

文章编号: 1000-8349(2011)01-0046-14

星系的基本面

王彩虹^{1,2}, 王有芬^{1,2}, 沈世银¹, 邵正义¹

(1. 中国科学院 上海天文台 星系宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 基本面最早是在早型星系中发现的一种经验标度律, 它是一个关于星系的有效半径、中心速度弥散度和有效半径内的平均面亮度之间的紧密相关关系。基本面对早型星系的形成机制、动力学演化理论等提出了很强的观测约束; 不仅如此, 它还可作为独立的星系距离测定方法, 用于哈勃常数的定标和星系本动速度场的测量。对早型星系基本面的研究进展做了简要评述, 包括在不同观测波段、不同密度环境、不同红移处测定的基本面, 以及观测基本面偏离简单位力定理的理论解释。除此之外, 还对旋涡星系的基本面问题进行了专题评论。

关键词: 早型星系; 基本面; 旋涡星系

中图分类号: P157 **文献标识码:** A

1 引言

1987 年 Djorgovski 和 Davis 综合并分析了 106 个椭圆星系和 18 个 S0 星系的 r_G 波段测光和光谱数据, 研究发现椭圆星系和 S0 星系的有效半径 R_e 、中心速度弥散 σ_0 和有效半径内的平均面亮度 I_e 在对数空间中近似分布于一个平面上:

$$\lg R_e = a \lg \sigma_0 + b \lg I_e + c, \quad (1)$$

其中 $a = 1.39$, $b = -0.90$, $c = -6.71$ 。由于该相关关系非常紧密 ($\Delta_{\lg R_e} \approx 0.08$), 而且其参数都是星系的基本结构参数, 他们将该拟合平面定义为早型星系的基本面 (Fundamental Plane)^[1]。同年 Dressler 等人^[2]用 6 个星系团中的 97 个椭圆星系也发现了该相关关系, 但其拟合参数略有差别, a 和 b 分别为 1.33 和 -0.83 。

早型星系基本面的一个直接应用就是估算早型星系的距离。其原理是, 在近距离宇宙中, 式 (1) 右边的参数 (σ_0 和 I_e) 的测量不依赖于星系的距离, 因而通过比较星系视大小与由式 (1) 估计的绝对大小可得星系的距离。基本面的内禀弥散 $\Delta_{\lg R_e} \approx 0.08$ 所对应的距离估算误

收稿日期: 2010-05-05; 修回日期: 2010-05-25

资助项目: 国家自然科学基金重点项目 (10833005)

差约为 20%。早型星系基本面的这种距离估算, 还可以进一步用于研究哈勃常数以及星系的本动速度场等^[3-5]。

基本面更重要的意义在于其可作为一个研究早型星系的起源和演化的有效工具。研究表明, 在各种情况下 (如不同观测波段、不同密度的大尺度环境中、不同的红移处) 早型星系的基本面都成立, 且具有很小的弥散^[6-10]。基本面的这种紧密相关性一般认为起源于引力束缚系统的简单位力定理。但是, 相对于由位力定理给出的平面 ($a = 2, b = -1$), 观测到的早型星系基本面存在一定的“倾斜”^[1, 2]。一般认为导致早型星系基本面“倾斜”的原因主要有三个方面: 一是早型星系的速度弥散并不能完全代表星系动能^[11], 二是不同质量的早型星系的质光比之间存在系统的差别^[12], 三是不同早型星系在结构和动力学上的分布不是完全相同的^[11] (具体讨论见第 3 章)。

自从早型星系的基本面被发现和定义后, 对于晚型 (旋涡) 星系也出现了类似的研究^[13]。旋涡星系基本面研究的出发点是基于另外一个著名的标度律: 旋涡星系的 Tully–Fisher 关系 (即星系光度和最大旋转速度之间的关系, 以下简称 TF 关系)^[14], 研究是否可以在 TF 关系中引入第三参量, 从而能在三维参数空间中构成一个更紧密的平面。但是, 关于旋涡星系的基本面是否存在的问题, 目前还存在较大的争议^[13, 15, 16] (具体参见第 4 章)。

除星系之外, 在星系核球^[17]、球状星团^[18]、星系团^[19]、黑洞^[20] 等动力学系统中, 也陆续发现了类似的三个基本参数之间的经验相关关系, 并且同样被命名为基本面。本文讨论的对象为星系, 因此对这些动力学系统的基本面的相关研究不予评述。

本文结构如下: 第 2 章简要评述早型星系基本面在观测上的研究进展, 包括在不同观测波段、不同密度环境、不同红移处的观测结果; 第 3 章重点探讨观测到的基本面偏离简单位力定理的理论原因; 第 4 章对旋涡星系基本面的观测和理论意义进行专题评述; 第 5 章给出简单的总结。

2 早型星系基本面的观测

2.1 不同观测波段的基本面

自早型星系的基本面在 r_G 波段被发现后, 其相关研究很快被拓展到各个不同波段。

基本面中的 σ_0 一般由覆盖整个光学波段的光谱观测得到, 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。

表 1 综合了各种文献中所给出的不同波段的基本面。应该指出的是, 不同文献中采用的对基本面的拟合方法可能不同, 而不同的拟合方法将会影响到基本面的拟合结果。因此, 在下文中, 我们将重点比较在同一研究工作中得到的不同波段的测定结果。

表 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	$-b$	$\Delta_{I_g R}$
[2]	B	97	1.33 ± 0.05	0.83 ± 0.03	0.079
[1]	r_G	106	1.39 ± 0.14	0.90 ± 0.09	0.079
[36]	B	91	1.20 ± 0.06	0.83 ± 0.02	0.071
[36]	g	109	1.16 ± 0.10	0.76 ± 0.04	0.090
[36]	r	226	1.24 ± 0.07	0.82 ± 0.02	0.084
[6]	K	251	1.53 ± 0.08	0.79 ± 0.03	0.096
[21]	B	38	1.40 ± 0.09	0.88 ± 0.05	0.07
[21]	V	41	1.35 ± 0.13	0.88 ± 0.05	0.07
[21]	r	54	1.35 ± 0.09	0.93 ± 0.05	0.08
[21]	I	75	1.70 ± 0.13	0.83 ± 0.03	0.09
[21]	H	73	1.66 ± 0.10	0.85 ± 0.03	0.09
[21]	K	29	1.70 ± 0.17	1.03 ± 0.13	0.07
[22]	V	48	1.44 ± 0.04	0.80 ± 0.03	0.074
[22]	K	48	1.38 ± 0.26	0.75 ± 0.05	0.072
[24]	g	9 000	1.45 ± 0.06	0.74 ± 0.01	0.056
[24]	r	9 000	1.49 ± 0.05	0.75 ± 0.01	0.052
[24]	i	9 000	1.52 ± 0.05	0.78 ± 0.01	0.049
[24]	z	9 000	1.51 ± 0.05	0.77 ± 0.01	0.049
[25]	r	1 430	1.42 ± 0.05	0.76 ± 0.003	0.064
[25]	K	1 430	1.53 ± 0.04	0.77 ± 0.003	0.062
[23]	g	50 000	1.40 ± 0.05	0.76 ± 0.02	0.062
[23]	r	50 000	1.43 ± 0.05	0.79 ± 0.02	0.058
[23]	i	50 000	1.46 ± 0.05	0.80 ± 0.02	0.056
[23]	z	50 000	1.47 ± 0.05	0.74 ± 0.02	0.054
[26]	g	39 993	1.384 ± 0.024	0.788 ± 0.002	0.095
[26]	r	39 993	1.390 ± 0.018	0.785 ± 0.002	0.082
[26]	i	39 993	1.426 ± 0.016	0.780 ± 0.002	0.079
[26]	z	39 993	1.418 ± 0.021	0.793 ± 0.002	0.079
[26]	Y	39 993	1.467 ± 0.019	0.785 ± 0.002	0.081
[26]	J	39 993	1.530 ± 0.017	0.795 ± 0.002	0.083
[26]	H	39 993	1.560 ± 0.021	0.795 ± 0.005	0.087
[26]	K	39 993	1.552 ± 0.021	0.790 ± 0.005	0.089
[28]	FUV	29	1.25	0.73	0.14
[28]	NUV	29	1.82	0.75	0.08
[28]	FUV	34	1.09	0.55	0.17
[28]	NUV	34	1.11	0.58	0.14
[27]	$0.55 \mu\text{m}$	56	1.23 ± 0.10	0.86 ± 0.04	
[27]	$2.2 \mu\text{m}$	56	1.42 ± 0.11	0.81 ± 0.05	
[27]	$3.6 \mu\text{m}$	56	1.55 ± 0.11	0.89 ± 0.04	
[27]	$4.5 \mu\text{m}$	56	1.47 ± 0.11	0.92 ± 0.04	
[27]	$5.8 \mu\text{m}$	56	1.57 ± 0.13	0.92 ± 0.05	
[27]	$8.0 \mu\text{m}$	56	1.55 ± 0.14	0.75 ± 0.05	

在各种研究结果中, 基本面的参数 b 一般都被认为几乎不随波长变化, 而参数 a 的变化情况还有一定的争议。有的研究认为基本面的参数 a 变化明显。如 Pahre 等人在考虑了不同波段的有效半径的不同后发现, 如果将 b 固定为 -0.8 , 则从 U 波段到 K 波段参数 a 会增加 0.51 ^[6]; 而 Scodreggio 等人用 Coma 团中心的 74 个早型星系 (E+S0+S0a) 也发现了类似的结果, 即从光学到近红外波段基本面的参数 b 保持不变 (≈ -0.88), 而参数 a 明显变大 (从 1.35 到 1.70)^[21]。但是也有研究认为不仅基本面的参数 b 几乎不变, 而且 a 也只有微小的增加。1999 年, Mobasher 等人用 Coma 团中的 48 个星系研究发现, 其基本面的参数在 K 波段的取值范围是 $a = 1.32 \sim 1.50$ 和 $b = -0.75 \sim -0.80$ (由于拟合方法不同所以拟合结果有一定范围的变化), 在 V 波段是 $a = 1.23 \sim 1.44$ 和 $b = -0.75 \sim -0.88$, 因此参数 a 随波段只有小的增加而 b 几乎不变, 其弥散也几乎不变^[22]。

在上述的这些研究中, 由于受到观测水平的限制, 通常不同波段的基本面是由不同的样本得到的, 星系参数也不是统一测量得到的, 而且各样本还有不同的选择条件 (如不同的星等极限和速度弥散度限制等), 这些都会影响到基本面参数的研究^[23]。2003 年 Bernardi 等人分析了 SDSS (Sloan 数字巡天) 中观测到的大约 9000 个椭圆星系的样本在不同波段的情况, 从而避免了这些问题。她们的研究表明从 g 到 z 波段基本面的变化很小^[24]。2008 年 La Barbera 等人认为, Bernardi 等人的研究结果 (基本面变化不明显) 可能是由于其用到的观测波段范围较窄 ($0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$)^[25]。因此他们综合了 SDSS 和 UKIDSS (UKIRT 红外深场巡天) 数据, 研究了 1430 个早型星系在 r 波段和 K 波段的基本面, 证实早型亮星系的基本面随波长变化不明显: 从光学 (r) 到近红外 (K) 波段其参数 a 只变化了 8% ; 而参数 b 和基本面在 $\lg R_e$ 上的弥散几乎不变。2009 年 Hyde 等人用更大的样本 (大约 50 000 个 SDSS 早型星系) 得到了类似的结果: 从 g 到较长波段 z , 基本面只略微地变陡 (g 波段 $a = 1.40$, z 波段 $a = 1.47$); 但是它们的基本面弥散有变化, 长波段的基本面弥散更小 (在 g 波段为 0.062 dex, 而在 z 波段只有 0.054 dex)^[23]。同年 La Barbera 等人同样用附近 ($z < 0.1$) 较大的样本 (39993 个椭圆星系) 研究发现从 g 到 K 波段 a 只变化了 10% ^[26]。2008 年 Jun 等人将波长范围扩展到中红外^[27]。他们研究了 56 个星系的可见光 (V)、近红外 (K) 和中红外 (Spitzer 的 IRAC, 3.6 、 4.5 、 5.8 、 $8.0 \mu\text{m}$) 波段的基本面, 发现从可见光到 $3.6 \mu\text{m}$ 参量 a 的变化可以描述为 $da/d\lambda = (0.11 \pm 0.04) \mu\text{m}^{-1}$, 大于 $3.6 \mu\text{m}$ 的 a 几乎为常数; 而参量 b 随波段没有系统的变化, 但在 $3.6 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 波长范围内 b 的值接近位力定理给出的理论值 -1 。

为了更直观地显示这种基本面的变化 (即 a 随观测波段有小的增加而 b 几乎不变), 我们综合了 Bernardi 等人、Hyde 等人、La Barbera 等人及 Jun 等人的研究结果, 并将其在图 1 中表示出来。除此之外, 值得一提的是, 2009 年 Jeong 等人^[28] 第一次研究了近紫外和远紫外的基本面, 发现 34 个早型星系的基本面参数分别为 $a = 1.11, b = -0.58$ 和 $a = 1.09, b = -0.55$, 我们将其用实心方格标在图 1 中。可以看到其参数 a 值较符合一般认为的变化趋势, 但是 b 值与 -0.8 有明显相差。另外, 在去除样本中最近有恒星形成的星系后他们发现, 其基本面参数分别变为 $a = 1.82, b = -0.75$ 和 $a = 1.25, b = -0.73$ (在图中用倒 Y 号表示), 即其 b 值会更接近 -0.8 , 但是参数 a 却不再符合其随波段变化的整体趋势, 而且近紫外和远紫外之间的相差也更加明显。

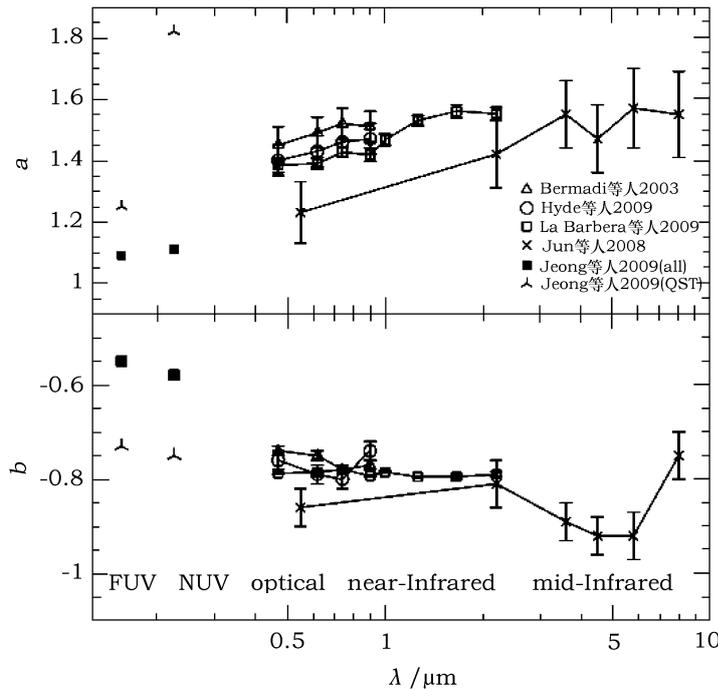


图 1 不同文献给出的不同波段的早型星系基本面的拟合参数

总之,关于基本面波长相关性的研究虽然还存在一定的争议,但是人们现在一般倾向于认为从可见光到近红外波长范围内,基本面的参数 a 随波段有变化,虽然这种变化不明显,而参数 b 几乎不变。基本面随波段的变化很可能是由不同质量星系的星族不同引起的^[27]。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大小的限制,早型星系基本面的研究还有待于进一步深入。

2.2 不同环境的基本面

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^[29]。尽管如此,对于早型星系来说,其基本面是否与环境相关还存在一定的争议。

有一些研究工作发现早型星系的基本面和环境相关。如 1992 年 de Carvalho 等人^[30]在比较了场、群、富团中的椭圆星系后发现,场星系基本面的零点 c 和团星系的有所不同,在有效半径固定时场星系的面亮度偏大或速度弥散偏小,他们认为这是由于场星系更年轻;并且,他们还发现场星系的基本面弥散也比团星系的大,但他们同时指出这可能是由于场星系距离的观测误差偏大引起的。2003 年 Bernardi 等人也认为基本面的弥散和星系环境弱相关,即基本面在有效半径方向的残差随着本地环境密度的增大而缓慢增大^[24]。2008 年 D'Onofrio 等人研究了 $z \approx 0.04 \sim 0.07$ 范围内 59 个星系团中的椭圆星系,发现基本面参数与环境密度也存在一定的相关性,随着密度增加, a 和 b 的绝对值增加而 c 的值减小,其偏相关系数 r 分别为 0.73、0.82 和 -0.86 ^[31]。

但是同样也有研究认为, 这种环境相关性并不显著。如 Pahre 等人就没有发现基本面的环境相关性^[6], 同时他们认为 de Carvalho 等人^[30] 发现的基本面区别不一定是由于星族差异引起的, 可能是由于尘埃消光估计不准确或星系距离有误差产生的。另外, Reda 等人研究了处于极低密度区的孤立星系的基本面, 也没有发现其与高密度环境星系基本面不同^[32]。

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 ($z \approx 0.5$) 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^[33]。

总之, 关于基本面是否与环境相关及如何相关还需要更深入的探究。最新的关于这方面的研究是由 La Barbera 等人进行的^[34]。他们认为在任何波段, 随着星系密度的减小基本面的参数 c 都减小, 参数 a 增大; 而参数 b 的变化还与观测波段有关。

2.3 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, 如果在基本面的暗端 (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, 其参数 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参数 a 会随红移的增大而略微减小。如, 1996 年 van Dokkum 和 Franx 发现 $z = 0.39$ 处的 CL0024 星系团在 V 波段的基本面参数为 $a = 0.97$ 和 $b = -0.77$ ^[35], 与 Jørgensen 等人观测的 Coma 星系团的 g 波段结果相比, 最明显的区别就是参数 a 的值略微偏小 ($\Delta a = 0.19 \pm 0.14$)^[36]。2006 年 Jørgensen 等人^[37] 研究了红移在 0.8~0.9 间的两个星系团, 发现其早型星系的基本面, 和 Coma 团的基本面相比, 参数值偏小了 0.70。

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、甚至高红移处 ($0.1 < z < 1.0$) 的基本面的斜率和弥散, 都与近邻 (低红移) 星系的基本面一致, 只是零点 c 有明显偏移, 即与近邻星系相比, 在给定有效半径和速度弥散时中红移星系更亮。如, 2005 年 Fritz 等人用 96 个 $z \approx 0.2$ 的团星系发现其基本面与近邻星系的基本面相比有平移, 其零点平移了 (0.10 ± 0.06) , 即变亮了 (0.31 ± 0.18) mag^[33]。2003 年 Gebhardt 等人研究了 $z = 0.3 \sim 1.0$ 范围内的场星系的基本面, 发现了类似的结果, 并且与近邻星系的相比, 他们得到的 $z = 1.0$ 处的基本面零点相当于亮了 2.4 mag^[8]。在红移更远处 ($z = 1.27$), van Dokkum 等人发现与 Coma 团的相比 RDCSJ0848+4453 星系团的基本面也有平移^[7]。另外, 有的工作还研究了零点随红移的具体变化情况。如, 2001 年 Treu 等人研究了 19 个 $z \approx 0.1 \sim 0.5$ 的场星系后发现, 直到 $z \approx 0.4$ 其基本面的弥散都很小, 并且与 Coma 团基本面的弥散相近; 只是这些基本面和 Coma 团的相比有平移, 并且平移量随红移增加^[38]。2002

年他们又利用 30 个红移在 0.1~0.66 间的场星系找到了基本面零点 c 的具体变化情况, 并表示为 $dc/dz = 0.58^{+0.09}_{-0.13}$ ^[39]。由于基本面的零点本质上反映的是星族的质光比, 因此 c 的演化等价于星系质光比的演化。如 van Dokkum 等人将其零点变化量用 B 波段的质光比变化表示为 $d\lg(M/L)/dz = -1.06 \pm 0.09$ (对于质量大于 $10^{11} M_{\odot}$ 的星系); 而 Treu 等人的零点变化情况表示 $d\lg(M/L)/dz = -0.72^{+0.11}_{-0.16}$ 。图 2 是不同红移处的星系的质光比与近邻星系的差值, 它是基于 Gebhardt 等人 2003 年文章^[8]中的图 7 给出的。图中不同形状的点代表了不同的文献来源, 除了部分前述文献外, 还给出了 2002 年 Im 等人的结果^[40], 1998 年、2001 年和 2003 年 van Dokkum 等人的结果^[41-43]以及 1999 年 Jørgensen 等人的结果^[44]。在图中, 由星族模型预言的纯粹被动演化的结果则用曲线表示了, 其中下边的曲线表示形成时标 $z_f > 3$ 的星族 (对应于团星系) 的被动演化预言的结果, 而上边的曲线表示 $z_f = 1.3$ (对应于场星系) 的模型结果。由图 2 可以看到, 观测结果和模型预言基本符合。

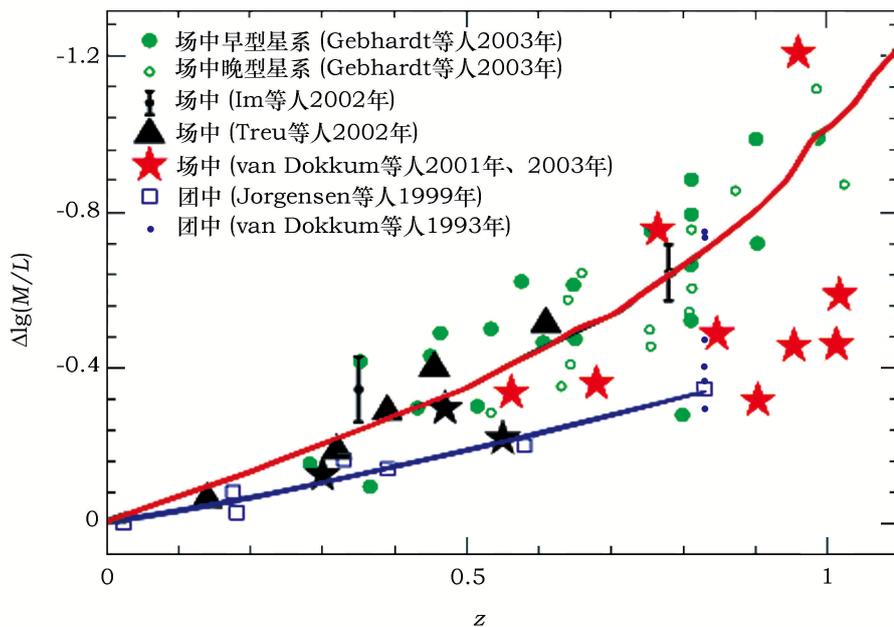


图 2 Gebhardt 等人 2003 年的文章^[8]中综合给出的早期星系基本面零点的演化

不同的点代表不同的研究工作及不同的样本 (具体见图例)。下边的曲线表示形成时标 $z_f > 3$ 的星族 (对应于团星系) 的被动演化模型预言结果, 而上边的曲线表示 $z_f = 1.3$ (对应于场星系) 的模型结果。

需要注意的是, 用基本面研究星系演化有明显的不足之处。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旋涡星系, 那么这种比较就变得复杂和难以理解。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, 很难对高红移和低红移样本的基本面进行严格统计上的比较。

3 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:

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

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_s 是星系的恒星质量, R_e 是星系的有效半径, γ 是星系质光比 (即 M_s/L , 其中 L 是星系光度), I_e 是有效半径内的平均面亮度 ($I_e \propto L/R_e^2$)。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_s 、有效半径 R_e 和位力半径 R_g 分别线性相关, 并且 γ 是常数, 则有:

$$R_e \propto \sigma_0^2 I_e^{-1}, \quad (3)$$

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 $a \approx 1.3 \sim 1.4$, $-b \approx 0.8 \sim 0.9$) 和理论值仍然不同 (参见 2.1 节), 即相对于理想的基本面, 观测到的基本面有点“倾斜” (tilt)^[1, 2]。

早型星系基本面倾斜可能是由于以上的理论推导中用到的几个假设引起的。

首先, 根据位力定理, 早型星系符合公式 (2) 需要假设恒星弥散运动的动能为星系的总动能。但是 1997 年 Busarello 等人提出速度弥散并不能完全代表星系的动能^[11], 因为早型星系存在一定的转动, 即使转动不是恒星的主要运动形式, 但它对动能的贡献仍然不能忽略; 并且星系的转动和恒星弥散运动之间没有相关性, 因此不能用恒星弥散运动表示转动动能。在考虑了星系转动动能后, Busarello 等人认为观测到的速度弥散与代表总动能的理论弥散值间的关系为 $\sigma_0 \propto \sigma^{1.28 \pm 0.11}$, 即对应理论值 σ^2 的应该是 $\sigma_0^{1.56}$, 因此观测基本面的参数 a 的理论值就应该是 1.56 而不是 2。另外, 即使不考虑转动效应, σ 和 σ_0 的线性相关假设也可能并不成立。因为由星系的并合理论可以知道, 前身星系的轨道动能会影响并合产物 (早型星系) 内的速度分布, 所以其中心处的速度弥散就不能很好地描述平均速度弥散, 进而使得其基本面关系与位力理论不符。

除此之外, 不同质量的早型星系的结构也不是自相似的。虽然经典的早型星系的面亮度径向分布可用 $n = 4$ 的 Sersic 分布律* (即 de Vaucouleurs 分布律) 很好地描述^[45], 但新近的研究表明, 早型星系的分布律指数 n 并不是一个常数, 而是与星系的总光度 (质量) 相关^[46]。对于大质量星系, 其密度分布律 $n \approx 4$, 且 n 随着星系质量的减小而减小; 对于小质量星系, $n \approx 1$ ^[47]。早型星系这种结构上的不相似性必然使得 R_e/R_g 为常数的假设不能成立, 从而也导致了基本面的倾斜。

除了动力学和结构上的不一致可以引起基本面倾斜外, 还有一个重要的原因就是早型星系中星族也不是一致的, 即星系质光比 γ 不是常数。1987 年 Faber 等人就注意到, 基本

* $I(r) = I(0) \exp[-(r/r_0)^{1/n}]$, 其中 $I(0)$ 是星系中心光度密度, r_0 是特征半径, n 是分布律指数。

面倾斜的原因可能是不同质量的星系中的星族成分不同,即质光比 γ 是星系质量的函数所引起的。随后的很多工作也支持了此观点^[48-51]。理论上讲,如果用星系恒星质量代替基本面的光度(质量密度代替面亮度),即研究所谓的“质量基本面”,可以去除 γ 的变化对基本面的影响。2009 年 Hyde 等人用观测数据发现,如果用恒星质量代替光度则基本面的确变得更陡,内禀弥散也减小到 0.048 dex,但是恒星质量基本面的斜率(1.54 或 1.63)仍然小于理论斜率值 2,他们认为这是由于动力学质量与恒星质量之比随着质量的增加而增加($M_{\text{dyn}}/M_s \propto M_{\text{dyn}}^{0.17 \pm 0.01}$)导致的^[23]。近年还有人直接用引力透镜质量^[52-54]或动力学质量^[55]代替光度,即试图消除 M_{dyn}/M_s 及 γ 不是常数的影响,发现观测基本面与理论值的差别的确会更小($a \approx 1.8$)。

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^[56, 57],并且各种原因影响的具体大小还存在一定的争议,仍需要进一步研究。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均匀性引起的,剩下的 30% 是由星族和结构不均匀性引起的;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^[58]。

4 旋涡星系基本面

旋涡星系基本面是参照早型星系基本面的发现过程提出来的。对于早型星系,首先发现的是其 Faber-Jackson 关系(即星系光度和中心速度弥散的相关关系)^[59],后来人们发现如果引入星系半径作为其第三参量(即组成基本面)其关系弥散可以明显减小。对于旋涡星系,与 Faber-Jackson 关系对应的标度律为 TF 关系,即星系光度 L 和最大旋转速度 V 之间存在显著的相关关系^[60]。受到早型星系基本面的启发,很多工作试图在 TF 关系中也引入第三参量,从而构建旋涡星系的基本面^[13, 15, 16, 61-63]。

4.1 旋涡星系基本面的观测

在观测方面,到目前为止还没有完全确定旋涡星系 TF 关系的第三参量是否存在,即旋涡星系是否也存在基本面。

一些研究认为旋涡星系的基本面存在,因为半径的引入可以使得旋涡星系的 TF 关系弥散明显减小。1989 年 Kodaira 研究了 Virgo 团中 18 个椭圆星系和 28 个旋涡星系($30^\circ \leq i \leq 60^\circ$)的面亮度参数(光度、直径、面亮度、中心聚度指数)和内部速度(速度弥散和旋转速度)的相关关系,发现无论是椭圆星系还是旋涡星系,由其光度 L 、半径 R 和最大旋转速度(或速度弥散) V 组成的关系都为 $L \propto V^2 R$,并且这个关系比其中任何两个参量组成的关系都紧密^[64]。2000 年 Koda 等人用模拟的旋涡星系发现,在三维空间 $\lg L - \lg R - \lg V$ 中旋涡星系分布在一个类似冲浪板的面上,如图 3 所示^[15],并用 $L \propto (VR)^{1.3}$ 描述了这个旋涡星系基本面,并且他们认为两维关系($L-V$ 、 $V-R$ 和 $R-L$)是这个冲浪板面的投影。稍后 Han 等人综合了其他人在各波段观测的 500 个旋涡星系,与 Kodaira 一样,他们也认为旋涡星系基

本面大概可以表达为 $L \propto V^2 R$, 并且在所有的光学波段这个基本面比任何两参数关系都更基本, 例如基本面关系弥散比 TF 的减小约 50%^[13]。另外, 除半径外有人发现其他参量也可以作为第三参量, 如 1999 年 Willick 研究了距离在 9000~12000 km 间的 15 个 Abell 星系团中的旋涡星系, 发现其 TF 关系的残差和面亮度间存在弱相关, 说明面亮度可以作为 TF 关系的第三参量, 并且这个基本面表示为: $V \propto L^{0.28} I_e^{0.14}$ ^[62]。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, 或者说是第三参量的作用不显著^[61, 63, 65]。1997 年 Willick 等人用 MarkIII 数据库研究 TF 关系时发现, 其残差和速度展宽及星系形态间都没有相关关系^[65]。1999 年 Courteau 和 Rix 发现 TF 关系

在速度方向的残差 $\Delta \lg V$ 和光度-半径关系在半径方向的残差 $\Delta \lg R$ 之间的关系斜率为 $\Delta \lg V / \Delta \lg R \approx -0.19 \pm 0.05$, 远小于“最大盘”假设得到的 -0.5 (具体讨论见 4.2 节), 因此他们认为 TF 第三参量的作用不明显^[63]。2007 年 Pizagno 等人研究了 162 个 SDSS 星系在 g 、 r 、 i 、 z 波段的 TF 关系, 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^[66]。2007 年 Gnedin 等人研究了从 SDSS 中选出的 81 个盘主导星系^[67], 用恒星质量 M_* 代替 TF 中的光度, 即研究“恒星”TF 关系 ($\lg M_* - \lg V$), 认为旋涡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)。也就是说, 在旋涡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 (即 $\lg L - \lg V$) 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”TF 关系 (用重子质量代替光度, 即 $\lg M_b - \lg V$) 的第三参量^[68-70]。例如, 2002 年 Avila-Reese 等人模拟了在冷暗物质晕中形成的旋涡星系, 发现其“重子”TF 关系的残差和 $\lg M_b - \lg R$ 关系的残差的相关关系 (以下简称为重子残差关系, 类似地有恒星残差关系和光度残差关系) 的平均斜率为 $\Delta \lg V / \Delta \lg R \approx -0.35$, 表明 R 是“重子”TF 的第三参量, 但是如果为了与观测比较而用恒星质量或光度代替 M_b , 则这种残差相关性就会消失^[71]。在观测方面同样有类似的结果。2008 年 Avila-Reese 等人研究了 76 个正常的、非相互作用的旋涡星系, 发现其重子残差关系的斜率为 $\Delta \lg V / \Delta \lg R \approx -0.15 \pm 0.04$, 但是对于恒星残差关系和光度残差关系, 其相关性同样几乎消失 (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^[72]。

需要注意的是, 上面提到的研究中, 结果不一样的工作所用的方法一般不同: 认为旋涡星系基本面存在的研究, 几乎都是直接分析 $V-L-R$ 三个参量的关系及其弥散的大小; 而认

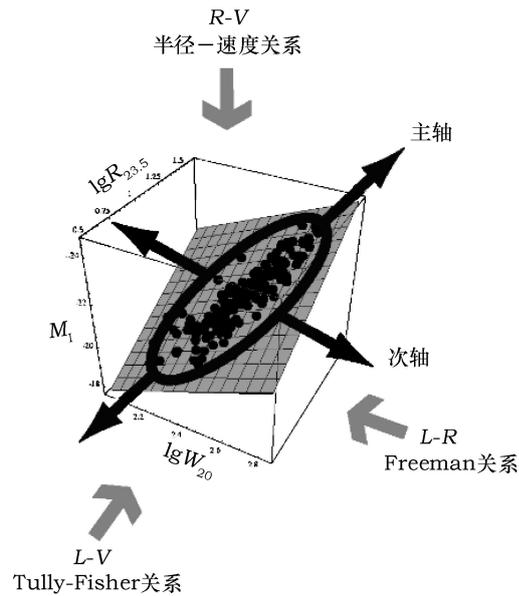


图 3 旋涡星系基本面的示意图
见 Koda 等人 2000 年文章^[15]。

为基本面不存在的研究,几乎都是分析 TF 关系的残差 $\Delta \lg V$ 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。并且我们认为通过研究残差关系确定旋涡星系基本面存在的方法更合理,因为 TF 关系的第三参量应该尽量独立于其另两个参量,而 $\lg R$ 并不独立于 $\lg W$ ^[69, 70, 72], 因此用 $\lg R$ - $\lg W$ 关系的残差 $\Delta \lg R$ 会更合适。另外,关于旋涡星系基本面是否存在还受一定的人为判定的影响,如在 Courteau 和 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。

4.2 旋涡星系基本面的理论意义

尽管在观测上旋涡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旋涡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 $V^2 \approx GM/R$, 因此星系半径就应该是重子 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 $\Delta \lg V$ 和 $\Delta \lg R$ 有强的负相关,并且 $\Delta \lg V/\Delta \lg R$ 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 TF 关系的内禀弥散 $\Delta \lg V$ 完全由重子质量固定时晕质量的弥散引起,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^[16]。

事实上,旋涡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,旋涡星系的盘是在暗物质晕提供的势阱下塌缩形成的^[73]。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, $V_{m,h}$ 是在位力半径 R_h 处的绕转速度,数值模拟的结果中 $a \approx 0.32 \sim 0.30$ ^[74, 75]。而位力半径和位力质量之间的关系可以简单地描述为 $R_h \propto M_h^{1/3}$ ^[73]。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 的关系、 R_h 和重子分布半径 R_b 的关系及 M_h 和重子质量 M_b 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_b 加以描述,即 $M_b = m_b M_h$ 。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 $R_b \propto \lambda R_h$, 其中 λ 为晕的自旋参数。对于 $V_{m,h}$ 和 V_m 的关系,其比值 $V_m/V_{m,h}$ 会随着盘的标长的减小(即 λ 的减小)和 m_b 的增加而增加。 λ 的减小和 m_b 的增加都会增加盘成分对于盘上的最大旋转速度 V_m 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_b 固定的情况下(即 M_b 固定),盘的半径 R_b 和其旋转速度 V_m 具有一定的负相关性,即重子 TF 关系中 $-0.5 < \Delta \lg V_m/\Delta \lg R_b < 0.0$, 而其相关程度则依赖于 m_b 、 λ 等模型参数的取值和分布^[16]。

对于恒星 TF 关系来说, λ 的减小不仅使星系的 V_m 增加和 R_s (恒星质量分布的半径)减小,同时也会使恒星质量 M_s 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_s 并不能作为第三参量引入而显著降低恒星 TF 关系的弥散。相对于恒星 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, 研究旋涡星系的 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旋涡星系的星族、动力学特征等形成和演化过程, 从而约束旋涡星系的形成和演化的理论模型^[76]。

5 总 结

自 1987 年早型星系的基本面被发现以来, 已经有大量的相关研究出现, 虽然具体的细节可能有所不同, 但是这些工作普遍的结论是:

(1) 早型星系的基本面在不同环境、不同观测波段中都是存在的, 并且这个关系至少可以扩展到红移 $z \approx 1$ 。

(2) 观测波段从可见光到近红外, 早型星系的基本面的斜率变化并不明显 (a 随着波长变长而缓慢增加, b 基本保持不变)。

(3) 早型星系的基本面随着红移的变化可以用星族的被动演化模型很好地解释。

(4) 早型星系的基本面的倾斜主要是由于不同质量的星系质光比不同及早型星系的结构和动力学不均匀引起的, 但是各个因素所占的比例问题目前还存在一定的争议。

对于晚型星系来说, 其基本面是否存在目前还存在一定的争议, 但是对其基本面的研究可以进一步深入理解晚型星系的形成和演化过程。

参考文献:

- [1] Djorgovski S, Davis M. ApJ, 1987, 313: 59D
- [2] Dressler A, Lynden-Bell D, Burstein D, et al. ApJ, 1987, 313: 42
- [3] Kelson D D, Illingworth G D, Tonry J L, et al. ApJ, 2000, 529: 768
- [4] Blakeslee J P, Lucey J R, Tonry J L, et al. MNRAS, 2002, 330: 443
- [5] Gavazzi G, Boselli A, Scodreggio M, et al. MNRAS, 1999, 304: 595
- [6] Pahre M A, Djorgovski S G, de Carvalho R R. AJ, 1998, 116: 1606
- [7] van Dokkum P G, Stanford S A. ApJ, 2003, 585: 78V
- [8] Gebhardt K, Faber S M, Koo D C, et al. ApJ, 2003, 597: 239G
- [9] Kelson D D, van Dokkum P G, Franx M. ApJ, 1997, 478: 13K
- [10] Treu T. ESASP, 1998, 429: 255T
- [11] Busarello G, Capaccioli M, Capozziello S, et al. A&A, 1997, 320: 415B
- [12] Faber S M, Dressler A, Davies R L, et al. nngp.proc, 1987: 175F
- [13] Han J, Deng Z, Zou Z, et al. PASJ, 2001, 53: 853H
- [14] 赵君亮. 天文学进展, 2010, 28: 164
- [15] Koda J, Sofue Y, Wada K. ApJ, 2000, 531L: 17K
- [16] Shen S, Mo H J, Shu C. MNRAS, 2002, 331: 259S
- [17] Falc n-Barroso J, Peletier R F, Balcells M. MNRAS, 2002, 335: 741F
- [18] Djorgovski S. ApJ, 1995, 438L: 29D
- [19] Fritsch C, Buchert T. A&A, 1999, 344: 749F
- [20] K rding E, Falcke H, Corbel S. A&A, 2006, 456: 439K
- [21] Scodreggio M, Gavazzi G, Belsole E, et al. MNRAS, 1998, 301: 1001
- [22] Mobasher B, Guzman R, Aragon-Salamanca A, et al. MNRAS, 1999, 304: 225
- [23] Hyde J B, Bernardi M. MNRAS, 2009, 396: 1171

- [24] Bernardi M, Sheth R K, Annis J, et al. *AJ*, 2003, 125: 1866
- [25] La Barbera F, Busarello G, Merluzzi P, et al. *ApJ*, 2008, 689: 913
- [26] La Barbera F, de Carvalho R R, de la Rosa I G, et al. *arXiv:0912.4558*: 2009
- [27] Jun H D, Im M. *ApJ*, 2008, 678: 97
- [28] Jeong H Y, Sukyoung K, Bureau M, et al. *MNRAS*, 2009, 398: 2028
- [29] Weinmann S M, Kauffmann G, van den Bosch F C, et al. *MNRAS*, 2009, 394: 1213W
- [30] de Carvalho R R, Djorgovski S. *ApJ*, 1992, 389: 49
- [31] D'Onofrio M, Fasano G, Varela J, et al. *ApJ*, 2008, 685: 875
- [32] Reda F M, Forbes D A, Hau G K T. *MNRAS*, 2005, 360: 693
- [33] Fritz A, Ziegler B L, Bower R G, et al. *MNRAS*, 2005, 358: 233F
- [34] Barbera F La, Lopes P A A, de Carvalho R R, et al. *MNRAS*, 2010, 108: 1361
- [35] van Dokkum, P. G., Franx, M., 1996, *MNRAS*, 281: 985
- [36] Jørgensen I, Frank M, Kjærgaard P. *MNRAS*, 1996, 280: 167
- [37] Jørgensen I, Chiboucas K, Flint K, et al. *ApJ*, 2006, 639L: 9J
- [38] Treu T, Stiavelli M, Bertin G, et al. *MNRAS*, 2001, 326: 237
- [39] Treu T, Stiavelli M, Casertano S, et al. *ApJ*, 2002, 564: 13
- [40] Im M, Simard L, Faber S M, et al. *ApJ*, 2002, 571: 136I
- [41] van Dokkum P G, Franx M, Kelson D D, et al. *ApJ*, 1998, 504L: 17V
- [42] van Dokkum P G, Franx M, Kelson D D, et al. *ApJ*, 2001, 553L: 39V
- [43] van Dokkum P G, Ellis R S, *ApJ*, 2003, 592: 53V
- [44] Jørgensen I, Franx M, Hjorth J, et al. *MNRAS*, 1999, 308: 833J
- [45] de Vaucouleurs G. *JO*, 1948, 31: 113D
- [46] Caon N, Capaccioli M, D'Onofrio M. *MNRAS*, 1993, 265: 1013C
- [47] Trujillo I, Graham A W, Caon N. *MNRAS*, 2001, 326: 869T
- [48] Rusin D, Kochanek C S, Keeton C R, et al. *ApJ*, 2003, 595: 29R
- [49] Jiang G, Kochanek C S. *ApJ*, 2007, 671: 1568J
- [50] Ferreras I, Saha P, Burles S. *MNRAS*, 2008, 383: 857F
- [51] Dominik M. *MNRAS*, 2009, 393: 816
- [52] Bolton A S, Burles S, Treu T, et al. *ApJ*, 2007, 665: 105B
- [53] Sanders R H, Land D D, *MNRAS*, 2008, 389: 701S
- [54] Leier D. *MNRAS*, 2009, 400: 875L
- [55] Cappellari M, Bacon R, Bureau M, et al. *MNRAS*, 2006, 366: 1126C
- [56] Graham A, Colless M. *MNRAS*, 1997, 287: 221G
- [57] Bertin G, Ciotti L, Del Principe M. *A&A*, 2002, 386: 149B
- [58] Trujillo I, Burkert A, Bell E F. *ApJ*, 2004, 600: 39T
- [59] Faber S M, Jachson R E. *ApJ*, 1976, 204: 668
- [60] Tully R B, Fisher J R. *A&A*, 1977, 54: 661T
- [61] Tully R B, Verheijen M A W. *ApJ*, 1997, 484: 145T
- [62] Willick J A. *ApJ*, 1999, 516: 47W
- [63] Courteau S, Rix H W. *ApJ*, 1999, 513: 561C
- [64] Kodaira K. *ApJ*, 1989, 342: 122
- [65] Willick J A, Courteau S, Faber S M, et al. *ApJS*, 1997, 109: 333W
- [66] Pizagno J, Prada F, Weinberg D H, et al. *AJ*, 2007, 134: 945P
- [67] Gnedin O Y, Weinberg D H, Pizagno J, et al. *ApJ*, 2007, 671: 1115G
- [68] Firmani C, Avila-Reese V. *MNRAS*, 2000, 315: 457F
- [69] Zavala J, Avila-Reese V, Hernández-Toledo H, et al. *A&A*, 2003, 412: 633Z
- [70] Dutton A A, van den Bosch F C, Dekel A, et al. *ApJ*, 2007, 654: 27D
- [71] Avila-Reese V, Firmani C. *ASPC*, 2002, 275: 405A
- [72] Avila-Reese V, Zavala J, Firmani C. et al. *AJ*, 2008, 136: 1340A

- [73] Mo H J, Mao S, White S D M. MNRAS, 1998, 295: 319M
[74] Navarro J F, Frenk C S, White S D M. ApJ, 1996, 462: 563N
[75] Avila-Reese V, Colin P, Gottlöber S, et al. ApJ, 2005, 634: 51A
[76] Shen S, Wang C, Chang R, et al. ApJ, 2009, 705: 1496S

Fundamental Plane of Galaxies

WANG Cai-hong^{1,2}, WANG You-fen^{1,2}, SHEN Shi-yin¹, SHAO Zheng-yi¹

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The Fundamental Plane (FP) is an empirical scaling relation first found for the early-type galaxies, which is a tight correlation among the effective radius R_e , the central velocity dispersion σ_0 , and the mean surface brightness within the effective radius I_e . Since the measurements of σ_0 and I_e are independent of distance, the FP can be used as a distance indicator for early-type galaxies. Moreover, the FP provides a strong constraint on the models of the formation and evolution of the early-type galaxies, especially their stellar population and dynamical evolution.

This paper gives an overview of the FP study on early-type galaxies, including the observed FPs in different bands, the FPs of galaxies at different environments and redshifts. Although there is controversy over the changes of FP with observation band, the slope a of FP is believed to be changed, even if it is unnoticeable, and the slope b is a constant. Whether the FPs at different environments are different is also controversial. For the FP evolutionary, it is generally acknowledged that only the zero point c of the FP at mid-redshift is different from that of nearby galaxies.

We then review the theoretical explanations of the ‘tilt’ of FP relative to the prediction from the virial theorem. There may be three main reasons: the velocity dispersion of early-type galaxy can not be used to represent its total energy; the mass-luminosity ratios of galaxies with different masses are different; the early-type galaxies do not have unified structure and dynamics.

Finally, as a comparison, we also review the FP study of spiral galaxies, including both the observational and theoretical aspects. Although there is controversy over the existence of the FP of spiral galaxies on observation, its study is important on constraining the models of the formation and evolution of spirals.

Key words: early-type galaxies; Fundamental Plane; spiral galaxies