

新的宇宙曙光

(中国科学院国家天文台 邓舒夏、苟利军 编译自 Keith Cooper. *Physics World*, 2022, (1):28)

哈勃太空望远镜拍摄的原始深场照片是天文学中最具标志性的图片之一。这张图片由数量惊人的遥远星系组成，星系镶嵌在黑色的背景之上，它是哈勃在1995年12月对大熊座的一小块区域进行了一系列观测之后得到的。受这张经典照片启发，天文学家们开始计划一项新任务来研究早期宇宙——这项任务可以看到更早的宇宙，观测到宇宙大爆炸之后3亿年就已经存在的最早的星系。但要做到这一点，需要一个有史以来最大的望远镜，一个比哈勃2.4 m的镜子大得多的望远镜。答案是：下一代太空望远

镜(Next Generation Space Telescope, NGST)，这是一个巨大的太空望远镜，拥有6.5 m的拼接式主镜，它有望实现一系列新的发现。

受到NGST潜力的鼓舞，美国天文学家很快在2000年的“十年调查报告”中将其选为天基任务的首要任务——这是美国国家科学院、工程院和医学研究院编制的未来项目的愿望清单。这个望远镜计划于2007年发射，耗资10亿美元。2002年，它以美国航天局(NASA)前局长的名字更名为詹姆斯·韦布太空望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)。然而，那些想用这个新望

远镜来研究星系演化以及恒星和行星如何形成的梦想，很快就变成了噩梦。该项目的预算急剧上升，以至于美国众议院在2011年提议将其完全取消，但在科学家、公众和媒体的联合拯救下，这个陷入困境的项目在最后一刻得到了挽救。就在2018年，当这个项目成本即将突破80亿美元大关时，美国国会不得不投票决定向其提供更多资金。

JWST现在的耗资估计为97亿美元，而成本飙升背后的部分原因是建造了一个尺寸巨大的望远镜。JWST的拼接式主镜直径为6.5 m，将是有史以来送入太空的最大主镜(图1)。诺贝尔奖获得者、宇宙学家John Mather自20世纪90年代中期以来，一直在美国航天局戈达德太空飞行中心领导该项目，他说：“当我们开始的时候，我们知道可以更安全地建造一个小得多的望远镜。”然而问题是，较小的望远镜不能实现天文学家想要的变革性科学。

不过，望远镜尺寸并不是唯一的苛刻需求。这些早期星系发出的光被宇宙膨胀拉长了，要想观测到它们，天文学家需要一个能够探测近红外和中红外波长的望远镜。要做到这一点，望远镜需要放在远离地球热辐射的地方，在拉格朗日L2点附近，这一点位于太阳和地球的背后。“另一件事是，要想达到我们需要的红外灵敏度，望远镜必须非常冷，”Mather说，“很快我们就面临着大量艰巨的技术挑战。”

二十年的艰难发展已经过去，

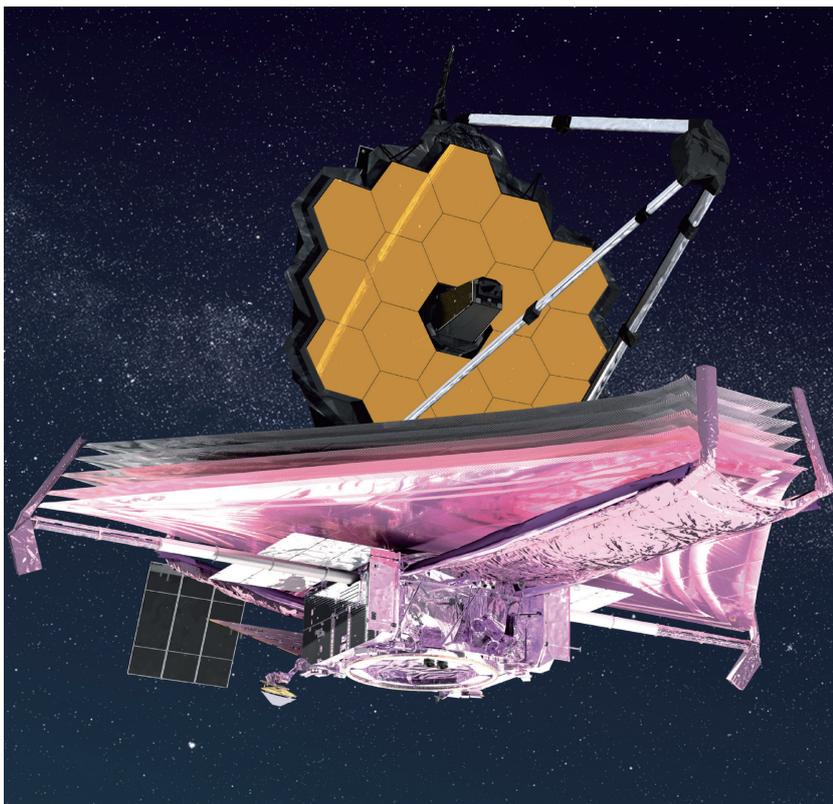


图1 准备发射。一位艺术家对詹姆斯·韦布太空望远镜的印象图

JWST终于准备就绪。对于天文界的大多数人来说，望远镜还需要一段时间才能开始工作。望远镜的发射计划定在2021年12月24日(译者注：后因24日的天气问题，韦布望远镜于北京时间12月25日晚8点20分成功发射升空)。然而，即使有效载荷搭载阿丽亚娜5号火箭(Ariane 5)从法属圭亚那的欧洲航天港发射升空了，科学家们也不能集体松了一口气。虽然通常发射是太空任务中最危险的部分，但对于JWST而言，情况并非如此。

这是NASA最新也是最昂贵的太空之眼，发射将是它最简单的部分，接下来的事情才将决定这项任务的成功与否。这是因为，在它科学和太空技术推向所能实现的极限之前，它必须首先克服危险的深空拆包：6.5 m宽的主镜必须小心正确地展开，网球场大小的遮阳板也必须一帆风顺地展开。整个部署大约需要30天才能完成——如果在300多件可能出错的事情中，任何一件真的出错了，那么望远镜的能力都将受到限制。在最坏的情况下，整个望远镜将被毁坏，这可能会使该领域倒退数十年。如果它成功了，它将改变天文学的研究——这一切都要归功于几项使JWST成为一台独特而强大望远镜的技术奇迹。(译者注：望远镜的遮阳板和镜面已经成功展开，目前进入校准阶段。)

对称镜面

在建造JWST的过程中，工程师们面临的最大挑战之一是6.5 m的主镜。建造这样大小的镜子本身不是问题，但要把它装进只有4.57 m宽的阿丽亚娜5号火箭中，又不至于太重而无法发射到太空，这就是一个问题。解决这个特殊问

题的任务落在了望远镜光学部件经理Lee Feinberg身上。“主镜的设计非常优雅，”Feinberg说，并解释道，这种设计的本质在于镜子是可折叠的：它由18个六边形部分组成，两边各有三个小镜面形成了可折叠的“两翼”。

JWST还有一个直径0.74 m的次镜，外加一个较小的三次镜，以消除望远镜的散光，使焦面变平，为科学仪器的使用做好准备。这三面镜子共同组成了一种被称为“离轴三反射光学系统”(off-axis three-mirror anastigmat)的结构，可以校正球面、彗差和散光误差，同时为仪器提供更大的视场。但这些功能本身也造成了发射过程中令人头疼的问题，Feinberg指出：“真正的困难是，支撑次镜的吊杆有8 m长，但你还必须把它装进火箭里，然后是防晒板，而我们不得不把所有的这些都折叠起来。”

这些镜子是由一种新型表面镀金的光学级别的铍制成，它在望远镜工作温度低至36 K时还能保持稳定。这种被称为O-30的材料由材料公司Materion专门为JWST制造，优点是质量轻，并且在低温下具有良好的技术性能等。例如，材料的刚性意味着，当镜子被放入望远镜遮阳板后面的低温环境中时，它不会产生太大的扭曲变形。Feinberg说，考虑到所有这些因素，以及被认为合理的铍坯料尺寸，制造一个可以折叠的六边形拼接系统是“最好的选择”。

自20世纪90年代以来，一个类似的六边形系统已经在夏威夷的两个10 m凯克望远镜(Keck telescopes)上运行，Feinberg承认，他的团队从凯克的光学设计中学到了很多。和凯克一样，JWST主镜上的18个

镜面和次镜都有机械触动器来推动镜面保证聚焦。然而，尽管凯克拥有精密的波前传感器来保证镜面不同部分对齐，JWST光学团队认为，这样的系统太复杂了，无法在深空自主运行。取而代之的是，望远镜将利用它的科学相机。Feinberg解释说：“实际上我们将获得的第一张测试图像包含18个独立恒星图像，这是同一个恒星在这18个独立镜面上形成的像，每个镜面都像一个望远镜。”然后，望远镜将使用相机和一种专门开发的名为“相位复原”(phase retrieval)的算法来测量波前的形状，从而调整主镜的形状，直到所有18个镜面聚焦为一个。

望远镜镜面的设计使JWST成为此类技术的典型代表和先驱，正是这些技术让JWST能够正常工作。Feinberg说：“总的来说，我们觉得所做的每一件事都没有现成的方案。我们真的在改变我们做事的方式。”一个典型的例子是：哈勃望远镜上2.4 m长的反射镜实际上是一个巨大的望远镜管组件，而JWST的反射镜是向太空敞开的，保护这些镜子不受太阳的炎热照射也是一项艰巨的挑战。

太阳的因素

由于JWST在红外波段下运行，来自太阳、地球甚至航天器本身的杂散热辐射可能会使其视野变得模糊。为了把它们挡在外面，科学家们设计了一种复杂的网球场大小的遮阳板(图2)，这与NASA以前试图在太空中部署的任何东西都非常不同。遮阳板由5层膜组成，这种名为Kapton的铝涂层聚合物由于具有极其宽温度范围内的稳定性而被广泛用于太空探索。这种稳定性是至关重要的：遮阳板面向太阳的



图2 分层遮阳板。这是一个巨型遮阳板的测试模型，可以让詹姆斯·韦布太空望远镜的温度保持足够低

第一层的温度预计将达到 383 K，而最内的第五层温度将降至 36 K。然而，遮阳板部经理 James Cooper 表示，即便是使用正确的材料，设计合理的遮阳层让其在深空中发挥作用也是一个“重大挑战”。

一部分问题是，遮阳板上的每一层膜都会根据其工作温度的不同而不同程度地膨胀或收缩。设计和建造遮阳板的航天公司 Northrop Grumman 公司洁净室里的薄膜会与太空中的薄膜大小不同。“每种膜的大小都需要经过精心调整，以适应预测的温度范围，” Cooper 解释说，“面向太阳的第一层将是最热的，而第五层将变得非常冷。因此，在地球上建造第五层时必须足够大，因为我们知道，当材料变冷时，它会收缩。”

另一个挑战是，遮阳板的每一层都薄如细纱。最热的第一层厚 0.05 mm，其他四层厚 0.025 mm，它们的铝层只有 100 nm 厚。保持薄膜较薄可以减轻重量，但也可能容易使遮阳板损坏。事实上，遮阳板的设计考虑了应对一定程度的损坏，工程师们预计它在使用期间会遭受微陨石撞击造成各种创伤。

Cooper 说，这里或那里的奇怪的洞不会影响它的性能——特别是因为他们他们在每一层中都建立了接缝和防止破裂的网格，以防止撕裂的尺寸超过大约一米乘两米。Cooper 补充说：“即使任何一层都有这种尺寸的撕裂，我们也能够满足性能要求。”

然而，最大的损害风险发生在发射后不久。风箏形状的遮阳板 6 个角中的每一个，都包含一个薄膜张力系统 (membrane tensioning system, MTS)，每个 MTS 连接着 15 根缆线 (每层膜各 3 根)，总共 90 根缆线。为了将遮阳板的 5 层分开，MTS 必须卷起这些电缆。在展开阶段的拉扯可能会非常具有破坏性，在系统演练过程中发现，让其工作是非常困难的。“MTS 在单独进行测试时相对简单，但当我们把所有东西放在一起时，发现膜和电缆管理系统之间存在复杂的相互作用，” Cooper 说，“我们必须克服挑战，从而应对电缆中时而张力过大、时而松弛的问题。”

遮阳板计划在望远镜发射 3 天后开始展开，并需要 5 天时间才能完成，这将是一段紧张的时期。但遮阳板工程师不会是唯一一个努力让 JWST 保持很低温度的人，虽然遮阳板将使望远镜的光学系统和大多数仪器保持在 36 K 的低温，但有些部件需要更低的温度。

保持冷却

在 JWST 上的 4 台仪器中，有 3 台 (近红外光谱仪 (NIRSpec)、近红外相机、精细制导传感器/近红外

成像仪和无缝光谱仪) 工作在 0.6—5 μm 的近红外波段。对它们来说，望远镜的一般工作温度 36 K 已经足够低了，然而第四台仪器被设计为在 5—28 μm 的更长波长下进行观测，为此它需要更低的温度，准确地说，比其他设备低 29 K。为了使中红外仪器 (Mid-Infrared Instrument, MIRI) 上的掺砷硅探测器保持在 7 K 的工作温度，NASA 建造了有史以来发射到太空中的最先进的制冷机，我们称它为“大冰箱”虽然准确，不过对其运行所需的创新技术有点严重贬低。

然而，与它的两个前身 (NASA 的斯皮策太空望远镜和欧洲航天局的赫歇尔空间天文台) 不同的是，它的冷却剂不会耗尽，因为它的制冷器是一个封闭的系统。制冷机的主要部分是它的制冷压缩机组件 (Cryocooler Compressor Assembly, CCA)，被安置在望远镜温暖的一侧，使用氦气作为制冷剂，并通过迷宫般的管子连接到 MIRI (距离望远镜主镜后面的综合科学设备模块大约 10 m 远)。一旦氦气被 CCA 内的预冷器冷却，它就利用制冷机冷头组件 (Cryocooler ColdHead Assembly) 通过这些管子泵送到 MIRI。制冷机冷头组件包含一个不到一毫米宽的阀门，它充当氦气的“节流阀”。由于焦耳—汤姆孙效应，当氦气在阀门的另一侧膨胀时，它会下降到 6 K (比 MIRI 的工作温度低 1 K)，然后氦气在通过 MIRI 探测器的后面时，会吸收并交换多余的热量。

在陆地制冷机中，这样的系统还是很容易实现的。然而，对位于深空望远镜上的冷却器就有一定的困难。例如，预冷器和氦气节流阀之间的距离，通常情况下，这两个

部件之间只有几厘米的距离，但在 JWST 上距离有好几米。因此，让氦气在通过望远镜的管道时保持温度是至关重要的。另一个挑战是振动，任何包含移动部件的低温系统都会产生一些振动，但在 JWST 上，这些振动最终是被消除的，因为活动机械的任何抖动都会振动光学系统，从而产生模糊的图像。因此，JWST 的制冷机仅包含两个活动部件：CCA 中一对水平相对运动的活塞泵，它们是专门设计的，运行起来非常平稳。

新的展望

JWST 并不是唯一一个将在 21 世纪 20 年代开始运行的主要天文设施。事实上，它是三个望远镜之一：维拉·C·鲁宾天文台 (Vera C Rubin Observatory) 将于 2022 年在智利开始观测，而南希·格雷斯·罗曼太空望远镜 (Nancy Grace Roman Space Telescope) 目前计划于 2027 年发射。这两个设施都将是全天巡天工作的领导者，重点是在大片天空中观察尽可能多的天体。这类巡天项目对于收集大量天体的数据至关重要。在除此之外的其他项目中，它们将努力提供测量暗能量强度的统计数据。

目前这一领域的领先者是位于基特峰国家天文台的尼古拉斯·U·梅奥尔 (Nicholas U Mayall) 4 m 望远镜，其暗能量光谱仪 (DESI) 可以一次进行 5000 个光谱观测。这个数字远远超出了 JWST 的能力，但由于 NIRSpec 设备的存在，新的太空望远镜仍将完成相应的天文巡天观测。NIRSpec 可以一次收集 100 个天体的光谱数据，使 JWST 拥有其他太空望远镜从未有过的能力，并为天文学家提供了新的视角。

为了使 JWST 适合于巡天工作，

它的设计者不得不超越 DESI 已经在使用的技术。在过去，同时观测是一个费力的过程，需要手动将光纤固定在铝板上打孔的位置。DESI 避免了这种情况，这要归功于机器触动器，它将光纤固定在仪器视野内的任何位置，并且可以每 20 分钟移动一次，从而允许仪器在一个晚上进行大量的观测。不幸的

是，这一解决方案被认为对天基天文台不可行。“当我们选择在 JWST 上的工作方式时，我们观察了 DESI 的机器人光纤方式，我们很难想象机器人能够在太空中做到这些。” Mather 说。

由于机械触动器无法在 JWST 的低温下以极高的精度运行，而且没有技术人员可以手动改变光纤的位置，Mather 和他的同事们需要一个与众不同的解决方案。他解释道，事实上他们需要一种完全不涉及光纤的解决方案，因为“没有光纤可以覆盖我们想要覆盖的整个波长范围”。

NIRSpec 团队的解决方案非常巧妙。该仪器的焦平面被分成四个象限，每个象限大约一张邮票大小，里面装满了 62000 个微快门，每个微型快门的尺寸只有 $100 \times 200 \mu\text{m}$ ，由氮化硅制成，氮化硅具有很高的抗拉强度，足够坚韧，可以多次打开和关闭，而且不会疲劳 (图 3)。在每一次观察过程中，需要打开的快门将接收到来自扫过象限区域磁臂的电信号，该系统将允许 JWST 在执行任务期间研究数千个最遥远星系的光谱，了解它们的化学组成、恒星形成率、红移等。Feinberg 说：“我们在第一年里要完成几百个

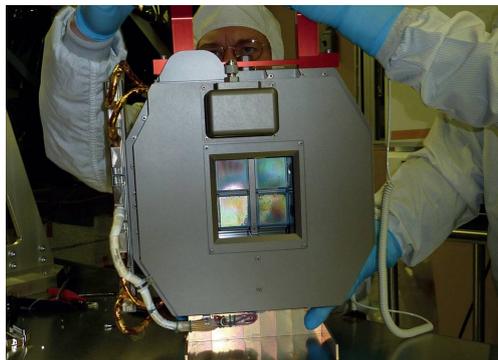


图3 打开和关闭。詹姆斯·韦布太空望远镜的近红外光谱仪 (NIRSpec) 的微快门阵列将使该望远镜能够研究数千个最遥远星系的光谱

科学提案，每个提案都可以证明韦布望远镜的价值。”

虽然哈勃望远镜和 JWST 有很多相似之处，但也有很多不同之处。其中尤其重要的是，望远镜工作的地方就不一样。当哈勃 2.4 m 的主镜被磨得出现失误时——当时工程师们还不知道——它导致了哈勃望远镜的球面像差。美国航天局的宇航员随后在 1993 年进行了一次大胆的太空行走，他们成功地安装了一台新仪器，为哈勃望远镜增添了一双新眼睛。哈勃望远镜在地球轨道附近工作，这与 JWST 所在的 L2 点的位置不同——太远了，宇航员无法到达从而进行维修任务。

虽然 JWST 将运行多久还有很多未知数，如果未来几个月的拆包和后续的操作一切都按计划进行的话，那么至少 JWST 应该在接下来的 10 年中运行。然后，它将能够与许多其他陆基和天基设备一起运行 (这些仪器计划在 2020 年代中后期上线)——就像哈勃在过去几十年里对其他天文台所做的那样。虽然天文学家们等待了二十多年才看到这个望远镜发射升空，但一旦它开始改变我们的宇宙观，那么对它的等待还是值得的。