



2016–2030年我国空间太阳物理发展的若干思考

甘为群^{1*}, 颜毅华², 黄宇^{1*}

1. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034;

2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

*联系人, 甘为群, E-mail: wqgan@pmo.ac.cn; 黄宇, E-mail: huangyu@pmo.ac.cn

收稿日期: 2018-08-28; 接受日期: 2018-09-27; 网络出版日期: 2019-01-08

国家自然科学基金(编号: 11427803, U1731241)和中国科学院空间科学战略性先导科技专项(编号: XDA15052200, XDA04061000)资助项目

摘要 本文简要介绍了国际上太阳物理的前沿科学问题以及太阳空间探测的发展趋势, 结合我国太阳物理研究和太阳空间探测的现状, 提出我国2016–2030年太阳物理领域发展的一些思考. 文章重点阐述了至2030年我国太阳空间探测比较可行的发展战略目标, 简要介绍了征集到的属于太阳全景计划和太阳显微计划的若干太阳空间探测项目, 描绘了实施路径并探讨了支撑计划的技术手段.

关键词 太阳物理, 空间物理, 空间任务

PACS: 95.55.Ev, 95.55.Fw, 96.60.-j

1 引言

空间太阳物理是伴随着人造卫星的出现而新兴起来的一门学科. 众所周知, 由于地球大气的影响, 人们在地面上只能观测到光学和有限的射电波段, 它们在宽广的太阳辐射波谱中只占很小的一部分. 空间卫星观测, 使人们摆脱了地球大气的束缚, 可以在几乎全波段范围内观测太阳的辐射(包括粒子), 从而带来了太阳物理学研究上的革命性突破.

据统计, 自20世纪50年代末第一颗人造卫星上天以来, 世界主要空间大国共发射与太阳观测有关的卫星70余颗^[1]. 近代太阳物理的许多开拓性重大成就大都来自卫星的观测结果. 例如对日冕结构的认识, 对磁重联的认识, 对太阳内部结构的认识, 等

等. 毫无疑问, 空间卫星探测是推动当代太阳物理学发展的主要动力.

我国早在20世纪70年代“东方红卫星”发射不久, 就提出并实施我国第一颗太阳探测卫星计划“天文1号”. 之后, 由于国家政策调整, 卫星计划中止. 20世纪90年代, 我国开展921-2空间天文分系统(包括超软X射线探测器、硬X射线探测器和伽玛射线探测器)的研制, 并于2001年初搭载“神舟2号”飞船发射升空, 成功观测到数十个太阳伽玛射线耀斑和数百个太阳X射线耀斑^[2,3].

但时至今日, 作为空间技术大国, 我国尚没有发射过一颗太阳探测专用卫星, 在空间太阳天文台的运行和管理方面基本上是空白. 中国国家航天局在2007年初向全世界发布了“十一五”空间科学

引用格式: 甘为群, 颜毅华, 黄宇. 2016–2030年我国空间太阳物理发展的若干思考. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 059602
Gan W Q, Yan Y H, Huang Y. Prospect for space solar physics in 2016–2030 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 059602, doi: [10.1360/SSPMA2018-00301](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00301)

规划,提出要在“十一五”期间实现6大发展目标,其中3大目标与太阳探测有关,它们是:“...四是充分利用空间科学的国际合作优势,参与中法合作太阳爆发探测小卫星计划(SMESE);五是进一步深化空间太阳望远镜(SST)的关键技术研究,开展“夸父”计划(KUAFU)的背景项目预先研究,凝练科学目标,突破关键技术;六是开展空间科学相关领域的关键技术和科学研究”。这里提到的涉及太阳观测的规划,从卫星层面上看,都没有实现。

2008年11月,中国科学院发布“中国空间科学项目中长期发展规划(2010–2025)”^[1](空间科学项目中长期发展规划研究课题组,2008),提出16个空间科学计划,其中两个属于太阳物理范畴,它们分别是“太阳显微”和“太阳全景”计划,另外隶属空间物理的“日地联系”计划也与太阳物理直接有关。此后,在2012年初发布的“空间科学项目发展规划深化研究报告”(空间科学项目中长期发展规划研究课题组,2012),对2008年的报告进行了补充和修订,在空间太阳探测方面,明确建议“十三五”实施的项目包括“深空太阳天文台(DSO)”和“先进天基太阳天文台(ASO-S)”。之后经过3年多的研究“2016–2030空间科学规划研究报告^[4]”正式发表。

本文是在之前规划研究的基础上,参考国际和国内太阳物理学发展的最新动态,对我国2016–2030年空间太阳物理发展的若干思考。

2 国际太阳空间探测的现状与发展趋势

2012年,美国发布的“太阳与空间物理十年规划”^[5]在太阳和日球物理领域方面提出了4个目标:确定太阳如何产生贯穿整个日球的准周期性变化磁场;确定太阳磁场机制如何产生太阳大气动力学;确定磁能如何存储和快速释放;探索太阳与局地星际介质的相互作用及对地球的保护。这4个目标基本反映了国际上太阳物理发展的趋势。

围绕太阳物理的核心科学问题,国际上近年来发射了一系列太阳探测卫星。表1列出了2000年以后发射的太阳探测卫星(含部分太阳观测相关卫星),以及已经明确列入发射计划的未来太阳探测卫星,包括卫星的名称、发射和结束科学寿命的时间、主

要任务(载荷情况)以及卫星所属国家。这里没有包括这期间发射的GOES系列监测卫星。

这里我们重点介绍正在实施中的两个卫星计划——欧洲的Solar Orbiter和美国的Parker Solar Probe计划。

(1) Solar Orbiter

Solar Orbiter是欧洲航天局(European Space Agency, ESA)提出的2015–2025年“宇宙憧憬”项目计划中的第一颗中等质量的卫星。该卫星由ESA研制,NASA负责发射,预期于2020年发射。它将在62个太阳半径的近距离和偏离黄道面35°倾角的纬度研究太阳表面、日冕和日球层内部之间的联系。

Solar Orbiter的科学目标为:太阳风的驱动源以及日冕磁场的来源;太阳的快速变化过程如何驱动日球的变化;太阳爆发产生的高能粒子是如何充满整个日球的;太阳发电机的工作机制以及太阳和日球的关联。

Solar Orbiter卫星搭载的仪器包括局地探测仪和遥测仪器。

局地探测仪包括高能粒子探测器(EPD)、磁场测量仪(MAG)、射电以及等离子体波探测器(RPW)和太阳风测量仪(SWA)。

遥测仪器包括极紫外成像仪(EUI)、多波段日冕成像望远镜及谱仪(METIS)、偏振及日震望远镜(PHI)、太阳轨道日球望远镜(SoloHI)、日冕环境光谱成像仪(SPICE)和X射线成像及谱仪(STIX)。

Solar Orbiter卫星基本参数:该卫星能够达到0.28 AU的近距离探测太阳表面,其轨道能够达到日球纬度25°,延伸任务更能达到日球纬度的34°–36°。卫星为三轴稳定,前端有热挡板。计划任务寿命7年,延伸任务3年。

(2) Parker Solar Probe

Parker Solar Probe的前身是NASA的Solar Probe计划,其将是历史上首次飞入日冕(8.5太阳半径)进行探测的卫星,于2018年8月12日发射。Parker Solar Probe卫星的科学目标为:探测太阳风源区磁场的结构;追踪日冕加热以及太阳风加速的能量来源;研究太阳高能粒子的加速和输运机制;研究太阳附近的尘埃等离子体对太阳风和高能粒子加速的影响。

表 1 2000年以后以及未来将发射的太阳相关探测卫星

Table 1 Solar satellites launched after 2000 and will be launched in the future

卫星名称	发射时间	结束时间	主要任务	国家
Koranas-F	2001-07-31	2005-12-06	X射线、EUV成像, X射线、伽马射线、UV谱仪	俄罗斯
Genesis	2001-08-08	2004-09-08	太阳元素的收集和测量	美国
RHESSI	2002-02-05	2018-10-01	太阳高能谱成像观测(3 keV–15 MeV)	美国
SORCE	2003-01-25	至今	太阳变化及辐射度监视器, 太阳光谱辐射度测量, 太阳EUV谱仪	美国
Hinode	2006-09-22	至今	太阳光学望远镜, X射线、EUV成像观测	日本
STEREO	2006-10-26	至今	EUV、白光日冕成像观测, 高能粒子、太阳风、磁场测量, 射电爆发观测	美国
Fermi	2008-06-11	至今	大面积伽马射线望远镜	美国
Koronas-P	2009-01-30	2009-12-01	伽马射线望远镜, X射线、UV、伽马射线谱仪	俄罗斯
Proba-2	2009-11-02	至今	宽波段紫外谱仪, EUV成像观测	欧洲
SDO	2010-02-11	至今	太阳白光多波段、EUV成像观测, 矢量磁场观测	美国
Picard	2010-06-15	2014-04-04	太阳辐射度、太阳形状观测	法国
IRIS	2013-06-27	至今	过渡区光谱成像观测	美国
Parker Solar Probe	2018-08-12	至今	近日8.5太阳半径探测日冕	美国
Solar Orbiter	2020		近日探测, 太阳风分析仪、高能粒子、磁场、光学、EUV、X成像观测	欧洲
Proba-3	2020		新技术试验, 内日冕仪	欧洲
Aditya-L1	2021		日冕物质抛射探测, EUV成像观测, X射线流量, 太阳风、磁场测量	印度
Interhelio-Probe	2025		近日太阳(光学、X射线和紫外成像)和日球(粒子、波)观测	俄罗斯

Parker Solar Probe卫星搭载的仪器包括局地探测仪和遥测仪器。

局地探测仪器包括快速离子分析仪(FIA)、两个快速电子分析仪(FEAs)、离子成分分析仪(ICA)、高能粒子测量仪(EPI)、磁场测量仪(MAG)、等离子体波测量仪(PWI)、中子及伽马射线谱仪(NGS)和日冕尘埃测量仪(CD)。

遥测仪器包括半球望远镜(Hemispheric Imager)。

Parker Solar Probe卫星基本参数: 该卫星是一颗三轴稳定的卫星, 预期净重555 kg, 预计寿命6年. 轨道近日点8.5倍太阳半径, 远日点0.73 AU, 倾角3.4°, 周期88 d.

此外, 在美国太阳和空间物理十年规划中, 专门就空间太阳(含空间物理)探测的发展规模进行了规划建议, 其主要是: 加强和扩展探索者(Explorer)计划, 每2–3年发射1颗探索者卫星; 调整日地探针计划, 每4年发射1颗中型卫星; 开展大型空间探测计划, 每6年发射1颗大型卫星. 在太阳探测卫星具体提案方面, 除了表 1提到的已经列入计划的卫星外, 还有太阳爆发事件任务(SEE)和L5任务等. 前者载荷候选包含X射线谱像、伽马射线谱像、高能中性原子谱像、EUV成像光谱仪等; 后者载荷候选包括大视场日冕仪、EUV成像仪、局地探测包等. SEE和L5尚处于早期方案和评估阶段, 目前建议优

化SEE(含1–2个核心载荷), 以争取纳入中型卫星计划; 建议L5为多部门合作推动项目。

由此我们可以总结出如下的太阳空间探测特点, 并分析出未来的发展趋势:

(1) 目前有多个太阳探测卫星在轨工作, 太阳空间探测处在空前繁荣的态势;

(2) 多个太阳空间探测项目正在预研当中, 未来太阳空间探测显示良好前景;

(3) 像印度这样的国家, 很有可能继美国、日本、欧洲之后, 在中国之前, 成为拥有太阳探测卫星的国家;

(4) 太阳全日面紫外成像观测, 以SDO为代表, 已经达到很高的水平, 短期内很难再有突破, 但局部高分辨成像在TRACE基础上仍有发展空间;

(5) 太阳紫外光谱成像在多个卫星(如SOHO, HINIDE, SDO, IRIS)上进行了观测, 特别是2013年发射的IRIS, 基于光谱成像的研究成为太阳研究的热点;

(6) 日冕的高分辨率观测仍然是未来一段时间太阳研究的重点;

(7) KORONAS-P由于其非正常结束寿命(2009年底停止工作), 目前太阳高能辐射仅有RHESSI卫星, 但其已经超期服役, 未来缺少对太阳耀斑高能辐射的探测;

(8) 近日探测是2020年前后的重点, 其好处是可

以提高空间分辨率, 满足人们在太阳近处探测的好奇心, 美国、欧洲和俄罗斯都提出了近日观测计划, 其中欧洲和俄罗斯的卫星计划都是较大倾角的对日观测, 可以观测到极区和高纬度的太阳活动, 同时能够测量到黄道面外的等离子体性质, 美国的PSP计划更是能够将卫星飞入日冕, 首次在8.5太阳半径处的日冕中观测太阳;

(9) 利用新的探测手段, 近距离观测、三维立体观测、甚至在太阳极轨上观测都将变成现实.

3 国内发展现状与优势分析

3.1 太阳物理研究方面

相比较国际太阳物理研究近年来的进展, 我国太阳物理研究的表现应该说相当突出. 虽然我国太阳物理研究的面尚不够宽广, 比如在太阳内部研究、在日震学研究以及在太阳宁静大气结构研究等方面, 从事研究的人员尚比较少, 但我国在当今太阳物理的主流——太阳活动研究方面, 尤其是在利用空间太阳探测观测资料开展研究方面, 取得了令人刮目相看的成果. 这些成果大体集中在3个研究方面: 太阳磁场、太阳耀斑、日冕物质抛射. 通俗地说, 就是“一磁两暴”. 这是我国太阳物理发展长期形成的格局, 我国太阳物理的研究力量也大都集中在这些研究范畴. 表 2 列出了2008–2012年我国太阳物理工作者在太阳物理主要国际学术期刊发表的主题词中分别包含太阳磁场、太阳耀斑、日冕物质抛射词根的论文数目, 以及与美国、法国、俄罗斯、日本等国家有关数据的比较(数据来源: Web of Science). 这里的数据虽然有重叠(即磁场词条中的论文, 可能包含耀斑; 耀斑词条中的论文可能包含日冕物质抛射; 一篇文章可能有多个国家的作者; 等

等), 而且并没有考虑所有SCI 刊物, 以及只考虑了几个代表性国家, 但也基本上反映了当前在空间太阳物理研究领域各国的大体实力. 从表中看到, 我国太阳物理界在相关领域发表论文的数目位列世界第二, 或可以说位列前茅. 这一结果, 与Springer出版社统计的2005–2010年在Solar Physics发表论文数分布类似, 与Schrijver^[6]最新统计结果一致, 也与中国科学院基础局2009 年所做的关于各学科国际比较的结果大体一致. 这些结果表明, 在天文学众多的学科中, 我国的太阳物理属于优势学科, 尤其在太阳磁场、太阳耀斑、日冕物质抛射研究方面, 在国际上具有相当的显示度.

3.2 太阳空间探测方面

虽然我国在太阳物理研究方面位列世界前茅, 但所使用的观测资料大都来自国外的太阳卫星. 相比较国际太阳空间探测的进展, 国内的太阳空间探测项目进展情况不容乐观(近年来进展详见文献[7–14]). 在“十一五”期间太阳物理领域主要开展的项目包括: 以理解太阳的高能爆发现象为目标的中法合作“太阳爆发探测小卫星”(SMESE), 该项目在中法航天局共同支持下, 先后完成了0相、A相和A+相研究, 并通过法国航天局主持的评审, 后来由于法国方面在项目安排上的原因而取消; “十一五”末, 太阳物理界有关单位与上海航天局合作, 共同提出“太阳爆发-近地空间环境响应”(SENEER) 太阳探测卫星计划, 以应征国家民用航天“十二五”项目(一箭5星)指南, SENEER项目的方案论证得到了中国科学院、国家自然科学基金委的经费支持, 但在完成方案阶段后, 由于项目总体前景不明朗而终止.

表 2 2008–2012年各国在主要学术刊物发表含太阳磁场/太阳耀斑/日冕物质抛射主题词的论文篇数比较

Table 2 The numbers of publications from 2008 to 2012 with keywords of solar magnetic fields/solar flares/coronal mass ejections in some major international journals for different countries

期刊	美国	法国	中国	俄罗斯	日本
<i>The Astrophysical Journal</i>	805/402/146	84/37/17	141/124/43	38/35/5	121/60/11
<i>Astronomy & Astrophysics</i>	132/62/36	108/28/20	45/21/14	38/19/8	28/6/2
<i>Solar Physics</i>	219/102/121	51/29/38	51/39/26	62/49/25	24/19/14
合计	2025	412	504	279	285

空间太阳望远镜(SST)项目早在20世纪90年代初就提出,以后进行了一系列研究,2005年国防科学技术工业委员会(国防科工委)遴选“十一五”空间科学卫星项目时, SST被列入深化研究项目. 2008年颁布的中国空间科学中长期发展规划(2010–2025)将SST列在“太阳显微”计划中. “十一五”后期,对SST的科学目标和载荷进行了优化,对主光学望远镜的关键技术研究也有了一定的进展,完成了总体、结构与机械、精密温度控制、高精度姿态控制、主光学望远镜、极紫外成像望远镜、星载科学数据处理系统7项关键技术攻关. 相关领域的重要技术创新,对国家高技术和航天技术的发展产生了牵引作用. 2011年,空间太阳物理领域有了新的机遇,太阳深空探测被列入拟启动的国家深空探测计划的3个主要方向之一. 基于SST所发展的技术构架, SST被列入拟立项的国家深空探测计划,当时提出争取在2020年前发射太阳天文台到第一拉格朗日点,新计划的英文缩写为DSO(深空太阳天文台). 经过多轮论证,作为国家深空探测计划第一批拟启动的项目,2011年正式提交国家航天局,但之后整个国家深空探测计划一直处在立项等待之中,前景不明朗.

KUAFU虽然是从空间物理方面提出,但其3颗星中的1颗(位于L1点)其实就是太阳探测卫星. KUAFU是我国主导的国际合作项目,具有广泛的国际参与. 在北京大学领导下, KUAFU计划完成了概念性研究阶段以后,2009年底由中国科学院正式接手,负责推进立项. KUAFU项目“十二五”初纳入中国科学院“十二五先导专项”系列中,原计划在“十二五”期间立项,但由于国际合作及其他方面的原因,没能按期完成立项工作.

与此相对照,近年来,中国科学院空间科学先导专项正在稳步推进,对空间太阳物理带来了实实在在的变化. 作为空间科学中长期发展规划深化研究的一部分,中国科学院于2009年启动了第一批空间科学预先研究项目,其中包括一项“太阳显微”项目(超高角分辨率X射线望远镜(SHARP-X)关键技术研究)和两项“太阳全景”项目(太阳磁场的立体观测、大尺寸宽带太阳高能辐射成像谱仪),支持其开展关键技术研究或概念性研究. 2011年在空间

科学先导专项第二批预先研究项目中又安排了两项“太阳显微”和两项“太阳全景”课题,分别支持太阳硬X射线成像、空间日冕仪、空间磁像仪的关键技术研究,以及瞄准“十三五”的“先进天基太阳天文台”(ASO-S)初步方案研究. 2013年,中国科学院空间科学先导专项又启动了第三批空间科学预先研究项目的论证,这次在“太阳显微”和“太阳全景”方向共通过了8个预先研究课题的论证. 后由于经费原因没有完全启动. 2018年初,先导专项II期启动,第一批共安排了7个太阳探测预先研究项目.

特别需要提到的是,2013年,中国科学院空间科学先导专项启动了第二批空间科学背景型号研究项目的评估. “太阳全景”方向的“先进天基太阳天文台”(ASO-S)经过严格遴选,与其他方向的3个项目一起入选第二批空间科学背景型号研究项目,执行期为2014年1月1日至2015年12月31日. ASO-S旨在观测下一个太阳活动峰年(2021–2025)的太阳表面矢量磁场、耀斑非热辐射和日冕物质抛射的初发过程,研究太阳磁场、耀斑和日冕物质抛射三者之间的关系. ASO-S背景型号研究于2016年4月圆满结题.

在中国科学院空间科学先导专项空间物理领域的“日地联系”计划中,也有一些与空间太阳探测直接有关的项目,如“太阳极轨行星际日冕物质抛射事件射电成像探测计划(SPORT)”在2012年也获得背景型号项目的立项. 由于分属不同的研究计划,详细可参阅空间物理领域发展规划报告.

总之,相对于国际太阳空间探测蓬勃发展的趋势而言,我国的形势比较严峻,眼看就要落在印度的后面. 相对于国内空间天文已有4个立项和成功发射的项目(SVOM, HXMT, POLAR, DAMPE)而言,从学科发展平衡来说,我国太阳空间探测正面临着机遇. 况且,我国早在20世纪70年代就提出要发射太阳探测卫星,无论是研究基础还是技术基础,都属于优势学科. 此外,我国在地面太阳物理观测设备方面,先后建成了太阳磁场望远镜、太阳光谱望远镜、1 m红外太阳塔、射电频谱仪、射电日像仪等一批具有国际先进水平的观测设备. 向空间发展,是未来中国太阳物理的必然方向. 国内太阳物理界应该正确认识形势、集中研讨、形成共识,抓住机遇,争

取在“十三五”期间,我国太阳空间探测至少在立项方面“零”的突破.

4 至2030年发展战略目标

4.1 至2030年发展战略目标及阶段目标

鉴于“十一五”和“十二五”的太阳空间探测规划执行情况,至少在卫星层面上,或者说在卫星立项方面没有实现“零”的突破,我们因此提出至2030年的比较现实的发展战略目标.

战略目标:集中优势研究领域,瞄准前沿科学问题,通过多波段观测认识太阳活动“一磁两暴”的基本规律,为理解宇宙类似现象和预报空间天气服务.

未来太阳物理最重要的一个发展方向就是高时间-空间-频谱分辨率、多波段全时域地探测发生在太阳表面及太阳大气各个层次中的各类物理过程.我国从20世纪90年代初就开始提出并预研旨在高分辨率观测磁场的“空间太阳望远镜”(SST)计划,并以此为龙头,初步形成了我国太阳物理界善于利用国际太阳探测卫星观测数据开展太阳物理研究的传统.2001年,经过近十年研制的载人航天工程-2系统的空间天文分系统成功搭载“神舟2号”飞船,观测到百余例太阳耀斑硬X射线暴和数十例太阳耀斑伽玛射线暴.加上“十一五”期间启动的SMESE计划(后因故中止),我国在空间太阳物理探测方面的相对优势比较明显.此外,在太阳物理课题研究方面,长期以来我国形成了以太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射(俗称“一磁两暴”)为主要方向的研究格局,其研究成果在国际上名列前茅(见表2).但我国太阳物理学家在国际上的地位比较尴尬,一方面坐享别国卫星观测的成果,一方面自己对卫星硬件的贡献为零.这在中国国力比较落后的时候尚可理解,如今中国的国力已经上升为世界第二,再不对科学的原始创新做出贡献,与大国的地位很不相符.事实上,我国无论从科研基础、技术水平,还是经济实力、航天能力等方面,都已经具备了循序发展的条件.发射我国自己的太阳探测卫星势在必行.

为实现此战略目标,我们首先寄希望于太阳探测卫星工程立项方面“零”的突破;继而实现我国太

阳卫星空间观测“零”的突破;进而形成从太阳卫星研发、卫星数据管理、分析软件服务,到国际研究组织、重大研究成果取得等空间太阳物理研究的完整体系,最终在2030年跨入空间太阳物理领域国际先进行列.按照这个思路,其分阶段目标应该是明确的.

2016–2020年:争取有1–2个太阳探测卫星计划获得国家正式工程立项,实现太阳探测卫星立项“零”的突破.2021–2025年:争取至少发射1颗太阳探测卫星,实现我国太阳卫星观测“零”的突破;

2026–2030年:形成较完整的空间太阳物理研究体系,走上可持续发展道路,形成差不多每5年发射1颗中小型太阳探测卫星、每10年发射1颗大型太阳探测卫星的规模.

上述战略目标和分阶段目标的着落点,首先是寄希望于中国科学院战略性空间科学先导专项,希望该专项在“十二五”实施的基础上,“十三五”期间有一个质的发展,形成一个经费来源基本稳定、能够支撑多学科发展的真正意义上的国家空间科学卫星中心,全面承担起发展我国空间科学卫星的任务;其次也寄希望于国家航天局的相关计划(如国家深空探测计划)能够落实.否则,需要国家大量经费投入的空间科学探测规划不可能实现.

4.2 拟研究的科学问题

太阳耀斑和日冕物质抛射是太阳上两类最剧烈的爆发现象,也是太阳系内最剧烈的爆发现象,它们在短时间内释放出巨大的能量,发射出从射电到伽马射线全波段辐射、高能粒子流、高速运动的等离子体云、以及磁化的物质流,可以对人类生存环境带来灾害性影响.这些爆发现象蕴含着一系列复杂的物理过程,对其观测和研究有助于理解宇宙中普遍存在的规模更大的类似爆发现象.现在一般认为,太阳耀斑和日冕物质抛射的能量来源于太阳磁场.因此,观测和研究太阳磁场、太阳耀斑、日冕物质抛射三者之间的关系,就显得特别的重要.未来若干年,我国太阳空间探测拟解决的科学问题可以集中在下面几个方面.

(1) 磁场与耀斑的关系.观测和模拟都认为日冕

磁场发生重联, 磁能转化为热能和热能, 从而产生耀斑. 这样的图像在两维空间下较好地说明了磁场与耀斑的关系. 真实的太阳活动发生在三维空间, 磁场与耀斑的关系非常复杂, 理解它们之间的关系需要从观测上发现三维磁重联的观测特征, 将二维平面磁重联模型拓展到三维立体空间. 其核心问题是: 究竟怎样的磁场结构和演化可以导致耀斑的发生. 具体问题包括: 磁场剪切和磁流浮现对耀斑前期的能量储备和耀斑的触发有什么样的作用? 磁重联的位置和触发阈值是什么? 磁场演化过程中可以导致耀斑的电流片是如何形成的? 重联倾向于在何种磁拓扑结构下发生? 重联演化过程有哪些特征? 耀斑发生前后磁场到底发生了哪些变化? 耀斑释放能量与磁能到底是怎样的关系? 耀斑能量释放在热、非热、波等各种形式上是如何分配的? 是什么因素决定着耀斑能量释放的规模和比例? 耀斑中粒子的加速到底是什么机制? 对光球矢量磁场的精确测量及对耀斑热与非热成像等的观测, 将有助于回答这些问题, 从而加深对太阳磁场和太阳耀斑的理解, 特别是理解它们之间可能存在的因果关系, 为预报耀斑的发生提供重要的物理基础.

(2) 磁场与日冕物质抛射的关系. 相对于耀斑局地性而言, 日冕物质抛射是太阳上的一种大尺度爆发现象, 它甚至可以覆盖整个日面. 由于目前只能对太阳光球进行较可靠的磁场观测, 而日冕物质抛射通常发生在太阳日冕中, 它们在空间位置上相互脱离, 这对理解它们之间的关系带来难题. 解决这个难题, 一方面需要发展日冕磁场测量新技术, 另一方面, 可以发展相对可靠的磁场外推方法, 重构日冕磁场. 对于后者, 它强烈地依赖于光球磁场的精确测量. 研究磁场与日冕物质抛射的关系, 其核心问题是: 什么样的磁场结构和演化可以引发日冕物质抛射的爆发. 具体问题包括: 日冕物质抛射发生的前兆特征, 尤其是磁场初始特征是什么? 磁场复杂度和日冕物质抛射的产率间有何定量关系? 日冕物质抛射是否都存在磁通量绳? 磁通量绳是在抛射前就存在的, 还是抛射时形成的? 日冕物质抛射是局地触发(比如磁重联)还是大尺度整体行为(比如理想磁流体不稳定性或失去平衡)? 日冕物质抛射中存在大尺度磁重联吗? 小尺度磁场、活动区磁场和全球

磁场之间是如何耦合的? 大尺度磁连接性在日冕物质抛射中起什么作用? 日冕物质抛射的传输演化特征(包括加速和减速)及与磁场的关系是怎样的? 日冕物质抛射的方向性是由磁场唯一决定的吗? 磁螺度的积累可以用来表征日冕物质抛射的爆发吗? 日冕物质抛射相互作用会产生什么样的后果? 对全日面光球矢量磁场的精确测量及对全日面和近日冕紫外成像等的观测, 将有助于回答这些问题, 从而加深对太阳磁场和日冕物质抛射的理解, 特别是理解它们之间可能存在的因果关系, 为预报日冕物质抛射的发生提供重要的物理基础.

(3) 耀斑和日冕物质抛射的关系. 目前太阳物理学家倾向于认为, 太阳磁场是驱动太阳耀斑爆发和日冕物质抛射爆发的主要原因, 即太阳耀斑爆发能量和日冕物质抛射爆发能量都是来自于太阳磁场的非势能量. 但怎样的磁场可以产生耀斑, 怎样的磁场可以产生日冕物质抛射, 怎样的磁场可以同时产生耀斑和日冕物质抛射, 这在当今太阳物理中是一个极其重要的问题. 耀斑和日冕物质抛射之间的关系, 也是小尺度磁场演化与大尺度磁场后果之间的关系. 具体问题包括: 耀斑和日冕物质抛射是否存在因果联系? 是耀斑事件触发日冕物质抛射, 还是日冕物质抛射触发耀斑, 或是两者之间无关? 为什么有时候小尺度的磁场变化会带来大尺度的爆发? 磁自由能在日冕物质抛射和耀斑之间的能量是如何分配的? 为什么有的耀斑有日冕物质抛射伴随, 有的却没有, 其决定因素是什么? 伴随日冕物质抛射的耀斑有哪些独特的性质? 存在纯的日冕物质抛射现象吗? 耀斑加速粒子和日冕物质抛射激波加速粒子的性质有何不同? 日冕物质抛射与其他爆发性事件(暗条爆发、紫外日冕波等)有何联系? 对日冕物质抛射的成像观测(尤其是近日冕观测)及耀斑非热像谱等观测, 加上全日面光球矢量磁场的精确测量, 将有助于回答这些问题, 从而加深对太阳磁场、太阳耀斑、日冕物质抛射三者之间关系的理解, 为预报空间天气提供重要的物理基础.

总结起来, 我国太阳空间探测近期拟研究的科学问题可以概括成“一磁两暴”, 即太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射的物理成因、相互作用和彼此关联. 这个主题既是国际学科前沿, 也是我国目前

太阳物理研究的优势所在,更是空间天气预报的物理基础.未来若干年我国太阳探测卫星的遴选应该以此作为主要参考标准之一.

4.3 科学卫星计划及任务建议

2008年颁布的“中国空间科学项目中长期发展规划(2010–2025)”中明确提出16个空间科学计划,其中属于太阳物理范畴的有2个:“太阳全景”计划和“太阳显微”计划.另外属于空间物理范畴的“日地联系”计划与太阳空间探测也密切相关.这里我们仅探讨属于太阳物理范畴的2个计划的规划,“日地联系”计划将会在空间物理的规划报告中给出.

4.3.1 太阳显微计划

对太阳进行高分辨或近距离多视角的多波段观测,研究太阳内部结构与演化、磁场起源、日冕结构与动力学、爆发过程的触发机制和粒子加速机制等基本物理过程.“太阳显微”计划的科学目标紧紧围绕“一磁两暴”,试图回答太阳磁场的磁元本质、磁场的小尺度特征、耀斑的能量过程、日冕物质抛射的源区特征等一系列重大问题.

“太阳显微”计划征集到如下项目:

(1) DSO任务

科学目标: 深空太阳天文台(Deep Space Solar Observatory, DSO),旨在研究太阳局部高分辨的磁场,不仅要获得 $0.1''$ – $0.15''$ 的空间分辨率,而且要获得高精度磁场结构,从而实现对太阳磁元的精确观测,结合多波段观测,取得太阳物理研究的重大突破,并为空间天气预报提供重要的物理依据和新方法.

初步方案: DSO属于大型卫星计划,其有效载荷包括: 口径为1 m的太阳磁场望远镜、多波段紫外望远镜、高能成像望远镜、日冕仪、射电探测器以及粒子探测器等.卫星计划发射到第一拉格朗日点,以达到长时间观测太阳的目的.

进展: 2005年在国防科工委遴选“十一五”科学卫星时,DSO的前身SST被列入深化研究项目.“十一五”期间开展了深化研究,“十二五”初期,DSO被列入拟第一批启动的国家深空探测计划.目前,整

个深空探测计划有待国家立项.一旦国家立项,DSO可望在5年内完成研制.

(2) SPORE任务

科学目标: 太阳极区探测器(Solar Polar Region Explorer, SPORE),将在绕日极轨面运行,首次实现对太阳极区正面的磁场、速度场的光谱和成像观测,揭示太阳活动周运行机理,认识高速太阳风起源.

初步方案: SPORE主要载荷包括太阳磁像仪、大视场极紫外成像仪和极紫外光谱仪、以及局地磁场和粒子探测仪器等.设计卫星轨道距离太阳约1 AU,与黄道面交角 70° ,周期1年.以保证1年中各有半年时间分别观测太阳南北半球.

进展: 2011年在准备国家深空探测计划时,初步提出SPORE,当时是将太阳极区探测作为太阳深空探测的第三步,即在2025年之后实施.

(3) SHARP-X任务

科学目标: 超高分辨X射线望远镜(Super High Angular Resolution Principle for Coded-mask X-ray Imaging, SHARP-X)将首次实现太阳X射线亚角秒空间分辨率观测,研究加速源区耀斑的结构、演化、粒子能量分布、加速和传输机制.

初步方案: 使用伸展臂技术,将高精度、轻量级的编码板和X射线探测器阵列分离20 m左右的距离,以实现对太阳X射线成像的亚角秒分辨率,X射线探测器具有100 eV左右的能量分辨率.

进展: 该项目概念曾得到前期预先研究支持,也开展了部分关键技术研究及可见光原理验证实验.如果X射线原理样机能够得到充分的实验验证,SHARP-X期望在下一个太阳活动峰年推进.

(4) MESMV任务

科学目标: 太阳磁场和速度场分层结构探测器(Multi-layer Exploration of Solar Magnetic and Velocity Field, MESMV),利用对太阳大气不同层次的高精度偏振测量,研究太阳的磁场和速度场,不仅要获得高空间分辨率的信息,也需要获得磁场和速度场分层结构的信息,从而深入理解太阳大气中物质和磁能从光球底部到日冕的传输演化过程,在太阳爆发机制和太阳活动区物理研究方面取得突破,为空间天气预报提供物理依据和新方法.

初步方案: MESMV载荷包括: 口径为0.2 m的太阳磁场望远镜、多波段紫外望远镜、高能成像望远镜、日冕仪等. 卫星计划发射到第一拉格朗日点, 以达到长时间观测太阳的目的.

进展: MESMV概念于2013年提出, 之前在空间预研项目支持下开展过磁场相关技术研究. 需要进一步开展概念性阶段预先研究, 以完善任务计划.

(5) 太阳爆发抵近探测任务

科学目标: 在距离太阳5–10个太阳半径范围内, 通过对CME-耀斑电流片中精细的物理过程以及发生在过渡区和日冕中精细的物理过程的观测, 加深对带电粒子加速机制和日冕加热等重大问题的认识, 同时对日冕磁场进行直接测量.

初步方案: 卫星拟采用水星轨道作为飞船的远日点、而近日点在5–10个太阳半径附近的椭圆轨道, 计划的仪器包括: 粒子探测器、电磁场探测器、白光日冕仪、低频射电谱仪、远紫外日冕光谱仪和远紫外日冕成像仪等.

进展: 太阳爆发抵近探测概念性研究入选中国科学院空间科学战略性先导科技专项(II期)预先研究项目, 研究周期为2018年1月至2019年12月.

(6) 太阳过渡区卫星探测任务

科学目标: 首次对高过渡区进行常规成像观测, 并同时高分辨率的光谱观测. 揭示物质和能量从太阳低层大气传输到日冕的连续过程, 揭示太阳风的形成机制及初始外流过程, 监测耀斑和日冕物质抛射的先兆和爆发.

初步方案: 350–1050 Å范围内的窄带成像和高分辨率光谱探测, 空间分辨率达到0.5"左右.

进展: 太阳过渡区卫星探测概念性研究入选中国科学院空间科学战略性先导科技专项(II期)预先研究项目, 研究周期为2018年1月至2019年12月.

(7) 编队飞行太阳硬X射线望远镜

科学目标: 在国际上首次采用编队飞行对太阳硬X射线实现前所未有的高分辨直接成像观测, 探索太阳非热能量释放的空间分布、能谱信息和时间特征, 揭示粒子加速机制的本质.

初步方案: 利用高精度的编队飞行, 将光学系统和焦平面拉开150 m甚至更远, 以大幅度提高空间分辨率. 预期能段达到100 keV.

进展: 目前仅仅是一个概念, 需要开展系列的预先研究, 包括硬X射线直接成像技术、编队飞行可行性等.

4.3.2 太阳全景计划

在关注太阳局部高分辨观测的同时, 注重太阳整体行为的研究, 多波段联合诊断太阳变化规律, 建立小尺度运动与大尺度变化的联系, 在探求太阳爆发规律和变化机理的同时, 为空间天气预报提供物理基础. “太阳全景”计划的科学目标紧紧围绕“一磁两暴”, 试图回答太阳磁场的起源、磁场的大尺度特征、耀斑的特性及与日冕物质抛射的关系、日冕物质抛射的全球特征等一系列重大问题.

“太阳全景”计划征集到如下项目:

(1) ASO-S任务

科学目标: 先进天基太阳天文台(Advance Space-based Solar Observatory, ASO-S)将首次实现在一颗卫星上同时观测太阳全日面矢量磁场、太阳耀斑高能辐射成像和日冕物质抛射的近日面传播, 研究当代太阳物理领域重大前沿科学问题——太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射三者之间的关系, 揭示太阳磁场演变导致太阳耀斑爆发和日冕物质抛射的物理机制, 在拓展人类知识疆野的同时, 为空间天气预报提供理论基础.

初步方案: ASO-S属于中小型卫星计划, 其有效载荷包括: 全日面太阳矢量磁像仪(Full-disc vector MagnetoGraph, FMG)、太阳硬X射线成像仪(Hard X-ray Imager, HXI)、莱曼阿尔法太阳望远镜(Lyman-alpha Solar Telescope, LST; 包括全日面成像仪和近日冕仪). 卫星对日定向, 三轴稳定, 采用太阳同步轨道, 以长时间观测太阳. 卫星设计寿命4年, 以覆盖至少太阳峰年的极大期.

进展: ASO-S概念及其相关的3个载荷, 获得过中国科学院空间科学先导专项第二批(2011–2013)预先研究项目的支持. 2014年1月到2016年4月ASO-S获得中国科学院空间科学先导专项第二批背景型号项目的支持. 2017年底ASO-S正式获得中国科学院批复立项, 如果一切顺利, 将赶在下一个太阳活动峰年前夕的2022年发射.

(2) CHAT任务

科学目标: 双超平台技术试验卫星是一颗旨在验证超高指向精度和超高稳定度的新型卫星平台, 利用双超平台的试验机会搭载“中国H α 望远镜”(Chinese H α Telescope, CHAT), 首次实现全日面H α 波段的光谱成像观测, 重点研究太阳活动在低层大气(光球和色球)中的物理过程, 并为空间天气预报提供必要参量.

初步方案: 太阳探测双超平台技术试验卫星轨道初步确定为平均高度517 km的太阳同步轨道, 卫星设计寿命3年. CHAT技术指标: 空间分辨率1", 像元光谱分辨率0.05 Å, 全日面光谱扫描时间60 s.

进展: 太阳探测双超平台技术试验卫星于2018年年中通过了工程立项综合论证评审, 预期很快会获得国防科工局立项批复. 如一切顺利, 卫星将于2020年前后发射.

(3) SRALF任务

科学目标: 空间甚低频观测阵(Solar Radio Array at Extremely Low Frequency, SRALF)将填补甚低频太阳射电天文科学空白, 打开新的天文学探测窗口, 可以实现对从太阳附近到地球磁层空间附近的太阳风的连续观测. 也可研究宇宙线成因、银河电离氢特性、脉冲星、空间粒子流、AKR等太阳系内射电现象等.

初步方案: SRALF拟在合适的轨道(从绕地、日地系L2点、月地系L2点、或绕月等中选择)上使用不少于3个航天器进行编队或准编队飞行, 每个航天器上安装简单天线接收宽视场信号, 单天线数据可直接用于时变研究, 多天线数据经过干涉处理得到高分辨天图.

进展: SRALF在“十一五”期间曾获国防科工委民用航天预研项目支持, 开展了甚低频观测仿真计算和样机试验, 认为我国现有技术水平能够达到研制要求. 在“十二五”早期深空探测计划论证时, SRALF被列入太阳深空探测计划第二批项目, 当时提出在2025年左右发射.

(4) SPIES任务

科学目标: 太阳磁场立体测量(Stereoscopic Polarization Imagers for Explosive Sun, SPIES)旨在国际上第一次实现准确测量太阳的矢量磁场, 从而有效

推动国际太阳物理及相关领域研究水平的突破和空间环境监测及预报水平的飞跃性的进步, 实现我国空间天文观测尤其是深空探测的跨越式发展.

初步方案: SPIES用3颗同样的绕日飞行的小卫星张开一定的角度(15°–20°)立体观测太阳圆偏振光, 同时测得太阳圆面上沿视线方向的磁场, 从而在国际上第一次实现准确测量太阳的矢量磁场.

进展: SPIES曾获得中国科学院空间科学预先研究第一批项目支持, 完成了概念性研究. 正在寻求进一步推进的机会.

(5) LASGA任务

科学目标: 大面积太阳伽马射线谱仪(Large Area Solar Gamma-ray Spectrometer, LASGA), 旨在通过对太阳宽能段伽马开展高灵敏度和高能量分辨探测, 研究耀斑加速高能电子和高能离子的物理机制和过程.

初步方案: LASGA的几何面积为1600 cm², 能量范围10 keV–2.5 GeV, 能量分辨率2.8% @ 662 keV.

进展: LASGA经过多轮竞争, 被列入中国空间站空间科学和应用第一批舱外实验项目候选. 后由于项目安排的原因, 没有继续推进.

(6) MSSO任务

科学目标: 多尺度太阳光谱天文台(Multi-scale Solar Spectral observatory, MSSO)旨在全谱段观测太阳及从紫外和软X射线波段对大尺度日冕结构进行光谱成像观测, 揭示不同波段太阳辐射的关系及外日冕形态和变化规律.

初步方案: MSSO计划由太阳全谱探测仪、光谱型日冕仪、大视场白光偏振日冕仪等组成.

进展: MSSO概念性研究入选中国科学院空间科学战略性先导科技专项(II期)预先研究项目, 研究周期为2018年1月至2019年12月.

(7) 太阳极轨对偶探测任务

科学目标: 太阳极轨对偶探测拟通过两个完全一样的太阳极轨卫星, 在对偶位置(黄道坐标系下, 黄纬相错180°)上从两个不同方向对太阳同时进行观测. 首次从高角度详细得到太阳极区的磁场特征和各种活动现象, 以前所未有的视角研究太阳磁场的整体特征、太阳活动的全球分布特征和太阳风的起源与演化.

初步方案: 太阳极轨对偶探测任务载荷包括全日面磁场望远镜、全日面极紫外偏振观测望远镜、行星际日冕仪、高精度太阳风原位探测系统等.

进展: 太阳极轨对偶探测概念性研究入选中国科学院空间科学战略性先导科技专项(II期)预先研究项目, 研究周期为2018年1月至2019年12月.

4.4 计划任务实施路径建议

“太阳显微”和“太阳全景”计划可以认为是一个整体, 前者侧重太阳表面细节的观测, 后者侧重太阳整体行为. 它们是当代太阳研究的两个重要方面, 彼此具有天然的联系, 它们的同时实施对于理解太阳小尺度活动与大尺度结果的物理联系至关重要. 因此, 路径的设计要强调这两个计划的匹配与互补, 同时也考虑到空间科学国家不同任务之间的衔接, 特别是与国家深空探测计划的关系.

从发射卫星的角度而言, 各5年期的计划如下.

2016–2020: 争取立项和实施DSO, ASO-S, CHAT任务, 赶在太阳活动第25周峰年前夕完成研制; 另评估和遴选1–2个新的太阳探测卫星计划作为背景型号任务;

2021–2025: 发射1–3颗太阳探测卫星(如ASO-S, CHAT等); 运行发射的卫星, 获取太阳磁场、太阳耀斑、日冕物质抛射观测资料, 组织相关研究; 另完成1–2项太阳探测卫星背景型号任务, 推动工程立项;

2025–2030: 在运行已发射卫星的同时, 实施并发射1–2颗新的太阳探测卫星, 开启下一代太阳空间探测任务.

在项目安排的优先级方面, 建议在中国科学院空间科学先导专项的框架内, 优先考虑支持中小型太阳探测计划; 在国家深空探测计划的框架内, 优先考虑支持大中型太阳探测计划; 在其他机遇渠道, 优先考虑功能单一的搭载项目. 在每一个框架内, 任务的优先级考虑因素包括: 科学目标先进性、研究基础、技术基础、人员队伍以及国内太阳物理界的介入程度等. 特别是, 如果我国首个太阳探测卫星, 国内太阳物理界仅有少数人介入, 或甚至没有太阳物理学家介入, 那么发射太阳探测卫星的预期目标

不可能实现. 综合这些因素, 在空间太阳物理领域, 近期我们将DSO和ASO-S分别列在国家深空探测计划框架下和中国科学院空间科学先导专项的框架下的最高优先级.

我们看到, ASO-S卫星已经于2017年年底获得了中国科学院的正式立项, 实现了中国太阳探测卫星立项“零”的突破, 以后将逐步形成每5年发射1颗中小型太阳探测卫星、每10年发射1颗大型太阳探测卫星的规模, 其中包括争取其他随机任务的机会(如CHAT), 最终走上可持续发展的轨道.

5 支撑计划的技术手段

在未来相当长一段时间内, 我国太阳空间探测的重点会集中在“一磁两暴”的科学目标方面. 这一科学需求决定了发展技术的路径主要是围绕对太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射观测技术的研究, 当然技术手段还包括发展策略、人员队伍建设、体制机制配套等诸多方面.

在具体技术方面, 需要进一步大力发展载荷关键技术研究. 中国科学院空间科学先导专项从2009年开始先后启动了第三批空间科学预先研究项目, 其中支持了“太阳显微”和“太阳全景”方向载荷关键技术研究共13项. 进一步的支持一方面可以是前期支持项目的深化研究, 也可以是针对国际上新的探测技术发展态势所做的研究, 比如, 中性原子成像探测技术、高能阵列探测技术、磁场偏振测量新技术、日冕磁场观测技术、紫外偏振测量技术、高能辐射偏振测量技术、红外探测器技术、紫外波段探测器技术、极紫外电流片诊断技术、大数据处理技术等. 这些技术的预先研究, 对太阳空间探测任务的实现至关重要.

在发展策略方面, 首先坚持自主开发为主, 同时重视广泛的国际交流与合作, 也就是说自主创新同国际交流合作相结合, 在这里自主创新必须是第一位的, 没有自主创新, 永远也不可能使我国进入空间太阳物理的强国行列; 其次是空间探测与地面探测相结合, 相辅相成, 发挥好我国地面设施的作用, 将这些地面观测设备与空间探测计划在科学目标方面

有机地结合起来,使我国太阳空间计划更加体现自己的特色和优势,极大地促进我国太阳物理学科的发展;三是理论研究与技术探索相结合,没有坚实的理论研究,我们的空间太阳物理计划将失去方向和后劲;四是强化优势领域与拓展相结合,虽然我们的优势在“一磁两暴”,但对新的学科生长点要时刻关注,并采取相应的技术措施;五是抓住各种机会性任务,如国家空间站计划、军方项目、航天领域技术试验的搭载机会、国际合作机会等等,只要是有利于我国太阳物理的发展,都要积极争取;六是加强与空间物理界的合作,从总体上把握太阳物理与空间天气的联系,尝试提出联合计划,共同推进。

在人员队伍建设方面,无论在国内还是在国外,实施大型科学计划最关键的制约因素就是研究队伍,它构成了科学计划成败的核心,也是世界各国在组织研究计划时要考虑的首要问题.我国太阳物理领域的研究队伍,以现阶段而言,无论是在研究方面还是在技术方面,应该说是可以承担DSO和ASO-S任务的.但也有队伍规模偏小、缺乏空间仪器研制经验、以及缺少空间项目管理经验的问题.人员队伍是靠项目来培养和维持的,因此,持续不断的项目来源是队伍建设的关键,这包括预先研究项目、关键技术研究项目、背景型号项目、卫星工程项目.保持一定的太阳探测卫星研制和发射频率,对于建立和维持一支高水平的技术研究队伍是必须的.我们因此建议每5年发射1颗中小型太阳探测卫星,每10年发射1颗大型太阳探测卫星.

在体制机制配套方面,由于太阳空间探测属于需要国家重大投资的大型项目,这决定了任何太阳空间探测计划都应该是国家层面的,强调国家目标,从根本上淡化或根除单位利益,切实鼓励和加强不同单位之间的合作,使之真正成为太阳物理界的共有的项目.另外,建议多渠道争取经费(比如国家自然科学基金委的仪器专项),一视同仁地对待不同渠道经费支持的各类项目,纳入统一的认可系统,在遴选项目方面给予公平的待遇.

6 2030以后发展展望

中国太阳物理界目前面临的主要问题是:具

有国际名列前茅的研究成果,但对太阳空间探测硬件的贡献为零.这是一对矛盾.随着中国的综合国力越来越强,这一矛盾变得越来越突出,成为一个非常敏感的问题.中国太阳物理学家强烈呼吁空间科学管理者和决策者予以充分关注,尽快改变中国没有空间太阳探测卫星的历史,在规划落实方面给予优势学科以及关乎国计民生的太阳物理以发展优先权.我们迫切期望,2016–2030年的空间太阳物理规划的大部分内容能够实现,这样就有基础展望2030年以后的学科发展.

到2030年左右,依靠中国国力的大幅度提高和依托中国强大的航天能力,中国空间太阳物理领域将具有在多波段上综合探测太阳的能力.通过DSO,ASO-S和CHAT等任务的实施,中国太阳物理界成功融入国际太阳空间探测“俱乐部”,并成为核心成员;对太阳物理研究产生众多原创性重要贡献,并得到国际上的广泛认可;空间太阳物理研究体系和人员队伍的整体水平进入世界先进行列,涌现出多位在国际上有重要影响的科学家.

预计2030年之后,中国太阳物理界将逐步进入国际太阳空间探测强国的行列.届时,国际合作将主导太阳物理领域超大型项目,中国将以提出者的身份全面介入国际太阳物理领域超大型项目,领导若干国际重大太阳物理研究计划,不断在太阳基础科学研究方面取得重大突破性成果.

2030年之后,空间太阳物理的远景科学项目可能包括:大型空间太阳全波段天文台、编队飞行太阳干涉望远镜阵列、太阳多视角卫星观测、太阳抵近观测等,这些空间计划瞄准的科学问题可以概括成:在前所未有的高空间分辨率、高时间分辨率、高谱分辨率、宽波段覆盖范围、大视场、全日面覆盖等观测条件下,认识太阳活动的规律和本质,并最终为空间天气预报,以及理解宇宙类似现象提供坚实的基础.同时,也期望对太阳物理中的一些基本问题(如日冕加热)取得观测和研究上的突破.

7 结束语

空间太阳观测是推动太阳物理研究的主要动力.50多年来,国际上共发射了70多颗专门的或有

关的太阳探测卫星, 目前就有约10颗太阳探测卫星在轨运行. 利用空间观测资料, 开展太阳物理研究, 填补了地面观测的缺陷, 早已成为太阳物理研究的主流.

最近几年以及在可以预见的将来, 国际上将有多个先进的空间太阳探测卫星发射运行, 其中包括Solar Orbiter, Parker Solar Probe等近日探测计划. 可以预计, 空间太阳物理研究将呈现新一轮空前繁荣的景象. 除了美国、欧洲、俄罗斯、日本等国家外, 印度将于2021年发射太阳探测卫星, 走在了中国的前面.

我国太阳物理工作者从20世纪70年代就提出要发射中国自己的太阳探测卫星, 几经波折, 至今我国仅有一个太阳探测卫星获得工程立项. 与此相对照, 我国基于空间探测资料所开展的太阳物理研究成果, 在国际上却名列前茅. 发射中国自己的太阳探

测卫星, 建立空间太阳物理研究体系, 比以往任何时候都显得迫切和时机成熟.

“十三五”是中国发展太阳空间探测的关键时期. 如果我们重点关注对太阳活动的观测和研究, 那只有在“十三五”工程立项, 才有可能在太阳活动第25周峰年的前夕完成卫星的研制, 以赶上对太阳活动第25周峰年的观测. 这一时间上的迫切性, 应该在我国太阳物理工作者与空间科学卫星计划的决策者和管理者之间达成共识.

在“十三五”期间, ASO-S卫星的立项使得中国太阳物理在卫星工程立项方面取得了“零”的突破; 我们预期并期待在“十四五”早期实现我国太阳卫星空间观测“零”的突破; 进而形成空间太阳物理研究的完整体系, 达到每5年发射1颗中小型太阳探测卫星、每10年发射1颗大型太阳探测卫星的规模, 跨入空间太阳物理领域国际先进行列.

致谢 感谢中国科学院空间科学战略性先导科技专项经费的支持. 向方成院士、汪景琇院士、吴季、孙丽琳、范全林、曹松、丁明德、邓元勇、张军、张枚、林隽、屈中权、刘忠、常进、季海生、刘四明、黎辉、宿英娜、封莉等对本文有帮助的人表示感谢.

参考文献

- 1 Gan W Q, Huang Y, Yan Y H. The past and future of space solar observations (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42: 1274–1281 [甘为群, 黄宇, 颜毅华. 太阳空间探测的过去与未来. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 1274–1281]
- 2 Zhang N, Tang H S, Chang J. Preliminary observing achievements of super soft X-ray detector and γ -ray detector onboard Shenzhou 2 (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2001, 42: 351–356 [张南, 唐和森, 常进. 神舟二号飞船搭载的超软X射线探测器和 γ 射线探测器初步观测结果. 天文学报, 2001, 42: 351–356]
- 3 Ma Y Q, Wang H Y, Zhang C M, et al. Gamma-ray burst events observed by SZ2/XD in 2001. In: *Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference*. Trukuba, Japan, 2003. 2765
- 4 Wu J, Sun L L, You L, et al. 2016–2030 Space Science Planning Research Report (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016 [吴季, 孙丽琳, 尤亮, 等. 2016–2030空间科学规划研究报告. 北京: 科学出版社, 2016]
- 5 Committee on a Decadal Strategy for Solar and Space Physics. *Solar and Space Physics: A Science for a Technological Society*. Washington DC: The National Academies Press, 2012
- 6 Schrijver C J. Publication Statistics on the Sun and the Heliosphere. *Sol Phys*, 2016, 291: 1267–1272
- 7 Gan W Q, Xue S J. Space astronomy in China: 2002–2004. *Chin J Space Sci*, 2004, 22(Suppl): 99–101
- 8 Gan W Q. Space astronomy in China during 2004–2006. *Chin J Space Sci*, 2006, 26(Suppl): 76–78
- 9 Gan W Q. Space astronomy in China: 2006–2008. *Chin J Space Sci*, 2008, 28: 424–425
- 10 Gan W Q, Zhang S N, Yan Y H, et al. Space astronomy in China: 2008–2010. *Chin J Space Sci*, 2010, 30: 424–426
- 11 Zhang S N, Yan Y H, Gan W Q. China's space astronomy and solar physics in 2011–2012. *Chin J Space Sci*, 2012, 32: 605–617
- 12 Gan W Q. Space solar physics in 2012–2014. *Chin J Space Sci*, 2014, 34: 563–564
- 13 Gan W Q. Space solar physics in 2014–2016. *Chin J Space Sci*, 2016, 36: 636–638
- 14 Gan W Q, Fan Q L. Space solar physics in 2016–2018. *Chin J Space Sci*, 2018, 38: 662–664

Prospect for space solar physics in 2016–2030

GAN WeiQun^{1*}, YAN YiHua² & HUANG Yu^{1*}

¹*Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China;*

²*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*

After a brief review on the recent solar physics and the status of the international space solar observations, together with analyzing the current status in China, we elaborate the strategic studies on Chinese space solar observations. This study focuses on the more feasibility strategy goals of Chinese space solar observations until 2030. Several collected space solar missions belonging to Solar Microscope Programme and Solar Panorama Programme have been introduced, respectively. The road map and implementation strategy of space solar physics have been proposed.

solar physics, space physics, space mission

PACS: 95.55.Ev, 95.55.Fw, 96.60.-j

doi: [10.1360/SSPMA2018-00301](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00301)