

分类号 _____

密级 _____

UDC _____

编号 _____

中国科学院研究生院 博士学位论文

旋涡星系 Tully–Fisher 关系的第三参量及形态相关性的
研究

王彩虹

指导教师 _____ 沈世银 副研究员， 侯金良 研究员

中国科学院上海天文台

申请学位级别 _____ 博士 _____ 学科专业名称 _____ 天体物理 _____

论文提交日期 2010 年 5 月 论文答辩日期 2010 年 6 月

培养单位 _____ 中国科学院上海天文台

学位授予单位 _____ 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 _____

Typeset by L^AT_EX 2_ε at May 24, 2010

With package C_ASt_Hesis v0.1g of C_TE_X.ORG

The third parameter and morphological-dependence of Tully–Fisher relation of Spiral Galaxies

Cai-Hong Wang

Supervisor:

Associate Prof. Shi-Yin Shen, Prof. Jin-Liang Hou

Shanghai Astronomical Observatory
Chinese Academy of Sciences

May, 2010

*Submitted in total fulfilment of the requirements for the degree of Ph.D.
in Astrophysics*

摘 要

本文用 I 波段的 SFI++ 数据库系统地研究了旋涡星系的 Tully-Fisher (TF) 关系, 并着重探讨了其第三参量是否存在的问题。与以前的研究相比, 本文不仅有样本较大的优势, 而且不假设第三参量的具体引入形式, 而是利用残差相关的方法研究 TF 关系的第三参量的存在可能性。具体来说, 通过研究 TF 关系的残差 ΔM 和 $\log R - \log W$ 关系的残差 $\Delta \log R$ 之间的相关性, 我们发现等光度半径 $R_{23.5}$ 作为第三参量的引入, 构成了旋涡星系在三维参量空间的一个基本平面, 从而使旋涡星系的 TF 关系的弥散显著减小 (Sc 星系样本的弥散降低 $\sim 50\%$, Sb 的降低 $\sim 40\%$)。而星系盘的标长 R_d 作为 TF 关系第三参量的作用并不显著, 仅能使 TF 关系的弥散降低 $\sim 20\%$ 。除此之外, 通过仔细研究不同 $\log W$ 范围内的 $\Delta M - \Delta \log R$ 关系, 我们发现, 在三维参数空间 $M - \log R_{23.5} - \log W$ 内旋涡星系 (尤其是 Sc 星系) 并不是严格地处于一个平面上, 而是处于一个在小质量端弯曲的曲面上。尽管如此, 由于我们样本中小质量星系的数目较小, 因此相对于基本平面来说, 引入基本曲面形式并不能进一步有效降低其弥散。

本文的另一个研究重点就是探讨旋涡星系 TF 关系的形态依赖性的起源。通过分别对旋涡星系的动力学和星族特征进行模型描述, 我们证得虽然旋涡星系旋转速度曲线的形状与星系的形态具有较强的相关性, 但最大旋转速度与星系的形态相关性较弱。因此, 旋涡星系 TF 关系的形态依赖性主要起源于星族的作用, 即不同形态星系的星族特征的不同。通过对不同波段 TF 关系的形态依赖性的研究, 进一步证明, 此星族特征差异主要起源于核球和盘成分之比的差异。

关键词: 旋涡星系, Tully-Fisher 关系, 第三参量, 星系形态, 星系动力学, 星族

Abstract

Using the I band SFI++ catalog, we study the Tully-Fisher (TF) relation of spirals systematically, and focus on whether its third parameter exists. Comparing to the previous studies, we not only benefit from this large sample, but use a residual relation to study whether the third parameter exists without a assumption of the form of the third parameter in TF relation. By studying the correlation between residuals of the TF relation (ΔM) and residuals of the $\log R$ - $\log W$ relation ($\Delta \log R$), we find that the scatter of the TF relation is reduced significantly (up to $\sim 50\%$ for Sc spirals and $\sim 40\%$ for Sb spirals) when $R_{23.5}$ is introduced as a third parameter making the ‘fundamental plane’ of spirals. It is not so significant when the disk scale-length R_d is adopted as the third parameter, which can only reduce $\sim 20\%$ of the TF scatter. Besides, by studying the residual relations in different $\log W$ bins, we find the spiral galaxies are actually located on a curved surface rather than a plane in the parameter space of $\log M$ - $\log W$ - $R_{23.5}$.

In this work, we also try to find out the main contributor to the morphological dependence of the TF relation. By modeling the dynamics and stellar populations of different type spiral galaxies in combination, we find that although the shape of the rotation curve is correlated with the galaxy morphology, the dependence of the maximum rotation velocity on the morphology is weak. Therefore, the morphological dependence of the TF relation is mainly contributed by the stellar population. By modelling the morphological dependence in different wavebands, we find that the difference of the stellar population of different morphological type is mainly originated from the bulge-disk composition effect.

Keywords: spiral galaxies, Tully-Fisher relation, the third parameter, morphology, dynamics, stellar population

目 录

摘要	i
Abstract	iii
目录	v
第一章 引言	1
1.1 早型星系的基本面	1
1.1.1 早型星系基本面的观测	4
1.1.2 早型星系基本面的理论解释	5
1.2 晚型星系的 Tully-Fisher 关系	6
1.2.1 TF 关系的观测	8
1.2.2 TF 关系的理论模型	13
1.3 晚型星系的基本面	15
1.3.1 晚型星系基本面的观测	15
1.3.2 晚型星系基本面的理论意义	17
1.4 本文的研究目的	18
第二章 数据	21
2.1 SFI++ 数据库	21
2.1.1 SCI	23
2.1.2 SC2	23
2.1.3 SFI	23
2.1.4 SF2	23
2.1.5 其它	24
2.2 用到的参数及其改正	24

2.2.1	星系倾角	24
2.2.2	绝对星等	25
2.2.3	速度展宽	26
2.2.4	星系半径	28
2.3	本文样本的选取	29
2.4	线性回归方法	31
2.4.1	最小二乘法	31
2.4.2	最大似然估计法	32
2.4.3	本文的回归方法及样本完备性改正	34
第三章	旋涡星系的 TF 关系中第三参量的引入	37
3.1	环境和星系形态的影响	38
3.2	第三参量的引入	39
3.3	三参量 TF 曲面关系	46
3.3.1	$R_{23.5}$ 作为第三参量	46
3.3.2	R_d 作为第三参量	50
3.3.3	TF 关系弥散的变化	50
3.3.4	其他方法	51
3.3.5	弯曲基本面的应用	53
3.3.6	本动的影响	55
3.4	总结和分析	56
第四章	TF 关系形态相关性的模型解释	59
4.1	旋涡星系的动力学模型	60
4.1.1	晕	60
4.1.2	核球	60
4.1.3	盘	61
4.1.4	旋转曲线	62
4.2	旋涡星系的星族	64

4.3	模型预言结果	65
4.3.1	<i>I</i> 波段 TF 关系	66
4.3.2	不同波段的 TF 形态相关性	67
4.4	讨论	70
4.4.1	模型参数值的弥散	70
4.4.2	经典核球和伪核球	70
4.4.3	尘埃消光	70
4.5	总结	71
	第五章 总结和展望	73
	参考文献	75
	简历	97
	致谢	99

表 格

1.1	不同波段的早型星系基本面的特征指数	2
1.2	不同波段的晚型星系 TF 关系的斜率和弥散	7
1.3	各种文献中与星系形态相关的 TF 关系。	10
3.1	4 个子样本的 TF 关系拟合系数	39
3.2	Sb 和 Sc 星系的一些线性关系的拟合结果	45

插 图

1.1	晚型星系基本面的示意图, 见 Koda 等人 2000 年文章 [122]。	16
2.1	本图来自文献 [183], 是 SFI++ 数据库中的星系以 R.A. = 6^h 为中心的空间分布等积投影图。其中的三条线分别表示 $b = -20, 0, +20^\circ$ 的情况。图中不同颜色表示 CMB 下的不同红移: $cz < 1000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为蓝点, $1000 < cz < 3000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为青点, $3000 < cz < 5000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为绿点, $5000 < cz < 7000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为黄点, $7000 < cz < 9000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为红点, $cz > 9000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为洋红色点。	22
2.2	本图来自文献 [182], 是测量 HI 谱线速度展宽的例子。(a) 图是较标准的 HI 谱, (b) 图是信噪比较差的情况, (c) 图是不对称谱线情况。其中 W_{50} 表示速度展宽, V_{sys} 是星系的退行速度, 两翼的直线 (多项式) 是用带圈的点拟合得到。	27
2.3	4319 个 SFI++ 星系的一些基本参量的统计直方图。这些星系的半径已由 Springob 等人提供。垂直的虚线表示样本的部分选择条件。	30
2.4	根据基本参量选出的 2899 个旋涡星系的 TF 关系图。实线代表拟合这些星系得到的 TF 关系, 两条虚线代表这个关系的 $3\sigma_{\text{rms}}$ 弥散。用迭代法去除 $3\sigma_{\text{rms}}$ 之外的星系后, 得到本文的最终样本, 点线代表最终样本的 TF 关系。	31
2.5	最终样本 (2835 个星系) 的 I 波段星等的直方图。每个区间中星系数目相同。曲线是代表光度函数的 Schechter 方程, 其参数是 $\alpha = -0.5$ 和 $M_* = -20.6$, 并且其高度已被调整, 以重合直方图的亮端 ($M_I < -21.0$) 的分布。	35
3.1	用于比较 TF 关系的 4 个子样本 (Sb 团星系、Sb 场星系、Sc 团星系和 Sc 场星系) 的 $\log W$ 分布情况。	38

- 3.2 6 个子样本的 TF 关系的系数比较图, 其中有 Sb 团星系、Sb 场星系、Sc 团星系和 Sc 场星系样本, 以及 Sb 团星系和 Sb 场星系组成的 Sb 样本, Sc 团星系和 Sc 场星系组成的 Sc 样本。误差棒代表系数的拟合误差。所有数据是经过反形态改正的。 40
- 3.3 Sc (左边) 和 Sb (右边) 星系的 TF 关系。实线表示拟合结果。 41
- 3.4 残差 ΔM_I 与半径的关系图。左上角是 Sc 星系的 $\Delta M_I - \log R_{23.5}$ 关系图, 右上角是 Sc 星系的 $\Delta M_I - \log R_d$ 关系图, 左下角是 Sb 星系的 $\Delta M_I - \log R_{23.5}$ 关系图, 右下角是 Sb 星系的 $\Delta M_I - \log R_d$ 关系图。图中红方格表示在每个横坐标 (半径) 区间内的 ΔM_I 的平均值。 42
- 3.5 星系的 $\log R - \log W$ 关系。左边两个是 Sc 星系的情况, 右边是 Sb 星系的情况; 上边两个是 $\log R_{23.5} - \log W$ 关系, 下边是 $\log R_d - \log W$ 关系。实线是它们的拟合线, 拟合系数都列在表 3.2 中。红色方格表示在每个横坐标区间内的平均值。 43
- 3.6 由左到右由上到下分别是 Sc 星系的 $\Delta M_I - \Delta \log R_{23.5}$ 关系图、Sc 星系的 $\Delta M_I - \Delta \log R_d$ 关系图、Sb 星系的 $\Delta M_I - \Delta \log R_{23.5}$ 关系图、Sb 星系的 $\Delta M_I - \Delta \log R_d$ 关系图。实线是它们的拟合线, 拟合系数都列在表 3.2 中。红色方格表示在每个横坐标区间内的平均值。 44
- 3.7 Sc 星系在不同 $\log W$ 区间内的残差关系图, 半径用的是 $R_{23.5}$ 。每个区间的 $\log W$ 平均值都被标在了子图的右上角。实线是由各 $\log W$ 区间内的星系拟合 $\Delta M_I = e \Delta \log R$ 得到的线性关系, 其斜率 e 标在图左下角。为了比较, 所有 Sc 星系的总残差关系用虚线表示了出来。红色小叉代表退行速度小于 3500 km/s 的星系。 47
- 3.8 同图 3.7, 但是描述 Sb 星系的情况。 48
- 3.9 Sb (三角) 和 Sc (方格) 星系的残差关系的斜率 e 与 $\log W$ 的关系图, 半径是 $R_{23.5}$ 。点上的误差棒由 bootstrap 计算得到。虚线由图中所有点近似拟合得到。水平实线和点线分别表示 Sb 和 Sc 星系的总残差关系的斜率, 阴影区表示这些斜率的误差。 49
- 3.10 同图 3.7, 但是半径用的是 R_d 。 50
- 3.11 同图 3.8, 但是半径用的是 R_d 。 51

3.12	同图3.9, 只是半径用的 R_d 。	52
3.13	在本章中出现的各种 TF 关系的弥散: 从左到右依次为两参量 TF、三参量 TF 并且半径为 R_d 、三参量 TF 并且半径为 $R_{23.5}$ 、半径为 $R_{23.5}$ 的非线性三参量 TF 的弥散。其中的三角表示 Sb 星系的关系弥散, 方格表示 Sc 星系的关系弥散。	53
3.14	以旋涡星系基本面为中心的垂直残差沿这个平面长轴方向的分布情况, 半径为 $R_{23.5}$, 上图是 Sc 星系的情况, 下图是 Sb 星系。三角表示每个 X_{FP} 区间内的平均 X_{FP} 值和平均残差, 计算平均值时考虑了星系的绝对星等误差和权重。三角上的误差棒代表分布弥散。	54
3.15	同图 3.14, 但是半径为 R_d	55
3.16	Sc 星系样本的三参量 TF 关系的各系数和样本 $\log W$ 下限的关系。实线、虚线和点线分别表示由 $e\text{-}\log W$ 关系得到的参数 α 、 β 和 $\gamma + 13.0$ 的变化情况。各种符号表示的是直接拟合样本得到的各系数。	56
4.1	$V_h = 120 \text{ km s}^{-1}$ 的模型星系的旋转曲线。其中实线代表星系旋转曲线, 点线、虚线和点划线分别代表了晕、核球和盘成分对旋转曲线的贡献, 绿色、红色和蓝色的线分别代表 Sa、Sb、Sc 型的模型星系	63
4.2	模型预言的不同形态旋涡星系的 I 波段 TF 关系。三角、方格和星号分别代表 Sc、Sb 和 Sa 的模型星系, 这些星系的 TF 关系用实线表示。M06 的观测 TF 关系用虚线表示。由 τ 的 1σ 变化引起的 TF 关系的变化范围, 用点线表示。	66
4.3	TF 关系在不同波段的形态相关性, 详见文中。	68

第一章 引言

星系，包括我们的银河系，是构成宇宙的基石。随着观测技术的进步，观测资料不断增多，人们测到了星系的颜色、亮度、形态、特征速度量、金属丰度和年龄等各种物理量。观测表明星系的这些物理量之间并不是完全独立的，而是存在各种相关关系，即标度律 (scaling relation)。标度律较强的约束了各种星系形成和演化模型，为理解星系的形成和演化提供了很大的帮助。

对于早型星系，其最显著的标度律是基本面，而晚型星系最显著的标度律是 Tully-Fisher 关系。这两种标度律除了可以约束星系形成和演化模型外，还都可以用来测量近邻星系的距离。下面我们将对这两个标度律进行简单的介绍。

1.1 早型星系的基本面

早型星系的基本面是 Faber-Jackson 关系的扩展。Faber-Jackson 关系是星系的光度 (L) 和其中中心处的恒星在视线方向的速度弥散 (σ_0) 之间的关系，表示为：

$$L \propto \sigma_0^\alpha, \quad (1.1)$$

其中 $3 \leq \alpha \leq 5$ 。此关系最先被 Morgan & Mayall 在 1957 年定性地描述。1976 年 Faber & Jackson 确定了此关系，并给出了具体的表达形式 (即公式 (1.1)) [64]，之后此关系就被称为 Faber-Jackson 关系 (以下简称为 FJ 关系)。

FJ 关系可以用来估算近邻早型星系的距离。其原理是，公式 (1.1) 取对数后为 $\log L = \alpha \log \sigma_0 + \beta$ ，只要对若干已知距离的星系测定其光度 (绝对星等) 和速度弥散，便可确定此关系的斜率 α 和零点 β ，即对 FJ 关系作绝对定标。由于速度弥散 σ_0 的测量一般基于光学光谱，不需要星系距离信息，于是，对于未知距离的星系来说，就可以根据此式，利用 σ_0 来确定星系的光度 (绝对星等)，再与视星等比较就可推算星系的距离。鉴于早型星系在许多星系团和团外场区中普遍存在，FJ 关系可用于研究宇宙的大尺度结构、哈勃流和与之有关的星系本动速度，以及早型星系的动力学演化等。

为了用 FJ 关系更好地测量星系距离，需要减小其弥散，因此人们引入星系半径作为 FJ 关系的第三参量，即组成了早型星系在三维参数空间中的基本面

(Fundamental Plane)。基本面是在 1987 年被 Djorgovski & Davis [56] 和 Dressler 等人 [59] 分别发现的，表示为：

$$\log R_e = a \log \sigma_0 + b \log I_e + c, \quad (1.2)$$

其中 R_e 是早型星系的有效半径， σ_0 是其中心处的速度弥散度， I_e 是有效半径内的平均面亮度 ($I_e = L/(2\pi R_e^2)$)。此平面之所以被定义为早型星系的基本面，不仅是由于该相关关系非常紧密 ($\Delta_{\log R_e} \approx 0.08$)，而且其参数都是星系的基本结构参数。由于速度弥散度 σ_0 和面亮度 I_e 都不依赖于星系的距离，因而通过比较星系视大小与由方程 (1.2) 估计的绝对大小也可得星系的距离。由其得到的星系距离的误差只有 FJ 关系的一半。早型星系基本面的这种距离估算，也可以进一步用于研究哈勃常数以及星系的本动速度场等 [118, 21, 77]。

下面将分别从观测和理论两个方面对早型星系的基本面进行简要描述，具体的综述可参见文章 [1]。

表 1.1: 不同波段的早型星系基本面的特征指数

来源	波段	星系数目	a	$-b$	$\Delta_{\log R}$
Dressler 等人 1987 年 [59]	B	97	1.33 ± 0.05	0.83 ± 0.03	0.079
Djorgovaki 等人 1987 年 [56]	r_G	106	1.39 ± 0.14	0.90 ± 0.09	0.079
Jørgensen 等人 1996 年 [112]	U	41	1.25 ± 0.08	0.86 ± 0.05	0.067
	B	91	1.20 ± 0.06	0.83 ± 0.02	0.071
	g	109	1.16 ± 0.10	0.76 ± 0.04	0.090
	r	226	1.24 ± 0.07	0.82 ± 0.02	0.084
Pahre 等人 1998 年 [146]	K	251	1.53 ± 0.08	0.79 ± 0.03	0.096
Scodeggio 等人 1998 年 [174]	B	38	1.40 ± 0.09	0.88 ± 0.05	0.07
	V	41	1.35 ± 0.13	0.88 ± 0.05	0.07
	r	54	1.35 ± 0.09	0.93 ± 0.05	0.08
	I	75	1.70 ± 0.13	0.83 ± 0.03	0.09
	H	73	1.66 ± 0.10	0.85 ± 0.03	0.09

	<i>K</i>	29	1.70±0.17	1.03±0.13	0.07
Mobasher 等人	<i>V</i>	48	1.44±0.04	0.80±0.03	0.074
1999 年 [137]	<i>K</i>	48	1.38±0.26	0.75±0.05	0.072
Bernardi 等人	<i>g</i>	9000	1.45±0.06	0.74±0.01	0.056
2003 年 [13]	<i>r</i>	9000	1.49±0.05	0.75±0.01	0.052
	<i>i</i>	9000	1.52±0.05	0.78±0.01	0.049
	<i>z</i>	9000	1.51±0.05	0.77±0.01	0.049
La Barberar 等人	<i>r</i>	1430	1.42±0.05	0.76±0.003	0.064
2008 年 [125]	<i>K</i>	1430	1.53±0.04	0.77±0.003	0.062
Hyde 等人	<i>g</i>	50 000	1.40±0.05	0.76±0.02	0.062
2009 年 [103]	<i>r</i>	50 000	1.43±0.05	0.79±0.02	0.058
	<i>i</i>	50 000	1.46±0.05	0.80±0.02	0.056
	<i>z</i>	50 000	1.47±0.05	0.74±0.02	0.054
La Barbera 等人	<i>g</i>	39993	1.384±0.024	0.788±0.002	0.095
2009 年 [126]	<i>r</i>	39993	1.390±0.018	0.785±0.002	0.082
	<i>i</i>	39993	1.426±0.016	0.780±0.002	0.079
	<i>z</i>	39993	1.418±0.021	0.793±0.002	0.079
	<i>Y</i>	39993	1.467±0.019	0.785±0.002	0.081
	<i>J</i>	39993	1.530±0.017	0.795±0.002	0.083
	<i>H</i>	39993	1.560±0.021	0.795±0.005	0.087
	<i>K</i>	39993	1.552±0.021	0.790±0.005	0.089
Jeong 等人	<i>FUV</i>	29	1.25	0.73	0.14
2009 年 [107]	<i>NUV</i>	29	1.82	0.75	0.08
	<i>FUV</i>	34	1.09	0.55	0.17
	<i>NUV</i>	34	1.11	0.58	0.14
Jun 等人	0.55 μm	56	1.23±0.10	0.86±0.04	
2008 年 [113]	2.2 μm	56	1.42±0.11	0.81±0.05	
	3.6 μm	56	1.55±0.11	0.89±0.04	
	4.5 μm	56	1.47±0.11	0.92±0.04	
	5.8 μm	56	1.57±0.13	0.92±0.05	
	8.0 μm	56	1.55±0.14	0.75±0.05	

1.1.1 早型星系基本面的观测

1.1.1.1 不同波段观测的基本面

基本面中的 σ_0 由光谱观测得到, 因此通常认为与具体的测光波段无关。如果假设早型星系的星族分布没有径向上的梯度, 那么 R_e 也与观测波段无关。如果进一步假设不同质量早型星系的星族成分是相同的, 那么在这种情况下早型星系的基本面的参数 a 和 b 将不具有波段依赖性, 不同波段基本面零点 c 的不同则将反映不同波段质光比的差异。因此, 研究早型星系基本面的波段依赖性对理解早型星系中的星族成分以及星族径向分布具有十分重要的意义。

如表 1.1 所示, 一般认为从可见光到近红外波长范围内, 基本面的斜率 a 随波段有变化, 虽然这种变化不明显, 而斜率 b 几乎不变 [13, 125, 103, 126, 113]。基本面这种随波段的变化主要是由于不同质量的星系的星族不同引起的 [113]。在紫外及中、远红外波段, 由于容易受到近期恒星形成、尘埃消光等物理机制的影响以及样本太小的限制, 其早型星系基本面的研究还有待于进一步深入。

1.1.1.2 不同环境中的基本面

在星系的等级结构成团理论中, 星系的性质和其所处的大尺度结构环境密切相关。尽管如此, 对于早型星系来说, 其基本面是否与环境有相关性还存在一定的争议 [50, 13, 58]。值得注意的是, 基本面的环境相关性还可能和红移有关。Fritz 等人在回顾了 2005 年以前的关于场星系和团星系基本面差异的文章和用基本面研究星系随红移演化的文章后认为, 在中等红移处 ($z \sim 0.5$) 场星系和团星系的基本面没有显著不同, 在更高的红移处它们之间则有较为明显的差异 [75]。

1.1.1.3 不同红移处的基本面

早型星系在不同红移处的基本面反映了早型星系的演化特征。但在观测上, 基本面如何随红移演化, 也存在着一定的争议。

一般来说, 基本面随着红移的演化是可以预测的。首先, 在星系的 R_e 和 σ_0 保持不变的情况下, 星族随着时间的被动演化可以使得星系在高红移处显得更亮, 从而使基本面在参数空间中发生平移 (即斜率相同, 但零点不同)。其次, 在基本面的暗端 (低质量端) 以年轻星系为主, 亮端 (高质量端) 以老年星系为主,

而年轻星系比年老星系更快地变暗, 即低质量端的 I_e 更快地增加。在这种情况下, 除了基本面的零点有明显演化外, 其斜率 a 也将会随红移的增加而减小。

在观测上, 有一些研究的确发现基本面的斜率 a 会随红移的增大而略微减小 [200, 112]。然而, 很多关于基本面演化的观测, 无论是星系团中的还是场中的, 都认为, 中红移处 ($0.1 < z < 1.0$) 的基本面与近邻 (低红移) 星系的基本面相比有平移, 即在给定有效半径和速度弥散时中红移星系更亮 [75, 78, 203, 189]。

需要注意的是, 用基本面研究星系演化有些明显的不足之处。首先, 直接比较低红移的星系和在高红移处看到的星系并不一定合适。因为如果星系是纯粹的被动演化, 则这个比较可以成立; 但是如果星系有主并合或者吸积过程, 即如今的椭圆星系在高红移处可能是晚型星系, 那么这种比较就变得复杂和难以理解了。另外, 受到观测水平的限制, 可以用来研究基本面的高红移星系样本很小, 因此也很难对高红移基本面和低红移样本的基本面进行严格地统计上的比较。

1.1.2 早型星系基本面的理论解释

由于早型星系中恒星弥散运动的动能可近似为星系的总动能, 则在动力学平衡的情况下, 由最简单的位力定理可得:

$$\sigma^2 \propto \frac{GM_{\text{dyn}}}{R_g} \propto \left(\frac{M_{\text{dyn}}}{M_*} \right) \left(\frac{R_e}{R_g} \right) \Upsilon I_e R_e, \quad (1.3)$$

其中 σ 是三维平均的恒星速度弥散, R_g 是星系的位力半径, M_{dyn} 是星系动力学质量 (总质量), M_* 是星系的恒星质量, R_e 是星系的有效半径, Υ 是星系质光比 (即 M_*/L , 其中 L 是星系光度), I_e 是有效半径内的平均面亮度。假设早型星系的平均速度弥散 σ 和观测到的中心速度弥散 σ_0 、动力学质量 M_{dyn} 和恒星质量 M_* 、有效半径 R_e 和位力半径 R_g 分别线性相关, 并且 Υ 是常数, 则有:

$$R_e \propto \sigma_0^2 I_e^{-1}, \quad (1.4)$$

即由位力定理得到的基本面的理论斜率值为 $a = 2, b = -1$ 。

早在 1987 年人们就发现即使去除所有的观测效应及拟合方法的影响, 观测到的基本面的斜率 (在光学波段 $a \sim 1.3-1.4$, $-b \sim 0.8-0.9$) 和理论值仍然不同, 即相对于理想的基本面, 观测到的基本面有点“倾斜” (tilt) [59, 56]。

早型星系基本面倾斜的原因, 可以由上面的理论推导中用到的几个假设分析得到, 主要有三个方面: 一是早型星系的速度弥散并不能完全代表星系动能 (因此位力定理不能用公式 (1.3) 表示) [29], 二是不同质量的早型星系的质光比之间存在系统的差别 (即 Υ 不是常数) [63], 三是早型星系在结构和动力学上的分布不是完全相同的 (即 $\sigma/\sigma_0, M_{\text{dyn}}/M_*, R_g/R_e$ 不是常数) [29]。

虽然人们已经证明早型星系基本面的倾斜的确可以用上述这些原因来解释, 但是任何一个单独的原因都不足以完全解释这个问题 [88, 15], 并且各种因素的影响具体有多大还存在一定的争议, 仍需要进一步地研究。如 Busarello 等人认为 15% 的倾斜是由于旋转动能没有考虑, 55% 是由于星系的动力学不统一引起的, 剩下的 30% 是由星族和结构不统一引起的。而 Trujillo 等人认为 3/4 的基本面倾斜是由于星系动力学和结构不均匀引起的, 1/4 是由于星族引起的 [191]。

1.2 晚型星系的 Tully-Fisher 关系

对于晚型星系 (特别是旋涡星系), 其光度和最大旋转速度之间存在着较紧密的相关关系, 即 Tully-Fisher 关系 (以下简称 TF 关系)。此关系是 Tully 和 Fisher 通过对本星系群、M81 星系群和 M101 星系群中 10 个近距旋涡星系样本分析得到的 [194], 其基本形式为:

$$M = a(\log W - 2.5) + b, \quad (1.5)$$

其中 M 是星系的绝对星等, W 是多普勒致宽效应引起的谱线展宽, 也称为速度展宽, 与最大旋转速度 V_{max} 成正比。由于 W 的测量不依赖于星系距离, 因此与早型星系的 FJ 关系和基本面类似, TF 关系也可以用来估算近邻星系的距离和本动及宇宙的哈勃常数。Tully 和 Fisher 利用他们所导出的关系 $M = -3.5 - 6.25 \log V_{\text{max}}$ 推算了室女团和大熊团的距离模数分别为 30.6 ± 0.2 和 30.5 ± 0.35 [194]。

下面对 TF 关系的研究进展作重点评述, 有关 TF 关系的详细评述可参见文献 [2]。

表 1.2: 不同波段的晚型星系 TF 关系的斜率和弥散

来源	波段	星系数目	a	Δ_M/mag
Tully 和 Fisher 1977 年 [194]	B	10	-6.25	0.3
Aaronson 等人 1979 年 [4]	H	29	-9.5	-
Aaronson 等人 1983 年 [5]	B	262	-8.82	0.30
	H		-12.07	0.28
Pierce 和 Tully 1988 年 [151]	B	60	-6.86 ± 0.32	0.37
	R		-7.64 ± 0.29	0.31
	I		-7.85 ± 0.29	0.28
	H		-9.25 ± 0.43	0.31
Pierce 和 Tully 1992 年 [152]	B	15	-7.48	-
	R		-8.23	-
	I		-8.72	-
	H		-9.50	-
Giovanelli 等人 1997 年 [82]	I	555	-7.68 ± 0.10	0.34
Master 等人 2006 年 [128]	I	807	-7.85 ± 0.10	0.32
Pizagno 等人 2007 年 [154]	g	162	-5.48 ± 0.23	0.46
	r		-5.96 ± 0.20	0.42
	i		-6.32 ± 0.22	0.42
	z		-6.59 ± 0.24	0.42
	B		351	-8.51 ± 0.23
Meyer 等人 2008 年 [134]	K	860	-9.38 ± 0.19	0.25
	J	888	-9.07 ± 0.12	0.43
Giovanelli 等人 2008 年 [129]	H	888	-9.02 ± 0.11	0.38
	K_S		-10.02 ± 0.10	0.37

1.2.1 TF 关系的观测

1.2.1.1 星系倾角的影响

TF 关系的 2 个基本观测量（星系视星等 m 和谱线宽度 W ）的原始观测值都必须就星系倾角 i 产生的观测效应加以改正，其中对观测星等 m 是作内部消光改正，对线宽 W 是作投影改正，而这两项改正值的大小与倾角 i 间的关系是反向的。 i 越小，星系盘越面向观测者，由内部消光引起的、对视星等的改正就越小。另一方面，星系的倾角 i 越小，线宽 W 的观测误差就越大。因此，为了能对基本观测量取得较为可靠的改正，必须充分注意样本星系的合理选取。例如，Tully 和 Fisher 当初所选用的星系均满足 $80^\circ > i > 50^\circ$ [194]。

1.2.1.2 不同波段观测的 TF 关系

TF 关系最先是被 Tully & Fisher 在 B 波段发现的，但是之后就被证明在红外波段其弥散会更小 [5]，因为在红外波段的观测受星系内部消光的影响更小，并且红外辐射能更好地表征星系中恒星的质量。表 1.2 总结了有关这方面研究的一些文章。如，1979 年，Aaronson 等人首先发现 H 波段 TF 关系的弥散度更小（相关系数 r 更大）[4]。1988 年，Pierce 和 Tully 利用大熊星系团内完备星系样本的 CCD 测光资料发现， B 、 R 和 I 波段 TF 关系的弥散度分别为 0.37、0.31 和 0.28 mag [151]。在 Meyer 等人 2008 年的研究中 [134]， B 和 K 波段的 TF 关系的观测弥散度分别为 0.40 mag 和 0.33 mag，内禀弥散度分别为 0.33 mag 和 0.25 mag。Giovanelli 等人 [82] 和 Master 等人 [128, 129] 都认为 I 波段的观测较可靠，因为 I 波段观测不仅受消光的影响比 B 波段小，而且 CCD 测光响应比 H 波段好。他们得到的 TF 关系在 I 波段的内禀弥散大约是 0.33 mag。

另外有人注意到 TF 关系的斜率与观测波段间的关系，并且斜率随波长而变陡已成定论。1979 年，Aaronson 等人就指出，红外波段 TF 关系中的斜率（ ≈ -9.5 ）明显要比可见光波段（ $-6 \sim -7$ [194]）更陡 [4]。1983 年，Bottinelli 等人明确指出，斜率是波长的连续函数，并得出斜率从 B 波段的 -5 变化为 H 波段的 -10 [26]。1992 年，Pierce 和 Tully 由星系团内 15 个旋涡星系和不规则星系样本，得出 B 、 R 、 I 和 H 波段 TF 关系的斜率分别为 -7.48 、 -8.23 、 -8.72 和 -9.5 [152]，这一结果被后人多次引用 [106, 19]。2007 年，Pizagno 等人由 162 个星系在 g 、 r 、 i 和 z 这 4 个波段取得的观测资料发现，TF 关系的斜率分别为 -5.48 、 -5.96 、 -6.32 和 -6.59 [154]。最近，Masters 等人通过对 2MASS 的

J 、 H 、 K_S 波段观测资料的细致分析, 同样得出斜率随波长而变陡的结论, 且随着波长的进一步增长, 斜率不再明显变化, 渐近值为 $-9 \sim -10$ [129]。

1.2.1.3 不同星系形态的 TF 关系

人们所关心的另一个重要问题是 TF 关系是否与样本星系的形态类别有关, 有关工作总结在表 1.3 中。

有的工作没有发现这种形态相关性。如, Aaronson 等人在 1983 年一项工作中的结论是, 在红外波段 TF 参数与星系形态之间并无显著的相关性, 在蓝波段也仅表现出少许的相关性 [5]。嗣后, 1988 年 Pierce 等人的工作 [151], 以及 1994 年 Bernstein 等人的工作 [14] 都证实了上述基本结论。

但是有很多工作, 尤其是近期的一些工作, 支持 TF 关系形态相关性的存在, 而且认为在短波段这种形态相关更明显。早在 1978 年 Roberts 就发现在固定的旋转速度处, 较早型的旋涡星系一般光度较小 [162]。Rubin 等人在 1985 年宣称, Sa 和 Sc 星系 TF 关系的斜率近乎相同, 但在 B 波段有 2 mag 的零点差, 而在 H 波段为 1 mag 的零点差 [164]。1997 年 Giovanelli 等人在 I 波段发现, 与 Sbc 及更晚类型星系的 TF 关系的零点相比, Sa/Sab 星系的零点降低了 0.32 mag, 而 Sb 星系的零点低了 0.10 mag [82]。2000 年 Sandage 在 B 波段发现固定 TF 关系斜率时 Sa 星系的零点比 Sc 星系的低 0.68 mag [170]。2004 年 Russell 同样在 B 波段发现 Sb 星系的零点比 Sc 星系的低 0.57 mag [167]。最近, Russell 发现 Sb 和 Sc 星系在 H 波段的平均零点差异是 0.19 mag [168]。另外, Masters 等人用 SFI++ 这个大的 I 波段旋涡星系样本证明, 对于 Sa、Sb 和 Sc 星系, 斜率分别为 -5.52 、 -7.07 和 -7.87 , 说明不同形态的 TF 关系的差异不只是简单的平移, 而且这种差异还和星系的光度有关: 对于较大光度 (质量) 的星系, 这种形态引起的零点差异更明显 [128, 129]。

TF 关系的形态相关性的起因可能是由于不同形态的星系的星族不同 (引起 TF 关系中的星等 M 变化), 或者星系盘的动力学不同 (引起最大旋转速度 V_{\max} 变化), 或者两者皆不同。在本文第四章中, 我们将就此问题展开讨论。

表 1.3: 各种文献中与星系形态相关的 TF 关系。

参考文献	波段	类型	a	b	ΔM
Aaronson 等人 1983 年 [5]	B	Sa/Sab	-6.89	-20.36	0.71
		Sb	-9.68	-20.69	0.38
		Sc	-8.81	-21.07	0
	H	Sa/Sab	-10.90	-23.25	0.00
		Sb	-10.73	-23.19	0.06
		Sc	-11.19	-23.25	0
Rubin 等人 1985 年 [164]	B	Sa	-9.95	-19.74	2.25
		Sb	-10.2	-20.75	1.24
		Sc	-11.0	-21.99	0
	H	Sa	-11.57	-22.72	1.35
		Sb	-10.12	-23.48	0.59
		Sc	-12.59	-24.07	0
Sandage 2000 年 [170]	B	Sa/Sab	-6.97	-20.46 ± 0.12	$0.68 \pm .13$
		Sbc/Sc/Scd	-6.97	-21.14 ± 0.06	0
Russell 2004 年 [167]	B	Sab~ Sc II-IV	-5.24 ± 0.10	-20.42 ± 0.16	$0.51 \pm .18$
		Sbc/Sc I-II	-4.91 ± 0.20	-20.93 ± 0.09	0
Masters 等人 2006 年 [128]	I	S0/Sa/Sab	-5.52 ± 0.40	-21.34 ± 0.07	0.32 ± 0.07
		Sb	-7.07 ± 0.17	-21.45 ± 0.03	0.21 ± 0.08
		Sbc/Sc/Scd	-7.87 ± 0.15	-21.66 ± 0.02	0
Masters 等人 2008 年 [129]	J	S0/Sa/Sab	-6.09 ± 0.30	-21.84 ± 0.06	0.12 ± 0.06
		Sb/Sbc	-7.80 ± 0.19	-21.81 ± 0.03	0.15 ± 0.04
		Sc/Scd	-9.23 ± 0.20	-21.96 ± 0.02	0
	H	S0/Sa/Sab	-6.08 ± 0.27	-22.62 ± 0.05	0.16 ± 0.05
		Sb/Sbc	-7.80 ± 0.19	-22.64 ± 0.03	0.14 ± 0.04
		Sc/Scd	-9.17 ± 0.20	-23.78 ± 0.02	0
	K	S0/Sa/Sab	-6.95 ± 0.24	-22.85 ± 0.03	0.21 ± 0.04
		Sb/Sbc	-8.64 ± 0.17	-22.92 ± 0.02	0.14 ± 0.04
		Sc/Scd	-10.09 ± 0.18	-23.06 ± 0.02	0
Russell 2009 年 [168]	K_s	Sa/Sab/Sb	-	-	0.19 ± 0.10

注意: 所有的 TF 关系已用公式 $M = a \log(V_{\max}/200 \text{ km s}^{-1}) + b$ 重新表示。在同一工作中, 相对于 Sc 星系的 TF 关系的零点 (b), 其它类型星系的零点差用 ΔM 表示。

1.2.1.4 不同红移处的 TF 关系

TF 关系可作为星系演化模型的重要观测约束, 可用于研究盘状星系的动力学演化和恒星演化史 [214], 因此有很多工作是关于 TF 关系随红移演化的。

在这些工作中, 有的没有发现 TF 关系的演化效应。如, 1999 年, Vogt 对红移范围为 $0.2 \sim 1$ 的 100 个盘状星系的研究 [205], 发现与本地 TF 关系相比, 远星系 TF 关系的斜率和零点并无显著差异, $\Delta M_B < 0.3 \text{ mag}$ 。2005 年, Conselice 等人利用 101 个红移范围 $0.2 < z < 1.2$ 的盘状星系, 讨论了 K 波段 TF 关系和恒星质量 TF 关系, 发现两者都未表现出演化效应 [40]。2006 年, Flores 等人分析了 35 个 $0.4 < z < 0.75$ 的星系的观测数据, 结果表明从 $z = 0.6$ 起, K 波段 TF 关系和恒星质量 TF 关系在斜率、零点以及弥散度上都没有呈现演化效应 [72]。

另一方面, 有很多研究结果支持 TF 关系随红移有演化。1996 年, Vogt 等人率先对红移范围 $0.1 \sim 1$ 的 9 个暗场星系进行了研究 [206]。他们发现, 与本地 TF 关系相比, 这些远星系的 B 波段光度仅高出约 $\Delta M_B \leq 0.6 \text{ mag}$ 。不久, Rix 等人 [161] 和 Simart 等人 [180] 利用不同的样本 (星系数分别为 24 和 22, 红移范围分别为 $0.16 \sim 0.34$ 和 $0.23 \sim 0.43$) 得出 $\Delta M_B \approx 1.5 \sim 2 \text{ mag}$ 。2002 年, Ziegler 等人利用红移范围 $0.1 \sim 1$ 的 60 个晚型场星系样本研究了 B 波段的 TF 关系 [214], 发现大质量星系没有表现出明显的演化效应, 但最小质量星系的 TF 关系的斜率为 -5.77 ± 0.45 , 与本地星系的斜率 (-7.92 ± 0.18) 相比显得较小。他们认为这可能是星系的光度演化的结果, 也可能是因为在他们的样本中补充了一批红移约大于 0.2 的蓝星系样本。之后有研究证实了星系的光度演化与星系质量有关 [121, 22]。2006 年, Weiner 等人利用大样本星系 (在 B 波段约有 1 000 个星系, 在 J 波段约有 670 个星系) 讨论了 TF 关系的演化情况 [208], 红移范围为 $0.4 < z < 1.2$ 。他们在两个波段都发现了 TF 关系斜率的演化, 与过去 (大红移处) 相比, 目前 (小红移处) 大质量亮星系的光度要比小质量星系减小得更多, 这一结果与 2002 年 Ziegler 等人 [214] 的结论恰好相反。最近, Fernández-Lorenzo 等人深入研究了 B 、 R 和 I 波段 TF 关系的演化问题, 共有 344 个星系, 最大红移为 1.3 [67]。他们的结论是 TF 关系呈现出光度演化的趋势, 即与具有相同旋转速度的本地星系相比, 过去的 (大红移) 星系的光度更大, 并且 3 个波段的零点差几乎相同 ($\Delta M = 1.0 \pm 0.15 \text{ mag}$)。

除了以上的实测研究,近十几年来一些作者对 TF 关系的起源和演化问题从理论上进行了探索。例如,1999 年 Steinmetz 等人借助高分辨率的宇宙学模拟,研究了 TF 关系的起源问题 [184]。他们发现, $z = 1$ 时模型星系 TF 关系的 B 波段光度要比现在大约亮 0.7 mag,与一些实测研究结果相符。2007 年,Portinari 等人 [157]通过对盘状星系形成和演化的宇宙学 N 体+流体动力学模拟,发现在 $z = 0 \sim 1$ 期间, B 波段 TF 关系的斜率并没有演化,但零点则约增亮 0.85 mag,大致处于不同观测结果的中间值附近。他们认为,此现象的产生原因主要是光度演化效应,而恒星质量 TF 关系(见下节)则未出现明显的演化。但是,这并不意味着个别星系的恒星质量没有发生变化。 z 在 $1 \rightarrow 0$ 期间单个星系的质量通常会增大 0.5~1 倍,与之同时旋转速度也相应地增大,于是在恒星质量 TF 图上星系位置的变化主要表现为沿着 TF 关系的演化,而恒星质量 TF 关系本身(指它的零点和斜率)并不呈现出任何显著的演化效应。

1.2.1.5 重子质量 TF 关系

经典意义上的光学 TF 关系是光度-旋转速度关系。但早在 1988 年,人们就认识到 TF 关系之所以成立,是因为星系旋转速度与盘的总重子质量相关,而后者是一种更为基本的关系 [148]。重子质量包括恒星质量和气体质量两部分,与恒星质量相关的 TF 关系称为恒星质量 TF 关系,与重子质量相关的 TF 关系称为重子质量 TF 关系 [51]。

2000 年,McGaugh 等人发现,不超过约 90 km s^{-1} 的那些暗星系在恒星质量 TF 关系上的位置,要明显低于由较亮星系导出的拟合直线,或者说此类星系 TF 关系的斜率比亮星系来得陡,然而在重子质量 TF 关系上这种现象不复存在 [133],这是因为暗星系含有非常丰富的气体,从本质上说 TF 关系反映了星系旋转速度与盘的总重子质量之间的关系,而仅考虑星系中恒星质量的光学 TF 关系只是它的一种近似表述。

继 McGaugh 等人的工作之后,不少人对涉及重子质量 TF 关系的问题进行了多方面的探索 [51, 12, 204, 92]。如,2007 年 de Rijcke 等人研究发现,尽管其样本中星系的质量差异很大,在恒星质量 TF 关系的低质量端(恒星质量 M_* 小于 10^9) 早型 (E) 和晚型 (S + Irr) 星系分布在向下弯曲的同一条曲线附近,而在 $9.0 < \log M_* < 12.0$ 范围内可用直线来拟合 [51]。另一方面,在重子质量 TF 关系上, $8.0 < \log M_* < 12.0$ 范围内的早型和晚型星系可以用同一条直线很好地拟合,而且拟合精度好于恒星质量 TF 关系中的直线部分 [133]。

1.2.2 TF 关系的理论模型

1.2.2.1 最大盘模型

在最大盘模型中, 假设盘是星系的唯一成分, 并且盘的面亮度为指数形式 $I(r) = I_0 \exp(-r/R_d)$, 其中 R_d 和 I_0 分别是盘标长和中心处的面亮度, 则盘的总光度 L_d 为

$$L_d = 2\pi I_0 R_d^2. \quad (1.6)$$

再假设盘上的粒子都是在圆轨道上运动, 则

$$V(r)^2 = \frac{GM(r)}{r}, \quad (1.7)$$

其中 $V(r)$ 是半径 r 处的旋转速度, $M(r)$ 是半径 r 内的总质量。如果最大旋转速度 V_{\max} 是在 $r = sR_d$ 处观测的, 将公式 (1.7) 平方, 并且考虑 (1.6) 和质光比 $\Upsilon \equiv M(sR_d)/L_d$, 得

$$L_d = V_{\max}^4 \frac{s^2}{I_0 \Upsilon^2} \frac{1}{2\pi G^2}, \quad (1.8)$$

如果 $I_0 \Upsilon^2$ 与旋转速度 V_{\max} 无关, 并且测量 V_{\max} 的半径与盘标长的比例固定 (即 s 固定), 则理论 TF 关系的对数斜率为 4 [即公式 (1.5) 中 $a = -10.0$]。

1.2.2.2 暗物质模型

这里介绍 Mo, Mao 和 White 1998 年的文章中提到的模型 (简称 MMW 模型) [136], 此模型假设星系只有盘和晕成分。

基于球塌缩模型 [91], 暗晕的最大半径定义为 r_{200} , 在此半径内的平均质量密度是此晕所处红移处的宇宙临界密度的 200 倍, 即 $\bar{\rho}_h = 200\rho_{\text{crit}} = 200 \times 3H(z)^2/(8\pi G)$, 其中 $H(z)$ 是红移 z 处的哈勃常数。因此, 对于红移 z 处的晕, 其半径 r_{200} 和质量 M_h 可直接用晕的绕转速度 V_h 分别表示为:

$$r_{200} = \frac{V_h}{10H(z)}; \quad M_h = \frac{V_h^2 r_{200}}{G} = \frac{V_h^3}{10GH(z)}. \quad (1.9)$$

由于耗散和辐射作用, 晕中的气体成分逐渐聚集成盘。假设盘质量与晕质量之比为 m_d , 那么盘质量可以表示为 $M_d = m_d M_h$ 。如果忽略盘的引力作用, 且将晕描述为单等温球, 则盘的旋转速度为常量, 即最大旋转速度 $V_{\max} = V_h$ 。再假设所有的盘有同样的恒星质光比 ($\Upsilon_d \equiv M_d/L_d$), 则可得理论 TF 关系:

$$L_d = \frac{m_d V_{\max}^3}{10GH(z)\Upsilon_d}, \quad (1.10)$$

其取对数后的斜率为 3, 即方程 (1.5) 中 a 的值为 -7.5 。

实际上, 晕的引力势不能用等温球简单描述, 因此 $V_{\max} \neq V_h$, 且盘的引力作用也不能完全忽略。

1996 年 Navarro, Frenk & white 用数值模拟得到已塌缩的位力化暗物质晕的密度分布为:

$$\rho_h(r) = \rho_{\text{crit}} \frac{\delta_0}{(r/r_s)(1+r/r_s)} \quad (1.11)$$

(简称 NFW) [140], 其中 ρ_{crit} 是宇宙临界密度, r_s 是特征半径, δ_0 是特征异常密度 (overdensity)。此分布取对数后的斜率在星系中心处为 -1 , 而在大半径处为 -3 。定义晕的中心聚度 $c \equiv r_{200}/r_s$, 则半径 r (小于 r_{200}) 内的晕质量为: $M_h(r) = 4\pi\rho_{\text{crit}}\delta_0 r_s^3 [1/(1+cx) - 1 + \ln(1+cx)]$, 其中 $x \equiv r/r_{200}$ 。当 $x = 1$ 时为晕的总质量, 与 $M_h = 200\rho_{\text{crit}}4\pi r_{200}^3/3$ 比较, 容易证得:

$$\delta_0 = \frac{200}{3} \frac{c^3}{\ln(1+c) - c/(1+c)}. \quad (1.12)$$

另外考虑到 $\rho_{\text{crit}} = 3H(z)^2/(8\pi G)$ 和公式 (1.9) 可得 $\rho_h(r)$ 的另一个表达式:

$$\rho_h(r) = \frac{V_h^2}{4\pi G r^2} \frac{c}{[\ln(1+c) - c/(1+c)]} \frac{r/r_s}{(r/r_s + 1)^2}. \quad (1.13)$$

如果忽略盘的引力作用, 则盘的旋转曲线为 $V^2(r) = GM_h(r)/r$, 旋转速度在 $r \approx 2r_s$ 时达到最大, 然后随半径增大而缓慢下降。实际上, 盘的形成之所以影响旋转曲线, 不只是因为盘的引力作用还因为晕中心区聚度的改变。为了分析此过程, 假设在聚集盘时, 晕是绝热的, 并且晕塌缩时保持球状, 则单个暗物质粒子的角动量就会守恒。即对于一个粒子, 初始在半径 r_i 处最终在 r 处, 其 $GM_f(r)r = GM_h(r_i)r_i$, 其中 $M_h(r_i)$ 是盘形成之前半径 r_i 内的质量 (公式 (1.11) 或 (1.13) 的积分), $M_f(r)$ 是最终半径 r 内的总质量, 既包括在初始半径 r_i 内的暗晕质量又包括 r 内盘的质量, 即 $M_f(r) = M_d(r) + M_h(r_i)(1 - m_d)$, 其中 m_d 仍是盘质量占总质量的比例, 而 $M_d(r) = M_d[1 - (1 + r/R_d) \exp(-r/R_d)]$ 。在这里假设了重子最初的密度分布和暗晕的一样, 并且最终没有落到盘上的重子和暗晕的分布仍一样。

旋转速度曲线由盘和暗晕共同作用产生:

$$V^2(r) = V_d^2(r) + V_{\text{DM}}^2(r), \quad (1.14)$$

其中 $V_{\text{DM}}^2(r) = G[M_f(r) - M_d(r)]/r$ 是暗晕产生的曲线, 而 V_d 是由指数盘产生的旋转曲线。参考文献 [20] 中的公式 (2-169), $V_d(r) = 4\pi G\mu_0 R_d y^2 [I_0(y)K_0(y) - I_1(y)K_1(y)]$, 其中 μ_0 是盘中心处的质量面密度, $y = r/(2R_d)$, $I_i(y)$ 和 $K_i(y)$ 是第一类型和第二类型模型化的 Bessel 方程 (具体计算见 [20] 中的附录 1.C.7)。

考虑暗物质的 MMW 模型成功的预言了旋涡星系的 TF 关系的零点和斜率, 因此是旋涡星系形成模型的经典工作之一。然而, MMW 模型仍有不足之处, 它只考虑了星系的晕和盘成分, 而没有考虑星系核球对旋转曲线的贡献。在本文第四章, 我们研究 TF 关系的形态依赖性时, 将进一步扩展 MMW 模型, 引入核球成分, 探讨核球对盘旋转曲线的贡献。

1.3 晚型星系的基本面

受到早型星系基本面发现过程的启发, 很多工作试图在 TF 关系中引入第三参量, 从而构建晚型星系的基本面 [196, 210, 43, 122, 94, 176]。虽然上节已经提到, TF 关系与观测波段、星系形态和红移等都相关, 但是, 为了与早型星系基本面相对应, 人们一般将星系半径作为 TF 关系的第三参量。然而到目前为止, 还没有确定星系半径是否是第三参量, 即晚型星系是否也存在一个类似早型星系基本面的关系。

1.3.1 晚型星系基本面的观测

在观测方面, 一些研究认为晚型星系的基本面存在, 因为半径的引入可以使得晚型星系的 TF 关系的弥散明显减小。如, 2000 年 Koda 等人发现, 在三维参数空间 $\log L - \log R - \log V$ 中晚型星系分布在一个类似冲浪板的面上 [122], 如图 1.1 所示, 并用 $L \propto (VR)^{1.3}$ 描述了这个晚型星系基本面, 并且他们认为两维关系 ($L-V$ 、 $V-R$ 和 $R-L$) 都是这个冲浪板面的投影。稍后 Han 等人综合了在各波段观测的 500 个晚型星系, 认为晚型星系的基本面大概可以表达为 $L \propto V^2 R$, 并且发现基本面的弥散比 TF 的减小了大约 50% [94]。另外, 1999 年 Willick 发现面亮度可以作为 TF 关系的第三参量, 并且这个基本面表示为: $V \propto L^{0.28} I_e^{0.14}$ [210]。其实, 在光度固定时, 星系面亮度等效于半径。

但是, 也有作者在研究了 TF 的残差后认为 TF 的第三参量不存在, 或者说第三参量的作用不显著 [211, 196, 43]。1999 年 Courteau & Rix 发现 TF 关系在速度方向的残差 $\Delta \log V$ 和光度-半径关系在半径方向的残差 $\Delta \log R$ 之间的

图 1.1: 晚型星系基本面的示意图, 见 Koda 等人 2000 年文章 [122]。

关系斜率为 $\Delta \log V / \Delta \log R \sim -0.19 \pm 0.05$, 远小于“最大盘”假设得到的 -0.5 (具体讨论见 1.3.2 节), 因此他们认为 TF 第三参量的作用不明显 [43]。2007 年 Pizagno 等人发现 TF 的残差虽然和一些星系特征 (如颜色、聚度) 相关但是并不和半光度半径相关 [155]。2007 年 Gnedin 等人 [87] 用恒星质量 M_* 代替 TF 中的光度, 即研究恒星质量 TF 关系 ($\log M_* - \log V$), 认为晚型星系的基本面虽然存在 ($V \propto M_*^{0.27} R^{0.09}$), 但是其弥散和 TF 的几乎一样 (分别为 0.048 dex 和 0.049 dex), 即晚型星系基本面中半径参量相对来说不重要。

近年来还有研究认为, 在传统的光度 TF 关系中半径 (或中心面亮度) 并不是有物理意义的第三参量, 但是半径可以是重子质量 TF 关系 (即 $\log M_s - \log V$)

的第三参量 [69, 213, 61]。例如, 2008 年 Avila-Reese 等人发现其重子残差关系¹的斜率为 $\Delta \log V / \Delta \log R \approx -0.15 \pm 0.04$, 但是对于恒星残差关系和光度残差关系, 其相关性几乎消失 (斜率分别为 -0.09 和 -0.07), 即标长不再是其 TF 关系的第三参量 [9]。

需要注意的是, 在这些研究中, 结果不一样的工作所用的方法一般不同: 认为晚型星系基本面存在的研究, 几乎都是直接地分析 $V-L-R$ 三个参量的关系及其弥散的大小; 然而认为基本面不存在的研究, 几乎都是分析的 TF 关系的残差 $\Delta \log V$ 与其它参量的关系。因此, 我们认为不同的研究结果很可能与研究方法不同有一定的关系。另外, 关于晚型星系基本面是否存在还受一定的人为判定的影响。如在 Courteau & Rix 等人的研究中找到的残差关系的斜率为 -0.19 , 他们认为基本面不存在; 然而 Avila-Reese 等人的斜率仅为 -0.15 却认为基本面存在。

1.3.2 晚型星系基本面的理论意义

尽管在观测上晚型星系的基本面是否存在还有一定的争议, 但对其存在性的研究和探讨对晚型星系的形成理论却有重大的意义。

假设极端情况: 重子盘是星系唯一的质量成分 (即“最大盘”假设), 星系的旋转速度可近似为 $V^2 \sim GM/R$, 因此星系半径就应该是重子质量 TF 关系 (与 V 和 M 相关) 重要的第三参量。另外, 在固定 M 时半径越小 (即聚度越大) 的盘转动越快, 因此在这种极端假设下 $\Delta \log V$ 和 $\Delta \log R$ 有强的负相关, 并且 $\Delta \log V / \Delta \log R$ 应该为 -0.5 。

而在另外一个极端, 如果重子作用可忽略、星系完全由暗物质晕主导, 则星系的旋转速度 V 完全由晕的质量 (而不是重子质量) 决定。这种情况下, 重子质量 TF 关系的内禀弥散 $\Delta \log V$, 完全由重子质量固定时晕质量的弥散引起的, 而这种弥散显然与星系的半径无关, 因此难以用引入半径 R 作为第三参量的办法加以消除 [176]。

事实上, 晚型星系是处于上述两种极端情况之间的。在标准的冷暗物质宇宙学模型中, 晚型星系的盘是在暗物质晕提供的势井下塌缩形成的 [136]。对于孤立的冷暗物质晕, 其 TF 关系表示为 $V_{m,h} \propto M_h^a$, 其中 M_h 是位力质量, $V_{m,h}$

¹重子残差关系是重子质量 TF 关系的残差和 $\log M_s - \log R$ 关系的残差之间的相关关系, 类似地有恒星残差关系和光度残差关系。

是在位力半径 R_h 处的绕转速度, 数值模拟的结果中 $a \approx 0.32 \sim 0.30$ [140, 7]。而位力半径和位力质量之间的关系可以简单地描述为 $R_h \propto M_h^{1/3}$ [136]。为了将晕的标度率转换成重子标度率, 需要知道 $V_{m,h}$ 和重子最大旋转速度 $V_{m,s}$ 的关系、 R_h 和重子分布半径 R_s 的关系、及 M_h 和重子质量 M_s 的关系。对于质量, 两者之间的关系一般可以简单地用重子组分参数 m_s 加以描述, 即 $M_s = m_s M_h$ 。对于半径之间的关系, 假设重子物质和暗物质具有相同的角动量分布, 且在星系盘的形成过程中角动量守恒, 则有盘标长 $R_s \propto \lambda R_h$, 其中 λ 为晕的自旋参数。对于 $V_{m,h}$ 和 $V_{m,s}$ 的关系, 其比值 $V_{m,s}/V_{m,h}$ 会随着盘的标长的减小(即 λ 的减小)和 m_s 的增加而增加。 λ 的减小和 m_s 的增加都会增加盘成份对于盘上的最大旋转速度 $V_{m,s}$ 的作用。因此, 对于给定质量为 M_h 的晕来说 (R_h 和 $V_{m,h}$ 固定), 在 m_s 固定的情况下 (即 M_s 固定), 盘的半径 R_s 和其旋转速度 $V_{m,s}$ 具有一定的负相关性, 即重子质量 TF 关系中 $-0.5 < \Delta \log V_{m,s}/\Delta \log R_s < 0.0$, 而其相关程度则依赖于 m_s 、 λ 等模型参数的取值和分布 [176]。

对于恒星质量 TF 关系来说, λ 的减小不仅使星系的 $V_{m,s}$ 增加和 R_* (恒星质量分布的半径) 减小, 其同时也会使恒星质量 M_* 增加。其原因是, λ 的减小会使盘面密度增大, 从而使得气体转换成恒星的效率增高。这样, λ 的变化引起的星系在 TF 参数空间的移动主要是沿着 TF 关系的方向, 因此 R_* 并不能作为第三参量引入而显著降低恒星质量 TF 关系的弥散。相对于恒星质量 TF 关系, 光度 TF 关系的情况可能更为复杂, 因为星系质光比的弥散和参量 V 、 L 和 R 的观测误差都会进一步弱化有可能存在的第三参量的作用。

综上所述, 研究晚型星系的 TF 关系在不同情况 (重子, 恒星, 光度) 的第三参量 (基本面) 问题, 可以进一步加深理解晚型星系的星族、动力学特征等形成和演化过程, 从而约束晚型星系的形成和演化的理论模型 [179]。

1.4 本文的研究目的

对于晚型星系, TF 关系已经被详细的研究, 并可以用模型很好的解释。但是关于晚型星系基本面是否存在还有一定的争议。

关于晚型星系基本面的研究之所以存在争议, 其主要原因之一就是缺少一个均匀的大样本。而 SFI++ 数据库的出现为进一步研究晚型星系基本面提供了可能。SFI++ 综合了一些以前发表的 I 波段的观测数据, 包含大约 5000 个晚型星系。为了使这些观测数据均匀、统一, 其所有光谱数据已经用统一的方

法重新计算, 另外, 由不同方法得到的旋转速度展宽也已经进行了统一改正 (详见第二章)。

早在 2006 年 Master 等人 [128] 就已经从 SFI++ 中精选了 807 个晚型星系, 进行了 TF 关系的研究, 并且得到了星系的本动和哈勃常数 H_0 。与其不同的是, 本文的研究重点是 TF 关系的第三参量, 并且我们并不事先假定三参量 TF 关系 (即基本面) 是平面, 而是通过研究 TF 关系的残差最终得到三参量 TF 关系的具体形式。

除此之外, 本文的另一个研究重点就是晚型星系 TF 关系的形态相关性的起因。TF 关系的形态相关性的具体表现是在固定最大旋转速度处, 较早型晚型星系的光度会系统地偏小, 并且这种偏差在短波段观测中更明显。对于各种形态的晚型星系, 通过模拟其动力学和星族, 分析 TF 关系与形态相关的主要原因是由于不同形态的星系的星族不同还是其动力学不同。

本文结构如下: 第二章主要介绍 SFI++ 数据库以及我们样本的选择和处理; 第三章研究 TF 关系中的第三参量问题; 第四章通过模拟 TF 关系分析其形态相关性的产生起因。

第二章 数据

到目前为止, 虽然已经发表了很多关于旋涡星系 TF 关系的文章, 但是这些文章的结论却仍然存在一些不一致处, 尤其是关于 TF 关系第三参量的问题。虽然一直以来人们不断尝试用不同的形式、或者引入不同的第三参量, 但是因为受到星系旋转速度测量的限制, 一直没有较大的 TF 样本出现, 所以也就无法提高统计研究结论的可靠性。直到最近, Springob 等人提供的 SFI++ 数据库的出现才改变了这一现状 [183]。

2.1 SFI++ 数据库

SFI++ 是 Springob 等人在 2007 年总结发表的、专门用来研究旋涡星系 TF 关系的数据库。这个数据库主要由上世纪 90 年代观测并发表的一些数据, 如 SCI (Spiral Cluster *I*-band) [84, 85, 82, 83], SC2 (Spiral Cluster *I*-band 2) [47, 46], SFI (Spiral Field *I*-band) [99, 100], 以及直到现在还没有单独发表的 SF2 (Spiral Field *I*-band 2) 组成, 另外 SFI++ 数据库还用到了 Mathewson 在 1992 年和 Mathewson & Ford 在 1996 年分别发表的两组数据 [131, 130], 及乌普萨拉星系总表 (Uppsala General Catalogue of Galaxies, UGC) 中的 172 个星系 [141]。Springob 等人用统一的方法重新计算了所有这些星系的光谱数据, 保证了这些数据的一致性。另外, 在组成 SFI++ 数据库时, 他们还去除了那些只有测光资料没有光谱资料或光谱质量不高的星系、或者只有光谱资料而没有测光资料的星系。对于观测资料有重复的星系, SFI++ 只选择其中观测质量最高的数据。如果一个星系同时有 HI 光谱和光学光谱观测时, SFI++ 更倾向于选择 HI 光谱。另外, 他们更信任自己的观测资料 (即 SF2), 所以如果在 SF2 和其它子数据库中都有某个星系的观测资料、而且观测值不同时, SFI++ 会选择 SF2 中的观测值。

最后, SFI++ 数据库包含了 4861 个有高质量数据的星系。图 2.1 是这些星系的全天分布的等积投影图。此图以 $R.A.=6^h$ 、 $Decl.=0^\circ$ 为中心, 三条线分别表示 $b = -20^\circ, 0^\circ, +20^\circ$ 对应地情况。图中不同颜色表示在宇宙微波背景 (Cosmic Microwave Background, CMB) 下的不同红移。

图 2.1: 本图来自文献 [183], 是 SFI++ 数据库中的星系以 $R.A. = 6^h$ 为中心的空间分布等积投影图。其中的三条线分别表示 $b = -20, 0, +20^\circ$ 的情况。图中不同颜色表示 CMB 下的不同红移: $cz < 1000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为蓝点, $1000 < cz < 3000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为青点, $3000 < cz < 5000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为绿点, $5000 < cz < 7000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为黄点, $7000 < cz < 9000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为红点, $cz > 9000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系表示为洋红色点。

因为 SFI++ 是由一些子数据库组成, 所以整个数据库的观测就相当于使用了很多不同的望远镜。比如, 在 HI 射电光谱观测时, 用到了美国国家天文学和电离层中心 (National Astronomy and Ionosphere Center) 的 305 米 Arecibo 望远镜、美国国家射电天文台 (National Radio Astronomy Observatory) 的 91 米和 42 米 Green Bank 望远镜、法国巴黎天文台的 Nançay 射电望远镜、以及德国马普射电天文学会 (Max Planck Institute for Radioastronomy) 的 100 米 Effelsberg 望远镜; SFI++ 中的光学光谱是通过澳洲 Siding Spring 天文台的 2.3 米望远镜、美国 Palomar 天文台的 5 米 Hale 望远镜、及在智利的 Cerro Tololo 美洲天文台 (Inter-American Observatory, CTIO) 的 4 米望远镜观测得到; 其中的光学测光用的是 Siding Spring 天文台的 1 米和 3.9 米望远镜、美国 Kitt Peak 国家天文台 (KPNO) 的 0.9 米望远镜、CTIO 的 0.9 米望远镜、麻省理工学院 (Michigan-Dartmouth-MIT, MDM) 天文台的 1.3 米 McGraw-Hill 望远镜。

关于各种观测和原始数据处理的细节, 参见数据的来源文献。下面我们只简单的介绍一下 SFI++ 中各子数据的主要的原初选择特征。

2.1.1 SCI

SCI 是一个包含 24 个星系团的数据库, 并且专门用来研究 TF 关系和团本动的。文章 [83] 中详细地描述了 SCI 中的每个星系团及其成员星系的选择过程和选择条件。

这些团在 CMB 中的平均退行速度都小于 $10\,000\text{ km s}^{-1}$ 。它们的富度 (richness) 分布较广, 在空间的分布也比较均匀。实际上, SCI 也包括一些在其以前 (即 1997 年以前) 发表的数据, 如 Pierce & Tully 在 1988 [151]、Han 在 1992 [97] 和 Han & Mould 在 1992 [98] 观测的数据, SCI 对这些观测数据已经用相同的方法进行了改正。

2.1.2 SC2

SC2 包含了全天 54 个、退行速度 cz 在 $5000\sim 25\,000\text{ km s}^{-1}$ 之间的星系团, 而且每个团中有 5~15 个可用于 TF 关系研究的星系。Dale 等人 [47, 46] 就是用 SC2 数据来获得较高质量的 Sc 型星系的 I 波段 TF 关系, 并且研究这些星系团的本动, 并进一步推断本星系群在 CMB 中的运动。

2.1.3 SFI

SFI 包含 2000 个场星系, 其选择条件是: 在本星系群坐标下 cz 小于 7500 km s^{-1} 、B 波段视星等小于 14.5 和谱线宽度大于 100 km s^{-1} 。另外还有随红移变化的直径限制: 对于退行速度 $cz < 3000\text{ km s}^{-1}$ 的星系, 其长轴 a 必须满足 $2.5' < a < 5.0'$, 而 $3000 < cz < 5000\text{ km s}^{-1}$ 的星系须满足的条件为 $1.5' < a < 5.0'$, $5000 < cz < 7500\text{ km s}^{-1}$ 的星系须满足的条件为 $1.3' < a < 5.0'$ 。这种直径限制可以使每单位红移范围内观测到的星系数目基本一致。

2.1.4 SF2

SF2 主要是对一些已经有 HI 或光学波段光谱数据的星系进行测光观测。其观测范围是 $-15^\circ < \text{Decl.} < +35^\circ$ 、 $cz < 10\,000\text{ km s}^{-1}$, 另外其星系还要满足光

学波段的直径 $a > 0.9'$ 。SF2 中星系的 HI 谱线和光学旋转曲线分别由 Springob 等人(2005) [182] 和 Catinella 等人 (2005) [35] 提供。它的 I 波段星系测光是由 KPNO 的 0.9 米的望远镜观测得到, 大约观测了 2300 个 $23' \times 23'$ 的场区, 其中 1900 个场区是高质量的观测, 大约 500 个观测区已经被 SC2 覆盖。另外, SF2 的图像处理和 SC2 一样。

2.1.5 其它

Mathewson 在 1992 年收集了南天区 1355 个 Sb~Sd 星系, 这些星系的直径 $a > 1.7'$ 、倾角 $i > 40^\circ$ 、银纬 $|b| > 11^\circ$, 并且大部分星系的退行速度小于 7000 km s^{-1} 。Mathewson & Ford 数据是另外的 920 个 Sb~Sd 星系。这些星系选自欧洲南方天文台 (European Southern Observatory, 缩写为 ESO, 简称欧南台) Atlas 的 ESO-Uppsala 巡天计划 [3]。此样本的选择条件是 $1.0' < a < 1.6'$ 、 $4000 < cz < 14000 \text{ km s}^{-1}$, 并且倾角和银纬的选择条件和 Mathewson 数据样本的一样。另外, SFI++ 中还包括从 UGC [141] 中选出 $250 < l < 360^\circ$ 且 $45 < b < 80^\circ$ 的 172 个星系。

2.2 用到的参数及其改正

因为 SFI++ 是由多个数据样本组合而成的, 如果直接用各样本的原观测量进行研究, 则结果会有一些的偏差, 所以 Springob 等人用统一的方法重新计算了 SFI++ 中的光谱数据, 而且还将其测光数据做了一些改正。本节具体介绍本文中用到的一些参数及其改正。

2.2.1 星系倾角

SFI++ 中星系的绝对星等、速度展宽和半径都需要做倾角改正, 因此合理地计算星系的倾角非常重要。SFI++ 中计算倾角的方法与文献 [83] 中的一样, 用的公式:

$$\cos^2 i = \frac{(1 - e_{\text{corr}})^2 - q_0^2}{1 - q_0^2}, \quad (2.1)$$

其中 q_0 是盘实际的轴比 (c/a), 对于 Sbc 及更晚的星系它取 0.13, 对于更早类型的星系它是 0.20; e_{corr} 是椭率的视宁度 (seeing) 改正值,

$$e_{\text{corr}} = 1 - \sqrt{\frac{(1 - \bar{e})^2 - \psi^2}{1 - \psi^2}}, \quad (2.2)$$

其中, ψ 是 0.5 倍的观测的视宁度盘大小除以星系 I 波段面亮度星等为 23.5 mag arcsec⁻² 处的半长轴大小, \bar{e} 是在某段半径范围内的平均椭率, 要求在此半径范围内的星系盘面亮度表现为指数分布。

2.2.2 绝对星等

在 SFI++ 中, 星系 I 波段图像的测量, 及视星等和观测误差的计算都和 Haynes 等人的 SFI 数据处理的一样 [99, 100]; 其 k 改正用了 Han [97] 的; 银河系消光改正采用的是 DIRBE (Diffuse Infrared Background Experiment) 尘埃分布图 [172]; 对于星系内的自消光, 则是用了文献 [84] 里的公式:

$$\Delta M_I = -\gamma \lg(a/b), \quad (2.3)$$

其中, ΔM_I 是以星等为单位的自消光量, a 和 b 是等面亮度拟合得到的椭圆的半长轴和半短轴, 并且 a 和 b 已经用 [84] 描述的方法进行了视宁度改正, γ 是一个和星系的红外波段绝对星等 (M_I) 相关的量。SFI++ 中用到的 γ - M_I 关系来自于文章 [85] 中的图 7, 其具体是:

$$\begin{cases} \gamma = 0.5, & M_I > -19.1; \\ \gamma = 1 - 0.417(M_I + 20.3), & -20.3 < M_I < -19.1; \\ \gamma = 1.0, & -21.8 < M_I < -20.3; \\ \gamma = 1.35 - 0.35(M_I + 22.8), & -22.7 < M_I < -21.8; \\ \gamma = 1.30, & M_I < -22.7. \end{cases} \quad (2.4)$$

这个公式的使用是假设了旋涡星系为圆盘, 因此对于面向星系 (face-on), $a = b$, 其自消光量 $\Delta M_I = 0$, 而侧向星系的自消光量最大。因此这个自消光改正相当于将观测到的绝对星等改为星系面向我们时的星等。

值得注意的是文献 [84] 在总结出这个自消光公式时, 用的样本主要是由 Sbc 和 Sc 星系组成的, 但是 SFI++ 数据却包含了数量不可忽略的较早型旋涡星系。对于较早型旋涡星系, 因为其盘比较厚, 即使完全侧向其短轴 b 也不会非常小, 所以其倾角可能被低估了, 进而其自消光被低估。然而较晚型星系的自消光也可能被低估了。因为较晚型星系很可能有较多的尘埃, 其消光量更大, 由上式可知其对应的 γ 值应更大, 所以由这个公式得到的自消光就被低估了。因此, 这种由于星系类型不同而引起的自消光估值的系统偏差可能并不重要, 所以 Springob 等人认为这个消光公式可以用在较早型旋涡星系中。

另外值得一提的是, 在 Springob 等人 2007 年发表的文章中, 关于计算星系绝对星等时用到的红移的描述是不准确的。在其文章中指出, 用的红移是星系本身的红移。但是实际在 SFI++ 中, 如果星系属于某个星系团或组、并且是 In 星系 (确定为成员星系) 时, 用来计算星系距离的红移是这个星系团或组的红移; 如果星系是场星系、或者是某个星系团或组的 In+ 星系 (可能是成员星系) 时, 用到的红移才是星系本身红移; 而且如果星系属于一些特殊的星系团组时, 如 Cancer, 考虑的会更复杂 (具体见文献 [128] 和 [83])。在计算绝对星等时使用的宇宙学为 $\Omega_0 = 0.3$ 、 $\Omega_\Lambda = 0.7$ 、 $H_0 = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。

2.2.3 速度展宽

在本研究中用到的另一个重要参数就是描述星系旋转速度的速度展宽。SFI++ 中的速度展宽数据包含两种类型: 观测 21cm 波长处 HI 谱线的展宽 W_{21} 和观测光学波段旋转曲线 (Optical Rotation Curve, ORC) 得到的光学速度展宽 W_{ORC} 。

关于 HI 谱线速度展宽的测量和改正在文献 [182] 中有详细描述, 这里只是简单的介绍一下。首先, 用多项式分别拟合谱线两翼, 如果某处的拟合流量是此侧的流量峰值减去流量的方均根值 (root mean square) 后的一半, 则定义为中点 (midpoint), 两个中点之间的宽度就是展宽, 以速度为单位时即为速度展宽。测量 HI 谱线速度展宽时, 大部分情况用的是一阶多项式 (即直线) 拟合谱线两翼, 只有少数时候用了二阶多项式。图 2.2 是文章 [182] 中的一个例子, 其中 W_{50} 就是谱线速度展宽 (相当于本节中的 W_{21})。

HI 谱线速度展宽之后又经过了红移改正、仪器改正、噪声改正、湍流改正以及视线投影改正。经过改正后的速度展宽 W_{21} 表示为:

$$W_{21} = \left(\frac{W_{\text{obs},21} - \Delta_s}{1+z} - \Delta_t \right) \frac{1}{\sin i}, \quad (2.5)$$

其中, $W_{\text{obs},21}$ 是观测到的速度展宽值, z 和 i 分别是星系的红移和倾角, Δ_t 代表湍流改正, 这里取做 6.5 km s^{-1} , 而 $\Delta_s = 2\Delta v \lambda$, 其中 Δv 是各光谱测量频道之间的分隔 (以 km s^{-1} 为单位), λ 是 Δv 的函数而且函数形式与光谱的信噪比和平滑类型有关 [182]。另外, 在计算 W_{21} 的误差时, 同时考虑了观测误差和各种改正误差, 并且是完全采用文献 [83] 中的公式和参数计算的, 即:

$$\epsilon_{W_{21}}^2 = \frac{\epsilon_{W_{\text{obs},21}}^2 + \epsilon_s^2}{(1+z)^2 \sin^2 i} + \frac{\epsilon_t^2}{\sin^2 i} + \epsilon_i^2 W_{21}^2 \sin^2 i, \quad (2.6)$$

图 2.2: 本图来自文献 [182], 是测量 HI 谱线速度展宽的例子。(a) 图是较标准的 HI 谱, (b) 图是信噪比较差的情况, (c) 图是不对称谱线情况。其中 W_{50} 表示速度展宽, V_{sys} 是星系的退行速度, 两翼的直线 (多项式) 是用带圈的点拟合得到。

其中, $\epsilon_{W_{\text{obs},21}}$ 是 $W_{\text{obs},21}$ 的观测误差, ϵ_s 和 ϵ_t 分别是 Δ_s 和 Δ_t 的误差, 分别为 $0.25\Delta_s$ 和 $0.25\Delta_t$, ϵ_i 是倾角改正误差,

$$\epsilon_i = \left[\frac{d(1/\sin i)}{d(e)} \right] \epsilon_e,$$

其中 $\epsilon_e = 0.090 - 0.12e + 0.037e^2$ 。

在 SFI++ 中, 所有的光学速度展宽 W_{ORC} 都是用 Giovanelli & Haynes (2002) [80] 的 polyex 模型拟合星系旋转曲线得到的。此模型定义, 在距离星系中心 r 处的旋转速度为:

$$V_{\text{PE}}(r) = V_0(1 - e^{-r/r_{\text{PE}}})(1 + \alpha r/r_{\text{PE}}), \quad (2.7)$$

其中, V_0 是 ORC 的幅值, r_{PE} 是 ORC 上升区的指数标长, α 是 ORC 外部区 (大半径处) 的变化斜率。在包含 83% 可见光总光度的半径 (r_{opt}) 处, 其 V_{PE} 就是光学速度展宽 W_{ORC} 。之后, W_{ORC} 也做了和 W_{21} 一样的红移和倾角改正 [35]。

在 SFI++ 中, 如果某星系的两种速度展宽都有测量, 而且质量都很好, SFI++ 一般会选 W_{21} 作为此星系的速度展宽。因为正常星系的 HI 气体分布范围几乎是恒星的两倍, 所以观测 HI 谱线可以跟踪到星系更大半径处。在 SFI++ 中, 大约有 60% 的星系用的 W_{21} , 剩下的 40% 用 W_{ORC} 。并且 SFI++ 有不到 20% (873个) 星系同时有两种展宽, Catinella 等人(2007) [36] 用这些数据将这两种展宽进行了比较, 发现这两种展宽有系统差, W_{21} 系统地大于 W_{ORC} 。并且, 这种系统差不仅和 ORC 沿半径的延展有关 (延展越大展宽差越大), 还和 r_{opt} 处的 ORC 斜率有关。他们拟合得到关系:

$$\begin{aligned} W_{21}/W_{ORC} &= 0.899 + 0.118r_{max}/r_{opt}, & \text{上升的 ORC;} \\ W_{21}/W_{ORC} &= 1.075 - 0.013r_{max}/r_{opt}, & \text{平的 ORC.} \end{aligned} \quad (2.8)$$

其中 r_{max} 是 ORC 的最大延展半径, “上升的 ORC” 指 r_{opt} 处的 ORC 斜率大于 $0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ arcsec}^{-1}$, “平的 ORC” 指 r_{opt} 处的 ORC 斜率小于 0.5。SFI++ 中用此公式将 W_{ORC} 做了改正, 试图消除两种速度展宽间的系统差, 并将改正过的 W_{21} 和 W_{ORC} 统一称为 W_{TF} , 在本章中用 W 简单表示。

2.2.4 星系半径

本文研究的是旋涡星系的 TF 关系, 并试图找一个第三参量使其弥散明显减小, 而星系半径 R 无疑是一个很好的候选者。因为 R 不仅和星等、速度展宽一样是基本参数, 而且取值范围较宽。

在 SFI++ 中列出了两种星系半径: 光学半径 r_{83L}^o 和等光度半径 $r_{23.5}^o$ 。其中 r_{83L}^o 是由星系图像得到的, 是包含 83% 光度的半径, 即上节中的 r_{opt} 。对于光度分布是指数轮廓的星系来说, 星系标长 $r_d^o \simeq r_{83L}^o/3.21$ 。而 $r_{23.5}^o$ 是星系的 I 波段面亮度为 $23.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$ 处的半径。它们的单位都是角秒 (arcsec)。

为了得到面向的 $r_{23.5}$, 类似于星等的面向改正 (即自消光改正), 用文献 [85] 中的公式 (6):

$$r_{23.5}^o/r_{23.5} = (a/b)^\beta \quad (2.9)$$

其中 $r_{23.5}^o$ 和 $r_{23.5}$ 分别是观测的半径和要得到的面向半径, a/b 是用文献 [84]

中的方法改正视宁度后的星系轴比, β 是一个与 I 波段绝对星等有关的量: $\beta = 0.03(M_I + 20.0) + 0.25$ (见文献 [85] 中图 7b)。

同样地, 可以得到面向的 r_d , 用的是文献 [85] 中的公式 (5):

$$r_d^o/r_d = (a/b)^\alpha, \quad (2.10)$$

其中 $\alpha = 0.04(M_I + 20.0) + 0.18$ (由文献 [85] 中图 7a 得)。

具体地, 星系半径的面向改正公式表示为:

$$R_{23.5} = r_{23.5}^o \times \frac{3.14d_A}{18 \times 36} (1 - e)^{0.03(M_I + 20.0) + 0.25}, \quad (2.11)$$

$$R_d = r_d^o \times \frac{3.14d_A}{18 \times 36} (1 - e)^{0.04(M_I + 20.0) + 0.18}, \quad (2.12)$$

其中, $R_{23.5}$ 和 R_d 是以 kpc 为单位的半径, d_A 是用星系红移计算得到的共动坐标系中的角直径距离, e 表示星系的椭率, 且 $(1 - e) = b/a$ 。

2.3 本文样本的选取

SFI++ 数据库中共有 4861 个星系, 其中 4319 个已经被 Springob 等人 (2007) [183] 公布了半径值, 这些有半径值的星系是我们真正需要的。为了保证研究结果的准确性, 我们用一些条件进一步选择样本。首先去除星系中 I 波段绝对星等的误差 ϵ_{M_I} 大于 0.15 的星系 220 个, 再去除 276 个速度展宽的对数值 $\log W$ 的误差 $\epsilon_{\log W}$ 大于 0.06 的星系。为了减小星系本动对距离测量和 TF 关系弥散的影响, 又去了 CMB 系中退行速度 $cz < 3000 \text{ km s}^{-1}$ 的星系共 721 个。另外, 考虑到 TF 关系的形态相关性 [82, 48, 128], 我们只研究了 Sb 和 Sc 星系。这里的 Sb 星系定义为在 RC3 系统 (Third Reference Catalogue of Bright Galaxies) [53] 内采用的星系形态代码 T 为 3 的星系; Sc 星系实际是 $T=4, 5, 6$ 即 Sbc/Sc/Scd 星系。虽然 SFI++ 已经将星系的类型做了改正, 使得不同类型星系得到的 TF 几乎一样, 但是为了研究的缜密性, 在第三章的研究中我们先将样本中的 Sb 星系做反形态改正, 即将其星等减去 $-0.1 - 0.9(\log W - 2.5) \text{ mag}$ 。我们没研究其它类型的星系, 因为它们的数量相对较小 (4319 个星系中只有 278 个其它类型星系), 统计价值不明显。图 2.3 中的虚线将这些选择条件形象的表示了出来。到此为止, 我们的样本包含有 2899 个星系。

图 2.4 显示的是这些星系 (未进行反形态改正) 的 TF 关系, 其中三角代表 Sb 星系, 方格代表 Sc 星系, 实线是拟合此 2899 个星系得到的 TF 关系, 两条

图 2.3: 4319 个 SFI++ 星系的一些基本参量的统计直方图。这些星系的半径已由 Springob 等人提供。垂直的虚线表示样本的部分选择条件。

虚线表示其 3 倍的均方根弥散范围 ($3\sigma_{\text{rms}}$)。具体的拟合方法在 2.4.3 节中单独介绍。由图可以看出, 有些点偏离拟合关系线较远。我们用迭代法去了那些偏离大于 $3\sigma_{\text{rms}}$ 的星系, 最后得到 2835 个星系作为本文的最终样本, 其中有 1093 个 Sb 星系和 1742 个 Sc 星系。此最终样本的 TF 关系是:

$$M_I = (-7.514 \pm 0.012)(\log W - 2.5) - 20.726 \pm 0.002, \quad (2.13)$$

用点线表示在图 2.4 中, 其弥散是 0.391 mag。此结果与同样研究 I 波段 TF 关系的 1997 年 Giovanelli 等人 [82] 及 2006 年 Master 等人 [128] 的结果基本一致, 他们得到的斜率分别为 -7.68 和 -7.85 。

图 2.4: 根据基本参量选出的 2899 个旋涡星系的 TF 关系图。实线代表拟合这些星系得到的 TF 关系, 两条虚线代表这个关系的 $3\sigma_{\text{rms}}$ 弥散。用迭代法去除 $3\sigma_{\text{rms}}$ 之外的星系后, 得到本文的最终样本, 点线代表最终样本的 TF 关系。

2.4 线性回归方法

在上节中我们给出了基于样本数据拟合出的 TF 关系。事实上, 数据的拟合结果在一定程度上和拟合方法有关。这里介绍在拟合 TF 关系和基本面时最常用的最小二乘法 [105, 66, 82] 和最大似然法 [44]。

2.4.1 最小二乘法

最小二乘法 (又称最小平方法) 是一种数学优化技术。它通过最小化偏差的平方和, 寻找数据的最佳函数匹配。依据自变量和因变量的选择的不同, 以及最小化参量的不同, 最小二乘法又可分为常用的 6 种。

1、正向 (forward) 最小二乘法要求数据在 y 轴方向的弥散 (χ^2) 最小。对于关系 $y = ax + b$, 要求

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - ax_i - b)^2}{\sigma_{y_i}^2 + a^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (2.14)$$

最小, 其中 N 是样本中数据点的数量, σ_{y_i} 和 σ_{x_i} 分别是第 i 个数据点的 y 和 x 值的误差。

2、反向 (inverse) 最小二乘法, 即要求 x 轴方向的弥散最小, 其 χ^2 为:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - (y_i - b)/a)^2}{\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{y_i}^2/a^2}. \quad (2.15)$$

3、数据点到回归线的垂直距离 (弥散) 最小。如果前两种方法得到的回归线的斜率分别为 a_1 和 a_2 , 此方法得到的斜率为 $a_3 = \frac{1}{2}[(a_2 - a_1^{-1}) + \text{sign}(S_{xy})\sqrt{4 + (a_2 - a_1^{-1})^2}]$, 其中 $\text{sign}(S_{xy})$ 是 $S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ 的正负号, 其中 $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i/n$, $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i/n$ 。然后, 根据回归线的斜率可以得到其零点 $b = \bar{y} - a\bar{x}$ 。

4、第 1 种和第 2 种回归线的角平分线, 其斜率为 $a_4 = (a_1 + a_2)^{-1}[a_1 a_2 - 1 + \sqrt{(1 + a_1^2)(1 + a_2^2)}]$ 。

5、第 1 种和第 2 种回归线的几何平均, 其斜率为 $a_5 = \text{sign}(S_{xy})\sqrt{a_1 a_2}$ 。

6、第 1 种和第 2 种回归线的算术平均, 其斜率为 $a_6 = (a_1 + a_2)/2$ 。

在上述的最小二乘法中, 暗含着一个假设, 即用来拟合的关系是一条没有内禀弥散的线。事实上, 在天文研究中很多经验相关关系 (标度律) 是存在内禀弥散的。在这种情况下, 可以用最大似然法同时分析观测误差和内禀弥散。

2.4.2 最大似然估计法

最大似然法是用来求一个样本的相关概率密度函数的参数。与最小二乘法一样, 对于线性关系, 传统的最大似然法只是简单地将其看成一条线, 即其未知参量只有两个: 斜率 a 和零点 b , 通过总的关系弥散与由观测误差引起的弥散相比较, 得到关系的内禀弥散。但是大多数线性关系是有一定内禀弥散的, 即线性关系实际应该有三个参量: 斜率 a 、零点 b 和内禀弥散 σ 。对于观测误差极小的个别数据点, 传统方法会使其权重太大, 拟合结果会有偏差, 实际上因为内禀

弥散的存在, 应该再加上 $1/\sigma^2$ 项, 以减小这些个别点的权重 (详见 D'Agostini 等人 2005 年的文章 [44])。下面简单介绍如何在考虑内禀弥散时用最大似然法得到线性关系的三个参量。

如果某星系 i 符合参量为 a 、 b 和 σ 的线性关系, 其自变量的观测值为 \hat{x}_i 时, 其因变量的观测值为 \hat{y}_i 的概率为

$$\begin{aligned} p(\hat{y}_i|\hat{x}_i, \sigma_{x,i}, \sigma_{y,i}, a, b, \sigma) &= \int_{-\infty}^{\infty} dy_i p(\hat{y}_i|y_i)p(y_i|\hat{x}_i) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} dy_i p(\hat{y}_i|y_i) \int_{-\infty}^{\infty} dx_i p(y_i|x_i)p(x_i|\hat{x}_i), \end{aligned} \quad (2.16)$$

其中 $\sigma_{x,i}$ 和 $\sigma_{y,i}$ 分别是 \hat{x}_i 和 \hat{y}_i 的测量误差, x_i 和 y_i 分别是 \hat{x}_i 和 \hat{y}_i 的真实值, $p(\hat{y}_i|y_i)$ 、 $p(y_i|\hat{x}_i)$ 、 $p(y_i|x_i)$ 和 $p(x_i|\hat{x}_i)$ 是一些概率。

假设此拟合关系的内禀弥散是高斯分布, 即星系 i 的真实自变量为 x_i 时, 其真实因变量为 y_i 的概率符合高斯分布, 表示为:

$$p(y_i|x_i) = (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(y_i - \bar{y}_i)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2.17)$$

其中

$$\bar{y}_i = a(x_i - x_0) + b$$

其中 x_0 值的选择使 a 和 b 不相关, 即 a 在最佳拟合值附件 $1\sigma_a$ 的变化, 不会影响 b 的拟合结果。另外, 假设观测值 \hat{x}_i 和 \hat{y}_i 相对于真实值 x_i 和 y_i 也分别是高斯分布, 即

$$\begin{aligned} p(\hat{y}_i|y_i) &= (2\pi\sigma_{y,i}^2)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{2\sigma_{y,i}^2}\right] \\ p(\hat{x}_i|x_i) &= (2\pi\sigma_{x,i}^2)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(\hat{x}_i - x_i)^2}{2\sigma_{x,i}^2}\right]. \end{aligned} \quad (2.18)$$

再假设 \hat{x}_i 在观测误差范围内其真实值为 x_i 的概率都一样, 即 $p(x_i|\hat{x}_i)$ 为常数, 则 $p(x_i|\hat{x}_i) = p(\hat{x}_i|x_i)$ 。那么, 就可以得到星系 i 的概率 $p(\hat{y}_i|\hat{x}_i, \sigma_{x,i}, \sigma_{y,i}, a, b, \sigma)$ 。

因此, 对于所有的星系, 总概率的对数值为:

$$\begin{aligned} \ln L &= \sum_i \ln p(\hat{y}_i|\hat{x}_i, \sigma_{x,i}, \sigma_{y,i}, a, b, \sigma) \\ &= -\frac{1}{2} \sum_i \ln(\sigma^2 + \sigma_{y,i}^2 + a^2\sigma_{x,i}^2) \\ &\quad - \sum_i \frac{[\hat{y}_i - (a\hat{x}_i + b)]^2}{2(\sigma^2 + \sigma_{y,i}^2 + a^2\sigma_{x,i}^2)} + C. \end{aligned} \quad (2.19)$$

最大 $\ln L$ 值对应的 (a, b, σ) , 就是此线性关系的斜率 a 、零点 b 和内禀弥散 σ 。值得注意的是, 如果将公式 (2.19) 中的 σ 设为 0, 则此方法就和传统的方法一致了。

2.4.3 本文的回归方法及样本完备性改正

对于不同的样本, 具体使用哪种方法拟合取决于样本的参数完备性、误差的信息、因变量和自变量的选择等具体情况。简单起见, 本文使用的是天文研究中最常用的正向最小二乘法, 除了考虑到其较简单外, 还因为本文关注的焦点之一是星系在 TF 关系的 M_I (即 y) 方向的弥散。

本工作中用到的拟合方法具体如下。对于关系 $y = f(x)$, 其 χ^2 表示为:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - f(x_i))^2}{\sigma_{y_i}^2} w_i, \quad (2.20)$$

其中, N 是样本中星系的数量, σ_{y_i} 是第 i 个数星系的 y 的误差, w_i 是这个星系的权重。以 TF 关系为例, 变量 x 代表 TF 关系中的 $(\log W - 2.5)$, $f(x)$ 是 $a(\log W - 2.5) + b$, y 和 σ_y 是 M_I 和其误差 σ_{M_I} 。

另外, 拟合时用到的参量还有星系权重 w_i 。 w_i 由两部分组成: 速度展宽的对数值 $\log W_i$ 的误差 (表示为 $\sigma_{\log W_i}$) 和观测时遗失较暗星系引起的样本的不完备性。 $\sigma_{\log W_i}$ 越大的星系占的权重越小; 而星系越暗, 其权重越大。如果用 w_{1i} 表示 $\sigma_{\log W_i}$ 引起的权重, 用 w_{2i} 表示由于样本的不完备性而引入的权重, 则第 i 个星系的总权重就被定义为 $w_i = w_{1i}w_{2i}$, 且 $w_{1i} = \sigma_{\log W_i}^{-1}$, 而 w_{2i} 是光度函数 (Luminosity Function) 与样本的星等直方图的比值, 如图 2.5 所示。图 2.5 显示了样本 (2835 个星系) 的星等分布直方图, 每个区间中的星系数目相同; 而曲线是光度函数, 表示一个完备的旋涡星系样本的光度分布情况, 用参数为 $\alpha = -0.5$ 和 $M_* = -21.6$ 的 Schechter 方程表示, 并且进行了标准化改正使其亮端 ($M_I < -21.0$) 的分布与星等直方图基本重合, 因此, 对于 $M_I < -21.0$ 的较亮星系, 其权重 w_{2i} 被固定为 1。这里, 对所有类型的星系我们只用了一个光度函数描述, 因为 Sb 和 Sc 星系的光度函数差别很小 [18]。最后, 就可以得到星系的总权重 w_i , 并且它还被归一化到星系的总数目, 即 $\sum w_i = N$ 。

在本文第三章的所有拟合中, 都用了星系的权重 w_i 。除了图 3.8 和图 3.11 中的误差棒用 bootstrap 计算外, 参数的误差 (如 TF 关系中 a 和 b 的误差) 都用 $\Delta\chi^2 = 1.0$ 估算。如果某关系的因变量没有误差数据, 我们取 $\sigma_{y_i} = 1.0$, 并且

图 2.5: 最终样本 (2835 个星系) 的 I 波段星等的直方图。每个区间中星系数目相同。曲线是代表光度函数的 Schechter 方程, 其参数是 $\alpha = -0.5$ 和 $M_* = -20.6$, 并且其高度已被调整, 以重合直方图的亮端 ($M_I < -21.0$) 的分布。

其所有系数的拟合误差需要再乘以 $\sqrt{\chi_{\min}^2 / (N - 2)}$, 其中 χ_{\min}^2 是拟合结果的 χ^2 值 [158]。

第三章 旋涡星系的 TF 关系中第三参量的引入

在本文第 1.2 节中已经提到, TF 关系可以用来测量近邻星系的距离。在 I 波段 TF 关系内禀弥散大约为 0.3 mag [82, 128], 对应的距离估算误差大约为 15%。如果 TF 关系的弥散再减小, 此估计的精度会更高。

TF 关系的弥散主要有三种起源: 原始数据的测量误差、参量改正中的不确定、及其它原因。通过提高数据质量和改进参量的改正方法, 可以减小前两个原因的影响。因此 TF 关系弥散的产生可能主要是由于第三个原因, 由此引起的弥散称为 TF 关系的内禀弥散 [82, 128]。为了减小内禀弥散, 人们试图找到 TF 关系的替代参量 [25, 133, 213, 61], 或者在 TF 中引入第三参量 [196, 210, 43]。在本文 1.3 节中, 我们已经简要介绍了在 TF 关系中引入第三参量、构建旋涡星系基本面的研究现状和理论意义。

为了得到关于第三参量的可信结果, 需要有个大且均匀的 TF 数据样本。最近 Springob 等人综合并公开了一个 I 波段、可用于 TF 研究的数据库, SFI++ (详见第二章)。此数据库包括了大约 5000 个旋涡星系, 是目前最大的 I 波段 TF 样本。基于 SFI++, TF 关系已经被仔细地研究, 并且通过联合 2MASS 数据研究已被扩展到 J 、 H 、 K 波段 [128, 129]。然而, SFI++ 还没有被用来研究 TF 关系的第三参量。

在本章中, 我们将用从 SFI++ 数据中得到的样本 (共 2835 个星系, 样本选择详见第二章) 研究半径 R 是否是 TF 关系的第三参量。与以前的研究相比, 我们不仅用 SFI++ 这个大样本提高了研究结果的可信度, 而且更关心 R 作为 TF 关系第三参量的具体形式。在以前的研究中, Koda 等人在其研究开始时就假设三参量 TF 的形式为 $L \propto (VR)^\alpha$, 类似地 Han 等人用的是 $L \propto V^\alpha R^\beta$ 。然而, Shen 等人 2003 年的工作表明 $R \propto M^\alpha$, 其中 M 是星系质量, 对于质量大于 $10^{10.3} M_\odot$ 的星系 $\alpha = 0.4$, 对于质量小于 $10^{10.3} M_\odot$ 的星系 $\alpha = 0.15$ 。因此, 一个更合理和复杂的猜测是, R 作为第三参量在三维参数空间的构成可能并不是一个平面, 而是一个曲面。基于此考虑, 我们没有预先假设 R 的引入形式, 而是从 TF 的残差开始, 通过详细研究 R 与 TF 残差之间的关系, 试图说明 R 是否是 TF 关系的第三参量, 并找到三参量 TF 关系的具体表达形式。

在本章中我们会先研究并排除, 星系所处的环境和星系形态对 TF 关系的

影响 (见 3.1 节)。然后通过分析引入 R 是否可以减小 TF 关系的残差, 证明 TF 关系的第三参量是否存在 (见 3.2 节), 并且分析 R 作为第三参量的具体形式 (见 3.3 节)。最后是简单的总结和讨论 (见 3.4 节)。

3.1 环境和星系形态的影响

一般认为, 星系的演化过程受到环境的影响: 当星系进入高密度区时, 其气体被剥离, 使其恒星形成和恒星运动都受到影响。因此不同环境中的 TF 关系可能不同 [138]。另外, TF 关系和星系形态也有一定的相关 [82, 48, 128]。然而形态和环境这两个因素又有一定的交叉影响, 在高密区早型星系较多, 而低密区中的晚型星系比例较大。

图 3.1: 用于比较 TF 关系的 4 个子样本 (Sb 团星系、Sb 场星系、Sc 团星系和 Sc 场星系) 的 $\log W$ 分布情况。

SFI++ 中既有团中的星系也有场中的星系，而且包含多种类型的星系。因此在研究 TF 关系之前，必须先考虑环境和星系形态对其的影响。将 2.3 节得到的 2835 个 SFI++ 星系，分为 4 个子样本：Sb 团星系、Sb 场星系、Sc 团星系和 Sc 场星系。通过比较它们的 TF 关系，证明用我们的样本研究 TF 关系是否受环境和星系形态影响。需要注意的是，TF 关系的弥散是旋转速度的函数 [82, 128]，因此即使这些子样本有相同的内禀 TF 关系，但是如果旋转速度分布不同，它们拟合得到的 TF 关系也可能不同。因此这 4 个子样本需要被进一步选取，使其旋转速度 $\log W$ 分布情况一样。我们选最小的样本 (Sb 团星系样本, 369 个星系) 的旋转速度分布作为标准，其它 3 个子样本通过与其比较得到最终的子样本。这 4 个最终子样本的 $\log W$ 分布情况见图 3.1。

表 3.1: 4 个子样本的 TF 关系拟合系数

子样本	N_0	N	a	b	$\sigma_{\text{rms}}/\text{mag}$
团, Sb	369	369	-6.410 ± 0.032	-20.664 ± 0.006	0.374
场, Sb	724	369	-5.886 ± 0.034	-20.658 ± 0.005	0.365
团, Sc	657	358	-7.766 ± 0.033	-20.716 ± 0.006	0.345
场, Sc	1085	369	-7.464 ± 0.040	-20.734 ± 0.006	0.415

注意： N_0 是各子样本在比较 $\log W$ 分布前的星系数， N 是比较后的星系数。 a 和 b 是由比较后的样本得到的。

这 4 个子样本的 TF 关系被记录在了图 3.2 和表 3.1 中，同时这 4 个子样本中的 Sb 和 Sc 星系分别组成了另两个样本，其拟合结果也被记录在图中。可以看出，这些参数分为明显的两组，Sb 子样本的参数和 Sc 的有显著区别，而在给定星系形态时团子样本的参数和场的差异较小，这个结果与文献 [48, 82, 48, 128] 的结果一致。因此，在接下来的研究中，我们将对 Sb 和 Sc 两种形态的星系分别讨论，而不再考虑环境的影响。

3.2 第三参量的引入

星系的大小经常被用作第三参量引入到 TF 关系中，而且一般假设三参量 TF 关系在参量的对数空间中是一个平面，被称为旋涡星系的“基本面”。与之前的研究类似的是，我们也用半径 R 作为第三参量；不同的是，我们从 TF 关

图 3.2: 6 个子样本的 TF 关系的系数比较图, 其中有 Sb 团星系、Sb 场星系、Sc 团星系和 Sc 场星系样本, 以及 Sb 团星系和 Sb 场星系组成的 Sb 样本, Sc 团星系和 Sc 场星系组成的 Sc 样本。误差棒代表系数的拟合误差。所有数据是经过反形态改正的。

系的残差 ΔM_I 开始, 通过研究它与半径的关系, 确定半径是否是 TF 关系的第三参量。其中, 残差 ΔM_I 定义为观测到的 I 波段绝对星等 M_I 减去由拟合关系推得的绝对星等值, 即 $\Delta M_I = M_I - a \times (\log W - 2.5) - b$ 。图 3.3 表示的是 Sc (左边) 和 Sb (右边) 星系的 TF 关系, 实线是拟合结果, 其拟合系数 a 和 b 见表 3.2, 由此关系即可得残差 ΔM_I 。

首先, 我们给出了星系半径与残差 ΔM_I 的关系, 如图 3.4 所示。图的左上角是 Sc 星系的 $\Delta M_I - \log R_{23.5}$ 关系图, 右上角是 Sc 星系的 $\Delta M_I - \log R_d$ 关系图, 左下角是 Sb 星系的 $\Delta M_I - \log R_{23.5}$ 关系图, 右下角是 Sb 星系的 $\Delta M_I - \log$

图 3.3: Sc (左边) 和 Sb (右边) 星系的 TF 关系。实线表示拟合结果。

R_d 关系图。图中的红色方格表示在每个横坐标 (半径) 区间内的 ΔM_I 的平均值 (带权重计算)。如图 3.4 所示, 虽然弥散较大, 但是星系半径与残差 ΔM_I 的确相关。

然而这种相关可能并不是内禀的, 而是由于 ΔM_I 和 $\log R$ 都是 $\log W$ 的函数 [213, 61, 9]。为了去除此效应, 我们需要先分析 $\log R$ - $\log W$ 关系, 得到与 $\log W$ 无关的残差 $\Delta \log R$, 再将其与 ΔM_I 进行比较, 如果它们相关则说明 R 可作为第三参量引入 TF 关系。

图 3.5 显示的是 $\log R$ - $\log W$ 关系。左上角是 Sc 星系的 $\log R_{23.5}$ - $\log W$ 关系图, 右上角是 Sb 星系的 $\log R_{23.5}$ - $\log W$ 关系图, 左下角是 Sc 星系的 $\log R_d$ - $\log W$ 关系图, 右下角是 Sb 星系的 $\log R_d$ - $\log W$ 关系图。红色方格同样表示在每个横坐标区间内的纵坐标量的带权重平均值。可以看出, 这 4 个关系基本上都是线性的, 我们将 $\log R$ - $\log W$ 关系表示为:

$$\log R = c (\log W - 2.5) + d, \quad (3.1)$$

其中 c 和 d 是拟合系数。图中的实线表示拟合结果, 其拟合系数被放在表 3.2 中。由此关系推得的 $\log R$ 再与观测值比较, 就可得到残差 $\Delta \log R$ 。

因此, 就可以研究残差关系 ΔM_I - $\Delta \log R$, 如图 3.6 所示。在图中由左到右由上到下分别是 Sc 星系的 ΔM_I - $\Delta \log R_{23.5}$ 关系图、Sc 星系的 ΔM_I - $\Delta \log R_d$ 关系图、Sb 星系的 ΔM_I - $\Delta \log R_{23.5}$ 关系图、Sb 星系的 ΔM_I - $\Delta \log R_d$ 关系图。红色方格同样表示在每个横坐标区间内的纵坐标量的带权重平均值。可以看出,

图 3.4: 残差 ΔM_I 与半径的关系图。左上角是 Sc 星系的 $\Delta M_I - \log R_{23.5}$ 关系图, 右上角是 Sc 星系的 $\Delta M_I - \log R_d$ 关系图, 左下角是 Sb 星系的 $\Delta M_I - \log R_{23.5}$ 关系图, 右下角是 Sb 星系的 $\Delta M_I - \log R_d$ 关系图。图中红方格表示在每个横坐标 (半径) 区间内的 ΔM_I 的平均值。

这 4 个残差关系基本上也都是线性的, 所以我们将其表示为:

$$\Delta M_I = e \Delta \log R + f, \quad (3.2)$$

其中 e 和 f 是拟合系数。图中的实线表示各残差关系的拟合结果, 拟合系数同样被放在表 3.2 中。

如表所示, 4 个残差关系的零点 f 的值都接近 0.0, 此与理论相符。因为在理论上任何残差, 包括 ΔM_I 和 $\Delta \log R$, 的平均值都应该是 0.0。值得注意的是, 残差关系的相关性较强, 尤其是半径为 $R_{23.5}$ 的情况, 对于 Sb 和 Sc 星系, 其相关系数分别为 -0.726 和 -0.859 ; 并且残差关系的弥散比 TF 关系的弥散

图 3.5: 星系的 $\log R$ - $\log W$ 关系。左边两个是 Sc 星系的情况，右边是 Sb 星系的情况；上边两个是 $\log R_{23.5}$ - $\log W$ 关系，下边是 $\log R_d$ - $\log W$ 关系。实线是它们的拟合线，拟合系数都列在表 3.2 中。红色方格表示在每个横坐标区间内的平均值。

明显要小，对于半径为 $R_{23.5}$ 的情况，弥散减小了大约 42%。因此，半径可以是 TF 关系的第三参量，并且 $R_{23.5}$ 比 R_d 更适合做 TF 关系的第三参量。Han 等人 [95] 以及 Shen 等人 [177] 也都认为等光度半径 $R_{23.5}$ 更适合做 TF 关系的第三参量。这可能是由于等光度半径的测量不仅和盘的标长 R_d 有关还和星系的总光度有关。

在上面的工作中，我们直接将所有的关系看做线性的，这实际上等价于研究旋涡星系的“基本面”。由公式 (1.5)、(3.1)、(3.2) 可得：

$$M_I = \alpha (\log W - 2.5) + \beta \log R + \gamma, \quad (3.3)$$

图 3.6: 由左到右由上到下分别是 Sc 星系的 $\Delta M_I - \Delta \log R_{23.5}$ 关系图、Sc 星系的 $\Delta M_I - \Delta \log R_d$ 关系图、Sb 星系的 $\Delta M_I - \Delta \log R_{23.5}$ 关系图、Sb 星系的 $\Delta M_I - \Delta \log R_d$ 关系图。实线是它们的拟合线, 拟合系数都列在表 3.2 中。红色方格表示在每个横坐标区间内的平均值。

其中 $\alpha = a - e \times c$, $\beta = e$ 和 $\gamma = b - e \times d + f$ 。将表 3.2 中的数据代入此方程

表 3.2: Sb 和 Sc 星系的一些线性关系的拟合结果

	Sb (1093)		Sc (1742)	
a	-6.196 ± 0.020		-7.742 ± 0.014	
b	-20.656 ± 0.004		-20.728 ± 0.002	
$\sigma_{\text{rms}}(2\text{P})^*$	0.367		0.400	
	$R_{23.5}$	R_d	$R_{23.5}$	R_d
c	1.226 ± 0.018	1.028 ± 0.024	1.264 ± 0.015	0.954 ± 0.020
d	0.872 ± 0.003	0.278 ± 0.004	0.886 ± 0.002	0.318 ± 0.003
e	-3.266 ± 0.075	-1.912 ± 0.075	-3.868 ± 0.055	-2.098 ± 0.065
f	0.022 ± 0.007	0.020 ± 0.009	0.024 ± 0.005	0.024 ± 0.008
r^{**}	-0.796	-0.608	-0.859	-0.612
$\sigma_{\text{rms}}(3\text{P})^{***}$	0.230	0.301	0.206	0.319

注意: $M_I = a (\log W - 2.5) - b$, $\log R = c (\log W - 2.5) + d$, and $\Delta M_I = e \Delta \log R + f$

* 两参量 TF 关系的弥散

** 残差关系的线性相关系数 (linear correlation coefficient)

*** 三参量 TF 关系的弥散

中, 就可以得到 Sb 和 Sc 星系的基本面的具体形式:

$$\begin{aligned}
\text{Sb, } R_{23.5}: \quad M_I &= (-2.192 \pm 0.111) (\log W - 2.5) - \\
&\quad (3.266 \pm 0.075) \log R_{23.5} - (17.786 \pm 0.067), \\
\text{Sc, } R_{23.5}: \quad M_I &= (-2.853 \pm 0.092) (\log W - 2.5) - \\
&\quad (3.868 \pm 0.055) \log R_{23.5} - (17.277 \pm 0.053), \\
\text{Sb, } R_d: \quad M_I &= (-4.230 \pm 0.092) (\log W - 2.5) - \\
&\quad (1.912 \pm 0.075) \log R_{23.5} - (20.105 \pm 0.024), \\
\text{Sc, } R_d: \quad M_I &= (-5.741 \pm 0.076) (\log W - 2.5) - \\
&\quad (2.098 \pm 0.065) \log R_{23.5} - (20.037 \pm 0.031).
\end{aligned} \tag{3.4}$$

比较 $\log R$ 的系数相对于 $\log W$ 的系数值, 即 $e/(a - e \times c)$, 可知 $\log R_{23.5}$ 的此值明显比 $\log R_d$ 的大, 这同样说明 $\log R_{23.5}$ 在三参量 TF 关系中比 $\log R_d$ 重要。

以上介绍的是从残差 ΔM_I 开始得到三参量 TF 平面关系的过程。这里我们也用以前工作中的研究方法, 直接拟合了旋涡星系的基本面, 即将同样的样本用正向最小二乘法拟合基本面, 并且考虑了绝对星等的误差和星系权重。此方

法得到的拟合结果是:

$$\begin{aligned}
\text{Sb, } R_{23.5}: \quad M_I &= (-2.284 \pm 0.045) (\log W - 2.5) - \\
&\quad (3.185 \pm 0.033) \log R_{23.5} - (17.881 \pm 0.042), \\
\text{Sc, } R_{23.5}: \quad M_I &= (-2.903 \pm 0.035) (\log W - 2.5) - \\
&\quad (3.833 \pm 0.025) \log R_{23.5} - (17.327 \pm 0.033), \\
\text{Sb, } R_d: \quad M_I &= (-4.233 \pm 0.033) (\log W - 2.5) - \\
&\quad (1.863 \pm 0.025) \log R_{23.5} - (20.149 \pm 0.031), \\
\text{Sc, } R_d: \quad M_I &= (-5.723 \pm 0.024) (\log W - 2.5) - \\
&\quad (2.108 \pm 0.019) \log R_{23.5} - (20.062 \pm 0.025).
\end{aligned} \tag{3.5}$$

可以看到, 此结果与上面的结果非常一致。

总之, 与 R_d 相比, $R_{23.5}$ 更可能是 TF 关系的第三参量。当 $R_{23.5}$ 作为第三参量引入时, Sb 星系和 Sc 星系的关系弥散分别减小了 37.3% 和更好的 48.5%。虽然如此, 在下节中, 我们还是考虑了所有的情况, 包括半径为 R_d 的情况。

3.3 三参量 TF 曲面关系

以前的大部分研究都假设三参量 TF 关系 (即 $M-\log W-\log R$) 是个平面 [122, 177, 95]。在上节中我们也证明了这个假设基本上是合理的。但是有些研究表明这一假设很可能过于简单, 三参量 TF 关系很可能是曲面。比如, 在 Kauffmann 等人 [115] 和 Shen 等人 [178] 的研究中都表明, 暗星系的 $\log R-M$ 关系与亮星系的并不相同。如果不同 $\log W$ 区间内的 $\log R-M_I$ 关系不同, 则对应的残差关系 $\Delta \log R-\Delta M_I$ 在不同 $\log W$ 区间内会有不同的斜率。在本节中我们试图分析此问题, 并分别讨论半径为 $R_{23.5}$ 和 R_d 的情况。

3.3.1 $R_{23.5}$ 作为第三参量

首先分析 $R_{23.5}$ 作为第三参量的情况。图 3.7 和 3.8 分别是 Sc 星系和 Sb 星系在 8 个不同 $\log W$ 区间内的残差关系图。 $\log W$ 在 2.28 (2.32) 到 2.7 (2.74) 之间的 Sc (Sb) 星系被分成 $\log W$ 宽度都为 0.07 的 6 份, 而 $\log W < 2.28$ (2.32) 及 $\log W > 2.7$ (2.74) 的星系分别组成了另外两个区间。每个区间的 $\log W$ 平均值都被标在了子图的右上角。图中的残差量 ΔM_I 和 $\Delta \log R$ 都是在上节中计算得到的, 即所有 Sc (或 Sb) 星系都用同一个 TF 关系和 $\log R-\log W$ 关系计算残

图 3.7: Sc 星系在不同 $\log W$ 区间内的残差关系图, 半径用的是 $R_{23.5}$ 。每个区间的 $\log W$ 平均值都被标在了子图的右上角。实线是由各 $\log W$ 区间内的星系拟合 $\Delta M_I = e \Delta \log R$ 得到的线性关系, 其斜率 e 标在图左下角。为了比较, 所有 Sc 星系的总残差关系用虚线表示了出来。红色小叉代表退行速度小于 3500 km/s 的星系。

差。简单起见, 我们固定 $f = 0.0$, 即拟合 $\Delta M_I = e \Delta \log R$, 将得到的斜率 e 标在了每个图的左下角。图中的实线表示拟合结果。为了比较, 所有 Sc (或 Sb) 星系的总残差关系用虚线表示了出来。由这两个图可以看出, 对于 Sb 和 Sc 星系, 不同 $\log W$ 区间内的斜率 e 的确有系统性差异。

为了形象地表示此差异, 我们直接考虑星系的 e - $\log W$ 关系, 见图 3.9。图中每个点上的误差棒代表此点的弥散。作为比较, Sb (Sc) 星系的总残差关系的斜率值及其误差分别用水平实线(点线)和其附近的阴影表示。

图 3.8: 同图 3.7, 但是描述 Sb 星系的情况。

如图 3.9 所示, 整体来说 Sb 和 Sc 星系的 e 的确随 $\log W$ 变化, 而且变化趋势一致, 因此证实了我们关于三参量 TF 关系是曲面的猜测。需要注意的是, 对于 Sb 星系 (三角), 如果考虑其所有的点, 也可以用简单的直线描述 e 随 $\log W$ 变大的情况, 但是如果去掉两端误差较大的两个点, e 又可以认为与 $\log W$ 无关, 即其三参量 TF 关系近似为平面。另外, 整体来说 e - $\log W$ 关系不是简单的线性关系, 在 $\log W$ 小于 2.4 处, 斜率 e 随 $\log W$ 较规律的变大, 这部分的三参量 TF 关系是弯曲的; 而在 $\log W > 2.4$ 处, e 几乎不随 $\log W$ 变化, 这部分 TF 关系可近似为平面。为了定量地描述此 e - $\log W$ 关系, 我们用曲线

$$e = -8.0 + \frac{4.94}{1 + 10^{-3.0(\log W - 2.14)}} \quad (3.6)$$

近似拟合图 3.9 中所有的点 (包括 Sb 和 Sc 星系), 如图中虚线所示。

将 e 的这个表达式代入公式 (3.3) 中, 就可以得到三参量 TF 曲面关系。可

图 3.9: Sb (三角)和 Sc (方格) 星系的残差关系的斜率 e 与 $\log W$ 的关系图, 半径是 $R_{23.5}$ 。点上的误差棒由 bootstrap 计算得到。虚线由图中所有点近似拟合得到。水平实线和点线分别表示 Sb 和 Sc 星系的总残差关系的斜率, 阴影区表示这些斜率的误差。

以想像, 相对于三参量 TF 平面, 三参量 TF 曲面会极其复杂, 而且对于 TF 关系的弥散的进一步降低作用有限 (详见 2.3.3 节)。另外, 虽然 e 随 $\log W$ 有规律地变化 (尤其是对于 Sc 星系), 但此 e - $\log W$ 关系仅适用于 $2.2 < \log W < 2.8$ 范围。尽管如此, 我们仍支持这种复杂的曲面, 因为三参量 TF 关系很可能是内禀弯曲的 (见 3.3.4、3.3.6 节), 如果用简单的平面拟合此关系, 拟合结果将会依赖于样本的选择范围 (见 3.3.5 节)。

图 3.10: 同图 3.7, 但是半径用的是 R_d 。

3.3.2 R_d 作为第三参量

与上节类似, 半径为 R_d 的 Sc 星系和 Sb 星系在 8 个不同 $\log W$ 区间内的残差关系被分别表示在图 3.10 和 3.11 中, 其 e - $\log W$ 关系被表示在图 3.12 中。与图 3.9 显示的结果不同的是, 半径为 R_d 时图 3.12 中的每个点的误差棒相对较大, 而且无论哪种星系其斜率 e 随 $\log W$ 的变化都不明显, 尤其是去掉两端误差棒最大的点之后。因此, R_d 作为第三参量的 TF 关系更接近平面。

3.3.3 TF 关系弥散的变化

我们总结了本章中出现的各种 TF 关系的弥散, 如图 3.13 所示。从左到右依次为两参量 TF 关系的弥散、半径为 R_d 的三参量 TF 关系的弥散、半径为 $R_{23.5}$ 的三参量 TF 关系的弥散、半径分别为 $R_{23.5}$ 的三参量 TF 曲面的弥散。如图

图 3.11: 同图 3.8, 但是半径用的是 R_d 。

所示由两参量到三参量, TF 关系的弥散减小较大, 尤其是以 $R_{23.5}$ 为半径时; 而三参量 TF 关系由平面到曲面时, 弥散变化并不明显, 这可能是因为样本中大质量星系的数目占主导, 而三参量 TF 关系只是在小质量端有弯曲。

3.3.4 其他方法

为了进一步证明三参量 TF 关系的确弯曲 (虽不明显), 我们用 Bernardi 等人的方法 [13] 直接“看”三参量 TF 关系面的侧面, 如图 3.14 和 3.15 所示。图中的纵坐标是三参量 TF 平面的弥散, 即垂直于这个面的残差。如果这个平面是 $M_I = \alpha (\log W - 2.5) + \beta \log R + \gamma$, 则其垂直残差就是

$$\Delta_o \equiv \frac{M_I - \alpha(\log W - 2.5) - \beta \log R - \gamma}{\sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2}}. \quad (3.7)$$

图 3.12: 同图3.9, 只是半径用的 R_d 。

横坐标是沿平面长轴方向的坐标:

$$\begin{aligned} X_{\text{FP}} &\equiv X\sqrt{1+\alpha^2} + (M_I - \alpha X)\frac{\alpha}{\sqrt{1+\alpha^2}} \\ &= \frac{X + \alpha M_I}{\sqrt{1+\alpha^2}}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

其中 $X = (\log W - 2.5) + (\beta/\alpha)\log R + (\gamma/\alpha)$ 。此图用的基本面是我们拟合得到的公式 (3.4)。图中每个小点代表一个星系, 三角表示每个 X_{FP} 区间内的平均 X_{FP} 值和平均残差, 计算平均值时考虑了星系的绝对星等误差和权重。三角上的误差棒代表分布弥散。图 3.15 与其类似, 只是半径用的 R_d 。可以看出, 半径无论是 $\log R_{23.5}$ 还是 $\log R_d$, Sc 星系的基本面都比 Sb 的更明显 (X_{FP} 的分布范围更广), 而且它们的基本面的确都有些弯曲。

图 3.13: 在本章中出现的各种 TF 关系的弥散: 从左到右依次为两参量 TF、三参量 TF 并且半径为 R_d 、三参量 TF 并且半径为 $R_{23.5}$ 、半径为 $R_{23.5}$ 的非线性三参量 TF 的弥散。其中的三角表示 Sb 星系的关系弥散, 方格表示 Sc 星系的关系弥散。

3.3.5 弯曲基本面的应用

对于半径为 $\log R_{23.5}$ 的 Sc 星系, 因为其斜率 e 随 $\log W$ 变化较明显, 所以如果星系样本有不同的 $\log W$ 分布范围, 就会得到不同的 e , 即不同的三参量 TF 关系的系数 (α, β, γ) 。为了证明此观点, 从我们的 Sc 星系样本中选出了 5 个子样本, 它们有不同的 $\log W$ 下限 ($\log W_{\text{lim}}$)。用 TF 关系平面 (基本面) 直接拟合这些子样本, 得到其 α, β, γ , 并用符号表示在图 3.16 中。不同符号代表不同的系数, 系数的误差非常小, 因此其误差棒几乎被点覆盖。图中的曲线分别是由等式: $\alpha = a - e \times c$ (实线)、 $\beta = e$ (虚线) 和 $\gamma + 13.0 = b - e \times d + 13.0$ (点线) 预测到的系数的变化情况, 其中 a, b, c 和 d 固定为表 3.2 中的值, e 是在

图 3.14: 以旋涡星系基本面为中心的垂直残差沿这个平面长轴方向的分布情况, 半径为 $R_{23.5}$, 上图是 Sc 星系的情况, 下图是 Sb 星系。三角表示每个 X_{FP} 区间内的平均 X_{FP} 值和平均残差, 计算平均值时考虑了星系的绝对星等误差和权重。三角上的误差棒代表分布弥散。

某个 $\log W_{\text{lim}}$ 限制内的所有 $\log W$ 区间的残差关系斜率的加权平均值, 并且每个斜率的权重是其区间内所有星系的权重的代数和。因为 e - $\log W$ 关系的存在, 所以由此方法得到的 TF 关系的系数会随 $\log W_{\text{lim}}$ 变化。

如图 3.16 所示, 点和线基本重合, 说明预测的三参量 TF 关系随 $\log W_{\text{lim}}$ 的变化情况基本正确。但是需要注意的是, $\log W_{\text{lim}} > 2.3$ 的 α 不再相符, 这不仅是因为 $\log W_{\text{lim}}$ 较大时样本中的 $\log W$ 范围太窄, 进而影响了拟合结果的可信度, 主要还是因为在预测 (实线) 时假设了 a 固定, 但是实际上 a 是随 $\log W_{\text{lim}}$ 变化的 [147, 204]。例如, $\log W_{\text{lim}} = 2.4$ 时, a 实际值是 -7.262 ± 0.030 (不是预

图 3.15: 同图 3.14, 但是半径为 R_d

测用的 -7.742 ± 0.014), 而其 c 和 e 的值仍符合预测, 即分别为 1.262 ± 0.025 和 -3.496 ± 0.062 , 因此可以计算出 $\alpha = -2.850$, 这与直接拟合得到的结果一致。

3.3.6 本动的影响

在半径为 $R_{23.5}$ 的 e - $\log W$ 关系中 (图 3.9), $\log W$ 最小时 e 接近 -5.0 。值得注意的是, 由于星系本动引起的距离测量不准确, 也同样会产生斜率值为 -5.0 的残差关系。因为绝对星等 $M \propto -5 \log d$, 其中 d 为星系的距离, 而星系绝对大小 $\log R \propto \log d$, 所以由于距离测量不准确引起的绝对星等的误差 ΔM 和由于同样原因引起的半径的对数值的误差 $\Delta \log R$ 之间的关系为 $\Delta M \propto -5 \Delta \log R$ 。

为了说明星系本动对本章的结果是否有影响, 我们在图 3.7、3.8、3.10 和 3.11 中用红色小叉代表退行速度小于 3500 km/s 的星系, 这些星系的距离测量

图 3.16: Sc 星系样本的三参量 TF 关系的各系数和样本 $\log W$ 下限的关系。实线、虚线和点线分别表示由 e - $\log W$ 关系得到的参数 α 、 β 和 $\gamma + 13.0$ 的变化情况。各种符号表示的是直接拟合样本得到的各系数。

受本动的影响较大。可以看到, 这些近距星系与其他星系相比并没有明显区别, 因此我们得到的每个 $\log W$ 区间中的 e 值是内禀的, 而不是由于星系距离测量不准确引起的。

3.4 总结和分析

在本章中, 用 SFI++ 数据库中选择的旋涡星系样本 (2835 个星系), 研究了 TF 关系。通过比较 TF 关系的残差与 $\log R$ - $\log W$ 关系的残差之间的关系发现, 等光度半径 $R_{23.5}$ 可以作为 TF 关系的第三参量, 而星系标长 R_d 作为第三参量的作用并不明显。并且还发现, 以 $R_{23.5}$ 为第三参量的 TF 关系并不是纯平

面, 尤其是对于 Sc 星系。本章主要的结果及讨论总结如下:

1. 发现 TF 关系的第三参量的存在证据。例如, 由两参量的 TF 到三参量的 (以 $R_{23.5}$ 为第三参量), Sb 星系和 Sc 星系的关系弥散分别减小了 37.3% 和 48.5%, 残差关系的相关系数分别为 -0.796 和 -0.859 。
2. 通过研究残差关系的斜率 e 与 $\log W$ 的关系, 发现三参量 TF 关系 (即 $M_I - \log W - \log R_{23.5}$, 所谓的旋涡星系基本面) 不是纯平面, 而是有些弯曲。然而用复杂的曲面描述三参量 TF 关系并不能使其弥散显著降低, 因为在样本中大质量星系的数量占主导, 三参量 TF 关系在小质量端的弯曲影响不大。
3. 由于旋涡星系的基本面是内禀弯曲的, 因此随着 $\log W$ 的取值范围的变化, 拟合得到的旋涡星系的基本平面会系统变化, 这可能是以前的工作得到的基本面各自不同的原因。

第四章 TF 关系形态相关性的模型解释

很早以前人们就发现了 TF 关系的形态相关性：在固定的旋转速度处，较早型的旋涡星系一般光度较小[162]。而且这种光度差异也和观测波段有关，在短波段这种差异更大 [128, 129]。TF 关系的形态相关性的起因可能是由于不同形态的星系的星族不同（引起 TF 关系中的星等 M 变化），或者星系盘的动力学不同（引起最大旋转速度 V_{\max} 变化），或者由于两者皆不同。

首先分析星系星族和其形态的关系。一般较早型旋涡星系比较晚型的颜色偏红。Devereux & Young 认为这种颜色差异是由于星系的核球和盘之间的比例不同引起 [54]。核球的星族一般比盘星族要老并且金属丰度也更高，因此核球颜色会更红，较早型旋涡星系的核球比例较大，自然使得整个星系的颜色偏红。另外，Kennicutt 等人将星系分解为核球和盘成分，并且比较不同形态旋涡星系的盘成分的恒星形成历史，发现较晚型星系的盘星族平均来说还是较年轻 [120]。

另外，分析星系旋转动力学和星系形态之间的关系。虽然旋涡星系的旋转曲线一般被认为具有统一的形状 [149, 150]，但是仍有一些证据表明，与较晚型旋涡星系相比较，较早型星系的内部区域的旋转曲线上升更快 [41, 143]。例如 Noordermeer & Verheijen 认为如果用渐近旋转速度 V_{asympt} 代替一般使用的 V_{\max} 则大质量 Sa 星系会更好的分布在 TF 关系上，这表明 V_{\max} 和形态相关 [143]。

在理论模型方面，冷暗物质等级宇宙（ Λ CDM）框架下的一些盘形成模型可以很好的实现 TF 关系的零点、斜率和弥散 [45, 136, 135, 153]。但是，这些模型并不能直接用来研究 TF 关系的形态相关性问题，因为这些模型一般忽略了星系核球部分的影响。这些模型的另一个局限是其星族并不是由星系的某个物理过程决定，而是用事先假定的质光比确定。

这本章中，我们用模型描述不同类型旋涡星系的星族和动力学，并且试图找出引起 TF 关系形态相关性的主要原因。具体地，在动力学方面我们用 Mo, Mao & White [136]提出的动力学模型 (MMW 模型)，并且在此基础上增加了核球成分。在星族方面，我们分别描述盘和核球的恒星形成历史 (SFH)，然后用星族合成模型得到它们在不同波段的质光比。

4.1 旋涡星系的动力学模型

我们用简化的 MMW 模型描述旋涡星系动力学情况, 并且在此基础上考虑了核球的贡献。在我们的模型中, 气体和暗物质最初均匀的混合在一个位力平衡的晕中。经过耗散和辐射冷却过程, 气体逐渐冷却下降, 并且下降过程中角动量守恒, 因此最终形成了一个盘状结构。最终形成的星系的恒星质量定义为 M_* , 其与初始晕质量 M_h 的比值为 $m_s \equiv M_*/M_h$ 。如果星系中核球所占的比例为 f_b , 则核球和盘的质量分别为 $M_b = f_b M_*$ 和 $M_d = (1 - f_b) M_*$ 。在本章中我们用统一的 Λ CDM 宇宙模型, 并且 $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_0 = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, 重子的质量密度 $\Omega_B = 0.04$ 。

因为旋涡星系可以分为晕、核球和盘三部分, 所以研究其动力学 (即旋转曲线) 时分别考虑了这三个动力学成分。下面将对其分别讨论。

4.1.1 晕

在给定的宇宙中, 晕的位力半径 r_{200} 和总质量 M_h 可以用绕转速度 V_h 表示 (公式 (1.9))。而且, 已经塌缩并位力化平衡的晕遵守 NFW 宇宙密度分布 [140] (见公式 (1.14))。因此, 如果晕的绕转速度 V_h 已经给定, 那么要得到这个晕的密度分布、半径及质量, 剩下的唯一需要确定的量就是中心聚度 c 。在红移 z 处, c 的大小主要和晕的质量有关 [140, 28]。我们用的 c 是在红移为 0 时的简单参数化模型 [177]:

$$c = 8.5 \left(\frac{V_h}{100 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1/3}. \quad (4.1)$$

因此, 晕的分布情况只和参数 V_h 有关。

4.1.2 核球

假设旋涡星系核球部分的质量呈球状分布, 并且其质量密度符合 *Hernquist* 分布 [101]:

$$\rho_b(r) = \frac{M_b a}{2\pi r} \frac{1}{(r+a)^2}, \quad (4.2)$$

其中, M_b 是核球的总质量, a 是核球的标长, 它和核球的有效半径 R_e (半光度半径) 的关系是 $R_e \approx 1.82a$ (文献 [101] 中的公式 (38))。此质量密度分布的投影近似为椭圆星系的经典的 $R^{1/4}$ 面亮度分布。由公式 (4.2) 可知, 为了建立核球的

动力学特征, 除了质量 M_b 外, 还需要知道标长 a 或有效半径 R_e 。因此假设核球遵从椭圆星系的大小-质量关系 [178]:

$$R_e(\text{Kpc}) = 3.47 \times 10^{-5} \left(\frac{M_b}{M_\odot} \right)^{0.56}, \quad (4.3)$$

则半径就可通过质量得到, $\rho_b(r)$ 就只与 M_b 相关。

4.1.3 盘

假设旋涡星系盘的面质量密度分布是指数形式: $\mu_d(r) = \mu_0 \exp(-r/R_d)$, 其中 μ_0 是盘中心质量面密度, R_d 是盘标长。则盘质量是: $M_d = 2\pi\mu_0 R_d^2$ 。因为盘的观测大小受其中心处核球的影响, 所以我们并没有用观测到的旋涡星系的 R - M 关系作为模型中的 R_d - M_d 关系。和 MMW 一样, 我们假设盘的大小 R_d 由晕的初始角动量 J_h 决定。而 J_h 可以由自转参数 λ 表示:

$$\lambda = J_h |E_h|^{1/2} G^{-1} M_h^{-5/2}, \quad (4.4)$$

其中, E_h 是晕的总能量。假设所有的粒子都在圆轨道上运动, 得到它们的总动能, 再用位力定理得到被截断到 r_{200} 的晕的总能量为:

$$\begin{aligned} E_h &= -G \frac{(4\pi\rho_{\text{crit}}\delta_0 r_s^3)^2}{2r_s} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2(1+c)^2} - \frac{\ln(1+c)}{1+c} \right] \\ &= -\frac{GM_h^2}{2r_{200}} f_c, \end{aligned} \quad (4.5)$$

其中

$$f_c = \left(\frac{c}{2} \right) \frac{1 - 1/(1+c)^2 - 2\ln(1+c)/(1+c)}{[c/(1+c) - \ln(1+c)]^2},$$

只与晕的密度分布 (c) 有关。

可以合理地假设: 每个重子粒子的角动量和每个暗物质粒子的角动量一样, 并且角动量在不同物质成分之间不相互转换, 则最终形成的盘的角动量是

$$J_d = m_d J_h, \quad (4.6)$$

其中 m_d 是盘中的重子物质占总物质的比例。另一方面, 对于给定的旋转曲线 $V(r)$, 盘的总角动量为:

$$\begin{aligned} J_d &= \int_0^{r_{200}} V(r) r \mu_d(r) 2\pi r dr \\ &= M_d R_d V_{200} \int_0^{r_{200}/R_d} e^{-u} u^2 \frac{V(R_d u)}{V_{200}} du, \end{aligned} \quad (4.7)$$

其中 $V_{200} \equiv V(r_{200})$ 不受盘的影响。因为盘面密度为指数分布, 所以 $r_{200} \gg R_d$, 积分上限可以设为无穷。最后由公式 (4.4)、(4.6) 和 (4.7) 得盘的标长为:

$$R_d = \frac{1}{\sqrt{2}} \lambda r_{200} f_c^{-0.5} f_R(\lambda, c, m_d, f_b), \quad (4.8)$$

其中

$$f_R(\lambda, c, m_d, f_b) = 2 \left[\int_0^\infty e^{-u} u^2 \frac{V(R_d u)}{V_{200}} du \right]^{-1}.$$

f_R 既与晕的密度分布有关又与盘和核球的引力作用有关。因此, 若已知参数 c 、 m_d 、 f_b 和 λ 则可以得到盘大小 R_d 。这种方法得到的旋涡星系大小与观测结果非常的吻合 [186, 178]。需要注意的是, 此 f_R 是 (λ, c, m_d, f_b) 的函数, 比没有考虑核球成分的 MMW 模型多了一项 f_b , 因为在我们的旋转曲线 $V(r)$ 中有核球的贡献 (见 4.1.4 节)。

数值模拟已经表明, 晕的自转参数 λ 遵从自然对数分布, 其分布的中心值 $\bar{\lambda} \sim 0.04$ 、弥散 $\sigma_{\ln \lambda} \sim 0.4$, 并且 λ 的分布几乎不受宇宙及晕的各种特征的影响 [16]。简单起见, 我们没有考虑 λ 分布的弥散, 所有星系都取其中间值 0.04。

4.1.4 旋转曲线

综合考虑晕、核球和盘三部分的动力学贡献, 就可得到旋涡星系的旋转曲线:

$$V^2(r) = G \frac{M_{DM}(r) + M_b(r)}{r} + V_d^2(r). \quad (4.9)$$

其中 M_{DM} 是暗物质晕的质量(由公式 (4.1) 和 m_d 得到, 详见第 1.2.2.2 节), M_b 是核球的质量(可由公式 (4.4) 得到), $V_d^2(r)$ 是由盘成分贡献的旋转速度 (详见第 1.2.2.2 节)。

由前面三个小节可知, 晕、核球和盘的质量分布可以用一些模型参数 (如 V_h 、 c 、 λ 等) 表示, 因此通过调整模型参数可以得到不同的旋转曲线。然而, 为了得到旋涡星系的旋转曲线, 除了星系总的恒星质量 M_* 外, 还需要知道其三个组成部分 (晕、核球和盘) 之间的质量比。这就涉及到两个参数: 重子成分所占的比重 m_s 和核球与盘的质量比值 $B/D = f_b/(1 - f_b)$ 。 m_s 被定义为晕绕转速度 V_h (即晕质量) 的函数:

$$m_s = \frac{0.13}{1 + (V_h/150 \text{ km s}^{-1})^{-2}}. \quad (4.10)$$

在小质量晕中，因为其势井较浅，气体的外流过程较有效，所以有较大比例的重子被吹到了暗晕外面，因此其 m_s 较小；而在大质量晕中，因为它们的势井深，所以其重子比重 m_s 较大，接近宇宙的重子所占比重 $\Omega_B/\Omega_0 \approx 0.13$ [209]。另一个参量 B/D 取值为 0.5、0.3、0.1，分别对应于 Sa、Sb、Sc 模型星系 [181]。

图 4.1: $V_h = 120 \text{ km s}^{-1}$ 的模型星系的旋转曲线。其中实线代表星系旋转曲线，点线、虚线和点划线分别代表了晕、核球和盘成分对旋转曲线的贡献，绿色、红色和蓝色的线分别代表 Sa、Sb、Sc 型的模型星系

图 4.1 显示了用我们的模型得到的三种类型 (Sa/Sb/Sc) 的星系的旋转曲线，其中实线代表星系旋转曲线 (即在不同半径处总的 V)，点线、虚线和点划线分别代表了晕、核球和盘成分对旋转曲线的贡献。这三个类型的模型星系有同样的绕转速度 $V_h = 120 \text{ km s}^{-1}$ ，根据公式 (1.9)、(4.10) 及 $M_* = m_s M_h$ 可知，其恒星质量也是一样的，并且为 $M_* = 3 \times 10^{10} M_\odot$ 。从图中可以看到，对于较早

型的旋涡星系，因为它们的核球成分较大，所以其模型预言的旋转曲线在星系中心处上升较快，因此其 V_{\max} 出现在较小的半径处，而且其 V_{\max} 值也较大。

但是，由此模型预言的 V_{\max} 值只与星系类型弱相关，Sa (Sb) 的 V_{\max} 值只比对应的 Sc 的高 1.5% (1.0%)。这是因为，由图 4.1 可以看出，虽然 Sa 星系 (绿线) 的核球的贡献比其它类型的大，但是 Sc (蓝线) 星系的盘的贡献又是最明显的，这就部分地弥补了不同类型星系的 V_{\max} 差别，另外，不同类型星系的晕的作用差别很小。

4.2 旋涡星系的星族

核球和盘除了动力学不同之外，其星族也是不同的。核球中很少有最近形成的恒星，其恒星一般较老；但是盘的恒星形成时标较长，即使现在仍有恒星不断在盘上形成。

在本节工作中，假设核球中的恒星是年龄为 10 Gyr 的单星族恒星，而盘的恒星形成历史 (star formation history, SFH) 是指数形式的，并且表示为：

$$SFR(t) \propto \exp(-t/\tau) , \quad (4.11)$$

其中 $SFR(t)$ 表示 t 时刻星系的恒星形成率 (star formation rate, SFR)， τ 是 SFH 的时间标长。此简单的分析表达式可以代表不同类型的 SFH。比如，当 τ 的取值接近 0 时，这个式子就表示单星族的 SFH；当 τ 取无穷时，在星系的整个历史中其恒星形成率就是常数。我们将星系盘的年龄同样设为 10 Gyr。

1994 年 Kennicutt 等人 (以下简称为 K94) [120] 将旋涡星系的 SFH 用单个参数 b 描述：

$$b \equiv \frac{SFR}{\langle SFR \rangle} , \quad (4.12)$$

其中， SFR 表示今天的恒星形成率，而 $\langle SFR \rangle$ 是过去的平均恒星形成率。他们根据旋涡星系的 UBV 颜色和 $H\alpha$ 流量得到 b 的值，并且发现对于 Sa/Sb/Sc 星系， b 的典型值分别为 0.12/0.33/0.84，其弥散大约为 0.05/0.15/0.20¹。在公式 (4.11) 中与这些 b 值对应的 τ 的中间值分别为 3/5/30 Gyr，并且 τ 的 1σ 范围为

¹ b 由 K94 中的表格 4 得到，在此表格中列出了各种次类型星系(包括 Sa/Sab/Sb/Sbc/Sc/Scd)的 b 值。取其 Sa 和 Sab 的 b 值的平均作为我们的 Sa 的 b (≈ 0.12)；Sb 的 b 值即为我们的 Sb 的 b (≈ 0.33)；Sbc/Sc/Scd 的 b 取平均作为 Sc 的 b (≈ 0.84)。另外 b 值的弥散大小由 K94 中的图 6 (b 的分布直方图)估计得到。

[2,4]/[4,7]/[10,∞] Gyr。这里 τ 的 1σ 范围是由 b 值弥散得到的, 并且 1σ 代表从 32% 到 68% 的 τ 分布范围。需要注意的是, 对于 Sc 类型, 在计算其 τ 的范围时, 其 b 值的上限定为 1, 即对应的 τ 为 ∞ , 此 SFH 的平均星族是由公式 (4.11) 得到的最年轻的。

基于以上假设的核球和盘的 SFH, 用 Bruzual & Charlot 最新版的星族合成标准 (被称为 CB07) [27], 可以分别得到核球和盘不同波段的质光比。在 CB07 中有不同金属丰度、不同年龄的星族, 其光谱、质量、各波段星等和颜色等为已知, 根据星系形成历史可以用这些星族合成星系, 因此这些合成星系的星等和质量都是已知的, 所以其质光比为已知的。我们用的星族的金属丰度被固定为太阳的值, 恒星的初始质量函数用的是 Chabrier [37] 的, 并且最小和最大恒星质量限分别为 $0.1 M_{\odot}$ 和 $100 M_{\odot}$ 。

最后, 如果给定每个模型星系的恒星质量 $m_s M_h$ 和 B/D 值, 就可以得到其不同波段的绝对星等。因为由总恒星质量和 B/D 值可以得到核球和盘的各自质量, 再根据它们各自的质光比, 可以得到它们各自的光度 (绝对星等), 它们相加即星系总光度 (绝对星等)。

4.3 模型预言结果

在本节中, 将讨论模型预言的 TF 关系的形态相关性, 并与观测相比较。对于每个星系类型, 我们都建立了 11 个模型星系, 这些星系的晕的绕转速度 V_h 在 100 到 200 km s^{-1} 之间取值, 并且取值间隔为 10 km s^{-1} 。由公式 (4.10) 可以得到对应的重子比重 m_s 的取值范围为 0.04 – 0.084 , 根据公式 (1.9) 可以得到晕质量 M_h 的范围为 3.4×10^{11} – $2.7 \times 10^{12} M_{\odot}$, 两者相乘则可以推得模型星系恒星质量的范围在 1.4×10^{10} 到 $2.3 \times 10^{11} M_{\odot}$ 之间。

由 4.1 节可以知道, 确定旋转曲线除了需要恒星质量和 m_s 外, 还需要 B/D 的值, 对应于 Sa、Sb、Sc, 其分别取值为 0.5 、 0.3 、 0.1 。而 4.2 节的分析表明, 得到星系的星族, 除了恒星质量和 B/D 外, 还需要核球和盘的各自的 SFH, 又因为核球已经假设为单星族, 所以模型中就只有一个自由参量: 盘形成时标 τ 。Sa/Sb/Sc 星系的 τ 被定为 K94 中的值, 即 τ 的中间值分别为 $3/5/30 \text{ Gyr}$, 1σ 范围分别为 $[2,4]/[4,7]/[10,\infty] \text{ Gyr}$, 此模型简称为 K94 模型。

4.3.1 I 波段 TF 关系

最近有很多 I 波段的 TF 数据观测 [83, 47, 207]。此波段的观测比更红的 H 波段有更好的 CCD 测光, 同时比更蓝的 B 波段的 TF 关系弥散更小。在本文第二章和第三章用到的 SFI++ 数据库就是 I 波段的。Master 等人早在 2006 年就从 SFI++ 中提取了所谓的样本星系, 并对不同星系类型的 TF 关系进行了研究 [128], 以下将用 M06 表示此研究工作。在本节, 我们构建模型星系, 预测 I 波段 TF 关系, 并将其与 M06 的结果比较。

图 4.2: 模型预言的不同形态旋涡星系的 I 波段 TF 关系。三角、方格和星号分别代表 Sc、Sb 和 Sa 的模型星系, 这些星系的 TF 关系用实线表示。M06 的观测 TF 关系用虚线表示。由 τ 的 1σ 变化引起的 TF 关系的变化范围, 用点线表示。

K94 模型预言的 I 波段 TF 关系被显示在图 4.2 中, 其中 Sc、Sb 和 Sa 星系被分别标在左上、右上和左下方的图中, 三角、方格和星号分别代表 Sc、Sb 和

Sa 的模型星系, 这些星系的 TF 关系用实线表示。作为对比, M06 的观测 TF 关系用虚线表示。盘的恒星形成时标 τ 在 1σ 内的变化, 会使得模拟 TF 关系有个变化范围, 在图中用点线表示。在此范围中, 较大的 τ 产生的 TF 关系的零点也较大, 即给定 V_{\max} 时 τ 越大星系越亮。

Sc (包括 Sbc/Sc/Scd) 旋涡星系是 TF 关系的主要研究对象, 因为晚型旋涡星系的 HI 和 H_α 谱线较强, 其速度展宽较容易测量。因此很多研究都是参考 Sc 的 TF 关系, 将其它形态的 TF 结果做相应的形态改正 [83, 47, 214]。在本模型中, Sc 星系的参数有的取值为数值模拟得到的典型值 (如 λ 和 c 的取值), 有的直接取观测推得的、没有做任何调整的值 (如 $\tau \sim 30$ Gyr)。由图 4.2 可以看到, 我们模型预言的 Sc 星系的 I 波段 TF 关系和 M06 的观测结果非常地一致。

但是, 对于 Sb 和 Sa 星系, 我们模型预言的 TF 关系和 M06 的观测不太一致。预言的 Sb ($\tau = 5$ Gyr) 的 TF 关系的零点比观测值系统地偏大, 即模型预言的光度偏大。当 τ 达到上限 (7 Gyr) 时, 此差别变小, 但是仍与观测不符。详细讨论见 4.4 节。

对于 Sa 星系, 观测到的 TF 关系的斜率明显比模型预言的小, 对此有两方面解释。首先, 正如文献 [82] 和 M06 讨论的那样, Sa 的 TF 关系斜率的差异是可以预见的, 因为 Sa 星系的样本不完备性非常大, 特别是在低光度区, 这使得关系斜率值变小。另一方面, 在我们模型中 Sa 的 B/D 是常量 0.5, 但是此假设可能过于简单。在 M06 中 Sa 星系包含三个子类型 S0/Sa/Sab。在这三个子类型中, 较早类型星系 (S0) 的 B/D 系统地偏大, 同时星系也系统地偏亮, 所以随着 V_{\max} 从低到高, B/D 系统地变化, 这也可以使得观测 TF 斜率变小。理论上讲, 通过引入 B/D 随 V_{\max} 的变化, 可以得到观测的 Sa 的 TF 关系斜率, 但是我们并没有这样做, 因为我们不想引入更多的不确定因素。

相较于 TF 关系的斜率, 其零点拟和得非常好。另外, 很多关于 TF 形态相关性的研究表示其零点有统一移动, 即 TF 关系有平移 [82, 167, 168]。因此在下节我们只用零点的移动 ΔM 表示 TF 关系的形态相关性。

4.3.2 不同波段的 TF 形态相关性

ΔM 表示不同形态的 TF 关系的差异, 它是 TF 关系在 $V_{\max} = 200 \text{ km s}^{-1}$ (即 $\log V_{\max} = 2.3$) 处的零点移动。之所以选择 $V_{\max} = 200 \text{ km s}^{-1}$, 是因为此值对应的绝对星等大约是旋涡星系光度函数的 M_* , 并且在星等限样本中此处的星

系最多。因此 TF 关系可描述为：

$$M = a \log \left(\frac{V_{\max}}{200 \text{ km s}^{-1}} \right) + b, \quad (4.13)$$

并且 $\Delta M = \Delta b$ 。

图 4.3: TF 关系在不同波段的形态相关性, 详见文中。

在图 4.3 中显示的是在不同波段的 TF 形态相关, 即 Sb 和 Sc 之间的 ΔM , 及 Sa 和 Sc 间的 ΔM 。模型预言, ΔM 和有效波长有一定的相关。在 0.33–2.2 微米的波长范围内, 波段包括 U 、 B 、 V 、 R 、 I 、 J 、 H 、 K 。我们综合了一些文献中不同波段的 ΔM , 列在表格 1.3 中, 并根据它们的波长点在了图中。不同作者的结果用不同形状的点表示, 具体已在图中说明。需要注意的是, 一些研究并没有被显示在图 4.3 中, 包括文献 [164] 和 [82] 的研究, 及 [170] 中 Sb 星系的研究。文献 [164] 发现 Sa 和 Sc 间的星等差 ΔM 在 B 波段达到 2 mag、在 H

波段为 1 mag, 与其它人的研究结果相差较大, 并且文中没有计算 TF 参数的误差, 其每个类型的星系数目 < 20 , 因此没有列出此结果。文献 [82] 中的数据已经被 M06 完全引用并重新分析, 两篇文章的结果大体一致, 因此也不再标出。[170] 中 Sb 星系的 TF 关系没被使用, 因为, 与其余大部分研究相反的是, 其零点甚至比 Sc 星系的还低, 即 $\Delta M(\text{Sb-Sc}) < 0$ 。

图 4.3 中的实线表示 K94 模型预测的结果。当 τ 在其 1σ 范围内变化时, 模型预测的 ΔM 的变化范围用阴影表示。可以看到, 无论是 Sb/Sc 的零点差还是 Sa/Sc 的, K94 模型预测的都比实际观测的明显偏大。例如, 在近红外波段观测到的零点差的平均值是 $\Delta M(\text{Sb-Sc}) \sim 0.15$ mag 和 $\Delta M(\text{Sa-Sc}) \sim 0.20$ mag, 然而模型预言的却高达 $\Delta M(\text{Sb-Sc}) \sim 0.45$ mag 和 $\Delta M(\text{Sa-Sc}) \sim 0.60$ mag。这说明, 如果 K94 模型预言不同类型旋涡星系的盘星族的差异 (即 Sa, Sb, Sc 星系的 τ 分别为 3, 5, 30 Gyr) 是正确的, 则 TF 关系的零点的差异会比观测到的大得多。

如果盘的恒星形成时标 τ 接近它的取值上限, 则模型预言的 ΔM 就会接近阴影的下边界, 即其与观测值的差别会变小。因此可以考虑一个极限情况: Sa 和 Sb 星系盘的 τ 也都为 30 Gyr, 即对于不同类型旋涡星系, 其盘的星族都是一样的, 其总体颜色之所以不同只是因为其核球与盘之间的比例不同。为了与 K94 模型区别, 我们将这种极端情况记为“合成” (composition) 模型。

合成模型预言的结果用点线表示在图 4.3 中。令人吃惊的是, 由此模型预言的 ΔM , 无论是 Sb/Sc 还是 Sa/Sc 的, 都大体上和观测一致, 特别是在近红外波段。在 B 波段, 预言的 ΔM 比观测的要小些, 这可能是因为在我们的模型中没有考虑尘埃消光的影响。如果较早型旋涡星系的面向尘埃消光更重要, 则在蓝波段 ΔM 会比我们预言的更大 (详细讨论见下节)。

最后需要注意的是, ΔM 不仅和星族有关, 还和星系的动力学有关。前面已经证明: 对于恒星质量同样为 $3 \times 10^{10} M_{\odot}$ 的星系, Sa (Sb) 星系的 V_{\max} 比 Sc 的大 ~ 1.5 (1.0)%, 对应的 $\Delta M \sim 0.04$ (0.03) mag (与波段无关)。这种贡献被表示为图 4.3 中的水平虚线。然而, 可以看到, 星族仍然是 TF 形态相关的主要贡献者。

4.4 讨论

在模拟旋涡星系的动力学和星族时存在一些不确定因素，如模型参数值的弥散、核球类型、及星系本身的尘埃消光等。下面分别讨论这些因素。

4.4.1 模型参数值的弥散

在我们的模型中，除了关键参数 τ 外，一般模型参数只取其典型值而不考虑其弥散。但是数值模拟和观测都表明，所有模型参数都有弥散 [135, 109, 177]。如果模型参数的弥散是独立变量，并且和星系的形态无关（正如我们模型用的那样），则这些弥散只会使预言的 TF 关系的弥散增加，而不会影响我们的任何结果 [135, 177]。

但是星系类型可能和旋转参量有关。较小的 λ 可以使得较大的核球更容易由盘的不稳定形成 [178]，因此产生较早型的旋涡星系。也就是说，当考虑 λ 的弥散时，较早型旋涡星系的 λ 偏小，其 V_{\max} 会更大 [135]，因此留给星族解释的 ΔM 会减小。

4.4.2 经典核球和伪核球

在本工作中，简单地将所有的核球都定为经典的核球，即其投影都为标准椭圆。

但是核球也较复杂，人们将核球主要分为两种类型：经典核球和可能由其它物理过程形成的伪核球 (pseudo-bulge) [70, 71, 76]。经典核球类似于标准的椭圆星系，面亮度符合经典的 $R^{1/4}$ 分布，颜色偏红。伪核球的星族较年轻，其密度分布可以用 n 明显小于 4 的 Sersic 分布表示。经典核球一般存在于较早型旋涡星系中，其质量较大。核球的恒星质量大部分是在经典核球中 ($\sim 90\%$, [76])。

如果模型中晚型旋涡星系 (如 Sc) 的核球是伪核球，则其与早型旋涡星系的星族差异会更大，因为伪核球比经典核球更蓝。因此会增加预言的 ΔM ，或者 ΔM 不变需要减小星系盘的差异。

4.4.3 尘埃消光

在我们的模型中，没有考虑星系内部尘埃消光的影响，不同类型的星系的消光可能不同。

值得庆幸的是,大部分 TF 关系的观测研究至少改正了部分的尘埃消光,如文献 [82, 128, 129]。他们改正消光的方法与本文 2.2 节中的消光改正方法一样,都用的文献 [84]中的参量:

$$A = \gamma \log(a/b)$$

将所有的盘都改成面向 (face-on) 的,并且假设面向观测时尘埃消光为 0 (即 $a/b \sim 1$ 时 $A \sim 0$)。

但是,即使是面向旋涡星系,其消光可能也不能忽略 [175, 60], 因为其盘的中心区域极像是光学厚的 [84]。面向盘的消光与星系类型之间有复杂的关系。一方面,较晚型旋涡星系的盘中气体丰富,因此可能包含更多的尘埃 [185]; 另一方面,较早型旋涡星系有较大的核球成分,核球受尘埃消光的影响更大,因为在星系中心区域尘埃的分布达到峰值 [193, 60]。因此,综合考虑这两个效应,总体的尘埃消光可能只和星系类型弱相关。最近文献 [139]用多波段数据研究认为,尘埃消光量随星系类型有个弱的总体趋势: $S_b > S_a > S_c$ 。

对于早型旋涡星系,如果因为其较大的聚度,其面向尘埃消光比晚型旋涡星系的更明显,因此会产生 ΔM 。因为在正常旋涡星系的典型消光曲线中, B 波段的消光比 K 波段的大 5 倍多 [175], 所以观测上因消光差引起的 ΔM 在 B 波段更大,因此就可以解释合成模型在 B 波段预言的 ΔM 偏小的问题。另外,如果在我们的模型中考虑尘埃消光,而且早型旋涡星系选择较大的尘埃消光,则合成模型预言的 ΔM 就会变大,而且其结果会近似于 K94 模型预言的。

4.5 总结

在本章中,通过模拟旋涡星系的动力学和星族,我们研究了与形态相关的 TF 关系。在模拟旋涡星系动力学时,用了 MMW 的盘形成模型,并且在其基础上增加了核球成分。在星族方面,我们分别定义了核球和盘的 SFH, 并且得到核球和盘各自的质光比。不用任何自由参数我们的模型就可以很好的模拟出观测到的 S_c 星系的 I 波段 TF 关系。

进一步地,对于 TF 关系的形态相关性,动力学和星族的作用是不同的。动力学产生的 V_{\max} 平移 (或光度平移 ΔM) 是和波长无关的。而由星族引起的形态相关 (ΔM) 是和波长有关的。因此,对于不同波段的 TF 关系的形态相关的研究,是约束旋涡星系动力学和星族的有效方法。

我们的研究表明：虽然动力学的作用不能忽略，但是 TF 关系的形态相关性主要是由于星族的作用，即不同形态的星系有不同的星族，而这种星族差异是由于不同形态星系的核球与盘的平均比重不同。

第五章 总结和展望

一方面, 本文用 I 波段的 SFI++ 数据库系统地研究了旋涡星系的 Tully-Fisher (TF) 关系, 并着重探讨了第三参量 (半径 R) 是否存在的问题。与以前的研究相比, 我们不仅用了较大样本而且更关心 R 的引入形式。通过研究两参量 TF 关系的残差 ΔM 和 $\log R - \log W$ 关系的残差 $\Delta \log R$ 之间的相关性, 我们发现等光度半径 $R_{23.5}$ 作为第三参量的引入, 使 TF 关系的弥散明显减小, 对于 Sb 和 Sc 星系分别减小了 $\sim 40\%$ 和 $\sim 50\%$ 。然而星系盘标长 R_d 的第三参量作用并不显著, 它的引入仅能使弥散减小 $\sim 20\%$ 。

另外, 通过研究不同 $\log W$ 范围内的残差关系, 我们证明了以 $R_{23.5}$ 为第三参量的 TF 关系并不是纯粹的平面, 尤其是对于 Sc 星系样本。然而用复杂的曲面描述三参量 TF 关系并不能使其弥散显著降低, 我们证得旋涡星系的基本面是内禀弯曲的, 因此随着样本中 $\log W$ 的取值范围的变化, 拟合得到的旋涡星系的基本平面会系统地变化, 这可能是以前的工作得到的旋涡星系基本面各自不同的原因。

另一方面, 通过分别构建旋涡星系的动力学和星族的模型, 我们研究了 TF 关系的形态相关性的起源问题。对于 TF 关系的形态相关性, 动力学和星族的作用是不同的。动力学产生的 V_{\max} 平移 (或光度平移 ΔM) 是和波长无关的。而由星族引起的形态相关 (ΔM) 是和波长有关的。因此, 对于不同波段的 TF 关系的形态相关性的研究, 是约束旋涡星系动力学和星族的有效方法。

在研究旋涡星系动力学时, 我们用了 MMW 的盘形成模型, 并且在其基础上增加了核球成分。在星族方面, 我们分别定义了核球和盘的 SFH, 并且得到核球和盘各自的质光比。我们的研究表明: TF 关系的形态相关性主要是由于星族的作用, 即不同形态的星系有不同的星族, 而这种星族差异是由于不同形态星系的核球与盘的平均比重不同引起的。

本文的不足之处是, 所用的样本 SFI++ 虽然比较大, 但仍然不够均匀, 仍然缺少暗星系。因此本文的结论 (如 $e - \log W$ 关系) 可能与样本的选择有一定的关系。另外, 在研究 TF 关系的形态依赖性时, 还缺少一个盘成分和核球成分分离的大样本来约束模型。如果有一个均匀的、盘和核球分离的大的 TF 样本, 那么 TF 关系的第三参量和形态依赖性就都可以得到更高精度的统计研究, 也

可以进一步提高 TF 关系作为距离定标方法的测量精度，从而也对星系形成模型提供更好的约束。

另外需要注意的是，本文在讨论 TF 关系第三参量的时候，考虑到 TF 关系的形态依赖性将样本按形态进行了分类，但是却没有将形态作为 TF 关系的第三参量进行讨论。显然，一种合理的猜测是旋涡星系的形态也可能是 TF 关系的第三参量，从而将 TF 关系的这种形态依赖性有效地统一在关于第三参量的研究中。类似的研究应该在下一步工作中开展。

参考文献

- [1] 王彩虹, 王有芬, 沈世银, 邵正义. 星系的基本面.
- [2] 赵君亮. Tully-Fisher关系之研究进展.
- [3] A. . *ESO/LaubertsUppsala survey of the ESO(B) atlas*. 1982.
- [4] M. Aaronson, J. Huchra, and J. Mould. The infrared luminosity/H I velocity-width relation and its application to the distance scale. *ApJ*, 229:1–13, April 1979.
- [5] M. Aaronson and J. Mould. A distance scale from the infrared magnitude/H I velocity-width relation. IV - The morphological type dependence and scatter in the relation; the distances to nearby groups. *ApJ*, 265:1–17, February 1983.
- [6] H. Aceves and H. Velázquez. From the Tully-Fisher relation to the Fundamental Plane through mergers. *MNRAS*, 360:L50–L54, June 2005.
- [7] V. Avila-Reese, P. Colín, S. Gottlöber, C. Firmani, and C. Maulbetsch. The Dependence on Environment of Cold Dark Matter Halo Properties. *ApJ*, 634:51–69, November 2005.
- [8] V. Avila-Reese and C. Firmani. Formation and Evolution of Galaxy Disks: What is wrong with CDM? In E. Athanassoula, A. Bosma, & R. Mujica, editor, *Disks of Galaxies: Kinematics, Dynamics and Perturbations*, volume 275 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 405–412, December 2002.
- [9] V. Avila-Reese, J. Zavala, C. Firmani, and H. M. Hernández-Toledo. On the Baryonic, Stellar, and Luminous Scaling Relations of Disk Galaxies. *AJ*, 136:1340–1360, September 2008.
- [10] I. K. Baldry, K. Glazebrook, J. Brinkmann, Ž. Ivezić, R. H. Lupton, R. C. Nichol, and A. S. Szalay. Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies. *ApJ*, 600:681–694, January 2004.
- [11] K. Bekki. The Fundamental Plane and Merger Scenario. I. Star Formation History of Galaxy Mergers and Origin of the Fundamental Plane. *ApJ*, 496:713–+, March 1998.

- [12] E. F. Bell and R. S. de Jong. Stellar Mass-to-Light Ratios and the Tully-Fisher Relation. *ApJ*, 550:212–229, March 2001.
- [13] M. Bernardi, R. K. Sheth, J. Annis, S. Burles, D. J. Eisenstein, D. P. Finkbeiner, D. W. Hogg, R. H. Lupton, D. J. Schlegel, M. SubbaRao, N. A. Bahcall, J. P. Blakeslee, J. Brinkmann, F. J. Castander, A. J. Connolly, I. Csabai, M. Doi, M. Fukugita, J. Frieman, T. Heckman, G. S. Hennessy, Ž. Ivezić, G. R. Knapp, D. Q. Lamb, T. McKay, J. A. Munn, R. Nichol, S. Okamura, D. P. Schneider, A. R. Thakar, and D. G. York. Early-Type Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. III. The Fundamental Plane. *AJ*, 125:1866–1881, April 2003.
- [14] G. M. Bernstein, P. Guhathakurta, S. Raychaudhury, R. Giovanelli, M. P. Haynes, T. Herter, and N. P. Vogt. Tests of the Tully-Fisher relation. 1: Scatter in infrared magnitude versus 21 CM width. *AJ*, 107:1962–1976, June 1994.
- [15] G. Bertin, L. Ciotti, and M. Del Principe. Weak homology of elliptical galaxies. *A&A*, 386:149–168, April 2002.
- [16] P. Bett, V. Eke, C. S. Frenk, A. Jenkins, J. Helly, and J. Navarro. The spin and shape of dark matter haloes in the Millennium simulation of a Λ cold dark matter universe. *MNRAS*, 376:215–232, March 2007.
- [17] D. Bettoni, R. Falomo, G. Fasano, and F. Govoni. The properties of low redshift radiogalaxies: the fundamental plane and central black hole mass. *New Astronomy Review*, 47:179–182, September 2003.
- [18] B. Binggeli, A. Sandage, and G. A. Tammann. The luminosity function of galaxies. *ARA&A*, 26:509–560, 1988.
- [19] J. Binney and M. Merrifield. *Galactic astronomy*. 1998.
- [20] J. Binney and S. Tremaine. *Galactic dynamics*. 1987.
- [21] J. P. Blakeslee, J. R. Lucey, J. L. Tonry, M. J. Hudson, V. K. Narayanan, and B. J. Barris. Early-type galaxy distances from the Fundamental Plane and surface brightness fluctuations. *MNRAS*, 330:443–457, February 2002.
- [22] A. Böhm, B. L. Ziegler, R. P. Saglia, R. Bender, K. J. Fricke, A. Gabasch, J. Heidt, D. Mehlert, S. Noll, and S. Seitz. The Tully-Fisher relation at intermediate redshift. *A&A*, 420:97–114, June 2004.

- [23] A. S. Bolton, S. Burles, T. Treu, L. V. E. Koopmans, and L. A. Moustakas. A More Fundamental Plane. *ApJ*, 665:L105–L108, August 2007.
- [24] S. Borgani, L. N. da Costa, W. Freudling, R. Giovanelli, M. P. Haynes, J. Salzer, and G. Wegner. Peculiar Velocities of Clusters in Cold Dark Matter Models. *ApJ*, 482:L121+, June 1997.
- [25] G. D. Bothun and J. R. Mould. Sources of error in the Tully-Fisher relation - Reducing the scatter with CCD I-band surface photometry of spiral galaxies. *ApJ*, 313:629–643, February 1987.
- [26] L. Bottinelli, L. Gouguenheim, G. Paturel, and G. de Vaucouleurs. H I line studies of galaxies. II - The 21-cm-width as an extragalactic distance indicator. *A&A*, 118:4–20, February 1983.
- [27] G. Bruzual and S. Charlot. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. *MNRAS*, 344:1000–1028, October 2003.
- [28] J. S. Bullock, T. S. Kolatt, Y. Sigad, R. S. Somerville, A. V. Kravtsov, A. A. Klypin, J. R. Primack, and A. Dekel. Profiles of dark haloes: evolution, scatter and environment. *MNRAS*, 321:559–575, March 2001.
- [29] G. Busarello, M. Capaccioli, S. Capozziello, G. Longo, and E. Puddu. The relation between the virial theorem and the fundamental plane of elliptical galaxies. *A&A*, 320:415–420, April 1997.
- [30] N. Caon, M. Capaccioli, and M. D’Onofrio. On the Shape of the Light Profiles of Early Type Galaxies. *MNRAS*, 265:1013–+, December 1993.
- [31] H. V. Capelato, R. R. de Carvalho, and R. G. Carlberg. Mergers of Dissipationless Systems: Clues about the Fundamental Plane. *ApJ*, 451:525–+, October 1995.
- [32] H. V. Capelato, R. R. de Carvalho, and R. G. Carlberg. The Fundamental Plane of Ellipticals: The Role of Nonhomology. In L. N. da Costa & A. Renzini, editor, *Galaxy Scaling Relations: Origins, Evolution and Applications*, pages 331–+, 1997.
- [33] M. Cappellari, R. Bacon, M. Bureau, M. C. Damen, R. L. Davies, P. T. de Zeeuw, E. Emsellem, J. Falcón-Barroso, D. Krajnović, H. Kuntschner, R. M. McDermid, R. F. Peletier, M. Sarzi, R. C. E. van den Bosch, and G. van de Ven. The SAURON project - IV. The mass-to-light ratio, the virial mass estimator and the Fundamental Plane of elliptical and lenticular galaxies. *MNRAS*, 366:1126–1150, March 2006.

- [34] B. Catinella, R. Giovanelli, and M. P. Haynes. Template Rotation Curves for Disk Galaxies. *ApJ*, 640:751–761, April 2006.
- [35] B. Catinella, M. P. Haynes, and R. Giovanelli. Rotational Widths for Use in the Tully-Fisher Relation. I. Long-Slit Spectroscopic Data. *AJ*, 130:1037–1048, September 2005.
- [36] B. Catinella, M. P. Haynes, and R. Giovanelli. Rotational Widths for Use in the Tully-Fisher Relation. II. The Impact of Surface Brightness. *AJ*, 134:334–343, July 2007.
- [37] G. Chabrier. Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function. *PASP*, 115:763–795, July 2003.
- [38] C. Chiosi, A. Bressan, L. Portinari, and R. Tantaló. A new scenario of galaxy evolution under a universal Initial Mass Function. *A&A*, 339:355–381, November 1998.
- [39] L. Ciotti, B. Lanzoni, and A. Renzini. The tilt of the fundamental plane of elliptical galaxies - I. Exploring dynamical and structural effects. *MNRAS*, 282:1–12, September 1996.
- [40] C. J. Conselice, K. Bundy, R. S. Ellis, J. Brinchmann, N. P. Vogt, and A. C. Phillips. Evolution of the Near-Infrared Tully-Fisher Relation: Constraints on the Relationship between the Stellar and Total Masses of Disk Galaxies since $z \sim 1$. *ApJ*, 628:160–168, July 2005.
- [41] R. L. M. Corradi and M. Capaccioli. Does the dark component influence the shape of the inner rotation curves of spiral galaxies? *A&A*, 237:36–41, October 1990.
- [42] S. Courteau, A. A. Dutton, F. C. van den Bosch, L. A. MacArthur, A. Dekel, D. H. McIntosh, and D. A. Dale. Scaling Relations of Spiral Galaxies. *ApJ*, 671:203–225, December 2007.
- [43] S. Courteau and H.-W. Rix. Maximal Disks and the Tully-Fisher Relation. *ApJ*, 513:561–571, March 1999.
- [44] G. D’Agostini. Fits, and especially linear fits, with errors on both axes, extra variance of the data points and other complications. *ArXiv Physics e-prints*, November 2005.
- [45] J. J. Dalcanton, D. N. Spergel, and F. J. Summers. The Formation of Disk Galaxies. *ApJ*, 482:659–+, June 1997.

- [46] D. A. Dale, R. Giovanelli, M. P. Haynes, L. E. Campusano, and E. Hardy. Seeking the Local Convergence Depth. V. Tully-Fisher Peculiar Velocities for 52 Abell Clusters. *AJ*, 118:1489–1505, October 1999.
- [47] D. A. Dale, R. Giovanelli, M. P. Haynes, E. Hardy, and L. E. Campusano. Seeking the Local Convergence Depth. IV. Tully-Fisher Observations of 35 Abell Clusters. *AJ*, 118:1468–1488, October 1999.
- [48] D. A. Dale, R. Giovanelli, M. P. Haynes, E. Hardy, and L. E. Campusano. Signatures of Galaxy-Cluster Interactions: Spiral Galaxy Rotation Curve Asymmetry, Shape, and Extent. *AJ*, 121:1886–1892, April 2001.
- [49] C. C. Dantas, H. V. Capelato, A. L. B. Ribeiro, and R. R. de Carvalho. ‘Fundamental Plane’-like relations from collisionless stellar dynamics: a comparison of mergers and collapses. *MNRAS*, 340:398–410, April 2003.
- [50] R. R. de Carvalho and S. Djorgovski. Systematic differences between the field and cluster elliptical galaxies. *ApJ*, 389:L49–L53, April 1992.
- [51] S. De Rijcke, W. W. Zeilinger, G. K. T. Hau, P. Prugniel, and H. Dejonghe. Generalizations of the Tully-Fisher Relation for Early- and Late-Type Galaxies. *ApJ*, 659:1172–1175, April 2007.
- [52] G. de Vaucouleurs. Recherches sur les nébuleuses extragalactiques. *Journal des Observateurs*, 31:113–+, January 1948.
- [53] G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin, Jr., R. J. Buta, G. Paturel, and P. Fouque. *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*. 1991.
- [54] N. A. Devereux and J. S. Young. The rate and efficiency of high-mass star formation along the Hubble sequence. *ApJ*, 371:515–524, April 1991.
- [55] S. Djorgovski. The fundamental plane correlations for globular clusters. *ApJ*, 438:L29–L32, January 1995.
- [56] S. Djorgovski and M. Davis. Fundamental properties of elliptical galaxies. *ApJ*, 313:59–68, February 1987.
- [57] M. Dominik. Parameter degeneracies and (un)predictability of gravitational microlensing events. *MNRAS*, 393:816–821, March 2009.

- [58] M. D’Onofrio, G. Fasano, J. Varela, D. Bettoni, M. Moles, P. Kjærgaard, E. Pignatelli, B. Poggianti, A. Dressler, A. Cava, J. Fritz, W. J. Couch, and A. Omizzolo. The Fundamental Plane of Early-Type Galaxies in Nearby Clusters from the WINGS Database. *ApJ*, 685:875–896, October 2008.
- [59] A. Dressler, D. Lynden-Bell, D. Burstein, R. L. Davies, S. M. Faber, R. Terlevich, and G. Wegner. Spectroscopy and photometry of elliptical galaxies. I - A new distance estimator. *ApJ*, 313:42–58, February 1987.
- [60] S. P. Driver, C. C. Popescu, R. J. Tuffs, J. Liske, A. W. Graham, P. D. Allen, and R. de Propris. The Millennium Galaxy Catalogue: the B-band attenuation of bulge and disc light and the implied cosmic dust and stellar mass densities. *MNRAS*, 379:1022–1036, August 2007.
- [61] A. A. Dutton, F. C. van den Bosch, A. Dekel, and S. Courteau. A Revised Model for the Formation of Disk Galaxies: Low Spin and Dark Halo Expansion. *ApJ*, 654:27–52, January 2007.
- [62] E. A. Evstigneeva, V. P. Reshetnikov, and N. Y. Sotnikova. Effect of the environment on the fundamental plane of elliptical galaxies. *A&A*, 381:6–12, January 2002.
- [63] S. M. Faber, A. Dressler, R. L. Davies, D. Burstein, and D. Lynden-Bell. Global scaling relations for elliptical galaxies and implications for formation. In S. M. Faber, editor, *Nearly Normal Galaxies. From the Planck Time to the Present*, pages 175–183, 1987.
- [64] S. M. Faber and R. E. Jackson. Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies. *ApJ*, 204:668–683, March 1976.
- [65] J. Falcón-Barroso, R. F. Peletier, and M. Balcells. Bulges on the Fundamental Plane of early-type galaxies. *MNRAS*, 335:741–752, September 2002.
- [66] E. D. Feigelson and G. J. Babu. Linear regression in astronomy. II. *ApJ*, 397:55–67, September 1992.
- [67] M. Fernández Lorenzo, J. Cepa, A. Bongiovanni, H. Castañeda, A. M. Pérez García, M. A. Lara-López, M. Pović, and M. Sánchez-Portal. Evolution of the optical Tully-Fisher relation up to $z = 1.3$. *A&A*, 496:389–397, March 2009.
- [68] I. Ferreras, P. Saha, and S. Burles. Unveiling dark haloes in lensing galaxies. *MNRAS*, 383:857–863, January 2008.

- [69] C. Firmani and V. Avila-Reese. Disc galaxy evolution models in a hierarchical formation scenario: structure and dynamics. *MNRAS*, 315:457–472, July 2000.
- [70] D. B. Fisher and N. Drory. The Structure of Classical Bulges and Pseudobulges: the Link Between Pseudobulges and SÉRSIC Index. *AJ*, 136:773–839, August 2008.
- [71] D. B. Fisher, N. Drory, and M. H. Fabricius. Bulges of Nearby Galaxies with Spitzer: The Growth of Pseudobulges in Disk Galaxies and its Connection to Outer Disks. *ApJ*, 697:630–650, May 2009.
- [72] H. Flores, F. Hammer, M. Puech, P. Amram, and C. Balkowski. 3D spectroscopy with VLT/GIRAFFE. I. The true Tully Fisher relationship at $z \lesssim 0.6$. *A&A*, 455:107–118, August 2006.
- [73] C. S. Frenk, S. D. M. White, M. Davis, and G. Efstathiou. The formation of dark halos in a universe dominated by cold dark matter. *ApJ*, 327:507–525, April 1988.
- [74] C. Fritsch and T. Buchert. The fundamental plane of clusters of galaxies: a quest for understanding cluster dynamics and morphology. *A&A*, 344:749–754, April 1999.
- [75] A. Fritz, B. L. Ziegler, R. G. Bower, I. Smail, and R. L. Davies. On the evolutionary status of early-type galaxies in clusters at $z \sim 0.2$ - I. The Fundamental Plane. *MNRAS*, 358:233–255, March 2005.
- [76] D. A. Gadotti. Structural properties of pseudo-bulges, classical bulges and elliptical galaxies: a Sloan Digital Sky Survey perspective. *MNRAS*, 393:1531–1552, March 2009.
- [77] G. Gavazzi, A. Boselli, M. Scodreggio, D. Pierini, and E. Belsole. The 3D structure of the Virgo cluster from H-band Fundamental Plane and Tully-Fisher distance determinations. *MNRAS*, 304:595–610, April 1999.
- [78] K. Gebhardt, S. M. Faber, D. C. Koo, M. Im, L. Simard, G. D. Illingworth, A. C. Phillips, V. L. Sarajedini, N. P. Vogt, B. Weiner, and C. N. A. Willmer. The DEEP Groth Strip Survey. IX. Evolution of the Fundamental Plane of Field Galaxies. *ApJ*, 597:239–262, November 2003.
- [79] M. Geha, M. R. Blanton, M. Masjedi, and A. A. West. The Baryon Content of Extremely Low Mass Dwarf Galaxies. *ApJ*, 653:240–254, December 2006.

- [80] R. Giovanelli and M. P. Haynes. The Inner Scale Length of Spiral Galaxy Rotation Curves. *ApJ*, 571:L107–L111, June 2002.
- [81] R. Giovanelli, M. P. Haynes, W. Freudling, L. N. da Costa, J. J. Salzer, and G. Wegner. Peculiar Velocity Dipoles of Field Galaxies. *ApJ*, 505:L91–L94, October 1998.
- [82] R. Giovanelli, M. P. Haynes, T. Herter, N. P. Vogt, L. N. da Costa, W. Freudling, J. J. Salzer, and G. Wegner. The I Band Tully-Fisher Relation for Cluster Galaxies: a Template Relation, its Scatter and Bias Corrections. *AJ*, 113:53–79, January 1997.
- [83] R. Giovanelli, M. P. Haynes, T. Herter, N. P. Vogt, G. Wegner, J. J. Salzer, L. N. da Costa, and W. Freudling. The I band Tully-Fisher relation for cluster galaxies: data presentation. *AJ*, 113:22–52, January 1997.
- [84] R. Giovanelli, M. P. Haynes, J. J. Salzer, G. Wegner, L. N. da Costa, and W. Freudling. Extinction in SC galaxies. *AJ*, 107:2036–2054, June 1994.
- [85] R. Giovanelli, M. P. Haynes, J. J. Salzer, G. Wegner, L. N. da Costa, and W. Freudling. Dependence on Luminosity of Photometric Properties of Disk Galaxies: Surface Brightness, Size, and Internal Extinction. *AJ*, 110:1059–+, September 1995.
- [86] R. Giovanelli, M. P. Haynes, J. J. Salzer, G. Wegner, L. N. da Costa, and W. Freudling. The Motions of Clusters of Galaxies and the Dipoles of the Peculiar Velocity Field. *AJ*, 116:2632–2643, December 1998.
- [87] O. Y. Gnedin, D. H. Weinberg, J. Pizagno, F. Prada, and H.-W. Rix. Dark Matter Halos of Disk Galaxies: Constraints from the Tully-Fisher Relation. *ApJ*, 671:1115–1134, December 2007.
- [88] A. Graham and M. Colless. Some effects of galaxy structure and dynamics on the Fundamental Plane. *MNRAS*, 287:221–239, May 1997.
- [89] A. W. Graham, I. Trujillo, and N. Caon. Galaxy Light Concentration. I. Index Stability and the Connection with Galaxy Structure, Dynamics, and Supermassive Black Holes. *AJ*, 122:1707–1717, October 2001.
- [90] C. Grillo and R. Gobat. On the initial mass function and tilt of the fundamental plane of massive early-type galaxies. *MNRAS*, 402:L67–L71, February 2010.

- [91] J. E. Gunn and J. R. Gott, III. On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution. *ApJ*, 176:1–+, August 1972.
- [92] S. Gurovich, S. S. McGaugh, K. C. Freeman, H. Jerjen, L. Staveley-Smith, and W. J. G. De Blok. The Baryonic Tully-Fisher Relation. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 21:412–414, 2004.
- [93] T. S. Hamilton, S. Casertano, and D. A. Turnshek. The fundamental plane of quasars. *New Astronomy Review*, 50:758–761, November 2006.
- [94] J. Han, Z. Deng, Z. Zou, X.-B. Wu, and Y. Jing. The Fundamental Plane of Spiral Galaxies: Search from Observational Data. *PASJ*, 53:853–859, October 2001.
- [95] J. Han, Z. Deng, Z. Zou, X.-B. Wu, and Y. Jing. The Fundamental Plane of Spiral Galaxies: Search from Observational Data. *PASJ*, 53:853–859, October 2001.
- [96] M. Han. *The I-band Tully-Fisher relation and large-scale motions in the universe*. PhD thesis, California Inst. of Tech., Pasadena., 1991.
- [97] M. Han. I-band CCD surface photometry of spiral galaxies in 16 nearby clusters. *ApJS*, 81:35–47, July 1992.
- [98] M. Han and J. R. Mould. Peculiar velocities of clusters in the Perseus-Pisces supercluster. *ApJ*, 396:453–459, September 1992.
- [99] M. P. Haynes, R. Giovanelli, P. Chamaraux, L. N. da Costa, W. Freudling, J. J. Salzer, and G. Wegner. The I-Band Tully-Fisher Relation for SC Galaxies: 21 Centimeter H I Line Data. *AJ*, 117:2039–2051, May 1999.
- [100] M. P. Haynes, R. Giovanelli, J. J. Salzer, G. Wegner, W. Freudling, L. N. da Costa, T. Herter, and N. P. Vogt. The I-Band Tully-Fisher Relation for SC Galaxies: Optical Imaging Data. *AJ*, 117:1668–1687, April 1999.
- [101] L. Hernquist. An analytical model for spherical galaxies and bulges. *ApJ*, 356:359–364, June 1990.
- [102] J. Hjorth and J. Madsen. Small deviations from the $R^{1/4}$ law, the fundamental plane, and phase densities of elliptical galaxies. *ApJ*, 445:55–61, May 1995.
- [103] J. B. Hyde and M. Bernardi. The luminosity and stellar mass Fundamental Plane of early-type galaxies. *MNRAS*, 396:1171–1185, June 2009.

- [104] M. Im, L. Simard, S. M. Faber, D. C. Koo, K. Gebhardt, C. N. A. Willmer, A. Phillips, G. Illingworth, N. P. Vogt, and V. L. Sarajedini. The DEEP Groth Strip Survey. X. Number Density and Luminosity Function of Field E/S0 Galaxies at $z \lt 1$. *ApJ*, 571:136–171, May 2002.
- [105] T. Isobe, E. D. Feigelson, M. G. Akritas, and G. J. Babu. Linear regression in astronomy. *ApJ*, 364:104–113, November 1990.
- [106] G. H. Jacoby, D. Branch, R. Ciardullo, R. L. Davies, W. E. Harris, M. J. Pierce, C. J. Pritchett, J. L. Tonry, and D. L. Welch. A critical review of selected techniques for measuring extragalactic distances. *PASP*, 104:599–662, August 1992.
- [107] H. Jeong, S. K. Yi, M. Bureau, R. L. Davies, J. Falc3n-Barroso, G. van de Ven, R. F. Peletier, R. Bacon, M. Cappellari, T. de Zeeuw, E. Emsellem, D. Krajnovi3c, H. Kuntschner, R. M. McDermid, M. Sarzi, and R. C. E. van den Bosch. The SAURON project - XIII. SAURON-GALEX study of early-type galaxies: the ultraviolet colour-magnitude relations and Fundamental Planes. *MNRAS*, 398:2028–2048, October 2009.
- [108] G. Jiang and C. S. Kochanek. The Baryon Fractions and Mass-to-Light Ratios of Early-Type Galaxies. *ApJ*, 671:1568–1578, December 2007.
- [109] Y. P. Jing. The Density Profile of Equilibrium and Nonequilibrium Dark Matter Halos. *ApJ*, 535:30–36, May 2000.
- [110] I. J3rgensen, K. Chiboucas, K. Flint, M. Bergmann, J. Barr, and R. Davies. The Fundamental Plane for $z = 0.8-0.9$ Cluster Galaxies. *ApJ*, 639:L9–L12, March 2006.
- [111] I. J3rgensen, M. Franx, J. Hjorth, and P. G. van Dokkum. The evolution of cluster E and S0 galaxies measured from the Fundamental Plane. *MNRAS*, 308:833–853, September 1999.
- [112] I. J3rgensen, M. Franx, and P. Kjaergaard. The Fundamental Plane for cluster E and S0 galaxies. *MNRAS*, 280:167–185, May 1996.
- [113] H. D. Jun and M. Im. The Mid-Infrared Fundamental Plane of Early-Type Galaxies. *ApJ*, 678:L97–L100, May 2008.
- [114] S. J. Kannappan. Linking Gas Fractions to Bimodalities in Galaxy Properties. *ApJ*, 611:L89–L92, August 2004.

- [115] G. Kauffmann, T. M. Heckman, C. Tremonti, J. Brinchmann, S. Charlot, S. D. M. White, S. E. Ridgway, J. Brinkmann, M. Fukugita, P. B. Hall, Ž. Ivezić, G. T. Richards, and D. P. Schneider. The host galaxies of active galactic nuclei. *MNRAS*, 346:1055–1077, December 2003.
- [116] G. Kauffmann, S. D. M. White, and B. Guiderdoni. The Formation and Evolution of Galaxies Within Merging Dark Matter Haloes. *MNRAS*, 264:201–+, September 1993.
- [117] G. Kauffmann, S. D. M. White, T. M. Heckman, B. Ménard, J. Brinchmann, S. Charlot, C. Tremonti, and J. Brinkmann. The environmental dependence of the relations between stellar mass, structure, star formation and nuclear activity in galaxies. *MNRAS*, 353:713–731, September 2004.
- [118] D. D. Kelson, G. D. Illingworth, J. L. Tonry, W. L. Freedman, R. C. Kennicutt, Jr., J. R. Mould, J. A. Graham, J. P. Huchra, L. M. Macri, B. F. Madore, L. Ferrarese, B. K. Gibson, S. Sakai, P. B. Stetson, E. A. Ajhar, J. P. Blakeslee, A. Dressler, H. C. Ford, S. M. G. Hughes, K. M. Sebo, and N. A. Silbermann. The Hubble Space Telescope Key Project on the Extragalactic Distance Scale. XXVII. A Derivation of the Hubble Constant Using the Fundamental Plane and D_n - σ Relations in Leo I, Virgo, and Fornax. *ApJ*, 529:768–785, February 2000.
- [119] D. D. Kelson, P. G. van Dokkum, M. Franx, G. D. Illingworth, and D. Fabricant. Evolution of Early-Type Galaxies in Distant Clusters: The Fundamental Plane from Hubble Space Telescope Imaging and Keck Spectroscopy. *ApJ*, 478:L13+, March 1997.
- [120] R. C. Kennicutt, Jr., P. Tamblyn, and C. E. Congdon. Past and future star formation in disk galaxies. *ApJ*, 435:22–36, November 1994.
- [121] H. A. Kobulnicky, C. N. A. Willmer, A. C. Phillips, D. C. Koo, S. M. Faber, B. J. Weiner, V. L. Sarajedini, L. Simard, and N. P. Vogt. The DEEP Groth Strip Survey. VII. The Metallicity of Field Galaxies at $0.26 < z < 0.82$ and the Evolution of the Luminosity-Metallicity Relation. *ApJ*, 599:1006–1030, December 2003.
- [122] J. Koda, Y. Sofue, and K. Wada. A Unified Scaling Law in Spiral Galaxies. *ApJ*, 531:L17–L20, March 2000.
- [123] K. Kodaira. On the interrelation between the surface photometric parameters and the internal velocities of galaxies. *ApJ*, 342:122–127, July 1989.

- [124] E. Körding, H. Falcke, and S. Corbel. Refining the fundamental plane of accreting black holes. *A&A*, 456:439–450, September 2006.
- [125] F. La Barbera, G. Busarello, P. Merluzzi, I. G. de la Rosa, G. Coppola, and C. P. Haines. The SDSS-UKIDSS Fundamental Plane of Early-Type Galaxies. *ApJ*, 689:913–918, December 2008.
- [126] F. La Barbera, R. R. de Carvalho, I. G. de la Rosa, and P. A. A. Lopes. SPIDER II - The Fundamental Plane of Early-type Galaxies in grizYJHK. *ArXiv e-prints*, December 2009.
- [127] D. Leier. A lensing view on the Fundamental Plane. *MNRAS*, 400:875–886, December 2009.
- [128] K. L. Masters, C. M. Springob, M. P. Haynes, and R. Giovanelli. SFI++ I: A New I-Band Tully-Fisher Template, the Cluster Peculiar Velocity Dispersion, and H_0 . *ApJ*, 653:861–880, December 2006.
- [129] K. L. Masters, C. M. Springob, and J. P. Huchra. 2MTF. I. The Tully-Fisher Relation in the Two Micron all Sky Survey J, H, and K Bands. *AJ*, 135:1738–1748, May 2008.
- [130] D. S. Mathewson and V. L. Ford. Parameters of 2447 Southern Spiral Galaxies for Use in the Tully-Fisher Relation. *ApJS*, 107:97–+, November 1996.
- [131] D. S. Mathewson, V. L. Ford, and M. Buchhorn. A southern sky survey of the peculiar velocities of 1355 spiral galaxies. *ApJS*, 81:413–659, August 1992.
- [132] S. S. McGaugh and W. J. G. de Blok. Gas Mass Fractions and the Evolution of Spiral Galaxies. *ApJ*, 481:689–+, May 1997.
- [133] S. S. McGaugh, J. M. Schombert, G. D. Bothun, and W. J. G. de Blok. The Baryonic Tully-Fisher Relation. *ApJ*, 533:L99–L102, April 2000.
- [134] M. J. Meyer, M. A. Zwaan, R. L. Webster, S. Schneider, and L. Staveley-Smith. Tully-Fisher relations from an HI-selected sample. *MNRAS*, 391:1712–1728, December 2008.
- [135] H. J. Mo and S. Mao. The Tully-Fisher relation and its implications for the halo density profile and self-interacting dark matter. *MNRAS*, 318:163–172, October 2000.

- [136] H. J. Mo, S. Mao, and S. D. M. White. The formation of galactic discs. *MNRAS*, 295:319–336, April 1998.
- [137] B. Mobasher, R. Guzman, A. Aragon-Salamanca, and S. Zepf. The near-infrared Fundamental Plane of elliptical galaxies. *MNRAS*, 304:225–234, April 1999.
- [138] S. M. Moran, N. Miller, T. Treu, R. S. Ellis, and G. P. Smith. Dynamical Evidence for Environmental Evolution of Intermediate-Redshift Spiral Galaxies. *ApJ*, 659:1138–1152, April 2007.
- [139] J. C. Muñoz-Mateos, A. Gil de Paz, S. Boissier, J. Zamorano, D. A. Dale, P. G. Pérez-González, J. Gallego, B. F. Madore, G. Bendo, M. D. Thornley, B. T. Draine, A. Boselli, V. Buat, D. Calzetti, J. Moustakas, and R. C. Kennicutt. Radial Distribution of Stars, Gas, and Dust in Sings Galaxies. II. Derived Dust Properties. *ApJ*, 701:1965–1991, August 2009.
- [140] J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White. The Structure of Cold Dark Matter Halos. *ApJ*, 462:563–+, May 1996.
- [141] P. Nilson. *Uppsala general catalogue of galaxies*. 1973.
- [142] C. Nipoti, P. Londrillo, and L. Ciotti. Galaxy merging, the fundamental plane of elliptical galaxies and the $M_{BH}-\sigma_0$ relation. *MNRAS*, 342:501–512, June 2003.
- [143] E. Noordermeer, J. M. van der Hulst, R. Sancisi, R. S. Swaters, and T. S. van Albada. The mass distribution in early-type disc galaxies: declining rotation curves and correlations with optical properties. *MNRAS*, 376:1513–1546, April 2007.
- [144] N. Padmanabhan, U. Seljak, M. A. Strauss, M. R. Blanton, G. Kauffmann, D. J. Schlegel, C. Tremonti, N. A. Bahcall, M. Bernardi, J. Brinkmann, M. Fukugita, and Ž. Ivezić. Stellar and dynamical masses of ellipticals in the Sloan Digital Sky Survey. *New Astronomy*, 9:329–342, June 2004.
- [145] M. A. Pahre, S. G. Djorgovski, and R. R. de Carvalho. The Near-Infrared Fundamental Plane of Elliptical Galaxies. *ApJ*, 453:L17+, November 1995.
- [146] M. A. Pahre, S. G. Djorgovski, and R. R. de Carvalho. Near-Infrared Imaging of Early-Type Galaxies. III. The Near-Infrared Fundamental Plane. *AJ*, 116:1591–1605, October 1998.

- [147] R. F. Peletier and S. P. Willner. The Infrared Tully-Fisher Relation in the Ursa Major Cluster. *ApJ*, 418:626–+, December 1993.
- [148] M. Persic and P. Salucci. Dark and visible matter in spiral galaxies. *MNRAS*, 234:131–154, September 1988.
- [149] M. Persic and P. Salucci. The universal galaxy rotation curve. *ApJ*, 368:60–65, February 1991.
- [150] M. Persic, P. Salucci, and F. Stel. The universal rotation curve of spiral galaxies - I. The dark matter connection. *MNRAS*, 281:27–47, July 1996.
- [151] M. J. Pierce and R. B. Tully. Distances to the Virgo and Ursa Major clusters and a determination of H_0 . *ApJ*, 330:579–581, July 1988.
- [152] M. J. Pierce and R. B. Tully. Luminosity-line width relations and the extragalactic distance scale. I - Absolute calibration. *ApJ*, 387:47–55, March 1992.
- [153] J. Pizagno, F. Prada, D. H. Weinberg, H.-W. Rix, D. Harbeck, E. K. Grebel, E. F. Bell, J. Brinkmann, J. Holtzman, and A. West. Dark Matter and Stellar Mass in the Luminous Regions of Disk Galaxies. *ApJ*, 633:844–856, November 2005.
- [154] J. Pizagno, F. Prada, D. H. Weinberg, H.-W. Rix, R. W. Pogge, E. K. Grebel, D. Harbeck, M. Blanton, J. Brinkmann, and J. E. Gunn. The Tully-Fisher Relation and its Residuals for a Broadly Selected Sample of Galaxies. *AJ*, 134:945–972, September 2007.
- [155] J. Pizagno, F. Prada, D. H. Weinberg, H.-W. Rix, R. W. Pogge, E. K. Grebel, D. Harbeck, M. Blanton, J. Brinkmann, and J. E. Gunn. The Tully-Fisher Relation and its Residuals for a Broadly Selected Sample of Galaxies. *AJ*, 134:945–972, September 2007.
- [156] S. Podariu, P. Nugent, and B. Ratra. Cosmological Model Parameter Determination from Satellite-acquired Supernova Apparent Magnitude versus Redshift Data. *ApJ*, 553:39–46, May 2001.
- [157] L. Portinari and J. Sommer-Larsen. The Tully-Fisher relation and its evolution with redshift in cosmological simulations of disc galaxy formation. *MNRAS*, 375:913–924, March 2007.

- [158] W. H. Press, Teukolsky S. A., Vetterling W. T., and Flannery B. P. *Numerical Recipes in C/Fortran, the Art of Scientific Computing*. University of Cambridge publisher, 1992.
- [159] F. M. Reda, D. A. Forbes, and G. K. T. Hau. The fundamental plane of isolated early-type galaxies. *MNRAS*, 360:693–702, June 2005.
- [160] A. Renzini and L. Ciotti. Transverse Dissections of the Fundamental Planes of Elliptical Galaxies and Clusters of Galaxies. *ApJ*, 416:L49+, October 1993.
- [161] H.-W. Rix, P. Guhathakurta, M. Colless, and K. Ing. Internal Kinematics of Distant Field Galaxies - I. Emission Linewidths for a Complete Sample of Faint Blue Galaxies at $z \leq 0.25$. *MNRAS*, 285:779–792, March 1997.
- [162] M. S. Roberts. Twenty-one centimeter line widths of galaxies. *AJ*, 83:1026–1035, September 1978.
- [163] B. Robertson, T. J. Cox, L. Hernquist, M. Franx, P. F. Hopkins, P. Martini, and V. Springel. The Fundamental Scaling Relations of Elliptical Galaxies. *ApJ*, 641:21–40, April 2006.
- [164] V. C. Rubin, D. Burstein, W. K. Ford, Jr., and N. Thonnard. Rotation velocities of 16 SA galaxies and a comparison of Sa, Sb, and SC rotation properties. *ApJ*, 289:81–98, February 1985.
- [165] V. C. Rubin, D. Burstein, and N. Thonnard. A new relation for estimating the intrinsic luminosities of spiral galaxies. *ApJ*, 242:L149–L152, December 1980.
- [166] D. Rusin, C. S. Kochanek, and C. R. Keeton. Self-similar Models for the Mass Profiles of Early-Type Lens Galaxies. *ApJ*, 595:29–42, September 2003.
- [167] D. G. Russell. Morphological Type Dependence in the Tully-Fisher Relationship. *ApJ*, 607:241–246, May 2004.
- [168] D. G. Russell. The Ks-band Tully-Fisher Relation – A determination of the Hubble parameter from 218 ScI galaxies and 16 galaxy clusters. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 30:93–118, August 2009.
- [169] S. Sakai, J. R. Mould, S. M. G. Hughes, J. P. Huchra, L. M. Macri, R. C. Kennicutt, Jr., B. K. Gibson, L. Ferrarese, W. L. Freedman, M. Han, H. C. Ford, J. A. Graham, G. D. Illingworth, D. D. Kelson, B. F. Madore, K. Sebo, N. A. Silbermann, and P.

- B. Stetson. The Hubble Space Telescope Key Project on the Extragalactic Distance Scale. XXIV. The Calibration of Tully-Fisher Relations and the Value of the Hubble Constant. *ApJ*, 529:698–722, February 2000.
- [170] A. Sandage. Bias Properties of Extragalactic Distance Indicators. IX. Absolute Luminosity and Line-Width Distributions for Galaxy Types along the Hubble Sequence Based on Distance-limited Samples from the Revised Shapley-Ames Catalog. *PASP*, 112:504–528, April 2000.
- [171] R. H. Sanders and D. D. Land. MOND and the lensing fundamental plane: no need for dark matter on galaxy scales. *MNRAS*, 389:701–705, September 2008.
- [172] D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. *ApJ*, 500:525–+, June 1998.
- [173] F. Schweizer and P. Seitzer. Ages and Metallicities of Young Globular Clusters in the Merger Remnant NGC 7252. *AJ*, 116:2206–2219, November 1998.
- [174] M. Scodeggio, G. Gavazzi, E. Belsole, D. Pierini, and A. Boselli. The tilt of the Fundamental Plane of early-type galaxies: wavelength dependence. *MNRAS*, 301:1001–1018, December 1998.
- [175] Z. Shao, Q. Xiao, S. Shen, H. J. Mo, X. Xia, and Z. Deng. Inclination-dependent Luminosity Function of Spiral Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: Implications for Dust Extinction. *ApJ*, 659:1159–1171, April 2007.
- [176] S. Shen, H. J. Mo, and C. Shu. The fundamental plane of spiral galaxies: theoretical expectations. *MNRAS*, 331:259–272, March 2002.
- [177] S. Shen, H. J. Mo, and C. Shu. The fundamental plane of spiral galaxies: theoretical expectations. *MNRAS*, 331:259–272, March 2002.
- [178] S. Shen, H. J. Mo, S. D. M. White, M. R. Blanton, G. Kauffmann, W. Voges, J. Brinkmann, and I. Csabai. The size distribution of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *MNRAS*, 343:978–994, August 2003.
- [179] S. Shen, C. Wang, R. Chang, Z. Shao, J. Hou, and C. Shu. The Morphological-Dependent Tully-Fisher Relation of Spiral Galaxies. *ApJ*, 705:1496–1502, November 2009.

- [180] L. Simard and C. J. Pritchett. Internal Kinematics of Field Galaxies at Intermediate Redshifts. *ApJ*, 505:96–110, September 1998.
- [181] F. Simien and G. de Vaucouleurs. Systematics of bulge-to-disk ratios. *ApJ*, 302:564–578, March 1986.
- [182] C. M. Springob, M. P. Haynes, R. Giovanelli, and B. R. Kent. A Digital Archive of H I 21 Centimeter Line Spectra of Optically Targeted Galaxies. *ApJS*, 160:149–162, September 2005.
- [183] C. M. Springob, K. L. Masters, M. P. Haynes, R. Giovanelli, and C. Marinoni. SFI++. II. A New I-Band Tully-Fisher Catalog, Derivation of Peculiar Velocities, and Data Set Properties. *ApJS*, 172:599–614, October 2007.
- [184] M. Steinmetz and J. F. Navarro. The Cosmological Origin of the Tully-Fisher Relation. *ApJ*, 513:555–560, March 1999.
- [185] J. A. Stevens, M. Amure, and W. K. Gear. Dust in spiral galaxies: global properties. *MNRAS*, 357:361–380, February 2005.
- [186] D. Syer, S. Mao, and H. J. Mo. Observational constraints on disc galaxy formation. *MNRAS*, 305:357–364, April 1999.
- [187] A. Toomre. Mergers and Some Consequences. In B. M. Tinsley & R. B. Larson, editor, *Evolution of Galaxies and Stellar Populations*, pages 401–+, 1977.
- [188] T. Treu. The Fundamental Plane of Elliptical Galaxies at Low and High Redshift. In B. Kaldeich, editor, *LIA Colloq. 34: The Next Generation Space Telescope: Science Drivers and Technological Challenges*, volume 429 of *ESA Special Publication*, pages 255–+, July 1998.
- [189] T. Treu, M. Stiavelli, G. Bertin, S. Casertano, and P. Møller. The properties of field elliptical galaxies at intermediate redshift - III. The Fundamental Plane and the evolution of stellar populations from $z \sim 0.4$ to $z=0$. *MNRAS*, 326:237–254, September 2001.
- [190] T. Treu, M. Stiavelli, S. Casertano, P. Møller, and G. Bertin. The Evolution of Field Early-Type Galaxies to $z \sim 0.7$. *ApJ*, 564:L13–L16, January 2002.
- [191] I. Trujillo, A. Burkert, and E. F. Bell. The Tilt of the Fundamental Plane: Three-Quarters Structural Nonhomology, One-Quarter Stellar Population. *ApJ*, 600:L39–L42, January 2004.

- [192] I. Trujillo, A. W. Graham, and N. Caon. On the estimation of galaxy structural parameters: the Sérsic model. *MNRAS*, 326:869–876, September 2001.
- [193] R. J. Tuffs, C. C. Popescu, H. J. Völk, N. D. Kylafis, and M. A. Dopita. Modelling the spectral energy distribution of galaxies. III. Attenuation of stellar light in spiral galaxies. *A&A*, 419:821–835, June 2004.
- [194] R. B. Tully and J. R. Fisher. A new method of determining distances to galaxies. *A&A*, 54:661–673, February 1977.
- [195] R. B. Tully and M. J. Pierce. Distances to Galaxies from the Correlation between Luminosities and Line Widths. III. Cluster Template and Global Measurement of H_0 . *ApJ*, 533:744–780, April 2000.
- [196] R. B. Tully and M. A. W. Verheijen. The Ursa Major Cluster of Galaxies. II. Bimodality of the Distribution of Central Surface Brightnesses. *ApJ*, 484:145–+, July 1997.
- [197] O. Vaduvescu and M. L. McCall. The fundamental plane of dwarf irregular galaxies. *A&A*, 487:147–160, August 2008.
- [198] G. van de Ven, P. G. van Dokkum, and M. Franx. The Fundamental Plane and the evolution of the M/L ratio of early-type field galaxies up to $z \sim 1$. *MNRAS*, 344:924–934, September 2003.
- [199] P. G. van Dokkum and R. S. Ellis. On the Assembly History of Early-Type Galaxies in the Hubble Deep Field-North. *ApJ*, 592:L53–L57, August 2003.
- [200] P. G. van Dokkum and M. Franx. The Fundamental Plane in CL 0024 at $z = 0.4$: implications for the evolution of the mass-to-light ratio. *MNRAS*, 281:985–1000, August 1996.
- [201] P. G. van Dokkum, M. Franx, D. D. Kelson, and G. D. Illingworth. Luminosity Evolution of Early-Type Galaxies to $Z = 0.83$: Constraints on Formation Epoch and Omega. *ApJ*, 504:L17+, September 1998.
- [202] P. G. van Dokkum, M. Franx, D. D. Kelson, and G. D. Illingworth. Luminosity Evolution of Field Early-Type Galaxies to $Z=0.55$. *ApJ*, 553:L39–L42, May 2001.
- [203] P. G. van Dokkum and S. A. Stanford. The Fundamental Plane at $z=1.27$: First Calibration of the Mass Scale of Red Galaxies at Redshifts $z \lesssim 1$. *ApJ*, 585:78–89, March 2003.

- [204] M. A. W. Verheijen. The Ursa Major Cluster of Galaxies. V. H I Rotation Curve Shapes and the Tully-Fisher Relations. *ApJ*, 563:694–715, December 2001.
- [205] N. P. Vogt. Distant Disk Galaxies: Kinematics and Evolution to $z \sim 1$. In A. J. Bunker & W. J. M. van Breugel, editor, *The High-Redshift Universe: Galaxy Formation and Evolution at High Redshift*, volume 193 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 145–+, 1999.
- [206] N. P. Vogt, D. A. Forbes, A. C. Phillips, C. Gronwall, S. M. Faber, G. D. Illingworth, and D. C. Koo. Optical Rotation Curves of Distant Field Galaxies: Keck Results at Redshifts to Z approximately 1. *ApJ*, 465:L15+, July 1996.
- [207] N. P. Vogt, M. P. Haynes, T. Herter, and R. Giovanelli. M/L, H α Rotation Curves, and H I Measurements for 329 Nearby Cluster and Field Spirals. I. Data. *AJ*, 127:3273–3299, June 2004.
- [208] B. J. Weiner, C. N. A. Willmer, S. M. Faber, J. Harker, S. A. Kassin, A. C. Phillips, J. Melbourne, A. J. Metevier, N. P. Vogt, and D. C. Koo. A Survey of Galaxy Kinematics to $z \sim 1$ in the TKRS/GOODS-N Field. II. Evolution in the Tully-Fisher Relation. *ApJ*, 653:1049–1069, December 2006.
- [209] S. D. M. White and C. S. Frenk. Galaxy formation through hierarchical clustering. *ApJ*, 379:52–79, September 1991.
- [210] J. A. Willick. The Las Campanas/Palomar 10,000 Kilometer Per Second Cluster Survey. I. Properties of the Tully-Fisher Relation. *ApJ*, 516:47–61, May 1999.
- [211] J. A. Willick, S. Courteau, S. M. Faber, D. Burstein, A. Dekel, and M. A. Strauss. Homogeneous Velocity-Distance Data for Peculiar Velocity Analysis. III. The Mark III Catalog of Galaxy Peculiar Velocities. *ApJS*, 109:333–+, April 1997.
- [212] J.-H. Woo, C. M. Urry, P. Lira, R. P. van der Marel, and J. Maza. The Fundamental Plane Evolution of Active Galactic Nucleus Host Galaxies. *ApJ*, 617:903–914, December 2004.
- [213] J. Zavala, V. Avila-Reese, H. Hernández-Toledo, and C. Firmani. The luminous and dark matter content of disk galaxies. *A&A*, 412:633–650, December 2003.
- [214] B. L. Ziegler, A. Böhm, K. J. Fricke, K. Jäger, H. Nicklas, R. Bender, N. Drory, A. Gabasch, R. P. Saglia, S. Seitz, J. Heidt, D. Mehlert, C. Möllenhoff, S. Noll, and

E. Sutorius. The Evolution of the Tully-Fisher Relation of Spiral Galaxies. *ApJ*, 564:L69–L72, January 2002.

文章目录

1. Shi-Yin Shen, Cai-Hong Wang, Rui-Xing Chang, Zheng-Yi Shao, Jin-Liang Hou and Cheng-Gang Shu. The morphological-dependent Tully-Fisher relation of spiral galaxies. *ApJ*, vol 705, pages 1496-1502, 2009.
2. 王彩虹、王有芬、沈世银、邵正义。星系的基本面。《天文学进展》，已被接收。
3. Cai-Hong Wang, Shi-Yin Shen. The fundamental plane of spiral galaxies: observational tests. in preparing.

简 历

基本情况

王彩虹，女，河北省栾城县人，1981年9月出生，已婚，中国科学院上海天文台在读博士研究生。

教育状况

2000年9月至2004年7月，河北师范大学，本科，专业：物理学。

2004年9月至2010年7月，中国科学院上海天文台，硕博连读研究生，专业：天体物理。

工作经历

无。

研究兴趣

星系特征、星系形成和演化的统计研究。

联系方式

通讯地址：上海南丹路80号，天文大厦1510室

邮编：200030

E-mail: chwang@shao.ac.cn

致 谢

值此论文完成之际，谨在此向多年来给予我关心和帮助的老师、同学、朋友和家人表示衷心的感谢和敬意！

首先，我要真诚地感谢我的两位指导老师，侯金良研究员和沈世银副研究员。侯老师不仅治学态度严谨、科学道德高尚，对人也特别亲切、和善，对我的学习和生活等各方面都给予了很大的照顾。沈老师系统地指导我完成了本文的工作，并在自己工作极为繁忙的情况下，为本文投入了巨大的热情和精力。承蒙沈老师的悉心指导，在他的科学安排和不断鼓励下，我虽愚钝也最终能学而得果。再次感谢沈老师的宽容、接纳和不弃。

同时，衷心地感谢中科院对我的培养，感谢上海天文台在我六年的学习和生活中提供的各项便利条件，感谢星系和宇宙学中心的各位老师在学习和生活上的指导和帮助。感谢 K. L. Masters 教授提供的 SFI++ 数据。感谢杨小虎研究员提供的星系群数据。此外，我要感谢刘成则博士、尹君博士，姜春艳博士，王有芬博士和付伟硕士等同学在生活上热心提供的各种帮助，并且在论文完成过程中的交流讨论使我受益匪浅。

在此我要特别地感谢我的父母。他们含辛茹苦、无怨无悔地劳作奔波，并且近 30 年来，一如既往地支持我的学业、教导我的为人，他们给予了我全部的物质和精神支持，却从未要求任何回报。感谢我的爱人张传宝先生对我的理解和支持，鼓励和等待。

谨此之际，祝所有关心、支持我的师长和朋友身体安康！