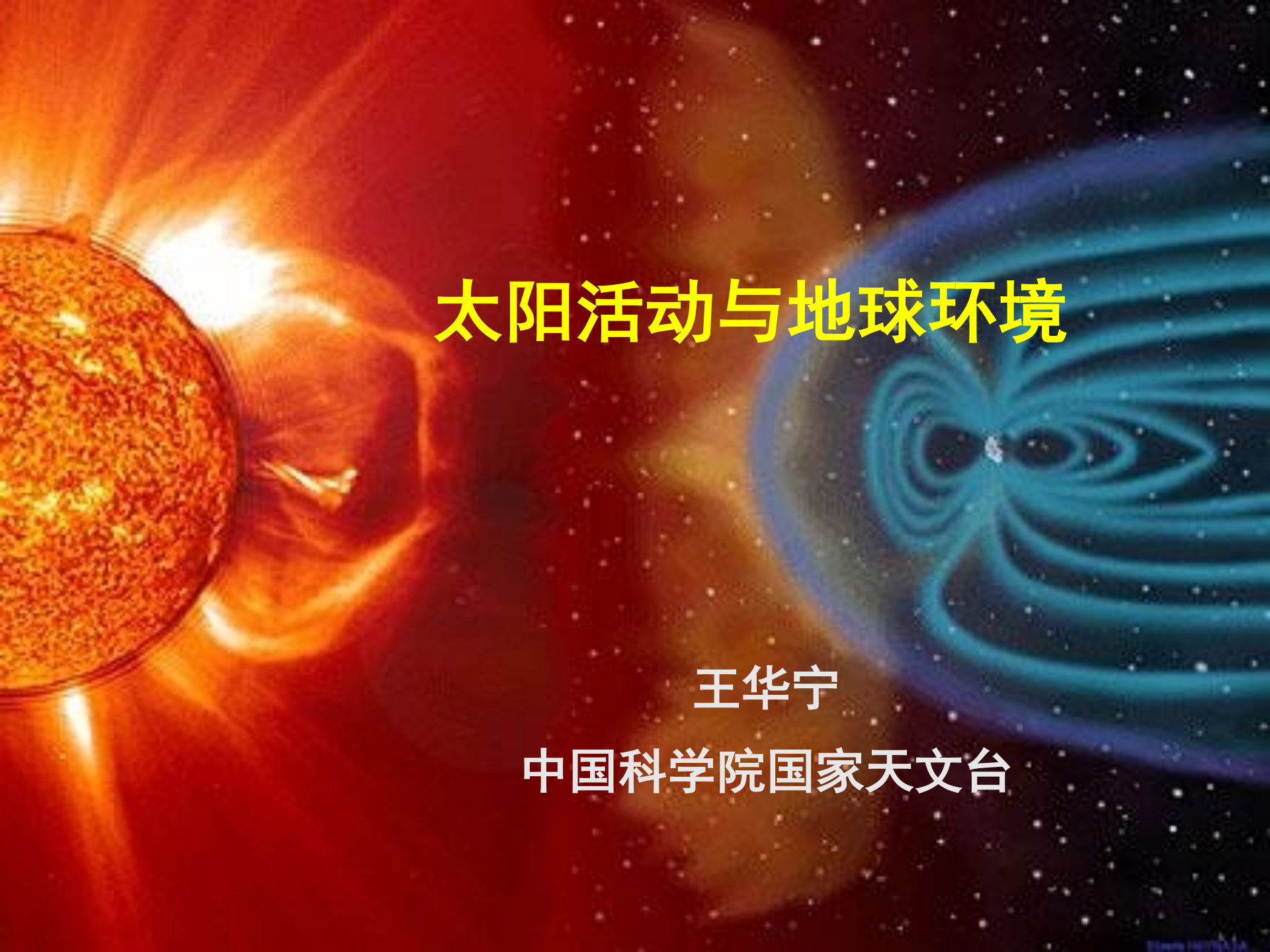




太阳活动与地球环境

王华宁

中国科学院国家天文台

内容提要

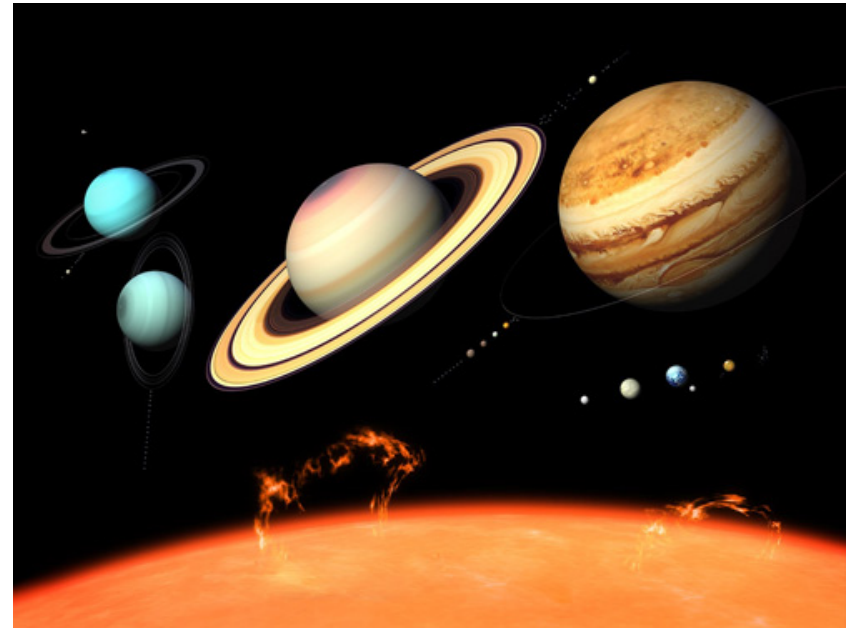
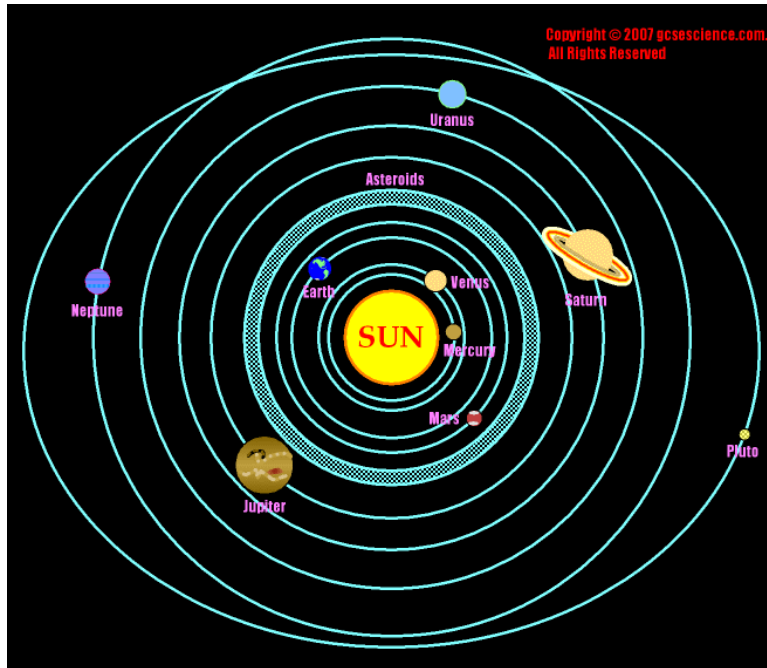
1. 日地关系
2. 太阳活动与地球气候变迁
3. 太阳活动与地震
4. 太阳活动预报

1. 日地关系

在太阳系中，日地关系也许不是最重要的关系，但对于人类而言，日地关系直接影响人类的生存环境。毫无疑问，太阳活动在日地关系中发挥重要的作用。因而研究地球环境的变化，必须考虑太阳活动因素。



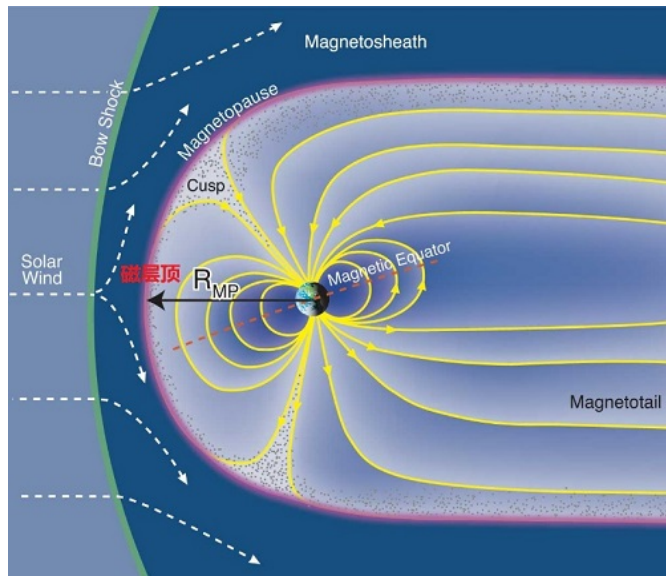
太阳系的主宰--太阳



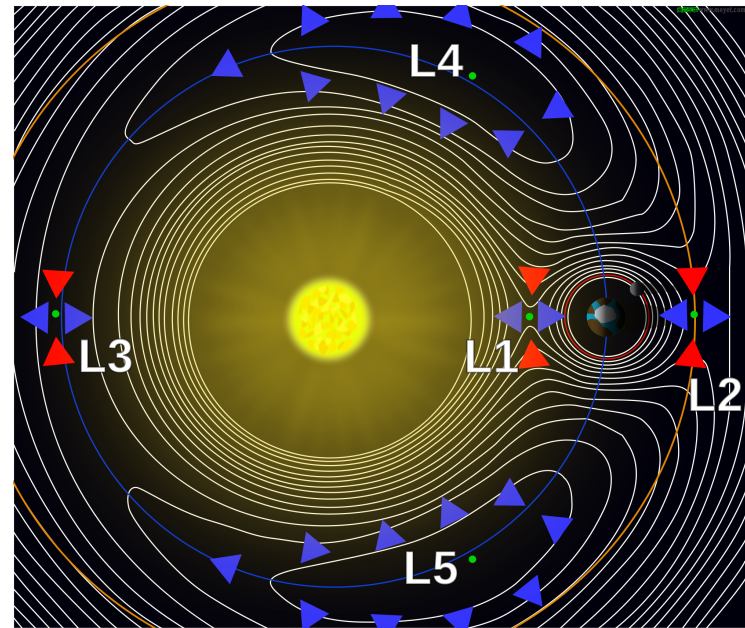
太阳控制着整个太阳系的引力环境、辐射环境、磁场环境和粒子环境。不过拥有磁场和大气的行星也能形成自己的小环境。很显然，太阳活动就是调制太阳系环境的主要因素。

近地空间(Near-earth space)

在里所说的近地空间 是指地球磁层能够涉及的范围，主要集中在**20**多个地球半径范围内，磁尾部分超越了月球轨道。如果考虑地球和太阳的引力平衡点，则可以延伸到**150**万公里之处。

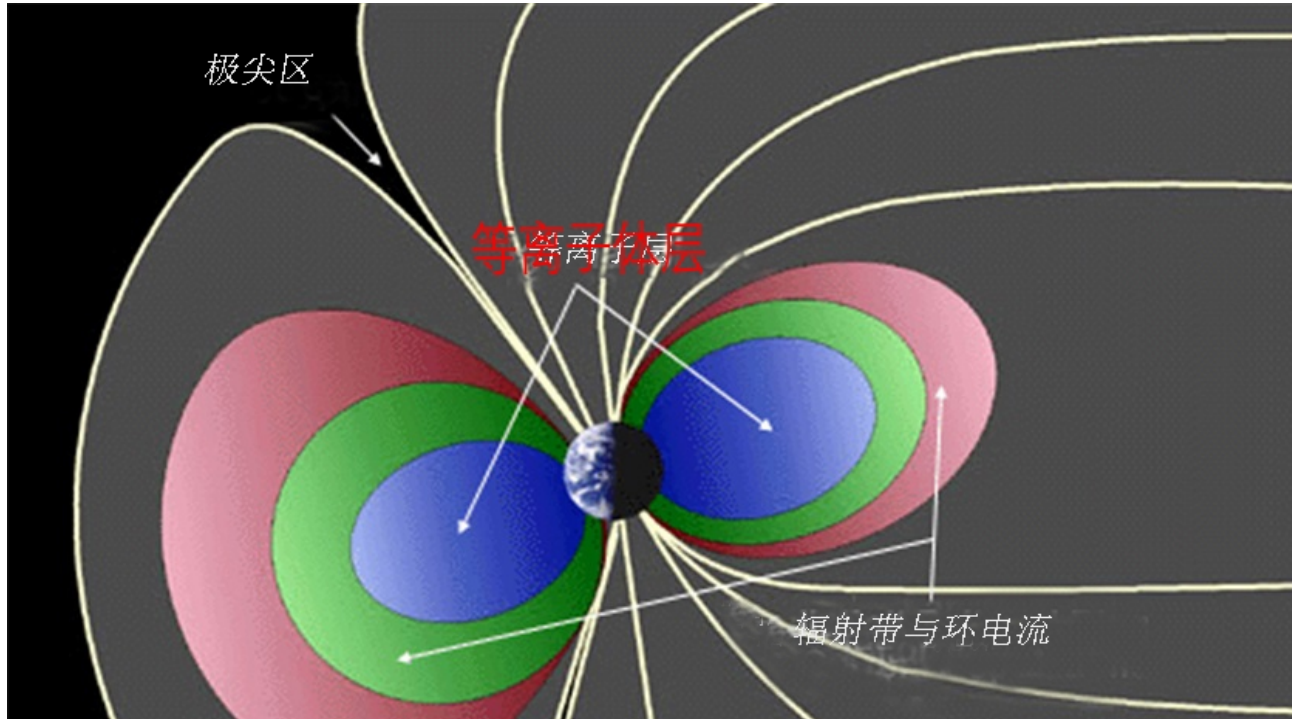


地球磁层示意图

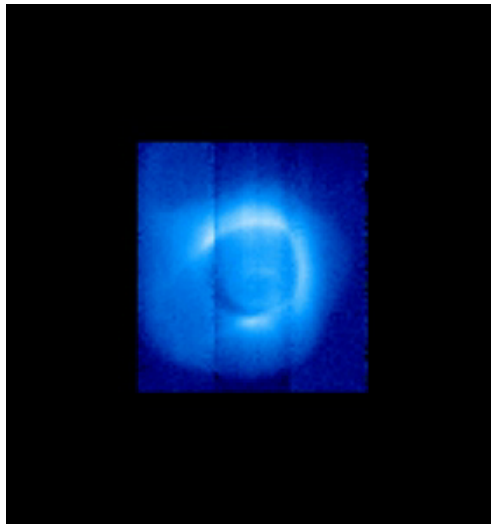


日地之间的拉格朗日点示意图

等离子体层 (Plasmasphere)

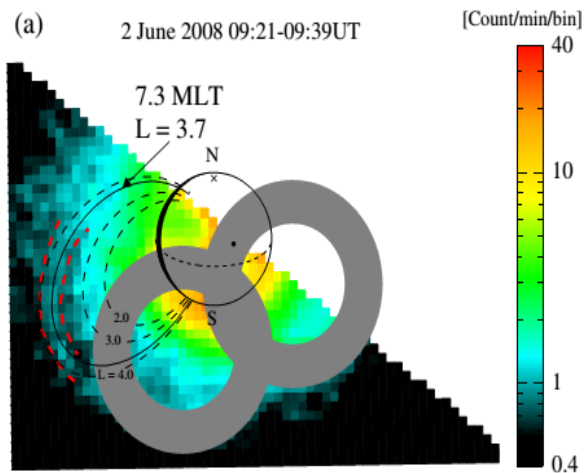


近地空间等离子体层是位于内磁层的一个环状的冷等离子体聚集区域（如图所示）。它的外面被环电流和辐射带包围，其主要成分来自被地磁场俘获的纬度**60度**以下的地球电离层离子。



美国IMAGER卫星观测数据

He⁺的含量在等离子体层内占第二位，典型的密度为**1000cm⁻³**，主要处在太阳光下，氦离子会共振散射阳光中的**30.4nm**的极紫外谱线，产生等离子体层“发光”的效果。因而可以直接观测地球等离子体层对太阳活动的响应。



日本月亮女神卫星观测数据



太阳风暴与地球空间暴

(Solar storm and Geospace storm)

太阳风暴是指太阳上电磁相互作用过程引起的爆发现象，并在日地空间产生响应，本质上就是太阳电磁风暴。当太阳风暴从太阳向地球邻近空间传播时，具有以下特征：

(1) 高能带电粒子

太阳爆发过程中磁场能量释放，产生强电场，加速带电粒子，形成高能粒子。高能粒子的速度有的甚至接近三分之一光速。因而，在大爆发开始后的几十分钟内就能观测到质子流量急剧增加。

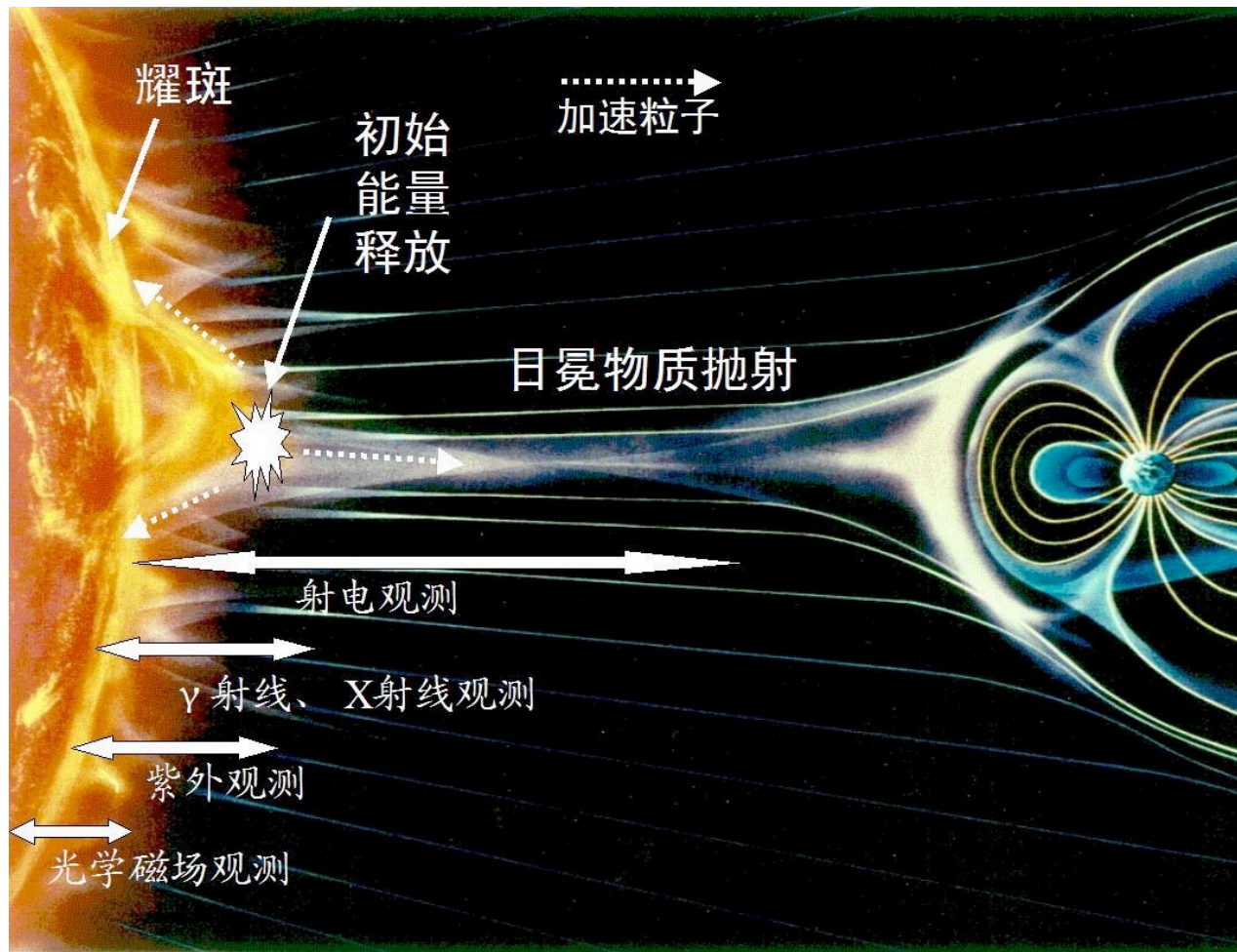
(2) 高速等离子体云

由于太阳磁场结构的变化，导致日冕中上百亿吨的物质携带磁场被抛射出来，抛射速度大约每小时数百千米至上千千米。如果这一团日冕抛射物质向着地球冲来，到达地球附近大约经过2~3天，对地球磁层和电离层有重大影响，引起地磁暴和电离层暴。

(3) 强烈的电磁辐射

太阳爆发产生以光速传播的射电和光学电磁辐射爆发，从太阳到地球约8分钟。强烈电磁辐射对地球电离层和高层大气有巨大影响。

高能带电粒子和高速等离子体云进入行星际磁场和太阳风场中，形成复杂的激波阵面，传播路径较为复杂。



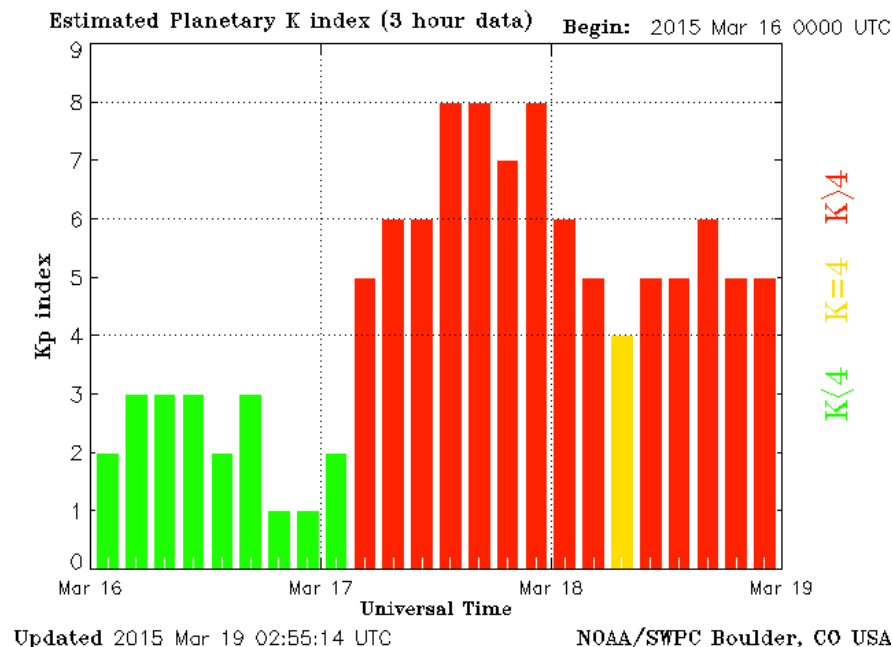
太阳风暴对地球影响示意图



地球空间暴是地球空间在太阳活动影响下产生的剧烈扰动现象，包括地磁暴（geomagnetic storm）、磁层亚暴（geomagnetic substorm）、电离层暴（ionospheric storm）等。

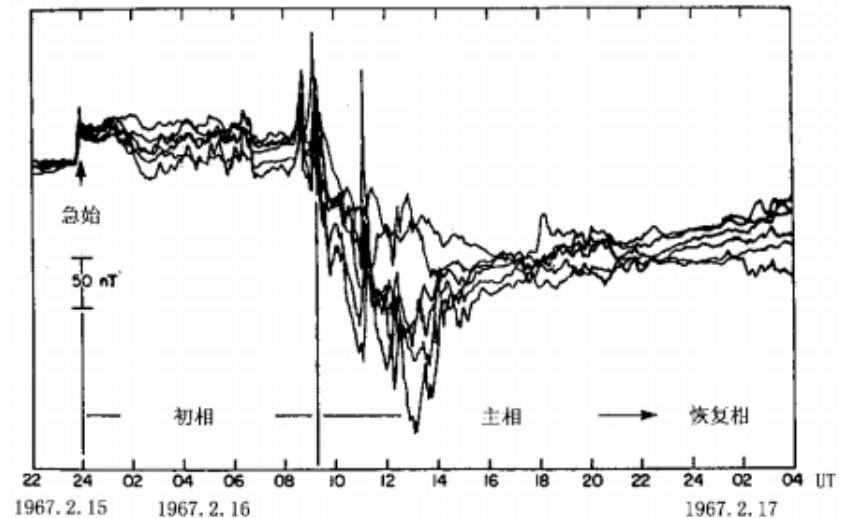
地磁暴是地球磁场全球性的剧烈扰动现象。以地磁指数来表征地磁暴的大小。通常采用的地磁指数为**Kp** 和 **Dst**指数。

K指数称为“三小时磁情指数”，是描述单个地磁台站3小时时段内地磁扰动强度的指数。取0到9共分10级，0表示地磁活动平静，9表示地磁扰动幅度最大。**Kp**指数由全球地磁台网中13个地磁台站的**K**指数计算得到的，用于表示全球地磁活动性，每3小时一个值，取值范围从0到9，共分28级：00, 0+, 1-, 10, 1+, ..., 9-, 90。其值逐渐增大表示地磁扰动逐渐增强。在日常的应用中，一般把**Kp**=5、6称为中小地磁暴，**Kp**=7、8、9称为大地磁暴。

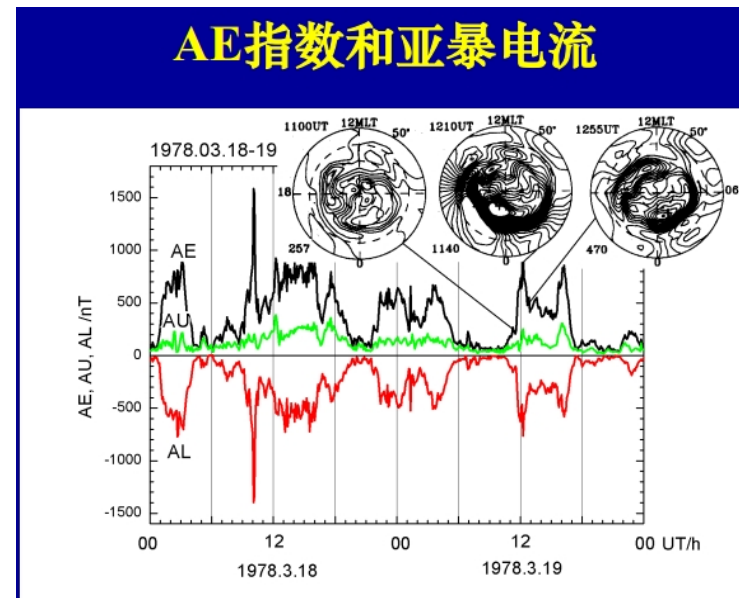


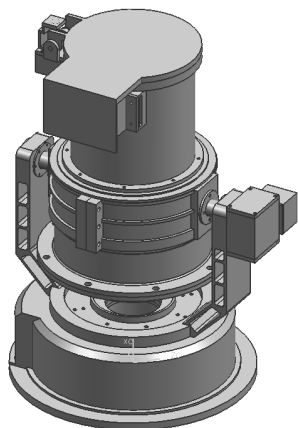
Dst指数（磁暴环电流指数）

在地球赤道附近，按大致均匀的经度间隔选取四个地磁台站，这四个台站每小时地磁水平强度变化的平均值即为**Dst**指数。它的单位是纳特斯拉，其范围可由正几十纳特斯拉到负几千纳特斯拉不止，并且其值逐渐减小表示磁扰幅度逐渐增大。

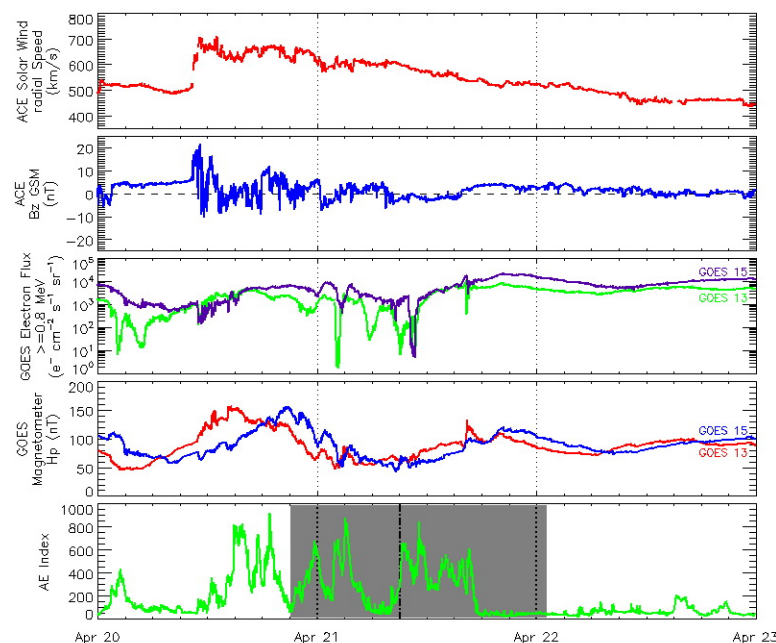
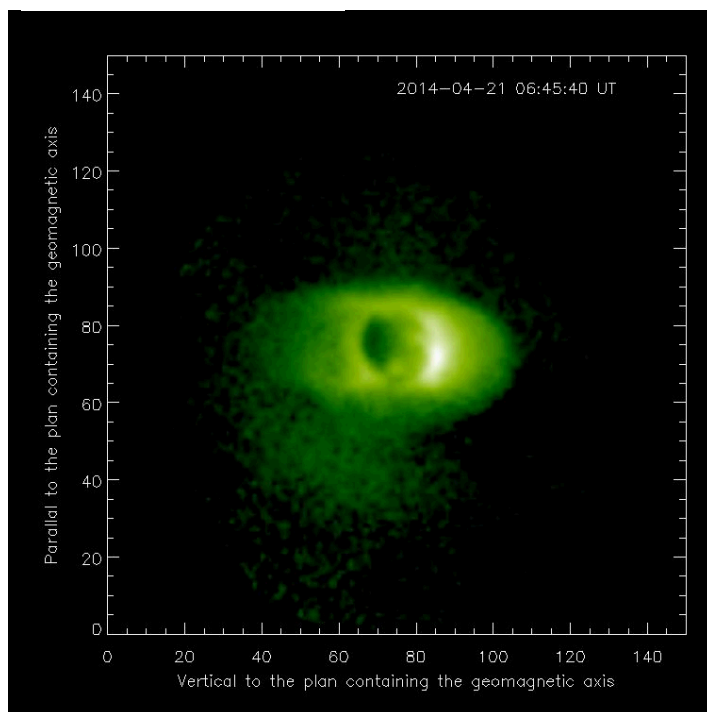
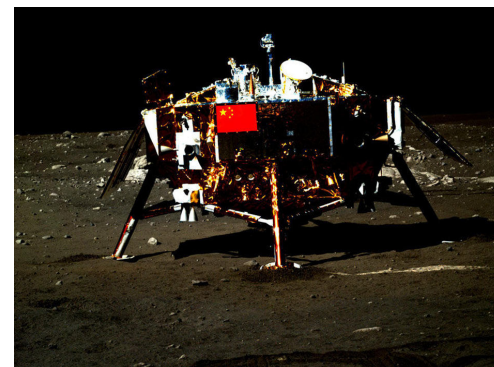


磁层亚暴是起始于地球夜晚面的一种瞬态过程，在此过程中来自太阳风-磁层耦合的很大一部分能量被释放并储存在极区电离层和磁层中。磁层亚暴可用**A**指数描述。



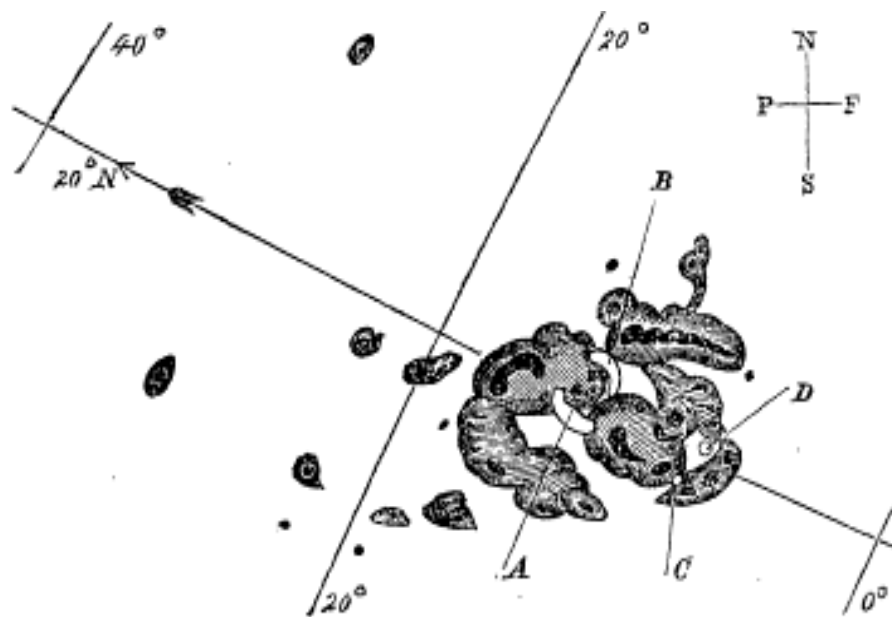


参 数	数 值
工作波长	30.4 nm
通带宽度	5 nm
视场	15° (约为15个地球半径)
空间分辨率	0.1°



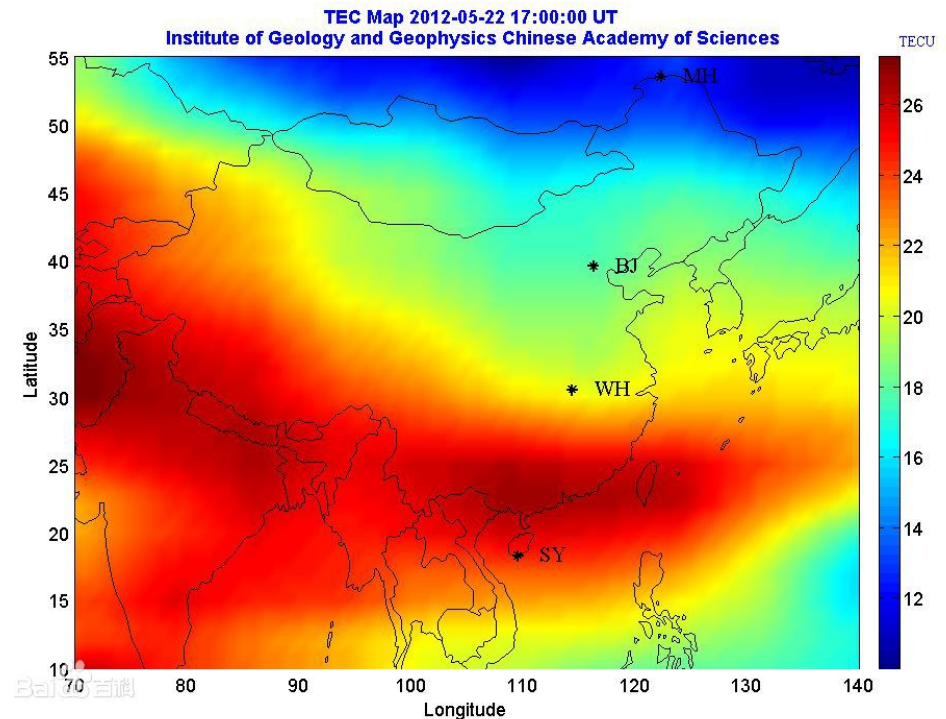
嫦娥3号的极紫外相机拍摄的地球等离子体层 对磁层亚暴的响应

卡林顿事件产生的太阳风暴引发了地球空间暴，产生强烈的近地空间环境效应。除了低纬度能看到极光之外，还有强烈的地磁暴，干扰了当时的电报通讯，甚至让电报员触电，电报纸燃烧。



卡林顿事件 (1859, 8.26-9.2)

电离层暴是指电离层物理参量对正常状态的重大偏离。长期以来备受重视。自**Appleton**和**Ingram**于**1935**年首次发现电离层暴现象以来,大量研究结果使人们对电离层暴随太阳地磁活动、经纬度和季节变化的统计形态有了基本认识。然而,电离层暴的影响因素众多,不同位置各因素的影响程度差别很大,使得暴的分布规律不具有普适性。

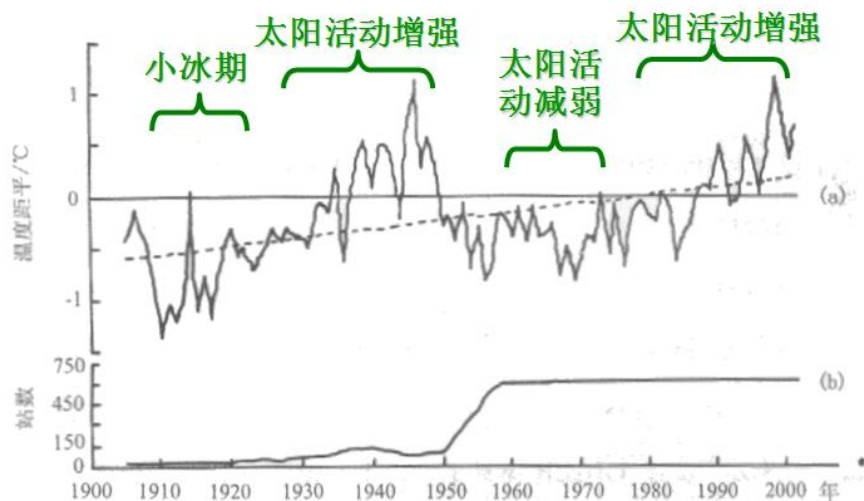
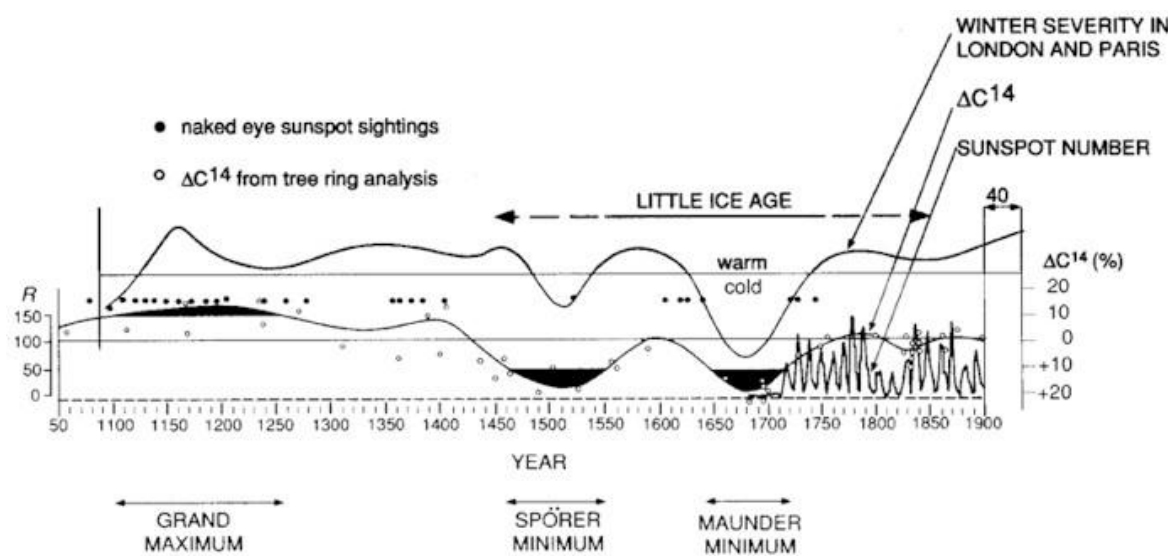


电离层暴时的TEC图

2. 太阳活动与地球气候变迁

全球气候模型的研究大约开始于上世纪五十年代后期。早期的模型比较简单，除了考虑大气动力学过程之外，还有考虑了太阳辐射常数和地球辐射反照率等因素，用于分析全球气温变化和极地冰盖变化以及冰期发生的可能性。随着温室效应现象的发现，并考虑地球大气中的多种物理和化学过程，全球气候变化形成了比较精确的全循环模型（General Circulation Models, **GCM**）。1988年政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, **IPCC**）根据**GCM**的计算结果发布全球气候变化报告。

早在上世纪中后期，太阳物理学家就注意到太阳活动与地球气候变化的关系。1976年美国国家大气研究中心Jonh. A. Eddy在《Science》期刊上发表了关于黑子蒙德极小期的研究论文。该论文利用树木年轮碳十四和太阳黑子记录，揭示了800多年欧洲气候变化与太阳活动的变化有较好的对应关系。图3显示了伦敦和巴黎的气温变化与太阳黑子数变化的比较。其中蒙德极小期期间，欧洲的气温很低。



1100-1900年伦敦和巴黎气候变化与太阳黑子数目变化。早于1700年的太阳活动水平估计借助了树木年轮碳14分析。Jonh. A. Eddy, 'The Maunder Minimum', Science, 1976, 192, 1189-1202

中国近百年(1905-2001年)来平均地表气温变化

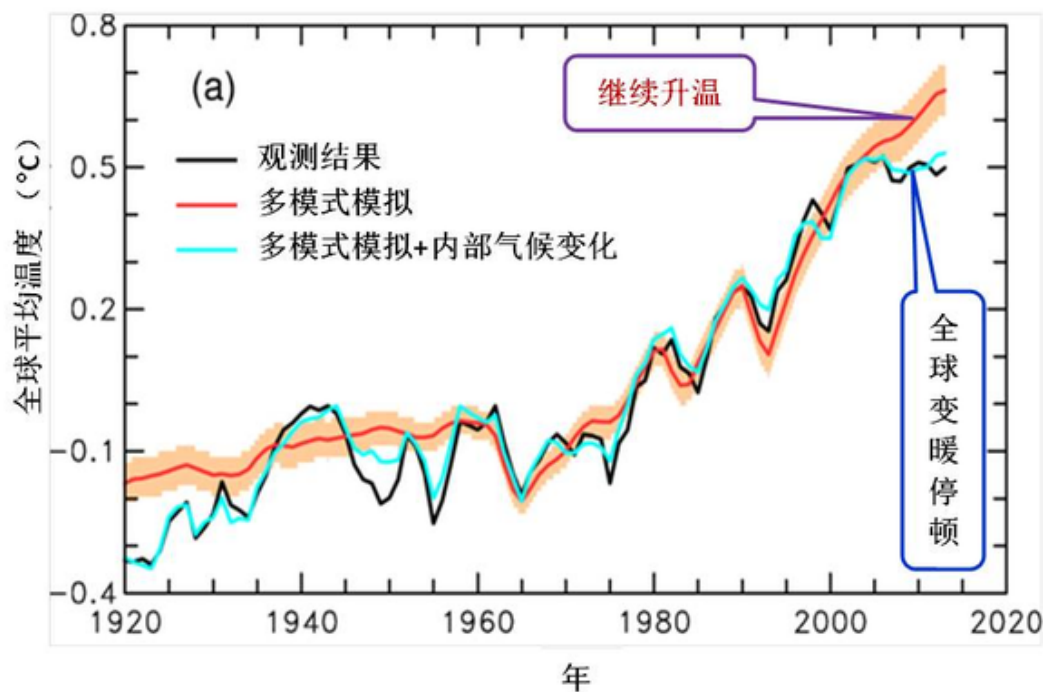
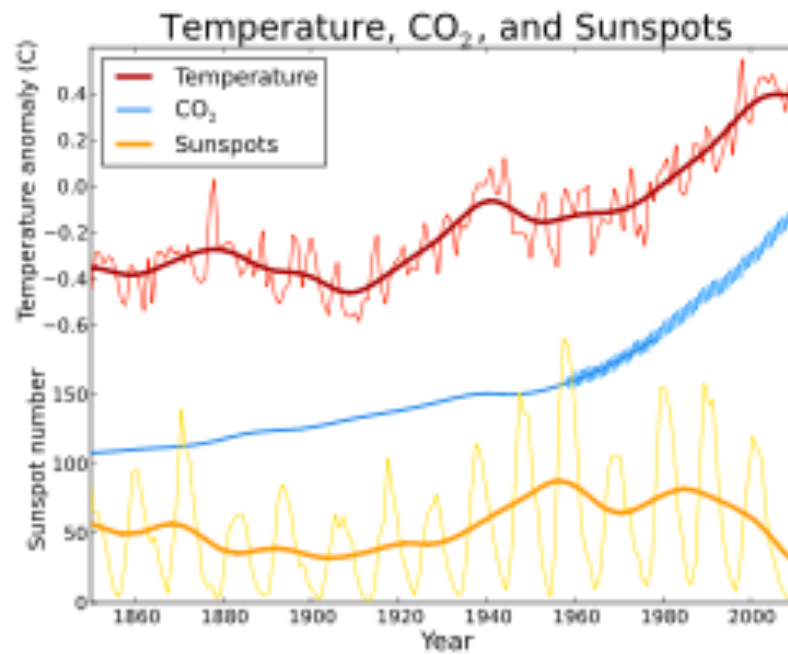
<http://blog.sciencenet.cn/blog-38693-496358.html>

Maunder minimum vs. Little Ice Age



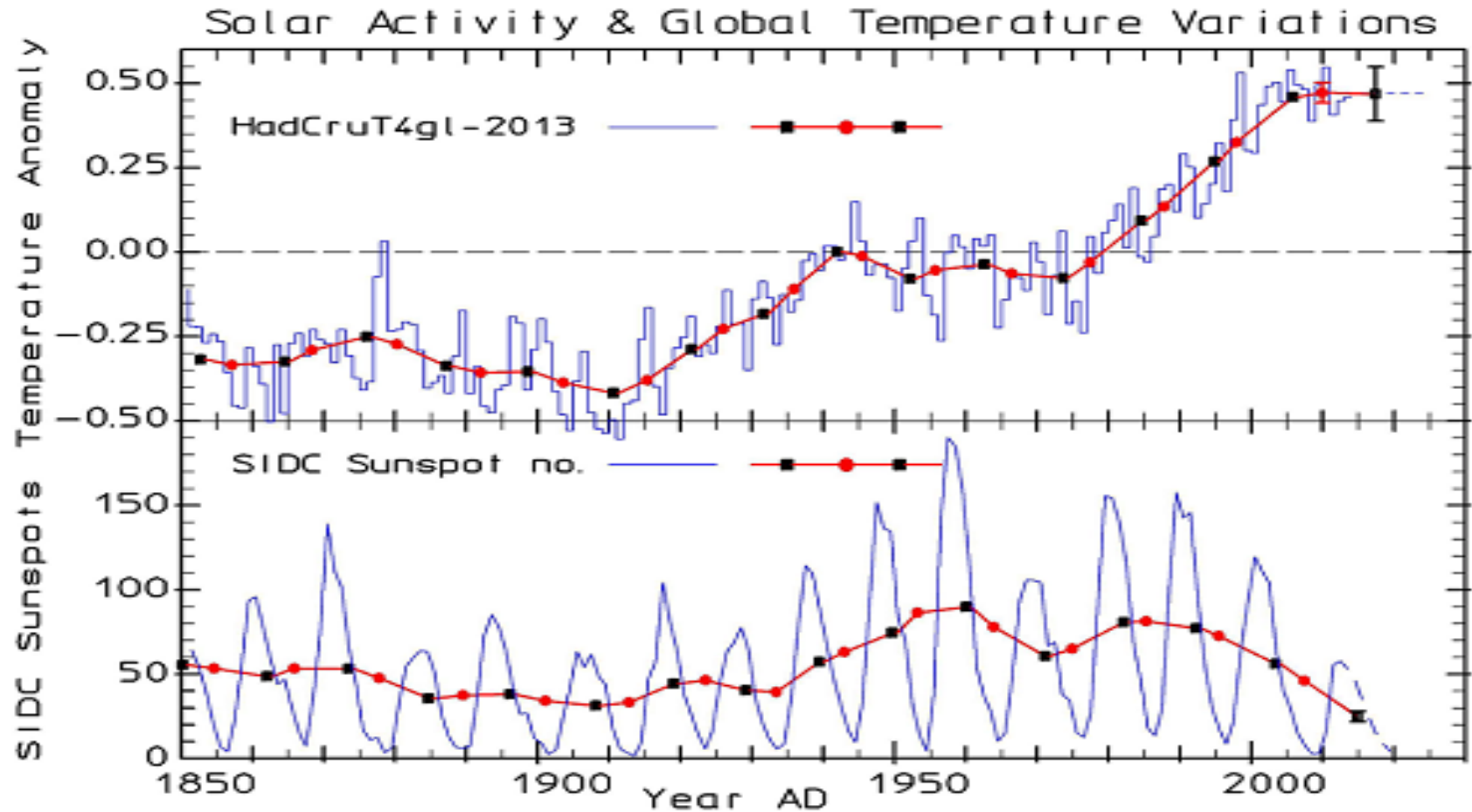
**“Little
Ice Age”
(~1550 –
~1850)**





近百多年气温、碳排放、黑子相对数的比较
<http://baike.chachaba.com/doc/88878.html>

多模式模拟结果与观测的比较
<http://www.zhihu.com/question/21796206/answer/59348474>



Stauning, P., Atmospheric and Climate
 Sciences, 2014, 4, 60-63



2008—2009年期间太阳上出现较多的无黑子日期，让太阳物理工作者注意到也许又会面临一次太阳活动大幅度减少。因而诸多太阳物理学家（如Zharkova等，2015）认为地球气候可能趋于变冷。2014年2月加拿大科学家Donald C. Morton 发表题为 ‘An Astronomer’s view of climate change’ 的论文，质疑IPCC发布的全球气候变化结果。

影响地球气候变化有4大天文因素（其中前三项与太阳活动有关，第4项影响第2项和第3项）：

- ◆ 反映太阳能量辐射的太阳常数实际上是不稳定的，影响太阳注入行星际的总能量；
- ◆ 地表太阳辐射（Surface Solar Irrdiance, SSI）变化, 尤其是UV波段辐射变化影响地球大气平流层化学过程；
- ◆ 太阳磁场的开放磁通量调制银河宇宙线强弱，进而影响天空云量；
- ◆ 地球公转轨道的变化，甚至还有太阳系整体在银河系的运动轨道的变化。

这些变化需要在IPCC的GCM中加以考虑。值得注意的是，这里所提到的全球平均温度变化都是在 ± 1 度范围之内，这种变化是否意味着小冰期的到来需要进一步研究。



3. 太阳活动与地震

科学家们查阅了历史上太阳活动的各项数据，包括太阳黑子，太阳风以及磁场的表现纪录，并将其与地球上地震的历史记录作比对，试图找出两者之间的相关性。但研究的结果是：在太阳活动与较大型地震之间并未发现显著的相关性。因此无法运用空间观测数据来进行未来地震的预测。

有关此项研究的报告发表于2013年出版的《地球物理学研究通报》(Love, J. J. & Thomas, J. N., 2013. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes, Geophys. Res. Lett., 40, 1165-1170)。研究中所采用的地震数据来自于联邦地质调查局(USGS)，太阳黑子数据来自于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)，太阳风数据取自美国宇航局(NASA)，而地磁数据则来自英国地质调查局以及澳大利亚地球科学研究所。

文引自<http://tech.sina.com.cn/d/2013-04-23/08588269219.shtml>

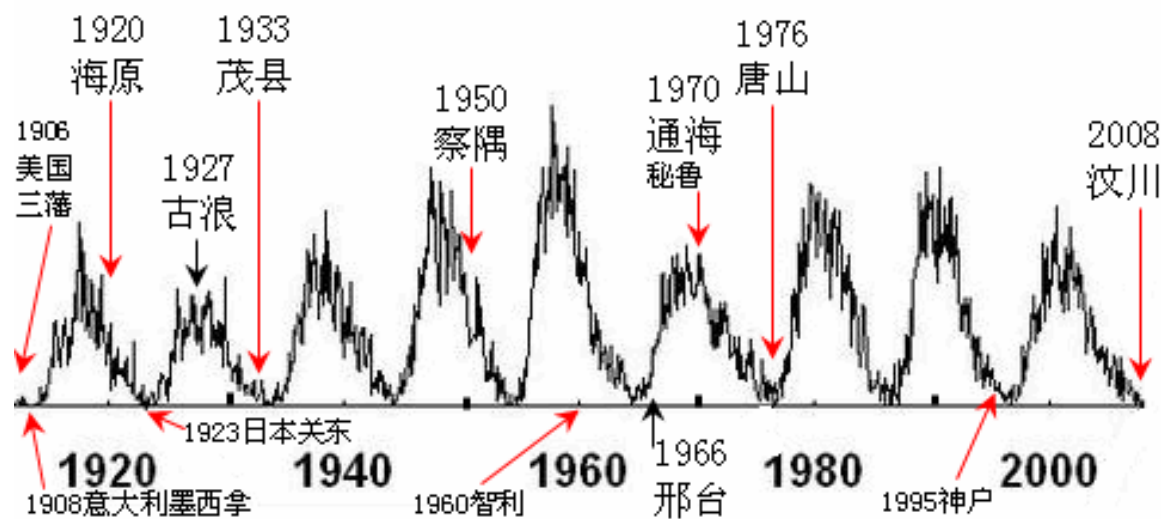


不过，也有另外一些科学家较为肯定的表态称，太阳活动产生的射电辐射流等因素可诱发地球内部的能量变化，可能引起局部的微震，当地球内部能量和其他条件都具备时，就会引发大地震。而且高能粒子流、太阳风以及宇宙射线都会直接或间接诱导地球磁场的变化，激发某些地层活动的机制。

目前，在对来自英、美地质调查局、NASA以及NOAA的统计数据进行研究之后，科学家们发现了越来越多有关太阳活动诱发地球地震的证据。有观点认为，截至目前的数据资料显示，有些大地震发生的非常突然，设置在地面的地震监测仪在灾害爆发前都未收集到任何“前兆”信息，而这部分地震很可能就是由太阳活动所引发的。

研究人员表示，太阳活动所带来的高速带电粒子流可引起地磁偶极子受到干扰，影响地球的自转速度并改变地球热力循环平衡，由太阳活动引发的电磁作用可以导致地球岩石圈出现分子级的变化，比如分子键断裂等，这些微观领域发生变化产生的最直观反应就是形成地震。

假如太阳爆发能够影响地球自转，那么，太阳活动有可能影响地球板块运动。至于最终表现为哪里发生地震、火山爆发和海啸，就不是太阳活动一家之功了。下面的统计分析可能有统计人的偏好在内，没有足够的说服力，有些关于大水灾的统计也可能面临同样的问题。至于关于太阳活动与疾病，太阳活动与经济活动乃至交通事故发生率、犯罪率、伟人生死等等统计分析，均缺乏说服力。但此类研究在上个世纪尤其多。



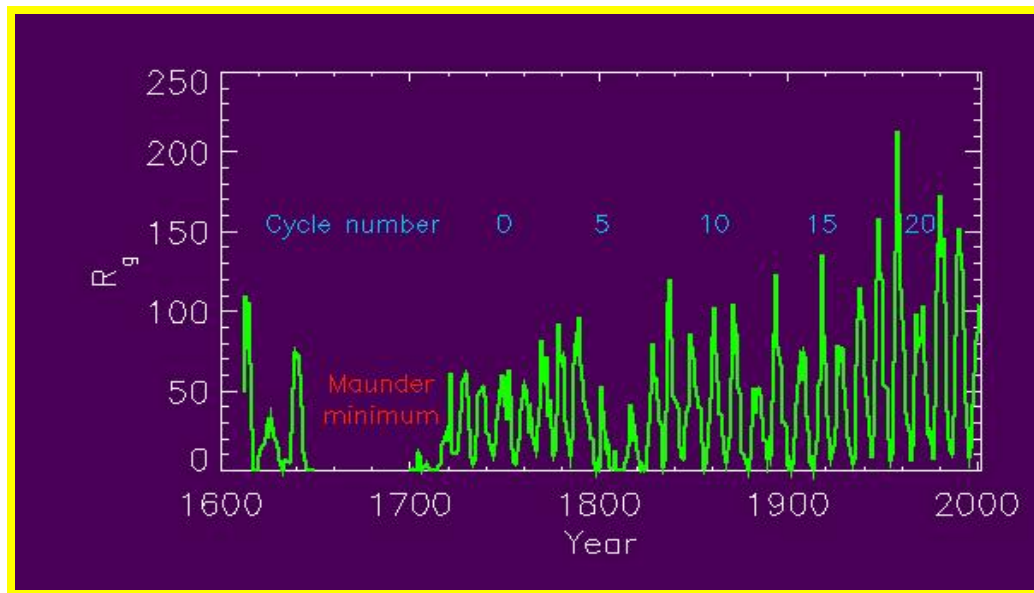
大地震与太阳黑子周期对照

4. 太阳活动预报

(1) 历史与现状---太阳活动水平指标的演进

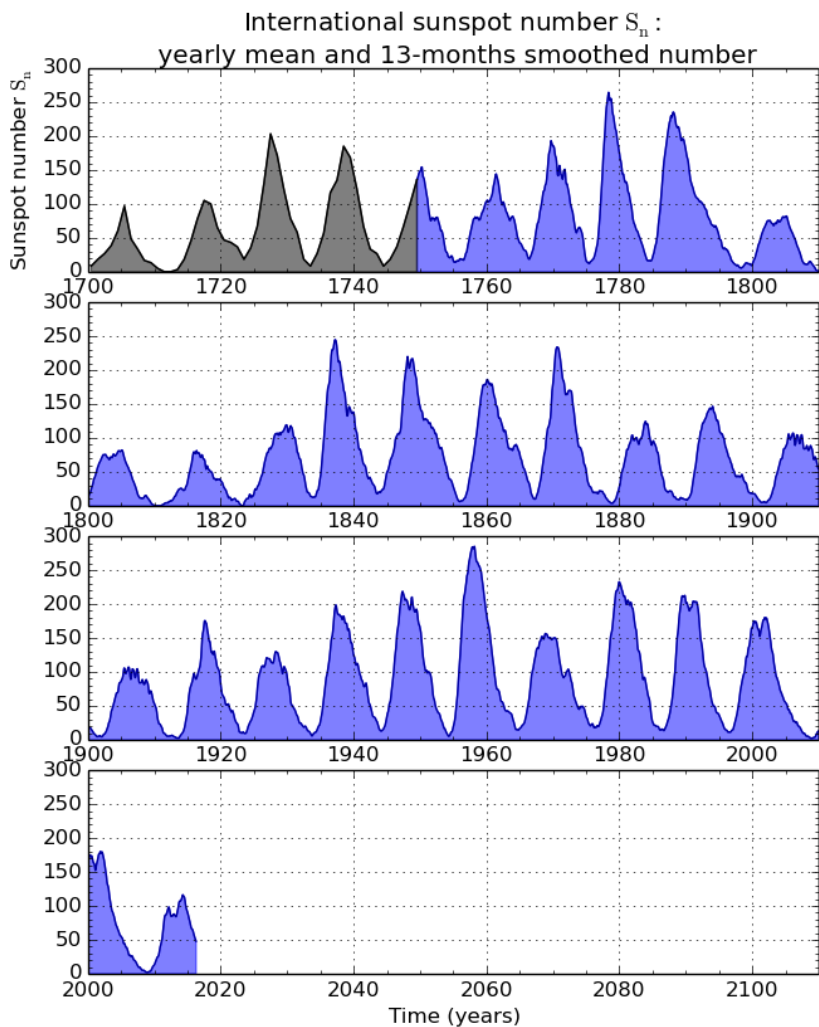
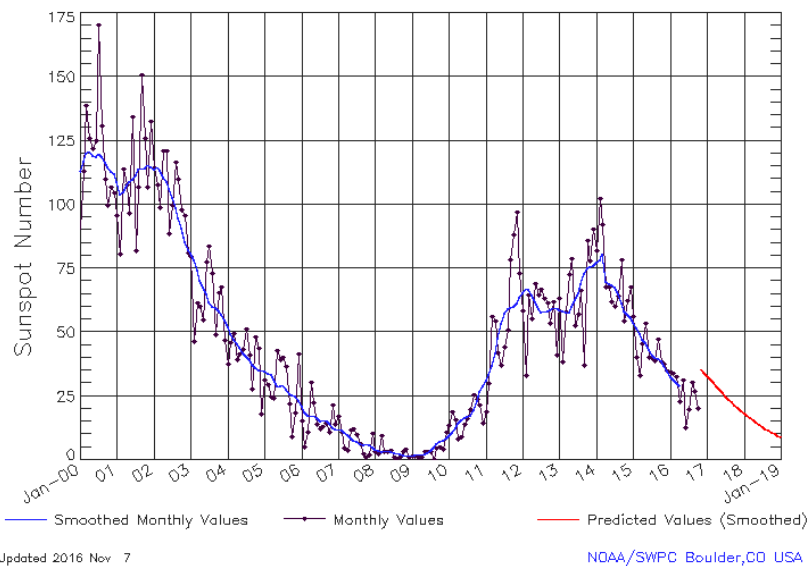
太阳黑子相对数

衡量太阳活动周活动水平的常用指标黑子相对数最大值是衡量太阳活动周活动水平的特征指标。活动周的周期长度也能反映活动周的活动水平



当黑子相对数很小且周期特征不明显时，意味着太阳活动在大时间尺度上异常。

ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression
Observed data through Oct 2016



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2016 November 4

第24活动周与其它活动周的比较

每天发生耀斑的级别和频度

衡量短时期内太阳耀斑活动水平常用指标

根据每天发生耀斑的级别和频度，太阳耀斑活动水平分为5个等级：

0(很低)：无耀斑或C级以下耀斑

1(低)：C级耀斑

2(中等)：1-4个M1-M4级耀斑

3(高)： ≥ 5 个M1-M4级耀斑，或者1-4个M5-M9耀斑

4(很高)： ≥ 5 个M5-M9耀斑，或者X级耀斑

太阳活动区特征参量

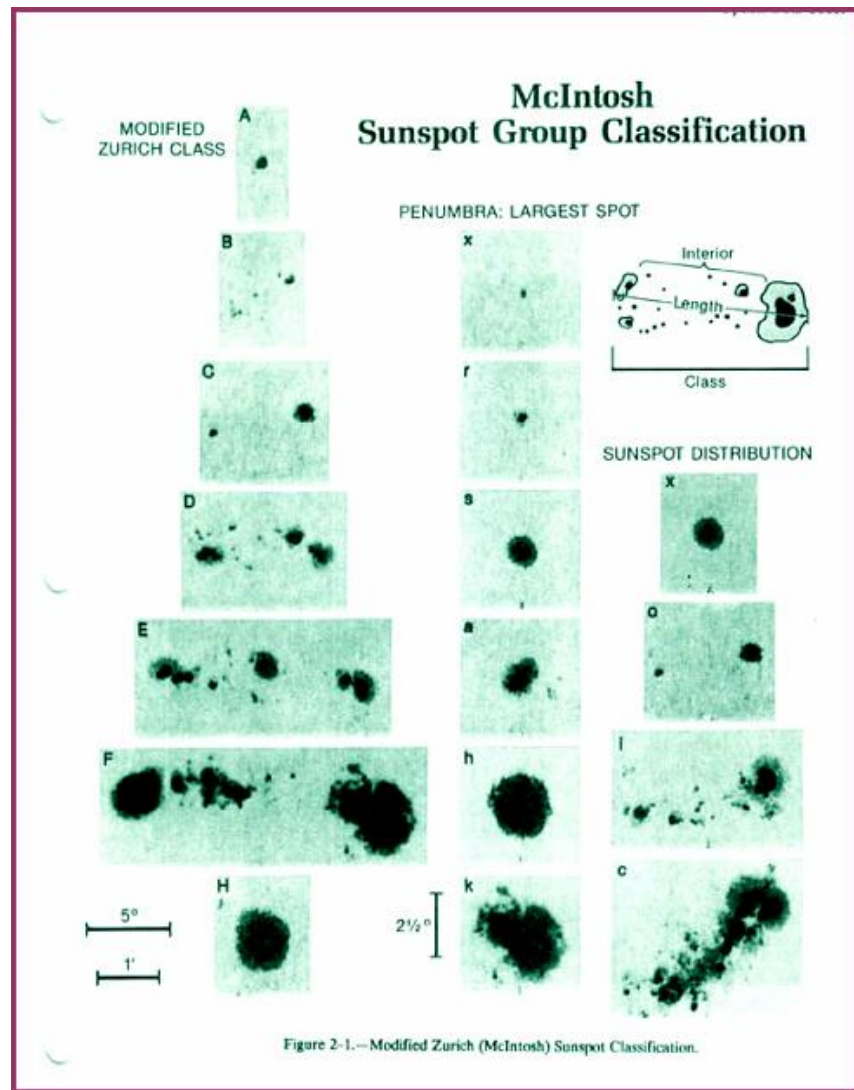
衡量太阳活动区活动水平常用指标

形态类指标

黑子形态分类和磁场类型

物理量指标

黑子面积、磁通量、磁场梯度、中性线长度、孤立奇点数目、活动区磁场等效距离、电流分布、电流螺度等等



苏黎世分类法

由瑞士苏黎世天文台瓦尔德内尔于1938年提出的。按黑子群的发展过程将其分为9个类型，用大写拉丁字母表示：

- A 无半影的黑子或单极小黑子群；
- B 无半影的双极黑子群；
- C 类似B的双极群，但其中有1个主要黑子有半影；
- D 双极群，2个主要黑子都有半影，其中有1个黑子是简单结构。东西方向延伸小于 10° ；
- E 大的双极群，结构复杂，2个主要黑子都有半影，且其间有些小黑子。东西方向延伸不小于 10° ；
- F 很大的双极群或很复杂的黑子群。东西方向延伸不小于 15° ；
- G 大的双极群，只有几个较大的黑子，而没有小黑子，东西延伸不小于 10° 。
- H 有半影的单极黑子或黑子群，有时也具有复杂结构，直径大于 $2^\circ . 5$ ；
- J 有半影的单极黑子或黑子群，直径小于 $2^\circ . 5$ 。

麦金托什分类法

由美国麦金托什提出的，美国《太阳地球物理资料》月刊近年来关于黑子群的记载一直采用这种分类法。

用并列的3个字母分别表示黑子群的3种特征：

第一个大写字母表示黑子群的类型，采用苏黎世分类法的分类，但作了一些修改，把原先的9类改分为7类，即A、B、C、D、E、F、H。

第二个大写字母表示黑子群内最大黑子的半影情况，分为6类，即X、R、S、A、H、K；

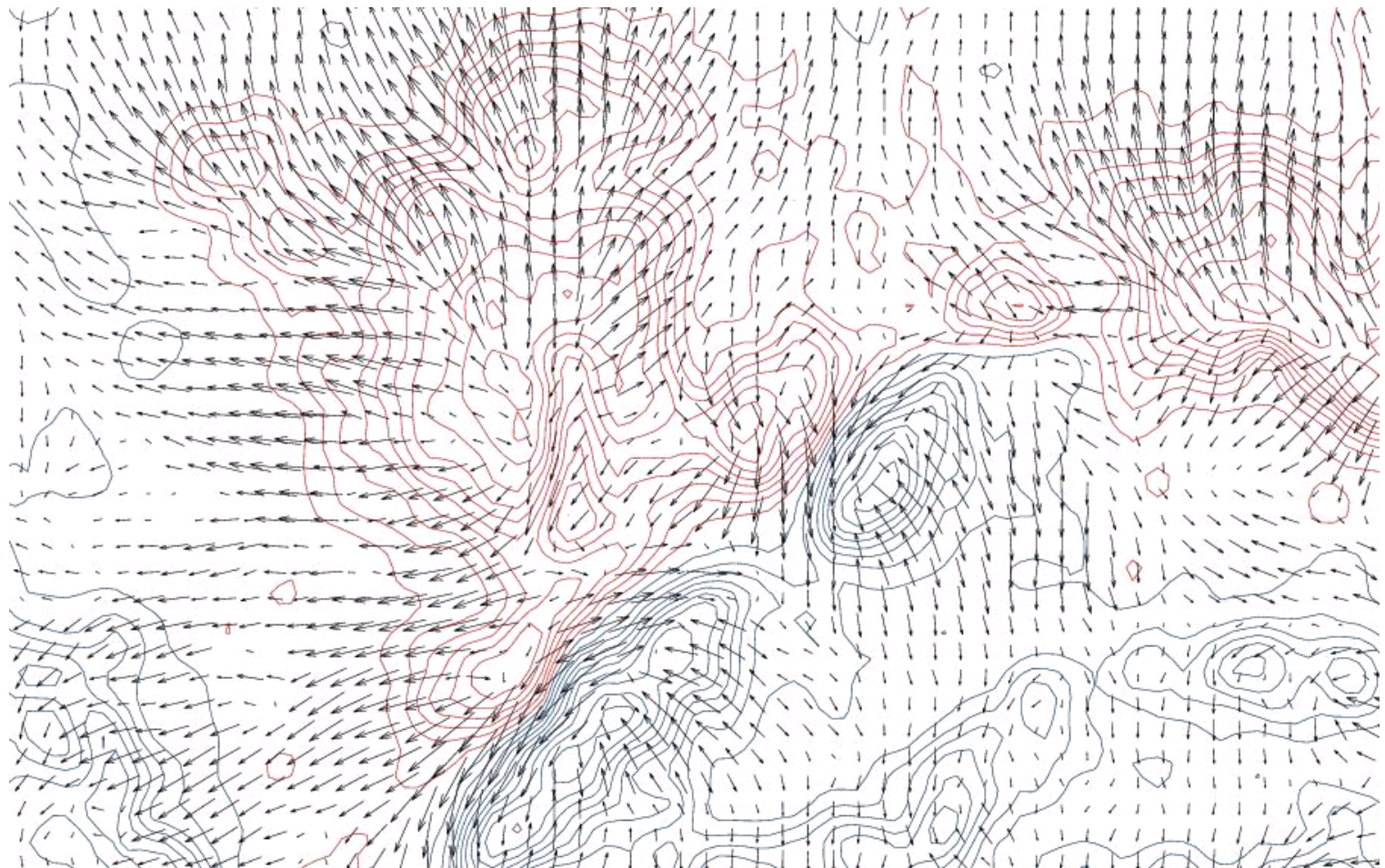
第三个字母表示黑子群紧密度或相对的黑子分布，分为4类：
x、o、i、c。



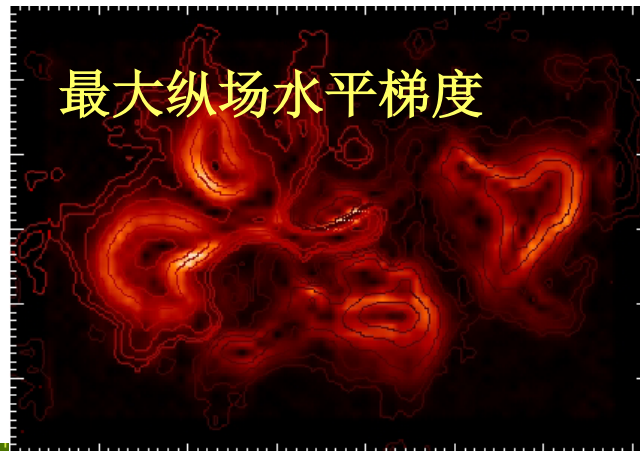
磁分类法

现在普遍使用的美国海耳天文台的分类法，是海耳等人于1919年根据几千个黑子群每个测点的极性测量提出的。这种分类法把黑子群分为 α [单极]、 β [双极]、 γ [复杂极性] 3类，或用字母A、B、r表示。再按黑子极性是对应于本太阳活动周其所在半球的前导黑子还是后随黑子，用字母p、f表示，或用字母P、F表示。

- AP或 αp 单极群，极性为本活动周其所在半球的前导黑子的极性；
- AF或 αf 单极群，极性为本活动周其所在半球的后随黑子的极性；
- BP或 βp 双极群，前导黑子的极性占优势；
- B或 β 双极群，前导和后随黑子的极性几乎相等；
- BF或 βf 双极群，后随黑子的极性占优势；
- Br或 $\beta \gamma$ 具有一般B型特征的双极群，但其中有一个或几个小黑子极性颠倒；
- R或 γ 极性混杂的复杂群；
- D或 δ 在同一半影内有彼此相距 2° 以内的异极性的黑子群；

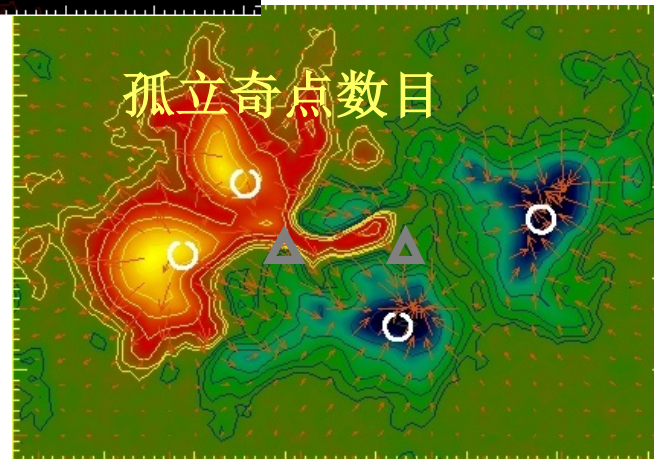
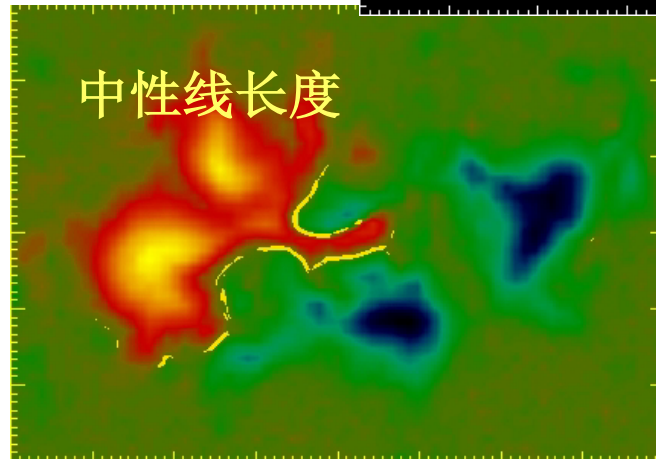


国家天文台怀柔观测基地太阳矢量磁图（AR9077局部，2000年7月14日）
等值轮廓图表示视向分量，红色N极，蓝色S极，箭头表示横向分量。



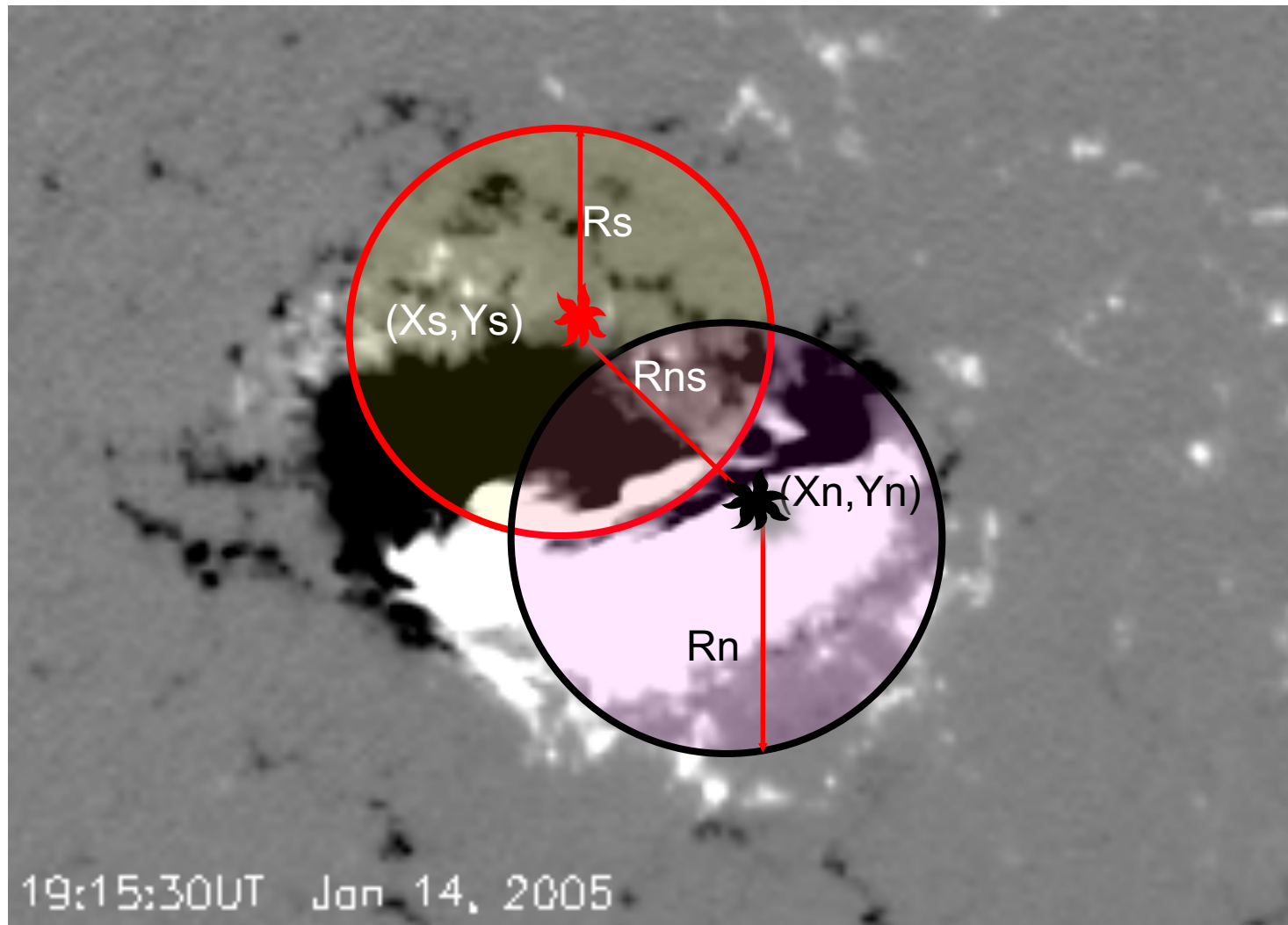
活动区NOAA 9574
(2001年8月11日)

Cui, et al. 2006



磁场参量反映太阳光球磁场的复杂性

活动区磁场等效距离参数 : $E_d = (R_n + R_s) / R_{ns} = 2.0969$



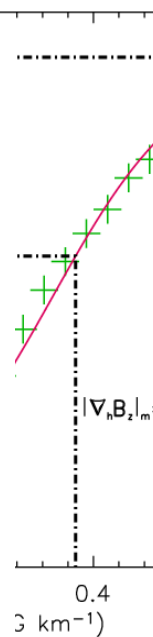
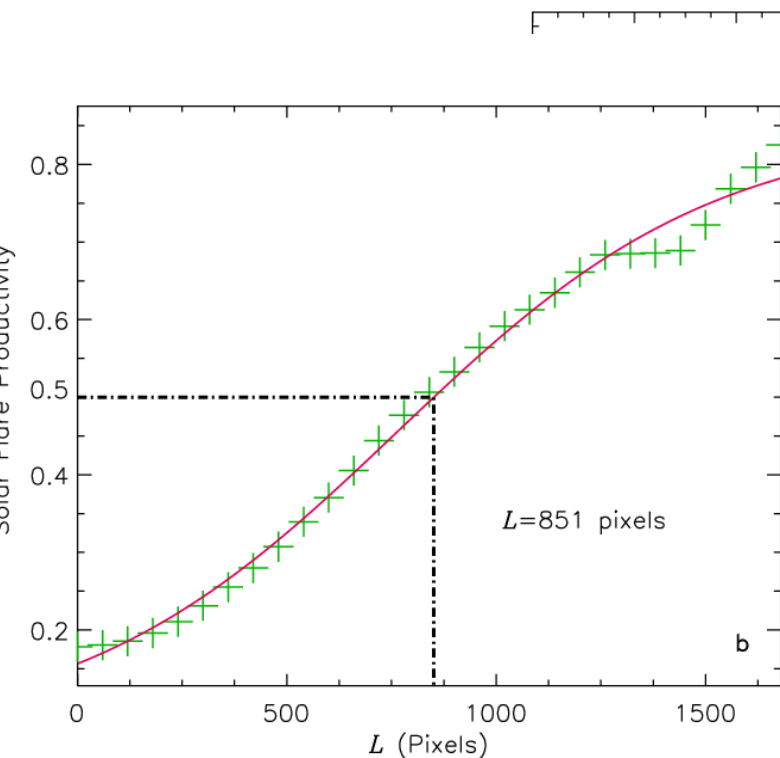
Guo J., Chumak O. et al., 2005, 2006

(2) 基于活动区物理参量的新型指标

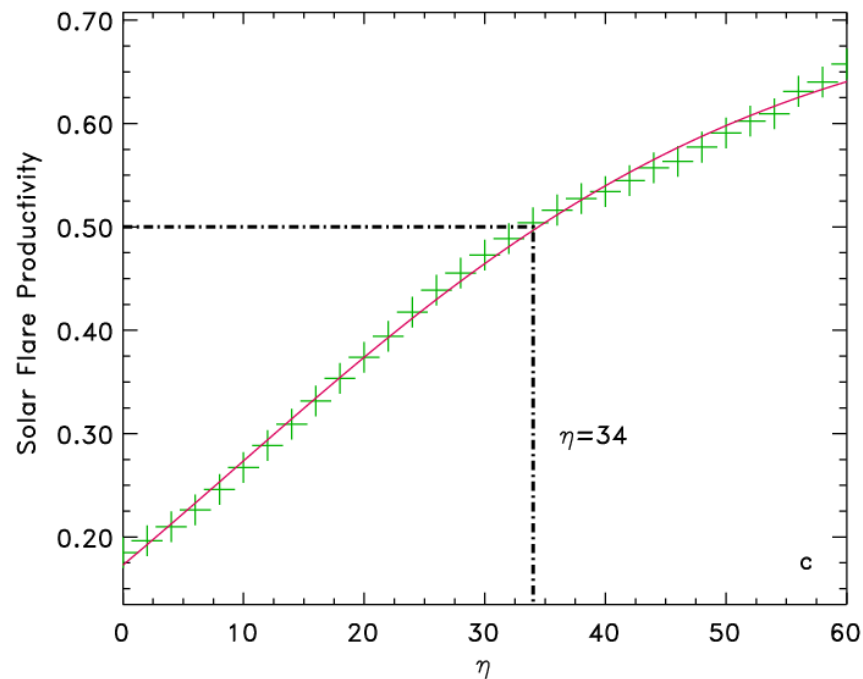
磁场参量与耀斑产率

(Cui, Y. M. et al, Solar Physics, 2006, 237, 45; 2007, 242, 1)

MDI 磁图23990张 怀柔磁图1353张)



水平梯



耀斑产率与中性线长度关系

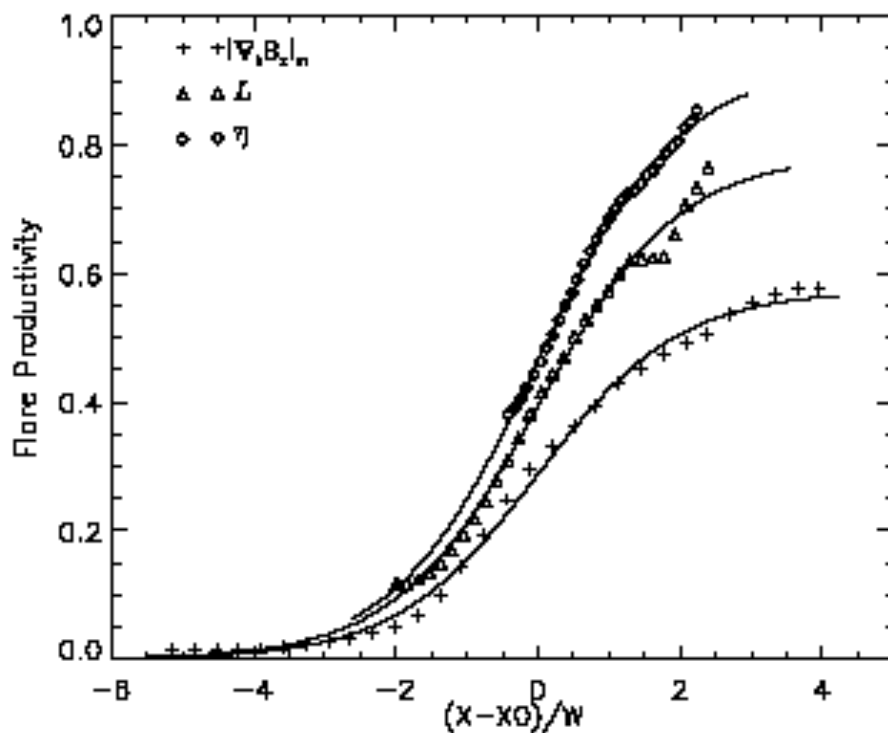
耀斑产率与孤立奇点数目关系

磁场特征参量耀斑爆发响应曲线无量纲化

(RAA, Wang, et al, 2009)

要求：磁场特征参量耀斑爆发响应曲线为S型函数，

$Y = A2 + (A1-A2) / (1 + \exp((X-X_0)/W))$ ，其中 X_0 与 W 通过统计曲线拟合求得。



磁场参量与活跃程度指标化

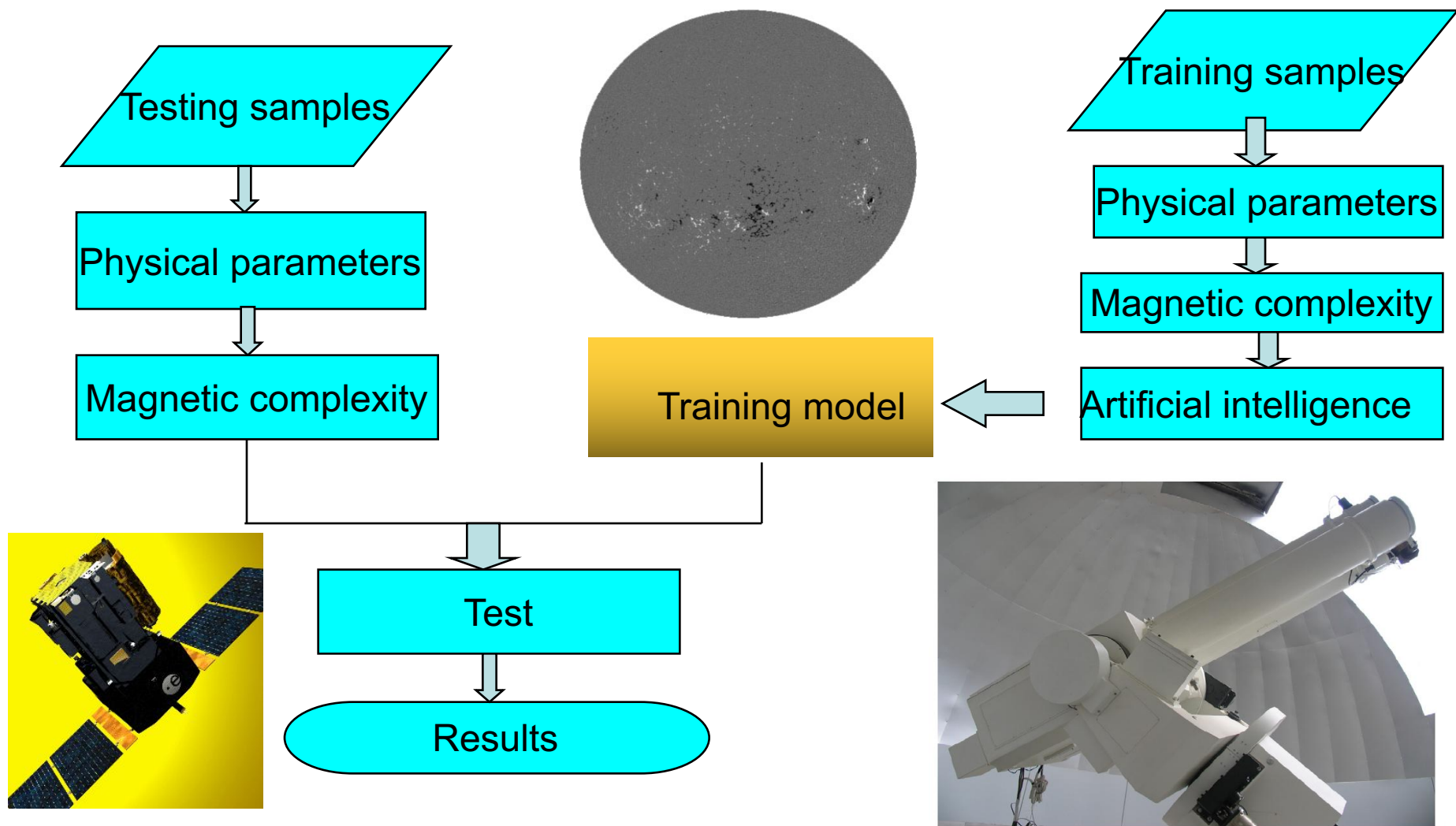
磁场参量的无量纲化表达式 $(X-X_0)/W$ 可以用来定义活动区活跃程度：

$(X-X_0)/W < 0$	不活跃
$0 \leq (X-X_0)/W < 1$	较活跃
$1 \leq (X-X_0)/W < 2$	活跃
$2 \leq (X-X_0)/W < 3$	很活跃
$3 \leq (X-X_0)/W$	极端活跃

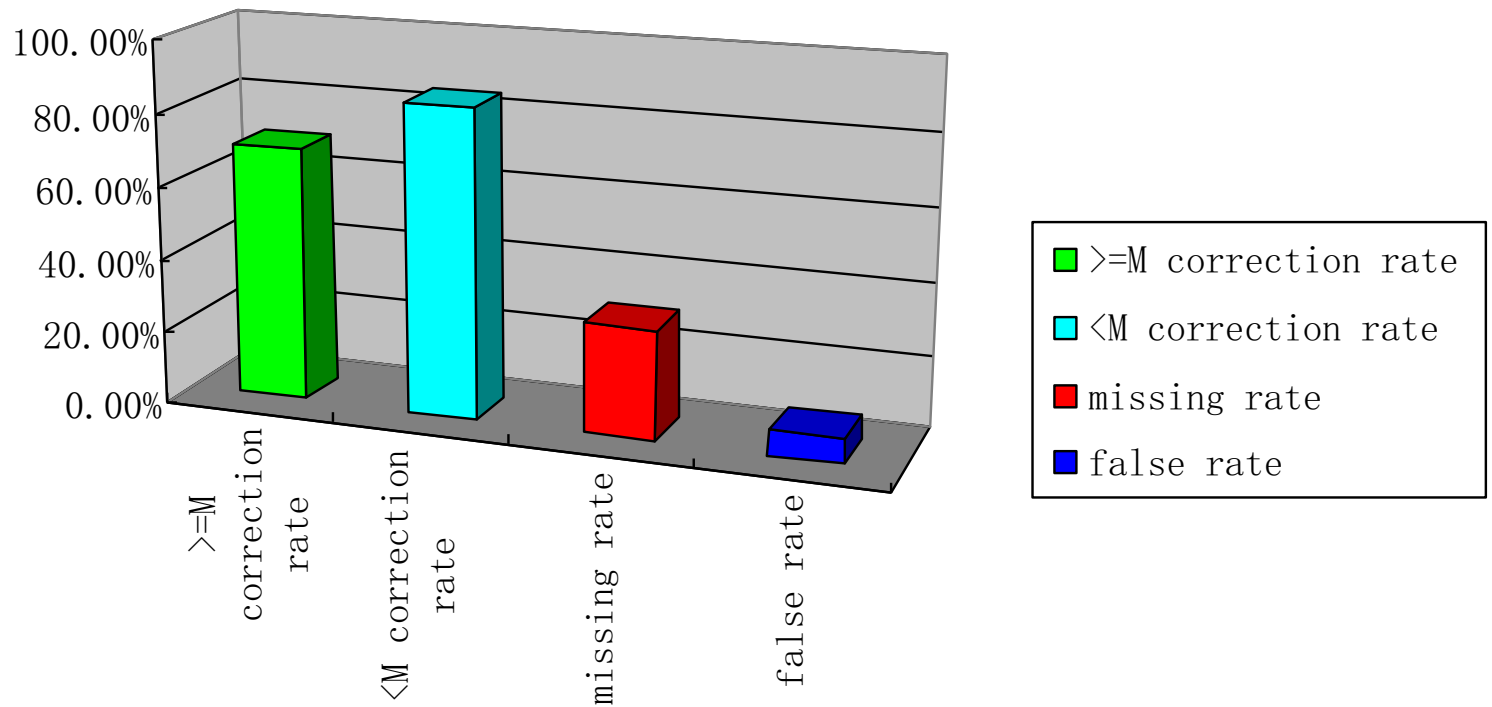
磁场特征参量耀斑爆发响应曲线无量纲化后，可以实现
对太阳活动水平的定量评估

运用人工智能技术建模

Li, R. et al, 2007; Wang, H. N., 2008, Yu, D. R., et al, 2009



以2001年观测数据为样本 测试耀斑预报模型



(3) 太阳爆发先兆因子

光球

磁场形态

(磁场类型, 磁中性线 , 磁孤立奇点)

磁场非势性 (磁剪切, 强磁场梯度, 磁螺度和电流螺度)

磁场演化

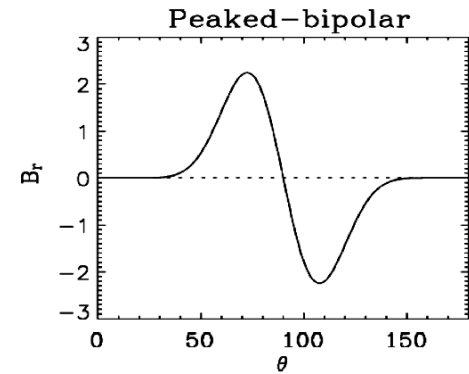
(磁通量浮现和对消, 磁结构的剪切和扭转运动)

- 上边界总磁螺度依赖光球边界条件
- 多极磁场的上边界磁螺度可十倍于偶极磁场。

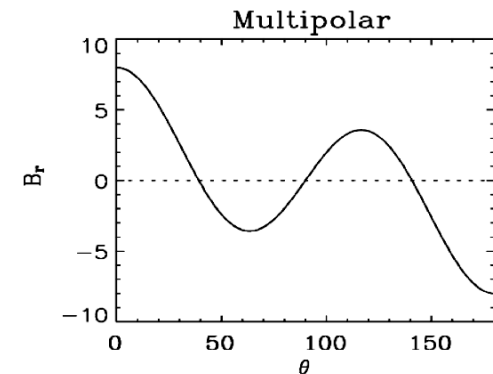
这意味着:

- 磁通量浮现等现象触发CME
- 越复杂的磁场越利于发生爆发事件

(Zhang & Flyer 2008, ApJ, 683, 1160)

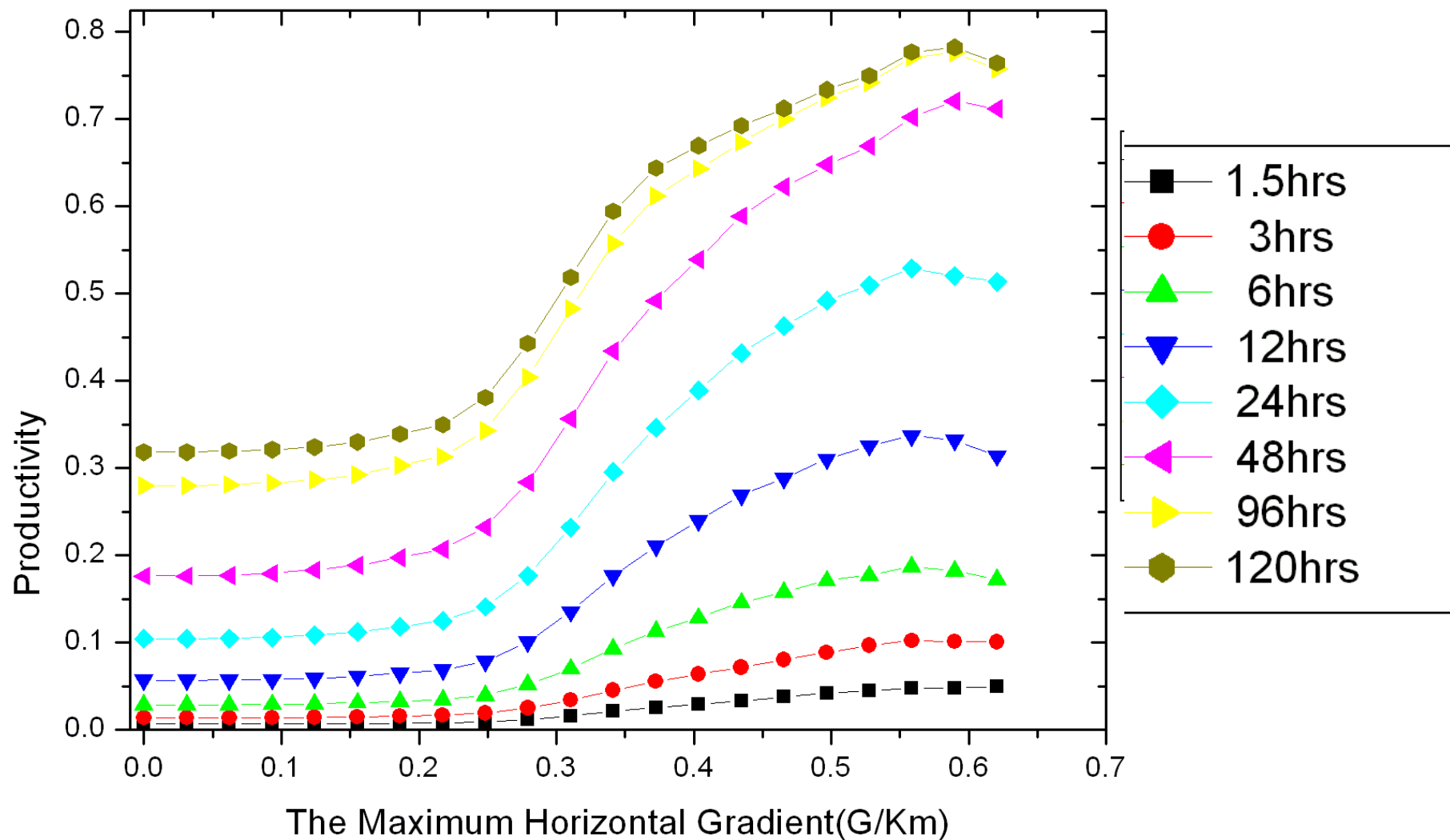


Bipolar: $\sim 0.2 \Phi_p^2$



Multipolar: $\sim 0.035 \Phi_p^2$

光球预报参量的时间延迟与耀斑产率



Cui et al, 2006

(2) 色球和日冕

暗条震荡, 日浪, 空穴, S型结构等

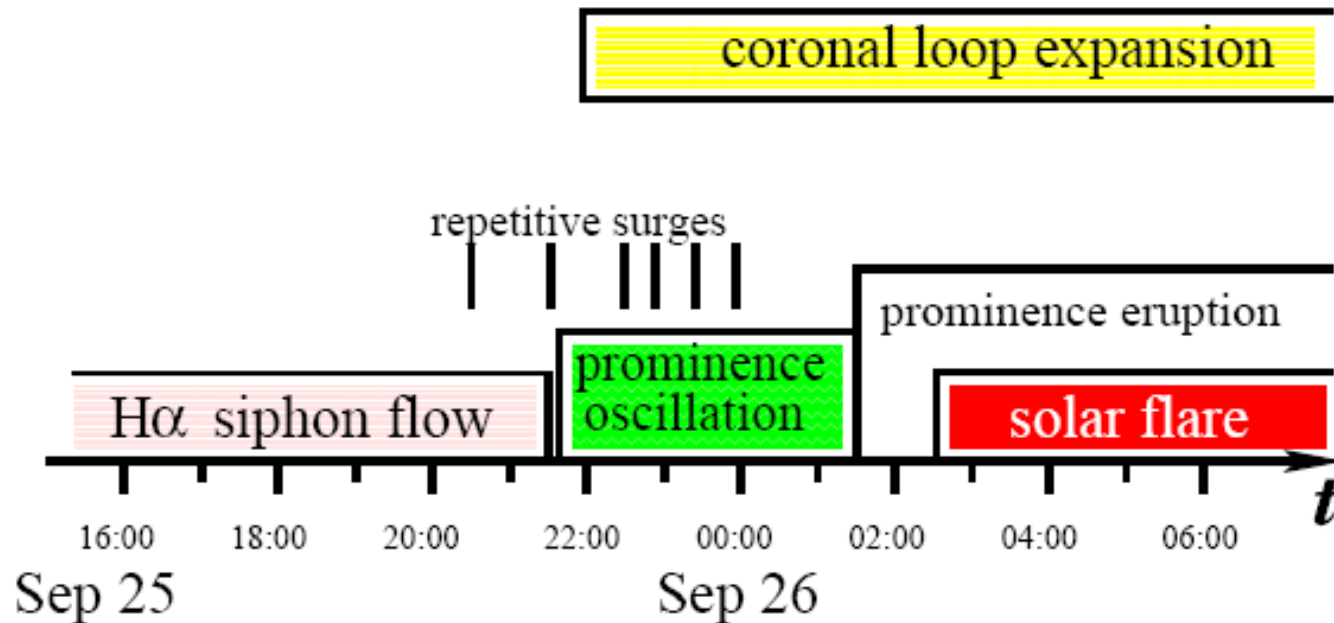
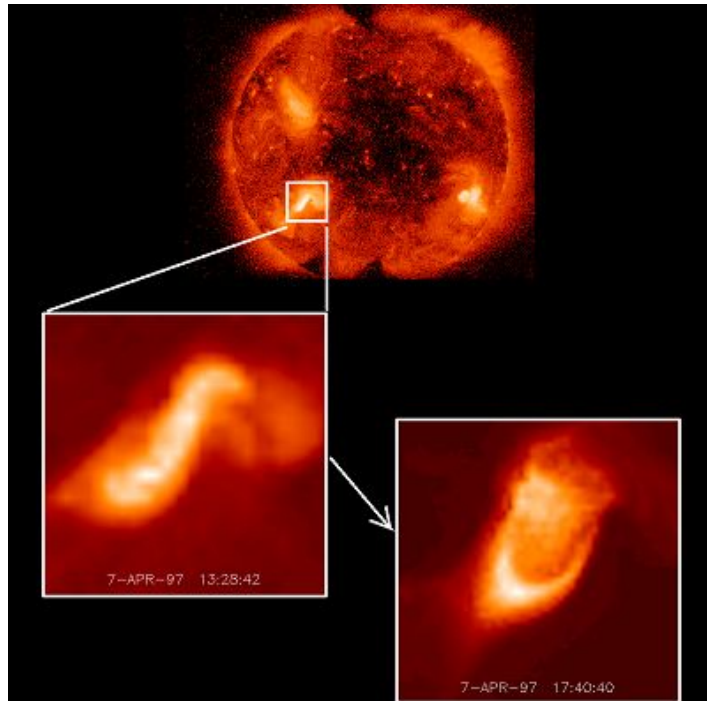


Fig. 7. Timeline of all phenomena associated with the prominence eruption.

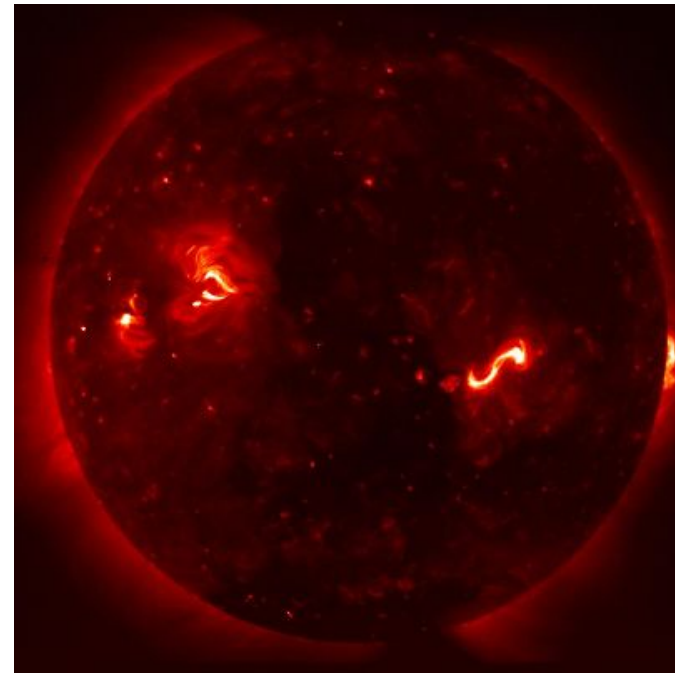
Chen, P. f., et al. 2008

“阳光”和“日出”卫星观测到的日冕S型结构

SXT/Yohkoh



XRT/Hinode



<http://solar.physics.montana.edu/canfield/sigmoids.shtml>
http://solar.physics.montana.edu/press/XRT_Sigmoid.html

太阳爆发先兆因子

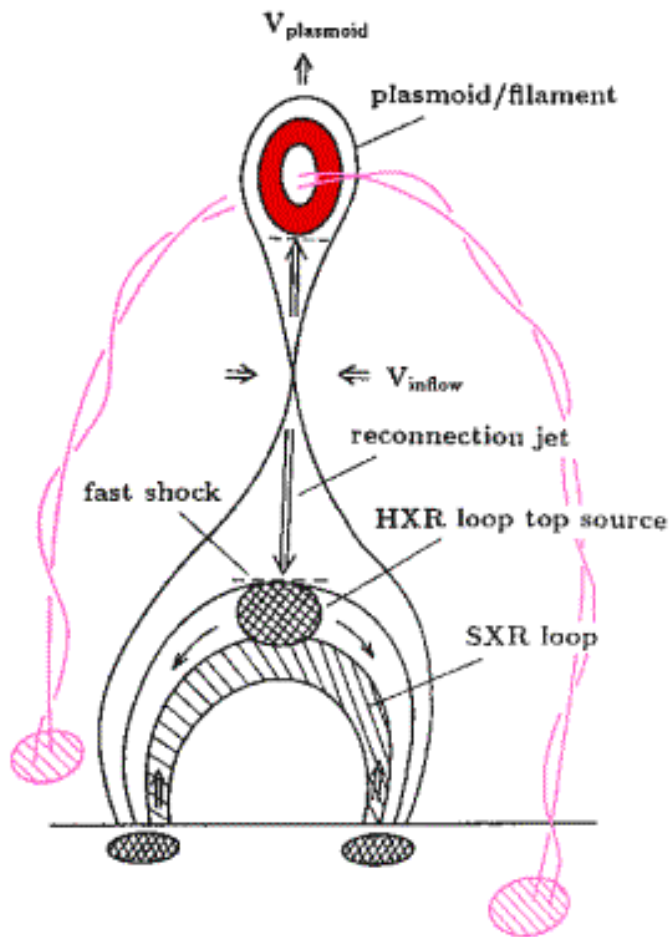
	光球	色球和日冕
自由能积累	磁场形态 (磁场类型, 磁中性线, 磁孤立奇点) 磁场非势性 (磁剪切, 强磁场梯度, 磁螺度和电流螺度)	暗条 空穴 s型结构等, ...
爆发触发或驱动	磁场演化 (磁通量浮现和对消, 磁结构的剪切和扭转运动)	暗条震荡, 日浪 ...

自由能积累因子

✓

爆发触发因子

?

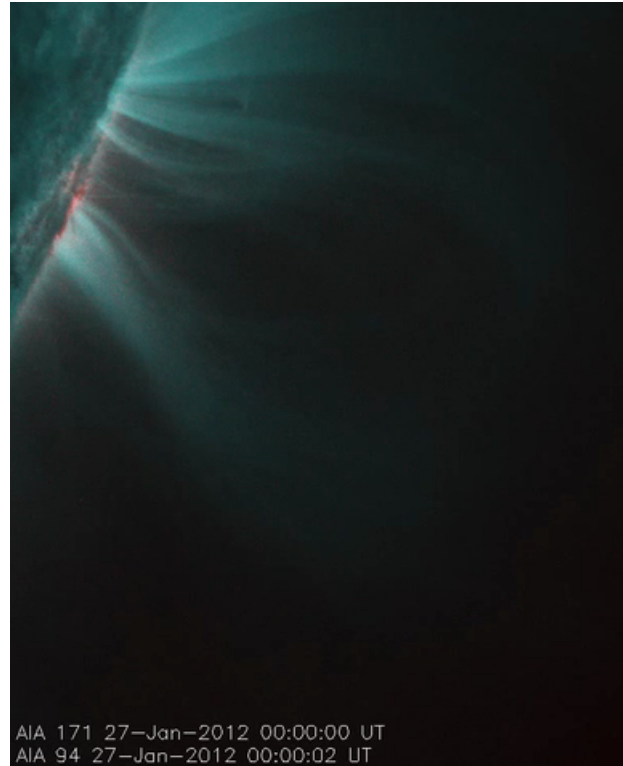


为了解释耀斑现象，人们提出了多种不同的物理模型，这些模型的出发点都是磁重联，如 **Carmichael (1964), Sturrock (1966), Hirayama (1974), 和 Kopp & Pneuman (1976)**。这些模型具有相似的磁位型和动力学过程，因此被统一的称为**CSHKP**模型。后来经过不断的完善,现已成为解释耀斑现象的标准模型,如左图所示。

CSHKP耀斑模型

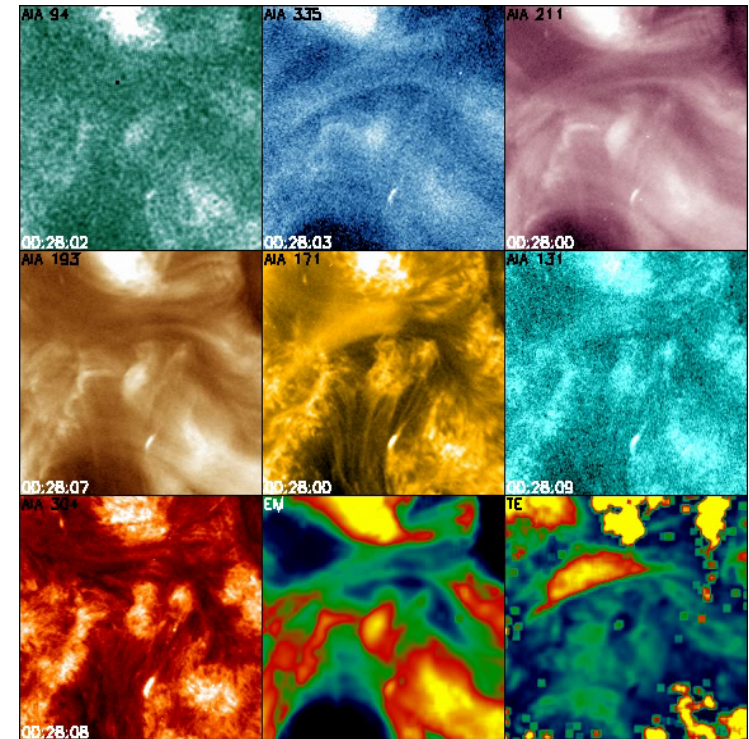
观测实例

太阳爆发过程中的3维磁重联



Sun, et al., Nature- Com., 2014

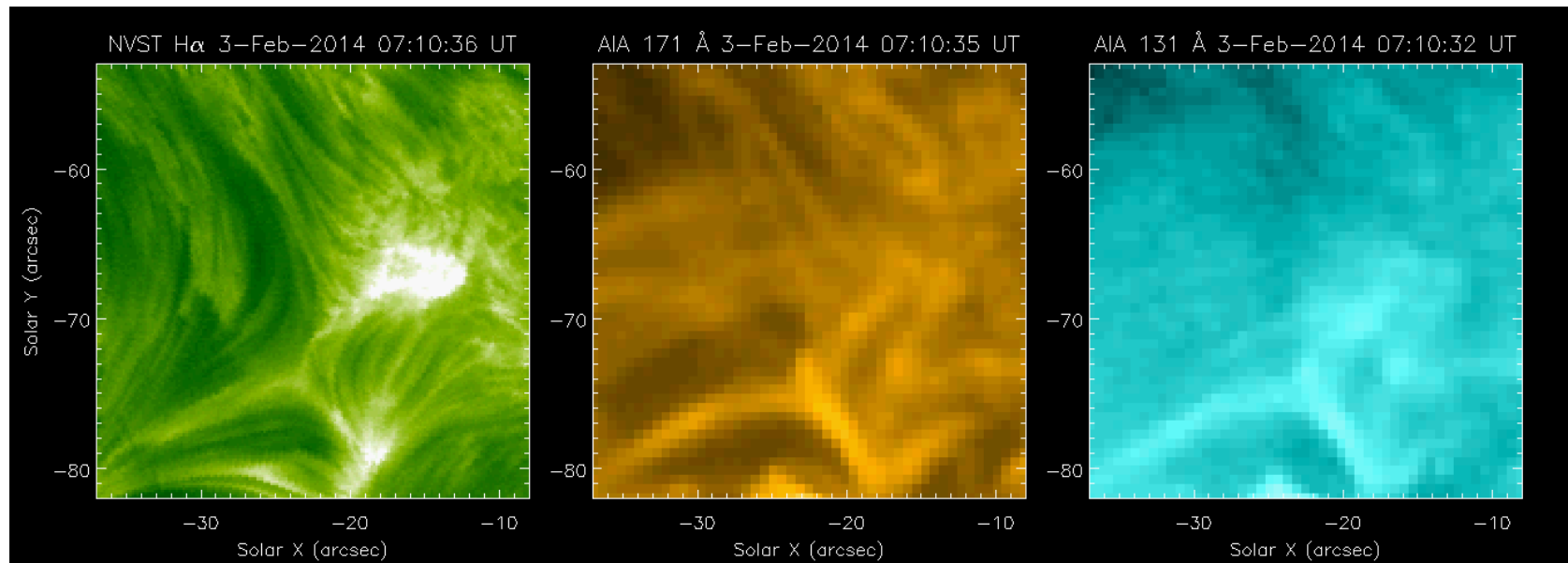
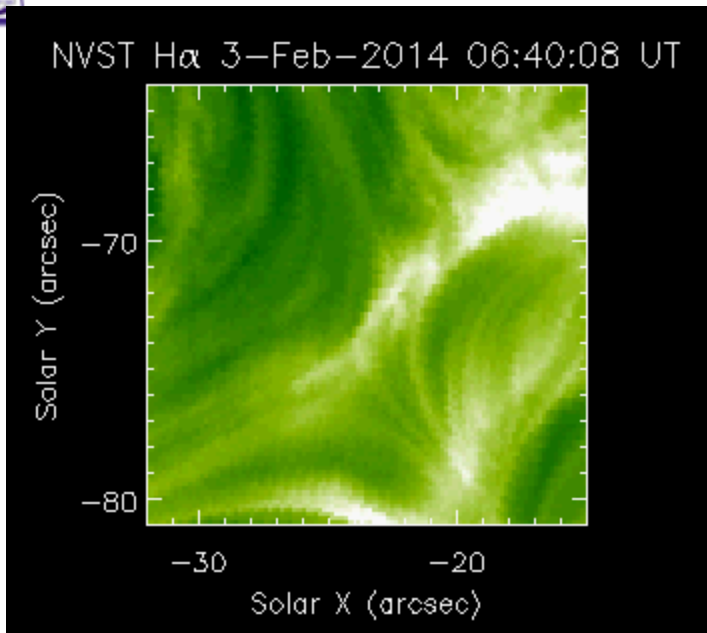
M暗条与邻近磁环的重联



Li, et al., Nature-Phy., 2016

观测实例

色球和日冕中的慢速与快速磁重联。S
(Yang et al. , ApJ, 2015)



(4) 关键科学问题

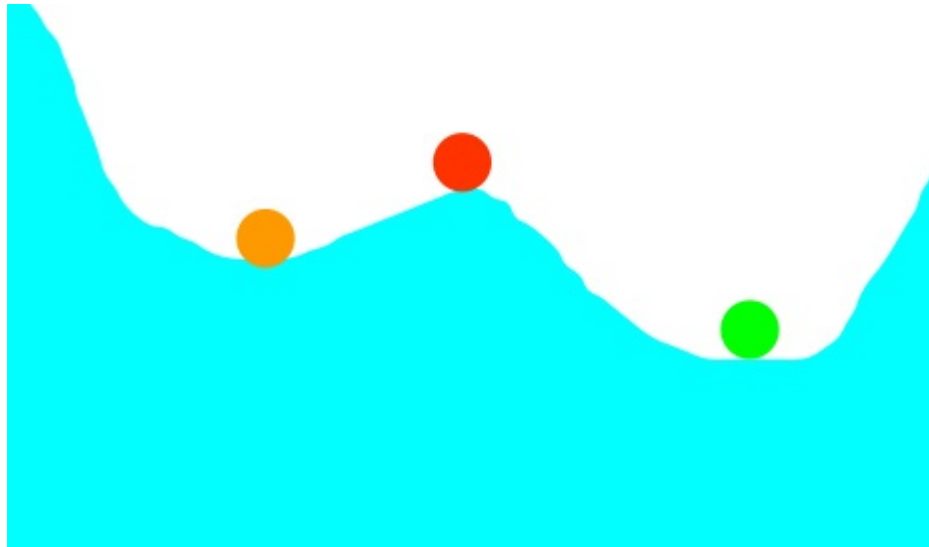
太阳爆发（如耀斑和日冕物质抛射）引起的扰动通过行星际空间传播，并在太阳风中形成可能强烈影响地球邻近空间环境的激波。预测这些扰动面临两大难题：

什么时候、怎样发生？（突发性）

是否影响地球邻近空间？（危害性）

自由能量积累—系统失稳过程

自由能量是指系统容易释放的那部分能量。对于一个系统而言，自由能量是相对系统稳定性而言的。系统稳定性减少对应着系统自由能量的增加。太阳磁场从势场变为非势场就是一个失稳过程。非势性增加意味着稳定性减少，自由能量增加。

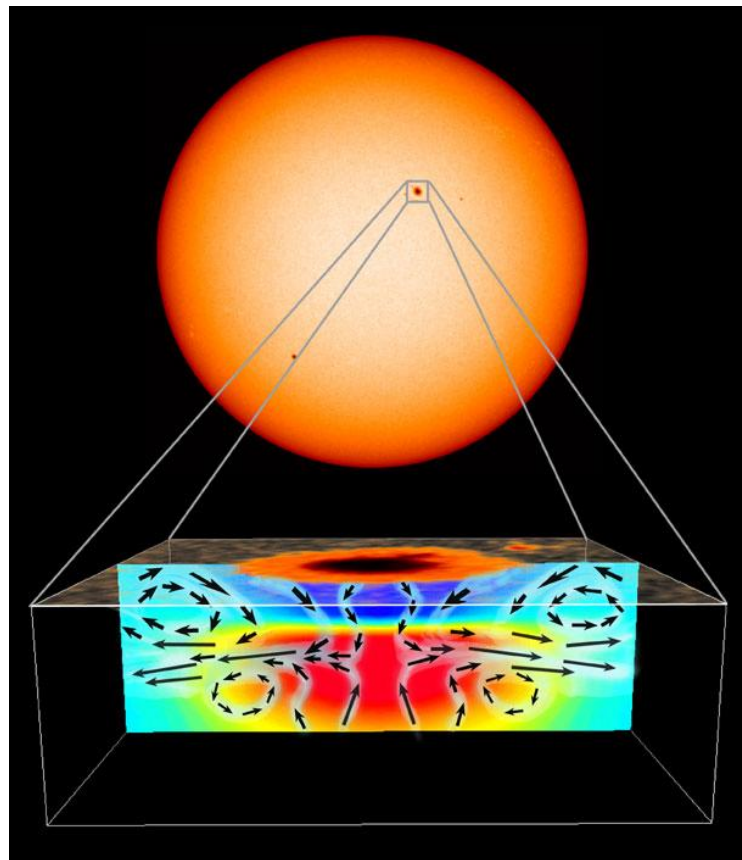


我们知道红球最不稳定，但预测它什么时候如何滚下来却很难！

自由能量积累需要驱动源头

自由能量积累是系统从相对稳定逐渐变为相对不稳定。这个变化是缓慢的，有时是不易察觉的。

无论如何变化，都需要驱动源头。太阳磁场扎根于太阳对流层，其自由能量积累来自光球层以下的驱动过程。



自由能量释放-系统状态的突变

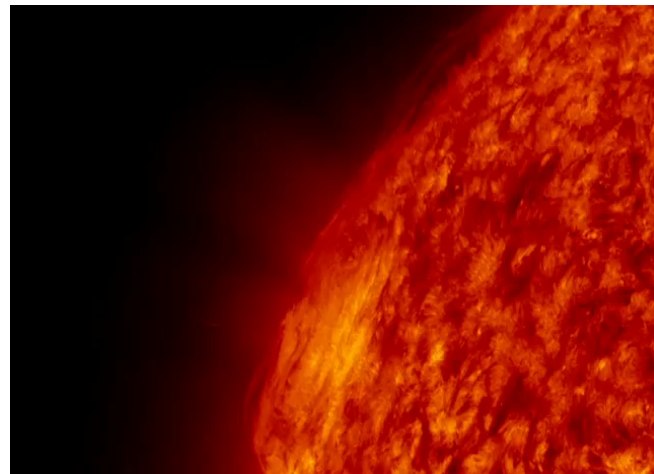
自由能量释放是一个由量变到质变的过程。相应的系统的状态也要发生改变。太阳爆发就是太阳磁场自由能量的大规模释放，伴随着太阳磁场结构变化。

然而自由能量释放往往需要起因一个很小的扰动事件。这个很小的扰动事件往往是不可预知的。更重要的是，对于非线性系统而言，扰动传播和放大也是难于估量的。因而就形成了自由能量释放过程的突发性。

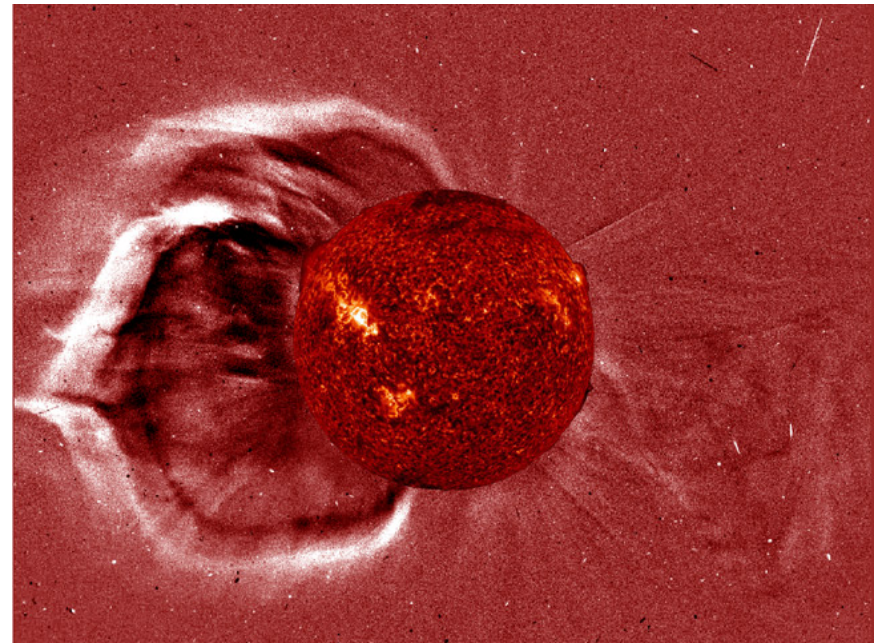
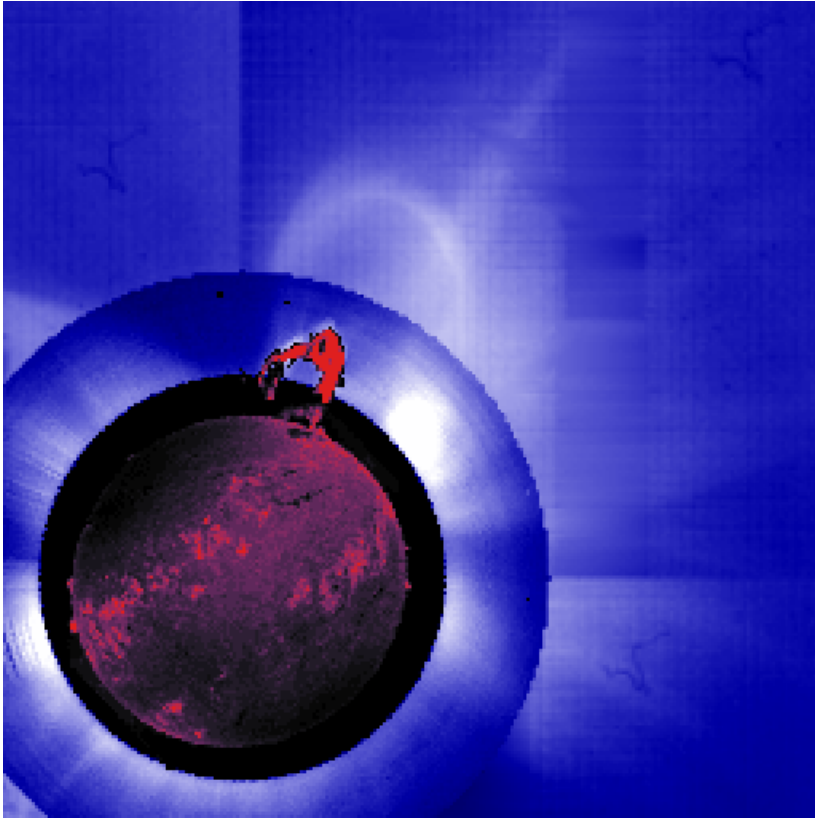
第一难点 太阳爆发突发性

系统的自由能量积累（或失稳过程）会有多种迹象。对于太阳磁场自由能量积累我们也能找到多种迹象。甚至我们能够用逻辑模型量化太阳磁场自由能量积累的程度。但我们对于自由能量释放的突发因素依然把握不准。因而迄今为止，太阳爆发预报都是属于给定时段内的概率预报，不是太阳爆发产生时刻和强度的准确预报。寻求爆发的群体特征和先兆特征是克服突发性难点的实用方法。

 This image cannot currently be displayed.



多个太阳爆发的时空关联蕴含爆发的群发特征



利用夏威夷冒纳罗亚山太阳天文台（**MLSO**）日冕图像和**SOHO**图像制作

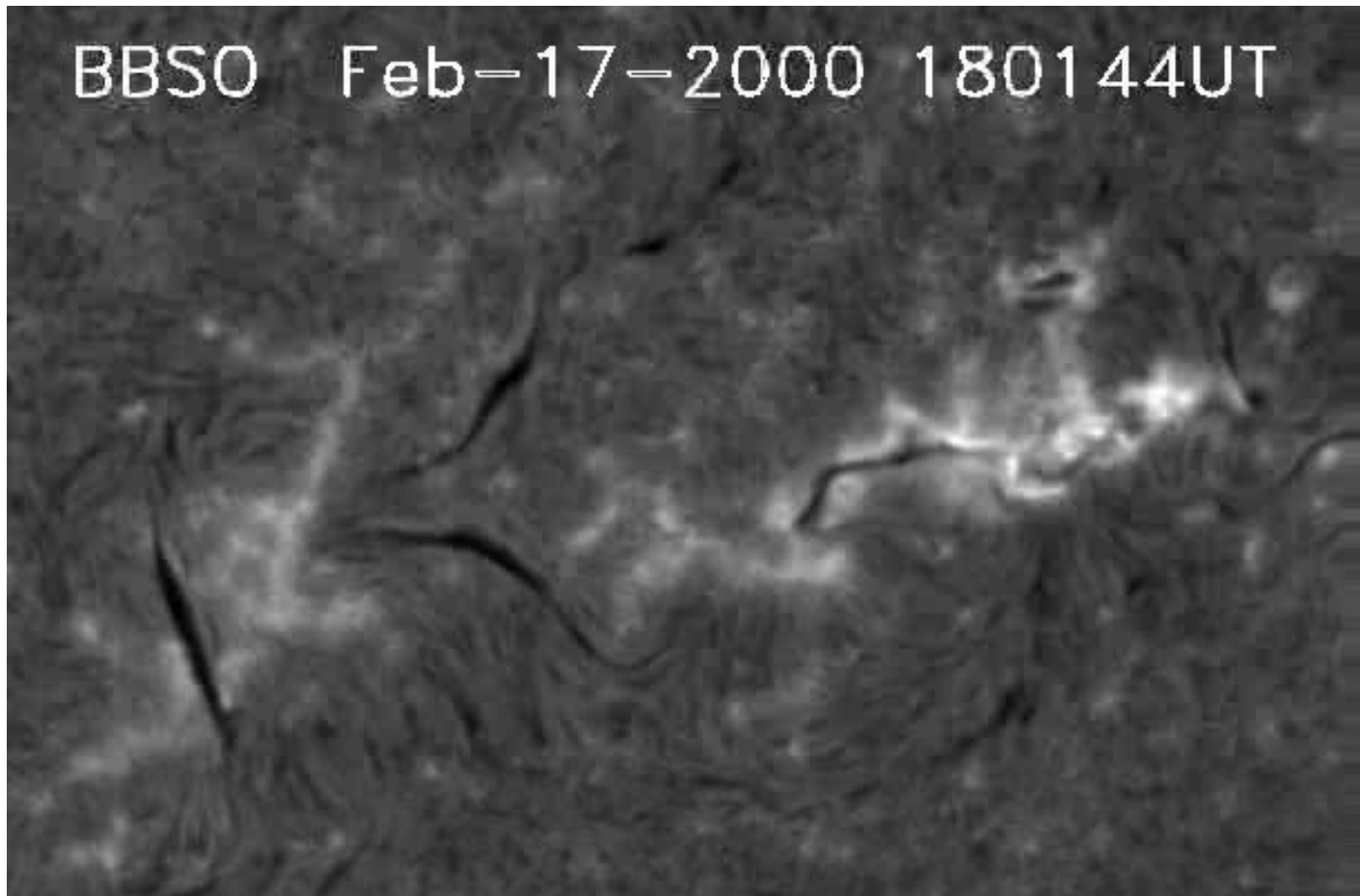
太阳爆发触发原因多样

导致爆发产生的扰动可能来自遥远的地方。

 This image cannot currently be displayed.

2000年7月14日AR9077活动区中的色球耀斑，国家天文台怀柔太阳观测基地提供

相邻活动区互相影响



美国大熊湖天文台提供

第二难点 太阳爆发对地有效性

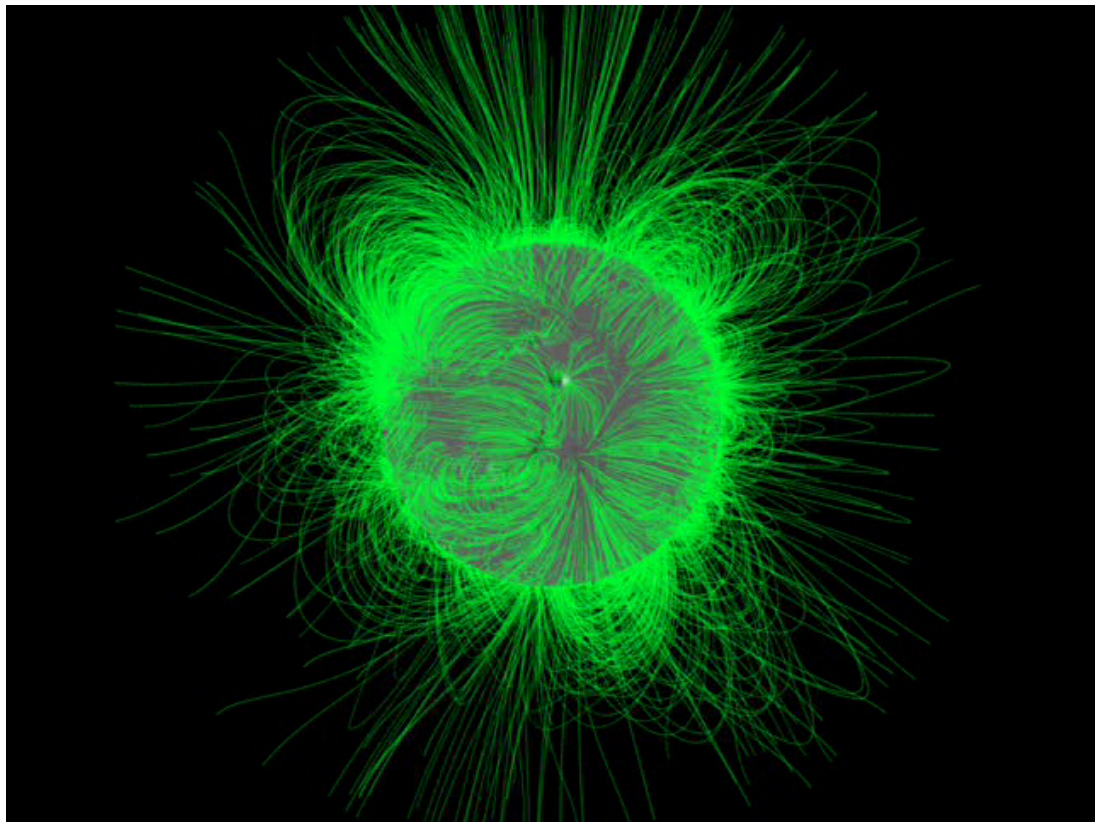
太阳耀斑的电磁辐射对地有效性主要表现为在8分钟以后对地球空间产生直接影响。

耀斑加速粒子和日冕物质抛射对地有效性受源区日面位置、太阳自转、太阳风、行星际磁场结构和地球公转影响。

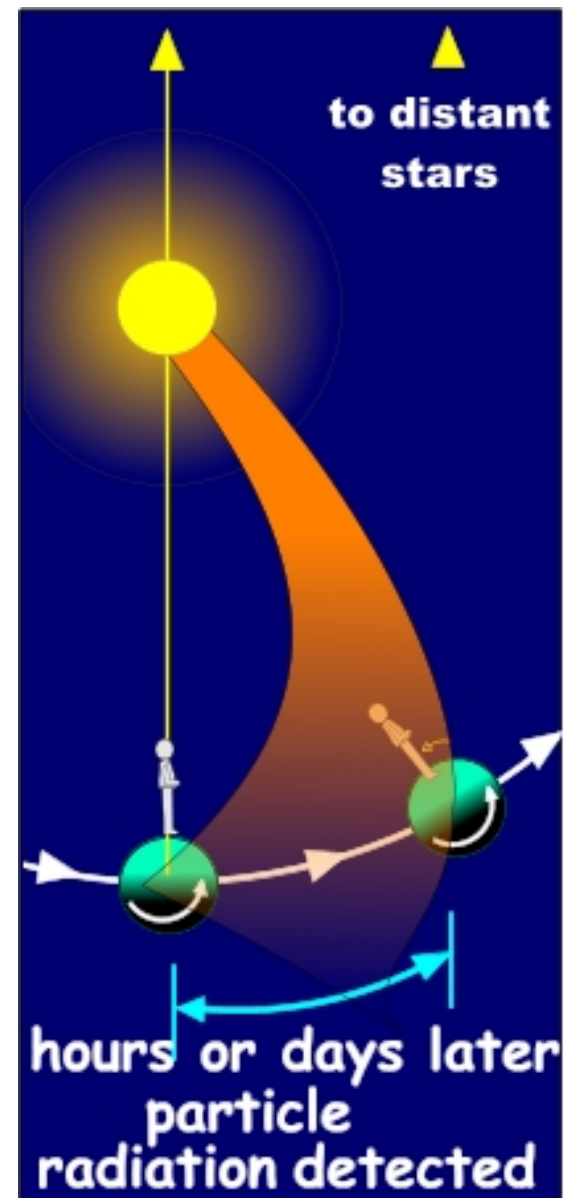
耀斑加速粒子对地影响大约在数十分钟~数小时之后，而日冕物质抛射对地影响是在数十小时之后。

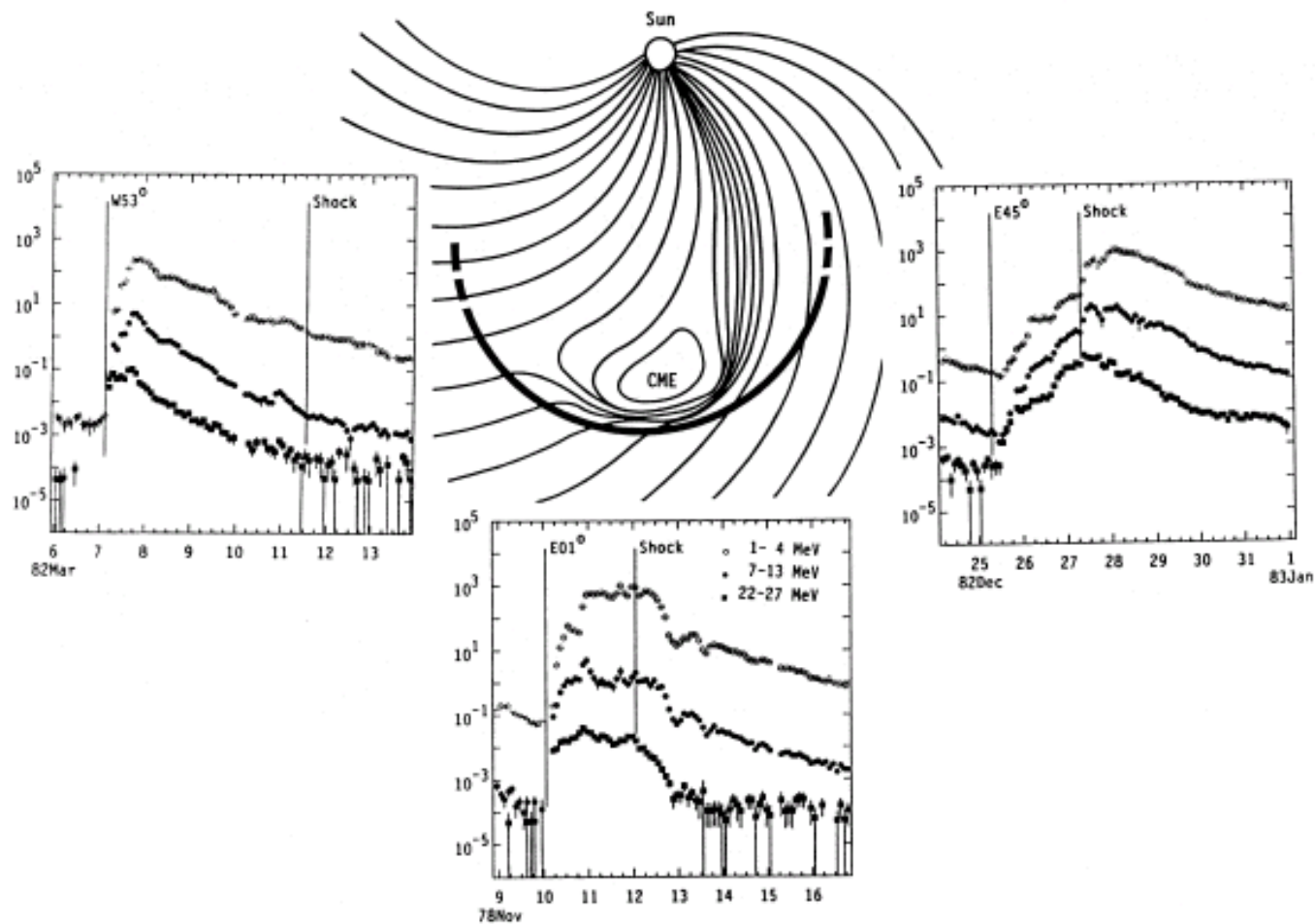
这就使得太阳爆发对地有效性成为一个复杂的日地物理问题。需要多学科综合分析方能得到解决。





以光球磁场为边界条件外推的日冕磁场



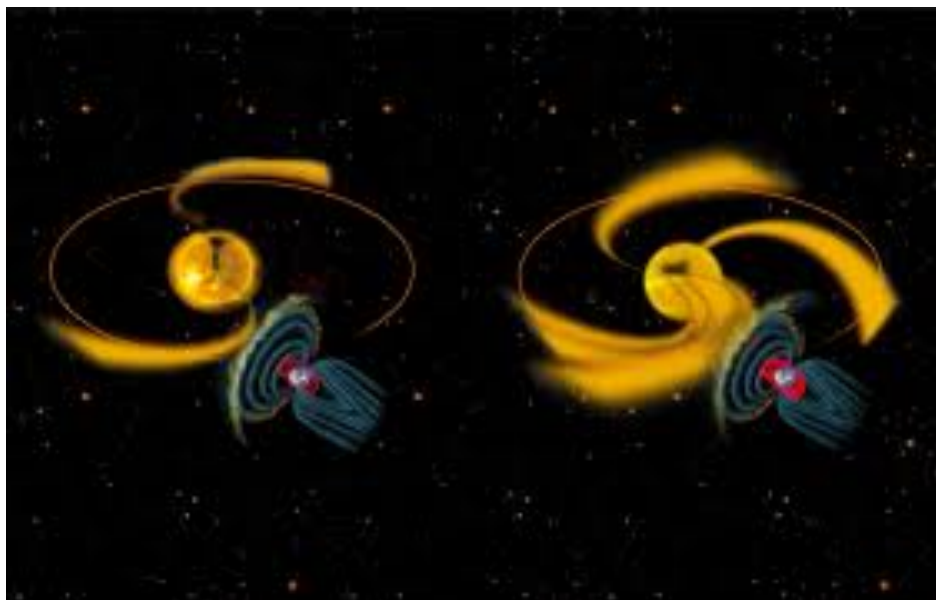


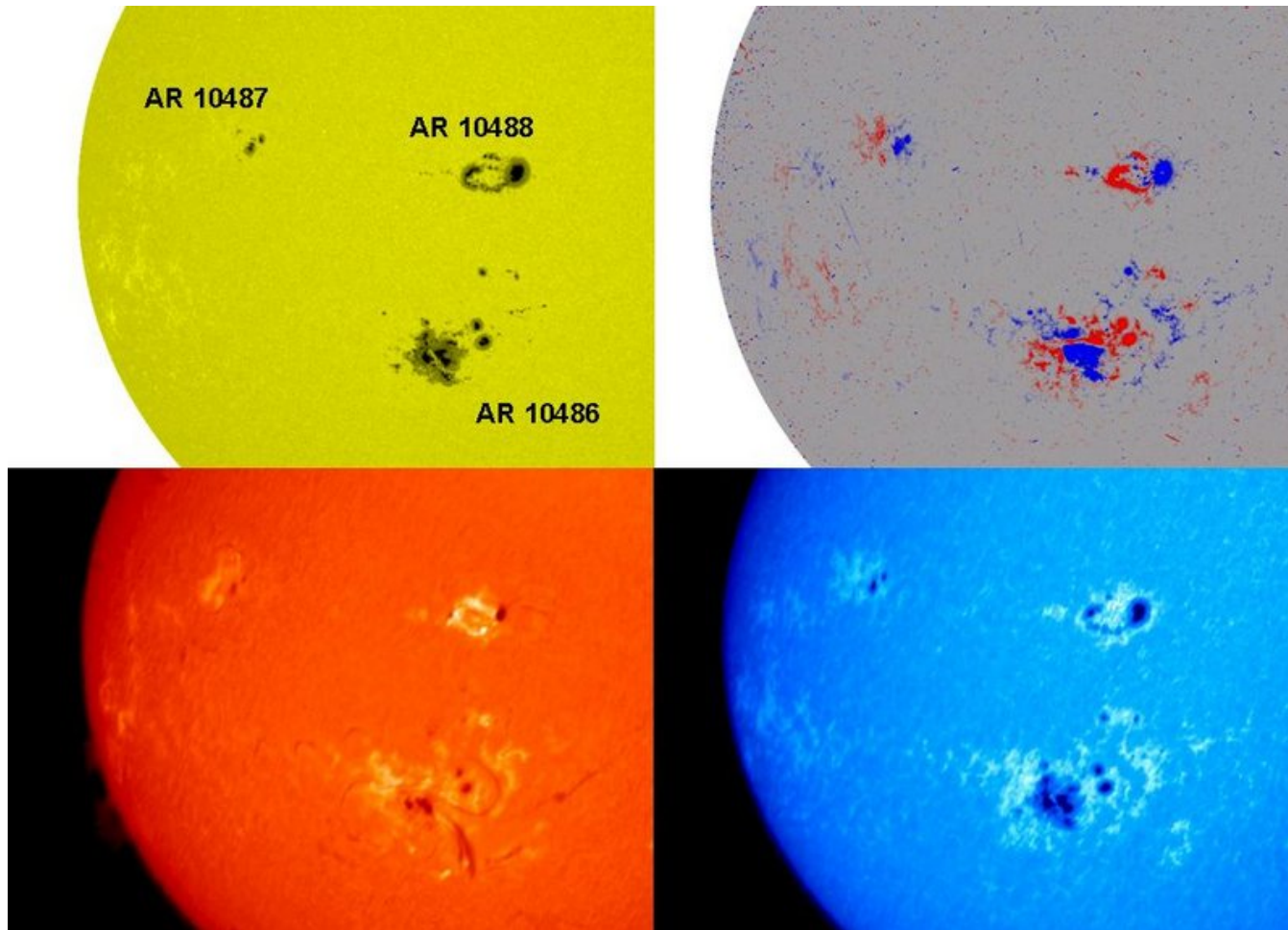
粒子流量受太阳自转、激波形态、行星际磁场和地球公转影响产生的观测特征 **Reames et al., 1996**

(5) 新型太阳活动预报产品

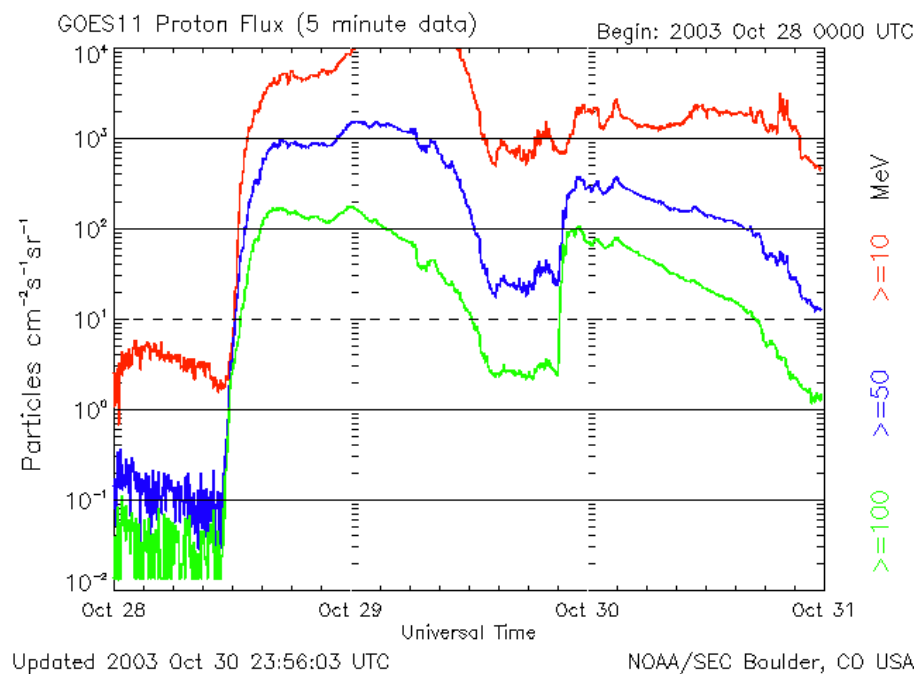
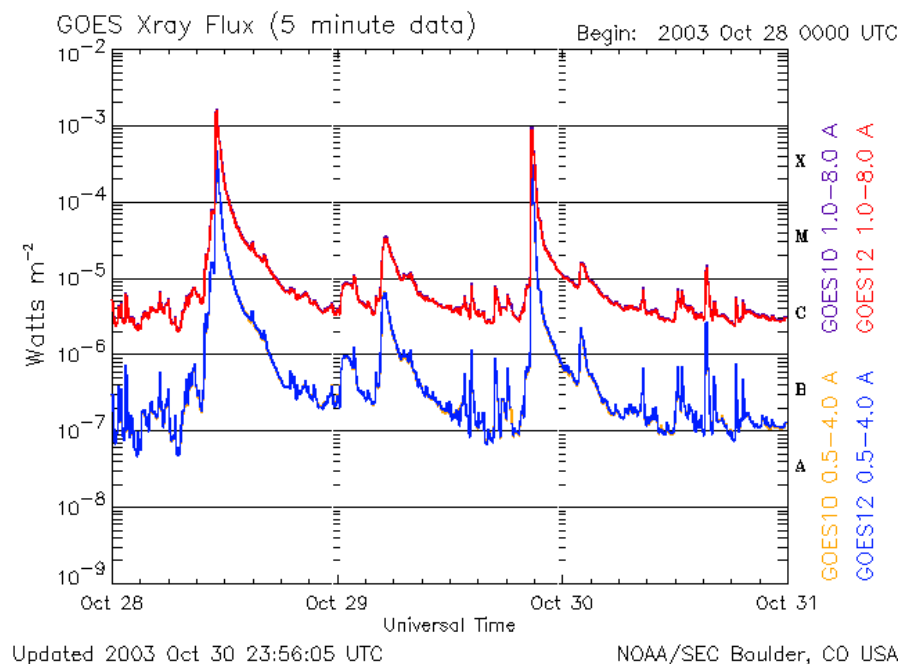
预报新概念

传统的太阳爆发概率预报显然不能充分表达太阳爆发的危害性。太阳爆发的频率是形成灾害性空间天气事件的重要条件之一。超级活动区的出现往往意味着太阳爆发的频率迅速增加。仅有频率增加还不能确定爆发是否对地产生影响。需要进一步考虑这些群发的爆发现像的主要打击方向。



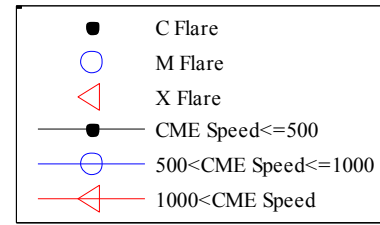
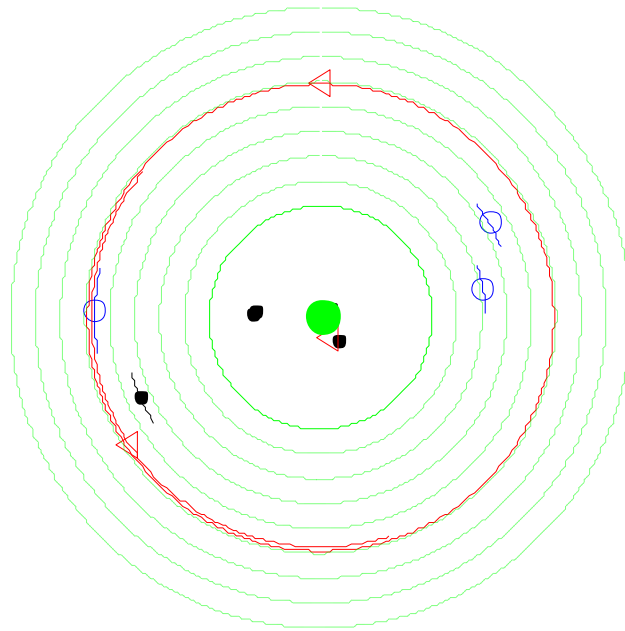


万圣节事件

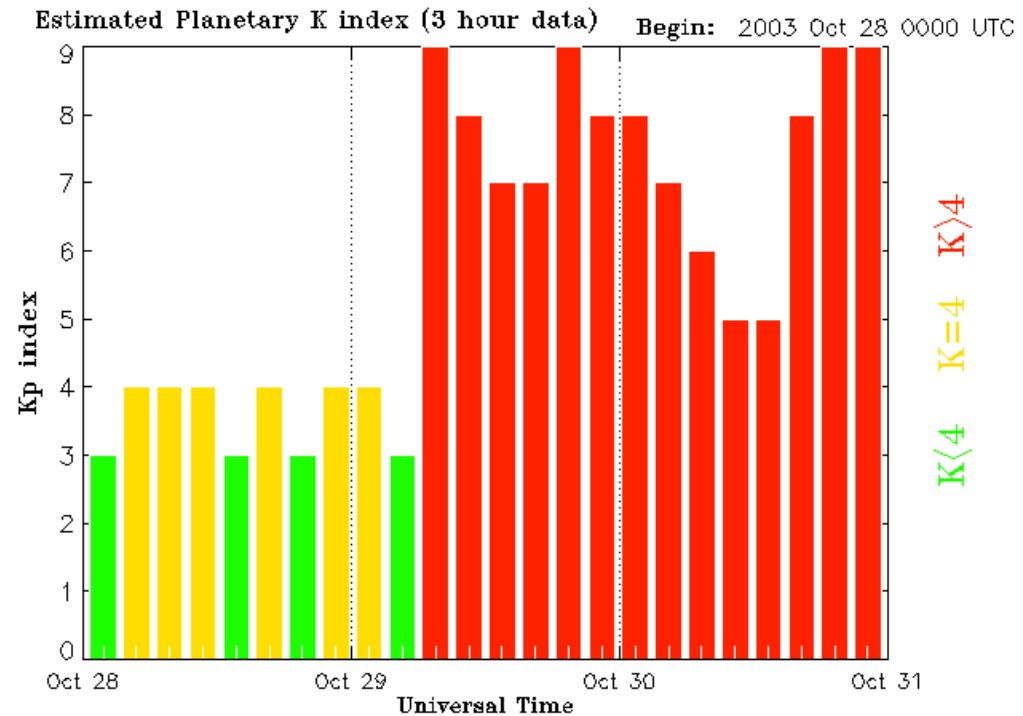


X射线流量与高能粒子流量图

28-Oct-2003



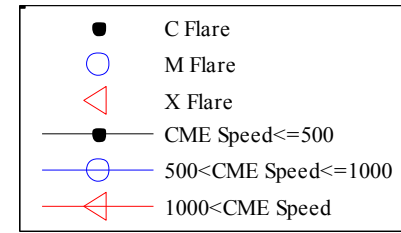
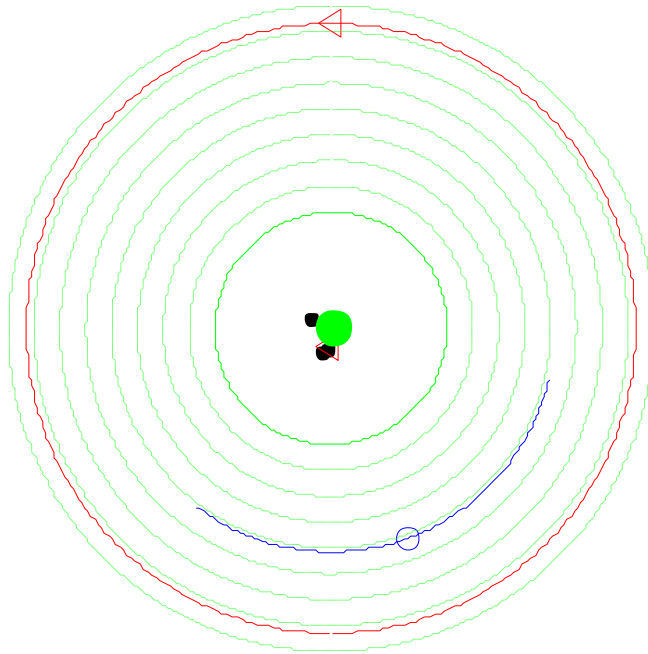
太阳活动态势图



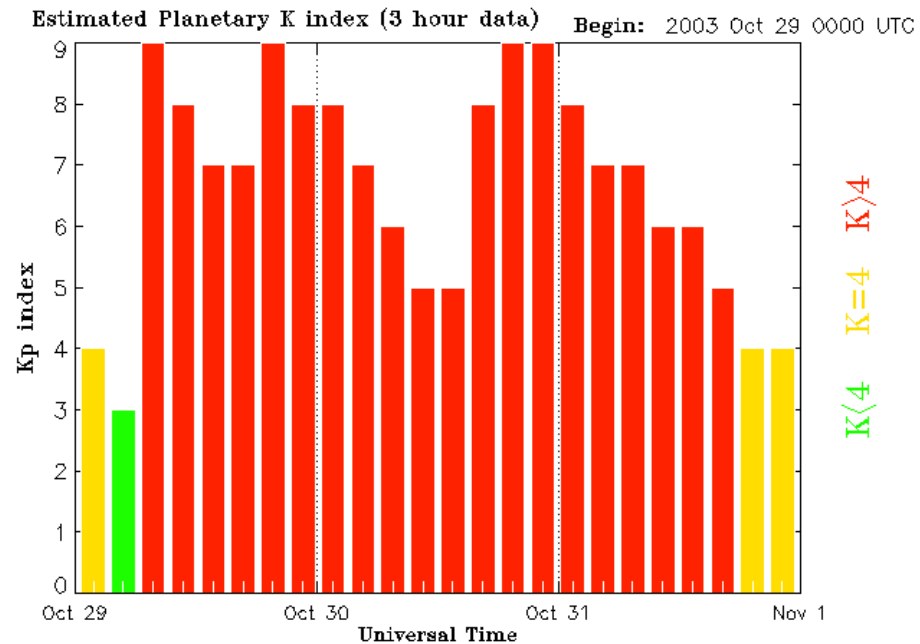
Updated 2003 Oct 31 02:45:02 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA
National Astronomical Observatories, CAS

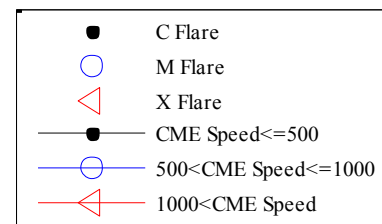
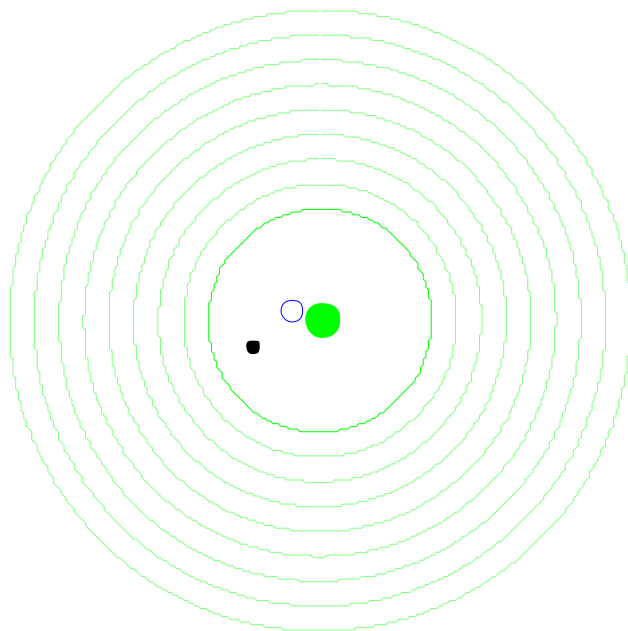
29-Oct-2003



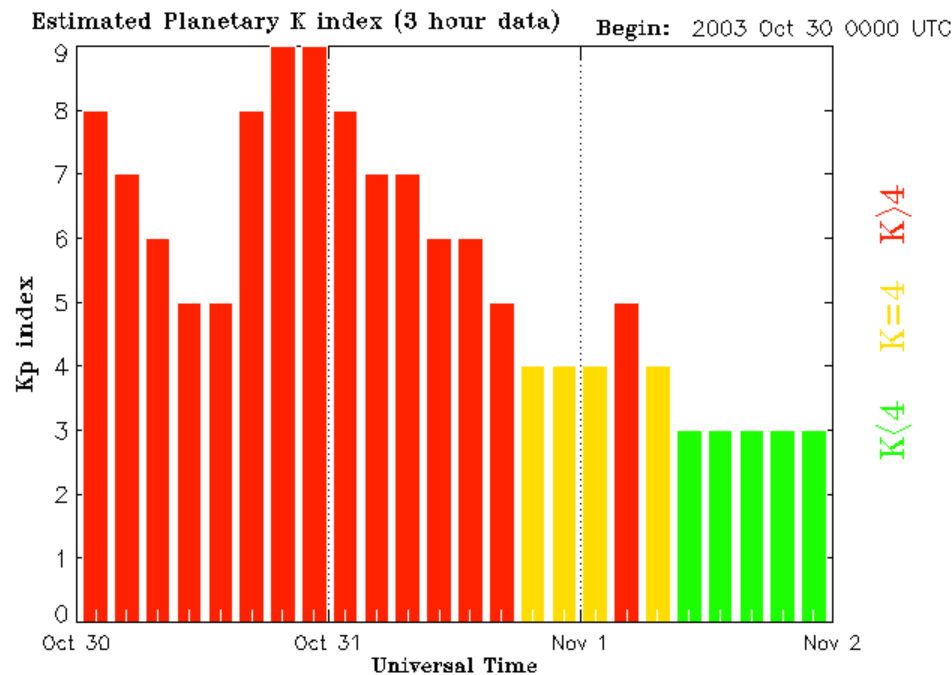
太阳活动态势图



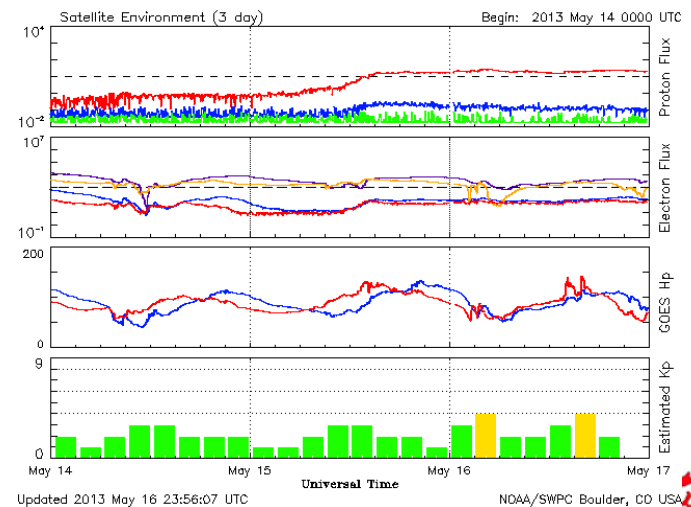
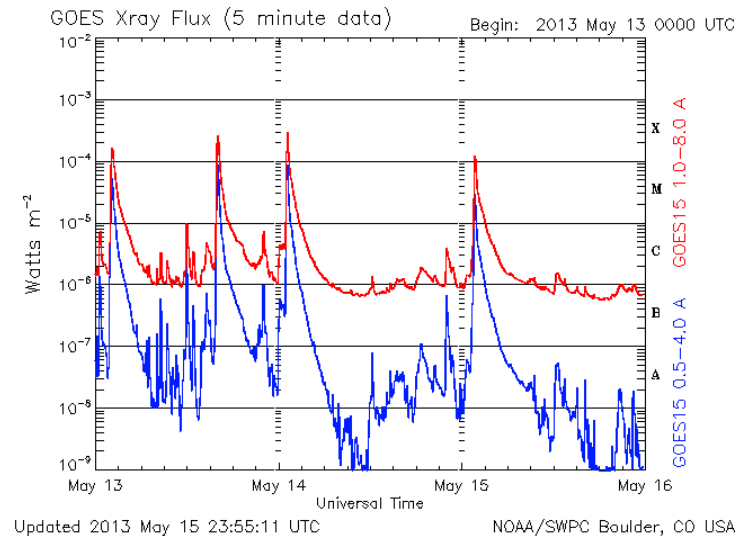
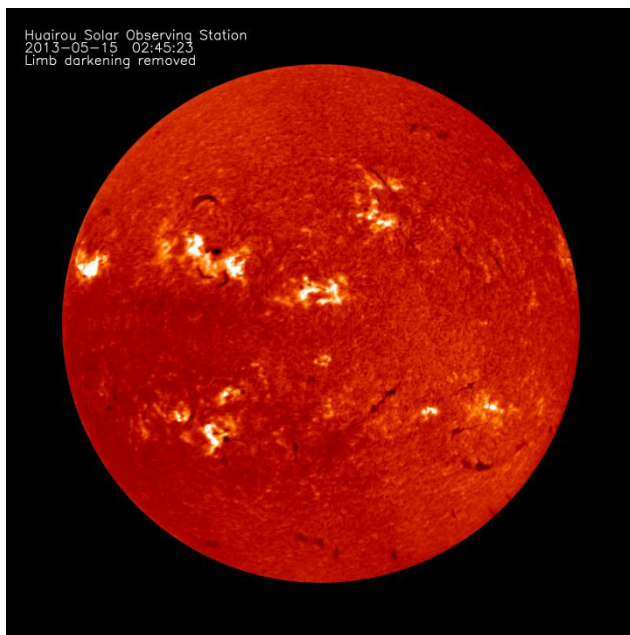
30-Oct-2003



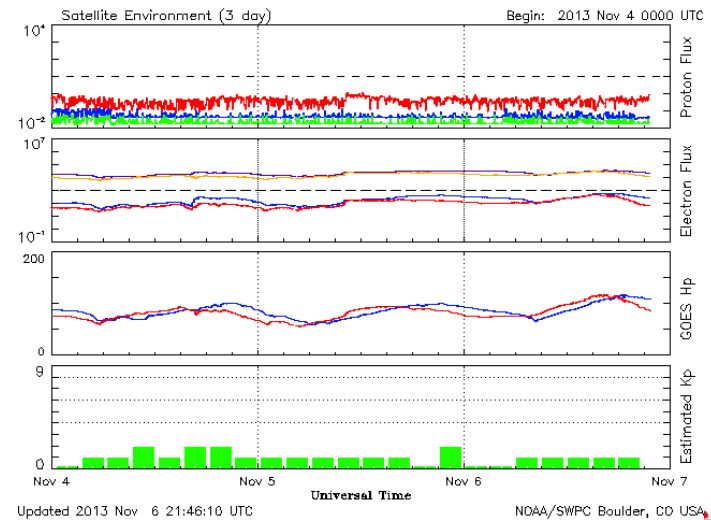
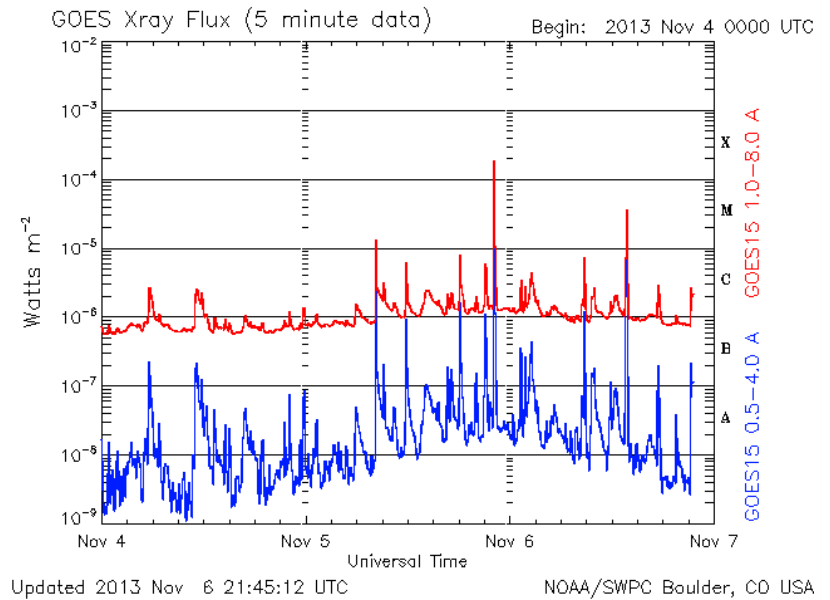
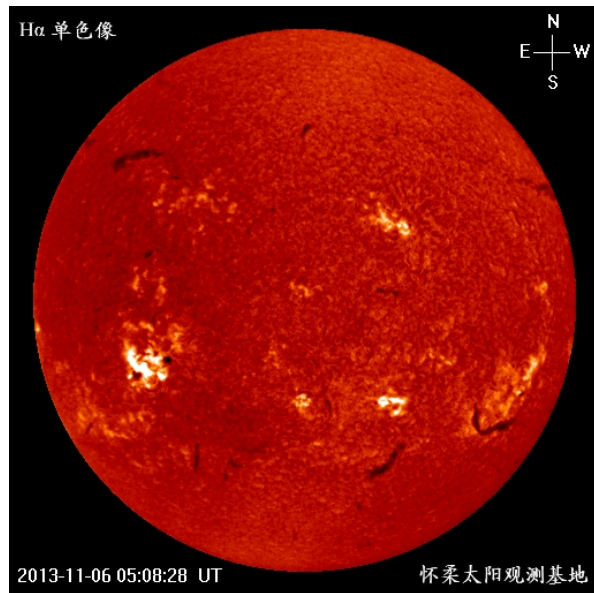
太阳活动态势图



AR11748 (N12E40), 2013, 5. 13-16



AR11890 (S11E36), 2013, 11.5-6





定义

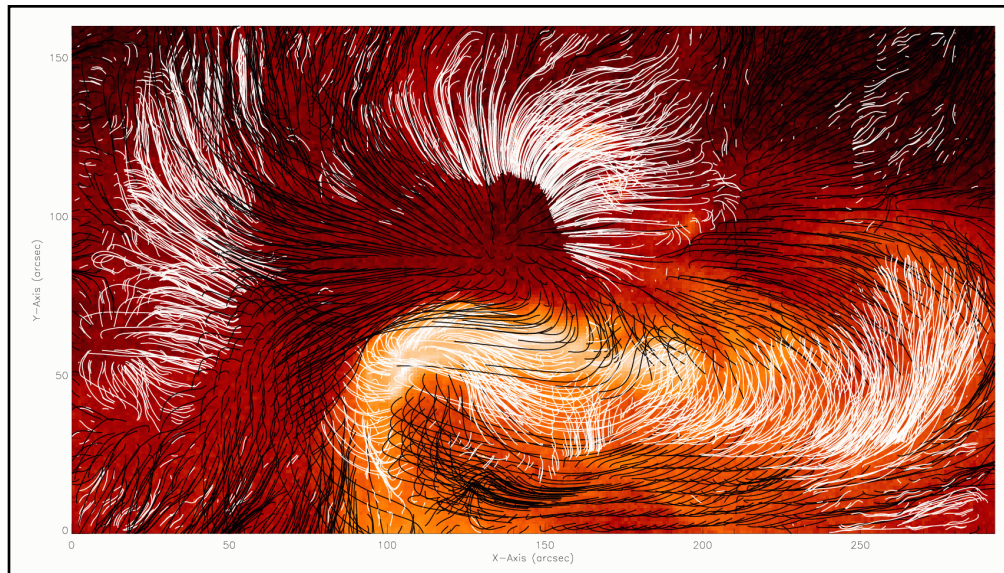
爆发频率 = 爆发数量/给定时间长度

主要打击方向：爆发源区喷发的等离子流可能的打击方向

所需主要分析工具

- (1) 太阳 矢量磁场和多波段成像观测
- (2) 日冕磁场重建
- (3) 日冕物质抛射三维重建

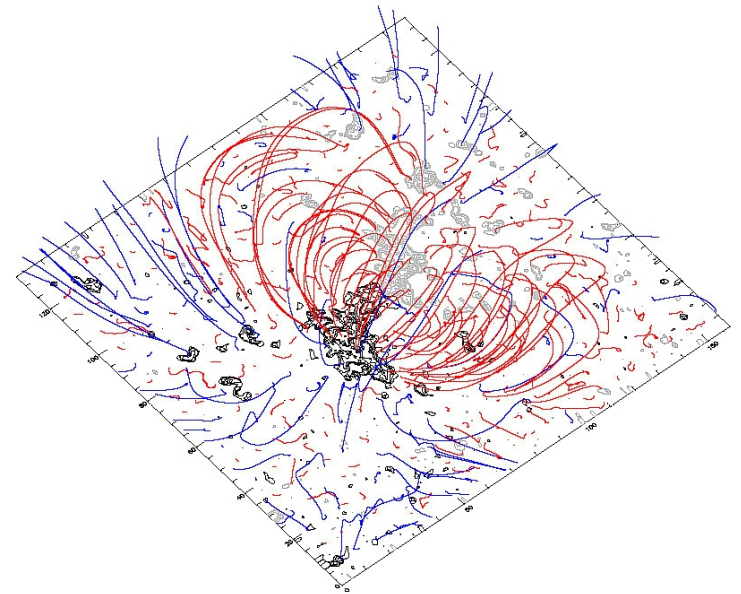
无力场和有力场重建



无力场

AR10930

He et al. JGR, 2009



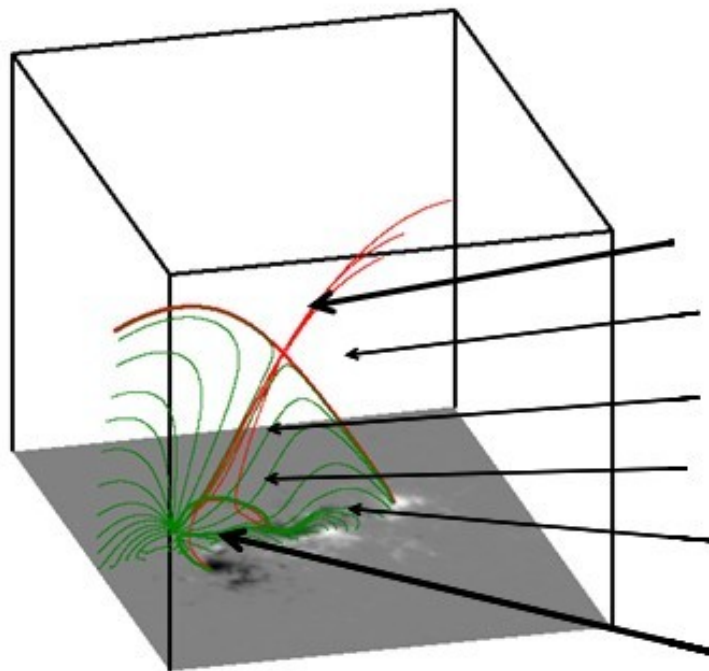
有力场

AR11187

Zhu et al., ApJ, 2013

see also poster PSA-01

NOAA11158活动区三维磁场重建与拓扑结构分析



Null : (74,100,56)

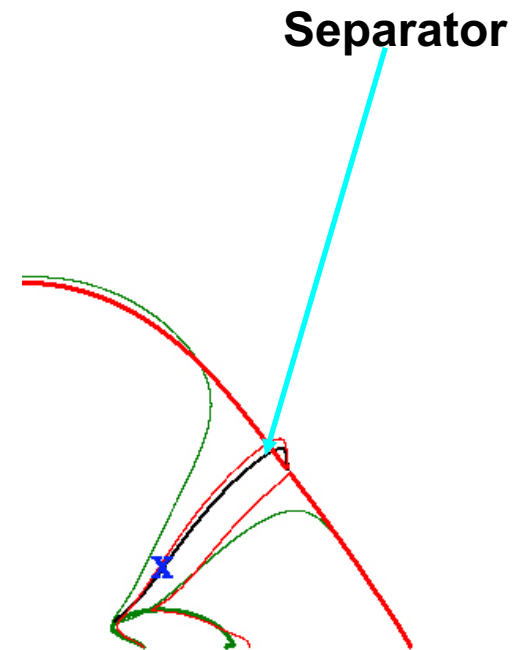
spine

fan

spine

fan

Null : (30,77,5)

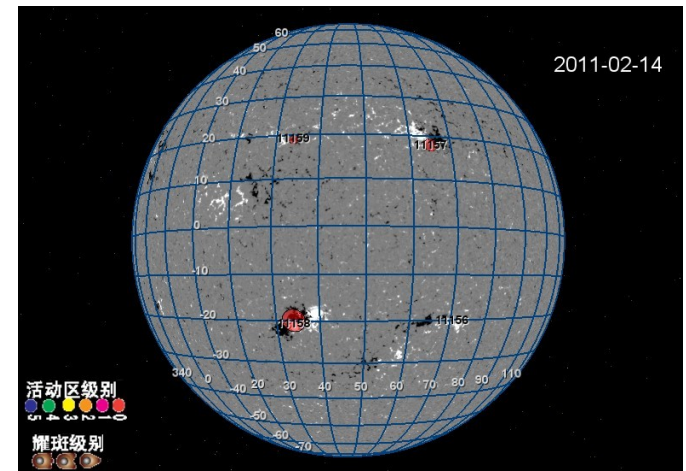


2011.02.14 14:24:00(UT) 1unit = 1500km

CME and flare lists obtained from observations of SoHO/Lasco and GOES 15 X-ray flux during the first 20 hours of 2011, Feb. 14

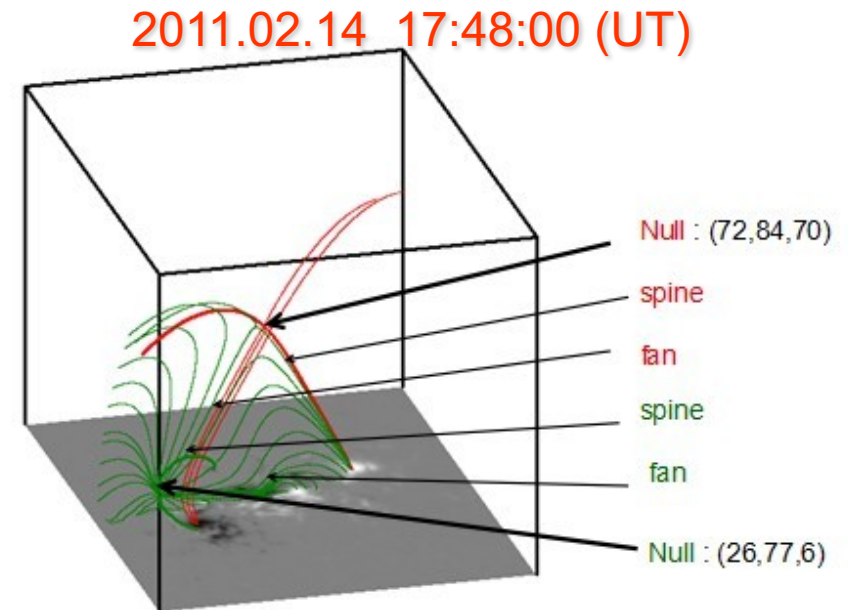
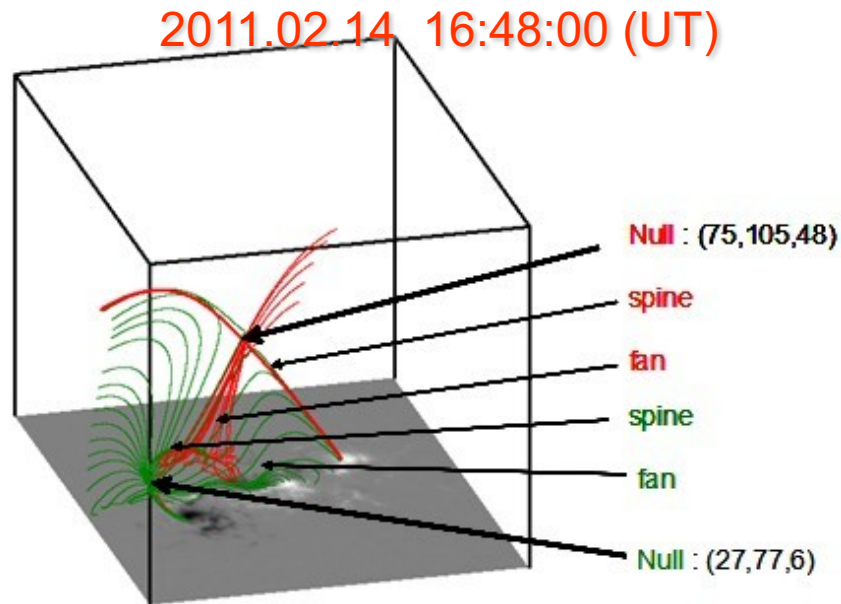
CME s (2011.02.14)	Central PA(deg)	Angular width (deg)	Linear fit (km/s)	Second order fit (m/s ²)
No1: 17:24:05	270	40	333	1.4
No2: 18:24:05	317	14	284	26.3
No3: 18:48:06	302	43	309	7.4

dates	begin	end	peak	class
20110214	0235	0246	0242	C 16
20110214	0651	0703	0658	C 66
20110214	0839	0904	0849	C 18
20110214	1151	1226	1200	C 17
20110214	1241	1258	1253	C 94
20110214	1347	1442	1427	C 70
20110214	1720	1732	1726	M 22
20110214	1923	1936	1930	C 66



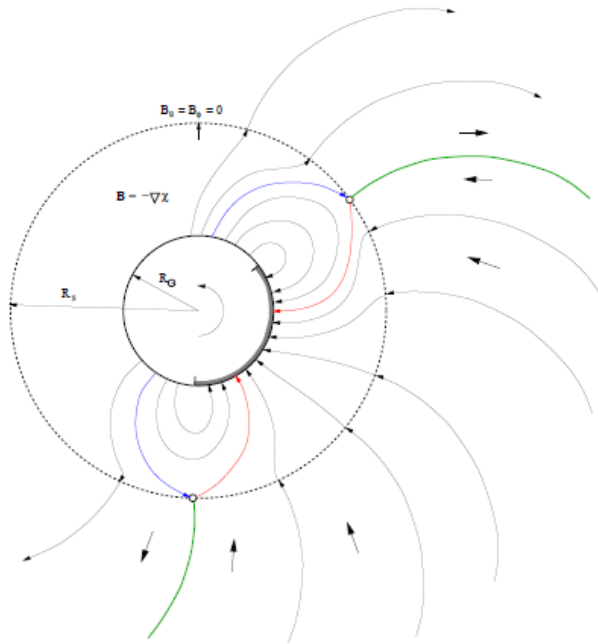
M2 flare time 2011.02.14. 17:20(UT) 1unit = 1500km

After the flare, the height of the red null point increased and the green one unchanged.

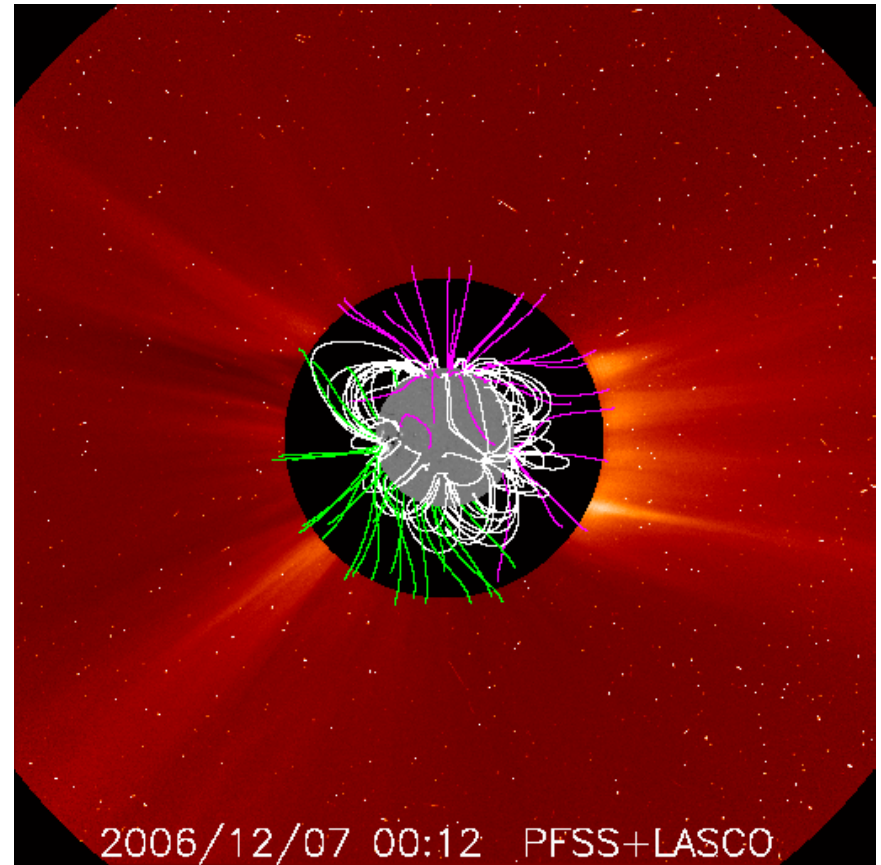


The three CMEs from this active region were ejected in non-radial direction, because all of them were related to the green fan.

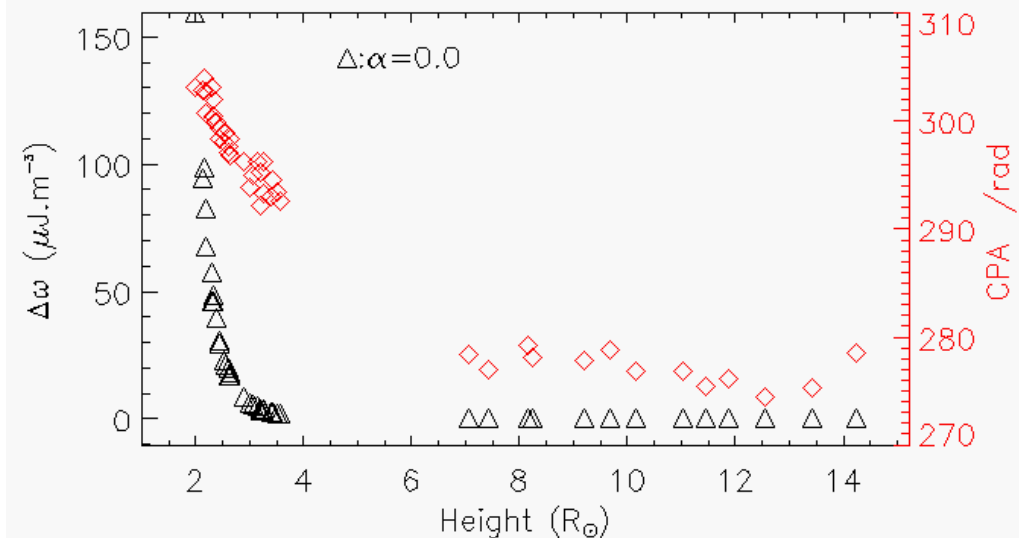
全球日冕磁场重建



PSS Model, Longcope, Living
Rev. Solar Phys., 2006

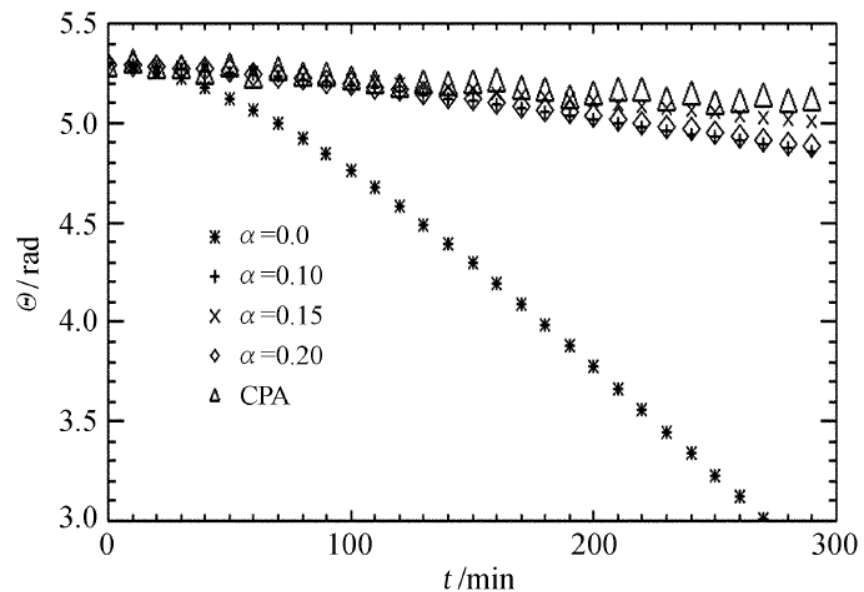


日冕物质抛射与大尺度磁环



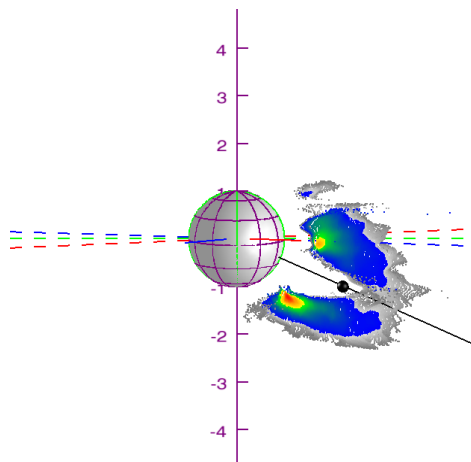
CME运动方向和磁能密度差值随高度的变化。图中三角形‘ Δ ’表示磁能密度差随高度的变化，红色菱形‘ $\diamond$ ’表示CME中心位置角随高度的变化。

实测CME运动方向与通过不同无力因子的线性无力场外推模型所计算的CME运动方向的比较。计算结果表明势场模型外推产生的误差较大。

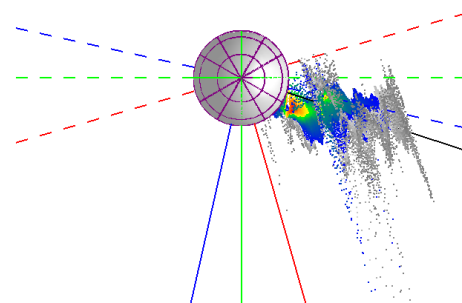


日冕物质抛射重建 (Aug. 31, 22UT, 2007)

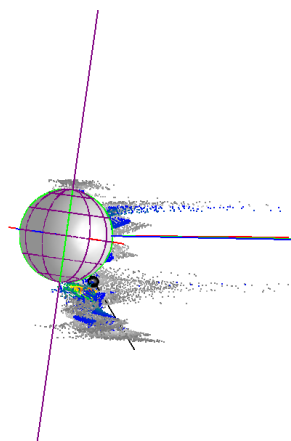
Dai, et al, 2014, ApJ, 780, 141



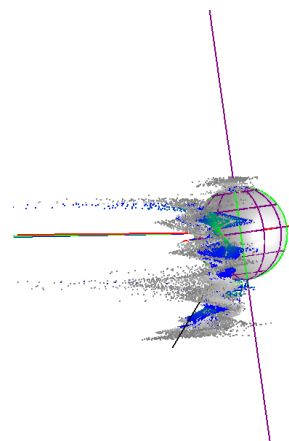
(a) earth direction view



(b) north polar view



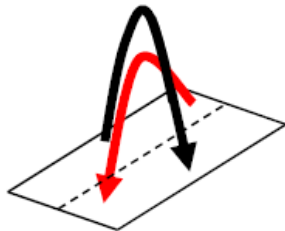
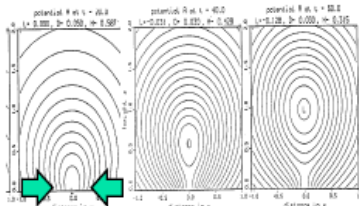
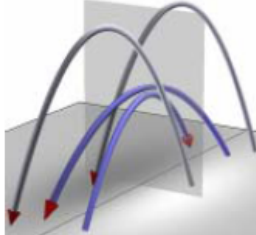
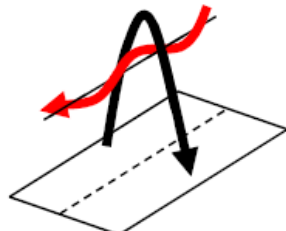
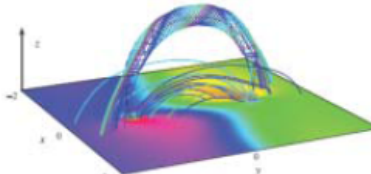
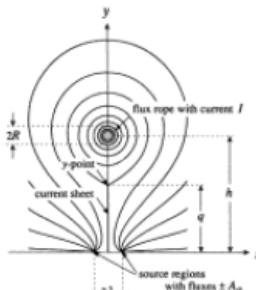
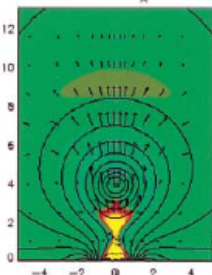
(c) eastern side view



(d) western side view

(6) 数值化太阳活动预报

Different Models of Solar Eruption

trigger				
free energy	shearing (twisting)	converging	emerging	
sheared field		 Mikic, Barns, Schnack 1988 Kusano 1996, 2002	 Inhester 1992 Amari et al. 2000	 Kusano 2008
flux tube		 Isenberg & Forbes 2006 Inoue & Kusano 2006	 Forbes & Priest 1995 Roussev et al. 2003	 Chen & Shibata 2000

3

Kusano et al., 2008

描述太阳大气中物理过程的磁流体力学方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0, \quad \frac{\rho^\gamma}{\gamma - 1} \frac{d}{dt} \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right) = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0,$$

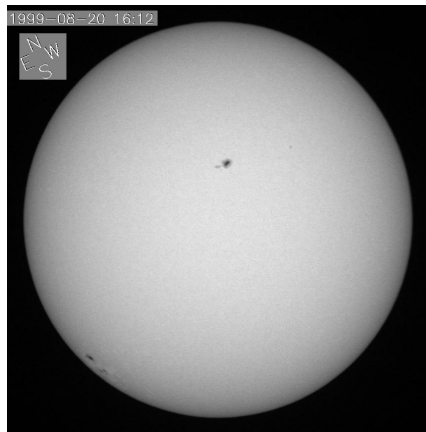
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B},$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla p - \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \times \nabla \times \mathbf{B} + \mathcal{F},$$

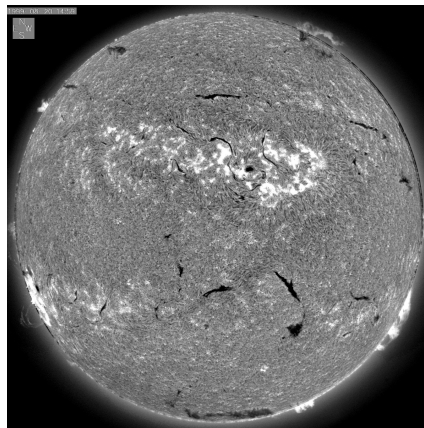
$$\mathcal{F} = -\rho \mathbf{g} + \nu \rho \left[\nabla^2 \mathbf{V} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{V}) \right],$$

$$\eta = 1/(\mu \sigma).$$

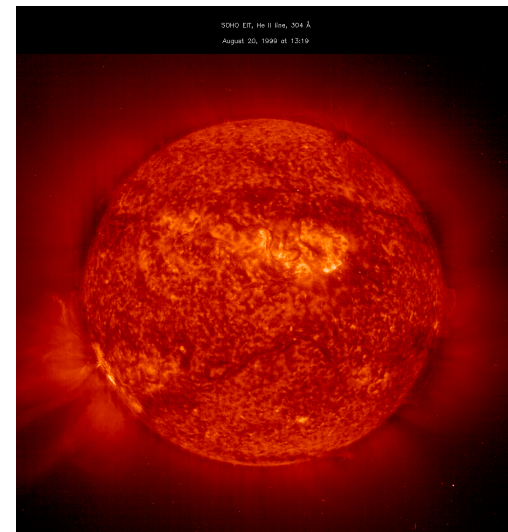
多波段天基和地基观测: 8/20/1999



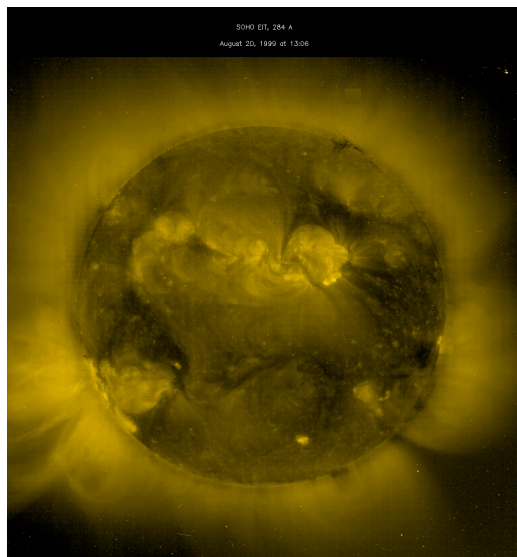
BBSO



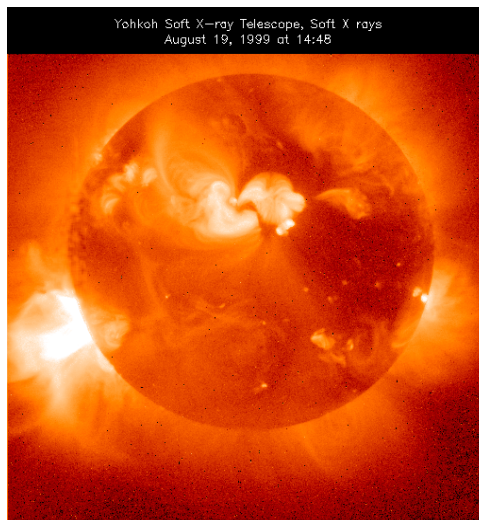
BBSO



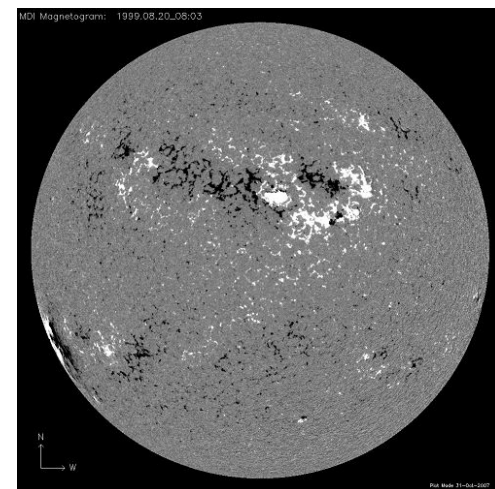
SOHO/EIT

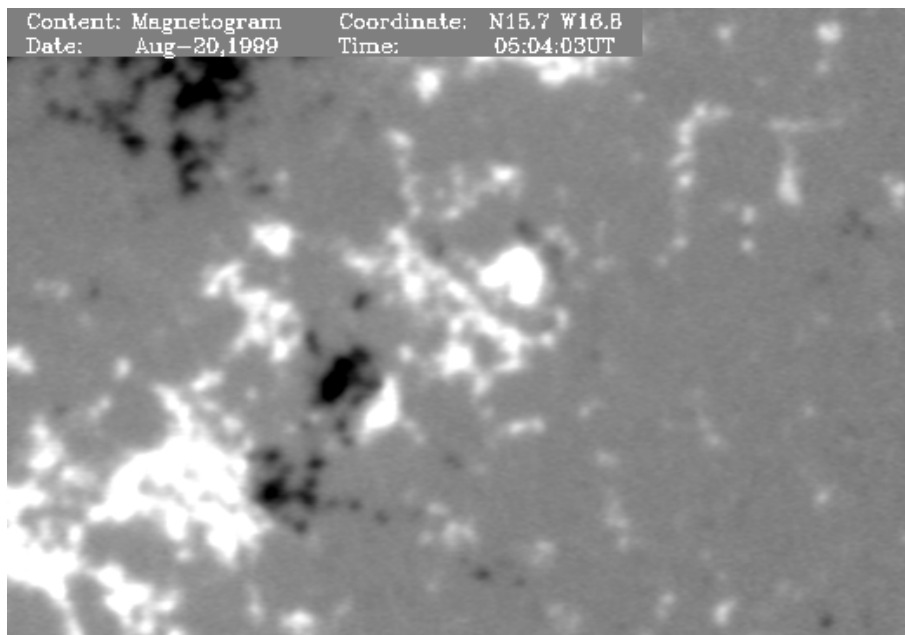


SOHO/EIT

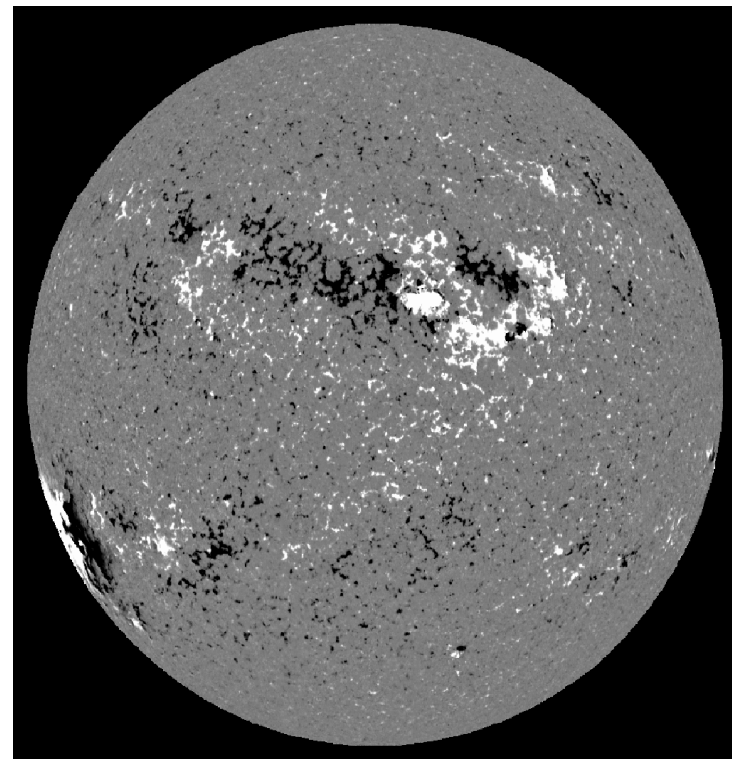


YOHKOH





HSOS



KPNO

时序观测的太阳光球磁场可以作为边界条件

数据驱动数值模拟方法

Roussev, I. I. , et al., 2005; Wu, S. T., et al., 2006

Kusano, K ., et al., 2008; Amari, T., et al., 2014

Jiang C. W., et al., 2016,



Different
models



Different
results



Which one is
reliable?



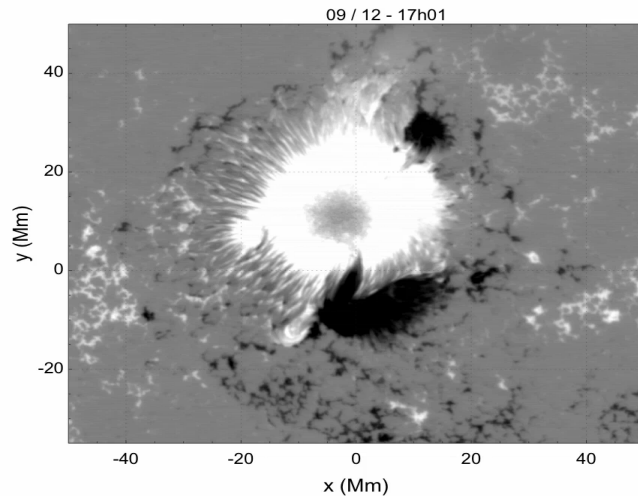
Case studies



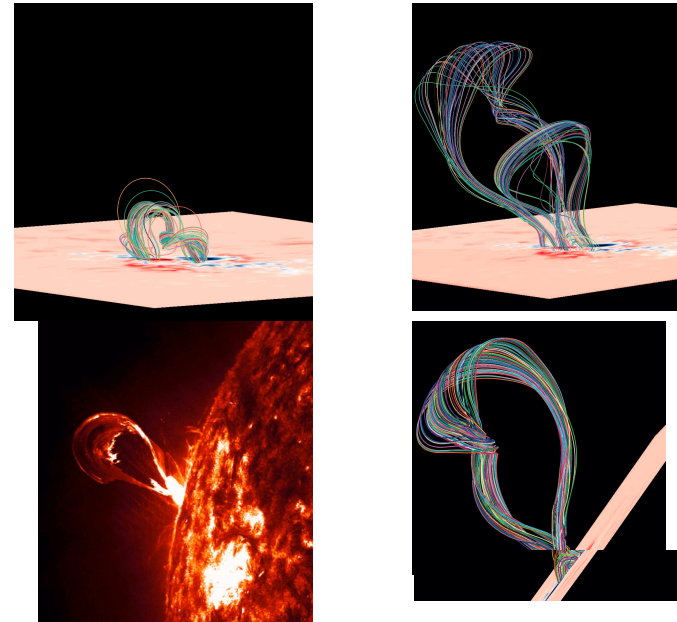
Large sample
surveys



A twisted flux rope moves out of equilibrium or becomes unstable, and the subsequent reconnection then powers a solar eruption (Amari, T., et al., Nature, 2014)

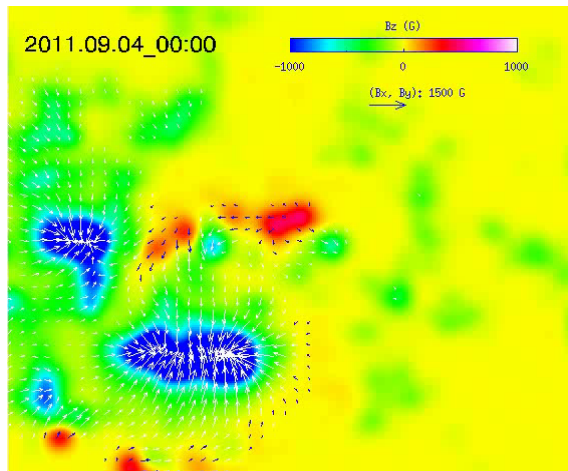


Evolution of the observed magnetic field in AR10930 by SOT/Hinode during the first half of December 2006

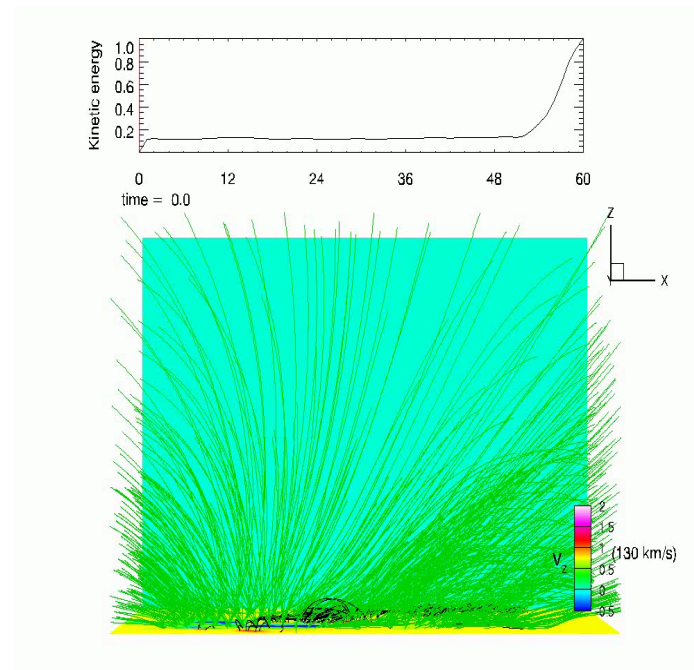


Evolution and eruption of the twisted flux rope driven by photospheric changes

Data-driven magnetohydrodynamic modelling of a flux-emerging active region leading to solar eruption (Jiang, et al., Nature Com., 2016)



Evolution of the observed magnetic field in AR 11283 by HMI/SDO during September 6-8, 2006



Evolution and eruption of Topology of corona magnetic field driven driven by photospheric changes

数值化太阳活动预报要点:

- 高时空分辨率太阳磁场测量;
- 高时空分辨率色球与日冕成像;
- 改进日冕磁场重建模型;
- 可靠的太阳磁场拓扑结构分析工具;
- 改进磁流体力学方程解法
- 高性能计算

谢谢!