

分类号 \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_ 公开 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号 800212009b08

# 中国科学院研究生院 博士学位论文

## 关于剪切耀斑环的研究

周团辉

指导教师 季海生 黄光力 研究员

中国科学院紫金山天文台

申请学位级别 博士 学科专业名称 天体物理

论文提交日期 2009年5月 论文答辩日期 2009年6月

培养单位 中国科学院紫金山天文台

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 方成 院士

Typeset by L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub> at June 7, 2009

With package CASthesis v0.1h of C<sub>T</sub>E<sub>X</sub>.ORG

## 摘 要

太阳耀斑是太阳大气中磁场自由能的突然释放。从观测上来讲,表征磁场自由能的重要参数之一是磁场剪切(Magnetic shear)。利用矢量磁图,磁场剪切被定义为观测到的横场方向与利用观测纵场在势场近似条件下计算得到的横场方向之间的夹角。磁场剪切还可以用另外一个量来参考,即耀斑剪切(Flare shear),它被定义为共轭亮核间连线与近似磁中性线的垂线之间的夹角。在对耀斑物理的背景和近几年耀斑观测的最新进展简要概述之后(第一章),本论文围绕磁场剪切和耀斑剪切叙述了如下工作:

第二章,我们首先简要论述了磁场剪切和耀斑剪切的异同,并简单介绍了耀斑剪切理论上的物理意义。

在第三章中,我们通过博士期间做的几个工作,具体论述了耀斑剪切在观测上对于研究耀斑释能过程的意义,主要结论有如下几点:1) 在几个耀斑事例中,不管是耀斑环膨胀(Expansion)还是收缩(Contraction),耀斑剪切持续减少,我们将之称为退剪切运动(Unshearing motion),这从一个侧面反映了非势磁能的释放过程;2) 从一个耀斑事件的仔细研究说明,耀斑剪切和磁场剪切是相关联的。我们还发现剪切磁流的浮现会引起磁场剪切的增大;3) 相对于磁场剪切,我们更容易得到耀斑剪切的高时间分辨率的曲线,因而,可以得到耀斑剪切的时间变化率(Unshearing rate)。通过几个耀斑事例的分析,我们发现,耀斑剪切的时间变化率的负峰与硬X射线尖峰相关。

最后一章给出本文的结论和展望。

**关键词:** 太阳活动, 磁场剪切, 耀斑剪切, 退剪切运动



## Abstract

The solar flare is believed to be the suddenly release of free magnetic energy in solar atmosphere. In solar physics, one of the most important parameters for evaluating magnetic nonpotentiality from a vector magnetogram is magnetic shear, defined as the excess of the observed azimuth of the vector field over the azimuth of the potential field calculated from the observed distribution of magnetic flux. On the other hand, when no vector magnetogram is available, magnetic shear is usually estimated from flaring loops or their FPs. This kind of shear is called “flare shear”. The flare shear is defined as the angle formed by the line connecting the centroids of two flare ribbons or FPs and the line perpendicular to the neutral line. In Chapter 1, we give a brief introduction to the background of solar flare physics including the recent progress. In Chapter 2, we discuss the relationship between magnetic shear and flare shear. Also, we introduce the physical significance of flare shear. In Chapter 3, we analyzed 5 solar flares, our main results are: 1) For several events, the value of the flare shear decreases steadily during the contracting motion as well as during the expanding motion. 2) The flare shear is found to be correlated with magnetic shear. For example, the emergence of highly-sheared magnetic flux can cause an enhancement of flare shear. 3) HXR peaks are found to be correlated with negative peaks on the time profile of unshear rate. Discussion and conclusions are given in Chapter 4.

**Keywords:** solar activities, magnetic shear, flare shear, unshearing motion



# 目 录

摘要	i
Abstract	iii
目录	v
<b>第一章 太阳耀斑</b>	<b>1</b>
1.1 太阳耀斑概述	1
1.2 耀斑的研究历史	3
1.3 耀斑的一般特征	7
1.4 耀斑的分类	8
1.5 耀斑的辐射	9
1.6 耀斑前活动的观测研究	12
1.7 耀斑的能量释放和传输	13
1.8 耀斑理论模型	14
1.9 耀斑环的收缩	16
1.9.1 环顶源的下降运动	16
1.9.2 足点源的靠近	22
<b>第二章 磁场剪切与耀斑剪切</b>	<b>27</b>
2.1 磁场剪切	27
2.2 耀斑剪切	27
2.3 耀斑剪切的物理意义	29
<b>第三章 事例分析</b>	<b>35</b>
3.1 2003年10月29日X10级耀斑	35
3.2 2002年3月14日M5.7级耀斑	37

---

3.3	2002年7月26日M1.0级耀斑 . . . . .	38
3.4	2002年11月9日M4.9级耀斑 . . . . .	44
3.5	2005年1月20日X7.1级耀斑 . . . . .	46
<b>第四章</b>	<b>总结和展望</b>	<b>53</b>
	<b>参考文献</b>	<b>55</b>
	<b>发表文章目录</b>	<b>65</b>
	<b>致谢</b>	<b>67</b>



# 第一章 太阳耀斑

## 1.1 太阳耀斑概述

太阳是离我们最近的恒星，也是宇宙中唯一一颗可以进行具有空间分辨率观测和研究的恒星。正是由于这个原因，太阳物理学成为天体物理学中最早发展起来的，并对天文学的发展有重大影响的分支<sup>[1]</sup>。

传统上，我们把太阳分为宁静太阳和活动太阳两部分。宁静太阳是一个静止的、球对称的等离子体球。活动太阳是由黑子、日珥和耀斑等活动现象所组成的。它们叠加在宁静太阳大气上，并且与磁场密切相关。严格来说，宁静太阳也是有许多结构的，但是这些变化或者比较缓慢（例如宁静太阳风），或者比较有规律（如对流），或遍布太阳表面（例如色球网络）。太阳活动现象通常是指太阳上局部区域内的、随时间变化剧烈的活动体。

在太阳光球中，能观测到许多比周围背景明显暗黑的斑点，称为黑子。人类在古代就观测到黑子，但直到本世纪初才对它的物理本质有了初步认识。黑子是太阳表面磁场最密集的地方，也是太阳活动的根源。黑子大多呈椭圆形，虽然在明亮的光球背景下被反衬得比较暗，实际上它的温度仍然高达4000℃左右。在色球和日冕的大气层中，黑子周围偶尔会发生巨大能量释放的现象，称为太阳耀斑（solar flare）。太阳耀斑是最剧烈的太阳活动现象，也是太阳物理中研究最多的物理现象。我们通常把太阳上所有这些在时间和空间上的局部现象，以及所表现出的各种辐射增强，称为太阳活动。与此对应，黑子周围的区域称为太阳活动区（solar active region）。

太阳耀斑是最剧烈的太阳活动现象之一。其观测特征是，日面黑子群上空的大气中突然出现迅速发展的亮斑闪烁，寿命在几分钟到几十分钟之间。早期对太阳耀斑的定义是指用 $H_{\alpha}$ 单色光看到的太阳色球层谱斑中的突然增亮现象，也称为色球爆发。后来通过多种手段的综合观测，发现在 $H_{\alpha}$ 突然增亮的同时，还伴随有一系列更高能的现象发生，包括从 $\gamma$ 射线到X射线辐射，以及射电波段等几乎全波段的电磁辐射的增强，还伴随有各种高能粒子流，有的耀斑还伴随有大规模的物质运动和抛射现象（如图1.1）。因此现在耀斑的概念定义为发生

<sup>1</sup>本章部分参照了方成，丁明德和陈鹏飞合著的《太阳活动区物理》一书，特别致谢！

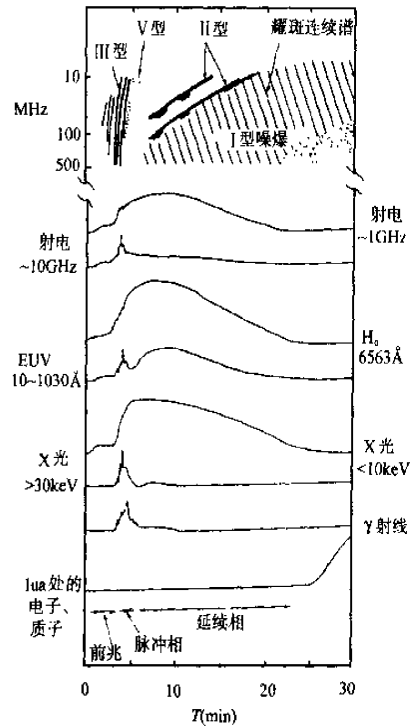


图 1.1: 一次大耀斑发生过程中各种电磁辐射和粒子发射随时间的变化<sup>[1]</sup>。

在太阳表面局部区域中突然和大规模的能量释放过程。目前普遍认为耀斑的基本结构是环或环系，耀斑的触发和能量释放很可能是在日冕内发生的。日冕环物质在短时间内被加热到几千万度，电子和离子被加速获得很高的能量，部分高能粒子和热能沿环到达环的足部，将色球甚至光球加热和电离，产生色球耀斑（ $H_{\alpha}$ 耀斑），同时使色球物质蒸发，产生了大量高温等离子体，使软X射线辐射大大增强。高能电子的回旋同步辐射和韧致辐射分别激发了射电暴和硬X射线暴。此外，还会产生 $\gamma$ 射线辐射等。因此耀斑爆发关系到是十分复杂的动力学过程，需要全波段的综合研究。

大量观测结果表明，太阳耀斑的电磁辐射能量和粒子动能是分别由太阳大气中两个不同区域发射的（如图1.2）。一个是色球层的低温耀斑区，也称为光学耀斑区（ $T \approx 10^4 K, n_e \approx 3 \times 10^{13} cm^3$ ）；另一个是经过过渡区至日冕的高温耀斑区（ $T \approx 10^7 \sim 10^9 K, n_e \approx 3 \times 10^{13} cm^3$ ）。高温耀斑区与低温耀斑区之间并没有明显的界限，它们的高度随不同耀斑也有所不同。根据对太阳边缘耀斑的观测，光学耀斑区的高度可达15000km（从色球底层算起），而高温耀斑区有时也可贯