

2020 届毕业论文（设计）

重子物质的角动量分布及其对星系形成的意义

年 级： 2016 级
学 号： 201601101049
姓 名： 郑致远
专 业： 物理学(国家基地)
指导老师： 李秀平

二零二零年五月

目 录

内容提要	1
Abstract.....	2
第一章 引言	3
1.1 什么是星系.....	3
1.2 星系的分类.....	3
1.3 星系的形成与演化.....	5
1.4 星系的测光与测动力学.....	5
1.4.1 测光.....	5
1.4.2 测动力学.....	6
1.5 本文的结构.....	7
第二章 星系样本选择与数据.....	7
2.1 星系样本	7
2.1.1 MaNGA.....	7
2.1.2 GSWLC-A2, Galaxy Zoo2	8
2.2 数据	8
2.2.1 判断星系是否存在气体发射	8
2.2.2 恒星角动量与气体角动量.....	9
2.2.3 其他物理量.....	11
第三章 结果.....	11
3.1 角动量与视椭圆率的关系.....	11
3.2 加入哈勃分类后角动量与视椭圆率的关系	13
3.3 恒星形成率与恒星质量.....	15
第四章 讨论与结论.....	16
4.1 讨论	16
4.2 结论	17
致谢	18

参考文献.....	19
附 录 1 计算角动量的代码	22
附 录 2 判断星系哈勃分类的程序框图	33
附 录 3 数据表.....	34

重子物质的角动量分布及其对星系形成的意义

内容提要：我们从 MaNGA, GSWLC-A2, Galaxy Zoo2 三个数据库的交集中选出了 100 个星系样本。使用 IFS（积分视场光谱）的数据计算了样本星系一个有效半径（ R_e ）的角动量参数 λ_{Re} ，并通过 $\lambda_{Re} - \epsilon_e$ 图像将它们分成两类星系：Fast-Rotators（FRs, 快速旋转体）和 Slow-Rotators（SRs, 慢速旋转体）。分类的方法是在根据经验方程 $\lambda_{Re} = 0.31\sqrt{\epsilon_e}$ 在 $\lambda_{Re} - \epsilon_e$ 图像中画出分界线，处在分界线上方的属于 FRs，处在分界线下方的属于 SRs。在我们的样本中有 88% 的星系属于 FRs，12% 的星系属于 SRs。通过分析样本星系的角动量与其他物理性质的关系：哈勃分类，恒星质量，恒星形成率，得到了 FRs 和 SRs 的一些普遍性质：FRs 通常质量较小，恒星形成率较高，气体发射较强，并且覆盖很大视椭圆率范围。其内部的恒星速度场比较规则，速度较大，角动量参数 λ_{Re} 较大，能表现出明显的旋转特征与盘结构，可以当作简单的‘扁盘’系统来看。而 SRs 通常质量较大，恒星形成率较低或几乎没有，气体发射较弱或者几乎没有，视椭圆率较小，说明 SRs 比较‘圆’。其内部的恒星运动一般不规则，速度较小，角动量参数 λ_{Re} 较小，星系内部与外部存在动力学解耦，速度存在突变，恒星的动力学结构比较复杂，不能用简单的模型来描述。依据这些性质我们可以获得它们的形成与演化信息：FRs 的形成来源于吸积过程。而使 FRs 维持稳定旋转的通常是多种因素共同作用的结果。SRs 的形成主要是经历缺乏气体的‘干’合并事件，形成复杂的动力学结构。

关键词：星系； 星系的角动量； 哈勃分类； 星系的动力学结构； 星系的演化与形成；

The angular momentum distribution of baryonic matter and its implications for galaxy formation

Abstract: We selected 100 Galaxy sample from the overlap of MaNGA, GSWLC-A2 and Galaxy Zoo2. By using the integral-field spectroscopy (IFS) we obtained the angular momentum (λ_{Re}) of our sample. We exploit the λ_{Re} parameter to divide the samples into two types: FRs (Fast Rotators) and SRs (Slow Rotators). We draw the dividing line on the $\lambda_{Re} - \epsilon_e$ diagram according to the empirical equation $\lambda_{Re} = 0.31\sqrt{\epsilon_e}$. In our sample, 88% of the galaxies belong to FRs and 12% to SRs. By analyzing the relationship between the angular momentum and other physical properties of the sample: Hubble classification, stellar mass, and star formation rate we find some general properties of them: fast rotators tend to have small mass, high star formation rate, strong gas emission, and span the full range of apparent ellipticities, the stars have regular motions, high velocities and large λ_{Re} . Fast rotators exhibit significant rotational characteristics and disk structures, suggesting that FRs are simple oblate systems. However, slow rotators usually have large mass, low star formation rate, weak or almost no gas emission, and small apparent ellipticities, which suggests that SRs are relatively ‘round’, and the stars have irregular motions, slow velocities and small λ_{Re} . Slow rotators have dynamical decoupling between the inner and outer components, and also have complex dynamical structures, which can’t be described by a simple model. According to these properties, we can obtain some information about their formation and evolution: FRs preserve their rotation probably through the dissipative process of star formation in the galaxy and the accretion process in the gas-rich environment. The stable rotation of FRs is usually more specific. On the other hand, SRs are mainly due to the ‘dry’ merger events which are lack of gas. And the merger events form complex dynamical structures.

Keyword: galaxies; angular momentum - galaxies; Hubble type; dynamical structures - galaxies; formation and evolution - galaxies

第一章 引言

1.1 什么是星系

星系是由恒星、星际气体、尘埃和暗物质等构成的引力束缚系统，是组成宇宙大尺度结构的基本单元，通常包含几十亿到几千亿颗恒星，占据几千光年到几十万光年的空间范围。

早在 17 世纪，望远镜被发明出来后，人们陆续观测到了一些云雾状天体，那时人们把这些东西叫做星云，18 世纪的大哲学家康德在其著作《宇宙发展史概论》中谈到，银河系并不是唯一的，在宇宙中还有很多像银河系这样的恒星系统，并将它们命名为宇宙岛，到 20 世纪初，记录在各种天体目录中的星云数目就已经达到了一万个以上，在这之中仙女座大星云(M31)引发了我们对这些天体的重新认知。1920 年，在美国国家科学院，有一场关于仙女座大星云距离的著名辩论，Shapley 依据 M31 的视星等认为 M31 应该在银河系之内，另一方的 Curtis 则依据新星的内禀亮度认为 M31 应在银河系之外，他们的这场辩论当时并没有产生结果。直到 3 年后，Hubble 用当时世界上最大口径的 2.5m 望远镜观测发现在 M31 中存在造父变星，通过给出 M31 的内禀亮度从而确定 M31 的距离为 275kpc(约 90 万光年)，证实了 M31 为河外星系，结束了这场世纪之争^[1]。至此，我们认识到了河外星系的存在，正式拉开了星系研究的序幕。图 1-1 展示了四种不同类型的星系。

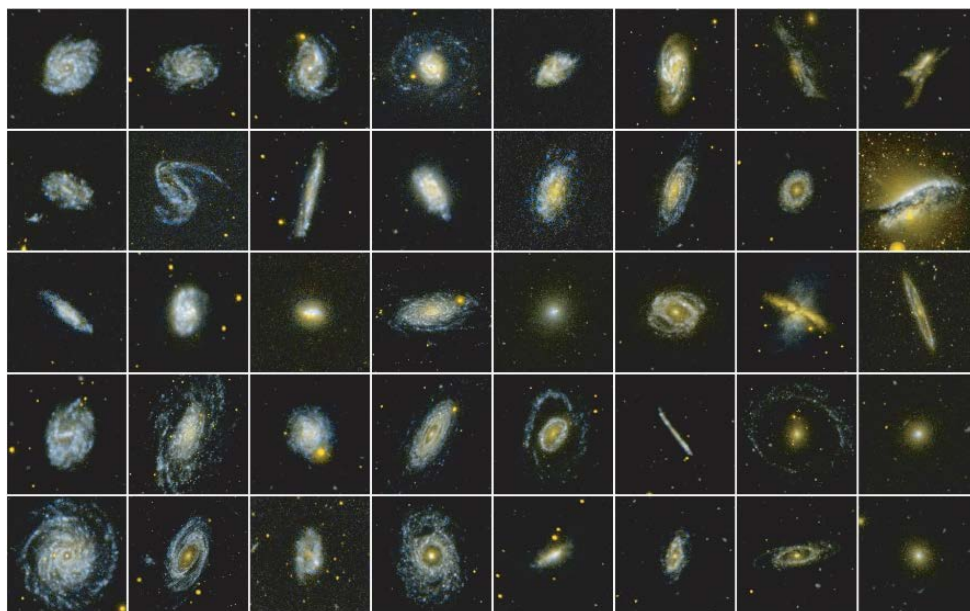


图 1-1 各种各样的星系（图片来源：[NASA/JPL-Caltech](https://www.nasa.gov/jpl-caltech)）

我们用来描述星系特征的物理量为：哈勃分类，星系内恒星的质量，恒星形成率，角动量，红移，金属丰度，椭圆率等。通过对这些物理特征的观测与分析，我们可以获得星系的历史信息。来验证、修正我们目前对星系描述的理论模型，加深我们对星系形成与演化的认知。

1.2 星系的分类

20 世纪初期，由于观测技术远没有现在这么发达，人们只能通过光学望远镜对星系进行观测、研究。当时，依据这些星系的光学形态，Hubble 通过对不同星系光学图像的细致研究，给出了一种星系的形态学分类方法，我们称为哈勃星系分类，这套分类方法将星系大致分为两类，一类是椭球形状的椭圆星系，另一类是盘形状的漩涡星系^[2]。哈勃分类方法直到现在依然作为其他各种分类方法的基础，被广泛应用。后 1936 年 Hubble 在之前的分类基础上新增了透镜星系和不规则星系，其中透镜星系位于椭圆星系与漩涡星系之间^[3]，如图 1-2 所示。

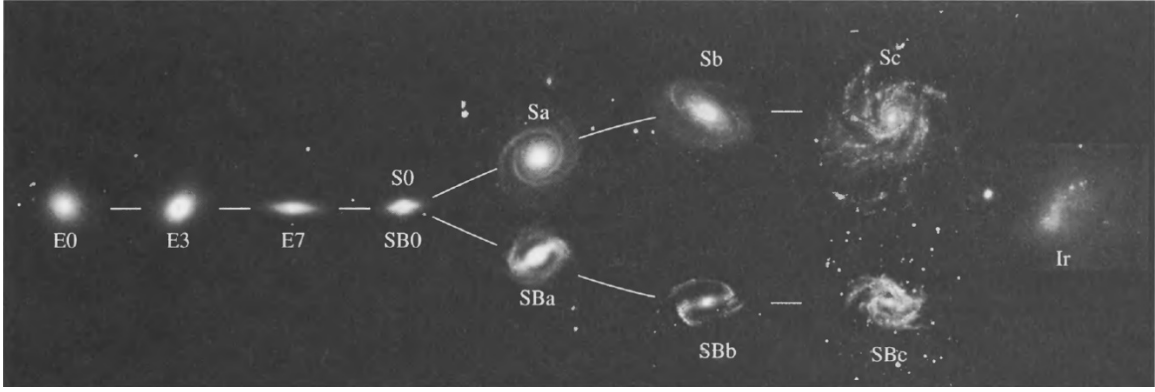


图 1-2 星系的 Hubble 分类（图片来源：An Introduction to Modern Astrophysics FIGURE25.1）

在这个分类方法中，椭圆星系依照其形态编号为 0-7，用 E0-E7 来表示，这里的数字定义为 $10(a-b)/a$ ，其中 a 为椭圆的半长轴， b 为椭圆的半短轴，数字越大表示星系越扁；透镜星系用 S0 表示，在形态上表现为有盘和核球结构但是没有旋臂的一类星系；漩涡星系可以再分为普通漩涡星系(S)和棒状漩涡星系(SB)两类，分类依据为中心的核球是否为棒状，两类星系分别用 a、b、c 进行编号，编号的标准为：1、核盘光度比：从 Sa 的大于 1 到 Sc 的小于 0.2。2、旋臂的螺距角，螺距角是指旋臂与正圆之间的夹角，用来衡量旋臂缠绕的紧度，从 Sa 的 $1-7^\circ$ 到 Sc 的 $10-35^\circ$ 角度越小，缠绕越紧。

后来人们又对哈勃分类进行了拓展与修订，加入了不规则星系，SAB 的过渡类型星系，表明核区的棒结构微弱的螺旋星系和环状星系(r)等更细致的补充^{[4][5]}。

我们将 Hubble 分类中的椭圆与透镜型星系称为早型星系(ETG)^[6]，早型星系定义为在光学图像中没有旋臂的星系。其特征为：年老、光学显示为红色，少量的气体和尘埃与缺少旋臂。剩余有旋臂的称为晚型星系(LTG)。

对于早型星系我们基于其动力学特性对其进行更详细的分类。通过 IFS（积分光谱视场）技术对恒星动力学的观测与研究，我们将 ETGs 分为两大类^[7]：1、慢速旋转体(SRs: slow rotators)，通常具有复杂的恒星速度场，并且包含动力学独立的核球，几乎没有旋转；2、快速旋转体(FRs: fast rotators)，通常具有规律的恒星速度场，在恒星动力学中表现出盘的性质。为了对星系中恒星速度场的规律程度进行定量描述，我们提出了 λ_{Re} 这一参数^[7]，其表达式为：

$$\lambda_{Re} \equiv \frac{\langle R|V| \rangle}{\langle R\sqrt{V^2 + \sigma^2} \rangle} \quad (1-1)$$

式中 R —所选区域到星系中心的距离；

V —所选区域的恒星速度；

σ —所选区域的恒星速度弥散，表征了恒星运动的不规则程度；

分子分母表示不同区域的均值；为了考虑不同区域中恒星质量不同的影响，在公式中加入光度权重 F_i ，公式变为：

$$\lambda_{Re} = \frac{\sum_{i=1}^{Np} F_i R_i |V_i|}{\sum_{i=1}^{Np} F_i R_i \sqrt{V_i^2 + \sigma_i^2}} \quad (1-2)$$

通过 ATLAS^{3D} 的数据对 260 个早型星系内的 λ_{Re} 进行分析，找到了一个经验性的划分这两类星系的方法^[8]，该方法为：测量这些星系一个 Re 范围内的 λ_R ， Re 为星系的有效半径，其定义为包含星系总光度一半的半径，在 $\lambda_{Re} - \epsilon_e$ 图像中人为确定一条曲线 $\lambda_{Re} = 0.31\sqrt{\epsilon_e}$ ，其中 ϵ_e 为该星系在有效半径处的视扁率，计算公式为 $\epsilon_e = 1 - b/a$ ， b 为有效半径处的椭圆的半短轴， a 为有效半径处的椭圆半长轴。 ϵ_e 越大，则星系越扁。在这条曲线上方的星系被认为是“Fast Rotators”，在这条曲线下

方的星系被认为是“Slow Rotators”。

1.3 星系的形成与演化

我们使用半解析模型研究星系团的历史，得到了星系分级增长的理论框架^[9]。根据目前我们对星系形成的理解，星系的形成可以被描述成以下过程^[10]：1、原初暗物质在引力势的驱动下产生不均匀分布从而形成暗物质晕，2、原初气体落入他们附近的暗物质晕并且通过辐射丢失一部分能量，因为丢失能量的原因，气体会逐渐沉积到暗晕中心，并形成一个旋转的盘，3、当气体拥有足够的密度时，由于辐射致冷，就会坍缩成团块开始产生恒星形成星团。

在这个过程中，初始暗物质晕的密度会对星系的形成过程产生很大的影响。暗物质密度高的区域能够在早期获取大量的气体，控制整体的引力势，迅速达到使沉积气体加热并产生恒星的临界质量^[11]，这些巨大的星系就是慢速旋转类星系(SRs)的前身。当两个星系群合并的时候，静止在暗晕质心附近的两个中心星系将最终沉入质量较大的星系群中心，这些星系由于质量大，相对速度小的原因会逐渐合并，从而形成典型的 SRs。这种星系内部区域先形成，之后外部区域通过合并或者吸积过程长大的形成方式被称为“inside-out”模式。

而在暗物质密度低的区域，无法有效的获取气体，因此生长的更加缓慢，他们会形成盘和不稳定的气体团块，这些团块与盘的相互作用会使气体沉积中心形成核球^[12]。最终会形成规则的螺旋星系，这种星系外部的盘先形成，之后气体流入星系中心从而形成核球的形成方式被称为“outside-in”模式。

不同哈勃分类的星系，演化方式也不同^[13]。对椭圆星系，尤其是大型椭圆星系的研究认为其形成方式主要是“inside-out”模式，通过椭圆星系中心光度与星族年龄的关系^[14]、椭圆星系附近的金属丰度梯度^[15]、以及星系的尺寸与其内部恒星质量的关系，我们可以确定椭圆星系内部是在高红移时期形成，外部通过并和缓慢增长，是通过“inside-out”模式形成的^[16]。

透镜星系的形成方式被认为主要是“outside-in”模式，观测证据为在星系团中的透镜星系年龄较老，超过 10Gyr，且星系盘上的星族年龄通常比核球更老^[17]。根据观测证据我们认为在星系群中透镜型星系会先形成，并在 10Gyr 左右恒星形成停止，后续通过吸积使气体掉入星系中心，后落入的气体再产生新的恒星。因此，透镜星系的形成主要是“outside-in”模式。

而漩涡星系的情况比较复杂，我们同时发现了两种模式的观测证据，但通过研究漩涡星系表面亮度和重子质量的分布认为漩涡星系是由恒星形成的环嵌套在原星系上^[18]。故认为漩涡星系的增长通常是从中间开始。

1.4 星系的测光与测动力学

1.4.1 测光

椭圆星系通常恒星形成率较小，缺少气体与尘埃，没有明显的盘状结构。其表面亮度的分布一般比较光滑，这表椭圆星系的恒星已经经过充分混合到达平衡状态。De Vaucouleurs 发现 $R^{1/4}$ 的幂律关系可以很好的描述椭圆星系的光度-半径关系^[19]：

$$I(R) = I(Re) \exp \left(-3.33 \left(\left(\frac{R}{Re} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right) \right) \quad (1-3)$$

式中 Re —有效半径；

后续的研究发现这一经验公式同样适用于漩涡星系的核球部分^{[4][20]}。而对漩涡星系核球部分的光度-半径关系描述更好的是指数关系^{[21][22]}：

$$I(r) = I_0 \exp \left(-\frac{r}{r_0} \right) \quad (1-4)$$

式中 I_0 —星系中心的光度;

r_0 —核区的半径;

后续的研究工作发现许多椭圆星系都可以用更加一般的参数方程来描述^{[23][24]}:

$$I(R) = I_e \exp \left(-b(n) \left(\left(\frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \right) \quad (1-5)$$

公式中 $b(n) \approx 2n - 0.327$ ^[25], 更重要的是发现了 Sersic 指数 n , 体现了光度分布的集中度, 与星系质量密度有关, 随星系总光度的增加而增加。在天文学中可以利用这个参数来实现星系的核盘分离, 来研究星系中不同成分的性质。

对星系的光学图像的等光强轮廓在在某一半径的椭圆上对面亮度进行傅立叶展开:

$$\Sigma(\psi) = \Sigma(0) + A_3 \sin(3\psi) + B_3 \cos(3\psi) + A_4 \sin(4\psi) + B_4 \cos(4\psi) \quad (1-6)$$

式中 ψ —偏近点角;

我们可以定义参数 $a_4 \equiv \sqrt{A_4^2 + B_4^2}$, a_4 可以用来判断等光度轮廓是“方形”($a_4 > 0$)还是“盘状”($a_4 < 0$)。

后续的研究发现等光强轮廓是星系结构的一个本征参数^[26], 从而使我们认识到这个本征参数与其他的星系整体特征有重要的关联, 比如星系的绝对星等, 恒星质量等, 从而提出了关于早型星系的重新分类^[27]。

1.4.2 测动力学

由于对星系的测光研究存在两个限制: 第一是测量核球的光度轮廓需要亚角秒的空间分辨率, 第二是等光度轮廓的差异只有在星系的边缘部分才能看到。为了解决两个问题, IFS(积分视场光谱学)通过对星系的测动力学研究来观测不同角度的星系。

最开始 IFS 对于恒星动力学的观测使用了很简单但很耗时的 y 扫描方法。之后由于仪器的数据质量相较以前有了显著的提高, SAURON 的观测计划^[28]首次绘制了二维 48 个邻近 ETGs 的恒星动力学图像, 离子气体和重要的星族信息。通过对样本星系的动力学图像的简单分析就可以对两类 ETGs (FRs 和 SRs) 做出定性的分离^[29]。

为了得到更多关于动力学的信息, 我们需要像对测光的分析一样引入拟合的方法来分析测到的动力学图像(即速度场)。对 ETGs 的速度场沿着最佳拟合的椭圆轮廓, 引入截断傅里叶展开:

$$V(\psi) = V(0) + A_4 \sin(4\psi) + B_4 \cos(4\psi) + A_5 \sin(5\psi) + B_5 \cos(5\psi) \quad (1-7)$$

式中 ψ —偏近点角;

同样的我们定义参数 $k_5 \equiv \sqrt{A_5^2 + B_5^2}$, k_5 可以用来确定在星系内是否存在不规则的动力学组分。ATLAS^{3D} 项目证实了可以通过 k_5/k_1 来定量的区分规则旋转体和不规则旋转体之间的动力学差异^[30]。

在对恒星动力学图像的观测和分析中, 我们发现了比从光学模型中预测的低得多的恒星速度^{[31][32]}。为了量化这一差异, 提出了 $(V/\sigma, \varepsilon)$ 图像的方法, 来量化规则旋转体与不规则旋转体的比率^[33]。该图像的是基于张量位力理论, 这个理论将恒星系统的动力学与引力势联系起来^[34]。使用积分视场 (IFS) 的技术, 并引入光度权重可以使 $(V/\sigma, \varepsilon)$ 图像变成更加稳定的分类方法。同时我们需要对 ε 进行修正以得到更加准确的分类:

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \varepsilon_{intr}(\varepsilon_{intr} - 2) \sin^2 i} \quad (1-8)$$

式中 ε_{intr} —本征椭圆率;

i —星系倾角;

因此, $(V/\sigma, \varepsilon)$ 图像不能只靠观测量来判断 ETGs 的类型。故引入了 $\lambda_{Re} - \varepsilon_e$ 图像的方法, 它做最大的优势是我们不用在意观测目标面对我们的角度, 可以直接使用观测量来判断该星系的分类^[8]。随着观测技术的不断提升, 我们对星系, 尤其式早型星系(ETGs)有了更详细的认识。同时, 这些对 ETGs 更加细致的分类也表明可能哈勃分类需要被修正。

1.5 本文的结构

在这篇文章中,我们主要测量了 100 个 MaNGA 星系样本的角动量,包括气体角动量和恒星角动量。又通过数据库获得了这些星系的哈勃分类,恒星形成率,恒星质量这三个重要的物理量。这个工作的主要目的是:

1. 将我们得到的 100 个 MaNGA 星系样本分类为 FRs 和 SRs,并得到这两类星系的特征。
2. 通过对角动量与其他物理量的关系的分析,来推测它们的形成与演化过程。

本文的章节组织结构如下:第一章:绪论部分,在这一部分简要的介绍星系及其相关性质,星系的几种分类方法,目前对星系的形成与演化的认识,对星系的观测和研究手段,和对 MaNGA 的介绍。第二章:简述选择 100 个星系样本的方法,计算 λ_{Re} 和获得其他数据的方法。第三章:介绍我们的计算结果,并对结果进行简要分析。第四章:对我们的结果进行讨论,得出结论。

第二章 星系样本选择与数据

2.1 星系样本

这篇文章选择的 100 个样本是首先从 MaNGA^[35], GSWLC-A2^{[36][37]}, Galaxy Zoo2^[38]三个数据库中选出交集,然后再从交集样本中随机挑选出来的。在这一小节中,我将对样本所在的三个数据库做简要的介绍。

2.1.1 MaNGA

MaNGA^[35]的全称是 Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory,是第四代 SDSS(Sloan Digital Sky Survey)巡天项目的三个核心项目之一,于 2014 年 7 月 1 日启动。该项目的目的是探索周围宇宙 10,000 个星系的内部动力学结构以及气体恒星组成,寻找推动星系演化的物理机制的起源。MaNGA 主要的科学目标是以下四点:1、我们观测到的星系盘如何演化的和这种生长过程中的气体供应源来自何处?2、恒星的吸积、星系的并和和长期的演化过程对星系核和椭圆星系的成长分别有什么作用?3、恒星形成的停止是如何被星系内部的过程和可能依赖外部环境的驱动过程调节的?4、星系中不同组分的质量和角动量是如何分布的,以及它们对这些组分有何影响?

基于以上的科学目的, MaNGA 的样本选择条件主要为以下三条:1、首先要求样本的总数量在 10000 个星系左右。原因是定义星系类型有三个理论参数:恒星质量,恒星形成率(星系的形态),星系所处环境(暗物质晕的质量)。我们粗略的要求每个参数都有六个划分区间,故我们需要有足够多的星系使测量能够体现出不同该区间的变化。再要求要有 5σ 的测量精度,就需要在每个区间至少有 50 个星系,再乘以 6^3 个区间,便需要 10800 个星系。大样本的另一个优点使可以为我们提供拥有极端状态的少部分星系,如活动星系核(AGN)、后星爆星系和强星系外流等等。2、我们需要选择质量下限为 $\log(M_*/M_\odot) > 9$,使质量均匀分布。这样做可以让我们在每一个质量区间内都有足够多的样本。3、在测量星系的光学轮廓时我们优先考虑统一的径向覆盖范围。这里星系的轮廓使用前文提到的有效半径做为单位。

根据以上筛选条件,在其选出的样本中,定义了“primary”与“secondary”两类样本。其中“primary”类样本的平均红移在 $z=0.03$,要求对 80% 的源的覆盖范围能达到 1.5 个有效半径,该类星系约有 5000 个。在这基础上,增加了大约 1700 个星系用来平衡每个质量区间内星系的颜色分布。这样做的原因是,在固定光度的情况下,约红的星系质量越大,因此在大质量的星系区间内,蓝色星系偏少,在小质量的星系区间内,红色星系较少。这里增加了大质量的蓝色星系以及小质量的红色星系和一些绿谷星系,来保证样本的覆盖率,这里增加的星系被称为“primary+”。“secondary”类样本的平均红移在 $z=0.045$,要求对 80% 的源的观测精度可以达到 2.5 个有效半径,该类星系约有 3300 个。

在硬件上, MaNGA 采用 5 中不同尺寸的 17 束积分视场单元: 2^*N19 (直径为 12 角秒), 4^*N37 , 4^*N61 , 2^*N91 , 5^*N127 (直径均为 32 角秒)。两个双通道双通道的 BOSS 光谱仪(Smee et al.2013)可

以覆盖的波长范围为 360nm-1030nm, 空间分辨率为 R-2000。由于总观测时间为三小时, 故 r 波段在 23AB 星等没平方角秒的信噪比可以到达 4-8, 23AB 星等为 MaNGA 观测的极限星等。

我们在 MaNGA 中选择的是 MaNGA-MPL-9 中的星系样本。

2.1.2 GSWLC-A2, Galaxy Zoo2

GSWLC^{[36][37]}的全称是 GALEX-SDSS-WISE LEGACY CATALOG, 包含约 700,000 个 SDSS(斯隆数字巡天)中红移低于 0.3 ($0.01 < z < 0.30$), 星等 <18 的星系的物理性质。覆盖了 SDSS 约 90%的数据, 它使用 CIGALE 来进行 SED 拟合并确定星系的物理性质, 如恒星质量和目前的恒星形成率。GSWLC-2 使用了 SED+LIR 的拟合方法, 该方法对 SED 拟合进行了优化, 可以更方便的得到同样精确度的数据。这篇文章使用的是 GSWLC-A2 数据库, 包含了 640,659 个样本星系。

Galaxy Zoo^[38]是由志愿者对 SDSS 的星系图像进行投票分类的项目。包括六种分类: 椭圆, 顺时针漩涡, 逆时针漩涡, 侧向, 恒星/无法辨别, 并和。Galaxy Zoo2 是 Galaxy 的后续计划, 不仅包含了 Galaxy Zoo 中的星系分类, 而且对分类进行了细化, 测量了更详细的星系形态特征。包括棒旋, 旋臂, 节面角, 核球, 相对椭圆率和许多其他的特征。我们使用的数据库是 Galaxy Zoo2 中的 Main sample, spectroscopic redshifts (Table 5)。这个数据库是 Galaxy Zoo2 最主要的数据发表, 给出了 243500 个星系的分类, 拥有数量最多的星系和最可靠的形态分类。

具体的分类依据是用 Galaxy Zoo2 的 Table5 中的特征判断标准来进行判断。例如: 假设我们需要判断一个星系是否是具有三个旋臂的盘星系, 那么我们需要从 Table5 中读取该星系的 t11_arms_number_a33_3_flag, 如果这个值等于 1, 就说明这个星系是具有三个旋臂的盘星系, 如果这个值等于 0, 那它就不是^[38]。我们运用这个方法, 对 100 个星系样本进行分类。分类椭圆星系的方法是读取 t01_smooth_or_features_a01_smooth_flag, 这个值为 1, 就认为这个星系是椭圆星系; 同理分类漩涡星系的方法是筛选 t04_spiral_a08_spiral_flag 为 1 的星系。需要强调的是在漩涡星系中我们并不做下一级的分类, 即中心是否有棒状结构。

由于这个数据库中并没有直接判断透镜型星系的方法, 因此对透镜型星系的判断是根据其定义来判断的。透镜型星系是椭圆星系与漩涡星系的中间形态, 在哈勃分类中被归类为 S0, 它拥有盘结构, 但是却没有旋臂。所以我们判断的方法是首先确定它是盘状星系, 再选择这之中没有旋臂的星系。具有两个特征的星系, 我们将它归类为透镜型星系。但是在 Galaxy Zoo2 的数据中, 在判断它是盘状星系之后, 需要保证这个星系不是侧向对着我们, 才能继续判断它有没有旋臂。因此我们再加入这个条件。最终, 我们的判断方法为: 首先筛选 t01_smooth_or_features_a02_features_or_disk_flag 等于 1, 来确定是盘状星系; 其次筛选 t02_edgemon_a05_no_flag 等于 1, 来保证它是面向我们的, 可以让我们继续判断它是否有旋臂; 最后筛选 t04_spiral_a09_no_spiral_flag 等于 1, 表示这个盘星系没有旋臂, 确定它是透镜型星系。之所以我们可以这样进行判断, 是因为这些判断条件之间是彼此独立的。具体判断的流程与代码部分见附录 2。

我们对以上三个数据库取交集, 这些样本拥有可靠的恒星质量和目前的恒星形成率数据, 同时它们在 Galaxy Zoo2 中的分类判断为椭圆星系、漩涡星系、透镜型星系这三类, 最终得到 3300 个星系样本。之后我们用程序从这 3300 个星系中随机选出 100 个星系作为我们研究的星系样本。

2.2 数据

我们需要获得关于星系的一些重要物理量, 分别为角动量 (包含气体角动量与恒星角动量), 视椭圆率, 星系的哈勃分类, 恒星质量, 恒星形成率。在这一节中, 我将会介绍我获得这些数据的方法。本节的结构如下, 首先要判断星系是否存在气体发射, 其次计算星系的角动量, 第三获取星系的恒星质量与恒星形成率, 最后介绍判断这些星系的哈勃分类的依据。

2.2.1 判断星系是否存在气体发射

我们在判断星系是否存在气体发射时使用了 MaNGA-MPL-9 中的数据。我们使用 IFS (积分视

场光谱)技术观测得到该数据库,这项技术的特点在于其观测到的星系数据是空间分解的,图 2-1 展示了作为例子的星系 8988-6102 的气体速度分布图像,具体表现为我们可以获得星系各个部分的数据。

我们可以通过如下公式来判断星系是否存在气体发射:

$$E = \frac{N(SNR_F > 3)}{N(Mask_F = 0)} > \frac{1}{3} \quad (2-1)$$

式中 SNR_F —流量的信噪比;

$Mask_F$ —流量数据质量的可靠度,当它为 0 时,我们认为这个像素的流量数据是可靠的;

N —像素的个数,括号内表示筛选条件;

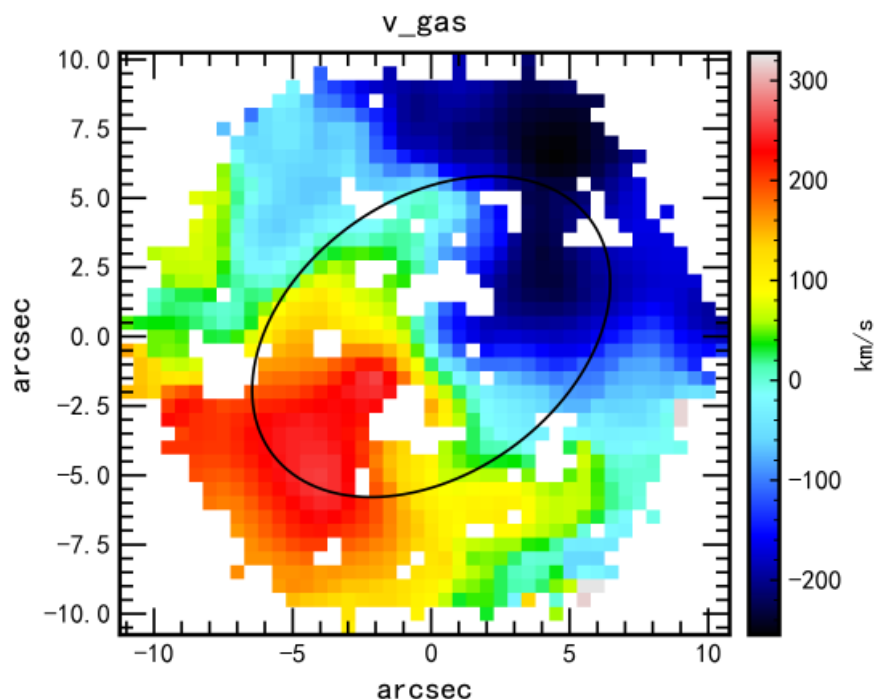


图 2-1 星系 8988-6102 的气体速度分布图像,图中黑色的椭圆表示的是半长轴为一个 R_e 的范围。每个像素点的速度大小用颜色来区分,颜色越深代表速度的绝对值越大。我们规定观测的视线方向为正方向,那么图中红色的部分表示它们在远离我们,蓝色的部分表示它们在靠近我们。横纵坐标分别表示位置,星系中心的坐标是(0,0),距离单位使用的是角秒

以上三个数据的来源均为 MaNGA-MPL-9。由于星系的发射谱中不只存在一种气体的发射线,因此我们通常选择其中的一根气体发射线来计算星系中气体的角动量。这样做的可行性来源于在 MaNGA-MPL-9 的数据中,所有发射线对应的速度都是一样的。因此公式(2-1)计算的是:一种气体发射线中流量信噪比大于 3 的个数与该发射线流量数据有效的个数之比。通过这个比率我们可以选择阈值来判断星系中是否存在气体发射。在这篇文章中,我们选择了强度较高的气体发射线 OIII-5008,当该气体发射线的比率满足公式(2-1)时,我们认为星系存在该气体发射。

通过这种方法对 100 个星系进行判断,得到了 65 个具有 OIII-5008 发射的星系,对这 65 个星系计算它们的气体角动量。

2.2.2 恒星角动量与气体角动量

在这一小节中,我将详细介绍计算恒星角动量的方法,气体角动量的计算方法与恒星角动量相同,因此不会过多赘述。

我们通过公式(1 – 2)来计算恒星角动量参数，数据来源是 MaNGA-MPL-9。每个像素点用的流量数据为‘g’波段（495.0-530.0nm）的数据。我们选择‘g’波段流量数据的信噪比大于3作为有效的数据点。某一像素点到星系中心的距离我们用角秒作为单位。接下来对每个像素点的速度重新处理。由哈勃定律可知，宇宙是一直在膨胀的，因此离我们越远的星系就有越大的退行速度，我们需要把退行速度通过星系的红移来去除。MPL-9 的数据已经处理过了退行速度，但是并不完全。由于公式(1 – 2)对恒星的速度十分敏感，因此我们需要再次去除。使用的方法是用获取的速度减去它的中位数，使得星系中心的速度为0，来得到每个像素相对中心的速度大小。图 2-2 展示了作为例子的星系 8988-6102 的恒星速度分布图像。

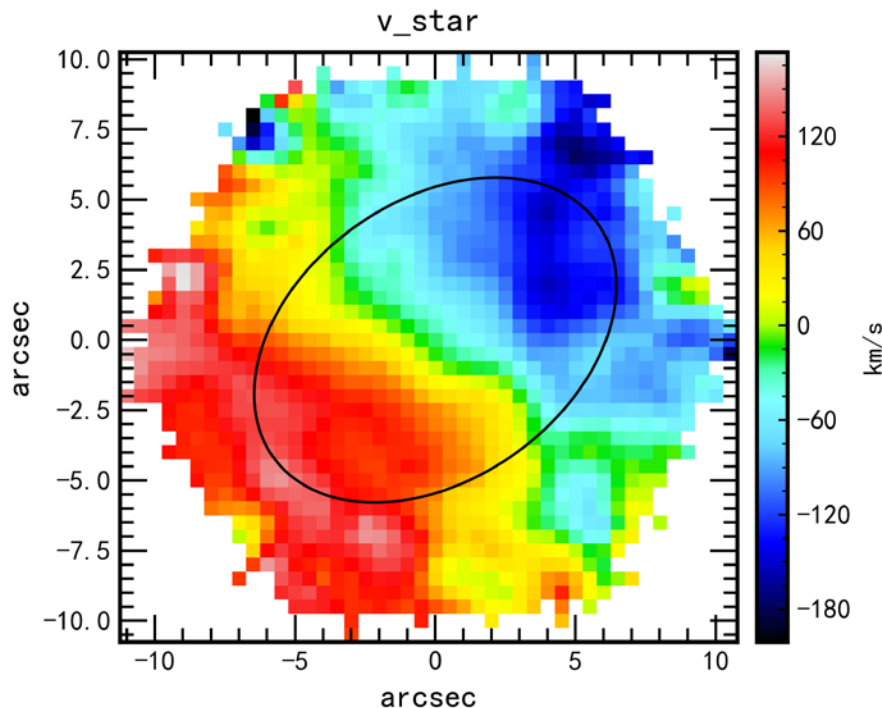


图 2-2 星系 8988-6102 的恒星速度分布图像，其他的图像性质与图 2-1 一致

最后，由于仪器误差的影响，我们需要对速度弥散 σ 进行修正。修正方法为：

$$\sigma_{\text{star_corr}} = \sqrt{\sigma_{\text{stellar}}^2 - \sigma_{\text{stellar_corr}}^2} \quad (2-2)$$

式中 $\sigma_{\text{star_corr}}$ —修正后的恒星速度弥散；

σ_{stellar} —恒星速度弥散的测量值；

$\sigma_{\text{stellar_corr}}$ —仪器速度弥散；

通过这种方法我们可以得到真实的恒星速度弥散。但是这样会造成一个问题，在信号微弱的地方，有可能存在 σ_{stellar} 比 $\sigma_{\text{stellar_corr}}$ 小的情况，导致修正公式(2 – 2)中根号内的部分小于 0，使有效数据被废弃掉。部分星系中可能存在大量这样的点，就会导致星系的形态发生很大的变化，从而使测量的 λ_R 误差过大。我们对这种情况的处理方法为，在保证数据有效的前提下设置信噪比阈值，对信噪比大于阈值的像素点使用公式(2 – 2)修正，而对信噪比低于阈值的点做处理，以保证星系形态的完整性^[39]。

为了将我们的结果放在 $\lambda_{Re} - \varepsilon_e$ 图像上，我们需要人为的划分出半长轴为一个 Re 的椭圆范围。 Re 的值我们依然使从 MaNGA-MPL-9 中获取。作为一个例子，我们在星系 8988-6102 的恒星速度分布图像上画出了这个椭圆（见图 2-2）。我们计算角动量参数 λ_{Re} 时所取的数据点为椭圆内的。

得到以上数据后，我们用公式(1 – 2)来计算恒星部分的角动量：

$$\lambda_{Re} = \frac{\sum_{i=1}^{Np} F_i R_i |V_i|}{\sum_{i=1}^{Np} F_i R_i \sqrt{V_i^2 + \sigma_i^2}} \quad (1-2)$$

计算气体角动量的方法与计算恒星角动量的方法相同，需要我们把流量、相对速度、速度弥散全部换成选择的气体发射线 OIII-5008 的数据。具体的计算代码见附录 1。

2.2.3 其他物理量

首先是在一个 Re 处的视椭圆率。我们可以通过 MaNGA-MPL-9 获得星系在一个 Re 处半短轴与半长轴的比 ba，然后通过简单的计算公式来得到视椭圆率：

$$\varepsilon_e = 1 - ba \quad (2-3)$$

式中 ε_e ——一个 Re 处的视椭圆率；

ba——一个 Re 处半短轴与半长轴的比；

这样我们就可以通过 $\lambda_{Re} - \varepsilon_e$ 图像来判断星系是 FRs 还是 SRs。

其次是恒星质量与恒星形成率。这两个数据可以直接从 GSWLC-A2 中获取，均为星系的整体性质，不区分气体部分和恒星部分。哈勃分类根据 2.1.2 小节中提到的分类方法来获取，最终我们得出在 100 个样本星系中包含有 40 个椭圆星系，57 个漩涡星系和 3 个透镜型星系。

所有计算、得到的数据见附录 3，会以表格的形式将我们的 100 个样本星系的编号，哈勃分类，恒星角动量，气体角动量，恒星质量，恒星形成率等数据展示出来。

第三章 结果

3.1 角动量与视椭圆率的关系

我们把 100 个样本以散点图的形式画在 $\lambda_{Re} - \varepsilon_e$ 的图像上，把它们分成两类：FRs 和 SRs。再对其中存在气体发射的 65 个样本星系画在另一张 $\lambda_{Re} - \varepsilon_e$ 图像中，分别为图 3-1 (a)，(b)。 λ_{Re} ， ε_e 的数据见附录 3。

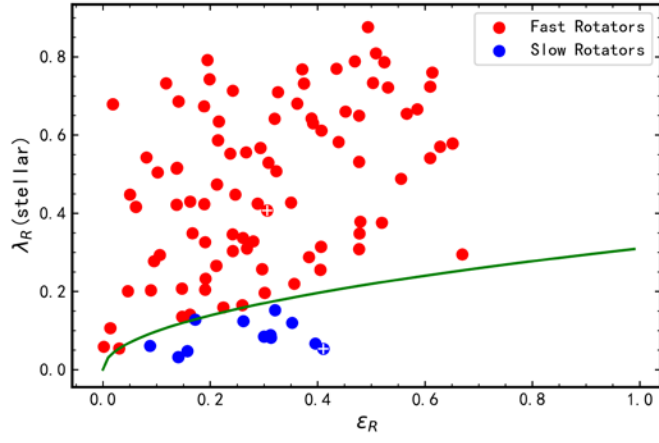
比较图 3-1 的 (a)，(b) 两图可以看出不论是用恒星角动量还是气体角动量，都表现出 λ_{Re} 与 ε_e 的正相关趋势，即随着 ε_e 的增大， λ_{Re} 的平均值也在增加。在对于两类星系的数量统计中，也都显示 FRs 占多数，统计的数据见表 3-1。

表 3-1 星系分类的比例表

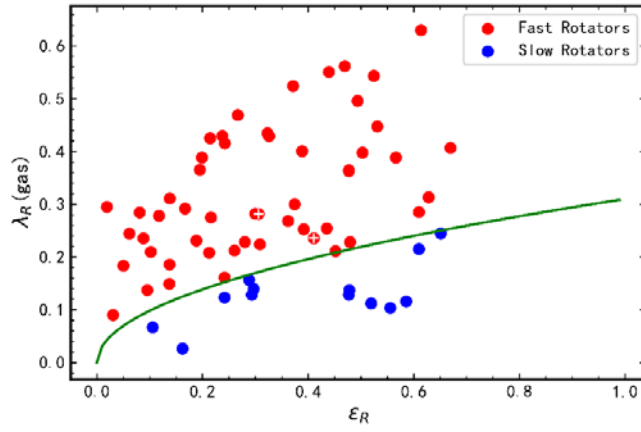
	FRs (个)	占比	SRs (个)	占比	星系总数 (个)
恒星角动量分类	88	88%	12	12%	100
气体角动量分类	52	80%	13	20%	65

由表 3-1 可以看出，不论是依据恒星角动量来分类还是依据气体角动量分类，FRs 的占比都在 80% 以上。另外，在本文中依据气体角动量的分类是起到对比作用。通常我们在判断星系属于 FRs 或者 SRs 是依据恒星角动量来判断，我认为这样做的原因有 1、依据我们的星系样本来看只有 65% 的星系具有气体发射，显然如果根据气体角动量来判断会损失相当一部分样本，而如果只判断 ETGs 的话这个比例将会更低，因为大部分椭圆星系包含的气体很少，几乎没有气体发射；2、尽管我们选择的 OIII-5008 具有较强的气体发射，但是根据图 2-1 来看，在我们选择的范围内仍然存在很多没有数据的像素。之前我们有提到计算 λ_{Re} 的公式(1-2)对速度非常敏感，那么缺失的数据就会对 λ_{Re} 造成很大的影响，可能导致测量值与实际值相差过大而失效。

图 3-1 中带有白色标记的两个星系分别为 8988-6102 和 8143-1902，我们对这两个星系的分类依据它们的恒星角动量，即图 3-1 (a)。根据该图，8988-6102 属于 FRs，8143-1902 属于 SRs。在哈勃分类中，8988-6102 是漩涡星系，8143-1902 是椭圆星系。通过比较两个星系的恒星速度分布图（图 2-2，图 3-2）



(a)



(b)

图 3-1 (a), (b) 两图分别展示了在一个 ϵ_e 范围内, 星系的恒星角动量、气体角动量与视椭圆率的关系。图中绿色的实线代表 FRs 与 SRs 的分界线, 其方程为 $\lambda_{Re} = 0.31\sqrt{\epsilon_e}$ 。红色的点位于绿色实线的上方, 代表 FRs; 蓝色的点位于绿色实线的下方, 代表 SRs。带有白色十字标记的是选出的两个例子

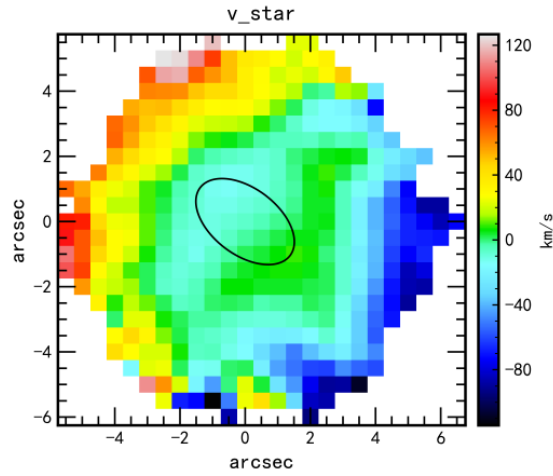


图 3-2 星系 8143-1902 的恒星速度分布图像, 其他的图像性质与图 2-1 一致

可以得出一些 FRs 和 SRs 的普遍性质：1、SRs 型星系内的恒星速度通常比较小，在远离星系中心的地方才会出现较大的运动速度，体现出了中心与外围存在动力学解耦，这意味着星系经历过并和过程，而 FRs 型星系内的恒星速度比较大，在一个 R_e 的范围内也能表现出很明显的速度取向。2、SRs 型星系中通常不表现出明显旋转特征，内部的恒星运动不规则程度大，而 FRs 型星系中可以明显的看出它们的旋转特征，内部的恒星运动较为规则。

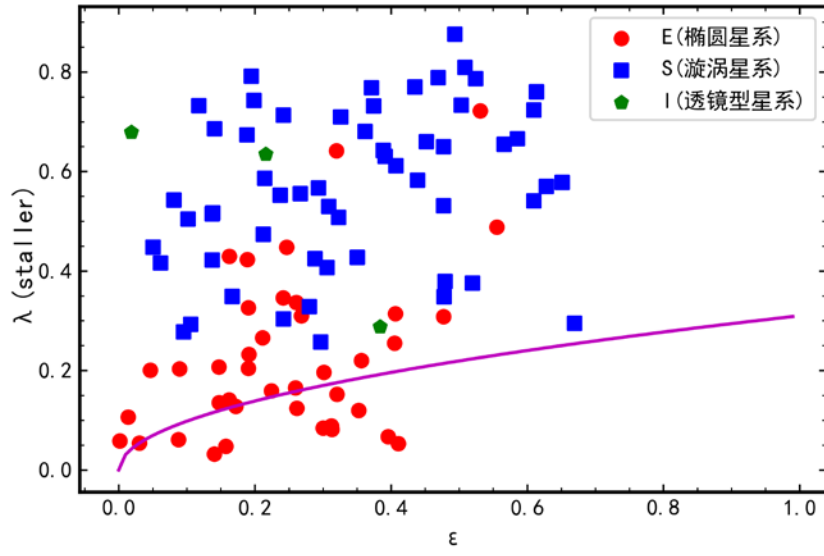
3.2 加入哈勃分类后角动量与视椭圆率的关系

接下来我们在区分 FRs 和 SRs 的基础上加入星系的哈勃分类，同样的把气体部分和恒星区分开。分别为图 3-3 (a)，(b)。

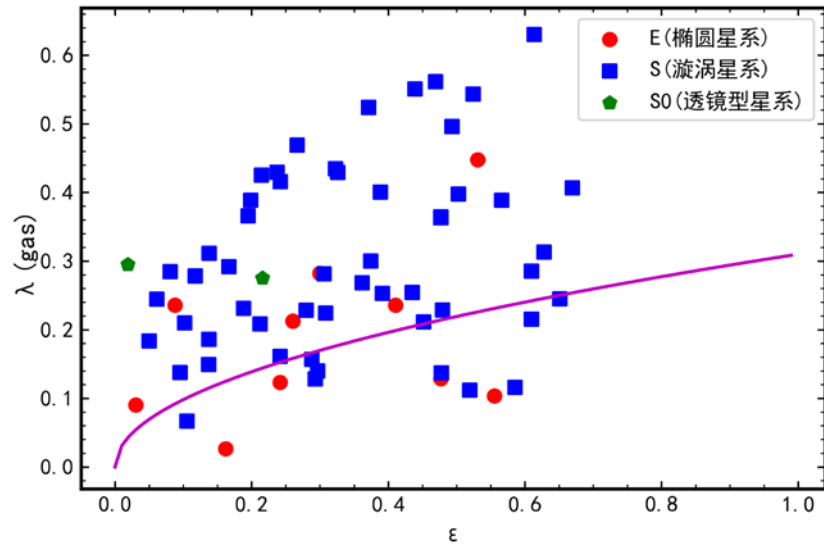
通过对比图 3-3 中的 (a)，(b) 两图可以发现存在气体发射的星系绝大多数是漩涡星系，共有 53 个占比约为 81.5%，同时也验证了用恒星角动量来判断星系动力学分类的原因 1。因此，我们着重分析图 3-3 中的 (a) 图，而 (b) 图用来对比。

在我们的 100 个星系样本中有 40 个椭圆星系，57 个漩涡星系和 3 个透镜型星系。由图可知，FRs 包含了样本中所有的，还包含了 2/3 的椭圆星系。漩涡星系和透镜星系通常具有明显的盘结构，从侧面来看比较‘扁’。如果近似为二维结构，那么恒星的运动就被限制在盘上在 z 方向几乎没有速度分量，因此，星系中速度分布比较规律。从图中也可以看出 FRs 的 λ_{Re} 普遍大于 0.2，同时也覆盖了很大的视椭圆率范围，表明这两类星系中恒星相对星系中心的运动速度比较大。

而 SRs 包含了样本中 1/3 的椭圆星系。从图 3-3 (a) 中我们可以发现 SRs 的 λ_{Re} 普遍小于 0.2，视椭圆率普遍小于 0.4，比较小。说明 SRs 更“圆”，内部恒星的运动速度较小，同时也更加不规律，表明星系中恒星的速度弥散占主导。每个星系的哈勃分类见附录 3。



(a)



(b)

图 3-3 (a), (b) 两图分表示加入了型星系哈勃分类后, 在一个 Re 范围内, 星系的恒星角动量、气体角动量与视椭圆率的关系。图中洋红色的实线代表 FRs 与 SRss 的分界线; 红色的圆点代表星系的哈勃分类是椭圆星系, 蓝色的方块代表星系的哈勃分类为漩涡星系, 绿色的五边形代表星系的哈勃分类是透镜型星系, 分类依据见第 2 章 2.1.2 小节中判断星系哈勃分类方法的部分

3.3 恒星形成率与恒星质量

接着我们分析型星系的另两个重要的物理特征：恒星质量和恒星形成率。我们将样本星系的这两个物理量画在 $\log(SFR) - \log(M_*/M_\odot)$ 图像中，其中对数均以 10 为底， M_* 是恒星质量， M_\odot 是太阳质量，SFR 的单位是 M_\odot/yr ，即太阳质量每年。图 3-4 即为 $\log(SFR) - \log(M_*/M_\odot)$ 图像。

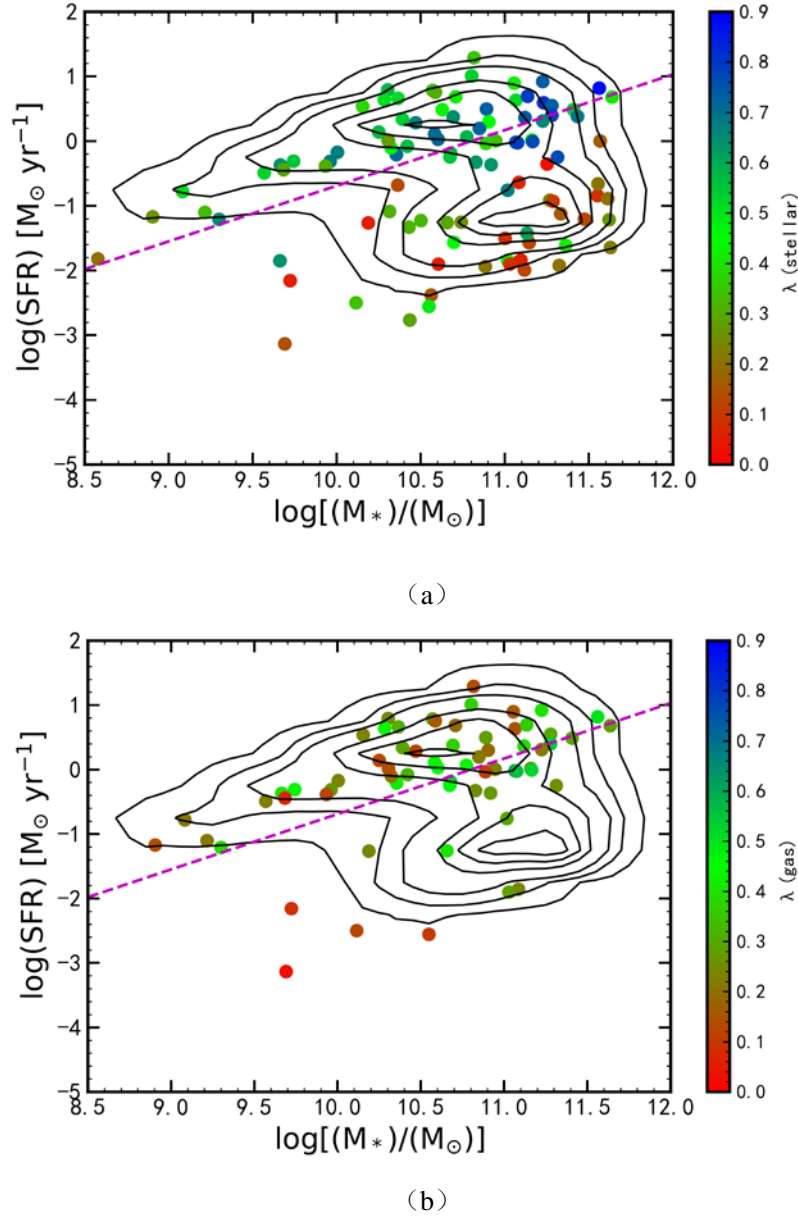


图 3-4 (a)，(b) 两图分别表示了在 $\log(SFR) - \log(M_*/M_\odot)$ 图像中星系样本的恒星角动量和气体角动量的分布。图中的黑色轮廓图是 GSWLC-A2 中有效的恒星质量和恒星形成率的数据，洋红色的虚线代表了恒星形成主序^[40]；图中使用颜色来标记角动量，从红色变到蓝色表示角动量由小变大

我们依然主要分析图 3-4 中的 (a) 图。在该图中，我们可以依据背景的黑色轮廓图来把星系分为三类。类似于等高线，在上下出现两个‘峰’状区域，在两个‘峰’之间是‘谷’。在这个图中我们把位于上面的‘峰’处的星系称为‘blue cloud’，位于下面的‘峰’处的星系称为‘red sequence’，位于它们之间的‘谷’处的区域称为‘green valley’。图中洋红色的虚线所在的位置代表了恒星形成

主序，位于这根线附近和上面（‘blue cloud’）的星系通常具有显著的恒星形成，恒星形成率高，平均的星系内恒星质量比较小，星族年龄偏小，这些星系在光学图像上表现为蓝色，因此叫做‘blue cloud’。处在‘red sequence’区域的星系几乎没有恒星形成，恒星形成率很低，平均的星系内恒星质量比较大，星族年龄偏大，这些星系在光学图像中表现为红色，因此叫做‘red sequence’。处在这两者之间‘green valley’的星系可以认为是这两者的过渡，存在一定的恒星形成，这部分星系的数量比较少。

依据我们之前对 SRs 的分析，它们的角动量参数 λ_{Re} 通常小于 0.2，且均为椭圆星系，在图 3-4 a) 图中 λ_{Re} 小于 0.2 表现为红色，可以看到 SRs 多数位于平均恒星质量大，恒星形成率低的‘red sequence’。 λ_R 比较大的 FRs 则大部分位于平均质量小，恒星形成率高‘blue cloud’。

根据以上的分析我们可以发现，在我们的样本星系中哈勃分类属于晚型星系的漩涡星系在 $\log(SFR) - \log(M_*/M_\odot)$ 图像中位于整体星族年龄较小的‘blue cloud’，属于早型星系的椭圆星系中有 1/3 左右的样本在 $\log(SFR) - \log(M_*/M_\odot)$ 图像中位于整体星族年龄较大的‘red sequence’。

第四章 讨论与结论

4.1 讨论

第三章已经给出了这篇文章的主要结果，接下来我们对这些结果进行一些讨论。首先我们对结果进行总结：

1. 在我们的 100 个星系样本中包含有 40 个椭圆星系，57 个漩涡星系，3 个透镜型星系。对它们进行动力学分类的结果为，全部的漩涡星系，透镜型星系和 28 个椭圆星系共计 88 个星系属于 FRs，12 个椭圆星系属于 SRs。在 12 个 SRs 中存在气体发射的星系有 3 个，88 个 FRs 中存在气体发射的星系有 62 个。

2. FRs 的恒星角动量参数 λ_{Re} 通常比较大，同时也覆盖了很大的视椭圆率范围，而 SRs 的恒星角动量参数 λ_{Re} 比较小，同时视椭圆率比较小。

3. 在 $\log(SFR) - \log(M_*/M_\odot)$ 图中，FRs 多位于平均恒星质量偏小，恒星形成率较高，星族年龄低的‘blue cloud’，而 SRs 多位于平均恒星质量大，恒星形成率低，星族年龄高的‘red sequence’。

在我们的样本中，没有漩涡星系与透镜型星系被分类为 SRs，而在 ATLAS^{3D} 的 260 个 ETGs 中存在少部分透镜型星系属于 SRs（见文献[8]，图 8）。我认为有几个可能的原因，第一是我们的样本不够大，覆盖率有限，没有发现分类为 SRs 的透镜型星系或漩涡星系；第二是我们对星系哈勃分类的判断方法存在漏洞，导致我们没有发现 SRs 中存在的透镜型星系。事实上，我们目前对透镜型星系的划分依据以及它们是如何形成的仍然存在很多不清楚的地方，也许对 ETGs 中存在很大比例的 FRs 的进一步研究可以帮助我们加深对透镜型星系的认识。

另一个有意思的结果是，我们发现在 SRs 中只有小部分星系存在气体发射，在我们的样本中占比为 25%；而在 FRs 中有大部分的星系都有气体发射，占比约为 70%。我认为这个可以在 $\log(SFR) - \log(M_*/M_\odot)$ 图像中得到解释：FRs 多为有显著恒星形成的星系，气体丰度较高，也较为活跃，因此自然就会有较强的气体发射，而 SRs 多为恒星形成率低，气体丰度低的星系，故气体发射较弱。

通过对星系的恒星速度分布图的研究，我们可以发现 FRs 具有规则的恒星速度分布，恒星速度较大，速度弥散较小，恒星的运动更加规律。可以当作一个简单的‘扁盘’系统^[8]。而 SRs 中恒星速度较小，速度弥散较大，恒星的运动更复杂，通常存在内部与外部的动力学解耦，无法用简单的模型来描述。作为 SRs 的一个例子，星系 8143-1902 的恒星速度分布图像（图 3-2）中，我们可以看出在中心的范围内恒星的运动速度都很小，但是在外围恒星的速度突然变大，存在突变的情况，这表明这个星系可能吸积过外部的气体或者经历过合并过程而导致星系内外的动力学解耦。

通过星系的角动量参数，我们可以推测究竟是什么样的物理过程会导致星系现在的角动量特征，

即星系可能经历的形成演化过程。

对 FRs 中的椭圆星系和透镜星系而言，由于它们存在显著的恒星形成，恒星形成的反馈过程通常会维持或者重建星系的旋转过程，帮助星系保持其内部恒星的旋转^[41]。其次在富含气体的环境中，环境中的气体会在旋转星系的潮汐力的作用下落入星系，并随着恒星共同转动，从而使 λ_{Re} 增大，为了验证这一推测需要我们对星系所处的外部环境有更多的了解，不能只通过本文已有的结果来证实。在第一章的 1.3 节中，我们提到在早期暗物质密度大的区域更容易吸积气体形成快速旋转的盘结构，如果在后续的演化过程中，没有经历过合并事件使它的动力学结构被破坏，也可能会形成 FRs。而在我们的样本中分类属于 FRs 的漩涡星系，有可能是来源于质量相差较大的两个星系的合并事件。

另一方面，对 SRs 来说，其形成过程必不可少的就是合并事件。通常大质量的 SRs 需要经历大型、反复的合并过程，不断增加它的质量的同时内部的动力学状态被破坏，从而形成复杂的动力学结构。而低质量的 SRs 则可能使两个旋转方向相反的星系合并的结果。

在我们对星系的气体吸积过程，以及星系内部的反馈机制有更细致的理解之后，可能会了解更多星系形成演化的细节。

4.2 结论

在这篇文章中，我们使用 IFS（积分视场光谱）的数据计算了 MaNGA-MPL-9 中 100 个星系样本的角动量参数 λ_{Re} 。通过分析 λ_{Re} 与星系的哈勃分类，恒星质量，恒星形成率等物理性质的关系，得到了 FRs 和 SRs 的一些普遍性质。

我们利用 $\lambda_{Re} - \varepsilon_e$ 图像对 100 个星系样本进行了动力学分类，根据恒星角动量的分类，我们发现 88% 的星系属于 FRs，12% 的星系属于 SRs。通过对第三章数据的分析我们得出了 FRs 和 SRs 的一些特征和可能的演化方式：

1. FRs 通常质量较小，恒星形成率较高，气体发射较强，并且在视椭圆率上包含的范围很大。而 SRs 通常质量较大，恒星形成率较低或几乎没有，气体发射较弱或者没有，视椭圆率也比较小，说明 SRs 比较‘圆’。

2. FRs 内部的恒星运动比较规则，速度较大，表现为角动量参数 λ_{Re} 较大。而且能表现出明显的旋转特征与盘结构，可以当作简单的‘扁盘’系统来看。而 SRs 内部的恒星运动一般不规则，速度较小，表现在角动量参数 λ_{Re} 较小，速度弥散占主导，处理起来比较复杂，不能用简单的模型来描述。

3. FRs 维持其旋转特性可能是通过数个过程：（1）星系内恒星形成的反馈过程（2）在富气体环境中的吸积过程。而使它们稳定旋转的反馈机制通常是多种因素共同作用的结果。SRs 的形成主要是经历合并事件，使这些星系的气体成分逸散，并形成复杂的动力学结构。

通过对结果的分析 and 讨论我们也发现了这篇文章值得改进的地方：

1. 我们的样本覆盖范围不够大，可能是由于样本数量少，或者是对星系哈勃分类的判断存在问题。

2. 我们没有对星系的其他物理特征进行分析，可能会导致我们对这些星系的形成演化的推测存在偏差。

在之后的工作中我们会对以上问题进行修正。

致谢

感谢山西大学每一位老师在本科的四年中对我的悉心培养。感谢施勇教授提供的课题研究方向以及对研究方法、理论体系的指导与建议。感谢李秀平老师对我毕业论文工作的指导。感谢俞效龄学长、李松霖学长、陈建杭学长对我在这个工作中的答疑解惑以及技术上的指导。感谢在我学习生活中帮助过我的父亲母亲、辅导员和每一位同学。

参考文献

- [1] Edwin P Hubble. A spiral nebula as a stellar system, messier 31. *The Astrophysical Journal*, 69, 1929.
- [2] Edwin P Hubble. Extragalactic nebulae. *The Astrophysical Journal*, 64, 1926.
- [3] EP Hubble. *Realm of the nebulae*. yale university press, new haven, 1936.
- [4] G de Vaucouleurs. *Astrophys. j.*, 128, 465. g. 1959. *Handbuch der Physik*, 53:275, 1958.
- [5] Sidney van den Bergh. A preliminary liminosity classification for galaxies of type sb. *The Astrophysical Journal*, 131:558, 1960.
- [6] Allan Sandage. *The Hubble atlas of galaxies*, volume 618. Carnegie Institution of Washington Washington, DC, 1961.
- [7] Eric Emsellem, Michele Cappellari, Davor Krajnović, Glenn Van De Ven, R Bacon, M Bureau, Roger L Davies, PT De Zeeuw, Jesús Falcón-Barroso, Harald Kuntschner, et al. The sauron project - ix. a kinematic classification for early-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 379(2):401 - 417, 2007.
- [8] Eric Emsellem, Michele Cappellari, Davor Krajnović, Katherine Alatalo, Leo Blitz, Maxime Bois, Frédéric Bournaud, Martin Bureau, Roger L Davies, Timothy A Davis, et al. The atlas3d project - iii. a census of the stellar angular momentum within the effective radius of early-type galaxies: Unveiling the distribution of fast and slow rotators. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414(2):888 - 912, 2011.
- [9] Gabriella De Lucia, Simone Weinmann, Bianca M Poggianti, Alfonso Aragon-Salamanca, and Dennis Zaritsky. The environmental history of group and cluster galaxies in a λ cold dark matter universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423(2):1277 - 1292, 2012.
- [10] Houjun Mo, Frank Van den Bosch, and Simon White. *Galaxy formation and evolution*. Cambridge University Press, 2010.
- [11] Dušan Kereš, Neal Katz, David H Weinberg, and Romeel Davé. How do galaxies get their gas? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 363(1):2 - 28, 2005.
- [12] Frédéric Bournaud, Bruce G Elmegreen, and Debra Meloy Elmegreen. Rapid formation of exponential disks and bulges at high redshift from the dynamical evolution of clump-cluster and chain galaxies. *The Astrophysical Journal*, 670(1):237, 2007.
- [13] OK Sil'chenko. Evolution of galaxies: inside-out? outside-in? *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 29:9 - 16, 2015.
- [14] Jenica E Nelan, Russell J Smith, Michael J Hudson, Gary A Wegner, John R Lucey, Stephen AW Moore, Stephen J Quinney, and Nicholas B Suntzeff. Noao fundamental plane survey. ii. age and metallicity along the red sequence from line-strength data. *The Astrophysical Journal*, 632(1):137, 2005.
- [15] N Lyskova, E Churazov, A Moiseev, O Sil'chenko, and I Zhuravleva. Stellar kinematics of x-ray bright massive elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441(3):2013 - 2033, 2014.
- [16] Maarten Baes, OK Sil'chenko, AV Moiseev, and EA Manakova. Metallicity and age

- gradients in round elliptical galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 467(3):991 – 1001, 2007.
- [17] Evelyn J Johnston, Alfonso Aragón-Salamanca, and Michael R Merrifield. The origin of s0s in clusters: evidence from the bulge and disc star formation histories. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441(1):333 – 342, 2014.
 - [18] Zheng Zheng, David A Thilker, Timothy M Heckman, Gerhardt R Meurer, WS Burgett, KC Chambers, ME Huber, N Kaiser, EA Magnier, N Metcalfe, et al. The structure and stellar content of the outer disks of galaxies: a new view from the pan-starrs1 medium deep survey. *The Astrophysical Journal*, 800(2):120, 2015
 - [19] Gerard de Vaucouleurs. Recherches sur les nebuleuses extragalactiques. In *Annales d’ Astrophysique*, volume 11, page 247, 1948.
 - [20] G De Vaucouleurs and S Flügge. *Handbuch der physik*. Berlin: Springer, 53:275, 1959.
 - [21] Kenneth C Freeman. On the disks of spiral and s0 galaxies. *The Astrophysical Journal*, 160:811, 1970.
 - [22] D Burstein. Structure and origin of s0 galaxies. i-surface photometry of s0galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 41:435 – 450, 1979.
 - [23] N Caon, M Capaccioli, and M D’ onofrio. On the shape of the light profiles of early-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 265(4):1013 – 1021, 1993.
 - [24] Jose Luis Sersic. Atlas de galaxias australes. *Cordoba, Argentina: Observatorio Astronomico, 1968*, 1968.
 - [25] M Capaccioli. In world of galaxies, eds. hg corwin jr., l bottinelli, 208 – 227, 1989.
 - [26] R Bender, P Surma, S Doebereiner, C Moellenhoff, and R Madejsky. Isophote shapes of elliptical galaxies. ii-correlations with global optical, radio and x-ray properties. *Astronomy and Astrophysics*, 217:35 – 43, 1989.
 - [27] John Kormendy and Ralf Bender. A proposed revision of the hubble sequence for elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal Letters*, 464(2):L119, 1996.
 - [28] P Tim de Zeeuw, M Bureau, Eric Emsellem, R Bacon, C Marcella Carollo, Y Copin, Roger L Davies, Harald Kuntschner, Bryan W Miller, G Monnet, et al. The sauron project—ii. sample and early results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 329(3):513 – 530, 2002.
 - [29] Eric Emsellem, Michele Cappellari, Reynier F Peletier, Richard M McDermid, R Bacon, M Bureau, Y Copin, Roger L Davies, Davor Krajnović, Harald Kuntschner, et al. The sauron project - iii. integral-field absorptionline kinematics of 48 elliptical and lenticular galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 352(3):721 – 743, 2004.
 - [30] Davor Krajnović, Eric Emsellem, Michele Cappellari, Katherine Alatalo, Leo Blitz, Maxime Bois, Frédéric Bournaud, Martin Bureau, Roger L Davies, Timothy A Davis, et al. The atlas3d project - ii. morphologies, kinematic features and alignment between photometric and kinematic axes of early-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414(4):2923 – 2949, 2011.
 - [31] Garth Illingworth. Rotation in 13 elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal*,

- 218:L43 – L47, 1977.
- [32] PAUL L Schechter and JAMES E Gunn. Observations of the internal dynamics of 12 elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal*, 229:472 – 484, 1979.
 - [33] James Binney. On the rotation of elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 183(3):501 – 514, 1978.
 - [34] James Binney and Scott Tremaine. *Galactic dynamics*. 2008.
 - [35] Niv Drory, N MacDonald, MA Bershad, K Bundy, J Gunn, DR Law, M Smith, R Stoll, CA Tremonti, DA Wake, et al. The manga integral field unit fiber feed system for the sloan 2.5 m telescope. *The Astronomical Journal*, 149(2):77, 2015.
 - [36] Samir Salim, Janice C Lee, Steven Janowiecki, Elisabete Da Cunha, Mark Dickinson, Médéric Boquien, Denis Burgarella, John J Salzer, and Stéphane Charlot. Galex – sdss – wise legacy catalog (gswlc): Star formation rates, stellar masses, and dust attenuations of 700,000 low-redshift galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 227(1):2, 2016.
 - [37] Samir Salim, Médéric Boquien, and Janice C Lee. Dust attenuation curves in the local universe: demographics and new laws for star-forming galaxies and high-redshift analogs. *The Astrophysical Journal*, 859(1):11, 2018.
 - [38] Kyle W Willett, Chris J Lintott, Steven P Bamford, Karen L Masters, Brooke D Simmons, Kevin RV Casteels, Edward M Edmondson, Lucy F Fortson, Sugata Kaviraj, William C Keel, et al. Galaxy zoo 2: detailed morphological classifications for 304 122 galaxies from the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435(4):2835 – 2860, 2013.
 - [39] 李松霖. 一个位于椭圆星系中心的盘星系: MaNGA-8335-6101. 南京大学本科生毕业论文. 2017 年
 - [40] Yifei Jin, Yanmei Chen, Yong Shi, Christy A Tremonti, Matthew A Bershad, Michael Merrifield, Eric Emsellem, Hai Fu, D Wake, Kevin Bundy, et al. Sdss-iv manga: properties of galaxies with kinematically decoupled stellar and gaseous components. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463(1):913 – 926, 2016.
 - [41] Ralf Bender, David Burstein, and SM Faber. Dynamically hot galaxies. i-structural properties. *The Astrophysical Journal*, 399:462 – 477, 1992.

附录 1 计算角动量的代码

```
#导入要用到的包
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import Ellipse
import numpy as np
from astropy.io import fits
import pandas as pd
from plotbin import display_pixels
import gc
import xldr
import matplotlib
import matplotlib.colors as col
import matplotlib.cm as cmd
from pylab import *
mpl.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei']
%matplotlib inline
%xmode Plain
%config InlineBackend.figure_format = 'svg'
#定义数学函数
sin = np.sin
cos = np.cos
pi = np.pi
sqrt = np.sqrt
#定义判断星系 HubbleType 的函数
def ga_type(t1_sm_fl, t4_sp_fl, t1_dis_fl, t2_eo_fl, t4_nsp_fl):
    if t1_sm_fl == 1:
        return('E')
    if t4_sp_fl == 1:
        return('S')
    if t1_dis_fl == 1:
        if t2_eo_fl == 1:
            if t4_nsp_fl == 1:
                return('S0')
    return
#打开需要的文件
dra_all = fits.open('D:/Data/drpal1-v2_5_3_uniq.fits')
nas_file_Ma = fits.open('D:/Data/nsa_v1_0_1.fits')
GSW_LC_da = fits.open('D:/Data/GSWLC-A2.fits')
ga_zoo = fits.open('D:/Data/zoo2MainSpecz.fits')
#获取 MaNGA 中星系的 nasiauname
nas_name_ma = dra_all[1].data.field('NSA_IAUNAME')
nas_name_Ma = nas_file_Ma[1].data.field('IAUNAME')
```

```

#MaNGA 与 GSWLC-A2 的 nasiauname 交集
nas_name_sl = np.array(list(set(nas_name_ma) & set(nas_name_Ma)))
#从 nas 中获取 MaNGA 的 plate mjd fiberid
pla_id_Ma = []
fib_id_Ma = []
mjd_id_Ma = []
for i in range(0, len(nas_name_sl)):
    iau_name_i = nas_name_sl[i]
    pla_id_Ma_i = nas_file_Ma[1].data[nas_file_Ma[1].data['IAUNAME']
    iau_name_i]['PLATE']
    fib_id_Ma_i = nas_file_Ma[1].data[nas_file_Ma[1].data['IAUNAME']
    iau_name_i]['FIBERID']
    mjd_id_Ma_i = nas_file_Ma[1].data[nas_file_Ma[1].data['IAUNAME']
    iau_name_i]['MJD']
    pla_id_Ma.append(pla_id_Ma_i)
    fib_id_Ma.append(fib_id_Ma_i)
    mjd_id_Ma.append(mjd_id_Ma_i)
pla_id_ma_1 = np.reshape(pla_id_Ma, (-1, 6386))
fib_id_ma_1 = np.reshape(fib_id_Ma, (-1, 6386))
mjd_id_ma_1 = np.reshape(mjd_id_Ma, (-1, 6386))
pla_id_ma = []
fib_id_ma = []
mjd_id_ma = []
for i in range(0, 6386):
    mjd_id_ma1 = ''.join(str(mjd_id_ma_1[0][i]))
    pla_id_ma1 = ''.join(str(pla_id_ma_1[0][i]))
    fib_id_ma1 = ''.join(str(fib_id_ma_1[0][i]))
    pla_id_ma.append(pla_id_ma1)
    fib_id_ma.append(fib_id_ma1)
    mjd_id_ma.append(mjd_id_ma1)
p_m_f_m = []
for i in range(0, len(pla_id_ma)):
    p_m_f_m.append(pla_id_ma[i] + '-' + mjd_id_ma[i] + '+' + fib_id_ma[i])
#获取最后的 plate mjd fiberid
p_m_f_fin = [i for i in p_m_f_d if i in p_m_f_m]
#获取 GSWLC-A2 的 plate mjd fiberid
flag_sed = np.array(GSW_LC_da[1].data.field('flag_sed'))
sl_flag = np.where(flag_sed == 0)
pla_id_Da = GSW_LC_da[1].data.field('PLATE')[sl_flag]
fib_id_Da = GSW_LC_da[1].data.field('FIBERID')[sl_flag]
mjd_id_Da = GSW_LC_da[1].data.field('MJD')[sl_flag]
pla_id_da = []
fib_id_da = []

```

```

mjd_id_da = []
# obj_id_da = []
for i in range(0, 632272):
    pla_id_1 = ''.join(str(pla_id_da[i]))
    fib_id_1 = ''.join(str(fib_id_da[i]))
    mjd_id_1 = ''.join(str(mjd_id_da[i]))
    pla_id_da.append(pla_id_1)
    fib_id_da.append(fib_id_1)
    mjd_id_da.append(mjd_id_1)
p_m_f_d = []
for i in range(0, 632272):
    p_m_f_d.append(pla_id_da[i] + '-' + mjd_id_da[i] + '+' + fib_id_da[i])
p_m_f_d
#获取 GSWLC-A2 里的 objid
obj_id_da = []
for i in range(0, len(p_m_f_fin)):
    p_l = p_m_f_fin[i][:str(p_m_f_fin[i]).index('-')]
    m_j_1 = p_m_f_fin[i][str(p_m_f_fin[i]).index('-'):p_m_f_fin[i].index('+')]
    m_j = m_j_1[1:]
    f_i = p_m_f_fin[i][str(p_m_f_fin[i]).index('+'):]
    obj_id_da_i = GSW_LC_da[1].data[(GSW_LC_da[1].data['PLATE'] == int(p_l)) &
    (GSW_LC_da[1].data['MJD'] == int(m_j)) & (GSW_LC_da[1].data['FIBERID'] ==
    int(f_i))]['objid']
    obj_id_da.append(obj_id_da_i)
print(len(obj_id_da))
#获取 galaxy zoo 的 objid
dr8obj_id = ga_zoo[1].data.field('dr8objid')
#获取 gsw 和 galaxyzoo 的交集
obj_fin = [i for i in dr8obj_id if i in obj_id_da]
#根据星系的 obj 判断其 type
obj_gaty = {}
for i in range(0, len(obj_fin)):
    t1_sm_fl = ga_zoo[1].data[ga_zoo[1].data['dr8objid'] ==
obj_fin[i]]['t01_smooth_or_features_a01_smooth_flag']
    t4_sp_fl = ga_zoo[1].data[ga_zoo[1].data['dr8objid'] ==
obj_fin[i]]['t04_spiral_a08_spiral_flag']
    t1_dis_fl = ga_zoo[1].data[ga_zoo[1].data['dr8objid'] ==
obj_fin[i]]['t01_smooth_or_features_a02_features_or_disk_flag']
    t2_eo_fl = ga_zoo[1].data[ga_zoo[1].data['dr8objid'] ==
obj_fin[i]]['t02_edgeon_a05_no_flag']
    t4_nsp_fl = ga_zoo[1].data[ga_zoo[1].data['dr8objid'] ==
obj_fin[i]]['t04_spiral_a09_no_spiral_flag']
    obj_gaty['objid'] + str(obj_fin[i]) =

```

```

ga_type(t1_sm_fl, t4_sp_fl, t1_dis_fl, t2_eo_fl, t4_nsp_fl)
#获取星系的哈勃分类为'E''S''S0'的objid
obj_id_f = []
for key in obj_gaty:
    if obj_gaty[key] == 'E' or obj_gaty[key] == 'S' or obj_gaty[key] == 'S0':
        obj_id_f.append(key)
#从确定 type 的星系中选出 100 个样本
import random
obj_s = random.sample(obj_id_f, 100)
#获取选好的objid样本的plateifu
p_id = []
m_id = []
f_id = []
p_m_f = []
pla_ifu_f = []
for i in range(0, len(obj_sam)):
    p_id_f_i = GSW_LC_da[1].data[GSW_LC_da[1].data['objid'] == int(obj_sam[i])]['PLATE']
    m_id_f_i = GSW_LC_da[1].data[GSW_LC_da[1].data['objid'] == int(obj_sam[i])]['MJD']
    f_id_f_i = GSW_LC_da[1].data[GSW_LC_da[1].data['objid'] == int(obj_sam[i])]['FIBERID']
    n_in_f_i = nas_file_Ma[1].data[(nas_file_Ma[1].data['PLATE'] == int(p_id_f_i)) &
(nas_file_Ma[1].data['MJD'] == int(m_id_f_i)) & (nas_file_Ma[1].data['FIBERID'] == int(f_id_f_i))]['IAUNAME']
    p_if_f_i = dra_all[1].data[dra_all[1].data['NSA_IAUNAME'] == n_in_f_i]['PLATEIFU']
    pla_ifu_f.append(p_if_f_i)
    p_id.append(str(int(p_id_f_i)))
    m_id.append(str(int(m_id_f_i)))
    f_id.append(str(int(f_id_f_i)))
    p_m_f.append(str(int(p_id_f_i) + '-' + str(int(m_id_f_i)) + '+' + str(int(f_id_f_i))))
p_i_f = np.reshape(pla_ifu_f, (-1, 100))
pifu_f = []
for i in range(0, 100):
    pifu_f.append(p_i_f[0][i])
print(pifu_f)
#定义样本
sample_fin = pifu_f
#获取 maps 文件的路径
ds_lam = {}
e_ellip = []
dg_lam = {}
e_ellip_g = []
for i in range(0, 100):

```

```

p_la = sample_fin[i][:str(sample_fin[i]).index('-')]
i_fu = sample_fin[i][str(sample_fin[i]).index('-'):]
i_fu_1 = i_fu[1:]
plateifu_i = p_la + i_fu
plateifu_i_pa = p_la + "/" + i_fu_1
path_0 =
list(str("D:/Data/data.sdss.org/sas/mangawork/manga/spectro/analysis/MPL-9/SPX-
MILESHC-MASTARHC/12222/22221/manga-12222-22221-MAPS-SPX-MILESHC-MASTARHC.fits"))
path_0[86:97] = plateifu_i_pa
path_0[104:115] = plateifu_i
path_fin = ''.join(path_0).replace(' ', '')
#读取 maps 文件
hdu = fits.open(path_fin)
#读 catalog 中的数据
re = dra_all[1].data[dra_all[1].data['PLATEIFU'] == plateifu_i]['NSA_SERSIC_TH50']
pa = ((dra_all[1].data[dra_all[1].data['PLATEIFU'] ==
plateifu_i]['NSA_SERSIC_PHI'])/180)*pi + pi/2
ba = dra_all[1].data[dra_all[1].data['PLATEIFU'] == plateifu_i]['NSA_SERSIC_BA']
#stellar part
#读取计算恒星角动量需要的数据
cor = np.array(hdu[1].data)
nx = np.array(-cor[0, :, :])
nx_0 = nx.shape[0]
nx_1 = nx.shape[1]
xcor = np.reshape(np.array(-cor[0, :, :]), nx_0*nx_1)
ycor = np.reshape(np.array(cor[1, :, :]), nx_0*nx_1)
mflux = np.reshape(np.array(hdu[3].data), nx_0*nx_1)
snr = np.reshape(np.array(hdu[5].data), nx_0*nx_1)
vstar = np.reshape(np.array(hdu[15].data), nx_0*nx_1)
vstarmask = np.reshape(np.array(hdu[17].data), nx_0*nx_1)
sigmamask = np.reshape(np.array(hdu[20].data), nx_0*nx_1)
sigma = np.reshape(np.array(hdu[18].data), nx_0*nx_1)
sigma_cor_0 = np.array(np.array(hdu[21].data)[0, :, :])
sigma_cor = np.reshape(sigma_cor_0, nx_0*nx_1)
#对数据进行修正、筛选
sigma_fin2 = sigma**2-sigma_cor**2
exam= np.where(sigma_fin2 < 0)
sigma_fin2[exam]=0
a_1 = np.where(snr >= 3)
a_2 = np.where(sigmamask == 0)
a_3 = np.where(vstarmask == 0)
igd = np.array(a_1 and a_2 and a_3 )
igd = np.reshape(igd, igd.shape[0]*igd.shape[1])

```

```

sysv = np.median(vstar[igd])
covel = vstar - sysv
#将图像旋转成方便计算的样子
rot1 = np.reshape(np.array([[cos(pa), -sin(pa)], [sin(pa), cos(pa)]]), (-1, 2))
rot2 = np.reshape(np.array([[cos(pa), sin(pa)], [-sin(pa), cos(pa)]]), (-1, 2))
cor2 = np.array(np.dot(rot2, np.array([xcor[igd], ycor[igd]])))
#圈定 re 的范围, 然后计算
yelip = re*ba*sqrt(1-((cor2[0, :]/re)**2)*((2*(cor2[1, :] > 0)-1)) #画 re 的边界
lielip = igd[np.abs(cor2[1, :] - yelip) < .7] #选择线上的点计算
ielip = igd[np.abs(cor2[1, :]) <= np.abs(yelip)] #选择圈内的点计算
#计算恒星的角动量参数
l_up_rin =
np.sum(mflux[ielip]*sqrt(xcor[ielip]**2+ycor[ielip]**2)*np.abs(covel[ielip]))
l_down_rin =
np.sum(mflux[ielip]*sqrt(xcor[ielip]**2+ycor[ielip]**2)*sqrt(covel[ielip]**2+sigma_fin
2[ielip]))
lam_rin_i = l_up_rin/l_down_rin
#将计算好的角动量和椭圆率保存
ds_lam['s_lam'+ ' ' + plateifu_i] = lam_rin_i
e_ellip.append(1-ba)
#gas part
#判断星系是否有气体发射
gflux = np.array(hdu[30].data)
oiii_gflux = np.reshape(np.array(gflux[16, :, :]), nx_0*nx_1)
gflux_iva = np.array(hdu[31].data)
oiii_gflux_iva = np.reshape(np.array(gflux_iva[16, :, :]), nx_0*nx_1)
oiii_snr = sqrt(oiii_gflux_iva)*oiii_gflux
g_sigmask_0 = np.array(hdu[42].data)
g_sigmask = np.reshape(g_sigmask_0[16, :, :], nx_0*nx_1)
a_4 = np.where(oiii_snr >= 3)
a_5 = np.where(g_sigmask == 0)
rate_gas = len(oiii_gflux[a_4])/len(oiii_gflux[a_5])
if rate_gas >= 1/3 :
    #读取剩余数据
    vgas_0 = np.array(hdu[37].data)
    vgas = np.reshape(vgas_0[17, :, :], nx_0*nx_1)
    vgasmask_0 = np.array(hdu[39].data)
    vgasmask = np.reshape(vgasmask_0[17, :, :], nx_0*nx_1)
    a_6 = np.where(vgasmask == 0)
    g_igd_0 = np.array(a_4 and a_5 and a_6)
    g_igd = np.reshape(g_igd_0, g_igd_0.shape[0]*g_igd_0.shape[1])
    g_sysv = np.median(vgas[g_igd])
    g_covel = vgas - g_sysv

```

```

g_sigma_0 = np.array(hdu[40].data)
g_sigma = np.reshape(g_sigma_0[17, :, :], nx_0*nx_1)
instsigma_0 = np.array(hdu[43].data)
instsigma = np.reshape(instsigma_0[17, :, :], nx_0*nx_1)
#修正仪器误差
g_sigma_fin2 = g_sigma**2 - instsigma**2
g_exam = np.where(g_sigma_fin2 < 0 )
g_sigma_fin2[g_exam] = 0
#计算 gas 的角动量
cor2_g = np.array(np.dot(rot2, np.array([xcor[g_igd], ycor[g_igd]])))
g_yelip = re*ba*sqrt(1-((cor2_g[0, :])/re)**2)*((2*(cor2_g[1, :]>0)-1))
g_lielip = g_igd[np.abs(cor2_g[1, :] - g_yelip) < .7]
g_ielip = g_igd[np.abs(cor2_g[1, :]) <= np.abs(g_yelip)]
g_l_up_rin =
np.sum(oiii_gflux[g_ielip]*sqrt(xcor[g_ielip]**2)*np.abs(g_covel[g_ielip]))
g_l_down_rin =
np.sum(oiii_gflux[g_ielip]*sqrt(xcor[g_ielip]**2+ycor[g_ielip]**2)*sqrt(g_covel[g_ieli
p]**2+g_sigma_fin2[g_ielip]))
g_lam_rin = g_l_up_rin/g_l_down_rin
#保存得到的气体角动量
dg_lam[plateifu_i] = g_lam_rin
e_ellip_g.append(1-ba)
#将计算出的恒星角动量、气体角动量、椭圆率转换格式
ls_lam = []
lg_lam = []
lifu_s = []
lifu_g = []
for key in ds_lam:
    ls_lam.append(ds_lam[key])
    lifu_s.append(key)
ls_lam_n = np.array(ls_lam)
for key in dg_lam:
    lg_lam.append(dg_lam[key])
    lifu_g.append(key)
lg_lam_n = np.array(lg_lam)
eg_ellip = np.reshape(e_ellip, (-1, 100))
e_ell_gas1 = np.reshape(e_ellip_g, (-1, 69))
eg_ell = []
e_ell_gas = []
for i in range(0, 100):
    eg_ell.append(eg_ellip[0][i])
for i in range(0, 69):
    e_ell_gas.append(e_ell_gas1[0][i])

```



```

lg_lam_fin = []
e_gas = []
pifu_gas = []
for i in range(len(lg_lam_n)):
    if lg_lam_n[i] > 0 and lg_lam_n[i] < 1:
        lg_lam_fin.append(lg_lam_n[i])
        e_gas.append(e_ell_gas[i])
for key in dg_lam:
    if dg_lam[key] >0 and dg_lam[key] < 1:
        pifu_gas.append(key)
g_pifu = []
for key in pifu_gas:
    g_pifu.append(key)
#读取星系的恒星质量、恒星形成率
ste_m_g = []
sfr_g = []
for i in range(len(obj_gas)):
    ste_m_i = np.array(GSW_LC_da[1].data[GSW_LC_da[1].data['objid'] ==
int(obj_gas[i])]['logm'])
    sfr_i = np.array(GSW_LC_da[1].data[GSW_LC_da[1].data['objid'] ==
int(obj_gas[i])]['logsfr'])
    ste_m_g.append(ste_m_i)
    sfr_g.append(sfr_i)
#画速度场的图像
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111)
plt.rcParams['axes.unicode_minus'] = False
vstar = display_pixels.display_pixels(xcor[igd], ycor[igd], covel[igd], colorbar =
True, label = 'km/s')
elip = Ellipse(xy = (0,0), width = re * 2, height = re * ba * 2, angle =
(pa*180)/pi, edgecolor = "black", facecolor = "none")
ax.add_patch(elip)
title_text_obj=plt.title('v_star', fontsize = 13, verticalalignment = 'bottom')
xlabel_obj=plt.xlabel('arcsec', fontsize=12)
ylabel_obj=plt.ylabel('arcsec', fontsize=12)
plt.savefig('s_v_m_8143-1902.png', dpi=600, format='png')
plt.show()
#画角动量参数 vs 椭圆率的图像，并将星系样本分为 FRs 和 SRs
%matplotlib inline
x = np.arange (0, 1, 0.01)
y=[]
for t in x:
    y_1 = 0.31*sqrt(t)

```

```

        y.append(y_1)
c_v = []
fr_s = []
fr_e = []
sr_e = []
sr_s = []
for i in range(0,65):
    if lg_lam_fin[i] > 0.31 * sqrt(e_gas[i]):
        color_1 = 'red'
        fr_s.append(lg_lam_fin[i])
        fr_e.append(e_gas[i])
    else:
        color_1 = 'blue'
        sr_s.append(lg_lam_fin[i])
        sr_e.append(e_gas[i])
    c_v.append(color_1)
t_1 = plt.scatter(fr_e, fr_s, c = 'red')
t_2 = plt.scatter(sr_e, sr_s, c = 'blue')
plt.legend(handles=[t_1, t_2], labels=['Fast Rotators', 'Slow Rotators'])
xlabel_obj=plt.xlabel('$\epsilon_R$', fontsize=12)
ylabel_obj=plt.ylabel('$\lambda_R$(gas)', fontsize=12)
ex_1 = [0.305994, 0.410552]
ex_2 = [0.2815876, 0.2356065]
plt.plot(ex_1, ex_2, 'w+')
plt.plot(x, y, 'g')
plt.savefig('lg-e.png', dpi=600, format='png')
plt.show()
#在角动量参数 vs 椭圆率图像的基础上添加星系的哈勃分类
x = np.arange (0, 1, 0.01)
y=[]
for t in x:
    y_1 = 0.31*sqrt(t)
    y.append(y_1)
E_t = []
S_t = []
S0_t = []
St_e = []
Et_e = []
S0t_e = []
for i in range(0,100):
    if ga_ty_sam[i] == 'E':
        E_t.append(ls_lam_n[i])
        Et_e.append(eg_ell[i])

```

```

elif ga_ty_sam[i] == 'S':
    S_t.append(ls_lam_n[i])
    St_e.append(eg_ell[i])
elif ga_ty_sam[i] == 'S0':
    S0_t.append(ls_lam_n[i])
    S0t_e.append(eg_ell[i])
t_1 = plt.scatter(Et_e, E_t, c = 'red', marker = 'o')
t_2 = plt.scatter(St_e, S_t, c = 'blue', marker = 's')
t_3 = plt.scatter(S0t_e, S0_t, c = 'green', marker = 'p')
plt.legend(handles=[t_1, t_2, t_3], labels=['E(椭圆星系)', 'S(漩涡星系)', 'l(透镜型星系)'])
plt.plot(x, y, 'm')
xlabel_obj=plt.xlabel('  $\epsilon$  ', fontsize=12)
ylabel_obj=plt.ylabel('  $\lambda$  (staller)', fontsize=12)
plt.savefig('ls-e-gt.png', dpi=600, format='png')
plt.show()
#画星系的恒星形成率与恒星质量的图像
file4 = fits.open('D:/data/GSWLC-A2.fits')
indpix = np.where((file4[1].data.field("logsfr") != -99) &
(file4[1].data.field("logm") != 99))[0]
x = file4[1].data.field("logm")[indpix]
y = file4[1].data.field("logsfr")[indpix]
x0 = 7.0
dx0 = 0.1
y0 = -5.0
dy0 = 0.5
xx = np.zeros((60, 18))
yy = np.zeros((60, 18))
zz = np.zeros((60, 18))
for ix in range(0, 59):
    x1 = x0 + ix * dx0
    x2 = x1 + dx0
    for iy in range(0, 17):
        y1 = y0 + iy * dy0
        y2 = y1 + dy0
        ind = np.sum((x >= x1) & (x <= x2) & (y >= y1) & (y <= y2))
        xx[ix, iy] = (x1 + x2)/2.
        yy[ix, iy] = (y1 + y2)/2.
        zz[ix, iy] = ind
fig = plt.figure()
plt.rcParams["xtick.direction"] = "in"
plt.rcParams["ytick.direction"] = "in"
plt.rcParams["xtick.top"] = True

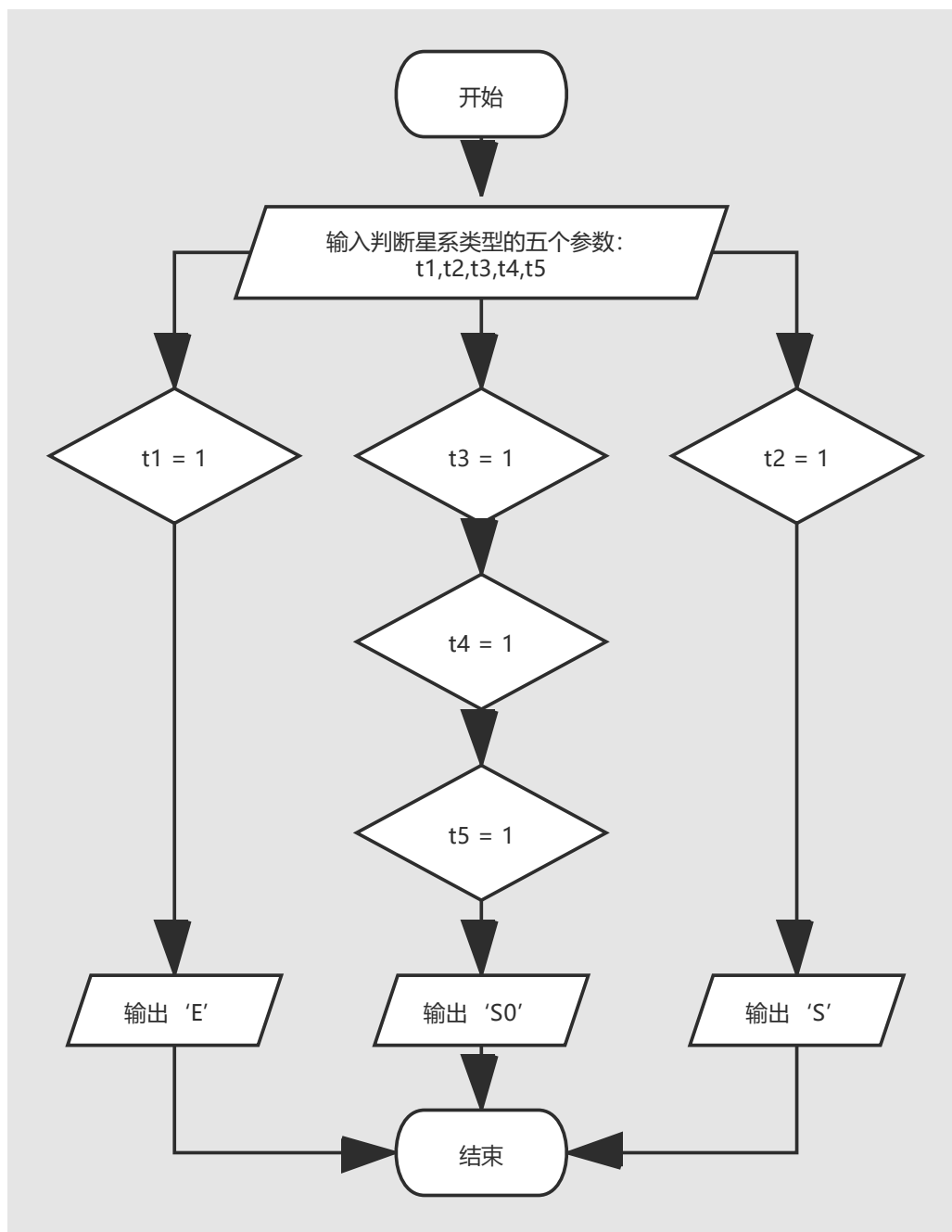
```

```

plt.rcParams["ytick.right"] = True
plt.rcParams["xtick.minor.visible"] = True
plt.rcParams["ytick.minor.visible"] = True
mpl.rcParams['axes.linewidth'] = 1.5
plt.subplots_adjust(left=0.10, bottom=0.15, right=0.96, top=0.95, hspace=0.1, wspace=0.2)
ax = fig.add_subplot(111)
ax.tick_params(direction='in', labelsz = 12, length = 6, width=1.2)
ax.set_xlim(8.5, 12)
ax.set_ylim(-5, 2)
ax.set_xlabel(r"$\rm{log}[(M_*) / (M_{\odot})]$", fontsize=15)
ax.set_ylabel(r"$\rm{log(SFR) \ [M_{\odot} \ yr^{-1}]}$", fontsize=15)
ax.contour(xx, yy, zz, [600, 1800, 3200, 6000, 8000, 10000], colors = "black", linewidths = 1)
startcolor = '#ff6163'    #红色,
midcolor = '#00ff00'      #绿色,
endcolor = '#00008B'      #蓝色,
cmap2 = col.LinearSegmentedColormap.from_list('own2', [startcolor, midcolor, endcolor])
ranking = np.array(ls_lam_n)
cm = plt.cm.get_cmap('own2')
scatter = ax.scatter(m_s, sfr_s, c=ranking, vmin=0, vmax = 0.9, cmap = cm )
cbar = plt.colorbar(scatter)
cbar.ax.set_ylabel('λ (stellar)')
xx2 = np.linspace(8.5, 12, 100)
yy2 = 0.86 * xx2 - 9.29
ax.plot(xx2, yy2, "--", c = 'm')
plt.savefig('sfr-sm-lam.png', dpi=600, format='png')

```

附录 2 判断星系哈勃分类的程序框图



上图是判断星系哈勃分类的程序框图，其中参数 t1, t2, t3, t4, t5 分别表示 t01_smooth_or_features_a01_smooth_flag; t04_spiral_a08_spiral_flag; t01_smooth_or_features_a02_features_or_disk_flag; t02_edgion_a05_no_flag; t04_spiral_a09_no_spiral_flag 这五个量，通过对这五个量的判断得到星系的分类：'E' 为椭圆星系，'S0' 为透镜型星系，'S' 为漩涡星系。

附 录 3 数据表

星系的 Plate-ifu	$\lambda_{Re}(\text{stellar})$	λ_{Re}	ε_e	Hubble Type	$\log(SFR)/$ (M_{\odot}/yr)	$\log(M_{*})$ $/M_{\odot})$
10510-6101	0.582340658	0.55078350	0.439076	S	-0.187	10.678
9024-3701	0.058731217	--	0.001436	E	-1.902	10.605
8988-6102	0.407132149	0.28158760	0.305994	S	0.680	11.638
8248-12705	0.416096151	0.24459314	0.061537	S	0.016	11.161
8934-12705	0.287742317	--	0.383976	S0	-2.767	10.435
8947-12704	0.328332722	0.22857580	0.279925	S	0.003	10.946
9892-3701	0.232642040	--	0.191194	E	-0.914	11.268
8141-6104	0.127771452	--	0.171929	E	-1.206	11.474
8722-12701	0.164998934	--	0.259398	E	0.001	11.568
8987-9102	0.578357816	0.24503860	0.651268	S	0.792	10.304
8319-6101	0.032315537	--	0.140527	E	-0.355	11.252
7957-6103	0.429547220	--	0.162486	E	-1.845	11.017
8614-6101	0.531323135	0.36459622	0.476959	S	1.008	10.803
8315-1902	0.314039320	--	0.406210	E	-1.331	10.430
8333-3701	0.514548719	0.14912459	0.137134	S	0.633	11.066
8248-12704	0.791543067	0.36557582	0.194728	S	0.693	11.136
8725-12703	0.135448724	--	0.147370	E	-0.682	10.363
9087-6102	0.326078922	--	0.190267	E	-1.229	10.501
8998-1902	0.140769348	0.02651364	0.162024	E	-3.135	9.691
8257-6103	0.542559862	0.28466755	0.081041	S	0.488	11.409
9185-12701	0.586204171	0.42543975	0.214220	S	0.066	10.774
8335-6103	0.088541538	--	0.312361	E	-0.844	11.552
8554-1902	0.346015781	0.12336789	0.241677	E	-2.500	10.115
10218-6102	0.721769452	0.44771996	0.531057	E	0.027	10.603
8624-12701	0.265553683	--	0.211093	E	-1.216	11.621
9028-1901	0.151979506	--	0.320661	E	-2.381	10.562
8461-12704	0.654682398	0.38862497	0.565940	S	-1.209	9.300
9002-3701	0.255067706	--	0.405126	E	-1.254	10.741
8723-12701	0.809148073	--	0.508633	S	0.593	11.231
8319-12701	0.106240556	--	0.013692	E	-0.931	11.287

续表:

星系的 Plate-ifu	$\lambda_{Re}(\text{stellar})$	λ_{Re}	ε_e	Hubble Type	$\log(SFR)/$ (M_{\odot}/yr)	$\log(M_{*}$ / M_{\odot})
8453-12701	0.713207841	0.41565020	0.242003	S	-0.211	10.355
8625-9101	0.665785372	0.11603955	0.585737	S	0.284	10.470
9501-9102	0.709497273	0.42904362	0.326063	S	0.107	10.583
8448-12701	0.119887486	--	0.352601	E	-1.570	11.145
8261-6102	0.473503709	0.20826149	0.212274	S	-0.103	10.323
8985-6104	0.540902674	0.28517297	0.609806	S	0.338	10.391
8938-6101	0.047567837	--	0.157326	E	-1.841	11.096
8551-12705	0.516449571	0.31116948	0.137986	S	0.661	10.365
8138-12704	0.731745899	0.30003664	0.374536	S	0.549	11.280
8994-12705	0.759895384	0.63026800	0.613728	S	-0.019	11.066
9493-12703	0.159120530	--	0.224073	E	-1.124	11.333
8482-9101	0.678724706	0.29499257	0.018692	S0	-0.760	11.017
9047-6102	0.061108202	0.23559540	0.087883	E	-1.857	11.087
9032-3704	0.348971844	0.29191402	0.166617	S	0.784	10.571
10215-12705	0.732268095	0.27826950	0.117715	S	0.496	10.891
10514-12703	0.529406846	0.22412492	0.308418	S	-0.492	9.569
7958-3702	0.649860501	0.36316288	0.476931	S	0.374	10.693
8245-6102	0.427287757	--	0.350477	S	0.487	10.628
8604-6104	0.207128614	--	0.147284	E	-1.940	10.884
8625-12703	0.788483739	0.56155807	0.469388	S	-0.026	11.076
8947-9101	0.424522370	0.15670995	0.288205	S	0.897	11.056
8143-1902	0.053024322	0.23560650	0.410552	E	-1.265	10.188
8465-3704	0.447598815	--	0.246672	E	-1.565	10.697
8588-9102	0.277431369	0.13762295	0.095307	S	0.012	10.306
8568-3704	0.421942949	0.18595529	0.137367	S	0.685	10.708
8989-9101	0.294733077	0.40677637	0.669390	S	-1.261	10.657
9867-12702	0.673223913	0.23122850	0.188234	S	-0.173	10.004
9045-9102	0.084533386	0.28214034	0.299912	E	-1.902	11.030
9486-1901	0.337010890	0.21247108	0.260601	E	-1.103	9.216
9086-12703	0.786616623	0.54337270	0.524245	S	0.399	11.280
9182-12703	0.659763336	0.21157092	0.451772	S	0.310	11.226

续表:

星系的 Plate-ifu	$\lambda_{Re}(\text{stellar})$	λ_{Re}	ε_e	Hubble Type	$\log(SFR)/$ (M_{\odot}/yr)	$\log(M_{*})$ $/M_{\odot})$
8332-3702	0.507679701	0.43473002	0.322899	S	0.638	10.283
8947-3702	0.488223016	0.10338671	0.555450	E	-2.557	10.549
9882-6102	0.504299402	0.21000065	0.102020	S	-0.781	9.083
9044-3701	0.611295342	--	0.407257	S	-1.426	11.132
9510-3702	0.567029297	0.12840824	0.293239	S	0.141	10.250
8450-12704	0.423074454	--	0.188819	E	-1.612	11.362
8438-12703	0.066911437	--	0.395807	E	-0.639	11.084
8135-12701	0.769552886	0.25421230	0.435128	S	-0.249	11.314
8595-3702	0.742792189	0.38842848	0.198774	S	0.364	11.120
9877-12702	0.641666770	--	0.319888	E	-1.851	9.662
9036-12704	0.680611074	0.26835218	0.361765	S	-0.314	9.961
9186-12702	0.447860450	0.18371834	0.050187	S	0.298	10.905
8716-12705	0.552268624	0.42968857	0.237230	S	-0.310	9.743
8254-12703	0.378688514	0.22865635	0.479448	S	0.537	10.154
7443-12703	0.348401457	0.13731289	0.477781	S	1.289	10.817
8600-6101	0.124010265	--	0.261383	E	-1.993	11.117
8135-6101	0.256937236	0.13969555	0.296528	S	-1.171	8.905
8311-3704	0.630376339	0.25283180	0.391384	S	-0.327	10.828
8456-6103	0.203186542	--	0.089313	E	-0.661	11.555
9496-9101	0.876080155	0.49604222	0.493442	S	0.818	11.562
8726-12702	0.733258784	0.39782768	0.502961	S	0.920	11.226
8486-12701	0.768108845	0.52399820	0.371377	S	-0.007	11.166
9026-12705	0.634407699	0.27523430	0.216009	S0	-0.366	10.919
8936-12702	0.204419479	--	0.190408	E	-1.923	11.324
8263-6104	0.723531723	0.21531487	0.609791	S	0.195	10.849
9892-12705	0.642335057	0.40071052	0.388580	S	-0.369	9.665
9032-1902	0.054235827	0.09030126	0.030327	E	-2.158	9.723
8606-12701	0.685847759	--	0.140702	S	0.381	11.433
9492-3701	0.309943706	--	0.268408	E	-1.088	10.314
8550-6103	0.555435658	0.46888800	0.266481	S	-0.245	10.674
8482-1902	0.375831366	0.11207347	0.519386	S	-0.036	10.888

续表:						
星系的 Plate-ifu	$\lambda_{Re}(\text{stellar})$	λ_{Re}	ε_e	Hubble Type	$\log(SFR)/$ (M_{\odot}/yr)	$\log(M_{*})$ $/M_{\odot})$
9183-6102	0.196463361	--	0.301126	E	-1.821	8.579
8595-12703	0.292882562	0.06662668	0.105627	S	-0.443	9.684
8725-6104	0.200793549	--	0.046329	E	-0.891	11.613
9034-9102	0.081743315	--	0.313035	E	-1.504	11.002
10499-1902	0.570162475	0.31323627	0.628060	S	-0.080	10.420