

# 我国日地科学的进展

胡文瑞

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

傅竹风

(中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100080)

## 一、日地科学

日地科学是研究太阳的能量、动量和质量如何经过行星际空间、地球磁层、电离层和中性大气而影响地球环境的科学。它有时也称为日地物理、日地关系、日地研究等。日地科学涉及太阳物理、行星际物理、磁层物理、电离层物理、热层及大气物理和化学,以及地球科学的有关领域,它更着重于研究日地系统不同区域之间的相互关联,以及这种关联的因果关系。目前的探测水平使人们更多地侧重于相邻区域之间的耦合过程。

在公元前 1500 年不迟于商代就已记载了最先看到的太阳黑子。我国史书中丰富的太阳黑子资料为研究日地关系提供了宝贵的历史数据。17 世纪以后利用望远镜观测太阳过程,使日地科学的研究成为自然科学的重要组成部分。60 年代以来的空间探测所取得的丰硕成果,将日地科学推到了当今科学的前沿。空间探测开创了全波段、高分辨率和综合观测的新阶段,揭示了许多重要的现象,诸如太阳耀斑的高能过程、太阳冕洞、日冕瞬变、行星际扇形结构、无碰撞激波、地球千米波辐射、极区场向电流、磁层中的氧离子分布、低纬电离层非均匀结构以及磁力线的重联等。80 年代以来,人们越来越认识到,探测日地系统的耦合过程必须同时监测若干关键区域,以获取日地系统的时间和空间变化图象。当然,空间探测也有许多局限性,日地科学的研究必须依赖地面、火箭、气球以及卫星等多种手段的探测。

日地科学在 90 年代会有重大进展,其主要标志是若干国际联合计划的执行。太阳峰年期间将有日本的卫星“太阳 A”以及美国的长时间气球计划,它们与地面的磁场望远镜和光学、射电观测仪器相结合,以揭示耀斑过程的具体细节。国际日地物理计划 (ISTP) 将在日地系统的关键位置部署若干携带先进仪器的空间探测器,联合探测日地系统中不同区域的耦合关系。这个计划的执行无疑将极大地促进日地科学的发展。与此相适应,国际科联有关组织将从 1990 年至 1995 年或稍后,开展日地能量计划 (STEP),促进各国的联合研究。此外,许多局部区域的研究计划,诸如中层大气研究、世界电离层/热层研究、与太阳相关的瞬态行星际传播过程及太阳耀斑研究等,也将促进日地科学的进展。

本文 1989 年 10 月 10 日收到, 1990 年 6 月 11 日收到修改稿。

## 二、我国日地科学的主要进展

40年代以来,我国不少学者在宇宙线、太阳和大气物理等领域有很好的建树。日地科学领域的系统研究还是近30年的工作。国际地球物理年的准备,开始促进我国的日地科学研究。60年代初期,赵九章教授从学术上和组织上做出了重大努力和贡献;有关学科的学者陈彪、吕保维、梁百先和朱岗昆等为促进我国日地物理的发展作了大量工作。而大批中年学者目前正活跃在日地科学的前沿,做出了一批成果<sup>[1-5]</sup>。

太阳提供的能源和扰动源在日地系统中具有核心的地位。我国的太阳物理研究有较好的基础,4个天文台已建立较完整的太阳常规观测地面设施,并达到很好的工作状态。最近,北京天文台艾国祥等研制的太阳磁场望远镜可同时获得光球和色球两层磁场和速度场,达到了国际先进水平<sup>[6]</sup>。此外,空间探测也取得结果<sup>[7]</sup>。我国学者在太阳物理的理论方面进行了大量研究。太阳耀斑过程是研究重点(详见文献[1]),其中涉及挤压、剪切等几种能量储存机制以及耀斑引起大气运动等过程<sup>[8]</sup>。关于太阳磁场位形的文章已发表了许多,其中要提到的是小尺度磁场的对消过程<sup>[9]</sup>、孤立磁通量管的模型<sup>[10]</sup>以及磁场的三维位形研究<sup>[11]</sup>等。我国太阳物理在若干课题上已跻身国际先进行例,但仍有许多薄弱环节,诸如耀斑的高能过程、日震及等离子体动力学等。

行星际空间的主要物质是太阳风等离子体和行星际磁场。涂传诒提出 Alfvén 涨落的波动能量串级理论能够与日冕和地球轨道附近的观测数据吻合,成功地解释了太阳风能源这个重要问题<sup>[12]</sup>。赵学溥等利用日球坐标最佳地拟合了太阳风的日面投影观测数据<sup>[13]</sup>。胡友秋等发展了多步隐式方法,成功地应用于大参数范围非定常磁流体力学过程,对太阳和行星际扰动传播过程的数值模拟做出贡献<sup>[14]</sup>。魏奉思研究了太阳耀斑激波在行星际的传播<sup>[15]</sup>。此外,亚声速流动区增加能量和动量亦可使远场太阳风加速<sup>[16]</sup>。日球磁场三维结构是大家关心的问题,胡文瑞给出的分析解可定性描述许多观测特征<sup>[17]</sup>。章公亮对宇宙线在行星际调制的研究也涉及行星际物理<sup>[18]</sup>,他最近还研究了磁云的特征<sup>[19]</sup>。总的来讲,我国尚缺乏行星际探测能力,多限于理论分析。

我国空间物理研究起步于磁层物理的前沿课题,诸如磁暴和亚暴机制等。过去30年重点发展了空间探测技术。1971年和1981年分别发射了“实践I号”和“实践II号”科学实验卫星,以后又多次进行卫星搭载实验。我国自行研制了一批空间仪器,诸如太阳软X射线分光计、紫外辐射计、短波红外辐射计、热电离计、闪烁计数器、磁强计、粒子成分探测器等,并取得一批科学数据,为日地物理、特别是近地空间过程研究打下了基础。在磁层物理研究中,我国保持着一支活跃的理论研究队伍。傅竹风等提出磁层顶多重X重联理论突破了传统的稳态重联概念,可解释磁通量传递事件,提供了耦合过程研究的新途径<sup>[20,21]</sup>。刘振兴等用涡旋诱发重联理论解释了高纬磁层顶的过程<sup>[22]</sup>。徐荣栏系统地计算了粒子在磁尾中性片内的运动和加速过程<sup>[23]</sup>。此外,结合磁层等离子体过程还开展了磁层顶切向速度不稳定性<sup>[24]</sup>、有流动时电流片的不稳定性<sup>[25]</sup>等研究(参见文献[4])。

我国电离层物理的研究始于40年代,目前有10个电离层台站装备着测高仪、偏振仪、电离层吸收仪、Doppler干涉仪和数字式垂测仪等设备。中国电波传播研究所研制成功短波后向散射雷达,是一台大型地面设备<sup>[26]</sup>。中国科学院在海南岛建成探空火箭发射基地,可进行120km以内高度的电离层探测。武汉物理研究所的短波Doppler台阵取得了一批电离层物理

的研究成果,中国电离层台站的建设已有一定规模.此外,地磁脉动和哨声的接收积累了 10 年的资料,最近又成功地在低纬接收到哨声<sup>[27]</sup>. 在电离层物理研究领域,我国老一代学者桂质廷和梁百先发现赤道异常按地磁纬度对称分布,作出了重要贡献<sup>[28]</sup>. 李钧等提出电离层运动剖面的反演原理和方法有较大的学术意义和实用价值<sup>[29]</sup>, 陈培仁用行星波理论解释电离层的两日振荡现象<sup>[30]</sup>,以及一大批电离层物理的研究工作都受到国际上同行的重视<sup>[31]</sup>. 另一方面,在日地科学中人们更关心耦合过程. 资民筠利用国外卫星资料系统地分析了极区及高纬电场图象及等离子体层顶的位置<sup>[32]</sup>,徐文耀分析和计算了全球电流体系<sup>[33]</sup>,肖佐等证实低电离层变化与同温层增温有关<sup>[34]</sup>.

热层物理是我国相对薄弱的研究领域. 陈哲明具体求解了热层大气动力学方程,系统地讨论了热层大气对热源的响应,理论上形成了较完整的体系<sup>[35]</sup>.

国际地球物理年以来,我国就建立了 Dobson 观测系统. 对臭氧的长期变化和大气环流的关系进行的系统研究发现, QBO 的双年周期振荡与太阳活动有关<sup>[36]</sup>. 利用历史资料,对重建历史气候进行了分析,发现了与太阳长周期和 11 年周期之间的关系<sup>[37]</sup>. 从日地整体行为的角度,人们十分关注中层大气对太阳和近地空间的变化,以及对火山爆发、构造变化、气候和生物圈变化的响应,也十分注意太阳变化对地球表面附近区域的影响机制. 后边一个问题在中国进行着相当活跃的研究,也召开过多次讨论会,机理方面的研究尚待深入<sup>[38]</sup>.

显然,在研究日地系统的整体行为时,太阳活动的周期性是一个基本现象. 一方面要探寻周期性本身的规律,另一方面要分析太阳活动的周期性在日地系统其他区域,特别是地球系统中的响应. 徐振韬和蒋窈窕对于 Maunder 极小期存在太阳活动的论述引起了广泛讨论<sup>[39]</sup>. 对此,中国学者反应不一. 罗葆荣和丁有济利用我国历史资料对太阳活动的周期性进行了统计,得到 11 年周期及其他更长的周期<sup>[40]</sup>. 我国对周期性的研究是很有特色的.

### 三、太阳峰期日地系统整体行为研究

在太阳活动第 21 周峰年期间,我国太阳物理工作者曾组织联合研究. 从 1987 年开始,中国科学院组织实施太阳活动第 22 周峰年期间日地系统整体行为研究计划. 该计划涉及中国科学院内有关太阳物理、空间物理以及地球科学的台、站、所共 10 余个单位的数百名科技人员. 同时,院外许多单位也共同参加了研究.

为了研究日地系统的整体行为,该计划以太阳活动的典型事件为内容,组织太阳、空间和地球科学的有关仪器和设备进行协调的联合观测,以探索各种现象间的因果关系. 在云南天文台建立了联测的指挥中心,根据太阳耀斑预报和监测,协调和指挥联合观测. 联合观测动用了 50 余台仪器和设备,其中关键的重大设备 10 余台,诸如太阳磁场望远镜、多通道太阳光谱仪、太阳射电望远镜、电离层垂测仪、总电子含量仪、地磁强度仪、Dobson 光度计和气球探测大气成分等. 联合观测的目的是进一步探索太阳耀斑过程及其在日地系统的影响,特别是地球物理效应. 联合观测还促进了太阳耀斑预报,太阳射电快速变化研究,地球磁层亚暴预报,近地空间环境研究以及高、中层大气动力学等方面的工作. 从 1988 年以来共组织了 10 次联测,其中含包与美国和日本等国天文台的几次联合观测. 各单位的仪器和设备已能协调工作,逐步取得一些较好的资料,有助于开展进一步的分析和研究<sup>[41]</sup>.

在加强联测资料的分析和开展理论研究的同时,根据我国的观测能力和地理特征,日地系统整体行为中若干课题被选择出来作为近期研究的重点. 利用北京天文台太阳磁场望远镜的

资料,以及云南天文台多通道光学望远镜和其他资料,可以研究太阳物理的许多过程,诸如大尺度现象、强磁场与等离子体的相互作用以及耀斑过程等<sup>[42]</sup>。外国学者曾于 50 年代提出远东电离层异常的概念,我国学者对此概念亦很关注。我国电离层极有特色,它表现为 E<sub>s</sub> 多且强,其形态包括赤道与极区常出现的各种类型, F<sub>2</sub> 扩展现象严重等。分析我国电离层特征以及这些特征形成的机理,这不仅可以促进电离层物理的研究,而且对监测我国近地环境也非常重要<sup>[43,44]</sup>。利用地磁链来研究全球电流体系是一种有效的方法。目前国际上的地磁链大多分布在欧美地区。建立我国南北向的中低纬地磁链,通过反演计算来分解各种磁层和电离层的电流体系,对研究地球磁层的电流分布及其变化十分有益<sup>[45]</sup>。该计划已在近期内部署中国的地磁链,并进行相应的分析和研究工作。大气中微量气体含量的变化是地球环境全球变化的重要内容,也是日地耦合过程的重要组成部分。利用气球直接探测及地面监测,可以获取臭氧等微量气体的数据。该计划将积累这些资料,并分析太阳活动及变化对大气微量气体的影响<sup>[46]</sup>。

极区动力学过程是研究磁层与电离层,以至高中层大气耦合的重要内容。为弥补我国大陆地处中低纬的局限,我国新建的南极中山站将主要从事日地物理的研究。这不仅扩大了现在的联测网,而且对研究整个耦合过程都十分有帮助。

中国只有很有限的空间探测能力,行星际空间和地球磁层的实测基础相当薄弱。中国学者在行星际空间物理和磁层物理方面做出了一些很好的工作,这些工作大多是利用国外资料进行分析,或者是对某些物理过程进行理论研究。在日地系统整体行为的研究中,行星际过程和地球磁层过程是不可忽略的环节。该计划只能逐步促进这方面的理论分析和数值模拟研究,并通过国际合作来补偿我国实测之不足。

太阳峰年期间将出现频繁的太阳活动,特别是质子耀斑等高能事件,为研究日地系统耦合过程的因果关系提供了极好的机会。一般预计,太阳活动第 22 周的峰值将出现在 1990 年春,比前几年预计的提前了一年左右。因此,各国的峰年研究计划都在加紧安排。中国科学院的研究计划将促进我国的峰年研究和日地科学研究,成为国际研究计划的一部分。通过各国科学家的努力,共同为日地科学做出贡献。

#### 四、日地系统的应用研究

日地环境的变化直接影响着航天、通讯、物探、地震等军事和民用事业,而且地球系统又与人类的生存和发展的环境密切相关。所以,日地系统的过程不仅构成基础研究的前沿学科,也具有重大的应用含义。

日地环境的监测预报是国民经济和国防许多单位所必须的。60 年代以来,北京、紫金山、云南天文台等单位就从事太阳活动和耀斑事件的预报工作,北京天文台和云南天文台发布的短期、中期和长期太阳预报不仅满足了日常需要,而且也构成我国监测和预报网的重要组成部分<sup>[47,48]</sup>。中国电波传播研究所是我国电离层资料收集和提供电离层骚扰预报的代表单位,为通讯和电离层监测做了大量工作<sup>[49]</sup>。电离层骚扰很多是太阳耀斑产生的地球物理效应,两者有很好的对应关系<sup>[50]</sup>。中国科学院地球物理研究所从 70 年代末期开始进行地磁扰动的中期预报,对航天、通讯、物探、地震等工作起到促进作用<sup>[51]</sup>。随着国家经济的发展和空间活动的增强,对日地环境特别是近地空间环境的实时监测和有效预报的要求将越来越迫切,需要地面台站网与空间飞行器的探测相结合才能完成任务。

卫星通讯在信息传递中的作用越来越大。电离层中的小尺度结构,特别是赤道和低纬地

区的非均匀结构使卫星与地面间传播的电磁波受到散射,造成很大畸变,从而影响通讯的质量。广州地区实测到电离层泡及与之相关的 VHF 闪烁<sup>[52]</sup>。利用电离层传播的无线电波仍广泛地用于通讯的许多领域。由于出现极光或亚暴而增加电离度,使低电离层条件变化造成中、高频讯号的衰减或者低、甚低频讯号相变。更严重的是,太阳耀斑质子形成的极盖吸收事件在中、高磁纬区域产生强电离度可持续数日,这时高纬地区的高频通讯严重恶化,甚致中断。电离层物理为了解电离层结构,预报电离层骚扰,选择合理的通讯频道和提高通讯质量奠定了基础。此外,电离层中的扰动,诸如台风、陨石、原子弹爆炸,甚致发射飞行体释放的巨大能量都可以激发波动,获取这些波动传播讯号就可以监测和分析这些扰动源,可产生重大的社会和军事效益<sup>[53]</sup>。

太阳活动对地球天气和气候的影响是一个全球关心的问题。强的太阳耀斑可引起中高纬度大气环流的变化,产生延迟效应。叶宗海等分析了 1966—1978 年太阳耀斑对大气湍度面积指数的影响,得到耀斑发生后 3 天有最大扰动的结论<sup>[54]</sup>。许多工作还表明,太阳耀斑与雷暴活动之间存在着相关性<sup>[55,56]</sup>。人们研究得更多的是与太阳活动周期相关的天气和气候的变化。王绍武曾统计了太阳扰动周期性与中国近 500 年来平均降水量的相关性<sup>[57]</sup>,以及与 1913 年以来我国大范围温度平均值的相关性(参见文献[1]第 575 页),统计结果表明,太阳活动周期性与中国气候之间存在着某种相关性。徐群等利用最近 28 年的资料得到太阳黑子数与北半球 500hPa 各海洋副高面积相关的结果<sup>[58]</sup>。太阳变化与地球天气和气候的关系是一个既吸引人、又意见分歧的争论问题。进一步的工作需要对太阳辐射,特别是短波辐射进行长期监测,对太阳变化与天气和气候的关系进行令人信服的相关分析,要重视研究中层大气过程和上、下层的耦合问题<sup>[59]</sup>。在此基础上,进一步开展相应的机理研究。近年来,庄洪春强调了太阳活动与雷暴电过程耦合的一种可能机制<sup>[60]</sup>。太阳变化与地球上许多灾害事件,诸如雷雨、水灾、地震等的关联,也是我国不少人有兴趣并进行了一些工作的问题,这种关联作为一个学术问题尚需进一步探讨。

地圈与生物圈的相互作用也是日地系统中具有重大社会意义的课题,我国学者也正在组织该课题的研究。

经过几十年的积累和努力,我国日地科学的有关领域获得了很大的进展,相关领域之间耦合过程的研究也取得了一批成果。作为国家的基础研究的重点项目,我国的日地科学研究在今后一定会继续取得好的成果,做出有特色的贡献。

致谢: 本文得到李钧、刘瑞源、吕达仁、徐文耀、王家龙、张柏荣、陈培仁等同志的许多帮助,谨此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] 胡文瑞、林元章、吴林襄,太阳耀斑,科学出版社,1983.
- [2] 胡文瑞,宇宙磁流体物理学,科学出版社,1986.
- [3] 胡文瑞、赵学溥,太阳十讲,科学出版社,1986.
- [4] 涂传诒等,日地空间物理学,科学出版社,1986,1987.
- [5] 叶永旭、吕保维,空间物理学进展,四川科技出版社,1989.
- [6] 文国祥、胡岳风,天文学报,27(1986),173.
- [7] Lin, H. A. et al., *CSGD Special Issue*, 1986, 1:74.
- [8] Gan, W. Q. & Fang, C., *Solar Phys.*, 107(1987),311.
- [9] Wang, H. & Zirin, H., *ibid.*, 98(1985), 241.
- [10] 胡文瑞,中国科学,A辑,1989,6: 616.

- [11] Hu, W.R., Hu, Y.Q. & Low, B.C., *Solar Phys.*, 83(1983), 195.
- [12] Tu, C.Y., *ibid.*, 109(1987), 149.
- [13] Zhao, X.P. & Hundhausen, A. J., *J. Geophys. Res.*, 86(1981), 5423.
- [14] Hu, Y. Q. & Wu, S. T., *J. Computational Phys.*, 55(1984), 33.
- [15] 魏奉思, 中国科学, A辑, 1987, 3: 186.
- [16] Hu, W. R., *Astrophys. Space Sci.*, 98(1984), 171.
- [17] —, *ibid.*, 90(1983), 391.
- [18] 章公亮, 中国科学, A辑, 1979, 8: 818.
- [19] 章公亮, 空间科学学报, 9(1989), 1.
- [20] Lee, L. C. & Fu, Z. F., *J. Geophys. Res.*, 91(1986), 6807, 13373.
- [21] Fu, Z. F., *Proc. International Workshop on Reconnection in Space Plasma*, EAS SP-285, Vol. II, 1988, 275.
- [22] Liu, Z. X. & Hu, Y. D., *Geophys. Res. Letter*, 15(1988), 752.
- [23] Xu, R.L., *Astrophys. Space Sci.*, 144(1988), 257.
- [24] Pu, Z. Y. & Kivelson, M. G., *J. Geophys. Res.*, 88(1983), 841.
- [25] Lee, L. C. & Wang, S., *J. Geophys. Res.*, 93(1988), 7354.
- [26] Jiao, P., *Proc. CIE International Conf. on Radar*, 1986.
- [27] 徐继生、田茂等, 地球物理学报, 32(1989), 125.
- [28] Gui, Z. T. & Liang, B. X., *Nature*, 160(1947), 642.
- [29] 李钧, 地球物理学报, 32(1989), 609.
- [30] 陈培仁, 地球物理学报, 32(1989), 225.
- [31] 梁百先、李钧, 地球物理学报 40 周年专集, 地球物理学报专刊, 1990.
- [32] 资民筠、尔·尼尔森, 空间科学学报, 4(1984), 34.
- [33] Xu, W. Y., Tschu, K. K. & Matushita, S., *Planetary and Space Sci.*, 32(1984), 629.
- [34] 肖佐等, 地球物理学报, 27(1984), 1.
- [35] 陈哲明, 空间物理论文集, 科学出版社, 1980, 29, 52, 66.
- [36] 黄荣辉等, *Advances in Atmospheric Sci.*, 6(1989), 4.
- [37] 吴达铭, 大气科学, 5(1981), 376.
- [38] 气象文集编委会, 天文气象学术讨论会文集, 气象出版社, 1986.
- [39] 徐振韬、蒋窈窕, 南京大学学报, 1979, 2: 30.
- [40] 罗葆荣、丁有济, 天文学进展, 4(1986), 188.
- [41] 胡文瑞、张柏荣, 太阳活动 22 周日地系统整体行为研究文集 I, 云南天文台台刊, 1989.
- [42] 艾国祥, 同上.
- [43] 李钧, 同上.
- [44] 奚迪龙、王伟平, 电波科学学报, 2(1987), 37.
- [45] 徐文耀, 同文献[41].
- [46] 王庚臣, 同文献[41].
- [47] Zhang, B. R., Luo, B. R. & Liu, Z. H., *Solar-Terrestrial Predictions: Proceeding of a Workshop on Mendon*, 1984, 324.
- [48] Dong, S.L. et al., *ibid.*, 331.
- [49] 梁丽屏、王伟平, 电波科学学报, 3(1988), 61.
- [50] Liu, R.Y. et al., *Telecomm. J.*, 50(1983), 408.
- [51] 高美庆、郑体容, 全国空间物理学学术会议论文集, 科学出版社, 1979, 217.
- [52] Ma, J. M. et al., *Proceedings International Beacon Satellite Symp.*, Part I, 1986, 317.
- [53] 李钧, 地球物理学报, 26(1983), 1.
- [54] 叶宗海、卢庆棠, 空间科学学报, 7(1987), 65.
- [55] 庄洪春、吕锡从, 空间科学学报, 6(1986), 52.
- [56] 官穆弘, 同文献[41].
- [57] Wang, S.W., Zhao, Z.C. & Chen, Z.H., *Geo. J.*, 5(1981), 117.
- [58] 徐群、金龙, 大气科学, 10(1986), 204.
- [59] 沈梅、吕达仁, 同文献[41].
- [60] 庄洪春, 空间科学学报, 4(1984), 58.