



观点

对太阳物理发展趋势的展望

陈鹏飞^{1,2*}

1. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023;
2. 南京大学教育部现代天文与天体物理重点实验室, 南京 210023

*联系人, E-mail: chenpf@nju.edu.cn

收稿日期: 2021-09-16; 接受日期: 2021-10-09; 网络出版日期: 2021-10-20

国家自然科学基金(编号: 11961131002, U1731241)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2020YFC2201200)资助项目

摘要 今年是我国“十四五”规划的第一年。近期, 风云E3气象卫星搭载的望远镜成功地对太阳进行了极紫外成像观测, CHASE和ASO-S两颗太阳观测卫星也即将发射, 多台2 m级的地面望远镜也已出光或正在研制, 我国的太阳物理呈现欣欣向荣的景象。本文简要概述对太阳物理发展的浅见, 包括将太阳物理研究定位在四个重要领域: 太阳内部与大气的结构、太阳爆发活动的物理机制、太阳爆发对行星际空间的影响, 以及太阳活动与恒星活动的比较性研究。

关键词 太阳物理, 磁场, 太阳爆发, 空间天气

PACS: 96.60.-j, 96.60.Hv, 96.60.Jw, 96.60.Q-, 95.55.Ev

天文学是研究天体的分布、运动、结构、性质、起源和演化的学科, 其研究对象涵盖了各个层次的天体, 包括太阳和太阳系内的各天体、恒星及其行星系统、银河系和河外星系、星系际介质乃至整个宇宙^[1]。在不同的历史阶段, 天文学研究可能会在某些领域产生热点, 与此同时, 有些领域则可能进展相对缓慢。然而, 需要指出的是, 任何热点都不可能长期存在, 而且热点的存在并不意味着其他研究方向不重要, 况且一度的夕阳学科也有可能重焕生机, 成为朝阳学科。20世纪80年代, 系外行星的研究算是旁门左道, 如今它已经成为天文学的新宠; 一度进展迟缓的恒星物理因为开普勒望远镜的观测而得以凤凰涅槃; 天体测量曾经为日心说替代地心说做出过巨大贡献, 在平淡度过几个世纪后因为Gaia卫星的发射而在揭示银河系结构

方面取得丰硕成果。夜天文如此, 太阳物理也是如此。

太阳是宇宙中众多恒星里面很普通的一颗, 但却是唯一可以让我们进行高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率、高偏振精度及立体观测的恒星。太阳物理研究结合了成像及光谱的遥感测量、中微子和带电粒子的局地测量以及日震学中基于声波的反演等多种手段。从这个意义上讲, 太阳物理比天体物理其他分支更早就进入了多信使研究阶段。太阳及太阳风的物理参数范围非常广: 温度跨越4个量级, 密度跨越30多个量级, 磁场跨越11个量级。从能量角度看, 耀斑能量可以高达 10^{32} erg, 而目前能探测到的小尺度增亮的能量大约为 10^{24} erg。因此, 太阳是一个多尺度物理过程并存的天然等离子体实验室, 其所展现的丰富等离子体和磁流体现象为众多

引用格式: 陈鹏飞. 对太阳物理发展趋势的展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 119632
Chen P-F. Perspectives on the promotion of solar physics (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 119632, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0262](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0262)

基本物理过程提供了重要信息, 为聚变等离子体物理和高能物理等学科领域提供了重要的参考。一方面, 太阳作为一颗恒星, 其高清观测揭示的电磁相互作用规律可以推广到其他天体。另一方面, 太阳距离我们人类如此之近, 其中的剧烈爆发现象(如太阳耀斑和日冕物质抛射)会直接影响到人类赖以生存的空间环境及通讯、导航等高科技活动, 常见的危害包括摧毁卫星、骚扰电离层以致于短波通讯失效、破坏远距离传输电网及石油管道等。因此, 有关太阳爆发现象的研究可以让我们理解爆发现象发生的物理规律, 从而为灾害性空间天气的预报提供物理基础。

所以, 尽管太阳物理现阶段不是天文学的热门研究方向, 但其研究依然非常有价值, 其中天文学其他分支不可比拟的便是太阳光度变化对地球气候变迁的影响和太阳爆发现象对人类高科技活动的影响。另外, 很多同行也在思考着如何拓展太阳物理的研究课题, 使得太阳物理研究更加有意义。正是基于这一理念, 我试图将太阳物理未来的研究方向定位为四类: (1) 太阳内部与大气的结构与演化, 这一领域代表的是天体等离子体的热核反应、辐射与动力学过程, 而只有太阳才能提供高分辨率的观测; (2) 太阳爆发活动的物理机制, 这一领域代表的是宇宙天体的磁能向动能、热能及非热能转换的过程, 而只有对太阳才能实现清晰的立体测量; (3) 太阳爆发对行星际空间的影响, 这一领域代表的是恒星对周围行星系统宜居性的影响, 而日地系统是唯一的可检视目标; (4) 太阳活动与恒星活动的比较性研究, 这一领域代表的是恒星演化的共性与差异性, 而太阳提供了一个高清模板。加强这四方面研究将为理解天体演化及生命演化提供不可或缺的一环。

对研究人员而言, 一个研究对象是否能引起研究兴趣就看其是否有我们不知道的性质。从这个意义上讲, 太阳仍然是非常有趣的天体, 因为不管是太阳内部还是太阳大气, 都还有很多未解之谜。

太阳内部结构 虽然标准太阳模型已经建立了近半个世纪, 但理论模型与观测依然存在差异, 其背后的原因很可能是我们对太阳内部物质的热力学性质、不透明度、元素丰度的扩散与对流、磁场的反馈等特性了解得还不太准确^[2]。对流区内的子午环流元胞是一个还是多个仍存在争议^[3,4]。我曾有个猜想: 也许子

午环流存在动态演化, 有时是单个元胞, 有时是多个。

太阳磁场的产生 虽然太阳磁场的产生机制已经研究了几十年, 但依然没有确切的答案, 至今也未有一个普遍接受的发电机模型^[5]。在发电机模型中, 自转和对流显然是非常重要的条件, 但是差旋层和子午环流的作用依然不是很明晰, 需要更多来自观测的限制。

色球和日冕加热机制 太阳表面的温度只有6000度左右, 而在色球则逐渐升温到2万度, 到日冕后增加到100–200万度。对于普通的流体, 常见的能量传递方式包括热传导、对流、辐射和声波。但这些方式都无法解释太阳色球和日冕的加热。对于等离子体而言, 磁场的存在导致额外的加热方式: 磁自由能的释放。具有自由能的磁场必须是含有电流的, 电流则分为交流和直流, 它们对应磁场带来两种新的能量传递方式: 磁流体波动和磁重联。在过去几十年里, 两种加热机制都有观测证据^[6,7], 很可能是两种机制都存在。倘若如此, 这两种机制在活动区、宁静区和冕洞中所占的比例将会是一个值得研究的课题。需要指出的一点是, 太阳对流区的能量足够提供色球和日冕的加热需求, 色球与日冕加热问题的本质在于能量的耗散机制, 这一问题的答案很可能和太阳大气的精细结构有关, 理解了日冕加热问题也就理解了太阳风加速问题。

日冕磁场的强度与分布 磁场对太阳物理至关重要。没有磁场, 太阳只是一个发光的圆球而已; 有了磁场, 太阳才有了生机, 才有了高温日冕和其中丰富多彩的爆发现象。然而, 在目前阶段我们只能对太阳表面的磁场进行相对准确的测量^[8], 太阳爆发现象却大多发生在日冕和色球中。日冕磁场的直接测量^[9–11]与间接反演(如外推和冕震学)都是值得探索的课题。需要指出的是, 获得日冕磁场强度只是第一步, 最具有挑战的任务是得到日冕磁场的拓扑结构。

色球与过渡区磁场的测量 在无法准确得到日冕磁场的现阶段, 将太阳光球磁场作为边界条件来进行日冕磁场外推是一个非常好的权宜之计。但是, 光球磁场通常并不处于无力场状态。更好的办法是利用色球磁场或过渡区磁场作为边界条件来进行日冕磁场的外推。因此, 色球与过渡区磁场的测量也是非常有趣的课题。测量色球磁场需要使用色球谱线, 如H β 。最近的研究表明, 对于宁静区而言, H β 偏振测量获得的磁场

能很好地表征色球磁场,而在黑子这样的强磁场区域, $H\beta$ 谱线获得磁场很可能依然是光球的磁场^[12].

太阳爆发的物理机制 太阳耀斑可以用磁重联模型很好地进行描述. 然而,很多相关问题并没有得到完美解决,譬如快速磁重联是如何被触发的、三维磁场分布带来的差异、磁重联中磁场转化成动能、热能及高能粒子非热能量的比例. 日冕物质抛射(简称CME)可以由标准耀斑/CME模型来解释^[13-15],但是,标准耀斑模型只是一个定性的框架,反映的是大型爆发事件的共性,还有很多定量细节需要完善,如CME的触发机制、磁重联在爆发过程中所起的作用^[16]、背景磁场对爆发特征及爆发与否的影响.

高能粒子加速机制 虽然日冕磁场比中子星的磁场要弱10个量级以上,在太阳爆发过程中,电子依然可以加速到100 MeV的能量^[17],质子则可以加速到10 GeV的能量. 这些粒子的加速机制依然是个迷. 如今,帕克太阳探针可以深入到太阳粒子加速源区进行局地测量,有望发现粒子加速的更多奥秘.

太阳爆发的经验与物理预报 太阳物理研究的一个重要价值就是对太阳耀斑和CME进行尽可能准确的预报. 这种预报以前多采用基于太阳爆发的前兆特征或磁场分布的经验预报^[18],近几年来,基于数据驱动磁流体力学数值模拟的物理预报得到了很大的发展^[19-21]. 预报的成功率、精确率与误报率将是这些预报模式的重要考量.

恒星磁活动的比较性研究 恒星的质量、丰度和自转等因素决定其内部的结构与流场,也就决定了其磁活跃性. 亿万计的恒星为恒星磁活动性的比较性研究提供了丰富的样本,而太阳,作为一颗G2V型恒星,则提供了恒星磁活动独一无二的高清样本,两者相得益彰. 这样,对太阳和其他恒星进行比较性研究将对太阳物理和恒星物理同时起到极大的推动作用. 最新的研究揭示目前的太阳磁活动性在同类恒星中是偏弱的. 其他恒星也会爆发耀斑和物质抛射,对太阳耀斑/日冕物质抛射与恒星耀发/星冕物质抛射进行比较性研究将是非常有意义的课题^[22]. 很有意思的是,有时降维观测会带来意想不到的好处. 因此,偶尔把太阳当作一个点源来观测可以为理解恒星活动提供重要线索.

物理学家薛定谔曾经说过: 研究人员的任务不只是去发现一些新现象,更多的是针对众人都习以为常

的东西做一些从未有过的思考. 这句话对太阳物理来说是再适合不过的了. 由于太阳距离我们如此之近,发现新现象的概率比夜天文要少很多. 因此,对太阳物理同行而言,更多的是需要对诸多研究了几十年的现象做一些新的思考,不必过多着力于分析一个又一个太阳爆发事件以证明某个公认的模型是对的,更应该通过对一些观测细节的重新思考而去对有争议的模型进行甄别,或者拓展已公认的模型,纠正公认模型中的某些局限性,甚至提出新的模型. 譬如Martin提出的暗条倒钩走向与磁场螺度的一一对应关系一直被教科书沿用,但我们却发现这种对应关系只对磁绳系统适用,而对剪切磁拱系统则完全相反^[23,24]; 各种文献也一直强调暗条的倒钩对应日珥的足,但我们却证实部分暗条倒钩并不是日珥的足^[25,26]. 我相信,目前对太阳的不少认识还存在或多或少的误解,而这正是我们研究的意义.

在2000–2020年期间,美国太阳物理同行发表了3200余篇文章,位居世界之首; 我国太阳物理同行则发表了近1700篇文章,位居第二. 近三年来,发达国家每年发表的太阳物理文章数目略有下降,而我国则不断攀升. 其原因之一就在于观测设备的研制是天文研究的重要推手. 相较于国外目前阶段新设备的支持力度远不如20年前,我国近几年陆陆续续建成或即将建成众多世界级的太阳观测设备. 在地面望远镜方面,一米真空太阳塔运行10年来,已取得丰硕的成果^[27],明安图射电频谱日像仪已经在顺利开展观测^[28],1.8 m望远镜已经调试成功^[29],2 m环形望远镜和2.5 m大视场高分辨率望远镜已正式立项. 在空间设备方面,搭载在风云三号E星的X射线和极紫外成像望远镜已经出光,ASO-S卫星^[30]和CHASE卫星^[31]即将发射. 此外,还有众多设备在规划之中. 中国的太阳物理研究正在迎来一个新的春天. 夜天文同行将他们的研究热点概括为“两暗一黑三起源”,即暗物质、暗能量、黑洞、宇宙的起源、天体的起源和宇宙生命的起源. 其实,太阳物理的研究热点也可以概括为“两暗一黑三起源”,那就是暗条、暗穴、黑子、磁场的起源、高温日冕的起源以及太阳爆发的起源. 这些世界级的观测设备将为探索太阳物理的“两暗一黑三起源”作出重大贡献. 我国学者自己创办的英文期刊也为提高国内科研成果在国际上的显示度提供了优秀的平台^[32].

与此同时,太阳物理界也可以加强与夜天文同行

的合作, 譬如研究太阳风及太阳爆发对引力波探测的影响^[33], 利用探测磁陀星的X 射线望远镜^[34,35]来研究

太阳耀斑, 利用郭守敬望远镜(LAMOST)来研究恒星的磁活动性^[36]等.

参考文献

- 1 Y. Jing, *White book of the 14th Five-Year Plan on Astronomy in China*, NSFC, first edition (2020)
- 2 Christensen-Dalsgaard J. Solar structure and evolution. *Living Rev Sol Phys*, 2021, 18: 2
- 3 Zhao J, Bogart R S, Kosovichev A G, et al. Detection of equatorward meridional flow and evidence of double-cell meridional circulation inside the sun. *Astrophys J*, 2013, 774: L29
- 4 Choudhuri A R. The meridional circulation of the Sun: Observations, theory and connections with the solar dynamo. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2021, 64: 239601
- 5 Brun A S, Browning M K. Magnetism, dynamo action and the solar-stellar connection. *Living Rev Sol Phys*, 2017, 14: 4
- 6 Samanta T, Tian H, Yurchyshyn V, et al. Generation of solar spicules and subsequent atmospheric heating. *Science*, 2019, 366: 890–894, arXiv: 2006.02571
- 7 Van Doorsselaere T, Srivastava A K, Antolin P, et al. Coronal heating by MHD waves. *Space Sci Rev*, 2020, 216: 140
- 8 Zhang H Q. From polarimetry to helicity: Studies of solar magnetic fields at the Huairou Solar Observing Station. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 999601
- 9 Wang Z, Gary D E, Fleishman G D, et al. Coronal magnetography of a simulated solar active region from microwave imaging spectropolarimetry. *Astrophys J*, 2015, 805: 93
- 10 Si R, Brage T, Li W, et al. A first spectroscopic measurement of the magnetic-field strength for an active region of the solar corona. *Astrophys J*, 2020, 898: L34
- 11 Li W, Li M, Wang K, et al. A theoretical investigation of the magnetic-field-induced transition in Fe X, of importance for measuring magnetic field strengths in the solar corona. *Astrophys J*, 2021, 913: 135
- 12 Zhang H Q. Diagnostic of spectral lines in magnetized solar atmosphere: Formation of the H β line in sunspots. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 119611
- 13 Lin J, Soon W, Baliunas S L. Theories of solar eruptions: A review. *New Astron Rev*, 2003, 47: 53–84
- 14 Zhang M, Low B C. The hydromagnetic nature of solar coronal mass ejections. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2005, 43: 103–137
- 15 Chen P F. Coronal mass ejections: Models and their observational basis. *Living Rev Sol Phys*, 2011, 8: 1
- 16 Cheng X, Li Y, Wan L F, et al. Observations of turbulent magnetic reconnection within a solar current sheet. *Astrophys J*, 2018, 866: 64
- 17 Chen B, Battaglia M, Krucker S, et al. Energetic electron distribution of the coronal acceleration region: First results from joint microwave and hard X-ray imaging spectroscopy. *Astrophys J*, 2021, 908: L55
- 18 Chen A Q, Wang J X. On the possibility of predicting flare index and CME velocity using vector magnetograms. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 269512
- 19 Guo Y, Xia C, Keppens R, et al. Solar magnetic flux rope eruption simulated by a data-driven magnetohydrodynamic model. *Astrophys J*, 2019, 870: L21
- 20 Jiang C, Bian X, Sun T, et al. MHD modeling of solar coronal magnetic evolution driven by photospheric flow. *Front Phys*, 2021, 9: 224
- 21 Yang L, Wang H, Feng X, et al. Numerical MHD simulations of the 3D morphology and kinematics of the 2017 September 10 CME-driven shock from the sun to earth. *Astrophys J*, 2021, 918: 31
- 22 Yan Y, He H, Li C, et al. Characteristic time of stellar flares on Sun-like stars. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2021, 505: L79–L83
- 23 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
- 24 Chen P F, Xu A A, Ding M D. Some interesting topics provoked by the solar filament research in the past decade. *Res Astron Astrophys*, 2020, 20: 166
- 25 Awasthi A K, Liu R, Wang Y. Double-decker filament configuration revealed by mass motions. *Astrophys J*, 2019, 872: 109
- 26 Ouyang Y, Chen P F, Fan S Q, et al. Does a solar filament barb always correspond to a prominence foot? *Astrophys J*, 2020, 894: 64
- 27 Yan X L, Liu Z, Zhang J, et al. Research progress based on observations of the New Vacuum Solar Telescope. *Sci China Technol Sci*, 2020, 63: 1656–1674
- 28 Yan Y, Chen Z, Wang W, et al. Mingantu spectral radioheliograph for solar and space weather studies. *Front Astron Space Sci*, 2021, 8: 20
- 29 Rao C H, Gu N T, Rao X J, et al. First light of the 1.8-m solar telescope—CLST. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 109631

- 30 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
- 31 Li C, Fang C, Li Z, et al. Chinese H α Solar Explorer (CHASE)—A complementary space mission to the ASO-S. *Res Astron Astrophys*, 2019, 19: 165
- 32 Wang J, Ip W H. Preface: Frontiers in Astrophysics (II)—A special issue dedicated to the 20th anniversary of RAA (2001–2020). *Res Astron Astrophys*, 2020, 20: 157
- 33 Su W, Wang Y, Zhou C, et al. Analyses of laser propagation noises for tianqin gravitational wave observatory based on the global magnetosphere MHD simulations. *Astrophys J*, 2021, 914: 139
- 34 Su Y, Chen W, Xiong S L, et al. Monitoring and research of high-energy solar flare emissions with GECAM (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129505 [苏杨, 陈维, 熊少林, 等. GECAM太阳耀斑高能辐射监测和研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129505]
- 35 Xiong S L. Special Topic: GECAM gamma-ray all-sky monitor (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129501 [熊少林. GECAM伽马射线全天监测器专题·编者按. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129501]
- 36 He H, Zhang H, Wang S, et al. Start-up of a research project on activities of solar-type stars based on the LAMOST sky survey. *Res Notes AAS*, 2021, 5: 6

Perspectives on the promotion of solar physics

CHEN Peng-Fei^{1,2*}

¹School of Astronomy & Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

²Key Laboratory of Modern Astronomy & Astrophysics (Ministry of Education), Nanjing University, Nanjing 210023, China

The year 2021 marks the beginning of China's 14th Five-Year Plan, while witnessing the growing and thriving of solar physics in China. Recently, the payload aboard the meteorological satellite FengYun 3E has captured its first EUV image of the Sun, and another two solar space missions, CHASE and ASO-S, have been scheduled to launch in the offing. In this Views paper, I present my personal thoughts on the trend of solar physics, which is divided into the following four directions: the structure of the solar interior and the atmosphere, the mechanisms of solar eruptions, the impacts of solar eruptions on the interplanetary space, and the comparative research between the Sun and other stars.

solar physics, magnetic field, solar eruptions, space weather

PACS: 96.60.-j, 96.60.Hv, 96.60.Jw, 96.60.Q-, 95.55.Ev

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0262](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0262)