



空间红外望远镜与宇宙早期星系研究的新进展

戴昱

中国科学院国家天文台, 北京 100101

E-mail: ydai@nao.cas.cn

威廉·赫歇尔(William Herschel)在1800年首次观测到了太阳光中的红外辐射。在肉眼可见的世界外还存在其他形式的能量, 这一发现在人类对于宇宙的认知过程中具有里程碑式的意义。由于地球大气中的水汽对于红外信号的吸收, 要可靠地探测到宇宙中的红外辐射, 特别是中远红外辐射, 必须利用空间红外望远镜。尘埃遮蔽导致的消光——红化, 和宇宙膨胀带来的多普勒效应——红移, 使得红外成为观测更远、更暗、更年老星系的不二之选, 也是研究宇宙起源, 特别是宇宙早期星系形成的最佳和唯一途径。

自20世纪50年代开始, 天文学家就开始利用气球载实验将红外探测器发射“上天”, 在水汽显著降低、大气相对稳定、对来自宇宙的红外辐射吸收明显减弱的平流层进行红外观测。一系列上升至几十千米高度的气球载实验室, 和飞机载红外天文台——如柯伊伯机载天文台(Kuiper Airborne Observatory, KAO)和索菲亚平流层红外天文台(Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, SOFIA), 都将可观测的红外拓展到了几百至上千微米的范围, 但是因其灵敏度的限制, 这些望远镜的主要贡献还是在行星和恒星形成相关的科学上, 对于星系的观测十分有限。

真正意义上的空间红外望远镜始于20世纪80年代, 以60厘米级的红外天文卫星(Infrared Astronomical Satellite, IRAS; 口径57 cm, 波长范围8~120 μm , 1983年)和红外空间天文台(Infrared Space Observatory, ISO, 口径60 cm, 波长范围2.5~240 μm , 1995~1998年)开启了红外天文探索宇宙起源的新篇章。前者首次完成了全天红外巡天, 发现了大量包含超亮红外星系(ultraluminous infrared galaxies, ULIRG)在内的约35万个红外源^[1,2]; 后者探测到了星际介质的水、二氧化碳、甲醇等复杂分子成分^[3], 详细研究了包括活动星系核(active galactic nuclei, AGN)在内的红外源^[4]。星系本身和星系中心的活动星系核都可以产生极强的红外辐射, 分别对应了剧烈恒星形成活动产生的恒星和活跃黑洞周围的吸积盘的能量被尘埃吸收之后的再次辐射。在红外对这两种辐射机制(恒星形成或黑洞吸积)进行区分, 对判断其星系和超大质量黑洞



戴昱 国家天文台研究员, 博士生导师。研究方向为星系的形成与演化, 主要从事活动星系核、星暴星系、并合星系与相互作用星系的观测研究。

性质至关重要。而超大质量黑洞与宿主星系的共同演化这一课题, 在此后的30余年, 一直是天文学中具有争议且悬而未决的热点问题。早期空间红外望远镜为星系形成和演化的研究奠定了基础, 并为后续红外天文望远镜提供了最初始的遗珍级数据(Legacy Data)。

历史上具有代表性的红外空间望远镜还包括在远红外运行的赫歇尔空间望远镜(Herschel Space Observatory, 口径3.5 m, 波长范围55~670 μm , 2009~2013年)和广域红外巡天探测器(Wide-Field Infrared Survey Explorer-WISE, 口径40 cm, 波长范围3.4, 4.6, 12, 22 μm , 2009~2024年)。前者在远红外运行, 观测到了大量星系、恒星和星际介质的尘埃辐射以及包括水分子在内的冷气体; 后者在近中红外拥有目前最全的地球红外图像, 发现了大量之前因尘埃遮蔽而未被发现的超大质量黑洞, 并在近地小行星与褐矮星的观测中贡献了重要数据^[5]。

观测早期宇宙方面, 具有划时代意义的空间红外望远镜首当其冲是斯皮策空间望远镜(Spitzer Space Telescope, 口径85 cm, 波长范围3.6~160 μm , 2003~2020年)。斯皮策首次探测到了宇宙早期再电离时期(红移7左右)的星系的质量和年龄, 这些宇宙早期星系的观测(红移7~10)为宇宙黎明时期的星系演化提供了直接观测证据(如文献^[6])。在红外测量的尘埃温度和辐射, 记录了恒星形成历史随宇宙年龄的变化, 恒星形成的峰值出现在红移2~3处, 之后随宇宙的进一步演化而呈

引用格式: 戴昱. 空间红外望远镜与宇宙早期星系研究的新进展. 科学通报, 2025, 70: 4165–4172

Dai Y. Advancement in space-based infrared telescopes and recent progress on the exploration of galaxy formation in the early universe (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 4165–4172, doi: 10.1360/CSB-2025-0511

下降趋势^[7]。斯皮策还发现了宇宙早期存在的星系团, 提供了宇宙的大尺度结构信息, 限制了宇宙演化模型; 观测到了大量的富尘埃活动星系核, 提供了利用测光数据选择活动星系核大样本的新方法并被广泛使用(如文献[8,9])。值得一提的是, 斯皮策协同哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope, HST)探测到了GN-z11, 这一星系保有的红移最高星系的纪录直到2023年才被打破。

作为斯皮策和哈勃空间望远镜的继任者, 2021年底发射的韦布空间望远镜(James Webb Space Telescope, JWST; 口径6.5 m, 波长范围0.6~28.5 μm), 以其超强的图像分辨能力、超深的视场和超精的光谱解析力毫无疑问已成为目前最强大的空间天文望远镜。它有4个主要仪器: 近红外相机(NIR-Cam)、近红外光谱仪(NIRSpec)、中红外仪器(MIRI)、近红外相机和无缝光谱(FGS/NIRISS), 覆盖了近、中红外对成像和不同分辨率的光谱测量的需求(图1)。科学上, 它有4个探索主题: 早期宇宙、不同时代的星系、恒星的生命周期, 及外面的世界(即系外行星)。其中, 早期宇宙和不同时代的星系都涉及了宇宙起源相关的问题。

目前认为, 宇宙始于138亿年前的大爆炸, 在经历了超光速暴胀后, 初始的物质密度的涨落打破了平衡, 首先形成了暗物质晕。这些结构上的不均匀性也可以通过在宇宙微波背景辐射被观测到。暗物质晕中的原初气体氢和氦聚集、冷却、坍缩, 直至聚变, 产生了初代的恒星, 最终在引力的作用下汇聚成了最初的星系。这些星系在接下来的100多亿年间不断地演化, 成为了现在观测到的不同时期、不同性质的星

系。自从哈勃发现宇宙膨胀认证星系的存在以来, 近100年间, 对高红移星系和最早星系的探索一直在进行, 最高红移的星系纪录也不断被打破。

寻找和认证高红移星系, 最常见的方法是利用相邻波段成像中在较短波段中存在“缺失”(Dropout)来寻找具有某些光谱特性的星系候选体。最常见的“缺失”选择是利用遥远星系发出的光会被周围的中性氢吸收而造成的莱曼断裂(Lyman Break)效应。由于这种效应, 静止波长短于912 Å(莱曼极限, 电离基态氢原子对应的波长)的光会被氢全部吸收, 并在相应的图像上缺失。这一效应在年轻的恒星形成星系中尤为显著, 因为年轻的恒星会产生丰富的电离氢, 而产生年轻恒星的原料——星际介质中存在大量的中性氢, 可以吸收这些电离产生的能量。在红移2.5以上, 紫色的莱曼极限被红移到了光学及红外波段, 因此莱曼断裂的特征可直接被观测到。一旦星体在莱曼极限左侧(蓝端)和右侧(红端)的测光值超过一定比例(比如红端测光比蓝端测光强1.2个星等以上, 如文献[10]), 那么这个源就会被判定为“缺失”源, 即高红移候选体。图2展示了一个红移7以上的例子, 此时莱曼断裂被红移到了波长0.7~0.8 μm 之间, 因此一个在F775W上缺失, 但在F105W上有明显探测的源就会被认证为红移7以上的莱曼断裂星系候选体。利用“缺失”如莱曼断裂的特征, 可以大量地选出高红移的星系候选体。需要指出的是, 高红移的宇宙中星系发出的光, 在通过富含中性氢的环境和到达地球沿途丰富星际介质后, 会经历大量的莱曼阿尔法(Lyman α , 电离氢在能级2和能级1之间的跃迁, $\lambda=1216$ Å)吸收, 导致912~1216 Å之间呈现出所

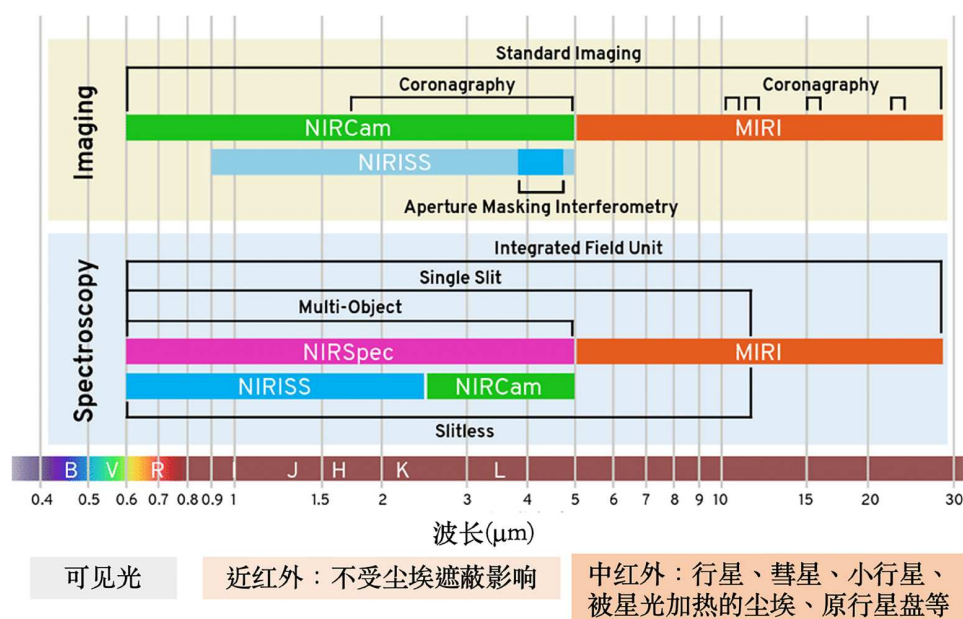


图1 (网络版彩色) JWST的仪器及相应波长覆盖和科学目标。图片来源: <https://webb.nasa.gov/>

Figure 1 (Color online) Wavelength coverage of the JWST instruments and their relative scientific goals. Image credit: <https://webb.nasa.gov/>

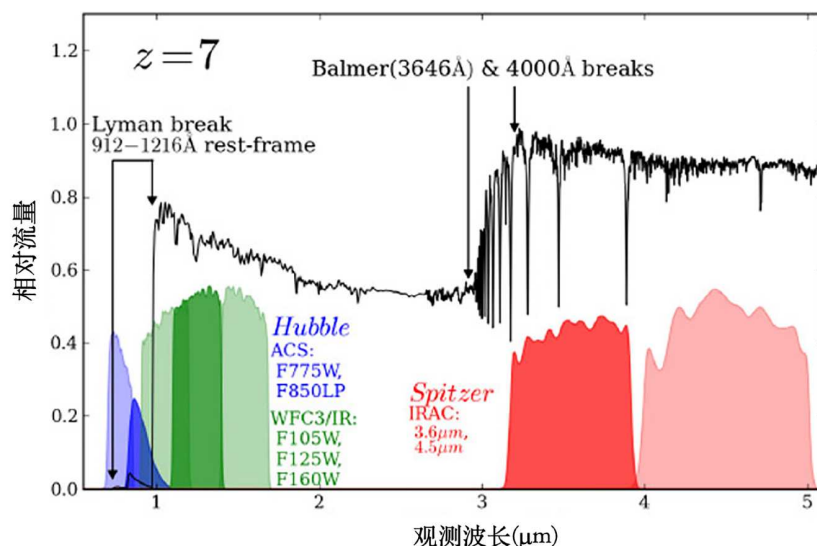


图 2 (网络版彩色) 一个红移7星系的能谱分布(观测波长)。哈勃和斯皮策空间望远镜的几个主要滤波片以蓝色(紫外)、绿色(光学)和红色(红外)表示。黑色代表光谱模型, 其中的两个主要“缺失”特征——莱曼断裂和巴尔末断裂, 分别落在了F775W和F105W, 及F160W和IRAC 3.6 μm 之间。如果测光的数据显示出红端明显亮于蓝端的情况, 即星系“偏红”, 那么它很有可能就是对应着莱曼断裂或巴尔末断裂的红移7的星系候选体。图源: J. Dunlop^[11]

Figure 2 (Color online) Spectral energy distribution of a redshift 7 young galaxy (observed frame). The various filters from Hubble and Spitzer Space Telescopes are in blue (UV), green (optical), and red (infrared) colors. The modelled spectra are in black, where the two typical ‘drop-out’ features, namely Lyman break and Balmer break, can be clearly seen to be between F775W and F105W, and F160W and IRAC 3.6 μm , respectively. If a galaxy appears extremely ‘red’ (i.e., photometry in the redder bands is significantly brighter than in the bluer bands), then it is possibly a redshift 7 Lyman break or Balmer break candidate. Image credit: J. Dunlop^[11]

谓的莱曼阿尔法森林现象。“缺失”条件选出的实际上是位于1216 Å的莱曼阿尔法断裂, 实际对应的红移更高。

要真正测量和确认星系的红移, 黄金标准仍然是光谱认证。高红移星系, 因为在宇宙早期, 大概率会是年轻的星系, 因此最常用于认证的谱线是年轻星系的特征谱线, 如莱曼阿尔法发射线。早期宇宙在较高红移, 莱曼阿尔法发射线被红移到了光学近红外($z > 7$), 因此近红外光谱测量是高红移星系的必要认证手段。需要指出, 亚毫米波光谱是另一种对高红移星系进行认证的方式。因远红外辐射存在“负K改正”效应, 且不受尘埃消光影响, 亚毫米波的谱线观测(如CO, [CII]等)也被广泛应用到红移6以上的星系认证中(如文献[12,13])。

直到2022年中, 即韦布空间望远镜正式开始发布科学数据之前, 已认证的最早的星系是2016年由哈勃空间望远镜结合斯皮策发现的位于红移11的GN-z11星系^[14]。这个源最初就是经由莱曼阿尔法断裂被选出的, 之后经哈勃空间望远镜的WFC3无缝光谱仪器认证为红移11的莱曼断裂星系。2022年7月, 随着韦布空间望远镜的第一批数据发布(<https://www.nasa.gov/webbfirstimages>), 光谱红移认证的最远星系纪录刷新到了红移13(JADES-GS-z13-0)。在JWST如此早期的观测阶段, 就在比现有记录更遥远的宇宙发现了一个新的星系, 强有力地证明了JWST发现高红移星系的强大能力(图3)。随

着越来越多JWST数据的发布, 这个纪录在随后的两年内一直在不断地被打破。

2024年中, 最远星系的纪录再次被刷新, 到了红移14(JADES-GS-z14-0和JADES-GS-z14-1)。从名字就可以看出, 这2个最远的星系都是由JWST的深场巡天JADES (JWST Advanced Deep Extragalactic Survey, PI: Eisenstein & Luetzgendorf)项目发现的, 分别位于红移 $14.3^{+0.08}_{-0.20}$ (JADES-GS-z14-0)和 $13.9^{+0.17}_{-0.17}$ (JADES-GS-z14-1)。这一项目是JWST初期最大、最深的巡天项目, 包含了至少三个GTO团组, 分别利用NIR-Cam, NIRSpec, MIRI三个仪器获得了9~14个滤光片的观测, 计划在0.7~5 μm 的范围内覆盖约100平方角分的天区, 在7.7 μm 覆盖10平方角分的天区, 目前已经释放了GOODS-S和GOODS-N两个天区的多波段图像和光谱数据(<https://archive.stsci.edu/hlsp/jades>)。

同GN-z11一样, JADES-GS-z14-0和JADES-GS-z14-1都是光谱认证的莱曼阿尔法断裂星系^[17], 图4显示了JADES-GS-z14-0的JWST多波段测光数据和一维二维光谱信息。两个源都是在2.7 μm 才开始被观测到的, 是明显的“Dropout”选择星系。NIRSpec的光谱也探测到了高可信度的莱曼阿尔法断裂特征, 因此 $z=14$ 这个破纪录的光谱红移十分可靠。JADES-GS-z14-0的发现不仅刷新了最远星系的纪录, 还对早

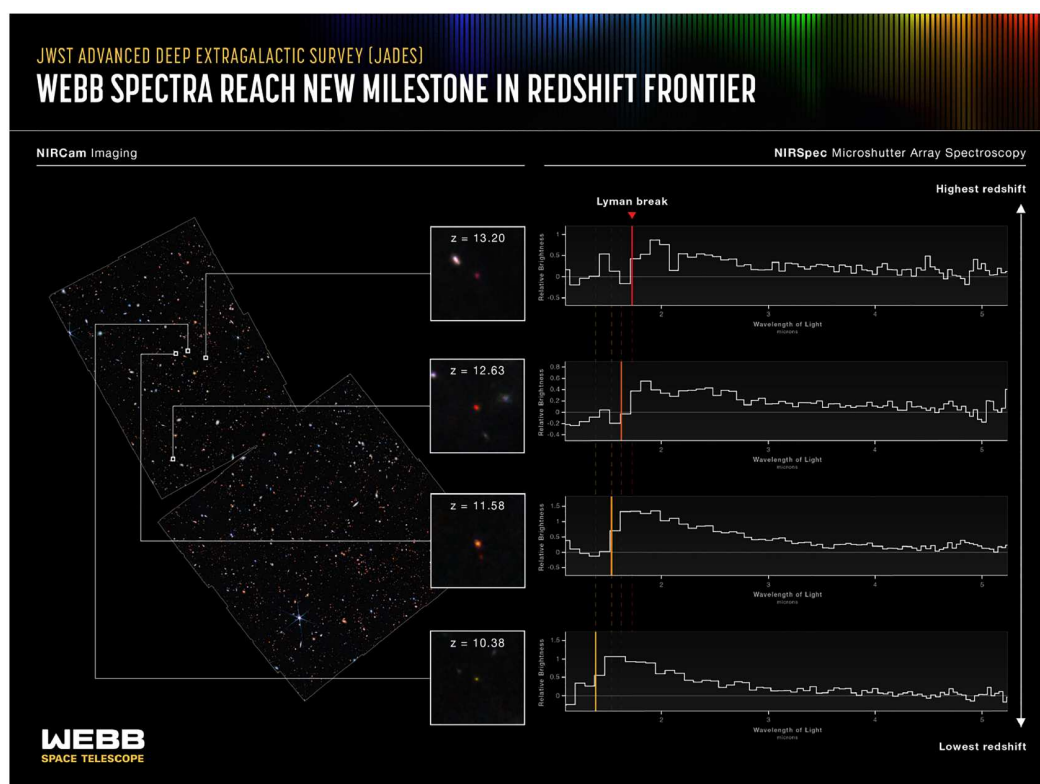


图3 (网络版彩色) JWST的深场巡天JADES巡天数据在哈勃深场中结合近红外相机图像(左)和近红外光谱(右)认证的部分宇宙早期星系(红移10以上)。从上到下分别显示了通过莱曼断裂认证的光谱红移由高到低的4个例子。图源: NASA, ESA, CSA和STScI, 文献[15,16]

Figure 3 (Color online) JWST JADES observations confirm galaxies in the early universe with redshift 10 or higher, using NIRCam images (left) and MIRI spectroscopy (right). From the top to bottom are four examples of the spectra of Lyman-break candidate galaxies, with confirmed spectroscopic redshift from high to low. Image credit: NASA, ESA, CSA, and STScI, Refs. [15,16]

期宇宙的恒星形成活动提供了重要信息。大爆炸后仅3亿年的宇宙早期,高光度的星系不仅存在,而且数量可能比之前预计的要多。对这两个星系的能谱分布分析表明,二者在静止波长的紫外部分,都拥有相对陡峭的斜率,表示了不甚强烈的消光;同时, JADES-GS-z14-0的紫外半光半径在0.3 kpc量级,超过了仪器对应的点扩散函数半高全宽(约0.16 kpc)和一般认为的黑洞活动主导的范围(<0.1 kpc),这预示着该星系的紫外光度是由星系中的恒星而非中心的超大质量黑洞所主导。在红移8以上观测到的星系数密度比之前利用哈勃数据得到的预测值高10倍^[18],相似的结论已被多个利用不同韦布样本开展的紫外光度函数工作所证实^[19]。“再电离时期”是否比现在模型所预料的更早发生?宇宙早期的星系和黑洞是否存在比现有理论更高效率的形成过程?这些高红移的观测结果对“再电离时期”和宇宙早期的星系形成机制都产生了一定的挑战^[17]。

除了认证这些高红移的星系,结合最新的JWST光谱观测, JADES团队对已知的高红移星系也开展了更高分辨率的光谱测量。比如在GN-z11的光谱中,就探测到了高激发态的

[NeIV] λ 2423和CII λ 1335谱线^[20]。通常认为,这类高激发态谱线是由活动星系核产生的。这一发现揭示了GN-z11星系中可能存在正在活跃吸积的大质量黑洞。光谱中还发现了CIV发射谱线的轮廓内存在蓝移的CIV吸收线(800~1000 km/s),符合外向流的假设,进一步认证了GN-z11的AGN属性。维里假设下利用MgII发射线(约450 km/s)估算的黑洞质量在 10^6 量级,结合这个源的强AGN光度($\sim 10^{45}$ erg/s),其现有吸积率是理论预测的爱丁顿率的5.5倍左右。

目前有两种理论解释在高红移发现的拥有大质量黑洞的星系,一是“重种子”经历了正常的爱丁顿吸积——吸积率与黑洞本身的质量成正比。这种情况下,黑洞的初始质量相对较“重”,可以达到上千甚至上万个太阳质量,那么在流体静力平衡的条件下就可以直接获得早期宇宙发现的这些大质量黑洞。另一种是“轻种子”模型中的黑洞,在经历了爆发式的超爱丁顿吸积的过程后,在较短的时标内积累到了相当大的质量(图5)。GN-z11的现有观测数据与两种理论都可以很好地符合。不管是哪一种情况,这些高红移大质量黑洞的发现和认证已经触发了新一轮对初始黑洞质量的理论研究(如

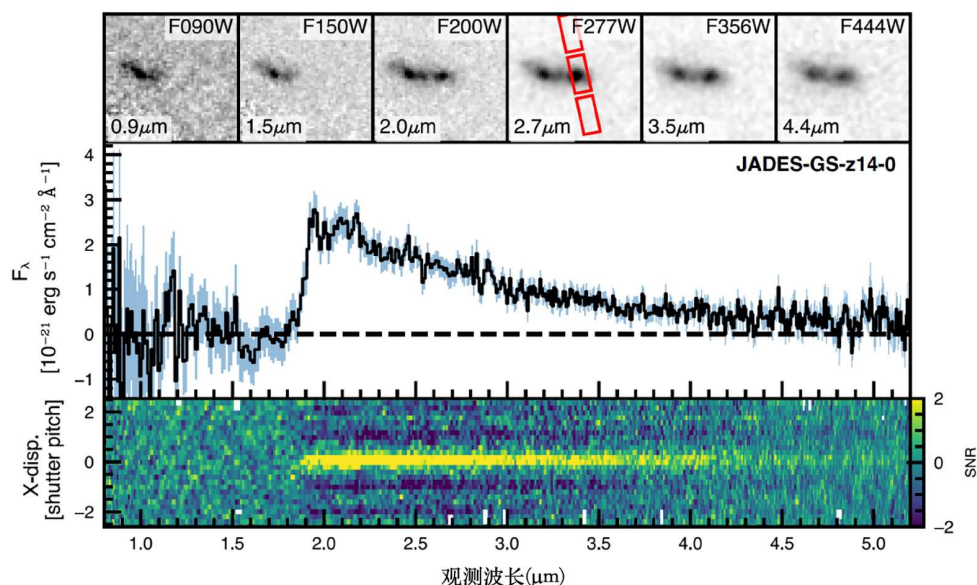


图4 (网络版彩色)JADES-GS-z14-0的光谱和测光信息。JADES-GS-z14-0是目前发现的红移最高的星系,多波段图像上是一个明显的拥有“缺失”特征的星系,从 $2\mu\text{m}$ 及以上才开始被探测到。NIRSpec光谱认证了明显的莱曼阿尔法断裂特征,光谱认证红移为 $14.3^{+0.08}_{-0.20}$,此时的宇宙仅为大爆炸后3亿年。图源:文献[17]

Figure 4 (Color online) Spectroscopic and direct images of JADES-GS-z14-0. JADES-GS-z14-0 is currently the galaxy with the highest redshift, and is clearly a ‘drop-out’ galaxy based on multi-wavelength stamp images, starting to appear only at bands longwards of $2\mu\text{m}$. NIRSpec spectroscopy confirmed the Lyman alpha break feature, and a spectroscopic redshift of $14.3^{+0.08}_{-0.20}$, only 300 million years after the Big Bang. Image credit: Ref. [17]

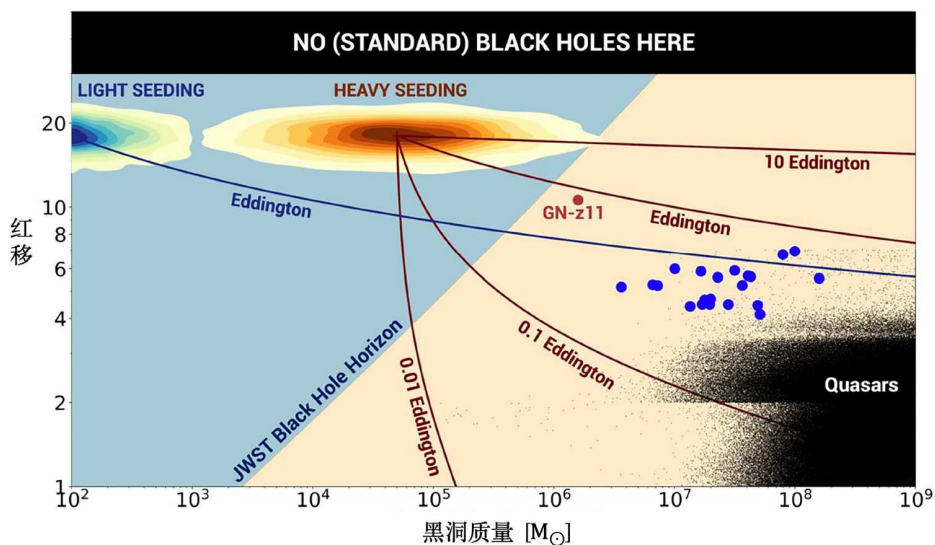


图5 (网络版彩色)对JWST在宇宙早期发现的大质量黑洞产生机制的定性说明。横坐标为黑洞质量,纵坐标为红移。蓝色和红色区域分别对应“轻”和“重”的种子黑洞在其质量对应的正常吸积率(爱丁顿率),和超过或低于爱丁顿率时对应的黑洞质量。图上的GN-z11(红点)既可以用重种子的正常吸积,也可以用轻种子的超爱丁顿吸积来解释。蓝点和黑点分别代表JWST新观测到的中高红移($z\sim 6$, 文献[23~25])和SDSS等传统地面观测得到的低红移($z<4$, 文献[26,27])的超大质量黑洞。图源:文献[28]

Figure 5 (Color online) Qualitative explanation of the different black hole seeding mechanisms of the supermassive black holes discovered with JWST in the early universe. The X-axis marks the black hole mass, and the Y-axis marks the redshift. The blue and red regions correspond to the ‘light’ and ‘heavy’ black hole seeds, respectively. The red and blue curves show the mass evolution for the two seeds along, above, and below the Eddington accretion limit, as marked along each curve. GN-z11 (red point) can be explained by either a normal accretion from a heavy seed, or a super-Eddington accretion from light seeds. Blue dots mark the JWST-observed mid- to high- redshift supermassive black holes ($z\sim 6$, Refs. [23~25]), while the black dots are quasars at $z<4$ observed by conventional ground-based observations such as SDSS (Refs. [26,27]). Image credit: Ref. [28]

文献[21,22]).

近年来,随着空间红外望远镜的技术突破,特别是詹姆斯·韦布空间望远镜(JWST)的投入运行,人类对宇宙早期星系的探索迈入了新的时代。作为目前灵敏度和分辨率最高的红外望远镜,JWST利用红移效应和穿透尘埃的红外观测能力,探测到了宇宙大爆炸后数亿年内的星系($z>10$)。这些超高红移星系的数量和亮度远超原来的理论预期,表明早期宇宙中已存在大规模恒星形成活动,且星系的成熟度远超模型预测,对现有星系形成理论中的许多假设提出了挑战。除了JWST,近年发射的欧几里得(2023年至今)([https://www.eu-](https://www.euclid-ec.org/)

[clid-ec.org/](https://www.euclid-ec.org/))和SPHEREx (2025年至今)(<https://spherex.caltech.edu/>)望远镜项目,以及计划于2027年发射的NGRST望远镜(<https://roman.gsfc.nasa.gov/>),都将专注于红外巡天,为河外背景光、宇宙再电离、宇宙膨胀、大尺度结构的形成等提供强有力的限制,加深对暗物质暗能量的理解。展望未来,相信随着越来越多更深曝光的红外数据和更多更暗弱早期星系的发现,我们有望在暗物质、恒星形成的初始条件、黑洞与星系的协同演化,及早期宇宙的结构研究方面取得突破,进一步理解和完善早期星系形成与演化机制的物理图景。

推荐阅读文献

- Neugebauer G, Habing H J, van Duinen R, et al. The Infrared Astronomical Satellite (IRAS) mission. *Astrophys J*, 1984, 278: L1
- Soifer B T, Rowan-Robinson M, Houck J R, et al. Infrared galaxies in the IRAS minisurvey. *Astrophys J*, 1984, 278: L71
- González-Alfonso E, Cernicharo J, van Dishoeck E F, et al. Radiative transfer models of emission and absorption in the H[TINF]2/[TINF]O 6 micron vibration-rotation Band toward Orion-BN-KL. *Astrophys J*, 1998, 502: L169–L172
- Genzel R, Lutz D, Sturm E, et al. What powers ultraluminous IRAS galaxies? *Astrophys J*, 1998, 498: 579–605
- Labbé I, van Dokkum P, Nelson E, et al. A population of red candidate massive galaxies ~600 Myr after the Big Bang. *Nature*, 2023, 616: 266–269
- Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): mission description and initial on-orbit performance. *Astron J*, 2010, 140: 1868–1881
- Madau P, Dickinson M. Cosmic star-formation history. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2014, 52: 415–486
- Lacy M, Storrie-Lombardi L J, Sajina A, et al. Obscured and unobscured active galactic nuclei in the Spitzer Space Telescope first look survey. *Astrophys J Suppl S*, 2004, 154: 166–169
- Donley J L, Koekemoer A M, Brusa M, et al. Identifying luminous active galactic nuclei in deep surveys: revised IRAC selection criteria. *Astrophys J*, 2012, 748: 142
- Steidel C C, Pettini M, Hamilton D. Lyman imaging of high-redshift galaxies. III. New observations of four QSO fields. *Astron J*, 1995, 110: 2519
- Dunlop J S. The first galaxies, observing the first galaxies. *Astrophysics and Space Science Library*, 2013, 396, 223, doi: 10.1007/978-3-642-32362-1_5
- Decarli R, Walter F, Venemans B P, et al. Rapidly star-forming galaxies adjacent to quasars at redshifts exceeding 6. *Nature*, 2017, 545: 457–461
- Liu D, Schinnerer E, Groves B, et al. Automated mining of the ALMA archive in the COSMOS field (A^3 COSMOS). II. Cold molecular gas evolution out to redshift 6. *Astrophys J*, 2019, 887: 235
- Oesch P A, Brammer G, Dokkum P G, et al. A remarkably luminous galaxy at $Z = 11.1$ measured with Hubble Space Telescope grism spectroscopy. *Astrophys J*, 2016, 819: 129
- Robertson B E, Tacchella S, Johnson B D, et al. Identification and properties of intense star-forming galaxies at redshifts $z > 10$. *Nat Astron*, 2023, 7: 611–621
- Curtis-Lake E, Carniani S, Cameron A, et al. Spectroscopic confirmation of four metal-poor galaxies at $z = 10.3$ – 13.2 . *Nat Astron*, 2023, 7: 622–632
- Carniani S, Hainline K, D'Eugenio F, et al. Spectroscopic confirmation of two luminous galaxies at a redshift of 14. *Nature*, 2024, 633: 318–322
- Bouwens R J, Oesch P A, Stefanon M, et al. New determinations of the UV luminosity functions from $z \sim 9$ to 2 show a remarkable consistency with halo growth and a constant star formation efficiency. *AJ*, 2021, 162: 47
- Robertson B, Johnson B D, Tacchella S, et al. Earliest galaxies in the JADES origins field: luminosity function and cosmic star formation rate density 300 Myr after the Big Bang. *Astrophys J*, 2024, 970: 31
- Maiolino R, Scholtz J, Wistok J, et al. A small and vigorous black hole in the early Universe. *Nature*, 2024, 627: 59–63
- Inayoshi K, Visbal E, Haiman Z. The assembly of the first massive black holes. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2020, 58: 27–97
- Schneider R, Valiante R, Trinca A, et al. Are we surprised to find SMBHs with JWST at $z \geq 9$? *Mon Not R Astron Soc*, 2023, 526: 3250–3261
- Harikane Y, Zhang Y, Nakajima K, et al. A JWST/NIRSpec first census of broad-line AGNs at $z = 4$ – 7 : detection of 10 faint AGNs with $M_{\text{BH}} \sim$

- $10^6\text{--}10^8 M_\odot$ and their host galaxy properties. [Astrophys J](#), 2023, 959: 39
- 24 Maiolino R, Scholtz J, Curtis-Lake E, et al. JADES. [Astron Astrophys](#), 2024, 691: A145
- 25 Übler H, Maiolino R, Curtis-Lake E, et al. GA-NIFS: a massive black hole in a low-metallicity AGN at $z \sim 5.55$ revealed by JWST/NIRSpec IFS. [Astron Astrophys](#), 2023, 677: A145
- 26 Lyke B W, Higley A N, McLane J N, et al. The Sloan Digital Sky Survey quasar catalog: sixteenth data release. [Astrophys J Suppl Ser](#), 2020, 250: 8
- 27 Fan X, Bañados E, Simcoe R A. Quasars and the intergalactic medium at cosmic dawn. [Annu Rev Astron Astrophys](#), 2023, 61: 373
- 28 Pacucci F, Nguyen B, Carniani S, et al. JWST CEERS and JADES Active Galaxies at $z = 4\text{--}7$ violate the local $M_\bullet\text{--}M_\star$ relation at $>3\sigma$: implications for low-mass black holes and seeding models. [ApJL](#), 2023, 957: L3

Summary for “空间红外望远镜与宇宙早期星系研究的新进展”

Advancement in space-based infrared telescopes and recent progress on the exploration of galaxy formation in the early universe

Yu Dai

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

E-mail: ydai@nao.cas.cn

Infrared observatories have been the key to our exploration of the distant universe, given the fact that star light from the early universe is redshifted to the infrared and these bands are immune to dust reddening. In the past 50 years or so, the advancement in space-based infrared telescopes has led to discoveries and systematic confirmation of high-redshift galaxies, including ultra-luminous infrared galaxies (ULIRGs) and active galactic nuclei (AGNs), which have significantly improved our understanding of galaxy formation and evolution at the high-redshift universe. Since its launch at the end of 2021, James Webb Space Telescope (JWST), as the most advanced space astronomical telescope available, has significantly pushed our frontier in the exploration of the origin of the universe with its unprecedented image resolution, deep fields, and the critical spectral coverage in the near- and mid-infrared wavelengths. Our understanding of galaxy formation and evolution in the early universe has greatly advanced with JWST's new observations. One important breakthrough is the continuous new records for the earliest galaxies detected and confirmed. The Lyman-break method is commonly employed to search for high-redshift galaxies. This method is based on the prominent Lyman-break feature in star-forming galaxies, which results in a significant jump from the bluer to redder bands. Several deep surveys in the near- and mid-infrared bands have taken advantage of this method to select galaxy candidates in the early universe. With follow-up spectroscopical observations, JWST has identified and confirmed multiple galaxies with redshifts exceeding 10, including the record-breaking redshift 14 galaxies JADES-GS-z14-0 and JADES-GS-z14-1. These findings indicate that large-scale star formation activities already happened only a few hundred million years after the Big Bang. The maturity of these galaxies far exceeded model predictions, posing a challenge to existing theories of galaxy formation and the time for cosmic ionization. In addition to the discovery of high-redshift galaxies, JWST has also revealed the existence of supermassive black holes in the early universe by spectral confirmations. For example, the highly excited spectral emission lines detected in the GN-z11 galaxy suggest the possibility of active accretion of supermassive black holes (SMBHs), which is “over-massive” compared to their host galaxies, as compared to the local SMBH-host mass relations. A population of similar “over-massive” SMBHs has been identified with JWST in the early universe at $z > 4$. This poses concerns to the current pictures on the co-evolution of black holes and their host galaxies, where the two should grow in sync with each other. Different black hole seeding mechanisms have been proposed to explain the observed black hole and host mass ratios. Looking ahead, with the release of more infrared data and the discovery of fainter galaxies at a high redshift, more breakthroughs are expected in the study of dark matter, initial conditions for star formation, co-evolution of black holes and galaxies, and the structure of the early universe. Upcoming infrared observations will further enrich our understanding of the origin of the universe and the formation and evolution of early galaxies, and promote the in-depth development of galaxy formation and evolution theories and simulations.

infrared astronomy, galaxy formation, supermassive black holes, high-redshift, Lyman-break galaxy, space telescope

doi: [10.1360/CSB-2025-0511](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0511)