

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号 8002120B03

中国科学院研究生院

博士学位论文

太阳大气等离子体磁环中的电流研究

谭 宝 林

指导教师 黄光力（研究员、博士，中国科学院紫金山天文台）

季海生（研究员、博士，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 天体物理学

论文提交日期 2006年5月20日 论文答辩日期 _____

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

太阳大气等离子体磁环中的电流研究

谭宝林

(天体物理学)

指导教师：黄光力研究员、季海生研究员

中文摘要

本文从理论和观测两个方面对太阳载流等离子体磁环中的电流进行了详细的研究。

首先从理论上详细研究了太阳载流等离子体磁环中的电流成因,提出除了对流电流外,还有因环形磁场位形作用产生的新经典自举电流。根据太阳载流等离子体磁环与托卡马克等离子体环在磁场位形和等离子体特征等方面的相似性,首次引入实验室等离子体中的新经典自举电流、破裂不稳定性和环柱状位形中的新经典撕裂模不稳定性等概念,推导了在太阳载流等离子体磁环中的新经典自举电流和总的环向电流的表达式。基于对 1999 年 8 月 25 日发生的耀斑事件多波段观测数据的分析,发现在耀斑环内的自举电流在总电流中所占的比例可达 44.6%,由该自举电流驱动的新经典撕裂模不稳定性增长的特征时间为 9.7×10^2 秒,与上述各波段辐射增强的时间基本一致;而经典撕裂模不稳定性增长的特征时间为 1.06×10^8 秒,远大于各波段辐射的增长时间。这些结果一方面间接表明自举电流的存在,另一方面也支持新经典撕裂模在环内的影响及由此而引起的磁场重联是在环内发生的,新经典撕裂模为环的爆发和能量释放提供了一个重要的理论机制。

进而利用美国大熊湖太阳物理观测台的高时空分辨率的太阳矢量磁场观测资料,对发生于 2002 年 7 月 26 日的两个太阳活动区中的纵向电流进行了系统的分析,首次对在耀斑活动过程中的电流的高分辨率的演化特征进行了研究,得出结论如下:(1)在空间上,耀斑活动并不是出现在电流密度最大的位置,而是出现在电流密度较小且较复杂的区域。(2)在电流的时间演化方面,发现在不同的耀斑事件中,电流的演化特征是不同的。在 2002 年 7 月 26 日发生的 M1.0 耀斑事件中,随着耀斑的发生,电流迅速减小;而在 M8.7 耀斑事件中,电流却持续增强。(3)根据对太阳黑子区域的纵向电流和磁场及其分布的测量和计算表明:电流方向与磁场的方向相反;电流密度和磁场在环截面上的分布具有向环轴集中的分布特征,这一特征与我们在理论上得到的受箍缩效应支配的环电流分布轮廓是基本一致的。

最后对载流等离子体磁环的不稳定性做了初步分析,指出环内的磁场重联及能量耗散发生在一系列的有理磁面附近。

关键词：太阳载流等离子体磁环，爆发过程，能量耗散，磁场重联

Study on the electric currents in solar magnetized plasma loops

Tan Baolin

(Astrophysics)

Directed by Professor Huang Guangli and Ji Haisheng

Abstract

In this paper, the electric currents of solar current-carrying magnetized plasma loops were studied in both of theories and observations.

Firstly, the origin of the electric currents in solar magnetized plasma loops was studied theoretically. Besides the convective currents due to the convective motions of photosphere and sub-photosphere mass, it was proposed that there may be the neoclassical bootstrap currents due to the toroidal magnetic configuration in the solar current-carrying magnetized plasma loops. From the similarities of the magnetic configurations and plasma behaviors between tokamaks and solar current-carrying magnetized plasma loops, the theory of neoclassical bootstrap currents in tokamaks was applied to the solar magnetized plasma loops, the simplified expressions of the bootstrap current and total current densities in the solar magnetized plasma loops were derived. Based on the data analysis with multi-wavelengths, it was found that the fraction of the bootstrap currents is up to 44.6% of the total currents in a flare loop occurred on Aug. 25 1999. The timescale of the neoclassical tearing mode triggered by the bootstrap currents is about 9.7×10^2 s which consistent with the rising time of the impulsive phase in the event, while the timescale of the classical tearing modes (1.06×10^8 s) is much longer than that in the event. This indicated indirectly the existence of bootstrap currents and implied that the reconnection due to neoclassical tearing mode instability occurred inside the loop. The magnetic reconnection triggered by neoclassical tearing mode may be an important mechanism for solar eruptive processes.

Then, using high cadence, high spatial resolution vector magnetograms of Big

Bear Solar Observatory, we analyzed the behavior of derived electric currents associated with two flares on July 26, 2002. It was found that there are two kinds of quite different electric current behaviors during the two flares. The first one is that the electric currents obviously decreased near the neutral line during an M1.0 flare. The second one is that the electric current rapidly increased near the neutral line during an M8.7 flare. Based on the analysis of the current distributions in the loop sections, we found that the direction of current is opposite to that of magnetic field, the current density and magnetic fields is concentrated to the loop axis, and this is consistent with our above theoretical expression of total electric current density which is dominated by the pinch effects.

Moreover, we analyzed the instabilities of the solar current-carrying magnetized plasma loops, and found that the magnetic reconnection and energy dissipation occurred near a series of magnetic rational surfaces inside the loops.

Key Words: solar current-carrying magnetized plasma loop, eruptive process, energy dissipation, magnetic reconnection

目 录

引言	1
第一章、太阳载流等离子体磁环概述	7
1.1 太阳大气等离子体中的环形结构	7
1.2 环形结构中的电流	9
1.3 载流等离子体磁环研究概述	12
1.4 小结和讨论	20
第二章、载流等离子体磁环模型的基本特征	25
第三章、载流等离子体磁环中的电流成因分析	29
3.1 对流电流	29
3.2 自举电流	35
3.2.1 托卡马克与太阳载流等离子体磁环的对比	35
3.2.2 自举电流的推导	41
3.2.3 自举电流的观测特征	46
3.3 关于电流的讨论	49
第四章、太阳等离子体磁环电流的观测和数据处理	51
4.1 太阳光球表面电流的观测	51
4.2 电流与太阳活动现象之间的时空关系	60
4.3 太阳等离子体环中的电流分布特征	70
第五章、载流等离子体磁环中的不稳定性初步分析	75
第六章、结论和讨论	81
附录 A 非日面中心的磁图投影改正	85
参考文献	87
作者在攻读博士学位期间发表的论文	95
致谢	97

太阳大气等离子体磁环中的电流研究

引言

目前人们一般认为发生在太阳大气中的各种爆发过程,如耀斑、日冕物质抛射(CME)、爆发日珥等现象实际上是太阳大气中同一种爆发过程的不同部分,或不同阶段,或不同的表现形式,它们之间的关联性取决于爆发前的能量储备以及活动区的磁场结构^[1](Lin, Raymond, and Van Ballegooijen, 2004)(图1a)。这些爆发过程的本质都是太阳大气等离子体不稳定性活动的反映,涉及到许多复杂的物理过程,包括:(1)能量的来源以及积累方式,(2)等离子体不稳定性激发,(3)高能粒子的加速和传播,(4)耀斑区等离子体的动力学特征。

关于能量来源问题目前基本上已达成共识:即这些能量来自于活动区中可供释放的自由磁能。磁场对势场的偏离越大则意味着有越多的自由磁能储备,发生爆发过程的几率就越高。自由能的释放可分成宁静型和爆发型两种。如果磁场总是处于不稳定状态,则它将连续地释放能量,这是一种慢过程,将导致日冕加热、活动区演化,以及爆发过程发生前的活动区预热等。爆发型的能量释放过程则要求非势磁场是亚稳态的,只有当扰动达到一定的阈值后才产生不稳定性的爆发。在以上几种太阳大气的爆发过程中,耀斑事件是最重要也最典型的,其它事件都或多或少地与耀斑事件关联。因此下面重点讨论一下有关耀斑的理论。

人们一般将耀斑分成致密耀斑和双带耀斑两类,有关耀斑的理论模型都是针对这两类耀斑提出来的,它们的基本出发点都是磁场重联,只是产生磁场重联的磁场位形不同(方成,2003)^[2]。

双带耀斑是大耀斑的一种常见的形式,多表现为两个较大的亮带,分别位于相反的磁极性区,二亮带由一些近于平行的磁环联结,亮带即为这些磁环的足根。双带耀斑多与活动日珥相联系,日珥位于双带的中间线上,其长轴与磁环的交角近于 90° 。双带耀斑的模型最初是由Carmichael^[3]和Sturrock^[4]提出来的,后来经Hirayama^[5]、Kopp和Pneumann^[6]做了进一步的改进和详细阐述,所以称之为CSHKP模型。Forbes和Acton将它们进行了综合和总结^[7],得到图1(b)所示的双带耀斑过程中磁场位形的变化和等离子体的运动模式。在该模式中,电流片的作用是至关重要的,在电流片附近发生的磁场重联将产生向上和向下的喷流。向下的喷流轰击日冕等离子体产生环顶X射线源,并产生快激波;在它下面,喷流受磁场的影响沿磁力线向下运动,在中性线附近产生慢激波;由于沿磁力线的热传导,将热能传递到色球,产生向上运动的色球蒸发和向下运动的对色球的压缩;色球蒸发产生的高温气体形成X射线环,等离子体的温度可达 $10^7 K$ 以上,冷却后产生UV环(温度为 $10^5 K$ 左右)和 H_α 环($10^4 K$ 左右),并在色球层形成 H_α 双带。当磁场较弱时,喷流的速度减小,向下运动的喷流变弱,沿磁分界线向下慢速流动,在电流片下端仍然可能出现慢激波,它们沿磁分界线向下运动到达色球

时将产生弱的色球蒸发以及弱的色球压缩。

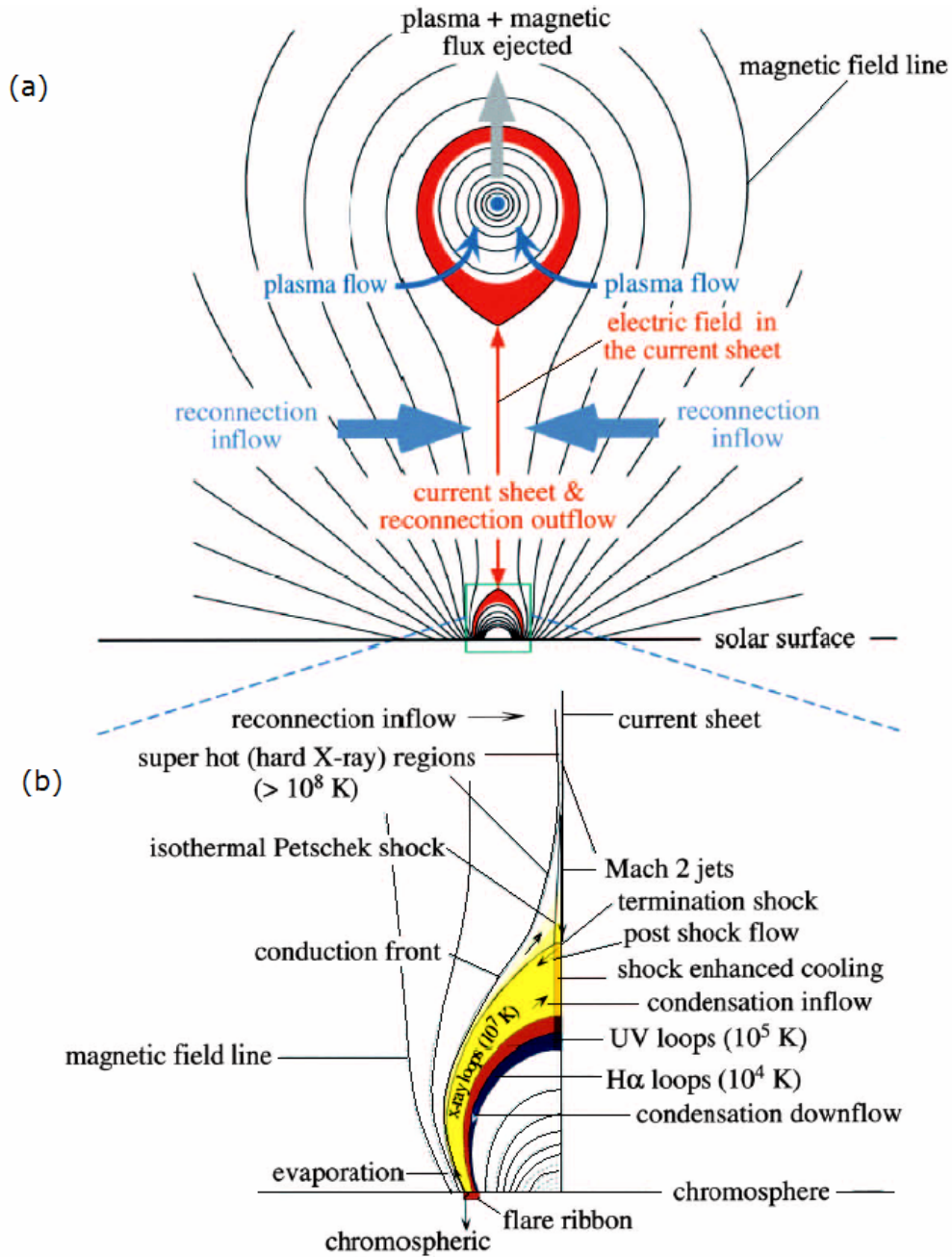


图 1 太阳爆发过程中的磁场位形和物质运动^[1]

致密耀斑通常是体积小、高度低的小型耀斑。其发生区域似乎被限制在高度较低的单一磁环中。关于致密耀斑的理论模型，广为人们接受的是Heyvaerts等人提出的磁流浮现模型^[8]，见图 2。该模型认为，从光球对流层向上浮现的磁环同已存在的原有磁环相互作用，在作用面附近形成电流片，撕裂模不稳定性将在该电流片中驱动磁场重联。开始时，电流片中的电阻率不大，仅有缓慢的磁场重联发生，释放出来的磁能对等离子体进行加热 (a)；随着电流片的升高，当电流密度与等离子体密度之比超过某一临界值时，将产生微观不稳定性，使等离子体的电阻急剧增大，从而使磁能快速释放出来，并加速带电粒子，产生硬X射线和微

波型爆发 (b); 当电流片的温度上升到一定值以后, 磁场重联达到一个稳定状态, 进入耀斑主相 (c)。Yokoyama和Shibata的数值模拟结果表明^[9], 磁流浮现后与上空原有磁场的相互作用发生磁场重联, 还将产生高温X射线喷流 (jet) 和低温 H_{α} 日浪 (surge) 等物质抛射现象。

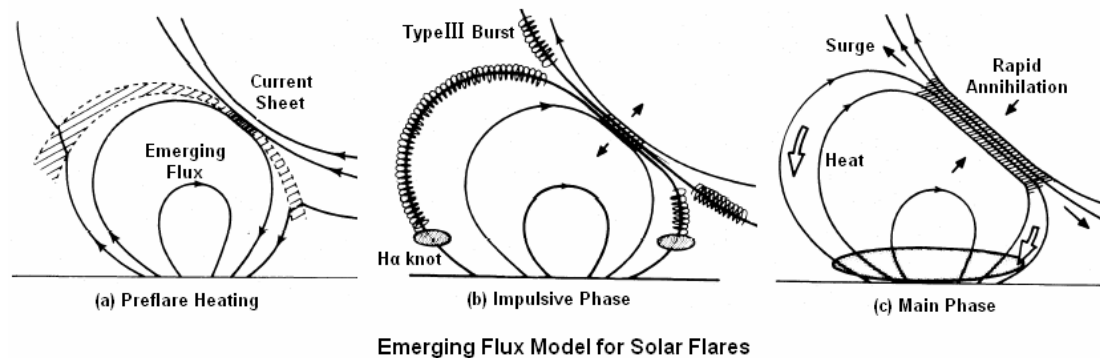


图 2 致密耀斑的磁流浮现模型^[8]

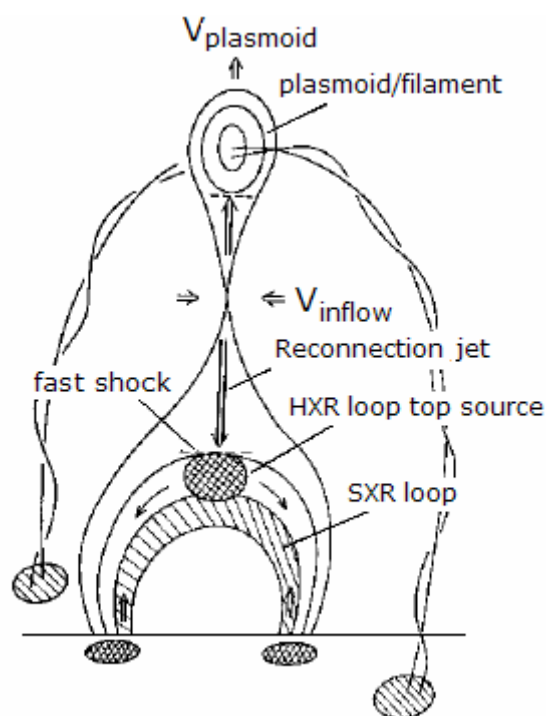


图 3 Shibata的耀斑统一模型^[10]

阳光卫星的观测表明, 双带耀斑和致密耀斑有许多相似之处, 例如它们都常常伴随有等离子体的抛射现象, 都存在着电流片和中性点等。基于这些特征, Shibata等人提出一个等离子体团的运动导致磁场重联的耀斑模型, 并称该模型为耀斑的统一模型^[10]。他们认为, 在触发耀斑的磁场重联过程中, 等离子体团的运动起着关键的作用: 一方面, 等离子体团的存在会阻止磁场重联的进行, 当外力压缩电流片时, 就在电流片的周围积聚能量, 这相当于能量的储备过程, 等离子体团越大, 储藏的能量就越多; 另一方面, 当等离子体团从电流片处抛射出去时, 又可以发出很强的入流, 从而导致快速磁场重联 (图 3)。另外陈鹏飞等人的数