

恒星耀发：一次持续40天的宇宙灯光秀

毛选^{1,2} 刘禾阳^{2,†}

(1 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

(2 中国科学院国家天文台 北京 100101)

2025-04-21 收到

† email: liuheyang@nao.cas.cn

DOI: 10.7693/wl20250506

CSTR: 32040.14.wl20250506

1 卡林顿事件

1859年9月1日清晨，英国天文学家理查德·卡林顿正在自己的私人天文台观测太阳。突然，他在太阳黑子群附近看到了两道异常明亮的白光(图1)。在短短五分钟内，这两道白光就消失了，但它在人类历史上留下了永恒的印记，这一太阳表面局部而暂时性的增亮后来被科学家们称为太阳耀斑。在这次耀斑爆发后不到18小时，地球遭遇了前所未有的地磁暴袭击，全世界各地陆续出现异常现象：当时刚发展起来的电报网络受到严重冲击，多地电报系统陷入瘫痪，有些电报机甚至自燃起火；通常只在北极圈内才能看到的极光，这次竟然向南延伸到了古巴、牙买加等热带地区。这就是著名的“卡林顿事件”^[1]，根据现代科学测算，该事件释放的能量相当于100亿颗广岛原子弹同时爆炸，其引发的日冕物质抛射仅用17小时就穿越了通常需要3—4天才能穿越的日地距离。“卡林顿事件”不仅让当时的人们第一次直观认识到太阳活动对地球的直接影响，也以其惊人的强度成为现代空间天气研究的里程碑事件。

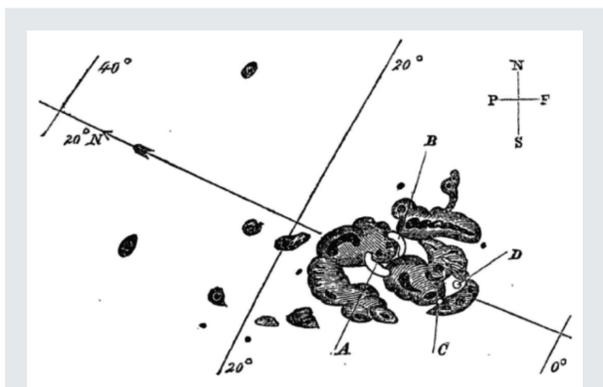


图1 1859年9月1日上午，卡林顿手绘的太阳黑子草图^[1]

2 什么是恒星耀发和太阳耀斑?

恒星耀发是恒星表面突然增亮的剧烈爆发现象，表现为在极短时间内亮度急剧上升，随后缓慢衰减，整个过程可持续从几分钟到数天不等。这类事件除了在各个波段(从X射线到射电波段)辐射的显著增强外，还可能伴随着冕区物质抛射。我们可以将恒星这个巨大的等离子体球想象成一个“宇宙生命体”，其表面活跃区就像容易“闹脾气”的器官。当这些区域压力积累到极限时，就会通过耀斑爆发来场“情绪宣泄”。不同类型、年龄、大小的恒星都能产生耀发，具体到太阳，这类活动被称为太阳耀斑，按照峰值X射线强度分为A、B、C、M和X五个等级，每级之间相差一个数量级。其中，A级耀斑相当于太阳打了个“小喷嚏”，而X级耀斑则如同“超级喷嚏”——2017年9月6日的X9.3级耀斑^[2](也被称为“中元节事件”，图2)，释放的能量与上百颗氢弹爆炸的能量相当。然而，与其他活跃恒星相比，太阳的耀发活动可谓“温和”。特别是红矮星(M型主序星)上的超级耀发，其能量规模远超太阳耀斑。2016年，在距离我们最近的恒星——比邻星上(距离太阳仅4.2光年)第一次探测到超级耀发^[3]，期间比邻星的亮度增加68倍，释放的能量比太阳上任何一次耀发都高10倍以上。这类极端事件不仅展现了恒星活动的剧烈程度，也为系外行星的宜居性研究提供了新的窗口。

3 为什么恒星会“发脾气”?

恒星“发脾气”是因为“压力”太大，这个“压力”来自它内部的磁场。我们可以把恒星的磁

力线想象成很多捆缚它的橡皮筋，当恒星自转时，恒星内部的等离子体对流和较差自转(赤道和两极自转速度不同)会不断扭曲磁力线，这些“橡皮筋”会被越扭越紧，使得磁场能量持续积累。当磁场应力超过临界值时，“橡皮筋”绷不住突然断裂，就会发生“磁重联”过程，将储存的磁能转化为等离子体的动能和热能，从而产生剧烈的耀发现象。在这一过程中，红矮星表现得尤为活跃。这类恒星具有完全对流的内部结构，加上缓慢的自转速度衰减，使其能够长期维持强磁场活动，观测上表现为频繁且剧烈的耀发活动。

4 对周围行星和生命的影响

太阳活动对地球的影响呈现出显著的强度梯度，普通太阳耀斑对地球的影响相对较小，就像一次“电磁按摩”：除了带来绚丽的极光景观外，主要表现为短时间的通信干扰。而当太阳耀斑增强到X级时，其对现代文明的破坏力则变得不可小觑：1859年的卡林顿事件使全球电报系统陷入混乱；1989年地磁暴导致加拿大魁北克省电网崩溃，900万居民陷入长达9小时的黑暗^[4]；2003年“万圣节太阳风暴”期间，全球约50%的卫星出现异常，海事紧急通信系统失效，珠穆朗玛峰探险队与外界失联，GPS定位精度下降，航空运输系统遭到不同程度的破坏，瑞典南部5万居民电力供应中断等^[5]。当今时代深度依赖空间技术，强烈太阳活动引发的空间天气扰动正在各个关键领域显现其破坏力：从航天器安全到航空导航，从移动通信到电网运行，从油气管道到金融交易系统，几乎现代社会的每个重要支柱都面临着太阳活动的潜在威胁。这种威胁随着人类科技水平的提升而不断放大，使得空间天气监测和预警变得前所未有的重要。

然而，与恒星的超级耀发相比，太阳的这些活动简直微不足道。在一些存在行星系统的宿主恒星上，此类极端事件释放的能量可比卡林顿事件高出上万倍，带来的强电离辐射和高能粒子可以极大地改变行星大气的化学组成，并完全摧毁类地行星的臭氧层，对生命活动产生灾难性的影

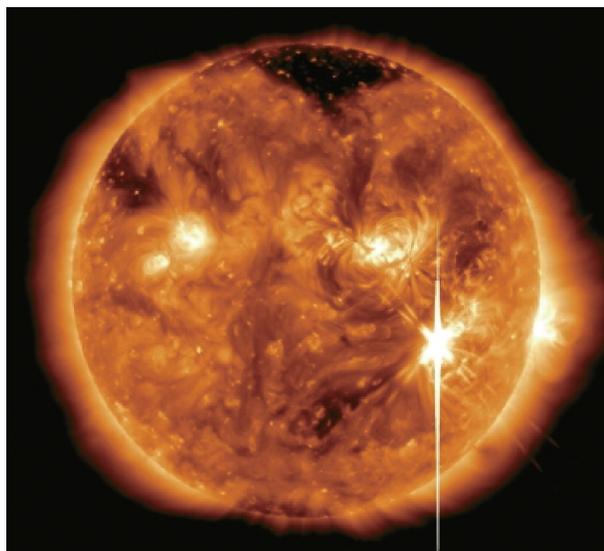


图2 2017年9月6日，太阳X9.3级耀斑图像(来源：中国科学院国家空间科学中心，拍摄卫星：SDO/AIA)

响^[6]。频繁发生的耀发将快速加热行星大气并使其逃逸，导致行星大气层被彻底剥离，而强烈的紫外线爆发足以灭绝地表任何可能的微生物生命。以比邻星b为例，这颗位于宜居带的系外行星因为比邻星频繁的耀发可能已变为“生命禁区”。另一方面，演化早期的恒星活动对于生命形成可能扮演着另一种重要的角色：有研究表明，早期太阳频繁的星冕物质抛射可能导致地球磁层压缩，高能粒子得以进入大气，与 N_2 、 CO_2 、 CH_4 等气体发生化学反应，产生 N_2O 等温室气体，以及其他形成生命必需的化合物^[7]。特别值得注意的是，年轻恒星的耀发活动更为剧烈，这些“恒星婴儿”频繁爆发的超级耀发，不仅能量远超其恒星风，还会显著改变原行星盘的化学组成和运动状态，对行星形成过程产生决定性影响^[8]。因此，深入研究恒星的耀发特性，不仅有助于理解行星形成机制，更为系外生命搜寻提供了重要线索，对寻找宇宙中的“第二地球”具有重大科学意义。

5 我国天文学家发现史上最强恒星X射线耀发

2022年11月7日，我国天文学家通过“天关”卫星(爱因斯坦探针)^[9]探路者莱娅(LEIA)X射线望远镜^[10, 11]，观测到了一次破纪录的恒星X射

线耀发事件(图3)。这次耀发发生在距离地球1600光年的晚型巨星HD 251108上,其X射线亮度峰值达到惊人的 1.1×10^{34} erg/s,是这颗恒星平时亮度的60倍,相当于太阳X射线亮度的百万倍!更令人惊讶的是,这次耀发持续了约40天,创造了恒星X射线耀发持续时间的新纪录。该研究成果近期发表于*The Astrophysical Journal*^[12]。

为了全面研究这一罕见现象,国际天文团队调动了包括LEIA、Swift/XRT、NICER以及丽江

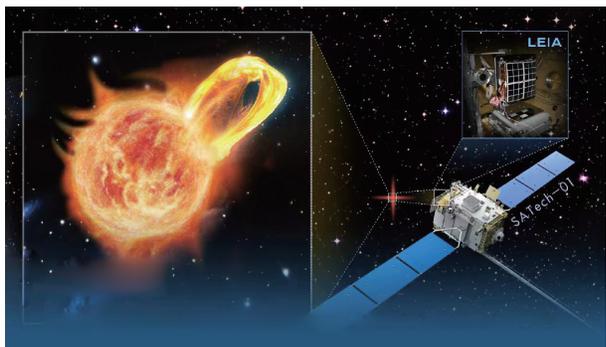


图3 恒星HD 251108的超级耀发想象图(来源:EP科学中心/OPENVERSE)

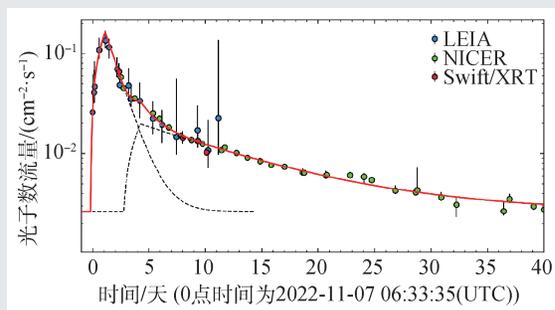


图4 此次超级耀发的X射线波段光变曲线综合了LEIA、NICER和Swift/XRT三台高能空间望远镜的观测数据,展现出持续近40天的复杂衰减特征:前期快速下降,后期转为平缓衰减,并在过渡阶段呈现明显的“拐折”现象;通过双分量耀发模型(红色实线)的拟合表明,该光变曲线可由两个经典耀发衰减轮廓(黑色虚线)叠加完美再现^[12]



图5 “天关”卫星示意图

2.4米光学望远镜在内的多台先进设备,在X射线、紫外和光学等多个波段进行了协同观测。由于恒星距离遥远,科学家们虽然无法直接“看见”耀发的具体位置和演化细节,但通过光谱和光变曲线这两个天文研究的得力工具,成功揭示了这次超级耀发的物理过程。

研究团队发现,这次耀发的X射线光谱需要两个温度成分才能完美拟合,表明辐射来自两种不同温度的等离子体:一种是弥散在恒星星冕中的较冷等离子体,另一种则是被束缚在耀发磁环结构中的超高温等离子体。光变曲线分析显示,除了典型的“快速上升—缓慢下降”模式外,在下降阶段还出现了一个明显的“拐折”,暗示着耀发冷却过程发生了转变(图4)。

通过深入分析,科学家们还原了这次超级耀发的完整物理过程:首先是恒星表面活跃区发生大规模磁重联,能量在巨大磁环结构中剧烈释放;随着主要能量释放完成,残余能量又“点燃”了一系列次级磁环结构,形成类似太阳耀斑中观测到的磁拱廊。计算表明,这次耀发在0.5—4.0 keV波段释放的总能量高达 3×10^{39} erg,可能是迄今观测到的最剧烈的恒星X射线耀发。更惊人的是,引发耀发的原始磁环长度估计达到2000万公里,相当于地球半径的3000倍,甚至达到了恒星本身半径的2倍!

为什么HD 251108会发生如此剧烈的耀发?进一步研究发现,这颗恒星本身就具有异常活跃的星冕,其活动水平存在以年为单位的长期变化。这次超级耀发恰好发生在恒星活动逐渐增强的时期,表面活动区不断扩大,磁场活动日益剧烈,为极端耀发的产生创造了理想条件。这项研究不仅刷新了我们对恒星高能活动的认知,也为理解恒星磁活动演化提供了重要案例。

“天关”卫星(图5)是中国科学院空间科学先导专项(二期)任务之一,由中国科学院主导,联合欧洲航天局、德国马克斯·普朗克研究所和法国宇航局等机构研制。其试验模块“莱娅”由中国科学院国家天文台与上海技术物理研究所联合开发,采用国家天文台2011年自主研发的龙虾眼X

射线成像技术，并联合北方夜视公司研制了其光学器件。该模块搭载于微小卫星创新研究院研制的首颗新技术试验卫星 SATech-01，于2022年7月27日发射。

6 展望

地球在宇宙中是唯一的生命星球吗？恒星活动对其周围的行星有什么影响？太阳会不会发生足以摧毁人类文明的超级耀发？这些问题长期困扰着我们。为此，国际天文界已部署了多个空间

观测设备。在光学波段，开普勒和TESS等卫星通过长期监测恒星的光学光变曲线探测系外行星，意外成为恒星耀发研究的重要工具，目前已发现大量的耀发事件，极大丰富了我们对于不同类型恒星耀发规律的认识。而我国自主研制的“天关”卫星将在X射线波段带来革命性突破，其宽视场X射线望远镜(WXT)凭借超高灵敏度和巡天能力，预计将在软X射线波段发现更多更有趣的耀发事件，构建有史以来最丰富的恒星X射线数据库，为研究耀发物理机制、评估行星宜居性等提供重要的观测支持。

参考文献

[1] Carrington R C. MNRAS, 1859, 19: 81
[2] Brosius J W, Inglis A R. ApJ, 2018, 867: 85
[3] Howard W S *et al.* ApJL, 2018, 860: L30
[4] Kappenman J G *et al.* Eos, Transactions American Geophysical Union, 1997, 78: 37
[5] Thomson N R, Rodger C J, Dowden R L. Geophysical Research Letters, 2004, 31: L06803

[6] Tilley M A *et al.* Astrobiology, 2019, 19: 64
[7] Airapetian V S *et al.* Nature, 2016, 9: 452
[8] Getman K V, Feigelson E D. ApJ, 2021, 916: 32
[9] Yuan W *et al.* Sci. China: Phys. Mech. Astron., 2025, 68: 239501
[10] Zhang C *et al.* ApJL, 2022, 941: L2
[11] Ling Z X *et al.* RAA, 2023, 23: 095007
[12] Mao X *et al.* ApJ, 2025, 980: 268

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月有情》
——<物理> 50周年纪念本

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑部特推出优惠订阅活动：凡直接向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠《岁月有情——<物理> 50周年纪念本》。内有自1972年至2022年《物理》发表的50篇精选文章信息，扫描对应的二维码，可重温经典之作，感悟物理科学的真谛，领略学科大家的风采。

希望读者们爱上《物理》！

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址：北京市中关村南三街8号
中国科学院物理研究所，100190

收款人姓名：《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行：农行北京科院南路支行

户名：中国科学院物理研究所
帐号：11 250 1010 4000 5699
(请注明《物理》编辑部)
咨询电话：010-82649029；82649277
Email: physics@iphy.ac.cn

