

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.01.02

红移 $z \approx 2$ 极亮红外星系的研究进展

方官文¹, 林泽森^{2,3}, 孔 旭^{2,3}

(1. 大理大学 天文与科技史研究所, 大理 671003; 2. 中国科学技术大学 天文学系, 合肥 230026; 3. 中国科学院 星系与宇宙学重点实验室, 合肥 230026)

摘要: 极亮红外星系 (ULIRGs) 是指红外 (IR, $8 \sim 1000 \mu\text{m}$) 光度 $L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$ 的一类星系。研究表明, 红移 $z \approx 2$ 处极亮红外星系是大质量 ($M_{*} > 10^{11} M_{\odot}$)、富尘埃和强恒星形成 (大于 $100 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$) 的特殊星系。极亮红外星系可分成活动星系核起主导作用的源和恒星形成占主导的星系。恒星形成主导的源, 中红外光谱有明显的多环芳香烃辐射; 而活动星系核主导的星系, 光谱呈现出幂律形式并有很强的硅线吸收。极亮红外星系的静止光学波段形态存在多样化, 既有并合结构特征, 又有椭圆形态。这类星系很可能是近邻大质量宁静星系的前身星系。介绍了红移 $z = 2$ 附近极亮红外星系的各种物理性质的研究进展, 如形态和结构、光谱特征、成团性、尘埃分布和形成机制等, 以及阐述了该领域未来的研究方向。

关键词: 高红移星系; 星系观测; 星系形态; 星系光谱; 星系成团性

中图分类号: P157.1 **文献标识码:** A

1 引 言

相对于近邻星系, 高红移 (特别是红移 $z = 2$ 附近) 大质量星系的形成和演化研究也有着非常重要的意义。首先, 星系的宇宙恒星形成率密度 (SFRD) 和类星体 (QSOs) 数密度在 $z \approx 2$ 有个峰值^[1, 2]; 其次, 星系的形态类型、比恒星形成率 (sSFR) 和恒星质量 (M_{*}) 在 $z \approx 2$ 处发生了显著的变化^[3-5]; 最后, 红外波段极亮星系主导红移 $1 < z < 3$ 区间内的宇宙恒星形成率密度^[6]。

Rieke 和 Low^[7] 在 1972 年首次证实了亮红外星系的存在, 后来随着 IRAS^[8] (Infrared Astronomical Satellite)、ISO^[9] (Infrared Space Observatory) 和 SST^[10] (Spitzer Space Telescope) 红外设备不断观测, 又陆续在不同红移处发现了一些红外特别亮的源^[11-13]。按照这些星系的红外 (IR, $8 \sim 1000 \mu\text{m}$) 光度 (L_{IR}), 我们可以将其分类成亮红外星系 (Luminous

收稿日期: 2016-02-01; 修回日期: 2016-04-01

资助项目: 国家自然科学基金 (11303002, 11225315, 11320101002); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB09000000); 云南省应用基础研究计划项目 (2014FB155)

通讯作者: 方官文, wen@mail.ustc.edu.cn

InfraRed Galaxies, LIRGs) 和极亮红外星系 (UltraLuminous InfraRed Galaxies, ULIRGs), 其中 LIRGs 红外光度满足 $10^{11} L_{\odot} < L_{\text{IR}} < 10^{12} L_{\odot}$, 而 ULIRGs 的 $L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$ 。这些红外特别亮的星系在近邻宇宙中的分布非常少, 它们对宇宙总红外流量密度的贡献很低 (LIRGs 只占 5%, ULIRGs 小于 1%), 但在 $z \approx 1$ 处, LIRGs 主导了宇宙红外背景辐射 (CIB) 和共动恒星形成率密度 (SFRD), 而 ULIRGs 则在 $z \approx 2$ 的地方起重要作用^[12, 14-16]。

研究表明, 极亮红外星系 (ULIRGs) 的强红外辐射主要来自星系热尘埃辐射, 大质量年轻恒星辐射或 AGN (活动星系核) 加热是尘埃不断产生红外辐射的能量来源^[12, 17-28]。这就要求极亮红外星系有很强的恒星形成爆发 (Starburst, SB) 或者 AGNs 活动。大量理论和观测研究表明, ULIRGs 是来自富气体盘星系的并合^[29-33], 而且 ULIRGs 最终会演化成类星体或者中等质量的椭圆星系^[34-42]。大量观测已经证明了高红移极亮红外星系是大质量 ($M_{*} > 10^{11} M_{\odot}$)、极高红外对光学流量密度比 ($F_{24\mu\text{m}}/F_{\text{R}} > 1000$) 和强恒星形成 ($100 \sim 1000 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$) 的特殊星系^[43-49]。但在红移 $z = 2 \sim 3$ 处存在大量大质量星系 ($M_{*} > 10^{11} M_{\odot}$) 的观测事实与星系形成的并合理论预言相矛盾^[50]。该理论认为大质量星系的形成是来自小质量星系间的并合, 而且这种并合过程是发生在红移 $z < 2$ 。在富气体星系间的主并合期间, 强恒星形成被触发, 尘埃遮蔽的星系被证认为极亮红外星系。与此同时, 星系在并合时, 气体也有可能通过吸积进入星系中央大质量黑洞, 形成类星体。星系在并合过程中表现出多样的结构特征, 如存在多个亮核、蝌蚪状、不规则形态以及取决于并合类型或阶段的星系对。因此, 高红移极亮红外星系的物理特性研究, 如形态和结构、光谱特征和成团性等, 对于理解宇宙早期大质量星系的形成和演化、宇宙红外背景辐射、宇宙总的恒星形成率密度演化以及约束星系形成和演化模型等都有重要意义。

本文第 2 章介绍了 ULIRGs 的选择; 第 3 章介绍了 ULIRGs 的物理性质 (包括形态、光谱、成团性等); 第 4 章介绍了 ULIRGs 的形成和演化; 第 5 章总结了本文的主要内容, 并对相关领域今后计划开展的工作进行了展望。除非有特殊说明, 本文所表述的星等和颜色都是 AB 星等。

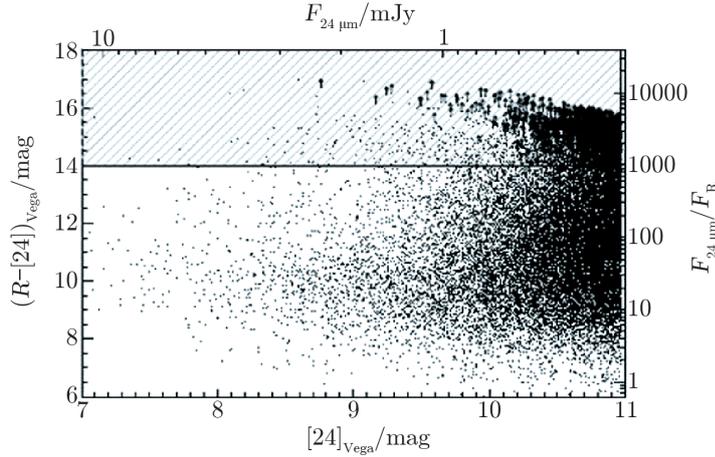
2 极亮红外星系的选择

目前, 证认高红移极亮红外星系有两种最有效的方法: 一种是中远红外波段选择技术, 另外一种是基于亚毫米波段观测图像选取高红移极亮红外星系。本章我们将主要介绍三种红移 $z \approx 2$ 处极亮红外星系候选体的选取方法: 亚毫米星系 (Submillimeter Galaxies, SMGs), 富尘埃遮蔽星系 (Dusty Obscured Galaxies, DOGs), 以及利用 MIPS (Multiband Imaging Photometer for Spitzer) $24 \mu\text{m}$ 流量限选择恒星形成主导的源。1997 年, Smail 等人^[51]首次从观测上证实了 $z > 1$ 处热光度非常亮的 SMGs 的存在, 他们使用的观测设备来自 JCMT (James Clerk Maxwell Telescope) 的 SCUBA^[52, 53] (Submillimetre Common User Bolometer Array)。后来有很多天文工作者基于地面亚毫米 (或毫米) 波巡天数据, 选取高红移极亮红外的亚毫米星系^[54-62]。Chapman 等人^[63]在 7 个不同巡天场中获得

了 73 个亚毫米星系的光谱红移, 这些源的亚毫米波段流量 $F_{850\mu\text{m}}$ 都是高于 5.0 mJy, 它们的光谱红移主要分布在 $z = 1.7 \sim 2.8$ 之间, 其红移中值和空间密度分别是 2.2 和 $9 \times 10^{-6} h_{70}^3 \cdot \text{Mpc}^{-3}$ 。最近 Chen 等人^[60] 基于 UKIDSS^[64] 多波段极深场巡天 (UDS) 数据, 提出利用光学和红外波段的颜色判据证认红移 $z = 2$ 附近的亚毫米星系的对应体, 具体标准定义为: $z - K > 1.1 \text{ mag}$ 、 $K - [3.6] > 1.25 \text{ mag}$ 且 $[3.6] - [4.5] > 0.22 \text{ mag}$, 其中 $3.6 \mu\text{m}$ 和 $4.5 \mu\text{m}$ 观测数据来自 Spitzer IRAC (InfraRed Array Camera)。通过 SCUBA 以及 ALMA (Atacama Large Millimeter Array) 亚毫米观测数据证实, 上述颜色判据所构建的星系样本中, 有 86% 的源是极亮红外星系, 对应红移分布中值 $z \approx 2.3$ (标准偏差 $\sigma = 0.1$)。如果只采用亚毫米流量限 $F_{850\mu\text{m}} > 1 \text{ mJy}$ 定义极亮红外星系样本, 则红移分布中值 $z \approx 2.6$ (标准偏差 $\sigma = 0.1$), 它是高于颜色判据所选的极亮红外星系样本。基于 Herschel 远红外 ($70 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$) 巡天数据, Magnelli 等人^[65] 和 Casey 等人^[66] 发现在红移 $z = 2$ 附近存在大量极亮红外星系, 而且这些源对宇宙的恒星形成率密度有着重要贡献。

富尘埃遮蔽星系 (DOGs) 的选取是基于光学非常暗而 MIPS $24 \mu\text{m}$ 非常亮的颜色标准, 例如: $\nu F_{\nu}(24 \mu\text{m})/\nu F_{\nu}(I) > 60$ ^[44], $R_{\text{Vega}} \geq 25.5 \text{ mag}$ 且 $F_{24 \mu\text{m}} > 0.9 \text{ mJy}$ ^[45, 67], $(R - [24])_{\text{Vega}} \geq 14 \text{ mag}$ ^[21, 46, 68]。目前, 最大的富尘埃遮蔽星系样本^[46] 来自 8.6 平方度 Boötes 场 (NOAO 深场巡天), 该样本容量为 2603 个源, 对应的面密度和空间密度分别是 $0.089 \text{ arcmin}^{-2}$ 和 $(2.82 \pm 0.05) \times 10^{-5} h_{70}^3 \cdot \text{Mpc}^{-3}$ 。正如图 1 所示, 这些 DOGs 满足 $(R - [24])_{\text{Vega}} \geq 14 \text{ mag}$ (对应 $F_{24 \mu\text{m}}/F_{\text{R}} > 1000$) 和 $F_{24 \mu\text{m}} > 0.3 \text{ mJy}$ 选择标准, 它们的红移主要分布在 $1 < z < 3$ 区间内, 其中 86 个源有光谱红移, 平均值 $z \approx 1.99$ (标准偏差 $\sigma = 0.45$)。Dey 等人^[46] 通过研究该星系样本进一步发现, 这些源可以分为 AGN 起主导作用的星系 (AGN-ULIRGs) 和 SB 占主导的星系 (SB-ULIRGs), 而且随着 $24 \mu\text{m}$ 流量限的提高, 样本中带有 AGNs 活动特征源的比例会上升, 这样的比例在 $F_{24 \mu\text{m}} > 0.3 \text{ mJy}$ 时是 20%, 对于 $F_{24 \mu\text{m}} > 1.0 \text{ mJy}$ 来说则高于 80%。类似的结论在 Riguccini 等人^[69] 对 DOGs 的远红外 (FIR) 性质研究工作中也得到证实, 他们采用的远红外 ($100 \mu\text{m}$ 、 $160 \mu\text{m}$ 、 $250 \mu\text{m}$ 、 $350 \mu\text{m}$ 和 $500 \mu\text{m}$) 观测数据分别来自 Herschel PACS^[70] (Photodetector Array Camera and Spectrometer) 和 SPIRE^[71] (Spectral and Photometric Imaging REceiver)。

基于在静止波长 $1.6 \mu\text{m}$ 处恒星辐射“包 (bump)”和 $24 \mu\text{m}$ 流量限判据, 也可以选择 $z \approx 2$ 的极亮红外星系^[47-49, 72-75], 因为当 $1.6 \mu\text{m}$ 恒星辐射“包”红移到 Spitzer IRAC 的 $4.5 \mu\text{m}$ 或 $5.8 \mu\text{m}$ 观测波段内时, 我们就可以利用 $0.05 < [3.6] - [4.5] < 0.4 \text{ mag}$ 且 $-0.7 < [3.6] - [8.0] < 0.5 \text{ mag}$ 颜色判据选取红移 $1.5 < z < 3.0$ 的星系 (见文献 [48] 中的图 2, 这里的 3.6 和 8.0 也是 IRAC 的两个观测滤光片)。通过结合 $24 \mu\text{m}$ 流量限判据 (如 $F_{24 \mu\text{m}} > 0.5 \text{ mJy}$), 该方法选出的极亮红外星系是富尘埃恒星形成主导的源 (SB-ULIRGs), 它们的光谱红移获得是通过定标观测星系中多环芳香烃^[76] (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH) 的辐射位置。Fang 等人^[49] 在 2014 年统计了 114 个来自不同巡天中的 SB-ULIRGs, 它们的光谱红移分布平均值是 1.89, 带有的弥散 $\sigma = 0.25$ 。多环芳香烃辐射在近邻星系中已被大量观测证实, 其中 PAH 主要的辐射波段有 $3.3 \mu\text{m}$ 、 $6.2 \mu\text{m}$ 、 $7.7 \mu\text{m}$ 、 $8.6 \mu\text{m}$ 、 $11.2 \mu\text{m}$ 、 $12.7 \mu\text{m}$ 和 $16.4 \mu\text{m}$ (在静止坐标系中)。对于 SB-ULIRGs 来说, 它们的 PAH 辐射能量来自星系中大质



注: 图中阴影区域对应的是 $(R - [24])_{\text{Vega}} \geq 14 \text{ mag}$ 和 $F_{24 \mu\text{m}} > 0.3 \text{ mJy}$ 。满足上述判据的富尘埃遮蔽星系有 2 603 个。

图 1 Boötes 场中富尘埃遮蔽星系 (DOGs) 的选取^[46]

量年轻恒星的紫外和光学波段输出, 因此, 可以通过计算极亮红外星系中的 PAH 辐射光度来估算星系的恒星形成率^[48]。

除了上述介绍的红移 $z = 2$ 附近极亮红外星系选择方法, 最近一些研究者提出了更高红移 ($z > 4$) 富尘埃恒星形成星系 (Dusty Star-Forming Galaxies, DSFGs) 选择技术^[77-79]。由于 DSFGs 的能谱分布 (Spectral Energy Distribution, SED) 在静止坐标系中的 $100 \mu\text{m}$ 附近有个峰值, 对于红移 $z > 4$ 的源, 该峰红移出 $500 \mu\text{m}$ 观测波段, 这样利用 Herschel SPIRE $250 \mu\text{m}$ 、 $350 \mu\text{m}$ 和 $500 \mu\text{m}$ 观测到的流量密度应该满足: $F_{500 \mu\text{m}} > F_{350 \mu\text{m}} > F_{250 \mu\text{m}}$ 。如果想挑选红外非常亮的星系, 可以加上 $F_{500 \mu\text{m}}$ 流量限判据。例如: Dowell 等人^[77] 采用上述方法从 HerMES^[80] (Herschel Multi-tiered Extragalactic Survey) 场中选出 38 个 DSFGs ($F_{500 \mu\text{m}} > 30 \text{ mJy}$)。另外, Eisenhardt 等人^[81] 基于 WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) $3.4 \mu\text{m}$ 、 $4.6 \mu\text{m}$ 、 $12 \mu\text{m}$ 和 $22 \mu\text{m}$ 共 4 个波段的观测数据, 发现了一批红移 $z > 2$ 的超亮红外 ($L_{\text{IR}} > 10^{13} L_{\odot}$) 星系 (HyperLuminous InfraRed Galaxies, HyLIRGs) 候选体。他们提供的具体判据如下: $[3.4]_{\text{Vega}} > 17.4 \text{ mag}$ 、 $[22]_{\text{Vega}} < 7.7 \text{ mag}$ 且 $([4.6] - [22])_{\text{Vega}} > 8.2 \text{ mag}$, 或 $[3.4]_{\text{Vega}} > 17.4 \text{ mag}$ 、 $[12]_{\text{Vega}} < 10.6 \text{ mag}$ 且 $([4.6] - [12])_{\text{Vega}} > 5.3 \text{ mag}$ 。目前高红移超亮红外星系的起源、物理性质和演化规律不甚清楚。Wardlow 等人^[82] 发现 Herschel 选的红外光度超亮的源大部分 (93%) 是由于被前景星系引力透镜放大的结果。与此同时, 通过对引力透镜星系放大效应的改正, 他们也的确证实了高红移处存在超亮红外星系, 而且这些源对应的恒星形成率极高 ($\gtrsim 2000 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$)。类似的结论在 Conley 等人^[83] 和 Harris 等人^[84] 的工作中得到证实, 他们测量的星系尘埃温度普遍高于 40 K , 有的甚至达到 100 K 。另外, 这些超亮红外星系所携带的分子气体质量都高于 $10^{10} M_{\odot}$, 红外光度对射电光度的比值主要分布在 1.5 附近, 这明显低于同等红移处恒星形成主导的星系。它们的形成很可能是来自富气体

星系间的主并合^[85]。相比较于红移 $z = 2$ 附近的极亮红外星系, 更高红移处的 ULIRGs 分布更少, 这一类源的研究更为复杂和困难, 因为星系红移的不确定性、流量随红移的衰减性质、高分辨率的光学和近红外图像的缺失等因素都会对研究结果产生影响。本文综述的是红移 $z = 2$ 附近极亮红外星系, 有关更高红移极亮红外星系的选取可参考文献 [86], 这里将不再详细描述。

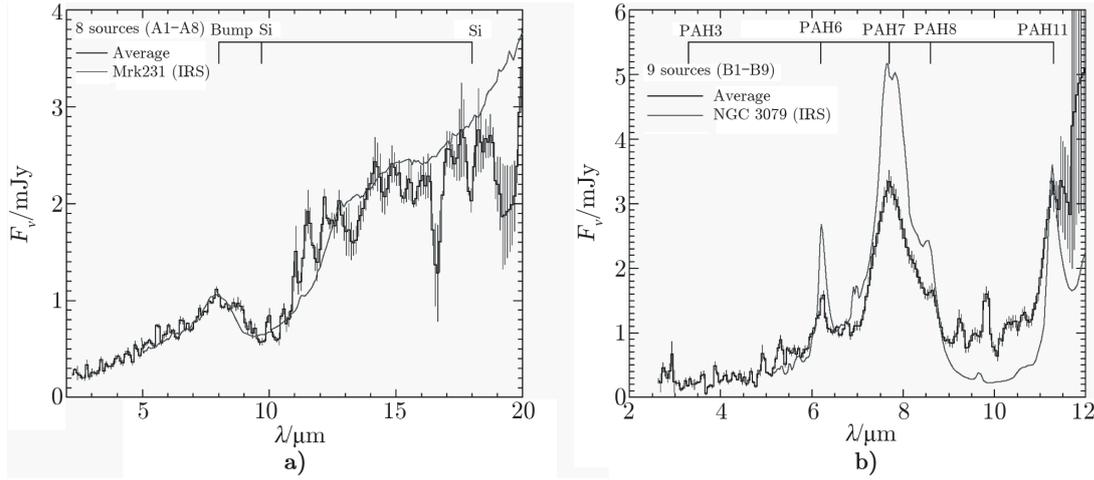
3 极亮红外星系的特性

3.1 光谱

由于高红移极亮红外星系尘埃消光强, 从光学和近红外 (NIR) 波段观测这些星系的光谱非常困难。但 Spitzer IRS^[87] (InfraRed Spectrograph) 中红外 (MIR) 光谱巡天提供了研究该类星系重要的光谱数据。IRS 光谱观测波长有效范围从 $5.2 \mu\text{m}$ 到 $38 \mu\text{m}$, 它有 4 种观测模式: SL (Short-Low)、LL (Long-Low)、SH (Short-High) 和 LH (Long-High), 每一种观测模式对应不同波段区间和光谱分辨率。例如: LL1 有效观测波长范围是 $19.5 \sim 38.0 \mu\text{m}$, 其光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda = 64 \sim 128$ 。对于红移 $z \approx 2$ 的星系来说, 这样的波长范围在静止坐标系中对应 $7 \sim 13 \mu\text{m}$ 。与此同时, IRS 也提供 2 个波段的成像观测: $13 \sim 18 \mu\text{m}$ 和 $18 \sim 26 \mu\text{m}$ 。

正如第 2 章所描述的那样, 我们可以将红移 $z \approx 2$ 极亮红外星系分成 AGN 起主导作用的源 (AGN-ULIRGs) 和 SB 占主导的源 (SB-ULIRGs)。这两类 ULIRGs 星系的中红外光谱有一定的差别, AGN-ULIRGs 的中红外光谱表现出幂律形式^[44, 67, 88], 而且有很强的硅线吸收 (光深 $\tau_{9.7 \mu\text{m}} > 1$), 没有 (或有弱的) PAH 的辐射特征, 因为 PAH 的热容量非常小, 它在 AGNs 活动剧烈的 ULIRGs 中很容易被破坏瓦解。另外, Yan 等人^[67] 和 Weedman 等人^[88] 也发现样本中 AGN 起主导作用的星系比例与 $24 \mu\text{m}$ 流量限判据有很大的相关性。对于 $F_{24 \mu\text{m}} \gtrsim 1.0 \text{ mJy}$ 来说, 样本中超过 70% 的源都有明显的 AGN 活动特征。相对于 AGN-ULIRGs 星系来说, Spitzer IRS 观测到 SB-ULIRGs 中有很强的 PAH 辐射特征, 静止波长主要对应应在 $6.2 \mu\text{m}$ 、 $7.7 \mu\text{m}$ 、 $8.6 \mu\text{m}$ 和 $11.2 \mu\text{m}$ 处, 但没有明显的硅线吸收和强的幂律谱特征^[47-49, 73-75]。图 2 显示的是 ULIRGs 中红外光谱。图 2 a) 对应应在静止坐标系中 AGN 主导的源, 它们的连续谱呈现出幂律分布且有着明显的硅吸收线特征, 其波长分别为 $9.7 \mu\text{m}$ 和 $18.0 \mu\text{m}$, 图中 Mrk231 是来自近邻宇宙中 AGN 主导的极亮红外星系。由此图可以看到红移 $z = 2$ 附近的 AGN-ULIRGs 平均谱与 Mrk231 具有类似的中红外光谱特征。与此同时, 图 2 b) 也提供了在静止坐标系中恒星形成主导的源平均光谱, 图中没有看到硅吸收线和强的连续谱辐射现象, 但 PAH 辐射特征明显, 其波长分别对应 $6.2 \mu\text{m}$ 、 $7.7 \mu\text{m}$ 、 $8.6 \mu\text{m}$ 和 $11.2 \mu\text{m}$, NGC 3079 是来自近邻宇宙中恒星形成主导的星系。相比较于近邻星暴星系 ($L_{\text{IR}} < 10^{11} L_{\odot}$) 的中红外光谱, 高红移恒星形成主导的极亮红外星系有着类似的分布特征, 但不同于近邻的 ULIRGs^[23, 73, 89], 这表明红移 $z = 2$ 附近的 ULIRGs 比近邻极亮红外星系有着更加延展的恒星形成区^[90, 91] (两者的物理尺度分别对应 $1 \sim 4 \text{ kpc}$ 和小于 1 kpc)。基于高信噪比 IRS 中红外光谱数据, Desai 等人^[47] 和 Fadda 等人^[74] 发现 $6.2 \mu\text{m}$ 、 $7.7 \mu\text{m}$ 和 $11.2 \mu\text{m}$ 等值宽度 (EW)

与静止 $24 \mu\text{m}$ 光度 $L_{24 \mu\text{m}}$ 反相关, 而且这些 PAH 辐射光度明显高于近邻极亮红外星系。类似的结论在 Farrah 等人^[73]、Huang 等人^[48] 和 Fiolet 等人^[75] 工作中也被发现, 物理原因可能是由于高红移极亮红外星系有着更加延展 ($1 \sim 4 \text{ kpc}$) 的 PAH 空间分布, 或者高红移星系的恒星形成是处在一个极其富气体环境中。在 2010 年, Fiolet 等人^[75] 进一步发现 $L_{6.2 \mu\text{m}}$ 、 $L_{8.6 \mu\text{m}}$ 、 $L_{11.3 \mu\text{m}}$ 和 L_{IR} 与 $L_{7.7 \mu\text{m}}$ 有很强的相关性, 且星系的恒星形成与 $EW_{7.7 \mu\text{m}}$ 也有相关性。对于 $EW_{7.7 \mu\text{m}} > 6 \mu\text{m}$ 的源, AGN 活动的贡献率低于 10%; 而 $EW_{7.7 \mu\text{m}} < 6 \mu\text{m}$ 的星系, AGN 活动的贡献率高于 25%。



注: a) 在静止坐标系中 AGN (简称 A) 主导的源平均光谱。图中“Bump”和硅的吸收线对应的波长分别为 $8.0 \mu\text{m}$ 、 $9.7 \mu\text{m}$ 和 $18.0 \mu\text{m}$ 。Mrk231 是来自近邻宇宙中 AGN 主导的极亮红外星系 (灰色实线), 其连续谱呈现出幂律分布且有着明显的硅吸收线特征。垂直灰色线代表 1σ 标准偏差。b) 在静止坐标系中恒星形成 (简称 B) 主导的源平均光谱。图中 PAH 辐射波长分别对应 $3.3 \mu\text{m}$ 、 $6.2 \mu\text{m}$ 、 $7.7 \mu\text{m}$ 、 $8.6 \mu\text{m}$ 和 $11.2 \mu\text{m}$ 。NGC 3079 是来自近邻宇宙中恒星形成主导的星系 (灰色实线), 其光谱有明显的 PAH 辐射特征, 但没有看到硅吸收线和强的连续谱辐射现象。

图 2 极亮红外星系的中红外光谱^[88]

高红移极亮红外星系的静止紫外 (UV) 和光学光谱观测尽管比较困难, 但也有研究团队在这方面做出了有意义的工作^[45, 63, 66, 92, 93], 主要体现在定标星系红移、分析 AGN 活动、计算金属丰度和尘埃消光等方面。基于 Keck 近红外光谱数据, Swinbank 等人^[92] 研究了红移中值 2.4 附近 30 个 SMGs 的 $\text{H}\alpha$ 发射线性质, 他们发现 $\text{H}\alpha$ 线宽达到 $400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应星系动力学质量是 $1.5 \times 10^{11} M_{\odot}$ 。与此同时, 他们也发现这些 SMGs 有着很高金属丰度和恒星形成率。同样是基于 Keck 观测的光谱数据, Casey 等人^[66] 利用 $[\text{O II}]$ 、 $[\text{O III}]$ 、 $\text{H}\beta$ 或 $\text{H}\alpha$ 发射线特征, 分析了 Herschel SPIRE 远红外选择的恒星形成星系红移分布情况, 在 767 个有光谱证认的源中, 96% 的星系红移小于 2。通过观测的 $\text{H}\beta$ 和 $\text{H}\alpha$ 宽发射线以及 X 射线光度, Alexander 等人^[94] 计算了 6 个红移分布在 2 附近的亚毫米星系的黑洞质量, 其结果分布在 $10^{8.0} M_{\odot} \sim 10^{8.4} M_{\odot}$ 区间内, 这类似于近邻极亮红外星系的黑洞质量, 但小于近邻大质量正常星系的黑洞质量 (相差约 3 倍左右)。基于 X 射线对 SMGs 的观测研究结果, Alexander

等人^[17]和 Wang 等人^[95]发现红移 $z \approx 2$ 处 SMGs 中的 AGNs 比例约为 20%。Chapman 等人^[63]在 2005 年分析了 73 个 SMGs 紫外光谱性质,他们测量的 UV 谱指数 $\beta = -1.5 \pm 0.8$, 对应红化 $E(B - V) = (0.14 \pm 0.15)$ mag, 这类似于 LBGs (Lyman Break Galaxies), 也就是说 SMGs 紫外性质与 LBGs 没有太大差别。得出这样的结论是由于 Chapman 等人挑选的 SMGs 是 UV 非常蓝的源。最近, Casey 等人^[96]基于红移分布在 $0 < z < 5$ 范围内的富尘埃的恒星形成星系样本, 研究了这些源的物理参数 $IRX (L_{IR}/L_{UV})$ 与 UV 谱指数 β 之间的关系, 他们发现不同的红外光度和恒星形成率会影响星系在 IRX 对 β 图上分布。更多关于高红移极亮红外星系的近红外光谱研究可参考文献 [86]。

3.2 成团性

星系环境对星系的形成和演化有着重要影响, 大质量椭圆星系通常分布在星系环境比较致密的区域, 而结构弥散的盘星系或不规则星系生存的环境则相反。研究星系形成和结构演化的一个重要方法就是通过计算星系的两点相关函数或三点相关函数来测量星系的成团性。如 $w(\theta) = A \times \theta^{-\delta}$, δ 一般取 0.8, θ 和 A 分别是星系间角距离和成团幅度, 基于 Limber^[97] 公式以及样本中星系的红移值可以将 A 转化为共动相关长度 r_0 , 当 A 或 r_0 值越大, 则表明星系的成团性越强。2004 年, Blain 等人^[98]研究了 73 个带有光谱红移的亚毫米星系 ($z = 2 \sim 3$), 结果发现它们的成团性类似于相同红移处的大质量恒星形成星系, 其共动相关长度 $r_0 = (6.9 \pm 2.1) h^{-1} \cdot \text{Mpc}$; 相似的结果在 Hickox 等人^[99]的工作中也被发现 ($r_0 = (7.7 \pm 2.3) h^{-1} \cdot \text{Mpc}$)。这比低红移的 ($z < 0.5$) 恒星形成星系成团性强, 但类似于红移 $z = 2$ 处光学选的类型体和近邻大质量 ($2 \sim 3 L_*$) 椭圆星系, 这表明高红移大质量的极亮红外星系可能是近邻大质量椭圆星系的前身星系, 而且与光学选的类型体可能处在同一个星系演化序列上。利用 ECDFS (Extended Chandra Deep Field South) 场中 $870 \mu\text{m}$ 巡天数据, Weiß 等人^[100]测量的 SMGs 共动相关长度 $r_0 = (13 \pm 6) h^{-1} \cdot \text{Mpc}$, 考虑到他们的标准偏差是 $6 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$, 所以这样的结果整体与 Blain 等人^[98]和 Hickox 等人^[99]计算的 r_0 相一致。最近, Chen 等人^[60]构建了一个红移中值在 2.3 附近的亚毫米星系大样本, 该样本包括 716 个源 ($F_{850 \mu\text{m}} \gtrsim 3 \text{ mJy}$)。这些星系的共动相关长度 $r_0 = 21_{-7}^{+6} h^{-1} \cdot \text{Mpc}$, 这明显高于前人的结果, 一个重要原因是他们选取的亚毫米星系都是非常亮的源。

在 2006 年, Farrah 等人^[101]分别对红移分布在 $1.5 < z < 2$ 和 $2 < z < 3$ 之间的极亮红外星系 ($M_* \geq 10^{11} M_\odot$) 的成团性进行了分析, 其 r_0 分别对应 $(9.4 \pm 2.24) h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 和 $(14.4 \pm 1.99) h^{-1} \cdot \text{Mpc}$, 相比较于亚毫米波段选取的极亮红外星系来说, 它们的成团幅度偏大。最近, Magliocchetti 等人^[102]从 SWIRE^[103] (SIRTF Wide-area InfraRed Extragalactic) 和 UDS 巡天重叠区域找到了 1041 个源满足 $F_{24 \mu\text{m}} \geq 0.4 \text{ mJy}$, 但红移分布处在 $z \approx 2$ 的极亮红外星系只有 210 个, 其空间相关长度 $r_0 \approx 15.9 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$, 与 Farrah 等人^[101]给出的结果相近。基于 Dey 等人^[46]从 NDWFS (NOAO Deep Wide-Field Survey) 场中选取的富尘埃遮蔽星系样本 (2603 个源), Brodwin 等人^[104]分析了 $1.5 \leq z \leq 2.5$ 范围内极亮红外星系成团性, 发现它们的成团性随着 $F_{24 \mu\text{m}}$ 流量限增大而增大 (如图 3 所示)。当 $F_{24 \mu\text{m}} > 0.3 \text{ mJy}$ 时, $r_0 \approx 7.40 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$, 而 $F_{24 \mu\text{m}} > 0.6 \text{ mJy}$ 对应的 $r_0 \approx 12.97 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$, 他们认为出现这种现象是由于较亮的 ULIRGs 主要分布在更大质量的暗物质晕中。相比较于上述其他工作结果,

Brodwin 等人给出的结论更加可靠, 因为他们的样本容量最大, 巡天视场面积也最大。综上所述, 红移 $z = 2$ 附近的极亮红外星系成团长度主要分布在 $7.0 h^{-1} \cdot \text{Mpc} < r_0 < 16.0 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 区间内, 具体数值取决于构建样本的流量限判据。极亮红外星系的成团性研究对于了解它们的暗物质晕质量, 约束其形成和演化模型有着重要的意义。早在 2004 年, Blain 等人^[98] 在分析高红移亚毫米星系 ($F_{850 \mu\text{m}} \geq 5 \text{ mJy}$) 的成团长度时, 发现这些源对应的暗晕质量约为 $10^{13} M_{\odot}$, 但他们给出的结果误差较大。后来, Hickox 等人^[99] 计算的暗物质晕质量大小是 $6 \times 10^{12} h^{-1} \cdot M_{\odot}$, 这与中远红外波段选择的极亮红外星系样本推导的结论相一致^[104, 105]。基于暗晕的形成和演化理论模型预言, 他们认为红移 $z \approx 2$ 的 ULIRGs 对应的暗晕质量是由更高红移 ($z > 3.5$) 处暗晕 ($10^{12} h^{-1} \cdot M_{\odot}$) 的生长产生, 当它们演化到近邻宇宙时其质量变为 $(0.6 \sim 5) \times 10^{13} h^{-1} \cdot M_{\odot}$ 。

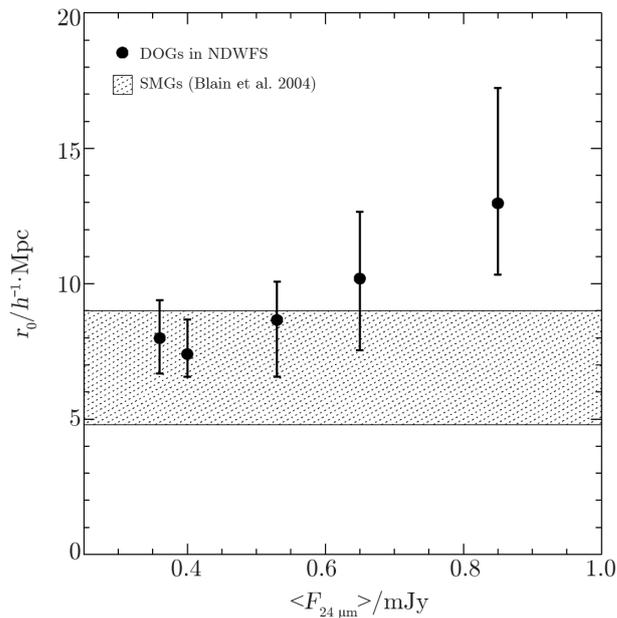


图 3 极亮红外星系的成团性^[104]

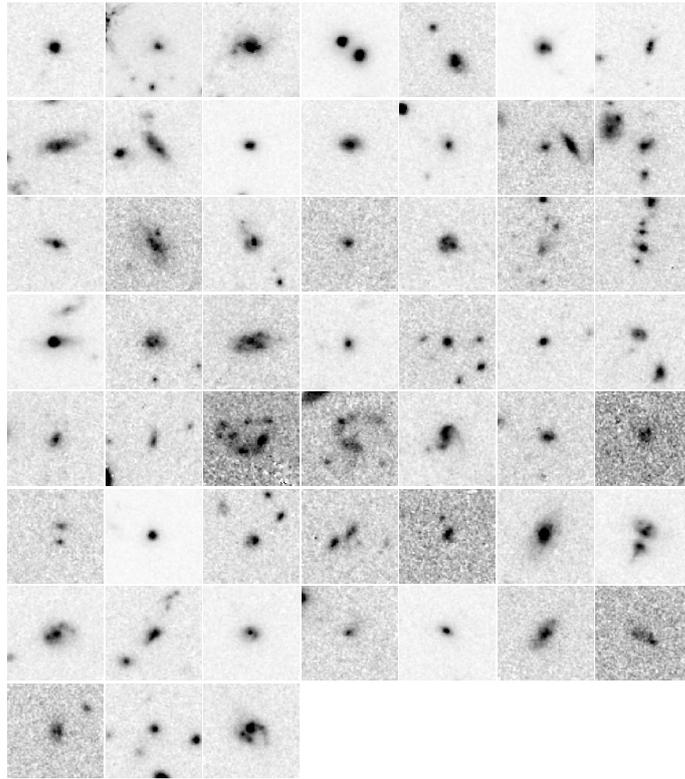
3.3 形态

星系形态是反映星系物理性质的一个重要特征量, 它与星系的其他物理性质有一定的关系, 如早型星系年老、颜色红、消光弱、多处于高密度区、恒星形成率低, 而晚型星系的特性则相反。高空间分辨率的极亮红外星系观测图像能提供很多星系形态和恒星形成区分布等信息。对于红移 $z \approx 2$ 处的星系, 光学波段观测对应的是静止紫外区域, 星系在紫外波段的形态很容易受到尘埃消光影响, 表现为不规则和弥散的结构。最近深场的哈勃空间望远镜 (HST) 光学图像观测显示, 大多数高红移星系静止紫外波段形态有着相当不规则和簇聚的结构。但 HST WFC3 (Wide Field Camera 3) 和 NICMOS (Near-Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) 近红外图像能提供这些源在静止光学波段的重要形态信息。在

$z \approx 2$ 处, HST 近红外观测对应的静止波长已经超出了巴耳末跳跃 ($\lambda_{\text{rest}} \geq 4000 \text{ \AA}$), 到了更红的波段, 探测到的流量来自星系中主导星族的辐射。这有利于我们研究高红移极亮红外星系在静止光学波段的形态和结构性质。通过利用 HST 近红外图像 (来自 NICMOS 或 WFC3), 很多研究小组^[106-116] 发现 ULIRGs 有着多样化的形态特征, 如盘状、核球、多种子结构、不规则结构; 这表明不同形态的极亮红外星系可能有不同的形成过程, 如星系并合和无并合的星系长期本征演化。

基于高分辨率的 Keck 自适应光学 K' 波段图像, Melbourne 等人^[107, 108] 对 Boötes 场中的 18 个富尘埃遮蔽星系进行了模型化分类研究, 发现有些源有指数盘结构, 另外一些则表现为早型椭圆星系形态。从 HST 光学波段图像看, Huang 等人^[48] 发现 SB-ULIRGs 在静止紫外波段有延展的形态, 有的源只显示一个致密的块状结构。同样在 Boötes 场中, Bussmann 等人^[110, 111] 选出 31 个 AGN-ULIRGs 和 22 个 SB-ULIRGs, 并在 HST NICMOS 近红外图像上测量了它们的非模型化参数 (基尼系数 G , 矩指数 M_{20}), 结果表明 SB-ULIRGs 有更大的 M_{20} 和较小的 G , 其中 SB-ULIRGs 的 (G, M_{20}) 中值是 (0.47, -1.08), 而 AGN-ULIRGs 则为 (0.49, -1.48); 另外, 模型化的二维面亮度拟合结果表明 AGN-ULIRGs 的 $r_e = 1 \sim 6 \text{ kpc}$ 。Zamojski 等人^[112] 利用 HST NICMOS 近红外 F160W 波段图像, 研究了 134 个亮红外星系 ($0.8 < z < 2.8$) 的形态, 结果显示样本中大约 80% 的源是并合星系, 而且他们也发现处在星系并合晚期的源光谱表现出很强的 AGN 特征。最近, Kartaltepe 等人^[113] 利用 HST WFC3 近红外图像, 详细研究了 52 个 $z \approx 2$ 极亮红外星系的形态, 这些极亮红外星系有 47% 的源表现出明显的并合或相互作用特征 (如图 4 所示), 不规则、盘状和椭圆形态的星系所占比例分别为 25%、18% 和 10%。总之, 红移为 2 附近的极亮红外星系的形态有很大差异, 包括有链状和延展的结构, 以及早型旋涡星系形态特征。但对于近邻 (红移 $z < 0.3$) 的极亮红外星系, 它们在光学波段的形态几乎都呈现出并合或相互作用的结构性质^[29, 117-120]。

为了分析样本中极亮红外星系的结构性质, Swinbank 等人^[121] 利用 HST NICMOS F160W 图像测量了 25 个亚毫米星系 ($z = 0.6 \sim 3.0$) 的大小。这些源在静止光学波段的平均大小是 $(2.8 \pm 0.4) \text{ kpc}$ 。同样利用 HST NICMOS F160W 波段图像, Dasyra 等人^[106] 计算了 33 个 $z \approx 2$ 极亮红外星系的大小, 他们发现这些源的有效半径分布在 $1.4 \text{ kpc} < r_e < 4.9 \text{ kpc}$ 区间内, 对应的平均值和标准偏差分别是 2.7 kpc 和 0.8 kpc 。这明显小于近邻极亮红外星系在光学波段的大小 (平均有效半径为 $(4.8 \pm 1.37) \text{ kpc}$)。基于 HST WFC3 近红外图像, Kartaltepe 等人^[113] 详细分析了 52 个红移在 2 附近极亮红外星系的结构性质, 这些极亮红外星系有效半径的平均值是 $(3.7 \pm 1.7) \text{ kpc}$, 且二维 Sérsic 面亮度分布函数拟合 ULIRGs 得到的指数 (n) 中值是 1.4。这与 Melbourne 等人^[109]、Chen 等人^[114] 和 Targett 等人^[115] 测量的结果相一致。在 2015 年, Simpson 等人^[122] 基于 ALMA $870 \mu\text{m}$ 观测图像测量了高红移亚毫米星系的大小, 其半光半径的中值为 $(1.2 \pm 0.1) \text{ kpc}$, 与静止光学波段的大小相比, 它们之间相差 3 到 4 倍, 这表明尘埃遮蔽的恒星形成区非常致密, 而这些致密部分可能暗示星系中的核球正在形成和生长。最近, Fang 等人^[116] 利用来自 Spitzer MIPS $24 \mu\text{m}$ 巡天数据, 构建了一个红移分布在 $1 < z < 3$ 区间内的大样本极亮红外星系, 该样本包括 502 个源。他们定量地研究



注: 观测数据 (52 个红移分布在 2 附近的极亮红外星系) 来自 HST WFC3 F160W 波段, 图像大小为 $5'' \times 5''$ 。

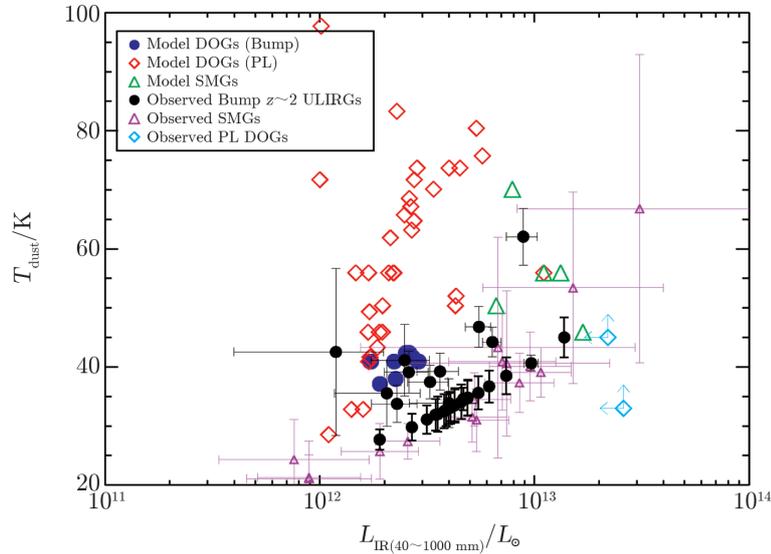
图 4 极亮红外星系的近红外观测图像^[113]

了这些星系在静止光学波段的形态和结构性质, 发现相比较于近邻相似质量的极亮红外星系, 高红移极亮红外星系的平均大小与红移之间存在明显的演化关系: $r_e \propto (1+z)^{-(0.96 \pm 0.23)}$ 。

3.4 其他物理特性

极亮红外星系中有关尘埃性质的研究, 早在 2005 年 Chapman 等人^[63] 就已开展相关工作, 对于一个亚毫米流量分布在 $5 \sim 10$ mJy 之间的样本, 他们推算出这些源的尘埃温度 (T_d) 中值是 (36 ± 7) K, 这表明星系中含有的尘埃质量 (M_d) 约为 $10^9 M_\odot$ 。这样的结论在 Swinbank 等人^[123] 的工作中也被证实, 他们的研究对象是 99 个满足 $870 \mu\text{m}$ 流量高于 2 mJy 的源。通过分析这些星系的远红外能谱性质, 他们测量的恒星形成率、尘埃温度和尘埃质量中值分别对应为 $(300 \pm 30) M_\odot \cdot \text{a}^{-1}$ 、 (32 ± 1) K 和 $(3.6 \pm 0.3) \times 10^8 M_\odot$ 。Magdis 等人^[124] 利用 Herschel PACS (100、160 μm) 和 SPIRE (250、350、500 μm) 的远红外观测数据, 研究了 25 个 SB-ULIRGs 尘埃温度特征, 结果表明这些星系的尘埃温度有比较宽的分布 ($25 \leq T_d \leq 62$ K), 中值 $T_d = 42.3$ K。另外, 他们也发现, 相对于近邻的极亮红外星系, 利用亚毫米波段流量限选取的源, 其尘埃辐射温度比较低, 没有把那些带有热尘埃辐射的极亮红外星系选为研究对象。正如图 5 所显示的那样, 观测的极亮红外星系尘埃温度主要分布在

$T_d = 20 \sim 50$ K 范围内, 并与星系红外光度相关。图中模拟数据来自 Narayanan 等人^[125] 对红移 2 附近富尘埃遮蔽星系起源的理论预言, 他们建立的物理模型能反映星系中三维多色尘埃辐射转移过程, 预言的极亮红外星系能谱分布、尘埃温度和 CO 线宽等物理参数值与观测数据符合得较好。模拟还发现, AGN 主导的源在尘埃温度统计上高于恒星形成星系, 这主要由于星系中的 AGN 加热起到很重要的作用, 但需要更多的观测数据来证实。



注: 图中“Bump”和“PL”分别表示恒星形成和活动星系核主导的源。观测数据黑色圆、紫色三角形和青色菱形分别代表来自参考文献 [126–129]。

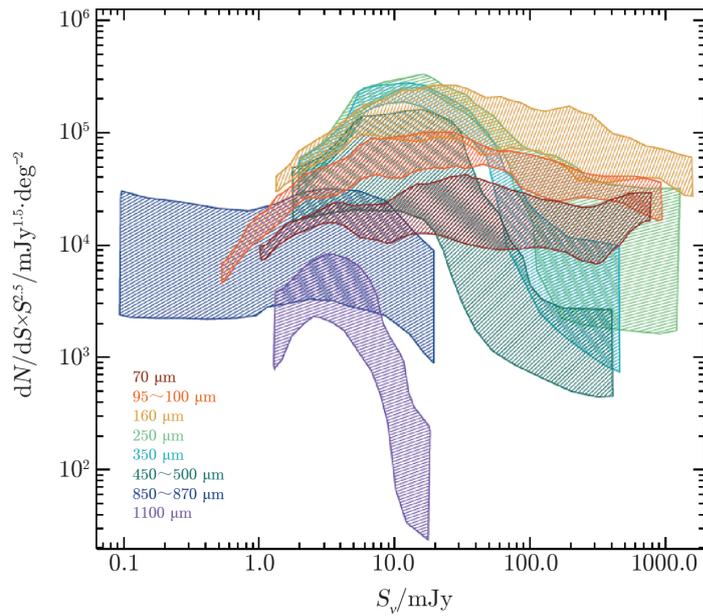
图 5 极亮红外星系的尘埃温度分布与红外光度关系^[125]

证认一个星系是否是 AGN 主导的源, 最直接的方法是测量它的 X 射线光度。除了 X 射线光度外, 射电波段 1.4 GHz 辐射也可以用来描述星系的 AGN 特征。Condon^[130] 定义了一个 L_{IR} 对 $L_{1.4 \text{ GHz}}$ 比值因子 q , 其中 $q = \lg \left(\frac{F_{\text{FIR}}}{3.75 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} \right) - \lg \left(\frac{F_{1.4 \text{ GHz}}}{\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}} \right)$ 。研究表明, 恒星形成主导的极亮红外星系 q 值主要分布在 2.35 附近, 而 AGN 主导的源其 q 值低于 2.35, 这是由于 AGNs 的非热同步辐射增强了射电波段辐射能量, 导致 q 值变小。Huang 等人^[48] 计算了 SB-ULIRGs 样本中 L_{IR} 与 $L_{1.4 \text{ GHz}}$ 比值, 他们的 q 主要分布在 2.15 处, 稍微低于 2.35。Sajina 等人^[131] 对富尘埃遮蔽星系样本进行研究, 这些星系的 q 主要分布在 1.6~2.15 区间内, 这表明富尘埃遮蔽星系中含有较高比例的 AGNs 贡献。Kovács 等人^[128] 也研究了红移 $1 < z < 3$ 的亚毫米星系, 其中平均值 $q = 2.07 \pm 0.3$ 。以上测量值显然低于近邻星暴星系的 $q = 2.75 \pm 0.03$ ^[132], 这暗示富尘埃的恒星形成星系 q 随红移存在一定的演化关系, 即 $q \propto (1+z)^\alpha$ 。基于 BLAST (Balloon-borne Large Aperture Submillimetre Telescope) 和 Herschel 远红外观测数据选取的大样本星暴星系, Ivison 等人分别测量的指数 α 依次为 -0.15 ± 0.03 ^[133] 和 -0.26 ± 0.07 ^[134]。在 2012 年, Casey 等人^[66] 利用 Herschel 远红外观测数据选取的带有光谱证认的富尘埃恒星形成星系样本, 建立的演化关系对应为

$q \propto (1+z)^{-0.30}$ 。以上结果表明, 高红移富尘埃的恒星形成星系比近邻对应体有着更强的射电辐射, 其物理原因是由于这些源有着不同于近邻星系的星际介质性质 (如磁场强度、气体密度和恒星形成率面密度等)^[135]。另外, Pope 等人^[21] 认为 $[4.5] - [8.0] = 0.75$ 颜色判据可以有效分离出恒星形成和活动星系核主导的源。类似结论在 2014 年 Fang 等人^[49] 的工作中也被证实。

中远红外以及毫米波段观测数据的星系计数, 通常是指在单位面积视场中流量密度介于 S 到 $S + dS$ (dS 是流量密度区间大小) 之间的星系数目, 常表示为 N , 其星系微分计数可写成 dN/dS 。为了在欧氏空间中分析星系的分布情况, 可对星系微分计数进行正交化处理, 即 $dN/dS \times S^{2.5}$ 。如图 6 所示, 基于远红外巡天数据计算的星系计数在 $10 \sim 20$ mJy 区间内有个峰值, 而对于毫米波段来说, 峰值对应的流量密度在 3 mJy 附近^[136]。2008 年, Shupe 等人^[137] 在研究星系的 $24 \mu\text{m}$ 波段计数时, 发现计算的峰值出现在 0.3 mJy 处; 与此同时, 他们也发现亮端 ($24 \mu\text{m}$ 流量密度高于 1 mJy) 的星系微分计算分布是由红移小于 0.3 的源主导。这样的结论在远红外的巡天工作当中得到证实, Magnelli 等人^[65] 在 2013 年发现, 相比较于流量分布的暗端, 在亮端星系的红移分布整体偏低, 例如: $160 \mu\text{m}$ 流量密度高于 (低于) 2.5 mJy 的源, 其红移中值约为 0.94 (1.22)。另外, 与近邻极亮红外星系的共动数密度相比, 红移为 2 处的 ULIRGs 是它们的 800 倍, 对应的共动红外光度密度相差 1000 倍左右, 这暗示高红移的极亮红外星系对总红外光度密度贡献率达到 $(50 \pm 24)\%$ 。最近, Swinbank 等人^[123] 在研究高红移 ($1.0 < z < 5.0$) 的 SMGs 红外光度函数 (ϕ) 时发现, 对于某个确定的红外光度, 源的空间数密度随着红移增大而增大; 但在红移 $z = 2$ 之后相应的数密度又开始随红移增大而变小, 即 SMGs 的空间数密度在红移 $z = 2$ 附近有个峰值。通过测量不同红移区间内星系的红外光度函数, Magnelli 等人^[65] 分析了 ϕ 与 L_{IR} 之间的变化关系, 他们发现星系的光度函数分布出现拐点 (knee) 的位置与红移有关。对于红移 $z < 1$ 来说, $L_{\text{knee}} = 10^{10.48 \pm 0.10} \times (1+z)^{3.8 \pm 0.6}$ 且 $\phi_{\text{knee}} = 10^{-2.57 \pm 0.12} \times (1+z)^{-1.5 \pm 0.7}$; 而在红移 $z > 1$ 区域, $L_{\text{knee}} = 10^{10.31 \pm 0.47} \times (1+z)^{4.2 \pm 1.2}$ 且 $\phi_{\text{knee}} = 10^{-2.03 \pm 0.72} \times (1+z)^{-3.0 \pm 1.8}$ 。

相比较于近邻星系中分子气体所占的比例 ($f_{\text{gas}} < 10\%$), 高红移极亮红外星系 f_{gas} 更高, 主要分布在 $20\% \sim 80\%$ 区间内^[86, 138], 其典型的分子气体质量 (M_{gas}) 和一氧化碳发射线 (CO) 半高全宽 (FWHM) 分别为 $5.3 \times 10^{10} M_{\odot}$ ^[139] (是近邻 ULIRGs 的 5 到 10 倍^[140]) 和 $500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[138]。这些分子气体在星系中的分布既有致密的结构特征 (物理尺度小于 2 kpc), 也有延展的状态 (分布区域大于 6 kpc)。基于 $24 \mu\text{m}$ 流量限选取的恒星形成星系样本, Geach 等人^[141] 在 2011 年研究了这些源的 M_{gas}/M_{*} 与红移之间的关系, 他们分析的结果为: $M_{\text{gas}}/M_{*} \propto (1+z)^{2 \pm 0.5}$ 。最近, Bothwell 等人^[139] 发现高红移极亮红外星系的一氧化碳发射线光度与星系的红外光度之间存在近似线性的关系, 其斜率为 0.93 ± 0.14 , 这比近邻的 ULIRGs (对应的斜率是 0.79 ± 0.08) 要高。



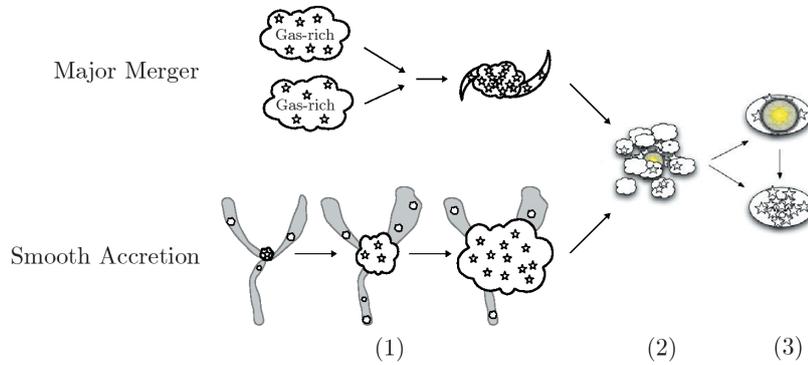
注：不同颜色阴影分布区域对应中值的 1σ 标准偏差。

图 6 不同红外波段星系微分计数^[86]

4 极亮红外星系的形成和演化

高红移大质量星系的形成和演化是星系天文学研究的热点。通过上述有关极亮红外星系的物理特性综述，我们了解到这些大质量、高恒星形成率和富尘埃的源有着不尽相同的性质。例如，它们的形态既有致密椭圆的结构，又有弥散并合的特征，这表明这些星系可能处在形成和演化的不同阶段。中红外波段选取的极亮红外星系（如 DOGs）与远红外或亚毫米波段选取的极亮红外星系（如 SMGs）有着相似的成团性，这暗示它们之间可能存在某种联系。事实上，正如第 3 章所描述的那样，亚毫米星系和富尘埃遮蔽星系有着很多相似的物理性质，这些观测事实说明它们两者之间应该处在同一个演化序列上。早在 1988 年，Sanders 等人^[34]对平均红移分布在 0.055 附近的 ULIRGs 进行研究时，就提出富气体旋涡星系间的并合是极亮红外星系形成的一种方式。随后在 2008 年，Hopkins 等人^[39]通过理论模型预言，红移 $z \approx 2$ 的极亮红外星系是富气体星系间主并合 (Major Merger) 演化到类星体的一个过渡阶段（如图 7 上端演化分支所示）。最近，Narayanan 等人^[125]在研究星系能谱分布随红移演化时发现， $24\mu\text{m}$ 流量高于 0.3 mJy 的源主要来自富气体星系间主并合。在并合的早期，星系恒星形成率不断增加，并达到一个极大值。与此同时，星系中央超大质量黑洞也随着气体物质的内流在不断生长。当星系的恒星形成率峰值过后大约 10^8 a，中央黑洞吸积率达到极大值（约为 $1 \sim 2 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ ），此时星系中 AGN 反馈作用非常明显，抑制星系的恒星形成。一旦星系中气体和尘埃被恒星形成消耗掉后，它就演化成在光学波段可见的类星体，并进而演化成宁静的

椭圆星系。不同于前述星系形成和演化模式, Davé 等人^[143]认为极亮红外星系形成时, 其不断地吸积气体 (Smooth Accretion) 从而引起激烈的恒星形成 (如图 7 下端演化分支所示), 无需星系间的并合。因为活跃的恒星形成 ($200 \sim 500 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$) 产生的恒星紫外和光学波段辐射可以为星系中的尘埃红外辐射提供足够能量, 使得源的红外光度 $L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$ 。



注: (1) 极亮红外星系的触发机制, 通过富气体星系间主并合 (Major Merger) 或持续地气体吸积 (Smooth Accretion) 引起激烈恒星形成, 并伴有强的尘埃遮蔽效应。(2) 高能反馈, 由于星系中气体和尘埃受到生长活动星系核的辐射加热, 恒星形成受到抑制。(3) 演化归宿, 经过短暂光学可见的类星体阶段并演化到宁静的椭球星系, 该过程取决于 AGN 活动时标长短、尘埃消耗和恒星形成。

图 7 极亮红外星系的形成和演化^[142]

5 总结和展望

极亮红外星系 (ULIRGs) 是指红外 (IR, $8 \sim 1000 \mu\text{m}$) 光度 (L_{IR}) 高于 $10^{12} L_{\odot}$ 的一类星系。大量观测结果表明高红移极亮红外星系是大质量 ($M_{*} > 10^{11} M_{\odot}$)、极高红外对光学流量密度比 ($F_{24 \mu\text{m}}/F_{\text{R}} > 1000$) 和强恒星形成 ($100 \sim 1000 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$) 的特殊星系。这些红外特别亮的星系在近邻宇宙中的分布非常少, 它们对宇宙总红外流量密度的贡献很低, 但在红移 $z \approx 2$ 处普遍存在。对大样本极亮红外星系的成团性分析表明, 它们的共动相关长度主要分布在 $7.0 h^{-1} \cdot \text{Mpc} < r_0 < 16.0 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 范围内, 具体数值取决于构建样本的流量限判据。高分辨率的近红外观测图像显示, 该类星系多半有并合形态, 同时也有不规则和致密的椭球结构。通过拟合极亮红外星系在静止光学波段的二维面亮度分布, 发现它们的 Sérsic 指数 ($n \approx 1.4$) 与盘星系相似, 且平均大小约为 4 kpc。来自 Spitzer IRS 光谱观测数据显示 AGN-ULIRGs 的中红外光谱表现出幂律形式, 而且有很强的硅线吸收, 没有 (或有弱的) 多环芳香烃 (PAH) 的辐射特征。而 SB-ULIRGs 中有很强的 PAH 辐射特征, 静止波长主要对应应在 $6.2 \mu\text{m}$ 、 $7.7 \mu\text{m}$ 、 $8.6 \mu\text{m}$ 和 $11.2 \mu\text{m}$ 处。另外, 极亮红外星系的远红外多波段观测数据表明, 它们的尘埃温度主要分布在 $T_{\text{d}} = 20 \sim 50 \text{K}$ 区间内。星系形成和演化模型预言, 高红移极亮红外星系可以由富气体星系间的并合模式形成, 也可以通过不断气体吸积引起活跃的恒星形成。

未来对极亮红外星系的研究工作可能主要从以下几个方面开展：(1) 基于红外光度 $L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$ 判据，选取一个完备的极亮红外星系样本，研究不同方法选取的极亮红外星系在物理性质上的差异和相似性。(2) 多波段研究极亮红外星系，特别是远红外观测数据，构建全波段的能谱分布，统计它们的尘埃温度分布情况，分析紫外消光和红外辐射的关系。(3) 定标极亮红外星系的恒星形成率指针。(4) 构建一个带有光谱红移证认的极亮红外星系大样本，统计分析它们的光谱特征，特别是比较 SB-ULIRGs 与 AGN-ULIRGs 的光谱差异，研究恒星形成星系与活动星系核的共动演化机制。(5) 如果极亮红外星系的演化是从 SB-ULIRGs 演化过渡到 AGN-ULIRGs，那它们在物理上有什么相似性？例如，测量它们的成团性。(6) 寻找极亮红外星系中非常致密的源，研究它们物理特性。(7) 对那些红外光度特别亮而且恒星形成率非常高的特殊源，要从光谱、多波段数据和星系形成模型上去分析，给出合理的物理解释。(8) 极亮红外星系的形成和演化机制依然存在争议，这需要从统计上提供更多可靠的观测结果，以便不断完善星系形成和演化模型，了解近邻大质量宁静的椭圆星系是否来自这些高红移极亮红外星系的演化。

参考文献：

- [1] Oesch P A, Bouwens R J, Illingworth G D, et al. *ApJ*, 2012, 759: 135
- [2] Richards G T, Strauss M A, Fan X, et al. *AJ*, 2006, 131: 2766
- [3] Fang G W, Kong X, Chen Y, et al. *ApJ*, 2012, 751: 109
- [4] González V, Bouwens R, Illingworth G, et al. *ApJ*, 2014, 781: 34
- [5] Ilbert O, McCracken H J, Le Fèvre O, et al. *A&A*, 2013, 556: A55
- [6] Murphy E J, Stierwalt S, Armus L, et al, et al. *ApJ*, 2013, 768: 2
- [7] Rieke G H, Low F J. *ApJ*, 1972, 176: L95
- [8] Neugebauer G, Habing H J, van Duinen R, et al. *ApJ*, 1984, 278: L1
- [9] Kessler M F, Steinz J A, Anderegg M E, et al. *A&A*, 1996, 315: L27
- [10] Werner M W, Roellig T L, Low F J, et al. *ApJS*, 2004, 154: 1
- [11] Soifer B T, Sanders D B, Madore B F, et al. *ApJ*, 1987, 320: 238
- [12] Sanders D, Mirabel I F. *ARA&A*, 1996, 34: 749
- [13] Genzel R, Cesarsky C J. *ARA&A*, 2000, 38: 761
- [14] Le Floch E, Papovich C, Dole H, et al. *ApJ*, 2005, 632: 169
- [15] Caputi K I, Lagache G, Yan L, et al. *ApJ*, 2007, 660: 97
- [16] Huang J S, Rigopoulou D, Papovich C, et al. *ApJ*, 2007, 660: 69
- [17] Alexander D M, Bauer F E, Chapman S C, et al. *ApJ*, 2005, 632: 736
- [18] Alexander D M, Bauer F E, Brandt W N, et al. *ApJ*, 2011, 738: 44
- [19] Menéndez-Delmestre K, Blain A W, Alexander D M, et al. *ApJ*, 2007, 655: L65
- [20] Valiante E, Lutz D, Sturm E, et al. *ApJ*, 2007, 660: 1060
- [21] Pope A, Bussmann R S, Dey A, et al. *ApJ*, 2008, 689: 127
- [22] Pope A, Chary R R, Alexander D M, et al. *ApJ*, 2008, 675: 1171
- [23] Menéndez-Delmestre K, Blain A W, Smail I, et al. *ApJ*, 2009, 699: 667
- [24] Laird E S, Nandra K, Pope A, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 2763
- [25] Georgantopoulos I, Rovilos E, Comastri A. *A&A*, 2011, 526: A46
- [26] Johnson S P, Wilson G W, Wang Q D, et al. *MNRAS*, 2013, 431: 662

- [27] Wang R, Wagg J, Carilli C L, et al. *ApJ*, 2013, 773: 44
- [28] Kirkpatrick A, Pope A, Charmandaris V, et al. *ApJ*, 2013, 763: 123
- [29] Clements D L, Sutherland W J, McMahon R G, et al. *MNRAS*, 1996, 279: 477
- [30] Mihos J C, Hernquist L. *ApJ*, 1996, 464: 641
- [31] Veilleux S, Kim D C, Sanders D B. *ApJS*, 2002, 143: 315
- [32] Younger J D, Hayward C C, Narayanan D, et al. *MNRAS*, 2009, 396: 66
- [33] Hwang H S, Elbaz D, Lee J C, et al. *A&A*, 2010, 522: 33
- [34] Sanders D B, Soifer B T, Elias J H, et al. *ApJ*, 1988, 325: 74
- [35] Genzel R, Tacconi L J, Rigopoulou D, et al. *ApJ*, 2001, 563: 527
- [36] Tacconi L J, Genzel R, Lutz D, et al. *ApJ*, 2002, 580: 73
- [37] Dasyra K M, Tacconi L J, Davies R I, et al. *ApJ*, 2006, 638: 745
- [38] Hopkins P F, Somerville R S, Hernquist L, et al. *ApJ*, 2006, 652: 864
- [39] Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J, et al. *ApJS*, 2008, 175: 356
- [40] Yuan T T, Kewley L J, Sanders D B. *ApJ*, 2010, 709: 884
- [41] Veilleux S, Rupke D S N, Kim D C, et al. *ApJS*, 2009, 182: 628
- [42] Hou L G, Han J L, Kong M Z, et al. *ApJ*, 2011, 732: 72
- [43] Chapman S C, Blain A W, Ivison R J, et al. *Nature*, 2003, 422: 695
- [44] Houck J R, Soifer B T, Weedman D, et al. *ApJ*, 2005, 622: L105
- [45] Yan L, Sajina A, Fadda D, et al. *ApJ*, 2007, 658: 778
- [46] Dey A, Soifer B T, Desai V, et al. *ApJ*, 2008, 677: 943
- [47] Desai V, Soifer B T, Dey A, et al. *ApJ*, 2009, 700: 1190
- [48] Huang J S, Faber S M, Daddi E, et al. *ApJ*, 2009, 700: 183
- [49] Fang G W, Huang J S, Willner S P, et al. *ApJ*, 2014, 781: 63
- [50] Narayanan D, Cox T J, Hayward C C, et al. *MNRAS*, 2009, 400: 1919
- [51] Smail I, Ivison R J, Blain A W. *ApJ*, 1997, 490: L5
- [52] Holland W S, Robson E I, Gear W K, et al. *MNRAS*, 1999, 303: 659
- [53] Holland W S, Bintley D, Chapin E L, et al. *MNRAS*, 2013, 430: 2513
- [54] Barger A J, Cowie L L, Sanders D B, et al. *Nature*, 1998, 394: 248
- [55] Hughes D H, Serjeant S, Dunlop J, et al. *Nature*, 1998, 394: 241
- [56] Mortier A M J, Serjeant S, Dunlop J S, et al. *MNRAS*, 2005, 363: 563
- [57] Pope A, Scott D, Dickinson M, et al. *MNRAS*, 2006, 370: 1185
- [58] Austermann J E, Dunlop J S, Perera T A, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 160
- [59] Hodge J A, Karim A, Smail I, et al. *ApJ*, 2013, 768: 91
- [60] Chen C C, Smail I, Ivison R J, et al. *ApJ*, 2016, 820: 82
- [61] Wardlow J L, Smail I, Coppin K E K, et al. 2011, *MNRAS*, 2011, 415: 1479
- [62] Yun M S, Scott K S, Guo Y, et al. *MNRAS*, 2012, 420: 957
- [63] Chapman S C, Blain A W, Smail I, et al. *ApJ*, 2005, 622: 772
- [64] Lawrence A, Warren S J, Almaini O, et al. *MNRAS*, 2007, 379: 1599
- [65] Magnelli B, Popesso P, Berta S, et al. *A&A*, 2013, 553: A132
- [66] Casey C M, Berta S, Béthermin M, et al. *ApJ*, 2012, 761: 140
- [67] Yan L, Chary R, Armus L, et al. *ApJ*, 2005, 628: 604
- [68] Brand K, Dey A, Desai V, et al. *ApJ*, 2007, 663: 204
- [69] Riguccini L, Le Floc'h E, Mullaney J R, et al. *MNRAS*, 2015, 452: 470
- [70] Poglitsch A, Waelkens C, Geis N, et al. *A&A*, 2010, 518: L2
- [71] Griffin M J, Abergel A, Abreu A, et al. *A&A*, 2010, 518: L3
- [72] Huang J S, Barmby P, Fazio G G, et al. *ApJS*, 2004, 154: 44
- [73] Farrah D, Lonsdale C J, Weedman D W, et al. *ApJ*, 2008, 677: 957
- [74] Fadda D, Yan L, Lagache G, et al. *ApJ*, 2010, 719: 425
- [75] Fiolet N, Omont A, Lagache G, et al. *A&A*, 2010, 524: 33

- [76] Tielens A G G M. *ARA&A*, 2008, 46: 289
- [77] Dowell C D, Conley A, Glenn J, et al. *ApJ*, 2014, 780: 75
- [78] Shu X W, Elbaz D, Bourne N, et al. *ApJS*, 2016, 222: 4
- [79] Asboth V, Conley A, Sayers J, et al. *MNRAS*, 2016, 462: 1989
- [80] Oliver S J, Bock J, Altieri B, et al. *MNRAS*, 2012, 424: 1614
- [81] Eisenhardt P R M, Wu J, Tsai C W, et al. *ApJ*, 2012, 755: 173
- [82] Wardlow J L, Cooray A, De Bernardis F, et al. *ApJ*, 2013, 762: 59
- [83] Conley A, Cooray A, Vieira J D, et al. *ApJ*, 2011, 732: L35
- [84] Harris A I, Baker A J, Frayer D T, et al. *ApJ*, 2012, 752: 152
- [85] Ivison R J, Swinbank A M, Smail I, et al. *ApJ*, 2013, 772: 137
- [86] Casey C M, Narayanan D, Cooray A. *Phys. Rep.*, 2014, 541: 45
- [87] Houck J R, Roellig T L, van Cleve J, et al. *ApJS*, 2004, 154: 18
- [88] Weedman D W, Polletta M, Lonsdale C J, et al. *ApJ*, 2006, 653: 101
- [89] Rigby J R, Marcillac D, Egami E, et al. *ApJ*, 2008, 675: 262
- [90] Farrah D, Bernard-Salas J, Spoon H W W, et al. *ApJ*, 2007, 667: 149
- [91] Rujopakarn W, Rieke G H, Eisenstein D J, et al. *ApJ*, 2011, 726: 93
- [92] Swinbank A M, Smail I, Chapman S C, et al. *ApJ*, 2004, 617: 64
- [93] Banerji M, Chapman S C, Smail I, et al. *MNRAS*, 2011, 418: 1071
- [94] Alexander D M, Brandt W N, Smail I, et al. *AJ*, 2008, 135: 1968
- [95] Wang S X, Brandt W N, Luo B, et al. *ApJ*, 2013, 778: 179
- [96] Casey C M, Scoville N Z, Sanders D B, et al. *ApJ*, 2014, 796: 95
- [97] Limber D N. *ApJ*, 1954, 119: 655
- [98] Blain A W, Chapman S C, Smail Ian, et al. *ApJ*, 2004, 611: 725
- [99] Hickox R C, Wardlow J L, Smail I, et al. *MNRAS*, 2012, 421: 284
- [100] Weiß A, Kovács A, Coppin K, et al. *ApJ*, 2009, 707: 1201
- [101] Farrah D, Lonsdale C J, Borys C, et al. *ApJ*, 2006, 643: L139
- [102] Magliocchetti M, Cirasuolo M, McLure R J, et al. *MNRAS*, 2008, 383: 1131
- [103] Lonsdale C J, Smith H E, Rowan-Robinson M, et al. *PASP*, 2003, 115: 897
- [104] Brodwin M, Dey A, Brown M J I, et al. *ApJ*, 2008, 687: L65
- [105] Cooray A, Amblard A, Wang L, et al. *A&A*, 2010, 518: L22
- [106] Dasyra K M, Yan L, Helou G, et al. *ApJ*, 2008, 680: 232
- [107] Melbourne J, Desai V, Armus L, et al. *AJ*, 2008, 136: 1110
- [108] Melbourne J, Bussman R S, Brand K, et al. *AJ*, 2009, 137: 4854
- [109] Melbourne J, Soifer B T, Desai V, et al. *AJ*, 2012, 143: 125
- [110] Bussmann R S, Dey A, Lotz J, et al. *ApJ*, 2009, 693: 750
- [111] Bussmann R S, Dey A, Lotz J, et al. *ApJ*, 2011, 733: 21
- [112] Zamojski M, Yan L, Dasyra K, et al. *ApJ*, 2011, 730: 125
- [113] Kartaltepe J S, Dickinson M, Alexander D M, et al. *ApJ*, 2012, 757: 23
- [114] Chen C C, Smail I, Swinbank A M, et al. *ApJ*, 2015, 799: 194
- [115] Targett T A, Dunlop J S, Cirasuolo M, et al. *MNRAS*, 2013, 432: 2012
- [116] Fang G W, Ma Z Y, Chen Y, et al. *Baltic Astronomy*, 2015, 24: 231
- [117] Armus L, Heckman T, Miley G. *AJ*, 1987, 94: 831
- [118] Melnick J, Mirabel I F. *A&A*, 1990, 231: L19
- [119] Farrah D, Rowan-Robinson M, Oliver S, et al. *MNRAS*, 2001, 326: 1333
- [120] Bushouse H A, Borne K D, Colina L, et al. *ApJS*, 2002, 138: 1
- [121] Swinbank A M, Smail I, Longmore S, et al. *Nature*, 2010, 464: 733
- [122] Simpson J M, Smail I, Swinbank A M, et al. *ApJ*, 2015, 799: 81
- [123] Swinbank A M, Simpson J M, Smail I, et al. *MNRAS*, 2014, 438: 1267
- [124] Magdis G E, Elbaz D, Hwang H S, et al. *MNRAS*, 2010, 409: 22

- [125] Narayanan D, Dey A, Hayward C C, et al. MNRAS, 2010, 407: 1701
 [126] Younger J D, Omont A, Fiolet N, et al. MNRAS, 2009, 394: 1685
 [127] Kovács A, Omont A, Beelen A, et al. ApJ, 2010, 717: 29
 [128] Kovács A, Chapman S C, Dowell C D, et al. ApJ, 2006, 650: 592
 [129] Bussmann R S, Dey A, Borys C, et al. ApJ, 2009, 705: 184
 [130] Condon J J. ARA&A, 1992, 30: 575
 [131] Sajina A, Yan L, Lutz D, et al. ApJ, 2008, 683: 659
 [132] Condon J J, Broderick J J. AJ, 1991, 102: 1663
 [133] Ivison R J, Alexander D M, Biggs A D, et al. MNRAS, 2010, 402: 245
 [134] Ivison R J, Magnelli B, Ibar E, et al. A&A, 2010, 518: L31
 [135] Magnelli B, Ivison R J, Lutz D, et al. A&A, 2015, 573: A45
 [136] Perera T A, Chapin E L, Austermann J E, et al. MNRAS, 2008, 391: 1227
 [137] Shupe D L, Rowan-Robinson M, Lonsdale C J, et al. AJ, 2008, 135: 1050
 [138] Tacconi L J, Genzel R, Smail I, et al. ApJ, 2008, 680: 246
 [139] Bothwell M S, Smail I, Chapman S C, et al. MNRAS, 2013, 429: 3047
 [140] Solomon P M, Downes D, Radford S J E, et al. ApJ, 1997, 478: 144
 [141] Geach J E, Smail I, Moran S M, et al. ApJ, 2011, 730: L19
 [142] Bussmann R S, Dey A, Armus L, et al. ApJ, 2012, 744: 150
 [143] Davé R, Finlator K, Oppenheimer B D, et al. MNRAS, 2010, 404: 1355

Research Progress on Ultraluminous Infrared Galaxies at $z \approx 2$

FANG Guan-wen¹, LIN Ze-sen^{2,3}, KONG Xu^{2,3}

(1. Institute for Astronomy and History of Science and Technology, Dali University, Dali 671003, China;
 2. Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3.
 Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026,
 China)

Abstract:

UltraLuminous InfraRed Galaxies (ULIRGs) are galaxies defined to have extremely high infrared (IR) luminosities ($L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$). Observations have shown that high-redshift ULIRGs are massive galaxies ($M_{*} > 10^{11} M_{\odot}$), with extremely high ratio of infrared to optical flux density ($F_{24 \mu\text{m}}/F_R > 1000$) and intensive star formation ($100 \sim 1000 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$). These objects are relatively rare at $z \approx 0$, but their space density rapidly increase with look-back time and apparently peaks around $z = 2 \sim 3$. Upon it's discovery, ULIRGs were suggested to be a feasible evolutionary phase towards the formation of local massive early-type galaxies. Their rest-frame optical morphologies show that high-redshift ULIRGs are a mixture of mergers or interacting systems, irregular galaxies, disks, and ellipticals. The morphological diversities of ULIRGs suggest that there are different formation processes for these galaxies.

Merger processes between galaxies and disk instabilities play an important role in the formation and evolution of ULIRGs at high redshift. Mid-infrared (MIR) spectra of ULIRGs are observed with the Spitzer/IRS (InfraRed Spectrograph) instrument. For ULIRGs at $z \approx 2$, major spectral features including the PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) emission features at 7.7, 8.6, and 11.3 μm and silicate absorption from 8 to 13 μm (peaking at 9.7 μm) fall in the observable wavelength range. ULIRGs can be divided into two types according to their MIR spectra. Objects with strong power-law continua are powered mainly by active galactic nuclei (AGNs), while those with a strong PAH emission are powered by intensive star formation. The clustering signal of ULIRGs roughly corresponds to a correlation length of $r_0 = 7.40 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ for the full $F_{24\mu\text{m}} > 0.3 \text{ mJy}$ sample. The clustering strength increases with luminosity, up to $r_0 = 12.97 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ for $F_{24\mu\text{m}} > 0.6 \text{ mJy}$ ULIRGs. Moreover, observations demonstrate that a median dust temperature is about 40 K for ULIRGs at $z \approx 2$.

Key words: high-redshift; galaxy observation; galaxy morphology; galaxy spectroscopy; galaxy clustering