

# 斯皮策空间望远镜实现最大化科学产出

范全林, 时蓬, 王琴, 尤亮

中国科学院国家空间科学中心空间科学与深空探测规划论证中心, 北京 100190

**摘要** 2020年1月30日, 美国主动关闭斯皮策空间望远镜。斯皮策空间望远镜已5次延寿、在轨运行超过16年, 运用科学数据发表了超过9000篇科学论文, 在宇宙红外观测、恒星和星系演化、系外行星证认等多个领域取得了重大发现。斯皮策空间望远镜在研制阶段采用了新颖的地球尾随日心轨道设计, 当时最先进的大面阵红外探测器件; 发射后科学目标紧扣空间天文观测新热点的系外行星及时调整, 在3个焦面有效载荷仅剩1个红外阵列相机, 且其4个波段仅存2个能正常工作的挑战下, 任务运控团队和科学团队紧密协同, 仍成功开展了长达10年的科学观测。空间科学先导专项部署了相关空间红外天文探测的预先研究, 斯皮策任务的开放技术创新、科学目标与时俱进、协同一体化观测等实现科学产出最大化的系列实践值得借鉴。

**关键词** 斯皮策空间望远镜; 红外天文; 空间科学; 产出最大化

利用科学卫星、载人飞船和空间站等航天器平台开展空间科学与探索, 是当代基础研究取得原创发现的重要手段。中国科学卫星系列正在起步, 仅实施了不足10个科学任务。多位有识之士呼吁, 科学卫星与国家民用空间基础设施各类“通导遥”卫星或演示验证卫星定位不同, 发现未知、产生知识、引领学科, 实现科学产出最大化是科学卫星承载的核心价值<sup>[1]</sup>, 引领空间技术发展、拓展空间应用领域属于它的溢出效应。为促进空间科学发展, 以斯皮策空间望远镜任务为例, 剖析其从概念提出

到运行结束全过程的里程碑事件, 聚焦科学产出最大化这一科学卫星任务核心理念, 分析其在产生重大发现、带动学科发展等方面的实践。

## 1 斯皮策任务简述

斯皮策空间望远镜(以下简称SST)属于美国国家航空航天局(NASA)大型空间天文台计划, 是该计划中唯一未搭载航天飞机升空的最后任务。它不像哈勃空间望远镜(HST, 1990年4月24日搭

收稿日期: 2020-03-10; 修回日期: 2020-06-19

基金项目: 中国科学院空间科学(二期)先导专项预研项目(XDA15010000)

作者简介: 范全林, 正高级工程师, 研究方向为空间科学发展战略和政策、空间天气学, 电子信箱: fan@nssc.ac.cn; 王琴(通信作者), 高级工程师, 研究方向为深空探测战略规划、组合导航, 电子信箱 wangqin@nssc.ac.cn

引用格式: 范全林, 时蓬, 王琴, 等. 斯皮策空间望远镜实现最大化科学产出[J]. 科技导报, 2020, 38(20): 113-122; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.20.017

乘发现号升空)那么著名,发射时间比康普顿伽马射线天文台(CGRO,1991年4月5日搭乘亚特兰蒂斯号升空)和钱德拉X射线天文台(CXO,1999年7月23日搭乘哥伦比亚号升空)都晚,它于2003年8月25日搭乘德尔塔-7920H重型运载火箭升空。

SST预期寿命最少2.5年、期望超过5年,但全部有效载荷正常观测5年5个月,实际运行超过16年。2020年1月29日,SST完成最后一项科学观测

任务“测量黄道光”,1月30日,接收美国深空网(DSN)戈尔德斯通(Goldstone)站的指令,启动安全模式,开始深空自由漂移。它主要搭载了3个焦面有效载荷和1台口径85 cm的里奇-克莱琴(R-C)望远镜,但多个工程载荷在后期科学观测中也起了重要作用(图1)<sup>[2]</sup>。SST从设计、研制到运行涉及到多个机构<sup>[3]</sup>,详见表1。

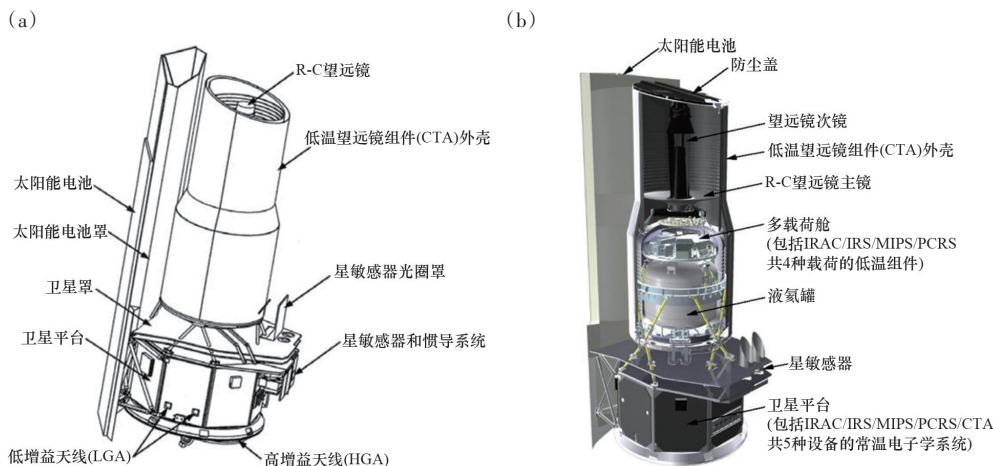


图1 斯皮策空间望远镜(SST)的外形(a)和结构剖面图(b)

表1 SST主要分工

名称	承担机构	主要职责
有效载荷	史密森天体物理天文台(SAO)	有效载荷任务首席科学家(PI)乔瓦尼·法齐奥(Giovanni Fazio)
	戈达德航天飞行中心(GSFC)	有效载荷设计、制造和测试
	康奈尔大学(CU)	有效载荷首席科学家詹姆斯·霍克(James Houck);有效载荷设计和开发
红外阵列相机(IRAC)	亚利桑那大学(UA)	有效载荷首席科学家乔治·里克(George Rieke);有效载荷设计和开发
多波段成像光度计(MIPS)	波尔航空航天技术公司(Ball Aerospace)	负责低温望远镜组件(CTA)的设计开发与集成,参与有效载荷IRS和MIPS的研制
R-C望远镜	洛克希德马丁公司(LMT)	卫星工程总师马克·埃弗茨(Mark Effertz);航天器的设计和开发,以及探测器系统工程、集成和测试(SEIT)
卫星平台	加州理工学院(Caltech)	科学运行中心主任托马斯·索夫(Thomas Soifer);科学应用系统、运控系统的设计、开发和实施,相关数据处理与存档
科学运行中心(SSC)	加州理工学院(Caltech)	SST首席科学家迈克尔·沃纳(Michael Werner)、项目经理约瑟夫·亨特(Joseph Hunt);SST的全面管理、分析与实施,运控系统的设计、开发和实施
工程总体	喷气推进实验室(JPL)	夫·亨特(Joseph Hunt);SST的全面管理、分析与实施,运控系统的设计、开发和实施

根据美国空间科学发展战略规划, SST的主要科学目标是通过电磁波谱3~180  $\mu\text{m}$ 波段的红外线观测研究暗弱的“极冷天体, 古老天体和尘埃物质”, 加深人们对宇宙的了解。但是它长达6002 d的科学观测成果已经远远超出任务初期NASA设定的限制, 并在系外行星等多个预期以外的领域促成了研究范式的变革<sup>[4]</sup>。

## 2 立项和研制阶段的决策和开放创新

SST最早可追溯于20世纪70年代, 受到探空火箭、高空气球和机载红外天文观测的激励, 也适逢1971年NASA开始征集搭载航天飞机的有效载荷, 美国天文学家提出向太空发射红外望远镜想法。现在回看, SST从概念提出到2003年发射升空长达33年, 适逢NASA第9任局长丹尼尔·S·戈尔丁推行“好、快、省”(FBC)民用航天发展方针, 若干关键决策和创新奠定了科学产出最大化的基础。

### 2.1 放弃航天飞机平台

SST在红外天文卫星发展史上的地位并非先天成就。虽然占据了NASA大型空间天文台计划的一席, 但在它之前, 美国、荷兰与英国在1983年联合发射了红外天文卫星(IRAS), 欧洲空间局(ESA)在1995年发射了红外空间天文台(ISO), 且都有优异的科学成果, 在它之后的多个红外天文卫星任务也各具特色(表2)。

直到1979年, 在美国科学院发布的《20世纪80年代空间天文学和天体物理学发展战略》中<sup>[5]</sup>, 仍将基于航天飞机平台的红外望远镜设施(SIRTF)列为“为空间实验室奠基的两大天体物理学装置”之一。1983年, NASA发布航天飞机搭载红外天文望远镜的任务征集建议, 首次发射拟定于1990年前后。

此间至少有两件大事影响了SST的走向。一是空间红外望远镜冷却事宜。IRAS卫星<sup>[6]</sup>尽管取得了成功, 但在地球空间900 km太阳同步轨道上, 其携带的600 L液氮制冷剂很快就消耗殆尽, 致使观测任务仅持续了10个月。二是空间观测平台的红外背景噪声不容忽视。1985年7月29日, 挑战

者号STS-51-F任务升空, 搭载的太空实验室2号(Spacelab-2)配置了一台口径15 cm、250 L液氮制冷的红外天文望远镜(IRT)<sup>[7]</sup>, 然而当年8月开展的红外观测实验表明, 航天飞机自身热辐射的红外干扰远超科学家预期, 这让人们意识到航天飞机可能并不适合搭载红外望远镜。雪上加霜的是, 1986年1月28日, 挑战者号发射失事。随后, NASA决定实施“自由飞行”(free-flyer)计划, 由卫星自身提供空间红外观测所需的飞行动力。

### 2.2 多重优化方案设计

由于地球大气层对大部分红外波段不透明, 故用红外观测深远、古老宇宙必须要到太空去。但是高分辨率、高灵敏度的空间红外天文任务仍需要克服地球、月球和太阳, 以及航天器/卫星平台本身等一切非观测对象带来的背景红外辐射干扰。例如, 研究表明, 地球本身作为一个辐射体, 它所释放的热量可以让传统近地轨道上的卫星和飞船达到250 K, 这对于开展10 K以下的中远红外波段科学观测来说是个巨大的先天不足。为了科学产出最大化, SST的设计方案非常优化<sup>[2]</sup>, 纵使抛开当时的历史条件现在回看也可圈可点。

1) 独特的地球尾随日心轨道设计<sup>[8]</sup>(图2)。SST底朝地球, 跟随在地球后面每373 d环绕太阳一圈, 相当于以0.12 AU/年的速度后滞远离地球。与近地轨道相比, 该轨道有4个主要优点: 第一, 巧妙避开地、月热辐射和杂散光污染, 携带制冷剂重量只有地球大椭圆轨道的ISO卫星所携带重量的15%, 却能比ISO拥有更长的在轨工作时间; 第二, 方便遮挡太阳辐射, SST以表贴太阳能电池的一面指向太阳并用太阳能电池罩隔热, 另一面在没有干扰热源情况下, 通过被动制冷就几乎能实现期望的超低温观测环境; 第三, 该轨道使得SST搭载的高灵敏度探测器规避了范·艾伦辐射带的影响, 虽然后续的空间红外天文任务如詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)和欧几里得卫星(Euclid)新选择日地L2点运行, 但较L2点而言, SST的轨道设计利用更低成本的运载火箭即可实现; 第四, 使得望远镜具有更大的视角, 该轨道设计使得两个主要热源(太阳和地球)几乎处于同一方向, 因此望远镜朝向只要

表2 主要红外天文卫星任务

名称	主要科学目标	主要载荷 及工作波段/ $\mu\text{m}$	望远镜 口径/cm	制冷方式	运行轨道或 位置	运行或发射 时间	主要研制方
IRAS	巡天, 红外恒星探测	Survey array: 12, 25, 60, 100	57	液氮主动 制冷	900 km 太阳 同步圆轨道	1983.1—1983.11	美国 NASA、 荷兰 NIVR 和英国 SERC
ISO	宇宙极深探测、近邻星 系精细成像、恒星形成 区及主序星尘埃盘详细 研究	ISOCAM (2.5~17), LWS (45~197), SWS (2.4~45), ISOPHOTO (2.4~ 240)	60	液氮主动 制冷	大椭圆轨 道, 1000 km $\times$ 70500 km	1995.11—1998.4	ESA
Spitzer	研究河外星系、观测遥 远星系, 揭示早期宇宙 图景	IRAC (3.6, 4.5, 5.8, 8), IRS (5.3~40), MIPS (24, 70, 160, 55~95)	85	液氮主动 制冷 + 被 动制冷	地球尾随日 心轨道	2003.8—2020.1	NASA
AKARI	探索星系起源和演变, 早期中/远红外巡天为 主, 也有近/中红外定点 观测, 制冷剂耗尽后研 究天体特征	FIS (50~200), IRC (1.7~26.5)	68.5	液氮主动 制冷	700 km 晨昏 太阳同步轨 道	2006.2—2011.11	JAXA、ESA
Herschel	早期星系形成和演化, 恒星形成及其与星际介 质的作用	PACS (55~210), SPIRE (194~672), HIFI (157~212, 240~625)	350	液氮主动 制冷 + 被 动制冷	日地 L2 点	2009.5—2013.4	ESA、NASA
WISE	红外巡天; 2013 年转为 近地球目标巡天, 更名 为 NEOWISE	Detector array: 3.4, 4.6, 12, 22	40	固氮主动 制冷	525 km 太阳 同步轨道	2009.12—2011.2	NASA
JWST	探测宇宙大爆炸后几亿 年第一个星系的形成机 制、系外行星研究	NIRCam (0.6~5), NIRSpec (0.6~5), MIRI (5~28), TFI (1.6~2.4, 3.2~ 4.9)	650	被动制冷	日地 L2 点	预计 2021 年发射	NASA、ESA 和加拿大
Euclid	光学巡天, 近红外/暗宇 宙, 暗能量与暗物质	NIP (0.92~1.37), NIS (1~2)	120	被动制冷	日地 L2 点	预计 2022 年发射	ESA、NASA

躲开太阳和地球即可, 观测视场得以极大扩展, 全天可观测天区约 35%。

2) 液氮主动制冷与辐射被动制冷相结合的组合热控方案。第 1 个优点是减少了 SST 携带的星载制冷剂, 结果能将航天器总尺寸削减 80% 以上、任务预算削减 75% 以上, 运载火箭可选用波音德尔塔-2 型, 而不是昂贵的 LMT 的泰坦-4 型或阿特

拉斯型火箭。SST 携带的 360 L 液氮用了 5.7 年, 相较而言, 其先驱 IRAS 在 10 个月内就消耗了 520 L 液氮。第 2 个优点是 SST 可以采取“暖发射策略”, 与既往的 IRAS 和 ISO 任务将望远镜预储于液氮罐的传统做法不同, SST 发射时仅需将科学载荷舱和液氮罐冷却至 1.5 K, 而望远镜及卫星其他部件则无需包裹在液氮罐中, 如图 1(b) 所示, 极大简化了

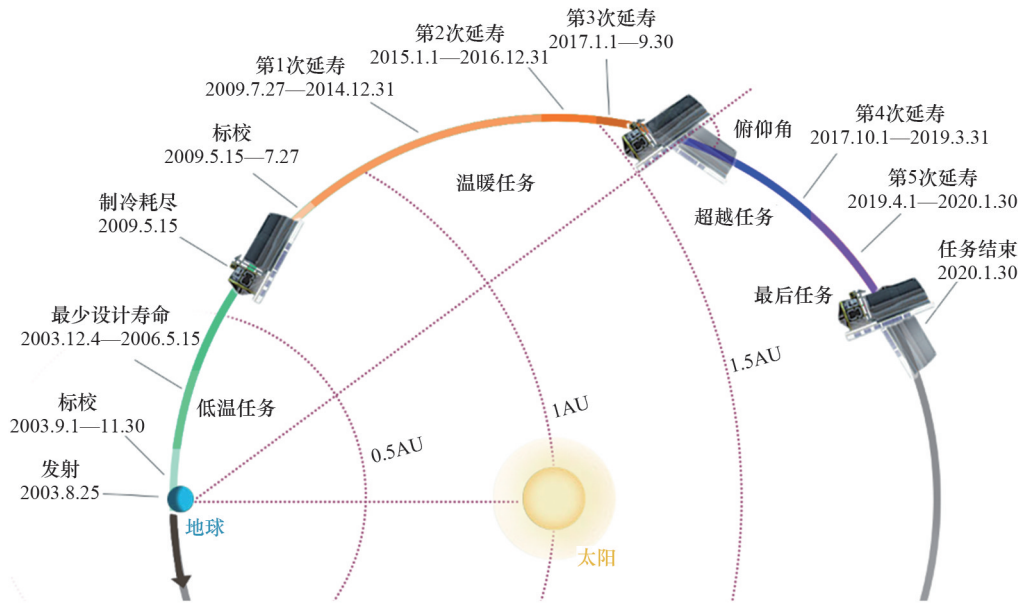


图2 SST阶段划分示意(图片参考:NASA/JPL-Caltech;图片处理:吴妮)

发射前的测试和组装流程,降低了费用。发射后历时5周在深空中自然冷却至20 K,靠少量液氮蒸发即可制冷到5.5 K最优工作温度<sup>[9]</sup>。SST的复合制冷方案启发了后续空间红外天文任务定点日地L2点,采用全被动制冷的热控策略(表2)。

3) 继承采用铍制的SST卫星主体结构的主镜镜片。铍是公众不太熟悉的碱土金属,但它具有密度小、导热性好、比刚度高等特点,是宇航事业不可或缺的珍贵材料。IRAS卫星是最早使用工业级铍材料的卫星之一,所有部件(包括反射镜和结构)均由铍制成<sup>[10]</sup>,整个探测器均匀降至10 K的工作温度时,铍的热膨胀系数基本为零,确保了系统的形稳性。SST继承了IRAS的设计理念,除镜子支架外,所有部件也均由铍制成,通过热等静压(HIP)工艺提升了材料质量。整颗卫星仅重950 kg,包括50.4 kg(约337 L)液氮,15.6 kg氮气推进剂;卫星干重851.5 kg,防尘盖等重6 kg。

4) 率先采用大型红外阵列相机等新技术。现在大型红外焦平面阵列技术已比较成熟,但在SST时代率先采用美国军方为满足导弹预警需求发展起来该技术,却意味着巨大的技术跨越。比起IRAS卫星焦平面探测器仅有62个像素来说,SST

卫星红外阵列相机(IRAC)的分辨率已超过65000像素,并且电子噪声更低、分辨率和性能更好。IRAC是4通道宽波段相机,可以同时拍摄中心波长为3.6、4.5、5.8和8.0  $\mu\text{m}$ 的多波段图像,4个探测器阵列的大小为256×256像素<sup>[11]</sup>。IRAC探测器阵列中使用两种不同类型的材料:两个较短的波长探测器使用铍化钢等材料,两个较长的波长通道使用特殊处理的硅掺砷等材料。特别的,IRAC的3.6  $\mu\text{m}$ 和4.5  $\mu\text{m}$ 探测器是SST液氮制冷剂耗尽后仍能以峰值性能正常工作的有效载荷,为其科学产出最大化做出了卓越贡献。

5) SST还是最早采用2G星载固态大容量存储器(MMC)“存储-转发”方式向地面传输观测数据的科学任务之一。

虽然美国科学院宣布SST属于20世纪90年代空间天文和天体物理最优先任务,框定了22亿美元的预算,但是基于以上多重策略优化的方案设计,不仅较好贯彻了NASA当时强调的FBC原则、为SST科学产出最大化奠定了坚实基础,而且到研制完成发射升空时实际耗费约7.76亿美元(含运载火箭等发射费用),仅为最初估计支出的1/3,为后续争取科学运行资金做了铺垫。

### 3 紧扣科学热点调整科学目标

SST发射升空后即进入了为期3个月的在轨测试和科学观测标校(IOC/SV)。2003年12月1日卫星交付,SST自此开启探测被尘埃遮蔽的寒冷和遥远天体的发现之旅。需要指出的是,当年12月18日,随着第1幅高质量科学观测图像和光谱数据向公众发布,此前一直被称为空间红外望远镜设施(SIRTF)的卫星才正式更名为斯皮策空间望远镜,以纪念1946年最先正式论证把望远镜放入太空的已故美国天体物理学家莱曼·斯皮策。正是他多年来一直坚持不懈地游说NASA和美国国会发展太空望远镜,才促成了哈勃空间望远镜的诞生。

SST的首批照片揭示出了它试观测的星云和星系的很多细节,这在此前利用其他观测工具是无法获得的,使得人类能清晰“看到”被尘埃遮蔽的银河系中心等宇宙空间。实际上,SST从此刻开始就呈现强大且理想的工作状态,围绕既定科学目标的预期成果,不仅完成了最低2.5年观测寿命、5年的预期观测寿命,而且得益于先期卫星各种方案设计优化成效,以及运控团队的细致液氮供给预算安排,星载液氮的消耗速度比预想的还要慢,仅28 g/d,至液氮全部消耗殆尽,SST又额外多工作了5个月15天。

SST在轨的5年期间,国际天文学界正在兴起一个全新的热点——系外行星探测。虽然长期以来多位哲学家和科学家推测太阳系之外有行星存在,但限于早期望远镜的光谱分辨率和计算机数据处理的软硬件水平都很低,系外行星还仅是个“传说”。1992年,波兰天文学家亚历山大·沃尔兹森用脉冲星计时法发现了第1个太阳系外行星——脉冲星行星PSR B1257+12 b<sup>[12]</sup>。人们为了解自己在宇宙中是否孤独,更渴望寻找位于主序星宜居带的行星,1995年,瑞士天文学家米歇尔·麦耶和他的学生迪迪埃·奎洛兹在《Nature》发表的论文彻底激活了系外行星探测领域<sup>[13]</sup>。他们师徒二人利用法国普罗旺斯天文台的望远镜,发现了围绕一颗类似太阳的恒星运转的系外行星——飞马座51b,并

获得了2019年的诺贝尔物理学奖。此间除了分布在世界各地的天文望远镜投入系外行星搜寻,专门探测系外行星的空间科学任务也成为热门。2006年12月31日,法国研制的人类首颗专门通过凌星法探测系外行星的科学任务柯罗号(CoRoT)在俄罗斯发射升空<sup>[14]</sup>。2009年3月6日,美国发射开普勒空间望远镜(Kepler)用于探测系外类地行星<sup>[15]</sup>。

SST比天文学界的这个新热点出发得太早了,其方案设计时人们尚未发现凌星系外行星。就如SST科学运行中心坦承的那样,SST发射刚升空时,他们从未考虑用它来研究系外行星,因为当时看起来很滑稽,更不用说会想到SST将成为强大的系外行星工具。基于SST超高精度和稳定度的观测指向系统及优异的温控能力,科学团队给处于巅峰状态的相机开辟了新阵地。他们扩充了SST的科学目标,从观测数据中解析出源自系外行星的红外辐射,使其能够探测到行星的温度、表面的风和大气成分。

新的重大科学产出超乎想象。SST运行的稳定环境与长时间观测天体的能力,促成了它在2005年第1次直接探测到两颗已知系外热木星——HD 209458b和TrES-1的光线,标志着行星科学新时代的开始。2007年2月,SST成为第1个直接识别系外行星大气分子的空间望远镜。科学家们利用“次食”技术获得了HD 209458b和HD 189733b两颗系外“热木星”行星大气的详细光谱信息,并有望确定系外行星大气层的分子组成。这一发现的里程碑意义在于人类迈出了探测系外行星潜在生命迹象的重要一步。2007年5月,科学家根据SST传回的探测数据,绘制出第1幅系外行星的“天气图”,它清楚描绘了气态系外行星HD 189733b表面的温度变化<sup>[16]</sup>。根据这幅天气图,科学家推断这颗行星和地球一样,大气层中有巨大的气流运动、刮着猛烈的风。

显然,SST团队在正确的时间做出了正确决策,科学产出最大化需要抓住每一次重大科学机遇。

## 4 多策略运行倍增观测成果

人们习惯把 SST 的主任务称为低温任务。回看 SST 在轨科学观测周期,它包括 4 个阶段(图 2),分别是:①低温任务:2003 年 12 月 1 日—2009 年 5 月 15 日;②温暖任务:由 3 次延寿机会组成,2009 年 7 月 27 日—2014 年 12 月 31 日、2015 年 1 月 1 日—2016 年 12 月 31 日、2017 年 1 月 1 日—2017 年 9 月 30 日;③超越任务:即第 4 次延寿,2017 年 10 月 1 日—2019 年 3 月 31 日;④最后任务:第 5 次也是最后 1 次延寿,2019 年 4 月 1 日—2020 年 1 月 30 日。在美国国会收紧 NASA 预算的情况下,SST 一直承受着因资金支持不足而被撤销的巨大压力。后 3 个阶段实际上是由任务团队艰苦争取到的 5 次延寿拓展任务组成<sup>[17]</sup>,特别是第 4、5 次延寿,某种程度上也得感谢其继任者 JWST 发射一再拖期。至 2020 年 1 月 30 日 SST 受控关闭,卫星在轨运行 6002 d,运行成本累计 5.84 亿美元。鉴于各机构学者对 SST 延寿阶段的描述千差万别,本文根据 SST 官网和 NASA 的财年预算严谨推算了各段时长。

### 4.1 运控策略优化支撑延寿科学观测

2009 年 5 月 15 日,SST 液氦耗尽后,SST 卫星温度迅速从 5.5 K 升至 20 K 左右,中/远红外波段观测功能失效。也就是说,3 个有效载荷中的 2 个,红外光谱仪(IRS)、多波段成像光度计(MIPS)完全停止工作,剩余 1 个载荷红外阵列相机(IRAC)仅有 3.6  $\mu\text{m}$  和 4.5  $\mu\text{m}$  两个通道相机仍能正常工作。为此,SST 团队采取了多种策略,确保仅存观测能力能不断获取珍贵探测数据、产出重大成果<sup>[18]</sup>。

1) 完成近红外阵列相机的重新标校(IWIC)。这项工作从 2009 年 5 月 16 日—7 月 27 日,历时 2 月有余,确保两个红外相机在 26 K“暖温”工况下科学观测数据的真实有效。

2) 重新优化完善卫星运控体系(MOS)。受深空测控(DSN)时间限制(例如,2006 年 1 月新视野号任务升空)等约束,工程总体 JPL、科学运行中心 Caltech 和卫星总体 LMT 协同,针对 SST 的测控数传上下行链路、星载大容量存储器(MMC)以及运控团队从发射后 150 人到后期仅 30 余人的大幅调

减等情况,通过数据包确认(PAP)、应用互联网技术调度等策略予以优化。

3) 克服地球尾随日心轨道所致的诸多挑战,包括安全模式触发、热控、卫星供电和测控数传等多个方面。随着星地距离逐年增长,SST 的地球尾随日心轨道轨道设计会引起两类困难:一是与测控数传深空通信相关的传统挑战,二是与卫星高增益天线(HGA)对地定向通信导致的卫星俯仰角(入射方向与太阳能电池法线平行 $0^\circ$ )增大相关的挑战(图 2),由于深空通信窗口期间卫星必须调姿,这会引发包括表贴太阳能电池充电效率降低以及星载电池充电时长增加、卫星遮光隔热罩泄漏引起的杂散光污染和卫星本体升温热污染、超过宽角太阳敏感器(WASS)科学观测仰角阈值触发安全模式等。为此,SST 团队采取了系列有效措施:(1) 调整深空通信策略;(2) 在确保卫星安全的前提下由地面人员手动操控卫星“暂停”进入预设的“安全模式”;(3) 新开发了限制卫星俯仰角和下行链路时长的热控和充电时序策略;(4) 修改飞控软件,利用地面检测 HGA 的纯载波信号激活安全模式,实现卫星异常恢复等。

### 4.2 多型观测任务孕育重大发现机遇

作为一个天文台型空间科学任务,SST 低温任务期间的观测研究主要分为普通观测用户(GO)、科学观测小组项目(LSP)、存档数据研究(AR)、理论研究(TR)和重要观测用户(GTO)。GTO 在任务在轨的前 2.5 年可以获得 20% 的观测时间,之后拥有 15% 的观测时间。SSC 主任有权限自由支配 10% 左右的观测时间(DDT)。LSP 和 GTO 的观测时间保证主要科学目标的完成。

统计数据显示,SST 低温任务期间共支持了 1711 个项目,其中 GO 项目 1066 个,占 62.3%,分配方式主要通过世界各国的科学家每年提交观测提案,通过国际同行评审确定观测方案。这种广泛的支持为验证科学猜想、实现重大发现提供了可能。例如科学家发现土卫八(Iapetus)始终呈现“一面黑一面白”的奇特情况,他们推测这或许是土星的一个难以观测的“隐形”环导致的,SST 为验证这一科学假说提供了可能。2008 年 8 月,SSC 批准了第

40840号GO观测申请,使来自弗吉尼亚大学和马里兰大学的两位科学家在2009年2月使用IRAC成像和MIPS扫描对土星环进行3.4 h观测。结果发现了目前已知最大的土星环土卫九环(Phoebe Ring)<sup>[19]</sup>,土卫九在该环内运行,它与其他天体碰撞产生的尘埃可能是其物质来源之一,并染黑了土卫八的一面。

#### 4.3 技术创新和任务协同产出重要成果

为了科学产出最大化,SST还在拓展任务期间发展了多项创新技术,提高时变观测精度同时降低数据量大小,记录系外行星、褐矮星、活动星系核和星系中心等目标天体或天区从几个小时到20多天的相对光度变化。例如,在系外行星观测中首次采用了抖动策略(间歇地改变探测器阵列上目标的位置),在提高指向的整体稳定性、提高目标捕获精度和重复性、独立校准像素内增益图以及建立与用户技术交流的论坛社区等方面实现了创新。尤其是用于校准和消除星敏感器和望远镜光学偏离的工程载荷卫星指向校准参考敏感器(PCRS),继主任任务阶段支持IRS观测外,在拓展任务阶段被用于支撑IRAC的科学观测,有效提升了目标捕获精度。

众人关注的TRAPPIST-1行星系统,虽然是2016年由欧洲南方天文台(ESO)的TRAPPIST地面巡天望远镜最先发现的,但当时只知道有3颗类地行星。2016年以来,SST对这个系统进行了长达1000 h的后续观测,又发现了4颗新行星,其中3颗位于恒星周围的宜居带。SST精确测量了7颗系外行星的大小,估算了其中6颗的质量和密度,判断所有TRAPPIST-1行星都可能是地球大小的岩石星球,成就了当代系外行星探测的新高峰<sup>[20]</sup>。

此外,SST通过与其他空间科学任务和地面望远镜的协同观测,不仅倍增自身的科学产出,而且拓展了人类认知边界,令人印象深刻。例如,在主任任务期间,2005年7月4日,NASA的深度撞击任务(Deep Impact)撞上坦普尔1号(Tempel 1)彗星,SST协同分析了被溅起的尘埃,发现其中既有已知的彗星成分,如硅酸盐和沙粒<sup>[21]</sup>,也有一些出乎意料成分,如黏土、碳酸盐、含铁化合物和芳香烃,这为确定太阳系内行星、彗星和其他天体的成分、

研究太阳系形成提供了线索。

在拓展任务阶段,2011年SST携手CXO、HST等望远镜,科学家发现了距地球126亿光年、正在成长的原始星系团COSMOS-AzTEC3。2015年,SST与地面的光学引力透镜实验(OGLE)共同发现迄今为止最遥远的系外行星OGLE-2014-BLG-0124Lb,距离地球13000光年<sup>[22]</sup>。2016年,SST携手HST发现了距离地球134亿光年外的星系——GN-z11<sup>[23]</sup>,并确定了它诞生于大爆炸4亿年后,位于大熊座方向,质量仅为银河系的1%,但其恒星的诞生速度却为银河系的20倍。

虽然SST在轨科学任务结束了,人们仍有理由坚信其会继续产出科学成果。一方面,SST的海量观测数据都保存在公开数据库中,向包括中国科学家在内的全球科学界开放研究使用;另一方面,它也可视作探路者任务,为JWST、Euclid等后续任务提供先导目标,包括重访SST红外巡天结果中的重要观测目标、深化系外行星和其他星系的精细探测等。例如,JWST前5个月将运行的13个科学计划中,有4个直接建立在SST观测基础上,其中包括深化观测TRAPPIST-1行星系统,确认TRAPPIST-1e行星是否具有大气及其化学组成。

据统计,利用SST科学数据,各国科学家迄今累计发表超过9000多篇论文<sup>[24]</sup>(图3),其中发表在《Science》和《Nature》中的分别有249篇和401篇。SST围绕红外天文、系外行星、活动星系核(AGN)的科学产出仍在继续,正如《Nature Astronomy》2020年4月、5月出版2期SST回顾专辑所呈现的那样<sup>[25]</sup>。

## 5 结论

进入新世纪,中国空间科学正在努力向世界科学舞台中央迈进。空间科学先导专项发射的“悟空”“墨子”和“慧眼”等科学卫星正处于在轨运行和延寿,也产出了一批有国际影响的成果<sup>[26-27]</sup>，“嫦娥四号”任务实现人类首次月背软着陆,正在开展科学探测产出成果<sup>[28]</sup>。

关于空间科学任务科学产出最大化<sup>[29]</sup>,中国科学家非常重视,并积极呼吁各方予以高度关注。就

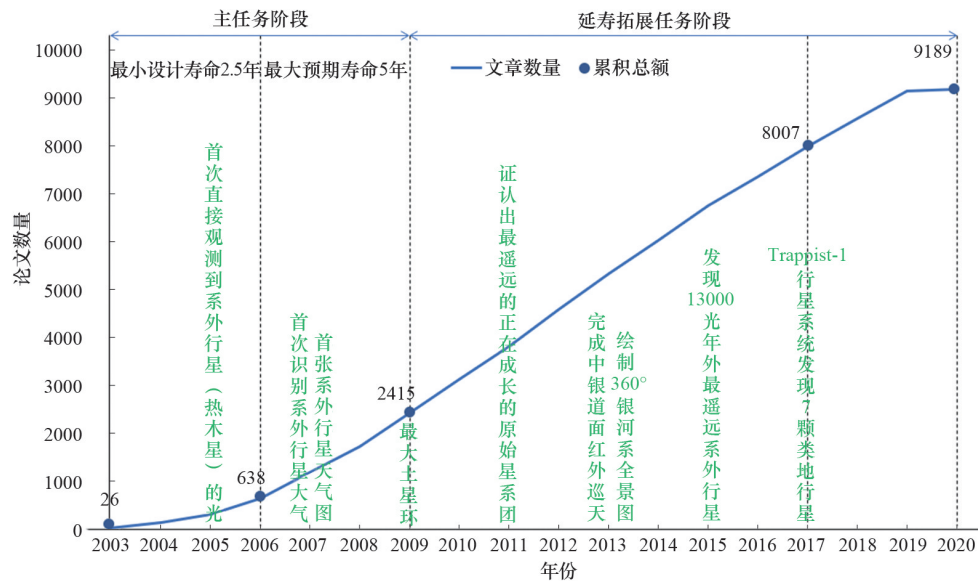


图3 SST代表性重大科学发现和科学产出统计

空间红外天文而言,2009年以来,通过中国科学院空间科学先导专项预先研究和背景型号的支持,国家天文台、上海天文台等单位已完成了中国红外天文小卫星的初步方案研究,科学目标聚焦天文多环芳香烃(PAH)近红外成像和光谱巡天,基于SiC主镜的R-C低温望远镜样机、液氦温区小型机械制冷技术等取得了积极进展<sup>[30]</sup>。红外观测技术是典型的军民融合领域<sup>[31]</sup>,推动中国空间红外天文科学任务实现零的突破,推动中国空间科学任务科学产出实现最大化,SST的方案设计、科学目标设定、运控策略更新的系列有效做法值得我们借鉴和思考。

#### 参考文献(References)

- [1] Wu J, Bonnet R. Maximize the impacts of space science [J]. *Nature*, 2007(551): 435-436.
- [2] Werner M W, Roellig T L, Low F J, et al. The SPITZER space telescope mission[J]. *The Astrophysical Supplement Series*, 2004, 154: 1-9.
- [3] Spitzer mission overview[EB/OL]. [2020-02-15]. [https://www.jpl.nasa.gov/news/press\\_kits/spitzer/](https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/spitzer/).
- [4] Spitzer science[EB/OL]. [2020-02-15]. [https://www.jpl.nasa.gov/news/press\\_kits/spitzer/science/](https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/spitzer/science/).
- [5] National Research Council. Strategy for space astronomy and astrophysics for the 1980's[M]. Washington D C: The National Academies Press, 1979.
- [6] Davies J K, Green S F, Stewart B C, et al. The IRAS fast-moving object search[J]. *Nature*, 1984(309): 315-319.
- [7] Fazio G G. Small helium-cooled infrared telescope experiment for Spacelab-2[R]. MA Cambridge: The Smithsonian Astrophysical Observatory, 1990.
- [8] Kwok J H, Garcia M D, Bonfiglio E, et al. Spitzer Space Telescope mission design[C]//Proceedings of SPIE. United Kingdom: Glasgow, SPIE, 2004(5487): 201-210.
- [9] Werner M W. The Spitzer Space Telescope[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 011008.
- [10] Gehrz R D, Roellig T L, Werner M W, et al. The NASA Spitzer Space Telescope[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2008, 78: 011302.
- [11] Fazio G G, Hora J L, Allen L E, et al. The Infrared Array Camera (IRAC) for the Spitzer Space Telescope[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2004 (154): 10-17.
- [12] Bryden G, Beichman C A, Rieke G H, et al. Spitzer/MIPS limits on asteroidal dust in the pulsar planetary system PSR B1257+12b[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006(646): 1038-1042.
- [13] Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J]. *Nature*, 1995(378): 355-359.
- [14] Hatzes A P. The role of space telescopes in the characterization of transiting exoplanets[J]. *Nature*, 2014(513): 353-357.
- [15] Lissauer J J, Dawson R I, Tremaine S. Advances in exoplanet science from Kepler[J]. *Nature*, 2014(513): 336-344.
- [16] Swain M R, Deroo P, Griffith C A, et al. A ground-based near-infrared emission spectrum of the exoplanet

- HD 189733b[J]. *Nature*, 2010(463): 637–639.
- [17] Yee J C, Fazio G G, Benjamin R, et al. The science case for an extended Spitzer mission[R]. MA Cambridge: the Smithsonian Astrophysical Observatory, 2017.
- [18] Lowrance P J, Ingalls J G, Krick J E, et al. Spitzer Space Telescope: Innovations and optimizations in the extended mission Era[C]//15th International Conference on Space Operations, France, Marseille: The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2018: 516–528.
- [19] Verbiscer A J, Skrutskie M F, Hamilton D P. Saturn's largest ring[J]. *Nature*, 2009(461): 1098–1100.
- [20] Gillon M, Triaud A, Demory B, et al. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1[J]. *Nature*, 2017(542): 456–460.
- [21] Lisse C M, VanCleve J, Adams A C, et al. Spitzer spectral observations of the deep impact ejecta[J]. *Science*, 2006, 313(5787): 635–640.
- [22] Map of Exoplanets Found in Our Galaxy[EB/OL]. (2015–04–14) [2020–02–16]. <http://www.spitzer.caltech.edu/images/6053-sig15-006>.
- [23] May C. Back to the beginning[J]. *Nature Physics*, 2017, 12: 287.
- [24] Spitzer Bibliographical Database[EB/OL]. [2020–02–15]. <http://sohelp2.ipac.caltech.edu/bibsearch/>.
- [25] Spitzer steps aside[J]. *Nature Astronomy*, 2020(4): 293.
- [26] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1140–1144.
- [27] Daphe C, An Q, Asfandiyarov R, et al. Measurement of the cosmic ray proton spectrum from 40 GeV to 100 TeV with the DAMPE satellite[J]. *Science Advances*, 2019, 5(9): 3793.
- [28] Wu W W, Li Ch Li, Zuo W, et al. Lunar farside to be explored by Chang'e-4[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 222–223.
- [29] 吴季. 空间科学任务的全价值链管理和产出评估[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(2): 206–213.
- [30] 邓劲松. 红外天文小卫星深化论证[R]. 北京: 上海微小卫星工程中心, 2016.
- [31] 李佳席, 邓劲松, 许春, 等. 红外空间天文发展[J]. *天文学进展*, 2016, 34(3): 327–340.

## The scientific output maximization of Spitzer Mission

FAN Quanlin, SHI Peng, WANG Qin, YOU Liang

Space Science and Deep Space Exploration Study Center, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** NASA's Spitzer Space Telescope finally ceased all science operations after more than 16 years' operation, with 5 times of mission extensions. Significant discoveries were made in many fields, such as studying the universe in the infrared light, revealing new wonders in our solar system, our galaxy, and beyond, as well as detecting exoplanets and characterizing their atmospheres. More than 9000 scientific papers were published based on its scientific data. A novel Earth-trailing heliocentric orbit was chosen, with the then state-of-the-art, large-format infrared detector arrays in the design of the Spitzer. The mission adjusted its scientific objectives as soon as the exoplanets became a new hot spot of the space astronomy observation after its launch. Scientific observations were made for another 10 years after its cryogenic main mission with the only one payload left among the three focal plane scientific instruments aboard, i.e. the two shortest wavelength bands, at 3.6 and 4.5 microns of the 4 channel infrared array camera. For a sustainable progress of China's space science missions, it is beneficial to learn from the Spitzer mission's practices such as the open technology innovation, the adjustment of the scientific goal with the times, and the collaborative integrated observation with other ground or space astronomical telescopes.

**Keywords** Spitzer Space Telescope; infrared astronomy; space science; scientific output maximization ●



(责任编辑 王丽娜)