

太阳的光辉

颜毅华

(中国科学院国家天文台 100101;中国科学院太阳活动重点实验室 100101;
中国科学院大学天文与空间科学学院 100049)

人类处在天地之间,每日目睹昼夜更替,每年经历寒暑变迁。“日居月诸,照临下土”。人类在阳光下生活、生存,与生具备的亘古不变的好奇心,也一直激励人们关心周围的自然现象,“日月安属?列星何陈?”几千年来,人类历经世代更迭,观念更新,从以地球为中心的地心说到以太阳为中心的日心说,直至1609年伽利略开始使用望远镜观测太阳黑子,人类对太阳逐渐有了正确的科学了解。到国际天文学联合会(IAU)成立的1919年为止,人们已经发现了太阳光谱中的大量谱线(Fraunhofer, 1814);发现了太阳黑子的蝴蝶图分布及其11年活动周期(Schwabe, 1843);发现了剧烈的太阳耀斑活动(Carrington, 1859);通过日食期间的太阳光谱观测,发现了一种新元素:氦(Secchi, 1868),次年又发现了一条与众不同的谱线,它与当时所有已知元素的谱线

都不吻合,以为是发现了另一种新元素;此外,还发现了太阳黑子具有强磁场(Hale, 1908),这是人类首次在地球以外的天体上发现磁场。这些工作为太阳物理以及天体物理的发展奠定了重要基础。

国际天文学联合会(IAU)成立之初,在太阳物理研究方向成立了太阳辐射专业委员会,历经百年运行,目前在国际天文联合会框架下演变为太阳与日球分会,下分太阳辐射与结构、太阳活动、和太阳在日球中的作用三个专业委员会,致力于研究太阳的变化、活动和动力学,及其对地球和日球层内其他天体的影响。我们特此回顾太阳物理一百年来的发展,展示人类对日地空间环境认识的改变,以纪念IAU成立100周年。

IAU成立伊始,英国皇家学会和皇家天文学会于1919年11月6日举行联合会议,正式宣布英国著名学者爱丁顿关于当年5月29日日全食观测的结果及结论。按照爱因斯坦的理论,当光线通过引力场的时候,路径会发生弯折。当发生日全食的时候,太阳附近的恒星将不再被太阳的光芒掩盖,并且由于太阳引力的作用,远处恒星发出的光线在到达地球之前发生了弯折,因此我们所看到的恒星位置将偏离它们的实际位置。爱丁顿通过观测日全食时太阳附近星体的位置,证实了广义相对论,使崭露头角的爱因斯坦瞬间成为世界公认的科学家。在日全食时,人们会看到日冕,由于日冕的光度比太阳弱1百万倍,平时看不到。1930年,法国科学家Lyot发明了日冕仪,从而可以随时观测日冕。

1938年,生于德国的美国物理学家和天文学家Bethe提出了太阳的能源来源于质子-质子反应链和

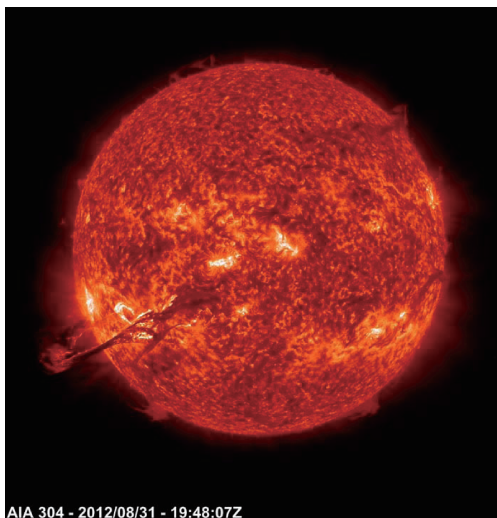


图1 这是美国SDO卫星观测到的一次普通太阳耀斑,被评为美国NASA最佳空间探测图像之一。该爆发过程在电影《流浪地球》中用作展示太阳爆发活动的片段(SDO/NASA网站)

碳氮循环链的核反应过程,从而解决了恒星发亮的能源问题。这一贡献使他获得了1967年度的诺贝尔物理学奖。

1942年,英国科学家Edlen将70多年前日全食观测发现的那条奇怪的日冕谱线解释为铁原子13次电离而产生,这很快得到人们的普遍接受。但由此又产生了一个新问题,日冕温度必需达到百万度以上才能使铁原子产生13次电离。日冕这么高的温度又是如何产生的呢?众所周知,太阳核心区热核聚变反应释放的能量向外传播,太阳各层次的温度必然是从里向外逐渐降低的。日冕温度竟然比其内层的光球高2~3个数量级,这有违常识并且严重违背热力学第二定律!这便是日冕加热之谜。高温日冕的发现至今又过了70多年,其形成之谜仍是太阳物理乃至天体物理学中悬而未决的一个老大难的问题。2012年国际著名杂志*Science*发表了当代天文学的八大难题,日冕加热之谜与暗物质和暗能量等问题一起,成为当代天体物理领域面临的重大难题之一。

同样是1942年,瑞典科学家Alfven在太阳黑子的研究中发现了太阳电离气体(即等离子体)的磁流体波,现在称之为Alfven波。它是等离子体中的一种沿磁场方向传播的波,这种波的频率远低于等离子体的回旋频率。以前人们认为通常在流体中不会有剪切波,但是处在磁场中的导电流体在垂直于磁场的方向上受到局部扰动时,沿着磁力线方向的磁张力将提供恢复力,于是便可以激发Alfven波。1949年当著名物理学家费米在听到Alfven的报告之后,点头说了句“当然是这样!”从此在科学界得到广泛公认。1970年Alfven因在磁流体动力学方面的基本研究和发现,及其在等离子体物理中卓有成效的应用而获诺贝尔物理学奖。

还是在1942年,在第二次世界大战期间,英国发现工作在波长为4~6厘米的防空雷达突然出现了莫名其妙的射电信号剧烈增强,但却未发现德国飞机来袭。起初以为是来自德军的干扰。但是后来人们经过仔细分析,发现这个强干扰信号并不是来

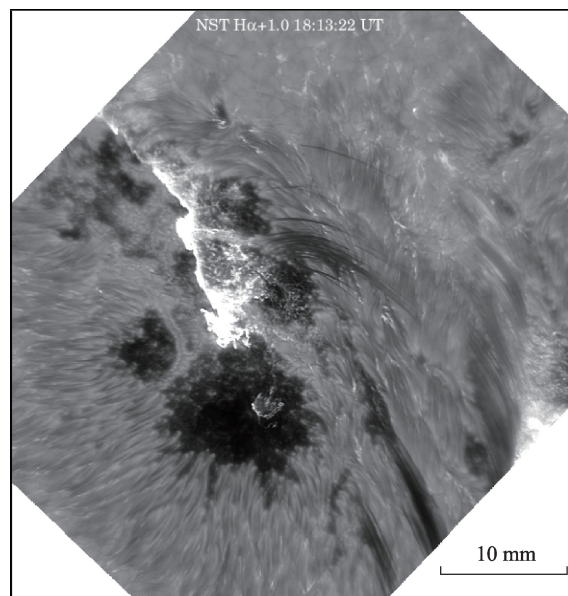


图2 目前世界最大口径的美国大熊湖天文台1.6米太阳望远镜观测到的太阳黑子与耀斑(曹文达供图)

自敌方,而是对应太阳耀斑的射电爆发。其实在19世纪爱迪生曾提出观测太阳无线电辐射,但试验未成功。19世纪末德国人曾在玻兹坦最早发表学术文献介绍观测太阳射电辐射的试验装置,也未提及观测结果。英国关于太阳射电的研究结果在战后发表以后,导致了太阳射电天文学的蓬勃发展,成为研究太阳物理的一个重要手段。人们发现太阳上不但在可见光波段可以观测到爆发现象,在射电波段同样也可以观测到强烈的爆发现象,称为太阳射电爆发。太阳射电爆发的研究对天体物理和等离子体物理都具有重要意义。太阳射电观测设备也从射电流量计、频谱仪发展到射电日像仪,目前更向射电频谱日像仪发展。我国新建成了国际先进的厘米分米波段的明安图射电频谱日像仪(MUSER),将在太阳物理研究中发挥重要作用。

在IAU成立的最初十年里,人们还普遍以为日地之间是真空。虽然已经有一些迹象表明来自太阳耀斑的等离子体流可能会通过日地空间进入地球空间环境导致磁暴,以及连续发出的太阳微粒导致彗尾离开太阳。然而,这些问题在当时并没有引起人们的足够重视。因为磁流体力学还没有完全发展起来,人们对磁场和等离子体的相互作用也缺

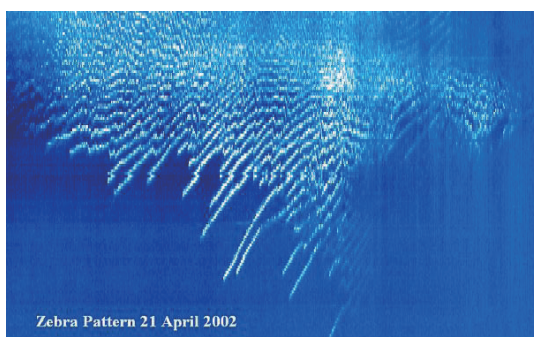


图3 国家天文台怀柔太阳观测基地观测到的极为复杂的太阳射电爆发频谱斑马纹结构,反映了耀斑活动致密核心区的动力学过程(纵轴对应2.6~3.8GHz,横轴约为2分钟)

乏充分的了解。1957年,人们根据太阳日冕为百万度高温的条件得到地球轨道附近的温度亦可达20万度。可见日冕并没有在太阳附近截止,而是会延伸到地球甚至更远的地方。因为以前一直以为地球处于真空中,这个“地球沐浴在热等离子体里”的预言使人震惊。1958年美国科学家Parker正确提出日冕不是静平衡的而是膨胀的:因为在无穷远处没有一个“盖子”来保持特定的压力,于是日冕不能平衡而必须持续不断地往外吹。他给出了无穷远处压力趋于零的非静态日冕解,并将之命名为“太阳风”。虽然Parker的太阳风解确实更符合实际。但当时并未得到承认而且引起了很大争论。直到1959年前苏联的“月球”2号和3号卫星(Lunik II & III)首次观测到确实存在从太阳方向吹出来的离子



图4 帕克太阳探针将实现人类前所未有的抵近太阳观测(PSP/NASA网站)

流所确认。随后又被1961年美国的“探索者10号”(Explore 10)和1962年美国的“水手2号”(Mariner II)卫星所进一步证实。为了铭记Parker教授的科学贡献,2018年8月12日美国发射的将于2022年飞至10个太阳半径以内实现人类前所未有的抵近太阳观测的太阳探测器便以Parker的名字命名。

人类对于太阳的了解全部来自于太阳表面通过光球层的辐射信息,对于内部则无法直接观测,只能是通过模型与表面观测数据的吻合来了解。1960年前后,人类探测到了中微子,它是作为放射性衰变的产物被发现的。其实,核聚变反应也能产生中微子。既然太阳核心在进行着大规模的热核反应,那就理应产生大量的中微子。这使得太阳成为中微子天文学研究的完美对象,从而可以确定恒星内部结构。为此,美国科学家Davis主持在美国南达科达州地下1.5千米的一个金矿里,安装了一个378立方米的大罐子,里面装满了四氯乙烯溶液(或干洗液),用它来俘获中微子。1968年首次探测到太阳中微子。但是实际在地球上测量到的太阳中微子数量只有期望数值的1/3,由此产生了太阳中微子亏损问题,称为“太阳中微子之谜”。日本科学家小柴昌俊改进了中微子的测量方法,利用位于日本神冈町地下的中微子探测装置探测再次证实了类似的现象。这说明,要么是我们对太阳内部的核聚变过程理解错了,要么是中微子发生了某些奇怪的变化。这个问题直到20世纪90年代末才得以解决。随后发展起来的日震学使人们确认太阳内部结构模型是正确的。后来,人们通过核反应堆中微子产生的电子反中微子消失的实验,完全揭示了“太阳中微子亏损”的秘密。小柴昌俊还利用日本神冈中微子探测装置探测到一次遥远超新星爆发过程中释放出的中微子。由于他们在探测太阳和宇宙中微子方面的开创性贡献,Davis和小柴昌俊获得了2002年的诺贝尔物理学奖。

1962年,美国科学家Leighton与其学生们使用非常精密的强力分光仪拍下太阳的光谱照片,从中发现太阳表面普遍存在不停地上下振动,振动周期

大约为5分钟。人们将这种振荡现象称为太阳5分钟振荡。由于太阳是一团炽热的火球,起初人们以为这就像大海表面的随机波动现象一样,5分钟就出现一波巨浪,浪高可达25千米,振荡气体的平均运动速度为0.5~1.0千米/秒。就连 Leighton 等人在发现5分钟振荡的那篇论文中也以为人们难以精确测定甚至不可能计算出所观测的振荡模式。在1960年代中期有人确实通过数值模拟随机波动重现了这种5分钟振荡结果。但是,1970年一位年轻的美国科学家 Ulrich 革命性地指出这种振荡可能是太阳内部的本征震荡模式在太阳表面的响应,并且预测了这种本征模式的频率和空间波数应该呈现离散的分佈关系。1975年德国科学家 Deubner 通过观测证实了 Ulrich 的结果,从而开启了日震学的科学时代。如果说 Leighton 等和 Ulrich 的论文宣告了日震学的诞生,那么 Deubner 的工作就是日震学的成人礼。太阳竟然能够像固体钟那样产生共振,太阳表面的振动是由太阳内部上千万个具有不同周期和波长的共振声波模式的叠加所引起的。声波是一种比较简单的压力波,它可以通过任何媒介传播,太阳的声波是与地球内部地震波有些相像的连续波,它们传播的速度和方向依赖于太阳内部的温度、化学成分、密度和运动。与地球物理学家通过研究地震波去查明地球内部的构造模式相类似,天文学家可利用太阳的振动,去窥探太阳内部的奥秘。日震学开启了人类研究太阳以及恒星内部的另一扇窗户,并且在解决太阳中微子问题中发挥了重要作用。基于日震学的太阳标准模型能够以0.1%的均方根误差准确预测0.05至0.95个太阳半径范围内的声波速度误差,从而导致人们进一步思考中微子基本物理问题,最终带来了突破。

自从美国科学家 Hale 发现太阳黑子磁场以来,人们发现太阳黑子在不同的11年活动周期里实际上对应着不同的磁场极性,亦即太阳活动为22年的磁活动周期。太阳磁场每11年极性要反转一次。而磁流体力学的发展使得人们发现宇宙磁场的磁冻结效应,即恒星尺度的磁场衰减时间可长达宇宙

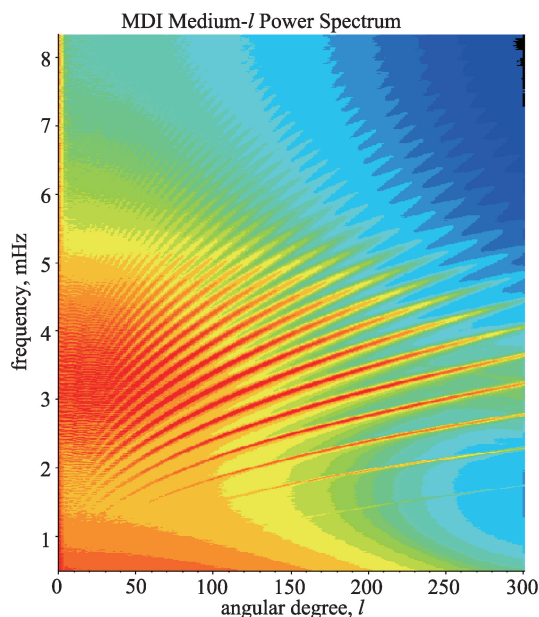


图5 基于美欧合作发射卫星 SOHO 上的载荷 MDI 观测数据获得的太阳震荡功率谱,图中脊线就是许许多多震荡模式形成的分布结果。(MDI/SOHO 网站)

寿命。那么太阳磁场的11年变化就必须有一个发电机过程在起作用。但是,1934年英国科学家 Cowling 证明,在轴对称磁场和速度场的条件下,不可能形成一个自激层流发电机。这是因为:若把磁场分解成环向分量和极向分量,则环向分量可由较差自转与极向分量相互作用产生的感应电动势而得到增强;但是,极向分量却没有相应的感应电动势的来源,即不存在由较差自转与环向分量相互作用而产生感应电动势来增长与维持极向分量的过程;因此,最初存在的极向分量终将衰减消失,而环向分量随极向分量的消失也终将消失。1955年美国科学家 Parker 提出了湍流平均场发电机理论,其中湍流的存在使得极向分量可以有相应的感应电动势来得到增长。随后的发展使得人们可以重现太阳的11年活动周期以及黑子分布蝴蝶图。然而,虽然我们对太阳活动周的观测日益增多,目前还不能依据基本物理原理可靠预报未来太阳活动周的开始时刻和幅度。因此太阳活动周的起源问题迄今仍是太阳物理的重大科学问题。

自从人类进入空间时代以后,太阳物理才有了突飞猛进的发展。1971年,美国 OSO-7 卫星首次观

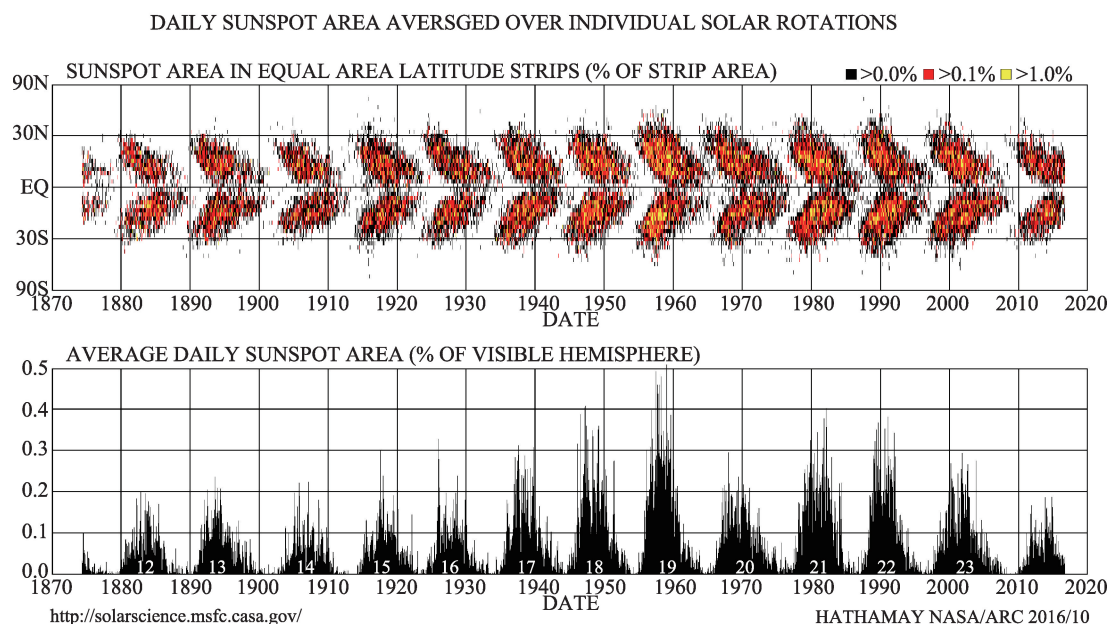


图6 太阳活动蝴蝶分布周(MSFC/NASA网站)

测到日冕物质抛射。人们已经知道太阳光和太阳高能粒子会离开太阳传播出来,没想到太阳上的普通物质:磁化等离子体团也会脱离太阳的巨大引力抛射出来,这是又一次对人类认识的突破。人们后来发现日冕物质抛射是产生灾害性空间天气的一个主要驱动因素。1973年,美国 Skylab 航天器上天,首次观测到日冕软 X 射线环状结构,从而改变了人们以前对太阳大气的简单均匀分层结构的认识。软 X 射线望远镜显示了日冕的新面孔:发现日冕是由冕环组成的新世界,具有冕洞(磁场开放区和快速太阳风源区)、冕环和 X 射线亮点(磁场相互作用区)三元结构。1980至1989年间,美国 SMM 卫星上天观测,首次实现了太阳的硬 X 射线耀斑成像。1990至2008年间,美国与欧洲联合发射 Ulysses 探测器,这是一颗太阳极区和恒星际环境探测器,第一次实现人类从三维立体角度探测太阳的南北极。1991至2001年间,美日欧合作发射的 Yohkoh 卫星上天观测,是当时世界上唯一一台监视太阳活动的 X 射线望远镜,记录下了一个完整的太阳活动周期内的图像,发现了冕环顶的硬 X 射线源,发现了软 X 射线喷流,取得了一批重要成果。1995年,欧美共同研制的 SOHO 卫星上天观测至今,揭示了

太阳大气层的自然状态,磁场和日冕之间的关系,并且在轨道上发现了 1000 余颗彗星。1998 至 2009 年间,美国 TRACE 卫星上天观测,为研究太阳的日冕结构、加热机制、光球层磁场的变化等课题进行了大量的观测。2002 至 2018 年间,美国发射 RHESSI 卫星上天进行高能太阳谱成像观测,发现了太阳耀斑中大量的高能物理过程,其伽马射线源与 X 射线源并不一致。这种空间差异完全是出乎意料的,因为 X 射线通常代表电子的活动,而伽马射线则代表质子和其他较重的带点粒子,也可称为离子。说明在不同情况下可激发不同粒子群的运动。从 2006 年至今,日美欧合作的 HINODE 卫星上天,能够对太阳的低层大气进行详细的观测,而且还是第一部能够测量太阳三维矢量磁场的太空望远镜,发现太阳一直是动态变化的。同年美欧合作的 STEREO 探测器上天,由两颗航天器组成,部署于太阳两侧,一颗在地球前进方向的前方,另一颗在后方,并以此获取太阳的三维立体图像。2007 年,STEREO 首次实现了对太阳整个球表面的多视角同时观测图像,2009 年,STEREO 首次获取了日冕物质抛射的立体观测图像。目前它们已经飞出了太阳背后,逐渐朝向地球,一颗仍然工作至今。

2010年,美国发射了SDO卫星,这是国际上迄今最强大的、太阳极紫外多波段和矢量磁场的高分辨率成像望远镜,旨在研究太阳活动的起因以及太阳活动对地球环境影响的科学计划。通过SDO的观测人们发现了太阳宁静大气中普遍存在龙卷风现象、太阳活动区的滑动磁重联、环形耀斑双带等现象,这些结果有助于理解太阳风暴的产生及其对地球环境的影响。2013年,美国IRIS卫星发射上天,它携带的紫外线望远镜能以高时间分辨率观测太阳获得高精度和高分辨率的图像与光谱,研究太阳低层大气的物质运动、能量积聚和加热过程。如前所述,2018年,美国航天局首次以在世的科学家的姓名命名发射了Parker Solar Probe探测器,它以椭圆轨道绕日飞行,通过7次经过金星附近时的引力变轨逐渐靠近太阳,最终以前所未有的距太阳不足十个太阳半径抵近探测,追踪加热和加速太阳日冕和太阳风的能量流动,研究太阳风源的等离子体和磁场的结构和动力学特征,探索高能粒子的加速和运动机制。从而为人类解开更多有关太阳及太阳风的谜团。未来几年,欧洲将发射Solar Orbiter以倾斜椭圆轨道近距离、高纬度观测太阳。我国也将发射ASOS,同时观测太阳磁场、耀斑和日冕物质抛射。

在当代太阳物理研究中,以空间探测为主导,开始了全波段、全时域、高分辨、多尺度、多视角和高精度探测的时代,已实现太阳极区和日面背后探测;地基已建成一批1米级太阳光学望远镜,包括美国

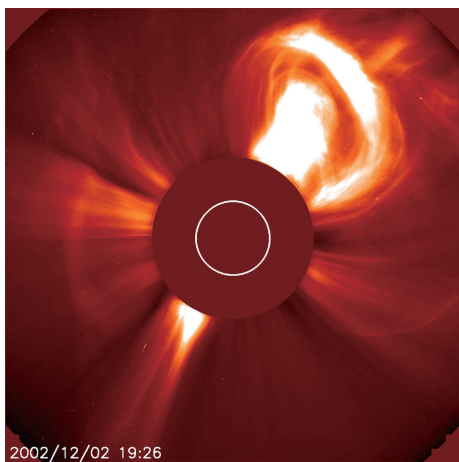


图7 美欧合作发射的SOHO卫星观测到的一次日冕物质抛射。白色圆圈表示太阳大小(SOHO网站)

1.6米GST,德国1.5米Gregor,瑞典1米SST,中国1米NVST和在建的1米红外太阳磁场测量系统AIMS,目前美国在建4米级DIKST太阳望远镜。地基太阳射电望远镜在朝宽带频谱成像观测方向发展,包括中国的MUSER,俄罗斯的西伯利亚日像仪SRH和美国计划的FASR(其先导项目EOVSR)等。

基于上述观测,将太阳表面行为与内部特征联系起来,将太阳表面磁场与太阳大气和活动联系起来,从而极大地推进了对太阳物理基本问题的理解。未来将进一步向小于0.1角秒高时空分辨和更近日距离立体观测方向发展。

一百年来,太阳物理的发展取得了辉煌的成就,促进了人类社会的进步。一方面,太阳作为唯一一颗可在所有参数上进行高精度详细观测的恒星,是天然的天体物理实验室。理解太阳所告诉我们的基本物理过程,有助于认识宇宙中其他地方发生的现象。另一方面,由于太阳的变化会影响空间环境以及人类在空间和地面的社会活动,需要了解太阳活动的本质及其产生极端空间天气的风险。

太阳主宰着地球与万物生长,人类在太阳的光辉照耀下,在过去的一百年里,对太阳以及日地环境的认识有了崭新的了解。然而,诸多困惑与不解之谜仍然存在,等待着人们去探索,洞悉太阳演化,庇护地球家园。

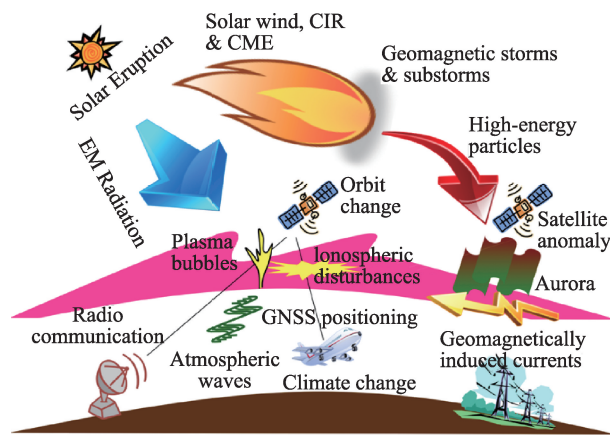


图8 空间天气即太阳活动对地球空间环境的影响示意图 (SCOSTEP网站)

(本文参考了众多文献,此处略。特此致谢。)