

近邻宇宙大星系潮汐结构的搜寻研究*

黄松立^{1,2} 房敏^{1,2†} 刘文浩^{1,2} 郑宪忠^{1,2} 潘治政^{1,2}
刘滨阳^{1,2} 杨超^{1,2} 常江^{1,2} 王蕾^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 在星系形成和演化的等级成团模型中, 星系之间的相互作用和并合过程是星系质量增长的重要机制, 会在星系周围产生一些低面亮度的潮汐结构. 观测上, 需要长时间曝光并结合特定的图像处理技术以获得更深的图像, 从而能够探测和研究这些较暗的结构. 为寻找近邻星系周围的潮汐结构, 从前人给出的源表中筛选出 76 个大星系样本, 并利用 ZTF (Zwicky Transient Facility) 时域巡天的 g 和 r 两个波段的数据进行图像叠加, 得到的深场图像的平均深度(面亮度极限)为 $\mu_g(3\sigma, 10'' \times 10'') = (28.86 \pm 0.27) \text{ mag}/('')^2$, $\mu_r(3\sigma, 10'' \times 10'') = (28.65 \pm 0.27) \text{ mag}/('')^2$ (其中 σ 为天光背景噪声标准差), 与国际上多数同类深场巡天深度相当. 在所有样本星系中, 22 个星系周围已知存在潮汐结构, 成功探测到其中 20 个星系附近的结构, 并在一个星系周围首次发现了潮汐结构. 对其中的星系 NGC 5907 周围的星流结构分析了形态并与前人文章进行了比较, 验证了单一环状星流的结论. 其次, 分析了在星系 NGC 4725 周围新发现的 3 个暗弱潮汐结构, 其中位于东北侧的结构颜色较蓝(g 、 r 波段星等差 $g - r$ 约 0.4–0.6), 与东北方向的伴星系 NGC 4747 颜色相似, 可能源于两个星系之间的相互作用; 位于东侧和东南侧的结构在位置和形态上对应于一个整体的环状结构, 其颜色均较红($g - r$ 约 0.7–0.9) 且与 NGC 4725 东侧外晕颜色一致, 可能来源于较年老的矮椭球星系的潮汐瓦解, 或者是 NGC 4725 在与 NGC 4747 相互作用的过程中被撕扯出去的盘成分. 后续还需利用更高分辨率、更深的 WFST (Wide Field Survey Telescope) 及其他波段数据对发现的潮汐结构进一步验证, 并通过数值模拟帮助理解星系相互作用过程. 最后, 在部分样本星系图像中发现延展的前景银河系卷云污染, 其面亮度较低(暗于 $\mu_g = 26 \text{ mag}/('')^2$) 且颜色($g - r$ 约 0.41) 蓝于河外星系等天体成分. 结果显示, 这类卷云反射光会影响星系周围暗弱潮汐结构的探测分析, 但是容易被辨认出来.

关键词 星系: 演化, 星系: 相互作用, 技术: 图像处理, 技术: 测光, 方法: 观测

中图分类号: P157; 文献标识码: A

1 引言

目前的星系形成和演化的等级成团模型 (Hierarchical model) 认为, 如今宇宙的大质量星系

的形成会经历较多的碰撞并合和矮星系吸积过程, 而并合或吸积过程会产生一些面亮度较低的潮汐结构 (Tidal structure), 又称低面亮度结构 (Low Surface Brightness Structure, LSBs), 如潮汐星流

2024-04-19 收到原稿, 2024-05-12 收到修改稿

* 国家重点研发项目 (2023YFA1608100) 资助

† mfang@pmo.ac.cn

(Tidal stream)、潮汐尾(Tidal tail)、壳结构(Shell)等^[1]. 其中星流是比较细长的结构, 主要产生自主星系对矮卫星星系的吸积过程, 即发生了次并合(Minor merger), 指的是质量相差悬殊的星系之间发生的并合过程, 在晚型星系(Late Type Galaxy, LTG)周围常见^[2]; 潮汐尾结构通常比星流更延展、范围更大, 有时表现为羽状结构(Plume), 主要源于质量相近的星系之间的主并合(Major merger)过程, 常见于早型星系(Early Type Galaxy, ETG)周围^[3]; 壳结构较为特殊, 表现为同心且成组出现的弧状特征, 通常来源于中等质量比的星系并合(约1:10), 且两个星系需以特定轨道发生碰撞^[4]. Sola等^[5]对近邻宇宙中300多个星系(包含数量相近的早型和晚型星系)周围存在的潮汐结构进行了形态和颜色上的统计研究, 他们发现, 潮汐尾很大概率会成对出现且比星流分布面积更广. 并且, 由于潮汐尾产生自气体含量更丰富的主并合过程, 其中的恒星形成更加活跃, 因此颜色通常比星流更蓝且亮度更高, 但存在时标更短.

Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter)宇宙学数值模拟表明, 随着星系的演化, 几乎所有大质量星系周围都会存在潮汐结构^[6]. 至少对于我们所在的银河系和邻居M31是这样: 早在30年前, 环绕银河系的人马座星流(Sagittarius stream)便被发现^[7], 而后又有许多更暗的星流被陆续探测到; 仙女座全景考古巡天(Pan-Andromeda Archaeological Survey, PAndAS)同样给出了关于M31星系晕中相似结构的观测结果^[8]. 这一结构证实了理论的预测, 即矮星系的潮汐瓦解是大质量晚型星系周围星流和弥漫晕结构形成的重要成因^[9]. 为了排除本星系群中两个旋涡星系并合历史的非典型性, 需要对更大样本的近邻星系进行搜寻研究. 对于这些潮汐结构的识别和分析可以得出其星族组分的年龄、金属丰度等性质, 从而推断出其宿主星系的形成历史. 另外, 观测与模拟数据的结合, 可以帮助我们理解星系所发生的并合过程, 从而进一步限制星系演化模型. 比如, Martínez-Delgado等^[2]将其对于近邻大星系的观测结果与N体数值模拟预测的由吸积卫星星系形成的星系晕结构^[6]进行了比较, 发现两者有着惊人的相似.

潮汐结构的面亮度一般很低($\mu_g > 25 \text{ mag}/(')^2$), 在较浅的图像中很难探测到. 对于近邻宇宙中的星系, 需要利用深场图像才能对周围潜在的暗弱潮汐结构进行探测和研究, 这就需要望远镜长时间曝光并结合特定的图像处理技术来获得更深的图像, 相关技术包括图像背景扣除(Background subtraction)和图像叠加(Image coaddition)等. 其中图像叠加是天文图像处理中最为基本的操作之一, 目的是为了延长目标天体的有效曝光时间, 提高其信噪比, 获得单幅图像无法达到的深度, 从而能探测到更多暗源.

目前对于近邻宇宙中大星系的潮汐结构搜寻是星系形成研究的热点方向之一, 已有许多工作对潮汐结构进行了搜寻和性质研究, 但缺乏对大样本的搜寻和对结构详细性质的研究工作. 在各种口径的望远镜中, 小口径业余望远镜($< 1 \text{ m}$)的深场观测普遍需要动辄几十个小时的长时间曝光, 且目标数量有限; 大口径望远镜(8–10 m)一般是对单个源观测, 样本数量少, 且很少用于对近邻星系的极深成像^[10]. 相比小口径业余望远镜, 专业的巡天望远镜具有一定的优势, 比如1.2 m口径茨威基暂现源设施(Zwicky Transient Facility, ZTF)^[11]和2.5 m口径大视场巡天望远镜(Wide Field Survey Telescope, WFST)^[12], 可用更少的曝光时间达到大致相同的深度, 并覆盖更多的源. 然而, 目前国际知名的3.6 m加拿大-法国-夏威夷望远镜(Canada-France-Hawaii Telescope, CFHT)参与的巡天项目^[3, 13]主要针对的是近邻宇宙中的早型星系; 2.5 m斯隆望远镜进行的巡天多用于除低面亮度结构搜寻外的其他科学领域, 除了Fliri等^[14]进行的IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias) Stripe 82传世巡天(Legacy Survey). 他们利用斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)的Stripe 82天区数据进行图像叠加, 开展低面亮度领域相关科学研究, 达到的深度为 $\mu_r(3\sigma, 10'' \times 10'') = 28.5 \text{ mag}/(')^2$. 国内由中国科学技术大学与紫金山天文台共建的2.5 m口径WFST兼具大视场、全北天覆盖、深度优越等特点, 对其图像进行叠加后面亮度极限预计可达 $\mu_r(3\sigma, 10'' \times 10'') =$

28.7 mag/(")² (总曝光时间 50 min), 在暗弱源搜寻方面具有较大优势^[12]. 其预期不久后将正式投入使用, 产出科学数据, 并将在一定程度上填补大样本潮汐结构搜寻这一领域的空白. 面向WFST的科学需求, 我们基于ZTF巡天数据, 开展图像叠加算法优化并应用于近邻星系样本的潮汐结构搜寻研究.

本文内容组织如下: 我们将在第2节介绍观测数据的来源以及星系样本的筛选, 在第3节对图像处理和测光流程作详细描述, 并在第4节对结果进行讨论, 第5节将对本工作内容进行总结.

2 数据和样本选取

2.1 观测数据的获取

本工作采用的观测数据来自ZTF, 其为针对北天的大视场光学时域巡天, 采用帕洛玛天文台(Palomar Observatory)的48英寸(1.2 m)口径施密特望远镜, 相机包含16片6K × 6K像素CCD (Charge Coupled Device), 每片CCD划分为4个读出通道. CCD像素大小为1.012" · pixel⁻¹, 相机总视场覆盖47 deg², 并以约3760 deg² · h⁻¹的速率扫描整个可见北天, 单次曝光时间30 s, 读出时间10 s, 曝光间隔15 s. 其光学图像覆盖g、r和i波段, 针对点源的探测深度(对应波段的极限星等)分别为: $g = 21.1 \text{ mag}$ 、 $r = 20.9 \text{ mag}$ 、 $i = 20.2 \text{ mag}$ (AB星等, 5σ , 30 s曝光)^[15]. 图像中点源流量分布的半高全宽(Full Width at Half-Maximum, FWHM)为2" (中值).

ZTF的科学目标主要是对瞬时和动态事件的观测, 包括近地小天体、稀有且流量变化迅速的暂现源以及各种银河系变源, 但针对静态图像叠加这一领域涉及较少. 虽然对于单个目标天体的观测图像深度不如小口径业余望远镜和小视场空间望远镜(如哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope, HST)), 但由于其数据覆盖整个北天, 可供研究的星系样本较多, 因此可用于进行大样本星系潮汐结构搜寻的科学研究.

在本工作中, 我们采用的是ZTF的g和r波段归档科学图像(Archived science image), 并且对于部分质量较差的图像进行了适当剔除. 数据来源于IRSA (Infrared Science Archive)官网¹, 其已经进行了一些图像预处理操作, 包括本底扣除、暗流扣除、平场改正、天体位置定标和流量定标等步骤. 图像拍摄时间范围为2018年3月至2023年6月.

2.2 样本的选取

本工作所选取的近邻星系样本来自于3个部分: Karachentsev等^[16]文中给出的最新近邻星系源表(Updated Nearby Galaxy Catalog) (以下简称K13源表)、Mao等^[17]文中类银河星系周围卫星星系巡天阶段II (Satellites Around Galactic Analogs (SAGA) Survey Stage II)的宿主星系样本(以下简称M20样本)以及Jarrett等^[18]文中给出的广域红外巡天探测器展源表(Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) Extended Source Catalog, WXSC) (以下简称J19源表), 下面分别进行介绍.

K13源表包含约1400个星系, 星系距离最远能达到约50 Mpc, 大部分星系(约87%)距离在11 Mpc以内. 该表对每个星系都列有许多可观测量, 包括角直径、视轴比、方位角以及通过多种方法测得的距离等, 并指明了星系是否是矮星系且给出了矮星系分类. 本文对K13源表的筛选标准如下: (1)位于北天球(即赤纬 $\delta > 0$), 以符合ZTF的科学目标; (2)非矮星系; (3)对应星系的ZTF数据质量较好(infobits = 0, 图像能完整覆盖样本星系且星系不处于读出通道的视场边缘, g和r波段图像数量均大于100幅, 不含明显图像缺陷(Artifact)且星系低面亮度结构周围无大范围亮星污染). 根据上述标准, 最终挑选出43个样本星系.

M20样本包含36个类银河星系, 在所有宿主星系周围约300 kpc范围内总共识别出127个卫星星系. 其中宿主星系的距离约为25–40.75 Mpc, 日心速度(Heliocentric velocity)大于1400 km · s⁻¹, 星系K波段绝对星等范围为 $-24.6 < M_K < -23$, 对应恒星质量范围为 $10^{10} - 10^{11} M_{\odot}$. 对于M20样本, 本文筛选出所有位于北天球且ZTF数据质量较好

¹<https://irsa.ipac.caltech.edu>

的星系, 得到17个样本星系.

J19源表包含WISE拍摄的中红外波段的全天100个角尺寸最大的星系, 根据星系在WISE W1 (3.4 μm)波段 1σ 天光背景等光半径 R_{W1} 进行筛选得到(该半径处对应面亮度约23 $\text{mag}/('')^2$, Vega星等), 角尺寸范围在5'-300'. 该源表包含了本星系群(Local Group)中的大部分星系, 距离约在37 Mpc以内. 该源表给出了星系形态、视轴比、方位角、 R_{W1} 角尺寸等参数. 对于J19源表, 本文同样对其筛选出所有位于北天球且ZTF数据质量较好的星系, 同时排除与前述样本重复的星系以及本星系群中位于密集星场中的星系(MAFFEI1和MAFFEI2), 得到16个样本星系. 需要说明的是, 由于J19源表包含本星系群中的源, 其中存在一些角尺寸较大但物理尺寸很小的星系, 不符合本工作的目标中“大(尺寸)星系”的范畴(如M31的卫星星系和一些矮星系). 然而, 在经过前述筛选后, 16个样本中的两个本星系群矮星系周围已知存在

潮汐结构(M110和NGC 0147), 因此我们将其保留.

本研究中最终的76个样本以及它们的主要性质、潮汐结构研究情况以及叠加图像总曝光时间和深度(深度的计算见第3.5节)均展示在表1中. 对于每个星系, 我们提供了: (1)星系主要名称; (2)赤经R.A.; (3)赤纬Dec.; (4)角直径 a_{25} ; (5)线直径 A_{25} ; (6)视轴比 b/a (b 和 a 分别为视椭圆半长轴和半短轴); (7)距离 D ; (8)星系形态(Morph); (9)是否存在低面亮度结构(LSBS)及相关文献; (10)叠加图像总曝光时间(g波段/r波段); (11)叠加图像极限面亮度 μ_{lim} (g波段/r波段). 由于3批样本的角尺寸性质的参考标准不同, 为了便于比较, 均采用NED² (NASA/IPAC Extragalactic Database)中给出的 a_{25} 角直径(即B波段面亮度为25 $\text{mag}/('')^2$ 处对应的椭圆长轴直径), 线直径 A_{25} 根据3批样本中各自给出的距离和上述角直径计算得到. 所有样本的星系形态参考NED中给出的分类(RC3哈勃型), M20样本的视轴比参考NED.

表 1 样本星系主要性质及叠加图像曝光时间和深度

Table 1 Main properties of sample galaxies as well as exposure time and depth of coadded images

Galaxy Name	R.A./ $^{\circ}$	Dec./ $^{\circ}$	$a_{25}/'$	A_{25}/kpc	b/a	D/Mpc	Morph	LSBS	Exposure Time/h	$\mu_{\text{lim}}/[\text{mag}\cdot('')^{-2}]$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
DDO 047	115.479	16.801	5.0	11.9	0.85	8.17	IB(s)m	N	2.5/5.3	28.65/28.64
DDO 084	160.675	34.449	5.3	15.3	0.74	9.95	Im	N	6.3/9.1	29.27/29.02
IC 0342	56.704	68.096	24.0	22.9	0.91	3.28	SAB(rs)cd	N	1.9/2.5	28.51/28.18
IC 0356	61.945	69.813	5.0	17.1	0.72	11.75	SA(s)ab pec	N	2.7/3.0	28.52/28.15
IC 1727	26.875	27.331	8.0	17.3	0.36	7.45	SB(s)m	N	3.0/4.1	28.65/28.53
IC 2574	157.093	68.416	15.0	17.2	0.41	3.93	SAB(s)m	N	2.8/3.2	28.72/28.39
IC 3247	185.808	28.894	2.3	16.3	0.17	24.40	(R')SAB0 ⁺ (r)	N	4.2/4.5	28.91/28.64
M51a	202.470	47.234	9.0	22.0	0.85	8.40	SA(s)bc pec	Y ^[19-20]	5.6/5.6	29.06/28.93
M51b	202.495	47.268	7.0	15.6	0.92	7.66	I0 pec	Y ^[20-21]	5.6/5.6	29.06/28.93
M63	198.955	42.029	15.0	39.4	0.57	9.04	SA(rs)bc	Y ^[22]	6.3/6.0	29.15/28.80
M64	194.184	21.685	10.0	12.8	0.52	4.41	(R)SA(rs)ab	N	3.5/4.3	28.86/28.49
M74	24.172	15.787	12.0	35.6	0.94	10.19	SA(s)c	N	3.1/3.9	28.88/28.64
M81	148.890	69.067	26.0	28.0	0.52	3.70	SA(s)ab	Y ^[23-24]	2.2/2.6	28.50/28.21

²<https://ned.ipac.caltech.edu>

表1 续
Table 1 Continued

Galaxy Name	R.A./°	Dec./°	$a_{25}/'$	$A_{25}/$ kpc	b/a	$D/$ Mpc	Morph	LSBS	Exposure Time/h	$\mu_{\text{lim}}/$ [mag·('') ⁻²]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
M82	148.975	69.682	13.0	13.7	0.38	3.61	I0	Y ^[23-24]	5.0/5.2	28.87/28.69
M84	186.266	12.887	5.0	25.7	0.97	17.70	E1	Y ^[1]	4.0/4.6	28.73/28.54
M86	186.549	12.946	12.0	57.0	0.62	16.32	S0(3)/E3	Y ^[1]	4.0/4.6	28.73/28.54
M94	192.723	41.119	14.0	18.0	0.81	4.41	(R)SA(r)ab	N	5.0/4.5	29.18/28.94
M98	183.451	14.901	9.9	46.0	0.28	15.98	SAB(s)ab	N	4.0/4.9	28.77/28.57
M101	210.803	54.351	28.0	56.6	0.93	6.95	SAB(rs)cd	Y ^[25]	8.0/7.1	29.21/28.91
M105	161.957	12.582	3.8	12.5	0.89	11.32	E1	Y ^[26]	1.3/1.7	28.39/28.19
M106	184.740	47.304	22.0	49.0	0.39	7.66	SAB(s)bc	Y ^[27-28]	3.9/3.7	28.71/28.49
M110	10.092	41.685	19.0	4.5	0.50	0.82	E5	Y ^[29-30]	6.2/8.4	28.72/28.25
NGC 0147	8.301	48.509	15.0	3.2	0.57	0.73	E5 pec	Y ^[31]	4.5/7.8	28.73/28.45
NGC 0672	26.972	27.434	7.2	15.0	0.36	7.18	SB(s)cd	N	3.0/4.1	28.66/28.54
NGC 0925	36.817	33.578	13.0	36.1	0.56	9.55	SAB(s)d	N	3.5/5.0	28.88/28.63
NGC 1023	40.100	39.063	8.5	25.7	0.47	10.41	SB(rs)0-	N	3.8/5.9	28.83/28.65
NGC 1055	40.438	0.444	8.0	33.0	0.30	14.16	SBb	Y ^[2]	2.9/2.8	28.56/28.34
NGC 2403	114.214	65.599	28.0	26.0	0.56	3.19	SAB(s)cd	N	3.4/4.2	28.92/28.63
NGC 2500	120.472	50.737	2.8	10.1	0.84	12.40	SB(rs)d	N	4.7/6.4	29.01/28.79
NGC 2541	123.667	49.062	8.1	29.2	0.53	12.40	SA(s)cd	N	3.5/5.1	29.00/28.78
NGC 2552	124.835	50.010	3.9	14.1	0.74	12.40	SA(s)m	N	4.6/6.4	28.98/28.73
NGC 2768	137.906	60.038	6.5	39.0	0.32	20.60	E6	N	5.2/6.0	29.02/28.62
NGC 2841	140.511	50.977	7.4	30.3	0.47	14.08	SA(r)b	N	4.7/7.3	28.91/28.85
NGC 2962	145.225	5.166	3.0	30.4	0.73	34.80	(R)SAB0 ⁺ (rs)	N	2.0/4.3	28.33/28.64
NGC 2967	145.514	0.336	2.8	24.4	1.00	29.90	SA(s)c	N	1.9/3.8	28.33/28.52
NGC 3104	150.989	40.757	3.6	16.8	0.56	16.00	IAB(s)m	N	3.8/5.1	28.83/28.65
NGC 3344	160.876	24.924	7.5	21.4	0.90	9.82	(R)SAB(r)bc	N	2.1/4.0	28.70/28.50
NGC 3377	161.927	13.986	4.0	12.1	0.58	10.42	E5-6	N	1.8/2.7	28.42/28.23
NGC 3412	162.722	13.412	3.3	10.9	0.56	11.32	SB0 ⁺ (s)	N	1.9/2.9	28.44/28.32
NGC 3432	163.130	36.619	7.5	19.9	0.22	9.14	SB(s)m	Y ^[32]	3.5/4.9	28.83/28.52
NGC 3489	165.078	13.901	3.2	11.2	0.57	12.08	SAB0 ⁺ (rs)	N	1.8/2.8	28.37/28.24
NGC 3593	168.650	12.819	5.2	16.3	0.43	10.80	SA(s)0/a	N	2.2/2.6	28.64/28.22
NGC 3689	172.046	25.661	1.6	18.5	0.62	39.80	SAB(rs)c	Y ^[9, 33]	3.7/5.1	28.89/28.75

表1 续
Table 1 Continued

Galaxy Name	R.A./°	Dec./°	a_{25}''	A_{25}/kpc	b/a	D/Mpc	Morph	LSBS	Exposure Time/h	$\mu_{\text{lim}}/''^{-2}$ [mag·(″) ⁻²]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
NGC 3976	178.989	6.750	3.6	37.6	0.31	35.90	SAB(s)b	N	1.7/2.4	28.36/28.21
NGC 4144	182.497	46.457	6.9	13.8	0.21	6.89	SAB(s)cd	N	4.9/5.0	29.11/28.89
NGC 4158	182.792	20.176	1.7	17.9	0.94	36.20	SA(r)b	N	2.7/2.8	28.79/28.49
NGC 4204	183.810	20.659	4.7	10.9	0.81	8.00	SB(s)dm	N	6.8/8.4	29.22/29.01
NGC 4217	183.962	47.092	5.5	29.7	0.17	18.57	Sb	N	5.3/5.6	28.98/28.89
NGC 4242	184.376	45.619	5.7	12.6	0.76	7.62	SAB(s)dm	N	4.9/4.7	29.08/28.76
NGC 4244	184.375	37.808	18.5	23.2	0.11	4.31	SA(s)cd	N	3.9/4.1	29.08/28.82
NGC 4278	185.028	29.281	3.5	16.4	0.92	16.07	E1-2	N	4.2/5.6	28.91/28.57
NGC 4365	186.118	7.318	5.5	34.7	0.68	21.68	E3	Y ^[34-35]	2.4/2.7	28.75/28.50
NGC 4490	187.652	41.644	7.0	18.1	0.49	8.91	SB(s)d pec	Y ^[36]	10.8/11.4	29.39/29.19
NGC 4656	190.990	32.170	22.0	51.1	0.15	7.98	SB(s)m pec	Y ^[37]	3.6/3.7	29.04/28.64
NGC 4725	192.611	25.501	12.0	44.5	0.63	12.74	SAB(r)ab pec	N	3.0/5.5	29.04/28.74
NGC 4762	193.233	11.231	9.0	36.3	0.29	13.86	SB0 [^] 0(r)	Y ^[38-39]	2.2/3.2	28.62/28.41
NGC 5023	198.050	44.039	7.5	13.2	0.11	6.05	Scd	N	6.2/6.6	29.10/28.86
NGC 5297	206.599	43.872	5.8	59.9	0.17	35.50	SAB(s)c	Y ^[33]	6.7/7.1	29.14/28.93
NGC 5347	208.324	33.491	1.7	17.1	0.82	34.60	(R')SB(rs)ab	N	4.6/4.5	29.04/28.80
NGC 5363	209.030	5.255	5.5	32.5	0.68	20.30	I0	Y ^[40]	2.1/2.5	28.53/28.27
NGC 5448	210.708	49.173	4.3	41.9	0.47	33.50	(R)SAB(r)a	N	7.4/8.5	29.25/29.21
NGC 5602	215.578	50.501	1.4	13.9	0.50	34.00	Sa	N	7.4/8.3	29.27/29.16
NGC 5633	216.868	46.147	2.5	25.2	0.44	34.60	(R)SA(rs)b	N	6.5/8.2	29.19/29.11
NGC 5869	227.456	0.470	1.0	8.8	0.80	30.10	SAB0 [^] -	N	1.8/2.5	28.35/28.30
NGC 5907	228.973	56.329	12.8	63.5	0.19	17.06	SA(s)c	Y ^[41-44]	9.4/8.9	29.28/29.00
NGC 5962	234.132	16.608	2.8	22.7	0.71	27.90	SA(r)c	N	3.5/4.6	28.77/28.62
NGC 6181	248.088	19.824	2.5	24.4	0.40	33.60	SAB(rs)c	N	4.0/4.8	29.01/28.63
NGC 6278	255.210	23.011	2.1	24.0	0.57	39.30	S0	N	9.0/8.9	29.27/28.98
NGC 6503	267.365	70.145	8.0	14.5	0.34	6.25	SA(s)cd	N	9.5/9.1	29.10/29.02
NGC 7328	339.372	10.532	21.0	23.8	0.33	38.90	Sab	N	3.4/4.2	28.70/28.52
NGC 7640	350.528	40.846	11.0	27.0	0.19	8.43	SB(s)c	N	9.1/13.2	29.09/28.89
NGC 7716	354.131	0.297	2.3	23.2	0.78	34.60	SAB(r)b	N	2.2/2.3	28.47/28.29
UGC 00903	20.449	17.592	2.0	22.3	0.20	38.40	S	N	3.6/5.1	28.75/28.80

表1 续
Table 1 Continued

Galaxy Name	R.A./°	Dec./°	a_{25}'	A_{25}/kpc	b/a	D/Mpc	Morph	LSBS	Exposure Time/h	$\mu_{\text{lim}}/[\text{mag}\cdot(\text{''})^{-2}]$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
UGC 04704	134.751	39.210	4.1	18.1	0.11	15.20	Sdm	N	4.5/5.9	29.09/28.92
UGC 07321	184.392	22.540	5.5	27.5	0.06	17.20	Sd	N	4.6/5.3	28.96/28.61
UGC 07774	189.094	40.005	3.7	24.3	0.16	22.60	Sd	N	6.2/6.2	29.23/29.01

Note:

Column (1): galaxy primary name.

Column (2): Right Ascension in degrees (J2000 equatorial coordinates).

Column (3): Declination in degrees (J2000 equatorial coordinates).

Column (4): major angular diameter in arcminutes, corresponding to the 25 mag/(")² isophote in B-band.

Column (5): major linear diameter in kpc, computed from the angular diameters in Col (4) and the distances in Col (7).

Column (6): apparent axial ratio.

Column (7): distance in Mpc.

Column (8): morphology (RC3 Hubble Type).

Column (9): the existence of low surface brightness structures and references.

Column (10): total exposure time of coadded images in hours (g-band/r-band).

Column (11): surface brightness limit of coadded images in mag/(")² (g-band/r-band).

所有样本的线尺寸分布、距离分布和形态分布如图1所示. 样本星系的线尺寸大小约为3–63 kpc, 尺寸分布在约17 kpc处达到峰值. 星系的距离约为0.7–40 Mpc, 其中位于7–15 Mpc的居多. 我们将样本星系分为了早型星系(ETG)和晚型星系(LTG)两类, 其中早型星系包括椭圆(E)和透镜

星系(S0), 晚型星系包括旋涡星系(S)和不规则星系(Irr), 样本中大部分为晚型星系. 在所有样本中, 28.9%的星系存在低面亮度潮汐结构(22/76). 并且, 在存在潮汐结构的22个星系中, 9个是早型星系, 13个是晚型星系.

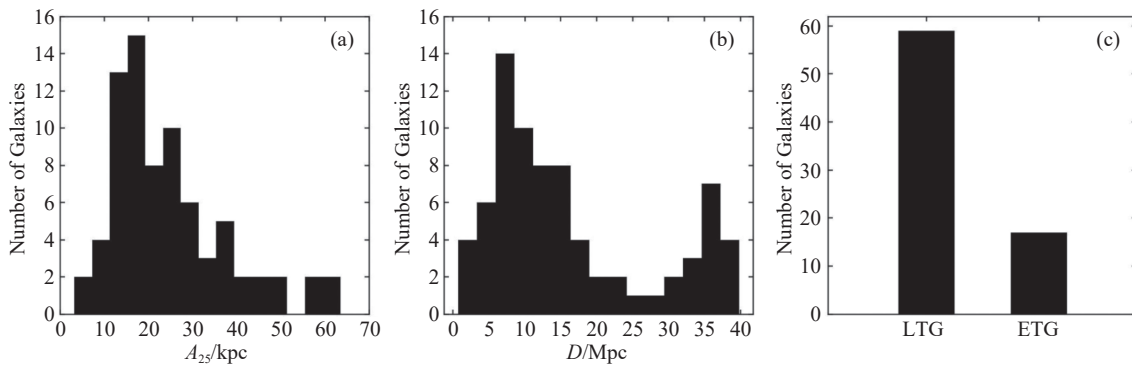


图1 76个样本的性质分布. (a)线尺寸分布, 单位为kpc; (b)距离分布, 单位为Mpc; (c)形态分布, 分为早型和晚型星系.

Fig. 1 Distribution of properties of the 76 samples. (a) Distribution of linear size, in unit of kpc; (b) Distribution of distance, in unit of Mpc; (c) Distribution of morphology type, divided into early type and late type galaxies.

3 图像处理及测光

本节内容主要围绕图像处理和图像分析技术展开, 主要包括由图像重采样(Resampling)、背景扣除、图像叠加等步骤获取深场图像以及后续通过光度测量(测光)得到潮汐结构的面亮度和颜色特性, 以下是对这些步骤的具体介绍。

3.1 图像重采样

在天文图像处理中, 由于天球的曲率和望远镜 CCD 平面的大小有限等因素, 不同天区位置拍摄的图像会存在不同程度的畸变。为了准确进行图像叠加和分析, 需要将这些图像重采样到同一像素网格上(通常以输入的第 1 幅图像为基准)。本工作利用 SWarp 软件^[45], 采用 3 阶 Lanczos 插值将目标星系单一波段多次曝光图像重采样到同一网格中以修正像场畸变效应。

3.2 背景扣除

CCD 图像中每个像素的流量都是来自天体源的信号和背景信号的总和, 而背景信号的存在会对目标天体源信号的处理产生影响, 因此在天文图像处理过程中要对背景进行扣除。在背景扣除过程中, 我们希望建立一个平滑、缓慢变化的 2 维流量分布模型并将其从图像中减去。这一流量分布包含来自大气散射、仪器镜头散射、亮星周围反射鬼影(Ghost reflection)和无法探测到的暗弱背景源等因素的贡献。目前对于恰当的背景扣除存在一定的挑战和困难, 主要是因为期望减去较小尺度的背景变化的同时又要避免过度减去亮源周围的流量, 而后者会使得对亮源和其周围较暗源的测光产生偏差。

在进行了重采样后, 本工作使用 Astropy 中的 Photutils³和 Astropy.modeling⁴软件包对每幅图像构建 2 维背景模型并从图像中扣除。具体过程如下:

(1) 识别背景像素—采用图像阈值分割(Image threshold segmentation)的方法来识别信号源, 先预估图像背景值和标准差, 设定高于背景值 2σ 为阈值, 像素值高于这一阈值的认为是天体源信号

像素。另外, 为了排除图像中小范围噪声起伏或宇宙线等图像缺陷的干扰, 将包含超过 10 个相连像素的区域设为信号源区域。通过以上做法, 可以有效区分信号源像素和背景像素;

(2) 掩模(Mask)信号源—对阈值分割图像标记出来的每个像素, 以 3 个像素为半径进行圆形像素膨胀, 生成掩模图像, 从而将信号源像素排除在背景之外。另外, 对于无法完全掩模的目标星系, 根据星系的位置和形状手动做圆形或椭圆形掩模, 覆盖至高于背景均值 0.5σ 范围, 防止目标星系周围背景扣减过度; 对于周围存在低面亮度结构的星系, 根据结构的位置和尺寸适当扩大掩模范围;

(3) 划分网格—在掩模信号源后, 对图像进行网格划分, 网格边长取 1/20 倍的图像边长, 将每个网格合并成一个像素, 并赋值该网格所有像素以 3 倍标准差剔除(3σ clipping)后的中值(为了避免网格值过多地受被掩模像素的影响, 我们舍去被掩模掉的像素占比大于 10% 的网格), 得到被掩模的低分辨率背景图像。这里选用适中的网格大小, 既保证了大到可以包含图像中的典型源(恒星), 又小到可以捕捉背景的微小变化;

(4) 补全被掩模像素—对于低分辨率背景图像中被掩模的像素, 采用反距离加权(Inverse Distance Weighted, IDW)插值方法进行补全;

(5) 插值背景—对低分辨率背景, 采用 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 大小的中值滤波器进行平滑, 并用双三次样条(Bicubic spline)插值方法将其还原为与原始图像尺寸大小相同的背景模型图像;

(6) 拟合背景—由于插值得到的背景模型会受到或高或低的局部背景的影响, 为了避免过度扣减背景, 对于存在低面亮度结构的星系, 我们用拟合的背景替代插值的背景。对于插值得到的全分辨率背景, 我们采用 Astropy.modeling 软件包进行 3 次多项式拟合, 得到 2 维背景模型, 再从原始图像中减去, 获得扣除背景后的数据。

3.3 图像叠加

图像叠加指的是通过将同一天区不同时间拍

³<https://photutils.readthedocs.io/en/stable/index.html>

⁴<https://docs.astropy.org/en/stable/modeling/index.html>

摄的图像叠加在一起,使得每幅图像上来自同一目标源的光子经过叠加后落在叠加图像上的同一位置,从而延长目标天体的有效曝光时间,提高目标信噪比^[46].我们测试了两种叠加方法,并对其结果进行了比较.

3.3.1 ZOGY 叠加方法

为了尽可能地提高叠加图像信噪比,本工作首先尝试用ZOGY (Zackay-Ofek-Gal-Yam) proper coadd方法^[47, 48]进行图像叠加,得到深场图像.叠加操作主要参考Bruno Sánchez发布的Python软件包ProperImage⁵,具体过程为:首先,输入进行了重采样、裁剪成同样大小、对齐了天球位置且扣除了背景的图像,对每幅图掩模坏点并插值,然后取图像中若干不位于边缘的、孤立的、中等亮度的非饱和恒星,采用K-L分解法^[49]建模图像随空间变化的点扩散函数(Point Spread Function, PSF),再利用此PSF对图像进行匹配滤波(Matched filtering).随后对每幅图像基于背景噪声方差和流量零点取权重相加,最后归一化得到针对点源探测的“最优(Optimal)”统计量,即为叠加后的图像.

3.3.2 SWarp 叠加方法

除了ZOGY叠加方法之外,本工作还采用对不同图像取中值的方法进行了叠加.类似于LSST (Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time)和HSC (Hyper Suprime-Cam)图像处理管线(Pipeline)中的叠加思路^[50],我们并未进行PSF改正,以尽可能地保留图像中暗弱延展结构的信息.但与LSST/HSC管线中的加权叠加不同的是,中值叠加方法得到的图像受单幅图像中离群像素值(Outlier)的影响较小,比如卫星轨迹(Satellite trail)、宇宙线(Cosmic ray)等.并且,我们利用SWarp软件进行叠加,其不受图像天区范围的限制,可以保留星系周围大部分天区,有利于对大尺度低面亮度结构的分析.需要注意的是,为了对不同时刻拍摄的图像进行叠加,输入的图像需要进行流量归一化,即将所有图像定标到同一流量零点.

3.3.3 叠加方法比较

我们对上述两种叠加方法进行了比较,以星

系M63的g波段图像为例,两种叠加方法得到的结果分别如图2 (a)和(b)所示.在叠加图像中,我们采用直径为7 pixel、 σ 为1.5 pixel的高斯核进行卷积平滑,以减少噪声提高信噪比,从而更清晰地显示出暗弱延展结构.同时,我们也将结果与Chonis等^[22]文中对M63的图像叠加结果进行了比较,其利用MDO (McDonald Observatory)的0.8 m口径望远镜的B波段和R波段图像进行了均值叠加(见其文中图2).可以看到图2 (a)中存在一些缺陷,这是由于ZOGY方法在对图像与其PSF匹配滤波时会进行卷积操作,导致图像灰度剧烈变化处(亮星与饱和星周围)产生振荡,即振铃效应(Ringing effect),从而干扰后续对图像的测光.另外,由于采用加权相加方式叠加,单幅图像中未处理干净的坏点会存在于叠加图像中,并且需要提前对图像中可能存在的卫星轨迹或宇宙线进行扣除(或剔除相关图像).相比ZOGY方法,利用SWarp中值叠加得到的图像显示出更佳的效果,能清晰地看到星系周围的大尺度环状结构及其他羽状结构,更接近于Chonis等^[22]文中的叠加结果.另外,我们采用的ZTF在g和r波段不同时期拍摄图像的视宁度(Seeing)分布较为集中,叠加图像中的较大范围延展结构受输入图像PSF变化的影响较小.综上所述,我们对所有样本星系的图像均使用SWarp软件进行中值叠加.

3.4 孔径测光及流量定标

孔径测光是指对于一幅观测图像中的目标源,选用一定尺寸的孔径,统计该孔径范围内所包含的总ADU值并减去该范围内的天光背景值,得到该源的净ADU值,随后计算得到仪器星等,可由以下公式表示:

$$M_{\text{ins}} = Z_{\text{mag}} - 2.5 \lg(\text{Sum} - \text{Area} \times \text{Sky}), \quad (1)$$

其中 M_{ins} 为仪器星等,单位为mag; Z_{mag} 为自定义的测光零点,单位为mag,设为0; Sum为测光孔径内包含的像素值总和,单位为ADU; Area为测光孔径内包含的总像素数; Sky为孔径内像素的平均

⁵<https://github.com/quatrope/ProperImage>

天光背景值, 单位为ADU.

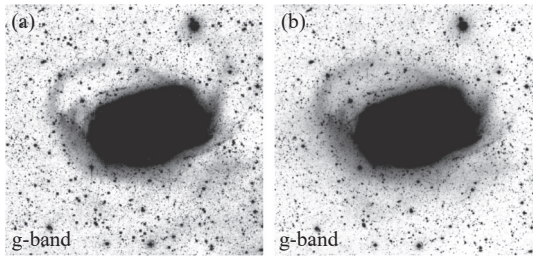


图 2 星系M63叠加图像比较, 均采用反转灰度图, 且用高斯核对图像进行了平滑以清晰地显示出暗弱延展结构, 图像大小为 $37.8' \times 34.9'$. (a) ZTF的g波段, ZOGY叠加图像, 总曝光时间约6.3 h; (b) ZTF的g波段, SWarp中值叠加图像, 总曝光时间约6.3 h. 图中方向向上为北, 向左为东.

Fig. 2 Comparison of coadded images of M63, shown with invert grey-scale. The images are smoothed with a Gaussian filter to clearly show the faint extended structures. The field of view is $37.8' \times 34.9'$. (a) ZTF g-band image, coadded by ZOGY method, with a total exposure time of about 6.3 h; (b) ZTF g-band image, median coadded by SWarp, with a total exposure time of about 6.3 h. North is up and east to the left.

本工作中采用Photutils软件包对叠加图像孔径测光的具体操作过程如下:

(1)准备输入图像—将某样本星系g和r两个波段的图像再次进行重采样以统一位置, 并将其裁剪对齐;

(2)掩模源—对中心星系连同周围低面亮度结构区域(若存在)以及饱和亮星进行掩模, 避免其对测光的影响;

(3)阈值分割—在分割之前, 采用大小为7 pixel、FWHM为4 pixel的高斯核对图像进行平滑, 从而过滤掉噪声信号. 然后设定阈值为3倍标准差、10 pixel, 对图像进行分割;

(4)去混叠(Deblending)—在阈值分割图像中, 若星场密集, 距离较近、相互重叠的两个或多个目标源会被证认为同一个源, 从而被划分为单一连通像素区域, 影响目标源测光, 因而我们进行去混叠操作将重叠的源分离. 我们采用多阈值(Multi-thresholding)构建多组等亮度线的方法^[51]进行这一操作, 即对于某局部区域的流量分布, 在上一步设定的阈值和局域峰值之间划分 N 组等亮度线, 在该像素区域内做 N 次阈值检测, 每次检测得到

一组或多组像素连通子区域, 最终构造出一个在该局部区域内目标源流量强度分布的树状图. 对于某一流量分支, 若其对应的像素子区域内所有像素的总流量强度大于上一级分支对应像素区域的 M 倍(取值范围为0.001–0.01, 值越小则分离源的能力越强), 则会被认定为单独的目标源. 在本工作中, 我们取 N 为64, M 为0.01;

(5)测光—根据分割图像生成天体信号源表, 将表中源的坐标位置设为孔径中心, 参照后续流量定标需要选取的星的星象, 假定其PSF分布为高斯分布且所有选取星的流量分布近似相同, 估计其平均FWHM为 $2.3''$. 取测光孔径半径为7 pixel (约2–3倍FWHM), 背景环内径取11.5 pixel (约4–5倍FWHM), 环宽取4.5 pixel (约2倍FWHM). 最后由测光结果生成测光源表, 根据(1)式计算得到各个源的仪器星等.

在得到仪器星等后, 为使该结果与标准星等有可比性, 还需做流量定标, 将仪器星等转化为标准系统下的星等. 为了保证流量定标的准确性, 用于定标的源需满足一定条件, 本工作采取的选择标准为: (1)非饱和、中等亮度(标准星等在15–18 mag之间); (2)不位于图像边缘; (3)不位于被掩模区域边缘; (4)位置孤立. 对于选出的源构建源表, 然后与ZTF归档的标准星表进行匹配, 由仪器星等和标准星表中对应恒星(称为参考星)的标准星等得到叠加图像的流量零点.

另外, 为排除银河系尘埃消光(Dust extinction)的影响, 我们在测光时对每个星系图像均做了消光改正, 采用的是Schlafly等^[52]文中给出的消光值.

3.5 极限面亮度估计

在进行流量定标得到流量零点后, 为估计叠加图像极限面亮度, 还需测定背景噪声的标准差 σ . 为得到叠加图像的背景部分, 我们首先预估计背景中值和标准差, 然后以2倍标准差和5 pixel为阈值选取信号源, 进行阈值分割; 接着以10 pixel为半径进行膨胀, 掩模信号源; 最后对未掩模部分像素的ADU值作分布直方图, 对其拟合高斯轮廓, 对应的标准差即为背景噪声标准差.

我们定义了对应于任意角尺寸($\Omega \times \Omega$)的 3σ 水平极限面亮度^[53]:

$$\mu_{\text{lim}}(3\sigma_{\Omega \times \Omega}) = -2.5 \lg \left(\frac{3\sigma}{\text{pix} \times \Omega} \right) + \text{ZP}, \quad (2)$$

其中 pix 为图像像素尺寸, 单位为角秒; Ω 为期望的像素尺寸大小, 单位为角秒; ZP 为图像的流量零点, 单位为 mag. 习惯上, 在探索近邻星系时, 通常用 $10'' \times 10''$ 大小的角尺寸来表征典型展源的空间范围, 本文也同样采用这一标准.

我们对所有样本的两个波段叠加图像均进行了面亮度极限的估计, 得到的结果见表 1. 图 3 中展示了所有样本星系两个波段叠加图像的面亮度极限分布直方图, 我们得到的平均图像深度分别为: $\mu_g(3\sigma, 10'' \times 10'') = (28.86 \pm 0.27) \text{ mag}/('')^2$, $\mu_r(3\sigma, 10'' \times 10'') = (28.65 \pm 0.27) \text{ mag}/('')^2$.

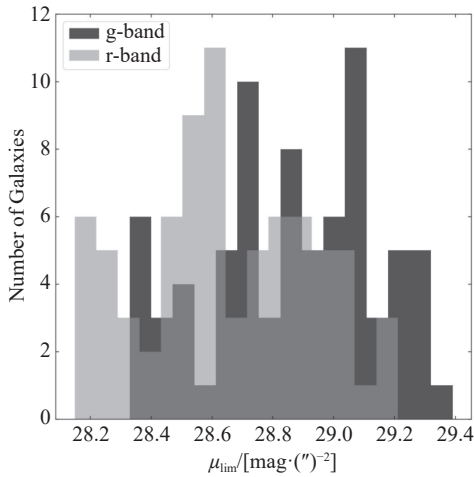


图 3 样本星系 g 和 r 波段叠加图像面亮度极限分布直方图. g 波段分布的均值和标准差分别为 28.86 和 0.27, r 波段分布的均值和标准差分别为 28.65 和 0.27, 单位均为 $\text{mag}/('')^2$.

Fig. 3 Histogram displaying the surface brightness limit that our coadded images of sample galaxies reached in g- and r-band. The histogram displays a mean value of 28.86 and a standard deviation of 0.27 in g-band, as well as a mean value of 28.65 and a standard deviation of 0.27 in r-band, both in unit of $\text{mag}/('')^2$.

3.6 色指数图

为分析潮汐结构的面亮度, 我们对叠加图像

中星系中心较亮的部分以及场中的恒星和背景星系均作了阈值分割选取和掩模操作. 然后, 我们采用 Lupton 等^[54]文中的方法, 将像素值从 ADU 转换为面亮度, 其使用的星等被称为“反双曲正弦星等 (asinh magnitude)”. 两个波段的面亮度转换公式如下:

$$\mu_g = \text{ZP}_g - 2.5 \lg(\sigma_g) - a \sinh^{-1}(f_g/2\sigma_g), \quad (3)$$

$$\mu_r = \text{ZP}_r - 2.5 \lg(\sigma_r) - a \sinh^{-1}(f_r/2\sigma_r), \quad (4)$$

其中下标为对应波段; 系数 $a \equiv 2.5 \lg e = 1.08574$; μ 为面亮度, 单位为 $\text{mag}/('')^2$; ZP 为图像流量零点, 单位为 mag; σ 为图像噪声标准差, 单位为 ADU; f 为图像像素值, 单位为 ADU.

在得到两个波段的面亮度后, 我们便能对其作差得到 $g-r$ 色指数图. 由于色指数本质上比单一波段面亮度测量具有更高的不确定性, 我们对两个波段掩模了源的的面亮度图像重新划分像素尺寸, 根据图像大小的不同, 将像素尺寸调整为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 或 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$, 赋值新像素块的值为其内所有像素值的中值(忽略被掩模的像素), 并且只保留未被掩模像素比例大于 60% 的像素块. 然后, 由于图像同时包含了背景成分和目标结构成分, 我们筛选出了面亮度亮于背景中值 k 倍 σ 的成分(根据不同星系周围结构亮度的不同, k 的取值范围为 1.5–3), 剔除了与研究目标无关的背景信号. 最后, 我们将 g 和 r 波段的面亮度图相减, 得到 $g-r$ 色指数图. 并且, 我们将图像尺寸适当调整至仅显示星系中心及周围结构.

4 结果与讨论

由于我们获得的叠加图像深度较为可观, 对于样本中已发现和证认过潮汐结构的 22 个星系(结构证认情况见表 1), 我们能够成功复现出其中 20 个星系周围的大部分结构, 并在一个星系周围首次发现了潮汐结构. 在本节中我们给出其中的星系 NGC 5907 周围结构的例子, 并与前人的研究结果进行比较. 并且, 对于所有复现出结构的星系, 我们给出其 g 和 r 波段叠加图像和 $g-r$ 色指数图; 对

于未复现出结构的两个星系,我们也分析了其可能原因.另外,我们将展示在NGC 4725周围新发现的低面亮度结构并分析可能的起源,同时还对部分星系图像中存在的前景银河系尘埃云结构进行了讨论和说明.

4.1 NGC 5907星流及复现出的所有结构

NGC 5907是一个著名的侧向星系(视轴比为0.19),被称为“刀锋星系”,属于NGC 5866星系群.它有着明显的整体HI盘翘曲(Warp),但在光学波段面积有限. Shang等^[41]首次发现了缠绕在其周围的环状潮汐星流,这一结构很有可能是由一个矮椭圆伴星系潮汐瓦解形成的.他们发现此环状星流在两处与NGC 5907存在物理相互作用,其中一处位于HI盘翘曲的顶端且星流延伸方向与翘曲方向相符,这说明HI盘的翘曲可能是由这一矮星系造成的. Martinez-Delgado^[42](简称M08)利用BBRO (BlackBird Remote Observatory) 0.5 m小口径望远镜重新观测了NGC 5907,区别于前述研究,他们发现了两个完整的包裹着星系的环状结构,图像深度约为R波段 $27.7 \text{ mag}/('')^2$. 然而, van Dokkum等^[43](简称v19)的研究证伪了双环结构,他们采用了蜻蜓望远镜阵列(Dragonfly Telephoto Array, DTA)^[55]的观测数据,得到了g波段深至 $30.3 \text{ mag}/('')^2$ 的图像,要比M08的结果更深. 他们的结果表明, NGC 5907周围只存在一个总长度为220 kpc的弯曲星流,该星流形态与围绕银河系的人马座星流(Sagittarius stream)类似. 随后, Müller等^[44]利用1.4 m口径的Milanković望远镜对DTA的图像结果进行了再确认,证实了单环结构.

v19文中给出了与M08中结果的比较(见其图5),他们得到的环结构在数量和位置上都与M08的结果有所不同. 图4展示了我们通过叠加得到的NGC 5907的g和r两个波段的深场图像,同样只显示出单环结构. 这说明,通过对星系深场图像的再研究,我们可以验证前人发现的一些潮汐结构的可靠性. 但是,由于图像处理过程以及深度的影响,图中只显示出东侧的部分环结构,且环在北侧并未与星系相接. 并且,西侧的向北方延伸的结

构没有v19中那么明显. 该环结构的g波段面亮度为 $27.52 \text{ mag}/('')^2$, $g-r$ 颜色为0.34,与NGC 5907的外盘颜色相当.

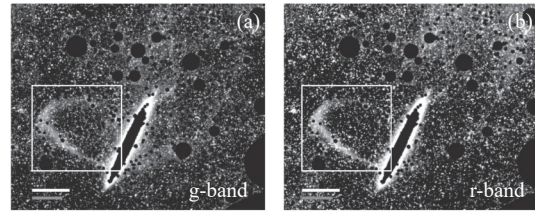


图4 本工作中得到的星系NGC 5907的深场图像. (a) g波段叠加图像,深度为 $29.28 \text{ mag}/('')^2$; (b) r波段叠加图像,深度为 $29 \text{ mag}/('')^2$. 两幅图像采用相同比例灰度图显示并用高斯核进行了平滑,且我们对星系中心部分和周围场星进行了掩模,以显示出暗弱延展结构. 图中的白色方框区域表示位于星系东侧的星流结构,白色比例尺表示 $5'$ 尺度,灰色比例尺表示20 kpc尺度. 图中方向向上为北,向左为东.

Fig. 4 The deep images of NGC 5907 in our study. (a) g-band coadded image, reaching depth of $29.28 \text{ mag}/('')^2$; (b) r-band coadded image, reaching depth of $29 \text{ mag}/('')^2$. The images are shown with grey-scale at the same level and smoothed with a Gaussian filter. The center of the galaxy and field stars are masked to show the faint extended structures. The white square region denotes the stellar stream structure located on the eastern side of the galaxy. The white scale bar is $5'$, the grey scale bar is 20 kpc at the distance of NGC 5907. North is up and east to the left.

另外,我们给出了所有20个复现出潮汐结构的样本星系的g、r波段叠加图像和 $g-r$ 色指数图,并在g波段图像中用红色区域标注出发现的结构,如图5所示.

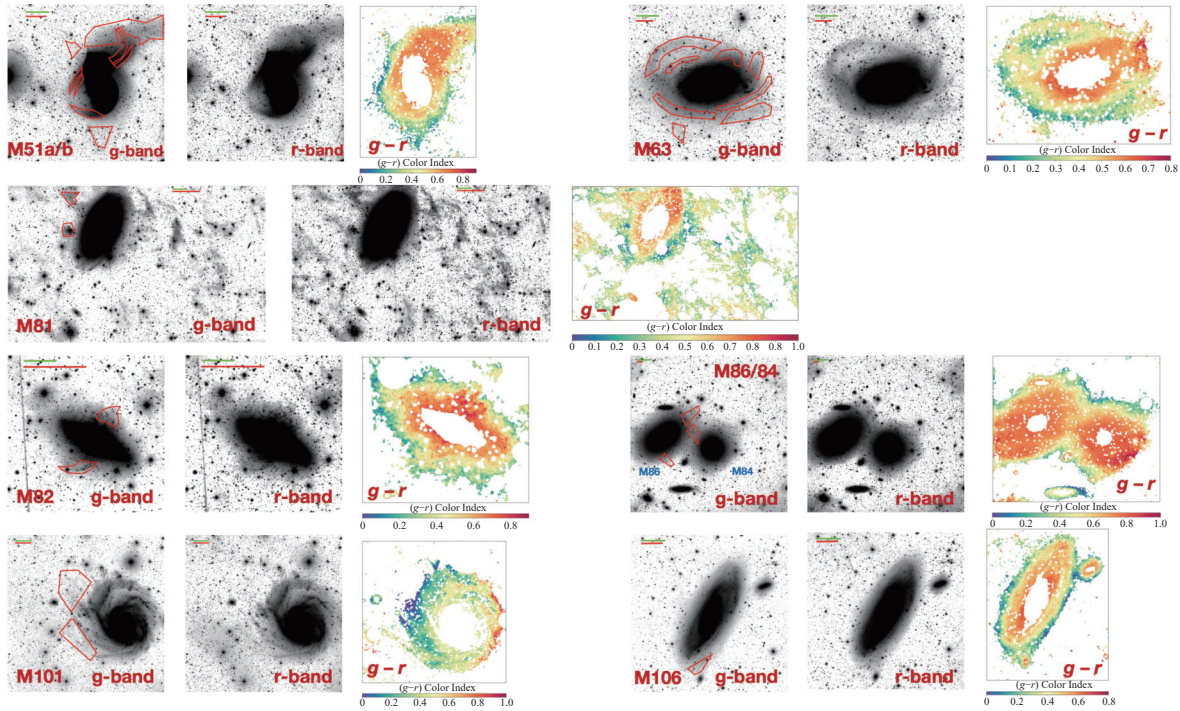
在已知存在潮汐结构的22个星系中,我们未能复现出其中两个星系周围结构: M105 (又称NGC 3379)和NGC 0147,现对可能的原因进行分析. M105与东北侧的星系NGC 3384是一对星系对(Pair of galaxies),均为Leo I星系群的成员. Ragusa等^[26]利用甚大巡天望远镜(Very Large Telescope Survey Telescope, VST)深场光学图像,对这一星系对进行了星系群内光(Intragroup light, IGL)研究. 通过g波段减去了星系等照度线模型的深场图像($\mu_g \sim 30 \text{ mag}/('')^2$, 见其图7),他们发现了从M105延伸出的两条十分暗弱的潮汐星流结构. 由于我们得到的叠加图像深度有限($\mu_g \sim 28.4 \text{ mag}/('')^2$),探测灵敏度不足,无法看到星系周围

的大范围结构. NGC 0147是M31的一个较大的矮卫星星系, 位于M31北侧. McConnachie等^[56]在红巨星支(Red giant branch, RGB)恒星密度图中探测到了位于NGC 0147南北两侧的大范围星流结构(见其图11), 而在我们的叠加图像中, 这一结构并不可见, 原因可能有以下几点: (1)图像深度有限($\mu_g \sim 28.7 \text{ mag}/('')^2$); (2)结构探测方法不同, 在叠加图像中难以发现对应于RGB星密度图的延展发射; (3) NGC 0147所在场受到大范围的银河系

前景尘埃云影响, 遮挡了该星系周围可能存在的暗弱恒星结构(对尘埃云的讨论详见第4.3节).

4.2 新发现的潮汐结构及起源

在我们的76个样本星系中, 已知有22个星系周围存在潮汐结构, 而我们在星系NGC 4725周围以及它与东北侧的星系NGC 4747之间新发现了3个低面亮度结构, 如图6所示, 在图6 (d)中用不同字母标出.



(a) Part 1

图 5 所有20个复现出潮汐结构的样本星系的g波段叠加图像(左)、r波段叠加图像(中)和 $g-r$ 色指数图(右), 其中M51a/M51b、M86/M84这两对星系分别位于同一幅图像中. 所有星系按名称顺序展示, 由于排版限制, 分为3部分展示. 其中每个星系g和r波段的叠加图像采用反转灰度图并用相同的灰度比例显示, 且大部分星系采用的灰度比例相同. 叠加图像均用高斯核进行了平滑以显示出暗弱延展结构. g波段图像中的红色区域表示在目标星系周围发现的结构. $g-r$ 色指数图中星系中心部分及周围场星均被掩模. 图中绿色比例尺表示5'尺度, 红色比例尺表示在星系对应距离处10 kpc的物理尺度. 其中M110由于距离过近且物理尺寸较小, 图中红色比例尺表示5 kpc物理尺度. 图中方向向上为北, 向左为东.

Fig. 5 g-band coadded image (left), r-band coadded image (middle) and $g-r$ color index map (right) of all the 20 sample galaxies with tidal structures reproduced. Among them, the galaxies M51a/M51b and M86/M84 are respectively located in the same image. All galaxies are displayed in the order of name. Due to layout constraints, they are presented in three parts. The g- and r-band coadded images of each galaxy are shown with invert grey-scale at the same level, and most of the galaxies share the same level. All coadded images are smoothed with a Gaussian filter to clearly show the faint extended structures. The red regions in g-band images denote the structures we found around target galaxies. The center of galaxies and field stars are masked in $g-r$ color index map. The green scale bar is 5', the red scale bar is 10 kpc at the distance of the galaxy. Among them, M110 is both too close and small in physical size, so the red scale bar in its image represents 5 kpc. North is up and east to the left.

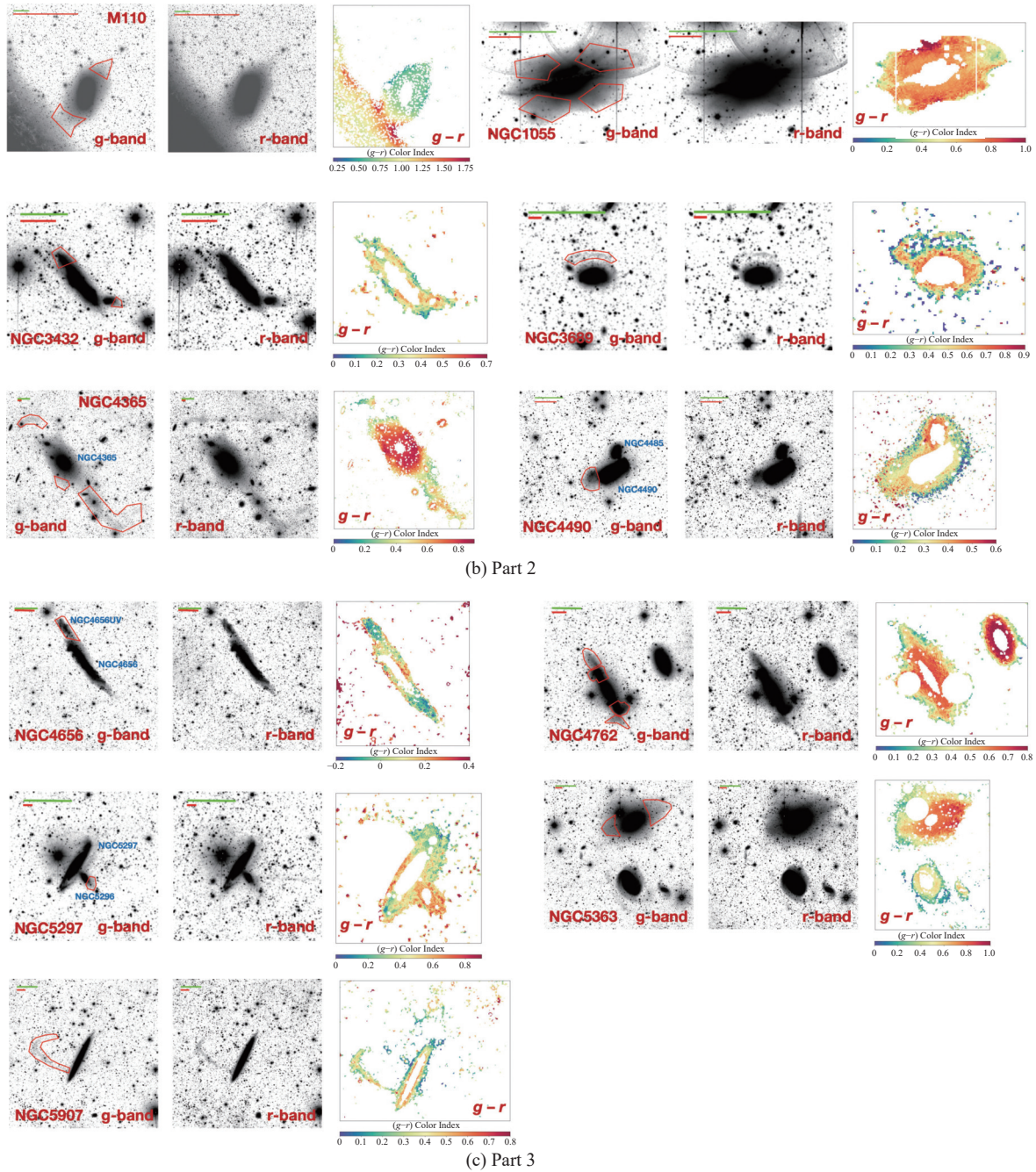


图 5 续

Fig. 5 Continued

NGC 4725是一个巨型旋涡星系,与东北侧的晚型特殊星系NGC 4747是一对相互作用星系,它们均为Coma I cloud的主要成员. Wevers等^[57]对这两个星系进行了HI观测研究,发现HI气体的运动

学和空间分布都表明这对星系处在潮汐相互作用过程中,并且NGC 4747中羽状潮汐结构的气体和恒星成分在位置上有一定偏离. Miskolczi等^[40]将NGC 4747周围的低面亮度结构分类为III型,即

大型星系相互作用的结果. 在我们的深场光学图像中, NGC 4747也显示出形态上的较大扰动, 说明其经历了较强烈的相互作用过程. 我们在暗能量光谱仪器传世成像巡天(Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) Legacy Imaging

Surveys)⁶的深场彩色图像中也同样能识别出NGC 4747的扰动形态, 但在NGC 4725周围, 由于可能的过度背景扣除, 从DESI成像巡天的图像中并不能有效识别出本工作中所观测到的细长潮汐流结构.

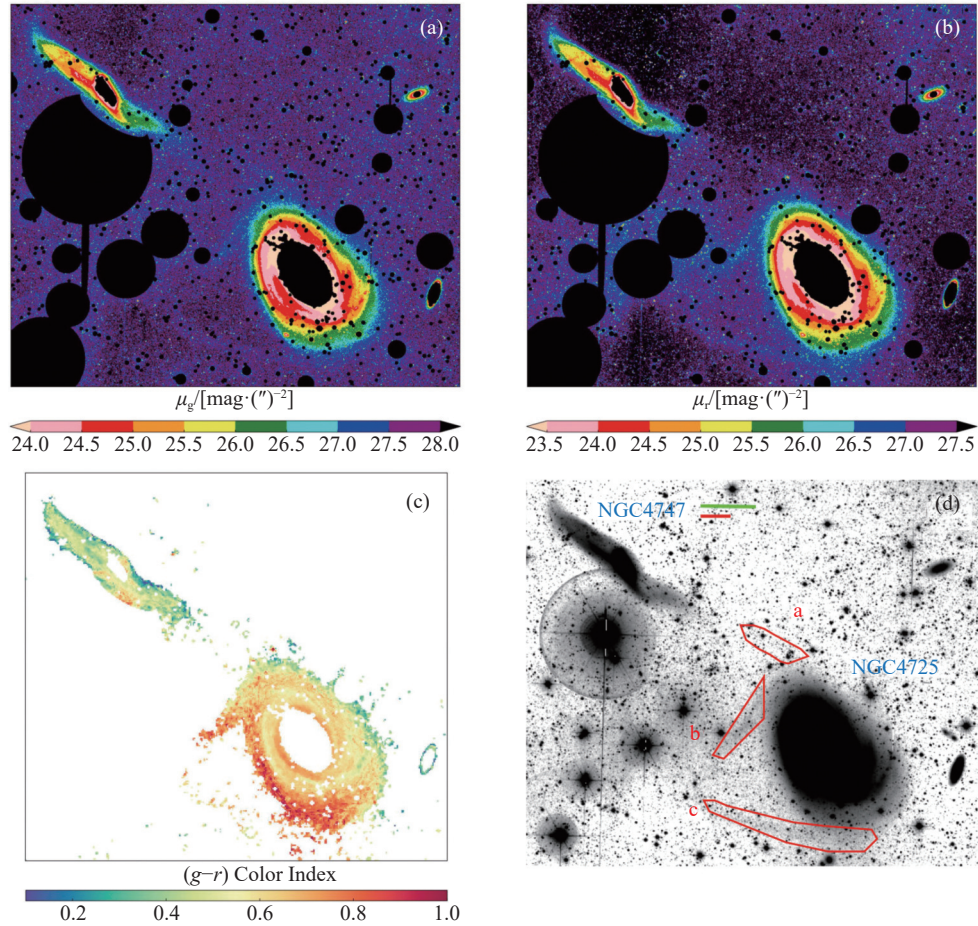


图 6 NGC 4725周围场的(a) g波段面亮度图; (b) r波段面亮度图; (c) $g-r$ 色指数图. 3幅图中星系中心较亮的部分和场星均被掩模, 下方分别给出了颜色比例尺, 单位为 $\text{mag}/(\text{arcmin})^2$; (d) r波段叠加图像, 采用反转灰度图并用高斯核进行了平滑. 图中发现的结构用红色区域标出, 绿色比例尺表示 $5'$ 尺度, 红色比例尺表示 10 kpc 尺度. 图中方向向上为北, 向左为东.

Fig. 6 (a) g -band surface brightness map; (b) r -band surface brightness map; (c) $g-r$ color index map of the field around NGC 4725. The bright part of the galaxies and field stars in the three maps are masked. The color bars are shown below, in unit of $\text{mag}/(\text{arcmin})^2$; (d) r -band coadded image of the field around NGC 4725, shown with invert grey-scale and smoothed with a Gaussian filter. The newly discovered tidal structures are labeled with red regions. The green scale bar is $5'$, the red scale bar is 10 kpc at the distance of NGC 4725. North is up and east to the left.

限于图像深度和星系NGC 4725所在场的图像背景扣除难度较大(图像中心位于CCD读出通道

拼接处, 受到不均匀的边缘效应影响; 周围亮星较多, 难以准确估计背景), 我们只能看到星系周围

⁶<http://legacysurvey.org/>

比较微弱的结构. 其中较暗的结构a位于NGC 4725东北侧, 在g波段面亮度图中比r波段中更为清晰, 在位置上似乎与NGC 4747有联系; 结构b和c位于NGC 4725的东侧和东南侧, 似乎是从其晕中延伸出来并连为一体的结构, 类似于NGC 5907周围由矮卫星星系潮汐瓦解形成的环绕主星系的潮汐星流. 并且, 其形态不太像是延伸到星系外围区域的大尺度旋臂结构.

对于上述结构, 我们测得其g波段面亮度(单位 $\text{mag}/('')^2$)和 $g-r$ 颜色分别为: 27.47 (a), 27.43、0.70 (b), 27.60、0.76 (c), 其中结构a由于颜色图所含有效像素较少, 我们未进行颜色测量. 从颜色上看, NGC 4725北侧的外晕与NGC 4747较为一致, 均偏蓝(范围在0.4–0.6), 说明其间的a结构可能起源于两个星系之间的相互作用, 在其内触发了恒星形成活动. 对于结构b和c (由于其面亮度较低, 颜色测量误差较大, 仅作为参考), 它们和NGC 4725东南侧外晕的颜色较为相似, 均偏红(范围在0.7–0.9). 其可能的来源有两种: 一是环绕NGC 4725运动的矮椭球星系(星族较年老)被NGC 4725引力俘获, 发生了潮汐瓦解, 汇入到NGC 4725的晕中并经历了部分或完整的轨道过程; 二是NGC 4725的盘成分在与NGC 4747相互作用的过程中被撕扯出去, 在更远的距离处重新被引力束缚而形成环绕星系的结构. 鉴于NGC 4725是一个颜色较红($g-r$ 约为0.8)的年老旋涡星系, 这一情况也有可能发生. 由于无法从图像中观测到b和c结构可能对应的前身星系, 我们难以有效判断其形成过程.

另外, 我们还获取了NGC 4725附近场的Planck 857 GHz远红外图像, 从中并未发现明显的红外发射特征, 排除了其周围结构是来自前景的银河系尘埃云污染的可能. 在后续工作中, 我们期望利用更深的图像(比如WFST)得到关于这一目标更可靠的结果, 并利用高分辨率的多波段数据交叉认证以及通过分析星族成分的特征来了解这些结构的具体性质, 比如其年龄组成和金属丰度. 我们还计划将观测结果与流体动力学模拟的结果进行比较, 探究潮汐结构的形成过程.

4.3 银河系卷云污染

随着观测技术与图像处理方法的发展, 深场光学图像虽然能帮助我们更深入地探索邻近宇宙中的一些暗弱源, 但是存在于我们所处的银河系中弥漫星际尘埃云的影响仍不可避免. 其会反射星光^[58]并干扰对低面亮度结构的研究, 从而影响对结构形状和亮度等性质的判断. 这些细丝状的尘埃云被称为“银河系卷云(Galactic cirrus)”, 除了低银纬的尘埃带之外, 它们还会出现在高银纬区. 其会吸收银河系恒星及遥远天体的星光, 在紫外和光学波段反射, 并在红外波段再辐射(由于尘埃云温度较低, 辐射峰值位于远红外波段)^[59, 60]. Román等^[53]利用SDSS Stripe 82区域的g、r、i和z波段的光学数据对银河系卷云的颜色进行了研究, 他们发现: (1)卷云的光学波段颜色与其柱密度有关, 当其100 μm 波段辐射强度增加即柱密度增大时, 颜色会变得更红; (2)卷云的光学波段颜色与银河系外天体的颜色有明显区别, 对于给定的 $g-r$ 颜色, 有着偏蓝的 $r-i$ 颜色, 这一点可以为区分卷云和河外星系周围暗弱结构提供参考; (3)在SDSS Stripe 82传世巡天中得到的尘埃颜色同样适用于其他巡天, 便于不同巡天数据结果的比较.

在我们的叠加图像所达到的深度上, 卷云的光学反射十分明显, 我们的样本中有约18.4% (14/76)的星系受到银河系卷云的污染, 其中有3个星系周围已知存在潮汐结构(M81、M82和NGC 0147), 这里给出星系M81的示例. 我们给出了ZTF光学伪彩色图和Planck HFI (High Frequency Instrument)相机拍摄的857 GHz (350 μm)远红外图像的对比, 如图7所示. 从图中可以看出, 延展的卷云占据了天空中大部分面积, 且其在光学和远红外图像中有着空间上很好的对应, 足以证实这一结构的起源. ZTF图像分辨率约为Planck HFI图像的150倍(Planck为5', ZTF约为2''), 在我們的高分辨率叠加图像中, 银河系卷云表现为朝向近乎一致的细长丝状结构. 我们的结果表明, 卷云发射只有当g波段面亮度暗于26 $\text{mag}/('')^2$ 时才变得明显, 且颜色几乎一致($g-r$ 约0.41), 但要比河外星系更蓝(见图5), 这一结论与Duc等^[9]和Román

等^[53]文中的一致。

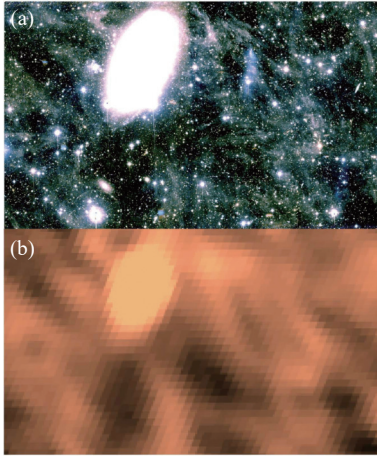


图 7 星系M81受卷云污染示意图. (a) M81周围场的伪彩色合成图像(采用g、r和0.5(g+r)波段图像叠加), 图像大小为 $86' \times 52'$; (b) 相同场由Planck卫星HFI相机拍摄的857 GHz (350 μm)图像. 图中方向向上为北, 向左为东.

Fig. 7 Contamination by Galactic cirrus around M81.

(a) Pseudo-color composite image (combined with g, r and 0.5(g+r) band images) of the field around M81, with a field of view of $86' \times 52'$; (b) The same field observed by the HFI camera on board Planck at 857 GHz (350 μm). North is up and east to the left.

图像中大范围前景卷云的存在会干扰我们对真实潮汐结构的判断, 并且较难剔除. 但如前所述, 我们可以通过颜色大致区分卷云和潮汐结构, 且能够联合红外数据进行证认. 另外, 虽然卷云的光学发射对于河外天体研究阻碍重重, 但对于星际介质(Interstellar medium, ISM)研究领域有潜在价值(目前的红外波段图像分辨率普遍不高, 而较高分辨率的光学深场图像对于ISM的研究意义非凡). 利用后续质量更好的光学图像(如WFST), 我们可以对一些卷云覆盖面积较大的天区进行ISM性质的深入探索.

5 总结

本工作基于ZTF的g和r波段光学巡天数据, 从前人文献中筛选出的近邻大星系样本进行了图像叠加, 以寻找星系周围存在的潮汐结构. 以下是本工作的主要结果:

(1)对 Karachentsev等^[16]、Mao等^[17]和 Jarrett

等^[18]文中给出的3批近邻星系样本进行了筛选, 利用ZTF时域巡天数据, 得到了样本星系的g和r两个波段的深场叠加图像, 平均深度分别为: $\mu_g(3\sigma, 10'' \times 10'') = (28.86 \pm 0.27) \text{ mag}/('')^2$, $\mu_r(3\sigma, 10'' \times 10'') = (28.65 \pm 0.27) \text{ mag}/('')^2$, 与国际上多数同类深场巡天深度相当. 在全部76个样本星系中, 已知22个星系周围存在低面亮度潮汐结构, 在我们所达到的图像深度下, 成功复现出其中20个星系周围存在的结构, 并在一个星系周围首次发现了潮汐结构;

(2)对于已知存在潮汐结构的星系进行测光, 得到了g和r波段面亮度图和 $g-r$ 色指数图. 对于其中的星系NGC 5907, 分析了复现出的环状潮汐星流的形态、面亮度和颜色性质, 并与前人文章进行了比较, 证实了NGC 5907周围的单环潮汐结构的存在;

(3)在星系NGC 4725周围新发现3个暗弱的潮汐结构, 其中位于东北侧的结构颜色较蓝($g-r$ 约0.4–0.6), 且与NGC 4725北侧外晕和伴星系NGC 4747的颜色相似, 说明存在近期的恒星形成活动, 可能源自与NGC 4747的潮汐相互作用; 而位于东侧和东南侧的两个结构在位置和形态上对应于一个整体的环状结构, 颜色均偏红($g-r$ 约0.7–0.9)并与NGC 4725东侧外晕颜色一致. 我们为此结构的产生提出了两种假设: 其一, 类似于NGC 5907周围的环状星流, 此结构可能来源于较年老的矮椭圆星系的潮汐瓦解; 其二, NGC 4725的盘成分在与NGC 4747相互作用的过程中被撕扯出去, 在更远的距离处重新被引力束缚而形成环绕星系的结构. 由于我们未观测到这一结构的潜在前身星系, 无法对两种可能辨别区分, 后续还需更高分辨率的多波段数据进行进一步验证;

(4)在部分样本星系图像中发现延展的前景银河系卷云污染, 这些结构通常呈现朝向一致的细丝状形态, 占据图像中大部分天区. 其只有当g波段面亮度暗于 $26 \text{ mag}/('')^2$ 时才变得明显, 且颜色几乎一致($g-r$ 约0.41), 但要比河外星系等天体成分更蓝. 虽然这些结构的存在会影响对于附近潮汐结构的分析, 但通过颜色性质我们可以大体上将两者区别开, 并结合远红外数据进行证认. 另外, 我们的深场光学图像有助于对这些ISM的深入研究.

随着WFST巡天工作的正式开展,我们能获得北天大部分星系的质量较好的大视场深场光学图像数据,其可涵盖光学的u、g、r、i、z和w总计6个波段.在结合优化的图像处理方法获得更深的叠加图像后,我们有机会发现更多近邻宇宙中星系周围的低面亮度潮汐结构,分析其多波段颜色特征.并且,在结合多波段数据比如HI气体、H α 、紫外和远红外数据后,我们能证认这些结构的来源.另外,与流体动力学数值模拟的比较可以帮助我们理解星系所发生的并合过程,从而进一步限制星系演化模型.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议,使得文章的质量有了显著的提高.感谢ADS以及NED数据库的协助.

参 考 文 献

- [1] Janowiecki S, Mihos J C, Harding P, et al. *ApJ*, 2010, 715: 972
- [2] Martínez-Delgado D, Gabany R J, Crawford K, et al. *AJ*, 2010, 140: 962
- [3] Duc P A, Cuillandre J C, Karabal E, et al. *MNRAS*, 2015, 446: 120
- [4] Pop A R, Pillepich A, Amorisco N C, et al. *MNRAS*, 2018, 480: 1715
- [5] Sola E, Duc P A, Richards F, et al. *A&A*, 2022, 662: A124
- [6] Bullock J S, Johnston K V. *ApJ*, 2005, 635: 931
- [7] Ibata R, Gilmore G, Irwin M. *Nature*, 1994, 370: 194
- [8] Ibata R, Martin N F, Irwin M, et al. *ApJ*, 2007, 671: 1591
- [9] Martínez-Delgado D, Cooper A P, Román J, et al. *A&A*, 2023, 671: A141
- [10] Knapen J H, Trujillo I. *Ultra-Deep Imaging: Structure of Disks and Haloes*//Knapen J H, Lee J C, Gil de Paz A. *Outskirts of Galaxies*. Cham: Springer International Publishing AG, 2017: 255-289
- [11] Masci F J, Laher R R, Rusholme B, et al. *PASP*, 2019, 131: 018003
- [12] Wang T, Liu G, Cai Z, et al. *SCPMA*, 2023, 66: 109512
- [13] Ferrarese L, Côté P, Cuillandre J C, et al. *ApJS*, 2012, 200: 4
- [14] Fliri J, Trujillo I. *MNRAS*, 2016, 456: 1359
- [15] Dekany R, Smith R M, Riddle R, et al. *PASP*, 2020, 132: 038001
- [16] Karachentsev I D, Makarov D I, Kaisina E I. *AJ*, 2013, 145: 101
- [17] Mao Y Y, Geha M, Wechsler R H, et al. *ApJ*, 2021, 907: 85
- [18] Jarrett T H, Cluver M E, Brown M J I, et al. *ApJS*, 2019, 245: 25
- [19] Block D L, Puerari I, Elmegreen B G, et al. *ApJ*, 2009, 694: 115
- [20] Watkins A E, Mihos J C, Harding P. *ApJL*, 2015, 800: L3
- [21] Knapen J H, Erroz-Ferrer S, Roa J, et al. *A&A*, 2014, 569: A91
- [22] Chonis T S, Martínez-Delgado D, Gabany R J, et al. *AJ*, 2011, 142: 166
- [23] Okamoto S, Arimoto N, Ferguson A M N, et al. *ApJL*, 2015, 809: L1
- [24] Okamoto S, Arimoto N, Ferguson A M N, et al. *ApJ*, 2019, 884: 128
- [25] Mihos J C, Harding P, Spengler C E, et al. *ApJ*, 2013, 762: 82
- [26] Ragusa R, Mirabile M, Spavone M, et al. *FASS*, 2022, 9: 852810
- [27] Merritt A, van Dokkum P, Abraham R, et al. *ApJ*, 2016, 830: 62
- [28] Watkins A E, Mihos J C, Harding P. *ApJ*, 2016, 826: 59
- [29] Rich R M, Mosenkov A, Lee-Saunders H, et al. *MNRAS*, 2019, 490: 1539
- [30] Dey A, Najita J R, Kopolov S E, et al. *ApJ*, 2023, 944: 1
- [31] Preston J, Collins M L M, Ibata R A, et al. *MNRAS*, 2019, 490: 2905
- [32] Gilhuly C, Merritt A, Abraham R, et al. *ApJ*, 2022, 932: 44
- [33] Miró-Carretero J, Martínez-Delgado D, Farràs-Aloy S, et al. *A&A*, 2023, 669: L13
- [34] Bogdán A, Forman W R, Zhuravleva I, et al. *ApJ*, 2012, 753: 140
- [35] Mihos J C, Harding P, Feldmeier J J, et al. *ApJ*, 2017, 834: 16
- [36] Paudel S, Smith R, Yoon S J, et al. *ApJS*, 2018, 237: 36
- [37] Muñoz-Elgueta N, Torres-Flores S, Amram P, et al. *MNRAS*, 2018, 480: 3257
- [38] Morales G, Martínez-Delgado D, Grebel E K, et al. *A&A*, 2018, 616: A143
- [39] Mosenkov A, Rich R M, Koch A, et al. *MNRAS*, 2020, 494: 1751
- [40] Miskolczi A, Bomans D J, Dettmar R J. *A&A*, 2011, 536: A66
- [41] Shang Z, Zheng Z, Brinks E, et al. *ApJL*, 1998, 504: L23
- [42] Martínez-Delgado D, Peñarrubia J, Gabany R J, et al. *ApJ*, 2008, 689: 184
- [43] van Dokkum P, Gilhuly C, Bonaca A, et al. *ApJL*, 2019, 883: L32
- [44] Müller O, Vudragović A, Bilek M. *A&A*, 2019, 632: L13
- [45] Bertin E, Mellier Y, Radovich M, et al. *The TERAPIX Pipeline*//Bohlender D A, Durand D, Handley T H. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XI*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2002: 228-237
- [46] 王斌, 赵海斌, 李彬. *天文学报*, 2017, 58: 13
- [47] Zackay B, Ofek E O. *ApJ*, 2017, 836: 187
- [48] Zackay B, Ofek E O. *ApJ*, 2017, 836: 188
- [49] Lauer T. *Deconvolution with a Spatially-variant PSF*//Starck J L, Murtagh F D. *Astronomical Data Analysis II*. Waikoloa: Proceedings of the SPIE, 2002: 167
- [50] Bosch J, Armstrong R, Bickerton S, et al. *PASJ*, 2018,

- 70: S5
- [51] Bertin E, Arnouts S. *A&AS*, 1996, 117: 393
- [52] Schlafly E F, Finkbeiner D P. *ApJ*, 2011, 737: 103
- [53] Román J, Trujillo I, Montes M. *A&A*, 2020, 644: A42
- [54] Lupton R H, Gunn J E, Szalay A S. *AJ*, 1999, 118: 1406
- [55] Abraham R G, van Dokkum P G. *PASP*, 2014, 126: 55
- [56] McConnachie A W, Ibata R, Martin N, et al. *ApJ*, 2018, 868: 55
- [57] Wevers B M H R, Appleton P N, Davies R D, et al. *A&A*, 1984, 140: 125
- [58] Sandage A. *AJ*, 1976, 81: 954
- [59] Low F J, Beintema D A, Gautier T N, et al. *ApJL*, 1984, 278: L19
- [60] Venziani M, Ade P A R, Bock J J, et al. *ApJ*, 2010, 713: 959

The Search for Tidal Structures around Nearby Large Galaxies

HUANG Song-li^{1,2} FANG Min^{1,2} LIU Wen-hao^{1,2} ZHENG Xian-zhong^{1,2}
 PAN Zhi-zheng^{1,2} LIU Bin-yang^{1,2} YANG Chao^{1,2}
 CHANG Jiang^{1,2} WANG Lei^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT In the hierarchical model of galaxy formation and evolution, interactions and mergers between galaxies play a pivotal role in their mass growth. These processes lead to the formation of low surface brightness tidal structures around galaxies, which are inherently faint. To capture these structures effectively, a combination of long telescope exposure time and specific image processing techniques is necessary. To search for tidal structures around nearby galaxies, the authors selected 76 large galaxy samples from catalogs in the literature and performed image coaddition using g-band and r-band data from ZTF (the Zwicky Transient Facility) time-domain survey. They achieved an average depth (surface brightness limit) of $\mu_g(3\sigma, 10'' \times 10'') = (28.86 \pm 0.27) \text{ mag}/('')^2$, $\mu_r(3\sigma, 10'' \times 10'') = (28.65 \pm 0.27) \text{ mag}/('')^2$ (σ is the standard deviation of sky background noise) for the deep images, comparable to the depth of most international deep imaging surveys. Among the 76 sample galaxies, tidal structures were known to exist around 22 galaxies, and the authors successfully detected the structures around 20 galaxies using their image processing methods. What's more, they first discovered tidal structures around one of the sample galaxies. They specifically analysed the morphology of the tidal stream around NGC 5907. The comparison with previous studies well proved the existence of a single circular stream structure. Secondly, they analysed the three newly discovered faint tidal structures around NGC 4725. The structure in the northeast exhibits a blue color (the magnitude difference $g - r \sim 0.4-0.6$), similar to the companion galaxy NGC 4747 in the same direction, likely resulting from their interaction. The two structures on the east and southeast sides correspond to an overall ring structure both in location and morphology, displaying a reddish color ($g - r \sim 0.7-0.9$) akin to the eastern outer halo of NGC 4725. These structures may originate from the tidal disruption of an old dwarf spheroidal galaxy or the torn-off disk components of NGC 4725 during interaction with NGC 4747. Future work will necessitate further verification of the tidal structures using higher-resolution and deeper WFST (Wide Field Survey Telescope) images, along with data in other wavebands. Besides, numerical simulations will help gain a better understanding of galaxy interaction processes. Finally, in some sample galaxy images, they identified diffuse foreground Galactic cirrus contamination, characterized by rather low surface brightness (fainter than $\mu_g = 26 \text{ mag}/('')^2$) and a bluer color ($g - r \sim 0.41$) compared to extragalactic sources, facilitating their differentiation. The results show that the light reflected by these cirrus affects the detection and analysis of faint tidal structures around galaxies, but is easy to identify.

Key words galaxies: evolution, galaxies: interactions, techniques: image processing, techniques: photometric, methods: observational