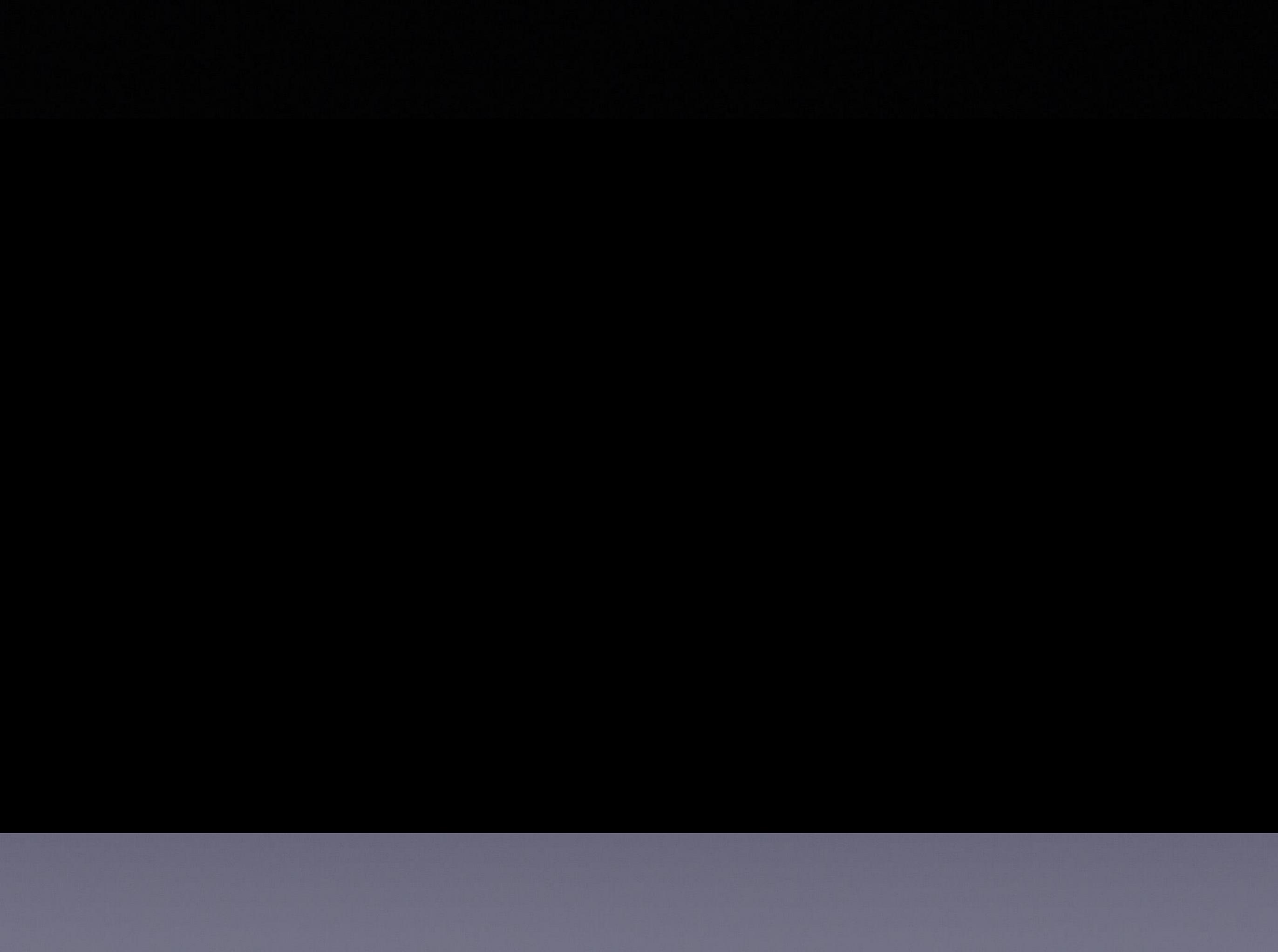


# 第七章

## 空间天气预报



# 1、什么是空间天气预报

**预报：**通过对客观事实的历史和现状进行科学分析，由过去和现在去推测未来，由已知去推测未知，从而揭示客观事实的未来发展趋势和规律。

## 空间天气预报

太阳活动  
预报

近地空间环境  
扰动预报

太阳黑子长期预报

耀斑

CME

太阳质子事件

...

太阳地磁扰动

高能电子暴

电离层扰动

...

# 空间天气预报的难点

## ★ 自身变化复杂

- ▶ 包含大量复杂的电动力学和等离子体物理现象

## ★ 空间范围广

- ▶ 空间范围从地球表面几十公里直到行星际空间、太阳表面

## ★ 研究对象复杂

- ▶ 研究对象包含中性大气、等离子体、电磁辐射和粒子辐射等

## ★ 观测资料少

- ▶ 观测资料获取相对困难和稀少

# 空间天气服务产品

**现报：** 对目前太阳风暴状况的描述，也是对正在发生情况的一种通报。

**警报：** 危急情况的报告或信号。



# 预报产品-常规预报

---

- ★ **现报**：对太阳风暴发生情况的实时动态描述
- ★ **短期预报**：每天上午发布的未来三天太阳风暴发生情况及太阳和地磁活动指数的预报
- ★ **周报**：包含两部分，一部分是对上一周太阳风暴情况的总结，另一部分是对下周太阳风暴发展趋势的预测
- ★ **中期预报**：每天发布的太阳F10.7、地磁AP指数在未来一个月的逐日变化情况

# 预报产品-常规预报

- ★ **月报**：每月发布一次，主要对上个月太阳风暴情况的总结，下月太阳风暴发展趋势的预测，每月的太阳和地磁活动指数，对低轨道卫星和同步轨道卫星的影响，最近太阳风暴热点问题追踪等
- ★ **长期预报**：对太阳黑子数和F10.7的未来11年周日变化的预测，在每个太阳活动周结束和新的太阳活动周开始时发布
- ★ **警报**：对已经发生或即将发生的太阳风暴事件的即时报告，有事件时发布
- ★ **通报**：主要对太阳风暴过程的预测、太阳风暴事件的详细分析和描述，未来的发展趋势等，不定期发布

# 预报产品-专项预报

★ **专项预报：** 以满足专业用户某些特定需求而制作的预报

- ▶ **针对某一环境要素：** 要求高、需要更精细、更高的时间分辨率和更实时的情况分析和预测
- ▶ 针对某一特定轨道的空间环境

★ **已有的专项服务的案例**



针对卫星运管部门和  
测控通信部门的预报  
服务

# 国际空间天气预报现状

▲表 国际太阳风暴预报现状

预报品种 预报要素	现报	警报	短期 预报 (1-3 天)	周报	中期 预报 (3- 30 天)	月报	长期 预报 (1- 11 年)	专项 预报
太阳活动水平	★		★	★		★	★	★
太阳黑子	★				★		★	★
太阳耀斑	★	★	★					★
太阳质子事件	★	★	★				★	★
F10.7	★		★		★	★	★	★
日冕物质抛射	☆							
地磁活动水平	★		★	★		★		★
地磁指数	★		★	★	★	★	☆	★
磁暴	★	★	★					★
高能电子暴	★	★	★					★
高层大气								★
TEC	★							★
foF2								
电离层暴	☆							
电离层突然骚扰	★	☆						★
极盖吸收	★	☆						★
电离层闪烁	★							★

★业务产品

☆研究产品

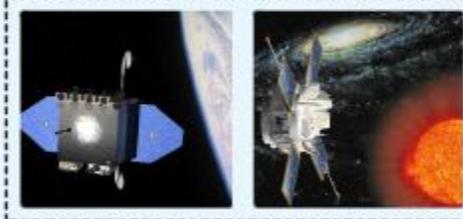
# 空间天气预报过程

## 太阳风暴监测

天基和地基的监测设备对太阳、行星际空间、磁层、电离层和中高层大气等进行监测



地基监测



天基监测

## 数据传输与处理

利用国际互联网和专网进行数据传输，并存储至数据库，高性能计算机运行预报模式



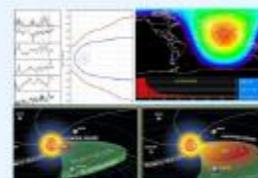
国际互联网和专网



太阳风暴监测数据库



大容量存储设备和  
高性能计算机



模式预报

## 预报产品制作

分析监测数据和模式预测结果，预报人员会商并制作各类预报警报产品



预警系统



预报会商

预报



月报

警报



## 产品发布与服务

通过网站、Email、邮寄、电视和手机短信等方式向公众及各类专业用户发布预报和警报



网站、Email、邮寄、专线、电视、手机短信

预报的起点



预报的基础



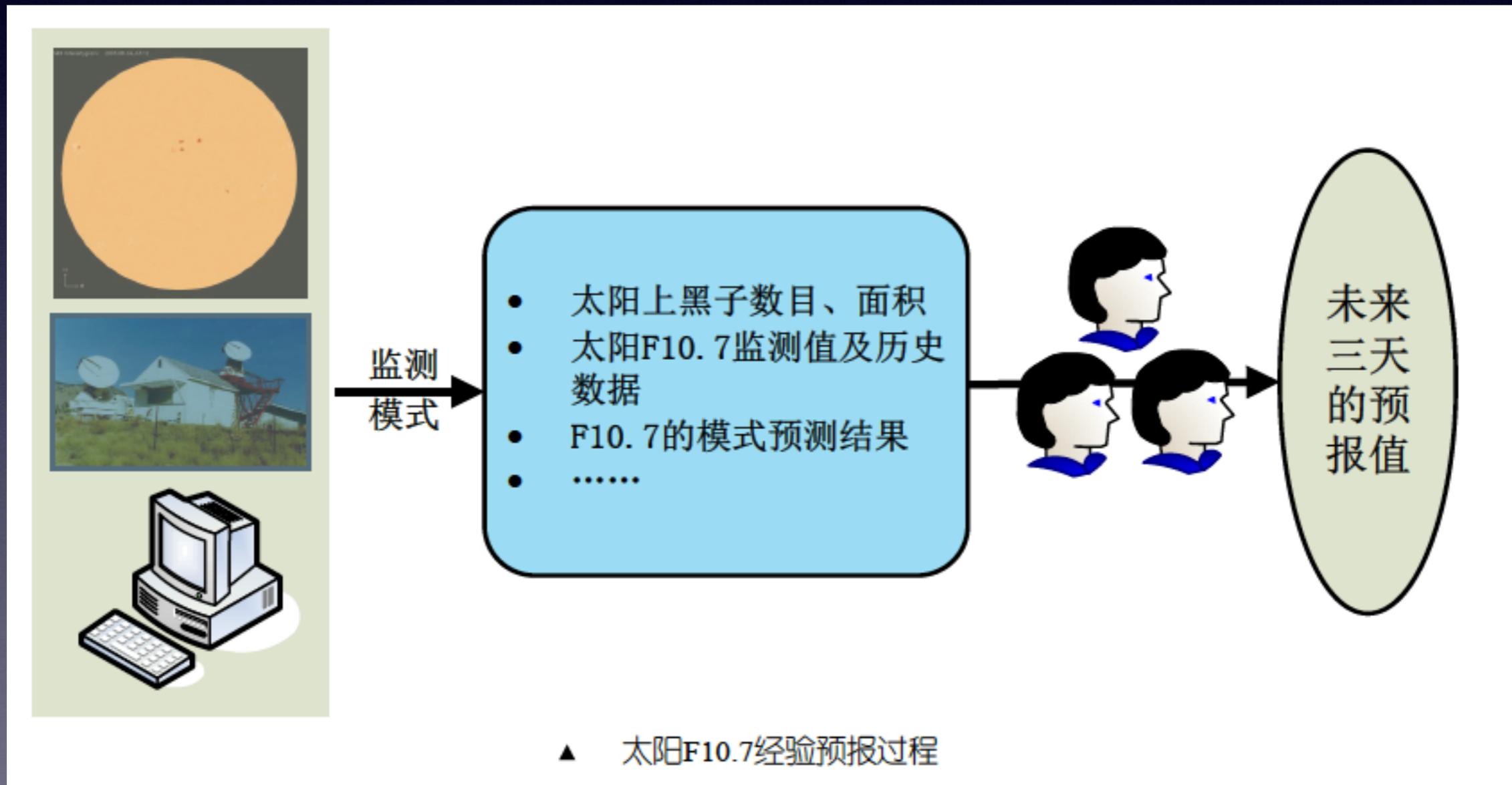
预报的实现



预报的价值

# 空间天气预报方法

## 人工预报：一种主观性预报



# 空间天气预报方法

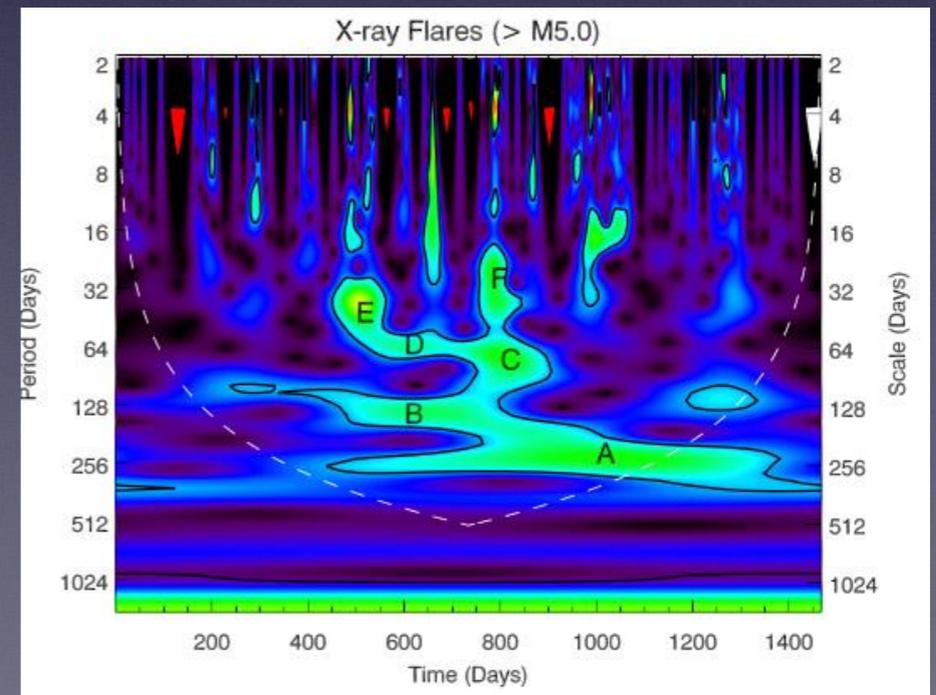
**统计模式：**依据预报对象与预报因子之间的统计关系而建立的预报方法

## ★ 主要的统计分析技术：

自回归、小波分析、时序叠加分析、滤波技术、模糊分析、物理量场的平均和神经网络技术

## ★ 模式创新的途径：

- ▶ 预报因子更新
- ▶ 分析技术更新



# 空间天气预报方法

**物理模式：**以电动力学、磁流体力学和运动学理论来描述空间天气是中能量、动量、质量和磁通量等物理量的传输，它的主要实现手段是数值模拟

## ★ 实现物理预报的基础

- ▶ 人们对日地空间事件发展过程和物理规律有清楚的了解
- ▶ 空间探测技术的发展为预报提供实时监测数据

## ★ 最大优点：物理过程清楚、便于机理分析

# 空间天气预报方法

## ★ 模式的优缺点

- ▶ 统计模式灵活，比物理模式更快、更准确的预测他们训练区域的预测对象，对训练之外的预测是不确定的，缺乏可拓展性
- ▶ 物理模式能够提供一系列变量的预测，但预测结果大多不能满足业务预报对预测精度的要求

## ★ 模式的互补

- ▶ 物理知识引导经验模式的发展
- ▶ 物理模式经常依赖于一些经验近似来描述一些物理过程

# 空间天气预报方法

经验模式 + 物理模式 = 混合模式

统计  
关系

物理  
基础

## WSA模式

光球层磁  
场观测



源表面磁  
场观测



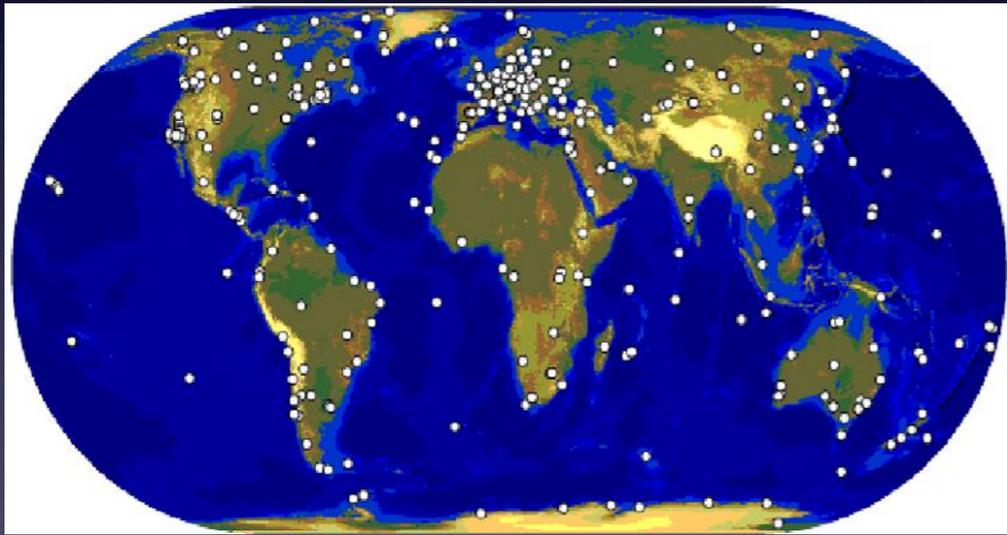
太阳风  
速度

PFSS模型  
+  
SC模型

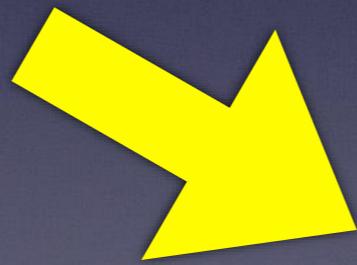
经验  
公式

# 空间天气预报方法

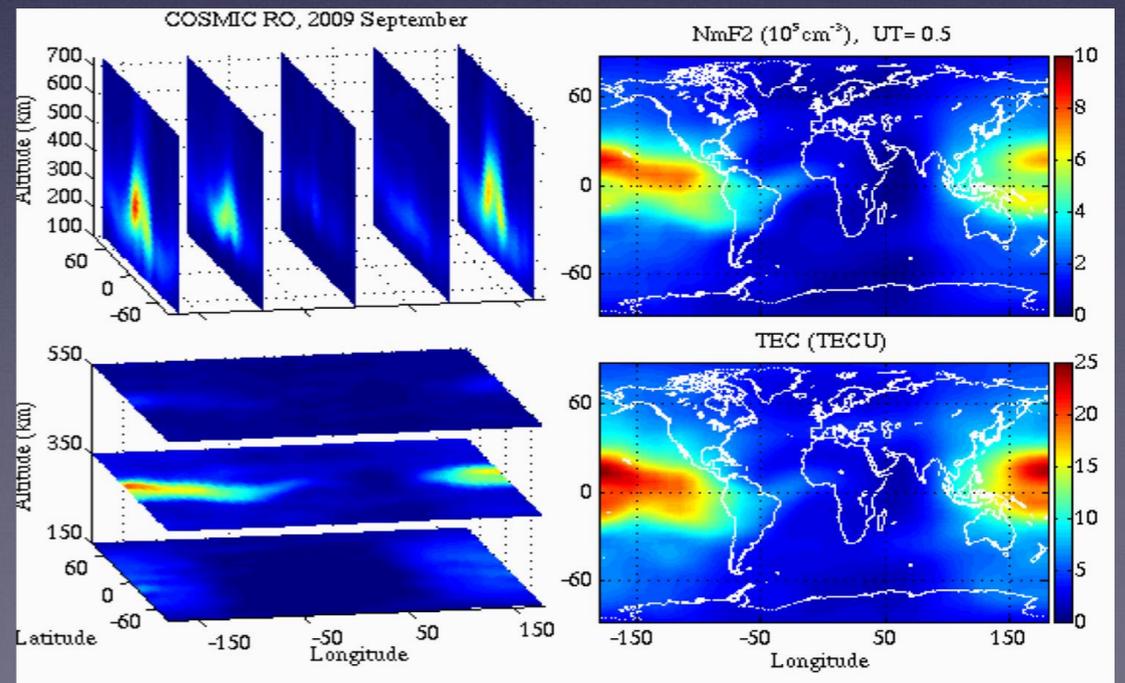
**数据同化：**将观测数据融入预报模式来改进模式的预测效果



电离层观测数据



同化后的结果



# 空间天气预报方法评估

**预报的准确性评估：**通过对预报量和观测值之间的比较，统计和总结预报与观测误差信息，以此来检验预报是否为“好”的预报。

- ▶ **评估属性：**偏差、相关性、准确性、可靠性、预报难度、预报技能等
- ▶ **评估度量：**可以从统计上提炼出对其描述的量化数值，如描述偏差的评估度量有误差、标准误差、方差等，描述相关性常用的评估度量是相关系数

# 空间天气预报方法评估

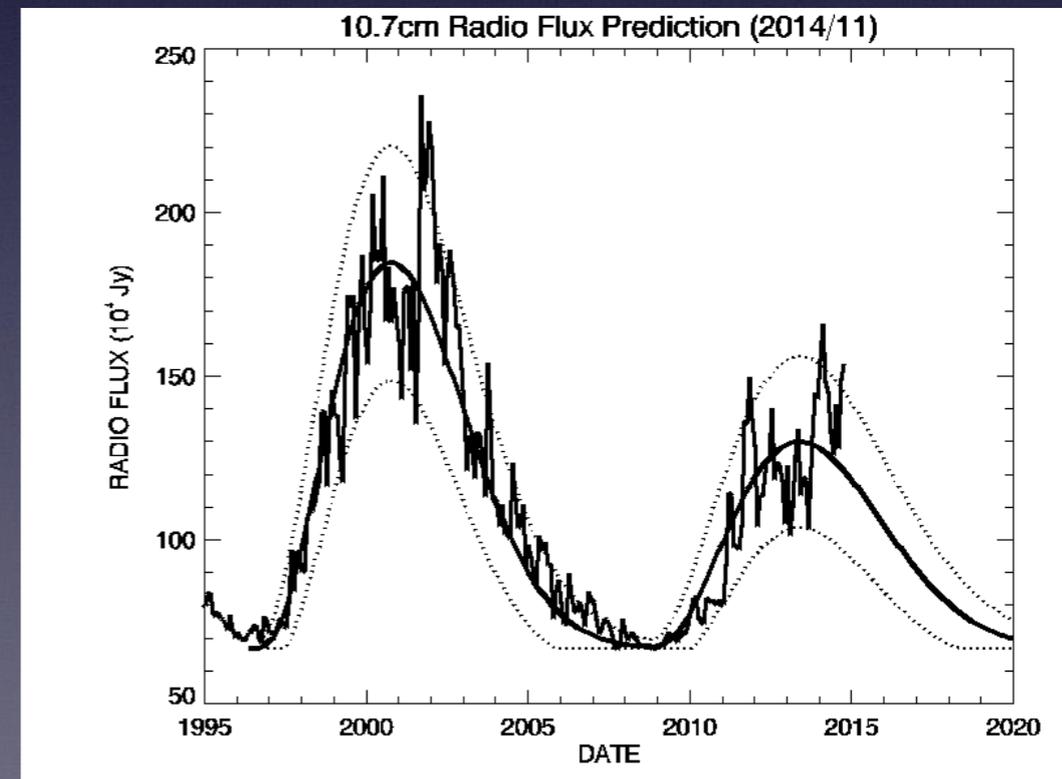
**预报技能：** 预报评估中常用的一种评估属性，它是评估相对参考模型，实际预报水平是否提升的属性

**参考模型：** 随机模型、持续模型、平均/气候模型或其他同类型的模型



# 空间天气预报方法评估

- ★ 选择单一评估参数评估，缺乏系统性、科学性和具有正确导向性的评估方法和体系
- ★ 评估不够精细、进行集体处理

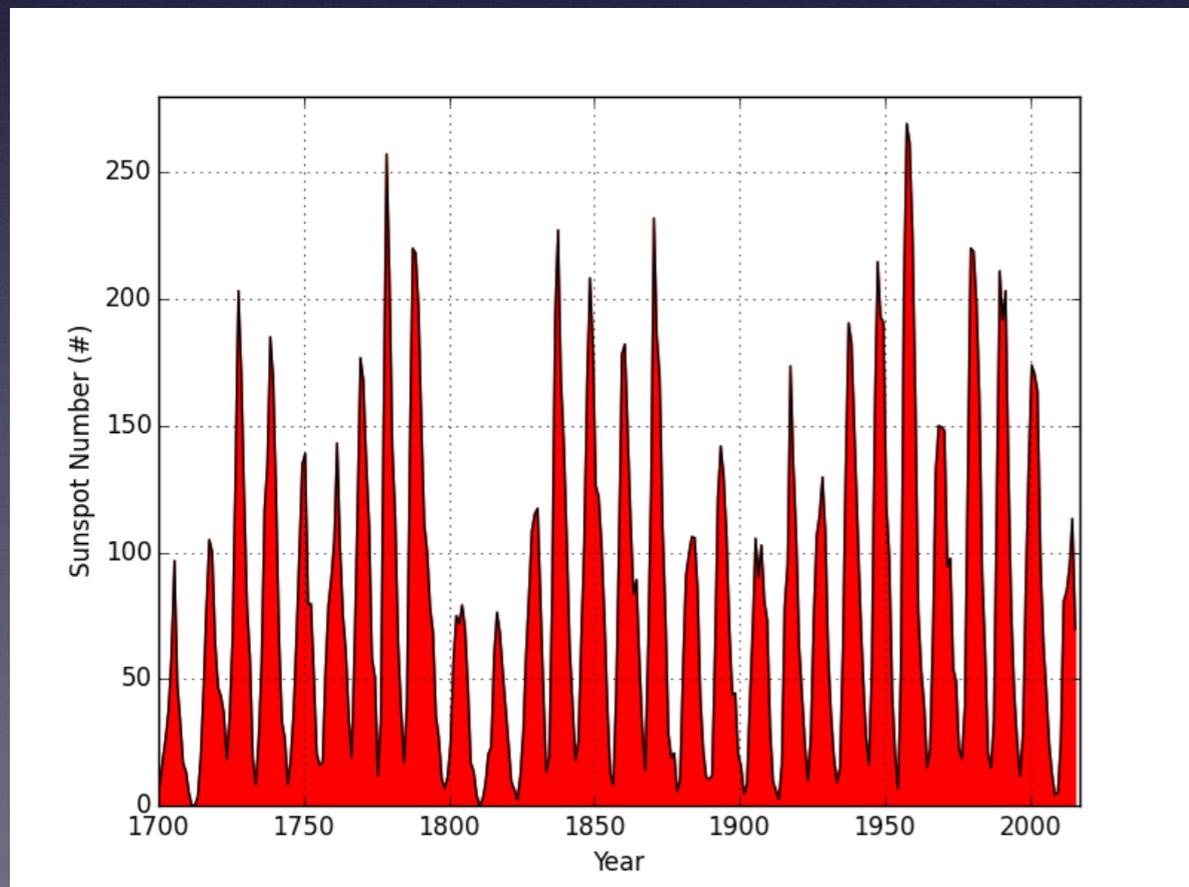


太阳高能和低年射电流量变化的差别

## 2、太阳活动预报

### 太阳黑子的长期预报

**黑子数的长期预报：** 预报未来太阳活动周的变化特征，如黑子数极大值、极小值和出现时间



#### ★ 黑子数预报难点

- ▶ 周期长短不固定
- ▶ 强度差别也很大

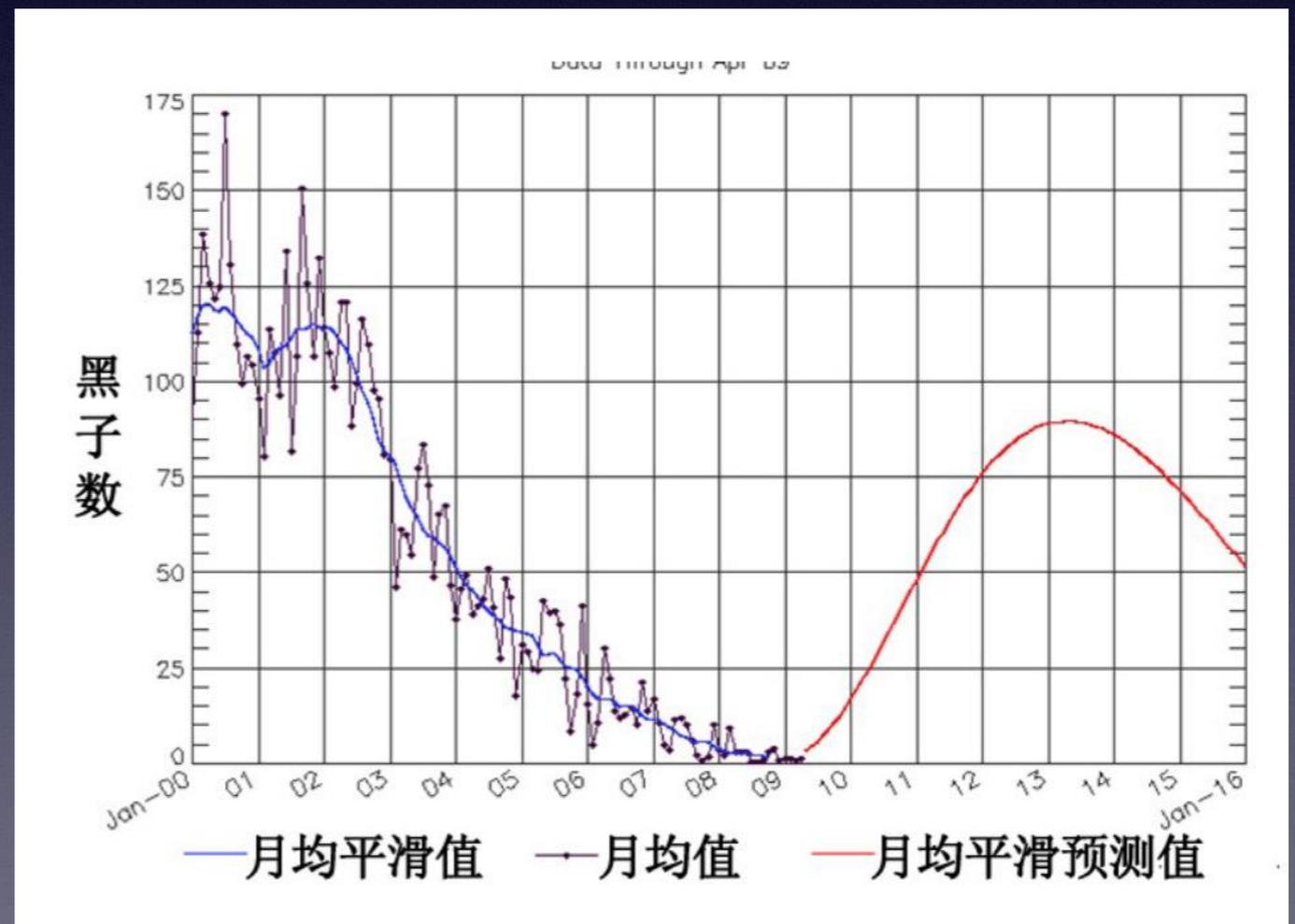
#### ★ 黑子数预报方法

- ▶ 统计方法
- ▶ 太阳风发电机模型预报

# 太阳黑子的长期预报：统计方法

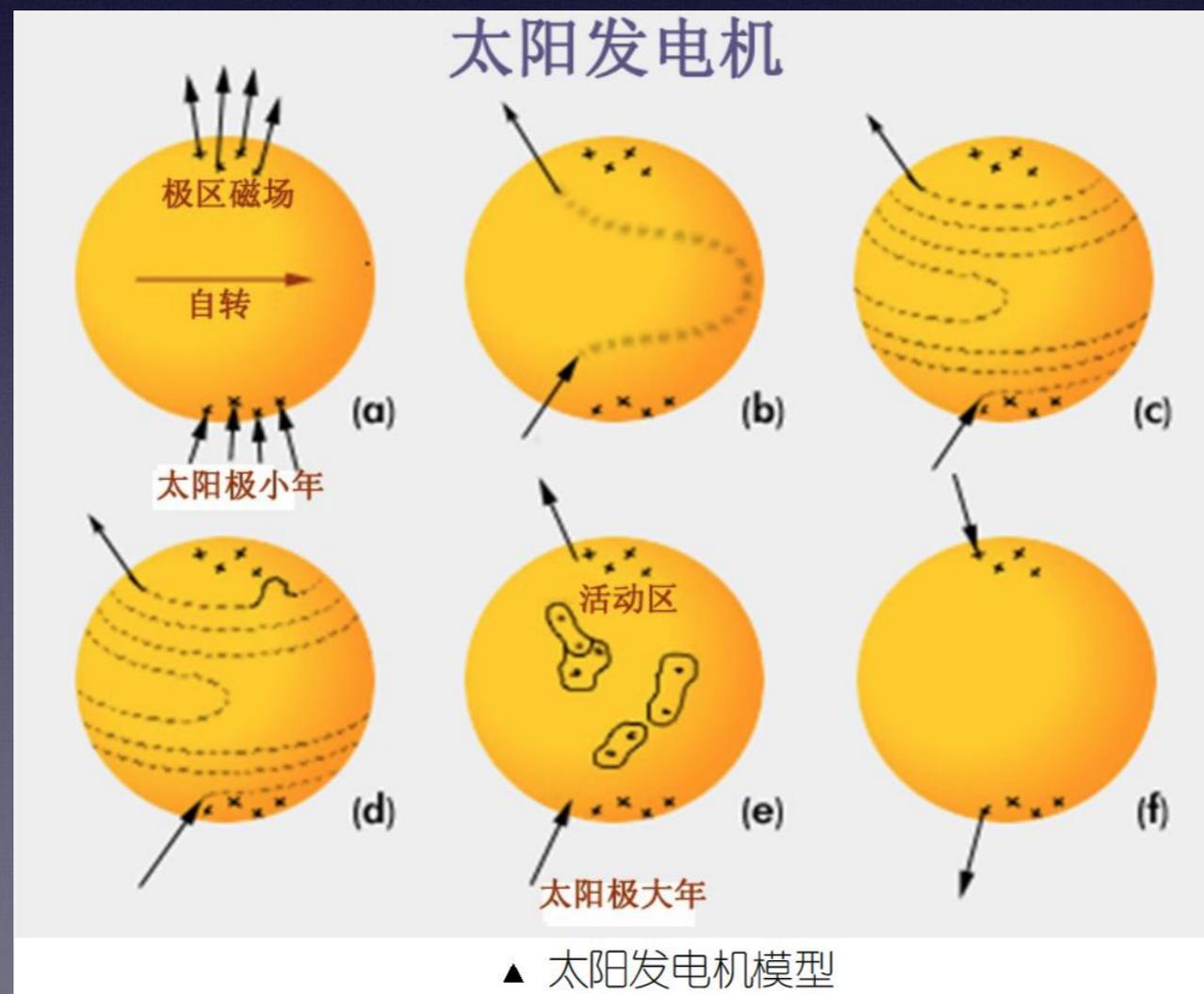
**统计方法：**在假设太阳活动遵循统计规律的基础上提出来，通过对黑子数的系列数据进行各种分析

- ▶ 频谱分析法
- ▶ 时间序列法
- ▶ 活动周参量法
- ▶ 自回归方法
- ▶ 长周期方法
- ▶ 人工神经网络法

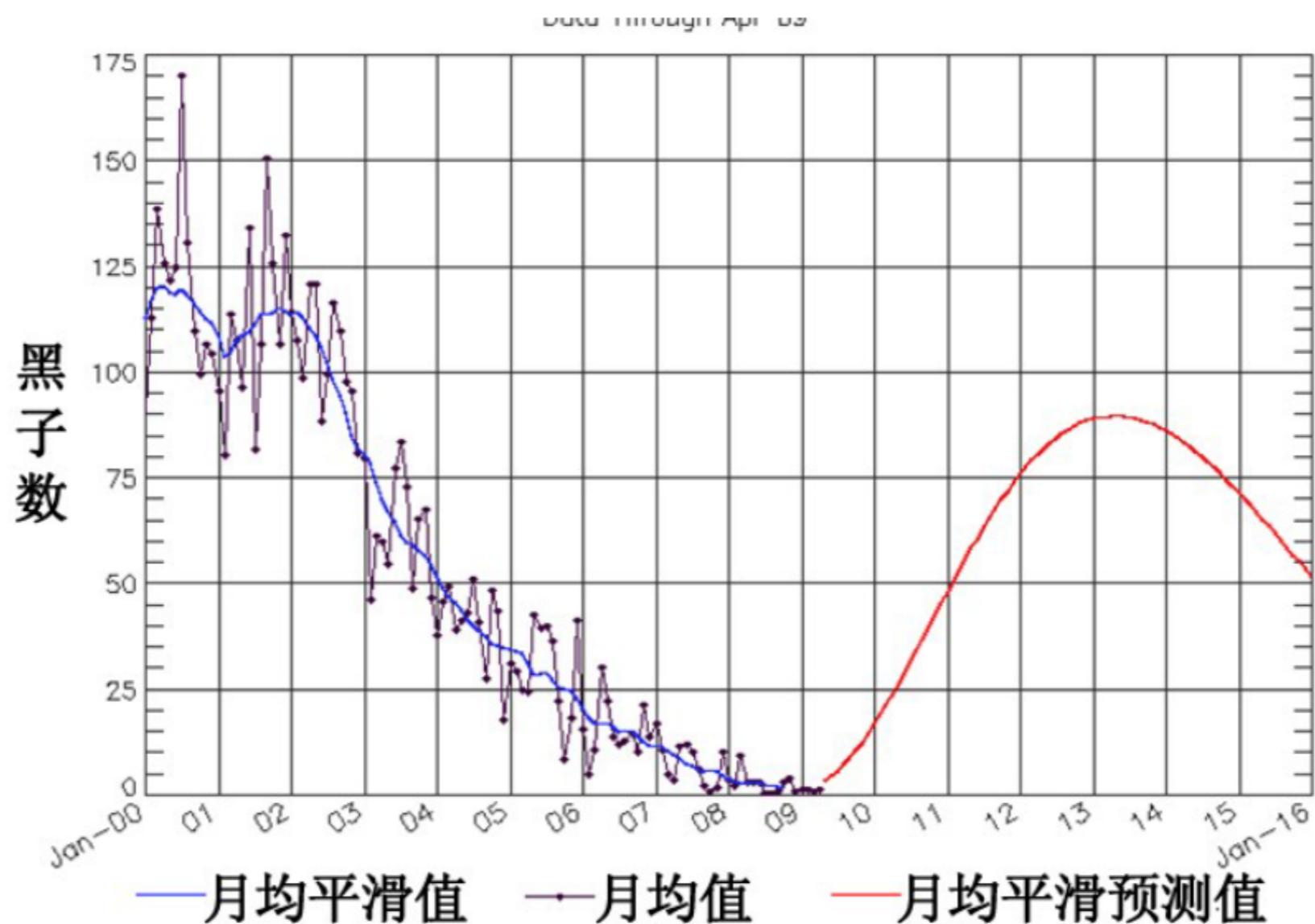


# 太阳黑子的长期预报：太阳发电机模型

**太阳发电机模型：**将某一特定周期的太阳活动极小时的极区磁场作为输入条件，直接利用太阳发电机模型通过数值模拟的方式就可以预报下一个太阳活动周的强度



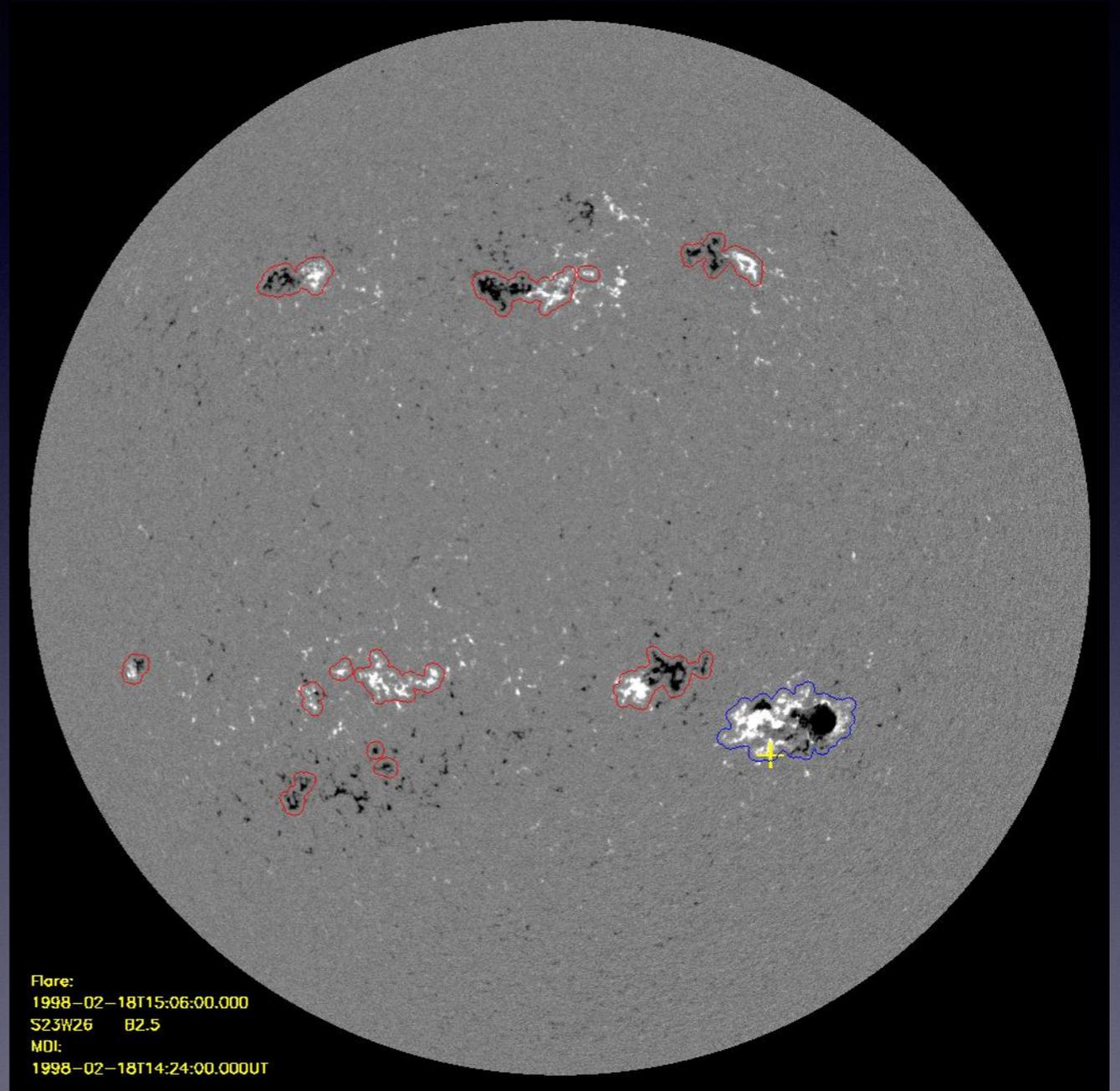
# 24太阳活动周预测



▲ 美国第24太阳活动周预测小组的官方预测

# 太阳耀斑预报

耀斑预报：依赖于以黑子为中心的活动区的监测和历史相关资料的统计分析



# 耀斑前兆

---

- 黑子群呈复杂活动类型
- 黑子群特殊运动或变化
- 暗条活动
- $H\alpha$ 辐射增强
- UV或X射线短波辐射增强

# 常见耀斑预报模式

## Leka等人模式

NWRA Magnetic Parametrization: KD Leka, G. Barnes

**Data Input:** photospheric vector magnetic field data

**From  $B(x,y)$ , describe:**

- the magnetic field strength and direction
- the horizontal gradients of the magnetic fields
- the vertical current density
- the magnetic twist and current helicity density
- the shear angle (deviation from potential, whole map and neutral-line areas)
- Proxy for the magnetic free energy
- Schrijver's  $R$  parameter

**Parameterization:**

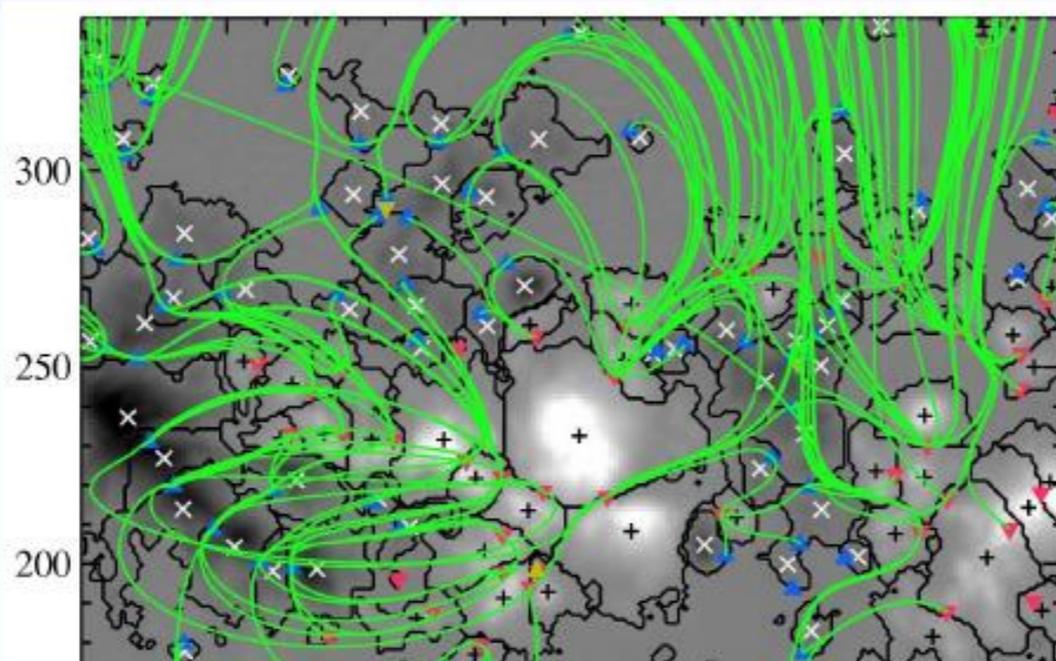
- *Moment analysis:* mean, standard deviation, skew, kurtosis to derive single-number parameters for each category
- **Additional parameters:** total, net, best-fit parameters.
- **Mix of intensive and extensive parameters.**
- **Completely objective**
- **Temporal analysis readily available:** fit for slope & intercept (at reference time).

# 常见耀斑预报模式

## Barnes模型

### NWRA Magnetic Charge Topology: G. Barnes, KD Leka

- Use photospheric  $B$  to investigate coronal  $B$ , where reconnection occurs
- Magnetic Charge Topology model
  - Partition  $B_r$  maps, model as point sources, potential-field extrapolation, determine the coronal connectivity matrix
  - Parametrize the coronal topology by characterizing the magnetic connectivity, distribution of magnetic nulls and separators.
  - Temporal analysis readily available (slope & intercept of parameters).



MCT analysis of NOAA AR10030 with 113 sources (+, x). "A", "B" and upright null points ( $\blacktriangledown$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\nabla$ ) and separator field lines ( $\text{---}$ ). Axes are in megameters.

# 常见耀斑预报模式

## Falconer的参数

### MAG4 Forecasting using MDI Sample

Free-energy proxies are obtained: 1. from the vertical-field component of a vector magnetogram (all vector magnetograms are deprojected) or, 2. from a line-of-sight magnetogram.

- Free energy of an active region (AR) is concentrated in horizontal shear along neutral-line intervals in which the horizontal component is strong and the vertical component's horizontal gradient is steep.

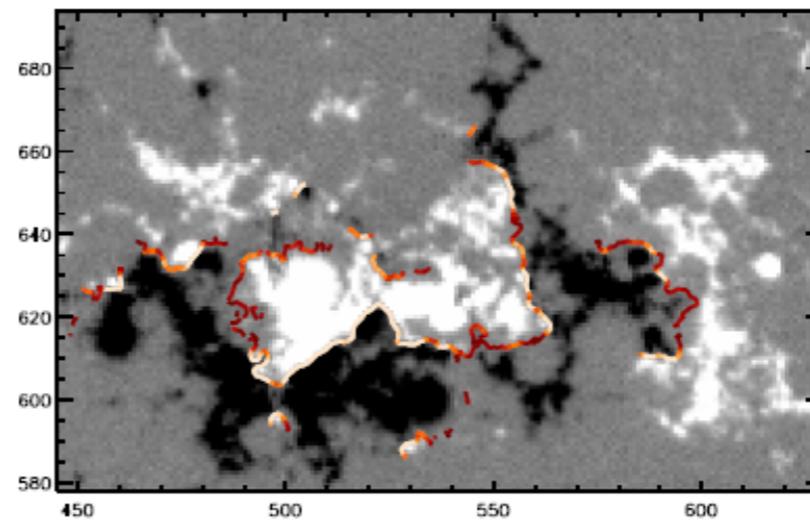
The measurement from a vector magnetogram:

$$W_{L_{SG}} = \int (\nabla B_z) dl.$$

The approximation from a line-of-sight magnetogram:

$$LW_{L_{SG}} = \int (\nabla B_{LOS}) dl.$$

Integration is along strong-field intervals of the AR's neutral lines.



# 常见耀斑预报模式

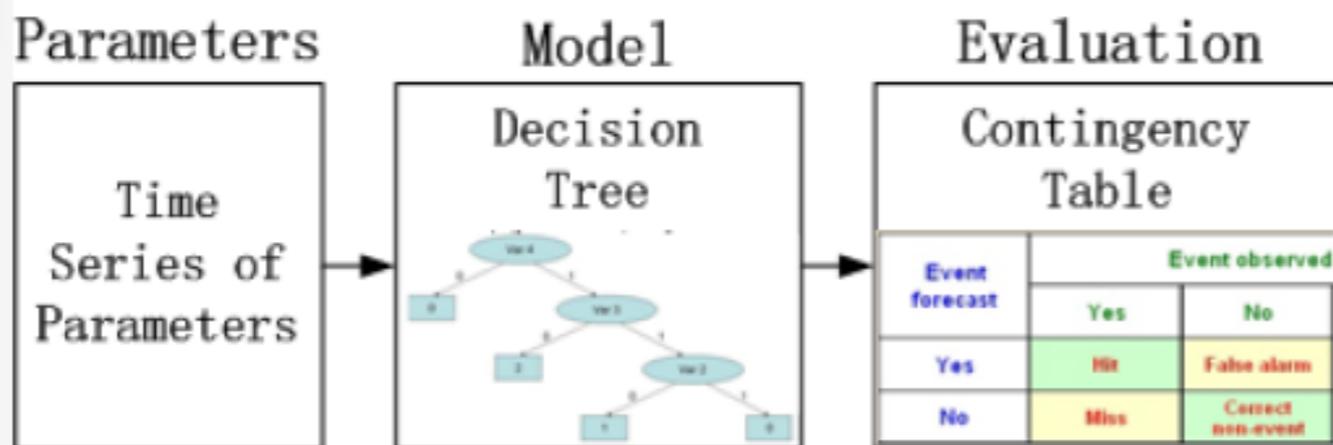
## 国家天文台的模型

Xin Huang (xhuang@bao.ac.cn) & Huaning Wang (hnwang@bao.ac.cn)

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

**Abstract:** We built a solar flare forecasting model from SDO/HMI vector magnetograms. The parameters, model and evaluation are presented here.

### ■ Framework



### ■ Parameters

- Maximum Horizontal Gradient
- Length of Neutral Line
- Number of Singular Points
- Tilt angle
- Magnetic Shear Angle
- Vertical Current Density
- Vertical Current Helicity Density
- Twist Parameter  $\alpha$
- Free Magnetic Energy Density

# 太阳耀斑预报性能比较指标

<i>Observed</i>		<i>Predicted</i>	
		flare	no flare
	flare	<b>TP</b>	<b>FN</b>
	no flare	<b>FP</b>	<b>TN</b>

**Heidke skill score:**  $HSS = (TP + TN - \text{random}) / (N - \text{random})$

**True skill statistic** (aka Hanssen and Kuipers discriminant, aka Peirce skill score) :  $TSS = POD - POFD = TP / (TP + FN) - FP / (FP + TN)$

## Conclusions.

**Talking is good.** The group did more talking than computing. It was intense. A lot was learned. A lot of coffee was consumed.

**Devil's in the details:** No two groups will get the same parameter (e.g., total magnetic flux) exactly the same due to internal details re: thresholds, grids, approximations, etc.

**We're not there yet.** A lot of progress has been made, especially with automation and machine-learning. However, the full potential of the information available is still not being utilized. And no one is yet producing a Sun-proof prediction method.

# 太阳耀斑预报性能比较结果

方法	国家天文台	Falconer	Leka
HSS (C级)	0.47	未提供	0.48
TSS (C级)	0.68	未提供	0.41
HSS (M级)	0.22	0.38	0.35
TSS (M级)	0.65	0.48	0.25

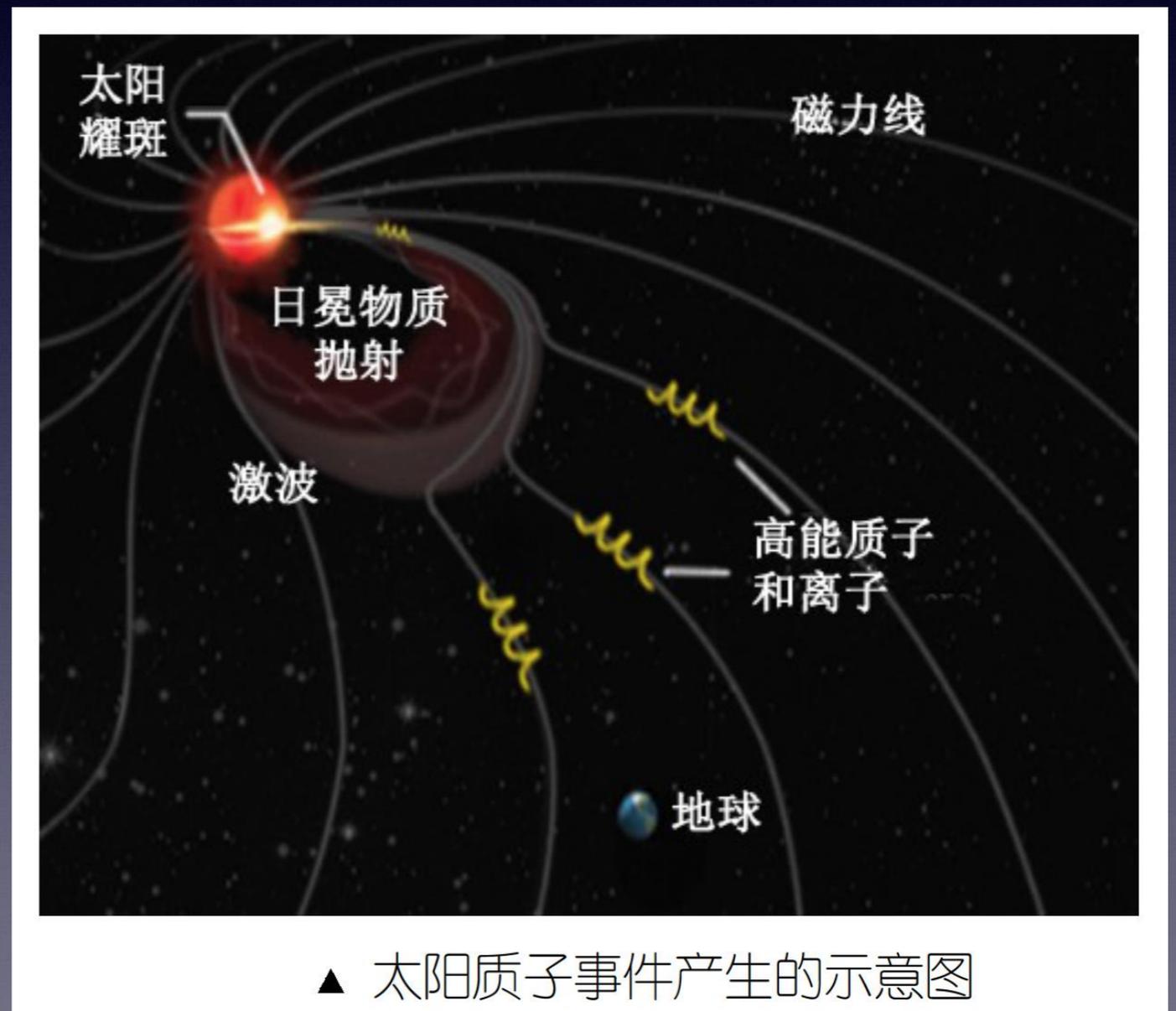
# 太阳质子事件预报

太阳质子事件根据其峰值大小可分为小、中、强三个级别

小：10pfu-100pfu

中：100pfu-1000pfu

大： $>1000$ pfu



# 太阳质子事件预报

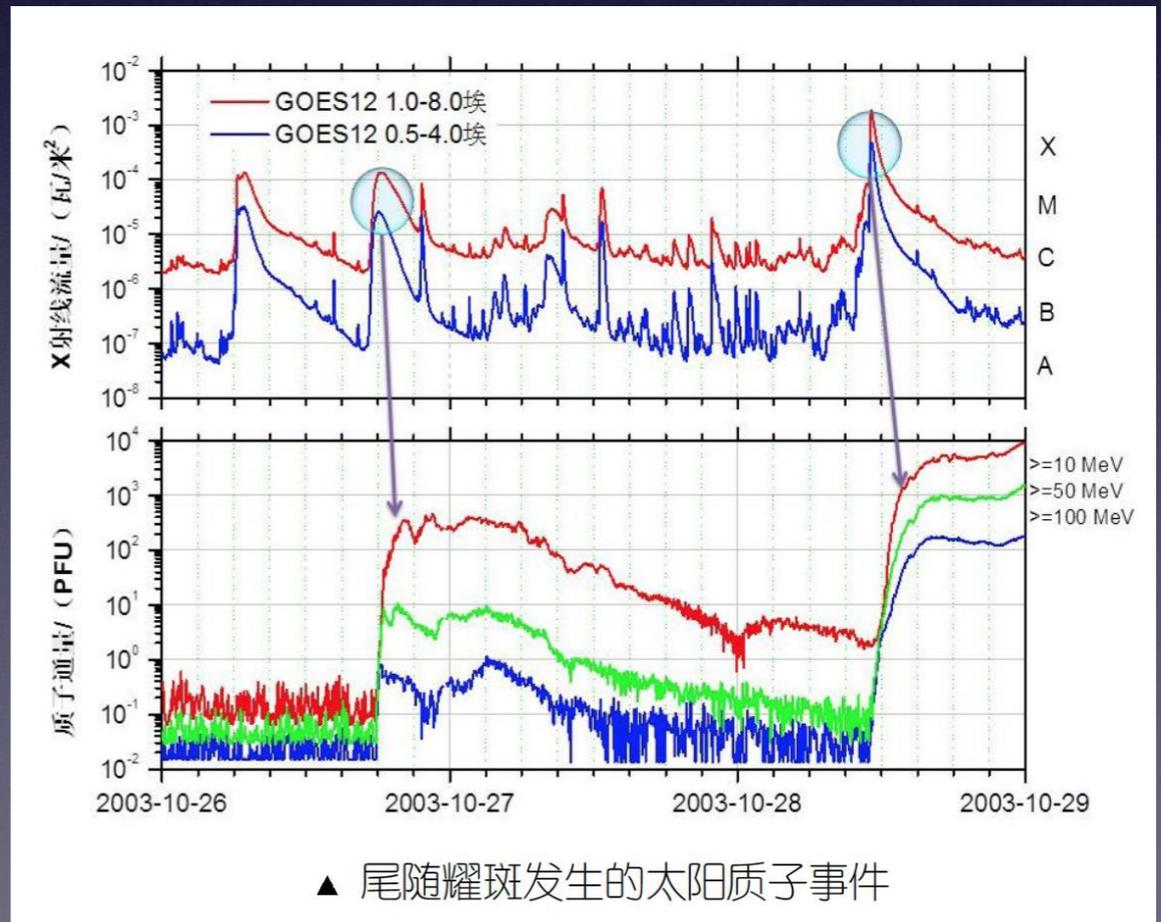
根据预报提前量的长短，质子事件预报主要是**长期预报**和**1天-3天的短期预报或警报**，还没有很有效的中期预报方法

- ▶ **长期预报**：预报未来一段长时间内的质子事件的积分通量和能谱，适用于航天器的飞行计划、轨道设计、姿态控制的制定，以及有关空间敏感器、探测器设计等
- ▶ **短期预报**：主要是质子事件的发生和级别，为宇航员出舱、太空行走及运行各类高能辐射敏感的科学设备等提供风险规避依据

# 太阳质子事件的长期预报

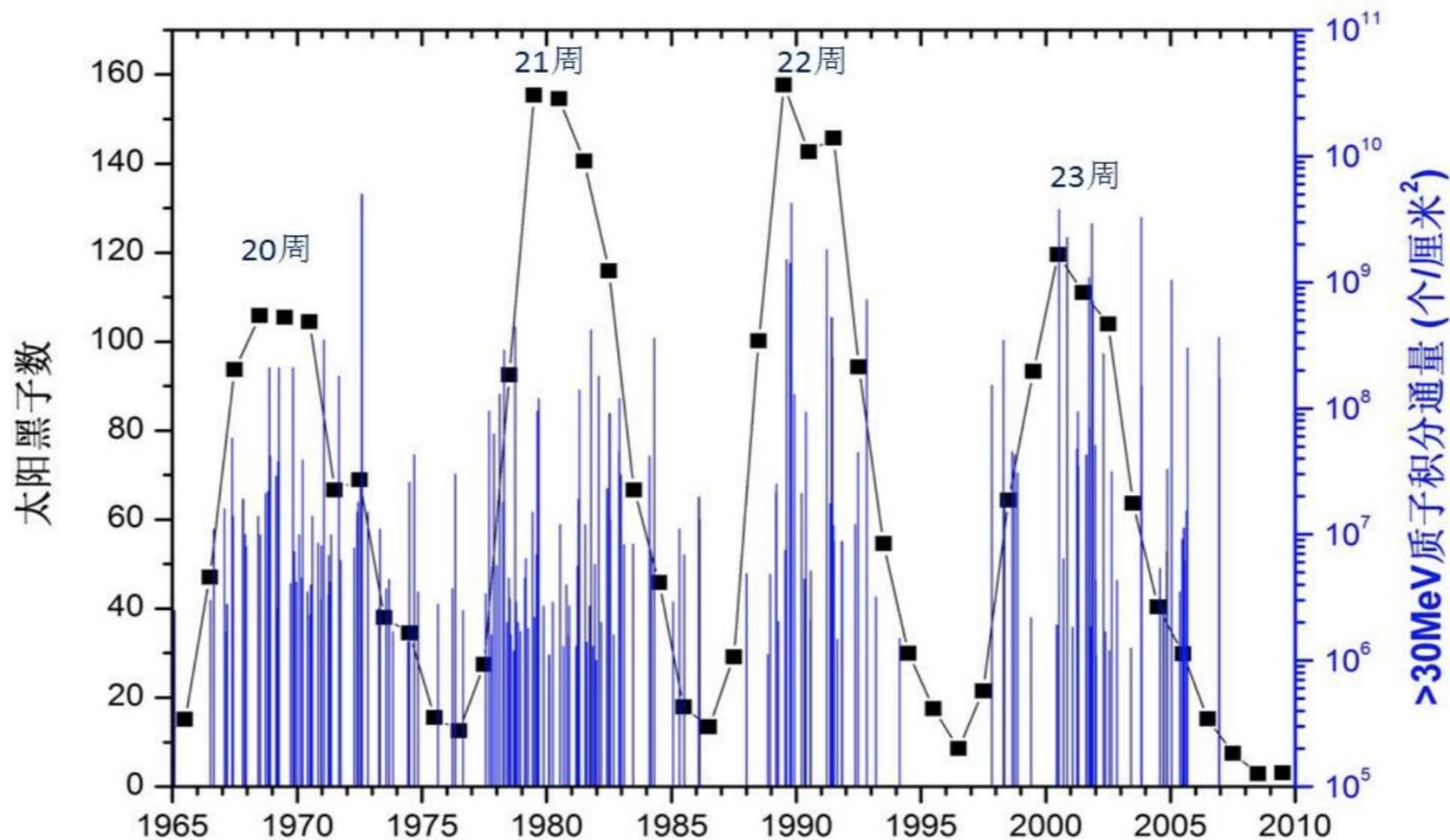
**质子事件的长期预报：** 提前一个太阳活动周或几年的事件预报，主要是给出未来长时间内的质子事件总的积分通量和能谱分布。

- ▶ **积分通量：** 质子事件期间的累积质子通量
- ▶ **能谱：** 通量在不同质子能量范围内的变化



# 太阳质子事件的长期预报

太阳质子事件长期预报主要依靠对过去质子事件的观测，在经验统计的基础上，根据一定时期内太阳质子通量水平，以及对相关参数如峰值流量、延迟事件等的分析来预报



▲ 太阳质子积分通量与黑子数之间的相关性

# 太阳质子事件的长期预报：King模型

- 时间段：20太阳活动周活跃年份[1966-1972年]
- 数据来源：IMP4、5和6卫星的质子数据[10 - 100MeV]
- 事件集：25个独立事件[其中一个异常庞大事件：1992年8月]

★ 持续t年航天器遭遇超过规定的质子（能量高于E）通量f的概率P:

$$P(> F, E, t) = \sum_{n=1}^{\infty} p(n, t, N, T) Q(> F, E, t)$$

$$f=10^F$$

N:T年中已经观测到的事件数

★ 在t年终观测到n次事件的概率p:

$$p(n, t; N, T) = \frac{(n + N)!}{n!N!} \frac{(t/T)^n}{1 + (t/T))^{1+n+N}}$$

# 太阳质子事件的长期预报：King模型

- ★ n次事件的混合通量的对数超过F的概率G:

$$Q(> F, E; n) = \int_{-\infty}^{\infty} q(x, E) Q(> \log(10^F - 10^x), E : n - 1) dx$$

Q: 在自变量小于或等于0时被定义为单位1, 在 $x < F$ 且 $n=1$ 时被定义为0.

- ★ 通量q的对数正则分布:

$$q(F) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)\sigma}} e^{-\frac{(F - \langle F \rangle)^2}{2\sigma^2}}$$

King模式两种使用方式: 指定数目 or 指定概率

# 太阳质子事件的长期预报: King模型

- ★ AL事件能谱[exponential in energy]

$$j(> E) = 7.9 \times 10^9 e^{\frac{30-E}{E_0}}$$

$$E_0=26.5$$

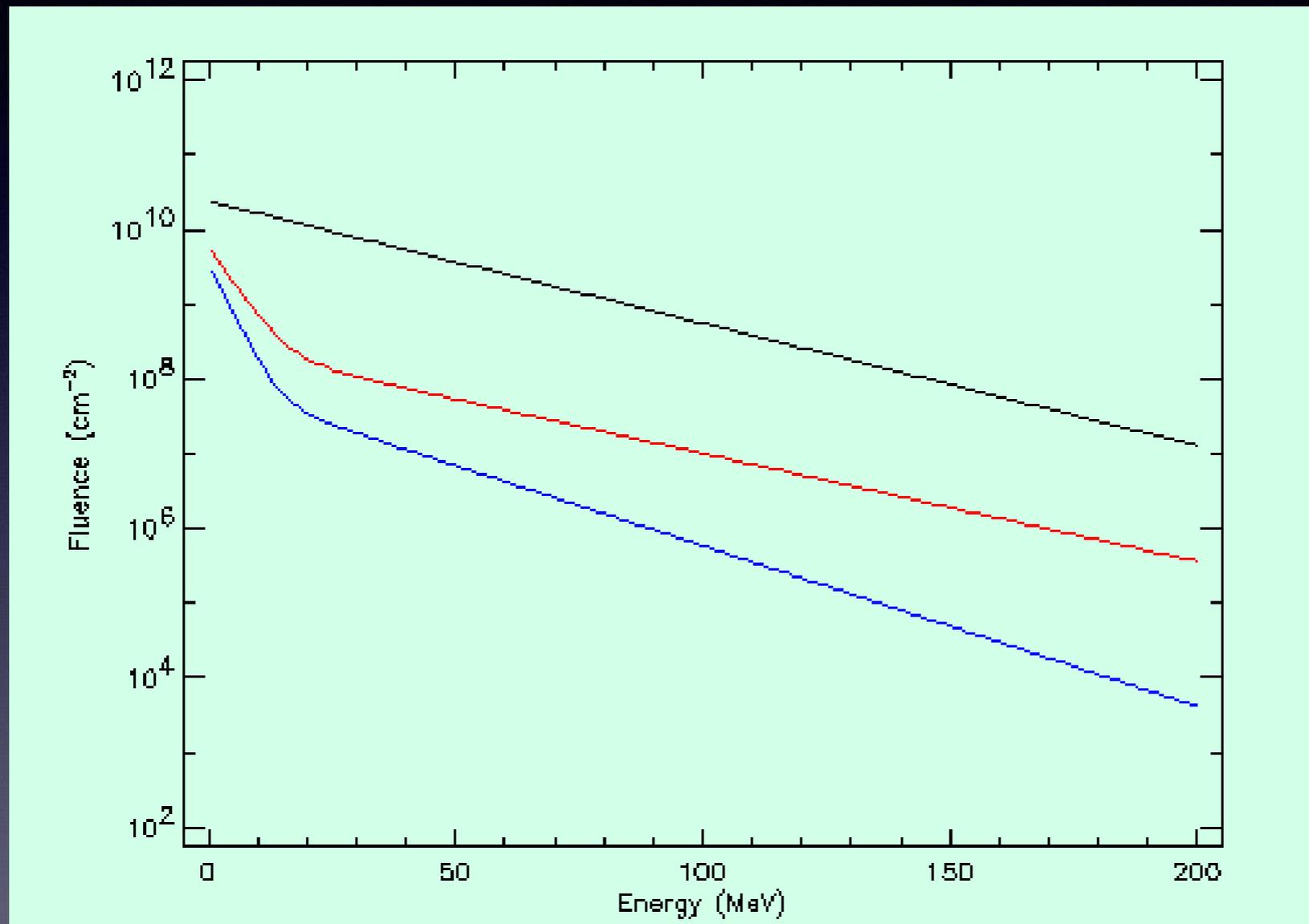
- ★ OR事件能谱[exponential in rigidity]

$$j(> E) = 8.38 \times 10^7 (e^{-E/20.2} + 45.6e^{-E/3})$$

- ★ 最坏OR事件能谱

$$j = 2.865 \times 10^8 (e^{-E/30} + 22.0e^{-E/4})$$

# 太阳质子事件的长期预报：King模型



# 太阳质子事件的长期预报：King模型

事件数n	任务时间[年]			
	1	3	5	7
0	76.56	49.00	34.03	25.00
1	96	78.40	62.38	50.00
2	99.29	91.63	80.11	68.75
3	99.89	96.92	89.95	81.25
4	99.98	98.91	95.08	89.01
5	99.99	99.62	97.65	93.75

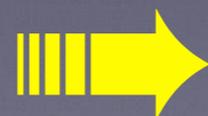
时间t内发生了n次异常大事件的概率

# 太阳质子事件的长期预报：JPL模型

## King模式的几个问题

- 太阳活动周累积通量和黑子数之间没有必然联系，因而忽略19周的数据是不必要的
- 如果计入19周和21周的数据，将太阳活动事件分为异常事件和普通事件的做法是不准确的
- 依据发生相对较少事件的20太阳活动周的数据所得到的模型只能有有限的统计有效性

利用更多数据



JPL模型

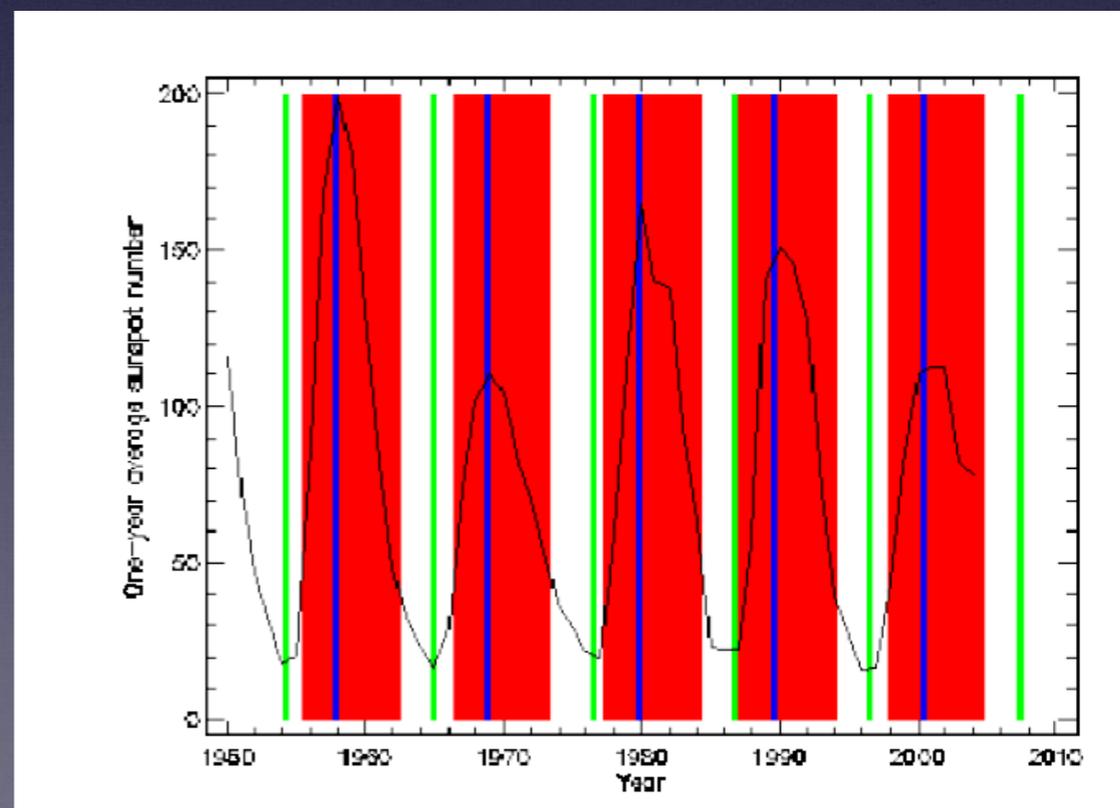
# 太阳质子事件的长期预报：JPL模型

- 时间段和数据来源
  - ▶ 1956-1963年的火箭和气球数据[19太阳周]
  - ▶ 1963年后一些系列近地辐射带卫星数据[20、21、22、23太阳周]
- 用确切的太阳高年日期作为太阳活动周的0参考年

- ▶ 11年周期中太阳活跃持续7年，零基准日期前2.5年到后4.5年
- ▶ 时间频率和强度不对称性



只考虑7个活跃年份的质子通量



# 太阳质子事件的长期预报：JPL模型

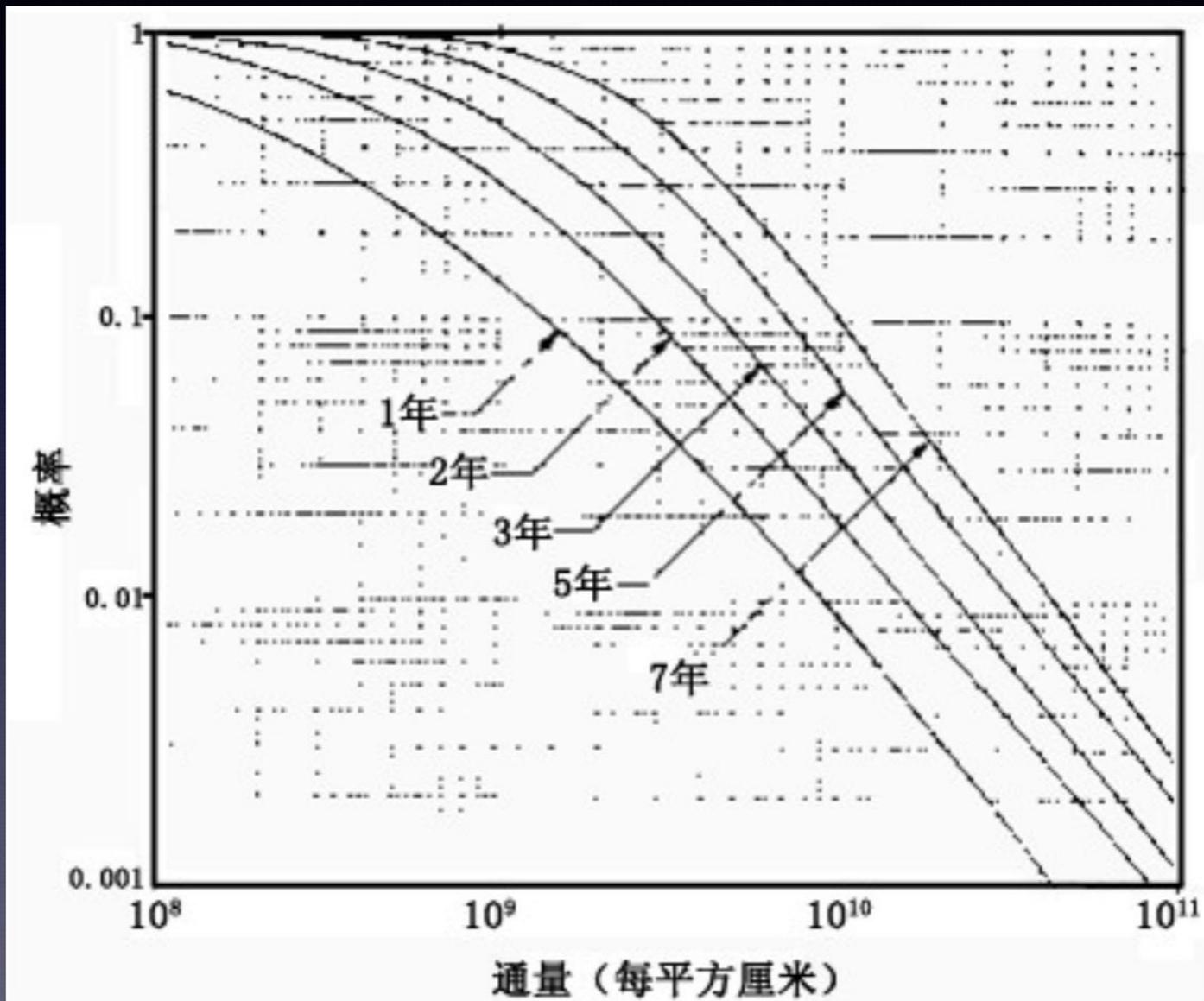
## ★ JPL模型中的假设：

- \* 单个太阳质子事件的发生时随机的，事件的爆发概率服从泊松统计分布
- \* 质子时间的通量服从对数正态分布
- \* 太阳质子时间只发生太阳活动周连续7个活跃年
- \* 不同太阳活跃年份的质子时间爆发频率是一致的

## ★ 在t年终观测到n次事件的概率p：

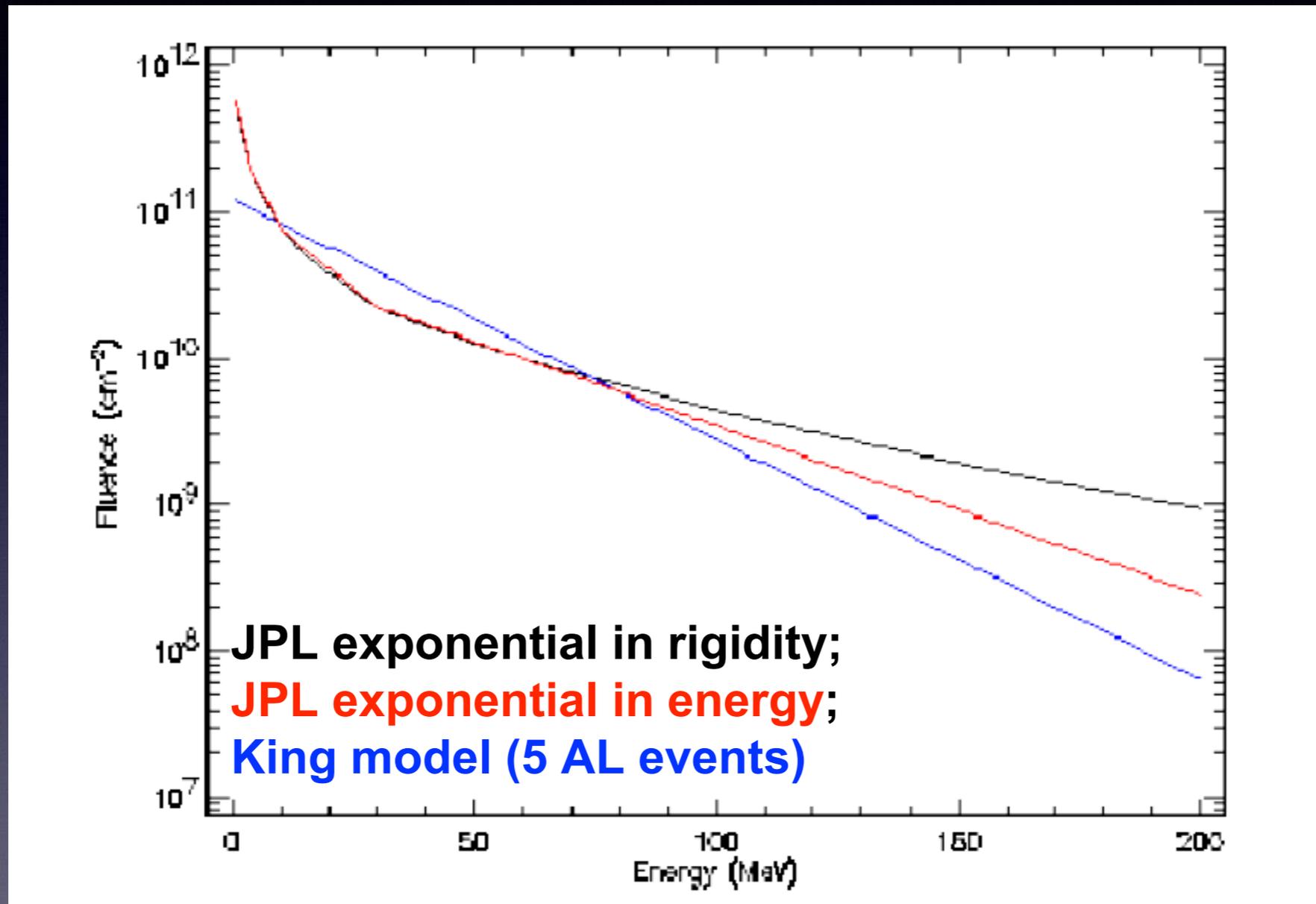
$$p(n, t; N, T) = e^{-\omega t} \frac{(\omega t)^n}{n!}$$

# 太阳质子事件的长期预报：JPL模型



- ▲ JPL模型给出的对应不同时间跨度遇到能量 $>60\text{MeV}$ 的高能质子积分通量水平的概率曲线

# King模型和JPL模型的比较



太阳峰值条件下7年任务的质子通量 (置信度90%)

# King模型和JPL模型的局限性

## ★ 质子能量范围

- ▶  $<10\text{MeV}$ 的质子通量对太阳电池有重要影响
- ▶ 最高能量质子对单粒子事件等有重要意义

## ★ 两个模型均没有包含完整的3个太阳活动周

## ★ 粒子通量强度分布模型不完全适用所有事件

- ▶ 对数正态分布—大事件
- ▶ 幂指数分布—小事件

# 太阳质子事件的长期预报：ESP模型

初始分布为截断  
的幂指数分布



最大熵理论



数据不全时具有最小方差的概率密度分布

# 太阳质子事件的长期预报：ESP模型

- 时间段和数据来源
  - ▶ Solar Cycle 20: IMP - 3,4,5,7,8
  - ▶ Solar Cycle 21: IMP - 8, GOES 5,6,7
  - ▶ Solar Cycle 22: GOES 5,6,7
- 通量小于 $\Phi_{\min}$ 的事件计入统计
- ★ 初始分布限定条件：
  - ▶ 分布可以归一化
  - ▶ 分布有明确的含义
  - ▶ 有明确的最低通量条件
  - ▶ 有边界，不存在无穷大的事件

Proton energy range (MeV)	Minimum event fluence $\Phi_{\min}$ (cm <sup>-2</sup> )	Worst case event maximum fluence $\Phi_{\max}$ (cm <sup>-2</sup> )
>1	5.0x10 <sup>8</sup>	1.55x10 <sup>11</sup>
>3	1.0x10 <sup>8</sup>	8.71x10 <sup>10</sup>
>5	1.0x10 <sup>8</sup>	6.46x10 <sup>10</sup>
>7	2.5x10 <sup>7</sup>	4.79x10 <sup>10</sup>
>10	2.5x10 <sup>7</sup>	3.47x10 <sup>10</sup>
>15	1.0x10 <sup>7</sup>	2.45x10 <sup>10</sup>
>20	1.0x10 <sup>7</sup>	1.95x10 <sup>10</sup>
>25	3.0x10 <sup>6</sup>	1.55x10 <sup>10</sup>
>30	3.0x10 <sup>6</sup>	1.32x10 <sup>10</sup>
>35	3.0x10 <sup>6</sup>	1.17x10 <sup>10</sup>
>40	1.0x10 <sup>6</sup>	8.91x10 <sup>9</sup>
>45	1.0x10 <sup>6</sup>	7.94x10 <sup>9</sup>
>50	3.0x10 <sup>5</sup>	6.03x10 <sup>9</sup>
>55	3.0x10 <sup>5</sup>	5.01x10 <sup>9</sup>
>60	3.0x10 <sup>5</sup>	4.37x10 <sup>9</sup>
>70	1.0x10 <sup>5</sup>	3.09x10 <sup>9</sup>
>80	1.0x10 <sup>5</sup>	2.29x10 <sup>9</sup>
>90	1.0x10 <sup>5</sup>	1.74x10 <sup>9</sup>
>100	1.0x10 <sup>5</sup>	1.41x10 <sup>9</sup>

# 太阳质子事件的长期预报：ESP模型

## ★ 熵S的定义：

$$S = - \int p(M) \ln[p(M)] dM$$

M: 随机变量 =  $\log \Phi$   
p(M): 概率密度

寻找p(M), 使得S最大。

## ★ 每年通量 $\geq \Phi$ 的事件数：

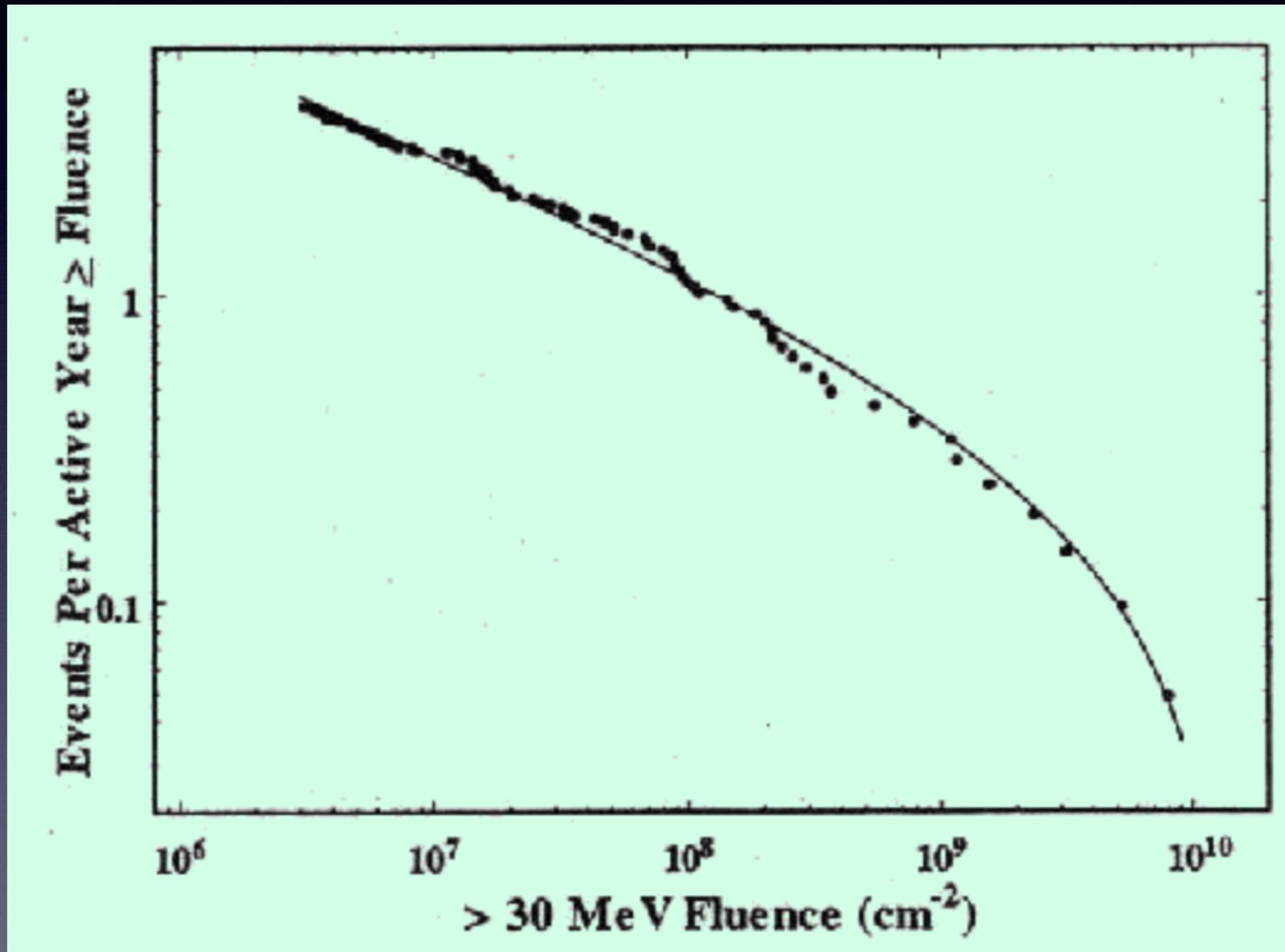
$$N = N_{tot} \frac{\Phi^{-b} - \Phi_{max}^{-b}}{\Phi_{min}^{-b} - \Phi_{max}^{-b}}$$

$N_{tot}$ : 每年通量 $\geq \Phi_{min}$ 的事件数

b: 幂指数

$\Phi_{max}$ : 最大事件的通量

# 太阳质子事件的长期预报：ESP模型



大于30MeV质子事件通量分布

# 太阳质子事件的短期预报

太阳质子事件的短期预报主要根据**与其他太阳活动现象的统计相关性**进行，如日面活动区（面积、磁类型、磁特征物理量）、耀斑（位置、频次、级别）、日冕物质抛射（方向、速度、角宽度）、射电暴以及质子通量变化的先兆特征等。

## ★ 预报内容

- ▶ 有或无
- ▶ 级别
- ▶ 流量
- ▶ 能谱

### ☰ 太阳质子事件概率预报

24HR	48HR	72HR
1%	1%	1%

# 质子耀斑

质子耀斑：与太阳质子事件对应的耀斑

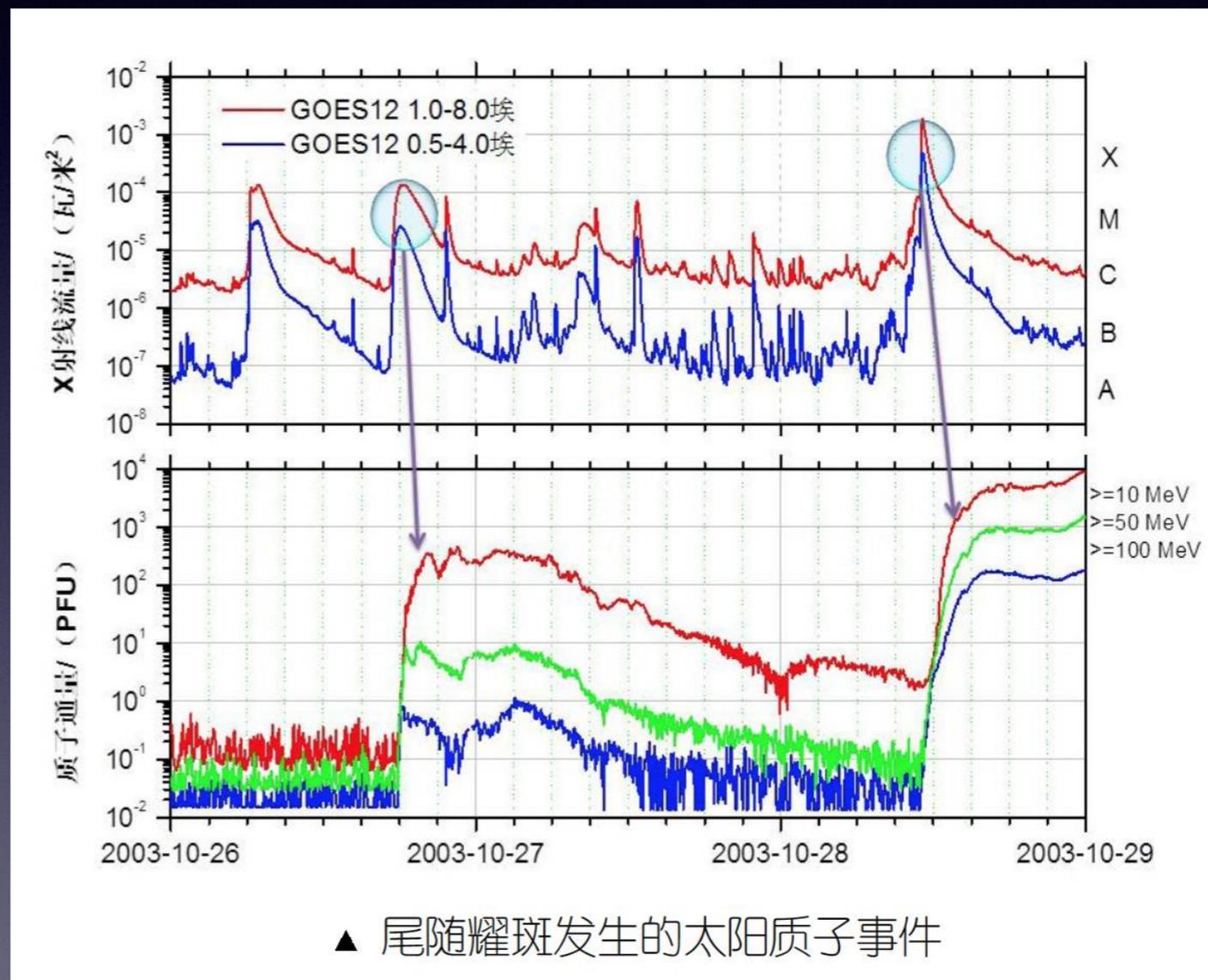
观测是否有耀斑发生



判断是否为质子耀斑



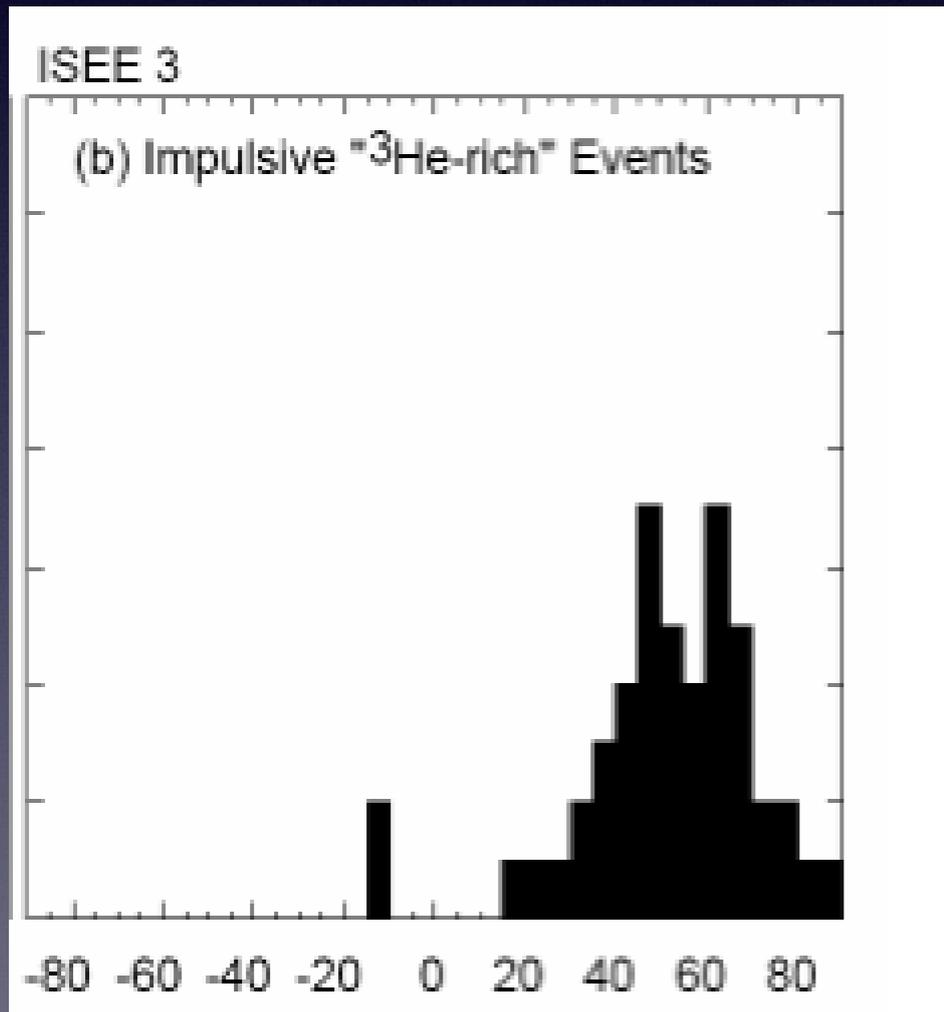
预报是否有质子事件



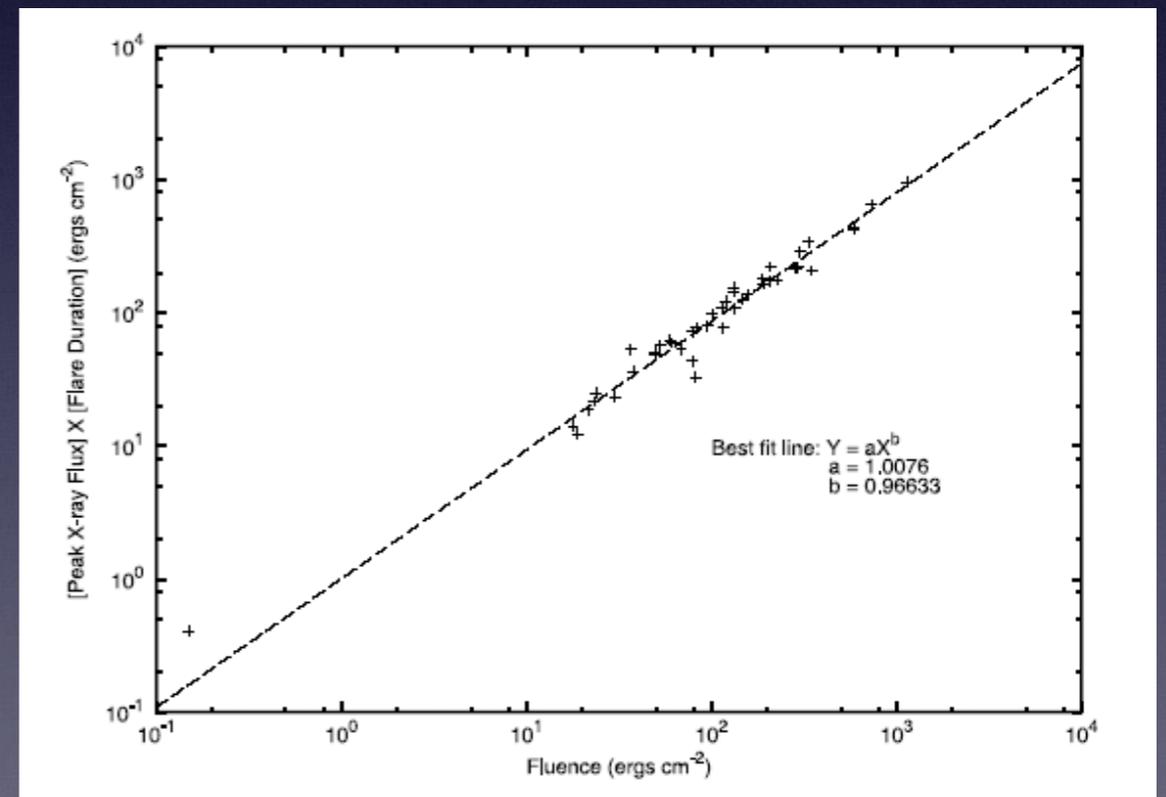
可实现提前1-3天的质子事件预报

# 质子耀斑的统计特征

源区特征：W60左右



耀斑级别特征：>M4级



# 质子耀斑的预报模式：PROTONS模式

## 输入量

## 输出结果

- ▶ GOES卫星X射线波段观测
- ▶ 地基H $\alpha$ 观测
- ▶ 射电II型和IV型暴爆发



- ✓ 质子事件是否发生
- ✓ 时间
- ✓ 峰值通量

# 质子耀斑的预报模式：PPS模式

输入量

输出结果

耀斑观测



产生  
时间  
强度  
能谱  
电子成分



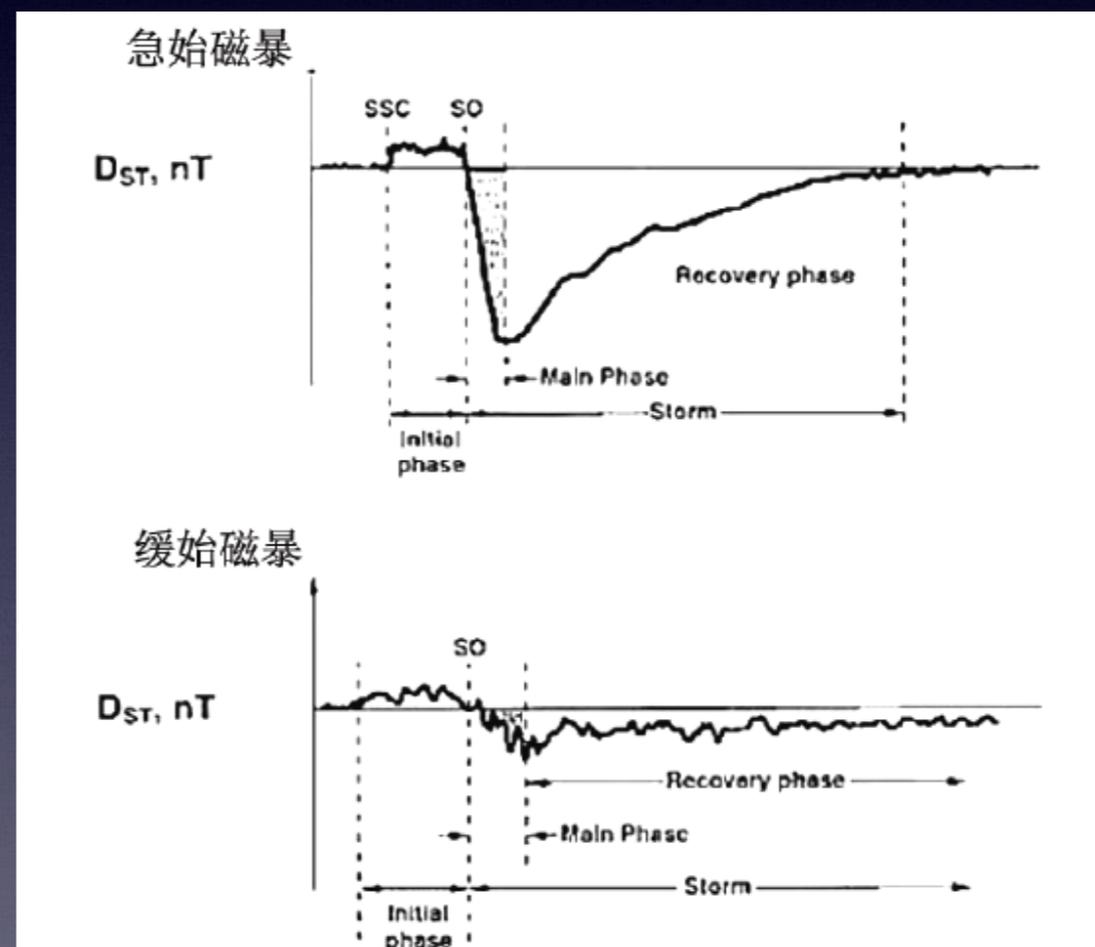
# 3、地球空间环境扰动预报

## 地磁暴的预报

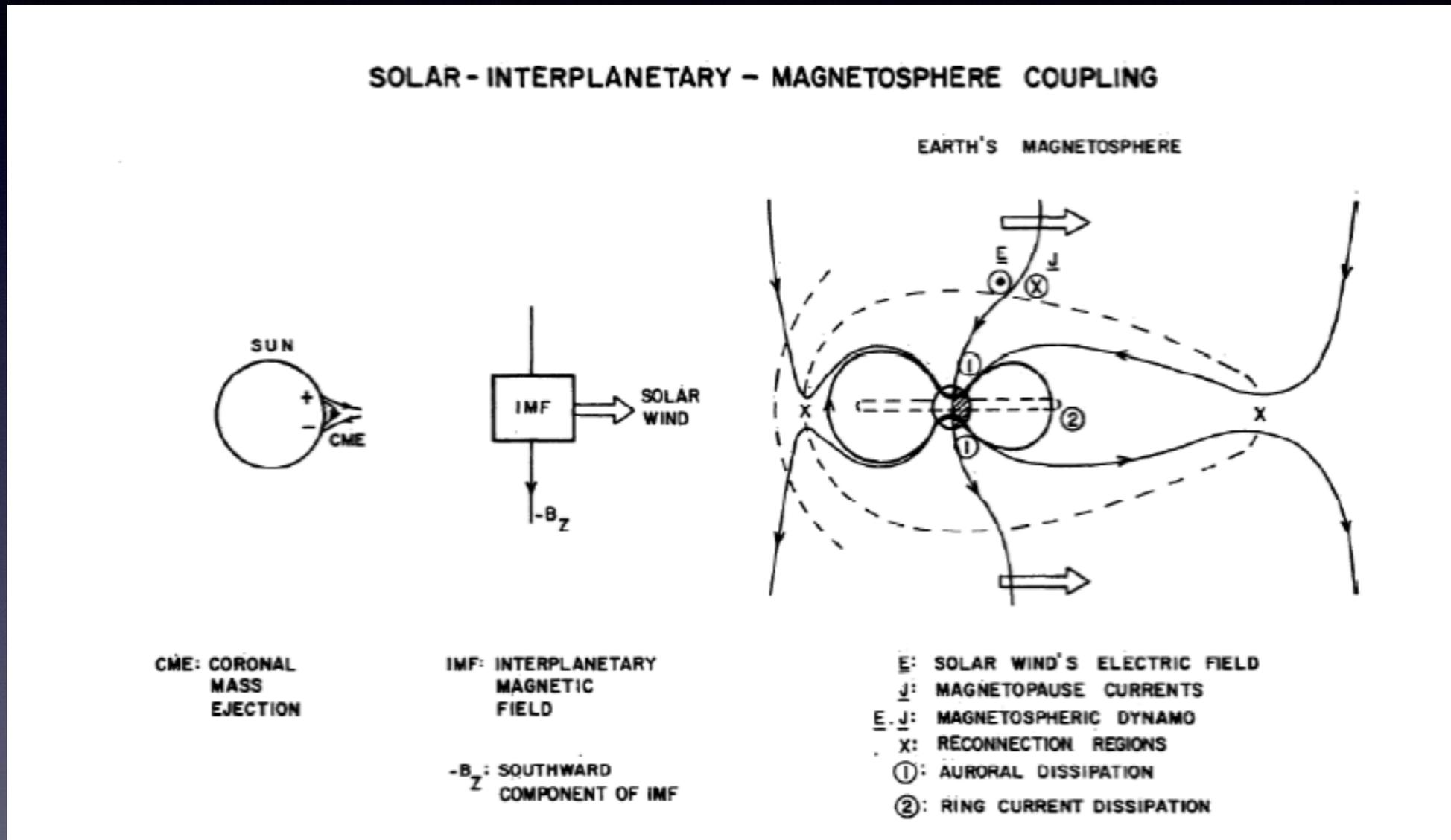
- ▶ 地磁场水平分量突然降低
- ▶ 主要灾害性空间天气事件
- ▶ 显著影响电力传输等系统



地磁暴可能导致大范围的停电



# 地磁暴形成过程示意图

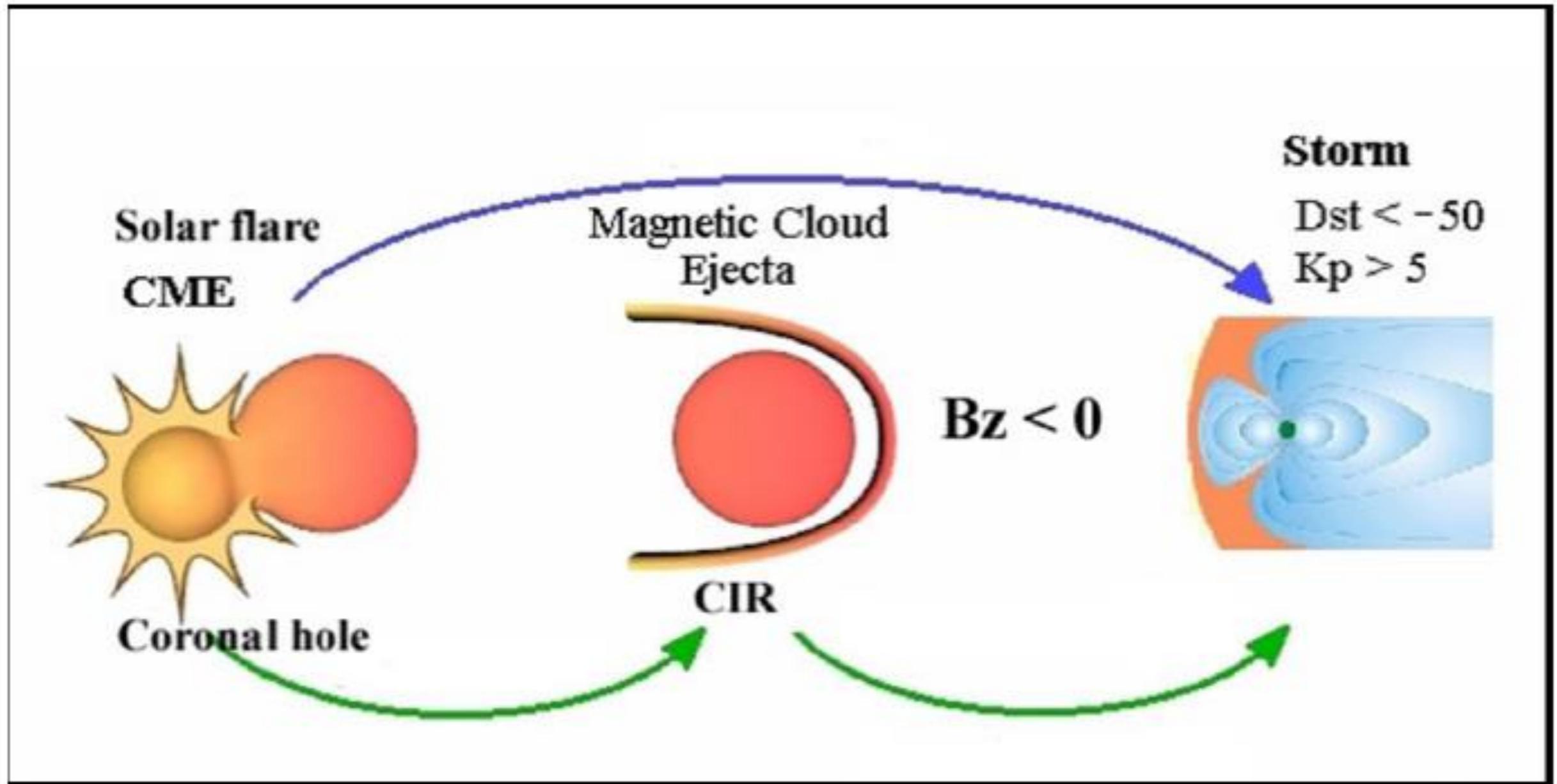


行星际南向磁场

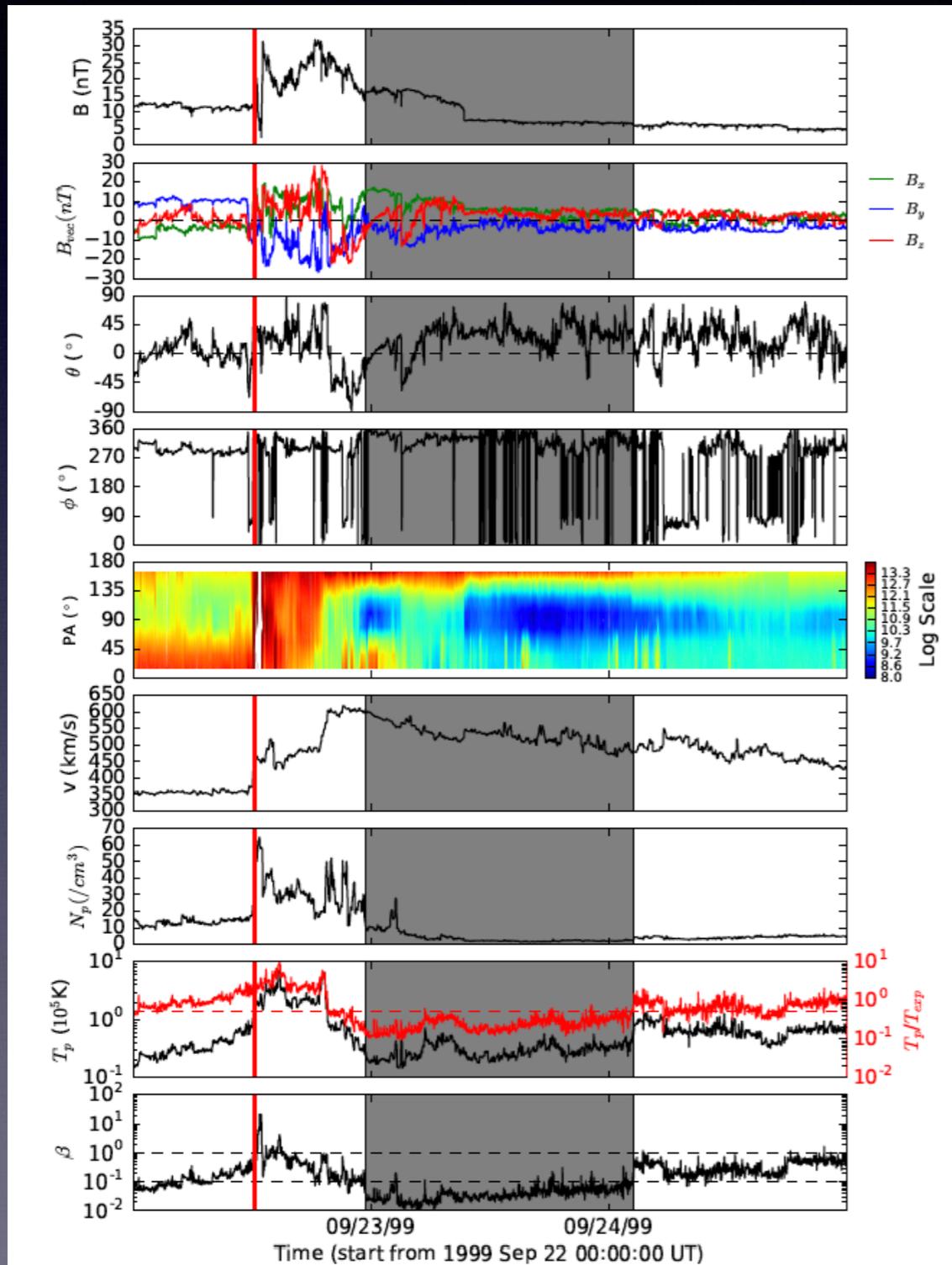


地磁暴

# 地磁暴的行星际和太阳源



# ICME观测特征

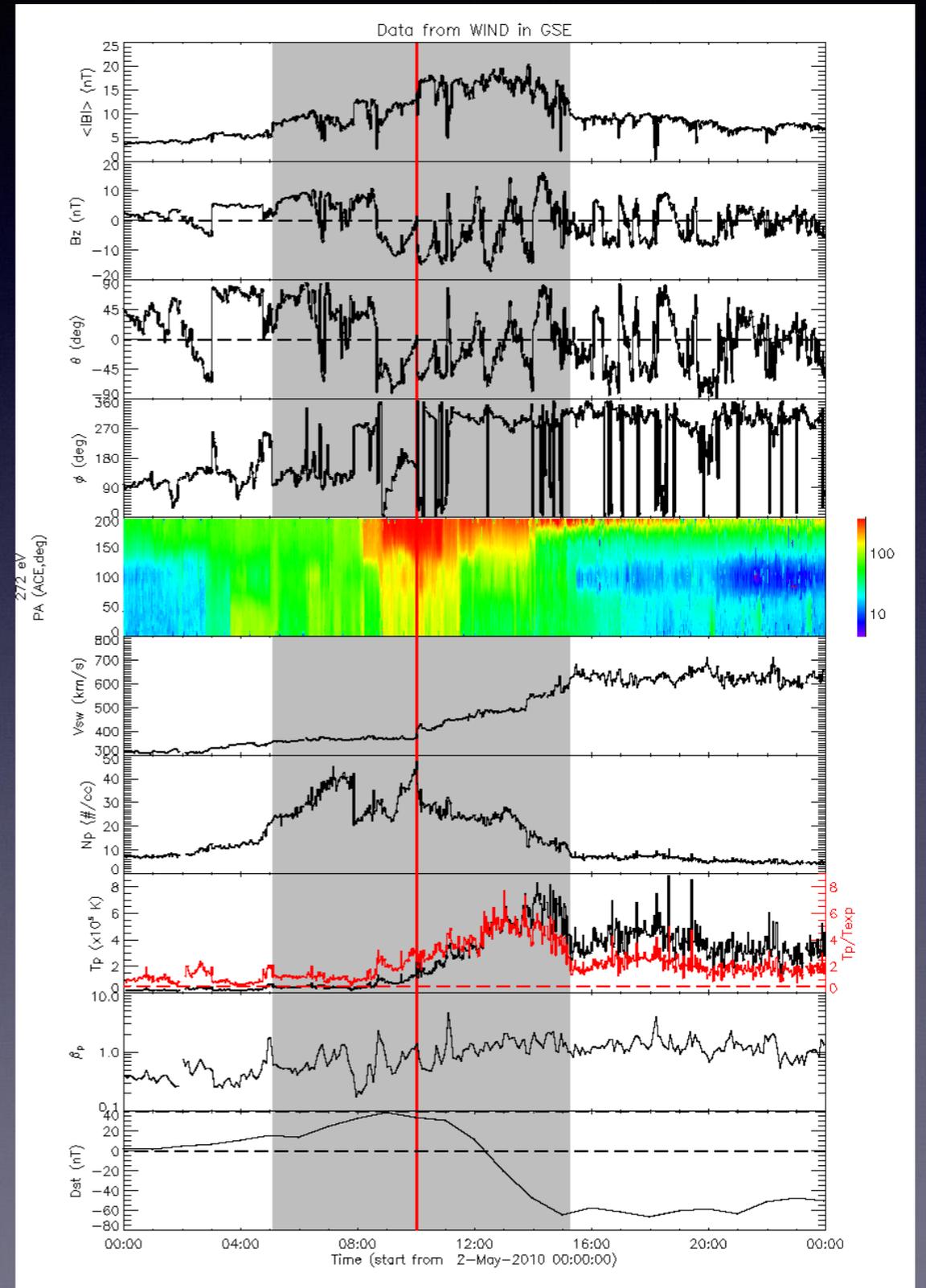
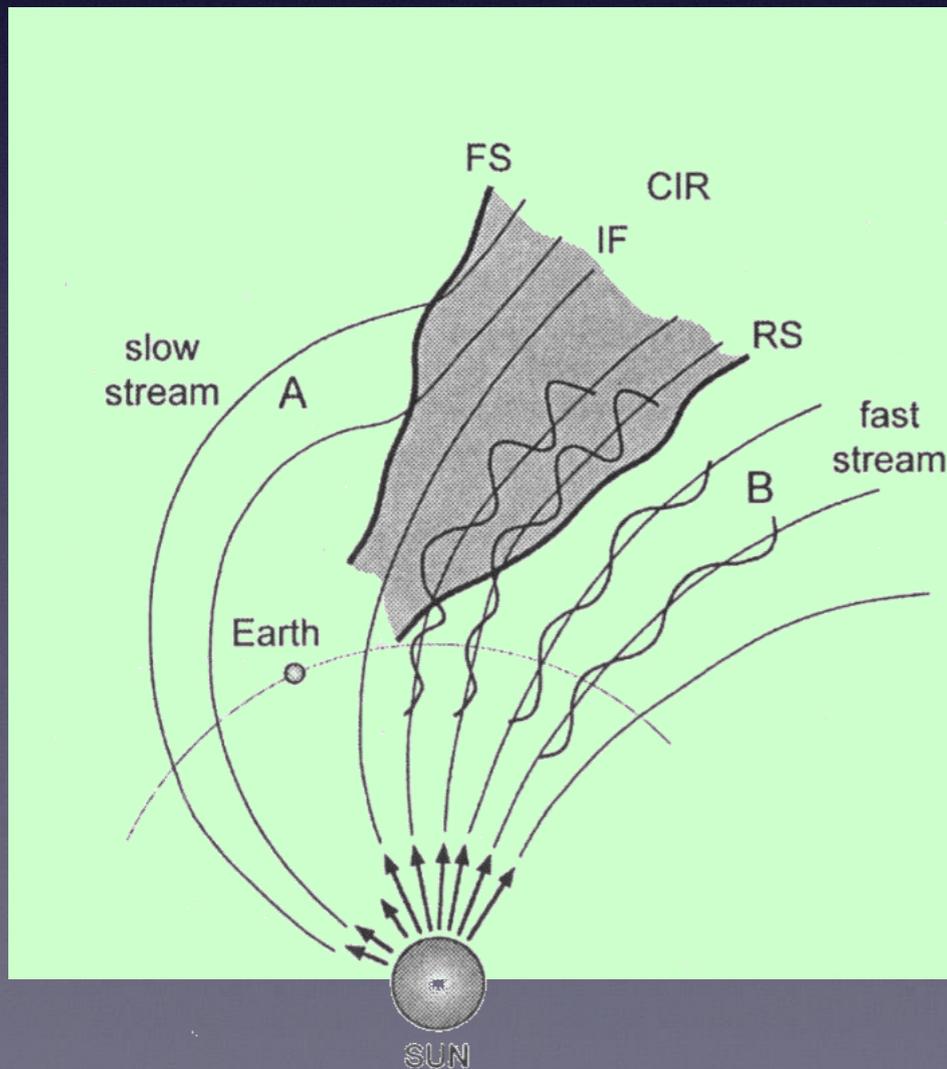


- ▶ 增强的磁场
- ▶ 平滑旋转的磁场方向
- ▶ 开始快后面慢的速度特征
- ▶ 双向电子流
- ▶ 双向低能质子流
- ▶ 低的质子温度
- ▶ 低的等离子体Beta
- ▶ 高的Fe电离态
- ▶ Forbush Decrease
- ▶ 低的质子通量
- ▶ ...

e.g. Wu and Lepping, 2011, Zurbuchen and Richardson, 2006, Jian et al., 2006

# 流相互作用区(SIR)观测特征

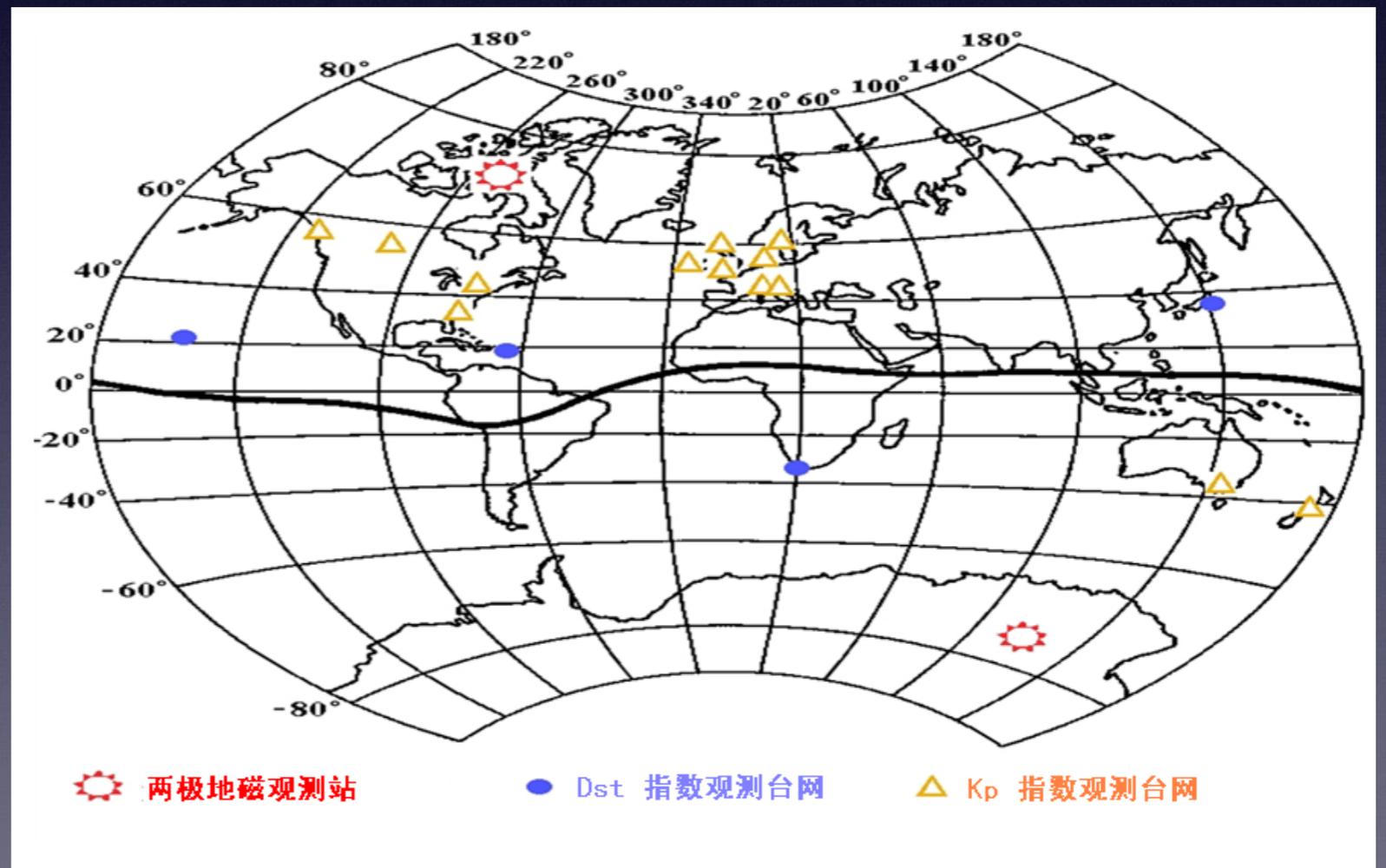
**流相互作用区(SIR)**: 太阳风高速流和低速流相互作用形成的区域



# 地磁暴的预报对象

预报能代表或描述全球地磁活动的指数进行预报

- ▶ Dst指数
- ▶ Kp指数
- ▶ Ap指数



# 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表示地磁扰动幅度最大。
- ▶ **Kp指数**：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。取值从0到9，分为28级。
- ▶ **指数意义**：Kp描述全球地磁扰动等级，“全球”和“等级”特性赋予其较强的业务实用性。
- ▶ **时间频率**：3小时。
- ▶ **更新情况**：官方Kp指数一般滞后半个月左右。美国NOAA空间天气预报中心（SWPC，<http://www.swpc.noaa.gov/alerts/k-index.html>）通过全球合作地磁台站实时发布估算的Kp指数，与官方Kp指数一致性很高，被应用在地磁暴警报业务上。

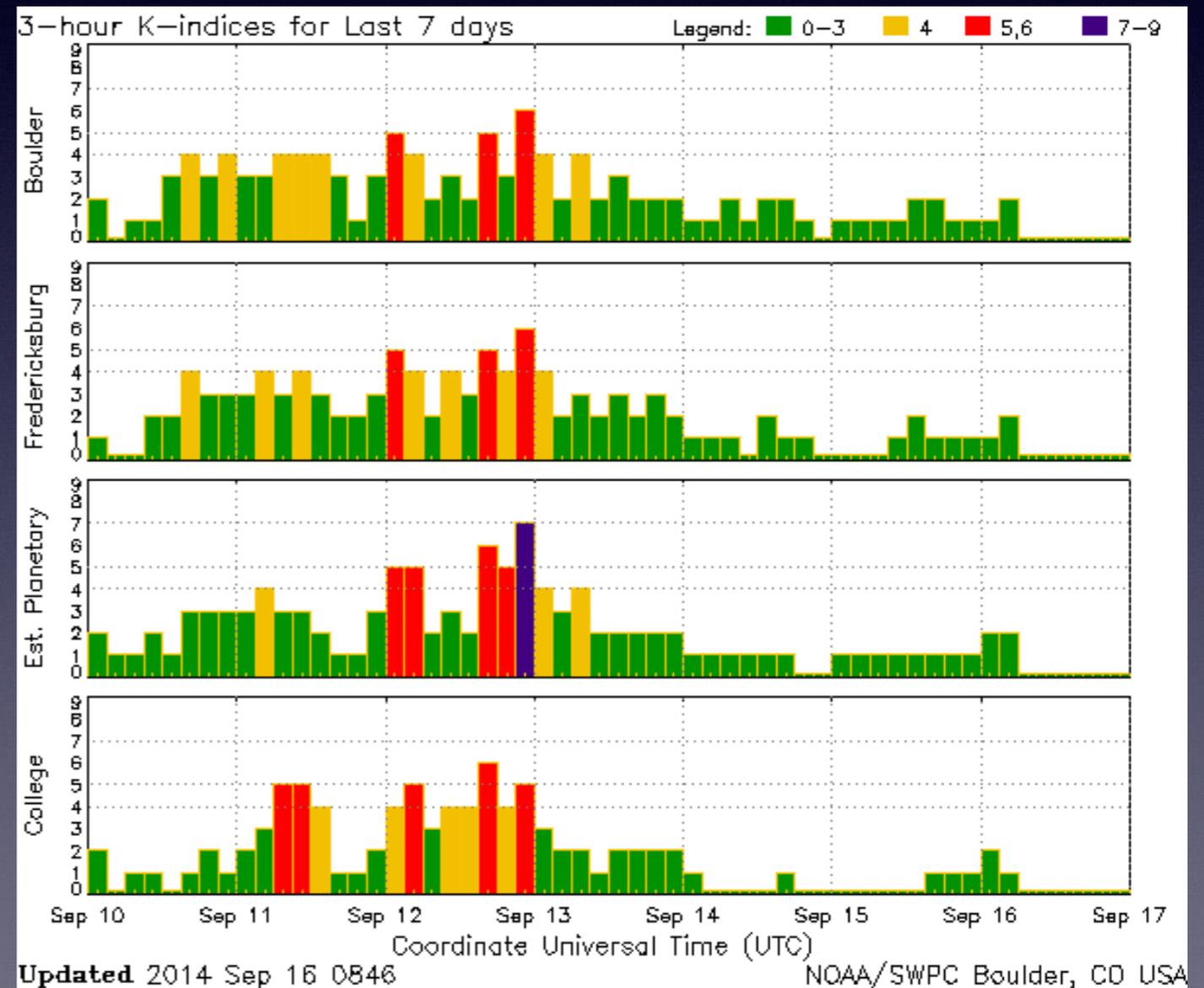
# Kp指数

## 基于Kp指数的地磁暴级别划分

$K_p \leq 4$ : 没有地磁暴

$K_p = 5, 6$ : 小地磁暴

$K_p = 7, 8, 9$ : 大地磁暴



# 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。

# Ap指数

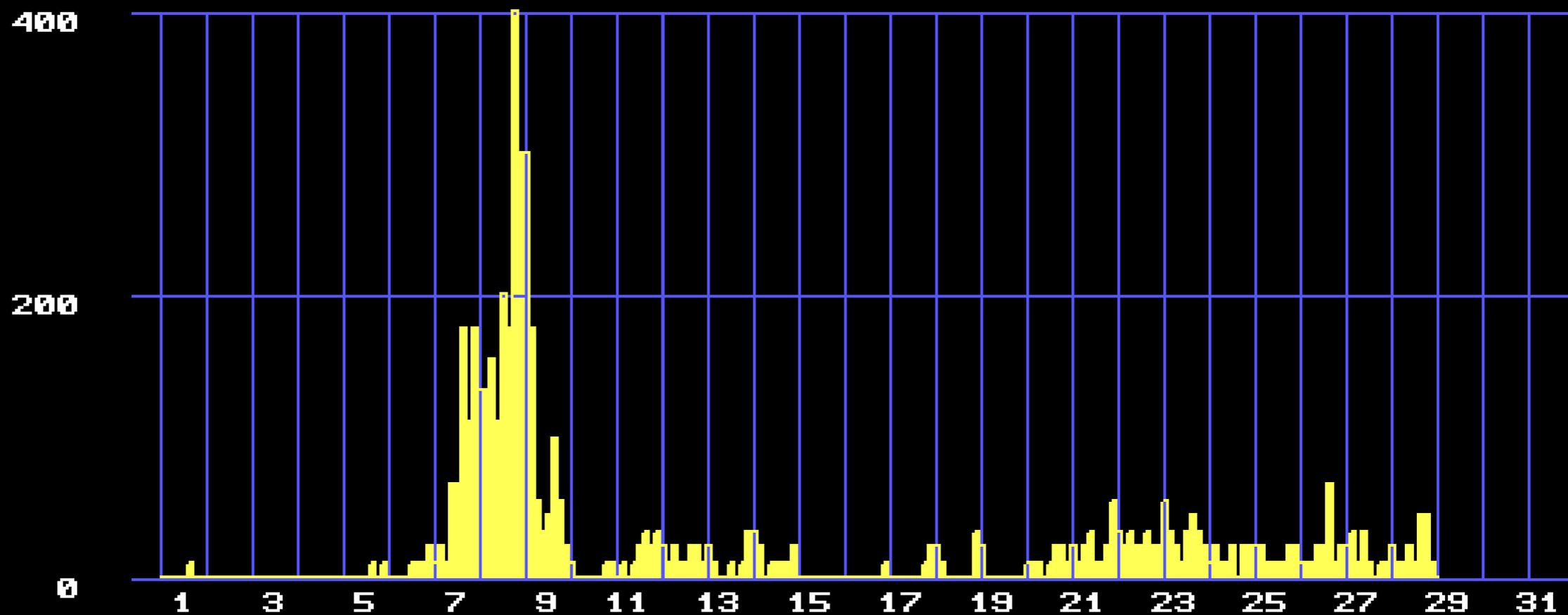
$K_p = 0_0$	0+	1-	1_0	1+	2-	2_0	2+	3-	3_0	3+	4-	4_0	4+
$a_p = 0$	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
$K_p = 5-$	5_0	5+	6-	6_0	6+	7-	7_0	7+	8-	8_0	8+	9-	9_0
$a_p = 39$	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

Kp指数和Ap指数换算表

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

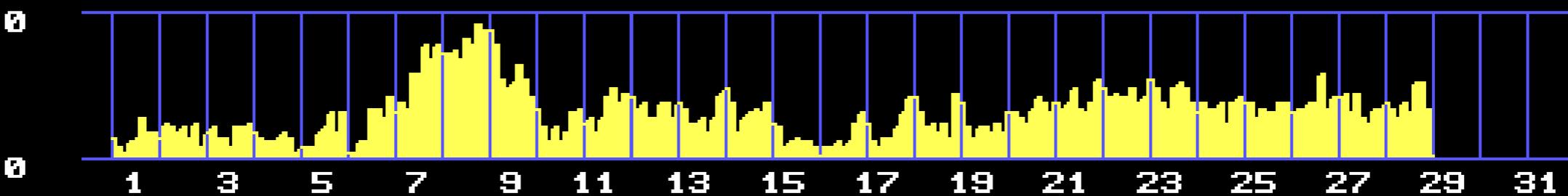
Year=1986

Month= 2



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

10.0



# 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）。

# Dst指数和地磁暴分类

## 基于DST指数的地磁暴的分类

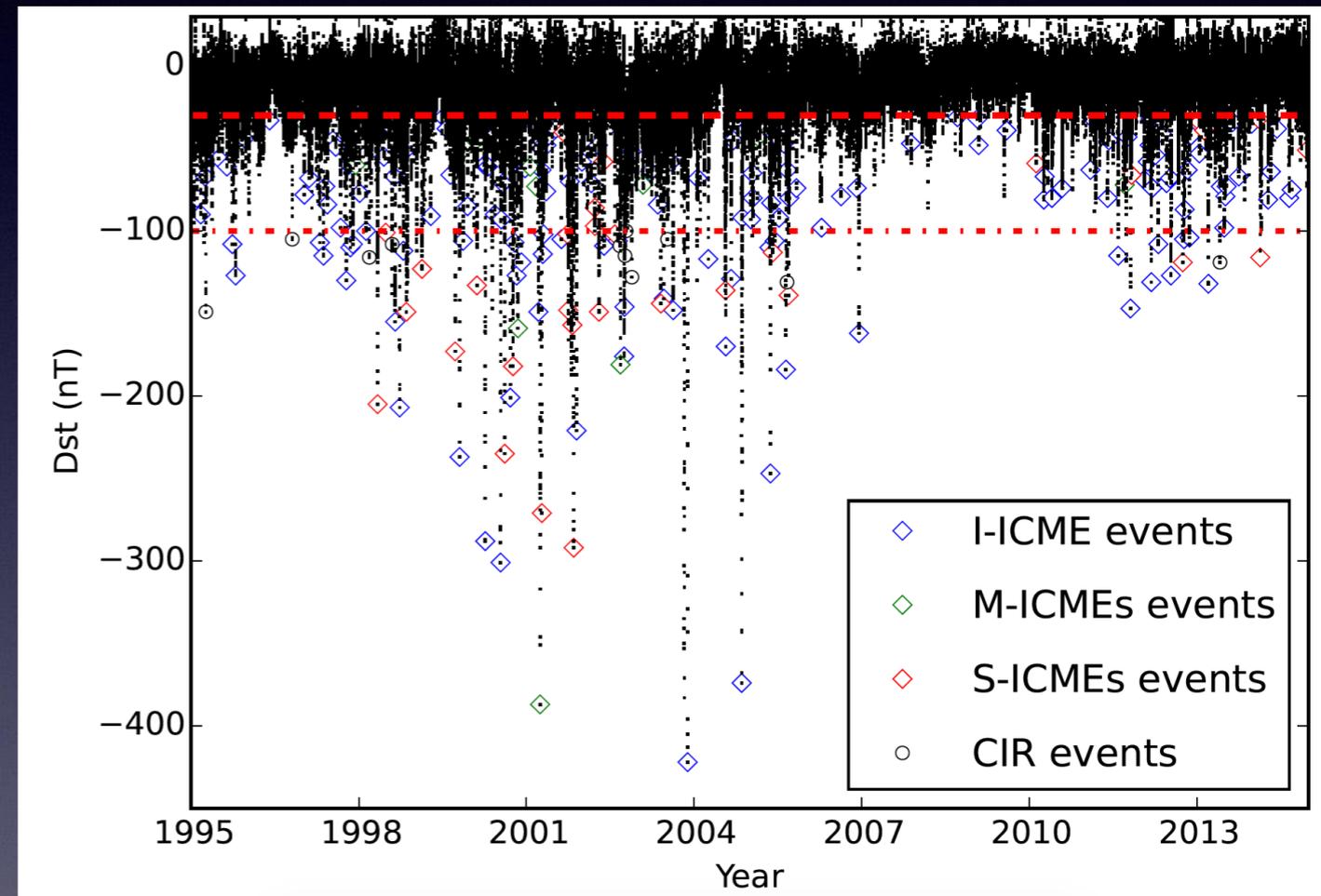
$Dst_{min} \leq -30nT$ : 地磁暴

$-50nT \geq Dst_{min} > -100nT$ :

中等地磁暴

$Dst_{min} \leq -100nT$ : 强地磁暴

$Dst_{min} \leq -200nT$ : 超强地磁暴



1995-2015年DST指数

# 不同指数的应用范围

Kp: 与业务  
应用更贴合

有对应  
关系



Ap: 更能反映  
地磁场的变化

Dst: 时间分辨率更高, 主要反映地磁场轴对称部分的变化, 多用于科学研究

# 地磁暴预报的分类

---

- ★ **警报**：对未来几小时类可能发生地磁暴的等级进行预报
- ★ **短期预报**：提前量1-3天，主要预报1-3天内Ap指数的日值
- ★ **中期预报**：提前量3天-1个月，主要预报未来一个月内存Ap指数的日值

# 地磁暴预报方法

---

**警报**



利用行星际观测资料

**短期预报**



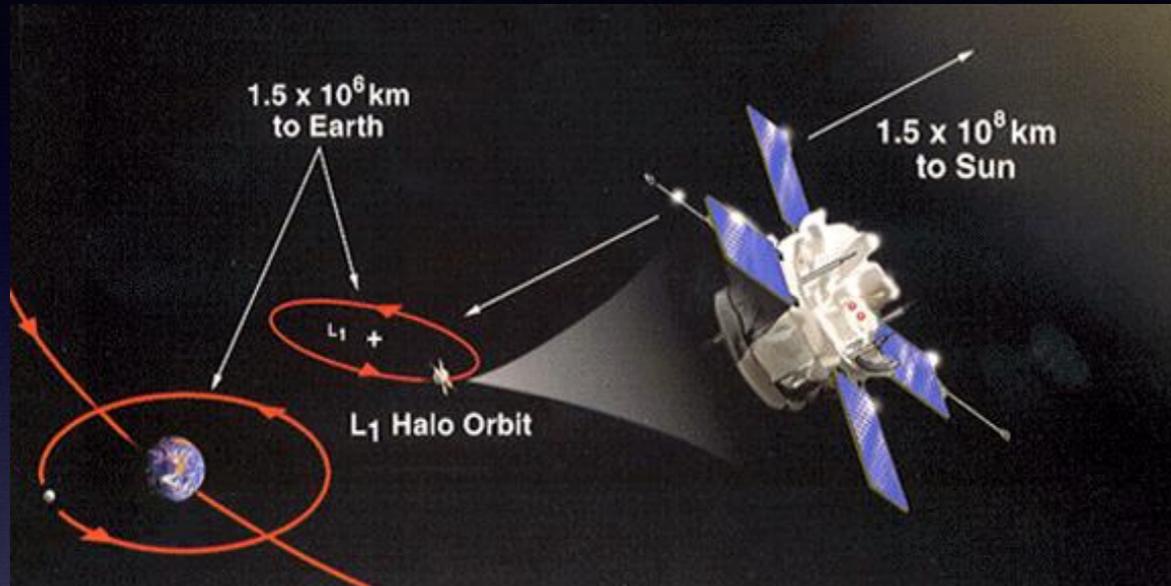
利用太阳活动监测资料

**中期预报**

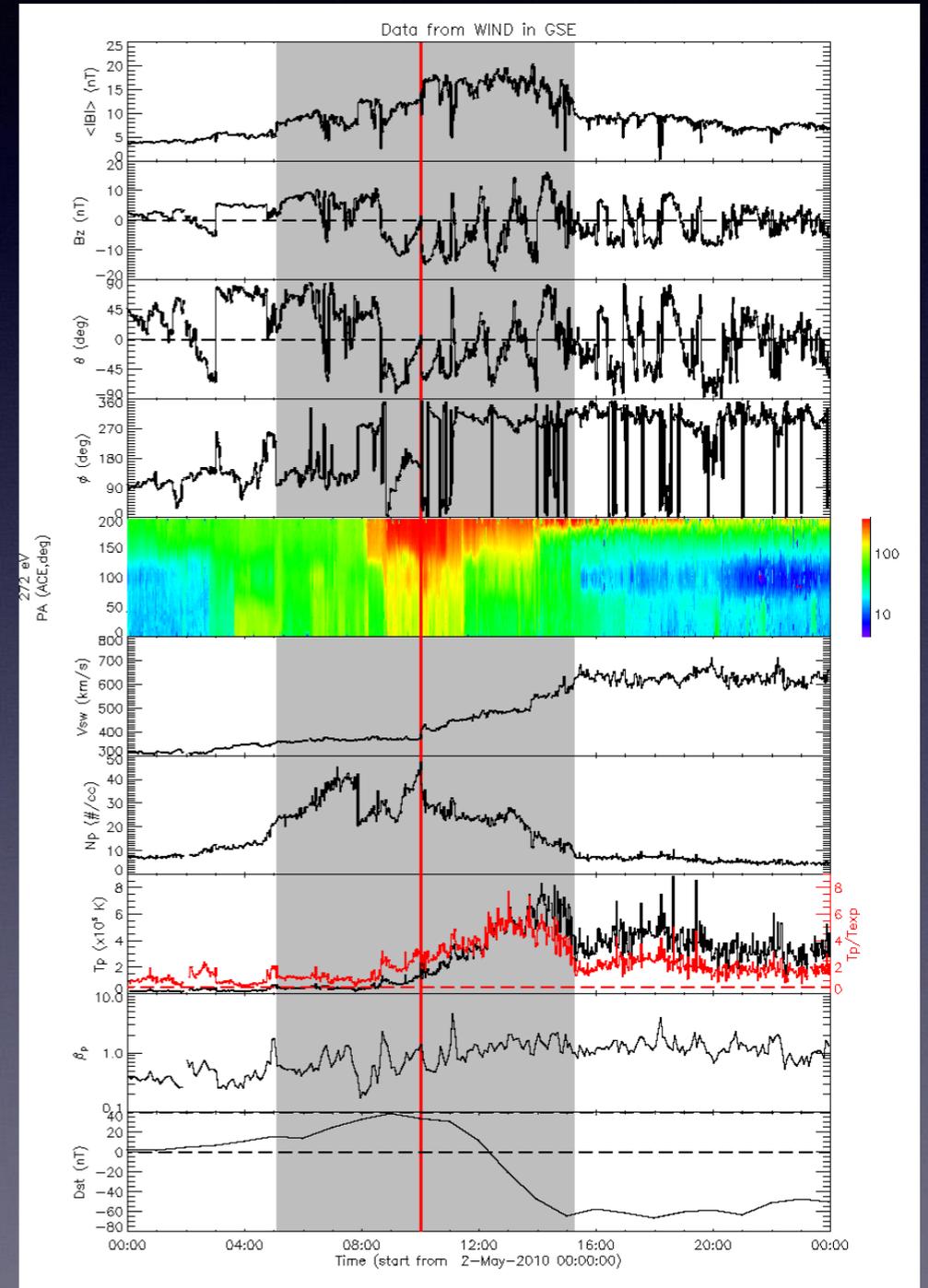


利用CIR重现特性

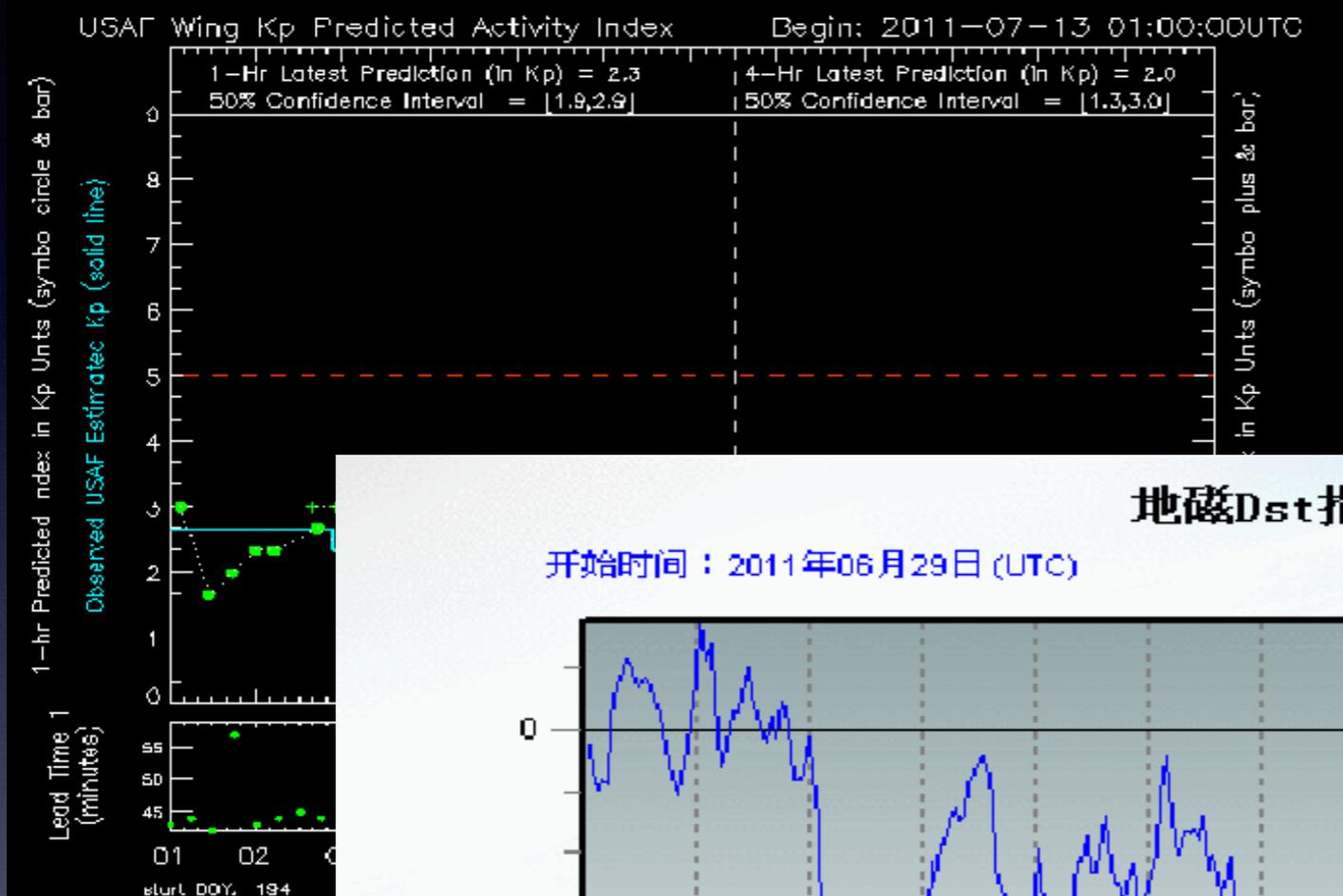
# 地磁暴警报



- ★ 预报方法
- ✓ 经验预报
- ✓ 物理预报
- ✓ 人工智能



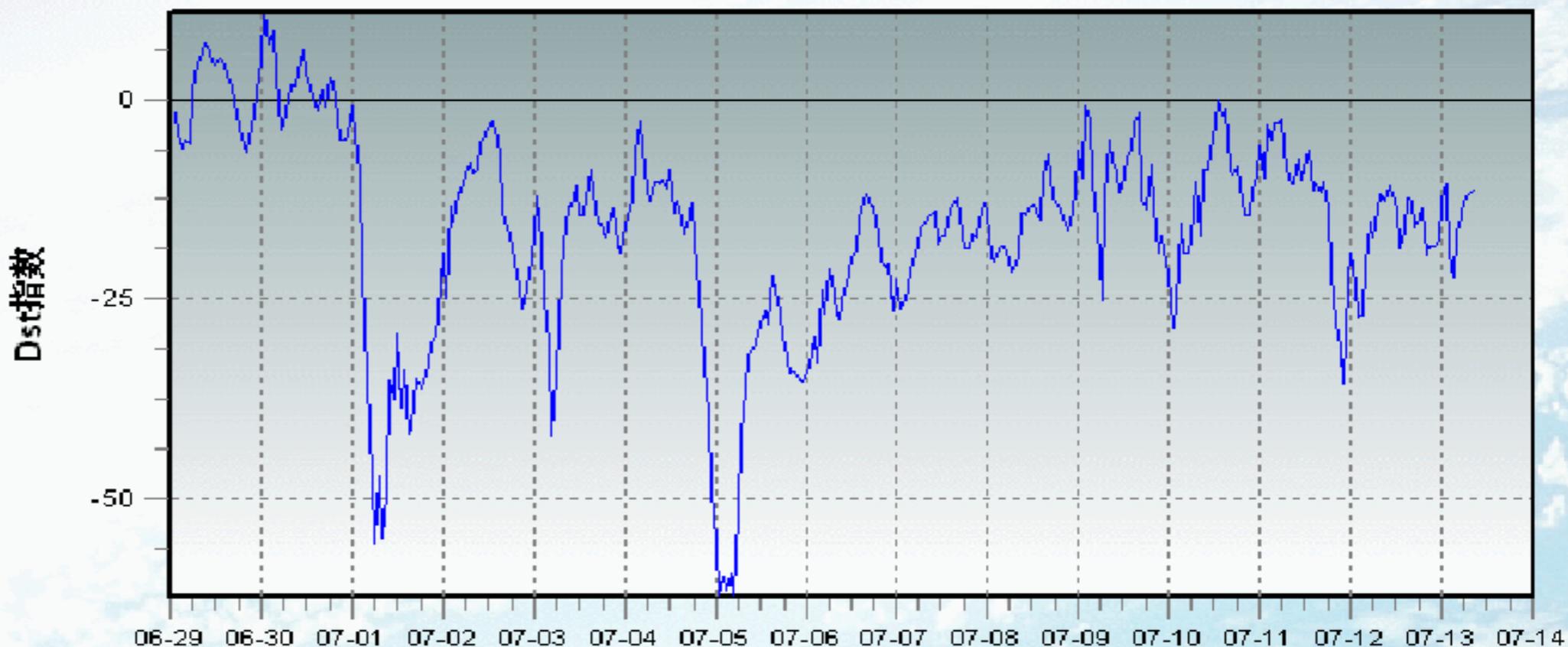
# 地磁暴警报



## 地磁Dst指数预报

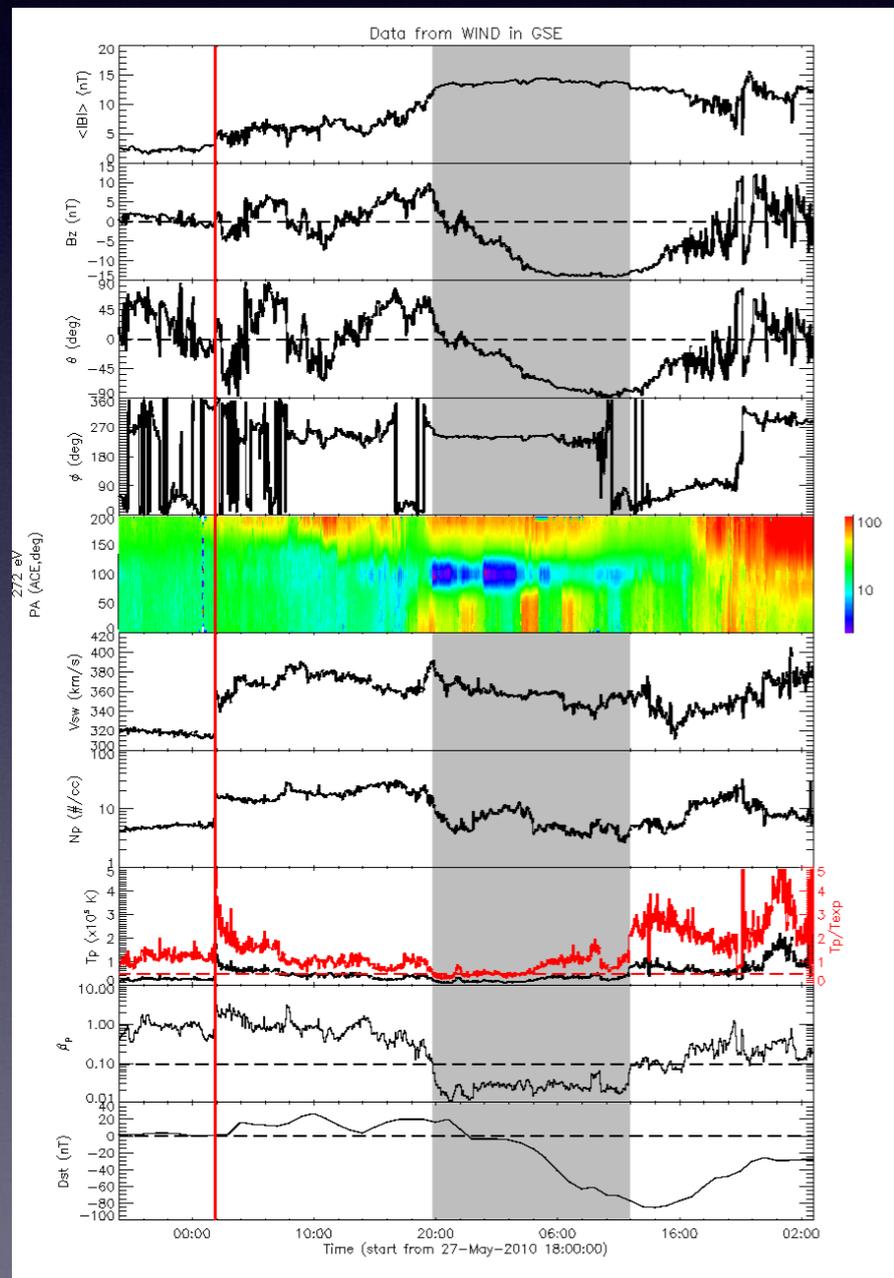
开始时间：2011年06月29日(UTC)

最新预报结果时间:2011年07月13日09时(UTC)

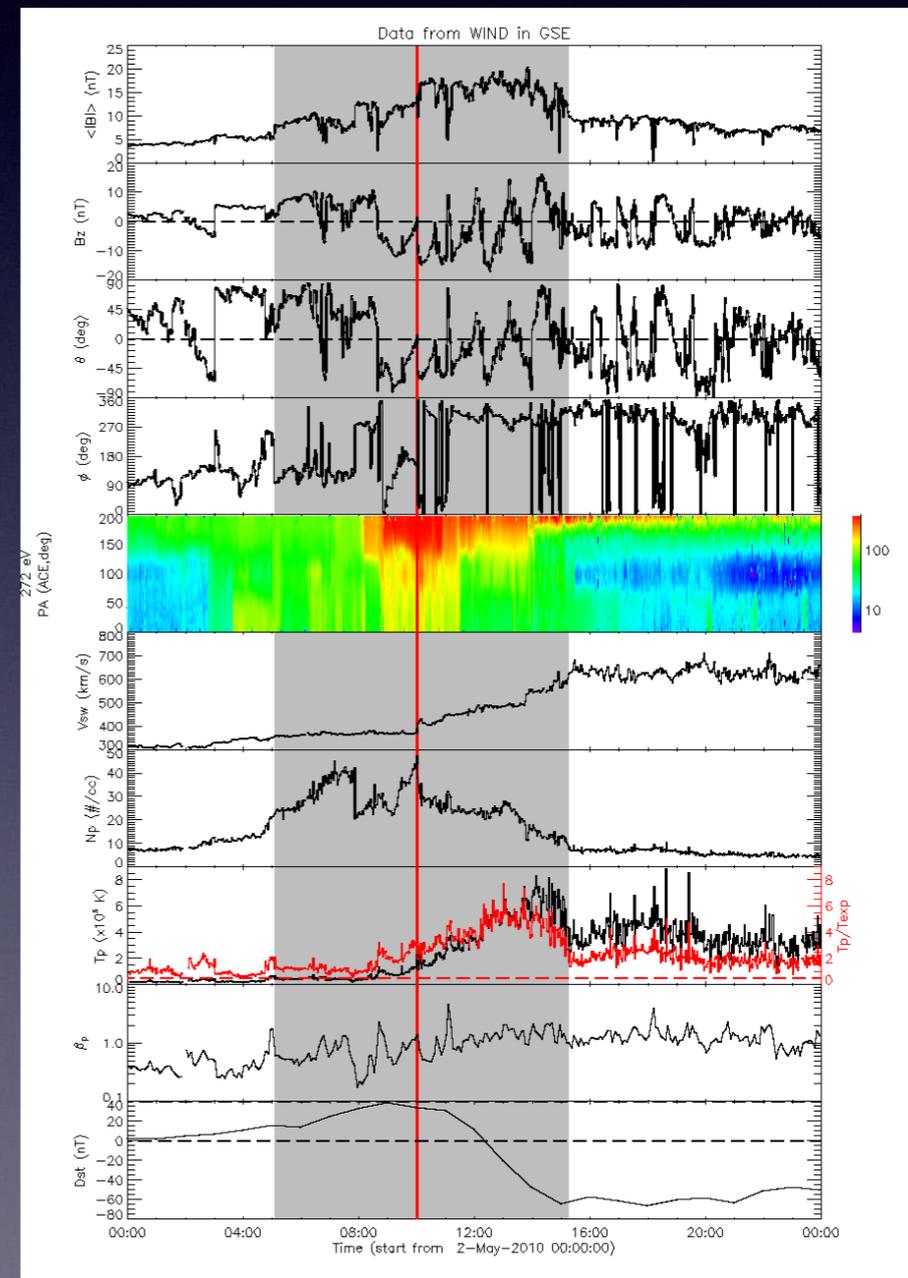


# 地磁暴短期预报

## CME



## CIR



# CME地磁效应预报

## 需要预报的关键问题

- ▶ 能否到达地球
- ▶ 何时到达地球
- ▶ 地磁效应如何

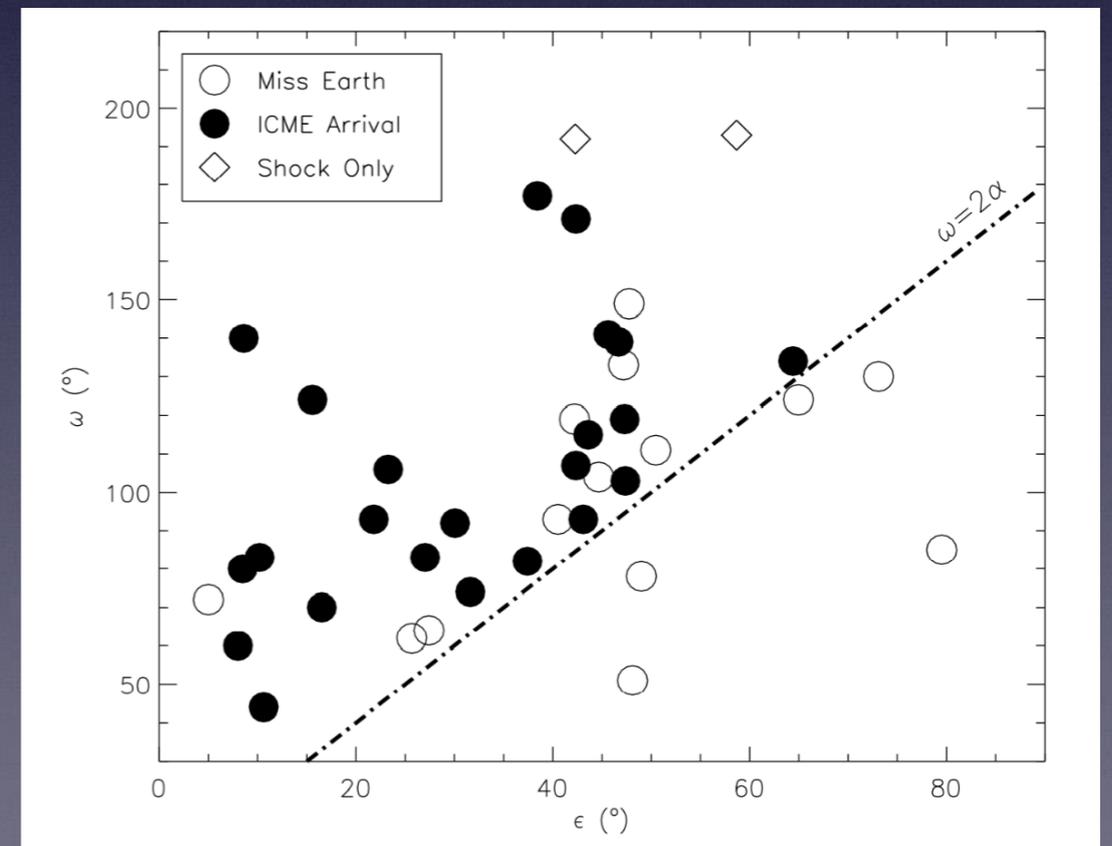
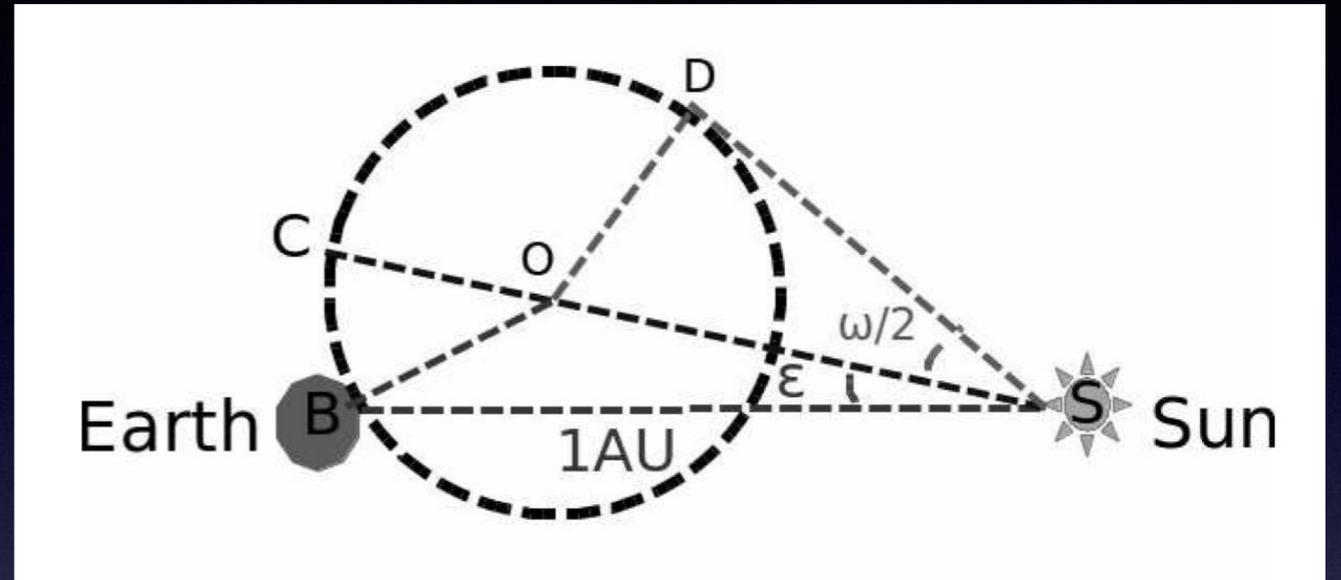
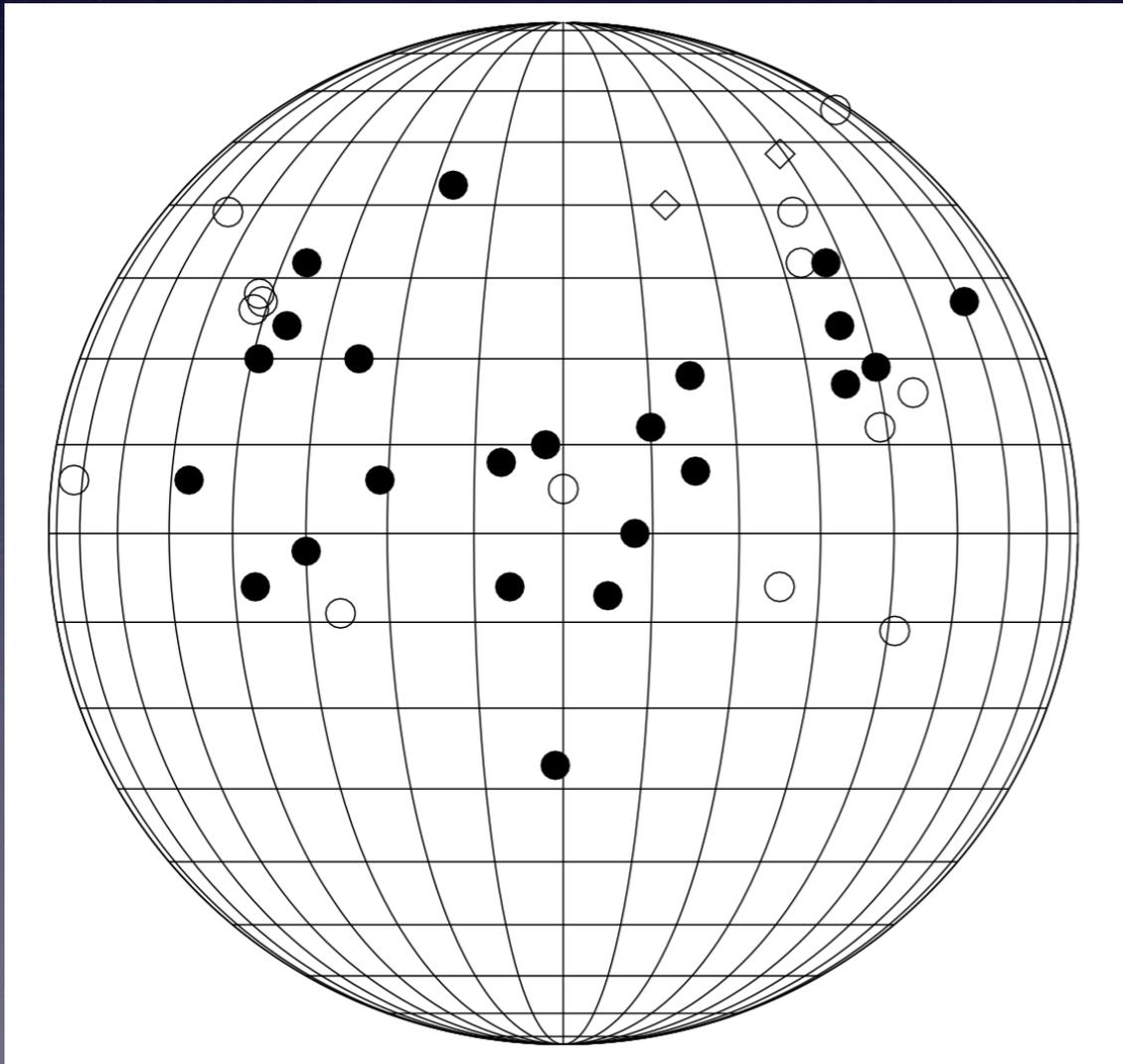


## 需要的参数

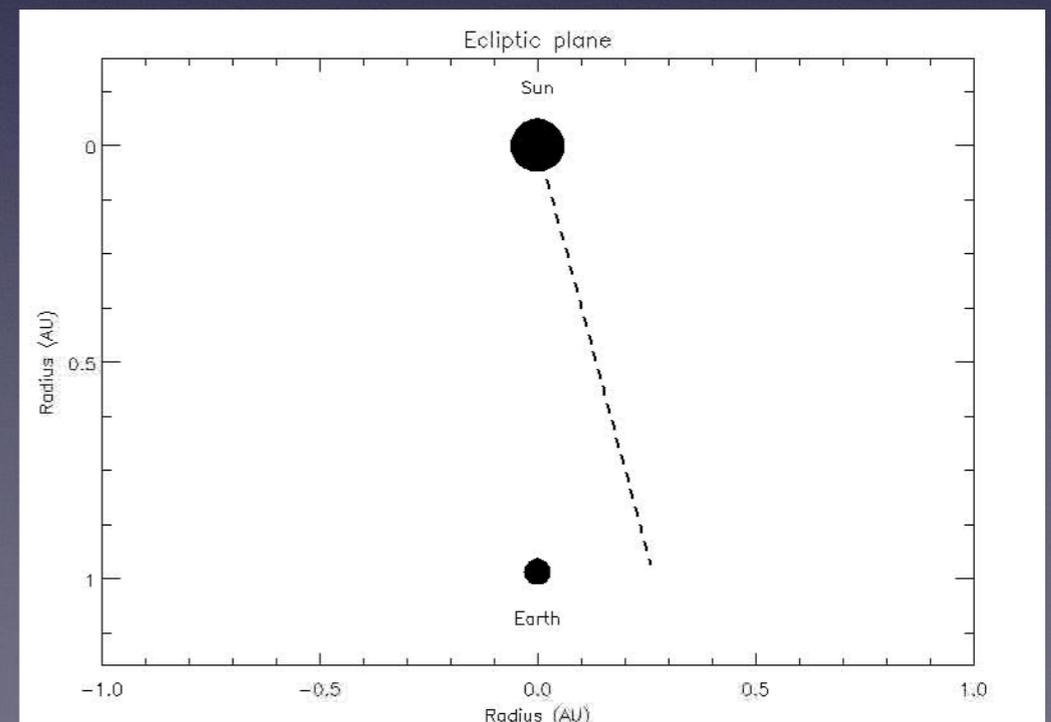
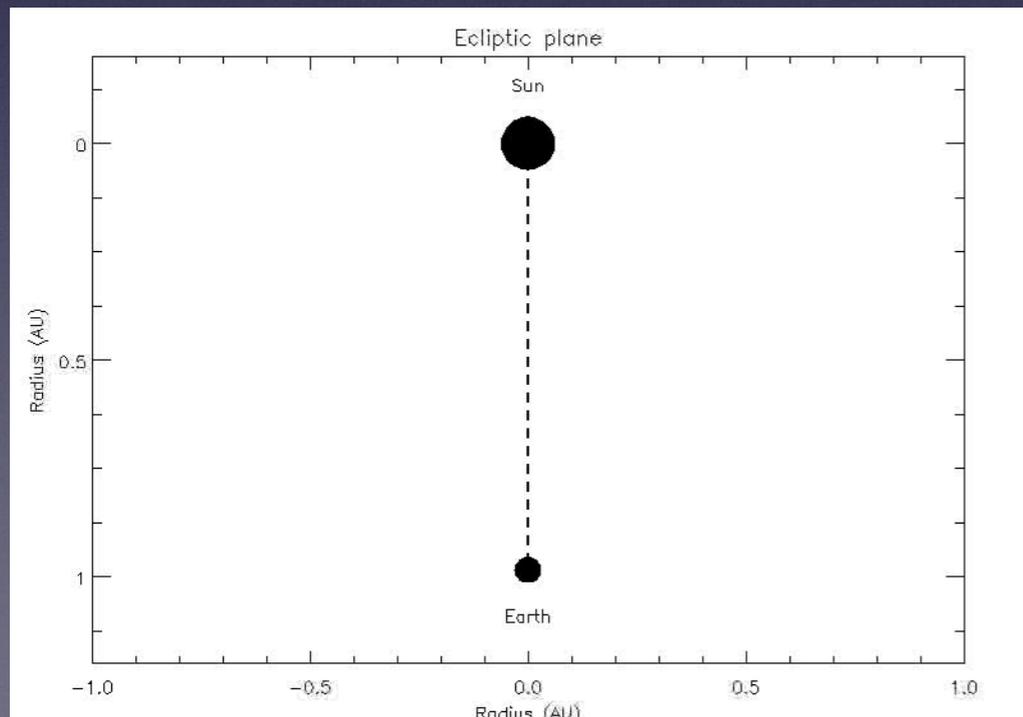
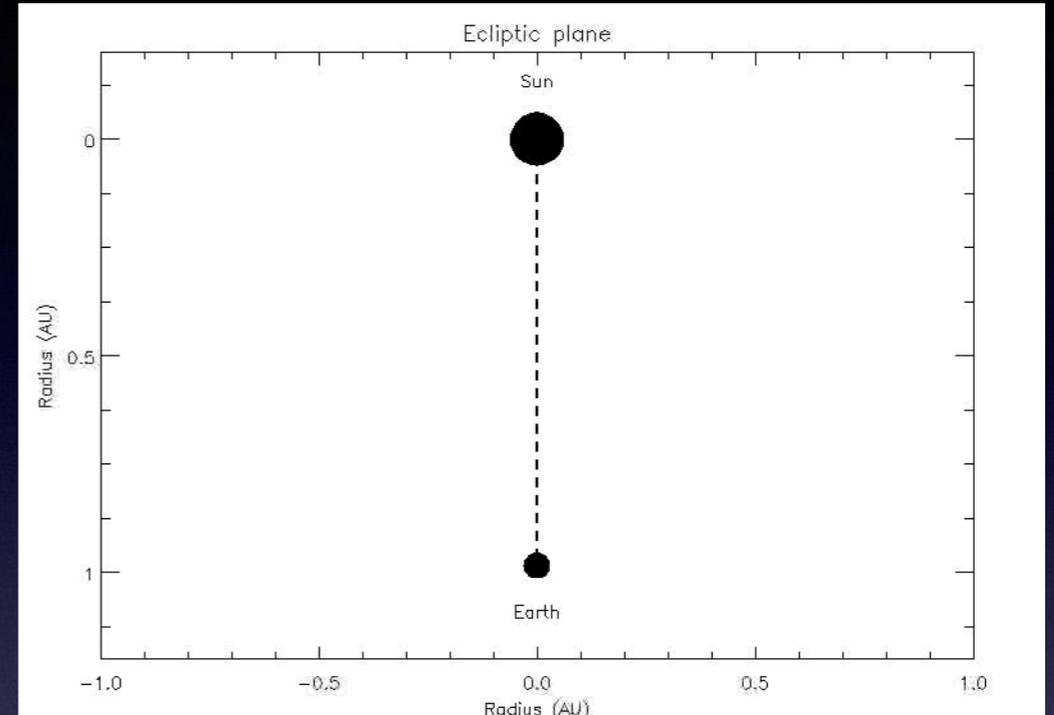
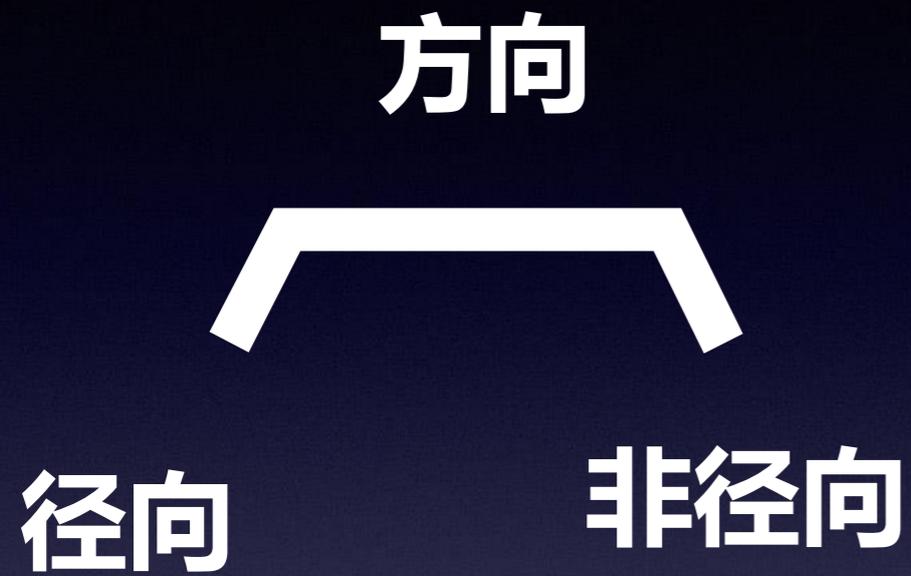
- ★ CME角宽度
- ★ CME传播方向
- ★ CME速度
- ★ 南向磁场

# CME能否到达经验预报

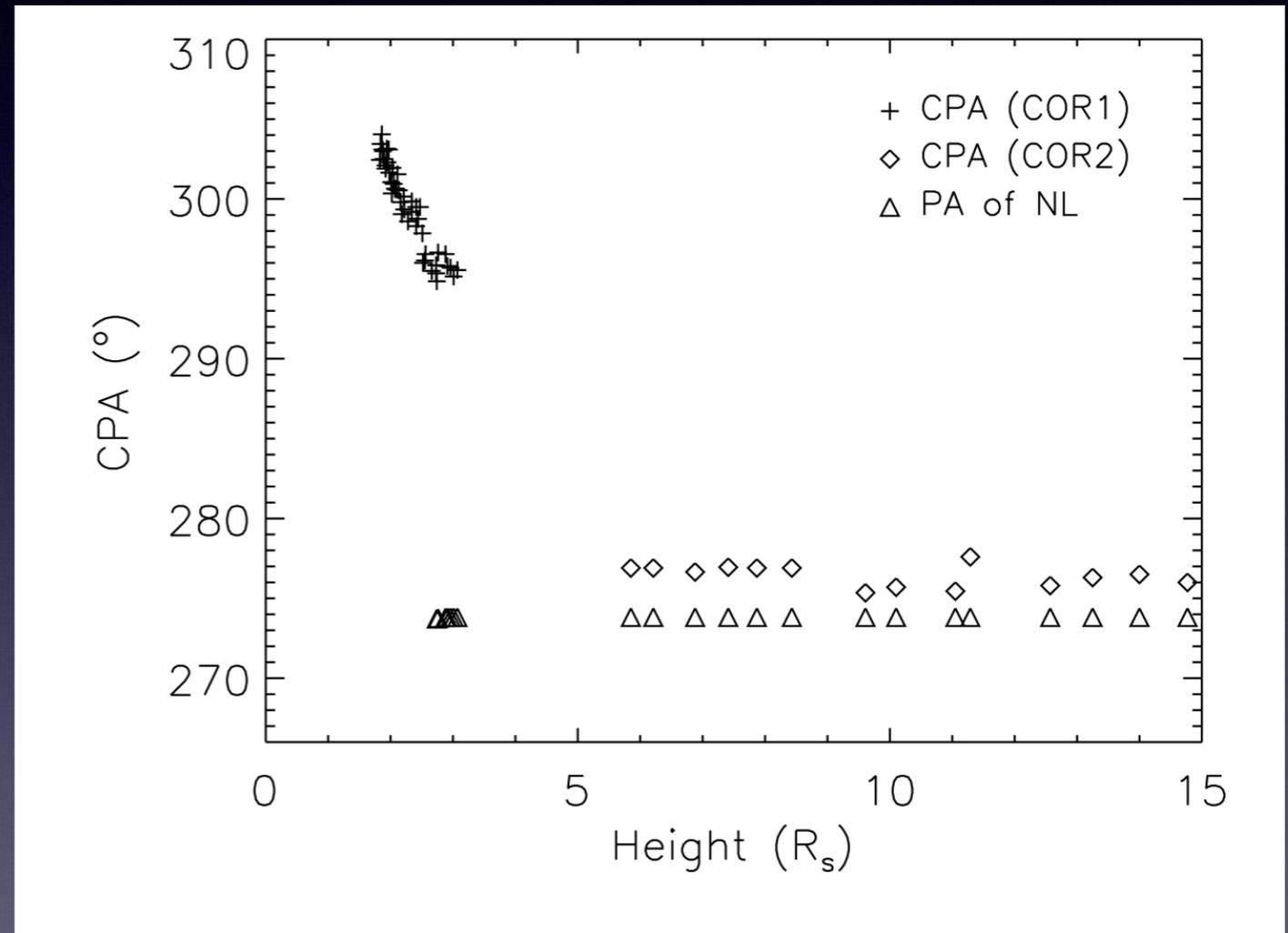
- ▶ 方向
- ▶ 大小



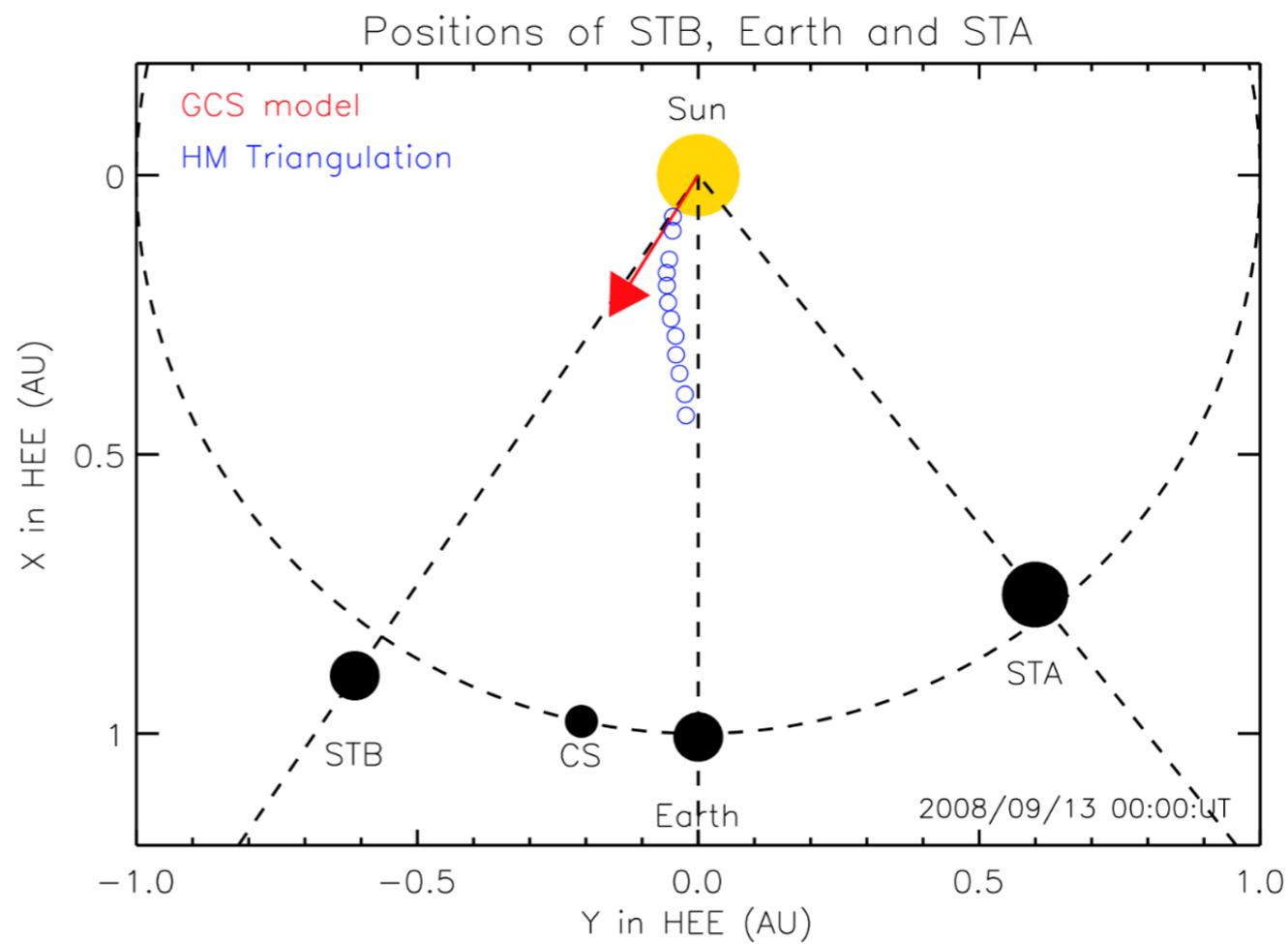
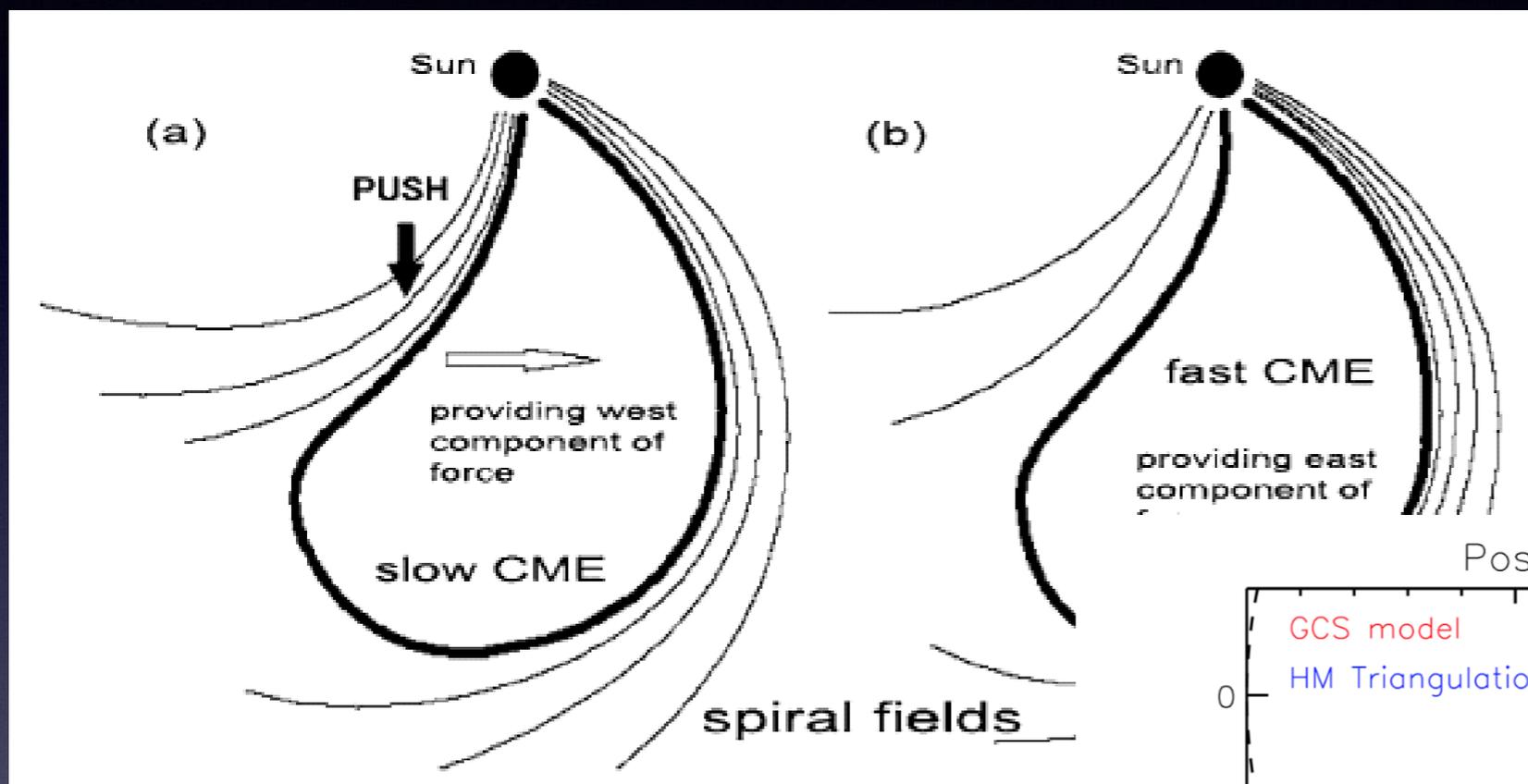
# 偏转对日冕物质抛射能否到达地球的影响



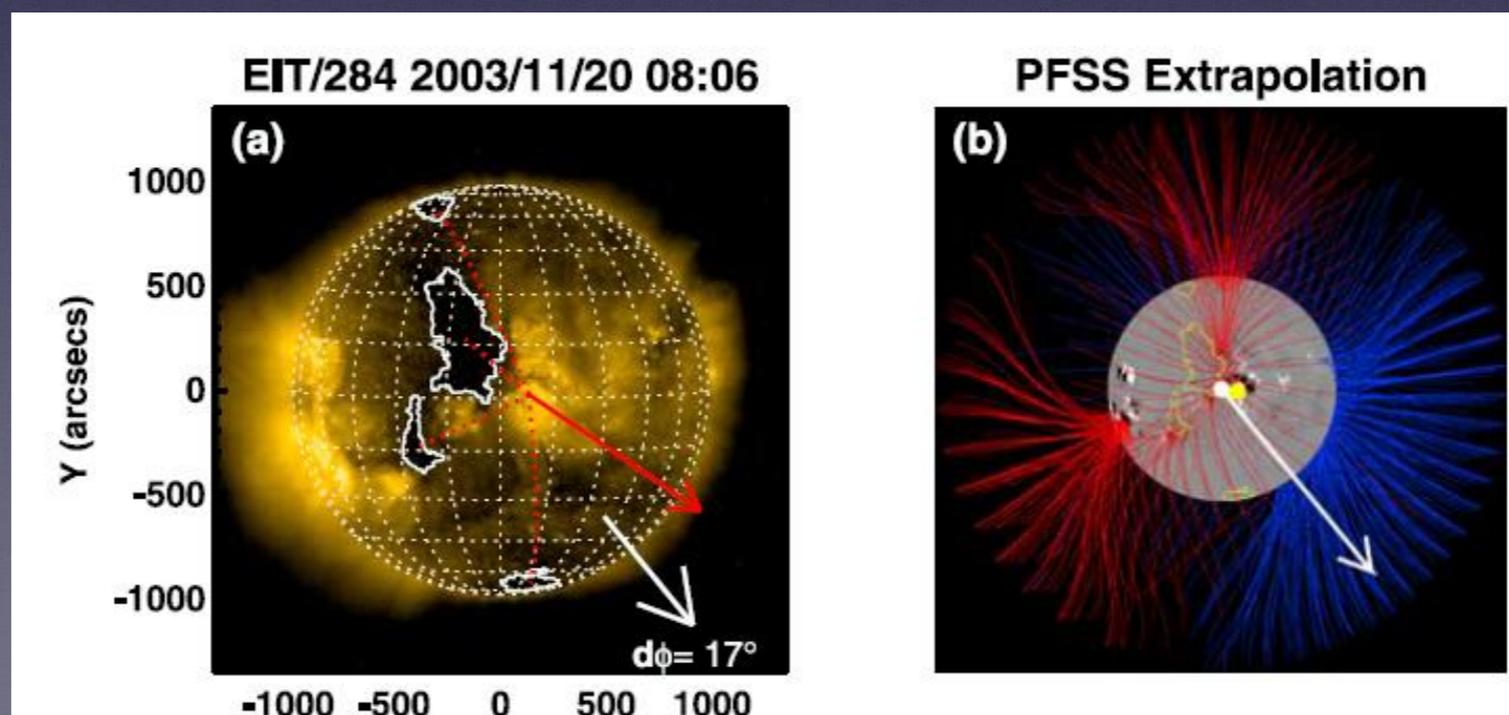
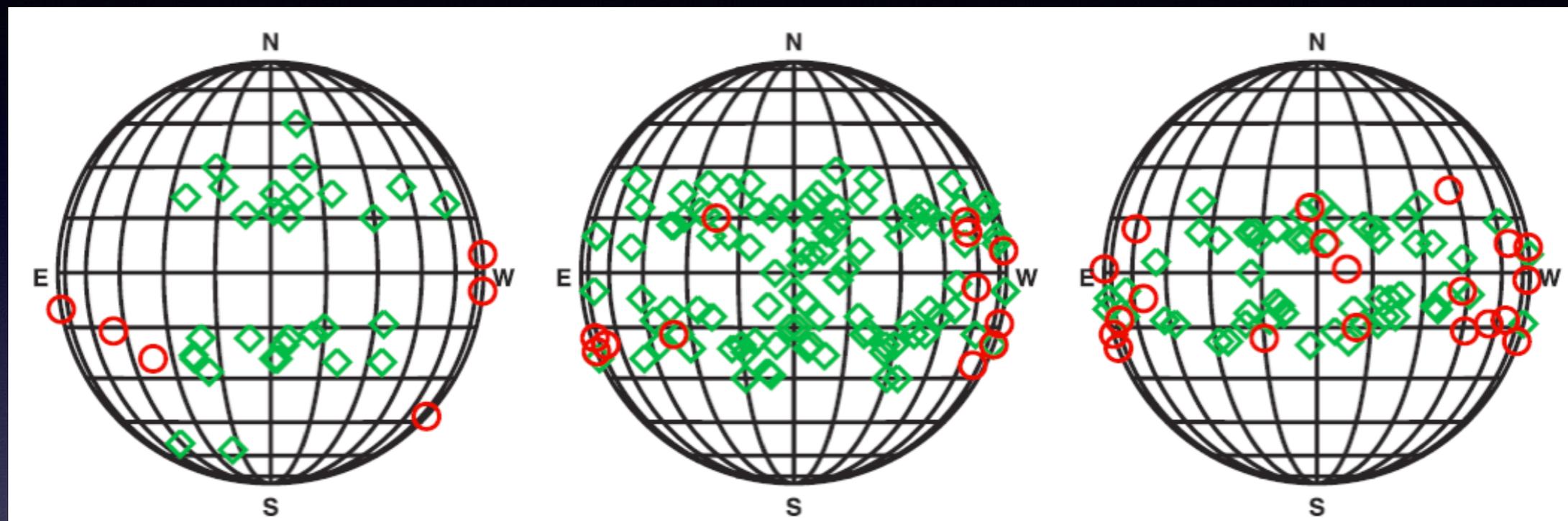
# 日冕物质抛射在日冕中的偏转



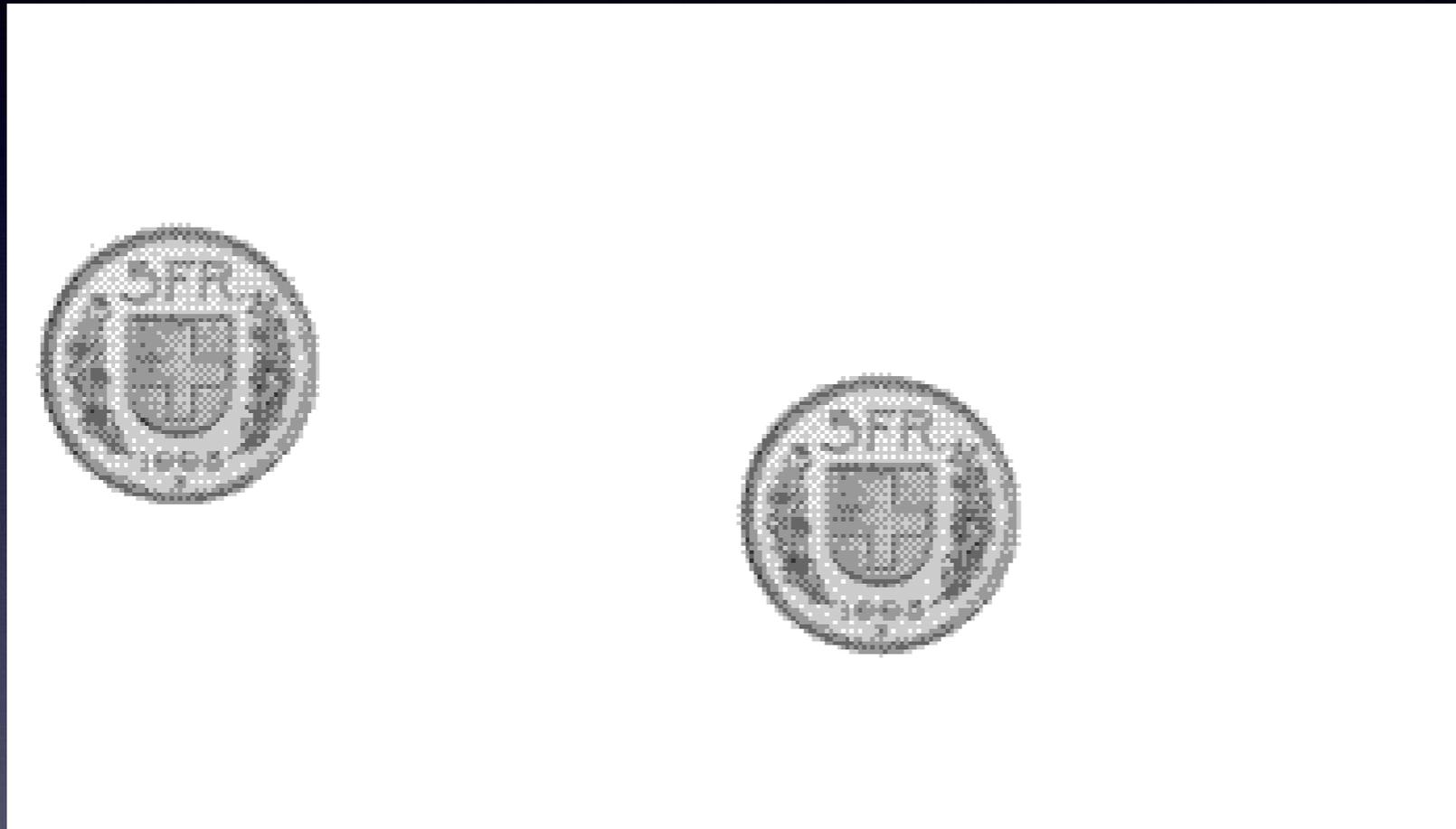
# 日冕物质抛射在行星际空间中的偏转传播



# 临近冕洞引起的日冕物质抛射的偏转



# 日冕物质抛射相互作用引起的偏转



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引起的偏转

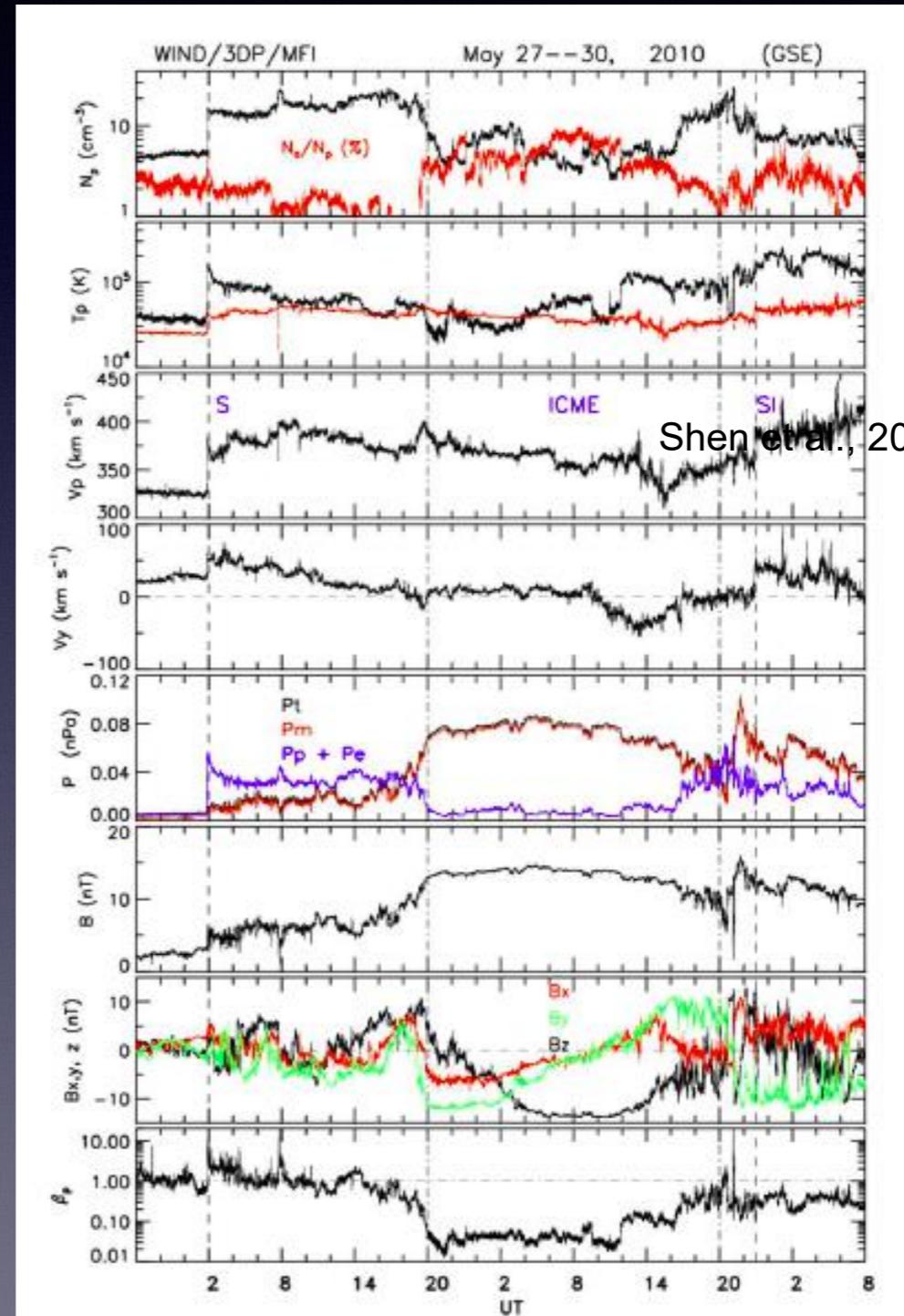
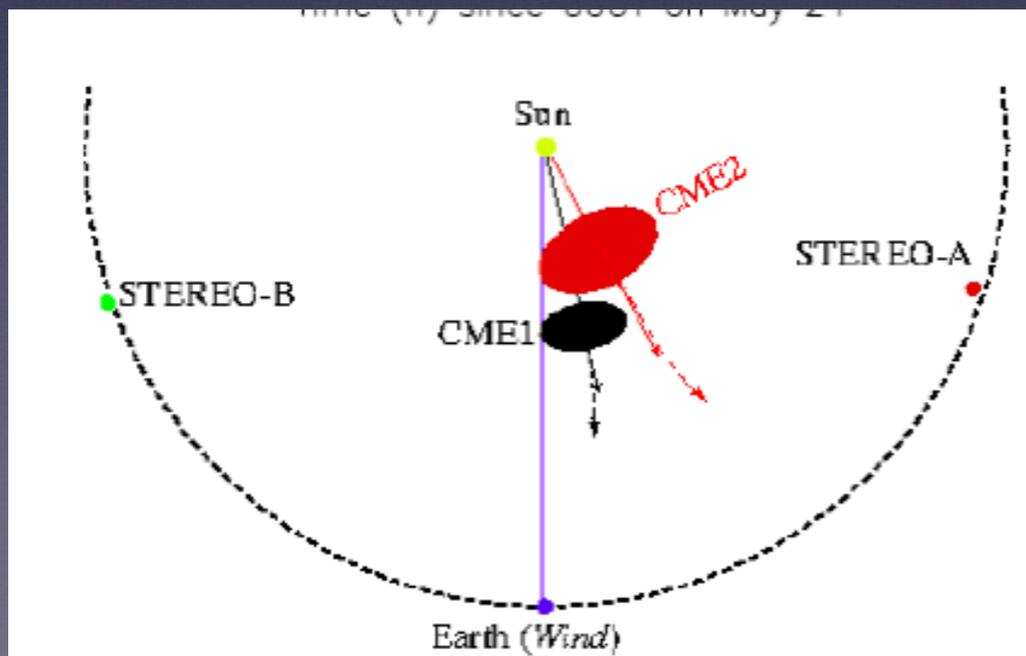
日冕物质抛射相互作用



改变方向[偏转]

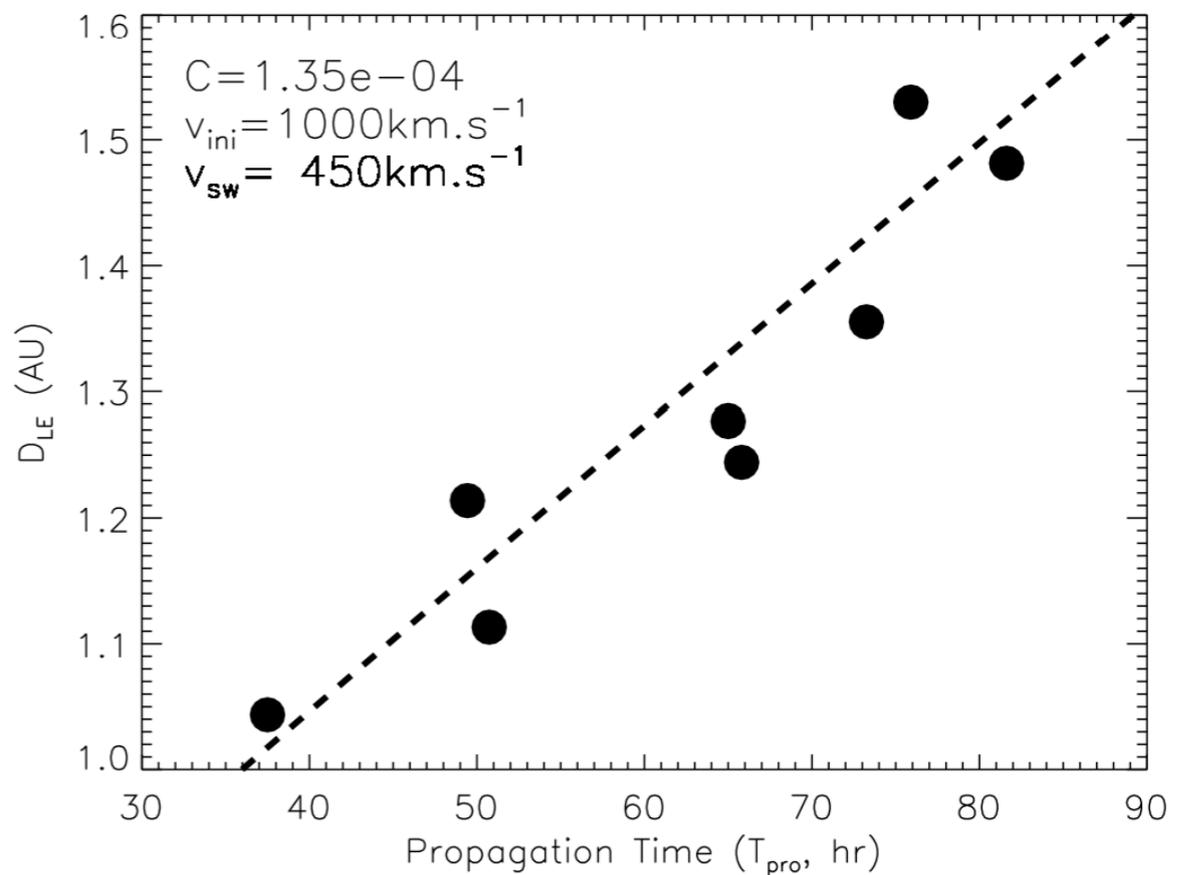
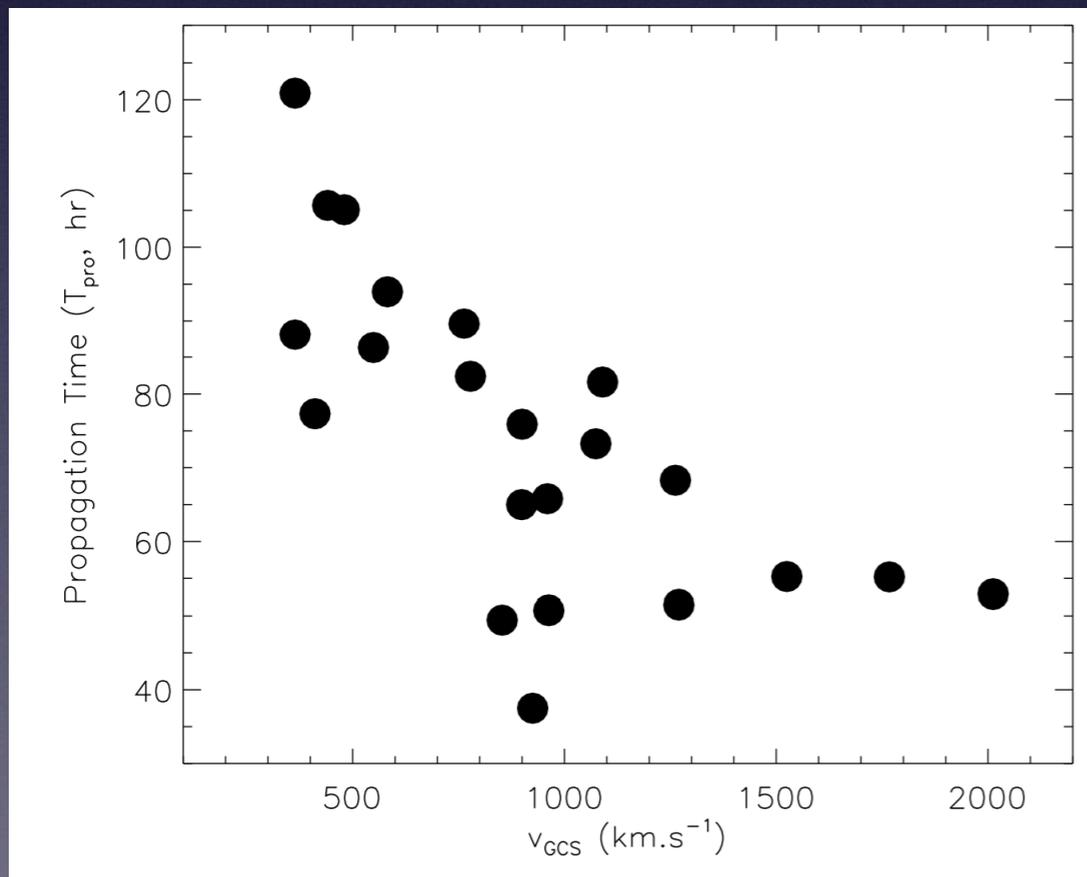
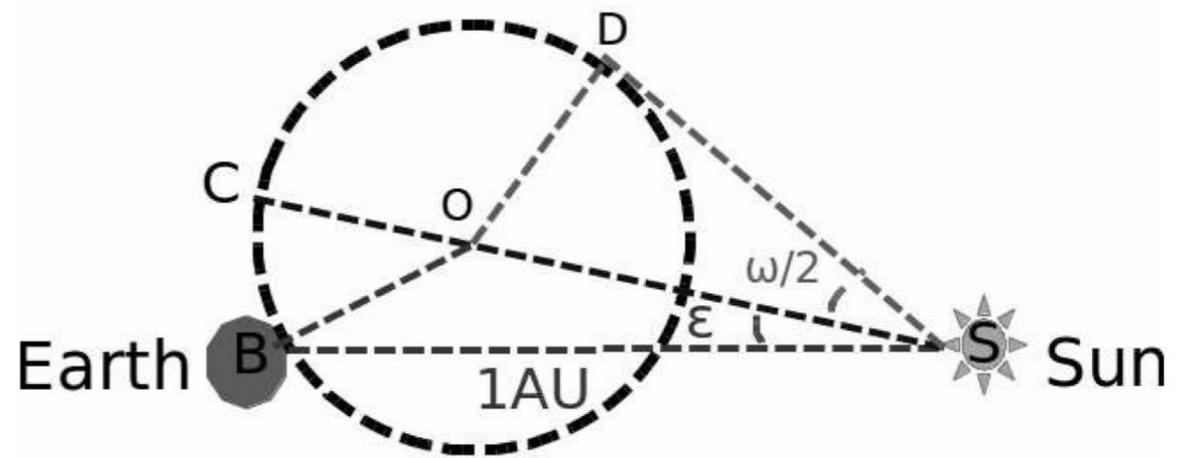


对地日冕物质抛射离开地球

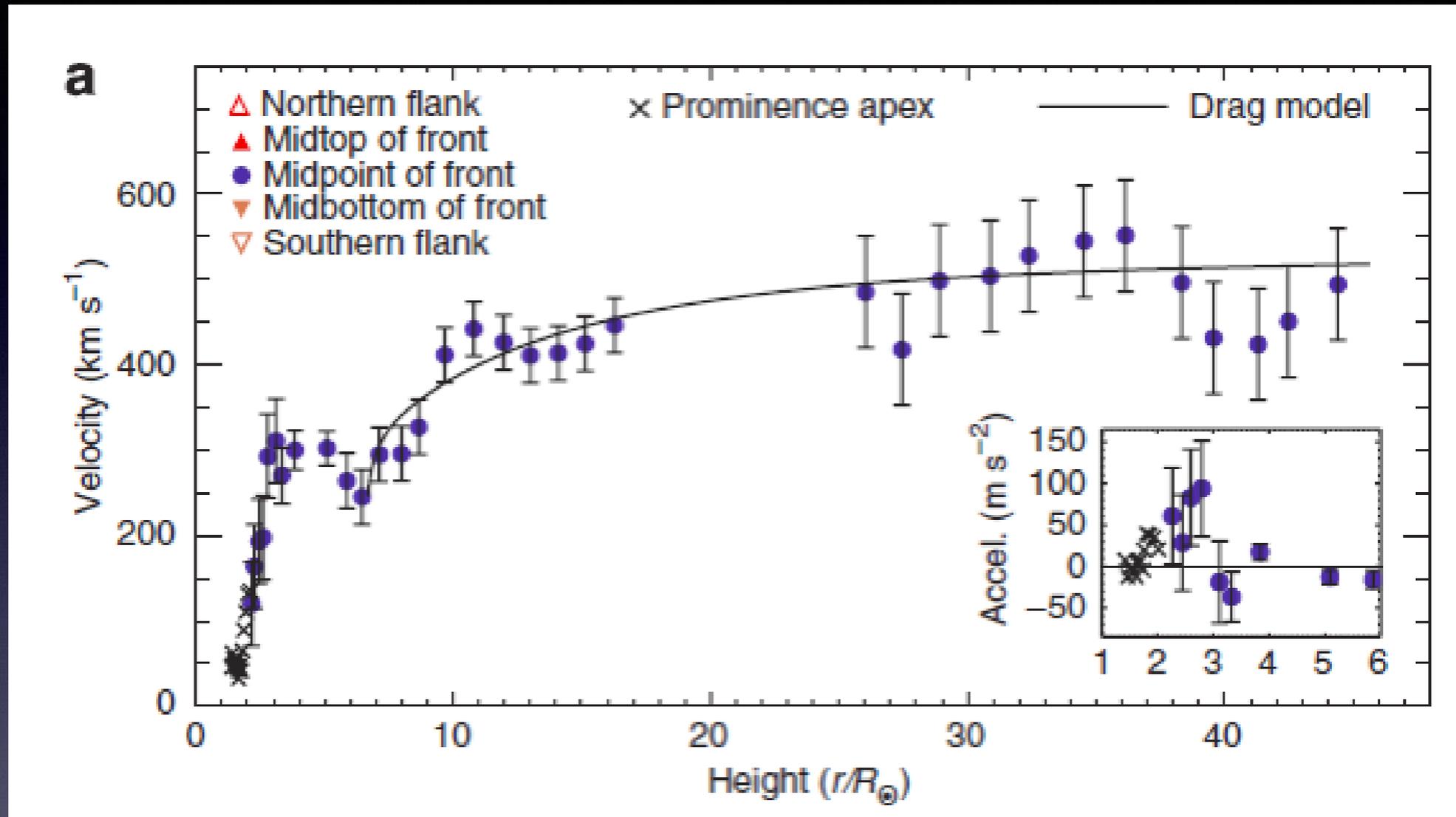


# 日冕物质抛射何时到达地球预报

▶ 方向  
▶ 大小



# 日冕物质抛射传播过程中的速度演化

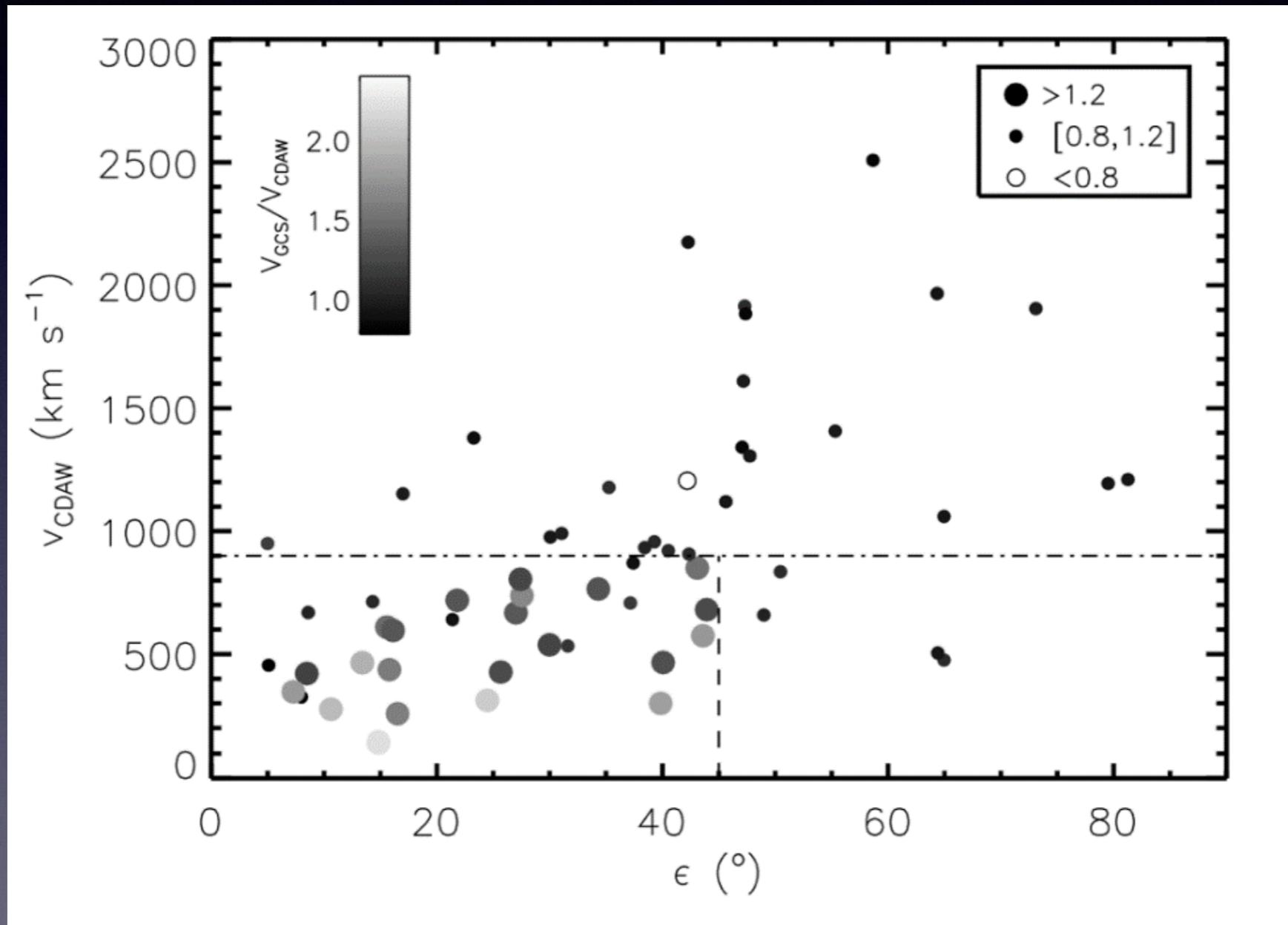


传播的拖拽模型

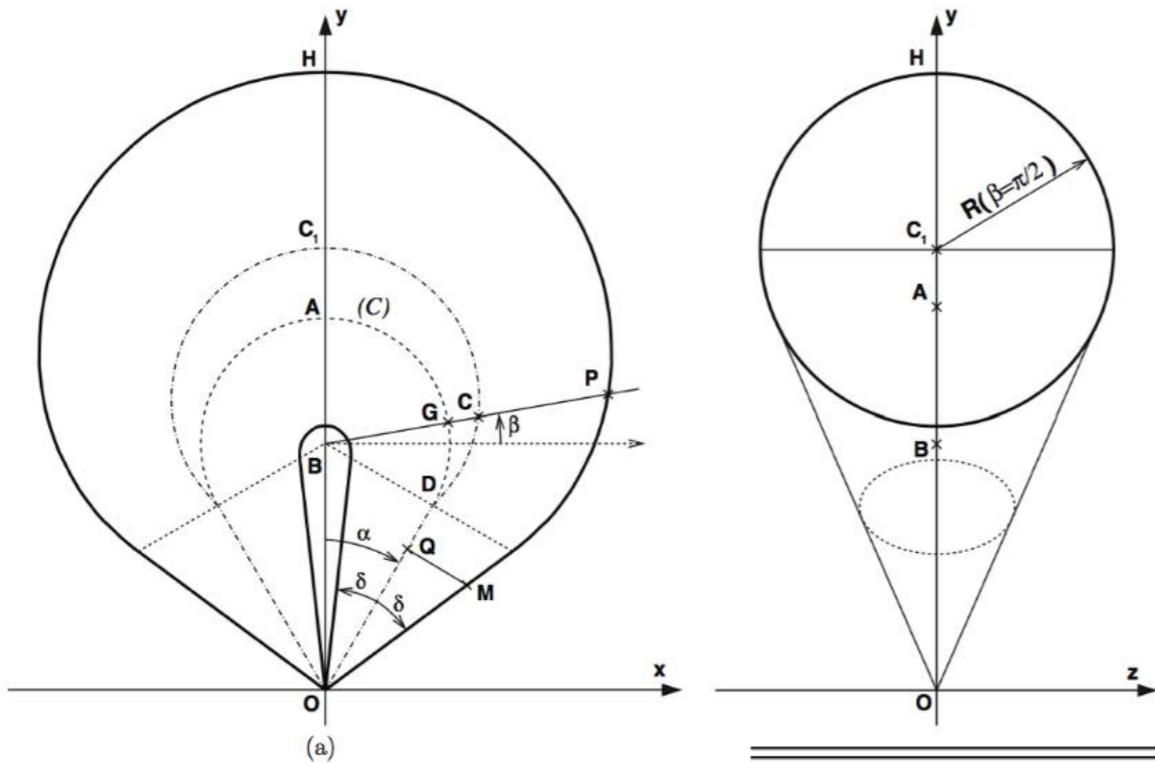
$$\frac{dv_{\text{cme}}}{dr} = -\alpha r^{-\beta} \frac{1}{v_{\text{cme}}} (v_{\text{sw}} - v_{\text{cme}})^{\gamma}$$

$$\alpha r^{-\beta} = \frac{1}{2} \frac{A_{\text{cme}} C_D \rho_{\text{sw}}}{M_{\text{cme}}}$$

# 日冕仪观测具有显著的投影效应



# 日冕物质抛射三维参数获取方法：GCS模型

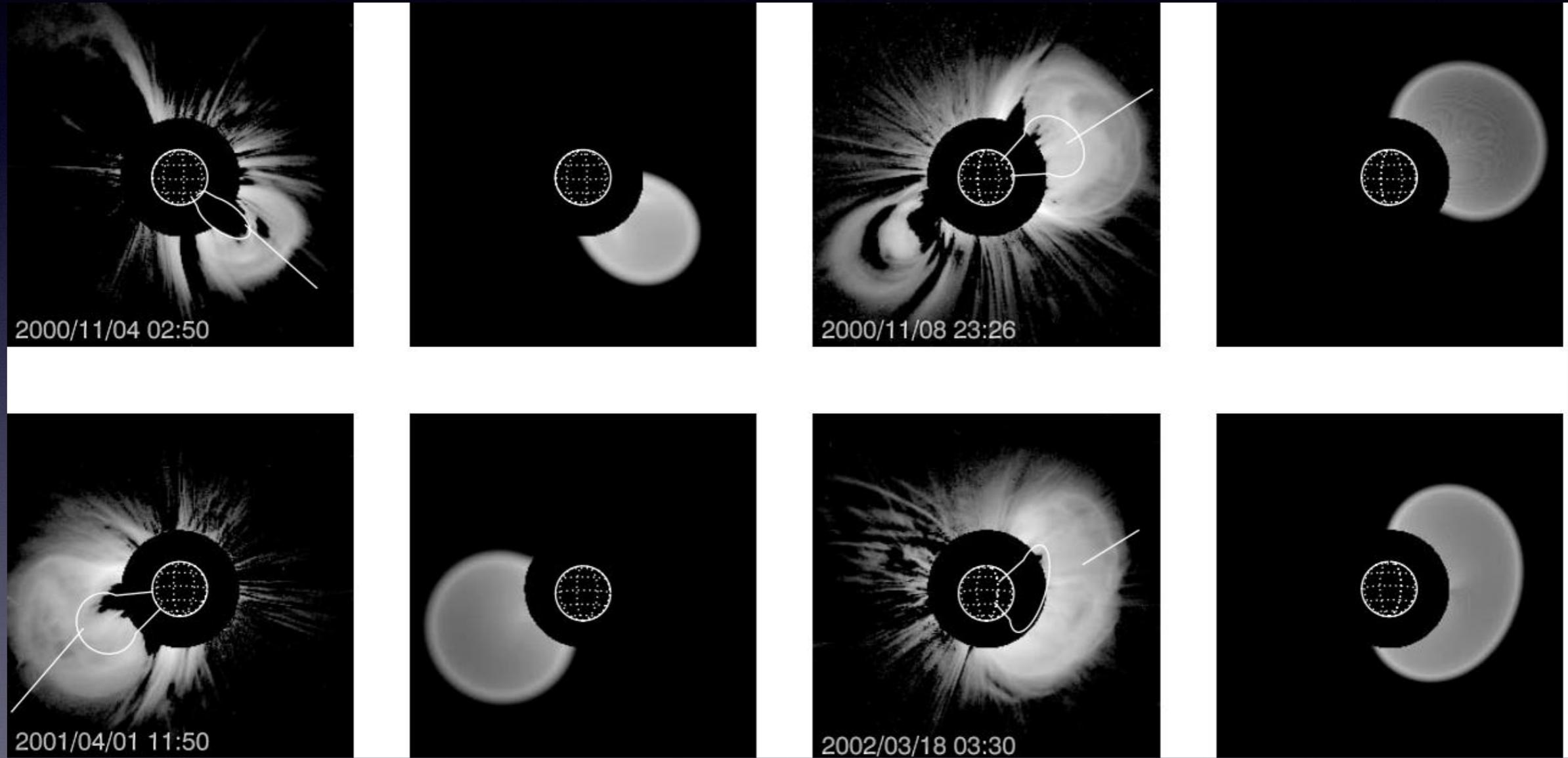


- ▶ 6个几何位型参数
- ▶ 3个亮度参数

Parameter	Description
Model Parameters	
$2\alpha$ .....	Angular width between the “legs” of the GCS model
$h$ .....	Height of the legs
$\kappa$ .....	Aspect ratio (see eq. [1])
$N_e$ .....	Electron density factor
$\sigma_{\text{trailing}}$ .....	Gaussian width of the density profile in the interior of the GCS (see eq. [2])
$\sigma_{\text{leading}}$ .....	Gaussian width of the density profile at the exterior of the GCS (see eq. [2])
Positioning Parameters	
$\phi, \theta$ .....	Carrington longitude and heliographic latitude of the SR
$\gamma$ .....	Tilt angle of the SR neutral line

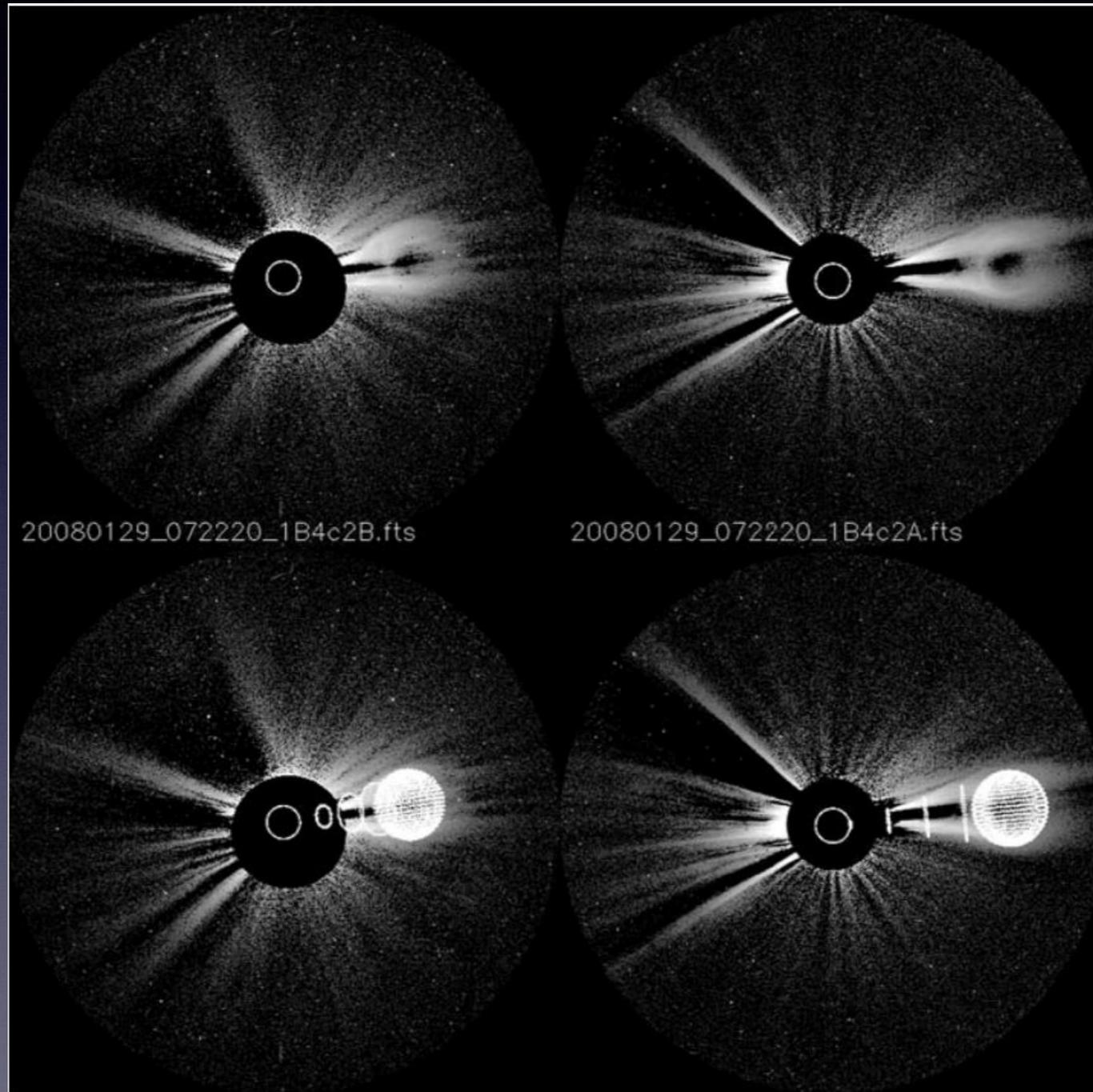
Thernisien et al.,  
2006, 2009;  
Thernisien 2011

# 日冕物质抛射三维参数获取方法：GCS模型



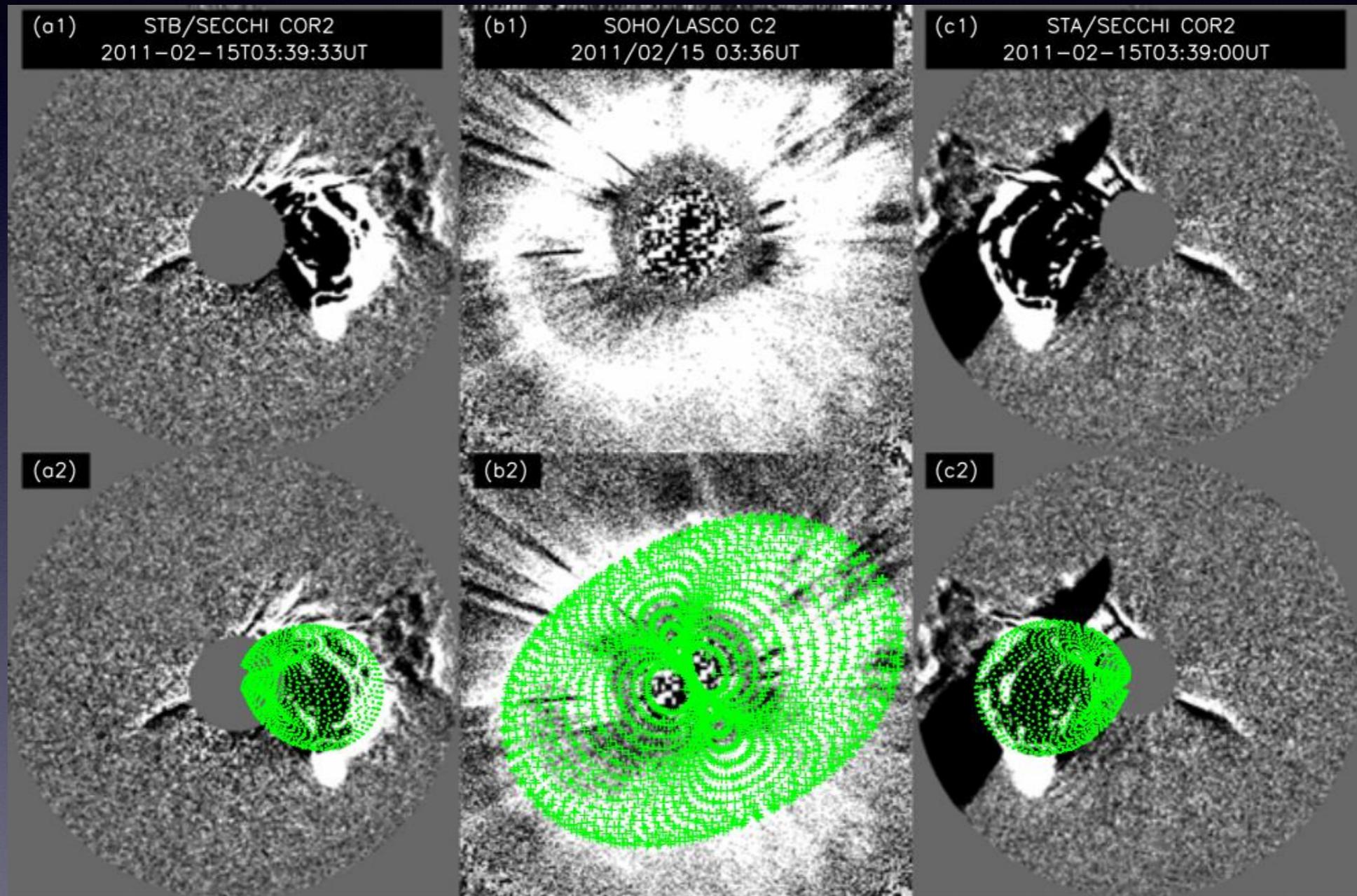
Thernisien et al., 2006

# 日冕物质抛射三维参数获取方法：GCS模型



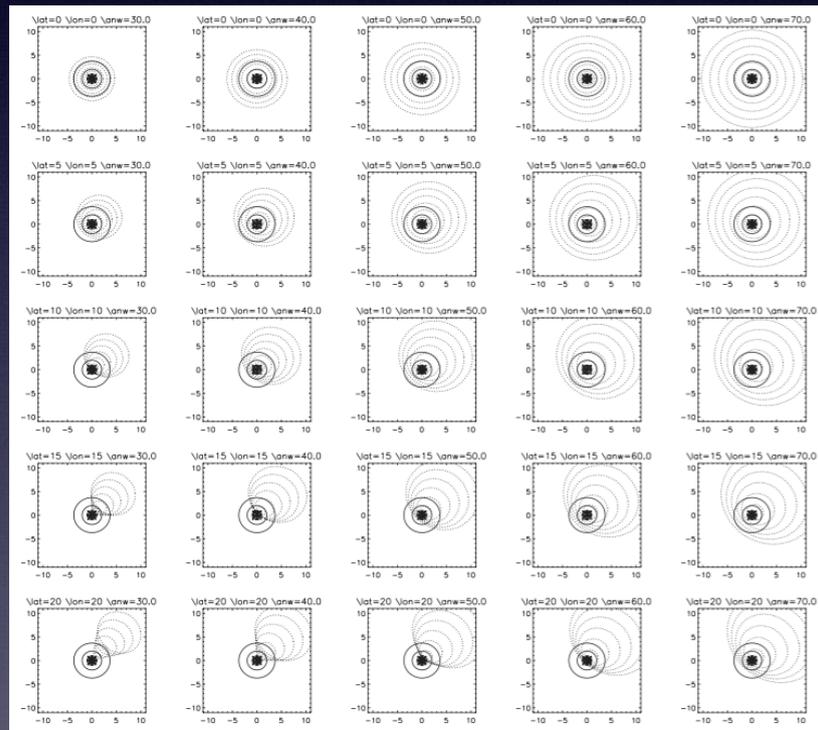
Thernisien et al., 2009

# 日冕物质抛射三维参数获取方法：GCS模型



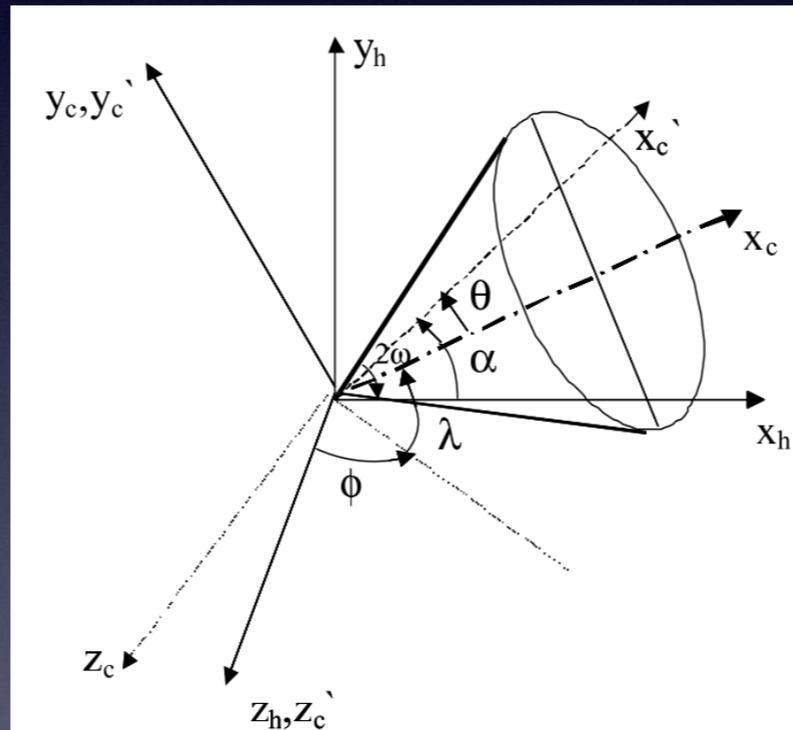
# 日冕物质抛射三维参数获取方法：锥模型

## 圆锥模型



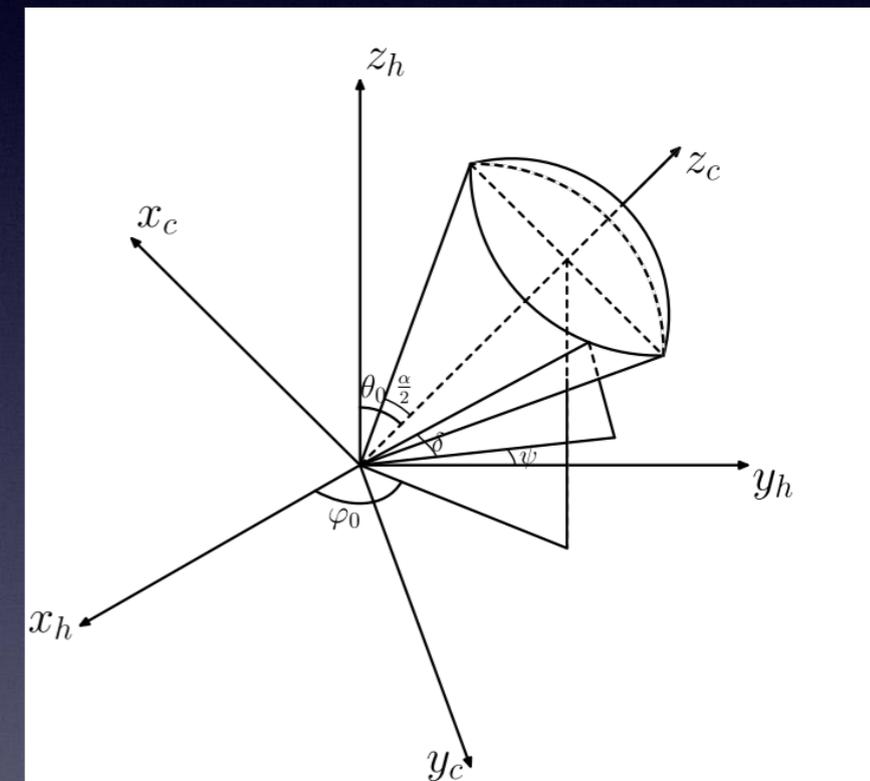
Zhao et al., 2002

## 圆锥模型



Xie et al., 2004

## 冰淇淋锥模型

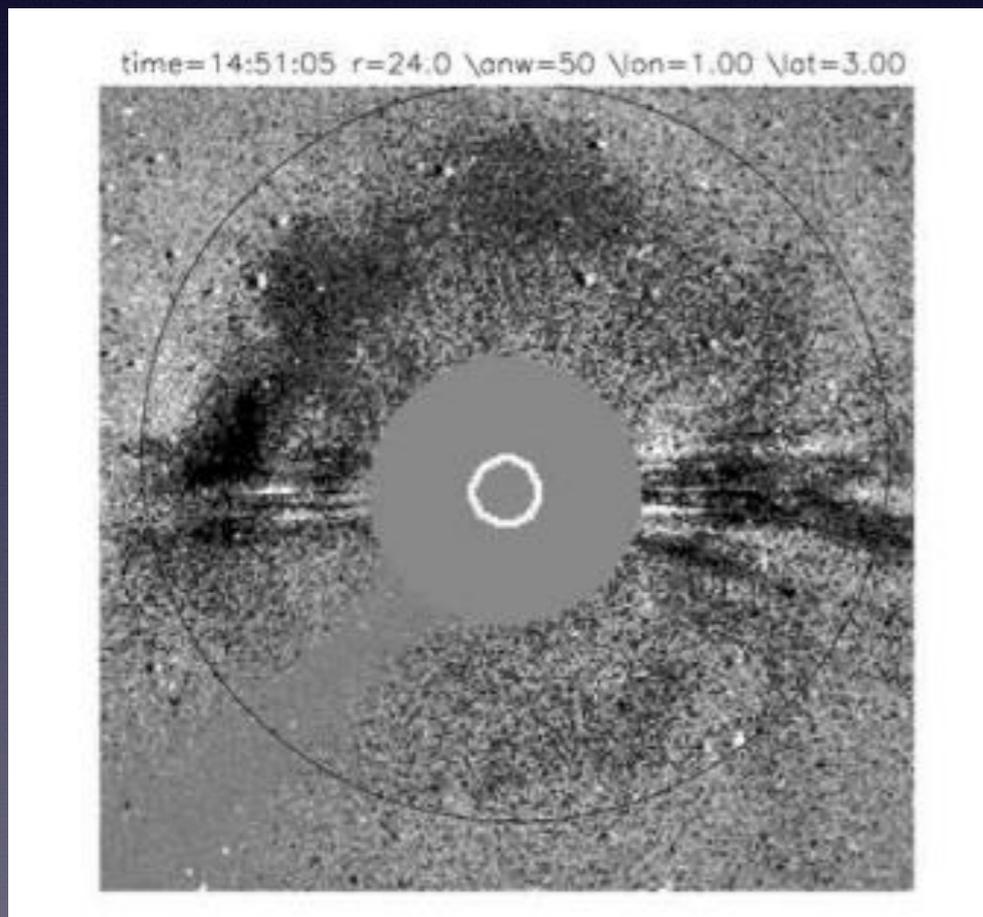


Xue et al., 2005

► 四个几何参数

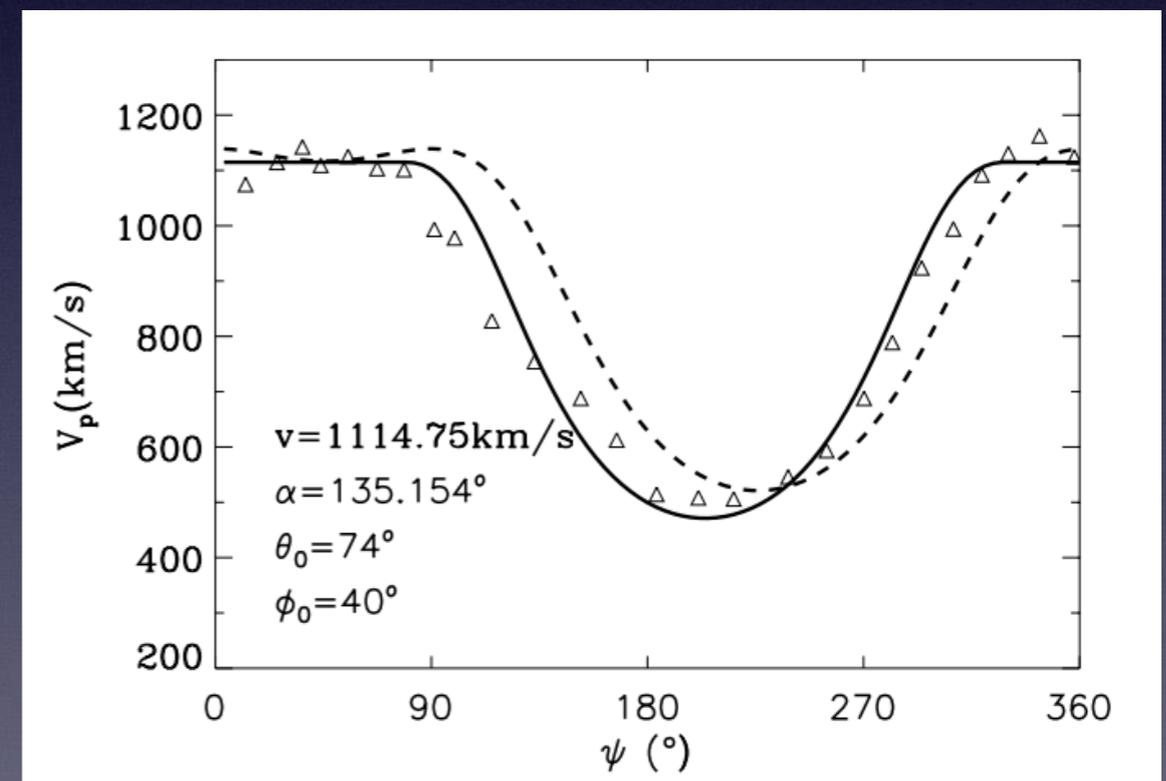
# 日冕物质抛射三维参数获取方法：锥模型

直接拟合图像



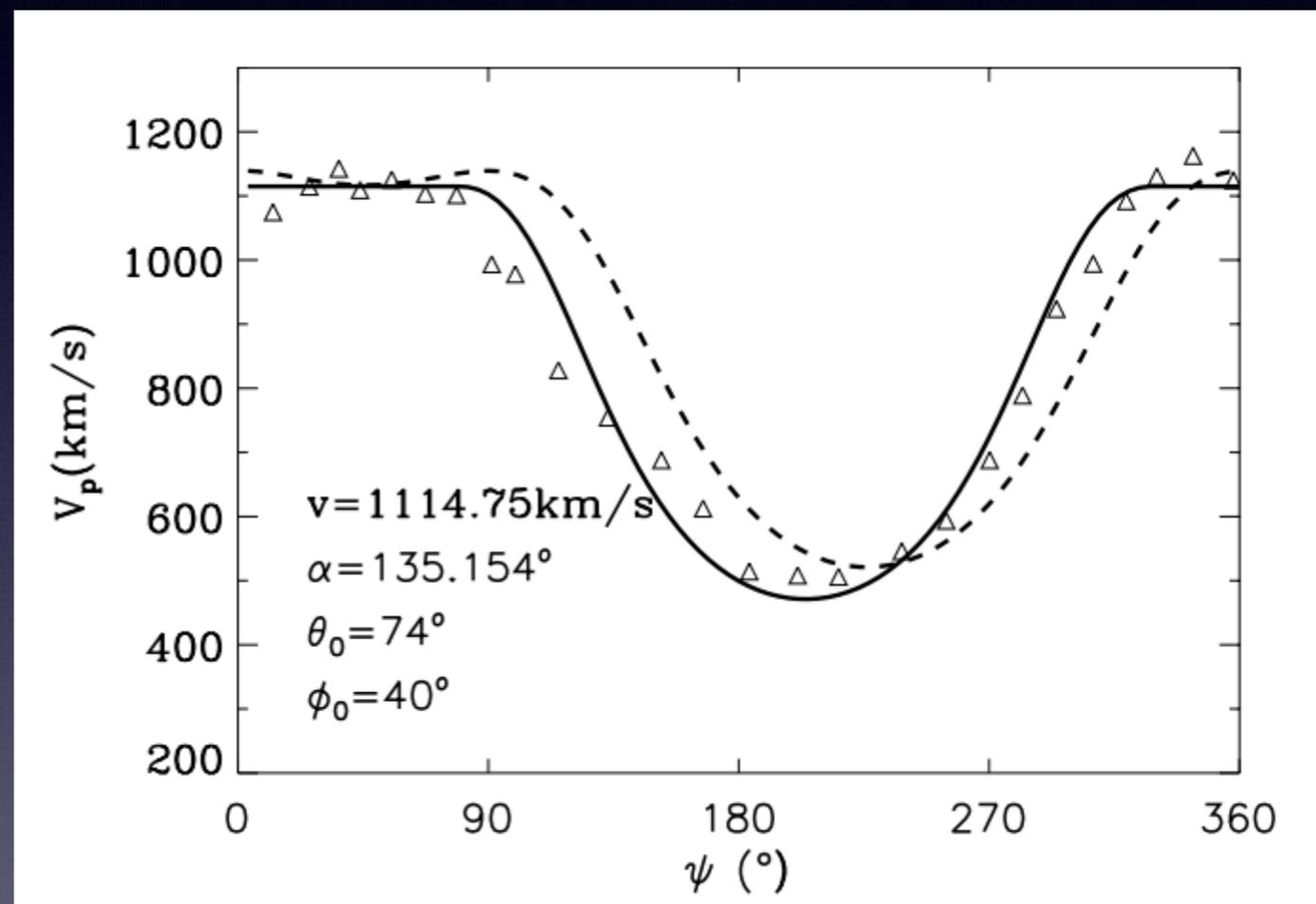
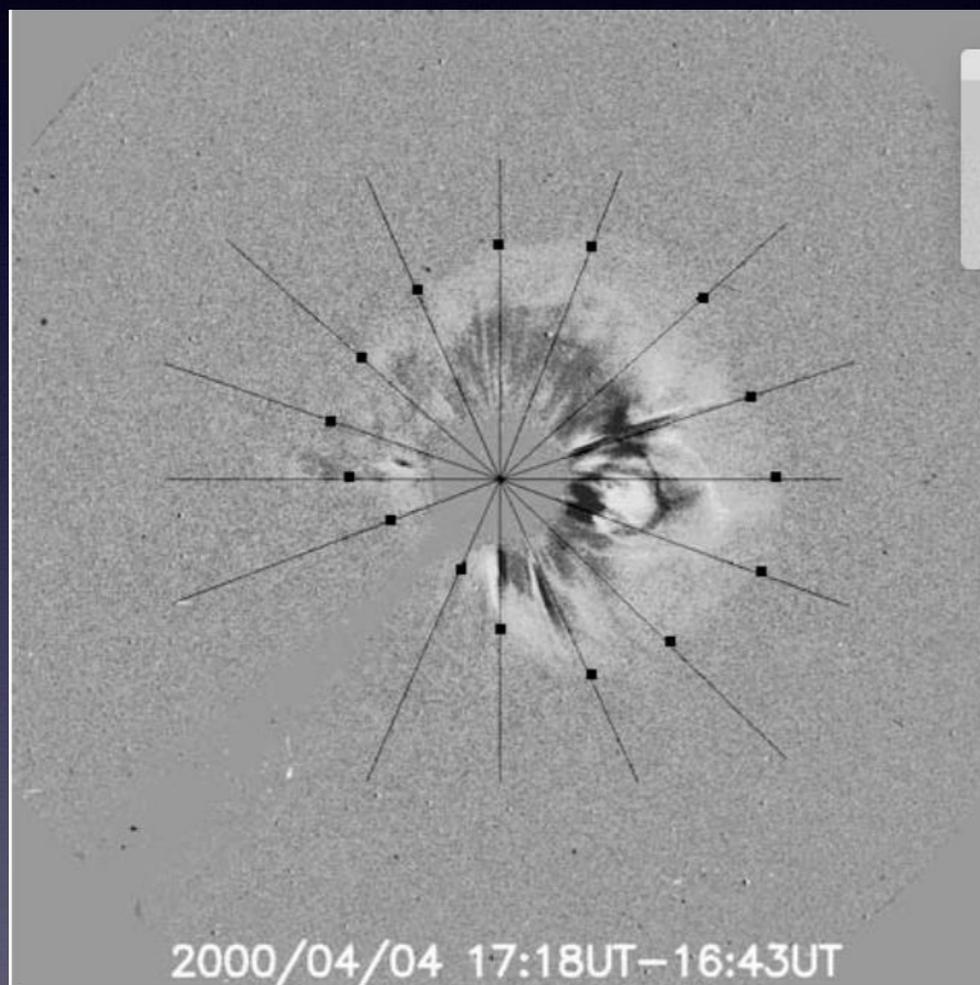
$$F(R, \theta, \phi, \omega)$$

拟合速度曲线

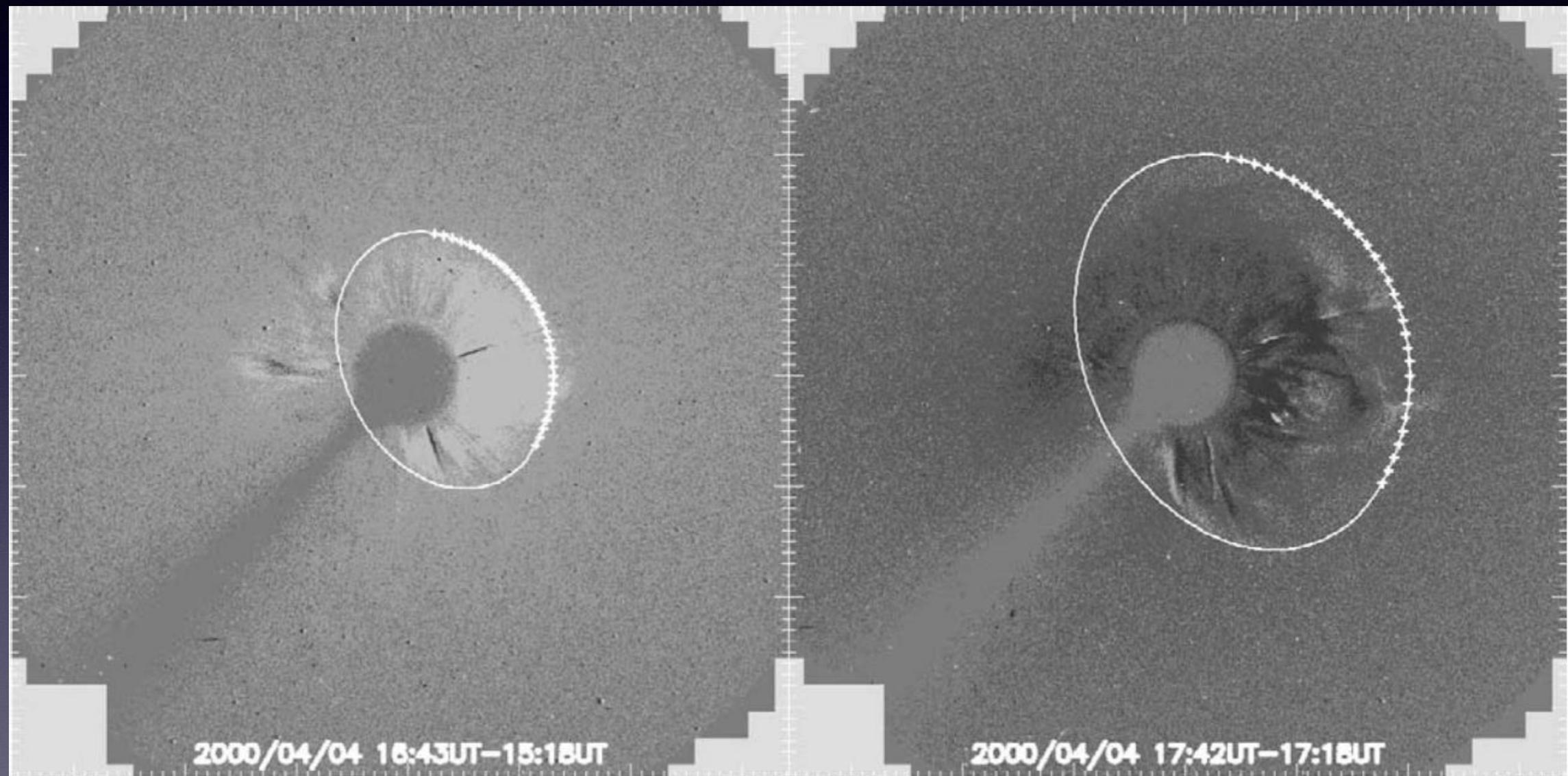


$$F(v, \theta, \phi, \omega)$$

# 日冕物质抛射三维参数获取方法：锥模型

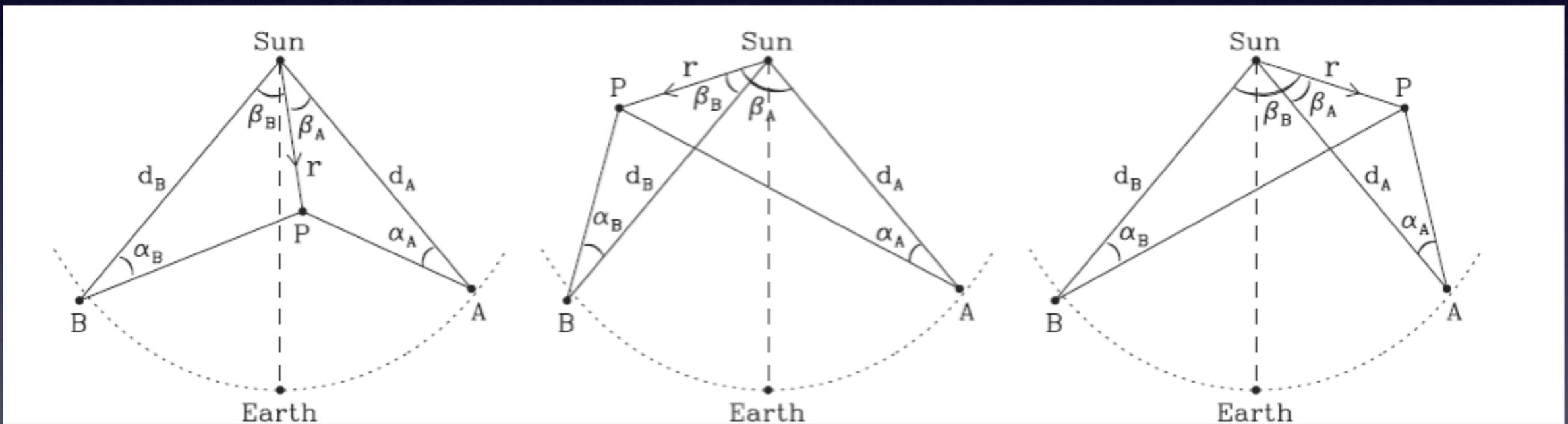


# 日冕物质抛射三维参数获取方法：锥模型



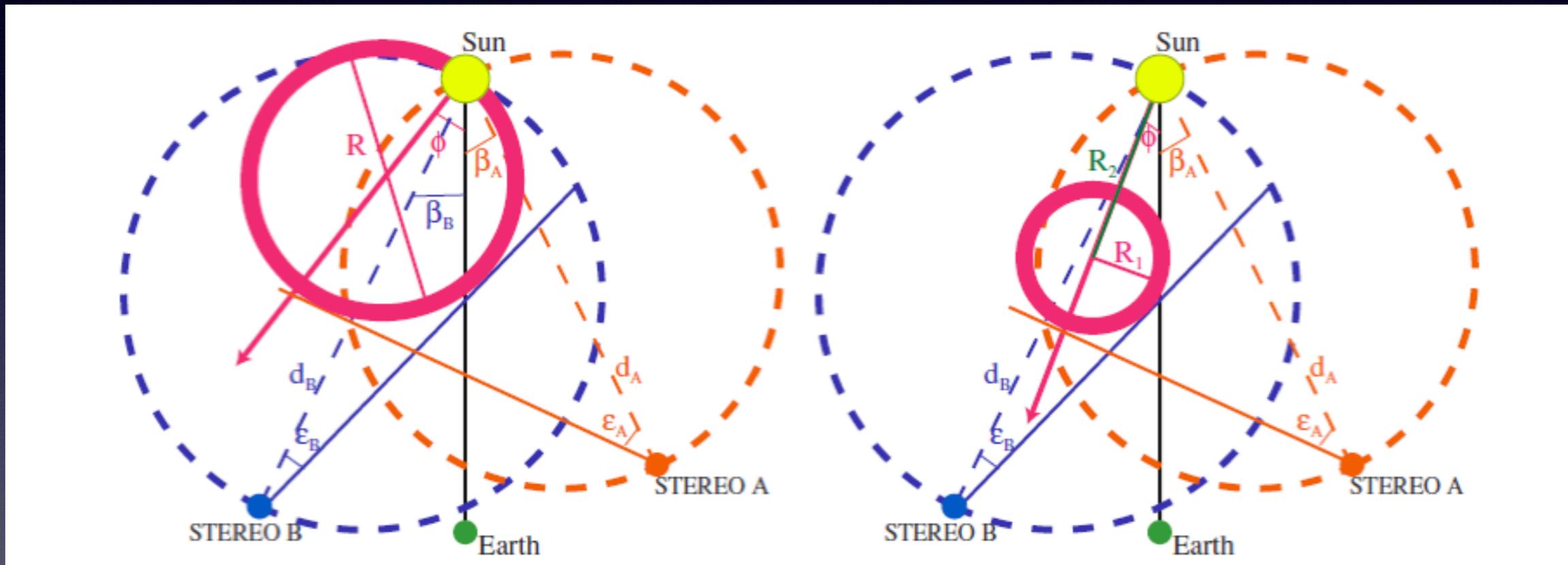
Xue et al., 2005

# 日冕物质抛射三维参数获取方法：三角分析



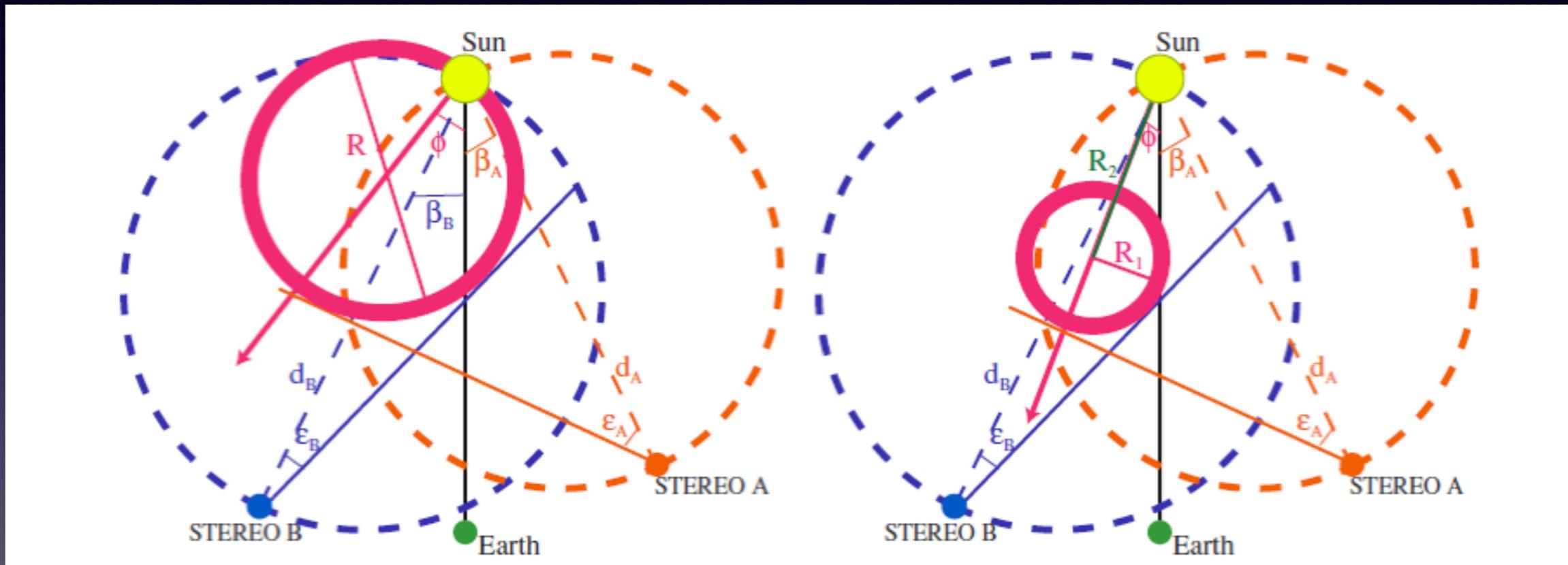
Liu et al., 2010

# 日冕物质抛射三维参数获取方法：HM法



Lugaz et al., 2010

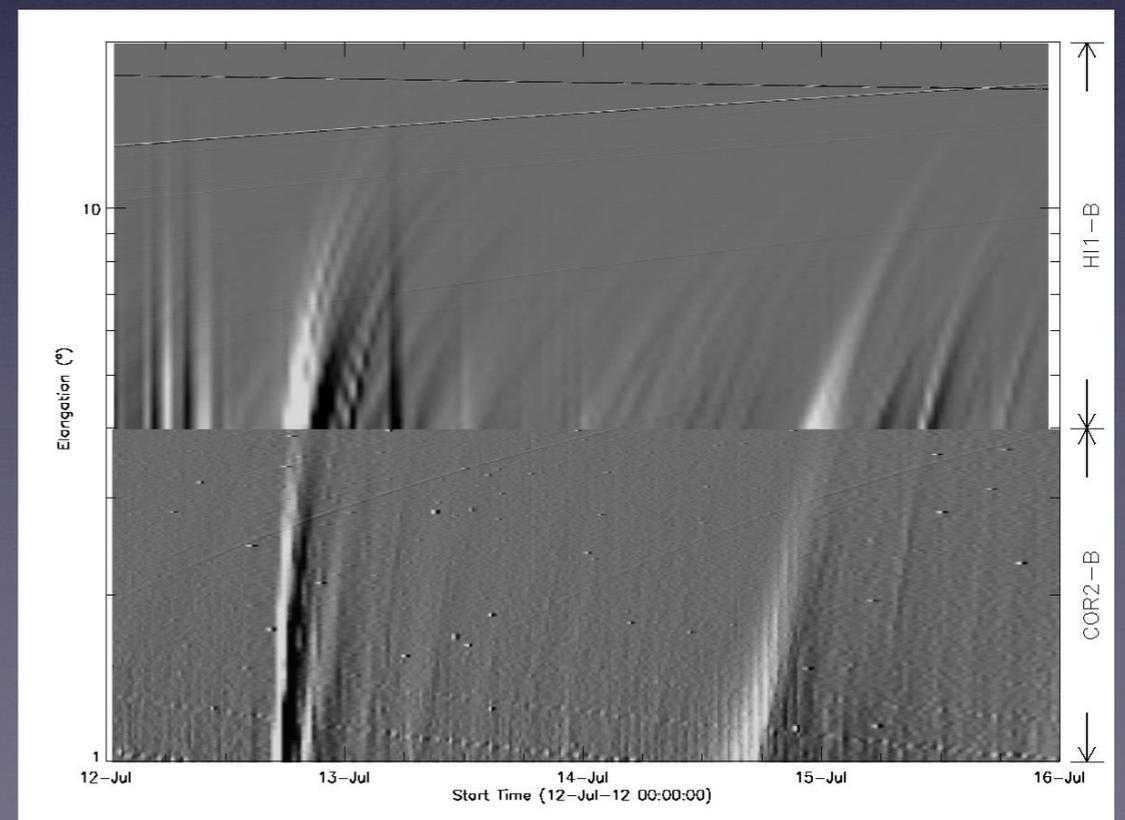
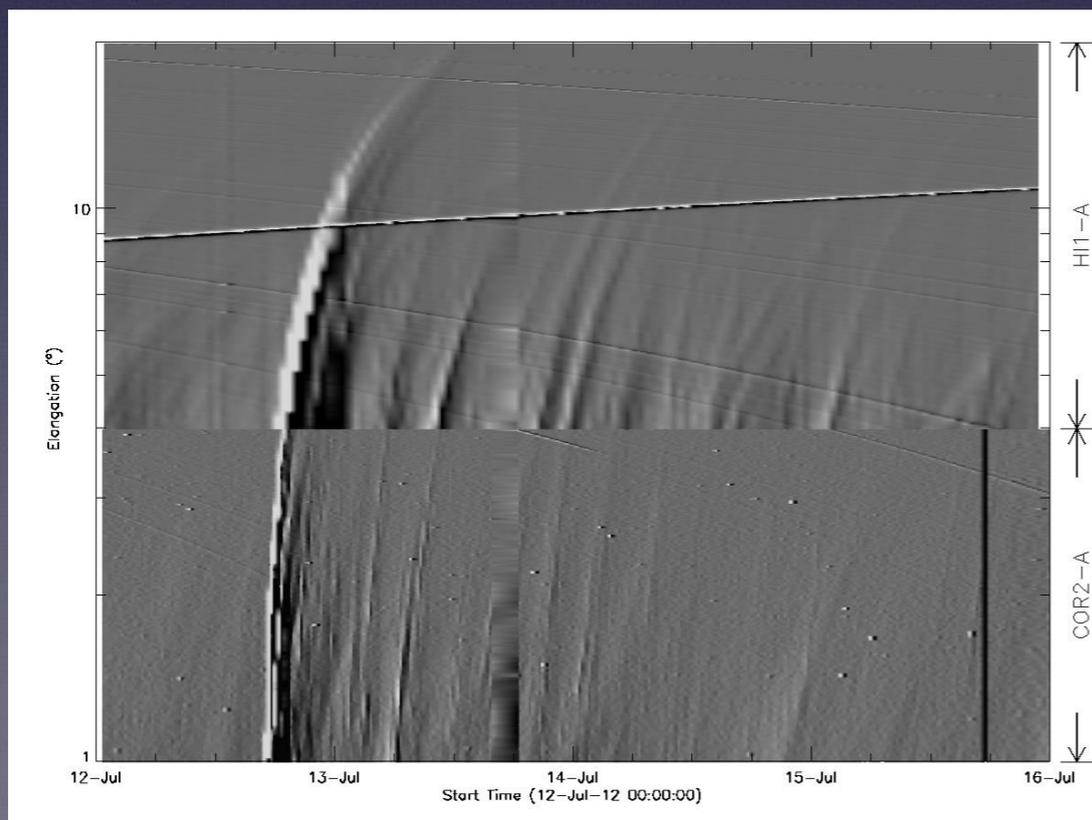
# 日冕物质抛射三维参数获取方法：HM法



Lugaz et al., 2010

# 利用STEREO数据获取三维参数的问题

- ★ 各种方法假设太强
- ★ 多星结构之间对应不确定
- ★ 需要多颗星的观测数据



# CME传播预报模式

## 经验模型

$$T = 27.98 + 2.11 \times 10^4 / V_p \quad \text{Wang et al. [2002]}$$

$$T = 96 + V_p / 21 \quad \text{Zhang et al. [2002]}$$

**ECA model** [Gopalswamy et al. 2000, 2001]

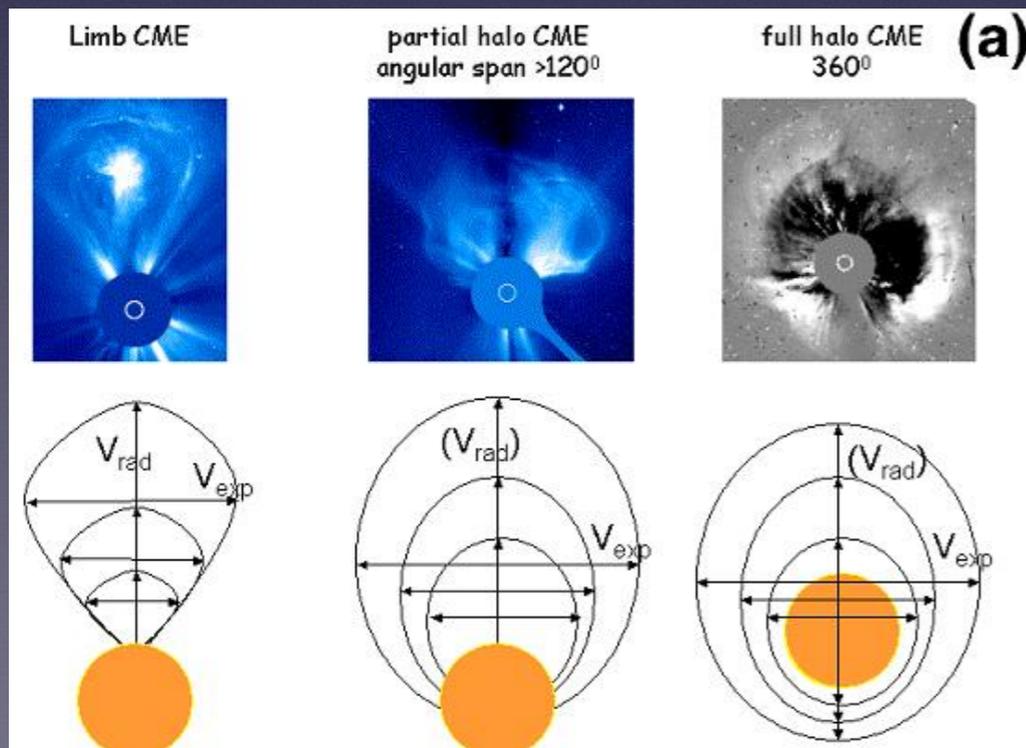
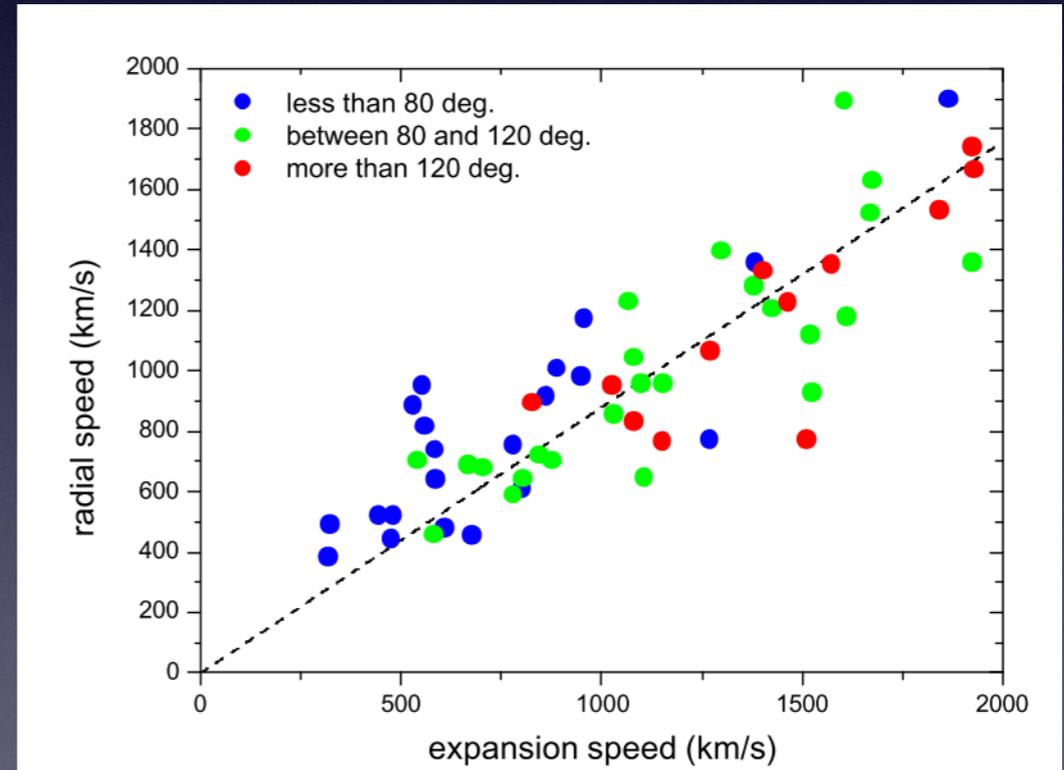
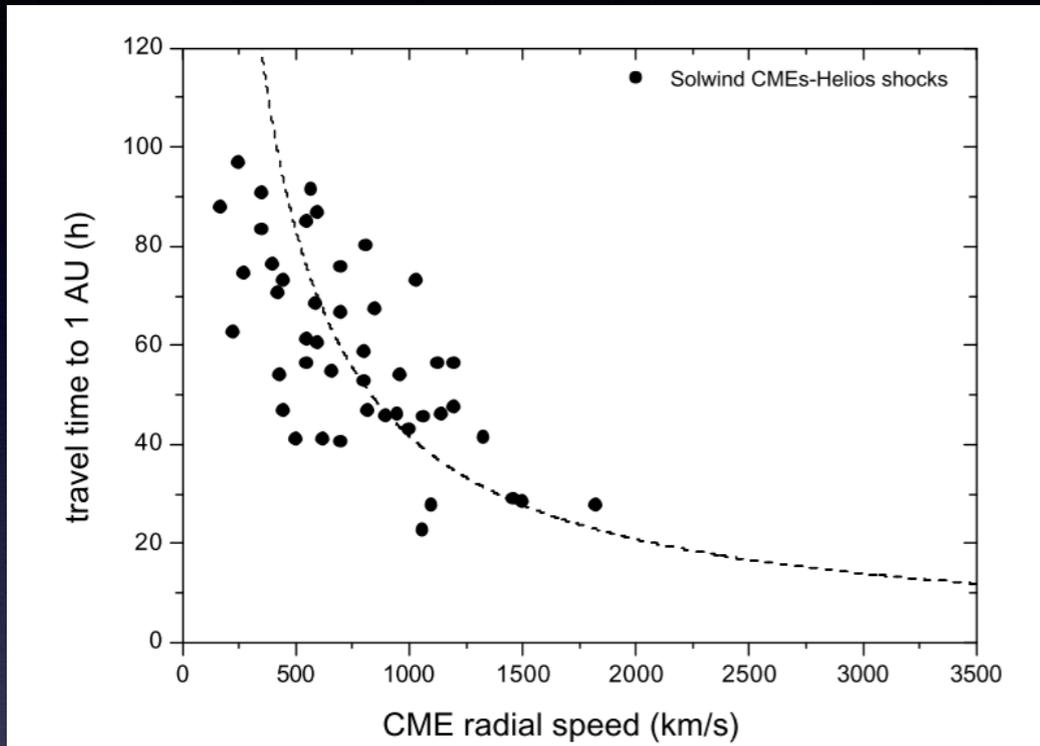
$$a = 1.41 - 0.0035u \quad s = ut + \frac{1}{2}at^2$$

**ECA model** [Gopalswamy et al. 2005]  $v_{sh} = v_p(\gamma + 1)/2$

$$\Delta R = R_{sh} - R_p = R_p(\gamma - 1)/2 \quad \Delta t = \Delta R / v_p$$

# CME传播预报模式

## 膨胀速度模型 [Schwenn et al. 2005]



$$T_{tr} = 203 - 20.77 \ln(v_{exp})$$

# 基于运动学的HAF (Hakamada-Akasofu-Fry) 模型

经验关系

★ HAF V1



速度分布

Hakamada and Akasofu, 1982, Space Sci. Rev; Sun and Akasofu, 1985, Akasofu and Fry, 1986, Planet Space Sci.

Wang-Sheeley-Arge(WSA)模式

★ HAF V2



速度分布

Fry et.al, 2001,2003, JGR; Arge and Pizzo, 2000, JGR; Wang and Sheeley, 1990, APJ

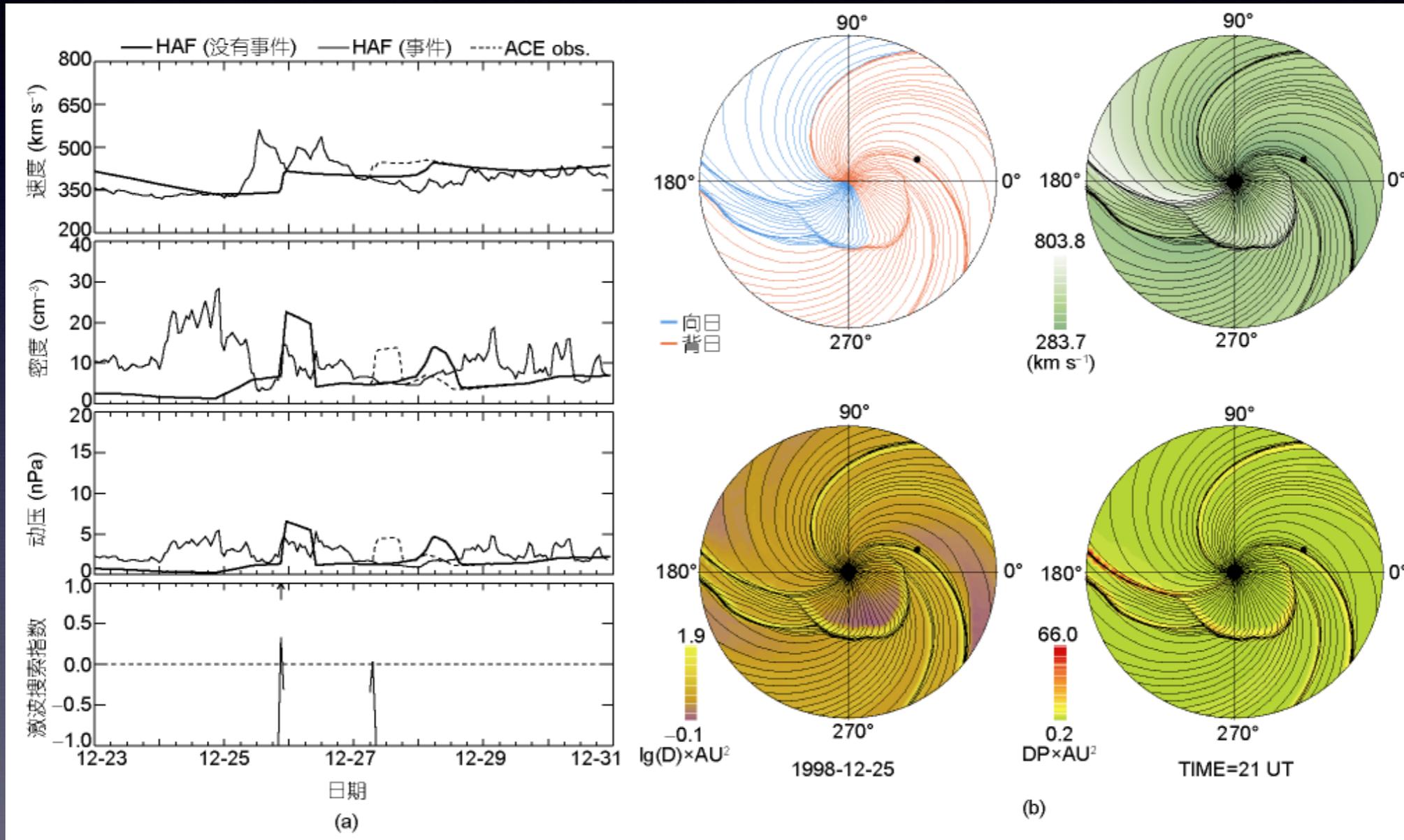
# HAF模式

## 对于源表面上初始太阳风场中的太阳瞬变活动引起的扰动风场



- ★ HAFv1 和HAFv2 的特点是采用经验的距离-时间关系, 描述太阳自转导致以不同初始速度离开太阳源表面的粒子在行星际空间的相互作用.
  - ▶ 优点: 快速稳定并能直接用观测作为输入;
  - ▶ 缺点: 不能直接提供太阳风的温度、能量流量等方面的详细信息, 在处理流-流相互作用时缺少必要的物理条件, 对行星际磁场南向分量的处理还有待进一步发展.

# HAF模式



模型HAFv2 的预测事例[Fry et al., 2003, JGR]

# WSA模式

光球层磁  
场观测



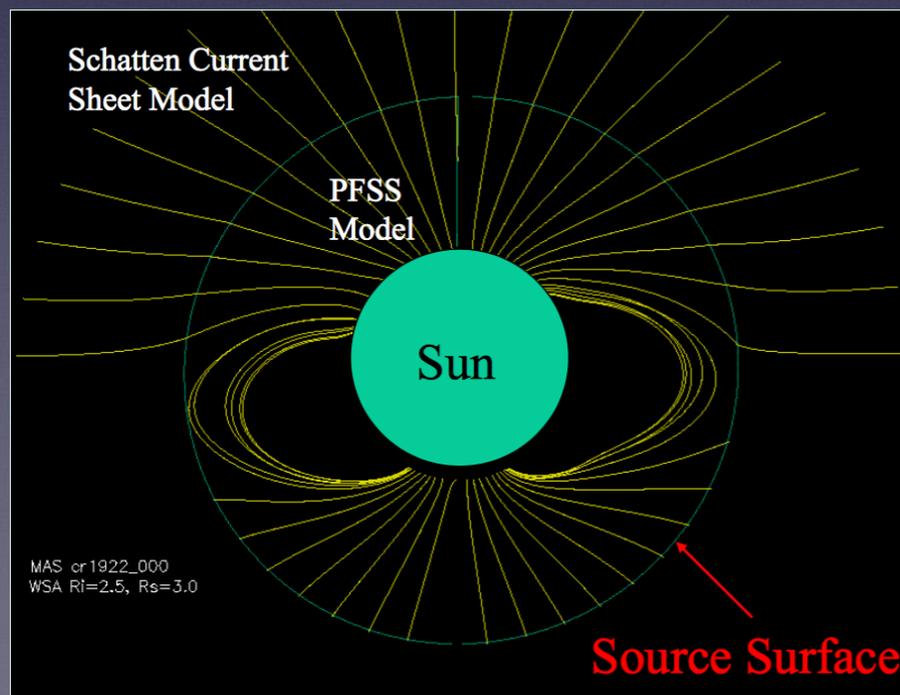
PFSS模型  
+  
SC模型

源表面磁  
场观测



经验  
公式

太阳风  
速度



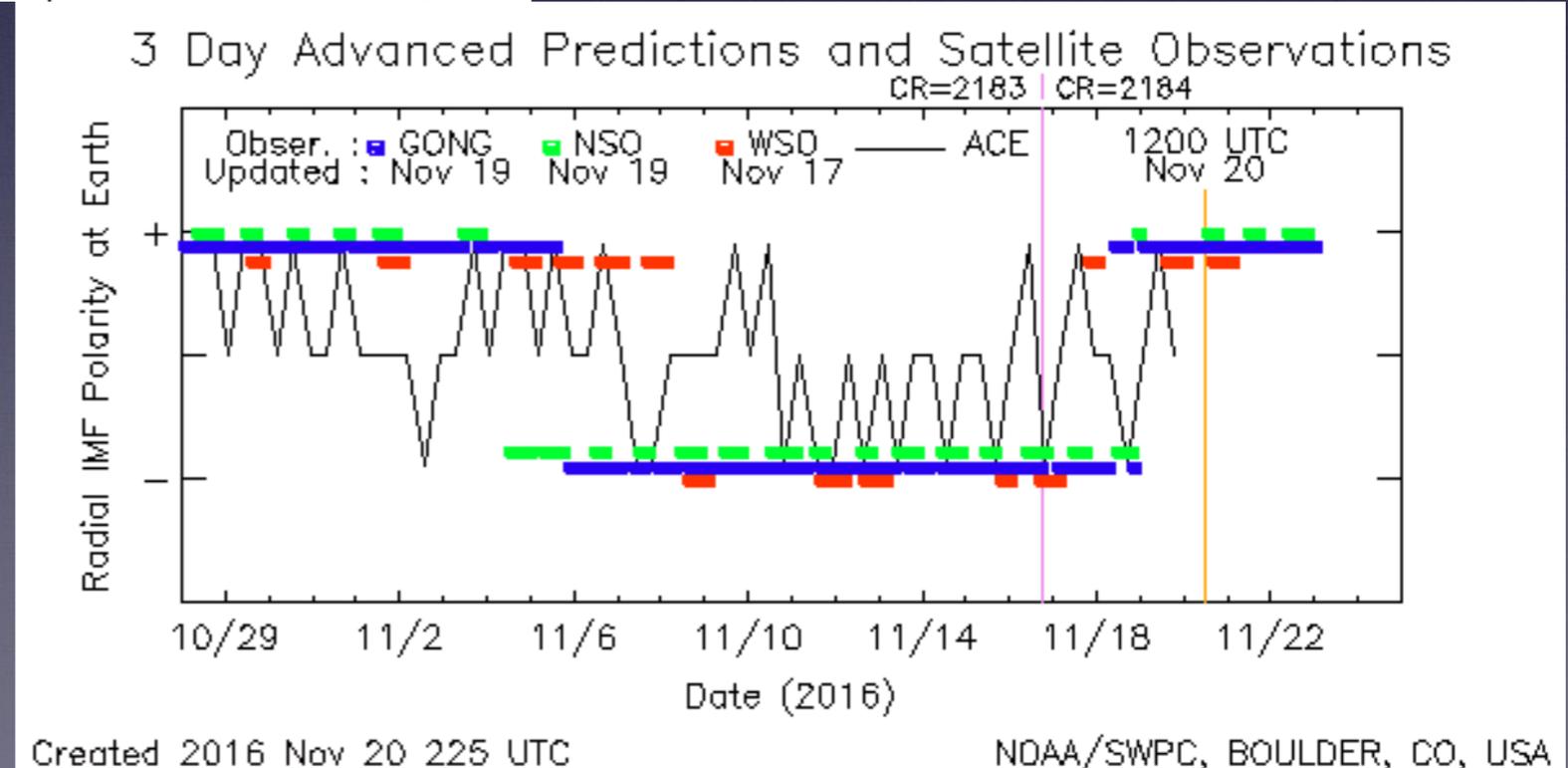
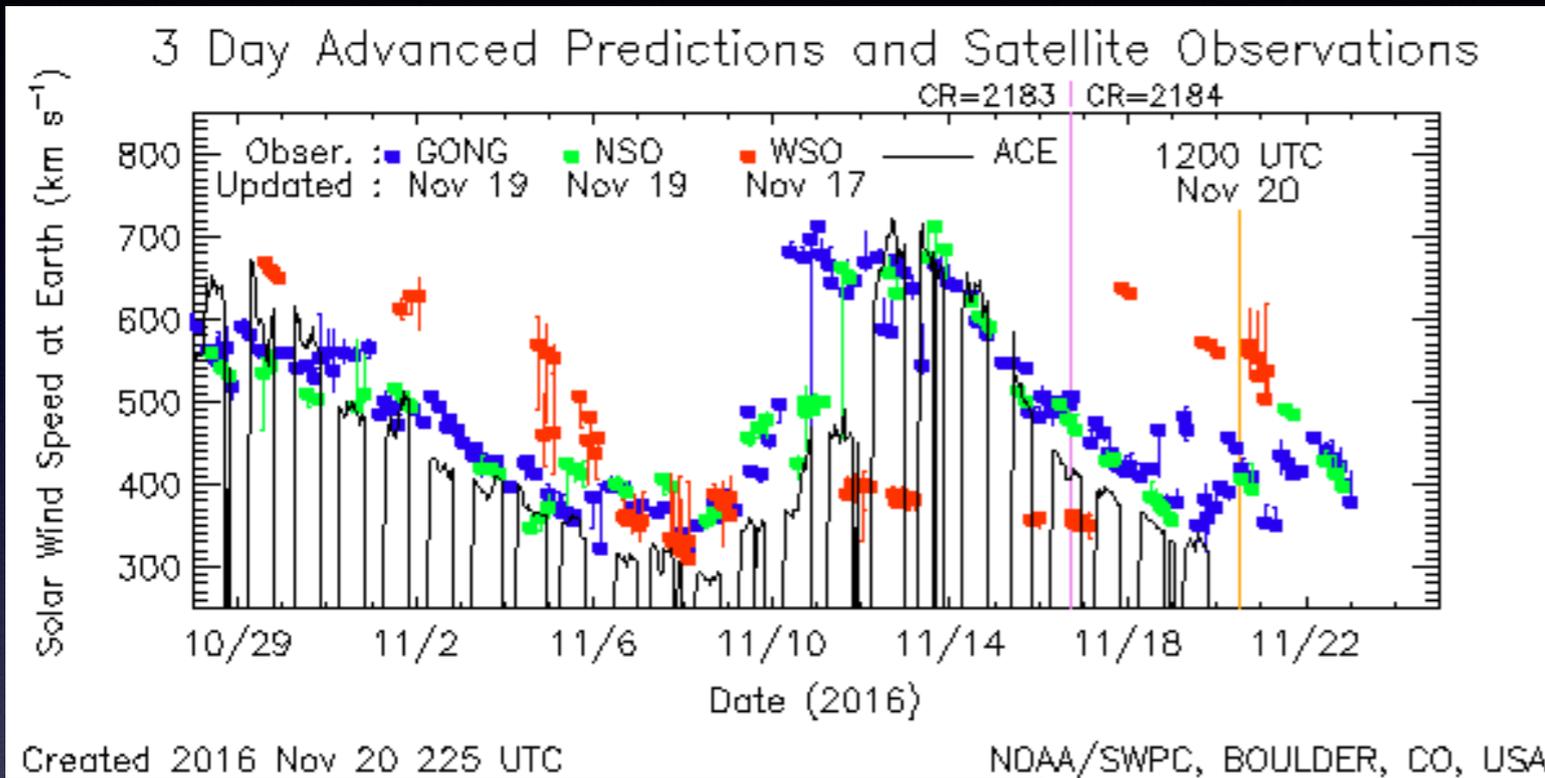
$$V(f_s, \theta_b) = 265 + \frac{1.5}{(1 + f_s)^{1/3}} \left\{ 5.8 - 1.6e^{\left(1 - \left(\frac{\theta_b}{7.5}\right)^3\right)} \right\}^{3.5} \text{ km s}^{-1}$$

Where:

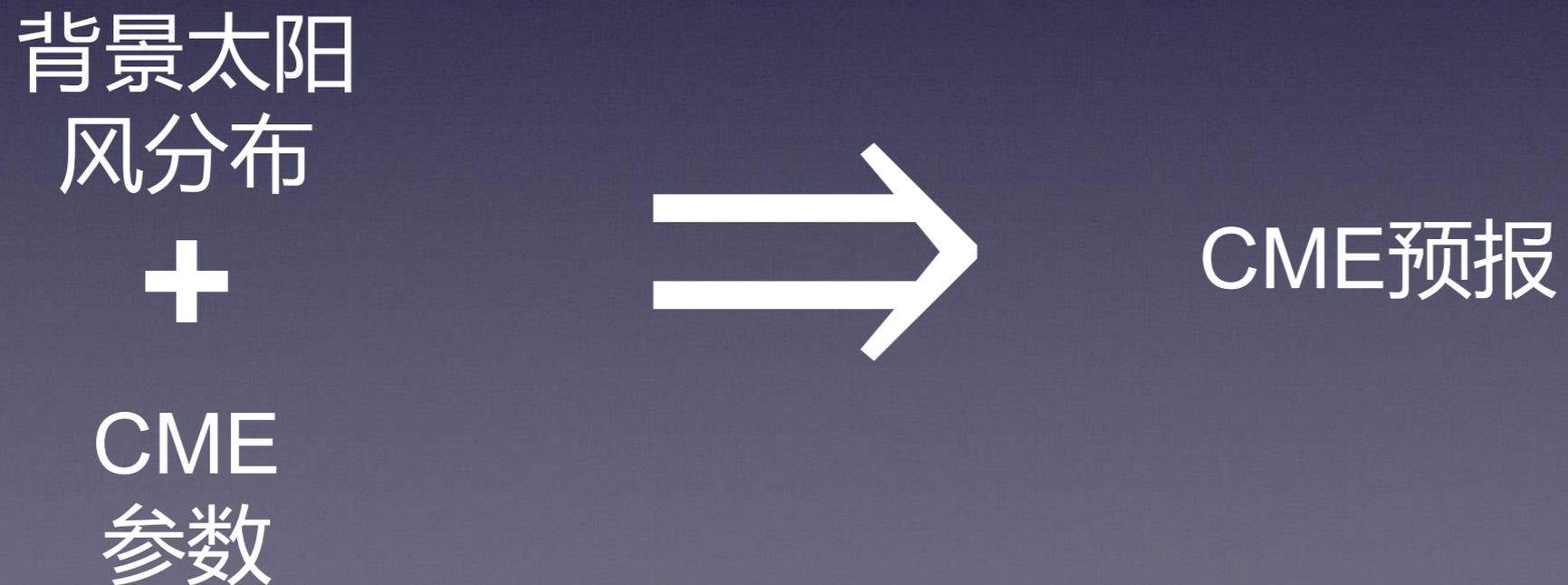
$f_s$  = Magnetic field expansion factor.

$\theta_b$  = Minimum angular distance that an open field footpoint lies from nearest coronal hole boundary (i.e., Angular depth inside a coronal hole)

# WSA模式

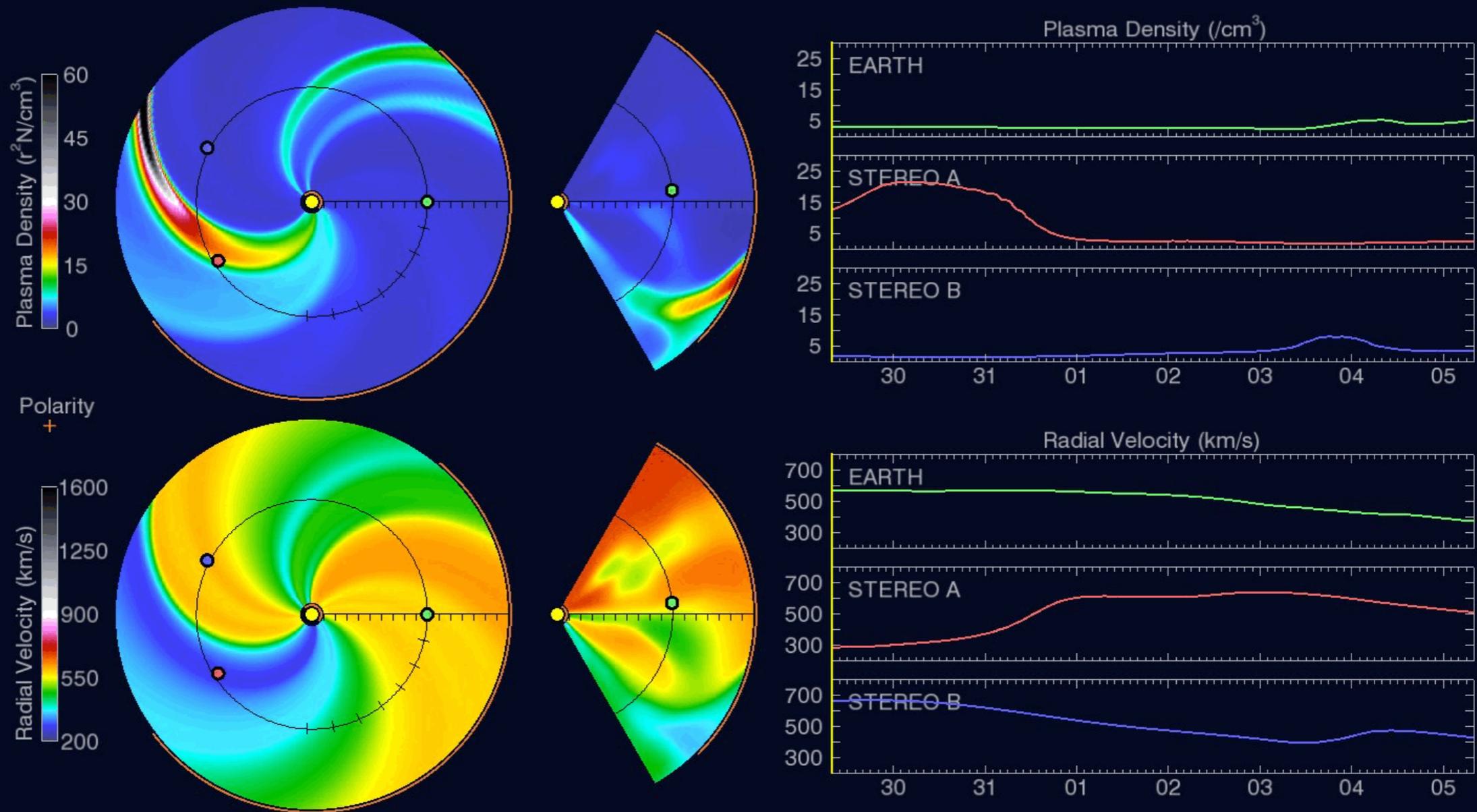


# WSA+ENLIL模式



# WSA+ENLIL模式

2016-10-29 08:00:00



# 激波传播模型SPM及其升级版SPM2

## ★ 理论基础

- ▶ 魏奉思 (1982) 关于点源爆炸波在稳态、变密度、运动介质中传播解析解

## ★ 出发方程

- ▶ 理想流体的基本方程组 (球对称假设)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2u}{r} \right) = 0,$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial p}{\partial r} = 0,$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial r} + \gamma p \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2u}{r} \right) = 0$$

# 激波传播模型SPM

采用无量纲化、自相似求解等一系列步骤，得到点源爆炸波产生扰动的一级近似解：

$$V_s = \frac{dR}{dt} = \left[ -2\lambda_1 + \sqrt{(2\lambda_1)^2 + \frac{E_0}{J_0 R} + \frac{1}{2J_0}} \right] u_0$$

$V_s$ : 激波速

$R$ : 日心距离

$E_0$ : 无量纲化的爆炸释放能量

$u_0$ : 为背景太阳风速度

$\lambda_1$ 和 $J_0$ 为常数。

积分给出激波传播到任意日心距离  $R$  所需要的时间  $T$ ：

$$T = \frac{J_0}{u_0} \left\{ 4\lambda_1 [R + 2E_0 - 2E_0 \ln(R + 2E_0)] + 2\sqrt{X} - \frac{(16\lambda_1^2 + \frac{1}{J_0})E_0}{\sqrt{4\lambda_1^2 + \frac{1}{2J_0}}} \right. \\ \times \ln \left[ \sqrt{X} + (R + 2E_0) \sqrt{4\lambda_1^2 + \frac{1}{2J_0}} - \frac{(16\lambda_1^2 + \frac{1}{J_0})E_0}{2\sqrt{4\lambda_1^2 + \frac{1}{2J_0}}} \right] - 8\lambda_1 E_0 \\ \left. \times \ln \left[ \frac{\sqrt{X} + 4\lambda_1 E_0}{(R + 2E_0)} - \frac{(16\lambda_1^2 + \frac{1}{J_0})}{8\lambda_1} \right] \right\} + T_0$$

$$\sqrt{X} = \sqrt{\frac{E_0}{J_0} R + (4\lambda_1^2 + \frac{1}{2J_0}) R^2}$$

$$E_0 = E_s / A u_0^2$$

# 激波传播模型SPM

激波传播模型(Shock Propagation Model, SPM)将 ISPM(Smith & Dryer 1990; 1995)模型中关于激波能量的估计方法与魏的理论解结合:

$$E_s = C V_{si}^3 \omega (\tau + D)$$

$V_{si}$ : 激波初始速度

C和D为常数

$\omega$ 为激波角宽度(由于很难观测也取常数)

$\tau$ 为扰动持续时间 (由伴随耀斑的软X射线流量变化得到)

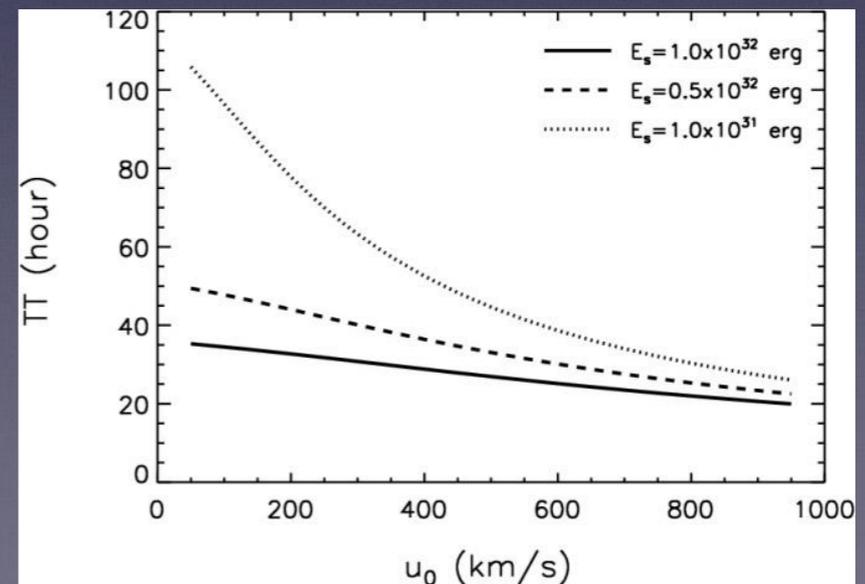
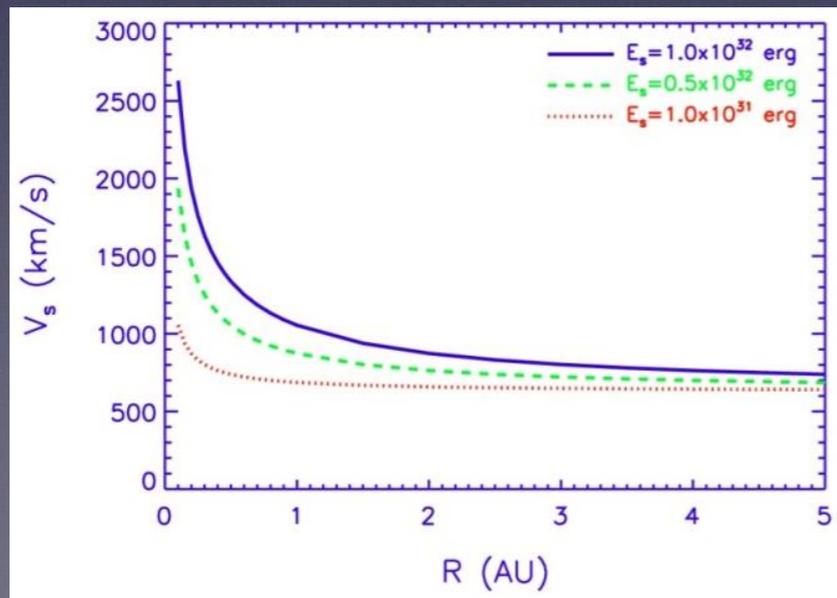
# 激波传播模型SPM

## ★ 输入

- ▶ 激波初始速度  $V_{si}$  —— I型暴频漂移估算
- ▶ 背景太阳风速度  $u_0$  —— 开始时刻1AU局地观测
- ▶ 扰动持续时间  $\tau$  —— 伴随耀斑软X射线流量变化得到

## ★ 输出:

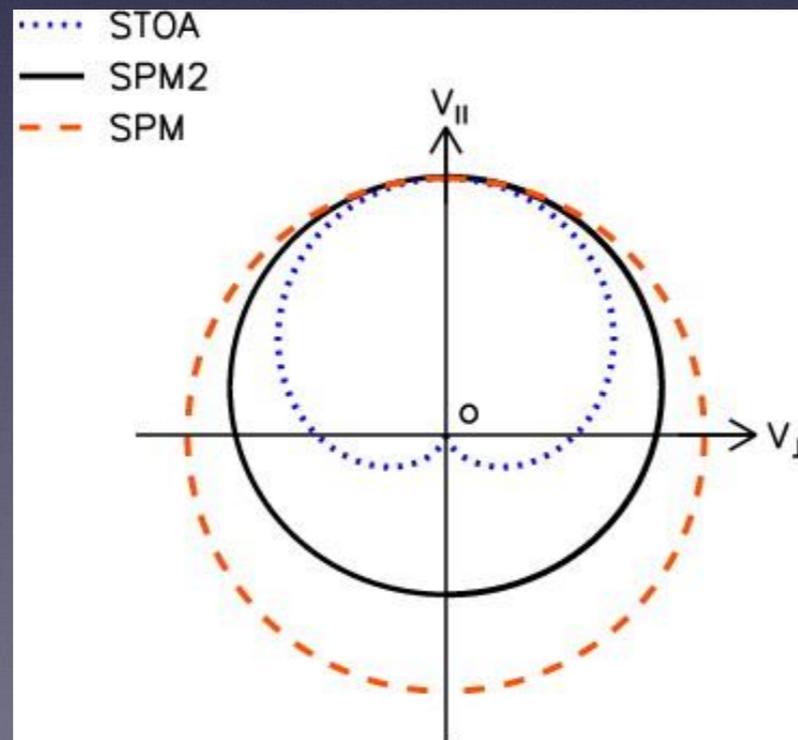
- ▶ 激波传播至任意距离R所需时间T(R)及传播速度 $V_s(R)$



# 激波传播模型SPM升级版SPM2

## ★ 改进方面

- ▶ 考虑了传播方向对激波到达时间的影响
- ▶ 引入激波强度等效指数对激波能否到达进行判断
- ▶ 修正了利用II型暴频率漂移估算的激波初始速度
- ▶ 修正了背景太阳风速度对激波传播所产生的“对流作用”



**传播方向对激波位形  
及到达时间的影响**

# 激波传播模型SPM升级版SPM2

## ★ 输入

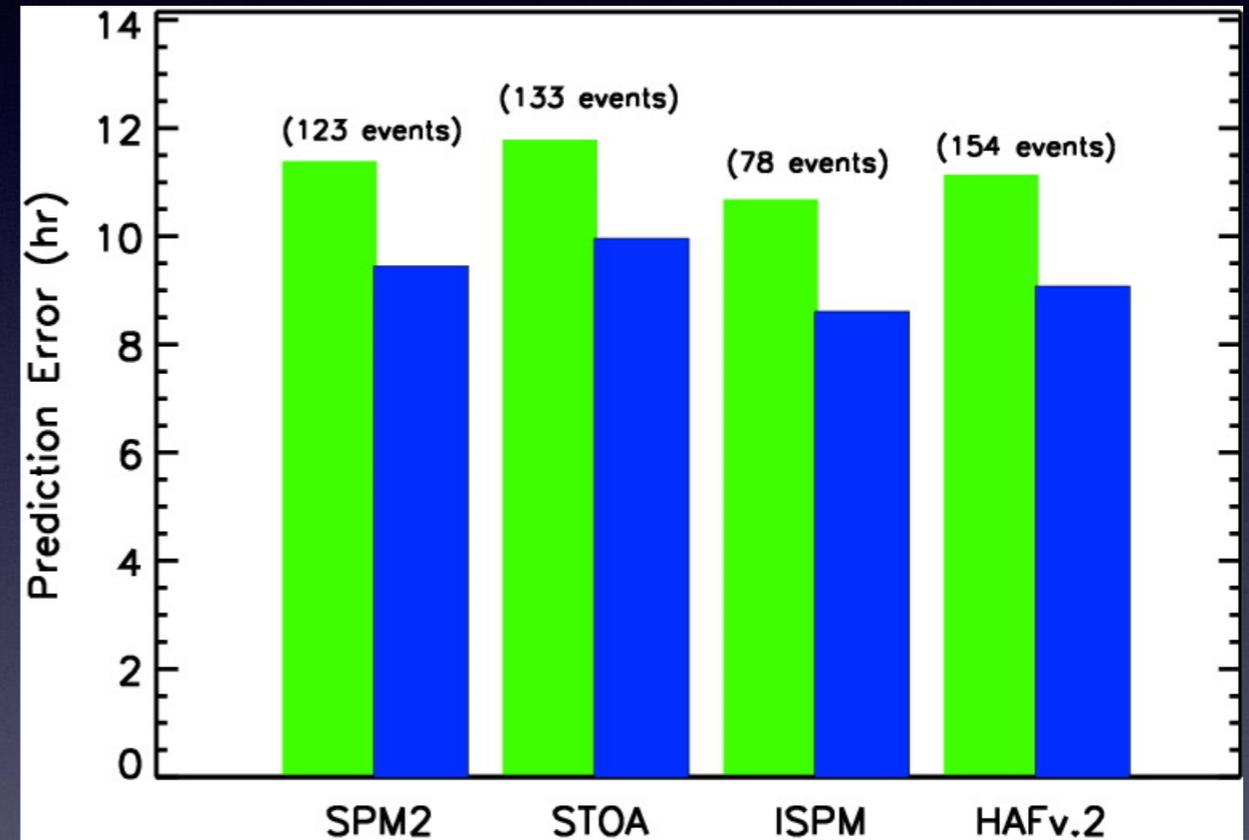
- ▶ 激波初始速度  $V_{si}$  —— II型暴频漂移估算
- ▶ 激波产生的日面位置 —— CME或伴随耀斑位置
- ▶ 背景太阳风速度  $u_0$  —— 开始时刻1AU局地观测
- ▶ 扰动持续时间  $\tau$  —— 伴随耀斑软X射线流量变化得到

## ★ 输出:

- ▶ 激波能否到达某一日心距离  $R$
- ▶ 激波传播至  $R$  所需时间  $T(R)$  及传播速度  $V_s(R)$

# 激波传播模型SPM升级版SPM2：预报效果

Forecast skill score	SPM2	HAFv.2	SPM2	STOA	SPM2	ISPM
Probability of detection, yes (PODy)	0.61	0.76	0.64	0.80	0.64	0.51
Probability of detection, no (PODn)	0.61	0.41	0.62	0.37	0.61	0.63
False alarm ratio (FAR)	0.53	0.57	0.52	0.58	0.52	0.56
BIAS	1.29	1.79	1.31	1.91	1.32	1.16
Critical success index (CSI)	0.36	0.38	0.38	0.38	0.38	0.31
True skill statistic (TSS)	0.22	0.17	0.25	0.17	0.25	0.15
Heidke skill score (HSS)	0.20	0.15	0.24	0.14	0.24	0.14
Gilbert skill score (GSS)	0.11	0.08	0.13	0.08	0.13	0.08
Success Rate (SR)	0.61	0.54	0.62	0.53	0.62	0.59
$\chi^2$	24.0	16.2	27.4	14.1	24.4	8.3
$p_3$	$9.5 \times 10^{-7}$	$5.6 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$7.8 \times 10^{-7}$	0.0039



# 激波传播模型SPM升级版SPM2：预报效果

SPM2模型支持在线运行，即时给出预报结果（无耗时）

空间天气学国家重点实验室  
太阳-行星际-地磁天气团队  
Solar-Interplanetary-GeoMagnetic Weather Group English Version

首页 团队介绍 人员构成 学科地位 在研项目 发表文章 学术活动 预报模式

SPM2 SPM DB Model

**SPM2 Model**

Date-time:

Source Longitude:  ° (≥-180, ≤180)

Source Latitude:  ° (≥-90, ≤90)

Initial Shock Speed:  km/s (≥0)

Background Solar Wind Speed:  km/s (≥0)

Duration Time:  hours (≥0)

网页版权所有：空间天气学国家重点实验室 备案序号：京ICP备05002824号

空间天气学国家重点实验室  
太阳-行星际-地磁天气团队  
Solar-Interplanetary-GeoMagnetic Weather Group English Version

首页 团队介绍 人员构成 学科地位 在研项目 发表文章 学术活动 预报模式

SPM2 SPM DB Model

**SPM2 Model**

Date-time:

Source Longitude:  ° (≥-180, ≤180)

Source Latitude:  ° (≥-90, ≤90)

Initial Shock Speed:  km/s (≥0)

Background Solar Wind Speed:  km/s (≥0)

Duration Time:  hours (≥0)

**The shock will arrive at the Earth at 2012-03-08 10:46:03**

**The transit time predicted is 34.52 hours!**

**Propagation of Shock**

R (AU)	v (km/s)
0.0	2368.5
0.2	1800
0.4	1400
0.6	1150
0.8	1050
1.0	1000

date	R (AU)
06:00 03/07 2012	0.0
12:00 03/07 2012	0.2
18:00 03/07 2012	0.4
00:00 03/08 2012	0.6
06:00 03/08 2012	0.8
10:46:03 03/08 2012	1.0

网页版权所有：空间天气学国家重点实验室 备案序号：京ICP备05002824号

<http://www.spaceweather.ac.cn/groupmodel.php?group=sigma>

# 激波传播模型SPM3

## ★ 改进方面

▶ 考虑CME对预报激波传播的影响

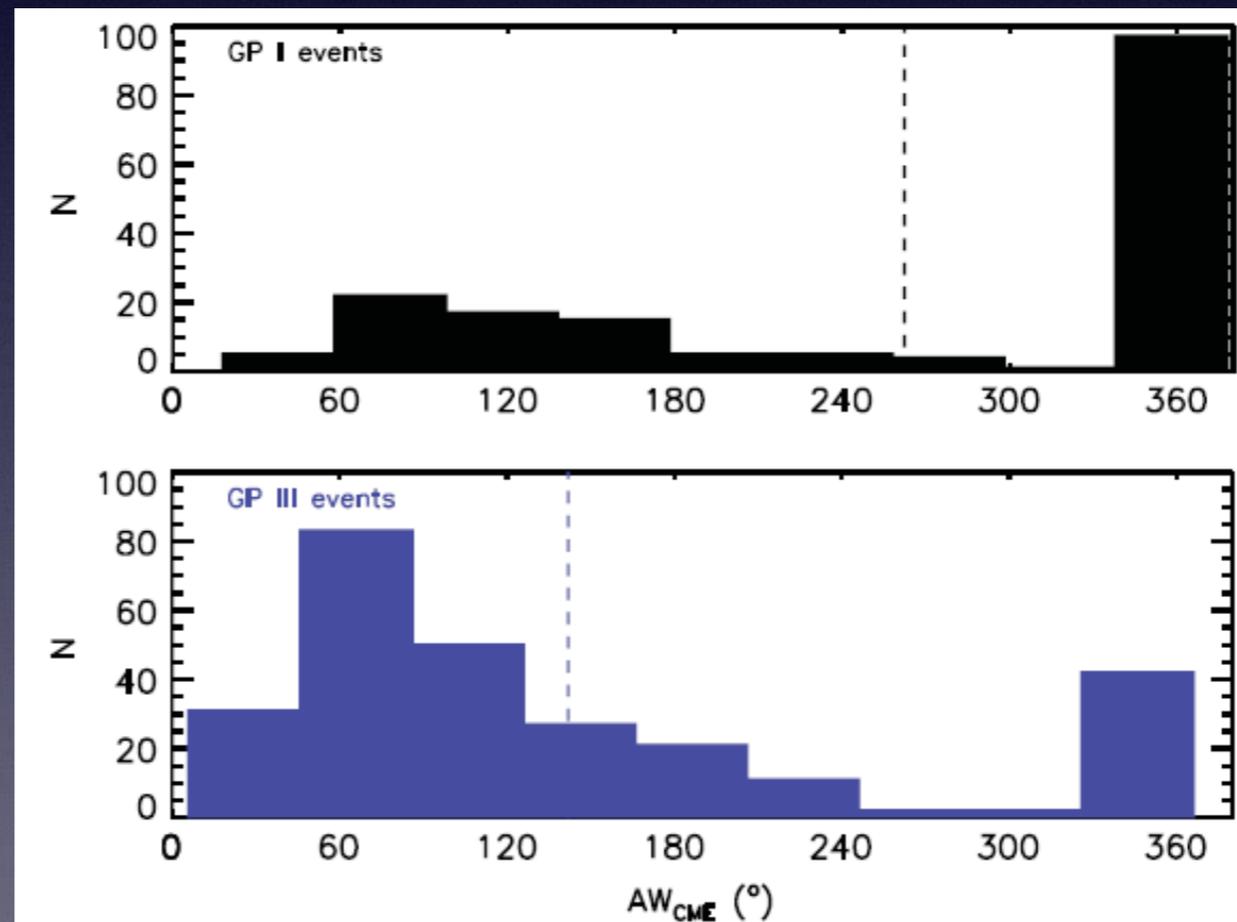


Figure 4. Number frequency distribution along the CME angular width  $AW_{CME}$  for GP I events (up) and GP III events (bottom). The dashed lines denote the mean values of  $AW_{CME}$  for the two groups.

# 激波传播模型SPM3

## ★ 输入

- ▶ 激波初始速度  $V_{si}$  —— II型暴频漂移估算
- ▶ 背景太阳风速度  $v_{sw}$  —— 开始时刻1AU局地观测
- ▶ 扰动持续时间  $\tau$  —— 伴随耀斑软X射线流量变化得到
- ▶ 源区位置 — 耀斑源区位置
- ▶ CME速度  $V_{CME}$  — SOHO/LASCO投影观测
- ▶ CME假乱度  $AW_{CME}$  — SOHO/LASCO投影观测

## ★ 输出:

- ▶ 激波能否到达某一日心距离  $R$
- ▶ 激波传播至  $R$  所需时间  $T(R)$  及传播速度  $V_s(R)$

# 激波传播模型SPM3:预报结果

**Table 3**

Statistical Comparison of the Values of Several Standard Meteorological Forecast Skill Scores Derived by SPM3, SPM2 With Those Derived by HAFv.2 Based on 498 Events, With Those of STOA Based on 418 Events, and With Those of ISPM Based on 375 Events

Skill scores	Ideal value	SPM3	SPM2	HAFv.2	SPM3	SPM2	STOA	SPM3	SPM2	ISPM
PODy	1	0.67	0.62	0.76	0.66	0.64	0.79	0.63	0.64	0.51
PODn	1	0.72	0.61	0.41	0.75	0.62	0.36	0.74	0.61	0.63
FAR	0	0.43	0.53	0.57	0.41	0.51	0.59	0.42	0.51	0.56
BIAS	1	1.17	1.30	1.79	1.11	1.32	1.91	1.08	1.31	1.15
CSI	1	0.45	0.37	0.38	0.45	0.38	0.37	0.43	0.38	0.31
TSS	1	0.39	0.22	0.18	0.40	0.26	0.15	0.37	0.26	0.14
HSS	1	0.37	0.21	0.15	0.39	0.24	0.13	0.36	0.24	0.14
GSS	1	0.23	0.12	0.08	0.24	0.14	0.07	0.22	0.14	0.07
SR	1	0.70	0.61	0.54	0.71	0.63	0.52	0.70	0.62	0.59
$\chi^2$	N	70.2	23.0	15.6	64.6	26.2	10.4	49.1	22.8	7.1
<i>p</i> -Value	0	0	$1.6 \times 10^{-6}$	$7.7 \times 10^{-5}$	$8.9 \times 10^{-16}$	$3.1 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-12}$	$1.8 \times 10^{-6}$	$7.7 \times 10^{-3}$

**Table 4**

Comparison of Prediction Errors of the Shock's Transit Time Derived by SPM3, SPM2 with those by HAFv.2, STOA, and ISPM Based on the Same Data Events

Model	Hit Number	MA <sup>a</sup> Error (hr)	rms <sup>b</sup> Error (hr)
SPM3	122	9.01	10.91
SPM2	112	9.58	11.60
HAFv.2	139	9.26	11.34
SPM3	99	8.94	10.76
SPM2	97	9.64	11.59
STOA	119	10.04	11.77
SPM3	86	8.87	10.64
SPM2	88	9.49	11.56
ISPM	70	8.88	10.97

# 激波传播模型DGSPM

## ★ SPM3存在的问题

- ▶ 没有显著提升
- ▶ 爆炸波理论不适用与初始加速阶段

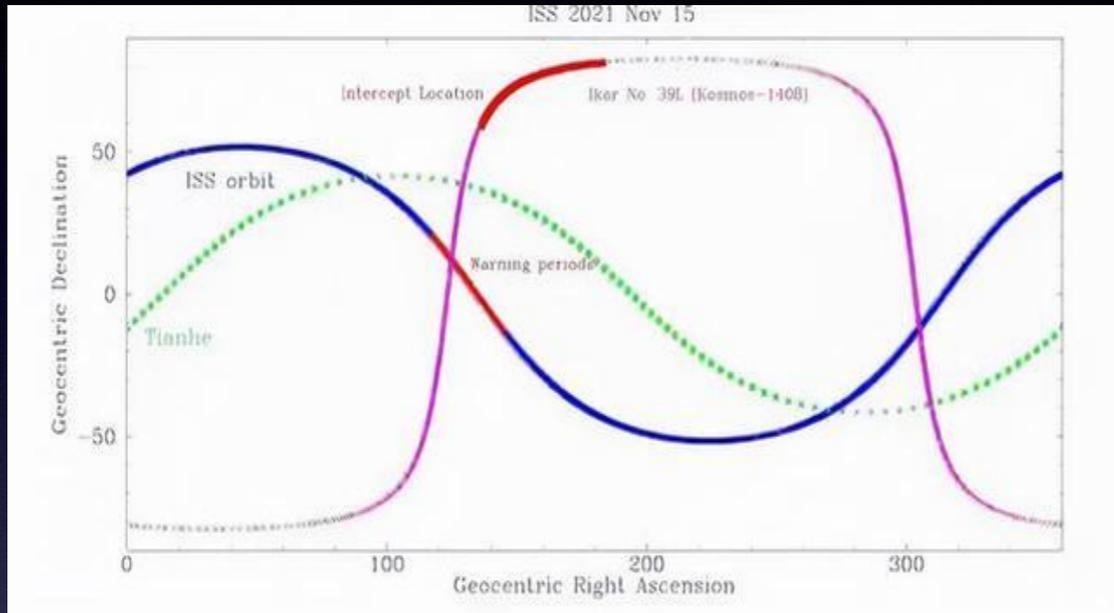
## ★ 修正方案

- ▶ 初始阶段：利用STEREO数据获取CME参数
- ▶ 加速后阶段：爆炸波理论

# 激波传播模型DGSPM

Model version	SPM	SPM2	SPM3	DGSPM
input	flare, Type II, SW	flare, Type II, SW	flare, Type II, SW, CME(SOHO)	CME <u>acce.</u> kinematics (STEREO)
output	when	whether & when	whether & when	whether & when
Success rate	—	61% ~ 62%	70% ~ 71%	100% (?)
$\sum  \Delta TT $	14.3 hr	9.5 hr	9.0 hr	7.3 hr
Reference	<u>Feng &amp; Zhao (2006)</u>	Zhao & <u>Feng (2014)</u>	Zhao & <u>Feng (2015)</u>	Zhao et al (2016)

# 俄罗斯摧毁卫星带量大量空间碎片



红色：被摧毁的卫星  
蓝色：国际空间站  
绿色：我国的天宫空间站

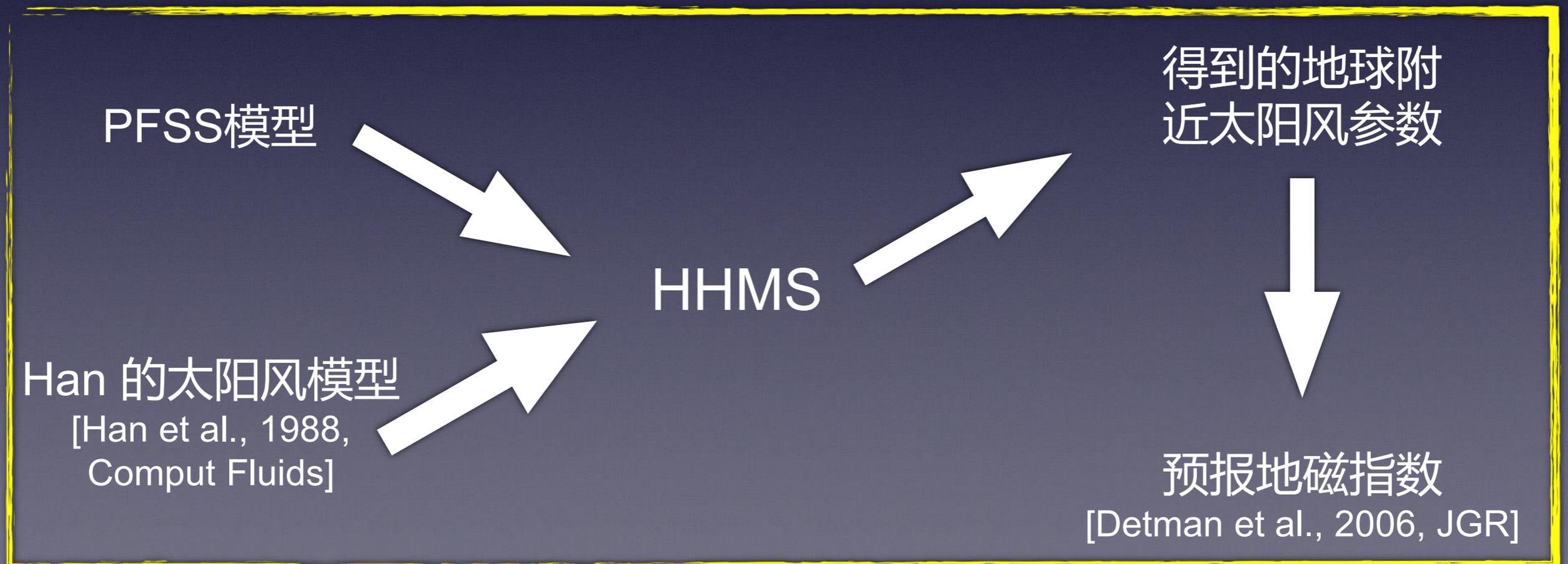
1月中旬，处在国际空间站上的宇航员们收到一个意外的指令，国际空间站遭受了严重的碰撞，宇航员们需要立即进入停靠在空间站上的航天器中来寻求庇护。而遭受此次严重碰撞的原因，就是空间站穿过一片新形成的轨道“碎片云”。



# MHD预报模型

## 混合日球层模型系统(HHMS)

HHMS(Hybrid Heliospheric Modeling System, HHMS): 由美国国家海洋大气局NOAA下设的空间环境中心(Space Environment Center, SEC)等六家单位合作开发的

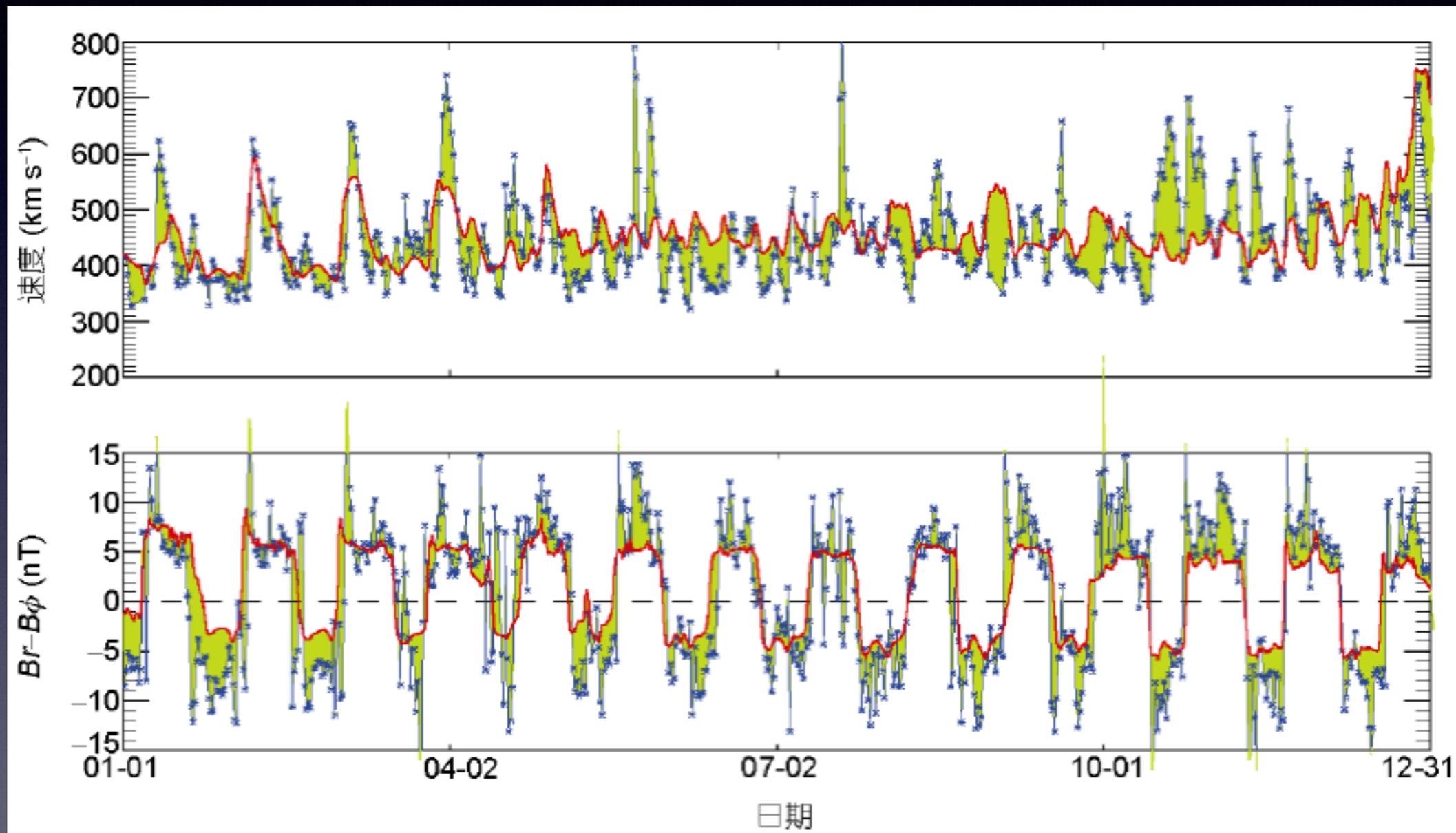


# 混合日球层模型系统(HHMS)



- ▶ **优点:** 能够模拟出太阳风高速流, 对大部分时间, 能够正确给出IMF 的极性
- ▶ **缺点:** 对诸如高速流的起止时间、速度大小等细节的模拟却不够好

# 混合日球层模型系统(HHMS)

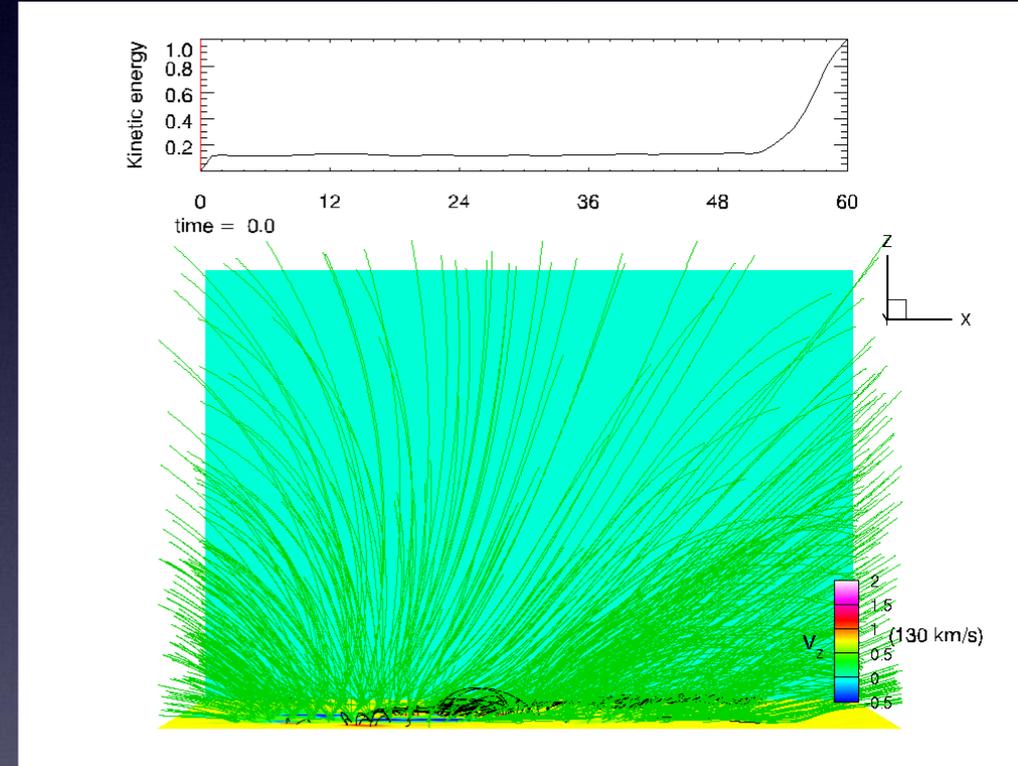
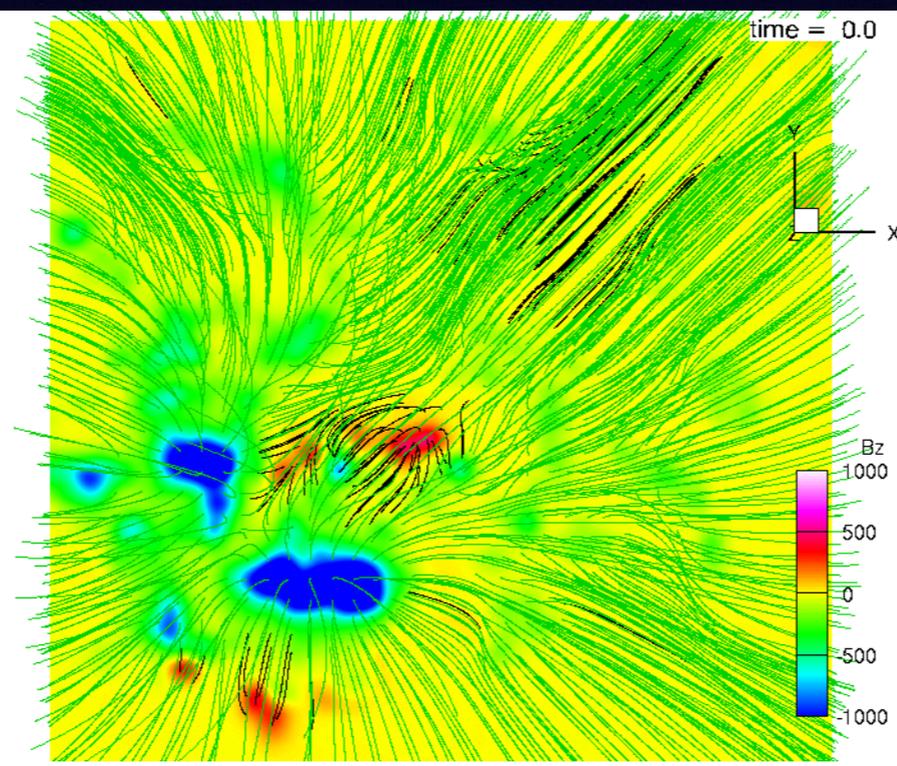
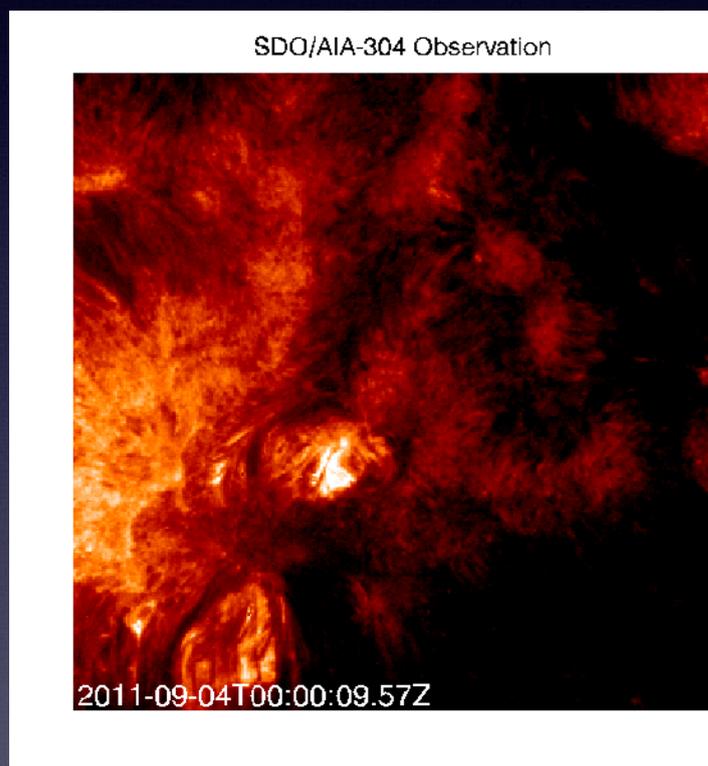


模型HHMS 模拟结果和观测的对比图[Detman et al., 2006, JGR]

# 基于观测数据驱动模型

太阳活动区形成→发展→触发→爆发的完整过程模拟再现

(Jiang et al. 2016a, Nature Communications)



卫星观测 (正面)

模拟磁场 (正面)

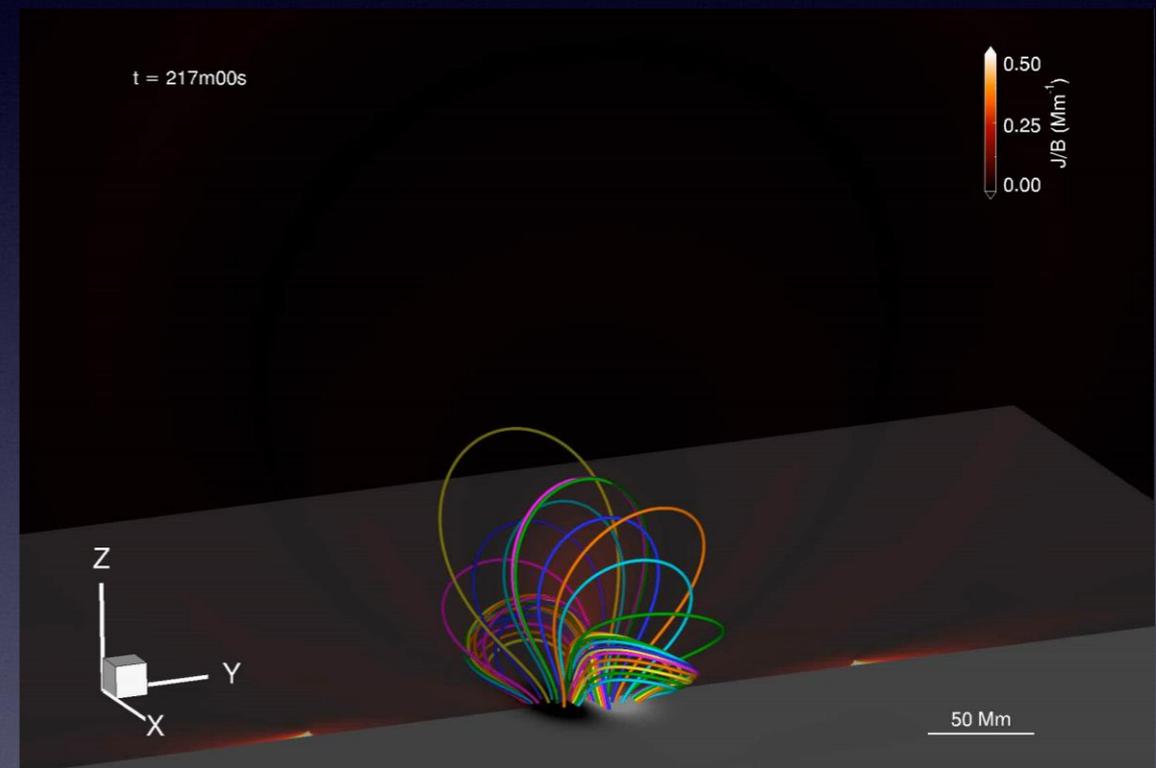
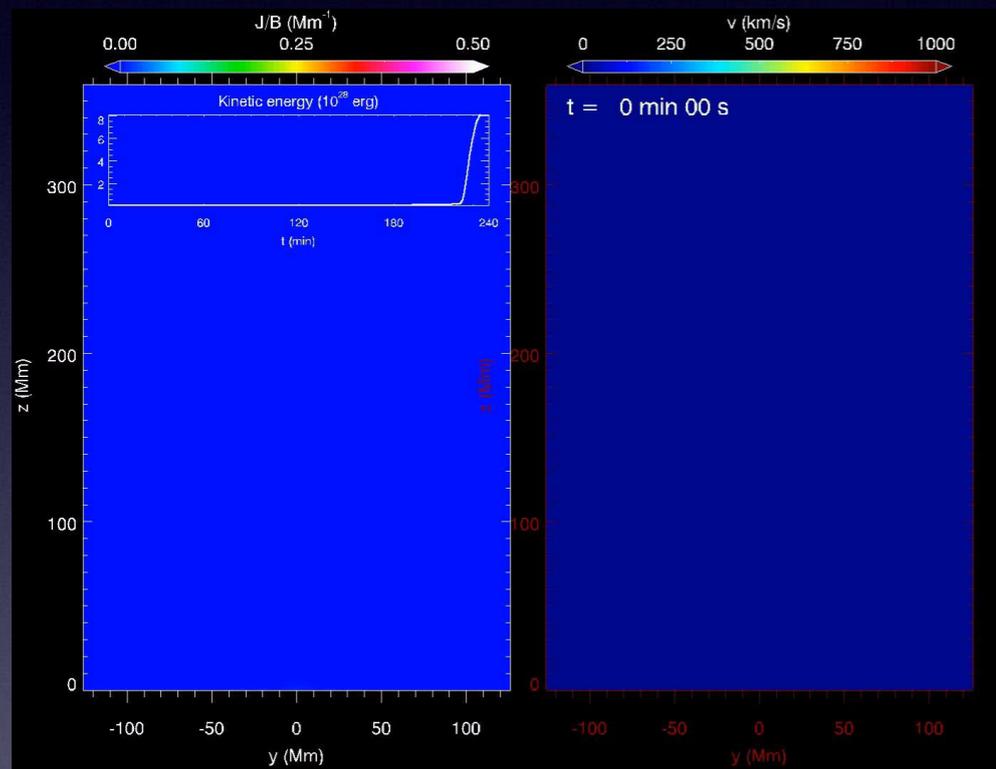
模拟磁场+速度分布 (侧面)

- ▶ 长达三天的连续观测磁图数据驱动过程最终导致爆发。
- ▶ 模拟结果在空间结构和时间演化都与观测吻合!
- ▶ 模拟中爆发的时间与实际观测的耀斑时间非常接近!

# 基于观测数据驱动模型

利用超高精度的全三维模拟揭示太阳爆发的基本触发机制

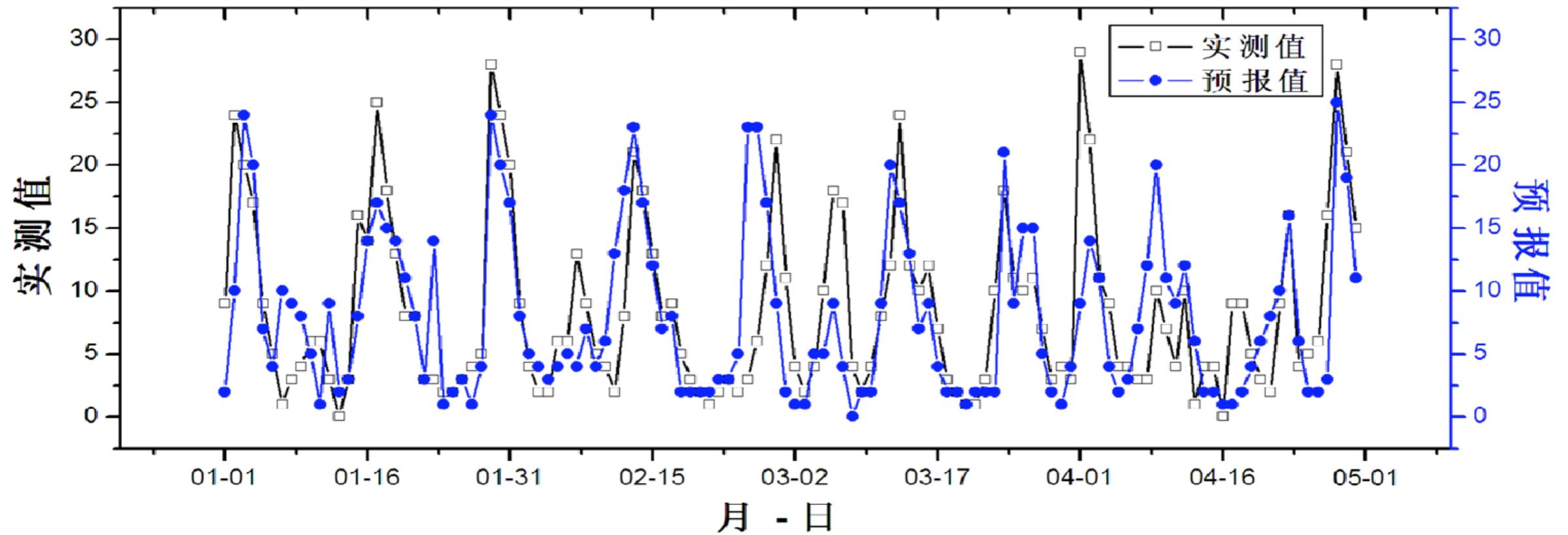
Jiang et al. 2021, Nature Astronomy



- 采用太阳爆发源区最普遍存在的双极磁场位形+光球剪切运动
- 自治地模拟日冕磁能量从缓慢积累到急剧释放而爆发的全部过程
- 剪切磁拱的内部→自发形成电流片→触发磁重联→驱动爆发
- 形成日冕物质抛射和激波，电流片迅速撕裂形成真实的复杂湍动结构

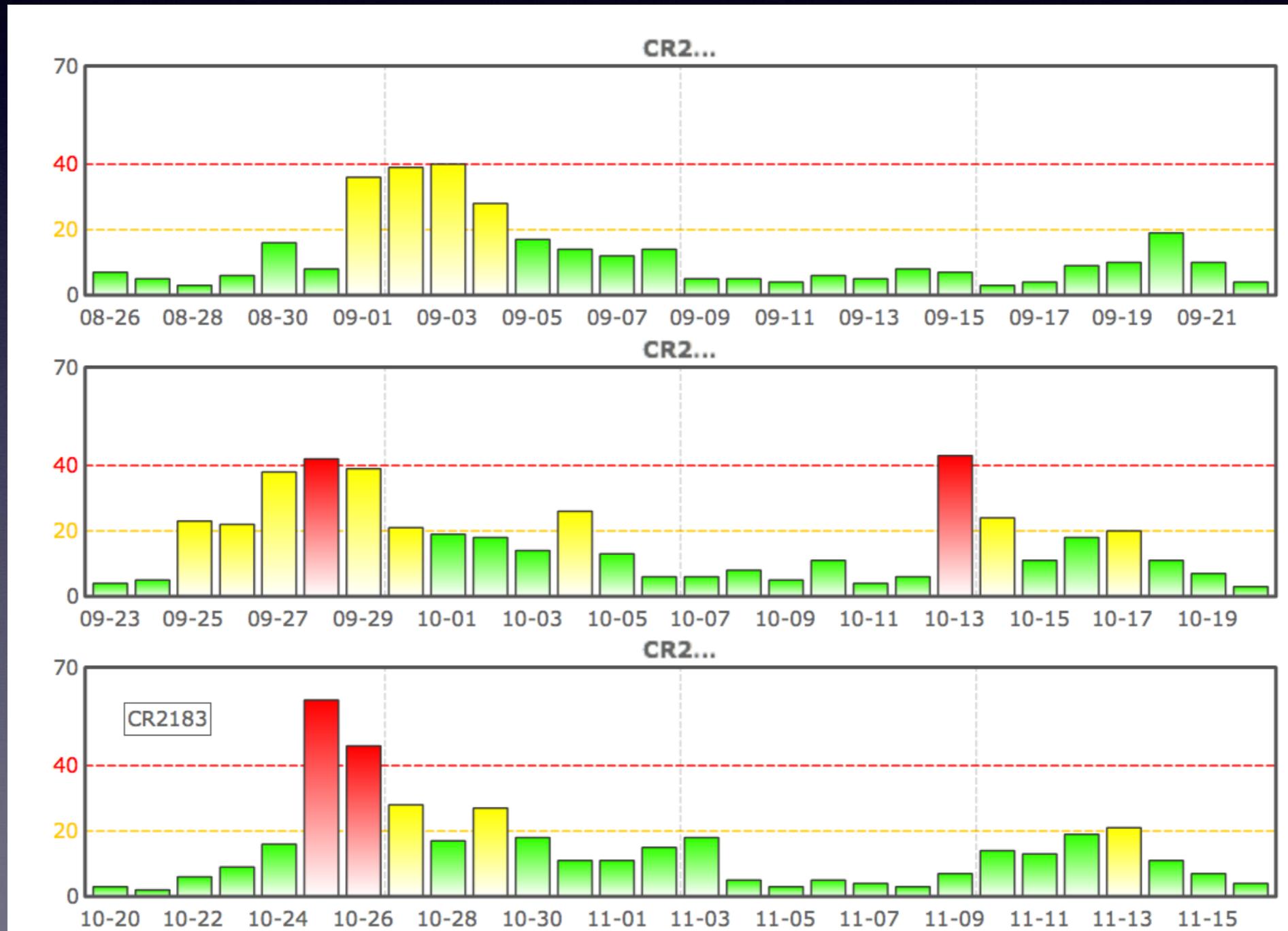
# 地磁暴中期预报

## 预报原理：CIR的重现性

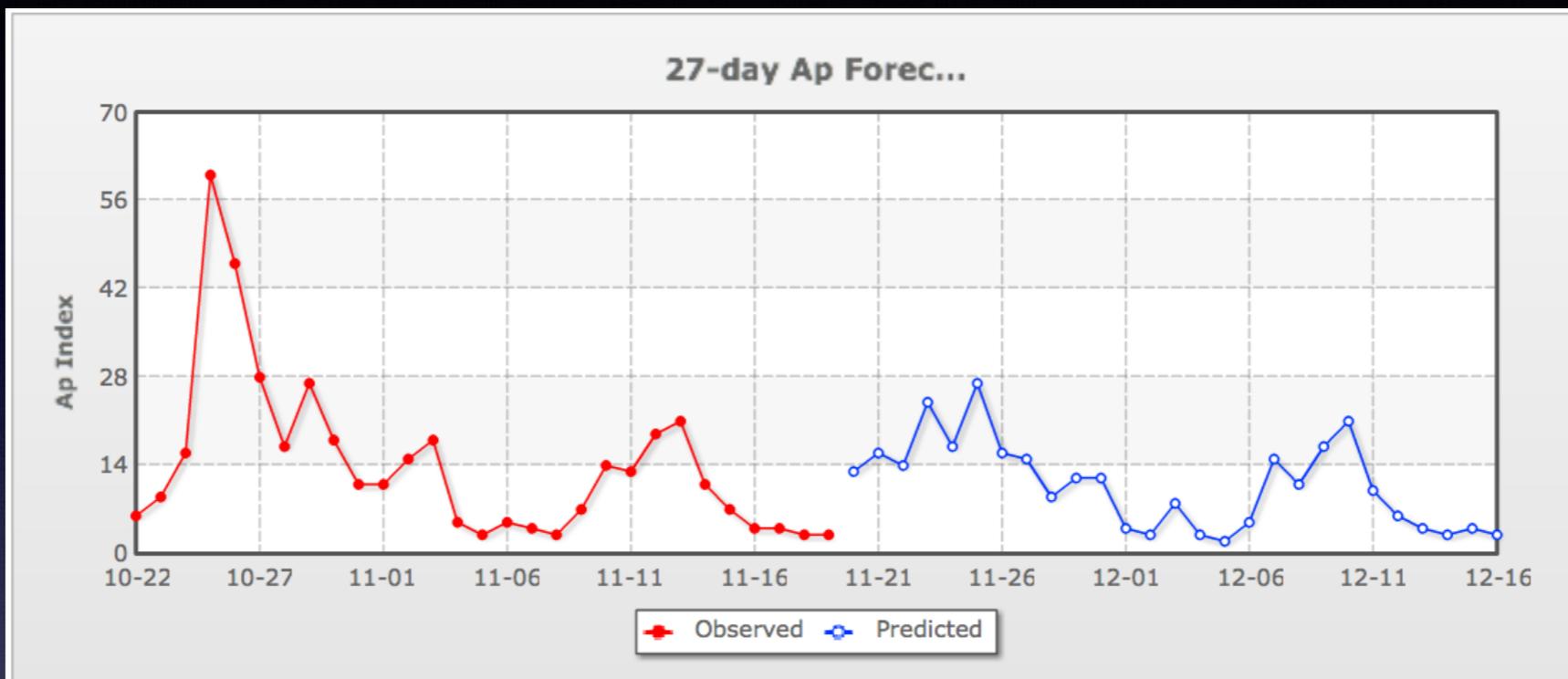


# 地磁暴中期预报

## 预报原理：CIR的重现性



# 地磁暴中期预报



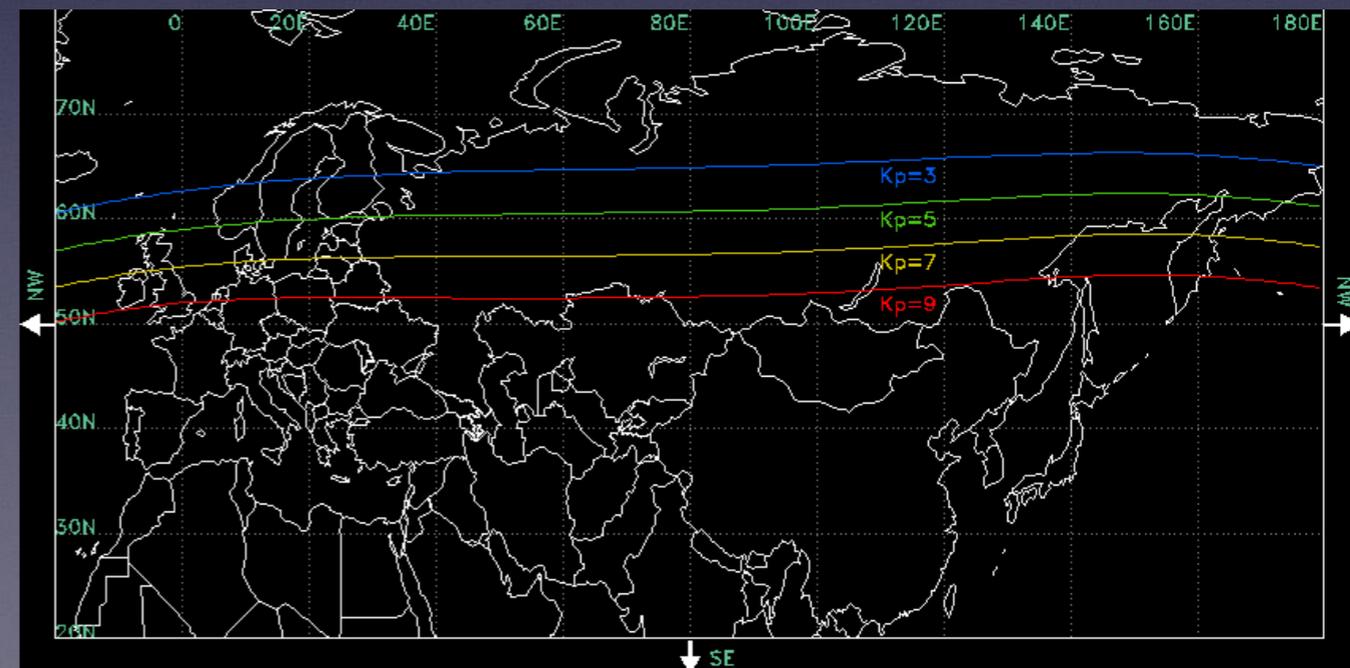
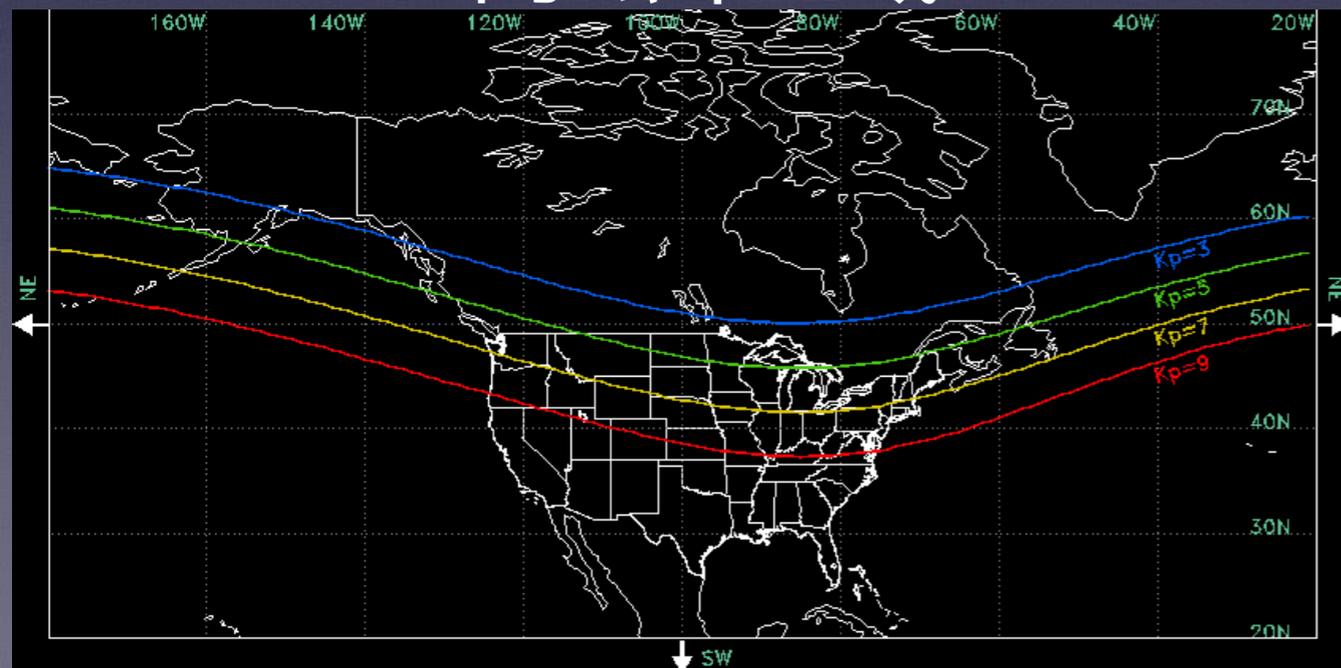
日期	实测值	预测值									
2016-10-23	9		2016-11-06	5		2016-11-20		13	2016-12-04		3
2016-10-24	16		2016-11-07	4		2016-11-21		16	2016-12-05		2
2016-10-25	60		2016-11-08	3		2016-11-22		14	2016-12-06		5
2016-10-26	46		2016-11-09	7		2016-11-23		24	2016-12-07		15
2016-10-27	28		2016-11-10	14		2016-11-24		17	2016-12-08		11
2016-10-28	17		2016-11-11	13		2016-11-25		27	2016-12-09		17
2016-10-29	27		2016-11-12	19		2016-11-26		16	2016-12-10		21
2016-10-30	18		2016-11-13	21		2016-11-27		15	2016-12-11		10
2016-10-31	11		2016-11-14	11		2016-11-28		9	2016-12-12		6
2016-11-01	11		2016-11-15	7		2016-11-29		12	2016-12-13		4
2016-11-02	15		2016-11-16	4		2016-11-30		12	2016-12-14		3
2016-11-03	18		2016-11-17	4		2016-12-01		4	2016-12-15		4
2016-11-04	5		2016-11-18	3		2016-12-02		3	2016-12-16		3
2016-11-05	3		2016-11-19	3		2016-12-03		8			

# 思考题

小强是你的好朋友，准备明年去看极光，请问你会建议他什么时候去，去什么地点，使得小强更可能有一趟舒适的赏极光之旅？

## ★ 区域性

### ▶ 高磁纬区域



# 思考题

小强是你的好朋友，准备明年去看极光，请问你会建议他什么时候去，去什么地点，使得小强更可能有一趟舒适的赏极光之旅？

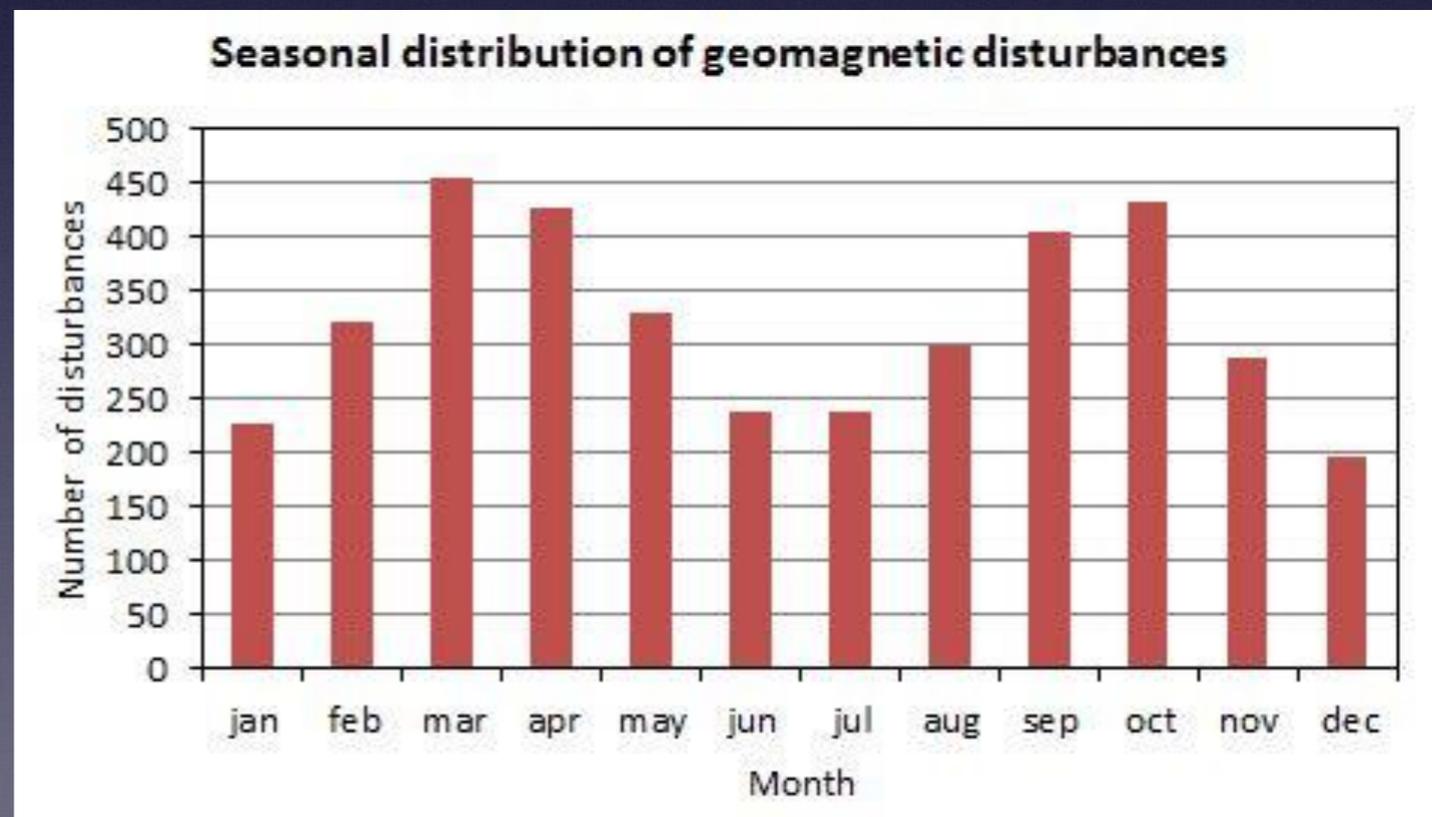
## ★ 区域性

▶ 高磁纬区域

## ★ 季节性

▶ 春分和秋分附近

[Russel-McPherson effect]



# 思考题

小强是你的好朋友，准备明年去看极光，请问你会建议他什么时候去，去什么地点，使得小强更可能有一趟舒适的赏极光之旅？

- ★ 区域性

- ▶ 高磁纬区域

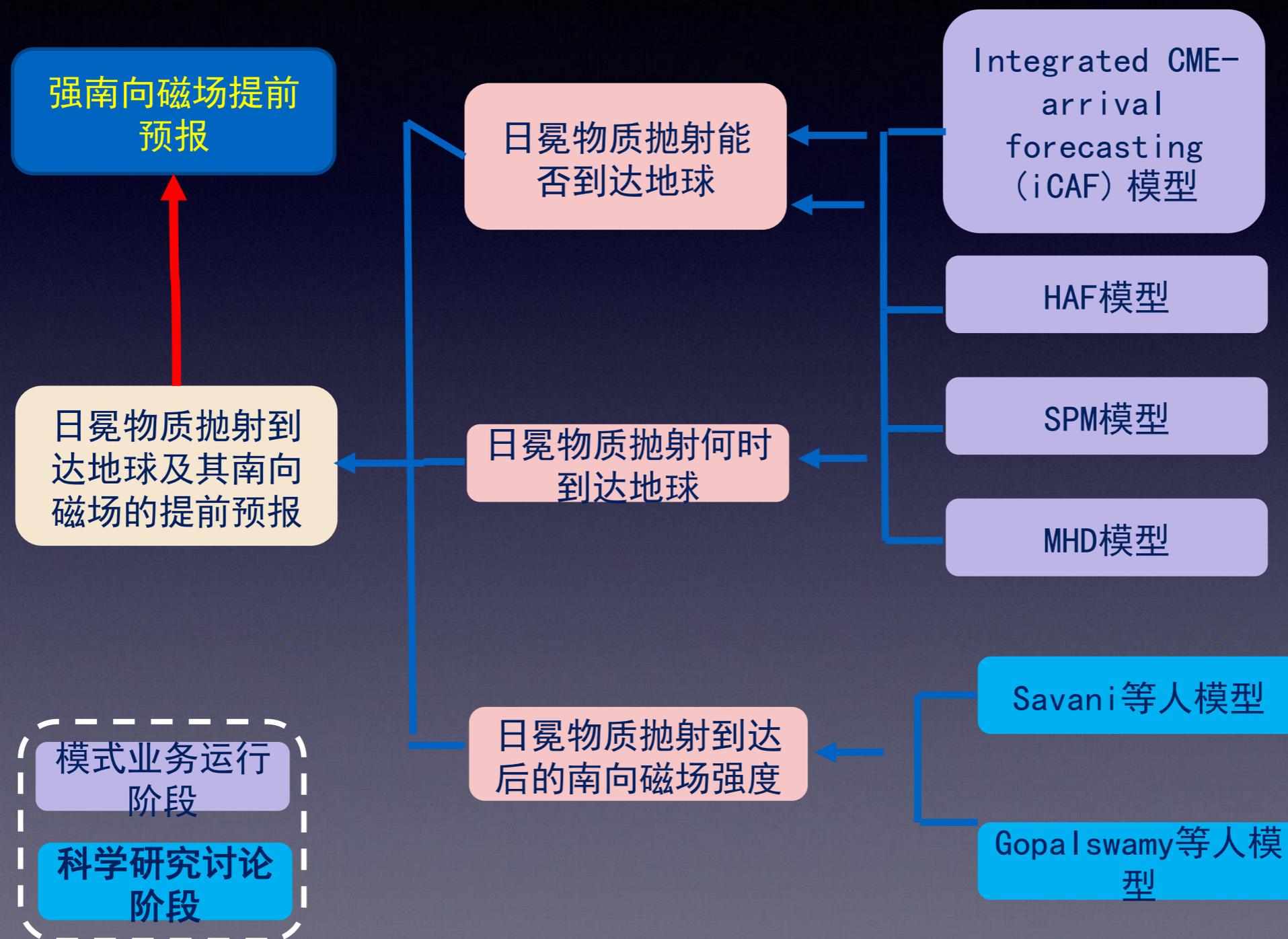
- ★ 季节性

- ▶ 春分和秋分附近[Russel-McPherson effect]

- ★ 周期性

- ▶ 11年周期！ 27天周期！

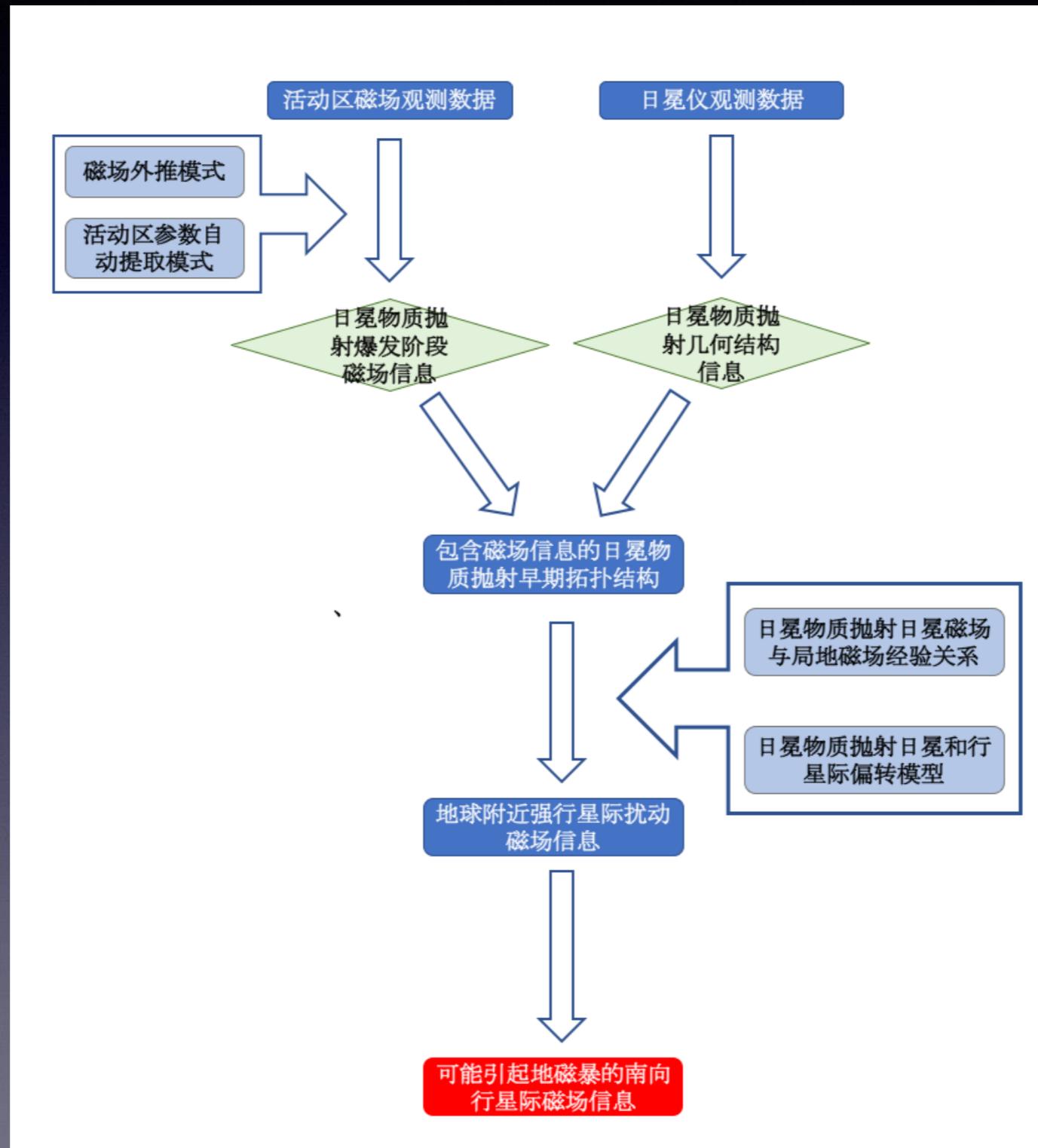
# 强南向磁场提前预报中的几个关键问题和已有模型



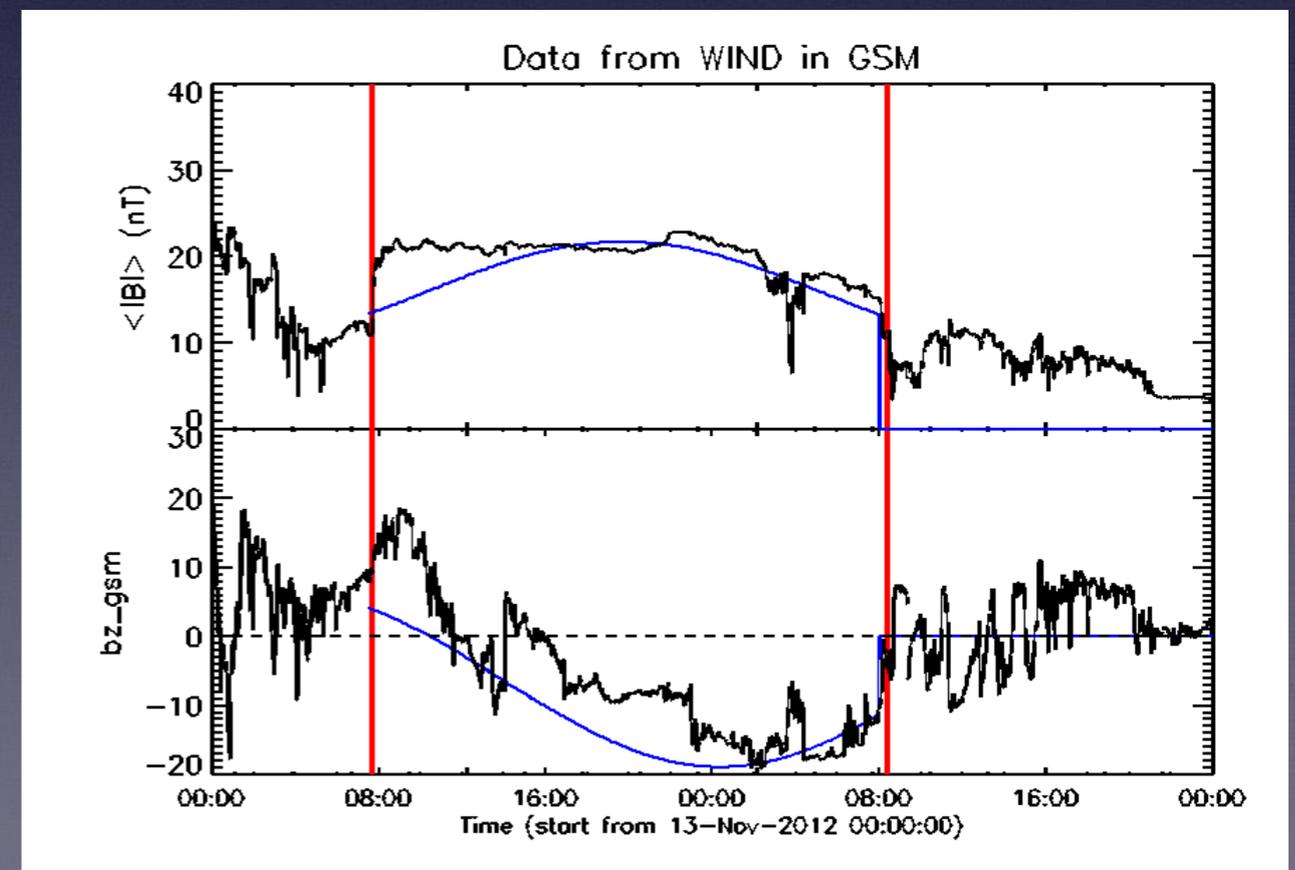
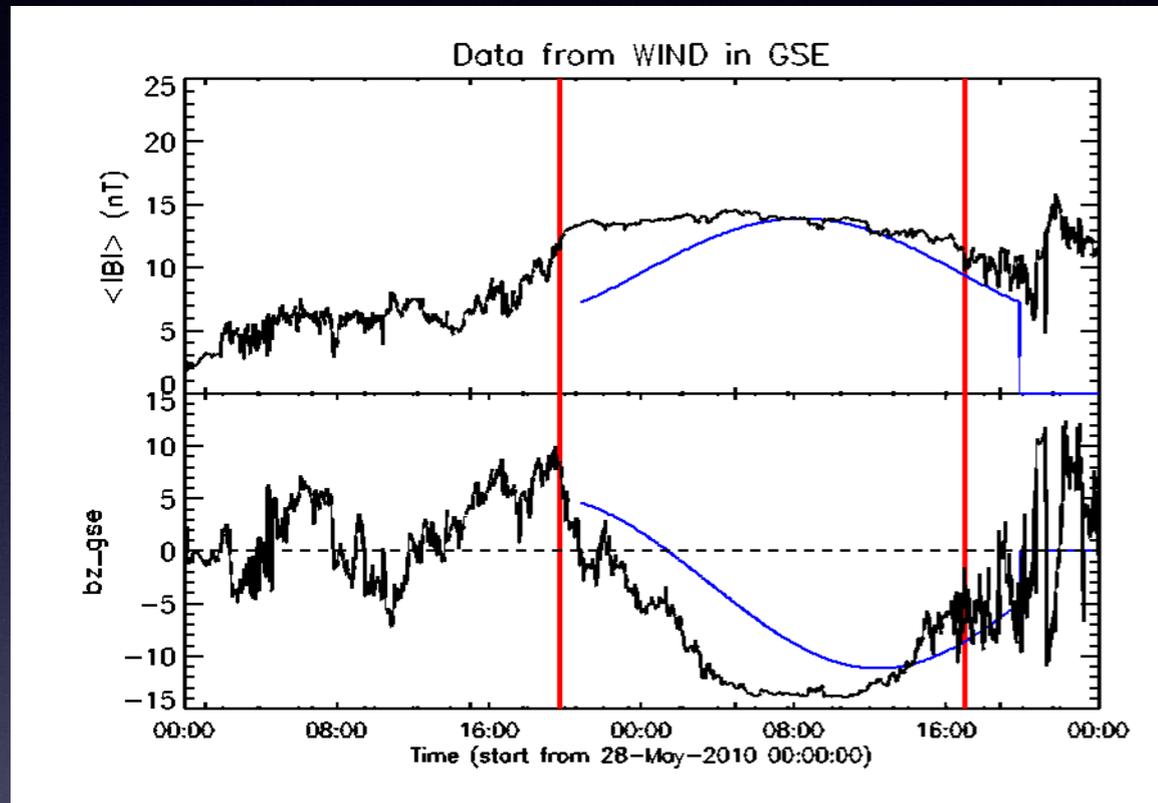
# 南向磁场预报的可能方法



# 南向磁场预报的具体流程

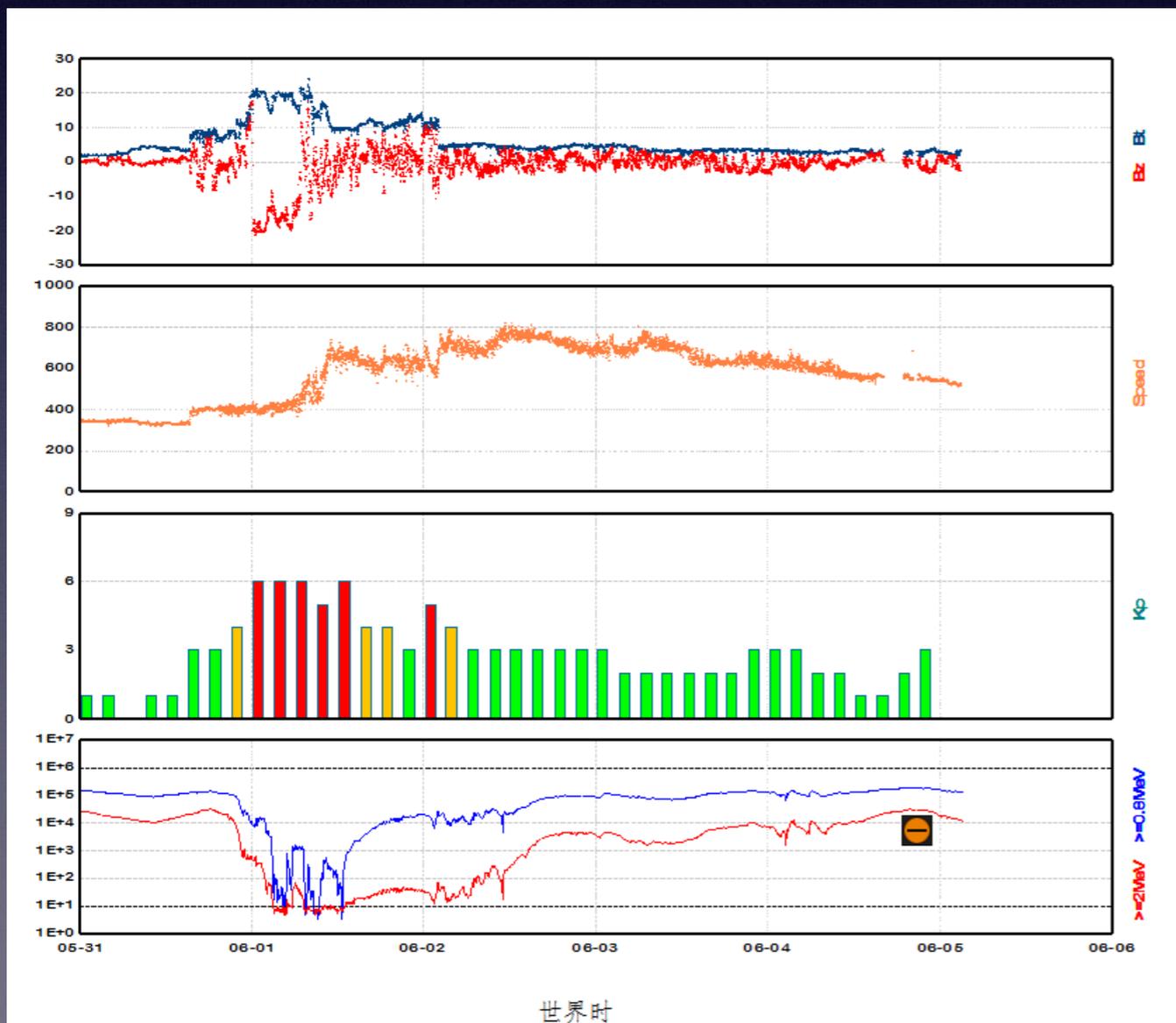


# 南向磁场预报的结果



# 高能电子暴预报

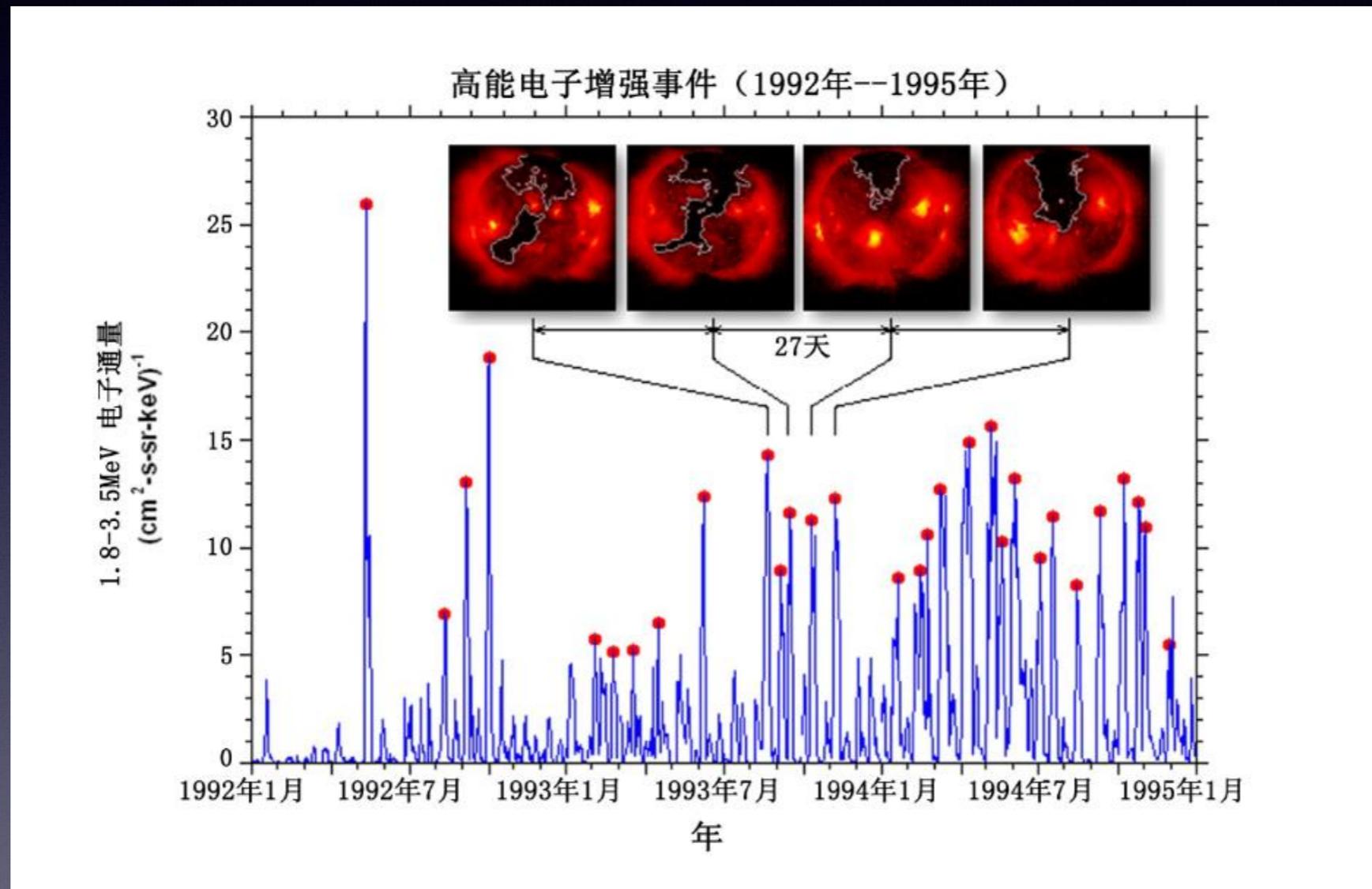
**高能电子暴：**强磁暴发生后，外辐射带电子的强度通常会骤然上升两到三个数量级以上



## ★ 起源

- ▶ 行星际日冕物质抛射
- ▶ 冕洞高速流

# 高能电子暴预报



冕洞高速流引起的高能电子暴有27天周期

# 高能电子暴预报方法

## ★ 物理模式



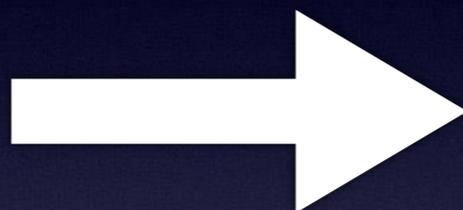
## 克罗拉多大学同步轨道高能电子通量预报径向扩散模式

- ▶ 物理基础：电子径向扩散机制
- ▶ 提前量：1-2天的高能电子日积分通量

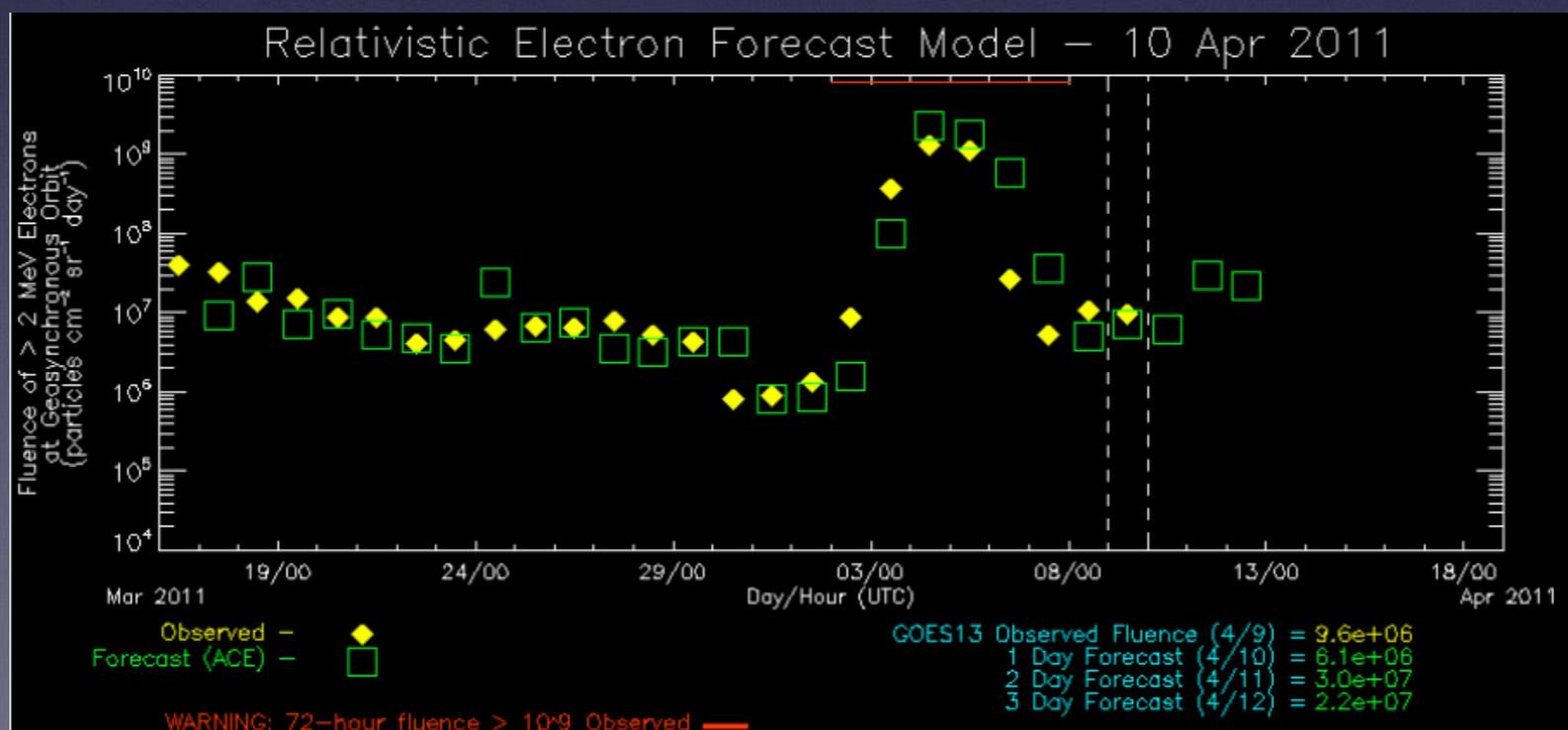
# 高能电子暴预报方法

## ★ 统计模式

太阳风  
速度

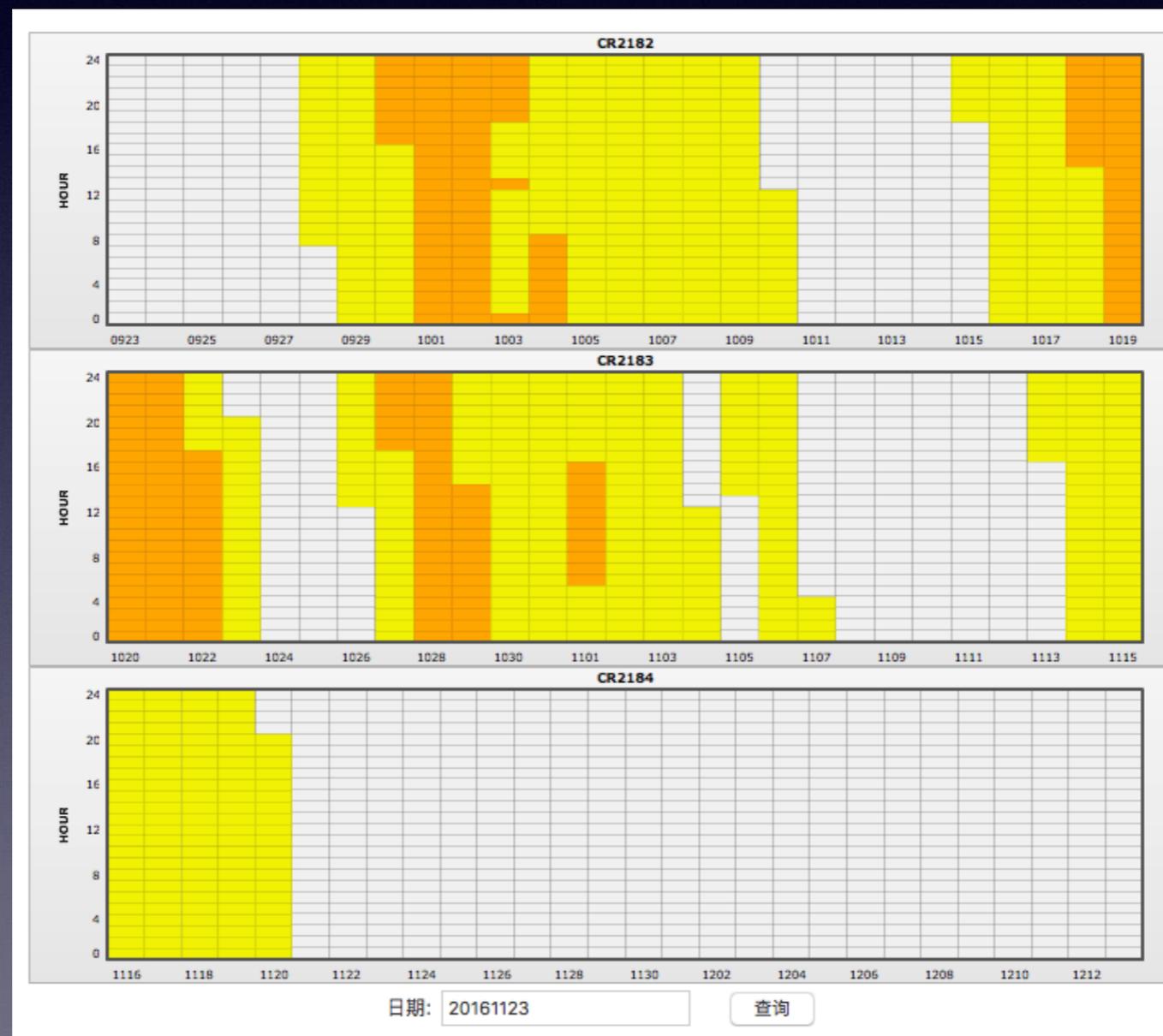


1天-3天高能电子  
积分通量



# 高能电子暴警报

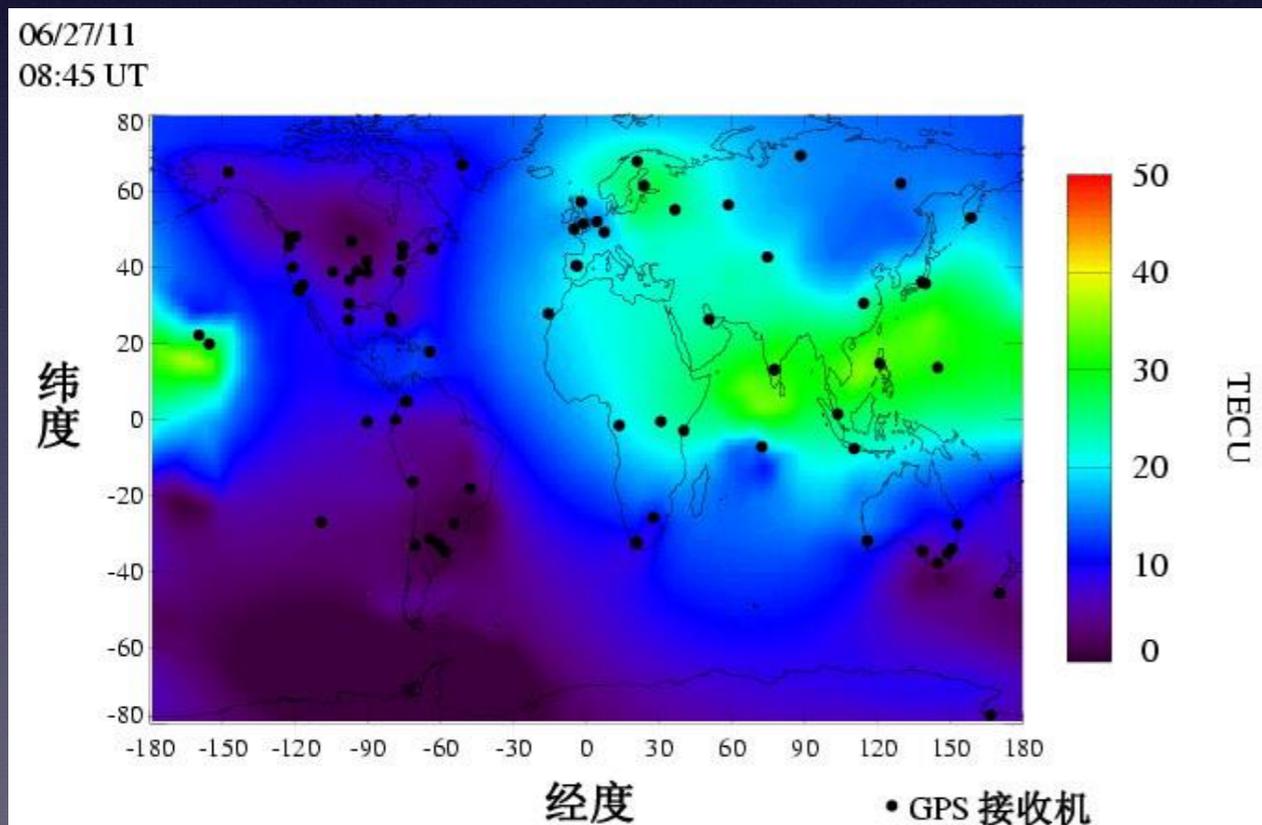
## 基于GOES卫星观测数据提供警报



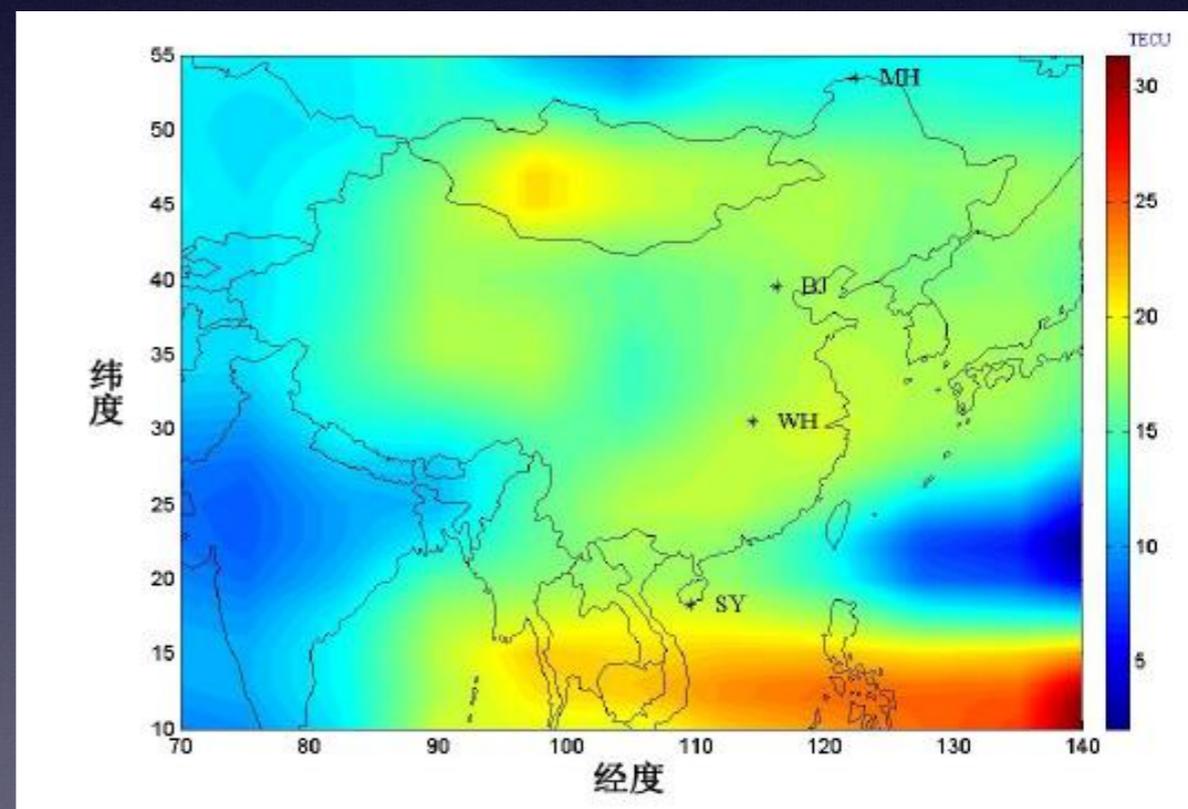
# 电离层扰动预报要求

## 电离层TEC现报和预报

TEC：单位面积电离层高度上的电子密度的总和



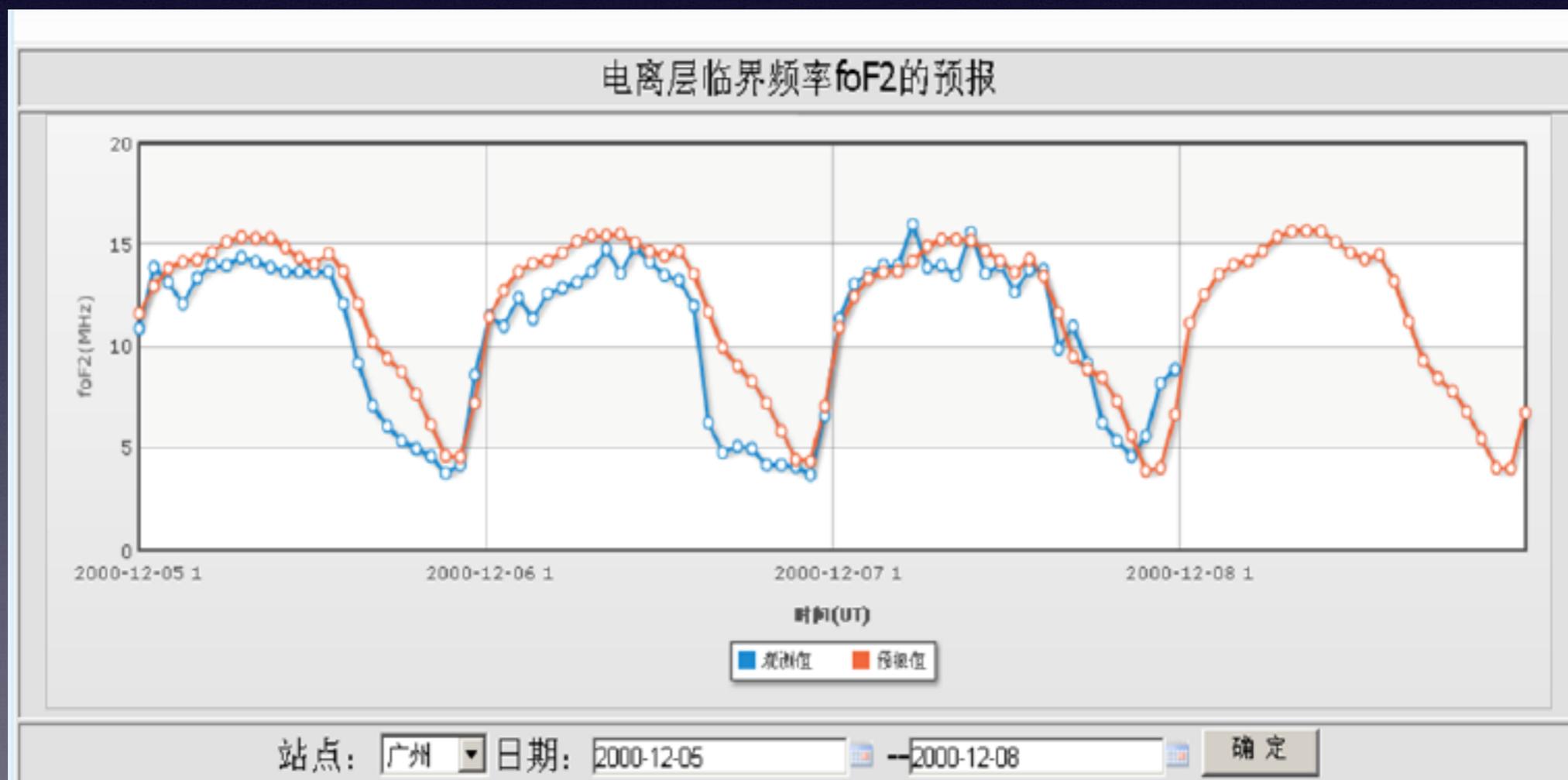
JPL TEC地图



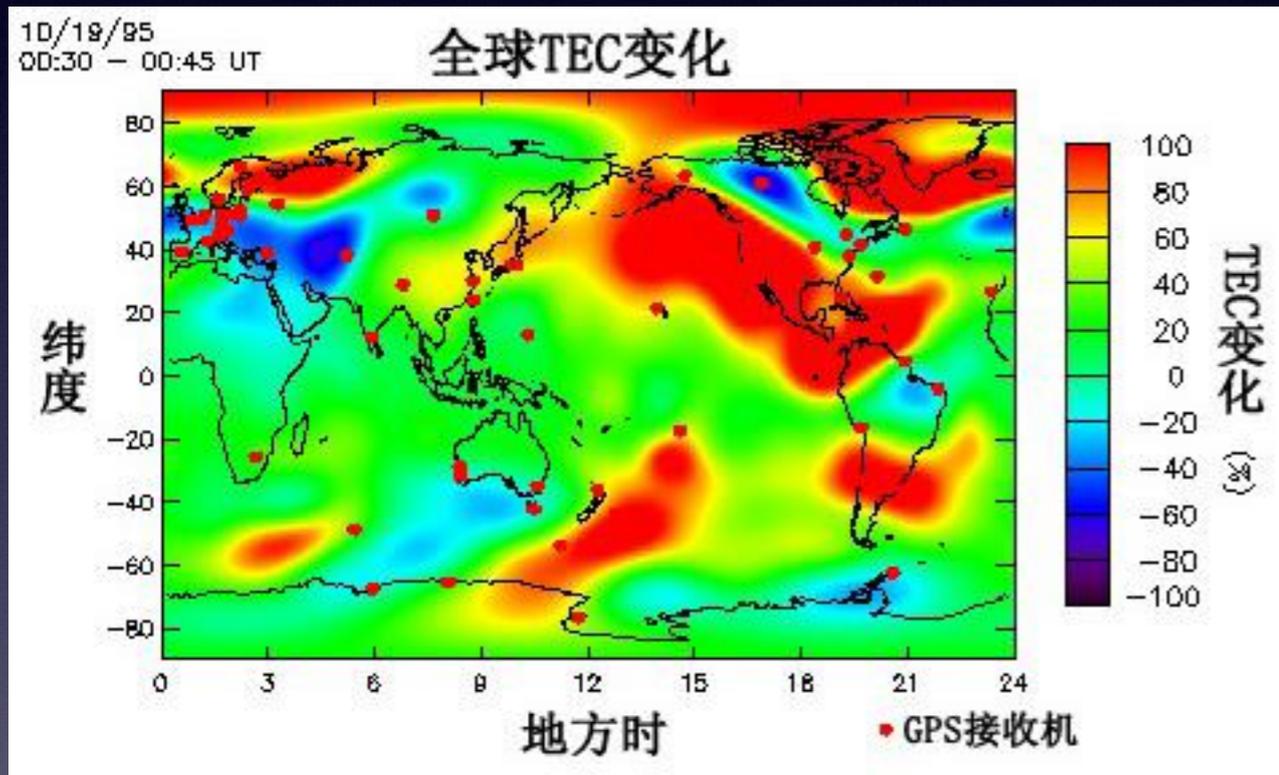
中国区域TEC地图

# 电离层扰动预报要求

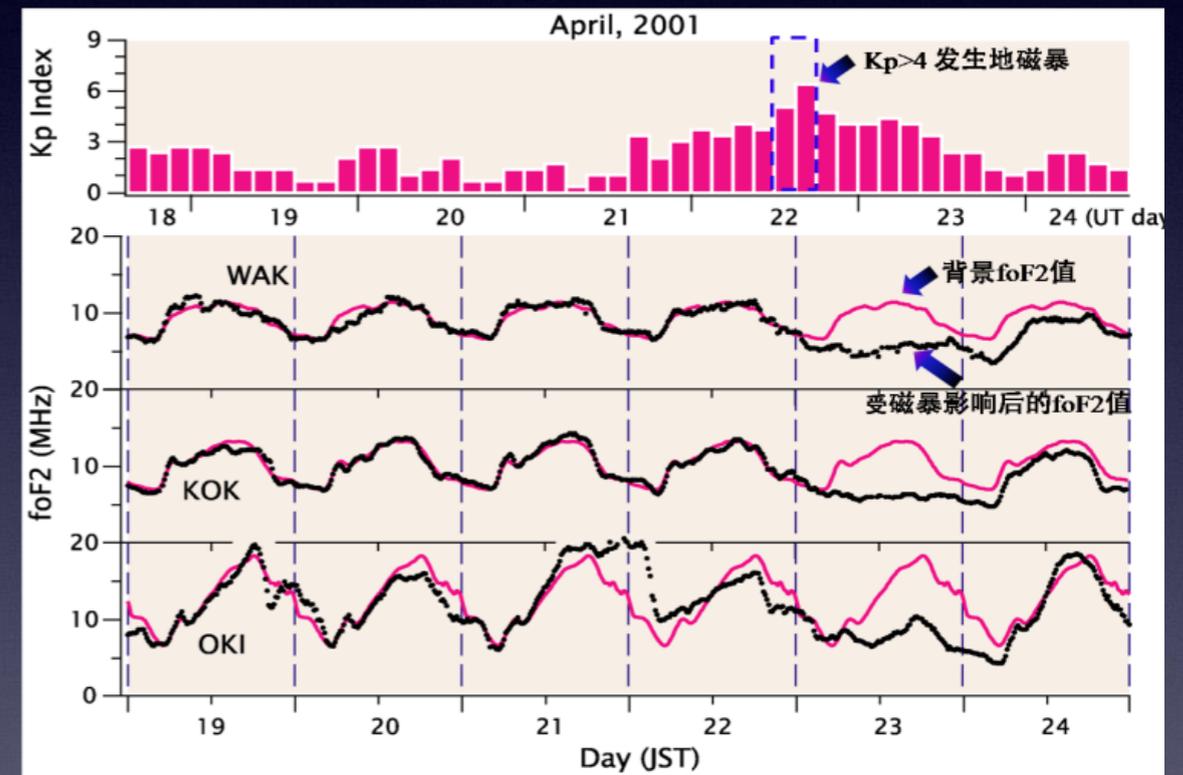
**foF2:** 电离层F2层临界频率，对短波通信用户的可用频率选择具有重要的参考意义



# 电离层暴预报



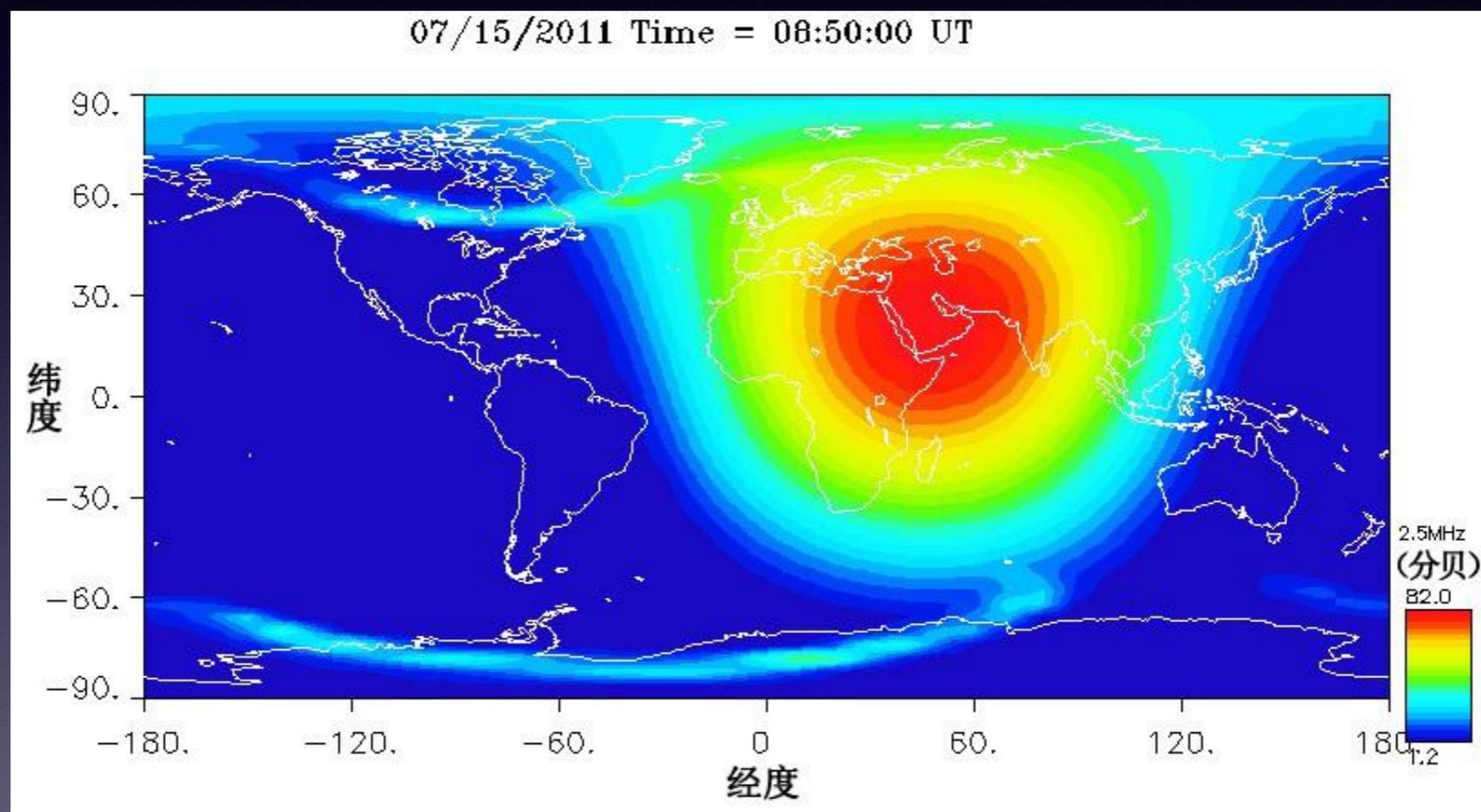
全球TEC变化反映电离层暴



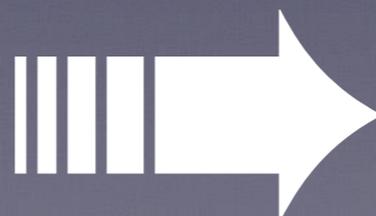
单台站foF2反映电离层暴

# 电离层扰动效应预报

## 电离层突然骚扰预报

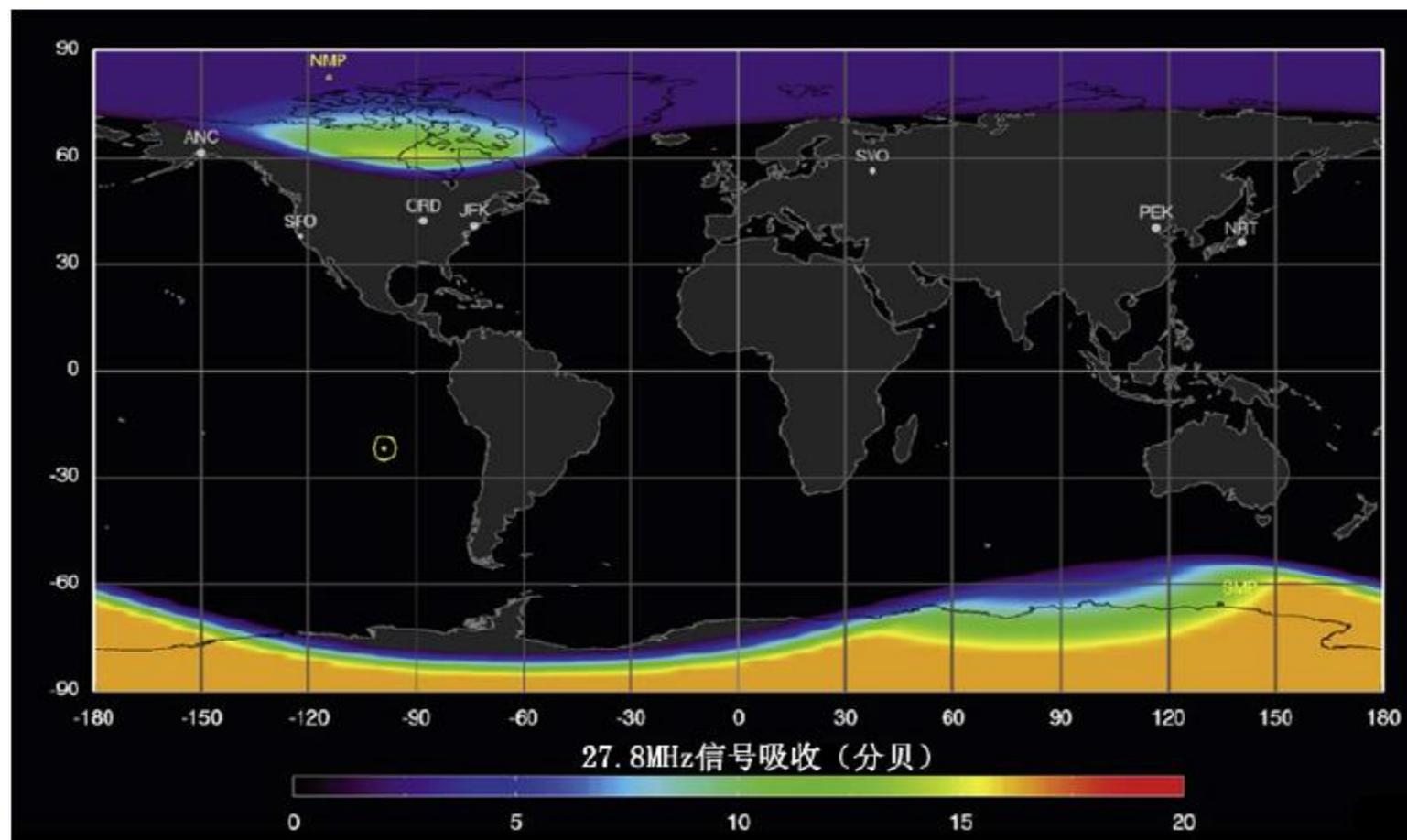


0.1nm - 0.8 nm波  
段X射线耀斑



电波吸  
收预报

# 极盖吸收事件预报



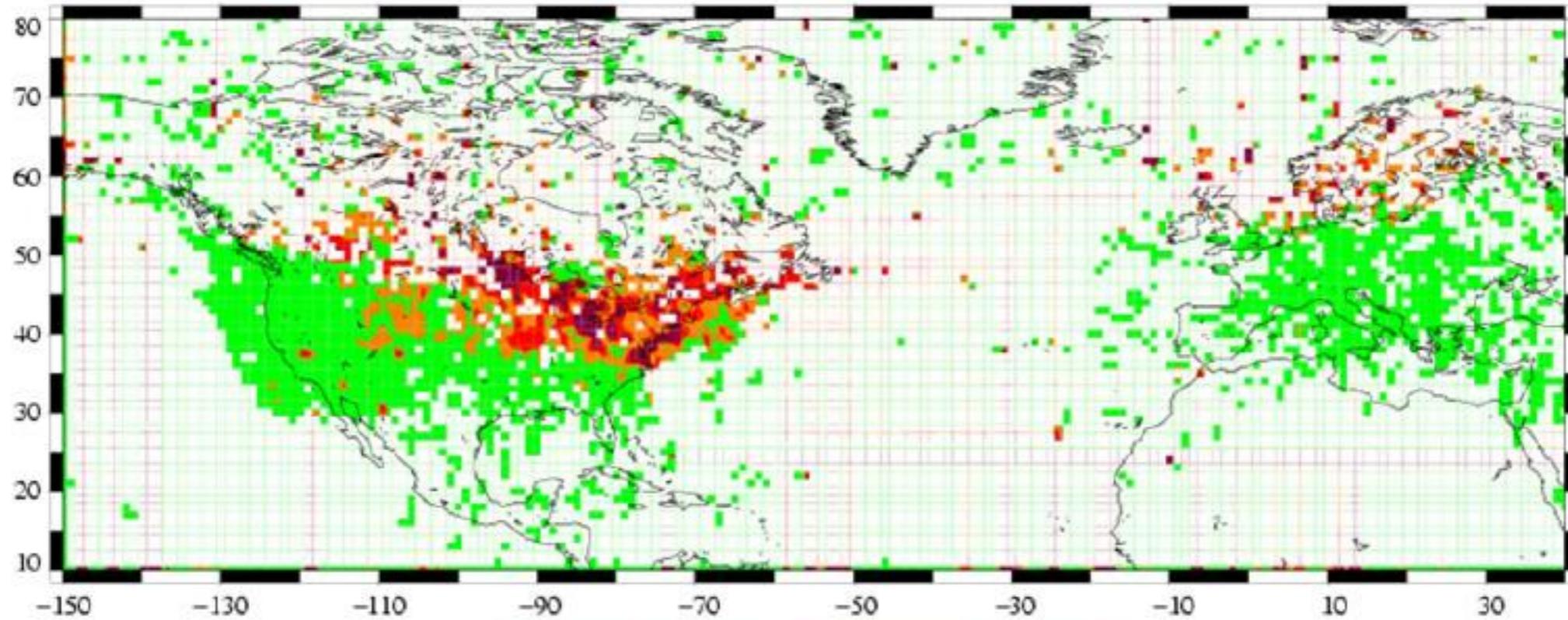
▲ 模式计算的2006年12月6日27.8MHz的极盖吸收

太阳质子  
事件预报



极盖吸  
收预报

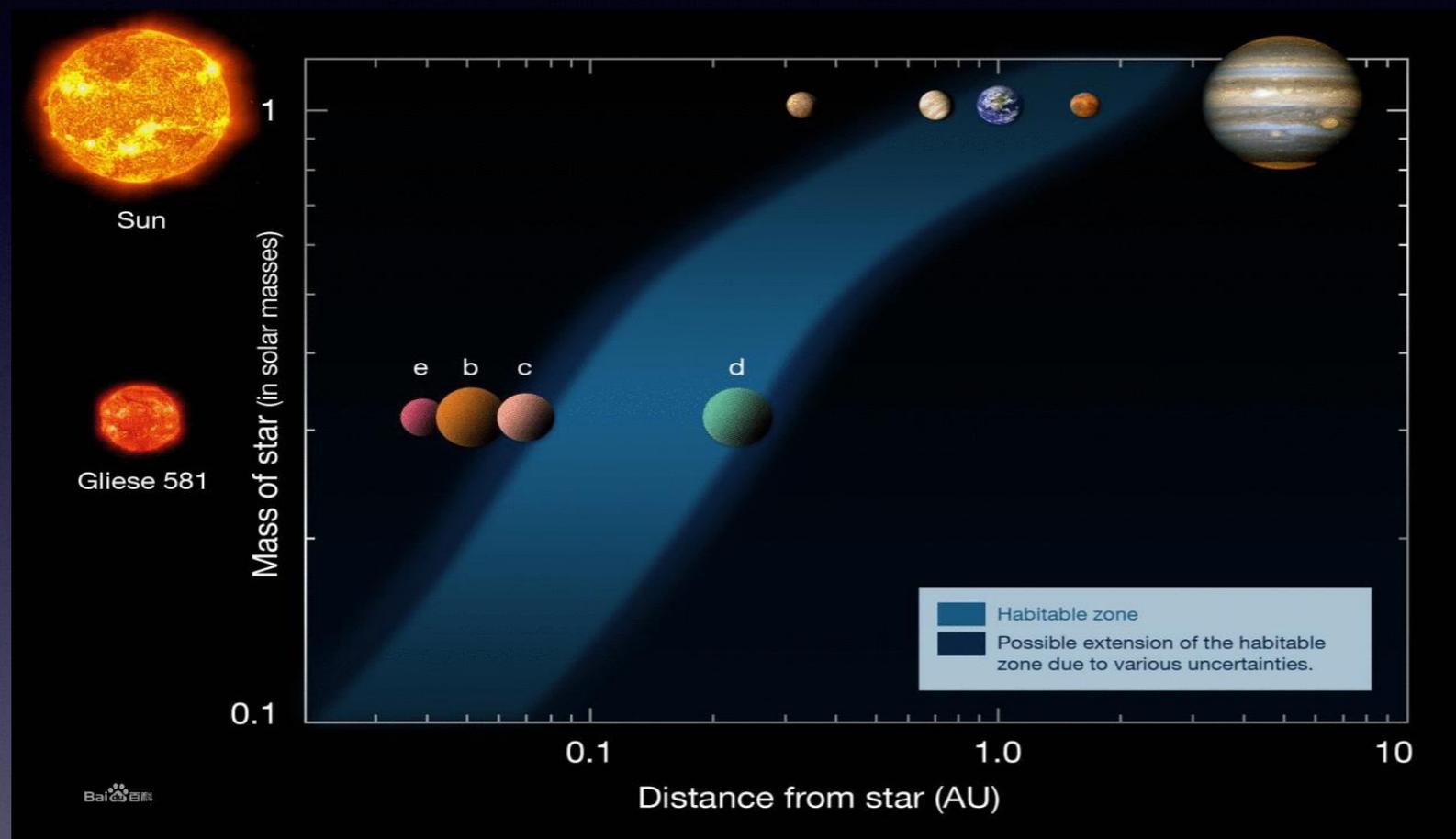
# 电离层闪烁预报



0.25 0.5 0.75 S<sub>4</sub>指数

2003年10月29日

# 未来的需要：行星空间天气预报



## 外部条件：

➤ 宿主恒星

➤ 行星际空间环境等

防御和修复能力：

➤ 行星空间环境

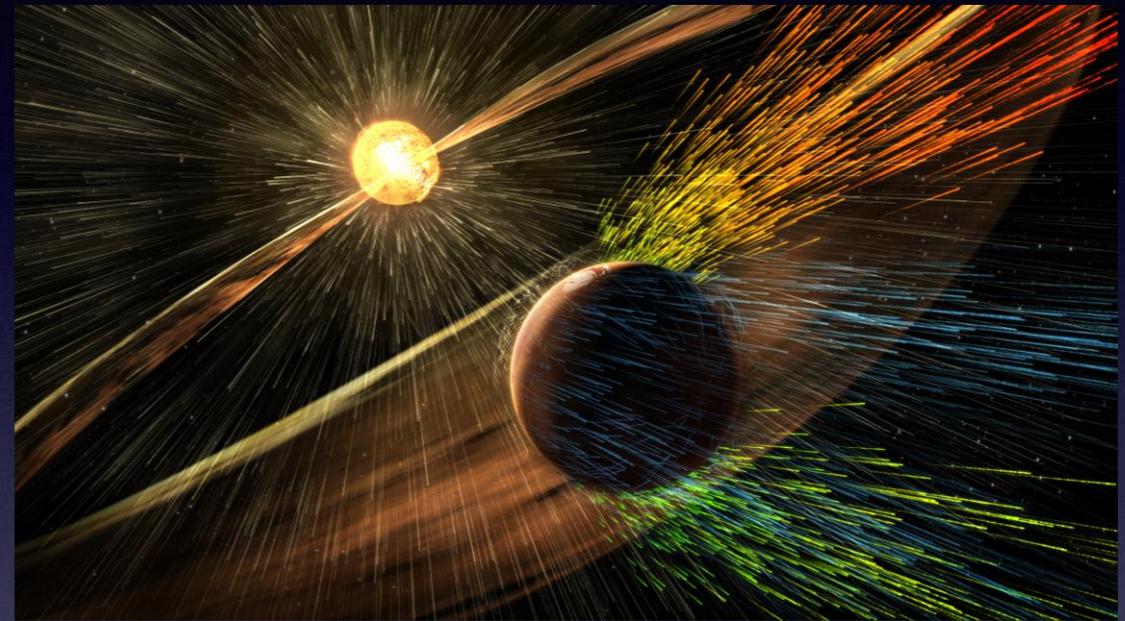
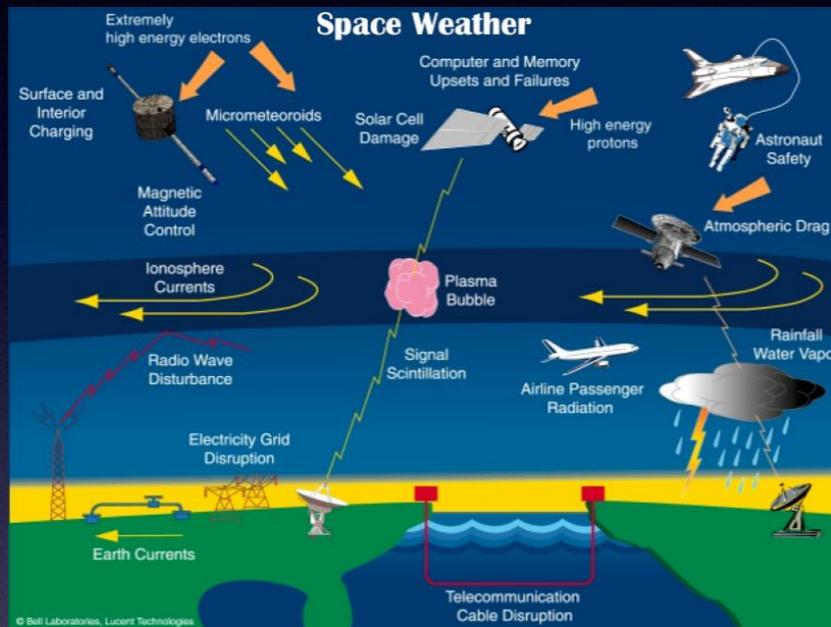
➤ 大气

➤ 地质条件

➤ 物质组成和圈层结构

## 类地行星宜居性的控制因素

# 行星际空间环境对宜居性具有显著的影响



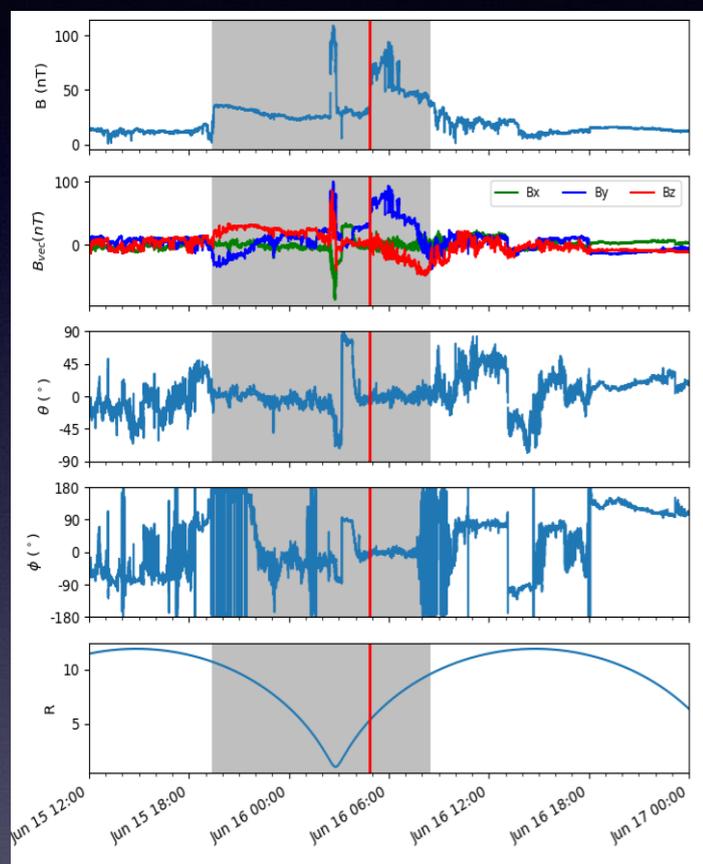
恶劣行星际空间环境将给地球带来灾害性的空间天气事件

恶劣行星际空间环境导致火星粒子逃逸率增加 [Jakosky et al., 2015, Science]

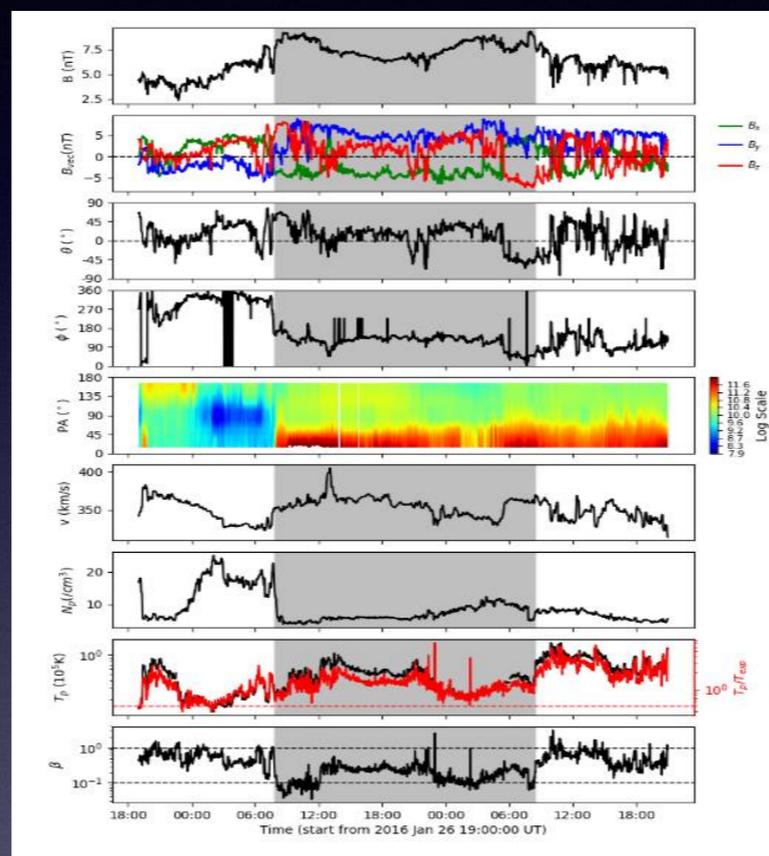
短时间尺度：辐射增强、磁场扰动等影响生物生存条件

长时间尺度：大气逃逸等导致的变化影响行星的宜居条件

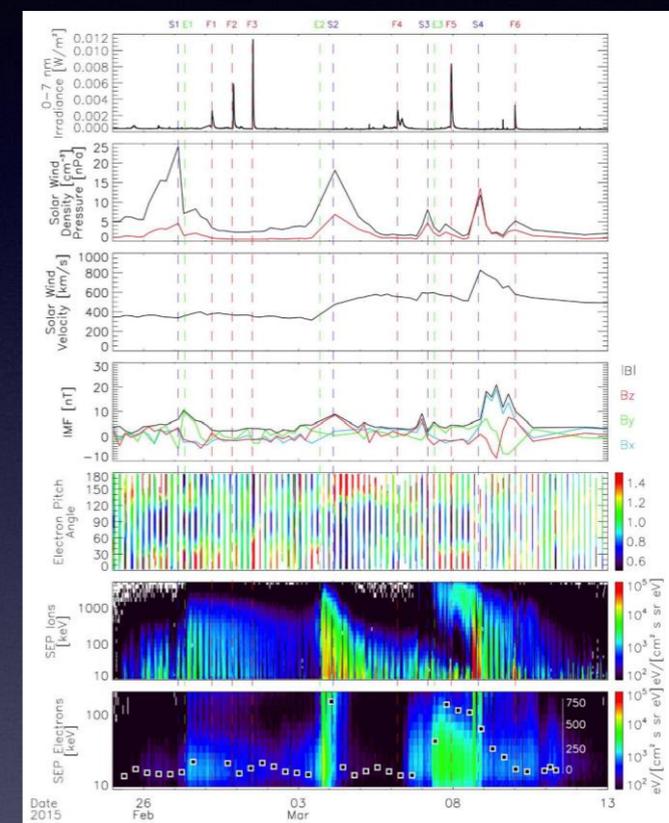
# 宜居带的行星际空间环境的主要太阳风参数



金星处的  
局地观测



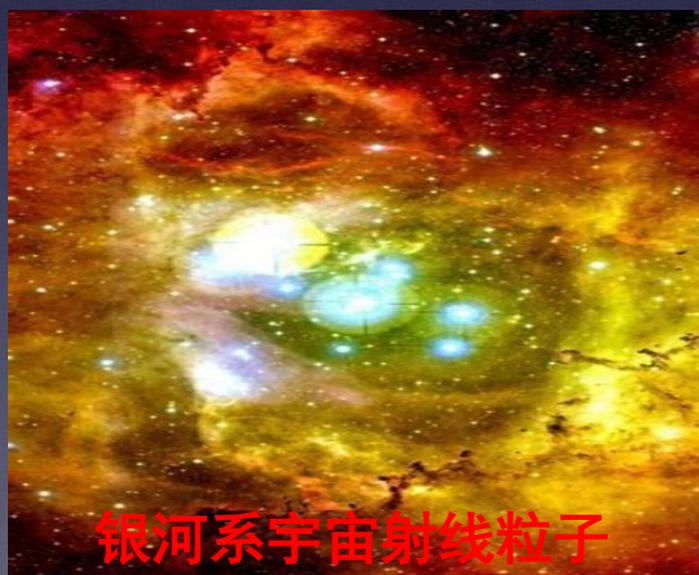
地球处的  
局地观测



火星处的  
局地观测

磁场强度、磁场方向、太阳风速度、质子密度、质子温度...

# 宜居带的行星的高能粒子辐射环境



		来源	分布
全局性高能粒子	宇宙射线	超星爆发	星系
	太阳高能粒子	太阳大气和行星际激波	太阳系
局域性高能粒子		行星土壤、大气和磁层核物理、粒子物理和等离子体物理过程	行星特定空间

# 怎么预报行星空间环境?

