第 43 卷 第 1 期
2025 年 3 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 43, No. 1
Mar., 2025

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.01.04

星系棒结构观测研究进展

王雯雯[1,2]，周志民[1]

(1. 中国科学院 国家天文台，北京100101； 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院，北京100049)

摘要： 星系棒是近邻宇宙中普遍存在的一种形态结构。星系棒与宿主星系之间存在相互作用，影响宿主星系的物理性质，驱动星系进行长期演化。首先介绍了棒对星系演化的影响，重点讨论了棒对星系中恒星形成的作用；其次分析了棒在星系中的分布，围绕棒旋星系的特性和棒随着红移的演化进行了阐述；接着讨论了对棒进行鉴别的几种主要方法；最后对棒与星系关系的研究进行了总结与展望。

关 键 词： 星系棒；星系性质；星系演化；星系形态

中图分类号： P152 **文献标识码：** A

1 引 言

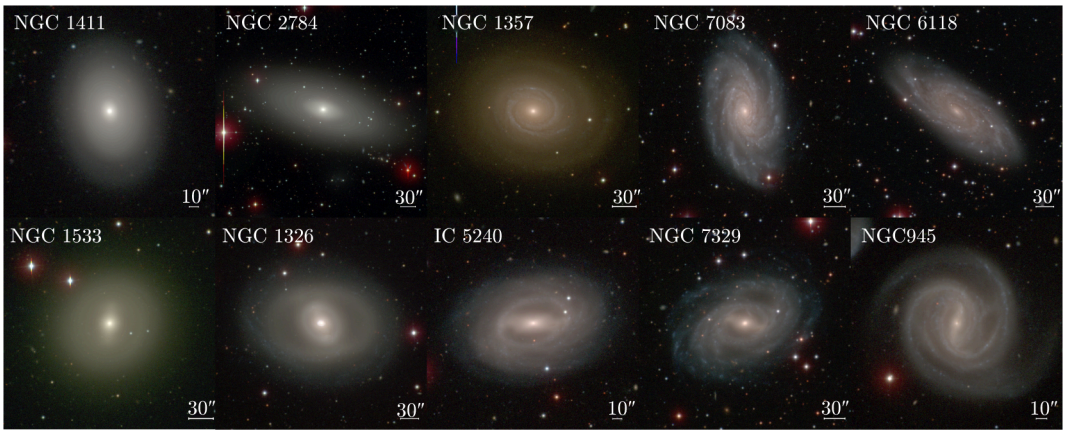
棒旋星系是近邻宇宙中常见的星系类型，像银河系一样，拥有一个明亮的由恒星组成的大尺度棒。星系棒（简称棒）是一种从星系中心延伸出来的细长结构，它是星系结构中最显著的特征之一，表征星系形态的同时，也影响着星系的演化过程。一般认为，棒可以通过星系盘本征的不稳定性等内部物理过程形成[1−3]，也可以通过星系间的相互作用、扰动、潮汐作用等外部过程形成[4−6]。许多理论研究和数值模拟表明，棒只会形成于运动学足够冷且由重子物质主导的盘星系当中[7−10]，是驱动盘星系进行长期演化的主要动力。棒一经形成，便会与气体和星系其他成分进行相互作用，这会逐渐改变棒的性质，也会对其宿主星系的演化产生影响[11]。如图 1 所示，Gao 和 Ho[12]展示了无棒星系与棒旋星系的对照图，能够看到棒旋星系与无棒星系在形态上有很大的区别，棒是一个很显著的星系结构。

近年来，随着天文技术和观测设备的发展，人们对星系棒结构的观测研究越来越细致。研究结果表明，作为驱动星系演化的重要内部因素，棒结构可以影响和改变星系盘上的气体和恒星的角动量，促使盘上的物质和能量重新分配，从而影响星系的物理性质，并改变星系的形态特征。在观测上，这些影响则体现在棒与星系的物理活动和特征的相关性（如恒星形

收稿日期： 2024-03-28； **修回日期：** 2024-04-13

资助项目： 国家自然科学基金 (12073035, 11890693)；国家重点研发计划 (2022YFA1602902)

通讯作者： 周志民，zmzhou@nao.cas.cn；王雯雯，wangww@bao.ac.cn



注：有棒与无棒星系示意图，包括上排的 5 个无棒星系和下排的 5 个棒旋星系。它们的形态类型为 S0 到 Scd。

图 1　无棒星系和棒旋星系图例[12]

成、核球、环结构、金属丰度分布、星系核的活动性等），以及棒在星系中的分布、棒随着红移的演化等方面。因此，系统了解这些研究进展有助于我们理解棒与星系的形成演化过程，本文将对以上研究成果进行简要介绍。

目前人们对棒的研究结果仍有很大的不确定性，有关棒的很多理论仍然没有被实测证实，甚至很多基本问题都尚无定论。这些差异和分歧的产生原因主要有两点：一方面是棒本身的形成演化机制以及星系演化的物理过程非常复杂；另一方面则来源于各研究使用的样本、数据以及对棒的鉴别和测量的方法不同。目前研究中对棒的鉴别和测量主要是基于一维或二维数据进行定性或定量的分析，而不同的方法侧重点和优缺点各有不同，也直接影响研究结果的准确性。因此，我们也将对棒的主要鉴别方法进行介绍。

本文将重点从棒对星系的影响和棒在星系中的分布两个方面进行叙述，并介绍对棒进行鉴别的主要方法。本文的结构如下：第 2 章介绍棒对星系的影响，其中以棒对宿主星系恒星形成的影响为主要论述点；第 3 章主要介绍棒在星系中的分布特性，包括棒旋星系的主要性质，以及棒随着红移的演化；第 4 章列举并讨论了对棒进行鉴别的几种主流方法；第 5 章对全文进行总结，并展望了未来的研究方向。

2　棒对星系恒星形成的影响

盘星系中的棒是近邻宇宙中星系演化的重要内部驱动因素[13]，而恒星形成是星系演化中非常关键的物理过程之一，因此两者之间必然存在直接或间接的关联。然而，近年来在对棒的研究中，棒对宿主星系恒星形成的影响还有较大争议。尽管许多研究已经证实了棒对星系中的恒星形成活动有重要的影响，但其中具体的物理过程还不够清晰。人们对此主要有两种观点：(1) 棒对星系（中心区域）恒星形成有促进或增强作用；(2) 棒会抑制星系（整体

或盘）的恒星形成活动并使其淬灭 (quenching)。这截然相反的结论的产生，除了选择的样本数据、研究环境、研究方法有所不同，主要原因还在于棒及星系复杂的演化机制和物理过程。本章主要介绍棒对星系中恒星形成作用的两种观点，并对其观测证据进行归纳总结。

2.1 促进恒星形成

2.1.1 早期研究

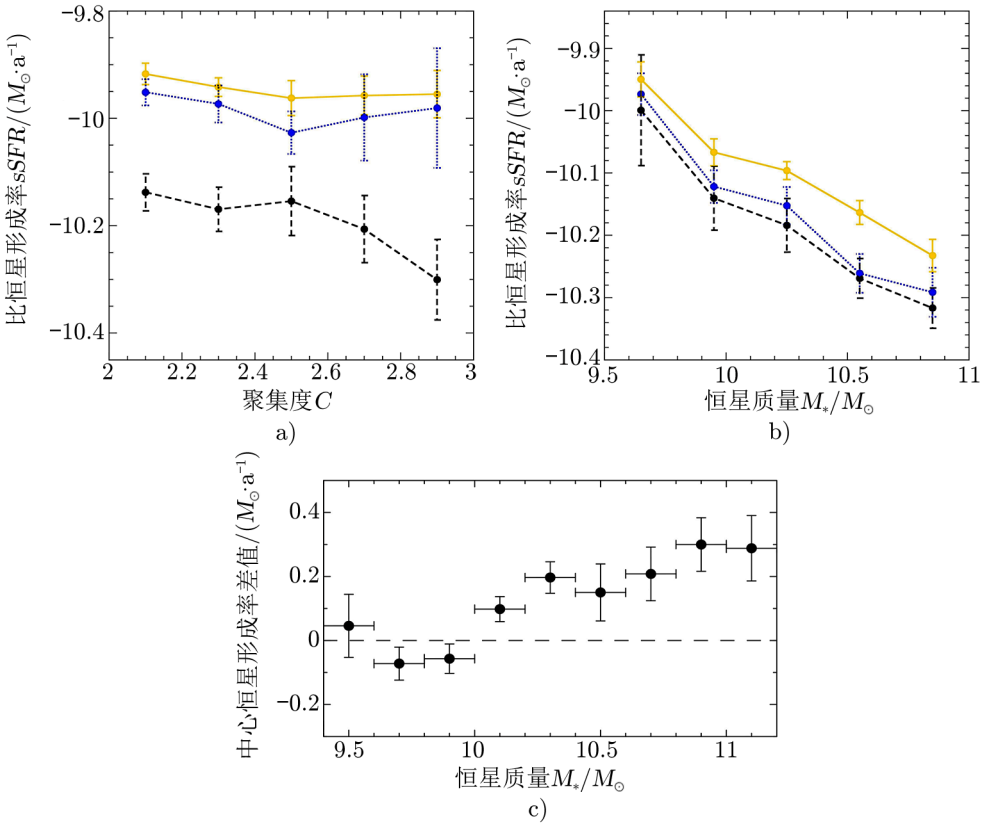
20 世纪末，天文学家开始研究棒对星系恒星形成的影响，但由于观测手段受限，观测技术和数据处理技术尚不成熟，大多局限于小样本的简单研究。1980 年，Heckman[14] 利用一个包含几十个近邻星系的样本，通过对星系类型进行简单的区分和光谱观测，发现有棒的盘星系比无棒的盘星系中心更有可能存在恒星形成活动。Hawarden 等人[15] 同样利用小样本，发现样本中超过 1/3 的有棒星系在 25 μm 波段处存在辐射增强现象，而这可能来自于棒诱导的星系中心恒星形成的增强。这些研究以现在的眼光来看，普遍性和精确度都不够，但是在研究条件受限的年代，该研究结果也能为研究者们点亮一盏明灯。

之后很多研究人员开始利用更多的观测手段和波段研究棒对恒星形成的影响。Roussel 等人[16] 研究了 69 个近邻旋涡星系中棒与中红外辐射的关系，他们认为观测到的 15 μm 发射线过盛很可能是由棒的动力学效应引发的中心星暴所导致。Knapen 等人[17] 利用 B、I 宽波段以及 Hα 窄波段观测，研究了 73 个近邻棒旋星系，分析证实了中心区域环主要存在于有棒星系中，一定程度上说明棒可以促进中心区域环的形成。Allard 等人[18] 支持了 Knapen 等人的结论，他对棒旋星系 M100 的棒和中心区域的恒星形成历史进行了研究，证实了 M100 中心区域是由盘中的气体在棒的作用下流入，形成大量的大质量恒星，从而证实了中心区域环可以在棒的影响下形成。Ho 等人[19] 利用光谱比较了有棒与无棒星系中心 HII 区和 AGN 的探测率和探测强度，证实了早型星系中的棒能够提高星系的恒星形成率。Huang 等人[20] 进行了更细致的研究，使用了多个详细的恒星形成指标。他们利用两个相对恒星形成率指标 $L_{\rm FIR}/L_{\rm B}$ 和 IRAS 颜色指数 S_{25}/S_{12}，分析了 3 个星系样本，证实强棒星系的比恒星形成率 (specific star-formation rate, sSFR) 的平均值显著高于无棒星系，而这种现象在红外波段中更为显著。并且，这一现象仅限于早型星系 (S0/a−Sbc)，在晚型星系 (Sc−Sdm) 中并不明显，在弱棒星系中则没有发现 sSFR 的增强现象。

2.1.2 最新进展

随着天文观测手段和数据分析技术的不断提高，研究者们获得了越来越多的观测数据以及提高了对大样本数据进行研究的能力，因此对棒上恒星形成进行的大样本研究成果也逐渐涌现出来。Coelho 和 Gadotti[21] 计算了 575 个盘星系样本的恒星年龄，发现大约 43% 的样本星系包含棒；他们还得到有棒星系核球的平均恒星年龄低于无棒星系的结论，这有力地支持了棒在星系中心引发恒星形成活动这一模型。Ellison 等人[22] 对比了具有大尺度棒的星系与无棒星系的恒星质量、恒星形成率和化学丰度。他们发现大质量的棒旋星系的中心恒星形成率比相同质量的无棒星系高 60%，而小质量的棒旋星系的中心恒星形成率没有增加。如图 2c) 所示，星系中心的恒星形成率差值在小质量端很小，甚至是负值；而在大质量端，是较大的正值。Wang 等人[23] 进一步指出星系中心恒星形成的增强与否主要取决于棒的

椭率，不取决于棒的大小或宿主星系的质量或结构，并且椭率大于 0.5 的强棒会致使星系中心恒星形成增强。Kim 等人[24]将星系质量和红移分布相似的有棒星系与无棒星系的物理性质进行了比较，分别用 g-r 颜色、NUV-r 颜色和中红外颜色表征恒星形成活动。他们发现强棒星系的恒星形成活动平均低于无棒星系，然而，弱棒星系却并没有表现出这样的差异。他们认为有棒星系的恒星形成活动在过去是增强的，但大量的气体消耗导致当前的恒星形成活动低于或接近于无棒星系，其中过去恒星形成的增强程度则取决于棒的强度。



注：a) 和 b) 为无棒星系（黄）、弱棒星系（蓝）和强棒星系（黑）中的比恒星形成率分别随着聚集度和恒星质量的变化曲线；c) 表示在给定的中心恒星质量下，有棒星系与无棒星系中星系中心恒星形成率之间的差值。

图 2 棒影响恒星形成的研究[22, 25]

随着积分视场光谱仪 (IFU) 的普及以及大量巡天观测的进行，IFU 数据也逐渐被应用到星系棒的研究中。Lin 等人[26]分析了大约 1 400 个低红移近邻晚型星系的二维光谱，鉴别出 121 个中心正在进行或近期有恒星形成的星系，这些星系中 (89±3)% 是有棒星系，其中心恒星形成活动可能被增强了一个数量级，且区域大小与棒长紧密相关。Chown 等人[27]研究了 58 个近邻星系的空间分辨恒星形成历史和分子气体分布。他们将星系样本分为 17 个有棒星系、24 个无棒星系和 17 个并合星系，发现中心恒星形成增强的星系只有有棒星系和并合星系，且他们的分子气体密度相对较高。他们的发现为冷气体通过棒或潮汐相互作用向

内输送，从而导致中心区域恒星形成的增长和年轻化这一理论提供了实质性的证据。

2.1.3 创新方法

还有一些不同于常规的研究，通过一些间接而巧妙的办法来探究棒旋星系中的恒星形成。如 Fraser-McKelvie 等人[28]对棒旋星系的结构进行了分解，区分了棒中心、棒两端，以及棒中心与两端之间的脊形区域，分别测量了其中的恒星形成效率，发现恒星形成往往沿棒发生，并且这种恒星形成一般发生在星系棒的前缘，这与气体被压缩，然后被激波引发恒星形成的设想一致。同时，他们[31]对星系样本进行光谱拟合的结果显示，有棒星系的恒星形成历史比无棒星系平均提前 1.7 Ga 就达到峰值，也就间接地证明了有棒星系的恒星形成率要高于无棒星系。此外，研究者发现恒星形成效率在棒中心和棒两端往往较高，棒上脊形区域的恒星形成则被系统性地抑制[29]。还有的学者则研究了特定环境下的棒对宿主星系恒星形成的影响。Yoon 和 Im[30]研究了 SDSS 的 105 个低红移星系团中的星系，目的是研究相互作用星系团中恒星形成星系比例与棒之间的可能联系。他们发现，在相互作用星系团中恒星形成星系比例的增加主要是由于有棒星系数目的增加，该结果表明相互作用星系团中星系的恒星形成与星系中的棒有关。

除了实际的天文观测结果，数值模拟也为棒对宿主星系恒星形成的影响提供证据。Renaud 等人[32]做了一个类银河系的流体力学模拟，他们发现棒的末端物质运动速度较慢，导致轨道拥挤，从而增加了分子云碰撞的概率，使恒星形成效率增强，其方式类似于星系之间的相互作用。Carles 等人[33] 对比了有棒与无棒的旋涡星系中的恒星形成历史，他们发现恒星形成往往会因棒的存在而显著增强。质量相同的有棒星系比无棒星系中心的恒星形成率更强，以致于质量最大的有棒星系会经历一个星暴，在中心 1 kpc 区域的恒星形成率相对于相同质量的无棒星系增加了 30 倍。

2.2 抑制恒星形成

在大质量盘星系中，恒星形成率的快速和持续下降被称为“恒星形成淬灭”，这一过程也经常被认为与棒的存在有关。一系列研究结果发现：一方面棒能够通过迅速消耗气体，导致后续气体不足引起星系恒星形成淬灭；另一方面，棒引起的大尺度剪切能够使能量转移到湍流，从而稳定气体盘，使气体速度弥散过大，不易坍缩形成恒星，从而抑制恒星形成，导致恒星形成淬灭[34]。研究发现，棒周围区域内缺乏恒星形成似乎是强棒盘星系的相当普遍的性质[35]。

2.2.1 强有力的证据

一些关于恒星形成淬灭的研究得到了明确且有力的结论。Kruk 等人[36]对棒旋星系进行了多波段二维光度分解。通过将这些星系与无棒星系进行比较，他们发现与无棒星系的盘相比，有棒星系的盘显著偏红，这表明棒与星系盘中恒星形成的淬灭有关；另外，他们还发现棒旋星系中心区域的核球和棒比盘更红，这与恒星形成从内到外停止 (inside-out) 的观测一致。因此，棒要么对恒星形成淬灭有影响，要么驱动棒形成的过程会导致恒星形成淬灭。Cheung 等人[13] 研究了盘星系中棒与比恒星形成率的关系。他们发现，无论恒星质量或核球占比如何，星系存在棒的可能性都与比恒星形成率呈反相关。Vera 等人[25]发现，相对于

弱棒星系和无棒星系，强棒星系具有更低的恒星形成活动效率和更老的星族，由图 2a) 和 b) 可以看到，不论是随着聚集度（C，即R_{90}/R_{50}，表示星系亮度分布的集中程度）还是恒星质量变化，sSFR 都在无棒星系中更高。James 和 Percival[37] 对 4 个强棒星系中心区域的恒星星族进行了研究，他们发现这 4 个强棒星系的中心和外环都表现出了较强的恒星形成活动，而棒上的恒星形成则被强烈抑制。他们[38] 于 2018 年又分析了 21 个棒旋星系的光谱数据，他们的分析集中在“恒星形成沙漠”区域（即恒星形成活动几乎完全被抑制的区域），证实了星系恒星形成率在被强棒扫出的盘区会被强烈抑制。

2.2.2 间接证据

其他一些研究虽然没能提供强而有力的证据，但在一定程度上也能够支持棒使恒星形成淬灭的结论。Gavazzi 等人[39] 发现强棒星系的比例随着星系质量的增加而急剧增加，这表明强棒可能导致了 sSFR 的下降。他们还结合数值模拟的结果提出，强棒对在大质量旋涡星系内部观测到的恒星形成淬灭有显著的贡献，然而在大质量旋涡星系的外部区域可能是由其他机制主导。Masters 等人[40] 发现了偏红的旋涡星系含棒的比例显著高于偏蓝的旋涡星系（分别为 70% 和 27%），这表明棒的不稳定性或许与旋涡星系中恒星形成的淬灭有关。George 和 Subramanian[41] 将有恒星形成淬灭的星系分为中心淬灭星系和全局淬灭星系，发现棒长与恒星形成率之间可能存在相关性。Masters 等人[42] 研究了盘星系的原子气体含量与容纳大尺度棒的可能性之间的关联，发现棒可能通过阻止棒共转区域外气体的流入，减少或阻止了盘外部区域的恒星形成，使盘外部区域的整体颜色变红。Emsellem 等人[35] 进行了一个类银河系的模拟，结果表明，恒星沿着被棒拉长的轨道运动时会在星际介质中引起剪切运动，而在气体含量较高的区域，剪切运动会对棒内恒星形成产生抑制作用。Géron 等人[43] 将星系分为息产星系 (quenching galaxy) 和恒星形成星系 (star-forming galaxy)，他们发现息产星系的强棒占比通常高于恒星形成星系，弱棒的占比则相似。此外，他们还发现强棒推动了恒星形成星系中的淬灭过程，这些星系中的局部恒星形成率比无棒星系更高。

2.2.3 模拟研究

数值模拟中也有支持棒抑制恒星形成的结论出现。Smethurst 等人[44] 使用了一个简单的贝叶斯方法来模拟星系的恒星形成历史，他们对指数下降的恒星形成淬灭模型进行了贝叶斯分析，发现棒的比例增加与恒星形成淬灭平均时间的增加一致，这也许表明棒对星系内部恒星形成的淬灭负有一定的责任。Khoperskov 等人[34] 定量地对富气体盘星系进行了模拟，他们的模拟包括恒星形成、恒星反馈和星际介质。他们发现棒有效地淬灭了恒星形成，在小于 1 Ga 的时间内，恒星形成率降低至 1/10。在他们的模拟中，棒增加了星系共转半径内气体的随机运动，使恒星形成效率迅速下降。并且，在所有模型中，棒都淬灭了星系中的恒星形成。模拟中的有棒星系与无棒星系相比，恒星形成效率要低得多，而且棒形成得更快，这能使恒星形成更快淬灭。Gavazzi 等人[39] 提出了一个模拟棒形成过程的数值模型，发现在场星系的中心几 kpc 处强棒可以快速淬灭恒星形成。Spinoso 等人[45] 模拟了一个类银河系星系，他们的模拟环境包括辐射冷却、恒星形成、超新星反馈和一个中心大质量黑洞。随着棒不断增长达到最大长度和强度，落入的气体几乎全部消耗到恒星的形成中，并在较小的程度上积聚到中心黑洞，在中心小范围内留下一个气体耗尽区。这表明棒驱动的恒星形成淬灭可

能在所有由盘主导的星系中都起着重要的作用。

2.3 分歧来源

正如前文提到的，人们关于棒对恒星形成的这两种不同的看法，一方面可能来自于研究选择的样本数据、研究环境、研究方法的不同，前者倾向于星系中心区域的恒星形成活动，而后者则着眼于星系整体的恒星形成；另一方面棒及星系复杂的演化机制和物理过程也是这一分歧产生的主要原因，星系和棒结构所处的不同演化过程和演化阶段也必将有不同的特征和影响。

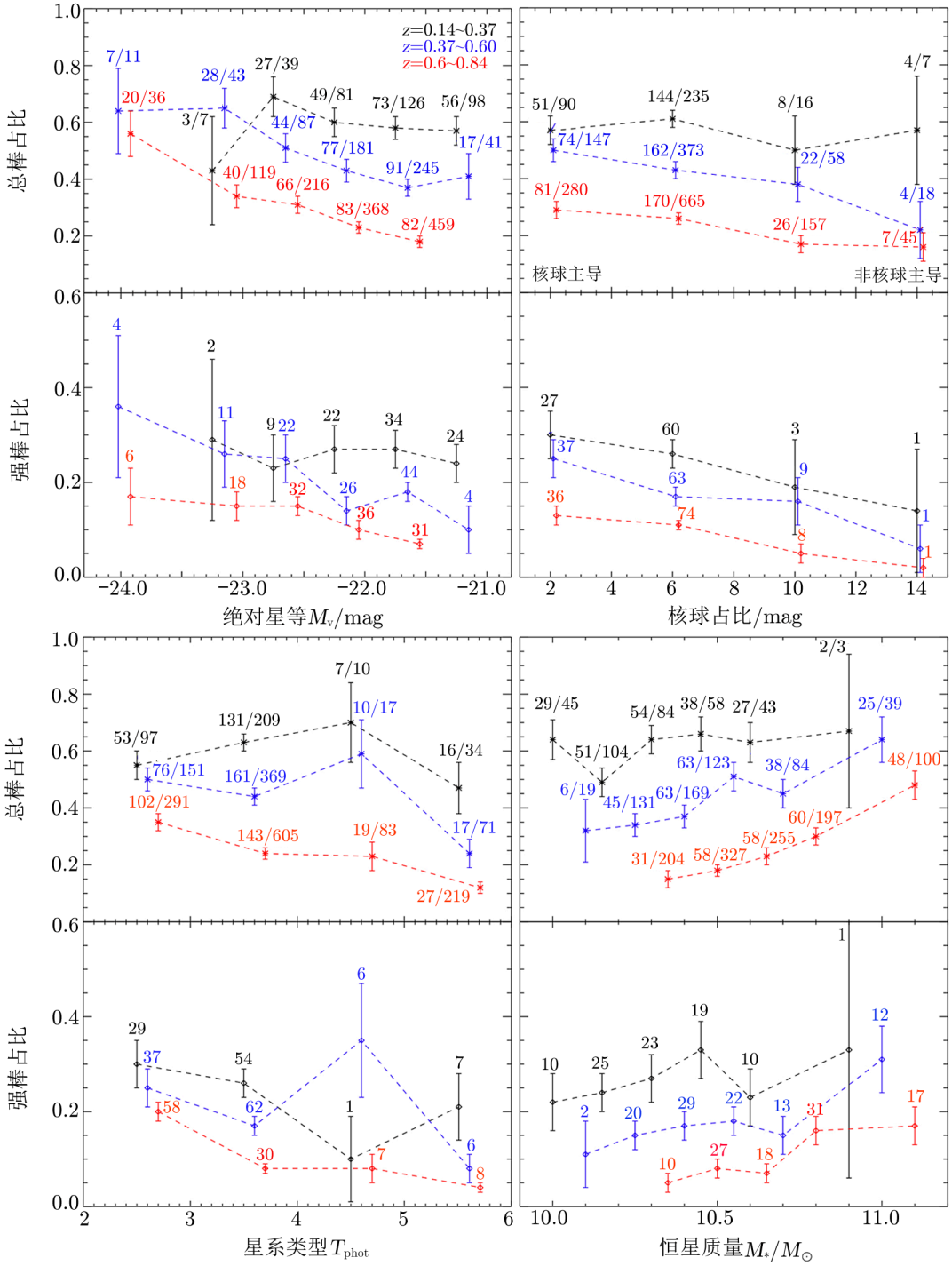
关于棒与盘的演化机制大多是基于观测数据的猜测或模拟研究，Jogee 等人[46]提出，宇宙早期强棒的大量存在意味着可以形成大尺度棒的动力学冷盘在红移为 1 时就已经形成，而大尺度棒可以存在很长时间，平均在 2 Ga 以上。然而，El-Zant 和 Shlosman[47]提出，中心集中的暗物质晕会破坏棒的稳定性；如此一来，棒在星系中的演化就具有很强的不确定性。Kim 等人[24]的研究结果支持该理论，有棒星系的恒星形成活动在过去是增强的，但明显的气体消耗导致当前的恒星形成活动低于或接近于无棒星系。也就是说，在星系演化的不同阶段，棒对于星系恒星形成的作用很可能不同。棒极有可能在星系演化的早期促进恒星形成，导致大量的气体消耗，而在气体消耗殆尽后，反过来又抑制了恒星形成。从前文提到的研究中也不难发现，棒大多促进星系中心的恒星形成，而抑制盘上的恒星形成。诸如此类的棒与盘之间演化的不同步以及受到的影响的不一致性还有很多，这些机制共同作用，导致了研究结果的一步步分化。

3 棒在星系中的分布

观测表明，大约 2/3 的近邻旋涡星系是有棒的[40, 48–50]，其中约 1/3 拥有强棒[46, 51, 52]。这说明，棒在近邻星系中普遍存在。那么棒在星系中的分布是否有迹可循？为什么有的星系有棒，有的星系没有棒？棒在高红移宇宙中的分布又是怎么样的呢？本章将对这些问题的研究进展进行介绍。

3.1 棒旋星系的特性

棒与宿主星系是相互作用的，星系既然能够孕育棒，棒必然也能够对星系产生影响。在理论研究中，棒对宿主星系的作用主要是源于棒在引力势中引入了一个非轴对称的分量，引导了大尺度的气体流动和角动量的转移，从而影响着宿主星系的运动学和化学演化[49, 53, 54]。有棒存在的星系，其大小、质量、年龄、金属丰度、气体含量等[13, 22, 42, 55, 56]都应与没有棒的星系有所不同，而不同棒旋星系中的棒也不尽相同。正如图 3 所示，棒在不同红移和不同性质的星系中有清楚分明的分布特征，棒占比在所有红移区间中都随着恒星质量的增大而增大，在大多数红移区间中随着核球主导程度和星系亮度的减小而减小。在最高的红移区间，棒在越晚的星系中存在的比例越低；然而在较小红移处，棒占比并不是单调地变化。除此之外，最近的研究表明，棒还可以在黑洞的反馈中起到至关重要的作用，特别是在拥有巨大恒星盘的星系中[57]，暗物质晕和星系的恒星盘中棒不稳定性的形成和棒的演化也有着相



注：在三个红移区间（黑、蓝、红）中总棒占比和强棒占比（纵坐标）随着星系绝对星等、核球占比（星系总星等与核球星等的差值，越大说明核球占比越低）、星系类型和恒星质量（横坐标）的变化关系。

图 3 棒在不同红移和不同性质的星系中的分布[49]

互作用[58]。许多结果表明，棒的性质与其宿主星系的内禀性质有很强的相关性，而不依赖于外部环境[59]。因此，棒所在星系的性质，就是研究棒在星系中分布的关键。下面将主要阐述棒与星系的几个重要特性之间的相关性。

3.1.1 星族

一个星系最显著的特性当属它所包含的恒星星族，其具有的性质有恒星的颜色、年龄、金属丰度等。纵览对于棒旋星系星族的研究可以发现，似乎大多数研究都支持棒存在于更红的星系中，但相反的结论也时有出现。观测表明，棒主要由较老的恒星星族组成[60, 61]。Fraser-McKelvie 等人[28]发现，在恒星质量和星系形态不变的情况下，有棒星系比无棒星系更红、更老、更富金属，他们认为这是由于有棒星系具有更老的和更富金属的恒星星族。Vera 等人[25]将棒旋星系分类并进行了量化研究，他们发现与弱棒星系和无棒星系相比，强棒星系具有更老更红的星族。Hoyle 等人[56]在棒的分布之外，还研究了棒长的分布。他们在棒长数据中发现了一个颜色双峰分布，即更长的棒位于更红的盘星系中，而棒本身也更红，最蓝的星系则拥有最小的星系棒；他们还发现，棒和盘的颜色有明显的相关性，平均来说，在棒较小的星系中，盘比棒的颜色要红，而在棒较长的星系中则反之。Wang 等人[23] 发现，棒长主要取决于星系的颜色，这与许多模拟的结果一致。Masters 等人[40]研究了低红移亮星系的棒占比，并且将样本按照颜色、光度以及核球占比分类。他们发现红的盘星系具有更高比例的棒（高达 50%）。Aguerri 等人[59] 则得出看似相反的结论，他们发现星系是否存在棒与星系的聚集度和颜色之间存在显著的联系，棒大多位于聚集度较低和较蓝的星系中。

3.1.2 金属丰度

棒旋星系中金属丰度的研究结果比星族更一致，几乎都是支持有棒星系的金属丰度更高。Vera 等人[25] 的研究也发现了有棒星系有更高的金属丰度。Ellison 等人[22] 比较了大尺度强棒星系与无棒星系的金属丰度，发现在小质量、低红移的情况下，有棒星系的中心局部金属丰度比无棒星系更高。Friedli 和 Benz[55]对棒旋星系的恒星形成进行了数值模拟，发现由棒引导的气体流动使棒上和中心的恒星形成增强，而这种增强的恒星形成活动增加了中心区域气体的金属丰度。

3.1.3 星系形态

棒旋星系的形态具体指早型星系和晚型星系中星系棒的分布特点。总体而言，关于棒在不同形态星系中分布特性的研究结果并不统一，不论是棒的占比还是棒长、棒强的分布，都存在持平的不同意见。Menéndez-Delmestre 等人[62]在近邻旋涡星系的近红外图像中测量了棒占比，并研究了棒占比与棒长和棒强度的关系，他们发现棒的强度与长度之间似乎存在微弱的相关性。而可以肯定的是，早型旋涡星系中的棒比晚型星系中的长。Aguerri 等人[59]研究了星系形态、大小、中心聚集度和颜色等信息与星系中的棒占比、棒长度和棒强度的关系。他们发现，晚型星系的棒相对更长，透镜星系的棒则更弱。Whyte 等人[48]的结论与之类似，而 Martin[63]发现早型星系的棒更强。Erwin[64]研究了 65 个近邻早型星系和 Martin (1995) 发布的 70 个近邻晚型星系的棒的大小，发现早型星系中的棒比晚型星系中的大，且不论采取何种方法测量棒的大小，结论都保持不变。平均而言，早型星系的棒比晚型星系的

棒大 2.5 倍。Giordano 等人[65]详细地研究了 Virgo 星系团中的棒占比如何随着光度、HI 气体质量、星系形态和颜色变化。他们发现棒占比对星系形态的依赖性最强，早型盘星系中的棒占比更高。他们给出的解释是早型星系的盘更重，因此更容易受到棒的不稳定性的影响，且环境效应可能会破坏晚型星系的旋涡结构，但会留下早型星系的螺旋结构。Lee 等人[52]发现，在晚型星系中，强棒的数量约是弱棒的 3.5 倍。

3.1.4 星系光度和质量

Masters 等人[40]发现，在颜色不变的情况下，棒占比随光度略微减小。Cheung 等人[13]的样本中棒占比大约为 1/4，大约一半的棒有棒长测量，他们发现棒的长度与星系的恒星质量相关。Marinova 等人[51] 研究了 Abell 901/2 超星系团中的 800 个低红移亮星系样本，他们发现，随着星系光度和恒星质量的增加，棒占比也在增加。但是，Barazza等人[66]研究了 SDSS 的 3 692 个低红移亮星系中的大尺度棒，给出了与之相反的结论，即棒占比随着星系光度和质量的增加而降低。Lee 等人[52] 发现样本中的强棒占比随着颜色的变红而增加，并且在中等速度弥散处达到最大，该现象表明强棒主要存在于中等质量系统中；而弱棒则更倾向存在于质量较小、较为不集中的蓝星系中。另外，还有对棒旋星系中恒星形成主序关系的研究。Willett 等人[67] 发现，不论是有棒星系还是无棒星系，恒星质量-恒星形成率关系的斜率和离散度都是恒定的，即恒星形成率与恒星质量的关系似乎不受棒存在的影响。

星系中的质量除了恒星，也包括暗物质，故而也有关于星系中暗物质晕对棒影响的研究。Skibba 等人研究了 SDSS 中的 15 810 个低红移星系，他们发现，当星系具有更红的颜色和更大的质量时，盘星系中出现棒或核球的可能性会增加；他们对此做出解释：超过一半的棒可以解释为更多的大质量暗物质晕容纳了更红的盘星系，从而更有可能存在棒。他们认为有棒星系处于比无棒星系略高的质量晕中，其中大概 1/4 是成群的卫星星系[68]。

3.1.5 星系气体

棒旋星系中原子气体的研究也有很多。Masters 等人[42] 研究了 2 090 个盘星系中观测到的原子气体含量，发现富气体盘星系的棒占比明显低于贫气体盘星系，即棒在贫气体星系中更为常见。他们对这种现象给出了三种可能的解释：(1) 盘星系中的棒导致原子气体被更快地消耗；(2) 盘星系中原子气体含量的增加抑制了棒的形成；(3) 棒占比和气体含量都是被同一外部环境因素所影响。Kim 等人[24]也发现强棒星系中原子和分子气体比无棒星系少，而气体的金属性则比无棒星系高。

3.1.6 其他特征

除上述提到的特性之外，棒旋星系还有许多其他性质，在此进行简要的列举。一般而言，更大的星系会容纳更大的棒，棒的长度和强度与星系的局部密度无关[59]。前文提到的研究也得出一些次要的结论，例如棒的长度与星系的 Sérsic 指数和中心恒星面密度都相关[13]，具有核球的星系比没有核球的星系可能拥有更长的棒[56]，核球较大的盘星系具有更高比例的棒[40]。Kruk 等人[36]对强棒星系进行了多波段 2D 光度分解，观测到盘比棒和核球更蓝，并且发现棒可能导致了伪核球的形成，继而影响其宿主星系的演化。Martel 等人[69]对盘星系进行了一系列的化学动力学模拟，他们发现，在盘星系中心区域观测到的化

学演化主要依赖于星系棒的主导程度，而星系棒的主导程度随着时间发生演化。López 等人[70]基于 TNG50 宇宙学模拟的数据发现，在棒形成之前，有棒星系内部区域的恒星与暗物质质量的比例更高，且具有较高的初始气体含量，这促进了恒星形成速率的增加，并导致中心恒星质量随时间的增长快于无棒星系；另外，他们还发现有棒星系具有更高的从盘到晕的角动量转移。

3.2 棒随着红移的演化

迄今为止的观测数据也在近邻宇宙中发现了 30%∼70% 的棒占比[40, 52, 71]，在较高红移中的值则略低[49, 72, 73]。这说明棒在星系中的比例在宇宙的不同时期发生了变化，即棒随着红移有明显的演化。

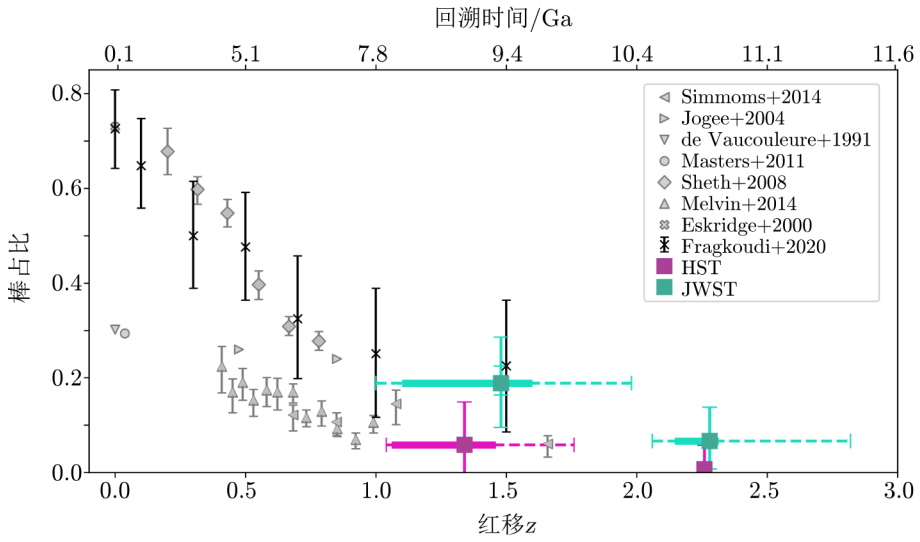
3.2.1 近年来的研究成果

最早关于棒随红移演化的研究是基于早型星系和晚型星系的数值模拟。Combes 和 Elmegreen[74]使用 N 体数值模拟方法研究了早型星系和晚型星系中的棒和气体。模拟表明，在小质量的晚型星系中，棒在早期停止生长；在大质量的早型星系中，棒则持续生长。

在 JWST 问世之前，星系棒随红移演化的观测研究主要基于 HST 数据的分析给出（如图 4 所示）。Sheth 等人[49] 利用 HST 数据分析了 2 157 个红移为 0.2∼0.84 的亮旋涡星系中棒的比例随红移的变化。他们发现，样本星系的棒占比随着红移的增加而迅速下降。在本地宇宙中，约 65% 的亮旋涡星系中存在棒，而在红移为 0.84 处这一比例下降到约 20%，其中强棒的比例从 30% 左右下降到 10% 以下。在大质量和红盘星系中，棒占比基本不随红移发生变化；而对于小质量的蓝星系，在红移大于 0.3 处，棒占比随着红移增加而显著下降。也就是说，大部分观测到的演化都发生在质量较小的蓝盘星系中。Melvin 等人[75]测量了 HST 中发现的 2 380 个经 Galaxy Zoo 分类的盘星系样本中棒占比随红移的演化。他们发现，整体棒占比下降了 1/2，从红移为 0.4 时的 (22±5)% 下降到红移为 1 时的 (11±2)%。他们的结果也证实，在红移为 1 时大质量盘星系的演化开始受到长期内部演化影响。Simmons 等人[73]利用 Galaxy Zoo:CANDELS 项目中 HST 图像的分类，研究了横跨红移范围为 0.5∼2 的棒占比的演化。他们发现，在红移小于 1 时，棒占比与先前的研究一致；而在红移为 1∼2 时，棒占比稳定在 10% 左右，没有显著的演化，这与宇宙学模拟的预测在定性上一致。

3.2.2 最新进展

转折点发生在 JWST 的问世，它使我们能够看到宇宙中更远的天体，从而研究更高红移处、更早宇宙的性质。最近许多学者利用 JWST 在 8∼11 Ga 的回溯发现了几个高红移星系棒[76–79]，Costantin 等人[80]甚至在红移为 3 处发现了一个类似银河系的棒旋星系，Conte 等人[81]则在 $z \geqslant 1$ 处发现了比早期 HST 结果高 3∼4 倍的棒占比。由于 JWST 尚未应用太久，许多研究仍在进行当中，现在已经确定的结果并不多，但相信日后会有更多关于高红移星系棒以及棒在更高红移处演化的研究。



注：利用 HST 进行的棒统计工作中盘星系的棒占比随红移的演化。

图 4 棒占比随红移的演化[81]

4 棒的鉴别方法

如前文所述，研究星系棒的一个基本前提就是对棒进行鉴别，目前主流的鉴别方法包括但不限于目视分类[83]、机器学习[84]、傅里叶分析[85]以及等照度线拟合[86]。在以往的研究中，早型旋涡星系中的高棒占比主要通过目视分类法或傅里叶分析法得到[13, 49, 59, 87]，而与之相反的结果则主要通过等照度线拟合法得到[59, 66]。Ghosh 和 Di Matteo[88] 使用了几种常用的研究方法测量了模拟棒的长度和强度，发现使用不同方法测量的棒长和强度有显著的区别，使用傅里叶分析法测量的棒长明显小于等照度线拟合法。因此，在对星系棒的研究中采用合适的方法对研究结果至关重要。Menéndez-Delmestre 等人对棒的长度和强度进行了从紫外波段到红外波段的研究，他们发现，不同波段测量出的棒长和强度有显著的差异，在某些波段甚至观测不到棒[89]。所以，在对棒进行鉴别时，选择合适的波段也十分重要，在棒的研究中最重要的波段当属红外波段，本章也将对红外数据[90] 的重要性进行简要介绍。

4.1 目视分类

目视分类法，顾名思义就是用眼睛观察星系的形态特征并进行分类，是一种完全依赖于主观判断的方法。这是星系形态分类中最简单直观，也是历史最悠久的分类方法。在 20 世纪天文学尚未兴起的年代，天文观测技术和计算机技术都不成熟，天文学家们自然而然地通过望远镜或是相机拍摄的星系照片对可见的近邻星系进行简单的分类，继而研究星系的形态分类与星系其他特征的联系。

目前广为人知的由目视分类法得到的星表有 RC3[91]和 Ann 15[92]。RC3 将 23 000 多个大于 1′、B 波段星等亮于 15.5 mag 且红移小于 0.05 的星系进行了目视分类；Ann15 对

Petrosian 半径处的星等亮于 17.77 mag 且红移小于 0.01 的 5 836 个星系进行了目视分类。Ann15 分类系统遵循了 RC3 的分类方法，两者将旋涡星系划分为 SA、SB 以及 SAB。RC3 将 1 274 个星系分类为 24% 的 SA、28% 的 SAB 和 48% 的 SB，以鉴别它们是否拥有棒；Ann15 在 1 163 个盘星系中发现了 361 个强棒和 365 个弱棒。

随着科技的进步与互联网的发展，进行大样本目视分类成为可能，尽管许多自动分类方法不断涌现，但鉴于大多数分类方法仍存在缺陷，且目视分类法仍有着不可取代的种种优势，Galaxy Zoo 这样的公民科学项目便应运而生。Galaxy Zoo2（简称 GZ2），即 Galaxy Zoo 的第二期项目，是基于斯隆数字巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) 的数据开展的一个公民科学项目，包含 304 122 个星系的 1 600 多个形态分类。在目前大数据时代，天文观测获得的大量图像，使得对每个星系进行详细的目视检查对于单个乃至几个天文学家来说都不切实际。GZ2 使用来自参与者的分类来鉴别大规模的星系形态，基于参与者的鉴别，并对个体参与者的准确性进行加权，推导出一个星系包含特定特征的概率。GZ2 将星系确定为早型、晚型或并合星系，以及更精细的形态特征，包括棒、核球和盘的形状和强度等。GZ2 分类中绝大多数的结果与专业天文学家的分类一致，尤其是强棒和旋臂的弯曲程度等[83]。

前文中的很多研究都基于 Galaxy Zoo 的成果而开展，这证明了 Galaxy Zoo 的价值和成功。Galaxy Zoo 让大规模参与者填写类流程图的判断题来对星系的形态进行鉴别分类，弥补了其受主观影响的不足，增强了普遍性和准确性。Galaxy Zoo 对星系的分类也包含星系的有棒与无棒、棒的强弱等其他信息，对星系棒的鉴别来说，也是一种可靠且具有重要意义的研究方法。

4.2 等照度线分析

等照度线分析法常常用于测量星系的面亮度轮廓[46, 66, 93, 94]。鉴于大多数星系的等照度线，特别是早型系统，如椭圆星系和透镜星系，他们的形态非常接近椭圆，故而我们可以根据 Jedrzejewski[95] 的迭代方法，用一组椭圆来拟合星系的等照度线，继而得到星系的面亮度轮廓。不同种类的星系以及星系的不同结构具有完全不同的面亮度轮廓曲线，Sérsic 早在 1963 年就提出了一种具有多个参数的指数函数的形式，并用以解释不同类型星系的面亮度轮廓。经过一代又一代人的总结，其中的参数 n 一般可以代表不同的星系结构，$n = 1$ 代表盘，也被称为指数盘，$n \geqslant 2$ 则一般表示核球或椭圆星系。

等照度线拟合出的椭圆不仅包含面亮度，还携带着椭率、方位角、椭圆中心坐标等十分有用的信息。星系中存在诸多大大小小、形状各异的结构，因此在星系不同位置拟合出的椭圆也相差很大，由此我们可以依靠拟合椭圆的变化来区分星系中存在的不同结构，这一方法非常适用于对星系的棒结构进行鉴别。

椭圆等照度线拟合的原理大致是：先设定好椭圆的初始参数等数据，也可以设定为自由参数；然后使椭圆沿着星系的半长轴以既定的步长采样，将每个椭圆的半径增加；在到达最外层椭圆后，拟合方向发生反转，向星系中心移动，椭圆半径不断减小。

对星系棒的鉴别标准常常是椭率和位置角的变化量以及椭率的大小。Wozniak 等人[96]的研究表明，棒的特征是椭率增大和位置角不变。Jogee 等人[46]给出更精确的鉴别棒的标准：(1) 棒的椭率必须大于等于 0.25，而沿着棒的位置角变化量必须在 $\pm 20^\circ$ 的范围内保持相对恒定；(2) 在棒与圆盘区域之间的过渡区，椭率的减小量大于等于 0.1，位置角的变化量需大于等于 10°。这种棒鉴别方法是由 4 个参数来定义的：棒的椭率阈值，棒区域上的位置角变化范围，棒与圆盘之间转变时椭率和位置的变化阈值。棒的椭率能够将棒与星系的椭圆结构区分开，相对恒定的位置角能够将棒与旋臂区分开。棒的椭率还可以用作星系棒强度的评判标准，椭圆的半长轴也能够在一定程度上反应棒的长度，除此之外的其他数据在进行下一步的处理后，也能得到星系的更深层次信息。图 5 所示为 Marinova 和 Jogee[97]分别对棒旋星系和无棒的椭圆星系进行的等照度线拟合示意图，从中可以看到有棒星系和无棒星系在等照度线拟合中展现出明显不同的特征，据此能够很好地对星系棒进行鉴别。

等照度线分析法受鉴别标准的影响较大，且这种方法要求拟合使用的星系图像具有较小的倾角，最好是面向观测者，才能够得到更准确的结果。因此，使用等照度线分析法时，需要对数据集进行筛选并谨慎采用研究标准。现今实施等照度线拟合的方式主要有两个，分别是 IRAF 中的 ellipse 包和 python 中的 photutils.isophote 包，使用时可按需要设置多个几何参数，例如拟合椭圆的初始坐标、初始椭率、初始位置角、步长等。拟合完成后会自动给出每一步的误差，方便快捷。两种方式各有优劣，在使用时需要根据不同的研究需求进行选择。

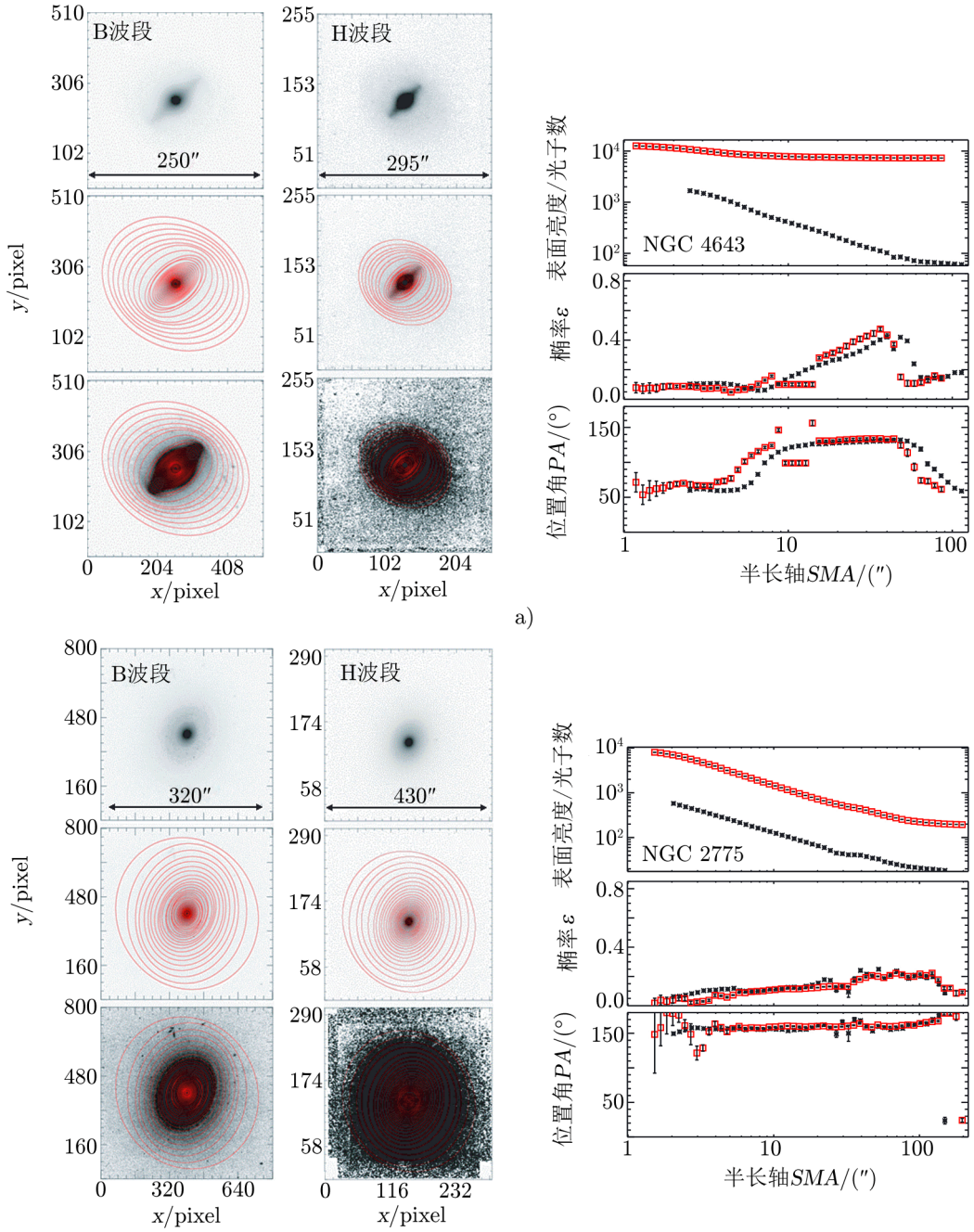
4.3 傅里叶分析

傅里叶分析是一种自动分类棒的方法，直接利用傅里叶系数来对图像进行分析[98, 99]。具体的方法是使用去投影的图像，利用傅里叶变换来分析沿同心椭圆的角向光度轮廓。傅里叶分析方法可以直接又简便地得到棒的强度和长度。使用二维快速傅里叶变换来量化不同阶的傅里叶矩的振幅，可以得到棒的强度。棒的长度也可以通过二阶傅里叶矩的变化来确定。

为了对棒进行鉴别，一部分研究[98, 99]使用的指标是棒强度与棒间强度的比值，其中棒强度定义为偶数傅里叶分量之和，即 $I_0 + I_2 + I_4 + I_6$，棒间强度则是 $I_0 - I_2 + I_4 - I_6$。而另一些研究[59, 100]使用的则是第 m 个分量的相对傅里叶振幅。通常情况下，棒所在区域内的偶数项，特别是 $m = 2$ 的偶数项要远大于奇数项。然而，其他非轴对称结构如旋臂也可以产生同样的效果。所以，一些研究还会附加一项条件，即由傅里叶系数的比值定义的相位保持不变，来区分棒和旋臂。傅里叶分析方法通常不会单独使用，通常与目视分类法和等照度线分析法共同使用，对研究结果进行弥补或比对。

4.4 机器学习

机器学习是一种使计算机自动学习数据的规律和模式，从而进行预测和决策的方法，即可以使其自动纠错，不断提高准确性。如此高效便捷的方法被越来越普遍地使用，渗透进各行各业，为大量的研究带来了非常多的便利。虽然机器学习存在一定的缺陷，例如需要大样本的数据进行训练，其中的内部机理不明等，但不可否认机器学习的优势是其他方法不可



注：黑色点为 B 波段数据，红色点为 H 波段数据。a) 显示出清晰的棒特征：椭率 (ε) 平稳上升到最大值 0.5，而位置角 (PA) 基本保持不变，然后 ε 下降到 0.1，PA 也在棒与圆盘区域的过渡处发生变化；b) 是一个明显的椭圆星系，没有显示出任何棒或旋臂的特征：在整个星系中，ε 保持在 0.25 以下，PA 也没有明显的变化。

图 5　等照度线拟合示意图[97]

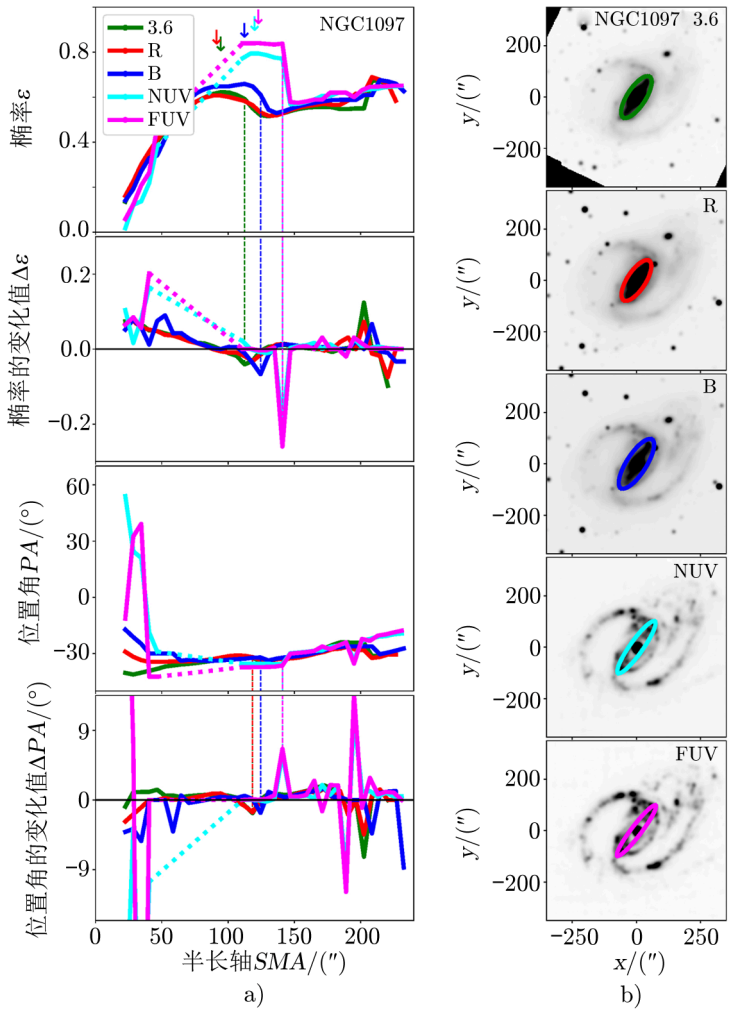
替代的，在各种研究上的应用是大势所趋。尤其是在天文学这样极其依赖于大数据分析的行业，显得必不可少。使用机器学习对星系形态进行分类，以及与本文相关的，对棒进行鉴别，是最为高效的一种方法，而其准确性也会随着探测数据的增多而不断提高。

Cheng 等人[84]比较了几种有监督的机器学习方法在星系形态自动分类上的应用，并对其有效性进行了研究。他们利用 Dark Energy Survey (DES) 的数据，结合 Galaxy Zoo 的分类结果，对 10 种常见的有监督的星系分类机器学习方法进行了比较，其中包括卷积神经网络 (CNN)、K 最近邻算法、逻辑回归、支持向量机、随机森林和神经网络，并确定了最优的机器学习方法。研究结果表明，CNN 是其中最成功的方法，并且对椭圆星系和旋涡星系的形态分类达到 0.99 的精度。他们进一步发现，小概率的旋涡星系或椭圆星系是 S0 星系，证明了有监督的学习能够发现这类星系既不同于椭圆星系又不同于旋涡星系。并且他们还证实了大于 2.5% 的星系被 GZ1 错误地分类；校正了这些星系的形态后，CNN 的精度提高到平均 0.99。

在棒的研究中，红外波段的数据占据相当重要的地位。虽然很大一部分红外波段需要穿越大气层到太空中进行观测，大大增加了探测难度，但红外数据仍具有不可替代的优势。例如，红外波段能够穿透宇宙尘埃，观测被尘埃遮挡的天体，如星云、行星和恒星形成区域等；红外波段还有许多重要的分子谱线，使天文学家能够研究天体中的分子成分；天体的热辐射也有很大一部分集中在红外波段。此外，由于棒在不同波段会表现出不同的性质，红外波段的棒自然会有其特点。在图 6 所示的研究中可以看到，棒在 3.6 μm，即红外波段，表现出最小的椭率和半长轴，这主要是由于红外波段受到的星族成分和消光的影响与其他波段不同导致的。可想而知，红外波段必然能够揭示很多其他波段得不到的重要信息，在红外波段对星系棒进行分类是具有重大研究价值的。例如，Buta 等人[90]采用了 S4G 巡天的数据，即 Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies，目前可用的最大星系深场中红外图像数据库，对星系进行形态分类。S4G 巡天包括 2 352 个近邻星系。他们利用 Comprehensive de Vaucouleurs Revised Hubble-Sandage(CVRHS) 系统的形态学分类，对中红外的 2 300 多个近邻星系进行详细分类。CVRHS 系统遵循经典的 de Vaucouleurs 形态学分类，调整后还能够鉴别其他特征，如透镜、环、棒、盘、球状星系、盒状/花生状结构等。他们发现，中红外 S0/a－Sc 星系中的棒通常与 Scd－Sm 星系中的棒具有不同的特征。较早型的星系显示出具有 3D 盒状/花生状/X 形图案、环脊或“棒透镜”等特征的棒，而晚型旋涡星系中的棒往往是很细的沿着恒星形成区域的线性形状。这种棒特征的二分性在很久以前就已经被认识到，并且这种区分对于估计宇宙学意义上的棒占比很重要。

5 总结与展望

星系棒是近邻宇宙中一种普遍存在的形态结构，它由恒星、气体和尘埃组成，驱动着宿主星系的动力学和化学演化。然而，棒如何演化的问题仍未解决，棒如何影响星系的演化也尚无定论，近年来对于棒的研究便是集中于以上两个问题。棒影响着宿主星系的各种特



注：a) 是 NGC 1097 在 3.6 μm、R、B、NUV 和 FUV，即从红外到紫外 5 个波段的椭率和位置角的径向轮廓，以及它们在不同半长轴处的变化；b) 是 NGC 1097 在这 5 个波段的图像叠加了最大椭率的等照度线。

图 6　不同波段中的棒[89]

性，如星系的恒星形成、大小、质量、形态、颜色、年龄等，宿主星系也反过来制约着棒的生长。此外，棒似乎并不是一个永远存在的结构，在宇宙的不同时期，棒存在着强烈的演化。除了以上对于棒的物理性质的研究，对其研究方法也在不断发展。棒的鉴别方法已经有了很多年的发展更迭，现如今大概有几种主流的研究方法，可根据研究需求和研究条件，如波段、效率、准确度等，选择不同的方法进行实际应用。棒的演化研究大多是理论猜测和模拟计算，而棒对星系的影响研究则更多是实际的观测和对理论的验证。

随着观测手段的进步和更先进望远镜的诞生，棒的观测数据呈指数级增加，越来越多的巡天项目，如 SDSS、DESI、HST 等，也为棒相关的统计研究提供了坚实的基础。然而受

限于观测精度，绝大多数的观测研究也只能集中于低红移，但随着最近 JWST 的观测，更高红移的棒接连被发现，在更高红移处的星系性质也能被学者们所分辨。在未来几年，下一代空间和地面观测设备（如 CSST、EUCLID、LSST、WFIRST 等）将相继建成并开展大规模图像巡天，这也将为星系棒的搜寻和研究带来新的机遇。高红移处的棒和星系的性质想必会在今后的研究中占据重要地位，也必然会获得突破性的成果。

参考文献：

[1] Athanassoula E, Sellwood J A. MNRAS, 1986, 221(2): 213
[2] Kwak S, Kim W T, Rey S C, et al. ApJ, 2017, 839(1): 24
[3] Zana T, Dotti M, Capelo P R, et al. MNRAS, 2018, 473(2): 2608
[4] Miwa T, Noguchi M. ApJ, 1998, 499(1): 149
[5] Berentzen I, Athanassoula E, Heller C H, et al. MNRAS, 2004, 347(1): 220
[6] Łokas E L, Athanassoula E, Debattista V P, et al. MNRAS, 2014, 445(2): 1339
[7] Athanassoula E, Misiriotis A. MNRAS, 2002, 330: 35
[8] Fragkoudi F, Grand R J J, Pakmor R, et al. A&A, 2021, 650: L16
[9] Bland-Hawthorn J, Tepper-Garcia T, Agertz O, et al. ApJ, 2023, 947: 80
[10] Rosas-Guevara Y, Bonoli S, Dotti M, et al. MNRAS, 2022, 512(4): 5339
[11] Sellwood J A. Rev. Mod. Phys, 2014, 86(1): 1
[12] Gao H, Ho L C. ApJ, 2017, 845(2): 114
[13] Cheung E, Athanassoula E, Masters K L, et al. ApJ, 2013, 779(2): 162
[14] Heckman T M. A&A, 1980, 88: 365
[15] Hawarden T G, Mountain C M, Leggett S K, et al. MNRAS, 1986, 221(1): 41P
[16] Roussel H, Sauvage M, Vigroux L, et al. A&A, 2001, 372(2): 406
[17] Knapen J H, Mazzuca L M, Böker T, et al. A&A, 2006, 448: 489
[18] Allard E L, Knapen J H, Peletier R F, et al. MNRAS, 2006, 371: 1087
[19] Ho L C, Filippenko A V, Sargent W L W. ApJ, 1997, 487(2): 591
[20] Huang J H, Gu Q S, Su H J, et al. A&A, 1996, 313: 13
[21] Coelho P, Gadotti D A. ApJL, 2011, 743(1): L13
[22] Ellison S L, Nair P, Patton D R, et al. MNRAS, 2011, 416: 2182
[23] Wang J, Kauffmann G, Overzier R, et al. MNRAS, 2012, 423: 3486
[24] Kim E, Hwang H S, Chung H, et al. ApJ, 2017, 845(2): 93
[25] Vera M, Alonso S, Coldwell G. A&A, 2016, 595: A63
[26] Lin L, Li C, Du C, et al. MNRAS, 2020, 499(1): 1406
[27] Chown R, Li C, Athanassoula E, et al. MNRAS, 2019, 484(4): 5192
[28] Fraser-McKelvie A, Aragón-Salamanca A, Merrifield M, et al. MNRAS, 2020, 495(4): 4158
[29] Maeda F, Egusa F, Ohta K, et al. ApJ, 2023, 943(1): 7
[30] Yoon Y, Im M. ApJ, 2020, 893(2): 117
[31] Fraser-McKelvie A, Merrifield M, Aragón-Salamanca A, et al. MNRAS, 2020, 499(1): 1116
[32] Renaud F, Bournaud F, Emsellem E, et al. MNRAS, 2015, 454: 3299
[33] Carles C, Martel H, Ellison S L, et al. MNRAS, 2016, 463: 1074
[34] Khoperskov S, Haywood M, Di Matteo P, et al. A&A, 2018, 609: A60
[35] Emsellem E, Renaud F, Bournaud F, et al. MNRAS, 2015, 446: 2468
[36] Kruk S J, Lintott C J, Bamford S P, et al. MNRAS, 2018, 473(4): 4731
[37] James P A, Percival S M. MNRAS, 2016, 457(1): 917

[38] James P A, Percival S M. MNRAS, 2018, 474(3): 3101
[39] Gavazzi G, Consolandi G, Dotti M, et al. A&A, 2015, 580: A116
[40] Masters K L, Nichol R C, Hoyle B, et al. MNRAS, 2011, 411(3): 2026
[41] George K, Subramanian S. A&A, 2021, 651: A107
[42] Masters K L, Nichol R C, Haynes M P, et al. MNRAS, 2012, 424: 2180
[43] Géron T, Smethurst R J, Lintott C, et al. MNRAS, 2021, 507(3): 4389
[44] Smethurst R J, Lintott C J, Simmons B D, et al. MNRAS, 2015, 450(1): 435
[45] Spinoso D, Bonoli S, Dotti M, et al. MNRAS, 2017, 465(3): 3729
[46] Jogee S, Barazza F D, Rix H W, et al. ApJ, 2004, 615(2): L105
[47] El-Zant A, Shlosman I. ApJ, 2002, 577(2): 626
[48] Whyte L F, Abraham R G, Merrifield M R, et al. MNRAS, 2002, 336: 1281
[49] Sheth K, Elmegreen D M, Elmegreen B G, et al. ApJ, 2008, 675: 1141
[50] Erwin P. MNRAS, 2018, 474: 5372
[51] Marinova I, Jogee S, Heiderman A, et al. ApJ, 2009, 698(2): 1639
[52] Lee G H, Park C, Lee M G, et al. ApJ, 2012, 745(2): 125
[53] Athanassoula E. MNRAS, 2003, 341: 1179
[54] Grand R J J, Kawata D, Cropper M. MNRAS, 2015, 447: 4018
[55] Friedli D, Benz W. A&A, 1995, 301: 649
[56] Hoyle B, Masters K L, Nichol R C, et al. MNRAS, 2011, 415(4): 3627
[57] Kataria S K, Vivek M. MNRAS, 2024, 527: 3366
[58] Ansar S, Das M. ApJ, 2024, 975: 243
[59] Aguerri J A L, Mendez-Abreu J, Corsini E M. A&A, 2009, 495(2): 491
[60] Sánchez-Blázquez P, Ocvirk P, Gibson B K, et al. MNRAS, 2011, 415: 709
[61] de Sá-Freitas C, Fragkoudi F, Gadotti D A, et al. A&A, 2023, 671: A8
[62] Menendez-Delmestre K, Sheth K, Schinnerer E, et al. ApJ, 2007, 657(2): 790
[63] Martin P. AJ, 1995, 109: 2428
[64] Erwin P. MNRAS, 2005, 364(1): 283
[65] Giordano L, Tran K V H, Moore B, et al. arXiv: 1002.3167, 2010
[66] Barazza F D, Jogee S, Marinova I. ApJ, 2008, 675(2): 1194
[67] Willett K W, Schawinski K, Simmons B D, et al. MNRAS, 2015, 449: 820
[68] Skibba R A, Masters K L, Nichol R C, et al. MNRAS, 2012, 423(2): 1485
[69] Martel H, Kawata D, Ellison S L. MNRAS, 2013, 431(3): 2560
[70] López P D, Scannapieco C, Cora S A, et al. MNRAS, 2024, 529(2): 979
[71] Knapen J H, Shlosman I, Peletier R F. ApJ, 2000, 529: 93
[72] Elmegreen B G, Elmegreen D M, Hirst A C. ApJ, 2004, 612(1): 191
[73] Simmons B D, Melvin T, Lintott C, et al. MNRAS, 2014, 445: 3466
[74] Combes F, Elmegreen B G. A&A, 1993, 271: 391
[75] Melvin T, Masters K, Lintott C, et al. MNRAS, 2014, 438: 2882
[76] Chen C C, Gao Z K, Hsu Q N, et al. ApJ, 2022, 939: L7
[77] Ferreira L, Conselice C J, Sazonova E, et al. ApJ, 2022, 955: 94
[78] Guo Y, Jogee S, Finkelstein S L, et al. ApJ, 2023, 945: L10
[79] Jacobs C, Glazebrook K, CalabròA, et al. ApJ, 2023, 948: L13
[80] Costantin L, Pérez-González P G, Guo Y, et al. Nature, 2023, 623(7987):499
[81] Le Conte Z A, Gadotti D A, Ferreira L, et al. MNRAS, 2024, 530: 1984
[82] Liang X, Yu S Y, Fang T, et al. A&A, 2024, 688: A158
[83] Willett K W, Lintott C J, Bamford S P, et al. MNRAS, 2013, 435(4): 2835
[84] Cheng T Y, Conselice C J, Aragón-Salamanca A, et al. MNRAS, 2020, 493(3): 4209
[85] Lee Y H, Ann H B, Park M G. ApJ, 2019, 872(1): 97
[86] Li Z Y, Ho L C, Barth A J, et al. ApJS, 2011, 197(2): 22

[87] Laurikainen E, Salo H, Buta R, et al. ApJ, 2009, 692(1): L34
[88] Ghosh S, Di Matteo P. A&A, 2024, 683: A100
[89] Menéndez-Delmestre K, Gonçalves T S, Sheth K, et al. MNRAS, 2024, 527(4): 11777
[90] Buta R J, Sheth K, Athanassoula E, et al. ApJS, 2015, 217(2): 32
[91] de Vaucouleurs G, de Vaucouleurs A, Corwin HG Jr, et al. Sky and Telescope, 1991, 82: 621
[92] Ann H B, Seo M, Ha D K. ApJS, 2015, 217: 27
[93] Silva D R, Elston R. ApJ, 1994, 428: 511
[94] Laine S, Shlosman I, Knapen J H, et al. ApJ, 2002, 567: 97
[95] Jedrzejewski R I. MNRAS, 1987, 226(4): 747
[96] Wozniak H, Friedli D, Martinet L, et al. A&AS, 1995, 111: 115
[97] Marinova I, Jogee S. ApJ, 2007, 659: 1176
[98] Ohta K, Hamabe M, Wakamatsu K I. ApJ, 1990, 357: 71
[99] Aguerri J A L, Muñoz-Tuñón C, Varela A M, et al. A&A, 2000, 361: 841
[100] Laurikainen E, Salo H, Buta R. ApJ, 2004, 607: 103

Research Progress on Observations of Galactic Bars

WANG Wenwen[1,2], ZHOU Zhimin[1]

(1. National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Astronomy and Space Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The galactic bar is a ubiquitous morphological structure in the nearby universe. There is an interaction between the bar and the host galaxy, which affects the physical properties of the host galaxy and drives secular evolution in the host galaxy. In recent years, many important progress on the evolutionary relationship between bars and galaxies have been made in observational studies. The research and identification methods of bars tend to be diversified, and the influence of bars on the evolution of galaxies and the physical mechanism are becoming more and more complete. Firstly, the influence of bars on the evolution of galaxies is introduced, and the emphasis is the effect of bars on the formation of stars in galaxies. Secondly, the distribution of bars in galaxies is analyzed, while the characteristics of barred spiral galaxies and the evolution of bars with red shift are described. Then, several main methods for identifying bars are summarized and discussed. Finally, the research on the relationship between bars and galaxies is summarized and prospected.

Key words: galactic bar; galaxy properties; galaxy evolution; galaxy structure