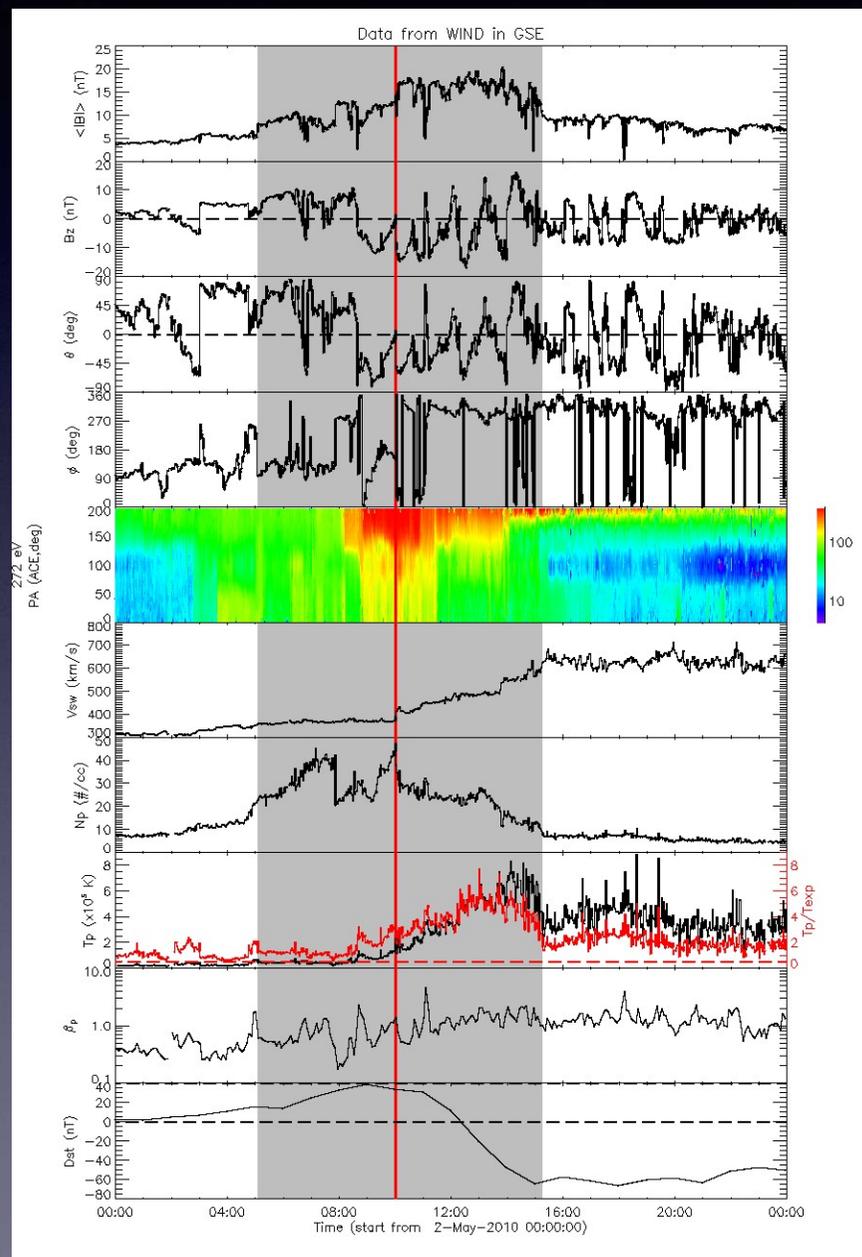
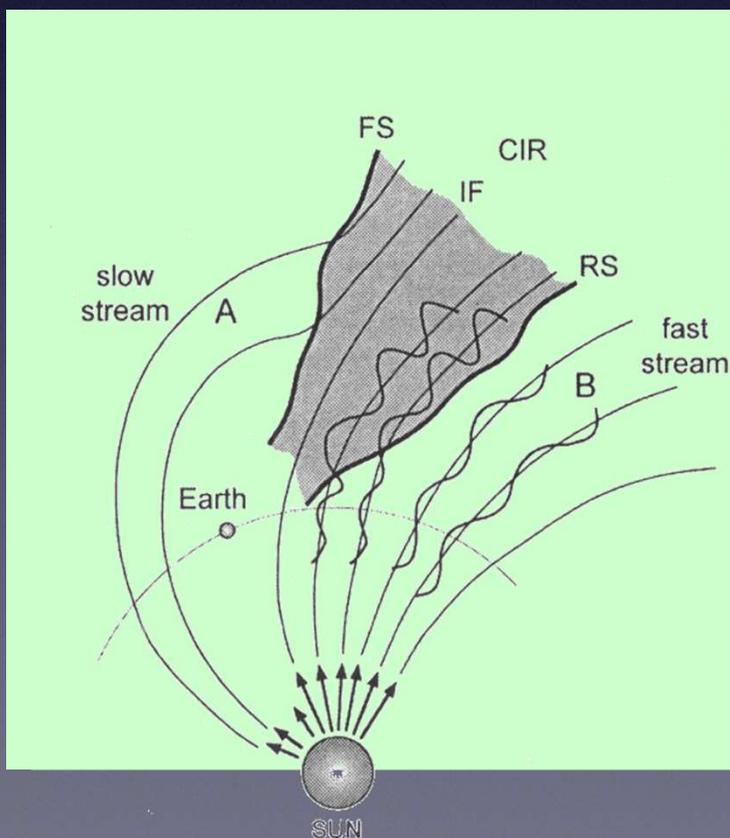




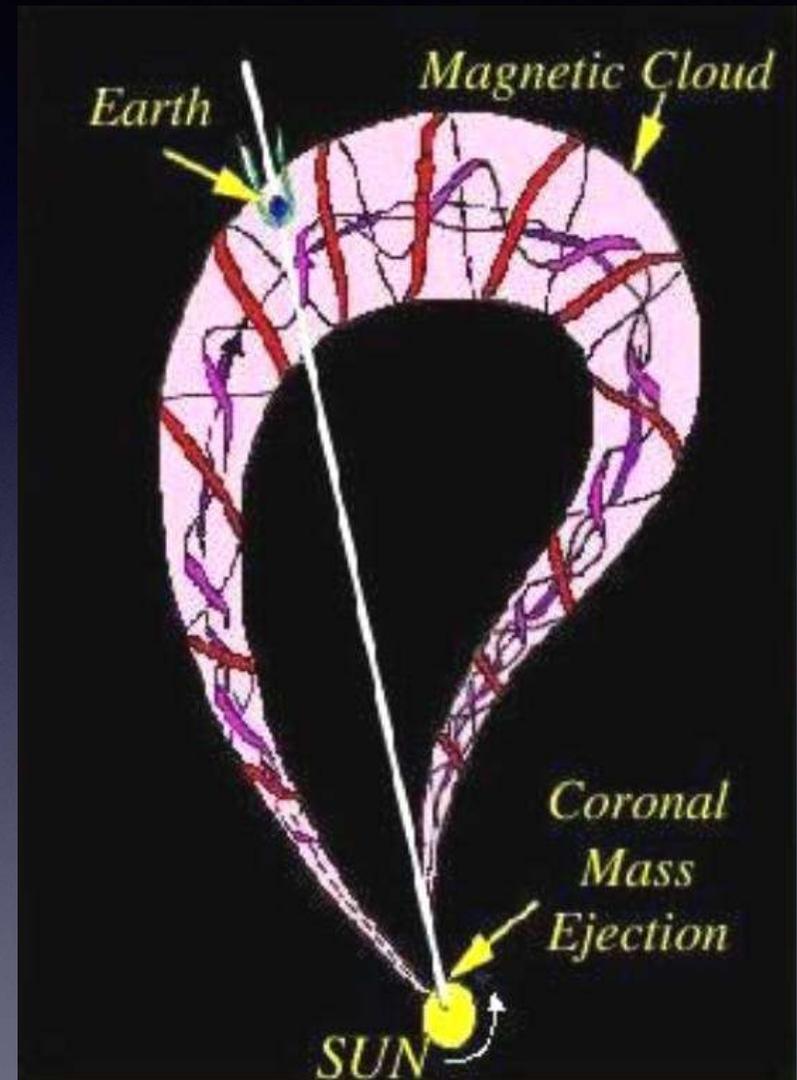
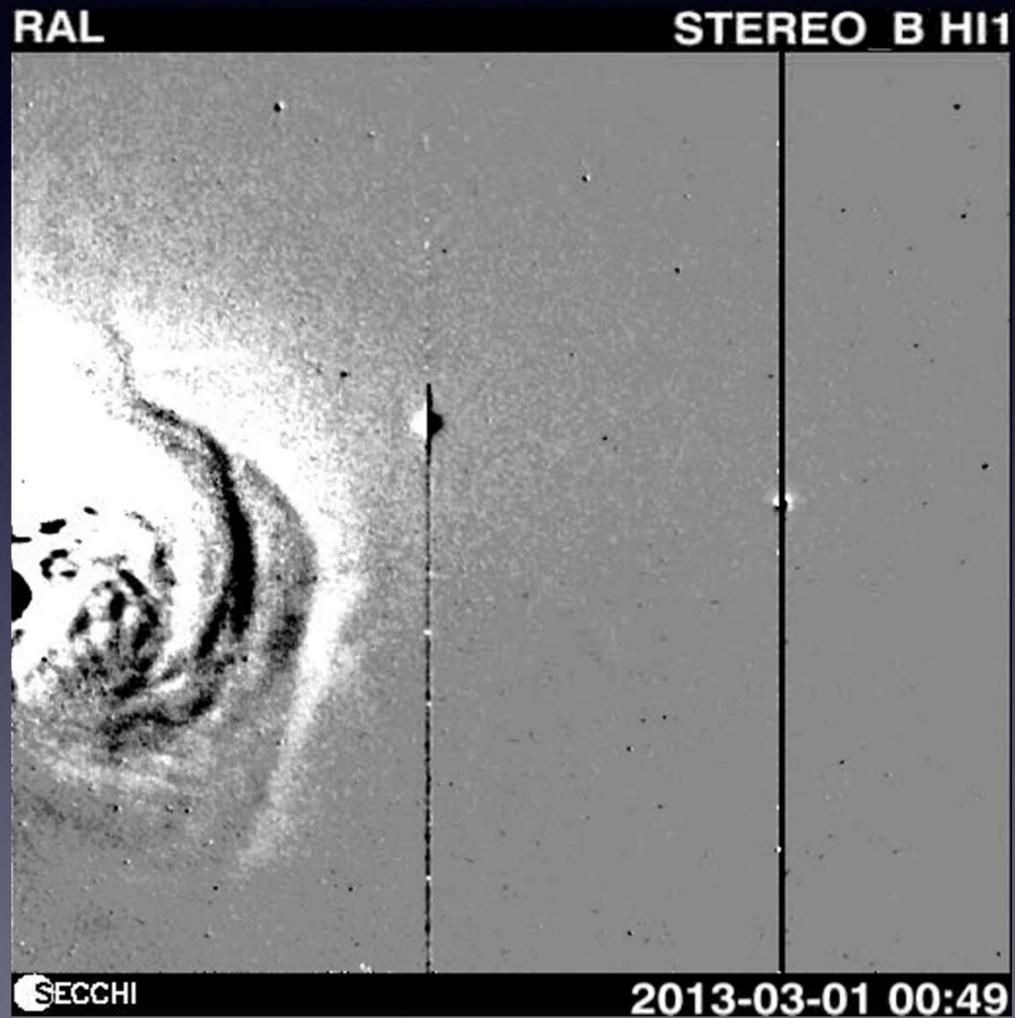
2.2 行星际空间结构

典型的行星际空间结构:CIR

共转相互作用区(CIR): 太阳风高速流和低速流相互作用形成的区域

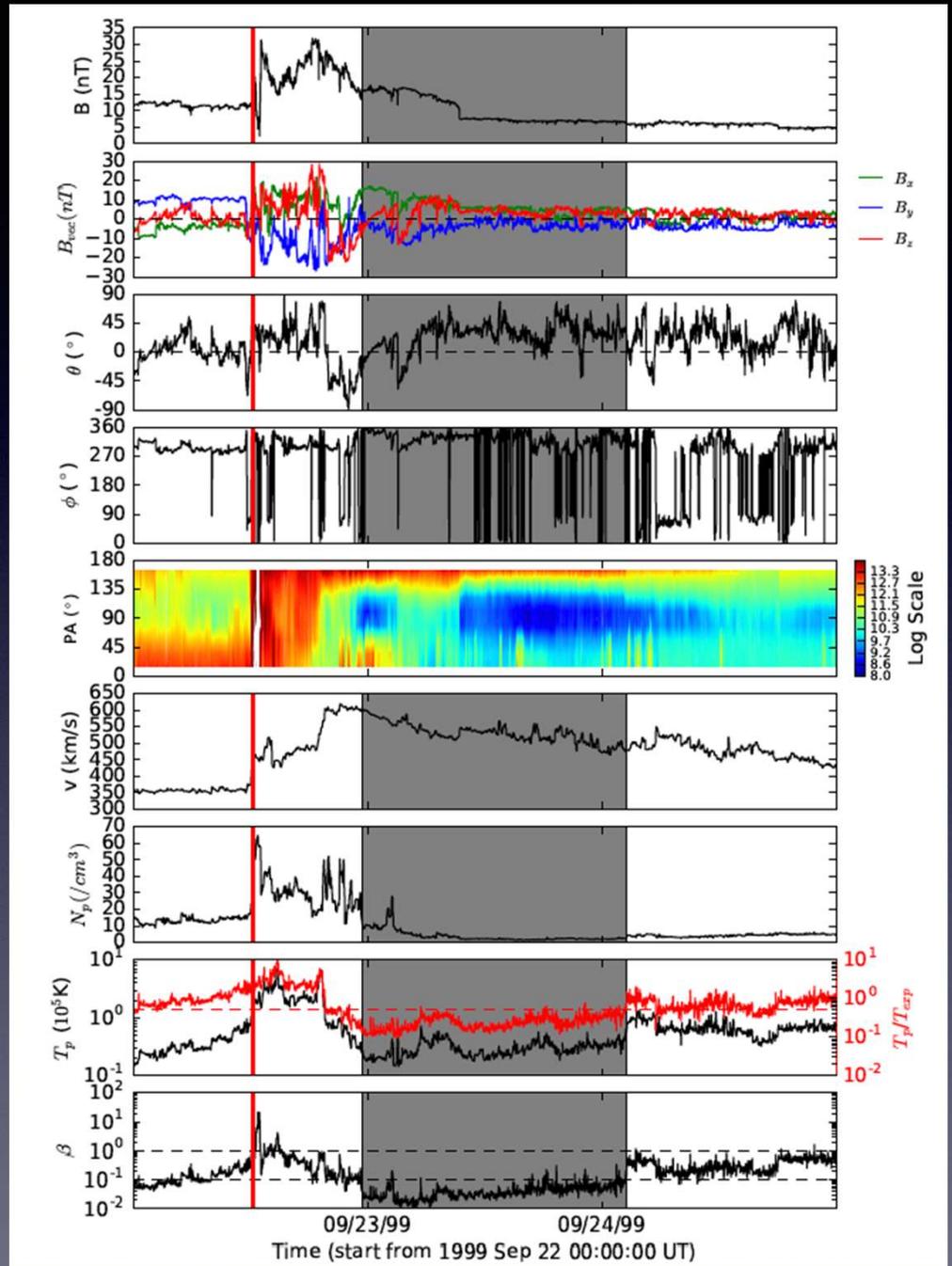


磁云、行星际CME



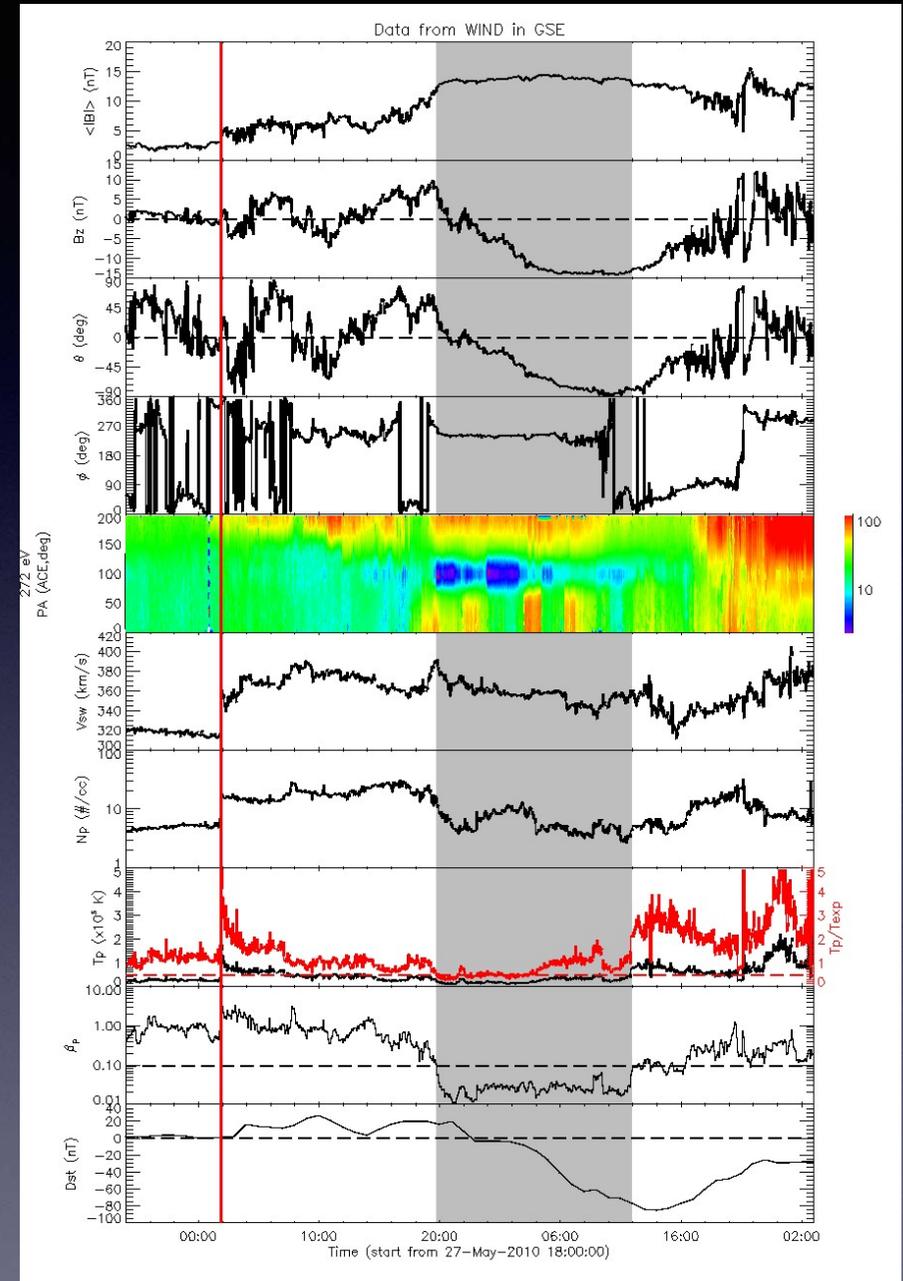
行星际日冕物质抛射(ICME)

- ▶ 增强的磁场
- ▶ 平滑旋转的磁场方向
- ▶ 膨胀的速度特征
- ▶ 双向电子流
- ▶ 双向低能质子流
- ▶ 低的质子温度
- ▶ 低的等离子体Beta
- ▶ 高的Fe电离态
- ▶ Forbush Decrease
- ▶ ...

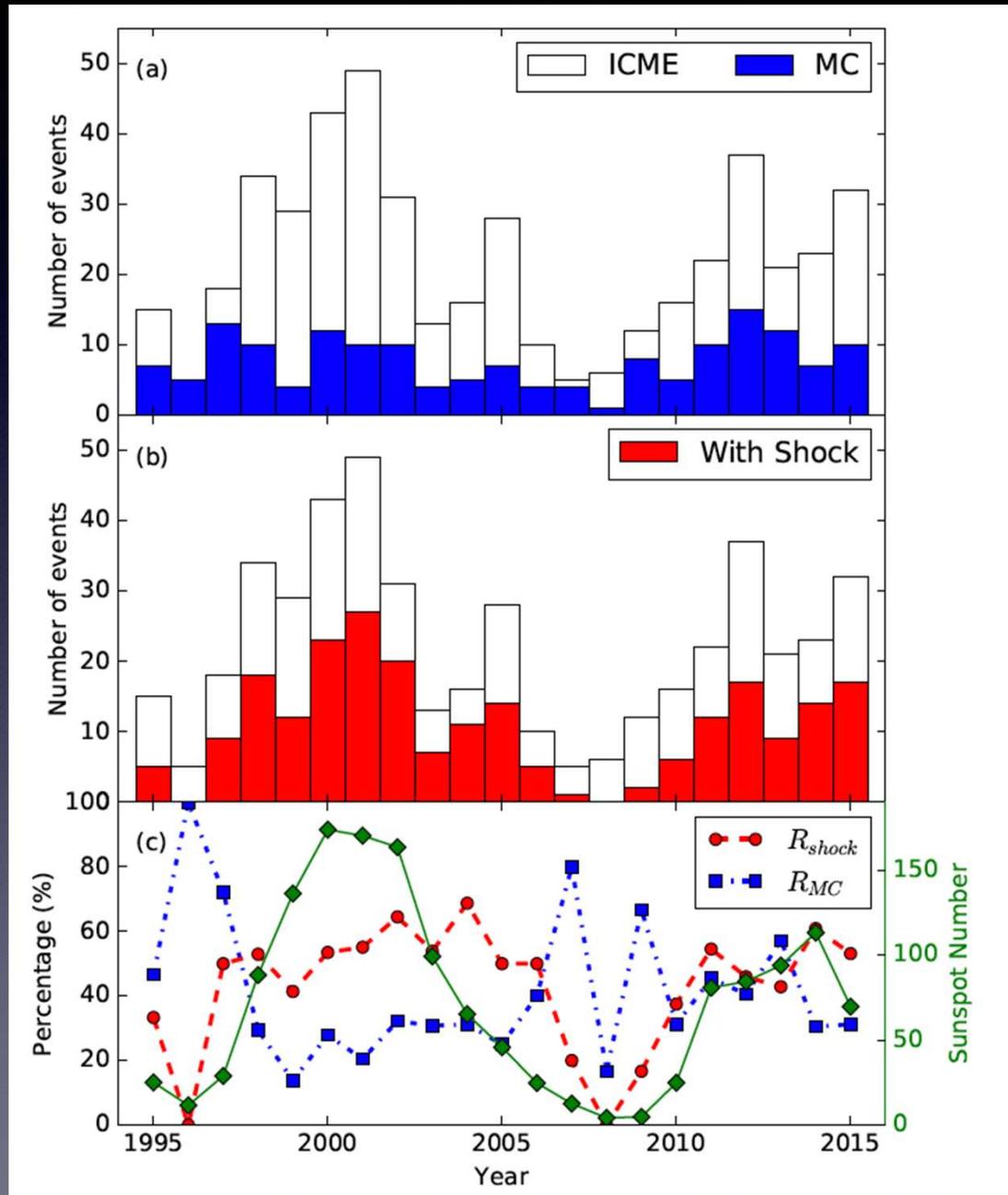


磁云(Magnetic Cloud, MC)

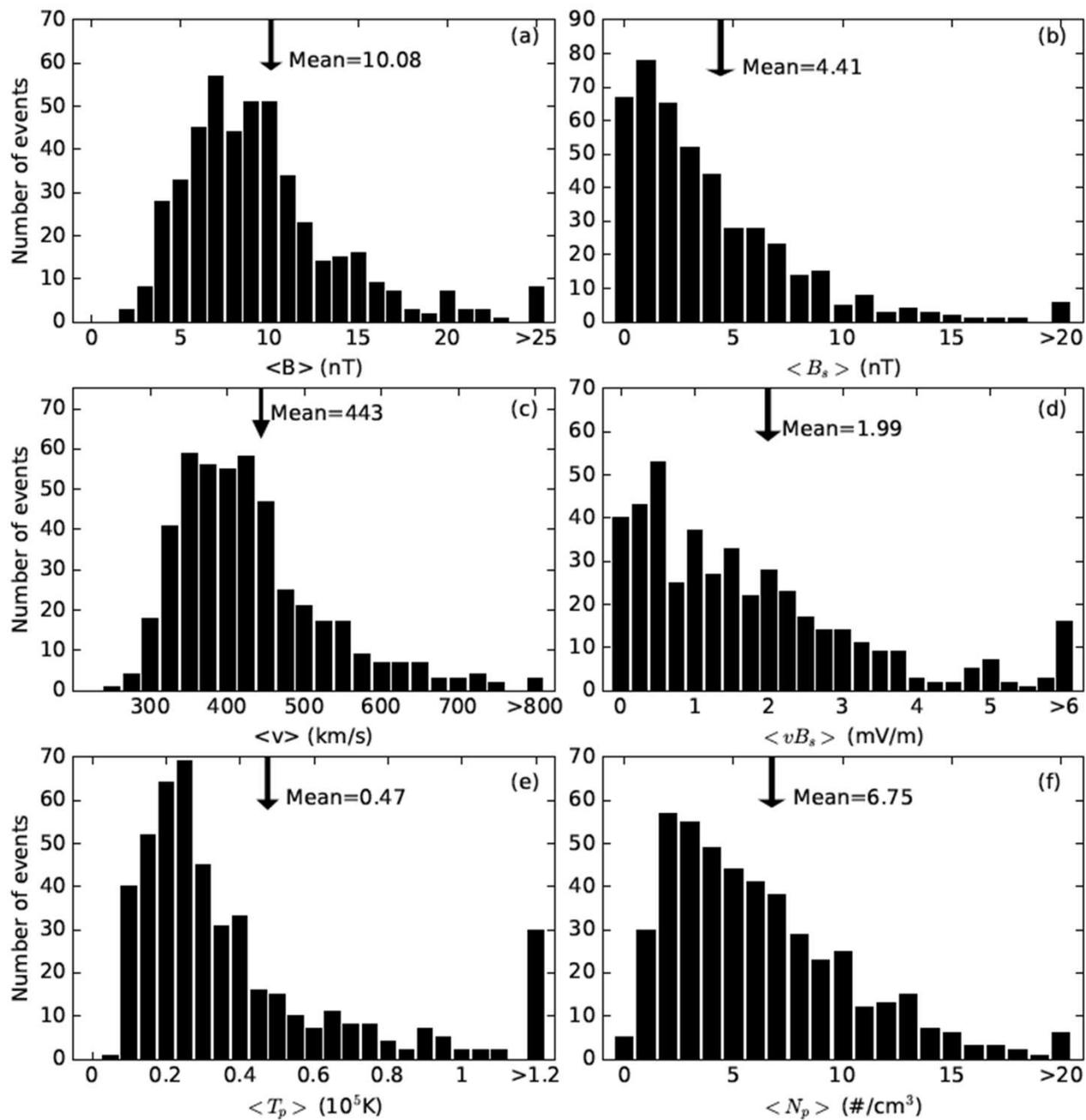
- ✓ 增强的磁场
- ✓ 平滑旋转的磁场方向
- ✓ 膨胀的速度特征
- ✓ 双向电子流
- 双向低能质子流
- ✓ 低的质子温度
- ✓ 低的等离子体Beta
- 高的Fe电离态
- Forbush Decrease
- ...



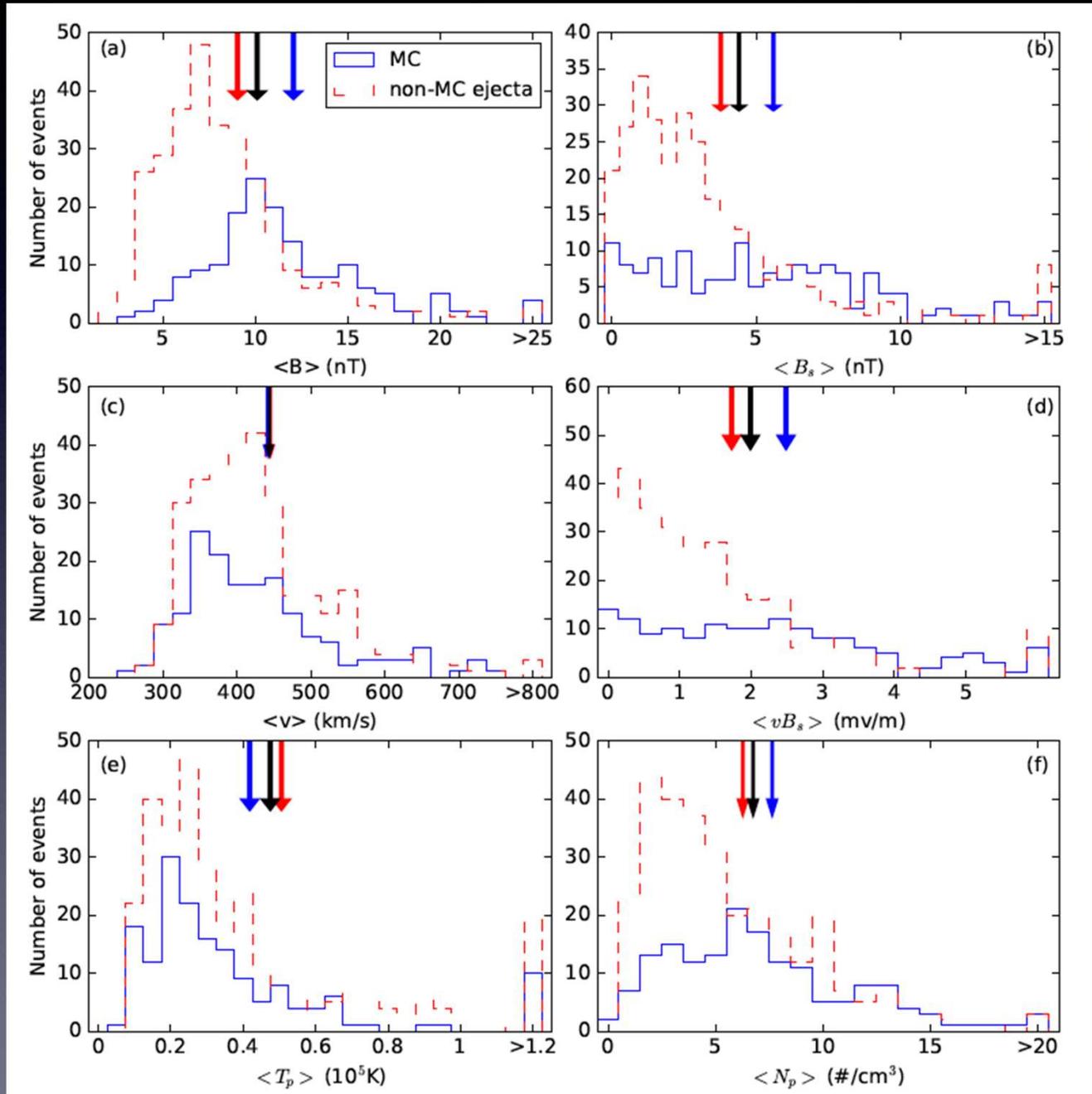
ICME数目年均数目变化



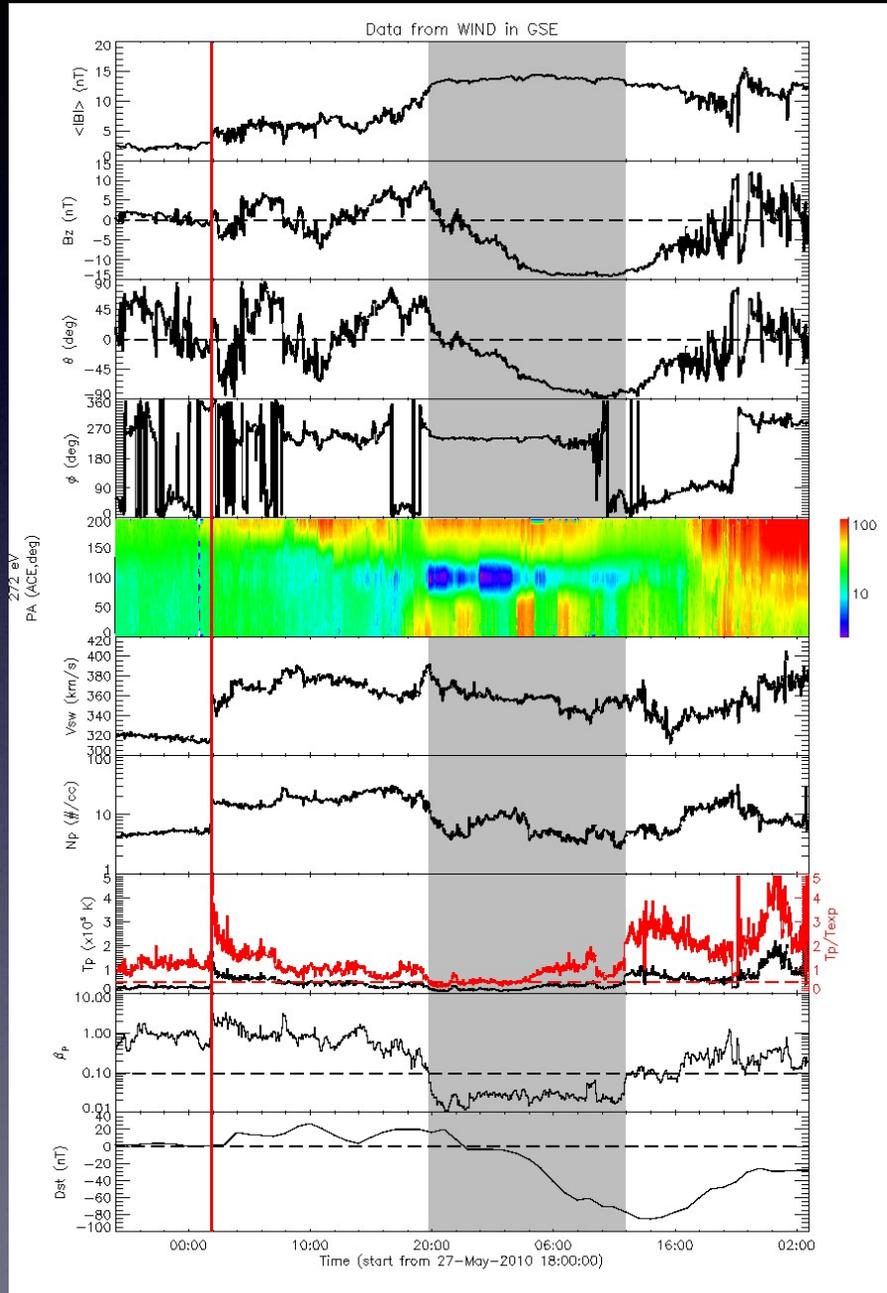
ICME特征参数分布



磁云和非磁云参数比较



行星际激波



磁场、速度、密度、温度跳变

驱动源：

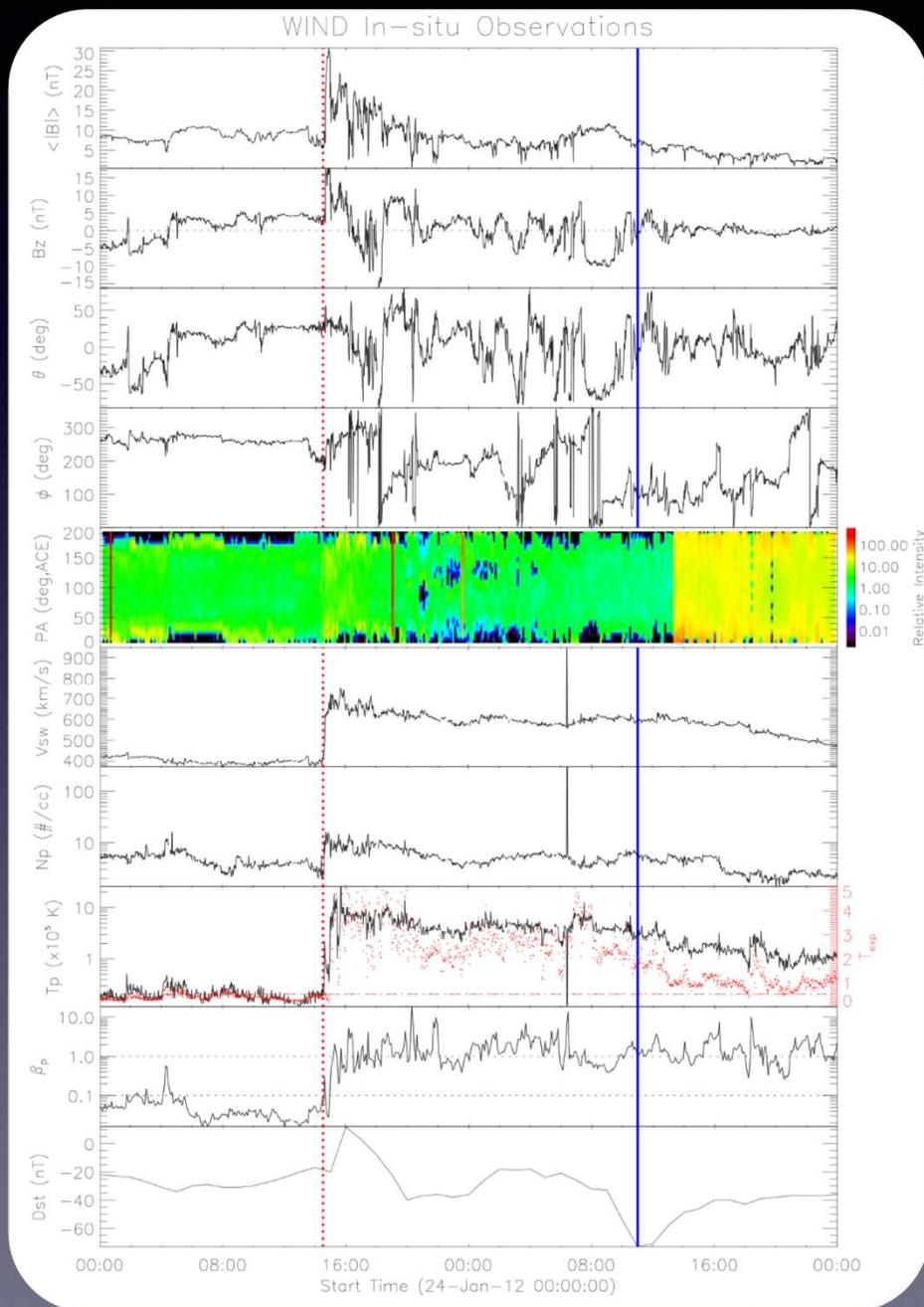
- ★ 行星际日冕物质抛射
- ★ 共转流相互做作用区
- ★ 快速太阳风
- ★ 其它结构

行星际激波

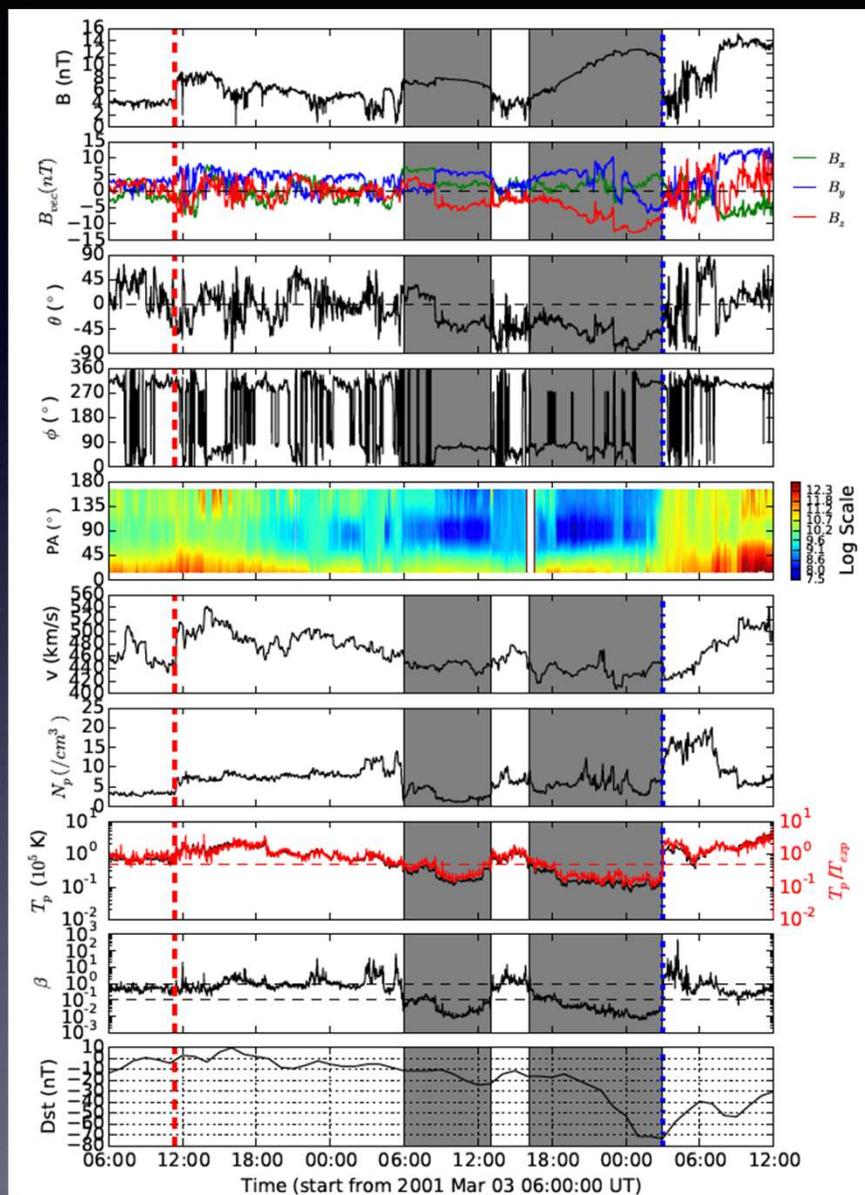
无驱动激波： 明显的激波特征，找不到对应的驱动物

可能原因：

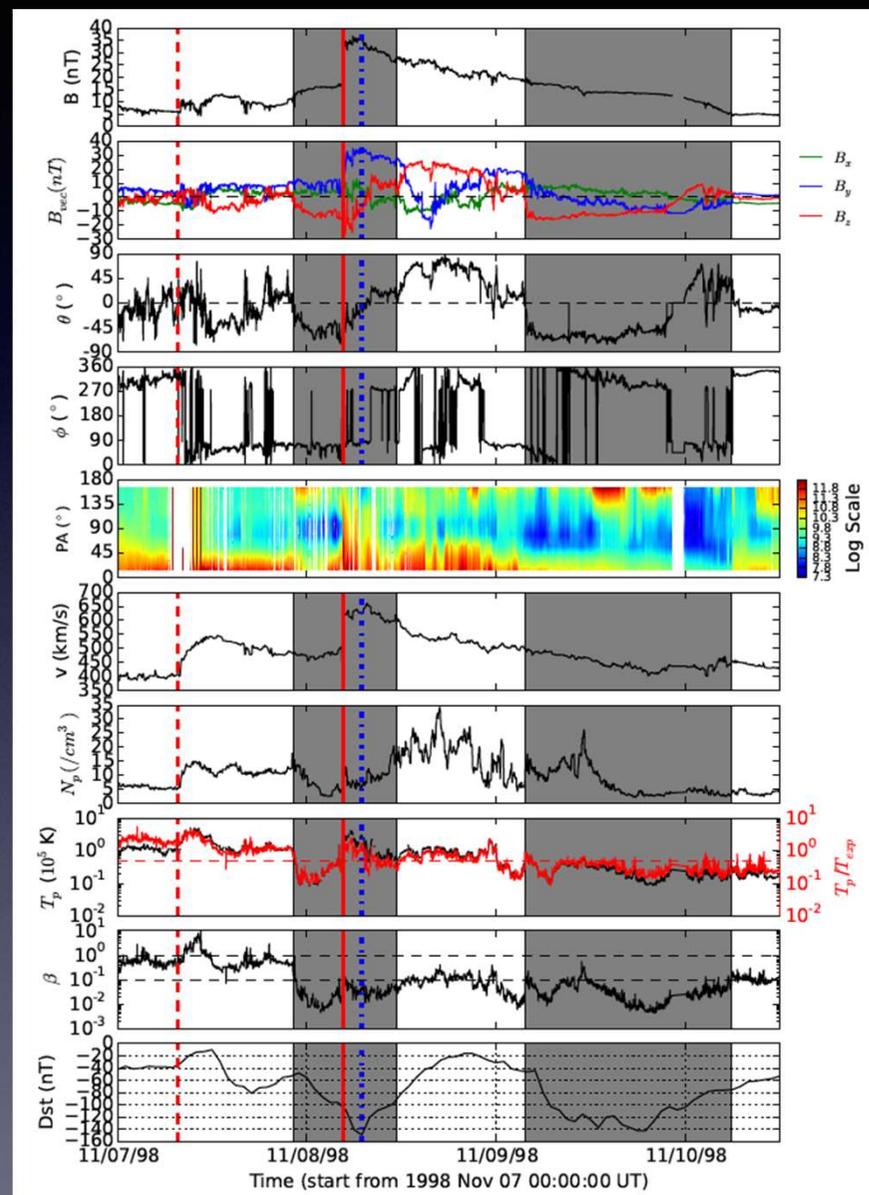
- CME的偏转
- 激波宽度比CME大
- 其它结构驱动？



行星际复杂结构

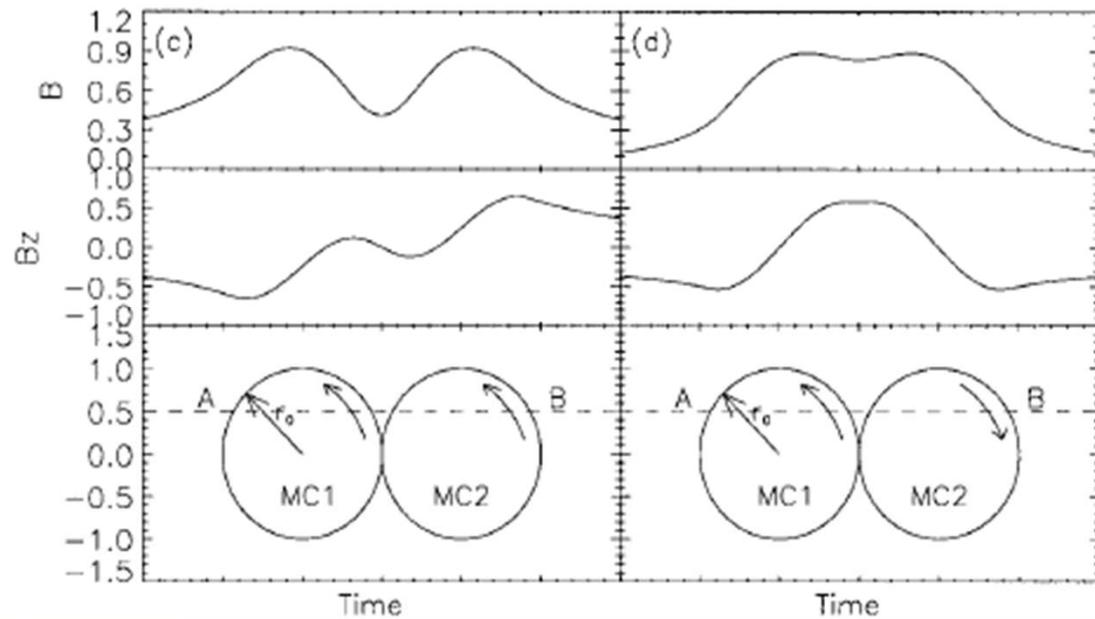
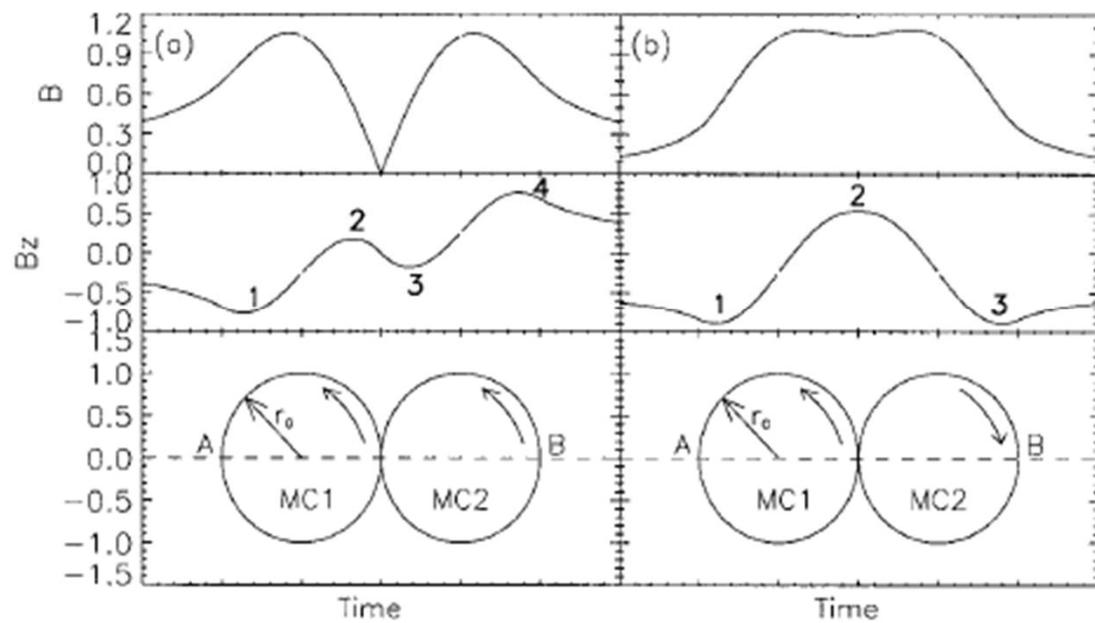
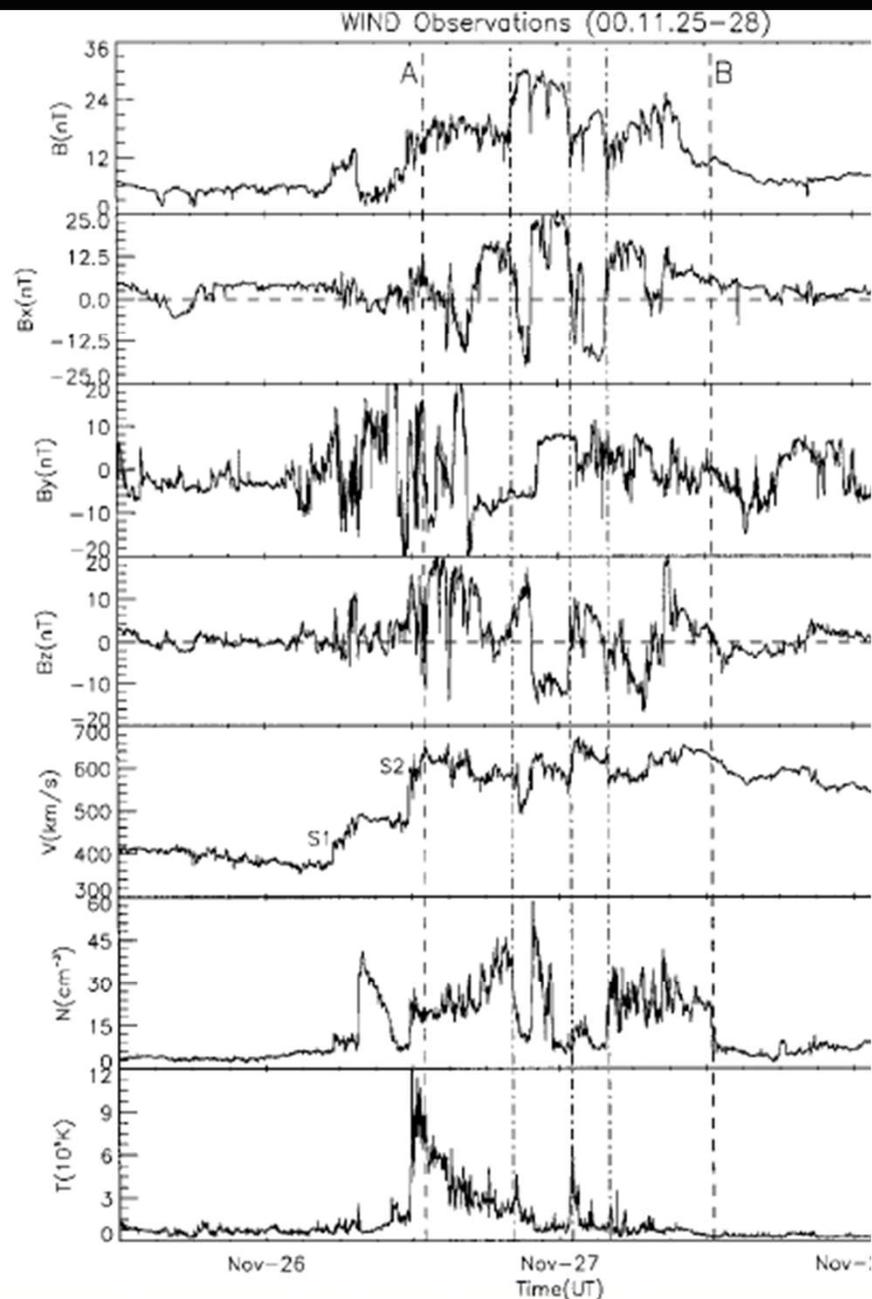


多重ICME结构

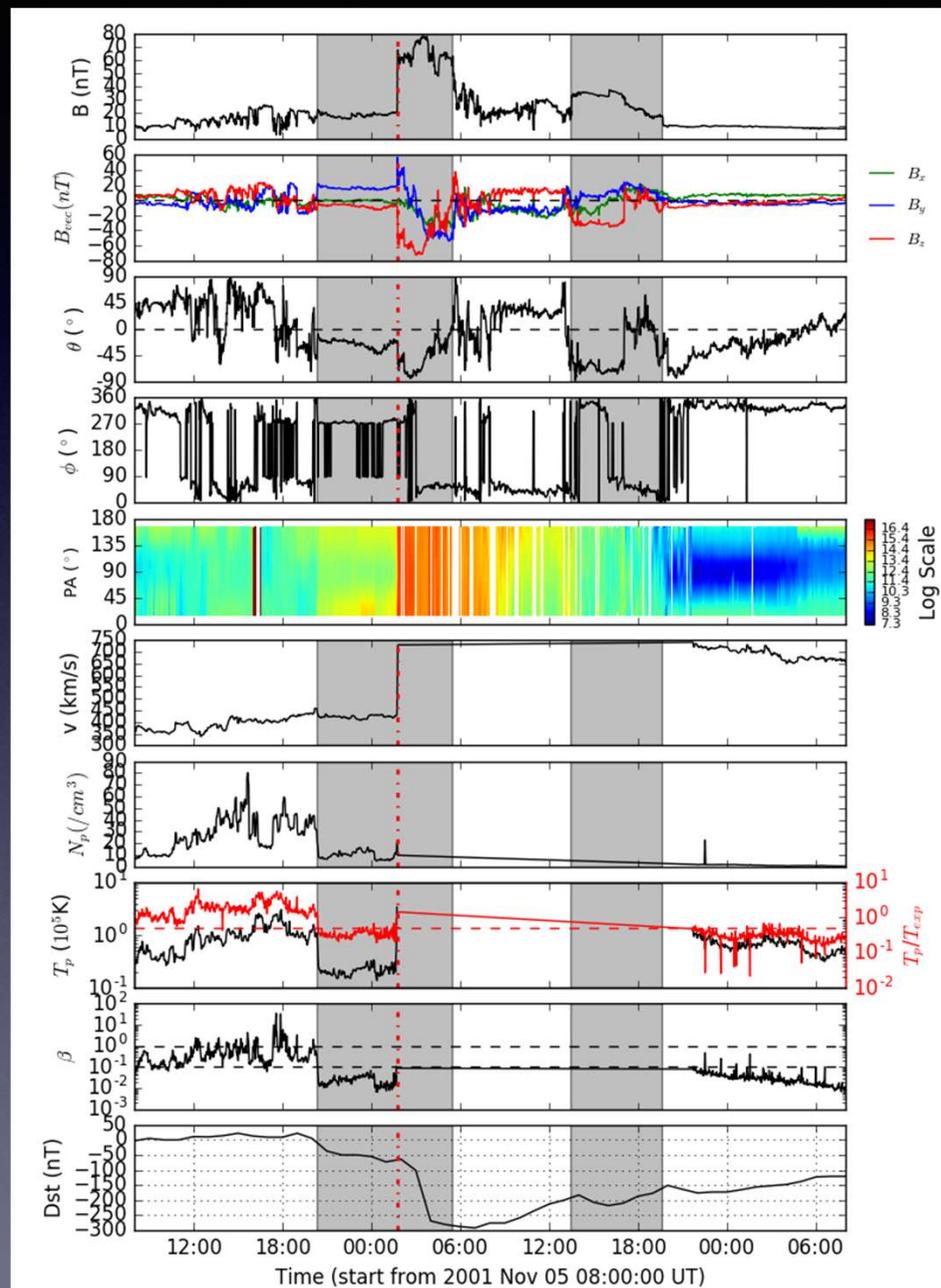
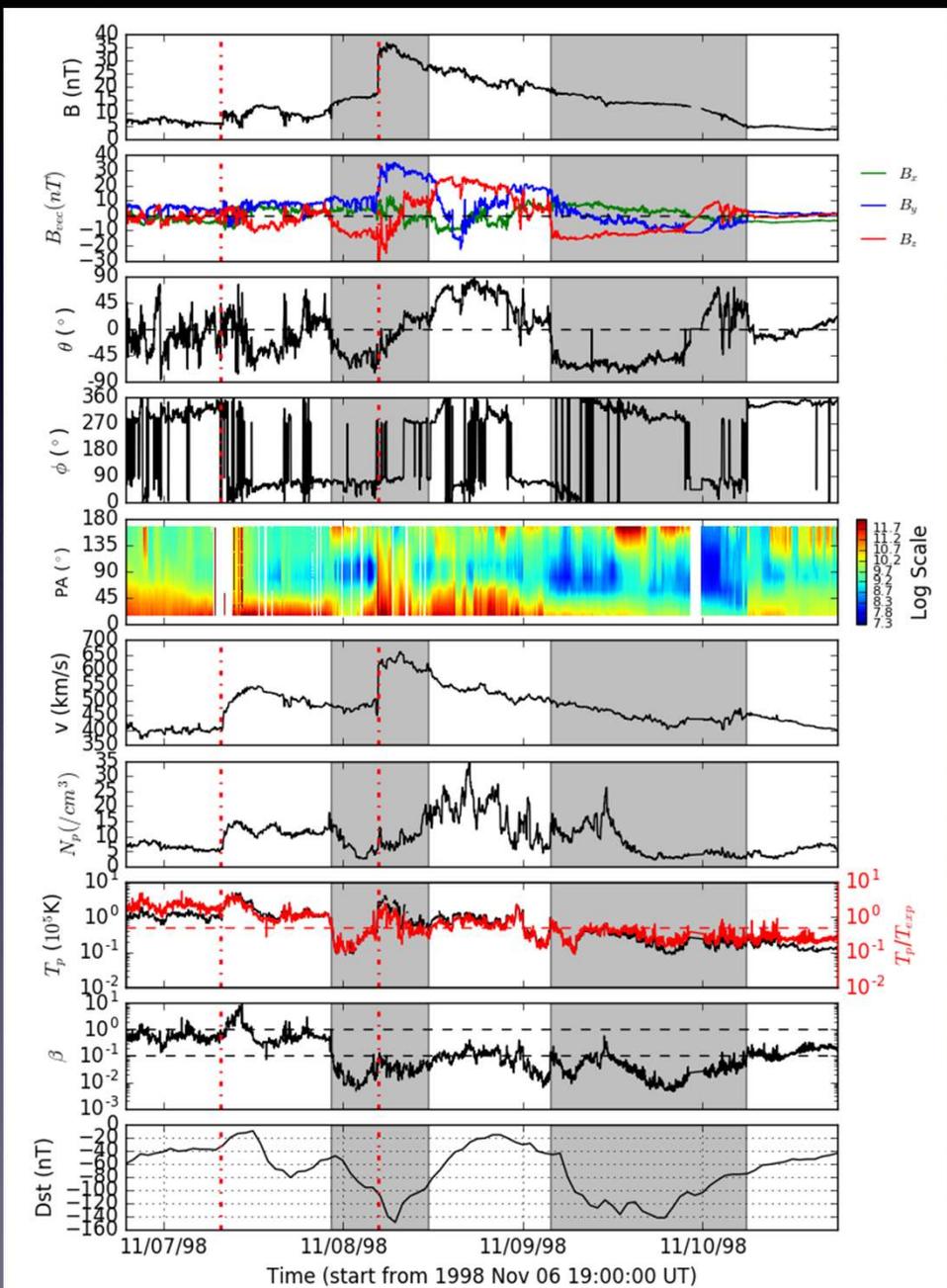


激波-ICME结构

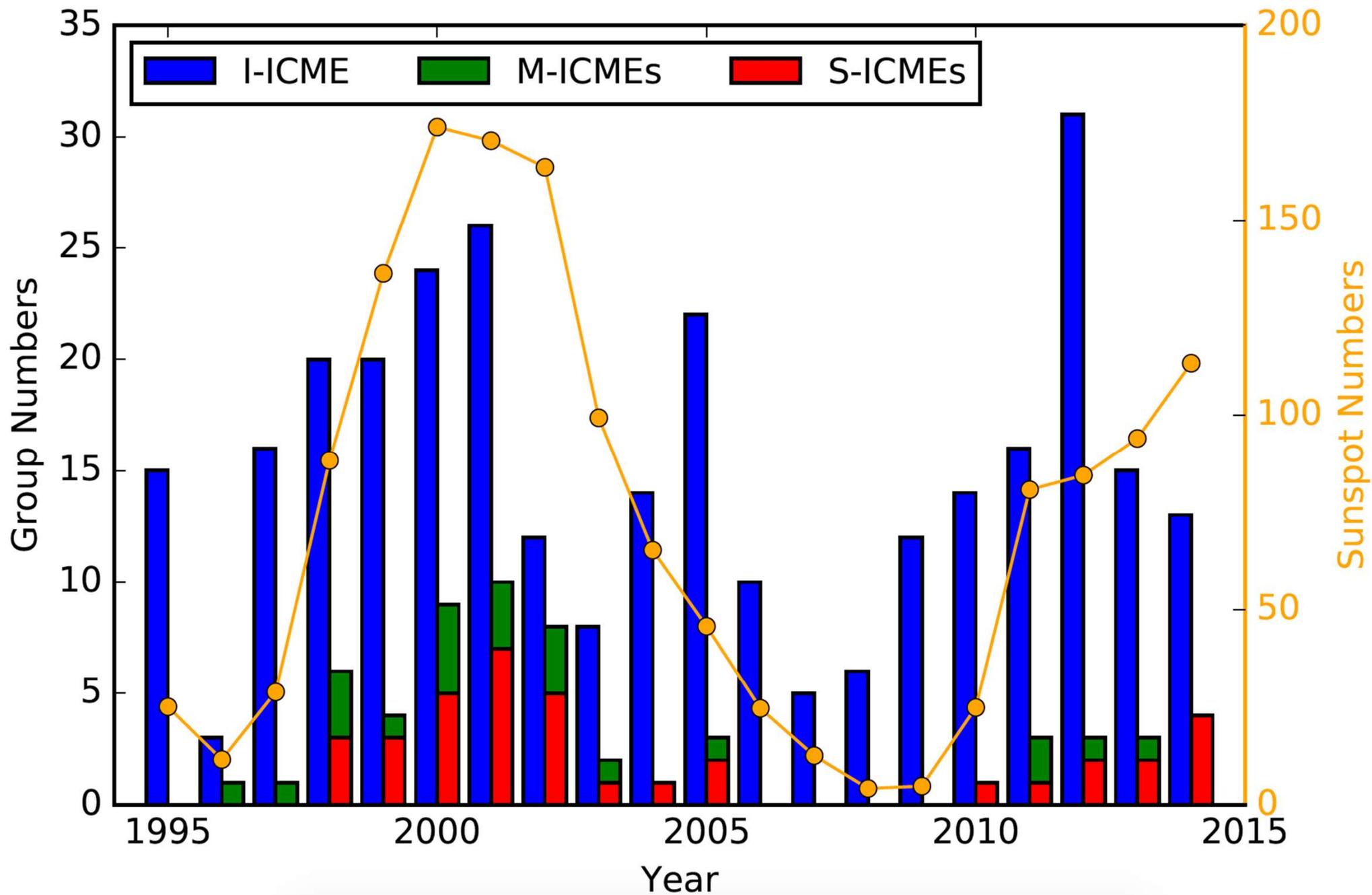
多重磁云



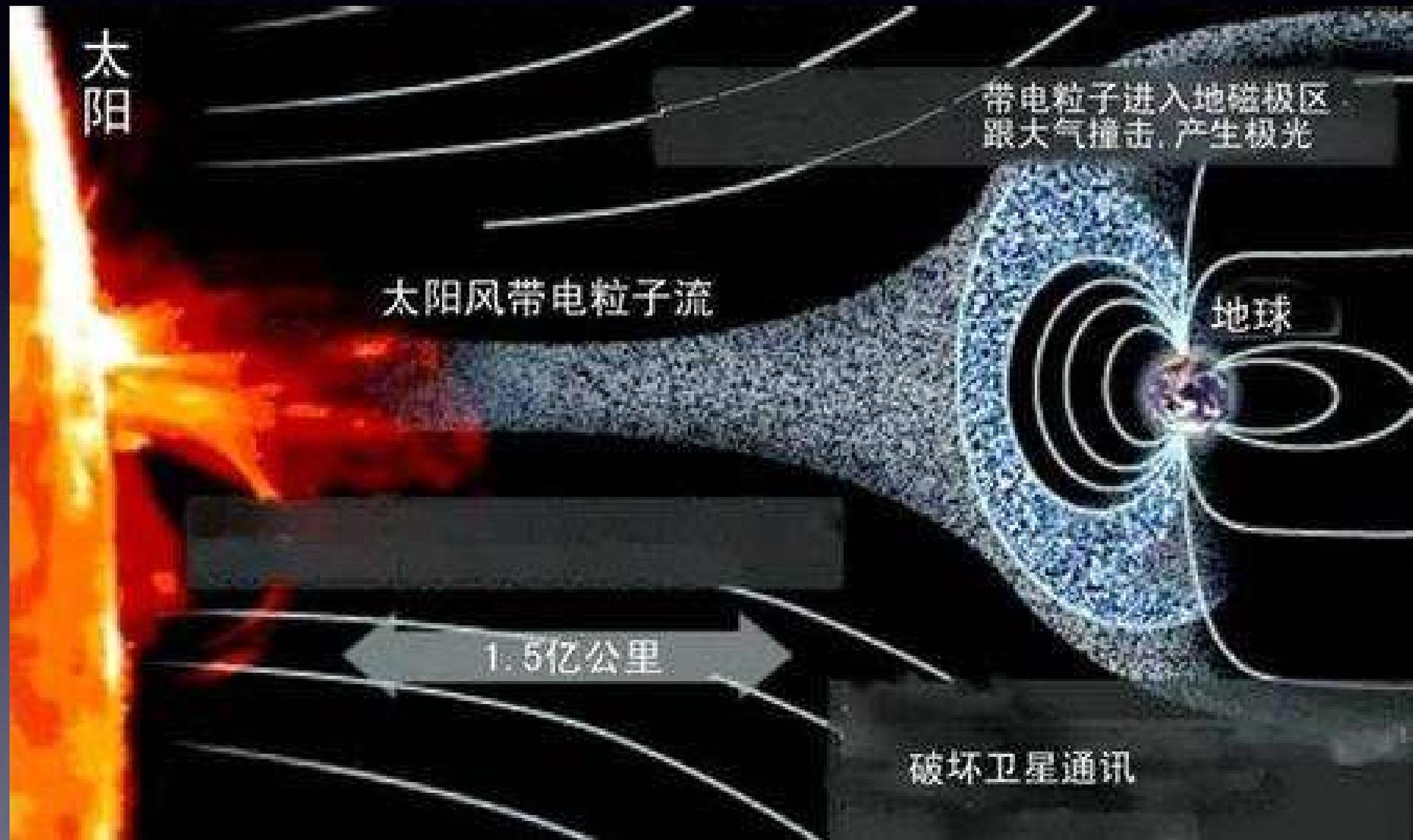
激波-磁云结构



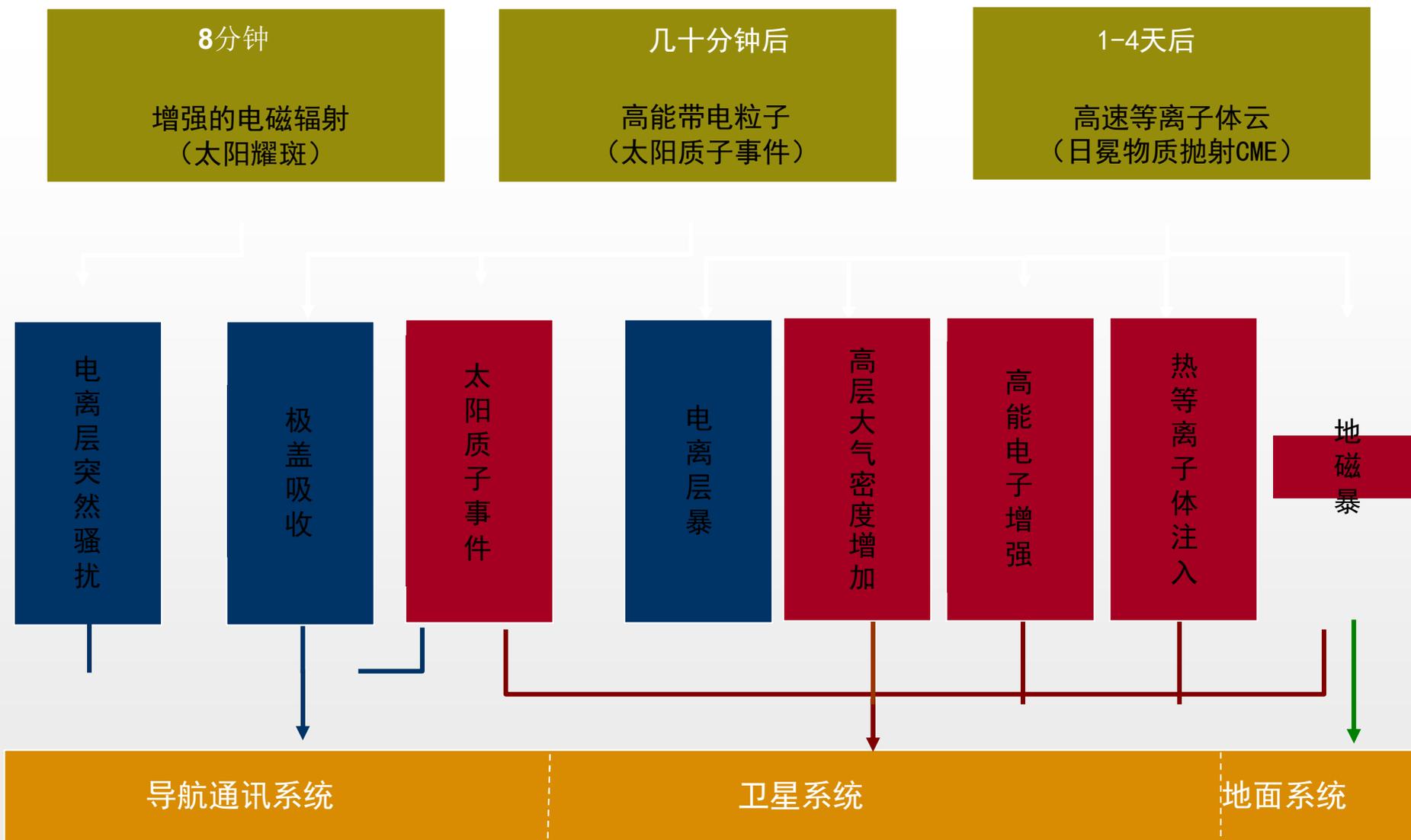
行星际复杂结构数目的年变化



2.3 日地空间系统全过程



太阳风暴是怎样影响人类活动的?



2.4 典型的灾害性空间天气事件

耀斑、日冕物质抛射

射电辐射增强



射电爆发

耀斑

辐射增强



电离层扰动

耀斑、日冕物质抛射

能量粒子增多



高能粒子事件

日冕物质抛射、共转流相互作用区

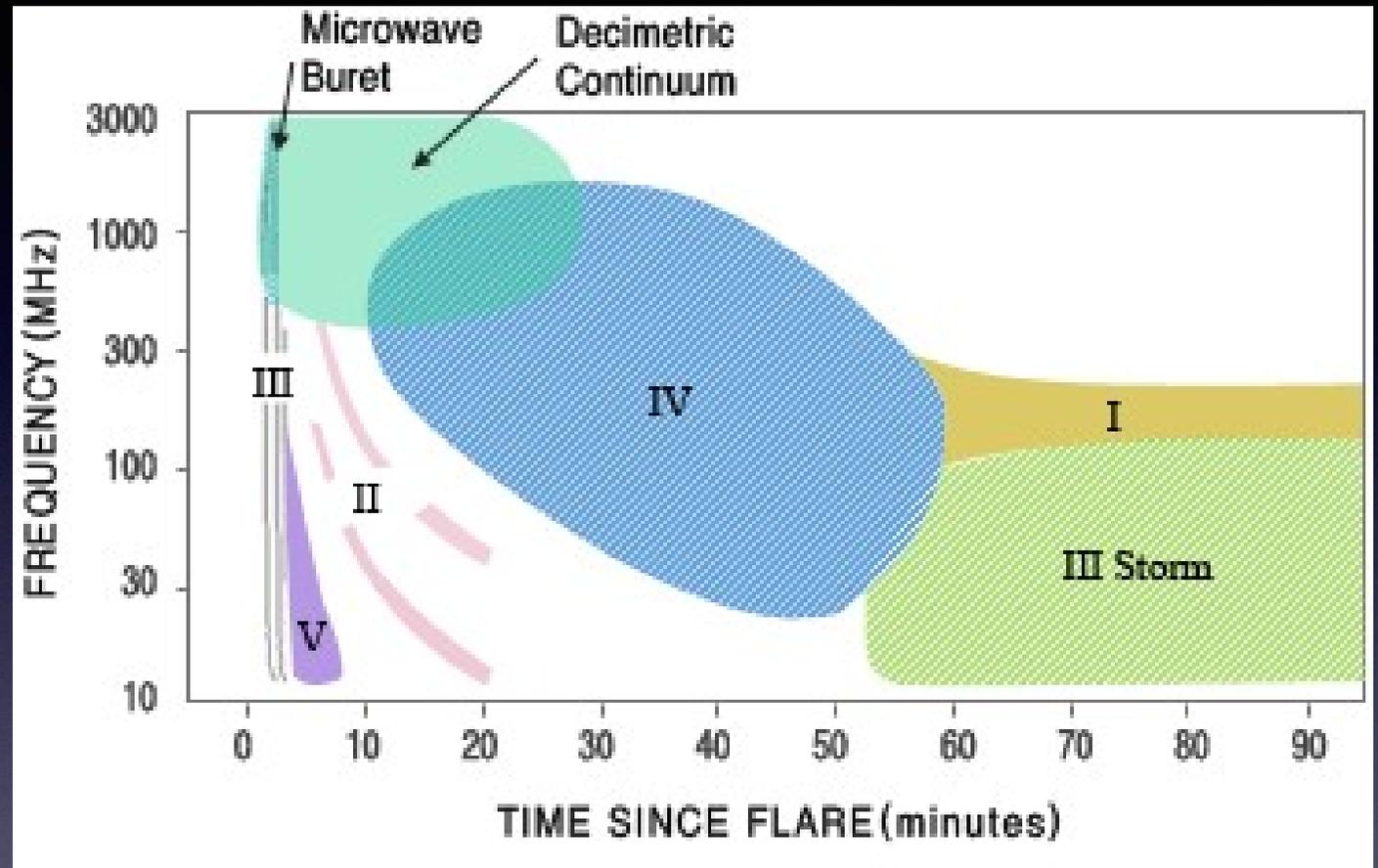
磁结构达到地球



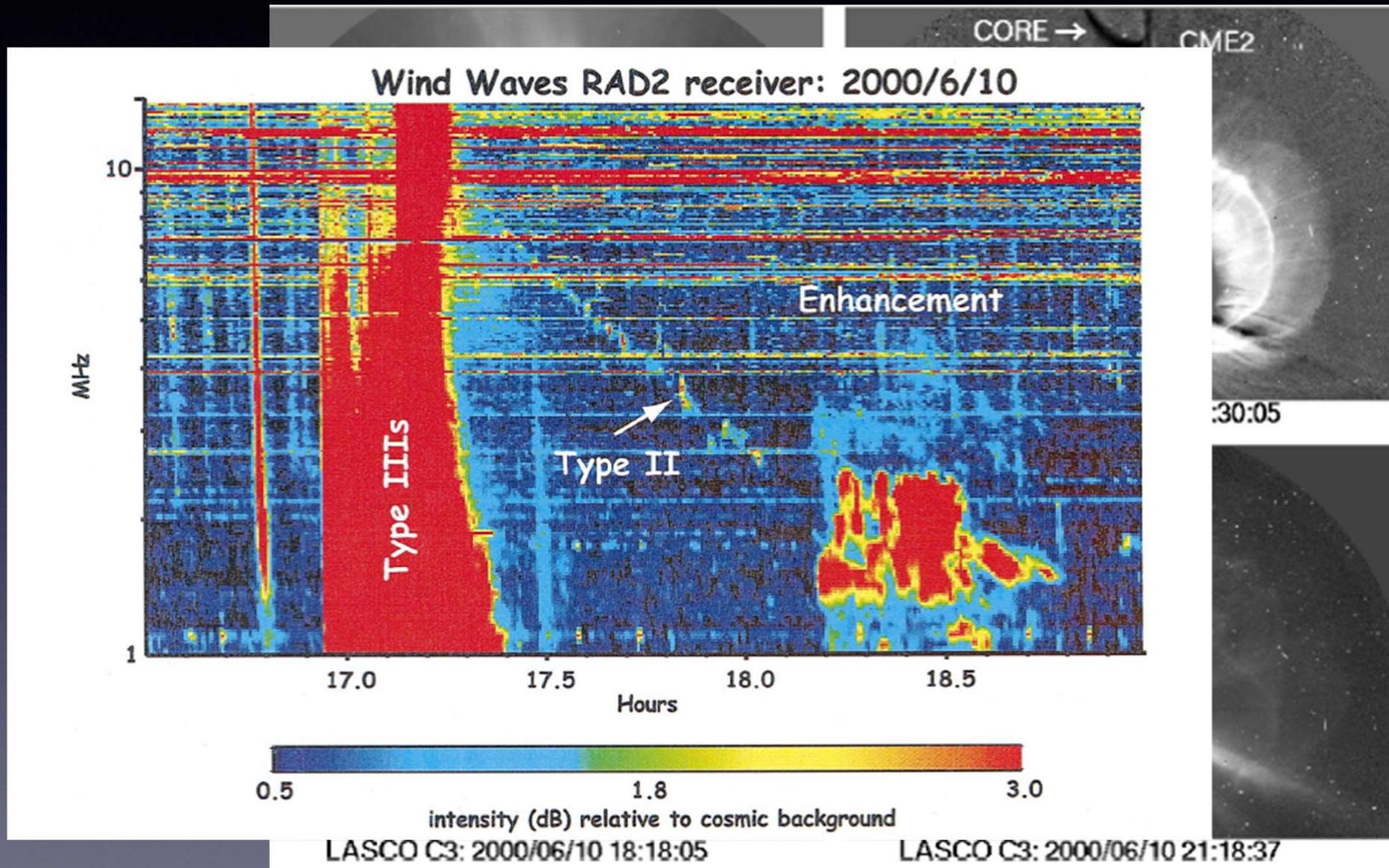
地磁暴

主要的空间天气事件：射电暴

射电暴：一般与耀斑、日冕物质抛射驱动激波有关，因而可用于其他相关空间天气事件的预测。

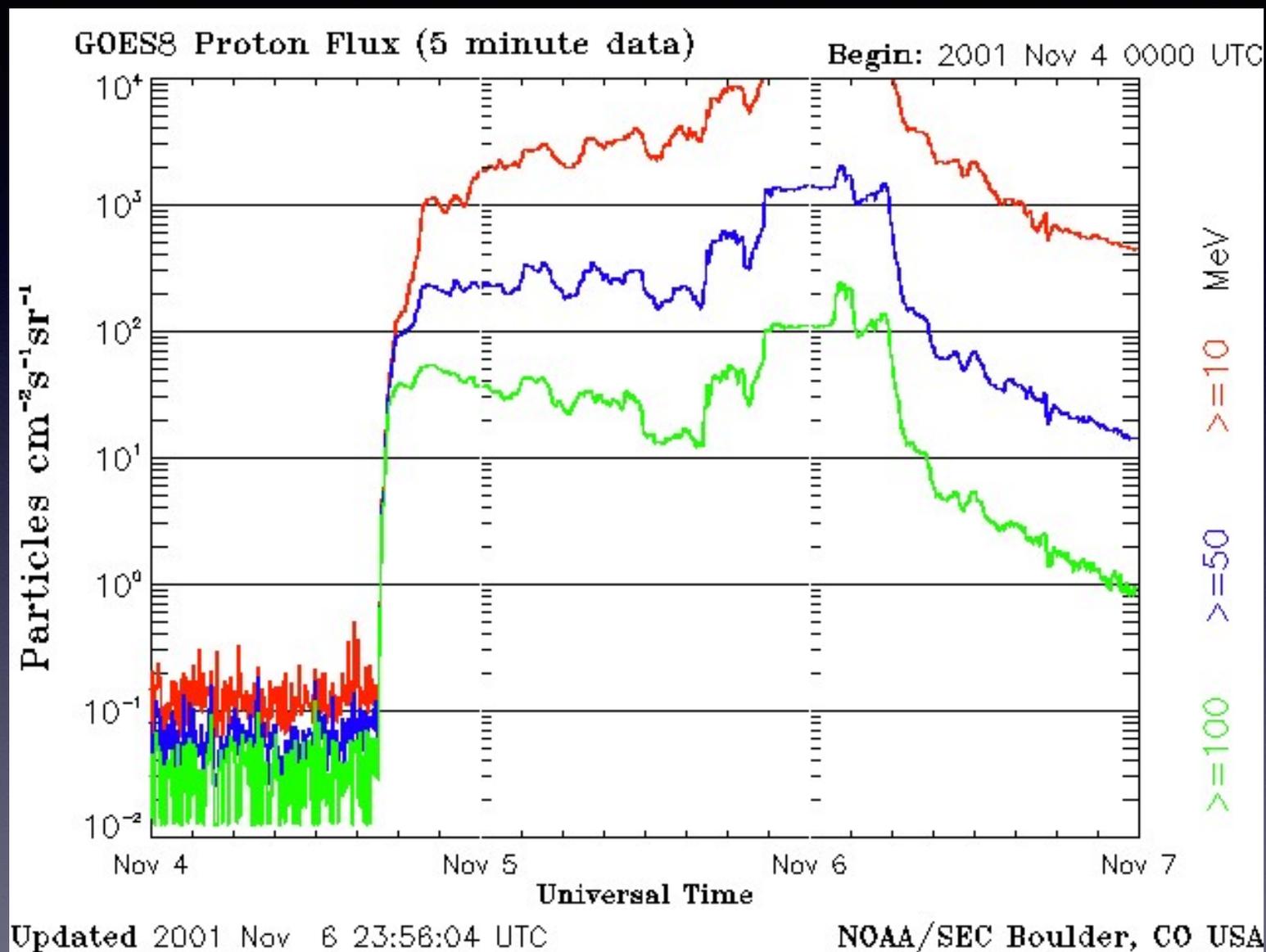


日冕物质抛射相互作用的射电表现

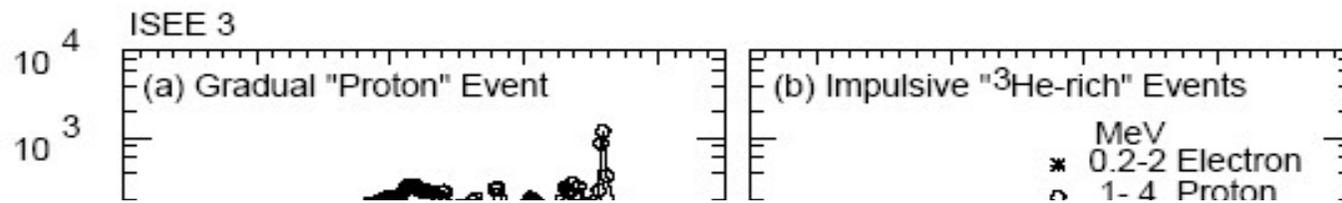


灾害性空间天气事件：太阳高能粒子事件

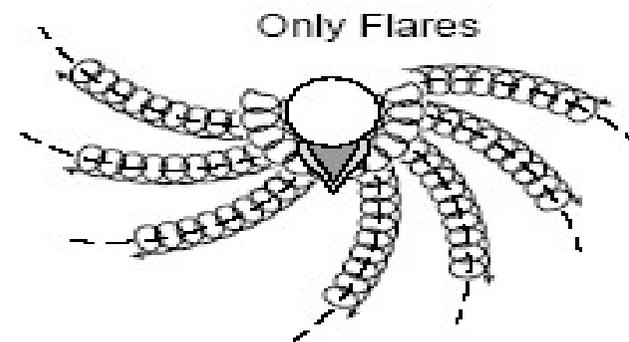
ISES定义：能量大于10MeV的质子通量大于10pfu的事件为太阳高能粒子事件。



两类典型的太阳高能粒子事件



Old Picture:



New Picture:

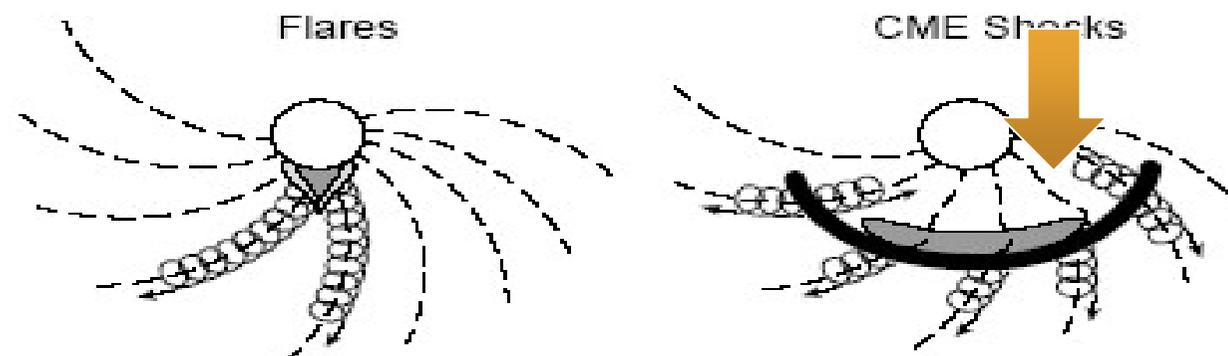


Figure 2.1. A paradigm shift.

两类典型的太阳高能粒子事件

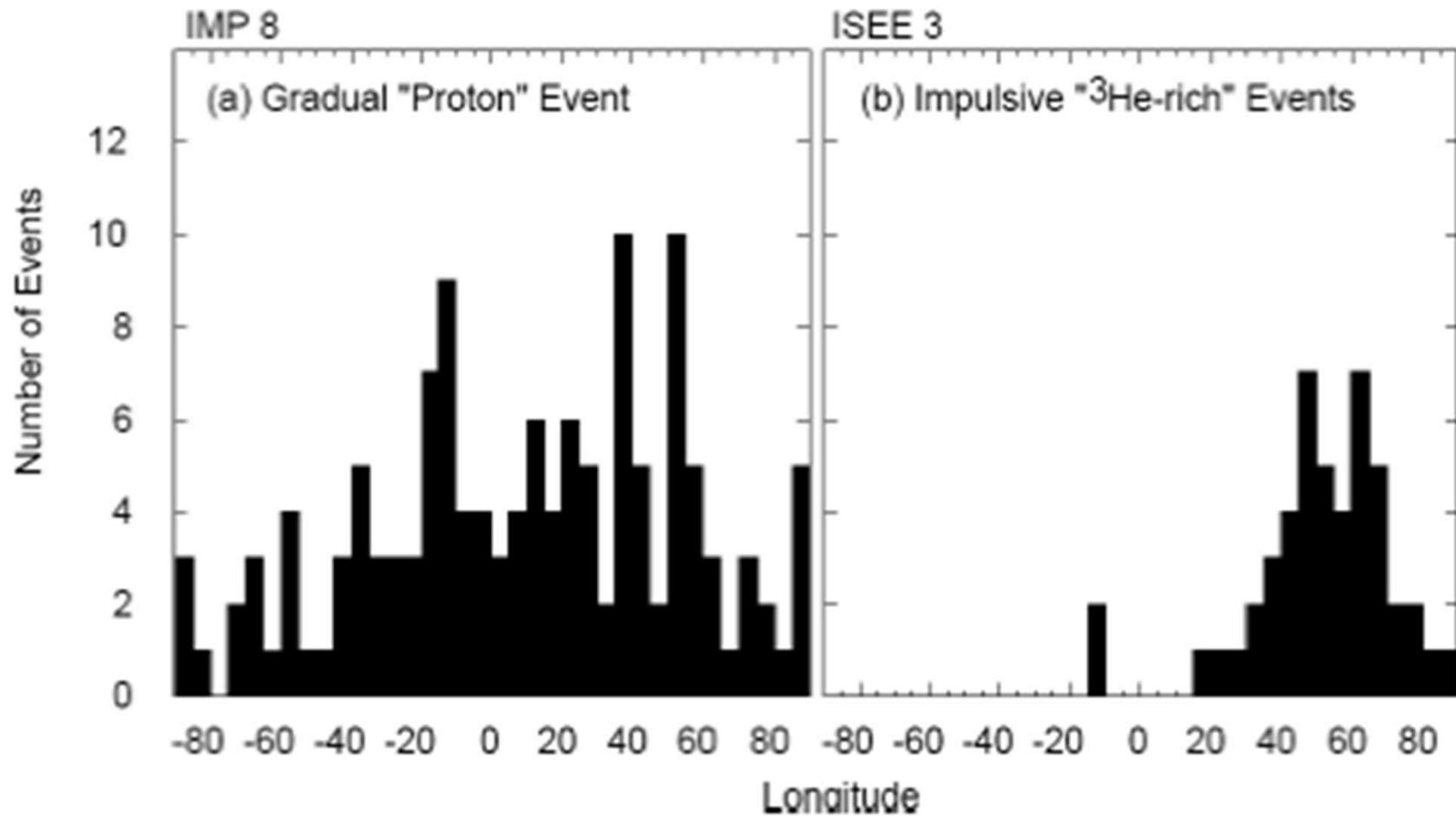


Table 2. Classes of solar energetic particle events.

| | ³ He-rich | Impulsive | Gradual |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------|
| Particles | Electron rich | Electron rich | Proton rich |
| ³ He/ ⁴ He | ~1 | ~0.2 | ~0.0005 |
| H/He | ~10 | ~10 | ~100 |
| Fe/O | ~1.23 | | ~0.15 |
| Q_{Fe} | ~20 | | ~14 |
| Duration | Hours | Hours–days | Days |
| Long. distrib. | <30° | ~100° | ≤180° |
| CMEs | No | Sometimes (small, slow) | Yes |
| Solar wind | – | – | Ipl. shock |
| Event rate | ~1000/a | Some ten/a | ~10/a |

太阳高能粒子事件的经度分布

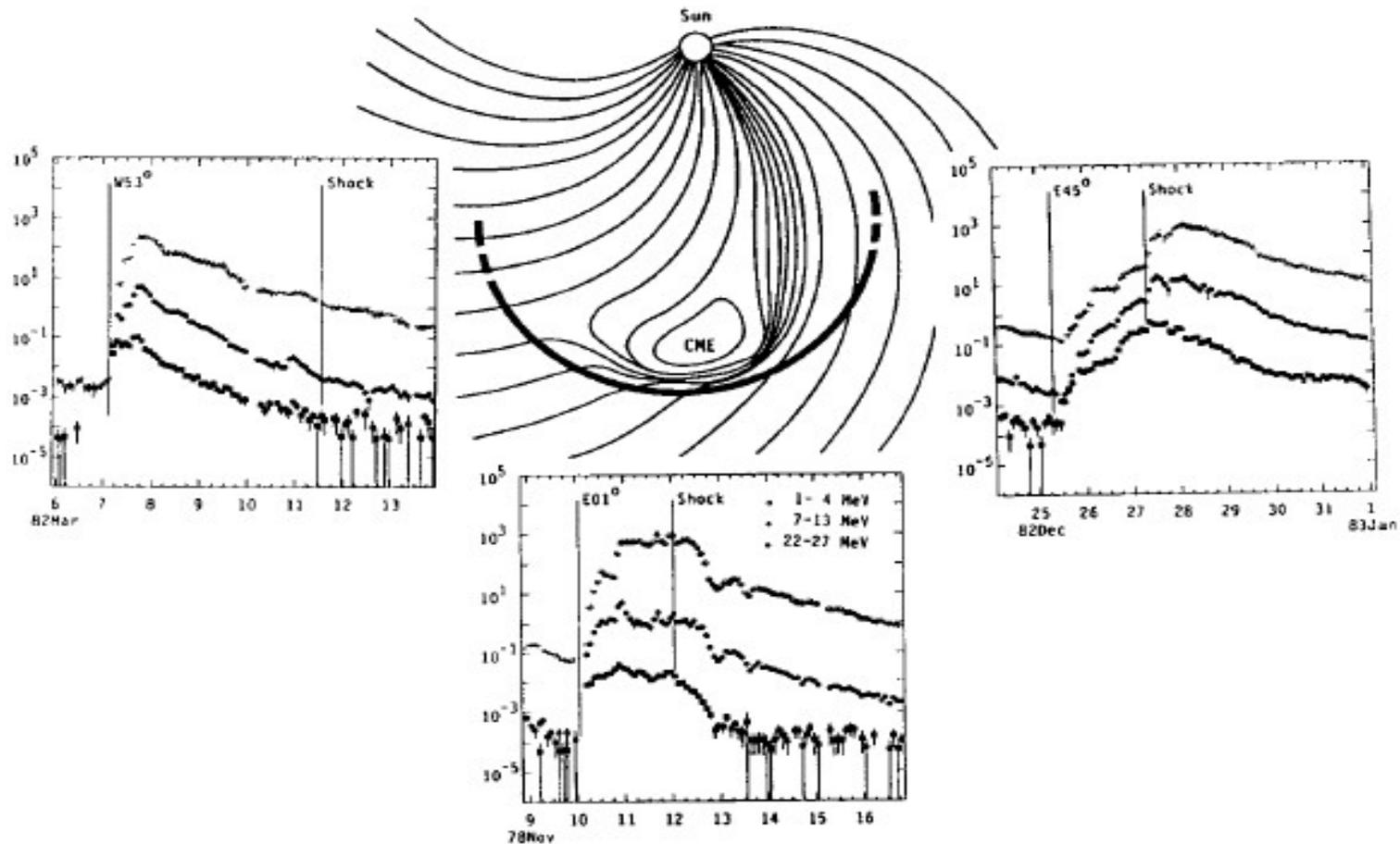


Figure 3.4. Typical intensity-time profiles are shown for 3 events viewed from different solar longitudes relative to the CME and shock.

太阳高能粒子事件耀斑的关系

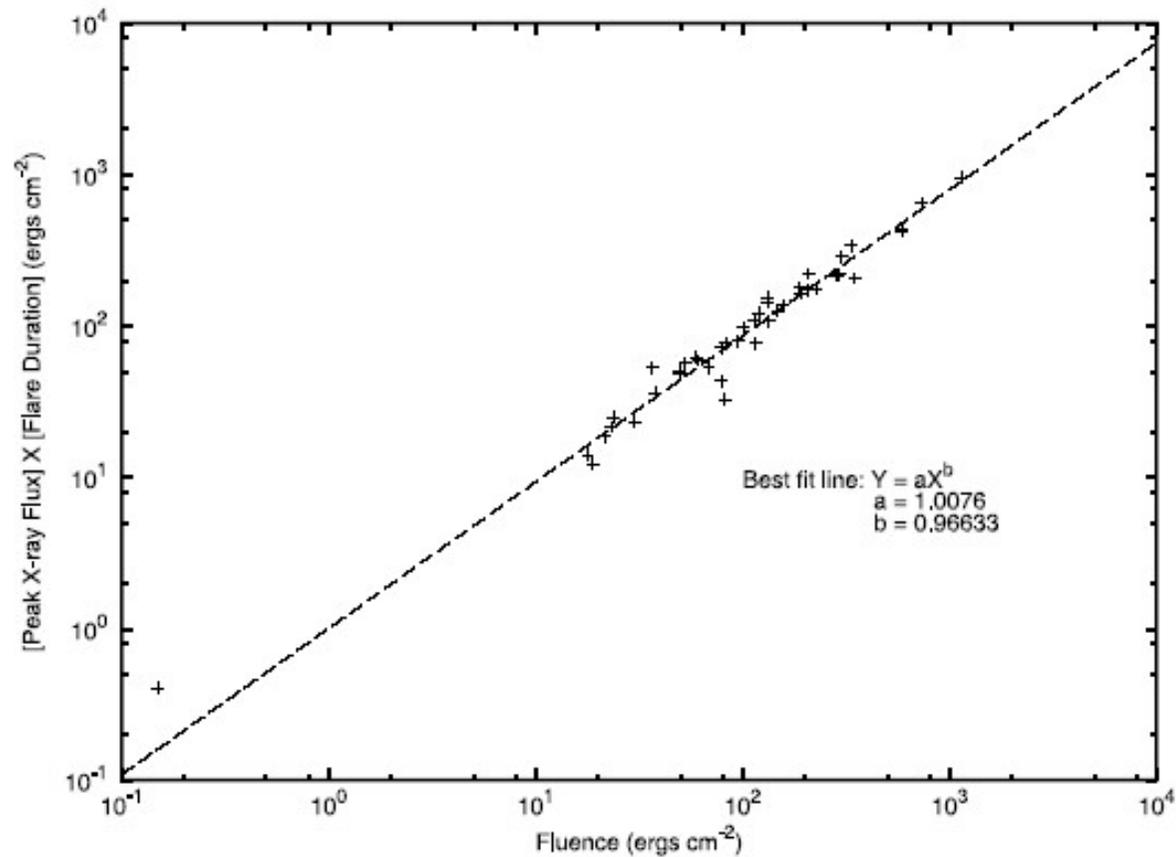


Figure 2. Scatter diagram for peak X-ray flux multiplied by flare duration versus fluence. The dashed line indicates least squares fit to the data. The data for the C1.7 flare (leftmost point in figure) was not used for fitting. The fluence was estimated by peak X-ray flux and flare duration within a factor of 2.

太阳高能粒子事件耀斑的关系

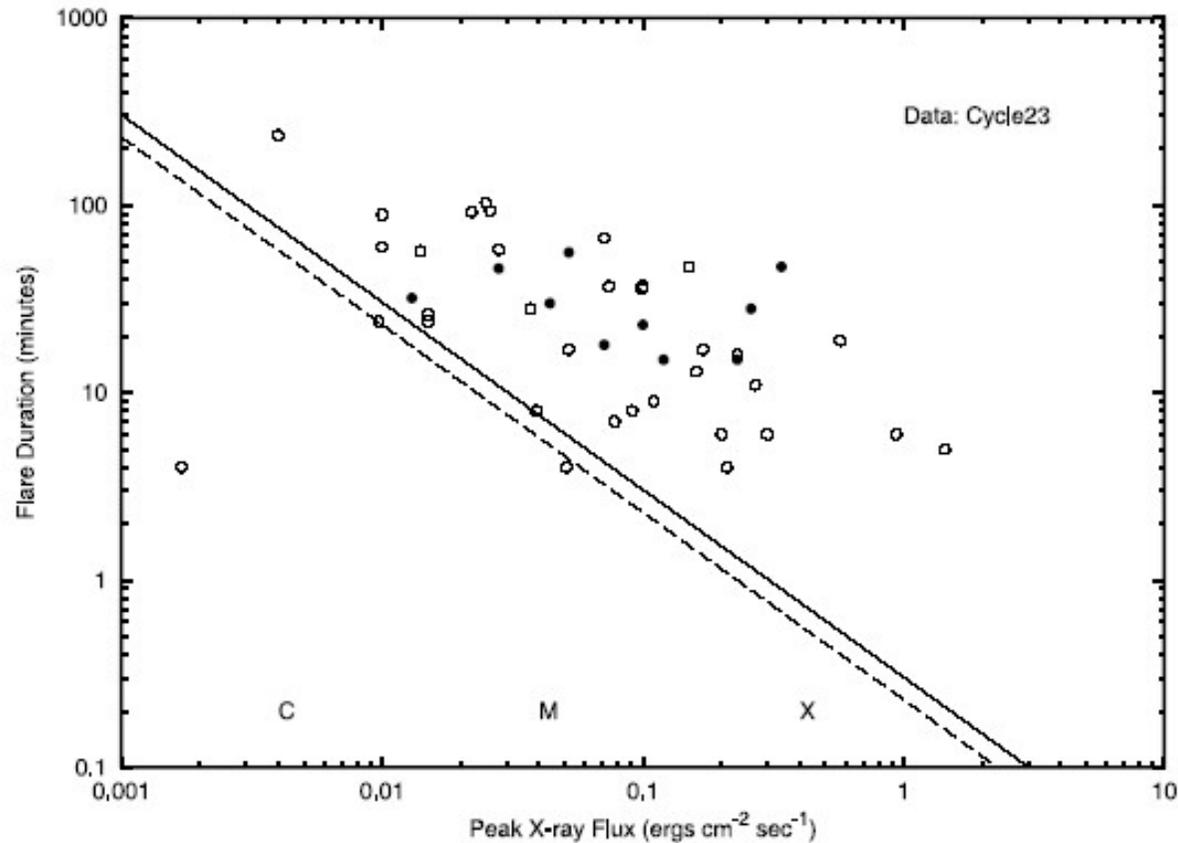
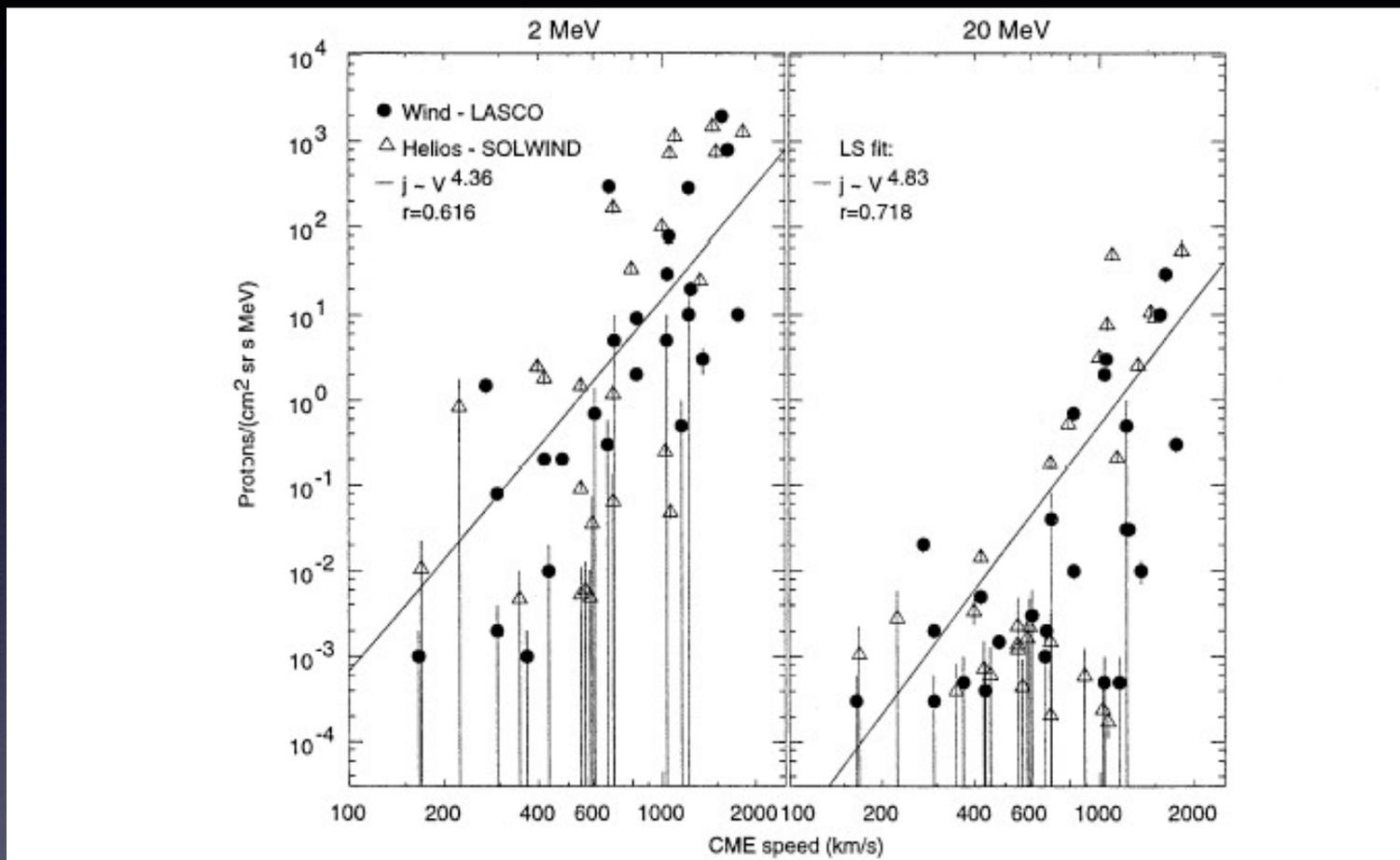


Figure 3. Scatter diagram for flare duration versus peak X-ray flux. The 23rd solar cycle data are plotted. The solid (dashed) line is the threshold line for 20 (15) ergs cm⁻² in fluence.

~30 min for an M1.0 flare
3 min for an X1.0 Flare

太阳高能粒子事件与日冕物质抛射速度的关系



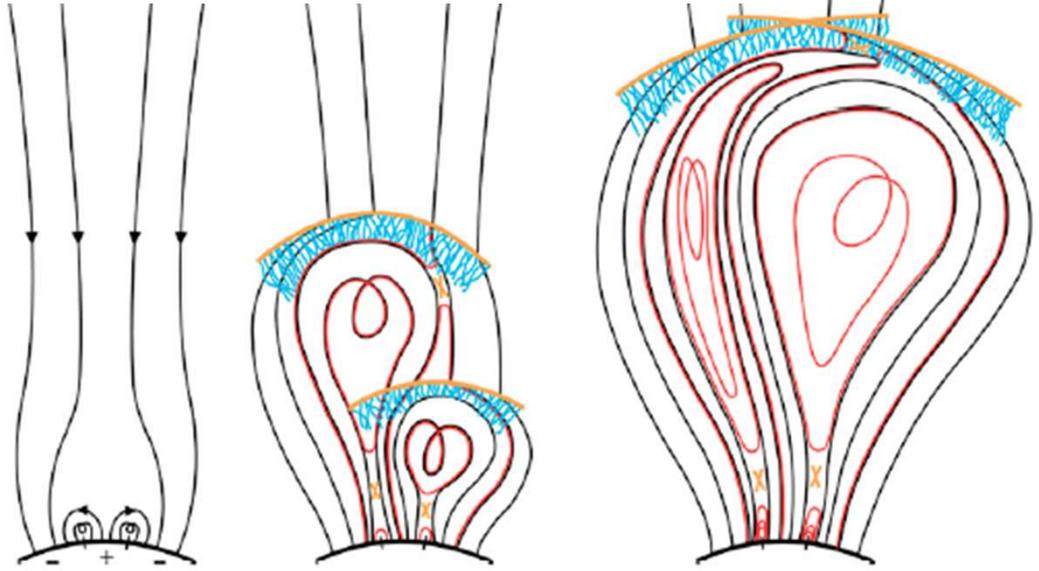
可能影响的因素：背景强度、激波强度、日冕物质抛射相互作用

日冕物质抛射相互作用对太阳高能粒子事件的影响

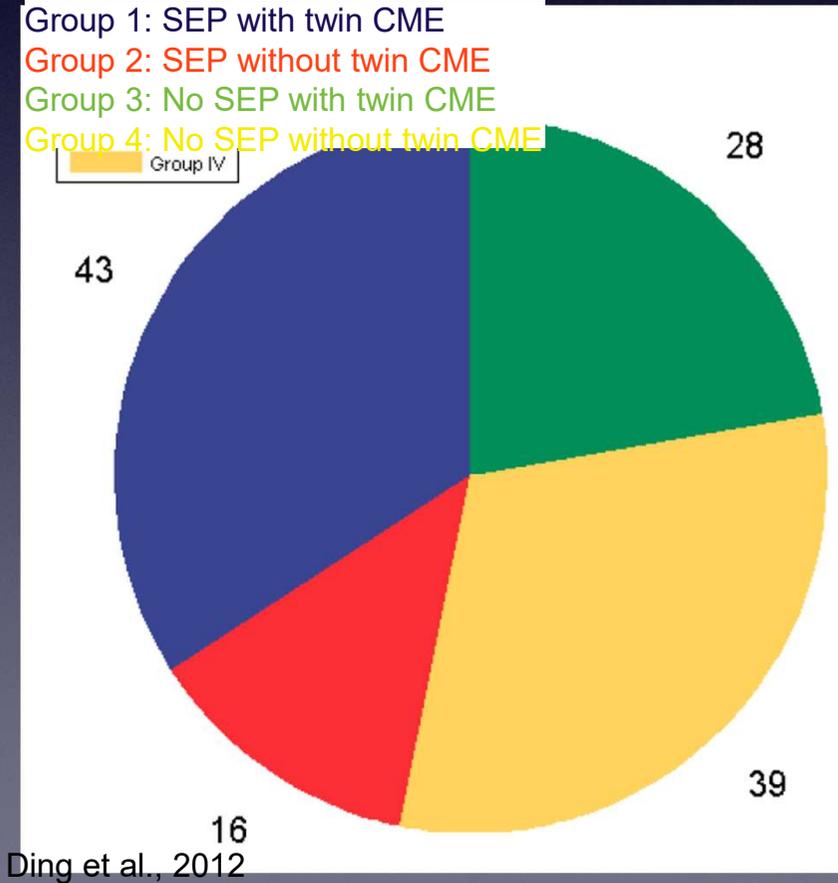
| Property | Major SEP | Minor SEP |
|--|-------------|-------------|
| No. of events | 43 | 39 |
| Average CME speed (km s^{-1}) | 1393 | 927 |
| CME longitude (deg) | >E32 | >E46 |
| Width > 100° | 41/42 (98%) | 34/39 (87%) |
| SEPs with CME interaction | 35/42 (83%) | 33/39 (84%) |
| SEPs with all interactions | 39/42 (93%) | 37/39 (95%) |
| Association with metric type II | 30/42 (71%) | 23/39 (59%) |
| Association with DH type II | 40/42 (95%) | 22/39 (56%) |
| Onset time difference (Δt hr) | 6.9 | 7.3 |
| Height of intersection (R_\odot) | 21 | 21 |
| P.A. overlap (Δw deg) | 50 | 53 |
| F/W CMEs with SEPs | 26/52 | 16/52 |
| Average CME speed (km s^{-1}) | 1433 | 1178 |
| Width > 100° | 25/26 (96%) | 15/16 (94%) |

几乎23周所有的地面增强事件 (GLE) 都存在日冕物质抛射的相互作用

“Twin-CME” scenario [Li et al., 2012]

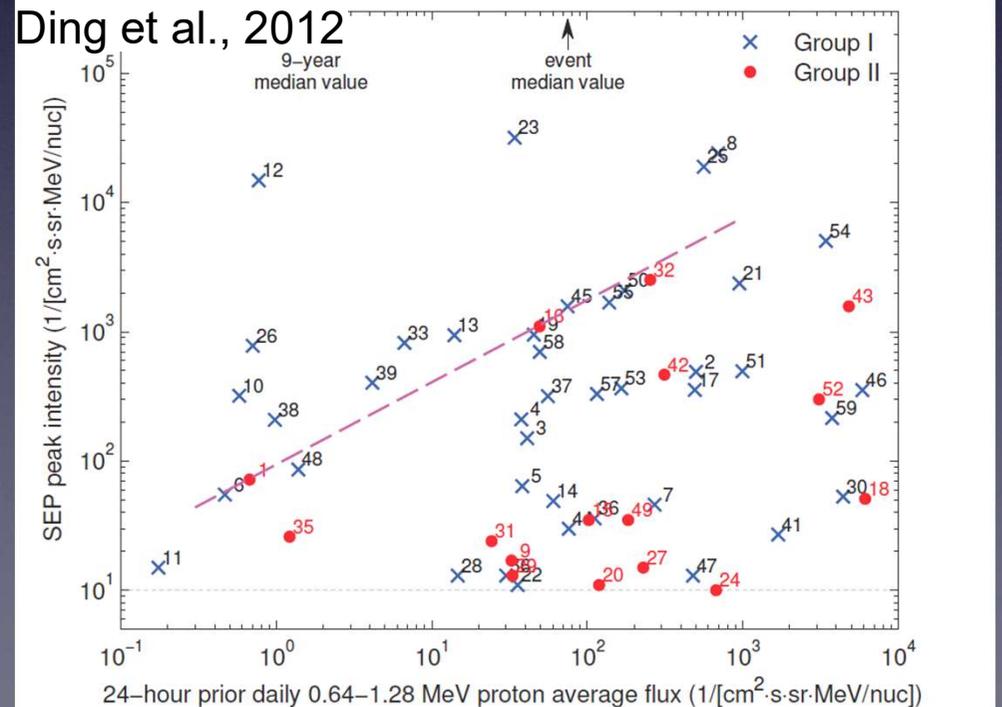


- Group 1: SEP with twin CME
- Group 2: SEP without twin CME
- Group 3: No SEP with twin CME
- Group 4: No SEP without twin CME

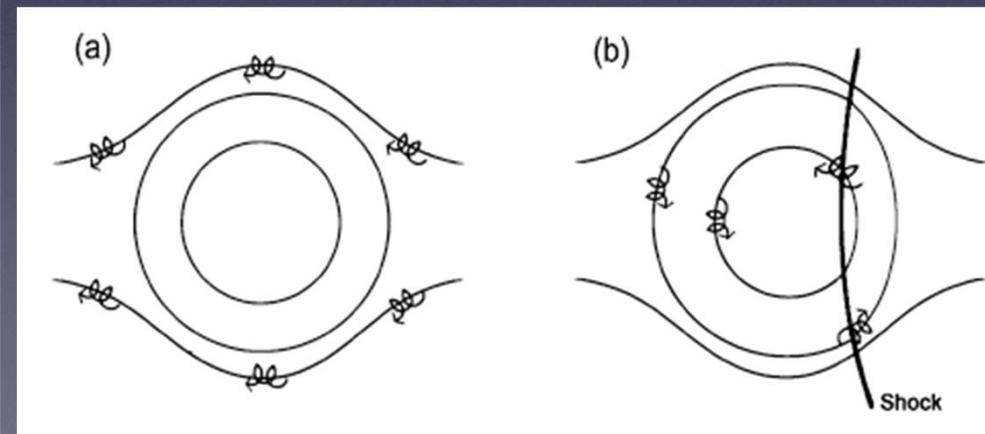
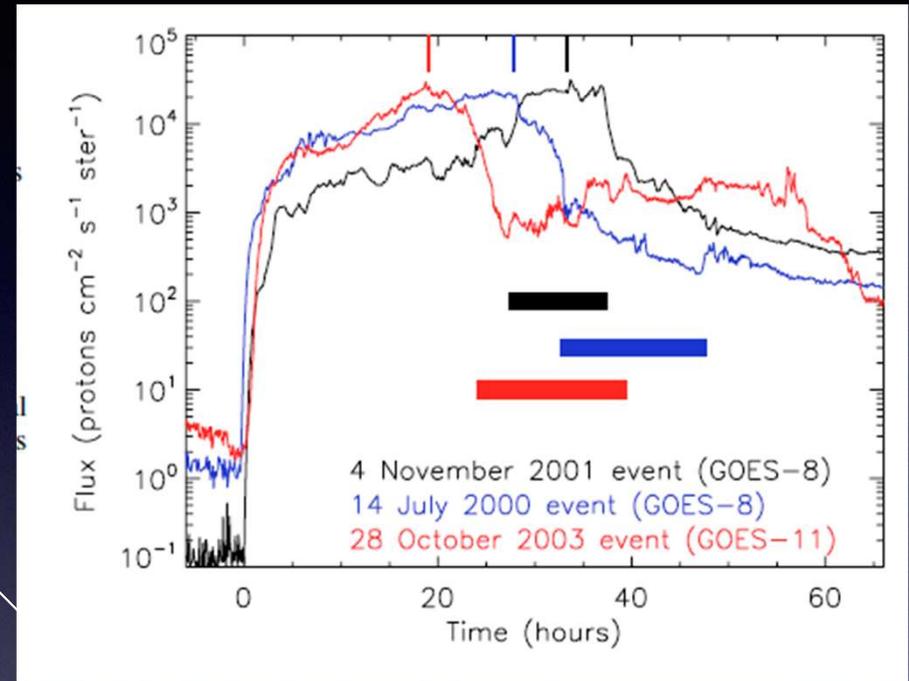
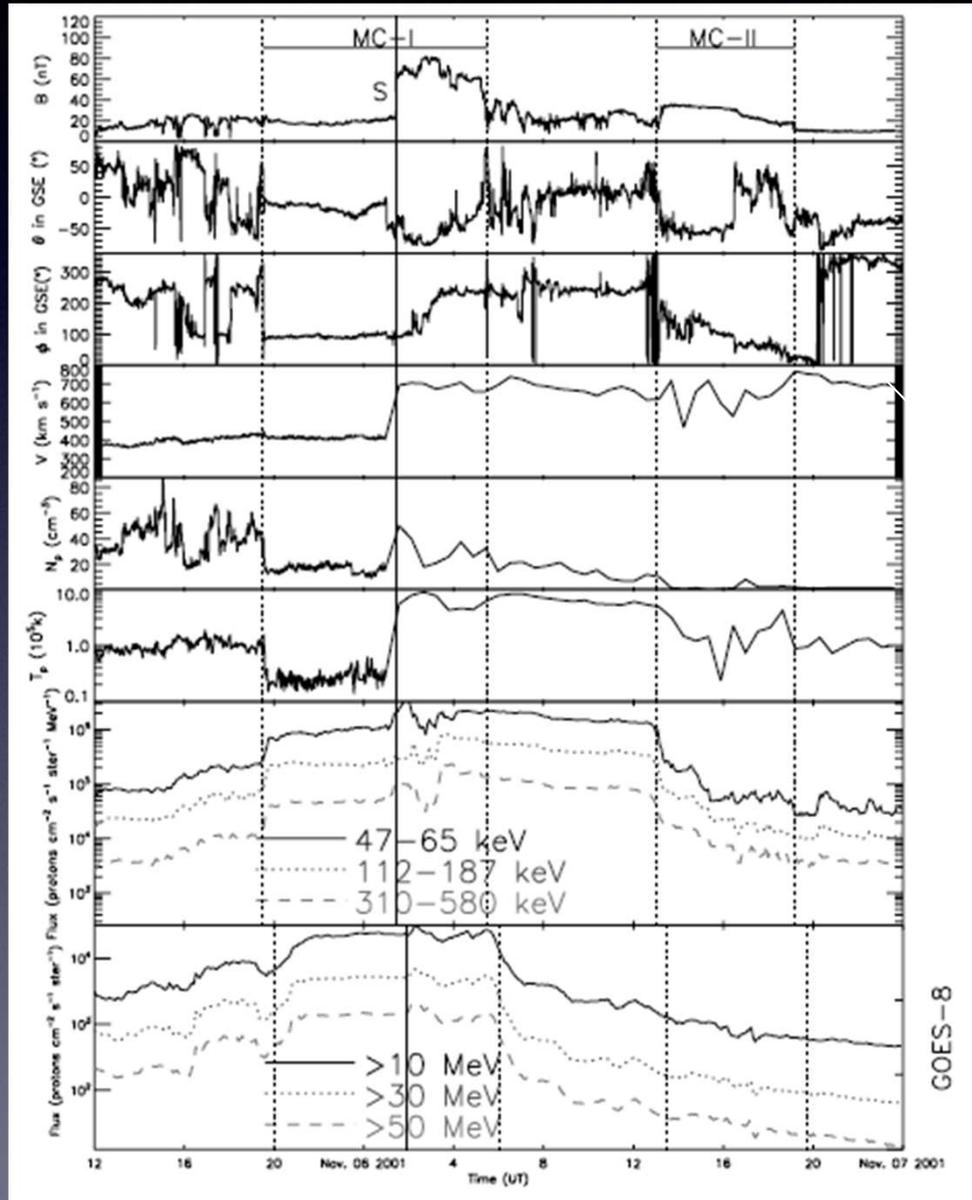


CME相互作用更容易产生大SEP

Ding et al., 2012

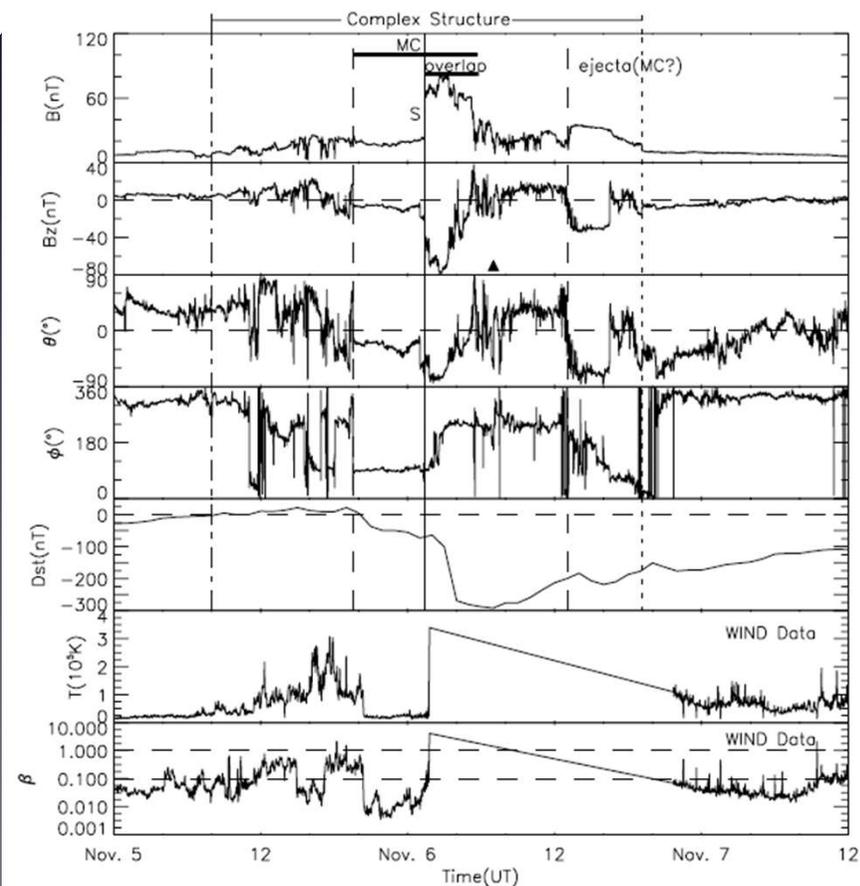
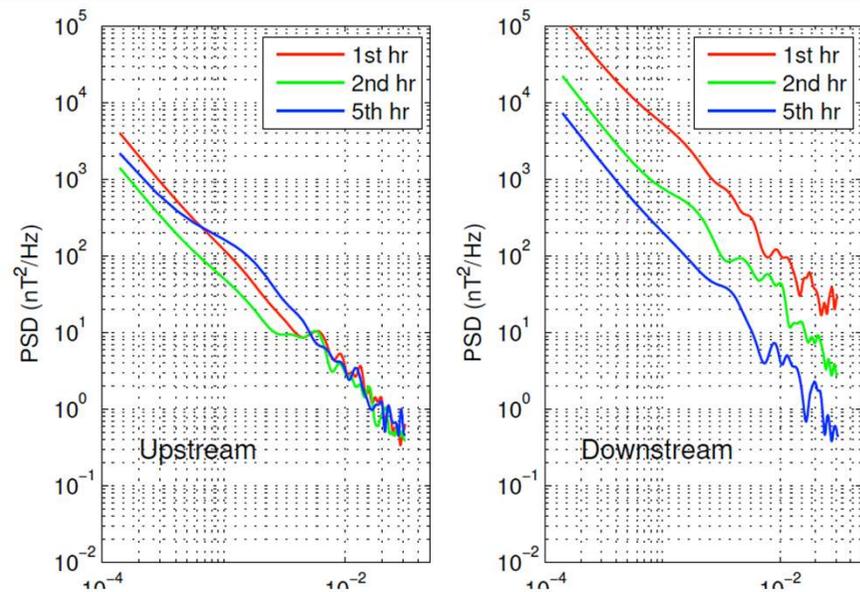


23周最大的太阳高能粒子事件



物理解释

- ★前一个激波引起了背景湍流的增强
- ★第一个激波的加速为后续加速提供了种子粒子
- ★前一个激波为后一个激波加速过程提供了新的约束机制。



耀斑、日冕物质抛射

射电辐射增强



射电爆发

耀斑

辐射增强



电离层扰动

耀斑、日冕物质抛射

能量粒子增多



高能粒子事件

日冕物质抛射、共转
流相互作用区

磁结构达到地球



地磁暴

太阳高能粒子事件的经度分布

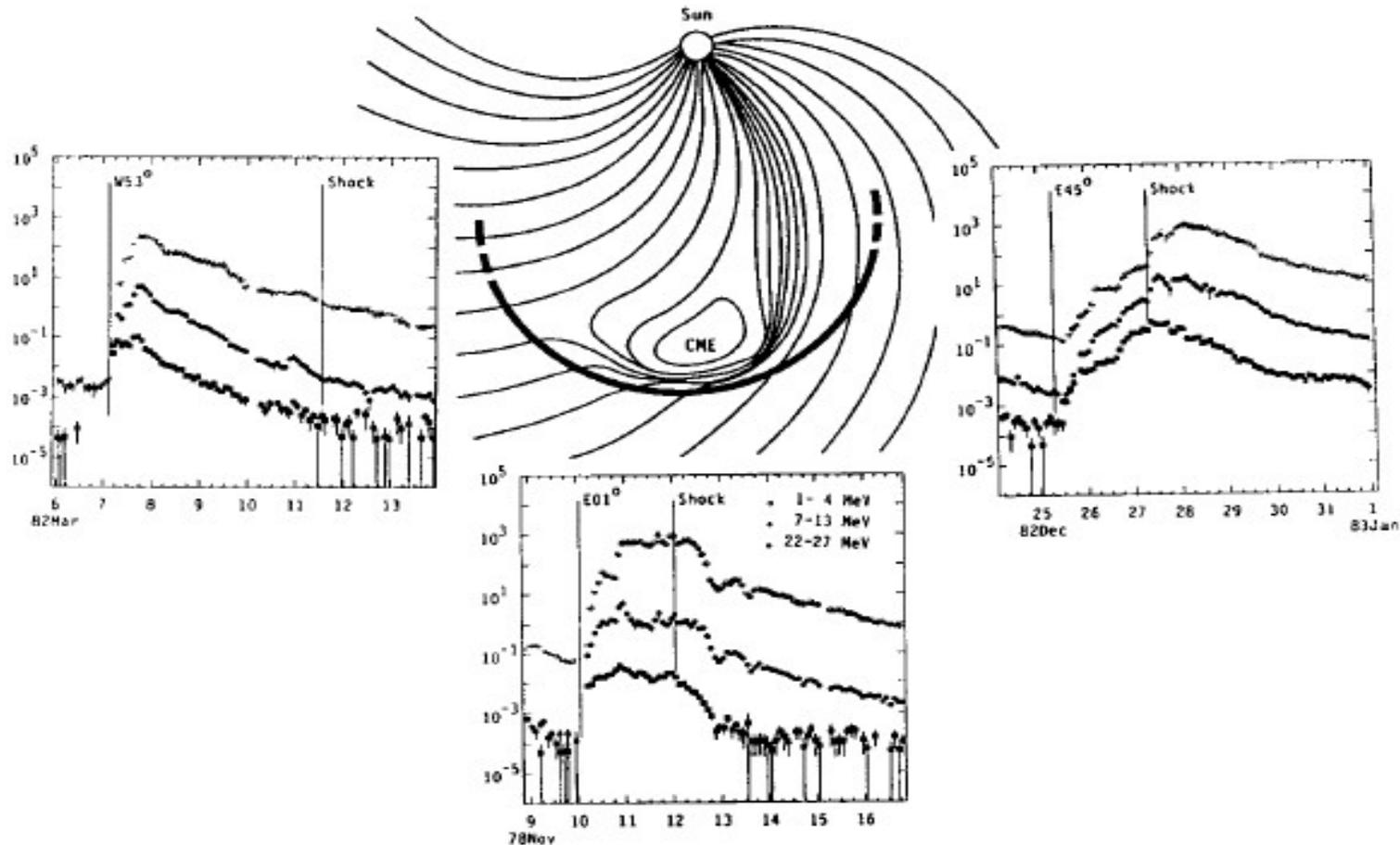
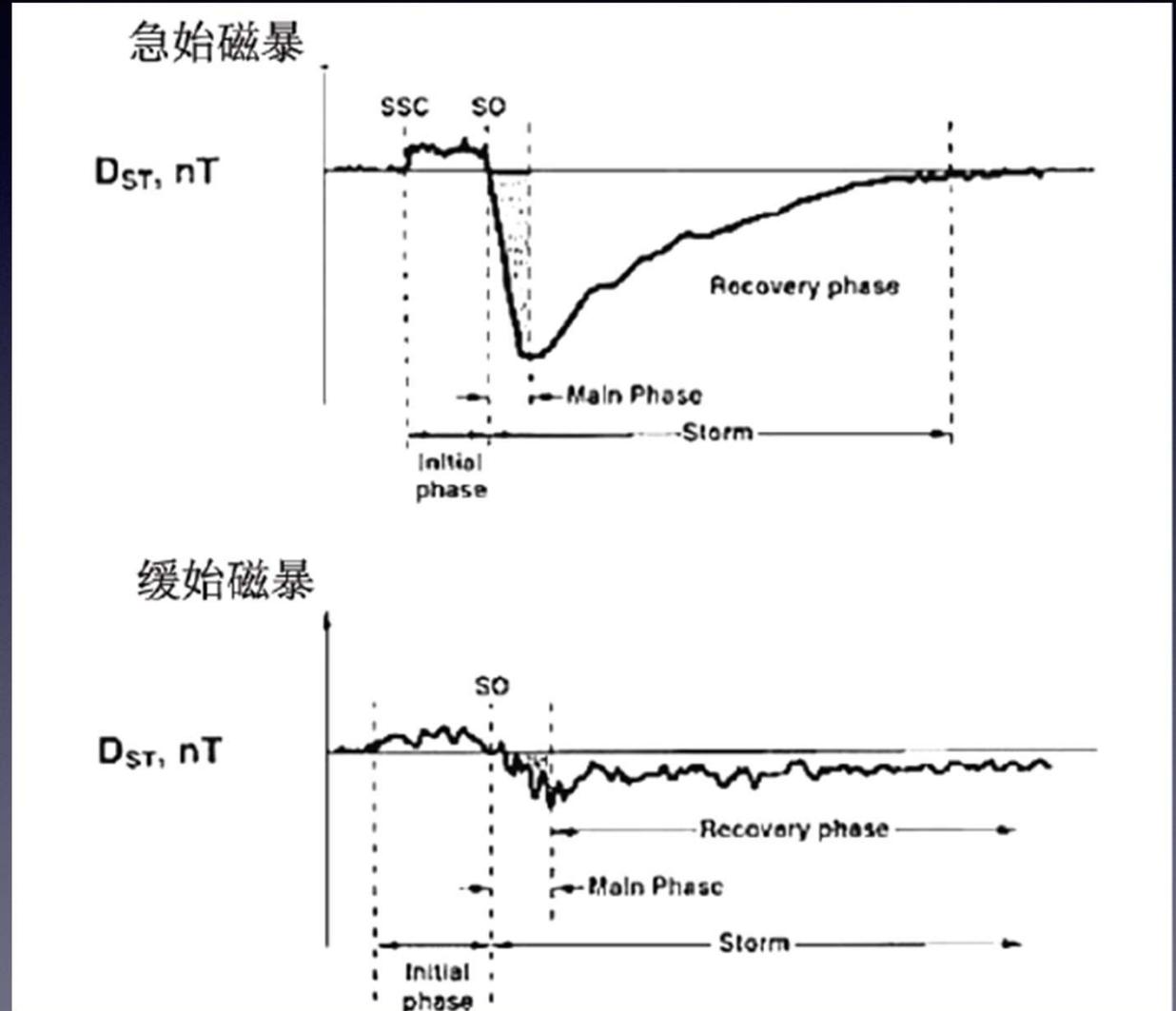


Figure 3.4. Typical intensity-time profiles are shown for 3 events viewed from different solar longitudes relative to the CME and shock.

思考题：为什么不同经度产生的太阳高能粒子事件曲线特点不一样？

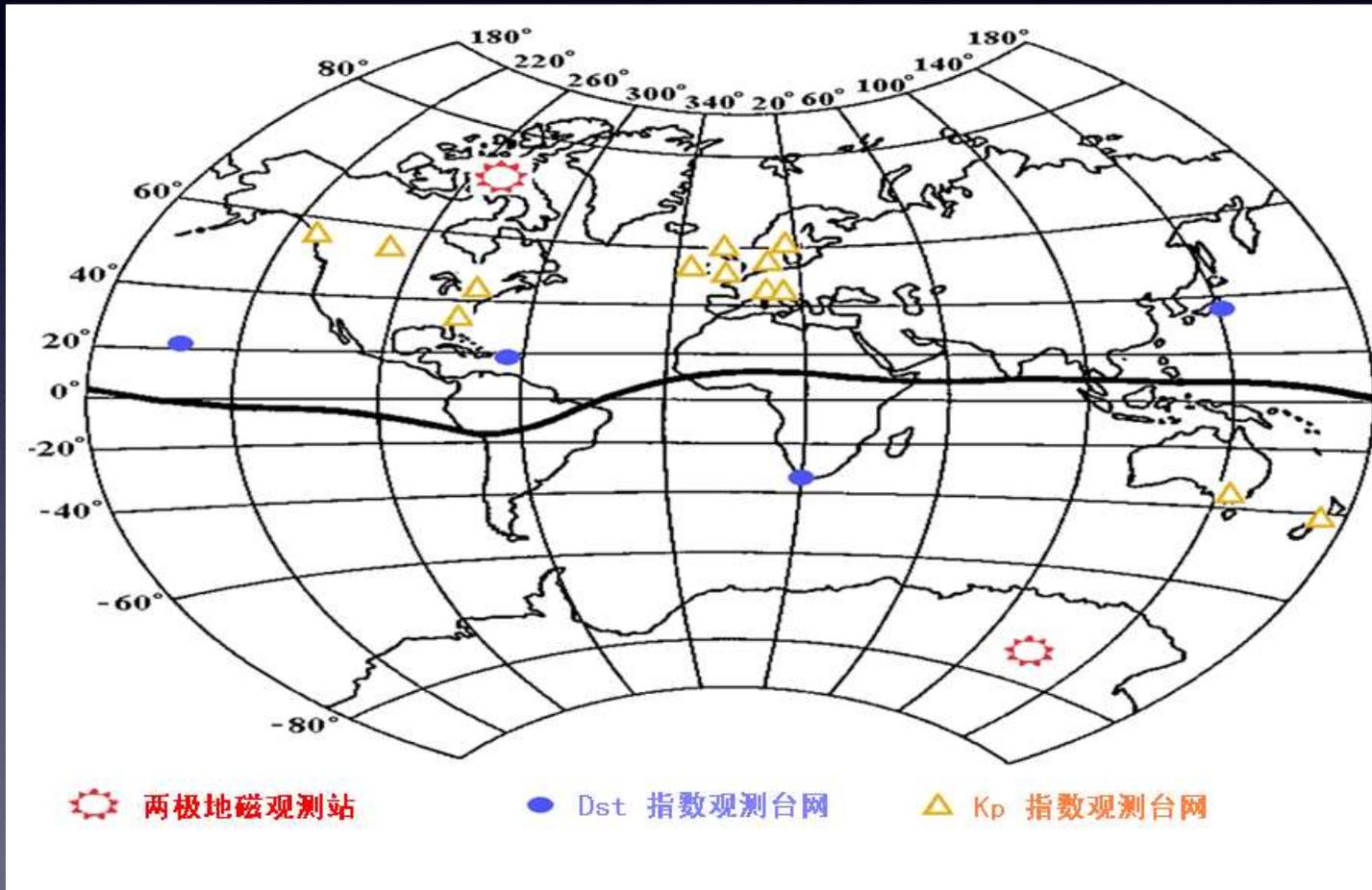
灾害性空间天气事件：地磁暴

地磁暴：在中低纬台站经常观测到的地磁场水平分量大幅度减小，并且大约持续数天，这种现象叫做地磁暴。



常用地磁指数

Dst指数、Kp指数、Ap指数



Dst指数

- ✓ **指数定义**: 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分量扰动值按一定权重平均即为Dst指数。
- ✓ **取值范围**: 正几十纳特斯拉到负几千纳特斯拉。
- ✓ **指数意义**: 描述了磁暴期间环电流的变化。
- ✓ **时间频率**: 1小时。
- ✓ **更新情况**: 由世界数据中心东京站 (WDC-Kyoto [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>])。包含初始数据 (Preliminary)，确定后发布最终数据 (Final)。



Kp指数

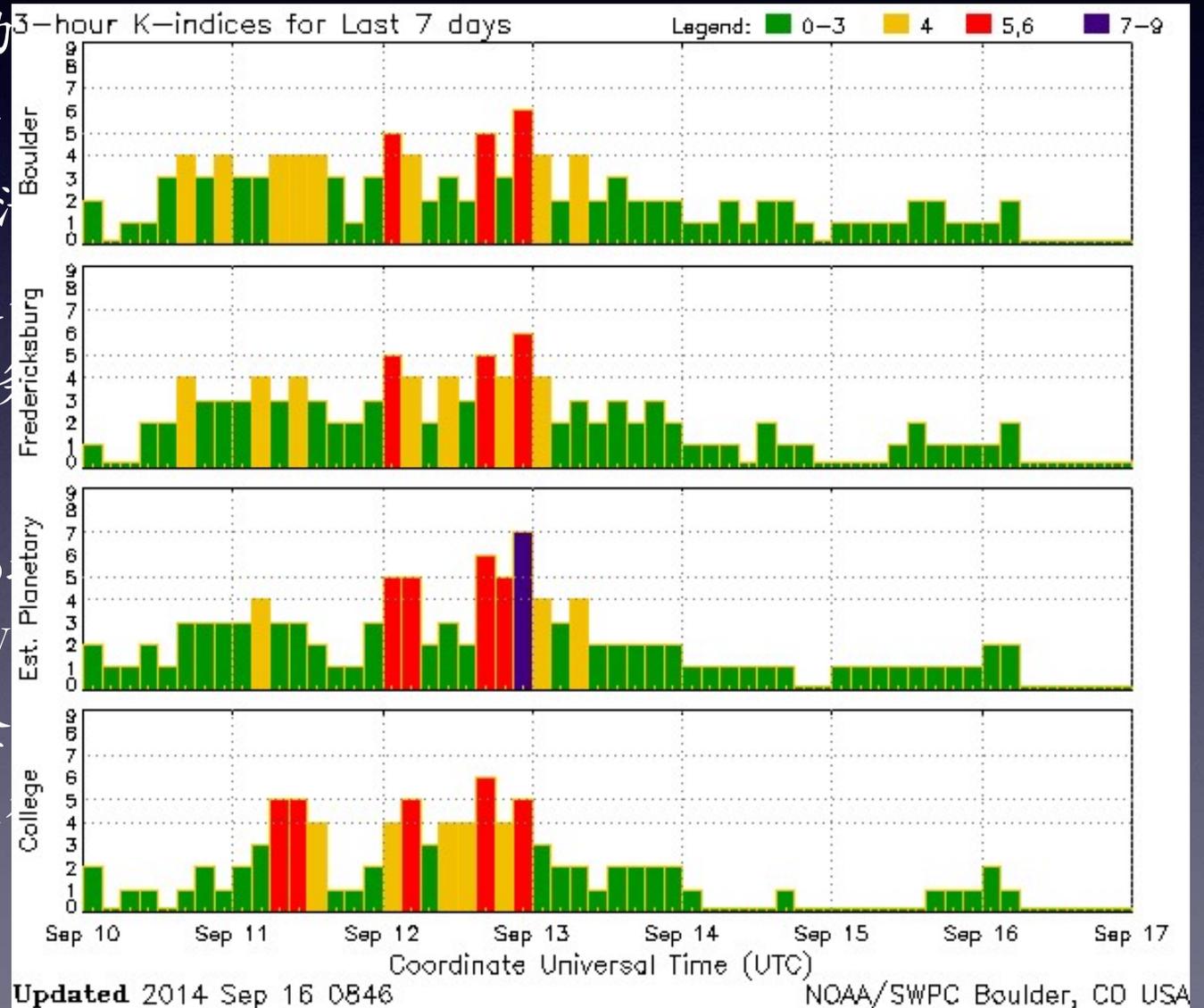
☑ K指数：描述单个地磁台站3小时时段内地磁扰动等级的指数，称为“三小时磁情指数”。取0到9共分10级，0表示地磁活动平静，9表示地磁扰动

☑ Kp指数：全球地磁扰动等级的指数，用于表示全球地磁扰动

☑ 指数意义：Kp描述地磁扰动等级，其数值大小赋予其较强的业务意义

☑ 时间频率：3小时。

☑ 更新情况：官方Kp指数由美国国家空间天气中心（NOAA/SWPC）提供，其更新频率为3小时。官方Kp指数一致性



Ap指数

- ☑指数定义：首先按照换算表格由Kp对应得到ap指数，一天8个ap的平均即为Ap指数。
- ☑取值范围：0到400，值越大，地磁扰动越强。
- ☑指数意义：Kp指数与磁扰幅度是非线性的，是个等级，没有单位，转化后的Ap指数单位为2nT，可表征全球地磁扰动的幅度。
- ☑时间频率：1天。
- ☑更新情况：和官方Kp指数同步更新。

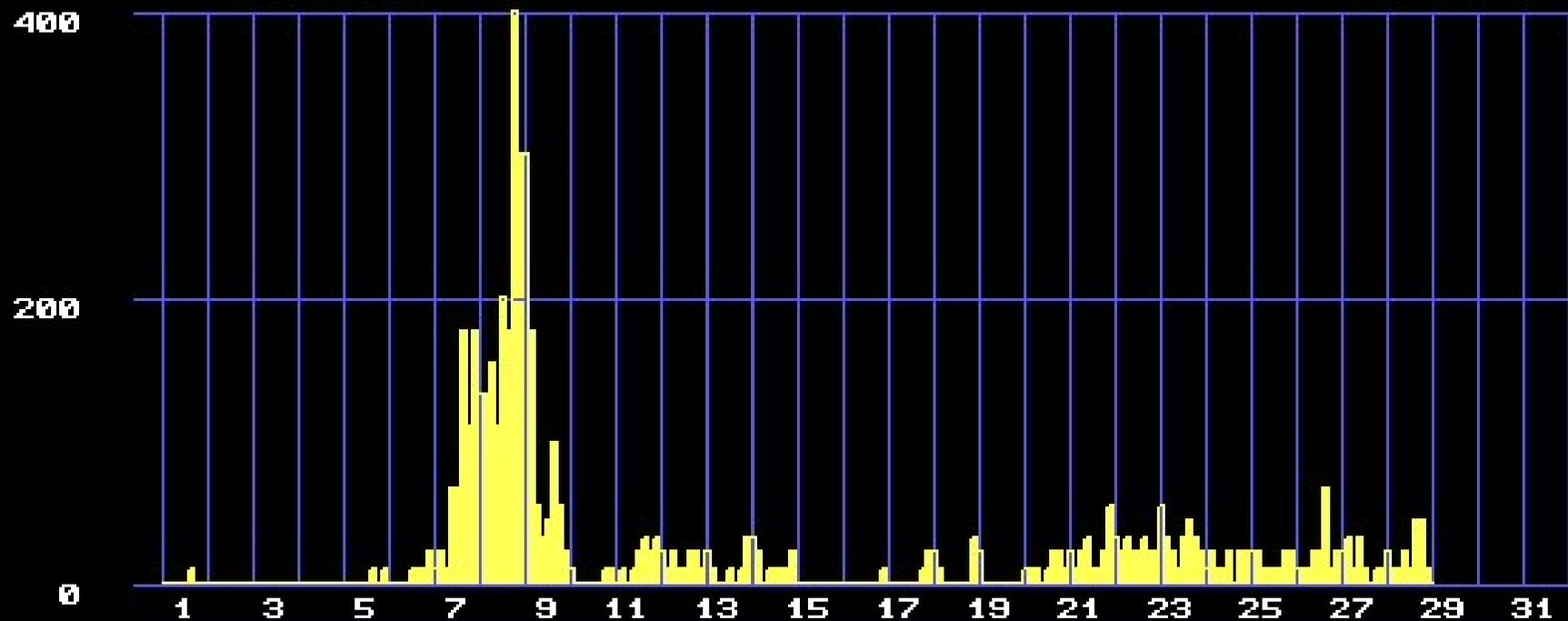
Kp指数和Ap
指数换算表

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Kp = 0o | 0+ | 1- | 1o | 1+ | 2- | 2o | 2+ | 3- | 3o | 3+ | 4- | 4o | 4+ |
| ap = 0 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 9 | 12 | 15 | 18 | 22 | 27 | 32 |
| Kp = 5- | 5o | 5+ | 6- | 6o | 6+ | 7- | 7o | 7+ | 8- | 8o | 8+ | 9- | 9o |
| ap = 39 | 48 | 56 | 67 | 80 | 94 | 111 | 132 | 154 | 179 | 207 | 236 | 300 | 400 |

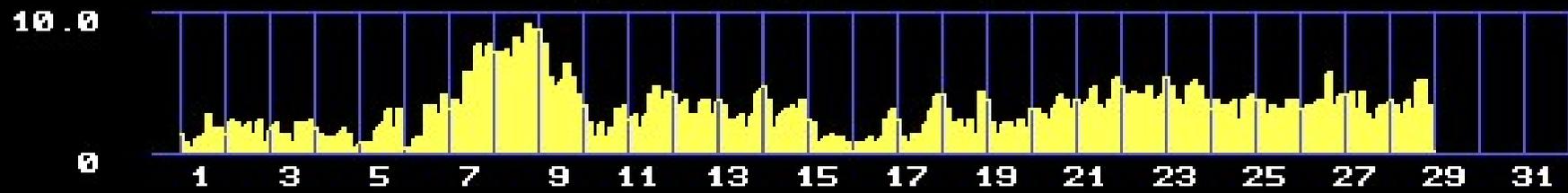
ap 3--HOURLY I n d i c e s

Year=1986

Month= 2



Kp 3--HOURLY I n d i c e s



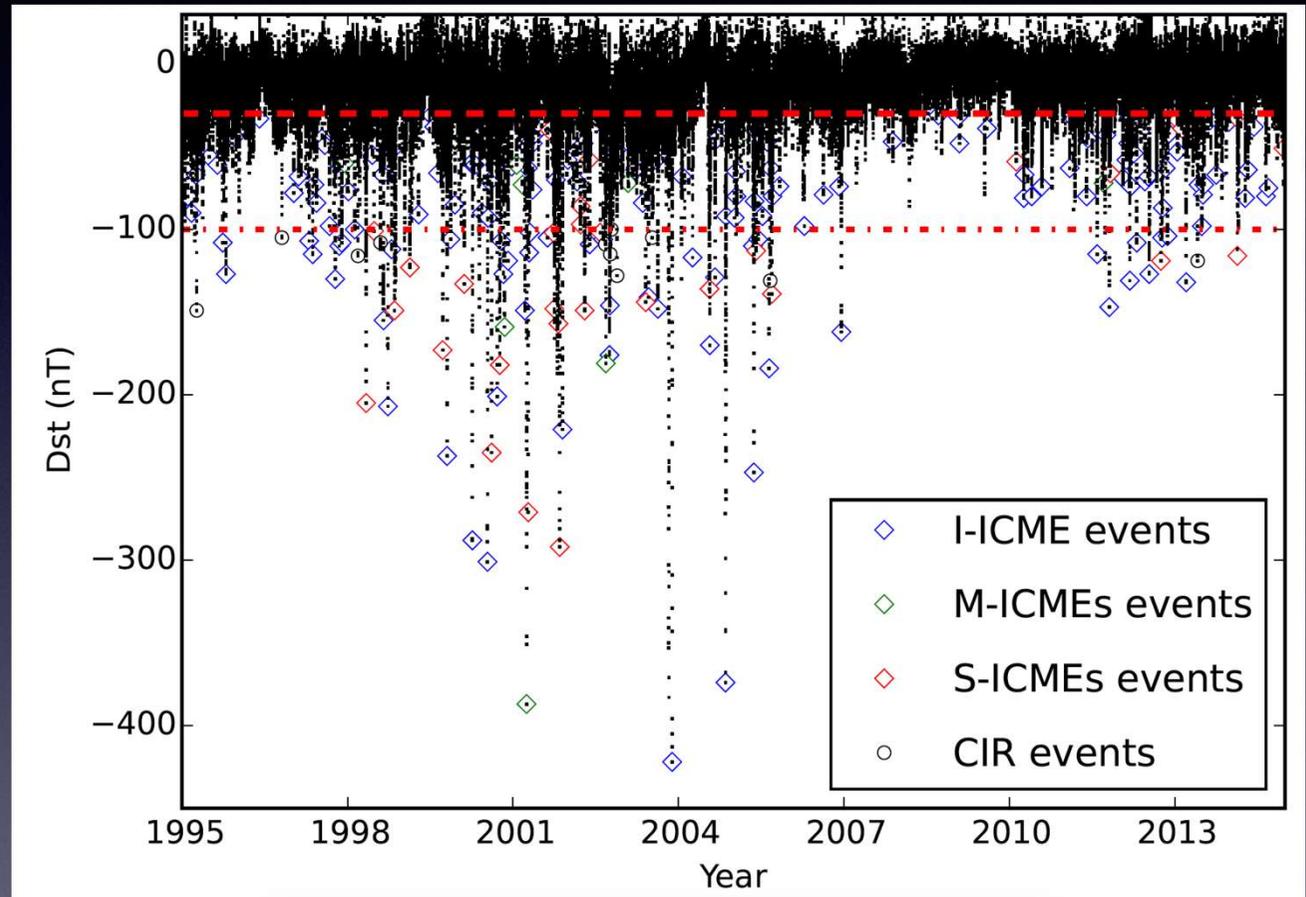
地磁暴的分类

$Dst_{min} \leq -30\text{nT}$: 地磁暴

$-50\text{nT} \geq Dst_{min} > -100\text{nT}$:
中等地磁暴

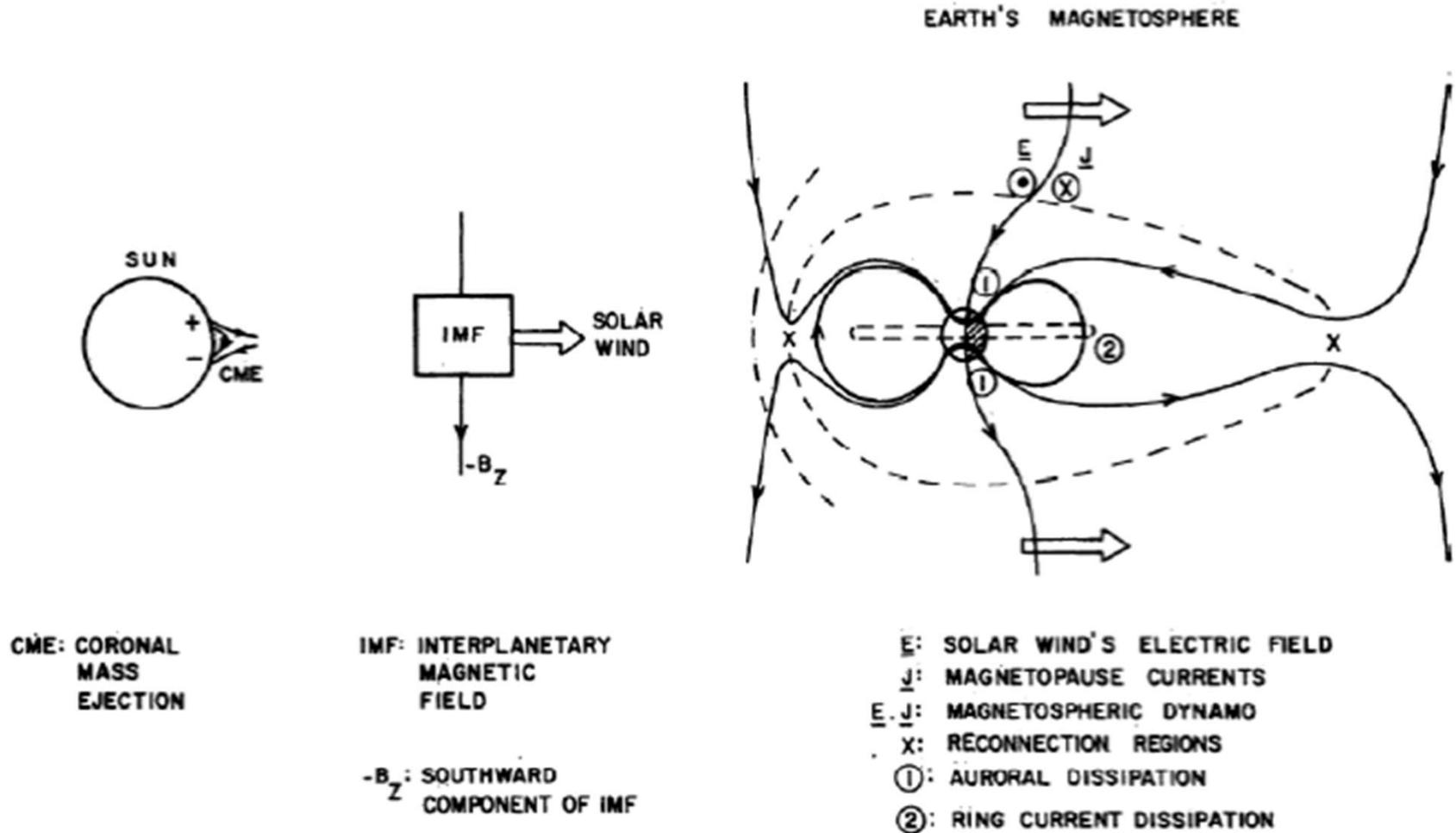
$Dst_{min} \leq -100\text{nT}$: 强
地磁暴

$Dst_{min} \leq -200\text{nT}$: 超
强地磁暴

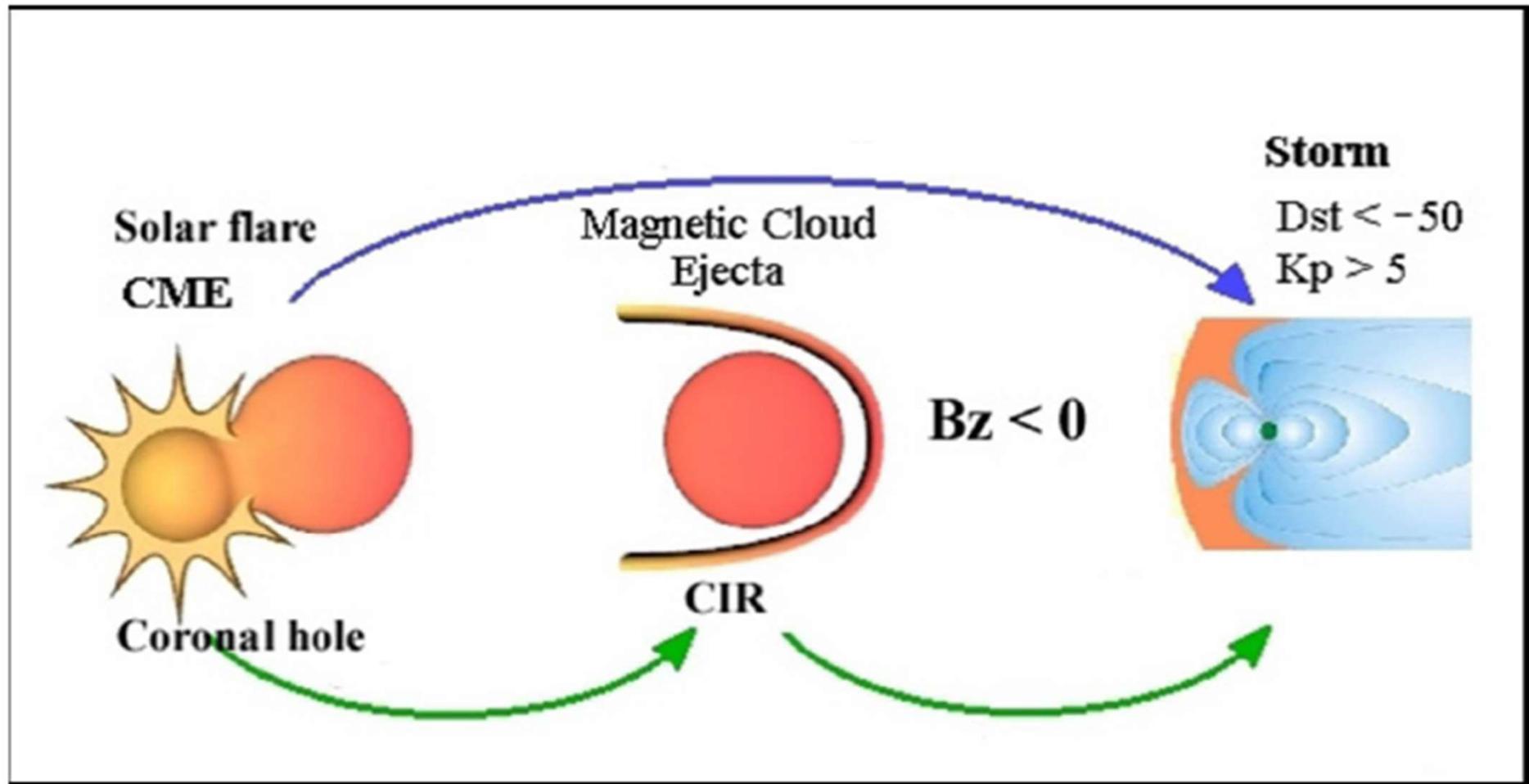


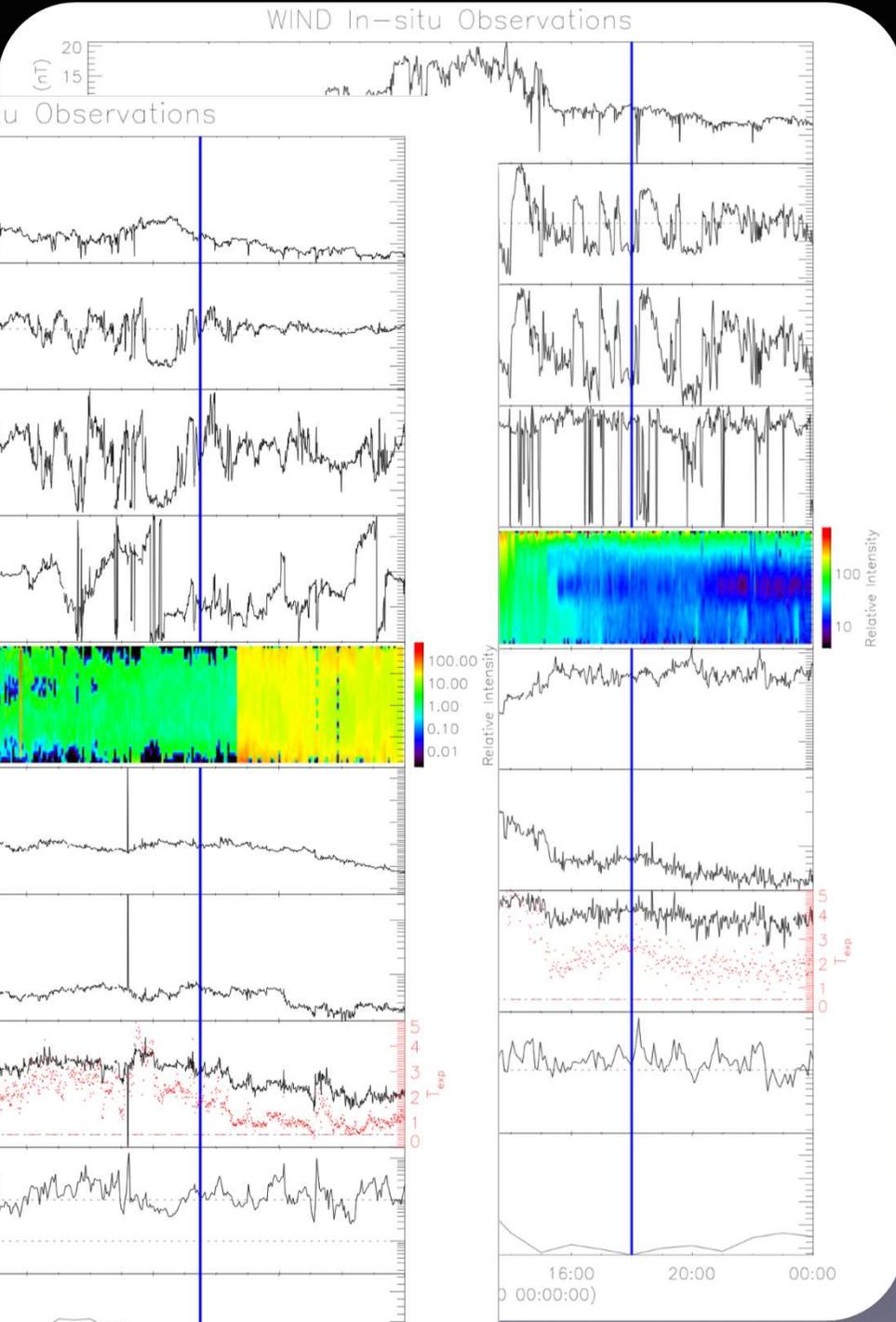
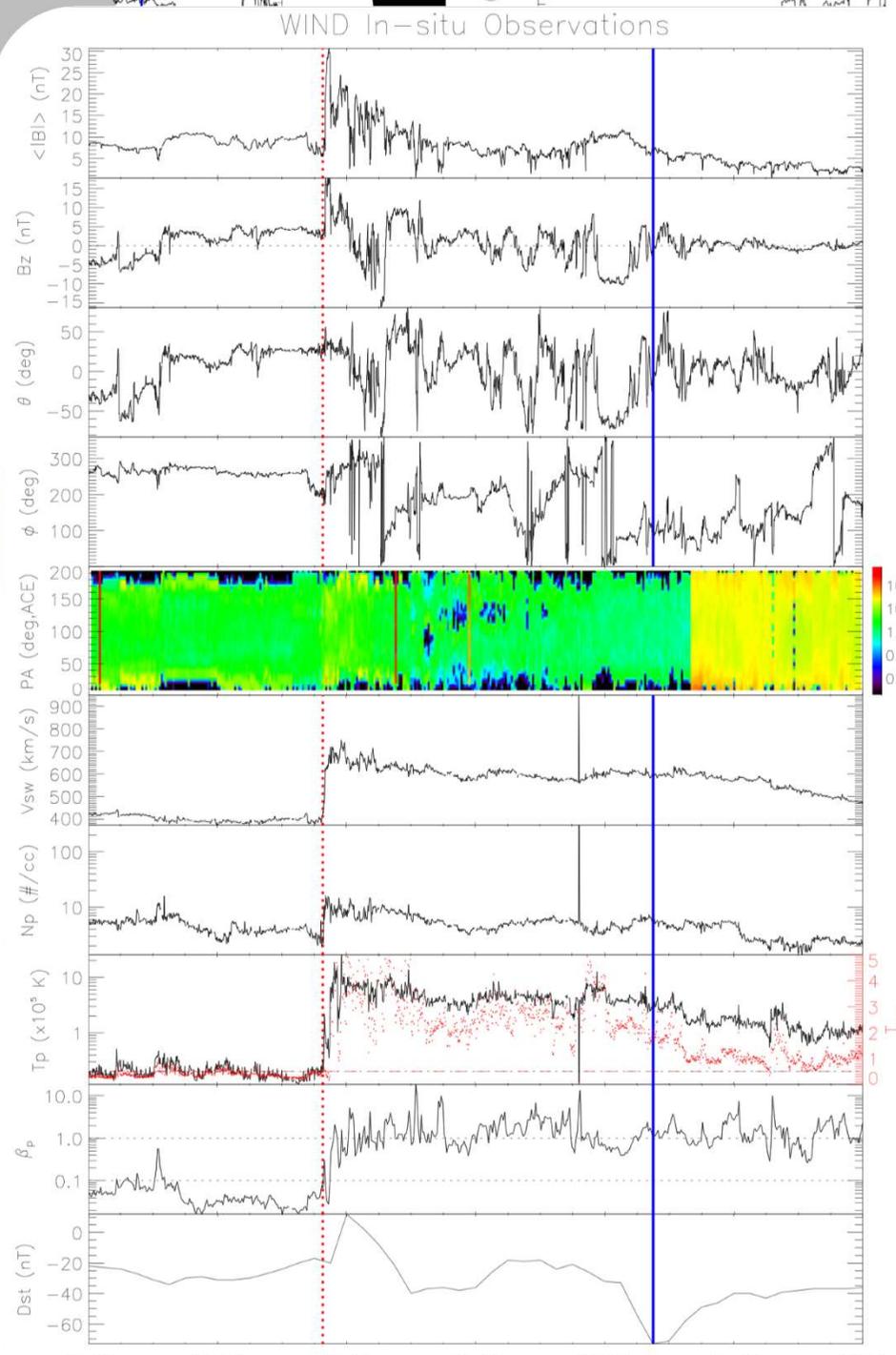
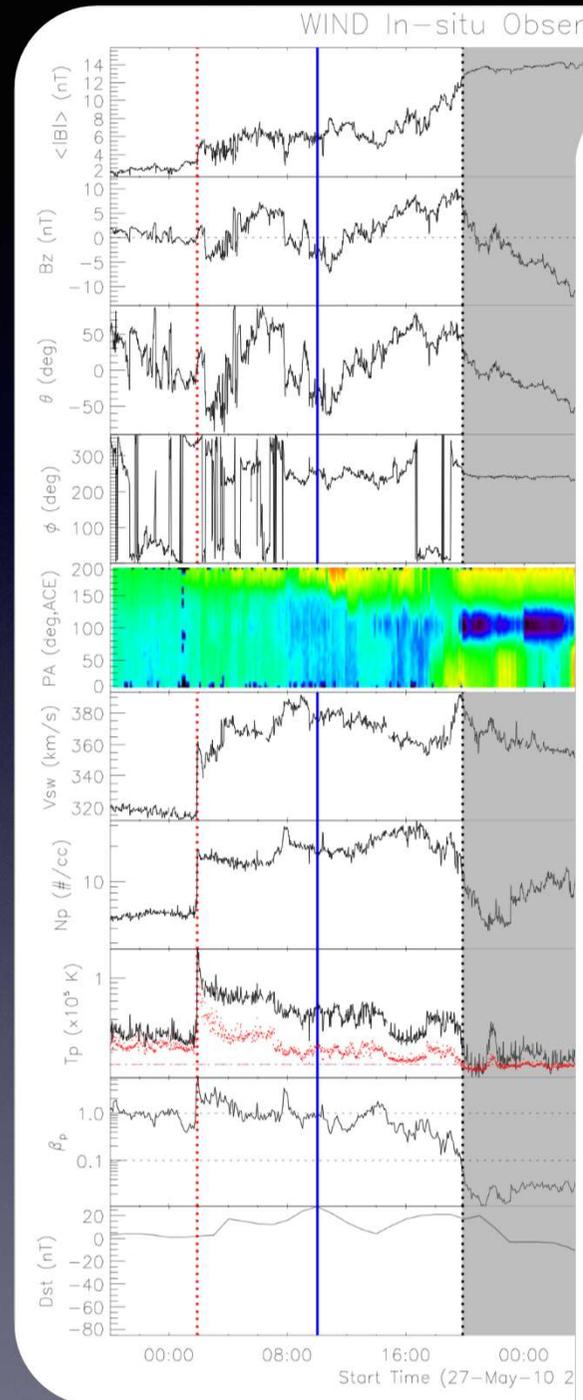
地磁暴形成过程示意图

SOLAR - INTERPLANETARY - MAGNETOSPHERE COUPLING

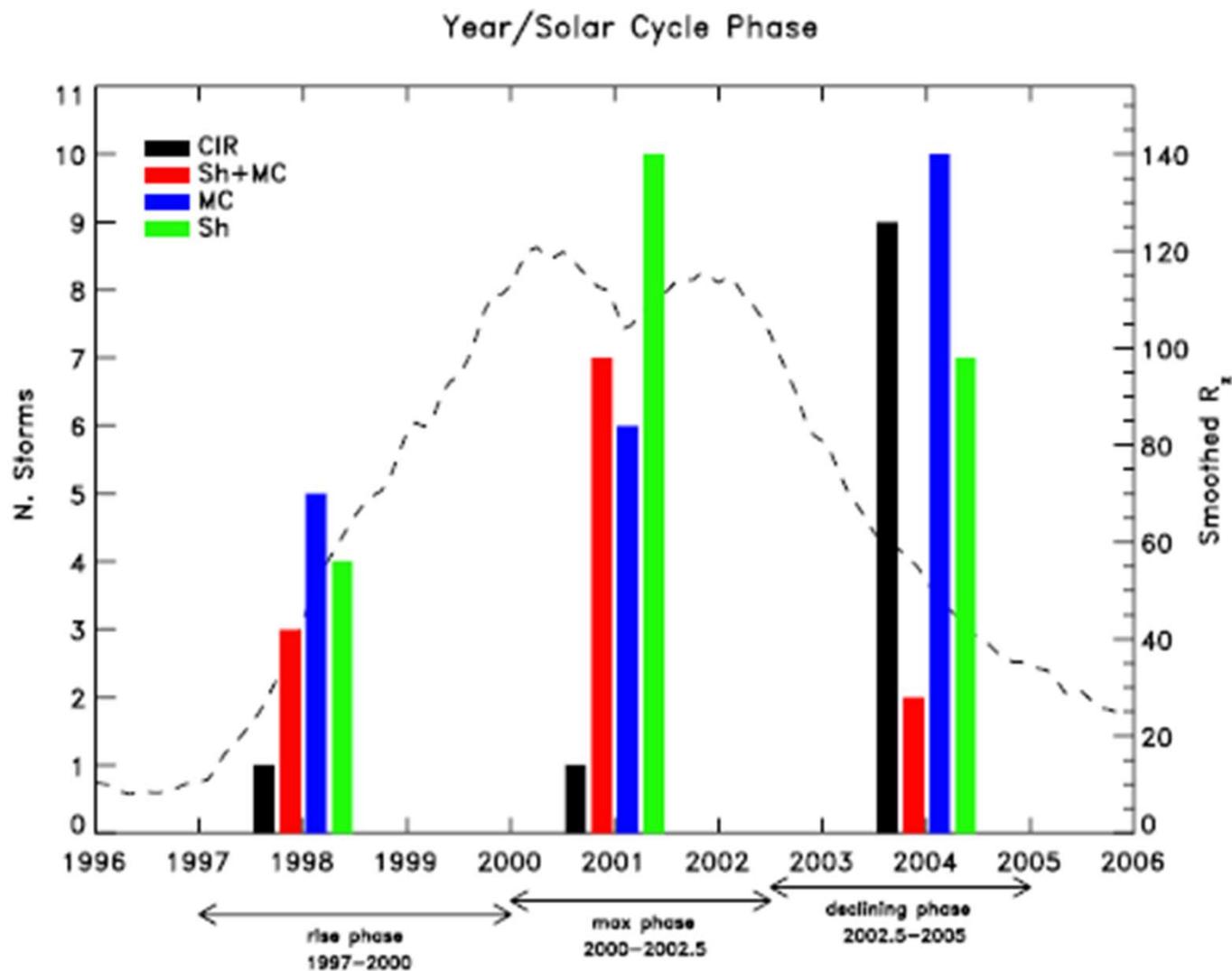


地磁暴的行星际和太阳源

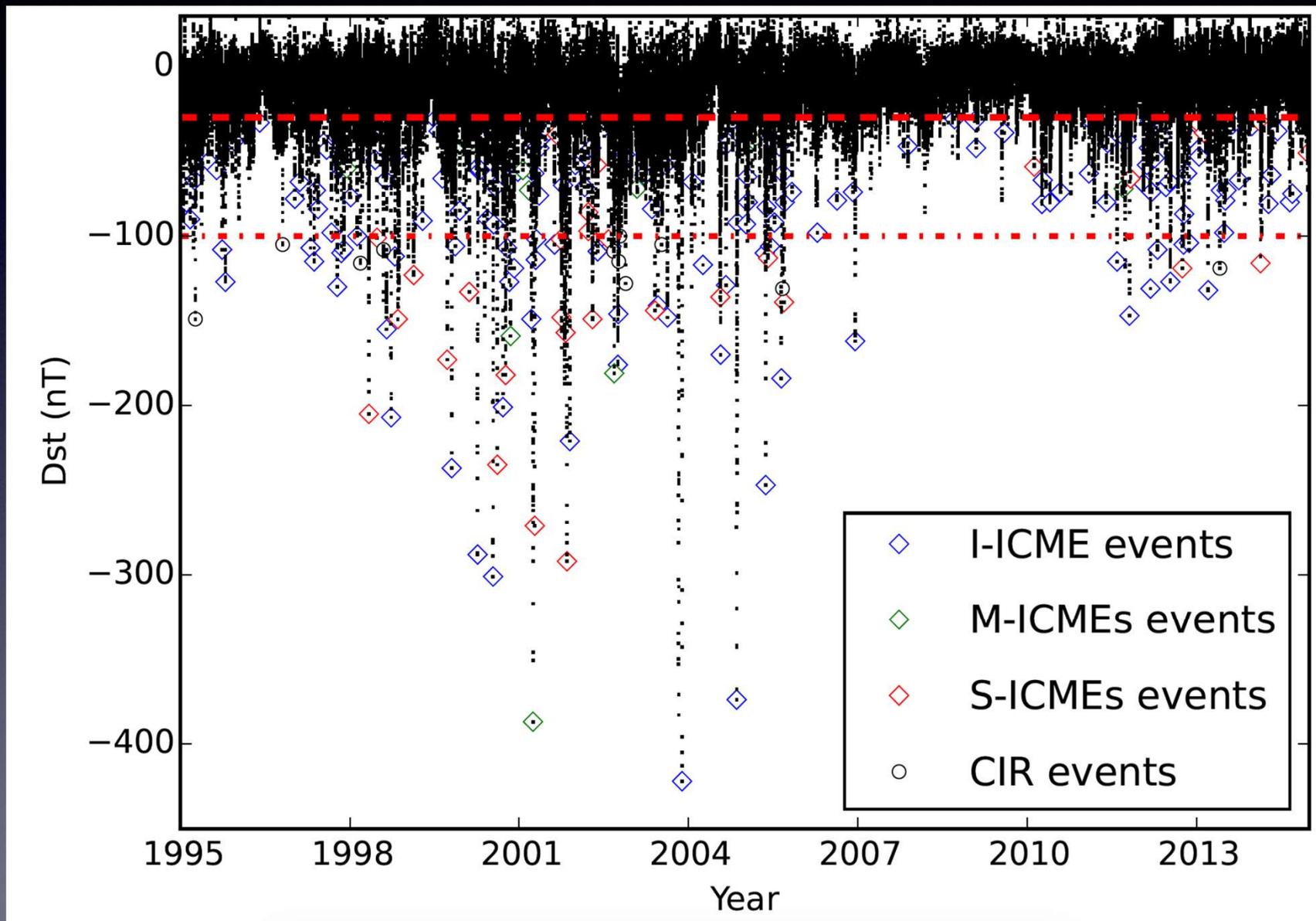




地磁爆行星际源在不同太阳活动阶段的差别



地磁暴行星际源在不同太阳活动阶段的差别

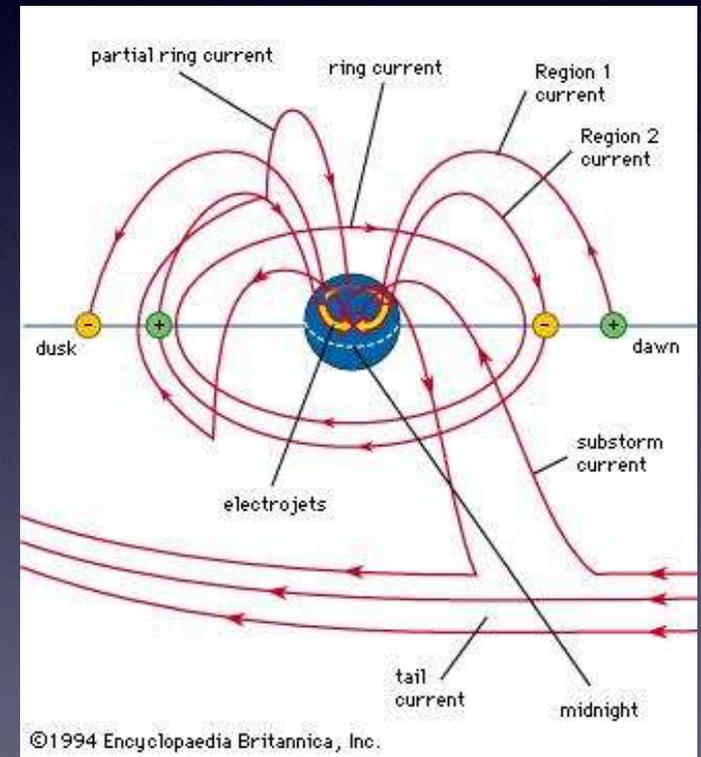
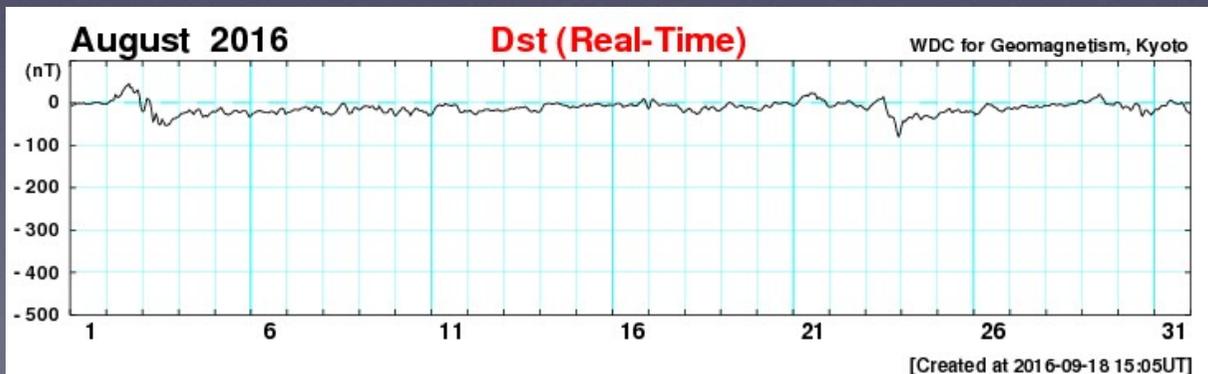


地磁暴强度与其他参数的关系

行星际参数变化引起的赤道环电流增加对地磁扰动的贡献可以用Dst*表示：

$$Dst^* = Dst - bP^{1/2} + c$$

$P = \rho v^2$ 为太阳风动压, b 为比例系数, c 为宁静是太阳风动压的贡献。



地磁爆强度与其他参数的关系

Dst*还可以进一步由表征能量输入的耦合函数Q和耗散时间 τ （一般可认为常数）来表示：

$$\frac{dDst^*(t)}{dt} = Q(t) - \frac{Dst^*(t)}{\tau}$$

$$Dst^* = e^{-\tau/t} [Dst^*(0) + \int_0^t Q(z) e^{z/\tau} dz]$$

耦合函数Q：

与电场相关： $VB_z, VB_T, VB_T \sin(\theta/2)$

与能量相关： $\varepsilon = V L_0^2 B^2 \sin^4(\theta/2)$

$$(\rho V^2)^{1/2} VB_z,$$

$$(\rho V^2)^{-1/3} V B_T^2 \sin^4(\theta/2)$$

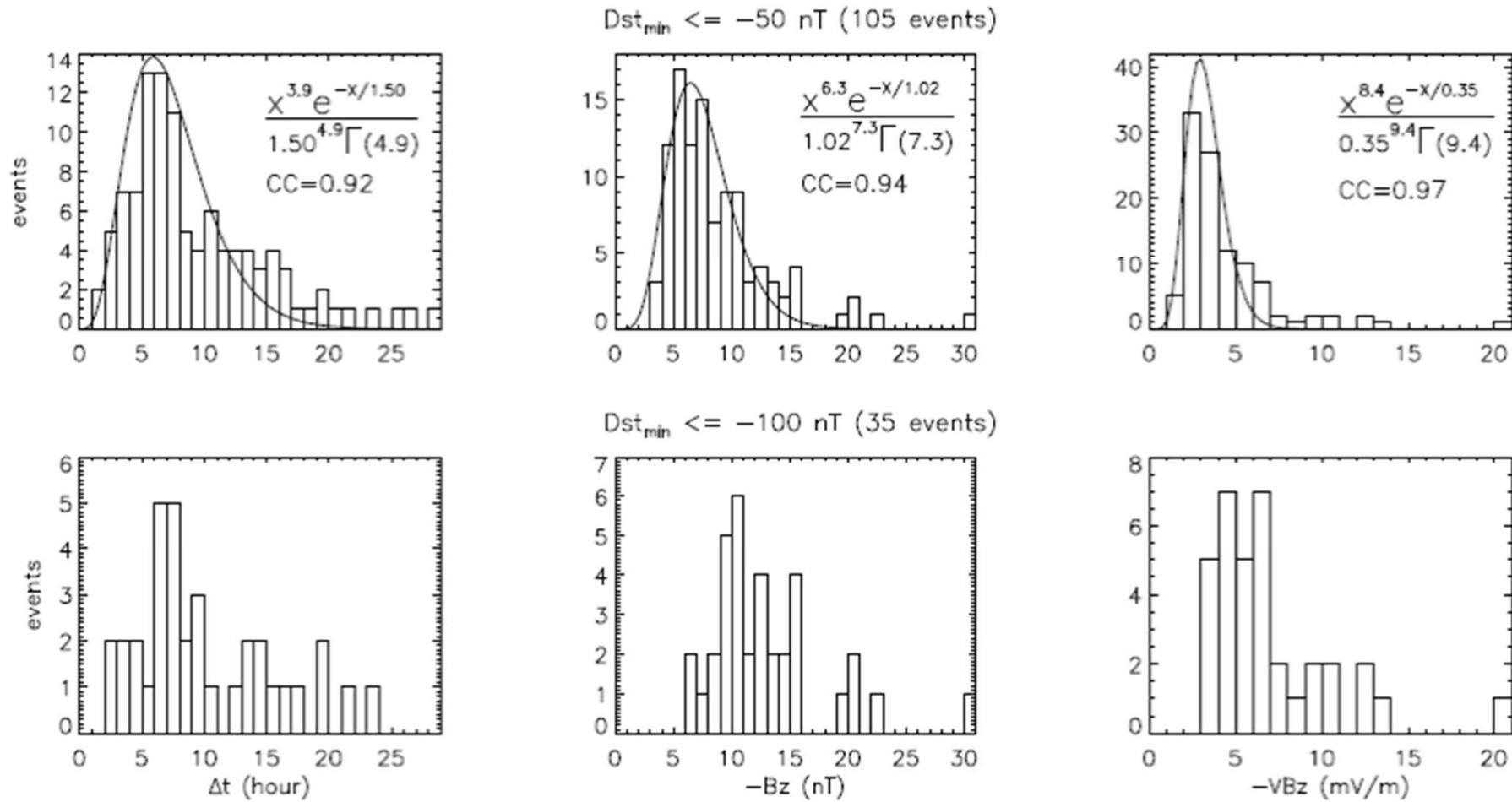
其他简单形式： $B_z, V^2 B_z, VB_z^2$

V：日地方向太阳风速度， B_z 为南北方向的磁场分量，

B_T ：垂直于日地联系方向的磁场分量， ρ ：太阳风等离子体密度，

θ 为 B_T 相对于磁层磁场在磁层顶投影的顺时针夹角， $L_0 = 7R_E$ 为一恒定长度

地磁爆事件的行星际参数分布



产生地磁暴的行星际参数阈值条件

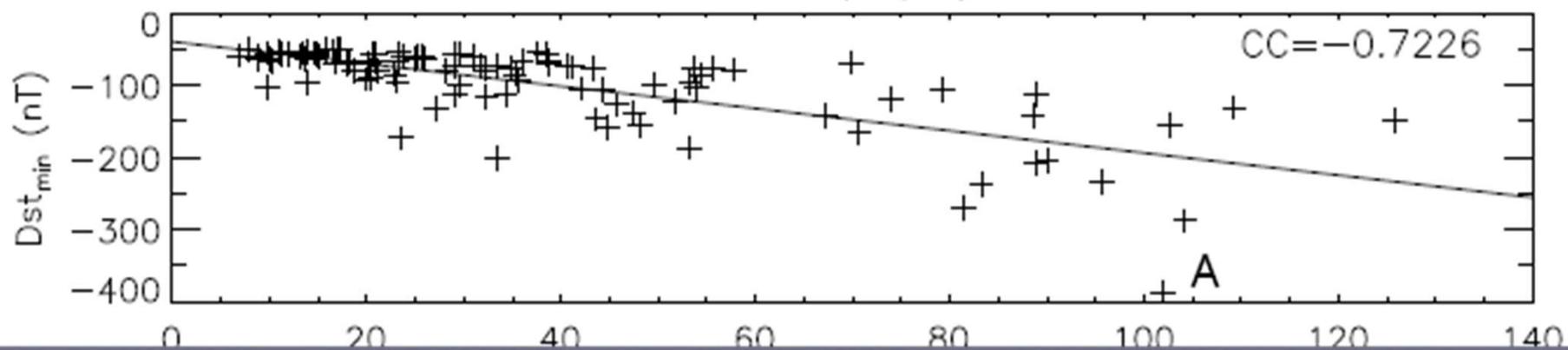
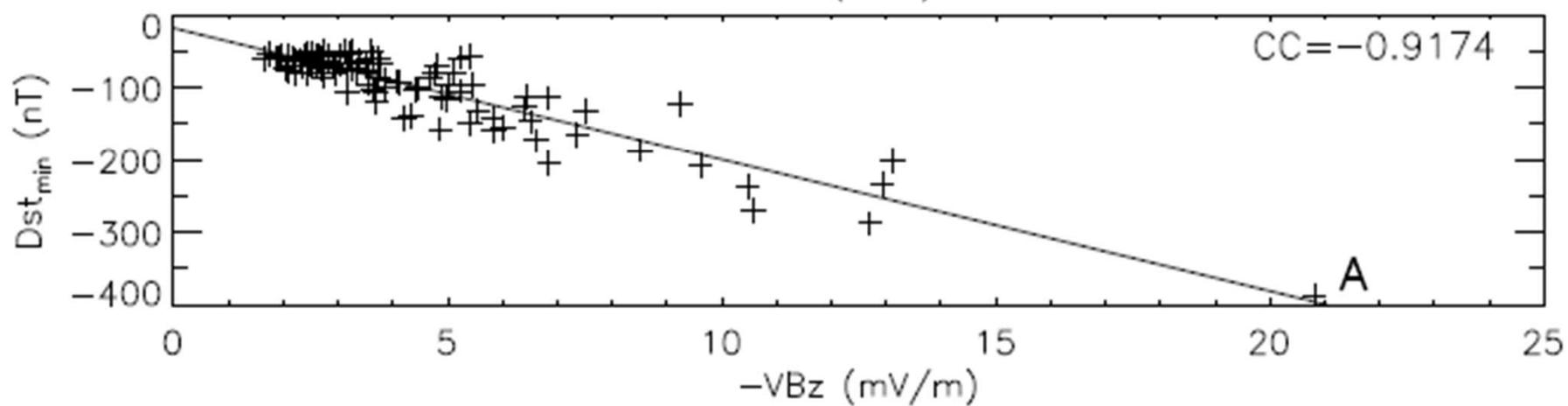
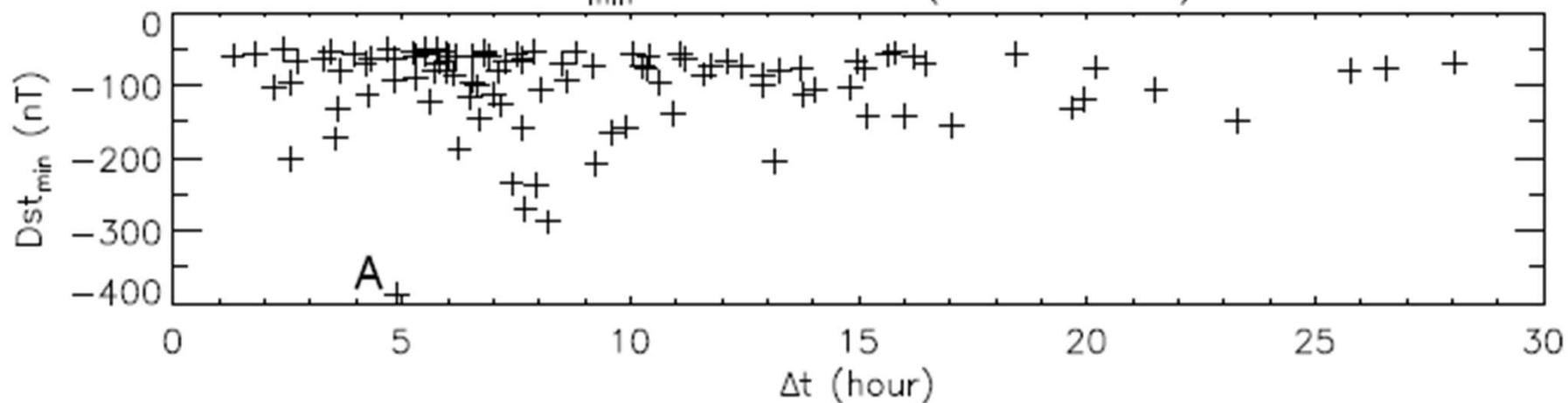
表 4.1 产生磁暴的行星际条件的比较

| | Dst_{min} (nT) | 阈值 ^a | | 阈值 ^b | |
|------|---------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| | | B_s (nT) | Δt (hour) | B_s (nT) | Δt (hour) |
| 强磁暴 | ≤ -100 | ≥ 10 | ≥ 3 | ≥ 6 | ≥ 2 |
| 中等磁暴 | ≤ -50 | ≥ 5 | ≥ 2 | ≥ 3 | ≥ 1 |

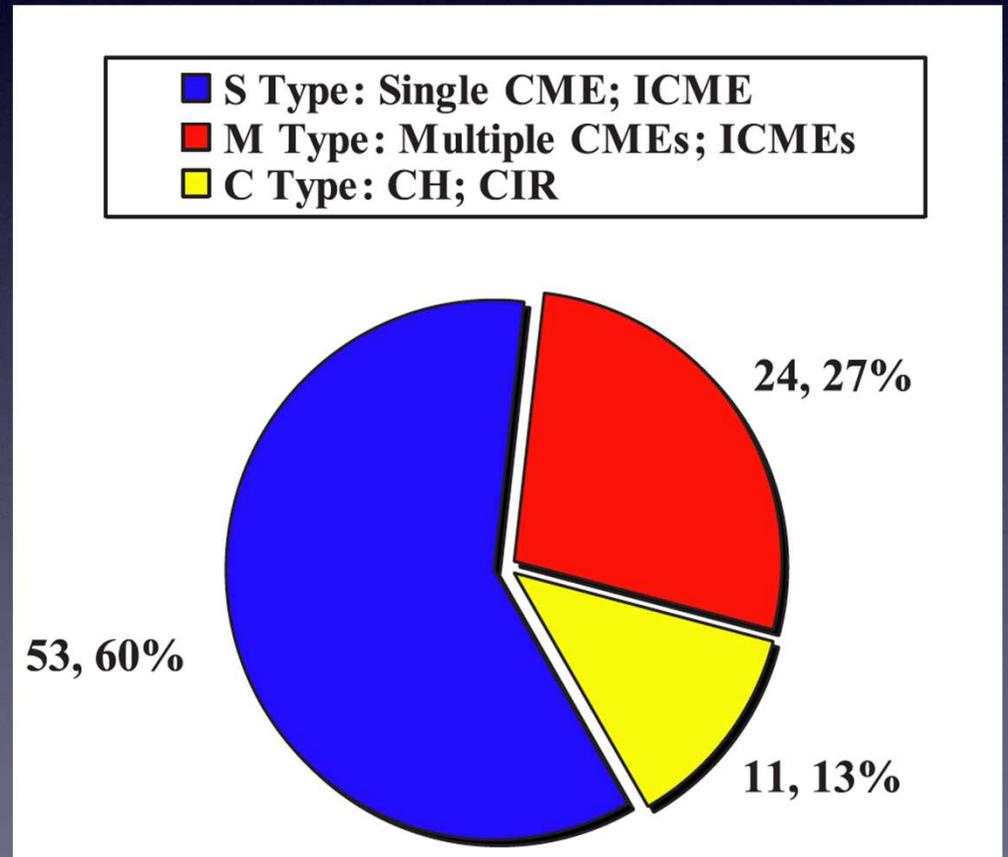
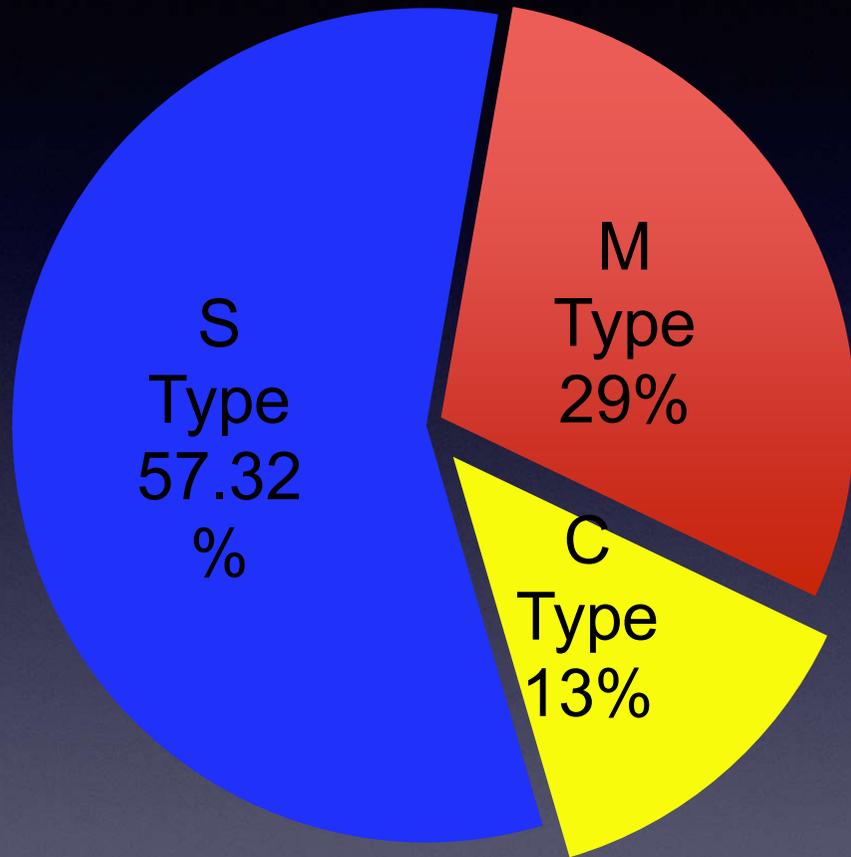
^a *Gonzalez and Tsurutani* [1987]以及*Russell et al.* [1974]的结果。

^b 我们的结果。

$Dst_{min} \leq -50$ nT (105 events)



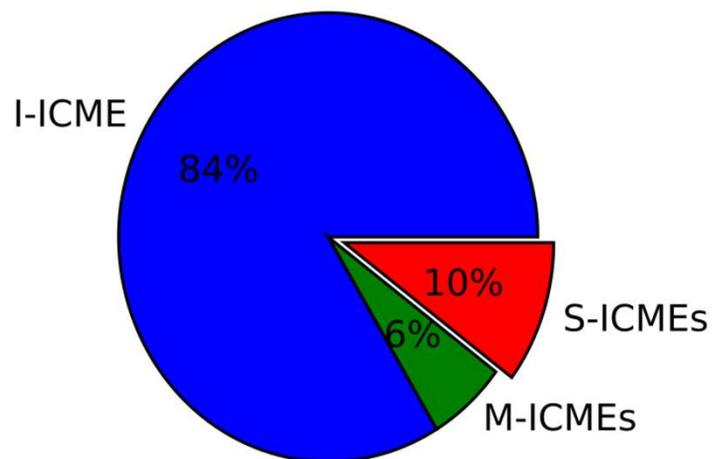
大磁暴的行星际起源



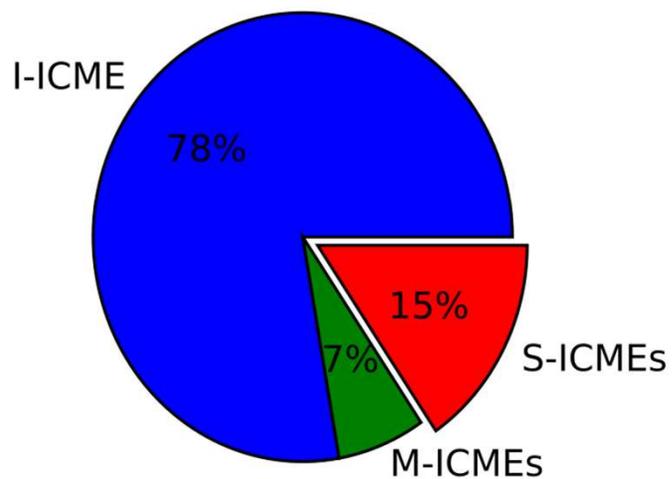
Zhang et al., 2007

引起了不同强度地磁暴的ICME的成分

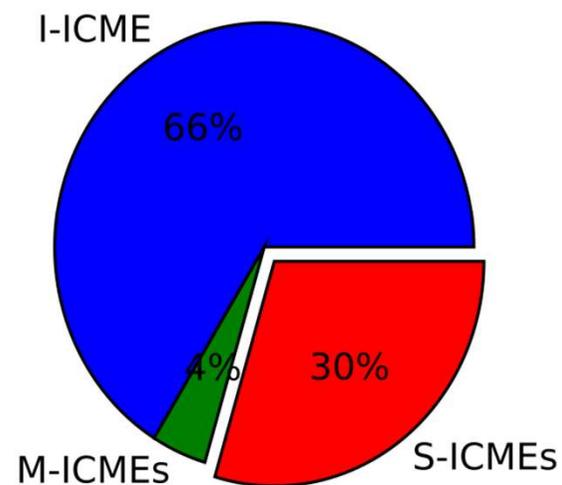
All events



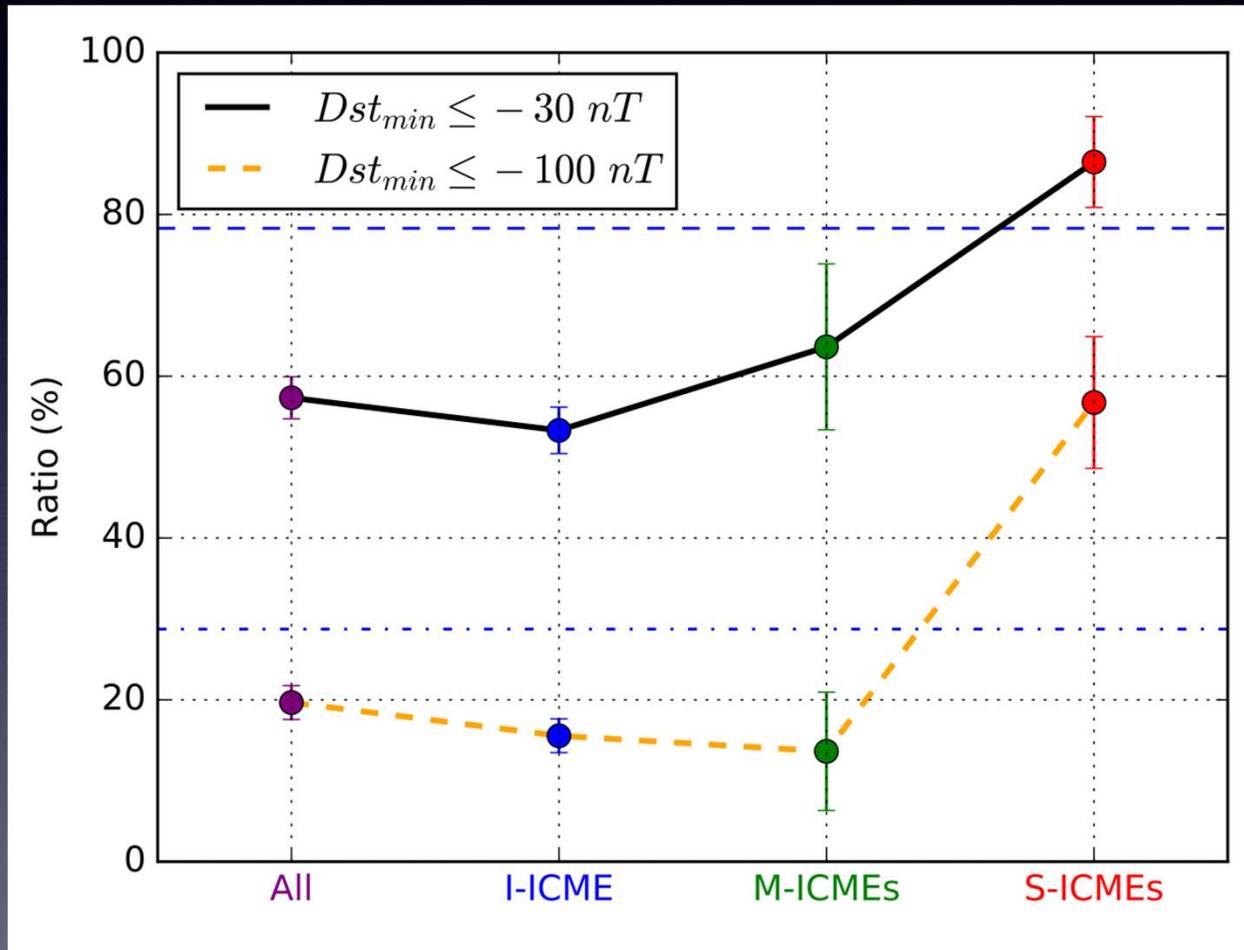
$Dst_{min} \leq -30 \text{ nT}$



$Dst_{min} \leq -100 \text{ nT}$



不同类型ICME产生地磁爆概率的差别



概率问题

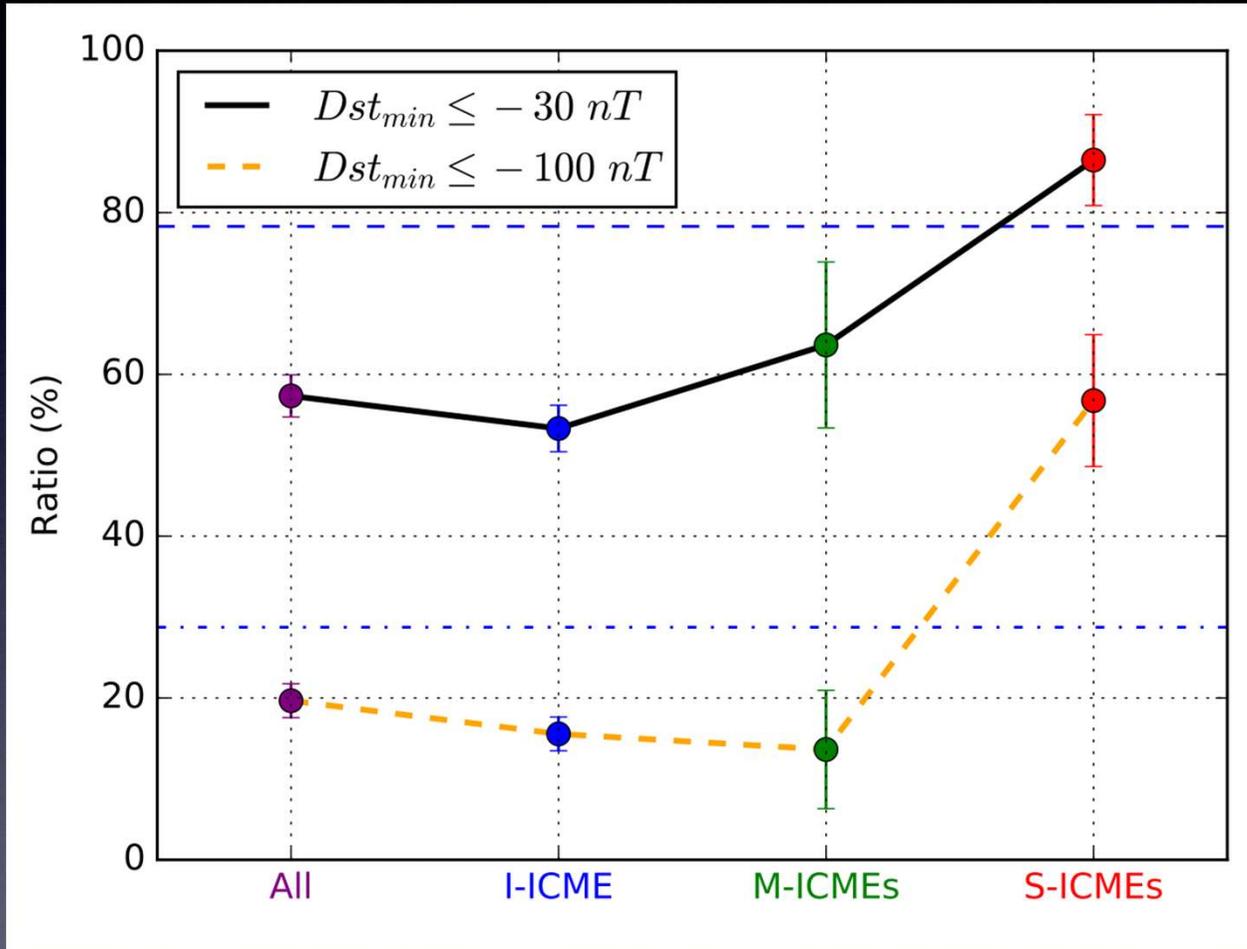
1个袋子中有100个球，其中有10个红球，请问从中抽取一个球为红球的概率为多少？

概率：
$$\frac{C_{10}^1}{C_{100}^1} = 0.1$$

1个袋子中有100个球，其中有10个红球，请问从中抽取两个球其中有一个为红球的概率为多少？

概率：
$$1 - \frac{C_{90}^1}{C_{100}^1} \frac{C_{89}^1}{C_{99}^1} = 0.19$$

不同类型ICME产生地磁爆概率的差别



$$1 - \frac{C_{100-P}^1}{C_{100}^1} \frac{C_{99-P}^1}{C_{99}^1}$$

2.5 空间天气预报中的日地物理问题

耀斑的关键问题

何时产生?

强度?

是否有加速粒子?

加速粒子的强度?

是否有激波?

激波的强度?

日冕物质抛射的关键问题

何时产生?

强度?

是否有加速粒子?

加速粒子的强度?

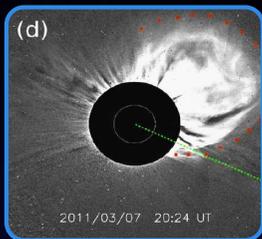
是否有激波?

激波的强度?

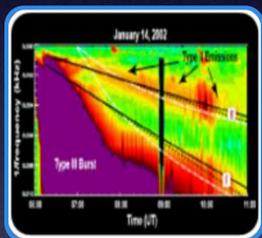
能都到达地球?

到达地球后的磁场强度?

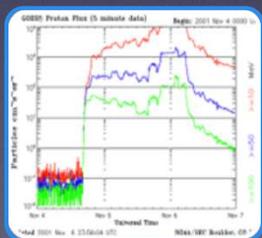
日冕物质抛射驱动激波相关预报



日冕仪观测



射电观测



太阳高能粒子
事件观测

观测数据

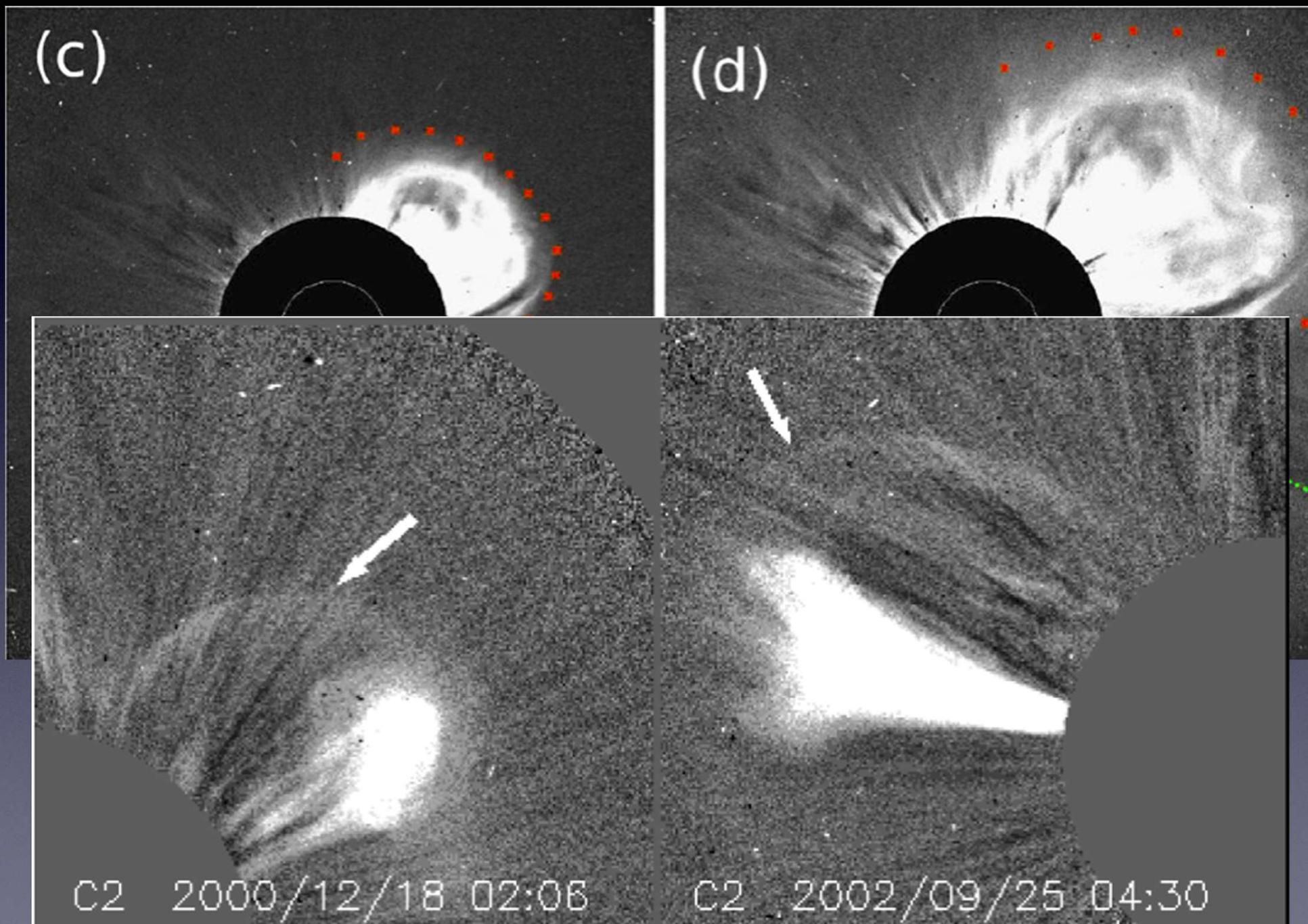
□ 是否存在激波

□ 激波速度

□ 激波强度

需要回答的问题

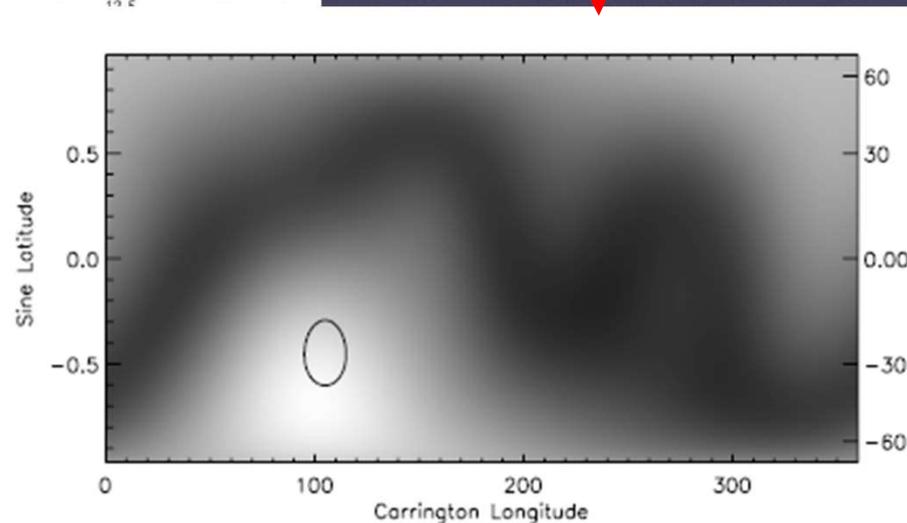
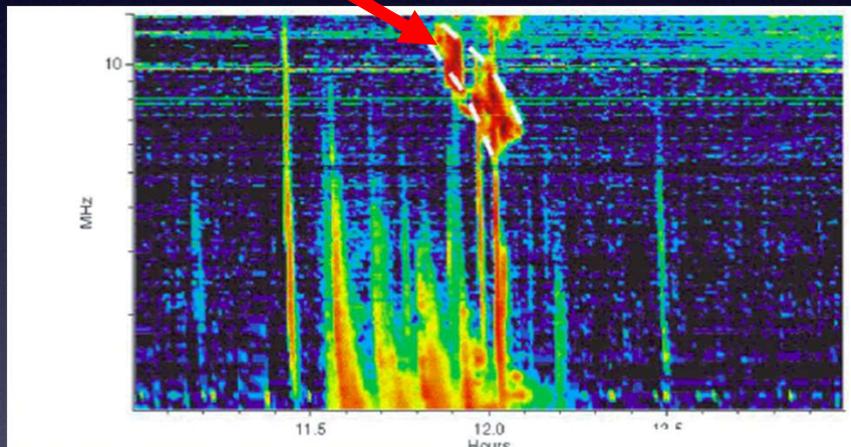
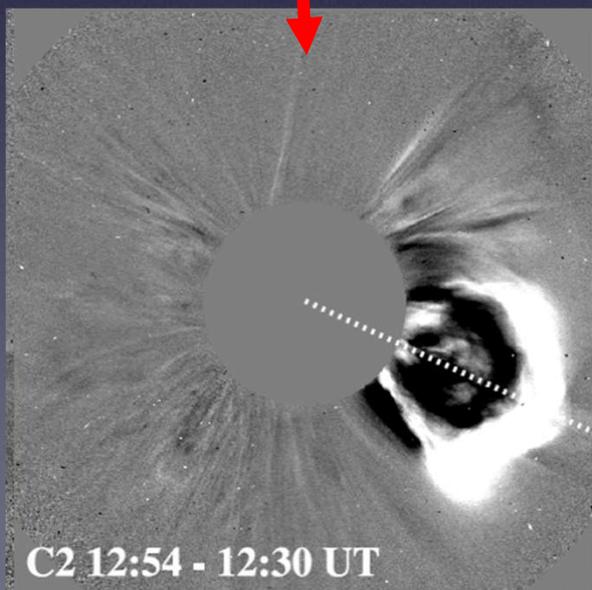
日冕仪中的激波观测



利用II型射电暴观测资料计算激波强度

激波强度:快磁声波马赫数 $M_s = (V_{sh} - V_{sw}) / V_{ms}$

需要知道的物理量: 背景密度、背景太阳风速度、背景磁场强度、激波速度
(忽略)



预报CME的地磁效应

日冕物质抛
射到达

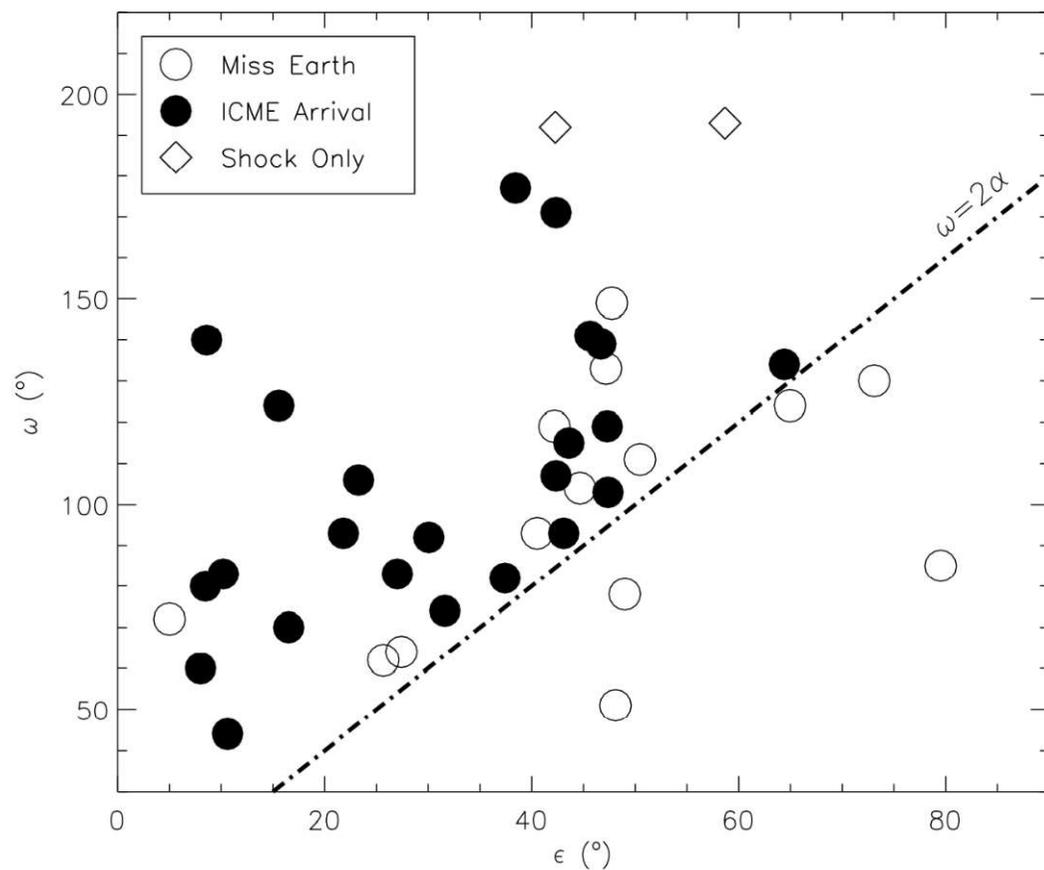
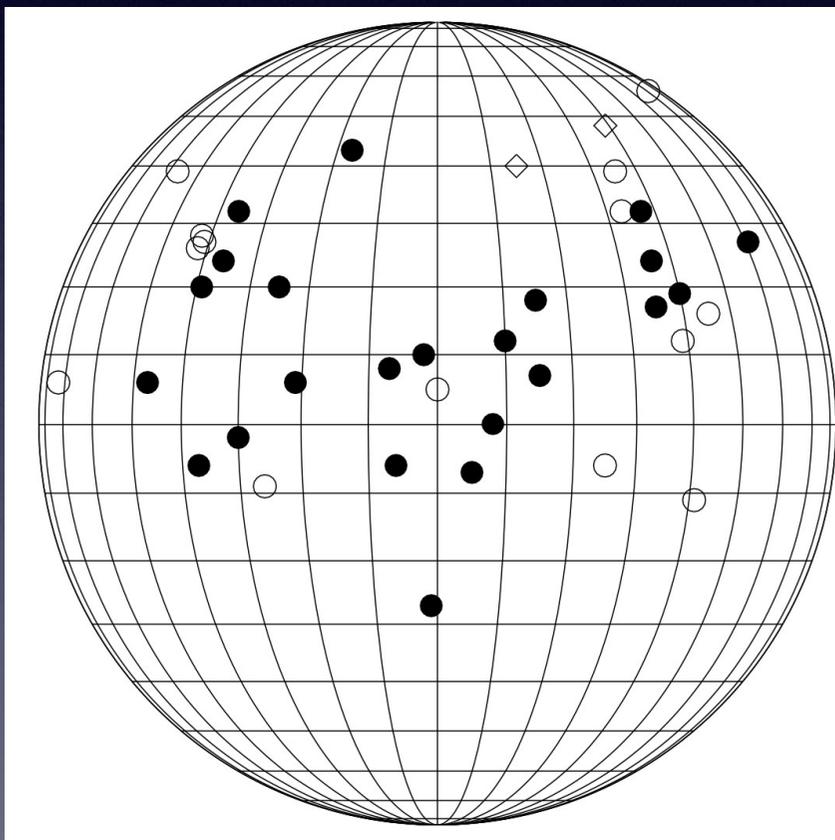
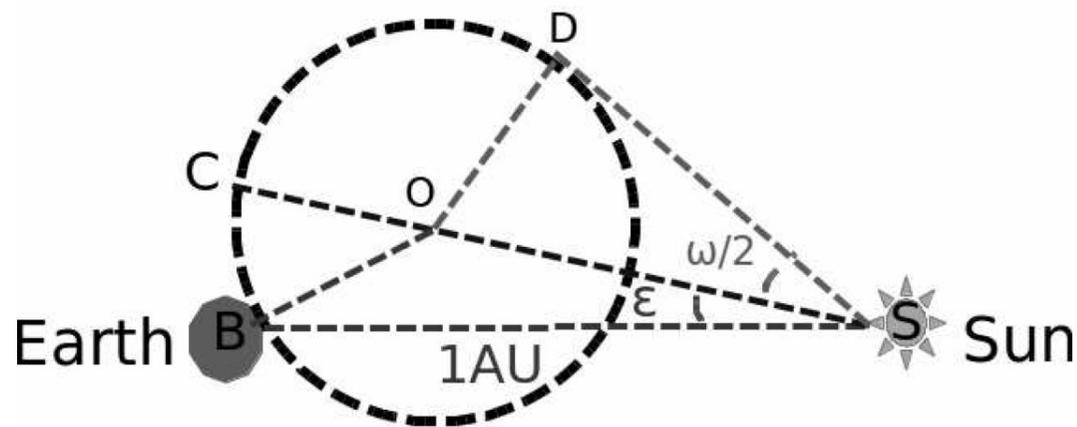
- 1. 能否达到地球?
- 2. 何时到达地球?
- 3. 地磁效应强度? → 南向磁场



- 方向
- 大小
- 速度

Q1: 能否到达地球?

- 方向
- 大小

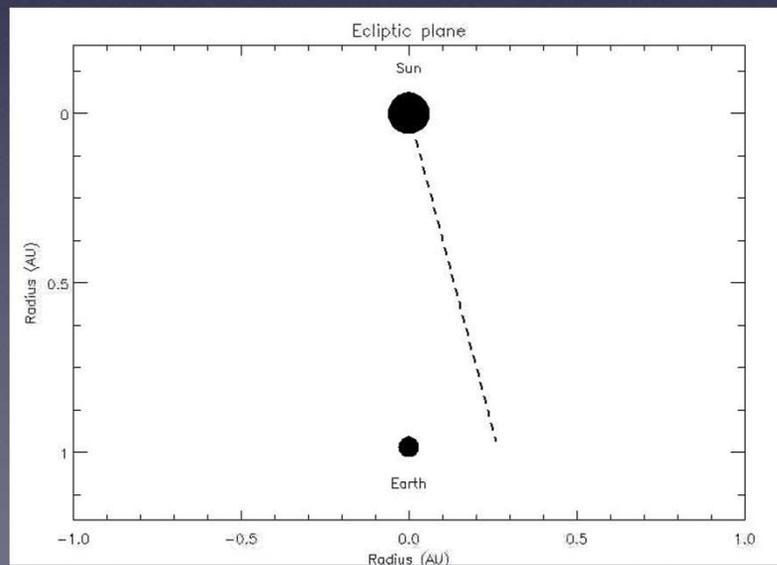
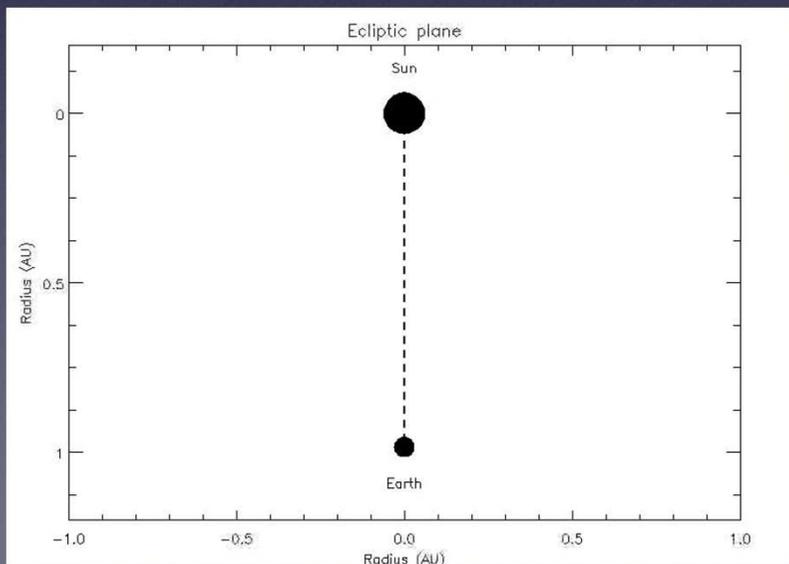
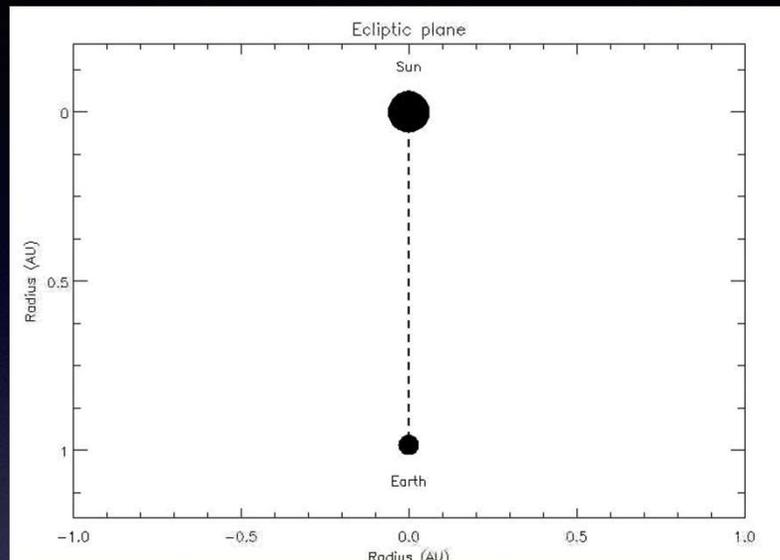


偏转对日冕物质抛射能否到达地球的影响?

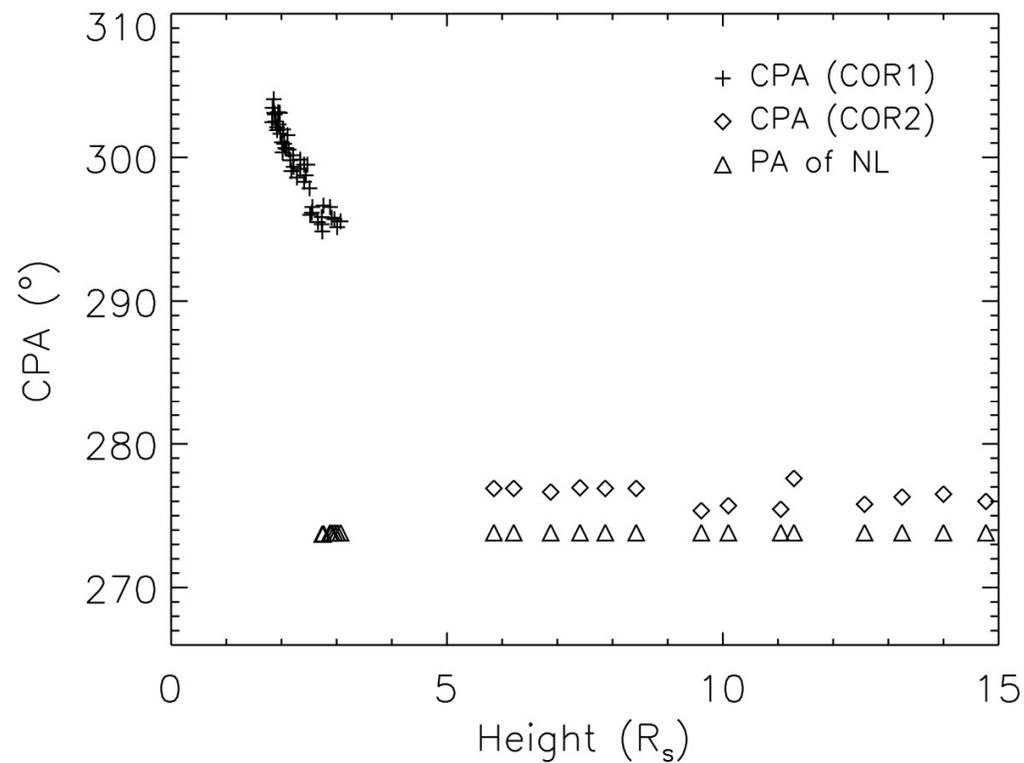
方向

径向

非径向

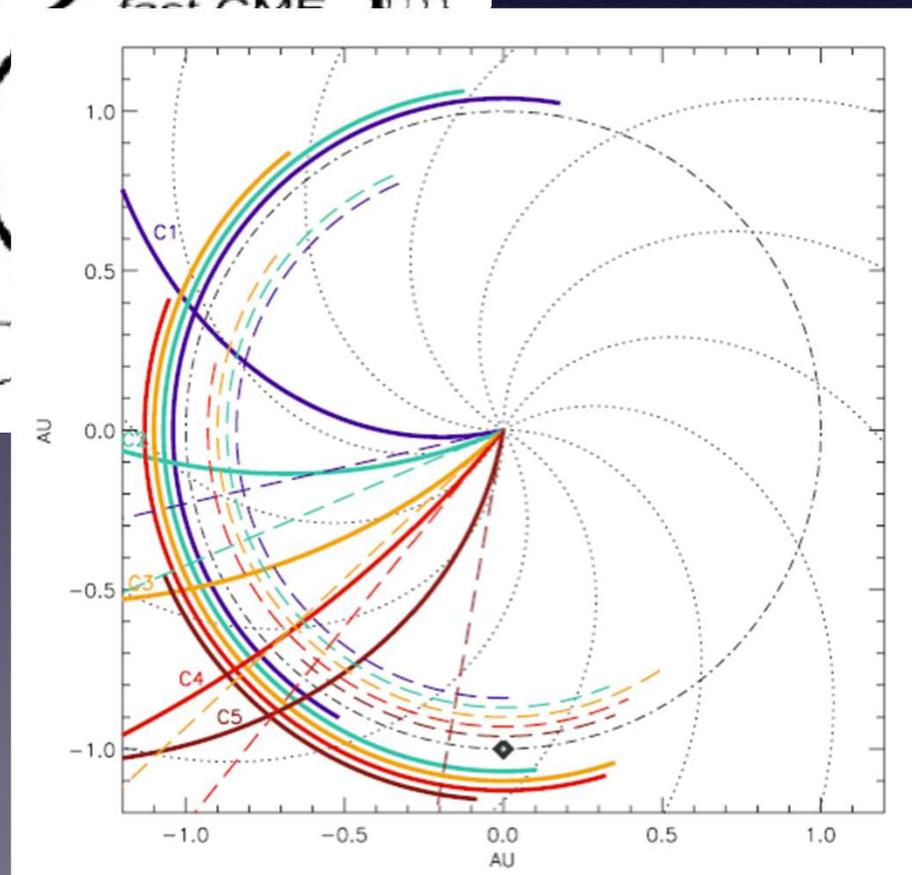
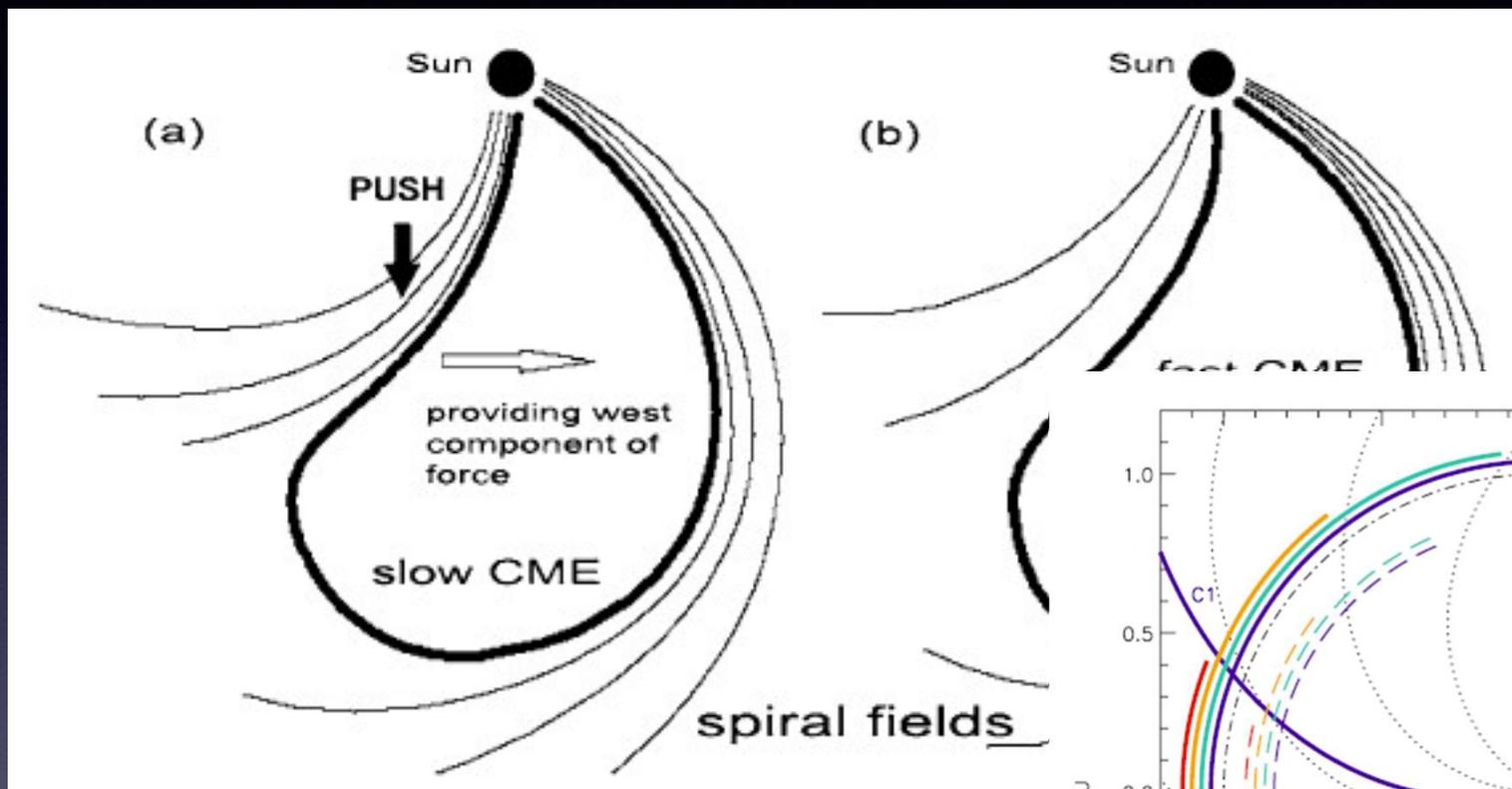


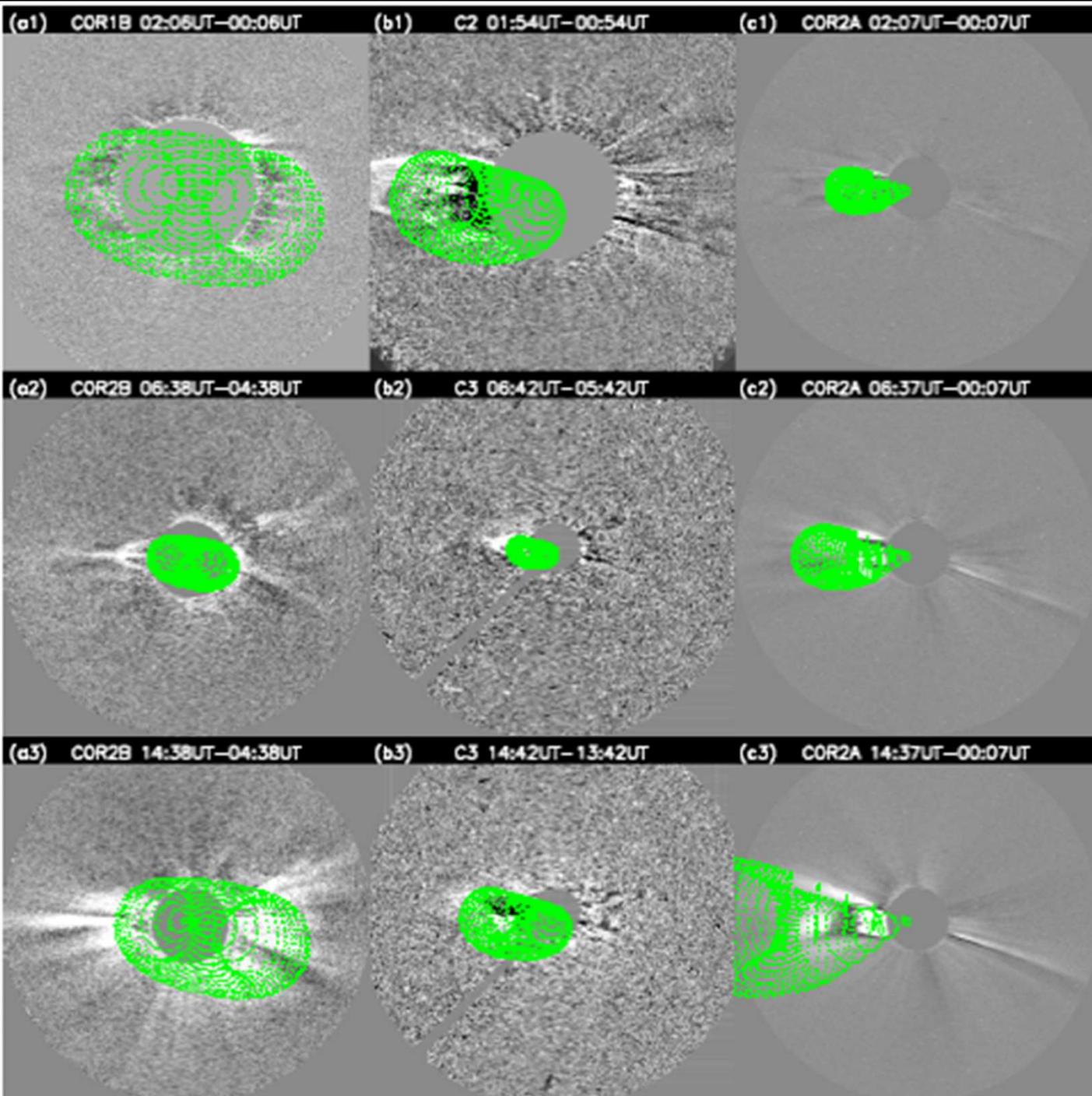
可能影响因素一：日冕中的偏转传播



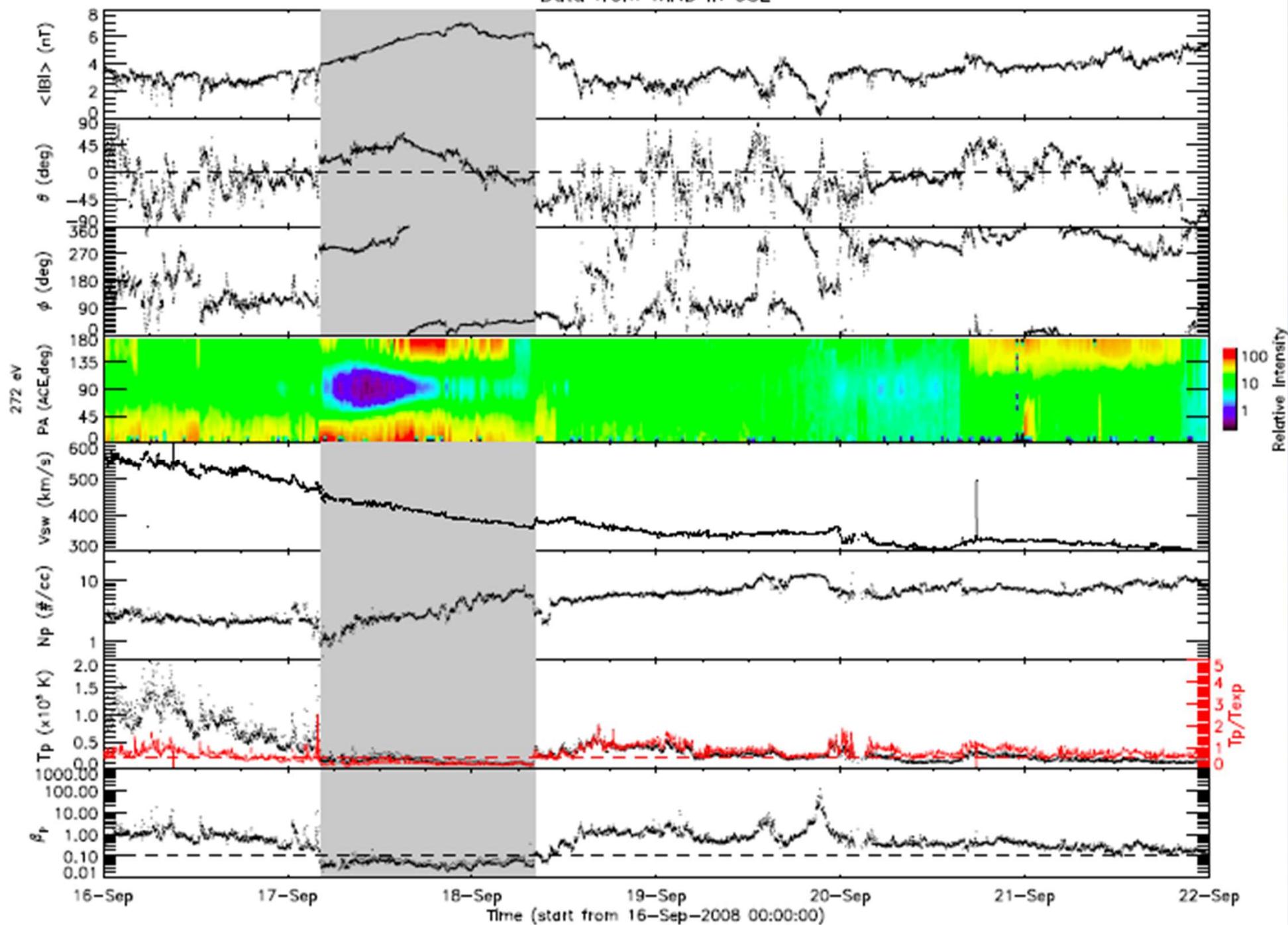
日冕物质抛射在传播过程中偏向电流片，后沿电流片传播

可能影响因素二：行星际空间中的偏转传播

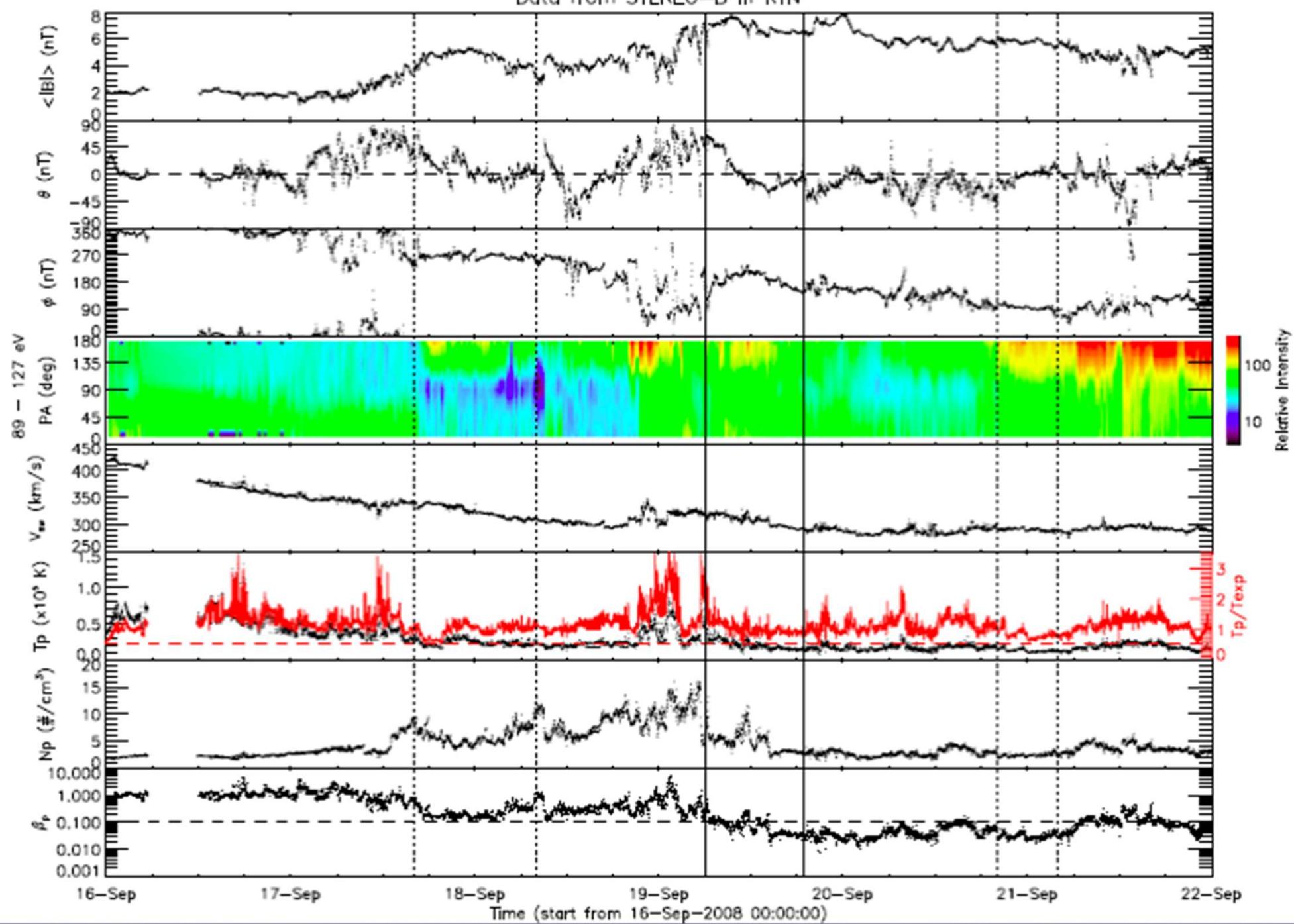


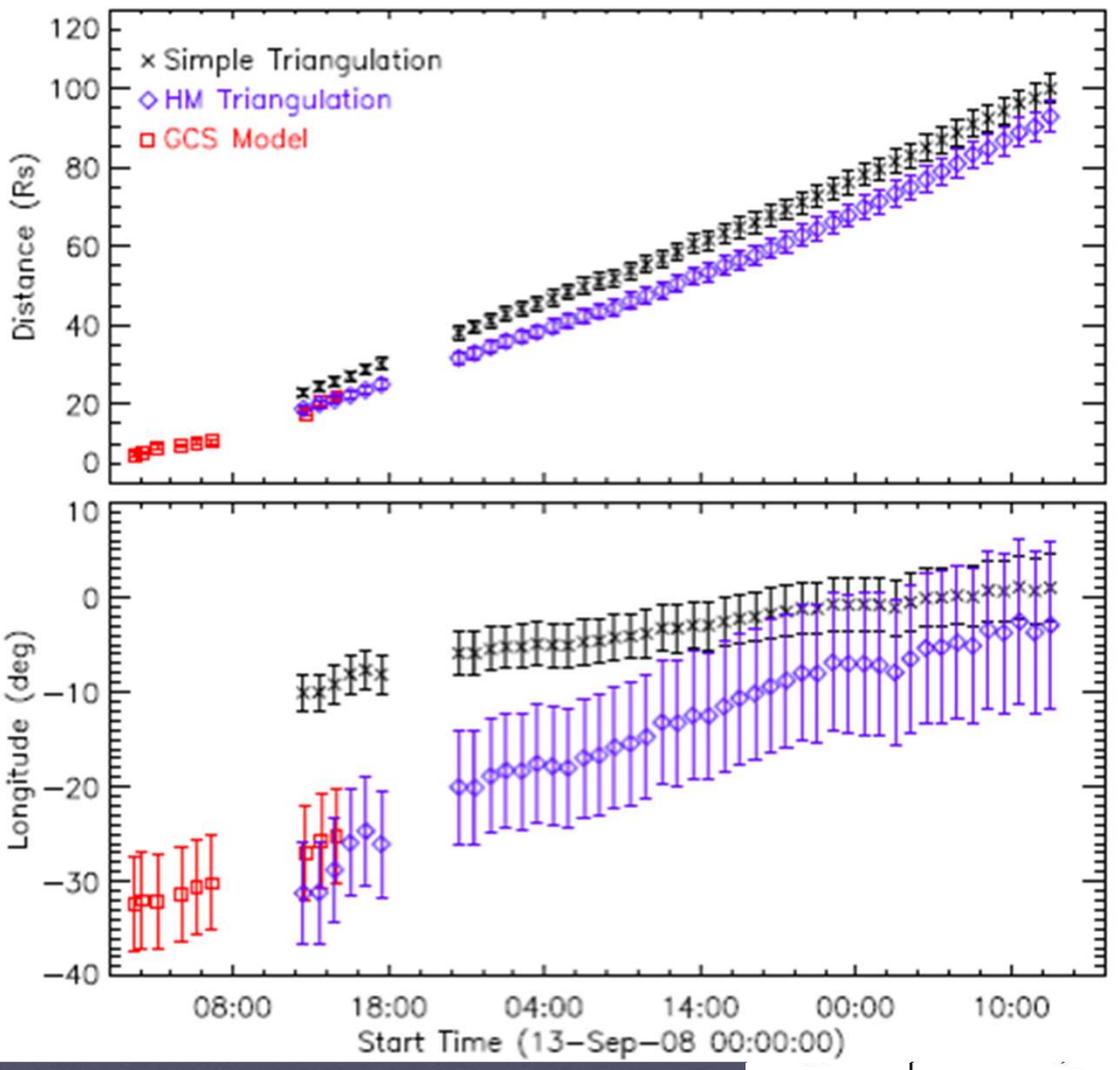


Data from WIND in GSE

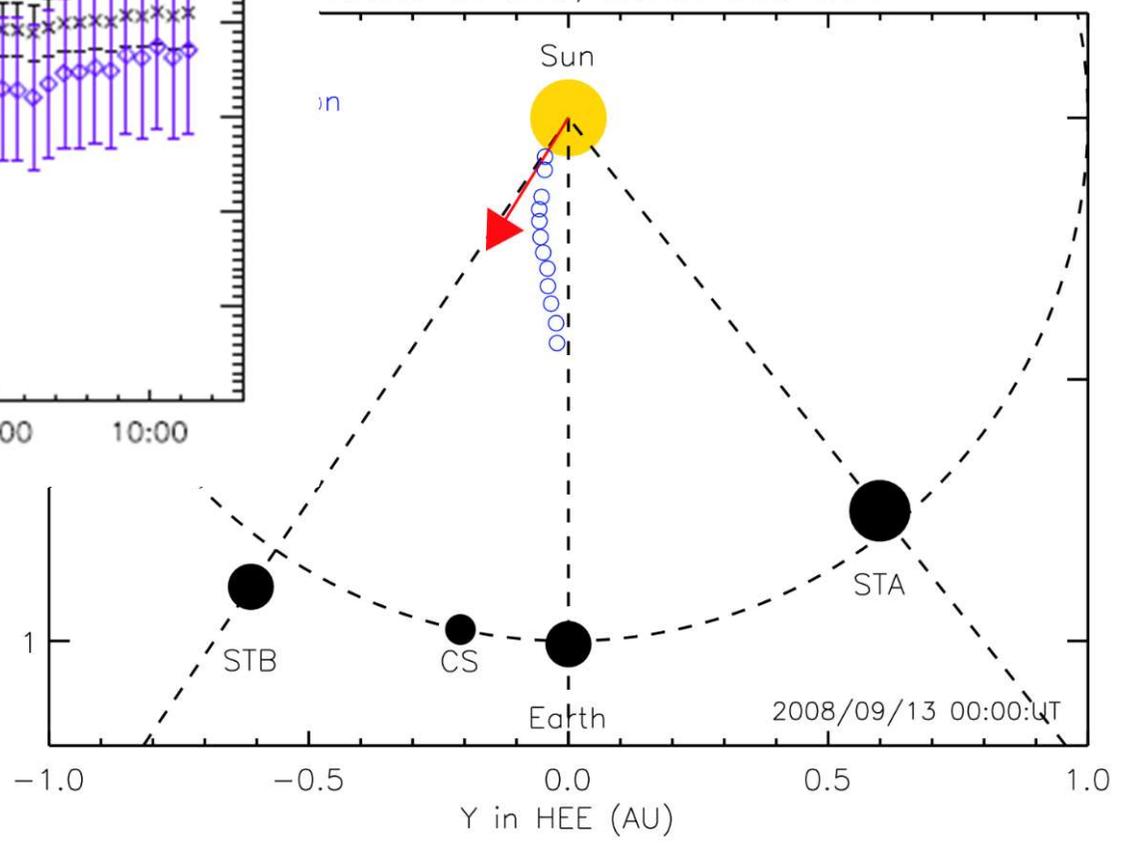


Data from STEREO-B in RTN

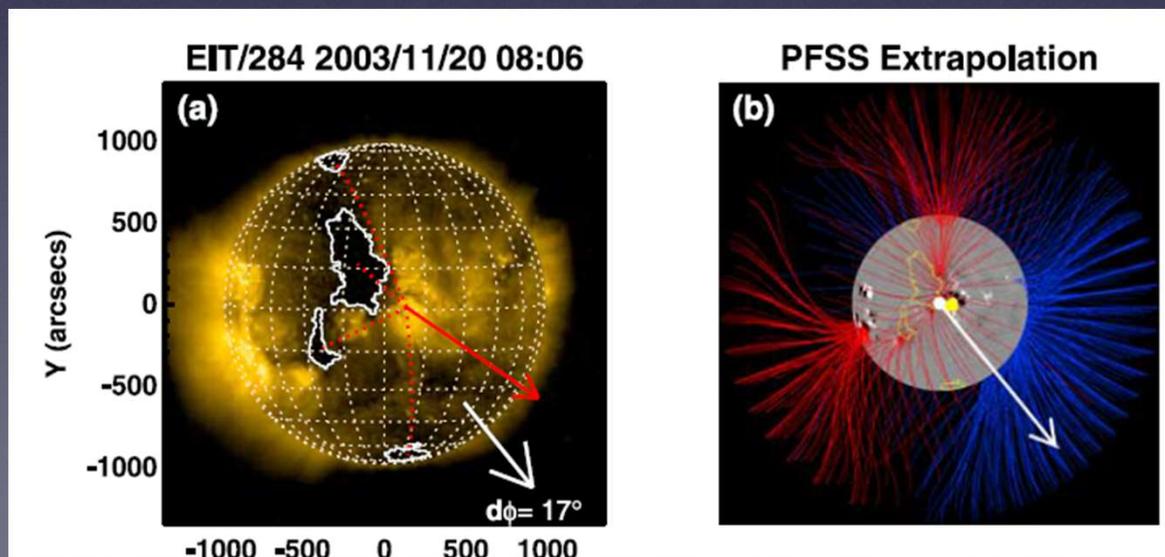
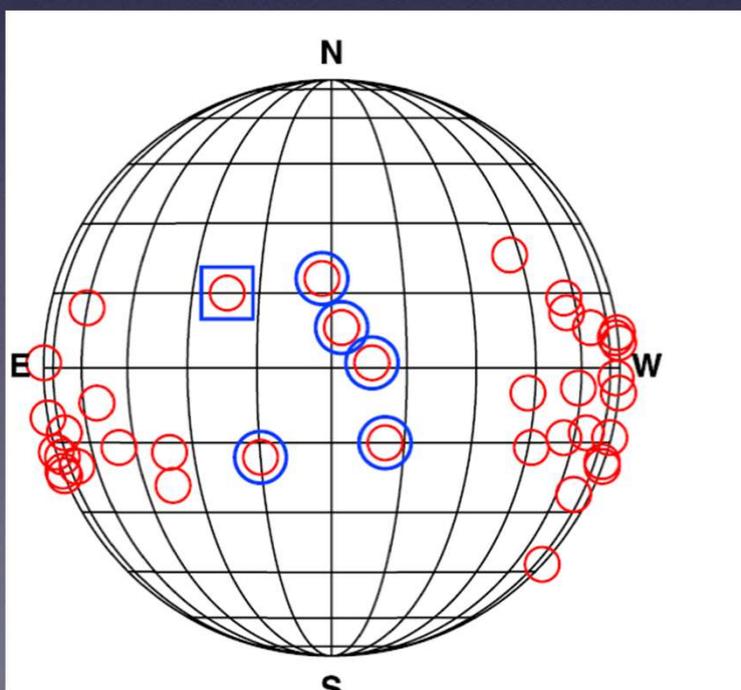
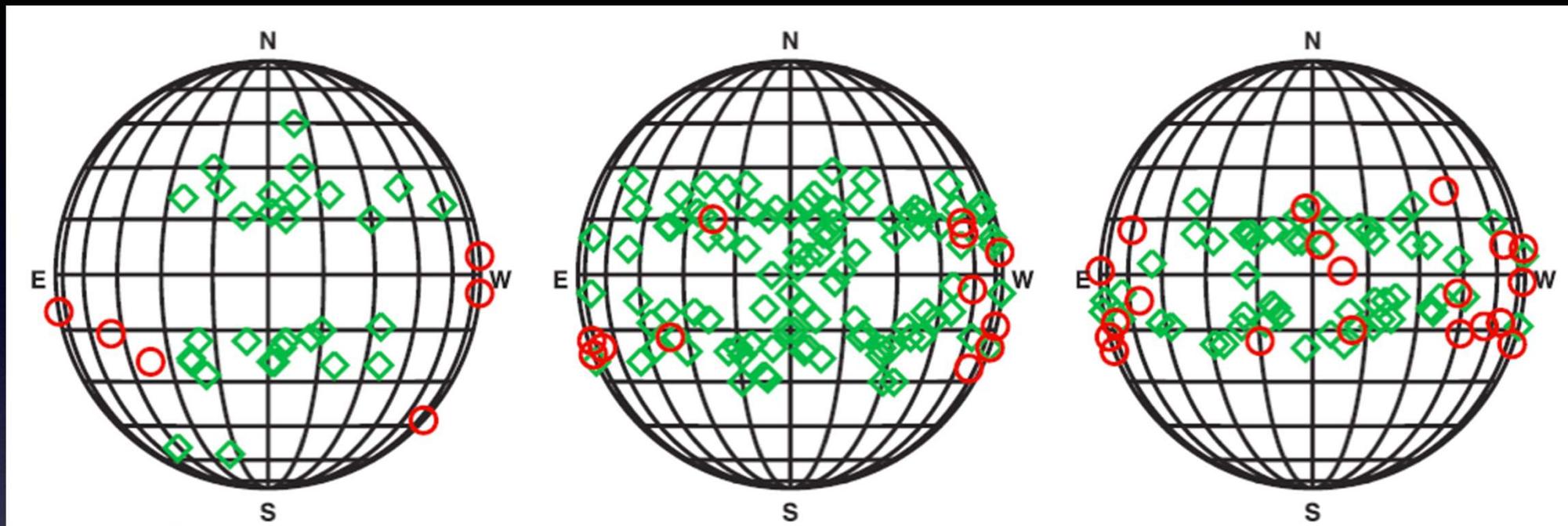




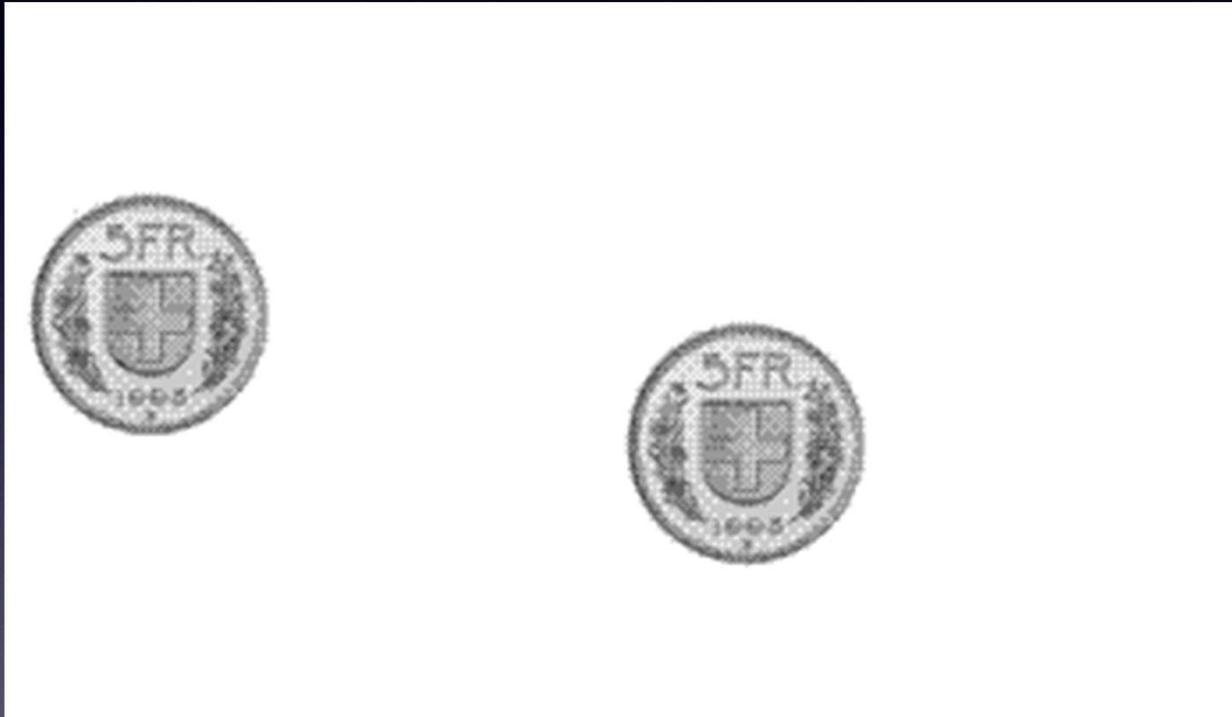
Positions of STB, Earth and STA



临近冕洞引起的日冕物质抛射的偏转



可能影响因素三：日冕物质抛射的相互作用



相互作用（碰撞）可能会显著改变CME的传播方向

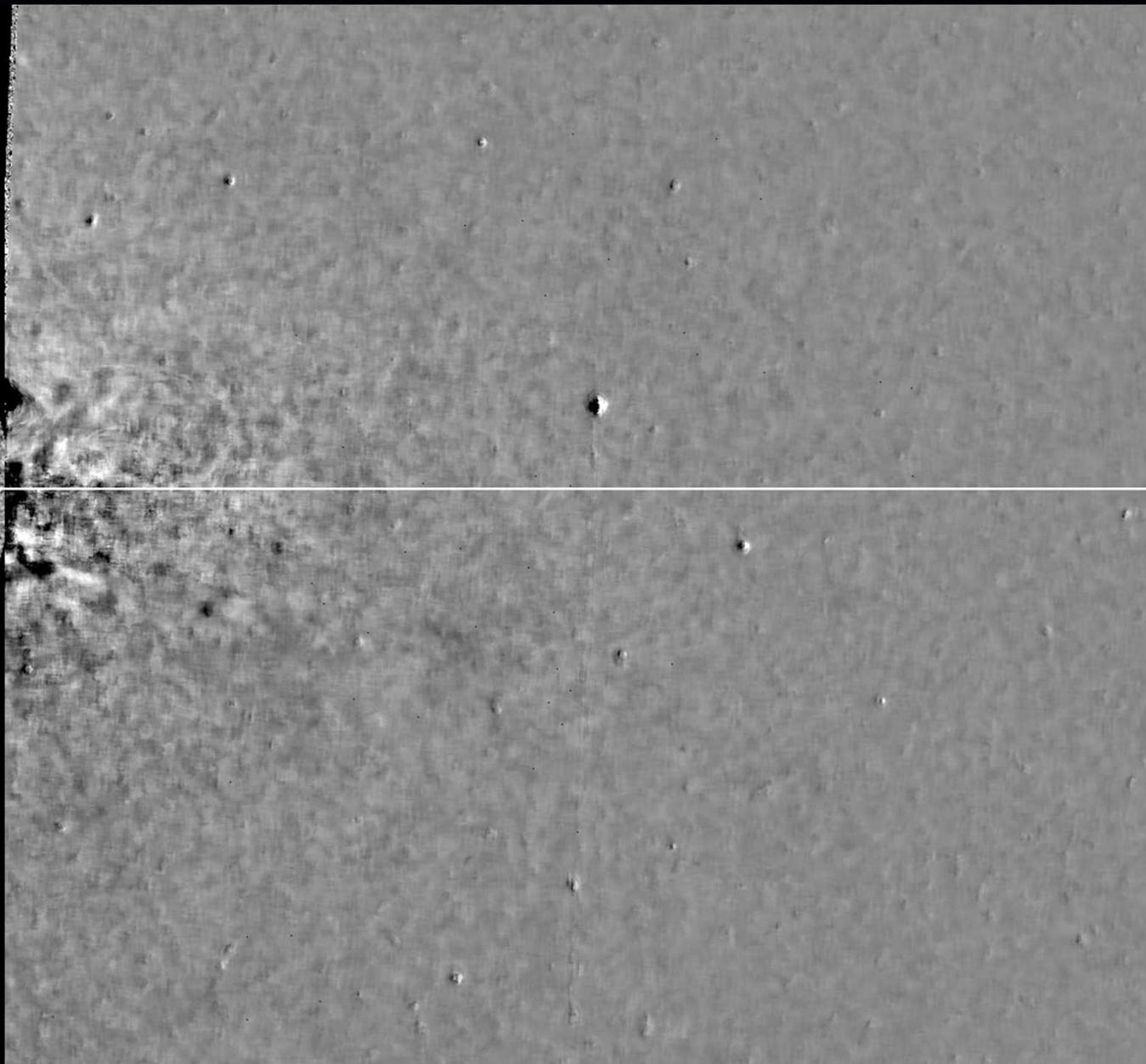
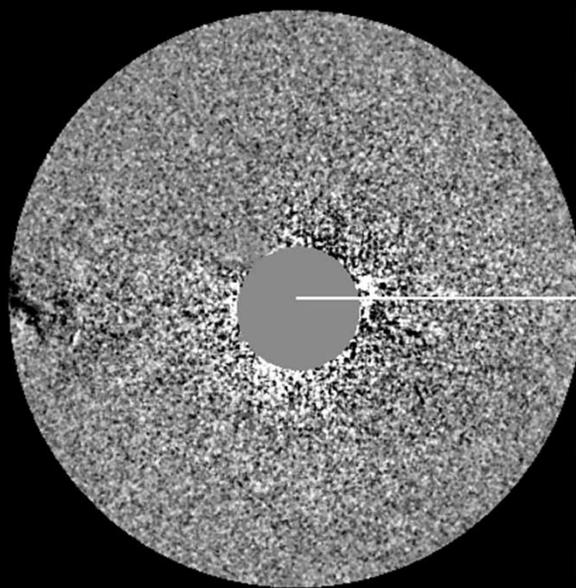
日冕物质抛射相互作用的成像观测

STEREO B

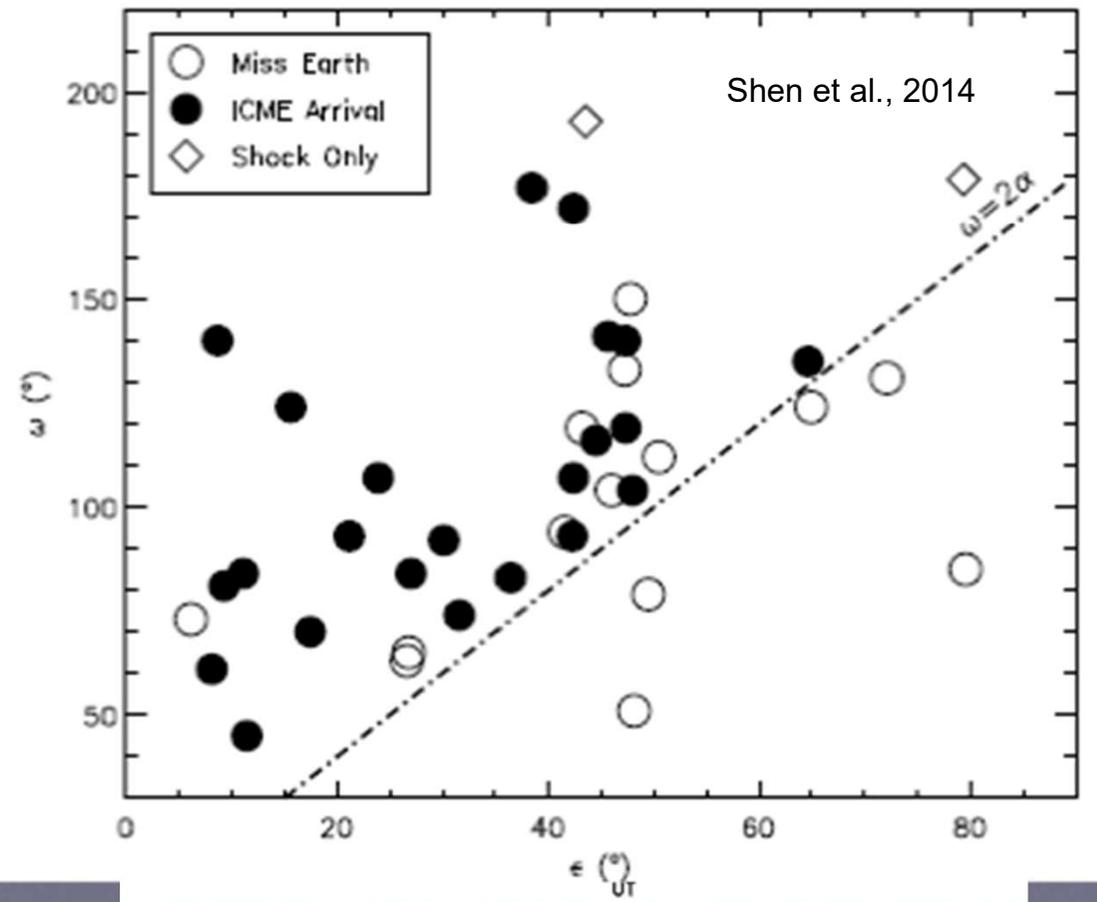
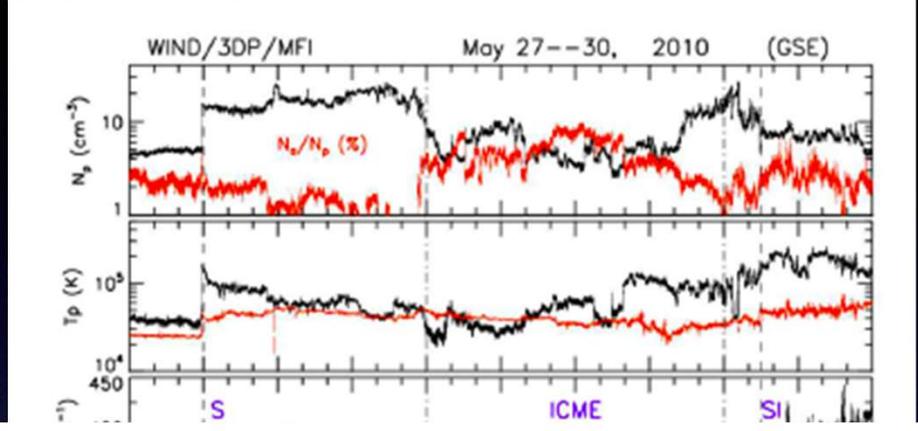
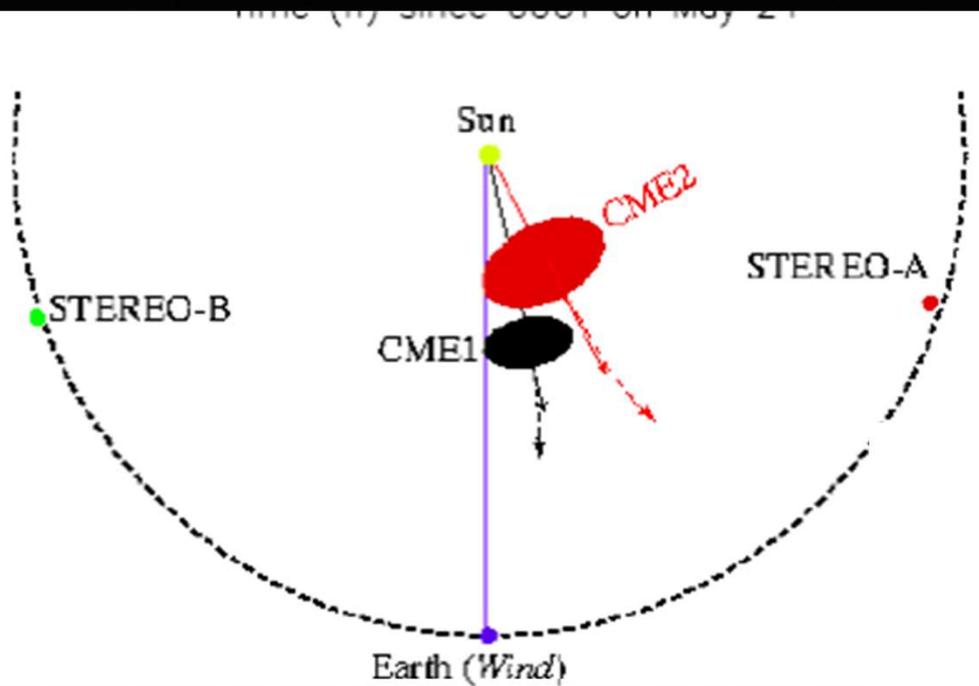
2008-11-02

COR2:02:08:19UT

HI1: 01:29:50UT



日冕物质抛射相互作用→改变方向[偏转]→对地日冕物质抛射离开地球



- 相互作用使得一个对向地球的CME离开了地球[Lugaz et al., 2013]
- 相互作用使得2 (of 6) 个爆发于日面中间的全晕状CME没有到达地球[Shen et al., 2014]