): 109. DOI: [10.1088/0004-637X/793/2/109](https://doi.org/10.1088/0004-637X/793/2/109).
- Jaskot A E, Oey M S. The Origin and Optical Depth of Ionizing Radiation in the “Green Pea” Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2013, 766(2): 91. DOI: [10.1088/0004-637X/766/2/91](https://doi.org/10.1088/0004-637X/766/2/91).
- Ji X, Li C, Yan R, et al. SDSS-IV MaNGA: the physical origin of off-galaxy H $\alpha$  blobs in the local Universe [J]. *arXiv e-prints*, 2021: arXiv:2101.07293.
- Jin Y, Chen Y, Shi Y, et al. SDSS-IV MaNGA: properties of galaxies with kinematically decoupled stellar and gaseous components [J/OL]. *MNRAS*, 2016, 463(1): 913-926. DOI: [10.1093/mnras/stw2055](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2055).
- Johnson B D. SEDPY: Modules for storing and operating on astronomical source spectral energy distribution [Z]. 2019: ascl:1905.026.
- Johnson B D, Leja J, Conroy C, et al. Stellar Population Inference with Prospector [J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, 254(2): 22. DOI: [10.3847/1538-4365/abef67](https://doi.org/10.3847/1538-4365/abef67).
- Johnson H L, Morgan W W. Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the Revised System of the Yerkes Spectral Atlas. [J/OL]. *ApJ*, 1953, 117: 313. DOI: [10.1086/145697](https://doi.org/10.1086/145697).
- Joung M R, Bryan G L, Putman M E. Gas Condensation in the Galactic Halo [J/OL]. *ApJ*, 2012, 745(2): 148. DOI: [10.1088/0004-637X/745/2/148](https://doi.org/10.1088/0004-637X/745/2/148).
- Kang X, Chang R, Yin J, et al. The evolution and star-formation history of M33 [J/OL]. *Monthly*

- Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 426(2): 1455-1464. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21778.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21778.x).
- Karachentsev I D, Kaisina E I. Dwarf Galaxies in the Local Volume [J/OL]. *Astrophysical Bulletin*, 2019, 74(2): 111-127. DOI: [10.1134/S1990341319020019](https://doi.org/10.1134/S1990341319020019).
- Kartaltepe J S, Dickinson M, Alexander D M, et al. GOODS-Herschel and CANDELS: The Morphologies of Ultraluminous Infrared Galaxies at  $z \sim 2$  [J/OL]. *ApJ*, 2012, 757(1): 23. DOI: [10.1088/0004-637X/757/1/23](https://doi.org/10.1088/0004-637X/757/1/23).
- Kashiwagi Y, Inoue A K, Isobe Y, et al. Subaru/FOCAS IFU revealed the metallicity gradient of a local extremely metal-poor galaxy [J/OL]. *PASJ*, 2021, 73(6): 1631-1637. DOI: [10.1093/pasj/psab100](https://doi.org/10.1093/pasj/psab100).
- Kauffmann G, Heckman T M, Tremonti C, et al. The host galaxies of active galactic nuclei [J/OL]. *MNRAS*, 2003, 346: 1055-1077. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x).
- Kauffmann G, Heckman T M, White S D M, et al. Stellar masses and star formation histories for  $10^5$  galaxies from the Sloan Digital Sky Survey [J/OL]. *MNRAS*, 2003, 341(1): 33-53. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06291.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06291.x).
- Kennicutt J, Robert C. The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 1998, 498 (2): 541-552. DOI: [10.1086/305588](https://doi.org/10.1086/305588).
- 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: 121-140. DOI: [10.1086/321545](https://doi.org/10.1086/321545).
- Kewley L J, Ellison S L. Metallicity Calibrations and the Mass-Metallicity Relation for Star-forming Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2008, 681(2): 1183-1204. DOI: [10.1086/587500](https://doi.org/10.1086/587500).
- Kewley L J, Dopita M A, Leitherer C, et al. Theoretical Evolution of Optical Strong Lines across Cosmic Time [J/OL]. *ApJ*, 2013, 774(2): 100. DOI: [10.1088/0004-637X/774/2/100](https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/2/100).
- Kewley L J, Nicholls D C, Sutherland R S. Understanding Galaxy Evolution Through Emission Lines [J/OL]. *ARA&A*, 2019, 57: 511-570. DOI: [10.1146/annurev-astro-081817-051832](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-051832).
- Kobulnicky H A, Kewley L J. Metallicities of  $0.3 < z < 1.0$  Galaxies in the GOODS-North Field [J/OL]. *ApJ*, 2004, 617(1): 240-261. DOI: [10.1086/425299](https://doi.org/10.1086/425299).
- Koleva M, De Rijcke S, Zeilinger W W, et al. On the origin of bursts in blue compact dwarf galaxies: clues from kinematics and stellar populations [J/OL]. *MNRAS*, 2014, 441(1): 452-469. DOI: [10.1093/mnras/stu556](https://doi.org/10.1093/mnras/stu556).
- Kormendy J, Kennicutt J, Robert C. Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in

- Disk Galaxies [J/OL]. *ARA&A*, 2004, 42(1): 603-683. DOI: [10.1146/annurev.astro.42.053102.134024](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.42.053102.134024).
- Kreckel K, Platen E, Aragón-Calvo M A, et al. The Void Galaxy Survey: Optical Properties and H I Morphology and Kinematics [J/OL]. *AJ*, 2012, 144(1): 16. DOI: [10.1088/0004-6256/144/1/16](https://doi.org/10.1088/0004-6256/144/1/16).
- Kriek M, Conroy C. The Dust Attenuation Law in Distant Galaxies: Evidence for Variation with Spectral Type [J/OL]. *ApJL*, 2013, 775(1): L16. DOI: [10.1088/2041-8205/775/1/L16](https://doi.org/10.1088/2041-8205/775/1/L16).
- Krueger H, Fritze-v. Alvensleben U, Loose H H. Optical and near infrared spectral energy distributions of blue compact galaxies from evolutionary synthesis [J]. *A&A*, 1995, 303: 41.
- Lagos P, Telles E, Melnick J. Narrow-band  $\{H\}\beta$  images of star-formation regions in HII galaxies [J/OL]. *A&A*, 2007, 476(1): 89-96. DOI: [10.1051/0004-6361:20066824](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20066824).
- Lagos P, Telles E, Nigoche-Netro A, et al. Star Cluster Complexes and the Host Galaxy in Three H II Galaxies: Mrk 36, UM 408, and UM 461 [J/OL]. *AJ*, 2011, 142(5): 162. DOI: [10.1088/0004-6256/142/5/162](https://doi.org/10.1088/0004-6256/142/5/162).
- Lagos P, Scott T C, Nigoche-Netro A, et al. Detecting metal-poor gas accretion in the star-forming dwarf galaxies UM 461 and Mrk 600 [J/OL]. *MNRAS*, 2018, 477(1): 392-411. DOI: [10.1093/mnras/sty601](https://doi.org/10.1093/mnras/sty601).
- Lassen A E, Riffel R, Chies-Santos A L, et al. The metal-poor dwarf irregular galaxy candidate next to Mrk 1172 [J/OL]. *MNRAS*, 2021, 506(3): 3527-3539. DOI: [10.1093/mnras/stab1838](https://doi.org/10.1093/mnras/stab1838).
- Law D R, Steidel C C, Erb D K, et al. The Kiloparsec-scale Kinematics of High-redshift Star-forming Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2009, 697(2): 2057-2082. DOI: [10.1088/0004-637X/697/2/2057](https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/2057).
- Law D R, Yan R, Bershady M A, et al. Observing Strategy for the SDSS-IV/MaNGA IFU Galaxy Survey [J/OL]. *AJ*, 2015, 150(1): 19. DOI: [10.1088/0004-6256/150/1/19](https://doi.org/10.1088/0004-6256/150/1/19).
- Law D R, Cherinka B, Yan R, et al. The Data Reduction Pipeline for the SDSS-IV MaNGA IFU Galaxy Survey [J/OL]. *AJ*, 2016, 152(4): 83. DOI: [10.3847/0004-6256/152/4/83](https://doi.org/10.3847/0004-6256/152/4/83).
- Law D R, Westfall K B, Bershady M A, et al. SDSS-IV MaNGA: Modeling the Spectral Line-spread Function to Subpercent Accuracy [J/OL]. *AJ*, 2021, 161(2): 52. DOI: [10.3847/1538-3881/abcaa2](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abcaa2).
- Lehner N, Howk J C. A Reservoir of Ionized Gas in the Galactic Halo to Sustain Star Formation in the Milky Way [J/OL]. *Science*, 2011, 334(6058): 955. DOI: [10.1126/science.1209069](https://doi.org/10.1126/science.1209069).
- Leitherer C, Schaerer D, Goldader J D, et al. Starburst99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation [J/OL]. *ApJS*, 1999, 123(1): 3-40. DOI: [10.1086/313233](https://doi.org/10.1086/313233).
- Leitherer C, Ekström S, Meynet G, et al. The Effects of Stellar Rotation. II. A Comprehensive Set of Starburst99 Models [J/OL]. *ApJS*, 2014, 212(1): 14. DOI: [10.1088/0067-0049/212/1/14](https://doi.org/10.1088/0067-0049/212/1/14).
- Lelli F, Verheijen M, Fraternali F, et al. Dynamics of starbursting dwarf galaxies: I Zw 18 [J/OL]. *A&A*, 2012, 537: A72. DOI: [10.1051/0004-6361/201117867](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117867).

- Lian J H, Kong X, Jiang N, et al. Surface brightness profiles of blue compact dwarf galaxies in the GOODS-N and GOODS-S field [J/OL]. MNRAS, 2015, 451(1): 1130-1140. DOI: [10.1093/mnras/stv1028](https://doi.org/10.1093/mnras/stv1028).
- Lima-Costa F, Martins L P, Rodríguez-Ardila A, et al. Spectroscopic study of the HII regions in the NGC 1232 galaxy [J/OL]. A&A, 2020, 642: A203. DOI: [10.1051/0004-6361/202038088](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038088).
- Lin D N C, Faber S M. Some implications of nonluminous matter in dwarf spheroidal galaxies. [J/OL]. ApJL, 1983, 266: L21-L25. DOI: [10.1086/183971](https://doi.org/10.1086/183971).
- Lin L, Lin J H, Hsu C H, et al. SDSS IV MaNGA: Discovery of an H $\alpha$  Blob Associated with a Dry Galaxy Pair—Ejected Gas or a “Dark” Galaxy Candidate? [J/OL]. ApJ, 2017, 837(1): 32. DOI: [10.3847/1538-4357/837/1/32](https://doi.org/10.3847/1538-4357/837/1/32).
- Liu C, Hao L, Wang H, et al. The Morphological Transformation and the Quenching of Galaxies [J/OL]. ApJ, 2019, 878(1): 69. DOI: [10.3847/1538-4357/ab1ea0](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1ea0).
- Liu G, Zakamska N L, Greene J E, et al. Observations of feedback from radio-quiet quasars - II. Kinematics of ionized gas nebulae [J/OL]. MNRAS, 2013, 436(3): 2576-2597. DOI: [10.1093/mnras/stt1755](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1755).
- Loose H H, Thuan T X. The morphology and structure of blue compact dwarf galaxies from CCD observations. [C]//Star-forming Dwarf Galaxies and Related Objects. 1986: 73-88.
- Lotz J M, Primack J, Madau P. A New Nonparametric Approach to Galaxy Morphological Classification [J/OL]. AJ, 2004, 128(1): 163-182. DOI: [10.1086/421849](https://doi.org/10.1086/421849).
- MacArthur L A, Courteau S, Holtzman J A. Structure of Disk-dominated Galaxies. I. Bulge/Disk Parameters, Simulations, and Secular Evolution [J/OL]. ApJ, 2003, 582(2): 689-722. DOI: [10.1086/344506](https://doi.org/10.1086/344506).
- Mallmann N D, Riffel R, Storchi-Bergmann T, et al. The first 62 AGN observed with SDSS-IV MaNGA - II. Resolved stellar populations [J/OL]. MNRAS, 2018, 478(4): 5491-5504. DOI: [10.1093/mnras/sty1364](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1364).
- Mannucci F, Cresci G, Maiolino R, et al. A fundamental relation between mass, star formation rate and metallicity in local and high-redshift galaxies [J/OL]. MNRAS, 2010, 408(4): 2115-2127. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.17291.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17291.x).
- Marasco A, Crain R A, Schaye J, et al. The environmental dependence of H I in galaxies in the EAGLE simulations [J/OL]. MNRAS, 2016, 461(3): 2630-2649. DOI: [10.1093/mnras/stw1498](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1498).
- Marino R A, Rosales-Ortega F F, Sánchez S F, et al. The O3N2 and N2 abundance indicators revisited: improved calibrations based on CALIFA and T<sub>e</sub>-based literature data [J/OL]. A&A, 2013, 559: A114. DOI: [10.1051/0004-6361/201321956](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321956).
- Masters K L, Stark D V, Pace Z J, et al. H I-MaNGA: H I follow-up for the MaNGA survey [J/OL]. MNRAS, 2019, 488(3): 3396-3405. DOI: [10.1093/mnras/stz1889](https://doi.org/10.1093/mnras/stz1889).

- McQuinn K B W, Skillman E D, Cannon J M, et al. The Nature of Starbursts. I. The Star Formation Histories of Eighteen Nearby Starburst Dwarf Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2010, 721(1): 297-317. DOI: [10.1088/0004-637X/721/1/297](https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/1/297).
- Meng X, Gnedin O Y. Origin of giant stellar clumps in high-redshift galaxies [J/OL]. *MNRAS*, 2020, 494(1): 1263-1275. DOI: [10.1093/mnras/staa776](https://doi.org/10.1093/mnras/staa776).
- Micheva G, Östlin G, Bergvall N, et al. Deep multiband surface photometry on a sample of 24 blue compact galaxies - I [J/OL]. *MNRAS*, 2013, 431(1): 102-144. DOI: [10.1093/mnras/stt146](https://doi.org/10.1093/mnras/stt146).
- Mo H, van den Bosch F C, White S. *Galaxy Formation and Evolution* [M]. 2010.
- Muller C A, Oort J H, Raimond E. Hydrogène neutre dans la couronne galactique? [J]. *Academie des Sciences Paris Comptes Rendus*, 1963, 257: 1661-1662.
- Noeske K G, Iglesias-Páramo J, Vílchez J M, et al. On faint companions in the close environment of star-forming dwarf galaxies. Possible external star formation triggers? [J/OL]. *A&A*, 2001, 371: 806-815. DOI: [10.1051/0004-6361:20010446](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010446).
- Ocvirk P, Pichon C, Lançon A, et al. STECMAP: STEllar Content from high-resolution galactic spectra via Maximum A Posteriori [J/OL]. *MNRAS*, 2006, 365(1): 46-73. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.09182.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09182.x).
- Ocvirk P, Pichon C, Lançon A, et al. STECKMAP: STEllar Content and Kinematics from high resolution galactic spectra via Maximum A Posteriori [J/OL]. *MNRAS*, 2006, 365(1): 74-84. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.09323.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09323.x).
- Ocvirk P, Pichon C, Teyssier R. Bimodal gas accretion in the Horizon-MareNostrum galaxy formation simulation [J/OL]. *MNRAS*, 2008, 390(4): 1326-1338. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13763.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13763.x).
- Oort J H. The formation of galaxies and the origin of the high-velocity hydrogen. [J]. *A&A*, 1970, 7: 381.
- Östlin G, Amram P, Bergvall N, et al. Dynamics of blue compact galaxies, as revealed by their H $\alpha$  velocity fields. II. Mass models and the starburst triggering mechanism [J/OL]. *A&A*, 2001, 374: 800-823. DOI: [10.1051/0004-6361:20010832](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010832).
- Pace Z J, Tremonti C, Schaefer A L, et al. SDSS-IV/MaNGA: Can Impulsive Gaseous Inflows Explain Steep Oxygen Abundance Profiles and Anomalously Low-Metallicity Regions? [J/OL]. *ApJ*, 2021, 908(2): 165. DOI: [10.3847/1538-4357/abd6bb](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abd6bb).
- Pagel B E J, Patchett B E. Metal abundances in nearby stars and the chemical history of the solar neighbourhood. [J/OL]. *MNRAS*, 1975, 172: 13-40. DOI: [10.1093/mnras/172.1.13](https://doi.org/10.1093/mnras/172.1.13).
- Pagel B E J, Edmunds M G, Blackwell D E, et al. On the composition of H II regions in southern galaxies. I - NGC 300 and 1365 [J/OL]. *MNRAS*, 1979, 189: 95-113. DOI: [10.1093/mnras/189.1.95](https://doi.org/10.1093/mnras/189.1.95).

- Pan H A, Lin L, Hsieh B C, et al. SDSS-IV MaNGA: The Nature of an Off-galaxy  $H_{\alpha}$  Blob—A Multiwavelength View of Offset Cooling in a Merging Galaxy Group [J/OL]. *ApJ*, 2020, 903(1): 16. DOI: [10.3847/1538-4357/abb80c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abb80c).
- Papaderos P, Östlin G. I Zw 18 as morphological paradigm for rapidly assembling high- $z$  galaxies [J/OL]. *A&A*, 2012, 537: A126. DOI: [10.1051/0004-6361/201117551](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117551).
- Papaderos P, Loose H H, Fricke K J, et al. Optical structure and star formation in blue compact dwarf galaxies. II. Relations between photometric components and evolutionary implications. [J]. *A&A*, 1996, 314: 59-72.
- Pappalardo C, Cardoso L S M, Michel Gomes J, et al. Self-consistent population spectral synthesis with FADO. II. Star formation history of galaxies in spectral synthesis methods [J/OL]. *A&A*, 2021, 651: A99. DOI: [10.1051/0004-6361/202039792](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039792).
- Peng C Y, Ho L C, Impey C D, et al. Detailed Structural Decomposition of Galaxy Images [J/OL]. *AJ*, 2002, 124: 266-293. DOI: [10.1086/340952](https://doi.org/10.1086/340952).
- Peng C Y, Ho L C, Impey C D, et al. Detailed Decomposition of Galaxy Images. II. Beyond Axisymmetric Models [J/OL]. *AJ*, 2010, 139: 2097-2129. DOI: [10.1088/0004-6256/139/6/2097](https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/6/2097).
- Peng Y j, Maiolino R. From haloes to Galaxies - I. The dynamics of the gas regulator model and the implied cosmic sSFR history [J/OL]. *MNRAS*, 2014, 443(4): 3643-3664. DOI: [10.1093/mnras/stu1288](https://doi.org/10.1093/mnras/stu1288).
- Pérez-Montero E. Deriving model-based  $T_e$ -consistent chemical abundances in ionized gaseous nebulae [J/OL]. *MNRAS*, 2014, 441(3): 2663-2675. DOI: [10.1093/mnras/stu753](https://doi.org/10.1093/mnras/stu753).
- Pettini M, Pagel B E J. [OIII]/[NII] as an abundance indicator at high redshift [J/OL]. *MNRAS*, 2004, 348: L59-L63. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07591.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07591.x).
- Pilyugin L S, Grebel E K. New calibrations for abundance determinations in H II regions [J/OL]. *MNRAS*, 2016, 457(4): 3678-3692. DOI: [10.1093/mnras/stw238](https://doi.org/10.1093/mnras/stw238).
- Putman M E. An Introduction to Gas Accretion onto Galaxies [C/OL]//Fox A, Davé R. *Astrophysics and Space Science Library: volume 430 Gas Accretion onto Galaxies*. 2017: 1. DOI: [10.1007/978-3-319-52512-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52512-9_1).
- Rauch M, Becker G D, Haehnelt M G, et al. Filamentary infall of cold gas and escape of  $Ly\alpha$  and hydrogen ionizing radiation from an interacting high-redshift galaxy [J/OL]. *MNRAS*, 2011, 418 (2): 1115-1126. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.19556.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19556.x).
- Richards S N, Schaefer A L, López-Sánchez Á R, et al. The SAMI Galaxy Survey: the discovery of a luminous, low-metallicity H II complex in the dwarf galaxy GAMA J141103.98-003242.3 [J/OL]. *MNRAS*, 2014, 445(2): 1104-1113. DOI: [10.1093/mnras/stu1820](https://doi.org/10.1093/mnras/stu1820).
- Riffel R, Mallmann N D, Ilha G S, et al. Determining star formation rates in active galactic nuclei

- hosts via stellar population synthesis [J/OL]. MNRAS, 2021, 501(3): 4064-4079. DOI: [10.1093/mnras/staa3907](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3907).
- Rosales-Ortega F F, Sánchez S F, Iglesias-Páramo J, et al. A New Scaling Relation for H II Regions in Spiral Galaxies: Unveiling the True Nature of the Mass-Metallicity Relation [J/OL]. ApJL, 2012, 756(2): L31. DOI: [10.1088/2041-8205/756/2/L31](https://doi.org/10.1088/2041-8205/756/2/L31).
- Salpeter E E. The Luminosity Function and Stellar Evolution. [J/OL]. ApJ, 1955, 121: 161. DOI: [10.1086/145971](https://doi.org/10.1086/145971).
- Salzer J J, MacAlpine G M, Boroson T A. Observations of a Complete Sample of Emission-Line Galaxies. I. CCD Imaging and Spectroscopy of Galaxies in UM Lists IV and V [J/OL]. ApJS, 1989, 70: 447. DOI: [10.1086/191345](https://doi.org/10.1086/191345).
- Sánchez S F, Rosales-Ortega F F, Jungwiert B, et al. Mass-metallicity relation explored with CALIFA. I. Is there a dependence on the star-formation rate? [J/OL]. A&A, 2013, 554: A58. DOI: [10.1051/0004-6361/201220669](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220669).
- 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 Almeida J, Muñoz-Tuñón C, Amorín R, et al. Search for Blue Compact Dwarf Galaxies During Quiescence [J/OL]. ApJ, 2008, 685(1): 194-210. DOI: [10.1086/590380](https://doi.org/10.1086/590380).
- Sánchez Almeida J, Elmegreen B G, Muñoz-Tuñón C, et al. Localized Starbursts in Dwarf Galaxies Produced by the Impact of Low-metallicity Cosmic Gas Clouds [J/OL]. ApJL, 2015, 810: L15. DOI: [10.1088/2041-8205/810/2/L15](https://doi.org/10.1088/2041-8205/810/2/L15).
- 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).
- 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).
- Sánchez-Menguiano L, Sánchez Almeida J, Muñoz-Tuñón C, et al. Characterizing the Local Relation between Star Formation Rate and Gas-phase Metallicity in MaNGA Spiral Galaxies [J/OL]. ApJ, 2019, 882(1): 9. DOI: [10.3847/1538-4357/ab3044](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3044).
- Sancisi R, Fraternali F, Oosterloo T, et al. Cold gas accretion in galaxies [J/OL]. A&A Rv, 2008, 15(3): 189-223. DOI: [10.1007/s00159-008-0010-0](https://doi.org/10.1007/s00159-008-0010-0).
- Scoville N, Sheth K, Aussel H, et al. ISM Masses and the Star formation Law at  $Z = 1$  to 6: ALMA

- Observations of Dust Continuum in 145 Galaxies in the COSMOS Survey Field [J/OL]. *ApJ*, 2016, 820(2): 83. DOI: [10.3847/0004-637X/820/2/83](https://doi.org/10.3847/0004-637X/820/2/83).
- Shapiro K L, Genzel R, Förster Schreiber N M, et al. Kinemetry of SINS High-Redshift Star-Forming Galaxies: Distinguishing Rotating Disks from Major Mergers [J/OL]. *ApJ*, 2008, 682(1): 231-251. DOI: [10.1086/587133](https://doi.org/10.1086/587133).
- Shapley A E, Steidel C C, Pettini M, et al. Rest-Frame Ultraviolet Spectra of  $z \sim 3$  Lyman Break Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2003, 588(1): 65-89. DOI: [10.1086/373922](https://doi.org/10.1086/373922).
- Silk J, Wyse R F G, Shields G A. On the Origin of Dwarf Galaxies [J/OL]. *ApJL*, 1987, 322: L59. DOI: [10.1086/185037](https://doi.org/10.1086/185037).
- Silva D R, Blum R D, Allen L, et al. The Mayall z-band Legacy Survey [C]//American Astronomical Society Meeting Abstracts: volume 228 American Astronomical Society Meeting Abstracts #228. 2016: 317.02.
- Smee S A, Gunn J E, Uomoto A, et al. The Multi-object, Fiber-fed Spectrographs for the Sloan Digital Sky Survey and the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey [J/OL]. *AJ*, 2013, 146: 32. DOI: [10.1088/0004-6256/146/2/32](https://doi.org/10.1088/0004-6256/146/2/32).
- Smith J A, Tucker D L, Kent S, et al. The u'g'r'i'z' Standard-Star System [J/OL]. *AJ*, 2002, 123(4): 2121-2144. DOI: [10.1086/339311](https://doi.org/10.1086/339311).
- Sparke L S, Gallagher I, John S. *Galaxies in the Universe: An Introduction* [M]. 2007.
- 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).
- Stewart K R, Kaufmann T, Bullock J S, et al. Orbiting Circumgalactic Gas as a Signature of Cosmological Accretion [J/OL]. *ApJ*, 2011, 738(1): 39. DOI: [10.1088/0004-637X/738/1/39](https://doi.org/10.1088/0004-637X/738/1/39).
- Storchi-Bergmann T, Calzetti D, Kinney A L. Ultraviolet to Near-Infrared Spectral Distributions of Star-forming Galaxies: Metallicity and Age Effects [J/OL]. *ApJ*, 1994, 429: 572. DOI: [10.1086/174345](https://doi.org/10.1086/174345).
- Tacconi L J, Neri R, Genzel R, et al. Phibss: Molecular Gas Content and Scaling Relations in  $z \sim 1-3$  Massive, Main-sequence Star-forming Galaxies [J/OL]. *ApJ*, 2013, 768(1): 74. DOI: [10.1088/0004-637X/768/1/74](https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/1/74).
- Telles E, Melnick J. Stellar populations of HII galaxies. A tale of three bursts [J/OL]. *A&A*, 2018, 615: A55. DOI: [10.1051/0004-6361/201732275](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732275).
- Tepper-García T, Bland-Hawthorn J, Sutherland R S. The Magellanic Stream: Break-up and Accretion onto the Hot Galactic Corona [J/OL]. *ApJ*, 2015, 813(2): 94. DOI: [10.1088/0004-637X/813/2/94](https://doi.org/10.1088/0004-637X/813/2/94).

- Thilker D A, Bianchi L, Meurer G, et al. A Search for Extended Ultraviolet Disk (XUV-Disk) Galaxies in the Local Universe [J/OL]. *ApJS*, 2007, 173(2): 538-571. DOI: [10.1086/523853](https://doi.org/10.1086/523853).
- Thuan T X. Near-infrared photometry and stellar populations in dwarf elliptical and irregular galaxies. [J/OL]. *ApJ*, 1985, 299: 881-895. DOI: [10.1086/163755](https://doi.org/10.1086/163755).
- 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).
- Tosi M. Star formation histories of resolved galaxies [C/OL]//Mamajek E E, Soderblom D R, Wyse R F G. *The Ages of Stars: volume 258*. 2009: 61-72. DOI: [10.1017/S1743921309031718](https://doi.org/10.1017/S1743921309031718).
- Tremonti C A, Heckman T M, Kauffmann G, et al. The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey [J/OL]. *ApJ*, 2004, 613: 898-913. DOI: [10.1086/423264](https://doi.org/10.1086/423264).
- Tumlinson J, Thom C, Werk J K, et al. The Large, Oxygen-Rich Halos of Star-Forming Galaxies Are a Major Reservoir of Galactic Metals [J/OL]. *Science*, 2011, 334(6058): 948. DOI: [10.1126/science.1209840](https://doi.org/10.1126/science.1209840).
- Tumlinson J, Thom C, Werk J K, et al. The COS-Halos Survey: Rationale, Design, and a Census of Circumgalactic Neutral Hydrogen [J/OL]. *ApJ*, 2013, 777(1): 59. DOI: [10.1088/0004-637X/777/1/59](https://doi.org/10.1088/0004-637X/777/1/59).
- Tumlinson J, Peebles M S, Werk J K. The Circumgalactic Medium [J/OL]. *ARA&A*, 2017, 55(1): 389-432. DOI: [10.1146/annurev-astro-091916-055240](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-091916-055240).
- van den Bergh S. The frequency of stars with different metal abundances. [J/OL]. *AJ*, 1962, 67: 486-490. DOI: [10.1086/108757](https://doi.org/10.1086/108757).
- van Zee L. The Evolutionary Status of Isolated Dwarf Irregular Galaxies. I. UBV and H $\alpha$  Imaging Observations [J/OL]. *AJ*, 2000, 119(6): 2757-2779. DOI: [10.1086/301378](https://doi.org/10.1086/301378).
- Verbeke R, De Rijcke S, Koleva M, et al. Gaseous infall triggering starbursts in simulated dwarf galaxies [J/OL]. *MNRAS*, 2014, 442(2): 1830-1843. DOI: [10.1093/mnras/stu947](https://doi.org/10.1093/mnras/stu947).
- 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).
- Walter F, Cannon J M, Roussel H, et al. Dust and Atomic Gas in Dwarf Irregular Galaxies of the M81 Group: The SINGS and THINGS View [J/OL]. *ApJ*, 2007, 661(1): 102-114. DOI: [10.1086/514807](https://doi.org/10.1086/514807).
- Wang H, Mo H J, Yang X, et al. ELUCID - Exploring the Local Universe with ReConstructed Initial Density Field III: Constrained Simulation in the SDSS Volume [J/OL]. *ApJ*, 2016, 831: 164. DOI: [10.3847/0004-637X/831/2/164](https://doi.org/10.3847/0004-637X/831/2/164).

- Wang H, Mo H J, Chen S, et al. ELUCID. IV. Galaxy Quenching and its Relation to Halo Mass, Environment, and Assembly Bias [J/OL]. *ApJ*, 2018, 852: 31. DOI: [10.3847/1538-4357/aa9e01](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa9e01).
- Warren B E, Jerjen H, Koribalski B S. Stellar and Gas Properties of High H I Mass-to-Light Ratio Galaxies in the Local Universe [J/OL]. *AJ*, 2006, 131(4): 2056-2073. DOI: [10.1086/500589](https://doi.org/10.1086/500589).
- Weiner B J, Coil A L, Prochaska J X, et al. Ubiquitous Outflows in DEEP2 Spectra of Star-Forming Galaxies at  $z = 1.4$  [J/OL]. *ApJ*, 2009, 692(1): 187-211. DOI: [10.1088/0004-637X/692/1/187](https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/1/187).
- Werk J K, Prochaska J X, Tumlinson J, et al. The COS-Halos Survey: Physical Conditions and Baryonic Mass in the Low-redshift Circumgalactic Medium [J/OL]. *ApJ*, 2014, 792(1): 8. DOI: [10.1088/0004-637X/792/1/8](https://doi.org/10.1088/0004-637X/792/1/8).
- 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).
- Willett K W, Lintott C J, Bamford S P, et al. Galaxy Zoo 2: detailed morphological classifications for 304 122 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey [J/OL]. *MNRAS*, 2013, 435(4): 2835-2860. DOI: [10.1093/mnras/stt1458](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1458).
- Wuyts E, Rigby J R, Gladders M D, et al. A Magnified View of the Kinematics and Morphology of RCSGA 032727-132609: Zooming in on a Merger at  $z = 1.7$  [J/OL]. *ApJ*, 2014, 781(2): 61. DOI: [10.1088/0004-637X/781/2/61](https://doi.org/10.1088/0004-637X/781/2/61).
- 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).
- Yan R, Chen Y, Lazarz D, et al. SDSS-IV MaStar: A Large and Comprehensive Empirical Stellar Spectral Library—First Release [J/OL]. *ApJ*, 2019, 883(2): 175. DOI: [10.3847/1538-4357/ab3ebc](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3ebc).
- Yang X, Mo H J, van den Bosch F C, et al. Galaxy Groups in the SDSS DR4. I. The Catalog and Basic Properties [J/OL]. *ApJ*, 2007, 671: 153-170. DOI: [10.1086/522027](https://doi.org/10.1086/522027).
- Yang X, Mo H J, van den Bosch F C, et al. Evolution of the Galaxy-Dark Matter Connection and the Assembly of Galaxies in Dark Matter Halos [J/OL]. *ApJ*, 2012, 752: 41. DOI: [10.1088/0004-637X/752/1/41](https://doi.org/10.1088/0004-637X/752/1/41).
- Yates R M, Kauffmann G, Guo Q. The relation between metallicity, stellar mass and star formation in galaxies: an analysis of observational and model data [J/OL]. *MNRAS*, 2012, 422(1): 215-231. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.20595.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20595.x).
- Yin J, Hou J L, Prantzos N, et al. Milky Way versus Andromeda: a tale of two disks [J/OL]. *A&A*, 2009, 505(2): 497-508. DOI: [10.1051/0004-6361/200912316](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912316).

- Zheng Y, Peek J E G, Werk J K, et al. HST/COS Observations of Ionized Gas Accretion at the Disk-Halo Interface of M33 [J/OL]. *ApJ*, 2017, 834(2): 179. DOI: [10.3847/1538-4357/834/2/179](https://doi.org/10.3847/1538-4357/834/2/179).
- Zheng Y L, Shen S Y, Feng S. The Compactness of Galaxy Groups in the Sloan Digital Sky Survey [J/OL]. *ApJ*, 2022, 926(2): 119. DOI: [10.3847/1538-4357/ac43ba](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac43ba).
- Zou H, Zhou X, Fan X, et al. Project Overview of the Beijing-Arizona Sky Survey [J/OL]. *PASP*, 2017, 129(976): 064101. DOI: [10.1088/1538-3873/aa65ba](https://doi.org/10.1088/1538-3873/aa65ba).



## 致 谢

这么多年，终于走到这了。感谢这些年在上海台里遇到的人和事，都让我成长了许多。尤其感谢郝蕾老师和尹君老师，在科研的道路上茫无头绪时，她们总是能告诉我前进的方向。其实回过头仔细想这几年，尤其是第一篇文章的那三年，我一直在自我怀疑。是两位老师没有放手，始终拽着我，至少让我把事情完成了。另外我的致谢怎么能少了冯帅师兄呢。有时候会觉得师兄就是个小百科，怎么科学上的问题他总能答出来，而且还很有耐心，太赞啦。还有还有，我还要致谢台里的猫和对面光启公园的猫，都是能摸能抱还能逗的小猫。我的同学们也是需要被感激的对象，他们是我在现实世界中不需要解释太多，就可以互相理解的朋友。与父母朋友和小动物们聊聊天，生活依旧可以是彩色的。最后虽然羞耻，但我还是想感谢舞台上发光的小偶像们，可惜她们两毕业的比我早，最终没能实现让她们送我毕业的想法。坚韧不服输的模样一直都是我喜欢的形状，眼睛里的倔强，也在鼓励我，只要自己的目标坚定，困难只不过是成功后快乐的添加剂而已。

人生在世不过数十寒暑，每一段能被回忆起的人生体验都值得被回味。确实啊，能被回忆起的经历，好像并没有多少是极快乐的。相比于痛苦和尴尬，快乐确实很难被记住吧，至少在我这里是。我猜当听到自己被上海台录取的时候，我是很开心的。我应该算是很少会有执念的人，也许考研算是难得的一次坚持。记得很清楚，第一次考研，当试卷发下来的那一刻，我就知道自己考不上了。等第二年我不甘心地在11月份准备了第二次考研。事不过三，很幸运在第二次尝试就成功了。说来好笑，其实我从小的愿望就是当明星，奈何天赋树上并没有点艺术。以至于不能说至今，那也是至几年前我一直一直在喜欢着舞台上发着光的小偶像们。毕竟谁又会讨厌亮晶晶的东西呢，无论是舞台上的还是天空中的。在回家的路上绕了点远路，也算是另一种梦想的实现。将来就着夏日的西瓜仰望星空时，大概还是会回忆起在上海台蹒跚学步的时光吧。

2023年6月



## 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

### 作者简历：

2010年9月至2014年6月，江西理工大学，给排水，工学学士

2015年9月至2016年6月，中国科学技术大学，代培研究生

2016年9月至2023年6月，中国科学院上海天文台，天体物理学，理学博士

### 已发表（或正式接受）的学术论文：

1. **Ju, M.**, Yin, J., Liu, R., et al. 2022, ApJ, 938, 96,

