

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.01.07

环星系的有效半径与红外总光度的相关性关系

秦龙华^{1,2,3}, 邬文骏^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台/云南天文台, 昆明 650011; 2. 中国科学院昆明天体结构与演化重点实验室, 昆明 650011; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 用一个完备的带环星系样本以及它们的 J, H, K_s 三个波段的 2MASS 数据, 采用考虑了多项因素的线性模型, 研究带内环、外环以及伪内环这三类带环星系的共振环物理直径 (D) 与星系有效半径 (R_e) 之间的统计关系。其结果为: 在带内环星系中, $R_e \propto D^{0.76 \pm 0.07}$; 在带外环星系中, $R_e \propto D^{0.60 \pm 0.08}$; 在伪内环星系中有 $R_e \propto D^{0.75 \pm 0.08}$ 。将其与 Wu 在 2008 年得到的带环星系的星系近红外总光度 (L_{NIR}) 与 D 的统计关系 ($L_{\text{NIR}} \propto D^{1.2}$) 结合, 得到带环星系 L_{NIR} 与 R_e 的系统关系, 即 $L_{\text{NIR}} \propto R_e^\beta$, 对带内环、外环和伪内环的星系, β 分别为 1.58 ± 0.15 、 2.00 ± 0.27 和 1.60 ± 0.17 。这些推论和我们的直接测量结果大致相符。考虑到星系 R_e 与星系盘尺度 (h_d) 之间接近线性关系, 以上结果较直接地检验了 Wu 在 2008 年得到的关于 h_d 与 D 的相关性结果, 这也说明典型的带环星系的盘成分在总的动力学质量中的比例分布和盘早期温度仅有较小的系统变化。与其它关于星系的光度和尺度的经验统计关系相结合, 这些结果提示带环星系的红外光度与盘尺度有与一般星系中的盘相近的统计关系。

关键词: 环星系; 旋涡星系; 统计

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引 言

通常观测到的光度范围内 ($M_B \lesssim -19$) 的邻近星系中透镜状和旋涡星系约占 80%, 所以它们在宇宙演化以及大尺度结构中扮演了一个至关重要的角色。在这些星系中, 星系盘的尺度 h_d (盘的面亮度近似地 $\propto e^{-r/h_d}$, r 为至中心距离) 是研究星系形态及动力学的重要特征量; 此外 h_d 也与星系盘中的物质分布^[1] (如其中的角动量与质量分布) 相关, 可在研究中指示这些物理量。这些星系盘的总光度 L^d 是研究星系结构成分和星系盘重子物质数量等的重要物理量。在星系演化的数值模拟中, 需要对单个星系建模, 包括对不同质量的星系建立系统

收稿日期: 2012-05-20; 修回日期: 2012-07-03

资助项目: 中国科学院 2009 年度百人计划资助项目

的盘物质分布模型, 如在并合星系前身^[2-5]或带环星系^[6]的演化模拟中。这些需要 L^d 与 h_d 之间的统计相关关系。研究 L^d 与 h_d 随着红移的变化也可以探讨星系结构演化。另外用 L^d-h_d 的统计关系可以估算盘星系面亮度选择效应, 以修正重要的观测结果, 如星系的光度函数。由于星系的近红外测光数据受气体和尘埃消光效应影响小, 所以更能反映星系盘中真实恒星的数量和动力学质量。因此, 探究星系盘的近红外总光度 L_{NIR}^d 与 h_d 的关系可更好地了解星系的内禀属性和演化, 或检验星系的面亮度选择效应。

早期 Freeman^[7] 采用 28 个旋涡及 S0 星系的样本, 得到 $L_B^d \propto h_d^2$ (L_B^d 盘蓝光光度), 即星系中心面亮度在不同星系中是一个常量。de Jong^[8] 研究了 86 个面向旋涡星系的红外及光学波段的面亮度测光, 统计了不同形态的星系面亮度与盘尺度的关系, 认为 Freeman 的结果可能是由样本选择效应引起的: Freeman 样本在进行目视证认时无法把较弱面亮度星系与天光背景区分而遗漏了相当数量的低面亮度星系, 观测到的 L_B^d 与 h_d 的分布偏离实际。类似的选择效应在近红外波段的 L^d 与 h_d 的统计中也存在。近期的近红外波段 L^d-h_d 关系的研究普遍采用了数量较少的样本, 这些样本的星系都不是系统选择的 (如文献 [9], [10], [11], [13], [14]), 面亮度选择效应难以避免。除了 Graham 和 Worley 的工作外^[14], 其他作者并没有对选择效应采取修正措施。因此, 这些研究虽然都验证了 $L_{\text{NIR}}^d \propto h_d^\alpha$ 的统计关系, 但 α 的值仍有相当出入, 从大约 0.8 到 1.7 左右。Graham 和 Worley 采用了平分线线性拟合法 (OLS-bisector) 以修正选择效应, 但其有效性有待进一步检验, 特别是其准确性依赖于选择效应严重程度。更可靠地检验近期结果的最佳方法是采用基本无选择效应的样本。在光学波段的数据中 Shen 等人^[11] 采用基本避免面亮度选择效应的样本, 因此得到的结果更具真实性。而近红外波段尚缺乏一个完备的、面亮度选择效应微弱的样本, 此外已有的近红外波段的统计样本数量也较少, 所以增加了统计结果的不确定性。

对某些特殊类型的透镜状或旋涡星系, 可能存在近红外数据的统计完备样本, 如 Wu^[15] 的带环星系样本 (WU08), 这样可以避免一般盘星系样本中出现的选择性效应, 从而可直接统计出较为可靠而准确的 L_{NIR}^d 与 h_d 的关系。此外研究这些星系的 $L_{\text{NIR}}^d-h_d$ 关系也可探讨这样的关系是与星系形态有关的还是普适的。大约 1/4 通常观测到的透镜状/旋涡星系有环状结构, 其中少数环的产生原因是星系间相互作用, 被称之为极环 (polar rings); 而绝大多数环的形成是由于星系中心结构 (如星系旋臂、棒等) 与星系盘离中心特定距离处的转动角频率差值相对于该处邻近物质的本轮频率满足一定条件时, 周期性变化的引力矩会在该距离处径向方向施加共振, 形成一个等效引力势阱将物质俘获在其中, 形成共振环, 这类星系称之为带环星系^[16, 17], 图 1 是一些典型的带环星系图像。

WU08 采用南天区带环星系星表^[16, 17] (Catalog of Southern Ringed galaxies, CSRG) 筛选三组完备且无显著选择性效应的带环星系样本来研究星系近红外总光度 L_{NIR} 与带环星系共振环直径 D 的统计关系, 样本涵盖了带内环 (inner rings)、外环 (outer rings) 以及伪内环 (inner pseudo rings) 的三大类带环星系, 其典型的红移 (z) 值为 $4000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, $\langle V/V_{\text{max}} \rangle$ 检验显示这组样本对所有取样范围内的不同 D 的星系都是统计完备的^[15]。Wu 统计了 M_c 与 D 的相关性 (M_c 是从星系近红外绝对星等做与 D 有关的变换后得到的一个量, 十分接近星系绝对星等^[15]), 发现残差分布与高斯分布一致, 也即残差是高度随机的, 样本无明显的选择效

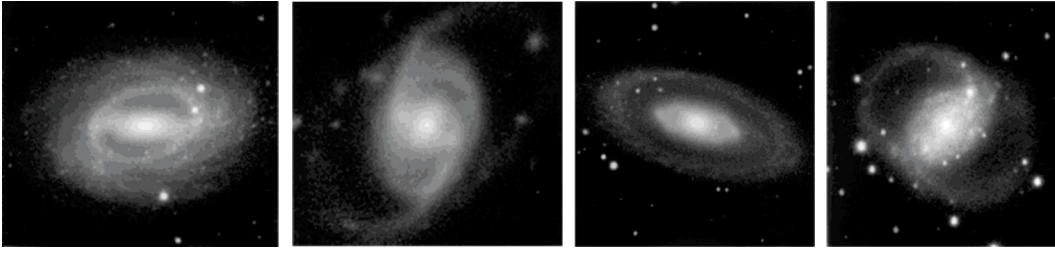


图 1 几个典型的带环星系的光学波段图像^[18]

从左至右分别为带内环星系 IC 5240、带伪内环星系 NGC 619、带外环星系 NGC 7020 以及带伪外环星系 NGC 2665。带环星系中，伪环相对于非伪环的最明显区别是其环显得较为不连续。

应存在，因此可以进行有关物理量对 D 的变化的统计。

由于带环星系包含了环以及棒等复杂结构，本身缺乏准确的面亮度分布模型，这使得难以对带环星系用包括盘、核球和这些复杂结构的模型进行精确的亮度度分解；此外大部分上述星系已有的近红外波段图像是分辨率较低的 2MASS (Two Micron All Sky Survey^[19]) 图像，使获得精确的核球与盘分解更为困难。但正如我们在第三章将要指出的，根据透镜状和旋涡星系的一般统计结果，近似地应有 $L_{\text{NIR}} \propto L_{\text{NIR}}^{\text{d}}$ 和 $R_{\text{e}} \propto h_{\text{d}}$ (R_{e} 为星系有效半径)。因此我们可研究这些星系的 L_{NIR} 和 R_{e} 的关系，这个关系可提示 $L_{\text{NIR}}^{\text{d}}$ 和 h_{d} 的关系。这样的结果可作为以后更直接地研究带环星系 $L_{\text{NIR}}^{\text{d}}-h_{\text{d}}$ 统计关系的独立检验。

具体地，我们利用 WU08 样本得到 R_{e} 与带环星系直径 D 的统计关系，然后结合 Wu^[15] 得到的 L_{NIR} 与 D 的统计关系，得到 L_{NIR} 与 R_{e} 的统计关系。我们得到的 L_{NIR} 与 R_{e} 的关系也反映了 $L_{\text{NIR}}^{\text{d}}$ 与 h_{d} 的关系，另外，对比三组不同类型的带环星系的 $L_{\text{NIR}}^{\text{d}}-h_{\text{d}}$ 关系也可以对其随形态的变化提供启示。我们间接用 D 来得到 L_{NIR} 与 R_{e} 的关系是考虑到了样本是针对环角直径选择的，因此只有 D 适合作为统计自变量，而非 R_{e} (详见第三章)。

在本文中，哈勃常数 (H_0) 采用 $65 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ ，宇宙质量密度常数 (Ω_m) 以及归一化宇宙学常数 (λ) 采用以下标准： $(\Omega_m, \lambda) = (0.3, 0.7)$ 。

2 样本及数据

WU08 样本在 CSRG 星表的基础上，选择了形态认证较为可靠的，不在富星系团且带内环、外环以及伪内环的带环星系。三类的环角直径分别被选为大于 $0'.7$ 、 $1'.1$ 与 $0'.7$ 。样本涵盖了赤纬 ($B1950$) $\leq -17^\circ$ 的南天区。

本文采用 WU08 三类带环星系样本，从 2MASS Extended Source Catalog 和 Large Galaxy Atlas 获取了有关星系的 J、H、Ks 波段的有效角半径 r_{eff} 。统计时还考虑了星系核球与盘比 (B/D) 以及星系倾角对于统计结果的影响。因此，还从 2MASS 中获取了星系聚光指数 $C (=R_{75}/R_{25})$ ，其中 R_{75} 与 R_{25} 分别指包含 75% 与 25% 的总光度处的半径，并采用了 WU08 的星系共振环的轴率 $q(=b/a)$ ，其中 a 与 b 分别是环半长轴与半短轴)。聚光指数对应

星系的 B/D ^[31]: 由于核球的尺度较小, 且流强较为集中, 核球的成分越大星系的聚光指数越大。考虑到带环星系中共振环接近圆形且在盘面上, 因此星系倾角为 $\cos^{-1} q$ 。样本中早型星系 (CSRG 形态指数 $T < 4.5$, 即按哈勃形态为 S0 和 S0/a 到 Sbc 的星系) 占绝大多数, 而且这些星系中气体尘埃较少, 这样获得的近红外数据受消光影响较小, 所以只统计研究这些星系。

对样本中每类星系统计表明 C 无显著依赖 D 的变化, 在取样的 D 范围内仅有 $\lesssim 0.1$ 的系统变化, 表明 B/D 系统变化甚微 (百分之几)。这支持了 $R_e \propto h_d$ 和 $L_{\text{NIR}} \propto L_{\text{NIR}}^d$ 的近似 (见第三章)。

3 统计与结果

主要有两方面的原因使 $R_e \propto h_d$ 和 $L_{\text{NIR}} \propto L_{\text{NIR}}^d$ 成为有效近似。在盘星系中星系的总面亮度一般可被近似地分解为盘 (disk) 和核球 (bulge) 成分。实测发现星系的核球尺度 (R_b) 与盘尺度 h_d 接近正比, 如 de Jong^[8] 得到在近红外波段统计关系 $\lg R_b = (0.95 \pm 0.17) \lg h_d - 0.86$, Méndez-Abreu 等人^[21] 也得到 $\lg R_b = (0.91 \pm 0.07) \lg h_d - (0.45 \pm 0.03)$ 。另一方面由近期统计研究可知, 近红外波段 B/D 较小且被认为基本不随星系尺度变化。特别对于 WU08 样本, 统计证据表明 B/D 变化甚小, 可被近似为常数 (详见第二章)。将 $R_b \propto h_d$ 与基本稳定的 B/D 纳入系统的星系面亮度 $I(\vec{r})$ 分解关系 $I(\vec{r}) \propto I_d(\vec{r}/h_d) + (B/D)I_b(\vec{r}/R_b)$ (I_d 和 I_b 分别为星系盘和核球的面亮度分布, \vec{r} 为从中心的位移矢量在天球面上的投影), 可知 $I(\vec{r}) \approx F(\vec{r}/h_d)$, 即整个星系的面亮度分布主要由盘成分为主, 并由一个特征尺度 h_d 决定其函数形状。相应地, 星系的有效半径 $R_e \approx f_{\text{eh}} h_d$, 而常数 f_{eh} 由 $\int_{|\vec{r}_n| < f_{\text{eh}}} F(\vec{r}_n) d^2 r_n / \int_{|\vec{r}_n| \leq \infty} F(\vec{r}_n) d^2 r_n = 1/2$ 求解 (\vec{r}_n 为归一化位置矢量)。另一方面, 也由于 B/D 近似不变, 星系总光度 $L_{\text{NIR}} = L_{\text{NIR}}^d \times (1 + B/D)$ 也近似正比于盘的 L_{NIR}^d 。在统计中, 我们进一步在统计模型中加入随星系的 B/D 以及与星系倾角有关的项, 以更直接地检验星系 B/D 和倾角对星系表面亮度的改变对统计结果造成的影响。

接第一章所述 (见倒数第二段), 用 WU08 样本统计 R_e 对 D 和 L_{NIR} 对 D 的依赖关系是合适的。但要直接进行 L_{NIR} 对 R_e 的统计, 要求在每一所考虑 R_e 值附近 $L_{\text{NIR}}-R_e$ 分布是统计完备的, 否则 L_{NIR} 会出现系统偏差; 而某一 R_e 值附近的真实带环星系分布包含了 D 不同的星系, 由于对环角直径的限制 (见第二章), D 较小的星系可能不被 WU08 样本包含。因此, 我们样本的 $L_{\text{NIR}}-R_e$ 分布并不一定是完备的, 不适于直接统计 L_{NIR} 和 R_e 关系。综合以上考虑, 我们利用下面的线性模型拟合 R_e 与 D 的关系 ($R_e = d_A(z)r_{\text{eff}}$, $d_A(z)$ 是在红移 z 处的光度距离, r_{eff} 是星系的有效角半径):

$$\lg R_e = \alpha \lg D + \sum_{i=0}^m b_i (C - 4.5)^i + \sum_{j=0}^n c_j (q - 0.5)^j + d \quad , \quad (1)$$

另外一个模型进一步考虑了聚光指数对 $\lg R_e$ 随 D 变化有影响的项:

$$\lg R_e = \alpha \lg D + \sum_{i=0}^m b_i (C - 4.5)^i + \sum_{j=0}^n c_j (q - 0.5)^j + \sum_{k=1}^p d_k (C - 4.5)^k \lg D + d \quad (2)$$

我们分别计算了 m 和 n 从 0 至 4, 以及 p 从 1 至 2 的各种情况。表 1 和表 2 给出了典型 α 值。

表 1 D 与 R_e 在 J, H, Ks 波段采用式 (1) 模型的典型的拟合结果

Band	Ring category	α_{00}	$\delta\alpha_{00}$	α_{01}	$\delta\alpha_{01}$	α_{23}	$\delta\alpha_{23}$	α_{44}	$\delta\alpha_{44}$
J	Inner	0.77	0.06	0.77	0.06	0.79	0.06	0.79	0.06
	Outer	0.59	0.07	0.57	0.07	0.59	0.07	0.57	0.07
	Inner pseudo	0.74	0.07	0.75	0.06	0.75	0.06	0.76	0.07
H	Inner	0.78	0.06	0.79	0.06	0.80	0.06	0.80	0.06
	Outer	0.62	0.08	0.59	0.07	0.61	0.07	0.59	0.07
	Inner pseudo	0.74	0.07	0.75	0.07	0.76	0.07	0.76	0.07
Ks	Inner	0.77	0.07	0.77	0.06	0.78	0.06	0.79	0.06
	Outer	0.60	0.08	0.58	0.08	0.59	0.08	0.56	0.08
	Inner pseudo	0.73	0.07	0.74	0.07	0.75	0.08	0.74	0.08

注: $\alpha_{00}, \alpha_{01}, \alpha_{23}, \alpha_{44}$ 为 $(m, n) = (0, 0), (0, 1), (2, 3)$ 以及 $(4, 4)$ 拟合得到的 α 的值, $\delta\alpha_{00}, \delta\alpha_{01}, \delta\alpha_{23}$ 以及 $\delta\alpha_{44}$ 是相应的 α 的标准差。

表 2 D 与 R_e 在 J, H, Ks 波段采用式 (2) 模型的典型的拟合结果

Band	Ring category	α_{001}	$\delta\alpha_{001}$	α_{011}	$\delta\alpha_{011}$	α_{232}	$\delta\alpha_{232}$	α_{442}	$\delta\alpha_{442}$
J	Inner	0.77	0.06	0.77	0.06	0.79	0.07	0.79	0.07
	Outer	0.57	0.07	0.57	0.07	0.65	0.08	0.62	0.08
	Inner pseudo	0.74	0.06	0.72	0.07	0.73	0.10	0.74	0.10
H	Inner	0.78	0.06	0.78	0.06	0.80	0.06	0.80	0.06
	Outer	0.60	0.07	0.60	0.07	0.63	0.08	0.61	0.08
	Inner pseudo	0.74	0.07	0.73	0.07	0.75	0.09	0.74	0.10
Ks	Inner	0.78	0.06	0.78	0.06	0.81	0.07	0.81	0.07
	Outer	0.58	0.08	0.58	0.08	0.64	0.09	0.60	0.09
	Inner pseudo	0.73	0.07	0.73	0.07	0.75	0.10	0.76	0.11

注: $\alpha_{001}, \alpha_{011}, \alpha_{232}, \alpha_{442}$ 为 $(m, n, p) = (0, 0, 1), (0, 1, 1), (2, 3, 2)$, 以及 $(4, 4, 2)$ 拟合得到的 α 的值, $\delta\alpha_{001}, \delta\alpha_{011}, \delta\alpha_{232}$ 以及 $\delta\alpha_{442}$ 是相应的 α 的标准差。

从表 1 和表 2 我们可以看出, α 变化都在 1σ 之内, 并不随 m, n, p 以及选择模型 (1) 或 (2) 而显著变化。这说明 R_e 随 D 系统变化趋势受 B/D 以及星系倾角造成的实测星系表面亮度分布变化的影响可忽略。我们分析了实测和拟合的 $\lg R_e$ 的残差: 残差的弥散均约为 0.15, 且几乎不受引入与 q, C 有关项的影响 (变化 $\lesssim 0.01$), 进一步证明了 B/D 与倾角对 α

的无关; 拟合后得到的残差分布接近高斯分布, 但在距分布中心较远的翼上会出现明显偏离, 这与标准线性拟合理论的参数误差估计所用的残差服从高斯分布的假设接近。

作为一个更定量的检验, 我们把 D 按照大于和小于中值分为两类, 然后对这两个区间的残差分布进行相互间的 Kolmogorv-Smirnov 检验 (KS^[22], 参见文献 [23]), 发现两种 D 区间的残差分布在统计上一致 (相似度一般 $\gtrsim 80\%$, 少数约 3%)。这表明残差没有随 $\lg D$ 显著的系统变化, 即斜率 α 的拟合值是系统准确的, 不受残差分布与高斯分布偏离的影响。

此外, 我们还固定 α 值, 对其他参数进行线性拟合。具体做法为: 按之前拟合所得的 $\alpha \pm 6\delta\alpha$ 范围内取样, 作为新的固定的 α ; 然后对比重新拟合得到的 χ^2 值与之前拟合得到的 χ^2 值, 其偏离程度基本符合 α 的误差服从高斯分布而 $\delta\alpha$ 为其标准差的假设。这显示即使残差相对于高斯分布有小的偏差, $\delta\alpha$ 仍是准确的误差估计。

图 2 给出了一个典型线性相关图。可以看出统计上有 $R_e \propto D^\alpha$, 并且含 q 与 C 项的值非常小, 说明 q 与 C 对拟合影响不大。

考虑到样本中星系的聚光指数典型值为 4~5, 该样本的星系模型接近 de Vaucouleurs^[24] 的 $r^{1/4}$ 律的预期, 这说明星系核球成分在星系内部中占有的比重十分显著; 但这还是与总体上低 B/D 一致的, 星系中 $B/D \approx 0.5$ 时依然可以产生较大的 C 值。如第一章所述, 以这样的 B/D 及 $R_b \propto R_e$ 可以预期 $R_e \propto h_d$ 以及 $L_{\text{NIR}} \propto L_{\text{NIR}}^d$ 应近似成立。我们的统计拟合也反映 B/D 对于 R_e 的统计无明显影响, 支持了有关预期。

此外本文也直接统计了带环星系的近红外星等 (M) 与 $\lg R_e$ 的相关性关系 (如图 3 所示)。我们发现用 $\lg R_e$ 作为自变量和 M 作为自变量分别统计所得 $\lg L_{\text{NIR}}$ 随 $\lg R_e$ 的变化斜率有较大的差异, 这一方面反映了这两者之间的相关有相当强度的弥散, 同时说明我们的样本还受一定的选择效应的影响。对比 Graham 和 Worley^[14] 的经验线性相关关系: $L_{\text{NIR}} \propto R_e^{1.45}$, 我们发现带内环、外环以及伪内环星系的 $L_{\text{NIR}}-R_e$ 关系没有明显的差异, 但对应有不同程度的弥散, 分别为 $\delta\beta \approx 0.4, 0.25, 0.5$ 。

4 总结与讨论

本文利用三组完备的带环星系样本研究了星系共振环物理直径 D 与星系的有效半径 R_e 之间的统计关系。我们发现统计关系 $R_e \propto D^\alpha$, 对带内环、外环和伪内环星系 α 分别为 0.76 ± 0.07 、 0.60 ± 0.07 和 0.75 ± 0.08 。统计结果显示样本中星系核球与盘比 (以聚光指数体现) 对 R_e 与 D 的统计关系的影响若存在也十分微弱, 否则在我们的线性拟合中增加随聚光指数 C 的变化项时, 我们应该能看到拟合得到 R_e 与 D 相关性随之发生显著变化, 但从表 1 和表 2 中我们没有看到这种现象。此外由 Wu^[15] 所得对早型带环星系的 $L_{\text{NIR}} \propto D^{1.2}$, 我们也得到了 $L_{\text{NIR}}-R_e$ 的统计关系, 既 $L_{\text{NIR}} \propto R_e^\beta$ ($\beta = 1.2/\alpha$), 对带内环、外环和伪内环的星系 β 分别为 1.58 ± 0.15 、 2.00 ± 0.27 、 1.60 ± 0.17 , 大体上和我们的直接测量结果相符。

基于一般的经验关系 $R_e \propto h_d$ (见第三章), 以上 R_e-D 结果也提示了 h_d-D 关系, 考虑到另一经验近似 $L_{\text{NIR}} \propto L_{\text{NIR}}^d$ (见第三章), 从我们的 $L_{\text{NIR}}-R_e$ 结果进一步提示对带环星系也有

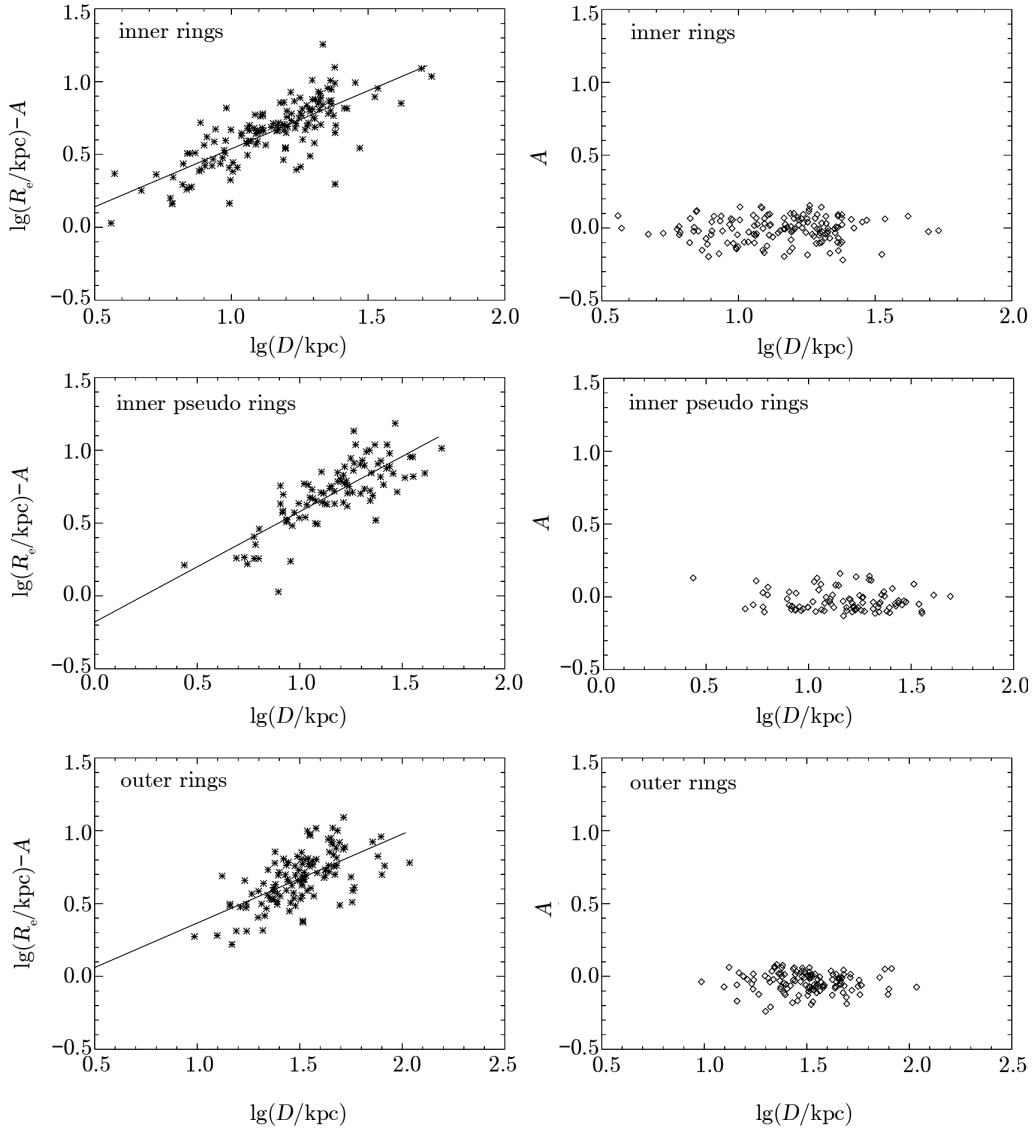


图 2 带内环、伪内环以及外环星系在 H 波段的 $\lg R_e$ 与 $\lg D$ 在 m, n, p 分别为 2, 2, 0 的拟合线性相关图。

图中 A 是式 (1) 中依赖 q 与 C 的项。左图为 $\lg R_e - A$ 与 $\lg D$ 的关系图，右图为 A 与 $\lg D$ 的关系图。

统计关系, $L_{\text{NIR}}^{\text{d}} \propto h_{\text{d}}^{\beta}$ 。我们的 β (见以上) 较为接近 Freeman 的 $L^{\text{d}} \propto h_{\text{d}}^2$ (即盘中心面亮度接近常数) 以及 Graham 和 Worley^[14] 得到的 $L_{\text{NIR}} \propto h_{\text{d}}^{1.45 \pm 0.08}$ 。对三组带环星系求平均, β 值为 1.73 ± 0.12 。这与 Courteau^[13] 对 Sa 星系 K 波段数据统计得到的 $L_{\text{NIR}}^{\text{d}} \propto h_{\text{d}}^{1.75 \pm 0.12}$ 基本一致。相对于另一些近红外波段研究结果, 如 de Jong 的 $\beta = 1.3$, Khosroshahi^[9] 的 $\beta = 1$ 以及 Möllenhoff^[10] 的 $\beta = 0.8$, 也大致和我们的直接测量相一致, 尤其是伪内环星系的 $L_{\text{NIR}} - R_e^{\beta}$ 的关系。这样的基本一致性, 一方面以较可靠样本支持了一般星系中 $L_{\text{NIR}}^{\text{d}}$ 与 h_{d} 的关系, 另

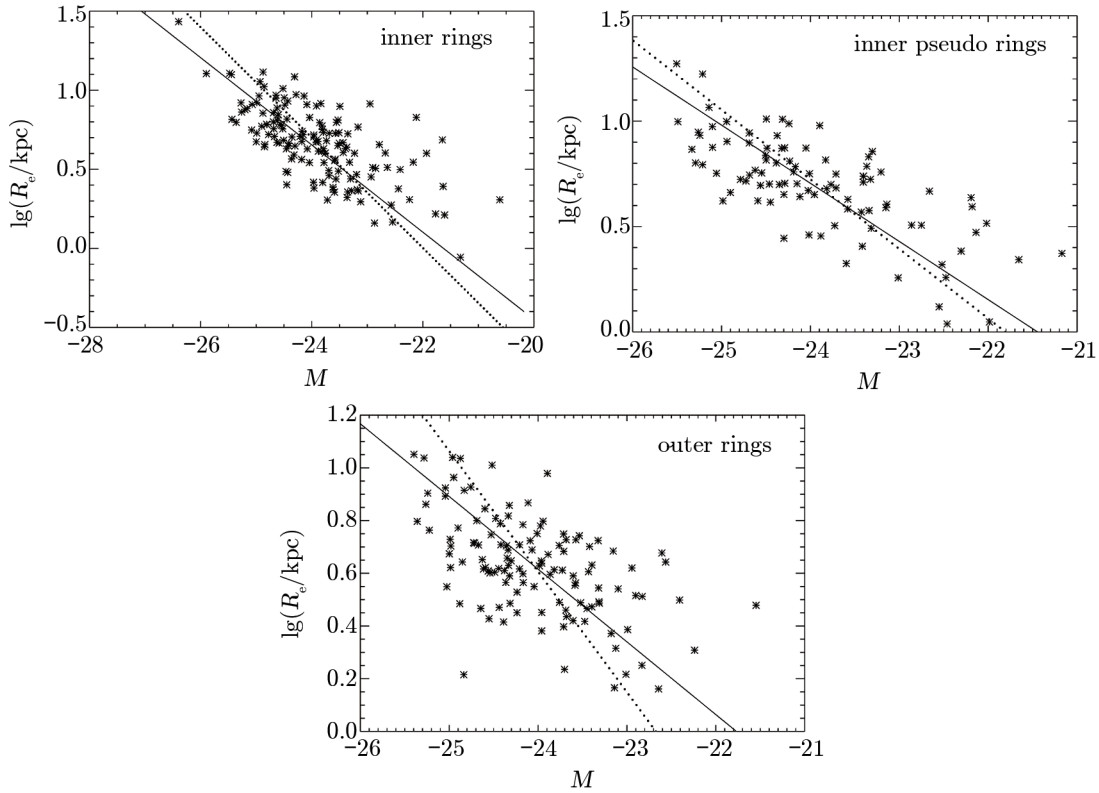


图 3 带内环、伪内环以及外环星系在 H 波段的 M 与 $\lg R_e$ 的线性相关图。

图中虚线部分是直接拟合 M - $\lg R_e$ 在 m, n, p 分别为 0, 0, 0 的拟合线性相关图, 即 $M \propto k \lg R_e$, k 在内环、伪内环以及外环星系中分别为 -2.86 ± 0.25 、 -3.03 ± 0.30 以及 -2.18 ± 0.30 。为了便于与 $\lg R_e$ - D 的统计结果对照, 在图中自变量 $\lg R_e$ 改为 Y 轴方向, 实线部分是 Graham 和 Worley^[14] 得到的经验线性相关性直线, 斜率为 -3.63 。

一方面也初步显示了带环星系中的盘与一般的星系盘在动力学上相似。这可能是由于形成和演化过程相似导致, 共振环对带环星系的结构和演化总体上影响较小; 这也为以后用 (因环的可见性) 较易获得完备样本的带环星系来研究一般的透镜状和旋涡星系的动力学性质提供了一定依据。从表 1 和表 2 也可以看出, 对于不同的带环星系, 拟合得到的 α 值也有所差异, 尤其带外环星系的 α 高于其他两类星系 ($\approx 1.5\sigma$); 这暗示 β 可能随星系形态有所变化, 可能进一步印证了 Courteau^[13] 以及 Graham 和 Worley^[14] 对不同形态星系的 β 有 $\approx 2\sigma$ 差异的研究结果。我们的结果也与 Shen 等人^[11] 在相似星等范围 ($M_H \lesssim -22$ 的早型星系, 按典型 $r' - H$ 颜色对应 $M_{r'} \lesssim -20$) 的光学波段的结果接近, $L \propto R_{50}^{1.73}$ (L 和 R_{50} 分别为星系的 r' 波段 Petrosian 的光度和有效半径), 对应于 $L_{\text{NIR}}^d \propto h_d^{1.73}$ (见 Graham 和 Worley 的讨论^[14])。最后本文的研究结果也较直接地验证了 Wu^[15] 利用获得的带环星系中 L_{NIR} 与 D 的统计关系并采用以往文献中 L_{NIR}^d 与 h_d 的结果推导出的 $h_d \propto D^m$, 其 m 值介于 0.6 与 1.8 之间。我们的结果中 m 值介于 0.6 与 0.8 之间, 按 Wu^[15] 的讨论这样的 m 值说明在常见带环

星系中, 盘质量占动力学质量比例分布和盘早期温度的系统变化有上限值, 分别为 30% 和 10%~20%。 D 在样本的范围内约有 5 倍的变化, 这样大的 D 范围内有这样小的星系动力学性质的系统变化是值得注意的。此结果反映带环星系的形成和结构特征有相当的一致性, 这对于未来研究带环星系的结构和演化, 以及利用数值模拟研究带环星系形成有重要的启示意义。

致谢

感谢中国科学院国家天文台/云南天文台在资金项目上的支持, 感谢韩占文老师、王建成老师和陈培生老师提供的帮助和建议, 感谢杨光普同学帮助对本文语言描述进行大幅度修改。

参考文献:

- [1] Fathi K, Allen M, Boch T, et al. MNRAS, 2010, 406: 1595
- [2] Barnes J E. ApJ, 1988, 331: 699
- [3] Barnes J E, Hernquist L. ARA&A, 1992, 30: 705
- [4] Barnes J E. ApJ, 1992, 393: 484
- [5] Barnes J E, Hernquist L. ApJ, 1996, 471: 115
- [6] Rautiainen P, Salo H. A&A, 2000, 362: 465
- [7] Freeman K C. ApJ, 1970, 160: 811
- [8] de Jong R S. A&A, 1996, 313: 45
- [9] Khosroshahi H G, Wadadekar Y, et al. ApJ, 2000, 533: 162
- [10] Möllenhoff C, Heidt J. A&A, 2001, 368: 16
- [11] Shen S, Mo H J, White S D M, et al. MNRAS, 2003, 343: 978
- [12] Abazajian K, Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, et al. AJ, 2003, 126: 2081
- [13] Courteau S, Dutton A A, van den Bosch F C, et al. ApJ, 2007, 671: 203
- [14] Graham A W, Worley C C. MNRAS, 2008, 388: 1708
- [15] Wu W. AJ, 2008, 135: 268
- [16] Buta R. ApJS, 1995, 96: 39
- [17] Buta R. ApJS, 1995, 98: 739
- [18] Buta R. Annals of the New York Academy of Sciences, 1990, 596: 58
- [19] Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. AJ, 2006, 131: 1163
- [20] Graham A W. MNRAS, 2001, 326: 543
- [21] Méndez-Abreu J, Aguerri J A L, Corsini E M, Simonneau E. A&A, 2008, 478: 353
- [22] Kormendy J. ApJ, 1979, 227: 714
- [23] Press W H, eds. Numerical recipes in C, the art of scientific computing, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 730
- [24] de Vaucouleurs G. Astronomicheskii Zhurnal, 1959, 36: 977
- [25] de Vaucouleurs G, Buta R. AJ, 1983, 88: 939
- [26] Ganda K, Peletier R F, Balcells M, Falcón-Barroso J. MNRAS, 2009, 395: 1669
- [27] Jarrett T H, Chester T, Cutri R, et al. AJ, 2000, 119: 2498
- [28] Jarrett T H, Chester T, Cutri R, Schneider S E, et al. AJ, 2003, 125: 525
- [29] Nilson P. Nova Acta Regiae Societatis Scientiarum Upsaliensis - Uppsala Astronomiska Observatoriums Annaler, Uppsala: Astronomiska Observatorium, 1973: 1

[30] Simard L, Mendel J T, Patton D R, et al. *ApJS*, 2011, 196: 11

[31] Wang M, Kong X. *Progress in Astronomy*, 2007, 25: 215

[32] Wu W. *AJ*, 2009, 137: 3455

Statistical Correlations between Effective Radii and Total Near-Infrared Luminosities in Field Ringed Galaxies

QIN Long-hua^{1,2,3}, WU Wen-tao^{1,2}

(1. *National Astronomical Observatories/Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China*; 2. *Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China* 3. *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Based on statistically complete samples of resonance-ringed galaxies compiled by Wu , and their 2MASS J, H, and Ks band data, we use liner models to fit the statistical correlations between their effective radii (R_e) and physical ring diameters (D). In these models we have properly taken into account influences of various relevant factors. We find that galaxies with inner rings, outer rings, and inner pseudo rings have systematic relations $R_e \propto D^{0.76 \pm 0.07}$, $R_e \propto D^{0.60 \pm 0.08}$, and $R_e \propto D^{0.75 \pm 0.08}$, respectively. Based on a correlation between galaxy total near-infrared luminosities (L_{NIR}) and D found by Wu , $L_{\text{NIR}} \propto D^{1.2}$, we convert our results to correlations between L_{NIR} and R_e in ringed galaxies, $L_{\text{NIR}} \propto R_e^\beta$. For galaxies with inner rings, outer ringers, and inner pseudo rings, β are 1.58 ± 0.15 , 2.00 ± 0.27 , and 1.60 ± 0.17 , respectively. These inferred values are roughly consistent with our direct measurements. Given the empirical liner correction between R_e and galaxy disk scale lengths (h_d), this relation confirms the suggested correlation between D and h_d of Wu. It means that, among typical ringed galaxies of different disk temperature, there is not much variation in the fraction of disk to total dynamical mass. Combined with the empirical correlations between luminosities and h_d , these results suggest that for disks in ringed galaxies, the correlations between L_{NIR}^d and h_d are close to those within general disk-galaxies.

Key words: ringed galaxies; spiral galaxies; statistics