科学通报 2019 年 第 64 卷 第 19 期: 2011 ~ 2024
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

中国太阳物理学研究进展

刘睿[1*], 陈耀[2], 邓元勇[3], 丁明德[4], 季海生[5], 林隽[6], 田晖[7], 汪毓明[1], 汪景琇[8*]

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;
2. 山东大学空间科学研究院, 威海 264209;
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;
4. 南京大学天文和空间科学学院, 南京 210023;
5. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034;
6. 中国科学院云南天文台, 昆明 650216;
7. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
8. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: rliu@ustc.edu.cn; wangjx@nao.cas.cn

2019-04-04 收稿, 2019-04-18 修回, 2019-04-24 接受, 2019-05-24 网络版发表
国家自然科学基金(11573038, 41842037, 11733003, 1142790, 111825301, 11790300)和中国科学院空间科学战略先导专项(XDA15320102)资助

摘要 太阳物理学聚焦于距离我们最近, 也是对我们最重要的恒星, 处于天文学、行星科学、空间科学、等离子体物理学等学科的前沿交叉领域. 很多基本科学问题的解决——宇宙天体磁场的起源、恒星磁活动周的演化规律和形成机制、恒星磁活动如何影响宜居环境和生命起源、如何预报太阳爆发活动以防止其对人类造成灾害性影响——都将得益于太阳物理学的突破性进展. 近10年来, 太阳物理学进入了多信使、全波段、全时域、高分辨、多尺度、多视角和高精度探测的时代, 而最新发射的帕克太阳探针和即将发射的太阳轨道飞行器, 将开启空间太阳探测的新纪元. 我国首颗太阳探测卫星——先进天基太阳天文台将于2021年发射. 在这重大变革的前夜, 我们回顾和梳理了近10年来我国太阳物理学者在认知太阳磁场性质、低层大气精细结构和动力学, 以及太阳爆发活动形成机理等方面的突出进步, 并展望中国太阳物理学的发展和中国学者未来可能做出的贡献.

关键词 太阳物理, 太阳磁场, 太阳大气, 太阳活动, 空间天气

太阳是离人类最近的恒星, 是迄今为止唯一一颗人类能观测到其详细结构和物理过程的恒星, 也是唯一有高精度磁场测量的恒星. 因此, 要解决宇宙天体磁场的起源、恒星磁活动周的形成机制, 以及恒星磁活动如何影响生命起源和宜居环境等重大科学问题, 研究太阳是已知最直接的途径. 同时, 太阳物理学的重要研究目标之一是预报太阳爆发活动以防止其对人类造成灾害性影响. 随着人类活动日益向外太空拓展以及人类社会日益依赖于对空间天气敏感的高技术系统, 太阳物理学的这一使命也日益重要和紧迫. 系外行星的探测和可宜居带的搜寻使得恒星磁活动、磁周期及其对可宜居性影响的研究成为天体物理学的前沿热点之一. 作为一颗光谱型为G2V的具备详细观测资料的普通恒星, 太阳磁周期的产生机制和磁周期强度变化的非线性调节机制可被恒星和星系物理所借鉴. 恒星和星系物理在不同物理参数下的活动特征也可用来检验我们对太阳周的理解.

自1612年伽利略(Galileo Galilei)开始用望远镜观测太阳黑子, 太阳物理学的研究已经走过了4个多世纪. 历史上每一次太阳观测仪器或技术的革新, 都使得

引用格式: 刘睿, 陈耀, 邓元勇, 等. 中国太阳物理学研究进展. 科学通报, 2019, 64: 2011–2024
Liu R, Chen Y, Deng Y Y, et al. Recent research progress of solar physics in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2011–2024, doi: 10.1360/N972019-00286

© 2019《中国科学》杂志社

太阳物理学处于推动天文学、空间科学、粒子物理学、等离子体物理学、行星科学和地球科学等学科发展的最前沿. 1814年夫琅禾费(Joseph von Fraunhofer)发现太阳吸收光谱线, 1908年Hale[1]通过塞曼效应发现太阳黑子磁场, 使得光谱学成为天文和天体物理研究不可或缺的利器. 1939和1941年Grotrian和Edlén分别证认出日冕谱线来自高电离态的金属元素, 表明太阳大气温度从表面6000 K在大约2000 km内(约0.03太阳半径)急剧上升到百万开尔文(K)[2]; 1959年苏联Luna飞船首次发现太阳风, 两三年间苏联和美国飞船先后探测到连续和超音速的太阳风, 证实了帕克(Eugen N. Parker)[3]关于日冕超音速膨胀的理论预见, 日冕加热机制和太阳风的起源遂成为过去半个多世纪以来天文和空间学界最激动人心的双子谜题. 对太阳的详尽观测帮助人类深入认识了恒星内部产能机制(Hans Albrecht Bathe, 1967年诺贝尔物理学奖)、恒星结构和演化(Subramanyan Chandrasekhar, 1983年诺贝尔物理学奖); 对太阳磁活动详细的观测研究, 催生了宇宙磁流体力学(Hannes Olof Gösta Alfvén, 1970年诺贝尔物理学奖); 对太阳中微子失踪之谜的破解在支持标准太阳模型的同时却突破了粒子物理学的标准模型, 从而开启了中微子物理学、中微子天文学和中微子宇宙学的新篇章(Raymond Davis Jr.和Masatoshi Koshiba, 2002年诺贝尔物理学奖; Takaaki Kajita和Arthur B. McDonald, 2015年诺贝尔物理学奖).

进入太空时代, 人类已经发射了上百颗卫星和飞船去探测太阳和我们赖以生存的日地空间环境. 20世纪70年代初, 安装在OSO-7飞船上的首个空间日冕仪发现日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME), 之后被证明为太阳系最剧烈的爆发现象之一, 能在行星际空间产生巨大的扰动, 是灾害性空间天气的最主要的驱动源, 因而成为日地空间物理研究的核心课题[4]. 近年的研究发现, 40亿年前太阳频繁剧烈的耀斑和CME有可能创造了地球上生命繁衍的条件[5]. 目前太阳物理学以空间探测和地基大型望远镜联合观测为主导, 开始了多信使、全波段、全时域、高分辨、多尺度、多视角和高精度探测的时代. 主要的空间太阳探测器包括SOHO(1995年至今), TRACE(1998~2010年), RHESSI(2002~2018年), Hinode(2006年至今), STEREO(2006年至今), SDO(2010年至今)和IRIS(2013年至今)等. 其中, SOHO卫星从1995年起运行在L1点, 全天候实时监测太阳, 至今仍在服役; STEREO卫星首次对太阳进行双视角观测, 并与SOHO和SDO卫星一起, 短暂实现了对太阳的360°全方位观测. 空间观测取得了众多里程碑式的进展, 已经积累了巨量关于太阳磁场、大气结构和太阳活动的系统完整的资料, 使得太阳物理学的研究空前繁荣.

如今, 太阳物理学再次面临历史性的机遇. 帕克太阳探针(Parker Solar Probe)和太阳轨道飞行器(Solar Orbiter)即将开启空间探测的新纪元, 实现对日冕和太阳极区前所未有的抵近探测. 帕克太阳探针于2018年8月12日发射, 将最终飞抵离太阳表面近达9个太阳半径的地方, 在1400 K的高温下探测日冕, 直接侦测太阳风从亚音速向超音速的嬗变和太阳高能粒子的诞生. 太阳轨道飞行器计划于2020年2月发射, 3年半后进入运行轨道; 借助金星的引力, 它与太阳赤道的夹角将逐渐增大到25°~34°, 从而近距离观测太阳极区. 可以预见, 这两个革命性的空间计划将给以下重大科学问题的探索带来突破性进展: 日冕加热、太阳风的起源和加速、太阳磁场的起源、磁活动周的形成以及太阳爆发活动的物理机制等. 同时, 建设中的4米口径太阳望远镜(Daniel K. Inouye Solar Telescope, DKIST)将实现从太阳表面到日冕的系统磁场观测; 基于磁流体力学、辐射磁流体力学和等离子体物理学的高性能数值模拟发展迅速——太阳物理学已处在重大变革的前夜.

本文将着重回顾过去10年中(2008~2018年)我国太阳物理学者在研究太阳磁场、太阳大气动力学和爆发活动中取得的成绩, 展望未来的发展和可能对太阳物理学作出的贡献.

1 中国太阳物理学进展

1.1 太阳磁场

太阳活动的产生和太阳大气中的磁场息息相关. 太阳活动和磁场均呈现大约11年的周期, 但每个太阳活动周的强度和长度都不相同. 当前的第24太阳周是百年来最弱的周期. 太阳活动周的强度直接影响空间天气事件的频次和强度, 其长期变化关系到全球气候变化. 需要指出的是, 虽然太阳活动周主要表现为活动区黑子和磁场的演化, 但宁静区的网络磁场也有较强的非势性[6]; 包括网络内磁场[7]在内的小尺度磁场[8]对太阳磁周期均有重要贡献.

虽然行星共转运动的引潮力对太阳活动的周期性有影响[9], 但太阳活动周的不规则变化主要来自对流层的磁流体湍动过程. 磁通量管上浮到太阳表面的过程

中, 受到湍动对流的作用, 使得黑子群的倾斜角在系统性分布的基础上表现出随机性. Jiang等人[10]提出这一随机分布特征主导了发电机过程中极向磁场产生的不确定性因素. 在磁通输运模型中考虑第23周出现的每个黑子群的倾斜角信息, 可成功再现第23周极小期异常弱的极区磁场强度以及第24周的强度[11]. 这一研究表明, 一些反Hale极性定律的黑子群的浮现能抑制极区磁场的增强, 并显著影响下一个太阳活动周的强度. Jiang等人[12]集合太阳黑子浮现的经验规律、磁通量转移发动机的理论计算和极区磁场与活动带磁场的经验关系, 发展了提前一个太阳周预报太阳活动周活动水平的系统方法.

磁螺度是描述磁场拓扑和演化的重要物理量. Hao和Zhang[13]通过计算活动区的螺度参数, 发现23周下降期不符合半球螺度符号法则, 而24周上升期基本符合该法则; 并证实强场和弱场可能有相反的螺度符号. Yang等人[14]发展了精确计算相对磁螺度的数值方法. Zhang等人[15]发现活动区的电流螺度功率谱倾向于−5/3的指数率. Zhang等人[16]研究了一类非线性无力场中磁螺度的积累, 发现轴对称的偶极无力场存在一绝对螺度上限; 当总螺度积累到一定程度时, 无力场将以Parker螺旋结构的态势趋于完全开放.

怎样测量光球以上大气的磁场是太阳物理学的一大难题. Tan等人[17]利用微波斑马纹结构诊断耀斑爆发源区的磁场. 为了测量日冕磁场, 我国学者多次在日食期间观测日冕的偏振光谱. 例如, 在2013年11月2日加蓬日全食期间, Qu等人[18]获得日冕绿线偏振成谱成像资料; 2017年8月21日的美国日全食期间, Chen等人[19]通过观测日冕禁线的偏振光谱, 再和日冕磁场建模结合以诊断日冕磁场结构.

由于缺乏日冕磁场的常规测量, 以光球磁场为边界进行外推和数值模拟是目前研究日冕磁场的主要手段. Jiang和Feng[20]基于磁流体力学(magnetohydrodynamics, MHD)松弛原理, 应用并行自适应网格技术, 实现了全球日冕非线性无力场的建模. Zhu等人[21]在非无力场约束条件下通过数据驱动的MHD模拟来建立准静态的日冕磁场模型, 为解决非无力的光球磁场边界与日冕无力场之间的耦合问题提供了新的思路. Jiang等人[22]进一步发展了数据驱动的日冕MHD演化模式, 以连续观测的光球矢量磁图作为时变边界条件, 成功再现了爆发源区从初始稳定态到爆发的演化过程. Guo等人[23]发展了磁摩擦外推非线性无力场的方法, 并和数据驱动MHD模拟结合. Xia等人[24]进一步完善了适用于MHD并行计算的自适应网格架构MPI-AMRVAC, 实现易用、功能和效率的大幅提升. 三维磁压缩因子计算方法的发展[25~27]为分析磁场三维拓扑结构提供了新的工具, 被应用到了多个方面, 如耀斑和CME前身结构的磁场位形[26,28~31]、活动区暗条的磁场结构和稳定性[27,32,33]、活动区日冕加热[34]等.

1.2 低层大气精细结构和动力学

太阳各个层次紧密联系, 相互耦合. 太阳内部产生的能量通过低层大气以坡印廷能流矢量和辐射等方式, 向色球和日冕传输. 随着美国大熊湖天文台1.6 m太阳望远镜(Goode Solar Telescope, GST)、中国抚仙湖的1 m新真空太阳望远镜(New Vacuum Solar Telescope, NVST)、IRIS卫星等仪器先后投入使用, 太阳物理学进入高分辨率的时代, 推动了我们对低层大气精细结构和动力学的认知. Ji等人[35]利用He I 10830 Å谱线对太阳进行了高分辨率成像观测, 发现了扎根在光球米粒组织之间的超精细磁通量管(~100 km); 沿这些通道有物质向上流动, 并对应于冕环的增亮, 可能与日冕加热过程有关. Zhang等人[36]通过考察针状体的完整运动轨迹, 发现I型针状体占主导地位, 向传统的针状体分类和II型针状体加热日冕的理论提出了挑战. Zhang和Liu[37]提出宁静太阳上无处不在的旋转磁结构和极紫外龙卷风可能是日冕加热的有效途径. Hong等人[38]发现低层大气中无处不在的微暗条爆发可以驱动微型CME. Yang等人[39]在色球观测到小尺度的磁重联过程. Li等人[40]在太阳大气的光球、色球、过渡区和日冕中同时探测到小尺度磁重联, 其在色球和过渡区表现为双向出流, 在光球表现为磁场对消, 在日冕则表现为极紫外增亮. 针对色球和光球上层等离子体的特点, Ni等人[41]通过数值实验研究了部分电离等离子体环境中的磁重联过程, 发现在多级磁岛的边缘存在众多小尺度激波, 可将初始温度为7000 K的等离子体加热到8×10^4 K以上, 可能是色球等离子体加热的重要机制.

紫外爆发事件是IRIS卫星新发现的一类小尺度活动现象, 主要特征是过渡区谱线的辐射大大增强和大幅增宽, 并叠加了一些色球吸收线. 紫外爆发事件多发生于新浮现活动区中, 发生的频率与磁通量浮现率密切相关[42], 有可能是色球甚至光球中磁重联的结果. 通常认为磁重联发生在上浮磁力线与光球对流运动相互作用形成的U形结构中, 但Tian等人[42]发现几乎所有紫

外爆发事件都出现在磁场连接性发生突变的地方，仅有少数出现在U形磁场结构附近. 紫外爆发事件与另一类小尺度活动现象——埃勒曼炸弹的形态与演化特征类似. 后者在观测上主要表现为Hα线翼瞬时增强, 而线心几乎没有变化. 为了区分线心的吸收特征与线翼的发射特征，Hong等人[43]使用两个简单叠加的云分别代表不同层次的大气. 通过对Hα谱线的拟合，得到埃勒曼炸弹区域的温度增加了600~2300 K左右，与前人的结果一致. Hong等人[44]利用辐射动力学模型对埃勒曼炸弹的研究表明，非热模型与热模型均会导致Hα谱线的变暗现象，但具体特征不同；如果低层大气加热过强，Hα谱线不再表现出典型的埃勒曼炸弹特征. 虽然埃勒曼炸弹的局地加热不超过1×10^4 K，而紫外爆发事件高达数万K，但Tian等人[45]发现约一半紫外爆发事件与埃勒曼炸弹相联系；反过来，在约20%的埃勒曼炸弹发生的时间和位置出现了紫外爆发. 现有理论尚无法完全解释这一观测结果.

得益于地基大望远镜的高分辨率观测，对黑子中的精细结构和动态过程有了更深入的了解. Su等人[46,47]发现黑子本影和半影行波的波前具有涡旋结构. Yang等人[48]发现太阳黑子亮桥(图1(a))上存在由许多喷流组成的振荡的亮墙结构. Zhang等人[49]发现窄亮桥上存在很多暗结(图1(b))，由此提出亮桥磁对流的新图像. Tian等人[50]指出亮桥上的喷流有两个分量: 一个是整个亮桥上由激波驱动的重现性慢速喷流(约15 km/s), 另一个是由间歇性磁重联产生的快速喷流(约100 km/s, 图1(c)).

1.3 日冕中的振荡和波动

由于磁场的存在，日冕中存在丰富的波动和振荡.

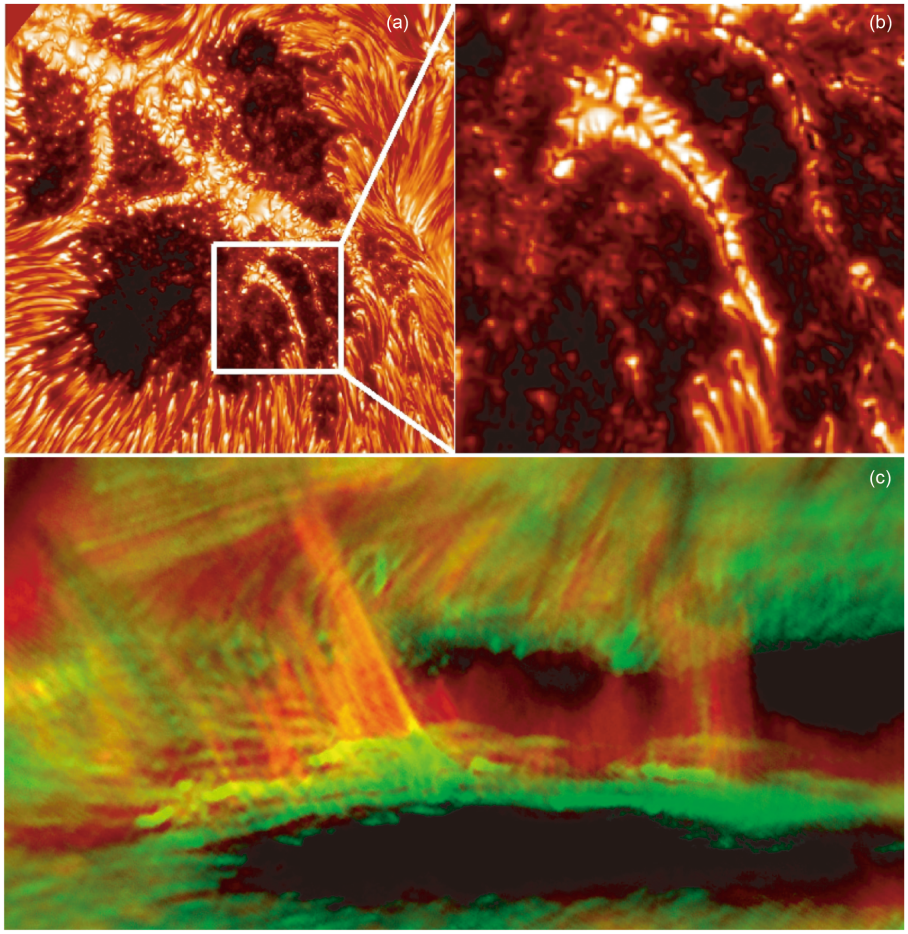


图 1 (网络版彩色)GST观测到的黑子亮桥. (a) 太阳黑子及其本影中的亮桥; (b) 亮桥上的暗结[49]; (c) 亮桥上的倒Y型喷流[50]

Figure 1 (Color online) Observations of sunspot light bridges by Goode Solar Telescope (GST). (a) A sunspot with a light bridge (marked by a rectangle) spanning across the umbra; (b) dark knots on the light bridge in (a)[49]; (c) inverted Y-shaped jets on a light bridge[50]

通过研究这些波动和振荡来诊断日冕磁场，被称为“冕震学”. 与太阳爆发活动相关的大尺度波动穿越活动区和冕洞或作用于暗条等结构表现出的观测特征与快模磁声波相符[51~54]. Chen和Wu[55]发现在同一CME事件中存在两个极紫外波，前者为快模磁声波，后者是CME引起的表观传播；前者速度大约是后者的3倍，与他们2002年的模型一致[56]. Chen等人[57]通过数值模拟发现快模磁声波在穿越准分界层之前转换为慢模波，由于慢模波无法跨越磁力线而产生驻留极紫外波. Chen等人[58]发现了CME冲撞冕流结构激发的沿等离子体片向外传播的冕流波，是迄今发现的最大尺度的日冕波动. 利用冕流波特性可诊断冕流区3~10太阳半径范围内的阿尔芬速度和磁场强度径向剖面，从而将冕震学拓展至高日冕区域[59,60]. Yang等人[61]通过数值模拟发现光球的横向汇聚和剪切运动可以驱动闭合磁结构和开放场之间的磁重联，重联产生间歇喷射的等离子体团撞击开放场，同时激发3种磁流体力学波；其中慢磁声波和阿尔芬波的能量密度的几何衰减比快磁声波慢得多，导致在行星际只观测到前两种波.

Tian等人[62]利用Fe XXI谱线在耀斑环中发现了周期约25 s的腊肠模震荡，为腊肠模的观测打开了紫外窗口. Chen等人[63]提出利用耀斑环中腊肠驻波来反演耀斑环物理参数. Li等人[64]发现同一耀斑激发的相邻冕环振荡频率不同，并利用这种现象反演冕环之间磁场和等离子密度的关系. 暗条的振荡是CME的前兆特征之一[65]. Zhang等人[66]通过数值模拟证认出重力是纵向振荡的主要回复力. Zhou等人[67]针对暗条的横向和纵向振荡进行了三维MHD数值模拟.

1.4 太阳爆发活动

1.4.1 耀斑

随着对太阳的观测日益精细和精密，耀斑中的许多动力学过程被揭示或得到更加深入的研究. 一方面是耀斑对光球磁场和结构的影响，另一方面是耀斑在色球和过渡区中的响应. Wang等人[68]研究了耀斑过程中光球磁场的变化. Bai等人[69]发现磁场重联导致的半影瞬亮. Jiang等人[70]发现一个快速转动的黑子在耀斑后突然停止转动；Bi等人[71]则发现耀斑导致黑子的旋转方向突然改变. Li和Ding[72]发现在高温($\geqslant$10 MK)谱线中蓝移分量占主导，比以往结果(静止分量占主导)更符合色球蒸发的理论预言. 利用更高空间分辨率的观测，Li等人[73]发现高温谱线Fe XXI(~10 MK)整体蓝移，这与色球蒸发理论完全吻合. Li等人[74]在一个X形耀斑中发现了分界线重联[31,75]的光谱证据，主要表现为过渡区Si IV谱线轮廓的红蓝翼展宽，表明重联双向出流的速度高达150~200 km/s.

(ⅰ) 耀斑电流片. 电流片是太阳爆发活动中释放磁能的关键结构，尤其在标准模型中，电流片连接CME和耀斑，提供了两者的耦合机制[76]. Lin等人[77,78]测量了CME-耀斑磁重联电流片的厚度，发现其远大于离子惯性尺度；估计了电流片中的电阻率的大小，发现其分别高出经典理论和反常电阻理论十几个和5个量级，与湍流导致的超电阻相当. 数值实验[41,79,80]表明，当电流片长宽比远远超过经典阈值之后，撕裂模不稳定性进入非线性阶段，湍流快速发展起来，耗散的效果被突然放大，可容纳多种形式的磁重联过程同时发生. 因此，大尺度电流片实际上是一个多种耗散结构的混合体.

观测显示，CME-耀斑电流片和其中的次级结构及其动力学演化都非常复杂. 在2017年9月10日的X级耀斑中，重联电流片极紫外辐射强度的空间变化以及出流区辐射强度的时间变化都呈现幂律谱分布[81]. 另外，电流片的长宽比高达200，温度高达20 MK，数密度达到10^9 cm^{-3}；Fe XXIV谱线(~18 MK)的非热速度高达200 km/s[82]. 这些观测特征表明，磁重联可能被撕裂模不稳定性和湍流调制，导致电流片被分裂为更小的电流结构，从而提高了磁重联的效率. CME-耀斑电流片中的等离子体团(图2(a))很有可能是撕裂模不稳定性的产物. Song等人[83]在日冕仪中观测到CME尾随电流片上大尺度等离子体团的合并过程，并伴随高能电子射电信号，这支持“磁岛合并可有效加速电子”的理论. Gou等人[84]发现爆发前沿电流片上行的等离子体团最终在电流片顶端合并为CME的前身结构(图2(b)，(c)). 而在爆发阶段，沿电流片下行的等离子体团与从Y型重联点收缩的耀斑环有密切关系[85].

(ⅱ) 三维磁重联与异常耀斑. 在经典的磁重联图像中，磁力线在磁场拓扑的间断(分界面)“断开”再“重新连接”. 但日冕中的磁重联通常发生在拓扑剧烈变化但仍然连续的地方——准分界层，表现为邻近磁力线之间交换磁场连接性，也被称为“滑动磁重联”(slipping reconnection). 利用STEREO卫星提供的不同于日地连线的视角，Sun等人[86]重构了发生重联的两组磁环的三维结构，发现它们分别位于两个不同的平面，重联后分别形成耀斑环和包裹在磁绳外层的磁环，加速了磁绳

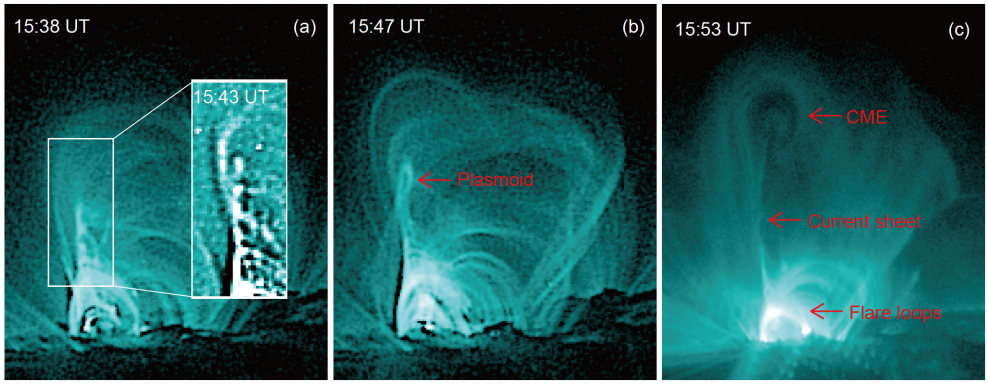


图 2 (网络版彩色)SDO卫星AIA 131 Å波段(Fe XXI发射线, 形成温度约10 MK)于2013年5月13日观测到的日冕物质抛射[84]. (a) 爆发前的电流片结构, 小图通过增强精细结构显示电流片撕裂为多个等离子体团; (b) 爆发初始时刻, 电流片顶端存在一个较大的等离子体团; (c) 爆发结构在内日冕呈现椭圆形, 身后拖出一条电流片与耀斑环相连

Figure 2 (Color online) The coronal mass ejection on 2013 May 13 observed by SDO/AIA 131 Å passband (Fe XXI emission with a formation temperature of ~10 MK)[84]. (a) The current sheet before the eruption, which is further highlighted by applying an unsharp masking technique in the inset to show that the current sheet is torn into multiple plasmoids. (b) At the onset of the eruption, a relatively large plasmoid is sitting at the upper tip of the current sheet. (c) The eruptive structure is manifested as an ellipsoid, with the current sheet connecting the ellipsoid and the flare loops underneath

的抛射. Gou等人[29]重构了耀斑后环的三维结构和演化, 发现耀斑后环沿着日冕磁场模型中准分界层的光球"足迹"滑动. Li和Zhang[87]报道了准周期的滑动磁重联.

基于经典的磁重联图像, 二维的"标准"耀斑模型从二十世纪六七十年代开始发展, 到21世纪初逐步得到完善, 成功地解释了典型的 "双带"耀斑. 一些"异常"耀斑无法用标准模型解释, 但从三维磁场拓扑的角度却较容易理解. 例如, "环形"耀斑多与磁零点的拓扑结构相关[26]. 新发现的"X形"耀斑中[31,75], 磁重联发生于两个相交的准分界层——双曲通量管(hyperbolic flux tube), 其横截面为X形, 对应于强电流区, 与X形耀斑带吻合; 相交线内嵌入连接两个磁零点的磁分界线. 束缚性耀斑(confined flare)的耀斑带常常对应于准分界层的光球"足迹". Liu等人[30]在一个X级束缚性耀斑中观测到与爆发耀斑类似的楔形结构, 温度分布却与经典图像相反; 楔形结构与拱形耀斑环之间还存在众多上升的环系, 与双曲通量管处的重联有关. 这些工作初步揭示了三维磁重联在耀斑过程中的关键作用.

白光耀斑指可见光连续谱辐射有明显增强的耀斑, 在观测中较为罕见. Cheng等人[88]利用辐射动力学模型, 发现非热粒子束加热可以解释大部分白光耀斑的连续谱辐射. Hao等人[89]发现在一个白光耀斑中同时出现脉冲式和渐变的耀斑核, 对现有的白光耀斑产生机理提出了挑战. Song和Tian[90]发现高达37%的环形耀斑都是白光耀斑; 只要能量释放的高度足够低、时间足够短, C级耀斑也可以是白光耀斑.

1.4.2 磁绳的结构和演化

磁绳(magnetic flux rope)由一组螺旋形的磁力线组成, 是宇宙中普遍存在的基本等离子体结构. 磁绳本身储存大量自由能, 当磁绳中的磁力线缠绕过多时, 会发生扭缠不稳定性(kink instability); 当背景磁场的约束不足时, 又会发生电流环不稳定性(torus instability). 近地飞船的局地探测表明, 磁绳结构普遍存在于行星际CME中. 因此, 磁绳被认为是太阳爆发活动的核心结构[91]. 但磁绳在太阳爆发前是否存在? 日冕磁绳是怎样形成的? 其内部结构如何? 这些基本科学问题尚未解决.

从光球磁场外推日冕磁场是研究太阳爆发活动的重要手段, 但从三维磁场中证认磁绳往往依赖于研究者的经验和主观判断. Liu等人[27]利用磁通量管的几何性质——磁螺绕数Tw, 并结合磁通量管另一几何性质——挤压因子Q来研究磁绳, 并给出Tw(相邻磁力线相互缠绕的圈数)与Tg(任意曲线缠绕主轴的圈数)的关系. 通过同时计算Q和Tw的三维分布, 发现磁绳是由磁准分界层 (Q>>1) 包裹的Tw增强 ($|Tw|\geqslant 1$) 的三维区域; Tw在磁绳主轴处通常取得极值. Guo等人[25,33,92]发展了使用Tg计算磁绳的磁螺度的方法. 结合Tw和Q的分布, Awasthi等人[93]证认出一个复杂磁绳系统, 由多个子磁绳编结而成, 在CME前相中内部出现明确的磁重联特征, 因此提出行星际CME的复杂性可能来自源区的多磁绳系统及其内部的复杂相互作用.

Cheng等人[94]通过多波段观测揭示CME的多温结构, 其亮前沿温度为2~3 MK, 而暗腔内的等离子体泡温度高达10 MK[95], 且具有磁绳的形态和演化特征, 在CME的加速相被进一步增强. 热等离子体泡在合适的视角下为高温通道结构(图3), 有时在CME和耀斑之前几分钟出现并缓慢抬升[96]. 高温通道源区的磁场最初主要为剪切磁拱, 在光球剪切和汇聚运动的作用下, 通过磁重联形成磁绳结构[28]. 光谱分析表明, 一些早期重联可能发生在色球[97].

Wang等人[98]在耀斑脉冲相观测到磁绳的两个共轭足点的形成过程: 从色球耀斑双带远端的亮点向外扩展为不规则的闭合亮带, 而亮带内部由于等离子体沿磁绳磁力线逃逸到行星际空间出现日冕暗化. 由于足点有明确的闭合边界, 又是典型的双带耀斑, 使得测量磁绳的轴向磁通和环向磁通随时间的演化成为可能. 由此可推出, 磁绳核心的磁场高度扭缠, 由内向外扭缠度降低, 与磁绳到达地球时根据飞船局地观测重构的纽缠分布一致. Gou等人[84]观测到剪切磁拱下的电流片结构在爆发前撕裂为多个等离子团, 后合并为电流片顶端的"种子"磁绳, 最终快速膨胀成为CME的完整过程. 种子磁绳起到连接电流片中的"微观"磁绳和CME磁绳的桥梁作用.

1.4.3 暗条结构和动力学

暗条(也叫日珥)爆发是太阳爆发的一种重要形式, 与CME和太阳耀斑密切相关. 通常认为冷而稠密的暗条物质受到剪切磁场或磁绳底部向上的磁张力而悬浮在热而稀薄的日冕中. Guo等人[32]研究了与一个暗条相关的非线性无力场, 发现其一部分为磁绳, 而另一部分为剪切磁拱. Su等人[99]用磁绳插入法为一个极区爆发日珥构建了一系列磁场模型, 经与观测比较, 认为支撑该日珥的磁场结构是一个有较强缠绕的磁绳. Xia等人[100]利用数值模拟研究了暗条的形成, 发现在色球蒸发-凝聚模型中, 一旦暗条种子形成, 暗条将自发通过虹吸流生长, 不需额外的色球蒸发. 通过实现该模型的二维辐射磁流体力学数值模拟, Xia等人[101]发现即使初始磁场没有凹陷, 暗条所受的重力也可能将磁力线压弯, 形成磁凹陷. Chen等人[102]提出利用暗条倒钩和螺度符号来判断暗条是正常极性还是反转极性的类型. 利用该方法, Ouyang等人[103]发现磁绳不是CME爆发的必要条件, 在CME爆发的前身结构中, 磁绳约占90%, 剪切磁拱约占10%.

暗条物质需要借助磁凹陷向上的磁张力才能悬浮在日冕中, 故而是指示磁场结构的重要"示踪"物; 暗条物质的动力学演化尤其是振荡[66,67,104]常常能提供磁场结构的线索. Liu等人[105]基于多个卫星不同视角的观测, 证认出一个双层暗条. 爆发前数小时内下层多次向上层输运物质和磁通量, 最终上层爆发形成CME, 下层仍然稳定. 由此提出两种可能的位形: 一种为双磁绳, 另一种为剪切磁拱上方再附着一个磁绳. 双层暗条有可能因任一层中缺失暗条物质[28]或两层紧密相连[104]而表现为普通的暗条. Zhang等人[106]研究了色球纤维结构与上方暗条融合导致的暗条爆发, 表明磁通/物质输运也是暗条爆发的可能机制. Xue等人[107]观测到暗条在爆发过程中通过磁重联释放暗条中的磁扭缠. Yan等人[108]发现小黑子的旋转可驱动活动区暗条的形成. Shen等人[109]观测到日珥底部空腔结构的复杂演化过程. Li等人[110]研究了暗条和冕环之间一连串磁重联中的精细结构.

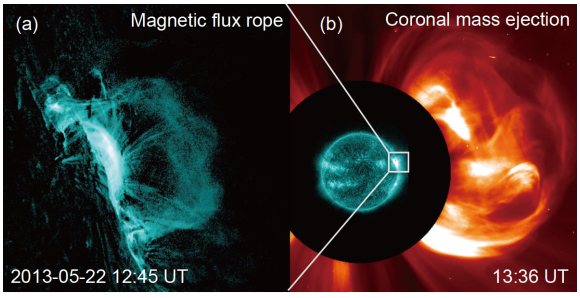


图 3 (网络版彩色)磁绳的爆发. (a) SDO卫星AIA 131 Å波段观测到的处于爆发过程中的高温磁绳结构; (b) 131 Å成像与SOHO卫星LASCO-C2白光日冕的合成图, 显示磁绳爆发导致的CME[91]

Figure 3 (Color online) An eruptive magnetic flux rope (MFR) observed by SDO/AIA 131 Å passband in the context of a SOHO/LASCO-C2 white light image. (a) The hot MFR observed by SDO/AIA 131 Å in the low corona; (b) the CME as a result of the MFR eruption[91]

1.4.4 太阳射电暴

太阳射电暴主要来自太阳爆发活动中产生的高能电子束的非热辐射. 根据其运动频谱的不同特征, 米波射电暴可分类为I~V型. Chen等人[111]根据射电和极紫外波段的同时成像观测, 证实CME作用于日冕结构可产生II型射电暴, 其中CME作用于冕流在运动频谱中表现为"隆起"[60,112]和"断谱"[113], 分别对应于射电辐射区穿越冕流和从冕流内部穿出两种情况. 微波射电暴呈现更加复杂多样的精细结构[17], 对诊断耀斑等离子体的物理参数具有重要作用[114~116]. Tan[117]提出, 载流等离子体环通过撕裂模扰动形成的一系列磁岛结构有可能通过干涉机制形成微波斑马纹结构. 针对电

子回旋脉泽(electron cyclotron maser, ECM)辐射机制在解释太阳射电暴时遇到的主要困难, Wu等人提出了一系列修正模型, 包括提出幂律谱高能电子束的低能截止陡化效应驱动ECM的辐射机制[118,119]; 发现阿尔文波扰动明显改变ECM的共振激发条件, 并显著影响ECM辐射的生长率和偏振态[120,121]; 通过引入高能电子束激发的自生阿尔文波, 发展了自洽的ECM辐射机制[122].

1.4.5 爆发机制

太阳爆发活动的物理机制是太阳物理学的一个核心研究课题[91,123,124]. Su等人[99]用磁绳插入法构建宁静日珥的磁场模型, 发现日珥爆发从缓慢上升相到快速上升相过渡的诱因是电流环不稳定性而非磁重联. 通过自洽地获得磁通量从光球浮现进入日冕的过程, Roussev等人[125]对磁通浮现触发CME的机制和伴随X-射线的起源进行了深入研究, 指出组成CME的磁力线与新浮磁场的磁力线不同, 在爆发前软X-射线波段出现的日冕S-形结构是磁场浮现的结果. Yang等人[126]提出由于已有黑子阻碍新浮现的黑子的横向运动, 从而形成复杂磁场结构, 导致活动区12673大耀斑频发. 另一方面, “失败”爆发的物理机制也得到关注[127]. 这些爆发初始或由纽缠不稳定性驱动, 但磁绳未能上升到磁场衰减足够快, 即电流环不稳定性起作用的高度[27,33]; 或者磁绳虽到达临界高度, 但在更高的高度上, 磁场随高度的衰减却低于临界值[128], 从而被约束在日冕磁场中.

通过外部磁重联削弱磁场约束是CME触发的几个主流机制之一, 常被用来解释“同调”爆发, 即不同区域几乎同时发生的爆发活动[129,130]. 但长期以来缺少对其重联过程的直接观测证认. Chen等人[131]研究了一例临边事件, 证认出多个外部重联的特征, 如高温尖状冕环对的出现及序列增亮等, 且各阶段演化特征与模型的预测吻合. Zhou等人[132]提供了外部磁重联导致磁拱爆裂和与暗条爆发相联系的CME的观测证据. Wang等人[133]给出了在宁静区发生的大尺度外部磁重联产生的一系列观测特征. Zhou等人[134]研究了由连接两个活动区的大尺度磁绳驱动的多重外部磁重联导致接连发生的大耀斑和CME的过程.

1.5 CME的传播和相互作用

CME之间及其和太阳风的相互作用提供了理解CME的性质及其空间天气效应的契机. Shen等人[135]分析了STEREO卫星观测到的一次CME碰撞事件. 发现CME之间的碰撞过程虽然类似弹性球, 方向和速度有明显的改变, 但碰撞之后系统总动能反而增加, 这是由于碰撞挤压使得CME内部的热能和磁能转换成动能, 是一种“超弹性”过程. Liu等人[136]报道了一个创历史纪录的高速CME, 仅用18.6 h就到达1个天文单位(astronomical unit, AU; 1 AU=1.496×10^{11} m, 即日地距离)外的STEREO卫星, 此时其速度和磁场仍高达通常太阳风的5倍和10倍. 这被归因于CME的相互作用, 以及之前的CME为此次事件的传播道路扫清了障碍.

Wang等人[137]确认了1997~1998两年间SOHO卫星观测到的1078个CME在太阳表面的源区位置和在日冕中的传播方向, 发现大部分CME向赤道偏转. 这是由于, 当CME排开日冕时, 原来趋于势场的背景磁场被挤压成非势场, CME周围磁能密度的不均匀造成了CME的偏转. 这一物理图像先后被个例分析[138]和统计研究[139]所证实. Feng等人[140]用多边形约束CME体积的方法进行CME三维重构, 观察到CME与太阳风相互作用而产生的形变. Liu等人[141]通过分析STEREO的宽视场立体成像数据, 揭示CME在整个日地空间的传播过程, 其中慢速CME主要被太阳风拖曳加速, 而快速CME则被太阳风拖曳而减速.

1.6 太阳风的起源

在传统的太阳风起源模型中, 物质由光球连续、定常地在一维流管中加速而形成太阳风. 这种模型假设“由色球到日冕的磁场结构是十分稳定的”, 与实际情况并不相符. 结合光谱观测和日冕磁场重构, Tu等人[142]提出了磁重联驱动的太阳风起源新图像, 即中尺度磁环被超米粒对流携带到色球网络组织处的漏斗状磁结构处, 并与之重联. 磁环携带的等离子体被注入漏斗状磁结构, 向外加速形成初始太阳风. IRIS卫星发现网络组织中普遍存在间歇性的温度高达1×10^5 K的高速喷流, 与这一图像吻合. 数值模拟重现了磁环与漏斗状磁结构发生间歇性磁重联, 从而将色球物质注入磁漏斗的过程[143,144].

冕流和冕羽等日冕结构是太阳风的重要源区. 冕流上方冕尖处, 常可观测到不断向外溢出团块结构——冕团. 为研究其成因, Chen等人[145]发展了低耗散、高分辨的冕流-太阳风模型, 再现了冕团的形成过程, 由此提出冕尖处存在周期性发生的不稳定过程, 给出了低速太阳风源于冕流闭场的一种机制. Fu等人[146]

对冕羽流动进行了多普勒测量，发现这一准稳态流动是太阳风的重要物质来源.

2 展望

从1985年我国发展自己的太阳磁场望远镜开始，中国太阳物理学开始走进国际学术前沿[147]. 过去10年，从论文数量、引文数量和高被引论文数量3个方面来看，中国太阳物理学在国际上已处于前列，在学科前沿领域开始取得一定的发言权. 得益于我国自主研制的观测设备，我国学者尤其在认知太阳磁场性质、低层大气精细结构和动力学，以及太阳爆发活动形成机理方面取得了重要进步，在探索太阳磁周期的起源和预报、日冕和太阳风的加热、日冕磁场的测量等难题方面也有实质性进展. 太阳物理学的概念、经验和物理规律正在对相邻学科产生重要影响[148~150]. 我国正在建设中的明安图射电频谱日像仪(Mingantu ultrawide spectral radioheliograph, MUSER)具有在超宽频带上同时以高时间、空间和频率分辨率观测太阳大气的能力，为耀斑和CME等太阳活动研究提供了新的观测手段. 正在建设中的用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统(accurate infrared magnetic field measurements of the Sun, AIMS)将以10高斯量级的精度开展太阳矢量磁场的测量，将横场测量水平提高一个量级. 已经启动的空间探测卫星计划“先进天基太阳天文台”(advanced space-based solar observatory, ASO-S)将以第25太阳活动周峰年为契机，首次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CME的近日面的初发和传播. “先进地基太阳天文台”(advanced ground-based solar observatory, ASO-G)已列入国家规划. 选址工作也为我国大型太阳观测设备获得了优秀的候选址点[151]，更多空间太阳的探测计划正在积极地探讨和论证之中[152]. 这些重大仪器设备必将极大促进太阳物理学和空间天气科学的发展.

从我国太阳物理学科的储备可以预见，未来我们可能取得重大成就的一个领域是，通过太阳向量磁场和多层次太阳大气的成像和光谱观测，与理论和三维辐射磁流体数值模拟研究真正结合，系统地提出太阳电磁风暴的形成机理和空间灾害天气预报的基础理论. 另一方面，我国太阳物理学的发展需要补齐“短板”——扶持薄弱的研究方向，例如日震学；需要持续地鼓励和支持对重大的、跨学科的科学问题的探索，例如，日冕加热机理和太阳风的起源、太阳磁场和磁周期的起源、太阳内部的物理诊断、重大灾害性空间天气的起源和预报，以及太阳变化如何影响空间环境和生命过程等. 同时，作为一门以观测为主兼具应用价值的基础学科，我国太阳物理学的发展还需要我们致力于自主获取优质的观测数据，需要大力培养望远镜和仪器设计以及数据标定和校正等方面的应用型人才，需要积极利用人工智能和大数据等新兴技术为空间天气预报服务[153]. 未来在我国快速发展的航天技术和深空探测能力的引领下，通过观测、理论和三维大规模数值模拟之间的深度碰撞和融合，我国太阳物理学科有望取得长足进步，在学科前沿占领若干制高点；同时也有助于推动我国航天事业的发展.

参考文献

1 Hale G E. On the probable existence of a magnetic field in sun-spots. Astrophys J, 1908, 28: 315
2 Sakurai T. Heating mechanisms of the solar corona. Proc Jpn Acad Ser B-Phys Biol Sci, 2017, 93: 87–97
3 Parker E N. Mass ejection and a brief history of the solar wind concept. In: Jokipii J R, Sonett C P, Giampapa M S, eds. Cosmic Winds and the Heliosphere. Tucson: University of Arizona, 1997
4 Gopalswamy N. History and development of coronal mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship. Geosci Lett, 2016, 3: 8
5 Airapetian V S, Glocer A, Gronoff G, et al. Prebiotic chemistry and atmospheric warming of early Earth by an active young Sun. Nat Geosci, 2016, 9: 452–455
6 Zhao M, Wang J X, Jin C L, et al. Magnetic non-potentiality on the quiet Sun and the filigree. Res Astron Astrophys, 2009, 9: 933–944
7 Zhou G, Wang J, Jin C. Solar intranetwork magnetic elements: Flux distributions. Sol Phys, 2013, 283: 273–282
8 Jin C L, Wang J X, Song Q, et al. The sun’s small-scale magnetic elements in solar cycle 23. Astrophys J, 2011, 731: 37
9 Tan B, Cheng Z. The mid-term and long-term solar quasi-periodic cycles and the possible relationship with planetary motions. Astrophys Space Sci, 2013, 343: 511–521
10 Jiang J, Cameron R H, Schüssler M. Effects of the scatter in sunspot group tilt angles on the large-scale magnetic field at the solar surface. Astrophys J, 2014, 791: 5
11 Jiang J, Cameron R H, Schüssler M. The cause of the weak solar cycle 24. Astrophys J, 2015, 808: L28

12 Jiang J, Wang J X, Jiao Q R, et al. Predictability of the solar cycle over one cycle. Astrophys J, 2018, 863: 159
13 Hao J, Zhang M. Hemispheric helicity trend for solar cycle 24. Astrophys J, 2011, 733: L27
14 Yang S, Büchner J, Santos J C, et al. Evolution of relative magnetic helicity: Method of computation and its application to a simulated solar corona above an active region. Sol Phys, 2013, 283: 369–382
15 Zhang H, Brandenburg A, Sokoloff D D. Magnetic helicity and energy spectra of a solar active region. Astrophys J, 2014, 784: L45
16 Zhang M, Flyer N, Low B C. Magnetic helicity of self-similar axisymmetric force-free fields. Astrophys J, 2012, 755: 78
17 Tan B, Yan Y, Tan C, et al. Microwave Zebra pattern structures in the X2.2 solar flare on 2011 February 15. Astrophys J, 2012, 744: 166
18 Qu Z Q, Dun G T, Chang L, et al. Spectro-imaging polarimetry of the local corona during solar eclipse. Sol Phys, 2017, 292: 37
19 Chen Y, Tian H, Su Y, et al. Diagnosing the magnetic field structure of a coronal cavity observed during the 2017 total solar eclipse. Astrophys J, 2018, 856: 21
20 Jiang C, Feng X. Extrapolation of the solar coronal magnetic field from SDO/HMI magnetogram by a CESE-MHD-NLFFF code. Astrophys J, 2013, 769: 144
21 Zhu X, Wang H, Du Z, et al. Forced field extrapolation of the Hα fibrils in the solar chromosphere. Astrophys J, 2016, 826: 51
22 Jiang C, Wu S T, Feng X, et al. Data-driven magnetohydrodynamic modelling of a flux-emerging active region leading to solar eruption. Nat Commun, 2016, 7: 11522
23 Guo Y, Xia C, Keppens R. Magneto-frictional modeling of coronal nonlinear force-free fields. II. Application to observations. Astrophys J, 2016, 828: 83
24 Xia C, Teunissen J, Mellah I E, et al. MPI-AMRVAC 2.0 for solar and astrophysical applications. Astrophys J Suppl Ser, 2018, 234: 30
25 Guo Y, Ding M D, Cheng X, et al. Twist accumulation and topology structure of a solar magnetic flux rope. Astrophys J, 2013, 779: 157
26 Yang K, Guo Y, Ding M D. On the 2012 October 23 circular ribbon flare: Emission features and magnetic topology. Astrophys J, 2015, 806: 171
27 Liu R, Kliem B, Titov V S, et al. Structure, stability, and evolution of magnetic flux ropes from the perspective of magnetic twist. Astrophys J, 2016, 818: 148
28 Cheng X, Ding M D, Zhang J, et al. Formation of a double-decker magnetic flux rope in the sigmoidal solar active region 11520. Astrophys J, 2014, 789: 93
29 Gou T, Liu R, Wang Y, et al. Stereoscopic observation of slipping reconnection in a double candle-flame-shaped solar flare. Astrophys J, 2016, 821: L28
30 Liu R, Titov V S, Gou T, et al. An unorthodox X-class long-duration confined flare. Astrophys J, 2014, 790: 8
31 Liu R, Chen J, Wang Y, et al. Investigating energetic X-shaped flares on the outskirts of a solar active region. Sci Rep, 2016, 6: 34021
32 Guo Y, Schmieder B, Démoulin P, et al. Coexisting flux rope and dipped arcade sections along one solar filament. Astrophys J, 2010, 714: 343–354
33 Guo Y, Ding M D, Schmieder B, et al. Driving mechanism and onset condition of a confined eruption. Astrophys J, 2010, 725: L38–L42
34 Yang K E, Longcope D W, Ding M D, et al. Observationally quantified reconnection providing a viable mechanism for active region coronal heating. Nat Commun, 2018, 9: 692
35 Ji H, Cao W, Goode P R. Observation of ultrafine channels of solar corona heating. Astrophys J, 2012, 750: L25
36 Zhang Y Z, Shibata K, Wang J X, et al. Revision of solar spicule classification. Astrophys J, 2012, 750: 16
37 Zhang J, Liu Y. Ubiquitous rotating network magnetic fields and extreme-ultraviolet cyclones in the quiet sun. Astrophys J, 2011, 741: L7
38 Hong J, Jiang Y, Zheng R, et al. A micro coronal mass ejection associated blowout extreme-ultraviolet jet. Astrophys J, 2011, 738: L20
39 Yang S, Zhang J, Xiang Y. Magnetic reconnection between small-scale loops observed with the New Vacuum Solar Telescope. Astrophys J, 2015, 798: L11
40 Li D, Li L, Ning Z. Spectroscopic and imaging observations of small-scale reconnection events. Mon Not R Astron Soc, 2018, 479: 2382–2388
41 Ni L, Kliem B, Lin J, et al. Fast magnetic reconnection in the solar chromosphere mediated by the plasmoid instability. Astrophys J, 2015, 799: 79
42 Tian H, Zhu X, Peter H, et al. Magnetic reconnection at the earliest stage of solar flux emergence. Astrophys J, 2018, 854: 174
43 Hong J, Ding M D, Li Y, et al. Spectral observations of ellerman bombs and fitting with a two-cloud model. Astrophys J, 2014, 792: 13
44 Hong J, Carlsson M, Ding M D. RADYN simulations of non-thermal and thermal models of ellerman bombs. Astrophys J, 2017, 845: 144
45 Tian H, Xu Z, He J, et al. Are IRIS bombs connected to ellerman bombs? Astrophys J, 2016, 824: 96
46 Su J T, Ji K F, Cao W, et al. Observations of oppositely directed umbral wavefronts rotating in sunspots obtained from the New Solar Telescope of BBSO. Astrophys J, 2016, 817: 117
47 Priya T G, Wenda C, Su J T, et al. Observations of running penumbral waves emerging in a sunspot. Astrophys J, 2018, 852: 15
48 Yang S, Zhang J, Jiang F, et al. Oscillating light wall above a sunspot light bridge. Astrophys J, 2015, 804: L27
49 Zhang J, Tian H, Solanki S K, et al. Dark structures in sunspot light bridges. Astrophys J, 2018, 865: 29
50 Tian H, Yurchyshyn V, Peter H, et al. Frequently occurring reconnection jets from sunspot light bridges. Astrophys J, 2018, 854: 92

51 Li T, Zhang J, Yang S, et al. SDO/AIA observations of secondary waves generated by interaction of the 2011 June 7 global EUV wave with solar coronal structure. Astrophys J, 2012, 746: 13

52 Shen Y, Liu Y, Su J, et al. Diffraction, refraction, and reflection of an extreme-ultraviolet wave observed during its interactions with remote active regions. Astrophys J, 2013, 773: L33

53 Shen Y, Liu Y D, Chen P F, et al. Simultaneous transverse oscillations of a prominence and a filament and longitudinal oscillation of another filament induced by a single shock wave. Astrophys J, 2014, 795: 130

54 Liu R, Wang Y, Lee J, et al. Impacts of EUV wavefronts on coronal structures in homologous coronal mass ejections. Astrophys J, 2019, 870: 15

55 Chen P F, Wu Y. First evidence of coexisting EIT wave and coronal Moreton wave from SDO/AIA observations. Astrophys J, 2011, 732: L20

56 Chen P F, Wu S T, Shibata K, et al. Evidence of EIT and Moreton waves in numerical simulations. Astrophys J, 2002, 572: L99–L102

57 Chen P F, Fang C, Chandra R, et al. Can a fast-mode EUV wave generate a stationary front? Sol Phys, 2016, 291: 3195–3206

58 Chen Y, Song H Q, Li B, et al. Streamer waves driven by coronal mass ejections. Astrophys J, 2010, 714: 644–651

59 Chen Y, Feng S W, Li B, et al. A coronal seismological study with streamer waves. Astrophys J, 2011, 728: 147

60 Feng S W, Chen Y, Kong X L, et al. Radio signatures of coronal-mass-ejection-streamer interaction and source diagnostics of type II radio burst. Astrophys J, 2012, 753: 21

61 Yang L, Zhang L, He J, et al. Numerical simulation of fast-mode magnetosonic waves excited by plasmoid ejections in the solar corona. Astrophys J, 2015, 800: 111

62 Tian H, Young P R, Reeves K K, et al. Global sausage oscillation of solar flare loops detected by the region imaging spectrograph. Astrophys J, 2016, 823: L16

63 Chen S X, Li B, Xiong M, et al. Standing sausage modes in nonuniform magnetic tubes: An inversion scheme for inferring flare loop parameters. Astrophys J, 2015, 812: 22

64 Li H, Liu Y, Tam K V. Fundamental and harmonic oscillations in neighboring coronal loops. Astrophys J, 2017, 842: 99

65 Chen P F, Innes D E, Solanki S K. SOHO/SUMER observations of prominence oscillation before eruption. Astron Astrophys, 2008, 484: 487–493

66 Zhang Q M, Chen P F, Xia C, et al. Observations and simulations of longitudinal oscillations of an active region prominence. Astron Astrophys, 2012, 542: A52

67 Zhou Y H, Xia C, Keppens R, et al. Three-dimensional MHD simulations of solar prominence oscillations in a magnetic flux rope. Astrophys J, 2018, 856: 179

68 Wang J, Zhao M, Zhou G. Magnetic changes in the course of the X7.1 solar flare on 2005 January 20. Astrophys J, 2009, 690: 862–874

69 Bai X Y, Su J T, Cao W D, et al. Multi-wavelength observations of a subarcsecond penumbral transient brightening event. Astrophys J, 2016, 823: 60

70 Jiang Y, Zheng R, Yang J, et al. Rapid sunspot rotation associated with the X2.2 flare on 2011 February 15. Astrophys J, 2012, 744: 50

71 Bi Y, Jiang Y, Yang J, et al. Observation of a reversal of rotation in a sunspot during a solar flare. Nat Commun, 2016, 7: 13798

72 Li Y, Ding M D. Different patterns of chromospheric evaporation in a flaring region observed with HINODE/EIS. Astrophys J, 2011, 727: 98

73 Li Y, Ding M D, Qiu J, et al. Chromospheric evaporation in an X1.0 flare on 2014 March 29 observed with IRIS and EIS. Astrophys J, 2015, 811: 7

74 Li Y, Kelly M, Ding M D, et al. Spectroscopic observations of magnetic reconnection and chromospheric evaporation in an X-shaped solar flare. Astrophys J, 2017, 848: 118

75 Li Y, Qiu J, Longcope D W, et al. Observations of an X-shaped ribbon flare in the sun and its three-dimensional magnetic reconnection. Astrophys J, 2016, 823: L13

76 Lin J, Murphy N A, Shen C, et al. Review on current sheets in CME development: Theories and observations. Space Sci Rev, 2015, 194: 237–302

77 Lin J, Li J, Forbes T G, et al. Features and properties of coronal mass ejection/flare current sheets. Astrophys J, 2007, 658: L123–L126

78 Lin J, Li J, Ko Y K, et al. Investigation of thickness and electrical resistivity of the current sheets in solar eruptions. Astrophys J, 2009, 693: 1666–1677

79 Shen C, Lin J, Murphy N A. Numerical experiments on fine structure within reconnecting current sheets in solar flares. Astrophys J, 2011, 737: 14

80 Mei Z, Shen C, Wu N, et al. Numerical experiments on magnetic reconnection in solar flare and coronal mass ejection current sheets. Mon Not R Astron Soc, 2012, 425: 2824–2839

81 Cheng X, Li Y, Wan L F, et al. Observations of turbulent magnetic reconnection within a solar current sheet. Astrophys J, 2018, 866: 64

82 Li Y, Xue J C, Ding M D, et al. Spectroscopic observations of a current sheet in a solar flare. Astrophys J, 2018, 853: L15

83 Song H Q, Chen Y, Li G, et al. Coalescence of macroscopic magnetic islands and electron acceleration from STEREO observation. Phys Rev X, 2012, 2: 021015

84 Gou T, Liu R, Kliem B, et al. The birth of a coronal mass ejection. Sci Adv, 2019, 5: eaau7004

85 Liu R. Dynamical processes at the vertical current sheet behind an erupting flux rope. Mon Not R Astron Soc, 2013, 434: 1309–1320
86 Sun J Q, Cheng X, Ding M D, et al. Extreme ultraviolet imaging of three-dimensional magnetic reconnection in a solar eruption. Nat Commun, 2015, 6: 7598
87 Li T, Zhang J. Quasi-periodic slipping magnetic reconnection during an X-class solar flare observed by the solar dynamics observatory and interface region imaging spectrograph. Astrophys J, 2015, 804: L8
88 Cheng J X, Ding M D, Carlsson M. Radiative hydrodynamic simulation of the continuum emission in solar white-light flares. Astrophys J, 2010, 711: 185–191
89 Hao Q, Yang K, Cheng X, et al. A circular white-light flare with impulsive and gradual white-light kernels. Nat Commun, 2017, 8: 2202
90 Song Y, Tian H. Investigation of white-light emission in circular-ribbon flares. Astrophys J, 2018, 867: 159
91 Cheng X, Guo Y, Ding M D. Origin and structures of solar eruptions I: Magnetic flux rope. Sci China Earth Sci, 2017, 60: 1383–1407
92 Guo Y, Pariat E, Valori G, et al. Magnetic helicity estimations in models and observations of the solar magnetic field. III. Twist number method. Astrophys J, 2017, 840: 40
93 Awasthi A K, Liu R, Wang H, et al. Pre-eruptive magnetic reconnection within a multi-flux-rope system in the solar corona. Astrophys J, 2018, 857: 124
94 Cheng X, Zhang J, Liu Y, et al. Observing flux rope formation during the impulsive phase of a solar eruption. Astrophys J, 2011, 732: L25
95 Cheng X, Zhang J, Saar S H, et al. Differential emission measure analysis of multiple structural components of coronal mass ejections in the inner corona. Astrophys J, 2012, 761: 62
96 Cheng X, Zhang J, Ding M D, et al. The driver of coronal mass ejections in the low corona: A flux rope. Astrophys J, 2013, 763: 43
97 Cheng X, Ding M D, Fang C. Imaging and spectroscopic diagnostics on the formation of two magnetic flux ropes revealed by SDO/AIA and IRIS. Astrophys J, 2015, 804: 82
98 Wang W, Liu R, Wang Y, et al. Buildup of a highly twisted magnetic flux rope during a solar eruption. Nat Commun, 2017, 8: 1330
99 Su Y, van Ballegooijen A, McCauley P, et al. Magnetic structure and dynamics of the erupting solar polar crown prominence on 2012 March 12. Astrophys J, 2015, 807: 144
100 Xia C, Chen P F, Keppens R, et al. Formation of solar filaments by steady and nonsteady chromospheric heating. Astrophys J, 2011, 737: 27
101 Xia C, Chen P F, Keppens R. Simulations of prominence formation in the magnetized solar corona by chromospheric heating. Astrophys J, 2012, 748: L26
102 Chen P F, Harra L K, Fang C. Imaging and spectroscopic observations of a filament channel and the implications for the nature of counter-streamings. Astrophys J, 2014, 784: 50
103 Ouyang Y, Zhou Y H, Chen P F, et al. Chirality and magnetic configurations of solar filaments. Astrophys J, 2017, 835: 94
104 Awasthi A K, Liu R, Wang Y. Double-decker filament configuration revealed by mass motions. Astrophys J, 2019, 872: 109
105 Liu R, Kliem B, Török T, et al. Slow rise and partial eruption of a double-decker filament. I. Observations and interpretation. Astrophys J, 2012, 756: 59
106 Zhang Q, Liu R, Wang Y, et al. A prominence eruption driven by flux feeding from chromospheric fibrils. Astrophys J, 2014, 789: 133
107 Xue Z, Yan X, Cheng X, et al. Observing the release of twist by magnetic reconnection in a solar filament eruption. Nat Commun, 2016, 7: 11837
108 Yan X L, Xue Z K, Pan G M, et al. The formation and magnetic structures of active-region filaments observed by NVST, SDO, and HINODE. Astrophys J Suppl Ser, 2015, 219: 17
109 Shen Y, Liu Y, Liu Y D, et al. Fine magnetic structure and origin of counter-streaming mass flows in a quiescent solar prominence. Astrophys J, 2015, 814: L17
110 Li L, Zhang J, Peter H, et al. Magnetic reconnection between a solar filament and nearby coronal loops. Nat Phys, 2016, 12: 847–851
111 Chen Y, Du G, Feng L, et al. A solar type II radio burst from coronal mass ejection-coronal ray interaction: Simultaneous radio and extreme ultraviolet imaging. Astrophys J, 2014, 787: 59
112 Feng S W, Chen Y, Kong X L, et al. Diagnostics on the source properties of a type II radio burst with spectral bumps. Astrophys J, 2013, 767: 29
113 Kong X L, Chen Y, Li G, et al. A broken solar type II radio burst induced by a coronal shock propagating across the streamer boundary. Astrophys J, 2012, 750: 158
114 Yan Y, Huang J, Chen B, et al. Radio fine structures in dm–cm wavelength range associated with magnetic reconnection processes. Adv Space Res, 2010, 46: 413–418
115 Huang J, Tan B. Microwave bursts with fine structures in the decay phase of a solar flare. Astrophys J, 2012, 745: 186
116 Yu S, Nakariakov V M, Selzer L A, et al. Quasi-periodic wiggles of microwave Zebra structures in a solar flare. Astrophys J, 2013, 777: 159
117 Tan B. A physical explanation of solar microwave Zebra pattern with the current-carrying plasma loop model. Astrophys Space Sci, 2010, 325: 251–257
118 Wu D J, Tang J F. Effects of the lower energy cutoff behavior of power-law electrons on the electron-cyclotron maser instability. Astrophys J,

2008, 677: L125–L128
119 Tang J F, Wu D J. Electron-cyclotron maser emission by power-law electrons in coronal loops. Astron Astrophys, 2009, 493: 623–628
120 Wu D J, Chen L, Wu C S. Alfvénic turbulence generated by a beam of energetic ions via spontaneous process. Phys Plasmas, 2012, 19: 024511
121 Wu D J. Effect of Alfvén waves on the growth rate of the electron-cyclotron maser emission. Phys Plasmas, 2014, 21: 064506
122 Wu D J, Chen L, Zhao G Q, et al. A novel mechanism for electron-cyclotron maser. Astron Astrophys, 2014, 566: A138
123 Chen P F. Coronal mass ejections: Models and their observational basis. Living Rev Sol Phys, 2011, 8: 1
124 Guo Y, Cheng X, Ding M D. Origin and structures of solar eruptions II: Magnetic modeling. Sci China Earth Sci, 2017, 60: 1408–1439
125 Roussev I I, Galsgaard K, Downs C, et al. Explaining fast ejections of plasma and exotic X-ray emission from the solar corona. Nat Phys, 2012, 8: 845–849
126 Yang S, Zhang J, Zhu X, et al. Block-induced complex structures building the flare-productive solar active region 12673. Astrophys J, 2017, 849: L21
127 Liu L, Wang Y, Wang J, et al. Why is a flare-rich active region CME-poor? Astrophys J, 2016, 826: 119
128 Wang D, Liu R, Wang Y, et al. Critical height of the torus instability in two-ribbon solar flares. Astrophys J, 2017, 843: L9
129 Shen Y, Liu Y, Su J, et al. On a coronal blowout jet: The first observation of a simultaneously produced bubble-like CME and a jet-like CME in a solar event. Astrophys J, 2012, 745: 164
130 Shen Y, Liu Y, Su J. Sympathetic partial and full filament eruptions observed in one solar breakout event. Astrophys J, 2012, 750: 12
131 Chen Y, Du G, Zhao D, et al. Imaging a magnetic-breakout solar eruption. Astrophys J, 2016, 820: L37
132 Zhou G P, Zhang J, Wang J X, et al. A study of external magnetic reconnection that triggers a solar eruption. Astrophys J, 2017, 851: L1
133 Wang D, Liu R, Wang Y, et al. Unraveling the links among sympathetic eruptions. Astrophys J, 2018, 869: 177
134 Zhou G P, Tan C M, Su Y N, et al. Multiple magnetic reconnections driven by a large-scale magnetic flux rope. Astrophys J, 2019, 873: 23
135 Shen C, Wang Y, Wang S, et al. Super-elastic collision of large-scale magnetized plasmoids in the heliosphere. Nat Phys, 2012, 8: 923–928
136 Liu Y D, Luhmann J G, Kajdič P, et al. Observations of an extreme storm in interplanetary space caused by successive coronal mass ejections. Nat Commun, 2014, 5: 3481
137 Wang Y, Chen C, Gui B, et al. Statistical study of coronal mass ejection source locations: Understanding CMEs viewed in coronagraphs. J Geophys Res, 2011, 116: A04104
138 Shen C, Wang Y, Gui B, et al. Kinematic evolution of a slow CME in corona viewed by STEREO-B on 8 October 2007. Sol Phys, 2011, 269: 389–400
139 Gui B, Shen C, Wang Y, et al. Quantitative analysis of CME deflections in the corona. Sol Phys, 2011, 271: 111–139
140 Feng L, Inhester B, Wei Y, et al. Morphological evolution of a three-dimensional coronal mass ejection cloud reconstructed from three viewpoints. Astrophys J, 2012, 751: 18
141 Liu Y D, Luhmann J G, Lugaz N, et al. On Sun-to-Earth propagation of coronal mass ejections. Astrophys J, 2013, 769: 45
142 Tu C Y, Zhou C, Marsch E, et al. Solar wind origin in coronal funnels. Science, 2005, 308: 519–523
143 He J S, Tu C Y, Marsch E. Modeling of solar wind in the coronal funnel with mass and energy supplied at 5 Mm. Sol Phys, 2008, 250: 147–158
144 Yang L, He J, Peter H, et al. Injection of plasma into the nascent solar wind via reconnection driven by supergranular advection. Astrophys J, 2013, 770: 6
145 Chen Y, Li X, Song H Q, et al. Intrinsic instability of coronal streamers. Astrophys J, 2009, 691: 1936–1942
146 Fu H, Xia L, Li B, et al. Measurements of outflow velocities in on-disk plumes from EIS/HINODE observations. Astrophys J, 2014, 794: 109
147 Fang C. Recent progress of solar physics research in China. Res Astron Astrophys, 2011, 11: 1377–1402
148 He H, Wang H, Yun D. Activity analyses for solar-type stars observed with Kepler. I. Proxies of magnetic activity. Astrophys J Suppl Ser, 2015, 221: 18
149 He H, Wang H, Zhang M, et al. Activity analyses for solar-type stars observed with Kepler. II. Magnetic feature versus flare activity. Astrophys J Suppl Ser, 2018, 236: 7
150 Yuan F, Lin J, Wu K, et al. A magnetohydrodynamical model for the formation of episodic jets. Mon Not R Astron Soc, 2009, 395: 2183–2188
151 Liu Y, Li X B, Zhang X F, et al. Operation of the astronomical monitoring stations at Mt. Wumingshan. In: Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2018. doi: 10.1117/12.2309831
152 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 [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]
153 Huang X, Wang H, Xu L, et al. Deep learning based solar flare forecasting model. I. Results for line-of-sight magnetograms. Astrophys J, 2018, 856: 7

Summary for “中国太阳物理学研究进展”

Recent research progress of solar physics in China

Rui Liu[1*], Yao Chen[2], Yuanyong Deng[3], Mingde Ding[4], Haisheng Ji[5], Jun Lin[6], Hui Tian[7], Yuming Wang[1] & Jingxiu Wang[8*]

[1] *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*
[2] *School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai 264209, China;*
[3] *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
[4] *School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;*
[5] *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China;*
[6] *Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;*
[7] *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;*
[8] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
* Corresponding authors, E-mail: rliu@ustc.edu.cn; wangjx@nao.cas.cn

Solar physics focuses on the star that is not only closest but most important to us. The study of solar physics is one of the most active interdisciplinary frontiers of astronomy, planetary and space science, plasma physics, etc. The eventual solution of many fundamental scientific problems would greatly benefit from breakthroughs in solar physics, e.g., problems such as the origin of magnetic field in astronomical objects, the formation and evolutionary mechanisms of the stellar magnetic cycle, the impact of stellar magnetic activities on the habitability of planets and the origin of life, and the forecast of solar eruptions to guard against adverse space weather effects. In the last ten years, solar physics has stepped into an era of multi-messenger, full electromagnetic spectrum, full time-domain, high-resolution, multi-scale, multi-view and high-precision detection. A new era is looming on the horizon with two revolutionary missions, namely, Parker Solar Probe, which was launched in 2018 and will probe the solar corona from as close as 6 million kilometers to the Sun’s surface, and Solar Orbiter, which will be launched in 2020 to image the Sun’s polar regions for the first time. In China, the first space mission dedicated to the Sun, the Advanced Space Based Solar Observatory (ASO-S), will be launched in 2021, targeting the next solar cycle. In addition, the Advanced Ground Based Solar Observatory (ASO-G) has been incorporated within the framework of national planning; under construction are two important instruments for solar physics, MUSER (Mingantu Ultrawide Spectral Radioheliograph) and AIMS (Accurate Infrared Magnetic field measurements of the Sun). Embracing the upcoming advancement in observing the Sun, we review in this article the prominent progresses made by Chinese scholars in the last ten years, mainly in studying the solar magnetic field, fine structures and dynamics of the lower atmosphere, and solar eruptions. At the frontier of solar magnetism, we have made headway in predicting the solar cycle, understanding the magnetic topology and the evolution of magnetic helicity, and modeling the coronal magnetic field. At the frontier of fine structures and dynamics of the lower atmosphere, we have advanced the understanding of not only new phenomena, such as ultraviolet bursts, but also traditional subjects, such as sunspot light bridges, Ellerman bombs, as well as mass and energy transfer from the lower to higher atmosphere. At the frontier of solar eruptions, we have made progress in identifying the eruption progenitor, clarifying its formation, structure, and evolution toward eruption as well as the subsequent propagation and interaction in interplanetary space, and understanding various aspects and consequences of magnetic reconnection, a fundament plasma process in the universe. On the basis of the review, we look forward to the future development of solar physics in China and to the prospect of Chinese scholars making even more substantial contributions to the solar physics research.

solar physics, solar magnetic field, solar atmosphere, solar activity, space weather

doi: 10.1360/N972019-00286