

小小立方星也能做大科学 ——以美国立方星科学探 索的实践为例

白青江 时 蓬 范全林

(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 100190)

一、立方星成为科学卫星大家庭的新选手

空间科学是以航天器为主要平台,研究发生在地球空间、日地空间、行星际空间乃至整个宇宙空间的物理、天文、化学以及生命等自然现象及其规律的科学^①。目前,航天器正朝着越来越大和越来越小的两个方向发展,即一方面研制综合型、高功率的大型卫星,如美国航空航天局(NASA)将于2020年之后发射的詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST),质量为6.2吨,主反射镜口径达到6.5米;另一方面研制质量轻、微型化的小型卫星。其中,立

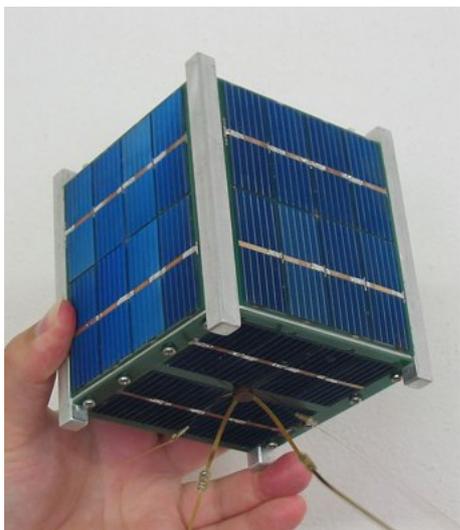


图1 1U立方星示意图(图片来源:韦伯州立大学)

方星是采用国际通用标准的微纳卫星,以U为单位,1U体积为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$,1U重量一般不超过1.33 kg。根据任务的需要,可将立方体卫星扩展为2U($10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 20\text{ cm}$)、3U、甚至16U或更大。

立方星采用商用现货部件和标准、模块化的设计,成本低、功能密度大、研制周期短,为更多人开展科学研究和技术开发提供了可能,包括学生、各种规模的高等院校、技术开发人员和众包(crowd-sourcing)活动等,为空间探索带来了革命性的变化。立方星的概念由加州州立理工大学(Cal Poly)和斯坦福大学的若迪·普伊格-苏阿里(Jordi Puig-Suari)教授和鲍伯·特维格斯(Bob Twiggs)教授于1999年发起,一经提出即在国际上掀起研究热潮。2003年,世界第一批立方星成功发射,开启了空间演示试验与应用阶段。2013年是立方星快速发展的新起点,用于商业和科学研究的立方星数量成倍增加。截至2019年1月,人类已发射超过1000颗立方星,其中900多颗成功入轨^②;近两年来用于科学研究的立方星数量大幅增长,详见图2所示^③,立方星已成为科学卫星大家庭的新选手。

一般来讲,每个立方星可以开展独立的科学观测,绝大多数立方星会携带1~2个科学仪器,作为其主要的有效载荷;也可以开展编队飞行,获得更高的空间分辨率和时间分辨率,例如既可以探索木卫二的冰核,也可以开展遥远星系和黑洞的极低频能



图2 2011~2018年用于科学应用的立方星数量

量探测。立方星还可以形成一个“集群”(hub), 其中中心航天器负责复杂的计算和数据传输, 每个立方星具有单一、聚焦的特点, 可以不断增加数量或者替换出现故障的单元^④。

二、立方星开启空间科学新发现

随着立方星平台的发展和成熟, 已经成为空间科学探索的重要手段之一。近年来, 立方星大量用于在近地轨道开展空间科学研究, 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。国际上已通过一系列立方星平台取得了重要的科学发现和成果, 如美国的“空间天气实验”(Colorado Student Space Weather Experiment, CSSWE)、微型X射线太阳光谱立方星(Miniature X-ray Solar Spectrometer CubeSat, MinXSS)项目, 以及欧洲牵头实施的QB50项目等。

MinXSS任务是由美国国家科学基金会(NSF)

资助、密歇根大学建造的3U立方星, 于2016年5月部署在国际空间站上, 在儒温拉玛蒂太阳高能分光成像仪(Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager, RHESSI)和界面区成像光谱仪(Interface Region Imaging Spectrograph, IRIS)任务未能覆盖的能量波段进行了科学研究和测量^⑤, 进行了“填空”观测。

QB50项目是欧盟2011年主导发起的国际合作项目, 计划由约50颗2U和3U立方体卫星组成星座, 对200~380 km地球大气低热层进行就位探测。我国共五个大学参加了该项目, 包括西北工业大学“翱翔一号”(Aoxiang-1)、哈尔滨工业大学“紫丁香1号卫星”(LilacSat-1)、南京理工大学“南理工一号立方星”(NJUST-1)、“国立”成功大学“凤凰号”(Phoenix, 中国台湾)和国防科技大学“国防科大立方星”(NUDTSat)。

随着美国科学家于2015年9月14日在地面探测到引力波并获得2017年诺贝尔奖, 对引力波电磁对应体的探测成为空间天文学探测的新热点。除了中科院空间科学(二期)先导专项正在研制的引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM)小卫星外, 基于立方星的“天格计划”(Gamma Ray Integrated Detectors, GRID)也值得关注。该计划是由清华大学发起的大学生实践计划, 计划在2018~2023年内约600千米的不同轨道发射24颗6U立方星组成星座, 探测引力波电磁对应体。其首颗立方星已于

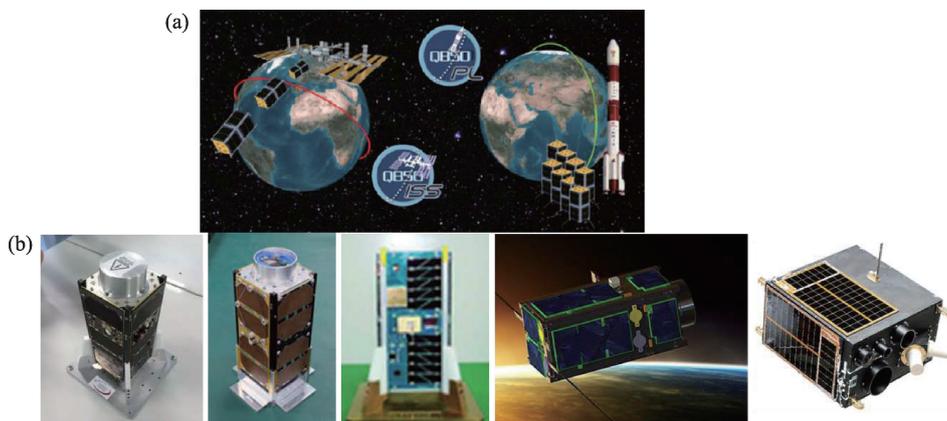


图3 QB50项目示意图(a); 参与QB50项目的中国立方星(b), 从左至右: 翱翔一号、“紫丁香1号卫星”、“南理工一号立方星”、“凤凰号”(中国台湾)、“国防科大立方星”



图4 天格计划首颗实验卫星及其载荷(图片来源:清华大学)

2018年10月底发射入轨,采用新型闪烁晶体与半导体光电倍增器件开展对空间伽马射线的探测^⑥。

与此同时,立方星也已开始进入深空探测领域,数个月球和火星任务计划利用立方星开展研究。MarCO立方星是NASA于2018年发射的两个行李箱大小的6U立方星,成为首批进入行星际空间的立方星,完成了众多有风险的深空导航和通信实验,其中MarCO-A在飞越火星的过程中还利用其穿过火星大气时无线电信号的变化,进行了反推火星大气成分的科学探测;MarCO-B在“洞察”号着陆不久后在离火星表面6000km处传回了火星的图像,这也是由立方星首次拍摄的火星图像^{⑦⑧}。

囿于篇幅限制,本文将主要介绍CSSWE任务取得的科学发现。

CSSWE任务是美国国家科学基金会资助的3U立方星,即一个鞋盒状大小的粒子空间望远镜卫星,由美国科罗拉多大学博尔德分校大气和空间物理实验室的本科生和研究生组成的团队设计和运

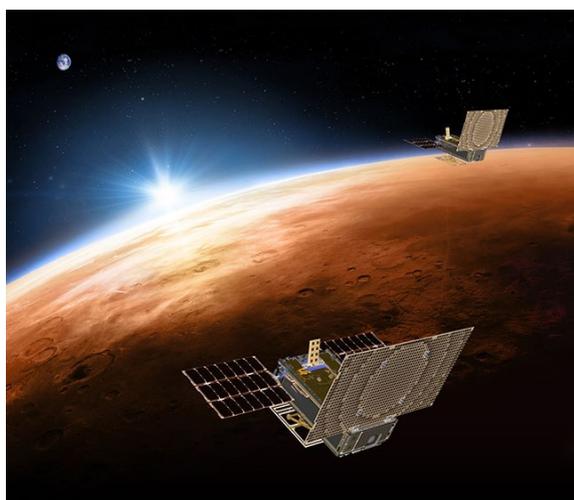


图5 MarCO-A and MarCO-B 土星运行示意图(图片来源:NASA)

行,设计寿命3个月,实际运行超过2年。2012年9月,CSSWE搭载在ELaNa VI任务上发射升空进入地球轨道,旨在测量高能太阳质子及电子通量,有助于科学家理解太阳高能质子、耀斑和日冕物质抛射(CME)之间的关系,以及对地球空间天气的影响。

科罗拉多大学李炘麟教授领导的研究小组在*Nature* 期刊发表的研究报告中指出,根据CSSWE任务的探测数据,在范·艾伦辐射带发现了高能电子,这一发现证实了之前科学家对范·艾伦辐射带形成原理的理论解释,即内辐射带中(主要在其内部边缘)的高能电子是超新星爆发时宇宙射线的作用下形成的,具体如图7所示^⑨。这些强烈的宇宙射线猛烈撞击地球附近的原子,导致其中子发生衰变,在宇宙射线反照率中子衰变过程中分解成为质子和电子,然后被地球磁场俘获。由此,形成了环绕地球的范·艾伦辐射带。范·艾伦辐射带会对航天器造成一定的危害。自从人类于1958年利用“探索者1号”首次发现范·艾伦辐射带(图8)以后,美国和俄罗斯科学家一致认为,“宇宙射线反照中子衰变”的过程很可能是地球磁场捕获的高能粒子的来源,但之后的60年来,人类一直未能探测到中子衰



图6 CSSWE立方星(图片来源:科罗拉多大学博尔德分校)

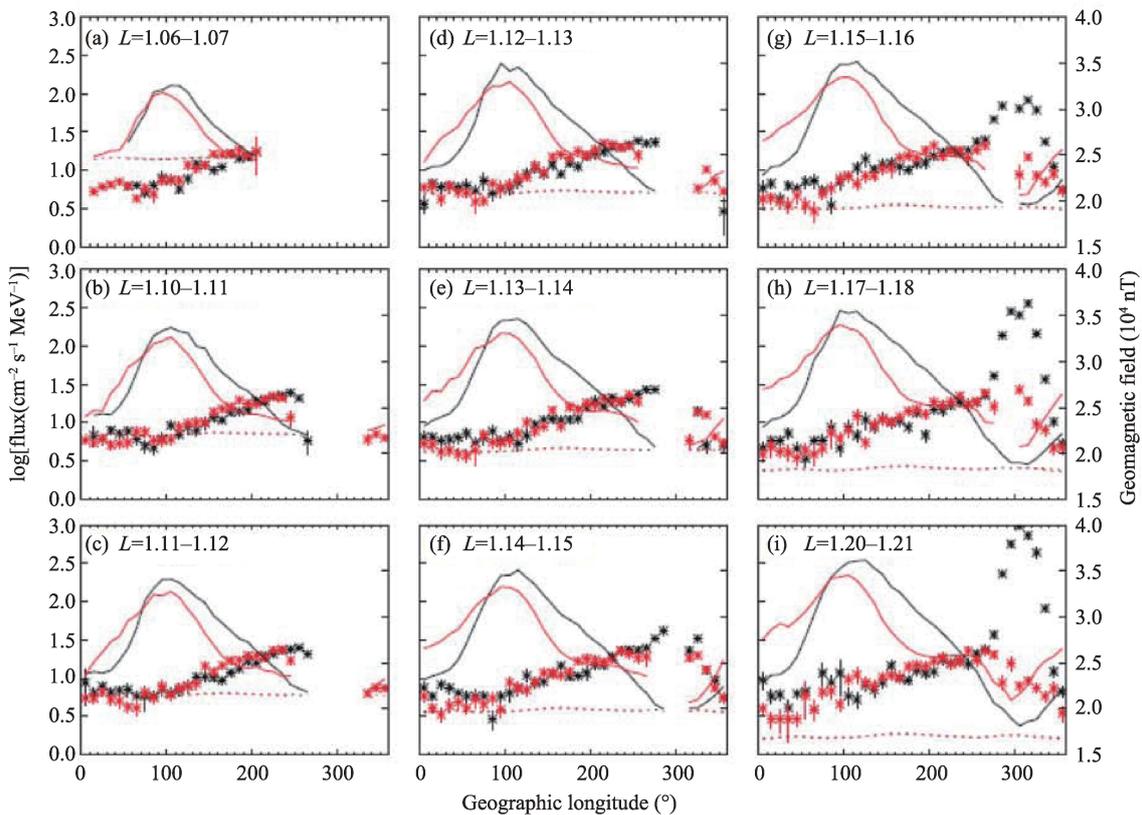


图7 根据CSSWE的探测数据,地球磁场不同地点(L:从地球核心磁场到某一个磁力线的距离)的0.5 MeV电子通量,表明被捕获的来自范·艾伦辐射带的电子

变产生的相应电子。CSSWE的成果是人类首次在范·艾伦辐射带内部边缘附近发现高能电子,最终揭开了困扰科学家60年的谜团。

可见,立方星经过数十年的发展,从最初的教育工具、技术验证方面的功能,已经发展成为了承载空间科学领域发现的重要平台,在科学研究方面发挥着不可替代的重要作用。

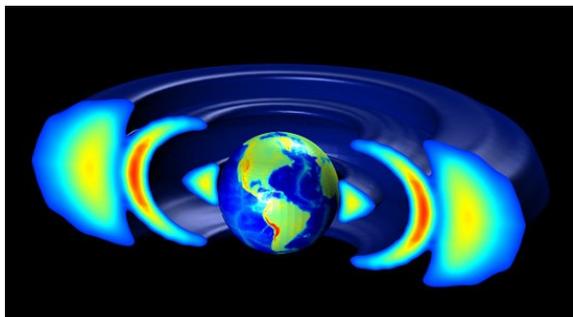


图8 2013年,通过分析范·艾伦探测器数据,科学家发现地球辐射带中出现第三个辐射带(红色)(图片来源:Yuri Shprits, Adam Kellerman, Dmitri Subbotin/加州大学洛杉矶分校)

三、立方星在空间科学探索中的作用得到高度重视

世界主要空间机构越来越重视立方星,利用立方星开展空间科学探索。国际空间研究委员会(COSPAR)、美国国家科学院(NAS)、美国国家科学基金会(NSF)等机构,组织了相关会议,研讨立方星开展空间科学探索的优势和劣势等,并发布了相关研究报告和路线图,如《利用小卫星开展空间科学研究》(*Small Satellites for Space Science*)、《立方星用于科学探索》(*Achieving Science with CubeSats*)等。2014年,立方体卫星入选美国《科学》杂志十大科学突破,指出“小小立方星,可做大科学”(The little boxes are starting to do real science.)^⑩。欧美许多高校及科研机构均已成功进行了立方体卫星在轨验证等^⑪。

近年来,美国NASA陆续发起了一系列倡议、



The rise of the CubeSat

A decade ago, CubeSats were just educational tools, a way for university students to place a simple Sputnik in space. Now these 10-centimeter boxes, built with off-the-shelf technology and costing hundreds of thousands of dollars rather than hundreds of millions, have taken off. More than 75 were launched this year, a record. What's more, the little boxes are starting to do real science.

Increased and affordable access to space is driving much of the boom. CubeSats can hitch a ride on commercial or government rockets carrying bigger spacecraft, or they can be pushed out the door of the International Space Station. The rapid-fire launch rate is encouraging something never before seen in space: risk-taking. Designers can tolerate a failure or two and quickly get back in the game. As technology advances, they can also swap in better solar panels, batteries, or processors.

Private money has taken notice, funding companies such as Planet Labs, which is monitoring Earth with a swarm of perennially replaced CubeSats. Their small telescopes take pictures with relatively poor spatial resolution—a few meters—but at frequent intervals. Spy agencies may not be seduced, but Planet Labs' data are plenty useful for monitoring deforestation, urban development, and river changes.

Coming up next: CubeSats that talk to one another while taking measurements. Among other things, such CubeSat constellations will be able to cover more area, faster, or monitor Earth's surface in several wavelengths at once. If they work, CubeSats will have demonstrated not only that small is beautiful, but also that the whole is greater than the sum of its parts. —Eric Hand

图9 2014年,立方体卫星入选美国《科学》杂志十大科学突破

挑战赛等活动,推动立方星用于空间科学研究和相应的技术开发。NASA载人探索和运行任务部发起了“立方星发射倡议”(CubeSat Launch Initiative, CSLI),其立方星用于科学研究的比例已近50%,如图10所示^⑫;NASA空间技术任务部还设立“立方星探索挑战赛”,为立方星提供搭载深空探测任务的机会,使其能够在月球附近和更远深空执行先进空间任务^⑬;NASA空间科学部在“探索者计划”(Explorers)框架下遴选了日球层物理小型科学任务等,旨在研究太阳风及其动力学效应。NASA三大空间任务部皆对立方星进行了相关部署,对立方星的重视可见一斑。下文将从NASA空间科学任务部

部署的两个日球层物理小型科学任务展开,进行相关阐述和分析。

NASA科学任务部于2019年6月遴选了两个小型日球层物理科学任务,旨在深入研究太阳风及其动力学效应,并为美国宇航员重返月球及相关关键技术(Artmis计划,2024年)奠定基础^⑭。这两个任务分别是“日冕和日球层联系偏振探测立方星座”(Polarimeter to Unify the Corona and Heliosphere, PUNCH)和“串联磁重联和极尖区电动力学探测双星”(Tandem Reconnection and Cusp Electrodynamics Reconnaissance Satellites, TRACERS)。

PUNCH由4个行李箱大小的6U立方星组成星

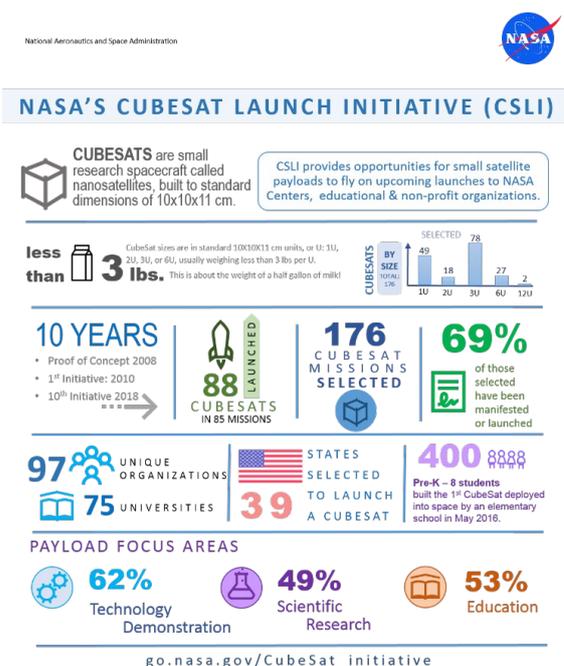


图10 NASA“立方星发射倡议”(图片来源:NASA)

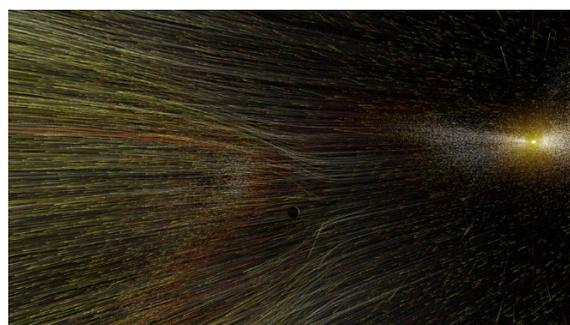


图11 NASA遴选了PUNCH和TRACERS任务研究太阳风及其动力学效应(图片来源:NASA)

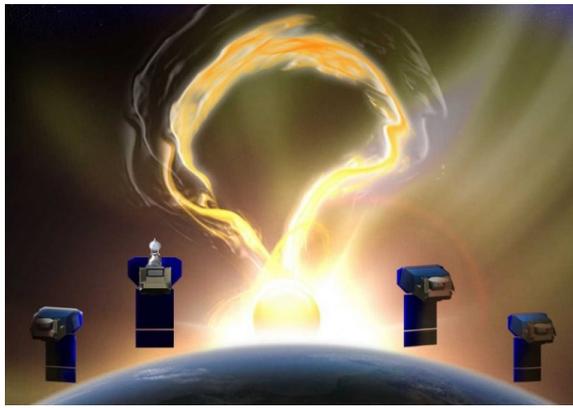


图12 PUNCH示意图(图片来源:美国西南研究所)

座开展编队飞行,轨道高度 560km(晨昏轨道),其中 1 颗星利用窄视场成像仪(NFI)观测太阳日冕的结构,另外 3 颗星搭载宽视场成像仪(WFIs)研究 CME 在行星际的传播。PUNCH 将首次对在内日球层传播的太阳风暴开展实时 3D 偏振成像探测。首席科学家是来自美国西南研究所的太阳物理学家克雷格·德弗雷斯特(Craig DeForest)博士。预算方面,包括发射费在内,其总预算不超过 1.65 亿美元,属于探索者计划的小型任务。

TRACERS 包括 2 颗小卫星,将搭载高能电子探测器和感应式磁力仪,对磁层顶和北极尖区的电子喷流和磁场进行实时就位测量。太阳耀斑的爆发、CME 的形成、太阳风-行星磁层在边界层的相互作用、行星磁尾蓄积能量的爆发等,都是磁场重联的不同表现形式。TRACERS 将覆盖磁层顶下点和极尖区,对该区域的串联磁重联事件驱动的空间天气现象和规律进行同步探测。其首席科学家是来自美国爱荷华大学的物理学家 Craig Kletzing 教授。上文提到的范·艾伦辐射带就是该校的詹姆

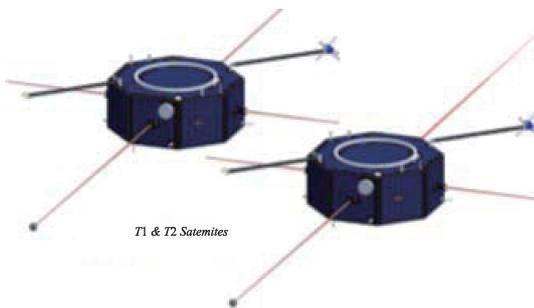


图13 TRACERS示意图(图片来源:NASA)

斯·范·艾伦(James Van Allen)教授利用世界首颗科学卫星——探索者 1 号(Explorer-1)发现的。由于 TRACERS 将搭载 PUNCH 任务一同发射,不考虑搭载费用,其预算不超过 1.15 亿美元,同属于探索者计划的小型任务。

NASA 强调,PUNCH 任务的 4 个 6U 立方星和 TRACERS 任务的 2 颗小卫星将于 2022 年 8 月前一同打包发射,一方面降低成本;另一方面,两个任务将联合开展大科学(big science)/先进科学(high-class science)研究。

PUNCH 和 TRACERS 由 NASA 戈达德航天飞行中心(GSFC)的探索者计划办公室管理。探索者计划通过创新、低成本和高效的管理模式,旨在为天体物理学和日球层物理学领域的科学研究提供频繁的发射机会,对大型任务未能覆盖的前沿领域进行“填空”。1958 年发现范·艾伦辐射带的“探索者一号”就是该计划的第一颗卫星。在探索者计划的框架下,已经陆续发射逾 90 个任务,取得了一系列重大的科学发现和成果,并有多位科学家们基于卫星数据获得了诺贝尔奖,如 1970 年发射的 X 射线探测卫星“乌呼鲁”(Uhuru)以及 1989 年发射的微波背景探测卫星(Cosmic Background Explorer, COBE)。该计划主要采用首席科学家负责制(PI-led),包括五类任务:中型任务(1.8 亿~2 亿美元)、小型任务(≤ 1.2 亿美元)和大学研发卫星(≤ 1500 万美元)、机会任务(≤ 5500 万美元)和国际合作机会任务。



图14 NASA 探索者计划(图片来源:NASA)

美国发展了类型完备、学科全面的空间科学计划,高度重视立方星等微小卫星,对科学任务进行合理布局。近年来,立方星在空间科学探索中作用愈来愈得到重视,美国的成功实践值得我们思考和借鉴。

四、期待立方星助力我国科学家实现梦想

综上所述,国际上经过数十年的发展,立方星已成为一种成熟的卫星平台,为科学探索提供了一种更为灵活的工具,目前已取得了令人赞叹的成就。

目前,我国空间科学事业进入了新的发展阶段,日益走近世界舞台的中央。空间科学先导专项成功实施,发射了“悟空”、“实践十号”、“墨子号”和“慧眼”等任务,已取得了一系列重大成果。空间科学(二期)先导专项已经立项实施多个卫星工程,预计将在时域天文学、太阳磁场与爆发的关系、太阳风-磁层相互作用规律、引力波电磁对应体等领域取得重大原创成果。然而,以上这些任务都属于规模较大的卫星工程。在利用立方星平台进行空间科学探测方面,虽然参与了个别国际合作项目,但总的来说,我国发展仍较为滞后。

令人欣喜的是,作为我国空间科学发展的排头兵,中国科学院日益重视基于立方星平台的空间科学任务培育。据悉在2019年部署的空间科学(二期)先导专项预先研究项目中,已支持了瞄准2030年空间天文研究的“全变源追踪猎人星座”计划,拟由大约100颗载有基于LIGA微缝光学的聚焦型X射线望远镜的8U立方星组成,专门针对多波段、多信使时代将会不断发现的海量变源开展观测;以及“磁场重联自适应多尺度显微计划”,旨在通过12颗微纳卫星编队位形自适应的调整,同时测量宏观尺度、离子运动尺度、电子运动尺度上物理过程的耦合,以认知磁场重联到底如何发生。我们有理由期待国内空间科学界利用立方星这一“新”航天器平

台开展科学研究,与传统的大中型空间科学卫星形成互补,促进我国空间科学取得重大发现和突破,助力科技强国、航天强国建设目标的早日实现。

本文得到了空间科学(二期)先导专项“综合论证”课题(课题号:Y7291A1AGS)的资助。

参考文献

- ① 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
- ② CubeSat [EB/OL]. [2019-08-26]. <https://en.wikipedia.org/wiki/CubeSat>
- ③ 时蓬, 苏晓华, 王琴, 范全林. 国际基于立方星平台的空间科学发展态势及启示[J]. 科技导报. 2019, 37(21), 印刷中
- ④ A New Revolution in Spacecraft - The CubeSat Era [EB/OL]. [2019-08-29]. <https://www.jpl.nasa.gov/cubesat/info.php>
- ⑤ Small Satellites yield Big Discoveries. [EB/OL]. [2019-08-26]. <https://science.nasa.gov/science-news/news-articles/small-satellites-yield-big-discoveries>
- ⑥ “天格计划”学生兴趣团队首颗实验卫星发射入轨并上电成功测试. [EB/OL]. [2019-09-10]. http://news.tsinghua.edu.cn/publish/thunews/10303/2018/20181112160816845487196/20181112160816845487196_.html
- ⑦ NASA CubeSats - MarCO-A and MarCO-B - Steer Toward Mars. [EB/OL]. [2019-09-02]. <https://sciencemetro.com/space/marco-success-vindicates-use-of-cubesats-on-deep-space-missions/>
- ⑧ NASA's First Image of Mars from a CubeSat. [EB/OL]. [2019-09-02]. <https://mars.nasa.gov/resources/22114/nasas-first-image-of-mars-from-a-cubesat/>
- ⑨ Xinlin Li, Richard Selesnick, Quintin Schiller, etc. Measurement of electrons from albedo neutron decay and neutron density in near-Earth space[J]. Nature. 12, 552(7685):382-385
- ⑩ Eric H, et al. Breakthrough of the year runners-up[J]. Science, 2014, 346(6216): 1444-1449
- ⑪ 廖文和. 立方体卫星技术发展及其应用[J]. 南京航空航天大学学报. 2015, 47(6): 792-797.
- ⑫ About CubeSat Launch Initiative [EB/OL]. [2019-08-26]. <https://www.nasa.gov/content/about-cubesat-launch-initiative>
- ⑬ Cube Quest Challenge [EB/OL]. [2019-08-26]. <https://www.nasa.gov/cubequest/details>
- ⑭ 白青江, 范全林. 美国两个日球层物理小型科学任务揭秘空间天气影响[J]. 空间科学学报. 2019, 39(4): 415-416