

# 空间天气学研究进展<sup>\*</sup>

曹晋滨

(空间科学与应用研究中心 北京 100080)

**摘要** 空间天气是一门把空间科学与天基、地基技术系统紧密结合,多学科交叉的新兴学科。主要研究太空灾害性天气的变化规律,进而实现对太空天气的预报,为人类的太空活动和国家安全服务。本文简要介绍了空间天气研究的重要意义、研究进展和发展趋势。

**关键词** 空间天气学,预报模式,空间天气观测,研究进展

## 1 空间天气学研究的 重要意义

空间天气是指发生在太阳表面、行星际直到地球空间环境(磁层、电离层、热层和中高层大气)中,可影响天

曹晋滨研究员

基和地基的技术系统正常运行和可靠性,甚至危及人类的活动、健康和生命。这种空间灾害性天气事件,无论是在太阳活动高年还是低年,都经常发生。只是近年来随着社会的进步,人们对航天、通信、导航、国家安全等高科技领域的需求日益迫切,空间灾害所带来的严重威胁和巨大损失,越来越引起人们的重视了。从现在的认识看,影响地球和人类生存发展的环境包括4个层次:固体地球、海洋、大气和空间,它们相互密切联系,共同构成地球环境的

完整的科学体系。

空间天气学是一门把空间科学与天基、地基技术系统紧密结合的多学科交叉的新兴学科,主要研究太空灾害性天气的变化规律,进而实现对太空天气的预报,为人类的太空活动和国家安全服务。

空间天气学的基本科学目标,是把太阳大气、行星际和地球的磁层、电离层和中高层大气作为一个有机系统,按空间灾害性天气事件过程的时序因果链关系配置空间、地面的监测体系,了解空间灾害性天气过程的变化规律。当前开展的主要研究涉及:太阳活动过程和物质输出结构;太阳风暴的形成、演化以及和地球的相互作用;地球空间系统的空间灾害性天气过程的因果链模式等方面。这些都是空间科学中面临巨大挑战的难题。

空间天气学的应用目标是减轻和避免空间灾害性天气对昂贵的高科技技术系统造成损失,为航天、通信、导航、资源、电力、生态、医学、科研、宇航安全和国防等部门提供区域性和全球性的背景与时变的环境模式。

## 2 空间天气研究现状

与一般基础性学科不同,空间天气学包括

<sup>\*</sup> 收稿日期:2005年7月6日

空间天气物理过程研究,空间天气观测以及模式的建立。从学科角度来讲,空间天气学主要指的是涉及空间天气的基本空间物理过程研究。所以研究的重点放在空间天气物理过程上。

## 2.1 空间天气物理过程研究

在发展和完善对空间天气的认识和预报过程中,人们所面临的最大挑战就是如何认识对空间天气起关键作用的一些物理过程。只有充分认识这些基本物理过程,才能谈得上发展和完善有效的预报模式,才能恰当地确定我们的观测需求。下面,我们将介绍空间天气所包含的从太阳到地球的一些重要物理过程。

### 2.1.1 太阳 / 行星际

太阳是一个剧烈活动的天体,与日地空间环境关系较密切的太阳结构和活动现象有:太阳磁场、黑子、耀斑、冕洞、暗条、日冕物质抛射等。

太阳物质的运动和变化与磁场密切相关,太阳黑子、耀斑等现象更是直接受磁场支配的,所以太阳磁场是太阳活动的一个决定性因素。

太阳黑子是最早观测到的天文现象之一。黑子数  $R$  的多少常常用来表征太阳活动的剧烈程度。大黑子磁场可达  $3\ 000\text{—}4\ 000$  高斯。

太阳耀斑是剧烈的日冕活动现象。绝大多数耀斑位于黑子区,一次大的太阳耀斑释放的能量可达  $3\times 10^{25}$  焦,其中  $2/3$  用在使大量等离子体(约  $1\ 013$  千克)抛出太阳所需的动能,一部分用于产生高能粒子,另一部分分布在从 X 射线到千米波的广阔谱段上。

太阳耀斑能导致空间电磁环境变化及地磁扰动。耀斑爆发后,强紫外辐射能使低电离层电离度增加。耀斑爆发的高能粒子到达地球附近会引起磁暴,并造成短波无线电通讯中断等破坏作用。

日冕物质抛射(CME)是日冕物质在较短时间内大规模抛离太阳,进入行星际空间,并

引起太阳风扰动的一种太阳活动现象,也是与空间扰动关系最密切的太阳事件。一次日冕抛射事件抛出的太阳物质可达  $1\ 011\text{—}1\ 013$  千克,能量可达  $1\ 022\text{—}1\ 026$  焦。在太阳活动高年,每天可发生  $3\text{—}4$  次日冕物质抛射事件,在低年,平均 5 天发生 1 次。

行星际空间是太阳大气的向外延伸,从日冕直到日球层边缘。行星际空间的结构和变化是由太阳上的各种结构和活动过程决定的,其中最主要的是太阳风和行星际磁场。

太阳上的各种活动过程都会造成太阳风和行星际磁场扰动。事实上行星际空间从来没有真正平静过,太阳风和行星际磁场的上述大尺度结构可以看做是某种平均的背景状态,在此背景上还有许多经常发生的小尺度结构和变化,它们与磁层-电离层系统的扰动有密切关系。特别是行星际磁场(IMF)中南北分量  $B_z$ ,它是太阳风向磁层输入能量的重要控制因素,大的、持续的南向  $B_z$  是亚暴发生的指标。

日冕物质抛射等过程产生的高速等离子体团,会产生行星际激波或形象地称为太阳风暴,当它吹过地球时,常会使地球空间环境的结构、状态和动力学行为发生急剧变化。

此外,还有银河宇宙线,它具有比太阳宇宙线粒子更高的能量,其通量变化与太阳 11 年活动周期呈负相关。

目前与空间天气密切联系的太阳和行星际科学问题有以下几个:

(1) 太阳事件发生的地点与时间。为了在几天内获取可靠的预警与预报,这是一个亟待解决的大问题。

(2) 太阳高能粒子的加速。这是与前一个问题相关的基础科学问题。不同 CME 事件会生成不同高能离子流射向地球,而我们并不知道其成因。

(3) 对 CME 结构和行星际传播的预报。即使观测到了太阳表面的 CME,我们仍然无法确定其是否会到达地球。即便它能够到达,如果没有实地上游观测,我们也无法确知该事

件是否会对地球造成影响。关键的问题在于 CME 是否足够快速,能够在前方生成激波,以及在激波后方与 / 或在 CME 结构内的磁场南向分量有多大。

### 2.1.2 磁层

太阳风压缩地球磁场,把地磁场限制在一个空腔范围内,这就是磁层。当太阳风流过磁层顶时,一部分能量、动量和质量会传输到磁层里来,从而引起磁层内部等离子体的大尺度对流运动,与运动相伴随的是大尺度磁层电场和电流。这些大尺度结构和过程表现了磁层的主要特征,决定着磁层粒子运动的轨迹和等离子体波传播的特性,磁层小尺度结构和过程也是在这种大尺度背景中发生的。

磁场重联是太阳风向磁层输运能量的最主要形式,通过重联太阳扰动非常容易到达磁层内部。磁尾也会通过类似的重联过程,把太阳风输入的能量释放出来,形成磁暴和亚暴。磁暴和亚暴是整个磁层-电离层系统的剧烈扰动事件,是爆发性能量输入和耗散的过程,它涉及电磁场变化、粒子流、等离子体波爆发、极光等许多相关现象。这是空间天气最主要的研究和预报内容。

目前与空间天气密切联系的磁层关键科学问题有以下几个:

(1) 磁层加速机制(例如杀手电子)。这些都是磁层物理学中的重要未知领域。即便在事后分析时,也很难重构出一次重要加速事件。因为该事件发生于磁暴中最活跃的阶段,要求建立很强的局部化瞬时电场结构。

(2) 磁暴机理。这里包含了很多尚未充分解决的问题,尤其是在近地空间(同步轨道内)。通常是用全球地磁指数的方式对磁暴机理进行描述,但对于磁层电流体系,对这些指数的贡献差异,以及磁暴机理中影响空间天气效应的关键因素尚不清楚。这些问题与磁暴驱动机制、加速事件、磁层-电离层耦合等有关。除了预警与预报方面的需要之外,这也是空间环境

事后分析方面的重要课题。

(3) 亚暴产生机制。亚暴发生的机制至今众说纷纭,但有两点是共同的,即亚暴的能量来源于太阳风,这是亚暴发生的根本原因,而亚暴何时发生,则决定于磁层的某种不稳定性,这是亚暴的直接原因。亚暴的根本原因是太阳风向磁层输入能量的急剧增加。大多数亚暴发生在行星际磁场由北转南之后,这样的磁场结构有利于磁场重联发生。太阳风能量通过磁场重联区输入磁层后,一部分随即释放,转变为磁层对流和电磁场能量,另一部分随着磁层等离子体的运动向磁尾输送,并以磁能的形式在磁尾积累起来。由于磁尾等离子体片的某种不稳定性,暂时储存在磁尾的能量突然释放。

### 2.1.3 电离层与中高层大气

电离层是大气层中电动力学性质显著的一个特定区域,因其对无线电波的传播有重要影响,离地面又很近,故在空间天气研究中占有十分重要的位置。

电离层的形成决定于大气和电离源两个因素。电离层的状态和过程不仅决定于太阳辐射和大气层性质,而且也受到磁层过程的影响,其中受磁层直接影响和控制的地区是极区。把极区电离层与磁层紧密地耦合在一起的是地磁场的磁力线,它构成了一条连接电离层和磁层的通道,带电粒子可以沿磁力线从几十个地球半径以外的远磁尾到达电离层,电离层粒子也可以沿磁力线进入磁层;磁力线作为等电位线,把电离层电场与磁层电场联系起来;某些等离子体波受磁场引导而传播。电离层就像一个巨大的显像管屏幕,把遥远磁层的变化呈现在观测者眼前,为我们研究磁层过程提供了有利的条件,其中能被肉眼直接看到的是极光现象。极光是磁层粒子进入大气层后激发大气发光的一种现象,其形态多姿多彩。

磁层粒子沉降不仅激发大气发光,而且增加电离层电离度和电导率,于是,沿极光粒子

密集的夜间极光椭圆区形成了一个高电导带。沉降粒子所携带的电流(叫做“场向电流”)注入电离层后,集中从高电导带流过,形成极光带电急流,这些电流与极区以及纬度较低处的电流构成闭合的电流体系,引起极区地磁场的剧烈扰动。

电离层与中高层大气对磁活动的动力学响应机制非常复杂。在此过程中,中性大气阻力和电离层效应都很重要。现在这一领域已取得良好进展,但在模型开发方面还需做更多的努力。

太阳活动最终将通过复杂的过程与大气相结合。对这些过程的理解仍然很有限,这也延缓了实用空间天气产品的开发进程。

## 2.2 空间天气预报模式

为了实现空间天气预报计划的目标,需要开发空间天气预报模式,它通过追踪从太阳流向地球的能流,将对其基本物理过程的了解转化为能够预报空间环境的模式。这一模式系统是由并行的太阳/太阳风模式、磁层模式和电离层/热层模式耦合而成的。此外,一些其它类型的模式也是必不可少的。任何预报模式都必须由详细描述当前系统状态开始,或者利用经验模式,或者用观测数据并填充了数据空缺的同化模式给出这种状态。在开发完全业务型模式的过程中,需要开发并验证另一些手段,包括经验预报方法,以确保最终预报系统使用的方法最有效和最准确。

想要预报 CME 及其效应,必须拥有 CME 初始过程模式和在太阳风中产生扰动的三维磁流体动力学模拟(3D MHD)。为了能预报太阳质子事件到达地球轨道的时间和强度,还必须要有行星际激波的 CME 中的粒子加速模式。

在建立太阳耀斑的模式时,需要知道日冕磁场。确定日冕磁场的唯一方法是在光球观测磁场,采用数值模拟方法将它外推到日冕。模拟太阳耀斑本身需要有三维的活动区磁重联模式,它必须包括考虑确定阻抗分布和大小的

过程。为准确做出太阳耀斑效应预报,还必须有关于耀斑加速粒子以及产生 UV、EUV 和 X 射线暴过程的模式。

太阳风模式包括三维磁流体日冕加速区模拟和太阳风向行星际空间的扩展。这两个模式的一个耦合版本是能用作在太阳风扩展到行星际空间之前描述太阳风速度的一个替身。因为行星际磁场(1MF)数据最可能是由位于拉格朗日(L1)点的卫星得到,也需要有一个模式,以便将可用的信息外推到磁层处的太阳风和行星际磁场。

为了预报太阳 UV、EUV 和 X 射线发射,需要开发三维的太阳大气模式,改进从原子、离子到分子的所有重要谱线和谱带的太阳光谱计算模式。

现有几个磁层模式已能基本描述和预报磁层中粒子和场(例如 MSM 磁层规范模式)。但一个更先进的磁层规范预报模式(MSFM),已研制成功。这两个模式都依赖于对磁场和电场,以及包括极光粒子沉降效应的电离层电导的准确描述。这些模式的不断改进将改善并扩展 MSM 和 MSFM 模式的能力。MSM 和 MHD 模式都不描述辐射带中高能粒子成分。虽早已有静态的辐射带模式,但急需开发考虑磁暴条件下的高能粒子通量变化的动态模式。

模拟电离层方法主要有基于世界范围数据的经验模式,实时观测的同化模式和 3D 时变物理模式。要建立一个完全耦合的模式,必须运用更真实的边界条件,这模式包括使用快速计算的中间层、热层和电离层的经验数值混杂模式。与磁层模式的情况一样,在准确预报电离层行为模式中,电场结构是一重要因素。电场可以用解析、半解析或经验的方法来描述,但它总是由行星际参量和磁层过程驱动。这些模式必须计入高纬电场到低纬的穿透以及中性大气风场的耦合。从卫星基地通信和导航系统的角度来说,包括导致电离层闪烁与这些结构相关联着的小尺度不规则性效应是最重要的。当前,能用来描述在任何频率上、任



何电波传播路径上的闪烁的模式必须要有来自台站网的实时数据的支持。最终目标是开发一个能产生任何尺度结构过程的物理模式。建立中性大气模式的努力集中于数字化的热层、电离层、电动力学广义环流模式(TIEGCMs),这个由物理原理为基础的模式能自洽地在环流的三维时变基础上计算密度扰动和中性风场。这些模式必须不断地更新、验证及测试。

### 2.3 空间天气观测

空间天气观测可以分为:进一步建模所需的观测(科学观测)和空间天气活动常规观测(监测)两大类。

预报业务地基探测器包括磁强计和电离层测高仪、射电和光学波段的地基太阳观测设备。今后需要增加的有闪烁监视系统、太阳日冕仪和行星际闪烁仪网。供科学研究用的地基观测仪包括有高频雷达、相干散射雷达阵和光学仪器。进一步所需的有极盖观测台(PCO),这能将现有相干散射雷达链扩展到有重要地球物理意义的极光带极侧区域。

天基探测必须考虑到许多不同轨道配置。低地球轨道卫星可以用来探测电离层和热层的性质以及沿极光场线的低高度等离子体物理过程。大椭圆的极轨航天器可以用来研究电离层和磁层耦合。更加理想的是能通过光学和X射线成像仪获取极光沉降瞬时分布情况。地球同步轨道卫星上的探测器能连续监测磁层中的高能粒子成分和软X射线辐射。GPS卫星上的粒子探测器也能用来确定辐射带通量。对空间天气预报极为关键的是在日地之间L1点上监测太阳风的一颗卫星,目前这一位置只有ACE卫星。

### 3 空间天气学研究发展趋势

从1994年底美国提出国家空间天气战略计划至今,空间天气研究、服务、计划的制定和实施迅速在各国和国际间展开。总的发展态势和基本特点是:观测、研究、预报服务和应用需求的紧密结合,多部门、多领域的广泛参与,研

究的全球性和国际合作的日益紧密和深入。空间天气正成为世界范围关注的科技活动热点之一。

(1)世界范围相继制定空间天气起步计划。美国、日本、欧空局、俄罗斯、加拿大、德国、法国、捷克、丹麦、芬兰、意大利、挪威、西班牙、瑞典、土耳其、英国、澳大利亚等相继制定空间天气起步计划。其中最重要的是美国国家空间天气计划和欧空局的欧洲空间天气计划。

(2)空间探测十分活跃。欧洲Cluster卫星计划于2000年7—8月成功发射,将有助于了解空间天气变化和磁层中小尺度结构。“Genesis(起源号)”飞船于2001年8月8日发射成功,收集太阳上抛出的物质——太阳风。GOES-12地球同步轨道卫星于2001年7月发射成功,主要用于X射线成像仪、地球大气层探测;我国地球“双星”探测计划的两颗卫星分别于2003年12月和2004年7月发射,将探测磁层空间暴的产生机制。

(3)规模宏大的空间天气计划相继提出。“living with a star(与星同在)”计划是由美国宇航局等部门提出的一个规模空前的空间天气计划,在整个日地系统将配置近10颗卫星。它是一个聚焦于空间天气,由应用驱动的研究计划,其目的是:把日地视为一个系统,科学地了解、阐明对人类生存与发展有直接影响的问题;把由该计划研究获得的知识应用到将来地基、天基技术系统的设计和防护。目前,该计划正扩展为“国际与日同在计划(ILWS)”。我国将积极参加该计划并做出重要贡献。国际科联所属日地物理委员会也制定了国际“日地系统气候和天气计划(2004—2008年)”,主要目的是了解空间天气(日地系统的短期变化)和空间气候(日地系统的长期变化);协调参与国之间关于日地系统因果链(End-to-End)模式研究;为人类活动相关技术系统(依赖于空间天气)的可靠性、全球变化(气候和臭氧)、研究向应用的过渡和公众教育等

提供科学输入。

#### 4 我国空间天气研究现状

近年来,中国对空间天气研究也产生了越来越紧迫的战略需求。自“七五”开始,国家自然科学基金委、中国科学院、国家南极办等部门相继组织了有关认识日地系统基本物理过程的重大项目,取得了较丰硕的成果,奠定了观测基础,培养了一大批优秀人才,相关学科配套,学科交叉向纵深发展;“十五”期间在空间天气领域,启动和进入预研阶段的国家重大计划有:“地球空间双星探测计划”、“子午工程”、“太阳空间望远镜”以及在“风云”、“资源”等卫星上搭载空间环境监测系统,推动由我国牵头的“国际空间环境子午圈计划”,开展战略性、基础性国际科技合作等等。这些都为空间天气研究提供了从空间到地面的学科基础、观测基础、人才基础、国际合作基础和配套条件(如数据与信息系统、研究与预报系统等的建立)。

空间天气研究是新世纪新兴的基础研究重大前沿领域之一,我国经济社会的高速发展,特别是高科技发展和国家安全的战略需

求,对空间天气研究提出了更高的要求。我国在这一领域已有相当的基础和一定优势,有和国际同步发展的历史机遇,可望取得重大原创性成就,跻身空间天气领域先进国家之列,为我国社会的发展和国家安全做出重要贡献。为达到这一目标,希望国家各主管部门能对该领域给予更大的持续投入。

**致谢** 本工作受到中国科学院“百人计划”和“创新团队国际合作伙伴计划”的支持。

#### 主要参考文献

- 1 美国空间环境预报委员会空间天气计划工作组 (WG/NSWP). 美国国家空间天气计划 - 战略规划, FGM-P30-1995. 美国华盛顿:1995.
- 2 美国空间环境预报委员会空间天气计划工作组 (WG/NSWP). 美国国家空间天气计划 - 实施计划, FGM-P31-1997. 美国华盛顿:1997.
- 3 欧洲空间局空间环境和效应分析部. 欧洲空间天气计划基本原理. 荷兰 Norrdwijk: 2001.
- 4 中国空间天气战略计划建议调研组. 中国空间天气战略计划建议. 科学出版社:2004.

### Space Weather Research

Jinbin Cao

(Center for Space Science and Applied Research, CAS, 100080 Beijing)

Space weather is a new inter-discipline which combines space science, space borne and ground based observation technologies. It studies hazardous space phenomena, moreover executes predictions of space weather, provides safety services for human space activities. The space weather comprises three research areas: physics process research of space weather, model development and observations. This paper briefly presents the space weather, research progress, and the perspective.

**Keywords** space weather, model, observation, development

**曹晋滨** 空间科学与应用研究中心研究员, 博士生导师。1981年考入中国科学技术大学, 1989年获硕士学位。1993—1996年在法国空间辐射研究中心学习并获博士学位。现任中国空间研究委员会副秘书长, 欧洲空间局 CLUSTER 计划合作科学家, 欧空局空间天气 SWEN 联络组中方成员, 国际辐射带模式专家组成员, 国家杰出青年基金获得者, 入选中科院“百人计划”。