

潮汐剥离形成超致密矮星系

王凯翔^{1,†} 刘成则^{2,††}

(1 北京大学物理学院天文学系 科维理天文与天体物理研究所 北京 100871)

(2 上海交通大学物理与天文学院 李政道研究所 上海 200240)

2023-12-01 收到

† email: kaixiang.wang@pku.edu.cn

†† email: czliu@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20231206

长期以来,星系(galaxy)和星团(star cluster)被认为是性质上截然不同的两类天体。星系在暗物质晕中诞生成长,有较为复杂的恒星形成历史,是由大量恒星、气体、尘埃和暗物质等组成,通过引力束缚在一起,通常被认为是组成宇宙的基本单元。相比之下,星团形成于星系内部的巨型分子云团块,分布在星系内的各个不同区域。除了年老的球状星团(globular cluster)和年轻的疏散星团(open cluster)之外,许多星系的中心还存在一个类似球状星团的致密恒星系统,称为核星团(nuclear star cluster)。核星团的具体形成机制尚未明确,它们或形成于星系中心附近的气体云,与星系中心超大质量黑洞的引力束缚有关,或是由若干球状星团相互并合及动力摩擦下落到星系中心附近形成的。中心有核星团存在的小质量星系被称为有核矮星系(nucleated dwarf galaxy)。对邻近星系的观测发现^[1],除了一些特别暗弱的矮星系外,大多数矮星系都是有核矮星系。

通常,半径超过100秒差距(约326光年)的天体被归类为星系,而球状星团的典型半径约为3秒差距,最大的球状星团也很少超过10秒差距。因此,10—100秒差距之间成为一个“真空地带”,使得星团和星系“泾渭分明”。不过,随着近些年越来越多半径介于10—100秒差距之间的天体被发现,如超暗矮星系(ultra-faint dwarf galaxy, UFD)、超致密矮星系(ultra-compact dwarf galaxy, UCD)等,星团和星系之间原本清晰的分界线变得模糊起来。

大约2000年前后,天文学家在邻近的星系团光谱巡天观测中注意到了一些类似球状星团的天体,它们的光度和质量比球状星团大上百倍,与

矮星系相当,但半径却比矮星系小了约两个数量级。这说明这些天体内部的恒星分布极其致密,因此得名“超致密矮星系”^[2],它们占据了星团和星系中间的空白地带。

超致密矮星系的性质介于星团和星系之间,因此,自被发现以来一直存在争议,超致密矮星系到底是星团还是星系呢?一种观点认为,超致密矮星系其实就是那些最明亮的星团,并没有经历星系的形成过程。它们可能来自相互并合的球状星团,或是诞生自星系内部曾经的剧烈的恒星形成过程。另一种观点认为,一种名为“潮汐剥离”(tidal stripping)的机制可能是超致密矮星系形成的重要途径^[3]。当一个有核矮星系处于另一个大质量星系的引力场内时,大质量星系带来的强大潮汐力会不断拉扯并逐渐剥离矮星系外围的恒星。这个过程导致矮星系的主体星系结构被瓦解,变成弥散在大星系周围的星流。而中心的核星团结构致密,即使在很强的潮汐力作用下也很难被瓦解。有核矮星系外围恒星被潮汐剥离后残留下来的中心核星团就成为超致密矮星系,观测中也发现超致密矮星系与星系中心的核星团在亮度、半径、恒星成分上都比较相似。此外,还有一种观点认为,超致密矮星系也可能生来就是非常致密的一类极端星系,有很多的暗物质存在,但是至今还没有切实的观测和数值模拟结果支持这一观点。

研究某些具有特殊性质的超致密矮星系有助于解决其起源之谜。比如,天文学家在几个大质量超致密矮星系中心发现了超大质量黑洞存在的迹象^[4],此外,有些研究工作也证认出几个拥有暗弱恒星晕的超致密矮星系^[5],这些都是星系起源的有

力证据。受观测条件所限,这些工作往往只能对少数几个超致密矮星系进行研究分析。由于缺乏大样本的系统性研究,超致密矮星系的演化图景依然不够完善。有核矮星系被潮汐剥离形成超致密矮星系的过程需要至少约十亿年的时间,那么正处于剥离过程中间阶段的星系在哪里?这些处于演化中间阶段的星系是观测上长期缺失的一块拼图。

为了挖掘那些处于演化过渡阶段的天体,利用下一代室女星系团巡天(The Next Generation Virgo Cluster Survey, NGVS)的数据,我们对室女星系团内部的矮星系和超致密矮星系进行了详尽普查。NGVS数据兼具了大天区(104平方度)、高分辨率(可分辨半径约10秒差距的天体)和深度成像(g波段的面亮度极限星等低至29等每平方角秒)的特点,因此是研究超致密矮星系的理想数据^[6]。结合光度、半径、颜色等判据,我们在整个室女星系团内筛选出了约600个超致密矮星系候选体^[7]。这是迄今最大的超致密矮星系样本,也是首个星系团尺度完备的超致密矮星系样本。基于该样本,我们通过测光和后续的光谱观测,证认

出了几十个被暗弱恒星晕包围的超致密矮星系(ultra-compact dwarf galaxy with envelope, eUCD)和另外几十个有着异常明显核星团的矮星系(命名为“强核矮星系”,strongly nucleated dwarf galaxy,图1)。这些强核矮星系和超致密矮星系形态类似,都集中于M87星系这样的大星系周围(图1),并且在空间分布上高度相关,轨道信息方面偏向于近期落入星系团中心,恒星晕的颜色也比同等质量的矮星系更红。多种观测证据都支持它们在同一条演化序列上,都来自那些近期(约10亿—20亿年)被剥离的更大质量的矮星系。不仅如此,在若干强核矮星系和超致密矮星系周围还发现了一些极其暗弱的潮汐星流特征,这是正在发生潮汐剥离的直接证据。因此,这些强核矮星系很可能是从有核矮星系演化为超致密矮星系的一个中间阶段,当外围恒星逐渐被剥离,中心核会相对更加明亮且突出。至此,我们首次呈现了有核矮星系被潮汐剥离,最后形成超致密矮星系的完整演化序列,在观测上补齐了长期缺失的拼图。研究成果发表在2023年11月9日出版的*Nature*杂志上^[8]。

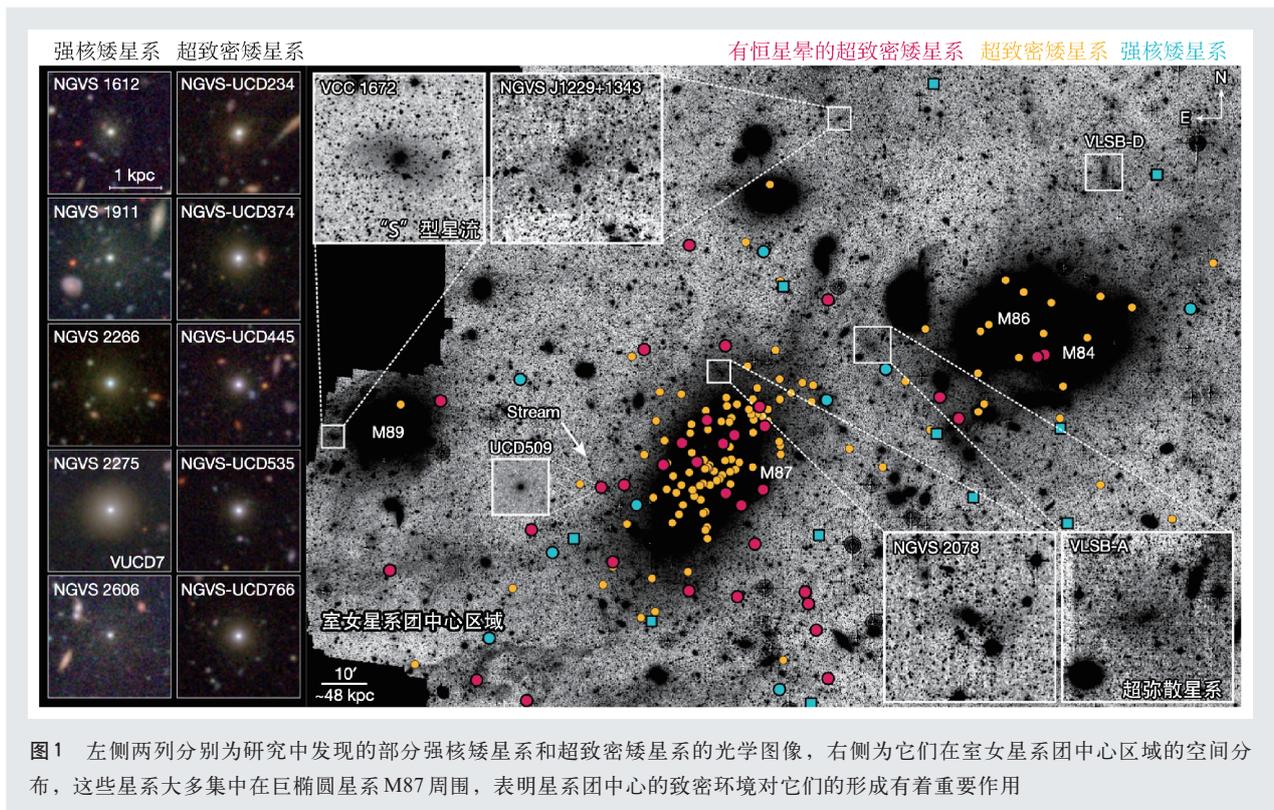


图1 左侧两列分别为研究中发现的部分强核矮星系和超致密矮星系的光学图像,右侧为它们在室女星系团中心区域的空间分布,这些星系大多集中在巨椭圆星系M87周围,表明星系团中心的致密环境对它们的形成有着重要作用

该研究还发现,一部分正在被剥离的强核矮星系的面亮度很低,可以被归为超弥散星系(ultra-diffuse galaxy)^[9]。数值模拟表明,潮汐剥离会首先剥离掉星系中的大量暗物质,然后才能有效地剥离星系的恒星成分。当大部分暗物质被剥离掉时,星系的恒星分布将变得比原先更为弥散。而当星系外围恒星被逐步剥离后,面亮度越来越低直至消失,中心的核星团就成为超致密矮星系。有核矮星系到超致密矮星系的演化

轨迹得到了进一步完善:有核矮星系→有核超弥散星系/低面亮度星系→强核矮星系→有暗弱恒星晕的超致密矮星系→超致密矮星系(图2)。该演化序列将宇宙中最弥散的星系(超弥散星系)和宇宙中最致密的星系(超致密星系)联系起来,它们都是由矮星系演化而来,只是处在不同的演化阶段。纵观超致密矮星系的演化轨迹,它是按从大到小的路径演化的,即矮星系因潮汐剥离而丢失质量,演化为质量更小的星系。然而,在标准冷暗物质宇宙学模型中,小质量星系率先形成,之后在引力作用下,小质量星系逐渐并合形成大质量星系。由此来看,超致密矮星系的演化走了一条不同寻常之路。

研究超致密矮星系的起源,也为我们研究星系团的演化打开了一扇新的窗口。超致密矮星系的空间分布和轨道信息表明,室女星系团可能在过去20亿—30亿年间经历了一次规模很大的并

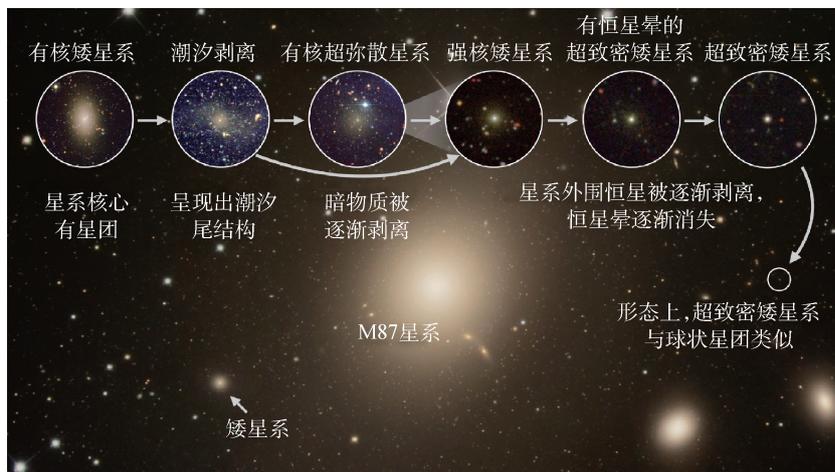


图2 有核矮星系被剥离形成超致密矮星系的演化序列,整个过程将持续约20亿—30亿年。M87星系周围的数百个超致密矮星系中,可能有相当一部分来自这种机制

合事件,有数百个星系落入到室女星系团中心星系M87附近。如今在M87周围漂浮的许多不起眼小亮点,就是那些被剥离瓦解的矮星系留下的遗迹。与此同时,被剥离掉的恒星弥散在M87周围,成为恒星晕和星系团内光的一部分。计算表明,M87的外围恒星晕中约有30%的恒星质量来自这些并合的矮星系,这对于理解巨椭圆星系的并合成长历史提供了重要参考。除了超致密矮星系以外,有一些目前被归为球状星团的天体很可能也是被剥离星系的核星团。只是受限于观测分辨率限制,很难去大规模证认。不过,在我们的银河系内就有球状星团来自被剥离的星系核的典型例子,例如银河系内最大的球状星团——半人马座 ω 星团和人马座星流中心的球状星团M54。未来,随着越来越多地面及空间大视场深度巡天观测的开展以及下一代望远镜的建成,我们将有望解开关于矮星系演化的更多奥秘。

参考文献

[1] Sánchez-Janssen R *et al.* *Astrophys. J.*, 2019, 878: 18
 [2] Drinkwater M J *et al.* *Nature*, 2003, 423: 519
 [3] Bekki K, Couch W J, Drinkwater M J *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2003, 344: 399
 [4] Seth A C *et al.* *Nature*, 2014, 513: 398

[5] Liu C *et al.* *Astrophys. J.*, 2015, 812: 34
 [6] Ferrarese L *et al.* *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 2012, 200: 4
 [7] Liu C *et al.* *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 2020, 250: 17
 [8] Wang K X *et al.* *Nature*, 2023, 623: 296
 [9] van Dokkum P G *et al.* *Astrophys. J. Lett.*, 2015, 798: L45