

太阳耀斑的先兆

陈协珍

(中国科学院紫金山天文台)

提 要

本文综述近20年来,国内外在探讨耀斑活动先兆方面所取得的进展。着重总结了光学、射电观测研究的成果。概括了迄今所掌握的耀斑发生前的征兆。回顾和介绍了我国天文工作者对这一领域所做的贡献。

一、引 言

耀斑爆发是太阳大气中最剧烈的等离子体不稳定引起的动力学过程。一次大耀斑往往包含了波长从短于 1\AA 的 γ 射线和X射线,直到波长达几km的射电波段的几乎全波段电磁辐射增强,特大耀斑还可能伴随高能粒子辐射。目前普遍认为耀斑不同波段的辐射增强来源于太阳大气的不同层次^[1,2]。从最早观测到的 H_{α} 耀斑绝大多数产生在黑子群附近上空这一事实出发,人们就认识到耀斑现象与太阳磁场或某种电磁过程有密切的联系。近20年来虽然在太阳耀斑的理论研究以及观测手段方面有很大的进展,但由于耀斑过程的复杂性,牵涉到许多尚未完善建立的理论。即使在观测方面,无论是地面观测或空间观测,由于种种因素的干扰使我们难以直接得到十分可靠的资料,所以直到今天我们还没有完全确切地掌握和洞察到耀斑的发生、发展的细微过程。因此耀斑理论的完善,还有待于今后得到更多波段高时空分辨率的资料。

由于耀斑活动密切联系到日地空间物理状态,直接影响空间探测,卫星的发射和安全飞行,地球大气及电离层的变化,地磁扰动等地球物理后果,甚至与地震,水文,人类的健康疾病等都可能有关。因此多年来人们一直在寻求预报耀斑的途径,特别着重于研究耀斑产生区域的物理条件和耀斑发生前的征兆,并已取得一系列进展。

二、耀斑发生前的征兆

按照一般定义,所谓“耀斑先兆”是指耀斑开始或脉冲相以前在耀斑区或其附近产生的瞬时效应^[3,4]。胡文瑞等人^[5]详细地总结了多年来对耀斑的观测和研究。Gaizauskas^[6]利用多波段观测结果总结和讨论了耀斑前(pre-flare)活动问题。本文主要从光球、色球、射电、磁场及速度场等方面观测的结果总结目前已掌握的耀斑先兆,并简要介绍我国天文工作者对

1991年8月4日收到。

1991年12月12日收到修改稿。

* 国家自然科学基金及中国科学院重大项目资助课题。

这一研究领域所做的贡献。

1. 暗条和色球纤维的变化

最早被人们注意到的是暗条活动与耀斑有密切联系。早在本世纪 30 年代,不少太阳物理学家们对暗条进行了详细的研究^[6-8]。Smith 等人^[9]曾统计得到:大约 45%的大耀斑发生前一小时左右伴随暗条活动。Martin 等人^[10]研究了 1959 年 5 月至 1961 年 12 月间发生的大于或等于 1 级的 297 个耀斑。他们利用透过带宽为 0.5 \AA 的双折射滤光器,分别在 H_{α} 线心和 $H_{\alpha}-0.5 \text{ \AA}$, 以及 $H_{\alpha}+0.5 \text{ \AA}$ 处拍摄耀斑照片,结果发现:在耀斑发生前两小时一些暗条就有了明显的变化,以后活动加剧。在耀斑发生前一小时,利用 $H_{\alpha}-0.5 \text{ \AA}$ 的离带观测可以看到有 53%的耀斑发生前暗条明显变黑,但若通过 H_{α} 线心观测,仅能发现有 12%的耀斑发生前有暗条变化的迹象。这表明在耀斑发生前附近暗条有迅速膨胀和上升的运动。

Rust 等人^[11]利用透过带为 0.25 \AA 的滤光器仔细研究了日面中心一个 1 级耀斑发生前附近暗条的视向运动。他们以每 20 秒拍 8 幅的时间分辨率得到一系列离带的活动区暗条照片,从中发现:耀斑前暗条上升,并缠绕成螺旋状,而在耀斑后暗条的螺旋结构放松。Tanaka^[12]认为:位于中性线的暗条或色球纤维的激活在耀斑爆发中有重要的作用。在耀斑前色球纤维呈剪切状态,这与黑子运动有密切的联系。

为了进一步研究暗条和色球纤维在耀斑发生前的变化,探讨耀斑触发的物理因素,21 周太阳活动峰年期间,许多国家开展了多波段的联合观测,证实和发展了过去已有的观测结果。例如:Schmahl^[13]分析了 1980 年 6 月 24 日至 6 月 30 日的 Boulder No. 2522 和 No. 2530 的活动复合体,着重研究了 10 个 M 级以上耀斑事件,发现在耀斑爆发前通过 H_{α} 和紫外波段观测都证实暗条有上升运动。文中给出 Martin 的观测结果是:1980 年 6 月 24 日 00^h02^m UT 达到极大的 M1 级耀斑所属的活动区,在耀斑开始前半小时有暗条激活。暗条中部蓝移大于等于 1 \AA ,而在两端有红移。这表明:耀斑爆发前暗条顶部向上膨胀,而在两端的腿部有物质下流。

Farnik 等人^[14]分析了 1981 年 5 月 16 日双带耀斑的 H_{α} 资料,发现在耀斑前 15 分钟暗条激活的同时磁剪切减小。这也许意味着在 H_{α} 耀斑初相前能量已经释放。对 1980 年 5 月 21 日耀斑资料分析中,de Jager 和 Švestka^[15]也注意到在大耀斑发生前暗条激活。Gaizauskas^[16]利用高时空分辨率的 H_{α} 单色像和离带资料分别研究了 1977 年 4 月 18 日一个亚耀斑及 1980 年 6 月 25 日 1B 级耀斑发生前暗条的变化。Zirin^[17]总结了多年来的高时空分辨率资料后认为:所有的耀斑都和暗条有联系。但是 Gaizauskas^[16]却认为不是所有的大耀斑都伴随暗条爆发,也不是所有与耀斑有关联的暗条都有一个耀斑前相(pre-flare phase)。他用 1980 年 5 月 21 日、6 月 22 日及 6 月 25 日的三个观测实例来说明这个论点。他也肯定了在活动区暗条中增强的物质运动是最好的预报耀斑指示。Kahler 等人^[18]考察了暗条的变化和耀斑爆发的过程后认为两者是共生的现象,其起因是由于磁场的某种不稳定性所造成的。这一看法也是目前普遍公认的。

值得注意的是,近年来广泛被研究的暗条不只是过去认为沿纵向磁场中性线走向的“经典”的暗条,而更多被注意的是拱状暗条、色球纤维、场过渡弧(FTA)等色球上突出的精细结构。70 年代初期,McIntosh^[19]就提出可以从 H_{α} 的高分辨单色像推断出磁场结构。色球

的小纤维沿水平磁场排列。比小纤维更黑更粗的拱状暗条系(AFS), 通常出现在新的发展着的谱斑区, 拱状暗条的足与日面倾斜小于 30° , 其顶部高度约为日面上1万公里, 通常连接相反极性区域。它们是沿着浮现磁场力线的轨迹。所以研究这些色球表面暗的环状结构对理解活动区早期发展, 磁流浮现过程以及太阳耀斑的触发有很重要的意义, 这些结构与磁场是密切相关的。

2. 耀斑前光球和色球磁场的变化

从50年代末期开始, 以Severny为首的一批学者们就着手研究磁场和耀斑之间的联系问题。Gopasiuk和Severny等人^[20]指出: 强的磁场梯度($\nabla H \geq 0.1 \text{G} \cdot \text{km}^{-1}$)有利于3级耀斑的出现。以后, Moreton和Severny^[21]又提出: 耀斑初始亮点常出现在纵向磁场中性线附近, 横向场的交叉处。Martres等人^[22]还提出发展磁结构的概念。他们认为耀斑初始亮点所在的两个磁细节需要反向演化, 即一个增加, 一个减小。对1980年5月21日20^h50^mUT开始的大耀斑所在活动区的磁图分析证实了Martres等人所提出的经验规则^[15, 23, 24]。

对于耀斑发生前后光球磁场的变化问题, 多年来许多人的观测结果很不一致。例如苏联的Severny等人^[20]提出: 不少大耀斑在发生前磁场梯度增加, 耀斑后又恢复到原来状态。而美国的Howard和Babcock^[25]对几个大耀斑观测的结果并未发现耀斑前后磁场有明显的变化。以后, Harvey等人^[26]利用基特峰天文台的磁像仪以80—120s的时间间隔, 在20h内得到800幅空间分辨率不低于2'5的磁图。研究结果表明: 活动区内纵向磁场在局部小区域中有时间尺度约为小时量级的变化。他们将这些变化与在此期间内发生的55个小耀斑进行了比对, 没有发现有统计的联系。70年代中期, Tanaka^[27]利用大熊湖天文台视频磁像仪对1974年9月10日21^h20^mUT开始的一个2B级耀斑的前后磁场进行了观测。磁图的时间分辨率为30s, 空间分辨率为2'5 × 3'2。他发现55%的耀斑区小于100G的弱磁场有振幅为30%到100%的变化, 且变化正好发生在耀斑开始之时。

近20年来磁流浮现的观测结果和理论研究得到很大发展。过去人们早就注意到: 耀斑常出现在发展的黑子群附近, 也就是磁场增强的活动区中。Rust和Bridge^[28]利用中性氢的10830 Å谱线研究了12个亚耀斑, 发现其中8个耀斑至少有一个耀斑核很靠近正在浮现的磁场区。Martin等人^[29]收集了21周峰年期间对Hale No.16918活动区从1980年6月16日至23日共7天的联合观测资料, 从这个活动区中找到17个新磁流浮现区。该活动区在7天中共产生86个耀斑, 其中有54%集中产生在新浮现磁流区; 20%是在新磁流浮现区与老场的交界处; 不到三分之一的耀斑发生在新浮现磁流区之外。特别值得注意的是: 17个新磁流浮现区大多位于暗条附近。这说明暗条的激活与新磁流的浮现有密切的联系。Kundu等人^[30]也给出了耀斑发生与浮现磁流相关的观测证明。目前普遍认为磁流浮现有利于发生耀斑, 但并非耀斑发生的充分条件。

近年来, 随着磁场测量仪器和各种观测手段时空分辨率的不断提高, 对小尺度磁场的研究引起很大兴趣。除了60年代Martres等人提出的发展磁结构外, 70年代初又有人提出运动磁结构(MMF)的概念。Harvey和Harvey^[31]仔细分析了观测资料, 认为运动磁结构出现在黑子半影边界, 以 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度径向地由黑子边界向外移动, 其空间尺度小于或等于2'', 最大磁场强度为300G, 平均磁通量为 10^{11}Wb (10^{10}Mx)量级。Roy和Michalitsanos^[32]利用

大熊湖天文台的视频磁像仪观测了 1973 年 7 月 3 日到 7 月 5 日的活动区, 他们以每 30s 取得一幅磁图的时间分辨率和 2'' 的空间分辨率的资料与 H_{α} 和 Ca II K 的单色像比对, 发现色球活动增强与运动磁结构有关。

80 年代中期 Martin 和 Livi 等人^[33,34]利用大熊湖的视频磁像仪进一步研究了小尺度磁场的演化特征。他们发展了运动磁结构的概念, 取得了磁对消、磁通量聚合等新的观测成果。他们认为运动磁结构是由于黑子的存在所加强的网络内磁场, 并且很可能是一种扰动磁场, 是黑子边界层的表面波与黑子磁通量的相互作用的结果, 它在黑子的能量平衡中起一定的作用。

Livi 等人^[35]进一步研究了磁对消与耀斑的联系。他们利用美国大熊湖天文台和我国怀柔观测站的高分辨率资料, 得到的结论是: 产生耀斑的新磁流浮现区都能观测到磁对消。耀斑所在区域附近中性线两侧相反极性的磁流向相反趋势演化: 即一种极性磁流增强; 另一种极性磁流减弱。他们认为: 磁对消是耀斑产生的必要条件。

近十多年来, 磁剪切在耀斑产生中的重要作用广泛被人们接受。磁环足点的位移及由此产生的磁剪切位形能积累足够的能量, 可作为一种有效的耀斑形成机制^[36-38]。不论是磁流浮现, 磁剪切都和等离子体运动分不开。

3. 活动区中等离子体运动、磁剪切和电流

磁场与速度场的关系可从磁场随时间变化的磁感应方程中看出:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \text{Curl}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

式中, \mathbf{B} 为磁矢量, \mathbf{V} 为速度, η 是与电导率有关的磁粘滞系数。如果认为在太阳大气中磁场是“冻结”的, 上式右边第二项可以忽略, 支配磁场变化的是第一项。由此不难看出: 速度场的变化直接影响磁场的变化。变化的磁场又可引起电流, 因此活动区中等离子运动, 磁场剪切及电流三者是密切相关的。

早在 70 年代初期, Martres 等人^[39,40]就提出: 在中性线附近的水平旋涡运动是产生耀斑的必要条件。这种水平运动实际上就是剪切运动。Sakurai^[41]在分析大的质子耀斑事件时注意到它们与黑子群的转动有关。他提出反转极性是质子耀斑的重要征兆。Harvey 等人^[42]利用基特峰天文台的 512 通道磁像仪研究了 24 个活动区的 77 个耀斑资料, 发现其中 55 个耀斑区域有特殊的速度场分布。48 个耀斑区的速度场表现出明显的水平剪切。他们认为可根据速度场的特征预报耀斑。

Machado^[43]研究了 SMM 取得的 HXIS 资料, 对 NOAA 2372 活动区从 1980 年 4 月 4 日至 4 月 14 日间发生的 70 多个耀斑的硬 X 射线发射变化作了仔细分析, 发现与磁剪切和重联有明显的关系。Athay 等人^[44]分析了 1980 年 11 月产生的 Hale 17 255 活动区, 发现这个区域在 11 月 6 日至 12 日间磁轴转动了近 25° , 表明有磁剪切存在。他们认为耀斑的发生与磁剪切有关, 但磁剪切并非耀斑产生的充分条件。Zirin 等人^[45]研究了与大耀斑密切相关的 δ 黑子群后指出: δ 黑子群的形成与新磁流浮现及黑子的运动密切相关。如果一个发展着的双极黑子群与另一个双极群碰撞, 相反极性被推在一起形成 δ 黑子结构往往发生大耀斑。

近年来 Hagyard 和她的同事们^[46-48]用向量磁图资料研究了活动区磁场变化和电流问

题。她得到的结果是: 耀斑产生在磁剪切大的区域。她用马歇尔空间飞行中心向量磁像仪得到的活动区横向磁场资料计算了光球上空电流密度的垂直分量的空间分布, 结果表明: 在靠近中性线附近, 耀斑产生区域电流密度的垂直分量最大。Venkatakrishnan等人^[49]利用向量磁图研究了1984年4月25日4474号活动区的耀斑发生前80min的资料, 并对磁图进行了投影改正后, 发现耀斑所在区域的磁剪切较非耀斑区大得多。

Browning和Priest等人^[50-52]在观测的基础上对磁流浮现, 磁剪切以及磁重联等理论进行了深入的研究。他们认为: 当磁环扭曲超过临界值或其足点相距太远时, 磁环将因磁张力和磁浮力的作用而失去平衡。磁拱平衡被破坏可能使日冕环物质抛射出去, 由此带动了下面的磁力线, 使日珥缓慢上升直至下部的磁重联开始, 进而触发双带耀斑。

Machado^[53]分析了硬X射线成像光谱仪(HXIS)和马歇尔空间飞行中心的向量磁像仪的观测资料后认为: 在一个活动区内存在两个或多个相互作用的双极结构。耀斑的初始结构是由一个初始的双极结构和一个或多个邻近双极结构靠近, 互相碰撞而引起的, 其能量释放是在初始的双极结构内或在两个双极结构的界面。Abramenko等人^[54]研究了两个活动区中的磁场结构和垂直电流, 结果表明: 耀斑活动与局部及全球电流的数值和方向都有密切的关系, 耀斑倾向于出现在电流向上的区域, H_{α} 谱斑也和垂直电流有关, 在一些区域向上电流越频繁出现, 谱斑亮度越亮。Low和Wolfson^[55]认为: 在一个稀薄的具有无限电导的等离子体内, 剪切磁场足点的连续边界运动能够促使多重电流片产生。近年来, 磁重联和电流片问题受到广泛重视, 普遍认为它们在耀斑能量的建立和释放过程中起着重要作用。

4. 在射电、紫外和X射线波段的耀斑先兆

众所周知, H_{α} 耀斑爆发前在太阳射电辐射波段产生一系列增强辐射。对毫米波缓变分量的观测与理论研究有助于了解活动区上空色球及色球日冕过渡区的物理状态。用高分辨率的毫米波偏振观测可以测定色球磁场。毫米波射电辐射增强与耀斑活动有密切联系。例如, Mayfield等人^[56]进行过统计, 他们将1967年到1972年间1B级以上耀斑与毫米波射电增强辐射相比较, 发现产生大量耀斑的活动区毫米波辐射的特点是辐射强、面积小; 而一些面积大的毫米波增强辐射区域却很少产生耀斑。这可解释为耀斑的产生与紧密复杂磁极区有关。磁通量密度和电流密度大的局部小区域容易产生耀斑。

Schmahl^[57]对21周年峰年期间联合观测的资料分析结果证实, 耀斑发生前20分钟除在 H_{α} 和紫外区可看到暗条上升外, 还可看到X射线谱线相对暗弱, 同时在离耀斑1'—2'处, 5—15 keV的X射线呈“闪光”现象。在射电波段, 微波辐射增强, 偏振度增大, 且有偏振面旋转(flip)的迹象。在耀斑脉冲相时或脉冲相前, 在边缘耀斑上可观测到日冕的扰动。

Machado等人^[57-60]研究了SMM的资料后提出: 射电Ⅲ型爆往往在耀斑发生前一小时就开始了, 耀斑前几十分钟可观测到软X射线辐射增强, 而能量小于100keV的硬X射线在耀斑前2min明显增强, 说明磁重联在耀斑前已开始。

MacNeice等人^[61]分析了1980年11月12日一个M1.4级耀斑的多波段观测资料, 发现最早发亮的是O V线, 与此同时 H_{α} 暗条消失。在脉冲相前在O V线中看到暗条以 $60\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度抛射。在 H_{α} 中看到耀斑环足点发亮和Ca X IX共振线加宽是在脉冲相以前2分钟。在脉冲相时, 检测到的非热硬X射线辐射是来自环足, 同时在Ca X IX线中看到有 $200\text{—}250\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$

的物质向上流动表现出的蓝移。根据上述观测事实他们对耀斑的机制进行了讨论。

近年来人们对紫外和 X 射线观测中发现的亮点和微耀斑也引起很大兴趣。在过渡区等离子体中的微耀斑用 C IV 1548-Å 谱线的观测结果被 Porter 等人^[62,63]仔细地研究过。一般不能用 UV 微耀斑来预报大耀斑, 因为 UV 事件是脉冲型的, 上升时间一般小于 20s, 甚至有时短于 5s。关于这方面的问题可参考文献[64]。

三、我国太阳工作者对这一领域所作的贡献

我国太阳工作者在寻求耀斑先兆课题上作了大量工作, 并应用到太阳活动预报任务上, 在 70 年代末期国际学术讨论会文集中发表了一系列文章^[65-67]。同期, 王家龙、董士仑等^[68-70]利用分级统计方法得到质子事件的预报判据, 他们还着重研究了质子耀斑与黑子磁结构之间的关系。丁有济、张柏荣等着重研究黑子半影的旋涡结构与耀斑活动的关系^[71-74], 得到重要的结果。郭权世等人^[75]从 70 年代初期开始对磁流浮现问题进行了系统的研究。他们利用 20 周连续拍摄的活动区光球和色球资料研究七个 II 级以上耀斑的触发, 发现一般磁流浮现的时间尺度为 5—6h。一定速度和强度的新磁流浮现在磁中性线附近是耀斑产生的重要条件。21 周峰年期间, 他们利用 20cm 折光望远镜拍摄了许多大活动区的白光连续资料, 研究了 H_α 耀斑, 软 X 射线爆和光球扰动间的联系, 发现在耀斑前和耀斑过程中光球下层有快速浮现的磁流, 其表现形式为从黑子本影“抛出”磁场和黑子群内白光辐射的增强, 它们足以供给大耀斑的能量。从光球下层快速上升的能量在水平方向上有明显的动力学效应, 它使其通道上的小黑子变形、瓦解, 甚至在几分钟至几小时内消失^[76]。通过对 1981 年 5 月 SESC No. 3106 大活动区中发生的三个 3B 级大耀斑的研究, 也得到类似的结论^[77]。陈协珍等人^[78]还对活动区中出现的白光辐射增强进行了探讨, 认为这是活动区不稳定的标志, 可作为耀斑先兆之一。

马骥、艾国祥等^[79-81]研究了耀斑活动区的无力场特征后指出: 在密集的多极黑子构成的局部区域中, 同极性的黑子分裂, 互相排斥, 异极性黑子相互靠近, 向异极区中场强较弱部份的挤压和入侵, 是一大批质子耀斑活动区的共同特点。1985 年北京天文台怀柔观测站建立起我国第一台视频磁像仪, 为我们研究活动区物理创造了必要的条件^[82]。近年来, 云南天文台和紫金山天文台的精细结构望远镜也取得了一批高时空分辨率的白光和 H_α 单色光照片, 为开展耀斑先兆的研究打下了基础^[83,84]。

80 年代初期, 史忠先、汪景琇等人^[33,34]利用国外资料研究了小尺度磁场的演化。史忠先等人^[85]用怀柔磁场望远镜取得的资料, 对一个亚耀斑进行了研究, 他们的结果是: 耀斑与对消磁结构的磁通量减小有关。具体的测量结果是: 耀斑前附近磁场梯度为 $0.15 \text{ G} \cdot \text{km}^{-1}$, 耀斑爆发时为 $0.17 \text{ G} \cdot \text{km}^{-1}$, 耀斑结束后附近的磁场梯度为 $0.10 \text{ G} \cdot \text{km}^{-1}$ 。他们还观测到对消磁结构处于日面视向速度的下降区, 说明磁对消可能包括磁通量下沉, 也可能同时包括磁场湮灭现象。艾国祥、李威等^[86,87]对许多大活动区的速度场资料进行了分析, 他们发现耀斑大多发生在红移区。陈协珍^[88-90]从多年的 H_α 单色像和光谱观测资料中发现, 耀斑与物质运动及磁剪切关系十分密切。她利用 Loughhead 等人^[91]提出的方法定量地计算了几个耀

斑发生前活动暗条的变化，证实耀斑前附近暗条有膨胀、上升及扭转运动，与观测十分符合。活动暗条所在平面与日面的倾角不断改变，同时方位角也在不断变化。这进一步证实了 Low 等人所提出的磁剪切储能机制是有现实意义的^[86-88]。曹天君、罗葆荣等^[82,83]研究了无黑子区耀斑产生的机制。林元章等^[94,95]从观测资料中发现耀斑核位于纵向电流密度峰值处，这一事实支持了耀斑是由过剩电流引起的等离子体不稳定性而触发的理论。

近年来对射电快速(秒级以下)尖峰辐射的研究日益深入并已取得了极为珍贵的资料^[86-89]，通过这方面的研究可以进一步探讨耀斑区高能粒子的起源、加速等问题。目前已普遍认识到为研究耀斑这一复杂现象需要取得多波段的观测资料进行综合分析。王家龙等^[100]对一些爆发事件做了系统的研究。

除了在观测、资料分析方面做了大量工作外，我国天文工作者在耀斑活动区物理、耀斑能量建立、耀斑模型等理论研究方面也取得很大进展。早在 70 年代中期，继 Nakagawa 等人之后，不少人用 $H\alpha$ 色球照片上色球纤维的形状排列估计了无力因子 α 的变化，进行活动区上空势场和无力场的理论计算，将其结果与观测比对，证实了当无力因子 α 大时容易引起耀斑^[79,101,102]。苏庆瑞^[103]拓展了 Low 的非线性无力场工作，他将边界条件写成更为普遍的形式得到二维非线性无力场的解析解。计算表明：当光球上的纵向磁场梯度和磁力线与磁中性线的剪切角都随着时间增加时，较高的磁弧就向较低磁弧演化，形成的低磁弧中密度和温度都逐渐增高并且有相当强大的电流系统，从而提供了产生耀斑的条件。近年来，他又深入研究磁剪切和磁挤压与预耀斑环的关系^[104]。利用有限元方法对非等温大气的磁流体静力学方程求解，他得到的结果是：对于高磁场梯度区的活动区磁场容易封闭而不易于形成开磁场结构，需要强的磁剪切才能形成开磁场结构，再由撕裂模不稳定性触发耀斑。因此高磁场梯度区的磁能容易积累而不易于释放，从而为形成大耀斑提供了条件。反之，对于低磁场梯度结构，能量不能积累很多，故易于发生小耀斑。这与实际观测相符合。吴林襄、胡文瑞、宋慕陶等在利用磁流体力学研究太阳活动区及太阳耀斑理论方面做了大量工作，并提出一些新的耀斑模型^[105-111]。

四、总结和讨论

综上所述，目前普遍认为：太阳活动区中高温等离子体的某种运动及新老场的相互作用是引起耀斑的重要原因。从光学和射电观测中发现的耀斑先兆可简单总结如下：

1. 靠近磁中性线附近一定强度的新磁流快速浮现；
2. 新的黑子(或小孔)浮现，黑子群迅速发展，谱斑亮度突增，微波辐射增强；
3. 磁中性线扭曲，反极性磁流互相入侵，由于挤压往往产生“海湾结构”；
4. 黑子的运动往往导致黑子半影纤维呈旋涡结构；
5. 活动暗条(或色球暗的环状物)膨胀和上升、转动和扭绞、暗条内部物质迅速下落，在速度场中表现为蓝移和红移等。

不同类型的耀斑可能有不同的物理机制，所以并非所有的耀斑都具有上述全部征兆。但无论如何，耀斑的大规模能量释放是活动区不稳定所导致的，这种不稳定性必然会反映在耀

斑区的电磁特征方面。目前的关键问题仍然是一方面要增加观测手段,提高观测资料的时空分辨率,另一方面深入进行耀斑物理机制的研究。王家龙、张柏荣^[112]在评述太阳活动预报一文中指出:短期预报目前多半采用先兆法,物理预报尚不能给出常规方法和投入常规应用。近年来行星运动对太阳表面产生摄动,可能触发太阳活动的理论又有人提出^[113-117],这也许是一个不可忽略的外因,值得进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 胡文瑞、林元章、吴林襄等编著,太阳耀斑,科学出版社,(1983).
- [2] Dennis, B. R. and Schwartz, R. A., *Sol. Phys.*, 121 (1989), 75.
- [3] Priest, E. R. et al., in *Energetic Phenomena on the Sun*, ed. by M. R. Kundu et al., NASA CP-2439, Ch. 1, (1986).
- [4] Tandberg-Hanssen, E. and Emslie, A. G. (eds.), in *The Physics of Solar Flares*, p. 140, Cambridge Univ. Press, (1988).
- [5] Gaizauskas, V., *Sol. Phys.*, 121 (1989), 135.
- [6] Newton, H. W., *M. N. R. A. S.*, 102 (1932), 2.
- [7] Giovanelli, R. G., *Ap. J.*, 91 (1940), 334.
- [8] Dodson, H. W. and Hedeman, E. R., *Ap. J.*, 110 (1949), 242.
- [9] Smith, S. F. and Ramsey, H. E., *Z. Astroph.*, 60 (1964), 1.
- [10] Martin, S. F., and Ramsey, H. E., in *Solar Activity Observations and Predictions*, ed. by P. S. McIntosh, p. 371, (1972).
- [11] Rust, D. M. et al., *Sol. Phys.*, 41 (1975), 397.
- [12] Tanaka, K., *Sol. Phys.*, 47 (1976), 247.
- [13] Schmahl, E. J., *Adv. Space Res.*, 2 (1982), No. 11, 73.
- [14] Farnik, F. et al., *Sol. Phys.*, 89 (1983), 355.
- [15] de Jager, C. and Svestka, Z., *Sol. Phys.*, 100 (1985), 435.
- [16] Gaizauskas, V., in *Proceedings of Kunming Workshop on Solar Phys. and Interplanetary Travelling Phenomena*, ed. by C. de Jager et al. p. 710, (1985).
- [17] Zirin, H. (ed.), in *Astrophysics of The Sun*, p. 268, Cambridge University Press, (1986).
- [18] Kahler, S. W. et al., *Ap. J.*, 328 (1988), 824.
- [19] McIntosh, P. S., in *Solar Activity Observations and Predictions*, ed. by P. S. McIntosh, p. 65, (1972).
- [20] Gopasiuk, S. I. et al., *Izv. Krymskoj Astrofiz. Obs.*, 29 (1963), 15.
- [21] Moreton, G. E. and Severny, A. B., *Sol. Phys.*, 3 (1968), 282.
- [22] Martres, M. J. et al., *Sol. Phys.*, 5 (1968), 187.
- [23] Hoyng, P. et al., *Ap. J.*, 246 (1981), L. 155.
- [24] Harvey, J. W., *Adv. Space Res.*, 2 (1982), No. 11, 31.
- [25] Howard, R. and Babcock, H. W., *Ap. J.*, 132 (1960), 218.
- [26] Harvey, K. L. et al., in *Solar Magnetic Fields*, ed. by R. Howard, p. 422, (1970).
- [27] Tanaka, K., *Sol. Phys.*, 58 (1978), 149.
- [28] Rust, D. M. and Bridge, C. A., *Sol. Phys.*, 43 (1975), 129.
- [29] Martin, S. F. et al., in *Measurements of Solar Vector Magnetic Fields*, ed. by M. J. Hagyard et al., p. 403, (1985).
- [30] Kundu, M. R. et al., *Ap. J. Suppl.*, 57 (1985), 621.
- [31] Harvey, K. L. and Harvey J. W., *Sol. Phys.*, 28 (1973), 61.
- [32] Roy, J. R. et al., *Sol. Phys.*, 35 (1974), 54.
- [33] Livi, S. H. B., Wang, J. and Martin, S. F., *Aust. J. Phys.*, 38 (1985), 855.
- [34] Martin, S. F. et al., *Aust. J. Phys.*, 38 (1985), 929.
- [35] Livi, S. H. B. et al., *Sol. Phys.*, 121 (1989), 197.
- [36] Low, B. C., *Ap. J.*, 217 (1977), 988.
- [37] Low, B. C., *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20 (1982), 145.
- [38] Low, B. C., *Ap. J.*, 307 (1986), 205.
- [39] Martres, M. J. et al., in *Solar Magnetic Fields*, ed. by R. Howard, p. 435, (1971).

- [40] Martres, M. J. et al., *Sol. Phys.*, 53 (1977), 225.
- [41] Sakurai, K., *Sol. Phys.*, 23 (1972), 142.
- [42] Harvey, K. L. and Harvey, J. W., *Bull. Am. Astron. Soc.*, 11 (1979), 440.
- [43] Machado, M. E., *Sol. Phys.*, 99 (1985), 159.
- [44] Athay, R. G. et al., *Ap. J.*, 303 (1986), 877.
- [45] Zirin, H. and Liggett, M. A., *Sol. Phys.*, 113 (1987), 267.
- [46] Hagyard, M. J. et al., in *Proceedings of Kunming Workshop on Solar Phys. and Interplanetary Travelling Phenomena*, ed. by C. de Jager, et al., p. 179, (1985).
- [47] Hagyard, M. J. et al., *Adv. Space Res.*, 6 (1986), No. 6, 7.
- [48] Hagyard, M. J., *Sol. Phys.*, 115 (1988), 107.
- [49] Venkatakrishnan, P. et al., *Sol. Phys.*, 115 (1988), 125.
- [50] Browning, P. and Priest, E. R., *Sol. Phys.*, 106 (1986), 335.
- [51] Priest, E. R., and Forbes, T. G., *J. G. R.*, 91 (1986), 5579.
- [52] Priest, E. R., *Ap. J.*, 328 (1988), 848.
- [53] Machado, M. E., *Sol. Phys.*, 113 (1987), 57.
- [54] Abramenko, V. I. et al., *Sol. Phys.*, 134 (1991), 287.
- [55] Low, B. C. and Wolfson, R., *Ap. J.* 324 (1988), 574.
- [56] Mayfield, E. B. et al., *Nature, Phys. Sci.*, 232 (1971), No. 30, 82.
- [57] Machado, M. E. et al., *Adv. Space Res.*, 6 (1986), No. 6, 33.
- [58] Harrison, R. A., *Astron. Astrophys.*, 162 (1986), 283.
- [59] Kundu, M. R. et al., *Sol. Phys.*, 114 (1987), 273.
- [60] Machado, M. E. et al., *Ap. J.*, 326 (1988), 425.
- [61] MacNeice, P. et al., *Sol. Phys.*, 99 (1985), 167.
- [62] Porter, J. G. et al., *Ap. J.*, 283 (1984), 879.
- [63] Porter, J. G. et al., in *Coronal and Prominence Plasmas*, ed. by A. I. Poland, p. 383, (1986).
- [64] Tandberg-Hanssen, E. A. et al. (eds.), *The Phys. of Solar Flares*, p. 145, (1988).
- [65] Chen, X. Z. and Zhao, A. D., *STP Proceedings*, ed. by R. F. Donnelly, Vol. 1, p. 176, (1979).
- [66] Zhu, Z. Y. et al., *STP Proceedings*, ed. by R. F. Donnelly, Vol. 4, p. 114, (1979).
- [67] Ding, Y. J. et al., *STP Proceedings*, ed. by R. F. Donnelly, Vol. 1, p. 140, (1979).
- [68] 王家龙等, 北京天文台台刊, (1974), No. 3, 34.
- [69] 史忠先等, 天文学报, 16 (1975), 12.
- [70] 董士仑等, 北京天文台台刊, (1979), No. 1, 8.
- [71] 丁有济等, 天文学报, 17 (1976), 60.
- [72] 丁有济等, 天文学报, 18 (1977), 143.
- [73] 张柏荣, 云南天文台台刊, (1979), No. 2, 20.
- [74] 张柏荣, 云南天文台台刊, (1979), No. 3, 18.
- [75] 郭权世, 陈协珍, 赵爱娣, 紫金山天文台科研工作报导, 4 (1979), 1.
- [76] 郭权世等, 紫金山天文台科研工作报导, 3 (1981), 27.
- [77] Guo, Q. et al., *Proceedings of Kunming Workshop on Solar Phys. and Interplanetary Travelling Phenomena*, ed. by C. de Jager et al., p. 642, (1985).
- [78] 陈协珍, 赵爱娣, 紫金山天文台台刊, 4 (1985), No. 1, 25.
- [79] 马 骥, 艾国祥, 天文学报, 20 (1979), No. 4, 374.
- [80] 张 衡, 李伯殊, 天文学报, 22 (1981), No. 1, 44.
- [81] 张桂清等, 天文学报, 25 (1984), No. 1, 31.
- [82] 艾国祥, 胡岳风, 北京天文台台刊, 5 (1986), No. 2, 79.
- [83] 吴铭镛等, 第 22 太阳活动周年峰年日地整体行为研究专集Ⅱ, 胡文瑞等编著, p. 31 及附图, (1990).
- [84] 胡福民, 第一次中苏太阳物理讨论会文集, 苏联出版, 即将付印 (1992).
- [85] 史忠先等, 中国太阳地球物理资料, 1988年 2—3月, 31.
- [86] 艾国祥, 张洪起等, *STP Proceedings*, ed. by R. J. Thompson et al., Vol. 1, p. 264, (1990).
- [87] 艾国祥, 李 威等, 第一次中苏太阳物理讨论会文集, 苏联出版, 即将付印, (1992).
- [88] 陈协珍, 紫金山天文台台刊, 8 (1989), No. 1, 28.
- [89] Chen, X., 22 MAX Global Character Research of Solar Terrestrial System Spacial Issue 111, ed. by Hu Wenrui et al., p. 48, (1990).
- [90] 陈协珍, 第一次中苏太阳物理讨论会文集, 苏联出版, 即将付印, (1992).
- [91] Loughhead, R. E. et al., *Ap. J.*, 274 (1983), 883.

- [92] 曹天君, 许放敖, 成中杰, 天文学报, 23 (1982), No. 3, 203.
- [93] Luo, B., in Proceedings of Kunming Workshop on Solar Phys. and Interplanetary Travelling Phenomena, ed. by C. de Jager et al., p. 718, (1985).
- [94] Lin, Y. et al., *Sol. Phys.*, 109 (1987), 81.
- [95] Ding, Y. J. et al., *Sol. Phys.*, 109 (1987), 307.
- [96] Zhao, R. Y. et al., *Sol. Phys.*, 130 (1990), 151.
- [97] Fu, Q. J. et al., *Sol. Phys.*, 130 (1990), 161.
- [98] Jin, S. Z. et al., *Sol. Phys.*, 130 (1990), 175.
- [99] Li, C. S. et al., *Sol. Phys.*, 131 (1991), 337.
- [100] 王家龙等, 天体物理学报, 6 (1986), 26.
- [101] 苏庆瑞, 朱祖彦, 胡福民, 紫金山天文台科研工作报导, (1979), No. 1, 46.
- [102] Lin, Y. et al., in Proceedings of Kunming Workshop, ed. by C. de Jager et al., p. 259, (1985).
- [103] 苏庆瑞, 紫金山天文台科研工作报导, (1979), No. 3, 66.
- [104] Su, Q. R., *Sol. Phys.*, 127 (1990), 139.
- [105] 胡文瑞等编著, 太阳耀斑, 科学出版社出版, p. 501, (1983).
- [106] 彭 元, 吴林襄, 天体物理学报, 8 (1988), 195.
- [107] 宋慕陶, 天体物理学报, 9 (1989), 46.
- [108] 彭 元, 吴林襄, 天体物理学报, 9 (1989), 353.
- [109] 宋慕陶, 天体物理学报, 10 (1990), 267.
- [110] 宋慕陶, 张洪起, 天体物理学报, 10 (1990), 354.
- [111] Wu, S. T. and Song, M. T. et al., *Sol. Phys.*, 134 (1991), 353.
- [112] 王家龙, 张柏荣, 天文学进展, 8 (1990), 89.
- [113] Landscheidt, T., in STP Proceedings, ed. by P. A. Simon et al., p. 48, (1986).
- [114] 杨志根, 赵 铭, 天文学报, 29 (1988), 297.
- [115] Sturrock, P. A. and Bai, T., *Bull. Am. Astron. Soc.*, 23 (1991), 1028.
- [116] 陈协珍等, 天文与自然灾害, 地震出版社出版, p. 130, (1991).
- [117] 杨志根, 天体物理学报, 11 (1991), 370.

(责任编辑 舒似竹)

The Precursors of Solar Flares

Chen Xiezhen

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, a review of some histories and recent advances in the area of the precursors of solar flares is given. The observational results in optics and radio are summarized. The contributions of chinese solar scientists in this area are also introduced. Finally, a series of references on the precursors of solar flares is listed.