

太阳活动的缓变与瞬变特征

■ 王华宇 闫岩

引言

太阳是唯一一颗能让我们仔细观察到其表面细节的恒星，它还是一颗球对称和稳定的恒星。因此，从认识恒星的角度来看，对于太阳的研究对整个天体物理学来讲是必要的，而且是重要的。但是大量观测表明，太阳除了稳定和均匀地向四面八方发出辐射的同时，它的大气中的一些局部区域，有时也会发生一些发生时间相对短暂的“事件”。例如，在太阳光球中，往往可以观测到许多比周围明显黑暗的点状小片区域（太阳黑子）和比背景较为明亮的浮云状小片区域（光斑）；在色球中，也可经常观测到比周围明亮的大片区域（谱斑）和突出于色球平均高度之上奇形怪状的太阳物质（称为日珥，或者暗条）；日冕中也可观测到许多不均匀结构。特别是在色球和日冕的大气层中，偶尔还会发生表明有巨大能量释放或者巨大质量抛射的太阳爆发现象。上述这些现象不仅存在时间比较短暂而且不断变化，并且往往集中在太阳黑子附近的太阳大气的局部区域。

太阳大气中的短暂事件属于太阳

活动的瞬变现象，太阳黑子数量的多寡变化、太阳电磁辐射的长期变化等属于太阳活动缓变现象。

太阳活动缓变主要影响地球环境的长期变化，因而与地球的气候和地质演化有联系；太阳活动瞬变主要影响地球环境的短期变化，形成空间天气事件，对人类的诸多高技术系统产生危害。

太阳活动的特征

太阳活动，实际上指的是在太阳大气中的活动现象。包括太阳黑子、光斑、谱斑、耀斑、日珥，以及日冕物质抛射、射电暴、太阳质子事件等瞬变事件。对于瞬变事件，我们现在主要关注的还是太阳耀斑、日冕物质抛射两种最重要的太阳活动，因为他们二者对于我们的影响非常大。除了时间尺度较小的瞬变事件外，太阳黑子还存在着长期变化的缓变特征。

太阳活动的缓变特征

太阳活动缓变特征可以从多种太阳观测现象中体现出来，如太阳黑子数、太阳常数、太阳10厘米射电流量长期变化等。由于太阳黑子数观测历史记录最长，因而黑子数量变化是常用于表征太阳缓变特征的物理量。

当太阳在地平线附近的时候，我

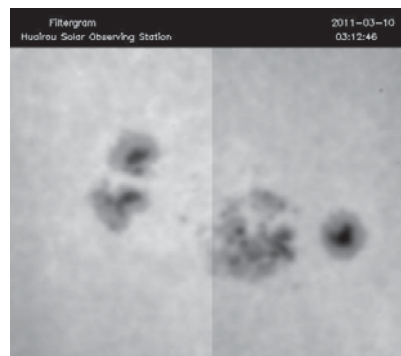


图1 太阳白光像，黑点区域为太阳黑子，拍摄于北京时间2011年3月10日11时12分

们甚至可以用肉眼分辨出太阳黑子来。黑子源于日面出现的小黑点，但是并不是任意的小黑点都能发展成黑子。当小黑点的尺度增长到5"以上时，它本身就形成了黑子的核心部分，称为“黑子本影”。在本影的周围开始出现灰暗的区域，此区域亮度超过本影，但是还是暗于光球背景，称为“黑子半影”。半影出现后，小黑点有强烈的向黑子发展的趋势。于是，半影的存在与否可以看做是是否为黑子的标志。黑子本影处的磁场强度与黑子的面积有关，面积越大磁场越强。大黑子本影中心的磁场强度可达4000G，到半影与光球交界处降至1000~1500G。据统计，只有约20%的黑子磁场强度大于2000G，

③进一步建设和完善我国空间天气的监测预警业务体系；④建设国家空间天气科学中心、空间天气联合预报会商中心和空间天气效应联合分析与防护中心；⑤实施我国领头的国际空间天气子午圈计划，推进全球空间天气联合数值预报中心建立；⑥共建一批航天和通信保障基地，推进我国空、天一体化保障体系建设；⑦培养一支活跃在国际科学舞台和保障空间安全的领军人才队伍；⑧健全空间天气管理、计划与协调体系，完善军民融合的运行

机制。

后记

从我国的国情出发，空间天气体制建设十分重要，可先在基础空间天气领域成立国家空间天气科学计划与协调领导小组，统筹考虑我国基础空间天气领域的发展，有利于尽快组织实施国家空间天气十年计划专项，关系实现我国空间天气科学从跟踪模仿向自主原创、引领发展转型的跨越式发展。此外，应充分发挥国家空间天气监测与预警中心的国家职能，进一步建设和完善国家空间天气监测预警

业务体系，有效应对空间天气灾害；再有，建立我国空间天气保障的军民融合共建体制十分重要，这是实现科学发展，事半功倍。最后，加大空间天气知识的科普宣传力度，使中国成为有空间天气知识的国家，这也是建设一个科学大国应有的知识水平。

（作者单位：中国科学院空间科学与应用研究中心）

约有5%的黑子磁场强度超过3000G。在黑子的一生之中，磁场强度在起始期增加很快，接着是较长保持磁场强度基本不变的时期，最后是磁场逐渐衰退的消亡期。图1是中国科学院国家天文台怀柔观测基地的太阳白光像，上面的黑点区域即是太阳黑子。

自从1611年望远镜发明以来，伽利略等许多科学家开始用望远镜观测太阳。1843年，德国天文爱好者Schwabe根据1826—1843年积累的资料，第一次指出太阳黑子数存在大约10年的周期。19世纪中叶，瑞士天文学家Johann Rudolph Wolf最早提出用以表征太阳黑子或黑子群在日面出现多少的一种指数，计算公式如下：

$$R=k(10g+n)$$

其中， R 是黑子相对数， g 代表黑子群数， n 代表黑子的个数， k 是与观测台站，仪器和观测者有关的一个参数。

德国天文学家Spörer先后指出在17世纪的几十年存在一个明显的太阳黑子数突降期，甚至有些年份根本无黑子观测记录。这个时期持续时间大约为70年，于1716年结束。几乎同时，英国天文学家，格林尼治天文台太阳部主任Maunder在1890年确认了Spörer的发现，并在1894年撰文首次提出所谓“延长极小期”

(A Prolonged Sunspot Minimum, 1645—1715年太阳活动的微弱时期)的概念。他提到，研究“延长极小期”不但可以加深我们对于太阳本身的理解，更有助于让我们了解日地关系。Eddy又根据树木年轮的同位素测定，间接地给出了延长极小期的证据，并为了纪念Maunder的贡献，把1645—1715年太阳的平静期称为“蒙德极小期”(Maunder Minimum)。

此外，Spörer还发现了太阳黑子在日面上的活动随时间变化的纬度分布也有规律性，即几乎所有太阳黑子位于 $\pm 30^\circ$ 的纬度内，而且每一个太阳周伊始，一般分布在 $\pm 30^\circ$

附近，而后逐渐向低纬度移动的规律，史称“蝴蝶图”。太阳黑子的变化规律在每个太阳活动周并不是相同的。所以，太阳活动的长期预报则主要在于预报每个太阳活动周的太阳黑子数上面。

太阳活动的瞬变特征

太阳黑子的周期规律是太阳活动的缓变现象，而太阳活动还有多种瞬变的活动现象更加重要。

■ 太阳耀斑

当太阳大气中的磁能积累到一定程度时，会突然释放，使太阳的某些波段的辐射突然地、快速地和强烈地变化，这种现象，我们称之为“耀斑”。强烈的辐射甚至可以覆盖整个电磁谱，从波长短于1埃的 γ 射线和X射线，直到波长达几千米的射电波段，几乎全波段的电磁辐射增强。

一个典型的耀斑可以分为以下几个过程：在耀斑没有爆发前，一段时期内，软X射线辐射持续增强，这个时期被称为“预耀斑相”；而稍后就进入耀斑的“爆发相”或者说“脉冲相”，在这段时间里，硬X射线和 γ 射线脉冲性增强，常有短而强的尖峰出现，而此时软X射线通量较前期上升更快；之后，进入到“渐变相”或称之为“主相”，硬X射线和 γ 射线以指数规律衰减，而软X射线继续上升，达到尖峰后再以指数规律衰减，但是时间相对较长。整个耀斑短可以仅几秒，长则可能到若干小时。图2(中国科学院国家天文台怀柔观测基地的H-alpha图)清晰地展现出一次正在爆发的耀斑过程。

经过近几年来对于耀斑的地空综合观测，人们对于耀斑的认知发生了重大转变。现在，太阳物理界普遍认为，耀斑是一个多级次辐射各种电磁波和粒子的复杂爆发过程，光学波段的现象不过是耀斑的一种次级现象。

太阳耀斑现象涉及到许多复杂的物理过程，包括 10^{32} erg量级的能量积累，等离子体不稳定性触发，

高能粒子的加速和传播方式，它们激发产生的从 γ 射线、X射线、紫外和可见光直至射电波段辐射增强的机制，同时发生的耀斑区大气动力学变化，以及物质运动和抛射现象等，因此对它的研究具有重要的理论意义。另一方面，耀斑事件引起的X射线辐射增强将破坏地球电离层的正常状态，耀斑的高能粒子流将造成地球轨道附近高能粒子污染并干扰地球磁层，这些扰动也会向下传播，导致地球低层大气(平流层和对流层)热力学状态的变化。通过这些扰动，太阳耀斑对人类的航天活动，无线通信，以及天气和气候产生影响。电磁辐射从太阳到地球只需要大约8分钟的传播时间，所以，对于各种波段爆发的预警就需要有好的耀斑预报方法。目前虽然没有完全可信的太阳耀斑发生的预报方法，但是中国科学院国家天文台太阳活动预报中心，还是通过多年来积累的观测资料，总结出若干种较为有效的耀斑预报方法。经验的预报方法可能不能完全揭示所有的物理过程，所以，如果想提高预报的准确率，还是要努力寻找磁能在日冕中积累的方式，以及释放机制。所以从空间天气学角度来看，磁能在日冕中积累的动力学、磁场位型等等就成了太阳耀斑研究的重中之重。

■ 日冕物质抛射

除了耀斑之外，近些年来，人们对于太阳活动的认识，更多则放在日冕物质抛射上面。

日冕是太阳大气的最外层，由色球表面延伸至数百万千米的星际空间，其实质是由于高温而完全电离的稀薄等离子体，包括质子、高度电离的离子和高速的自由电子等。最初，日冕是在日全食中被发现的，由于其类似于太阳的王冠，所以称为日冕(corona来源于拉丁语词汇“王冠”)。日冕在平时不可见，而在日

全食的时候,可以看到环绕暗黑太阳的银白色冕区。广义的日冕包括几个太阳半径以外的太阳风区,延伸到包括地球在内的广大太阳系空间。

日冕物质抛射是日冕物质在较短的时间内被大规模的抛出太阳本身,抛入行星际空间的一种太阳活动事件。它是太阳大气中最剧烈的爆发活动之一。短时间的日冕活动按照其活动区域大致分为两种:一种是某些局部区域的日冕物质瞬时飞离太阳后又返回日冕;另一种则是日冕物质抛射,其速度大大超过了日面的逃逸速度,一经抛出即不会返回太阳。

大量的日冕物质抛射观测开始于1970年前后,自1996年运行以来,已有一万多次日冕物质抛射事件被观测、记录到。由于日冕物质极其稀薄,亮度很低,所以观测日冕物质抛射很难在地面进行,通常是利用卫星搭载的日冕仪在空间中进行。图3即是一次日冕物质抛射过程。日冕物质抛射可以在白光、X射线和射电波段里观测到。大量的观测与分析不仅给出了日冕物质抛射的许多性质,也很大程度上改变了我们过去关于耀斑与日冕物质抛射过程的因果关系,日冕物质抛射伴随的耀斑更像是前者的次级过程。

日冕物质抛射本质上是抛离太阳本身的大块等离子体云,从它的密度和体积估计,一次抛射的物质大概有 $10^{14} \sim 10^{16} \text{g}$,平均为 10^{15}g 。由于日冕物质抛射的发射角度和我们的目视方向存在一定的角度,所以我们观测到的日冕物质抛射的速度实际上是其投影速度。日冕物质抛射的投影速度分布较为广泛,从 20km/s 到大于 2000km/s ,甚至有时可能达到 3500km/s 。一般来说,投影速度的平均速度大约从太阳活动低年的 300km/s 可以上升到太阳活动峰年的 500km/s ,并且其展开角度达 $2 \sim 360^\circ$ 。从每次物质抛射的整体速度和质量来估计,一次日冕物质抛射所携带出去的动能大约为 $10^{22} \sim 10^{26} \text{J}$,平均为 10^{24}J 。

日冕物质抛射的形态结构也非常

复杂和多样化,较经典的形态为膨胀的泡沫状圆环,前端是亮环,中间是暗腔,末端是亮核,亮环的双臂插在太阳上,但是其他形态,如云状、扇形、多峰结构、喷射状,以及另外一些形态也存在。

以往往往把观测得到的太阳活动对各种日地空间和地球造成的物理现象,如行星际激波、高能粒子流、地磁暴、极光和电离层等,全部归因于太阳耀斑事件。但是经过最近日冕物质抛射的研究表明,其本身对于日地空间和地球造成的物理效应并不亚于耀斑。而且太阳耀斑和日冕物质抛射产生的影响有着较为不同的特征。一般来说,耀斑对粒子的加速过程是脉冲式的,粒子流量不大。大流量的粒子事件则是由日冕和太阳风粒子通过激波加速形成的,而激波正是由快速日冕物质抛射驱动的。日冕物质抛射驱动的行星际扰动也是非重现性强地磁暴的主要扰动源。关于日冕物质抛射预报的方法,现在还处于开始阶段,主要是基于先兆的统计研究。研究内容包括区磁场拓扑结构特征和演化特征、多波段成像观测特征和动态演化特征。所有的统计结果都表明日冕物质抛射源区的自由能存储具有明显的标志,如非势磁场形态(强梯度、强剪切);有利于磁重联发生的拓扑结构和运动(磁零点、磁流管扭曲、新磁通量浮现、磁通量对消)等。依据这些特征可以提前数十小时给出优于60%的预测,但预测日冕物质抛射发生的准确时刻较为困

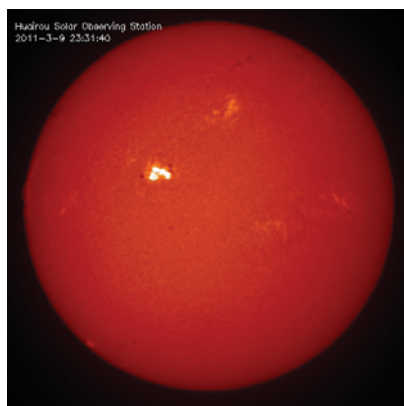


图2 H-alpha图,明亮区域为耀斑发生区域,该耀斑为X1.5级,发生在北京时间2011年3月10日7时31分

难,其主要原因是这些特征不能描述日冕物质抛射发生的具体物理过程。在深空对太阳和行星际空间进行多波段、多方位监测是预测日冕物质抛射的发生时刻和对地影响的重要前提。

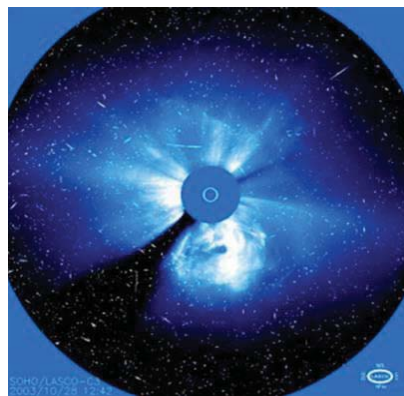


图3 SOHO/LASCO日冕仪观测的日冕物质抛射的形态

结语

在太阳活动现象方面,一次耀斑过程只持续几秒钟至几个小时,一次日冕物质抛射过程也基本上在几个小时左右,一个活动区的寿命约几天至几个月。同时,整个太阳大气所发生的太阳活动现象的多寡,还表现出平均长度约为11年的周期,也可能存在更长的周期。因此,太阳活动的时标可以认为从几分钟至几十年。所以,大功率的太阳周期性活动变化叠加上短时间的太阳活动事件,就是现阶段太阳活动的主要特征。

(作者单位:中国科学院国家天文台,中国科学院太阳活动重点实验室)