

# 詹姆斯·韦布空间望远镜

## ——窥探宇宙之深奥隐秘

邓劲松

(中国科学院国家天文台 100190)

2021年底,肩负着人类下一代观天重器的使命,詹姆斯·韦布空间望远镜(James Webb Space Telescope,简称 JWST;中文简称韦布空间望远镜)在法属圭亚那发射升空,引发了全球科学界及民众的广泛关注,蔚为西方圣诞节前后的一大盛事。经过一个月的飞行,望远镜顺利抵达环绕日地第二拉格朗日点的工作轨道,巨大的遮阳板(面积约300平方米)、副镜组件、口径6.5米的拼接主镜(由18面铍制子镜组成,图1)均已在旅途中依次展开和部署到位。接下来是对望远镜为期数月的精细调试和验证,以实现预定的性能指标,开启长达十年的天文观测及伟大宇宙探索之序幕。

韦布空间望远镜太空旅程的归宿地,日地第二拉格朗日点,位于太阳和地球连线方向,距地球

大约150万千米(图2)。航天器在此处绕太阳公转时,离心力恰好能与日、地引力之合平衡。而将望远镜远置此处,不用烦恼“渺小”的地球会不时遮挡观测视野,也无需考虑热流、重力场不均匀等地球干扰带来的麻烦,太阳的光热能用遮阳板方便地拒之门外——总之,环境深冷、黑暗、自由,对实现高灵敏度、高稳定性的空间天文观测来说,再理想不过了。不过,第二拉格朗日点并非力学上的稳定平衡点,所以韦布空间望远镜在绕日公转的同时,实际上是在几十万千米之外近似以半年为周期围着该点绕转,且需要消耗宝贵的燃料来频繁修正轨道,而这限制了它为人类服务的职业生涯长度。

### 全副武装的红外“巨眼”

众所周知,韦布空间望远镜将继续服役多年的哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope,简称 HST),项目的早期名字即“下一代空间望远镜”(Next Generation Space Telescope)。不过除了口径远比哈勃空间望远镜的2.4米大,韦布空间望远镜还有一与哈勃空间望远镜最显著的不同之处——它是一台红外望远镜,工作在近、中红外波段,主要接收波长约从1微米到30微米的天体电磁辐射。哈勃空间望远镜虽然也有一定的近红外观测能力,但主要工作在波长1微米不到的光学波段以及近紫外波段。事实上,韦布空间望远镜也是已退役的斯皮策空间望远镜(Spitzer Space Telescope,简称 SST)的继任,后者口径只有85厘米,却作为专门的红外设

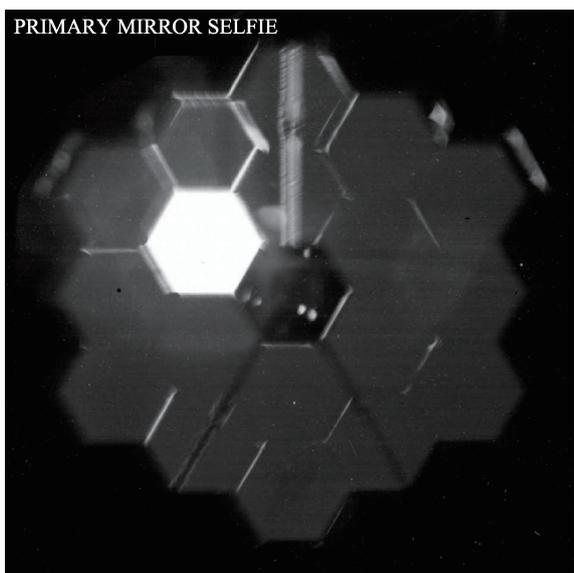


图1 韦布空间望远镜在轨调试之初使用MIRI相机对拼接主镜的首张“自拍”(图片来源:NASA)

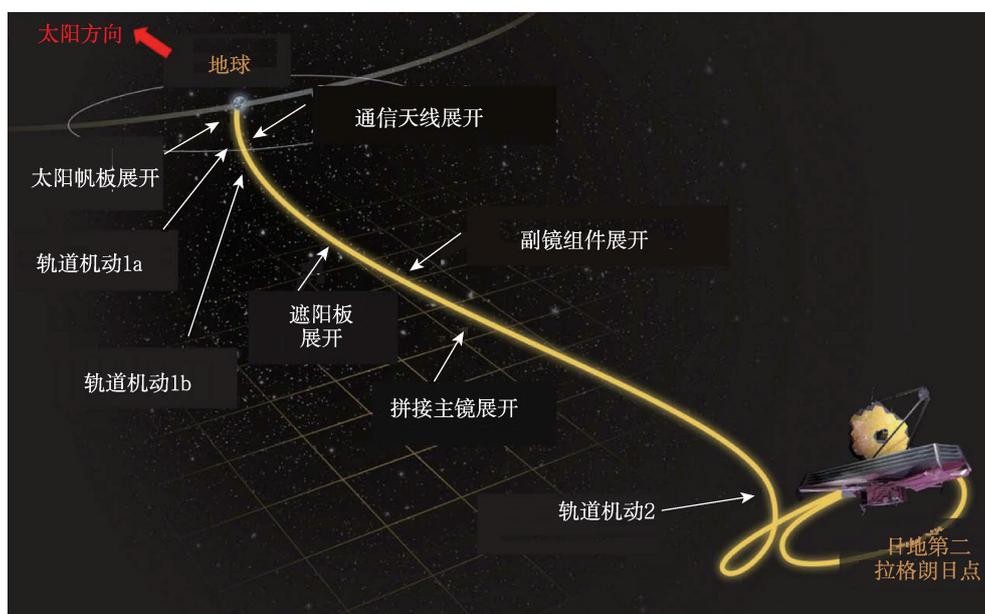


图2 韦布空间望远镜的太空旅程及工作轨道示意图(原英文标注图片来源:NASA)

备与哈勃空间望远镜一同跻身于美国上一代“四大空间天文台”。

红外横跨的光子能量(或波长)范围的两端比值要比光学和紫外大得多。而相对于主导可见光星空的炽热普通恒星,星际有大量天体是温热乃至冰冷的,它们的主要辐射是红外线(譬如地球)。事实上典型星系的全部恒星辐射,大约一半也会经星际尘埃等的吸收和再发射转移到红外。但地球大气层阻挡了红外大部分波段的天体辐射,有幸能漏过的少量波段也往往淹没在大气发出的强大红外背景中。能像探测可见光一样轻松探测红外线,揭秘地面光学望远镜和哈勃空间望远镜力有不逮的“温冷宇宙”、“尘埃宇宙”、“分子宇宙”,这曾是斯皮策空间望远镜能力令人惊叹之处,也将会被口径大8倍的韦布空间望远镜发扬到全新的高度。

韦布空间望远镜采用了比哈勃空间望远镜主光学设计更为现代的三反消像散系统(图3),其焦面视场由四台终端仪器分享,分别是中红外仪器(MIRI)、近红外相机(NIRCam)、近红外光谱仪(NIRSpec),以及兼作精密导星仪(FGS)的近红外成像仪和无缝光谱仪(NIRISS)。这些仪器有各自不同的工作波段

(图4),并且设计有多种观测模式供天文学家灵活选用,包括直接成像、无缝光谱、单缝光谱、多目标光谱、集成视场光谱、星冕仪、时序测量等。详尽的技术资料,负责运行的美国空间望远镜研究所(STScI)在网站上有公开提供。这里只给出观测性能的一个简单对比,以总曝光时间1万秒对点源成像的10倍信噪比探测极限(AB星等)为例,韦布空间望远镜在近红外波段能接近29等,比哈勃空间望远镜(在1.6微米附近)要深近2个星等,在中红外

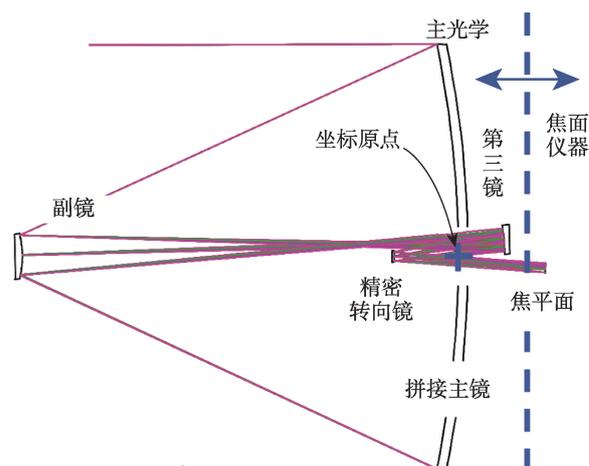


图3 韦布空间望远镜的三反消像散系统主光学光路示意图

(原英文标注图片来源: Gardner et al. 2006, *Space Science Reviews*, 123, 485)

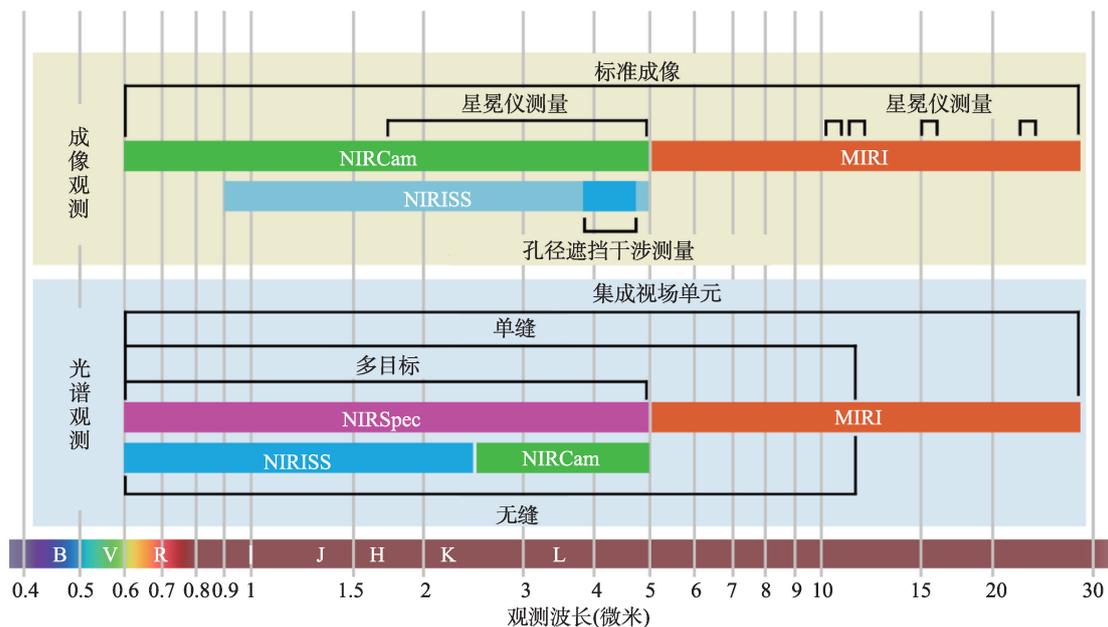


图4 韦布空间望远镜焦面终端仪器的工作波段与观测模式(原英文标注图片来源:STScI)

波段如10微米附近能到约24等,比斯皮策空间望远镜深3个星等。星等差根据定义与亮度比成对数关系,2个星等差不多是6倍亮度,3个星等则大约暗16倍。

### 传承上一代的辉煌成就

毋庸置疑,凭借强大的性能指标,韦布空间望远镜将和哈勃空间望远镜一样,堪称各自时代人类探索宇宙的“万能”利器,在天文学几乎所有领域都会有极其丰富的科学产出。但二者对观测波段的不同抉择,也切实反映着天文学领域在焦点科学兴趣和探索方向上的重要变化。

哈勃空间望远镜构思、研制于二十世纪七八十年代,天文学家其时的最大期盼,是借此摆脱地球大气湍流扰动带来的成像模糊(视宁度效应),获得空间分辨率远超地面大型光学望远镜的高质量观测:哈勃空间望远镜在可见光波段的衍射极限分辨率达到0.05角秒,而最好天文台址的视宁度也难以优于0.4~0.5角秒。哈勃空间望远镜不负众望,它能在近邻星系中辨析出造父变星(作为测距的“标准烛光”)以此测量哈勃常数和宇宙年龄,拍摄了星系团中暗物质分布造成的引力透镜成像的

清晰锐利照片,也为新视野号飞船与冥王星的交会勘测准备好了冥王星的全球地图……而它向公众发布的那些美轮美奂的河内星云和河外星系的照片,细节之丰富令人惊叹,早已深深刻在世人的心目当中。

至于韦布空间望远镜,在提议之初就已确定,要将研究高红移宇宙也就是早期宇宙作为驱动性科学目标。大爆炸之后,宇宙空间整体持续膨胀。根据广义相对论,光在膨胀宇宙中旅行其波长会一直增长,将我们观测到的波长与原初波长的比值定义为 $(1+z)$ ,它等同于膨胀到现今的宇宙与光发出时宇宙的尺度之比,这里的 $z$ 就是红移。显然,天体的观测红移 $z$ 越大,意味着所看到的是越早期的宇宙。考虑到光传播的速度恒定,对于特别遥远的那些天体,天文学家也将其各自的红移 $z$ 作为方便的距离标示。

早期为韦布空间望远镜指定的主要观测对象是 $z>2\sim 3$ 的高红移宇宙,相当于现今宇宙年龄(约137亿年)的大约五分之一不到,其时总的恒星形成率尚未达到 $z\sim 2$ 处的峰值,大部分星系团也在成形之中,宇宙的面貌当与今日迥异。如此遥远(或者说早期)宇宙中的恒星和星系,它们在光学波段的

辐射,到达我们时早已在宇宙学红移下变成红外辐射。而距离越遥远,单位面积能接收到的光子数自然越少。所以需要的是一台大口径红外望远镜,放置在空间,以远离地球大气对红外的强吸收,并且避开大气压倒性的热辐射背景。

韦布空间望远镜的研制历程坎坷而漫长,远超计划,期间人类在高红移宇宙的观测和研究方面取得了许多重要进展,与此相应,上述科学目标也被进一步深化。自1995年底开始,哈勃空间望远镜开展了几回累积大量曝光时间的深场观测项目,首次尝试即带来巨大惊喜——在一小片远离银道面、仅占全天两千四百万分之一的天区图像中,密布有近三千颗暗弱的未知星系,不少颜色发红,可能非常遥远。事实上,其中约20颗测量出红移在4以上(宇宙年龄不到15亿年),最高接近于6。此后,结合哈勃空间望远镜观测和斯皮策空间望远镜的红外能力,在几乎同一天区发现了目前能证实的最遥远天体——一颗红移11的原始星系GN-z11(图5),来自大爆炸后仅4亿年的黎明宇宙。从该星系发出时波长大于121.6纳米的紫外和光学辐射全部被红移到红外,波长更短的辐射则在旅途中因中性氢的Ly $\alpha$ 吸收而损失殆尽。

## 捕捉来自宇宙深奥的“第一缕光”

现今韦布空间望远镜被反复强调的核心科学目标,已升级为去找寻来自黎明宇宙的那些最遥远的第一代星系甚至第一代恒星,或者说“第一缕光”。它们既是后继宇宙中的结构、氢与氦之外其他元素(天文学家统称为“金属”)以及各代天体的形成基础,也能用于回溯作为“种子”的原初宇宙密度涨落。

根据日渐成熟、由观测所完善和修改着的理论大图像(图6),紧随微波背景辐射的对应阶段( $z \sim 1100$ 即大爆炸后约37万年),宇宙先后经历了黑暗期和再电离时期,第一代恒星和星系迅速生成,然后再朝我们更熟悉的宇宙形态演化。首先,由于原初密度涨落的存在,物质在引力作用下集聚,猜测到 $z$ 为20~30之时(大爆炸后约1亿~2亿年),在密度最高的坍缩区,最内部的高压高温足以导致核聚变,第一代恒星陆续诞生,就此打破黑暗期的死寂。它们仅由氢和氦组成(也就是说零金属丰度),理论推算拥有极其巨大的质量,发出强大的辐射,其中的紫外部分,由近到远,将如同黑布一样紧裹着宇宙各处的中性氢气体逐步电离。到 $z \sim 10$ 前后,宇宙可

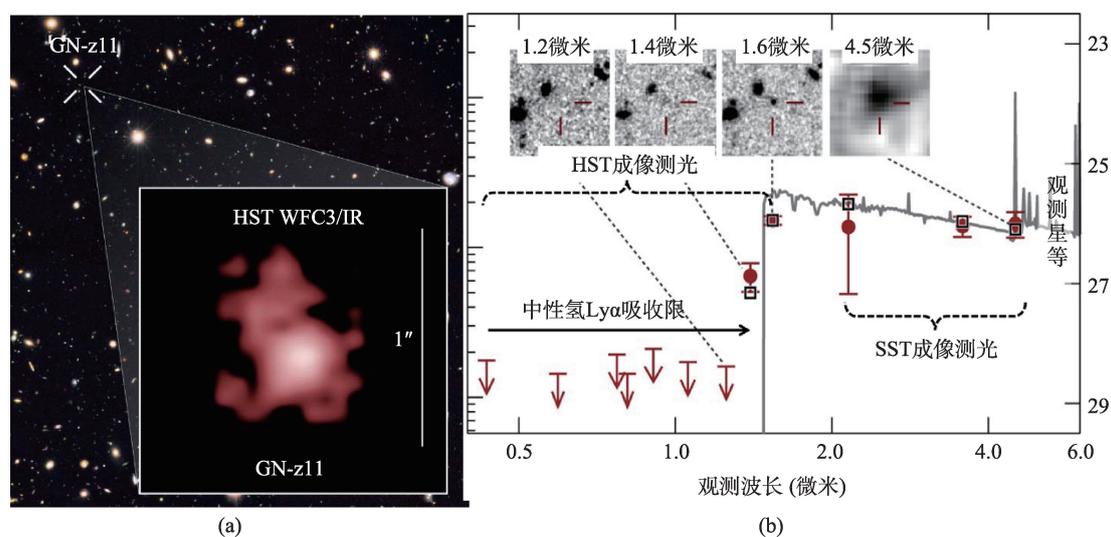


图5 哈勃空间望远镜深场观测中红移值11的星系GN-z11((a)图片来源:HubbleSite)、哈勃空间望远镜和斯皮策空间望远镜联合测光(红点为探测值、箭头表示未探测到)与 $z=11$ 处一个星系模型光谱(灰线)的比较  
(b)原英文标注图片来源:Oesch et al. 2016, *The Astrophysical Journal*, 819, 129)

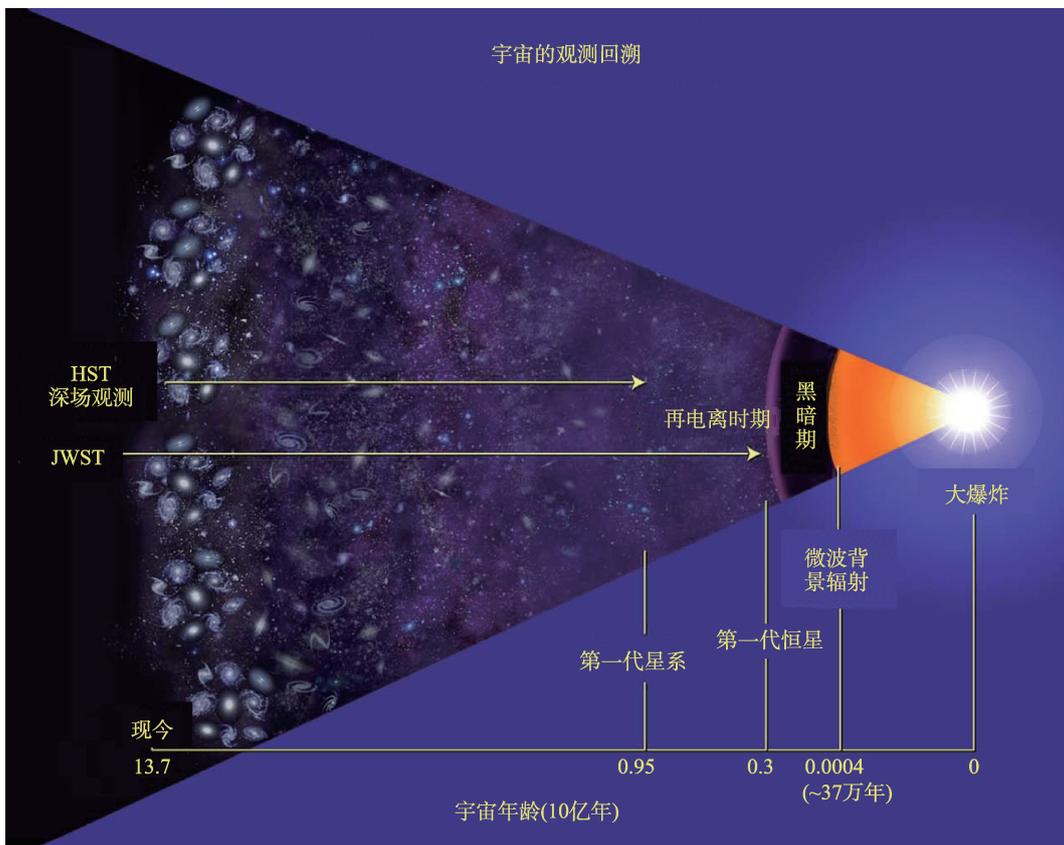


图6 宇宙演化的示意图及早期的黑暗期和再电离时期(原英文标注图片来源: HubbleSite)

能已在整体上基本转为透明。最原始的星系也应形成于这段时期,它们的形态与性质如何?是否也会对宇宙的再电离有所贡献?围绕最早的恒星和星系,也就是宇宙“第一缕光”的所有这些预言和问题,都有待于韦布空间望远镜的观测去验证和回答。而根据微波背景辐射的精细测量,再电离时期终结于大爆炸后约10亿年( $z \sim 6$ )。

韦布空间望远镜巨大的红外锐眼,无疑将窥见一批比哈勃空间望远镜/斯皮策空间望远镜的纪录更遥远的原始星系(图7),并且能借助光谱高效揭示出它们的红移距离和物理性质。对于 $z > 12$ 的极早期天体,因为宇宙学红移和中性氢 Ly $\alpha$ 吸收,到达我们的辐射落在哈勃空间望远镜工作波段之外;而相比斯皮策空间望远镜,韦布空间望远镜的红外探测灵敏度强大几十倍。哈勃空间望远镜/斯皮策空间望远镜之所以能幸运探测到 GN-z11,是因为它出乎意料地“明亮”,且碰巧处在一个再电离完成较早的

当地环境中。

另一方面,对处于 $z$ 为10~25时期的第一代恒星,理论预测的近红外观测亮度约为38.5~40等,远超出韦布空间望远镜的深场探测极限。也就是说,韦布空间望远镜尚不足以直接看到和辨析出第一代恒星的单颗个体,探测需要另辟蹊径。前景星系团的引力透镜效应是某种可能性,它能将第一代恒星或它们所成星团的观测亮度提高上百倍,当然,这需要一定的运气。更为可行的是观测第一代恒星在其短暂生命终结时刻的超新星爆发,即理论预言已久、极其明亮且性质特殊的对不稳定性超新星,观测上或能达到26~27等的红外亮度。还有就是从红外背景辐射中确认扣除所有已知贡献后的残余涨落,它们应来自第一代恒星的集体。

### 隐秘宇宙的红外探测

韦布空间望远镜强大的红外成像与光谱观测

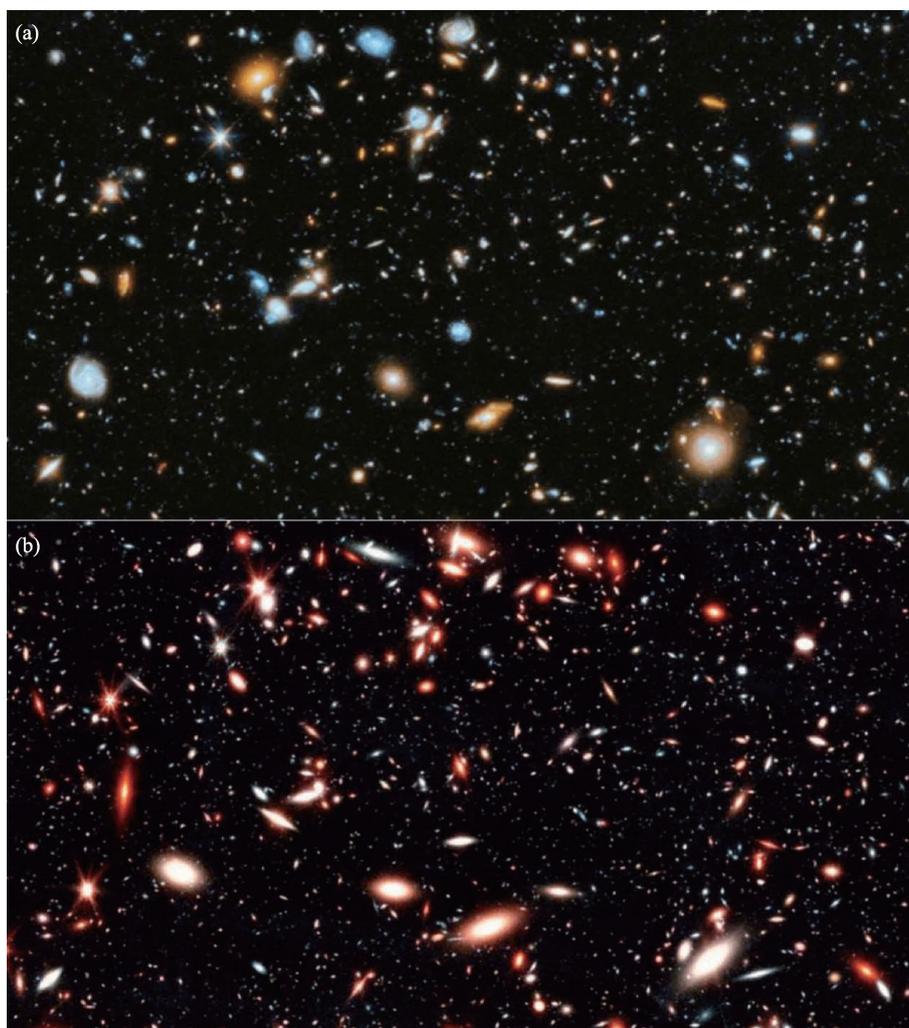


图7 (a)总曝光23天的哈勃空间望远镜极深场(XDF)观测结果局部(图片来源:NASA)与(b)数值模拟的韦布空间望远镜近红外相机NIRCcam观测效果(图片来源:JADES合作团队)对比

能力,允许我们将早期宇宙的原始星系与现代以及中间阶段的星系收集在一起,在形态和物理性质上进行全面比较。借此,就可以深入了解星系成长的全部历史,暗物质在其中的重要作用,星系之间的碰撞与相互作用,星系与它们中央黑洞的协同演化,宇宙的恒星形成总体历史,星系中“金属”元素的增丰过程,等等。这些研究方向,被官方归纳为韦布空间望远镜四大焦点科学主题之一“星系的组装”。

红外观测还有一大优势,就是能穿透在星际环境中大量存在的尘埃,将那些不巧被尘埃云严实遮蔽的天体和隐秘宇宙暴露于天文学家眼前。这对韦布空间望远镜的另一焦点科学主题“恒星及

原行星系的诞生”来说,十分关键,因为恒星集中诞生于上一代恒星生命周期播撒下大量尘埃的区域(图8)。新生的原恒星和原行星系更是被一个个的尘埃“厚茧”包裹,早期成长就是一个尘埃被逐渐驱散的过程(图9(a)),而原恒星的自身辐射会被外面的尘埃转移到红外波段。近年来,智利的阿塔卡马大型毫米/亚毫米波阵(ALMA)获得了一批原行星盘的高分辨率成像,揭示出盘隙、不对称性、螺旋等许多有趣结构;ALMA的观测波长主要是对冰冷的盘外区灵敏。而韦布空间望远镜的中红外观测有望将研究推进到原行星盘温度更高、意义更为重大的内区——可以使用星冕仪消除寄主星过于强烈的光芒从而暴露出暗弱的内盘结构,可以通过光谱

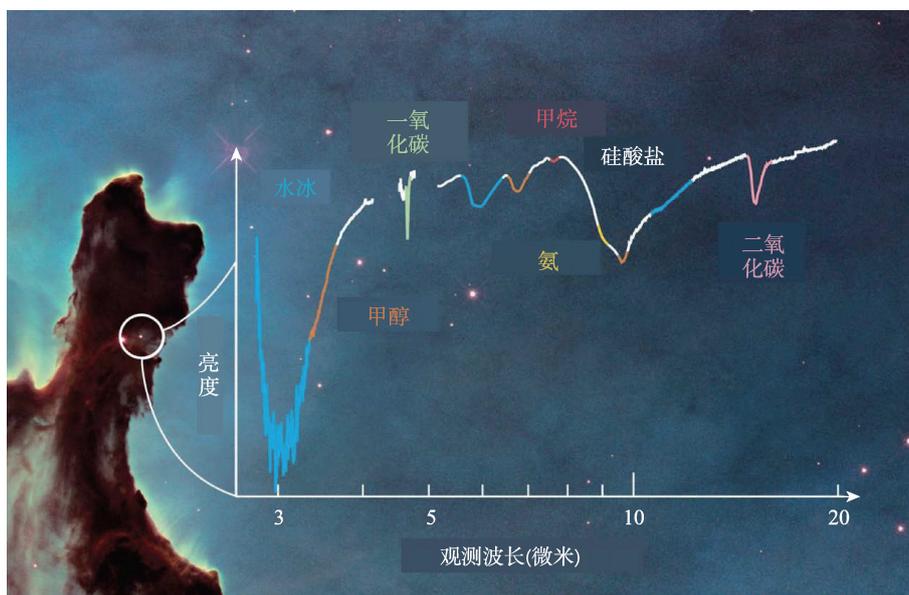


图8 藏身鹰状星云尘埃之下(哈勃空间望远镜著名的合成照“创生之柱”)新生恒星区的韦布空间望远镜模拟红外光谱  
(标注的是冰态分子和硅酸盐分子的振动谱带吸收;原文标注图片来源:NASA)

去探测水分子、二氧化碳分子以及甲烷、氨、乙炔、氰化氢等重要有机分子的存在及分布(如使用集成视场单元),可以获取作为行星胚胎形成“种子”的尘埃和冰粒的物理化学性质,借助一定的运气,还有可能直接辨析出某个盘隙处正在形成中的类地行星。韦布空间望远镜的成像分辨率虽说并非它的最强项,但设计成波长2微米附近实现衍射极限,归功于更大的口径,根据瑞利判据,观测效果当可与哈勃空间望远镜在光学波段媲美。

### 详察系外行星、遥想生命起源

韦布空间望远镜计划重点开展的系外行星观测也给人们以无限遐想,构成“行星系统与生命起源”这一大焦点科学主题的核心。最早发现系外行星是20世纪90年代初,但在韦布空间望远镜的提议与早期设计阶段,系外行星观测甚少被提及。其后二三十年,系外行星被大量发现,现今数目已接近5000颗,该领域迅速成为与宇宙学并头前行的当前最重要的天文研究热点之一。哈勃空间望远镜和斯皮策空间望远镜受限于时代,研制时完全没有预计到系外行星,但凭借各自优越的性能,

再经由天文学家的巧思和努力,仍然对系外行星研究做出了重大贡献。它们成功观测到一批系外行星的光谱,让人类对系外行星表面和大气的性质有了初步了解,例如水分子在系外行星的大气中普遍存在等。但这些观测已经把哈勃空间望远镜和斯皮策空间望远镜拉到能力极限的边缘,信噪比和谱分辨率很不理想,许多结果似是而非或争议甚大。

韦布空间望远镜有望把人类的系外行星研究推进一大步,特别是探测大气中被认为与生命活动密切相关的分子的红外光谱信号,如甲烷、二氧化碳、臭氧、氨等。考虑到系外行星的自身辐射过于微弱,韦布空间望远镜将同哈勃空间望远镜和斯皮策空间望远镜一样,主要采用凌星法开展探测。当公转的系外行星从寄主星的视向圆盘前方掠过时(即凌星),恒星辐射中的极少一部分会穿越行星大气并被大气分子吸收,分子浓度越高,特征谱带处损失的那一丁点辐射就越多,或者说凌星深度越大。这种信号极其微弱,但将多次凌星的观测数据累加起来,可以获得足够的信噪比。以拟议的韦布空间望远镜优先观测目标中的TRAPPIST-1行星系

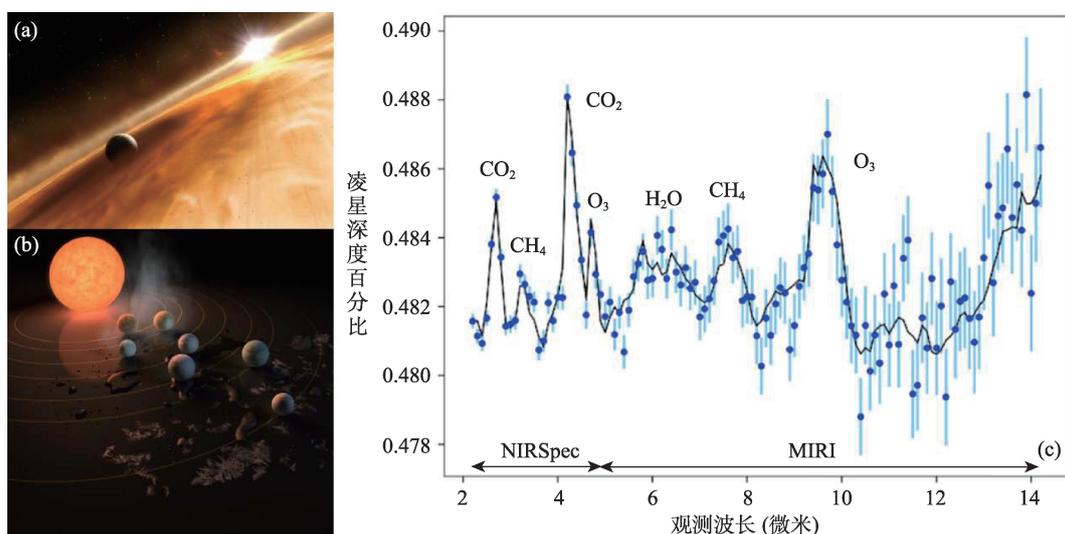


图9 环绕北落师门的系外行星“大衮”与尘埃盘的艺术想象图((a)图片来源:NASA)、环绕TRAPPIST-1(一颗超小、冷暗的红矮星)由7颗类地大小行星组成行星系的艺术模型图((b)图片来源:NASA)、TRAPPIST-1行星系一颗宜居带行星以地球大气作为假想模型(黑线)的韦布空间望远镜凌星法观测模拟红外光谱(蓝点)((c)原文英文标注图片来源:Macdonald & Cowan, 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489, 196)

为例,这是距离我们40光年的一个非常迷你的系统(图9(b)):寄主星是尺寸仅比木星稍大的超冷红矮星,辐射不到太阳的千分之一;由斯皮策空间望远镜的观测数据推算,有7颗地球大小的行星在远小于水星轨道的空间内公转,其中3到4颗落在同样迷你的宜居带内(平衡温度适合水以液态形式存在的区域)。寄主星个头越小,行星大气的凌星深度就越大,有利于探测。数值模拟表明,假设韦布空间望远镜进行150次凌星观测,累计约5.8天总曝光时间,获得的光谱质量相当不错(图9(c))。

此外,韦布空间望远镜还会贡献约5%的少量时间用于太阳系观测,提议的目标包括巨行星的冰月、彗星和柯伊伯带天体、奥陌陌那样的外来闯入者等。这些观测,或给我们带来太阳系起源和地球生命起源的关键信息。

为了充分验证和展示詹姆斯·韦布空间望远镜的科学潜力,空间望远镜研究所特别征集了一批台长授权的早期发布科学课题,在正式观测的头5个

月集中开展。这13个课题,被归为星系与星系际介质、大质量黑洞及寄主星系、行星与行星形成、太阳系、恒星物理、星族共6大类。韦布空间望远镜能否不辱使命,对得住十几年的工程延期和数倍经费超支?早期发布课题的数据是否就能带来意外惊喜?让我们大家拭目以待吧。

