

# 美国空间科学的发展及其启示

范全林, 白青江

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** 剖析了美国空间科学战略规划的模式、科学计划的布局、空间科学发展的体制保障和机制创新; 提出在中国空间科学发展不断得到重视的大环境下, 亟需重视战略规划研究, 并强调规划的严肃性, 要坚持重大科学任务的国家属性和国际合作开放性并举, 要重视厚植和夯实空间科学发展的基础等3方面的建议。

**关键词** 美国空间科学; 空间科学规划; 航天发展模式

2000年, 中国第一部《中国的航天》白皮书确立了中国的空间活动包括空间技术、空间应用和空间科学。2018年中国实施了以北斗卫星组网、嫦娥四号探月等为代表的39次航天发射, 创下中国航天发射新纪录的同时首次超过美国(34次)、跃居世界首位<sup>[1]</sup>。2019年1月3日, 嫦娥四号在人类历史上首次实现了航天器在月球背面软着陆和巡视勘察<sup>[2]</sup>。这些都成为中国由航天大国向航天强国迈进的重要标志。

但在成绩面前, 众多专家学者对中国航天的现状一直保持着清醒的认识和判断。中国是航天大国, 主要是指航天规模和能力比较大、比较强, 但中国还不是航天强国, 表现在航天技术的原始创新性

不足, 而加强原始创新是实现航天强国的一个重要条件<sup>[3]</sup>。中国空间科学规模小、投入少, 只发射过少量科学卫星, 进行了约100余项空间实验。而国外航天机构中空间科学预算占比普遍为20%~30%, 完成了约5000项空间实验<sup>[4]</sup>。

多位学者参考美国、日本等机构的研究报告, 对中国的航天实力进行了定量分析, 指出空间运输是中国航天的加分项, 载人航天活动能力与中国的整体空间能力地位基本相称, 空间科学和应用是中国航天的短板。跟踪模仿创新只能短期解决“追赶”问题, 缩短与国际先进水平的差距, 不可能消除差距更不可能实现“赶超”<sup>[5-8]</sup>。无论在政府层面还是科学界, 对于发展空间科学是建设世界科技强国

收稿日期: 2019-05-16; 修回日期: 2019-08-26

基金项目: 中国科学院战略研究和决策支持系统建设专项项目(GHJ-ZLZX-2019-06-2); 空间科学(二期)先导专项“十四五”空间科学、火星以远无人探测发展战略规划编制研究(XDA15018200)

作者简介: 范全林, 高级工程师, 研究方向为空间科学发展战略和政策研究、空间天气, 电子信箱: fan@nssc.ac.cn

引用格式: 范全林, 白青江. 美国空间科学的发展及其启示[J]. 科技导报, 2019, 37(21): 73-87; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.21.007

的重要途径已有了共识,中国要成为空间科学知识的产出国<sup>[9-10]</sup>,空间科学的跨越可作为今后中国航天领域和基础科学发展的主要突破口之一,并将改变中国航天大而不强的不平衡状态。只要重视,就有巨大的机会<sup>[11-12]</sup>。

空间科学作为20世纪初第三次科学革命后兴起的重大科学领域,通过航天器平台直接面对和深入广袤宇宙,居高临下研究人类家园行星地球,开辟了全新的窗口,提供了崭新的手段和强大的能力,推动和见证了科技发展的“太空时代”新纪元。20世纪50年代末,包括中国在内的世界主要国家站在了发展航天、探索宇宙的同一起点上。从那时起,中国经历了建国后的百废待兴和改革开放,中国航天支撑了国防安全和经济社会发展,国家民用空间基础设施日臻完善,“悟空”“墨子号”等科学卫星引起世界关注<sup>[13]</sup>,而美国则凭借经济总量和综合国力全球第一的优势成为世界航天强国,完成了人类在太空领域几乎所有的第一次重大突破和重大发现,获得空间科学领域12项诺贝尔奖中的9项,18名美籍科学家摘得诺贝尔奖桂冠<sup>[14]</sup>。

美国国家航空航天局(NASA)负责制定、实施美国的太空计划,并牵头开展空间科学研究,拥有多个世界著名的空间科学研究中心。在新媒体时代,关于NASA及美国诸项空间科学任务的新闻报道、科普推文不计其数,但传递给受众的是较为表层的、碎片化的信息<sup>[15-16]</sup>。本文在长期发展战略研究的基础上,对NASA的空间科学计划、战略规划研究、体制机制保障和创新,以及国际和国内参与度等方面进行了全景透视,并以帕克太阳探测器为样本进行了深度剖析。尽管中美国情不同,但依然建议从3个方面借鉴美国空间科学发展的成功经验,促进中国科技强国、航天强国建设。

## 1 美国发展了类型完备、学科全面的空间科学计划

美国国家航空航天局科学任务部对美国的太空科学计划和项目进行资助、研发和管理,组织美国科学界开展4个领域的研究:天体物理学、行星

科学、日球层物理学、地球科学。

1) 天体物理学领域。包括3个主要的研究计划,即宇宙物理计划、宇宙起源计划、系外行星探索计划,以及另外2个补充计划,即天体物理探索者计划和天体物理研究计划。其中,天体物理探索者计划(Explorers)是首席科学家(PI)领导的研究计划,包括中型任务、小型任务以及大学研发卫星、机会任务和国际合作机会任务。本领域正在运行和论证研发的太空科学卫星任务多达28项。

2) 行星科学领域。包括7个计划,即发现计划、火星探索计划、新前沿计划、小行星带以外行星旗舰计划、无人月球探索计划、小卫星计划和太阳系探索研究所。本领域正在运行和论证研发的太空科学卫星任务多达16项。

3) 日球层物理学领域。包括8个计划,即日球层物理研究计划、日地探测器计划、与日共存计划、探空火箭计划、数据计划、工作组计划、科学界协调建模中心、国家空间天气计划。本领域正在运行和论证研发的太空科学卫星任务多达39项。

4) 地球科学领域。包括4个元素,即飞行器计划、研究和分析计划、应用科学计划、地球科学技术办公室。本领域正在运行和论证研发的太空科学任务多达48项。

可以看出,NASA目前布局了4个领域至少24类科学计划,正在运行和论证研发的各种类型和规模的任务超过130个,具体详见表1。

## 2 美国高度倚重空间科学战略规划报告作为其发展的主要依据

### 2.1 《十年调查》报告为美国空间科学发展提供最重要战略指导

NASA依赖科学界遴选前沿科学问题,并排列优先级。这项工作主要是通过美国科学院国家研究委员会(NRC)空间研究委员会(SSB),组织科学界围绕NASA提出的科学问题开展研究并给出结论。其中最为广泛的研究方式是《十年调查》(Decadal Survey)<sup>[17-20]</sup>,就未来10年或更长时间内的研究、观测和任务建议进行优先级排序(图1)。

表1 NASA空间科学计划和项目  
Table 1 NASA space science programs and projects

领域	研究计划	科学目标	空间科学任务			备注
			正在运行	论证&研发中	已退役	
天体物理学	1. 宇宙物理计划 (PCOS)	回答有关复杂天体物理学现象本质(如黑洞、中子星、暗能量和引力波)的科学问题,理解宇宙的起源和最终命运	-Chandra -Fermi -ESA LISA Pathfinder -ESA XMM-Newton	-Euclid -Athena -LISA	/	/
	2. 宇宙起源计划 (COR)	回答有关宇宙演化的问题,覆盖了从远紫外、远红外和毫米波的电磁波频谱	-HST -Spitzer	-JWST -SOFIA -Hubble 紫外光学替代者	/	/
	3. 系外行星探索计划 (Exoplanet Exploration)	发现和表征邻居恒星的行星系统和类地行星,寻找可能存在生命的系外行星	-Kepler -LBTI	-WFIRST	/	/
	中型任务 (MIDEX)		-ACE -SWIFT -TESS -THEMIS	-ICON	-FUSE -IMAGE -RXTE (XTE) -WISE -WMAP	NASA 总成本不超过 1.8~2 亿美元
	4. 探索者计划 (Explorer Program, PI-led)	小型任务者计划 (SMEX) (Explorer Program, PI-led) 旨在对大型任务未能覆盖领域开展研究 大学研发卫星、机会任务 (MO)、国际合作机会等		-AIM -IBEX -IRIS -NuSTAR -RHESSI	-IXPE	-FAST -GALEX -SAMPEX -SWAS -TRACE
5. 天体物理学研究计划	通过理论和应用技术研究为下一代任务做准备,同时利用现有任务和亚轨道任务数据完成科学目标		-Integral	/	/	大学研发卫星的 NASA 总成本 ≤ 1500 万美元,机会任务的 NASA 总成本 ≤ 5500 万美元
			/	/	/	学术奖学金计划

注:“/”代表不详细说明,“★”代表应用科学计划。

表1 NASA空间科学计划和项目(续)

Table 1 NASA space science programs and projects

领域	研究计划	科学目标	空间科学任务			备注
			正在运行	论证&研发中	已退役	
行星科学	1. 发现计划 (Discovery)	通过探索太阳系行星、卫星和小天体(彗星、小行星)增强对于太阳系的理解	-Chandrayaan-1 (M3) -Dawn -InSight -Kepler/K2	-Lucy -Psyche	-Contour -Deep Impact -Genesis -GRAIL -Lunar Prospector -Mars Express -(ASPERA-3) -Mars Pathfinder -MESSENGER -NEAR-Shoemaker -Stardust -Stardust-NEXT	主要包括小规模卫星任务
	2. 火星探索计划 (Mars Exploration)	理解火星过去、现在和未来是否可能是宜居星球	-Mars Odyssey -MRO -Curiosity -MAVEN		-Mariner -Mars Climate Orbiter -Opportunity -Spirit -Mars Express -(ASPERA-3) -Mars Global Surveyor -Mars Observer -Mars Polar Lander -Phoenix -Viking 1-2	
	3. 新前沿计划 (New Frontiers)	解决特定的太阳系探索目标——由首个十年调查(Decadal Survey, 2002)审核确定的最高优先级目标	-Juno -New Horizons -OSIRIS-Rex	/	/	/
	4. 小行星带以外行星旗舰计划(Outer Planets Flagship)		-Voyager	/	-Cassini -Galileo -Viking 1-2	/
	5. 无人月球探索计划(Robotic Lunar Exploration)	推动实现月球科学的“复兴”	-LRO	/	-LADEE	/
	6. 小卫星计划(Small Sats)	减少成本,增加进入空间的机会;开展技术创新	-CubeSat	/	/	/
	7. 太阳系探索研究所(SSERVI)	解决对于理解月球、近地小行星、火卫一和火卫二、以及其近地空间环境关键的基础和应用科学问题		/	/	/







图1 《十年调查》封面图

Fig. 1 The covers of Decadal Survey

《十年调查》是美国科学界、NASA 和国会讨论所有项目优先级排序和资源投入的基础参考,是相关领域唯一就优先级顺序给出指导性意见的报告。总的来说,美国国会和NASA 会遵循报告提出的指导思想和规划目标。据统计,除去一些“短平快”的小项目,NASA 有 90% 甚至更多项目都是遵照《十年调查》开展的。但并不一定会按照其推荐的优先级具体实施任务,例如,预算方面的限制等因素会不可避免地阻碍高优先级任务进入研发阶段。关于十年调查报告,SSB 指导委员会(16 位专家)投入长达 1~1.5 年的时间撰写报告,提供一个在预算方面较为平衡的探索计划研究报告,一般会推荐逐步实施小型任务、两个中型任务和一个大型/旗舰型任务。

在《十年调查》报告发布约 4~5 年后,美国科学院会召集一个临时委员会,对 NASA 相关领域《十年调查》的执行情况进行中期评议(图 2),内容包括:自从《十年调查》发布以来,该领域的新发现、技术进步等;该领域计划是否执行《十年调查》中的发展战略、目标和优先级顺序,以及是否保持各计划之间的平衡;对于各计划的评议,并对优化各计划的科学价值提出建议等;为下一次十年调查做准备,如科学界对科学目标、潜在任务、各计划间的平衡,以及 NASA 对潜在任务概念研究的支持等。但中期评议并不会重新定义项目的优先级顺序。

除 NRC SSB 之外,NASA 还从美国航空航天工程委员会(ASEB)获取外部的独立咨询。

## 2.2 NASA 建立了落实空间科学战略规划规范流程

作为美国空间科学管理和研究机构,NASA 自

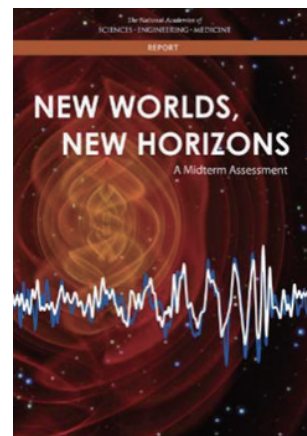


图2 “New Worlds, New Horizons”十年调查中期评议报告封面图

Fig. 2 The cover of Mid-term Assessment of Decadal Survey "New Worlds, New Horizons"

身的战略目标较全面反映了政策、预算、外部科技界的需求、合作伙伴、工业界,以及 NASA 能力、限制和挑战。NASA 局长会利用多种正式的内部机制,保证开展活动在其战略规划框架内。这些机制包括规划、立项、预算和执行(PPBE)过程,NASA 战略管理理事会(SMC),以及咨询 NASA 机构外的利益相关方。NASA 运行主管负责监督其计划和项目规划的进展。

关于 PPBE,规划阶段的工作包括分析可能会影响 NASA 的技术、内外部条件和不利因素等,考察针对这些因素作出的战略调整,确定长期的战略目标和短期的绩效目标。规划阶段主要分为 5 个步骤<sup>[21]</sup>,包括内/外部调研分析、制定战略规划、制定年度绩效目标、制定执行规划、制定战略规划指南等。

### 3 美国空间科学发展的体制保障

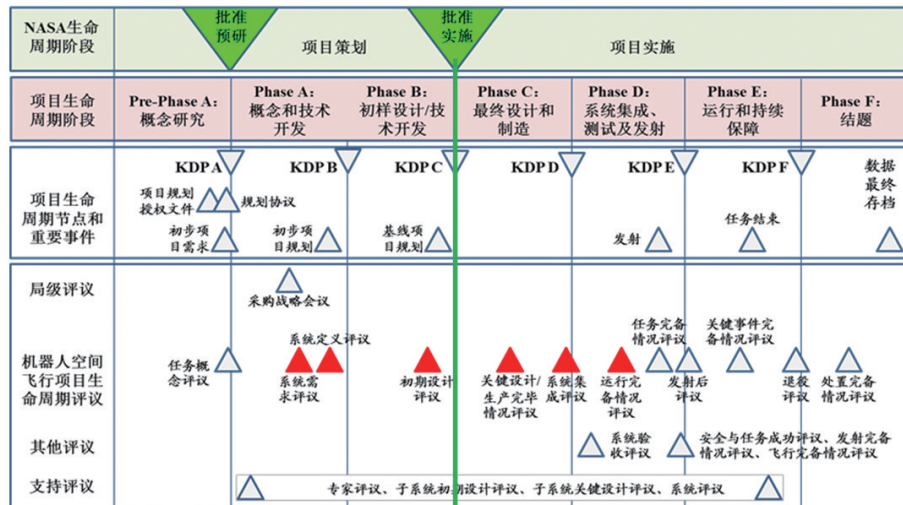
#### 3.1 NASA 空间科学任务的培养机制

为了推动美国空间科学的发展, NASA 通过实施空间飞行、研究与技术、信息技术、机构基础设施计划/项目等多类预研项目, 建立了空间科学任务完整的培养机制。这些预研工作尤其关注长远的、原始性的创新工作, 采取“广种薄收”的管理模式, 在其探索阶段, 给予充分的经费支持, 以建立起科学和技术积累, 为后期的型号研制工作打下基础。正是有了这些充足的储备, 从而形成了一系列先进

的成果。本文重点介绍空间飞行类预研项目、研究与技术类预研项目的遴选和管理机制<sup>[22]</sup>。

#### 3.1.1 空间飞行类预研项目

NASA 空间飞行预研项目, 是指处于“预研阶段”的空间飞行项目, 包括概念研究 (Pre-Phase A)、概念及技术开发 (Phase A) 及初样设计和技术开发 (Phase B) 3 个阶段, 并非中国科学卫星任务的“预先研究项目”, 而是大致涵盖了中国科学卫星任务的概念研究、预先研究、背景型号、方案研究和初样研制等 5 个阶段。NASA 空间飞行类项目中的机器人空间飞行项目的生命周期如图 3 所示。



注: KDP 表示关键决策点

图3 NASA空间飞行项目生命周期  
Fig. 3 Life cycle of NASA Space Flight Program

首先, NASA 空间飞行类项目根据其项目生命周期成本 (LCC) 和项目优先级分类, 然后按照类别 (表 2) 决定项目决策权负责人, 第 1 类项目决策权由 NASA 局长助理负责, 第 2 和第 3 类项目的决策权由任务部主任负责。

表 2 空间飞行项目分类情况

Table 2 Classification by cost of Space Flight Program

生命周期成本	2.5 亿美元 <	LCC > 10 亿美元,
优先级	LCC < 2.5 亿美元	LCC > 10 亿美元, 含有大量放射性材料
高	第 2 类	第 1 类
中等	第 3 类	第 1 类
低	第 3 类	第 1 类

项目开始时, NASA 任务部主任根据战略规划的方向和指南将其分配给 NASA 的一个中心或执行机构。项目或由任务部直接分配、或通过竞争过程如机会公告 (AO) 等。

NASA 任务部主任有权启动一个新项目的 Pre-Phase A 阶段。概念研究活动包括设计参考任务 (DRM) 分析、可行性分析、技术需求及技术成熟度 (TRL) 分析、工程系统评估以及替代方案分析等活动。经过任务概念评议 (MCR) 以及关键决策点 A (KDP A), 项目决策负责人批准进入 Phase A 阶段。

Phase A 将成立或扩大项目研究团队以更新或全面开发项目概念、开始或承担技术开发、工程原型、硬件和软件评估工作。之后, 项目决策负责人

在KDP B中批准项目从Phase A进入Phase B阶段。

Phase B将按照NASA相关标准,完成其技术开发、原型机开发、已有硬件和软件的评估、风险降低以及完成初样设计等工作。项目决策负责人在KDP C中批准项目从Phase B进入Phase C阶段。

### 3.1.2 研究与技术类预研项目

研究与技术(R&T)项目是指NASA项目中完全由R&T投资组成的项目。R&T项目倾向于制定成本或进度构架,有两种形式:技术开发(TD)项目和R&T组合项目,前者也被称为先进技术开发项目,后者也被称为基础和应用研究项目。NASA所有的R&T项目既可以按照TD项目管理,也可以按照R&T组合项目管理。

1) TD预研项目。TD预研项目管理包括酝酿、策划两个阶段。项目决策负责人决定进入项目酝酿(Pre-Formulation)阶段,启动新的TD项目。在酝酿阶段,TD项目主管制定一份R&T项目策划授权文件(FAD),获得批准后,即关键决策点A,进入生命周期的策划阶段;在策划阶段,主要涉及明确客户/受益方、识别技术需求、评估可选项、确定关键性能参数(KPP),以及规划项目的实施。

2) R&T组合预研项目。由于R&T项目在预研阶段管理与TD项目基本一致,不再重复说明。

## 3.2 美国空间科学任务及相关科学研究经费渠道

NASA作为一个联邦政府机构,其经费来自美国国会通过的年度联邦政府预算,拥有常规、稳定的预算支持。近20年来,其预算总额基本保持上升趋势,近5年的预算总额维持在180亿美元左右,稳中有升。其中空间科学预算的净值和占总预算的比重大并逐年增长,比重已接近30%。

此外,美国国家科学基金会(NSF)也对相关空间科学基础研究进行了资助。例如,在地球科学领域,NSF资助来自NASA等政府机构和科研院所的科学家开展了大气、海洋和极地科学的跨学科研究,其资助经费占学术机构获得联邦经费(用于该领域基础研究)的64%<sup>[23]</sup>。再如,过去10年来NSF对立方星项目也进行了持续的资助,推动了NASA利用立方星开展科学研究,产生了很多创新的思想,而非仅仅作为教学工具或工程与技术验证。

## 3.3 NASA空间科学任务的空间技术支撑

### 3.3.1 NASA空间技术项目

NASA空间技术任务部(STMD)负责研发创新的、引领性的技术和能力,以支撑NASA实施现有和未来的任务。通过开展公开透明的合作,STMD对革命性的、高回报技术进行研发、验证并对其进行技术间融合,其研发内容覆盖各学科领域和各个技术成熟度等级。通过对大胆的、适用范围广泛的、对工业界而言棘手的技术难题进行投资研发,STMD旨在为NASA未来科学和探索任务提高技术成熟度,同时也为其他政府机构和商业航天活动开展技术能力验证和降低成本。

NASA空间技术任务部部署了一系列计划,主要包括中心创新基金项目、新兴航天项目、飞行机会项目、改变游戏规则研发项目、NASA创新先进概念项目、NASA电子技术倡议项目(NIAC)、地区经济发展项目、小企业创新研究(SBIR)与小企业技术转让(STTR)项目、航天技术研究助学金项目、技术演示验证任务项目、技术转移项目等11类。此外,还有小型航天器技术计划“百年挑战大赛”“大奖赛和挑战赛”等项目。

### 3.3.2 NASA技术成熟度

为了评估技术的成熟水平,NASA采用了技术成熟度(TRL)测量系统,共包括9个等级,其中第9级是最高级别的成熟度。NASA代表性的空间技术项目与技术成熟度的关系如图4所示。

## 3.4 NASA空间科学的本国机构参与度

NASA总部位于华盛顿,共拥有17个研究中心/设施,其中10个为研究中心,即艾姆斯研究中心(Ames)、阿姆斯特朗飞行研究中心(Armstrong)、格林研究中心(Glenn)、戈达德航天飞行中心(GSFC)、喷气推进实验室(JPL)、约翰逊航天中心(JSC)、肯尼迪航天中心(Kennedy)、兰利研究中心(Langley)、马歇尔航天飞行中心(Marshall)和斯坦尼斯航天中心(SSC),位置分布如图5所示。

其中,GSFC覆盖了NASA的全部空间科学领域,是NASA首个空间飞行中心,拥有美国最多的科学家、工程师和技术人员。目前,GSFC负责哈勃空间望远镜的运行,研发了MAVEN等火星探测

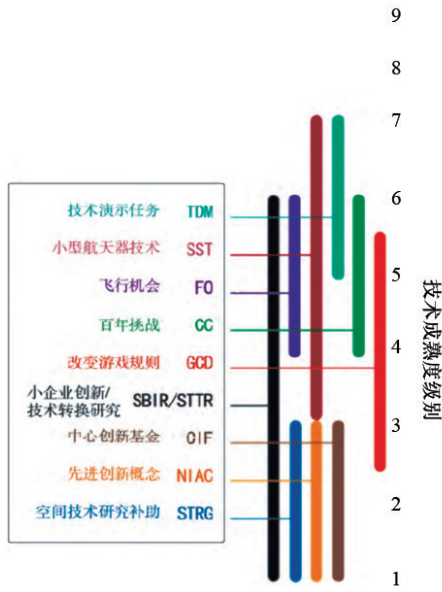


图4 NASA TRL验证的相关项目<sup>[24]</sup>  
Fig. 4 NASA TRL ranges of program

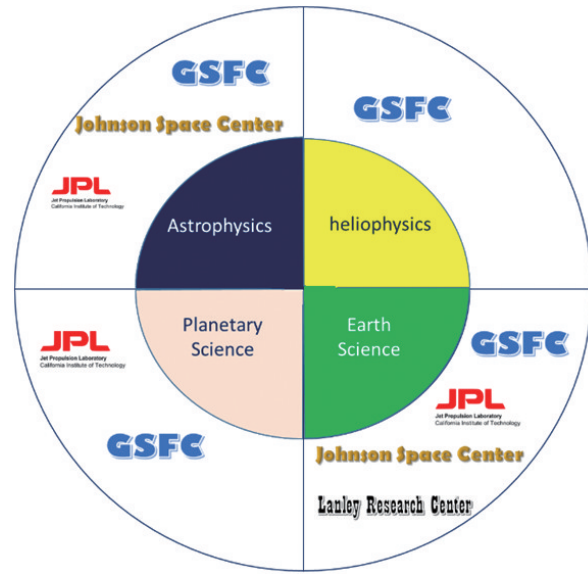


图6 NASA空间科学学科与其主要研究中心大致对应  
Fig. 6 NASA space science disciplines and their involving research centers



图5 NASA各研究中心大致分布图  
Fig. 5 Layout of NASA research centers

器、月球勘测轨道器、帕克等太阳探测器,以及系列地球监测卫星。JPL主要研究领域是太阳系机器人探索,由加州理工大学管理运行。JPL研发了美国首个地球轨道卫星,创造了首个成功的行星际航天器,并利用机器人任务探索了太阳系所有行星以及小行星、彗星和月球。JPL还负责对NASA的深空网络进行研发和管理。NASA各中心研究领域大致分布如图6所示。

此外,美国的大学和国家科学基金会等机构和组织也积极开展和参与空间科学研究。

### 3.5 NASA空间科学的国际参与度

美国空间科学任务具有很高的开放性,在空间科学各学科领域,NASA大规模地领导和参与了国际合作项目。若是NASA的大型旗舰项目,则由NASA主导项目实施,例如哈勃空间望远镜(HST)、卡西尼任务(Cassini)、好奇号(Curiosity)等。NASA的合作国家和地区遍布全球,包括欧洲空间局(ESA)、日本宇宙研究开发机构(JAXA)、德国宇航中心(DLR)、俄罗斯联邦航天局(ROSCOSMOS)、法国空间局(CNES)、意大利航天局(ISA)、加拿大航天局(CSA)、印度空间研究中心(ISRO)等。以哈勃空间望远镜为例,NASA主导研发和实施,ESA提供经费和所需的仪器。项目由NASA和ESA共同管理,ESA得到的回报是欧洲天文学家可以使用不少于15%的望远镜观测时间。

然而,在中美航天合作方面,美国的航天政策和法律制度设置了重重障碍。例如受到2011年提出的沃尔夫条款等的限制,NASA拒绝和中国航天开展任何形式的合作。庆幸的是,由中国科学院和美国科学院共同发起的中美空间科学领军人物论坛<sup>[25]</sup>,自2014年开始为两国青年科学家搭建了目前唯一的沟通 and 交流平台,开拓了中美航天领域合作

的新渠道。随着议员莱斯特·沃尔夫于2013年退休,据媒体报道,在嫦娥四号任务期间NASA与中国国家航天局进行了接触。

## 4 美国空间科学发展的机制创新

### 4.1 小卫星研究

美国凭借其雄厚的技术基础已经走在小卫星发展的最前列,投资小、见效快的卫星技术是其亮点。NASA通过一系列计划促进微型卫星关键技术的发展,为提高实用型小卫星性能创造条件,先后提出了“小卫星技术创新计划(SSTI)”“新盛世计划(New Millennium)”“21世纪技术星计划”“空间技术计划”等一系列小卫星发展计划。另外,美国的商业公司也形成了一部分小卫星开发的力量,例如以摩托罗拉全球电信等为首的电信公司提出卫星组网的低轨移动通讯方案。从21世纪初,NASA就开始开发一系列新技术和新产品,例如自动操作技术、微型传感器和结构紧凑的小推力推进系统等,以使卫星实现微型化。

目前,NASA空间技术任务部下设有“小型航天器技术计划”,主要包括4个项目,即集中技术研发和验证、任务能力验证、杠杆投资、小卫星技术合作。一般来讲,该计划中的每个项目每年都会发出征集项目和其他倡议的通知,然而预算方面的限制可能会造成推迟。

### 4.2 开放式创新

2009年以来,NASA提出了“开放式创新”概念(open innovation),设立多个“挑战赛”“有奖竞赛”和“众包活动”,吸引广大公众参与NASA的创新研究并已取得初步成效。

NASA首席技术专家办公室(OCT)负责NASA的技术研发管理工作,同时还在全局层面进行技术协调,以保证相关投资在满足任务需求的同时填补各类技术空白,满足未来预期,最大限度地减少重复研究。此外,该办公室组织编写《航天技术路线图》和《战略航天技术投资规划》等活动,《航天技术路线图》每4年更新一次,《战略航天技术投资规划》每2年更新一次。

应白宫科学与技术政策办公室(OSTP)要求,NASA首席技术专家办公室组建了协同创新卓越技术中心(CoECI),利用现代网络平台,具体负责指导和管理“众包”挑战赛项目。CoECI通过管理NASA创新展示平台、NASA锦标赛实验室计划(NASA Tournament Lab)和NASA@work 3个平台,实现对众包活动(Outsourcing)的管理。其中,NASA@work仅面向NASA内部员工征集方案。“百年挑战大赛”和“小行星挑战大赛”(Asteroid Grand Challenges)由首席技术专家办公室直接领导。“小行星挑战大赛”属于NASA空间科学任务部行星科学领域的计划;“百年挑战大赛”和其他开放式创新活动属于NASA空间技术任务部的计划。

此外,NASA还利用Challenge.gov网站发布“百年挑战大赛”“NASA锦标赛实验室计划”“小行星挑战大赛”等重要赛事公告。该网站是由美国联邦勤务总局监管的在线挑战大赛平台,是美国政府通过有奖竞赛推动创新活动开展的一个最具里程碑意义的网络平台<sup>[26]</sup>。

综上所述,NASA开放式创新机制如图7所示。其中,NASA锦标赛实验室计划包括数十个平台(图8)。开放式创新活动经费来源为联邦政府预算、私人企业、非盈利性组织等。

## 5 NASA“帕克”任务剖析

太阳系与人类的关系是世界空间科学探索的重要主题。为了解太阳与行星地球的关系,获取空间天气预报的“金钥匙”,规避和降低灾害性空间天气事件对地球生命和技术系统以及在轨航天器和宇航员的伤害,美国率先实施了史诗级的“帕克”号任务,使人类以史无前例的距离接近太阳,也是迄今最“热”的太空探测任务。它有望揭示太阳风的加速原理、太阳风暴的原理以及日冕温度为什么这么高等困扰空间物理和太阳物理领域的3大难题。

“帕克”号太阳探测器是NASA第一次以健在人物命名的航天器,以向1958年最早预测了“太阳风”存在的芝加哥大学教授尤金·帕克(Eugene Parker)致敬(图9)。探测器已于2018年发射,飞行



图7 NASA开放式创新机制

Fig. 7 Structure of NASA open innovation

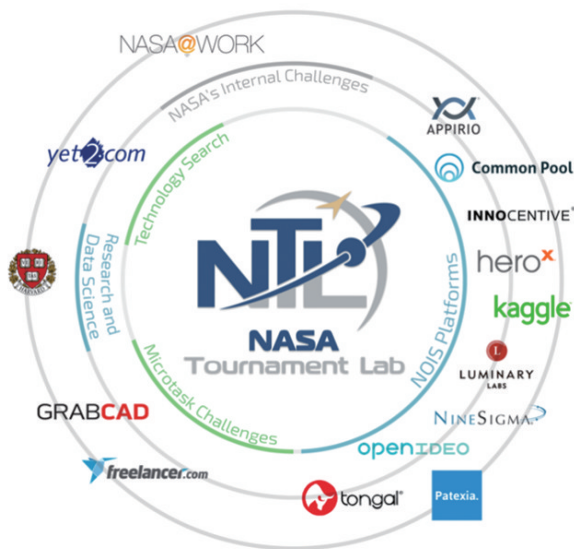


图8 NASA锦标赛实验室计划的平台(来源:NASA)

Fig. 8 Platform of NASA Tournament Lab

7年后将进入太阳日冕,将是首个飞掠太阳外层大气的人类航天器,可抵达太阳表面上方8.86个太阳半径处(约620万km),这一距离将是先前德、美联合研制的“太阳神2号”(Helios-B)所到达最近距日距离(4300万km)的1/7。

但是,“帕克”任务一波三折,实施过程中遭遇了重重挑战。帕克太阳探测器源于20世纪90年代形成的一个太阳轨道器项目概念(Solar Probe),作为“外太阳系行星/太阳探测器”计划(Outer Planet/

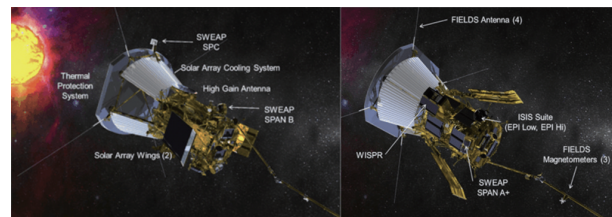


图9 帕克太阳探测器(来源:NASA)

Fig. 9 Layout of Parker Solar Probe

Solar Probe, OPSP)的3个任务之一。

NRC太阳和空间物理十年调查(2003—2012)中,推荐Solar Probe为大型任务(large-class)的最高优先级任务,应“尽快实施Solar Probe任务”。2003年,时任美国总统乔治·布什取消了“外太阳系行星/太阳探测器”计划。2005年,在NASA的“太阳-太阳系联系路线图”中,将Solar Probe任务列为旗舰级任务;并对任务进行了重新设计,删去了飞掠木星的内容。2008年,Solar Probe进入NASA 2009财年预算,耗资15亿美元。2010年,任务整合为预算较低的Solar Probe Plus,任务方案修改为运用多次金星借力等。NASA遴选该任务进入研发阶段,属于“与日共存”计划(LWS)。2011年,Solar Probe Plus项目通过任务设计评审,进入Phase A。2012年,Solar Probe Plus项目通过NASA组织的评审,进入Phase B。2014年进入Phase C

阶段;2016年进入Phase D阶段,参见图3“NASA空间飞行项目生命周期”。应NASA的要求,十年调查2013—2022(Solar and Space Physics A Science for a Technological Society)对Solar Probe Plus项目科学原理(scientific rationale)开展了进一步的研究。2017年,项目再次更名为“帕克”号(Parker So-

lar Probe)。2018年,“帕克”号成功发射。它将在2024年最接近太阳的飞掠中,以69万km/h的速度飞行,从而创下人造物体飞行速度的新纪录——这个速度相当于从华盛顿起飞,不到1 min就能到达北京(图10)。

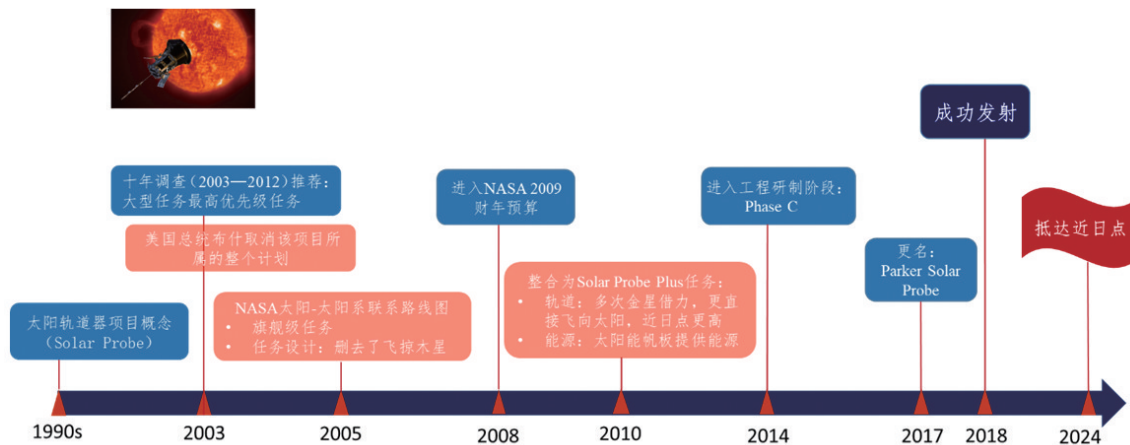


图10 帕克太阳探测器重要里程碑

Fig. 10 Milestones of Parker Solar Probe

作为史诗级的“触摸太阳”计划,美国政府为“帕克”号项目累计投资超过15亿美元,集中反映了一个空间科学任务所具有的体量大、周期长、创新性、探索性和学科交叉性强,体现国家意志和国家综合科技水平等特点。“帕克”号历经长达30余年的论证、立项、研制、发射历程,曾遭遇所属计划取消、数次任务方案修改等挫折,最终得以成功实施和发射。在媒体点赞其辉煌成就之际,“帕克”号首席科学家和工程师团队坚持不懈的努力,以及其“几下几上”的历程也值得航天主管部门和决策层思考。

## 6 启示

美国是航天强国,也是空间科学强国,建立了类型完备、全面覆盖的空间科学计划体系,历经半个多世纪仍保持了空间科学发展的机制创新能力,并取得了以多项诺贝尔奖为代表的前沿突破和重大原创成果,并远远领先其他航天国家。中国作为发展

中国家,不可能完全复制美国的空间科学发展模式。但建设航天强国,剖析美国空间科学发展实践仍有重大和现实意义,这主要表现在以下3个方面。

1) 高度重视战略规划研究,并强调规划的严肃性。相关战略研究工作坚持重大科学目标牵引,紧扣基础科学研究前沿,按领域自下而上形成经过评议的战略研究成果《十年调查》,而从规划到任务阶段保持适度竞争和调整,通过《十年调查中期评议报告》实现战略研究的与时俱进生命力。战略研究成果的严肃性还体现在所有空间科学任务均来自规划工作,鲜见“一事一议”个案,并且对空间科学任务产出的评估直接关系到战略研究滚动过程的新部署。美国空间科学战略规划研究的闭环实践值得借鉴。

2) 坚持重大科学任务的国家属性和国际合作开放性并举。美国坚持其在空间科学与探索的领导力,以其雄厚的综合国力为支撑,牵头提出实施了多个旗舰型任务,但这些项目同时又是开放的,

吸纳了欧空局等国际合作伙伴投资和参加,在降低美国自身投资压力的同时,彰显了共同探索浩瀚太空、发现人类未知的属性。其“以我为主”和开放性并举的理念和做法值得我们借鉴。

3) 重视厚植和夯实空间科学发展的基础。美国空间科学的发展以 NASA 为统领,既有其所属各中心的参与,也与美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、加州理工学院等其他部委和高校乃至商业航天形成了有机制保障的互动关系。例如,地球研究方面,如果是应用卫星,则由 NOAA 主导卫星任务的研发和实施;如果是科学卫星,则由 NASA 主导卫星任务的研发和实施。建设航天强国,坚持重大科学目标牵引,以筹建中的空间科学国家实验室为牵引,支持中国科学院、高校院所和航天行业部门全面积极投身空间科学和探索,美国的相关实践值得借鉴。

中国空间科学的发展目前得到了中科院空间科学先导专项、国家自然科学基金委-中科院空间科学卫星科学研究联合基金、国家航天局民用航天、载人航天与月球探测重大专项、科技部重点研发计划(空间领域)等的支持。对此剖析美国空间科学发展的成功实践,并结合国情,取之所长补己所短,还有很多值得研究的内容。应该说,相关专家学者结合中国科学卫星发展已有思考<sup>[27-29]</sup>,本文视线转向国际,期望亦能起到抛砖引玉之功效。

### 参考文献(References)

- [1] 空间瞭望智库. 2018 年全球十大航天新闻、中国十大航天新闻评选揭晓[J]. 国际太空, 2019, 1(481): 19-25.
- [2] 中共中央国务院中央军委致电祝贺 嫦娥四号任务取得圆满成功[EB/OL]. [2019-08-20]. [http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2019-01/11/c\\_1123979192.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2019-01/11/c_1123979192.htm).
- [3] 徐菁. 加速实现航天强国梦是我们的历史使命——专访中国航天科技集团公司高级技术顾问王礼恒院士[J]. 中国航天, 2015(8): 3-7.
- [4] 中国空间科学需奋起直追——顾逸东院士:空间研究不能重技术轻科学[EB/OL]. [2019-08-20]. [http://epaper.gmw.cn/gmrb/html/2014-08/07/nw.D110000gmrb\\_201408-07\\_1-12.htm](http://epaper.gmw.cn/gmrb/html/2014-08/07/nw.D110000gmrb_201408-07_1-12.htm).
- [5] 戴阳利, 于森. 航天强国发展与启示[J]. 卫星应用, 2014(3): 7-14.
- [6] 杨帆, 韩淋, 王海名, 等. 国际空间科学发展态势研究与思考[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(5): 603-612.
- [7] 任杰, 高峰, 李意. 中国与世界航天强国深空探测对标分析[J]. 军民两用技术与产品, 2016(15): 47-50.
- [8] 马雪梅, 薛慧锋, 袁建华, 等. 主要航天国家航空航天技术研究发展态势——基于 Web of Science 数据库的科学计量分析[J]. 情报工程, 2017, 3(4): 87-98.
- [9] 庞之浩. 我国要成为空间科学知识的产出国——访中国科学院国家空间科学中心主任吴季研究员[J]. 国际太空, 2016, 1(445): 2-8.
- [10] 吴季. 发展空间科学是建设世界科技强国的重要途径[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(5): 504-511.
- [11] 顾逸东院士: 我国空间科学研究不能再“甘当配角”[EB/OL]. [2019-08-20]. <http://scitech.people.com.cn/n/2014/0715/c1007-25281758.html>.
- [12] 顾逸东. 我国空间科学发展的挑战和机遇[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(5): 575-582.
- [13] Wu Ji, Wang Chi. Progress of Strategic Priority Program on Space Science[J]. Chinese Journal of Space Science 2018, 38(5): 585-590.
- [14] 范全林, 白青江, 王海名, 等. 从诺贝尔奖看空间科学对科技强国的贡献[J]. 科技导报, 2018, 36(15): 8-12.
- [15] 龚钻尔. 别闹了, 美国宇航局[M]. 上海: 上海文艺出版社/上海锦绣文章出版社, 2008: 22-79.
- [16] 白春礼. 世界主要国立科研机构概况[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 81-92.
- [17] Committee for a Decadal Survey of Astronomy and Astrophysics, Board on Physics and Astronomy, Space Studies Board, et al. New worlds, New horizons in astronomy and Astrophysics[R]. Washington, DC: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2010.
- [18] Committee on a Decadal Strategy for Solar and Space Physics (Heliophysics), Space Studies Board, Aeronautics and Space Engineering Board, et al. Solar and Space Physics: A science for a technological society (2013)[R]. Washington, DC: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2013.
- [19] Committee on the Planetary Science Decadal Survey, Space Studies Board, Division on Engineering and Physical Sciences. Visions and voyages for planetary science in the decade 2013—2022[R]. Washington, DC: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2011.
- [20] Committee on the Decadal Survey for Earth Science and

- Applications from Space, Space Studies Board, Division on Engineering and Physical Sciences. Thriving on our changing planet: A decadal strategy for earth observations from space[R]. Washington, DC: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018.
- [21] 张瑾, 祝彬, 王家胜. NASA 战略管理系统的工作流程[J]. 航天工业管理. 2014(2): 34-37.
- [22] 杨帆, 王海名, 韩淋, 等. NASA 和 ESA 预研项目遴选和管理机制调研[R]. 北京: 中国科学院文献情报中心, 2016.
- [23] National Science Foundation—About GEO[EB/OL]. [2019-08-20]. <https://www.nsf.gov/geo/about.jsp>.
- [24] 姚秀娟, 高翔, 陈志敏. 空间短时飞行试验工具的应用与展望[J]. 宇航总体技术. 2018, 2(6): 66-74.
- [25] National Academy of Sciences—CAS-NAS Forum for New Leaders in Space Science[EB/OL]. [2019-08-20]. [http://sites.nationalacademies.org/ssb/ssb\\_086017](http://sites.nationalacademies.org/ssb/ssb_086017).
- [26] 刘映国. NASA 开放式创新特点研究与思考[J]. 卫星应用. 2016(9): 18-25.
- [27] Wu J, Bonnet R. Maximize the impacts of space science[J]. Nature, 2017, 551(7681): 435-436.
- [28] 吴季. 空间科学任务及其特点综述[J]. 空间科学学报, 2018, 38(2): 139-146.
- [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.

## American space science development and its enlightenment

FAN Quanlin, BAI Qingjiang

National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** The paper introduces the American space science strategic planning, the layout of its science programs and its development mechanism at first. Then it concludes with several suggestions advices for China to accelerate its space science. Despite the huge difference between China and US, we propose that, with the growing importance attached to Chinese space science, it is necessary to think highly of strategic planning and its authority, to insist on the national cause of space science programs, with worldwide openness at the same time, and to foster space science missions in more extensive involvements.

**Keywords** Space science in America; space science strategic planning; space development model ●



(责任编辑 卫夏雯)