

从太阳磁活动到太阳爆发

苏威¹, 余聪^{1,2}

(1. 中山大学 物理与天文学院, 广东 珠海 519082;

2. 中国空间站工程巡天望远镜粤港澳大湾区科学中心, 广东 珠海 519082)

摘要: 太阳是太阳系唯一的恒星, 它是空间天气的源, 其在各种尺度的活动影响着整个日球层的等离子体和磁场环境。磁场是太阳活动的重要因素, 太阳的磁场活动在长时标上导致太阳活动周, 在短时标上导致耀斑、日冕物质抛射等太阳爆发现象。从太阳活动周入手, 介绍了太阳磁场的产生机制、耀斑和日冕物质抛射的主流模型, 即磁场重联及其相关模型和磁绳不稳定性模型。研究太阳爆发不仅深化了对太阳的认识, 也为比较不同恒星活动提供了参考和基准, 还为理解不同尺度天体磁流体现象提供了参考, 并为未来空间天气预警和工程防护措施奠定了基础。

关键词: 太阳磁活动; 太阳活动周; 太阳爆发; 日球层等离子体

中图分类号: P182; P353

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2025)06-0145-08

太阳作为太阳系的中心天体, 是地球生命赖以生存的能量源, 还可视作宇宙中的一个动态的磁场系统。尽管太阳的主要作用是提供稳定的光和热, 但其复杂的磁活动和剧烈的爆发现象在科学研究中始终是备受关注的热点问题。从太阳黑子的出现到日冕物质抛射(CME)和太阳耀斑(flare)^[1], 太阳活动表现出强烈的周期性和随机性^[2-3]。这些现象不仅是太阳自身演化的重要标志, 也对地球及其空间环境产生了广泛而深远的影响。

太阳磁活动是太阳内部物理过程与表面大气相互作用的结果。太阳的内部结构包括核反应驱动的核心、辐射区和对流区。对流区的热对流和太阳的较差自转共同作用产生复杂的磁场系统。太阳黑子的出现是太阳磁场活动的直观表现, 太阳黑子数量增减的周期性是太阳活动周的重要标志, 同时伴随着太阳磁极周期性(周期约为11 a)的反转, 展现了长时标的规律性。然而, 太阳活动中也存在不可预测的爆发事件, 如CME和耀斑。这些现象的发生与太阳磁场的复杂性密切相关, 但其触发机制和能量释放过程仍存在许多未解之谜。

由于太阳和地球之间的紧密联系, 太阳活动现象对地球的空间天气有直接影响^[4]。例如, 强烈的CME可以引发地磁暴, 扰乱地球的磁层和电离层。地磁暴会对卫星通信、导航系统、全球电网和极地航线飞行等产生不利影响, 甚至可能威胁到地球轨道上的航天员安全。因此, 研究太阳磁活动和爆发机制不仅在基础研究领域具有意义, 也在实际应用中扮演着重要角色^[5]。

当前, 随着太阳探测技术的进步, 人类能够以前所未有的精度观测太阳活动。例如, NASA的太阳动力学天文台(SDO)^[6]、帕克太阳探测器(parker solar probe)^[7]和欧洲的太阳轨道飞行器(solar orbiter)^[8]等探测任务, 提供了对太阳黑子、磁场活动和爆发事件的详细观测数据。这些科学成果不仅揭示了太阳活动的动态过程, 还为预测太阳爆发的影响提供了重要支持。

本文旨在通过介绍太阳磁活动和太阳爆发的相关物理过程, 探讨从太阳活动周的周期性变化到爆发事件的形成机制。在总结现有研究的基础上, 本文还将展望未来的研究方向, 为进一步理解太阳-地球系统的复

收稿日期: 2025-01-04; 修回日期: 2025-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金(12473060); 国家重点研发计划(2020YFC2201200).

作者简介: 苏威(1987—), 男, 湖北荆州人, 中山大学副教授, 博士, 主要从事太阳物理、空间物理、空间引力波探测等研究。

通信作者: 苏威, E-mail: suwei25@mail.sysu.edu.cn; 余聪, E-mail: yucong@mail.sysu.edu.cn.

引用本文: 苏威, 余聪. 从太阳磁活动到太阳爆发[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 145-152. (Su Wei, Yu Cong. From solar magnetic activity to solar eruptions[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(6): 145-152. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.01.04.0001.)

杂关系提供启示.

1 太阳活动周

1.1 太阳活动周

太阳活动周是指太阳表面活动的周期性变化.这一现象最显著的标志是太阳黑子数量的增减.每个活动周平均持续约 11 a,从太阳活动的极小期(黑子数量少)到极大期(黑子数量多),再逐渐回归极小期.观测显示,这一周期性变化并不仅限于太阳表面的黑子现象,还包括更深层次的磁场结构反转和空间天气变化.例如,在极大期,太阳磁场表现出高度复杂和紊乱,常常伴随着更频繁的 CME 以及耀斑等高能事件的爆发.

从磁场变化的角度来看,11 a 的太阳活动周期仅仅是太阳磁场变化的“半周期”.太阳的南北磁极在一个周期结束时会发生翻转,完成一个完整的磁场周期需要约 22 a.这种磁场反转现象不仅是太阳活动的关键特征,也提供了研究太阳内部物理机制的重要线索.

1.2 太阳发电机

太阳活动周期的驱动力源于太阳内部的“发电机机制”,又称太阳发电机理论.这一理论基于磁流体动力学(magnetohydrodynamics, MHD),描述了太阳内部的等离子体运动如何产生并维持太阳的磁场^[9-10].

太阳内部可以分为核心、辐射区和对流区 3 大主要层次(图 1(a)).核心是核聚变发生的区域,为太阳提供能量;辐射区则是能量通过辐射传递的区域;对流区是太阳磁场生成的关键所在.在对流区,炽热的等离子体通过强烈的对流运动将热能传递到太阳表面.这些运动还受到科里奥利力的影响,形成了复杂的旋转和湍流结构.

太阳并不像一个刚体那样均匀旋转,而是具有较差自转特性.即太阳的赤道区域自转速度快,而两极区域自转速度较慢.这种较差自转对磁场的产生至关重要,被称为“ Ω 效应”.在 Ω 效应作用下,原始的极向磁场(子午面内的磁场,(图 1(a)))会因较差自转而被拉伸,逐渐演变为环向磁场(沿纬向的磁场,(图 1(b))).这一过程使太阳的磁场形态从简单的对称形式转变为复杂的扭曲结构^[11-12].

除了较差自转,对流区内的湍流运动也对磁场生成产生重要作用,这一过程被称为“ α 效应”. α 效应的过程为:由于太阳的自转,太阳对流层中的湍流运动会受到科里奥利力的影响,形成涡旋结构.涡旋运动使环

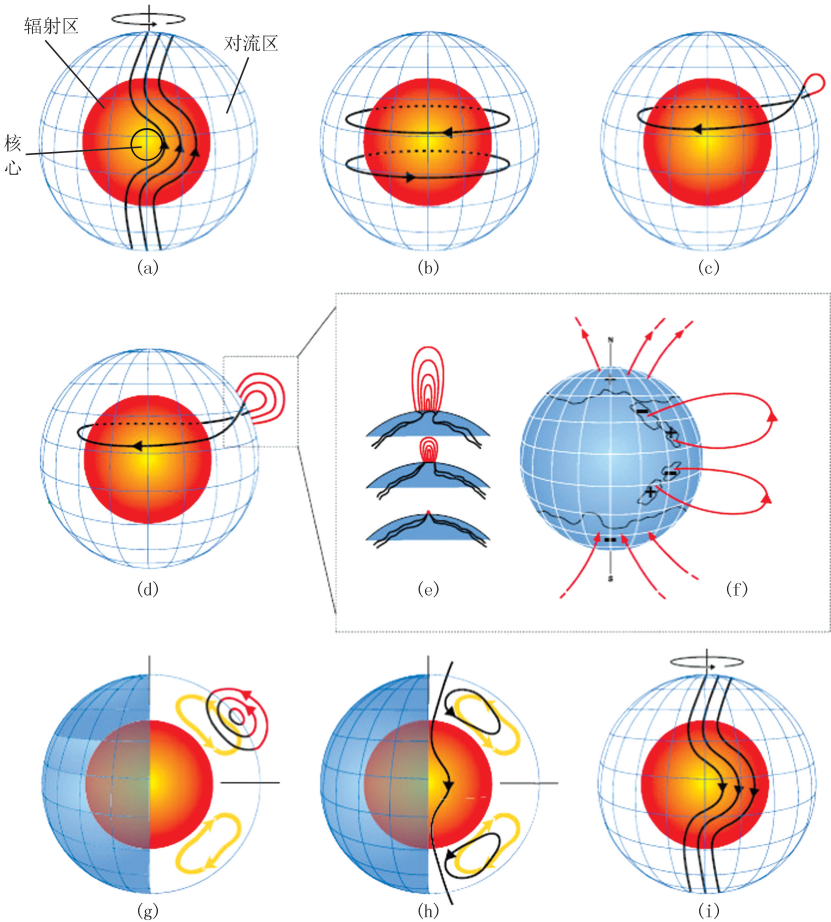


图1 太阳磁活动周的 α - Ω 效应示意图^[11]

Fig.1 Schematic diagram of the α - Ω effect of the solar magnetic activity cycle^[11]

向磁场进一步被扭曲,产生极向的磁场分量.最终, α 效应将被拉伸的环向磁场转化为新的极向磁场分量(图 1(c-f)),从而补充和维持原始的极向磁场^[13].

初始的极向磁场通过 Ω 效应被拉伸为环向磁场.环向磁场通过 α 效应被重新转化为新的极向磁场.这便是 α - Ω 效应.通过 α - Ω 效应,太阳的磁场被周期性地生成、拉伸、扭曲和重新连接.然而,随着时间推移,磁场积累的能量达到极限时会出现反转(图 1(g-i)).此时,南北极的磁场会发生翻转,完成一个完整的磁场周期,在随后逐渐增强并进入下一个周期^[14].

太阳活动周期的强弱直接影响太阳爆发事件的频率和强度.在极大期,太阳黑子数量激增,大规模的 CME 和高能耀斑更为常见.这是因为磁场在这一时期达到高度复杂和紊乱的状态,更容易触发磁场重联等剧烈的能量释放过程.而在极小期,太阳表面相对平静,爆发事件较少.

2 太阳爆发

太阳爆发是太阳大气中磁场能量的大规模释放过程,主要表现为耀斑、CME 和高能粒子事件(SEP)等.这些爆发事件均与磁场活动密切相关.太阳爆发导致磁绳裹挟日冕物质向上抛射产生 CME,在此过程中产生的高能粒子向下运动到低日冕、色球层、光球层产生耀斑.从大尺度去看 CME,可以将其看作 MHD 不稳定性导致的磁绳爆发,从微观的角度去看 CME,磁场重联是触发 CME 和耀斑产生的重要原因.

2.1 磁场重联

磁场重联(磁重联)理论可能是太阳爆发等日球层爆发现象最核心机制,描述了磁场线在等离子体中断裂并重新连接的过程(图 2^[15]).在这一过程中,磁场储存的自由能迅速释放,并转化为热能、动能以及高能粒子加速能量,最终形成耀斑、CME.磁重联发生在磁场强烈扭曲或磁场方向相反的区域.在磁重联发生的过程中,磁场线的断裂点被称为“X 点”或“重联点”.磁场线在该区域重新连接,释放能量并形成高速的等离子体流和激波^[16-17].

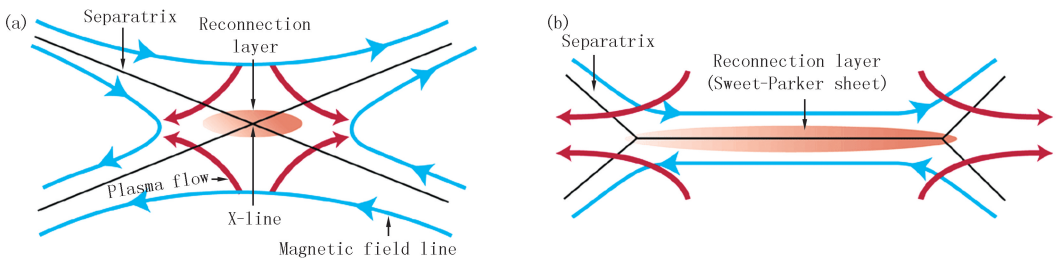


图2 磁场重联示意图^[15]

Fig.2 Schematic diagram of magnetic reconnection^[15]

尽管磁重联理论成功解释了能量释放的核心机制,但其触发条件和微观过程仍存在争议.例如,重联速率在观测与理论预测之间存在一定差异.此外,如何在宏观尺度上快速形成重联点也是需要深入研究的问题.

2.2 磁绳不稳定性

磁绳(magnetic flux rope)是一种扭曲的磁场结构,存在于太阳大气的活动区中.磁绳是太阳爆发(包括耀斑和 CME)的重要前兆之一.磁绳不稳定性模型认为,当磁绳的力学平衡被破坏时,磁绳会快速上升并引发大规模的太阳爆发^[18-19].

磁绳具有螺旋状的磁场结构,储存了大量的自由磁能.磁绳的底部通常受到光球磁场的牵引,而顶部则受到日冕磁场的约束,形成稳定的力学平衡.磁绳内部的平衡由磁张力和磁压力决定,磁绳外部的平衡由周围磁场的拉力(strapping force)和自洛伦兹力(hoop force)决定^[20-21].

磁绳不稳定性触发爆发的过程概括如下:初始阶段是磁能的积累.太阳活动区中,光球对流运动推动磁场逐渐增强,磁绳的扭转和剪切程度不断增加.此时磁绳稳定,但自由磁能大量积累,达到某种不稳定性临界条件,比如扭转数(twist number)超过 1 圈,发生扭曲不稳定性(kink instability).接着是失稳阶段,当背景磁场衰减因子超过临界值(约为 1.5),磁绳失去平衡并迅速上升.磁绳的上升拉伸了上层的磁场,形成电流片,为后续的磁重联提供条件.之后是能量释放阶段,磁绳的上升引发大规模磁重联,磁重联释放的能量驱动耀

斑爆发,同时使磁绳进一步加速,形成 CME.最后是结构重组阶段,磁绳爆发后,原来的磁场结构重新调整,形成新的稳定磁场.观测中常见的“耀斑后环”就是这种重组的结果.磁绳不稳定性导致太阳爆发有相应的观测支撑,如 CME 抛射物常呈现环状或绳状结构,与磁绳模型一致.

磁绳不稳定性可以与其他太阳爆发模型相结合,共同解释不同尺度和现象的爆发过程.例如其与磁重联结合:磁绳的上升拉伸触发磁重联,形成电流片结构;磁重联又加速了磁绳的抛射.

2.3 耀斑和日冕物质抛射

2.3.1 耀斑和 CME 经典模型:CSHKP 模型

CSHKP 模型是解释太阳耀斑和 CME 产生机制的经典模型,以 5 位科学家 CARMICHAEL、STUR-ROCK、HIRAYAMA、KOPP 和 PNEUMAN 的名字命名.这一模型基于磁重联理论,描述了太阳大气中磁场重联过程如何触发能量释放,并形成耀斑和 CME^[22-25].

CSHKP 模型的基本结构和过程如下.CSHKP 模型需要预先存在一个磁绳结构的初始状态,储存了大量磁能.然后通过磁重联触发耀斑释放能量:随着磁绳底部的磁场逐渐扭曲或拉伸,在磁绳的下部形成了一个电流片(current sheet).电流片两边的磁场方向相反,磁重联开始发生,导致磁场能量快速释放,形成耀斑.这一过程产生了高能粒子、热等离子体以及辐射.最后形成 CME 和耀斑:磁绳受到重联释放能量的推动,被迅速抛射到日冕甚至星际空间,形成 CME.与此同时,磁重联过程中释放出的等离子体形成高温等离子体喷流,向内外方向流动.向内撞击光球层,形成耀斑,时常会伴随微波暴;向外助推 CME 并在日冕产生激波,有时会伴随射电 II 型暴.最后,随着磁场重联持续释放能量,磁场逐渐恢复到新的平衡状态.爆发结束后,可以观测到日冕中的耀斑环.该模型成功解释了耀斑和 CME 的联动机制及其动态演化过程,然而它主要描述了磁场的宏观现象,对于触发磁重联的具体细节和微观机制解释较少.

β 是用于描述等离子体中气压(热压)与磁压之比的一个无量纲参数.当 $\beta \gg 1$ 时,磁场能量占主导地位,磁场对等离子体的运动起决定性作用; $\beta \ll 1$ 时,等离子体的动能占主导地位,等离子体对磁场的变化起决定性作用.从对流层到日冕,太阳的 β 逐渐变小,等离子体在对流层、光球层、色球层由流场主导,逐渐过渡为在日冕中由磁场主导.从 β 值角度考虑太阳爆发模型,根据驱动太阳爆发产生的位置,可以大体上将太阳爆发分为磁场主导和流场主导的模型.

2.3.2 磁场主导的太阳爆发模型之一:Lin-Forbes 模型

Lin-Forbes 模型是对 CSHKP 模型的拓展和细化,特别关注磁场演化过程中能量转化的细节以及电流片的形成和演化,强调电流片在磁重联中的核心作用^[26].模型示意图见图 3^[27].

Lin-Forbes 模型的核心内容在于电流片的形成与演化.在爆发前,日冕中的磁场逐渐被拉伸,形成一个细长的电流片区域.该电流片位于磁绳顶部,与上下磁场方向相反的区域相接.电流片的长度增加到一定临界值后,磁重联启动.日冕物质开始向外抛射,Lin-Forbes 模型将 CME 的抛射视为磁场结构

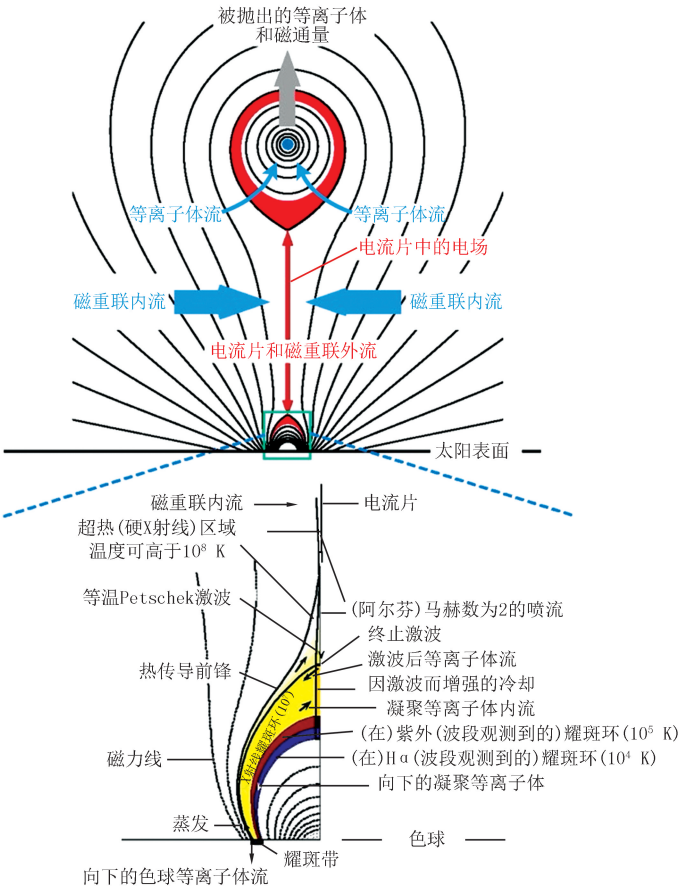


图3 Lin-Forbes 模型示意图^[27]
Fig.3 Schematic of the Lin-Forbes model^[27]

不稳定性的结果.CME 抛射过程中,电流片的进一步拉伸加强了重联,形成了一个相互耦合的能量释放和物质抛射过程.Lin-Forbes 模型通过数值计算明确了电流片的拉伸速度和重联过程中的能量释放速率,与观测中耀斑爆发的时间尺度相符.磁场的自由能通过重联转化为等离子体的热能、动能以及高能粒子能量.

Lin-Forbes 模型强调了电流片的演化和动力学过程,提供了重联速率与耀斑爆发规模之间的定量关系,描述了磁场拓扑变化如何与 CME 动力学相互作用.但对于电流片的形成条件以及磁场拓扑变化的具体触发机制仍需要进一步研究.

2.3.3 磁场主导的太阳爆发模型之二:Breakout 模型

Breakout 模型是一种解释太阳爆发的经典理论,强调日冕中的大尺度磁场相互作用及拓扑变化触发爆发的机制.

Breakout 模型的机制如下:首先该模型需要存在四极磁场结构,并形成有利于磁重联发生的磁场位形.磁零点在磁重联产生时形成,并导致磁绳/磁拱失稳,形成 CME 抛射.爆发过程中,磁场的拓扑结构从闭合到开放,储存的磁能被迅速释放^[28].模型示意图见图 4^[29].

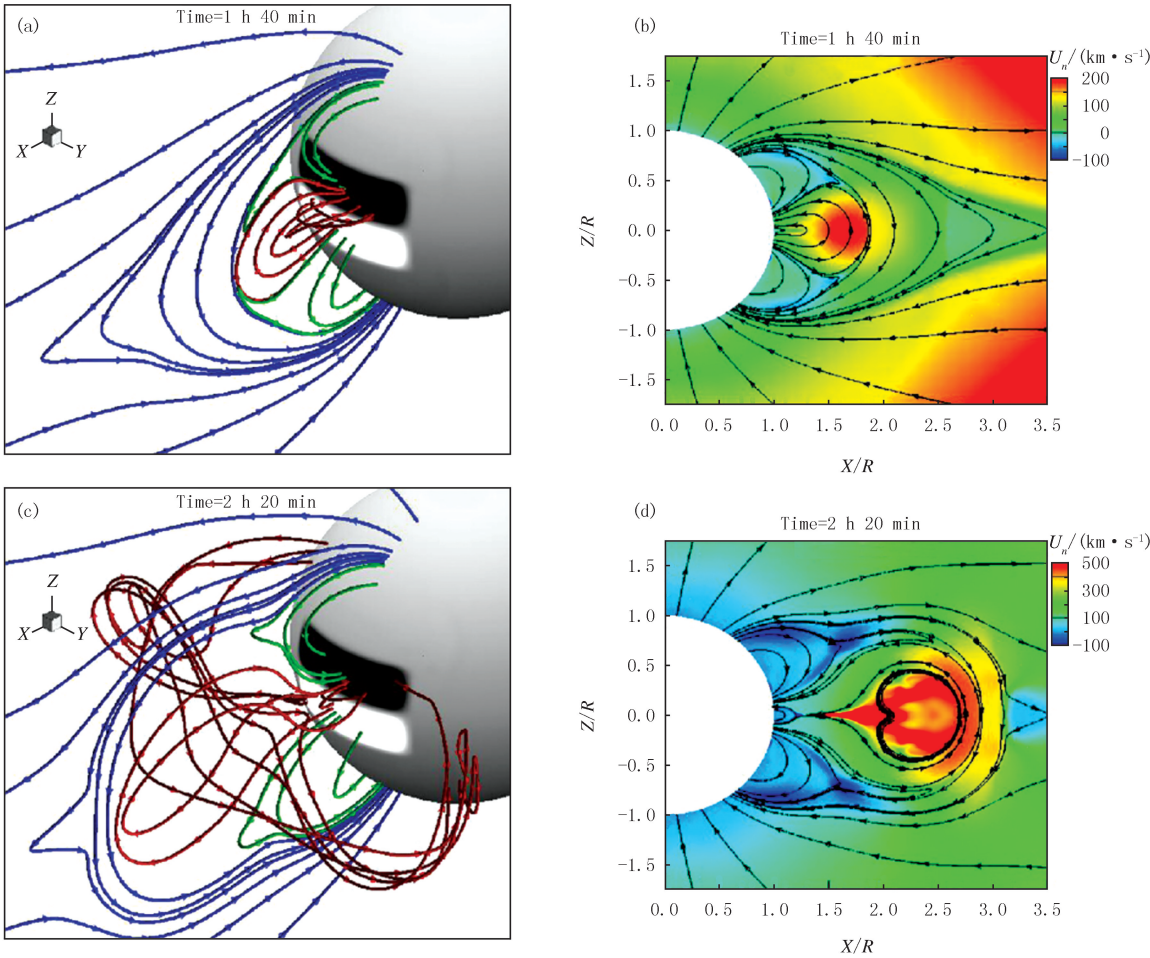


图4 Breakout模型磁场位形示意图^[29]

Fig.4 Schematic diagram of magnetic field configuration for Breakout model^[29]

在 CME 发生之前的日冕观测中,经常出现高层磁场的逐渐开启现象.符合 Breakout 模型的预期.Breakout 模型特别适合解释那些由日冕磁场拓扑变化而触发的爆发事件,Breakout 模型的关键在于形成利于磁重联发生的磁场四极结构.

2.3.4 流场主导的太阳爆发模型之一:新浮磁流模型

流场主导的太阳爆发模型主要是通过对流层和光球层的流场裹挟着磁场运动,使得磁场形成利于诱发磁重联的磁场位形,如强的磁剪切结构(magnetic shear).磁剪切指磁力线扭曲或错开的现象.这种剪切状态

可以储存大量的磁能,为耀斑和 CME 提供能量来源^[30].通过剪切重联的触发,削弱了磁力线的约束,为磁场失稳创造条件.以下结合新浮磁流模型和 Tether-cutting 模型来具体说明磁剪切的作用.

Joan FEYNMAN (Richard FEYNMAN 的妹妹)提出了新浮磁流模型(emerging flux model).该模型强调磁通量从太阳内部向上浮升,并与现存磁场相互作用触发爆发^[31].在此过程中,磁剪切通过影响磁场相互作用的强度和复杂性,成为关键因素之一.

新浮磁流模型的机制如下:从太阳对流层浮升的磁绳(flux rope)到达光球层,形成“新浮磁流”,与已有的磁场结构相遇.新浮磁流常具有高度扭曲和复杂的拓扑结构,可能储存了大量的自由磁能.新浮磁流通常具有一定的扭曲和方向性,新浮磁流与已有磁场方向相反时,会加剧磁场的剪切程度.剪切磁场的增强导致局部磁场发生重联.一方面,新浮磁流的输入进一步积累了磁能;另一方面,磁重联削弱了磁场的约束力,导致磁绳结构的失稳和上升.

新浮磁流常伴随着太阳活动区的形成.新浮磁流模型不仅在观测得到了证实也在数值模拟也得到了实现^[32].但对新浮磁流与已有磁场的具体相互作用机制以及其导致不稳定的微观过程仍需更详细的研究.

2.3.5 流场主导的太阳爆发模型之二:Tether-cutting 模型

Tether-cutting 模型(缙绳断裂模型)由 Moore 等科学家提出,是解释太阳耀斑和 CME 爆发的经典模型^[33].该模型强调局部磁场的重联削弱了磁力线的约束,从而触发全局性的爆发.

Tether-cutting 模型的示意如图 5 所示.该模型的初始状态为爆发前太阳大气中闭合磁场线组成的磁拱系统(如低层磁拱).磁拱由于光球运动逐渐积累剪切磁场,并储存了大量的自由磁能.当磁拱底部的磁场剪切增强到一定程度时,发生局部磁重联.局部磁重联削弱了磁力线对磁拱顶部的约束,造成部分磁力线被“剪断”.局部重联的发生使磁拱顶部失去约束力,磁拱结构迅速上升.随着磁拱上升拉伸高层磁场,进一步触发新一轮的磁重联.这种链式反应导致耀斑和 CME 的爆发.Tether-cutting 模型主要针对低层磁绳的爆发机制,对日冕高层磁场的拓扑变化描述不足.

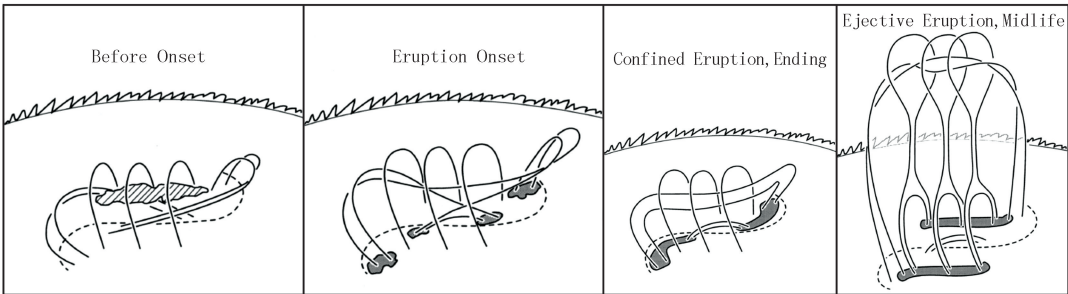


图5 Tether-cutting 模型示意图^[33]
Fig.5 Schematic of the Tether-cutting model^[33]

3 讨论与总结

本文从太阳磁场的角度出发,首先介绍了太阳磁场的长周期活动及其原因,太阳发电机原理.然后介绍了太阳磁场活动导致的短时标的太阳爆发模型,太阳爆发模型按照触发机制可以分为磁重联机制和磁绳不稳定性机制.进一步,从等离子体参数 β 的角度,按照磁重联触发的位置可以将太阳爆发模型分为磁场主导的和流场主导的 2 种类型.需要注意的是,在太阳爆发中,磁重联和磁绳不稳定性并不是可以割裂的,比如磁重联模型最后的结果是磁绳爆发,磁绳不稳定性的触发可能是因为磁重联.在此,从主导太阳爆发原因的角度,对太阳爆发模型进行了分类讨论,模型汇总于表 1.

太阳磁活动不仅在长时标上导致太阳活动周,在短时标内也会导致耀斑和 CME 等太阳爆发现象.太阳活动周、太阳爆发不仅本身是令人关注的天文现象,还对地球环境、无线电通信^[34],甚至人体健康构成潜在威胁.在太阳质子事件期间,航天员暴露于高能粒子辐射的风险显著增加.特别地,由于地球南北极区开放的磁场结构,高能粒子可能对极地航线上的人员健康构成威胁.

此外,随着科技的发展,各种仪器,例如 GNSS、空间引力波探测等,对探测精度要求的不断提高,这些设备对太阳爆发变得越来越敏感.例如太阳爆发导致的空间等离子体和磁场的扰动会影响空间引力波探测的精度^[35–37].

表 1 太阳爆发模型汇总
Tab. 1 Summary of solar eruption models

爆发原因	太阳爆发模型	触发区域	关键点
磁场重联	Lin-Forbes 模型(改进的 CSHKP 模型)	磁场主导,触发于日冕	电流片的产生
	Breakout 模型	磁场主导,触发于日冕	磁场四极结构
	新浮磁流模型	流场主导触发于光球层、色球层	对流层运动将“磁流”带入到光球层
	Tether-cutting 模型	流场主导触发于光球层、色球层	磁绳足点的磁力线被“剪断”
磁绳不稳定性	磁绳不稳定性爆发模型	—	磁绳的扭曲不稳定性

太阳是离地球最近的恒星,其与人类的关系最为密切,由于其近距离优势,科学家能够获取详尽的观测数据并开展深入研究.太阳爆发模型的磁重联和磁绳不稳定性等机制,揭示了太阳活动中磁流体动力学过程的核心规律,这些研究不仅深化了对太阳的认识,也为理解其他恒星的活动提供了重要参考.更为关键的是,太阳爆发所涉及的磁流体过程具有广泛的普适性,可应用于研究不同尺度的天体磁流体现象,如恒星风、星际介质扰动以及其他活跃天体的能量释放,为天体物理学多个领域提供宝贵的理论框架和实验依据.

参 考 文 献

[1] CHEN P F. Coronal mass ejections: models and their observational basis[J]. Living Reviews in Solar Physics, 2011, 8: 1.

[2] BRUN A S, BROWNING M K. Magnetism, dynamo action and the solar-stellar connection[J]. Living Reviews in Solar Physics, 2017, 14(1): 4.

[3] CHARBONNEAU P. Dynamo models of the solar cycle[J]. Living Reviews in Solar Physics, 2020, 17(1): 4.

[4] TEMMER M. Space weather: the solar perspective[J]. Living Reviews in Solar Physics, 2021, 18(1): 4.

[5] PULKKINEN T. Space weather: terrestrial perspective[J]. Living Reviews in Solar Physics, 2007, 4(1): 1.

[6] PESNELL W D, THOMPSON B J, CHAMBERLIN P C. The solar dynamics observatory [M]. [S.l.]: Springer, 2012.

[7] FOX N J, VELLI M C, BALE S D, et al. The solar probe plus mission: humanity’s first visit to our star[J]. Space Science Reviews, 2016, 204(1): 7-48.

[8] MÜLLER D, CYR O C, ZOUGANELIS I, et al. The Solar Orbiter mission. Science overview[J]. A&A, 2020, 642(1): A1.

[9] PARKER E N. Hydromagnetic dynamo models[J]. The Astrophysical Journal, 1955, 122: 293.

[10] PARKER E N. The formation of sunspots from the solar toroidal field[J]. The Astrophysical Journal, 1955, 121: 491.

[11] DIKPATI M, GILMAN P A. Global solar dynamo models: simulations and predictions of cyclic photospheric fields and long-term non-reversing interior fields[J]. New Journal of Physics, 2007, 9(8): 297.

[12] CHATTERJEE P, NANDY D, CHOUDHURI A R. Full-sphere simulations of a circulation-dominated solar dynamo: Exploring the parity issue[J]. Astronomy & Astrophysics, 2004, 427(3): 1019-1030.

[13] PETRIE G J D. Solar magnetism in the polar regions[J]. Living Reviews in Solar Physics, 2015, 12(1): 5.

[14] NANDY D, CHOUDHURI A R. Explaining the latitudinal distribution of sunspots with deep meridional flow[J]. Science, 2002, 296(5573): 1671-1673.

[15] FINN J M. Null point[J]. Nature Physics, 2006, 2(7): 445-446.

[16] SWEET P A. Electromagnetic phenomena in cosmical physics[C]//IAU Symp 6. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1958: 123.

[17] PARKER E N. Sweet’s mechanism for merging magnetic fields in conducting fluids[J]. Journal of Geophysical Research, 1957, 62(4): 509-520.

[18] GOLD T, HOYLE F. On the origin of solar flares[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1960, 120(2): 89-105.

[19] SAKURAI T. Magnetohydrodynamic interpretation of the motion of prominences[J]. Astronomical Society of Japan, 1976, 28(2): 177-198.

[20] ZHONG Z, GUO Y, WIEGELMANN T, et al. Unveiling the mechanism for the rapid acceleration phase in a solar eruption[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2023, 947(1): L2.

[21] KLIEM B, TÖRÖK T. Torus instability[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(25): 255002.

[22] CARMICHAEL H. A PROCESS FOR FLARES[J]. NASA Special Publication, 1964 (50): 451.

[23] STURROCK P A. Model of the high-energy phase of solar flares[J]. Nature, 1966, 211(5050): 695-697.

[24] HIRAYAMA T. Theoretical model of flares and prominences[J]. Solar Physics, 1974, 34(2): 323-338.

[25] KOPP R A, PNEUMAN G W. Magnetic reconnection in the Corona and the loop prominence phenomenon[J]. Solar Physics, 1976, 50(1):

85-98.

[26] LIN J, FORBES T G. Effects of reconnection on the coronal mass ejection process[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, 105(A2): 2375-2392.

[27] KO Y K, RAYMOND J C, LIN J, et al. Dynamical and physical properties of a post-coronal mass ejection current sheet[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, 594(2): 1068-1084.

[28] ANTIOCHOS S K, DEVORE C R, KLIMCHUK J A. A model for solar coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 1999, 510(1): 485-493.

[29] VAN DER HOLST B, MANCHESTER W, SOKOLOV I V, et al. Breakout coronal mass ejection or streamer blowout: the bugle effect[J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 693(2): 1178-1187.

[30] ZHANG H Q, AI G X, YAN X, et al. Evolution of vector magnetic field and white-light flares in a solar active region (NOAA 6659) in 1991 June[J]. *The Astrophysical Journal*, 1994, 423: 828.

[31] FEYNMAN J, MARTIN S F. The initiation of coronal mass ejections by newly emerging magnetic flux[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, 100(A3): 3355-3367.

[32] CHEN P F, SHIBATA K. An emerging flux trigger mechanism for coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 2000, 545(1): 524-531.

[33] MOORE R L, STERLING A C, HUDSON H S, et al. Onset of the magnetic explosion in solar flares and coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 2001, 552(2): 833-848.

[34] 牛有田, 张安琪, 赵歌歌, 等. 太阳耀斑对无线电导航通信的影响[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(1): 151-156.

NIU Y T, ZHANG A Q, ZHAO G G, et al. Effects of solar flares on radio navigation and communication[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2025, 53(1): 151-156.

[35] SU W, WANG Y, ZHOU Z-B, et al. Analyses of residual accelerations for TianQin based on the global MHD simulation[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(18): 185017.

[36] SU W, WANG Y, ZHOU C, et al. Analyses of laser propagation noises for TianQin gravitational wave observatory based on the global magnetosphere MHD simulations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, 914(2): 139.

[37] JENNRICH O, LUETZGENDORF N, THORPE J I, et al. Sensitivity limits of space-based interferometric gravitational wave observatories from the solar wind[J]. *Physical Review D*, 2021, 104(6): 062003.

From solar magnetic activity to solar eruptions

Su Wei¹, Yu Cong^{1,2}

(1. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. CSST Science Center for the Guangdong-Hongkong-Macau Greater Bay Area, Zhuhai 519082, China)

Abstract: The Solar, as the only stellar in the solar system, is the source of space weather, and its activity affects the plasma and magnetic field environment throughout the heliosphere on various temporal and spatial scales. The magnetic field is a key factor in solar activity. The solar magnetic activity leads to the solar cycle on long time scales, and leads to solar eruption phenomena such as flares and coronal mass ejections on short time scales. In this paper, the mechanism of solar magnetic field generation and solar cycle is introduced. Subsequently, the dominant models for flares and coronal mass ejections, i. e., the magnetic field reconnection and the magnetic flux rope instability model, are introduced. The study of solar eruptions not only deepens the understanding of the Sun, but also provides a reference and benchmark for comparing study of other stellar activities, and for understanding other astrophysical magnetohydrodynamic phenomena at different scales meanwhile, and lays the groundwork for future space weather forecast and engineering protection as well.

Keywords: solar magnetic activity; solar cycle; solar eruption; heliosphere plasma

[责任编辑 杨浦 刘洋]