

文章编号: 1000-8349(2011)04-357-14

太阳低层大气内小尺度活动

——埃勒曼炸弹和微耀斑的物理特性和理论解释

张 萍^{1,2}, 方 成^{1,2}

(1. 南京大学 天文系, 南京 210093; 2. 南京大学 教育部现代天文与天体物理重点实验室, 南京 210093)

摘要: 随着观测的时间分辨率和空间分辨率的提高, 近年来已发现和仔细研究了很多小尺度的太阳活动现象。它们的物理过程同复杂激烈的爆发现象有许多共同之处, 因而可以为研究有复杂结构的激烈爆发现象(如耀斑和日冕物质抛射等)提供重要线索; 同时, 它们对太阳大气的加热可能有重要贡献, 因而对理解太阳大气的加热机制有重要意义。太阳小尺度活动现象可以发生在太阳大气的不同高度, 具有不同的物理特性。主要综述对太阳低层大气(光球和色球)中埃勒曼炸弹和微耀斑等小尺度活动现象的研究进展, 包括它们的形态、大小、寿命、光谱、磁场和速度场、大气半经验模型和能量估计等, 还介绍了已提出的各种模型和理论解释, 特别是磁重联的模型。对今后的研究重点也进行了讨论。

关 键 词: 太阳物理; 小尺度活动; 微耀斑; 埃勒曼炸弹

中图分类号: P182.9 **文献标识码:** A

1 引 言

太阳上常发生一些激烈的爆发事件, 最主要的是耀斑和日冕物质抛射。它们对日地空间环境会产生很大的扰动, 产生恶劣的空间天气, 严重影响卫星、磁层、电离层和中高层大气的状态, 因而引起了人们的高度关注。但是, 除了这些激烈的太阳活动现象以外, 随着观测的时间分辨率和空间分辨率的提高, 近年来已发现或仔细研究了很多小尺度的太阳活动现象^[1], 包括日冕 X 射线亮点^[2, 3], 过渡区爆发事件(transition-region explosive events)^[4, 5], Blinker^[6, 7], 微耀斑, 埃勒曼炸弹(Ellerman bomb, 简称为 EB), 微喷流和微暗条等。近年来, 随着观测资料的积累, 人们对小尺度活动的研究越来越重视, 引起了广泛的兴趣。这是因为, 一方面这些小尺度活动比较简单, 但物理过程同复杂激烈的爆发现象可能有许多共同之处, 因而可以为研究有复杂结构的爆发现象(如耀斑和日冕物质抛射等)提供重要线索; 另一方面, 它们对太阳

收稿日期: 2011-06-11; 修回日期: 2011-07-22

资助项目: 国家自然科学基金(10878002, 10610099, 10933003, 10673004); 973 计划(2011CB811402)

大气的加热可能有重要贡献,而至今对太阳大气(包括日冕、过渡区和色球等)的加热机制仍然知之甚少,成为太阳物理中一个很大的疑难问题。这些小尺度活动现象发生在太阳大气的不同高度,具有不同的物理特性,虽然它们之间也可能有某种联系。日冕 X 射线亮点、过渡区爆发事件、Blinker 等活动主要发生在日冕或色球-日冕过渡区内,有一部分的微耀斑也发生在太阳高层大气中。

本文将主要综述对太阳低层大气中的埃勒曼炸弹和微耀斑等小尺度活动现象的物理特性和产生机制的研究进展。这里所说的太阳低层大气主要是指光球和色球,不过由于微耀斑可以发生在太阳大气的不同高度,为了明确起见,这里主要介绍发生在色球层中的微耀斑,或许可称之为“色球微耀斑”。但是,本文也介绍了与色球微耀斑有关的在不同波段(如射电、紫外和 X 射线等)的观测结果。第2章和第3章分别叙述埃勒曼炸弹和微耀斑,以及与它们有关的活动。第4章给出讨论和展望。至于微暗条,由于目前观测还较少,不作详细介绍。

2 埃勒曼炸弹

埃勒曼炸弹是主要发生在光球内小的、存在时间较短的增亮事件,最早由埃勒曼在1917年发现。它们常发生在黑子区周围。虽然有时在白光观测中能看到埃勒曼炸弹,但由于它们的连续发射很弱,通常可在色球谱线(例如 $H\alpha$ 6563 Å 谱线)线翼处观测到。此时,它们表现为亮点状结构。它们光谱的主要特征是在 $H\alpha$ 谱线线心几乎没有发射,仅在线翼上能看到向外沿伸的发射,最宽可延伸至 10~15 Å,因而曾被称为“胡须”^[8]。图1给出埃勒曼炸弹在 $H\alpha$ 和 1600 Å 处的形态^[9]。图2给出一个典型的中等强度埃勒曼炸弹的 $H\alpha$ 和 Ca II 8542 Å 谱线轮廓^[10]。近年来,得益于高分辨率的成像和光谱观测,对埃勒曼炸弹的物理特性和产生机制有了较深入的了解。下面分别就它们的大小、形态、寿命、谱线特征、磁场和速度场、能量估计,以及产生机制等作较详细的介绍。

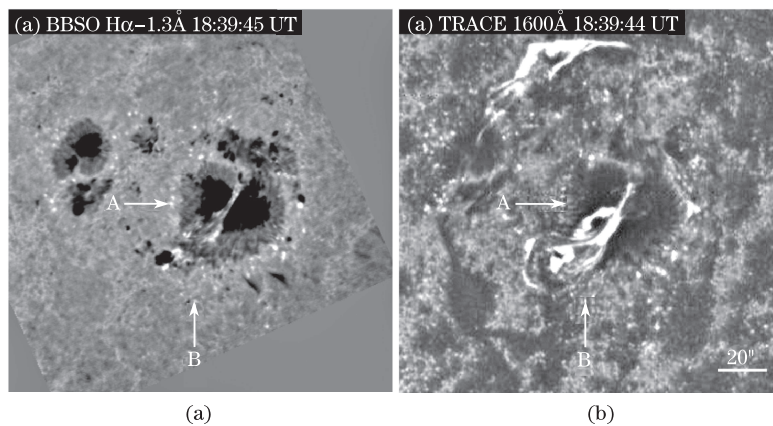


图1 (a) 埃勒曼炸弹在 $H\alpha-1.3$ Å; (b) 1600 Å 处的形态^[9]。

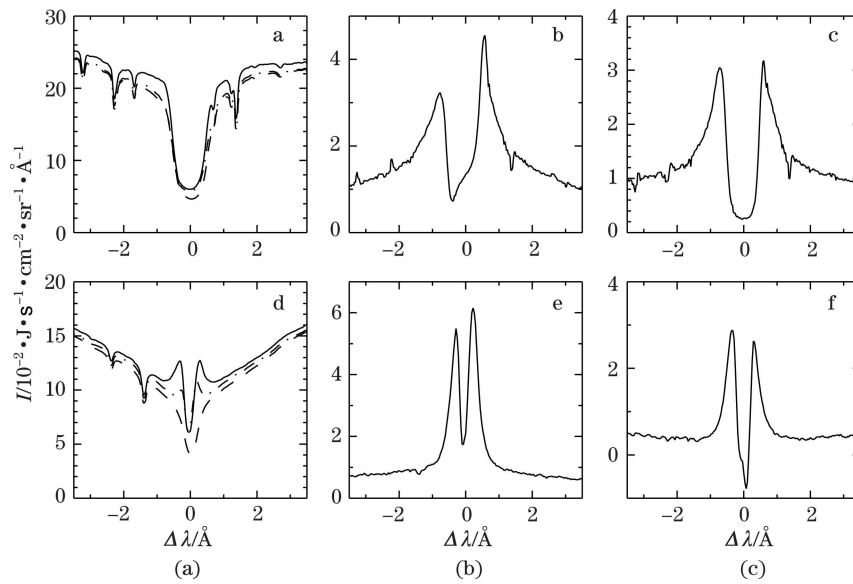


图2 典型的中等强度埃勒曼炸弹的 $H\alpha$ (上半图)和 $Ca II 8542 \text{ \AA}$ (下半图) 谱线轮廓 (a) 实线为埃勒曼炸弹(EB)的谱线轮廓, 虚线和点虚线分别为为宁静大气(Q)和埃勒曼炸弹附近处(N)的谱线轮廓; (b) EB-Q的轮廓; (c) EB-N的轮廓^[10]。

2.1 埃勒曼炸弹的大小、寿命及其谱线特征

1968年 Severny^[11]观测到埃勒曼炸弹的平均持续时间为15~20 min。1973年 ROY 和 Leparskas^[12]利用分辨率为0.3"的 Lyot 双折射 $H\alpha$ 滤光器观测分析了178个埃勒曼炸弹,发现在 $H\alpha-2 \text{ \AA}$ 波段,位于日心附近的埃勒曼炸弹平均持续时间为13 min,位于日面边缘的埃勒曼炸弹平均持续时间为11 min。1982年 Kurokawa 等人^[13]使用日本京都大学天文台无圆顶太阳望远镜的观测资料,分析了174个埃勒曼炸弹,发现其中大多数为拉长的椭圆结构,且其平均长度为1.1",在 $H\alpha-1.2 \text{ \AA}$ 波段的平均持续时间为12 min。2000年邱炯等人^[9]使用美国大熊湖天文台(BBSO)和 TRACE 卫星的高时间分辨率的数据详细研究了75个埃勒曼炸弹在 $H\alpha-1.3 \text{ \AA}$ 和 1600 \AA 的光变曲线,得到其持续时间为10~20 min。2002年 Georgoulis 等人^[14]分析气球搭载的耀斑起源探测装置(Flare Genesis Experiment)的观测资料,得到埃勒曼炸弹多为椭圆结构,平均大小为 $1.1'' \times 1.8''$,平均寿命为10~14 min,并且很多会在同一位置重复出现。2007年 Pariat 等人^[15]分析 SOHO/MDI 磁图及 TRACE 195 \AA 和 1600 \AA 图像,以及法意联合研制的90 cm真空太阳望远镜 THEMIS 的资料,也得到埃勒曼炸弹多为椭圆结构,且在 $Ca II$ 线翼平均大小为 $1.4'' \times 2.0''$ 。2008年 Matsumoto 等人^[16]利用日出(Hinode)卫星上口径50 cm的太阳望远镜的高分辨率 $Ca II H$ 线图像,观测到埃勒曼炸弹存在亚角秒结构,包括一个沿着磁中性线的大小为 $0.7'' \times 0.5''$ 的拉长的亮核,和一个观测过程中亮度基本保持稳定的扩散的晕,其大小为 $1.2'' \times 1.8''$ 。2010年 Hashimoto 等人^[17]利用日出卫星的高分辨率 $Ca II H$ 图像资料研究了4个埃勒曼炸弹,也发现它们由一些精细的次级结构组成,其平均纵

横比为 2.7。他们还由观测结果得出在埃勒曼炸弹中,磁重联可以持续地、间断地发生。

埃勒曼炸弹谱线最显著的特征是在 $H\alpha$ 等色球谱线的线心几乎没有发射,而在两翼存在较强的不对称的发射(见图2)。 $H\alpha$ 线的多普勒宽度大约为 3 \AA ,且谱线强度在波长距离线心 1 \AA 左右达到最大值。这明确地说明,埃勒曼炸弹主要发生在光球层,在色球层可能只有微弱的加热。1970年 Koval 和 Severny^[18]首次发现埃勒曼炸弹谱线的蓝翼不对称性,并认为这是由色球发射物质的上升运动或者埃勒曼炸弹上方吸收物质的下降运动所导致。方成等人^[10]研究了 THEMIS 观测到的 13 个埃勒曼炸弹,发现有些埃勒曼炸弹的色球谱线中也出现红翼不对称性。

2.2 埃勒曼炸弹的磁场和速度场特征

对于埃勒曼炸弹的速度场已有很多观测研究。在埃勒曼炸弹附近经常可以观测到色球物质上升运动、 $H\alpha$ 冲浪、双极浮现磁流以及移动的磁场结构等。1968年 Severny^[11]在埃勒曼炸弹大气中观测到 $1\sim 3 \text{ km/s}$ 的上升流。1982年 Kurokawa 等人^[13]发现埃勒曼炸弹与色球上升流有关,其速度大约为 $6\sim 8 \text{ km/s}$ 。另一方面,2002年 Georgoulis 等人^[14]通过统计研究发现超过 80% 的埃勒曼炸弹通常与光球层的下降流相伴,其速度大约为 $0.1\sim 0.4 \text{ km/s}$ 。2006年方成等人^[10]利用 THEMIS 望远镜在 2002年 9月 5日观测到的典型埃勒曼炸弹 $H\alpha$ 和 $\text{Ca II } 8542 \text{ \AA}$ 谱线的光谱轮廓,得到对于强、中等和弱的埃勒曼炸弹,视向速度分别为 2.2, 1 和 0.5 km/s 。2008年 Matsumoto 等人^[16]通过分光手段得到埃勒曼炸弹的光球速度场,发现其光球平均速度为 0.2 km/s ,且为向下的运动;色球平均速度为 $1\sim 3 \text{ km/s}$,为向上的运动。他们还发现光球层速度的变化曲线与 $H\alpha$ 线翼的光变曲线具有很好的时间相关性。

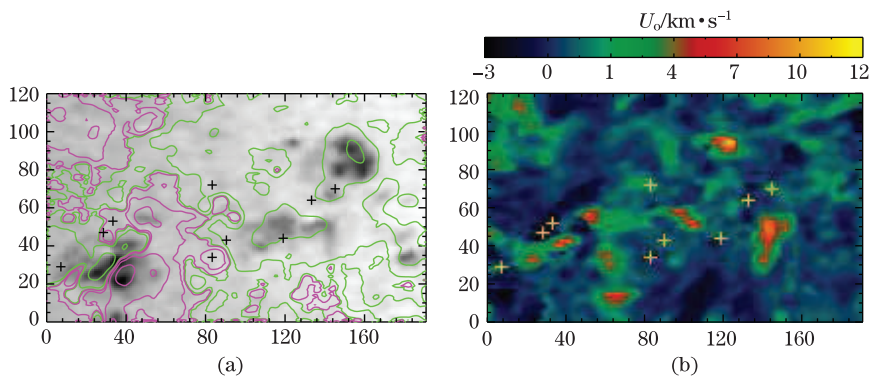


图3 2002年9月5日THEMIS望远镜观测到的EB位置(十字)和纵向磁场等值线分布(a)和速度场分布(b)^[10]

埃勒曼炸弹一般发生在磁流浮现区和较强磁场存在的区域,因此研究它们与磁场的关系对于理解它们的形成机制非常重要。在以前的一些研究中,人们发现一些埃勒曼炸弹会在一些磁场结构的边界出现,例如在磁中性线附近^[12,19],在浮现磁流附近^[15,20],或者在移动的磁场结构附近^[21]。2000年邱炯等人^[9]发现在黑子和磁中性线附近以及超米粒结构的边缘,埃勒曼炸弹的发生率会增加,且 $H\alpha$ 蓝翼的强度变化同 1600 \AA 的光变曲线具有较好相关性的

埃勒曼炸弹大多位于双极磁场区域, 而其他埃勒曼炸弹则位于磁中性线及其附近。2002 年 Georgoulis 等人^[14] 提出埃勒曼炸弹倾向于出现在低色球层的磁分割面或准分界层上。2007 年 Pariat 等人^[15] 观测到的 13 个埃勒曼炸弹中有 9 个都位于纵向磁场的中性线附近。2008 年 Watanabe 等人^[22] 利用京都大学天文台矢量磁图和 $H\alpha$ 波段对一个磁流浮现区的高分辨率观测, 发现所有观测到的埃勒曼炸弹都位于垂直磁场强度空间梯度大的区域, 且在此区域内磁场的水平和垂直分量都存在波动。方成等人除了观测到埃勒曼炸弹 $H\alpha$ 和 $Ca II 8 542 \text{ \AA}$ 谱线的光谱轮廓外, 还观测得到了 $Fe I 6 302.5 \text{ \AA}$ 线的斯托克斯光谱。由于不同谱线的光谱观测是同时进行的, 因此可以得到埃勒曼炸弹的亮度场、磁场和速度场, 它们的空间位置是严格一一对应的。图 3 给出埃勒曼炸弹在两维磁场和速度场中的分布。由图可见, 多数埃勒曼炸弹出现在磁中性线附近, 且它们同向上或向下的物质运动相联系。

对于埃勒曼炸弹与其他活动的关系也有一些研究。1972 年 Vorpahl 和 Pope^[23] 发现埃勒曼炸弹在 $3 840 \text{ \AA}$ 达到峰值的时间比在 $H\alpha-0.9 \text{ \AA}$ 达到峰值的时间早 3.5 min。1984 年 Kitai 和 Muller^[24] 得到埃勒曼炸弹与光斑亮点以及光斑米粒在空间上一致, 还发现埃勒曼炸弹在 $H\alpha-0.75 \text{ \AA}$ 的强度增加与光斑结构在 $4 083 \text{ \AA}$ 连续谱上的强度增加存在弱相关。2008 年 Matsumoto 等人^[16] 发现埃勒曼炸弹与 $H\alpha$ 冲浪相关。

2.3 埃勒曼炸弹的大气模型和能量估计

2006 年方成等人^[10] 利用 THEMIS 的高分辨率 $H\alpha$ 和 $Ca II 8 542 \text{ \AA}$ 谱线轮廓的观测资料, 通过非局部热动平衡的理论计算, 首次得到了不同强度的埃勒曼炸弹的热和非热大气半经验模型。图 4 给出对典型的中等强度埃勒曼炸弹得到的大气半经验模型。作为对比, 图中也给出了太阳宁静大气的半经验模型 (VALC)^[25] 和方成等人^[26] 得到的谱斑大气模型 (PLAGE)。方成等人的结果表明, 埃勒曼炸弹主要发生在光球上层和色球下层, 温度增加为 $600 \sim 1 300 \text{ K}$ 。

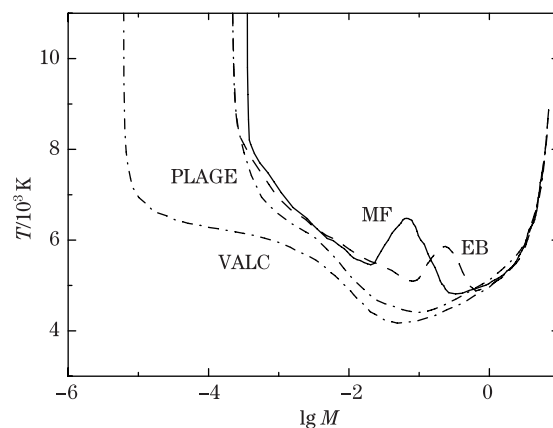


图 4 典型的中等强度埃勒曼炸弹(EB)和微耀斑(MF)的大气半经验模型^[10]

可以采用不同的方法来估计埃勒曼炸弹的能量,结果得到埃勒曼炸弹的能量一般在 $10^{18} \sim 10^{20}$ J的范围^[10, 14, 27-29]。较准确的方法是利用半经验大气模型,并结合速度场的测量,可分别估计埃勒曼炸弹的辐射损失能量和动能。在埃勒曼炸弹爆发过程中能量损失主要由辐射和热传导产生。由于在低色球层中温度梯度较小,可以忽略热传导的能量损失。因此,埃勒曼炸弹主要的能量损失机制是辐射致冷。这样,利用计算得到的大气半经验模型,就可采用甘为群和方成^[30]提供的半经验公式计算出净辐射损失的能量。根据大气半经验模型给出的密度和观测得到的速度,就可得到动能,因而就可以估计出埃勒曼炸弹的总能量。方成等人^[10]采用这一方法估计出埃勒曼炸弹的总能量为 $10^{19} \sim 5 \times 10^{20}$ J。

2.4 埃勒曼炸弹的理论解释

埃勒曼炸弹虽然已被发现了近百年,但现在人们仍然不清楚其特征谱线的形成及其触发机制。在观测的基础上,提出了许多模型。1968年 Severny 提出^[11],在扰动介质中具有速度梯度的扩散不透明层可以产生埃勒曼炸弹。1974年 Pikel'ner 指出^[31],如果埃勒曼炸弹是由磁重联触发的,那么磁力线湮灭后当地温度能够达到日冕的温度值。从新的观测来看(例如文献 [10]),这个温度是太高了。1983年 Kitai 指出^[32],在低色球层的温度上升和密度梯度增加能够解释埃勒曼炸弹的谱线致宽。Diver 等人^[33]则认为埃勒曼炸弹是由 Kelvin-Helmholtz 不稳定性导致的撕裂模不稳定性触发。1998年 Hénoux 等人^[29]提出了关于埃勒曼炸弹的非热模型,认为胡须状谱线产生的原因是高能粒子轰击低色球层。1999年 Litvinenko 利用半分析解证明^[34],低层大气的磁重联在温度极小区最有效,因此,埃勒曼炸弹可以由磁重联产生。2000年邱炯等人^[9]发现,一些埃勒曼炸弹的产生与磁重联有关,但另一些位于单极磁场区域边界的埃勒曼炸弹可能由其他机制触发。

目前人们最普遍接受的模型是光球上层或低色球层的磁重联模型(参见文献 [9], [14], [16], [28], [29], [34-37] 等)。2001年陈鹏飞等人^[38]进行了二维磁流体动力学模拟,并考虑了低层大气中十分重要的辐射和电离的作用。近来,徐晓燕等人^[69]进行了 2.5 维磁流体数值模拟,还考虑了重力的作用。他们的结果表明,光球或色球低层的磁重联能够解释埃勒曼炸弹的主要特征,包括温度增强、寿命和 $H\alpha$ 谱线特征等。2002年 Georgoulis 等人^[14]提出埃勒曼炸弹的磁重联模型。他们认为,由于光球上相反极性的磁结构相向运动的挤压,或一对双极磁结构的靠拢,可使反向磁力线接近而产生磁重联;或新的磁流浮现与已有的磁伞盖结构磁场之间产生磁重联,都能产生埃勒曼炸弹。图 5 是他们给出的卡通图。2004年 Pariat 等人^[36]通过拓扑分析发现,埃勒曼炸弹和秃斑区(Bald patch)通过非周期性波动的拉伸磁流管相互联系,且波动的波长大于 Parker 不稳定性的阈值。这个发现使他们提出了磁流管有阻浮现模型,即埃勒曼炸弹是由 Parker 不稳定性激发的波动磁流管有阻浮现的表现。2007年 Isobe 等人^[37]利用二维磁流体动力学模拟证明这个模型可能是正确的。2008年 Watanabe 等人^[22]通过观测磁流浮现区的磁场构型随时间的演化,发现一些埃勒曼炸弹位于浮现磁流管的足部,有些位于 Ω 环的顶部或单极磁场区域,因此没有凹陷(dip)构型的埃勒曼炸弹触发机制仍然有效,这进一步扩展了 Pariat 等人的工作。Matsumoto 等人^[16]还根据日出卫星观测到的埃勒曼炸弹的亚角秒结构图像,提出了一个更加精细的磁重联模型,其中椭圆状的亮核是由磁重联

导致的加热气体所产生。图 6 是他们给出的卡通图。

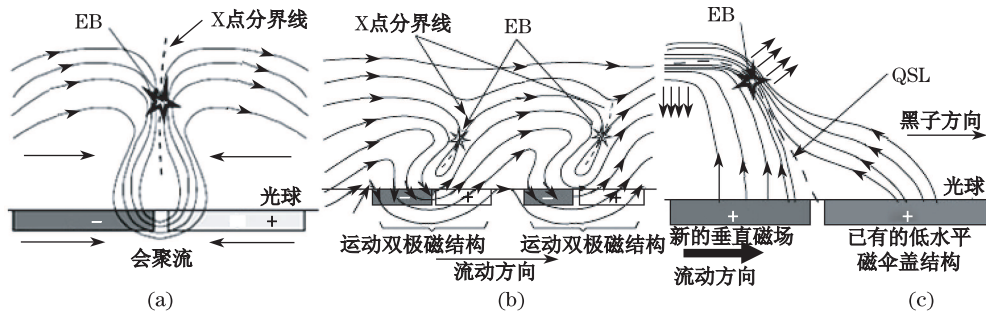


图 5 埃勒曼炸弹的磁重联模型卡通图^[14]

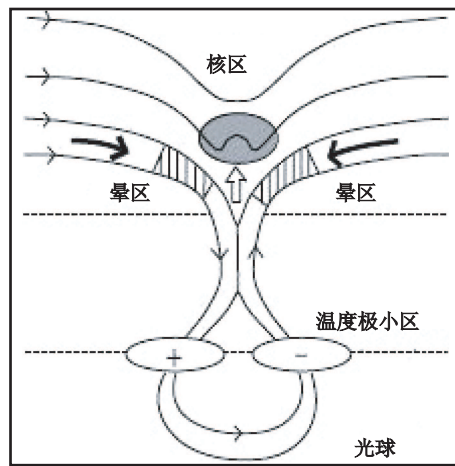


图 6 具有亚角秒结构的埃勒曼炸弹的磁重联模型卡通图^[16]

3 微耀斑

3.1 微耀斑的形态、大小、寿命及其辐射

微耀斑, 通常也被称为亚耀斑, 是一种尺度小且持续时间短的增亮现象。如果增亮发生在色球-日冕过渡区或日冕中, 表现为 EUV 或 X 射线辐射的增强, 则常称为 EUV 亮点或 X 射线亮点。如果这种增亮主要发生在色球中, 则可称之为“色球微耀斑”, 但有时也可观测到它们也有 EUV 和/或 X 射线都有增亮的现象, 此时人们常统称之为微耀斑。这里仅重点介绍色球微耀斑及与之相关的其他波段的辐射。

关于微耀斑的研究已经持续了几十年(见参考文献 [39-41], [43])。微耀斑的尺度一般为几个角秒到大约 20", 持续时间为 10~30 min, 微耀斑的能量比大耀斑小 3~6 个量级, 约为

$10^{19} \sim 10^{22}$ J, 与微耀斑的强弱有关^[42]。最弱的微耀斑的能量甚至和埃勒曼炸弹的能量相当。对于色球中有明显增亮的微耀斑来说, 其可见光谱的明显特征是色球谱线线心处存在弱的发射, 因此 $H\alpha$ 谱线成为最常被研究的谱线。图 7 给出一个典型的微耀斑的 $H\alpha$ 和 $Ca II 8542 \text{ \AA}$ 谱线轮廓^[43]。许多人对在不同波段有辐射增亮的微耀斑做过深入的观测和研究。

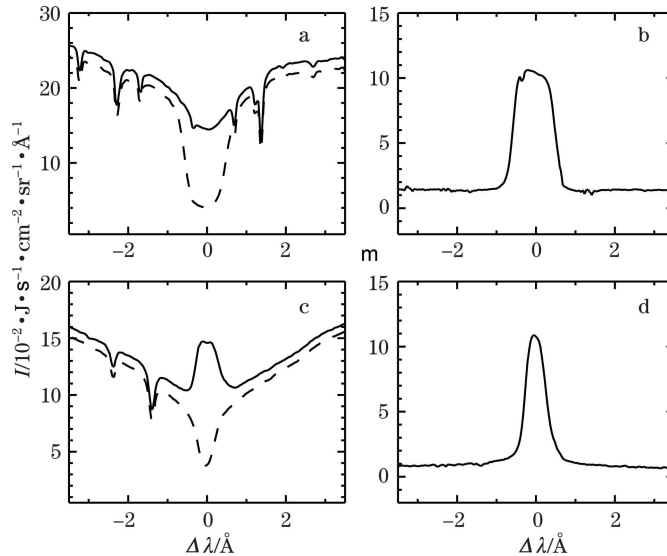


图 7 典型的微耀斑 $H\alpha$ (上半图) 和 $Ca II 8542 \text{ \AA}$ (下半图) 谱线轮廓 (a,c) 实线为微耀斑(MF)的谱线轮廓, 虚线为宁静大气(Q)的谱线轮廓; (b,d) MF-Q 的轮廓^[43]。

1984 年 Lin 等人^[44] 使用气球搭载的高分辨率仪器共观测到 25 个持续时间几秒到几十秒的硬 X 射线微耀斑, 其中大多都有小的软 X 射线爆发伴随, 但是只在几个事件中观测到 $H\alpha$ 处有发射, 并伴有射电爆发。他们得到光子能谱的谱指数为 $4 \sim 6$, 产生频率随能量分布的谱指数约为 -1 。1987 年 Porter 等人^[45] 利用 SMM 卫星的数据发现, 持续时间较长的紫外 EUV 亮点在 CIV 线的发射与软 X 射线微耀斑同时产生。2002 年 RHESSI 卫星首次获得了微耀斑的硬 X 射线图像^[46, 47]。

1993 年, Tsuneta 和 Lemen^[48] 证明, Lin 等人 1984 年观测到的微耀斑硬 X 射线的强度变化与 GOES 卫星的软 X 射线随时间增强的变化存在联系, 并认为这是硬 X 射线微耀斑在软 X 射线波段的对应物。1994 年 Shimizu 等人^[49] 观测到微耀斑在软 X 射线波段存在多种形态, 他们大多数是多环或单环结构, 还有一些是点源。1995 年, Shimizu^[50] 利用 Yohkoh/SXT 的观测, 得到微耀斑软 X 射线环长 $5000 \sim 40000 \text{ km}$, 环宽 $2000 \sim 7000 \text{ km}$, 持续时间 $2 \sim 7 \text{ min}$, 在观测到的短期增亮过程中能量为 $10^{18} \sim 10^{22} \text{ J}$, 且能量分布可用单一的谱分布拟合, 在大于 10^{20} J 的能量范围内, 谱指数为 $1.5 \sim 1.6$, 由此可得由微耀斑所提供的能量比活动区日冕加热所需能量至少低 5 个量级。因此还需要能量更高的活动来解释活动区日冕加热。2001 年 Berghmans 等人^[51] 比较 Yohkoh/SXT, SOHO/EIT 和 TRACE 的观测资料, 发现最强的 EUV 亮点是软 X 射线微耀斑的对应物。2004 年 Liu 等人^[41] 利用 BBSO 的 $H\alpha$ 和 GOES 卫星的资

料以及 RHESSI 3~5 keV 的图像, 比较了 12 个微耀斑的资料, 发现所有的微耀斑都能在软 X 射线、硬 X 射线和 H α 波段观测到。但是, 人们显然不能期望在不同波段总能同时观测到发射, 这在很大程度上由每个微耀斑的加热条件决定。2004 年邱炯等人^[52]分析 RHESSI 的硬 X 射线资料和 OVSA 的射电资料, 共分析了 760 个微耀斑。他们的统计表明, 微耀斑的数目与太阳活动有关, 有些活动区会产生更多的微耀斑; 大约 40% 的微耀斑在大于 10 keV 上有硬 X 射线辐射, 在 10 GHz 附近有微波射电辐射。这表明了微耀斑的非热特性。RHESSI 观测的硬 X 射线对应的光子能谱指数为 4.5~7, 微波谱指数约为 2.5, 与一般耀斑不同。这表明这些微耀斑产生更多高能量的、产生射电的电子。2008 年 Christe 等人^[53]对 RHESSI 观测到的 25 705 个 GOES C 级以下的 X 射线微耀斑进行统计研究, 发现所有的微耀斑都产生在活动区, 且它们每月的平均产生率随太阳活动周变化, 从太阳活动时期的 90 个变到太阳活动宁静期的 5 个。他们还得到微耀斑 X 射线的峰值计数率按频率的分布可用幂律谱表示, 谱指数约为 1.50~1.58。

近年来, 一些人对微耀斑的热和非热特性进行了深入的研究。已研究了微耀斑的非热特性在微波辐射^[60-62]和硬 X 射线辐射^[41, 52, 53, 63]方面的表现。一些微耀斑甚至与 III 型爆相关联^[41], 这是非热电子存在的明显特征。Krucker 等人^[46]及 Benz 和 Grigis^[47]得到的微耀斑的光谱表明, 在 10 keV 以下热发射处于主导地位。2008 年 Hannah 等人^[54]对微耀斑进行了统计研究, 对每个微耀斑在其 0~12 keV 发射峰值附近的特性进行了分析, 并对其中的 4 236 个微耀斑进行了热和非热辐射的模拟。该统计得到了一些微耀斑的参数值, 包括持续时间为 5.4 min, 热源温度为 1.26×10^7 K, 发射量为 3×10^{46} cm⁻³, 热环的长度为 32"。Krucker 等人^[46], Benz 和 Grigis^[47]及 Stoiser 等人^[55, 56]对 RHESSI 卫星观测到的能量低至 3 keV 的硬 X 射线微耀斑进行了分析, 发现一些事件具有拉伸的源, 而另一些事件则是无法进一步分辨的点源。在微耀斑的脉冲相, 谱分布能够用能量低于 10 keV 的热能谱和较高能量的非热幂律谱很好地拟合。2006 年 Jain 等人^[58]利用印度卫星上 SOXS 的数据得到了类似的结果。Stoiser 等人^[56]分析 TRACE 1 600 Å 和 171 Å 的数据, 得到其光变曲线与 RHESSI 观测到的 X 射线光变曲线同时达到峰值。这表明高速电子将冷的色球物质加热至耀斑温度的耀斑模型同样适用于微耀斑。Brosius 和 Holman^[57]观测到微耀斑在色球和过渡区谱线中有发射, 表明有非热电子加热色球物质。

3.2 微耀斑磁场和速度场特征

在微耀斑所在位置及其附近常常能观测到物质运动。2002 年 Shimizu 等人^[42]发现在一些微耀斑中能观测到色球物质抛射, X 射线喷流也能在某些微耀斑中观测到。方成等人^[43]利用 THEMIS 望远镜观测到的微耀斑 H α 和 Ca II 8 542 Å 的光谱资料, 得到对于强和弱的微耀斑, 视向速度分别为 2.0 和 0.5 km/s。观测表明^[41, 42, 45, 59], 一些微耀斑位于磁中性线附近或跨越磁中性线。此外, 在许多微耀斑事件中磁流浮现在微耀斑爆发之前 5~30 min 出现^[42, 64]。

值得提到的是, Shibata 等人^[65]利用日出卫星的 Ca II H 线滤光片的高分辨率图像观测, 发现色球中存在许多海葵状喷流。它们宽约 100~300 km, 长约 500~2 000 km, 速度为 5~20 km/s, 寿命为 100~200 s。它们常出现于磁中性线附近或与新浮磁流有关。据此, Shibata 等人

提出,这种微喷流可能与埃勒曼炸弹或色球微耀斑有关,也是由磁重联所产生。Nishizuka 等人^[66]利用日出卫星资料还发现了冷的和热的色球喷流,支持了它们由磁重联产生的观点。

3.3 微耀斑的能量

人们可以用亮度、面积和持续时间的测量或光谱测量等不同的方法来估计微耀斑的能量,得到的能量值为 $10^{19} \sim 10^{22}$ J^[9, 42, 43]。对于“色球微耀斑”来说,估计能量的较好方法是利用拟合光谱线轮廓所得到的非局部热动平衡大气半经验模型,并结合速度场的测量,分别估计色球微耀斑的辐射损失能量和动能。方成等人^[43]利用 THEMIS 望远镜观测到的 5 个微耀斑的高分辨率 H α 和 Ca II 8 542 Å 光谱资料,先求得大气半经验模型和速度场分布,再由此求得微耀斑的能量,结果得到这些微耀斑的总能量约为 $10^{20} \sim 4 \times 10^{21}$ J,其中动能比辐射损失的能量要小一个量级以上。这些微耀斑色球温度的增加约为 1 000~2 200 K。值得提到的是,夏苑等人^[67]和方成等人^[68]还观测到一个双带微耀斑。它在 H α 图像上表现为小尺度的双带增亮,每个带大小为 $14'' \times 5''$ 。RHESSI 也观测到它的硬 X 射线辐射,表明它兼有热和非热成分,与通常的双带耀斑相似,只是规模要小得多。利用由光谱求得的大气半经验模型和速度场,可估计出这个双带微耀斑的总能量约为 2.4×10^{22} J,即比以前观测到的最亮的色球微耀斑的能量要大几倍。

3.4 微耀斑的大气模型和理论解释

方成等人^[43]利用 THEMIS 的高分辨率 H α 和 Ca II 8 542 Å 谱线轮廓的观测资料,通过非局部热动平衡的理论计算,首次得到了 5 个不同强度的微耀斑热和非热大气半经验模型。图 4 上也给出了对典型的较强微耀斑得到的大气半经验模型(FM)。方成等人的结果表明,色球微耀斑主要发生在色球内,温度增加为 1 000~2 200 K。如果微耀斑有高能电子加热作用,则温度增加的数值可减少 100~150 K。

所有的观测表明太阳低层大气中的磁重联是一个合理的微耀斑触发机制^[40, 41, 57]。最近徐晓燕等人^[69]进行了 2.5 维 MHD 数值模拟,考虑了重力、辐射和电离等因素的影响。结果表明,太阳色球大气中的磁重联能够解释微耀斑的一些特征,例如温度增加和持续时间等,且利用所得大气模型,采用非局部热动平衡计算出的 H α 和 Ca II 8 542 Å 的谱线轮廓在定性上与观测一致。蒋荣琳等人^[70]利用更好的格式对太阳色球中的磁重联进行了详细的 2.5 维 MHD 数值模拟。图 8 给出数值模拟得到的微耀斑的温度、磁场和速度场随时间演化的情况,此时取背景磁场为 5×10^{-3} T,发生磁重联的高度为 1 000 km。模拟结果表明,微耀斑温度的增加和背景磁场强度关系最大,而微耀斑的持续时间则和反常电阻的大小有关。他们还得到了一个标度律,可由重联区的中性氢原子密度、磁场和反常电阻来决定温度增加的多少。

4 讨论和展望

观测表明,在太阳低层大气中会发生埃勒曼炸弹和微耀斑等许多小尺度的活动现象。它们形态比较简单、寿命比较短、演化也不复杂,但却包含了磁重联、加热和粒子加速等许多

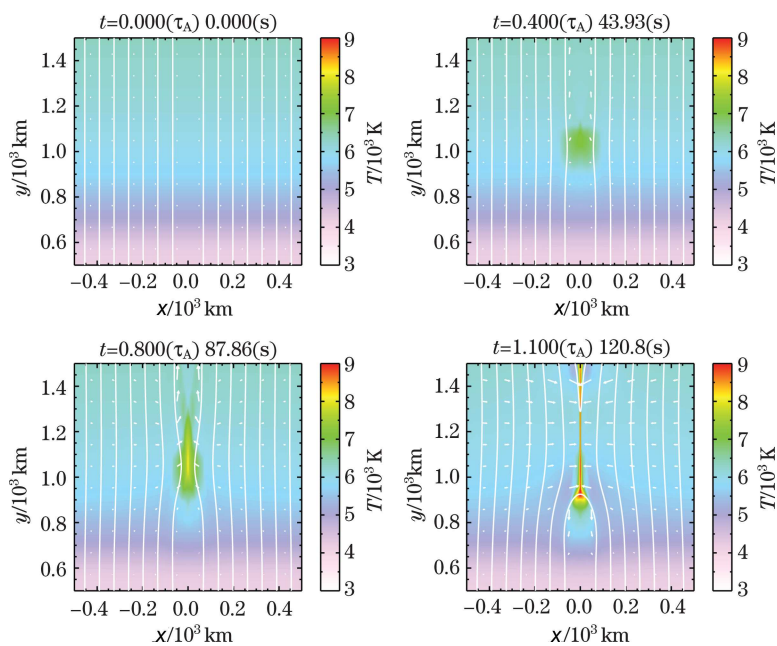


图8 数值模拟得到的微耀斑在 $t = 0$ 和 $t = 0.4$ (上半图) 和 $t = 0.8$ 和 $t = 1.1$ (下半图) 时的温度分布, 磁场(实线)和速度场(箭头)

基本的物理过程。因此, 对它们的研究可以使人们较容易地理解这些物理过程, 从而有助于人们对耀斑、日冕物质抛射等激烈爆发现象物理本质的了解。同时, 这些小尺度活动现象可能对太阳大气的加热有一定的贡献。再加上由于近年来许多地面和空间高分辨观测仪器的投入使用, 使人们可以观测到更多的小尺度活动现象, 因此, 近年来对小尺度活动现象的研究变得十分活跃。

尽管埃勒曼炸弹和微耀斑都是太阳低层大气中的小尺度活动现象, 它们还是有一些不同的特性。最主要的差别是: 埃勒曼炸弹发生在光球上层或色球下层, 温度增加不大, $H\alpha$ 谱线非常宽且常有蓝不对称性, 但线心却几乎没有辐射增强, 一般没有对应的 EUV 和 X 射线辐射; 而微耀斑(这里指色球微耀斑)却发生在色球中, 温度增加显著, $H\alpha$ 线心有明显发射, 且有时伴随有射电、EUV 和 X 射线辐射。另一方面, 埃勒曼炸弹和微耀斑都伴随有一些物质抛射, 且都是常发生在磁中性线或磁分界面附近; 因此, 多数人认为它们都是由磁重联产生的, 只不过磁重联发生在不同的太阳大气高度, 从而产生了不同的表现。因此, 从理论和数值模拟上研究太阳大气不同高度处的磁重联现象, 并同观测结果相比较, 对于理解小尺度现象的物理本质, 乃至太阳上爆发现象的本质就具有重要的意义。南京大学天文系太阳研究组^[38, 69, 70]在这方面做了一些努力, 在定性上取得了一些可和观测相比较的结果。目前的一个突出问题是, 与所有磁重联研究中遇到的问题一样, 必须假设存在一个数值小的反常电阻, 才能使磁重联发生。在太阳低层大气中如何能产生这样一个小的反常电阻? 它产生的条件是什么? 这是今后需要仔细研究的一个重要问题。

另一个重要问题是,如何统一地解释微耀斑在不同波段(可见光、射电、EUV、甚至X波段)处的辐射,以及它们的互相联系。如前所述,观测表明,有些微耀斑仅有色球谱线的发射,而有些却伴随着其他波段的辐射。为什么?它们的物理条件有什么不同?弄清楚这个问题,才能更好地理解小尺度太阳活动的本质。为此,首要的是取得更多的、高分辨率的、不同波段的观测资料,并对它们进行详细的对比和分析。这就需要开展地面和空间高分辨观测设备的联测,特别是光谱观测,并开展联合研究。今后要沿着这一方向多做努力。

参考文献:

- [1] 方成,丁明德,陈鹏飞. 太阳活动区物理. 南京: 南京大学出版社, 2008
- [2] Longcope D W, Kankelborg C C, Nelson J L, Pevtsov A A. *ApJ*, 2001, 553: 429
- [3] 田晖, 夏利东, 何建森等. *天文学进展*, 2009, 27: 193
- [4] Innes D E, Inhester B, Axford W L, et al. *Nature*, 1997, 386: 811
- [5] 章敏, 夏利东, 黄正化. *天文学进展*, 2010, 28: 229
- [6] Harrison R A. *Sol. Phys.*, 1997, 175: 467
- [7] Doyle J G, Roussev I I, Madjarska M S. *A&A*, 2004, 418: L9
- [8] Severny A B. *Observatory*, 1956, 76: 241
- [9] Qiu J, Ding M D, Wang H, et al. *ApJ*, 2000, 544: L157
- [10] Fang C, Tang Y H, Xu Z, et al. *ApJ*, 2006a, 643: 1325
- [11] Severny A B. in *Nobel Symp. 9, Mass Motions in Solar Flares and Related Phenomena*. New York: Wiley, 1968: 71
- [12] Roy J R, Leparskas H. *Sol. Phys.*, 1973, 30: 449
- [13] Kurokawa H, Kawaguchi I, Funakoshi Y, et al. *Sol Phys.* 1982, 79: 77
- [14] Georgoulis M K, Rust D M, Bernasconi P N, et al. *ApJ*, 2002, 575: 506
- [15] Pariat E, Schmieder B, Berlicki A, et al. *A&A*, 2007, 473: 279
- [16] Matsumoto T, Kitai R, Shibata K, et al. *PASJ*, 2008, 60: 577
- [17] Hashimoto Y, Kitai R, Ichimoto K, et al. *PASJ*, 2010, 62: 879
- [18] Koval A N, Severny A B. *Sol. Phys.*, 1970, 11: 276
- [19] Dara H C, Alissandrakis C E, Zachariadis Th G, et al. *A&A*, 1997, 322: 653
- [20] Zachariadis Th G, Alissandrakis C E, Banos G. *Sol. Phys.*, 1987, 108: 227
- [21] Nindos A, Zirker H. *Sol. Phys.*, 1998, 182: 381
- [22] Watanabe H, Kitai R, Okamoto K, et al. *ApJ*, 2008, 684: 736
- [23] Vorpahl J, Pope T. *Sol. Phys.*, 1972, 25: 347
- [24] Kitai R, Muller R. *Sol. Phys.*, 1984, 90: 303
- [25] Vernazza J E, Avrett E H, Loeser R. *ApJS*, 1981, 45: 635
- [26] Fang C, Ding M D, Hénoux J -C, Livingston W C. *Science in China, Ser.A*, 2001, 44: 528
- [27] Bruzek A. *Sol. Phys.*, 1972, 26: 94
- [28] Hu F M, Song M T, Li X Q. *ApSS*, 1995, 229: 325
- [29] Hénoux J -C, Fang C, Ding M D. *A&A*, 1998, 337: 294
- [30] Gan W Q, Fang C. *ApJ*, 1990, 358: 328
- [31] Pikel'ner S B. *SvA*, 1974, 18: 136
- [32] Kitai R. *Sol. Phys.*, 1983, 87: 135
- [33] Diver D A, Brown J C, Rust D M. *Sol. Phys.*, 1996, 168: 105
- [34] Litvinenko Y E. *ApJ*, 1999, 515: 435
- [35] Ding M D, Hénoux J -C, Fang C. *A&A*, 1998, 332: 761
- [36] Pariat E, Aulanier G, Schmieder B, et al. *ApJ*, 2004, 614: 1099

- [37] Isobe H, Tripathi D, Archontis V. *ApJ*, 2007, 657: 53
- [38] Chen P F, Fang C, Ding M D. *ChJAA*, 2001, 1: 176
- [39] Svestka Z, *Solar Flares*. Dordrecht: D.Reidel Publ. Co., 1976
- [40] Tandberg-Hanssen E, Emslie A D. *The physics of solar flares*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988: 286
- [41] Liu C, Qiu J, Gary D E, et al. *ApJ*, 2004, 604: 442
- [42] Shimizu T, Shine R A, Title A M, et al. *ApJ*, 2002, 574: 1074
- [43] Fang C, Tang Y H, Xu Z. *ChJAA*, 2006b, 6: 597
- [44] Lin R P, Schwartz R A, Kane S R, et al. *ApJ*, 1984, 283: 421
- [45] Porter J G, Moore R L, Reichmann E J, et al. *ApJ*, 1987, 323: 380
- [46] Krucker S, Christe S, Lin R P, et al. *Sol. Phys.*, 2002, 210: 445
- [47] Benz A O, Grigis P C. *Sol. Phys.*, 2002, 210: 431
- [48] Tsuneta S, Lemen J R. *pssc.symp.*, 1993, 113
- [49] Shimizu T, Tsuneta S, Acton L W, et al. *ApJ*, 1994, 422: 906
- [50] Shimizu T. *PASJ*, 1995, 47: 251
- [51] Berghmans D, McKenzie D, Clette F. *A&A*, 2001, 369: 291
- [52] Qiu J, Liu C, Gary D E, et al. *ApJ*, 2004, 612: 530
- [53] Christe S, Hannah I G, Krucker S, et al. *ApJ*, 2008, 677: 1385
- [54] Hannah I G, Christe S, Krucker S, et al. *ApJ*, 2008, 677: 704
- [55] Stoiser S, Veronig A M, Aurass H, Hanslmeier A. *Sol. Phys.*, 2007, 246: 339
- [56] Stoiser S, Brown J C, Veronig A M. *Sol. Phys.*, 2008, 250: 315
- [57] Brosius J W, Holman G D. *ApJ*, 2009, 692: 492
- [58] Jain R, Joshi V, Hanaoka Y. *JApA*, 2006, 27: 339
- [59] Wang H, Chae J, Qiu J, et al. *Sol. Phys.* 1999, 188: 365
- [60] Gary D E, Zirin H. *ApJ*, 1988, 329: 991
- [61] White S M, Kundu M R, Shimizu T, et al. *ApJ*, 1995, 450: 435
- [62] Nindos A, Kundu M R, White S M. *ApJ*, 1999, 513: 983
- [63] Nitta N. *ApJ*, 1997, 491: 402
- [64] Tang Y H, Li Y N, Fang C, et al. *ApJ*, 2000, 534: 482
- [65] Shibata K, Nakamura T, Matsumoto T, et al. *Science*, 2007, 318: 1591
- [66] Nishizuka N, Shimizu M, Nakamura T, et al. *ApJ*, 2008, 683: 83
- [67] Xia C, Fang C, Chen Q R, Tang Y H. *Adv. Space Res.*, 2007, 39: 1402
- [68] Fang C, Chen P F, Jiang R L, Tang Y H. *RAA*, 2009, 9: 83
- [69] Xu X Y, Fang C, Ding M D, Gao D H. *RAA*, 2011, 11: 225
- [70] Jiang R L, Fang C, Chen P F. *ApJ*, 2010, 710: 1387

Physic Property and Theoretical Explanation of the Small-Scale Activities: Ellerman Bombs and Microflares in the Solar Lower Atmosphere

ZHANG Ping^{1,2}, FANG Cheng^{1,2}

(1. Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics, Ministry of Education, Nanjing 210093, China)

Abstract: Owe to high-resolution observations made in both space-born and ground-based tele-

scopes, solar small-scale activities (SSAs), such as Ellerman bombs (EBs) and microflares (MFs), have recently become hot topics in solar physics. Because the relatively simple structures of SSAs are easy to study, but their physical mechanisms are more or less similar to major and complicated eruptions, such as major flares and coronal mass ejections, and so on, the study of SSAs will help to understand the physical nature of the major eruptions. Moreover, some studies also show that SSAs might contribute to some extent the heating of the solar atmosphere, which is still a puzzling problem in solar physics.

In this paper we present a review on the study of SSAs which mainly appear in the solar lower atmosphere, the photosphere and chromosphere. We focus on EBs and chromospheric MFs, although part of them could sometimes have emission in EUV, X-ray and radio wavebands. The study progress and the observational results of SSAs, including their configurations, sizes, lifetimes, spectra, velocities, magnetic fields, atmospheric models and the energy estimation etc., have been presented in details. The corresponding physical mechanisms and theoretical modellings have been described as well. In particular, magnetic reconnection in the solar lower atmosphere as a common and well-accepted mechanism for both EBs and chromospheric MFs has been described. The difference of triggering mechanisms between EBs and chromospheric MFs is that the reconnection occurs in the photosphere for the former, while in the chromosphere for the later.

The direction of the future study has been discussed. We point out that the joint high-resolution observations in different wavebands are essentially important for understanding the physics and mechanism of SSAs. The theoretical modeling and numerical simulation should be compared with observations in details. Why and how a lower resistivity, which is necessary for the triggering of magnetic reconnection, could exist in the solar lower atmosphere is another important problem for understanding the magnetic reconnection.

Key words: solar physics; small scale activities; Ellerman bomb; microflare