



我国空间科学发展的 挑战和机遇*

文 / 顾逸东

中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094

【摘要】 文章概述了空间活动的兴起和空间科学探索研究取得的巨大成就,阐述了空间科学在当代基础前沿研究中的重要战略地位,分析了我国发展空间科学面临的挑战和机遇,强调我国应当进一步重视空间科学,将其作为前沿研究的突破口。文章还提出了促进我国空间科学发展的相关建议。

【关键词】 空间科学, 基础研究, 挑战, 机遇, 突破口

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2014.05.008



中国科学院

1 空间时代兴起的重大科学领域

1957年10月4日,前苏联成功发射了第一颗人造地球卫星“斯普特尼克-1”号,人类终于得以挣脱地球的束缚进入太空,开创了空间科技发展新纪元。第一颗人造卫星发射成功恰逢1957—1959年的国际地球物理年(IGY),在此期间发射了十几颗卫星,开展了高层大气、微流星体、宇宙射线、太阳辐射、地球辐射、行星际物质成分、地球和云图拍摄等研究,其中1958美国“探险者”1号发现并确认了范艾伦辐射带的存在,1959年前苏联“月球”1号首次探测到太阳风,同年美国“探险者”6号从太空拍摄了第一张地球照片。首次在科学计划中用卫星进行空间探测获得了极大成功。在当时的冷战背

景下,前苏联一度在空间技术上的领先(包括1961年4月前苏联首次实现载人太空飞行)对美国形成了巨大挑战,触发了美苏之间全方位、大规模的太空竞赛。这个阶段的特点是以政治需求驱动,在空间这个新的战略领域不惜代价大规模投入,重点发展高显示度的载人航天、载人登月和深空探测。这场竞赛以美国取得全面优势告一段落,前苏联虽然也取得了许多重大成就,但也付出了因过度投入而经济失衡加剧的惨痛代价。类似15—17世纪的地理大发现,这一时期空间活动规模和探索疆界迅速扩张,促进了空间技术的飞速发展,同时在空间开展科学研究和应用(包括军事应用)的效益和巨大潜力受到重视,并逐渐成为空间活动的核心

* 基金项目:中科院“我国空间科学发展战略研究”(Y2020111AY)
修改稿收到日期:2014年8月28日

内容。

半个多世纪以来,人类共发射了约6 000颗卫星和300多艘(次)载人航天器。规模如此巨大的空间活动的内涵是什么?我国2000年11月首次发布的《中国航天白皮书》指出,空间领域(我国称航天事业)包括空间科学、空间应用和空间技术三个关系密切而目的不同的主要方面。

空间科学是以空间飞行器为主要平台,研究发生在地球、日地空间、太阳系乃至整个宇宙的物理、化学及生命等自然现象及其规律的科学^[1]。在太空开展科学研究冲破了地球大气屏障和引力束缚,直接面对或深入广袤无垠的宇宙,具有地面无法企及的特殊优势,极大地开拓了人类的视野和活动疆域,在科学发展史上具有划时代意义。空间科学是基础研究,其目的是探索 and 发现。空间应用已深入渗透到经济、社会、人类日常生活和军事活动中,效益巨大,空间活动成为我们所处时代科技和社会进步的显著标识。

空间技术造就了空间科学和应用,空间科学和应用是空间活动的主要目的,也有力地推动了空间技术进步,成为人类开展空间活动的不竭动力。

空间科学发展到今天,已经涉及几乎全部自然科学领域。刚结题的中科院学部空间科学战略研究课题把空间科学分为空间物理学和太阳物理学、空间天文学、月球与行星科学、空间地球科学、空间生命科学、微重力科学(含微重力流体物理、燃烧、材料和基础物理)等分支领域。空间科学在我国学科分类中没有被定义为单独的一级学科,而是作为相关母学科的重要组成部分或前沿分支,发挥着探索先锋的重大作用。

2 空间科学获得前所未有的研究成果

几十年来国际空间科学研究高潮迭起,发射了700颗专门从事空间科学研究的科学卫星,建造了多个空间实验室和空间站等综合性空间研究设施,实施了几十个大型科学研究计划,开展了规模巨大的空间科学探测、实验和研究活动,取得了人

类历史上划时代的辉煌成就。

太阳物理学研究太阳的结构、组成、能量和辐射的来源与传输;空间物理学研究地球空间、日地空间和行星际空间的物理现象和规律。全世界共发射了约200颗卫星,并利用地面设施进行了大规模全方位探测,深入研究了太阳活动规律和机理,揭示了太阳耀斑的非热特征,发现了日冕稳定向外膨胀,发现了地球辐射带,揭示了行星际磁场结构,证实了太阳风的存在及其与地球和行星磁场相互作用,以及影响地球空间各层次的基本过程,建立了全新的地球空间、日-地空间和行星际空间较为完整清晰的物理图像(图1)。

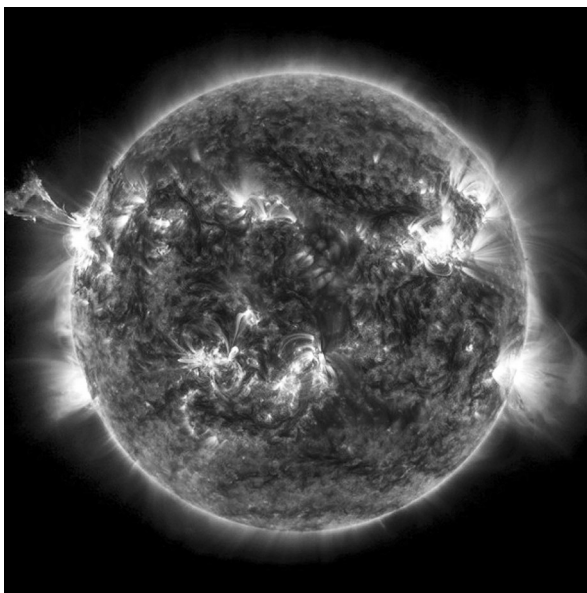


图1 2013年5月3日美国太阳动力学天文台(SDO)拍摄的日珥爆发事件(左侧)

空间天文学在大气顶部和空间开展天文观测,拓展了仅限于可见光、射电等波段(称为大气窗口)的地面观测限制,扩展为红外/亚毫米、可见、紫外、X射线和 γ 射线的全电磁波段天文,以及粒子天文和引力波天文的新时代。通过发射100多颗不同波段、功能强大的天文卫星,发现了数以千万计的红外、X射线和 γ 射线源,发现并证实存在黑洞/中子星等致密天体,确定了类星体性质以及对于宇宙演化的作用,发现了宇宙 γ 射线暴及其多样性,发现了大批系外行星,建立了宇宙重子物质循环的基本物理图像;特别是精细测定了宇宙

微波背景辐射,有力支持了宇宙暴胀模型,测定了宇宙年龄和物质组成。空间天文推动建立了恒星结构演化、宇宙大爆炸模型两大理论框架,以前所未有的深度和广度拓展了人类对于宇宙和天体的认识(图2、3)。

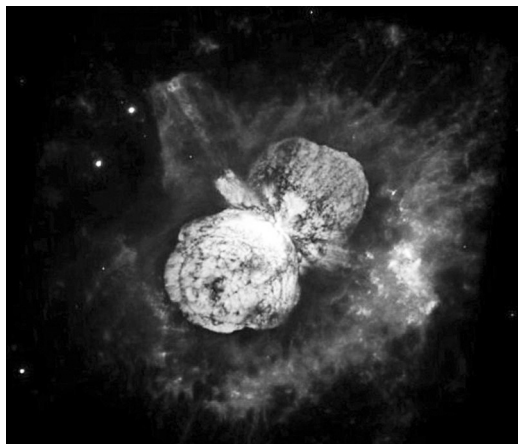


图2 哈勃望远镜拍摄的船底座 η 星,这颗恒星可能即将爆发

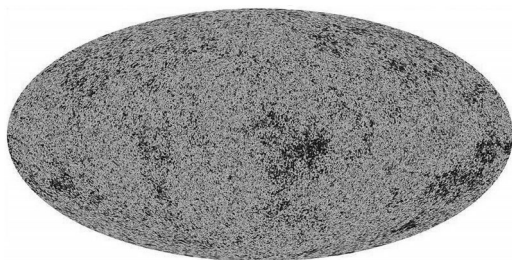


图3 欧美合作的普朗克卫星2013年3月21日公布的最空间分辨率宇宙微波观测数据(据此计算出宇宙年龄为138.2亿年、宇宙中普通物质占4.9%、暗物质26.8%、暗能量68.3%等最新数据,进一步证实宇宙微波背景约十万分之一的各向非均匀性,并符合平直宇宙模型。)

月球和行星科学领域共发射了200多个探测器,对月球和太阳系所有行星及其主要卫星、矮行星、小行星、彗星等进行了多波段遥感观测、着陆探测或表面巡视勘查,对各天体的形貌、物质组成和结构、大气和磁场等进行了大量观测研究,实现了载人登月及取样返回,发现了火星上的甲烷和水冰。全面更新了太阳系各类天体的知识,对太阳系及行星的起源与演化有了全新的认识(图4)。

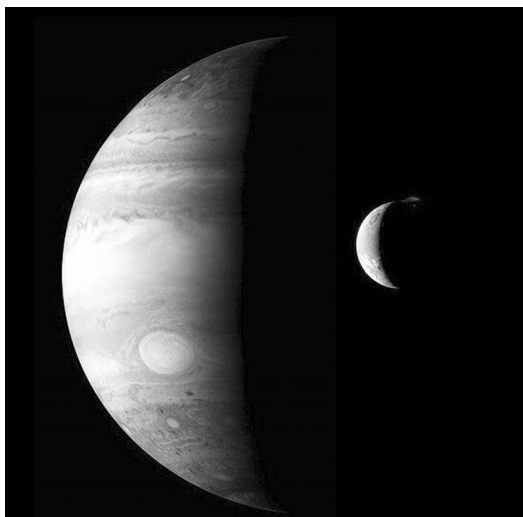


图4 美国2011年在空间拍摄的最新木星照片,为近红外和线性成像光谱仪合成图片(已探明木星是质量巨大的气态行星,氢氦比约3:1,与整个宇宙中的氢氦比例相似,符合宇宙暴胀理论预期,内部为液态氢和固体核,有偶极强磁场。)

空间地球科学通过空间观测,研究地球作为一颗行星的整体系统状态及变化。通过发射上百颗专门的地球研究卫星,采用最先进的观测手段,对地球的大气圈、水圈(含冰冻圈)、生物圈(包括人类活动)、岩石圈及其相互作用进行了全球量化研究,取得了系统资料 and 许多新发现(图5)。获取了全球重力场,发现中高层大气放电,发现了海洋环流变化、陆/海/气能量交换及其与区域气候变化的关联,在地球极区大气层发现臭氧洞,对预测和应对全球变化等关系人类生存环境和可持续发展的重大问题中发挥了重要作用。

空间生命科学研究地球生物包括人类在空间特殊环境下的变化、生存和适应,关注外太空是否存在生命及生命起源演化问题^[2]。实现了人在太空长时间的生活工作,500多位航天员进入太空,航天员单次在空间最长时间438天,航天医学保障取得显著进展;在空间站和航天飞机上开展了上千次实验,取得了各类地球生物在空间特殊环境下应激响应、生长发育等重要认识(图6),



中国科学院



图5 欧空局空间高光谱成像仪观测的纳米比亚和安哥拉边界影像

发现了动植物感知重力的可能机理,发现空间辐射对生物组织的旁效应。空间生物技术和转化研究取得显著成就。发现地外生命可能存在的迹象,拓展了对生命存在条件的认识。



图6 国际空间站(ISS)上的科学手套箱,用于开展生命科学实验和其他科学实验

微重力科学^[3]利用空间飞行器的长时间微重力条件开展了约4 000项实验,揭示了地面被重力掩盖的表面(界面)张力梯度和浓度梯度驱动的特殊对流,以及扩散、相变等行为和规律(图7);实现了胶体晶体的无序/有序转变;发现了燃烧火焰形态、传播、熄灭、热质输运等新特性和冷焰燃烧现象;晶体生长动力学、相分离与聚集,过冷、形核与非平衡相变,熔体热物性测量取得重要进展;验证了广义相对论一些重要效应,在超冷条件下新奇

量子现象研究获初步结果,展现了微重力条件下研究基础物理的巨大潜力。

空间科学革命性的发现源源不断,超过了以往几千年的总和。这些激动人心的发现全面更新了人类对宇宙、太阳系、地球和物质运动规律的认知,深刻改变了人类的宇宙观和自然观,在科学发展史上具有划时代意义。1971年以来,有5项诺贝尔奖授予与空间科学直接相关的科学家。

3 空间科学的重要战略地位

(1)基础前沿研究的重大领域。空间科学研究宇宙和太阳系形成演化、物质深层结构、生命起源及其存在形式、地球变化及未来命运等重大基础前沿问题。研究表明,宇宙中只有约5%的天体和星际物质是粒子物理标准模型可以解释的,其余95%是我们不了解的暗物质和暗能量,挑战了现代物理学的底线,引起了科学界的强烈关注;宇宙中有地球上无法模拟的超高能量、超高密度、超强磁场等极端条件,宇观和微观的研究汇合,成为探究物质本源的前沿;地球生命能否在地外长期繁衍,地外有无生命及其表达形式如何?生命之谜将可能在空间研究中得到回答或启示;月球和行星研究将解答太阳系形成演化问题,还将通过比较深入对地球变化趋势的认识;微重力科学开拓了另辟蹊径的应用基础

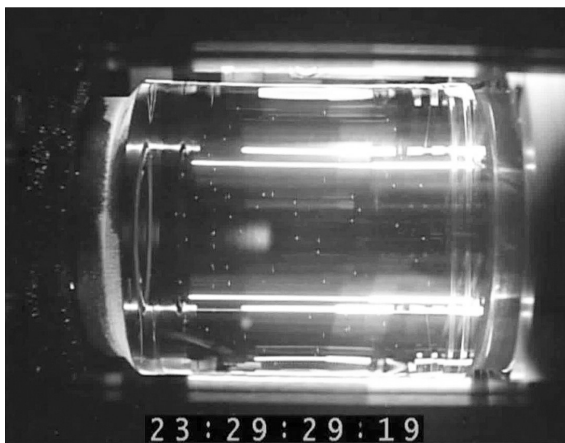


图7 日本在ISS上完成国际最大尺寸(50mm×62.5mm)液桥流体实验,其模型来自半导体晶体生长

研究途径,并针对基础物理理论开展实验验证,寻找可能的破缺,推进“新物理”发展。

科学之树长青。空间科学已取得的成就只是自然界奥秘的冰山一角。空间科学涵盖了极为广阔深邃的研究内涵,是探索发现,获取新知识的不竭源泉。

基础研究是科学之本、技术之源,科技发达国家无不高度重视,将其作为国家科技实力的根基。大部分科学知识可以获得,而研究发现的能力不可替代。基础研究所体现的追根求源、探索真理、创新思维以及科学精神和科学方法的渗透传播,是国家和民族文明程度的体现和永续发展的基础。从我国实际情况看,基础研究薄弱已经成为我国科学水平提升、高技术创新和经济转型升级的瓶颈。空间科学在基础研究中的重要战略地位值得高度关注。

(2)创新驱动发展的重要阵地。空间科学的许多领域与经济社会发展,与国家创新驱动发展战略密切相关。太阳物理和空间天气研究直接为保障空间活动和地面设施安全服务;空间地球科学着眼于全球气候变化,将为制定外交、经济、社会发展政策和解决环境资源重大问题提供科学依据和技术手段;空间生命科学将获得创新的生物材料、药物、医疗和农业技术;微重力科学对流体、燃烧和材料制备过程的研究将为改善几乎所有重要生产加工过程,以及发展低碳燃烧、节能减排,提升空天动力技术做出贡献;微重力基础物理研究将推动量子信息技术发展和极高精度时间频率技术的广泛应用等。

(3)航天事业发展的不竭动力。空间科学在航天领域中是最活跃、最具技术带动性的部分。空间科学突出的探索性、非重复性以及强烈科学发现的驱动,促使其不断采用最新的尖端探测技术和实验装备,并对空间

技术提出多种特殊和高精度要求,成为高技术发展的强大动力。我国被公认为航天大国,但空间科学十分薄弱。大力发展空间科学将为我国航天事业注入新的活力,改变结构不合理状态,推动从规模扩张型到内涵发展型、从航天大国到航天强国的转变。

空间科学无例外是各科技发达国家科学研究的重点,又是各空间大国政府空间预算支持的重点。各大国(地区)均成立了国家空间机构。这些著名的机构——美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、欧洲空间局(European Space Agency, ESA)、俄罗斯航天局(Russian Federal Space Agency, Roscosmos)、日本宇航研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA),以及法国、德国、意大利、加拿大等国空间局都主要或大部分负责空间科学,从一个侧面反映了空间科学的重要战略地位。

4 我国空间科学存在的问题

我国空间科学取得了显著成绩,在自主空间项目很少的情况下,我国科学家开展了大量研究,并利用国际空间项目公开的二次数据取得了不俗的成绩,说明具备了较高水平的研究实力。但我国空间科学整体水平与国际先进水平还有很大差距。统计表明,自2000—2012年我国空间科学论文数(SCI检索)在美、德、英、法、意和日本之后排名世界第七;影响力排名十二,远低于世界平均水平。受限于我国主导的空间科学任务的匮乏,围绕我国空间任务产出的论文数量仅占中国论文总量的5.2%。至今我国空间科学领域尚无被国际同行公认的重大成就。

主要原因,一是我国空间科学活动规模小、投入低,不仅远低于美、欧,也大大低于俄、日,只发射过极少量科学卫星,利用载人飞船和卫星仅进行了约100项空间实验,而



中国科学院

其他国家则完成了约5 000项空间实验;2014年1月统计^[4],在空间运行的各国卫星中有92颗科学卫星,约占总数10%,而我国在轨的106颗卫星中没有一颗科学卫星。2000年以来的15年空间科学预算,NASA年均60.8亿美元,ESA年均22.7亿美元,Roscosmos近7年年均8.2亿美元,JAXA约4亿美元,粗略估计我国年均低于1亿美元(包括载人航天和探月工程中的空间科学任务),国外空间机构中直接空间科学预算占比普遍为20%—30%,我国占比约5%以下,有很大差距。

二是我国缺乏长远的空间科学规划。国家对空间科学发展缺乏统筹,科学卫星立项“一事一议”,或不得不“上书陈情”;空间重大专项计划中对空间科学重视不够。科技资源分配渠道分散,造成空间科学布局不系统,缺乏预见性和长期准备,预研和地面实验支持不足,实验机会少,条件保障不配套。空间科学研究队伍随具体任务变化,任务落实后又缺少人才储备,缺乏长期性和稳定性。

5 我国空间科学面临的挑战和机遇

发达国家针对科学前沿和重大基础科学问题,在空间科学方面加大了力度,近期具有代表性的综合空间科学规划是美国《NASA科学任务部科学规划2010》^[5]和欧洲空间局的《宇宙憧憬2015—2025》^[6],各国还有各领域详细的约束性计划。今后10年仅天文、空间物理(含太阳)和行星科学领域就计划发射50多颗卫星,其中不乏哈勃望远镜后继者詹姆斯·韦伯太空望远镜(JWST)(图8),以及宽视场红外巡天望远镜(WFIRST)、高能天体先进望远镜(ATHENA)、新型引力波天文台(eLISA/NGO)、太阳探针加强号(SP+)、太阳卫星(Solar-C)、金星着陆器(Venera-D)、火星着陆巡视器(Mars 2020)、木星冰月探测器(JUICE)等采用新一代技术的重要项目,其中大部分为大型项目(单项任务16亿美元或10亿欧元以上)。空间地球科学另有相当大的计划。

国际空间站(ISS)已进入科学研究高峰期,各

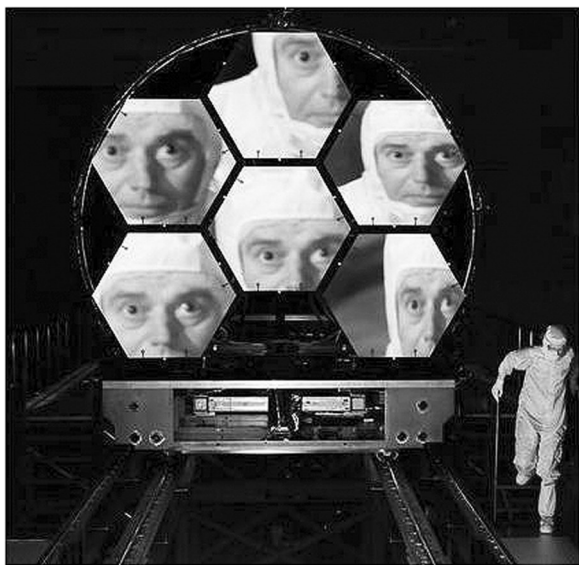


图8 美国JWST,主镜直径6.5米,由7块子镜拼成,计划2018发射到日地L2点接替哈勃望远镜

参与国普遍加强了科学任务规划。有许多新颖的项目安排,如冷原子钟组合(ACES)、空间光钟(SOC)(图9)、冻结原子实验室(CAL)、等离子体综合实验室(PlasmaLab)、量子破缺等效原理实验(QTEST)、超临界液体和结晶研究(DECLIC),先进燃烧科学研究(ACME)等。各国还加强了空间站先进天文和地球科学项目安排,确定的有日本的暗物质粒子谱仪(CALET)、宇宙线探测器(JEM-EUSO),美国暗物质设备(CREAM)、中子星观测器(NICER),还有欧洲的大气关联监测器(ASIM)和日本气候观测设施(CLIMS)等。

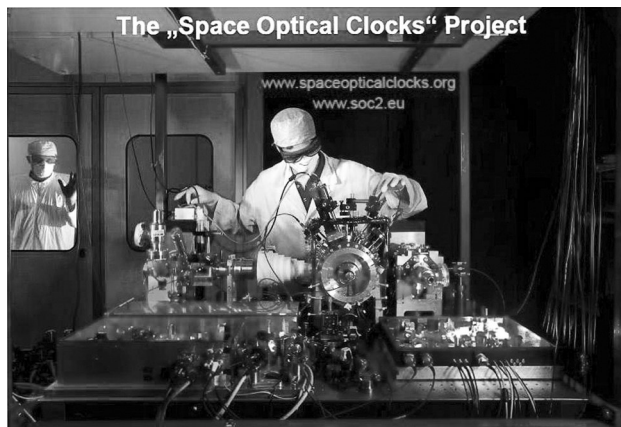


图9 欧洲空间光钟地面实验,属ESA ELIPS-4计划^[7],该计划基础物理部分包括冷原子钟、Bose-Einstein凝聚、物质波和量子性质等研究

从发展趋势看,今后空间科学的目标更趋集中,酝酿着对物理学、生命科学、宇宙科学和地球科学研究的重大突破,预示新一轮的科学革命或许正在孕育之中。一个多世纪前,以相对论、量子论创立为标志的科学革命奠定了当代科学技术的几乎全部基础,推动了新的产业革命,深刻地改变了人类社会的面貌。我国已经屡次失去了近代历次科技革命中有所作为的机遇,今天和未来我们不可再错失机会、我们再也无所作为。

经过多年发展,我国空间科学各领域布局较完整,具备较坚实的学术基础和研究积累;在国家重大专项和前期任务的推动下,科学探测、实验技术和载荷研制积累了相当基础;我国空间工程技术实力显著提升,为发展空间科学提供了强大的支撑。

我国已开始实施载人空间站工程,将成为21世纪30年代中后期国际上唯一的空间站。空间站科学计划涉及空间科学绝大部分领域,规划了大批面向国际前沿的项目。探月三期工程和酝酿的深空探测计划为月球和行星科学研究提供重要机遇。中科院空间科学先导专项正在研制4颗重要的科学卫星,并开展了一批背景型号预研,为持续发展科学卫星打下基础。

我国科学界特别需要有世界前沿水平的重大突破。发展我国空间科学既有难得的历史机遇,又是我国基础科学重点突破的需要,国家发展的需要。

6 我国空间科学发展目标和政策建议

中科院学部组织多位院士专家讨论,认为我国具备在空间科学领域实施突破的基本条件,呼吁抓住历史机遇,将空间科学的跨越作为今后我国基础科学和航天领域发展的主要突破口之一。

(1)我们的战略目标:经过15—20年的

努力,使我国空间科学整体跨上新台阶,进入世界先进行列;努力在若干重点领域取得有重大影响的领先科学发现,使我国成为国际上重要的空间科学大国。

振兴我国空间科学的关键,是在体制机制方面加大改革的力度,做好顶层设计,转变发展理念,重视具有长远性、基础性和战略性的空间科学。

(2)我们的主要政策建议:理顺国家对空间科学的领导管理体制,制定国家空间科学发展中远期规划和实施计划,长远谋划、科学决策。与之相配合,应为空间科学单独建立长期稳定的经费预算,在民用航天和航天重大专项中空间科学应保证合理比例,体现支持政策,并形成空间科学项目经费支持体系,统筹支持从科学概念提出、理论方法研究,项目预研、技术攻关、工程研制、条件保障,到数据分析、成果产出转化全过程。要发挥中科院作为国家战略科技力量 and 实际上的空间科学主力军作用,并发动高校和其他科研院所优势力量参与。要加强国际合作,开放我国重大专项和科学卫星的科学计划,积极鼓励以我为主的国际合作,积极参加重要的国际空间科学计划和双、多边合作项目。要加强人才培养,采取有力措施稳定和扩大队伍,改变由于单纯经费引导使队伍波动或流失等不利情况,并加强空间科学相关学科建设和科普教育。

在实施途径上,要充分利用国家重大专项(载人空间站、探月工程和未来深空探测工程)开展空间研究,特别需要突出科学驱动的理念;应建立我国科学卫星系列,今后15年需要规划约30颗科学卫星,含10个里程碑式的大型项目;要完善科学气球、探空火箭、自由落体等设施 and 地面台站,加强预先研究,扩大地基研究规模,培养壮大队伍,部署空间科学探测和实验重点技术发展,充



中国科学院

分做好前期准备,夯实空间项目基础;要制定针对性政策,鼓励和资助科研院所、高校、民企发展低成本新颖科学载荷和科学卫星,集聚资源,活跃繁荣我国空间科学。

我国在空间领域长期轻视空间科学的情况应当尽快改变,全面规划空间科学应当摆上国家议事日程。期望中国空间科学能创造辉煌,做出无愧于中华民族的伟大贡献。

参考文献

1 全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 30114.1-2013, 空间科学及其应用术语 第1部分:基础通用. 北京:中国标准出

版社,2013.

2 格尔达·霍内克,庄逢源. 宇宙生物学. 北京:中国宇航出版社,2010.

3 胡文瑞. 微重力科学概论. 北京:科学出版社,2010.

4 http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html.

5 NASA. 2010 Science Plan For NASA's Science Mission Directorate. 2010.

6 ESA. Cosmic Vision: space science for Europe 2015-2025. 2005.

7 ESA. ELIPS-4. 2012.

Challenge and Opportunity for Promoting Space Science in China

Gu Yidong

(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract This paper describes the rising space activity and the great achievement in space science briefly. The strategic importance of space science in forefront fundamental research has been expounded. Also the challenges and opportunities to promote space science in China have been analyzed. It is emphasized that we should pay more attention to space science and take it as a breakthrough opportunity in cutting-edge research in China. A series of recommendations have been proposed to promote space science in China.

Keywords space science, fundamental research, challenge, opportunity, breakthrough

顾逸东 中科院院士,中科院空间应用工程与技术中心学术委员会主任,研究员,中国空间科学学会理事长。1970年毕业于清华大学工程物理系,1974年起在中科院高能物理所从事宇宙线研究和科学气球工作,1994—2009年任载人航天应用系统总设计师,领导了应用系统总体技术工作和“神舟飞船”、“天宫一号”空间实验室多项空间科学和应用任务,近年参与组织空间站科学和应用任务规划。曾获国家科技进步奖特等奖等科技奖励,发表论文60余篇。E-mail: ydgu@aoe.ac.cn