

太阳磁场探测现状与展望

邓元勇 甘为群 颜毅华 杨尚斌 白先勇 侯俊峰 陈洁

Current situation and prospect of solar magnetic field exploration

Deng Yuanyong, Gan Weiqun, Yan Yihua, Yang Shangbin, Bai Xianyong, Hou Junfeng, Chen Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20200278>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间衍射望远镜自展开结构设计

Design of the spontaneous deployable structure for space diffractive telescope

红外与激光工程. 2017, 46(12): 1218001–1218001(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.1218001>

太阳同步轨道二维变姿态空间相机的外热流计算

Calculation of external heat fluxes on space camera with two-dimensional changing attitudes in sun-synchronous orbit

红外与激光工程. 2018, 47(9): 917008–0917008(10) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0917008>

稳恒磁场设计及电流强度对激光熔覆Fe55涂层微结构的影响

Design of steady-state magnetic field and effect of current intensity on microstructure of Fe55 alloy coating by laser cladding

红外与激光工程. 2017, 46(4): 406001–0406001(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0406001>

激光诱导三结砷化镓太阳能电池短路电流增大现象与机理

Mechanism of laser induced short circuit current increasing in triple-junction GaAs solar cell

红外与激光工程. 2017, 46(S1): 50–55 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.S106009>

大型太阳模拟器准直镜装调及辐照特性测试

Alignment of collimator and test of radiation characteristics for large solar simulator

红外与激光工程. 2019, 48(4): 417006–0417006(5) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0417006>

大光斑高均匀度发散式太阳模拟器设计

Design of divergence solar simulator with large irradiated surface and high uniformity

红外与激光工程. 2018, 47(4): 418005–0418005(9) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0418005>

太阳磁场探测现状与展望

邓元勇^{1,2}, 甘为群³, 颜毅华^{1,2}, 杨尚斌^{1,2}, 白先勇^{1,2}, 侯俊峰^{1,2}, 陈洁¹

1. 中国科学院国家天文台太阳活动重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文重点实验室, 江苏南京 210033)

摘要: 磁场是当今太阳物理最重要的观测量, 与太阳磁场观测研究相关的科学问题是当今太阳物理、日地物理的前沿和热点。文中简要回顾了太阳磁场观测的发展历程、现状以及面临的困难, 并结合国内在太阳磁场观测研究中取得的成就, 探讨了国内在未来的竞争中可能的突破口。基于空间探测的优势, 笔者认为深空探测将在有关太阳磁场的重大科学难题的突破方面发挥决定性作用。

关键词: 太阳; 太阳磁活动; 太阳磁场测量; 空间探测

中图分类号: P141 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200278

Current situation and prospect of solar magnetic field exploration

Deng Yuanyong^{1,2}, Gan Weiqun³, Yan Yihua^{1,2}, Yang Shangbin^{1,2}, Bai Xianyong^{1,2}, Hou Junfeng^{1,2}, Chen Jie¹

1. Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China)

Abstract: Magnetic field is the most important observed parameter in modern solar physics. The observation and research related to the solar magnetic field are always the front and hot topic in solar and space physics. The development history, current status, and the difficulties in the measurement of solar magnetic field were briefly reviewed. The progress made by Chinese solar community was outlined too. Depending on these reviews, what Chinese solar magnetic field should do in the future international competition was discussed. Based on the advantages of space observation, it is believed that deep-space exploration will play a decisive role in the breakthrough of major scientific problems related to the solar magnetic field.

Key words: sun; solar magnetic activity; measurement of solar magnetic field; space exploration

收稿日期: 2020-07-09; 修订日期: 2020-09-29

基金项目: 国家基金委重大科研仪器研制项目 (11427901); 中国科学院空间科学先导专项 (XDA15320000)

作者简介: 邓元勇 (1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事太阳物理观测和天文仪器研制等方面的工作。Email: dyy@nao.cas.cn

0 引言

太阳大气是一个巨大的磁等离子体,其间的一切现象和过程都和磁场相互作用密不可分,当今太阳物理的重大成就和主要困难都与太阳磁场的观测及理论研究有关。同时,太阳磁场通过其开放的磁力线结构,将其影响延伸到地球空间乃至太阳系边界,太阳磁相互作用导致的剧烈活动如耀斑和日冕物质抛射(CME)会借助这个磁场环境对人类社会,特别是航空航天、导航通讯等高科技领域以及输油输电等国民经济系统产生灾害性影响。因此太阳磁场的观测研究不仅具有重要的科学意义,同时也具有重要的社会意义。

太阳磁场测量迄今已有 110 多年的历史,随着观测手段的不断改善,取得了诸多突破性进展。同时,借鉴太阳物理的成功经验,天文学家在恒星磁场、银河系磁场测量方面也取得了重大进展。尽管如此,由于观测方法和技术手段的限制,在太阳物理、恒星物理以及空间物理中,仍然存在与磁场相关的诸多重大科学难题,例如被《Science》列为 125 个重大科学难题之一的太阳和恒星磁活动周起源、困扰了天体物理学家数十年的日冕加热问题、以及和人类高科技活动密切相关的磁能在灾害性空间天气事件中的积累和释放的机制问题等^[1]。

天文学是一门极度依赖于观测的科学,要攻克上述科学难题,不但需要理论研究的不断深入和拓展、现有观测资料的不断积累,更需要新的技术方法的介入从而提供更精细更丰富的观测信息。基于这个目的,笔者试图通过对太阳磁场测量历史的回顾、现状的分析,从而思考太阳磁场观测未来可能取得突破的方向。

1 太阳磁场测量的发展历史

1908 年,美国科学家 Hale^[2]首次测得太阳黑子磁场,从而开创了天体磁场测量的先河。此后的近 50 年时间里,磁场测量基本沿着 Hale 的仪器思路缓慢完善和发展,直到 1953 年 Babcock 才突破只能测量太阳强磁场的桎梏,实现了太阳弱磁场的观测,发现太阳极区也存在磁场。随后,1962 年 Severny 首次

测量了太阳矢量磁场(在此之前都只能测量视向磁场分量)。以上这些测量都有一个共同的特点或缺陷,即将观测对象当做点源来观测,不能成像,也无所谓空间分辨率。

但众所周知,太阳是人类唯一可以进行精细观测的恒星样本,高空间分辨率的成像观测是太阳物理的首要追求,因此仅仅将太阳观测目标当成一个点来观测显然无法满足太阳物理研究需求。基于这一目的,Livingston 等利用线阵探测器,通过光谱仪的狭缝扫描获得二维图像,首次实现了太阳磁场的成像观测。与此同时,利用 Lyot 和 Ohman 发明的双折射滤光器原理,Beckers、Ramsey 等发明了单波段上实现太阳磁场快速成像观测的视频矢量磁像仪,这个概念一经提出即广受追捧,在随后的数十年间得到迅猛发展^[3]。

不过,磁场测量设备发展到此,天文学家仍然不满足,因为无论是 Livingston 所用的设备(以下简称光谱仪型磁场测量设备),还是 Beckers 等的发明(以下简称滤光器型设备)都有自身的局限:光谱仪型设备通过其所获得的完整光谱信息,可以获得观测对象的温度、速度、密度等丰富的物理信息,但这类设备观测的是沿着光谱仪狭缝方向的线源信息,需要通过狭缝的空间扫描成像,这个过程消耗的时间很长,其观测资料在研究太阳结构演化等方面受到极大制约;滤光器型设备则相反,可以快速成像,但其只能在一个光谱点上获得信息,因此所能诊断的物理信息较少,无法满足观测者的多方位需求^[3]。图 1 是太阳结构示意图,其中的光球(photosphere)、色球(chromosphere)、日冕(corona)构成了可被人类直接观测的太阳大气。因此,太阳物理界一直期待一种可以同时成谱成像设备的出现(或曰谱像一体化设备)。可惜迄今为止,这类设备发展缓慢。其中,比较成功的尝试有法国学者 Mein 提出的“多通道相减式双透过光谱仪”,在法意合作的 THEMIS 望远镜上得到应用、中国学者艾国祥等提出的“多通道双折射滤光器”^[4],在国家天文台怀柔太阳观测基地得到应用。但由于技术复杂度太高,目前这两种设备都只是有限地实现了同时成谱成像的目的,要想完全达到太阳物理学家的需求尚有很长的路要走。当然,在这一领域还有一个值得期待的方

向,即利用光纤光谱仪实现谱像一体化,理论上来说,这是一种更完善的方案,但目前尚有诸多关键技术有待攻克,例如如何提高空间分辨率、如何提高填充因子、如何应对光纤对磁场信息的衰减和串扰等等。国内学者在这方面已经开展了多年的探索,期待不久的将来能在这个术方向率先取得突破^[5]。

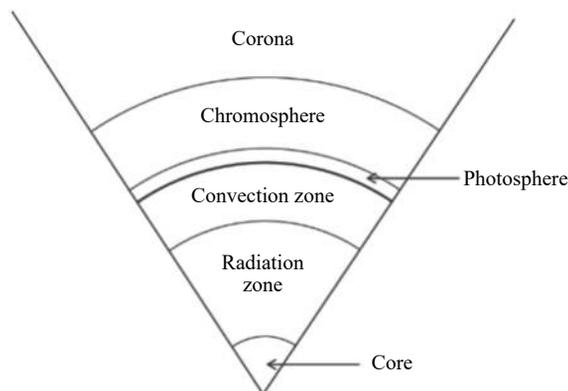


图 1 太阳结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of solar structure

2 太阳磁场空间探测研究现状

2.1 国内研究现状

国内在太阳磁场及磁活动相关研究领域始于现安置于国家天文台怀柔太阳观测基地的太阳磁场望远镜 (SMFT)。SMFT 于 1986 年投入使用,由于其先进的设计理念,使得在其后的短短数年间就成为了国际最顶尖的三台磁场观测设备之一(另外两台在美国)(图 2 展示了 SMFT 观测到的一个活动区矢量磁场

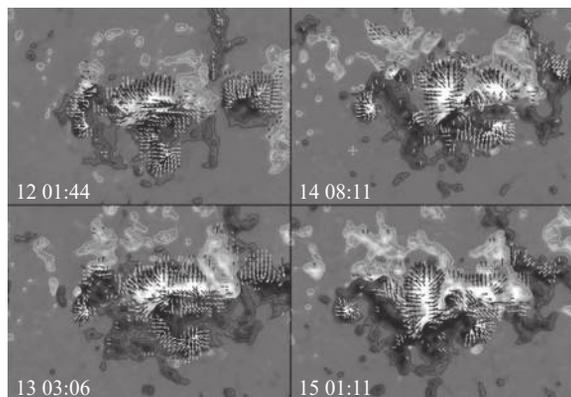


图 2 SMFT 观测的太阳活动区 9077 的光球矢量磁场演化系列图^[6]

Fig.2 An evolution series of photospheric magnetogram of NOAA 9077 obtained by SMFT

的演化)。利用这些观测资料,国内学者及其国内外合作者在诸多重要课题研究中取得了重要进展,例如:利用 SMFT 的特有观测能力,首次研究了色球速度场与耀斑位置的关系;首次基于观测数据分析了磁场结构从光球到色球的变化;首次系统提出了磁非势性在活动区中的演化及其作用;利用怀柔基地长期的资料积累,在磁螺度的统计研究和理论研究方面引领潮流;通过特别的观测设计,首次开展了太阳极区矢量磁场测量,基于矢量磁场观测数据发展起来的无力场外推模型和三维空间的磁螺度计算模型,成为太阳物理教科书中的代表性方法之一。

2018 年,“先进天基太阳天文台”(ASO-S)工程研制正式启动。ASO-S 是国内第一颗太阳观测卫星(见图 3),由中国科学院空间科学先导专项支持,计划 2021 年底发射,目前工程研制处于初样转正样阶段。其上搭载的全日面矢量磁像仪 FMG,与 HMI 和 PHI 大致相仿,但具有相对更好的磁场测量精度。ASO-S 的载荷配置,有望在理解太阳剧烈活动现象如耀斑和日冕物质抛射的磁相互作用机理等前沿研究上获得突破。

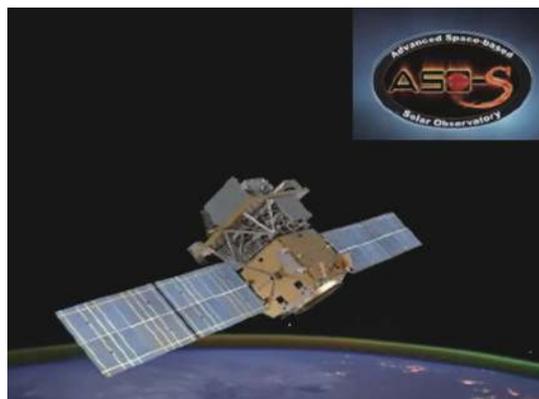


图 3 中国即将发射的首颗太阳观测卫星—先进天基太阳天文台 (ASO-S)^[7]

Fig.3 China's first solar observation satellite to be launched-Advanced Space based Solar Observatory (ASO-S)^[7]

2.2 国际研究现状

从 1990 年代开始,欧洲、美国、日本陆续发射了用于观测太阳磁场的空间卫星。空间观测对天文学而言有着无与伦比的优越性,除了可以克服地基观测分辨率与精度的冲突以外,还具有连续、稳定、全波

段等地基观测不可企及的优势。因此空间太阳磁场观测虽然面临极大的技术挑战,但人类仍然在这一方向不断前进,并取得了瞩目成果。

SOHO 卫星是人类真正意义上的第一个空间太阳磁场观测设备,在此之前也有一些空间探测器获得过关于太阳磁场的结果,比如 Ulysess 等,但这些成果都是从其它观测或原位探测 (in situ) 数据推断的结果,不是对太阳磁场的直接观测。

SOHO 搭载了太阳速度场和磁场的观测仪器——迈克尔逊多普勒成像仪 (Michelson Doppler Imager, MDI), 基于其不间断测量数据,利用日震学方法揭示了太阳内部的较差自转结构与平均场发电机模型的预测不一致,对太阳物理的核心问题——太阳发电机问题提出了巨大的挑战。在此基础上成型的输运发电机模型,革命性地提出了太阳磁场形成的新理论。

不过 MDI 仅有视向磁场观测,没有矢量磁场测量,且时间、空间分辨率都很低,所以虽然在有关太阳活动周这一重大科学问题上取得了重要进展,但对于太阳磁场内秉性质、太阳爆发式活动现象中的磁能释放机制等重大问题的研究并未能提供足够的观测资料。

Hinode 卫星(“日出”卫星)在世界上首次用 50 cm 光学望远镜进行空间太阳光学和磁场观测,给出了太阳磁场的高分辨率图像。其上搭载了两种磁场测量的仪器,其一是基于窄带滤光器的 NFI,另一是基于光谱仪的斯托克斯参数仪 SP。不过由于技术原因,NFI 上天后不久即出现不可逆故障从而导致无法正常开展磁场观测。

Hinode/SP 取得了一些重要的科学成果,例如:发现极区磁场呈千高斯量级、发现光球磁场精细结构呈水平结构以及对流塌缩、发现太阳针状体的阿尔芬波结构、发现黑子纤维冲浪和缠绕运动、发现太阳耀斑触发过程的细节等。图 4 展示了 SP 观测到的太阳宁静区的高分辨率磁场^[8]。

Hinode 卫星是世界上第一次在空间开展太阳矢量磁场观测的卫星,有巨大成功,也有失败的遗憾。此外,SP 虽然提供了大量高质量数据,但它依靠光栅狭缝扫描从而获得磁场图像的工作模式使其时间分辨率很低,这与主光学望远镜高分辨率下磁场的

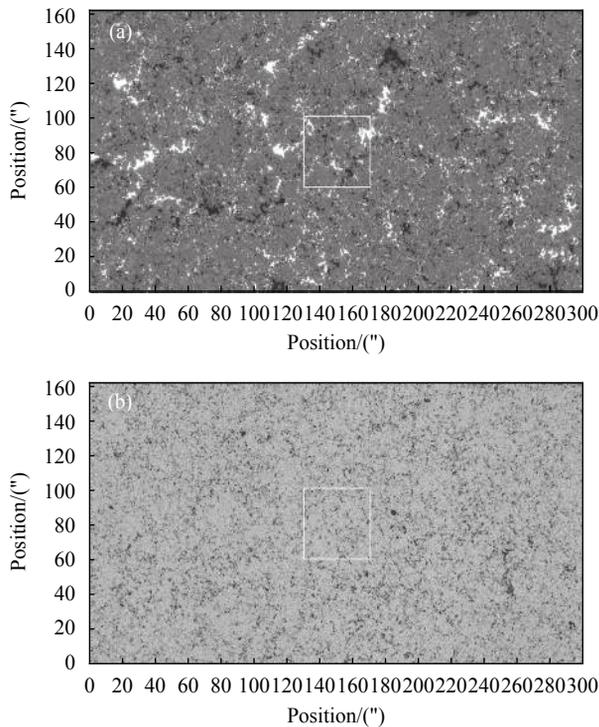


图 4 Hinode/SP 观测的宁静区高分辨率纵向磁场 (a); 横向磁场信号 (b)

Fig.4 (a) Longitudinal magnetic field with high spatial resolution obtained by Hinode/SP; (b) Strong transverse magnetic field

特征演化时间不匹配,极大限制了对于高分辨率磁场的演化研究,对于小尺度磁场局部发电机过程的贡献有限。

现在空间矢量磁场观测的主角是 SDO 卫星上搭载的 HMI (Helioseismic and Magnetic Imager)。HMI 实现了全日面太阳矢量磁场的首次空间观测(见图 5),从而能够精细研究太阳磁场和爆发活动的相关性,对小尺度磁活动现象(例如喷流)找到其源头及演化特征;利用非线性无力场模型可以获得日冕的矢量磁场结构;发现了与 23 太阳活动周半球螺度法则的差异;在利用其对速度场和磁场的研究中发现其内部的流场分布特征出现了多层结构与输运发电机模型依赖的单层结构产生了明显的差异,对太阳发电机模型产生了更大的挑战。

SDO/HMI 的口径与 SOHO/MDI 的望远镜的口径相当,在宁静区的矢量磁场数据的使用中面临着巨大的挑战,因为其磁场测量精度方面远不如 Hinode/SP,甚至也不如地基太阳磁场望远镜的最佳数据。

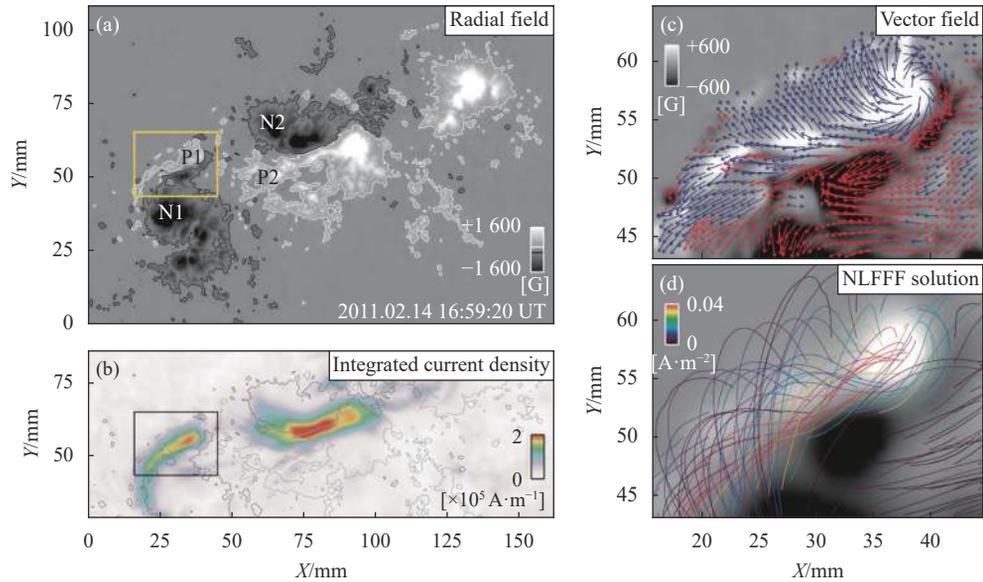


图 5 SDO/HMI 获得的活动区 11 158 的光球矢量磁图以及由矢量磁场数据演化出的图像^[9]。(a) 活动区 11 158 的纵向磁图；(b) (a) 图黄色方框区域中的矢量磁图；(c) 基于矢量磁场数据，由非线性无力场外推方法得到的磁力线结构；(d) 基于矢量磁场数据得到的活动区 11 158 的电流密度图像

Fig.5 Photospheric vector magnetograms of NOAA 11 158 obtained by SDO/HMI and images obtained by the vector magnetic field^[9]. (a) Longitudinal magnetogram of NOAA 11 158; (b) Vector magnetogram of the region marked by the yellow rectangle in Fig.(a); (c) Magnetic field lines induced by NLFFF model based on observed vector magnetic field; (d) Current density image of NOAA 11 158 obtained by the vector magnetic field

3 太阳和空间物理前沿课题对太阳磁场探测的需求

在当今太阳物理的重大科学难题中，以太阳发电机、纤维化辐射磁对流和日冕加热最具挑战性，而这些问题无一不与太阳磁场密切相关，再加上太阳和空间物理共同关心的灾害性空间天气因果链中磁能的传输、积累和释放问题，使得太阳磁场成为了太阳物理的“第一观测量”，无论是过去、现在还是将来，太阳磁场探测都将是本领域的最前沿。

当然，这些重大科学难题的存在有多方面的原因，但观测手段的不足无疑是其中的主因之一。以下笔者简要分析了磁场探测能力的相关方面。

太阳发电机问题，也即太阳磁活动周起源问题：在日趋完善的太阳发电机模型中，太阳极区磁场和流场是模型完整拼图中缺失的一环，例如用日震学方法得到的 60° 以上的较差自转（流场）信号即已不可信^[10]。目前人类对太阳极区磁场的成像观测都是在黄道面上开展的，由于投影效应和临边昏暗等因素，观测的分辨率、灵敏度都极低，因此，虽然人类从 1950 年就开始了极区磁场的观测，而且观测能力不断提升，但

到现在为止，所有观测都远远不能满足研究需求。近期发射的 SO，最值得期待的是其对太阳极区的探测能力，但值得注意的是，SO 的轨道偏离黄道面的角度为 20 多度（在任务末期可能达到 30° 多一点），对极区观测而言，这样的角度显然远远不够！一个高轨道倾角、短周期、具备高精度磁场探测能力的太阳极轨探测器才可能对太阳发电机问题带来突破性的贡献。

对太阳大气纤维化辐射磁对流的认识，观测方面目前最大的不足就是对太阳磁场基本结构的探测能力。在关于太阳磁场基本结构的“磁流管”(flux-tube) 模型中，磁场的空间尺度由太阳大气的平均光子自由程所确定，物理尺度在 100 km 以下，大约相当于地基 0.1" 空间分辨率（约 75 km）所对应的尺度。另一方面，虽然早期的磁流管模型认为离散的磁流管磁场都很强，在千高斯以上，但随着观测研究的深入，越来越多的证据显示太阳磁场强度分布是多样化的，弱磁场结构不容忽视^[11]。高分辨率和高灵敏度的磁场探测是目前面临的巨大挑战，简单而言，目前地基太阳望远镜的空间分辨率已经达到 0.1" 的尺度，但在此分辨能力下，磁场测量精度却尚无法达到；反之，也有办法可以获得极高的磁场测量精度，但此时空间分

辨率无法满足需求。针对纤维化辐射磁对流这一科学难题,空间大口径光学望远镜是终极解决方案。

太阳大气从底层的光球到高层的色球,再到外部的日冕,温度逐次升高,这种反常的温度分布形成机制,即所谓的日冕加热问题,是天体物理中长期悬而未决的难题。太阳大气是一个有机整体,其间的物理过程相互关联,无论哪种理论,要最终理解日冕加热难题,需要对不同大气层次的磁场进行精确测量,构筑完整的三维磁大气模型。但遗憾的是,由于日冕的光学薄特性,日冕磁场测量极具挑战性,红外、射电方法虽有进展,仍未成熟^[12]。因此,目前人类尚不能对日冕磁场进行高精度的测量和诊断,对色球磁场的测量水平也差强人意。相对于有成熟磁场测量手段的光球而言,日冕的物理环境非常不同,信号也更弱。因此,针对日冕加热难题,太阳磁场测量的发展方向可能需要寻找新的磁场测量理论并发展相应的技术方法。日冕中,紫外、极紫外辐射甚为显著,也已经形成了很好的成像观测技术,在此基础上如何实现偏振测量从而诊断日冕磁场,将是未来的方向。而由于地球大气的存在,紫外观测只能借助空间平台实现。

灾害性空间天气中磁能的传输、积累和释放,同日冕加热问题一样,核心还是各层次物理过程的耦合,只是该难题涉及的尺度更广,太阳光球、色球、日冕只是这个过程的发源地,广阔的日地空间、近地空间的电磁相互作用过程都是需要监测的对象(如图 6 所示)。目前,人类极度缺乏有关这个因果链的完整图像,要想实现这类观测,需要覆盖全波段、全时段、全日地空间尺度的复杂监测网络,而这也只有空基观测才可能实现。

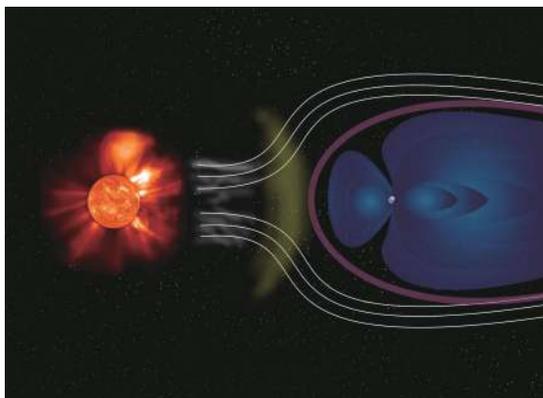


图 6 太阳和日地空间的磁结构

Fig.6 Magnetic structure of the sun and solar-terrestrial space

4 结 论

综上所述,无论是在太阳磁场的观测研究,还是相关设备的研制方面,国内均有很好的基础和国际先进地位。有鉴于此,展望未来,笔者认为首先应该瞄准“大的”科学问题和工程项目,加入到国际最前沿的竞争行列;与此同时,也应该抓住一些“小的”机遇,实现重点突破。

(1) 太阳极轨探测器

大的科学和工程问题中,太阳极轨探测器无疑是最具科学意义的项目。在美国通过 Parker Solar Probe (PSP) 实现了进入太阳大气层的观测、欧洲发射 Solar Orbiter 实现偏离黄道面的观测(准确的描述应该是:小角度偏离+抵近)之后,国际下一个竞争焦点必将是太阳极轨探测器。极轨探测器的科学预期除了太阳发电机问题外,也将推动人们对空间天气中特别关注的高速太阳风起源等问题带来实质性进展。目前,美欧等发达国家都在开展相关研究,而国内也有很好的研究基础和工程能力,比如在 2011 年前后的国家深空探测规划中,太阳极轨探测器即被列为三次深空太阳探测任务之一,而中国科学院空间科学先导专项支持的“太阳极轨射电望远镜”(SPORT)和“太阳极轨探测器”预研,也为后续工作奠定了坚实基础。如果择机实现,必将使国内的太阳和空间物理占据引领性的国际地位。

(2) 高空间分辨和高测量精度的设备

有关太阳磁场基本结构这一重大科学难题,显而易见,必须发展兼具高空间分辨和高测量精度的设备,同时为匹配上述指标,时间分辨率也不可能太差。因此,最佳的解决方案是实施一个大口径空间太阳望远镜计划。得益于早期“空间太阳望远镜”的不断推动、深空探测计划中对“深空太阳天文台”的预研,国内无疑已经具备了实施这类计划的基本条件。当然,大口径空间太阳望远镜通过适当的载荷优化,也可对日冕加热、磁能传输释放等科学问题的研究做出重要贡献。

(3) 空间天气日地因果链的立体探测

对于磁能在空间天气因果链中的传输、积累和释放相关的科学问题,深空探测将是终极解决方案。目前国际上最关注的项目即是利用深空探测能力,构筑

太阳立体探测网,这里面至少应该包括一到数个远离地球的探测器,和地基、近地轨道探测器、乃至太阳极轨探测器,组成一个覆盖日地全空间的观测网。深空太阳天文台、夸父卫星计划以及其他多个空间物理卫星预研为此积累了坚实的科学基础,而随着国内深空探测能力的不断实施,工程技术条件也必将日益完善。

(4) 观测理论、技术与方法的突破及验证

如前所述,日冕加热问题涉及到日冕磁场测量的瓶颈,因此在这一问题上,亟需的不是大工程,而是观测理论、技术与方法的突破。在日冕磁场测量方面,紫外/极紫外的偏振测量是最有希望的方向,但目前尚待解决诸多关键技术;此外,近年来发现的紫外光谱中的磁场诱导跃迁现象,可能会为日冕磁场测量提供一个新的手段^[13]。由于极紫外观测只能在地球大气外实施,因此应该抓住一些“小的”搭载机会,验证设备原理和关键技术,时机成熟后,提出较小规模的项目,同样可以对日冕加热等大科学问题发起冲击。

参考文献:

- [1] National Research Council, Division on Engineering and Physical Sciences. Solar and Space Physics: A Science for a Technological Society[M]. US: American Academy of Sciences, 2012.
- [2] Hale G E. On the probable existence of a magnetic field in sunspots [J]. *Astrophysical Journal*, 1908, 28: 315-343.
- [3] Stix Michael. The Sun, An introduction [M]. 2nd ed. Berlin: Springer Publisher, 2002.
- [4] Ai G, Hu Y. Multi-channel birefringent filter (I)-principle and video spectrograph [J]. *Science in China*, 1987, 8: 868-876.
- [5] 林元章. 太阳物理导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [6] Deng Y Y, Wang J X, Yan Y H, et al. Evolution of magnetic nonpotentiality in NOAA AR 9077 [J]. *Solar Physics*, 2001, 204: 11-26.
- [7] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S): an overview [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19: 156-163.
- [8] Lites B W, Kubo M, Socas-Navarro H, et al. The horizontal magnetic flux of the quiet-sun internetwork as observed with the hinode spectro-polarimeter [J]. *Astrophysical Journal*, 2008, 672: 1237-1253.
- [9] Sun X D, Hoeksema J T, Liu Y, et al. A non-radial eruption in a quadrupolar magnetic configuration with a coronal null [J]. *Astrophysical Journal*, 2012, 757: 149.
- [10] Zhao J, Bogart R S, Kosovichev A G, et al. Detection of equatorward meridional flow and evidence of double-cell meridional circulation inside the sun [J]. *Astrophysical Journal Letters*, 2013, 774: L29-34.
- [11] Stenflo J. Strong and weak magnetic fields: Nature of the small-scale flux elements[C]//Proceedings of the 141th IAU Colloquium, 1993: 205-214.
- [12] Lin H S, Penn M J, Tomczyk S, et al. A new precise measurement of the coronal magnetic field strength [J]. *Astrophysical Journal*, 2000, 541: L83-L86.
- [13] Li W, Yang Y, Tu B, et al. Atomic-level pseudo-degeneracy of atomic levels giving transitions induced by magnetic fields, of importance for determining the field strengths in the solar corona [J]. *Astrophysical Journal Letters*, 2016, 826: 219.