

太阳耀斑的观测性质

王 家 龙

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文综述了太阳耀斑的观测性质。首先叙述新的太阳耀斑集体的统计特征,然后着重根据新的空间与地面观测结果论述单个耀斑的时间过程与空间结构,较全面地介绍太阳耀斑的物理图像。最后,简单讨论了耀斑的供能机制及今后的观测与分析等问题。

一、前 言

太阳耀斑是太阳上最剧烈的局部区域的爆发现象,大的太阳耀斑往往对地球环境有很大的影响^[1]。因而太阳耀斑的研究不只受到太阳物理学家的重视,它还具有空间物理、地球物理以及空间开发与利用方面的意义。近年来,耀星和恒星耀斑研究的开展^[2],使太阳耀斑的观测与分析又具有恒星物理研究的意义。几十年来,地面的光学与射电观测虽然使我们对太阳耀斑有了相当的认识,但是有关耀斑的关键知识,却是近二十年特别是近十年以来空间观测和地空资料联合分析带给我们的。其中 SMM 和火鸟两颗卫星的观测工作起了极大的作用。现在我们已经能够探测到能量高达 1GeV 的太阳耀斑中子^[3],能获得高达 50keV 的、空间分辨率为 10'' 至 5'' 的硬 X 射线耀斑的二维像^[4],能在 $\leq 1s$ 的时段内观测一幅太阳 X 射线爆发谱^[5],能记录时间分辨为 1ms 的耀斑射电辐射精细时间结构^[6],能以 1'' 至 2'' (甚至更高)的空间分辨力和几高斯至十几高斯的灵敏度来测量太阳光球磁场^[7]。这些有意义的观测大大改变了我们关于太阳耀斑的传统概念,帮助我们认识到耀斑是一个按一定时间次序辐射各种电磁波和粒子的三维爆发过程,光学现象只是次级产物。虽然当前一些基于近代观测提出的理论模型可在不同程度上解释耀斑现象,但是,有关耀斑的根本问题,诸如能量释放过程的细节、热成分与非热成分的比例变化情况、耀斑高能粒子是如何在短时间内加速的等等,都还未获解决。观测工作的进展无疑会促进这些理论问题的解决。

本文主要综述从观测得到的太阳耀斑的时空性质。首先简单介绍几个新耀斑的集体行为时空特性,然后研究单个耀斑的观测性质,论述耀斑的时间过程和空间结构。最后讨论耀斑的能量机制以及为了进一步了解耀斑所应进行的观测和分析工作。

国家自然科学基金及中国科学院重大项目资助课题。

1991年5月27日收到。

1991年10月2日收到修改稿。

二、太阳耀斑的统计行为特征

几十年大量积累起来的耀斑观测资料,为我们探讨耀斑的统计行为提供了很好的实测基础。文[8]列出了许多众所熟知的耀斑性质。下面仅介绍与耀斑产率有关的几个较新的特性。

1. 时间分布特征——周期性与迟至性

(1) 耀斑产率的时间周期性 自从1984年文[9]指出 γ 射线耀斑的产率有154d的周期以来,许多人相继用不同时段资料对各类各级耀斑作了周期分析。文[10]分析了在25—33 keV能段上记录到的6776个硬X射线爆发,得到了158d的周期;文[11]分析了1966—1983年在 ≥ 1 GHz波段观测到的流量 ≥ 10 sfu的寿命 < 30 min的21 847个射电事件,得到152d的周期;文[12]分析1965—1984年的8821个 H_{α} 耀斑,得到155d的周期;文[13]对1980—1982年峰值流量 $> 1000 \text{ counts} \cdot \text{s}^{-1}$ 的硬X射线爆发作了分析,得到152d的周期。接着,文[14]更进一步,把这种分析推广应用于太阳活动指标,发现第19到第21太阳周的黑子数和10cm太阳辐射流量也有155d左右的周期。最近,文[15]将1980—1985年的硬X射线爆发作分级研究,发现除150d的周期外,峰值流量 $\geq 5000 \text{ counts} \cdot \text{s}^{-1}$ 的事件还有80d的周期。应注意到,上述这些研究主要使用1986年以前的资料。

与此相反,近年的某些分析对太阳活动的150d周期性提出了异议。Bai^[16]指出,用1984至1989年6月的较大的硬X射线爆发记录,得不到前述周期。文[17]分析1986—1988年记录到的5447个射电爆发,也没有找到这个周期。有趣的是,1989年3月和8月发生的高太阳活动又恰是相隔约150d。因此,似乎可以得出这样的结论:(a)对于第20、21周,各类太阳爆发的发生有154d的周期,甚至反映太阳活动水平的某些非爆发型的活动指标也有约150d的周期变化;(b)大太阳爆发事件的产率除150d周期外,还有80d的周期;(c)对于第22太阳周,150d左右的周期性在该周的上升位相中不明显。

(2) 大耀斑产率峰期的迟至性 大耀斑多产于大而复杂的活动区中,据前几个太阳周的观测资料,可知产生大耀斑较多的大活动区的出现常迟于黑子数的极大期^[18]。为探讨这一规律是否适于太阳高能事件,文[19]将1980—1987年太阳硬X射线爆发按峰值流量分成三级进行统计,发现硬X射线爆发的产率峰期有随峰值流量的增大而迟至的表现。实际上,不同的太阳活动指标的时间变化常有位相差^[20]。一般的表现是,黑子数峰期在前,然后是10cm流量和耀斑的峰,再后是大耀斑的峰。个别的强耀斑也发生在太阳黑子数的极小期。

2. 空间分布特征——群聚性与不对称性

绝大部分耀斑发生于含有黑子群的活动区中,耀斑在日面上的分布与黑子群在日面上的分布密切相关^[21]。大耀斑的分布更是与大而复杂的黑子群的分布有关。在研究活动经度区的统计性质时,曾发现1967—1969年期间49%的较大的质子耀斑产生在仅仅占日面(半球面)28%的活动经度区。在1946—1977年期间,有8个活动区的大耀斑产率是其余活动区的2.3倍。文[22]指出,1955—1985年出现的少数活动区产生46%的大爆发。大耀斑的群聚性是被确认的重要统计特征。

此外,由于行星际磁场的作用,观测到地球物理效应的耀斑在日面上的分布有东西不对

称性^[23]。近年更发现, 耀斑产生的激波有倾向于向赤道面传播的特征^[24]。耀斑在日面上常有南北半球不对称的分布, 文[25]的统计表明, 这种不对称分布随太阳周位相的变化而变化, 大耀斑有更强的南北分布不对称性。

三、单个太阳耀斑的性质

一个典型的强的太阳耀斑常常可以在射电、可见光、紫外、远紫外、X射线和 γ 射线等波段发射强烈的电磁辐射, 并在相应的能段发射电子、质子、离子和中子, 乃至抛射出 10^{16} 克左右的等离子体物质。本节从单个耀斑的时间过程开始, 论述耀斑的一般性质。

1. 时间过程

典型耀斑爆发过程在时间上可被分为预耀斑相(前相)、爆发相(脉冲相)和渐变相(主相)三个相连的位相, 并不是每一个耀斑都具有典型完整的三个位相, 例如1981年5月13日3B/X1.5的大耀斑是没有脉冲相的渐变型爆发。

在预耀斑相, 耀斑的先兆事件在主爆发之前几分钟到几十分钟出现。这些先兆现象包括活动区中 H_{α} 亮块或亮点的增强或出现、色球暗条的活动或消失、射电波段的小爆发以及软X射线辐射较长时间的弱增长等。1986年2月4日在3B/X3.0大耀斑之前约40分钟, 观测到了射电波段的辐射缓增和小爆发以及在软X射线波段(1—8 \AA)辐射的缓变增强^[26]。然而至今还没有观测到在预耀斑相有硬X射线爆出现。某些先兆现象也常称为耀斑的预热现象^[27]。1986年2月4日大耀斑的预热温度达 $1.7 \times 10^7 \text{K}$, 辐射量度达 $6.1 \times 10^{48} \text{cm}^{-3}$ ^[28]。大多数耀斑看起来似乎没有预相, 但是如果把预耀斑现象的概念扩展到包括物质运动和磁场结构的变化, 如剪切、挤压和红移等, 则每个耀斑均有预相存在。

在耀斑的脉冲相或爆发相, 各波段的辐射在原有的背景上突然大增, 除去2.22MeV和0.51MeV的 γ 射线辐射迟至之外^[28], 各波段辐射几乎同时开始, 上升的时间尺度具有分钟的量级。在硬X射线波段, 辐射几乎同时达到峰值, 有时可观测到高能硬X射线辐射的峰迟于低能硬X射线的辐射峰。这可能是由于高能粒子需要更多的加速时间。在微波波段, 随着辐射源向弱磁场区的扩展或运动, 会观测到低频辐射的峰迟于高频辐射的流量峰。上述两种延迟可长达 $\geq 5\text{s}$ 。观测发现, 耀斑的硬X射线辐射与微波辐射的时间变化曲线在形态上相符得很好。因而一般认为, 产生微波辐射的高能电子与产生硬X射线辐射的电子来自同一电子总体。大多数脉冲耀斑没有微波辐射流量峰相对于硬X射线辐射峰的迟至, 在某些渐变型耀斑中则可观测到明显的迟到现象^[29]。在短厘米波区还发现了射电(17GHz)辐射流量峰值与硬X射线($\geq 30\text{keV}$)辐射流量峰值有很好的关系。另外, 米波射电III型爆发常在耀斑脉冲相或更早出现, 成群的III型爆发与硬X射线爆发彼此相关。可见在耀斑主体爆发之前, 已经有少量的电子被加速到很高的速度, 甚至达到光速的几分之一。

脉冲相过程中, 在软X射线波段常可观测到谱线的变宽和蓝移, 反映出高能粒子的轰击和加热引起色球物质的湍动和蒸发。利用软X谱线Ca XIX和Fe XXV的加宽与蓝移, 推算出这种湍动速度约为 $100\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 物质向上运动速度约为 $350\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[30]。文[31]指出, 耀斑的软X射线与硬X射线辐射在时间结构特征上相似, 并且能量为20keV的电子降落到过渡区,

使过渡区加热,从而产生了辐射软X射线的热等离子体。在紫外区,早期观测表明OV($\lambda 1371 \text{ \AA}$)线辐射与30keV以上的硬X射线辐射在时间特征上彼此相符的程度 $< 1\text{s}$ 。后来用SMM卫星在紫外区的观测结论是^[32]:耀斑的OV线(1371 \AA)辐射与连续辐射($\sim 1600 \text{ \AA}$)具有同时性;紫外辐射与硬X射线辐射的时变曲线中,某些特殊的时间特征彼此可相符到0.1s内;OV的紫外线辐射和1600 \AA 附近的连续辐射总的说来较硬X射线辐射的时间特征结构迟约0.3s。这就导致一个严重的机制问题,在密度为 10^{12}cm^{-3} 的大气中产生硬X射线辐射和OV线辐射的20—100keV的电子并不能穿透到产生UV连续谱的区域($\sim 10^{14}\text{cm}^{-3}$),又怎么能几乎同时产生硬X射线与UV连续辐射呢?这个问题的解决将涉及到耀斑的辐射机制和能量传输问题。

1972年8月4日和7日首次在0.51、2.22、4.4、6.2MeV处观测到耀斑的 γ 射线的线辐射^[33]。耀斑的 γ 射线辐射在很宽的波段内几乎同时开始,相差 $< 2\text{s}$ 。与硬X射线辐射相比,耀斑的 γ 射线辐射流量峰要迟2—45s。从核反应来看,要产生 γ 射线辐射,需要把电子加速到2—10MeV。对于质子,要加速到 $\geq 30\text{MeV}$ 才能产生 γ 射线的线辐射,要加速到300MeV才能产生 γ 射线的连续谱辐射。因此,耀斑的高能辐射显然要求有一种短时间的大功率粒子加速机制。应该提到的是,文[34]报告了一个有意义的观测事实,即观测到耀斑的17GHz的时间轮廓上的每个脉冲峰含有两个次峰,其中第一个次峰与硬X射线辐射峰相符,第二个次峰则与 γ 射线流量峰相符。

在 高能段的另一个惊人发现是观测到了耀斑的中子(1GeV)发射。耀斑爆发过程中原子核相互作用产生的中子,很容易逃逸出太阳大气,因为日冕的密度很低,中子运动又不受太阳磁场的影响。在地球上观测到的耀斑中子比耀斑的 γ 射线辐射晚几分钟至20分钟。

观测发现,在可见光区,脉冲相耀斑的 H_{α} 面积迅速膨胀,在时间上与微波辐射峰相符,而 H_{α} 面积峰与硬X射线流量峰、微波流量峰之间有一个长的时间差,约为20至30min^[35]。将耀斑的 H_{α} 辐射、硬X射线和微波辐射的观测结果作时间过程的比对,可以得知,在脉冲相初期耀斑的 H_{α} 辐射强度与硬X射线辐射流量之间在时间上彼此相关,不同的硬X射线辐射流量峰与不同位置上的爆发相符合^[36]。耀斑的可见光光谱观测表明,在脉冲相 H_{α} 谱线有红不对称性。最近方成等^[37]观测到耀斑Ca IIK线的红不对称。总的看来,上述情况似乎有利于耀斑的电子束轰击及加热模型,快电子束可能是耀斑色球加热的重要因素。

近些年,人们用具有毫秒级的高时间分辨观测设备,在耀斑的射电厘米、分米波段和硬X射线波段观测到在流量曲线上有脉冲型结构,称之为尖峰(Spike),也常泛称为快速结构或时间精细结构等。这些尖峰的宽度与辐射频率有关,约为几十毫秒至几毫秒,短时间的尖峰结构常在耀斑的脉冲相或极大时刻出现。有趣的是,VLA在20cm波段观测到了日冕中的亮点^[38]。这类新的观测结果促进了称为微耀斑的研究的发展^[39]。

在耀斑的第三位相——渐变相,各种辐射的时间轮廓表现为平滑的缓慢的变化,有时也有小脉冲叠加在渐变轮廓上。耀斑的软X射线辐射流量和 H_{α} 面积在这个相内达到极大。高能双带耀斑的两个亮带则从膨胀转变到开始作反向移动,亮带渐渐分开^[40]。也就是说,亮带的膨胀对应于脉冲相,亮带的分裂运动对应于渐变相。这时,有些耀斑会产生米波射电II型爆发,并且有射电IV型爆发跟在II型爆发后。一般认为,射电米波II型爆发是耀斑激波在日冕中运动引起的,常与物质抛射相联系^[41]。

需要说明的是, 耀斑的渐变相并不是唯一地意味着能量的逐渐耗散。例如, 1982年6月3日大高能耀斑在 $>10\text{MeV}$ 能段有长达1000s的长辐射位相, 70%的 π 介子在这个位相产生^[42]。

2. 空间结构

耀斑的空间结构对于我们全面了解耀斑是极其重要的。以前单波段的耀斑研究只能给出某一相应层次的现象或状态, 不能获得完整的耀斑概念。70年代空间观测发现耀斑基本上具有三维环弧状结构, 现代几乎所有的耀斑研究均与环弧状结构相联系^[43]。近十年来, 空间和地面多波段观测使我们能直接对各波段辐射源的位置和变化。大量的观测工作表明: 耀斑的硬X射线辐射源的尺度范围是从小于 $10''$ 到 $2'-3'$; 硬X射线源相对于 H_{α} 源的位置情况是多种多样的, 在整个爆发过程中, 有的耀斑源有移动, 有的则保持稳定。Machado等^[44]分析耀斑的硬X射线二维像, 结论是: 脉冲式耀斑在脉冲相里在硬X射线波段($16-30\text{keV}$)显示为双源, 而在后期则变成拉长的单源。王家龙等^[35]分析1982年3月30日耀斑, 结果是: 硬X射线($20-40\text{keV}$)源的核出现在整个源的一端, 像是位于环弧或环弧系统的足部或腿部; 射电波段 35GHz 的一维强度分布的峰与硬X射线源的核心位置重合, 两者在后期同步地移到源的中央部分, 说明这两种辐射有共同的源; 在后期硬X源的核与软X射线源的核重合; 软X射线波段的源($7-14\text{keV}$)的核心位于整个环弧结构的中央, 在后期软X射线源几乎遮盖了整个 H_{α} 辐射亮块, 似乎表明热等离子体与 H_{α} 的发亮有较直接的联系。最近, Nitta等^[41]研究了1982年2月3日脉冲型耀斑, 得到的结果是: 在脉冲峰期耀斑有两个硬X射线源对应于环弧结构的足部, 即 H_{α} 增亮区; 在辐射衰减期, 硬X射线辐射变成了单源, 它与位于环弧结构顶部的软X射线辐射源相吻合; 另一方面, 耀斑的微波源在脉冲相位置很低, 接近黑子, 在衰减期微波源则移向高处。显然, 上述两个观测分析结果有某种相似之处。这类观测分析至少说明有一类耀斑的空间结构物理图像是: 爆发首先发生在环弧结构的上部, 高能电子沿环向下轰击, 打击环内物质产生硬X射线辐射, 同时, 在环弧内的磁场中产生微波辐射, 在色球层轰击和加热产生 H_{α} 辐射。然后, 随着物质的向上运动, 硬X射线辐射源和微波辐射源均向上移动到结构的顶部, 其投影看起来为结构的中央部位即色球亮带之间的部位。

但是, 从耀斑的观测资料还可看出, 有许多爆发, 特别是渐变型爆发, 具有与上述完全不同的图像。这些耀斑的硬X射线辐射呈单源, 位于两个 H_{α} 主亮块的上方。例如1981年4月1日大耀斑, 其硬X射线($13-29\text{keV}$)主源是沿着日冕拱形结构的顶部, 在纵磁场中性线的上方约 $2 \times 10^4\text{km}$ 处。该耀斑的热成分从初期开始就经历很大的变化, 但其硬X射线辐射源始终保持稳定不变。这似乎表明耀斑的加热与粒子的加速过程是在同一源中发生的^[45]。另一个有说服力的例子是1981年5月13日大耀斑, 其硬X射线辐射源($14-38\text{keV}$)也呈单体, 源的投影位置距耀斑的 H_{α} 双亮带有 $1'$ 之遥。它的软X射线源的位置和尺度均与硬X射线源相符。使用恢复环弧结构的技术^[46], 我们计算出硬X射线辐射源的位置在光球之上约 $6 \times 10^4\text{km}$ ^[47]处。看来, 这类观测结果是支持等离子体被俘获在磁弧结构上部的这种模型或物理图像的。

尽管观测已经给出了种种令人鼓舞的耀斑图像, 但是许多关键问题仍有待解决。比如, 耀斑的微波源是否与硬X射线源重合, 微波源是在 H_{α} 亮带之间, 位于环弧顶部, 还是位置较低接近环的足部, 以及热与非热成分的变化问题等等^[48, 49]。提高观测的时间和空间分辨力

是解决这些问题的必要条件。近代的观测丰富了我们关于太阳耀斑的物理过程和物理结构的知识,但是物理图像还不十分清楚,耀斑的几种模型,如电子束模型、热传导模型、俘获模型等,仍有待观测证明。

四、两点讨论

1. 耀斑的供能问题

关于耀斑的能源问题,较普遍的看法是:活动区中非势磁场的自由能提供了耀斑的爆发能,但供能与传能的具体机制并不很清楚。在一般给出的耀斑图像中,常设想耀斑能量来自磁环的一部分,爆发开始后再将能量传至其他部分^[50]。已知耀斑硬 X 射线辐射源的高度为 $4-6 \times 10^4 \text{ km}$, 位于日冕中。大耀斑 H_α 辐射源的投影面积可取为 $3 \times 10^9 \text{ km}^2$ (即约 1 000 面积单位),若原始释能区占磁环体积的 $10^{-1}-10^{-2}$,则释能 $4 \times 10^{32} \text{ erg}$ 的耀斑能源处的能量密度为 $4 \times 10^4-4 \times 10^5 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。若其能量全部来自磁场,该处场强应为 $10^3-3 \times 10^3 \text{ G}$ 。这个数字大于从射电和软 X 射线辐射推出的强度^[51]。因此,合理的想法应是,耀斑的能量来自整个系统。又知,开放式磁场是荷电粒子从耀斑区逃逸出太阳大气的必要条件,撕裂模式或扭转磁场的重联能产生“开放”式磁结构。文[52]分析边缘耀斑日珥并指出,如整个系统的电感为 $10^{-1}-10 \text{ H}$,则断开的磁环的松转可产生 10^7-10^9 V 的感应电动势,加速荷电粒子。所以应深入扭转与重联的联合作用,类似的机制使爆发能来自整个系统,而不是系统的一部分。

2. 耀斑的观测与分析问题

耀斑的观测是耀斑研究的基础,为了能在已经取得的进展上更深入地认识耀斑的能量问题、时间过程和空间结构,许多新的观测和研究计划都在试图利用当前太阳活动峰期的机会,作更多的完整的有高分辨力的耀斑观测。把空间和地面观测作综合分析,构成更合理更清楚的物理图像。为此,太阳物理学家正在以下几个方面作努力:

(i) 提高耀斑观测的分辨力,达到:二维成像观测的时间分辨 $< 1 \text{ s}$,空间分辨 $< 1''$;辐射过程观测的时间分辨 $\leq 1 \text{ ms}$;高能部分辐射谱观测的谱分辨 $\leq 1 \text{ keV}$ 。将于近期发射的日本卫星 Solar A^[53]上的设备可望在一定程度上满足上述要求。

(ii) 观测资料的成套性完整性是分析工作的重要关键,现在执行的许多太阳耀斑观测计划的目的是得到尽量多的成套而完整的多波段耀斑资料。目前,国际上组织了 FLARES 22 计划,进行世界性的耀斑联合观测。美国有 Max 91 计划^[54],其中包括在南极用气球作观测。苏联有 CORONAS 空间观测计划,并配合有地面观测网。我国有 Max 22 研究计划^[55],作日地和空间的观测与研究。这些计划与项目形成了空前大规模与空前高水平的太阳活动观测与研究活动,也给太阳物理,特别是耀斑物理研究带来了空前的希望。

(iii) 在众多的理论或方法的研究课题中,特别要指出的是,必须发展辐射谱的分析方法,增加耀斑辐射谱解释的唯一性,这是我们面临的一个重大任务。

(iv) 对于已经观测到的新现象,如耀斑在射电波段和硬 X 射线波段辐射的快速精细结构和耀斑核产生于色球 H_α 谱线的红移区^[56]等,必须给以确认性的观测和寻求合理的解释。

参 考 文 献

- [1] Speich, D., in Proc. Max 91 Workshop, ed. by R. M. Winglee and B. R. Dennis, p. 233. (1989).
- [2] Wiess, N. O., in Proc. 5th European Solar Meeting, ed. by E. -H. Schroter and M. Schussler, p. 3. (1987).
- [3] Chupp, E. L., *Solar Phys.*, 118 (1988), 137.
- [4] Nitta, N. et al., *Ap. J.*, 337 (1989), 1003.
- [5] Lin, R. P. and Schwatz, R. A., *Ap. J.*, 321 (1987), 462.
- [6] Benz, A. O., in Rapid Fluctuations in Solar Flares, ed. by B. R. Dennis et al., NASA CP 2449, p. 133, (1987).
- [7] Ai, G. X., *Publ. Yunnan Obs. Special Issue 1*, p. 5, (1989).
- [8] Svestka, Z., *Solar Flares*, Riedel, Dordrecht (1976).
- [9] Rieger, E. et al., *Nature*, 312 (1984), 623.
- [10] Kiplinger, A. L., *Dull. Am. Astron. Soc.*, 16 (1984), 891.
- [11] Bogart, R. S. and Bai, T., *Ap. J.*, 299 (1985), L. 51.
- [12] Ichimoto, K. et al., *Nature*, 316 (1985), 422.
- [13] Bai, T. and Sturrock, P. A., *Nature*, 327 (1987), 568.
- [14] Lean, J. L. and Bruckner, G. E., *Ap. J.*, 337 (1989), 568.
- [15] Wang, J. L. and Qui, Y., *Chinese Solar-Geophysical Data*, 1 (1990), 33.
- [16] Bai, T., in Proc. Max 91 Workshop 2, ed. by R. M. Winglee and B. R. Dennis, p. 46, (1989).
- [17] Lui, Y., *Publ. Yunnan Obs. Special Issue III*, p. 243, (1990).
- [18] Fritzoza-Svestka and Svestka, Z., *Solar Phys.*, 29 (1973), 417.
- [19] Wang, J. L., *Publ. Yunnan Obs. Special Issue I*, p. 331, (1989).
- [20] 王家龙等, 地球物理学报, 28 (1985), 641.
- [21] McIntosh, P. S., *Solar Phys.*, 125 (1990), 251.
- [22] Bai, T., *Ap. J.*, 328 (1988), 860.
- [23] 王家龙, 张柏荣, 天文学进展, 8 (1990), 89.
- [24] 魏奉思等, 地球物理学报, 34 (1991), 133.
- [25] Garcia, H. A., *Solar Phys.*, 127 (1990), 158.
- [26] Wang, J. L., *Publ. Beijing Astron. Obs.*, (1991), in press.
- [27] Cheng, C. C. et al., *Ap. J.*, 298 (1985), 887.
- [28] Chupp, E. L., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 22 (1984), 359.
- [29] Takakura, T. et al., *Solar Phys.*, 89 (1983), 379.
- [30] Antonucci, E. et al., *Solar Phys.*, 78 (1982), 107.
- [31] Tanaka, K. et al., in Proc. Hinotori Symp., p. 20, (1982).
- [32] Orwig, L. E. et al., in The Lower Atmosphere of Solar Flares, ed. by D. E. Neidig, p. 306, NSO/Sac. Peak, (1986).
- [33] Chupp, E. L., *Nature*, 241 (1973), 333.
- [34] Nakajima, H. et al., in Proc. Hinotori Symp., p. 273, (1982).
- [35] Wang, J. L. et al., *Solar Phys.*, 108 (1987), 169.
- [36] Gan, W. Q. and Fan, C., *Solar Phys.*, 125 (1990), 333.
- [37] Fan, C. et al., *Publ. Yunnan Obs. Special Issue III*, p. 284, (1990).
- [38] Habbol, R. S. et al., *Ap. J.*, 306 (1986), 740.
- [39] Benz, A. O., in Highlight of Astronomy, ed. by D. McNally, 8 (1989), 359.
- [40] 王家龙等, 天体物理学报, 1 (1981), 67.
- [41] Nelson, G. and Melrose, D., in Solar Radiophys., ed. by D. J. McLean and N. R. Labyum, p. 37, Cambridge Univ. Press, (1985).
- [42] Forrest, D. et al., Proc. XXVI COSPAR Symp., preprint, (1986).
- [43] Bray, R. J. et al., Plasma Loops in the Solar Corona, Cambridge Univ. Press, Ch. 4, (1991).
- [44] Machado, M. E. et al., *Solar Phys.*, 79 (1982), 85.
- [45] Takakura, T. et al., *Solar Phys.*, 94 (1984), 359.
- [46] Loughhead, R. E. et al., *Ap. J.*, 274 (1983), 883.
- [47] Loughhead, R. E. et al., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 37 (1985), 619.
- [48] Kundu, M., *Adv. Space Rev.*, 4 (1984), 157.
- [49] Kai, K., *Solar Phys.*, 111 (1987), 81.

- [50] Dennis, B. R., *Solar Phys.*, 121 (1989), 75.
[51] Dulk, G. A., in *Solar Radiophys.*, ed. by D. J. McLean et al., p. 53, Cambridge Univ. Press, (1985).
[52] 王家龙, 中国科学, A辑, 9 (1985), 840.
[53] Ogawara, Y., *Solar Phys.*, 113 (1987), 361.
[54] Dennis, B. R., *Adv. Space Rev.*, 8 (1988), No. 11, 29.
[55] Hu, W. -R. and Zhang, B. -R., *Publ. Yunnan Obs. Special Issue I*, p. 1, (1989).
[56] 艾国祥等, 科学通报, 36 (1991), 122.

(责任编辑 林一梅)

Observational Properties of Solar Flares

Wang Jialong

(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper we describe observational properties of solar flares. In the first section, statistical properties of solar flares are given briefly, with an emphasis on properties of major flares. In the second section, observational properties of individual flares, including the time process and spatial structure of flares, are investigated. And in the last section, some problems on flare energy source, flare observations and studies faced by astronomer engaging in solar physics are mentioned.