

太阳磁重联的新证据

(奥地利格拉茨大学物理系 苏杨 编译自 Johanna Miller.

Physics Today, 2013. (9): 12), 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

新观测为太阳系内最剧烈能量爆发现象提供了迄今最完整的图像证据

太阳耀斑(solar flare)可以将太阳大气中的等离子体从百万度加热到几千万度。常随其爆发的还有日冕物质抛射(CME), 可将几十亿吨的等离子体抛进行星际空间。CME到达地球可扰乱地磁层, 破坏电网设备, 通讯系统等其他基础设施, 对宇航员及在极地高空飞行的乘客造成潜在危险。

在20世纪60年代, 一个理论观点逐渐形成: 太阳耀斑可由磁场重联驱动。当磁场演化到复杂的拓扑

1) 日冕是完全电离的低密度等离子体, 是绝佳的电导体, 同时其中的带电粒子只能沿磁力线运动。也就是说, 磁力线和等离子体是“绑定”在一起的, 而在这里磁场处于主导地位。因此可以认为, 日冕环在一定程度上代表了磁场的空间分布和结构。——译者注

结构而变的不稳定时, 相反走向的磁力线可能会被推到一起, 产生一个电流片(如图1所示, 电流片与纸面垂直)。同时, 它还通过欧姆耗散加热等离子体。磁场通过 X 点重新连接, 新磁力线则如弯弓般弹出重

联区, 达到稳定的低能状态, 并将磁能快速转化为热能和动能。被加热的等离子体可在远紫外和X射线波段观测到。

针对耀斑和日冕环¹⁾的长期观测已获得诸多支持该理论的相关证

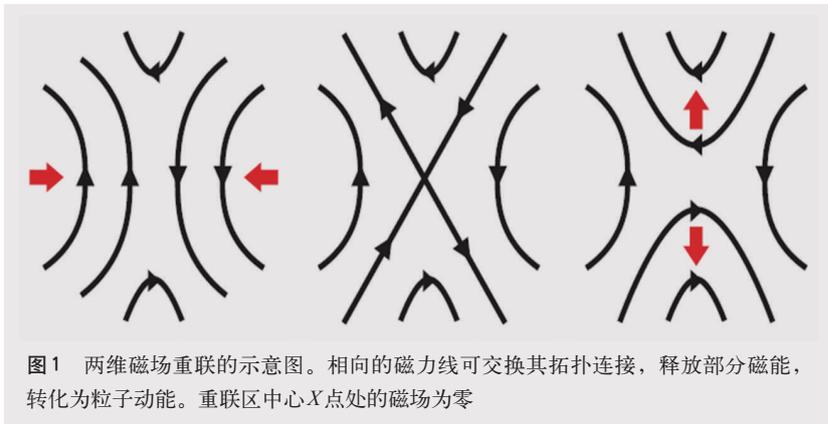


图1 二维磁场重联的示意图。相向的磁力线可交换其拓扑连接, 释放部分磁能, 转化为粒子动能。重联区中心 X 点处的磁场为零

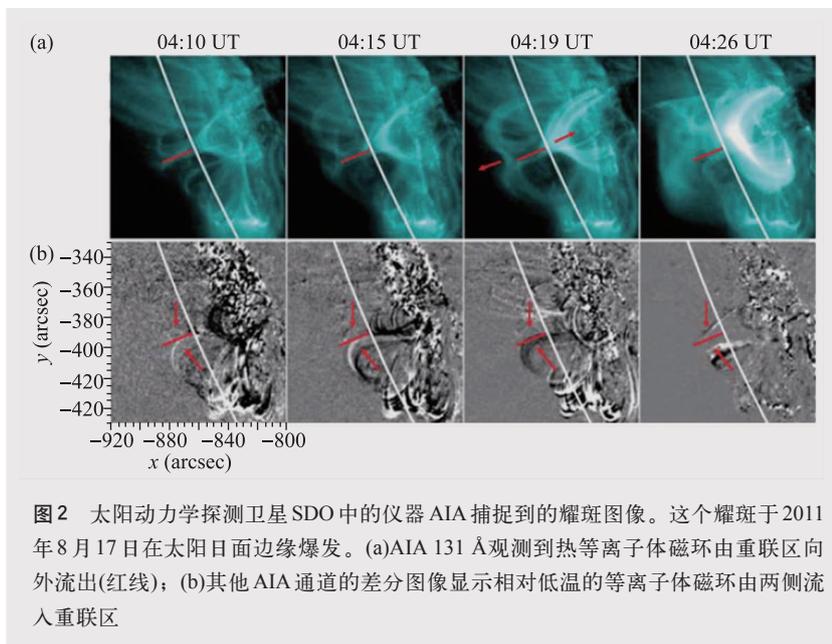


图2 太阳动力学探测卫星SDO中的仪器AIA捕捉到的耀斑图像。这个耀斑于2011年8月17日在太阳日面边缘爆发。(a)AIA 131 Å观测到热等离子体磁环由重联区向外流出(红线);(b)其他AIA通道的差分图像显示相对低温的等离子体磁环由两侧流入重联区

据(见 Gordon Holman. *Physics Today*, 2012, (4): 56)。然而,由于观测能力的不足,无法同时捕捉到快速磁重联中各个关键要素。现有的观测证据质量参差不齐,且多为间接证据。

2010年,美国宇航局(NASA)发射了太阳动力学探测卫星(SDO)。其三部仪器之一的大气成像组件(AIA),以前所未有的速度和质量对太阳整个日面进行不间断成像观测。利用该仪器搜集的观测数据,苏杨(格拉茨大学,奥地利)和一个国际研究团队,包括Holman,展示了迄今最完整的太阳磁重联过程(见 *Nature Physics*, 2013, (9): 489)。国际磁重联权威,圣安德鲁斯大学的Eric Priest评论说:“这个事例正是我们多年翘首企盼的。”

一个合适的耀斑

AIA可利用4个望远镜,在10个通道/波长上对太阳进行观测,这些通道可每12s成像一次,其空间分辨率达到0.6角秒(地球处看到的

太阳日面直径约1900角秒)。与以前的仪器相比较,其高时间/空间分辨率下的多波段持续观测能力大幅提高。

然而苏杨等人报告的这个发生在国际时间2011年8月17日4时的耀斑,之前并没有被注意到。苏杨等人也是在研究另一个课题时意外发现的。

自SDO发射以来,已经观测到了大量的太阳耀斑,但是没有有一个事件能像这个耀斑一样展示出了磁重联的细节。主要原因有两个:一是该耀斑发生于太阳日面的边缘,其位置和方位利于观察其空间形态和结构;二是这个耀斑相对较小,所以没有像大耀斑一样造成AIA敏感的探测器饱和,保留了细节。

更完整的重联图像

图2显示的是该耀斑的图像。其中图2(a)的图像表明千万度高温的等离子体随着磁环由重联区向两个相

反的方向流出(红色箭头),并且随着耀斑进行而变得越来越亮。图2(b)则显示了5万度到2百万度之间的等离子体的变化(差分图像)。白色表示该处辐射相对一分钟之前增强了,黑色代表减少。这些相对较冷的等离子体环从两边向内靠近重联区,并在该处相互作用,然后消失。

另一个NASA的卫星,太阳高能像谱卫星(RHESSI)则使磁重联的图像更加完整而可信。该卫星负责观测高温,高能电子辐射出的X射线和伽马射线(见 *Physics Today*, 2003, (9): 22),是观测耀斑能量释放的重要工具。该卫星的成像表明,X射线源亦存在于重联的流出区,证明确实存在高温等离子或被加速的超热电子。AIA和RHESSI两者结合,提供了磁场在此重联的根本性证据。观测还发现了主流的耀斑模型中尚未包含的内容。比如,提供入流等离子体的日冕环具有很广的温度分布,其中一些环来自距重联区几万公里远的源区。而在标准耀斑模型里,重联发生在一个均匀而剪切的拱形磁环系中。此外,对入流和出流的量化分析表明重联率并非恒定,重联的入流环可能会间断性的在重联区的一侧堆积。“这一点之前尚未被注意到,”苏杨解释说,“但应在将来的模型中考虑到”。

仅对理论模型进行细枝末节的调整改进是不够的。2011年8月17日耀斑的一些特征表明,这是一个3维空间的磁重联,并非两维磁重联模型所能描述的。理论专家早已开始了这方面的工作,但由于其复杂性和多种多样的拓扑结构,目前尚在发展阶段。