

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.02.03

河外星系恒星潮汐流的探测

赵君亮^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 上海师范大学, 上海 200233)

摘要: 不少河外星系的周边发现有不同形态的恒星潮汐流, 它们大多源自主星系潮汐力场对伴星系的作用, 少数来自球状星团, 而对它们进行探测有着重要的天体物理意义。对几个代表性河外星系的潮汐流、星系团环境中的星流结构、潮汐流探测的统计性质和球状星团潮汐尾的探测现状及若干相关问题作了简要介绍。

关键词: 星系; 星系团; 恒星潮汐流; 球状星团; 潮汐尾

中图分类号: P156 **文献标识码:** A

1 引 言

关于星流 (stellar stream) 概念的出现, 最早可追溯到 19 世纪末 Holmes^[1]的专题论述, 而有效的实测研究则始于约 20 世纪 90 年代 Ibata 等人^[2]对人马矮椭圆星系的开创性工作。继人马星流之后, 在银晕外区又发现了许多不同尺度的星流, 包括矮星系星流和球状星团星流^[3], 其中尺度相对较小的星流又常称为潮汐尾 (tidal tail)。鉴于星流通常表现为由众多小块恒星聚集区构成的条形结构, 故又称为恒星碎片流 (stellar debris stream) 或潮汐碎片流 (tidal debris stream)^[4]。在相空间中, 星流成员星的数密度高于周围同类场星, 故星流又可归类于所谓恒星密度超区。

银河系星流或潮汐尾, 是矮伴星系或晕族球状星团在银河系潮汐力场的长期作用下生成的。银河系是一个棒旋星系, 那么其他同类型河外星系, 以及不同形态类别星系的周边, 是否也会有星流或潮汐尾那样的次结构存在呢? 如果答案是肯定的, 那么星流结构对星系天文学研究便具有普遍意义, 否则星流便只是银河系所特有的一类观测现象。

NGC 5907 是第一个被确认为有星流次结构存在的河外星系。1998 年 Shang 等人^[5]发现, 在这个星系的外围存在一个暗的椭圆弧状星流。但是, 有人认为 NGC 5907 属于有强相互作用的特殊星系, 存在星流结构并不具有普适性^[6,7]。

收稿日期: 2013-12-06; 修回日期: 2014-02-27

资助项目: 国家自然科学基金 (11173044)

通讯作者: 赵君亮, jlzhao@shao.ac.cn

仙女星系 M31 是距离最近 (日心距 $r \approx 780$ kpc) 的旋涡星系, 它为探测 (非特殊) 河外星系星流提供了一个极好的目标。2001 年 Ibata 等人^[6]率先发现, 在 M31 的星系晕内存在一个巨星流, 并进而推测潮汐流很可能在星系 (特别是旋涡星系) 晕中普遍存在。作者认为, 该星流物质 (星流成员星) 可能源自 M31 的两个近邻矮星系。同年, Irwin 等人^[8]对这一发现作了确认。

嗣后, 人们对 M31 中的星流结构及其相关问题做了大量的观测研究^[9-27]。2002 年, Ferguson 等人^[9]发现了 M31 中另一个不太显著的密度超区。接着, McConnachie 等人^[10]讨论了 M31 巨星流的三维结构。2007 年, Ibata 等人^[19]探测到在该星系中包含了多条星流。不久, Chapman 等人^[22]对 M31 晕中 5 条星流进行了详细讨论。2013 年, Fardal 等人^[26]推算了巨星流前身天体的质量。

自 20 世纪末以来, 在 M31 以外的其他一些河外星系中也确认或新发现了为数众多的星流结构, 其中相关工作做得较多的是星系 NGC 5907^[28-31]; 此外还有 NGC 891^[32,33]、NGC 1097^[34-36]、NGC 4013^[37]、NGC 4449^[38,39]、NGC 5055 (M63)^[40,41]、NGC 5128 (人马 A 射电源)^[42]、NGC 7331^[43], 以及船底矮星系^[44], 等等。

上述工作侧重于对各别河外星系中的星流做较详细的研究, 而另一条探测途径则是分析大样本星系中恒星潮汐流的统计特性。从历史上看, 这方面的讨论至少可追溯到 21 世纪初 Reshetnikov^[45,46] 的 2 项工作。之后, 用于统计分析的样本星系数逐渐增多, 研究内容亦渐而丰富^[40,47-55]。

近期, 有关河外星系星流研究的另一个重要方面涉及到星系团, 包括团星系的潮汐流^[53], 以及所谓团内星光 (infrcluster light, ICL) 的潮汐特征结构^[56-59], 前者主要讨论形成星流的环境因素, 后者则与星系团的动力学演化有关。

除了暗伴星系星流外, 在个别近距河外星系中也发现了由球状星团生成的小尺度星流——潮汐尾。因观测资料所限, 这方面研究做得很少, 明确指出存在球状星团潮汐尾的仅见于 2012 年 Annibali 等人^[60]的工作, 在其他一些讨论中只是提到若干球状星团外区的恒星因潮汐剥离使其分布明显不符合 King 模型^[61], 或者比较模糊地称之为潮汐羽状物 (tidal plume)^[62]等。

恒星潮汐流主要源自主星系引力场对近邻暗伴星系的长期作用, 而这一过程必然会影响到星系 (包括主星系和伴星系) 的结构和演化。因此, 有关河外星系星流的观测研究, 对于探索星系的结构和演化史 (包括星系相互作用和星系并合), 探究星系的物质组成, 检验星系演化理论, 认识伴星系和星系团的动力学演化过程等, 有着重要的天体物理意义。尽管河外星系星流的观测研究存在诸多难点, 如距离测定、成员判别、范围大且面亮度低等, 人们还是利用地面和空间观测资料获得了不少颇为重要的结果, 进而得出了一些重要结论。

本文仅限于综述有关河外星系恒星潮汐流的探测现状和目前取得的一些主要结果, 包括代表性矮星系星流的探测结果 (见第 2 章)、星系团环境中的星流结构 (见第 3 章) 和星流探测结果的若干统计性质 (见第 4 章)。第 5 章中简述球状星团潮汐尾的主要探测结果; 最后, 第 6 章对与星流探测有关的若干问题做了简要说明。

2 矮星系星流

通常认为, 星系晕和盘外区中的星流主要源自主星系周围的矮伴星系, 仅有少数来自主星系中的晕族球状星团。在所有河外星系中, 有关星流研究工作做得最多、最仔细的无疑是旋涡星系 M31。

2.1 仙女星系中的复杂星流结构

2001 年, Ibata 等人^[6]和 Irwin 等人^[8]通过对 Issac Newton Telescope (INT) 观测资料的分析发现, M31 星系的南部晕内存在一个由富金属恒星构成的巨星流。上述工作以红巨星支 (RGB) 恒星为示踪天体, 发现该星流一直延伸到当时观测资料所及的范围, 最大投影中心距约为 40 kpc, 总绝对星等 $M_V \approx -14$ mag。鉴于南巨星流指向 M31 的伴星系 M32 和 NGC 205, 并与它们的外区等亮度线之拉长方向相一致, 加之星流与伴星系的金属度分布又大致相同, 从而表明 M31 星流与这两个矮星系有着某种联系, 即星流物质来自这些 (或其中一个) 矮星系, 甚至进而认为在 M31 星系晕的北部应该存在一条类似的星流。尽管如此, 作者还是非常谨慎地指出, 不能完全排除另一种可能性的存在——目前观测到的星流物质乃是已被 M31 完全吞噬掉的另一个矮星系的遗迹。

两年后, McConnachie 等人^[10]利用观测星等更深、天区范围也更大的 Canada-Franch-Hawaii Telescope (CFHT) 巡天资料, 讨论了 M31 南巨星流的空间结构。他们发现, 在 M31 东南侧、观测天区的远端, 巨星流一直延伸到沿视线方向比 M31 远 100 kpc 的地方; 在西北侧, 则可以跟踪到 M31 前方约 40 kpc 的观测天区边缘, 可见巨星流围绕 M31 表现为某种卷曲状结构 (见图 1)。

2007 年, Ibata 等人^[19]在研究 M31 的晕结构时发现, 该星系中大尺度低面亮度结构颇为复杂, 除南巨星流外, 还包括多条星流, 以及如星弧 (arc) 等其他形式的恒星密度超区, 这些次结构有的彼此相关, 有的则源自不同的吸积事件。翌年, Chapman 等人^[22]对 M31 晕中 5 条星流的运动学特征进行了较为详细的讨论, 并分别给出它们的日心视向速度和相应的速度弥散度。2009 年, McConnachie 等人^[63]由 PAndAS (Pan-Andromeda Archaeological Survey) 计划^[64,65]所发表的、有关 M31 近邻天区物质分布次结构的观测资料 (涉及 M31 周边约 390 平方度天区), 揭示了 M31 可能对 M33 产生的潮汐力作用, 发现了众多的暗伴星系, 以及至少 5 条星流, 其中有的星流为首次发现, 这就进一步证实了 M31 周边的星流结构颇为复杂 (见图 2)。

最近, Fardal 等人^[26]通过建立模型, 推算出 M31 南巨星流之前身天体在最近一次过近团心点时所含恒星物质的质量为 $3.7 \times 10^9 M_\odot$ (与大麦云质量相当), 以及 M31 的位力质量为 $2.0 \times 10^{12} M_\odot$ 。

2.2 其他若干星系中的星流

2.2.1 NGC 5907

NGC 5907 是一个近距离 (日心距 $r \approx 14$ Mpc^[31]) 侧向 Sc 旋涡星系, 其极向环状星流结构的发现甚至先于 M31 的南巨星流^[5,28]。Shang 等人^[5]1998 年的研究表明, 该环状星流

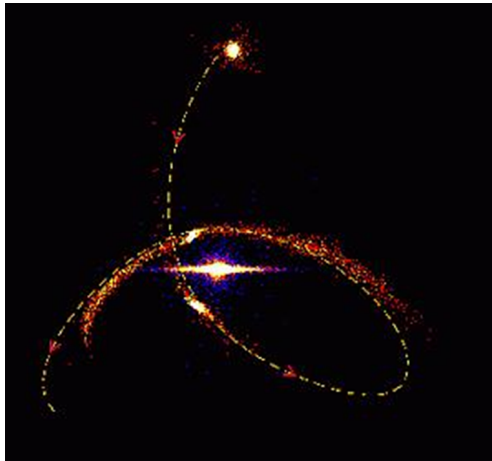


图 1 矮伴星系绕主星系运动并渐而瓦解的过程示意^[8]
星流即在这一过程中形成, 上部亮点为起始位置。

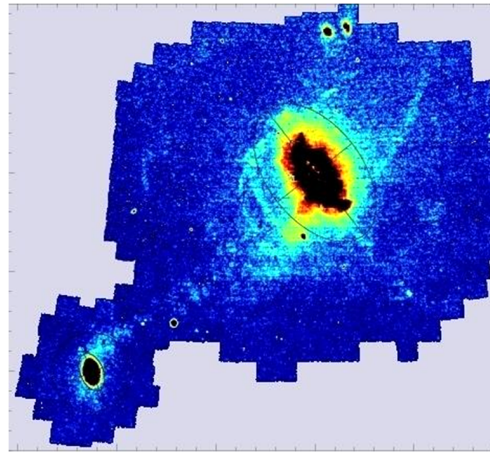


图 2 M31(右上方)及其周边复杂的次结构^[63]
多条星流清晰可见, 左下方为 M33。

呈现为沿 NGC 5907 短轴方向拉长的椭圆弧形, 主星系的中心则位于该椭圆的一个焦点附近 (参见文献 [5] 中的图 1 和图 3)。2000 年, Reshetnikov 和 Sotnikova^[29]指出, 这个星流可能源自一个现已瓦解了的暗伴星系, 后者更可能是一个盘星系而不是椭圆星系, 其质量约为主星系质量的千分之一, 由此可见两者的并合属于次级并合 (minor merger) 事件。他们的数值模拟结果说明, 目前处于伴星系瓦解的相对早期阶段, 距首次与主星系近距离交会尚不足 14 亿年。



图 3 星系 NGC 5907 及其周围的复杂星流结构^[30]
总曝光时间为 11.35 h。

2008 年 Mat3nez-Delgado 等人^[30]通过深度观测发现, NGC 5907 周围的恒星碎片弧有着很复杂的大尺度结构 (见图 3), 而早期 Shang 等人^[5]所观测到的只是其中较为明亮的部分。作者认为, 小质量星系的内落, 即次级并合事件可以产生相互交错、玫瑰花瓣状的恒星碎片流结构。

不过, 最近有人认为, 一次主级并合 (major merger) 事件能够解释有关 NGC 5907 巨星流较多的观测事实^[31] (详见本文 6.4 节)。

2.2.2 NGC 891

这是在本星系群尺度之外 (日心距约 10 Mpc), 利用地面设备 (8.2 米 Subaru 望远镜) 所发现的、第一个有巨星流结构的侧向旋涡星系。2010 年, Mouhcine 等人^[32]以 RGB 星为示踪天体, 发现在 NGC 891 主体周围存在一个圈状巨星流, 最远可延伸至中心距约 50 kpc 的地方, 而且在 RGB 星的面密度分布图上, 星流密度超区的结构显得颇为复杂。

同年, Shih 等人^[33]以行星状星云 (PN) 为示踪天体, 讨论了 NGC 891 的次结构问题。PN 有很强的 [OIII] $\lambda 5007$ 发射, 即使在 20 Mpc 远处也能探测到, 且可测定其视向速度, 并进而用于运动学研究。Shih 等人^[33]的工作表明, 在星系盘两侧中面距 (目标天体到星系盘对称面的距离) 大于 2 kpc 的天区内, 样本 PN (计 125 个) 在位置空间和速度空间的分布呈现明显的不对称特征。他们经细致分析后对此解释为该区域可能存在 2 条星流, 星流绕星系运动, 而运动轨道与星系主体的交角很大。不过, 作者没有就此与 Mouhcine 等人^[32]发现的巨星流作详细的比对研究, 只是指出这两项工作的结果都可作为 NGC 891 曾发生过星系合并事件的观测证据^[33]。

2.2.3 NGC 1097

自 1975 年起, 就已在棒旋星系 NGC 1097 周围发现了 4 个暗淡的光学喷流状结构, 中心距可延伸至 55 kpc, 其中最明显的喷流 R1 因在远端出现直角转向而被称为呈“罗圈腿 (dog-leg)”形结构^[66-68]。尽管有人提及可能存在潮汐相互作用, 但由于 NGC 1097 是一个特殊星系, 有关喷流起源的倾向性意见是来自星系核的喷发物质。

1997 年, Wehrae 等人^[34]基于 NGC 1097 的光学和射电观测资料, 并顾及喷流的颜色和表观形态, 认定这些喷流不可能源自 AGN 的物质喷发, 而是起因于与其椭圆伴星系 NGC 1097A 的多次近距离交会, 它们应该属于恒星潮汐流, 或可称为喷流状潮汐流^[36]。

2003 年, Higdon 和 Wallin^[35]根据这些喷流状结构的射电-X 射线能谱分布, 进一步证实它们应该源自恒星星光。不过, 考虑到喷流的形态, 可见光和近红外波段的颜色, 以及未能观测到中性氢发射这一事实, 他们认为这些喷流不可能是由 NGC 1097 星系盘或伴星系 NGC 1097A 生成的潮汐尾。由此得出的推论是, 目前观测到的喷流, 乃是一个业已瓦解了的矮星系之残留物, 而这个矮星系曾在中心距仅为几个 kpc 的地方穿越 NGC 1097 星系盘的内区。

近期, Galianni 等人^[36]对 NGC 1097 中东北向的“罗圈腿”潮汐流做了较为深入的讨论。他们在该星流中观测到 2 个尺度相对较大的光学恒星集聚区, 称之为“亮结 (knot)”, 其测光和光谱特性与普通 dSph 星系相同。经仔细分析后他们认为, 该星流很可能源自亮结 A 的潮汐扰动。对于一个处于潮汐剥离过程中的 dSph 星系, 先行释放的是星系中的暗物质, 然后才是恒星, 由此推知亮结 A 现在应该是一个贫冷暗物质 (CDM) 天体。

关于其他一些河外星系星流的观测研究可参见文献 [37—44]。

3 星系团环境中的星流结构

星系团是宇宙中质量最大的位力化结构, 一些富星系团的成员星系可数以千计, 而关于星系团的生成和演化以及团内星系演化的研究, 乃是现代宇宙学中最令人感兴趣的领域之一。

在星系团内, 处于任何团星系之外的恒星称为团内恒星 (intracluster star), 它们并非是各别团星系的成员, 但仍受到团引力势的束缚。团内恒星在整体上显示为一种弥漫光, 称之

为团内星光 (ICL)^[56,57]。实测研究表明, ICL 约占团内总恒星亮度的 10%~30%, 在某些富团内其占比可高达 40%~50%^[57]。ICL 的发现需要借助面亮度测量, 或者利用某些可分辨的高光度示踪天体, 如行星状星云、超新星、红巨星、球状星团系统等^[69]。ICL 被广泛用来探测星系团内的星流结构。观测表明, ICL 显示出有不同形态的星流状次结构, 如长的直线状星流^[70]、弯曲的弧状结构^[71]、潮汐尾^[69]、羽状结构^[72], 以及星系际桥^[73]等。鉴于这些结构均起因于潮汐力场的作用, 故又常统称为潮汐特征结构 (tidal feature)。

尽管 ICL 的生成机制尚未十分明确, 但通常认为产生 ICL 的团内恒星应该源自团星系物质的潮汐剥离。这里又有几种可能的剥离机制, 如星系团初始坍缩期内的物质剥离, 团引力势确立后的星系剥离, 被星系团吸积的星系群内的星系剥离, 以及团星系间高速交会过程中的物质剥离等^[56]。近期的一些工作则表明, 星系并合乃是生成 ICL 的主要机制^[74-77]。显然, ICL 及其次结构 (包括星流) 的探究 (包括实测和理论两方面), 可以为认识星系团和团内星系的演化提供一条重要而又有效的途径。

2009 年, Rudick 等人^[56]就 ICL 中的潮汐流结构做了一项较为细致的理论研究——通过 N 体模拟, 来讨论模拟星系团内 ICL 中星流的生成和演化过程。他们发现, 星系团 ICL 约有 40% 以大质量 ($M \geq 7.0 \times 10^8 M_{\odot}$) 的动力学冷星流形式生成。在团演化早期, 星流所产生的 ICL 之占比较大, 而在大质量团引力势确立后的团演化后期这一占比较小。Rudick 等人^[56]指出, 星流的形成需要因星系对之间的密近相互作用而出现的强潮汐力场, 如星系对的并合, 或者与团中心星系的快速密近交会。星流一旦形成, 便会因星系团潮汐力场的瓦解作用而丢失质量, 然后开始衰退, 衰退时标 (decay timescale) 约为它们之团内动力学时标的 1.5 倍。

2012 年, Koch 等人^[58]对长蛇 I 星系团的观测发现, 作为星系团成员的矮椭球星系 HCC-087, 其外观呈 S 形且空间范围相当大 (半光半径 3.1 kpc), 这说明它正处于潮汐瓦解过程中。 N 体模拟表明, 目前 HCC-087 正首度通过远团心点, 团心距 150 kpc, 它所经历的潮汐瓦解应该源自星系团的自身引力场, 而不太可能起因于与相距 50 kpc 处的近邻 S0 星系 HCC-005 的相互作用, 或者说该矮星系的瓦解与局域环境因素无关。另外, 模拟计算还发现 HCC-087 潮汐尾的取向与它的运动轨道正交。

同年, Arnaboldi 等人^[59]的速度空间研究表明, 在长蛇 I 星系团的中心区有 2 条潮汐星流, 它们分别从矮星系 HCC-026 和 S0 星系 HCC-007 伸出。HCC-026 星流相对团中心 cD 星系 NGC 3311 的红移约为 $1200 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 与矮星系 HCC-026 自身以及其他几个近距矮星系的红移相一致。HCC-007 潮汐流的两侧伸展范围至少会达到 110 kpc, 且可能与 NGC 3311 非对称外晕的一边相接, 而 HCC-007 目前已经失去了大约 50% 的恒星。据此作者推论, 有一群小星系正在朝向长蛇 I 星系团的核区内落, 并且已经因星系团的强引力场作用而部分瓦解。

为了更客观地讨论星系团环境对团星系潮汐特征的影响, Adams 等人^[53]于 2012 年进行了一项较大样本的统计研究——计有 54 个星系团 ($0.04 < z < 0.15$), 共包含 3551 个早型星系。经细致分析后发现, 随着团心距的减小, 受潮汐干扰的星系数渐而减少, 这一趋势在约 R_{200} 范围之内最为明显; 这里 R_{200} 是表征星系团线尺度大小的一种特征半径, 在这一半径

(团心距) 范围内, 星系团的平均引力质量密度 $\langle \rho \rangle = 200\rho_c$, 而 $\rho_c = 3H_0^2/(8\pi G)$ 为宇宙临界密度^[78]。此外, Adams 等人^[53]的工作还指出, 尚无证据表明潮汐结构的生成率与局域密度之间存在统计显著的相关关系。不过, 鉴于这项工作中星系局域密度的测定有相当大的不确定性, 上述结果并非结论性的。

4 统计研究

除对各别星系中的星流做较为细致的研究外, 自本世纪初起人们即开始探讨大样本星系中恒星潮汐流的某些统计特性。显然, 有潮汐特征结构星系的统计研究, 可用于探究该类结构与星系形态或某些物理量(如红移、质量等)的关系, 以及估算并合事件的发生率。

4.1 潮汐流结构与星系形态的联系

2010 年, Matínez-Delgado 等人^[40]对 8 个孤立旋涡星系做了宽视场、深度成像观测, 结果发现其中 6 个星系的外区表现出形态各异的潮汐流特征, 如圆弧形、喷流状或壳层类结构等, 由此推测这类潮汐特征结构在正常盘星系的周围应该较为普遍地存在。不过, 鉴于样本星系数太少, 这一结果尚不足以成为具有普遍意义的结论。

另一方面, 不仅盘状星系外区存在恒星潮汐流, 椭圆星系周边同样可以观测到类似的结构。2009 年, Tal 等人^[48]对 55 个近距离 (15~50 Mpc) 的亮椭圆星系 ($M_B < -20$ mag) 做了有关的观测研究, 证实约有 73% 的样本星系呈现有恒星潮汐特征结构。他们还分析了此类引力相互作用与星系环境的关系, 发现群内星系和场星系受潮汐力扰动影响的程度, 要比团内星系来得明显, 低密度环境中椭圆星系的质量目前仍在持续增大, 每 10 亿年的增长率 $dM/M \approx 0.2$ 。

2011 年, Mixkolczi 等人^[50]利用 SDSS (DR7) 观测资料, 对 474 个旋涡星系周围的低面亮度潮汐结构做了系统性搜索, 发现约 19% 样本星系具有此类结构, 且至少有 6% 的星系呈现明显的恒星潮汐流特征; 鉴于探测能力所限, 上述潮汐结构的出现频数应该只是实际情况之下限。另外, 所发现的星流有着不同的长度, 包括相对较短的星流(如 NGC 3221), 中等尺度的星流(如 NGC 4684), 以及已经绕母星系转过两整圈的星流(NGC 7711)。他们还指出, 星流长度的不同有可能对应着不同的物质吸积阶段, 而这种吸积过程目前仍在进行之中, 并会影响到星系的演化。

基于 Tal 等人^[48]和 Mixkolczi 等人^[50]的上述工作, Ferguson^[52]认为星系外区的潮汐次结构与星系的形态有关——73% 的亮椭圆星系表现出有恒星潮汐特征结构, 而在所有近距离星系中这一占比不足 20%, 这意味着不同形态类别的星系可能有不同的近期吸积史。最近, Atkinson 等人^[54]由 CFHT 巡天资料得到 1781 个亮星系 ($M_r < -19.3$ mag) 样本, 红移范围 $0.04 < z < 0.2$ 。经仔细识别后他们发现, 样本中有各类清晰潮汐结构的星系约占 12%(207 个); 如计入有弱潮汐结构的星系, 则这一占比为 18%(314 个), 与 Mixkolczi 等人^[50]的结果基本一致。

4.2 潮汐流结构与星系红移和质量的关系

本世纪初, Reshetnikov^[45,46]在他的两项工作中分别用到了 12 和 25 个有潮汐尾的场星系 (红移 $z = 0.5 \sim 1.5$)。作者发现, 对于其中 $z = 0.5 \sim 1.0$ 的较完备星系样本 (14 个), 星系的观测空间密度 ρ_V 随红移值而变, 相应的关系式为

$$\rho_V \propto (1+z)^m, \quad (1)$$

其中幂指数 $m = 3.6_{-0.9}^{+1.2}$, 并据此推论在 $z \approx 1$ 处星系并合率快速上升。不过, 作为一项统计研究, 这里所用的样本星系数显然太少。

2010 年, Bridge 等人^[49]由 CFHT 巡天资料中的约 27 000 个星系, 编纂了一份含约 1600 个并合星系的星系表。经细致分析后他们发现: (1) 在 $z \approx 0.3$ 处并合星系的占比为 4.3%, 而对于 $z \approx 1$ 的星系占比则提高为 19.0%; 这一结果意味着并合占比按式 (1) 的规律随红移而演化, 幂指数 $m = 2.25 \pm 0.24$ 。(2) 在 $0.2 < z < 0.6$ 范围内, 平均并合率约为每 10 亿年、每个星系发生 0.075 次并合, 而当 $z \approx 1$ 时这一数字提高到 0.24。(3) 并合占比与星系质量有一定程度的相关性, 在 $z < 1$ 的范围内, 与质量较大的星系 ($M > 10^{10.7} M_\odot$) 相比, 较小质量星系 ($M \approx 10^{10} M_\odot$) 有着比较高的并合占比。

翌年, Reshetnikov 和 Mohamed^[51]利用 HST 的深场资料, 讨论了有潮汐尾星系 (含 M51 型星系) 的出现频数。他们在 5 个深场中发现了近 700 个有潮汐尾的星系 (红移 $z \leq 1.5$), 对于其中 $z \leq 0.67$ 的完备样本 (454 个星系) 有 $m \approx 2.6$ 。作者估计, 在最近 60~70 亿年时间内, 约有 1/3 的亮星系 ($M_B \leq -18$ mag) 必然经历了强引力扰动和并合过程, 约有 1/10~1/5 亮星系吞噬了邻近的小质量伴星系。

事实上, 在本世纪的 10 余年内相关工作可谓颇多。尽管在有潮汐流结构星系的确认判据、研究途径、样本容量以及样本星系红移和光度的范围等方面有所不同, 但大部分工作给出 m 的取值范围为 $m \approx 2 \sim 4$ ^[49,79-86]。Reshetnikov 和 Mohamed^[51]认为, 他们得出的 $m \approx 2.6$ 大致等于上述结果之平均值, 而这一较大的 m 值表明 (直至 $z \approx 1$) 相互作用星系和并合星系出现的频数 (占比) 一直在增大; 当 $z \approx 0.7$ 时此类星系的占比约为 8%, 与 Bridge 等人^[49] 和 Atkinson 等人^[54]的结果相符。

5 球状星团潮汐尾

球状星团是属于极端星族 II(晕星族) 的老年天体, 它们在星系早期演化史和星系晕物质结构的研究中有着重要的地位。

与银河系的情况相类似^[87,88], 除矮星系潮汐尾外, 在河外星系中也已发现了由球状星团生成的潮汐尾或其他形状的潮汐结构。Grillmair 等人^[61]曾指出, 对球状星团潮汐尾的详细研究, 可能是深入认识该类星团轨道运动形状的唯一途径, 可由此推知星系晕的质量分布, 并进而探讨一些久未解决的难题, 如球状星团的起源、旋涡星系的形成和演化等^[61]。

1996 年, Grillmair 等人^[61]通过对 M31 中 4 个球状星团 HST 成像资料的分析, 发现其

中 3 个团的外区面密度径向分布轮廓与 King 模型不符——在星团潮汐半径附近及更远处, 实测面密度高于模型值, 即使引入多质量 King 模型亦不能解释这一差异。据此, 他们推测这 3 个球状星团有可能存在潮汐尾结构。

本世纪初, Ferguson 等人^[62]利用 INT 观测资料, 对 M31 周围约 25 平方度天区 (沿长轴的延伸范围达 55 kpc) 内 RGB 星的密度和颜色分布进行了详细的分析。他们确认, 除 Ibata 等人^[6]所发现的南巨星流外, 在靠近东北向长轴的地方, 还存在另一个恒星密度超区, 只是远不如南巨星流来得显著。该密度超区位于球状星团 G1 邻域内, 而 G1 是一个非常明亮的团, 与 M31 核之间的投影距离约为 40 kpc。对于这个非条状的次结构, Ferguson 等人^[62]冠名为 G1 星簇 (G1 clump), 而有人则称之为潮汐羽状物^[60]。对于星团 G1 和 G1 星簇的起源, 一种解释是: 亮星团 G1 乃是一个现已不见踪影的矮星系的核 (裸核), 而 G1 星簇则是从该矮星系外围剥离出来的恒星^[62]。

最近, Annibali 等人^[60]在对 NGC 4449 的一项研究中, 确认河外星系内的球状星团存在潮汐尾结构。NGC 4449 是一个不规则星暴星系, 日心距 3.82 Mpc。CL77 是该星系内的一个老年星团, 到母星系中心的投影距离约 3 kpc, 质量约为 $1.7 \times 10^6 M_{\odot}$, 年龄约 70 亿年, 其观测像呈明显的椭圆形 (偏心率约为 0.24)。作者由 HST 观测资料发现, 在 CL77 周围存在两条由年轻 (蓝色) 恒星构成的潮汐尾, 它们相对星团大致呈对称分布。潮汐尾的长度约为 50", 相应的线尺度约为 1 kpc。上述特征表明, CL77 的前身有可能是 NGC 4449 的一个富含气体的伴星系, 该伴星系因受 NGC 4449 的潮汐瓦解作用使其外区物质被剥离, 残留下来的裸核则是目前观测到的 CL77。

Annibali 等人^[60]指出, CL77 的重要性在于, 与其他一些球状星团相比, 它可能反映了伴星系瓦解过程的不同阶段。对于银河系球状星团人马 ω (或 M31 球状星团 G1), 前身伴星系已完全瓦解而不复可见。另一方面, 银河系球状星团 M54 代表了伴星系瓦解的早期阶段——该伴星系 (亦即 M54 的母星系) 依然存在, 并正在展现出较为明显的矮星系星流^[60,89,90]。CL77 与人马 ω 和 M54 有着类似的演化路径, 但在演化进程上处于上述两种情况之间的中间阶段: 尽管母星系已不可见, 但蓝色潮汐尾意味着其前身矮星系在过去曾一度存在。

由于河外星系中球状星团潮汐尾结构的尺度很小, 亮度又很低, 故探测颇为不易, 相关工作远少于对矮星系潮汐流的研究。

6 与星流探测有关的若干问题

6.1 星流的探测途径

星流成员星源自同一个矮伴星系 (或球状星团), 且已经历了相当长时间的演化, 它们在参数 (如位置、速度、颜色等) 空间中会呈现与非星流成员星不同的共性特征。据此, 观测者可以借助能反映恒星潮汐流物质分布的所谓“示踪天体 (tracer)”的观测特征, 来探究星流的结构, 而示踪天体应该是一些能满足一定条件的某类恒星或者其他类别天体。这些条件包

括: (1) 它们应该有较高的光度, 以在很远的地方也能够观测到; (2) 有可能估算出它们的距离 (通常是光度距离); (3) 此类天体在星流结构中应该较为普遍地存在, 从而能取得较大的观测样本以保证统计分析结论的可靠性; (4) 它们应不难加以识别。目前广泛用于星流探测的示踪天体首推 RGB 星^[6,10,19,32,63], 个别工作则用到行星状星云^[33]。

鉴于一些河外星系距离比较远, 星系外围的星流又比星系主体暗弱得多, 因而星流探测的主要途径是深空成像观测 (包括地面观测和空间观测), 即在位置空间中讨论星流的形态和结构^[6,10,61]。近期, 在有的工作中用到星流成员星的速度空间观测资料 (即视向速度)^[59], 或者用到了目标天体的颜色和射电观测资料, 以及 X 射线辐射的能谱分布等^[34,35]。

6.2 潮汐流的质量估算

2002 年, Peng 等人^[42]在讨论有关最近的巨椭圆星系 NGC 5128(人马 A) 之蓝色、弧状潮汐流问题时, 根据 Johnston 等人^[91]的工作, 给出了描述星流特征的 2 个重要物理参数——伴星系瓦解过程迄今所经历的时间 t_d , 以作为瓦解时标之下限, 以及还有潮汐流中恒星物质的质量 m_{ts} :

$$t_d = 0.01\Psi \left(\frac{R}{w} \right) \left(\frac{R_c}{10 \text{ kpc}} \right) \left(\frac{200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}{v_c} \right) \text{ Ga} , \quad (2)$$

$$m_{ts} = 10^{11} \left(\frac{w}{R} \right)^3 \left(\frac{R_p}{10 \text{ kpc}} \right) \left(\frac{v_c}{200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}} \right) M_\odot , \quad (3)$$

式中 Ψ 是潮汐流物质在伴星系绕主星系运动轨道上所占有弧长 (以弧度计), w 是在半径 (即投影中心距) R 处潮汐流的宽度, R_c 是与实际轨道具有等值能量的圆轨道之半径, v_c 为圆运动速度, 而 R_p 为轨道近心距。对于 NGC 5128 中的年轻潮汐流, 以 $\Psi = \pi$ 、 $R = 8 \text{ kpc}$ 、 $w = 490 \text{ pc}$ 、 $R_c = 5.8 \text{ kpc}$ 、 $v_c = 250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及 $R_p = 3.5 \text{ kpc}$ 代入式 (2) 和 (3), 即可得出瓦解时标 $t_d \geq 240 \text{ Ma}$, 以及该潮汐流的质量估值 $m_{ts} = 7.7 \times 10^6 M_\odot$ 。

6.3 因潮汐流引发的星系形态转化

矮伴星系因与主星系的相互作用生成恒星潮汐流, 此类潮汐流是从矮星系中剥离出来的, 而随着剥离过程的发展, 矮星系的形态就有可能发生改变, 这就是星系的形态转化 (morphological transformation); 有的甚至最终会演化为球状星团, 如银河系球状星团人马 ω 和 M31 球状星团 G1 可能即属此例^[60]。

2001 年, Mayer 等人^[92]就这一问题做了一项 N 体模拟, 以探究矮不规则星系 (dIrr) 在银河系暗物质晕中作轨道运动时的形态转化趋势。他们发现, 在不到 10 Ga 时间内, 如果期间 dIrr 星系能经过近银心点 2 或 3 次 (轨道运动周期约小于 3~4 Ga), 那么低面亮度 dIrr 星系会转化为矮椭球星系 (dSph), 而高面亮度 dIrr 星系会转化为矮椭圆星系 (dE)。

不久, Forbes 等人^[93]通过实测证实了上述观点。他们由 HST 的多色成像资料, 发现在一个侧向旋涡星系的附近有一个矮伴星系, 而矮星系两侧的星流清晰可见 (参见图 4)。详细的分析表明, 根据其结构和测光性质可判定, 该矮星系是一个 dE 星系, 而它的前身应该是一个有盘的 dIrr 星系——矮星系的中心区偏于蓝色, 这说明其中富含年轻星, 而这些年轻星则由盘内气体生成, 并估计前身星系的光度可能是目前观测光度的两倍。

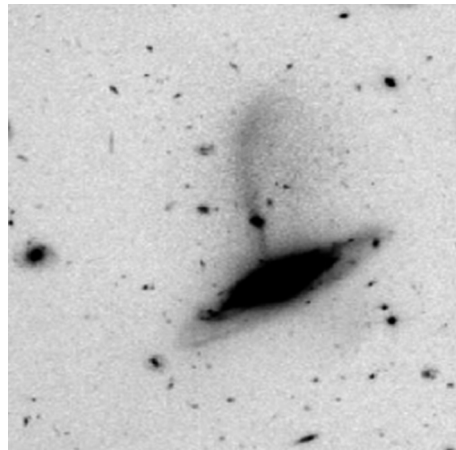


图 4 在侧向星系的上方, 矮伴星系及两侧的星流清晰可见^[90]

本世纪初, 人们在天炉星系团中发现了若干尺度仅约为 100 pc 的所谓“超致密矮星系 (ultracompact dwarf galaxy, UCD)”^[94-97], 其 B 波段绝对星等范围为 $-11 \sim -13$ mag, 与团中心 cD 星系 NGC 1399 的角距离不超过 $30'$ 。Bekki 等人^[94]的工作证实, 此类星系的前身很可能是一些有致密核的 dSph 或 dE 星系, 它们的光度大于现存的矮致密星系; 或者说, UCD 星系是因主星系的潮汐剥离作用, 由 dSph 或 dE 星系演化而来, 而这一过程又被作者形象化地称为星系脱粒 (galaxy threshing)。除上述 Forbes 等人^[93]的发现外, 2007 年 Sasaki 等人^[98]的实测工作也发现了类似的伴星系星流和星系脱粒现象——由伴星系伸出的两条潮汐尾之长度超过 150 kpc, 而伴星系与主星系的距离大于 100 kpc。

6.4 关于主级并合和次级并合

众所周知, 两个质量相差不太大的星系间的并合称为主级并合, 而质量差异较为悬殊的两个星系的并合则称为次级并合。不过, 如何区分主级并合和次级并合并无明确的定量判据, 有时甚至会引入中级并合 (intermediate merge) 的概念。例如, 在 Chonis 等人^[41] 2011 年的工作中, 以主星系和伴星系之质量比 10:1 作为区分主级并合和次级并合的判据; 而差不多同一时期 Wang 等人^[31]则称质量比为 3:1~5:1 者为主级并合, 质量比为 5:1~12:1 者归入中级并合, 质量比大于 12:1 者为次级并合。

在涉及星系形成的研究中, 人们对主级并合和次级并合两类事件的相对重要性是有争议的^[31]。有人认为星系主级并合现在非常罕见, 而次级并合事件则可以持续出现, 并影响到星系目前的演化进程^[41,99]。2011 年, Chonis 等人^[41]在前人工作的基础上, 利用大视场、深度面测光资料, 证实近距旋涡星系 M63 (NGC 5055, 亦称葵花星系) 盘的周围有一个弧圈状恒星巨潮汐流, 该星流离盘中心最远距离约为 $14.0'$ (约 29 kpc), 其投影宽度达 $1.6'$ (约 3.3 kpc)。对星流的形态和颜色进行详细分析后表明, 这个大尺度潮汐流应该起因于最近几十亿年内 M63 吸积了一个质量约 $10^8 M_{\odot}$ 的矮星系。尽管对前身伴星系的现有位置及其最终归宿尚未能给出明确的结论性意见, 但作者认为一次次级并合事件无疑正在进行过程之中。

另一种观点更多强调了主级并合的重要性。以 NGC 5907 的巨星流为例, 尽管一些工作认定其起因于次级并合事件^[29,30], 但最近 Wang 等人^[31]对此提出了不同的观点。他们的模拟计算表明, 质量比为 3:1~5:1 的主级并合事件, 可以生成如 NGC 5907 那样复杂的环状潮汐流结构 (参见图 3), 并能合理地解释较多次级并合机制所难以解释的观测事实, 如主星系有一个范围较大的薄盘, 一个相对较小的核球, 以及气体盘呈明显的翘曲结构等。可见, 人们对恒星潮汐流形成具体过程的定量研究还很不完善。

7 结 语

本文仅就河外星系星流 (潮汐尾) 实测方面目前取得的一些主要结果给以简要综述, 包括若干代表性矮星系星流 (特别是 M31 星流的复杂结构) 和球状星团潮汐尾的探测现状, 星系团环境对团星系潮汐特征的影响, 潮汐流结构与星系形态、红移和质量的统计关系等。

从河外星系星流的探测史不难看出, 由地面大望远镜观测、空间深场观测和局域性多波段普查观测, 可以取得更大范围天区、更深的多类观测资料, 而这对探究河外星系周边恒星潮汐流和其他潮汐特征结构的细节, 以及发现新的潮汐流殊为重要, 它们必将在未来有关河外星系星流的探测和研究工作中继续发挥重要的作用。

参考文献:

- [1] Holmes E. JBAA, 1984, 5: 26
- [2] Ibata R A, Gilmore G, Irwin M J. Nature, 1994, 370: 194
- [3] 田浩, 姜碧涛. 天文学进展, 2012, 30: 64
- [4] Grillmair C J. ApJ, 2009, 693: 1118
- [5] Shang Z H, Zheng Z Y, Brinks E, et al. ApJL, 1998, 504: L23
- [6] Ibata R A, Irwin M J, Lewis G, et al. Nature, 2001, 412: 49
- [7] Sackett P D, Morrison H L, Harding P, et al. Nature, 1994, 370: 441
- [8] Irwin M J, Ferguson A M N, Tanvir N, et al. INGN, 2001, 5: 31
- [9] Ferguson A M N, Irwin M J, Ibata R A, et al. AJ, 2002, 124: 1452
- [10] McConnachie A W, Irwin M J, Ibata R A. MNRAS, 2003, 343: 1335
- [11] Ibata R A, Chapman S C, Ferguson A M N, et al. MNRAS, 2004, 351: 117
- [12] Guhathakurta P, Rich R M, Reitzel D B, et al. AJ, 2006, 131: 2497
- [13] Kalirai J S, Guhathakurta P, Gilbert K M, et al. ApJ, 2006, 641: 268
- [14] Brown T M, Smith E, Guhathakurta P, et al. ApJL, 2006, 636: L89
- [15] Font A S, Johnston K V, Guhathakurta P, et al. AJ, 2006, 131: 1436
- [16] Fardal M A, Babul A, Geehan J J, et al. MNRAS, 2006, 366: 1012
- [17] Geehan J J, Fardal M A, Babul A, et al. MNRAS, 366: 996
- [18] Gilbert K M, Fardal M A, Kalirai J S, et al. ApJ, 2007, 668: 245
- [19] Ibata R A, Martin N F, Irwin M J, et al. ApJ, 2007, 671: 1591
- [20] Fardal M A, Guhathakurta P, Babul A, et al. MNRAS, 2007, 380: 15
- [21] Fardal M A, Babul A, Guhathakurta P, et al. ApJL, 2008, 682: L33
- [22] Chapman S C, Ibata R A, Irwin M J, et al. MNRAS, 2008, 390: 1437

- [23] Fardal M A, Guhathakurta P, Gilbert K M, et al. ASPC, 2009, 419: 118
- [24] Gilbert K M, Guhathakurta P, Kollipara P, et al. ApJ, 2009, 705: 1275
- [25] Gilbert K M, Font A S, Johnston K V, et al. ApJ, 2009, 701: 776
- [26] Fardal M A, Weinberg M D, Babul A, et al. MNRAS, 2013, 434: 2779
- [27] Fang X, Zhang Y, García-Benito R, et al. ApJ, 2013, 774: 138
- [28] Zheng Z Y, Shang Z H, Su H J, et al. AJ, 1999, 117: 2757
- [29] Reshetnikov V P, Sotnikova N Y. AstL, 2000, 26: 333
- [30] Matínez-Delgado D, Peñarrubia J, Gabany R J, et al. ApJ, 2008, 689: 184
- [31] Wang J, Hammer F, Athanassoula E, et al. A&A, 2012, 538: 121
- [32] Mouhcine M, Ibata R A, Rejkuba M. ApJL, 2010, 714: L12
- [33] Shih H Y, Méndez R H. ApJL, 2010, 725: L97
- [34] Wehrle A E, Keel W C, Jones D L. AJ, 1997, 114: 115
- [35] Higdon J L, Wallin J F. ApJ, 2003, 585: 281
- [36] Galianni P, Patat F, Higdon J L, et al. A&A, 2010, 521: 20
- [37] Matínez-Delgado D, Pohlen M, Gabany R J, et al. ApJ, 2009, 692: 955
- [38] Matínez-Delgado D, Romanowsky A J, Gabany R J, et al. ApJL, 2012, 748: L24
- [39] Rich R M, Collins M L M, Black C M, et al. Nature, 2012, 482: 192
- [40] Matínez-Delgado D, Gabany R J, Crawford K, et al. AJ, 2010, 140: 962
- [41] Chonis T S, Matínez-Delgado D, Gabany R J, et al. AJ, 2011, 142: 166
- [42] Peng E W, Ford H C, Freeman K C, et al. AJ, 2002, 124: 3144
- [43] Ludwig J, Pasquali A, Grebel E K, et al. AJ, 2012, 144: 190
- [44] Muñoz R R, Majewski S R, Zaggia S, et al. ApJ, 2006, 649: 201
- [45] Reshetnikov V P. AstL, 2000, 26: 61
- [46] Reshetnikov V P. A&A, 2000, 353: 92
- [47] Matínez-Delgado D, Gabany R J, Peñarrubia J, et al. arXiv0812.3219v1, 2008
- [48] Tal T, van Dokkum P G, Nelan J, et al. AJ, 2009, 138: 1417
- [49] Bridge C R, Carlberg R G, Sullivan M. ApJ, 2010, 709: 1067
- [50] Miskolczi A, Bomans D J, Dettmar R J. A&A, 2011, 536: 66
- [51] Reshetnikov V P, Mohamed Y H. AstL, 2011, 37: 743
- [52] Ferguson A M N. ASPC, 2012, 458: 265
- [53] Adams S M, Zaritsky D, Sand D J, et al. AJ, 2012, 144: 128
- [54] Atkinson A M, Abraham R G, Ferguson A M N. ApJ, 2013, 765: 28
- [55] Duc P A, Renaud F. Tides in Astronomy and Astrophysics. Berlin: Springer-Verlag, 2013
- [56] Rudick C S, Mihos J C, Frey L H, et al. ApJ, 2009, 699: 1518
- [57] Arnaboldi M, Gerhard O. Highlights, 2010, 15: 97
- [58] Koch A, Burkert A, Rich R M, et al. ApJL, 2012, 755: L13
- [59] Arnaboldi M, Ventimiglia G, Iodice E, et al. A&A, 2012, 545: 37
- [60] Annibali F, Tosi M, Aloisi A, et al. ApJL, 2012, 745: L1
- [61] Grillmair C J, Ajhar E A, Faber S M, et al. AJ, 1996, 111: 2293
- [62] Ferguson A M N, Irwin M J, Ibata R A, et al. AJ, 2002, 124: 1452
- [63] McConnachie A W, Irwin M J, Ibata R A, et al. Nature, 2009, 461: 66
- [64] Martin N F, McConnachie A W, Irwin M, et al. ApJ, 2009, 705: 758
- [65] Martin N F, Ibata R A, McConnachie A W, et al. ApJ, 2013, 776: 80
- [66] Wolstencroft R D, Zealey W J. MNRAS, 1975, 173: 51
- [67] Lorre J. ApJL, 1978, 222: L99
- [68] Carter D, Allen D A, Malin D F. MNRAS, 1984, 211: 707
- [69] Krick J E, Bernstein R A, Pimbblet K A. AJ, 2006, 131: 168
- [70] Mihos J C, Harding P, Feildmeier J, et al. ApJL, 2005, 631: L41
- [71] Calcáneo-Roldán C, Moore B, Bland-Hawthorn J, et al. MNRAS, 2000, 314: 324

- [72] Feildmeier J, Mihos J C, Morrison H L, et al. ApJ, 2004, 609: 617
- [73] Feildmeier J, Mihos J C, Morrison H L, et al. ApJ, 2002, 575: 779
- [74] Monaco P, Murante G, Borgani S, et al. ApJL, 2006, 652: L89
- [75] Stanghellini L, González-García A C, Manchado A. ApJ, 2006, 644: 843
- [76] Conroy C, Wechsler R H, Kravstov A V. ApJ, 2007, 668: 826
- [77] Murante G, Giovalli M, Gerhard O, et al. MNRAS, 2007, 377: 2
- [78] Reiprich T H, Böhringer H. ApJ, 2002, 567: 716
- [79] Conselice Ch J, Bershadsky M A, Dickinson M, et al. AJ, 2003, 126: 1183
- [80] Lavery R J, Remijan A, Charmandaris V, et al. ApJ, 2004, 612: 679
- [81] Bridge C R, Appleton P N, Conselice Ch J, et al. ApJ, 2007, 659: 931
- [82] Kampczyk P, Lilly S J, Carollo C M, et al. ApJS, 2007, 172: 329
- [83] Lotz J M, Davis M, Faber S M, et al. ApJ, 2008, 672: 177
- [84] Conselice Ch J, Yang C, Bluck A F L. MNRAS, 2009, 394: 1956
- [85] López-Sanjuan C, Balcells M, García-Dabó C E, et al. ApJ, 2009, 694: 643
- [86] López-Sanjuan C, Balcells M, Pérez-González P G, et al. A&A, 2009, 501: 505
- [87] Grillmair C J, Freeman K C, Irwin M, et al. AJ, 1995, 109: 2553
- [88] Grillmair C J, Dionatos O. ApJL, 2006, 643: L17
- [89] Bellazzini M, Ibata R A, Chapman S C, et al. AJ, 2008, 136: 1147
- [90] Carretta E, Bragaglia A, Gratton R G, et al. ApJL, 2010, 714: L7
- [91] Johnston K V, Sackett P D, Bullock J S. ApJ, 2001, 557: 137
- [92] Mayer L, Governato F, Colpi M, et al. ApJ, 2001, 559: 754
- [93] Forbes D A, Beasley M A, Bekki K, et al. Science, 2003, 301: 1217
- [94] Bekki K, Couch W J, Drinkwater M J. ApJL, 2001, 552: L105
- [95] Bekki K, Couch W J, Drinkwater M J, et al. MNRAS, 2003, 344: 399
- [96] Drinkwater M J, Phillipps S, Jones J B, et al. A&A, 2000, 355: 900
- [97] Drinkwater M J, Jones J B, Gregg M D, et al. PASA, 2000, 17: 227
- [98] Sasaki S S, Taniguchi Y, Scoville N, et al. ApJS, 2007, 172: 511
- [99] Robaina A R, Bell E F, Skelton R E, et al. ApJ, 2009, 704: 324

Stellar Tidal Streams Around External Galaxies

ZHAO Jun-liang^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Normal University, Shanghai 200233, China)

Abstract: Many stellar tidal streams around external galaxies have been found since 1998. Most of such streams that can be observationally detected are formed from striped matter of nearby dwarf satellites, and a few ones from old globular clusters, which are usually with relatively small sizes and can also be called as tidal tails of clusters. A lot of observational and theoretical studies on the tidal streams have been done during recent more than 10 years, including tidal streams of individual field galaxies and in environment of galaxy clusters, statistics of tidal streams, tidal tails of globular clusters etc.

Andromeda galaxy (M31) is the best one which can be studied in detail so as to detect its halo substructure such as tidal streams. In the early 20th century, a great southern stellar stream in M31 was found, which is 100 kpc further away along the line of sight than M31 and some 30 kpc in front of the galaxy. Then, the complex structure of the M31 stellar halo was also detected, which contains five stellar streams at least. In addition to M31, tidal streams of many other external galaxies were found and studied during much the same period, including NGC 891, NGC 1097, NGC 4013, NGC 4449, NGC 5128, NGC 5055, NGC 7331 etc.

In order to discuss the effects of environment on formation of stellar streams, tidal features of cluster galaxies are studied, they being in environments different from field galaxies. Two great tidal streams have been discovered in the center of Hydra I cluster, emerging from a dwarf galaxy and a S0 galaxy respectively, and the stream around the S0 galaxy extends over at least ~ 110 kpc. Recently, it is shown from a study based on a sample of 54 clusters with 3551 galaxies that a deficit of tidal disturbed galaxies with decreasing clustercenter radius, and no evidence of a relationship between local density and the incidence of tidal features has been found.

Besides detailed studies on the tidal streams of individual galaxies, attentions are also paid to looking for statistical properties of streams for big samples of galaxies from the beginning of this century. Using the SDSS DR7 archive, a significant number of stellar streams around galaxies were found, including relatively short streams, medium sized streams and even a stream which seems to have already completed two orbits around NGC 7711, that means they may correspond to different stages of accretion. On the other side, some 700 galaxies with tidal tails were detected from HST data, and a statistical law that the observed space densities of galaxies with tidal structure increase with z as $(1+z)^{2.6}$ was found.

Key words: external galaxy; dwarf galaxy; stellar tidal stream; globular cluster; tidal tail