

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.01.03

红移 $z \approx 1$ 极红天体的研究进展

方官文^{1,2}, 汪 敏^{2,3}, 马仲阳^{2,3}, 陈 洋^{2,3}, 孔 旭^{2,3}

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

摘要: 极红天体 (EROs) 是指利用光学和近红外两个波段的色指数 (如 $I - K > 4 \text{ mag}$) 挑选出来的一类星系。研究表明极红天体可分为两类: 一类是被大量尘埃红化的高红移恒星形成星系, 主要是较年轻的旋涡或不规则星系, 有恒星正在形成, 称为 DGs; 另一类是由年老星族 ($\geq 1 \text{ Ga}$) 主导的高红移椭圆星系, 基本上没有或仅有弱的恒星形成, 简称为 OGs。极红天体中这两种不同类型的星系, 很可能是近邻大质量星系的前身星系, 只是分别代表着不同的形成历史。介绍了不同类型极红天体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、红移分布和星系计数等, 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

极红天体^[1] (Extremely Red Objects, EROs) 是指利用光学和红外两个波段的色指数 $R - K > 5 \text{ mag}$ 或 $I - K > 4 \text{ mag}$, 挑选出来的星系 (也有研究者采用其他的颜色标准, 如: $R - K > 4 \text{ mag}$ 、 $R - K > 5.3 \text{ mag}$ 、 $R - K > 6 \text{ mag}$ 、 $I - K > 3 \text{ mag}$ 和 $I - K > 5 \text{ mag}$ 等)。研究表明极红天体可分为两类^[1, 2]: 一类是被大量尘埃红化的高红移恒星形成星系, 主要是较年轻的旋涡星系或不规则星系, 有恒星正在形成, 我们称为 DGs (Dusty star-forming Galaxies); 另一类是由年老星族 ($\geq 1 \text{ Ga}$) 主导的高红移椭圆星系, 基本上没有或仅有弱的恒星形成, 简称为 OGs (Old elliptical Galaxies 或 Old passively evolving Galaxies)。极红天体中这两种星系都有可能是近邻大质量星系的前身星系, 只是分别代表不同的形成历史。

随着地面近红外观测仪器的发展, 极红天体的研究在最近十几年才兴起, 第一批极红天体成员直到 1989—1991 年才被证认。1988 年, Elston 等人^[3] 首次在近红外波段发现极红天

收稿日期: 2014-08-15; 修回日期: 2014-10-20

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

体, 即 $R - K > 5 \text{ mag}$ 的星系, 从此掀起了一阵观测极红天体和研究其本质的热潮。虽然 Elston 等人观测的天区仅 10 平方角分, 但仍然探测到两个比正常演化轨迹更红的天体, 如图 1 所示。图中两条直的虚线分别代表 K 和 R 波段的探测极限, 弯曲的虚线表示恒星形成星系的演化轨迹, 点线和实线分别对应于非演化模型和被动演化模型给出的早期星系演化轨迹。从图 1 可见, 有两个源位于正常近邻星系分布的区域之外。如果它们是银河系内的天体, 那么在仅仅 10 平方角分的天区内找到两个这样亮天体的几率只有 10^{-4} , 所以他们认为这两个源有可能是红外亮 (近红外波段星等 $K \approx 17 \text{ mag}$) 的高红移星系。Elston 等人^[4] 又根据多波段 (BVRIJHK) 测光和光谱数据进一步得到了这两个红星系的红移值为 $z \approx 0.8$, 于是他们认为极红天体很可能是高红移处的年老星系, 而不是原初星系。1996 年, Graham 等人^[5] 通过宽 $H\alpha$ 发射线定出了 HR10 (Hu 等人^[6] 在 1994 年的样本中给出的两个极红星系之一) 的红移值为 $z = 1.44$, 并认为它是一个被尘埃遮蔽的恒星形成星系。接着, Dey 等人^[7] 于 1999 年利用 $[O II] \lambda 3727 \text{ \AA}$ 发射线再次确认了该红移值, 因此可证实极红天体中包含富尘埃的恒星形成星系这一子类。

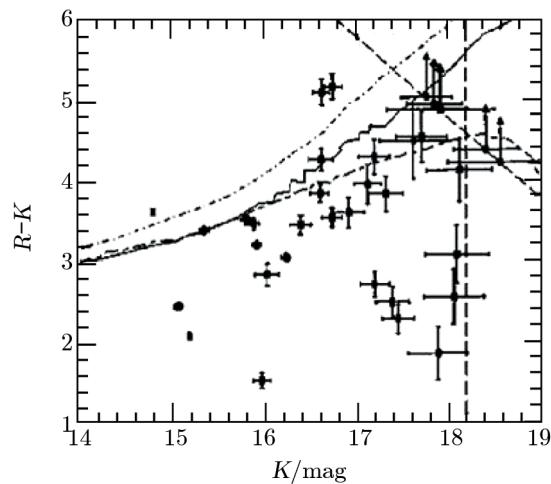


图 1 首次发现极红天体的颜色—星等图^[3]

图中两条直的虚线分别代表 K 和 R 波段的探测极限, 弯曲的虚线表示恒星形成星系的演化轨迹, 点线和实线分别对应于非演化模型和被动演化模型给出的早期星系演化轨迹。两个极红天体 ($R - K > 5 \text{ mag}$) 位于正常近邻星系分布的区域之外。

事实上, 大多数极红天体早已在光学波段被观测到, 但人们开始一直以为它们是正常星系; 直到利用近红外图像发现它们的颜色特别红, 人们才意识到它们的特殊性, 并展开了大量的观测以研究它们的本质和特征^[1]。从 20 世纪 90 年代早期开始, 特别是近几年, 随着一些空间巡天项目和大口径、大视场地面望远镜的投入使用, 很多研究小组利用近红外和光学波段仪器, 观测了多个高银纬天区, 发现了一批极红天体^[1, 8-17]。通过对这些极红天体的多波段测光研究 (从 X 射线到射电波段), 发现这些星系样本中有约 10% 的源带有活动星系核特征; 而且射电和远红外证认的极红天体, 其恒星形成率范围为 $20 \sim 60 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

极红天体的分类、形成和演化问题是天体物理研究领域的一个热门课题, 吸引着很多学

者去研究。观测和研究极红天体,对了解早期宇宙的形成和演化、大质量椭圆星系的形成和演化、恒星的形成历史以及约束星系形成模型都有十分重要的意义。早期极红天体观测主要集中在光学和近红外波段,近几年观测波段扩展到中远红外、亚毫米波、厘米波、X 射线,因此天文学家可以从不同的波段、不同的视场、不同的观测深度以及不同的角度去研究极红天体的本质。

本文第 2 章介绍了极红天体的几种颜色选择标准;第 3 章介绍了极红天体的分类;第 4 章介绍了极红天体的物理性质(包括形态、光谱、成团性等);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 Vega 星等。

2 极红天体的选择

2.1 $R - K$ 和 $I - K$ 判据

因为星系的能谱分布(Spectral Energy Distribution, SED)在静止坐标系中的紫外部分较陡、近红外部分较平,所以对于正常星系,随着红移的增大,其颜色将变红。因此,我们可以用色指数数据来选择高红移星系。对于极红天体,最常用的选择标准是 $R - K$ 判据和 $I - K$ 判据。

图 2 (a) 和 (b) 显示利用 $R - K$ 色指数可以有效地选取极红天体。利用星族合成程序^[18],在这两幅图中,我们显示了 3 类星系的 $R - K$ 色指数随红移的变化趋势:(1) 消光 $E(B - V) = 0.6$ 的富尘埃年轻恒星形成星系(年龄分别为 1 Ga、2 Ga、3 Ga,见图 2 (a));(2) 消光 $E(B - V) = 0.0$ 的没有尘埃的恒星形成星系(年龄分别为 1 Ga、2 Ga、3 Ga,见图 2 (a));(3) 消光 $E(B - V) = 0.0$ 的年老星系(年龄分别为 5 Ga、10 Ga、12 Ga,见图 2 (b))。由图 2 (a) 和 (b),我们可以发现, $(R - K)_{AB} > 3.35 \text{ mag}$, 对应于 $R - K > 5 \text{ mag}$, 可以选取 $z > 0.8$ 的富尘埃恒星形成星系(DGs)和年老的高红移星系(OGs)。

图 2 (c) 和 (d) 显示利用 $I - K$ 色指数也可以有效地选取极红天体。星族合成程序、星系模板和选取的参数同图 2 (a) 和 (b) 一样。由图 2 (c) 和 (d),我们可以发现:(1) $(I - K)_{AB} > 2.55 \text{ mag}$, 对应于 $I - K > 4 \text{ mag}$, 也可以选取高红移的富尘埃恒星形成星系(DGs)和年老的高红移星系(OGs);(2) 虽然 $R - K$ 色指数被广泛应用,但是 $I - K$ 色指数可以选取的红移下限比 $R - K$ 色指数稍高($I - K$ 的红移下限约为 1.0, $R - K$ 的红移下限约为 0.8)。对于 OGs,红移约为 2 时, $R - K$ 色指数约为 6 mag。随着红移增大,色指数将继续增大,这在观测上比较困难。如果星系 $K = 20 \text{ mag}$ 、 $R - K = 7 \text{ mag}$,则星系在 R 波段为 27 mag,很暗,以致于在 R 波段图像上观测不到这个星系。对于 $I - K$ 色指数,由图 2 (d) 我们可以发现将不存在这个问题。因此,利用 $I - K$ 色指数可以有效地选取红移范围更宽的高红移星系样本。另外,有研究表明极红天体的计数与所选用的色指数有很大的关系,随着色指数的增加,极红天体的数目将快速减少。

虽然银河系内较小质量的恒星和褐矮星也有类似的近红外颜色,但它们的表面密度相对

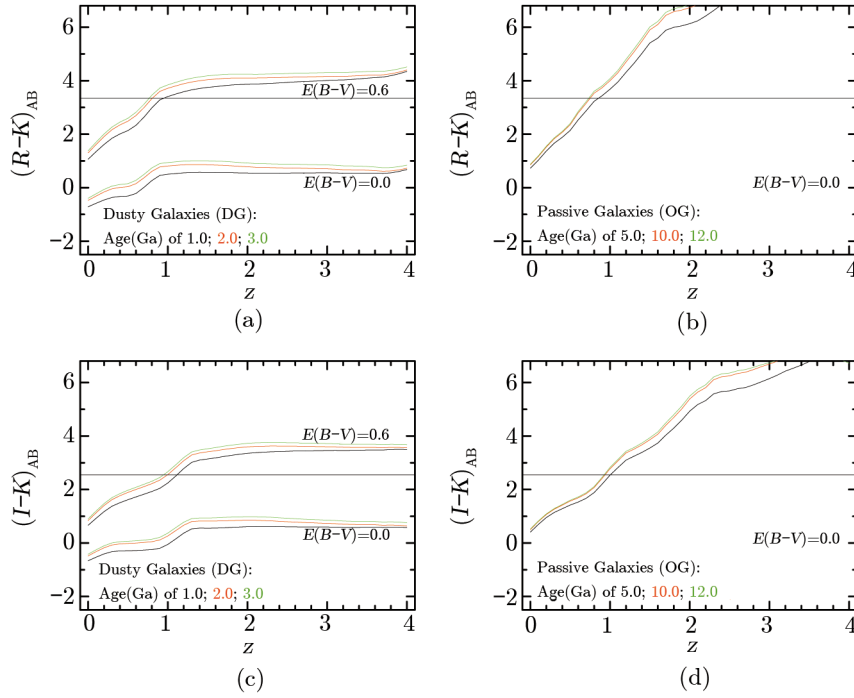


图 2 色指数-红移关系图

(a) 年轻星系的 $R-K$ 与红移的关系; (b) 年老星系的 $R-K$ 与红移的关系; (c) 年轻星系的 $I-K$ 与红移的关系; (d) 年老星系的 $I-K$ 与红移的关系。不同颜色谱线代表星系年龄不同, 水平线表示极红天体的颜色选择标准。

于暗星系来说很低, 因此不会明显地污染极红天体样本。然而, 哪怕是非常少的恒星形成活动都会使高红移椭圆星系的颜色变得更蓝, 以致于被我们的基于测光特征的颜色选择标准剔除在外, 所以颜色选择标准也存在一定的限制。

2.2 $R-[3.6]$ 和 $K-[3.6]$ 判据

2004 年, Wilson 等人^[19] 利用 Spitzer 望远镜在红外的 5 个波段 (3.6, 4.5, 5.8, 8.0 和 24 μm) 所得到的观测数据, 并结合来自地面望远镜的 R 和 K 波段图像, 研究了 LOCKMAN HOLE 视场中的极红天体。利用色指数 $R-[3.6] > 4.0$ mag 判据, 他们在 LOCKMAN HOLE 视场中选出了 64 个极红天体 ($[3.6]_{\text{AB}} < 23.7$ mag), 对应表面密度为 (2.90 ± 0.36) arcmin⁻²。基于同样颜色判据, Wilson 等人^[20] 于 2007 年从 AEGIS^[21] (All-Wavelength Extended Groth Strip International Survey) 巡天中选出 87 个带有光谱红移的极红天体, 这些星系光谱红移分布较窄 ($0.76 < z < 1.42$)。与此同时, 他们提出了色指数 $K-[3.6]$ 也可以用来选取极红天体, 主要依据是: 静止坐标系中的 1.6 μm “包”是红外波段最重要的光谱特征, 随着星系红移的增大, 这个“包”会出现在 K 波段和 3.6 μm 波段之间, 甚至红移到 3.6 μm 和 4.5 μm 之间。他们提出可以用 $K-[3.6] > 0$ 和 $[3.6]-[4.5] > 0$ 挑选出 $z > 1.3$ 的极红天体, 用 $K-[3.6] > 0$ 和 $[3.6]-[4.5] < 0$ 挑选出 $0.6 < z < 1.3$ 的极红天体; 而红移更大的极红天体可以用 IRAC-[24] 选取。另外, Wilson 等人^[20] 和 Yan 等人^[22] 认为, 在 Spitzer 24 μm 图

像中探测到的极红天体是尘埃遮蔽的星暴星系，而未被探测到的极红天体可能是被动演化的早型星系或是红外流量太低的星暴星系。因此，用这种方法可以估算出尘埃遮蔽的恒星形成星系的面密度下限。

3 极红天体的分类

极红天体 (EROs) 的主要观测特征：很暗的近红外星等 ($K \gtrsim 18 \sim 20$ mag) 和极红的“光学—红外颜色”。根据观测得到的颜色和光度，利用星系演化模型可以推断出极红天体的红移值 $z \approx 1$ ，这一点已被直接的光谱观测数据所证实^[23]。

目前，普遍认为观测到的极红天体可分为两类^[13-15]：一类是被大量尘埃红化的高红移恒星形成星系，主要是较年轻的旋涡或不规则星系，有恒星正在形成，我们称为 DGs；另一类是由年老星族 (≥ 1 Ga) 主导的高红移椭圆星系，基本上没有或弱的恒星形成，简称为 OGs。两者的能谱分布相似，且颜色相近。由于极红天体多数都比较暗、星系图像较小，所以人们很难从光谱 (即使 10 m 级的望远镜，获取光学波段观测星等 $I > 23$ mag 的星系光谱也很困难) 和形态 (受到大气宁静度影响，地面望远镜观测得到的图像分辨率较低) 上将它们区分开来。

已有的研究表明，这两类极红天体很可能反映了近邻大质量椭圆星系在形成和演化过程中的不同阶段^[13-17]。事实上，研究这类大质量星系 (恒星质量 $M_* \geq 10^{11} M_\odot$) 的演化过程相当重要，因为它们可以用来约束星系形成和演化模型。到目前为止，研究近邻大质量椭圆星系的形成仍然是星系形成和演化研究领域中最有争议的课题之一。然而，两种星系形成模型 (纯光度演化模型和等级成团模型) 给出了他们截然不同的形成历史。其中，纯光度演化模型^[24] (Pure Luminosity Evolution models, PLE) 认为大质量的椭圆星系是在宇宙早期 (如 $z > 3$) 形成的，其恒星形成率 (SFR) 约为 $100 \sim 1000 M_\odot \cdot a^{-1}$ ，然后一直被动演化至今，是当今椭圆星系的前身星系。等级成团模型^[25] (Hierarchical Merging Models, HMM) 则认为大质量椭圆星系是由两个旋涡星系在低红移处并合而成，伴随着中等恒星形成率。在等级成团模型中，在红移 $z \geq 1.5$ 处极少有大质量椭圆星系 ($M_* \geq 10^{11} M_\odot$)，这一点与现有的观测事实不符合^[26, 27]。

由于近红外光度是星系质量的良好追踪器，且 K 波段成像受到消光的影响小，适合选择大质量星系，所以观测 K 波段星系的图像和光谱，选取不同红移的大质量星系，比较观测结果与不同模型给出的预言，是检验星系形成和演化模型的最直接的方法^[13-15, 23]。在研究极红天体的物理特性，进而研究星系的形成和演化之前，我们必须对已选样本中两类极红天体 (OGs 和 DGs) 进行准确的分类。Fang 等人^[14] 和 Kong 等人^[15] 在 2009 年发展和比较了不同的极红天体分类方法，深入研究了如何准确有效地区分极红天体中的 DGs 和 OGs。这些分类方法主要包括：能谱拟合法 (SpT)，双色图分类法，非模型化分类法，24 μm 图像，主成分分析法 (PCA，可查阅文献 [15] 中的图 8)。关于这些分类方法的详细解释以及各自优缺点的比较请参考文献 [14, 15, 22, 28]，本文不再详细描述。总之，在对两类极红天体进行有效分类的前提下，研究极红天体的特征 (如数密度、颜色、红移分布、恒星形成率以及成团性等)，

并与星系模型比较, 可以对星系形成和演化模型及其参数给予严格的限制。

4 极红天体的特性

4.1 形态

对于远距离的星系来说, 地面望远镜无法提供高信噪比和高空间分辨率的星系图片 (由于低信噪比和观测面亮度 Σ_{obs} 与相对静止面亮度 Σ_{rest} 关系为 $\Sigma_{\text{obs}} = \Sigma_{\text{rest}}/(1+z)^4$, 以及相对静止波长随红移的变化等)。但如果望远镜观测得到的图像空间分辨率足够高, 像哈勃空间望远镜 (HST) 的 ACS (Advanced Camera for Surveys)、NICMOS (Near-Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) 和 WFC3 (Wide Field Camera 3) 提供的图像数据, 那么区分 DGs 和 OGs 最直接的方法就是看它们的星系形态。Moriondo 等人^[29] 利用哈勃空间望远镜的 WFPC2 (Wide Field Planetary Camera 2) 和 NICMOS 的深度光学和近红外图像数据, 在 41 个极红天体样本中发现 OGs 是致密且外形规则的天体, 而 DGs 看起来很不规则 (尤其是当星暴是由并合引发或是有大量尘埃不规则地分布在恒星形成星系中时)。最近, Fang 等人^[14] 在哈勃极深场 (UDF) 中研究极红天体的不同分类方法时, 发现目视分类与双色图分类法、能谱拟合法、非模型化分类法和 24 μm 图像给出的结果相一致, 即其他分类标准定义为 DGs 的形态表现出盘状或不规则结构, 而分类为 OGs 的多为椭圆星系的形态, 如图 3 所示。这些彩色图片来自 ACS 的 B、i 和 z 共 3 个波段图像合成, 每个小图中的 DGs 和 OGs 分类来自总体考虑能谱拟合法、双色图法、非模型化分类法和 24 μm 图像的结果得出。

基于 CANDELS^[30, 31] (Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey) 巡天中 F125W (J) 波段观测数据, Fang 等人^[32] 首次在静止光学波段 ($\lambda_{\text{rest}} \approx 6300 \text{ \AA}$) 研究了 COSMOS (Cosmic Evolution Survey) 场中极红天体的形态和结构特征, 如图 4 所示。类似于在观测光学波段所看到那样, OGs 呈现出致密的早期星系形态特征, 而 DGs 有着盘状或不规则的结构。另外, 他们计算出 OGs 和 DGs 的平均大小分别为 $(2.09 \pm 1.13) \text{ kpc}$ 和 $(3.27 \pm 1.14) \text{ kpc}$ 。相似质量的近邻早期星系 (晚期星系) 的平均大小要比 OGs (DGs) 大 2 (1.5) 倍。这意味着 OGs 和 DGs 可能有着不同的形成和演化过程, 如 OGs 是通过星系间的并合形成的, 而 DGs 则是在无并合作用下的长期本征演化。

对极红天体形态的划分, 不同的作者给出的结果是有差别的。Stiavelli 和 Treu^[33] 在 2001 年利用 HST NICMOS 和地面观测图像, 将极红天体分成椭圆星系、盘星系和不规则星系; 而 Wilson 等人^[20] 则将 87 个带有光谱红移的极红天体划分为早期星系、富尘埃星暴星系和 AGN (Active Galactic Nucleus) 主导的源, 类似的分类很多^[34-36], 但实质上我们可以将这些分类结果归结为 OGs 和 DGs 两类。至于在极红天体样本中, 哪一类星系占主要部分, 不同的研究者给出的结果不尽相同。Moriondo 等人^[29]、Simpson 等人^[37] 和 Conselice 等人^[38] 认为极红天体中大部分源是 OGs 星系; 与之相反的研究结果表明极红天体中大部分源是 DGs^[2, 34, 36]; 另外, 也有人发现在极红天体样本中, OGs 和 DGs 各占一半^[39-41]。出现上述这样的现象, 是因为不同的研究者在工作中利用了不同天区的观测数据、不同的 K 波段

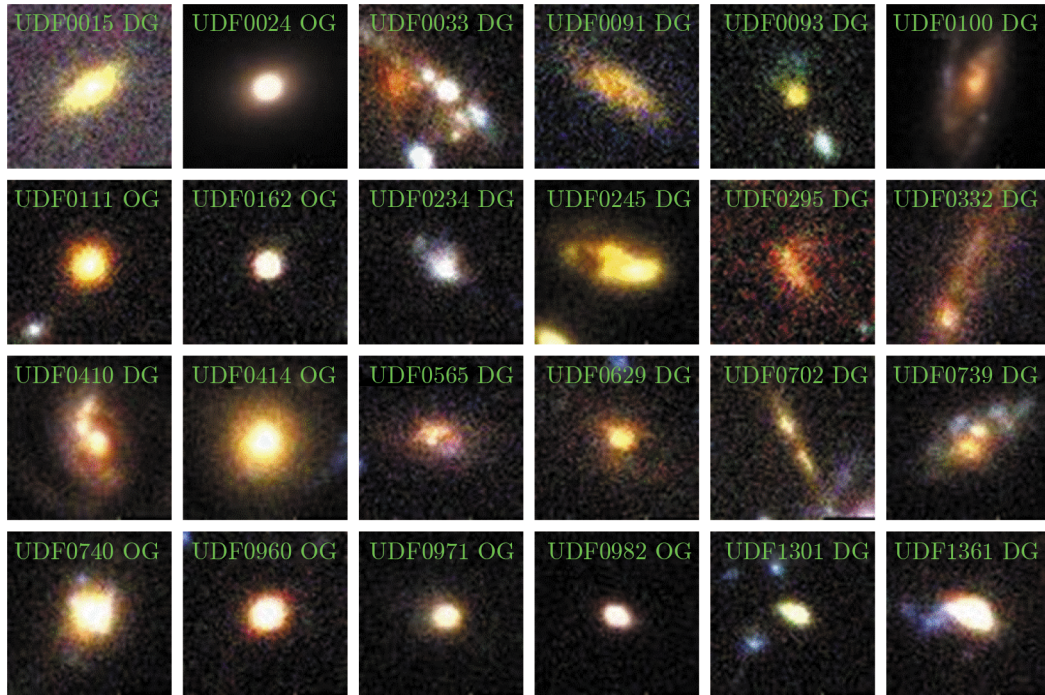


图 3 哈勃极深场 (UDF) 中 24 个极红天体的合成图像^[14]

数据来自 ACS 的 B、i 和 z 共 3 个波段, 图像大小为 $1.''8 \times 1.''8$, 每个分图中的 DGs 和 OGs 分类来自总体考虑能谱拟合法、双色图法、非模型化分类法和 $24 \mu\text{m}$ 图像的结果得出。

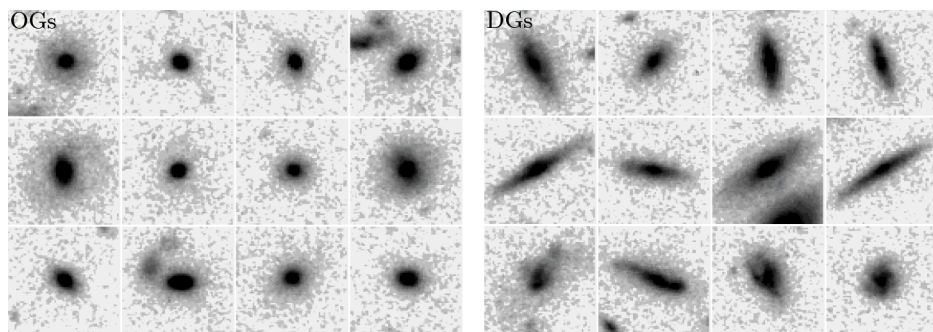


图 4 极红天体的近红外图像^[32]

观测数据来自 CANDELS 巡天中 F125W (J) 波段, 图像大小为 $4.'' \times 4.''$ 。类似于在观测光学波段所看到那样 (见图 3), OGs 呈现出致密的早型星系形态特征, 而 DGs 有着盘状或不规则的结构。

观测深度、不同的样本选择判据以及不同的极红天体分类法, 而且他们选取的样本容量普遍偏小, 易受宇宙涨落的影响, 另外极红天体的成团性也有一定的影响, 这些因素最终会导致极红天体的形态分类结果相差很大^[1]。本文会在 4.4 节中进一步讨论, 在极红天体样本中影响 OGs 和 DGs 所占比例的物理原因。

4.2 光谱

星系的光谱中包含着大量的信息, 通过分析谱线和连续谱特征, 可以了解星系的年龄、星族、恒星形成历史和元素丰度等信息。极红天体的光谱观测为研究它们的物理特征提供了很多信息。

与早期有关单个源 HR10^[6] 的光谱工作类似, Cimatti 等人^[23] 在 2002 年研究了 K20 巡天 (近红外波段观测星等小于 20 mag) 得到的极红天体光谱。他们利用 VLT (Very Large Telescope) 在共 52 平方角分的视场中观测得到的 R 波段和 Ks 波段的图像, 挑选出了 78 个 $R - Ks > 5$ mag 并且 $Ks \leq 20.0$ mag 的极红天体。他们假设星系的光谱型与星系的形态分类有着对应关系, 根据发射线存在与否, 将 35 个具有相应光谱的极红天体分类为 15 个 OGs 和 18 个 DGs (在 15 个 OGs 中, 有 4 个表现出弱 [O II] $\lambda 3727$ Å 发射线), 另外还有两个源无法区分是 DGs 还是 OGs (虽然在它们的光谱中发现了 [Mg II] $\lambda 2800$ Å 和 [Fe II] $\lambda 2600$ Å 吸收线, 但是没有发现其他的任何谱型特征)。具体的分类依据是: (1) 如果光谱中无发射线、有明显的 4000 Å 跃变、出现了强 [Ca II]H, K 吸收线且整个谱形是连续谱, 则被认为是年老的被动演化星系; (2) 如果光谱中呈现出清晰的 [O II] $\lambda 3727$ Å 发射线且没有强 4000 Å 跃变, 则被认为是被尘埃遮蔽的恒星形成星系。考虑到光谱样本的完备性, 他们重点研究了 45 个 $K \leq 19.2$ mag 的极红天体, 其中有 30 个极红天体具有相应的光谱, 红移在 $0.7 < z < 1.5$ 之间。在这个子样本中, 包括 14 个 OGs 和 15 个 DGs, 还有一个无法证认是 DG 还是 OG, DGs 和 OGs 的比例约为 1 : 1。

为了研究极红天体的主要特性, Cimatti 等人^[23] 将样本中所有极红天体 ($Ks \leq 20.0$ mag) 的单个光谱经过红移改正、归一化和叠加之后, 给出了 OGs 和 DGs 的平均光谱, 如图 5 所示。另外, 他们发现 Bruzual 和 Charlot^[42] 的简单星族模型 (simple stellar population, SSP) 能够很好地拟合 OGs 的平均光谱。模型采用了 Salpeter^[43] 初始质量函数 (IMF) 和太阳金属丰度 $Z = Z_{\odot}$, 不考虑尘埃消光, 得出最佳拟合的星系年龄为 (3.3 ± 0.3) Ga。如果采用平均年龄为 (3.1 ± 0.3) Ga, 同时规定金属丰度 $Z = Z_{\odot}$ 的话, 那么 OGs 的形成红移 $z_f = 2.4 \pm 0.3$; 如果采用幂指数恒星形成时标 $\tau = 0.3$ Ga 或采用 Scalo^[44] 选取的 IMF, 那么 OG 的平均年龄将上升至大约 4 Ga; 如果仍然采用 SSP 模型但是选用较低金属丰度 $Z = 0.4 Z_{\odot}$, OGs 的平均年龄将继续上升至约 5 ~ 6 Ga, 并导致星系有极高的 z_f 值。另一方面, 如果采用较高的金属丰度 $Z = 2.5 Z_{\odot}$, 则平均年龄会减至约 1.1 Ga, 同时它们的形成红移值为 $z_f \approx 1.5$ 。但是, 这样的 SSP ($Z = 2.5 Z_{\odot}$) 使得 $z > 1$ 的年老极红天体色指数 $R - Ks$ 偏小, 所以不适用于 OGs。对于 DGs, 将其平均光谱与已有的恒星形成星系模板比较之后发现: 红化 $E(B - V)_{\text{star}} \approx 0.8$ mag 的 Kinney 等人^[45] 的 SB6 模板可以较好地拟合 DGs 的 SED, 而红化 $E(B - V) \approx 1.1$ mag 的亮红外星系的平均光谱在 $\lambda > 3600$ Å 处也和它吻合得很好。最后, 他们将 DGs 的平均光谱与恒星形成星系的合成光谱 (太阳金属

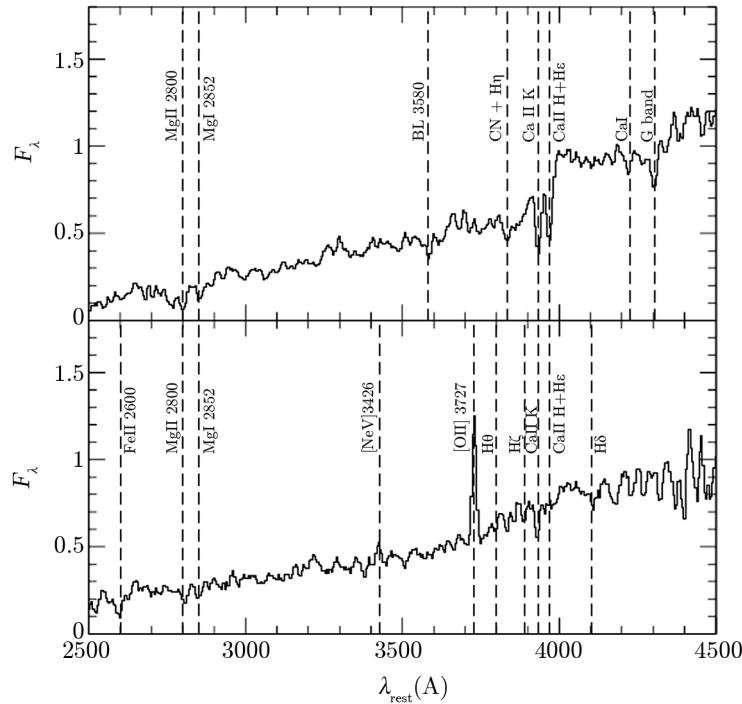


图 5 OGs (上图) 和 DGs (下图) 的平均光谱^[23]

OGs 光谱表现出较强的 4000 Å 跃变, 出现了强 [Ca II]H, K 吸收线, 整个谱形是连续谱而且没有发射线特征; DGs 的光谱中没有 4000 Å 跃变, 但有明显的 [O II]λ3727 Å 发射线。

丰度, Salpeter^[43] 得到的 IMF, 固定的恒星形成率) 进行了比较, 发现 DGs 的连续谱谱形和 $R - K_s$ 颜色可以用红化在 $0.6 < E(B - V) < 1.1$ mag 之间的不同年龄的恒星形成星系模板来拟合。

事实上, 仅根据发射线的存在与否将极红天体分成 DGs 和 OGs 两类是否合理, 现在还不能确定。2004 年, Yan 等人^[46] 研究了 $I - K_s > 4$ mag 且平均 K_s 星等为 18.7 mag 的 24 个极红天体, 其中 92% 的源红移分布在 $0.9 < z < 1.5$ 之间。通过分析它们的形态和光谱信息, 可以得到以下结果: (1) 86% 的光谱含有年老恒星的吸收特征, 这表明静止紫外坐标系中占主导地位的星族是年老的恒星; 其中, 50% 的源显示出纯吸收线, 而剩下的 50% 有发射线存在, 这表明这些源中最近有恒星形成。另外, 极红天体的颜色选择标准对于挑选 $z \approx 1$ 的年老星族是非常有效的, 并且大部分年老星族占主导的极红天体都伴随有最近的恒星形成。(2) 在 12 个发射线系统和 12 个纯吸收线系统中发现了相同数目的盘星系和核球星系, 这意味着光谱型与形态分类之间并没有简单的对应关系。(3) 在这 24 个源中, 有 3 个极红天体是可以单独分离出来的 $z \approx 1$ 的纯被动演化早型星系; 也就是说, 只有很小的一部分 (10% ~ 15%) 早型星系是在高红移处快速爆发形成, 然后一直被动演化至今。(4) 有 3 个极红天体显示出很红的连续谱和纯发射谱线, 它们的红移和恒星形成率与著名的极红天体 HR10^[6] 很相似, 很可能是 DGs。

随着天文观测技术的进步, 以及高红移光谱巡天计划的开展和深入观测, 例如 DEEP2 (Deep Extragalactic Evolutionary Probe 2)、DEEP3 (Deep Extragalactic Evolutionary Probe 3)、zCOSMOS (COSMOS 场中红移巡天) 等, 极红天体的光谱观测波段范围会越来越宽, 谱分辨率也会越来越高, 这为极红天体光谱的统计研究提供了大量高信噪比的观测数据。

4.3 成团性

研究星系形成和结构演化的另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。Daddi 等人^[47] 利用 $R - K_s \geq 5$ mag 在 700 平方角分的天区内找到了 400 个极红天体 ($K_s \leq 18 \sim 19.2$ mag), 并计算了它们的两点相关函数, 发现极红天体的成团性很强, 比相同星等范围内的其他场星系的成团性要高 10 倍左右。2006 年, Kong 等人^[13] 利用更大视场、更深极限星等的极红天体样本, 得到了相似的结果。另外, 在两类极红天体中, OGs 具有更强的二维成团性, DGs 的成团性比 OGs 的成团性弱一点, 但仍然远高于场星系的成团性。2002 年, Daddi 等人^[48] 利用 K20 巡天的数据对 $z \approx 1$ 的极红天体样本中 OGs 和 DGs 的三维成团性进行比较。由具体的成团性数值模拟得到, DGs 的共动相关尺度 $r_0 \approx 2.5 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$, 它们的成团性较弱; 相反地, OGs 显示了很强的成团性, 它们的共动相关尺度为 $5.5 \leq r_0 (h^{-1} \cdot \text{Mpc}) \leq 16$, 这点与以前得到的 $z \approx 1$ 处大质量早型星系的角成团性吻合得很好。DGs 稍弱的成团性与大质量椭圆星系的成团性不同, 说明他们之间可能没有直接的演化关系; 但 DGs 的成团性与高红移蓝星系以及近邻亮红外星系和极亮红外星系的成团性相似, 他们之间是否存在演化关系还有待进一步研究。

通过采用 Landy 和 Szalay^[49] 的技术, Kong 等人^[15] 2009 年计算了 COSMOS 视场中 EROs、DGs 和 OGs 的两点相关函数: $w(\theta) = A \times \theta^{-\delta}$, 其中 δ 取 0.8。图 6 显示了他们计算的结果, 红色三角形和蓝色圆点分别对应的是 OGs 和 DGs, (a) 中不同颜色虚线是对测量的数据点进行最小二乘法拟合得到的, (b) 同时给出了 PCA 和 SpT 分类标准对应的 EROs、DGs 和 OGs 成团幅度 (A)。基于 Limber^[50] 公式, 以及极红天体的测光红移, 他们将 A 转换到共动相关尺度 r_0 。计算的结果表明极红天体成团幅度与以前的工作发现相一致, 而且极红天体的成团性强于相同 K 波段星等的场星系。另外, 他们也发现越暗的 K 限, 极红天体的成团幅度 A 越小; 而对于同等的 K 限, OGs 比 DGs 有更强的成团性, 即有更大的 A 和 r_0 值, 两者相差将近 2 倍因子。类似的结论在最近大视场、大样本的极红天体成团性研究工作中也被证实^[16, 17, 51]。从图 6 也可以看出不同的极红天体分类标准不会对样本中 DGs 和 OGs 成团性测量产生影响。

目前的等级成团模型虽然能够很好地解释 $z \approx 1$ 处早型星系的强成团性 (较大的 r_0 值), 却无法解释它们的高数密度和很老的年龄。最近几年的近红外观测发现, 极红天体的角相关大小与低红移大质量早型星系的差不多, 都要比场星系的平均角相关程度高出 10 倍左右。大质量、高红移、强成团等特征表明, 红移 $z \approx 1$ 的极红天体有可能是近邻大质量早型星系的前身星系。

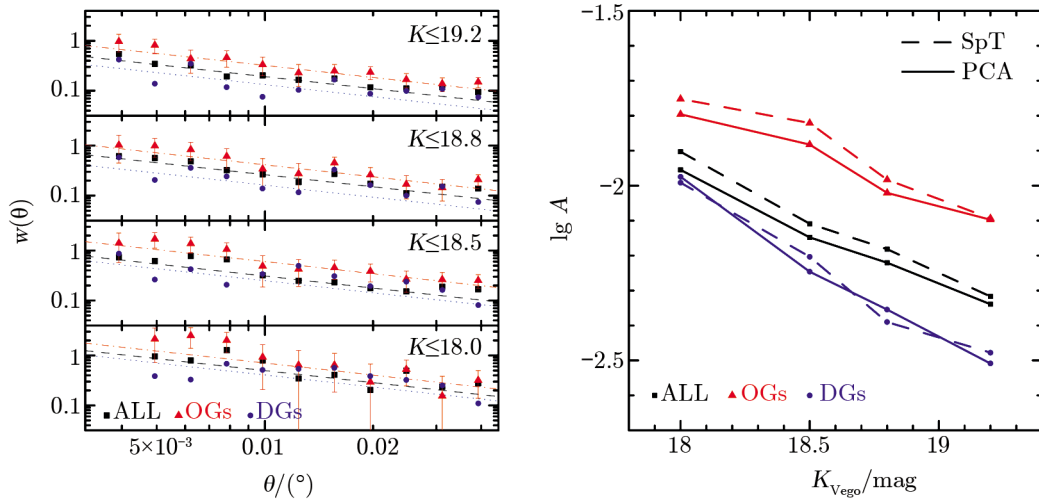


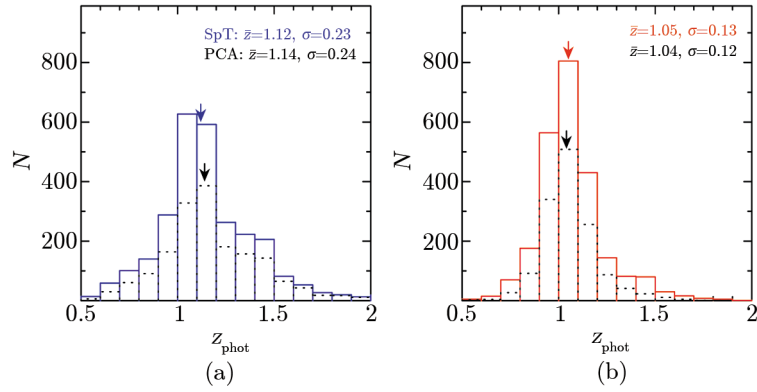
图 6 极红天体的成团性^[15]

(a) 显示的是 COSMOS 视场中不同 K 波段星等限的 EROs、DGs 和 OGS 两点角相关函数分布。其中 DGs 和 OGS 分别对应 $\text{SpT} < 6.5$ 和 $\text{SpT} > 6.5$ 的极红天体，不同颜色虚线是对测量的数据点进行最小二乘法拟合得到的。(b) 是 EROs、DGs 和 OGS 角成团幅度 A 与 K 波段星等限的关系。虚线对应极红天体的能谱拟合分类方法 (SpT)，实线代表极红天体的主成分分析方法 (PCA)。

4.4 其他物理特性

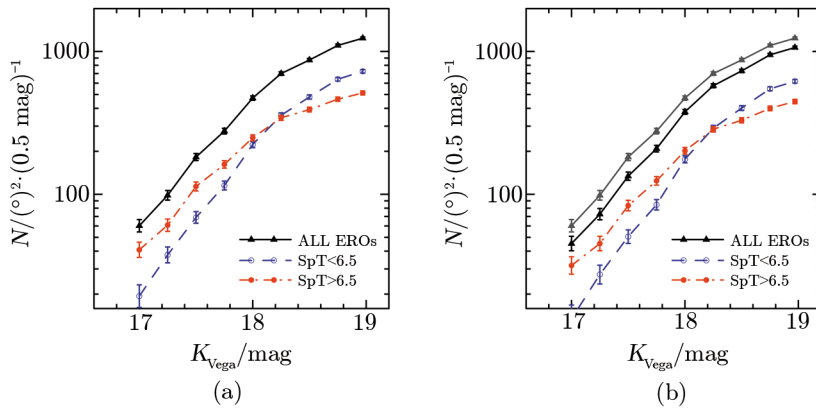
研究表明^[1]，基于光学和红外两个波段的色指数选取的极红天体，其红移主要分布在 1 附近。图 7 显示了 COSMOS 视场中极红天体的 DGs 和 OGS 红移分布^[15]，图中实线利用了能谱拟合分类方法 (SpT) 得到的 DGs 和 OGS 样本，而虚线对应的是主成分分析方法 (PCA) 给出的 DGs 和 OGS 分类结果。对于 $K \leq 19.2$ mag 的极红天体样本，DGs 红移分布中值 $z \approx 1.12$ (标准偏差 $\sigma = 0.23$)，而 OGS 则 $z \approx 1.05$ ($\sigma = 0.13$)，稍低于 DGs。相比较于 DGs，OGs 有比较窄 ($\sigma = 0.13$) 的红移分布 ($0.8 < z < 1.4$)，只有很少一部分 OGS 的红移处在 $z > 1.4$ 区域。另外，从图中也可以看出，PCA 方法和能谱拟合方法分别给出的 DGs 和 OGS 的红移分布非常相似。

星系计数是指在单位面积视场中视星等介于 m 到 $m + dm$ (dm 是星等区间大小) 之间的星系数目，常表示为 N 。比较不同视场中的星系计数，可以检验星系星等和图像零点等测量量的准确度，也可以用来确定观测图像的极限星等。鉴于红外波段，特别是 K 波段具有对尘埃消光不敏感和 k 改正较小等优点，Kong 等人^[15] 计算了 COSMOS 大视场中 EROs、DGs ($\text{SpT} < 6.5$) 和 OGS ($\text{SpT} > 6.5$) 的 K 波段星系微分计数 (图 8)。为了检验 $(i - K)_{\text{AB}}$ 颜色标准对 DGs 和 OGS 计数的影响，在图 8 (b) 中也画出了 $(i - K)_{\text{AB}} \geq 2.55$ mag 判据挑选出的极红天体计数，对应的 DGs 和 OGS 也显示在该图中，其中灰色的线来自 $(i - K)_{\text{AB}} \geq 2.45$ mag 判据挑选出的极红天体样本。从该图中可以发现，极红天体样本中 DGs 和 OGS 的相对比例依赖于 K 波段星等限。DGs 向着暗端，其星系微分计数以很陡的方式增加，即 35% 的 DGs 满足 $K \leq 17.5$ mag，39% 的 DGs 满足 $K \leq 18.0$ mag，46% 的 DGs 满足 $K \leq 18.5$ mag，52%

图 7 极红天体的红移分布^[15]

COSMOS 视场中极红天体的红移分布。(a) 和 (b) 分别对应 DGs 和 OGs, 实线代表能谱拟合分类 (SpT) 给出的 DGs 和 OGs 红移分布, 而虚线是来自主成分分析法 (PCA) 的结果。

的 DGs 满足 $K \leq 19.2$ mag。与 DGs 计数有所不同, OGs 在亮端 ($K < 18.5$ mag) 较陡, 但在暗端变平, 对应的 $K = 18.5$ mag 是 OGs 计数的拐点, 这样的物理特征在整个极红天体样本的计数中也被发现。这些结果进一步表明 OGs 有比较窄的红移分布。另外, Kong 等人也发现, $(i - K)_{AB}$ 标准越红, 选出的极红天体样本中 DGs 所占比例越大。

图 8 极红天体的星系计数^[15]

COSMOS 视场中 EROs (黑色线)、DGs (蓝色线) 和 OGs (红色线) 的 K 波段星系微分计数。(a) 采用的极红天体选取标准是 $(i - K)_{AB} \geq 2.45$ mag, 而 (b) 对应的是 $(i - K)_{AB} \geq 2.55$ mag, (b) 中的灰色线来自 (a) 中极红天体 (黑色线) 的 K 波段星系微分计数。

5 总结和展望

极红天体 (EROs) 是指利用光学和近红外两个波段的色指数 $(i - K)_{AB} > 2.45$ mag 或 $I - K > 4$ mag 挑选出来的一类星系, 也有研究者将其称为极红星系 (Extremely Red Galaxies, ERGs)。极红天体中 DGs 和 OGs 表现出几乎完全不同的物理性质。DGs 是富尘埃、有恒星形成的晚型星系, 其形态表现出盘状或不规则结构特征, 红移分布宽 ($\sigma = 0.23$), 星系光谱中有清晰的 $[O II]\lambda 3727 \text{ \AA}$ 发射线但没有强 4000 \AA 跃变。DGs 有稍弱的成团性, 这与高红移蓝星系以及近邻亮红外星系和极亮红外星系的成团性相似。相比较于 DGs, OGs 是由年老星族 (大于等于 1 Ga) 起主导作用的早型星系, 没有或有很弱的恒星形成; 星系形态呈现出椭圆状结构, 且光谱带有金属吸收线和 4000 \AA 跃变特征, 有很强的成团性 (高于 DGs 2 倍因子), 红移分布较窄 ($\sigma = 0.13$)。在静止光学波段 ($\lambda_{rest} \approx 6300 \text{ \AA}$), OGs 和 DGs 的平均大小分别为 $(2.09 \pm 1.13) \text{ kpc}$ 和 $(3.27 \pm 1.14) \text{ kpc}$; 近邻相似质量的早型星系 (晚型星系) 的平均大小是 OGs (DGs) 的 2 (1.5) 倍。这意味着 OGs 和 DGs 可能有不同的形成和演化历史。

未来对极红天体的研究工作可能主要从以下几个方面开展: (1) 全波段 (从 X 射线到射电波段) 研究极红天体的物理性质和本质, 特别是这些星系在射电、红外和 X 射线波段的物理特征。(2) 利用 CANDELS 的 5 个巡天场数据 (HST WFC3 J 和 H), 研究和分析大样本极红天体中 OGs 和 DGs 的形态和结构。(3) 利用高红移光谱巡天数据 (如 DEEP2, DEEP3, zCOSMOS 等), 统计研究极红天体样本中 OGs 和 DGs 的光谱差异。(4) 正如 Kong 等人^[15] 所发现的那样, 有些极红天体形态类似于早型星系, 但也有晚型星系的 SED 特征; 而有的星系表现出晚型星系的结构特征, 但其 SED 类似于早型星系。这些特殊的源也是今后工作要研究的对象。(5) 基于极红天体的各种物理性质 (如星系计数、恒星形成、红移分布、形态特征和成团性), 检验星系形成和演化模型 (比如纯光度演化模型和等级成团模型) 的理论预言, 从而为各种模型提供观测上的约束。(6) 利用大样本的观测数据和星系演化的理论模型, 分析极红天体与近邻宇宙中大质量星系存在怎样的演化关系。(7) 从极红天体样本中挑选致密的恒星形成星系 (基于星系的质量面密度判据), 研究这些特殊星系的形成和演化, 分析它们与非致密 DGs 和 OGs 之间的各种物理性质差异。

参考文献:

- [1] McCarthy P. ARA&A, 2004, 42: 477
- [2] Sawicki M, Stevenson M, Barrientos L F, et al. ApJ, 2005, 627: 621
- [3] Elston R, Rieke G H, Rieke M J. ApJ, 1988, 331: L77
- [4] Elston R, Rieke M J, Rieke G H. ApJ, 1989, 341: 80
- [5] Graham J R, Dey A. ApJ, 1996, 471: 720
- [6] Hu E M, Ridgway S E. AJ, 1994, 107: 1303
- [7] Dey A, Graham J R, Ivison R J, et al. ApJ, 1999, 519: 610
- [8] Thompson R I, Storrie-Lombardi L J, Weymann R J, et al. AJ, 1999, 117: 17

-
- [9] Cimatti A, Villani D, Pozzetti L, et al. MNRAS, 2000, 318: 453
- [10] Miyazaki M, Shimasaku K, Kodama T, et al. PASJ, 2003, 55: 1079
- [11] Brown M J I, Jannuzi B T, Dey A, et al. ApJ, 2005, 621: 41
- [12] Georgakakis A, Afonso J, Hopkins A M, et al. ApJ, 2005, 620: 584
- [13] Kong X, Daddi E, Arimoto N, et al. ApJ, 2006, 638: 72
- [14] Fang G W, Kong X, Wang M. RAA, 2009, 9: 59
- [15] Kong X, Fang G W, Arimoto N, et al. ApJ, 2009, 702: 1458
- [16] Kim J W, Edge A C, Wake D A, et al. MNRAS, 2011, 410: 241
- [17] Palamara D P, Brown M J I, Jannuzi B T, et al. ApJ, 2013, 764: 31
- [18] Bruzual G, Charlot S. MNRAS, 2003, 344: 1000
- [19] Wilson G, Huang J S, Pérez-González P G, et al. ApJS, 2004, 154: 107
- [20] Wilson G, Huang J S, Fazio G G, et al. ApJ, 2007, 660: L59
- [21] Davis M, Guhathakurta P, Konidaris N P, et al. ApJ, 2007, 660: L1
- [22] Yan L, Choi P I, Fadda D, et al. ApJS, 2004, 154: 75
- [23] Cimatti A, Daddi E, Mignoli M, et al. A&A, 2002, 381: L68
- [24] Kitzbichler M G, White S D M. MNRAS, 2006, 366: 858
- [25] Kitzbichler M G, White S D M. MNRAS, 2007, 376: 2
- [26] Cimatti A, Daddi E, Renzini A, et al. Nature, 2004, 430: 184
- [27] Glazebrook K, Abraham R G, McCarthy P J, et al. Nature, 2004, 430: 181
- [28] Pozzetti L, Mannucci F. MNRAS, 2000, 317: L17
- [29] Moriondo G, Cimatti A, Daddi E. A&A, 2000, 364: 26
- [30] Grogin N A, Kocevski D D, Faber S M, et al. ApJS, 2011, 197: 35
- [31] Koekemoer A M, Faber S M, Ferguson H C, et al. ApJS, 2011, 197: 36
- [32] Fang G W, Ma Z Y, Chen Y, et al. RAA, arXiv:1411.2341, 2014
- [33] Stiavelli M, Treu T. ASPC, 2001, 230: 603
- [34] Cimatti A, Daddi E, Cassata P, et al. A&A, 2003, 412: L1
- [35] Gilbank D G, Smail I, Ivison R J, et al. MNRAS, 2003, 346: 1125
- [36] Yan L, Thompson D. ApJ, 2003, 586: 765
- [37] Simpson C, Almaini O, Cirasuolo M, et al. MNRAS, 2006, 373: 21
- [38] Conselice C J, Bundy K, Vivian U, et al. MNRAS, 2008, 383: 1366
- [39] Mannucci F, Pozzetti L, Thompson D, et al. MNRAS, 2002, 329: L57
- [40] Giavalisco M, Ferguson H C, Koekemoer A M, et al. ApJ, 2004, 600: L93
- [41] Moustakas L A, Casertano S, Conselice C J, et al. ApJ, 2004, 600: L131
- [42] Bruzual G, Charlot S. ApJ, 1993, 405: 538
- [43] Salpeter E E. ApJ, 1955, 121: 161
- [44] Scalo J M. Fundam. Cosmic Phys, 1986, 11: 1
- [45] Kinney A L, Bohlin R C, Calzetti D, et al. ApJ, 1993, 86: 5
- [46] Yan L, Thompson D, Soifer B T. AJ, 2004, 127: 1274
- [47] Daddi E, Cimatti A, Pozzetti L, et al. A&A, 2000, 361: 535
- [48] Daddi E, Cimatti A, Broadhurst T, et al. A&A, 2002, 384: L1
- [49] Landy S D, Szalay A S. ApJ, 1993, 412: 64
- [50] Limber D N. ApJ, 1954, 119: 655
- [51] Kim J W, Edge A C, Wake D A, et al. MNRAS, 2014, 438: 825

Research Progress on Extremely Red Objects at $z \approx 1$

FANG Guan-wen^{1,2}, WANG Min^{2,3}, MA Zhong-yang^{2,3},
CHEN Yang^{2,3}, KONG Xu^{2,3}

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

Abstract: Extremely Red Objects (EROs) are massive galaxies ($M_* > 10^{10.5} M_\odot$) characterized by extremely red optical-to-infrared colors (e.g., $(i - K)_{\text{AB}} > 2.45$ mag or $(I - K)_{\text{Vega}} > 4$ mag) and high redshifts ($z \approx 1$). EROs are recognized to be primarily comprised of two interesting galaxy populations: Old passively evolving Galaxies (OGs) characterized by old stellar populations, and Dusty star-forming Galaxies (DGs) reddened by a large amount of dust. EROs continue to be hot, on the one hand, the research in the literature suggests that they may be the direct progenitors of present-day massive E/S0 galaxies. On the other hand, they can provide crucial constraints on the current galaxy formation and evolution models. Observations show that OGs and DGs have different physical properties and formation processes. OGs in appearance are very similar to local early-type galaxies, compared to DGs. For the morphological properties of DGs, the majority of them show disk or irregular structures, which is similar to late-type galaxies we see today. The results from literatures suggest that DGs become increasingly important at fainter magnitudes, redder colors, and higher redshifts. Compared to DGs, major spectral features of OGs include 4000 Å break, [Ca II]H,K absorption features and no emission lines in the observable wavelength range. Moreover, observations demonstrate that the clustering of EROs is much stronger than that of full K-limited samples of galaxies, the clustering amplitude of OGs is by a factor of $\simeq 2$ larger than that of DGs. For a given stellar mass, the mean size of OGs (DGs) is smaller by a factor of $\simeq 2$ (1.5) than that of present-day early-type (late-type) galaxies at rest-frame optical wavelength ($\lambda_{\text{rest}} \simeq 6300$ Å), implying that OGs and DGs have different evolutionary processes, and the minor merger scenario is the most likely mechanism for the structural properties of OGs. However, the size evolution of DGs is possibly due to the secular evolution of galaxies. Finally, we present the future study of EROs.

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