



中国科学院国家天文台太阳物理研究20年

颜毅华^{1,2,3}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;
2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;
3. 中国科学院太阳活动重点实验室(国家天文台), 北京 100101

E-mail: yyh@naoc.cas.cn

2020-12-23 收稿, 2021-03-01 修回, 2021-03-02 接受, 2021-03-03 网络版发表

国家自然科学基金(11790300, 11790301)资助

摘要 中国科学院国家天文台自2001年成立以来, 汇集了与太阳物理有关的创新研究队伍和观测基地, 是我国规模最大的太阳物理研究群体, 拥有理论研究、观测分析和设备研制等综合优势. 20年来, 国家天文台成功运行着多通道太阳磁场望远镜和太阳射电宽带动态频谱仪等世界一流的观测设备, 研制了全日面太阳光学和磁场监测系统及明安图射电频谱日像仪(Mingantu Spectral Radioheliograph, MUSER)等新一代观测设备, 正在研制中红外太阳磁场精确测量观测系统(accurate solar infrared magnetic measuring system, AIMS)、我国首个空间太阳望远镜ASO-S (Advanced Space-based Solar Observatory)的有效载荷全日面磁场望远镜(full-disk magnetograph, FMG)、米波-十米波射电频谱日像仪和行星际闪烁射电望远镜等新设备. 本文着重回顾近20年国家天文台研究人员取得的一系列开拓性研究成果或亮点研究进展, 进一步展望未来我国太阳物理界将主要在太阳磁场、太阳射电和深空太阳探测方面进行的重点突破, 推动在太阳和日地物理中解决科学难题, 包括太阳磁场与太阳周的起源、日冕加热、太阳爆发起源及其对日地空间环境的作用和影响等.

关键词 太阳物理, 太阳磁场, 太阳活动, 太阳射电, 太阳活动预报

太阳是一颗离人类最近、对人类影响最大、与人类生存环境关系最为密切的恒星. 太阳的光辉为人类带来温暖、光明和勃勃生机, 而剧烈的太阳活动却为人类的生存带来巨大灾难, 形成灾害性空间天气. 因此, 太阳物理研究直接关系到人类社会的生存和发展.

在太阳物理学中, 太阳活动研究占据着极为重要的地位. 所谓太阳活动, 是指发生于太阳大气中的各种扰动现象, 包括太阳黑子、光斑、谱斑、耀斑、日珥、日冕物质抛射以及射电爆发等, 尤其以耀斑和日冕物质抛射最为显著. 太阳活动强烈时, 紫外辐射、X射线、 γ 射线、射电辐射以及高能粒子发射都将迅速

增强. 日地空间环境以及地球高层大气结构在很大程度上由太阳电磁辐射和高能粒子发射决定. 因此, 太阳活动直接影响着空间飞行安全、人造卫星的使用寿命、无线电通讯以及电力系统的稳定运行等. 研究太阳活动规律并对它进行科学预报, 对国民经济发展、国家安全和社会生活具有重要的实用意义, 是全球共同关心的重大课题. 在尚待解决的太阳物理难题中, 以太阳磁场起源、爆发活动本质和日冕加热三大难题最为重要, 其中有关太阳磁场和磁化等离子体的研究是最核心的物理问题. 近年天体物理研究(如星暴星系、吸积盘和喷流、 γ 暴、快速射电暴等)的进展, 清晰表明了天体磁场与等离子体耦合(即磁流体力学)研究的

引用格式: 颜毅华. 中国科学院国家天文台太阳物理研究20年. 科学通报, 2021, 66: 1363–1384

Yan Y H. Research advances in solar physics at National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1363–1384, doi: [10.1360/TB-2020-1645](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1645)

重要性.

太阳是唯一能进行高分辨率详细观测和研究的一颗恒星. 通过对太阳活动的发生规律、起源和激发机制, 太阳活动过程中磁化等离子体的能量释放过程的详细研究, 可以推广到宇宙间许多其他天体活动现象的研究中, 对天体形成与演化的研究具有重要指导意义. 因此, 人们常常将它视作天然的天体物理实验室. 对太阳活动现象的研究, 不仅对认识天体物理过程, 而且对许多自然科学问题的探索, 都具有不可替代的作用.

太阳物理的最大特点是观测与理论研究密切结合, 对太阳活动的探索必然是对探测技术、科学研究和应用(太阳活动预报)三个方面的协调发展. 只有这样, 该学科的发展才有长久持续的活力. 中国科学院国家天文台继承了原北京天文台几代太阳物理学家们不懈努力所形成的创新研究力量, 包括一系列性能优良、达到国际先进水平的观测设备; 形成了完整的太阳物理研究队伍和观测基地, 是我国规模最大的太阳物理研究队伍, 拥有理论研究、观测分析和设备研制等综合优势, 是一个实力雄厚、具有很强知识创新能力、拥有重要国际影响、在太阳物理和日地空间环境研究方面对国家经济社会发展具有关键性作用的科学基地. 中国科学院国家天文台曾多次主持召开国际最高级别的相关学术会议^[1~3]、其他多边和双边太阳物理学术研讨会及国际合作.

据不完全统计, 中国科学院国家天文台组建以来, 在学术期刊上发表经过审稿的太阳物理研究论文900篇以上, 得到13000多次引用. 本文在此基础上, 回顾国家天文台组建以来在太阳物理领域20载的研究历程, 展示在攻克相关科学难题方面所取得的研究进展, 并展望未来的发展方向.

1 观测分析与理论研究进展

太阳结构主要包括太阳内部、光球、色球、过渡区、日冕、太阳风及行星际空间和日球层(即太阳风吹出的等离子体空间), 相应的观测特征有光球特征、色球特征、日冕特征和太阳风特征等. 太阳活动主要表现为太阳耀斑、高能粒子、日冕物质抛射、太阳表面与内部流动、日震学等, 并具有周期性特点. 国家天文台太阳物理研究主要基于自主研发的具有国际先进水平的设备, 同时结合国内外其他多种探测手段, 包括对历史数据的深入挖掘, 对各种太阳活动过程进行高

水平的观测和系统研究, 探索它们的起源和发生发展规律, 揭示其中的新物理现象, 为研究其他天体激变现象提供引导, 并深入研究太阳活动对日地空间和人类生存环境的作用和影响, 建立太阳活动预报模型, 为灾害性空间天气预报提供理论依据.

1.1 太阳活动起源、发生和发展规律

太阳活动基本物理过程包括太阳活动整体行为、耀斑高能辐射、射电辐射及其动力学过程、日冕物质抛射的形态特性及物理机制、日冕物质抛射和激波的光谱-射电综合研究、磁场重联的基本物理过程及等离子体不稳定性、太阳大气爆发过程的理论和数值模拟等研究方向. 以下大致按照截至目前的顺序, 包括太阳发电机、光球磁场、磁重联、耀斑、磁绳结构、磁螺度、色球精细结构、射电爆发、日冕物质抛射、日冕磁场重建、冕洞、喷流等日冕现象、日冕加热和日地空间效应等内容, 介绍国家天文台在太阳活动起源、发生和发展规律方面的主要研究进展.

1.1.1 太阳发电机

太阳磁场变化必须有一个发电机过程起作用. 然而, 虽然人们对太阳活动周(太阳周)的观测日益增多, 目前还无法依据基本物理原理可靠预报未来太阳活动周的开始时刻和幅度. 因此, 太阳活动周的起源至今仍是太阳物理的一个重大难题. 针对恒星磁场具有显著非轴对称性这一特征, 非轴对称的发电机模型表明, 对流层厚度对恒星的磁场特性有很大的影响, 对流层越薄, 非轴对称的模式越容易激发, 环向波模式越大, 越容易产生复杂的磁场位形. Jiang和Wang^[4]首次以数值解的形式得出了激发非轴对称模式的条件, 建立了线性的非轴对称太阳发电机模型; 他们由此首次详细研究了磁场特征, 为解释太阳表面观测到的活动经度等非轴对称现象提供了理论依据. Xu等人^[5]利用Parker太阳发电机理论解析了太阳螺度随太阳活动周反号的原因. 太阳第24活动周反常弱是由下降相随机产生的少数异常极性黑子所致^[6].

Jiang等人^[7]基于第15~21太阳活动周历史记录分析, 得到了磁通量输运型发电机模型中极向场的源项, 并在模型中包括了磁泵效应, 结果表明, 在活动极小期, 模拟的极区磁场和对流层底部的环向场与观测到的活动周强度有很高的相关性, 利用Babcock-Leighton机制能很好地再现活动周的变化. 黑子群的倾斜角对应Babcock-Leighton型发电机模型中极向磁场的源, 对

极区磁场的产生和反转起到了至关重要的作用。倾斜角随机性分布是贡献活动周强度变化的一个主要的随机性因素,也限制了对活动周强度的预报^[8]。基于海量全日面视向磁图数据,Zhang和Yang^[9]计算得到了大尺度、活动周尺度上的磁螺度传输,进一步验证了从综合磁图中得到磁螺度传输的震荡特征和南北半球的不平衡性(图1),对现有太阳发电机理论模型提出了观测约束和挑战。

1.1.2 太阳光球磁场

太阳磁场在爆发过程中具有关键性的作用,人类对于太阳磁场的了解首先来自对太阳光球磁场的观测。国家天文台在太阳光球磁场方面开展了大量研究。

以Hinode/SP(Spectropolarimeter)矢量磁场为基准,Wang等人^[10]对怀柔与SOHO/MDI(Solar Heliospheric Observatory/Michelson Doppler Imager)磁场的定标系数进行了细致分析。通过太阳宁静区向量磁场演化和动力学研究,Jin等人^[11,12]首次得到了米粒的向量磁场分布,证认了两类水平磁元;Zhang等人^[13]研究了小尺度磁元和米粒的相互作用,揭示了宁静太阳上的磁非势性和米斑亮点的磁特征^[11~13]。根据测量结果估计,宁静太阳上网络内磁元能贡献大约52%的磁通量和平均12.4 G磁通量密度,网络内磁元的寿命约3 min,网络内磁场平均每天能贡献 3.8×10^{26} Mx的磁通量,宁静太阳和增强网络内磁元的磁通量分布没有根本区别^[14]。

Zhang等人^[15]首次给出了冕洞内磁通量分布规律,发现冕洞弱磁场与强磁场的极性存在反向分布趋势,强磁场以一个极性占主导,弱磁场以另一个极性占主导;宁静区和冕洞区的磁场演化有本质差别,宁静区磁场演化速率是冕洞的4倍,解释了冕洞温度为什么比较低这一太阳物理难题。Yang等人^[16]通过研究冕洞内的双极磁场演化,首次在冕洞区观测到磁环系统浮现后又下沉到光球层之下,这有助于理解冕洞和宁静区相互转换以及太阳风的起源和加速机制。极区磁场是目前所知甚少的一个太阳磁场分量,Jin等人^[17]通过详细研究得到了极区向量磁场的分布。

Su等人^[18]通过研究与耀斑有关的光球矢量磁场,发现在耀斑前后的横向磁场和纵向磁场均存在显著变化。基于大量矢量磁图进行非线性无力场外推,计算了三维空间的磁自由能,发现磁自由能与光球磁通量高度相关,而磁自由能、磁通量与耀斑指数的相关性都较弱,但磁自由能比磁通量更具有耀斑预测能力。

通过分析黑子本影的波动现象,Su和Ji^[19]、Su和

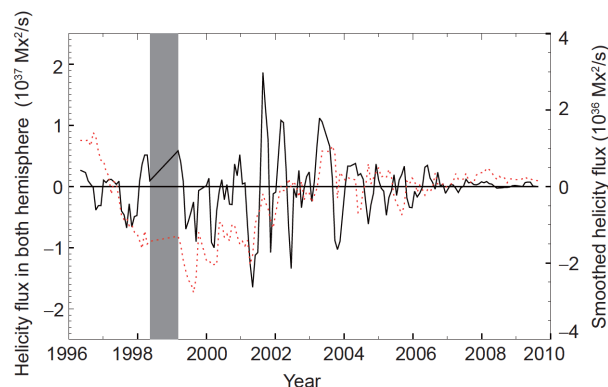


图1 南北半球的净磁螺度分布反映了磁螺度传输的震荡特征和不平衡性^[9]

Figure 1 Net injected helicity from northern and southern hemispheres showing the oscillating and imbalance features of the helicity flux^[9]

Liu^[20]发现,黑子本影波波前传播有3种模式:单旋臂、双旋臂、三旋臂模式,形态类似星系旋臂结构。他们还发现黑子本影行波波前不但可以旋转,而且旋转方向可以转换,比如从顺时针旋转向逆时针方向转化,再从逆时针向顺时针转化,类似所谓的扭转振荡模式,因此猜测这种振荡不是由阿尔芬波传播引起的(阿尔芬波是不可压缩波,单从光强探测是看不到这种振荡模式的)。

1.1.3 磁重联过程

磁重联是磁场连接性改变从而导致磁场拓扑重构的物理过程,是解释磁能的快速释放并转化为动能和热能的基本物理机制,是理解各种太阳活动现象的一个核心概念,但直接观测磁重联过程极其困难。

Li和Zhang^[21~23]通过完整的统计和个例研究,探讨了耀斑过程中磁重联的观测特征,对理解耀斑中的磁重联给出了若干定量约束,如内流速度、耀斑带分离和等离子体团抛射速度等,首次描述并统计研究了耀斑带扫过本影的耀斑。耀斑带扫过本影与黑子旋转、新浮磁通量和黑子间相对的剪切运动紧密联系。他们在经典耀斑理论框架下,提出了耀斑带扫过本影的唯像模型。

Yang等人^[24]利用云南一米口径新真空太阳望远镜(New Vacuum Solar Telescope, NVST)^[25]高时空分辨率的Ha数据,观测到了确切的磁重联过程(图2)。磁重联过程包含两个阶段:一个持续了数十分钟的缓慢阶段和一个仅仅持续了3 min的快速阶段。持续的慢速磁重联改变了磁重联区周围的环境,破坏了其稳定性,导致反向磁力线迅速靠近,进而发生了快速的磁重联。

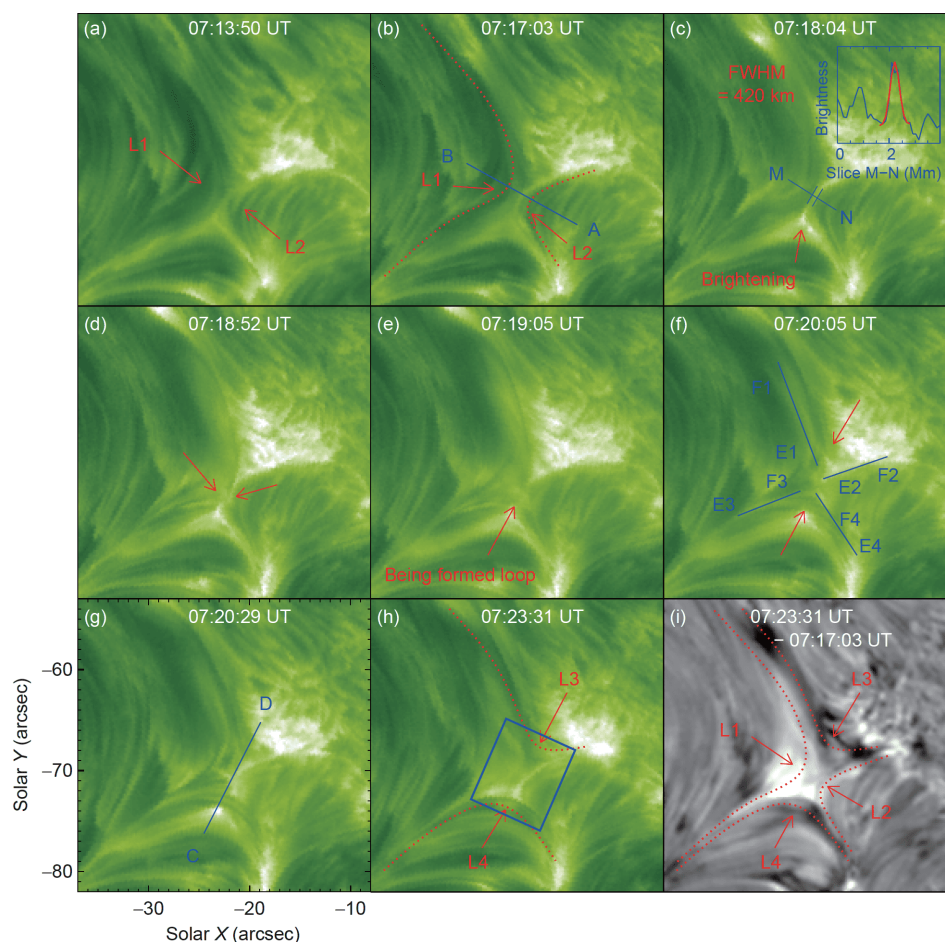


图2 利用NVST的 $H\alpha$ 数据序列观测到的磁重联过程((a)~(h))以及(h)和(b)时刻之间的差图像(i)^[24]. L1、L2表示重联前的磁环, L3、L4表示重联后新产生的磁环

Figure 2 Sequence of $H\alpha$ images observed by NVST showing the rapid reconnection process ((a)~(h)), and the difference image between (h) and (b) (i)^[24]. L1, L2 denote the to-be-connected loops before reconnection whereas L3, L4 denote the newly formed loops after reconnection

Li等人^[26]观测研究了发生在太阳暗条和冕环之间的磁重联过程中重联区的精细结构和详细演化, 发现了多组电流片结构, 证实了磁场重联是一个三维的物理过程, 这无法用两维的磁重联模型进行解释.

基于成像观测分析, Hou等人^[27,28]发现并命名了新的太阳活动现象: 亮墙(light wall), 活动区内小尺度的“墙状”磁结构, 通常位于黑子亮桥上方. 亮墙的周期性振荡运动则被认为是由从光球下泄漏上来的p模波所驱动. 在一些事件中, 亮墙明亮前沿的辐射强度在上升阶段明显强于其在回落阶段, 由此进一步确认了泄漏的p模波及其导致的激波对亮墙的加热和驱动作用. 与此同时, 伴随着底部辐射增强的喷流类现象被观测到间歇地出现在亮桥的某些位置, 并与此处周期振荡的亮墙重合、叠加. 在某些事件中, 两类物理机制p模波

和磁场重联会同时作用在亮桥处, 并在亮桥上方产生两种不同的活动现象: 亮墙和喷流.

1.1.4 耀斑

耀斑是太阳上最剧烈的活动现象之一, 通过磁重联释放大磁能, 加热周围等离子体, 并加速产生高能粒子, 进而影响行星际空间环境.

Yang等人^[29]通过集中研究相似约束耀斑的精细结构, 探讨了其之所以为约束耀斑而不是爆发耀斑的原因, 这有利于进一步理解爆发耀斑和约束耀斑的机制及其对空间天气的影响.

2017年9月, 太阳活动区12673在7天时间里产生了4个X级、27个M级以及大量的低级别耀斑, 其中X9.3级耀斑是过去10余年中最大级别的太阳耀斑. Yang等人^[30]研究发现, 在最初的几天里存在一个正极性的黑

子, 然后在其附近区域两对双极磁场相继浮现. 由于已存在黑子伫立不动, 新浮现双极的运动受到了阻挡. 阻挡形成的复杂磁拓扑结构造就了耀斑多发的活动区. 此前关于大耀斑的触发机制主要有三类: 磁场浮现对消、剪切运动、黑子旋转, 为了更好地说明这一过程, Yang等人^[30]首次提出了“阻致爆发模型”, 它或许为第四类, 强调了阻挡所起的作用.

1.1.5 太阳大气中的磁绳

磁绳这种磁力线绕其自身中心轴缠绕的特殊磁场结构往往在耀斑的能量释放过程中扮演着重要角色. 日冕物质抛射理论模型的核心为扭缠的磁绳, 理论预言和观测均推断它们的存在, 但长期未得到确认. 关于磁绳与太阳爆发活动的因果关系, 有两种观点, 一种是预先存在的磁绳失稳, 导致磁重联, 引起爆发; 另一种是在爆发过程中, 新磁绳作为磁环中磁力线重联的结果而形成. 最近的模拟分析支持第一种观点^[31].

先进的空间和地基多波段观测为研究磁绳提供了契机. Yan等人^[32,33]基于怀柔观测数据, 首次根据边界积分方程法模型重建得到了磁绳结构(图3). Deng等人^[34]确认磁绳的足点位于非势特征急剧变化的区域. 这是世界上首次从观测数据中根据理论模型重建得到磁绳结构, 并且明确指出位于磁中性线上方的磁绳在X级耀斑爆发前10 h即已存在, 该磁绳失稳导致了对应的耀斑/日冕物质抛射事件. 他们利用空间多波段观测数据研究了磁绳的各种特征与性质, 如从磁绳特性(缠绕性的手征性变化、膨胀分裂、可延长、收缩等)出发, 从观测上证实半影暗条的磁绳物理本质. Li和Zhang^[35,36]首次研究了爆发物质示踪的磁绳精细结构, 研究了SDO/AIA(Solar Dynamic Observatory/Atmospheric Imaging Assembly)观测的4个相似磁绳结构, 它们都位于活动区中性线上方, 足点扎根于相同区域, 有相似形态. 在活动区演化过程中, 多个磁绳在同一位置依次形成, 磁绳的缓慢抬升不一定导致日冕物质抛射, 而快速爆发的磁绳能导致日冕物质抛射. 爆发磁绳和日冕物质抛射的亮核相一致, 而膨胀的上覆磁环则与日冕物质抛射的亮前沿相一致. 因此, 把爆发磁绳当作日冕物质抛射早期在低日冕的对应物是合理的. Li和Zhang^[37]还发现了冕环的滑动运动和磁绳的滑动爆发现象. 在耀斑活动末期, 耀斑环发展为“双扇形”系统. 磁绳的一侧足点沿耀斑带滑动, 同时, 磁绳的精细结构快速抬升. 滑动运动勾勒出“三角扇形”的界面, 暗示磁绳的拓扑结构远比预想的复杂. 这对两维标准耀斑模

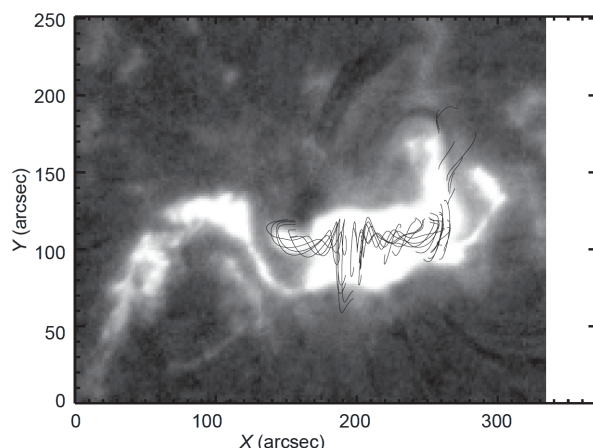


图3 基于观测数据, 利用非线性无力磁场的边界积分方法首次证实磁绳结构^[32]

Figure 3 The magnetic rope structure reconstructed for the first time from observed vector magnetograms by the boundary integral equation method^[32]

型提出了挑战, 给出了三维磁重联的直接观测证据.

1.1.6 磁螺度

磁螺度作为一个拓扑守恒量是联系观测和数值模拟的重要桥梁, 是表征太阳活动区非势性的重要参数之一, 为太阳耀斑过程中磁重联区的形成和位置、磁场的三维拓扑结构提供了必要的限制条件.

Yang等人^[38]统计研究了简单活动区磁浮现活动区太阳南北半球的浮现特征和活动区之间的螺度交换. Hao和Zhang^[39]利用Hinode/SP矢量磁场数据计算了活动区的两个螺度参数, 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; 证实了螺度符号分布的大弥散是规律的内禀性质, 而非由测量误差引起; 证实了以往强场和弱场螺度符号相反的观测, 并指出其实质是黑子本影强场区和半影弱场区有着相反的螺度符号. 通过研究磁螺度从太阳黑子中心到边缘的变化特征, 他们发现强磁场本影区与弱磁场半影区的磁螺度符号相反(图4).

Zhang等人^[40]采用磁场的傅里叶变换两点相关张量的各向同性表示方法, 首次计算了一个位于南半球的太阳活动区磁螺度和能量谱, 该活动区磁螺度的符号在所有波数主要显示为正, 与理论预计一致. 他们发现, 磁螺度谱的模数在大波数时呈现出 $-11/3$ 幂定律, 意味着 $-5/3$ 频谱相对于电流螺度的模量, 同时获得活动区磁能谱的幂律为 $-5/3$. 通过研究磁能谱指数和螺度谱指数以及电流螺度谱指数的分布和发展演化规律, 他们探讨了太阳活动区磁能和电流螺度谱指数从柯尔莫哥

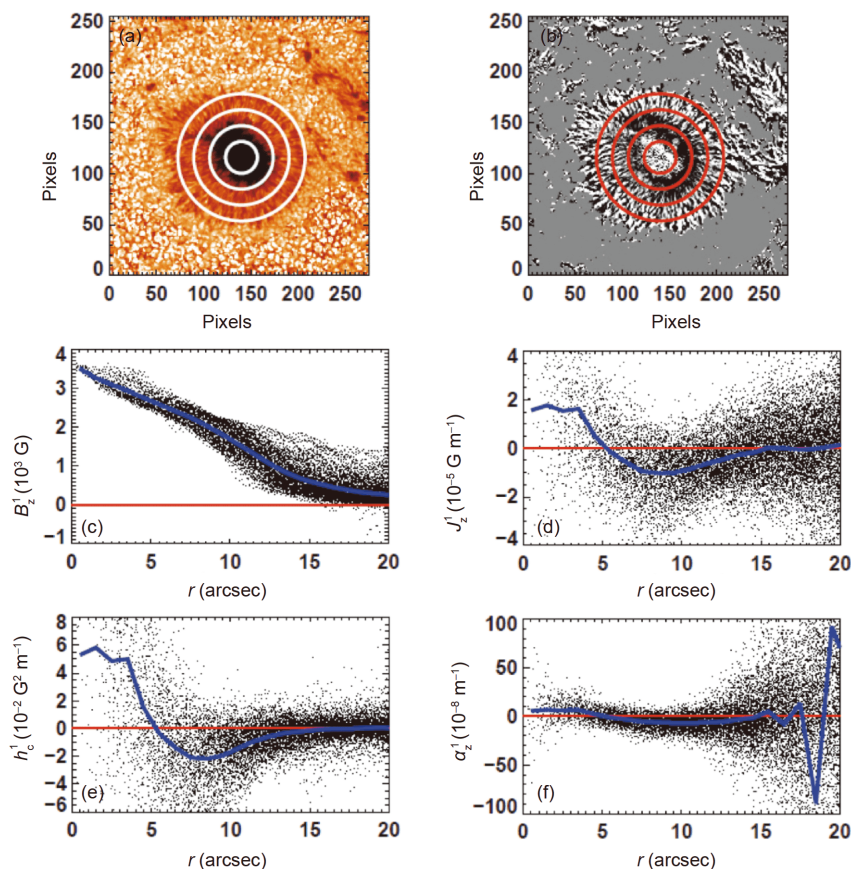


图4 强、弱磁场区光球电流螺度的符号相反并随太阳周变化^[39]。黑子强度(a)和电流(b)分布图, 圆环表示距中心分别为5、10、15和20角秒。视向磁场(c)、电流(d)、电流螺度(e)和无因子(f)随黑子中心的变化情况, 实线表示平均值

Figure 4 The helicity parameters (current helicity and local twist) change their sign from the inner umbra (strong field) to the outer penumbra (weak field), where the sign of penumbra agrees with the sign of the active region as a whole^[39]. The continuum image of a sunspot (a) and the corresponding electric current distribution (b), respectively. Circles in these two panels indicate the distances to the sunspot center are 5, 10, 15, 20, respectively. The variations of longitudinal magnetic field (c), electric current (d), current helicity (e) and the force-free factor (or local twist) (f) with distance to the sunspot center, respectively, where the solid line indicates mean values

洛夫谱指数5/3的统计偏离程度。当能量承载磁结构的尺度增加时, 磁螺度谱指数趋于增强, 且电流螺度谱指数低于磁能谱的谱指数。太阳活动区NOAA11515的磁螺度违反了预期的半球符号规则, 这被解释为在大于30~60 Mm的尺度上, 具有相反的符号螺度密度对增强磁场的影响。基于怀柔太阳观测基地的长期磁场观测资料, 统计分析了活动区磁场谱指数随太阳周的变化, 发现在太阳峰年附近, 由于太阳表面大尺度结构磁场的增多, 磁能和螺度谱更陡峭, 反映出随太阳周的变化规律。另外, Zhang等人^[41]给出了活动区光球相对磁螺度和磁场积分尺度演化及随太阳活动周的统计分布特征, 反映了太阳活动区磁场特征尺度量的变化。

从矢量场的亥姆霍兹原理出发, Yang等人^[42]提出了开放磁场、非零磁通边界条件下的相对磁螺度精确

数值计算模型, 突破了长期困扰太阳物理学界的磁螺度数值计算难题。他们首次模拟了使用微观等离子体电阻率模型和太阳黑子数据驱动模型的相对磁螺度演化特征, 定量给出了在太阳爆发过程中的磁螺度耗散率和守恒特性。同时, 他们发现在快速磁场重联触发时刻, 磁通量归一化的相对磁螺度(磁力线缠绕数)的值与对新浮活动区中太阳磁流管爆发时得到的观测值非常一致, 这也揭示了相对磁螺度对于理解和预测太阳爆发过程的重要意义。该相对磁螺度数值计算模型已被列入国际空间科学研究院“太阳磁场磁螺度观测和计算工作组”参考模型。

1.1.7 太阳色球精细结构

色球是光球层之上密度更为稀薄、厚度约2000 km的充满磁场等离子体层。在色球上, 经常能观

测到等离子体和磁场之间的复杂相互作用。由于磁场的不稳定性,常常会产生剧烈的耀斑爆发,以及与耀斑共生的爆发日珥、冲浪、喷焰等动力学现象。当日珥位于日面时,表现为暗条。太阳大气会出现温度的反常分布。在厚度约2000 km的色球层内,温度从光球顶部的4600 K增加到色球顶部的几万K,而其他的密度、电离度等物理参数和物理过程也会发生巨大变化。因此,色球物理状况的研究无论对太阳物理还是对日地物理都具有重要的意义。

Zhang等人^[43]对太阳针状体进行了分类研究。Zhang等人^[44]根据H- α 波段观测到的13个莫尔顿波传播事件,研究了莫尔顿波的传播性质,发现莫尔顿波在传播过程中被严格限制在一个扇形区域内。与莫尔顿波传播相关的磁场拓扑有两类:一类是在大尺度磁环下方并沿着环传播,另一类是先沿着两套磁通量系统互相分开的扇形区域传播,再传播到开放的磁通量系统区域。莫尔顿波扫过区域的磁场强度比区域外两边的磁场弱。通过估算莫尔顿波传播路径上和路径两边的快磁声速的分布,发现在波的传播路径上的快磁声速值较低,莫尔顿波的传播方向与暗条爆发的方向基本一致。这支持“活塞”模型对莫尔顿波的解释。

Li等人^[45]利用SDO、STEREO(Solar Terrestrial Relations Observatory) A/B三个空间飞行器同时观测的数据重构了一个极冠暗条的三维爆发过程,发现该暗条经历了两次爆发过程:先是暗条只在纬度和高度方向上变化,然后在暗条第一次爆发后期,部分暗条物质与主体分离,表现为抛物体运动。这暗示着极冠暗条可能由两组磁系统组成。

Li和Zhang^[46]在一个位于约北纬60°的极冠暗条中证认出了69个暗条倒钩(barb),以其中58个远离日面西边缘的倒钩作为样本,统计研究了它们的形成、消失和演化。他们发现了三类倒钩形成方式:(1)周围运动等离子体的汇聚形成倒钩,占总数的55.2%;(2)暗条本体的物质流入形成倒钩,占总数的37.9%;(3)周围增亮区域的等离子体抛射形成倒钩,占总数的6.9%。他们还发现了三类倒钩消失方式:(1)倒钩物质双向弥散到背景大气导致倒钩消失,占总数的44.8%;(2)倒钩物质的流出导致倒钩消失,占总数的27.6%;(3)周围增亮区域导致倒钩消失,占总数的27.6%。他们据此认为,光球磁场的演化(如磁流浮现和对消等)是导致倒钩磁场结构形成和消失的原因,而倒钩与周围大气、暗条本体和附近增亮区域之间的物质交换是倒钩物质增加和减少

的原因。所有的倒钩都在振荡。除了振荡,有21(36%)个倒钩存在侧向移动。他们还发现了小尺度增亮引起的小尺度波状扰动传播,而这些波状扰动传播引起了倒钩的振荡。因此,倒钩周围光球磁场的演化是引起倒钩动力学演化的原因。

Jin等人^[47]通过SOLIS-VSM(synoptic optical long-term investigation of the Sun-vector spectromagnetograph)仪器对色球磁场的观测,对色球磁场进行了尝试性的定量分析,发现相较于太阳光球,色球极区有着更多的磁结构,而且这些磁结构更加弥散。色球极区非主导极性磁场几乎不随太阳周变化,暗示了在太阳极区除全球发电机之外,肯定还存在另外一种机制产生磁场。尽管色球磁场比光球磁场更加接近无力状态,色球磁场外推并不能完美地匹配日冕观测。

由于“磁冻结”,色球物质很难穿过磁力线,因此纤维结构应该与磁力线走向一致。在松弛MHD(magnetohydrodynamics)系统使洛伦兹力与气体压力、重力趋于平衡,收敛至最终稳定状态的框架下,Zhu等人^[48]通过计算磁场外推结构,发现在有力场、势场、Wiegelmann非线性无力场外推方法中,有力场外推的磁力线更符合H α 纤维的走向。进一步的分析表明,强剪切的中性线上方具有很高的非势能,可能是有力场结果更好的原因。另外,洛伦兹力在光球和色球不可忽略,在高度高于1800 km以上时,有力场外推的结果接近于物理场。

Yang等人^[49]基于NVST观测数据发现了太阳大气中的一种新现象——色球炮弹,这为色球活动现象名单增添了一名新成员。色球炮弹是由低层大气磁重联所产生的:色球物质团从重联区向外抛出并沿大尺度磁环系统运动形成色球炮弹。这些飞行的色球炮弹为太阳大气中物质和能量的转移与分配起到了重要作用。

1.1.8 太阳射电爆发研究

剧烈的太阳爆发活动会产生并向日冕中释放大量高能电子,这些高能电子与磁场、热等离子体等发生耦合作用在多个波段产生辐射。在射电波段,高能电子会产生非常强烈的电磁辐射,即太阳射电暴。因此,基于射电波段的太阳观测可以为诊断日冕的物理特性以及日冕中电子的加速和传输过程提供独一无二的资料,为进一步理解太阳爆发活动提供关键信息。太阳射电爆发是太阳耀斑和日冕物质抛射等爆发过程的重要表现形式,是太阳爆发过程中非热过程和粒子加速与传播过程最直接的响应,可以帮助人们更清楚地理解太

阳爆发过程的触发机制、能量的释放机制、高能粒子的产生和传播机制等。厘米-分米波段的射电频谱精细结构是太阳耀斑爆发相期间初始能量释放过程的体现,对诊断耀斑过程中日冕等离子体的物理参数具有重要作用。

太阳射电斑马纹结构被认为是反映耀斑源区物理信息的示踪器,可用于诊断耀斑源区日冕磁场等特征,因而得到人们的重视。但是,斑马纹结构极其复杂,其形成机制一直为太阳射电天文学中的一个难题,几十年来人们提出了数十个模型试图解释其形成过程,但至今没有一个模型能被大家所接受。

人们在射电频谱观测数据中发现了许多新的射电频谱精细结构^[50,51],如独特的微波“斑马纹”结构^[52]、首次在厘米波段(5.7 GHz)观测到的“斑马纹”结构、新型“曲棍球棒”结构^[53]、亚秒级尖峰斑马纹结构和微波吸收型快速III型暴等丰富的精细结构^[54,55]。在日冕物质抛射的不同阶段,射电辐射具有不同的频谱结构特征^[56]。提取这些精细结构爆发的频谱结构参数,结合其辐射机制模型,可对辐射源区的磁场、等离子体密度以及温度等参数进行诊断和估算。

在著名的2006年12月13日耀斑事件中,Tan等人^[57]发现了具有从数十毫秒到几分钟的多时间尺度的射电准周期脉动特征,可根据磁流体振荡及等离子体不稳定性理论来解释,对于理解耀斑演化和能量释放机制具有启示意义。对该耀斑活动期间的微波斑马纹结构的分析发现,在该斑马纹的内部还存在着明显的毫秒级快速准周期脉动现象。利用载流环模型和有关撕裂模理论,他们提出,载流等离子体环通过撕裂模扰动形成的一系列磁岛结构,为通过干涉机制形成太阳微波辐射频谱斑马纹结构提供了必要条件,自恰解释了斑马纹的形成机制与观测特征^[58,59]。部分微波斑马纹结构具有周期为0.5~1.5 s的准周期摆动现象。这种准周期摆动的微波斑马纹结构很可能与源区由腊肠模驻波激发的快磁声波振荡有关^[60]。Yan等人^[55]对该事件假定等离子体密度的特征高度变化不大,利用斑马纹结构并结合双共振模型得到的磁场特征高度从耀斑开始到耀斑极大提高约1倍,可能反映了磁重联过程前后的松弛过程,随后的斑马纹统计研究确认了这个变化约1倍的结果。

根据对2011年8月9日大耀斑期间的太阳微波宽带动态频谱观测,Tan和Tan^[61]发现在耀斑峰值前存在一个持续时间约20 s的亚秒级快速准周期脉动结构,奇

特之处是每个脉冲都是由一群毫秒级微波尖峰爆发或窄带III型爆发群构成。根据伴生斑马纹结构对源区磁场的估计结果,毫秒级尖峰的形成机制并非过去大多数人所支持的电子回旋脉泽机制,提出耀斑环内撕裂模不稳定性演化在耀斑环内各处产生的磁场重联加速了电子,从而触发的等离子体辐射是形成毫秒级尖峰结构的可能机制。对第24太阳周的第一个X级耀斑事件,Tan等人^[62]发现,从高频(约7 GHz)到低频(约1.08 GHz)存在3个显著的微波斑马纹结构,分别位于耀斑前和耀斑后,对应微波辐射的日冕源区的磁场强度分别诊断为230~345、126~147和23~26高斯,反映了磁场释放过程。其中,7 GHz的微波斑马纹结构是迄今所发现的最高频率的同类结构,对研究其形成机制具有重要意义。Tan等人^[63]通过200余个微波斑马纹事件的统计分析,将斑马纹分成等间距斑马纹结构、变间距斑马纹结构和间距增长型斑马纹结构三大类型,其形成过程分别对应Bernstein波模耦合、Whistler波模耦合、等离子体双共振机制,在这三种不同的形成过程中,分别对应不同的非热电子分布特征和磁场位型结构。

对于2012年7月6日X1.1耀斑事件,Huang等人^[64]在多个波段观测到准周期脉动,且周期在不同波段呈现递增的趋势。振荡过程覆盖从色球顶到高日冕的广阔空间,包含热和非热过程。基于SDO成像观测提供的耀斑环尺度,推断可能是等离子体的扭缠模引起的振荡。耀斑前,两个环结构缓慢抬升,在耀斑开始时,其中一个环迅速塌缩,另一个环则迅速抬升。环的塌缩可能是扭缠振荡的触发机制,而抬升环的速度与同时观测到的分米波准周期脉动结构和之后的米波II型爆结构吻合,为研究日冕物质抛射的早期演化提供了观测依据。

通常,太阳微波精细结构都出现在耀斑的上升相和峰值附近,反映了太阳大气中的短时标非热强爆发过程。Huang和Tan^[65]对RHESSI(Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager)硬X射线和怀柔1.10~1.34 GHz的观测数据分析发现,2004年12月1日耀斑后相存在大量微波精细结构,如带状结构、纤维结构、斑马纹结构、脉动结构、点状爆发、窄带III型爆发等,这一发现表明,耀斑后相同样存在着短时标的非热能量释放过程。

Tan^[66]发现在一些长持续时间的耀斑事件中,从耀斑早期的上升相到耀斑衰减相中普遍存在着大量的微波小爆发现象,这些小爆发主要表现为寿命短

(5~18 ms)、带宽窄(相对带宽仅0.7%~3.5%)、辐射亮温高($8.18 \times 10^{11} \sim 1.92 \times 10^{13}$ K)、强偏振等, 它们与背景的耀斑连续谱微波爆发具有截然不同的频谱特征。这些微波小爆事件主要是通过非热高能粒子激发的相干辐射机制形成, 它们的大量存在反映了耀斑源区大量小尺度的磁场重联和粒子加速等非热过程和能量释放过程。

Chen等人^[67]发现太阳活动区AR12242在2014年12月17日存在多尺度等离子体环系, 组成环形活动区。在耀斑前相, 极紫外波段显示活动区边缘地带存在周期为3 min的准周期脉动结构; 在紫外波段, 太阳黑子上空存在周期约4 min的准周期脉动结构, 这种脉动成分从耀斑前相一直持续到耀斑后相; 而在耀斑脉冲相, 源区在明安图射电频谱日像仪(Mingantu spectral radioheliograph, MUSER)^[68]射电图像上发生周期约2 min的准周期脉动结构(图5)。研究表明, 4 min紫外准周期脉动很可能是黑子振荡调制的结果, 2 min射电准周期脉动则是耀斑爆发过程源区非势电流调制的结果, 耀斑前相的3 min极紫外准周期脉动则很可能是耀斑爆发的一种前兆信号。

1.1.9 日冕物质抛射研究

Zhang和Low^[69]在分析了太阳日冕中磁流体的主要性质和各种模型的基础上, 提出了日冕物质抛射是磁螺度在日冕中积累的必然结果的观点, 进一步的非线性无力场数值解和理论推导显示, 针对一定的边界条件, 非线性无力场存在着一总磁螺度上限值; 当总磁螺度积累超过这一上限值时, 无力场将不存在, 即爆发将成为必然。进一步分析表明, 不同边界条件下无力场的总磁螺度的上限值不同, 这为许多日冕物质抛射触发的观测现象提供了物理解释。在前期研究基础上, 对日冕物质抛射可能是日冕中螺度积累的结果进行理论研究, 重点研究表面流分布由自相似无力场定义的磁螺度系统。轴对称的自相似无力场的半解析解可以讨论产生大量螺度积累的无力场的特征, 结果表明, 所有的轴对称双极无力场的磁螺度可能有一个绝对上限^[70]。

真实太阳日冕中的磁螺度是通过太阳光球上的磁浮现而带入日冕的。如果日冕物质抛射是磁螺度在日冕中积累的必然结果, 就可以通过测量磁螺度向日冕的传输量等来“监控”磁螺度在日冕中的积累, 以实现预报日冕物质抛射爆发的目的^[69]。研究发现, 与日冕物质抛射相关的太阳活动区具有与活动区符号相反的磁

浮现过程, 与此相关的磁对消发生在螺度相反的磁通量系统之间, 表明来源不同的磁通量系统的相互作用是导致日冕物质抛射初发的原因^[71], 反映了日冕物质抛射过程的复杂性。

Zhou等人^[72]利用高分辨率数据, 综合多波段分析, 完成构造了第23太阳周较完整的对地晕状日冕物质抛射子样, 得出四类日冕物质抛射大尺度源区磁场结构为扩展的磁双极群、跨赤道磁环、跨赤道暗条和扩展的磁双极群边界上的长暗条。Wang等人^[73]首先描述了跨赤道暗条及其与日冕物质抛射的关系, 从日冕磁场的连接性和日冕暗化之间的关系说明, 日冕物质抛射源区在本质上是大量尺度的。对于复杂耀斑/日冕物质抛射事件, 在可见日面上, 有50%以上的磁通量环系参与了日冕暗化的过程; 参与日冕物质抛射最普遍的环系是活动区间环。连接模式如鞍形场、磁拱和准分割面(或磁界面)与日冕暗化相关得很好^[74]。

Zhou等人^[75]详细描述了暗条扭曲和物质流出导致的不稳定性驱动日冕物质抛射的初发过程, 为理解暗条爆发和日冕物质抛射的关系、理解日冕物质抛射的三分量的物理本质提供了新的线索。Wen等人^[76]运用三点外推或内插方法对日冕物质抛射进行统计分析, 发现在4个太阳半径内, 高度的测量误差与离日面中心距离的平方成正比, 在5个太阳半径以上的高度, 测量误差则与离日面中心距离的平方根成正比, 进而总结出日冕物质抛射高度测量的误差函数。

有两种模型可用于解释太阳耀斑和日冕物质抛射: 磁爆裂模型和标准耀斑模型。Zhang和Wang^[77]把这两个模型联系在一起建立了新模型: 在四极场背景下, 磁绳系统在发生灾变后存在两个电流片——横向电流片和垂直电流片。该两电流片重联模型同时具有磁爆裂模型和标准耀斑模型的特征。

Huang等人^[56]根据射电和紫外观测数据, 将日冕物质抛射的演化分成5个阶段, 发现在日冕物质抛射演化的不同阶段, 射电辐射源具有不同的频谱结构特征, 这对于理解在日冕物质抛射演化过程中的非热现象具有重要意义。

1.1.10 日冕磁场的外推计算研究

迄今为止, 可靠的磁场观测限于光球表面, 对于日冕磁场, 除射电、红外诊断方法和利用观测冕环推断之外, 需用数值外插的办法。Yan和Sakurai^[78,79]曾提出三维非线性无力磁场的边界积分方法, 并进一步探讨了该方法的伪无力因子分布问题^[80], 得到了新的直接

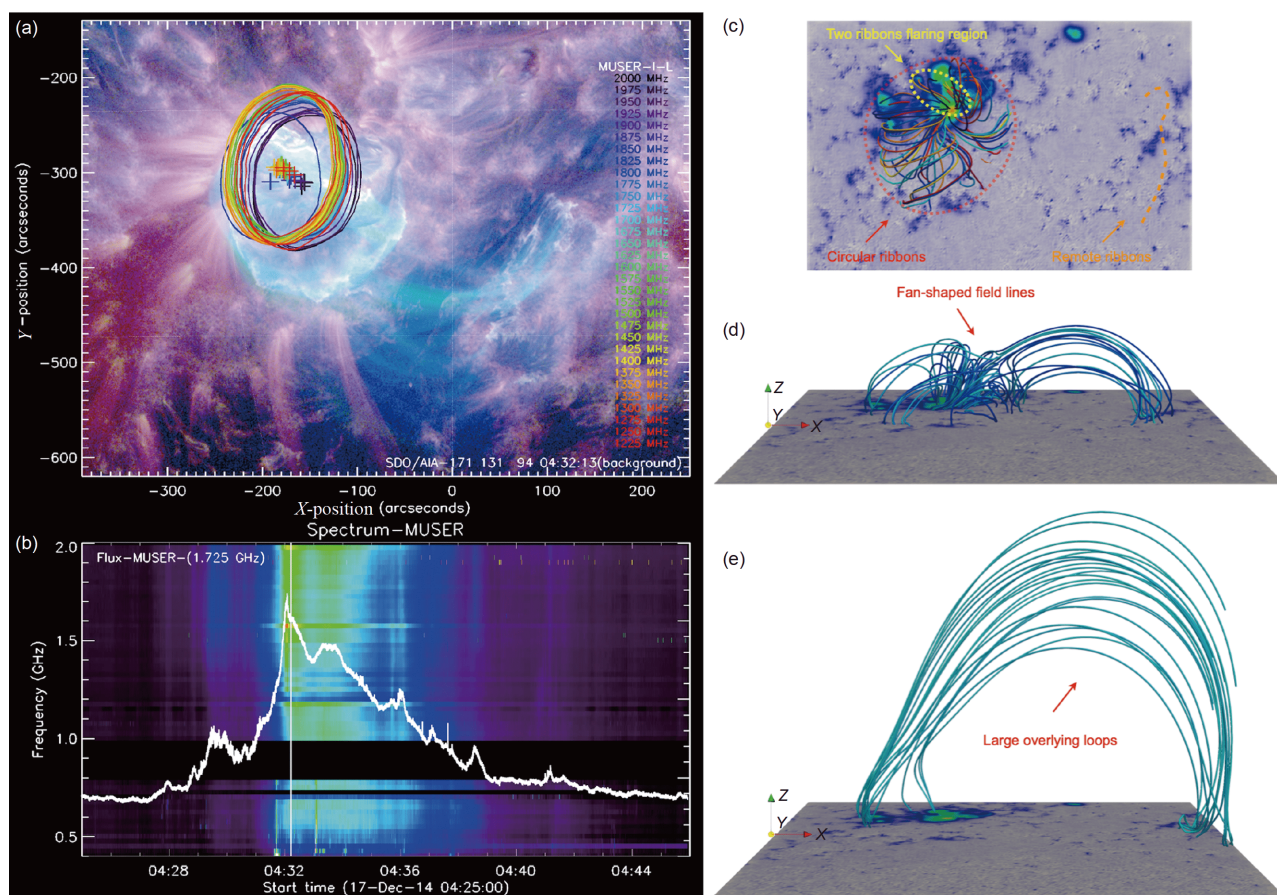


图 5 MUSER观测发现太阳耀斑过程中的准周期脉动结构和对应活动区磁场外推结果^[67]. (a) 用不同颜色等高线表示的MUSER 1~2 GHz的射电图像叠加在SDO/AIA极紫外171、131和94 Å的复合图像上; (b) MUSER-I观测到的耀斑爆发前后的太阳射电动态频谱; (c) 活动区低位磁力线分布; (d) 中等高度的扇形磁力线分布; (e) 大尺度磁力线分布. 表面为对应的光球磁图

Figure 5 The radio imaging and spectral observations of quasi-periodic pulsations by MUSER and the corresponding magnetic extrapolation results^[67]. (a) Images of the radio source observed by MUSER-I in a frequency range of 1–2 GHz by different contours, overlaid on the AIA composite images of 171, 131 and 94 Å. (b) Solar radio dynamic spectrum of MUSER. (c) The extrapolated field lines overlaid over the photospheric magnetogram. (d) 3D view of the fan-shaped field lines. (e) Large scale field lines. The surface image is the corresponding photospheric magnetogram

边界积分格式^[81]. He等人^[82]应用该方法采用不同模型分析了著名的巴士底狱日事件等问题, 完成了活动区磁场的静态模型外推与基于数据驱动的松弛法模拟结果的比较, 处理了Hinode数据, 对理论外推结果与日冕观测数据进行了比较, 证实了该方法的有效性.

对太阳活动区日冕三维磁场的分析计算, He等人^[82]定量描述了日冕磁场三维特征的分布与演化, 阐述了其与耀斑、暗条和日冕物质抛射等现象之间的关系, 发展了基于日冕磁场3D结构特征定量分析的太阳活动预警和预报模型.

Zhu等人^[48]实现了一种新的MHD松弛外推方法, 该方法放宽了外推中的无力场假设, 通过引入包含光球高Beta值区域的大气模型, 得到了适应于有力磁图

的MHD解. 通过对参考模型的等离子体状态进行分析, 认为其与太阳真实情况有一定的相似性, 是一个较好的类太阳有力场. 作为类比, 选取了3种方法对该参考模型进行了重构, 并采用6个量化比较参数对外推结果进行了量化评估. 结果表明, 有力场外推在此参考模型中的表现优于Wiegmann外推方法. 目前, 此方法已经用于HMI矢量磁场数据的外推. 将有力场外推方法运用到研究色球精细结构分析工作中, 有力场外推结果也优于Wiegmann外推结果^[48].

1.1.11 日冕现象

Zhang等人^[83]通过追踪低纬度冕洞的消失过程, 研究其消失的物理机制, 发现冕洞温度比宁静区低10%, 提出冕洞内正负磁通量趋于平衡是冕洞消失的重要原

因。Yang等人^[84]利用SDO数据在冕洞边界上发现了磁重联的证据——日冕喷流。通过对冕洞边界处太阳自转的定量测量,证明磁重联维持了冕洞的刚体自转。磁重联过程伴随着能量释放,将磁能转化成等离子体的内能和动能,能引起冕洞太阳风的加速。该研究有助于理解冕洞的形成和演化,也为太阳风的加速模型提供了必要的物理基础。

日冕喷流经常在同一位置重复出现。Zhu等人^[85]分析了发生在2012年7月2日活动区11513的一个复杂的喷流。通过高分辨率观测,发现喷流在22:30 UT存在两个相位。它们的形状和足点位置各不相同,并且足点在不同的位置增亮。一个足点的增亮时间与一个相位中的喷流爆发时间一致,而另一个足点的增亮时间则与另一个相位的喷流爆发时间一致。喷流的两个相位对应于不同的磁区域,且在两个不同的相位,磁通量的面积减少。他们认为,喷流中两个连续相位的驱动机制是两个相反磁极性区域的磁对消。结合观测事实,他们给出了新的唯象模型解释这种现象。

Kelvin-Helmholtz(KH)不稳定性是流体力学中的一项目基本物理过程,也是天体物理中的一种常见现象。KH不稳定性在地球磁层顶、行星磁尾、活动星系核的喷流以及日冕物质抛射等现象中都被研究过。Li等人^[86]首次在太阳大气中观测到KH不稳定性发生的详细过程,对理解磁场与KH不稳定性的关系、喷流的动力学演化过程有很大帮助。

他们利用IRIS的高分辨率观测数据,对发生在2015年6月12日的一个喷流进行了详细研究,发现了KH不稳定性。他们提出了一个模型来描述喷流中的KH不稳定性:将喷流看成是由一系列磁流管组成,两股物质流看作是等离子体在相邻两个磁流管中的流动。由于两股流之间存在速度差,在相邻两个磁流管之间会发生KH不稳定性,产生涡旋,喷流的边缘也会发生变化,表现为由光滑变成锯齿状结构。在喷流演化后期,物质从喷流尾部向喷流初始触发位置回流^[87]。

Li等人^[88]通过SDO极紫外高分辨率成像观测数据分析,首次观测到由日冕紫外波与活动区相互作用产生的次级波现象,观测到日冕波遇到冕洞和日冕亮结构时产生的反射波。上述现象为理解日冕波的本质提供了新的证据,充分说明日冕波是由日冕物质抛射驱动的快模磁声波/激波。利用SDO观测数据,研究了日冕极紫外波与活动区、冕洞及日冕亮结构的相互作用,发现日冕极紫外波表现为三维的穹顶形,在日冕物质

抛射膨胀的磁环前传播,初始阶段传播速度近似为常数。当波遇到活动区时,初始日冕极紫外波消失,次级日冕波在相隔75 Mm处迅速产生,并以接近初始波的速度向前传播。当日冕波遇到日冕亮结构时,一个新的波前在初始波前方产生,并以接近初始波两倍的速度向前传播。在极区冕洞和日冕亮结构附近有反射波产生,反射波的传播速度小于初始波的速度。这些观测现象说明,日冕波包含在膨胀的日冕物质抛射磁结构前传播的快模磁声波成分。另一个极紫外波事件的观测可以用极紫外波的快模磁声波理论解释,其中极紫外波由膨胀的日冕物质抛射所激发^[89]。

1.1.12 日冕加热

日冕温度比其下层的光球高2~3个数量级,如何产生这种反常增温现象,即日冕加热的加热机制问题是太阳物理极为重要且悬而未决的一个难题,困扰了太阳物理学家、天体物理学家和理论学家们70余年,也是当代天文学领域的八大难题之一^[90]。

Zhang和Liu^[91]利用SDO/AIA和HMI(Helioseismic and Magnetic Imager)数据在太阳宁静区观测到了极紫外龙卷风结构,这些龙卷风结构扎根于旋转网络磁结构(图6)。龙卷风结构可以持续几个小时甚至10个小时;龙卷风的晚期阶段一般伴有微耀斑,甚至极紫外波。旋转磁结构在宁静太阳上普遍存在,其磁通量约占总网络磁通量的78%。旋转磁结构的旋转方向表现出一种弱的半球倾向性。这些小尺度的观测现象与活动区尺度的现象是一致的。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。

太阳大气的磁场结构中普遍存在着磁场梯度。在磁场梯度的作用下,带电粒子将受到一个梯度力的等效作用,大小与磁场梯度成正比而反向,指向弱磁场区域,同时还与粒子的横向动能成正比,动能越大的粒子受到的指向弱磁场区的等效力越大。因此,Tan^[92]提出了太阳大气磁场梯度抽运机制(magnetic gradient pumping mechanism, MGP),可以有效解释高温日冕的形成。低层大气中热平衡分布的富能粒子在磁梯度力的作用下被抽运到高层大气中,且能量越高的粒子被抽运得越快。这些富能粒子被驱动沿磁通量管向上输运,并在高层大气中聚集形成高温日冕。太阳低层大气中被抽运的富能粒子可以通过太阳内部的对流形式给予补充。MGP机制是一个稳态连续的加热过程,其加热日冕所需的能量来自太阳内部,通过富能热粒子向上输运实现对日冕加热,而且其能量耗散方式也是连续

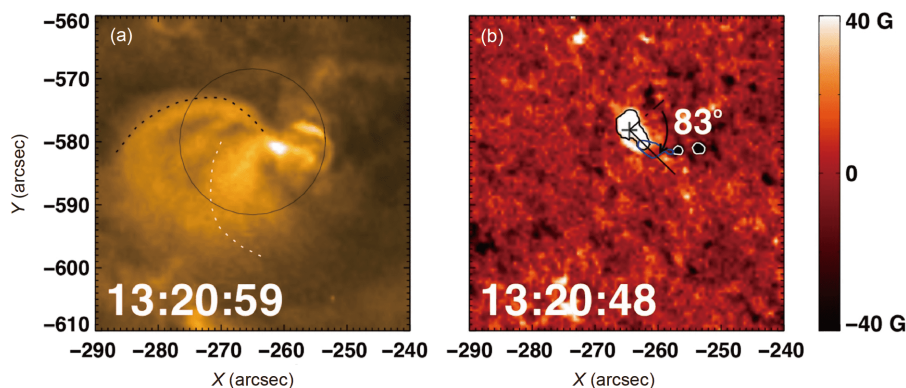


图6 首次发现极紫外龙卷风(a)与宁静太阳网络磁场螺旋结构(b)的物理对应关系^[91]

Figure 6 The EUV cyclones in the quiet Sun (a) were firstly found to be rooted in the ubiquitous rotating network magnetic fields (b)^[91]

稳态进行的. 同时, 利用MHP机制引起的闭合环环顶的约束泄漏机制还可以解释部分耀斑环顶增亮现象.

浮现活动区不断地与周围宁静太阳相互作用, 导致浮现活动区和宁静太阳交界处的暗带出现. 在极紫外波段观测到的暗带以几千米每秒的速度从浮现活动区向外传播, 被暗带扫过的区域随后变亮, 平均温度升高了约1/4. 这些观测表明, 浮现活动区与宁静太阳之间具有不间断的磁重联发生, 随着浮现活动区的发展, 磁重联继续发生. 暗带很可能示踪出了重联磁场与未被扰动宁静场之间的分界面, 暗带的传播速度反映了重联率, 这一结果与数值模拟一致. 因此, 从靠近浮现活动区到远离浮现活动区的依次磁重联导致了一个长时间的日冕加热过程^[93].

1.1.13 日球空间与地球等离子体层

通过系统分析中国“双星”计划和欧洲空间局“星簇”计划(Cluster Mission)4颗卫星的探测数据, Xiao等人^[94,95]首次在日地空间中发现了自然界中存在的磁零点. 地球等离子体层(plasmasphere)是磁层与电离层的耦合区域, 其结构对磁层中的磁暴和亚暴活动非常敏感. 然而, 人们关于亚暴(substorm)期间等离子体层形态对亚暴的响应过程理解并不充分, 嫦娥三号月球着陆器上极紫外相机(extreme ultraviolet camera, EUVC)的观测为研究这一问题提供了一次良机. He等人^[96]通过分析等离子体层边界面的形态发现了3个明显的凸起结构, 分布于不同的磁经度上, 与地球一起共转. 用地球的自转速度推算这3个凸起结构分别经过地球午夜位置的时间, 发现它们与3次亚暴的发生时间相一致, 表明3次亚暴与等离子体层上形成3个凸起之间存在因果关系. 与地磁暴导致等离子体层刻蚀不同, 肇始于地

球夜侧的磁层亚暴会在午夜区域引起等离子体层局部位形的快速膨胀. 嫦娥三号月基极紫外相机的这一观测结果改变了以往认为地磁活动只是引起地球等离子体层刻蚀的看法.

1.2 太阳活动与人类生存环境

平均大约11年的太阳周是太阳活动长期行为的基本特征, 也是决定地球和近地空间环境长期演化和变迁的主要因素之一. 然而, 太阳活动周具有非常复杂的变化, 具体表现在周期有长有短, 介于8.8~13.6年之间; 不同活动周的强度也有高有低, 以黑子相对数表示的峰值强度可有数倍之差, 在强活动周(例如第22和23周)的峰年期间, 常常会多次发生大于X10的超级耀斑爆发; 但是在较弱太阳周(比如第24周)的峰年期间, 则可能完全没有超级耀斑发生. 因此, 如何准确预测未来太阳活动周的基本特征, 如增长速率、强度、周期等参数, 是研究未来近地空间环境变迁的重要依据之一, 同时也是太阳物理中的难题. 太阳活动与人类生存环境研究包括太阳活动预报模型、警报规范研究和太阳活动与地球气候变化的关系等. 太阳活动是空间环境的驱动源, 太阳活动预报是空间天气预报的首要环节. 太阳大气中存在多种活动现象, 需要对太阳活动进行综合性预报.

1.2.1 太阳活动预报研究

到目前为止, 国际上还没有成熟的太阳活动综合预报模式. Cui等人^[97,98]通过深入研究太阳磁场的特性, 引入了全新的太阳活动预报参量, 建立了新型太阳活动水平评估方法. 他们自主开发了太阳10 cm射电预报模型, 该模型可以适应短期和中长期太阳10 cm射电电流

量预报. 建立太阳10 cm射电预报模型的基础是对太阳黑子相对数变化规律的认识. Huang等人^[99]定义了一个新的太阳耀斑预报参数DARAL(distance between active regions and predicted active longitudes), 用来刻画活动区与活动经度带间的关系. 统计参数DARAL与太阳耀斑产率间的关系, 使用该参数建立太阳耀斑预报模型, 预报模型的结果验证了参数DARAL在太阳耀斑预报中的有效性. Huang等人^[100]还定量地比较了太阳耀斑参数和日冕物质抛射参数在太阳质子事件预报中的作用, 研究了在质子事件预报模型中耀斑参数和日冕物质抛射参数的互补性, 并分别基于太阳耀斑参数和日冕物质抛射参数建立了太阳质子事件预报模型, 然后将两个模型的结果融合起来, 得到了更加准确的质子事件预报模型.

太阳表面存在两个相隔180°的活动经度带, 太阳活动经度带研究和预报具有悠久历史. 太阳耀斑活动经度带预报对于太阳活动中短期预报具有十分重要的价值. Zhang等人^[101]从统计上证实了耀斑活动经度带存在. 以往都是基于耀斑位置的统计分析预报. 他们的结果基于如下物理假定: 太阳磁场源于太阳内部发电机过程, 但受到内部刚体自转分量的影响. 在刚体自转条件下, 太阳磁场变化率分布具有驻波特征, 因而太阳活动经度带能够长期稳定在卡林顿坐标系统中. 通常情况下, 太阳较差自转会扭曲太阳活动经度带, 如果消除太阳较差自转影响, 活动经度带就会显现出全新的太阳活动经度带预报模型^[102]. 较差自转改正后, 活动经度带的位置具有稳定性. 这一研究结果也解释了类太阳恒星的光度跳变现象(flip-flop). 当类太阳恒星表面产生大耀斑且产生位置相对固定时, 由于恒星自转, 光度表现为跳变. 进一步分析活动周不同时期的耀斑发生规律, 可以发现, 在活动周峰年, 大部分X级耀斑出现在活动经度带内; 而在活动周谷年, 大部分C级耀斑出现在活动经度带内.

根据活动经度带稳定在卡林顿坐标系中的客观现象, 可以得到太阳活动经度带预报方法. 该方法既可以预报未来一个卡林顿周内的活动经度带日面位置, 又可以追踪以往的活动经度带位置, 比如著名的AR9077活动区就出现在活动经度带内. 更有意思的是, 在活动极低年, 小黑子往往优先出现在活动经度带内, 因而活动极低年可以用活动经度带预报方法预报可能出现黑子的区域. 另外, 需要发展太阳黑子相对数长周期变化预报方法.

1.2.2 太阳活动周行为研究

太阳活动的长期行为是太阳物理界甚至整个科学界都普遍关注的问题. Wang等人^[103]梳理了“太阳风暴”研究的历史渊源, 指出太阳风暴的本质为“太阳电磁风暴”. Jin等人^[17]基于1996年9月~2010年2月SOHO/MDI的全日面磁图, 研究了太阳小尺度磁元的太阳活动周行为, 发现在整个第23太阳周, 宁静区磁场有8年的时间超过了活动区磁通量, 宁静区每月的平均磁通量是活动区平均磁通量的1.12倍. 从太阳活动低年至峰年, 宁静区磁通量增长了1.49倍. 宁静区磁通量的占有率同样可以描述太阳活动周过程. 从2007年7月~2009年10月, 连续28个月宁静区的磁通量占有率超过90%, 这很好地描述了第23与24太阳周之间长时间的活动极小期. 他们总共证认了1300多万个小尺度磁元, 根据磁元磁通量的大小, 发现了3类不同的磁元, 它们的数目以及磁通量的太阳周行为分别与太阳黑子周期显示出不相关、反相关以及正相关的关系(图7). 这些结果为太阳小尺度活动周与太阳黑子活动周反相关提供了新的解释.

在任何一个太阳活动周内, 产生重大灾害性空间天气的太阳活动总是集中在少数的超级活动区内. Chen等人^[104]基于黑子群的最大面积、软X射线耀斑指数、10.7 cm射电流量峰值和太阳辐射总量变化这4个参数, 对第21~23太阳活动周的45个超级活动区进行重新证认, 发现它们产生了这三个周44%的X级耀斑, 且基本都产生了快速日冕物质抛射. 第19~23太阳活动周中165个超级活动区的经纬度分布亦呈现蝴蝶图分布, 主要集中在每个太阳活动周的峰年附近. 19和20周的超级活动区主要集中在北半球, 21和22周的重要集中在南半球, 而23周的则基本均匀分布在两个半球上. 它们的经度分布则主要处于相距160°~200°的两个活动经度带内. 对超级活动区的卡林顿经度进行较差自转改正后发现, 超级活动区在南北半球的会合周期分别为27.25和27.19 d. 大约75%的超级活动区集中在半宽为45°的活动经度带附近^[104]. 对第23太阳活动周中不同等级的耀斑和2.84 GHz微波辐射流量的分布对比分析发现, 越大的耀斑越趋向于在活动周的后期发生, 几乎所有的大于X10级的超级耀斑都发生在太阳黑子活动的峰年之后^[105].

自第23太阳活动周结束以来, 太阳活动变得反常弱, 尤其是第24活动周, 明显比上一个活动周弱, 其原因是什么呢? Tan^[105]基于1700~2009年期间太阳黑子相

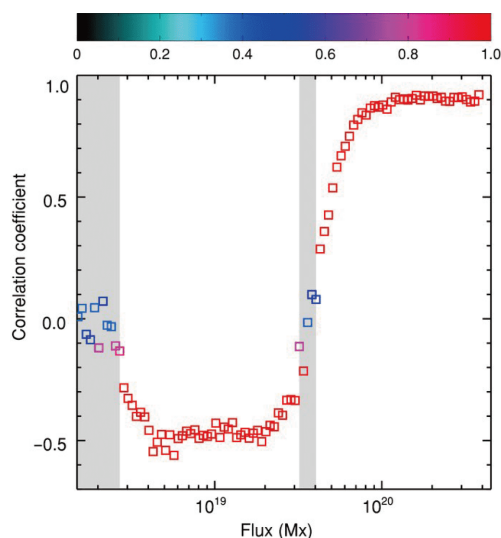


图7 太阳小尺度活动与太阳黑子活动反相关^[17]

Figure 7 Correlation coefficients between the sunspot number and network element number^[17]

对数的年均值的分析,发现太阳活动的长期行为除了具有11年的Schwabe活动周外,还有51.5年和103年等多种时间尺度的活动周期,而且第24太阳活动周正好位于两个103年周期之间的低谷,因此推断第24太阳活动周的强度应当相对较弱。Jiang等人^[6]通过对太阳表面磁场的模拟计算发现,近年来太阳活动周确实出现了一定程度的异常;这些异常的根本原因是23周极小期的异常弱极区磁场,之前所有的解释都猜测是由于子午环流的变化导致。基于观测可提出不同的解释,即这些异常的根本原因是在23周的下降相随机产生的少数异常极性黑子导致,这一与随机性有关的原因对太阳活动周预报的时间尺度提供了约束。Du^[106]分析了第24太阳活动周与第14、10、17周的相似性,提出了一种函数来描述太阳活动周,并详细分析了其预报能力,显示略优于Planck函数。

1.2.3 太阳与地磁活动等的关系研究

Le等人^[107]统计分析了强地磁暴(Dst-200 nT)及超强地磁暴(Dst-300 nT)的活动周分布,指出73.2%的(超)强地磁暴发生在太阳活动周的下降相,83%的(超)强地磁暴发生在从峰值前两年到峰值后三年的期间内。Du^[108]提出并改进了一种预报条件用来提高预报准确度,指出太阳发电机理论作为预报工具应考虑长周期修正。Du^[109]还提出了一个积分响应模型,用来研究地磁与太阳活动的关系。

Tan和Cheng^[110]通过对太阳黑子相对数和

2.80 GHz射电流量数据的分析,研究了太阳活动的多尺度中长周期与太阳行星引潮力变化周期之间的联系,发现周期小于12年的太阳活动与行星运动和行星引潮力变化的时间相关性较高,而周期大于12年的太阳活动与行星运动的相关性较弱。在所有八大行星中,木星及木内行星共转运动的引潮力对太阳活动的周期性影响最大。

1.2.4 太阳活动预报新方法

Huang等人^[111]基于国内外海量天基和地基太阳活动观测数据,建立了基于人工智能技术的太阳爆发预报模型,并通过跟踪人工智能技术的进步,不断改进预报模型。他们利用深度学习中的卷积神经网络,从太阳活动区光球视向磁图中提取太阳耀斑预报模式,并对自动提取的预报模式进行物理分析,实现了太阳耀斑短期自动预报模型。

通常太阳活动预报主要依赖预报人员的个人经验,引入人工智能技术有利于实现从预报员的主观预报向计算机的客观预报。通过运用新创建的预报模式,使得完成全部工作所需时间显著减少,实现了向机器预报的转变。预报模式成功运用于载人航天、嫦娥工程和奥运会等重大事件的空间环境保障服务。

1.2.5 类太阳恒星磁场活动特征研究

由于类太阳恒星表面反映磁场活动的光球特征元素(黑子和光斑)对恒星亮度的自转调制,恒星的光变曲线会呈现一定的起伏变化。He等人^[112]通过对开普勒空间望远镜观测到的类太阳恒星自转调制光变曲线的定量分析,得到两个反映恒星表面磁场活动变化的表征参量,第一个参量为自相关指数iAC,用于定量描述光变曲线起伏的周期性强弱,包含了黑子或光斑的时间演化信息;第二个参量为光变曲线起伏的有效幅度Reff,用于描述自转调制的深浅程度,包含了黑子或光斑的尺度和分布信息。使用磁场活动表征参量iAC和Reff,他们分析了开普勒望远镜观测到的两颗类太阳恒星的活动特性,这两颗类太阳恒星的亮度变化动态范围与太阳接近,但自转周期差别很大,分别约为14.7和6.0 d。作为对比,使用相同的参量和方法分析了太阳的光变曲线。结果表明,选用的两个磁场活动表征参量均能揭示两颗类太阳恒星以及太阳上的周期性活动变化。把两个参量所反映的周期性活动变化分别称之为“iAC-活动周”和“Reff-活动周”。两颗类太阳恒星中,自转较快的恒星“iAC-活动周”和“Reff-活动周”变化相位相同,而对于太阳(自转相对较慢),“iAC-活动

周”和“Reff-活动周”相位相反。通过对比太阳活动周极小期的光变曲线和同时段观测到的光球磁图,可以发现,引起太阳光变曲线强周期性调制的光球特征元素为日面上增强网络磁场区域内的光斑,这也可以用来解释两颗类太阳恒星上强周期性调制光变曲线的形成机制。He等人^[113]利用开普勒空间望远镜获取的类太阳恒星光变曲线数据,分析了类太阳恒星上耀斑的长周期活动行为,并与太阳耀斑的长周期行为进行对比,揭示出太阳耀斑与类太阳恒星耀斑长周期活动行为的差异。

2 新一代太阳物理探测技术及方法研究进展

经过几代太阳物理学家们的不懈努力,在国家天文台形成了太阳物理领域的创新研究力量,包括一系列总体性能优良的观测设备,其中部分设备达到国际先进水平。国家天文台拥有世界一流的多通道太阳磁场望远镜、全日面光学与磁场监测系统、太阳射电宽带动态频谱仪。

在太阳多通道磁场望远镜数十年连续稳定运行的基础上,全日面光学与磁场监测系统在国际上率先突破了宽视场高分辨率太阳矢量磁场观测的关键技术,获得了高时间分辨率、高磁场分辨率的全日面矢量磁图和全日面色球单色像,为我国太阳观测和空间环境预报提供了新的技术手段,提高了太阳活动监测和预报能力。Zhang等人^[114]利用它的观测资料展开了大尺度太阳活动的观测研究。

艾国祥院士^[115]曾提出,空间太阳望远镜(Space Solar Telescope, SST)以高空间分辨率为主要特色,以磁元探测为突破点,开展太阳瞬变和稳定态磁流体动力学的观测和研究,实现空间探测和太阳物理研究的重大突破,将使我国的空间太阳探测达到世界领先水平。他们承担完成的SST有效载荷预研项目,其1 m口径主光学望远镜分辨率达到衍射极限0.1角秒,2007年被鉴定评价为我国当时预研成功的口径最大、分辨率最高的空间光学望远镜。SST预研的另一项重要技术成果——相关跟踪图像稳定技术,在“十一五”之后应用于我国多项空间对地相机研制。基于SST需求,还提出发展了大口径空间光学望远镜贯通式卫星平台技术、热机光一体化热控分析技术、高精度卫星姿态控制技术,这些创新性的技术成果不但对完成空间太阳望远镜科学任务具有重要价值,而且推动了我国航天高技术的发展。随后,我国深空探测规划中将太阳作为重要的探测

目标之一,旨在理解太阳磁场和太阳活动周的起源及其对地球和行星系统的影响^[116]。虽然SST被列入我国深空探测计划成为深空太阳天文台(Deep-Space Solar Observatory, DSO),但仍没能获得正式工程立项。Deng等人^[117]基于SST的相关技术积累,推动全日面矢量磁场磁像仪(full-disk magnetograph, FMG)应用在我国正在实施的第一颗综合性太阳探测卫星计划——先进天基太阳天文台(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)^[118]上。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场磁像仪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。

邓元勇等人^[119]提出了用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统(accurate solar infrared magnetic measuring system, AIMS),研制了国际上第一台中红外太阳磁场观测设备。利用中红外的观测优势,他们克服磁场测量百年历史中的瓶颈问题,实现了太阳磁场从“间接测量”到“直接测量”的跨越发展。预期首次获得优于10高斯的横场测量精度,将现有国际水平提高1个量级,以此促进诸如天体爆发活动的成因、辐射磁流体动力学过程、局地发电机过程、日冕加热等前沿研究的进展,并探索目前知之甚少の中红外波段所蕴含的新的科学研究机遇。AIMS是一个1 m离轴地平式太阳望远镜,工作波长为12.3 μm ,焦面仪器使用红外傅里叶光谱仪实现成谱成像测量。系统由成像光学、偏振光学、红外傅里叶光谱仪、探测器、数据分析处理等五大部分组成,涉及的核心关键技术包括偏振性能优化的离轴格里高利太阳望远镜技术、全系统偏振检测和定标技术、高光谱分辨率获取技术等。这些关键技术的解决,将极大推动中红外波段大口径太阳望远镜技术、中红外偏振测量技术、高分辨红外傅里叶光谱仪研制技术、高性能中红外探测器的阵列化应用等相关前沿技术的发展。

自2003年以来,Yan等人^[68]积极开展新一代射电成像望远镜——中国射电频谱日像仪的研制。新一代厘米-分米射电频谱日像仪位于内蒙古自治区锡林郭勒盟正镶白旗明安图镇,2016年通过验收,并被命名为“明安图射电频谱日像仪(Mingantu Spectral Radioheliograph, MUSER)”。MUSER是太阳专用综合孔径成像望远镜,是由40面4.5 m口径和60面2 m口径抛物面天线组成的最远相距3 km的天线阵列,观测频率分别是0.4~2

和2~15 GHz, 具有超宽的观测频率覆盖和高时间-空间-频率分辨率. MUSER的研制促进了几个关键的科技创新, 采用宽频带线极化馈源加3 dB电桥移相器, 自主研制了具有世界先进水平的高性能超宽带双圆极化馈源. 通过一系列先进技术应用和创新性的系统集成, 实现了多通道幅相一致性和稳定性, 通过解决宽带信号信道化的高效算法实现、高速延迟补偿与条纹旋转, 实现了技术和多通道信号采集同步和相位稳定等关键技术, 研制成功了国际上最大规模的太阳射电观测高速相关处理阵列. MUSER将实现在厘米-分米波段同时以高时间、高空间和高频率分辨率观测和探测日冕大气, 对重联加速区进行射电成像观测并诊断日冕磁场, 对于揭示太阳活动中的能量释放和粒子加速等基本物理过程具有独特作用, 为开展前沿太阳物理研究将发挥不可取代的作用.

行星际闪烁(Interplanetary Scintillation, IPS)望远镜能够在地面测量到太阳扰动通过行星际空间传播到地球空间附近的整个过程. 国际上现有的IPS专用设备可分为两类, 第一类采用单站的大接收面积天线构成, 由于是单站测量, 测量的太阳风速度依靠模型, 但可接收的源数量多; 第二类采用多个接收面积较小的站组成, 由于是多站测量, 可通过不同台站接收的信号相关来直接测量太阳风速度. Yan等人^[120]提出了新的IPS望远镜方案, 在主站明安图观测基地布置目前国际最大接收面积的单站IPS天线接收系统, 同时布置两个辅站, 可以通过多站信号相关来直接测量太阳风的速度, 该方案结合了上述两种类型的优点. 在明安图观测基地还将建设米波-十米波射电日像仪, 它们均已得到子午II期项目的支持. 建成后, 将实现对太阳到地球空间环境的全链路监测, 在太阳活动对日地空间的扰动监测方面占据重要地位.

3 总结与展望

中国科学院国家天文台整合成立以来, 保持以太阳磁场和太阳射电观测为主要特色和优势的太阳物理研究, 在太阳矢量磁场和速度场演化、磁活动本质和起源、太阳射电物理、新一代太阳探测技术以及太阳活动预报研究和应用服务等方面均取得了许多有重要影响的成果.

(1) 运行并研制了一系列世界一流太阳探测设备. 全日面光学与磁场监测系统在国际上率先突破了宽视场高分辨率太阳矢量磁场观测的关键技术, 获得了高

时间分辨率、高精度的全日面矢量磁图和全日面色球单色像; 中国太阳射电宽带动态频谱仪在过去20年的运行过程中, 取得了大量令人瞩目的高时间、高频率分辨率射电频谱数据; 研制建成了国际上新一代厘米-分米波射电频谱日像仪; 推动了中红外太阳磁场精确测量观测系统的研制建设, 并推动了我国首个空间太阳望远镜ASO-S的有效载荷全日面磁场望远镜的研制; 启动了国家子午工程II期明安图米波-十米波射电日像仪和行星际闪烁望远镜的研制, 并积极推动了未来空间太阳探测计划.

(2) 太阳磁场研究. 在光球磁场观测以及冕洞、宁静太阳和网络磁元方面的研究取得了开拓性的成果, 基于自主矢量磁场观测数据, 发展了非线性无力场外推方法和三维空间的磁螺度计算方法, 成为太阳物理教科书中的代表性方法; 基于自主观测数据得到磁场螺度传输的振荡特征和南北半球的不平衡性, 对太阳发电机理论模型提出了观测约束和挑战.

(3) 磁场重联研究. 给出了太阳低层大气磁重联的直接观测证据, 发现并命名了一些新的太阳活动现象如亮墙、色球炮弹等, 首次从观测数据中重建得到了在耀斑/日冕物质抛射爆发之前即已存在的磁绳结构, 系统分析中欧合作空间探测数据, 首次在日地空间中发现了自然界中存在的磁零点; 首次在太阳大气中观测到Kelvin-Helmholtz不稳定性的详细过程, 发现了太阳大气中无所不在的龙卷风现象, 可能是日冕加热的一种有效途径.

(4) 太阳射电物理研究. 基于自主观测数据发现并理论解释了大量独特的射电频谱精细结构现象, 如微波“斑马纹”结构、微波快漂准周期脉动结构、新型“曲棍球棒”结构、“鱼群”结构等, 并将它们应用于诊断日冕源区磁场、密度等物理参数的演化, 揭示了太阳大气中复杂的动力学过程.

(5) 耀斑和日冕物质抛射研究. 系统研究了太阳剧烈爆发的储能过程、触发机制、爆发与能量释放、粒子加速与扰动传播, 深入揭示了爆发过程的物理本质, 包括系统证实了日冕物质抛射的源区磁场和初发过程、首先描述了跨赤道暗条与日冕物质抛射的关系、提出了日冕物质抛射是磁螺度在日冕中积累的自然结果的观点, 为日冕物质抛射预报奠定了物理基础.

(6) 太阳活动周及太阳活动预报研究. 深入研究了不同时间尺度的太阳活动周行为特征, 并从发电机理论和磁螺度角度分别开展了理论和观测论证, 提出了

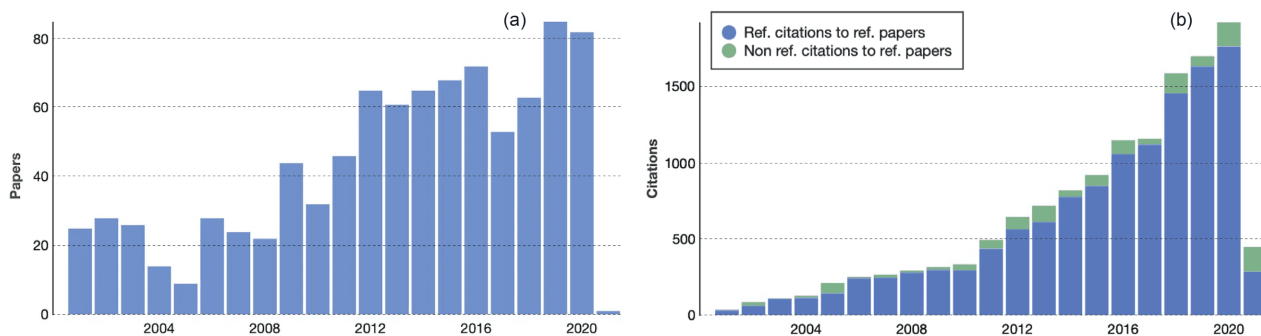


图8 根据ADS检索得到的国家天文台自2001年至今逐年发表的太阳和日地物理方面的审稿论文数(总数913篇)(a)及这些论文的被引用数(总数13356次)(b)

Figure 8 The annual refereed papers published since 2001 by NAOC on solar and heliospheric physics with a total of 913 papers (a) and the citations of these papers with a total citations of 13356 (b)

新的太阳活动预报参数和预报方法,引入人工智能包括神经网络和机器学习等现代技术方法,实现了机器预报。多次成功将太阳活动预报结果应用于载人航天、嫦娥工程和奥运会等重大事件的空间环境保障,受到有关部门嘉奖。

此外,基于嫦娥三号月球着陆器上极紫外相机观测,还发现了肇始于地球夜侧的磁层亚暴会在午夜区域引起等离子体层局部位形的快速膨胀,改变了以往地磁活动只是引起地球等离子体层刻蚀的认识。太阳与类太阳恒星研究进一步拓展了对天体演化和生命起源以及人类在宇宙中宜居性的认识。

据ADS不完全统计,国家天文台组建以来逐年发表的太阳物理研究方面的审稿论文和这些论文的被引用情况如图8所示,反映了国家天文台在太阳物理相关领域的发展势头和影响不断增强。

为了进一步发挥国家天文台在我国太阳物理领域的重要作用,未来将在如下几个方向进行重点突破。

(1) 太阳磁场测量。一方面继续发挥怀柔多波段太阳磁场-速度场探测设备的作用,研制新一代多通道中红外太阳磁场望远镜,建设青海冷湖观测基地,实现多波段、高分辨率太阳矢量磁场观测,使我国太阳磁场观测占据国际领先地位。

(2) 太阳射电观测。射电辐射对于太阳爆发中的非热过程最为敏感,必须给予高度重视。充分发挥MU-

SER在厘米-分米波段射电频谱成像观测的作用,推动国家子午工程中米波-十米波射电频谱日像仪、IPS望远镜和超宽带射电动态频谱仪的研制建设,将明安图观测基地建设成为一个拥有多手段、多波段、超宽带、综合性的太阳射电观测中心,实现对太阳活动和演化中非热过程的三维立体观测和综合研究,具有在理论和应用方面带来突破的新机会。

(3) 积极推动深空太阳探测计划的实施,在避开地球大气和人工干扰的环境中实现对太阳进行多视角立体观测,尤其是太阳磁场-速度场、紫外-极紫外频谱成像、亚厘米波和甚低频波段的射电频谱观测互相结合,推动对太阳活动周形成机制,太阳爆发活动起源,日冕加热机制,灾害性空间天气事件的孕育、演化和对地作用机制等重大问题研究的突破。

太阳物理学是天文学领域中唯一一个既联系现代天体物理重大前沿科学问题,同时又服务于航空、航天、通讯、导航、电网运行等高技术系统的安全可靠运行的学科。目前,该领域在理论和应用中仍然存在诸多悬而未决的难题,包括太阳磁场与太阳周的起源、磁元探测、日冕加热、太阳爆发起源及其对日地空间环境的作用和影响等。国家天文台新建和在建的先进观测设施将极大地促进上述问题的解决,对于科学长远发展、重大空间计划与国家安全等均具有极其重要的意义。

致谢 本文得到了中国科学院国家天文台艾国祥院士、汪景琇院士、张洪起研究员、张军研究员、邓元勇研究员、张枚研究员、王华宁研究员、周桂萍研究员、徐龙研究员、谭宝林研究员等人的帮助,特此致谢。同时,感谢博士生周志超、张茗惠的帮助。文中图1~7部分或全部取自对应文献,得到了原作者及AAS的许可,特此致谢。

参考文献

- 1 Wang H N, Xu R L. Solar-terrestrial magnetic activity and space environment. In: Proceedings of the COSPAR Colloquium on Solar-Terrestrial Magnetic Activity and Space Environment (STMASE), held in the NAOC in Beijing, China, September 10–12, 2001. Boston: Pergamon, 2002
- 2 Dere K, Wang J X, Yan Y H. Coronal and stellar mass ejections. In: Proceedings of International Astronomical Union Symposium, No. 226, 13–17 September, 2004, Beijing, China. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- 3 Kosovichev A G, De Gouveia Dal Pino E, Yan Y H. Solar and astrophysical dynamos and magnetic activity. In: Proceedings of International Astronomical Union Symposium, No. 294, August 27–31, 2012, Beijing, China. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 4 Jiang J, Wang J X. A dynamo model for axisymmetric and non-axisymmetric solar magnetic fields. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2007, 377: 711–718
- 5 Xu H, Gao Y, Popova E P, et al. Magnetic and electric-current helicities in very simple models of the solar dynamo. *Astron Rep*, 2009, 53: 160–165
- 6 Jiang J, Cameron R H, Schüssler M. The cause of the weak solar cycle 24. *Astrophys J*, 2015, 808: L28
- 7 Jiang J, Cameron R H, Schmitt D, et al. Modeling solar cycles 15 to 21 using a flux transport dynamo. *Astron Astrophys*, 2013, 553: A128
- 8 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
- 9 Zhang H, Yang S. Distribution of magnetic helicity flux with solar cycles. *Astrophys J*, 2013, 763: 105–110
- 10 Wang J X, Zhao M, Zhou G P. Magnetic changes in the course of the X7.1 solar flare on 2005 January 20. *Astrophys J*, 2009, 690: 862–874
- 11 Jin C, Wang J, Zhao M. Vector magnetic fields of solar granulation. *Astrophys J*, 2009, 690: 279–287
- 12 Jin C, Wang J, Zhou G. The properties of horizontal magnetic elements in quiet solar intra-network. *Astrophys J*, 2009, 697: 693–700
- 13 Zhang J, Yang S H, Jin C L. Interaction between granulation and small-scale magnetic flux observed by Hinode. *Res Astron Astrophys*, 2009, 9: 921–932
- 14 Zhou G P, Wang J X, Jin C L. Solar intranetwork magnetic elements: Evolution and lifetime. *Sol Phys*, 2010, 267: 63–73
- 15 Zhang J, Ma J, Wang H. Comparison of magnetic flux distribution between a coronal hole and a quiet region. *Astrophys J*, 2006, 649: 464–469
- 16 Yang S, Zhang J, Borrero J M. Dipolar evolution in a coronal hole region. *Astrophys J*, 2009, 703: 1012–1020
- 17 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
- 18 Su J T, Jing J, Wang S, et al. Statistical study of free magnetic energy and flare productivity of solar active regions. *Astrophys J*, 2014, 788: 150–159
- 19 Su J T, Ji K F, Banerjee D, et al. Interference of the running waves on light bridges of a sunspot. *Astrophys J*, 2016, 816: 30
- 20 Su J T, Liu Y. Local twist and current helicity distributions of active region NOAA 10930. *Astrophys J Lett*, 2009, 697: 103
- 21 Li L, Zhang J. Statistics of flares sweeping across sunspots. *Astrophys J*, 2009, 706: L17–L21
- 22 Li L P, Zhang J. Observations of the magnetic reconnection signature of an M2 flare on 2000 March 23. *Astrophys J*, 2009, 703: 877–882
- 23 Li L, Zhang J. On the brightening propagation of post-flare loops observed by TRACE. *Astrophys J*, 2009, 690: 347–357
- 24 Yang S, Zhang J, Xiang Y. Magnetic reconnection between small-scale loops observed with the new vacuum solar telescope. *Astrophys J*, 2015, 798: L11
- 25 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
- 26 Li L, Zhang J, Peter H, et al. Magnetic reconnection between a solar filament and nearby coronal loops. *Nat Phys*, 2016, 12: 847–851
- 27 Hou Y J, Li T, Yang S H, et al. Light walls around sunspots observed by the interface region imaging spectrograph. *Astron Astrophys*, 2016, 589: L7
- 28 Hou Y, Zhang J, Li T, et al. Simultaneous observations of p-mode light walls and magnetic reconnection ejections above sunspot light bridges. *Astrophys J*, 2017, 848: L9
- 29 Yang S, Zhang J, Xiang Y. Fine structures and overlying loops of confined solar flares. *Astrophys J*, 2014, 793: L28
- 30 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
- 31 Amari T, Canou A, Aly J J. Characterizing and predicting the magnetic environment leading to solar eruptions. *Nature*, 2014, 514: 465–469
- 32 Yan Y H, Deng Y Y, Karlický M, et al. The magnetic rope structure and associated energetic processes in the 2000 July 14 solar flare. *Astrophys J Lett*, 2001, 551: L115–L119
- 33 Yan Y H, Aschwanden M J, Wang S J, et al. Evolution of magnetic flux rope in the active region NOAA 9077 on 14 July 2000. *Sol Phys*, 2001, 204: 27
- 34 Deng Y, Wang J, Yan Y, et al. Evolution of magnetic nonpotentiality in NOAA AR 9077. *Sol Phys*, 2001, 204: 11–26
- 35 Li T, Zhang J. Homologous flux ropes observed by SDO/AIA. *Astrophys J Lett*, 2013, 804: L1
- 36 Li T, Zhang J. Fine-scale structures of flux ropes tracked by erupting material. *Astrophys J*, 2013, 770: L25

- 37 Li T, Zhang J. Slipping magnetic reconnection triggering a solar eruption of a triangle-shaped flag flux rope. *Astrophys J*, 2014, 791: L13
- 38 Yang S, Zhang H, Büchner J. Magnetic helicity accumulation and tilt angle evolution of newly emerging active regions. *Astron Astrophys*, 2009, 502: 333–340
- 39 Hao J, Zhang M. Hemispheric helicity trend for solar cycle 24. *Astrophys J*, 2011, 733: L27
- 40 Zhang H Q, Brandenburg A, Sokoloff D D. Magnetic helicity and energy spectra of a solar active region. *Astrophys J Lett*, 2014, 784: 45
- 41 Zhang H, Brandenburg A, Sokoloff D D. Evolution of magnetic helicity and energy spectra of solar active regions. *Astrophys J*, 2016, 819: 146
- 42 Yang S, Büchner J, Skála J, et al. Evolution of relative magnetic helicity. *Astron Astrophys*, 2018, 613: A27
- 43 Zhang Y Z, Shibata K, Wang J X, et al. Revision of solar spicule classification. *Astrophys J*, 2012, 750: 16
- 44 Zhang Y, Kitai R, Narukage N, et al. Propagation of Moreton waves. *Publ Astron Soc Jpn*, 2011, 63: 685–696
- 45 Li T, Zhang J, Zhang Y, et al. Three-dimensional reconstruction of an erupting filament with solar dynamics observatory and STEREO observations. *Astrophys J*, 2011, 739: 43
- 46 Li L, Zhang J. The evolution of barbs of a polar crown filament observed by SDO. *Sol Phys*, 2013, 282: 147–174
- 47 Jin C L, Harvey J W, Pietarila A. Synoptic mapping of chromospheric magnetic flux. *Astrophys J*, 2013, 765: 79
- 48 Zhu X, Wang H, Du Z, et al. Forced field extrapolation of the magnetic structure of the H α fibrils in the solar chromosphere. *Astrophys J*, 2016, 826: 51
- 49 Yang S, Zhang J, Li X, et al. Chromospheric cannonballs on the sun. *Astrophys J*, 2019, 880: L24
- 50 Fu Q, Ji H, Qin Z, et al. A new solar broadband radio spectrometer (SBRs) in China. *Sol Phys*, 2004, 222: 167–173
- 51 Fu Q J, Yan Y H, Liu Y Y, et al. A new catalogue of fine structures superimposed on solar microwave bursts. *Chin J Astron Astrophys*, 2004, 4: 176–188
- 52 Chen B, Yan Y H. On the origin of the zebra pattern with pulsating superfine structures on 21 April 2002. *Sol Phys*, 2007, 246: 431–443
- 53 Huang J, Yan Y H, Liu Y Y. An analysis of solar radio burst events on December 1 2004. *Adv Space Res*, 2007, 39: 1439–1444
- 54 Tan B, Yan Y, Tan C, et al. The microwave pulsations and the tearing modes in the current-carrying flare loops. *Astrophys J*, 2007, 671: 964–972
- 55 Yan Y H, Huang J, Chen B, et al. Diagnostics of radio fine structures around 3 GHz with Hinode data in the impulsive phase of an X3.4/4B flare event on 2006 December 13. *Publ Astron Soc Jpn*, 2007, 59: 815
- 56 Huang J, Démoulin P, Pick M, et al. Initiation and early development of the 2008 April 26 coronal mass ejection. *Astrophys J*, 2011, 729: 107
- 57 Tan B L, Zhang Y, Tan C M, et al. Microwave quasi-periodic pulsations in multi-timescales associated with a solar flare/CME event. *Astrophys J*, 2010, 723: 1–25
- 58 Tan B. A physical explanation of solar microwave Zebra pattern with the current-carrying plasma loop model. *Astrophys Space Sci*, 2010, 325: 251–257
- 59 Chernov G P. Recent results of zebra patterns in solar radio bursts. *Res Astron Astrophys*, 2010, 10: 821–866
- 60 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
- 61 Tan B L, Tan C M. Microwave quasi-periodic pulsation with millisecond bursts in a solar flare on 2011 August 9. *Astrophys J*, 2012, 749: 28
- 62 Tan B L, Yan Y H, Tan C M. Microwave zebra pattern structures in the X2.2 solar flare on 2011 February 15. *Astrophys J*, 2012, 744: 166
- 63 Tan B, Tan C, Zhang Y, et al. Statistics and classification of the microwave zebra patterns associated with solar flares. *Astrophys J*, 2014, 780: 129
- 64 Huang J, Tan B, Zhang Y, et al. Quasi-periodic pulsations with varying period in multi-wavelength observations of an X-class flare. *Astrophys J*, 2014, 791: 44
- 65 Huang J, Tan B. Microwave bursts with fine structures in the decay phase of a solar flare. *Astrophys J*, 2012, 745: 186
- 66 Tan B. Small-scale microwave bursts in long-duration solar flares. *Astrophys J*, 2013, 773: 165
- 67 Chen X, Yan Y, Tan B, et al. Quasi-periodic pulsations before and during a solar flare in AR 12242. *Astrophys J*, 2019, 878: 78
- 68 Yan Y, Zhang J, Wang W, et al. The Chinese Spectral RadioHeliograph—CSRH. *Earth Moon Planet*, 2009, 104: 97–100
- 69 Zhang M, Low B C. The hydromagnetic nature of solar coronal mass ejections. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2005, 43: 103–137
- 70 Zhang M, Flyer N, Chye Low B. Magnetic helicity of self-similar axisymmetric force-free fields. *Astrophys J*, 2012, 755: 78
- 71 Wang J, Zhou G, Zhang J. Helicity patterns of coronal mass ejection-associated active regions. *Astrophys J*, 2004, 615: 1021–1028
- 72 Zhou G P, Wang J X, Zhang J. Large-scale source regions of earth-directed coronal mass ejections. *Astron Astrophys*, 2006, 445: 1133–1141
- 73 Wang J X, Zhou G P, Wen Y Y, et al. Transequatorial filament eruption and its link to a coronal mass ejection. *Chin J Astron Astrophys*, 2006, 6: 247–259
- 74 Zhang Y, Wang J, Attrill G D R, et al. Coronal magnetic connectivity and EUV dimmings. *Sol Phys*, 2007, 241: 329–349
- 75 Zhou G P, Wang J X, Zhang J, et al. Two successive coronal mass ejections driven by the kink and drainage instabilities of an eruptive prominence. *Astrophys J*, 2006, 651: 1238–1244
- 76 Wen Y, Maia D J F, Wang J. The CME acceleration problem: Error estimates in LASCO coronal mass ejection measurements. *Astrophys J*, 2007, 657: 1117–1126

- 77 Zhang Y Z, Wang J X. A catastrophic flux rope in a quadrupole magnetic field for coronal mass ejections. *Astrophys J*, 2007, 663: 592–597
- 78 Yan Y, Sakurai T. New boundary integral equation representation for finite energy force-free magnetic fields in open space above the sun. *Sol Phys*, 2000, 195: 89–109
- 79 Yan Y. On the application of the boundary element method in coronal magnetic field reconstruction. *Space Sci Rev*, 2003, 107: 119–138
- 80 Li Z, Yan Y, Song G. Properties of the boundary integral equation for solar non-constant- α force-free magnetic fields. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2004, 347: 1255–1265
- 81 Yan Y, Li Z. Direct boundary integral formulation for solar non-constant- α force-free magnetic fields. *Astrophys J*, 2006, 638: 1162–1168
- 82 He H, Wang H N, Yan Y H. Nonlinear force-free field extrapolation of the coronal magnetic field using the data obtained by the Hinode satellite. *J Geophys Res-Space Phys*, 2011, 116: 1–27
- 83 Zhang J, Zhou G, Wang J, et al. Magnetic evolution and temperature variation in a coronal hole. *Astrophys J*, 2007, 655: L113–L116
- 84 Yang S, Zhang J, Li T, et al. SDO observations of magnetic reconnection at coronal hole boundaries. *Astrophys J*, 2011, 732: L7
- 85 Zhu X, Wang H, Cheng X, et al. A solar blowout jet caused by the eruption of a magnetic flux rope. *Astrophys J*, 2017, 844: L20
- 86 Li X, Zhang J, Yang S, et al. Observing Kelvin–Helmholtz instability in solar blowout jet. *Sci Rep*, 2018, 8: 8136
- 87 Li X, Yang S, Chen H, et al. Trigger of a blowout jet in a solar coronal mass ejection associated with a flare. *Astrophys J*, 2015, 814: L13
- 88 Li T, Zhang J, Yang S H, et al. SDO/AIA observations of secondary waves generated by interaction of the 2011 June 7 global EUV wave with solar coronal structures. *Astrophys J*, 2012, 746: 13
- 89 Yang L, Zhang J, Liu W, et al. SDO/AIA and Hinode/EIS observations of interaction between an EUV wave and active region loops. *Astrophys J*, 2013, 775: 39
- 90 Kerr R A. Why is the sun's corona so hot? *Science*, 2012, 33: P1099
- 91 Zhang J, Liu Y. Ubiquitous rotating network magnetic fields and extreme-ultraviolet cyclones in the quiet sun. *Astrophys J*, 2011, 741: 7
- 92 Tan B. Coronal heating driven by a magnetic gradient pumping mechanism in solar plasmas. *Astrophys J*, 2014, 795: 140
- 93 Zhang J, Zhang B, Li T, et al. Coronal heating by the interaction between emerging active regions and the quiet sun observed by the solar dynamics observatory. *Astrophys J*, 2015, 799: L27
- 94 Xiao C J, Wang X G, Pu Z Y, et al. *In situ* evidence for the structure of the magnetic null in a 3D reconnection event in the earth's magnetotail. *Nat Phys*, 2006, 2: 478–483
- 95 Xiao C J, Wang X G, Pu Z Y, et al. Satellite observations of separator-line geometry of three-dimensional magnetic reconnection. *Nat Phys*, 2007, 3: 609–613
- 96 He H, Shen C, Wang H, et al. Response of plasmaspheric configuration to substorms revealed by Chang'e 3. *Sci Rep*, 2016, 6: 32362
- 97 Cui Y, Li R, Zhang L, et al. Correlation between solar flare productivity and photospheric magnetic field properties. *Sol Phys*, 2006, 237: 45–59
- 98 Cui Y, Li R, Wang H, et al. Correlation between solar flare productivity and photospheric magnetic field properties II. Magnetic gradient and magnetic shear. *Sol Phys*, 2007, 242: 1–8
- 99 Huang X, Zhang L, Wang H, et al. Improving the performance of solar flare prediction using active longitudes information. *Astron Astrophys*, 2013, 549: A127
- 100 Huang X, Wang H N, Li L P. Ensemble prediction model of solar proton events associated with solar flares and coronal mass ejections. *Res Astron Astrophys*, 2012, 12: 313–321
- 101 Zhang L Y, Wang H N, Du Z L, et al. Long-term behavior of active longitudes for solar X-ray flares. *Astron Astrophys*, 2007, 471: 711–716
- 102 Zhang L, Mursula K, Usoskin I, et al. Global analysis of active longitudes of sunspots. *Astron Astrophys*, 2011, 529: A23
- 103 Wang H N, Ai G X, Wang J X. What is a solar electromagnetic storm? *Space Weather*, 2012, 10: S09003
- 104 Chen A Q, Wang J X, Li J W, et al. Statistical properties of superactive regions during solar cycles 19–23. *Astron Astrophys*, 2011, 534: 47
- 105 Tan B. Multi-timescale solar cycles and the possible implications. *Astrophys Space Sci*, 2011, 332: 65–72
- 106 Du Z. The shape of solar cycle described by a modified gaussian function. *Sol Phys*, 2011, 273: 231–253
- 107 Le G, Cai Z, Wang H, et al. Solar cycle distribution of great geomagnetic storms. *Astrophys Space Sci*, 2012, 339: 151–156
- 108 Du Z. The relationship between prediction accuracy and correlation coefficient. *Sol Phys*, 2011, 270: 407–416
- 109 Du Z L. The correlation between solar and geomagnetic activity-Part 3: An integral response model. *Ann Geophys*, 2011, 29: 1005–1018
- 110 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
- 111 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
- 112 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
- 113 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
- 114 Zhang H Q, Wang D G, Deng Y Y, et al. Solar magnetism and the activity telescope at HSOS. [Chin J Astron Astrophys](#), 2007, 7: 281–288
- 115 Ai G X, Yan Y H, Yang S M, et al. Progress on space solar telescope in 2004–2006. [Chin J Space Sci](#), 2006, 26: 14–17
- 116 Lunar and Deep Space Exploration Office of the Chinese Academy of Sciences. Lunar and Deep Space Exploration (in Chinese). Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2014 [中国科学院月球与深空探测总体部. 月球与深空探测. 广州: 广东科技出版社, 2014]
- 117 Deng Y Y, Zhang H Y, Yang J F, et al. Design of the full-disk magnetograph (FMG) onboard the ASO-S. [Res Astron Astrophys](#), 2019, 19: 157
- 118 Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. Advanced space-based solar observatory (ASO-S): An overview. [Res Astron Astrophys](#), 2019, 19: 156
- 119 Deng Y Y, Gan W Q, Yan Y H, et al. Current situation and prospect of solar magnetic field exploration (in Chinese). [Infr Laser Eng](#), 2020, 49: 20200278 [邓元勇, 甘为群, 颜毅华, 等. 太阳磁场探测现状与展望. 红外与激光工程, 2020, 49: 20200278]
- 120 Yan Y H, Wang W, Chen L J, et al. New interplanetary scintillation array in China for space weather. [Sun Geosphere](#), 2018, 13: 153–155

Summary for “中国科学院国家天文台太阳物理研究20年”

Research advances in solar physics at National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences

Yihua Yan^{1,2,3}¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³ CAS Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, ChinaE-mail: yyh@nao.cas.cn

In 2001, the National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences (NAOC) was established with the reorganization of the astronomical community within the Chinese Academy of Sciences then. Several solar physics research groups in the former Beijing Astronomical Observatory of Chinese Academy of Sciences were incorporated into NAOC. During the past 20 years NAOC has successfully operated several world class solar telescopes, including the multi-channel solar magnetic field telescope and the solar radio broadband dynamic spectrometers and other advanced solar telescopes. It has developed the solar full-disk optical and magnetic field monitoring system and the Mingantu spectral radioheliograph (MUSER) and other new generation of observing instruments. Presently, the accurate solar infrared magnetic measuring system (AIMS), the main payload of the China's first space solar telescope (Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)—the full-disk magnetograph (FMG), the meter-decameter wavelength spectral radioheliograph, and the radio interplanetary scintillation (IPS) telescope are under construction. The paper gives an overview for the original or notable research advances made by NAOC solar staff in the past 2 decades, which includes the research of solar magnetic field in the photosphere, coronal hole, quiet region and solar networks, new magnetic field extrapolation method and a magnetic flux rope that existed before a flare/coronal mass ejection eruption that was firstly revealed with the extrapolation method, new magnetic helicity calculation method, the oscillating characteristics of magnetic helicity transportation and the unbalance between the northern and southern hemispheres which presents a new observation constraint and challenge to the solar dynamo model, sunspot bright walls, direct observational evidence of magnetic reconnection in the solar lower atmosphere and ubiquitous tornadoes in the solar atmosphere that may be possible energy sources of corona heating. A large number of unique solar radio spectral fine structures have been discovered and explained theoretically based on the observed data of NAOC. The microwave Zebra patterns, multi-timescale quasi-periodic pulsations, lace bursts, and spikes present the diversity and complexity of the energy release related to the solar flares. They provide an important tool for diagnosing the physical conditions of flaring source regions and useful probe for revealing the details of magnetic reconnection, particles accelerations and propagations. The magnetic field in the source region and the initial process of coronal mass ejections are systematically identified. For the first time, the relationship between the trans-equatorial filaments and coronal mass ejections is developed. The theory that coronal mass ejection is the natural result of magnetic helicity accumulation in the corona is put forward, which lays a physical foundation for the prediction of CMEs. The results of solar activity predictions have been successfully applied to the space environment guarantee of several manned space missions, the Chang'e project and the Olympic Games. This paper further proposes that the future China will mainly develop the solar magnetic field measurements, the solar radio observations and the deep-space explorations for the great breakthrough, which will promote the tackling of a series of solar and terrestrial physics scientific problems, including the origin of the solar magnetic field, solar cycles, coronal heating, solar eruptions and its influential mechanism on solar-terrestrial space environment.

solar physics, solar magnetic fields, solar activities, solar radio emissions, solar activity predictionsdoi: [10.1360/TB-2020-1645](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1645)