

文章编号: 1000-8349(2009)01-0347-11



旋涡星系颜色梯度的研究进展

刘成则^{1,2}, 邵正义^{1,3}, 沈世银^{1,3}, 常瑞香^{1,3}

(1. 中国科学院 上海天文台 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 上海市星系与宇宙学半解析重点实验室, 上海 200234)

摘要: 旋涡星系的颜色梯度反映了其星族构成沿径向的分布, 包含了星系恒星形成历史的信息。因此, 对旋涡星系颜色梯度的研究有助于理解星系的形成和演化过程。大部分旋涡星系存在负的颜色梯度, 其主要原因是旋涡星系存在星族梯度。颜色梯度与星系的面亮度之间存在内禀的相关, 表明质量面密度在星系的形成和演化过程中具有重要作用。

关键词: 旋涡星系; 颜色梯度; 辐射

中图分类号: P157; P144.3 **文献标识码:** A

1 引 言

旋涡星系中存在着大量的质量、年龄及金属丰度各不相同的恒星, 在光学和近红外波段, 观测到的星系的辐射主要是这些恒星的贡献。因此, 星系的整体颜色主要受其星族成分构成的影响。如果构成星系的恒星平均年龄比较老, 或金属丰度比较高, 那么该星系的颜色会比较红; 反之, 星系的整体颜色就会比较蓝。因此, 可以利用星族合成模型来模拟星系的星族成分并计算星系的光度和颜色, 通过与观测结果比较来研究星系的恒星形成历史 (Star Formation History, 简称 SFH) [1-4]。

然而, 旋涡星系内不同区域的颜色是存在差异的。早在 1961 年, de Vaucouleurs [5] 就发现星系的颜色随着半径的增加而逐渐变蓝, 旋涡星系的这种变化趋势尤为明显。人们往往用颜色梯度来定量地描述星系的颜色沿径向的这种变化。随着观测技术的不断进步, 人们利用高质量的测光资料进一步证实: 旋涡星系普遍存在负的颜色梯度, 即中心偏红, 外

收稿日期: 2009-05-27; 修回日期: 2009-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10573028、10803016、10833005、10878003); 973 项目 (2007CB815402/403)

围偏蓝^[6-10]。导致这一现象的原因与旋涡星系的结构有关。一般认为,旋涡星系通常由两个性质不同的成分组成:一个是面亮度服从 de Vaucouleurs 轮廓的核球;另一成分是服从 e 指数轮廓的盘^[11-13]。核球与盘的性质不同,以银河系为例,核球的星族年龄比盘更老,金属丰度更高^[14]。其表现在颜色上就是核球比盘更红,这就使得整个星系有了负的颜色梯度。

既然核球与盘有着根本区别,所以有必要把旋涡星系的核球和盘分开来研究。Balcells 和 Peletier^[15]研究了 45 个早型旋涡星系 (Sa),发现它们的核球存在着明显的颜色梯度,颜色随半径增加而逐渐变蓝。晚型旋涡星系 (Sb/c) 的核球同样存在负的颜色梯度,而且比椭圆星系和透镜星系的颜色梯度更陡^[16]。

de Jong^[17-20]系统地研究了 86 个面向旋涡星系,他利用两成分(核球 + 盘)拟合的方法把每一个星系都分解为核球和盘两部分。经统计发现盘的标长 (scale-length) 随波段的不同而有系统的变化,大部分星系的盘成分在短波段(蓝波段)的标长大于其在长波段(红波段)的标长。这表明蓝波段面亮度轮廓随半径的变化比红波段平缓,从而导致了星系的颜色随着半径增加而逐渐变蓝,意味着旋涡星系的盘成分同样存在负的颜色梯度。Li 等人^[21]用类似的方法对 395 个面向旋涡星系进行了核球和盘的分解,通过拟合星系盘颜色的径向分布计算了颜色梯度,并进一步证实了盘成分同样存在负的颜色梯度。一般认为,旋涡星系的盘成分是由内而外形成的 (inside-out)^[22-27],这会导致旋涡星系中心的星族年龄比外围偏老,表现在颜色上就是星系中心的颜色比外围偏红,即负的颜色梯度。

两成分拟合虽然是分解核球和盘成分比较好的方法,但该方法的最大问题是对所采用的模型有很强的依赖。采用不同的模型得出的结果往往不同。考虑到核球的面亮度轮廓基本符合 $R^{1/4}$ 律,其面亮度随半径下降的速度要明显快于服从 e 指数轮廓的盘成分。因此,对于旋涡星系,尤其是晚型旋涡星系(核球比较小),核球在大半径处的影响将非常小。Taylor 等人^[28]研究了 142 个晚型星系的颜色梯度,他们并没有对星系进行两成分拟合,而是在有效半径 R_e 处把星系分成了两部分。并认为 R_e 以内以核球成分为主,而 R_e 以外以盘成分为主,核球对这部分的影响很小。他们发现大部分旋涡星系 (Sa/b/c) 的外围区域 ($R > R_e$) 存在负的颜色梯度。Liu 等人^[29]采用了类似的方法,在半光度半径 R_{50} 处把星系分成两部分并研究了盘部分 ($R > R_{50}$) 的颜色梯度。他们发现,超过 70% 的旋涡星系的盘部分存在负的 $g-r$ 颜色梯度,同时超过 90% 的星系盘有负的 $r-z$ 颜色梯度。

虽然对旋涡星系颜色梯度的研究有很多,但是产生颜色梯度的原因至今仍然存在争议。现在比较一致的观点是:旋涡星系的颜色梯度主要是由星族梯度 (stellar population gradient) 引起的,而尘埃对颜色梯度影响很小^[2,20,30,31]。因此,旋涡星系的颜色梯度主要反映了其恒星形成历史沿径向的差异,研究颜色梯度可以为旋涡星系的形成和演化模型提供有力的观测约束。

以下将首先介绍颜色梯度的定义以及一些主要的观测结果,然后讨论产生颜色梯度的原因和影响颜色梯度测量的因素,最后介绍颜色梯度的演化以及总结和展望。

2 颜色梯度的定义

简单地说,星系的颜色梯度就是对其颜色的径向分布进行线性拟合而得到的斜率。但迄

今为止, 颜色梯度并没有一个统一的定义。表 1 给出了一些研究工作中采用的颜色梯度的定义以及测量颜色梯度的范围。从表中可以看到, 当研究对象为整个旋涡星系时, 颜色梯度往往定义为 $\Delta CI/\Delta \lg R$, 其中 ΔCI 为颜色的变化量; 而只研究星系盘部分的颜色梯度时, 颜色梯度则通常定义为 $\Delta CI/\Delta R$ 。这是因为大部分旋涡星系外围的颜色变化趋势比中心部分平缓 (参见文献 [29] 中的图 2), 整个星系的颜色径向分布可以在对数直角坐标中很好地线性拟合, 而盘部分的颜色径向分布在线性直角坐标中就能很好地线性拟合。从表 1 中还可以看到, 在线性的颜色梯度的定义中, 有些半径采用了物理单位 (kpc), 另外一些半径则归一到了某特征尺度 (标长 R_d 或有效半径 R_e)。 $\Delta CI/\Delta(R/\text{kpc})$ 反映了每 kpc 尺度颜色的变化量, 这样的定义更加物理。而当星系有相似的结构时, $\Delta CI/\Delta(R/R_d)$ 的定义可以合理地比较不同大小星系的颜色梯度, 而且可以方便地和理论模型进行比较。

表 1 不同研究工作中颜色梯度的定义

研究工作	颜色梯度的定义	测量范围
Prugniel 等人 (1998) [7]	$\Delta CI/\Delta \lg R$	整个星系
Gadotti 等人 (2001) [8]	$\Delta CI/\Delta \lg R$	整个星系
Moth 等人 (2002) [9]	$\Delta CI/\Delta \lg R$	整个星系
Li 等人 (2005) [21]	$\Delta CI/\Delta(R/R_d)^{1)}$	星系的盘部分
Taylor 等人 (2005) [28]	$\Delta CI/\Delta(R/R_e)^{2)}$	星系的盘部分
Muñoz-Mateos 等人 (2007) [31]	$\Delta CI/\Delta(R/\text{kpc})$	星系的盘部分
Liu 等人 (2009) [29]	$\Delta CI/\Delta(R/\text{kpc})$	星系的盘部分

1) R_d 是用一维两成分拟合星系的面亮度轮廓得出的盘的标长;

2) R_e 为有效半径。

由于颜色梯度的定义多种多样, 而且测量范围也有差异, 所以不同工作之间很难进行定量地比较, 但是颜色梯度的特性是不随定义的不同而变化的。如果颜色梯度为负值, 表示星系外围的颜色比中间的颜色蓝; 反之, 正的颜色梯度表示星系中心偏蓝, 边缘偏红。

3 颜色梯度与星系基本参量的关系

研究旋涡星系颜色梯度和星系基本参量的关系可以用来分析影响星系恒星形成历史的主要因素, 从而为模型提供有效的观测约束。

3.1 与星系形态的关系

目前比较明确的结论是: 椭圆星系和透镜星系有较平的颜色梯度 [32,33], 而且其颜色梯度和星系所处的环境有关, 星系的成团性越强, 其颜色梯度越平 [34]。不规则星系 (Im) 以及接近不规则星系的晚型旋涡星系 (Sd/m) 存在正的颜色梯度或没有颜色梯度, 而且颜色梯度的弥散比较大 [6,7,28]。早型旋涡星系 (Sa/b/c) 则普遍存在负的颜色梯度, 而且比其他类型星系的颜色梯度都要陡 [9,21,28]。

此外, Liu 等人 [29] 发现旋涡星系的盘部分 ($R > R_{50}$) 的颜色梯度和星系中心聚度参数 c 无关, 而星系的中心聚度和形态类型有密切的关系 [35-37]。旋涡星系的中心聚度越大往往表

示星系的核球越大。他们的结果表明了旋涡星系盘的颜色梯度受核球的影响很小。

3.2 与星系大小的关系

Taylor 等人^[28]研究了 142 个晚型星系盘部分 ($R > R_e$) 的颜色梯度, 他们发现星系越大, 盘的颜色梯度越陡 (参见文献 [28] 中的图 7 和图 8)。而 Muñoz-Mateos 等人^[31]以及 Liu 等人^[29]的研究结果却显示颜色梯度与星系大小没有显著关系。其结果上的差异其实是采用了不同的颜色梯度定义所致。如表 1 所示, Taylor 等人采用的颜色梯度的定义是每有效半径尺度上颜色的变化量, 而 Muñoz-Mateos 等人以及 Liu 等人测量的则是每物理尺度 (kpc) 上颜色的变化量。星系越大, 其有效半径就会越大, 相应的每有效半径尺度上颜色的变化量就自然越大。

此外, 颜色梯度的弥散与星系的大小有关。小星系颜色梯度的弥散往往很大, 而大星系的颜色梯度弥散非常小^[29,31]。

3.3 与星系质量的关系

星系的光度与其恒星质量是密切相关的, 颜色梯度和光度的关系可以间接反映颜色梯度和恒星质量的关系。Kim 和 Ann^[6]发现了颜色梯度和 B 波段的绝对星等之间存在着很弱的相关关系: 亮的星系似乎有较陡的颜色梯度。而 Taylor 等人^[28]的工作同样发现梯度与绝对星等之间的相关性很弱。

绝对星等是星系的基本参量之一, 颜色-星等关系也是观测上很早就发现的标度律 (scaling law) 之一, 即: 越亮的星系, 其颜色越红。颜色-星等关系主要是由于越亮 (质量越大) 的星系的恒星形成时标更短^[38], 增丰更快, 所以, 其平均星族的年龄更老, 金属丰度更高, 观测上表现为颜色更红^[39,40]。

3.4 与星系面亮度的关系

Liu 等人^[29]在计算星系的颜色梯度时采用了构建“组合星系”的方法。具体而言, 他们把一性质相似的星系的面亮度轮廓进行叠加, 并把叠加后的轮廓看做一个“组合星系”的面亮度轮廓。利用这种方法, 他们用 Sloan 数字巡天观测的两万多个面向旋涡星系构建了 193 个“组合星系”, 并研究了“组合星系”的盘部分 ($R > R_{50}$) 的颜色梯度和盘的面亮度之间的相关关系, 其结果如图 1 所示。颜色梯度与面亮度之间存在很强的相关, 星系盘的面亮度越低, 其颜色梯度越陡。图 1 上的实线是对所有数据点用误差加权后的最佳线性拟合, 实线两边的虚线标出了残差分布的弥散 σ 。可以看到, 大多数分布在 1σ 之外的星系 R_{50} 都比较小 (表现为点的尺寸较小) 而且比较暗 (表现为数据点的颜色较浅), 同时这些星系颜色梯度的测量误差也比较大。

面亮度表现出与颜色梯度很强的相关, 表明星系的质量面密度在星系的形成和演化过程中起了非常重要的作用。Kauffmann 等人^[41,42]用恒星光谱在 4000 \AA 处的跃变以及 Balmer 吸收线 $H_{\delta A}$ 性质, 估算了星系内恒星的平均年龄以及过去几 Ga 形成的恒星质量占星系总质量的百分比, 从而得到了星系中的恒星形成历史的信息, 并研究了 SFH 对星系基本参数的依赖关系。他们发现恒星质量面密度对星系整体的恒星形成历史很重要。Chang 等人^[39]通过研究旋涡星系的颜色星等关系也发现恒星质量面密度是影响旋涡星系恒星形成历史的主要因素。而 Bell 等人^[2]通过星族合成模型 (stellar population synthesis model) 得出结论, 星系某半径处的平均面亮度与该半径处的平均星族年龄和金属丰度都

有很强的相关。由这些研究可见, 无论是对星系的整体还是局部而言, 质量面密度对其恒星形成历史都有很大的影响。

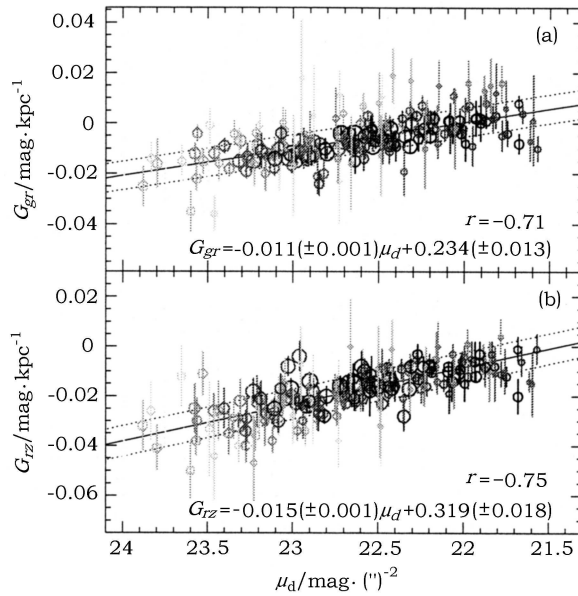


图 1 $g-r$ 颜色梯度 (定义为每 kpc 颜色的变化量) G_{gr} (上图) 和 $r-z$ 颜色梯度 G_{rz} (下图) 与星系盘部分平均面亮度 μ_d (r 波段) 之间的相关关系^[29]

每一个数据点代表一个“组合星系”, 误差棒为颜色梯度的测量误差。数据点越大表示星系的 R_{50} 越大, 数据点颜色越深表示星系越亮。图中的实线是对所有数据点的最佳拟合, 实线两边的虚线标出了残差分布的弥散 (σ)。在每个图的右下角给出了两个参量之间的相关系数以及对最佳拟合直线的描述。

4 产生颜色梯度的原因

造成旋涡星系存在负的颜色梯度的潜在原因主要有两个, 一是内禀的星族梯度, 二是尘埃消光。

4.1 星族梯度

星族梯度一直被认为是星系存在颜色梯度的主要原因, 但是通过颜色梯度研究星系的星族构成很困难, 这是因为年龄-金属丰度简并 (degeneracy) 的存在。众所周知, 年龄老或金属丰度高的星族颜色偏红, 而年龄小或金属丰度低的星族颜色偏蓝。这就导致年龄老而金属丰度低的星族和年龄小但金属丰度高的星族可能会表现为相同的颜色。这种年龄-金属丰度简并对研究星系的恒星形成历史造成了很大的困难。一般认为, 比起星系的外围, 旋涡星系中心的星族年龄更老同时金属丰度更高, 这样便产生了观测到的颜色梯度。但要研究星族年龄和金属丰度中哪个是产生颜色梯度的主要原因, 就要设法解除年龄-金属丰度简并。

Bell 和 de Jong^[2] 提出加入红外波段的观测数据会部分地解除年龄-金属丰度简并。他们研究了 121 个低倾角旋涡星系, 并采用 e 指数恒星形成速率 $\Psi(t) \propto \exp(-t/\tau)$ 来建立星族

合成模型, 计算了不同初始金属丰度和不同恒星形成时标 τ 所产生的颜色, 然后将模型计算的颜色与观测的颜色径向分布在双色图上进行了比较。他们发现, 旋涡星系的颜色梯度是年龄和金属丰度梯度共同作用的结果。而 de Jong^[20] 以及 Abraham 等人^[43] 则发现旋涡星系的颜色梯度主要是由年龄梯度引起的, 金属丰度梯度对颜色梯度的作用很小。Wu 等人^[44] 利用 SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 和 2MASS (Two Micro All Sky Survey) 的数据研究了早型星系的颜色梯度, 并利用星族合成模型把颜色梯度分解成年龄梯度和金属丰度梯度。他们用这种方法发现了早型星系的颜色梯度主要是由金属丰度梯度贡献的, 而这种方法可以推广用来研究旋涡星系。

既然产生旋涡星系颜色梯度的主要原因是星族梯度, 那么影响星系星族成分构成的因素就可能影响到旋涡星系的颜色梯度, 比如, 星系边缘的恒星形成截止 (star formation threshold)、影响星系中心区域恒星形成的活动星系核 AGN 和棒状结构等。下面将对这些因素一一进行讨论。

4.1.1 恒星形成截止

van der Kruit^[45] 在 1979 年提出, 随着半径的增加, 旋涡星系的面亮度轮廓并不总是符合 e 指数分布, 而是存在某个截止半径 (break radius 或 cut-off radius), 在该半径以外的区域, 面亮度分布不再服从 e 指数分布。之后又有许多研究工作证实了这一现象^[46-48], 其中 Pohlen 等人^[48] 通过对 31 个近邻侧向星系进行测光得到了每个星系的截止半径。他们发现截止半径与星系的标长之比和标长本身成反比。例如: 标长为 5 kpc 的星系, 截止半径约为标长的 4.5 倍, 而标长为 20 kpc 的星系, 截止半径仅为标长的 1.5 倍。Martin 和 Kennicutt^[49] 通过研究对恒星形成敏感的 $H\alpha$ 面亮度轮廓发现截止半径可以解释为星系边缘存在恒星形成截止, 即截止半径以外的区域几乎没有近期恒星形成, 使得该区域的颜色偏红。这会导致截止半径以外的颜色径向分布偏平甚至上翘^[10,50], 从而影响到颜色梯度的测量。如果想避免恒星形成截止对颜色梯度的影响, 颜色梯度的测量范围最好限制在截止半径以内。

4.1.2 活动星系核

Kauffmann 等人^[51] 发现高光度 AGN 的宿主星系的星族平均年龄比较小, 而且这些年轻恒星并不只分布在核附近, 而是可以扩散到几 kpc 的地方。这说明高光度 AGN 触发了星系中心的近期恒星形成, 而且波及至几千秒差距的范围, 这一机制会影响到颜色梯度的测量。而对于低光度 AGN 的宿主星系, 其星族成分与正常星系类似, 这说明低光度 AGN 对宿主星系的恒星形成影响不大。Chatzichristou^[52] 研究发现大多数 Seyfert II 型宿主星系颜色梯度为负值, 而且可见光波段颜色梯度跟正常星系没明显区别。通过研究 32 个正常星系和 18 个 AGN (1 个 Seyfert I 型, 17 个 Seyfert II 型) 的宿主星系, Cunow 发现在可见光波段, 宿主星系颜色梯度比正常星系稍小, 而在红外波段却没有差别^[30,53,4]。Hunt^[55] 也得到了类似的结论。一般来说, 旋涡星系中心的 AGN 往往光度比较低, 所以 AGN 对其宿主星系的颜色梯度, 尤其是星系外围的颜色梯度影响较小。

4.1.3 棒状结构

棒状不稳定性是触发恒星形成的另外一个重要因素^[56-60], Gadotti 和 dos Anjos^[8] 研究了 72 个旋涡星系和 166 个棒旋星系的整体颜色梯度, 发现有 41% 的星系存在正的颜色梯度或没有颜色梯度, 而这些星系中大部分是棒旋星系。这说明棒状结构对星系 (尤其是中心部

分)的星族成分产生了一定的影响。但是由于他们测量的是星系整体的颜色梯度,所以并不能说明棒状结构对星系大半径处恒星形成的影响,这方面还有待进一步的研究。

4.2 尘埃

不同波段尘埃消光量的差异会使观测到的天体颜色比真实颜色偏红。在某一视线方向上的消光 and 红化量依赖于该方向上的尘埃密度。观测到的尘埃分布比恒星分布更延展,其标长大约是恒星盘标长的 1.4 倍,而标高只是恒星盘标高的一半^[61-65]。对于面向旋涡星系,中间厚边缘薄的尘埃分布会使得星系中心受到的尘埃红化更为严重,因而可以产生所观测到的负颜色梯度。

利用模型研究尘埃对颜色梯度的影响有多种方法^[66],最简单的一种是认为尘埃盘位于观测者和星系之间,这种方法称为“屏幕”模型(screen model),但是这种模型把尘埃分布过于简单化了。“三明治”模型则假设无限薄的尘埃盘位于恒星盘中间,这样有一半的恒星(位于尘埃盘之后)受到尘埃的影响。比较接近实际观测的尘埃模型是 Disney 等人提出来的 Triplex model^[66],尘埃盘的分布与恒星盘类似,在径向和垂直方向上都符合 e 指数分布,不同的是尘埃盘的标高要比恒星盘小(这与观测事实符合),这一模型被广泛应用^[20,67,68]。以 de Jong 的工作为例^[20],他利用这一模型研究了尘埃对面向旋涡星系颜色梯度的影响。在他的工作中尘埃盘的标高和标长并不固定,尘埃盘与恒星盘标高的比值分别取为 0.3、0.5 和 1.0,而标长的比值分别取为 1.0、2.0 和 3.0,并在具体计算过程中考虑了尘埃在不同波段消光、吸收及散射对测光的影响。最后他得出结论,不同波段的尘埃消光确实可以产生颜色梯度,但是由此产生的颜色梯度很小,而且只影响到星系的中间区域(小于两倍的恒星盘标长)。Cunow^[30]也得出了类似的结论:尘埃消光对星系中心部分的测光影响很严重,但是在星系外围,尘埃几乎是透明的。

5 影响颜色梯度测量的因素

在颜色梯度的测量过程中,点扩展函数、天光背景的测量误差等因素都会影响到测量结果。

5.1 点扩展函数

一个点源因受到大气的扰动和湍流以及仪器响应等原因的影响,在 CCD 上的成像不是一个点,称其为实际成像的亮度分布的点扩展函数(Point Spread Function,简称 PSF)。一般情况下,PSF 值不会很大。比如,SDSS 中 PSF 的半峰全宽(Full Width at Half Maximum,简称 FWHM)约为 $1.5''$ ^[69]。因此,PSF 主要影响的是视半径比较小的天体的测光结果。对于星系,PSF 对其中心部分的影响会大一些,而对大半径处的影响比较小。此外,如果两个波段的 PSF 不一致,就会影响到颜色的测量,从而影响到颜色梯度。总的来说,如果不同波段 PSF 差别不大,PSF 对星系外围的颜色梯度影响很小。

Michard^[70]发现,在有些波段 PSF 的翼(wing)可以延伸到很大半径处(可达到 $15'' \sim 40''$),他称这种现象为“红晕”效应(red halo effect),这种效应会影响到大半径处面亮度的测量。在计算星系颜色的径向分布时,如果所用的两个波段之一存在“红晕”效应,颜色梯度的测量就会受到影响。Wu 等人^[44]发现 SDSS 在 i 波段的 PSF 就存在这种“红晕”效应。在研究星系的

颜色梯度时, 要尽量避开这些波段。

5.2 天光背景

天光背景的存在对暗弱天体以及星系边缘部分的测光有着很大的影响。所以在对星系进行测光之前, 首先要将天光背景准确地扣除掉。如果天光测量有系统偏差, 就会影响到天体的测光^[71-73]。但是天光背景影响到的只是星系的整体颜色, 而颜色梯度是个相对量, 受到的影响不会很大。但是, 天光背景噪声的存在会使得星系边缘的信噪比很低。因此, 这些区域的测光误差会比较大, 从而影响到颜色梯度的测量精度。

6 颜色梯度与星系演化

根据等级成团模型^[74]的有关概念, 早期宇宙原初物质密度的涨落在引力的作用下被放大, 暗物质逐渐聚集起来形成暗晕。当暗晕增长到一定程度, 会由于引力作用而发生坍缩。在暗晕的坍缩过程中, 气体由于动力学弛豫过程而被加热, 之后气体通过向外辐射能量而冷却坍缩。如果没有初始角动量, 那么气体将坍缩成一团。反之, 如果气体存在初始角动量, 气体将坍缩成一个旋转的盘。如果坍缩时标小于恒星形成时标, 那么恒星将在气体盘上产生, 从而形成了盘状星系。在盘状星系的演化过程中会由于动力学过程(潮汐作用、棒状结构的不稳定性、并合等)而损失角动量。如果动力学过程比较平缓, 原初星系只会损失少量的角动量, 从而使气体向中心集中, 触发恒星形成, 最终形成核球。而当动力学过程比较剧烈时, 比如主并合(major merger), 原初星系会损失绝大部分角动量, 而且星系中丰富的气体会因为剧烈的扰动而导致大规模恒星形成(star burst), 这样最终形成了椭圆星系。

在以上图景下, 演化到今天的旋涡星系可以分为两类, 一类是没有经历过并合或相互作用的星系, 这类星系由内而外(inside-out)形成, 故而存在星族梯度, 表现在观测上就是有负的颜色梯度。而另一类星系的演化过程伴随着并合和相互作用(interaction), 这些动力学过程会使气体向星系中心集中而激发恒星形成^[58,75,76], 从而导致星系中心的颜色变蓝, 即颜色梯度为正值。鉴于高红移处星系的并合和相互作用比低红移更加常见, 可以从这个简单的图景得出推论, 高红移星系中存在正颜色梯度的比例应该比低红移星系高。Moth 和 Elston^[9]研究了哈勃深场中的 32 个中红移星系 ($0.5 < z < 1.2$) 和 20 个高红移星系 ($2.0 < z < 3.5$) 的颜色梯度, 发现中红移星系颜色梯度的平均值为 $\Delta(UV_{218} - U_{300})/\Delta \lg R = -0.091 \pm 0.007$, 而高红移星系平均颜色梯度为 $\Delta(UV_{218} - U_{300})/\Delta \lg R = 0.272 \pm 0.007$, 从而验证了这一推论。

7 总结和展望

本文系统地介绍了旋涡星系颜色梯度的研究进展。大部分旋涡星系都存在负的颜色梯度, 即颜色随着半径的增加而逐渐变蓝。这主要是由于旋涡星系由内而外的形成过程使其在径向上存在星族梯度。而通过颜色梯度和星系基本参量的相关关系的研究, 星系的质量面密度在星系的形成和演化过程中起了很大的作用。

虽然星系的颜色梯度是一个“古老”的课题(de Vaucouleurs 1961 年就发现了星系内存在

颜色梯度^[5]), 但随着观测技术的进步, 观测数据的质量和数量都快速提高, 使得人们可以用大样本对星系的颜色梯度进行统计研究, 从而得到更可靠的结论。旋涡星系的形成与演化是近年来的研究热点之一, 但人们往往用星系的整体颜色来约束星系的形成演化模型, 如星系的颜色-星等关系。星系的整体颜色只能反映其平均的星族构成, 相当于把星系看成一个点来考虑, 而星系的颜色梯度能够反映其星族沿径向的分布, 可以为星系的形成演化模型提供更加严格的观测约束。

尽管对旋涡星系颜色梯度的研究有很多, 但是对产生颜色梯度的原因人们还存在争议, 争议主要集中在颜色梯度是由年龄梯度引起的还是年龄梯度和金属丰度梯度共同作用的结果, 这还有待进一步的研究。此外, 研究棒状结构对星系颜色梯度的影响可以反映棒状不稳定性在星系形成和演化过程中所起的作用, 而这方面的研究很少。随着观测数据的增加, 现在已经有条件选取大的棒旋星系样本来统计研究其颜色梯度。Liu 等人^[29]发现颜色梯度与面亮度之间存在内禀的相关, 这个关系为旋涡星系的形成和演化模型提供了新的观测约束, 所以有必要通过模型来解释颜色梯度与面亮度之间的相关。

参考文献:

- [1] Peletier R F, de Grijs R. MNRAS, 1998, 300: L3
- [2] Bell E F, de Jong R S. MNRAS, 2000, 312: 497
- [3] MacArthur L A, Courteau S, Bell E, et al. ApJS, 2004, 152: 175
- [4] Chang R, Shen S, Hou J, et al. MNRAS, 2006, 372: 199
- [5] de Vaucouleurs G. ApJS, 1961, 5: 233
- [6] Kim K O, Ann H B. JKAS, 1990, 23: 43
- [7] Prugniel P, Heraudeau P. A&AS, 1998, 128: 299
- [8] Gadotti D A, dos Anjos S. AJ, 2001, 122: 1298
- [9] Moth P, Elston R J. AJ, 2002, 124: 1886
- [10] Azzollini R, Trujillo I, Beckman J E. ApJ, 2008, 679: L69
- [11] de Vaucouleurs G. Handbuch der Physik, 1959, 53: 311
- [12] Simien F, Michard R. A&A, 1990, 227: 11
- [13] Capaccioli M, Caon N, D'Onofrio M. MNRAS, 1992, 259: 323
- [14] Minniti D, Zoccali M. IAU Symposium, 2008, 245: 323
- [15] Balcells M, Peletier R F. AJ, 1994, 107: 135
- [16] Wirth A, Shaw R. AJ, 1983, 88: 171
- [17] de Jong R S, van der Kruit P C. A&AS, 1994, 106: 451
- [18] de Jong R S. A&AS, 1996, 118: 557
- [19] de Jong R S. A&A, 1996, 313: 45
- [20] de Jong R S. A&A, 1996, 313: 377
- [21] 李化南, 邵正义, 肖泉宝等. 天文学进展, 2005, 23: 371
- [22] Blitz L, Spergel D N, Teuben P J, et al. ApJ, 1999, 514: 818
- [23] Ferguson A M N, Irwin M J, Ibata R A, et al. AJ, 2002, 124: 1452
- [24] Thilker D A, Braun R, Walterbos R A M, et al. ApJ, 2004, 601: L39
- [25] Ibata R, Chapman S, Ferguson A M N, et al. MNRAS, 2004, 351: 117
- [26] Ibata R, Chapman S, Ferguson A M N, et al. ApJ, 2005, 634: 287
- [27] Williams B F, Dalcanton J J, Dolphin A E, et al. ApJ, 2009, 695: L15
- [28] Taylor V A, Jansen R A, Windhorst R A, et al. ApJ, 2005, 630: 784

- [29] Liu C Z, Shen S Y, Shao Z Y, et al. *RAA*, 2009, 9: 1119
- [30] Cunow B. *MNRAS*, 2004, 353: 477
- [31] Muñoz-Mateos J C, Gil de Paz A, Boissier S, et al. *ApJ*, 2007, 658: 1006
- [32] Cantiello M, Blakeslee J P, Raimondo G, et al. *ApJ*, 2005, 634: 239
- [33] Hinkley S, Im M. *ApJ*, 2001, 560: L41
- [34] La Barbera F, de Carvalho R R, Gal R R, et al. *ApJ*, 2005, 626: L19
- [35] Shimasaku K, Fukugita M, Doi M, et al. *AJ*, 2001, 122: 1238
- [36] Strauss M A, Weinberg D H, Lupton R H, et al. *AJ*, 2002, 124: 1810
- [37] Nakamura O, Fukugita M, Yasuda N, et al. *AJ*, 2003, 125: 1682
- [38] Boissier S, Prantzos N. *MNRAS*, 2000, 312: 398
- [39] Chang R, Gallazzi A, Kauffmann G, et al. *MNRAS*, 2006, 366: 717
- [40] Wu H B, Liu C Z, Zhang B, et al. *AcASn*, 2007, 48: 11
- [41] Kauffmann G, Heckman T M, White S D M, et al. *MNRAS*, 2003, 341: 33
- [42] Kauffmann G, Heckman T M, White S D M, et al. *MNRAS*, 2003, 341: 54
- [43] Abraham R G, Ellis R S, Fabian A C, et al. *MNRAS*, 1999, 303: 641
- [44] Wu H, Shao Z, Mo H J, et al. *ApJ*, 2005, 622: 244
- [45] van der Kruit P C. *A&AS*, 1979, 38: 15
- [46] Abe F, Bond I A, Carter B S, et al. *AJ*, 1999, 118: 261
- [47] Fry A M, Morrison H L, Harding P, et al. *AJ*, 1999, 118: 1209
- [48] Pohlen M, Dettmar R J, Lüticke R. *A&A*, 2000, 357: L1
- [49] Martin C L, Kennicutt R C Jr. *ApJ*, 2001, 555: 301
- [50] Bakos J, Trujillo I, Pohlen M. *ApJ*, 2008, 683: L103
- [51] Kauffmann G, Heckman T M, Tremonti C, et al. *MNRAS*, 2003, 346: 1055
- [52] Chatzichristou E T. *ApJ*, 2001, 556: 676
- [53] Cunow B. *MNRAS*, 2001, 323: 130
- [54] Cunow B. *Ap&SS*, 2003, 284: 743
- [55] Hunt L K, Malkan M A, Salvati M, et al. *ApJS*, 1997, 108: 229
- [56] Noguchi M. *A&A*, 1988, 203: 259
- [57] Shlosman I, Frank J, Begelman M C. *Nature*, 1989, 338: 45
- [58] Mihos J C, Hernquist L. *ApJ*, 1994, 425: L13
- [59] Friedli D, Benz W. *A&A*, 1993, 268: 65
- [60] Friedli D, Benz W. *A&A*, 1995, 301: 649
- [61] Alton P B, Trewhella M, Davies J I, et al. *A&A*, 1998, 335: 807
- [62] Davies J I, Alton P, Trewhella M, et al. *MNRAS*, 1999, 304: 495
- [63] Trewhella M, Davies J I, Alton P B, et al. *ApJ*, 2000, 543: 153
- [64] Radovich M, Kahanpää J, Lemke D. *A&A*, 2001, 377: 73
- [65] Xilouris E M, Byun Y I, Kylafis N D, et al. *A&A*, 1999, 344: 868
- [66] Disney M, Davies J, Phillipps S. *MNRAS*, 1989, 239: 939
- [67] Evans R. *MNRAS*, 1994, 266: 511
- [68] Shao Z, Xiao Q, Shen S, et al. *ApJ*, 2007, 659: 1159
- [69] York D G, Adelman J, Anderson J E Jr, et al. *AJ*, 2000, 120: 1579
- [70] Michard R. *A&A*, 2002, 384: 763
- [71] Lauer T R, Faber S M, Richstone D, et al. *ApJ*, 2007, 662: 808
- [72] Bernardi M, Hyde J B, Sheth R K, et al. *AJ*, 2007, 133: 1741
- [73] Lisker T, Grebel E K, Binggeli B, et al. *ApJ*, 2007, 660: 1186
- [74] White S D M. *MNRAS*, 1979, 189: 831
- [75] Barnes J E, Hernquist L. *ApJ*, 1996, 471: 115
- [76] Somerville R S, Primack J R, Faber S M. *MNRAS*, 2001, 320: 504

The Research Progress in the Color Gradients of Spiral Galaxies

LIU Cheng-ze^{1,2}, SHAO Zheng-yi^{1,3}, SHEN Shi-yin^{1,3}, CHANG Rui-xiang^{1,3}

(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; 3. Key Laboratory for Astrophysics, Shanghai 200234, China)

Abstract: The color gradient of spiral galaxy freezes its fossil information of the star formation history along the disk and therefore provides a strong constraint on the models of disk formation and evolution. In this paper we review the recent progress of the research on color gradients of spiral galaxies, including the observational results, the explanation of color gradients and the involvement of the color gradients. In addition, we list the observational factors which influence the measurement of color gradients.

Most of spiral galaxies show negative color gradients, i.e. the color is gradually bluer outwards. Either the bulge or disk components of spiral galaxies has negative color gradient. The color gradients of disk components are independent of the concentration parameter, which implies that the bulge may not strongly affect the formation and evolution of the disk component. There is also no significant correlation between disk color gradients and the size of galaxies, but bigger galaxies tend to have smaller scatters of the color gradients. The color gradients are weakly dependent on the absolute magnitude, this weak correlation suggests that the stellar mass may not be an important ingredient in regulating the inside-out growth of galactic disk. There is an intrinsic correlation between the color gradients and surface brightness, with lower surface brightness galaxies having steeper color gradients. This result indicates the mass surface density may play an important role in the formation and evolution of galactic disk, which gives a strong observational constraint on the model.

The color gradients of spiral galaxies were found to be mainly caused by stellar population gradients, with inner region having higher metallicity and older stellar population than the outer part. The dust extinction only plays a minor role in regulating the color gradients of spiral galaxies.

Key words: spiral galaxy; color gradient; radiation