

詹姆斯·韦布空间望远镜的早期科学成果

邓劲松

(中国科学院国家天文台 100101)

距离詹姆斯·韦布空间望远镜(以下简称韦布望远镜)2021年圣诞节令全世界瞩目的发射升空,已经过去两年多了。与其漫长而坎坷的研制历程形成鲜明对照的是,它奔赴150万千米之外工作轨道的旅途格外顺利;在轨的工作性能表现出色,拍摄的星像清晰而锐利。它自2022年7月起正式开始天文观测,不遗余力地为人类持续揭示来自宇宙万象的深奥隐秘。

相比预期将长达20年的工作寿命,韦布望远镜这一年多来的科学产出只是小试牛刀。然而就重要发现的数量和质量而言,也可以说业已蔚为大观——本文将尝试从中撷取一二,以飨读者。作为人类迄今最强大的“观天巨眼”之一,韦布望远镜工作中红外和近红外波段,它最有望获得丰硕回报的

科学目标,被官方概括为“早期宇宙”、“时间长河里的星系”、“恒星的生死轮回”以及“行星新世界”这四大方面。那么就允许我照此分门别类,带领读者们来一次走马观花,一起来看看,它已经取得了怎样一些科学突破或者有趣的发现呢?

一、首张深场照——极早期宇宙的惊鸿一瞥

韦布望远镜首幅正式的科学观测图像(图1左侧大图),甫一发布就攫取了世人的目光。它来自对星系团SMACS 0723方向一小块天区的宇宙深场观测,由多波段的数据合成,总的曝光时间约12.5小时。这块天区之前已经被哈勃空间望远镜多次

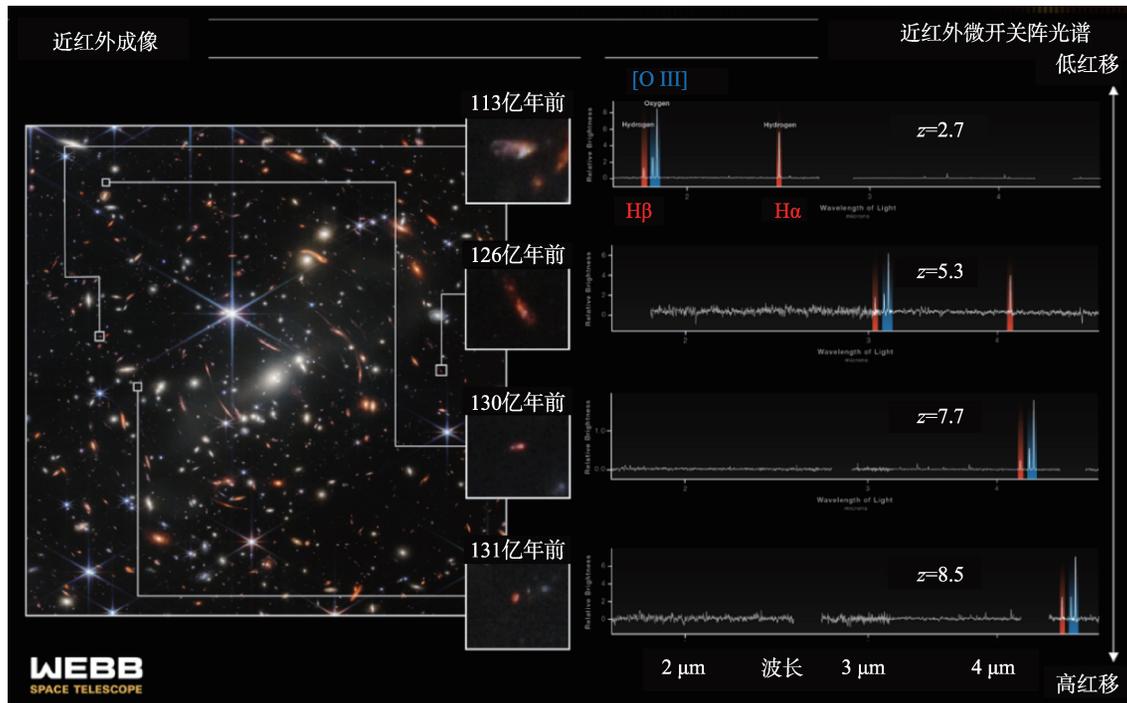


图1 韦布望远镜的首张深场照及几例高红移星系的光谱(原英文标注图片来源: NASA)

拍摄过,而韦布望远镜的红外图像展现出远为丰富的细节,以及大量超出后者视觉范围的遥远天体。

SMACS 0723 包含成百上千颗成员星系,镶嵌在一个巨大的暗物质晕上,被后者的引力紧紧束缚着。它远在 50 亿光年之外,或者说,对应的宇宙学红移值为 0.39——考虑到大爆炸后宇宙膨胀所伴随的相对论效应,当遥远天体发出的光达到我们时,波长已被相应拉长,称为宇宙学红移。为方便起见,天文学家用红移值 z 来表征遥远天体的距离和它们被观测到所处的宇宙年龄;注意其数学关系并非线性,举例说明: $z=1$ 对应距离约 110 亿光年(共动距离)、宇宙年龄约 60 亿年, $z=2$ 对应距离约 170 亿光年、宇宙年龄约 30 亿年, $z=6$ 对应宇宙年龄约 9.5 亿年, $z=10$ 对应宇宙年龄约 5 亿年,等等。为获得可靠的红移值,天文学家需要用望远镜上的光谱仪对来自天体的光进行色散,将光的强度按观测波长进行排列——即光谱,再找到各种物质元素的光谱特征(称为谱线),将观测到的波长和它们的原始静止波长(实验室或理论数据)进行比较。

在该图像中,点缀在璀璨的星系团成员星系之间,还有大量远超出该星系团距离的遥远的背景星系。其中一些因形状扭曲而格外醒目,这是当它们的光穿过星系团质量巨大的暗物质晕时,在引力透镜现象下所成的“畸变放大”像。另外一些则仅表现为暗淡的小斑点(图 1 左侧小图),特别是其中有些“颜色”相当偏红——换句话说,观测到的光在总体上波长较长——同时公布的首批光谱(图 1 右侧示例)立刻揭示出,有几颗是来自极早期宇宙的极其遥远的星系,红移值在 7 以上(示例图标注了红移测量用到的氢原子及氧离子特征谱线)。

如此遥远的星系,之前要得以被发现,以及确认其红移,都是相当不容易的观测挑战,而韦布望远镜却能做到信手拈来,效率是惊人的!这对期待用它来探索极早期宇宙的天文学家来说,是莫大的鼓舞。

二、目睹宇宙的“第一缕光”还远吗?

“要有光”——根据推算,第一代恒星和星系大

约在红移 20(宇宙年龄约 2 亿年)之后一段时期内相继形成,终结了宇宙的“黑暗期”。找到这些“第一缕光”天体,了解它们的性质,可以说是当前极早期宇宙研究的圣杯,也是韦布望远镜的观测既为天文学界也为社会最强调的研究方向。

最遥远天体的记录之前由哈勃空间望远镜发现的星系 GNz-11 保持,红移约 11(宇宙年龄约 4 亿年)。韦布望远镜的首张深场照和“早期释放科学课题”的数据一经公开,全世界天文学家竞相投入分析,唯恐落他人之后——红移 16.4,红移 20.4,一个个惊人的数字被曝出来!但这些抢先发表的结果,是基于多波段“颜色”信息所做的估算,难免出现歧义——比如低红移但富含尘埃的星系同样“颜色”偏红。正应了“萝卜快了不洗泥”这句俗语,“红移 16.4”的星系被光谱更正为红移 4.9,而“20.4”的红移值经进一步分析更可能是不到 1。

好在韦布望远镜拥有强大而灵活、观测效率空前的红外光谱仪。待喧嚣过后,迄今已有近十个星系被揭示出红移大于 11、来自过去尚未触及之宇宙时期的庐山真面目。距离桂冠暂时戴在“早期释放科学课题”JADES 发现的 JADES-GS-z13-0 头上(图 2),这是一颗贫“金属”星系(所谓“金属”是指除宇宙的原初元素氢和氦之外的其他元素),红移高达 13.2,对应宇宙年龄约 3 亿年。

人类的视线离第一代星系看来已越来越接近,那么第一代恒星呢?即使对于强大如韦布望远镜,它们还是太过暗弱,更别说将单颗恒星从遥远星系中分辨出来的能力了。不过,哈勃空间望远镜近几年在观测星系团时,借助引力透镜放大的机缘巧合,意外捕获到三颗被增亮数千倍、极其遥远的超巨星“伊卡洛斯”(红移 1.5)、“哥斯拉”(红移 2.4)和“埃雅仁迪尔”(红移 6.2)!更极端的引力透镜现象能否让韦布望远镜“捡漏”到某颗第一代恒星呢?好运或许千载难逢,但未必不能期待一下。事实上,韦布望远镜在 GNz-11 周边用光谱探测到的氦离子谱线,就有研究认为代表了第一代恒星的集体星光贡献。

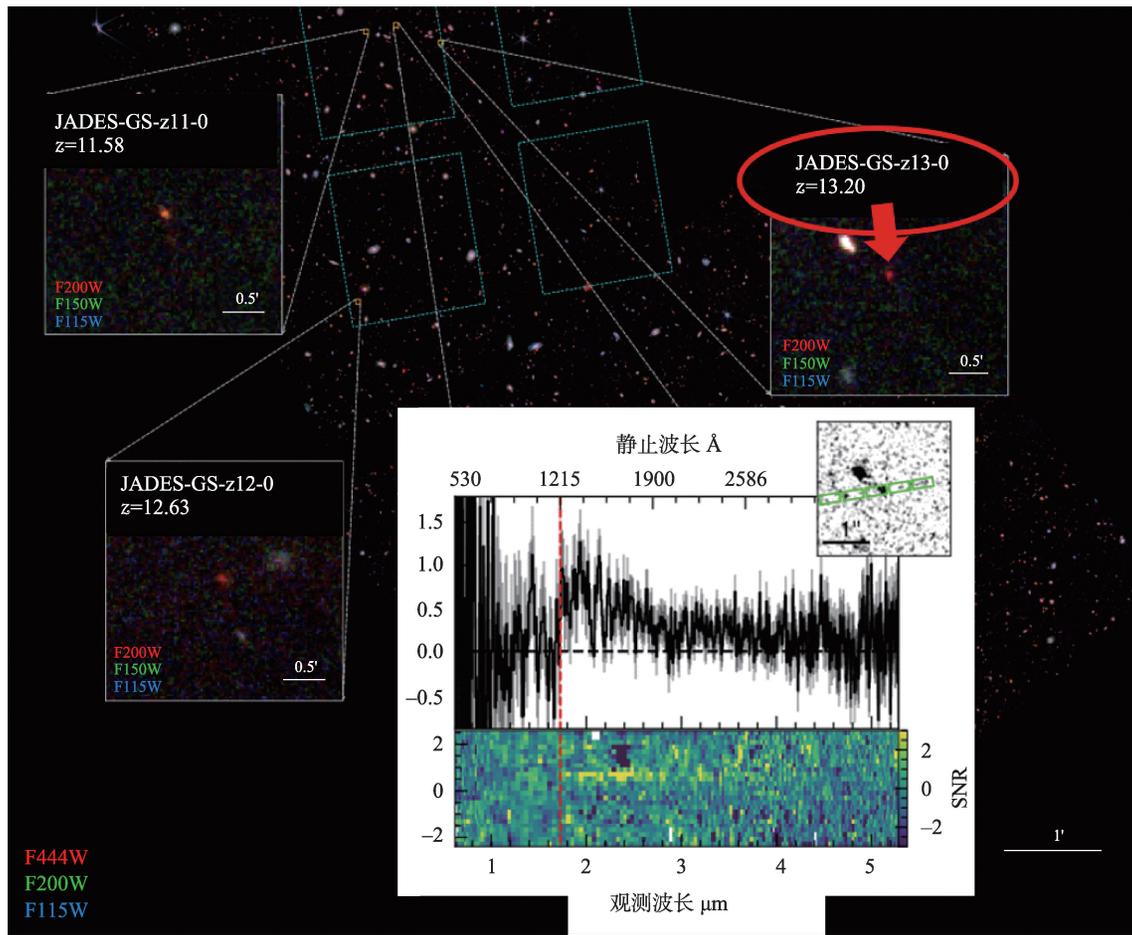


图2 最高红移记录星系JADES-GS-z13-0及其光谱(原英文标注图片来源: *Nature Astronomy*)

三、意外早熟的星系与“隐藏怪兽”

在一块约4%月面大小的天区,天文学家用“早期释放科学课题”CEERS的观测数据,鉴定出6颗所处宇宙年龄仅5到7亿年(红移约7到9)的大质量星系。根据亮度,推算出它们所含恒星的总质量均在百亿倍太阳质量之上,最重一颗甚至接近千亿倍太阳质量,超过今天的银河系。而过度偏红的“颜色”,暗示着它们拥有大量年老恒星。这些星系可以说尚沐浴在宇宙的晨光之下,但它们自身怎么会成长得如此之快呢?另一方面,韦布望远镜也对一批处于相同红移年代、但质量较小的星系做了光谱观测,分析后却发现,后者“金属”元素丰度的增加要显著低于预期——或许这批星系尚未“断奶”,恒星核合成的产物(富含“金属”)被从星系际流入的原

初气体(仅含氢和氦)稀释了?

让韦布望远镜把目光稍微挪近一点。同样基于CEERS数据,但是在红移1.5到6.5之间,天文学家建立了一个包含4千颗星系的观测大样本。统计发现,相对于不规则的星系形态(就像今天的大小麦哲伦云),盘星系(就像今天的银河系和仙女大星云)这种“宁静”成熟的形态占比意外之高(图3)。特别是,对于恒星总质量大于十亿倍太阳质量的较大星系,当宇宙从“清晨”步向“正午”,盘星系的高占比数并未有明显变化。之前被哈勃空间望远镜观测数据支持的主流图景,即宇宙早期的星系演化,是由小质量的不规则星系通过频繁的碰撞并合形成大质量的规则形态所主导,会不会自此得以颠覆呢?观测还发现一颗红移约为3的星系CEERS 2112,是与今天的银河系形态类似的棒旋星系(图3)。一般

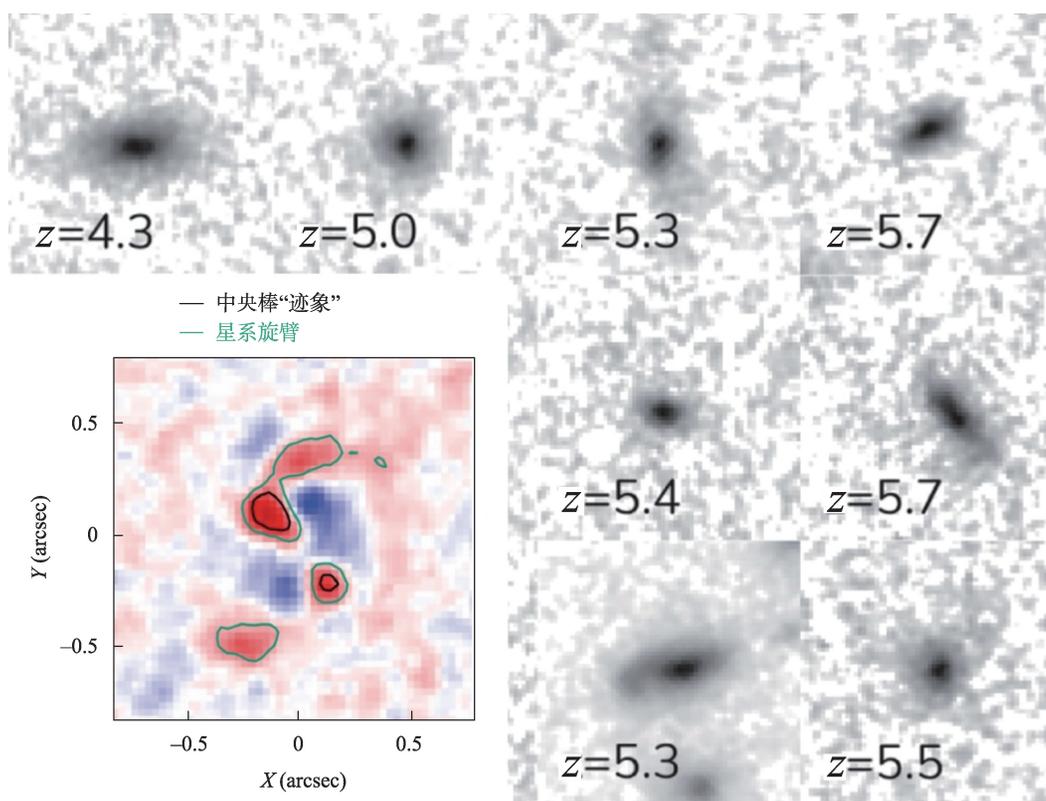


图3 CEERS 高红移星系形态样本中的盘星系示例(图片来源: *The Astrophysical Journal* 及红移3附近星系 CEERS 2112 的旋臂和中央棒“迹象”(左下; 原英文标注图片来源: *Nature*)

认为,盘星系中央的棒结构是直到晚近才演化出的特征,而CEERS 2112所处的宇宙尚幼,年龄仅约20亿年。

今天宇宙中的星系,在中央核区普遍藏有一头“巨兽”——超大质量黑洞。它们之中很小一部分,会因大量攫取流入核区的星系物质而进入活跃期:周边的下落物质在黑洞的强大引力下做超高速运动,将引力能转化为多变而耀眼的“濒死”光辉(波长覆盖可从射电一直到伽马射线)释放出来,并呈现出独特的光谱,这就是活动星系核及其极端形式——类星体。它们所源自的“种子”黑洞是在宇宙中何时、又是如何诞生的,它们对荡清“黑暗期”的宇宙再电离过程(紫外光将星系之间的中性氢电离从而使宇宙变得透明)有多少贡献,它们的质量增长与寄主星系的演化是否协同,都是当代天文学的热点问题。

韦布望远镜在宇宙早期超大质量黑洞的研究

方面迅速带来激动人心的发现,以及新的谜团。用“早期释放科学课题”的数据,在红移4到7之间发现了一批年轻的活动星系核或类星体,是根据该类天体成年数目所作预测的几十倍。跟之前已有发现相比,这批活跃的星系级黑洞往往还很小个,质量可以仅为太阳的几百万倍到上千万倍,与银河系中央那个毫不起眼的宁静黑洞半斤八两。甚至有研究宣称,位于红移6之处的最小一颗,已落入超大质量黑洞的原初物质团“直接坍缩”形成理论假说中的“种子”黑洞质量范围——运气足够好的话,韦布望远镜将来能不能直接探测到某颗活跃的“种子”黑洞呢?

此外,类星体顾名思义,其寄主星系本身会因核区的高亮度而难以被探测(就好比盯住汽车的远光灯)。而韦布望远镜的强大性能,使其能前所未有的做到将两颗红移6附近类星体的暗弱寄主星系辨析出来,据此发现,测量出的中央黑洞质量大约是

星系的恒星总质量(百亿到千亿倍太阳)的1%,符合在晚近宇宙中观测到的普适经验范围,为研究星系和超大质量黑洞的协同演化提供了宝贵的来自早期宇宙的新观测事实。

另一重要进展是与钱德拉X射线天文台联合取得的,后者对一个星系团做了长达两星期的曝光观测,搜寻被引力透镜放大的高红移X射线天体:最终证实约有20颗X射线光子来自被韦布望远镜探测到的星系UHZ1,这意味着发现了一颗红移高达10的类星体(图4)!令人颇感意外同时也惊喜的是,测量的黑洞质量大到几乎与该星系的恒星总质量(太阳的几千万到近亿倍)相当!此等规模的黑洞,要在宇宙极早期经短时间内形成,绝非易事——这会不会是超大质量黑洞的所谓“重种子”直接坍缩假说的证据呢?

有意思的是,对曾经的红移记录星系GNz-11,

韦布望远镜的红外光谱揭示,它很可能也隐藏有百万倍太阳质量的活跃黑洞(或许也是它亮到足以被哈勃空间望远镜捕获的原因)。另一方面,韦布望远镜对几颗与之类似的极早期星系($z>7$)的复杂周边环境做了成像观测,从而推断出,GNz-11的观测性质也与星系间相互作用有关——如其周边存在氢原子和氦离子的紫外谱线(观测红移到红外波段)发射区——它或许正落在一个原星系团(星系团尚在形成的阶段)的核心。

总结一下,韦布望远镜在对早期宇宙的观测中,迄今为止最令天文学家们惊讶的发现,是这些发育成熟得过早的星系和超大质量黑洞。这一方面是对现有的星系形成和演化理论(也包括宇宙演化理论)的不大不小挑战,另一方面也说明,尽管实际的整体演化图景相当复杂(如上面提及的其他发现),韦布望远镜有能力将大门一点点推开,窥探到

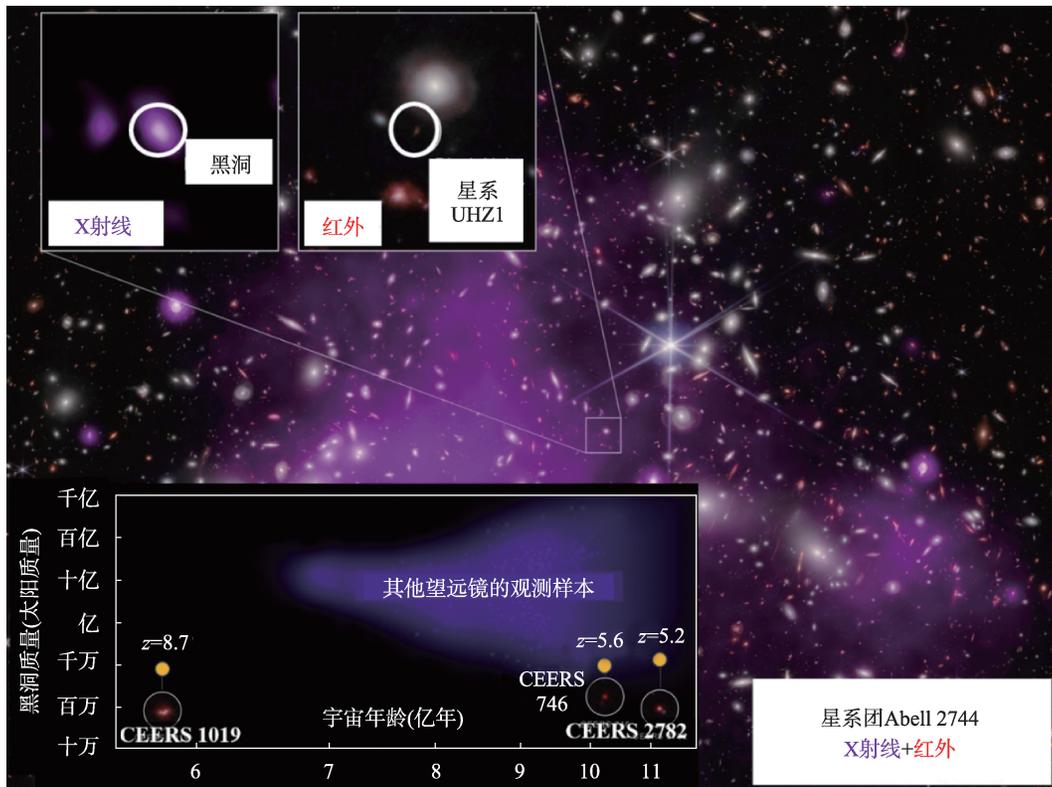


图4 韦布望远镜和钱德拉X射线天文台联合观测的星系团Abell 2744天区中被引力透镜现象放大的最高红移类星体UHZ1(原文标注图片来源:NASA)及韦布望远镜测量的3颗高红移活动星系核的黑洞质量(左下图黄色点符:原文标注图片来源:NASA)

更多奥秘。

四、物质外流与碰撞——恒星的“生命舞步”

让我们回到银河系,看一看千姿百态的恒星世界,还有孕育也埋葬它们的星际空间。哈勃空间望远镜献给人类社会最为震撼的照片是《创生之柱》,那是老鹰星云 M16 中包裹有大量恒星“婴儿”,由气体与尘埃组成的巨大结构。韦布望远镜的红外观测,能更清晰地窥见隐藏在这些星际介质深处的原恒星(新生的初期恒星体)或它们的“襁褓”。

原恒星会喷射高速的物质外流,预示着它们即将破茧而出。韦布望远镜观测了最年轻的原恒星外流 HH 211,证实其主要成分是氢和一氧化碳这些分子物质(图 5 右上)。它的灵敏度如此之高,以至于还能在银河系的伴星系小麦哲伦云中的一个恒星形成区,一次性发现几百颗小质量的初期恒星体。

沃尔夫-拉叶星是演化到生命末期,丢失了外

壳层的大质量恒星,对应非常短暂的演化阶段,故此在观测上非常少见。在由沃尔夫-拉叶星和年轻大质量恒星组成的双星系统 WR 140 中,韦布望远镜拍摄到让观者无不惊叹的层层嵌套结构(图 5 左)。观测与用计算机开展的理论模拟吻合得很好:两颗恒星在“起舞”绕转,每过 8 年当它们最为靠近时,从沃尔夫-拉叶星流失的富含碳元素的稠密星风,受到伴星星风的猛烈撞击和压缩,生成能发出红外辐射的大量尘埃和多环芳香烃(一大类含数个苯环的常见的宇宙有机分子)。

韦布望远镜还详览了著名的南、北环状星云,即 NGC 3132(图 5 右下)和 M57,对它们美丽而精微的形态给出了一个全新的解释:除了分别位于这两颗行星状星云的中央,抛出这些星云物质并正在向致密天体——白矮星——演变的“濒死”主恒星,很可能还存在两三星隐匿的伴侣恒星,观测到的复杂结构来自它们在“集体舞会”中的共同塑造。

在银河系的另一伴星系大麦哲伦云,韦布望远镜观测了著名的超新星 1987A 的遗迹。1987 年的

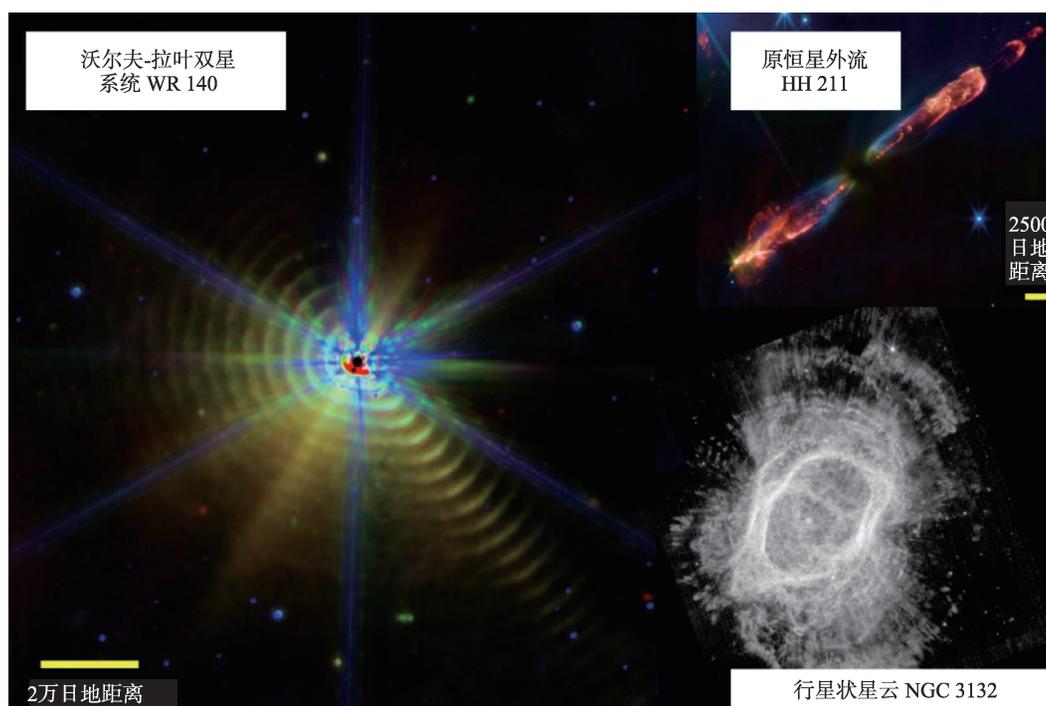


图 5 沃尔夫-拉叶双星 WR 140 的嵌套尘环、原恒星外流 HR 211 的氢分子(红与蓝)和 CO(绿)分布及南环状星云 NGC 3132 的氢分子分布(原英文标注图片来源: *Nature Astronomy*)

那次爆发标志着一颗大质量恒星的死亡瞬间,释放的中微子被实时探测(后被授予诺贝尔物理奖),符合爆发为恒星最内核中新生的一颗中子星所启动的理论图像,爆发抛出的恒星物质则推击星际介质形成仍在膨胀的遗迹。几十年来,人们一直徒劳无功寻找着那颗幸存的致密“遗骸”天体,直到韦布望远镜在遗迹中央探测到来自氦元素的红外辐射——高度电离的氦,其电离需要有大量的高能光子,最可能的源头是中子星。

让我们将目光再投向宇宙深处:2023年3月7日,伽马射线望远镜探测到远在9亿光年之外两颗中子星的并合——它们很早以前就被抛出寄主星系,共舞多年后在骇人的伽马射线暴和千新星爆炸中粉身碎骨。一两个月后,韦布望远镜在红外光谱中探测到罕见的碲元素谱线,为包括稀土和金在内诸多重元素的千新星起源假说提供了新的强有力证据。

从以上五花八门的发现中可见,韦布望远镜在红外波段的锐利视觉,为研究各类恒星如何从星际气体和尘埃中诞生,在生命的旅途中如何跟星际介质相互作用,又是如何将它们核合成的元素产物返还给星系,成为下一代恒星、行星系统乃至生命得以从中生成的原料,提供了一个空前清晰的视角。

五、“另世界”:二氧化碳、水和有机分子

用韦布望远镜分析系外行星的大气光谱,筛查它们的宜居性以及可能与生命活动相关的蛛丝马迹,在寻找“第二个地球”的漫漫长途上更迈进一步,人们对此也寄予厚望。当然这并非易事,需要积累多次的长时间观测数据,并从中扣除寄主恒星的压倒性贡献,才能获得一点信噪比并不高的结果;为了从这样的数据中提取大气成分等信息,需要构筑海量的大气理论模型来进行拟合对比,而即便如此,获得的解释很可能仍存在着模棱两可。

韦布望远镜迎难而上,它不负众望,陆续取得了一些突破。首先是在 WASP-39 b 的蓬松大气中探测到了二氧化碳(图6)。这是一颗质量跟土星差不多的系外行星,属热木星类型——因离恒星很近而被加热到高温的气态巨行星。众所周知,二氧化碳是可能与生命活动相关的分子,而这是它首次被确认存在于某颗系外行星的大气之中。对 WASP-39 b 红外光谱分析所用的最佳拟合理论模型表明,它的大气中可能还存在一定量的二氧化硫和硫化氢,事实上,硫也是地球上一种重要的生命元素。

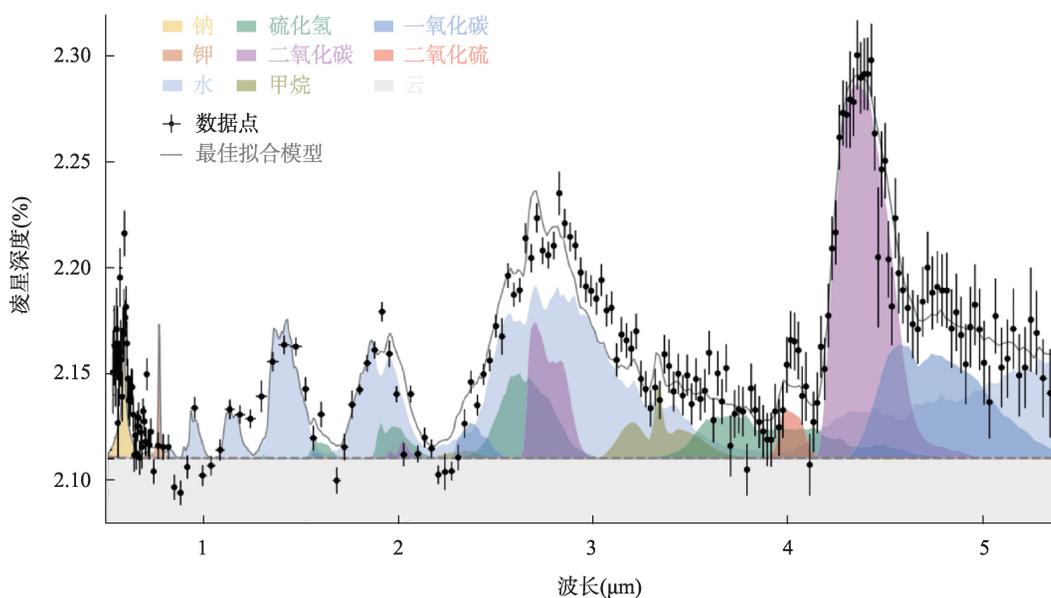


图6 热木星 WASP-39 b 通过凌星观测到的大气红外光谱(原英文标注图片来源: *Nature*)

虽说 WASP-39 b 的物理条件并不具备宜居性,但这些发现足以证实韦布望远镜的潜力。

借助韦布望远镜而首次成功探测到二氧化碳的,还有太阳系中木卫二“欧罗巴”的冰面:是在两块所谓的混杂地貌区,据推测很可能是从它那个著名的冰下海洋中泄漏上来的。木卫二一直为天体生物学研究所关注,而韦布望远镜的这一新发现,难免不让人更加浮想联翩。

人类早已认识到,水分子在宇宙中普遍存在。但当行星系诞生时,水是如何被递送到内区的岩态行星譬如地球上的,一直被争论不休。韦布望远镜提供了新的观测事实。PDS 70(质量约 0.8 倍太阳)是一颗年龄仅 5 百万年、尚未演化到主序阶段的年轻恒星,它的原行星盘尚在,包括内盘、外盘和盘隙中两颗新生原行星。在韦布望远镜获得的内盘红外光谱中,探测到了大量高温水蒸气(图 7),依理论模型可能是来自最中央的区域,此外还有易为恒星紫外辐射摧毁的二氧化碳。据此推测,假如最内区

藏有形成中的岩态行星,会有足够多现场生成的水能从紫外辐射幸存下来,供其汲取。此外,韦布望远镜还在太阳系的里德彗星(238P)的彗发光谱中探测到了水蒸气——这是一颗来自小行星主带而非外太阳系的特殊类型彗星——该结果对回溯内太阳系早期的挥发物历史具有重要意义。

韦布望远镜对系外行星 K2-18b 的观测曾在社会上引发过轰动。有天文学家宣称,不仅在其大气光谱中发现了甲烷和二氧化碳,所用的拟合大气模型甚至有二甲基硫醚——后者在地球上基本都是产自生命相关活动! K2-18b 是大小介于地球和海王星之间的迷你海王星类型;它恰好位于水能以液态稳定存在的所谓宜居带,据猜测或同时拥有海水和富氢的大气(一颗海氢行星)。不过,天文学家同行们迅速指出,尽管对甲烷的明确探测是个突破,甲烷与二氧化碳在大气中的共存在天体生物学中也很有趣,但就目前的数据质量而言,二甲基硫醚的有无完全是两可的——或者说,在模型中引入该

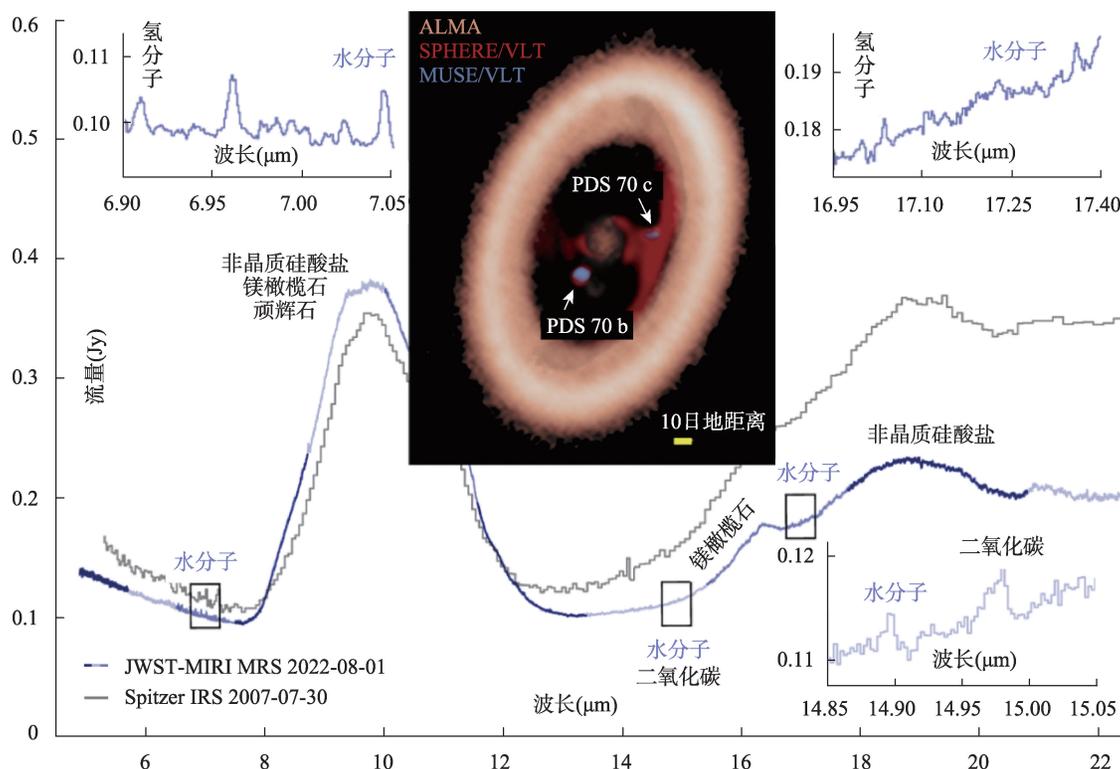


图7 主序前恒星 PDS 70 的内、外原行星盘和盘隙中两颗原行星(原英文标注图片来源: ESA) 及韦布望远镜拍摄的内盘红外光谱和水分子特征(原英文标注图片来源: Nature)

成分没有科学意义！韦布望远镜对K2-18b的后续观测数据也将会发表,值得继续关注。

当然,星际空间并不缺乏各种简单或复杂的有机分子。如图7所示,韦布望远镜观测了恒星形成区**蝮蛇 I**的一颗新生原恒星,瞄准正在向其下落的包层物质的外缘,借助于对视线方向两颗背景恒星光**的强吸收**,获得了分子云内部冰态分子的红外光谱。除了水冰、干冰、一氧化碳冰,还探测到冰态的氨、铵根、氰酸根和羧基硫,以及简单有机分子甲烷冰和复杂有机分子甲醇冰(或许也有乙醛、乙醇、丙酮等)。这些冰分子,可以为原行星形成时的有机化学过程提供重要原料。图7右下小图则是韦布望远镜对猎户星云方向一个原行星盘系统d203-506的观测,这是首次在太阳系外探测到甲基阳离子。这种简单阳离子由一个碳原子和三个氢原子组成,化学性质活跃,在理论假说中被认为是在星际启动气相有机化学的基石!而该系统之所以有甲基阳离子形成,很可能得益于附近著名的**四边形星团**中大质量年轻恒星的强大紫外辐射。

同样是在**四边形星团**不远处的星际空间,韦布

望远镜的图像捕捉到500多颗不与任何恒星相伴的“流浪行星”,意外的是其中竟有40个双行星系统和2个三行星系统!它们是如何能够形成的?天文学家们感到无比困惑。此外,韦布望远镜还在红移高达4.4的星系SPT0418-47的光谱中,探测到静止波长3.3微米的多环芳香烃特征,在红移高达6.7的星系**JADES-GS-6**的光谱中,探测到静止波长217.5纳米的富碳微尘特征,这为宇宙早期的星系有机化学和行星形成图景增添了有趣的变数。

诚然,韦布望远镜尚未强大到足以探测环绕类太阳恒星的宜居带类地行星,更毋庸奢求它在系外行星世界中发现所谓的生命活动迹象。但仅看观测数据中目前公布的这冰山一角,数据质量已远超前**的哈勃空间望远镜、斯皮策空间望远镜以及地面上的大望远镜**。对系外行星的性质特别是大气成分很多模棱两可的认知正在得以澄清,新的发现将源源不断涌现,再与对星际尘埃和分子以及太阳系天体的观测相结合,韦布望远镜无疑为探索人类的终结问题之一——宇宙与生命的关系——提供了新的助推力。

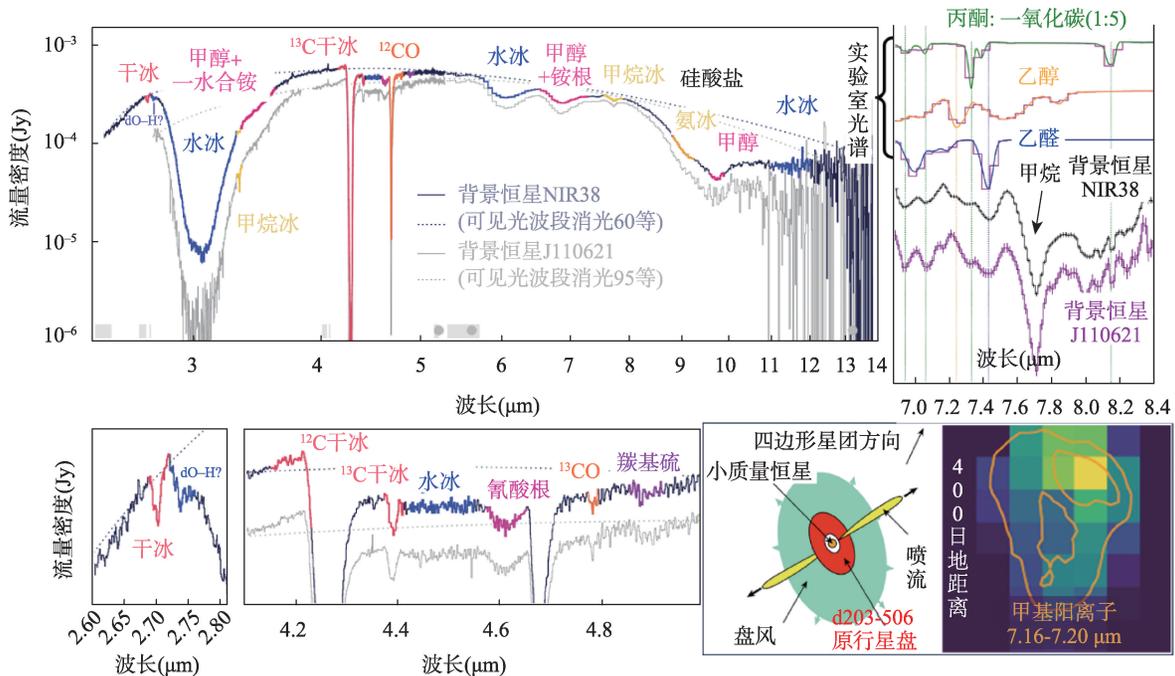


图8 蝮蛇I方向分子云的冰态分子红外光谱(原英文标注图片来源: *Nature Astronomy*) 及d203-506原行星盘的甲基阳离子红外像和结构示意(右下:原英文标注图片来源: *Nature*)