

太阳活动区AR 12975中X1.3级耀斑事件分析

杨 翰^{1,2}, 郑建川^{3*}, 刘雄伟^{1,2}

¹西华师范大学物理与天文学院, 四川 南充

²现代天体物理与宇宙学四川省高等学校重点实验室, 四川 南充

³深圳市天文台, 广东 深圳

收稿日期: 2024年3月5日; 录用日期: 2024年4月5日; 发布日期: 2024年4月15日

摘 要

基于多波段观测数据, 分析2022年3月30日太阳活动区NOAA AR 12975中爆发的X1.3级耀斑。耀斑发生期间活动区出现了S型结构与明显的光斑, 同时活动区里出现的白色局部斑状光亮, 可以看到明显的亮度提升, 白色局部斑状光亮逐渐演变为明亮的耀斑带。两条耀斑带相互接近, 发生重联现象, 之后形成大型拱顶结构, 两端脚点的耀斑带向外拓展; 到最后拱顶结构断开, 南北脚点的耀斑带停止了延伸。从磁场能量的角度看, 早在耀斑出现在太阳表面时, 活动区的磁场活跃强度就在逐渐加剧。在不同的M级耀斑与C级耀斑事件发生后, 活动区AR 12975的磁场强度不减反增, 预示了接下来即将发生的大型耀斑爆发。结合多维演变图像分析, 我们得出结论: 活动区AR 12975可以被视为一个良好的测试对象, 用来研究光球磁场活动在触发强大太阳爆发中的作用。

关键词

太阳耀斑, 多波段观测, 磁重联

Analysis of X1.3 Flare Events in the Solar Active Region AR 12975

Han Yang^{1,2}, Jianchuan Zheng^{3*}, Xiongwei Liu^{1,2}

¹School of Physics and Astronomy, China West Normal University, Nanchong Sichuan

²Key Laboratory of Modern Astrophysics and Cosmology of Sichuan Provincial Education Department, Nanchong Sichuan

³Shenzhen Astronomical Observatory, Shenzhen Guangdong

Received: Mar. 5th, 2024; accepted: Apr. 5th, 2024; published: Apr. 15th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 杨翰, 郑建川, 刘雄伟. 太阳活动区 AR 12975 中 X1.3 级耀斑事件分析[J]. 天文与天体物理, 2024, 12(2): 9-17. DOI: 10.12677/aas.2024.122002

Abstract

Based on multi-band observation data, the X1.3 flare that erupted in NOAA AR 12975 in the active region of the solar surface on March 30, 2022 was analyzed. During the flare, the S-shaped structure and obvious light spots appeared in the active area, and the white local spotted light appeared in the active area, and the brightness of the white local spotted light gradually evolved into a bright flare band. The two flare zones are close to each other and reconnect, and then a large vault structure is formed, and the flare zones at the feet of both ends expand outward. By the end of the vault structure was disconnected, and the flare bands at the north and south foot points stopped extending. From the perspective of magnetic field energy, as early as the appearance of flares on the surface of the sun, the active intensity of the magnetic field in the active region is gradually increasing. After the occurrence of different M-class flare and C-class flare events, the magnetic field strength of AR 12975 in the active area did not decrease but increased, indicating that the next large-scale flare outbreak was about to occur. Combined with the analysis of multi-dimensional evolutionary images, we conclude that the active region AR 12975 can be considered as a good test object for studying the role of photosphere magnetic field activity in triggering powerful solar bursts.

Keywords

Solar Flares, Multi-Band Observations, Magnetic Reconnection

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太阳的结构从内到外依次为日核、辐射区、对流层、光球层、色球层、过渡区、日冕。日冕是太阳外部的高温电离大气层。在太阳磁场的作用下,大部分等离子体以闭环结构和扭曲的拱状结构的形式存在于日冕中[1]。日冕上会发生许多的爆发事件,例如耀斑与日冕物质喷射。

“耀斑”一词指的是发生在色球层和日冕层的磁重联现象。在观测上耀斑现象被定义为以分钟为时间尺度在电磁波谱上发生的辐射增亮。大多数表现是对原始能量释放过程的二次反应,将磁能转化为粒子能、热、波和动能[2]。其强度大致可以分为五个等级,由弱到强依次为:A、B、C、M、X。

太阳耀斑是太阳局部区域强烈而脉冲的电磁辐射释放。它是太阳系中最强大和最具有破坏性的爆发事件之一,耀斑可以发生在太阳的任何地方,在活动区、半影区、安静的太阳磁力线构成的网络的边界上,甚至可以发生在这个磁网内部[3]。活动区演化过程常伴随着爆发现象[4]。耀斑是由储存在太阳日冕中的磁能通过磁重联过程释放出来引起的[5]。活动区(ARs),即磁通量强集中的正、负极性区域,是耀斑的主要来源[6]。AR的生命周期开始于光球上相反磁通量的出现,称为出现阶段。新出现的正(负)磁通量合并在一起,形成一个正(负)极性强集中的区域。下一个阶段是衰变阶段,在这个阶段,集中的磁通量区域开始破裂、扩散,并从光球中消散[7]。光球运动将能量储存起来之后,在AR磁场中,储存在太阳黑子周围的磁能通过磁重联突然释放,短时间内总光度大幅度提升。一次太阳耀斑释放的能量约为 $10^{26}\sim 10^{32}$ erg。在观测中往往表现为出现太阳上局部的、持续一分钟的光亮[8]。

耀斑爆发可以大致分为三个阶段。在耀斑前阶段，软 X 射线与极紫外波段中可以观测到耀斑区域的日冕等离子体缓慢升温[9]。在脉冲阶段，大量高能电子和离子被加速，大部分能量被释放[10]。一些高能粒子被捕获并在无线电波段产生强烈的辐射[11]。脉冲阶段后软 X 射线和 $H\alpha$ 辐射达到最大值，此时能量释放较为平缓。在衰变阶段，日冕等离子体几乎恢复到原始状态，一部分粒子落回色球层[12]。高层日冕发生磁重联，等离子体喷射和冲击波继续加速另一部分粒子，使其上升至太阳系空间，造成米波射电暴和行星际粒子事件[13]。

近年来对耀斑的研究包括对耀斑能量分配、能量释放位置、能量释放场景和粒子加速的测试的改进[14][15]。越来越多的证据[16]支持磁力线重联是耀斑爆发的根本原因。磁重联这一过程虽然已被普遍认为是触发因素，但它如何将相当一部分能量转化为非热粒子的问题仍然存在争议[17]。类似耀斑的过程可能是造成日冕磁场大规模重构以及日冕加热的原因。大型耀斑会影响行星际空间，并且实质性地影响地球较低的电离层[18]。

AR 12975 是太阳进入第 25 太阳周期以来产生的活动区中包含了 X 级耀斑的 ARs 之一。磁场复杂性的快速演变触发 X 级耀斑的爆发。利用对太阳的观测数据，处理多波段的图像，直观而明晰地显示了太阳耀斑爆发过程。由于近期太阳爆发的 X 级强度耀斑比较少见，所以 AR 12975 具有一定研究意义。

本文详细分析了发生于 2022 年 3 月 30 日的强度为 X1.3 级的耀斑的多波段成像，及其能量释放的触发机制与演化过程，同时探讨了 X 级耀斑爆发前光球磁场的复杂性。

2. 观测 AR 12975

2.1. 耀斑爆发的过程与演化

2022 年 3 月 24 日，活动区 AR 12975 以单极黑子的形式出现在太阳东侧。随后，活动区域不断表现出带有的极性的磁通量的光球运动，其中包括剪切和旋转运动[19]，这导致该区域迅速演变成最复杂的 δ 型结构[20]，并导致了后续大型爆发耀斑。

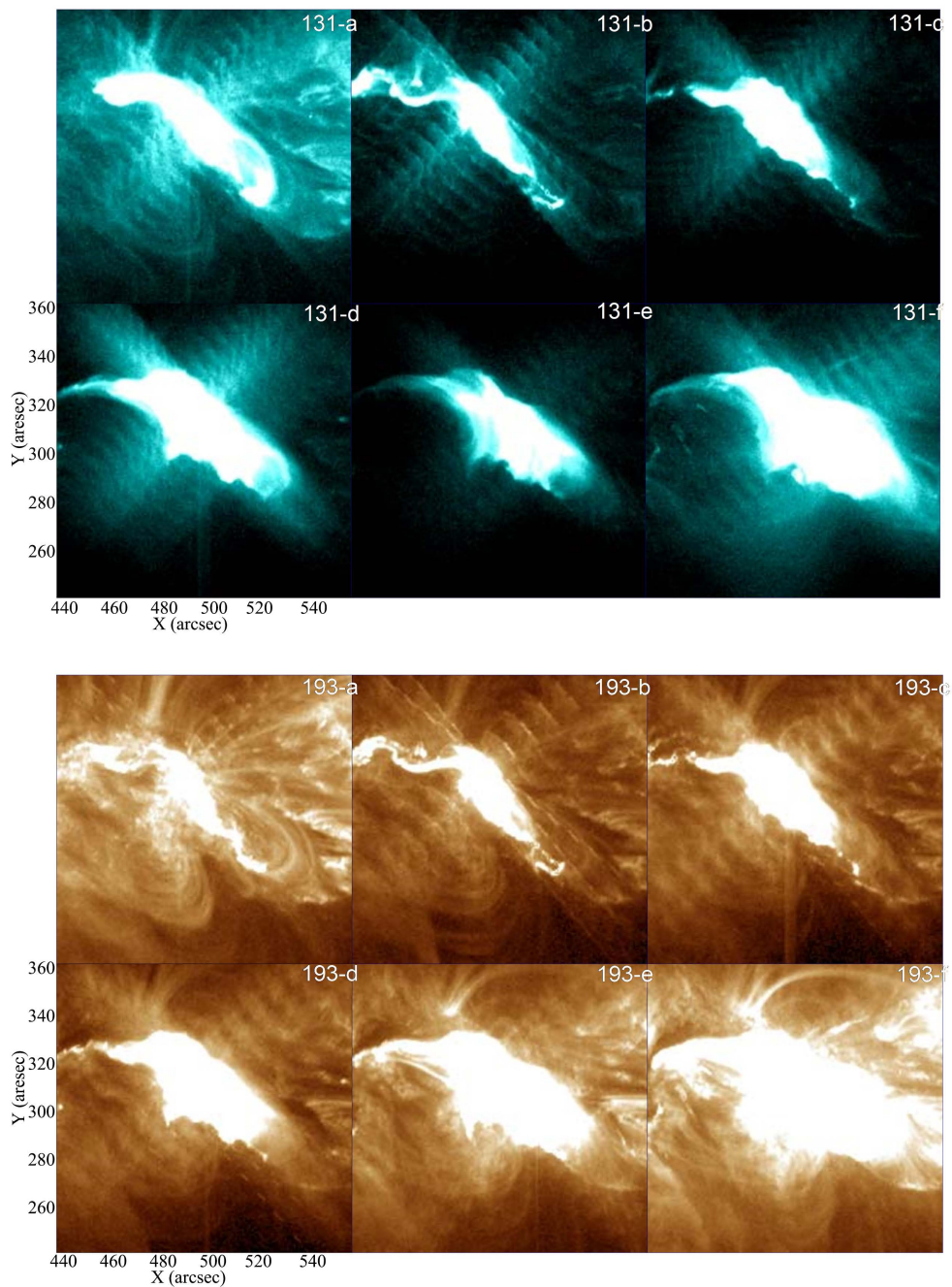
AR 12975 爆发了 1 次 X 级耀斑和 11 次 M 级耀斑以及 62 次 C 级耀斑事件。表 1 给出了 M 级耀斑和 X 级耀斑的具体爆发时间、峰值时间与结束时间。活动区 AR 12975 的第一次 M 级耀斑爆发于 2022 年 3 月 28 日，随后又在同一天爆发了三次 M 级耀斑。在 29 日爆发三次 M 级耀斑后，在 30 日爆发了一个 X1.3 级耀斑。也是这次活动区内爆发的唯一一次 X 级耀斑。

Table 1. Flare event from active region AR 12975

表 1. 活动区 AR 12975 产生的耀斑事件

No	Date	GOES class	Tstart	Tpeak	Tend
1	20220328	M4.0	10:58:00	11:29:00	11:45:00
2	20220328	M1.0	17:32:00	17:41:00	17:47:00
3	20220328	M1.0	19:08:00	19:23:00	19:40:00
4	20220328	M1.1	20:49:00	20:59:00	21:09:00
5	20220329	M1.1	01:48:00	01:58:00	02:03:00
6	20220329	M1.0	09:17:00	09:38:00	09:55:00
7	20220329	M1.6	21:43:00	21:52:00	21:57:00
8	20220330	X1.3	17:21:00	17:37:00	17:46:00
9	20220331	M9.6	18:17:00	18:35:00	18:45:00
10	20220402	M4.3	17:34:00	17:44:00	17:51:00
11	20220402	M3.9	12:56:00	13:55:00	14:44:00
12	20220402	M2.9	02:39:00	02:56:00	03:07:00

活动区 AR 12975 产生的 X 级耀斑发生在 3 月 30 日，它开始于 17:20 UT，峰值在 17:38 UT，结束于 17:50 UT。图 1 是一些具有代表性的 131 Å, 193 Å 与 304 Å 波段的耀斑图像，显示了 X1.3 级耀斑的演变，数据来源于斯坦福大学的联合科学运营中心 Joint Science Operations Center (JSOC)。其中，SDO/HMI 在 6173 Å 以 1 角秒的分辨率观测到完整的太阳盘，其数据用来研究太阳表面的振荡和磁场；而 SDO/AIA 对应于不同温度的耀斑响应不同，在日冕和过渡区(太阳边缘以上半太阳半径)的多个波长同时拍摄全盘图像，具有 1.5 弧秒分辨率和 12 秒时间节奏，其数据用于研究太阳日冕。耀斑发生前的 EUV 图像显示，与 AR 相关的日冕结构呈现出 S 形状，即一个突出的日冕 S 形结构。在耀斑的脉冲阶段，这条通量绳经历了部分喷发，形成了色球耀斑带。



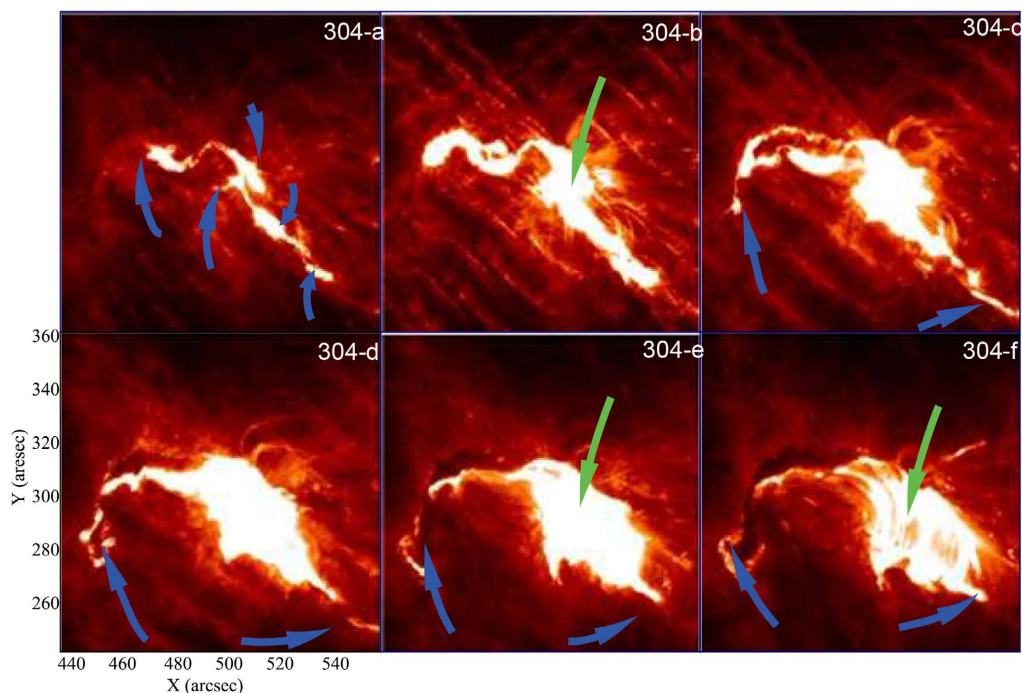


Figure 1. AIA flare images of the 131 Å, 193 Å and 304 Å bands

图 1. AIA 131 Å, 193 Å 与 304 Å 波段的耀斑图像

耀斑爆发前, 在一些 M 级与 C 级耀斑之后, 活动区 12975 的活跃程度逐渐提高, 在图像上观测的结果为出现一些白色的斑点, 而在这些斑点与斑点之间, 隐约可以看到有曲折的痕迹将其相互连接(图 1 304-a)。这些曲折的、有着细丝喷发的显著特征痕迹就是耀斑的磁通量绳[21], 这些痕迹的脚点出现的白色斑点就是它的局部斑状光亮。然后活动区的活跃强度逐渐提升, 这些曲折的痕迹逐渐也变得如同一开始的白色斑点一样明亮, 大体上可以看出两条白色的耀斑带, 上方的耀斑带呈现出“S”形而下方的耀斑带几乎是一条直线, 这两条耀斑带彼此接近(图 1 304-b)。此时活动区的强度与其活跃程度达到了最大值(图 1 304-c), 在短时间内释放出大量能量, 其亮度大幅度提升。图像中两条耀斑带的宽度拓宽, 中间一段交汇重联形成拱状结构。此时活动区正在经历其渐变阶段(图 1 304-d), 这个阶段的特点是形成了一个大型环形拱顶和耀斑带, 覆盖了整个 AR 区域。与此同时可以看到, 两条耀斑带的剩余两端分别向外延伸(图 1 304-e)。最后活动区的耀斑爆发后变为断开的大型环形拱顶和耀斑带, 以及南北两端脚点处分别向外延伸的耀斑带(图 1 304-f)。

以 304 Å 为例, 图上可以看到, 活动区 AR 12975 出现了 S 型结构与明显的光斑, 图 1 304-a 中蓝色箭头所指是耀斑爆发之前活动区里出现的白色局部斑状光亮, 可以看到明显的亮度提升, 白色局部斑状光亮逐渐演变为明亮的耀斑带。两条耀斑带相互接近, 发生重联现象(图 1 304-b)。此时画面中心形成大型拱顶结构, 两端脚点的耀斑带向外延伸(图 1 304-c、图 1 304-d)。接着拱顶结构开始有断开的迹象, 南北脚点的耀斑带仍在延伸(图 1 304-e)。到最后拱顶结构几乎完全断开, 南北脚点的耀斑带停止延伸(图 1 304-f)。

2.2. 耀斑过程期间的磁场演化

磁能被视作是太阳耀斑释放的热能和辐射能以及日冕物质抛射中观测到的动能的有效能量来源[22]。为了了解活动区 AR 12975 在 X 级耀斑爆发前的磁性性质, 我们处理得到了 AR 在耀斑爆发最大阶段的

磁力数据图像。图像表明，在太阳黑子中心区域存在一些被单个半影包围的分节的本影。磁图的颜色表明，这些本影与半影中有一些具有负极性，而一些与正极性有关。X 级耀斑爆发后螺旋度和能量通量的下降必然与这些通量所依赖的磁场和速度场的变化有关[23]。

AR 12975 于 2022 年 3 月 24 日出现在日面上，之后迅速变为复杂的 δ 型活跃区。图 2 显示了 AR 12975 从 3 月 25 日到 4 月 1 日的演变和发展情况。从图像来看，一开始耀斑的磁力活动并不明显，随后开始逐渐变得强烈，这段时间里日冕活动区陆续发生了许多次 M 级耀斑和 C 级耀斑，直到 3 月 30 日发生了 AR 12975 活动区观测到的强度最高的 X1.3 级耀斑。此时可以明显看到黑子的本影集中出现在画面中心，周围是它的半影。这样强烈复杂的格局一直持续到耀斑爆发结束。

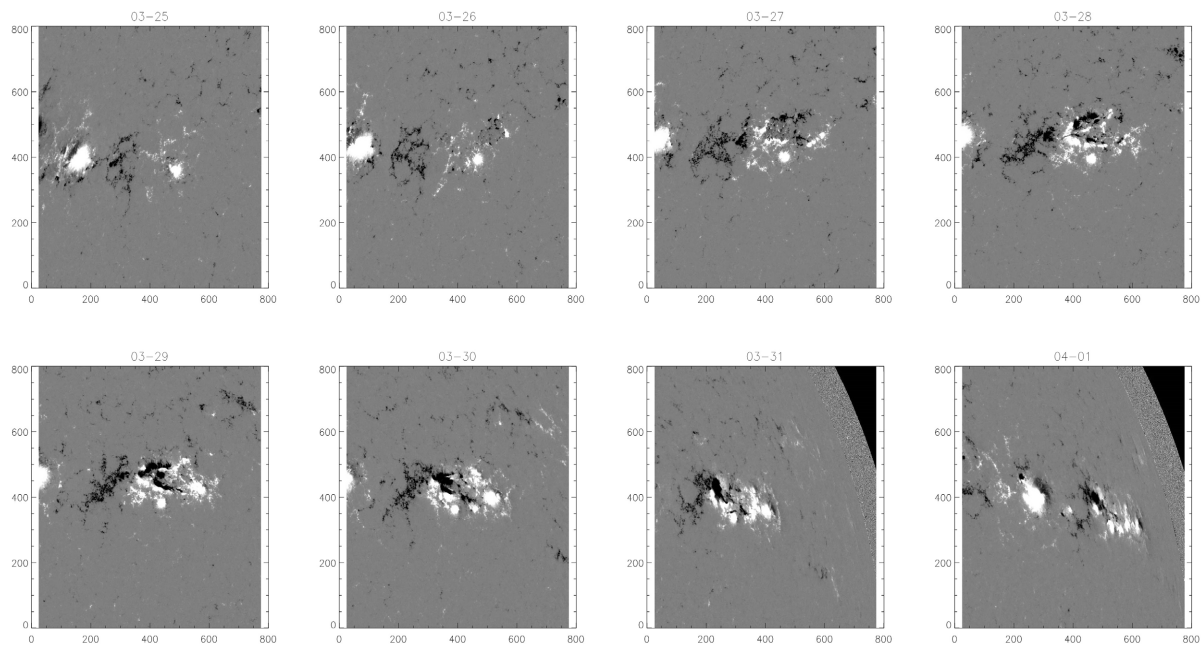


Figure 2. The HMI image shows the change in magnetic field strength of AR 12975 in the active region. The magnetic flux generated by the photosphere is stored in the active zone, causing it to become more active, eventually leading to the eruption of the flare

图 2. HMI 图像显示了活动区 AR 12975 的磁场强度变化。光球产生的磁通量存储于活动区，使其演变得更加活跃，最终导致了耀斑的爆发

可以看到，早在耀斑出现在太阳表面时，活动区的磁场活跃强度就在逐渐加剧。爆发表生前，在不同的 M 级耀斑与 C 级耀斑事件发生后，活动区 AR 12975 的磁场强度并未减弱，反而在增加。从 3 月 30 日开始，活动区的磁场强度及其复杂程度一直在增加，在 3 月 30 日达到顶峰。

2.3. 耀斑期间 X 射线流量的变化

利用 GOES 卫星数据观测耀斑期间的 X 射线流量。GOES 由一系列地球静止卫星组成(在 35,790 公里的高度绕地球运行)，这些卫星产生不间断的太阳 X 射线通量时间序列，以及对地球的气象观测[24]。提供精确到秒的实时条件到太阳周期时间尺度的地球有效 X 射线辐照度的精确测量。

利用 SDO AIA 数据连续积分获得 AIA 94 Å、AIA 131 Å、AIA 304 Å 波段的光变强度曲线(图 3)。在三个不同的波段中选择活动区域 a 与同波段同时刻同样大小宁静区域 b，分别对两个区域进行连续积分后相除，将数据绘制成连续的曲线，得到图像中的结果。

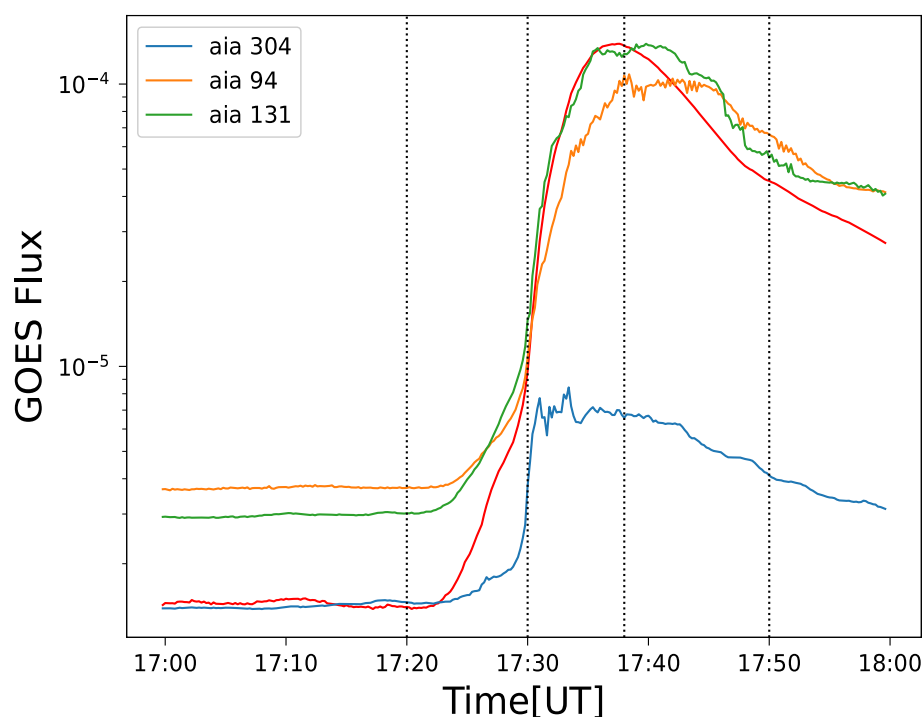


Figure 3. X-ray flow curves of the active AR 12975 flare burst time period and the photointensity curves of the AIA 94 Å, AIA 131 Å, and AIA 304 Å bands. The dotted lines in the diagram indicate the start, lift, peak, and end of a flare. The red curve represents the X-ray flow curve observed by the GOES satellite, the blue curve represents the photointensity curve of the AIA 304 Å band, the yellow curve represents the photointensity curve of the AIA 94 Å band, and the green curve represents the photointensity curve of the AIA 131 Å band

图 3. 活动区 AR 12975 的耀斑爆发时间段的 X 射线流量变化与 AIA 94 Å、AIA 131 Å、AIA 304 Å 波段的光变强度曲线。图中虚线表示耀斑的开始，提升，峰值与结束。红色曲线代表 GOES 卫星观测得到的 X 射线流量变化曲线，蓝色曲线代表 AIA 304 Å 波段的光变强度曲线，黄色曲线代表 AIA 94 Å 波段的光变强度曲线，绿色曲线代表 AIA 131 Å 波段的光变强度曲线

活动区 AR 12975 的 X1.3 级耀斑的 X 射线流量强度于 2022 年 3 月 30 日晚 17:21 分开始出现明显爬升(图中红色虚线)，此时的 X 射线流量强度约在 10^{-6} KeV 的量级，在 17:37 达到最大峰值，超过 10^{-4} KeV (图中黄色虚线)，之后逐渐下降至爆发前的水平。

这与在 AIA 图像上观测到的爆发过程是较为吻合的。从 AIA 94 Å、AIA 131 Å、AIA 304 Å 三个波段的光变曲线可以看到，这三个波段的光强度几乎都是在 17:30 左右的同一时间段大幅提升，而此刻恰好 X 射线流量同步有着跨越了数量级的提升。AIA 304 Å 波段在 17:30 分后不久达到峰值，而其余的波段与 X 射线在 17:38 达到顶峰，结合 AIA 图像观察，此时正是耀斑爆发最剧烈的时刻。这说明在此次耀斑爆发的过程中一定伴随着大量的能量传递。而这也与 HMI 图像的结果非常吻合，说明耀斑喷发的过程中释放的大量能量存在磁能的占比。

3. 结论

由于日冕动力学的自由度[25]和活动区 AR 12975 复杂的磁场特性[26]，该活动区中爆发了多个耀斑，并爆发了太阳进入第 25 周期来爆发的第二次 X 级耀斑，第一次 X 级耀斑爆发于活动区 AR 12887 [27]中。AR 12975 出现在日面后，活动区中不断有新的磁通量浮现，加上光球运动促进能量储存，最终爆发了 X 级耀斑。在此大耀斑发生期间，活动区 AR 12975 中的黑子是 δ 型太阳黑子，复杂的强磁场促使耀斑爆发，大量磁能转化为等离子体动能和热能。

我们研究了这次 X 级耀斑之前的 S 形结构, 耀斑结束后它变为了拱状结构。结合 AIA 图像与 HMI 图像也说明了初始能量释放的位置与磁零点的位置在空间上具有一定相关性[28]。此次 X 级耀斑期间, 磁零点处的触发重新连接只能局部破坏通量绳的稳定, 因为喷发相对较小, 并且整个 S 形结构得以保留, 而拱状结构断开。这可能是由于磁通绳上有很强的磁力线, 以及其南部足点的牢固连接。各波段光强增幅与 X 射线流量的突然增加几乎发生在同一时刻, 表明耀斑爆发伴随着大量的能量传递。分析耀斑爆发前后的 HMI 图像, 耀斑喷发的过程中释放的大量磁能。

总之, 磁通量浮现和光球运动在活动区 AR 12975 中储存了大量的磁能, 是研究光球磁场活动触发强太阳爆发中的有效事件。耀斑过程从日冕的能量积累开始, 到磁场结构的重构和释放磁能结束, 都是太阳物理中值得研究的重要问题。在过去的几十年里, 这些问题取得了一系列进展, 未来将建设大口径太阳望远镜、增加计算模拟能力、发展理论研究, 加深对耀斑过程中各种物理机制的理解。

基金项目

新疆自治区重大科技专项支持(项目编号 2022A03013-2, 刘雄伟参与)。

参考文献

- [1] Gupta, M., Thalmann, J.K. and Veronig, A.M. (2024) Stability of the Coronal Magnetic Field around Large Confined and Eruptive Solar Flares. *Astronomy & Astrophysics*. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346212>
- [2] Gonz'alez-Serv'in, M. and Gonz'alez-Avil'es, J.J. (2024) Numerical MHD Simulations of Solar Flares and Their Associated Small-Scale Structures. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **528**, 5098-5113. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae375>
- [3] McKeivitt, J., Jarolim, R., Matthews, S., Baker, D., Temmer, M., Veronig, A.M., Reid, H. and Green, L.M. (2024) The Link Between Nonthermal Velocity and Free Magnetic Energy in Solar Flares. *The Astrophysical Journal Letters*, **961**, L29. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad1bee>
- [4] Dhakal, S.K. and Zhang, J. (2023) What Are the Causes of Super Activity of Solar Active Regions? *The Astrophysical Journal*, **960**, Article 36. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad07d2>
- [5] Agarwal, S., Bhattacharyya, R. and Yang, S. (2024) Study of Reconnection Dynamics and Plasma Relaxation in MHD Simulation of a Solar Flare. *Solar Physics*, **299**, Article No. 15. <https://doi.org/10.1007/s11207-024-02255-5>
- [6] Kosovichev, A.G. and Sadykov, V.M. (2024) Subsurface Flows Associated with Formation and Flaring Activity of Solar Active Regions. arXiv: 2401.17598.
- [7] Balamuralikrishna, K., Soo, J.Y., Mohamed Tahrin, N. and Abdul Aziz, A.H. (2023) Characterising Solar Magnetic Reconnection in Confined and Eruptive Flares. *Astrophysics and Space Science*, **368**, Article No. 94. <https://doi.org/10.1007/s10509-023-04251-w>
- [8] Benz, A.O. (2008) Flare Observations. *Living Reviews in Solar Physics*, **5**, Article No. 1. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2008-1>
- [9] Tsiklauri, D. (2023) Particle Acceleration by Sub-Proton Cyclotron Frequency Spectrum of Dispersive Alfvén Waves in Inhomogeneous Solar Coronal Plasmas. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **527**, 10822-10836. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3958>
- [10] Pietrow, A.G., Druett, M.K. and Singh, V. (2024) Spectral Variations Within Solar Flare Ribbons. *Astronomy & Astrophysics*. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348839>
- [11] Roy, S. and Tripathi, D. (2024) Evolution of the Ratio of Mg II Intensities during Solar Flares. *The Astrophysical Journal*, **964**, Article 106. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad2a46>
- [12] Yang, L., Yan, X., Xue, Z., Xu, Z., Zhang, Q., Hou, Y., Wang, J., Chen, H. and Li, Q. (2024) Simultaneous Observations of a Breakout Current Sheet and a Flare Current Sheet in a Coronal Jet Event. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **528**, 1094-1107. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3876>
- [13] Collier, H., Limousin, O., Xiao, H., Claret, A., Schuller, F., Dresing, N., Valkila, S., Lara, F.E., Fedeli, A., Foucambert, S. and Krucker, S. (2024) Energetic Particle Contamination in STIX during Solar Orbiter's Passage through Earth's Radiation Belts and an Interplanetary Shock. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. <https://doi.org/10.1109/TNS.2024.3355473>
- [14] Jebaraj, I.C., Kouloumvakos, A., Dresing, N., Warmuth, A., Wijsen, N., Palmroos, C., Gieseler, J., Vainio, R., Krupař,

- V., Magdalenic, J., Wiegmann, T., Schuller, F., Battaglia, A.F. and Fedeli, A.M. (2023) Multiple Injections of Energetic Electrons Associated with the Flare and CME Event on 9 October 2021. *Astronomy & Astrophysics*, **675**, Article No. A27. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245716>
- [15] Saqri, J., Veronig, A.M., Dickson, E.C., Podladchikova, T., Warmuth, A., Xiao, H., Gary, D.E., Battaglia, A.F. and Krucker, S. (2023) Multi-Point Study of the Energy Release and Impulsive CME Dynamics in an Eruptive C7 Flare. *Astronomy & Astrophysics*, **672**, Article No. A23. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245079>
- [16] Liu, Y., Su, Y., Liu, R., Chen, J., Liu, T. and Ji, H. (2022) Formation and Eruption of Hot Channels during an M6.5 Class Solar Flare. *The Astrophysical Journal*, **941**, Article 83. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aca08c>
- [17] Awasthi, A.K., Mrozek, T., Kolomański, S., Litwicka, M., Stke'slicki, M., Centre, K.K., Sciences, P.A., Warsaw Institute, P.A., Wrocław, U.O., Wrocław Wrocław, P., Solar, C.O. and Activity, S. (2024) Relative Yield of Thermal and Nonthermal Emission during Weak Flares Observed by STIX during September 20-25, 2021. *The Astrophysical Journal*, **964**, Article 142. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad2518>
- [18] Cranmer, S.R. and Winebarger, A.R. (2018) The Properties of the Solar Corona and Its Connection to the Solar Wind. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **57**, 157-187. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-091918-104416>
- [19] Maity, S.S., Sarkar, R., Chatterjee, P. and Srivastava, N. (2023) Photospheric Lorentz Force Changes in Eruptive and Confined Solar Flares. arXiv: 2312.06787S.
- [20] Pontin, D.I., Priest, E.R., Chitta, L.P. and Titov, V.S. (2023) Coronal Heating and Solar Wind Generation by Flux Cancellation Reconnection. *The Astrophysical Journal*, **960**, Article 51. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad03eb>
- [21] Liu, Q., Jiang, C., Bian, X., Feng, X., Zuo, P. and Wang, Y. (2024) A Model of Solar Magnetic Flux Rope Eruption Initiated Primarily by Magnetic Reconnection. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **529**, 761-771. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae530>
- [22] Duan, A., Jiang, C. and Feng, X. (2023) A Study of Preflare Solar Coronal Magnetic Fields: Magnetic Energy and Helicity. *The Astrophysical Journal*, **945**, Article 102. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/acbc1a>
- [23] Liu, Y., Welsch, B.T., Valori, G.K., Georgoulis, M., Guo, Y., Parlat, E., Park, S. and Thalmann, J.K. (2022) Changes of Magnetic Energy and Helicity in Solar Active Regions from Major Flares. *The Astrophysical Journal*, **942**, Article 27. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aca3a6>
- [24] Hudson, H.H., Cliver, E., White, S.M., Machol, J., Peck, C., Tolbert, K., Viereck, R. and Zarro, D.A. (2023) The Greatest GOES Soft X-Ray Flares: Saturation and Recalibration over Two Hale Cycles. *Solar Physics*, **299**, Article No. 39. <https://doi.org/10.1007/s11207-024-02287-x>
- [25] Zhou, X., Shen, Y., Zhou, C., Tang, Z. and Ibrahim, A.A. (2024) Consecutive Narrow and Broad Quasi-Periodic Fast-Propagating Wave Trains Associated with a Flare. arXiv: 2401.06661.
- [26] Lowder, C., Gilly, C.R. and DeForest, C. (2024) Field Line Universal Relaxer (FLUX): A Fluxon Approach to Coronal Magnetic Field Modeling. *The Astrophysical Journal*, **965**, Article 13. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad2845>
- [27] Yamasaki, D., Inoue, S., Bamba, Y., Lee, J. and Wang, H. (2022) A Data-Constrained Magnetohydrodynamic Simulation of the X1.0 Solar Flare of 2021 October 28. *The Astrophysical Journal*, **940**, Article 119. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac9df4>
- [28] Sadykov, A.M. and Krasotkin, S. (2024) Magnetic Field and Radial Velocity Fluxes at the Initial Stages of the Evolution of Solar Active Regions Based on Measurements at the Photospheric Level. arXiv: 2402.13806.