



太阳物理研究与发展*

文/颜毅华 谭宝林

中国科学院国家天文台 中国科学院太阳活动重点实验室 北京 100012

【摘要】 太阳是离地球最近的一颗恒星,也是人类可以进行具有一定空间分辨率地详细观测和研究的唯一恒星,在现代物理学和天文学的发展中扮演着重要的角色;同时,太阳为人类家园带来了温暖和光明,太阳的剧烈活动也对人类产生重大影响,探索太阳对现代社会的可持续发展具有极其重要的意义。本文简要介绍了太阳物理学的基本内容、研究方法,总结了过去半个多世纪太阳物理学研究所取得的主要成就,在此基础上对太阳物理学的前沿科学难题及未来发展前景进行了讨论。

【关键词】 太阳,爆发,等离子体,日地环境

DOI:10.3969/j.issn.1000-3045.2012.01.009

1 前言

在茫茫宇宙数以亿计的恒星中,太阳是与人类家园——地球关系最为密切的一个。由于它到地球的距离(约1.5亿公里)仅仅只有到离我们最近的另一个恒星——半人马座 α 星的28万分之一,所以太阳是宇宙中能被人类以最高分辨率进行观测和研究的一颗恒星。为了研究太阳的结构、物质组成、能量来源与传输、太阳活动与演化以及对太阳系空间的作用和影响等问题而形成了天体物理学中最早发展起来,并对天文学的发展具有重大影响的分支学科——太阳

物理学,其用物理学的理论与方法研究太阳的本质和演化^[1]。

太阳是一个与地球有直接物质联系的日地系统的母体。日地之间通过太阳发射的带磁场的高速太阳风进行物质联系,地球实际上处在太阳全波段电磁辐射和高能粒子发射的背景中,日地空间环境和地球高层大气结构在很大程度上取决于太阳电磁辐射和粒子发射特征。人们研究地球环境的变迁,地球生命演化等重大课题时都必须考虑太阳因素。太阳活动引起的电磁辐射和粒子发射增强严重干扰地球附近空间环境,如地球轨道附近的太阳质子事件、地球电离层骚扰、地磁暴、平流层升温等,这些变化将

* 收稿日期:2011年10月18日

直接影响航天和航空飞行安全、人造卫星寿命、无线电通讯、高纬度地区电网和管道系统、导航、物探、气象和水文等国防和国民经济诸多基础设施的可靠运行。对太阳电磁辐射和粒子辐射中稳定成分和扰动成分的能谱进行研究,探讨太阳活动的规律性并对其进行预测预报,是太阳物理研究的关键课题^[2]。

太阳物理学研究不仅对认识天体物理过程,而且对广泛的自然科学问题的探索都具有重要意义。太阳还是一个完全由高温磁化等离子体构成的巨大天体,人们在地面等离子体实验室研究中,因时间和空间尺度的限制而无法得到的一些物理过程,则可以通过对太阳的研究得到弥补,关于太阳爆发机制、太阳磁场和太阳活动起源的研究以及太阳大气动力学和行星际动力学现象的研究,直接推动着等离子体物理和磁流体力学的迅速发展^[3]。

美国科学院关于《新千年天文学和天体物理学》规划认为,太阳物理学研究已经远远地超出了狭义太阳物理和天体物理学范畴,正在向3个重大方向扩展:(1)把太阳作为等离子体物理学研究的天然实验室;(2)理解和预报太阳活动对地球气候和日地环境的作用和影响;(3)理解太阳演化对行星系统以及生命演化的作用,并在多学科层面获取新的知识。

总之,可以说,太阳物理学是一门联系现代天文学、现代物理学和地球环境科学的综合性交叉学科。太阳物理学的发展,直接关系到科学和社会的诸多领域的发展,具有十分重大的意义。

2 太阳物理学的研究方法

和其他天体物理学分支一样,太阳物理学的研究方法主要包括两大方面:观测和理论研究。

2.1 太阳观测

太阳物理学是天文学的一个分支学科,主要是通过研制各种各样的太阳望远镜对发生在太阳上的各种物理现象和过程进行系统观测,收集各种信息,获得感性材料。因此,太阳物理学首先是

一门观测的科学^[4]。

太阳望远镜可分为地基太阳望远镜和空基太阳望远镜两大类。早期的空间太阳望远镜主要观测因受地球大气吸收而不能到达地面的太阳紫外、X光和 γ 辐射,以及因地球磁场作用而无法到达地面的太阳粒子流。由于空间观测不仅可以避免地球大气吸收,还可以避免地球大气扰动对太阳电磁辐射波前的扰动,可以显著提高空间分辨率和图像的稳定性和稳定性,因此,自上世纪80年代开始,人们陆续开始研制探测太阳可见光、近红外、甚至射电辐射的空基望远镜。

(1)地基太阳望远镜。由于太阳辐射的绝大部分能量集中在可见光和近红外波段,正好这些波段的辐射可以穿透地球大气层到达地面。因此,在太阳望远镜中,地基望远镜占有非常重要的地位,即使在空基望远镜得到迅速发展的今天,同样离不开地基望远镜观测的配合。

地球大气是地面观测太阳的主要障碍。一般地基太阳光学望远镜只能达到1—2角秒的空间分辨率,经过特殊选址的观测基地,空间分辨率可达到0.3—0.5角秒。最近,人们在经过多年选址找到的西班牙Canary群岛上建成的瑞典1米口径太阳望远镜上获得了空间分辨率达0.1角秒的太阳黑子图像。中科院国家天文台怀柔太阳观测基地的35厘米口径多通道太阳望远镜能够实现对太阳三维矢量磁场、视向速度场、各种单色像和白光像的全日面或活动区同时观测,是迄今已建成的功能最齐全的地基太阳望远镜之一。

计划中的其他地基项目包括美国大熊湖1.6米太阳望远镜(NST/BBSO)、国立天文台4米太阳望远镜(ATST)、美国夏威夷1.5米日冕磁场望远镜(COSMO)、印度2米级太阳望远镜(NLST)、中国巨型太阳望远镜(CGST)等都将在探测技术方面有所突破。

除了地基光学望远镜外,还有很重要的一类太阳望远镜——地基太阳射电望远镜。从射电的亚毫米波(频率达1 000GHz)到10米波(30MHz)

的宽广波段范围内,地球大气的吸收都很弱,完全可以通过地面望远镜来实现在该波段的太阳观测。地基太阳射电观测经历了从单频总流量观测→多频总流量观测→宽带动态频谱观测,以及单频成像观测→多频成像观测的发展趋势,目前正在朝着宽带动态频谱成像观测方向发展。中科院国家天文台2001年在北京怀柔太阳观测基地建成的中国太阳射电宽带动态频谱仪(SBRS/Huairou)工作于厘米—分米波段,拥有目前国际上最高的时间-频谱分辨率,在国际同类装置中处先进水平,已经连续运行10年。正在内蒙古正镶白旗建设的新一代厘米—分米波太阳射电日像仪(CSRH)是一种宽带动态频谱日像仪,由100面抛物面天线组成一个最大基线长度为3公里的三臂螺旋阵列,将工作在从400MHz到15GHz的宽频段内,具有高空间-时间-频率分辨本领,建成后将具有国际领先水平。计划中的美国变频太阳射电望远镜(FASR)也与CSRH具有相近的探测能力。

(2)空基太阳望远镜。我们知道,太阳爆发现象,如耀斑、日冕物质抛射、爆发日珥等,几乎全都发生在太阳大气中,除光球外,太阳色球的辐射主要集中在波长为90—160nm之间的紫外波段,日冕的辐射则主要发生于波长<90nm的极紫外和X光波段。由于地球大气的吸收,波长<290nm的太阳电磁辐射基本上无法到达地面,对它们的探测只能借助于地球大气层外的空间。自上世纪60年代以来,美国、前苏联、日本、欧盟等先后发射了数十个太阳探测卫星,如美国海军的Solarad卫星系列、NASA的OSO卫星系列、“探险者”卫星系列、前苏联的“预报者”卫星系列、1980年美欧合作的“太阳极大年使者(SMM)”、1981年日本的“火鸟(Hinotori)”卫星、1990年欧洲的“尤利西斯(Ulysses)”探测器、1991年日、美、英合作的

“阳光(Yohkoh)”卫星、1995年欧美合作的“太阳与日球天文台(SOHO)”、1998年美国发射的“过渡区和日冕探测器(TRACE)”、2002年欧洲“高能太阳分光成像卫星(RHESSI)”、2006年日本发射的“日出(Hinode)”新一代大型综合性太阳探测卫星等。2006年美欧合作发射的“日地关系天文台(STEREO)”双子卫星,能与SOHO一起从3个角度拍摄太阳的立体图像,可更准确地计算出日冕物质抛射的方向和抵达地球的时间。2010年美国发射的“太阳动力学天文台(SDO)”卫星,运行在36000公里高的地球同步轨道上,搭载了3部太阳探测仪器,能够不间断地对太阳进行高分辨率的快速成像,每秒钟拍摄1张太阳照片(相比之下,STEREO每3分钟拍摄1张,SOHO每12分钟拍摄1张)。我国在1米口径空间太阳望远镜(SST)的研制基础上,正积极推动深空太阳探测计划,希望发射到距离地球约150万公里的日地第一拉格朗日点上,建立“深空太阳天文台(DSO)”,以前所未有的精细程度观测和研究太阳磁场的基本结构和演化特征,对太阳耀斑和日冕物质抛射等爆发活动,进行高能、极紫外、可见光和射电波段的连续观测,揭示太阳活动中磁能存储与释放的物理机理,为太阳活动预报提供最新的物理依据,并为灾害性空间天气预警服务。

另一方面,日冕物质抛射、太阳风、行星际激波和高能粒子现象等传播、加速与演化的主要空间位于太阳表面以上4—5倍太阳半径到200余倍太阳半径之间的日地空间,在这个广阔区域,由于等离子体十分稀薄,电磁辐射主要位于从几十kHz到几十MHz之间,该频段称为太阳甚低频波段(VLF)。由于地球电离层的吸收和反射等的影响,以及电台、电视台、雷达、各种通讯信号,以及雷电、火山爆发等人工信号和自然辐射的频



率大多也位于该频段,剔除它们十分困难,地基探测基本上无法接收到来自于太阳的VLF信号。因此必须将望远镜发射定位到地球电离层以外的空间去,尤其是在远离地球的深空最适合于VLF信号的接收,这就是空间甚低频射电探测。目前,STEREO上搭载了太阳甚低频的探测设备SWAVES。我国正在预研的DSO也计划搭载太阳甚低频探测分系统,将在10kHz到30MHz范围内实现高时间-频谱分辨率的宽带动态频谱观测。

2.2 太阳物理理论研究

太阳物理的理论研究主要可分为3种途径:

(1)模型研究。在观测事实的基础上,根据有关物理概念和规律,建立物理模型,解释太阳观测现象,反演太阳物理参数,再现太阳物理过程,揭示其物理本质,获得有关理性认识,并推断其发展趋势,这是太阳物理理论研究的主要目标。这种模型研究涉及等离子体物理、电动力学、流体与磁流体力学、粒子物理、量子辐射理论等。人们关于太阳风的早期研究印证了理论研究的重要性,英国数学家Chapman首先通过理论计算获得了在太阳日冕的高温及良导体条件下气体的性质,发现日冕将延伸到地球轨道外空间,1958年,Parker从理论上预言应该有一股强劲的风从太阳表面不间断地吹出来,使等离子体充斥整个行星际的空间,1962年卫星观测直接证实了上述预言,改变了科学家对行星际空间的看法,并得以解释磁暴、极光以及其他一些太阳、地球甚至恒星形成现象等。太阳物理学理论研究方面最重要的发展,无疑是上世纪40年代Alfven所发现的在高导电流体中磁场与流场的耦合,从而把等离子体物理理论应用于太阳研究,解释了许多太阳及其他天体物理观测现象,获得了1971年诺贝尔物理学奖。

(2)数值模拟。太阳物理问题中常常包含很多自由参数,这给解析求解增加了很大的难度,有些问题甚至得不到解析解。随着现代计算机技术的发展,数值求解已经成为可能。通过数值模拟,常常能够从复杂的太阳物理过程中提取出非常直

观的物理图像。近年来太阳物理的数值模拟研究得到了迅速发展。我国学者也做出了很有特色的工作,例如关于太阳耀斑和CME的Forbe-Lin模型和Shibata-Chen模型等。另外一个基于数值模拟而产生的重要领域就是太阳日冕磁场的理论外推,因为迄今我们还无法对日冕磁场进行直接可靠的测量,理论外推是我们获得日冕磁场信息的重要手段。

(3)实验室模拟。在实验室里通过构造太阳物理中的某些条件来研究某些过程也是一个重要的研究方法。近年来,国内逐步开始实验室模拟研究,并取得了一定进展^[5]。

3 太阳物理的研究进展

太阳物理学的真正发展始于19世纪初。1802年首次发现太阳的吸收光谱;1844年发现太阳黑子活动具有11年周期性;1859年发现太阳耀斑;1908年测定黑子磁场;1939年确立日冕的存在;1942年发现太阳米波射电辐射、确认日冕为高温等离子体;1946年提出耀斑的磁重联机制、发现紫外和X射线光谱;1950年提出射电辐射机制;1955年发现太阳普遍磁场;1958年预言太阳风并于1962年得到观测证实;1960年发现太阳5分钟振荡并导致10余年后日震学的建立和发展;1961年提出太阳周唯象模型;1968开展太阳中微子探测并发现中微子短缺现象,这一问题直到2001年才被Davis和小柴昌俊基本解决并获得了2002年诺贝尔物理奖;1971年发现日冕物质抛射这一新的太阳大气爆发形式;1968—1977年初步建立太阳耀斑标准模型;1983年发现过渡区爆发现象,并证实它源于低层大气磁场重联。

20世纪90年代以后太阳与日球物理的研究进入了一个全面发展时期^[3]。这期间空间卫星探测占主导地位,Yohkoh、SOHO、RHESSI、TRACE、Hinode、Stereo和SDO等太阳探测卫星无论是在探测技术还是在探测范围都得到了空前提高,开启了多波段、全时域、高分辨率和高精度探测时代。结合一系列地面观测设备的联合研究,取得了一

系列科学发现:1992年日震学研究在太阳辐射层和对流层边界发现了一个速度高度剪切、厚度只有约0.05倍太阳半径的Tachocline层,被认为是太阳磁场和太阳周发端的孕床;发现了活动区浮现的明显证据;发现在接近太阳表面附近稳定流向极区的子午环流;三维磁流体数值模拟再现了活动区浮现的主要观测特征,太阳磁场与电流和磁螺度同时浮现,通过对流塌缩和浮力不稳定性发展为与太阳表面近垂直并超过1.5kG的磁场;太阳活动区的谱斑辐射增强超过黑子本影和半影的吸收;红外太阳向量磁场观测取得进展,得到在温度极小区高达5G/km的磁场梯度,揭示低层大气电流片结构的存在;太阳表面小尺度磁场的浮现和对消在约40小时的时标内迅速更新太阳表面磁通量;观测到太阳极区的kG磁场以及太阳表面量大命短的水平磁场。太阳表面的局地磁发电机可提供足够的磁能加热太阳外层大气;太阳表面到处都存在小尺度的磁环,它们受对流等离子体影响,形成磁毯结构,很可能与传统的磁结构伞盖模型不一致。

太阳外层大气和日球方面,发现色球和过渡区之间无明显边界,其光谱特征远离局部热动平衡,是非线性磁流体动力学过程在辐射转移中的反映;有磁场和无磁场区域很可能存在不同的大气模型,标准大气模型只是一个平均结果;初步证认日冕中波的传播、磁重联、微耀斑对UV和EUV谱线轮廓的影响;射电、X射线、光谱和白光日冕观测揭示日冕以日冕物质抛射(CME)的形式向行星际空间抛射磁化等离子体和磁螺度,同时通过发生在CME和耀斑之间的电流片当中的磁重联释放磁自由能;CME的源区、触发机制、与太阳耀斑及爆发日珥的关系、对地有效性以及高速太阳风起源的研究均取得了实质性的进展。

我国学者在太阳表面磁学,包括太阳活动区向量磁场演化和太阳弱磁场研究,太阳活动大气的光谱诊断、基于非局部热动平衡理论计算的半经验大气模型、耀斑动力学过程、太阳活动中的高能辐射、太阳大气中的微观等离子体机制、太阳风理论和模型、太阳磁场的理论外推、太阳活动磁流体理论与数值模拟、太阳活动中长期变化等方向开展了一系列原创性研究,在国际学术界已占有一席之地。

4 太阳物理学的前沿难题

在一代又一代太阳物理学家百余年的不懈探索后,关于太阳仍然存在许多尚未解决的难题。美国学者Aschwanden在一篇综述文章中列出了10个太阳物理学中的重要课题^[6]。2007年,由教育部、科技部、中科院和国家自然科学基金委联合向国内外工作在科研一线的科学家们发起了“10 000个科学难题”的征集活动,其中,有关“太阳和日地科学”领域中共征集了50个难题^[7]。我们将它们概括成如下几个主要问题:

(1)太阳内部结构问题。对于太阳内部结构问题的研究主要取决于探测方法,这包括两大途径:中微子探测途径和日震学途径,这两个途径是互相补充的。

中微子探测:人们基本上已弄清所谓的“中微子失踪”是因为中微子振荡,即中微子从其源区释放出来后在其传播过程中能够在其三种味之间相互转化。这也表明,中微子拥有一定的静止质量。详细分析各实验室的观测数据还发现,太阳中微子流量存在着多个周期性,其中,最主要的周期接近太阳自转的周期。这表明中微子流量可能与太阳磁场之间存在着相互作用,而且中微子还拥有一定磁矩。根据这些周期性,人们推测出中微子与磁场的作用很可能发生在太阳对流层底部的速度剪切层(tachocline),



中国科学院

这个区域正是产生太阳磁场的地方。另外,由中微子流量的变化还可推测出辐射层的自转速度,这一速度与日震学方法所给出的速度接近。通过中微子流量变化的研究发现,在日核与辐射层交界的地方似乎还存在另外一个速度剪切层,可能是另一个发电机机制孕育的地方。上述结果有待进一步观测检验。

日震学探测:根据国际上多个日震观测台网(GOLF、VIRGO、SOI、GONG、BISON、TONG)的观测数据,已能在千分之一的精度上反演从太阳表面附近直到日心的声速分布,在百分之一的精度上给出太阳内部密度和压强的分布,并相当精确地给出太阳内部自转的轮廓。但是,对于0.4倍太阳半径以内的区域,只能通过重力模(g模)的探测才能进行研究,然而迄今探测g模仍然是一个尚未解决的问题。

(2)太阳磁场问题。太阳磁场问题包括两大方面,一是太阳磁场的探测问题,另一个是太阳磁场的起源和活动规律问题。

对于磁场探测,我们面临如下问题:①目前最可靠的太阳磁场测量主要是集中在太阳光球附近有限区域中应用谱线的Zeeman效应进行测量,而且在磁场矢量的纵向分量和横向分量的测量精度几乎相差一个数量级,如何进一步提高横场的测量精度还是一个难题;②横场测量的180度不确定性也是一个未解的难题;③色球和日冕中的磁场测量,迄今还没有可靠的解决办法。射电诊断是最可能的一个途径,但是依赖于射电辐射机制,而在该区域,有多种辐射机制同时发生作用,如何分别反演也是一个非常困难的问题;④如何进一步提高磁场测量的空间分辨率直至探测基本磁元,这也是一大挑战。例如,理论估计磁元的大小在0.1角秒左右,迄今尚未实现观测磁元^[8]。

关于太阳磁场的起源和活动规律,涉及太阳内部物质的对流运动及相互作用。一般认为太阳磁场是带电物质运动使太阳原初微弱的种子磁场得到放大的结果。既然太阳的物质绝大部分是等离子体,并且经常处于运动状态,可以利用发电机

效应来说明太阳磁场起源中的若干问题。目前公认的是较差自转理论,即太阳的较差自转使光球下面的水平磁力线管互相缠绕并上浮到日面,形成双极黑子;大量双极黑子磁场的膨胀和扩散使原来的普遍磁场被中和,接着就会出现极性相反的普遍磁场。这样可以解释太阳22年的磁活动周现象。

高分辨率观测表明,太阳磁场存在复杂的精细结构。在活动区的同一个黑子范围内各处磁场强度往往相差悬殊;并且在一个就整体说来是某一极性(例如N极)的黑子里,常含有另一极性(S极)的小磁结点。因此,单极黑子并不存在。在横向磁场图上,不仅各处强度不同,方位角也不一样。在黑子半影中,较亮条纹与它们间的较暗区域的磁场也有明显差异。在活动区中,磁结点直径约为1 000公里,磁场强度为1 000—2 000高斯。在宁静区,过去认为只有强度约为1—10高斯的弱磁场。最新的观测表明,宁静区的磁场的强度同样是很不均匀的,也含有许多磁结点,宁静区磁结点的尺度不到200公里,磁通量却占整个宁静区的90%左右。由于磁通量高度集中,磁结点的磁场强度可达上千高斯,远远超过宁静区大范围的平均磁场强度。对上述结构的形成机制,目前还没有一个合理的解释。

(3)太阳大气的反常加热问题。太阳物理中,最令人费解的是太阳外层大气(色球和日冕)的温度比内层的光球高得多,是什么机制导致了太阳高层大气的反常加热,数十年来一直困扰着天体物理学家们。一般认为,反常加热的能源应当来自对流层气团运动激发的机械能流(如声波和重力波等)。一些研究表明声波或转换为激波后可以向外传播和耗散,似乎可以加热色球层。日冕加热则可能涉及磁流体动力学过程。迄今已提出至少两种类型的模型,它们是磁流体波耗散(主要是Alfven波)和电流耗散模型。前者可以通过日冕磁环中的共振吸收进行加热,后者如Parker提出的拓扑耗散或微耀斑加热等。此外,还有磁流体湍流加热等。另外,色球针状体和小纤维的本质

及其在太阳高层大气能量传输中的作用还不清楚,使得太阳高层大气反常加热的研究更具复杂性和不确定性。

(4)太阳大气爆发活动的起源问题。宏观上稳定的太阳为什么会突然出现爆发现象,一直是太阳物理学中最热门的研究课题。这些爆发现象主要包括太阳耀斑、日冕物质抛射、爆发日珥等,它们涉及许多复杂的物理过程,包括 10^{27} 焦耳数量级的能量积累,等离子体不稳定性的触发,高能粒子的加速与传播,以及相应的从 γ 射线、 χ 射线、紫外和可见光、直至射电波段电磁辐射增强的机制,源区的大气动力学变化,以及物质运动和抛射等。

(5)太阳活动周的起源问题。太阳长期活动行为具有多种尺度的周期性,其中最著名的就是约11年的Schwabe活动周,除此外还有其他多周周期:160天、2—3年、51.5年、103年……这些不同时间尺度的周期性一定与太阳内部的某种结构和运动以及太阳周边的环境特征有关联。这些关联机制目前还是一个未解之谜。一般认为维持周期性太阳活动的物理机制,是太阳等离子体自身运动产生的磁场所表现的周期性现象,与运动导体通过感应产生磁场的自发电机原理相似,称为太阳发电机理论,其核心问题是利用磁流体力学方程组,在太阳较差自转和湍动对流条件下,寻求太阳极向磁场与环向磁场之间的周期性转换,即发电机解。

(6)太阳活动与日地空间环境的作用机制问题。太阳爆发活动向日地空间环境释放出大量的带电粒子流和各波段电磁辐射增强,它们通过什么样的机制对日地空间环境、地球电离层、大气层等产生作用,并对地球气候变化产生影响,这是人们非常关注的问题。然而到目前为止,人们的认识还非常有限。

(7)太阳活动预报问题。太阳将在什么时间、什么地点、以何种方式发生爆发活动?这些都是我们想知道的问题,然而由于观测技术和理论认识水平的限制,目前我们还无法对这些问题给出明确的答案。

5 太阳物理学的发展

未来太阳物理学的发展主要体现在3个方面:

首先,在太阳物理理论研究方面,无论是太阳活动的起源研究,还是各种时间尺度的太阳活动周的起源探索,似乎都与各种空间尺度的等离子体湍流与磁场的相互作用有密切的联系。太阳作为天体等离子体的天然实验室,对太阳物理的探索,必将推动天体物理学其他领域和等离子体物理等学科的发展。

第二,在太阳物理探测方面,探索新的太阳观测方法和手段,扩展望远镜的观测能力始终是太阳物理的前沿课题,所有观测方法的革新和观测工具的改进,都会极大地推动太阳物理学的发展。太阳物理探测技术随时都在从同时代的光学、机械、电子学、无线电等技术中吸取营养,不断发展和创新。

第三,因为太阳活动直接作用于地球空间环境,与人类生存及国民经济发展和国家安全的许多领域密切相关,因此,太阳物理的研究将越来越受到从政府到民间的高度重视,具有很好的发展前景。

主要参考文献

- 1 Lang K R. The Sun from Space. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- 2 Foukal P V. Solar Astrophysics, New York, John Wiley and Sons, Inc.,1990.
- 3 中国天文学会编著. 天文学学科发展报告2007—2008. 北京: 中国科学技术出版社,2008.
- 4 汪景. 太阳物理研究进展. 物理,1998,27: 651-659.



中国科学院

- 5 Zhong J Y, Li Y T, Wang X G et al, Modeling loop-top X-ray source and reconnection outflows in solar flares with intense lasers. *Nature Physics*, 2010, 6: 984-987.
- 6 Aschwanden M J. Keynote address: Outstanding problems in solar physics. *JApA*, 2008, 29, 3.
- 7 “10 000 个科学难题”天文学编委会. 10 000 个科学难题——天文学卷. 北京: 科学出版社, 2010.
- 8 Berger T E, Rouppe van der Voort L H M, Löfdahl M G et al. Solar magnetic elements at 0.1" resolution. *A&A*, 2005, 428: 613-628.

Research and Development of Solar Physics

Yan Yihua Tan Baolin

(Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories of CAS 100012 Beijing)

Abstract The Sun is the nearest star to our Earth. It is the only star which can be observed and investigated by us in some spatial resolutions. It plays an important role in the development of modern astrophysics and astronomy. Meanwhile, the Sun brings us the warmth and brightness and its intense activities also have a great effect on the terrestrial environment. It is extremely meaningful to explore the activities and revolutions of the Sun. This paper introduces the basic conceptions and the research methods of the solar physics, makes a brief summary of the main achievements during the past half century, and then discusses the key problems and the prospective on the frontier of solar physics.

Keywords the Sun, eruptive process, plasma, solar-terrestrial environment

颜毅华 中科院国家天文台研究员、博士生导师、台长助理。1962年4月出生于陕西西安。现任太阳物理研究部主任、太阳射电研究团组首席研究员,中科院太阳活动重点实验室主任,中国天文学会太阳与日球物理专业委员会主任,中国电子学会射电天文分会主任,中科院深空太阳探测论证组组长。主要研究方向:太阳物理、射电天文方法及空间天文技术。E-mail:yyh@bao.ac.cn