

# 从宇宙尽头到太阳近邻—詹姆斯·韦布空间望远镜 2024 年进展回顾(上)

张 博

(中国科学院国家天文台 100101)

在投入科学运营的第三个年头,詹姆斯·韦布空间望远镜凭借红外波段卓越的分辨率与灵敏度,取得了一系列突破性的进展,其中包括证认出了已知红移最高的星系,进一步推进了宇宙学研究的最前沿;考察了一系列的高红移星系与活动星系核,为星系演化理论提供了更多观测线索;更全面地揭示了恒星诞生与演化过程中的细节,论证了恒星形成过程与环境的关系;针对一系列系外行星开展了分光成像观测,见证了系外行星惊人的多样性和复杂性;展现了太阳系天体前所未有的细节。本文将对韦布望远镜在 2024 年发表的成果作一个总体回顾。

## 1. 刷新星系红移的记录——一窥星系早期演化的重重疑云

宇宙再电离期指的是大爆炸发生数亿年后,来

自刚刚形成的第一代大质量恒星发出的光线照彻成分以氢元素为主、当时尚属电中性的星际介质,并将后者电离的时代。再电离标志着宇宙历史上距今最近的一次整体相变的完成,它改变了充斥整个宇宙的气体性质,并对后续的星系和恒星演化都产生了深远影响,但其发生的具体时间和过程仍有大量未决之处。显然,无论是探索人们至今所知甚少的再电离期,还是深入了解早期星系的形成历史,作为见证物的高红移星系都是不可或缺的。但因为这些星系本身展现的是其幼年期的面貌(也就是说,它们的体量进而是本征光度远小于当代星系),而且遥远的距离导致视光度进一步降低,再加上宇宙膨胀让高红移天体发出的可见光波长增大,变成地面观测受水气吸收影响而难以开展的红外辐射,这一系列的原因导致已知的高红移星系样本

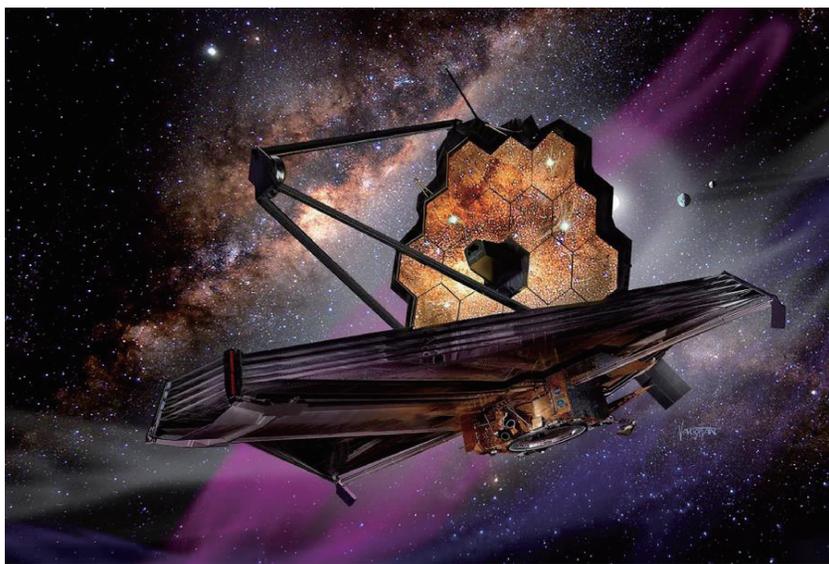


图1 詹姆斯·韦布空间望远镜的艺术图(图片来源: James Vaughan)

屈指可数。

韦布望远镜的高灵敏度与远离地球有利位置为高红移星系的研究带来了新的机遇。在2022年夏季公布的“韦布第一深场图”(也就是星系团SMACS 0723方向的长时间曝光照片)中,天文学家已然辨认出了多个红移超过10的星系,其中更有经光谱认证,红移超过13的JADESGS-z13-0<sup>[1]</sup>。这里JADES是“JWST先进深度河外星系巡天”(JWST Advanced Deep Extragalactic Survey)的英文名称缩写,该项目提出于望远镜发射之前,旨在借助韦布非凡的红外性能,进一步观测大型天文台起源深空巡天(GOODS)南北两个天区<sup>[2]</sup>,以图在此搜寻形成于大爆炸后3亿年内的星系。JADES项目之所以选择GOODS深空区作为目标,是因为这两处早已被哈勃空间望远镜、钱德拉X射线天文台等多架大型空间天文仪器反复巡视过,这些工作显然可以成为JWST更深度研究的参照系。而基于高红移星系的重要性,JADES巡天成为了韦布第一轮观测期间规模最大、分配时间最长的项目。

在刚刚过去的2024年,韦布望远镜继续借助JADES项目开展高红移星系搜索,并成功将已知星系的最高红移记录推进至14.32<sup>[3]</sup>。在筛选高红移星系时,研究者首先要对目标天区进行多波段深度曝光,然后利用多波段测光的手段估算所拍下的各星系红移,再对其中的高红移候选体进行光谱认证。估算测光红移的奥秘在于星系内的中性氢原子气体。这类气体算是再电离过程的漏网之鱼,它们往往会成团地散布在星系内外,为恒星形成提供了物资储备,也为射电天文领域贡献了最重要的一条谱线——21厘米氢线。对于高红移星系搜寻而言,中性氢最为重要的性质是对高频辐射的吸收效应——当氢原子的外围电子在某个特定能级和更高能级之间跃迁时,就会在光谱中产生特定的谱线系,如从主量子数 $n=1$ 跃迁到 $n>1$ 对应莱曼线系, $n=2$ 跃迁到 $n>2$ 对应巴耳末线系,等等;而当目标能级的 $n$ 取无穷大,对应的位置就是相应线系的极限点,又称“系限断裂”,理论上说波长短于该极

限的辐射均应被氢原子完全吸收,原子也因此被电离。反映在光谱特征上,就是系限断裂处的高频一侧流量相较低频一侧出现陡降,其中以静止系波长约合912纳米的莱曼断裂表现最为显著,应用也最广。由此,如果在某个星系的多波段图像中,两个相邻波段的辐射具备类似莱曼断裂的高频流量低、低频流量高的特性,就可以根据断裂处的波长,粗略地估算该星系的红移了。JADES课题组正是利用类似的方法来筛选感兴趣的星系。当然,因为多波段图像所具备的光谱分辨率极其有限,而且经红移后的光谱断裂点可能存在多重解释(如星际尘埃吸收等其他机制也会造就类似系限断裂的辐射特征),所以要获取准确的红移数值并最终确定目标星系的身份,后续的高分辨率光谱观测是不可或缺的。

新认证的星系红移纪录创造者——JADES-GS-z14-0位于GOODS的南天天区(图2),实际上它是同期通过谱线断裂发现的三个高红移候选体中最为明亮的一个。由于它与一个红移较低的前景星系角距离很近(0.4角秒),而且前景星系的巴耳末



图2 已知最遥远的星系——JADES-GS-z14-0在詹姆斯·韦布空间望远镜拍摄的深度影像中的位置,右上插图为该星系的放大图。在这样的窄视场深度影像中,绝大部分光点都是河外星系(图片来源:NASA, ESA, CSA, STScI, B. Robertson (UC Santa Cruz), B. Johnson (CfA), S. Tacchella (Cambridge), P. Cargile (CfA))

断裂频率恰好与它的莱曼断裂频率相近,研究者一开始认为这不过是一个能谱分布有些特殊的低红移星系而已。不过进一步分析表明,低红移解释在理论上实在行不通;而后续的光谱观测确认了 JADES-GS-z14-0 的莱曼断裂结构(虽然并未探测到任何谱线,图 3(a)),证明它是一个红移超高的星系,对应的宇宙年龄只有 2.9 亿年,也就是说只相当于大爆炸至今总时间的大约 2%。相对红移而言,该星系的古怪之处是庞大的体量,根据其紫外光度推断出的恒星质量达到了太阳的 4 亿倍左右,星系的特征半径也接近 850 光年,实际尺度还可能更大一些。要知道,如今银河系周边的一些矮星系规模也不过与 JADES-GS-z14-0 相当,但这是在年龄已达 138 亿年、星系形态也已经历了充分演化的当代宇宙中;而根据主流模型,在宇宙年龄只有数亿年的

时候,现今大型星系的“种子”规模应该只有如今的万分之一以至更小,因此银河系在当年的体量很可能还不如这个远古星系。此外这次与 JADES-GS-z14-0 一同得到认证的还有一个红移 13.9 的星系 JADES-GS-z14-1(图 3(b)),后者本身也打破了先前的红移记录。

根据 JADES-GS-z14-0 光谱中连续谱成分的谱指数以及形态上的延展特性,它的辐射应该是由恒星而非活动星系核主导的。直观上看, JADES-GS-z14-0 这样年轻而又具备足够数量的恒星的星系,其恒星形成率必然不低。按照常理,高恒星形成率的星系富含辐射偏蓝的年轻大质量恒星,但 JADES-GS-z14-0 的颜色却显得太红了。虽然一定数量的星际尘埃可以解释韦望远镜布所见的星系辐射红化,但尘埃的形成有赖于金属元素的存在。天文学所说的金属元素指的是在周期表中排列在氢和氦之后的元素,它们的形成通常有赖于恒星中心持续的核聚变反应,或是发生于恒星生命终期的超新星爆发事件。因此想要积累足够的尘埃,就需要足够长的时间,好让几代恒星完成演化,可是这对于如此年轻的星系来说又显得有些矛盾。总之,相比韦布升空之前的推测,这个新的红移记录让当时宇宙中同等规模的星系数量足足提升了一个数量级,且这样的早期星系的性质也有颇多费解之处,这无疑对星系演化理论提出了挑战。JADES 团队目前还有大量高红移候选体有待认证,其中的一些可能具有比 JADES-GS-z14-0 还要遥远的距离。如果这些星系的身份能够得到证实,它们将显著扩大原本稀缺的高红移星系的样本,从而更好地回答有关早期宇宙的谜题。

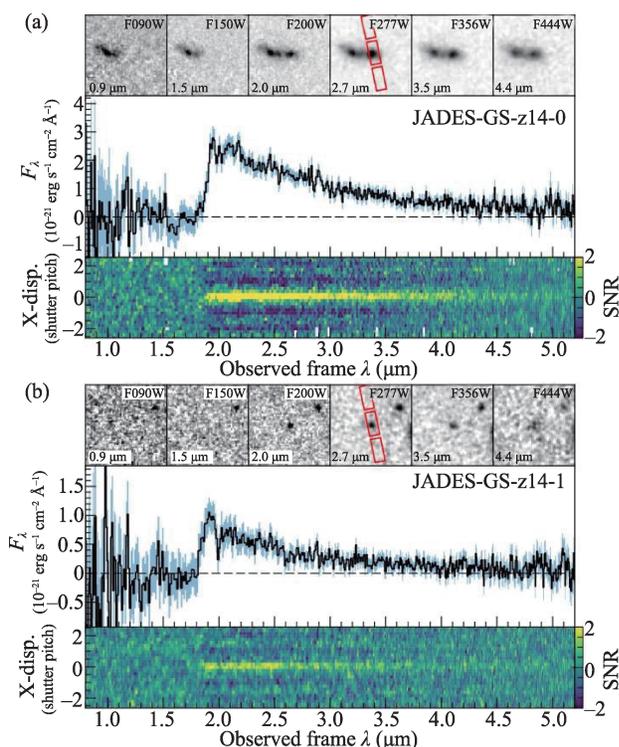


图3 JADES-GS-z14-0(a)与 JADES-GS-z14-1; (b)的多波段红外图像和光谱。可见这两个星系都没有表现出明显的谱线,但在短波端均具备明显的光谱断裂,其形态与莱曼断裂的性质相符。这两个星系的红移也是以光谱断裂的位置为基础,并综合考虑紫外连续谱辐射的形态以及影响莱曼断裂形态的机制等多种因素来确定的(图片来源: Carniani et al. (2024))

## 2. 探秘宇宙尽头的暗淡星系——探秘大质量星团、高密度氢云与暗物质的角色

如果说刷新红移记录的 JADES-GS-z14-0 以其超出预期的质量挑战了星系演化理论,同样在 2024

年发表的韦布望远镜对“萤火虫闪光”(Firefly Sparkle)的观测则提供了一个窥探银河系这样的大型星系在现有理论框架下早期历史的机会<sup>[4]</sup>。萤火虫闪光原本是哈勃空间望远镜在星系团 MACS J1423.8+2404 方向识别出一道引力透镜光弧,后来地面大型望远镜拍摄的光谱说明它很可能是一个红移接近8的高红移源。得益于前景星系的放大作用以及自身强大的解析能力,韦布望远镜得以进一步分辨“萤火虫闪光”的细节(图4)。这是一个富含气体的产星星系,红移约为8.3,对应的宇宙年龄合6亿年,比创纪录的JADES-GS-z14-0几乎大了一倍。在规模上,该星系倒是更符合数值模拟对大型星系形成历史的预言。但与后世的同类天体不同的是,“萤火虫闪光”的一半质量集中在10个年轻的星团中,每个星团的质量约合太阳的 $10^5$ 到 $10^6$ 倍,与银河系中不太大的球状星团相当;这些得到直接成像的已知最遥远星团也贡献了整个星系大半的光度。因此整个星系的形态表现为弥漫光弧背景上的一串光点,宛如夏夜的一群萤火虫,星系本身也由此得名。此外在“萤火虫闪光”附近,还存在两

个红移接近、规模更小的星系,但它们并未展示出太多的细节。

“萤火虫闪光”的这10个主要星团有一半是集中分布于光弧中心的。它们颜色不一,对应演化的不同阶段,同时也意味着整个星系的恒星形成史并非均一化的整体过程,而是不同区域有着先后之别。通过分析前景星系团的引力场,研究者复原了“萤火虫闪光”原本可能的面貌(图5),发现这个年轻的星系尚未演化出明确的中央核球或星系盘;且10个星团中有8个较为松散地聚集在一起,但还有两个“悬浮”在星系的主体部分以外。值得一提的是,“萤火虫闪光”与两个邻近星系的距离都还不及现今银河系本身的尺度,其中较近的一个更是距离前者只有6000余光年,日后这三个星系很有可能整合为一,并在此期间激发更多的恒星形成活动,并且通过引力作用塑造出如今我们所熟悉的大型星系外观。不过当星系并合时,这次观测到的星团的归宿尚不明确——它们日后可能在一次次的星系并合中解体,并最终汇入成型后的大型星系核球之中;也可能挺过潮汐作用,最终成为构成星系晕的

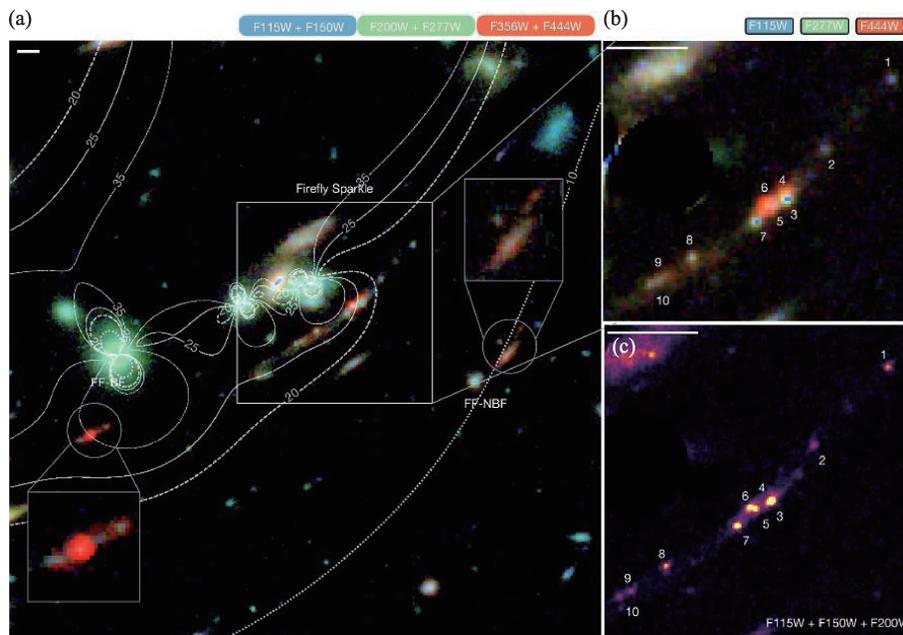


图4 “萤火虫闪光”以及两个邻近星系(图中标为FF-BF以及FF-NBF,分别代表其昵称“萤火虫的好朋友”和“萤火虫新的好朋友”)的影像,其上叠加的等高线代表引力透镜的放大倍率分布,右侧插图是其中10个星团的红外多波段图像(图片来源: Mowla et al. (2024))

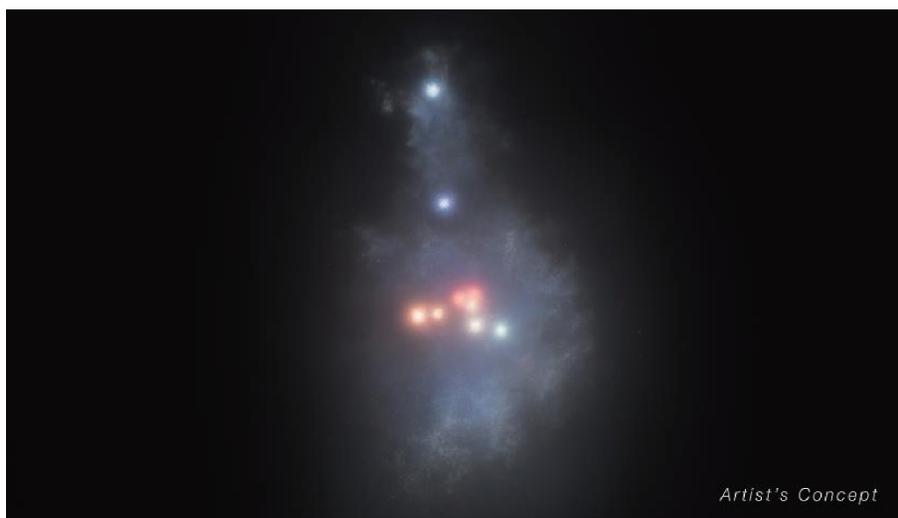


图5 “萤火虫闪光”未经引力透镜变形时的形态推测图(图片来源: NASA, ESA, CSA, Ralf Crawford (STScI))

中坚力量。

远古星系用自身辐射照彻中性氢云的具体过程也是亟待韦布望远镜考察的问题。在再电离时期,星系外围的气体分布是怎样的?这些气体对星系的演化又有何种影响?韦布凭借对3个红移大于8的星系中性氢成分的直接测量,稍稍窥探了这些问题的冰山一角<sup>[5]</sup>。这里的测量工具是氢云的阻尼莱曼 $\alpha$ 吸收效应。莱曼 $\alpha$ 谱线是氢原子外围的电子在主量子数 $n=1$ 和2之间跃迁的产物,在静止系中的波长合121.6纳米。分布在连续谱源(如星系)与观测者之间的氢云会让连续谱中出现莱曼 $\alpha$ 吸收线;而当视线方向氢云的柱密度足够高(每平方厘米原子数大于 $10^{20}$ )时,不同速度的氢云将导致光谱中的吸收线连成一片吸收带,吸收带的性质可以用于反推中性氢原子的数量。这次被韦布望远镜探测到阻尼莱曼 $\alpha$ 吸收的三个星系,其周边中性氢气体的柱密度均在每平方厘米 $10^{22}$ 以上,比宇宙学模型针对完全未电离的星系际介质预期的还要高一个数量级,考虑韦布同期观测了另外9个身处同样红移区间的星系,但并未发现阻尼莱曼 $\alpha$ 吸收带,中性气体的超高密度对于早期星系来说可能还算比较普遍。星系周边高密度氢云的存在说明,在此之外应该分布着更为辽阔的中性气体成分。自然,海量的气体也为星系中未来的大规模恒星形成提供

了物质保障。

此外韦布望远镜仔细研究了6个红移介于6到7之间,恒星质量只相当于太阳1000万到1亿倍的小型星系,并意外地发现这些星系核心区域的主导成分是只能通过引力作用来感知的暗物质,而非当代大型星系这样的恒星成分<sup>[6]</sup>。不过这样的现象倒是在多年之前就已由宇宙学数值模拟TNG50所预言,且这项模拟还发现,高红移星系中的恒星质量越大,中心暗物质占比也就越低,这与韦布望远镜的观测也比较相符。不过模拟星系的中心暗物质比例随红移减小迅速降低,最终会演变成如今所见的普通物质主导。韦布看到的这些星系很可能就是TNG50模拟的实际对应体,它们展现了星系演化早期一个暗物质主导的时代,而人们对该时代的认识才刚刚起步。韦布还获取了8个被引力透镜放大的高红移( $z\sim 6-7.7$ )暗弱目标的光谱,发现这些小型星系贡献的紫外电离辐射是先前预期的4倍,暗示它们(而非大型星系或是类星体)或许才是让宇宙再电离的主力<sup>[7]</sup>,未来更多的观测有望证实这一论点。

### 3. 揭示古老星系中央的黑洞——从快速生长到归于沉寂

与JADES-GS-z14-0一样,于2016年发表的星

系 GN-z11 曾经也是星系距离记录的保持者<sup>[8]</sup>。这个最早由哈勃空间望远镜发现的星系位于大熊座,红移约为 10.6,也是高红移星系中较为明亮的一个。在寻找属于自己的遥远星系之余,韦布望远镜的 JADES 项目组也将视线对准了这个已知的高红移样本,并由此发现了已知最为遥远的特大质量黑洞的踪迹<sup>[9]</sup>。

同星系早期演化史类似,由于高红移样本的严重缺乏,关于星系中央特大质量黑洞的形成与生长过程,还有它们在宇宙再电离期间所扮演的角色,理论家向来众说纷纭。诚然,哪怕以韦布望远镜的分辨率,也无法解析如此遥远的星系中心的细节,但望远镜搭载的红外光谱仪可以毫不含糊地追踪常见于活动星系核的几条谱线,包括氦原子波长 242.2/242.4 纳米的 [NeIV] 禁线双线,以及碳原子波长 133.5 纳米的 CII\* 谱线。其中前者的产生需要能量高于 63.5 电子伏特的光子照射,只有活动星系核周边的极端环境才能满足要求;后者虽然也会出现在恒星形成区中,但在这种情况下一来谱线强度一般较弱,二来通常伴随着波长 133.4 纳米的 CII 吸收结构,明显与实测不符。所以 GN-z11 中央存在活跃的黑洞是最合理的解释。根据谱线宽度和光谱中连续谱成分推测,这个黑洞质量约合太阳的 160 万倍,而吸积速率高达爱丁顿极限的 5 倍。爱丁顿极限相当于黑洞稳定吸积率的上限,由引力和球状吸积产生的辐射压二者的平衡点所决定。多种黑洞演化理论都认为,超爱丁顿吸积是黑洞早期快速增长所必需的,韦布的这一发现证实了这个观点。

2024 年发表的另一项与高红移星系中心黑洞有关的工作是针对艾贝尔 (Abell) 2744-QSO1 开展的<sup>[10]</sup>。这个红移约 7.045 的活动星系核属于韦布望远镜入役之初公布的一类颜色极红的中高红移宽线源(“小红点”)之列。艾贝尔 2744-QSO1 恰好位于具有强引力透镜效应的星系团艾贝尔 2744 后方,因此其影像被一分为三,自身发出的辐射也得到了极大的增强(图 6)。韦布对该目标三个影像的观测最终叠合成了一条总曝光时间 38 小时的光谱,创下了自望远镜发射以来针对单天体的积分时长记录。从形态上看,艾贝尔 2744-QSO1 是一个颜色极红的点源。而其红外光谱中氢元素的巴耳末线系 H $\beta$  谱线形态极宽,对应的谱线速度弥散高达 2800 千米/秒。使用阿塔卡马大型毫米/亚毫米波阵对该天体的毫米波探测又没有发现任何信号,这意味着星系中的恒星形成率很低,因此来自恒星的尘埃辐射较弱。结合以上几条特征,研究者意识到,韦布望远镜接收到的应该是来自活动星系核黑洞周边宽线区的信号,这一区域存在高速环绕黑洞运行的气体。而根据谱线宽度可知,艾贝尔 2744-QSO1 中心黑洞的质量约合太阳的 4000 万倍,也就是说,黑洞质量超过星系中恒星总质量的 3%(作为对比,当代宇宙中这一比例通常在 0.1% 左右);而且它正以爱丁顿吸积率 30% 的速率在吞噬周边物质。如此夸张的黑洞质量比例可能代表了特大质量黑洞演化史上一个快速生长的特定阶段,偏红的色彩则暗示了星系核周边分布着大量尘埃;未来对类似样本的多波段研究有望加深人们对黑洞生长的了解。

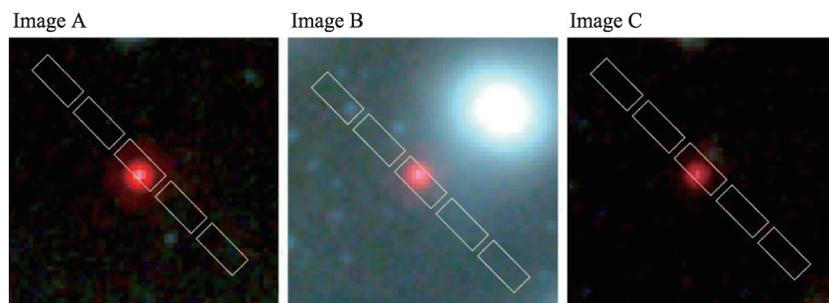


图 6 艾贝尔 2744-QSO1 经引力透镜作用所成的三个分立影像。图中以方框标出了韦布望远镜近红外光谱仪一组微快门阵列掩模的微型狭缝(图片来源: Furtak et al. (2024))

韦布望远镜还对红移 6.677 的星系 GN-1001830<sup>[11]</sup>和红移 3.965 的 X 射线明亮的活动星系核 LID-568<sup>[12]</sup>开展了研究,其中前者拥有一个质量偏大(但星系动力学质量与速度弥散度的关系符合预期),且极其不活跃的中央黑洞,可能代表了一类早期宇宙中先前被忽略的沉寂族群,这类黑洞平日默默无闻,只依靠偶发的超爱丁顿吸积事件迅速增长,随后吸积盘因强大的辐射压被驱散;后者是一个吸积率 40 倍于爱丁顿速率的小质量黑洞(质量约合太阳的 700 余万倍),其所处的演化阶段可能正是理论所预言的超爱丁顿吸积时期。这些在行为方面乍看有些陌生的星系核可能正在为研究者拼起特大质量黑洞从诞生到成长的全景图,而韦布望远镜在红外波段的明晰视角则让探秘黑洞演化史成为了可能。另一方面,当特大质量黑洞持续活跃一段时间后,就会造成星系的大规模气体外流,最终耗尽恒星形成所依赖的原材料,让整个星系“息产”。这样的黑洞反馈主要发生在上百亿年前,必须通过高红移观测来探索。韦布望远镜获取的红移 3.064 的星系 GS-10578 红外光谱数据就因为蕴含了外流物速度的准确信息,从而提供了这样一个机会<sup>[13]</sup>。研究者发现,GS-10578 的中心黑洞不仅驱使电离气体外流,而且还抛出了更多的中性气体,其中后者的运动速度与星系的逃逸速度相当,在数量上则胜过了整个星系的恒星形成率。换句话说,在黑洞的影响下,星系中的大量气体一去不复返,长此以往,必然将导致大规模恒星形成的终结。

而当两个星系并合时,其核心的黑洞也会合二为一,这又是一类在特大质量黑洞的形成和演化历史上理应扮演重要作用,但人们对其知之甚少的过程。韦布望远镜就以其高分辨率,发现了已知红移最高的并合黑洞系统——ZS7<sup>[14]</sup>。乍看之下,这个

位于红移 7.15 处的星系拥有一个活跃吸积的黑洞,周围环绕着源自高速云团构成的宽线区,与活动星系核的典型特性相符。但奇怪的是,这个宽线区相对星系的光学中心存在明显的速度和位置偏移;星系的光学中心本身又具备与前述黑洞无关的星云窄线,也是活动星系核常见的光谱特征。这样看来,最合理的解释应该就是这个 ZS7 是一个经历过并合事件的星系,但前身星系留下的两个中心黑洞尚未完成并合。如果能够积累更多此类现象的样本,就可以更好地估算特大质量黑洞并合事件的发生率,进而指导未来的空间低频引力波探测。(未完待续)

### 参考文献

- [1] Curtis-Lake, E., Carniani, S., Cameron, A., et al. 2023, *Nature Astronomy*, 7, 622
- [2] Eisenstein, D. J., Willot, C., Alberts, S., et al. 2023, arXiv: 2306.02465
- [3] Carniani, S., Hainline, K., D'Eugenio, F., et al. 2024, *Nature*, 633, 318
- [4] Mowla, L., Iyer, K., Asada, Y., et al. 2024, *Nature*, 636, 332
- [5] Heintz, K. E., Watson, D., Brammer, G., et al. 2024, *Science*, 384, 890
- [6] de Graaff, A., Pillepich, A., Rix, H.-W. 2024, *ApJL*, 967, L40
- [7] Atek, H., Labbé, I., Furtak, L. J., et al. 2024, *Nature*, 626, 975
- [8] Oesch, P. A., Brammer, G., van Dokkum, P. G., et al. 2016, *ApJ*, 819, 129
- [9] Maiolino, R., Scholtz, J., Witstok, J., et al. 2024, *Nature*, 627, 59
- [10] Furtak, L. J., Labbé, I., Zitrin, A., et al. 2024, *Nature*, 628, 57
- [11] Juodžbalis, I., Maiolino, R., Baker, W. M., et al. 2024, *Nature*, 636, 594
- [12] Suh, H., Scharwächter, J., Farina, E. P., et al. 2025, *Nature Astronomy*, 9, 271
- [13] D'Eugenio, F., Pérez-González, P. G., Maiolino, R., et al. 2024, *Nature Astronomy*, 8, 1443
- [14] Übler, H., Maiolino, R., Pérez-González, P. G., et al. 2024, *MNRAS*, 531, 355