

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.03.02

亮桥与冕环关系的研究进展

苗玉虎^{1,2,3,4}, 邓林华², 苏江涛^{5,6}, 管明祥¹, 邹海鑫¹, 夏林中¹,
曹雪梅¹, 华韵之¹, 刘煜⁷, 袁丁³

(1. 深圳信息职业技术学院 信息与通信学院, 深圳 518172; 2. 云南民族大学 数学与计算机科学学院, 昆明 650504; 3. 哈尔滨工业大学(深圳) 空间科学与应用技术研究院, 深圳 518055; 4. 云南省太阳物理与空间目标监测重点实验室, 昆明 650216; 5. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101; 6. 中国科学院大学, 北京 100049; 7. 西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 亮桥是太阳黑子内部一种常见的结构, 通常在亮桥区域会产生一系列的爆发活动, 并对黑子演化产生影响。利用太阳动力学天文台 (Solar Dynamics Observatory, SDO) 搭载的大气成像阵列 (Atmospheric Imaging Assembly, AIA) 极紫外成像数据和日震学与磁场成像仪 (Helioseismic and Magnetic Imager, HMI) 视向磁图和矢量磁图, 通过统计大数据样本, 表明亮桥与冕环之间的抑制特征具有一定的普遍性。冕环缺失区域主要位于亮桥锚定点附近的本影-半影边界上, 在该区域, 随着亮桥的演化和形态的改变, 冕环也表现出显现和消失现象。通过分析 HMI 磁图数据, 亮桥锚定区通常伴随着极性相反的小尺度磁场结构, 可以推断亮桥锚定点区域的磁力线与周围相反极性的小尺度磁场结构相连, 并形成短程闭合磁环, 由于磁环的长度较短, 无法延伸到日冕层, 因此在日冕层无法观测到冕环。根据研究结果, 提出了亮桥与冕环关系模型, 用来解释亮桥与冕环之间的磁连接性, 这个模型可以解释许多与亮桥相关的物理过程。

关键词: 太阳活动; 太阳黑子; 太阳磁场

中图分类号: P182.9

文献标识码: A

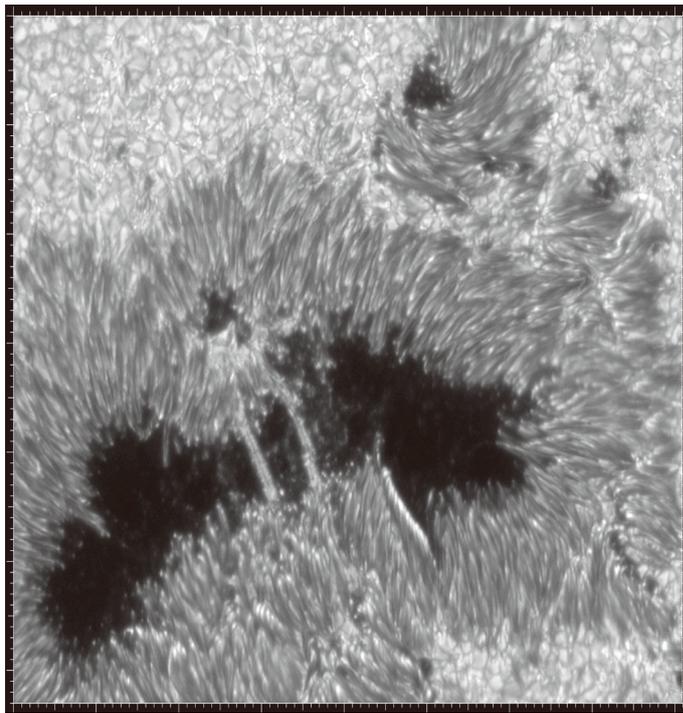
收稿日期: 2023-08-23; **修回日期:** 2023-12-08

资助项目: 国家自然科学基金 (12103016, 12173012, 118030051, 12273059); 云南省太阳物理与空间目标监测重点实验室项目 (YNSPCC202201); 广东省基础与应用基础研究基金 (2022B1515120002); 云南省基础研究计划项目 (202301AV070007); 云南省“兴滇英才支持计划”创新团队专项; 深圳市科技创新委员会资助项目 (JSGG20211029095003004); 深圳信息职业技术学院校级科技项目 (SZIIT2022KJ040, SZIIT2021KJ046); 2020 年深圳市科技计划项目 (JCYJ20190808093001772); 广东省无线通信与人工智能应用技术开发中心 (2019GGCZX009); 2020 年度广东省普通高校青年创新人才项目 (2020KQNCX206); 深圳市高层次人才科研启动经费项目 (RC2022-001, RC2024-003); 创新团队的项目 (202405AS350012)

通讯作者: 邓林华, linhua.deng@ymu.edu.cn; 袁丁, yuanding@hit.edu.cn

1 引言

太阳黑子区域往往会引发多种活动现象，如耀斑、喷流及日冕震荡等。亮桥作为黑子中常见结构，其对黑子的演化具有重要的影响。亮桥这一概念最早在 1869 年由 Braley^[1] 提出，它是一种延伸或横跨黑子的狭窄且明亮的条状结构。亮桥的出现往往意味着太阳黑子的形成或原黑子的衰退^[2-7]，即亮桥的出现可能预示着原黑子衰退的开始，进而产生分裂，形成两个或多个新的黑子。根据亮桥外形特征，粗略可以分为两类：一类由米粒状结构构成^[8]，一类由更小米粒状结构构成的长条形纤维状结构^[9, 10]。Muller^[3] 根据亮桥特征，进一步将亮桥细化成 3 类：(1) 光球亮桥，主要由光球层米粒状结构所构成的亮结构；(2) 半影亮桥，主要由纤维状结构构成的长条状结构，一般在亮桥一侧呈现倒刺状特征^[11]；(3) 本影亮桥，由比本影点更亮的亮点结构所构成的细长的带状结构。成熟的亮桥两端往往连接半影的两个不同侧面。有研究表明，亮桥和本影点有许多相似之处，例如都具有中央暗通道和亮边缘^[12-15]。亮桥被认为是一种极端细长的本影点形成的，大尺度的亮桥能够在弧秒分辨率下被探测到速度的红蓝移。图 1 展示了瑞典真空太阳望远镜于 2000 年 5 月 22 日观测到的非常清晰的亮桥结构。



注：图片由瑞典真空太阳望远镜于 2000 年 5 月 22 日拍摄^[16]。

图 1 亮桥结构图

下文将介绍几个与亮桥结构有关的名称。亮桥“脊”一般是指沿着亮桥中央的呈长条状

的部位, 而与亮桥“脊”平行的较长边称为亮桥的“侧边”。锚定在黑子半影区的两个较短边称为亮桥的两个“端点”或“短边”, 文中的锚定区域指该短边所在的区域。

研究表明, 在黑子衰退阶段, 随着对流的增强, 亮桥从光球底部逐渐浮现在黑子本影区^[17, 18]。随着对流减弱以及高度的上升, 亮桥顶部的磁场会拱起形成尖角状结构, 这些尖角结构就是所谓的磁“罩盖”(canopy)结构^[19]。由于磁“罩盖”结构的影响, 亮桥内部的上升流的通道愈来愈窄, 下降流增强^[20, 21], 这与 Vazquez^[2]的观测相符。通常情况下亮桥处磁场相对于黑子本影区的磁场弱得多, 而且更趋于水平, 而 Castellanos 等人^[22]研究表明, 在 Delta 黑子中的亮桥区域存在强磁场, 甚至磁场强度可达 0.82 T。由于 Delta 黑子区域磁场结构复杂, 亮桥连接的往往是两个极性相反的黑子区域^[23]。尤其是在携带埃弗谢德流和反向埃弗谢德流区域能探测到强磁场存在。在 Delta 黑子区, 沿着磁场极性反转线附近形成的亮桥也能探测到强磁场且磁场方向平行与日面^[22-26]。

2 日冕冕环特征及亮桥形成统计

冕环研究方面, Feng 等人^[27]发现了亮桥的锚定位置与冕环可能存在相关性。他们首次指出黑子区冕环形成与亮桥演化存在关联。冕环的形成是与等离子体加热和太阳风产生相关的复杂物理过程。Wang 等人^[28, 29]研究发现, 在冕环的足点通常形成一个小而紧凑的双极结构。他们还指出这些冕环结构可以形成倒“Y”结构, 而这种倒“Y”结构容易发生磁重联。磁重联为大尺度磁场结构重组提供了动力, 容易引发各种大尺度活动爆发的同时, 还会引起冕环结构的改变, 往往会形成开放性磁力线。同时, Chitta 等人^[30]指出, 冕环足点倾向于扎根在混合性小区域。

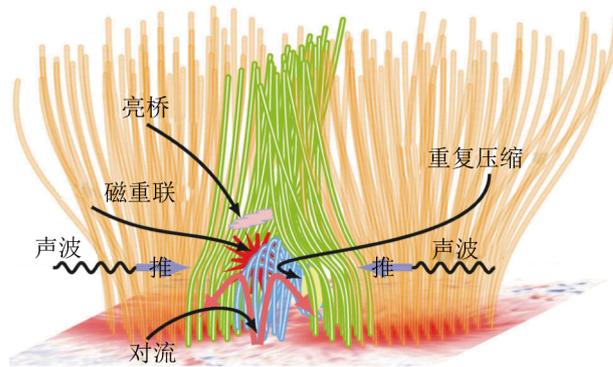
Li 等人^[31]基于 2014 年太阳动力学天文台 (Solar Dynamics Observatory, SDO) 搭载的日震学与磁场成像仪 (Helioseismic and Magnetic Imager, HMI) 的观测数据, 首次对亮桥的形成进行了统计研究, 共获得 144 个亮桥, 并根据亮桥形态或形成方式的不同进行了分类。他们将亮桥分成三类: 第一类为 A 型亮桥, 又称为半侵入型亮桥^[32, 33]; 第二类为 B 型亮桥, 即黑子融合型亮桥^[34]; 第三类为 C 型亮桥, 即由本影点浮现而形成的亮桥^[35, 36], 可称为本影点浮现亮桥。其中 A 型亮桥共 74 个, 占比约为 51%; B 型亮桥共 57 个, 占比约为 40%; C 型亮桥共 13 个, 占比约为 9%。

3 亮桥与其他太阳活动爆发

亮桥在黑子中的出现, 不仅预示着黑子衰退, 还可能引发多种太阳活动爆发现象。研究表明, 亮桥及其所在的黑子区域磁场结构极其复杂, 多种太阳活动爆发现象与亮桥密切相关, 比如常见的日冕喷流、色球增亮、耀斑等^[37-63]。Lim 等人^[64]在一个亮桥上探测到相反磁场在其上方出现和消失的现象。他们认为该观测特征可能表明小尺度新磁浮现与亮桥上的磁场发生了磁重联, 从而导致间歇性喷流^[53, 61, 65, 66, 68-70]。此外, Yang 等人^[71]认为在亮桥

边缘产生的光球涡旋与色球喷流具有相关性。

Yuan 和 Walsh^[61]根据亮桥的观测特征,提出了一个亮桥三维模型(见图2)。该模型指出,亮桥一侧长边的磁场几乎与黑子本影场一致,而另一侧长边的磁场几乎和黑子本影区磁场反向平行。这种情况很容易导致亮桥的两侧发生磁重联,从而可能导致喷流等活动的爆发^[72]。Tian 等人^[53]和 Robustini 等人^[73]在亮桥上方发现了倒“Y”形喷流现象。这种倒“Y”形喷流是验证垂直本影磁场中的磁浮现模型的有力证据,这也解释了为何喷流呈准直线型^[55, 57, 69, 70, 74]。Hou 等人^[62]通过分析 SDO、太阳过渡区成像光谱仪(Interface Region Imaging Spectrograph, IRIS)以及位于中国云南抚仙湖的 1 m 新真空太阳望远镜(New Vacuum Solar Telescope, NVST)图像数据,对活动区 AR12741 的主黑子、亮桥、暗条及磁场结构进行了研究,并在亮桥西侧观测到喷流爆发现象(如图3所示)。研究人员认为喷流是由磁重联导致的,该研究证实了 Yuan 和 Walsh^[61]的亮桥模型,即在亮桥一侧容易发生磁重联。除了喷流之外,在黑子区域往往还会观测到波动及震荡现象。研究表明,在黑子本影区会产生 3 min 震荡现象,而在黑子半影区会产生 5 min 震荡现象。巧合的是,在亮桥上方同样存在 5 min 震荡现象,这种现象背后的物理机制至今还未被完全揭开^[61, 75, 76]。

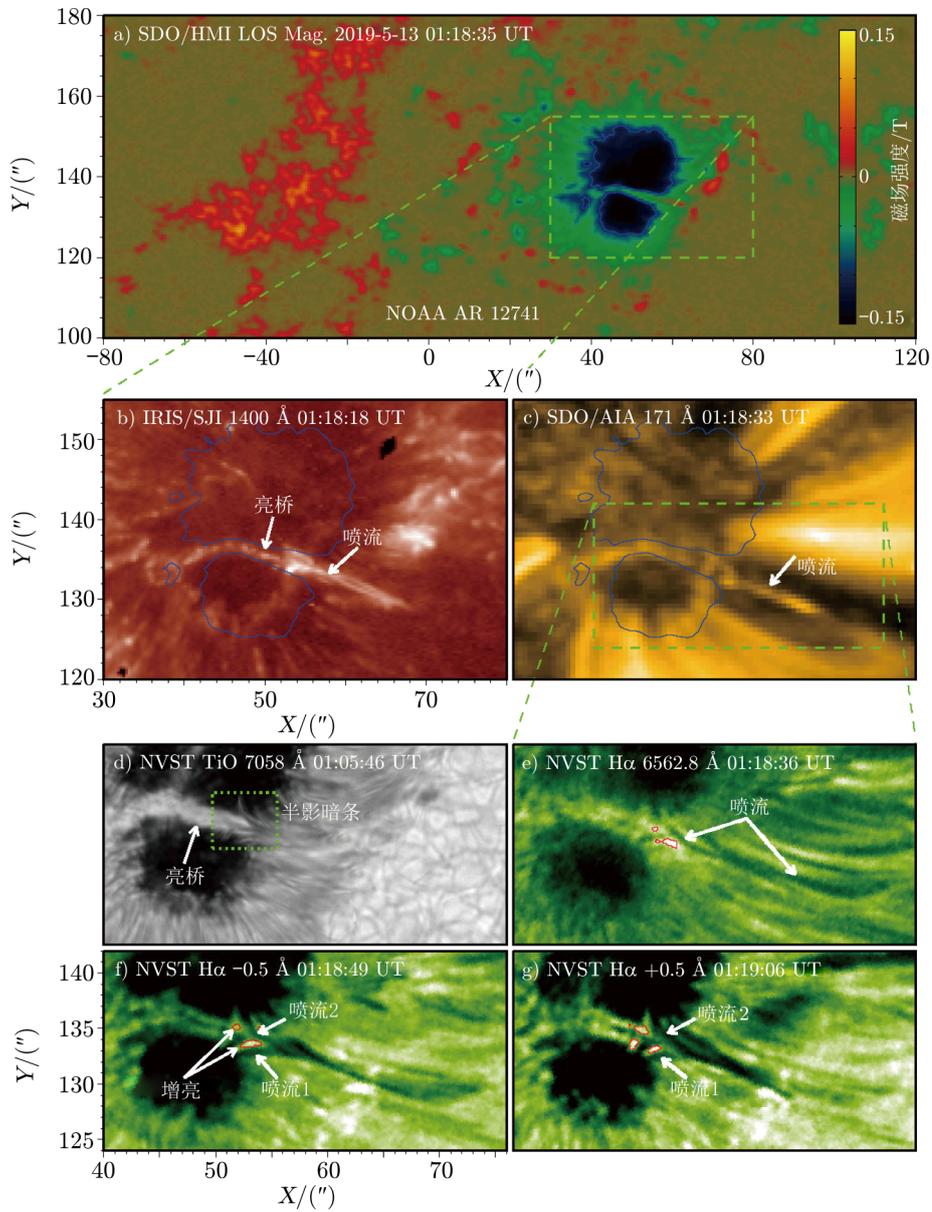


注:天蓝色曲线表示对流区;绿色曲线代表亮桥两侧的磁场情况,此区域为易发生磁重联区。

图2 亮桥区域磁场位型以及活动爆发模型^[61]

4 亮桥和黑子半影区的磁场对流

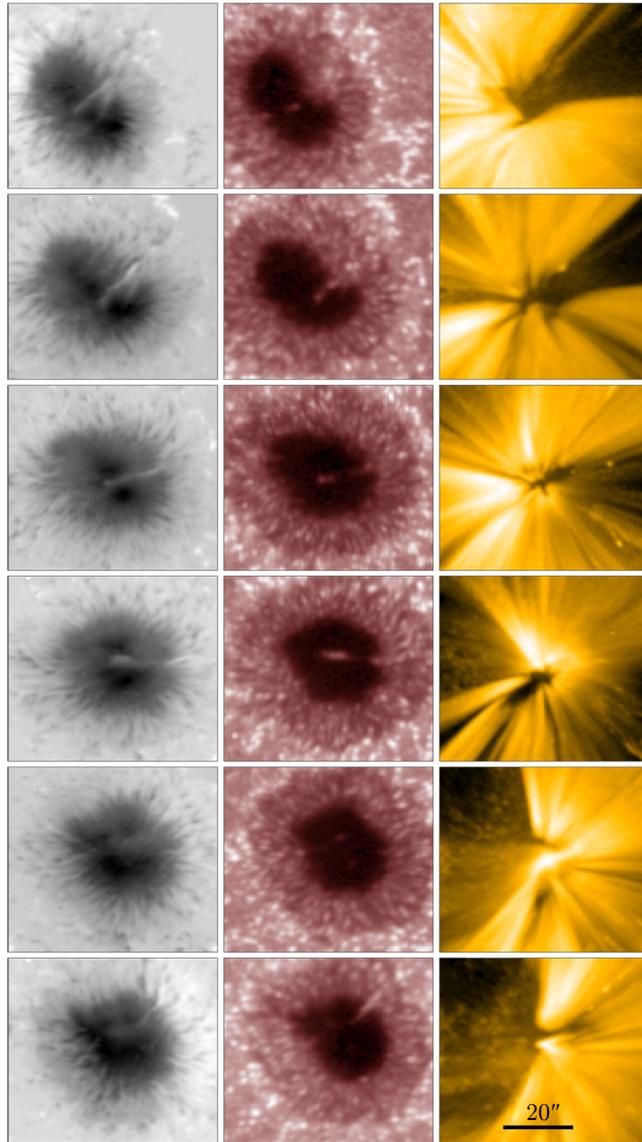
最近的高分辨率观测显示,在一些窄的亮桥中频繁发现了类似于磁对流的特征,如暗带和暗结^[6, 77, 78]。Feng 等人^[27]分析了一编号为 AR12738 的太阳活动区。2019 年 4 月 10 日—11 日,他们发现一条半影暗条出现在黑子本影区,随后逐步形成了一个微弱的亮桥。该亮桥的形成与半影暗条相关,在 4 月 12 日—13 日,逐步演化成了独立的结构;在 14 日之后,逐步消失。图 4 展示了亮桥的演化过程,在 SDO 白光像以及紫外(ultraviolet, UV)波段可观测到该亮桥的演化过程,在极紫外(extreme ultraviolet, EUV)波段可以观测到对应的日冕层冕环演化情况。由图可知,在亮桥对应的日冕层区域,冕环是缺失的,这就引出了一个



注: 展示 2019 年 5 月 13 日在 AR12741 活动区的主黑子、亮桥、半影暗条和喷流等活动情况。a)–c) 为 SDO/HMI 视向磁图、IRIS/狭缝成像仪 (Slit Jaw Imager, SJI) 1400Å 图像及 SDO/AIA 171 Å 图像, 展示亮桥西侧处的喷流爆发; d) 为 NVST 氧化钛 (TiO) 图像观测到的半影暗条; e)–g) 为 NVST H α 线心和两个线翼 ($\Delta\lambda=\pm 0.5$ Å) 图像, 有两组喷流从亮桥底部喷发。

图 3 SDO、IRIS 及 NVST 观测到的亮桥结构以及与喷流爆发之间的关系^[62]

有趣的问题，冕环与亮桥之间是否存在某种联系？

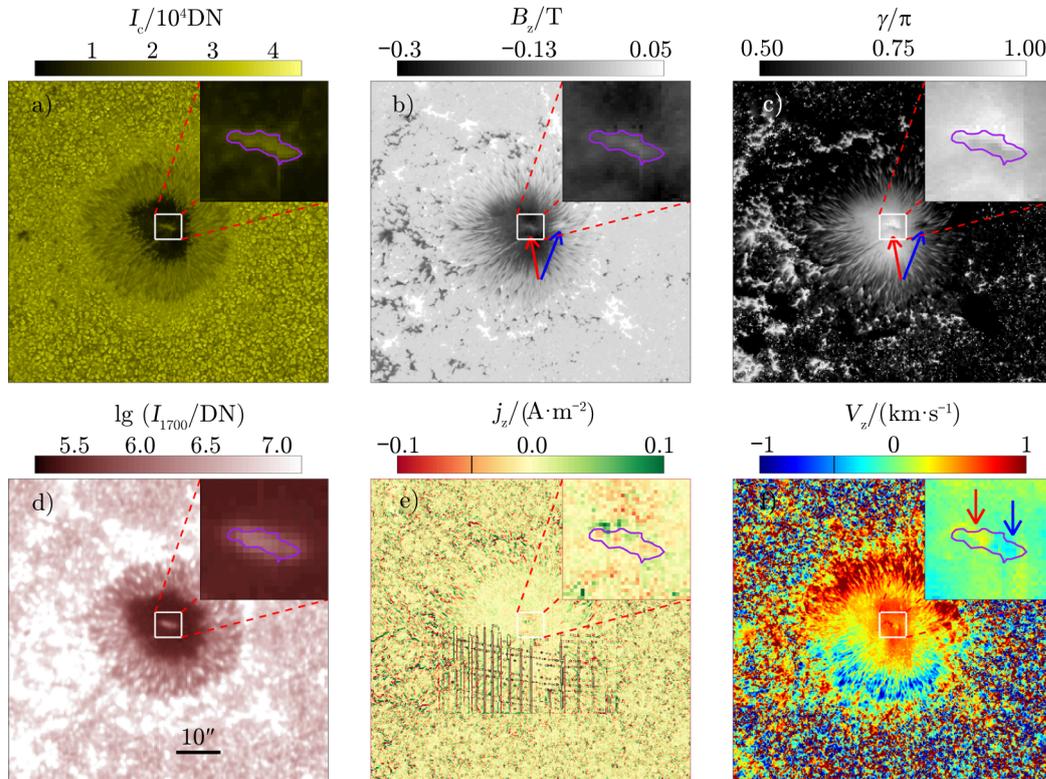


注：每列 6 幅图观测日期从 2019 年 4 月 10 日—15 日，时间大约为每天的 10:00 UT。第 1 列为 SDO/HMI 视向磁图；第 2 列为 SDO/AIA UV 波段 1700 Å 观测图像；第 3 列为 SDO/AIA EUV 波段 171 Å 观测图像。

图 4 2019 年位于编号为 AR12738 活动区的黑子、亮桥以及对应日冕区冕环的演化过程^[27]

在亮桥扎根区域，磁场的强度和倾角偏离了半影区域另外一部分，如图 5b) 和 c) 所示。与本影处的负性磁场相比，这部分显示出复杂的磁场特征，属于混合型磁场（如图 5b) 中蓝色箭头所示）。多普勒频移速度分析中（见图 5f)，在本影区北部发现了红移，速度约为

$1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这证明了 Bharti 等人^[20, 21]的研究结果, 即亮桥中不仅存在上升流, 还存在下降流; 这也意味着在半影边界外的多普勒频移速度将近 $1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 这个速度要高于半影-本影交界面区域的频移速度。这种现象很可能是埃弗谢德流 (Evershed flow)^[79], 这种流动模式一般是由磁对流运动引起的磁场线反转^[80, 81]。



注: a) SOT/SP 6301.5 Å 连续谱强度图; b) 视向磁场分量; c) 磁场矢量倾角; d) AIA 1700 Å 波段图; e) 电流密度; f) 多普勒频移速度。每图右上角为亮桥局部结构的放大图。f) 中一对红色和蓝色箭头标出亮桥和半影处另一个具有混合磁场极性的区域; 其局部放大图的背景速度已去除, 以突显亮桥上方的多普勒频移情况。

图 5 SOT/SP 6301.5 Å 连续光强度图^[27]

Feng 等人^[27]证实了先前的研究结果, 即在本影区存在 2 min 震荡^[61, 76]。但是 2 min 震荡在亮桥上方呈现出快速衰减或消失的现象, 即在亮桥区 2 min 震荡被抑制了, 而在亮桥区观测到的 4 min 震荡信号却十分明显, 这与黑子半影区的 4 min 震荡信号相同。

5 亮桥与冕环形成的相关性统计分析

亮桥的形成机制及其与日冕冕环形成之间的关系吸引了研究人员的关注。Feng 等人^[27]利用 Hinode 卫星搭载的高分辨率太阳光学望远镜 (Solar Optical Telescope, SOT) 的光谱偏

振仪 (Spectropolarimeter, SP)、SDO/HMI 和 SDO/AIA UV 与 EUV 波段的观测数据, 对 AR12738 活动区展开研究, 并对黑子内部形成的亮桥进行了近一周的跟踪观测研究 (如图 4 所示)。结果证明在亮桥上方对应的日冕区, 存在冕环缺失的现象。这一发现说明, 亮桥与冕环结构很可能存在某种联系。Feng 等人^[27]通过分析多个观测设备的数据, 对 AR12738 活动区的磁场、黑子的本影及半影等区域做了分析, 并诊断了亮桥的震荡情况。他们发现在亮桥演化过程中, 日冕冕环的形成与亮桥的演化存在某种制约关系或者调制机制。Feng 等人^[27]研究表明, 亮桥形态和锚定点的位置随着时间不断演化和改变, 而对应上方日冕区的冕环也出现相应演化, 这种现象类似于电路上开关的断开-闭合。我们可以认为在亮桥相应区域, 冕环消失时为开关闭合, 即磁力线形成短程闭合, 未延伸到日冕层; 冕环出现时可以认为是开关的断开, 即磁力线是长程的, 可以延伸到日冕层区域。冕环和亮桥之间的这种断开-闭合机制是亮桥对冕环的一种调制。这种短程磁力线的形成很可能跟亮桥锚定点附近的反极性小尺度磁场结构区域与主磁场区域所形成的闭合磁力线未能延伸到日冕层相关, 所以在对应日冕层区域显示冕环缺失; 而长程磁力线的形成, 可能是由于亮桥周围的反极性小尺度磁场结构区域与主磁场区域不断进行磁场对消、磁场位移及新磁浮现等相互作用有关, 这些因素可能导致磁力线的拉伸或磁力线重联, 从而形成长程闭合冕环或开放性冕环, 并延伸到日冕层, 所以在日冕层对应区域能观测到冕环。

Miao 等人^[67]利用 SDO/AIA^[82]、SDO/HMI^[83, 84]的观测数据, 对其 10 多年来观测积累的数据进行了长期研究和跟踪分析, 并对处在稳定期的亮桥以及黑子磁场等参数进行了大量的计算。他们的统计研究表明, 亮桥与冕环的抑制并非孤立事件; 他们共发现 66 例该类型样本案例。为了排除不必要的干扰, 他们统计的黑子区域以 α 类型的黑子为主。在此后的观测中, 又陆续发现 4 例此类案例, 亮桥抑制冕环的案例增加到 70 例, 新增案例在表 1 中展示。按照这种趋势预测, 未来会有更多新的相关案例被观测和统计。

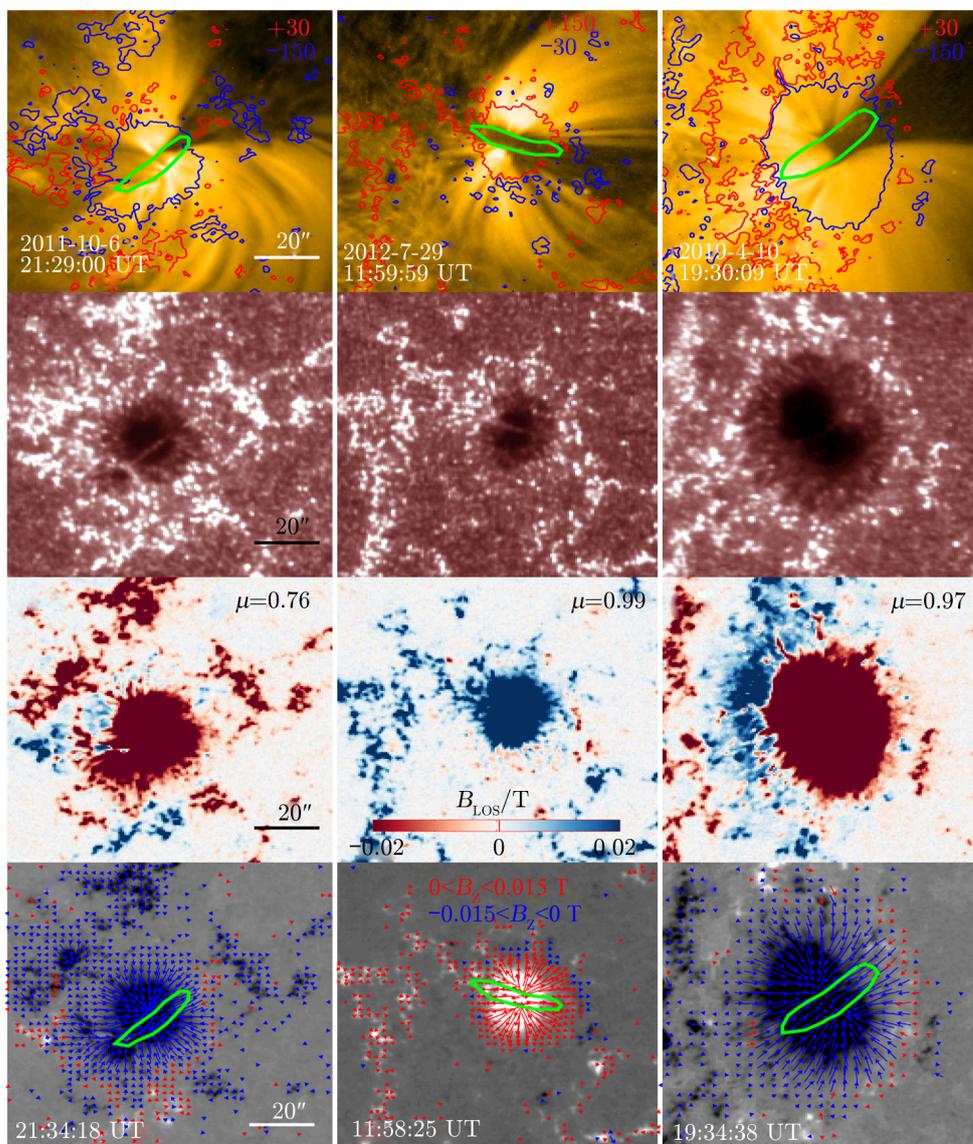
表 1 新增亮桥抑制冕环事件统计

世界时 (UT)	活动区	日球球面坐标
2011-09-06 20:50	AR11283	+265'', +100''
2014-01-19 15:00	AR11955	-430'', -155''
2014-07-10 20:30	AR12108	+780'', -170''
2023-03-08 19:30	AR13245	-160'', -270''

5.1 观测特征

Miao 等人^[67]的统计结果表明, 亮桥与冕环之间确实存在一种制约关系。图 6 展示了 3 个案例, 分别为活动区 AR11309、AR11529 和 AR12738。3 个活动区主要特点为: (1) 黑子属于单极性 α 太阳黑子; (2) 亮桥位于黑子核心区; (3) 亮桥锚定点附近存在与主黑子极性相反的小尺度磁场结构; (4) 冕环会跟随亮桥的演化而不断变化; (5) 亮桥和冕环演化时间跨度一般较长, 从几小时到几天不等。

冕环被抑制的区域主要集中在亮桥锚定点附近, 即在亮桥的两个短边附近区域。两者关系可分成三个阶段: (1) 当亮桥端点与半影区混合时, 冕环被抑制; (2) 当亮桥端点与半影



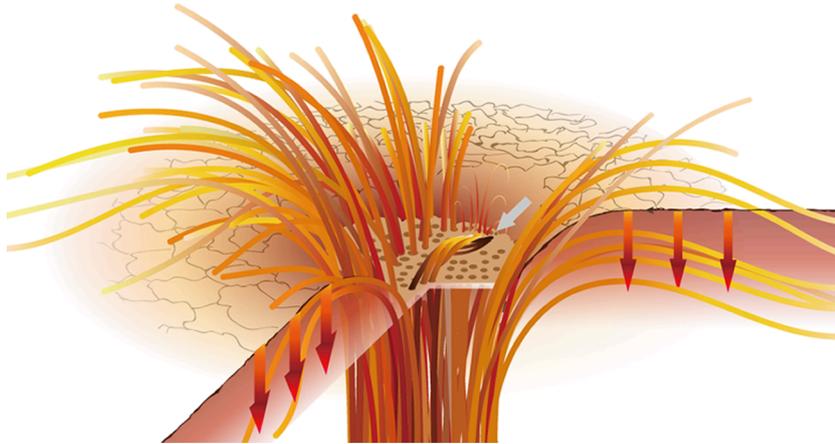
注: 从左至右分别是, 2011 年 10 月 6 日活动区 AR11309、2012 年 7 月 29 日活动区 AR11529 和 2019 年 4 月 10 日活动区 AR12738。 $\mu = \cos\theta$ 标记投影效果, 其中, θ 表示太阳黑子的经度。

图 6 太阳活动区 AR11309、AR11529 和 AR12738^[67]

分离时，冕环会逐步形成；(3) 随着亮桥和黑子的演化，冕环会存在一个动态变化的过程，冕环消失和出现现象会交替产生。Miao 等人^[67]统计分析了 SDO/AIA 近 10 年的观测数据，共收集了 66 例相关案例。Miao 等人^[67]所统计案例并非穷尽所有的观测数据，其中绝大多数案例中黑子极性较为简单，对于极性复杂的活动区，其冕环结构错综复杂，难以排除其他冕环结构的干扰，这样的案例未被统计。

5.2 亮桥与冕环形成机制的分析及模型

Feng 等人^[27]和 Miao 等人^[67]的研究认为，亮桥与冕环之间存在一种制约机制。根据观测统计及分析，Miao 等人^[67]提出亮桥与冕环三维抑制模型（如图 7 所示）。该抑制模型展示了亮桥小尺度磁场结构附着于黑子半影区域，更趋于平行日面。由于磁力线的闭合，所形成的小尺度闭合磁环高度无法延伸到日冕层，因此，在日冕层无法观测到对应的冕环结构，便出现了冕环缺失的现象。在 Yuan 和 Walsh^[61]提出的亮桥磁场模型中（如图 2 所示），其展示的磁场尺度和范围比图 7 的要大。图 2 中的亮桥模型可以解释亮桥磁场扭曲特征及可能激发的活动，例如磁重联和喷流等活动现象，但 Yuan 和 Walsh^[61]提出的亮桥磁场模型并未阐明和展示亮桥源区的磁场特征。图 7 给出的亮桥源区的磁场精细结构，弥补了图 2 中亮桥源区磁场结构缺失的问题。两者在展示亮桥磁场结构方面具有衔接和传承关系。Miao 等人^[67]研究表明磁场在水平方向沿着亮桥脊扭曲，证实了最初由 Yuan 和 Walsh^[61]提出的亮桥模型，他们认为可以解释倒“Y”型喷流^[53, 73]，并解释了喷流起源的空间不对称性和喷流传播方向^[52]。Miao 等人^[67]提出的亮桥与冕环抑制模型，能很好地解释亮桥与冕环形成的关系。将亮桥比作一把开关，对冕环的消失和出现进行控制。基于亮桥结构和磁场的复杂性，他们还认为，亮桥的锚定点可能有多个，该问题需要进一步研究证实。



注：亮桥锚定点与周围相反极性小区域磁场形成了小尺度的磁环，磁环高度被限制。即在演化阶段初期，磁环并未形成大尺度或开放性磁环，因而无法延伸至日冕层。灰色箭头指示区域为锚定点。

图 7 带有亮桥的黑子区域磁场卡通结构^[67]

Miao 等人^[67]通过视向磁图和矢量磁图分析，认为在亮桥的锚定点附近，通常会出现与主黑子极性相反的小极性群区域，这可能意味着磁场线是主黑子与相反小极性群区域连接

而形成的, 而不是直接沿径向延伸到日冕层形成冕环。由于冕环加热速率与长度具有一定的相关性^[85, 86], Miao 等人^[67]除了分析 171 Å 波段数据, 还分析了相同时间段的其他更高波段数据, 即 AIA/EUV 波段的 94 Å、131 Å 和 335 Å 等高温数据。研究表明, 在更高温度观测数据下并未发现对应的冕环结构。此结果原因可能有两种: 一是冕环结构可能被加热到色球温度, 并且无法被 AIA/EUV 多波段通道所探测到, 这与 Huang 等人^[87, 88]的研究结果相符; 另外一种解释, 可能是 AIA 搭载的热通道观测仪器对短程磁环形成的环结构不够敏感。该问题需进一步研究。

6 总结与展望

由于太阳黑子的本影区域中强磁场占主导^[23, 89-92], 所以本影内部的对流通常受到抑制^[32, 93]。然而, 当太阳黑子处于衰退期时, 磁场强度变弱, 磁对流开始起主导作用, 导致本影点和亮桥的形成。亮桥的磁场虽比黑子弱, 但温度更高、亮度更强; 亮桥的出现通常预示黑子即将分裂和消亡; 成熟的亮桥两端通常连接半影的两侧; 亮桥与本影点有相似之处, 如中央暗通道和亮边缘; 亮桥可视为细长形态的本影点; 大尺度亮桥可在角秒量级分辨率下观测到红蓝移现象。Miao 等人^[67]统计研究表明, 如果亮桥两端锚定在本影-半影边界, 对应日冕层区域会出现冕环缺失。如果亮桥与半影分离, 冕环可能再形成^[27, 67]。亮桥此刻起到“开关”作用, 即亮桥形态演化可以抑制或释放冕环形成。形成的机制可能是由亮桥锚定区域的具有相反极性的小尺度磁场结构集群区域与主黑子区以磁力线连接形成短程磁环。该机制原理大致为: 主黑子区域与亮桥锚定点周围出现的具有相反极性的小尺度磁场结构集群区域以短程磁环连接, 形成的磁环高度有限, 无法延伸至日冕层, 导致冕环缺失。随着亮桥的演化, 光球磁场显示出磁场对消及浮现现象, 而日冕层可能出现磁场的重联并伴随活动爆发现象及冕环的形成。这一系列的演化过程会导致短程磁环拉伸或形成开放性磁环, 增大了延伸高度, 从而可以延伸到日冕层, 形成冕环。该现象表明, 光球磁场与日冕层冕环形成直接相关。Miao 等人^[67]通过统计研究大样本数据, 提出亮桥与冕环形成模型(如图 7 所示), 该模型解释了为什么在亮桥的锚点附近不会形成冕环。该模型为研究日冕等离子体受限、太阳风形成以及其他日冕结构加热提供了新的思路。此外, 该研究对理解和阐释光球磁场演化与日冕层磁场演化的对应关系, 及日球内部磁场演化机制具有重要的参考意义。

未来需要进一步加强对磁场演化机制的研究, 对亮桥形成机制作进一步的分析。此类研究还存在一些不足: (1) Miao 等人^[67]的统计样本主要以单极性的 α 黑子为主, 对于更复杂的极性活动区是否也遵循该机制, 尚不清楚; (2) 此类统计事件还需要更多高分辨率多角度观测数据, 尤其是在具有复杂磁场的活动区, 单一视角观测很容易受到其他结构的干扰, 特别是无关活动区大尺度冕环结构投影的影响。

参考文献:

- [1] Brayley E W. MNRAS, 1869, 29: 320
- [2] Vazquez M. SoPh, 1973, 31: 377
- [3] Muller R. Sol Phys, 1979, 61: 297
- [4] Kitai R. SoPh, 1986, 104: 287
- [5] Zhang J, Tian H, He J, et al. ApJ, 2017, 838: 2
- [6] Zhang J, Tian H, Solanki S K, et al. ApJ, 2018, 865: 29
- [7] Li Q, Zhang L, Yan X, et al. ApJ, 2023, 942: 61
- [8] Rouppe van der Voort L, Bellot Rubio L R, Ortiz A. ApJ, 2010, 718: L78
- [9] Sobotka M. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1997, 118: 155
- [10] Sobotka M, Švanda M, Jurčák J, et al. A&A, 2013, 560: A84
- [11] Louis R E, Bayanna A R, Mathew S K, et al. Sol Phys, 2008, 252: 43
- [12] Rimmele T. ApJ, 2008, 672: 684
- [13] Rempel M. ApJ, 2011, 740: 15
- [14] Toriumi S, Cheung M C M, Katsukawa Y. ApJ, 2015, 811: 138
- [15] Toriumi S, Katsukawa Y, Cheung M C M. ApJ, 2015, 811: 137
- [16] <https://apod.nasa.gov/apod/ap000522.html>, 2024
- [17] Solanki S K. A&A Rv, 2003, 11: 153
- [18] Livingston W, Harvey J W, Malanushenko O V, et al. SoPh, 2006, 239: 41
- [19] Jurčák J, Martínez Pillet V, Sobotka M. A&A, 2006, 453: 1079
- [20] Bharti L, Jain R, Jaaffrey S N A. ApJL, 2007, 665: L79
- [21] Bharti L, Rimmele T, Jain R, et al. MNRAS, 2007, 376: 1291
- [22] Castellanos D J S, Lagg A, Solanki S K, et al. ApJ, 2020, 895: 129
- [23] Okamoto T J, Sakurai T. ApJL, 2018, 852: L16
- [24] Zirin H, Wang H. SoPh, 1993, 144: 37
- [25] Wang H, Yurchyshyn V, Liu C, et al. Research Notes of the American Astronomical Society, 2018, 2: 8
- [26] Liu J, Sun X, Schuck P W, et al. ApJ, 2023, 955: 40
- [27] Feng S, Miao Y, Yuan D, et al. ApJ, 2020, 893: L2
- [28] Wang Y M, Warren H P, Muglach K. ApJ, 2016, 818: 203
- [29] Wang Y M, Ugarte-Urra I, Reep J W. ApJ, 2019, 885: 34
- [30] Chitta L P, Peter H, Solanki S K, et al. ApJS, 2017, 229: 4
- [31] Li F Y, Chen Y H, Song Y L, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21: 144
- [32] Katsukawa Y, Yokoyama T, Berger T E, et al. PASJ, 2007, 59: S577
- [33] Louis R E, Beck C, Choudhary D P. ApJ, 2020, 905: 153
- [34] Zirin H, Wang H. Sol Phys, 1990, 125: 45
- [35] Rimmele T R. ApJ, 2004, 604: 906
- [36] Ortiz A, Bellot R L R, Rouppe van der V L. ApJ, 2010, 713: 1282
- [37] Li L, Zhang J, Peter H, et al. ApJ, 2018, 868: L33
- [38] Li F, Chen Y, Hou Y, et al. ApJ, 2021, 908: 201
- [39] Yang X, Yurchyshyn V, Ahn K, et al. ApJ, 2019, 886: 64
- [40] Asai A, Ishii T T, Kurokawa H. ApJ, 2001, 555: L65
- [41] Zhao J, Su J, Yang X, et al. ApJ, 2022, 932: 95
- [42] Shen Y, Liu Y, Su J, et al. ApJL, 2013, 773: L33
- [43] Shen Y D, Liu Y, Su J T, et al. SoPh, 2013, 288: 585
- [44] Shen Y, Liu Y, Tian Z, et al. ApJ, 2017, 851: 101
- [45] Hou Y, Li T, Yang S, et al. ApJ, 2022, 929: 12
- [46] Shen Y, Liu Y D, Chen P F, et al. ApJ, 2014, 795: 130
- [47] Qu Z N, Jiang L Q, Chen S L. ApJ, 2017, 851: 41

- [48] Shen Y, Liu Y D, Su J, et al. *ApJ*, 2017, 851: 67
- [49] Hou Y J, Li T, Yang S H, et al. *A&A*, 2016, 589: L7
- [50] Cai Q, Shen C, Ni L, et al. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 2019, 124: 9824
- [51] Shen Y, Chen P F, Liu Y D, et al. *ApJ*, 2019, 873: 22
- [52] Louis R E, Beck C, Ichimoto K. *A&A*, 2014, 567: A96
- [53] Tian H, Yurchyshyn V, Peter H, et al. *ApJ*, 2018, 854: 92
- [54] Siu-Tapia A L, Rempel M, Lagg A, et al. *ApJ*, 2018, 852: 66
- [55] Shen Y, Liu Y, Su J, et al. *ApJ*, 2011, 735: L43
- [56] Miao Y H, Liu Y, Shen Y D, et al. *ApJL*, 2019, 871: L2
- [57] Miao Y, Liu Y, Shen Y D, et al. *ApJ*, 2019, 877: 61
- [58] Miao Y, Liu Y, Elmhamdi A, et al. *ApJ*, 2020, 889: 139
- [59] Shen Y, Liu Y. *ApJ*, 2012, 753: 53
- [60] Shen Y, Liu Y, Su J, et al. *ApJ*, 2012, 745: 164
- [61] Yuan D, Walsh R W. *A&A*, 2016, 594: A101
- [62] Hou Y J, Li T, Zhong S H, et al. *A&A*, 2020, 642: A44
- [63] Miao Y, Li D, Yuan D, et al. *ApJL*, 2021, 908: L37
- [64] Lim E K, Yang H, Yurchyshyn V, et al. *ApJ*, 2020, 904: 84
- [65] Louis R E, Bellot R L R, de la Cruz R J, et al. *A&A*, 2015, 584: A1
- [66] Hou Y, Zhang J, Li T, et al. *ApJL*, 2017, 848: L9
- [67] Miao Y, Fu L, Du X, et al. *MNRAS*, 2021, 506: L35
- [68] Shen Y, Tang Z, Miao Y, et al. *ApJL*, 2018, 860: L8
- [69] Miao Y, Liu Y, Li H B, et al. *ApJ*, 2018, 869: 39
- [70] Bai X, Socas-Navarro H, Nóbrega-Siverio D, et al. *ApJ*, 2019, 870: 90
- [71] Yang H, Lim E K, Iijima H, et al. *ApJ*, 2019, 882: 175
- [72] Moore R L, Cirtain J W, Sterling A C, et al. *ApJ*, 2010, 720: 757
- [73] Robustini C, Leenaarts J, de la Cruz R J, et al. *A&A*, 2016, 590: A57
- [74] Bharti L, Solanki S K, Hirzberger J. *A&A*, 2017, 597: A127
- [75] Yang S, Zhang J, Jiang F, et al. *ApJL*, 2015, 804: L27
- [76] Yuan D, Nakariakov V M, Huang Z, et al. *ApJ*, 2014, 792: 41
- [77] Berger T E, Berdyugina S V. *ApJL*, 2003, 589: L117
- [78] Lites B W, Scharmer G B, Berger T E, et al. *Sol Phys*, 2004, 221: 65
- [79] Evershed J. *MNRAS*, 1909, 69: 454
- [80] Thomas J H, Weiss N O, Tobias S M, et al. *Nature*, 2002, 420: 390
- [81] Rimmele T, Marino J. *ApJ*, 2006, 646: 593
- [82] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. *SoPh*, 2012, 275: 17
- [83] Schou J, Borrero J M, Norton A A, et al. *Sol Phys*, 2012, 275: 327
- [84] Scherrer P H, Schou J, Bush R I, et al. *SoPh*, 2012, 275: 207
- [85] Fisher G H, Hawley S L. *ApJ*, 1990, 357: 243
- [86] Yokoyama T, Shibata K. *ApJ*, 1998, 494: L113
- [87] Huang Z. *ApJ*, 2018, 869: 175
- [88] Huang Z, Zhang Q, Xia L, et al. *ApJ*, 2020, 897: 113
- [89] Lagg A, Solanki S K, van Noort M, et al. *A&A*, 2014, 568: A60
- [90] Felipe T, Collados M, Khomenko E, et al. *A&A*, 2016, 596: A59
- [91] Felipe T, Collados M, Khomenko E, et al. *A&A*, 2017, 608: A97
- [92] Guglielmino S L, Romano P, Zuccarello F. *ApJ*, 2017, 846: L16
- [93] Leka K D. *ApJ*, 1997, 484: 900

Research Progress of the Relationship Between Light Bridges and Coronal Loops

MIAO Yu-hu^{1,2,3,4}, DENG Lin-hua², SU Jiang-tao^{5,6}, GUAN Ming-xiang¹,
ZOU Hai-xin¹ XIA Lin-zhong¹, CAO Xue-mei¹,
HUA Yun-zhi¹, LIU Yu⁷, YUAN Ding³

(1. School of Information and Communication, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, China; 2. School of Mathematics and Computer Science, Yunnan Minzu University, Kunming 650504, China; 3. Institute of Space Science and Applied Technology, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China; 4. Yunman Key Laboratory of the Solar physics and Space Science, Kunming 650216, China; 5. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 7. School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, 611756 Chengdu, China)

Abstract: The light bridge is a common structure within sunspots that typically triggers a series of eruptive activities and influences the evolution of sunspots. This article focuses on elucidating the inhibitory relationship between light bridges and coronal loops. By utilizing data from the Solar Dynamics Observatory (SDO), including the Atmospheric Imaging Assembly (AIA) for extreme ultraviolet (EUV) imaging and the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) for line-of-sight and vector magnetograms, we performed a statistical analysis of a large dataset, revealing the prevalent characteristics of the inhibitory features between light bridges and coronal loops. The regions with missing coronal loops are primarily located at the umbra-penumbra boundary near the anchor point of the light bridge. In this region, as the light bridge evolves and changes its morphology, the appearance and disappearance of coronal loops are observed. Analysis of HMI magnetogram data indicates that the light bridge anchoring region is often accompanied by small magnetic fields of opposite polarity. It can be inferred that the magnetic field lines of the light bridge anchor point are connected to the surrounding small magnetic fields of opposite polarity, forming a short-circuited magnetic loop. However, due to the relatively short length of the loop, it does not extend into the corona, thus preventing the observation of coronal loops in the corona. Based on the research findings, a model describing the magnetic connectivity between light bridges and coronal loops is proposed, which can explain many physical processes associated with light bridges.

Key words: solar activity; sunspot; solar magnetic field