



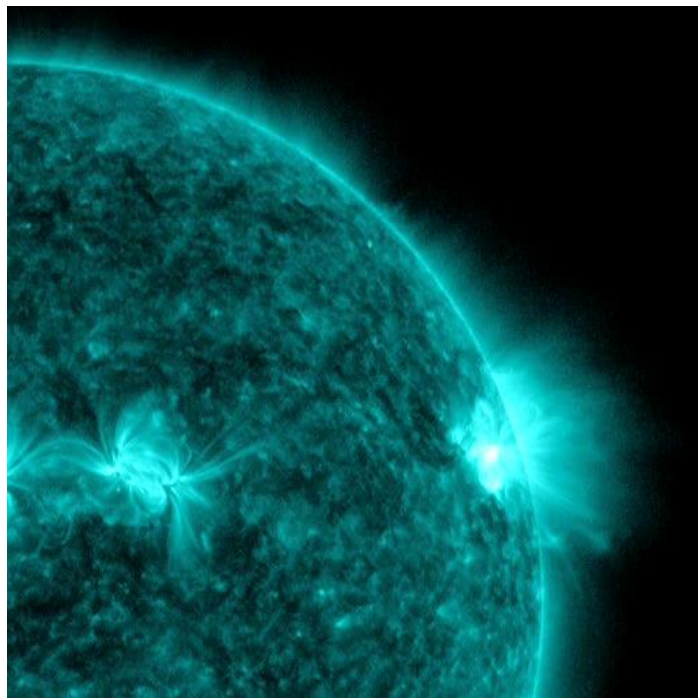
太阳耀斑的爆发机制

李婷

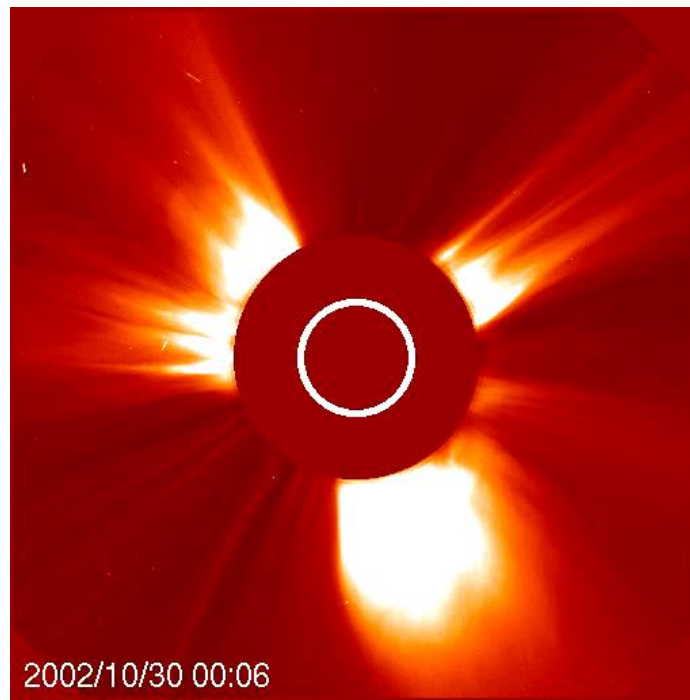
中国科学院国家天文台

■ 太阳物理研究未解决的基本问题——**太阳活动的物理机制**

- 耀斑和日冕物质抛射(CME)是太阳系中**最剧烈**的两类活动现象
- 磁能爆发式释放，转化成等离子体的动能和热能等



太阳耀斑



日冕物质抛射(CME)

研究背景

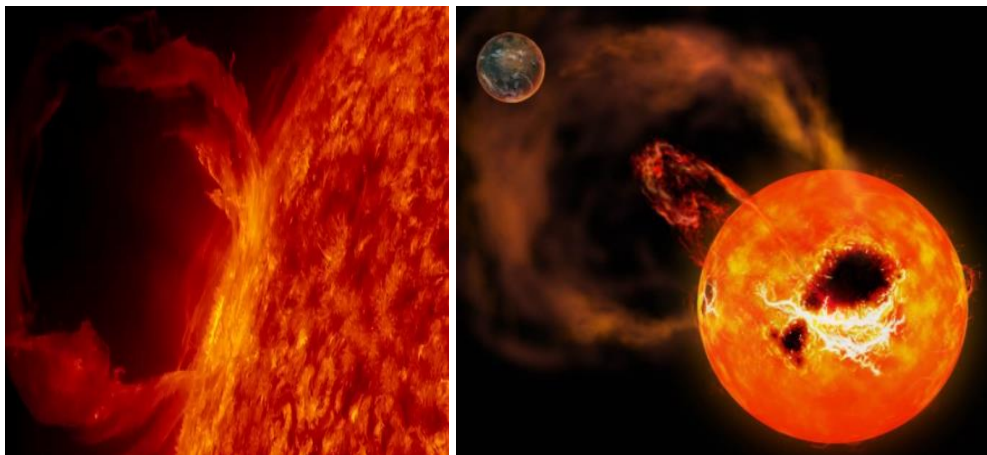
■ 科学意义

- 理解基本等离子体物理过程
- 为理解其他恒星的活动现象提供重要的参考

太阳

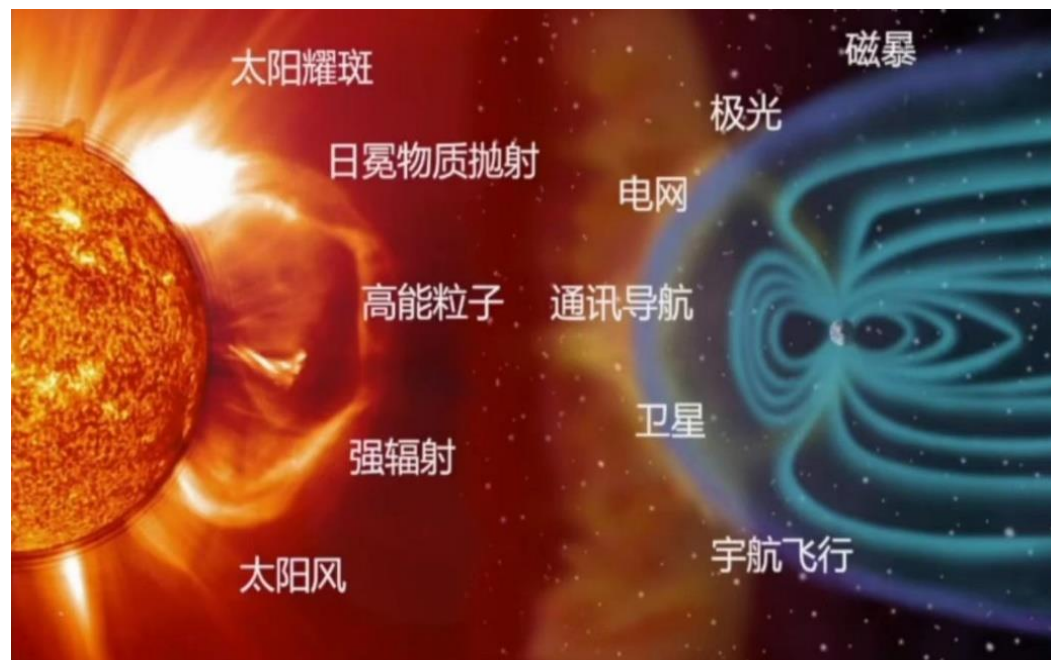


其他恒星



■ 实用意义

- 直接影响近地空间环境**最重要的天文学因素**
- 对准确预测太阳风暴和灾害性空间天气至关重要



太阳耀斑的爆发机制

耀斑的触发机制和三维演化

1. 发现耀斑中三维磁重联的观测特征

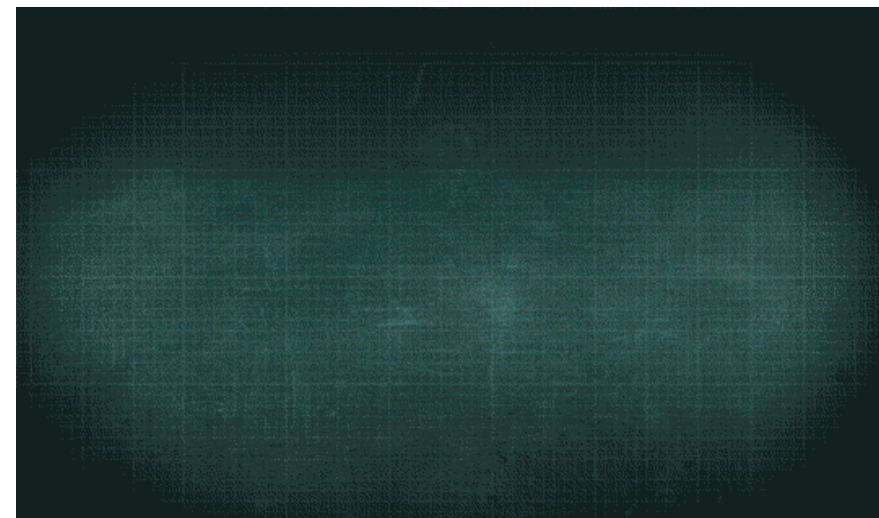
耀斑与CME的关系

2. 揭示决定耀斑与CME关系的关键物理参量

工作一：发现三维磁重联的观测特征

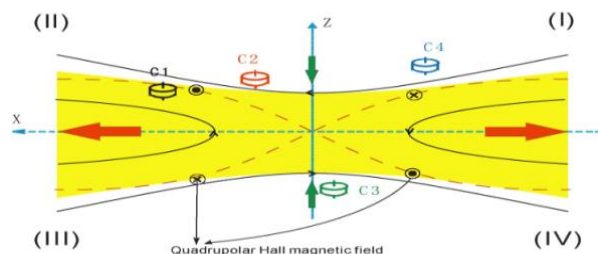
磁重联

- 磁场拓扑改变
- 磁场能量改变：
磁能 \longrightarrow 等离子体的动能、热能等

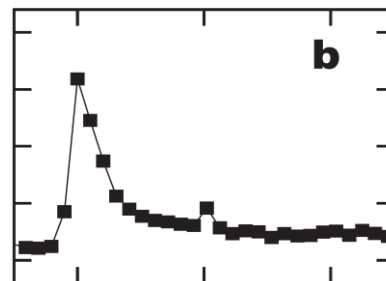


二维磁重联示意图

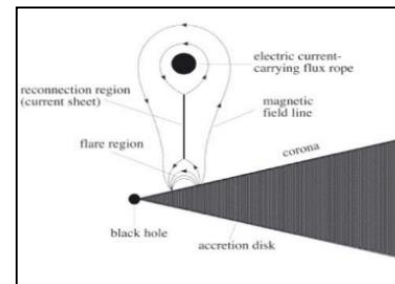
普遍存在于行星磁层、恒星大气、黑洞吸积盘以及实验室天体物理等系统中，是磁化等离子体环境中的一个基本物理过程



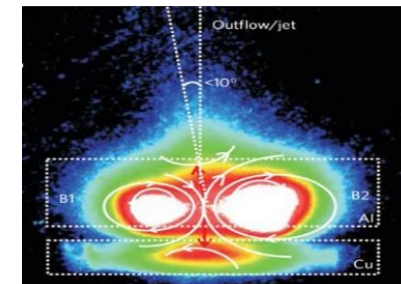
地球磁尾中发生磁重联过程
(Xiao et al. 2006)



G型星超级耀发
(Maehara et al. 2012)



黑洞吸积盘磁活动
(Yuan et al. 2009)

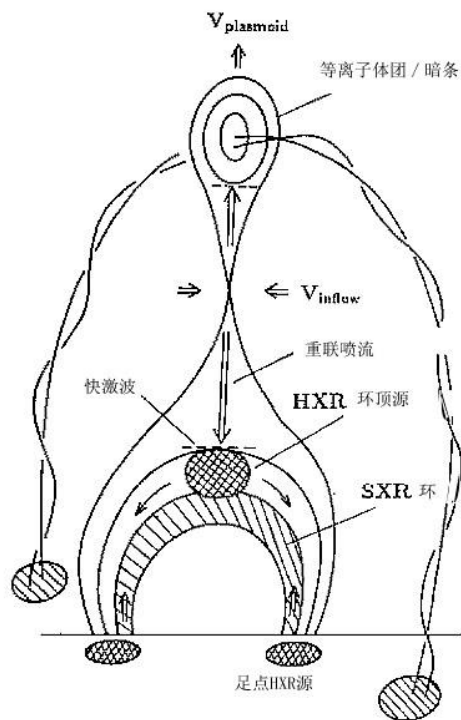


实验室天体物理
(Zhong et al. 2010)

工作一：发现三维磁重联的观测特征

二维标准耀斑模型

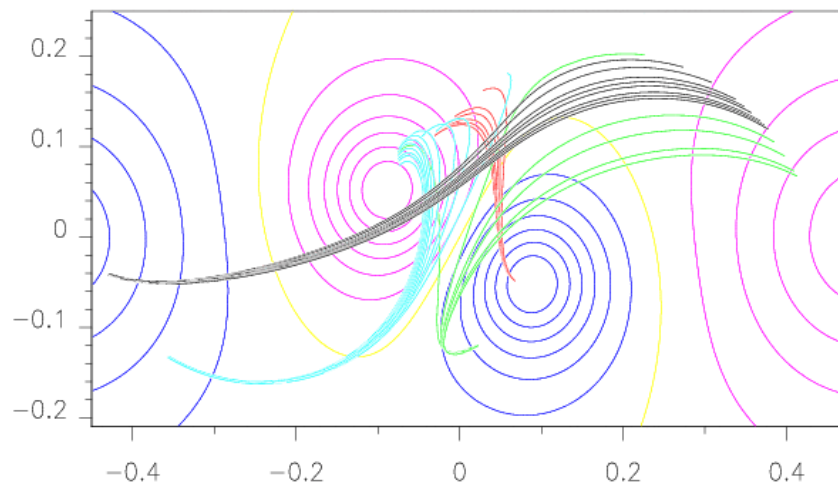
- 以二维磁重联为基础
- 有充足的观测证据



二维标准耀斑模型
(Shibata, 1998)

三维耀斑模型？

- 以三维磁重联理论和观测为基础
- 三维磁重联观测证据罕见



三维滑动磁重联模型
(Aulanier et al. 2006)

目标

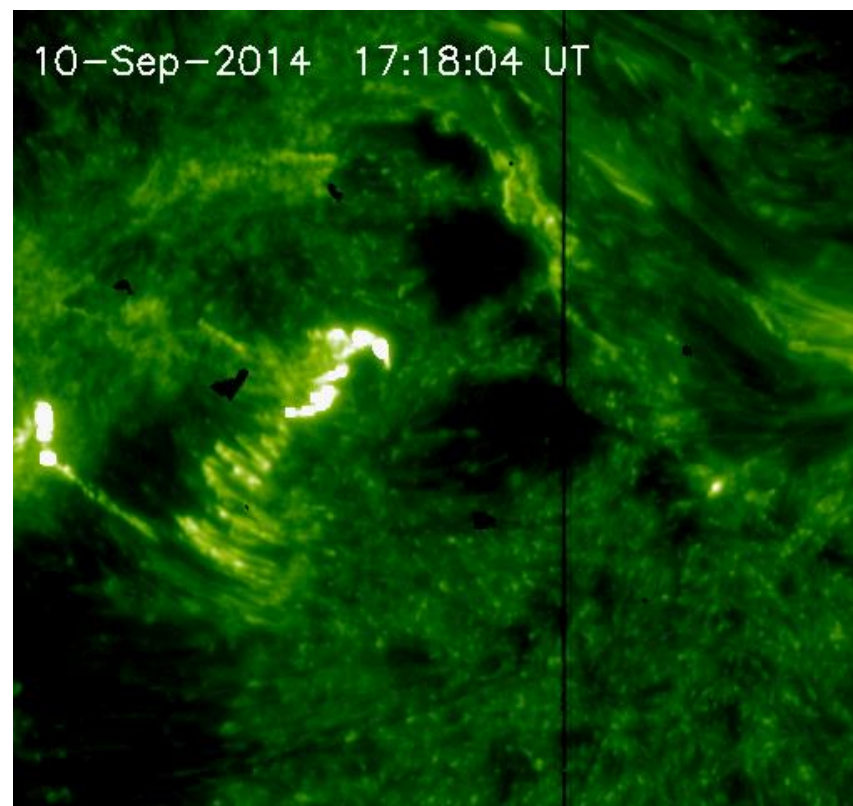
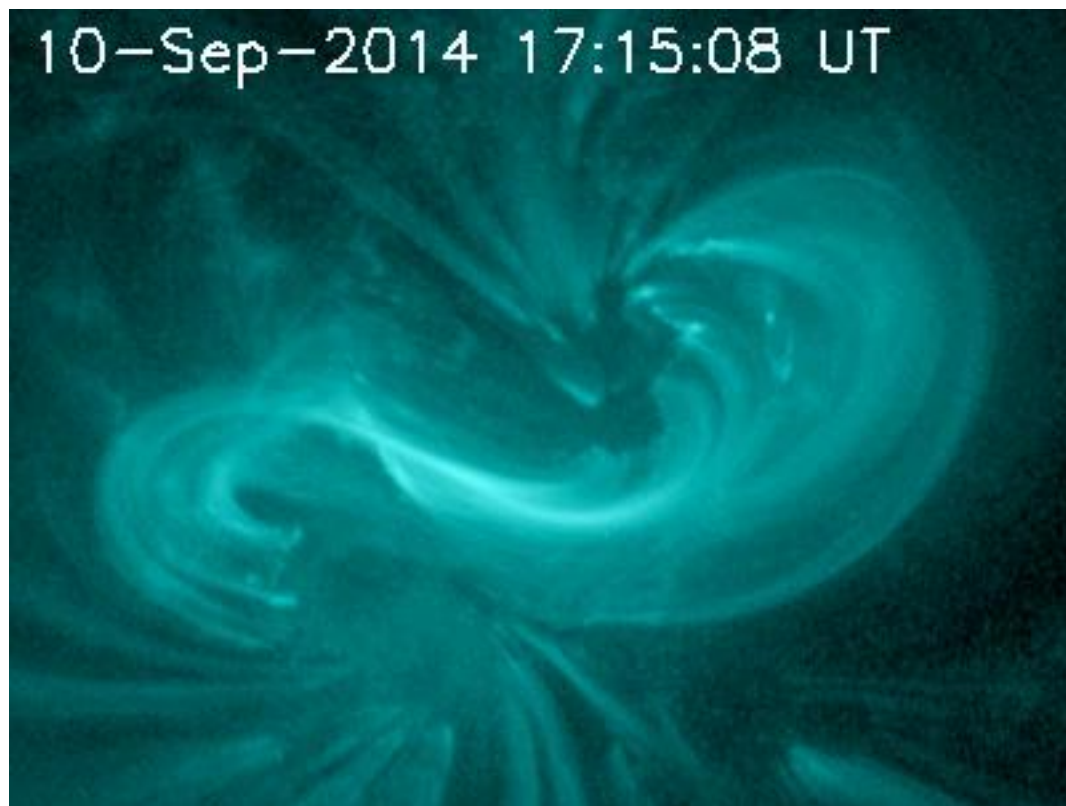
寻找耀斑中
三维磁重联
的观测特征

工作一：发现三维磁重联的观测特征

典型特征：耀斑环和耀斑带精细结构的滑动运动

双向滑动前兆特征之一

证实三维磁重联理论模型的预言

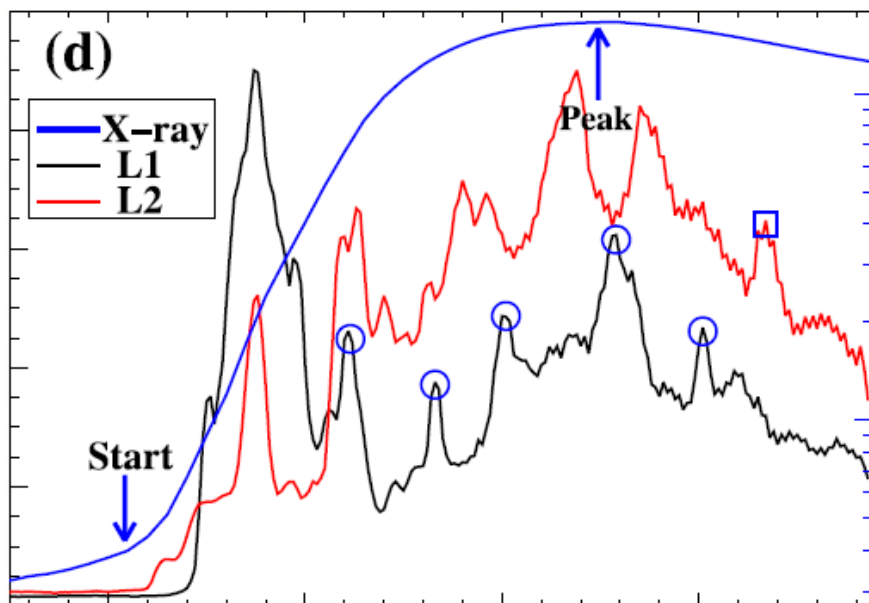


相关代表论文：Li & Zhang 2014, 2015, [ApJL](#); Li et al. 2016, 2018a, 2018b, [ApJ](#); Li et al. 2021, [Proceedings of the Royal Society A](#) (综述)

工作一：发现三维磁重联的观测特征

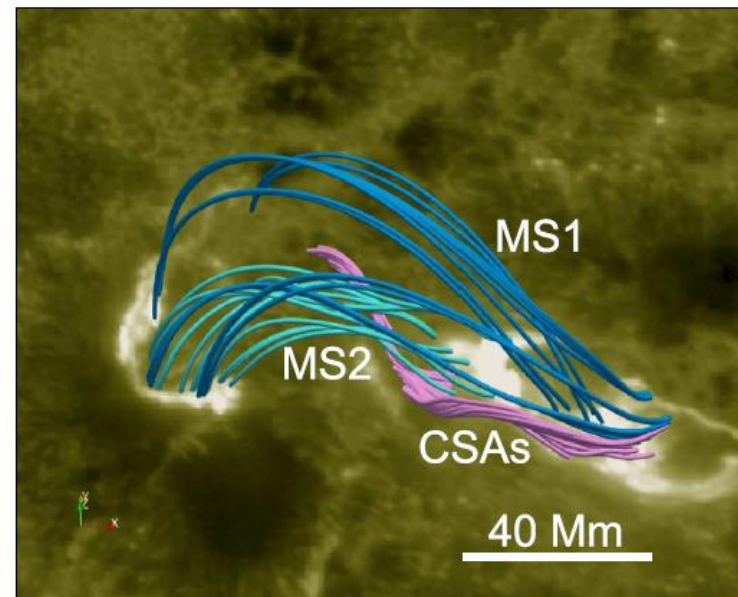
新特征：1. 准周期性

周期3-5分钟，说明磁重联的能量释放是间歇的



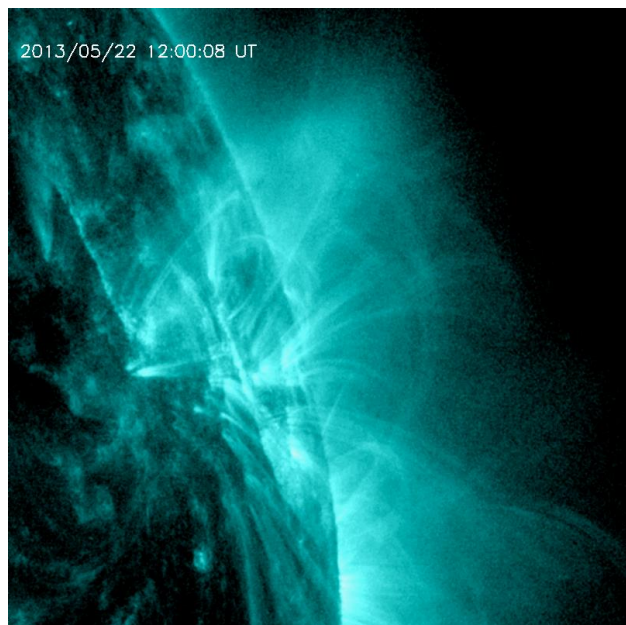
新特征：2. 新一类耀斑

不伴随任何磁结构的爆发，同时表现出滑动运动的特征

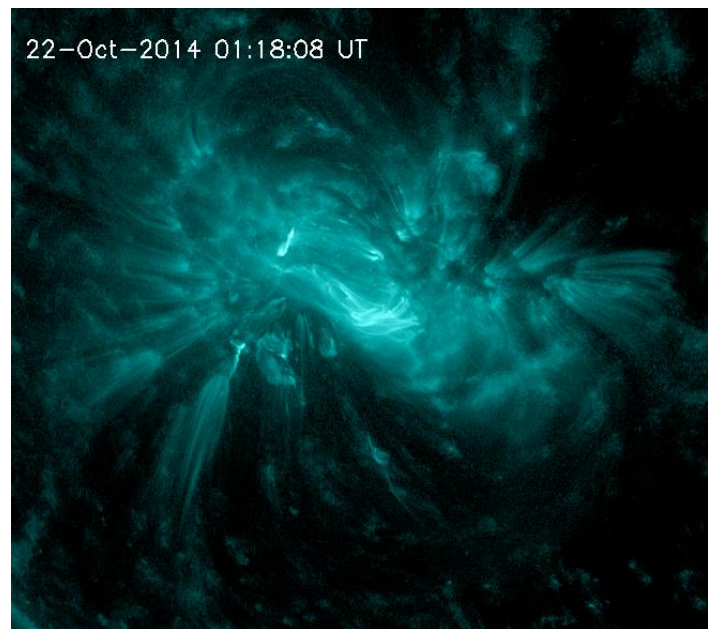


意义：为建立新的三维耀斑模型提供直接的观测基础

工作二：揭示决定耀斑-CME关系的关键参量



伴随CME的耀斑



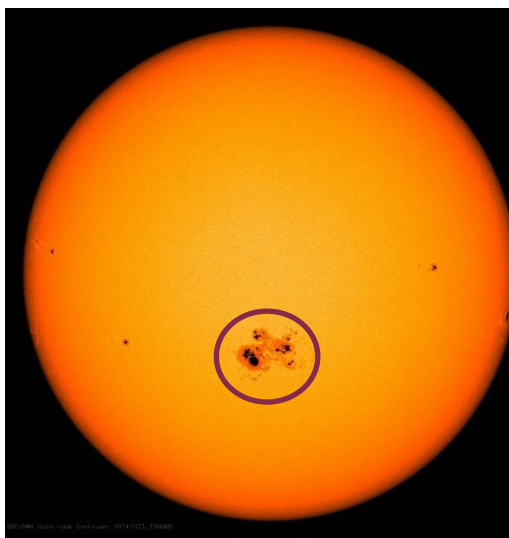
不伴随CME的耀斑

工作二：揭示决定耀斑-CME关系的关键参量

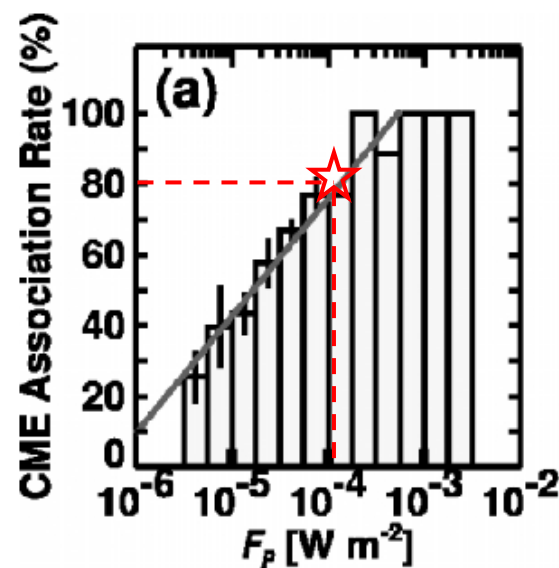
活动区12192

- 自1990年，最大的活动区
- 产生6个X级耀斑，但都没有日冕物质抛射（CME）；与已有认识不符

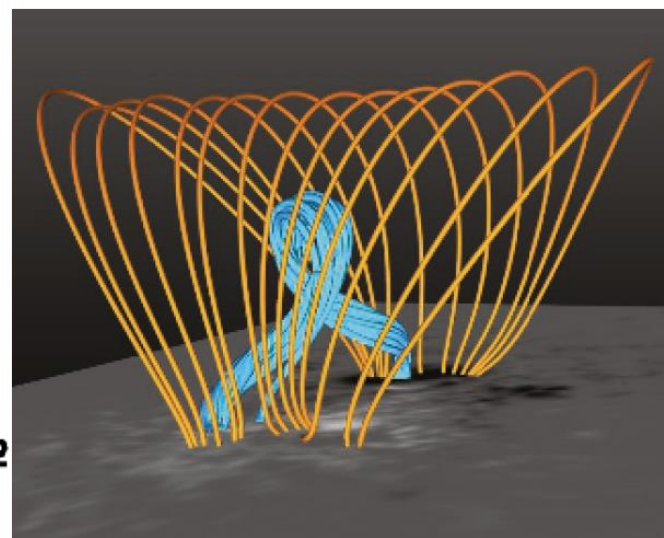
目标： 通过大样本统计分析，寻找关键物理参量



活动区12192
(2014/10/19-29)



CME相关率与耀斑强度的关系
(Yashiro et al. 2006)



强磁场约束 (Amari et al. 2018;
Chen et al. 2015; Liu et al. 2016)

工作二：揭示决定耀斑-CME关系的关键参量

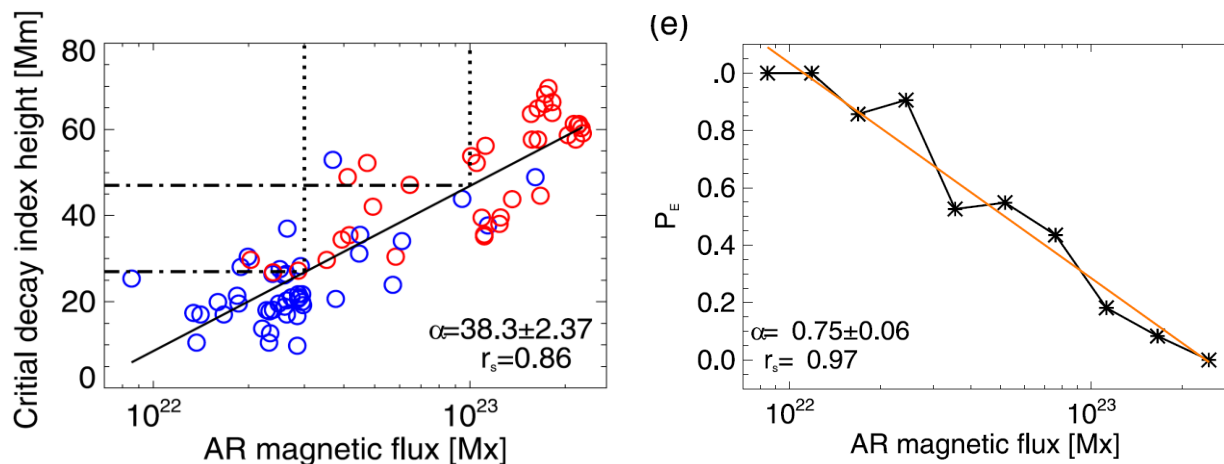
新数据： 筛选**十年间**SDO卫星观测的**719**个耀斑，建立**最大的**包含耀斑类型的数据库

新思路： **第一次**对磁通量和耀斑—CME的关系进行详细分析

相关代表论文：

1. Li, T. et al. 2019, *ApJ*, 881, 151
2. Li, T. et al. 2020, *ApJ*, 900, 128
3. Li, T. et al. 2021, *ApJL*, 917, L29
4. Li, T. et al. 2022, *ApJL*, 926, L14
5. Duan, X., Li, T. * & Jing, Q. 2022, *ApJ*, 933, 191

成果一： 发现磁通量表征耀斑上方磁场束缚的强弱，磁通量越大，耀斑-CME相关率越低；揭示**磁通量**是决定耀斑是否伴随CME的一个**重要物理参量**

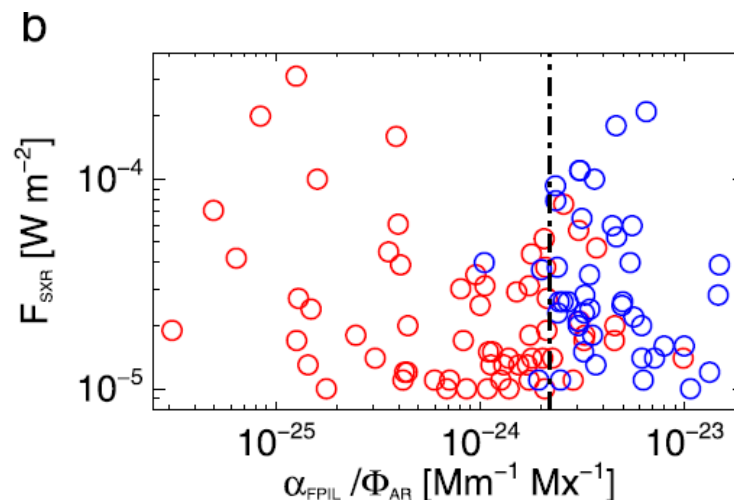
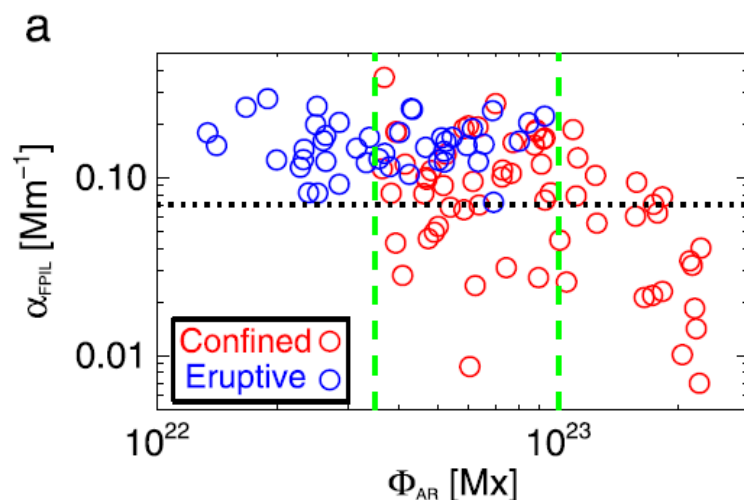
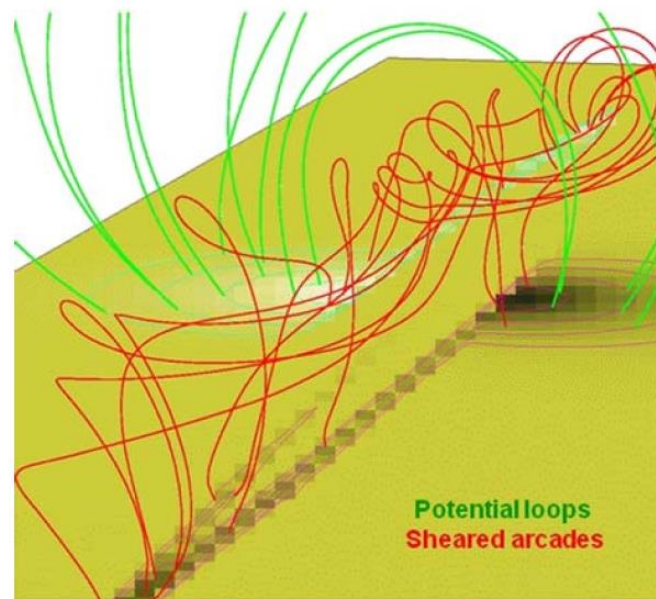


磁通量与耀斑-CME相关率的关系 (Li et al. 2020)

工作二：揭示决定耀斑-CME关系的关键参量

思路： 考虑**磁通量**(磁场约束强弱) 和**磁场扭缠程度** 两个因素

成果二： 提出**新的参量** (磁场扭缠数/磁通量)，可以很好地区分两类耀斑 (超过80%)，说明该参量是决定耀斑是否伴随CME的**关键物理参量**



相对磁扭缠数与耀斑-CME相关率的关系 (Li et al. 2022)

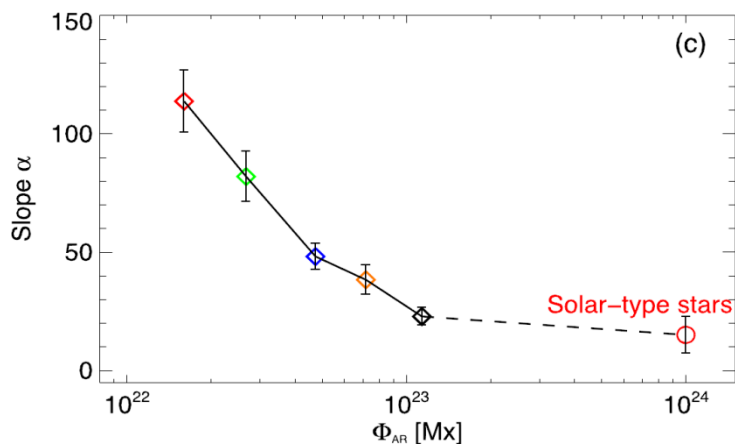
工作二：揭示决定耀斑-CME关系的关键参量

■ 对太阳爆发的意义:

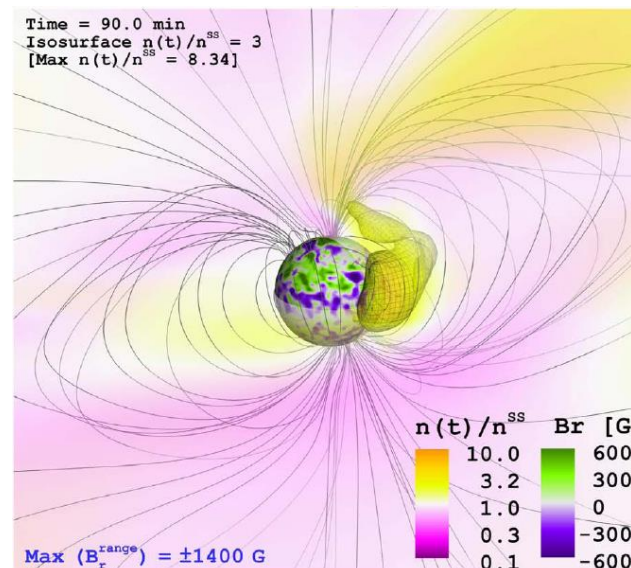
为预报CME和灾害性空间天气提供**定量的标准**

■ 对恒星爆发的启示:

太阳耀斑-CME的关系 -> 恒星耀发-星冕物质抛射的关系: G型星上X100级“超级耀斑”伴随星冕物质抛射的可能性最大为50%



基于太阳观测的结果推测恒星耀发-星冕物质抛射的关系 (Li et al. 2021)



强磁场约束星冕物质抛射 (Alvarado-Gomez et al. 2019)

工作小结：太阳耀斑的爆发机制

1、发现耀斑中
三维磁重联的观
测特征



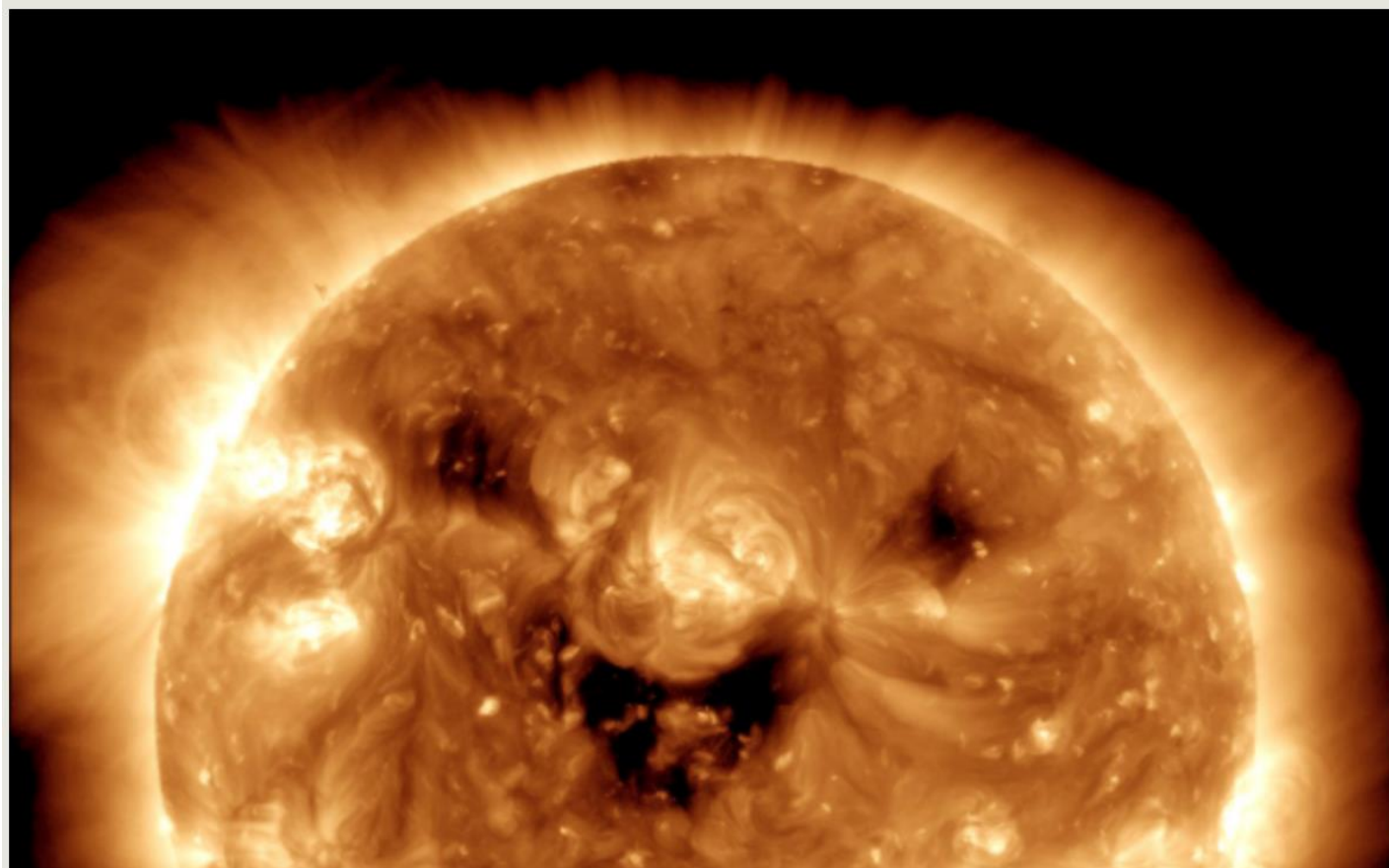
证实三维磁重联理
论模型的预言

2、揭示决定耀
斑—CME关系
的关键物理参量



为预报提供定量标
准，对理解恒星爆
发具有启示

为全面理解太阳和恒星
大气中磁能积累和爆发
式释放过程提供重要的
观测基础



**谢谢各位专家！
敬请批评指正！**