



超致密矮星系的潮汐剥离演化序列

王凯翔^{1,2*}, 刘成则^{3,4}

1. 北京大学物理学院天文学系, 北京 100871;

2. 北京大学科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871;

3. 上海交通大学物理与天文学院天文学系, 上海 200240;

4. 上海交通大学李政道研究所, 上海 200240

* 联系人, E-mail: kaixiang.wang@pku.edu.cn

Tidal stripping evolutionary sequence of ultra-compact dwarf galaxies

Kaixiang Wang^{1,2*} & Chengze Liu^{3,4}

¹ Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

² Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China;

³ Department of Astronomy, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

⁴ Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

* Corresponding author, E-mail: kaixiang.wang@pku.edu.cn

doi: [10.1360/TB-2023-1228](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1228)

长期以来, 星系(galaxy)和星团(star cluster)被认为是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、尘埃和暗物质等物质组成的天体系统, 往往有着庞大的结构. 星系的形态也多种多样, 包括椭圆星系、旋涡星系、不规则星系等. 多个星系通常以星系群和星系团的形式存在, 形成宇宙中大尺度结构的同时, 也互相影响着各自的演化轨迹.

相比之下, 星团的规模较小, 它们脱胎于星系内部的巨型分子云团块, 主要分为年老的球状星团(globular cluster)和年轻的疏散星团(open cluster)两类, 分布在星系内的各个不同区域. 此外, 许多星系的中心还存在一个类似球状星团的致密恒星结构, 称为核星团(nuclear star cluster). 银河系中心的超大质量黑洞就藏在一个核星团内. 核星团的具体形成机制还不太明确, 可能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, 也可能是若干球状星团相互并合及动力摩擦(dynamical friction)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). 目前对近邻星系的观测发现^[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.

过去往往以物理尺寸和亮度对星系与星团进行分类. 半径超过100秒差距(约326光年)的天体都被归类为星系. 而球状星团的半径小于10秒差距, 质量上也介于 $10^4 \sim 10^5$ 倍太阳质量之间. 10~100秒差距成为区分星团和星系的明显分界线.

不过, 随着近些年来越来越多在半径和质量上介于两者之间的天体被发现, 这一分界线变得模糊起来. 在大约2000年前后, 天文学家在邻近的星系团巡天图像中注意到了一些近似点源、类似球状星团的天体, 光谱观测确认它们是星系团内的成员. 它们的光度和质量比普通球状星团大上百倍, 与矮星系质量相当, 尺寸上却比其他正常矮星系小了约两个数量级. 换言之, 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”(ultra-compact dwarf galaxy, UCD)^[2], 它们占据了星团和星系中间的空白地带.

超致密矮星系到底是星系还是星团? 自从发现以来争议持续不断. 一种观点是, 超致密矮星系其实就是那些最亮的球状星团, 可能来自大质量的、相互并合的球状星团, 或是在星系内部曾经的剧烈恒星形成过程中诞生. 另一种观点是, 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]. 潮汐剥离发生在星系之间的引力相互作用中, 当一个矮星系处于另一个大星系的引力场内时, 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破坏, 规模逐渐缩小. 而中心的核星团结构致密, 在潮汐力作用下也能保持总体稳定. 有核矮星系被潮汐剥离后留下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.

超致密矮星系尺寸非常小, 也往往较暗. 受观测能力所

限, 早先的研究中往往只能对少数较亮的个体进行分析. 科学家在几个超致密矮星系中心发现了超大质量黑洞存在的迹象^[4], 也证认出一些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. 近些年研究表明, 许多较暗的超致密矮星系可能就是星团, 较亮的超致密矮星系则大多为星系起源. 但因为始终缺乏大样本的系统性研究, 它们在观测上的演化图景依然不够全面. 此外, 超致密矮星系也可能是生来就非常致密的一类极端星系, 有很多的暗物质存在, 但是现有的观测和数值模拟条件不足以对这个假设给出确切的回答.

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? 从有核矮星系到超致密矮星系之间的空缺, 是在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, 我们对室女星系团中的超致密矮星系进行了详尽普查. NGVS是由3.6米的加拿大-法国-夏威夷望远镜对整个室女星系团进行的深度成像, 覆盖面积达到了104平方度^[6]. 我们在整个星系团内筛选出了600多个超致密矮星系及候选体^[7], 大部分集中于星系团中心巨椭圆星系M87周围. 通过测光和后续8.1米双子望远镜的光谱观测, 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). 它们集中于M87星系这样的大星系周围, 在空间分布上高度相关, 轨道信息上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. 这些观测证据都强有力地证明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被剥离演化为超致密矮星系的一个前序阶段, 当外围恒星逐渐被剥离, 中心核会显得非常明亮而突出. 本工作首次呈现了从有核矮星系被潮汐剥离, 到最后形成超致密矮星系的完整演化序列, 表明潮汐剥离的确产生了星系形态上的连续分布, 填补了先前的空白区域^[8].

研究中还注意到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]. 超致密矮星系的潮汐剥离起源和近年来发现的若干缺失暗物质的超弥散星系的形成可能高度相关. 这是因为潮汐剥离会首先剥离掉星系中的大量暗物质, 然后才开始有效地剥离星系外围的恒星. 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. 该研究进一步完善了部分矮星系到超致密矮星系的演化轨迹为: 有核矮星系-有核超弥散星系/低面亮度星系-强核矮

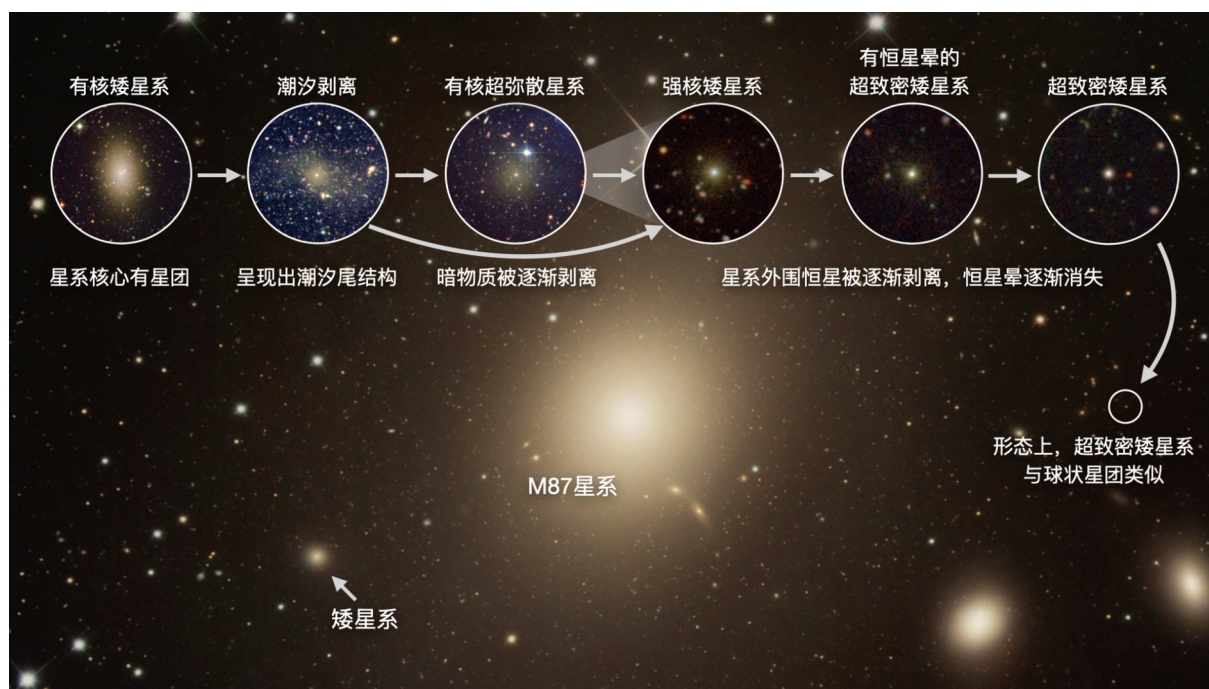


图1 (网络版彩色)有核矮星系被剥离形成超致密矮星系的演化序列, 整个过程将持续约20亿~30亿年. M87星系周围的数百个超致密矮星系中, 可能有相当一部分来自这种机制

Figure 1 (Color online) A continuum of galaxies captured at different stages of the transformation process from a dwarf galaxy to an ultra-compact dwarf galaxy (UCD). These objects are located near the supergiant elliptical galaxy M87, the dominant member of the neighboring Virgo cluster

星系-有暗弱恒星晕的超致密矮星系-超致密矮星系。一部分超弥散星系和超致密矮星系同源，只是处在不同的演化阶段。

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合事件，有数百个星系落入到室女星系团中心星系M87附近。部分矮星系外围的恒星晕在并合过程中被剥离，其中心致密的星系核演化为超致密矮星系。如今在M87周围漂浮的许多不起眼小亮点，就是那些曾经的矮星系留下的遗迹。与此同时，被剥离掉的恒星也并没有消失，而是弥散在

M87周围，成为恒星晕(stellar halo)和星系团内光(intracluster light, ICL)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，这为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，有一些球状星团很可能也是被剥离星系中心的小质量核星团，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，人们将有望解开关于矮星系演化的更多奥秘。

推荐阅读文献

- 1 Sánchez-Janssen R, Côté P, Ferrarese L, et al. The Next Generation Virgo Cluster Survey. XXIII. Fundamentals of nuclear star clusters over seven decades in galaxy mass. *Astrophys J*, 2019, 878: 18
- 2 Drinkwater M J, Gregg M D, Hilker M, et al. A class of compact dwarf galaxies from disruptive processes in galaxy clusters. *Nature*, 2003, 423: 519–521
- 3 Bekki K, Couch W J, Drinkwater M J, et al. Galaxy threshing and the origin of ultra-compact dwarf galaxies in the Fornax cluster. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2003, 344: 399–411
- 4 Seth A C, van den Bosch R, Mieske S, et al. A supermassive black hole in an ultra-compact dwarf galaxy. *Nature*, 2014, 513: 398–400
- 5 Liu C, Peng E W, Côté P, et al. The Next Generation Virgo Cluster Survey. X. Properties of ultra-compact dwarfs in the M87, M49, and M60 regions. *Astrophys J*, 2015, 812: 34
- 6 Ferrarese L, Côté P, Cuillandre J C, et al. The Next Generation Virgo Cluster Survey (NGVS). I. Introduction to the survey. *Astrophys J Suppl Ser*, 2012, 200: 4
- 7 Liu C, Côté P, Peng E W, et al. The Next Generation Virgo Cluster Survey. XXXIV. Ultracompact dwarf galaxies in the Virgo cluster. *Astrophys J Suppl Ser*, 2020, 250: 17
- 8 Wang K, Peng E W, Liu C, et al. An evolutionary continuum from nucleated dwarf galaxies to star clusters. *Nature*, 2023, 623: 296–300
- 9 van Dokkum P G, Abraham R, Merritt A, et al. Forty-seven milky way-sized, extremely diffuse galaxies in the Coma cluster. *Astrophys J*, 2015, 798: L45