

空间中心科研人员采用新方法揭示同源太阳爆发中磁绳反复形成的原因

文章来源: | 发布时间: 2022-02-15 | 【打印】 【关闭】

同源日冕物质抛射 (CME) 是指连续的CME从相同的太阳活动源区爆发出来。这一类的CME爆发通常会跟极端空间天气灾害性事件相联系。连续的CME爆发会有很高的概率在这些CME之间产生相互作用, 先行的CME也可以“预先调制”太阳风环境, 为后来的CME创造更“有利”的传播条件; 空间中心空间天气国家重点实验室刘颖研究员等人在2014和2019年的工作中指出通过CME之间的这种相互作用, 可能以一种“完美风暴”的方式产生超级太阳风暴, 进而对近地空间环境产生巨大影响。这使得对这类连续爆发CME的研究变得重要起来。

我们知道CME爆发的能量主要来自于磁场的自由能。而对大部分的CME来说为爆发提供能量的磁能在太阳上是以磁通量绳结构(磁绳)存在的。而作为同源CME, 多次CME会反复从同一源区爆发出来, 那么, 对应的磁绳结构是否是同一条磁绳反复爆发, 还是不断有新的磁绳产生出来? 从能量的角度来说, 每次爆发是部分的磁能释放, 还是反复的磁能释放和累积过程? 对此, 刘颖团队的王瑞副研究员等人通过典型同源太阳爆发事件对磁绳的能量累积过程进行了深入的剖析。

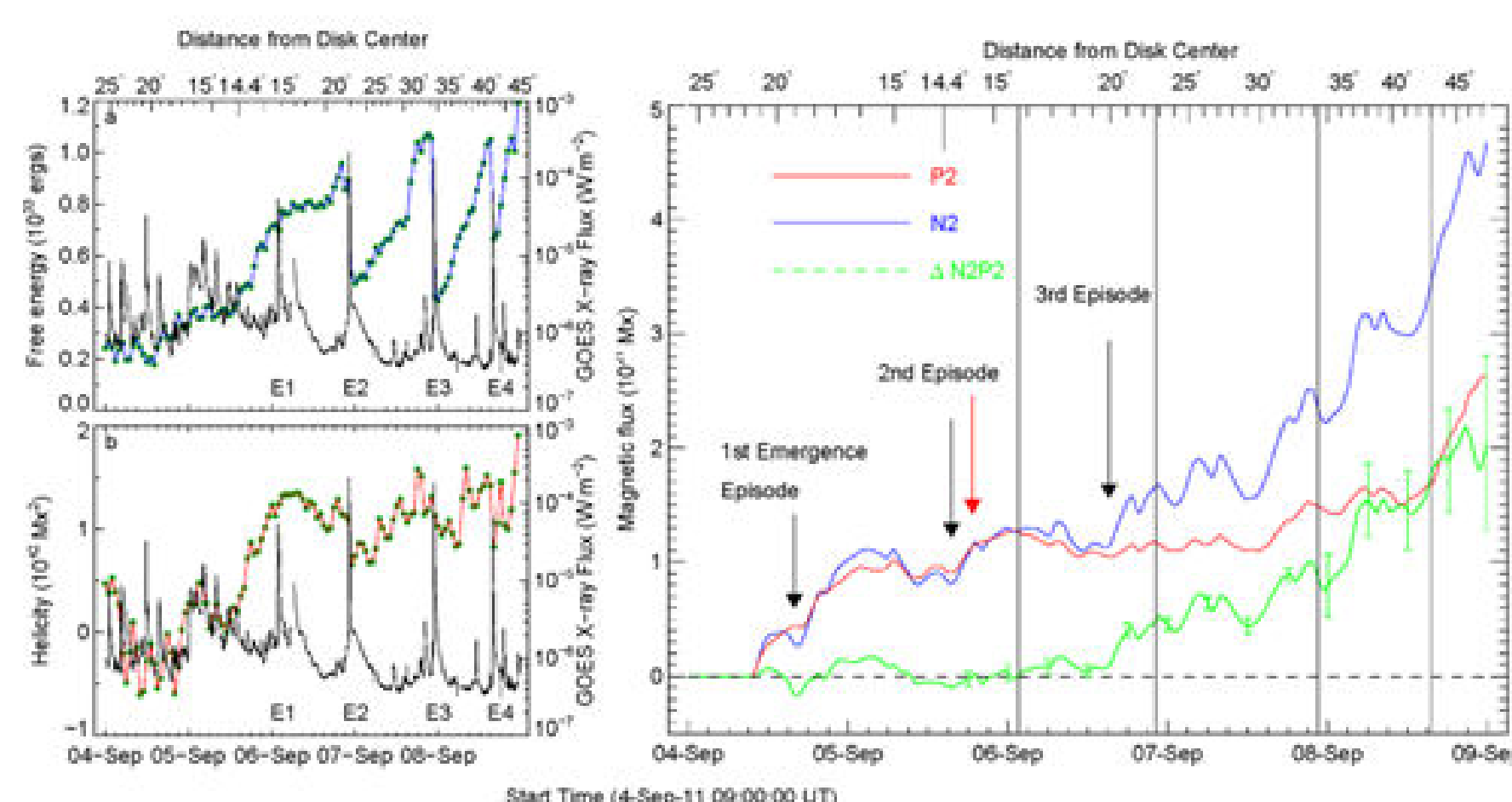


图1. 活动区磁能 (左上) 和螺度 (左下) 演化曲线。右侧: 共轭磁极磁通演化曲线及磁通的亏损量 (绿色) 曲线。爆发源区角日心距在上方标出。

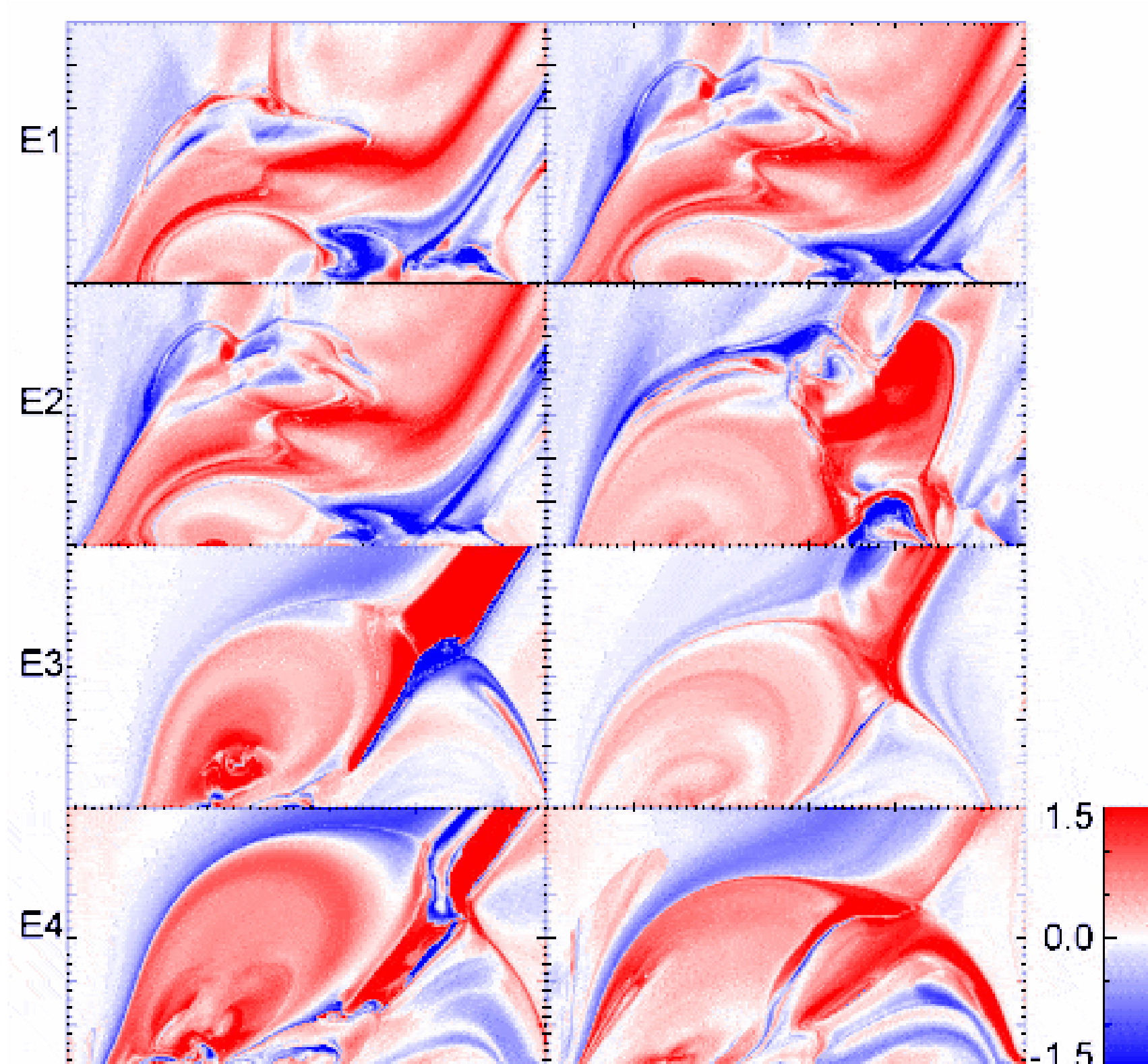


图2. 四次爆发前后磁绳扭缠度演化及比较。左列为爆发前扭缠度, 右列为爆发后状态。

针对典型活动区11283, 通过非线性无力场外推和有限体积法分别给出了磁能和磁螺度在四次连续爆发之间的对应关系。结果表明, 除了第一次爆发, 其余三次爆发过程均伴随明显的能量和螺度释放过程, 且最多一次能量释放占爆发前能量的60% (如图1所示)。结合磁场外推结果, 我们发现除第一次爆发外, 其余三次爆发前在中性线上均重构出扭缠的磁绳结构, 通过对比爆发前后磁场的扭缠度变化 (如图2所示), 我们发现磁绳在每次爆发后其扭缠度都会大幅度降低; 而在爆发之后又可以迅速将这种扭缠度重新累积起来, 为接下来的爆发储备丰富的能量和螺度。那么, 如此反复而又快速的能量累积是通过什么机制完成的呢?

根据以往的研究经验, 磁绳的形成主要通过两种方式, 一种是通过强烈的光球水平运动, 凭借磁场对消和所谓的Tether-cutting重联等方式在中性线处形成扭缠的磁绳结构; 另一种则通过光球下方的对流运动, 在对流层形成了扭缠磁绳结构, 最终这种扭缠结构通过磁浮力浮现出光球形成磁绳。研究表明, 第一种方式被越来越多的观测和模拟结果证实, 逐渐成为一种主导的成因。关于光球磁场的水平运动和磁场的浮现关系在早期研究就有大量的论述, 磁场水平运动往往伴随有磁浮现现象, 而有时候磁浮现又是水平运动的一种成因。Chintzoglou等人 (2019) 提出“碰撞剪切”的概念, 指出两个属于不同共轭偶极对的磁极在浮现过程中会发生碰撞, 碰撞导致在非共轭磁极中性线附近发生剧烈的磁场对消和重联, 快速地累积磁能和螺度从而形成磁绳。而当磁能和螺度累积到一定程度后又释放掉, 也就是发生了CME爆发。通过堆叠磁图我们发现活动区11283也满足这样一种情况 (如图3所示), 一对共轭磁极P2和N2 (蓝色) 快速浮现过程中与N1发生碰撞剪切, 四次爆发均发生在P2 (红色) 与N1 (蓝色) 之间 (绿色球)。共轭磁极在未发生碰撞时, 磁通是正负平衡的, 我们通过计算共轭磁极对磁通的亏损量来估计磁场发生对消和重联的量 (如图1右图所示), 结果显示在置信区间内最大亏损率为24%, 也就是第三次爆发前有24%的磁通可能转化成了磁能。

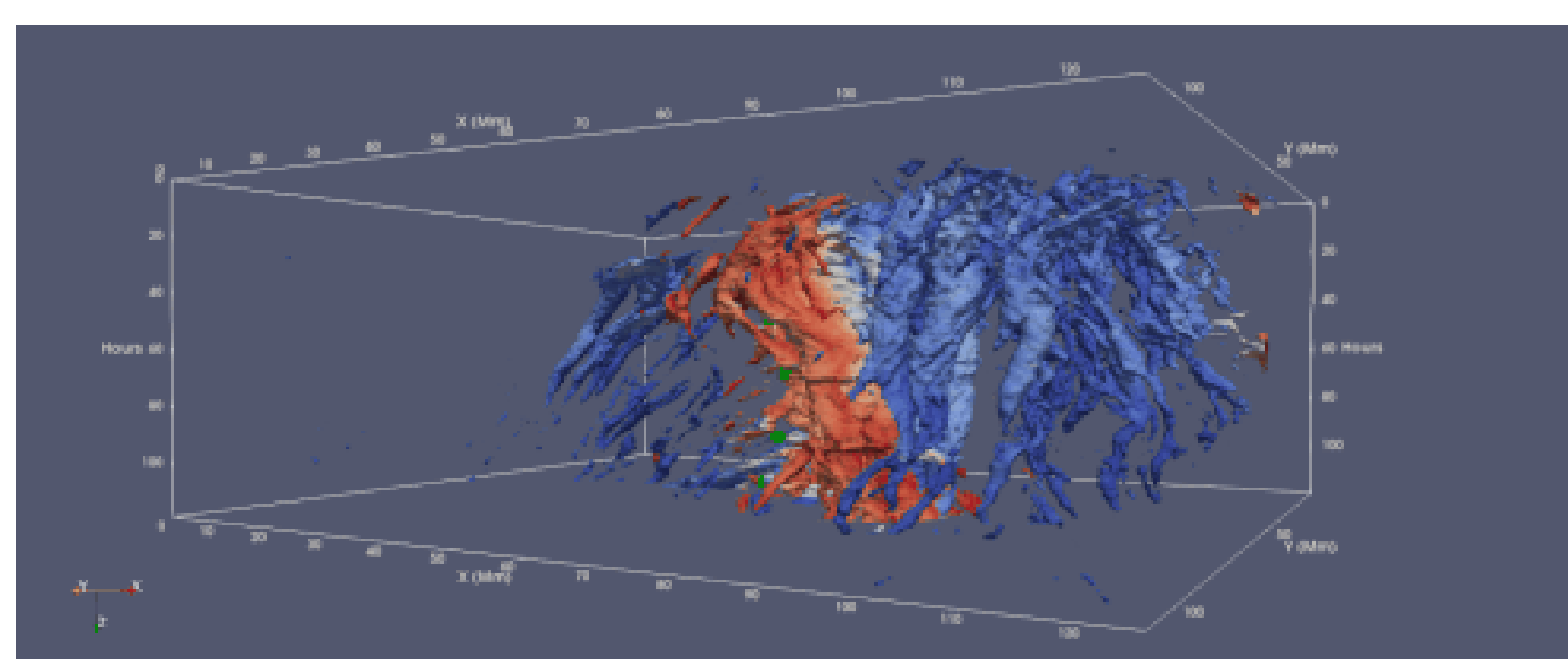


图3. 活动区11283磁图堆叠磁极等值面 $|B| = 1000$ G, 红色为正极P2, 蓝色为负极N2和N1, 绿色球表示四次连续爆发发生时间和大致位置。

“碰撞剪切”方法的优势是可以计算处于不断浮现过程的活动区的通量亏损量, 而相比于处于衰退期的活动区, 浮现过程强烈的活动区往往是伴随非常频繁太阳爆发活动的区域, 研究工作通过具体事件展示了能量的累积和爆发的对应关系, 同时给出了计算通量亏损具体区域选取方法。

相关论文发表于The Astrophysical Journal, 第一作者为王瑞。该研究采用了新方法更加准确、定量地给出伴随强烈磁浮现过程的磁场对消通量的亏损情况, 这是之前的研究没有实现的。我们也揭示, 该同源多次爆发是反复的磁能累积和释放过程, 其中新的磁绳不断形成和爆发。这些结果对于探究反复多次太阳爆发的能量累积过程和爆发机制具有重要意义, 对于空间天气预报有重要价值。

Citation: Rui Wang, Ying D. Liu, Shangbin Yang, and Huidong Hu, Buildup of the Magnetic Flux Ropes in Homologous Solar Eruptions, 2022, The Astrophysical Journal, 925, 202. (<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac3f35>)

(供稿: 天气室)