

文章编号: 1000-8349(2005)04-0371-08



晚型旋涡星系盘的颜色梯度

李化南, 邵正义, 肖泉宝, 刘成则

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 从 Sloan 巡天第二批释放的数据 (Sloan Digital Sky Survey, Data Release Two) 中选择了 395 个在 r 波段亮于 15 mag 的晚型旋涡星系作为样本, 对样本星系的表面亮度轮廓进行一维两成分 (核球与盘) 拟合, 并着重讨论了盘的颜色梯度, 分别用 $\Delta c/\Delta R$ 和 $\Delta c/\Delta \lg R$ 两种形式来拟合。结果表明, 对于波长相距较大的颜色 $r-z$ 和 $g-z$, 颜色梯度更符合 $\Delta c/\Delta R$ 为常数的线性变化形式, 而 $g-r$ 则符合 $\Delta c/\Delta \lg R$ 为线性的情形; 用 $\Delta c/\Delta \lg R$ 拟合的梯度值分别为 $\Delta(g-r)/\Delta \lg R = -0.152 \pm 0.010$, $\Delta(r-z)/\Delta \lg R = -0.377 \pm 0.019$, $\Delta(g-z)/\Delta \lg R = -0.590 \pm 0.026$, 均与前人的研究结果一致。

关键词: 天体物理学; 颜色梯度; 一维两成分拟合; 旋涡星系; 盘

中图分类号: P157 **文献标识码:** A

1 引 言

星系的颜色分布能够直观地反映出星族的变化以及尘埃在星系中的分布情况, 也是用来约束星系形成和演化机制的有效手段^[1,2]。对于旋涡星系来说, 径向的颜色梯度是其盘的形成及化学演化历史的反映, 这对于研究盘星系的形成和演化具有十分重要的意义。大量观测表明, 颜色梯度在旋涡星系中普遍存在^[3], 几乎所有的旋涡星系都随着半径的增加越来越蓝^[4,5]。de Jong^[4]、de Jong 和 van der Kruit^[5] 在研究 86 个面向 (face-on) 旋涡星系的光学和近红外颜色梯度时, 通过分析双色图得出结论: 这些星系的盘的颜色梯度应该由年龄和金属度梯度两方面因素来解释, 盘外部区域的恒星更年轻、金属度更低, 尘埃红化则对颜色梯度影响很小。Cunow^[6] 在对活动与非活动的旋涡星系研究中发现, 这两类星系在近红外波段的颜色梯度都很小, 没有明显的不同; 但在光学波段, 非活动的旋涡星系有明显的颜色梯度, 而活动的旋涡星系的颜色梯度不明显, 这些梯度很可能是由恒星盘内禀的颜色梯度

收稿日期: 2005-04-22; 修回日期: 2005-05-11

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (10273016、10333060)

和尘埃两方面引起的。由此可见,旋涡星系的盘的颜色梯度是非常值得探讨的问题。

事实上,星系的颜色梯度并没有一个统一的定义,早期研究多采用 $\Delta c/\Delta R$ 形式^[7,8],而近年来的工作则更多地采用 $\Delta c/\Delta \lg R$ 形式^[9,10]。至于它在哪种形式下会更好地符合线性关系,这与星系或星系中盘形成的物理过程不无关系。从最原始的定义 $\Delta c/\Delta R$ 来看,若仅用一个梯度值来对整个星系进行描述,实际上暗含了颜色梯度与 R 无关的假设;而如果采用 $\Delta c/\Delta \lg R$ 形式,相应的假设则是 $\Delta c/\Delta R \propto R^{-1}$,即越往外颜色变化越缓慢。另一方面,以前的研究由于受观测技术等因素的限制,很难获得大样本,所以对单个星系作颜色梯度研究的比较多^[11,12],而单个星系之间的颜色梯度差异可能是非常大的。Gadotti 和 Anjos^[13] 虽然用了 257 个 Sbc 星系作颜色梯度研究,但是他们的数据样本来自 3 种不同时间、不同仪器的观测,存在不同的选择效应和系统差,所以并不是一个很好的统计样本。要对某类星系的颜色梯度作统计上的研究,最好是有一个大的、有很好测光资料的样本,如 Sloan 数字巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS)。

本文正是基于 SDSS 多色测光资料,对晚型旋涡星系盘的颜色梯度进行统计研究的。具体方法是将所有星系在不同半径处的颜色观测值经归一化处理后叠放在一起,即构造一个“标准”星系(详见 2.3 节和图 5),以避免单个星系之间颜色梯度差异较大的问题,从而得到一类星系的盘的颜色变化趋势,对其他方面的研究也提供一定的参考。

第 2 节对 SDSS 测光数据作简要介绍,对面向旋涡星系表面亮度的一维两成分拟合作说明,并对样本的选择和样本数据的预处理作详细介绍;第 3 节给出颜色梯度的拟合结果,并分析了颜色梯度的两种表达形式;最后一节对结果进行了讨论。

2 样本选择

2.1 SDSS 测光数据介绍

SDSS 的测光观测采用漂移扫描模式在 5 个光学波段进行巡天。这 5 个光学波段分别是 u 、 g 、 r 、 i 、 z ,相应中心波长为 3540、4770、6230、7630、9130 Å。详细信息可以参考文献[14]。本文所用的数据来源于 SDSS 2004 年 3 月第二批释放的数据(Data Release Two, DR2),它的测光覆盖了北天 3324 平方度天区。SDSS 释放的数据中给出了星系在 5 个波段的表面亮度轮廓,且分别用 15 个不同半径处圆环内的平均表面亮度 (ProfMean) 表示,具体的环半径可参考文献[14]中的表 7。基于 ProfMean 数据,可以考察单个星系光度和颜色的分布情况。另外,SDSS 还提供了单个星系的聚度 (concentration, $C = R_{90}/R_{50}$, 这里 R_{90} 和 R_{50} 分别指包含 90% 和 50% Petrosian 流量处的半径)、短长轴比 (b/a)、星系的总光度等许多其他重要测光参数^[14]。

SDSS 测光虽然有 5 个光学波段,但由于 u 波段露光太浅^[14],而 i 波段又存在薄片 CCD 的红晕效应影响^[15],不利于颜色分布研究,所以我们仅选择 g 、 r 、 z 波段,分别对 $g-r$ 、 $r-z$ 和 $g-z$ 作颜色梯度研究。

2.2 面向星系的一维两成分拟合

一般而言,旋涡星系在结构上可分为相对较红的核球和较蓝的盘^[9],其表面亮度轮廓分别服从 de Vaucouleurs 形式(简称 $R^{1/4}$ 律)

$$I_b(R) = I_{b,0} \exp \left[-7.67(R/R_b)^{1/4} \right]$$

和指数分布形式

$$I_d(R) = I_{d,0} \exp(-1.68R/R_d),$$

其中 $I_{b,0}$ 和 $I_{d,0}$ 分别为核球和盘的中心表面亮度, R_b 和 R_d 分别为核球和盘的半光度半径 (或称有效半径) [16]。整个星系的表面亮度分布就是这两个成分的叠加, $I(R) = I_d(R) + I_b(R)$ 。对星系核球和盘成分的有效区分是研究星系盘颜色梯度的一个必要条件。对于面向星系, 我们可以直接利用 SDSS 给出的一维星系表面亮度轮廓来拟合 4 个结构参数 ($I_{b,0}$, R_b , $I_{d,0}$, R_d)。当然在轮廓拟合过程中我们还考虑了不同波段的点扩展函数 (Point Spread Function, PSF) 的影响。在核球与盘两成分的假设前提下, ($I_{b,0}$, R_b , $I_{d,0}$, R_d) 这 4 个参数的最佳拟合值完全决定了整个星系的径向结构。由此, 我们还可以对星系的其它细节作进一步的分析, 比如: 核球和盘的光度比 (bulge-to-disk ratio, B/D)、每个环内核球成分和盘成分的光度比等。此外, 在对多个波段分别进行拟合后, 还能得到核球颜色、盘颜色等信息。

2.3 样本选择和数据预处理

我们首先选出在 r 波段亮于 15 mag 并且具有光谱测量的 5068 个星系, 从中挑出 1543 个短长轴比大于 0.75 的面向星系作核球和盘两成分拟合。这样选择样本主要基于以下 3 方面考虑: 第一, 选择较亮的星系是因为它们有较准确的测光, 不仅如此, 较亮的星系一般处于较低红移处, 因此其视半径也相对较大, 从而在径向方向的结构可以得到有效区分; 第二, 由于尘埃主要也呈盘状分布, 面向星系受尘埃的影响最小; 第三, SDSS 的圆环测光能够很好地反映面向星系径向的光度分布, 而无需进行倾角改正。

根据 r 波段对结构参数进行拟合后, 我们同时用 $-2.5 \lg(B/D) > 0.5$ 和聚度 $C < 2.5$ 为条件 [17] 来选取旋涡星系 (参见图 1、图 2), 共找到 480 个星系, 约占总数的 1/3。因为 r 波段是 SDSS 进行测光处理的基准波段和选择光谱样本的参考波段, 所以在以下讨论中, 如果不加特殊说明都是指 r 波段。这些星系基本上都是 $S_b \sim S_d$ 较晚型的旋涡星系。同样, 我们可以

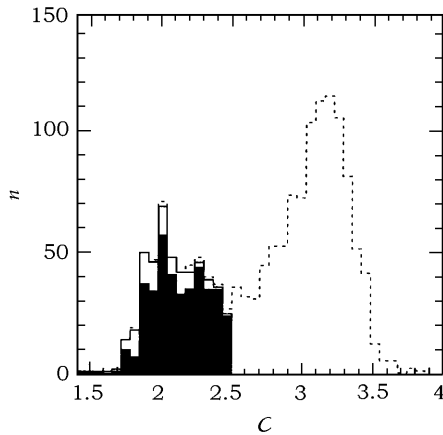


图 1 聚度 C 的分布直方图

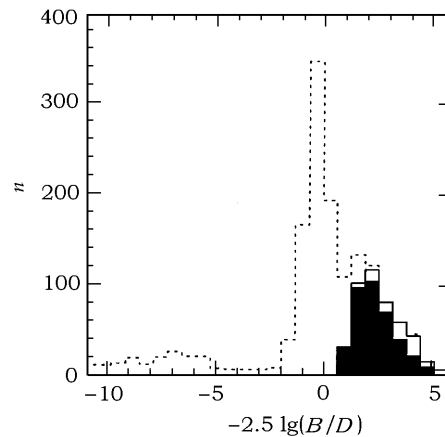


图 2 核球与盘光度比的分布直方图

在 g 波段和 z 波段对星系的结构进行拟合。不同波段之间结构参数的差异反映出星系中不同结构成分有不同的颜色。比如, 在蓝波段上看盘比较大, 而在红波段上是核球更突出。但是, 结构参数间过大的区别则有可能是拟合本身带来的问题, 毕竟我们只用了一维信息, 而且对于大部分星系来说只有 10 或 11 个圆环的测光数据。为了纯净样本, 我们剔除了在 g 、 r 、 z 波段拟合后参数 B/D 明显不相符的星系, 最终保留了 395 个样本星系。图 1 和图 2 分别是 r 波段的聚度 C 与 B/D 的分布直方图。其中虚线代表所有近邻的面向星系, 实线是用 r 波段的 C 和 B/D 选出的晚型旋涡星系 (480 个), 而阴影是最终选定的 395 个星系的分布情况。可以看出聚度 $C = 2.5$ 和 $-2.5 \lg(B/D) = 0.5$ 处是这两个参数两个峰值的分界。

图 3 和图 4 分别是星系的半光度半径 R_{50} 和红移 z 的分布直方图。其中实线和阴影部分含义同图 1 和图 2。从这两幅图可以看出, 我们这样纯净样本并没有带来系统偏差, 也就是说, 最终的样本并没有选择效应。

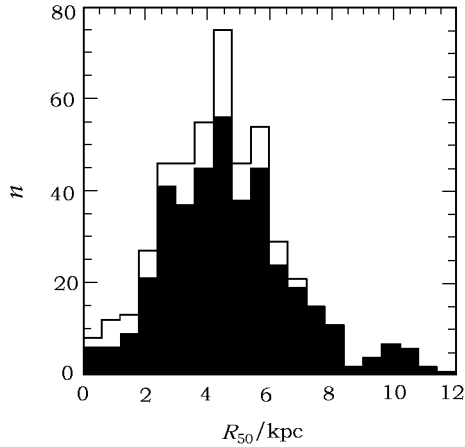


图 3 星系半光度半径 R_{50} 的分布直方图

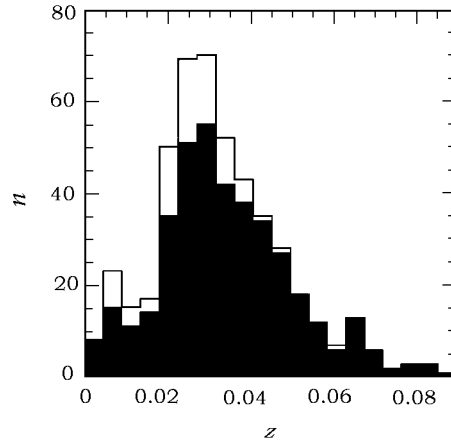


图 4 星系红移 z 的分布直方图

有了星系的结构参数, 我们就可以讨论在给定圆环内的核球与盘的光度比了。为了尽量减小核球的影响, 我们只选取在 r 波段的核球成分小于 10% 的环作为盘成分来研究盘的颜色梯度。

要对整个星系样本进行统计分析, 数据之间的归一化处理是必须的。这包括两个方面: 首先, 是尺度上的归一。我们将每个星系的半径都归一到它们各自的盘的有效半径 R_d (r 波段)。事实上, 将星系的半径归一到直接的观测量 R_{50} 也不会改变我们的结论。其次, 在颜色上也可以进行定标。我们将星系中每一圆环的颜色都归一到这个星系的盘的颜色。比如, 若有一个圆环的颜色等于整个星系的盘的颜色, 那么这个圆环的颜色值就设为零。由于每个星系最中心的 4 个环的测光受 PSF 影响较大, 而且不同波段之间的 PSF 也有所差异, 不同波段的测光值并不来源于完全相同的部分, 所以我们放弃了中心的 4 个环。事实上, 由 PSF 去掉的环大部分是已被 $B/D > 0.1$ 这一条件所剔除的。而且, 我们还去除了作一维两成分拟合时实测与模型光度的偏差在 3σ 以上的环 (这些环的数目约占总环数的 1.7%)。经过上述数据处理, 最终 $g-r$ 、 $r-z$ 和 $g-z$ 分别剩下了 332、331 和 322 个星系作颜色梯度研究。

为了直观地表达上述数据选择过程, 我们以 $r-z$ 颜色为例, 给出了我们去除的环和最终

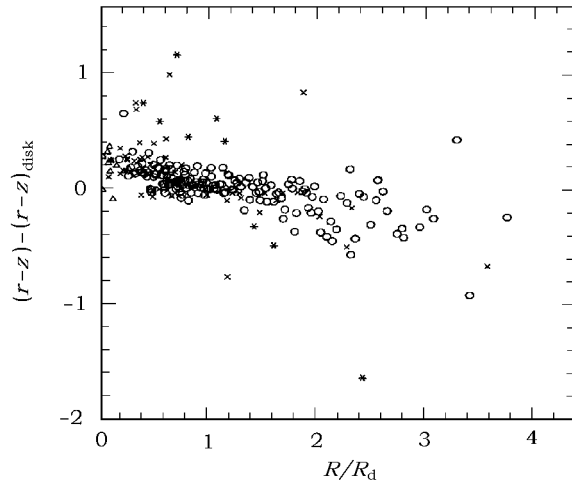


图 5 星系盘的颜色 $(r-z) - (r-z)_{\text{disk}}$ 随半径的分布

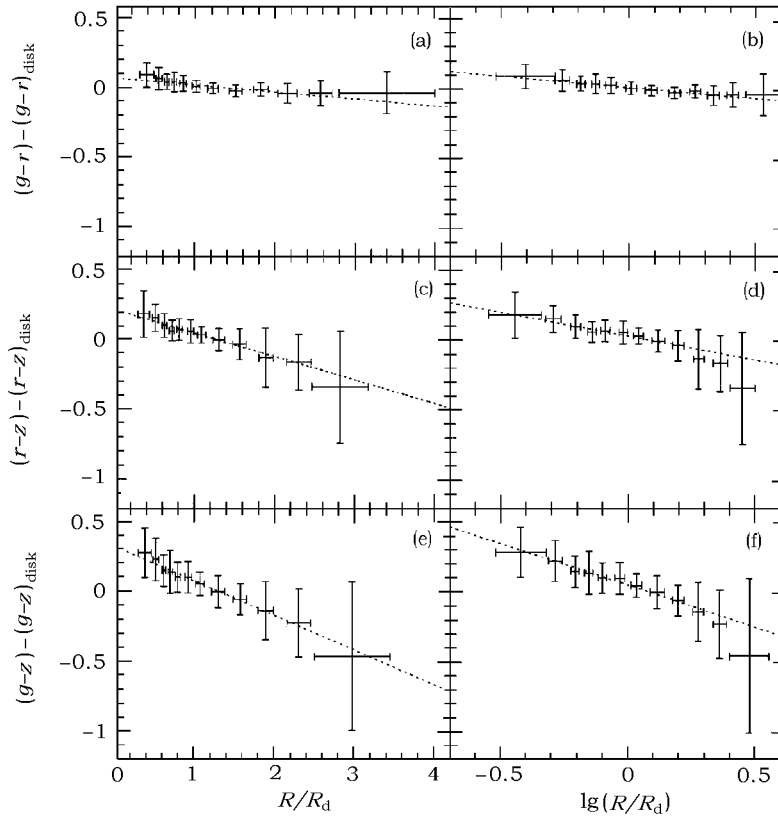


图 6 颜色 $g-r$ 、 $r-z$ 和 $g-z$ 的分布及最佳线性拟合

所用的环的分布情况。图 5 中的每一个点代表样本星系中的一个圆环。“×”表示第二次选择源时去掉的环(即去掉的 g 、 r 、 z 波段拟合后参数 B/D 明显不相符星系的环)，“ Δ ”表示因受 PSF 影响而去掉的最中心的 4 个环，“*”表示拟合时因在 3σ 以外而去掉的环，“ \circ ”则是最终所用源的环。为了使图示清楚，我们仅随机选取了 20% 的数据点。最后我们沿径向将所有的点按照点数相同的原則划分了 12 个区间，每个区间中的半径和颜色的代表值分别取本区间中数据点的中值。这样，对于每一种颜色，我们就可以通过拟合这 12 个代表点的分布来讨论其颜色梯度(详见图 6)。图 6 是颜色梯度的拟合结果，其横坐标为归一化的半径，横坐标的误差棒表示点分布的半径弥散；纵坐标为归一化的颜色，纵坐标的误差棒表示颜色的弥散。虚线代表最佳线性拟合。(a)、(c) 和 (e) 图是颜色随 R/R_d 的分布；(b)、(d) 和 (f) 图是颜色随 $\lg(R/R_d)$ 的分布。在给定区间内，我们用颜色分布的中值作为典型值(数学期望)，用标准偏差 σ 表示颜色的弥散，而颜色中值的误差则用 σ/\sqrt{N} (其中 N 为区间中的数据点数目) 来表示。

3 拟合结果

图 6 所示的数据可以清晰地反映出旋涡星系中盘的颜色随半径 R (或 $\lg R$) 的变化。我们假设这样的变化都是线性的，然后用 χ^2 拟合方法分别拟合出颜色梯度 $\Delta c/\Delta R$ 或 $\Delta c/\Delta \lg R$ 的值以及它们各自的误差。通过最佳拟合处的 χ^2 值，还可以考察观测数据与假设模型的符合程度。

表 1 总结了 3 组颜色梯度的拟合值和最佳拟合处的 χ^2 值。不难看出：

表 1 颜色梯度的拟合值

	$\Delta c/\Delta R$	χ^2	$\Delta c/\Delta \lg R$	χ^2
$g-r$	-0.048 ± 0.003	7.04	-0.152 ± 0.010	2.23
$r-z$	-0.166 ± 0.088	2.42	-0.377 ± 0.019	4.59
$g-z$	-0.245 ± 0.011	1.49	-0.590 ± 0.026	2.76

(1) 对于波长跨度大的颜色 $r-z$ 和 $g-z$ 来说，颜色梯度倾向于 $\Delta c/\Delta R = \text{const}$ 情形。而 $g-r$ 则倾向于 $\Delta c/\Delta \lg R = \text{const}$ 情形；

(2) 3 个颜色梯度均为负值(越往外越蓝)，而且波长相距越远的颜色梯度越陡。这其实说明了旋涡星系盘的颜色梯度并不仅仅存在于某两个特定的颜色之间，而是贯穿了整个光学波段(甚至更大范围)；

(3) 从图 6 可以看出，颜色 $g-r$ 在盘的最外部有 2 个点为上翘的，以至于 $\Delta c/\Delta \lg R$ 的形式更符合线性，而另外两个颜色则没有这种现象。这可能是由于尘埃影响或其他原因造成的。因为本文只是利用观测数据对颜色梯度这一现象进行研究，因此对颜色梯度的起源及差异不作深入讨论。

4 讨论

由上述拟合结果可以看到，用不同定义来拟合颜色梯度还是有差异的。我们的结果更倾

向于采用 $\Delta c/\Delta R$ 形式, 即星系盘的颜色梯度与 R 无关, 尤其是对波长相距较远的颜色。这与近年来常用 $\Delta c/\Delta \lg R$ 形式有悖。原因可能来自于核球的污染, 因为核球基本上服从 $R^{1/4}$ 律分布, 这会导致颜色变化在中心处更陡, 使之看上去比较接近 $\lg R$ 形状。以前的研究并没有仔细讨论这个问题, 我们的工作因为选取了纯净的盘样本, 结果应该更加合理。

为了与别人的工作进行比较, 我们仍然参考 $\Delta c/\Delta \lg R$ 的拟合值。我们的结果与 Gadotti 和 Anjos^[9] 的结果一致。我们将 $g-r$ 平均颜色梯度的 $\Delta c/\Delta \lg R$ 拟合值转化到 $B-V$ 的梯度值是 -0.156 ± 0.010 , 而 Gadotti 和 Anjos 所列举出的典型旋涡星系的颜色梯度值在 -0.01 到 -0.38 之间, 我们的结果接近于他们结果的中值。另外, 我们也对单个样本星系的颜色梯度值作了拟合, 约 95% 星系的颜色梯度值是负的, 这与 de Jong^[4] 在对 86 个面向旋涡星系作颜色梯度研究时的发现, 即几乎所有的星系都随归一化半径的增加而变蓝是一致的。

关于星系颜色梯度的起源是一个值得深入研究的问题, 人们对于大多数旋涡星系沿径向有颜色梯度的认识已经有很长时间了, 但一直不能确定这到底是由年龄、金属度还是尘埃造成的^[18]。实际上, 以颜色梯度作为研究基础, 很多人从星族合成的角度来解释不同星系的年龄和金属度的分布规律。Abraham 等人^[19] 通过对高红移旋涡星系的研究, 认为旋涡星系的颜色梯度主要是由年龄引起的。而 Bell 和 de Jong^[20] 却倾向于认为, 星系外部比内部更蓝是由年龄和金属度两方面因素所致。对于这些问题, 我们将在后续工作中作进一步的讨论。

参考文献:

- [1] Evans R. MNRAS, 1994, 266: 511
- [2] Peletier R F, Valentijn E A, Moorwood A F M *et al.* A&A, 1995, 300: L1
- [3] Elmegreen D M, Elmegreen B G. ApJS, 1984, 54: 127
- [4] de Jong R S. A&A, 1996, 313: 37
- [5] de Jong R S, van der Kruit P C. A&AS, 1994, 106: 451
- [6] Cunow B. MNRAS, 2001, 323: 130
- [7] Segalovitz A. A&A, 1975, 40: 401
- [8] Vader J P, Vigroux L. A&A, 1988, 203: 217
- [9] Gadotti D A, Anjos S. AJ, 2001, 122: 1298
- [10] Tamura N. AJ, 2003, 126: 596
- [11] Kong X, Zhou X, Chen J S *et al.* AJ, 2000, 119: 2745
- [12] Josey S A, Arimoto N. A&A, 1992, 255: 105
- [13] Gadotti D A, Anjos S. AJ, 2001, 122: 1298
- [14] Stoughton C, Lupton R H, Bernardi M *et al.* AJ, 2002, 123: 485
- [15] Wu H, Shao Z Y, Mo H J *et al.* AJ, 2005, 622: 244
- [16] Binney J, Tremaine S. Galactic Dynamics, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1987: 13
- [17] Bernardi M, Sheth R K, Annis J *et al.* AJ, 2003, 125: 1817
- [18] Cunow B. MNRAS, 2004, 353: 477
- [19] Abraham R G, Ellis R S, Fabian A C *et al.* MNRAS, 1999, 303: 641
- [20] Bell E F, de Jong R S. MNRAS, 2000, 312: 497

Color Gradients in the Disks of Late-type Spiral Galaxies

LI Hua-nan, SHAO Zheng-yi, XIAO Quan-bao, LIU Cheng-ze

(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*)

Abstract: Based on 395 late-type spiral galaxies brighter than 15 mag in r-band that selected from Data Release Two of Sloan Digital Sky Survey, we decompose their bulges and disks through one-dimensional fitting of the surface brightness profile, and statistically analyze the color gradients in their disks. We fit the color gradients by the forms of $\Delta c/\Delta R$ and $\Delta c/\Delta \lg R$ separately. It can be found that the gradients in the colors of $r - z$ and $g - z$ are roughly constant in $\Delta c/\Delta R$, while $g - r$ favors the form of $\Delta c/\Delta \lg R$. The values of color gradients are: $\Delta(g - r)/\Delta \lg R = -0.152 \pm 0.010$, $\Delta(r - z)/\Delta \lg R = -0.377 \pm 0.019$, $\Delta(g - z)/\Delta \lg R = -0.590 \pm 0.026$, which are in good agreement with previous results.

Key words: astrophysics; color gradient; one-dimensional two components fitting; spiral galaxy; disk