

迈向太空——空间天气学

吕建永 杨亚芬 赵明现

1. 引言

在浩瀚的星空，高纬度区域（如欧洲的挪威、瑞典，美国的阿拉斯加和加拿大）经常可以看到一种眩目的发光现象——北极光（图1）。绚丽的极光在夜空中起舞，这些缎带般波动的美丽光线包括了从绿色到红色，从粉色到紫色的多种色彩。早期，欧洲的爱斯基摩人将北极光与死亡联系在一起，美洲的印第安人传说它与战争有关，而我们的祖先把它看作恶劣天气降临的象征。实际上，极光是人类肉眼能直接看到的空间天气现象，现在使用的这一科学词汇（aurora borealis）由伽利略1619年引入，但应该说这个天才根本不知道极光

到底是什么，因为当时还没有建立磁场和电流的理论体系。

20世纪物理学的飞速发展是人类对极光的认识提供了全面的基础。例如，激光射线的解释离不开原子物理和量子力学的出现。随着人们将极光与太阳扰动联系起来，以及查普曼和费拉罗磁暴理论的出现，极光不再被披上传说中的神秘光环，人们逐渐认识到，太阳不断地向行星际空间“吹”带电粒子，这些带电粒子与地球磁场相互作用后会产生沿磁力线的平行电场。带电粒子在这一电场的作用下被加速并沿着磁力线运动直至地球大气，与大气中的分子或原子相撞导致电子跃迁发光。就是说极光与太阳以

及地磁活动性密切相关。极光虽然美丽，但是强烈极光伴同亚暴和磁暴对地面技术系统和航天器均有不良影响。现在，我们把空间环境中能够影响人类技术活动的那些领域称为“空间天气”，这里涉及的技术系统分布于从地面到太阳系外层的广阔空间里。

空间天气学就是研究地表20~30 km以上的近地空间至太阳大气的日地空间环境中有关电磁、粒子和大气等状态的变化规律，减轻或防止空间灾害，为人类活动服务的学科。它涉及太阳以及太阳风、磁层、电离层和热层中的条件，这些条件可以影响地基和地技术系统的正常运行和可靠性，进而危及人类的生命或健康。一次完整的空间天气事件通常具有从太阳表面形成与发展，然后在行星际空间传播和演化，最后在地球磁层、电离层和中高层大气产生影响和效应的一般规律（图2）。空间天气学是一门把日地物理科学与地面和空间技术的应用紧密结合在一起的学科，是一门多学科多技术领域高度交叉综合的新学科。

2. 空间天气学发展史

在“空间天气”一词出现以前，研究太阳与地球之间的空间中自然现象及其内在规律的学科叫做“日地空间物理学”，或称“空间物理学”。如前所述，人类注意到



图1 地面观测到的空间天气现象——北极光

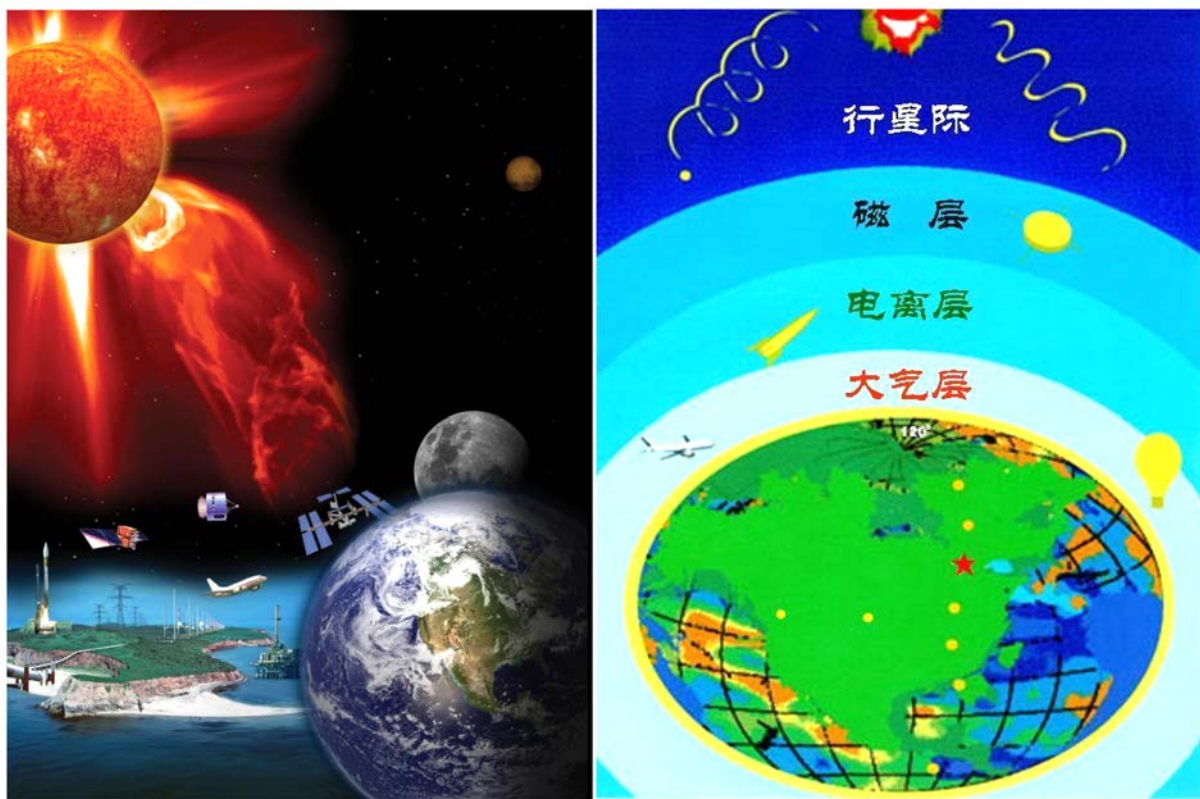


图2 空间天气学的研究区域示意图

空间天气造成的极光已经有几个世纪了。此外，1600年，英国科学家吉尔伯特在 *De Magnete* 一书中曾经描述到，中世纪欧洲航海家曾用天然磁石作磁罗盘导航仪，发现石头的方向有时候会偏离磁北极。1840年记录到空间天气第一次在不同地区不同时段影响到电报业务。1859年的巨烈的太阳风暴中断了全球的电报业务。英国天文学家卡林顿（Richard Carrington）把这次中断与一天前观测到的太阳耀斑以及与电报中断同时发生的地磁场大偏转（磁暴）联系起来。后来，挪威学者伯克兰（Kristian Birkeland）通过在实验室人工制造极光解释了极光的物理过程，并推测出太阳风的存在。随着无线电在商业和军事领域的应用，人们注意

到通讯有时会极端平静，有时噪声严重。1942年，一个大太阳事件期间雷达受到的严重干扰导致了太阳射电爆的发现。

但20世纪40年代的空间环境研究只是电离层探测研究，是美国军方为解决二战中发生的通信、导航等问题而开始的。随着人造地球卫星、洲际弹道导弹、宇宙飞船、空间站发射升空等空间活动的不断增加，空间环境的探测范围逐步从电离层、中高层大气，扩大到了磁层，乃至整个日地空间。1957～1958年的国际地球物理年（IGY）大大促进了空间天气研究。IGY期间获得的地基数据表明，极光发生在距离磁极15～25纬度，宽5～20度的极光椭圆带上，是一个永久的发光区域。1958年，

Explorer I 卫星发现了范艾伦带，即辐射粒子被地球磁场束缚的区域。1959年和1961年，苏联 Luna 1 和美国 Mariner 2 卫星分别直接观察到了太阳风。随着军事和商业系统对空间天气影响的依赖性增强，人们对空间天气越来越感兴趣。通信卫星是全球贸易的重要组成部分，气象卫星系统提供地面天气信息，全球定位系统的卫星信号广泛用于各种各样的商业产品和过程。空间天气现象会干扰这些卫星的无线电上行和下行信号，甚至损坏卫星。空间天气现象会在长距离输电线路中产生有损害作用的浪涌电流，也会使飞机上的乘客和机组人员暴露在辐射之中。

这些认识吸引了学术界对空间天气的广泛关注，“空间天气”

一词在 20 世纪 90 年代开始密集出现, 美国的科学家率先系统地将日地空间中发生的自然现象与人类技术系统(特别是卫星系统)的故障联系起来, 并借用“天气”对人类活动的影响来说明日地空间状态对技术的影响, 其内涵与外延大大超过以往的“日地空间物理学”。中国学者在国际上首次提出并使用一个新的学科名称——“空间天气学”。

各国在开展空间天气研究的同时, 逐步建立起较完善的覆盖全球各空间层次的空间天气探测系统, 研制出一批空间天气描述和预报模式, 并于 20 世纪 90 年代初, 初步具备了提供空间天气预报、警报的能力。这标志着国际空间天气研究已经从基础理论研究、工程设计和建设走向了应用和服务。

3. 空间天气学研究内容

空间天气扰动的源头主要来自太阳, 包括太阳上各种各样的短时间尺度的太阳活动, 以及与之相关的较长时间尺度的太阳输出变化。太阳活动的时间尺度很广, 从著名的 11 年太阳活动周期, 到 27 天太阳自转周期, 再到爆发中的亚秒。现代高技术社会对地球外的扰

动正变得越来越脆弱, 特别是对那些由太阳爆发引起的事件。恶劣空间天气条件主要由耀斑(太阳大气最大的能量释放现象)和日冕物质抛射(太阳大气最大规模的物质抛射现象)(图 3)引起。此外, 由太阳偶尔喷发出来的高能粒子, 即太阳能量粒子, 有时在耀斑发生后几分钟内就可到达地球。它们可以穿透太空探测器的外壳, 降低甚至损坏技术系统的灵敏性, 因而受到特别关注。极端事件发生时, 太阳能量粒子可使极区大气层电离化, 产生硝酸盐, 沉降陷入到地球极地的冰中。

地球周围的磁场空间, 被来自太阳的带电粒子(即太阳风)包围成彗星状区域, 这就是地球磁层(图 4), 其中大量的高能电子(大于 100 keV), 被捕获在离地心 1.2 ~ 8 个地球半径的磁壳区域, 这就是我们常说的辐射带。辐射带是太阳-行星际空间与地球磁层、电离层和热层关系链中非常重要的部分, 距离地心 1.2 ~ 2 个地球半径处的内辐射带高能电子分布相对稳定, 而距离地心 3 ~ 8 个地球半径处的外辐射带电子分布随地磁活动的变化而变化。南向行星际磁场/高速太阳

风持续几小时会引起磁层最大的扰动现象, 即磁暴, 常伴有强极光, 对地面技术系统和航天器产生不良影响。太阳活动对地面技术系统的效应是空间天气应用和服务的重要内容。其中对地磁环境的效应, 特别是地磁传导电流和其他地面效应最受关注。地磁效应是在地面上可以观测到的, 电离层和磁层电流系统引起的地磁场扰动的直接结果, 对人类生活质量、技术性能和经济状况都有潜在的影响, 特别是地磁扰动可影响电网, 电力供应在地磁扰动之后停止的许多事例已引起广泛关注。

在大气层的高层部分, 存在着中性粒子。这些中性粒子在选择性地强烈吸收部分太阳辐射后, 大气受到加热。从中层顶(位于约 85 ~ 90 km)向上, 大气温度随高度增加而显著上升, 随后温度变化趋势减缓, 趋向于随高度不再变化, 中层顶以上的这一区域在大气层中温度最高。根据大气层的温度特征, 人们将这一部分大气层称为热层。在热层的下面, 分别存在着中层、平流层和对流层(图 5)。地球以上 60 ~ 1000 km 的区域存在着大量的自由电子, 这就是我们

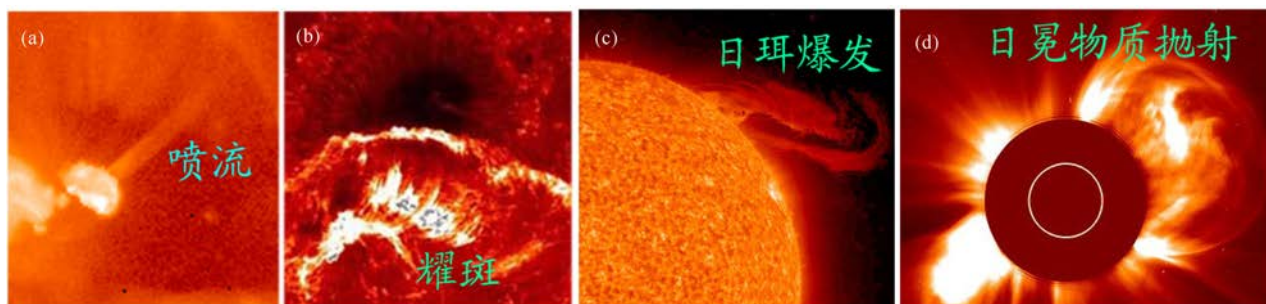


图 3 各种太阳爆发现象 (b) 图增亮的耀斑上方的黑色区域为太阳黑子; (d) 图的白圈标示日面边缘
(引自: 王劲松、吕建永, 《空间天气》, 北京: 气象出版社, 2010)

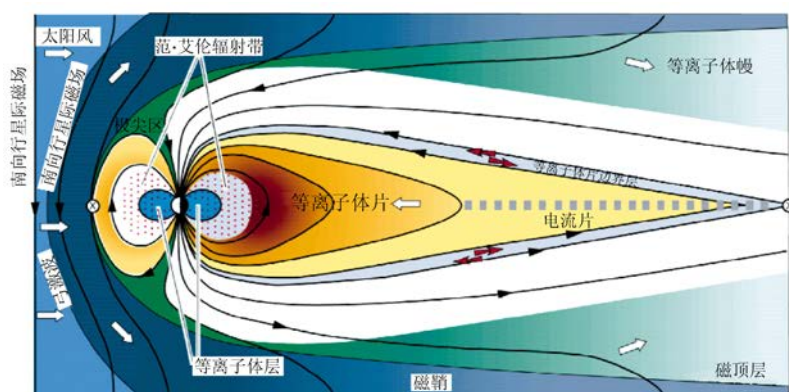


图4 磁层结构示意图 (引自:《空间天气》)

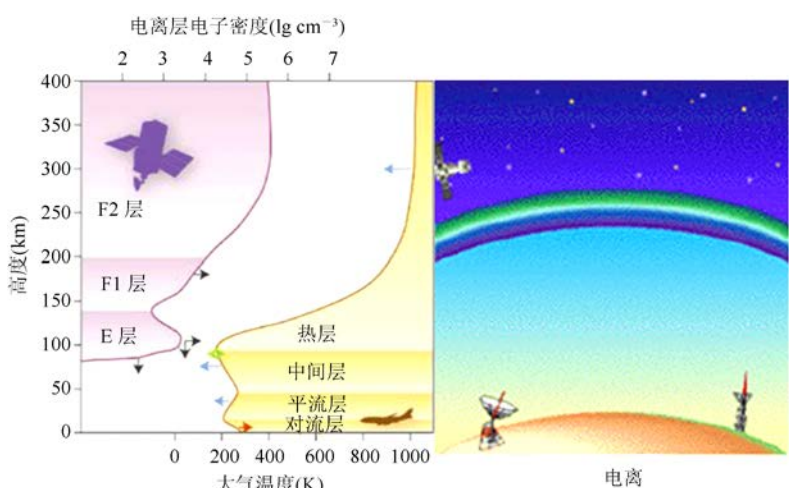


图5 电离层结构示意图

常说的电离层。电离层在高度上存在着清楚的分层特征,如图5的左图所示。根据白天电子浓度的高度分布特征,电离层由下向上依次划分为D层、E层、F层(F层又进一步区分为F1层和F2层)和顶部电离层(图5)。电离层对太阳活动和地磁暴有着积极的响应。电离层显示出非常复杂的动力学变化特征,大部分过程是由太阳和磁层驱动的,对通信和卫星定位以及导航系统的运行有重要的影响。

地球热层、气候系统与太阳的相互作用也是空间天气的重要研究内容。虽然现在已经了解了太阳以及地球热层与气候系统的许多相关

过程,但是对于它们之间的确切关系以及这些系统的预测目前还不清楚。

导致这种情况的原因很多,最主要的是其中的一些重要的物理、化学和生物学机制还不能被有效地量化,甚至有些还不能确定,整个系统在很大的空间尺度与多种时间尺度上存在复杂的相互作用与反馈。图6显示了气温变化与太阳活动的关系,其中细红线表示年度全球气温变化,深红线表示11年平均气温变化值;细蓝线表示年度太阳发光总量,深蓝线表示11年平均发光量变化值。

空间天气学就是空间天气(状态或事件)的监测、变化规律研究、建模、预报、效应、信息的传输与处理,对人类活动的影响,以及空间天气的开发利用和服务等方面的集成。

空间天气学的基本科学目标,是把太阳大气、行星际与地球的磁层、电离层和中高层大气作为一个有机系统(图2),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

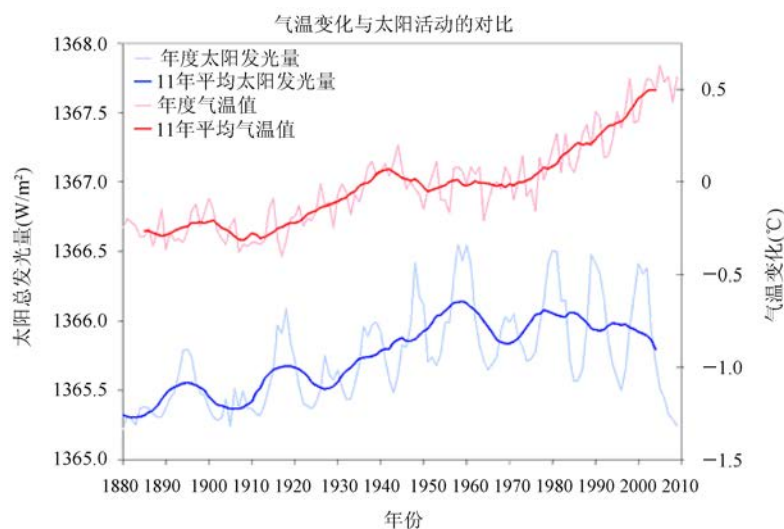


图6 太阳活动与气温变化

(引自 <http://www.skepticalscience.com/translation.php?a=18&l=14>)

间灾害性天气过程的变化规律。当前开展的主要科学课题涉及：太阳活动过程和物质输出结构研究；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，就是减轻和避免灾害性空间天气对高科技技术系统所造成的昂贵损失，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；为重要空间和地面活动提供空间天气预报、效应预测和决策依据；为效应分析和

防护措施提供依据；为空间资源的开发、利用和人工控制空间天气探索可能途径，以及制定有关空间政策，等等。

4. 研究特点

空间天气学是一门理论与实践紧密结合的应用学科。空间天气学始于航天、航空、导航、通信、能源、国防等对空间天气预报的需求，准确的空间天气预报是空间天气学研究的主要目标。由于等离子体运动的复杂性和空间天气的多变性，空间天气预报的水平与实际需求差距巨大，仅相当于气象天气预报 20 世纪五六十年代的水平。空间天气的变化规律和预报精度还需要进一步的研究和提高。

空间天气学是根据实际观测资料概括出其变化规律和模式，并以空间物理学为理论基础进行研究的学科。由于空间天气覆盖的空间和时间范围巨大，有限的局域观测无法从整体上把握其变化规律，而且绝大部分的空间天气现象都无法在实验室中进行观察，各圈层又存在复杂的耦合，因此需要把太阳大气、行星际、磁层、电离层和中高层大气作为一个整体“实验室”进行研究。

空间天气学是多种学科（太阳物理、空间物理、地球物理、大气物理、宇宙线物理、等离子体物理、磁流体力学、数值计算、图像处理等）与多种技术（信息技术、计算

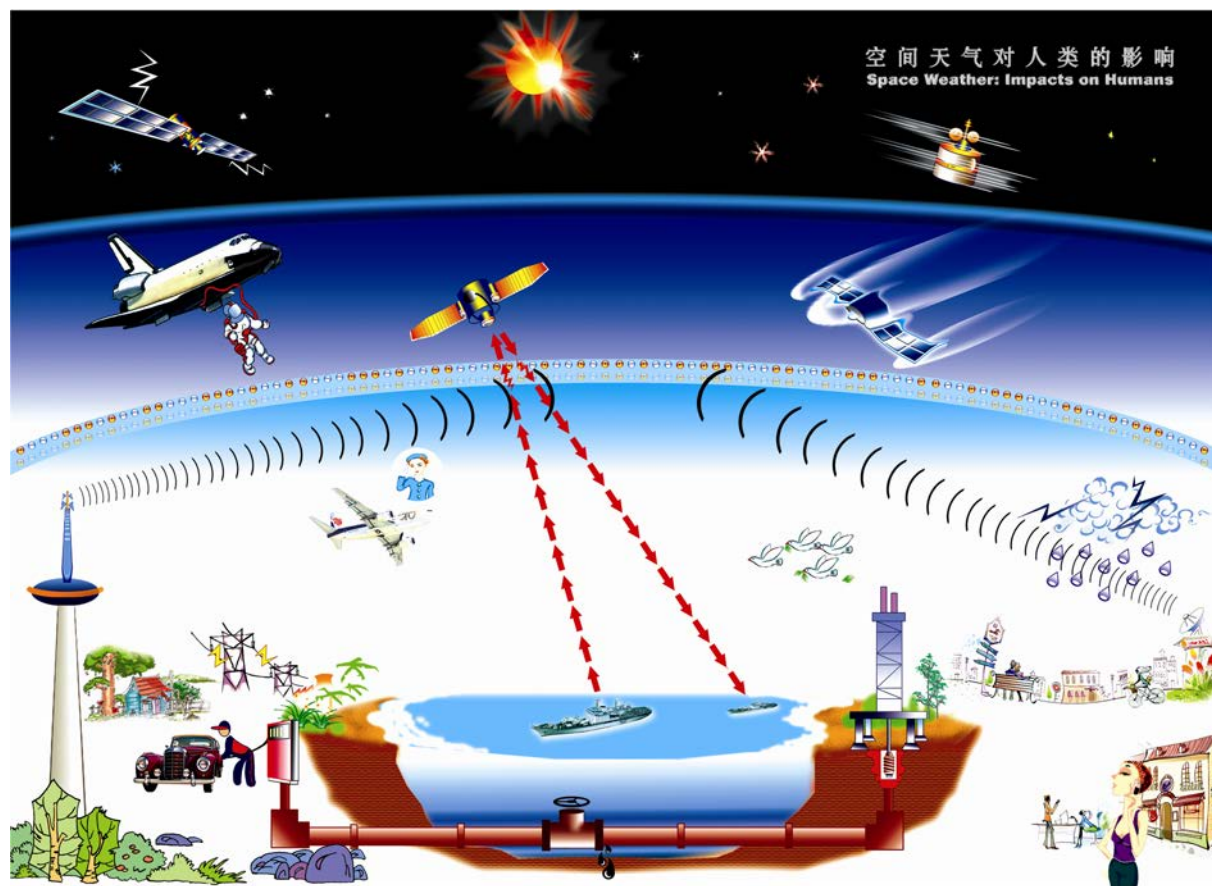


图 7 空间天气对人类的影响（引自：《空间天气》）

机技术、各种探测技术和成像技术、空间和地面技术系统与环境相互作用等)的高度综合与交叉。与“空间环境”主要关注航天系统不同,“空间天气”关注所有可能受到日地空间自然过程影响的技术系统。

空间天气学正在从以研究为主阶段逐渐向应用和服务阶段转化,从描述向预报转变,从定性向定量转变;目前,已经建立并逐渐完善了各种空间天气模式,范围从空间天气的源——太阳、太阳风,一直到电离层和热层。预报进入实施并广泛发布阶段,美国、澳大利亚和欧洲航天局(ESA)等国家和区域组织均已通过互联网发布预报。

5. 灾害性空间天气

如同天气有好有坏一样,空间天气也有好坏之分。当空间天气变化十分剧烈时,会对人类技术系统产生严重的影响,这种空间天气被称为灾害性空间天气。灾害性空间天气可使卫星提前失效乃至陨落,通信中断,导航、跟踪失误,电力系统损坏,危害人类健康(图7)。

1989年3月6~19日发生的太阳大耀斑以及由此引起的地球强

磁暴,是几十年来给人类造成影响和损失最严重的灾害性空间天气事件之一。卫星SMM等轨道高度下降,日本和美国通信卫星发生异常,美国GOES-7卫星的太阳能电池损失了一半的能源,致使卫星寿命减少一半,全球无线电通信异常,轮船、飞机的导航系统失灵,美国核电站变压器烧毁,加拿大北部电网烧毁,美国、瑞典以及日本的电力系统也受到了不同程度的损害,引起国际社会的震惊和对灾害性空间天气的强烈关注。

因此,灾害性空间天气及其对航空航天、通信、电力等影响的研究将成为未来研究和发展的重点。而空间天气灾害和事后分析研究,包括空间天气灾害的监测系统、技术系统的灾害影响评估和应对分析、空间天气灾害的预报和灾害标准体系等研究,已成为为高科技发展保驾护航和进行空间天气服务的基本需求。

6. 展望

空间天气研究正经历一个前所未有的发展时期,空间天气的预报和应用特性使它不同于传统的空间物理学研究。空间天气是一门应

用科学,更准确地说,是一门由纯科学和应用科学在空间领域交叉定义的使能科学。

空间天气正从描述性研究向预报性研究转变,从定性研究向定量研究转变。空间灾害性天气的发生和发展,是太阳活动-行星际空间扰动-地球空间暴的连锁变化过程,它伴随着一系列人类尚未认识的基本物理过程。随着社会经济发展和国家安全需求的日益增长,空间天气的研究得到迅速的发展。未来十年,空间天气保障能力将实现新飞跃。提升空间天气保障能力、降低危害效应是空间天气科学的主攻战略任务。

作者简介

吕建永,理学博士,博导,中国气象局特聘专家,南京信息工程大学特聘教授,中国空间科学学会空间物理专业委员会、中国地球物理学会空间天气专业委员会以及中国气象学会极地与冰冻圈气象专业委员会委员。目前主要从事空间天气数值模拟、太阳风-磁层-电离层耦合等研究工作。

(南京信息工程大学数学与统计学院 210044)

科苑快讯

细胞内的纳米温度计

如果高价耳温计不能足够准确地告诉你,宝宝是否发烧了,那就试试你的订婚戒指吧。研究者已能用直径100纳米的钻石探知注入纳米金粒子的细胞内0.044℃的微小温度变化。当原子离开钻石晶格

产生所谓氮晶格空位中心,被绿光照射时,它们将基于温度变化发出不同强度的红光。通过监控光的强度就可作为一个超级准确的原子尺度温度计。

科学家利用纳米硅传感器将纳米金粒子和钻石晶体(想象图中的灰色晶体)注入活细胞。当纳米金粒子被激光束加热时,钻石温度计就能监控细胞不同部分的温度变

化。研究者已将该发现发表在《自然》(Nature)杂志上,利用这一技术也可确定杀死细胞需要多少热量。他们希望这一发现能够有助于细胞生物学的基础研究甚至是用于癌症检测,因为恶性组织的快速新陈代谢会提高温度。

(高凌云编译自2013年7月31日 www.sciencemag.org)