



太阳空间探测的过去与未来

甘为群^{①*}, 黄宇^①, 颜毅华^②^① 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008;^② 中国科学院国家天文台, 北京 100012

*联系人, E-mail: wqgan@pmo.ac.cn

收稿日期: 2012-07-30; 接受日期: 2012-09-05; 网络出版日期: 2012-12-10

国家自然科学基金(批准号: 11078025)资助项目



摘要 在简要回顾国际太阳空间探测历史的基础上, 结合我国太阳空间探测的现状, 重点阐述了我国天文界近年来开展太阳空间探测规划研究情况, 并就未来发展, 简要介绍了规划中拟开展的深空太阳天文台、先进天基太阳天文台、空间甚低频观测阵、立体观测太阳磁场、高分辨太阳 X 射线成像望远镜、以及空间站候选项目—高灵敏度太阳高能辐射探测等计划。

关键词 太阳物理, 空间探测, 卫星计划

PACS: 96.60.-j

doi: 10.1360/132012-658

1 引言

由于地球大气的吸收, 电磁波中只有很窄的波段可以穿透地球大气, 从而可以在地面上进行天文观测, 这包括光学、近红外和部分射电波段, 而对 γ 射线、X 射线、紫外和远红外等重要波段, 我们无法在地面对其进行观测, 必须到几十至几百公里的高度以上利用高空气球、火箭和人造卫星进行天文观测。所谓“空间天文”, 就是特指利用各种空间探测技术所获得的观测数据开展的有关天文现象的研究, 以及为实现这些观测所采用的空间探测技术研究。由此可见, 空间天文是伴随着卫星的出现而诞生的一门新兴的学科。除了不受地球大气吸收和干扰对红外、紫外、X 射线、 γ 射线等波段进行天文探测, 即使在光学波段, 空间探测也显示无比的优越性, 它能

够克服地球大气的抖动, 在角分辨率上达到仪器的衍射极限。空间观测还可以克服地球的昼夜变化和天气的限制, 进行长时间的连续观测。此外, 空间探测在尺度上也具有无比的优越性, 如空间射电甚长基线探测、空间引力波探测等。

作为空间天文的先驱, 空间太阳探测在空间天文学科中扮演重要角色, 许多空间天文的探测技术, 首先是在对太阳的空间探测中得到试验验证。空间太阳探测结果也大大推进了人们对太阳的认识。由于太阳是唯一一颗可以在所有参数上(包括时间、空间和波段)进行高分辨率观测的恒星, 而且是唯一一颗可以进行局地高能粒子流和物质流探测的恒星, 对太阳空间探测的意义已经突破太阳物理本身, 而具有广义的天体物理意义。同时, 太阳的变化深刻地

引用格式: 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

Gan W Q, Huang Y, Yang Y H. The past and future of space solar observations (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 1274–1281, doi: 10.1360/132012-658

影响着地球上的生命,太阳光度的长期变化导致地球上的冰期,太阳活动 11 年周期所产生的剧烈爆发严重影响近地空间环境,会使通讯中断、卫星失灵、甚至给地面电力设备和输油管道带来灾害性影响.因此,对太阳的空间探测近年来受到越来越多的关注.

自上世纪五十年代末第一颗人造卫星上天以来,五十多年间,世界主要空间大国共发射与太阳观测直接有关的卫星 60 余颗.本文简要地回顾国际上太阳空间探测的历史、现状和未来的发展趋势;对比国际太阳空间探测发展的情况,重点探讨我国天文界太阳空间探测发展的道路;结合空间科学中长期发展规划研究,简要介绍规划中提出的一些太阳空间探测计划.

2 太阳空间探测的历史

太阳空间探测包括:火箭探测、气球探测、卫星探测.火箭探测起始于上世纪四十年代第二次世界大战结束之后,当时美国利用从德军缴获的 V2 火箭开展了系列空间探测试验,包括得到第一张太阳紫外光谱照片,以及首次测到来自太阳的 X 射线辐射^[1].虽然火箭探测的主要问题是时间太短,一般仅 5 到 15 分钟,但它在试验一些新的技术中发挥了重要作用,至今仍在使使用,如将于 2012 年年底发射的 FOSSI(聚焦式太阳 X 射线成像望远镜)就将是火箭探测.气球探测也是太阳空间探测的常用手段,它的飞行高度虽然比火箭低,但它持续的时间可以从数小时到数周.1958 年首次测到太阳耀斑硬 X 射线发射,就是气球观测的结果.现在一些卫星在计划实施之前,往往要开展气球观测试验,如 RHESSI 卫星之前,开展了一系列高纯锗探测器性能气球探测试验^[2].将于 2013 年发射的 GRIPS(太阳耀斑 γ 射线偏振成像仪)也是气球探测试验.

太阳空间探测的主体是卫星探测.表 1 列出了过去以及目前正在轨运行的与太阳探测有关的主要卫星,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.有些可以观测太阳的非太阳卫星(如 CGRO、FERMI 等)以及以空间物理为主的卫星(如 GOES 系列)没有列入.

在表 1 所列卫星中,我们摘要介绍一些各个时代的代表性卫星.

OSO-7 (1971.09.29–1974.09.29): 即轨道太阳天文台第 7 号卫星,它共携带 4 个太阳探测仪器: X 射线和极紫外谱仪(2–400 Å)、白光日冕仪和紫外成像仪、硬 X 射线监视器(2–300 keV)、 γ 射线监视器(0.3–10 MeV).它载入史册的一个重要贡献是,首次测量到太阳耀斑 γ 射线谱线发射^[3].

SMM (1980.02.14–1989.12.02): 即太阳极大年任务卫星^[4],它的科学目标主要是研究太阳耀斑.它共携带 7 个载荷:白光日冕/偏振仪、紫外谱仪、软 X 射线谱仪、X 射线像谱望远镜、硬 X 射线谱仪、 γ 射线谱仪、以及射电流量监视器. SMM 在轨运行差不多十年时间,覆盖太阳活动 21 周和 22 周的上升相,利用 SMM 观测资料,对太阳耀斑等现象(尤其是高能辐射)开展了前所未有的研究.

Yohkoh (1991.08.30–2001.12.14): 即阳光太阳探测卫星^[5],也是一颗专门的观测太阳耀斑的卫星.它有 4 个主要载荷:软 X 射线望远镜、硬 X 射线望远镜、软 X 射线谱仪、宽波段谱仪. Yohkoh 的观测结果,将太阳耀斑的研究推向一个新的高度,尤其是其中的软 X 射线望远镜,在获取耀斑发生的形态方面,取得了巨大成功.

SOHO (1995.12.02 至今): 即太阳和日球层探测器^[11],是一颗用以研究从太阳内部深处到太阳风的综合性探测卫星.它有 12 个载荷:日冕诊断谱仪、电荷和元素同位素分析系统、高能粒子分析仪、极紫外望远镜、相对论性核子与电子实验仪器、低频振动检测仪、大角度日冕观测仪、麦克逊多普勒成像仪、太阳紫外辐射测量仪、紫外日冕观测谱仪、太阳风各向异性探测器、太阳发光度及重力振动研究装置. SOHO 卫星已经在轨运行 16 年以上了,其对研究太阳内部结构、太阳大气层的物理性质、磁场和日冕之间的关系、日冕物质抛射过程做出了重要的贡献,并且在轨期间发现了 2000 余颗彗星.向地面传回了大量的珍贵的研究图片.

RHESSI (2002.02.05 至今): 即 Reuven Ramaty 太阳高能谱成像仪^[7],是一颗专门的太阳高能辐射探测卫星.它首次采用高纯锗探测器,在 3 keV–15 MeV 实现前所未有的高能量分辨观测,既可以获得能谱,也可以得到像谱.截至 2012 年 6 月,基于 RHESSI 观测数据的研究论文已经达到 1650 余篇.

Hinode (2006.09.22 至今): 即日出太阳探测卫星^[8],主要用来研究太阳磁场与爆发式太阳能量释放

表 1 过去和目前正在轨运行的太阳有关探测卫星

Table 1 The past and current missions related to solar observations

序号	卫星名称	发射时间	结束时间	主要载荷任务	国家
1	Pioneer-5	1960.03.11	1960.06.26	旋转磁场测量计, 全方向正比粒子计数器, 宇宙辐射测量	美国
2	OSO-1	1962.03.07	1963.08.06	太阳 X 射线、 γ 射线探测器(50 keV–3 MeV), UV 谱测量	美国
3	OSO-2	1965.02.03	1965.11.06	太阳 X、 γ 射线、宇宙 γ 射线探测器, 太阳 UV 谱、热辐射系数测量	美国
4	Pioneer-6	1965.12.16	2000.12.08	太阳风、宇宙线测量, 静电分析仪, 相对论研究, 磁场测量	美国
5	Pioneer-7	1966.08.17	1995.03.31	太阳风、宇宙线各向异性测量, 静电分析仪, 磁场测量	美国
6	OSO-3	1967.03.08	1968.06.27	X 射线测量(7.7–210 keV), γ 射线测量(>50 MeV)	美国
7	OSO-4	1967.10.18	1971.12.07	X 射线测量(8–200 keV), γ 射线测量, UV 谱测量	美国
8	ESRO-2B	1968.05.17	1971.05.08	高能宇宙线电子、太阳 X 射线总流量、宇宙线质子测量	欧洲
9	Pioneer-9	1968.11.08	1983.05	宇宙线、磁场、宇宙尘埃测量, 等离子体波, 太阳风测量	美国
10	OSO-5	1969.01.22	1975.07	X 射线测量(14–254 keV), γ 射线测量, UV 谱测量	美国
11	OSO-6	1969.08.01	1972.01	X 射线测量(27–189 keV), γ 射线测量, UV 谱测量	美国
12	OSO-7	1971.09.29	1974.09.29	X 射线和极紫外谱仪, 白光日冕仪和紫外成像仪, 硬 X 射线、 γ 射线监视器	美国
13	ATM	1973.05.14	1979.07.11	白光、EUV 和 X 射线望远镜安装在空间站上观测	美国
14	Helios-A	1974.12.10	1985.02.18	太阳风速度和分布、磁场、等离子体波、宇宙线辐射、尘埃粒子散射测量	德美
15	OSO-8	1975.06.21	1978.10.01	X 射线测量(0.01–1 MeV), 软 X 射线背景测量(0.15–45 keV)	美国
16	Helios-B	1976.01.15	1979.12.13	太阳风速度和分布、磁场、等离子体波、宇宙线辐射、尘埃粒子散射测量	德美
17	Prognoz-6	1977.09.22	1978.03	磁场、粒子测量, 太阳 X 射线(2–511 keV), γ 射线(0.1–3 MeV), UV 谱仪	苏联
18	ISEE-3	1978.12.12	1997.05.05	太阳风、激波的测量, 宇宙线和太阳辐射测量, 彗星探测	欧美
19	P78-1	1979.02.24	1985.09.13	X 射线监视器, γ 射线、白光、EUV 谱仪	美国
20	SMM	1980.02.14	1989.12.02	日冕仪, X 射线像谱, γ 射线谱仪, UV 谱仪, 太阳辐射度观测	美国
21	Hinotori	1981.02.21	1991.07.11	X 射线像, 软 X 射线、 γ 射线监视器, 电子密度温度测量	日本
22	Ulysses	1990.10.06	2009.06.30	等离子体波、射电辐射、X 射线、磁场测量, 粒子、尘埃、宇宙线计数	欧洲
23	Yohkoh	1991.08.30	2001.12.14	软 X 射线、硬 X 射线成像观测, X 射线、 γ 射线谱仪	日本
24	Koronas-I	1994.03.02	2001.03.04	X 射线单色像, X 射线、 γ 射线谱仪, UV 辐射计	俄罗斯
25	WIND	1994.11.01	至今	静电分析仪, 等离子体、磁场、高能粒子测量, 射电辐射测量	美国
26	SOHO	1995.12.02	至今	多普勒光度计和磁图, UV 望远镜和光谱仪, 日冕观测, 粒子测量	欧美
27	ACE	1997.08.25	至今	宇宙线同位素、太阳风离子质量、高能粒子、太阳元素同位素、磁场测量	美国
28	TRACE	1998.04.02	2010.06.21	白光、UV、EUV 成像观测过渡区和日冕	美国
29	Koranas-F	2001.07.31	2005.12.06	X 射线、EUV 成像, X 射线、 γ 射线、UV 谱仪	俄罗斯
30	Genesis	2001.08.08	2004.04.22	太阳元素的收集和测量	美国
31	RHESSI	2002.02.05	至今	太阳高能谱成像观测(3 keV–15 MeV)	美国
32	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
33	Hinode	2006.09.22	至今	太阳光学望远镜, X 射线、EUV 成像观测	日本
34	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
35	Koronas-P	2009.01.30	2009.12.01	γ 射线望远镜, X 射线、UV、 γ 射线谱仪	俄罗斯
36	Proba-2	2009.11.02	至今	宽波段紫外谱仪, EUV 成像观测	欧洲
37	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
38	Picard	2010.06.15	至今	太阳辐射度、太阳形状观测	法国

之间的关系, 它有 3 个主要载荷: 口径 0.5 m 的光学望远镜、软 X 射线望远镜、以及紫外像谱仪(170–210 Å; 250–290 Å). 其光学望远镜的磁场测量精度为 1–5 G (纵场)和 30–50 G (横场).

SDO (2010.02.11 至今): 即太阳动力学天文台. 其主要科学目标是: 研究三维日冕动力学结构、高精度向量磁场和速度场、高能粒子辐射和源区、各种波的形成及太阳辐射测量. 它有三个载荷: 太阳外层大

气成像(AIA, 10 个波段全日面高分辨成像)、磁场和流场测量(HMI, 全日面 1"分辨率的光球矢量磁场)、极紫外变化高分辨测量(EVE).

在过去和目前尚在轨运行的这些卫星中, 我们从卫星的规模上看到, 有小卫星、中等规模的卫星和大卫星之分. 通常小卫星的功能比较单一, 花费也较少, 如 RHESSI 卫星, 它仅专门用来观测太阳高能辐射, 研制总费用不到 1 亿美元. 大卫星通常是一个综

合性的天文台, 有多个科学目标, 同时进行多个物理量的测量, 像 SOHO 卫星, 它上面共有 12 台载荷, 耗资 20 亿美元. 还有一些特色十分明显的卫星, 如 STEREO, 它有两个同样的卫星组成, 分别从两个角度立体地观测太阳, 从而得到太阳活动现象的三维结构, 解决具体的重要科学问题. 另外, 发展系列性卫星, 也是太阳空间探测的一个重要模式, 像日本, 在 1981 年发射了旨在观测太阳耀斑的 Hinotori (火鸟) 卫星, 1991 年发射了 Yohkoh (阳光) 卫星, 把对太阳耀斑的观测水平提高了一个台阶, 2006 年又发射了 Hinode (日出) 卫星, 进一步发展了对日面局部磁场的高空间分辨观测, 体现了日本在太阳空间探测方面的连续性和系统性.

近 50 年的空间太阳探测可以分为三个主要发展阶段: 第一阶段是上世纪六七十年代对太阳活动和爆发进行低分辨流量探测, 这一阶段的主要特点是把太阳作为一个点源来观测, 重点关注对耀斑的观测; 上世纪八九十年代进入了第二阶段, 这个时期以 SMM、Yohkoh 和 SOHO 为代表, 在提高分辨率的同时, 开始关注成像观测, 把观测分辨率提高到几个角秒到 10 个角秒的水平, 并进一步注重对太阳活动周的研究; 第三阶段从本世纪初开始, 大幅度提高观测的分辨率(包括能量分辨率、时间分辨率、空间分辨率), 既注重太阳局部高分辨成像, 也注重全日面成像, 尤其强调多波段观测, 高精度磁场测量也受到广泛的关注.

3 未来太阳探测卫星

除了目前天上正在运行的卫星, 国际上还有一系列的太阳空间探测计划, 表 2 列出这些计划中的项目, 它们中有些项目已经基本确定, 正在实施当中, 有些还在推进阶段.

这里, 我们简要介绍两个卫星计划.

Solar Orbiter: 即太阳轨道探测器. 它将进入距太阳近地点为 45 个太阳半径的太阳椭圆轨道, 实现近距离对太阳高纬度地区到极区的观测, 将以史无前例的高精度从可见光到 X 射线的极宽的波段范围对太阳大气进行成像观测, 以及开展局地探测. 其科学目标是研究太阳风的动力学特性, 利用日震学研究极区磁场和日冕的结构. 探测器计划于 2017 年发射, 经过 3.4 年的飞行进入最近点为 45 个太阳半径的

太阳椭圆轨道.

Solar-C: 是日本在成功实施 Hinode 卫星基础上, 预期在 2018 年发射的下一颗太阳探测卫星计划. 它的主要科学目标是理解太阳大气中三维磁场结构、MHD 波以及磁重联在太阳大气加热中的作用等. 它包含 3 个主要载荷: 口径达 1.5 m 的太阳紫外、可见光和红外望远镜(SUVIT, 主要用来测量光球和色球磁场)、高输出极紫外光谱望远镜(EUVS)、以及 X 射线像谱望远镜(XIT).

从这些未来的太阳探测计划中, 结合前面关于过去和正在运行的太阳探测空间计划, 我们可以总结出太阳空间探测的特点及未来的发展趋势: (i) 从数量上看, 太阳空间探测处在空前繁荣的态势, 并显示出良好的发展前景; (ii) 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; (iii) 太阳紫外光谱成像在多个卫星(如 SOHO、Hinode 和 SDO)上进行了观测, IRIS 和 Solar-C 也将开展这类观测, 基于光谱成像的研究将成为太阳物理研究的热点; (iv) SOHO 和 STEREO 卫星携带有观测 CME 的日冕仪, 但 SOHO 很快将结束寿命, 而 STEREO 也将很快完成历史使命, 如果 ADITYA 不能按计划于 2013 年发射, 则太阳活动 24 周峰年将缺少空间日冕仪观测, 对 CME 的研究十分不利; (v) 本来 CORONAS-P 可以在太阳活动 24 周峰年期间太阳高能辐射观测方面发挥重要的作用, 由于其非正常结束寿命(2009 年底停止工作), 这一任务是否能由 RHESSI 卫星担当还是疑问, 因为 RHESSI 卫星毕竟已经严重超过服役期, 太阳活动 24 周峰年将缺少对太阳耀斑高能辐射的探测; (vi) 近日探测是 2017 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; (vii) 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.

4 我国太阳空间探测状况

与国际上太阳空间探测相比, 我国处在明显落后的地位. 上世纪七十年代中后期, 我国自主提出旨在观测太阳的“天文卫星 1 号”计划; 上世纪 90 年代初开始, 提出并不断预研“空间太阳望远镜”计划; 2001 年初, 神州 2 号飞船成功搭载了旨在观测太阳 X

表 2 一些太阳空间探测的未来计划

Table 2 Some future solar missions

序号	计划名称	发射时间	主要任务	国家	状态 ^{a)}
1	IRIS	2012.12	高速率 UV 像谱观测, 0.3"空间分辨率	美国	✓
2	FOXSI	2012	火箭探测, <100 keV 聚焦成像, 空间分辨率 5"	美国	✓
3	Aditya-1	2013	白光日冕仪	印度	✓
4	GRIPS	2013	气球探测, 20 keV–10 MeV 成像	美国	✓
5	PROBA-3	2015	新技术验证卫星, 内日冕仪	ESA	✓
6	Solar Orbiter	2017	太阳风分析仪, 高能粒子、磁场测量, 光学、EUV、X 射线成像观测	欧洲	✓
7	Solar Probe+	2018	近日观测, 8.5 太阳半径探测外部日冕	美国	?
8	Solar-C	2018	1.5 米口径光学观测, X 射线、紫外谱成像观测	日本	✓
9	Interhelioprobe	2018	近日观测, 太阳(光学、X 射线、紫外成像等)和日球(粒子、波)观测	俄罗斯	?
10	SEE	2022	高能像谱、日冕仪观测	美国	?
11	SPARK	2022	磁场、光学、X 射线、 γ 射线、远红外观测	欧洲	?
12	Solar-D	2025	太阳极轨观测	日本	?

a) ✓表示基本确定, ?表示尚不确定.

射线和 γ 射线的“空间天文分系统”; 2006 年至 2008 年, 中法合作“太阳爆发探测小卫星(SMESE)”完成了方案阶段研究. 但这些项目中, 除了搭载神州 2 号飞船的“空间天文分系统”, 其余均没有发射上天. 从太阳探测专门卫星的角度而言, 我国至今仍是零记录.

“天文卫星 1 号”计划是上世纪七十年代后期提出并实施的, 当时星上五个主要探测器是: 太阳软 X 射线流气式正比计数器(0.2–2 keV)、太阳 X 射线正比计数器(2–20 keV)、太阳氢 Ly- α 辐射探测器、宇宙 X 射线源探测器(2–20 keV)以及掠入射式太阳 X 射线望远镜. 1983 年, 前四项仪器完成了包括所有环境模拟试验和系统联试的研制全过程, 各项性能指标达到了设计要求. 之后由于国家政策调整, “天文卫星 1 号”最终没有发射.

“空间太阳望远镜(SST)”计划的概念在 1992 年就已提出, 以后不断完善, 包括曾经走过与德国的合作历程(1995–1997). SST 的主载荷是一架口径为 1 米的光学望远镜, 其它载荷包括 4 个波段的极紫外望远镜、宽波段高能谱仪、射电频谱仪、以及白光监测望远镜等. 其科学目标是实现前所未有的达到衍射极限的高空间分辨率及太阳磁场观测. 该计划在“十五”期间被列为国家民用航天预研项目, “十一五”期间被列为国家民用航天进一步深化预研项目.

搭载神州 2 号飞船的“空间天文分系统”是我国天文界首次在卫星平台上实现对太阳 γ 射线的观测. 该分系统包括: 超软 X 射线探测器、硬 X 射线探测器和 γ 射线探测器. 在轨运行的半年多时间里(2001.01–2001.07), 观测到数以百计的太阳耀斑爆发, 其中有

约 20 例太阳 γ 射线暴. 所得观测结果与日本同期的 Yohkoh 卫星观测结果完全吻合.

2004 年提出的中法合作“太阳爆发探测小卫星(SMESE)”计划, 经过两年多的运作, 于 2006 年获得国家民用航天前期支持. 该卫星旨在太阳活动 24 周极大年, 从全新的观测波段组合, 同时观测太阳上两类最剧烈的爆发现象. 中方具体负责太阳高能辐射探测包、星上数据处理单元、以及地面应用系统. 但该项目在完成 A 相研究后, 由于法国航天局在项目安排方面的原因而中止.

横向地与日本相比较, 也许对我国发展太阳空间探测有所借鉴. 日本在空间太阳物理上走过了三步曲: Hinotori 卫星(1981–1991); Yohkoh 卫星(1991–2001); Hinode 卫星(2006 至今). 我国的“天文卫星 1 号”计划在提出时间和项目水平上与 Hinotori 相当, 甚至比 Hinotori 还要先进, 因为“天文卫星 1 号”提出的掠射式软 X 射线望远镜, Hinotori 没有. 遗憾的是, 后来“天文卫星 1 号”计划下马. Yohkoh 卫星奠定了日本在空间太阳物理方面的国际领先水平, 同时期的我国神州 2 号飞船上的“空间天文分系统”仅仅是在高能谱仪方面达到 Yohkoh 的水平, 而 Yohkoh 上另外三个仪器(软 X 射线望远镜、硬 X 射线望远镜、高分辨软 X 射线谱仪), 我们的能力尚达不到. 2006 年日本发射的 Hinode 在提出时间上与我国的 SST 差不多, 在仪器指标的先进性方面(如主光学望远镜的口径)尚不及 SST, 日本的 Hinode 在 2006 年已经上天, 遗憾的是, 我们的 SST 尚没有正式立项.

如此看来, 我国在空间太阳物理探测方面与国

际先进水平的差距在加大. 我们在计划上往往并不落后, 但在计划落实上则往往不能到位, 这使得我们坐失良机. 加强政府部门的空间项目规划, 显得迫在眉睫. 另外, 日本是倾全国太阳物理界的力量开展太阳空间探测, 即全国一盘棋, 而我国的力量显得比较分散, 这样不利于像 SST 这样大型空间计划的实施, 这涉及到我国科研体制问题. 日本在空间太阳探测方面还有一个成功的经验就是走国际合作的道路. Yohkoh 上 4 个仪器中的 2 个是与美国和英国合作的; Hinode 上 3 个仪器均是国际合作. 通过国际合作, 可以弥补与国际先进水平的差距.

5 我国太阳空间探测规划研究及实施情况

鉴于我国在空间探测(包括太阳空间探测)方面的落后局面, 有必要加强在国家层面上的总体规划研究. 为此, 中国科学院在 2006 年布置了空间科学中长期发展规划研究, 一期(2006–2008)研究规划到 2025 年¹⁾, 二期(2009–2011)研究规划到 2030 年²⁾, 以后又制定了至 2050 年的空间科技发展路线图^[9]. 在这些规划中, “空间天文和太阳物理”是六大主题之一, 在空间科学探测领域占有重要地位.

规划中提出的我国“空间天文和太阳物理”发展战略目标是: 在成功实施国家“十二五”空间天文和太阳物理规划, 取得空间天文和太阳物理卫星观测“零”的突破基础上, 走可持续发展的道路. 其基本思路是: 瞄准前沿科学问题, 加强优势领域, 适当扩大规模; 以高能天体物理观测和太阳物理观测为重点, 兼顾空间光学、射电、引力波、以及旨在搜索宇宙暗物质的高能粒子探测; 在天文卫星的发射数量、主导和实质性参与国际空间天文卫星计划、以及形成完整的空间天文和太阳物理研究体系方面, 均有大幅度提升. 同时, 通过空间天文和太阳物理探测计划的实施, 将牵引和带动若干航天和空间关键技术的发展, 将满足国家重大战略需求与发展空间天文结合起来. 经过约 10 年的快速发展, 在 2020 年左右使我国空间天文卫星能够对现代天文学的发展做出被认可的贡献; 在 2030 年左右, 使我国能够进入空间天文大国的行列.

在分解总体战略目标时, 共提出 3 个具体战略目标, 其中一个专门针对太阳空间探测的: 通过多波段太阳观测认识太阳活动基本规律, 为理解宇宙类似现象和预报空间天气服务.

为实现太阳空间探测的战略目标, 规划提出“太阳显微计划”、“太阳全景计划”, 以及与太阳空间探测有关的“日地联系计划”. “太阳显微计划”, 顾名思义, 就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. “太阳全景计划”就是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, 为空间天气预报服务提供物理基础. “日地联系计划”分属空间物理专题, 就是要探测和研究日地空间天气连锁变化过程及其规律, 认识太阳活动对地球空间和人类社会的影响, 实现空间天气预报的精确服务.

与以往规划不同, 中国科学院主持的这次规划研究更多地关注规划的落实. 在完成规划研究的同时, 就开始布置规划项目的实施. 2009 年和 2011 年分别布置了两期规划项目, 每期项目布置又分为卫星概念性研究和技术方案研究. 表 3 列出了分属“太阳显微”和“太阳全景”计划的 7 个预研项目.

针对至 2030 年的规划, 还制定了太阳空间探测发展线路图. 这里, 我们摘要介绍若干可能立项的候选项目.

DSO, 即深空太阳天文台. 它的主要科学目标是研究太阳的磁场, 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, 配合多波段观测, 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. DSO 的前身是 SST, 前后完成了总体、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等 7 项关键技术攻关. DSO 载荷包括: 磁场望远镜、紫外成像仪、H α 和白光成像仪、Ly- α 成像和日冕仪、高能辐射谱仪及粒子探测包、射电频谱仪等.

1) 甘为群, 张双南, 颜毅华. 空间天文与太阳物理中长期发展战略规划研究报告 I, 2008

2) 甘为群, 张双南, 颜毅华, 等. 空间天文与太阳物理中长期发展战略规划研究报告 II, 2012

表 3 规划 1 期和 2 期布置的太阳空间探测项目

Table 3 The pre-study projects supported in 2009 and 2011

序号	方向	名称	类别	时间
1	太阳显微	超高角分辨率 X 射线望远镜关键技术研究	技术方法	2009.11–2011.10
2	太阳全景	太阳磁场的立体观测	概念研究	2009.11–2011.10
3	太阳全景	大尺寸宽带太阳高能辐射成像谱仪	技术方法	2009.11–2011.10
4	太阳显微	空间磁像仪关键技术研究	技术方法	2011.10–2013.09
5	太阳显微	太阳硬 X 射线望远镜关键技术研究	技术方法	2011.10–2013.09
6	太阳全景	先进天基太阳天文台初步方案研究	概念研究	2011.10–2013.03
7	太阳全景	Ly- α 望远镜和日冕仪关键技术研究	技术方法	2011.10–2013.09

目前 DSO 已纳入国家深空探测计划, 争取“十二五”后期立项, 2018 年发射。

Kuafu, 即夸父计划。它由三颗卫星组成, “夸父 A”卫星位于日地连线上距地球 150 万公里的日地第一拉格朗日点(L1)处, 用来监测太阳活动的发生及其伴生现象向日地空间传播的过程; “夸父 B”包括的两颗卫星位于磁层极区, 主要观测目标是地球空间对太阳活动和行星际扰动的响应。 “夸父 A”实际上就是一颗太阳观测卫星, 它的主要载荷包括: 紫外全日面成像仪、日冕仪、太阳风仪器包、射电探测器、粒子探测包等。夸父计划目前已经纳入中国科学院空间先导专项第一批拟启动名单, 正寻求国际合作, 择机启动。

ASO-S, 即先进天基太阳天文台。它瞄准先进的“一磁二暴”科学目标, 即通过观测全日面磁场、耀斑和日冕物质抛射, 建立磁场变化导致太阳剧烈爆发的因果关系, 为空间天气预报提供物理基础。主要载荷包括: 全日面矢量磁像仪、硬 X 射线/ γ 射线望远镜、宽视场日冕仪和日面成像仪。它是一个中小规模的太阳峰年观测卫星, 计划 2013 年完成方案阶段研究, 之后进入背景型号阶段, 赶在太阳活动 25 周峰年前夕的 2020 年发射, 以期观测到一个完整的太阳活动周。

HOSHER, 即高灵敏度太阳高能辐射探测。这是搭载空间站的候选项目。它合理利用空间站在重量上的资源, 使探测有效面积比以往提高 20–50 倍, 从而可以探测到以往探测不到的微耀斑, 以及太阳高能辐射能谱的精细结构。它将采用新一代 LaBr3 闪烁探测器, 能量范围 10 keV–600 MeV, 并具有测量 γ 射线偏振和中子的能力。该项目如果能顺利入选我国空间站载荷, 将于 2018–2020 年发射, 可以在轨运行 8–10 年, 取得一个完整太阳活动周的观测资料。

SHARP-X, 即超高分辨太阳 X 射线成像。它基

于多针孔 X 射线衍射/干涉成像等先进技术, 通过伸杆相距约 20 m, 对太阳硬 X 射线辐射进行高空间(亚角秒)、能谱和时变分辨率、以及宽波段观测。如果原理样机得到充分论证, 争取在 2020 年左右发射。

SRALF, 即空间甚低频观测阵项目。它计划使用多站干涉的观测方式进行射电观测研究, 即使用位于第二拉格朗日点附近的多个子卫星上的多站接收进行干涉观测的方案, 实现从太阳附近到地球磁层空间附近的太阳风的连续观测。本计划预期“十二五”得到启动支持, “十三五”寻机实施, 也可争取纳入国家深空探测计划。

SPIES, 即太阳磁场立体观测。通过发射相距一定距离的卫星, 从三个方向同时测量太阳表面纵向磁场, 从而达到重构太阳矢量磁场的目的。这将是历史上首次实现太阳矢量磁场的直接推演观测, 对理解太阳磁场的起源和演化具有重要意义。已经完成概念性研究, 在“十二五”后期和“十三五”寻机实施, 也可争取纳入国家深空探测计划。

6 展望

无论是纵向比较国际上太阳空间探测的发展历史, 还是横向比较我国空间天文领域已经有若干立项的项目, 开展我国太阳空间探测都显得刻不容缓!

DSO 作为国家深空探测计划, 极有可能在近期立项, 机会难得。一旦立项, 务必集中我国太阳物理界的有生力量, 全力以赴。Kuafu 虽然是空间物理界提出的计划, 一旦立项启动, 太阳物理界应当全力配合。

除了大的太阳卫星探测计划, 我们也应该关注中小型太阳卫星探测计划, 它们花费少, 风险相对较低, 这对从未发射过专门天文卫星的我国, 也不失为一条发展途径。以科学目标作为牵引, 瞄准下一个太

阳活动峰年, 积极开展和推进 ASO-S 计划.

此外, 寻求一切可能的机会(包括空间站、卫星搭载、国际合作等), 积极推进 HOSHER、SHARP-X、SRALF 和 SPIES 等项目, 以及参加有关国际合作项目.

目.

我们期望, 我国的空间太阳探测能够在“十二五”期间立项 1–2 个卫星计划项目, 2020 年之前实现我国太阳卫星观测, 之后进入可持续发展阶段.

参考文献

- 1 甘为群, 王德娟. 太阳高能物理. 北京: 科学出版社, 2002
- 2 Lin R P, Curtis D W, Primbsch J H, et al. A long-duration balloon payload for hard X-ray and gamma-ray observations of the sun. *Sol Phys*, 1987, 113: 333–345
- 3 Chupp E L, Forrest D J, Highbie P R, et al. Solar gamma ray lines observed during the solar activity of August 2 to August 11, 1972. *Nature*, 1973, 241: 333–335
- 4 Bohlin J D, Frost K J, Burr P T, et al. Solar maximum mission. *Sol Phys*, 1980, 65: 5–14
- 5 Ogawara Y, Takano T, Kato T, et al. The SOLAR-A mission: An overview. *Sol Phys*, 1991, 136: 1–16
- 6 Domingo V, Fleck B, Poland A I. The SOHO mission: An overview. *Sol Phys*, 1995, 162: 1–37
- 7 Lin R P, Dennis B R, Hurford G J, et al. The reuven ramaty high-energy solar spectroscopic imager (RHESSI). *Sol Phys*, 2002, 210: 3–32
- 8 Kosugi T, Matsuzaki K, Sakao T, et al. The Hinode (Solar-B) mission: An overview. *Sol Phys*, 2007, 243: 3–17
- 9 中国科学院空间领域战略研究组. 中国至 2050 年空间科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009

The past and future of space solar observations

GAN WeiQun^{1*}, HUANG Yu¹ & YAN YiHua²

¹ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

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

After a brief review on the history of the international space solar observations, together with analyzing the current status in China, we elaborate in particular the recent strategic studies on Chinese space solar observations. Some candidates of the future missions are described, such as Deep-Space Solar Observatory (DSO), Advanced Space Solar Observatory (ASO-S), Solar Radio Array of Lower Frequency (SRALF), Stereoscopic Polarization Imager for Explosive Sun (SPIES), Super High Angular Resolution Principle for coded-mask X-ray imaging (SHARP-X), and High-sensitivity Observations of Solar High-Energy Radiation (HOSHER).

solar physics, space observation, satellite mission

PACS: 96.60.-j

doi: 10.1360/132012-658