

# 90年代的太阳物理学

艾国祥

(中国科学院北京天文台)

汲培文

(国家自然科学基金委员会数理学部)

**[摘要]** 本文简要回顾了太阳物理学发展的历史,介绍了太阳物理研究的主要领域、现状和难题,展望90年代太阳物理学的进展,对中国太阳物理学的发展提出了看法。

## 一、引言

展望和分析90年代的太阳物理学,简要回顾一下太阳物理学的发展是有意义的。人类对太阳的物理认识可粗分三个阶段:第一阶段从远古至1611年,属于神秘和直觉阶段。在此阶段,中国古代对黑子的大量肉眼观测和史书记载,曾有过杰出贡献;第二阶段从1611年至第二次世界大战前后,是以光学望远镜、光谱仪和照相技术的发展为主要特征的阶段,人类从物理上初步认识了太阳;第三阶段从第二次世界大战后至今,人类开始进入全面和深入认识太阳物理性质阶段。科学和技术的发展使人类进入了空间与计算机时代。太阳物理学由单纯的可见光观测进入全波段观测,射电、紫外、X射线、 $\gamma$ 射线、各种高能粒子和电子、中子、直到中微子探测等手段均已被采用,并向声频太阳振荡观测发展。接收系统由简单的光电系统发展到二维 CCD 系统,配有强大的图象处理和计算机分析,并产生了数值模拟新方法。空间和全波段太阳物理研究的第一高潮期是60至70年代,各式各样可见光波段外的辐射接收装置进入太空,从而获得许多重要发现,如各种耀斑辐射和太阳风的发现等。但是,这些较为简单的、低时间和低空间分辨率的观测设备已不能适应对太阳做进一步的深入研究。进入80年代,人们要求有高空间、高时间、高灵敏度的观测设备。建造这些设备不仅有技术上的难度,且耗资巨大,因此新上大项目不多,而且进展较慢。计算机及 CCD 在太阳物理学的应用则突飞猛进,在二维像接收和变化的探测上,在数字化处理和大型实验模拟方面都取得许多重要结果。我们将依据90年代前的总体发展状况,来探讨90年代太阳物理学的发展。

## 二、太阳物理研究现状和难题

### 1. 太阳结构

#### (1) 太阳核心结构和中微子问题

由于太阳中微子探测结果比理论预言的中微子值少 $1/3$ (即亏损),使得现有太阳结构理论与中微子探测的亏损发生矛盾,进一步的探测在进行中。1990年底的初步结果证实,太阳不但存在高能中微子亏损,也存在明显的低能中微子亏损,因此对现有的天体物理与粒子物理理论提出了挑战——要么修改现有恒星理论模型,要么是人们对中微子的认识和理解有问题。在理

本文于1992年5月3日收到

论上,太阳核心结构与  $g$  模太阳振荡有关,如160分钟等长周期振荡,但实测上仍有争论。长周期振荡有待 GONG(美国全球太阳振荡观测网)等的观测证实和发现新的  $g$  模。

### (2) 对流层和振荡

现已发现数以千计的太阳声频振荡模式,对振荡频率的测量,相对精度达到 $10^{-4}$ 。1990年发表了频率表,理论与观测仍有明显差别。新一轮的研究将进一步集中于太阳的不透明度效应、状态方程和元素扩散可能性等方面。已有大量和高质量的观测资料,推动了反演技术的发展,用以探测太阳内部结构。在 $2/3$ 太阳半径之外可精确定出声频振荡的声速。核心部分用  $p$  模很难研究,现普遍采用与外层结构相结合的方法进行改进。用声速反演法获得对流层深度为太阳半径的 $30\% \pm 1\%$ ,1990年统计结果是 $28.7\% \pm 0.23\%$ 。

对  $p$  模转动分裂频率的精确测量导致太阳内部转动研究的重大进展。在对流层内,发现角速度几乎与深度无关,而纬度变化与表面相同,在振荡的磁场效应研究中发现有环向磁场。

### (3) 光球层、对流和磁场

计算机模拟和理论研究表明,光球顶500公里以下存在片状的下降流,合并成下沉纤维,如同有等级的树枝一样发展,估计有20万公里深。对米粒对流模拟结果显示,把磁场因素引入米粒过程后,米粒对流有明显变化;引入75高斯磁场时,米粒寿命倍增,水平速度减少,并出现奇特和碎片状,与观测一致;引入500高斯磁场,40分钟后,场集中于米粒间走廊;引入2万高斯磁场后,对流被抑制,预示太阳上不可能存在2万高斯的磁场。目前的计算机能力还不能模拟大尺度的对流层过程。在观测和理论上,巨米粒对流仍无定论。地面上的实测能力已发展到可对较米粒小的结构进行 $0.2-0.3$ 角秒分辨率的观测。

光球层中的一个重大结构是磁结构,已发现黑子强磁场外存在增强网络、网络、网络边界、内网络场、瞬变区等不同尺度的磁结构。多年来争论的一个焦点是,太阳光球磁场是不是 $0.1-0.2$ 角秒和 $1000-2000$ 高斯,对此,间接推算与直接测量两派间争论激烈。近年来,已发现网络边界有 $1$ 角秒和 $500$ 高斯左右的磁场,但内网络场仅 $10-20$ 高斯。现在的共识是,有不同类型的光球场存在,但尺度和强度是多少(包括米粒场)还有待高分辨率观测研究确认。近4年来,中美开展连续24小时视频磁场联测,对光球磁场结构演化图像和寿命的观测研究有了许多新结果,如在国际上首次对超米粒寿命连续观测由20小时提高到 $70-90$ 小时,这对存在磁场时大尺度对流研究将产生重要影响。

### (4) 色球和日冕结构及加热问题

太阳温度从光球层的几千度上升到日冕高温区的1千万度,这一现象一直是具有重要影响且长期困扰人们的问题。现在看来,这一现象不大可能是单一因素引起,而可能有多种因素。由于观测积累不多、理论研究不足,目前仍无法确定主要原因。从能量输入机制看,分为波动机制和电动力学机制。波动机制处理声波、快-慢磁声波、Alfoen 波和表面波。在晚型星中,波能由对流层的快速湍流运动、小尺度不稳定性或者与其它波的耦合模式激发。电动力学机制包括电流耗散、微耀斑或者毫耀斑、磁流浮现、以及磁对消等,通过缓慢的光球脚点运动或磁浮力,将能量转入磁场。

对太阳结构的研究热点,概括地讲,在太阳内部主要是与太阳振荡和中微子有关;外部主要是与磁场和速度场有关(与光变和光谱中高阶物理量有关)的磁流体动力学过程。

## 2. 太阳活动

### (1) 太阳耀斑物理

当前耀斑物理已成为涉及众多方面的独特领域。早在60至70年代,几乎全波段地观测了耀斑及其后的动力学过程,发现了耀斑环结构及大量的高能过程。进入80年代,转入高空间和高时间分辨率探测。空间探测的重点是能揭示日冕过程的 X 射线观测,软 X 射线已采用入射光学(以前是掠射系统),空间分辨率达到1—2角秒,时间分辨率达到毫秒。与其对应的射电毫秒探测获得不少新结果,主要解决了耀斑过程与 X 射线结构位置与变化(时间)关系。但是目前硬 X 射线分辨率只有5角秒(Solar),仍然不够高。耀斑的微观等离子体过程是高能的基础,它包括粒子加速、粒子传输和不稳定性及粒子辐射理论。

耀斑能量的积累、储存和释放——即耀斑模型也取得很多进展。对磁剪切、磁挤压、磁浮出、磁对消、电流、磁重联的观测不断有新发现,新的概念不断产生;出现了系统的色球磁场观测和研究;发现了磁纤维及反变磁结构,耀斑发生前色球位置存在前兆红移等。但是,一个统一的可以准确预报耀斑发生位置、高度、大小及其后随效应的理论体系尚未建立。主要原因是现有能准确进行磁场和速度场观测的是光球,而在耀斑发生的日冕和上色球层中仍缺乏高分辨的磁场和速度场及演化的观测和理论。

### (2) 日珥物理

近几年来,日珥物理的发展特别引人注目。一般把日珥分为稳定、爆发和与耀斑有关的三大类。关于日珥在极高温和低密度日冕中存在的支撑问题,虽有众多磁流模型,但仍未有定论。与爆发有关的日珥及其大量发生的日冕物质抛射和引起的地球物理效应,很引人注目。与耀斑有关的日珥中的环状特征及种种磁力线重联的设想都很吸引研究者的注意力。目前对日珥磁场的 Hanle 效应探测正拉开高色球以上磁场精确探测的序幕。

### (3) 日冕物质抛射

日冕物质抛射时释放出高达 $10^{52}$ 尔格的能量和 $10^{13}$ 公斤的物质,它的发生引起日冕结构重大变化和太阳风大扰动。80年代初,普遍认为日冕物质抛射是耀斑的附属现象和后随余波。80年代中的联测证实,日冕物质抛射有时发生在耀斑之前,并且核心区远离耀斑区,这与上层大尺度日冕磁场结构演化有关而不是下面层次变化的直接结果。

(4) 黑子物理、黑子演化和黑子结构的研究重点在磁场和流场方面。近期的主要发现有,黑子从具有半影开始就有磁结构,而这种结构并不带走净磁通量和引起黑子消亡。此外,关于黑子本影磁结构、半影亮纤维与暗纤维磁场及其演化特征、超半影结构等的观测不断有新的发现。黑子中流场也出现了不同于 Evershed 流场的许多精细结构,这些都将引导黑子物理向深层发展。

(5) 冕洞物理,冕洞的产生、发展及持续性和磁结构的研究正取得较大进展,它与地球物理及太阳大尺度结构的关系正吸引着人们的注意力。

(6) 与太阳耀斑、日珥爆发、日冕瞬变、冕洞、日冕物质抛射、与太阳风有关的行星际过程、能量传播及地球物理效应和太阳活动预报研究等已引起日地物理学家的极大关注。预报具有重要的应用价值,目前预报方法多为形态预报结合数值预报。

(7) 太阳活动11年周期性、经度漂移、黑子磁极规律性的研究日趋活跃。近年来,出现了扩展的太阳活动周假说:任何时候,太阳上都存在两个18—22年的太阳活动周,11年周期仅仅是主相。在大尺度磁场和流场中,纬度带局部区域较差自转引起的“扭曲振荡”现象,比该纬度处

的平均较差自转的扭曲振荡快或慢。

在太阳活动领域中,与磁场和速度场密切联系的太阳磁流体动力学过程和等离子体动力学过程起主导作用;而高分辨率以及长时间大尺度磁场、速度场,与日冕上空有关的高分辨 X 射线观测和研究有决定性作用。

以上分析可以看出,80年代太阳物理学取得重大进展的领域是:太阳振荡、太阳耀斑和太阳磁场三方面,其中空间探测和计算机技术起了决定性作用。而碰到的难题基本上都与高灵敏度、高空间、高时间分辨率的观测技术有关。

### 三、90年代太阳物理学展望

#### 1. 90年代的几项重大设备及主攻方向

(1)OSL 轨道太阳实验室——口径为1米的望远镜,附有 X 射线及紫外等小型望远镜,空间分辨率可达0.1角秒。美、德、意三国合作建造,投资约3亿美元,计划1998年投入观测,主要研究太阳磁流体动力学问题。

(2)Solar-A(阳光)X 射线卫星,1991年8月30日发射,以研究耀斑和日冕为主,软 X 射线分辨率为2.5角秒,硬 X 射线分辨率为5角秒。日、美、英合作,耗资约2亿美元。

(3)LEST,口径2.4米,地面最大太阳光学望远镜,采用主动光学和图象处理技术,可获得0.1—0.2角秒高空间分辨率的磁场和光谱。LEST 是以欧洲为主建造的,耗资约5000万美元,计划1995年以后投入观测。主要目标是研究太阳磁场。LEST 将放置于当前地面天文观测优良台址西班牙的 Canary 岛上。

(4)GONG,美国为主的全球太阳振荡观测网(环地球表面设6个观测站),以观测长周期太阳振荡为主,研究太阳内部结构和活动区起源,约1994年建成。

(5)SMOT,太阳多通道望远镜,可同时进行多层次高分辨率磁场和速度场观测,安装在北京天文台怀柔观测站,1992年全面运转。主攻方向是太阳磁场和速度场。

(6)日本野边山大型射电日象仪,由76面1米天线阵组成,在太阳观测时间分辨率方面超过美国的甚大阵(VLA),1992年左右投入观测,主攻目标是太阳射电。

(7)THEMIS,法国建造,口径为90厘米,无偏振太阳望远镜,采用20个 CCD,在3800 Å 至11000 Å 波长范围上研究太阳大气磁场和各种不稳定过程。THEMIS 将安装在 Canary 岛上,预计1994年建成。

(8)CORONA,前苏联建造,以观测太阳 X 射线为主的天文卫星,原计划90年代初发射。

(9)SOHO,太阳日球天文台,欧洲建造,以探测太阳风和日震为目标的天文卫星,预计1995年发射。

以上设备将决定90年代太阳物理发展的基本格局,在耀斑物理、太阳振荡和太阳内部、磁流体力学等方面将有新的进展和突破,并向高空间分辨率和长持续时间发展。

上述太阳物理学专用设备和90年代通用计算机的发展,将使数值模拟成为主要理论研究手段,如对太阳内部、活动周以及耀斑储能过程模拟等。

#### 2. 90年代太阳物理研究

(1)中微子和长期振荡观测将再一次向传统的恒星内部模型提出挑战,引起恒星模型及其演化理论研究的再次活跃,数值模拟将取得重大进展。

(2)实现0.1—0.2角秒的太阳磁场和速度场“细胞”结构的观测,揭示一系列关于太阳对流、光球和色球磁结构;黑子活动区微磁结构也将有一系列重要发现;将改写以往不考虑磁场因素的太阳外层大气平滑结构模型,揭示色球和日冕加热及结构的主要因素。

(3)以研究高能过程为主,基本上可搞清耀斑发生和持续过程,在耀斑储能及释放过程的研究方面取得重大进展,但仍不可能基本解决。

(4)在太阳活动周起源、大尺度磁场和速度场结构方面,观测上将有所突破,并产生新的理论解释和更多的数值模拟模型。

(5)对耀斑、日珥、日冕等的深入研究,将推动与其紧密相关的日地系统耦合过程的研究,改进和提高太阳活动对地球环境(包括空间和生物圈)和技术系统影响的预测能力。

### 3. 几项突破性的太阳物理研究方法的期待

(1)可直接进行高空间、高时间分辨率日冕磁场探测方法,以解决日冕物理和耀斑前过程。

(2)能提供测量太阳活动周演化的重要观测参数的方法,取得重要观测依据。

(3)数值模拟方法能有新的突破,以更好地解决真实边界条件外推技术。

(4)在地面上能获得高空间分辨率观测的有关技术和方法。

## 四、对发展我国太阳物理学的几点设想

### 1. 80年代我国太阳物理研究的重要特征

(1)以峰年太阳活动研究为主的中国太阳物理观测研究一次比一次组织得好,一次比一次取得更大进展。22周峰年期中,中国已由跟着国外走,到开始有了重要发现的年代,在80年代后期有所突破,主要在太阳磁场和速度场以及射电快速变化两方面,如磁对消、耀斑前兆红移、耀斑与电流、色球磁纤维和反变磁场、耀斑红外发射、短厘米波段上太阳射电爆发精细结构等。这些发现使我国的一部分研究工作开始步入世界先进行列。

(2)国外很活跃的主要领域,如日震、白光耀斑等,中国也已开始起步和参与。

(3)在 CCD 及图象处理系统方面,与国际上处于同等水平,并有相当的规模。射电观测普遍使用高时间分辨率接收系统。

(4)在数值模拟方面,已开展对多达200多个方程的有限元求解,整体上处于跟踪阶段。

(5)实测能力提高很大,一批新型或专题型设备投入观测,如具有国际先进水平的太阳磁场望远镜、60厘米太阳塔和太阳精细结构望远镜、白光耀斑探测器、动态声光谱仪及第一代和第二代太阳微波爆发快速辐射计等。

(6)一批以中年科学家为学术带头人的研究队伍已形成,他们具有丰富的观测经验和很强的研究能力,并不断开拓新的领域,如磁场和速度场、日震学等。

### 2. 对90年代我国太阳物理研究的几点设想

当前,国际上太阳物理学已进入深化阶段,目标高、技术难、研究经费高昂,许多大设备都一拖再拖,往往迟5至10年投入使用。80年代末,中国太阳物理学能有所进展,与20多年前看准磁场和后来抓住射电快速变化不无关系。90年代,在中国全面大于快上的基本条件仍不具备,但是中国太阳物理学有一个有利的方面,即在“太阳磁场和速度场”这一重要领域已步入世界先进行列和发展的主流体系,中型多通道望远镜将全面投入运转,新发明的二维实时光谱仪的建成有可能使我国的研究工作形成更大特色,这就有可能在局部重要领域进入世界先进行列,

甚至领先。具体设想如下：

(1)以“磁场和速度场”的观测研究作为主攻方向,结合观测、分析和数值模拟,争取在三维磁场、纤维磁场、耀斑磁场、大尺度磁场几方面作出重要贡献。

(2)加强耀斑物理机制的研究,利用地面和空间观测资料,获得较完整的耀斑结构和演化图象,争取在耀斑大气模型和动力学演化、耀斑触发和能量传输等方面提出有创新的见解。

(3)为高分辨率观测准备条件,其中包括地面优于0.3角秒台站选址、二维实时光谱仪预研、太阳射电高分辨观测设备预研方案等。

(4)80年代末,我国有一批中小型设备投入观测,如先进的白光耀斑探测器,改进后的60厘米太阳塔望远镜、射电快速辐射计、偏振和频谱观测、10830 Å 红外谱线分析和单色像高分辨率观测等,要尽量发挥其作用,力争获得一些具有世界水平的观测和分析成果。

(5)以二维实时光谱仪等具有创新思想的设备为基础,通过学术竞争,争取跻身于国家空间项目中,弥补我国天文学在空间观测手段上的不足。

(6)跟踪太阳振荡研究,利用国际合作和我国已有的观测设备积极开展工作,积累经验、储备人才。

(7)在战略上,注意跟踪国外大型数字模拟实验和数字图象处理技术的发展,而不要仅限于个别人或个别小题目,逐步形成我们自己的研究队伍。

## SOLAR PHYSICS IN 1990s

Ai Guoxiang

(Beijing Observatory, Academia Sinica)

Ji Peiwen

(National Natural Science Foundation of China)

### Abstract

This paper reviews briefly history of solar physics development and introduces main fields, situation and puzzles of solar physics. It predicts main development of solar physics in 1990s and gives some suggestions to development of Chinese solar physics.

## “中国科学基金研究会”召开成立大会

“中国科学基金研究会”日前成立。1992年12月21日在北京召开了成立大会暨第一届理事会议。有关行业科学基金机构和有关地方科学基金组织推举的80多位理事出席了会议。有关方面的负责人到会祝贺并出席了开幕式。

会议代表听取了国家自然科学基金委员会副主任胡兆森代表筹备组所做的工作报告;听取了“中国科学基金研究会”前身——原“中国管理科学研究会科学基金分会”理事长潘振基的工作汇报。会议选举产生了常务理事、正副理事长及正副秘书长,胡兆森同志当选为理事长。会议讨论通过了《中国科学基金研究会章程》,并讨论通过了研究会的组织发展工作和今后的工作任务。