

# 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(下)

张 博

(中国科学院国家天文台 100101)

(续前)

## 4. 纵览恒星的死亡与新生——远在天边的超新星与近在眼前的原恒星

韦布望远镜在 2024 年公布了创下距离记录的 Ia 型超新星——位于红移 2.9 处的 SN 2023adys<sup>[1]</sup>, 以及位于红移 3.6 处疑似已知最遥远的核心坍缩型超新星(源于大质量恒星濒死时的爆发)的踪迹<sup>[2]</sup>, 其中后者对应的宇宙年龄只有 18 亿年左右。搜索高红移超新星的意义第一是籍此探索宇宙早期大质量恒星的生命史;第二是借助白矮星质量超过钱德拉塞卡极限后的爆发产物——Ia 型超新星来不断拓展距离测量的范围,更好地推进宇宙学研究,这是因为此类超新星的峰值光度与峰值之后的光变曲线衰减速率具有规则的关系(菲利普斯关系),光度越低随后衰减则越快,因此被天文学家视作宇宙学距离测量的标准烛光,之前曾被用于宇宙加速膨胀的发现和确认。实际上韦布在这方面作出的发现不止上述两个例子,它在短短 3 年的时间里让红移大于 2 的超新星总数增长了 10 倍以上,让研究者得以详查宇宙在“青春期”的情况。

至于超新星爆发后的残留——超新星遗迹,韦布望远镜在 2024 年公布了蟹状星云红外观测,从而更好地限制了产生它的 1054 年超新星的性质<sup>[3]</sup>。蟹状星云的名气固然不小,之前已有研究者尝试用罕见的电子俘获超新星来解释根据其抛射物计算的较低爆发总能量,但这一理论对其中心脉冲星的快速自转却无能为力。韦布获得了蟹状星云的中红外谱线,更可靠地限制了抛射物中镍/铁元素的比

例。这个比值与前身星的爆发机制有关,电子俘获超新星产生的镍铁比远高于太阳,而更加常见的核心坍缩型超新星相应的比例就与太阳相似得多了。韦布的新结果降低了人们对蟹状星云镍铁比的预期,使得两种超新星爆发机制都成为了可能。此外,韦布还发表了迄今为止最强有力的观测证据,利用红外积分视场光谱所展示的氦线种类、空间分布和多普勒频移信息,表明 SN 1987A 爆发残留物中心理应具有一颗中子星——只有来自新生中子星的高能光子才能让遗迹中的氦元素电离,从而产生韦布所见的谱线<sup>[4]</sup>。虽然现在还不能完全断言中子星的确存在,但这无疑是朝向 SN 1987A 爆发产物的确认又迈进了一步。

韦布望远镜的团队还在 2024 年一举发布了邻近星系高分辨率物理(Physics at High Angular Resolution in Nearby Galaxies, 简称 PHANGS)项目获取的 19 个目标星系的中/近红外高分辨率影像,展现了这些星系中最小可达 100 光年的细节——这意味着天文学家得以直接解析数亿光年之外的河外星系中尺度比猎户星云还要小的结构(图 1)。而且与 PHANGS 项目之前用过的哈勃空间望远镜相比,韦布的红外观测能力还赋予了它穿透将恒星形成区层层包裹、遮挡可见光的尘云,直接考察其中的种种物理机制的能力。这样天文学家就能够凭借韦布望远镜的红外数据,直接计数某个恒星形成区内部的恒星数量(而不是像过去那样只能凭借大质量恒星的数目推测中小恒星族群的规模),这无疑对认识恒星初始质量分布进而是恒星的整个生命周期大有裨益。同时,韦布在这些星系旋臂上分辨出的尘

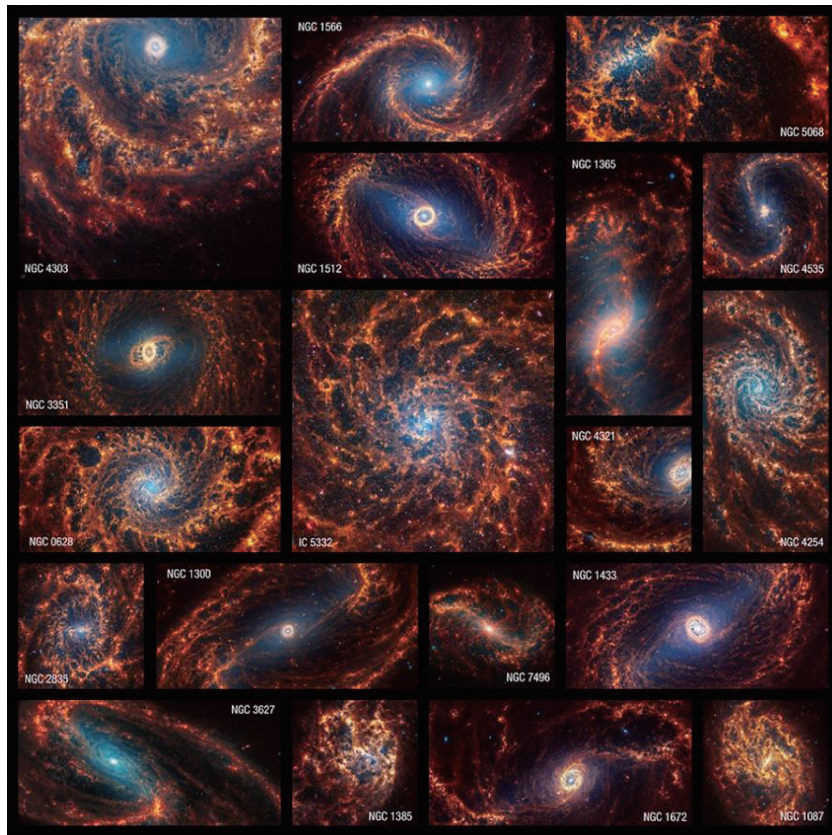


图1 PHANGS项目使用韦布望远镜获取的19个邻近星系的红外影像,图中蓝色表示恒星发出的近红外星光,橙红色是主要来自恒星形成区的中红外尘埃辐射(图片来源: NASA / ESA / CSA / STScI / Janice Lee (STScI) / Thomas Williams (Oxford) / PHANGS Team)

云泡也为追溯超新星爆发的历史提供了见证,大量沿大型泡状结构边缘分布的小型泡对应在过往超新星爆发的冲击波诱发下新一代的恒星形成活动,个中的反馈机制也是恒星演化领域的热点话题。

不过倘或要仔细了解恒星的诞生和幼年期,哪怕强大如韦布望远镜,也需要将目光对准银河系之内的恒星形成区。这些区域大多集中在星系盘尤其是旋臂区域,一直延伸到物质密度较为稀疏、金属元素丰度也相对更低的银河系最外围。韦布望远镜瞄准了迪格尔(Digel)1号和2号各自的两个星团<sup>[5]</sup>。与早年观测同一批目标所使用的8米级地面望远镜相比,韦布的近红外灵敏度提升了数十倍,由此可以在此处第一次解析出质量小于太阳0.1倍的新生恒星,而具有这样质量的恒星数量在环境迥异于银河系外围的太阳附近是最多的。韦布望远

镜在这几个星团中识别出了可能属于幼年原恒星的颜色极红天体、与云团中尘埃结构成协的初期恒星体的分布,还有可能由原恒星发出的喷流或外流结构,这样的结构是原恒星通过吸积盘汲取周边物质而增长的过程中损耗多余角动量的主要途径,外流物质的运动方向通常标出了星体自转轴的取向。未来韦布还将再次瞄准这几个银河系尽头的产星工厂,以图探知其中的恒星质量分布,并比较其与太阳系周边的异同,以此确定环境对恒星形成的影响。

在更靠近太阳系的地方,韦布在2024年发表了对巨蛇主星团的近红外观测。该星团距离地球约1300光年,其中富含新生恒星。研究者在其中识别出了20处可能的原恒星物质外流现象,还将外流物与驱动它们的源头一一对应了起来。韦布这项工作的突破点在于第一次准确无误地确认,巨蛇主

星团中源自不同原恒星的外流物大多具有统一的走向,并且它们与星团所在的巨蛇分子云中一个显著的狭长结构——巨蛇纤维的分布一致(图2)<sup>[6]</sup>。考虑巨蛇纤维本身具有大尺度的相干磁场,这样看来星团中成员星的形成应该是批量化事件,并且星体初始角动量的方向与所在恒星形成区的整体物理环境有关。

普遍存在于新生恒星周边的结构除了从星体两极涌出的喷流或外流物之外,还有星周盘。在恒星的成长期,它藉由盘面吸积周边物质;在恒星形成之后,盘中的残片物质也会逐渐凝结成行星系,因此星周对恒星早期生命史的意义重大。韦布望

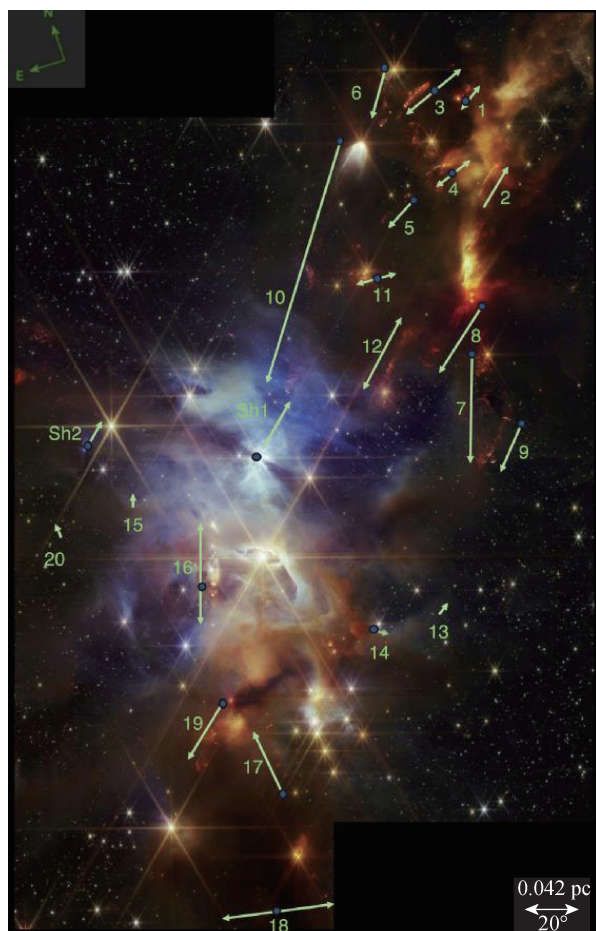


图2 韦布望远镜使用近红外照相机拍摄的巨蛇主星团,图中以绿色箭头标出了各处原恒星外流物的走向,以蓝色圆点标出了起源星。图中右上角(也就是星云西北方)可见12组走向与巨蛇纤维一致的外流结构。东南方的外流物走向相对杂乱一些。(图片来源:Green et al. (2024))

望远镜在2024年也为此带来了新知。比如它在金属丰度较低的小麦哲伦云的恒星形成区NGC 346中发现,更少的重元素可以让星周盘保留得更为持久,从而让吸积过程持续时间较先前所认为的更长,最终产生更大的恒星<sup>[7]</sup>。这可能与重元素多则恒星辐射压更强,从而能够更快地驱散盘面有关。韦布还从一颗质量只有太阳0.11倍的年轻恒星ISO-ChaI 147周围的盘面上辨识出了迄今所见数量最多的烃分子,种类达到了13种,其中包括首次在太阳系之外发现的乙烷,但却明显缺乏太阳质量恒星的行星盘中常见的氧元素,这在日后可能会引发不同于太阳的行星形成过程<sup>[8]</sup>。韦布还在金牛分子云内四颗原行星盘侧向地球的初期恒星体周围,首次目击了多层嵌套式的外流盘风(图3),各层表现出了明显的速度和成分差异。这一发现证实了早先对盘风驱动吸积机制的理论预言——星周盘吹出的结构化盘风由磁压与热压诱发于盘面的不同区域,它们的作用在于将角动量向外转移,帮助物质向内集中,最终形成成熟的恒星以及周边的行星系<sup>[9]</sup>。此外韦布还在最早被发现拥有星周盘的恒星——绘架 $\beta$ 周围考察了20年前一次小行星碰撞的

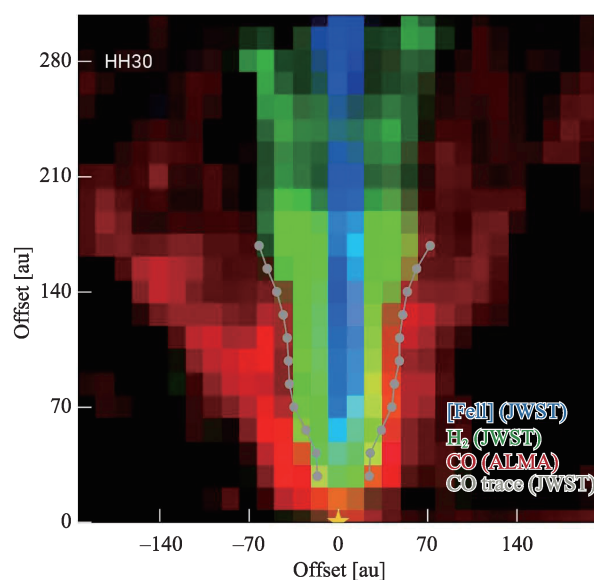


图3 韦布望远镜在原恒星HH30周边发现的有的结构化盘风。图中以黄色五角星标出了恒星的位置,蓝色是原恒星喷流,绿色和红色代表盘风的不同成分(图片来源:I. Pascucci et al. /MPIA)

余波<sup>[10]</sup>。当时斯皮策空间望远镜看到了绘架β方向海量的尘埃;现在韦布在这颗恒星的盘面内发现了翘曲的“猫尾巴”状结构,且斯皮策先前所见的一系列尘埃辐射特征均有明显的改变。这颗恒星据信正处在周边的行星系经由星子碰撞而形成的阶段。韦布以及斯皮策跨越20年的观测为实时考察碰撞过程带来了难得的机会,它们一同说明了超细颗粒尘埃的产生以及绘架β系统星周环境的活跃性。

## 5. 解析异域行星——热木星的天气、超级地球的炽热大气与白矮星的行星系

虽然行星系的形成与宜居性是韦布望远镜的核心科学目标之一,但韦布本身并非开普勒或凌星系外行星巡天卫星(TESS)这样专门设计用于巡天观测,通过长时间监测海量恒星的光变曲线来发现新行星的仪器。这架太空巨镜的长处在于深度考察单个行星系,并解析其组分、温度等特性的能力。比如韦布对约280光年之外的WASP-43b天气现象的探测就称得上这方面的一个范例<sup>[11]</sup>。这颗因过于靠近主星而处在潮汐锁定状态的热木星以固定的半球持续朝向主星,它的中红外透射光谱清晰展现了其上超过650开的昼夜半球温差以及明确的水蒸气成分。而且虽然行星的夜半球背对主星,但星球大气中的东风带来的热量让这里的温度也超过了860开,而且很可能具有阻止部分红外辐射逃逸的高空云层。同样因为强劲的风力作用,大气中温度最高的部分并非距离主星最近的一点,而是略微偏向东侧。韦布还凭借对潮汐锁定的热木星WASP-39b透射光谱的分析,识别出了行星并不规则的昼夜分界线<sup>[12]</sup>;在已知密度最低的系外行星WASP-107b(质量相当于木星的十分之一,但体积约合后者的四分之三)上发现了强烈的内部热流,这可以被视作潮汐加热导致星球体积膨胀的证据<sup>[13]</sup>。这些研究成果都说明,系外行星的大气层可以表现出无尽的复杂性和多样性,而且在太阳系中

往往是找不到类似现象的。

至于体量更小、与地球更相似的行星,韦布望远镜在2023年发表的对身居宜居带的K2-18b的观测轰动一时<sup>[14]</sup>。该星球的透射光谱表现出了明确的甲烷和二氧化碳成分,有研究者将其解释为带有生物活动的“海氢行星”大气(海氢行星是一类质量介于海王星与地球之间,且在液态水体之上包裹着富氢大气的行星,据信水体中可能蕴含生命)。但是2024年发表的对同一行星的后续研究指出极端富含金属元素的亚海王星型行星的深层大气热化学反应也可以产生韦布所见的光谱,在这样的场景下,K2-18b可能连真正意义的地表都不具备<sup>[15]</sup>。不过韦布望远镜当前已有的数据仍不足以为K2-18b的本质下定论,而且两种观点同观测均存在矛盾之处。未来如果能够在行星大气中发现氨(对应亚海王星行星)或起初为拟合观测所引力的二甲基硫醚成分(这一分子在地球上基本起源于生命活动),方可确定这颗系外行星的真实性质。

体量更小的巨蟹55e则是一颗直径相当于地球两倍不到的岩质“超级地球”,它属于一个已知拥有5颗系外行星的系统。虽然巨蟹55e与主星靠得很近,只相当于水星与太阳距离的25分之一,但韦布望远镜却发现了其周围大气层的踪迹,这也是研究者第一次目睹系外类地行星大气<sup>[16]</sup>。当然,距离主星如此之近的类地行星,其地表温度足以融化岩石,因此巨蟹55e很可能就是一个沸腾的岩浆星球,岩浆海洋的深度相当于行星半径的百分之几。从直觉上看,巨蟹55e的大气理应源自熔岩汽化,但韦布记录的光谱却充斥着来自二氧化碳、一氧化碳等气体的信号,气体可能的起源则是岩浆的溢出物。不过要最终确认巨蟹55e大气的存在,还需要搜集更多的观测证据,有关这颗系外行星的后续研究也值得关注。

除了通过系外行星的高质量光谱间接研究系外行星大气的特性,韦布望远镜还可以直接获取近邻行星的影像。已知温度最低的系外行星之一——印第安εAb就是其中一例<sup>[17]</sup>。这颗质量相当

于木星数倍的行星距离地球只有12光年左右,其存在早已由天体测量和视向速度数据所暗示,如今韦布利用星冕仪遮挡主星光拍摄的照片确认了它的身份。但是这次直接观测到的行星质量、与主星的距离以及轨道形态与先前通过间接方法的推测均有不同。行星的表面温度约为275开,与温度最低的褐矮星相当,可以用于在更低的温度区间内验证行星的热演化理论。相较已有的20余个得到直接成像的系外行星,印第安 $\epsilon$  Ab更加引人注目的一点是其环绕的主星年龄——与太阳相当,而非像其他样本那样在5亿年以下,所以这一行星系可以被视作当代太阳系的对照样本。

韦布望远镜还拍下了两个更加奇异的行星系候选体,由富金属白矮星和环绕其运行的巨行星组成(图4)<sup>[18]</sup>。这两个行星候选体的质量以及与主星的距离都与太阳系中的气态巨行星类似,可能是经历了主星红巨星阶段膨胀的幸存者。对于中央白矮星的演化而言,幸存的巨行星可能会对行星系中的小天体施加引力摄动,让后者向内迁移,并最终在白矮星的洛希极限内解体,汇入白矮星大气,从

而引入观测所见的与类地行星类似的极高金属元素丰度。如果能够得到确认,这两个行星系可以用于研究类太阳恒星演化终末之时周边行星的命运,从而揭示太阳系的未来。

对于恒星与行星的过渡天体——褐矮星,韦布望远镜还在2024年公布了第一批可能的河外族群——位于小麦哲伦云年轻的NGC 602星团中的64个质量相当于太阳百分之几的候选体<sup>[19]</sup>,以及河内孤立褐矮星W1935的甲烷分子红外特征辐射<sup>[20]</sup>。其中前者将帮助研究者进一步了解质量小于太阳的星体的初始质量分布,更好地限制恒星形成理论;后者可能起源于褐矮星的极光,如果能被后续工作所证明,将大大加深人们对此类天体大气活动的认识。

## 6. 重勘量天尺,近观太阳系

在回答研制阶段确定的四大科学问题以外,韦布望远镜也要在天文学的其他领域开展了研究。首先,韦布身负着哈勃继任者的头衔。要知道,哈勃空间望远镜的主要研制目的之一就是勘定哈勃

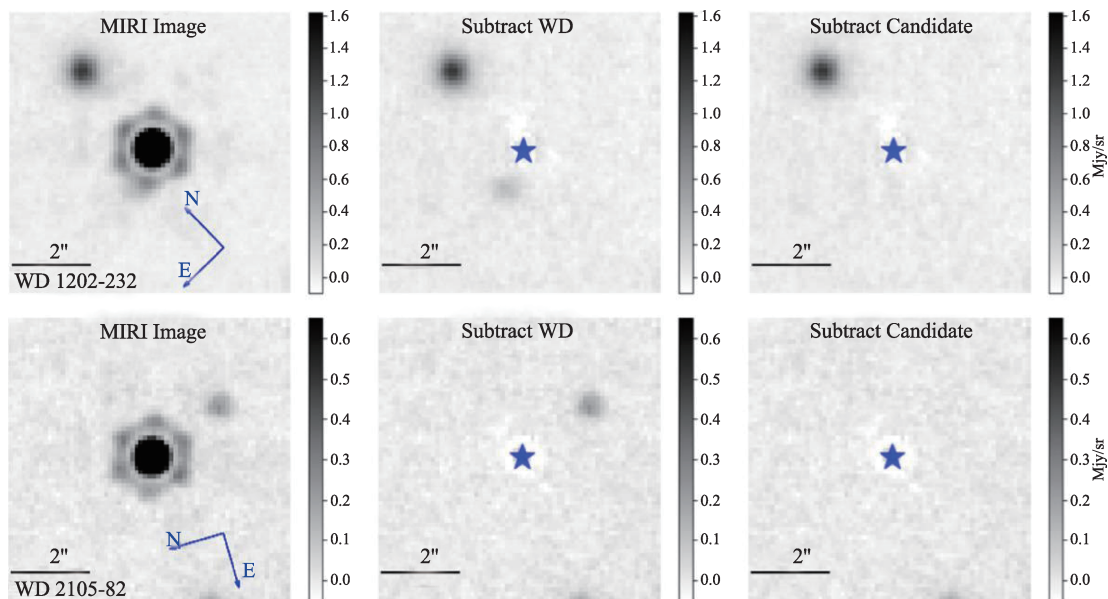


图4 韦布望远镜在白矮星WD 1202-232(上)和WD 2105-82(下)周围发现的系外行星候选体,其中左图是原始中红外照片;中图是借助望远镜的点扩散函数扣除中心白矮星影响后的效果(白矮星以蓝色星号标出),可见两颗白矮星附近各存在一个可以被视作系外行星的弱源(WD 1202-232左上方的光点是河外星系);右图是扣除白矮星和行星候选体二者之后的效果,可见与背景无异(图片来源: Mullally et al. (2024))

常数,而韦布也在延续这方面的工作,于2024年发表了对6个星系中1000余颗造父变星的普查,并凭借远远胜过哈勃的红外分辨率,确认后者数据中无法避免的拥挤噪声(crowding noise)对河外变星的测光并无本质影响<sup>[21]</sup>。拥挤噪声指的是因仪器分辨率不足,导致背景星与目标星混淆的现象,它可能会改变测光结果。因为韦布的空间分辨率远胜于哈勃,因此前者拍摄的图像几乎不受这一因素的干扰(图5)。使用韦布这样最先进的空间望远镜持续开展造父变星普查,看似大材小用,其背景却是宇宙学界日渐尖锐的“哈勃常数争议”问题——哈勃常数是宇宙膨胀速率的度量,但如今使用包括造父变星在内一系列标准烛光天体测得的近域宇宙哈勃常数 $H_0$ 在73千米/秒/百万秒差距左右,普遍大于根据微波背景辐射的温度起伏分布尺度所推算出的数值(约为67.4千米/秒/百万秒差距)。换句话说,从当今向前推溯的宇宙膨胀速率与从往昔向后度量的宇宙膨胀速率并不等同,这无疑对主流宇宙学理论提出了挑战。有一种流行观点认为,“哈勃常数争议”的可能起源就是拥挤噪声的干扰;但是韦布的工作证明,想平息争议,单纯将责任推给望远镜分辨率恐怕是不够的。未来韦布望远镜会将目光对准更多的造父变星,并结合对河外Ia型超新星的观测,让近域宇宙中哈勃常数的测量精度提升到1%的水平甚至更高,这将最终帮助研究者敲定 $H_0$ 。

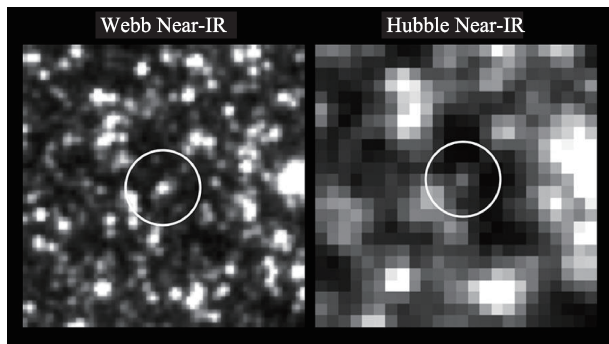


图5 由哈勃(右)和韦布(左)空间望远镜拍摄的一颗河外造父变星的红外波段图像,可见在前者视野中模糊成一团的星点已被后者明晰解析开来,由此拥挤噪声得到了极大的抑制(图片来源: NASA / ESA / CSA / STScI / Adam G. Riess (JHU, STScI))

之争究竟是源自测量误差,还是真的需要向宇宙学模型引入新的物理机制。

回到太阳系之内,韦布望远镜将目光瞄准了数十个身居太阳系外围的海王星外天体,对这些暗淡的目标进行了分光研究。其中冥族小天体摩耳斯-宋努斯(Mors-Somnus)是一个难得的宽距双星,两个成员体量相当,且韦布的解析力也足以直接区分二者。观测表明,摩耳斯与宋努斯的表面组分很是类似<sup>[22]</sup>。考虑这对天体高偏心率、大倾角的轨道相对经典柯伊伯带天体差别很大,它们理应形成于太阳系更加靠外的区域,在轨道迁移期间如何保持成员星不分离就成了难题。韦布观测过的其他轨道类似的天体也有一部分在成分上接近摩耳斯-宋努斯,但另一些有着迥异的组分,这可能是冥族小天体起源地多样化的线索。韦布望远镜还探测到了来自鸟神星的显著中红外辐射超出,该特征对应的星球表面温度约为150开<sup>[23]</sup>,对于距离太阳如此遥远、所接收太阳辐射寥寥的星球来说,这样的温度水平通常代表星球具有活跃的地质活动(不过富含碳质尘埃的星球环也是可能的解释)。再结合韦布测得的鸟神星和阋神星地表甲烷冰中氘/气和碳13/碳12两组同位素比例<sup>[24,25]</sup>,这两个天体的内部大概率存在水热或者变质等形式的活动。这样看来,哪怕身居冰冷的太阳系外围,某些海王星外天体的面貌也并非死气沉沉。

在更加靠近太阳的地方,韦布望远镜发现了半人马群天体29P/施瓦斯曼-瓦赫曼1号彗星的反常喷流。半人马群在木星和海王星轨道之间运行,原本是冰质海王星外天体,后来在行星的引力摄动之下向内迁移,最终可能变成真正的短周期彗星。这其中的施瓦斯曼-瓦赫曼1号彗星是外太阳系最活跃的天体之一,具有准周期性喷发现象,每6-8周活动增强一次。韦布在其上发现了新的一氧化碳喷流以及前所未有的二氧化碳喷流,它们的源头位于彗核表面的不同区域,喷流成分的迥异则表明相应区域的彗核物质有着显著差别——这也许是因为该天体可能系由多个组分有别的前身聚集而来的

缘故<sup>[26]</sup>。不过气体喷流的起源以及导致喷发的原因目前尚无定论,而且我们对其他同类天体的行为所知甚少,这都有待更多的研究去解决。

哪怕是韦布原本用于记录深空的数据,研究者都在其中挖掘出了已知最小的主带小行星的影像,其最小尺度达到了10米<sup>[27]</sup>,这将使人们更好地了解这些小天体的尺度分布,进而为行星防御服务。甚至对于木星大红斑这样人人熟知的目标,韦布望远镜都在其高空发现了前所未知的小尺度条带、斑块、弧型等结构(图6),它们可能是木星大气电离层底部与下方的重力波耦合的产物<sup>[28]</sup>。

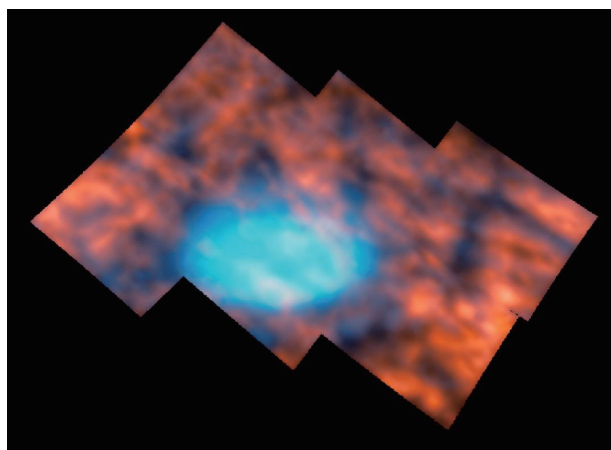


图6 韦布望远镜拍摄的木星大红斑区域,其中的红外辐射主要来自大红斑上方300千米处电离层中的 $H_3^+$ 离子。图中可见一系列小尺度不规则结构(图片提供:ESA/Webb, NASA & CSA, H. Melin, M. Zamani (ESA/Webb))

### 参考文献

- [1] Pierel, J. D. R., Engesser, M., Coulter, D. A., et al. 2024, ApJL, 971, L32.
- [2] Coulter, D. A., Pierel, J. D. R., DeCoursey, C., et al. 2025, arXiv: 2501.05513, Submitted to ApJ.
- [3] Temim, T., Laming, J. M., Kavanagh, P. J., et al. 2024, ApJL, 968, L18.
- [4] Fransson, C., Barlow, M. J., Kavanagh, P. J., et al. 2024, Science, 383, 898.
- [5] Izumi, N., Ressler, M. E., Lau, R. M. et al. 2024, AJ, 168, 68.
- [6] Green, J. D., Pontoppidan, K., Reiter, M., et al. 2024, ApJ, 972, 5.
- [7] De Marchi, G., Giardino, G., Biazzo, K., et al. 2024, ApJ, 977, 214.
- [8] Arabhavi, A. M., Kamp, I., Henning, Th., et al. 2024, Science, 384, 1086.
- [9] Pascucci, I., Beck, T. L., Cabrit, S., et al. 2025, Nature Astronomy, 9, 81.
- [10] Chen, C. H., Lu, C. X., Worthen, K., et al. 2024, ApJ, 973, 139.
- [11] Bell, T. J., Crouzet, N., Cubillos, P. E., et al. 2024, Nature Astronomy, 8, 879.
- [12] Espinoza, N., Steinrueck, M. E., Kirk, J., et al. 2024, Nature, 632, 1017.
- [13] Welbanks, L., Bell, T. J., Beatty, T. G., et al. 2024, Nature, 630, 836.
- [14] Madhusudhan, N., Sarkar, S., Constantinou, S., et al. 2023, ApJL, 956, L13.
- [15] Wogan, N. F., Batalha, N. E., Zahnle, K. J., et al. 2024, ApJL, 963, L7.
- [16] Hu, R., Bello-Arufe, A., Zhang, M., et al. 2024, Nature, 630, 609.
- [17] Matthews, E. C., Carter, A. L., Pathak, P., et al. 2024, Nature, 633, 789.
- [18] Mullally, S. E., Debes, J., Cracraft, M., 2024, ApJL, 962, L32.
- [19] Zeidler, P., Sabbi, E., Nota, A. et al. 2024, ApJ, 975, 18.
- [20] Faherty, J. K., Burningham, B., Gagné, J., et al. 2024, Nature, 628, 511.
- [21] Riess, A. G., Anand, G. S., Yuan, W., et al. 2024, ApJL, 962, L17.
- [22] Souza-Feliciano, A. C., Holler, B. J., Pinilla-Alonso, N., et al. 2024, A&A, 681, L17.
- [23] Kiss, C., Müller, T. G., Farkas-Takács, A., et al. 2024, ApJL, 976, L9.
- [24] Glein, C. R., Grundy, W. M., Lunine, J. I., et al. 2024, Icarus, 412, 11599.
- [25] Grundy, W. M., Wong, I., Glein, C. R., et al. 2024, Icarus, 411, 115923.
- [26] Faggi, S., Villanueva, G. L., McKay, A., et al. 2024, Nature Astronomy, 8, 1237.
- [27] Burdanov, A. Y., de Wit, J., Broz, M. et al. 2024, Nature, 638, 74.
- [28] Melin, H., O' Donoghue, J., Moore, L., et al. 2024, Nature Astronomy, 8, 1000.