



太阳的立体观测

季海生^{1*}, 汪毓明², 汪景琇³

1. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034;

2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;

3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

*联系人, E-mail: jihhs@pmo.ac.cn

收稿日期: 2018-08-29; 接受日期: 2018-11-12; 网络出版日期: 2018-12-29

国家自然科学基金(编号: NSFC4184200073)资助项目

摘要 本文分析了太阳物理研究的核心问题以及观测需求的发展趋势, 阐述了对于太阳的立体探测尤其是太阳磁场的立体观测在科学上的必要性, 预期了这样的观测对太阳物理研究将产生的重大影响. 并同时介绍了我国太阳物理界所达成的未来(2035/2050)太阳活动立体探测计划, 该计划将围绕三位一体的立体探测展开, 即立体观测太阳磁场、立体观测太阳高能辐射、立体多波段观测太阳耀斑三维结构和日冕物质抛射等.

关键词 立体观测, 太阳磁场, 太阳活动

PACS: 96.60.-j, 96.60.Hv, 96.60.Ly, 92.60.Vb

1 科学需求

太阳物理不仅是一门传统的天体物理学科分支, 也是一个处于天文学、空间科学、行星科学和地球科学之间的前沿交叉学科领域. 通过对太阳这一离人类最近的恒星的研究, 人类将最终了解宇宙天体磁场的起源、恒星磁活动周的演化规律及其形成的物理机制、恒星磁活动如何影响类地生命宜居环境和生命起源、如何成功预报太阳活动并防止特大型(重大)灾害性空间天气给人类带来的灾难性影响. 目前国际太阳物理领域以空间探测和地基大型望远镜联合观测为主导, 开始了全波段、全时域、

高分辨、多尺度、多视角和高精度探测的时代. 在未来的20–30年, 天体物理的很多基本问题、人类生存环境的演化问题以及外星生命(文明)的寻找将大大得益于太阳物理(包括空间科学)的突破性发展. 自20世纪90年代以来, 人类已经发射了数十颗卫星去探测太阳和人类赖以生存的日地空间环境, 主要的空间太阳探测器包括SOHO, TRACE, RHESSI, Hinode, STEREO, SDO和IRIS等. 由于上述空间观测资料的及时开放, 太阳物理的研究空前繁荣, 由此推进了对太阳物理前沿问题的理解, 也使其多年来一直是我国天文界的优势学科.

地球的尺度相对于其他天体与我们的距离来

引用格式: 季海生, 汪毓明, 汪景琇. 太阳的立体观测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 059605
Ji H S, Wang Y M, Wang J X. Stereoscopic observations of the Sun (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 059605, doi: 10.1360/SSPMA2018-00303

说非常渺小, 这形成了天文遥感观测(Remote Sensing)长期以来所固有的一个大的缺陷: 即在地球上甚至附近空间的任何两点对这些遥远天体的观测均不能构成有实质意义的立体观测, 即多视角观测. 所幸的是, 日地距离所造成的障碍可以征服. 太阳是离我们最近的恒星, 并且不仅是唯一可以被空间分辨的恒星, 也是唯一可以进行立体观测的恒星. 正如“ASO-S”卫星所提出的“一磁二暴”科学目标所彰显, 磁场在太阳物理乃至整个天体物理中都处于核心位置, 如果没有磁场, 宇宙将非常沉闷和单调. 太阳磁场的测量为我们理解宇宙中磁场的演化尤其是宇宙磁场的产生机制提供了极其重要甚至是唯一的借鉴. 太阳黑子的11年周期以及太阳的各类尺度的活动均与磁场密不可分. 太阳活动的能量来源于磁场“自由能”的突然释放, 因而测量太阳活动区磁场对于研究太阳活动的能量存储、转化和释放极为重要, 尤其是太阳活动中关键性的触发过程的最终解决极大依赖于对太阳磁场的准确了解. 我国国家天文台怀柔太阳观测基地磁场望远镜的成功观测和运行使得我国太阳物理观测和研究水平在长时间内一直处于世界太阳物理的前列^[2].

目前, 测量太阳磁场的原理主要是依靠光源处的磁场导致的塞曼效应. 如果从单点观测太阳磁场, 我们所测量的是沿着视线方向的磁场(纵场)和垂直于视线方向的磁场(横场). 对于横场测量来说, 精确度要比纵场测量低一个量级, 而且所测量的横向磁场的方向存在着一个180°的不确定性. 它是由塞曼效应测量磁场的一个内禀缺陷. 现阶段, 磁场的180°不确定性主要依赖一些假设的模型来克服. 因此, 目前观测的太阳磁场是先天不准确的, 这会导致许多重要的物理参数无法准确估计, 如电流、磁场螺度、磁自由能等, 制约了深入研究太阳活动的进行, 这样的测量也可能是导致太阳活动许多未解之谜难以破解的根本原因. 对太阳进行多视角偏振测量使我们可以直接利用简单的几何方法确定太阳磁场矢量的方向, 最理想的办法是有三颗不共面的卫星彼此之间张开一定的角度, 从三个不同的方向观测太阳的纵场 $B_{\parallel 1}$, $B_{\parallel 2}$ 和 $B_{\parallel 3}$, 通过完备的线性代数方程求解得到太阳表面的 B_x , B_y 和 B_z . 如果有张开一定角度的两颗卫星从两个不同的方向同时观测太阳

的纵场 $B_{\parallel 1}$ 和 $B_{\parallel 2}$ 和横场 $B_{\perp 1}$ 和 $B_{\perp 2}$, 除了个别的奇点之外, 太阳表面的 B_x , B_y 和 B_z 可通过如下代数方程得到

$$\begin{cases} B \cdot r_1 = B_{\parallel 1}, \\ B \cdot r_2 = B_{\parallel 2}, \\ |B \times r_1| = B_{\perp 1}, \\ |B \times r_2| = B_{\perp 2}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 r_1 和 r_2 是连接我们所关心的太阳表面某点和卫星连线的单位矢量. 奇点就是该点的矢量横场方向恰好与 r_1 和 r_2 所决定的平面共面, 但是这样的情况只是极少的点, 可通过内插等方法解决. 卫星张角的大小需要磁场望远镜的偏振测量精度和空间分辨率之间达到平衡, 对于 $\sim 10^{-4}$ 的偏振测量精度和1"的空间分辨率, 卫星张角可定为30°左右. 立体观测是目前直接确定太阳磁场矢量方向的唯一可靠的方法. 值得一提的是, 国际太阳物理学界于2017年10月16–20日在哥廷根召开了关于L5点立体观测太阳的专题研讨, 其中一个重要议题就是如何通过多视线方向使得太阳矢量磁场观测取得突破.

目前只能观测到太阳低层大气的磁场(主要是光球), 对于日冕磁场来说, 目前只能依据观测到的太阳光球磁场作为边界条件在无力场的近似下外推得到, 因而, 作为边界条件的光球磁场是否准确显得极为重要, 多视角偏振测量将给构建日冕磁场提供准确的边界条件. 此外, 由于日冕是光学薄的, 如果在单视线方向观测日冕磁场, 我们得到的磁场是视线方向的叠加结果, 多视角方向的立体观测日冕磁场将能够定量评估某一视线方向的叠加效应, 由此有助于对日冕磁场结构的诊断^[2].

飞离黄道面的多视角观测将有利于揭开太阳极区现象(高速太阳风、冕羽活动和喷流)的物理本质. 太阳极区磁场的观测对于理解太阳磁场起源和太阳活动周行为具有重要的意义. 由于极区的垂直方向与日地方向张开的角度太大以及极区磁场很弱, 太阳极区的矢量磁场一直未能够准确测量. 我国学者在国际上首先对极区矢量磁场进行了测量^[2]. 太阳极区的磁场及其活动是未来几十年太阳物理研究最能产生成果的地方之一. 为此, 人类一直梦想从太阳

极区上空实现对太阳的观测. 基于这样的远大目标, 国际上已经出现飞越太阳极区上空观测的计划, 譬如欧洲的Solar Orbiter计划^[1].

多视线方向的立体观测将有效观测射电辐射、X射线辐射以及高能粒子传播的各向异性. 太阳活动所产生的高能辐射和射电辐射是各向异性的, 不同方向对高能辐射的同时观测对于理解高能粒子的加速和传播过程至关重要^[2,3,4]. 太阳活动过程中具有非常复杂的三维结构, 如暗条、磁绳、磁环和磁场重联位形等, 多视线方向的立体观测将使得一个太阳爆发既是边缘事件, 又是日面事件. 我们极其需要多视角观测来探测它们的三维结构以便准确把握其中的物理过程^[3,5]. 同时, 多视线方向的立体观测将使得我们有效长期观测太阳活动区的演化. 传统的单视线方向对一个活动区只能观测13.5天, L5点的观测加上地球方向的观测将使得跟踪天数扩大至18天, 如果再加上L4点的观测, 这一天数将达到22.5天, 从而实现太阳自转周的覆盖率达到80%以上(图1).

多视线方向的立体观测将对太阳速度场进行更加准确的观测, 由此将带来日震学的飞跃发展. 日震学是观测到的太阳表面的声波振荡来探测太阳的内部结构和动态过程, 单视线方向只能观测一个方向的速度场. 多视线方向的速度场观测能够帮助的一

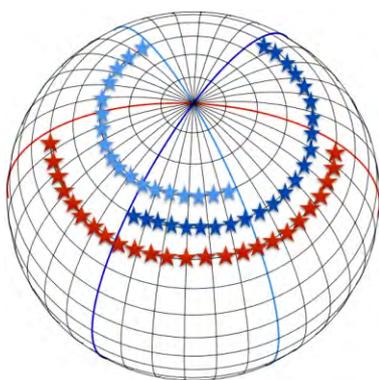


图1 (网络版彩图) L5, 地球和L4方向所能观测到的日面经度范围的俯瞰图. 浅蓝色、红色和深蓝色五角星分别代表L5, 地球和L4方向所能观测到的日面经度范围, 相应颜色的经度线分别代表相应的日面边缘

Figure 1 (Color online) Bird view of the Sun's longitudinal range that can be observed from L5, Earth and L4 respectively. Light blue, red and deep blue stars represent the corresponding ranges.

些课题包括太阳内部深层的立体日震学、大尺度对流模式的演化、活动区的浮现和演化和太阳黑子内的MHD波的传播和模物理. 关于太阳磁场起源的发电机机制仍富有争议^[2], 太阳内部深层的立体日震学将更加有利于观测太阳对流层底部的流动、差旋层的厚度及其随经度的变化.

对于太阳磁场以及太阳活动周期性的形成, 我们仍旧知之甚少. 尽管太阳发电机理论(Solar Dynamo)和太阳全球性对流(Global Convection)的模拟已经取得了长足的进展, 但是大部分的相关结果仍然缺少观测的支持, 因为太阳内部(包括对流层、辐射层和日核)的结构与动力学过程仍然没有被准确可靠地观测到. 过去20多年日震学的迅速发展, 提供了太阳较差自转的图像以及子午流的方向及速度, 但是这些结果仍然局限在纬度 60° 以下和对流层内^[1]. 众所周知, 太阳每个活动周期的磁场转换是从高纬度的极区开始的, 但是这些地区的自转以及子午流仍然是未知的, 而其未知的原因就是因为我们单一视角(即在黄道面上)的观测. 日震学研究日震波在太阳内部及表面的传播, 因此为了推算出极区(或者更深处)的太阳信息, 需要观测到传播通过极区(或者更深处)的日震波. 但是在 60° 以上地区, 由于foreshortening的原因, 我们仅能观测到空间分辨率很低而且横向振荡占据了很大贡献的振荡信号. 另外, 日震学中的临边效应(Heliioseismic Center-to-limb Effect)使得测量中的一个系统误差比子午流所引起的日震学信号要高出一个数量级^[2]. 以上为精确获得太阳极区与太阳较深处的结构与流场造成了难以克服的困难.

因此, 离开黄道面的观测也就成为推算出太阳极区自转和子午流的必然途径, 而极区自转和子午流是我们了解太阳磁场产生及其周期性的至关重要的一环. 另外一个立体观测的可能是不离开黄道面, 而是在地球轨道上但在地球之前或之后进行观测. 这种观测可以帮助我们推算出太阳更深层次(包括辐射层和日核)的结构与动力学过程, 也具有重要意义, 但是不能帮助我们更好地理解极区的情况. 另外, 黄道面内的单视向观测仅能观测到太阳振荡的一个分量, 这在高纬度地区以及横向振荡分量较大的太阳黑子区, 必然会造成一些计算分析中的误差.

多视角的立体观测(无论是黄道面内的或者离开黄道面的)必然能够帮助我们解决上述等问题,从而获得更多更有价值的新科学成果.

多视线的立体观测将极大地帮助人们理解三维日冕和太阳风结构的形成和演化规律,从而推动日冕加热、太阳风加速、太阳爆发结构的传播演化以及空间天气等方面的研究^[2,3].日冕和太阳风结构的立体成像观测能给出它们的电子密度分布、形态和演化过程,得到的三维运动学参数对于空间天气的预报至关重要.对它们的立体谱线观测还能给出多普勒速度的信息,从而获得温度、视向速度等参数,这也为准确地反演日冕温度和太阳风速度的三维分布提供了关键信息.多视线方向的立体观测将带来以上这些方面的观测突破,人类对太阳磁场的产生、太阳内部结构以及太阳活动的物理机制(包括粒子的加速过程)的理解一定会得到革命性的进展,由此对太阳物理和空间天气预报所产生的推动作用的意义非常深远.因而,以磁场探测为中心,到深空对太阳活动实施多波段立体探测是突破太阳观测瓶颈的至关重要的一个环节.

2 国内外发展趋势

经过在现代条件下上几个峰年的观测,从单视线方向对太阳的观测已经达到了相当充分的水平.例如,抚仙湖1 m口径的NVST(New Vacuum Solar Telescope)和大熊湖天文台的1.6 m口径的GST将太阳的高分辨率观测提高到了一个新的高度^[2,3].在未来,太阳观测的总体趋势如下:

1) 对于光学和红外窗口,以太阳基本磁结构为目标,在地面追求利用4 m以上的大口径的大型望远镜配合自适应光学追求高时空分辨率观测,譬如在建的4 m DKIST和预研中的中国8 m口径太阳望远镜CGST(Chinese Giant Solar Telescope)^[2,3];

2) 对于地面射电窗口,继续利用干涉和现代电子技术追求宽谱条件下的高时空分辨率观测,同时观测太阳大气多层结构.这方面的设备有刚刚投入使用的MUSER^[2];

3) 继续向空间发展,太阳的空间观测起始于自20世纪50年代特别是70年代,比较著名的太

阳卫星有OSO, Sky-Lab, Hinotori, Yohkoh, SOHO, TRACE, Ulysses, RHESSI, HINODE, STEREO, SDO和IRIS等^[2,3,4,5,6,7,8,9].我国从20世纪90年代开始预研“空间太阳望远镜”并进行了关键技术的攻关,已经完成了总体、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项技术攻关,这些关键技术无疑已经为我国的未来空间太阳立体观测奠定了良好的基础^[2].未来空间单视线方向对太阳的观测追求的是更高的分辨率、更宽的波段和更大的视场;或者是通过特定的关键科学目标而形成的巧妙的、前所未有的载荷组合,譬如已经得到正式立项的我国首颗观测太阳的卫星ASO-S,紧紧围绕“一磁二暴”,是国际上首颗集矢量磁场观测、耀斑和CME观测为一体的太阳观测卫星,预计2021年左右发射上天^[2,3].

4) 以Parker Solar Probe^[2,3]为代表的深入太阳大气层内的“触摸式”探测,直接测量日冕和太阳大气中的结构、能流、日冕加热、太阳风、CME初发和高能粒子的源头.

当前,太阳的空间观测除了追求高时空分辨率、宽的波段覆盖和大视场之外,有以下三类值得注意的立体观测或偏离日地连线(off-Sun-Earth-line)的观测趋势.

1) 高纬观测和抵近观测.在这一方面,欧洲宇航局(European Space Agency, ESA)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)曾经合作实施了Ulysses项目,通过几乎垂直于黄道面的轨道,飞越太阳南北极区,观测证实了太阳极区的高速太阳风.正在计划中的ESA Solar Orbiter将在0.23 AU处绕太阳飞行,其轨道与太阳赤道面的倾角将不断增大至30°,因而, Solar Orbiter的观测除了达到前所未有的高空间分辨率和实地测量内日球层之外,还会观测到高空间分辨率的太阳极区. NASA 2018年8月刚刚发射的Parker Solar Probe (PSP)将会飞近太阳仔细观察太阳高温大气,最近可飞到离开太阳表面610万公里的地方进行观测,预计这些观测将改写我们对于太阳高层大气以及太阳风的认识.中国科学院国家空间科学中心提出用于探测日地空间的行星际CME传播和演变的空

学卫星计划-太阳极轨射电望远镜计划(Solar Polar Orbit Radio Telescope, SPORT). SPORT计划的主要特点是卫星脱离黄道面进入太阳极轨,从太阳极区上空1-1.5 AU处对内黄道面内的高密度行星际等离子体云进行遥感探测,跟踪观测这些等离子体云的运动并做出预报,这有助于太阳物理研究并解决日地空间天气和环境的预报问题.

2) 远离日地连线在L4和L5日地引力平衡的多视角点观测. 在这一方面,已经出现了很多提议和专题研讨会,提议中的Lagrange和SELEX等项目属于此类. 依据我们早先的预研究初步结果,由于L4和L5与日地连线的夹角太大,与地面联合进行磁场立体观测并不适合. 此类观测非常适合于空间天气的研究和观测, L5点位于地球上游,对于空间天气预警有着独特的作用, L4点在地球下游,但由于行星际磁场的螺旋结构,刚好正对太阳上与地球保持磁连接的区域,能帮助人们准确理解空间天气效应的太阳和行星际源.

3) 视角不断变化的立体观测. 必须说的是Solar Orbiter和Parker Solar Probe组合起来也属于此类. 这一方向最具代表性的是NASA于2006年发射的STEREO双星, STEREO包括两颗相同的卫星,它们与地球一起一前一后在黄道面上绕太阳旋转,张开一定的角度从两个不同的方向观测太阳,从而实现太阳大气和爆发结构的立体观测. 但是STEREO只是人类尝试立体观测太阳的第一步,由于缺少偏振、速度场和磁场等至关重要的观测物理量,迄今为止, STEREO虽然取得了一系列里程碑式的成果,但绝大多数太阳物理(也是天体物理)中的科学难题依然没有得到很好的解决.

3 建议中的行动计划

从以上可以看出,太阳物理的观测与研究以及空间天气监测的能力建设方兴未艾. 太阳空间观测已经通过绕太阳轨道向全方位的立体观测发展,一个大的趋势将是脱离日地连线以及突破日地距离,密集实现多视角和近距离的常态观测. 因而,这也是未来几十年太阳空间观测发展的大势所趋. 在此背景之下以及在ASO-S的基础之上,中国太阳物理

学界提出深入预研围绕太阳磁场和爆发活动的三位一体的空间立体观测,即立体观测太阳磁场、立体观测太阳耀斑高能辐射、立体观测日冕物质抛射. 该规划既跟踪了国际前沿,又具有我们独具创新的思维. 磁场观测是天体活动研究的核心内容,通过围绕太阳磁场的空间立体观测项目的实施,我们的空间太阳观测将实现引领国际前沿的作用. 本规划将其通俗称为“环视一颗恒星(Circling A Star, CaS)”和“走近一颗恒星(Approaching A Star, AaS)”的观测. 脱离日地连线以及对太阳的近距离的深空观测需要克服多方面的技术难题,第一步需要将飞船发射到千万公里之外的L5点,第二步是近距离环绕太阳的极轨观测,这对于我国现有的火箭技术和遥测能力均产生了挑战;对实现科学目标对卫星和载荷的长寿命要求(>25年)和我国现有的技术能力提出了挑战. 走近太阳的观测对航天技术、卫星和载荷技术提出了更强的要求. 这些项目必将引领我国的深空探测,使我国成为航天强国.

本着全波段、全时域、高分辨、多尺度、多视角和高精度探测的基本要求,一个大的框架是在积极推动“先进地基太阳天文台(ASO-G)”建设,建立完备的天基和地基相结合的观测体系. 在本领域空间观测的发展路线图上,我们瞄准并锁定太阳物理观测在未来20年内的新的地平线-多视角偏振观测,其中包括太阳极轨观测,朝着这个方向勇于面对国际竞争,抢先拓展太阳物理观测的新的疆域,并由此在太阳磁场的起源和多时空尺度的演化规律这一总体科学目标上取得突破性进展,从而最终能够解释驱动太阳磁周期和剧烈太阳活动的原因.

基于以上给出的太阳物理领域发展的新趋势和新特点,未来的太阳物理空间观测新的地平线包括两个部分: CaS和AaS. 第一部分即CaS是期望在2035-2050年期间实施的项目,在这期间, AaS的项目必须得到充分的预研,在科学目标上应该远超过“帕克太阳探针”和“太阳环绕器”,并由此最终得到工程立项. 对于CaS,我们建议但不局限于如下计划: 到2035年,实现黄道面上多视角和多波段偏振测量和立体观测. 具体来讲,实现在L5和L4点的观测(CaS-L5/L4)与日地连线方向(CaS-E)所组成的空间立体观测. 到2050年实现太阳极轨观测(CaS-P),

由此实现太阳极轨、L5/L4点以及与日地联线的多点立体观测,即真正意义上的立体观测,精确确定太阳表面的矢量磁场,由此成为国际太阳物理空间观测的旗舰型项目.

CaS-L5/L4设计位于日地引力L5和L4点,其有效载荷需求为全日面太阳矢量磁场和速度场望远镜、全日面多波段紫外望远镜、日冕和日球层成像仪、X射线谱仪、射电探测器以及原位磁场和粒子探测器等.其成像空间分辨率达到1",成像观测的时间分辨率达到30 s,偏振测量精度达到万分之一,实现在地球上对太阳磁场、日冕、内日球层和局地环境的探测,同时对太阳射电暴、等离子体波和太阳风磁场进行本地测量.

CaS-E设计运行在倾斜的地球同步轨道E,其有效载荷需求为口径为1 m的太阳矢量磁场和速度场望远镜、多波段紫外望远镜、高能成像望远镜、日冕和日球成像仪、射电探测器以及粒子探测器等.其中的成像空间分辨率达到0.2",偏振测量精度达到万分之一,由于近似同步轨道非常有利于数据的传输,其成像时间分辨率可达到10 s量级.

CaS-P为太阳极轨卫星,设计卫星轨道距离太

阳约1 AU,与黄道面交角超过70°,实现太阳极轨、L5点以及与日地联线的三点立体观测.其有效载荷需求为全日面太阳矢量磁场和速度场望远镜、全日面单波段极紫外望远镜以及原位磁场和粒子探测器.其中的成像空间分辨率设计为2",成像观测的时间分辨率为1 h,偏振测量精度达到万分之一.由于极轨观测对于研究太阳活动周这一特殊的使命以及太阳极轨观测的难度,极轨太阳卫星和其载荷的寿命必须达到25年以上.

在CaS这一新的地平线计划里,我们所面对的是来自美欧航天强国激烈的国际竞争,因此,一方面我们在预研和立项方面必须争分夺秒,抢先拓展.另一方面,必须有自己的特点.我们设计的计划中的一个重要特点是“全景”与“显微”的结合,实现高分辨、多尺度、多视角和高精度探测以及相互之间的精巧组合.CaS-L5/L4和CaS-P均属于“全景”探测,结合CaS-E和“先进地基太阳天文台(ASO-G)”在地面的“显微”观测,能实现多视角观测.由于太阳物理与空间物理和空间环境的研究越来越密切,在顶层设计时,期待本规划和空间物理子领域的规划统筹考虑.

致谢 本文作者感谢审稿人提出的宝贵意见,这些意见促使我们继续了更多的科学上的思考和同行专家咨询.关于立体观测如何促进太阳发电机理论和日震学的发展,我们与北京师范大学毕少兰教授、北京航空航天大学姜杰教授以及斯坦福大学资深研究员赵俊伟博士进行了非常有益的讨论,相关的部分章节来自赵俊伟博士的撰写.

参考文献

- Zhang H, Sokoloff D, Rogachevskii I, et al. The radial distribution of magnetic helicity in the solar convective zone: Observations and dynamo theory. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 365: 276–286
- Solanki S. “L5 Consortium Meeting”, Max Planck Institute for Solar System Research, Göttingen, Germany October 16-20, 2017
- Deng Y, Wang J, Ai G. Vector magnetic field in solar polar region. *Sci China Ser A-Math*, 1999, 42: 1096–1102
- Marsden R G, Müller D, StCyr O C. Solar orbiter-close-up view of the sun. *Solar Wind*, 2013, 1539: 448–453
- Bale S D, Goetz K, Harvey P R, et al. The FIELDS instrument suite for solar probe plus. Measuring the coronal plasma and magnetic field, plasma waves and turbulence, and radio signatures of solar transients. *Space Sci Rev*, 2016, 204: 49–82
- Hassler D M, Rafkin S, Reitz G, et al. Space weather measurements from the surface of Mars with the RAD instrument on the Mars Science Laboratory. In: 41st COSPAR Scientific Assembly. Istanbul, 2016. 812
- Klassen A, Dresing N, Gómez-Herrero R, et al. Unexpected spatial intensity distributions and onset timing of solar electron events observed by closely spaced STEREO spacecraft. *Astron Astrophys*, 2016, 593: A31
- Wuelser J P, Lemen J R, Tarbell T D, et al. EUVI: The STEREO-SECCHI extreme ultraviolet imager. *Proc SPIE*, 2004, 5171: 111–122
- Howard R A, Moses J D, Socker D G, et al. Sun earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI). *Adv Space Res*, 2002, 29: 2017–2026
- Karak B B, Jiang J, Miesch M S, et al. Flux transport dynamos: From kinematics to dynamics. *Space Sci Rev*, 2014, 186: 561–602

- 11 Gizon L, Schunker H, Baldner C S, et al. Helioseismology of sunspots: A case study of NOAA region 9787. *Space Sci Rev*, 2009, 144: 249–273
- 12 Zhao J, Stejko A, Chen R. Effect of foreshortening on center-to-limb variations of measured acoustic travel times. *Sol Phys*, 2016, 291: 731–739
- 13 Wang Y, Wang B, Shen C, et al. Deflected propagation of a coronal mass ejection from the corona to interplanetary space. *J Geophys Res Space Phys*, 2014, 119: 5117–5132
- 14 Feng L, Wang Y, Shen F, et al. Why does the apparent mass of a coronal mass ejection increase? *Astrophys J*, 2015, 812: 70
- 15 Goode P R, Coulter R, Gorceix N, et al. The NST: First results and some lessons for ATST and EST. *Astron Nachr*, 2010, 331: 620–623
- 16 Liu Z, Xu J, Gu B Z, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 705–718
- 17 Liu Z, Deng Y Y, Ji H S, et al. Ground-based giant solar telescope of China (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42: 1282–1291 [刘忠, 邓元勇, 季海生, 等. 中国地基大太阳望远镜. 2012, 42: 1282–1291]
- 18 Tritschler A, Rimmele T R, Berukoff S, et al. Daniel K. Inouye solar telescope: High-resolution observing of the dynamic Sun. *Astron Nachr*, 2016, 337: 1064–1069
- 19 Yan Y, Zhang J, Wang W, et al. The Chinese spectral radioheliograph-CSRH. *Earth Moon Planet*, 2009, 104: 97–100
- 20 Kuznetsov V D. Solar and heliospheric space missions. *Adv Space Res*, 2015, 55: 879–885
- 21 De Pontieu B, Title A M, Lemen J R, et al. The interface region imaging spectrograph (IRIS). *Sol Phys*, 2014, 289: 2733–2779
- 22 Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. The atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO). *Sol Phys*, 2012, 275: 17–40
- 23 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
- 24 Howard R A, Moses J D, Vourlidas A, et al. Sun earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI). *Space Sci Rev*, 2008, 136: 67–115
- 25 Kosugi T, Matsuzaki K, Sakao T, et al. The hinode (Solar-B) mission: An overview. *Sol Phys*, 2007, 243: 3–17
- 26 Acton L, Bruner M, Lemen J, et al. The YOHKOH mission for high-energy solar physics. *Science*, 1992, 258: 618–625
- 27 Domingo V, Fleck B, Poland A I. The SOHO mission: An overview. *Sol Phys*, 1995, 162: 1–37
- 28 Handy B N, Acton L W, Kankelborg C C, et al. The transition region and coronal explorer. *Sol Phys*, 1999, 187: 229–260
- 29 Deng Y Y, Zhang H Q. Progress in space solar telescope. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 52: 1655–1659
- 30 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 [甘主群, 黄宇, 颜毅华. 太阳空间探测的过去与未来. 2012, 42: 1274–1281]
- 31 Gan W, Deng Y, Li H, et al. ASO-S: Advanced space-based solar observatory. *SPIE*, 2015, 9604: 96040T
- 32 Hassler D M. Solar probe: Mission to the sun. *Proc SPIE*, 2003, 4853: 180–186
- 33 Fox N J, Velli M C, Bale S D, et al. The solar probe plus mission: Humanity’s first visit to our star. *Space Sci Rev*, 2016, 204: 7–48

Stereoscopic observations of the Sun

Ji HaiSheng^{1*}, Wang YuMing² & Wang JingXiu³

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

²*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

³*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*

This article analyzes key problems in solar physics and the corresponding development trends in observation, and explains the necessity of stereoscopic observation, especially for the solar magnetic field. It can be expected that such kind of observations will have a significant impact on solar physics. At the same time, the article introduces the future (2035/2050) layout for solar stereoscopic exploration reached by the solar physics community in China. The plan includes stereoscopic observation of solar magnetic field, stereoscopic observation of high-energy radiation in solar activities, and stereoscopic observation of solar flares and coronal mass ejections in multi-wavelengths.

stereoscopic observation, solar magnetic field, solar activity

PACS: 96.60.-j, 96.60.Hv, 96.60.Ly, 92.60.Vb

doi: 10.1360/SSPMA2018-00303