

同等质量下盘状星系的颜色 - 尺度关系*

付 炜^{1,2,3†} 常瑞香^{2,3†} 沈世银^{2,3} 张 波¹

(1 河北师范大学物理科学与信息工程学院 石家庄 050016)

(2 中国科学院上海天文台星系与宇宙学重点实验室 上海 200030)

(3 上海市星系与宇宙学半解析研究重点实验室 上海 200234)

摘要 挑选 Sloan 数字巡天第 7 次释放数据 (SDSS DR7) 的主星系样本中近邻的、面向的盘状星系作为星系样本, 统计研究了在恒星总质量相等的情况下盘状星系的颜色和尺度之间的相关性, 并对相关性的真实性进行了检验. 发现对于同等质量的盘状星系, $u-r$ 颜色与尺度相关性很弱, 而 $g-r$ 、 $r-i$ 、 $r-z$ 颜色与尺度负相关, 即星系的尺度越大, 颜色越蓝. 该结果意味着盘状星系的质量分布对其恒星形成历史影响很大, 物质分布越延展的星系, 其演化越慢.

关键词 星系: 演化, 星系: 旋涡, 星系: 统计

中图分类号: P 157; **文献标识码:** A

1 引言

在冷暗物质宇宙学框架下^[1], 早期均匀的宇宙背景中, 物质的密度涨落在引力不稳定性作用下被逐步放大, 形成许多团块, 即“暗晕”. 小的暗晕通过逐级并合, 形成更大尺度的暗晕. 起初, 暗晕中的暗物质和气体均匀混合, 气体由于热辐射而逐步冷却, 向中心塌缩形成气体盘, 并转化为恒星, 最终形成盘状星系.

在此基本框架下, 1998 年 Mo 等^[2](以下简称 MMW98) 详细研究了盘状星系的形成过程. 他们提出盘状星系的尺度依赖于其寄主暗晕的质量和角动量. 由于大质量暗晕中形成大质量星系, 这使得质量越大的星系, 其尺度也越大. 另外, 数值模拟的结果表明, 对于质量相同的暗晕, 其角动量呈正态分布. 由于星系的尺度还依赖于暗晕角动量大小, MMW98 的模型预言, 当形成的星系恒星总质量相等时, 星系的尺度在给定质量处呈正态分布. 该模型预言的星系尺度可以很好地与观测结果相符合.

值得注意的是, 盘状星系沿半径方向的物质分布近似服从自然指数函数, 当星系的恒星总质量相等时, 盘状星系尺度不同, 反映了星系在物质分布上的差异. 尺度较大的星系, 其物质分布较为延展; 而尺度较小的星系, 其物质分布则向中心聚集得更严重.

观测发现, 盘状星系的尺度与恒星总质量之间存在正相关关系 (通常被称为“尺度 - 质量关系”), 即恒星总质量越大的星系, 尺度也越大, 并且星系的尺度在给定恒星总质量

2010-04-26 收到原稿, 2010-05-12 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10803016 和 10833005) 资助

† fuwei@shao.ac.cn; crx@shao.ac.cn

处呈正态分布^[3]. 另外的一些研究结果表明, 盘状星系的颜色和恒星总质量之间存在“颜色-质量关系”, 即恒星总质量大的星系, 其颜色较红^[4]. 一般认为, 星系的颜色由其星族成分和尘埃共同决定. 利用颜色对盘状星系进行星族分析给出的结果表明: 质量不同的星系, 其星族成分也不同, 大质量星系的星族年龄较老、金属丰度较高^[4]. 遗憾的是, 到目前为止, 还没有工作从观测角度讨论, 当恒星总质量相等时, 星系的物质分布对星系星族成分(即星系的颜色)是否存在影响.

本文的研究目的在于收集一个盘状星系的样本, 从观测角度统计研究在恒星总质量相等的情况下, 盘状星系的物质分布对其星族成分的影响, 从而为盘状星系的形成和演化模型提供有效的信息和有力的观测约束. 考虑到恒星总质量相等时, 盘状星系的尺度反映了星系盘沿半径方向的物质分布情况, 同时星系的颜色又由其星族成分决定, 我们需考察在恒星总质量相等的条件下, 盘状星系的颜色和尺度之间的相关性, 即“同等质量下盘状星系的颜色-尺度关系”.

2 数据样本

基于 SDSS DR7 的主星系样本^[5], 我们选取其中近邻的面向盘状星系作为本文的星系样本. 下面介绍本文星系样本的生成过程.

为了保证星系可以得到较为准确的测光信息, 我们剔除了红移 $z \geq 0.06$ 的远距离星系. 对于距离太近的星系, 其本动速度会导致无法利用红移对星系的距离进行准确测定, 所以, 我们同时剔除了 $z \leq 0.004$ 的星系. 另外, 考虑到像星系这样的延展光源位于图像的边缘将严重影响其测光质量, 我们还去除了位于图像边缘的星系.

对于星系形态的筛选, 通常人们把 $fracdev = 0.5$ ^[6] 作为早型星系和晚型星系的划分标准, 其中 $fracdev$ 为星系面亮度轮廓的最佳拟合中 de Vaucouleurs 轮廓^[7] 所占的比例. 本文为了筛选出核球成分较小、盘结构占主导的盘状星系, 采用了较为严格的判据—r 波段 $fracdev < 0.1$.

盘状星系的颜色会受到自身尘埃的影响, 而面向的盘状星系受到的影响最小^[8-9], 因此我们只选取面向的盘状星系作为我们的样本星系, 要求星系的 r 波段视轴比 $b/a > 0.75$.

为了保证星系颜色测量的准确性, 同时也利于得到更明显的结果, 我们除去了颜色观测误差较大的星系, 方法如下: 将颜色误差分布最为密集的误差值定义为 $error_0$, 然后去除星系误差大于 $5error_0$ 的星系. 于是, 我们将 u-r 误差大于 0.320、g-r 误差大于 0.065、r-i 误差大于 0.050、r-z 误差大于 0.175 的星系去除掉.

除此之外, 为了保证星系的尺度可以得到准确的度量, 我们要求样本中盘状星系的半光半径 r_{50} 满足 $r_{50} \geq 1.5$ arcsec.

利用上面的判据, 我们最终得到了本文的星系样本, 样本中共包含 7 959 个近邻面向的盘状星系, 并且这些星系都具有较好的测光质量. 表 1 是我们选取样本所采用的各种判据的小结, 表中同时给出了各判据剔除的星系的数目.

关于星系的基本观测量, 本文用到的视星等为 SDSS 给出的 Petrosian 星等^[10], 并对其进行了银河系消光改正和 K 改正, 其中银河系消光改正取自 SDSS 释放的测光数据,

K 改正正是利用 Blanton 等^[11] 给出的 K 改正程序 (kcorrect.v4_1_4) 计算得到的. 关于颜色, 我们选用 u-r、g-r、r-i、r-z 4 个颜色. 选用 r 波段作为基准波段的原因是 SDSS 在 r 波段测光质量最好. 星系的尺度使用对数形式的半光半径, 即 $\lg r_{50}$, 原因是 $\lg r_{50}$ 在给定质量处呈正态分布^[3], 其中 r_{50} 的单位是 kpc. 星系的恒星总质量用 $\lg(M_*/M_\odot)$ 表示, 其中 M_* 为星系的恒星总质量, M_\odot 为太阳质量. M_* 取自 Kauffmann 等^[12] 对 SDSS DR7 给出的最新结果.

表 1 建立本文样本所使用的判据

Table 1 Criteria used in constructing the sample

Number	Parameter	Criterion	Number of removed galaxies	Number of remained galaxies
1	$fracdev$ in r band	$fracdev < 0.1$	519804	122116
2	b/a in r band	$b/a > 0.75$	86931	35185
3	redshift	$0.004 < z < 0.06$	25746	9439
4	r_{50} in r band	$r_{50} \geq 1.5$ arcsec	150	9289
5	flag edge	edge	40	9249
6	error of colors	$error \leq 5error_0$	1290	7959

样本建立后, 我们考察了样本的基本情况, 图 1 给出了本文样本星系的一些基本参数的统计直方图, 纵轴为归一化后的星系数目. 图左下角和右下角两图分别示意了星系 r 波段 Petrosian 星等及绝对星等的分布情况.

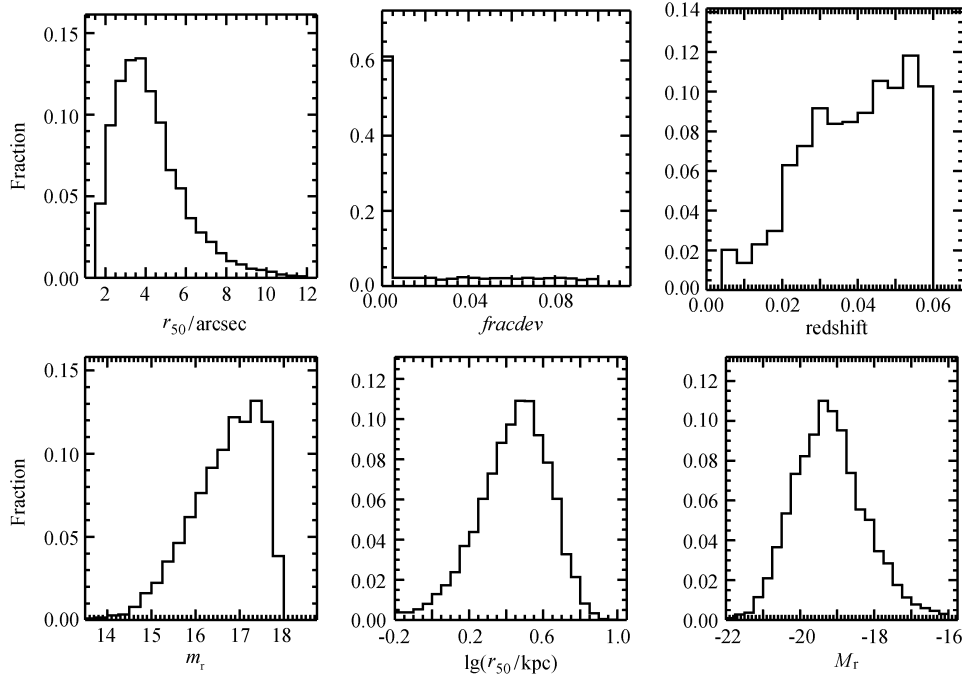


图 1 星系样本的一些基本参数的统计直方图

Fig. 1 Histogram distribution of some parameters in our sample

3 结果

为了考察同等质量下盘状星系的颜色 - 尺度关系, 我们需要考虑盘状星系的颜色、尺度、恒星总质量之间的两个相关关系: 颜色 - 质量关系和尺度 - 质量关系. 图 2 给出样本星系在尺度、颜色、恒星总质量的参数空间内的分布情况. 图中轮廓线从内到外依次表示包含样本中 20%、40%、60%、80%、90% 的星系的区域. 三角形及误差棒表示星系的颜色或尺度在给定星系质量处的中位值和弥散, 图右侧误差棒表示星系颜色的平均观测误差. 从图 2 中, 我们可以看到: 恒星总质量越大的星系颜色越红, 同时尺度也越大. 换句话说, 本文样本表现出盘状星系所具有的颜色 - 质量关系和尺度 - 质量关系.

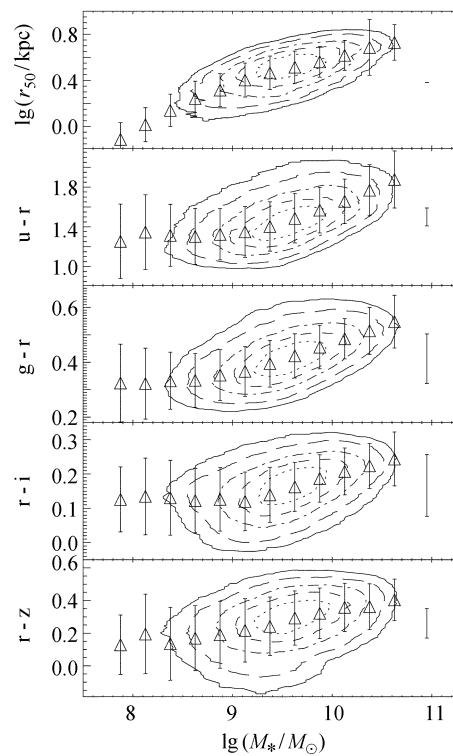


图 2 盘状星系的颜色 - 质量关系和尺度 - 质量关系

Fig. 2 The color - stellar mass relations and size - stellar mass relation of disc galaxies

我们期望得到在恒星总质量相同的情况下星系的尺度和颜色的相关关系, 即星系的恒星总质量相等时, 物质分布对星系颜色的影响. 为了实现此目的, 我们分两步来实现:

第 1 步: 定义参数相对尺度 $\Delta \lg r_{50}$ 和相对颜色 Δcolor , 用于描述某个星系的尺度 (或颜色) 相对于与该星系具有相等或相近恒星总质量的星系群体的尺度 (或颜色) 中位值

的偏差. 具体做法如下: 对于 $\Delta \lg r_{50}$, 在图 2 最上图, 即样本星系在“尺度 - 质量”参数空间分布图中, 将星系样本按照星系的恒星总质量从大到小分成若干 bin, 然后求出每个 bin 中星系尺度的中位值, 即图 2 中最上图中三角形所示的值. 对样本中某个星系来说, 其 $\Delta \lg r_{50}$ 为星系的尺度与所在 bin 的尺度的中位值的差. $\Delta \lg r_{50} > 0$ 说明该星系的尺度比其所在 bin 的尺度的中位值要大; 相反, $\Delta \lg r_{50} < 0$ 说明该星系的尺度比其所在 bin 的尺度的中位值要小. 另外, 为了保证中位值比较可靠地表征星系在给定星系恒星总质量处的星系尺度, 我们舍去了星系数目少于 40 个的 bin. 按照同样的方法, 我们计算了星系的 Δcolor . 同理, $\Delta \text{color} > 0$ 说明该星系的颜色比其所在 bin 的颜色的中位值要红, $\Delta \text{color} < 0$ 说明该星系的颜色比其所在 bin 的颜色的中位值要蓝.

第 2 步: 考察相对尺度和相对颜色之间的相关性. 在第 1 步中, 对样本中每一个星系, 我们都可以按照第 1 步中的方法得到其相对颜色和相对尺度. 现在, 我们对样本星系的相对颜色和相对尺度进行统计研究, 考察两个参量间的相关性. 图 3 给出样本星系在相对尺度 ($\Delta \lg r_{50}$) 和相对颜色 ($\Delta(u-r)$ 、 $\Delta(g-r)$ 、 $\Delta(r-i)$ 、 $\Delta(r-z)$) 空间内的分布情况, 图中轮廓线从内到外依次表示包含样本中 20%、40%、60%、80%、90% 的星系的区域. 我们同时计算了参量间的秩相关系数, 4 个相对颜色 ($\Delta(u-r)$ 、 $\Delta(g-r)$ 、 $\Delta(r-i)$ 、 $\Delta(r-z)$) 与相对尺度 ($\Delta \lg r_{50}$) 间的秩相关系数分别为 -0.040、-0.210、-0.488 和 -0.499.

由图 3 可见, 星系的相对尺度 ($\Delta \lg r_{50}$) 越大, 其相对颜色 $\Delta(u-r)$ 变化越不明显, 而 $\Delta(g-r)$ 、 $\Delta(r-i)$ 、 $\Delta(r-z)$ 越蓝. 这说明当星系的恒星总质量相等时, 星系的尺度越大, 其颜色越蓝.

另外, 我们将星系样本按照恒星总质量从小到大分为 6 个子样本, 并对各子样本的这一相关关系进行了考察, 表 2 给出各子样本星系的恒星总质量以及相对颜色与相对尺度的秩相关系数. 该结果表明: 对任何质量的盘状星系, 同等质量盘状星系的颜色 - 尺度关系仍然成立.

表 2 不同质量范围内的盘状星系的同等质量下颜色 - 尺度关系

Table 2 Color - size relations of disc galaxies with similar stellar masses in different stellar mass ranges

Range of M_*	Spearman relation test between Δcolor and $\Delta \lg r_{50}$			
	$\Delta(u-r)$	$\Delta(g-r)$	$\Delta(r-i)$	$\Delta(r-z)$
$7.75 \leq \lg M_*/M_\odot < 8.25$	-0.085	-0.354	-0.388	-0.383
$8.25 \leq \lg M_*/M_\odot < 8.75$	-0.109	-0.252	-0.433	-0.366
$8.75 \leq \lg M_*/M_\odot < 9.25$	-0.046	-0.164	-0.477	-0.474
$9.25 \leq \lg M_*/M_\odot < 9.75$	-0.093	-0.230	-0.520	-0.503
$9.75 \leq \lg M_*/M_\odot < 10.25$	0.021	-0.240	-0.547	-0.631
$10.25 \leq \lg M_*/M_\odot \leq 10.75$	0.154	-0.137	-0.487	-0.472

4 结果的检验

我们的结果表明：在恒星总质量相等的情况下，盘状星系的尺度与颜色存在相关性，即同等质量的盘状星系存在颜色 - 尺度关系。但是还有一个疑问：我们所得到的颜色 - 尺度关系是反映了盘状星系存在的一种内禀的相关，还是盘状星系的尺度 - 质量关系和颜色 - 质量关系产生的结果呢？

为了回答这个问题，我们构造了一个“模拟样本”，对上述结果进行了模拟检验。模拟样本具有下面两个特征：模拟样本表现尺度 - 质量关系和颜色 - 质量关系；对于模拟样本中的任何一个星系，其颜色和尺度来源于随机赋值，而不是来源于对该星系的观测结果。如果同等质量下颜色 - 尺度关系仅仅是由尺度 - 质量关系和颜色 - 质量关系而产生的结果，则模拟样本完全可以“再现”真实样本的结果；否则，模拟样本将不可“再现”真实样本的结果。

我们建立模拟样本的具体方法如下：首先，将星系样本按照质量从大到小分成若干 bin，同一个 bin 中的星系具有相同的恒星总质量。然后，对于同等质量的星系，将尺度与颜色的对应关系随机打乱，如表 3 所示。例如：真实样本中 1 号星系的尺度为 $(\lg r_{50})_1$ ，相对颜色为 color_1 ；而在模拟样本中 1 号星系的相对尺度为 $(\lg r_{50})_1$ ，相对颜色为 color_4 。模拟样本里的每一个星系同真实样本一样，都具有质量、尺度、颜色等参量，但是不同的是模拟样本的尺度与颜色之间没有任何内在的关联，只是在形式上，模拟样本统计上满足与真实样本相同的尺度 - 质量关系和颜色 - 质量关系。

表 3 同等质量的星系建立模拟样本的方法演示

Table 3 Method of constructing artificial sample for galaxies with similar stellar masses

Galaxy number	$\lg r_{50}$ of real sample	Color of real sample	$\lg r_{50}$ of artificial sample	Color of artificial sample
1	$(\lg r_{50})_1$	color_1	$(\lg r_{50})_1$	color_4
2	$(\lg r_{50})_2$	color_2	$(\lg r_{50})_4$	color_3
3	$(\lg r_{50})_3$	color_3	$(\lg r_{50})_3$	color_1
4	$(\lg r_{50})_4$	color_4	$(\lg r_{50})_2$	color_5
5	$(\lg r_{50})_5$	color_5	$(\lg r_{50})_5$	color_2
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•

按照与真实样本同样的方法，我们首先计算出模拟样本中星系的相对颜色和相对尺度，然后考察其相对颜色和相对尺度的相关关系。图 4 展示了模拟样本给出的结果。对于模拟样本，我们发现：相对颜色 ($\Delta(u-r)$ 、 $\Delta(g-r)$ 、 $\Delta(r-i)$ 、 $\Delta(r-z)$) 和相对尺度 ($\Delta \lg r_{50}$) 之间的相关性都很弱，秩相关系数分别为 -0.007、-0.010、-0.020 和 -0.009。可见，模拟星系样本不可再现真实样本的结果。这说明实际星系样本所表现的同等质量下的颜色

- 尺度关系是真实的.

另外, 我们对任何质量的盘状星系表现出的这一相关关系的真实性也进行了检验, 检验结果表明对任何质量的盘状星系这一相关关系亦是真实的.

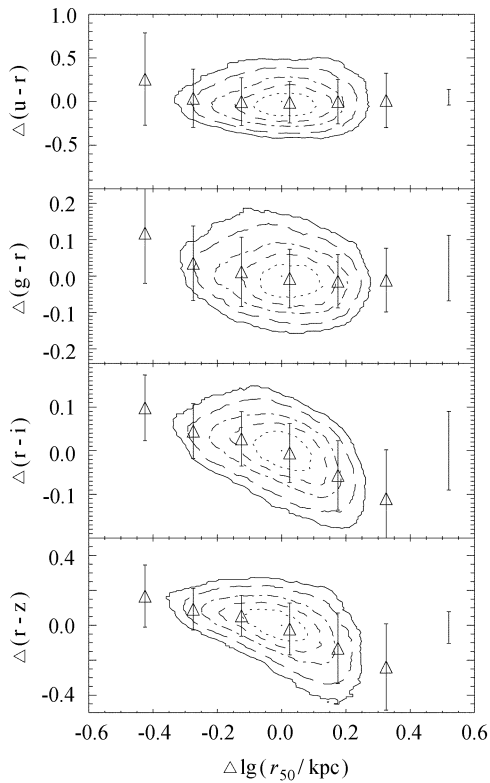


图 3 真实样本给出的结果
Fig. 3 The results of the real sample

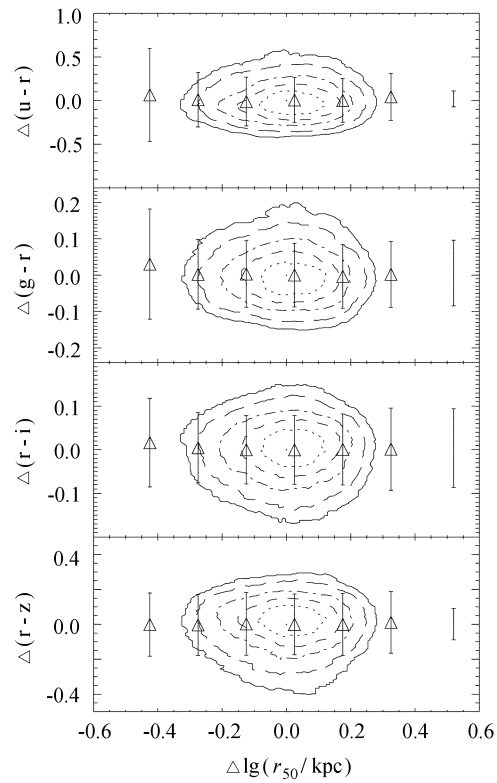


图 4 模拟样本给出的结果
Fig. 4 The results of the artificial sample

5 结论

观测结果表明, 盘状星系的尺度和颜色同时与星系的恒星总质量正相关, 表现为颜色 - 质量关系和尺度 - 质量关系. 为了研究同等质量的盘状星系是否存在颜色 - 尺度关系, 我们收集一个近邻的、面向的盘状星系的样本, 定义了在同等质量条件下描述星系的颜色和尺度的相对尺度和相对颜色. 通过统计相对颜色与相对尺度之间的相关性, 得到了同等质量盘状星系的颜色 - 尺度关系, 即恒星总质量相等时, 尺度越大的星系, 其 $u-r$ 颜色变化越不明显, 而 $g-r$ 、 $r-i$ 和 $r-z$ 颜色越蓝. 我们的结果表明: 当恒星总质量相等时, 盘状星系的物质分布对其星族成分 (即星系的颜色) 存在一定的影响, 为盘状星系的形成和演化模型提供有效的观测约束.

为了证明同等质量下颜色 - 尺度关系的真实性, 我们构造了一个模拟样本. 模拟样本的结果说明: 同等质量下颜色 - 尺度关系不是由尺度 - 质量关系和颜色 - 质量关系产

生的结果, 而是反映了同等质量下盘状星系的颜色和尺度之间存在内禀的相关性.

同等质量下 $g-r$ 、 $r-i$ 、 $r-z$ 颜色与尺度的相关性较强, 尤其是最红的 $r-z$ 颜色, 而 $u-r$ 颜色与尺度的相关性则很弱. 这可能是由于星系受到自身尘埃消光的影响, 而 u 波段受到的影响最严重, 这种影响可能会破坏同等质量下颜色与尺度间微弱的相关关系; z 波段受到的影响较小, 使得这一相关关系得以保留下来.

对于本文所讨论的同等质量下盘状星系的颜色 - 尺度关系的成因, 我们给出如下两种可能的解释:

(1) 星系的颜色不同是因为星系的尺度不同这个内在物理因素引起的. 一种可能是尺度越小的星系由于质量面密度更高, 使其演化更充分, 从而使其星族的平均年龄更老, 其颜色也就更红; 另一种可能是星系寄主暗晕的维里半径随着红移演化, 高红移的星系其寄主暗晕的维里半径较小. 假设盘的尺度正比于寄主暗晕的维里半径, 那么高红移形成(年龄较老)的星系的尺度自然更小^[13]. 年龄越老的盘星系其尺度可能越小, 这与本文给出的测量结果一致. 尽管如此, 我们曾经尝试利用星族合成的方法进行定量的解释, 即考察盘星系的星族与其尺度的依赖关系. 但是我们的结果表明: 仅仅利用 SDSS 光学波段的颜色进行星族分析, 很难得到可靠的星族成分信息. 也就是说虽然目前我们测量到越小的星系其颜色更红, 但还没有直接的证据表明其年龄越老.

(2) 这种颜色和尺度的相关性是一种选择效应. 比如, 旋涡星系存在负的径向颜色梯度, 可以使得其测量的尺度在蓝波段偏大. 如果 $r-z$ 颜色越蓝的星系也对应了径向颜色梯度越负(外围越蓝)的星系, 那么我们在 r 波段测量得到的蓝星系的尺度也将比红星系的尺度偏大, 从而“人为”造成我们观察到的这种较弱的颜色 - 尺度相关关系. 但是, 本文利用的是星系的总的颜色, 而没有颜色梯度的信息, 因此也还没有直接证据表明越蓝的星系其梯度也越大. 对颜色梯度造成的星系尺度测量的偏差效应, 还有待于进一步的研究.

致谢 此研究使用了美国 Sloan 数字巡天的观测数据.

参 考 文 献

- [1] White S D M, Rees M J. MNRAS, 1978, 183: 341
- [2] Mo H J, Mao S, White S D M. MNRAS, 1998, 295: 319
- [3] Shen S, Mo H J, White S D M, et al. MNRAS, 2003, 343: 978
- [4] Chang R, Shen S, Hou J, et al. MNRAS, 2006, 372: 199
- [5] Strauss M A, Weinberg D H, Lupton R H, et al. AJ, 2002, 124: 1810
- [6] Sorrentino G, Radovich M, Rifatto A. A&A, 2006, 451: 809
- [7] de Vaucouleurs G. Handbuch der Physik. Berlin: Springer, 1959: 53-311
- [8] Shao Z, Xiao Q, Shen S, et al. ApJ, 2007, 659: 1159
- [9] Unterborn C T, Ryden B S. ApJ, 2008, 687: 976
- [10] Petrosian V. ApJ, 1976, 209: L1
- [11] Blanton M R, Roweis S. AJ, 2007, 133: 734
- [12] Kauffmann G, Heckman T M, White S D M, et al. MNRAS, 2003, 341: 33
- [13] Cameron E, Driver S P. MNRAS, 2007, 377: 523

Color-size Relations of Disc Galaxies with Similar Stellar Masses

FU Wei^{1,2,3} CHANG Rui-xiang^{2,3} SHEN Shi-yin^{2,3} ZHANG Bo¹

(1 *College of Physics Science and Information Technology, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016*)

(2 *Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(3 *Key Laboratory for Astrophysics, Shanghai 200234*)

ABSTRACT To investigate the correlations between colors and sizes of disc galaxies with similar stellar masses, a sample of 7959 local face-on disc galaxies is collected from the main galaxy sample of the Seventh Data Release of Sloan Digital Sky Survey (SDSS DR7). Our results show that, under the condition that the stellar masses of disc galaxies are similar, the relation between u-r and size is weak, while g-r, r-i and r-z colors decrease with disk size. This means that the color-size relations of disc galaxies with similar stellar masses do exist, i.e., the more extended disc galaxies with similar stellar masses tend to have bluer colors. An artificial sample is constructed to confirm that this correlation is not driven by the color-stellar mass relations and size-stellar mass relation of disc galaxies. Our results suggest that the mass distribution of disk galaxies may have an important influence on their stellar formation history, i.e., the galaxies with more extended mass distribution evolve more slowly.

Key words galaxies: evolution, galaxies: spiral, galaxies: statistics