



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

博士学位论文

MaNGA 巡天中的双峰窄发射线星系及其物理起源

作者姓名: 邱佳杰

指导教师: 沈世银 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

2025 年 6 月

Double-peaked Narrow Emission-line Galaxies in MaNGA
Survey and Their Physical Origins

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

Jia-jie Qiu

Supervisor: Professor Shiyin Shen

Shanghai Astronomical Observatory, CAS

June, 2025

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

在星系的光谱观测中，双峰窄发射线星系（DPGs）因其独特的光谱特征而成为研究星系结构和运动学的重要探针，其光谱中呈现窄发射线的双峰结构通常反映了星系中心区域存在不同运动速度的电离气体，这为理解星系中的子结构提供了关键线索。本研究基于斯隆数字巡天（SDSS）的 MaNGA 积分视场光谱数据，系统分析了双峰窄发射线星系的分类及其物理起源，揭示了双峰特征起源的多样性及其与星系结构的关联。

在第一部分的研究中，我们使用了来自斯隆数字巡天的 MaNGA 最终数据发布的星系，通过检查所有 MaNGA 空间像素中 $H\alpha$ -[N II] 三重线的双高斯轮廓来获得双峰窄发射线空间像素（DPSs）。我们总共识别出 5420 个 DPSs 以及它们所在的 304 个 DPGs，且每个 DPGs 至少包含 5 个 DPSs。我们发现，根据 DPSs 到星系中心的距离 r/R_e 以及 DPSs 中两个成分之间的速度差 Δv ，DPSs 可以划分为三种类型，即内部低 Δv 、内部高 Δv 以及外部的 DPSs。通过将 DPGs 的物理性质纳入其 DPSs，我们证实了有棒 DPGs 与内部低 Δv 的 DPSs、AGN 宿主 DPGs 与内部高 Δv 的 DPSs 以及潮汐特征 DPGs 与外部的 DPSs 之间存在的统计相关性。

正如第一部分研究所证明的那样，MaNGA 巡天中的双峰窄发射线星系与棒、AGN 以及潮汐扰动表现出物理相关性。这些结构，尤其是棒结构，如何在积分视场光谱巡天中产生双峰特征，尚未得到充分研究。进一步针对有棒 DPGs 的研究发现，其双峰特征更可能源于与棒相关的气体核环，而非单纯的棒中气体内流。核环半径与 DPSs 的最大中心距显著相关，核环理论速度差与 DPSs 的最大速度差也存在一定的相关性。通过模拟星系速度场和流量分布，我们验证了核环在 PSF 效应下可形成观测到的双峰轮廓。

本研究为双峰窄发射线现象的物理起源提供了系统性证据，揭示了棒、AGN 和潮汐相互作用在星系动力学中的重要作用，并为未来利用积分视场光谱研究星系演化奠定了基础。未来的研究将围绕多波段协同观测、高分辨率成像与动力学建模的深度融合展开，而下一代大型巡天项目如中国巡天空间望远镜（CSST）和更高灵敏度的积分视场光谱仪将大幅提升样本统计质量与空间分辨率，解决当前双峰特征物理起源证认的不确定性难题。

关键词：星系结构，星系演化，星系运动学与动力学，星系发射线

Abstract

In the spectroscopic survey of galaxies, double-peaked narrow emission-line galaxies (DPGs) have emerged as important probes for studying galactic structure and kinematics due to their unique spectral characteristics. The double-peaked structures of narrow emission lines observed in their spectra typically reflects the presence of ionized gas with different velocities in the galactic central region, providing key clues for understanding the sub-structures within galaxies. This study systematically analyzes the classification and physical origins of the DPGs based on MaNGA integral field spectroscopy data from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS), revealing the diversity of double-peaked features and their association with galaxy structure.

In the first part of this study, we use galaxies from the final MaNGA data release to detect double-peaked narrow emission-line spaxels (DPSs) by examining the double Gaussian profiles of the $H\alpha$ -[N II] doublets across all MaNGA spaxels. A total of 5,420 DPSs associated with 304 DPGs are identified, each DPG containing a minimum of 5 DPSs and being free from overlap with other galaxies. We find that DPSs can be categorized into three groups according to their central distance r/R_e and the velocity difference Δv between their two components: the inner low- Δv , inner high- Δv and outer DPSs. By incorporating the physical characteristics of the DPGs into their DPSs, we demonstrate for the first time the existence of statistical correlations between barred DPGs and inner low- Δv DPSs, AGN-hosting DPGs and inner high- Δv DPSs, as well as tidal DPGs and outer DPSs.

As demonstrated in the first study, the DPGs in MaNGA survey exhibit a physical correlation with bars, AGNs, and/or tidal disturbances. How these structures, especially the bars, give rise to the double-peaked features in the integral-field spectroscopic (IFS) survey, has not been fully investigated. Further studies of barred DPGs suggest that their double-peaked features are more likely to originate from gas nuclear rings associated with bars rather than simple gas inflow within the bars themselves. We find a good correlation between the radius of the nuclear ring of each barred DPG and the maximum centric distance of its DPSs, as well as a correlation between the velocity difference formed by the nuclear ring and the maximum velocity difference between the double peaks of its DPSs. By simulating the galaxy velocity field and flow distribution, we have verified that the nuclear ring can form the observed double-peaked profile under the PSF effect.

This study provides systematic evidence for the physical origin of the double-peak narrow emission line phenomenon, revealing the important role of bars, AGNs, and tidal interactions in galactic dynamics, and laying the foundation for future studies of

galactic evolution using integral field spectroscopy. Future research will focus on the deep integration of multi-wavelength collaborative observations, high-resolution imaging, and dynamical modeling. Next-generation large-scale survey projects, such as the China Space Station Telescope (CSST) and more sensitive integral field spectrographs, will significantly enhance sample statistical quality and spatial resolution, addressing the current uncertainties in identifying the physical origins of the double-peak features.

Key Words: Galaxies: Structure, Galaxies: Evolution, Galaxies: Kinematics and Dynamics, Galaxies: Emission Line

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 光谱巡天与积分视场光谱	1
1.2 MaNGA 巡天项目	3
1.2.1 MaNGA 巡天的设备与观测策略	3
1.2.2 MaNGA 巡天的数据与分析流程	4
1.3 双峰窄发射线星系	5
1.3.1 双峰窄发射线星系的定义	5
1.3.2 使用积分视场光谱巡天对双峰窄发射线星系的研究	8
1.4 文章结构	15
第 2 章 搜寻 MaNGA 巡天中的双峰窄发射线空间像素	17
2.1 数据处理过程	17
2.1.1 双峰窄发射线的拟合	17
2.1.2 双峰窄发射线空间像素的筛选	17
2.2 双峰窄发射线空间像素	21
2.3 小结	23
第 3 章 MaNGA 双峰窄发射线星系的分类	25
3.1 双峰窄发射线空间像素的分类	25
3.2 双峰窄发射线星系的分类	27
3.3 双峰窄发射线空间像素与双峰窄发射线星系的对应关系	34
3.4 小结	37
第 4 章 具有双峰窄发射线的潮汐特征星系与 AGN 宿主星系 ..	39
4.1 具有双峰窄发射线的潮汐特征星系	39
4.1.1 具有双峰窄发射线的潮汐特征星系的形态特征	39
4.1.2 具有双峰窄发射线的潮汐特征星系的运动学特征	40
4.2 具有双峰窄发射线的 AGN 宿主星系	42
4.2.1 具有双峰窄发射线的 AGN 宿主星系的运动学特征	42
4.2.2 具有双峰窄发射线的 AGN 宿主星系的发射线诊断	44
4.3 具有双 AGN 的双峰窄发射线星系	44
4.4 小结	45

第 5 章 具有双峰窄发射线的有棒星系的物理起源	47
5.1 有棒星系中双峰特征的研究	47
5.2 有棒的双峰窄发射线星系样本	52
5.3 棒中气体内流导致双峰特征的可能性	52
5.4 棒相关气体核环导致双峰特征的可能性	56
5.5 对具有双峰窄发射线的有棒星系的模拟	62
5.6 小结	72
第 6 章 总结与展望	73
6.1 本文结论	73
6.2 未来工作	74
参考文献	77
附录一 双峰窄发射线星系的目录	83
附录二 有棒的双峰窄发射线星系的目录	87
致谢	89
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 ..	91

图目录

- 图 1-1 DPGs 的发射线示意图。左图包含 $H\beta$ 线与 $[O\ III]$ 双线的双峰特征，右图包含 $H\alpha$ - $[N\ II]$ 三重线的双峰特征。每一条线均包含蓝色与红色两个窄高斯轮廓。 6
- 图 1-2 三个 DPGs 的发射线。每个子图的左上方都显示了它们的 SDSS 快照。一些标有“with DP”的发射线，其蓝移的高斯成分显示为蓝线，红移的高斯成分显示为红线，而其他标有“无 DP”的发射线则没有明显的双峰特征。顶部子图的光谱来自于一个面朝上的旋涡星系，可能有外流。中间子图的光谱来自于一个椭圆星系的光谱。底部子图的光谱来自于一个星系合并，可能与最近的星系合并有关。 7
- 图 1-3 模型中双 AGN 的光谱，其特点是双 AGN 以旋转为主的区域，没有外流成分。左侧子图的空间分辨光谱的 x 轴是速度空间。右侧子图是包含双 AGN 的理论星系。洋红色方框是狭缝的位置（顶部子图是沿着西南到东北的方向，底部子图是沿着东南到西北）。我们预计中心会出现双峰轮廓。 9
- 图 1-4 外流的对称双锥形的总体结构与变化。颜色越深表示视向速度越大。左一子图有对称的两层双锥形外流，两层的开口角度不同。左二子图有一层对称的双锥形外流，顶点之间相连。右二子图与左二的相似，但两个锥形的开口角度不同。右一子图的两个锥形均为蓝移，开口角度也不同。 10
- 图 1-5 三种主要运动学分类的卡通示意图。这里使用绿色显示以外流为主的分类以及两种以旋转为主的分类中发射线运动学的起源，其中黑色箭头给出了造成发射线轮廓速度偏移的运动学成分。顶部子图：以外流为主的发射线特征。中间子图：旋转主导 + 扰动，星系可能具有旋转结构或棒结构。底部子图：旋转主导 + 尘埃遮蔽结构，例如尘埃带。这些都有可能产生双峰轮廓。 11
- 图 1-6 MaNGA 使用定制设计的光纤束来获取目标星系整个表面的光谱。右下说明了光纤阵列是如何对特定星系进行空间采样的。右上比较了两根光纤在星系不同位置观测到的光谱，表明中心区域与外围区域的光谱有很大不同。 12
- 图 1-7 MaNGA 1-166919 示意图。星系中心是低光度、低爱丁顿 AGN，向周围注入快速运动的物质（红色椭圆与箭头）。物质通过激波冲击到星际介质（黑线）中，受到激波冲击的物质产生了电离气体（蓝色圆形）。这个激波周围探测到恒星形成增强的区域（橙色圆形）与恒星形成较低的区域（紫色阴影）。 13

- 图 1-8 并合系统示意图。顶部子图：次星系近侧位于北方的情况。底部子图：次星系近侧位于南方的情况。左侧子图为两个盘在天空中的投影。右侧子图为不同视角下的三维视图，且能看到这两个盘并不重叠。 14
- 图 2-1 MaNGA-ID 为 1-593159 星系中一个空间像素在波长范围 6500 - 6650 Å 的光谱示例。上方子图：光谱是直接从 MaNGA 数据立方中获得的，而连续谱则是通过 MaNGA DAP 拟合得到的。下方子图：发射线是从上方的光谱中减去连续谱计算得到的，与直接从 MaNGA DAP 拟合的发射线（单高斯轮廓）有明显不同。 18
- 图 2-2 MaNGA-ID 为 1-593159 星系中一个空间像素在波长范围 6500 - 6650 Å 的 $H\alpha$ λ 6564 Å- [N II] λ 6549, 6586 Å 三重线的示例。在每一张子图中，黑色实线都表示观测到的发射线轮廓。左上子图中的黑色虚线是单高斯轮廓的拟合结果，从左到右分别是 [N II] λ 6549 Å 线， $H\alpha$ λ 6564 Å 线以及 [N II] λ 6586 Å 线这三条线的三个高斯轮廓。右上子图是从左上子图中得到的单高斯轮廓拟合结果的整体轮廓。左下子图中的蓝色与红色虚线是双高斯的拟合结果，分别表示蓝移与红色的两组发射线，每种颜色都包含三个高斯轮廓，从左到右也是 [N II] λ 6549 Å 线， $H\alpha$ λ 6564 Å 线以及 [N II] λ 6586 Å 线。右下子图同样是从左下子图中得到的双高斯轮廓拟合结果的整体轮廓。 20
- 图 2-3 MaNGA-ID 为 1-593159 星系在斯隆数字巡天 gri 波段的成像，白框给出了其中心 6×6 空间像素 ($3'' \times 3''$) 的 $H\alpha$ -[N II] 三重线轮廓。右边网格均使用黑色虚线表示原始发射线。双高斯轮廓拟合更佳的空间像素还显示了蓝移与红移的 $H\alpha$ 线。 21
- 图 3-1 左上子图给出了 5420 个 DPSs（红色直方图）与所有其它正常空间像素（黑色）的信噪比 ($SNR_S \geq 5$) 分布。右上子图给出所有 DPSs（红色直方图）、正常空间像素（黑色）以及信噪比与 DPS 匹配的正常空间像素（蓝色）的归一化宿主星系中心距分布 (r/R_e)，它们的平均值使用相应颜色的虚线表示。左下子图：DPSs 的双峰速度差的分布 ($\Delta v > 200$ km/s)，由高斯分布（虚线）拟合。右下子图给出了 DPSs 在 $\Delta v - r/R_e$ 平面内的分布，黑色轮廓表示 DPSs 的数密度。峰值使用黑色三角标记，坐标分别是 [0.17, 225], [0.25, 378] 与 [1.16, 344]。 26
- 图 3-2 所有 MaNGA 星系（黑色直方图）、DPGs（红色）以及没有双峰特征的正常星系控制样本（蓝色）的恒星质量分布。每种的平均值使用与直方图相同颜色的虚线标记。 28
- 图 3-3 DPGs（红色直方图）与正常星系控制样本（蓝色）的整体性质分布，包括左上子图的宿主晕质量，右上子图的 Sersic 指数 n ，左下子图的比恒星形成率以及右下子图的气体速度场的运动不对称性。 ... 29
- 图 3-4 Galaxy Zoo 2 决策树。我们使用的参数（全都使用红色矩形框出）有 T02 的棒选项，T06 的扰动选项与并合选项。后两者我们都视为潮汐特征。 30

图 3-5 [N II]-与 [S II] - BPT 图中用来分辨 AGN (虚线以上) 与非 AGN。发射线流量比分别使用 [N II]/H α , [O III]/H β 以及 [S II]/H α 。虚线以上的 DPGs 被认为是具有 AGN 的 DPGs。	31
图 3-6 左侧韦恩图显示了在 304 个 DPGs 中, 具有不同结构特征的 DPGs 的数量。其中 58 个不存在任意一种结构。123 个 DPGs 具有棒的特征, 其中 72 个仅有棒的特征; 122 个具有 AGN 特征, 其中 80 个仅有 AGN 特征; 74 个具有潮汐特征, 其中 31 个仅有潮汐特征。10 个 DPGs 同时存在棒、AGN 以及潮汐特征。右侧的 SDSS 成像图给出了对应位置类型 DPGs 的一个例子。	32
图 3-7 DPGs (红色直方图) 与正常星系控制样本 (蓝色) 结构特征的比例, 从左到右分别是棒、AGN 与潮汐特征。	33
图 3-8 $\Delta v - r/R_e$ 平面上每个 DPS 所属 DPG 参数的颜色编码分布, 通过 LOESS 算法平滑。DPG 参数包括恒星质量 (左上子图), 比恒星形成率 (右上), Sersic 指数 n (左下) 以及气体速度场的运动不对称性 (右下)。 $\Delta v - r/R_e$ 平面上的 DPS 数密度使用轮廓线表示, 与图 3-1 右下子图相同。根据 $r/R_e = 0.75$ 以及 $\Delta v = 300$ km/s, 虚线将所有 DPSs 划分为三类, 即内部低 Δv 、内部高 Δv 以及外部 DPSs。	35
图 3-9 与图 3-8 相似, 但使用的是 DPG 结构特征, 包括左上子图的棒, 右上的 AGN 以及左下的潮汐特征。	36
图 3-10 左侧子图为 MaNGA-ID 1-382452 的 AGN 宿主 DPG, 没有棒与潮汐特征。其 DPSs 有内部低 Δv 与内部高 Δv 两种。右侧子图为 MaNGA-ID 1-1038 的有棒 AGN 宿主 DPG, 没有潮汐特征。其 DPSs 仅有内部低 Δv 一种。	37
图 4-1 8 个处于不同状态的潮汐特征 DPGs 的例子, 包括重叠的星系对, 多重星系系统, 规则或不规则形态的星系。	40
图 4-2 潮汐特征 DPGs 中 DPSs 的运动学特征。左侧显示了它们的 SDSS 成像, 并使用白色虚线给出了中心 DPG 的主轴, 使用白色方框给出了 DPSs 出现的位置。右侧是它们的旋转曲线 (虚线) 与 DPSs 的位置与速度, 其中黑色点是非 DPSs, 蓝色与红色点是 DPSs 的蓝移与红移成分。顶部子图: MaNGA-ID 1-114955; 底部子图: MaNGA-ID 1-150947。	41
图 4-3 4 个处于 AGN 宿主 DPGs 的例子, 除了最后一个是侧向星系外, 其它三个星系的形态非常相似。	42
图 4-4 AGN 宿主 DPGs 中 DPSs 的运动学特征。左侧显示了它们的 SDSS 成像, 并使用白色虚线给出了中心 DPG 的主轴, 使用白色方框给出了 DPSs 出现的位置。右侧是它们的旋转曲线 (虚线) 与 DPSs 的位置与速度, 其中黑色点是非 DPSs, 蓝色与红色点是 DPSs 的蓝移与红移成分。顶部子图: MaNGA-ID 1-166919; 底部子图: MaNGA-ID 1-135159。	43

- 图 4-5 AGN 宿主 DPGs 中蓝移 (蓝色) 与红移 (红移) 成分的 $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ 流量比的分布。黑色表示作为对照的非 DPSs 的结果。····· 44
- 图 4-6 4 个可能是双 AGN 候选体的例子, 前两个具有非常靠近的双核球, 后两个的投影距离稍远, 但仍不超过 1 千秒差距。····· 45
- 图 5-1 PGC 34107 恒星棒的气体内流简图。恒星棒以椭圆形表示, 其后退和靠近的两侧分别用红色和蓝色表示。白色云朵、金色恒星和虚线分别代表气体、恒星形成区和林德布拉德内共振。在视线方向, 可以观察到蓝移和红移成分。····· 48
- 图 5-2 对于一个孤立有棒星系的观测。在顶部子图, 我们显示了 3D 空间中的气体分布, 并定义了观测角度 ϕ 与 θ 。在中间子图, 我们显示了一个倾角为 40° 的二维投影。左侧与右侧的方位角分别是 0° 与 90° , 这对应平行于与垂直于棒的观测。红色圆圈标记位于红移 0.05 的 $3''$ 光纤光谱观测的位置。在底部子图, 我们显示了光纤的气体发射线视向速度分布, 使用单高斯函数与双高斯函数拟合。····· 49
- 图 5-3 内环和核环。左侧子图: 由 SDSS gri 图像绘制的 NGC 5792 整体彩色合成图。红色椭圆代表外 (假) 环, 青色椭圆代表内环。右侧子图是左图中白色矩形区域的放大图。青色线表示内环, 蓝色圆圈表示核环。····· 50
- 图 5-4 旋涡星系 NGC 7331。左上子图是 R 波段的等照度线; 中间是 R 波段的负片, 覆盖有 CO 环状发射; 右上是 $\text{H}\alpha$ 发射的负片。下图显示了 HI 的整体轮廓剖面图, 气体以不同速度移动, 相对于太阳。·· 51
- 图 5-5 72 个有棒 DPGs 的倾角 (inc) 及其棒的方向 (ΔPA) 的分布。左侧子图是有棒 DPGs (红色直方图) 以及没有 DPSs 的 M_* & SFR 控制样本 (黑色) 的倾角分布, 中值为 38.0° 与 28.9° , 对应虚线的颜色与直方图一致。右侧子图是有棒 DPGs (红色直方图), 没有 DPSs 的 M_* & SFR 控制样本控制样本 (黑色) 以及没有 DPSs 的 M_* & SFR & inc 控制样本 (蓝色) 的棒方向的分布, 中值分别为 20.5° , 34.7° 与 23.2° 。····· 53
- 图 5-6 Galaxy Zoo: 3D 中绘制在星系上的遮蔽示例。图中显示了各种遮罩, 颜色表示类型 (绿色表示星系中心, 紫色表示恒星, 橙色表示棒, 蓝色表示旋臂), 密度表示在该像素中创建遮蔽的志愿者人数。····· 54
- 图 5-7 有棒双峰窄发射线星系 (MaNGA-ID 1-593159) 及其棒的形态参数。左侧子图给出的是 SDSS gri 波段图像以及得到的棒的方向 ($\Delta PA = |PA - PA_{bar}|$)。中间子图给出的红色矩形对应的星系棒的位置, 棒的长度 (L_{bar}) 与方位角 (PA_{bar}) 是通过这个矩形测量得到的。Galaxy Zoo: 3D 项目在空间上使用计数值 (0-15) 表征认为该空间像素属于星系棒的人数, 0 是最少, 15 是最多。而这个矩形包围着计数值 8-15 的空间像素。右侧子图给出的是使用 Python PAFIT 包, 通过 MaNGA DAP 的恒星速度场计算得到星系运动学方位角 (PA)。 55

- 图 5-8 左侧子图：有棒 DPG MaNGA-ID 1-593159 的恒星流量，一系列伪狭缝是由平行于 PA 的白色狭缝绘制出的；中间子图：同一 DPG 的恒星速度场；右侧子图：对于这个 DPG 的伪狭缝的运动积分 $\langle V \rangle$ 与测光积分 $\langle X \rangle$ 的比较。最佳拟合直线经过这些点，斜率等于 $\Omega_p \times \sin(\text{inc})$ 。 57
- 图 5-9 左侧子图给出了有棒 DPG (MaNGA-ID 1-593159) 的旋转曲线 $V_{\text{gas}}(r)$ 及其棒的图案速度 (Ω_p)。实线表示棒的 Ω_p ，是通过 TW 算法获得的。黑色实心圆表示主轴上每个空间像素的位置与 $H\alpha$ 速度，虚线表示 $V_{\text{gas}}(r)$ 。右侧子图表示同一个有棒 DPG 的棒的 Ω_p 以及气体核环半径 (r_{NR})。虚线表示气体旋转角速度 $\Omega_{\text{gas}}(r)$ ，点划线是本轮频率 $\kappa(r)$ 。气体核环的边境使用一个实心圆表示，该位置的 $\Omega_p = \Omega_{\text{gas}}(r) - \kappa(r)/2$ 。 58
- 图 5-10 左侧子图给出了三个有棒 DPG 旋转曲线的拟合，右侧是在不同过渡半径情况下，拟合结果的卡方分布。这三个有棒 DPG 分别为 MaNGA-ID 1-195478, MaNGA-ID 1-10248 以及 MaNGA-ID 1-593159。 59
- 图 5-11 左侧小图为有棒 DPG MaNGA-ID 1-593159 的 SDSS g, r, i 波段成像，以及它的方位角 ($PA = 160^\circ$)。白色方框包含其中心 10×10 的空间像素 ($5'' \times 5''$)，白色椭圆是倾斜的气体核环 ($\text{inc} = 38^\circ$)。右侧大图是中心 10×10 空间像素的 $H\alpha$ 线轮廓。使用双高斯轮廓拟合的空间像素使用蓝移与红移的 $H\alpha$ 线分别表示，颜色分别是蓝色与红色。每个 DPS 中标注的值是其 Δv 值。黑色椭圆是气体核环，黑色箭头表示环的半径 ($r_{\text{NR}} = 1''.9$)，蓝色与红色箭头表示核环运动的方向 ($\Delta v_{\text{NR}} = 330 \text{ km/s}$)。 60
- 图 5-12 核环的性质与观测到双峰之间的关系，其中黑点是有棒 DPGs，空心点是“平坦样本”，星号是示例样本，虚线是 1:1 的对角线。左侧子图给出了有棒 DPGs 气体核环半径 r_{NR} 与其中 DPSs 最大 r/R_c 之间的关系。这一关系的皮尔逊相关系数为 $R = 0.82$ ，去掉“平坦样本”后为 0.90。右侧子图给出了有棒 DPGs 核环旋转速度对应的理论双峰速度差 Δv_{NR} 与其中 DPSs 最大 Δv 之间的关系。这一关系的皮尔逊相关系数为 $R = 0.40$ ，去掉“平坦样本”后为 0.46。 61
- 图 5-13 左侧子图： $H\alpha$ 流量的径向分布（去卷积前的叉号与去卷积后的黑点）及其去卷积后流量的线性拟合（点线）。右侧子图： $H\alpha$ 的速度（黑点）与旋转曲线（点线）。虚线方框表示该 DPG 出现双峰特征的区域。 63
- 图 5-14 用于模拟发射线的三个参数的分布。左上子图：模拟的 $H\alpha$ 流量分布；中上子图：模拟的 $H\alpha$ 速度场；右上子图：中心空间像素的二维高斯 PSF；下图：中心空间像素在 PSF 效应影响下所包含的所有发射线（点线）及其叠加后的发射线（实线）。 64

- 图 5-15 沿着星系主轴方向的 $H\alpha$ 双峰轮廓变化, 共 13 个位置 (在发射线左侧使用 PSF 标出), 标记为 $(-6, 0)$ 到 $(6, 0)$ 。除了第一行的中心空间像素 $(0, 0)$ 外, 其余 12 个位置以左右对称的形式在同一行中表示, 如第二行为 $(-1, 0)$ 与 $(1, 0)$ 。..... 65
- 图 5-16 与图 5-15 相同, 但沿着星系短轴方向。除了发射线整体轮廓 (黑色实线) 外, 还给出了拟合的蓝色与红色轮廓, 分别使用对应颜色的实线表示 (轮廓的中心位置使用对应颜色的虚线表示)。在图的左上与右上分别列出了蓝色与红色轮廓的参数, 从上到下依次是轮廓的振幅、速度与速度弥散。..... 66
- 图 5-17 观测到的样本 DPG 中心 6×6 空间像素的发射线轮廓 (左图) 与模拟得到的结果 (右图)。蓝色与红色轮廓分别表示双高斯函数拟合双峰窄发射线的结果, 黑色虚线则表示整体的发射线轮廓。..... 67
- 图 5-18 用于描述双峰轮廓的参数, 来自图 5-17。从左到右的三列分别表示高斯轮廓的速度、流量以及速度弥散。从上到下的四行分别表示观测的蓝移成分、观测的红移成分、模拟的蓝移成分、模拟的红移成分。..... 68
- 图 5-19 用于描述观测到的双峰轮廓参数与模拟结果之间的差异, 来自图 5-18 第一行与第三行、第二行与第四行的比较。从左到右的三列分别表示红移成分与蓝移成分的速度差、流量比 (对数形式) 以及速度弥散差。上下两行分别是蓝移与红移成分的比较结果。..... 69
- 图 5-20 用于描述蓝移与红移之间差异, 来自图 5-18 第一行与第二行、第三行与第四行的比较。从左到右的三列分别表示红移成分与蓝移成分的速度差、流量比 (对数形式) 以及速度弥散差。上下两行分别是蓝移与红移成分的比较结果。..... 70
- 图 5-21 样本 DPG 的旋转曲线 (没有消除倾角影响)。黑点表示 MaNGA DAP 给出空间像素的中心距与速度, 蓝色与红色点表示 DPSs 中蓝移与红移成分的速度。虚线表示拟合的旋转曲线, 蓝色与红色实线表示模拟得到蓝移与红移成分的速度分布。..... 71

表目录

- 表 1-1 星系积分视场光谱巡天项目。..... 3
- 表 2-1 MaNGA 星系中 DPSs 目录的 10 个样例。第一列: MaNGA 星系 ID; 第二、三列: DPS 在 MaNGA DAP 中的坐标; 第四到九列: 拟合参数成分 1 的振幅、速度、弥散, 成分 2 的振幅、速度、弥散; 第十列: DPS 宿主星系有效半径归一化的中心距; 第十一列: DPS 的速度差。第六、九列的弥散没有进行仪器致宽的改正。..... 22

表 3-1 DPGs 与 DPSs 的棒、AGNs 以及潮汐特征的数量比例。第一列：特征类型；第二、三列：所有 DPGs 及其控制样本的特征数量比例；第四列：所有 DPSs 的特征比例；第五到七列：DPSs 子类型中的特征比例。	33
附表 1-1 MaNGA 星系中所有 304 个 DPGs 目录。第一列：MaNGA-ID，第二至四列：棒、AGN 与潮汐特征。	83
附表 1-2 表 1-1 的续表。	84
附表 1-3 表 1-1 的续表。	85
附表 1-4 72 个有棒 DPGs 目录。第一列：MaNGA-ID，第二列：倾角，第三列：棒的方向，第四列：核环的半径，第五列：核环的旋转速度 ·	87
附表 1-5 表 1-4 的续表。	88

符号列表

缩写

SDSS	Sloan Digital Sky Survey
IFS	Integral Field Spectroscopy
CSST	China Space Station Telescope
CALIFA	Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey
SAMI	Sydney-AAO Multi-object Integral Field Spectrograph
MaNGA	Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory
AGN	Active Galactic Nucleus
IFU	Integral Field Unit
RSS	Row-Stacked Spectra files
DRP	Data Reduction Pipeline
DAP	Data Analysis Pipeline
VACs	Value-Added Catalogs
DPG	Double-Peaked narrow emission-line Galaxies
DPS	Double-Peaked narrow emission-line Spaxels
SNR	Signal to Noise Ratio
BIC	Bayesian Information Criterion
SFR	Star Forming Rate
sSFR	Specific Star Forming Rate
KA	Kinematic Asymmetry
BPT	Baldwin, Phillips, Terlevich
LOESS	Locally Estimated Scatterplot Smoothing

第1章 引言

1.1 光谱巡天与积分视场光谱

自 20 世纪 20 年代埃德温·哈勃首次确认仙女座星云为银河系以外的独立星系以来，人类对宇宙的认知发生了革命性跃迁。数以千亿计的星系构成了我们宇宙的宏观结构网络，每个星系本质上是一个复杂的由引力主导的系统：其质量主要由暗物质构成，形成维持星系稳定的引力势阱；可见物质则以恒星、气体与尘埃等形式存在，在引力与电磁相互作用的驱动下，持续上演着恒星诞生与死亡、超大质量黑洞吸积与喷流、星系并合与潮汐撕裂等宇宙级物理过程^[1-3]。

星系光谱巡天是一种革命性的系统观测方式，其核心在于对可观测天区的星系实施模块化、全覆盖的连续扫描^[4-6]。这种大视场、高通量的观测模式，依托多目标光纤光谱技术，能够同时获取数百个天体的光谱数据，将星系物理性质（如星族年龄^[7,8]、金属丰度^[9,10]、气体运动学^[11]以及尘埃^[12]）的批量研究效率提升至前所未有的量级。例如，作为数字巡天项目的奠基者，斯隆数字巡天^[13]（Sloan Digital Sky Survey, SDSS）自 1998 年启动以来，凭借其创新的 2.5 米广角望远镜与多色成像系统，系统性地对全天空四分之一面积区域进行可见光波段扫描，并利用光纤光谱仪捕获目标光谱，构建了首个覆盖数百万天体的三维宇宙地图。截至 2020 年 SDSS-IV^[14] 结束，SDSS 的主项目总共给出了约一百万个邻近星系中心光谱。但是，SDSS 所提供的是单光纤光谱数据，是指将望远镜对准星系的中心区域并且通过单根光纤将收集到的光传输到光谱仪后进行色散得到的光谱^[13]。受制于光纤直径，SDSS 的单光纤光谱的空间分辨率约为 $3''$ ，反映的仅是星系中心区域的性质。而星系是由内外不同的结构组成的，从处于中心的超大质量黑洞及其相关的活动星系核（Active Galactic Nucleus, AGN），到星系的核球与棒结构，再到更外围的旋臂，不同的结构有着截然不同的星族成分与动力学性质。仅依靠单光纤光谱数据，我们难以研究星系由内向外的恒星形成演化与化学梯度；难以区分 AGN 的核区与外流成分；同样难以检查星系的并合特征。

积分视场光谱（Integral Field Spectroscopy, IFS）技术^[15]近年来在天文观测领域取得了显著的突破。相较于传统的单光纤光谱巡天，IFS 在空间分辨率、数据维度、科学应用等方面具有革命性优势。不同于传统光谱巡天需要多次调整望远镜才能观测星系的不同位置，IFS 的单次曝光即可获取整个星系的光谱数据，实现对星系二维空间的全方位覆盖观测，同时获取不同区域的光谱，从而解析星系内部动力学与化学丰度的梯度。IFS 也支持多目标同步观测，极大提升了星系巡天的效率，使得大样本统计成为可能。

IFS 技术的原理是使用积分视场单元（Integral Field Unit, IFU）的光谱成像技术，主要有透镜组、光纤束以及像切分器这三种仪器类型。透镜组（Lenslets）积分视场光谱仪是一种使用微透镜阵列作为 IFU 的技术。它位于望远镜焦面处，将入射光分割成多个微小的光束，每个光束对应于视场中的一个特定位置。这

些微透镜将光聚焦到后端的光谱仪中，光谱仪将光按波长分散并记录下来，从而实现对目标二维空间信息与一维光谱信息的同时采集。因为其非常高的空间分辨率与光谱分辨率，以及非常快的响应速度，早期的凯克望远镜的 OSIRIS (OH-Suppressing Infra-Red Imaging Spectrograph) 光谱仪^[16]，双子座多天体摄谱仪 (Gemini Multi-Object Spectrographs)^[17] 以及 Subaru 望远镜的 CHARIS (Coronagraphic High Angular Resolution Imaging Spectrograph)^[18] 都是透镜组积分视场光谱仪。

光纤束 (Fiber Bundle) 积分视场光谱仪是一种利用光纤束将二维视场分割成多个微小区域，并将这些区域的光传输到光谱仪中进行色散并记录的光谱成像设备。通过记录每个光纤的光谱信息，结合光纤在视场中的位置，重建出目标的三维数据立方。这种技术结合了光纤的灵活性与光谱仪的高分辨率，广泛地应用于天文观测中。作为最具代表性的三个使用光纤束的 IFS 巡天项目，CALIFA (Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey)、SAMI (Sydney-AAO Multi-object Integral Field Spectrograph) 以及 MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at APO) 在观测目标、样本规模、空间覆盖等方面各有特点。CALIFA^[19] 是西班牙卡拉阿托天文台于 2010-2016 年间使用 3.5 米望远镜与 PMAS/PPAKIFS 仪对红移范围 0.005–0.03 的约 600 个星系进行巡天的项目。其科学目标包括星系的化学演化 (例如金属丰度梯度)，星系形态-运动学关系以及星系并合与相互作用。CALIFA 的优势在于覆盖了星系 $2.5R_e$ 内的区域，中等的空间分辨率 ($\sim 1''$)，但其局限性在于光谱分辨率较低 (低分辨观测仅为 $R \sim 850$ ，中等分辨观测为 $R \sim 1,700$) 且样本规模较小，统计研究能力较弱。SAMI^[20] 是澳大利亚天文台于 2013–2018 年间使用 3.9 米的英澳望远镜对红移范围 0.004–0.095 的约 3,000 个星系进行巡天的项目。SAMI 更专注于星系环境、星系内部运动学以及 AGN 的反馈。SAMI 的优势在于其非常大的红移范围，可以研究不同红移处星系的演化，但其空间分辨率较低 ($\sim 2''$)，难以解析小尺度的结构。MaNGA^[21] 是美国阿帕奇点天文台于 2014-2020 年间使用 2.5 米望远镜与光纤束积分视场单元对红移约 0.03 的约 10,000 个近邻星系进行巡天的项目。作为这三个项目中样本规模最大的项目，MaNGA 最适合用于星系的统计研究工作。它也是本论文使用的母样本。因此我们下一节详细介绍 MaNGA 巡天项目。

像切分器 (Slicer) 积分视场光谱仪^[22] 是一种利用光学切片技术将二维视场分解为多个切片，并将这些切片重新排列以形成光谱仪入射狭缝的光谱成像技术。具体来说它包含前者光学系统与像切分器这两个部分。前者对视场进行变形放大，将二维视场转换为具有特定长宽比的变形视场；后者通常是由切片镜阵列、瞳镜阵列与狭缝镜阵列组成。切片镜阵列由多片薄的球面镜组成，这些镜片将变形视场分割成多个狭窄的子图像。每个切片镜形成一个镜瞳实像，并投射到对应的瞳镜上。瞳镜将每个切片重新成像到对应的狭缝镜上，最终狭缝镜将这些切片重新排列在光谱仪的入射狭缝处。像切分器积分视场光谱仪具有高空间分辨率与光谱分辨率，高光谱能量利用率，及其低光学畸变，是三种类型的积分视场光

谱仪中最先进的一个。例如，甚大望远镜 VLT/MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer)^[23]，詹姆斯·韦布空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 的近红外光谱仪 MOS (NIRSpec multi-object spectroscopy)^[24]，以及即将发射的中国巡天空间望远镜 (CSST) 的光谱仪都使用了扇形切分器，以减少光学畸变并提高成像质量。

在未来，IFS 技术还有非常大的潜力。例如使用人工智能的方法将各种类型的神经网络自动化提取 IFS 中的信号，或者结合射电以及 X 射线的的数据以构建多信使星系物理模型。

表 1-1 星系积分视场光谱巡天项目。

Table 1-1 Integral field spectroscopic survey projects of galaxies.

项目	波长范围	光谱分辨率	视场	空间分辨率	样本数量	样本红移范围
Keck OSIRIS	1–2.5 μm	$R \sim 3,800$	$20'' \times 20''$	$0''.15$	$\sim 3,000$	$\sim 2 - 3$
Gemini GMOS	365–1000 nm	$R \sim 1,500\text{--}4,000$	$5'' \times 7''$	$0''.2$	$\sim 1,500$	$\sim 0 - 3$
CALIFA	370–750 nm	$R \sim 1,650$	$74'' \times 64''$	$1''$	529	$\sim 0.005 - 0.03$
SAMI	370–750 nm	$R \sim 1,200$	$15'' \times 15''$	$0''.5$	$\sim 3,400$	$\sim 0.004 - 0.095$
MaNGA	365–1030 nm	$R \sim 2,000$	$30'' \times 30''$	$0''.5$	$\sim 10,000$	$\sim 0.01 - 0.15$
VLT/MUSE	480–930 nm	$R \sim 2,500$	$7''.42 \times 7''.43$	$0''.025$	$\sim 1,600$	$\sim 0 - 3$
JWST MOS	0.6–5.0 μm	$R \sim 2,700$	$3'.6 \times 3'.4$	$0''.2$	~ 30	$\sim 1 - 9$
CSST IFS	0.255–1 μm	$R \sim 2,500$	$7' \times 7'$	$0''.15$	-	-

1.2 MaNGA 巡天项目

MaNGA^[21] 作为 SDSS-IV 的重要组成部分，为了能更全面地获取星系不同区域的性质，使用 IFS 技术，专注于对邻近星系进行详细的光谱测绘^[14]。这些星系的光谱数据有助于深入了解其内部结构、恒星形成历史、化学成分、动力学性质以及暗物质分布等。

1.2.1 MaNGA 巡天的设备与观测策略

作为 SDSS 的子项目，MaNGA 巡天使用的设备是光谱模式下 2.5 米的斯隆望远镜^[21]。但 MaNGA 在接收端使用的是可以部署到直径为 3° 的焦平面内任意位置的 17 个 IFU，每个单元是由 19 到 127 根光纤组成的尺度不一的六边形，对应于天空的直径从 $12''$ 到 $32''$ 之间不等。MaNGA 总共使用了 270 块观测板，覆盖天空约 2700 平方度的天区。MaNGA 对每个观测板采用三次曝光，并在曝光之间施加亚光纤直径的偏移抖动。观测的视宁度为 $1''.5$ ，曝光时长选为 15 分钟，以尽量减少由视差角变化带来的影响。星系的光从光纤引入光谱仪后，得到的光谱覆盖范围是 $3,600\text{--}10,300\text{ \AA}$ ，根据 $6,050\text{ \AA}$ 划分为蓝色通道与红色通道。蓝色通道的光谱分辨率从 $4,000\text{ \AA}$ 的 $R \sim 1,400$ 到 $6,050\text{ \AA}$ 的 $R \sim 2,100$ ，红色通道的光谱分辨率从 $6,050\text{ \AA}$ 的 $R \sim 1,800$ 到 $9,000\text{ \AA}$ 的 $R \sim 2,600$ 。

为了对具有不同物理性质的邻近星系进行全方位的科学观测，MaNGA 观测的样本数量设置在约 10,000 个，以保证在恒星质量、恒星形成率以及环境这三个主要性质在不同范围内都有足够的样本。MaNGA 从 SDSS 的主要星系样本中选取了一个与光度相关的体积限制样本^[25]，使得更大质量的星系处于更高的红移，从而让它们在天空上的尺度尽可能保持一致。根据 IFU 对所有 10,000 个观测目标覆盖面积，MaNGA 将它们划分为主要与次要样本^[21]。主要样本的数量约 5,000 个，平均红移为 0.03，覆盖目标 $1.5R_e$ 内的区域。主要样本有一个额外的颜色增强样本（约 1,700 个），旨在平衡星系的颜色分布以覆盖恒星形成主序与红色序列。次要样本的数量约 3,300 个，平均红移为 0.045，覆盖 $2.R_e$ 内的区域。剩余的目标则是高价值的辅助目标，例如处于低红移明亮星系，它们提供了这些星系中心范围约 1 kpc 的超高分辨率光谱。

1.2.2 MaNGA 巡天的数据与分析流程

MaNGA 将直接从光谱仪中输出的数据称为行堆叠光谱文件（Row-Stacked Spectra files, RSS）^[25]，它是汇编了特定星系的所有光纤参数的完全还原光谱，也是 MaNGA 能提供的最原始光谱。但对于星系的科学研究来说，RSS 的数据还需要进行校正处理。

数据缩减流程（Data Reduction Pipeline, DRP）是一个在 RSS 的数据中校正流量并去除大气谱线的软件包^[25]，从而得到用于科学研究的数据立方（Cube），包含二维的空间信息与一维的光谱信息。由于 MaNGA 的偏移抖动曝光策略，数据立方在空间上的像素（空间像素 Spaxel，来自 Space + pixel）对应于天空 $0''.5 \times 0''.5$ 的范围。根据 IFU 的光纤数量（19 到 127 根光纤），每个星系的空间像素的数量有 34×34 ， 44×44 ， 54×54 ， 64×64 以及 74×74 这五种。需要说明的，由于点扩散函数效应以及偏移抖动的影响，相邻空间像素并不是完全独立的，它们给出的一维光谱信息在物理上有很强的相关性。

数据分析流程（Data Analysis Pipeline, DAP）是一个以 MaNGA 巡天观测为主导的软件包^[26]，它分析了由 MaNGA DRP 产生的所有星系数据。它的目标是从 MaNGA 光谱中产生高级的、可用于科学研究的数据产品。MaNGA DAP 的数据结构有两种：一种是类似于数据立方的三维数据，称为模型立方（ModelCube），主要包括拟合得到的光谱、发射线与连续谱。另一种是仅保留了空间信息的二维数据，称为数据图（Maps），主要包括空间叠加的光谱数据、恒星运动学数据、星云发射线性质、谱指数等这些不依赖于模型的性质，不包括例如星族参数的结果。从 MaNGA DAP 得到数据图的方法主要有三种：第一，从每个空间像素中单独拟合的方法（缩写为 SPX）；第二，从相邻空间像素中叠加光谱直至信噪比 10 再进行拟合的方法（VOR10）；第三，对于发射线相关性使用第一种而其它的性质使用第二种的混合方法（HYB10）。显然，这三种方法各有优劣，但通常以第三种为默认使用方法。

增值星表（Value-Added Catalogs, VACs）是由 SDSS 的测光与光谱数据经

过科学研究后获得的星表。MaNGA 作为 SDSS 的一个子项目，继承了其中有关邻近星系的一部分星表，例如 Pipe3D^[15]，Galaxy Zoo 2^[27] 等。MaNGA DAP 不提供的依赖于模型的性质也可以在 VACs 中找到，例如 Pipe3D 就提供了星族参数。

最后，我们介绍一下获取 MaNGA 中上述数据的端口：Marvin^[28]。Marvin 是一个专门用于可视化与分析 MaNGA 数据的工具，由 MaNGA 团队开发并维护 (<https://sas.sdss.org/marvin/>)。借助于 Marvin，用户可以通过本地、远程或网络接口访问 MaNGA DRP 与 DAP，以及部分的增值目录数据。

1.3 双峰窄发射线星系

双峰窄发射线星系因其独特的光谱特征而成为研究星系结构和动力学的重要探针，其光谱中呈现的双峰窄发射线结构通常反映了星系中心区域存在不同运动速度的电离气体或双活动星系核/并合系统，这为理解星系中的子结构，星系并合，超大质量黑洞协同演化以及反馈机制提供了关键线索^[29]。双峰窄发射线星系中电离气体的运动学与恒星形成活动的相关性为研究反馈过程如何调节星系演化提供了天然实验室，其窄线区的物理条件（如电子密度、电离参数）可通过双峰组分的谱线诊断进行精确测量，这些观测约束对完善星系共演化理论具有不可替代的作用^[30]。此外，这类天体对光谱分辨率提出了较高要求，推动着积分场光谱仪和自适应光学系统的发展，而其特殊光谱形态也为机器学习在天体光谱分类中的应用提供了重要测试样本^[31]。

1.3.1 双峰窄发射线星系的定义

星系中气体的运动学信息可以非常容易地从星系光谱巡天中的发射线获得。星系在可见光波段的发射线常见有由电子在氢原子能级间跃迁产生的巴尔末系发射线 $H\alpha$ λ 6564 Å 与 $H\beta$ λ 4862 Å，由低密度电离气体中的禁戒跃迁主导的禁线 $[O\ III]$ $\lambda\lambda$ 4960, 5008 Å 以及 $[N\ II]$ $\lambda\lambda$ 6549, 6586 Å 等。这些发射线的形态（如线宽、偏移等）直接反映了气体的物理特征。在通常情况下，对于一个星系来说，它的每一条发射线的形状可以近似为窄高斯轮廓（线宽约为几十至几百 km/s，区别于上千 km/s 的宽高斯轮廓，后者通常不单独出现在光谱中，与 AGN 相关）。高斯轮廓包含的三个参数：中心波长、标准差以及流量。中心波长通过对比实验室静止波长，可以计算气体的整体速度偏移，对应于星系整体的运动；标准差在转换为速度空间后，表征气体运动的速度弥散，对应于星系整体的热运动；而流量与发射线区域的电离气体密度、电离源强度有关，可以用来判断电离机制。不同发射线对气体物理条件的敏感性存在差异，因此需要多条发射线协同分析。对于光谱巡天中的大多数星系，它们中每个星系所有发射线的速度偏移与弥散均一致（一组发射线），表明这些星系中的气体运动主要是由星系整体运动主导^[11]。

不过，星系光谱巡天的结果发现，一些星系的部分或全部发射线的形状明显偏离了高斯轮廓^[32,33]。它们中一部分的典型表现为：同一发射线的轮廓呈现对

称的双峰结构，且每个峰各自对应了一个窄高斯轮廓^[34]（如图1-1所示）。这一现象无法通过单一高斯模型解释，说明存在两组独立且具有不同运动学性质的电离气体成分^[35]。这类具有对称发射线轮廓的星系被命名为双峰窄发射线星系^[29]（Double-peaked Narrow Emission-line Galaxies, 为了与之前的文献保持一致，本文缩写为 DPGs）。它们与那些同时存在窄高斯轮廓和宽高斯轮廓的宽发射线星系不同。Ge 等^[29] 最早给出了 DPGs 的定义，并在当时最大的光谱巡天 SDSS DR7 给出的近一百万个星系中，建立了首个大规模样本。他们通过多高斯拟合算法要求至少一条发射线的双峰显著性超过 5σ ，且两个峰的速度差超过 150 km/s 以避免仪器分辨率导致的伪信号，然后剔除具有宽线成分的星系，发现了 3,030 个 DPGs 样本。基于这些星系发射线提供的运动学与化学信息，Ge 等^[29] 提出双峰可能起源于双 AGN 或大尺度的气体运动。

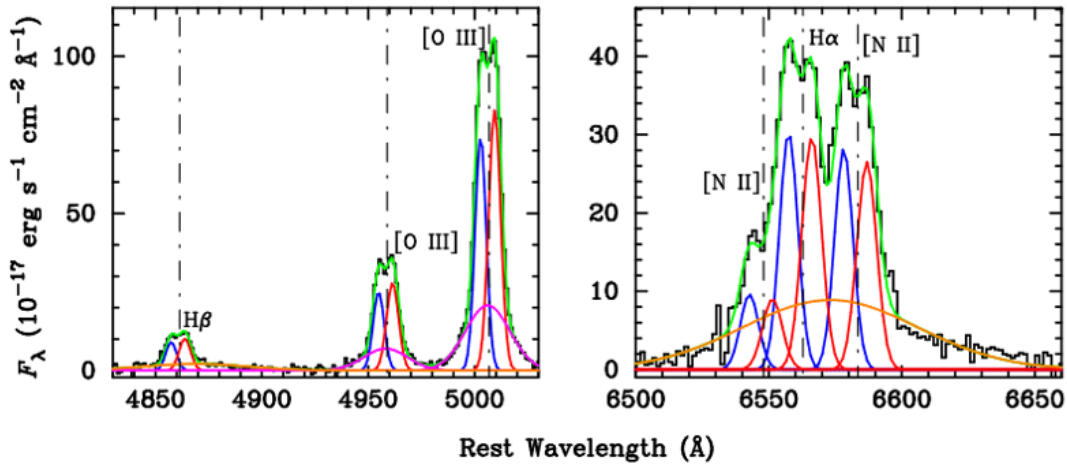


图 1-1 DPGs 的发射线示意图。左图包含 $H\beta$ 线与 $[O III]$ 双线的双峰特征，右图包含 $H\alpha$ - $[N II]$ 三重线的双峰特征。每一条线均包含蓝色与红色两个窄高斯轮廓。

Figure 1-1 Schematic diagram of the emission lines of a double-peaked narrow emission-line galaxy. The left figure shows the double-peaked features of the $H\beta$ line and the $[O III]$ doublets, while the right figure shows the double-peaked features of the $H\alpha$ - $[N II]$ triple lines. Each line containing two narrow Gaussian profiles in blue and red.

注：图取自 Ge 等^[29] 的图 3。

随着 SDSS 更多数据释放与分析技术优化，Maschmann 等^[36] 将 DPGs 样本更新到 5,663 个。其中的改进包括：使用马尔可夫链蒙特卡罗拟合算法提升双峰分解的可靠性；放宽双峰速度差的限制，要求超过 100 km/s 以捕捉更致密的双峰系统；使用红外与 X 射线源表进行多波段交叉认证。Maschmann 等^[36] 对这些 DPGs 进行了形态、运动学、恒星形成活动以及环境方面的分类，发现它们广泛存在于早型或晚型、孤立或并合、贫气或富气的星系中，同样表明它们的多种物理起源。例如，在图1-2中，顶部子图的正面朝向且富含气体的旋涡星系，中间子图的气体贫乏的椭圆星系，以及底部子图的并合星系，都能在光谱中探测到双

峰窄发射线。

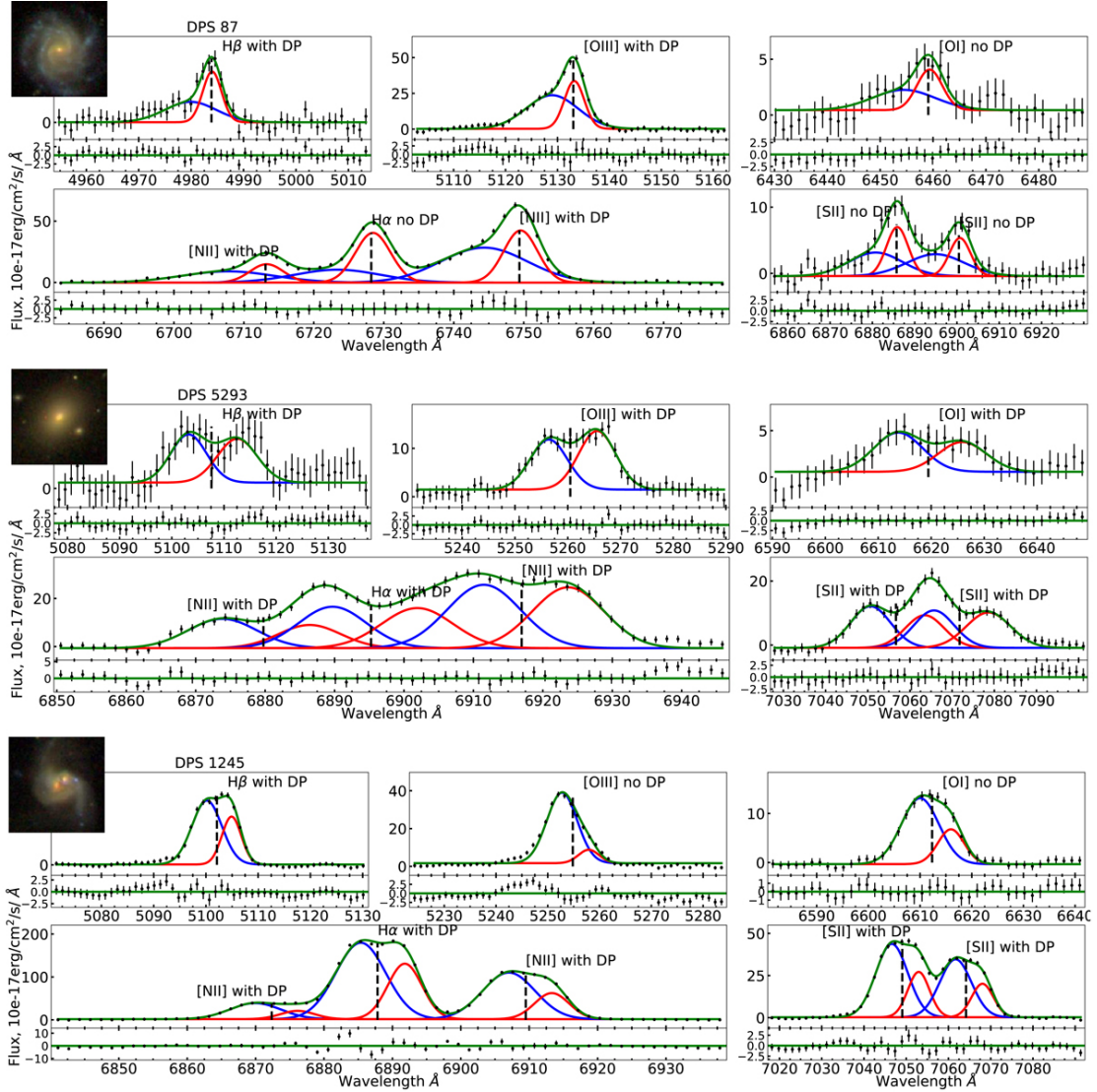


图 1-2 三个 DPGs 的发射线。每个子图的左上方都显示了它们的 SDSS 快照。一些标有“with DP”的发射线，其蓝移的高斯成分显示为蓝线，红移的高斯成分显示为红线，而其他标有“无 DP”的发射线则没有明显的双峰特征。顶部子图的光谱来自于一个面朝上的旋涡星系，可能有外流。中间子图的光谱来自于一个椭圆星系的光谱。底部子图的光谱来自于一个星系合并，可能与最近的星系合并有关。

Figure 1-2 Emission lines of three DP galaxies. For each panel, they display an SDSS snapshot on the top left. Some lines labeled “with DP” are plotted with their blue-shifted Gaussian component shown as blue lines and the red-shifted component as red lines, while the others labeled “no DP” have no significant DP features. The top spectra are for a face-on spiral galaxy, which may have an outflow. The middle spectra are for an elliptical galaxy. The bottom spectra are for a galaxy merger, probably associated with recent galaxy merger.

注：图取自 Maschmann 等^[36] 的图 1。

DPGs 在光谱上均表现为两组独立的高斯成分叠加，但其物理起源具有显著的多样性。近年来的观测与理论研究揭示了多种可能机制，涵盖星系并合^[37]、AGN^[38]、恒星形成活动^[30]以及气体运动学模型^[39]等。例如，Pilyugin 等^[40]基于 SDSS 数据筛选的 55 个 DPGs，其中 18 个被认为来自同一个星系中两次独立星暴事件的叠加，其中气体的快速内流或并合导致不同气体成分的速度分离。而 Müller-Sanchez 等^[41]及其系列文献^[30,42,43]针对这一主题进行了深入研究，提出了包括相互绕转的双 AGN（如图1-3所示的双 AGN 模型）、AGN 导致的双锥形外流（如图1-4所示的双锥形外流模型）以及扰动的旋转盘（如图1-5所示的星系盘旋转主导的模型）等假设来解释 DPGs。

1.3.2 使用积分视场光谱巡天对双峰窄发射线星系的研究

尽管星系光谱巡天通过测量星系中心光谱能够高效获取星系发射线特征，但其在二维空间信息上的缺失使得其无法解析星系不同区域的运动学差异以及不同机制的几何分布特征，其难以确认双峰窄发射线的物理起源。

针对上述限制，Wang 等^[31]提出使用 SDSS 的子项目 MaNGA^[21]巡天开展空间分辨光谱研究。MaNGA 采用 IFS 技术^[44]，对邻近星系进行全覆盖的光谱观测，获得它们的二维空间分辨的发射线速度场以及恒星运动学信息。这一方法为双峰窄发射线起源的判断提供了革命性工具（如图1-6右侧所示的星系中心区域与外围区域光谱）。此外，MaNGA 还发布了 VACs，它们是通过原始数据的深度处理与分析，为研究者提供了丰富的衍生数据产品，极大地扩展了 MaNGA 数据的科学应用范围。VACs 涵盖了恒星运动学、气体动力学、星族参数、形态学等多个领域，在 DPGs 的研究中发挥了重要作用。

相较于 SDSS 的主项目，MaNGA 巡天给出的星系样本数量要小得多（约 10,000 个），因此早期的研究通常针对具体的某个 DPG。例如，Wang 等^[31]对典型目标 MaNGA-ID 1-556501 的发射线速度场进行重建，发现其呈现出对称的旋转结构，判定其双峰最有可能的起源是 Nevin 等^[30]提出的叠加扰动的旋转盘结构，而非双 AGN 或外流。Yazeedi 等^[45]针对 MaNGA-ID 1-166919，除了对发射线的运动学进行分析之外，还结合发射线的电离参数、星族性质以及尘埃等空间分辨的数据，证明了这一星系中的双峰是由 AGN 驱动的双锥形外流与背景盘气体叠加形成的，并且首次在空间尺度上验证了外流模型的可观测特征。他们的模型如图1-7所示。类似地，Ciraulo 等^[46]通过形态学证据、运动学解耦以及星族性质差异等方式，证明了 MaNGA-ID 1-114955 的双峰源于两个星系盘的视线方向重叠，其独立运动学状态导致发射线轮廓叠加。他们对这个并合系统速度场的建模如图1-8。

Fu 等^[47]使用 MaNGA IFS 数据，系统性地对所有星系样本进行发射线特征分析。不过他们的研究重点聚焦于宽发射线星系，尤其是处于星系中心区域，与 AGN 相关的宽线区动力学。该研究在宽发射线星系的分类与物理机制分析方面取得了重要进展，但对于 DPGs 的关注相对有限，并没有对双峰窄发射线的起源

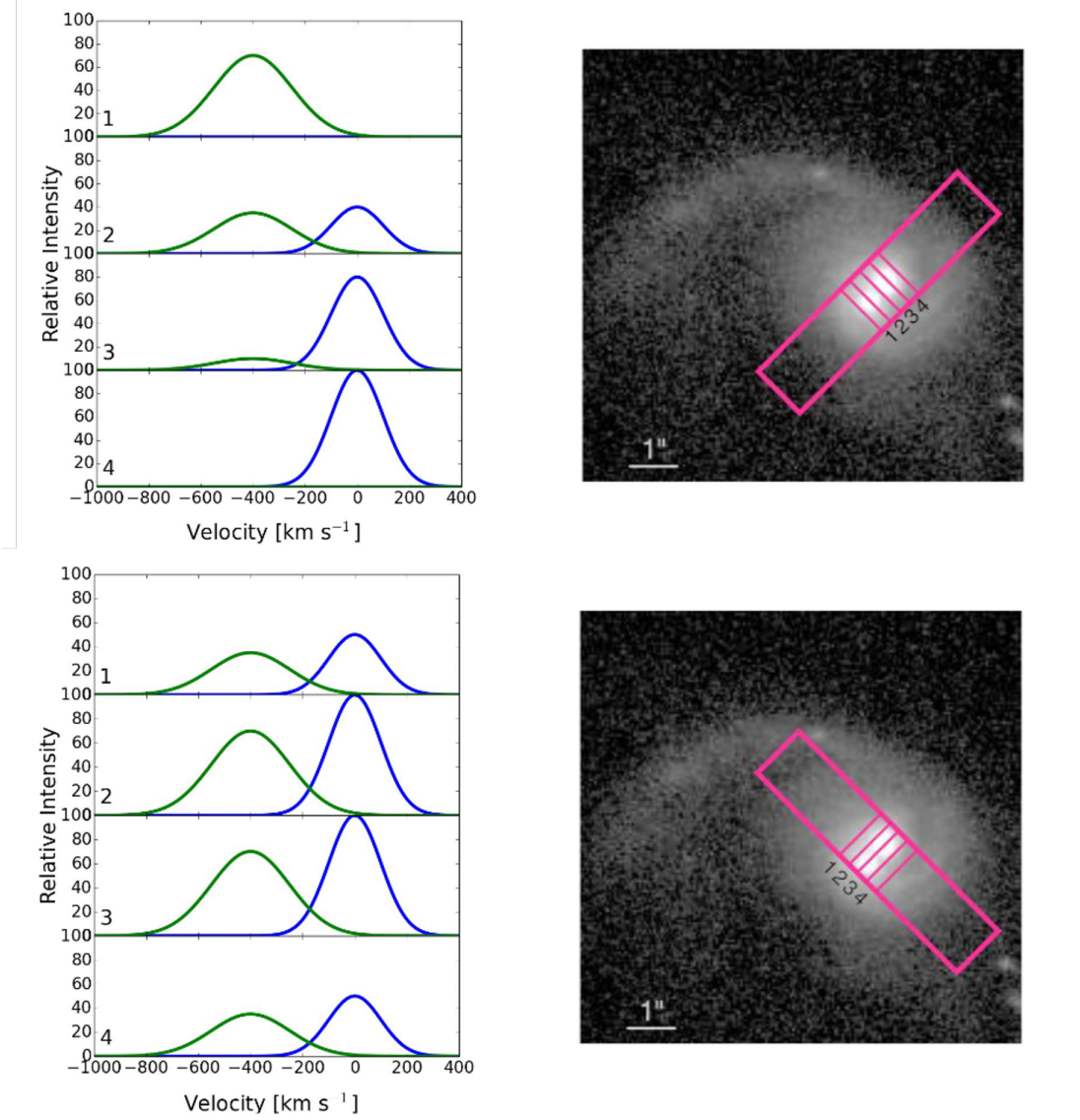


图 1-3 模型中双 AGN 的光谱，其特点是双 AGN 以旋转为主的区域，没有外流成分。左侧子图的空间分辨光谱的 x 轴是速度空间。右侧子图是包含双 AGN 的理论星系。洋红色方框是狭缝的位置（顶部子图是沿着西南到东北的方向，底部子图是沿着东南到西北）。我们预计中心会出现双峰轮廓。

Figure 1-3 Spectrum of a toy model of a dual AGN that is characterized by the rotation-dominated region of the dual AGNs with no outflow components. The x axis of the spatially resolved spectrum (left) is in velocity space. On the right is the theoretical galaxy that hosts a dual AGN. The magenta box is the slit position (top: aligned SW to NE; bottom: aligned SE to NW). We would expect a double-peaked profile at the center.

注：图取自 Nevin 等^[30] 的图 5 与 6。

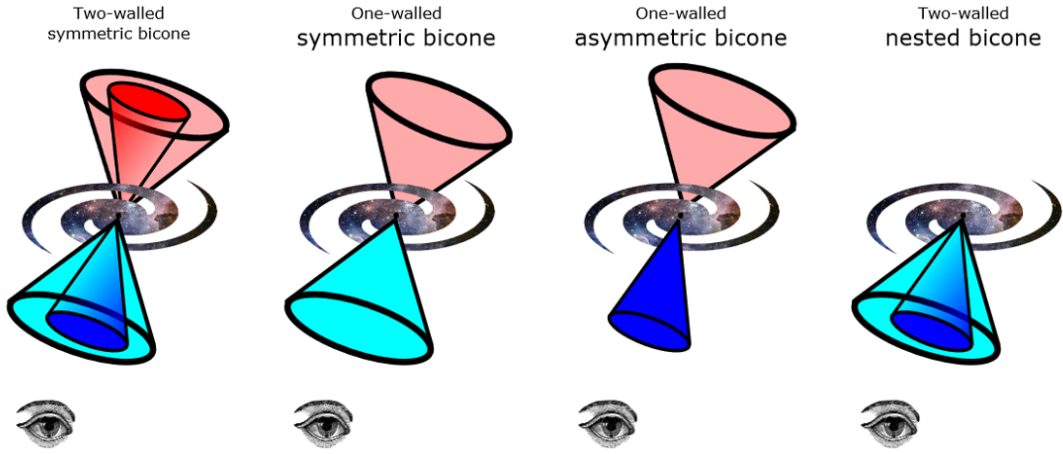


图 1-4 外流的对称双锥形的总体结构与变化。颜色越深表示视向速度越大。左一子图有对称的两层双锥形外流，两层的开口角度不同。左二子图有一层对称的双锥形外流，顶点之间相连。右二子图与左二的相似，但两个锥形的开口角度不同。右一子图的两个锥形均为蓝移，开口角度也不同。

Figure 1-4 The general structure and variations of the symmetric bicone of outflows. Darker colours indicate larger line-of-sight velocities. The general structure (left) has four total walls, all of which are aligned and described by two different opening angles. The symmetric bicone (second from left) has two cones of the same opening angle that touch apex to apex. The asymmetric bicone (second from right) has two cones of different opening angles, where the larger opening angle cone illustrates the receding emission component. The nested bicone (far right) has two cones, both of which are blueshifted.

注: 图取自 Nevin 等^[42] 的图 2。

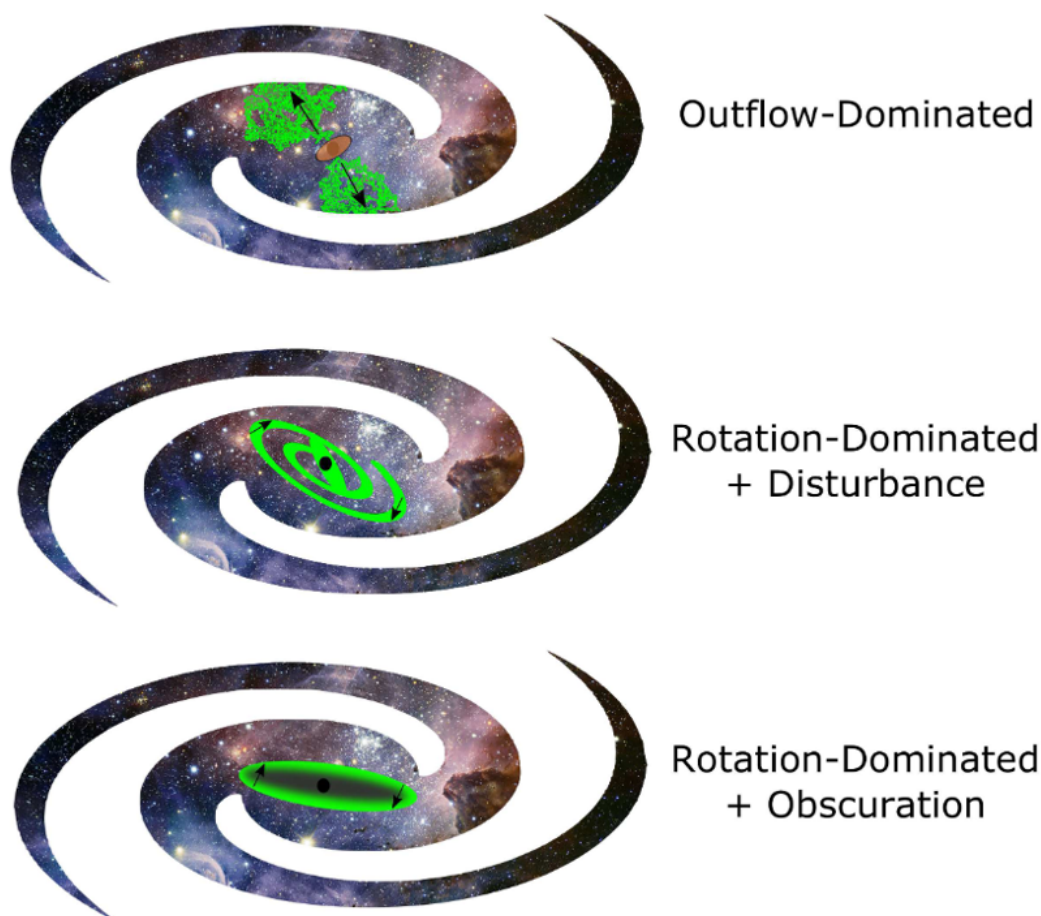


图 1-5 三种主要运动学分类的卡通示意图。这里使用绿色显示以外流为主的分类以及两种以旋转为主的分类中发射线运动学的起源，其中黑色箭头给出了造成发射线轮廓速度偏移的运动学成分。顶部子图：以外流为主的发射线特征。中间子图：旋转主导 + 扰动，星系可能具有旋转结构或棒结构。底部子图：旋转主导 + 尘埃遮蔽结构，例如尘埃带。这些都有可能产生双峰轮廓。

Figure 1-5 Cartoon diagrams of three of the main kinematic classifications. Here we show the origin of the emission-line kinematics in green for an outflow-dominated classification and the two rotation-dominated classifications. We demonstrate the kinematic components that are responsible for the velocity shifts in the emission-line profiles using black arrows. Top: an outflow-dominated galaxy, “Outflow” or “Outflow Composite,” is characterized by outflowing emission. Middle: a Rotation Dominated + Disturbance galaxy may have rotating spiral structure or a bar structure. Bottom: a Rotation Dominated + Obscuration galaxy is characterized by a rotating disk that has a co-rotating obscuring structure such as a dust lane that produces a double-peaked profile at each spatial position.

注：图取自 Nevin 等^[30] 的图 9。

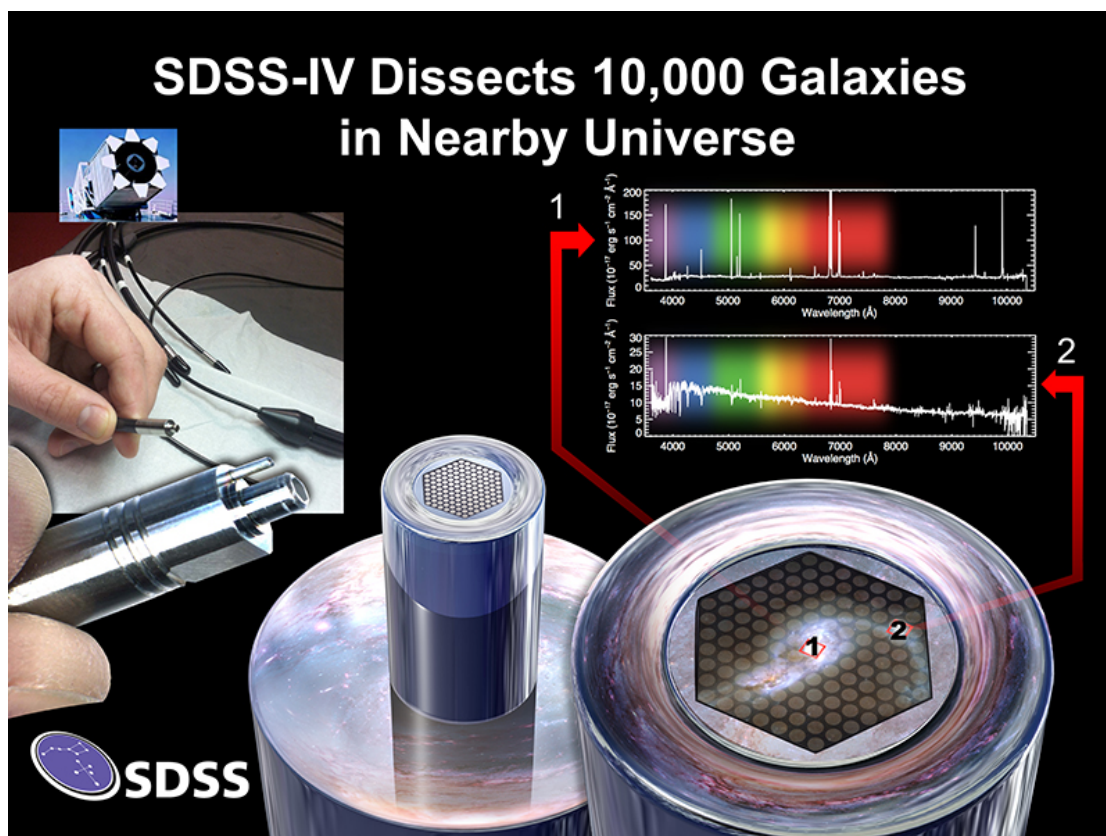


图 1-6 MaNGA 使用定制设计的光纤束来获取目标星系整个表面的光谱。右下说明了光纤阵列是如何对特定星系进行空间采样的。右上比较了两根光纤在星系不同位置观测到的光谱，表明中心区域与外围区域的光谱有很大不同。

Figure 1-6 MaNGA obtains spectra across the entire face of target galaxies using custom designed fiber bundles. The bottom right illustrates how the array of fibers spatially samples a particular galaxy. The top right compares spectra observed by two fibers at different locations in the galaxy, showing how the spectrum of the central regions differs dramatically from outer regions.

注：图取自 Dana Berry / SkyWorks Digital Inc., David Law, and the SDSS collaboration。

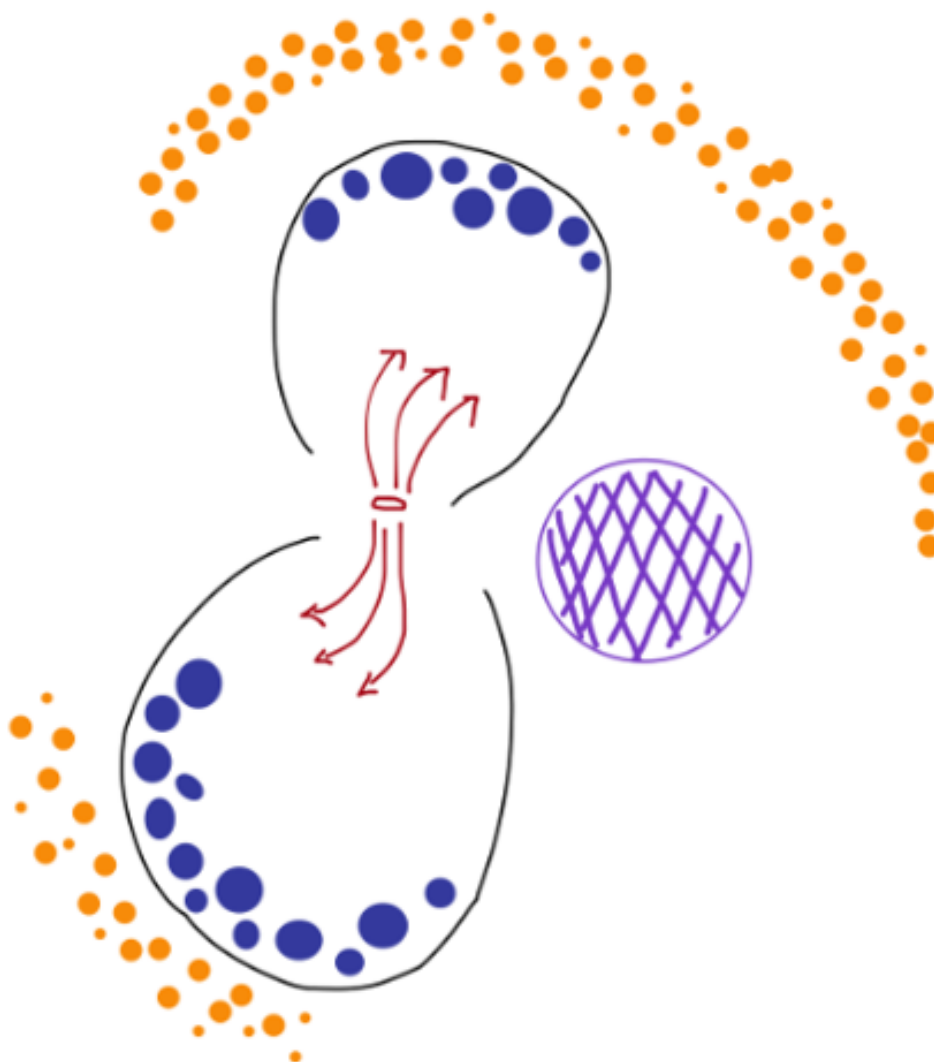


图 1-7 MaNGA 1-166919 示意图。星系中心是低光度、低爱丁顿 AGN，向周围注入快速运动的物质（红色椭圆与箭头）。物质通过激波冲击到星际介质（黑线）中，受到激波冲击的物质产生了电离气体（蓝色圆形）。这个激波周围探测到恒星形成增强的区域（橙色圆形）与恒星形成较低的区域（紫色阴影）。

Figure 1-7 Schematic diagram of MaNGA 1-166919. In the center of the galaxy is the low-luminosity, low Eddington AGN injecting fast-moving material into its surroundings (red circle and arrows). This material drives shocks into the ISM (black lines), with the shocked material responsible for the observed relativistic electrons and hot ionized gas (blue circles). Around this shock we detect regions of enhanced star formation (orange circles), as well as a region of low star formation (purple hatched region).

注：图取自 Yazeedi 等^[45] 的图 28。

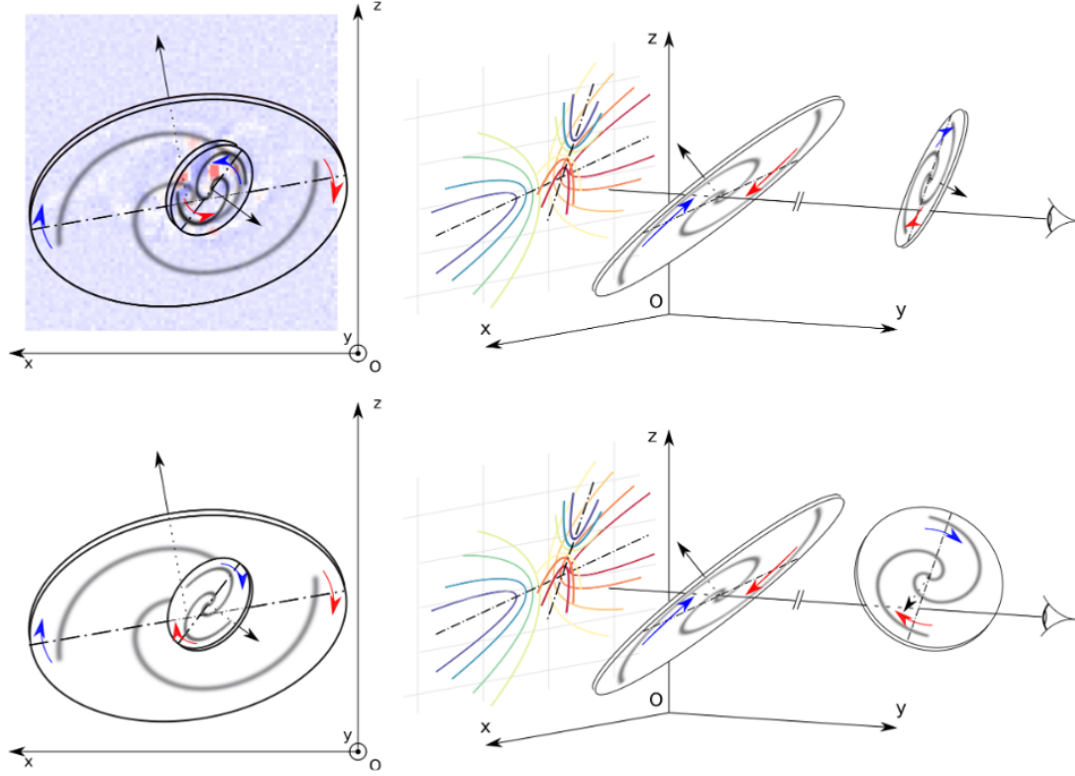


图 1-8 并合系统示意图。顶部子图：次星系近侧位于北方的情况。底部子图：次星系近侧位于南方的情况。左侧子图为两个盘在天空中的投影。右侧子图为不同视角下的三维视图，且能看到这两个盘并不重叠。

Figure 1-8 Schematic illustration of the revealed merging system. **Top:** Configuration where the near-side of the secondary galaxy is on the north side. **Bottom:** Configuration where the near-side is on the south side of the major axis. **Left panels** show the discs as projected on the sky. **Right panels** show a "3D view", with a different viewing angle, for which discs can be represented with no superposition.

注：图取自 Ciraulo 等^[46] 的图 11。

进行系统性分类与统计，仅筛选出了 49 个在星系中心区域呈现双峰窄发射线特征的星系。因此，针对上述空白，本论文将基于 MaNGA IFS 数据，填补当前统计研究的空白，为理解 DPGs 的物理起源与演化意义提供新的视角。

1.4 文章结构

通过上一节的叙述，我们已经明确了 IFS 技术在 DPGs 研究中的独特优势，即能够解析星系内部不同区域的发射线速度场与恒星运动学信息，为双峰特征的物理起源提供直接观测证据。我们的两个主要目标分别是 DPGs 的分类及其物理起源的研究。下面我们对本论文中的两个工作分别做出简要叙述，而详细介绍将在之后两个章节中给出。

第一部分的研究是基于 MaNGA 巡天的约 10,000 个星系，覆盖了总计约三百万个空间像素的发射线数据^[44]。通过比较这些空间像素发射线轮廓的单高斯与双高斯拟合，我们筛选出双峰窄发射线空间像素 (Double-peaked Narrow Emission-line Spaxels, 缩写为 DPSs)，并进一步定位这些空间像素所在的 DPGs。我们的分析从空间像素与星系两个层次展开，揭示了双峰特征的多样性及其宿主星系物理性质的关联。对于每个 DPS，我们提取了两个关键参数：有效半径归一化的宿主星系中心距与双峰之间的速度差。基于这两个参数，我们将所有 DPSs 划分为三种类型：处于星系中心且速度差较小的主要类型，处于星系中心且速度差较大的次要类型 1 以及处于星系外围且速度差较大的次要类型 2。对于 DPGs，我们比较了它们与控制样本（无双峰特征的星系）的物理性质，发现它们的恒星质量更大、恒星形成更活跃。此外，DPGs 在棒、AGN 以及潮汐这三个特征上的比例显著高于控制样本。通过将空间像素的三种类型与星系的三种特征（棒、AGN 以及潮汐）进行关联，我们发现 DPSs 的主要类型对应棒，次要类型 1 对应 AGN，次要类型 2 对应潮汐特征。这些关系并非一一对应的，因为一个 DPGs 可能包含 1 到 3 种类型的空间像素且具有 0 到 3 种特征。

第二部分的研究是基于第一部分的研究中，我们首先对潮汐特征 DPGs 与 AGN 宿主 DPGs 的形态与运动学性质进行了分析，发现它们与之前研究中的结果相吻合。前者的双峰来自于中心星系及其伴星系，后者的来自于中心星系及其外流。我们注意到有棒 DPGs 在 DPGs 样本中占有显著比例，但其双峰特征的物理起源尚未明确。与 AGN 驱动外流或潮汐相互作用不同，现有文献对有棒 DPGs 的研究较少。其中，棒可能通过两种机制产生双峰特征，它们分别是棒中气体内流与气体核环导致的双峰特征。前者可以通过计算星系及其棒方位角之差验证，气体内流导致双峰特征的情况仅发生在棒的方向与星系主轴方向接近于平行时。后者则需要通过共振理论中的内林德布拉德共振，计算气体核环的半径与旋转速度，并与 DPSs 的中心距以及速度差进行对比。我们的结果表明，后者的可能性更大。此外，我们挑选了一个有棒 DPGs，通过它的速度场与流量分布还原了其空间分布的双峰特征。

在文章的最后，我们将总结以上研究的全部内容，并简单介绍一下未来可以

进一步探索的工作。

第2章 搜寻 MaNGA 巡天中的双峰窄发射线空间像素

MaNGA 巡天^[21] 是 SDSS-IV^[14] 的核心项目之一，旨在通过积分视场光谱技术对约 10,000 个邻近星系进行空间分辨光谱观测，覆盖了总计约三百万个空间像素的发射线数据。MaNGA 数据可以分为以下几个主要层次：由望远镜直接获取的原始 RSS 数据，经过初步的 DRP^[25] 得到的三维数据立方，经过深度 DAP^[26] 得到的二维数据图与模拟拟合的三维光谱模型立方，以及 VACs。除了 RSS 数据，剩余三种类型数据都在本工作中涉及。

2.1 数据处理过程

为了获得最完备的 DPG 样本，我们对这 10,000 个邻近星系的总计约三百万个空间像素的发射线数据都进行了处理。

2.1.1 双峰窄发射线的拟合

我们使用最常见的 $H\alpha$ λ 6564 Å - [N II] $\lambda\lambda$ 6549, 6586 Å 三线作为数据分析对象，截取红移改正后 6500 - 6650 Å 作为发射线的拟合范围。需要说明的是，星系的模型立方提供了每个空间像素中所有发射线的单高斯轮廓拟合结果，但这明显不是我们需要的拟合结果。因此，我们预先将数据立方的每个空间像素中的光谱扣除模型立方提供的拟合连续谱，来得到我们用来研究的发射线（其中一个空间像素的光谱如图2-1所示）。同时，我们计算每个空间像素在这一波长范围内的发射线平均信噪比（ SNR_S ），要求 $SNR_S \geq 5$ 以去除没有发射线的空间像素。

发射线的拟合过程如下。首先，我们对 6500 - 6650 Å 范围内的 $H\alpha$ - [N II] 线进行单高斯轮廓与双高斯轮廓拟合，使用 Python 包 `Scipy.optimize.curve_fit`（包的使用方法详见 `Scipy` 高级科学计算库网页 <https://docs.scipy.org>）。单高斯拟合包含一组发射线，其中的基本参数有九个，分别是这三条线的振幅、速度与弥散。双高斯拟合包含两组发射线，因此基本参数数量则是单高斯的两倍。为了减少自由参数，我们要求在每一组发射线中，三条线的速度都是耦合的，而 [N II] $\lambda\lambda$ 6549, 6586 Å 双线的振幅比为 1: 3^[48]，弥散比为 1: 1。这样，单高斯拟合的自由参数减少为五个（ $H\alpha$ 的振幅 $A_{H\alpha}$ 、速度 $v_{H\alpha}$ 与弥散 $\sigma_{H\alpha}$ ，[N II] λ 6586 Å 的振幅 $A_{[NII]\lambda 6586}$ 与弥散 $\sigma_{[NII]\lambda 6586}$ ），而双高斯拟合的自由参数有两组共十个（ $A_{1,H\alpha}$ ， $A_{2,H\alpha}$ ， $v_{1,H\alpha}$ ， $v_{2,H\alpha}$ ， $\sigma_{1,H\alpha}$ ， $\sigma_{2,H\alpha}$ ， $A_{1,[NII]\lambda 6586}$ ， $A_{2,[NII]\lambda 6586}$ ， $\sigma_{1,[NII]\lambda 6586}$ 以及 $\sigma_{2,[NII]\lambda 6586}$ ），其中角标为 1 的参数属于高斯轮廓 1，角标为 2 的参数属于高斯轮廓 2。

2.1.2 双峰窄发射线空间像素的筛选

在得到单高斯与双高斯轮廓的拟合结果后，我们需要对它们进行限制，以挑选出在物理与统计方面都满足要求的具有双峰窄发射线的空间像素。首先，我

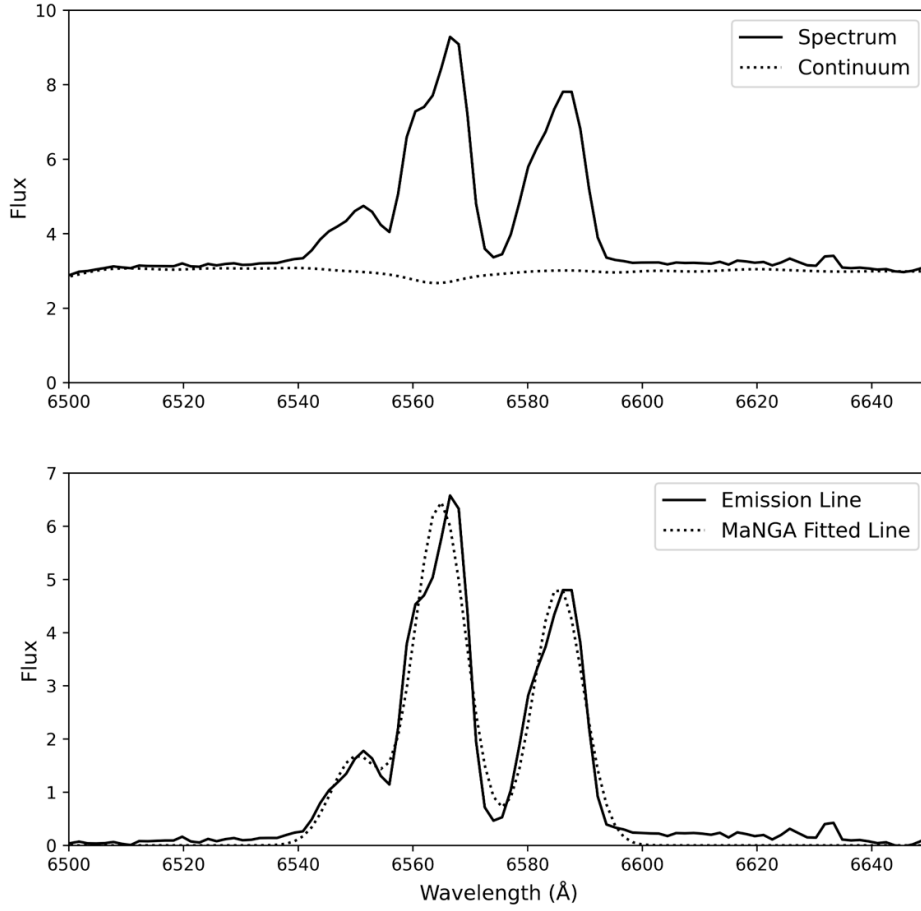


图 2-1 MaNGA-ID 为 1-593159 星系中一个空间像素在波长范围 6500 - 6650 Å 的光谱示例。上方子图：光谱是直接从 MaNGA 数据立方中获得的，而连续谱则是通过 MaNGA DAP 拟合得到的。下方子图：发射线是从上方的光谱中减去连续谱计算得到的，与直接从 MaNGA DAP 拟合的发射线（单高斯轮廓）有明显不同。

Figure 2-1 An example of the spectra in a spaxel in the galaxy with MaNGA-ID 1-593159. **Top:** The spectrum is directly obtained from the MaNGA data cube, and the continuum is fitted from the MaNGA DAP. **Bottom:** The emission line is calculated from the spectrum subtracted the continuum, which is significantly different with the MaNGA fitted line (single Gaussian profiles) directly from the MaNGA DAP.

们定义蓝移成分为高斯轮廓 1，红移成分为高斯轮廓 2，蓝移成分的速度总是小于红移成分的速度 ($v_{1,H\alpha} < v_{2,H\alpha}$)。我们要求这两个成分的速度差超过 200 km/s ($\Delta v \equiv v_{2,H\alpha} - v_{1,H\alpha} > 200 \text{ km/s}$)，以保证双峰特征在光谱上是可分辨的。接下来，我们要求这两个成分的弥散均不大于 600 km/s ($\sigma_{1,H\alpha} \leq 600 \text{ km/s}$, $\sigma_{2,H\alpha} \leq 600 \text{ km/s}$)，以保证它们都是窄发射线。然后，我们计算两个成分的流量比（定义为 $f_{2,H\alpha}/f_{1,H\alpha} \equiv (A_{2,H\alpha} \times \sigma_{2,H\alpha})/(A_{1,H\alpha} \times \sigma_{1,H\alpha})$ ）在 $1/5 < f_{2,H\alpha}/f_{1,H\alpha} < 5$ 之间，以保证这两个成分在物理上是可比的。最后，在统计上，我们计算并比较了单高斯与双高斯拟合优度：F 检验 (F-test) 与贝叶斯信息准则^[49] (Bayesian Information Criterion, BIC)，当它们均满足双高斯拟合优于单高斯时，该空间像素才能被认为是存在双峰的。其中 F 检验的定义如下：

$$F = \frac{\chi_d^2/N_{\text{vars,d}}}{\chi_s^2/N_{\text{vars,s}}} \quad (2-1)$$

贝叶斯信息准则的定义如下：

$$\Delta BIC = N_{\text{data}} \times \ln \frac{\chi_s^2}{\chi_d^2} + (N_{\text{vars,s}} - N_{\text{vars,d}}) \times \ln N_{\text{data}} \quad (2-2)$$

在式 2-1 与 2-2 中， N_{data} 表示在 6500 - 6650 Å 范围内光谱的采样点数； $N_{\text{vars,s}} (= 5)$ ， χ_s^2 以及 $N_{\text{vars,d}} (= 10)$ ， χ_d^2 分别是在单高斯轮廓与双高斯轮廓的情况下，自由参数的数量以及拟合的最小卡方值。我们认为，当一个空间像素的发射线拟合结果均满足 $\Delta BIC > 0$ ^[45] 与 $F > F_{0.05}(N_{\text{vars,s}}, N_{\text{vars,d}}) \sim 4.74$ ($F_{0.05}$ 表示在没有实际差异的情况下，得出单高斯分布和双高斯分布之间存在差异的结论的风险为 5%) 这两个条件时，该空间像素才被认为是 DPSs。

我们在图 2-2 中给出了 MaNGA-ID 为 1-593159 的星系中一个空间像素在波长范围 6500 - 6650 Å 的 $H\alpha \lambda 6564 \text{ Å}$ - [N II] $\lambda\lambda 6549, 6586 \text{ Å}$ 三重线及其拟合结果。上方两个子图与下方两个子图分别显示了单高斯轮廓与双高斯轮廓拟合的情况。我们发现对于这个空间像素来说，双高斯轮廓拟合有效解决了每条发射线不对称的问题，拟合优度明显好于单高斯轮廓。

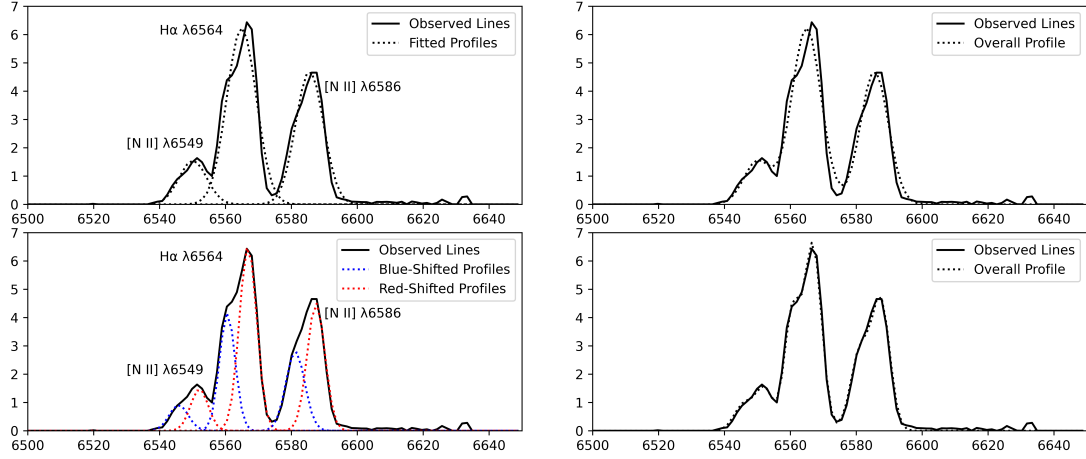


图 2-2 MaNGA-ID 为 1-593159 星系中一个空间像素在波长范围 6500 - 6650 Å 的 $H\alpha$ λ 6564 Å- [N II] $\lambda\lambda$ 6549, 6586 Å 三重线的示例。在每一张子图中，黑色实线都表示观测到的发射线轮廓。左上子图中的黑色虚线是单高斯轮廓的拟合结果，从左到右分别是 [N II] λ 6549 Å 线, $H\alpha$ λ 6564 Å 线以及 [N II] λ 6586 Å 线这三条线的三个高斯轮廓。右上子图是从左上子图中得到的单高斯轮廓拟合结果的整体轮廓。左下子图中的蓝色与红色虚线是双高斯的拟合结果，分别表示蓝移与红色的两组发射线，每种颜色都包含三个高斯轮廓，从左到右也是 [N II] λ 6549 Å 线, $H\alpha$ λ 6564 Å 线以及 [N II] λ 6586 Å 线。右下子图同样是从左下子图中得到的双高斯轮廓拟合结果的整体轮廓。

Figure 2-2 An example of the single and double Gaussian profiles fitting for the emission lines in a spaxel in the galaxy with MaNGA-ID 1-593159. Top left: The original $H\alpha$ -[N II] $\lambda\lambda$ 6549, 6586 emission lines are shown in the solid black profile in the wavelength ranging from 6,500 - 6,650 Å. The black dotted line is the fitting result, containing 3 Gaussian profiles corresponding to [N II] λ 6549, $H\alpha$ and [N II] λ 6586, respectively, from left to right. Top right: The overall profile is obtained from the result in top left panel. Bottom left: The solid black profile is the same as that in the top left panel. The dotted lines are also the fitting results, but it contains 2×3 Gaussian profiles. The blue and red lines represent two sets of emission lines blue- and red-shifted, respectively, each of which contains 3 Gaussian profiles corresponding to [N II] λ 6549, $H\alpha$ and [N II] λ 6586 respectively from left to right. Bottom right: The overall profile is obtained from the result in bottom left panel.

2.2 双峰窄发射线空间像素

由于空间像素是 MaNGA 光纤抖动曝光叠加与插值的结果，并不是独立的空间分辨单元，因此真正的双峰特征通常会在 MaNGA 数据立方中产生多个相邻的 DPSs。考虑到这一点，我们只选择至少包含五个 DPSs 的星系作为潜在的 DPGs。我们还去除了仅由于投影效应而非物理起源的 6 个 DPGs。我们在图2-3中给出了 MaNGA-ID 为 1-593159 的 DPG 的例子，其中位于中心 $3'' \times 3''$ 区域内的 DPSs 均表示了它们蓝移与红移的 $H\alpha$ 线。

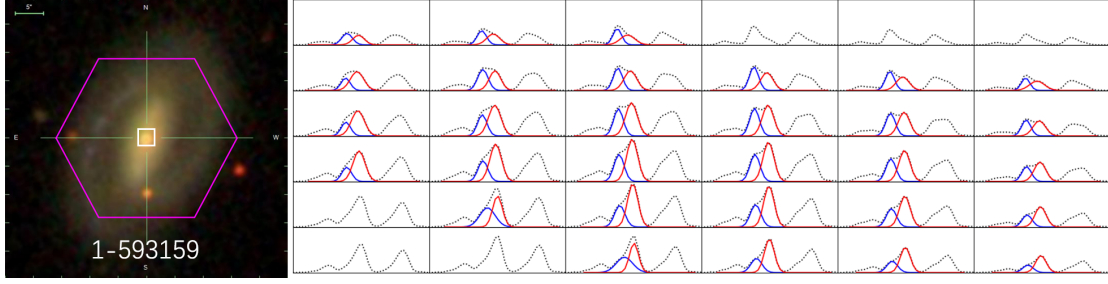


图 2-3 MaNGA-ID 为 1-593159 星系在斯隆数字巡天 gri 波段的成像，白框给出了其中心 6×6 空间像素 ($3'' \times 3''$) 的 $H\alpha$ -[N II] 三重线轮廓。右边网格均使用黑色虚线表示原始发射线。双高斯轮廓拟合更佳的空间像素还显示了蓝移与红移的 $H\alpha$ 线。

Figure 2-3 The SDSS image of the galaxy with MaNGA-ID 1-593159 and the $H\alpha$ -[N II] $\lambda\lambda$ 6549, 6586 line profiles of its central 6×6 spaxels ($3'' \times 3''$, white box). All grids show the original emission lines with black dotted lines. Spaxels better fitted by the double Gaussian profiles are shown with the blue- and red-shifted $H\alpha$ lines additionally.

最后，我们得到了 304 个 DPGs 中的 5,420 个 DPSs。由于数量太多，我们在表2-1中仅列出了 10 个 DPSs 的结果记录，除了星系的 MaNGA-ID 与空间像素的坐标外，我们还详细给出了每个 DPS 的双高斯轮廓拟合参数。

表 2-1 MaNGA 星系中 DPSs 目录的 10 个样例。第一列：MaNGA 星系 ID；第二、三列：DPS 在 MaNGA DAP 中的坐标；第四到九列：拟合参数成分 1 的振幅、速度、弥散，成分 2 的振幅、速度、弥散；第十列：DPS 宿主星系有效半径归一化的中心距；第十一列：DPS 的速度差。第六、九列的弥散没有进行仪器致宽的改正。

Table 2-1 10 Examples in the Catalog of DPSs in MaNGA galaxies. Column (1): the ID of the MaNGA galaxies. Column (2 and 3): the coordinates of the DPSs in MaNGA DAP. Column (4 - 9): Fitting parameters $A_{1,H\alpha}$, $v_{1,H\alpha}$, $\sigma_{1,H\alpha}$, $A_{2,H\alpha}$, $v_{2,H\alpha}$, $\sigma_{2,H\alpha}$. Column (10): Normalized centric distance to the effective radius of its host galaxy r/R_e . Column (11): Velocity difference Δv . The velocity dispersion for the two narrow components remains unadjusted for instrumental broadening.

MaNGA-ID	x	y	$A_{1,H\alpha}$ $10^{-17}\text{erg}/\text{\AA}/\text{s}/\text{cm}^2$	$v_{1,H\alpha}$ (km/s)	$\sigma_{1,H\alpha}$ (km/s)	$A_{2,H\alpha}$ $10^{-17}\text{erg}/\text{\AA}/\text{s}/\text{cm}^2$	$v_{2,H\alpha}$ (km/s)	$\sigma_{2,H\alpha}$ (km/s)	r (R_e)	Δv (km/s)
1-114955	37	40	2.87	-146.7	82.8	2.80	+81.4	124.5	0.35	228.0
1-200058	29	36	2.23	-46.6	81.0	1.35	+200.2	101.7	0.62	246.8
1-258380	26	26	2.19	-93.2	91.0	2.23	+129.8	108.5	0.11	223.0
1-339094	17	18	1.65	-82.7	86.2	1.86	+163.2	115.1	0.22	245.9
1-35268	22	20	1.11	-88.2	98.2	1.03	+167.3	113.2	0.16	255.5
1-42250	21	21	1.82	-153.1	98.4	2.36	+152.7	118.9	0.07	305.7
1-443132	26	27	5.78	-98.7	91.2	7.41	+141.7	93.2	0.15	240.4
1-556749	22	23	2.46	-200.0	164.6	2.84	+184.2	152.4	0.14	383.9
1-585711	24	40	0.43	+256.9	123.6	0.80	+564.9	113.1	0.57	308.0
1-634140	20	34	0.41	-154.9	71.4	0.20	+203.4	133.5	0.91	358.3

2.3 小结

在这一章中，我们基于 SDSS MaNGA 巡天的约 10,000 个邻近星系的积分视场光谱数据，系统地搜寻了具有双峰窄发射线的空间像素 (DPSs)。通过对总计约 300 万个空间像素的光谱数据进行分析，我们最终识别出了 5,420 个 DPSs，这些 DPSs 分布在 304 个双峰窄发射线星系 (DPGs) 中，且每个 DPG 至少包含 5 个 DPSs。

在筛选 DPSs 的过程中，我们对每个空间像素的 $H\alpha$ λ 6564 Å- [N II] $\lambda\lambda$ 6549, 6586 Å 线进行了单高斯与双高斯轮廓拟合，并通过一系列物理与统计条件进行筛选。具体而言，我们要求双峰成分的速度差超过 200 km/s，以确保双峰在光谱上可分辨；两个成分的弥散均不超过 600 km/s，以保证它们为窄发射线；两个成分的流量比在 1/5 到 5 之间，以确保它们在物理上可比。最终，通过贝叶斯信息准则 (BIC) 和 F 检验，我们确认了双高斯拟合优于单高斯拟合的空间像素为 DPSs。

第3章 MaNGA 双峰窄发射线星系的分类

在第2章中，由于通过 MaNGA 数据得到的结果包含 DPSs 与 DPGs 这两个层次，我们首先对两者的物理性质分别进行统计检查，然后通过关联它们的性质来研究各种双峰特征类型的潜在物理起源。

3.1 双峰窄发射线空间像素的分类

我们从 MaNGA 覆盖的总计约三百万个空间像素中获得了 5,420 个 DPSs，分布在 304 个 DPGs 中。它们的基本信息除了上一节中得到的 SNR_S 与 Δv 这两个参数外，我们还通过 MaNGA DAP，计算了每个空间像素到星系中心的距离，并使用星系的有效半径归一化（归一化的宿主星系中心距， r/R_e ）。

对于信噪比与中心距，我们在图3-1的左上与右上子图中分别给出了它们的分布情况。为了进行比较，我们将这 304 个 DPGs 中非 DPSs 的正常空间像素信噪比（使用与 DPSs 的相同的计算方式）的分布同样绘制在子图中。我们只比较 $\text{SNR}_S \geq 5$ 的空间像素，发现所有 DPSs 的平均信噪比为 15.3，高于 DPGs 中正常空间像素信噪比（11.0）。此外，DPSs 也偏向于分布在 DPGs 的内部区域（平均为 $0.44 R_e$ ，小于正常空间像素的 $0.67 R_e$ ）。这两者的结果表明，可能是因为信噪比高的区域更易探测到 DPSs，也可能因为 DPSs 本身倾向于分布在星系中心，或二者兼有。为了验证这一点，我们给每个 DPS 一对一地找到具有相似信噪比的正常空间像素，以此创建一个包含 5420 个正常空间像素的控制样本。

同样如右上子图所示，信噪比匹配的正常空间像素的中心距平均为 $0.57 R_e$ ，仍然明显大于 DPSs 的结果。这表明双峰特征确实更有可能与星系内部区域的活动有关。然而，双峰特征出现的位置并不局限在星系的中心。我们发现，约 10% 的 DPSs 距离中心超过了 $1 R_e$ 。这一发现进一步支持了使用积分视场光谱而不是星系巡天的单光纤光谱来识别双峰特征的重要。

除了信噪比与中心距外，我们测得范围在 200 - 500 km/s 内的速度差参数 Δv ，见左下子图。通常情况下，随着 Δv 的增大，DPSs 的数量明显减少，呈现出类似高斯的轮廓。我们使用高斯分布拟合 Δv 的分布（均值固定为 0），得到弥散为 135 km/s，如子图中的虚线所示。与高斯分布相比，我们注意到速度差在 $\Delta v \sim 375$ km/s 位置的 DPSs 数量偏多。

为了进一步探索不同 Δv 的 DPSs 的物理性质，我们将所有 DPSs 定位到 $\Delta v - r/R_e$ 平面内。为了更加清晰地显示 DPSs 的分布，我们还绘制了 DPSs 的数密度轮廓。如右下子图所示，绝大多数 DPSs 处于 $r/R_e < 0.5$ 且 $\Delta v < 300$ km/s 的范围内，峰值位置 $r/R_e \sim 0.17$ 且 $\Delta v \sim 225$ km/s。此外，还有两个较小的聚集区域，其中一个具有高 Δv 且仍然处于中心（峰值位置 $r/R_e \sim 0.25$ 且 $\Delta v \sim 378$ km/s），而另一个具有高 Δv 但处于星系外围（峰值位置 $r/R_e \sim 1.16$ 且 $\Delta v \sim 344$ km/s）。

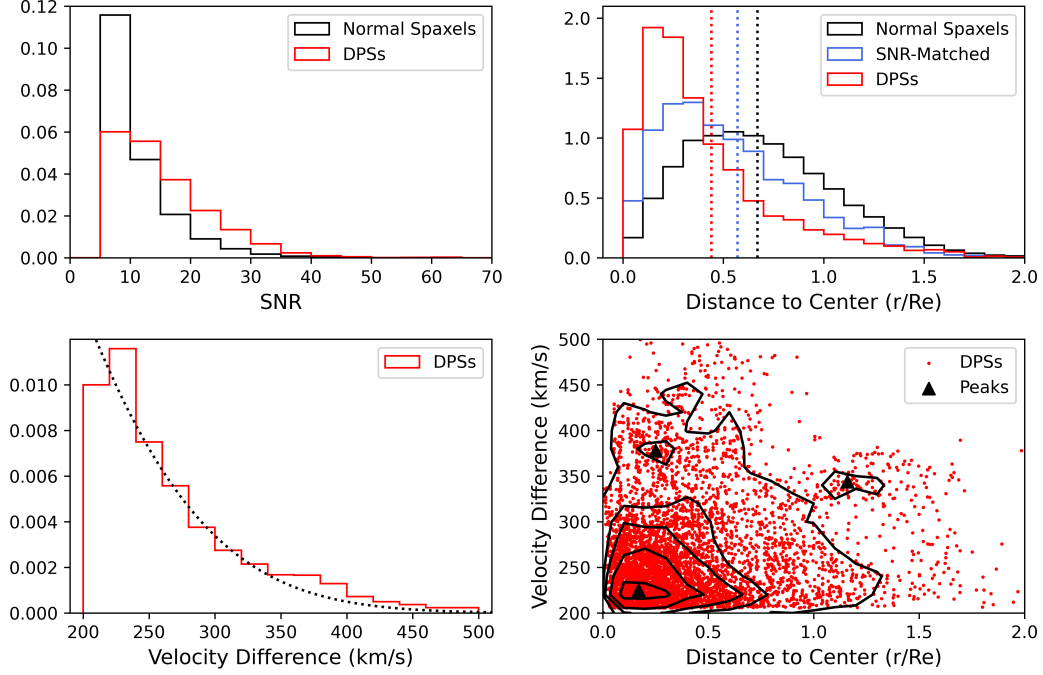


图 3-1 左上子图给出了 5420 个 DPSs (红色直方图) 与所有其它正常空间像素 (黑色) 的信噪比 ($\text{SNR}_s \geq 5$) 分布。右上子图给出所有 DPSs (红色直方图)、正常空间像素 (黑色) 以及信噪比与 DPS 匹配的正常空间像素 (蓝色) 的归一化宿主星系中心距分布 (r/R_e)，它们的平均值使用相应颜色的虚线表示。左下子图：DPSs 的双峰速度差的分布 ($\Delta v > 200 \text{ km/s}$)，由高斯分布 (虚线) 拟合。右下子图给出了 DPSs 在 $\Delta v - r/R_e$ 平面内的分布，黑色轮廓表示 DPSs 的数密度。峰值使用黑色三角标记，坐标分别是 $[0.17, 225]$ ， $[0.25, 378]$ 与 $[1.16, 344]$ 。

Figure 3-1 Top left: The SNR (> 5) distributions of 5,420 DPSs (red) and all other normal spaxels (black). Top right: Distributions of r/R_e of all DPSs (red), normal spaxels (black), and SNR-matched normal spaxels (blue). The average values of them are marked with dotted lines with the corresponding colors. Bottom left: Distributions of Δv of DPSs, fitted by a Gaussian profile (dotted line). Bottom right: The DPSs in the $\Delta v - r/R_e$ plane. Contours are plotted by their number density. The peaks are located at $[0.17, 225]$, $[0.25, 378]$ and $[1.16, 344]$ in units $[R_e, \text{km/s}]$ respectively.

km/s)。为了方便起见，我们将 $\Delta v - r/R_e$ 平面内这三个区域的 DPSs 分别称为内部低 Δv 、内部高 Δv 与外部 Δv 的 DPSs。

3.2 双峰窄发射线星系的分类

对于我们从 MaNGA 中得到的 304 个 DPGs，我们主要从 MaNGA DAP 以及增值目录获得它们的物理性质，例如 pipe3D^[15] 与 Galaxy Zoo 2^[27]。

作为星系最重要的物理性质，我们首先比较了 DPGs 与所有 MaNGA 星系的恒星质量 (M_* ，来自 pipe3D) 分布情况。考虑到我们之前在选择 DPSs 时潜在的信噪比偏差，这里我们创建了一个与 DPG 具有相同信噪比 (SNR_G ，定义为每个星系中 $\text{SNR}_S \geq 5$ 的空间像素的均值) 分布的正常星系的控制样本。如图3-2所示，与所有 MaNGA 星系 ($9.0 < \log M_*/M_\odot < 12.0$) 相比，DPGs 具有更大的恒星质量分布 ($10.5 < \log M_*/M_\odot < 12.0$)。即便是考虑了信噪比的选择偏差，这一结果仍然成立，与 Maschmann 等^[36] 通过单光纤光谱的发现一致。DPGs 对大质量星系的偏向可能与星系的物理性质有关（例如 AGN，核环等），也有可能是由于硬件（例如 MaNGA 光谱的有限分辨率）或者软件（DPS 选择算法的问题）上的限制，使得我们的条件 ($\Delta v > 200$ km/s) 无法检测到低质量星系更小的 Δv 。为了排除恒星质量的影响以更好地理解 DPGs 的其它物理性质，我们构建了一个与 DPGs 具有相同恒星质量与信噪比的正常星系控制样本，以此进一步探索 DPGs 独特的物理性质。

本工作讨论的 DPGs 整体参数包括宿主晕质量 (M_{halo})，Sersic 指数 n ，比恒星形成率 ($sSFR$) 以及气体速度场的运动不对称性 (KA)。宿主晕质量是 Yang 等^[50] 在他们的目录中给出的，是使用光度 $L_{19.5}$ 得到的。Sersic 指数 n 来自 MaNGA DAP 目录。比恒星形成率则是通过恒星质量与来自 pipe3D 的恒星形成率（对整个星系范围内 $H\alpha$ 流量的积分，通过 Kennicutt 定律^[51] 计算得到 SFR ）计算得到的。不对称性参数取自 Feng 等^[52]，其计算方法为从来自 MaNGA DAP 的 $H\alpha$ 发射线速度场的非旋转高阶傅里叶成分与表示有效半径内旋转的一阶成分之比。

我们的结果显示，DPGs 与其控制样本的 M_{halo} 与 Sersic 指数 n 的分布没有显著差异，如图3-3的左上与右上子图，表明这些星系中的 DPSs 并不与晕质量或形态有直接联系。然而，即使是改正了信噪比的影响，我们发现 DPGs 的比恒星形成率与气体速度场的运动不对称性均高于控制样本，如左下与右下子图所示。这些结果与 Feng 等^[53] 的结果非常符合，他们发现具有高 KA 值的星系显示出高 $sSFR$ 。不过，Feng 等^[52] 还指出，星系中的高 KA 值不仅能够反应星系高恒星形成，还可能与其它结构特征有关。因此，我们研究了与 DPGs 有关的一些结构特征，包括棒、AGN 以及潮汐特征。

棒与潮汐特征来自于 Galaxy Zoo 2 目录（他们的决策树如图3-4所示），它包括 304,122 个星系，覆盖 MaNGA 星系总数的 96%。志愿者通过目视检查的方式对每个星系是否存在棒或潮汐特征进行投票。当超过 60% 投票为“是”时，我

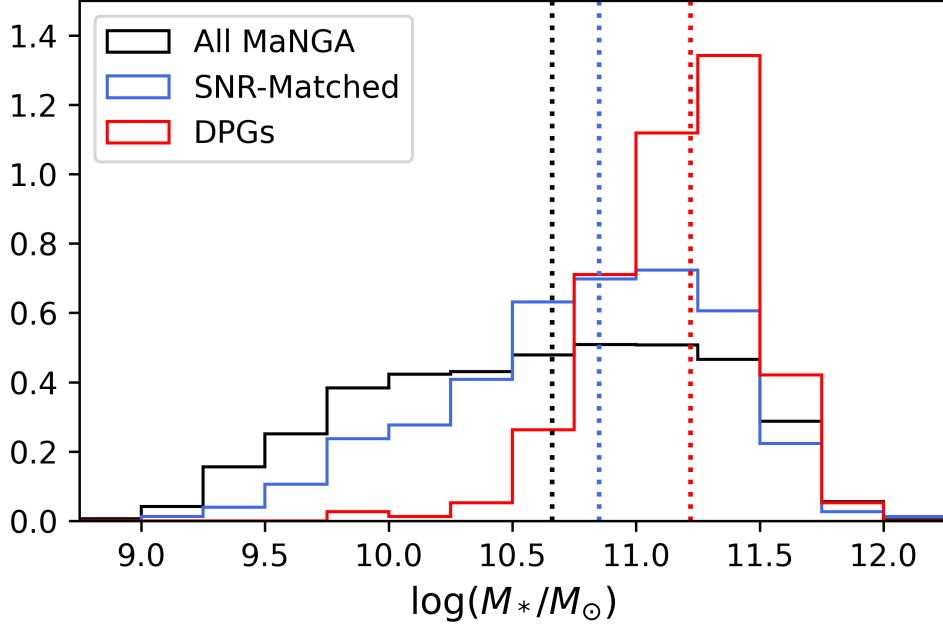


图 3-2 所有 MaNGA 星系（黑色直方图）、DPGs（红色）以及没有双峰特征的正常星系控制样本（蓝色）的恒星质量分布。每种的平均值使用与直方图相同颜色的虚线标记。

Figure 3-2 The distributions of M_* of all MaNGA galaxies (black histograms), DPGs (red), and the control sample of normal galaxies (blue). The mean values of the physical parameters are marked as vertical lines in the same color as the histograms.

们认为这个星系存在棒或者潮汐特征。少数没有覆盖的星系，我们自己通过目视检查来估计。

AGN 的识别是在光学与射电波段进行的。在光学波段中，对于每个 DPG，我们使用 MaNGA DAP 中最近星系光学中心（3'' 内）的正常空间像素的发射线参数，并计算 $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ ， $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ 以及 $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ 的流量比。我们使用 $[\text{N II}]$ -与 $[\text{S II}]$ - BPT 图^[54,55] (Baldwin, Phillips, Terlevich Diagram, 如图3-5) 来确定这些空间像素的电离机制，并根据 Kelley 等^[56] 的标准挑选出具有 AGN 的宿主 DPGs：

$$0.61/(\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) - 0.47) + 1.19 < \log([\text{O III}]/\text{H}\beta) \quad (3-1)$$

以及

$$0.72/(\log([\text{S II}]/\text{H}\alpha) - 0.32) + 1.30 < \log([\text{O III}]/\text{H}\beta) \quad (3-2)$$

我们在光学波段从 304 个 DPGs 中找到了 97 个光学 AGN。在射电波段，我们将 DPGs 与 Best 等^[57] 的 AGN 目录进行了比较。该目录包括 18,286 个射电 AGN，并包含了全部的 MaNGA 星系。在 304 个 DPGs 中，我们匹配得到 47 个射电 AGN。结合光学与射电的结果，我们总共得到了 127 个具有 AGN 的 DPGs。

对于一个 DPGs 来说，它具有棒、AGN 以及潮汐特征其中的一种、两种、三种结构甚至没有其中任意一种结构都是有可能的。如图3-6左侧的韦恩图所示，具有不同结构特征的 DPGs 的数量均表示出来，并在右侧子图中给出了每种类

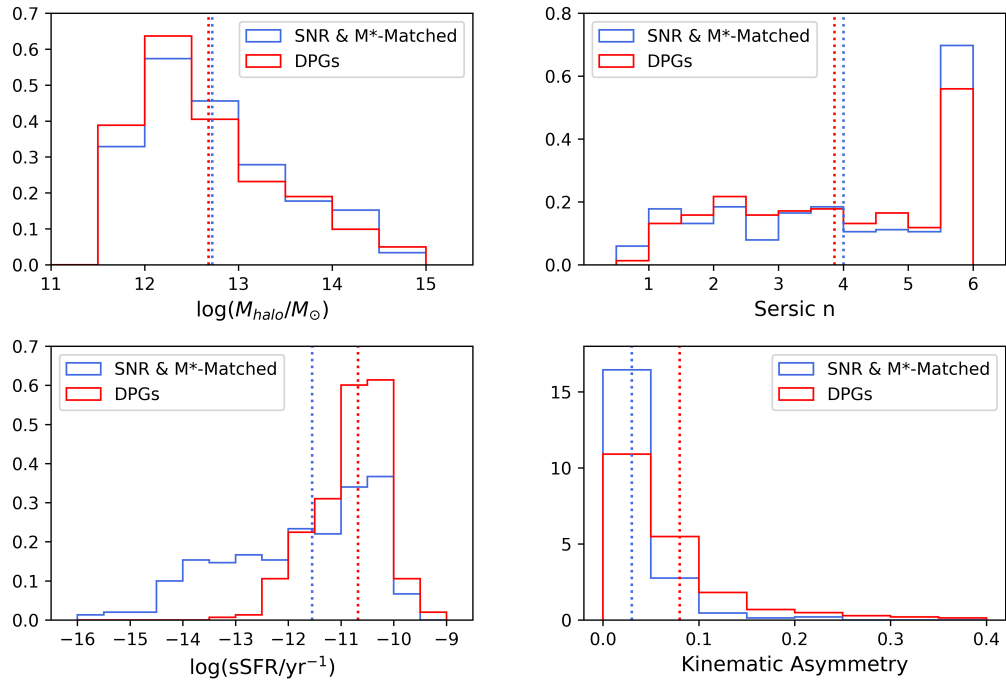


图 3-3 DPGs (红色直方图) 与正常星系控制样本 (蓝色) 的整体性质分布, 包括左上子图的宿主晕质量, 右上子图的 Sersic 指数 n , 左下子图的比恒星形成率以及右下子图的气体速度场的运动不对称性。

Figure 3-3 The distributions of global properties of DPGs (red) and the control sample of normal galaxies (blue), including M_{halo} (top left), Sersic index n (top right), sSFR (bottom left) and Kinematic Asymmetry (bottom right).

Galaxy Zoo Decision Trees

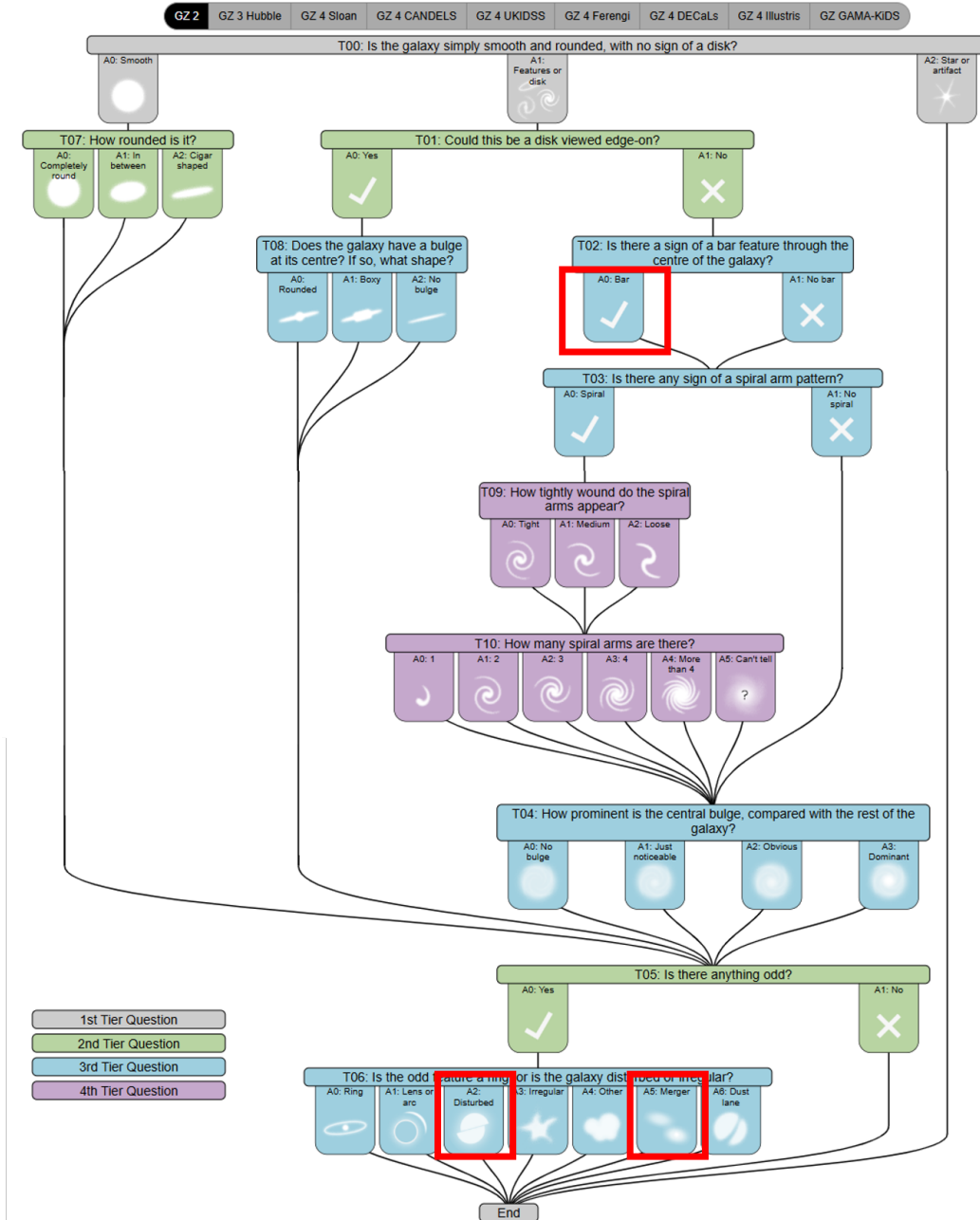


图 3-4 Galaxy Zoo 2 决策树。我们使用的参数（全都使用红色矩形框出）有 T02 的棒选项，T06 的扰动选项与并合选项。后两者我们都视为潮汐特征。

Figure 3-4 Galaxy Zoo 2 Decision Trees. The parameters we used (all boxed out using red rectangles) are the "Bar" option for T02, and the "Disturbed" and "Merger" T06. The latter two are both considered as tidal features.

注：图取自 Galaxy Zoo 官网：galaxyzoo.org/gz-trees

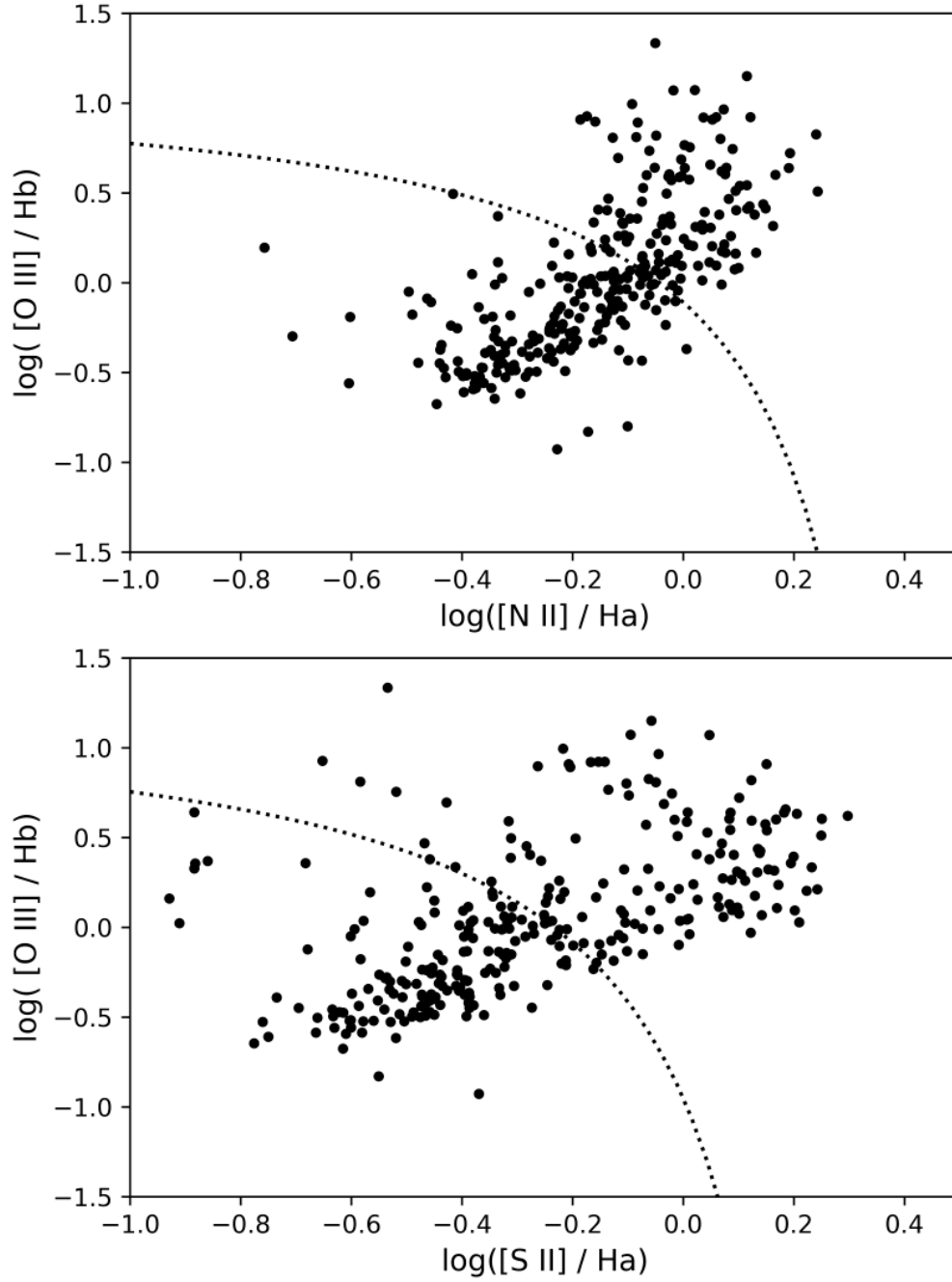


图 3-5 [N II]-与 [S II] - BPT 图中用来分辨 AGN（虚线以上）与非 AGN。发射线流量比分别使用 [N II]/H α , [O III]/H β 以及 [S II]/H α 。虚线以上的 DPGs 被认为是具有 AGN 的 DPGs。

Figure 3-5 [N II]- and [S II] - BPT diagrams to classify the AGNs (above the dash lines) and non-AGNs. The emission-line ratios used are respectively [N II]/H α , [O III]/H β and [S II]/H α . The AGN-hosting DPGs are above the dash lines.

型 DPGs 一个例子的成像。我们在附录一的表1-1、表1-2以及表1-3中列出了所有 DPGs 的结果记录，包括它们的结构特征类型。

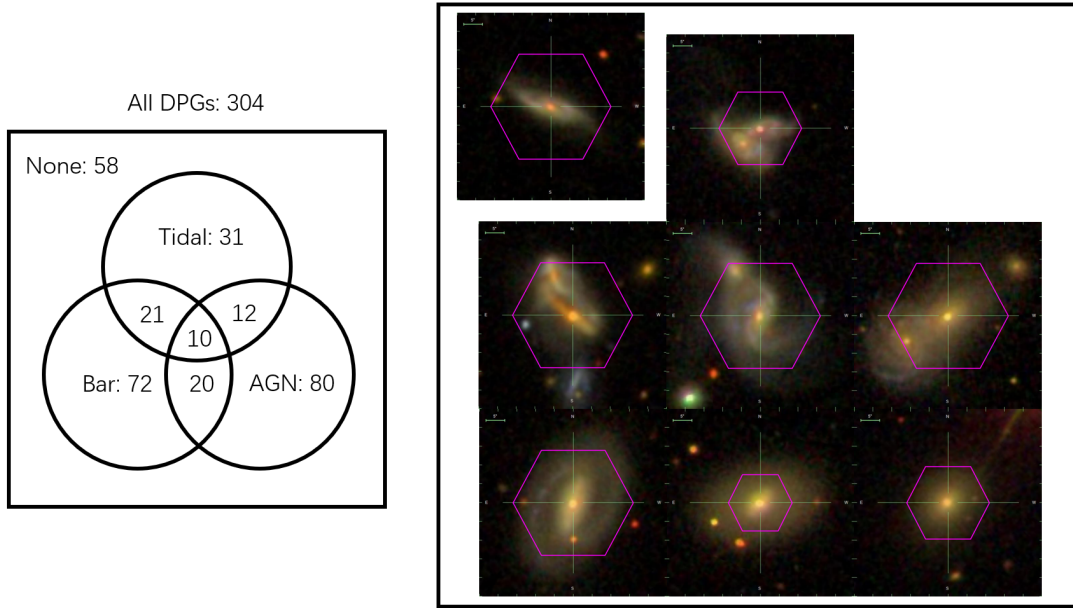


图 3-6 左侧韦恩图显示了在 304 个 DPGs 中，具有不同结构特征的 DPGs 的数量。其中 58 个不存在任意一种结构。123 个 DPGs 具有棒的特征，其中 72 个仅有棒的特征；122 个具有 AGN 特征，其中 80 个仅有 AGN 特征；74 个具有潮汐特征，其中 31 个仅有潮汐特征。10 个 DPGs 同时存在棒、AGN 以及潮汐特征。右侧的 SDSS 成像图给出了对应位置类型 DPGs 的一个例子。

Figure 3-6 Venn diagram shows the numbers of DPGs with different structural features in 304 DPGs. Of these, 58 do not have any one. 123 DPGs have bar features, of which 72 only have bar features; 122 have AGNs, of which 80 only have AGNs; and 74 have tidal features, of which 31 only have tidal features. 10 DPGs have all bars, AGNs, and tidal features. 8 examples for the different DPGs at the same positions.

如表3-1的前三列以及图3-7所示，具有棒、AGN 以及潮汐特征的 DPGs 的数量比例分别为 29.6%，43.0% 以及 17.1%，所有这些比例都显著超过了 DPGs 的控制样本的数量比例（24.5%，35.8% 以及 10.5%）。这些结果证实了双峰特征与星系中的这些结构特征相关联。

表 3-1 DPGs 与 DPSs 的棒、AGNs 以及潮汐特征的数量比例。第一列：特征类型；第二、三列：所有 DPGs 及其控制样本的特征数量比例；第四列：所有 DPSs 的特征比例；第五到七列：DPSs 子类型中的特征比例。

Table 3-1 The number fractions of bars, AGNs, and tidal features for DPGs and DPSs. Column (1): the types of features. Column (2 and 3): the fractions of all DPGs and their control sample with these features. Column (4): the fractions of all DPSs with these features. Column (5 - 7): the fractions of sub-type DPSs with these features.

Types	All DPG	Control DPG	All DPS	Inner low- Δv DPS	Inner high- Δv DPS	Outer DPS
(Num)	(304)	(304)	(5,420)	(3,522)	(1,040)	(858)
Bar	0.296	0.245	0.307	0.363	0.154	0.260
AGN	0.430	0.358	0.480	0.422	0.675	0.484
Tidal	0.171	0.105	0.271	0.204	0.362	0.437

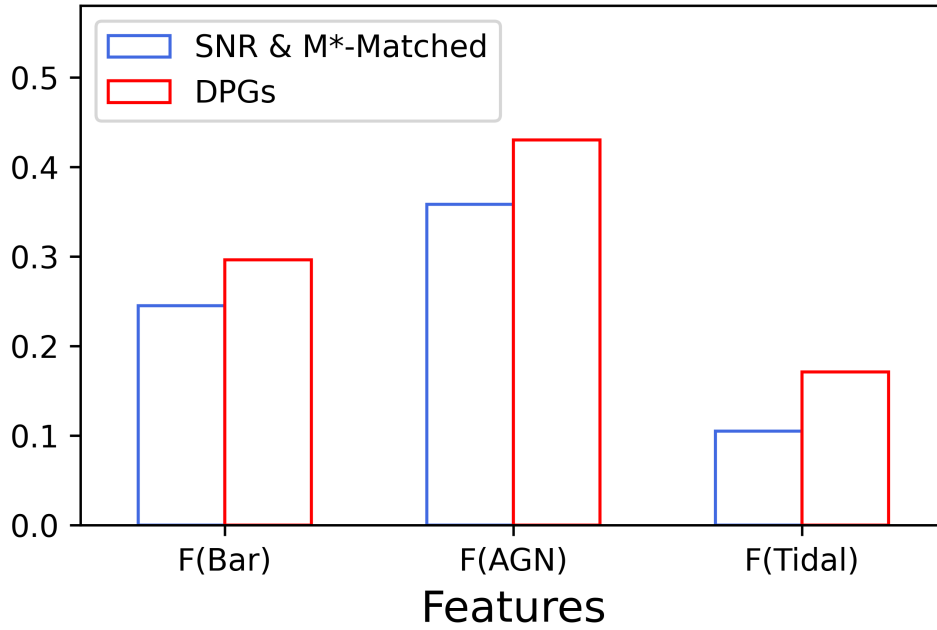


图 3-7 DPGs (红色直方图) 与正常星系控制样本 (蓝色) 结构特征的比例，从左到右分别是棒、AGN 与潮汐特征。

Figure 3-7 The distributions of physical features of DPGs (red) and the control sample of normal galaxies (blue), including bars, AGNs, and tidal features, labeled as F(Bar), F(AGN), and F(Tidal), respectively.

3.3 双峰窄发射线空间像素与双峰窄发射线星系的对应关系

在之前的分析中，我们已经证明了 DPSs 在 $\Delta v - r/R_e$ 平面内三组聚类，而 DPGs 物理性质偏向于具有高度不对称气体速度场的大质量恒星形成星系，也偏向于结构上具有棒、AGN 以及潮汐特征的星系。这里我们将进一步检查这三组 DPSs 是如何与其宿主 DPGs 的不同特征连接的。

为了便于定量分析，我们使用 $r/R_e = 0.75$ 以及 $\Delta v = 300 \text{ km/s}$ 将整个 $\Delta v - r/R_e$ 平面划分为三块，如图3-8每个子图中的虚线所示。总共得到 3,522 个内部低 Δv 的 DPSs ($r/R_e < 0.75$, $\Delta v < 300 \text{ km/s}$)，1,040 个内部高 Δv 的 DPSs ($r/R_e < 0.75$, $\Delta v > 300 \text{ km/s}$) 以及 828 个外部 DPSs ($r/R_e > 0.75$)。

我们将每个 DPS 在 $\Delta v - r/R_e$ 平面上的位置与其宿主 DPG 的物理参数结合起来。该过程使用了局部加权回归算法 LOESS^[58] (对于任意位置的一个点，我们计算其周围最近距离的十个点的参数的平均值作为该点的这一参数实际数值)，并使用不同颜色对不同数值进行可视化。图3-8的四个子图分别显示了恒星质量 (左上子图)，比恒星形成率 (右上)，Sersic 指数 n (左下) 以及气体速度场的运动不对称性 (右下) 的结果。

我们可以很明显地看到，三种类型 DPSs 的宿主星系物理参数存在差异。内部低 Δv 的 DPSs 更常见于质量较小的晚型恒星形成星系，而内部高 Δv 的 DPSs 主要位于大质量的早型星系，这两种的气体速度场的运动不对称性均较小。外部 DPSs 的宿主星系表现出最独特的特征：大质量、高恒星形成的晚型星系，且气体速度场的不对称性最强。

这些结果清楚表明，我们在 $\Delta v - r/R_e$ 平面上划分的不同类型的 DPSs 确实与不同类型的星系有关。那么，它们是否也与我们所揭示的三种不同结构特征有关呢？

为了验证这一点，我们将 DPGs 是否存在这三个结构特征 (是为 1，否为 0) 分配给它们的每个 DPS，并计算 $\Delta v - r/R_e$ 平面上这些结构特征的比例 (具体的比例在表3-1后四列中列出)。

对于所有 DPSs 来说，有 30.7%，48.0% 以及 27.1% 的比例分别位于具有棒、AGN 以及潮汐特征的星系中。这些比例系统地高于具有这些特征的对照样本中的整体比例 (分别为 24.5%，35.8% 以及 10.5%)。这些结果表明，具有棒、AGN 以及潮汐特征的 DPGs 中 DPSs 的数量比例系统地高于其它类型的 DPGs，这证实了双峰特征与星系的棒、AGN 以及潮汐特征存在内在联系的观点。

对于三种类型的 DPSs 来说，我们注意到它们与棒、AGN 以及潮汐特征存在有趣的一对一关系。如表所示，内部低 Δv 、内部高 Δv 以及外部 DPSs 分别在有棒星系、AGN 宿主星系以及潮汐特征星系中具有最高的比例。与图3-8相似， $\Delta v - r/R_e$ 平面上 DPSs 的位置及其具有结构特征的相应比例可以在图3-9中看到。具体细节如下。

(1) 内部低 Δv 的 DPSs 与有棒 DPGs 的对应。内部低 Δv 的 DPSs 在我们的 DPSs 样本中数量最多 (3,522/5,420)。它们在有棒 DPGs 中的数量比例为 36.3%，

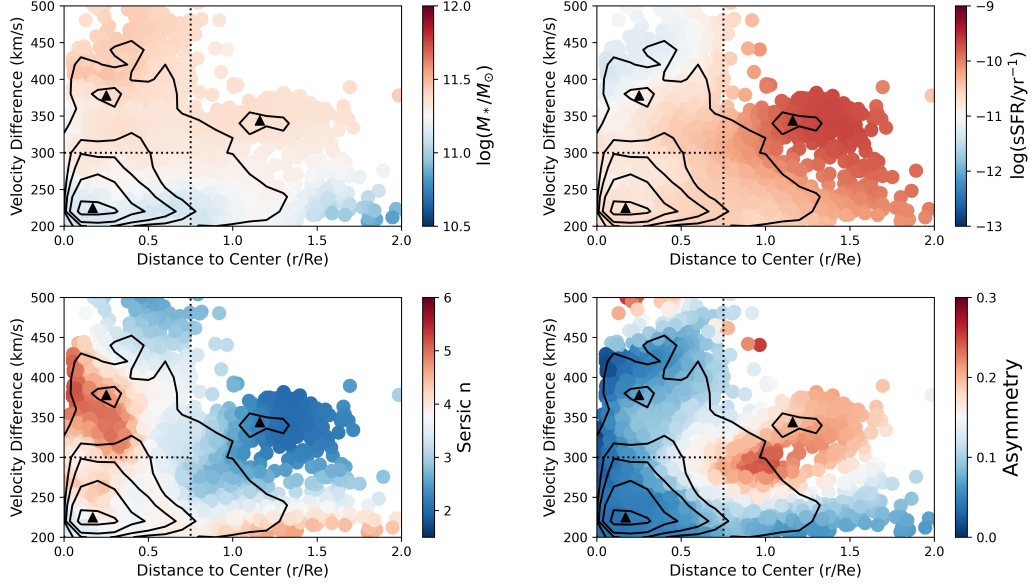


图 3-8 $\Delta v - r/R_e$ 平面上每个 DPS 所属 DPG 参数的颜色编码分布，通过 LOESS 算法平滑。DPG 参数包括恒星质量（左上子图），比恒星形成率（右上），Sersic 指数 n （左下）以及气体速度场的运动不对称性（右下）。 $\Delta v - r/R_e$ 平面上的 DPS 数密度使用轮廓线表示，与图 3-1 右下子图相同。根据 $r/R_e = 0.75$ 以及 $\Delta v = 300 \text{ km/s}$ ，虚线将所有 DPSs 划分为三类，即内部低 Δv 、内部高 Δv 以及外部 DPSs。

Figure 3-8 The color-coded distributions of the DPG parameters of the DPSs on the $\Delta v - r/R_e$ plane, which have been smoothed by the LOESS algorithm. The DPG parameters include M_* (top left), $sSFR$ (top right), Sersic index n (bottom left), and Kinematic Asymmetry (bottom right). The number density of DPSs in the $\Delta v - r/R_e$ plane is shown as the contours in each panel (the same as the bottom right panel of Fig. 3-1). Three types (the inner low- Δv , inner high- Δv and outer DPSs) are divided by the dotted lines according to $r/R_e = 0.75$ and $\Delta v/(km/s) = 300$.

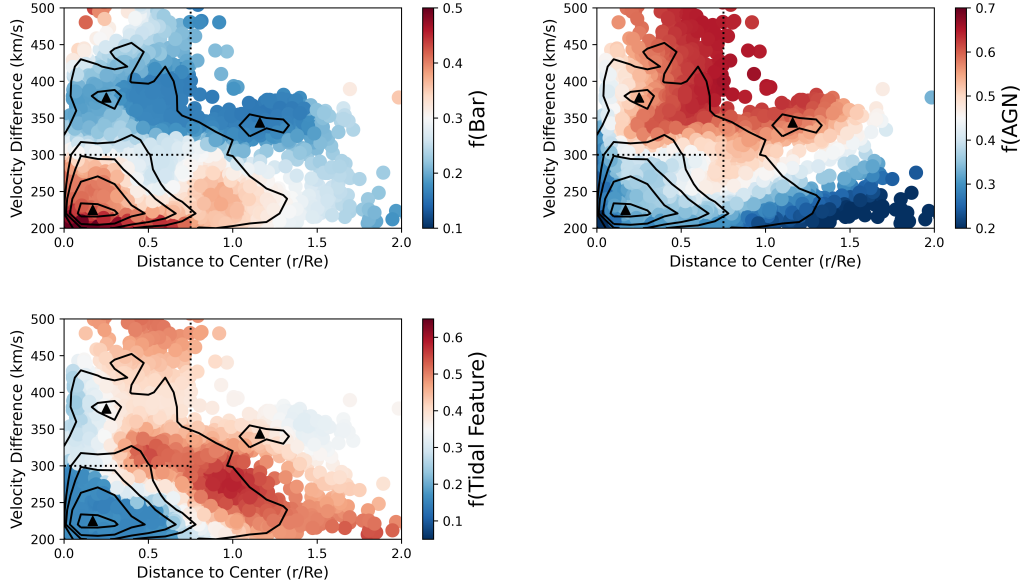


图 3-9 与图3-8相似，但使用的是 DPG 结构特征，包括左上子图的棒，右上的 AGN 以及左下的潮汐特征。

Figure 3-9 Similar plots as Fig. 3-8 but for physical features, including bars (top left), AGNs (top right) and tidal features (bottom left).

高于所有 DPSs 的 30.7%。棒是由星系盘的不稳定性形成的，它是星系中气体内流的通道^[41]。Maschmann 等^[59] 猜测，棒导致的气体内流与星系的整体旋转速度场之间的差异可能导致发射线出现双峰特征。这种情况下与内部低 Δv 的 DPSs 特征是一致的。

(2) 内部高 Δv 的 DPSs 与 AGN 宿主 DPGs 的对应。在我们的 5,420 个 DPSs 样本中，内部高 Δv 的 DPSs 有 1,040 个。它们在 AGN 宿主星系中的比例高达 67.5%，远高于所有 DPSs 的 48.0%。早期研究表明，AGN 与双峰特征之间存在很强的相关性。例如 Dojcinovic 等^[48] 发现在 AGN 宿主星系中的两条 $H\alpha$ 线的速度差从不到 200 km/s 到超过 700 km/s 都存在。Muller-Sanchez 等^[41] 研究了 18 个具有双峰窄发射线的 AGN 宿主星系样本，有 7 个在光谱中被发现具有 AGN 驱动的双锥形的外流，其中 5 个同时在光学与射电波段得到证实。考虑到这些来自星系中心的外流速度在几百到约 1,000 km/s，这种情况与我们研究中出现的内部高 Δv 的 DPSs 非常吻合。

(3) 外部 DPSs 与潮汐特征 DPGs 的对应。对于 858 个外部 DPSs，它们在具有潮汐特征的星系中的比例为 43.7%，而所有 DPSs 仅为 27.1%。这些 DPSs 的宿主星系显示出明显的高恒星形成与高度不对称的气体运动速度场，与并合导致的 DPSs 的情况基本一致^[36]。

需要注意的是，这种联系并非是一一对应的，这是因为对于某一个 DPG 来说，它可能包含一种、两种或者三种类型的 DPSs，也可以包含一种、两种、三种或者没有这些结构类型。如图3-10左侧子图，MaNGA-ID 1-382452 是一个仅有

AGN、没有棒与潮汐特征的 DPG，但在 $\Delta v - r/R_e$ 平面内，同时存在内部低 Δv 与内部高 Δv 的 DPSs；相反，右侧子图的 MaNGA-ID 1-1038 是同时有棒与 AGN 特征的 DPG，但仅存在内部低 Δv 的 DPSs。

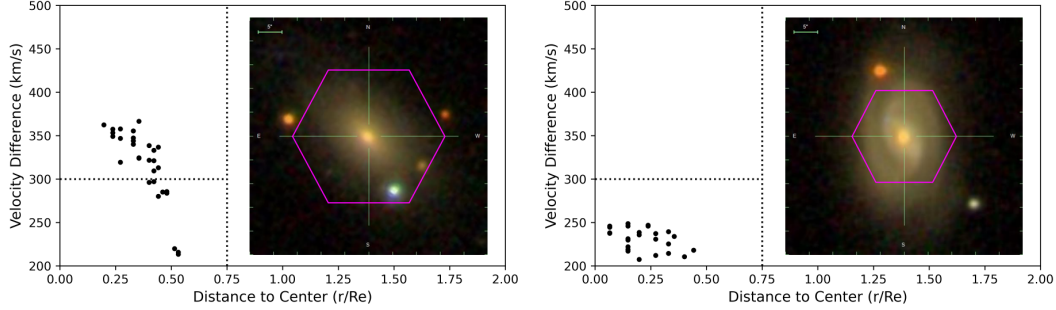


图 3-10 左侧子图为 MaNGA-ID 1-382452 的 AGN 宿主 DPG，没有棒与潮汐特征。其 DPSs 有内部低 Δv 与内部高 Δv 两种。右侧子图为 MaNGA-ID 1-1038 的有棒 AGN 宿主 DPG，没有潮汐特征。其 DPSs 仅有内部低 Δv 一种。

Figure 3-10 Left: An AGN-hosting DPG without bar or tidal features has both inner low- Δv and inner high- Δv DPSs. Right: A barred AGN-hosting DPG without tidal features has only inner low- Δv DPSs.

因此，我们在这项工作中得到的这三个对应关系，仅适用于包含大量 DPGs 以及 DPSs 的样本。

3.4 小结

在这一章中，我们在 DPS 层面，通过分析 DPSs 在 $\Delta v - r/R_e$ 平面上的分布，我们发现 DPSs 聚集成三个不同的类型：3,522 个内部低 Δv 的 DPSs，1,040 个内部高 Δv 的 DPSs 以及 828 个外部 DPSs。在 DPG 层面，我们将它们与对照样本比较后，发现 DPGs 表现出更高的恒星质量、更活跃的恒星形成、更高的气体速度场不对称性。同时，DPGs 包含更多的棒、AGN 以及潮汐特征。这部分工作的最关键发现是 DPSs 的三种不同类型与三个结构特征之间的统计相关性，即内部低 Δv 的 DPSs 与棒结构有关，内部高 Δv 的 DPSs 与 AGN 有关，外部 DPSs 与潮汐特征有关。需要提醒的是，单个 DPGs 的特征及其包含的 DPSs 类型并不一定存在一一对应的关系，我们的结果仅适用于大量 DPGs 及其 DPSs 的对应。

第4章 具有双峰窄发射线的潮汐特征星系与 AGN 宿主星系

在第3章中，我们划分的三种类型 DPSs 可以对应于 DPGs 的三种不同的结构特征，它们分别是：数量最多的、处于星系内部低 Δv 的 DPSs 与 DPGs 的棒结构有关；处于星系内部高 Δv 的 DPSs 与 DPGs 的 AGN 导致外流有关；处于星系外部的 DPSs 与 DPGs 的潮汐特征有关。其中后两者相关的物理机制已经得到了广泛的证实，因此我们首先对潮汐特征 DPGs 与 AGN 宿主 DPGs 进行研究。

4.1 具有双峰窄发射线的潮汐特征星系

宇宙中星系相互作用与并合事件的重要性如今已无可争议。分层星系演化理论的广泛采用，已经进行了多项观测与理论工作来研究与相互作用星系演化相关的各种机制^[53]。数据分辨率的提高使得我们能够看到并合的各种观测特征，例如形态变化^[60]、恒星形成增强^[61]，以及光学与红外波段并合引起的核活动^[62]。处于并合系统或正在发生相互作用的星系可能在它们重叠的位置观测到双峰窄发射线，源自于不同星系中截然不同的运动学状态。

我们是通过 Galaxy Zoo 2 目录^[27] 选择具有潮汐特征的星系，要求志愿者通过目视检查的方法对每个星系是否存在潮汐特征进行投票。当超过 60% 投票为“是”时，我们认为这个星系存在潮汐特征。在之前对 DPGs 分类，我们得到了一个包含 304 个 DPGs 的样本，其中具有潮汐特征的星系数量是 74 个。由于每个 DPG 可能同时具有棒、AGN 或者潮汐特征，为了避免这种情况，我们选择仅包含潮汐特征、没有棒或 AGN 的 DPGs，得到了 31 个纯的潮汐特征 DPGs。

4.1.1 具有双峰窄发射线的潮汐特征星系的形态特征

我们针对潮汐特征 DPGs 的研究主要集中在它们的形态上。这是因为对于大多数处于相互作用与并合阶段的星系，它们的运动学特征变得非常复杂。我们在图4-1中给出了总共 8 个潮汐特征 DPGs 的例子。它们的形态特征均有所不同。

第一行第一个潮汐特征 DPGs 是 Ciraulo 等^[46] 证明的处于并合系统中重叠的两个星系 (MaNGA-ID 1-114955)。与之情况类似的是第一行第二个 (MaNGA-ID 1-134597)，它也是由两个重叠的星系组成的。第一行第三个 (MaNGA-ID 1-576342) 是一个多重星系系统，包含三个能够明显区分开的单个星系。与之情况类似的是第一行第四个 (MaNGA-ID 1-576342)，其中两个星系的形状较为规整而第三个处于非常扭曲的状态。第二行第一个潮汐特征 DPGs (MaNGA-ID 1-150947) 是形状非常规则的处于主并合开始阶段的星系对，其中两个星系的主体能够很好地区分开来。第二行第二个 (MaNGA-ID 1-576458) 同样非常规则，但这是一个次并合星系对。第二行第三个 (MaNGA-ID 1-251269) 是处于主并合阶段后期的星系对，它的两个星系已经变得不规则，出现了长长的潮汐尾。第二

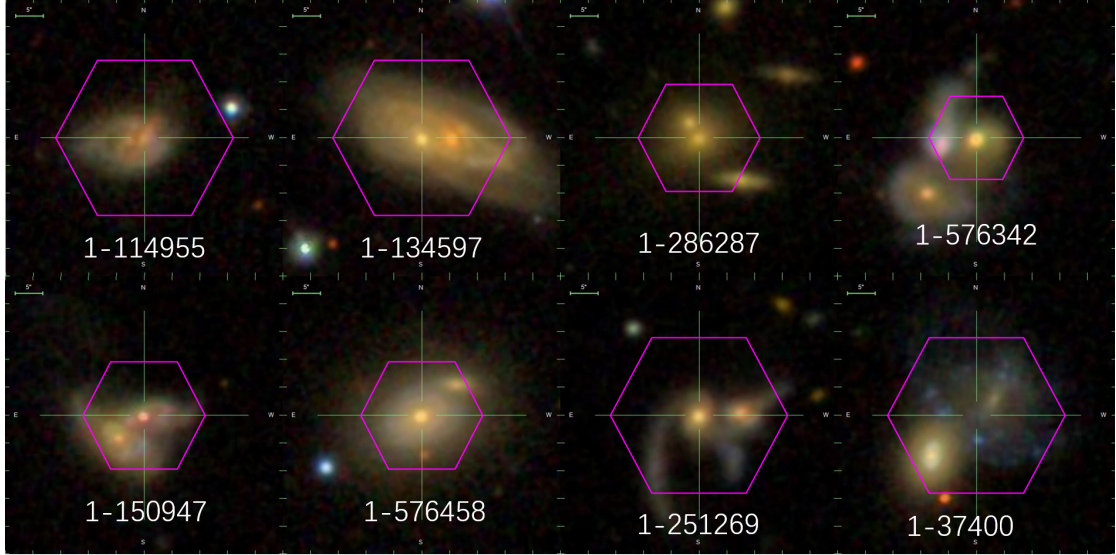


图 4-1 8 个处于不同状态的潮汐特征 DPGs 的例子，包括重叠的星系对，多重星系系统，规则或不规则形态的星系。

Figure 4-1 8 examples of tidal feature DPGs in different states, including overlapping galaxy pairs, multiple galaxy systems, and galaxies with regular or irregular shapes.

行第四个（MaNGA-ID 1-37400）则是包含有一个致密矮椭圆星系与一个非常暗弱的矮不规则星系的特别系统。

综上所述，具有潮汐特征的 DPGs 通常是一个处于并合过程中的系统，其双峰特征所对应的两个成分很有可能分别来源于中心星系本身及其伴星系。

4.1.2 具有双峰窄发射线的潮汐特征星系的运动学特征

尽管潮汐特征 DPGs 的运动学特征非常复杂，我们还是从 MaNGA-ID 1-114955 与 1-150947 这两个较为规则的系统中提取出了它们的旋转曲线。如图 4-2 所示，我们在 SDSS 成像中使用白色虚线标出中心星系的主轴，使用白色方框标出 DPSs 出现的大概位置。我们将主轴上非 DPSs 给出的速度绘制出它们的旋转曲线，将主轴附近 DPSs 的蓝移与红移成分分别标记出来。

对于 MaNGA-ID 1-114955，在我们得到的 DPSs 中，红移成分属于中心星系，蓝移成分属于它的伴星系；对于 MaNGA-ID 1-150947，结果正好相反，它的蓝移成分属于中心星系，而红移成分属于它的伴星系。

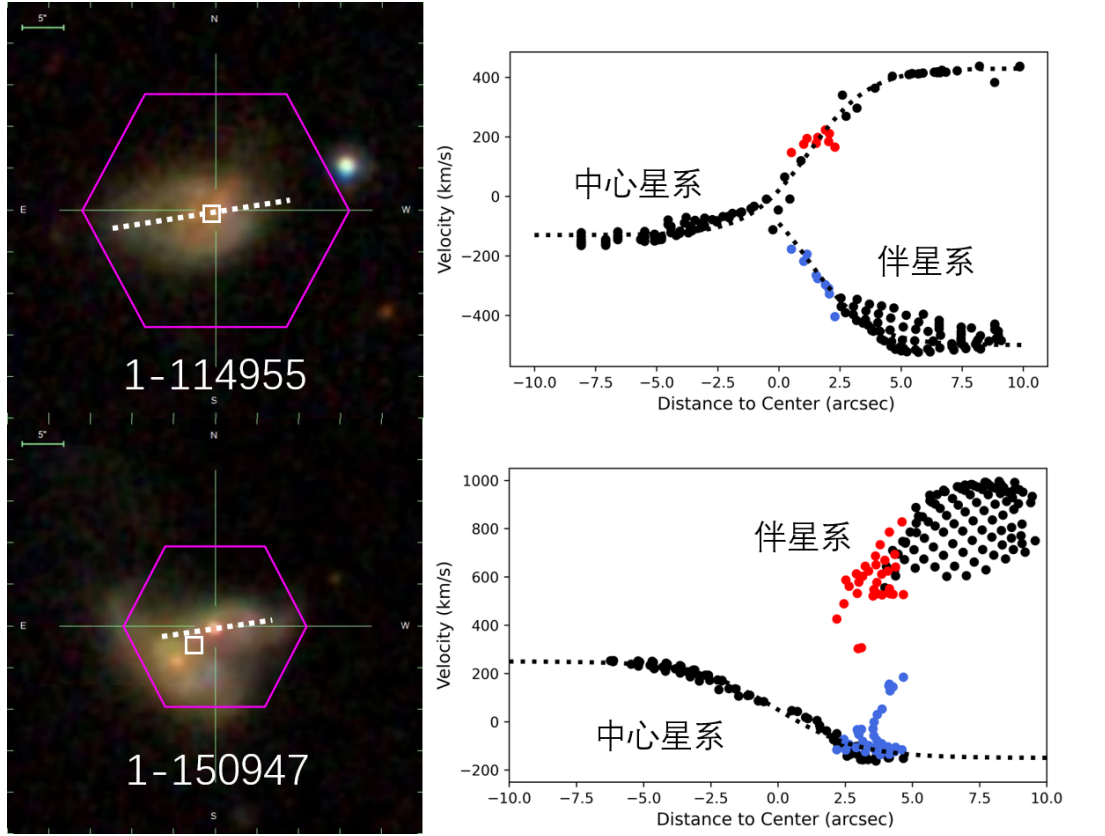


图 4-2 潮汐特征 DPGs 中 DPSs 的运动学特征。左侧显示了它们的 SDSS 成像，并使用白色虚线给出了中心 DPG 的主轴，使用白色方框给出了 DPSs 出现的位置。右侧是它们的旋转曲线（虚线）与 DPSs 的位置与速度，其中黑色点是非 DPSs，蓝色与红色点是 DPSs 的蓝移与红移成分。顶部子图：MaNGA-ID 1-114955；底部子图：MaNGA-ID 1-150947。

Figure 4-2 Kinematic features of DPSs in the DPGs with tidal features. Left images show their SDSS imaging, where there are the major axes of the central DPGs (white dash lines) and the DPSs (white frames). Right panels are the rotation curves of different DPGs (dotted lines), as well as the positions and velocities of their DPSs. No-DPSs are labeled as black dots, while the blue- and red-shifted components are labeled as blue and red dots, respectively. Top: MaNGA-ID 1-114955; Bottom: MaNGA-ID 1-150947.

4.2 具有双峰窄发射线的 AGN 宿主星系

观测到的星系性质与其超大质量黑洞之间的相关性表明，两者的演化是明显相关的。在目前的星系演化模型中，这种关系的一个重要组成部分是由超大质量黑洞吸积导致的 AGN 与 kpc 尺度的外流。研究发现有两种不同类型的外流：由吸积物质的辐射产生的“风”以及高度准直的相对论性粒子“喷流”。在这两种情况下，这些外流会与周围介质之间的相互作用都能够产生激波，激波可以传播并影响整个星系的性质。由 AGN 产生的外流中存在多种成分，例如激波产生的热电离气体、中性或分子物质，它们相较于星系本身的运动来说存在截然不同的运动学状态。

我们是通过在光学波段的 BPT 图与射电波段的流量识别 AGN 的。在之前对 DPGs 分类，我们得到了一个包含 304 个 DPGs 的样本，其中是 AGN 宿主星系的数量是 122 个。由于每个 DPG 可能同时具有棒、AGN 或者潮汐特征，为了避免这种情况，我们选择仅包含 AGN、没有棒或潮汐特征的 DPGs，得到了 80 个纯的 AGN 宿主 DPGs。

我们在图4-3中给出了总共 4 个 AGN 宿主 DPGs 的例子。它们的形态特征均非常相似，仅有 MaNGA-ID 1-455722 是一个侧向星系。

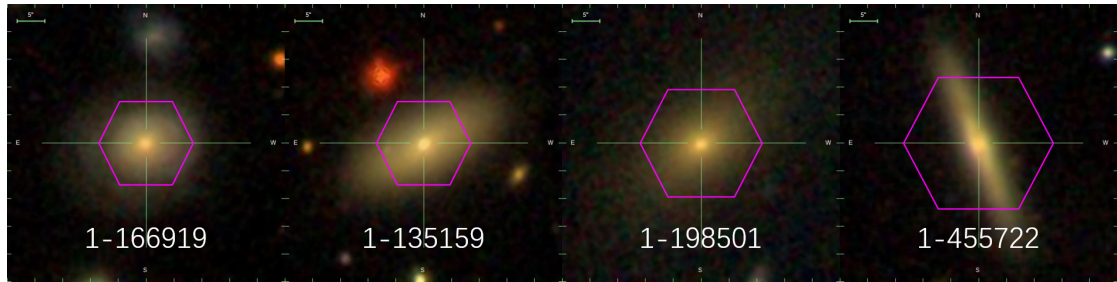


图 4-3 4 个处于 AGN 宿主 DPGs 的例子，除了最后一个是侧向星系外，其它三个星系的形态非常相似。

Figure 4-3 4 examples of AGN-hosting DPGs in similar states; except for the last one, which is an edge-on galaxy, the other three galaxies are very similar in morphology.

4.2.1 具有双峰窄发射线的 AGN 宿主星系的运动学特征

AGN 宿主 DPGs 的运动学特征是研究其双峰特征起源的重要手段，我们以 MaNGA-ID 1-166919 与 1-135159 为例，提取出了它们的旋转曲线。其中 MaNGA-ID 1-166919 已经在 Yazeedi 等^[45]中研究过了。如图4-4所示，我们在 SDSS 成像中使用白色虚线标出中心星系的主轴，使用白色方框标出 DPSs 出现的大概位置。我们将主轴上非 DPSs 给出的速度绘制出它们的旋转曲线，将主轴附近 DPSs 的蓝移与红移成分分别标记出来。

对于这两个 AGN 宿主 DPGs 来说，红移成分属于中心星系，蓝移成分属于它的外流。我们注意到这种情况在所有 AGN 宿主 DPGs 中更为常见，反过来的情况很少（即红移成分属于外流）。

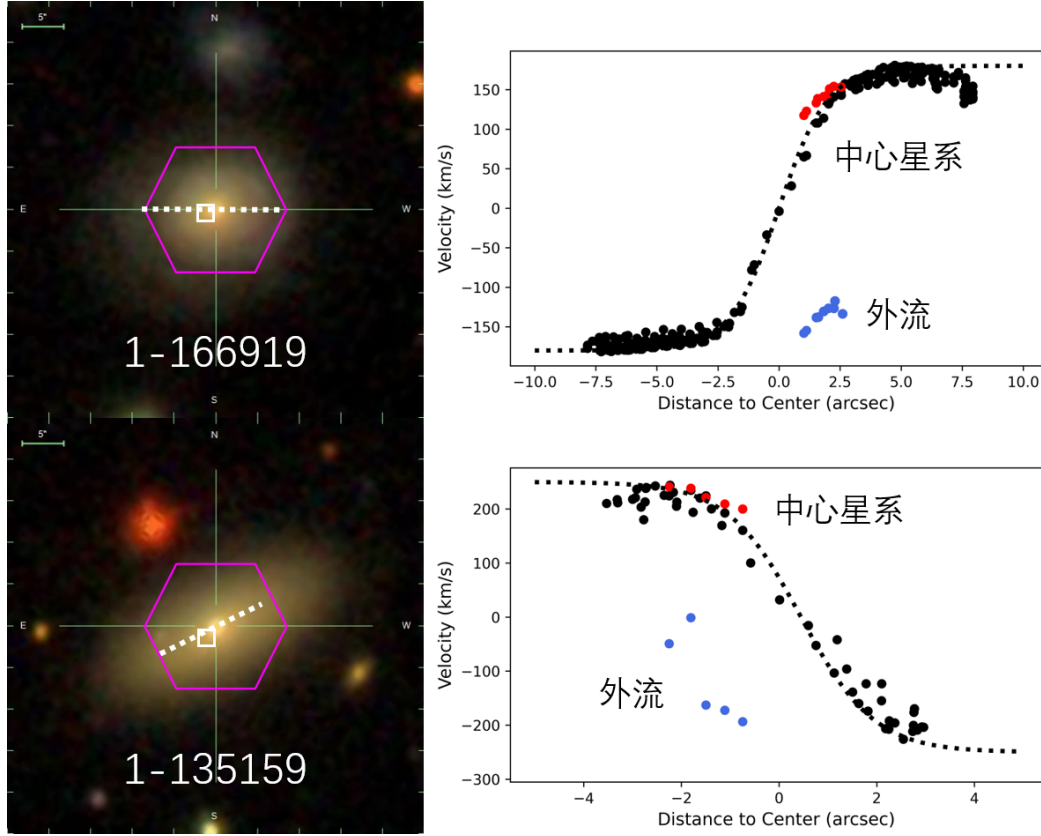


图 4-4 AGN 宿主 DPGs 中 DPSs 的运动学特征。左侧显示了它们的 SDSS 成像，并使用白色虚线给出了中心 DPG 的主轴，使用白色方框给出了 DPSs 出现的位置。右侧是它们的旋转曲线（虚线）与 DPSs 的位置与速度，其中黑色点是非 DPSs，蓝色与红色点是 DPSs 的蓝移与红移成分。顶部子图：MaNGA-ID 1-166919；底部子图：MaNGA-ID 1-135159。

Figure 4-4 Kinematic features of DPSs in the AGN-hosting DPGs. Left images show their SDSS imaging, where there are the major axes of the central DPGs (white dash lines) and the DPSs (white frames). Right panels are the rotation curves of different DPGs (dotted lines), as well as the positions and velocities of their DPSs. No-DPSs are labeled as black dots, while the blue- and red-shifted components are labeled as blue and red dots, respectively. Top: MaNGA-ID 1-166919; Bottom: MaNGA-ID 1-135159.

4.2.2 具有双峰窄发射线的 AGN 宿主星系的发射线诊断

[N II]/H α 是星系光谱中一对关键的发射线比值，其数值包含了关于气体物理状态、金属丰度及电离源性质的重要信息。对于星系来说，更高的 [N II]/H α 流量比意味着电离气体更有可能是由 AGN 而非恒星形成电离产生的。由于我们对 H α λ 6564 Å- [N II] $\lambda\lambda$ 6549, 6586 Å 三线进行了拟合，我们尝试使用双峰特征中的蓝移与红移成分的 [N II]/H α 流量比进行发射线的诊断，如图4-5所示。作为对照，我们将 AGN 宿主 DPGs 中非 DPSs 的 [N II]/H α 也绘制了出来。

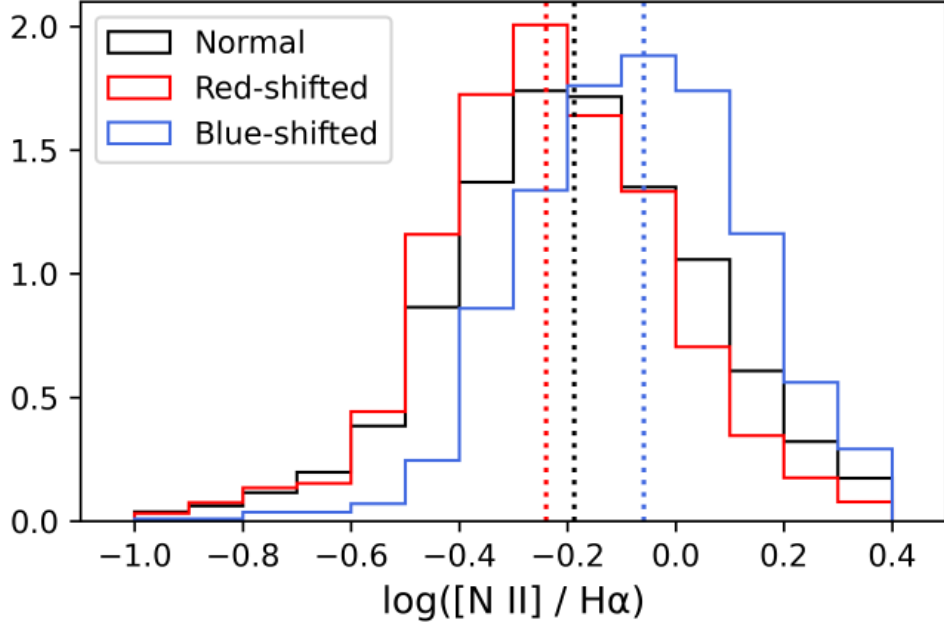


图 4-5 AGN 宿主 DPGs 中蓝移（蓝色）与红移（红移）成分的 [N II]/H α 流量比的分布。黑色表示作为对照的非 DPSs 的结果。

Figure 4-5 The distributions for the flux ratios of [N II]/H α in blue- (blue) and red-shifted (red) components in AGN-hosting DPGs. As a comparison, the black columns are the results of non-DPSs.

AGN 宿主 DPGs 中非 DPSs 的中值 [N II]/H α 流量比为-0.19。在双峰特征中，红移成分的中值流量比为-0.24，蓝移成分为-0.06。相较于蓝移成分的流量比分布，红移成分的结果更加接近于非 DPSs 的结果，表明它们更有可能属于 AGN 宿主 DPGs 本身，这与我们之前通过运动学特征得到的结论相同。蓝移成分的流量比明显高于红移成分与非 DPSs 的结果，结合它们的运动学信息，表明它们可能是 AGN 导致的外流。

4.3 具有双 AGN 的双峰窄发射线星系

除了上述的分别具有双峰窄发射线的潮汐特征星系与 AGN 宿主星系外，我们还发现了 12 个同时包含这两个结构特征的 DPGs，其中有 4 个 DPGs 的形态特征接近 Müller-Sanchez 等^[41]提出的双 AGN。它们的典型特征是仅有一个具有潮

汐特征星系本体, 包含两个相邻核球结构 (AGN), 如图4-6所示。其中 MaNGA-ID 390389 与 1-209980 具有两个紧贴的核球结构 (相距几百个 pc), 而 MaNGA-ID 1-392952 与 1-42078 尽管没有紧贴, 但相距不超过 1 kpc。它们核球附近的运动学仍然是处于紊乱的状态, 无法通过旋转曲线区分这两个核球的结构。

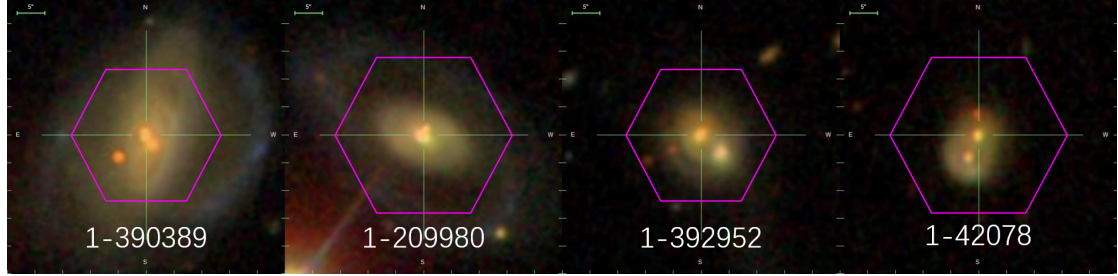


图 4-6 4 个可能是双 AGN 候选体的例子, 前两个具有非常靠近的双核球, 后两个的投影距离稍远, 但仍不超过 1 千秒差距。

Figure 4-6 4 examples of dual AGN candidates: the first two with very close double cores, and the latter two with slightly more distant projections, but still within 1 kpc.

4.4 小结

在这一章中, 我们对具有潮汐特征与 AGN 的 DPGs 的形态与运动学特征分别进行了讨论。对于潮汐特征 DPGs, 我们发现它们在形态上表现出非常大的差异, 在运动学上具有非常复杂的特征。我们仅在部分潮汐特征 DPGs 相对规则的旋转曲线中提取出其双峰特征的可能来源, 即中心星系与它的伴星系。对于 AGN 宿主 DPGs, 我们发现它们在形态上较为相似, 在运动学上也基本保持一致。我们从它们的旋转曲线中提取出双峰特征的可能来源是其中中心星系及其外流, 并且使用 $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ 流量比证明了这一观点。对于一部分具有潮汐特征的 AGN 宿主 DPGs, 我们发现其中可能的双 AGN 候选体: 它们在形态上表现出非常靠近的双核球 (AGN) 特征。

第 5 章 具有双峰窄发射线的有棒星系的物理起源

5.1 有棒星系中双峰特征的研究

在第3章中，我们划分的三种类型 DPSs 可以对应于 DPGs 的三种不同的结构特征，它们分别是：数量最多的、处于星系内部低 Δv 的 DPSs 与 DPGs 的棒结构有关；处于星系内部高 Δv 的 DPSs 与 DPGs 的 AGN 导致外流有关；处于星系外部的 DPSs 与 DPGs 的潮汐特征有关。其中后两者相关的物理机制已经得到了广泛的证实，而棒是如何导致双峰特征这一问题，目前尚未有统一的结论。

有棒星系可能产生双峰特征的物理机制不止一种。首先，棒作为星系中气体内流的通道，允许气体从星系外围快速流向星系中^[63-65]（如图5-1所示）。当沿着棒的方向观测倾斜盘时，可以探测到第二组发射线（如图5-2所示）^[59]。其次，气体核环是由气体的运动与恒星棒的运动发生内林德布拉德共振，导致气体在共振半径位置聚集而形成的^[66-68]。有关星系核环的直接观测非常少，它们通常位于星系中心几个 kpc 的尺度内^[69]（如图5-3）。当环的空间分辨率不高时，就会得到双角形（double-horned）的发射线轮廓。Sparke 等^[70]给出了 NGC 7331 的气体环的例子，当气体环结构无法在空间上分辨时，它会在光谱上形成一个双角形的发射线轮廓（如图5-4所示）。对于 MaNGA 的积分视场光谱巡天，由于空间分辨率有限且 PSF 的影响，发射线轮廓也将显示为双峰形状，并且会随着空间像素的位置变化而变化^[71,72]。

因此，这一个工作的出发点是统计研究上一个工作中给出的有棒 DPGs 双峰特征的物理机制。不仅如此，我们还希望使用这部分工作进一步探索与棒相关的气体动力学。

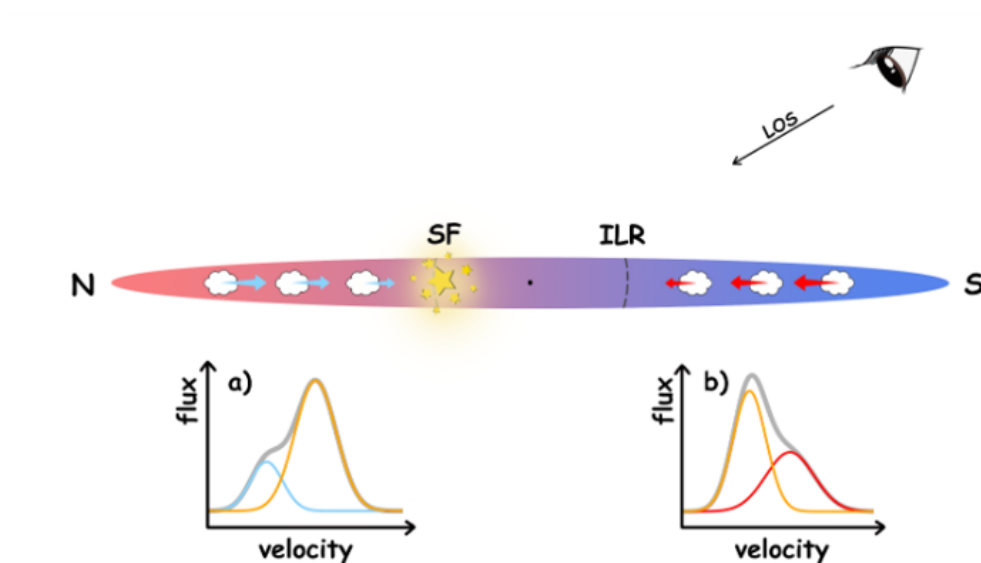


图 5-1 PGC 34107 恒星棒的气体内流简图。恒星棒以椭圆形表示，其后退和靠近的两侧分别用红色和蓝色表示。白色云朵、金色恒星和虚线分别代表气体、恒星形成区和林德布拉德内共振。在视线方向，可以观察到蓝移和红移成分。

Figure 5-1 The sketch of gas inflow along the bar of PGC 34107. The stellar bar is represented by an elliptical shape, with its receding and approaching sides in red and blue, respectively. White clouds, golden stars and dashed lines represent the gas, star formation region and inner Lindblad resonances. In the line-of-sight direction, a blue-shifted and a red-shifted component can be observed.

注：图取自 Lu 等^[63] 的图 9。

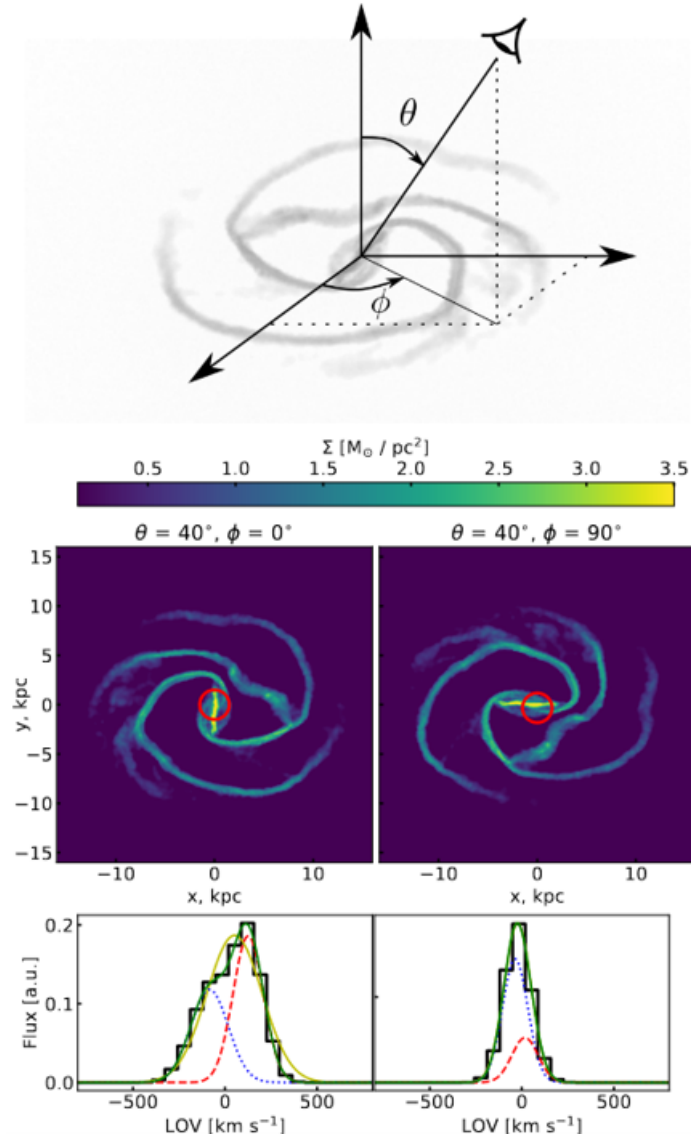


图 5-2 对于一个孤立有棒星系的观测。在顶部子图，我们显示了 3D 空间中的气体分布，并定义了观测角度 ϕ 与 θ 。在中间子图，我们显示了一个倾角为 40° 的二维投影。左侧与右侧的方位角分别是 0° 与 90° ，这对应平行于与垂直于棒的观测。红色圆圈标记位于红移 0.05 的 $3''$ 光纤光谱观测的位置。在底部子图，我们显示了光纤的气体发射线视线速度分布，使用单高斯函数与双高斯函数拟合。

Figure 5-2 Observation of an isolated barred galaxy. Top panel shows the gas distribution in the 3D space and define the observation angles ϕ and θ . Middle panels show two 2D projections for an inclination of $\theta = 40^\circ$. Left and right show an azimuth of $\phi = 0^\circ$ and $\phi = 90^\circ$, which respective correspond to the observation parallel and perpendicular to the bar. The red circles are marked as a $3''$ spectral fiber observation at a redshift of 0.05. Bottom panels show the gas emission line line-of-sight distribution inside the fiber, fitted by a double and single Gaussian function.

注：图取自 Maschmann 等^[59] 的图 7。

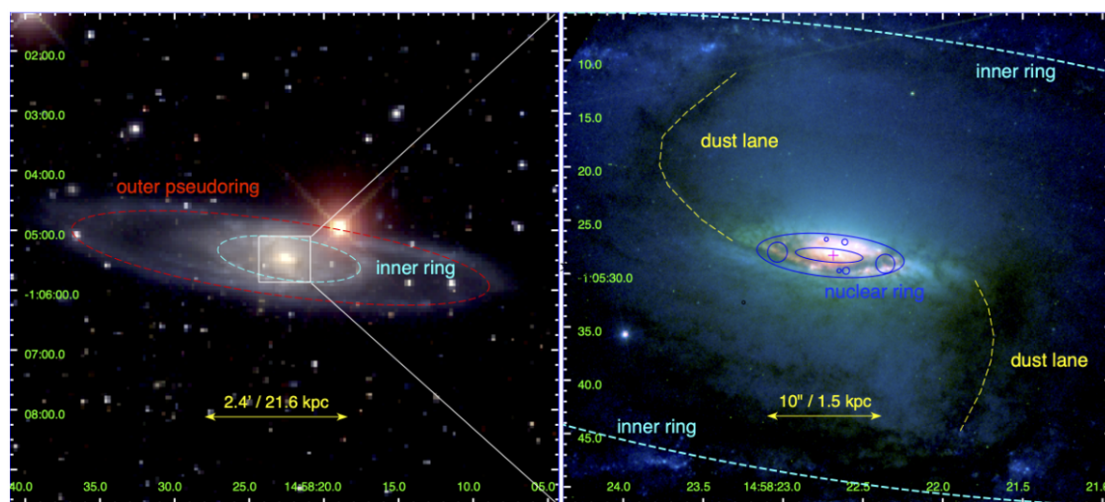


图 5-3 内环和核环。左侧子图：由 SDSS gri 图像绘制的 NGC 5792 整体彩色合成图。红色椭圆代表外（假）环，青色椭圆代表内环。右侧子图是左图中白色矩形区域的放大图。青色线表示内环，蓝色圆圈表示核环。

Figure 5-3 Inner ring and nuclear ring. Left panel: color composite image of the global morphology of NGC 5792, created by SDSS gri images. The red ellipse represents the outer pseudoring, and the cyan ellipse represents the inner ring. Right panel: A blow-up of the white rectangular region in the left panel. The cyan line indicates the inner ring and the blue circles are the nuclear ring.

注：图取自 Yang 等^[69] 的图 1。

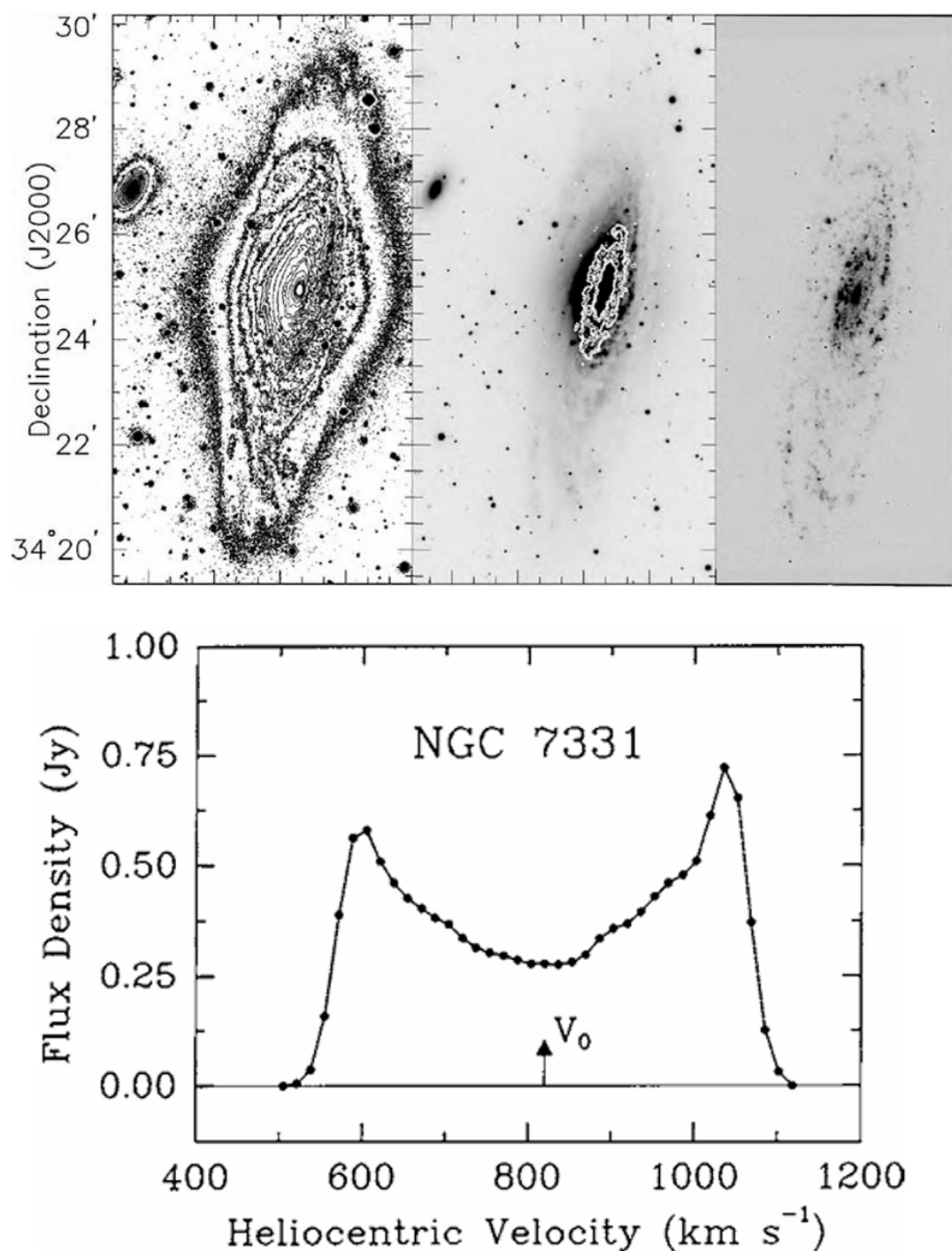


图 5-4 旋涡星系 NGC 7331。左上子图是 R 波段的等照度线；中间是 R 波段的负片，覆盖有 CO 环状发射；右上是 H α 发射的负片。下图显示了 HI 的整体轮廓剖面图，气体以不同速度移动，相对于太阳。

Figure 5-4 Spiral galaxy NGC 7331. Top Left: isophotes in the R band. Top Middle: negative image in the R band, with contours of ringed CO emission. Top Right: negative image in H α . The bottom panel shows the HI global profile, gas moving at each velocity, measured with respect to the Sun.

注：图取自 Sparke 等^[70] 的图 5.3 与 5.22。

5.2 有棒的双峰窄发射线星系样本

在第3章中，我们得到了一个包含 304 个 DPGs 的样本，其中有棒星系的数量是 123 个。由于每个 DPG 可能同时具有棒、AGN 或者潮汐特征，为了避免这种情况，我们选择仅包含棒特征、没有 AGN 或潮汐特征的 DPGs，得到了 72 个纯的有棒 DPGs（以及其中的 1,068 个 DPSs）。我们在附录一的表1-1、表1-2以及表1-3中列出了所有 DPGs 的结果记录，包括它们的结构特征类型。本工作使用了上一个工作中的部分 DPGs 与 DPSs 特征参数，主要包括 DPGs 的恒星质量 (M_*) 与比恒星形成率 ($sSFR$)，以及 DPSs 归一化的宿主星系中心距 (r/R_e) 与双峰速度差 (Δv)。

5.3 棒中气体内流导致双峰特征的可能性

如果有棒星系的双峰特征是由电离气体沿着棒方向的整体运动产生的，那么我们会预期它们的盘是高度倾斜的，而且它们的棒更有可能垂直于星系的主轴。为了验证这一假设，我们需要检查这 72 个有棒 DPGs 的倾角及其棒方向的分布。

首先，我们使用 NSA 参数等轮廓线轴比 (b/a) 来计算星系的倾角 (inc)^[4]，使用式5-1。

$$\sin(inc) = \frac{1 - (b/a)}{1 - (b/a)_{\min}} \quad (5-1)$$

其中 $(b/a)_{\min} = 0.15$ 表示侧向星系 ($inc = 90^\circ$) 至少有 $b/a = 0.15$ 。我们在图5-5左侧子图的红色直方图中显示了有棒 DPGs 的 inc 分布。可以看出，有棒 DPGs 的 inc 整体上的分布是偏向于低倾角的（中值为 38.0° ），也就是正面朝向的星系。这是一种选择效应，即正面朝向星系中的棒更容易通过目视识别出来。为了进一步说明这种效应，我们选取了 MaNGA 巡天中没有 DPSs 的有棒星系作为对照样本，使用它们的 M_* 与 $sSFR$ 进行一对一的单独匹配的。为了便于比较，对照样本的 inc 分布也显示在左侧子图中的黑色直方图。对照样本的结果表明，有棒星系显著偏向于正面朝向（中值为 28.9° ）。然而，在对有 DPSs 与无 DPSs 的有棒星系的比较中，有棒 DPGs 反而更偏向于侧向。这一结果初步表明，双峰特征可能与盘上的气体运动有关，因为在高度倾斜的盘上的气体运动更容易被我们探测到。

为了确定棒在星系平面上的方向，我们首先需要量化星系成像上的棒的形状。为此，我们使用 Galaxy Zoo: 3D 项目^[73]来得到棒的参数，所有 MaNGA 星系的棒的区域都是人工绘制的。具体来说，在合成的 g, r, i 成像 (525×525 像素，每个像素的比例尺为 $0''.099$) 上，所有有棒星系的棒的区域都要经过至少 15 个志愿者的检查与遮蔽。然后，星系图像的每个像素都被赋予一个介于 0 到 15 之间的值，表示有多少个志愿者认为这个像素是棒的一部分（如图5-6所示）。根据这些棒的遮蔽，我们使用目测方法将遮蔽值大于 7.5 的所有像素框定在一个最小矩阵内，并测量其长边的方位角 (PA_{bar}) 与长度 (L_{bar})。我们使用 Python 的

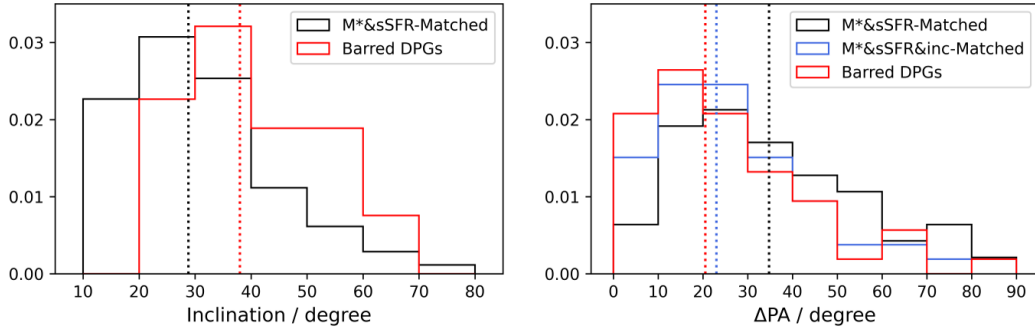


图 5-5 72 个有棒 DPGs 的倾角 (inc) 及其棒的方向 (ΔPA) 的分布。左侧子图是有棒 DPGs (红色直方图) 以及没有 DPSs 的 M_* & $sSFR$ 控制样本 (黑色) 的倾角分布, 中值为 38.0° 与 28.9° , 对应虚线的颜色与直方图一致。右侧子图是有棒 DPGs (红色直方图), 没有 DPSs 的 M_* & $sSFR$ 控制样本 (黑色) 以及没有 DPSs 的 M_* & $sSFR$ & inc 控制样本 (蓝色) 的棒方向的分布, 中值分别为 20.5° , 34.7° 与 23.2° 。

Figure 5-5 The distributions of inclinations (inc) and bar orientations (ΔPA) between of their bars of 72 barred DPGs. Left: The distributions of inclinations (inc), their median values are 38.0° and 28.9° , with the same colors as the histograms. Right: The distributions of bar orientations (ΔPA), their median values are 20.5° , 34.7° and 23.2° , respectively.

PAFIT 包^[74], 根据 MaNGA DAP 中的恒星速度场自动计算得出的有棒星系运动学主轴的方位角 (PA), 并通过 $\Delta PA = |PA - PA_{\text{bar}}|$ 计算出棒相对于星系主轴的方向。在图5-7中, 我们以 DPG (MaNGA-ID 1-593159) 为例, 计算出它的棒的 ΔPA 为 10.5° 。

在图5-5的右侧子图中, 我们使用红色与黑色直方图分别展示了 DPGs 以及在的 M_* 与 $sSFR$ 对照样本的 ΔPA 分布。与对照样本相比, 有棒 DPGs 的 ΔPA 值偏低。这种趋势很有可能与在有棒 DPGs 中观测到的倾角偏差有关 (左侧子图)。对于高度倾斜的盘, 如果棒垂直于主轴, 那么投影的棒的长度可能太短, 无法进行视觉上的探测。为了研究这个问题, 除了 M_* 与 $sSFR$ 外, 我们额外使用 inc 作为控制参数, 创建了一个新的没有 DPSs 的正常有棒星系作为对照样本。我们称之为 “ inc 控制样本”, 区别于之前的 “ M_* 与 $sSFR$ 控制样本”。右图中的蓝色直方图代表了这个 inc 控制样本的 ΔPA 分布。值得注意的是, 一旦控制了 inc , 有棒 DPGs 的 ΔPA 分布与正常有棒星系的 ΔPA 分布非常接近, 这一点可以通过 KS 检验的 P 值为 0.85 得到证实。这一发现与我们的假设相矛盾, 即有棒 DPGs 主要是由垂直于星系主轴的棒形成的, DPSs 中的一个速度成分代表了沿着棒的电离气体的整体运动。

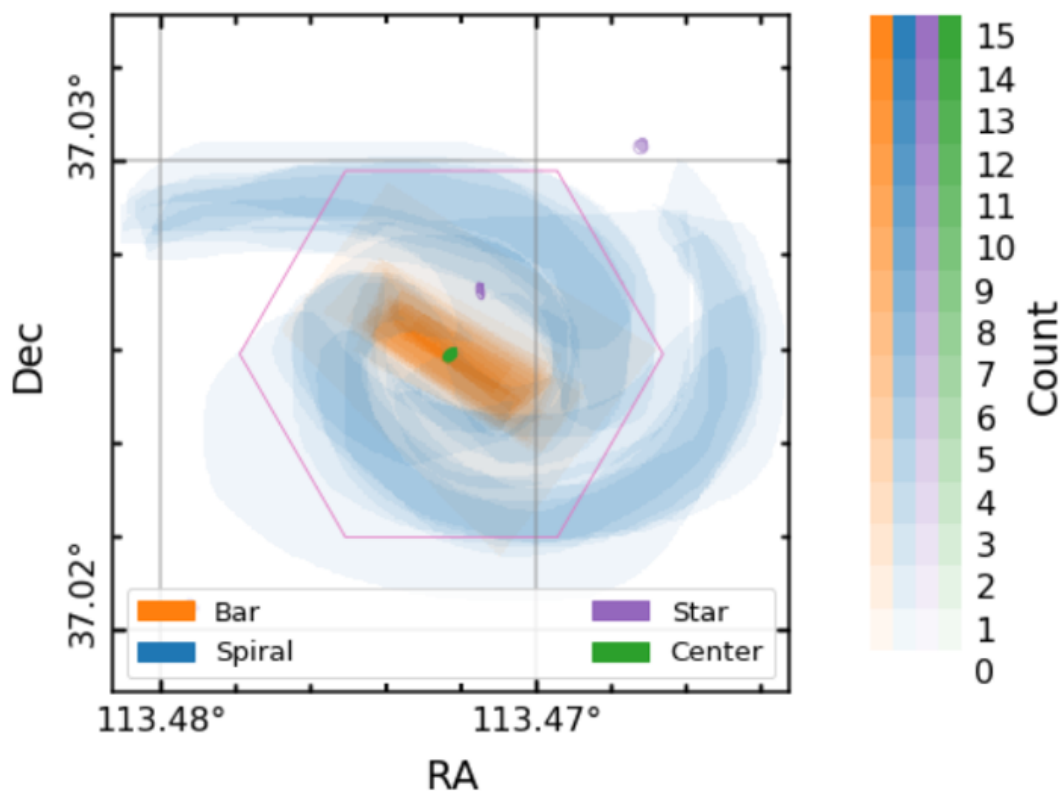


图 5-6 Galaxy Zoo: 3D 中绘制在星系上的遮蔽示例。图中显示了各种遮罩，颜色表示类型（绿色表示星系中心，紫色表示恒星，橙色表示棒，蓝色表示旋臂），密度表示在该像素中创建遮蔽的志愿者人数。

Figure 5-6 An example of the masks drawn on a galaxy in Galaxy Zoo: 3D. This shows all kinds of masks with color indicating the type (green for galaxy center, purple for star, orange for bar and blue for spirals), and the density indicating the number of volunteers who created the mask in that pixel.

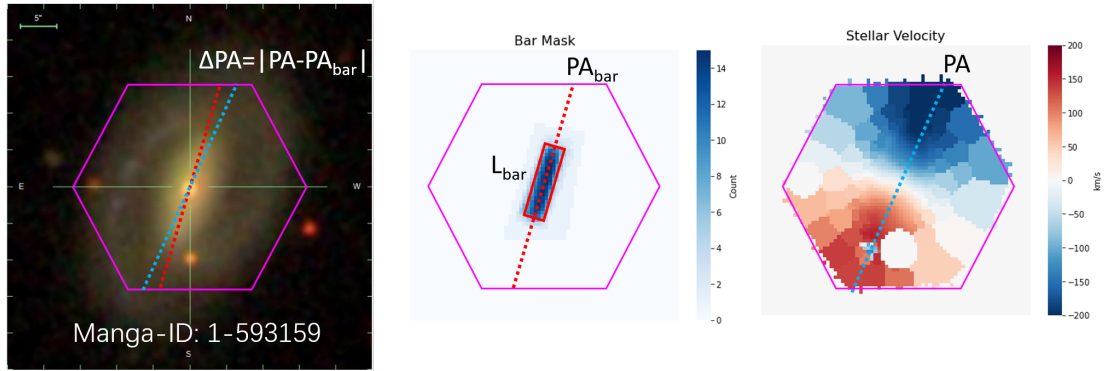


图 5-7 有棒双峰窄发射线星系 (MaNGA-ID 1-593159) 及其棒的形态参数。左侧子图给出的是 SDSS gri 波段图像以及得到的棒的方向 ($\Delta PA = |PA - PA_{bar}|$)。中间子图给出的红色矩形对应的星系棒的位置, 棒的长度 (L_{bar}) 与方位角 (PA_{bar}) 是通过这个矩形测量得到的。Galaxy Zoo: 3D 项目在空间上使用计数值 (0-15) 表征认为该空间像素属于星系棒的人数, 0 是最少, 15 是最多。而这个矩形包围着计数值 8-15 的空间像素。右侧子图给出的是使用 Python PAFIT 包, 通过 MaNGA DAP 的恒星速度场计算得到星系运动学方位角 (PA)。

Figure 5-7 The morphological parameters of the DPG (MaNGA-ID 1-593159) and its bar. Left: The SDSS gri band image and the obtained $\Delta PA = |PA - PA_{bar}|$. Middle: The length (L_{bar}) and position angle (PA_{bar}) of the bar are derived from the red rectangle enclosing the spaxels with their count values between 8 and 15. The count values (0 - 15) derived from the Galaxy Zoo: 3D project characterize the likelihood that the spaxel belongs to the bar, with a value of 0 being the least possible and 15 being the most possible. Right: The kinematic position angle (PA) of the DPG is from the stellar velocity fields in MaNGA DAP, calculated by the Python PAFIT package.

5.4 棒相关气体核环导致双峰特征的可能性

有棒星系的 DPGs 也可能是由气体核环产生的，其中包含蓝移与红移的气体成分。当星系的倾角足够大且核环是高速旋转时，核环范围内的空间像素可能会由于 PSF 效应而产生双峰轮廓。在这种情况下，气体核环的运动学性质可能与 DPSs 的参数有关。因此，我们计算了有棒 DPGs 的核环半径与旋转速度，并与它们的 DPSs 归一化的宿主星系中心距 (r/R_c) 与双峰速度差 (Δv)。

由于核环是 kpc 尺度的结构 (尺度小于 PSF 的 FWHM)，我们无法在 MaNGA 巡天中辨别它们，需要使用间接的方法。气体核环的运动学参数可以从其对应得到内林德布拉德共振中获得 (林德布拉德共振是一种轨道共振现象，发生在天体的本轮频率与外部周期性扰动的频率匹配时。根据共振方向，可分为：内林德布拉德共振与外林德布拉德共振。对于有棒星系中的气体，它们会在内流过程中聚集在内林德布拉德共振，形成气体核环)，其半径 (r_{NR}) 可以通过棒的图案速度 (Ω_p) 与 DPGs 的气体角速度 $\Omega_{gas}(r) = V_{gas}(r)/r$ 来计算，其中 $V_{gas}(r)$ 是气体旋转曲线^[67]。当 $r = r_{NR}$ ，满足方程

$$\Omega_p = \Omega_{gas}(r) - \kappa(r)/2, \quad (5-2)$$

其中的周转频率 κ (描述引力势中的微小径向振荡) 为

$$\kappa^2(r) = 4\Omega_{gas}^2(r) \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{\Omega_{gas}(r)} \frac{d\Omega_{gas}(r)}{dr} \right) \right] \quad (5-3)$$

对于棒的 Ω_p ，我们使用 Tremaine-Weinberg (TW) 算法^[75,76] 拟合 MaNGA DAP 数据立方中的恒星速度。(使用方法详见 <https://zenodo.org/records/7567945>，一种用于测量星系模式速度的天文学技术，描述了星系中旋转的密度波的角速度。这一方法在研究星系动力学、结构形成和演化中具有重要意义。) 这是一种不依赖于模型的方法，假设棒是一个刚性结构，在一个倾斜的盘 ($inc > 20^\circ$) 中以固定的 Ω_p 旋转。TW 算法是在棒上均匀覆盖一系列平行于星系 PA 的相同伪狭缝 (图5-8上方的两个子图中的白框)，并计算每个伪狭缝中所有空间像素的光度加权平均距离 ($\langle X \rangle$ ，这个距离是每个空间像素到星系短轴的距离，并且使用与速度方向相同的正负号表示方向) 与速度 ($\langle V \rangle$)。其中计算 $\langle X \rangle$ 与 $\langle V \rangle$ 的方程是

$$\langle X \rangle = \frac{\int_{slit} X \Sigma(X, Y) dX}{\int_{slit} \Sigma(X, Y) dX}, \quad (5-4)$$

$$\langle V \rangle = \frac{\int_{slit} V_{LOS}(X, Y) \Sigma(X, Y) dX}{\int_{slit} \Sigma(X, Y) dX} \quad (5-5)$$

其中 (X, Y) 是以星系中心为原点的天平面坐标， $X = 0$ 对齐星系的主轴， $Y = 0$ 对齐短轴。 $\Sigma(X, Y)$ 与 $V_{LOS}(X, Y)$ 分别是星系 (X, Y) 位置的恒星流量与速度。举例来说，我们在图5-8的左侧和中侧面板中，以 MaNGA-ID 1-593159 星系为例，

在恒星流量和速度场上的白色条带表示伪狭缝。多个伪狭缝的 $\langle V \rangle$ 与 $\langle X \rangle$ 之间的斜率可以通过 Ω_p 联系起来

$$\Omega_p \times \sin(\text{inc}) = \frac{\langle V \rangle}{\langle X \rangle} \quad (5-6)$$

在图5-8的右侧面板中，我们展示了对示例 DPG 的线性拟合结果以及得出 $\Omega_p = 30.3 \text{ km/s/arcsec}$ 。

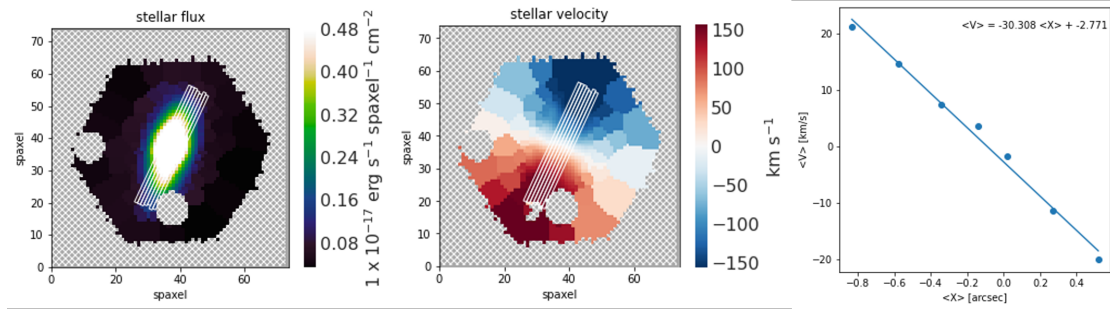


图 5-8 左侧子图：有棒 DPG MaNGA-ID 1-593159 的恒星流量，一系列伪狭缝是由平行于 PA 的白色狭缝绘制出的；中间子图：同一 DPG 的恒星速度场；右侧子图：对于这个 DPG 的伪狭缝的运动积分 $\langle V \rangle$ 与测光积分 $\langle X \rangle$ 的比较。最佳拟合直线经过这些点，斜率等于 $\Omega_p \times \sin(\text{inc})$ 。

Figure 5-8 Left: The stellar flux for the barred DPG with MaNGA-ID 1-593159. A series of pseudo-slits plotted by the white slits are parallel to the PA . Middle: The stellar velocity for the same barred DPG. Right: The kinematic integral, $\langle V \rangle$, is plotted against the photometric integral, $\langle X \rangle$, for all the pseudo-slits for this galaxy. The equation of the best-fit line goes through these points, and the slope is equal to $\Omega_p \times \sin(\text{inc})$.

我们在 DPGs 主轴上选择信噪比 $\text{SNR}_S \geq 5$ 的非 DPS 的空间像素，通过 MaNGA DAP 给出的 $H\alpha$ 速度场，使用 Python 包 `Scipy.optimize.curve_fit`（包的使用方法详见 Scipy 高级科学计算库网页 <https://docs.scipy.org>）来获得它们的气体旋转曲线 $V_{\text{gas}}(r)$ （见式5-7），其中 $r_{\text{gas},0}$ 与 $V_{\text{gas},0}$ 是气体的过渡半径与渐进速度。

$$V_{\text{gas}}(r) = V_{\text{gas},0} \times \tanh\left(\frac{r}{r_{\text{gas},0}}\right), \quad (5-7)$$

这样，如图5-9左侧子图所示，有棒 DPG（MaNGA-ID 1-593159）棒的图案速度 $\Omega_p = 30.3 \text{ km/s/arcsec}$ ，气体旋转曲线 $V_{\text{gas}} = 285 \times \tanh(r/1''.1) \text{ km/s}$ 。

考虑到一部分有棒 DPG 的非 DPS 的空间像素仅覆盖了旋转曲线的平坦部分，对上升段的约束相对较差，我们单独将这些样本表示出来，称之为“平坦样本”（Flat Example）。如图5-10所示，最上方的 DPG（MaNGA-ID 1-195478）的非 DPS 空间像素覆盖到旋转曲线的上升部分，它的过渡半径的卡方值存在明显的最小值，也就是它的拟合结果。中间的 DPG（MaNGA-ID 1-10248）非 DPS 的空间像素仅覆盖了旋转曲线的平坦部分，它的卡方值不存在明显的最小值，我们将其出现拐点的位置作为其过渡半径。最下面的示例 DPG（MaNGA-ID 1-593159）。

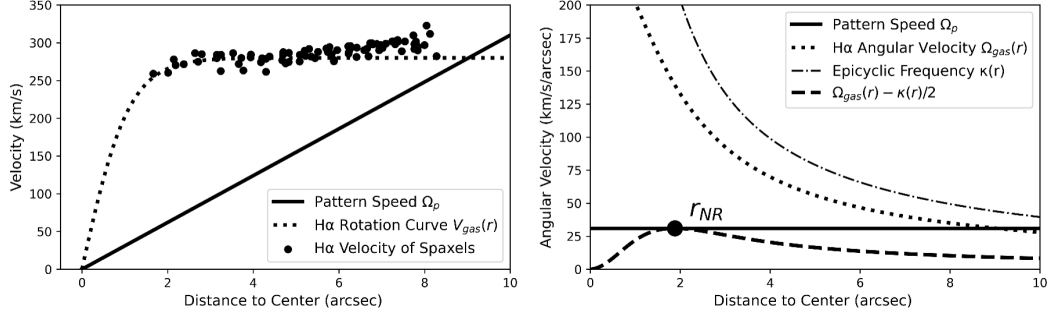


图 5-9 左侧子图给出了有棒 DPG (MaNGA-ID 1-593159) 的旋转曲线 $V_{gas}(r)$ 及其棒的图案速度 (Ω_p)。实线表示棒的 Ω_p ，是通过 TW 算法获得的。黑色实心圆表示主轴上每个空间像素的位置与 H α 速度，虚线表示 $V_{gas}(r)$ 。右侧子图表示同一个有棒 DPG 的棒的 Ω_p 以及气体核环半径 (r_{NR})。虚线表示气体旋转角速度 $\Omega_{gas}(r)$ ，点划线是本轮频率 $\kappa(r)$ 。气体核环的边境使用一个实心圆表示，该位置的 $\Omega_p = \Omega_{gas}(r) - \kappa(r)/2$ 。

Figure 5-9 Left: The pattern speed of the bar and the rotation curves of the barred DPG 1-593159. The solid line represents the pattern speed (Ω_p) of the bar, obtained via TW algorithm. The black filled circles indicate the positions and H α velocities of the spaxels on the major axis, and the dotted line represents the gas rotation curve $V_{gas}(r)$. Right: The pattern speed of the bar and the radius of the gas nuclear ring for the same DPG. The dotted line is the gas angular velocity $\Omega_{gas}(r)$ and the dash-dotted line is the epicyclic frequency $\kappa(r)$. The radius of the gas nuclear ring is indicated using a filled circle where Ω_p (solid line) equal to $\Omega_p = \Omega_{gas}(r) - \kappa(r)/2$ (dashed line).

在获得了棒的图案速度与气体旋转曲线后，我们可以找到内林德布拉德共振出现的位置。具体来说，气体核环的半径 (r_{NR}) 可以通过 $\Omega_p = \Omega_{gas}(r) - \kappa(r)/2$ [71] 的方法找到。如图 5-9 右侧子图所示，有棒 DPG (MaNGA-ID 1-593159) 存在 $\Omega_{gas}(r) - \kappa(r)/2$ 与 Ω_p 相交的点 (图中表示为实心圆)，即 $r_{NR} = 1''.9$ 。我们在图 5-11 展示了该 DPG 中气体核环的位置，它与 DPS 出现的位置高度重合。考虑到气体旋转曲线的形状，我们可以推断出不同星系的 r_{NR} 数量可能是两个、一个或者没有。当有两个交点时，我们选择更加靠外的 r_{NR} 作为该 DPGs 的代表；当没有交点时，我们就不考虑这个 DPGs 的运动学参数。对于 19 个没有 r_{NR} 的星系，我们将其排除在进一步的分析之外。在 72 个有棒 DPGs 中，我们发现 53 个 DPGs 的核环半径在空间尺度上在 $0''.8$ 与 $2''.2$ 之间。

在确定了 r_{NR} ，我们使用 $V_{gas}(r_{NR})$ 来计算核环上的气体旋转速度 (v_{NR})。以有棒 DPG (MaNGA-ID 1-593159) 为例，它的 $v_{NR} = 268$ km/s。值得一提的是，有棒 DPG 的 v_{NR} 是根据拟合气体旋转曲线 $V_{gas}(r)$ 得出的，并不能直接从 DAP 的 H α 速度场图中确定。其根本原因有两个。首先，DPSs 位于 DPG 的中心区域，而且就在 r_{NR} 附近，这里的速度场数据无法反映气体的整体旋转运动 (DPS 已被排除在 $V_{gas}(r)$ 的拟合过程之外)。其次，我们的 DPGs 的 r_{NR} 小于 MaNGA 巡天的点扩散函数 (PSF)，其 FWHM $\sim 2''.5$ 。因此，直接从星系最内部空间像素的光谱中得到的速度基本上是在不同半径位置上的旋转曲线与 PSF 之间的卷积。实

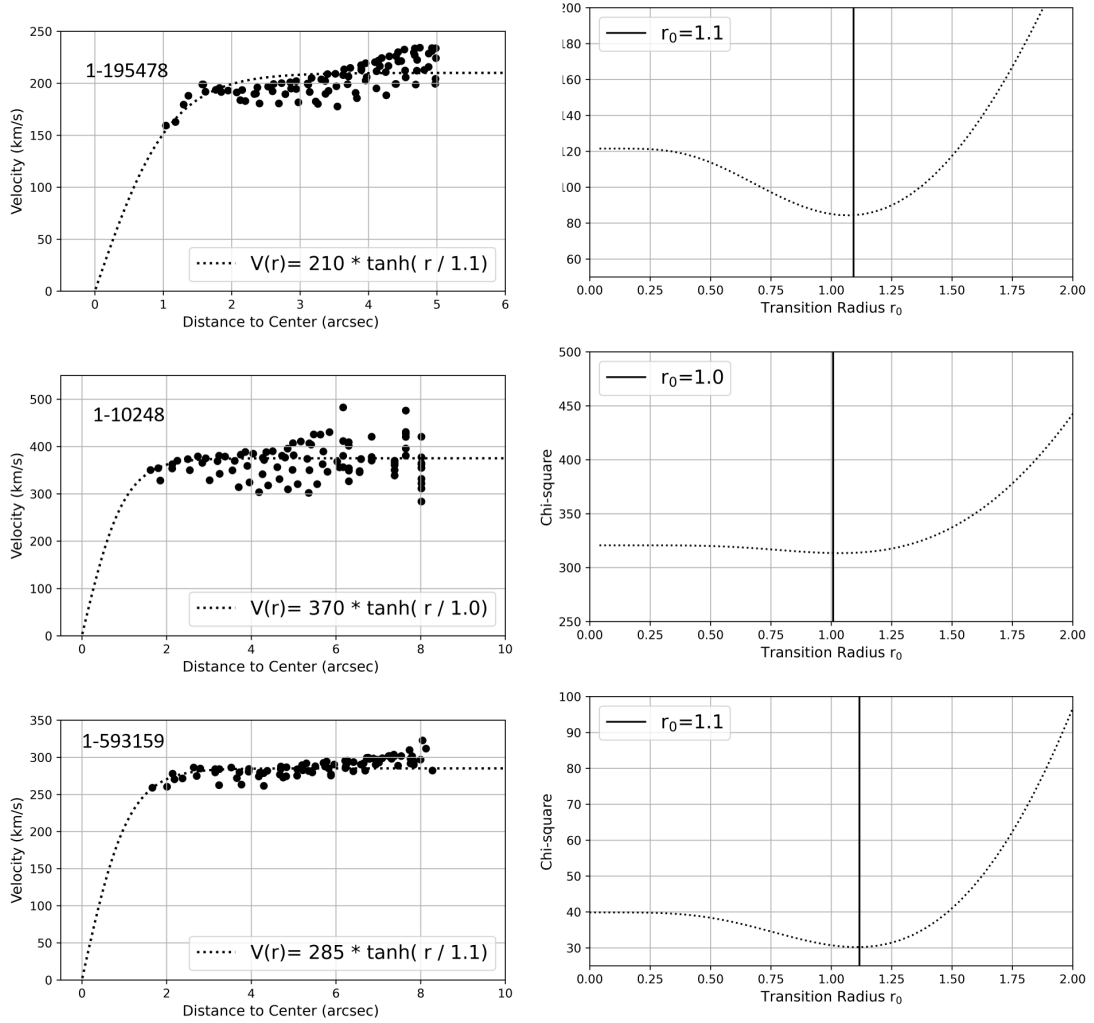


图 5-10 左侧子图给出了三个有棒 DPG 旋转曲线的拟合，右侧是在不同过渡半径情况下，拟合结果的卡方分布。这三个有棒 DPG 分别为 MaNGA-ID 1-195478，MaNGA-ID 1-10248 以及 MaNGA-ID 1-593159。

Figure 5-10 The left panels show the fits for rotation curves of 3 barred DPGs, while the right panels show the chi-square distribution of the fit results for different transition radii. These 3 barred DPGs are MaNGA-ID 1-195478, MaNGA-ID 1-10248, and MaNGA-ID 1-593159, respectively.

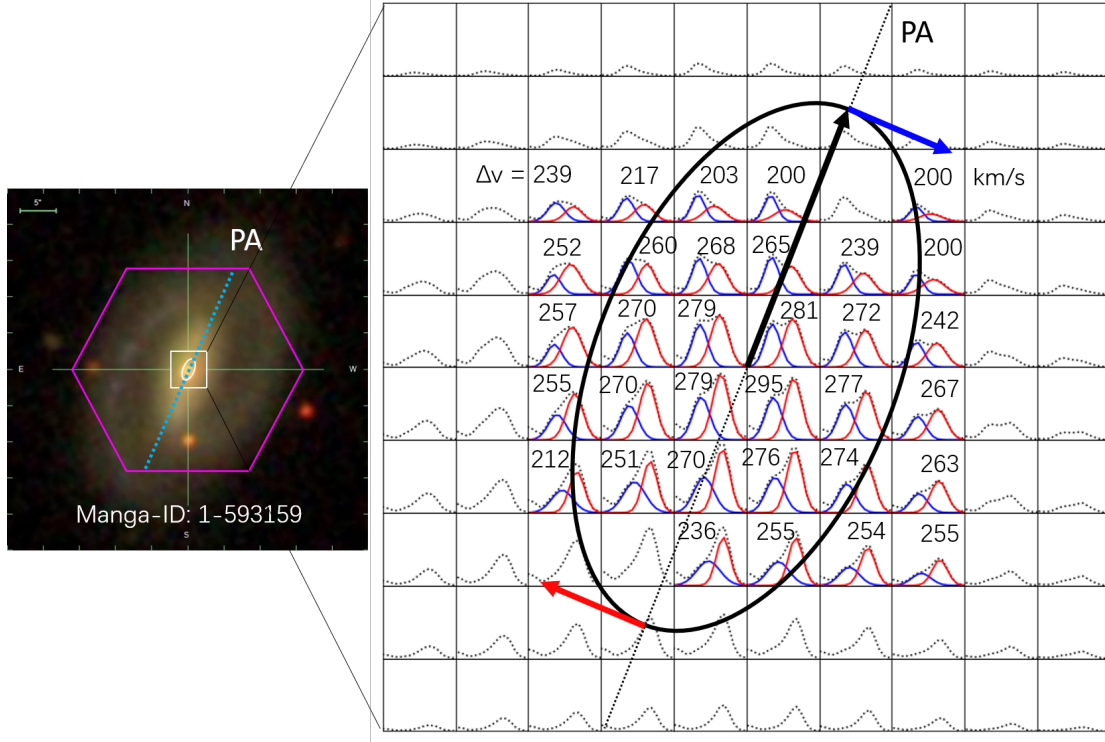


图 5-11 左侧小图为有棒 DPG MaNGA-ID 1-593159 的 SDSS g, r, i 波段成像，以及它的方位角 ($PA = 160^\circ$)。白色方框包含其中心 10×10 的空间像素 ($5'' \times 5''$)，白色椭圆是倾斜的气体核环 ($inc = 38^\circ$)。右侧大图是中心 10×10 空间像素的 $H\alpha$ 线轮廓。使用双高斯轮廓拟合的空间像素使用蓝移与红移的 $H\alpha$ 线分别表示，颜色分别是蓝色与红色。每个 DPS 中标注的值是其 Δv 值。黑色椭圆是气体核环，黑色箭头表示环的半径 ($r_{NR} = 1''.9$)，蓝色与红色箭头表示核环运动的方向 ($\Delta v_{NR} = 330$ km/s)。

Figure 5-11 Left: The SDSS g, r, i band image for an example (MaNGA-ID 1-593159), and its position angle ($PA = 160^\circ$) of the galaxy. The white box is its central 10×10 spaxels ($5'' \times 5''$), and the white ellipse is the inclined gas nuclear ring ($inc = 38^\circ$). Right: The $H\alpha$ line profiles of its central 10×10 spaxels. Spaxels fitted by the double Gaussian profiles are shown with the blue- and red-shifted $H\alpha$ lines additionally, plotted by the blue and red lines respectively. The value labeled in each DPS is its Δv value in km/s. The black ellipse is the gas nuclear ring, the black arrow shows the radius ($r_{NR} = 1''.9$) of the ring, and the blue and red arrows indicate the direction of motion of the nuclear ring ($\Delta v_{NR} = 330$ km/s).

际上，如果核环代表了中心区域最重要的电离气体特征，并且由于 PSF 的影响而无法有效地分辨出来，那么在其光谱的窄发射线上就会出现一个双峰特征，两个峰之间的理论速度差为^[70]

$$\Delta v_{\text{NR}} = 2v_{\text{NR}} \times \sin(\text{inc}), . \quad (5-8)$$

其中 inc 表示核环所在平面的倾角。在核环内部还分布有电离气体的现实情况下，我们预计 Δv_{NR} 值将是任何从 DPSs 测得的 Δv 值的上限。这一结论与我们给出的 DPG 例子是一致的，如图5-11所示，其中 Δv 的值在 200 到 300 km/s 之间，均小于 Δv_{NR} 值。

在得到核环半径与理论速度差后，我们首先将每个 DPG 中距离中心最远的 DPSs ($r_{\text{max,DPS}}/R_e$) 与其气体核环半径 (r_{NR}/R_e ，由宿主星系的有效半径归一化) 进行比较，如图5-12的左侧子图所示。这两个参数之间存在非常显著的相关性 (皮尔逊相关系数 $r_{\text{pearson}} = 0.82$ ，如果去掉“平坦样本”则为 0.90)。它们的关系也非常接近 1:1 的对角线， $r_{\text{max,DPS}}/R_e$ 平均比 r_{NR}/R_e 大 25%。这可能是由于 DPSs 并非正好落在核环上，而是在核环半径上有一定弥散，使得最大 r/R_e 稍大一些 (如图5-11中核环之外的 DPSs)。

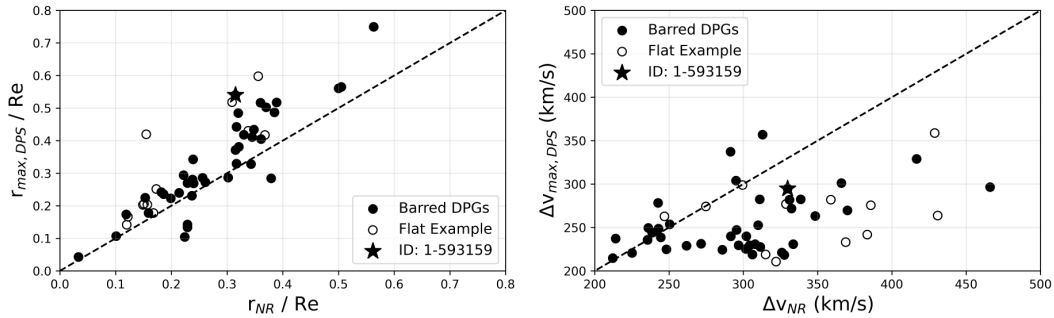


图 5-12 核环的性质与观测到双峰之间的关系，其中黑点是有棒 DPGs，空心点是“平坦样本”，星号是示例样本，虚线是 1:1 的对角线。左侧子图给出了有棒 DPGs 气体核环半径 r_{NR} 与其中 DPSs 最大 r/R_e 之间的关系。这一关系的皮尔逊相关系数为 $R = 0.82$ ，去掉“平坦样本”后为 0.90。右侧子图给出了有棒 DPGs 核环旋转速度对应的理论双峰速度差 Δv_{NR} 与其中 DPSs 最大 Δv 之间的关系。这一关系的皮尔逊相关系数为 $R = 0.40$ ，去掉“平坦样本”后为 0.46。

Figure 5-12 The relationship between the properties of nuclear rings and the observed double-peaked features, where black dots are barred DPGs, hollow dots are “flat samples”, asterisks are the example galaxy, and the dotted line is the 1:1 diagonal. Left: The relation between the r_{NR} and r/R_e of the barred DPGs, whose Pearson coefficient is $R = 0.82$ ($R = 0.90$ if “flat samples” are excluded). Right: The relation between the Δv_{NR} and Δv of the barred DPGs, whose Pearson coefficient is $R = 0.40$ ($R = 0.46$ if “flat samples” are excluded).

而速度差的比较如图5-12的右侧子图所示。每个 DPG 的理论 Δv_{NR} 与其 DPSs 的最大 Δv ($\Delta v_{\text{max,DPS}}$) 之间也存在相关性 (皮尔逊相关系数 $r_{\text{pearson}} = 0.40$,

如果去掉“平坦样本”则为 0.46), 这表明气体核环产生的理论速度差可以在一定程度上反映在 DPSs 的 Δv 中。然而, 观测到的最大 Δv 普遍小于理论 Δv_{NR} , 对此我们的解释是, 如图5-4所示, 仅处于环上的气体能够呈现出双角形轮廓, 但在实际观测中, 气体还聚集于核环内的区域。(核环以外区域的气体含量下降得非常快, 对发射线的整体轮廓影响很小。)核环内的气体相较于核环上的气体有更小的旋转速度, 使得双角形轮廓整体向中间收缩, 形成近似双峰的形状。此时的双峰速度差小于双角形轮廓的速度差, 后者是前者的上限。

结合上述对气体核环运动学性质与有棒 DPGs 中 DPSs 参数的比较, 我们的结果表明双峰特征与和棒有关的气体核环之间有很强的相关性。

5.5 对具有双峰窄发射线的有棒星系的模拟

由于直接从星系最内部空间像素的光谱中得到的速度基本上是不同半径位置上的旋转曲线与 PSF 之间的卷积, 在我们了解到有棒 DPGs 中气体核环与星系中心双峰特征的关联后, 我们尝试使用 MaNGA 给出的星系二维空间分辨的发射线速度场与流量分布的信息, 还原光谱发射线中的双峰轮廓。我们以 MaNGA-ID 1-593159 的有棒 DPG 为例。

Maschmann 等^[59]已经提出了 PSF 效应在产生双峰特征过程中必不可少的作用, 尤其是对于发射线的流量分布以及速度场。具体来说, PSF 效应会通过卷积改变星系原始的流量分布, 模糊星系的细节, 导致尖锐的结构变得平滑; PSF 的旁瓣可能导致光从亮区向暗区“泄露”, 例如星系中心的光会扩散到外围, 影响表面亮度轮廓的测量。PSF 的卷积也会混合相邻空间像素的速度信息, 导致速度梯度(例如旋转曲线)变得平缓, 低估真实速度剪切; 同时加宽谱线宽度, 影响湍流或速度弥散的测量。因此, 我们不能直接使用 MaNGA DAP 提供的流量分布与速度场, 需要尽可能去除 PSF 效应的影响。

由于 PSF 去卷积过程是不适定的, 我们使用一个线性关系来近似描述改正的 $\text{H}\alpha$ 流量在半径上的分布。如图5-13所示, 左侧子图给出了 $\text{H}\alpha$ 流量在半径上的分布情况(黑色叉号是去卷积前的结果, 黑点是去卷积后的结果), 其中点线是 $3''.5$ 半径内对去卷积后 $\text{H}\alpha$ 流量的拟合:

$$F_{\text{gas}}(r) = 140 - 40 \times r/\text{arcsec} \quad (5-9)$$

$$f_{\text{H}\alpha} = 0, (r > 3''.5). \quad (5-10)$$

右图是该 DPG 的气体旋转曲线, 黑点是来自 MaNGA DAP 的空间像素的速度。由于中心区域存在双峰特征(虚线方框), 该区域的黑点并没有参与拟合。外部区域的旋转曲线相对比较平坦, 表明这部分速度受到 PSF 效应的影响较小, 因此我们使用气体旋转曲线 $V_{\text{gas}} = 285 \times \tanh(r/1''.1) \text{ km/s}$ 作为去卷积后 $\text{H}\alpha$ 速度的拟合。

在获得了每个空间像素 PSF 去卷积的 $\text{H}\alpha$ 流量与速度后, 我们还需要会导致发射线呈现出高斯轮廓的参数: 速度弥散。在 MaNGA 中, 它与仪器的光谱线

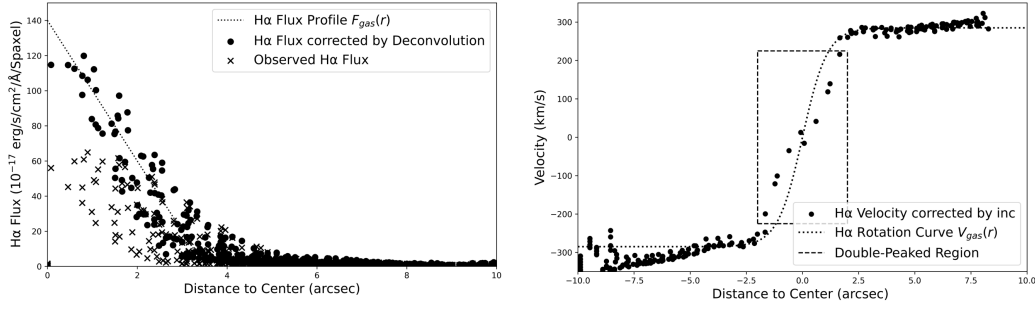


图 5-13 左侧子图: $H\alpha$ 流量的径向分布 (去卷积前的叉号与去卷积后的黑点) 及其去卷积后流量的线性拟合 (点线)。右侧子图: $H\alpha$ 的速度 (黑点) 与旋转曲线 (点线)。虚线方框表示该 DPG 出现双峰特征的区域。

Figure 5-13 Left: Radial distribution of $H\alpha$ flux (crosses before deconvolution and black dots after deconvolution) and its linear fit after deconvolved (dotted line). Right: $H\alpha$ velocity (black dots) and rotation curve (dotted line). The dashed box indicates the region where there are double-peaked features.

展宽函数有关, 典型值约为 70 km/s 。结合这三个参数, 我们可以得到每个空间像素的发射线形状。如图5-14所示, 在倾角为 38° 与方位角为 90° 的情况下, 上面三个子图分别表示模拟的 $H\alpha$ 流量分布、速度场以及中心空间像素的二维 PSF 函数。对于中心空间像素, 在 PSF 效应的影响下, 我们观测到它的发射线轮廓实际上是其周围发射线的叠加 (如下图的实线), 呈现出近似双峰的发射线轮廓。

在得到了样本 DPG 中心空间像素的双峰发射线轮廓后, 我们进一步研究了双峰轮廓在空间上的变化, 如图5-15与5-16所示, 分别沿着星系的主轴与短轴。(由于页面格式的限制, 我们将这两张图的说明文字分段) 为了更好地描述双峰轮廓的变化, 我们使用双高斯函数对其进行了拟合, 并且根据两个轮廓的速度方向将它们称为蓝色与红色轮廓。需要说明的是, 这两个轮廓在物理上并没有对应的结构, 不能将它们视为两个不关联的成分。

在图5-15中, 我们在第一行给出了样本 DPG 中心空间像素的 PSF (左侧的二维图像) 与叠加后发射线的轮廓 (右侧的速度-流量图)。在左侧图, 我们在左上角标注该空间像素的位置为 $(0, 0)$ 。在右侧图中, 我们使用蓝色与红色轮廓描述整体轮廓的变化, 它们都使用三个参数表示 (振幅、速度与速度弥散), 分别标注在左上角与右上角。在图的第二到七行中, 我们将主轴上对称与 $(0, 0)$ 的具有完全对称轮廓的空间像素为一组, 绘制在同一行中。例如第二行的 $(-1, 0)$ 与 $(1, 0)$, $(-1, 0)$ 的蓝色/红色轮廓与 $(1, 0)$ 的红色/蓝色轮廓具有相同的振幅、速度与速度弥散值, 以及相反的速度方向。

以从 $(0, 0)$ 到 $(-6, 0)$ 为例, 我们注意到双峰发射线轮廓的变化存在明显规律。对于振幅, 除了从 $(0, 0)$ 到 $(-1, 0)$ 过程中的蓝色轮廓出现略微增加外, 蓝色与红色轮廓都在逐渐减小, 这是因为 PSF 在逐渐远离流量最高的星系中心。在 $(-6, 0)$ 的位置, 红色轮廓的振幅已经接近于 0, 仅存在蓝色轮廓, 表明该位

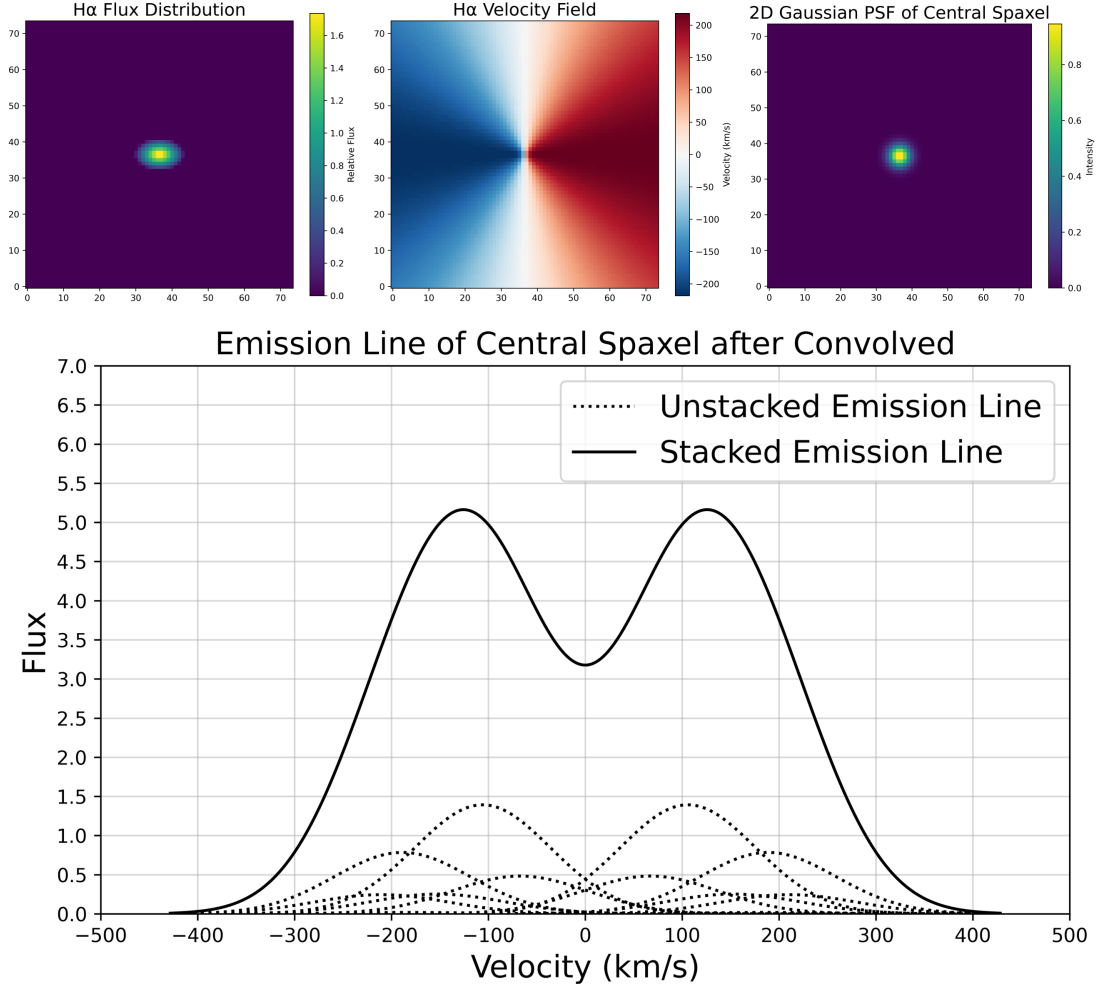


图 5-14 用于模拟发射线的三个参数的分布。左上子图：模拟的 $H\alpha$ 流量分布；中上子图：模拟的 $H\alpha$ 速度场；右上子图：中心空间像素的二维高斯 PSF；下图：中心空间像素在 PSF 效应影响下所包含的所有发射线（点线）及其叠加后的发射线（实线）。

Figure 5-14 Distribution of three parameters used to model the emission lines. Top left: Modeled $H\alpha$ flux distribution. Top middle: Modeled $H\alpha$ velocity field. Top right: 2D Gaussian PSF of Central Spaxel. Bottom: All emission lines (dotted lines, unstacked) contained in the central spaxel under the influence of the PSF effect and their stacked emission line (solid lines).

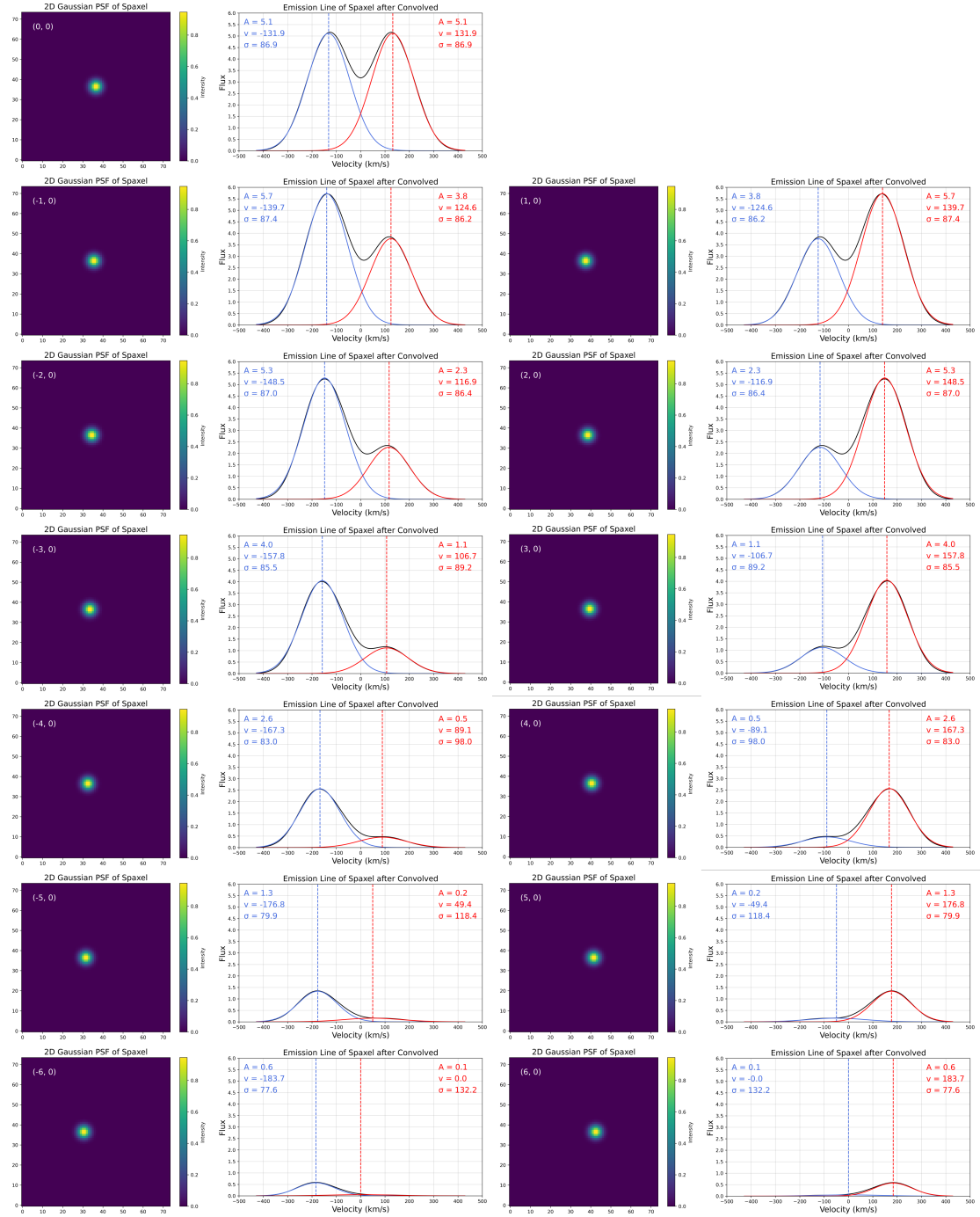


图 5-15 沿着星系主轴方向的 $H\alpha$ 双峰轮廓变化，共 13 个位置（在发射线左侧使用 PSF 标出），标记为 $(-6, 0)$ 到 $(6, 0)$ 。除了第一行的中心空间像素 $(0, 0)$ 外，其余 12 个位置以左右对称的形式在同一行中表示，如第二行为 $(-1, 0)$ 与 $(1, 0)$ 。

Figure 5-15 The $H\alpha$ double-peaked profiles vary along the major-axis direction, with a total of 13 positions, labeled from $(-6, 0)$ to $(6, 0)$. Except for the central spaxel $(0, 0)$ in the first row, the remaining 12 positions are represented in a left-right symmetric manner within the same row.

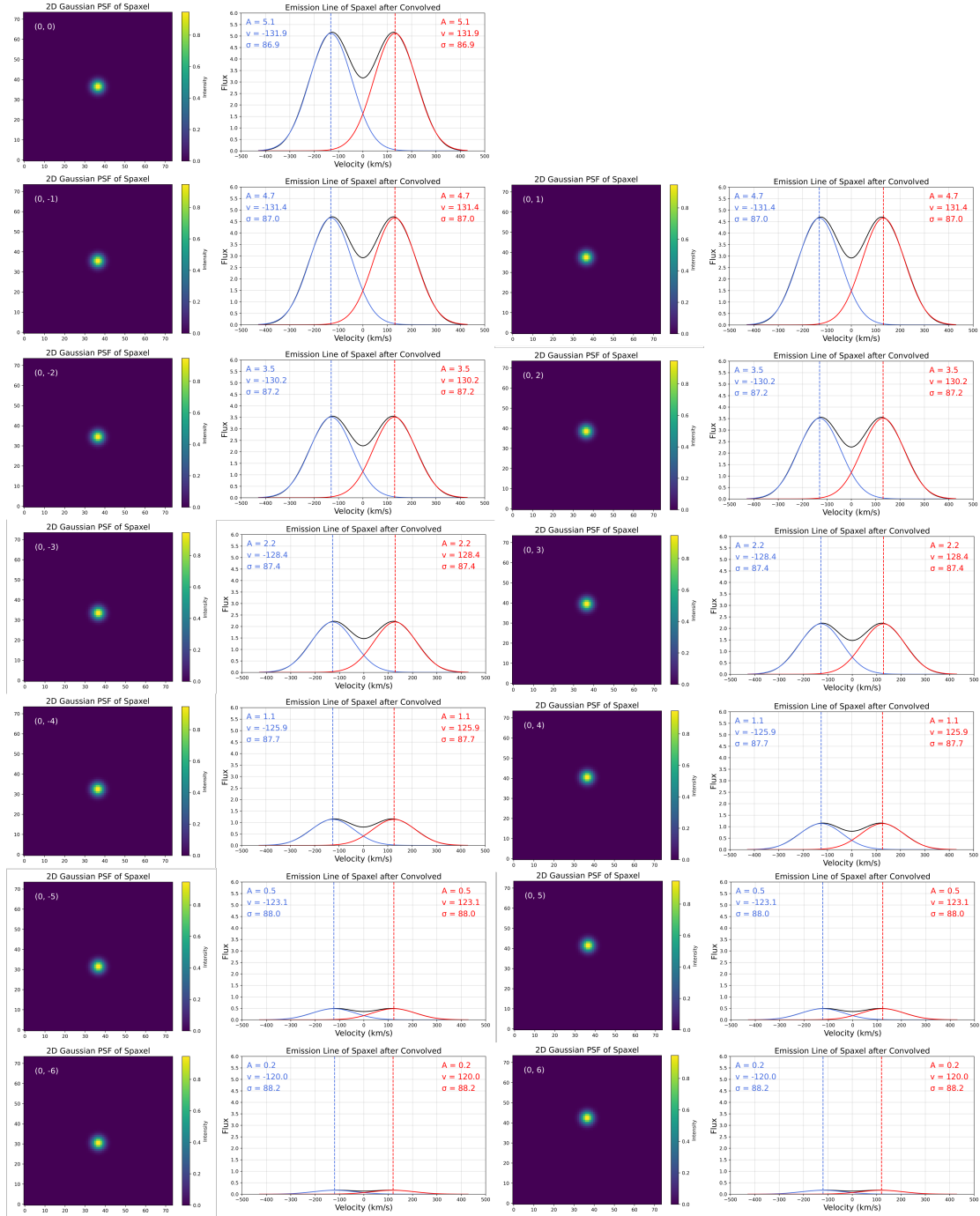


图 5-16 与图5-15相同，但沿着星系短轴方向。除了发射线整体轮廓（黑色实线）外，还给出了拟合的蓝色与红色轮廓，分别使用对应颜色的实线表示（轮廓的中心位置使用对应颜色的虚线表示）。在图的左上与右上分别列出了蓝色与红色轮廓的参数，从上到下依次是轮廓的振幅、速度与速度弥散。

Figure 5-16 The same as Fig. 5-15, but along the minor-axis direction. In addition to the overall emission line profile (black solid line), fitted blue and red profiles are also shown, represented by solid lines of corresponding colors (their central positions of the profiles are also indicated by dashed lines of corresponding colors). The parameters of the blue and red profiles are listed in the upper left and right corners of each figure, respectively, from top to bottom: profile amplitude, velocity, and velocity dispersion.

置的发射线已经趋近于单峰轮廓。对于速度，蓝色与红移轮廓都在减小，且两者的速度差也在逐渐减小；对于速度弥散，蓝色与红色轮廓在 $(0, 0)$ 到 $(-3, 0)$ 几乎不变，但从 $(-4, 0)$ 到 $(-6, 0)$ ，蓝色/红色轮廓的速度弥散分别减小/增大。

与图5-15相同，图5-16的第一行也标注为 $(0, 0)$ 。但在第二到七行中，我们将短轴上对称与 $(0, 0)$ 的具有完全对称轮廓的空间像素为一组，绘制在同一行中。例如第二行的 $(0, -1)$ 与 $(0, 1)$ ， $(0, -1)$ 与 $(0, 1)$ 具有完全相同的轮廓，且蓝色与红色轮廓具有相同的振幅、速度与速度弥散值，以及相反的速度方向。

同样以从 $(0, 0)$ 到 $(0, -6)$ 为例，我们也注意到双峰发射线轮廓的变化存在明显规律。对于振幅，蓝色与红色轮廓都在逐渐减小，这同样是因为 PSF 在逐渐远离流量最高的星系中心。在 $(0, -6)$ 的位置，蓝色与红色轮廓的振幅都接近于 0，表明该位置的发射线已经非常弱。对于速度与速度弥散，蓝色与红移轮廓几乎不变，且两者的速度差也几乎不变。

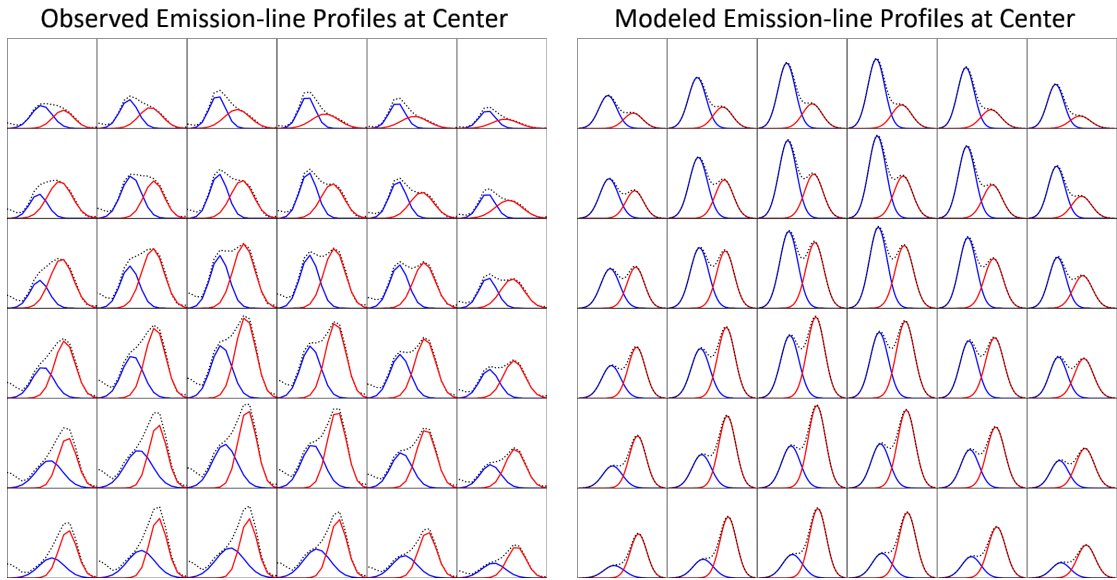


图 5-17 观测到的样本 DPG 中心 6×6 空间像素的发射线轮廓（左图）与模拟得到的结果（右图）。蓝色与红色轮廓分别表示双高斯函数拟合双峰窄发射线的结果，黑色虚线则表示整体的发射线轮廓。

Figure 5-17 The emission line profiles of the observed sample DPG at center 6×6 spaxels (left) and the modeled results (right). The blue and red profiles represent the results of fitting the double-peaked narrow emission lines with double Gaussian profiles, and the black dashed lines are the overall profiles of emission lines.

最后，我们注意到图2-3右侧子图中，蓝移与红移成分发射线的轮廓在空间上存在一定变化。这里我们将模拟的空间像素发射线应用到整个空间内，查看模拟的结果与实际观测到的结果之间是否一致。我们从模拟的 $H\alpha$ 速度场选择中心 6×6 范围内的空间像素，将观测到的样本 DPG 的发射线结果如图5-17左侧子图所示，模拟结果如右侧子图所示。所有发射线的参数可以在图5-18中看到。我们注意到，对于速度与弥散这两个参数，它们在 6×6 空间像素上的观测结果与模

拟结果具有非常相似的空间变化趋势；对于流量，观测到的红移成分的流量峰值位置与模拟结果相似，但蓝移成分的结果明显不同。

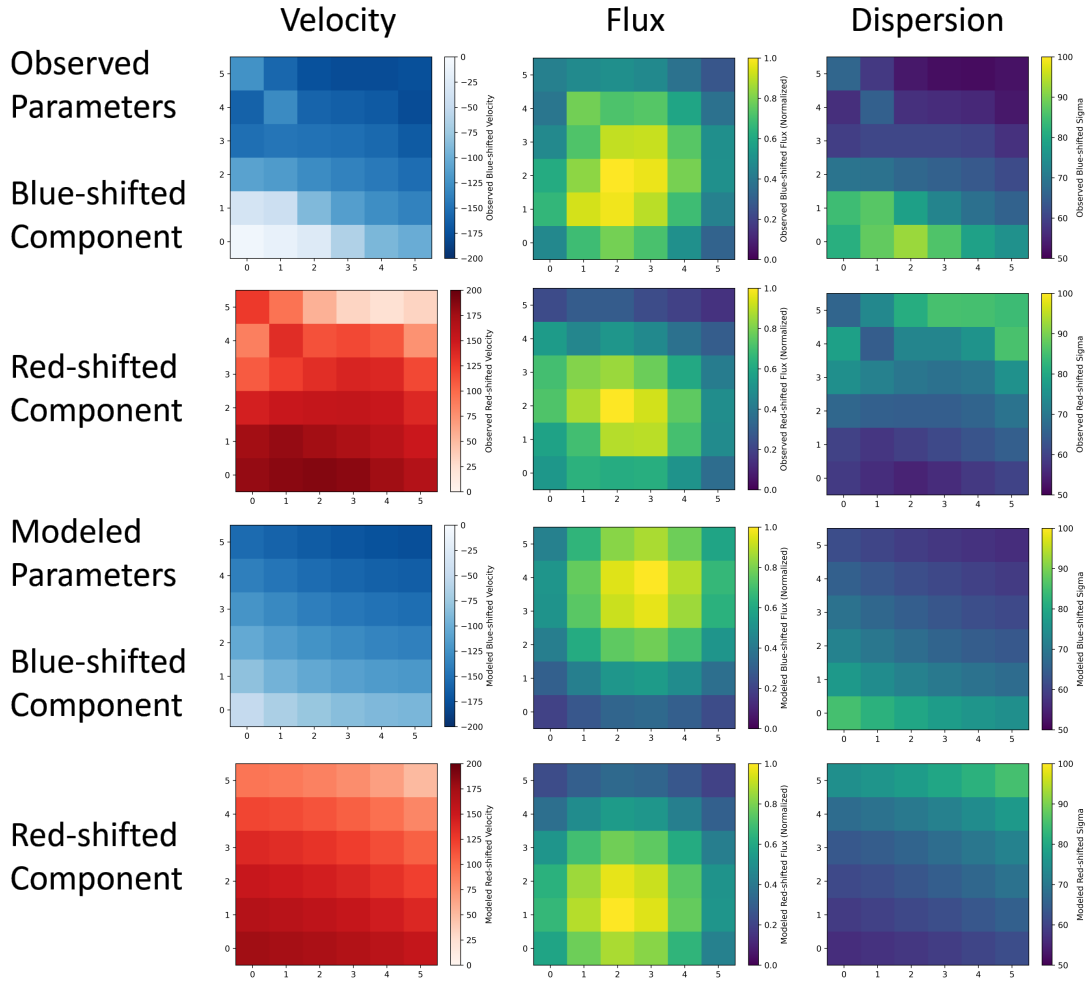


图 5-18 用于描述双峰轮廓的参数，来自图5-17。从左到右的三列分别表示高斯轮廓的速度、流量以及速度弥散。从上到下的四行分别表示观测的蓝移成分、观测的红移成分、模拟的蓝移成分、模拟的红移成分。

Figure 5-18 Parameters used to describe the double-peaked profiles, taken from Fig. 5-17. The three columns from left to right represent the velocity, flux, and dispersion of the Gaussian profile, respectively. The four rows from top to bottom represent the observed blue-shifted component, the observed red-shifted component, the modeled blue-shifted component, and the modeled red-shifted component, respectively.

图5-19进一步给出了观测与模拟结果的差异。对于速度，观测与模拟的蓝移/红移成分的速度在蓝移（上半部分）/红移（下半部分）成分主导区域内的差异较小（不超过 20 km/s），在红移/蓝移成分主导区域内的差异较大（约为 40 km/s）；对于流量，观测与模拟的红移成分的流量几乎相同，但蓝移成分有明显的梯度变化，在蓝移成分主导区域内的观测结果明显偏小，而在红移成分主导区域内的观测结果则偏大；对于速度弥散，观测的蓝移/红移成分的速度弥散比模拟的结果都偏大，但最显著的偏差出现在蓝移/红移成分主导区域内观测到的红移/蓝移的

速度弥散。

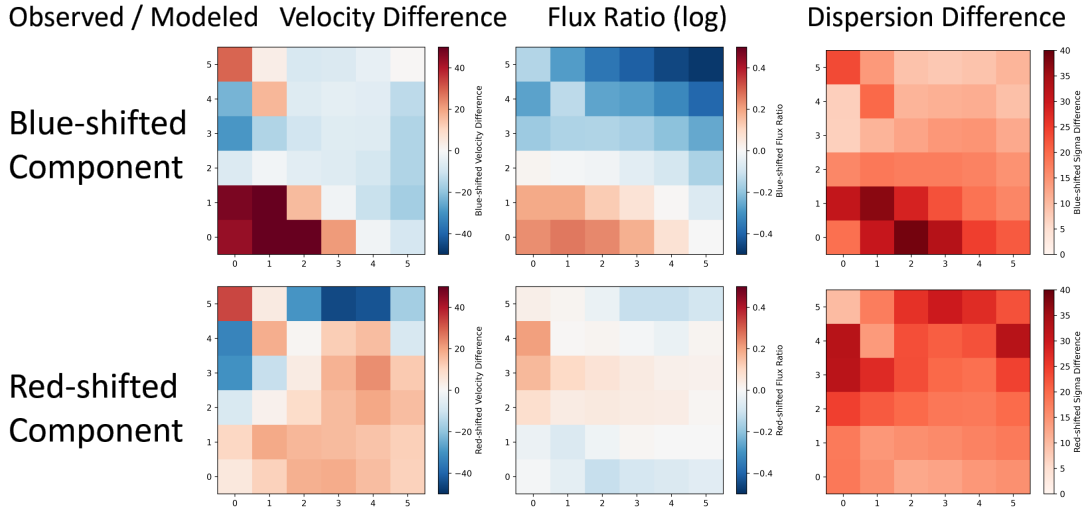


图 5-19 用于描述观测到的双峰轮廓参数与模拟结果之间的差异，来自图5-18第一行与第三行、第二行与第四行的比较。从左到右的三列分别表示红移成分与蓝移成分的速度差、流量比（对数形式）以及速度弥散差。上下两行分别是蓝移与红移成分的比较结果。

Figure 5-19 The differences between the observed double-peaked profile parameters and the modeled results, from Fig. 5-18. The three columns from left to right represent the velocity difference, the flux ratio (logarithmic form), and the velocity dispersion difference between the redshift component and the blueshift component, respectively. The top and bottom rows are the comparison results of the blue-shifted and red-shifted components, respectively.

图5-20则给出了观测与模拟中，描述蓝移与红移之间差异的图像。对于速度差，模拟结果更加均匀（最大与最小值相差约 50 km/s），观测结果的范围在 200 - 300 km/s 之间，且最大速度差的位置出现在中心偏右的位置，并不完全对称。对于流量比，模拟结果呈现出明显的梯度变化，而观测结果由于之前提到的“蓝移成分的流量峰值位置”显得整体上的红移成分占比更高。对于速度弥散差，两者的结果比较相似，都呈现出明显的梯度变化，但观测结果的范围（约 80 km/s）比模拟的结果（约 60 km/s）略大。

结合以上对样本 DPG 中心 6×6 范围内空间像素的观测与模拟发射线的比较，我们认为我们的方法能够比较好地还原其中心双峰窄发射线轮廓，但仍然存在一些问题。首先，我们的一维去卷积方法无法还原蓝移与红移成分流量不一致的情况，这使得我们模拟得到的蓝移成分的流量在蓝移为主导的空间像素中整体偏大，与观测结果不符。其次，尽管我们在模拟蓝移/红移为主导的空间像素中得到的蓝移/红移成分的速度与观测到的结果非常相近，但得到的红移/蓝移成分的速度差异较大。最后，模拟得到的速度弥散以及弥散差普遍小于观测到的结果。对于后两种情况，我们猜测这可能是因为在观测中，较小的成分受到周围 [N II] 发射线以及谱本身噪声的影响较大，而我们的模拟并没有考虑这些因素。我们将观测到的有棒 DPG (MaNGA-ID 1-593159) 的核环半径 ($r_{\text{NR}} = 1''.9$)

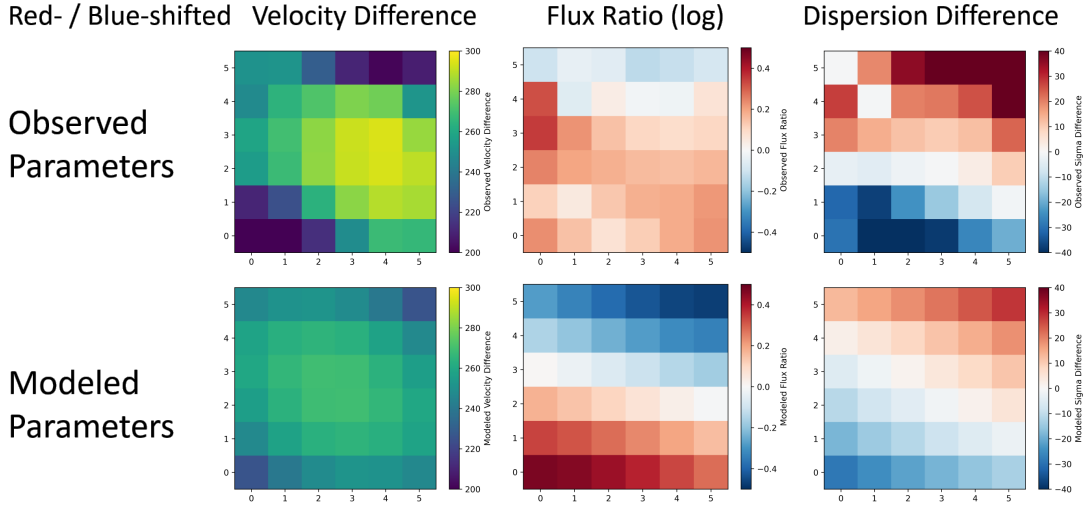


图 5-20 用于描述蓝移与红移之间差异，来自图5-18第一行与第二行、第三行与第四行的比较。从左到右的三列分别表示红移成分与蓝移成分的速度差、流量比（对数形式）以及速度弥散差。上下两行分别是蓝移与红移成分的比较结果。

Figure 5-20 The differences between the blue- and red-shifted components, from Fig. 5-18. The three columns from left to right represent the velocity difference, the flux ratio (logarithmic form), and the velocity dispersion difference between the redshift component and the blueshift component, respectively. The top and bottom rows are the comparison results of the blue-shifted and red-shifted components, respectively.

以及最大速度差 ($\Delta v_{\text{max,DPS}} = 295 \text{ km/s}$) 与模拟得到 (如图5-15与5-16) 的具有双峰特征的最大中心距 ($r \sim 2''.5$) 以及最大速度差 ($\Delta v = 264 \text{ km/s}$)，发现我们的模拟方法已经能够较好地模拟出观测到的结果。

最后，我们对样本 DPG 的旋转曲线及其蓝移与红移成分的速度分布进行解释。如图5-21所示，黑点表示 MaNGA DAP 给出空间像素的中心距与速度（包括 DPSs），蓝色与红色点表示 DPSs 中蓝移与红移成分的速度。考虑到蓝移与红移成分的速度在物理上并没有对应的结构，我们没有修正倾角的影响。虚线表示拟合的旋转曲线，蓝色与红色实线表示模拟得到蓝移与红移成分的速度分布。

我们注意到，蓝色以及红色实线的一段与旋转曲线的平坦部分相连，表明双峰特征在向外的过程中会退化为单峰状态。蓝色与红色点与对应颜色实线在靠近旋转曲线一端比较相似，因为在这些位置蓝移与红移成分各自占据主导；在远离旋转曲线一端，观测到的结果下降得更快，这是由于在蓝移与红移成分不再占据主导后，其受到 [N II] 发射线以及谱本身噪声的影响较大，使得它们与模拟的结果差异较大。

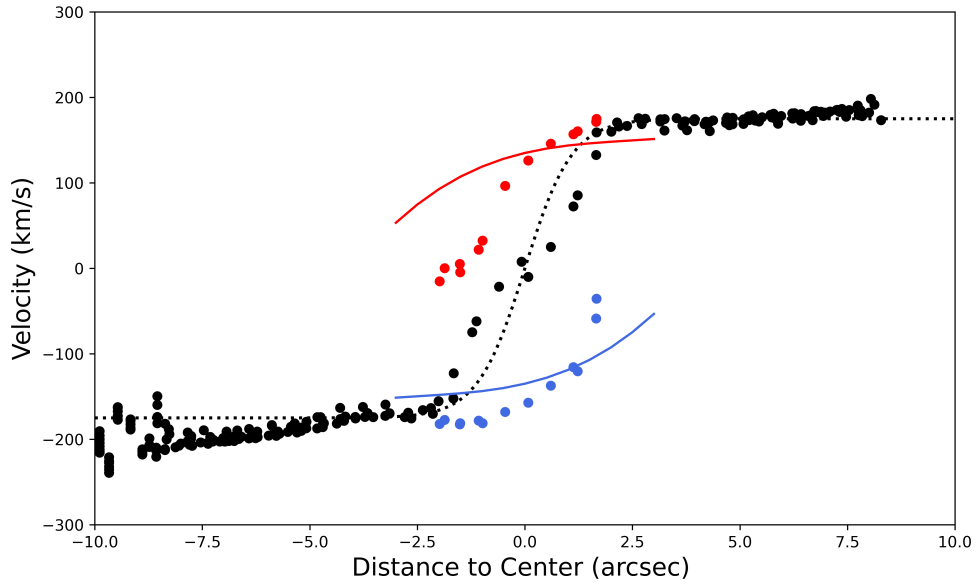


图 5-21 样本 DPG 的旋转曲线（没有消除倾角影响）。黑点表示 MaNGA DAP 给出空间像素的中心距与速度，蓝色与红色点表示 DPSs 中蓝移与红移成分的速度。虚线表示拟合的旋转曲线，蓝色与红色实线表示模拟得到蓝移与红移成分的速度分布。

Figure 5-21 Rotation curve of sample DPG (without eliminating the effect of inclination). Black dots represent the center distance and velocity given by MaNGA DAP, while blue and red dots represent the velocities of the blue- and red-shifted components in DPSs. The dashed line represents the fitted rotation curve, while the blue and red solid lines represent the velocity distributions of the blue- and red-shifted components obtained from our model.

5.6 小结

在这项工作中，我们通过研究具有双峰窄发射线的有棒星系，探讨了其双峰特征的物理起源。通过对 72 个有棒双峰窄发射线星系的形态和运动学参数进行分析，我们检验了两种可能的物理机制：棒中气体内流以及与棒相关的气体核环。我们的结果表明，棒中气体内流的假设无法很好地解释这些星系中的双峰特征，因为大多数有棒 DPGs 的棒的方位角与星系主轴接近平行，而非该假设预期的垂直于主轴。相反，我们发现气体核环的半径与 DPSs 的最大中心距之间存在显著的相关性，且核环形成的理论速度差与 DPSs 的最大速度差也存在一定的相关性。这些发现表明，双峰特征更可能是由与棒相关的气体核环引起的。之后，我们通过模拟有棒 DPG 的 $H\alpha$ 速度场和流量分布，进一步验证了气体核环在产生双峰特征中的作用。尽管模拟结果与观测数据基本一致，但观测到的 $H\alpha$ 速度场显示出更多的扰动，表明星系内部的复杂动力学过程可能对双峰特征的形成有重要影响。总体而言，这项工作为理解有棒星系中双峰窄发射线的物理起源提供了有力的证据，并揭示了气体核环在星系中心动力学中的重要作用。

第6章 总结与展望

6.1 本文结论

本论文基于斯隆数字巡天的 MaNGA 积分视场光谱数据，系统研究了双峰窄发射线星系的分类及其物理起源。通过分析星系光谱中的双峰窄发射线特征，我们发现在这些星系中存在不同速度的气体成分，并探讨了其可能的物理机制。本论文的研究主要分为两个主要部分：第一部分是对双峰窄发射线星系的分类以及它们与星系中的结构特征之间的关系进行研究；第二部分则聚焦于具有各种结构特征的星系中双峰窄发射线的物理起源，探讨棒是如何产生双峰特征的。

在第一部分的研究中，我们通过 MaNGA 巡天的数据，筛选出了 5420 个双峰窄发射线空间像素，这些 DPSs 分布在 304 个 DPGs。通过对这些 DPSs 的分析，我们发现它们可以根据其到星系中心的距离 (r/R_e) 和双峰之间的速度差 (Δv) 划分为三种类型：内部低 Δv 、内部高 Δv 和外部 DPSs。

(1) 内部低 Δv 的 DPSs 主要分布在星系的中心区域，且速度差较小。我们发现这些 DPSs 与有棒星系之间存在显著的统计相关性。棒结构被认为是星系中气体内流的通道，可能导致星系中心区域的气体运动速度与星系整体旋转速度之间存在差异，从而产生双峰特征。

(2) 内部高 Δv 的 DPSs 分布在星系的中心区域，但速度差较大。我们发现这些 DPSs 与活动星系核宿主星系之间存在显著的相关性。AGN 驱动的外流或双锥形喷流可能是导致这些高速度差双峰特征的原因。AGN 的外流速度通常在几百到上千公里每秒，这与我们观测到的高 Δv 的 DPSs 的速度差范围一致。

(3) 外部 DPSs 分布在星系的外围区域且速度差较大。我们发现这些 DPSs 与具有潮汐特征的星系（如并合星系）之间存在显著的相关性。星系并合过程中的潮汐力可能导致星系外围的气体运动速度发生剧烈变化，从而产生双峰特征。

通过进一步分析 DPGs 的物理性质，我们发现 DPGs 的恒星质量、比恒星形成率和气体速度场的不对称性均显著高于无双峰特征的对照样本。这表明双峰窄发射线星系通常具有更高的恒星形成活动和更复杂的动力学结构。此外，DPGs 中棒、AGN 和潮汐特征的比例也显著高于对照样本，进一步支持了双峰特征与这些结构特征之间的物理联系。

在第二部分的研究中，我们聚焦于具有各种结构特征的星系中双峰窄发射线的物理起源。对于具有双峰特征的潮汐特征与 AGN 宿主星系，它们可能分别起源于中心星系及其伴星系与中心星系及其外流。这与之前的研究结果相同。有一些同时具有潮汐特征与 AGN 的双峰窄发射线星系，它们在形态上近似双 AGN。而在 DPGs 样本中占有显著比例的有棒星系，其双峰特征的物理机制尚未得到充分研究。我们提出了两种可能的物理机制：棒中气体内流和与棒相关的气体核环。

(1) 我们首先检验了棒中气体内流导致双峰特征的假设。通过分析有棒 DPGs 及其棒的形态参数，特别是星系主轴与棒方向之间的夹角，我们发现大多数有棒 DPGs 的棒方向与星系主轴方向接近平行，而不是假设中的垂直情况。因此，棒中气体内流并不能很好地解释这些星系中的双峰特征。

(2) 我们进一步研究了与棒相关的气体核环导致双峰特征的可能性。通过计算有棒 DPGs 的气体核环半径和核环旋转速度，我们发现核环半径与 DPSs 的最大中心距之间存在显著的相关性。此外，核环旋转速度对应的理论双峰速度差与 DPSs 的最大速度差之间也存在一定的相关性。这些结果表明，与棒相关的气体核环可以较好地解释有棒 DPGs 中的双峰特征。

为了进一步验证这一结论，我们通过模拟有棒星系的气体速度场和流量分布，还原了双峰窄发射线的形成过程。我们发现，气体核环的旋转速度在星系中心区域的快速变化是导致双峰特征的主要原因。模拟结果与观测数据的一致性进一步支持了气体核环作为双峰特征起源的假设。总之，棒状结构可以引发核环的形成，而核环中电离气体的发射线在一定的观测条件下可以呈现出双峰特征，对于 MaNGA 数据集来说，这些观测条件可能是相当严格的，这就导致了 MaNGA 中的大多数棒状星系并没有显示出清晰的 DPS 特征。

6.2 未来工作

探索具有双峰窄发射线特征的星系在未来具有广阔的研究前景与重要的科学意义。我们在以下几个方面展示有关它们对未来的工作的影响。

首先，双峰窄发射线星系的双峰特征起源于 AGN 导致的外流，这种现象同样在绿豌豆星系（Green Peas）中被发现。这些星系具有极强的发射线，尤其是电离 $[\text{O III}]\lambda\lambda 4960, 5008 \text{ \AA}$ 双线，被认为是早期星系在近邻宇宙中的对应体。由 $\text{H}\alpha \lambda 6564 \text{ \AA}$ - $[\text{N II}]\lambda\lambda 6549, 6586 \text{ \AA}$ 三线与由 $[\text{O III}]\lambda\lambda 4960, 5008 \text{ \AA}$ 双线分别发现的双峰特征可能在一部分星系中得到交叉印证，有助于揭示大质量星系与其中超大质量黑洞的联合演化机制，进一步理解早期宇宙中星系的形成与演化。双峰窄发射线星系的双峰特征也可能与双 AGN 并合有关，这对于研究宇宙中的星系并合提供了重要线索，有助于构建更完整的宇宙中的星系并合历史，揭示宇宙的结构形成与演化。

其次，双峰窄发射线星系的双峰特征起源于并合系统中星系的相互作用，这对于研究通过理论模型与数值模拟来揭示处于并合过程中星系的气体动力学以及恒星运动有非常大的帮助。数值模拟技术的进步，如基于半解析模型和暗物质并合树的发射线自洽建模，将量化双峰星系在宇宙学尺度上的偏袒因子及其演化规律，为星系并合率与 AGN 触发机制提供更严格的约束。未来的理论研究可以结合更多的观测数据，进一步完善并合系统的物理模型，更准确地预测与解释观测到的潮汐现象，推动对星系并合与演化的理解。而对于有棒星系来说，尽管提出了多种机制，比如棒状体诱导的非圆运动，但人们对棒状体在星系中的作用仍然知之甚少，尤其是在区分气体流入和核环方面。区分这两种机制至关重要，

因为核环中的气体可以为中心黑洞提供燃料，而棒状体诱导的气体流入可能表明其不同的传输路径。因此，弄清这些棒状星系双峰特征的物理起源，对于更好地理解与棒状星系有关的动力学过程大有帮助。

最后，随着新一代望远镜的投入使用，天文学家能够获取更高分辨率、更高质量的光谱数据，并结合更多波段的数据，以更全面地理解双峰窄发射线星系的物理性质。对于可能的气体核环导致的双峰窄发射线星系，它们核环通常位于难以直接分辨的中心位置，通过 MaNGA 数据集中的双峰发射线轴间接识别气体核环，我们为研究核环的运动学和动力学行为开辟了一条新途径，能够更加精确地测量核环相关的特征与物理性质，并根据例如 X 射线、中红外、射电等多波段的观测数据，推动对这些星系中核环的理解。双峰窄发射线星系研究的未来展望将围绕多波段协同观测、高分辨率成像与动力学建模的深度融合展开，下一代大型巡天项目如中国巡天空间望远镜（CSST）和更高灵敏度的积分场光谱仪将大幅提升样本统计质量与空间分辨率，解决当前双峰特征物理起源证认的不确定性难题。

参考文献

- [1] Springel V. The cosmological simulation code gadget-2 [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, 364(4): 1105-1134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09655.x>.
- [2] Benson A J. Galaxy formation theory [J/OL]. Physics Reports, 2010, 495(2): 33-86. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037015731000150X>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.06.001>.
- [3] Rubinur K, Das M, Kharb P, et al. A candidate dual AGN in a double-peaked emission-line galaxy with precessing radio jets [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 465(4): 4772-4782. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2981>.
- [4] Abdurro'uf, Accetta K, Aerts C, et al. THE SEVENTH DATA RELEASE OF THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY [J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2009, 182(2): 543-558. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/182/2/543>.
- [5] Shi Z, Luo A, Comte G, et al. A search for double-peaked narrow emission line galaxies and agns in the lamost dr1 [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14: 1234-1250.
- [6] Wang M X, Luo A L. Stellar population analysis on the stacked spectra of double-peaked emission-line galaxies [J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(9): 126. <https://dx.doi.org/10.1088/1674-4527/19/9/126>.
- [7] 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 FUNCTION TO THE DERIVED PHYSICAL PROPERTIES OF GALAXIES [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2009, 699(1): 486-506. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/699/1/486>.
- [8] Conroy C. Modeling the panchromatic spectral energy distributions of galaxies [J/OL]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2013, 51(1): 393-455. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082812-141017>.
- [9] Tremonti C, 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]. The Astrophysical Journal, 2004, 613: 898-913.
- [10] Kewley L J, Nicholls D C, Sutherland R. Understanding galaxy evolution through emission lines [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2019.
- [11] Heckler K F, Ricci T V, Riffel R A. IFU observations of the inner 200 pc of NGC 4546: gas rotation, non-circular motions, and ionized outflows [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022, 517(4): 5959-5970. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3041>.
- [12] Wang W J, Liu X W, Zhang Y, et al. A reexamination of electron density diagnostics for ionized gaseous nebulae [J]. Astronomy and Astrophysics, 2004, 427: 873-886.
- [13] Gunn J E, Siegmund W A, Mannery E J, et al. The 2.5 m telescope of the sloan digital sky survey [J/OL]. The Astronomical Journal, 2006, 131(4): 2332-2359. <https://doi.org/10.1086/500975>.
- [14] 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]. The Astronomical Journal (Online), 2017, 154(1). DOI: [10.3847/1538-3881/aa7567](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa7567).

- [15] S'anchez S F, P'erez E A S, S'anchez-BI'azquez P, et al. Pipe3d, a pipeline to analyze integral field spectroscopy data: Ii. analysis sequence and califa dataproducts [J]. *Revista Mexicana De Astronomia Y Astrofisica*, 2016, 52: 171-220.
- [16] Quirrenbach A, Larkin J, Barczys M, et al. Osiris: Ao-assisted integral-field spectroscopy at the keck observatory [J/OL]. *New Astronomy Reviews*, 2006, 49(10): 639-646. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387647305001260>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.newar.2005.10.018>.
- [17] Macintosh B A, Graham J R, Palmer D W, et al. The Gemini Planet Imager: from science to design to construction [C/OL]//Hubin N, Max C E, Wizinowich P L. *Adaptive Optics Systems: volume 7015*. SPIE, 2008: 701518. <https://doi.org/10.1117/12.788083>.
- [18] Groff T D, Kasdin N J, Limbach M A, et al. The CHARIS IFS for high contrast imaging at Subaru [C/OL]//Shaklan S. *Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VII: volume 9605*. SPIE, 2015: 96051C. <https://doi.org/10.1117/12.2188465>.
- [19] Sánchez, S. F., Kennicutt, R. C., Gil de Paz, A., et al. Califa, the calar alto legacy integral field area survey - i. survey presentation★ [J/OL]. *A&A*, 2012, 538: A8. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117353>.
- [20] Croom S M, Lawrence J S, Bland-Hawthorn J, et al. The sydney-aao multi-object integral field spectrograph [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 421(1): 872-893. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.20365.x>.
- [21] 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]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 798(1): 7. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/798/1/7>.
- [22] Urrutia, T., Wisotzki, L., Kerutt, J., et al. The muse-wide survey: survey description and first data release★★★ [J/OL]. *A&A*, 2019, 624: A141. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834656>.
- [23] Bacon R, Accardo M, Adjali L, et al. The MUSE second-generation VLT instrument [C/OL]//McLean I S, Ramsay S K, Takami H. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III: volume 7735*. SPIE, 2010: 773508. <https://doi.org/10.1117/12.856027>.
- [24] Jakobsen, P., Ferruit, P., Alves de Oliveira, C., et al. The near-infrared spectrograph (nirspec) on the james webb space telescope - i. overview of the instrument and its capabilities [J/OL]. *A&A*, 2022, 661: A80. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142663>.
- [25] Law D R, Cherinka B, Yan R, et al. The data reduction pipeline for the sdss-iv manga ifu galaxy survey [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2016, 152(4): 83. <https://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/152/4/83>.
- [26] Westfall K B, Cappellari M, Bershadsky M A, et al. The data analysis pipeline for the sdss-iv manga ifu galaxy survey: Overview [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2019, 158(6): 231. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ab44a2>.
- [27] 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]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 435(4): 2835-2860. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt1458>.
- [28] Cherinka B, Andrews B H, Sánchez-Gallego J, et al. Marvin: A tool kit for streamlined access and visualization of the sdss-iv manga data set [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 2019, 158(2): 74. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ab2634>.

- [29] Ge J Q, Hu C, Wang J M, et al. DOUBLE-PEAKED NARROW EMISSION-LINE GALAXIES FROM THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY. i. SAMPLE AND BASIC PROPERTIES [J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2012, 201(2): 31. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/201/2/31>.
- [30] Nevin R, Comerford J, Müller-Sánchez F, et al. The origin of double-peaked narrow lines in active galactic nuclei. ii. kinematic classifications for the population at $z < 0.1$ [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2016, 832(1): 67. <https://doi.org/10.3847/0004-637x/832/1/67>.
- [31] Wang M X, Luo A L, Song Y H, et al. Double-peaked narrow emission-line galaxies in LAMOST survey [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 482(2): 1889-1899. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2818>.
- [32] Heckman, T., M., et al. Emission-line profiles and kinematics of the narrow-line region in seyfert and radio galaxies [J]. ApJ, 1981, 247: 403-403.
- [33] Heckman T M, Miley G K, Green R F. The kinematics of the narrow-line region in active galaxies and quasars. iii - correlations with the broad-line region and radio emission [J]. Astrophysical Journal, 1984, 281(2): 525-534.
- [34] Xu D, Komossa S. Narrow double-peaked emission lines of sdss j131642.90+175332.5: Signature of a single or a binary agn in a merger, jet-cloud interaction, or unusual narrow-line region geometry [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2009, 705(1): L20-L24. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/705/1/L20>.
- [35] Eracleous M, Halpern J P. Doubled-peaked emission lines in active galactic nuclei [J]. Astrophysical Journal Supplement, 1994, 90(1): 1-30.
- [36] Maschmann D, Melchior A L, Mamon G A, et al. Double-peak emission line galaxies in the sdss catalogue. a minor merger sequence [J]. Astronomy and Astrophysics, 2020, 641.
- [37] Smith K L, Shields G A, Bonning E W, et al. A SEARCH FOR BINARY ACTIVE GALACTIC NUCLEI: DOUBLE-PEAKED [o III] AGNs IN THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2010, 716(1): 866-877. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/716/1/866>.
- [38] Liu X, Shen Y, Strauss M A, et al. TYPE 2 ACTIVE GALACTIC NUCLEI WITH DOUBLE-PEAKED [o III] LINES: NARROW-LINE REGION KINEMATICS OR MERGING SUPERMASSIVE BLACK HOLE PAIRS? [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2009, 708(1): 427-434. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/708/1/427>.
- [39] Eracleous M, Boroson T A, Halpern J P, et al. A LARGE SYSTEMATIC SEARCH FOR CLOSE SUPERMASSIVE BINARY AND RAPIDLY RECOILING BLACK HOLES [J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2012, 201(2): 23. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/201/2/23>.
- [40] Pilyugin L S, Zinchenko I A, Cedrés B, et al. SDSS galaxies with double-peaked emission lines: double starbursts or active galactic nuclei? [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, 419(1): 490-502. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19714.x>.
- [41] Müller-Sánchez F, Comerford J M, Nevin R, et al. THE ORIGIN OF DOUBLE-PEAKED NARROW LINES IN ACTIVE GALACTIC NUCLEI. i. VERY LARGE ARRAY DETECTIONS OF DUAL AGNs AND AGN OUTFLOWS [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2015, 813(2): 103. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/813/2/103>.
- [42] Nevin R, Comerford J M, Müller-Sánchez F, et al. The origin of double-peaked narrow lines in active galactic nuclei –III. Feedback from biconical AGN outflows [J/OL]. Monthly Notices

- of the Royal Astronomical Society, 2017, 473(2): 2160-2187. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2433>.
- [43] Comerford J M, Nevin R, Stemo A, et al. The origin of double-peaked narrow lines in active galactic nuclei. IV. association with galaxy mergers [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2018, 867(1): 66. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae2b4>.
- [44] Drory N, MacDonald N, Bershadsky M A, et al. THE MANGA INTEGRAL FIELD UNIT FIBER FEED SYSTEM FOR THE SLOAN 2.5 m TELESCOPE [J/OL]. The Astronomical Journal, 2015, 149(2): 77. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/149/2/77>.
- [45] Yazeedi A A, Katkov I Y, Gelfand J D, et al. The impact of low-luminosity AGNs on their host galaxies: A radio and optical investigation of the kiloparsec-scale outflow in MaNGA 1-166919 [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2021, 916(2): 102. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abf5e1>.
- [46] Ciraulo B, Melchior A, Maschmann D, et al. Two interacting galaxies hiding as one, revealed by manga [J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 2021, 653. DOI: [10.1051/0004-6361/202141319](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141319).
- [47] Fu Y, Cappellari M, Mao S, et al. A complete catalogue of broad-line agns and double-peaked emission lines from manga integral-field spectroscopy of 10k galaxies: stellar population of agns, supermassive black holes, and dual agns [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2023.
- [48] Dojcinovic I, Kovacevic-Dojcinovic J, Popovic L C. The flux ratio of the [n ii] $\lambda\lambda$ 6548, 6583Å lines in sample of active galactic nuclei type 2 [J/OL]. Advances in Space Research, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117722003064>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.041>.
- [49] Liddle A R. Information criteria for astrophysical model selection [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2007, 377(1): L74-L78. <https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2007.00306.x>.
- [50] 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]. The Astrophysical Journal, 2007, 671(1): 153. <https://dx.doi.org/10.1086/522027>.
- [51] Kennicutt R C. Star formation in galaxies along the hubble sequence [J/OL]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1998, 36(1): 189-231. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.36.1.189>.
- [52] 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]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2022, 262(1): 6. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4365/ac80f2>.
- [53] Feng S, Shen S Y, Yuan F T, et al. Sdss-iv manga: Kinematic asymmetry as an indicator of galaxy interaction in paired galaxies [J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 2020, 892(2): L20. <https://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ab7dba>.
- [54] Baldwin J A, Phillips M M, Terlevich R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects [J/OL]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1981, 93: 5. <https://doi.org/10.1086/130766>.
- [55] Kewley L J, Dopita M A. Using strong lines to estimate abundances in extragalactic h ii regions and starburst galaxies [J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2002, 142(1): 35-52. <https://doi.org/10.1086/341326>.
- [56] Kewley L J, Groves B, Kauffmann G, et al. The host galaxies and classification of active

- galactic nuclei [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, 372(3): 961-976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10859.x>.
- [57] Best P N, Heckman T M. On the fundamental dichotomy in the local radio-AGN population: accretion, evolution and host galaxy properties [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 421(2): 1569-1582. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20414.x>.
- [58] Cappellari M, McDermid R M, Alatalo K, et al. The ATLAS^{3D} project - XX. Mass-size and mass- σ distributions of early-type galaxies: bulge fraction drives kinematics, mass-to-light ratio, molecular gas fraction and stellar initial mass function [J/OL]. MNRAS, 2013, 432: 1862-1893. DOI: [10.1093/mnras/stt644](https://doi.org/10.1093/mnras/stt644).
- [59] Maschmann D, Halle A, Melchior A L, et al. The origin of double-peak emission-line galaxies: Rotating discs, bars, or galaxy mergers? [J/OL]. A&A, 2023, 670: A46. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244746>.
- [60] Ellison S L, Patton D R, Simard L, et al. Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey –II. The effect of environment on interactions [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 407(3): 1514-1528. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17076.x>.
- [61] Patton D R, Torrey P, Ellison S L, et al. Galaxy pairs in the sloan digital sky survey –vi. the orbital extent of enhanced star formation in interacting galaxies [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2013, 433(1): L59-L63. <https://doi.org/10.1093/mnras/slt058>.
- [62] Ellison S L, Viswanathan A, Patton D R, et al. A definitive merger-agn connection at $z \sim 0$ with cfis: mergers have an excess of agn and agn hosts are more frequently disturbed [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 487(2): 2491-2504. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1431>.
- [63] Lu S, Gu Q, Ge X, et al. Asymmetric star formation triggered by gas inflow in a barred lenticular galaxy pgc 34107 [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2022, 927(2): 215. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac4be1>.
- [64] Feng Z X, Li Z, Shen J, et al. Bar-driven gas dynamics of m31 [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2024, 963(1): 22. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ad13ee>.
- [65] Kim T, Gadotti D A, Querejeta M, et al. Impacts of bar-driven shear and shocks on star formation [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2024, 968(2): 87. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ad410e>.
- [66] Lindblad B. On the possibility of a quasi-stationary spiral structure in galaxies [J]. Stockholms Observatoriums Annaler, 1963, 5.
- [67] Aswathy S, Ravikumar C D. Co-evolution of nuclear rings, bars and the central intensity ratio of their host galaxies [J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20(2): 015. <https://dx.doi.org/10.1088/1674-4527/20/2/15>.
- [68] Sormani M C, Sobacchi E, Sanders J L. Nuclear rings are the inner edge of a gap around the lindblad resonance [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2024, 528(4): 5742-5762. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae082>.
- [69] Yang Y, Irwin J, Li J, et al. Chang-es. xxiv. first detection of a radio nuclear ring and potential llagn in ngc 5792 [J/OL]. The Astrophysical Journal, 2022, 927(1): 4. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac4ae7>.
- [70] Sparke L S, Gallagher J S I. Galaxies in the universe - 2nd edition [J]. Galaxies in the Universe

- 2nd Edition, by Linda S. Sparke and John S. Gallagher, III, pp. 406. Cambridge University Press, 2006, 2006.
- [71] Schmidt E O, Mast D, Díaz R J, et al. Circumnuclear rings and lindblad resonances in spiral galaxies [J/OL]. The Astronomical Journal, 2019, 158(2): 60. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ab2882>.
 - [72] Erwin P. The frequency and sizes of inner bars and nuclear rings in barred galaxies and their dependence on galaxy properties [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2023, 528(2): 3613-3628. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3944>.
 - [73] Masters K L, Krawczyk C, Shamsi S, et al. Galaxy zoo: 3d –crowdsourced bar, spiral, and foreground star masks for manga target galaxies [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 507(3): 3923-3935. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2282>.
 - [74] Krajnovic D, Cappellari M, De Zeeuw P T, et al. Kinemetry: a generalization of photometry to the higher moments of the line-of-sight velocity distribution [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, 366(3): 787-802. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09902.x>.
 - [75] Tremaine S, Weinberg M. A kinematic method for measuring the pattern speed of barred galaxies [J/OL]. The Astrophysical Journal, 1984, 282: L5-L7. DOI: [10.1086/184292](https://doi.org/10.1086/184292).
 - [76] Géron T, Smethurst R J, Lintott C, et al. Galaxy zoo: kinematics of strongly and weakly barred galaxies [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2023, 521(2): 1775-1793. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad501>.

附录一 双峰窄发射线星系的目录

附表 1-1 MaNGA 星系中所有 304 个 DPGs 目录。第一列：MaNGA-ID，第二至四列：棒、AGN 与潮汐特征。

App Table 1-1 Catalog of all 304 DPGs in the MaNGA survey. Column 1: MaNGA ID. Column 2 - 4: The bar, AGN and tidal features (Labeled "Yes")

MaNGA ID	Bar	AGN	Tide	MaNGA ID	Bar	AGN	Tide	MaNGA ID	Bar	AGN	Tide
1-1038	Yes	Yes		1-114245		Yes		1-114252		Yes	
1-114955			Yes	1-115365	Yes			1-117635			
1-117856			Yes	1-118294				1-118520	Yes		
1-121532	Yes	Yes	Yes	1-121717				1-131279	Yes		
1-134597			Yes	1-134620				1-135159		Yes	
1-136034				1-136044		Yes		1-137528			
1-140369	Yes			1-145978	Yes			1-146543		Yes	
1-149512		Yes		1-149536	Yes			1-149631		Yes	
1-149650				1-150947			Yes	1-153317		Yes	
1-153589	Yes			1-155975	Yes	Yes		1-163876			Yes
1-166919		Yes		1-166929	Yes	Yes		1-167242	Yes	Yes	
1-176174		Yes		1-177972	Yes	Yes		1-179060	Yes		
1-180308				1-180514			Yes	1-180618	Yes		
1-180981	Yes		Yes	1-188303		Yes		1-195169			
1-195337	Yes	Yes		1-195478	Yes	Yes		1-197677	Yes		
1-198237			Yes	1-198501		Yes		1-200058	Yes	Yes	
1-202775				1-208709	Yes			1-209772		Yes	
1-209786		Yes		1-209980		Yes	Yes	1-210702		Yes	
1-211525	Yes	Yes		1-214225		Yes		1-214286			Yes
1-218041			Yes	1-218047	Yes			1-218695		Yes	
1-22538				1-230783				1-233125		Yes	Yes
1-233665				1-233861				1-233925			Yes
1-234004	Yes	Yes		1-24104		Yes		1-244377	Yes	Yes	Yes
1-245451		Yes		1-24641				1-24660	Yes	Yes	
1-24661	Yes			1-2469		Yes		1-247082	Yes	Yes	
1-247082				1-247674				1-248276		Yes	
1-248638	Yes			1-249258				1-251269			Yes
1-251458	Yes	Yes		1-256234		Yes		1-25725		Yes	
1-257903			Yes	1-258380				1-258849			
1-259142	Yes	Yes		1-259952				1-262830	Yes		Yes
1-26390		Yes		1-26436	Yes			1-265404		Yes	Yes
1-265495			Yes	1-265750	Yes		Yes	1-26788		Yes	

附表 1-2 表1-1的续表。

App Table 1-2 Continuation of Table 1-1

MaNGA ID	Bar	AGN	Tide	MaNGA ID	Bar	AGN	Tide	MaNGA ID	Bar	AGN	Tide
1-268854	Yes			1-270170		Yes		1-272819	Yes	Yes	
1-27482	Yes			1-277858		Yes		1-278057			
1-278059				1-279329	Yes	Yes		1-280728	Yes		
1-282472	Yes			1-284293		Yes		1-286287			Yes
1-286804			Yes	1-287790	Yes	Yes		1-2936	Yes	Yes	Yes
1-294355	Yes			1-295355		Yes	Yes	1-295411	Yes		Yes
1-295709				1-295839				1-296733		Yes	
1-298111		Yes	Yes	1-298623				1-298938	Yes	Yes	
1-299561		Yes		1-300318	Yes			1-301470	Yes		
1-314409	Yes	Yes		1-316144				1-316402			
1-317809	Yes	Yes		1-318089	Yes			1-318146		Yes	Yes
1-320337				1-321655		Yes		1-321823			
1-322113				1-324658	Yes			1-325869	Yes		
1-335141		Yes		1-336095	Yes	Yes		1-336486			
1-338555	Yes		Yes	1-338559		Yes		1-339094		Yes	
1-339163		Yes		1-35268	Yes			1-35650		Yes	
1-36357				1-36874			Yes	1-373191		Yes	
1-37400			Yes	1-376413	Yes	Yes		1-377720		Yes	
1-378237			Yes	1-37863				1-378688	Yes	Yes	
1-379030	Yes			1-379653		Yes		1-38167	Yes	Yes	
1-382273	Yes		Yes	1-382452		Yes		1-382793			
1-382817	Yes		Yes	1-383135	Yes			1-383171	Yes		
1-383214	Yes			1-383997			Yes	1-384945			Yes
1-386822	Yes	Yes		1-386962	Yes	Yes		1-387136	Yes	Yes	
1-389285		Yes		1-390389	Yes		Yes	1-392952		Yes	Yes
1-397168				1-397613		Yes		1-397773			
1-399563		Yes		1-40248	Yes			1-404171	Yes		
1-405760	Yes			1-41092		Yes		1-41350	Yes		Yes
1-415768				1-415842		Yes		1-415848	Yes		
1-41750	Yes	Yes	Yes	1-418023				1-42007	Yes		
1-42078		Yes	Yes	1-420973	Yes			1-421972	Yes		
1-42214			Yes	1-42250				1-423101	Yes		
1-42813	Yes			1-43214			Yes	1-43241		Yes	
1-443132				1-44479				1-45554		Yes	
1-455722		Yes		1-458604		Yes		1-458682			
1-460812		Yes		1-460840	Yes			1-47248			
1-47409		Yes		1-481824				1-487379			Yes
1-495018				1-497602		Yes		1-497686			
1-50542		Yes		1-50577				1-523057	Yes		

附表 1-3 表1-1的续表。

App Table 1-3 Continuation of Table 1-1

MaNGA ID	Bar	AGN	Tide	MaNGA ID	Bar	AGN	Tide	MaNGA ID	Bar	AGN	Tide
1-52590				1-53618			Yes	1-53646		Yes	
1-53653	Yes	Yes		1-542318	Yes			1-542392	Yes		
1-543416	Yes		Yes	1-54435	Yes	Yes		1-54539	Yes		
1-546819		Yes		1-547548		Yes		1-547744	Yes		
1-54784		Yes		1-548024	Yes	Yes		1-548290		Yes	
1-54939				1-551121				1-55272			
1-556492			Yes	1-556501	Yes			1-556527		Yes	
1-556749		Yes		1-556959				1-558248			Yes
1-559049			Yes	1-567397	Yes			1-568624	Yes		
1-569095			Yes	1-569199	Yes		Yes	1-570555		Yes	
1-574402		Yes		1-575186	Yes	Yes		1-576061	Yes		Yes
1-576083	Yes			1-576127				1-576342			Yes
1-576458			Yes	1-585149	Yes		Yes	1-585230	Yes		Yes
1-585513	Yes	Yes	Yes	1-585632		Yes		1-585711	Yes	Yes	Yes
1-585869		Yes		1-587628			Yes	1-591343	Yes		Yes
1-593159	Yes			1-593533		Yes		1-594489	Yes		Yes
1-594544				1-596598				1-596678	Yes		
1-602324	Yes	Yes	Yes	1-603624	Yes			1-604912		Yes	
1-605195		Yes		1-605311		Yes		1-605367	Yes	Yes	Yes
1-605458	Yes			1-605722	Yes	Yes		1-605792	Yes		Yes
1-607451		Yes		1-614567			Yes	1-617445			
1-624592	Yes			1-626502	Yes	Yes		1-627142		Yes	
1-631278	Yes	Yes		1-632035			Yes	1-633356	Yes		Yes
1-633584	Yes			1-633683	Yes	Yes		1-633832		Yes	
1-633969		Yes		1-634132		Yes		1-634140			Yes
1-71	Yes	Yes	Yes	1-72166		Yes		1-72322		Yes	
1-72795		Yes		1-76419		Yes		1-77704			
1-82432	Yes			1-90190	Yes	Yes		1-92048	Yes		Yes
1-92547	Yes			1-92866		Yes		1-95842	Yes		Yes
1-96483				1-96712	Yes		Yes	1-98401			Yes
1-98636		Yes	Yes								

附录二 有棒的双峰窄发射线星系的目录

附表 1-4 72 个有棒 DPGs 目录。第一列：MaNGA-ID，第二列：倾角，第三列：棒的方向，第四列：核环的半径，第五列：核环的旋转速度

App Table 1-4 Catalog of 72 barred DPGs in the MaNGA survey. Column 1: MaNGA ID. Column 2: The inclinations of the DPGs. Column 3: The orientations of bars. Column 4: The radii of nuclear rings. Column 5: The rotating velocities of nuclear rings.

MaNGA ID	<i>inc</i>	ΔPA	r_{NR}	v_{NR}	MaNGA ID	<i>inc</i>	ΔPA	r_{NR}	v_{NR}
	degree	degree	Re	km/s		degree	degree	Re	km/s
1-1038	24.7	45.5	0.24	393	1-115365	56.7	9.5	0.12	147
1-118520	20.5	64	0.36	383	1-140369	34.5	12.0	0.24	201
1-145978	50.4	6.5	0.35	239	1-149536	26.6	30.0	0.24	234
1-153589	16.2	22.5			1-155975	29.3	11.5	0.26	280
1-167242	28.8	28.5	0.38	305	1-177972	20.8	32.5		
1-179060	29.4	14.0			1-180618	26.0	21.5		
1-195478	52.0	14.0	0.24	191	1-208709	14.4	40.5		
1-211525	47.7	0.12			1-218047	34.5	44.5		
1-234004	16.8	10.0			1-24660	37.4	19.5	0.32	259
1-24661	31.2	27.5	0.33	338	1-247082	23.9	60.0	0.51	474
1-248638	41.6	11.5	0.03	218	1-259142	31.9	25	0.16	295
1-26436	12.4	11.5			1-268854	18.9	21.0		
1-272819	37.8	21.0	0.16	267	1-27482	1.3	31.5		
1-280728	42.0	21.5	0.22	245	1-282472	15.0	16.5		
1-287790	40.9	12.5	0.16	328	1-294355	32.3	31.0	0.51	312
1-298938	42.9	31.0	0.17	236	1-300318	37.4	8.5	0.56	253
1-301470	23.4	68.0	0.32	474	1-324658	54.2	10.5	0.18	183
1-325869	56.7	14.5	0.37	308	1-336095	29.7	54.5	0.32	243

附表 1-5 表1-4的续表。

App Table 1-5 Continuation of Table 1-4

MaNGA ID	<i>inc</i>	ΔPA	r_{NR}	v_{NR}	MaNGA ID	<i>inc</i>	ΔPA	r_{NR}	v_{NR}
	degree	degree	Re	km/s		degree	degree	Re	km/s
1-35268	24.7	28.0	0.36	359	1-376413	43.0	4.0	0.17	270
1-379030	17.1	16.5			1-383135	9.3	31.5		
1-383171	27.3	31.5	0.34	304	1-386822	54.1	7.0	0.35	237
1-40248	30.6	18.0	0.5	316	1-404171	24.5	23.5		
1-405760	60.9	17.5	0.37	176	1-415848	57.4	9.0	0.23	128
1-42007	63.7	20.0	0.21	139	1-420973	57.4	5.5	0.34	143
1-421972	62.5	8.0	0.32	132	1-423101	17.4	17.0		
1-42813	22.9	16.0	0.23	596	1-460840	42.7	13.5	0.39	227
1-523057	15.6	31.0			1-542318	28.5	81.5	0.26	243
1-542392	34.9	18.0	0.10	254	1-54539	37.6	34.5	0.20	338
1-547744	41.3	18.0			1-548024	45.6	46.5	0.35	216
1-556501	46.9	55.0			1-567397	25.2	27.0	0.31	256
1-568624	27.5	32.5	0.32	333	1-576083	32.1	42.5	0.39	234
1-593159	38.2	10.5	0.32	268	1-596678	22.9	5.5	0.15	212
1-603624	61.1	9.5	0.12	175	1-605458	32.1	20.5	0.23	315
1-624592	30.7	9.5			1-626502	41.1	23.5	0.32	186
1-633683	57.6	6.5	0.15	174	1-633832	31.8	24.0	0.22	270
1-82432	29.7	41.5	0.18	303	1-92547	37.7	33.5	0.36	197

致 谢

从最初邂逅天文，仰望星空的好奇心萌发至今，已逾二十年。尽管时光流转，这份纯粹的热爱从未改变。在北师大攻读本科与硕士期间，通过系统的课程学习，我逐渐触摸到天文学的脉络；也正是如此，我产生了深究学术的想法。进入到博士阶段，我发现这可能是学术生涯中创造力最蓬勃的时期，人生中鲜有如此奢侈的时光，能心无旁骛地投入数年，专注探索一个问题的本质。无论是仔细查看数据的情况，还是反复阅读文献中的细节，这段纯粹的学术探索让我深刻体会到科研的艰辛与魅力。更幸运的是，每当我陷入困境，总有导师的悉心指导和同学们的鼎力相助，使我在迷茫时总能找到方向。因此，这五年的博士生涯本身，就是一段无比珍贵的经历。

衷心感谢我的导师沈世银教授，您不仅以深厚的学术造诣引领我进入前沿研究领域，更在潜移默化中塑造了我的科研思维。从如何提出一个有价值的问题，到如何严谨地验证假设，您的言传身教让我逐渐尝试像一名真正的科学家一样思考。您始终给予我充分的探索自由，同时又在我走偏时及时点拨，这种“有保护的自由”让我受益匪浅。同时，也要感谢课题组的每一位同学，冯帅、卢家风、郑云亮、钟文心师兄，穆子豪，徐权锋，叶人豪，曾琪，赵倩文，陈宓。我们共同阅读文献、讨论数据、分享成果，那些在 1503 激烈辩论的午后，或是 1817 偶然碰撞出的奇思妙想，都成为这段旅程中最难忘的回忆。在科研这条艰辛的道路上，正是这些平等而畅通的交流，让思想的火花得以持续燃烧。

站在毕业的门槛上，回望这段旅程，我深信博士阶段的结束并非探索的终点，而是更广阔科研生涯的起点。未来，无论走向学术道路还是其他领域，我都将带着这段时光赋予我的问题意识、批判思维和坚韧品格继续前行。天文研究教会我的不仅是知识，更是一种面对未知的勇气——正如观测遥远星系时，我们捕捉的其实是亿万年前的光芒，而人类对宇宙的探索，也正是在这种时空交错中不断突破认知的边界。愿我们都能保持这份好奇与热忱，在各自的方向上，继续追寻属于自己的星光。

2025 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：

邱佳杰，男，浙江省宁波市 2013 年 9 月——2017 年 7 月，在北京师范大学天文系获得学士学位。

2017 年 9 月——2020 年 7 月，在北京师范大学天文系获得硕士学位。

2020 年 9 月——2025 年 8 月，在中国科学院上海天文台攻读博士学位。

已发表（或正式接受）的学术论文：

- (1) Qiu, J., Shen, S., Feng, S., et al. 2024, Double-peaked Narrow Emission-line Galaxies in SDSS-IV MaNGA, ApJ, 976, 15, doi: 10.3847/1538-4357/ad6b8e
- (2) Qiu J , Shen S , Chang R ,et al. 2025, SDSS-IV MaNGA: Physical Origins of Double-Peaked Narrow Emission-Line Spaxels in Barred Galaxies, ApJ accepted.

