

# 第三章：地球空间系统



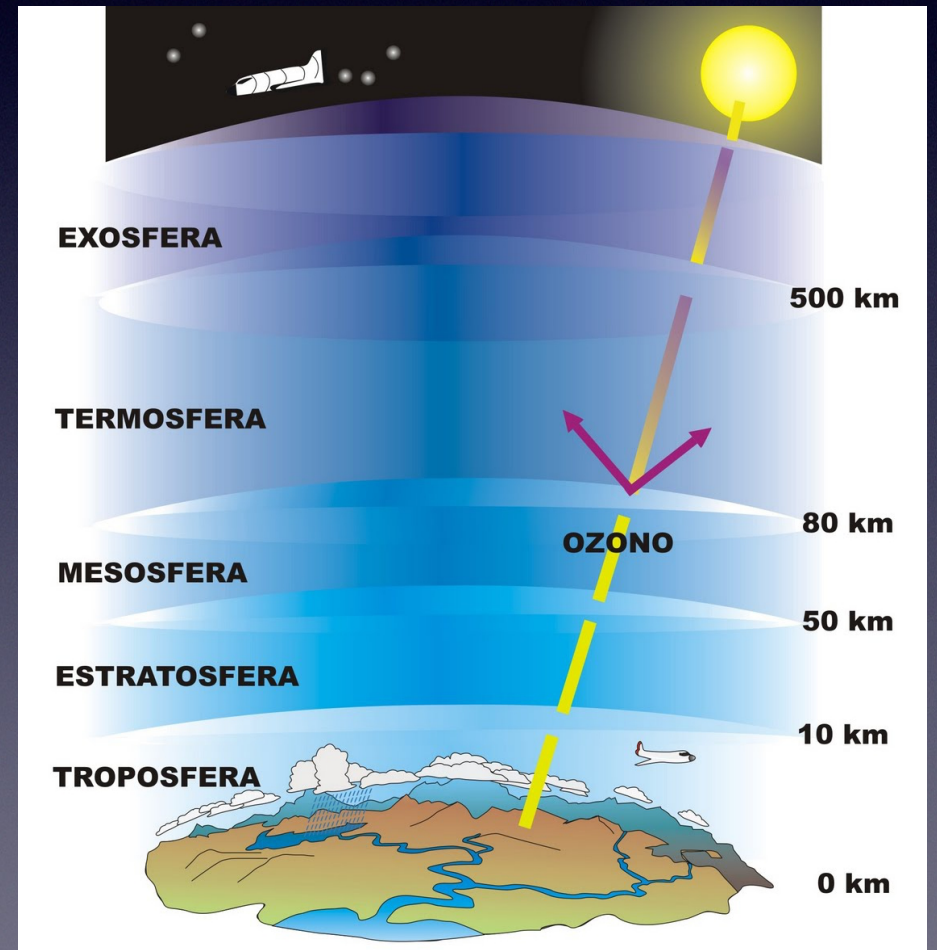
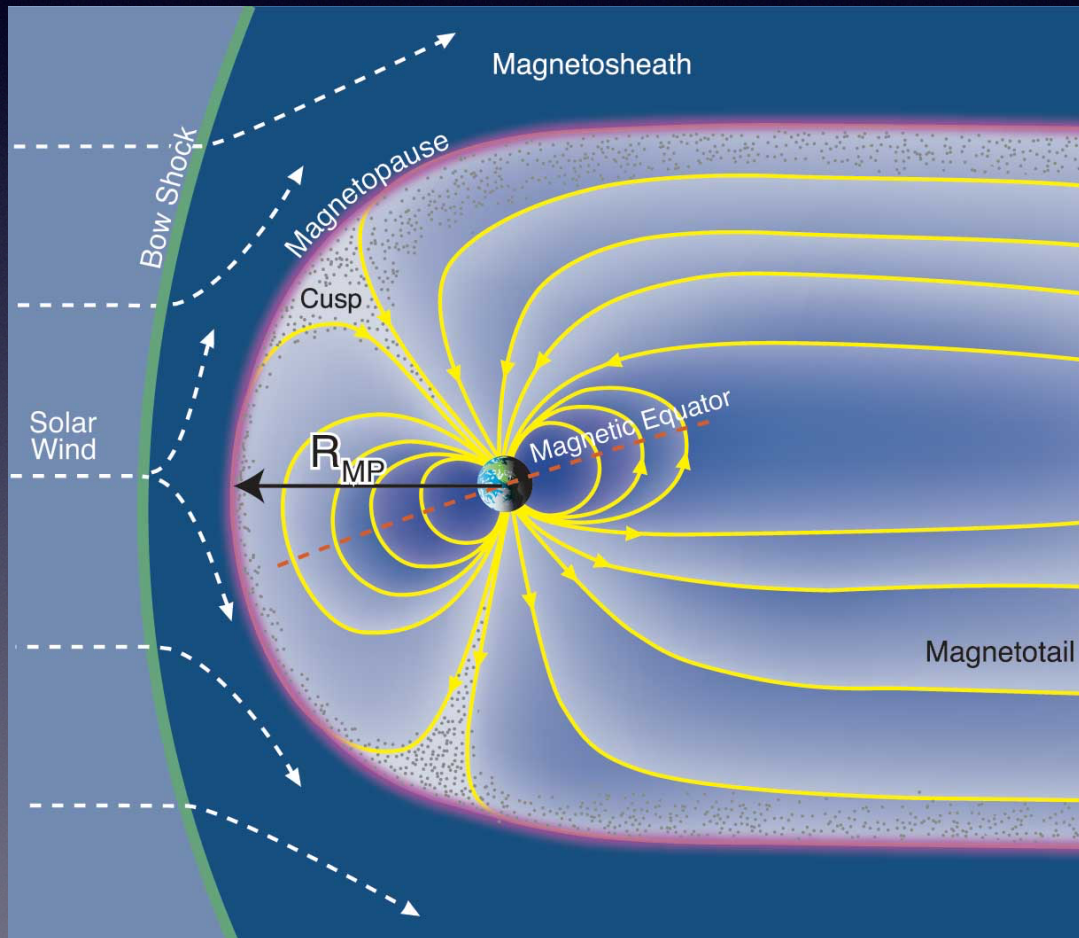
# 地球空间天气系统

★磁层

★电离层

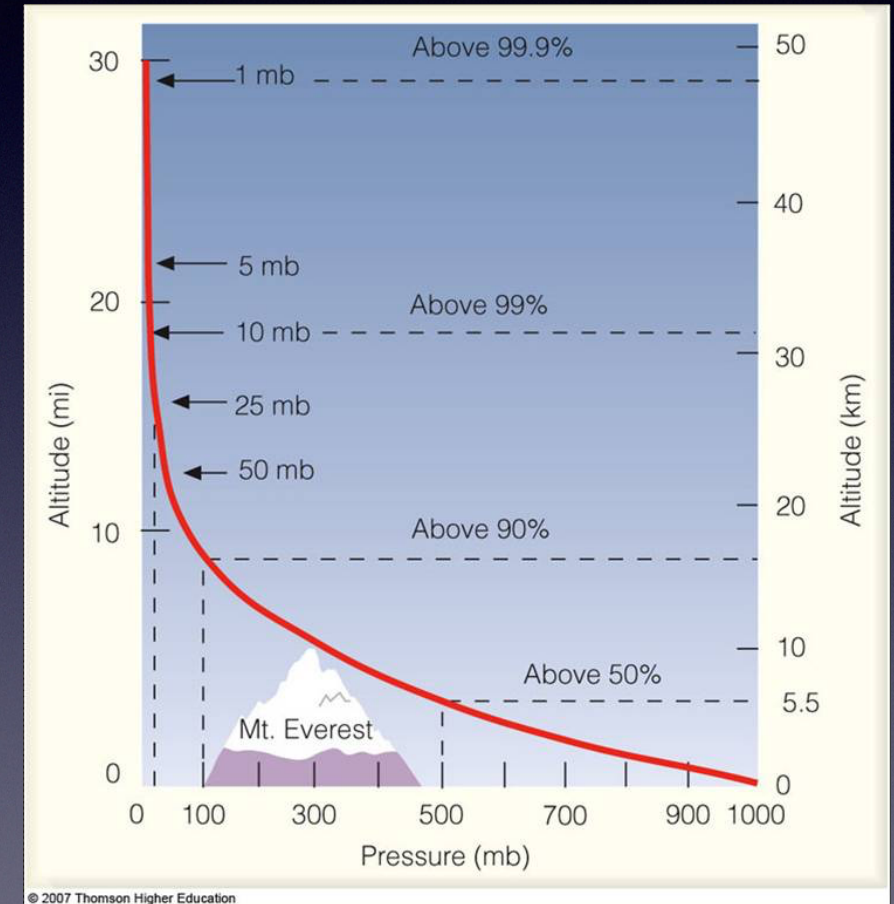
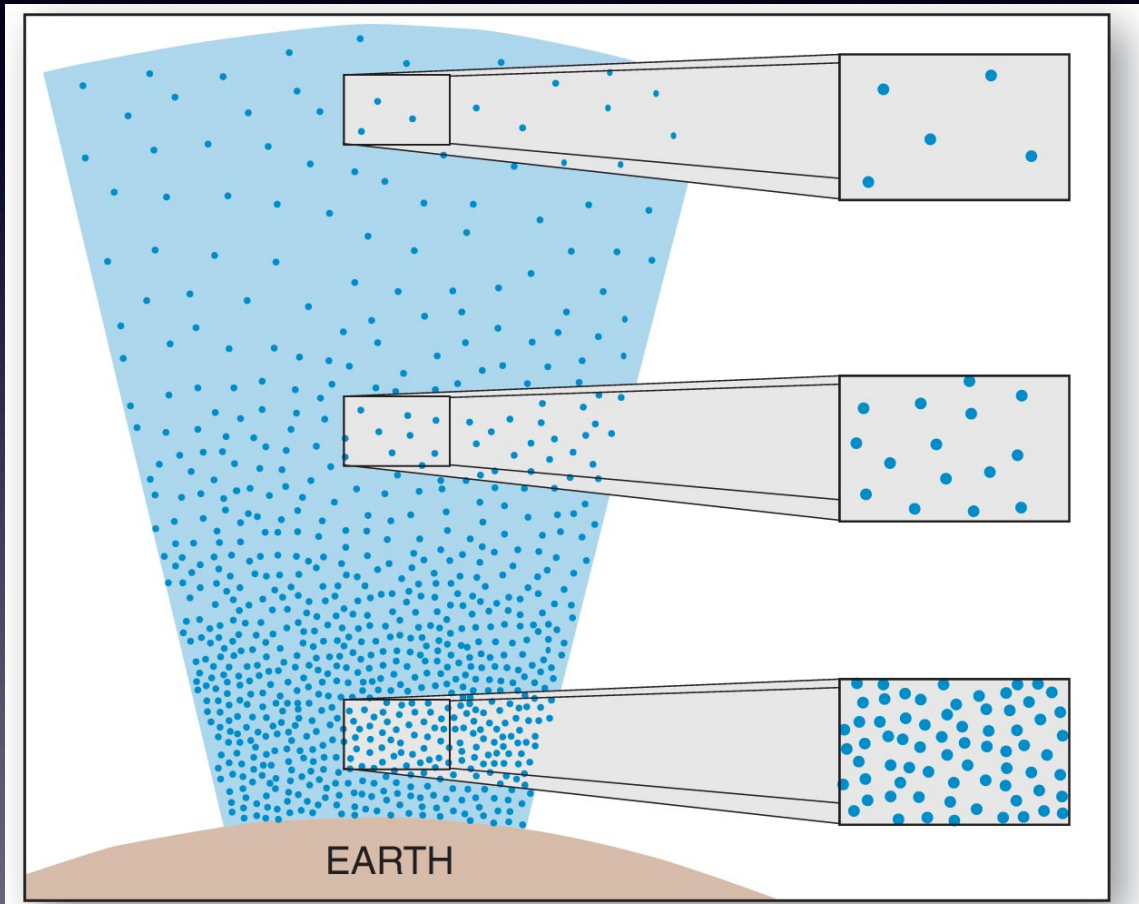
★热层

★高层大气



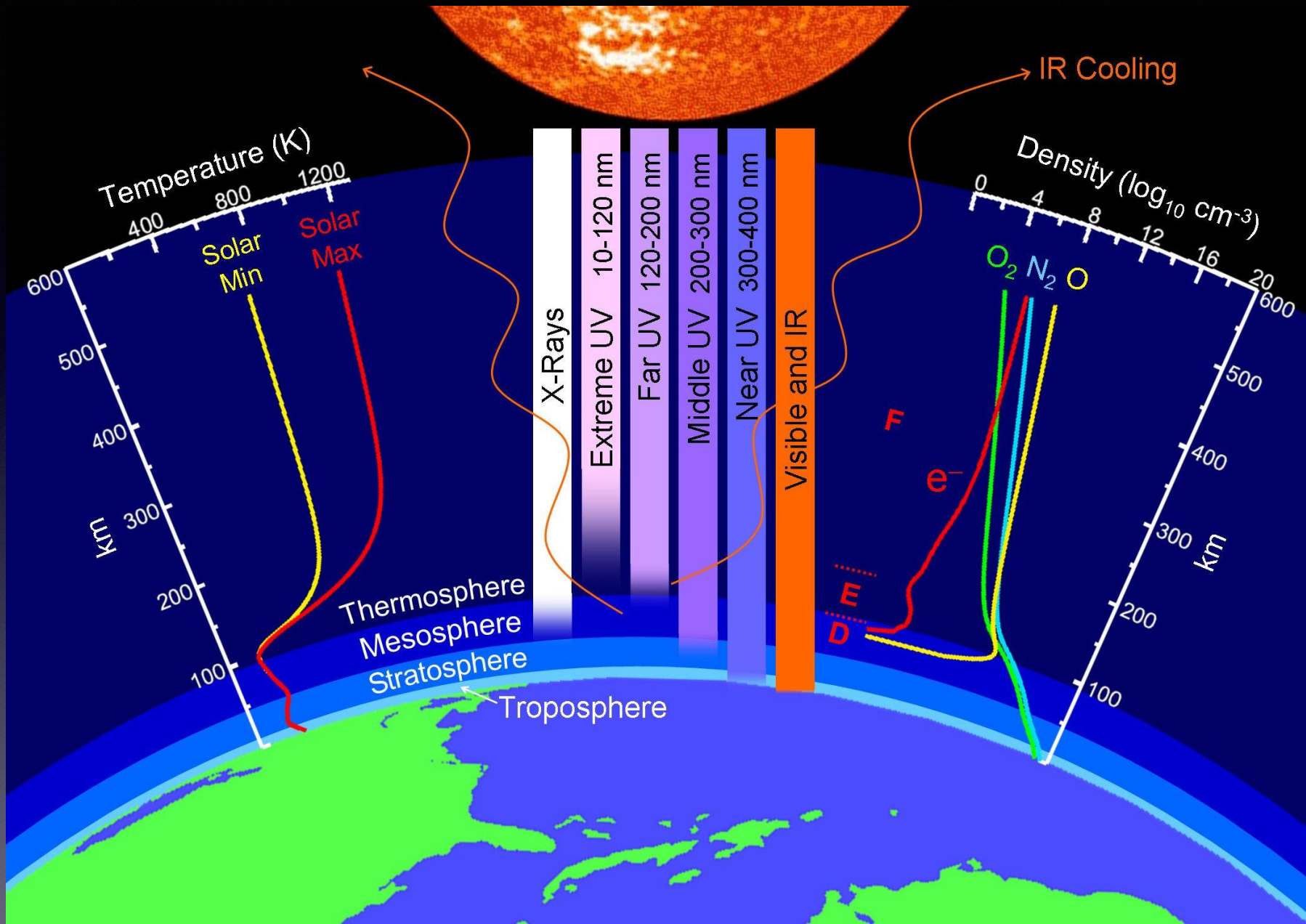
# 1. 地球大气及其分层

描述静态大气的主要参数：压强(P)、密度( $\rho$ )、温度(T)、成分



大气密度、压强随高度的变化

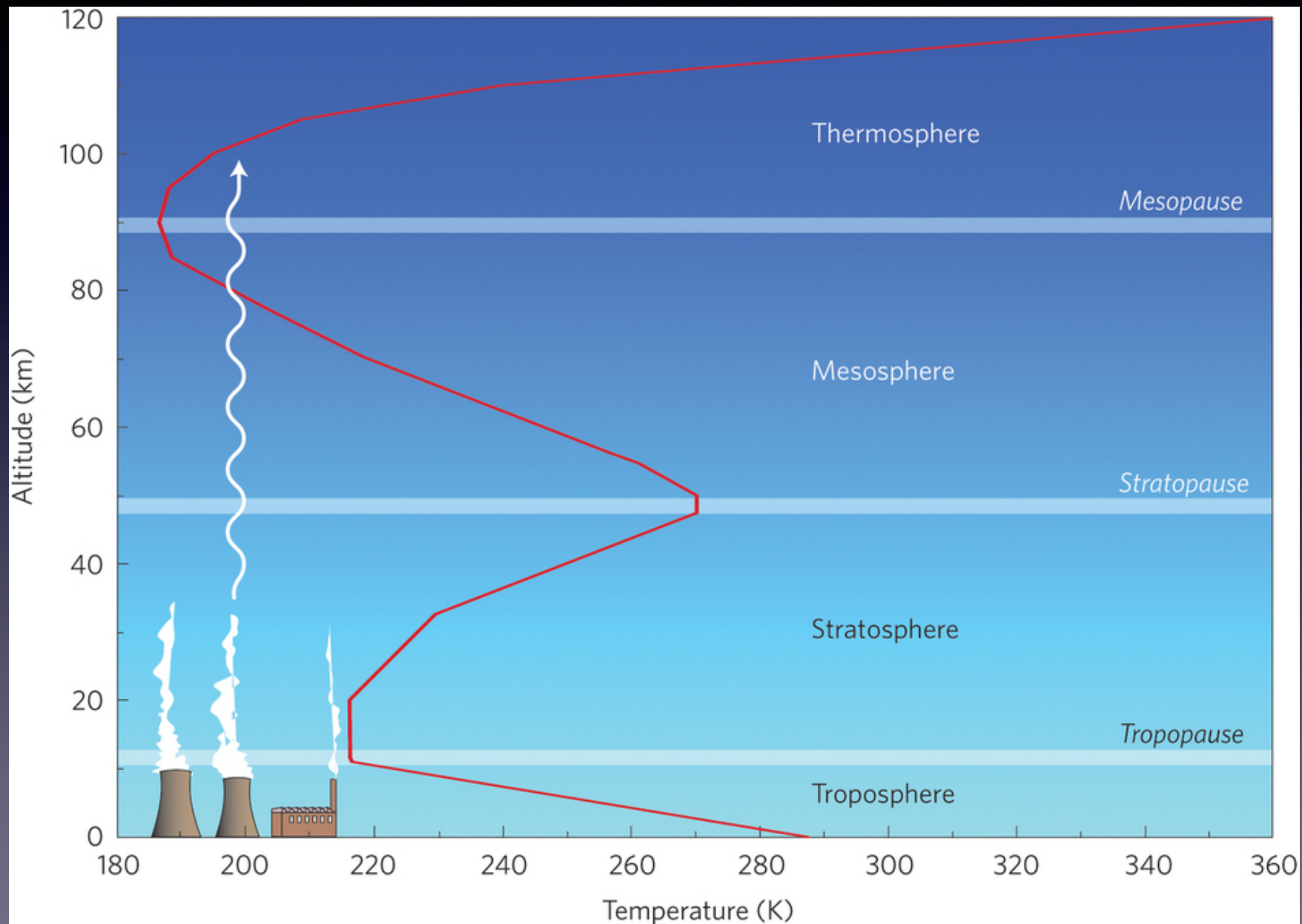




大气温度随高度的变化

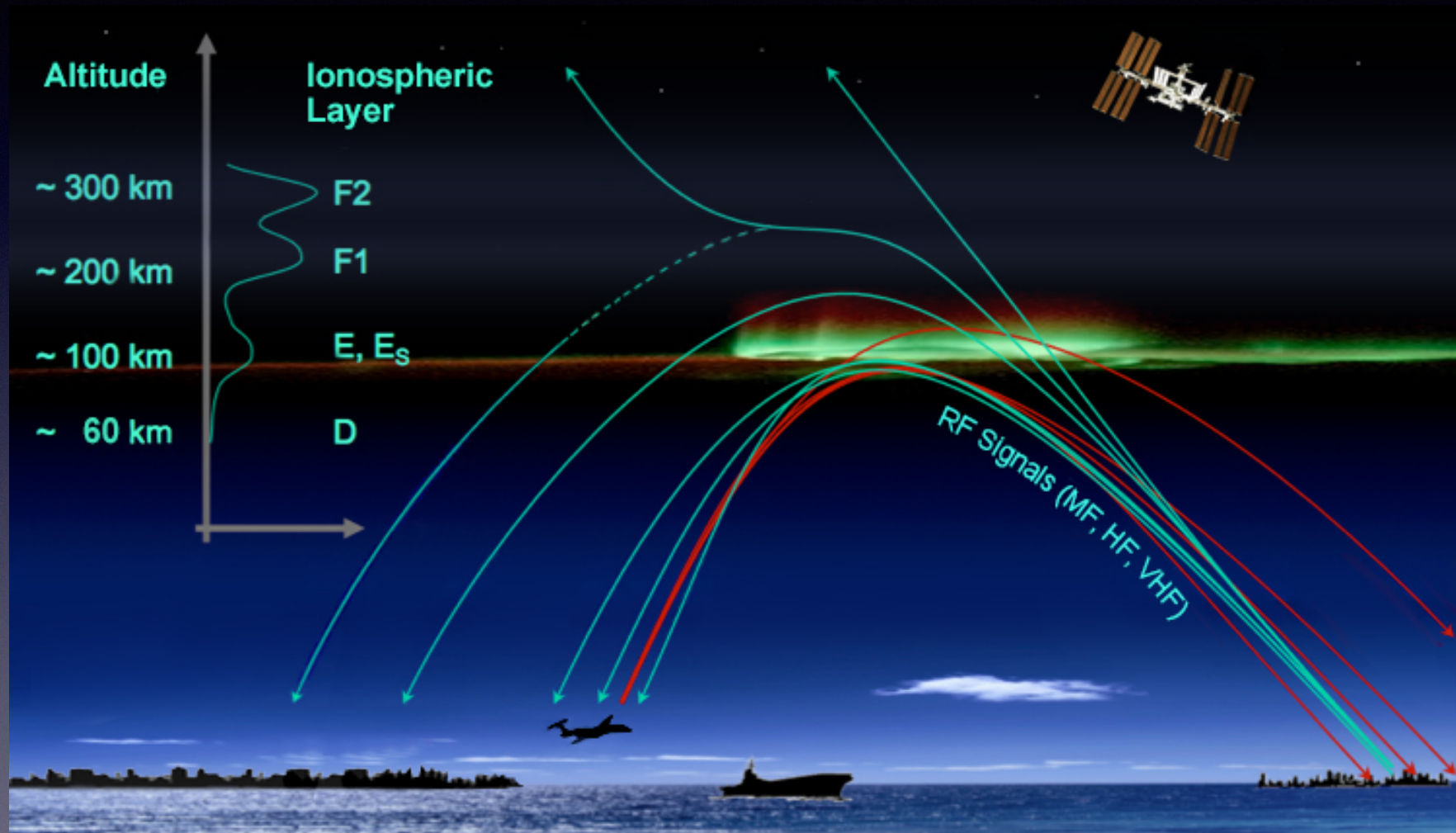


# 地球大气的性质和分层结构：按温度变化分





# 地球大气的性质和分层结构：按电离程度分



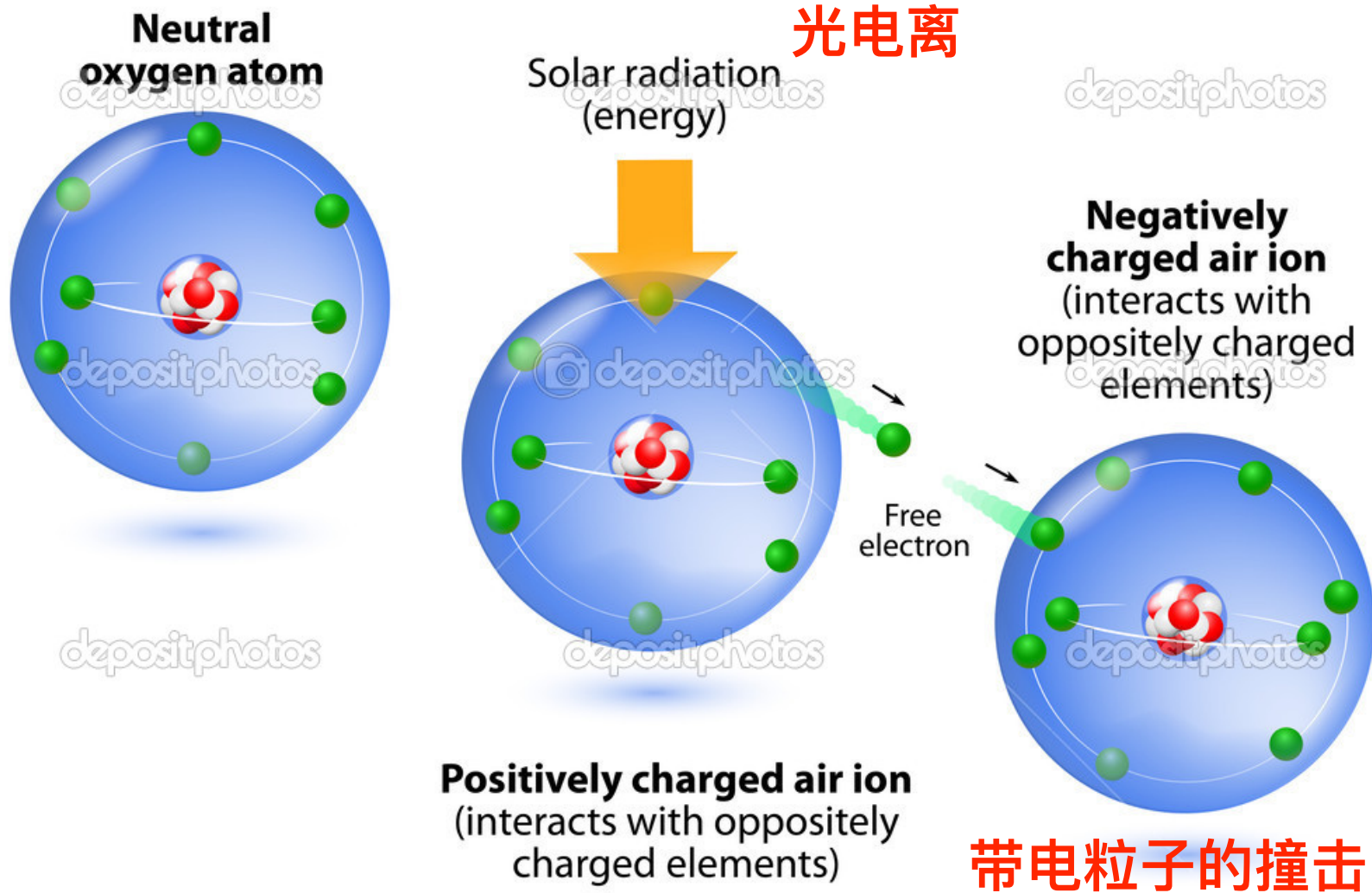
★ <50km 中性层

★ 50km ~ 400km 电离层



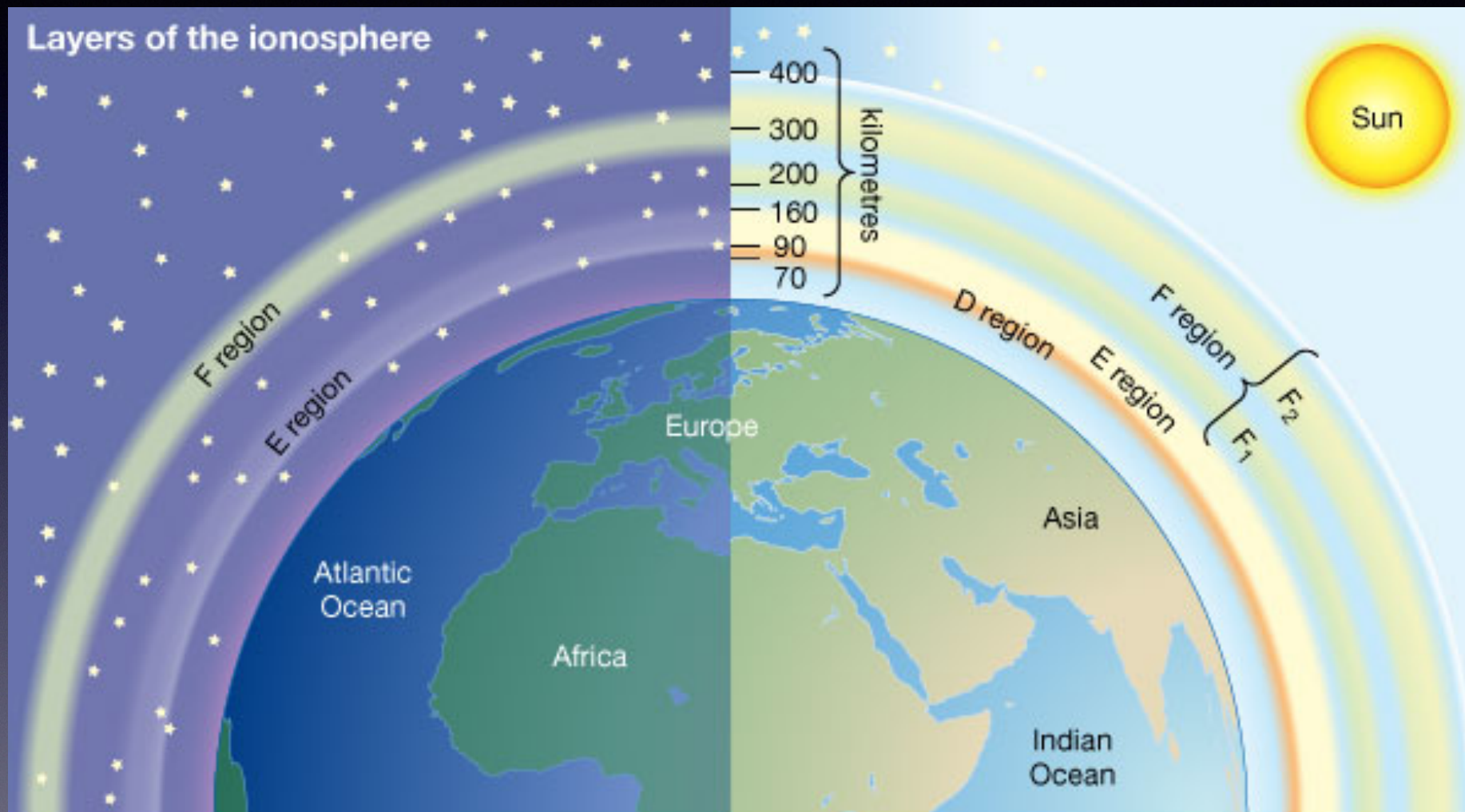
# 电离层的形成过程

## ION FORMATION





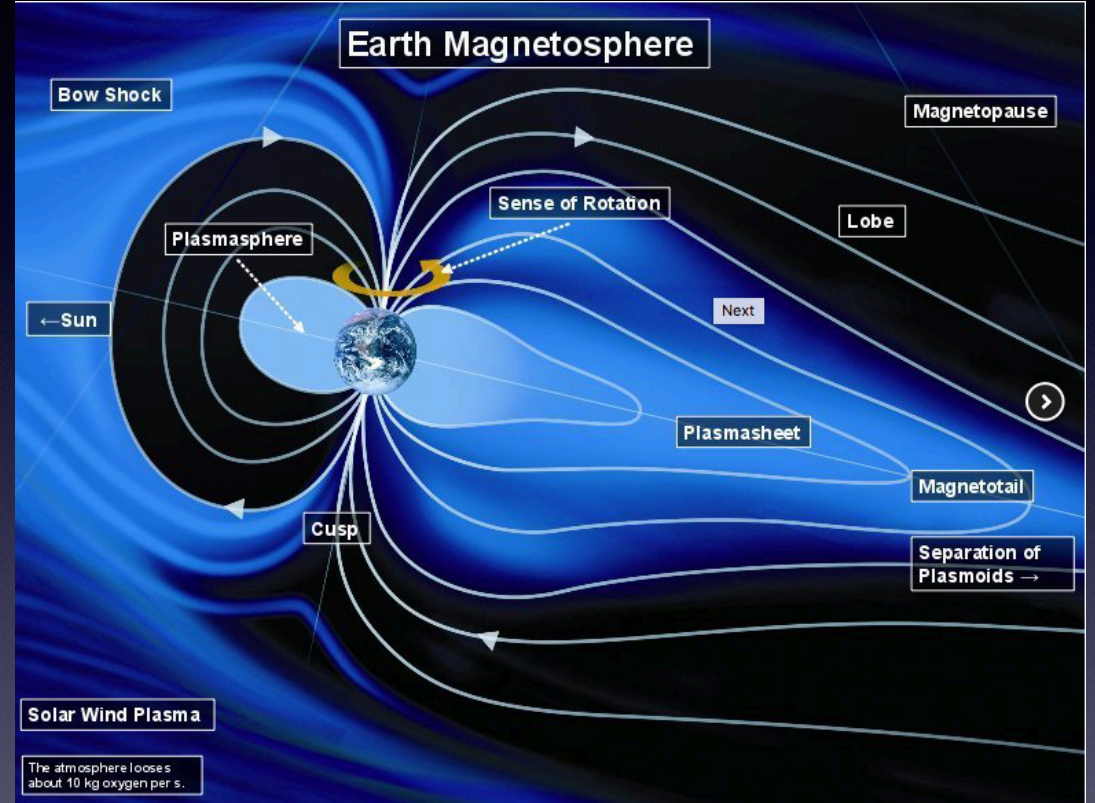
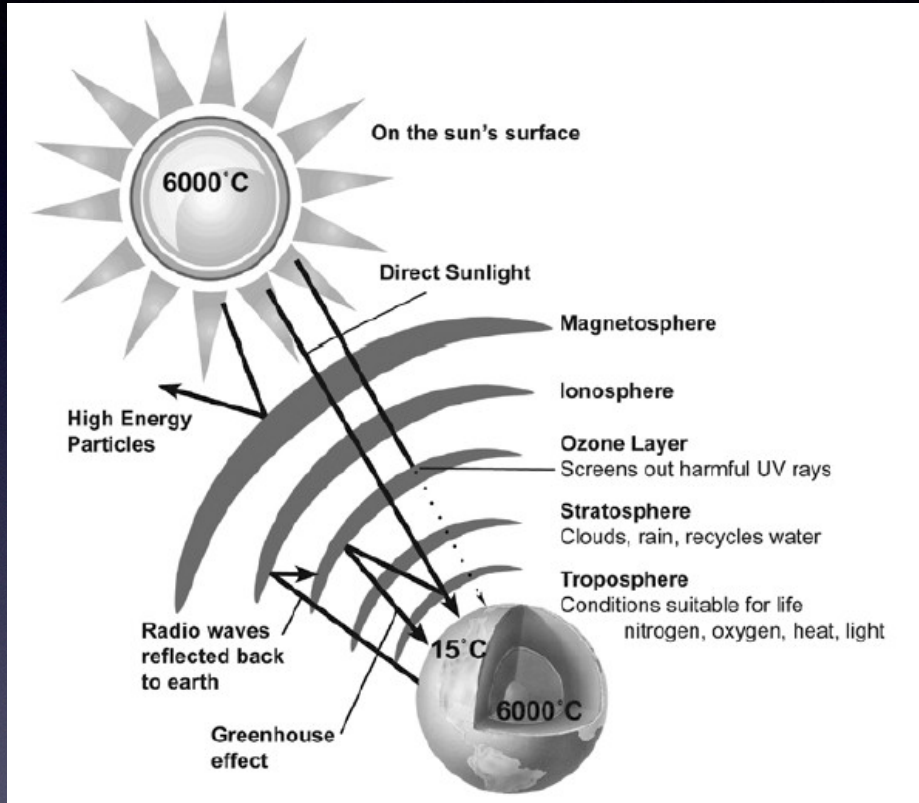
# 电离层的分层



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.



## 2. 地球磁层



**磁层：** 在距离地球表面1000km以上，大气基本完全电离，带电粒子的运动基本由磁场控制



地磁场

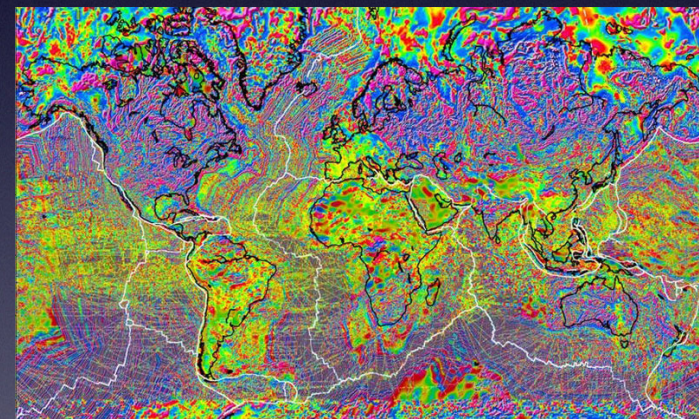
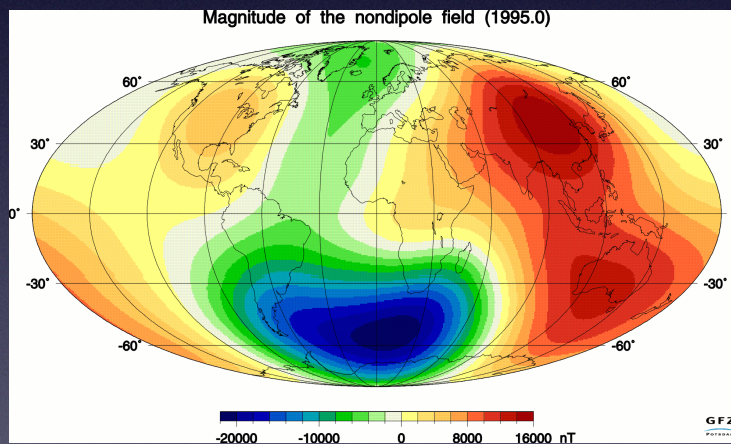
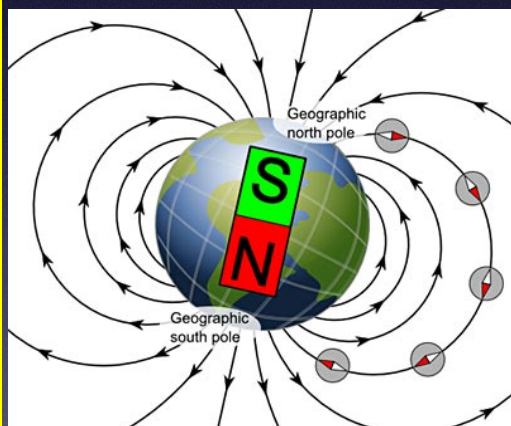
=

基本磁场

+

变化磁场

## 基本磁场



偶极场

+

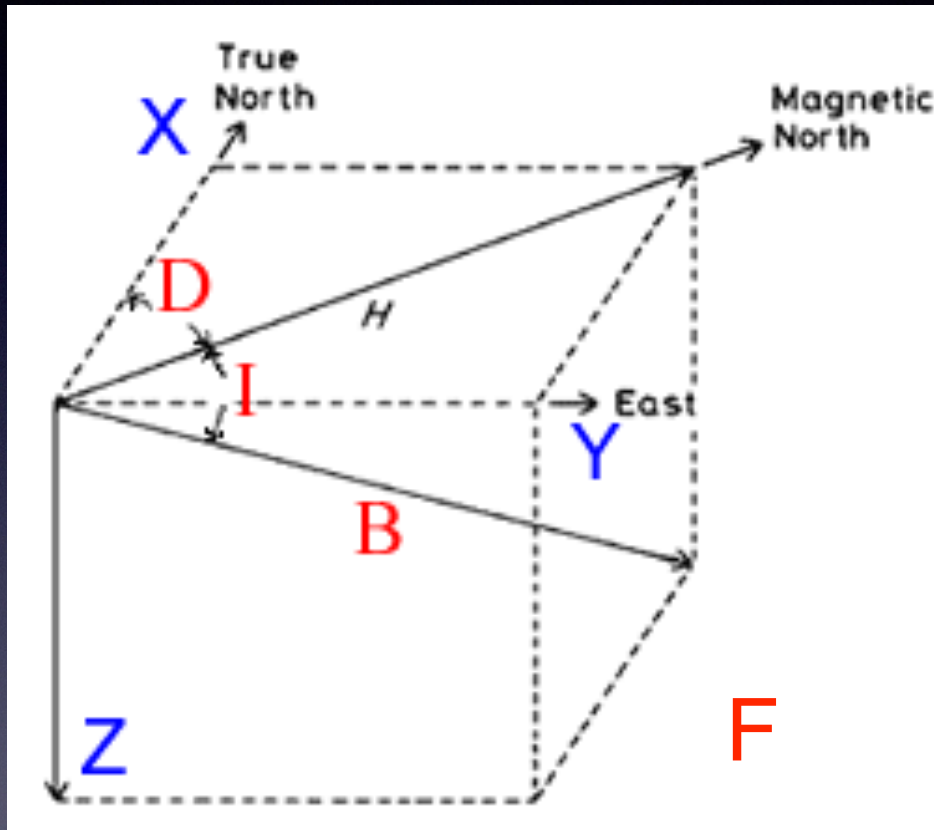
非偶极场

+

地磁异常



# 地磁场的基本要素



F:总强度

H:水平分量

Z:垂直分量

X:北向分量

Y:东向分量

D:磁偏角

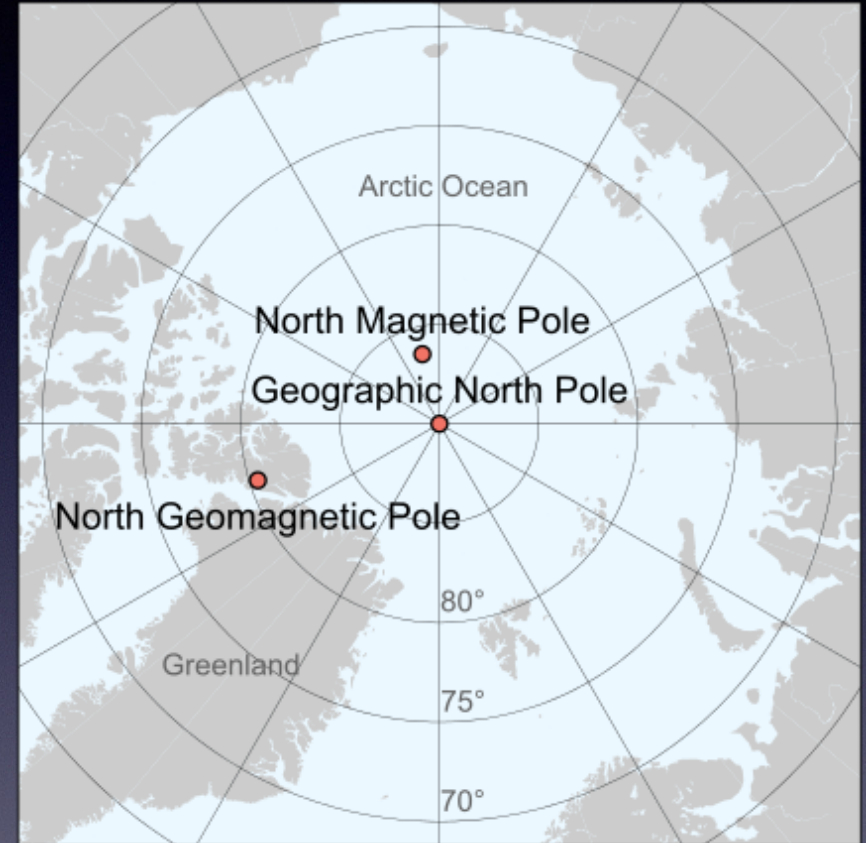
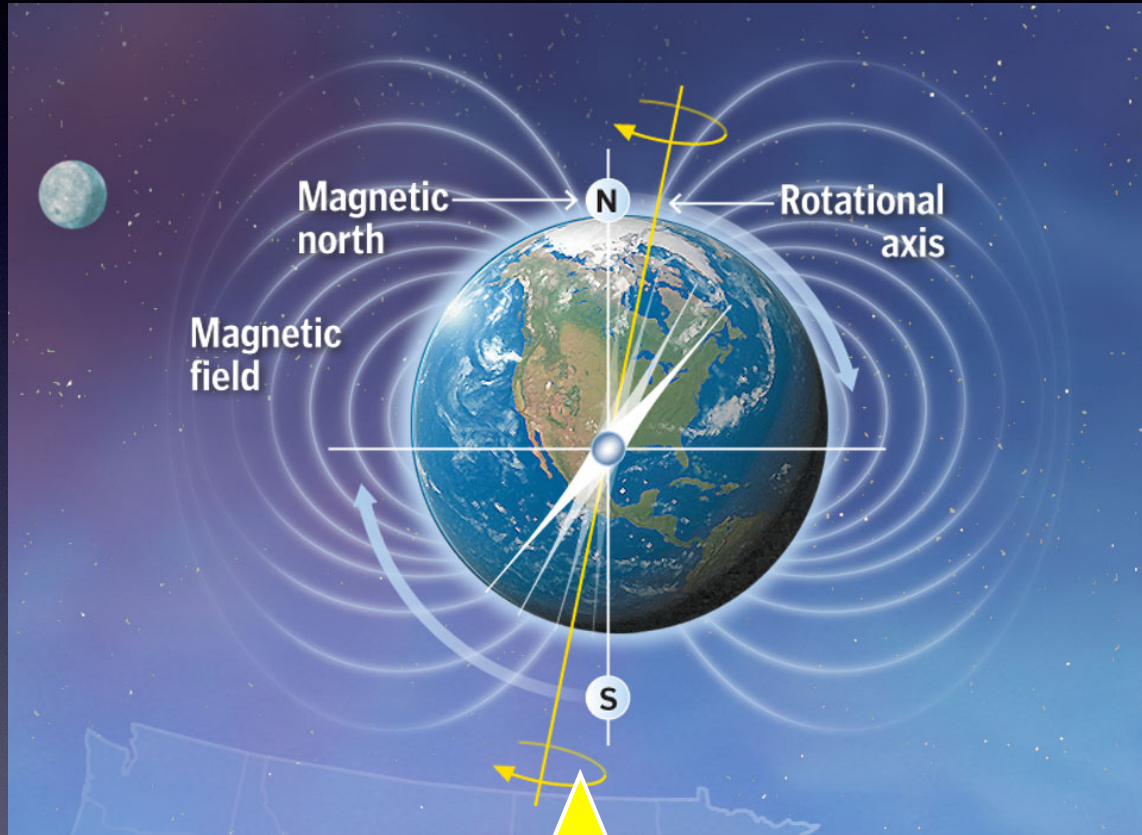
I:磁倾角

强度单位: Tesla (特斯拉)

$1\text{nT}=10^{-9}\text{T}=10^{-5}\text{G}$



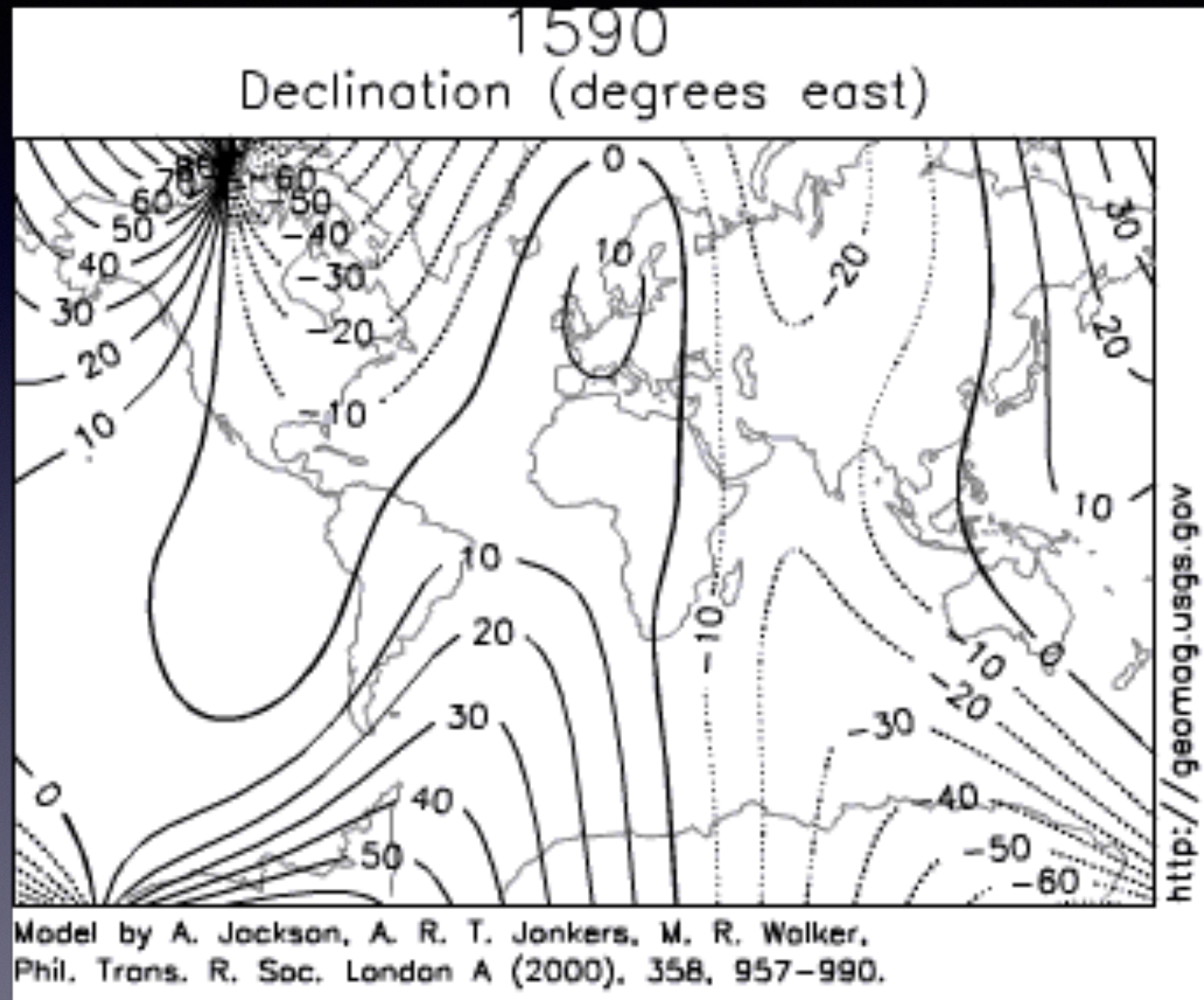
# 地磁轴



交角： $11^{\circ}$

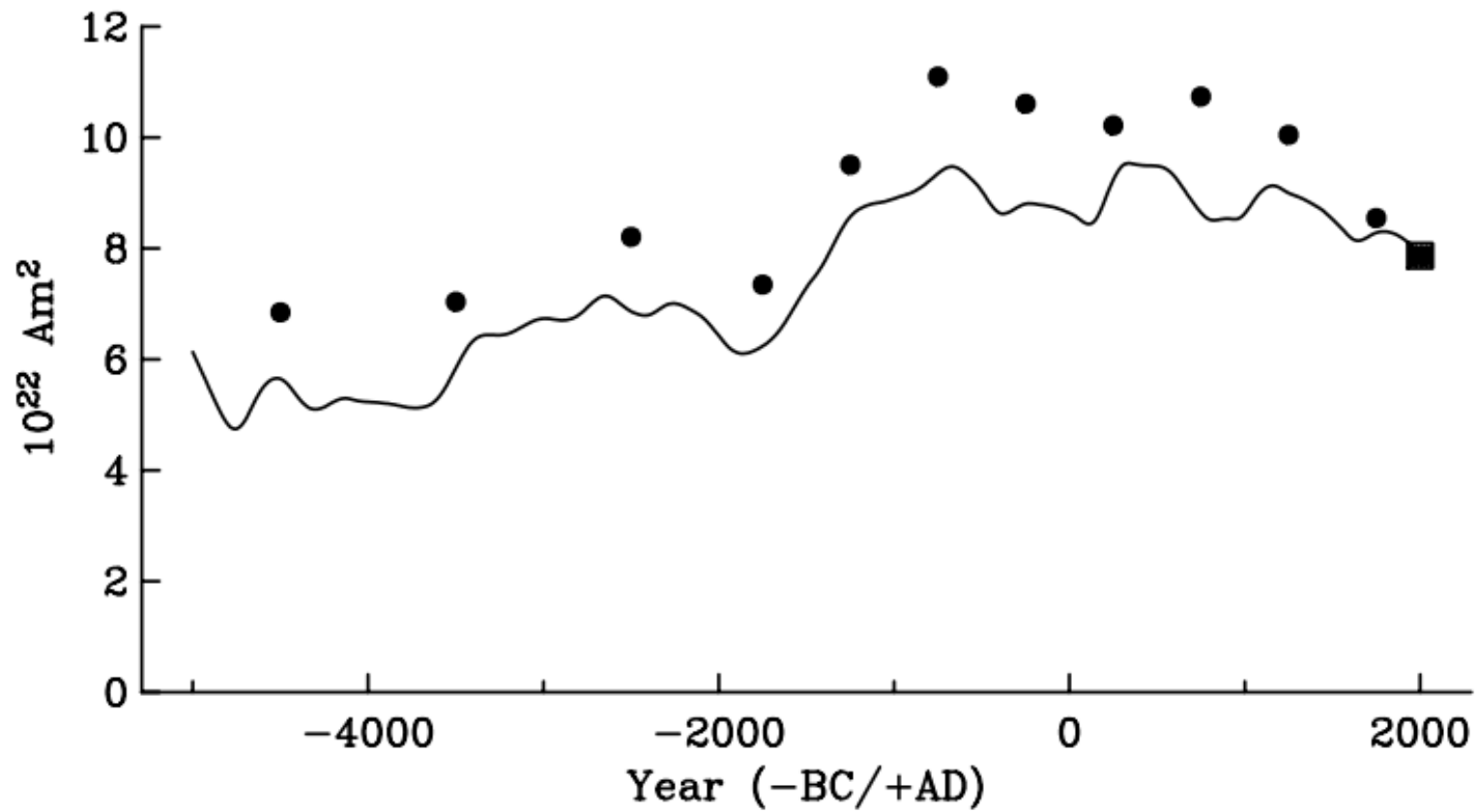


# 地磁场的长期变化



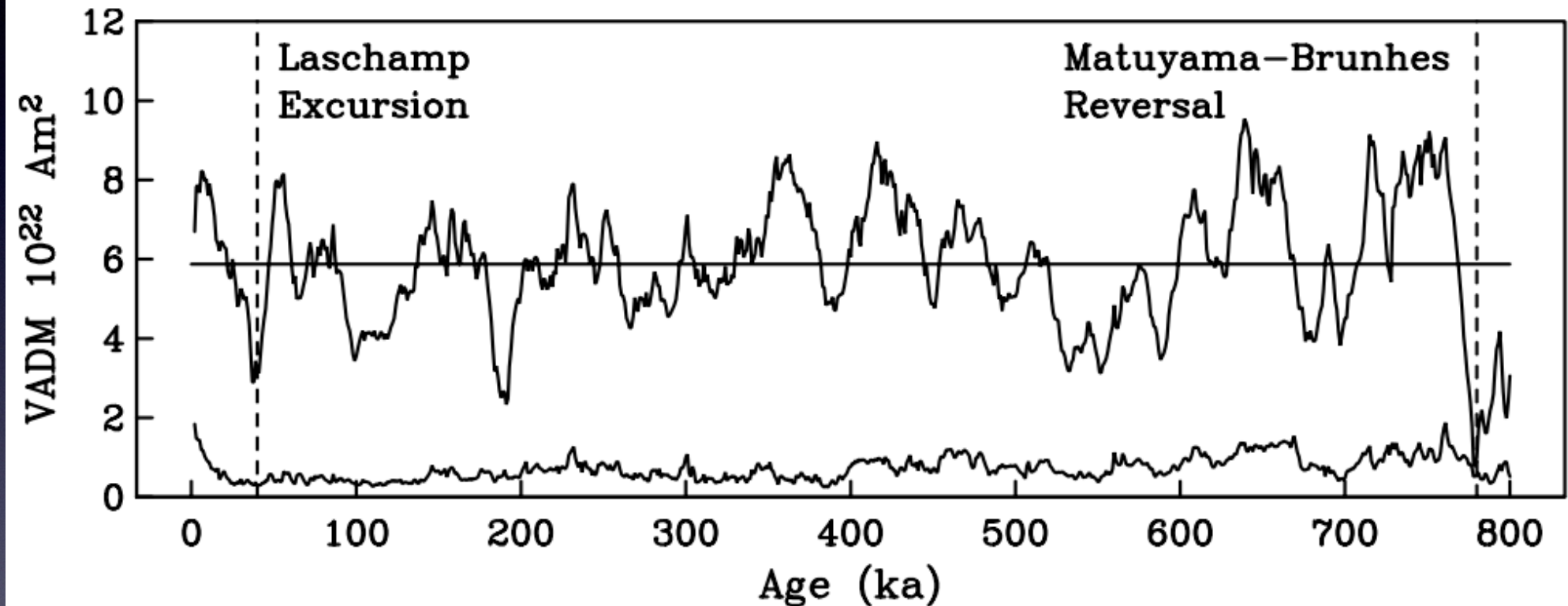


# 偶极子磁矩的衰減



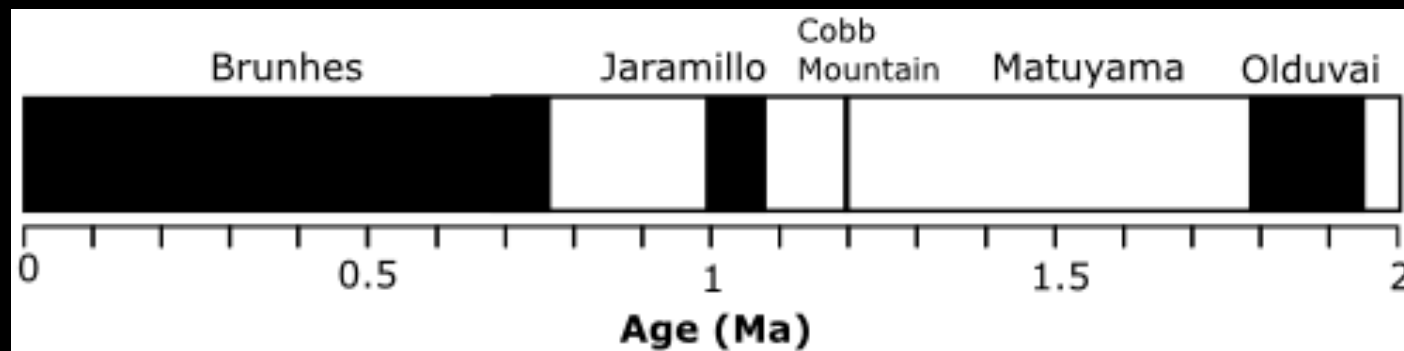
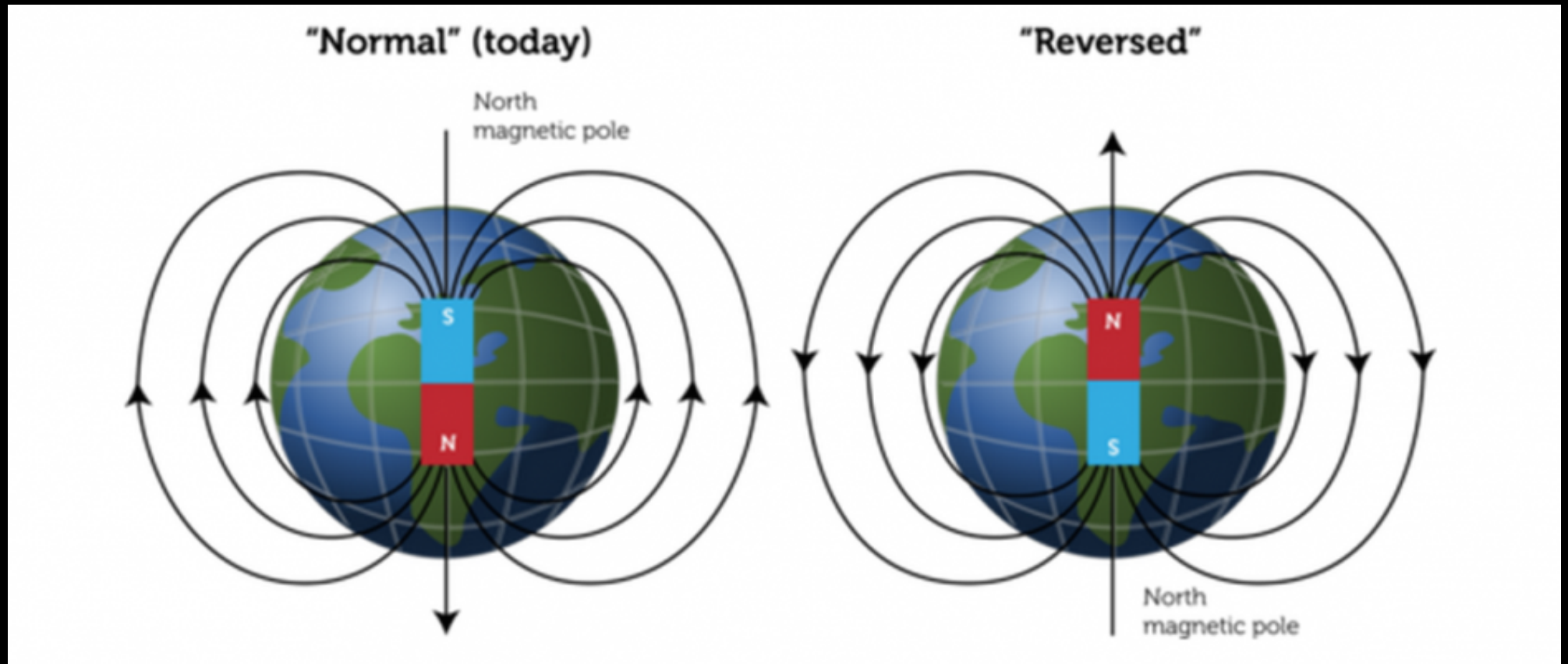


# 地磁场偶极子磁矩的长期变化



- ✱ years (yrs) before present **bp**
- ✱ thousands ( $10^3$ ) of years before present, **ka**
- ✱ millions ( $10^6$ ) of years before present, **Ma**
- ✱ billions ( $10^9$ ) of years before present, **Ga**

# 磁场反转





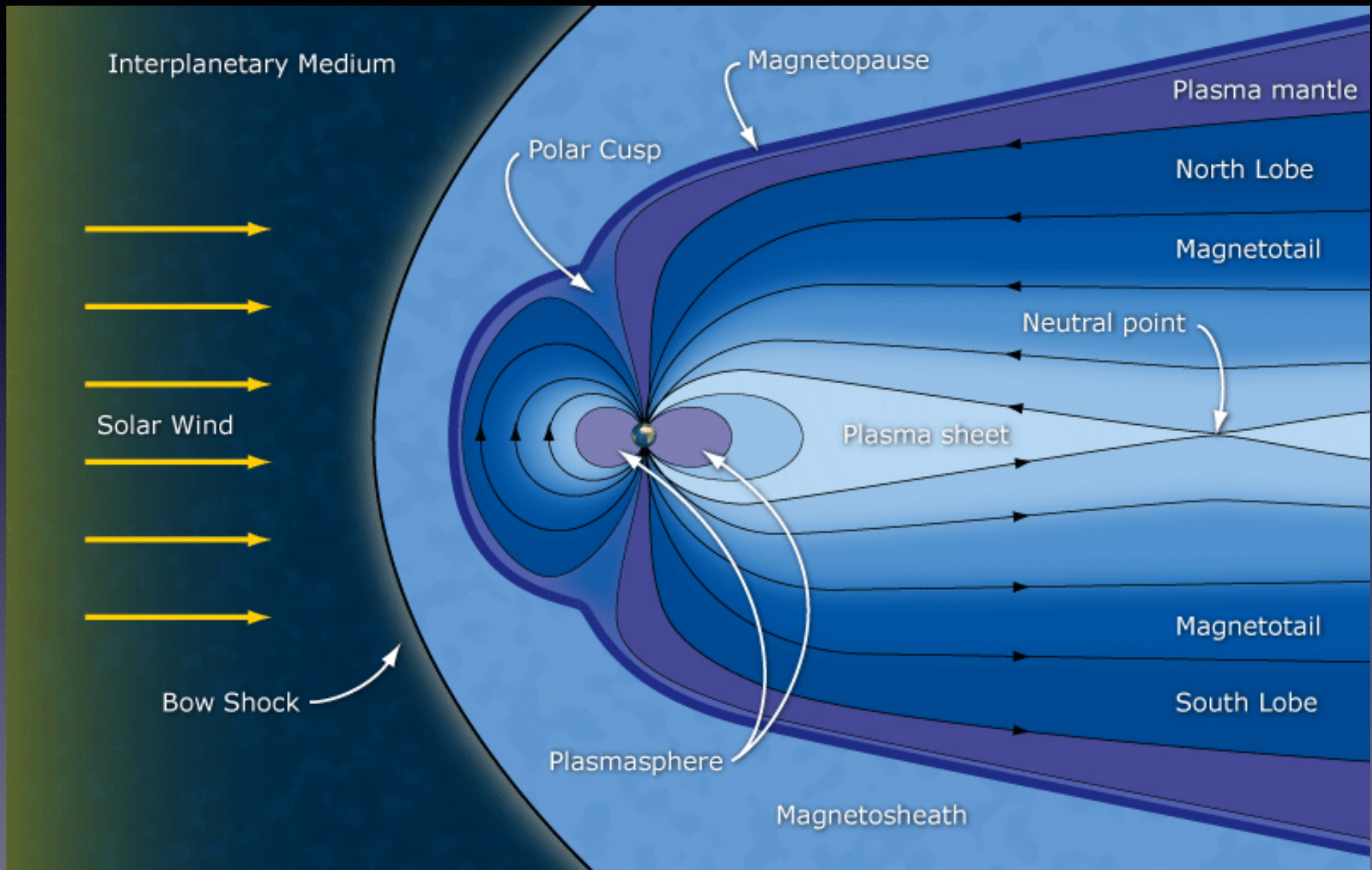
mywttv.cn

优酷



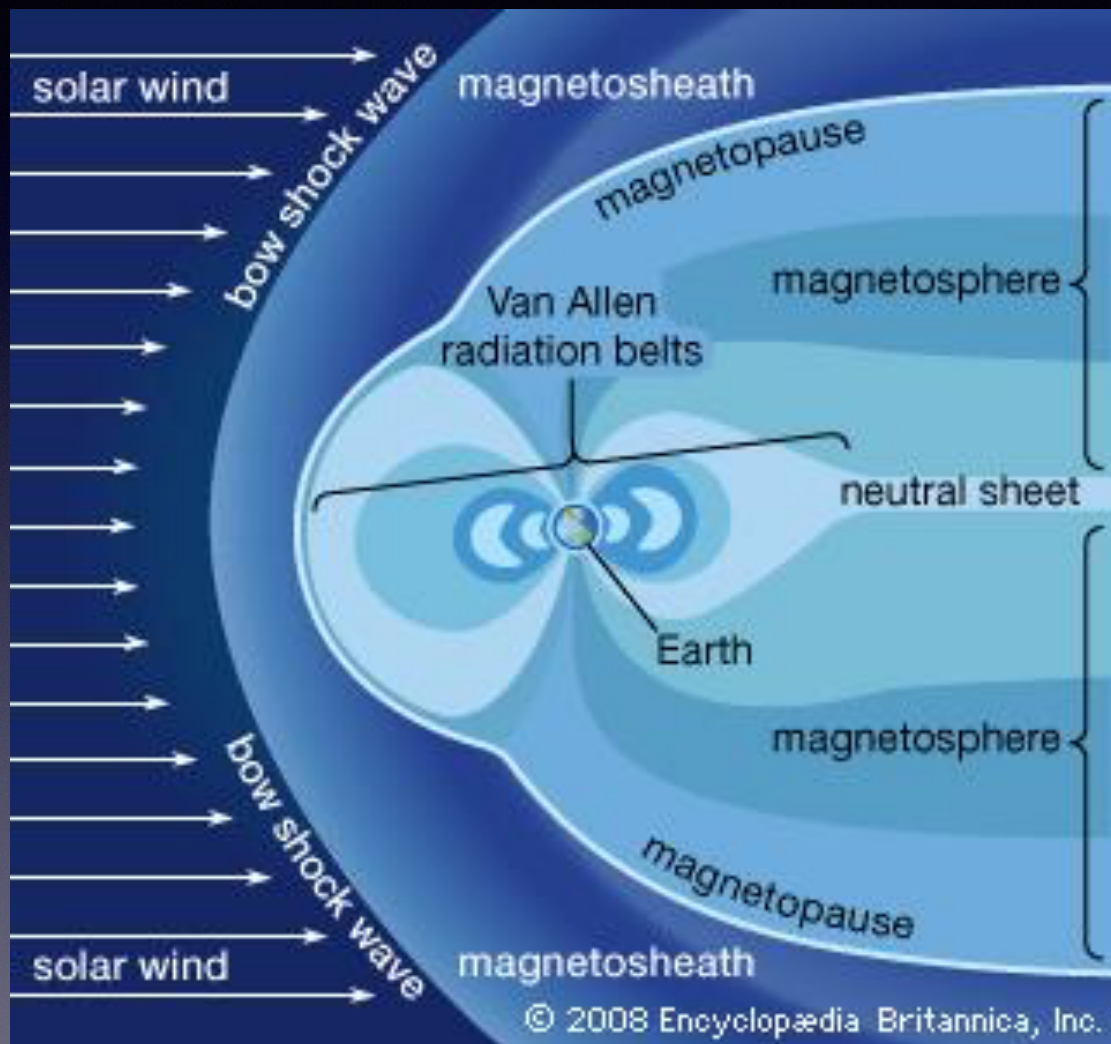


# 地球磁层





# 磁层的结构



**磁层顶:** 太阳风和磁层之间的薄薄的边界层

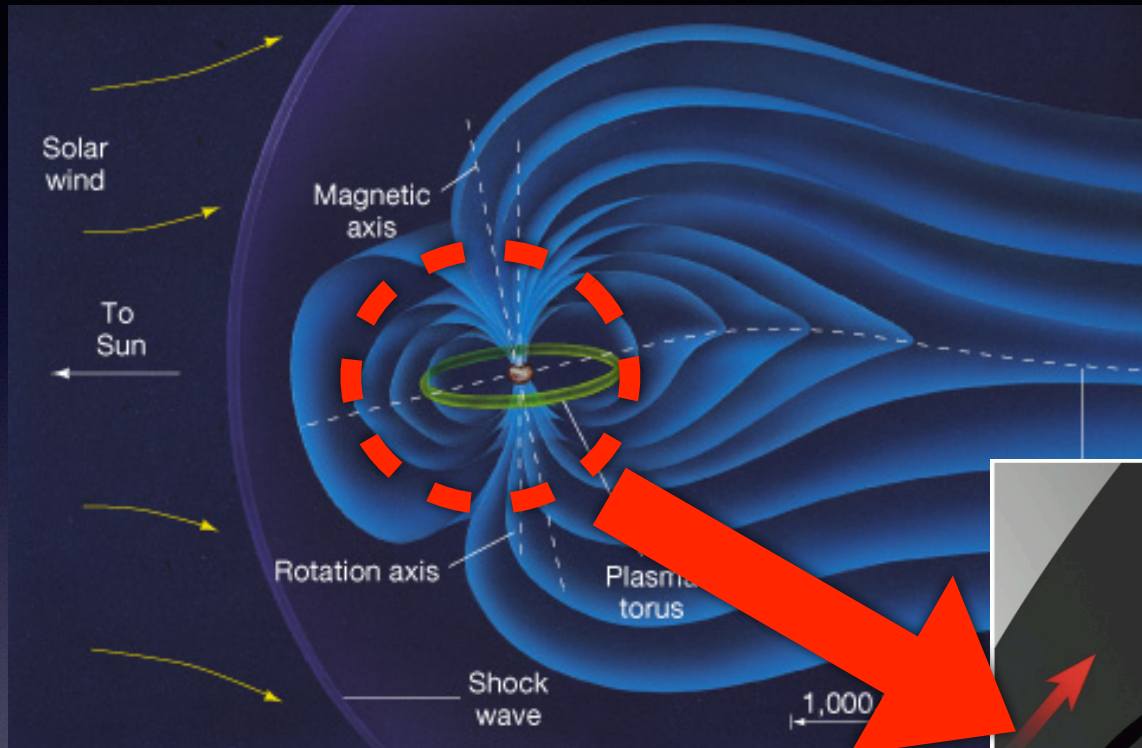
太阳风动压

||

地磁场压强

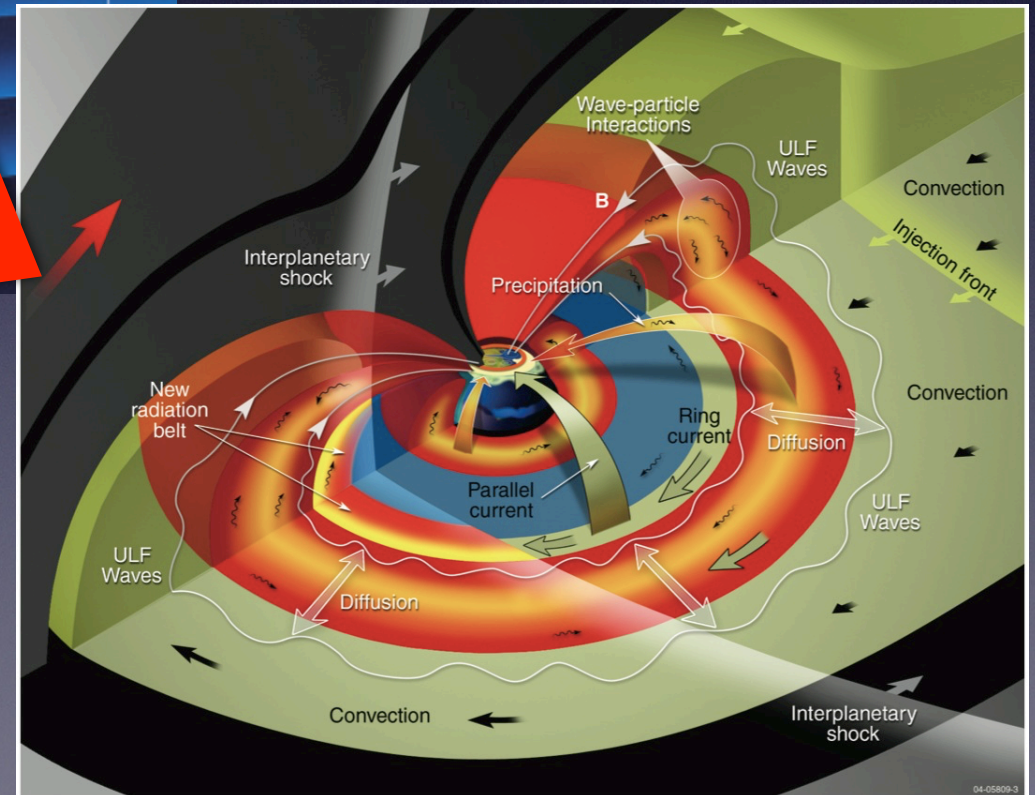


# 磁层结构：内磁层



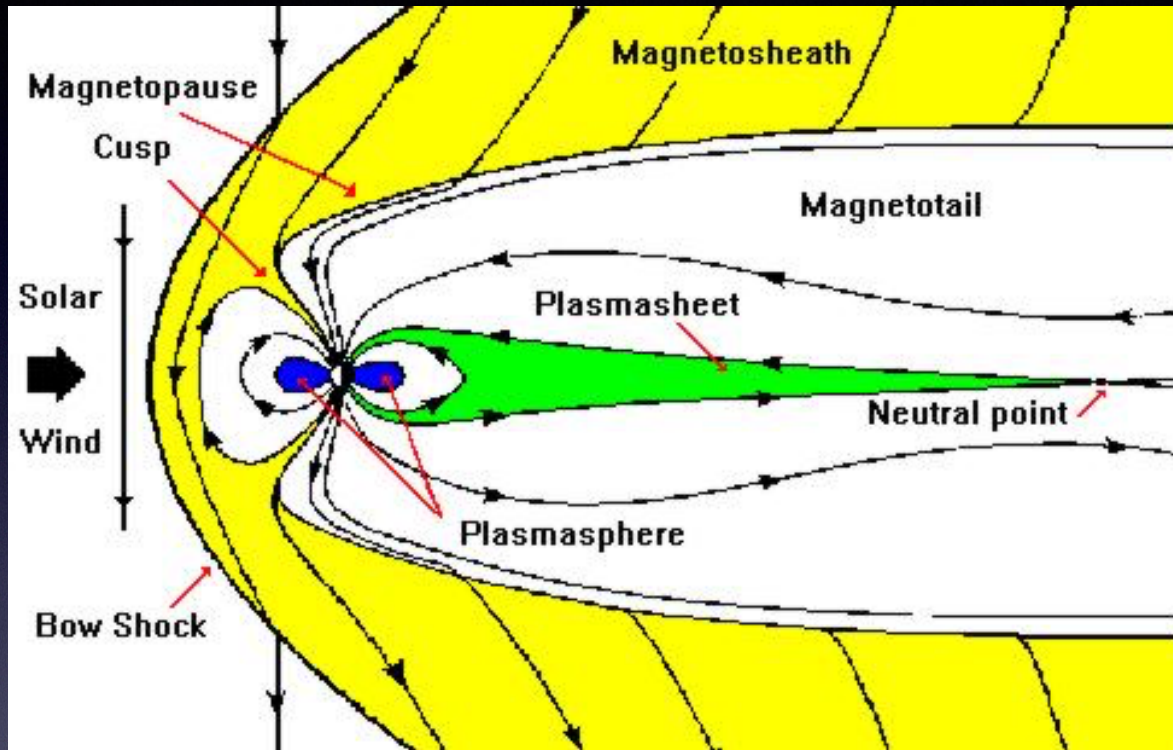
区域： $<10R_E$

- ★ 受地磁场控制
- ★ 包含辐射带
- ★ 形成对流电场





# 磁层结构：外磁层



★太阳风、磁层、电离层相互作用的强耦合区

★磁场与等离子体的强相互作用常表现为空间和时间上的突变。

磁鞘

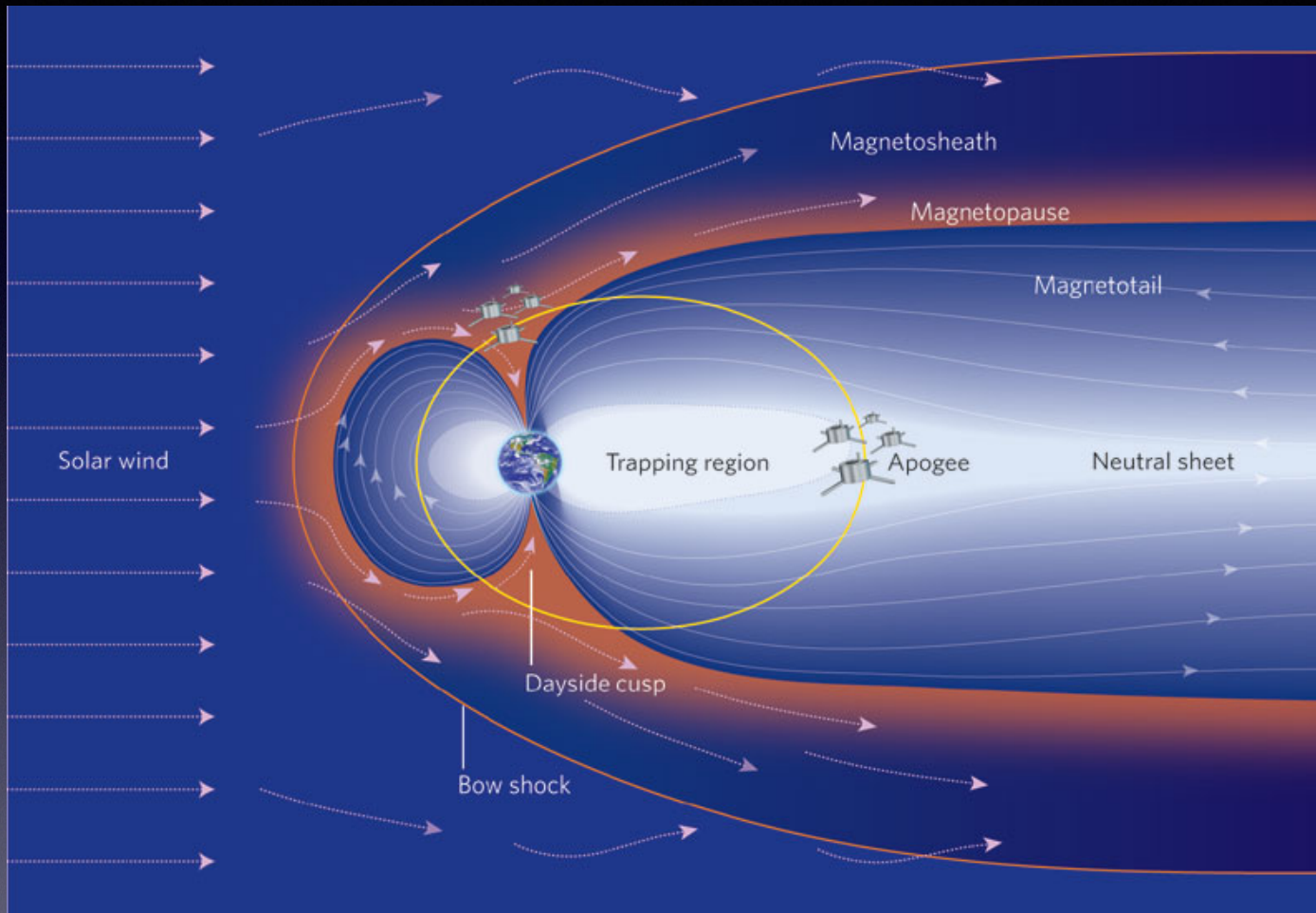
磁层顶

磁尾

开放磁场



# 磁层结构：磁鞘



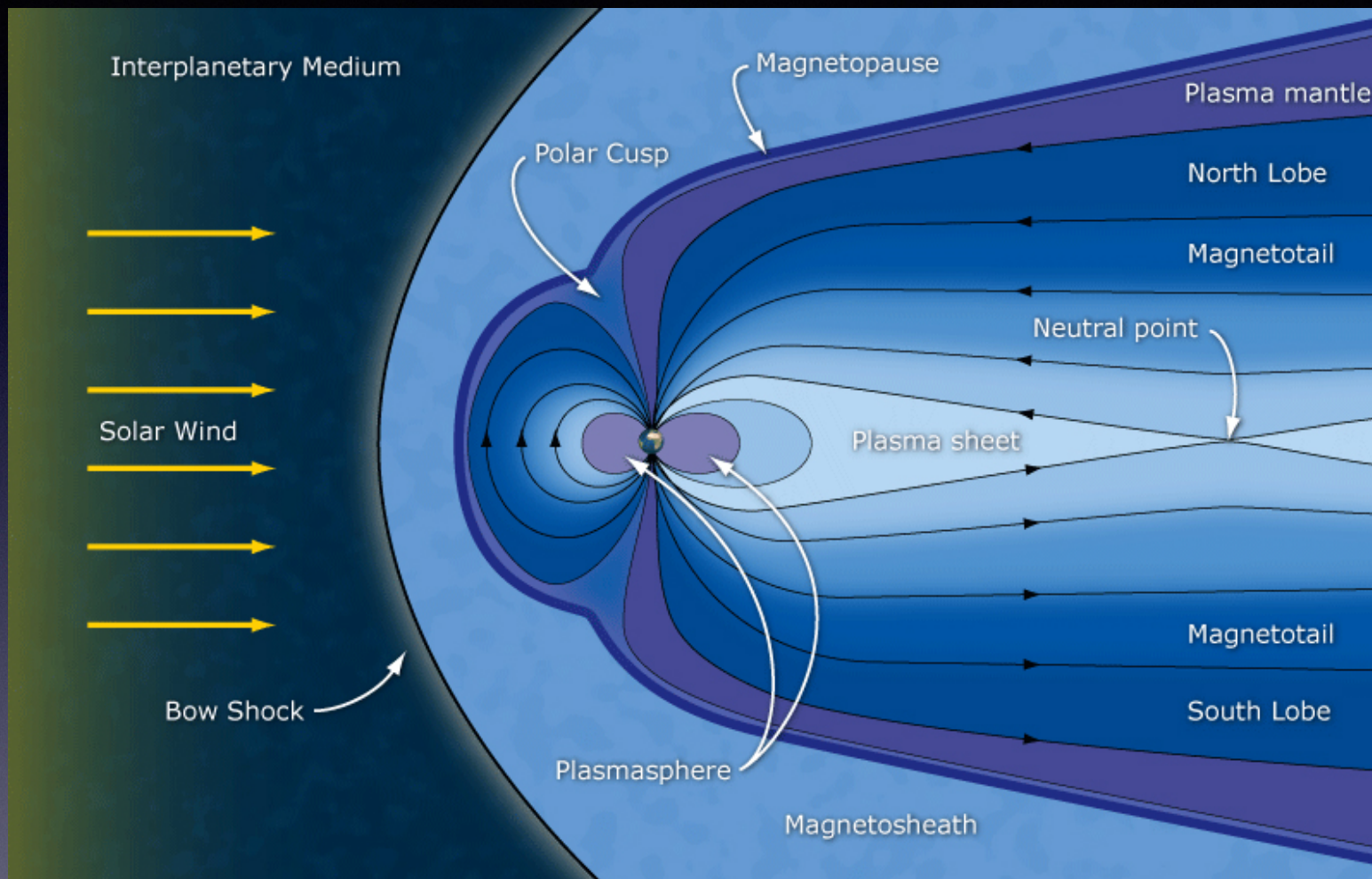
★ 主要物质来自太阳风

★ 流动方向偏离日地连线 $20^\circ$ 以上

★ 流速比太阳风低



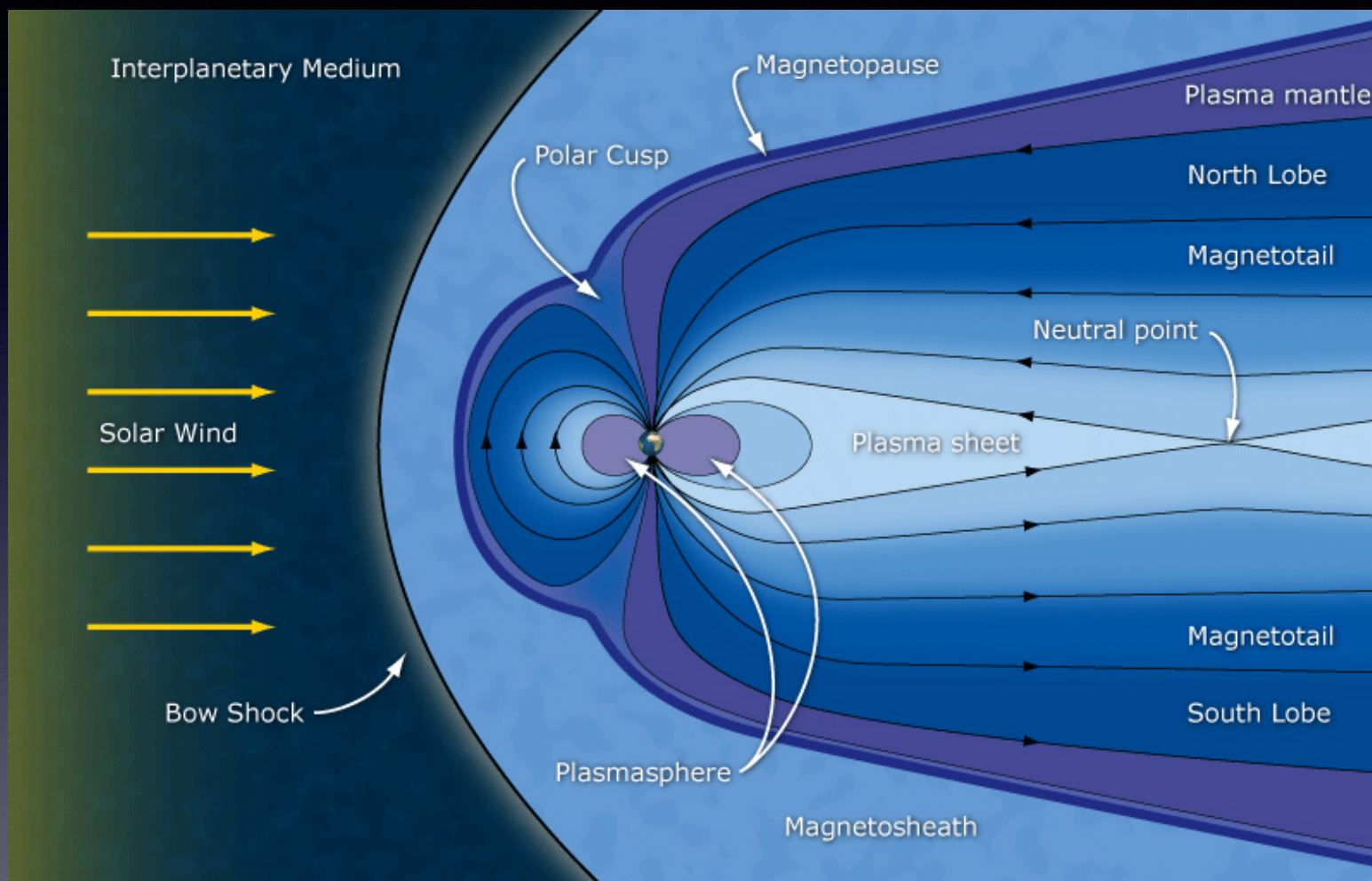
# 磁层结构：等离子体幔



★ 能谱和流速与磁鞘类似的等离子体区域



# 磁层结构：极尖区



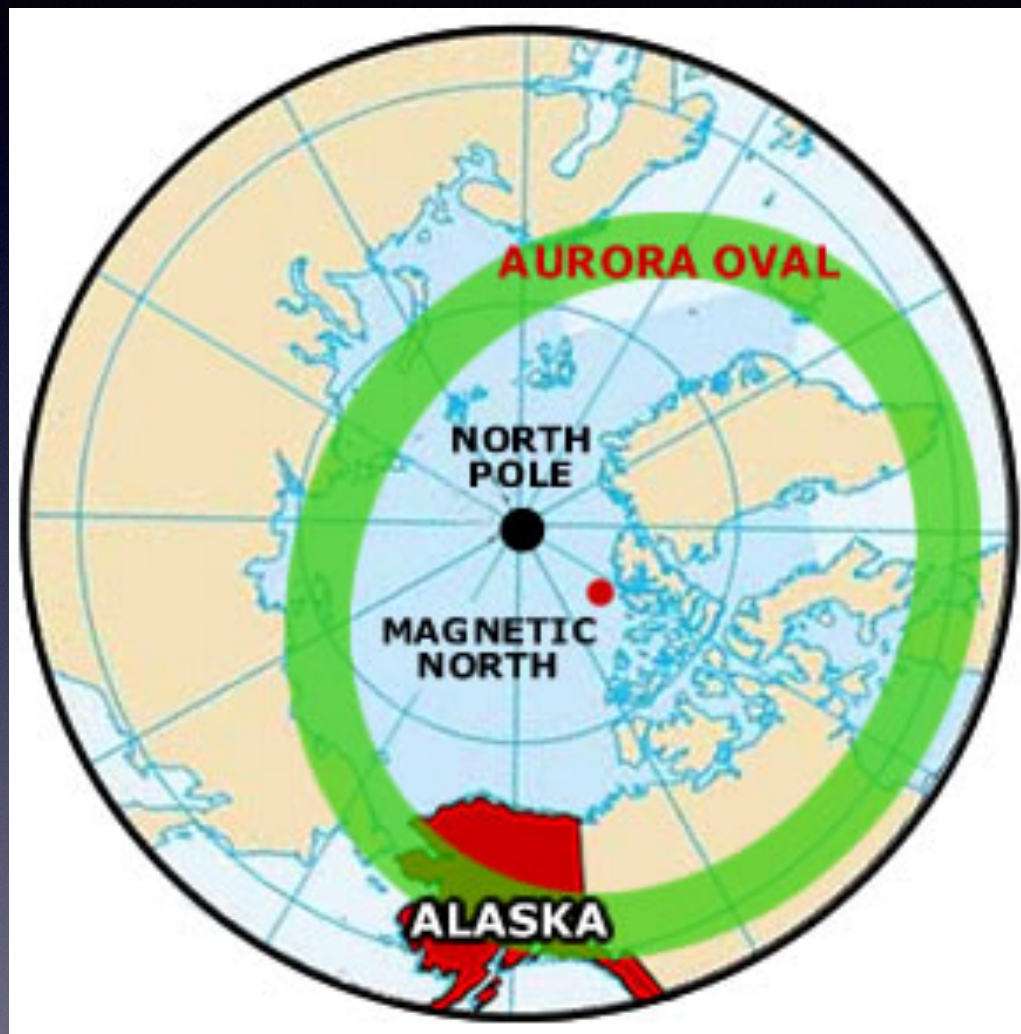
★ 总磁场为0的中性点

★ 太阳风粒子可直接进入磁层

★ 连接地球表面 $\pm 78^\circ$ 附近



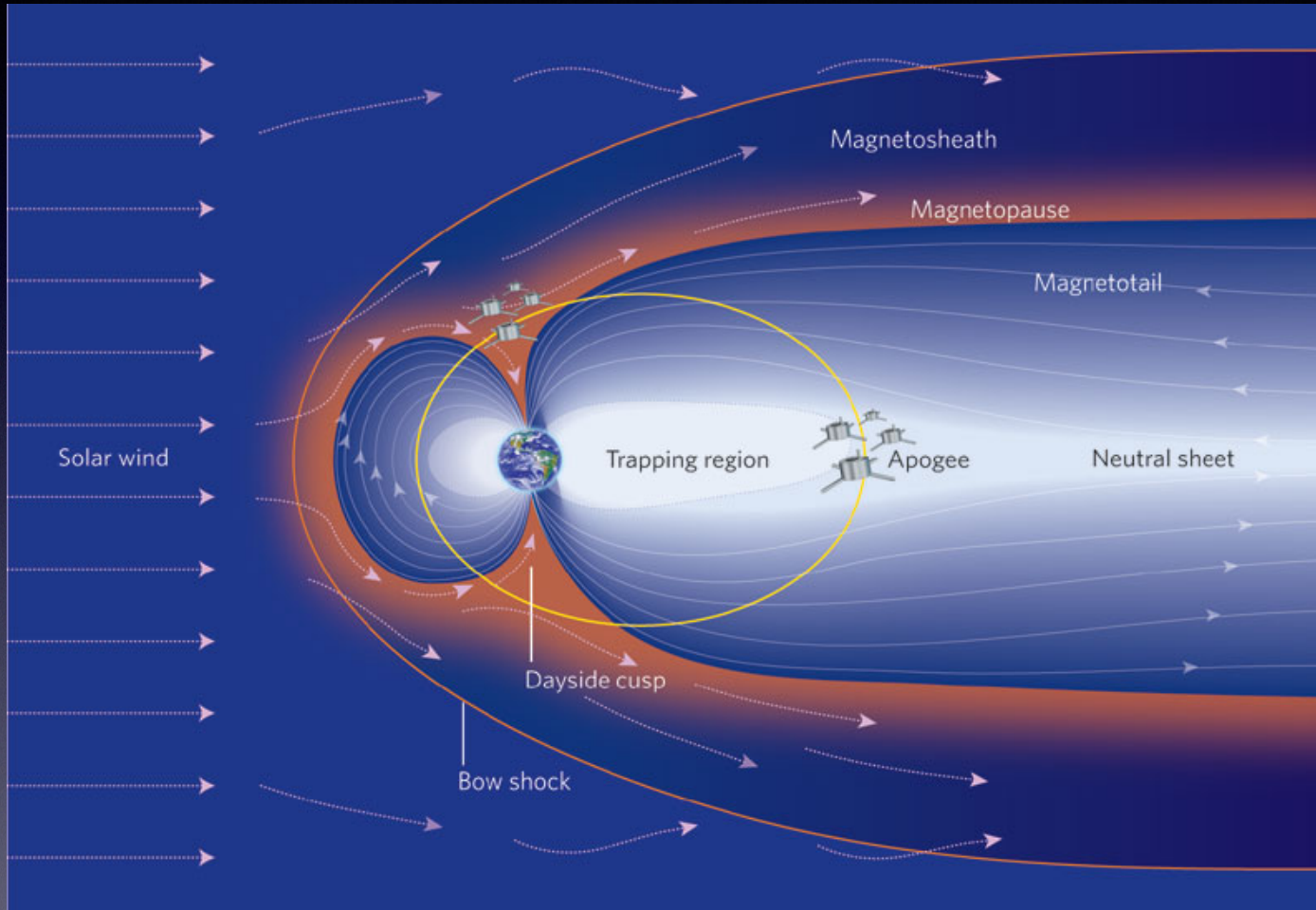
# 磁层结构：极光卵



极光卵：带电粒子进入大气层的区域



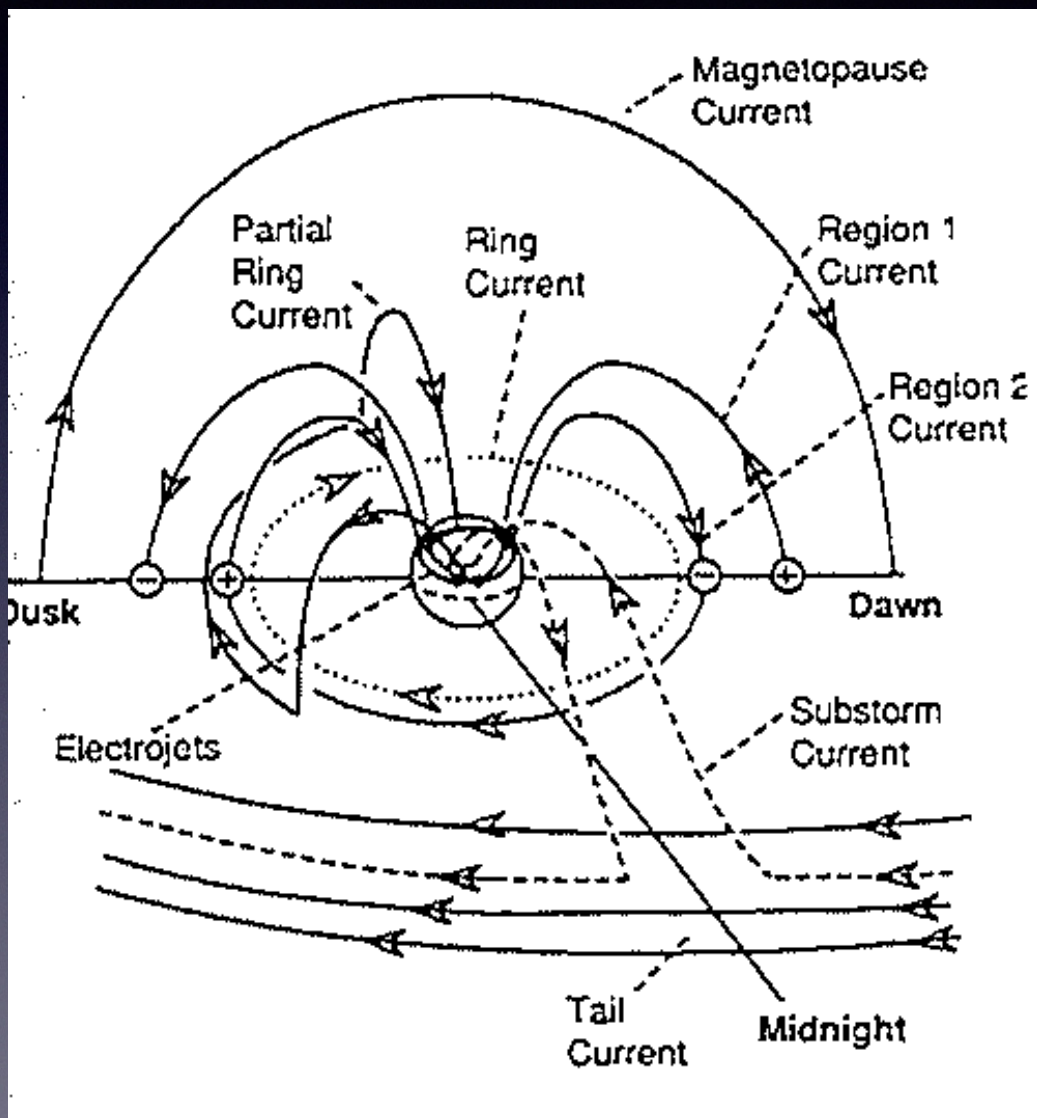
# 磁层结构：磁尾



★ 反太阳方向,  $>10R_E$



# 带电粒子在地磁场中的运动



★ **回旋运动:** 围绕磁力线

★ **弹跳运动:** 在磁力线南

北两个共轭点间

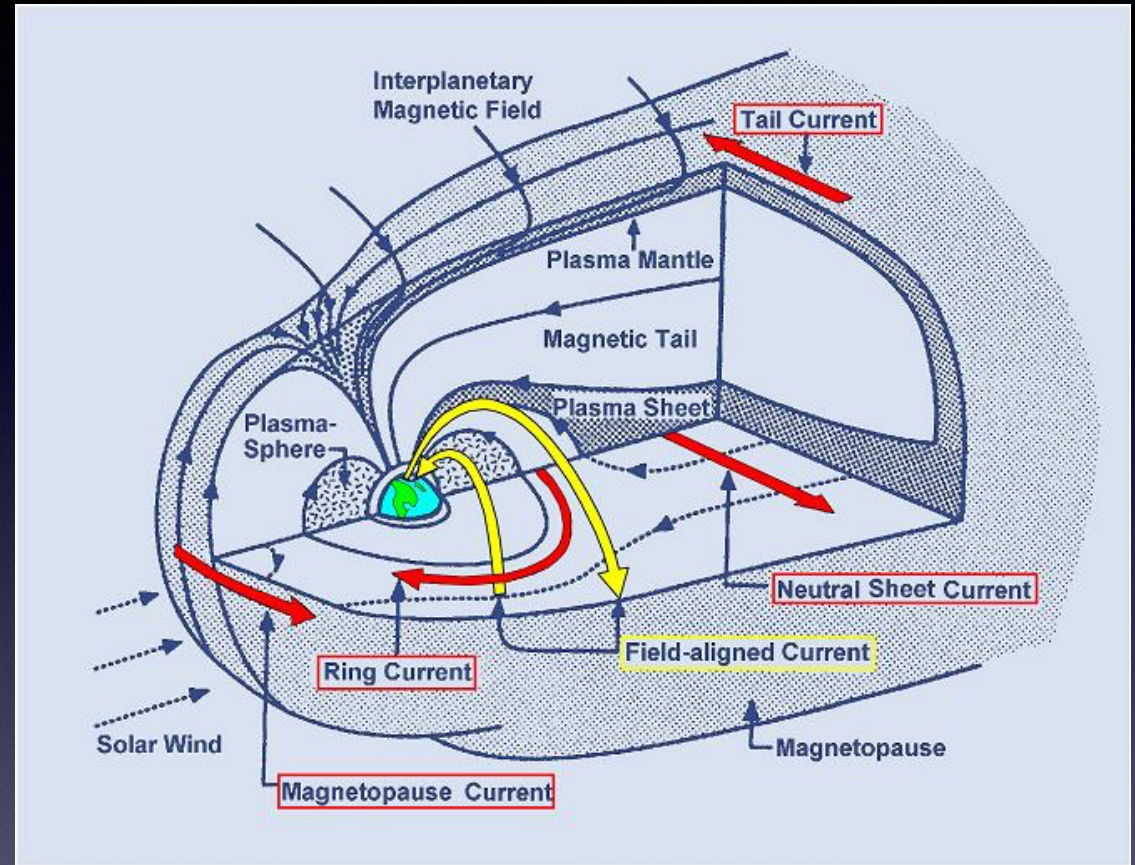
★ **漂移运动:** 赤道上空垂

直磁力线



# 环电流

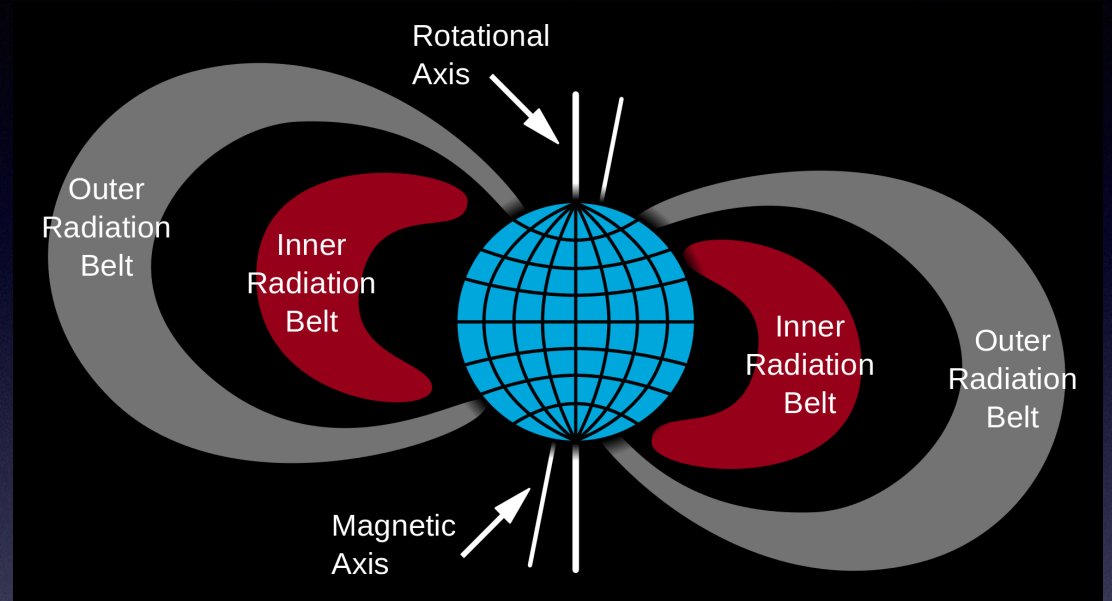
在做漂移运动的时候，质子和电子的运动方向相反，因此，这种漂移运动在赤道上空产生了围绕地球的电



- ★ 离子的混合表明环电流的粒子源不止一个
- ★ alpha粒子是典型的太阳风离子



# 辐射带



★ 内辐射带(1.2-2.0  $R_E$ )

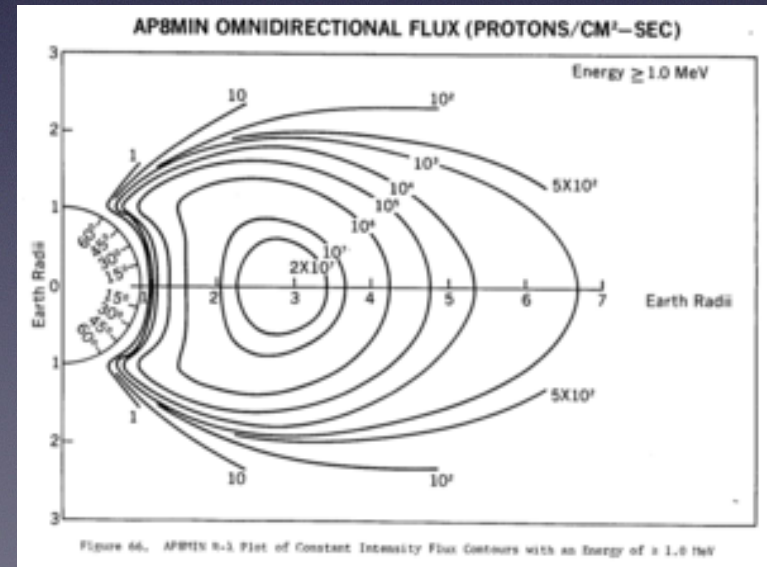
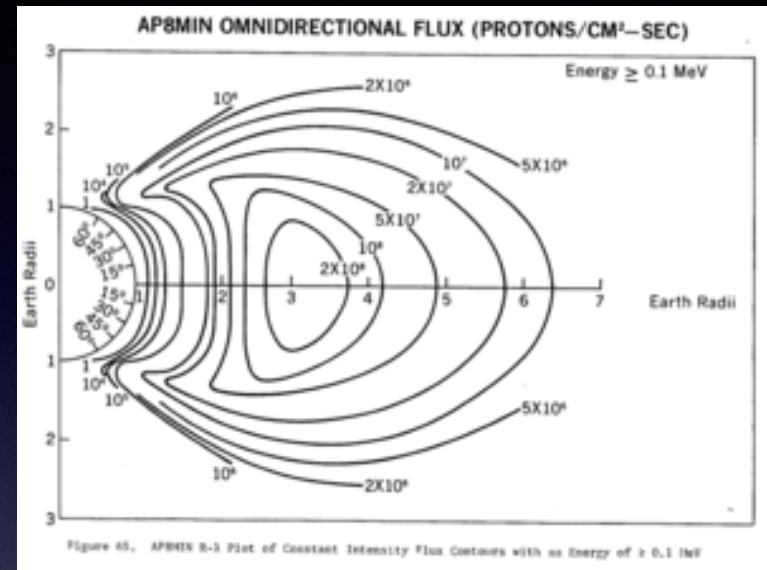
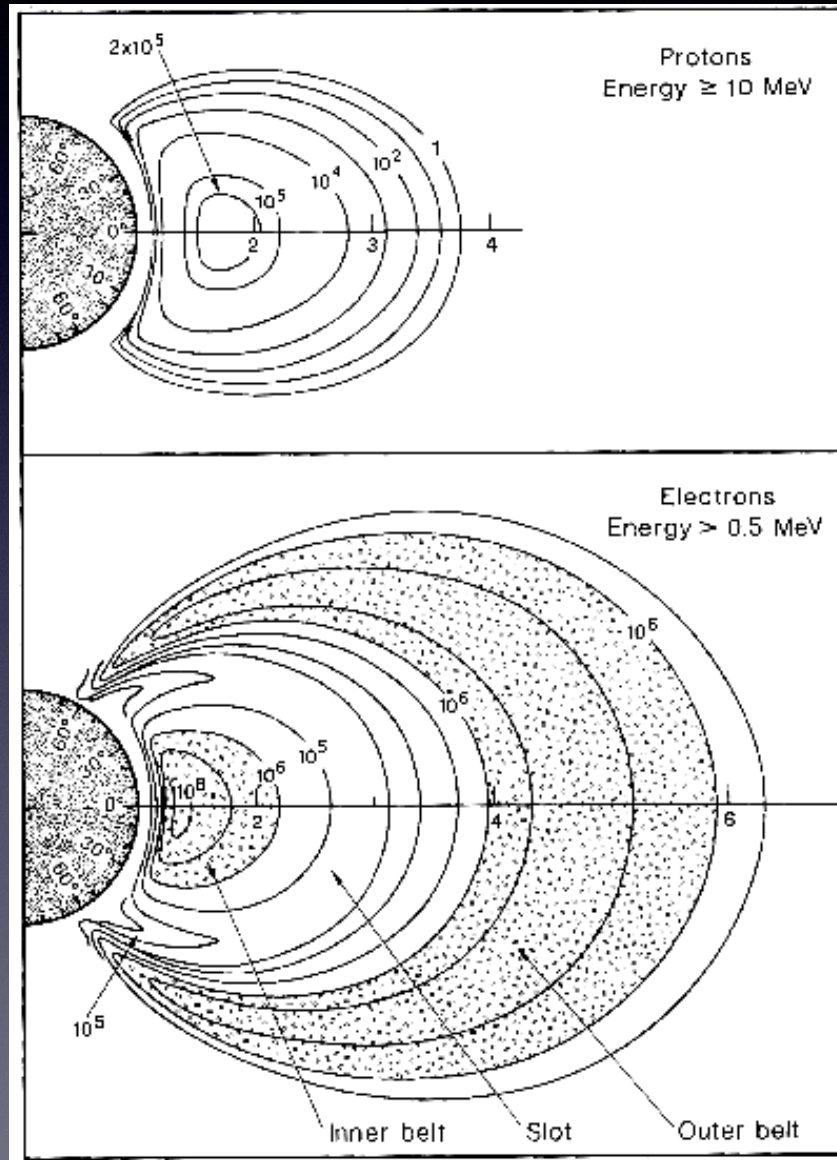
>100MeV protons

★ 外辐射带 (3.0-8.0  $R_E$ )

>0.1MeV electrons

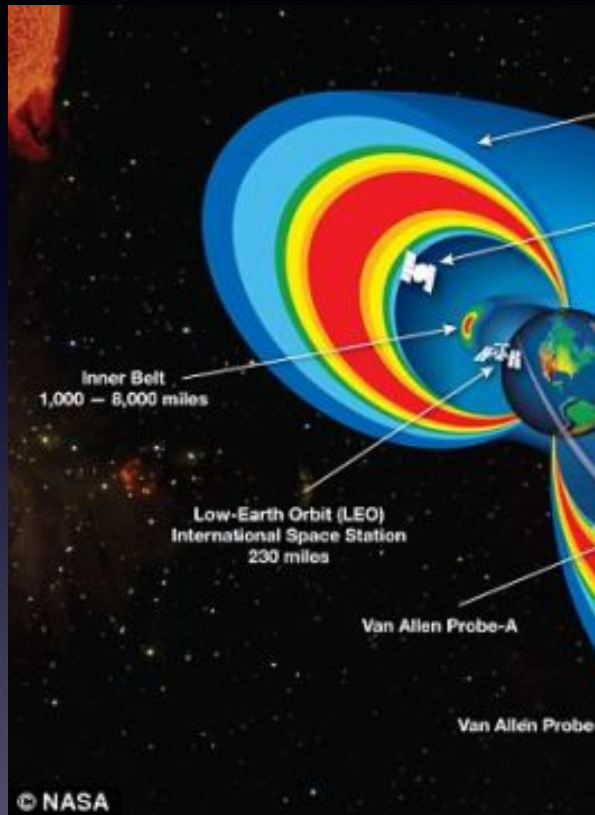


# 辐射带中的粒子分布

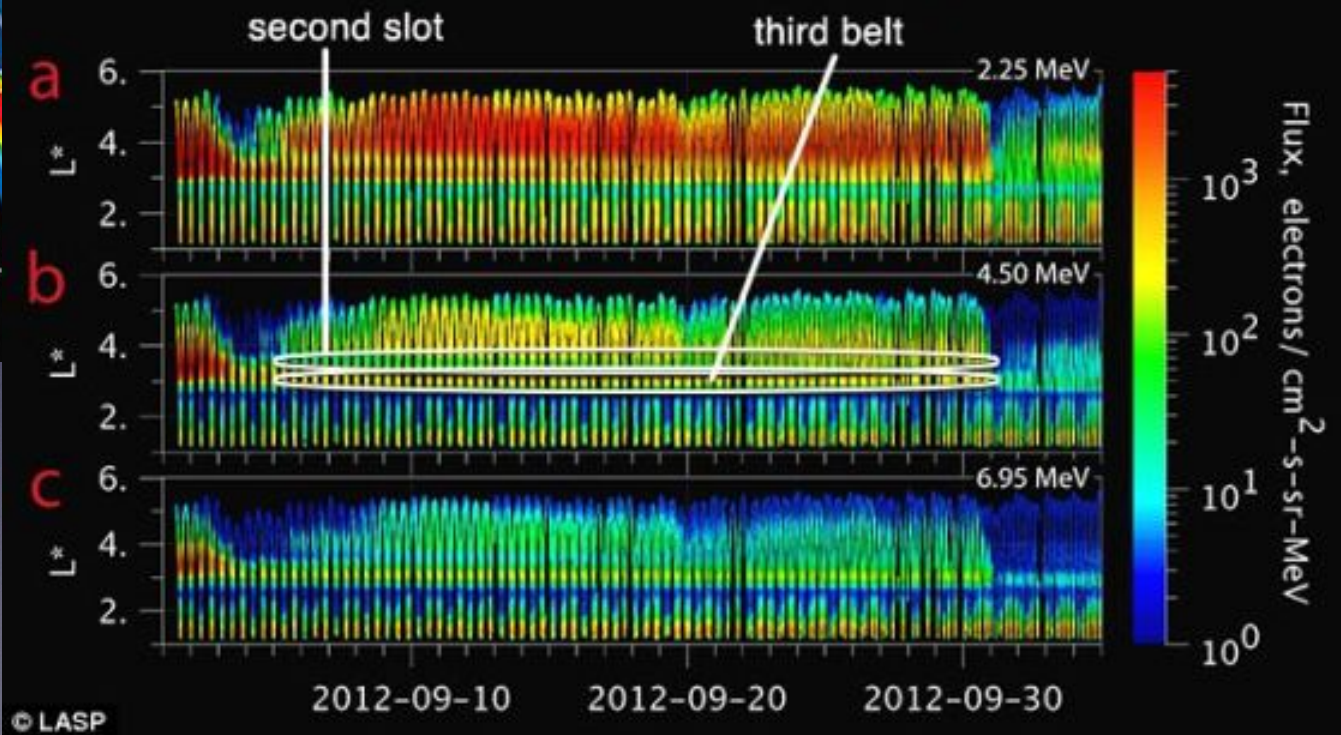




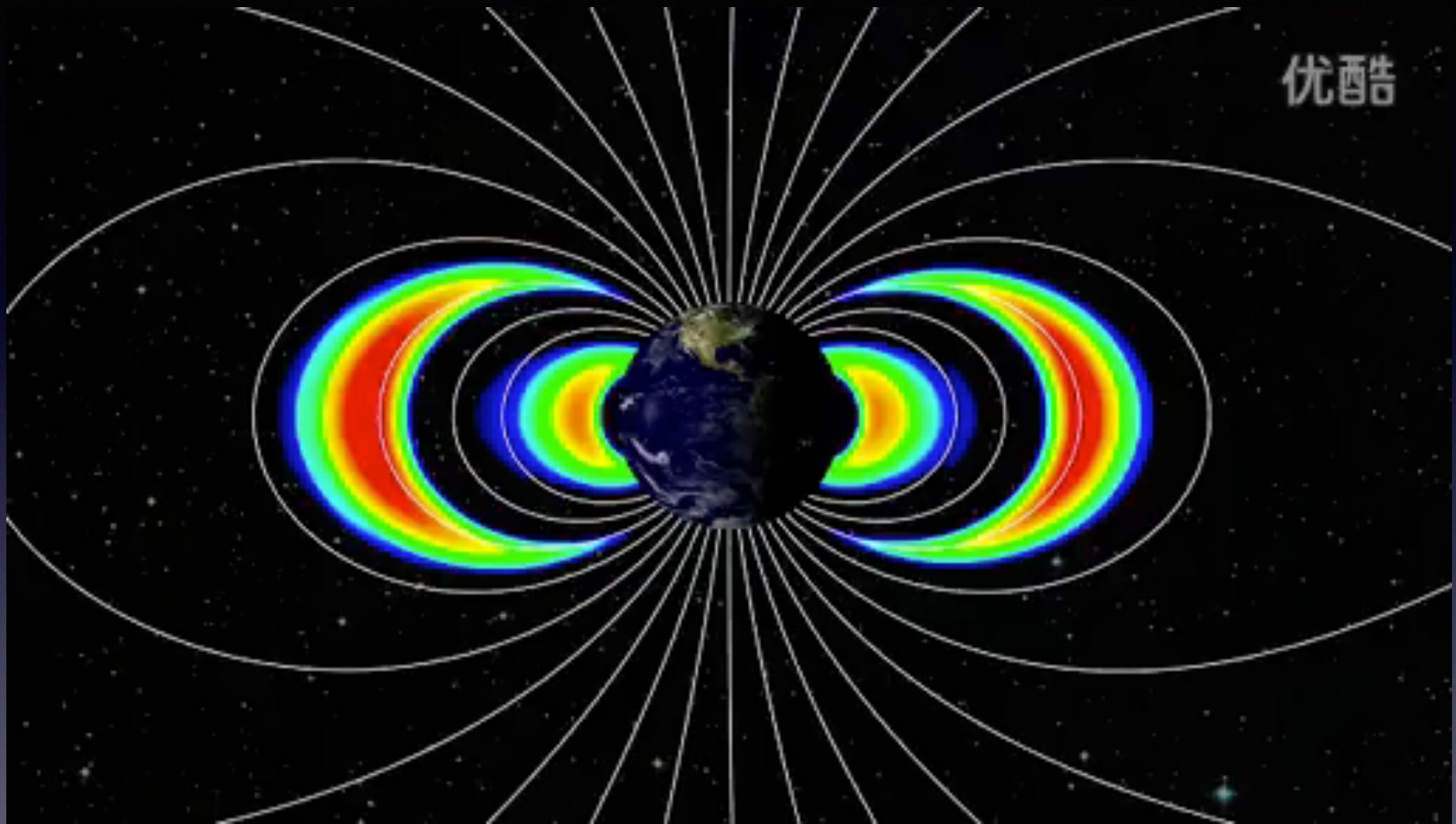
# 辐射带：第三辐射带



## Energetic electron data from the Relativistic Electron-Proton Telescopes (REPT) on the Van Allen Probes





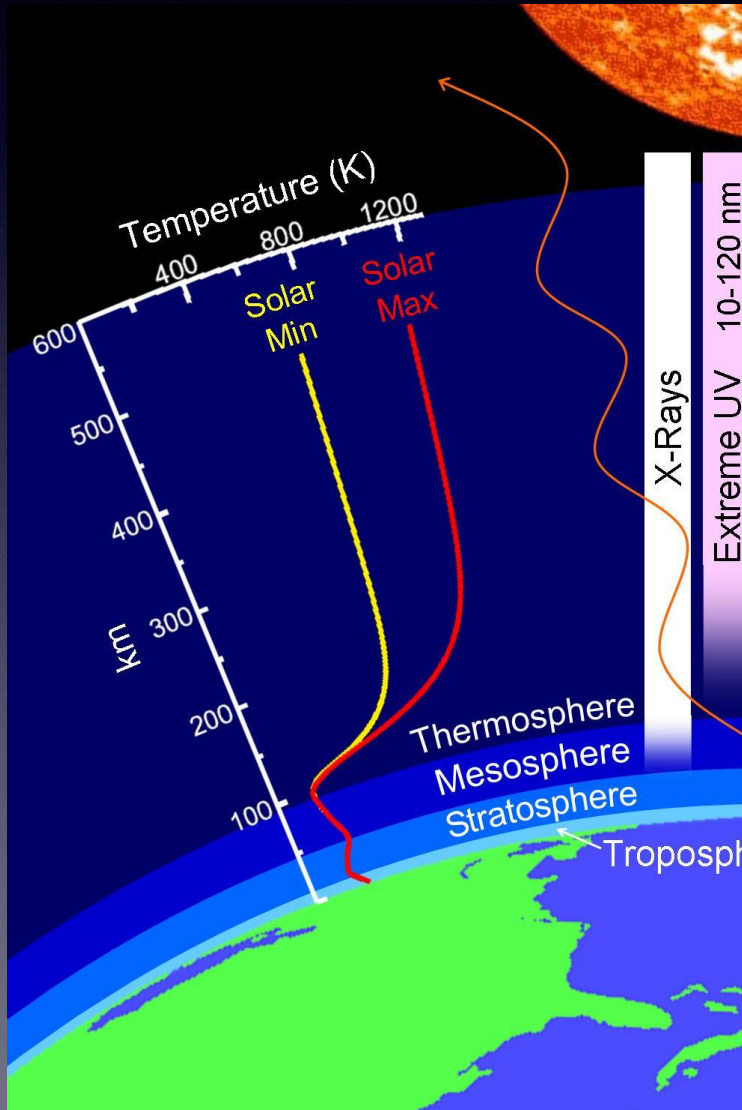


Van Allen卫星探测到的地球辐射带变化



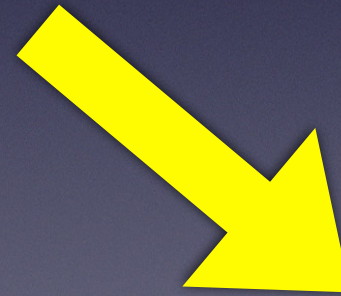
# 3. 地球空间对太阳活动的响应

## 3.1 大气对太阳活动的响应



主要受太阳紫外辐射的影响

太阳活动强



温度密度升高



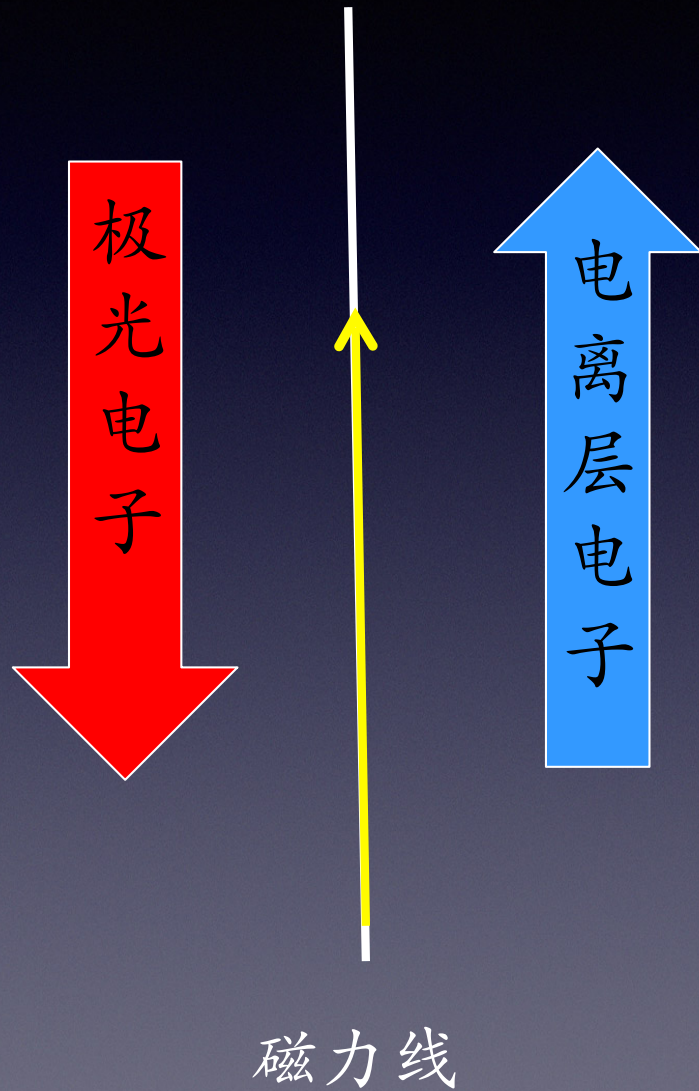
# 影响大气特征的主要因素

## 地磁活动：突发、短促、局部

- 在磁扰动期间，高能极光粒子加热大气；
- 太阳风电场从极区向下进入电离层，与地磁场作用驱动电离层电流；
- 粒子碰撞中性大气，驱动一个双涡旋风体系
- 等离子体摩擦加热引起焦耳热；
- 极光带上层大气向上运动，这种运动和对流驱动的中性风产生成分和密度的变化，这种变化从高纬度传播到低纬。



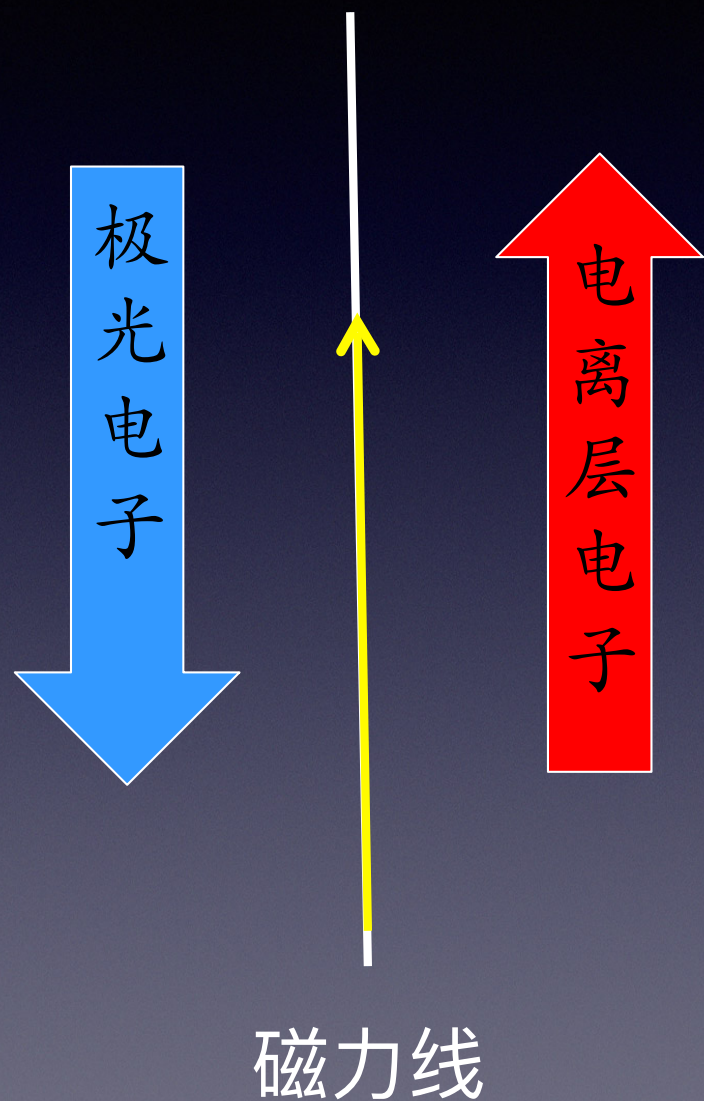
# 电离层与磁层的耦合：通过大尺度场向电流的电动耦合



**极光电子：**携带相当大的能量进入高层大气，对电离层和中性大气都有明显的效应。除了激发极光发射外，极光电子沉降还增加了高纬电离层的等离子体密度和电导率，提供了兆瓦级的能量加热高层大气，极大地影响全球热层风的形态。



# 电离层与磁层的耦合：通过大尺度场向电流的电动耦合



**电磁层到磁层的等离子体外流：**在接近太阳活动最大时的磁扰动期间，这种外流通量达 $10^{26}/s$ 个离子。电离层的等离子体外流以几种形式发生：超声速的极风、极盖外流、来自极光区的向上等离子体束等。除了这些高纬源外，在强地磁扰动时还观测到来自中纬电离层的 $O^+$ 外流。



- 某些磁层过程使其中的带电粒子获得很高能量后又可沿着地磁力线沉降到高纬地区的电离层中。
- 磁层和太阳风相互作用形成的大尺度磁层电场也沿着高电导率的地磁力线传递到高纬电离层，而电离层的变化又可对磁层电场施加一定得调制作用。



# 磁层-电离层耦合：极光

太阳风扰动与地球磁场相互作用会带来地球磁场的变化，以及沿磁力线的电流和电场。带电粒子在这一电场的作用下被加速沿着磁力线传播，穿透电离层直至地球大气，与大气中的分子或原子相撞导致电子跃迁发光，

绿色：与氧原子碰撞

蓝光或者红光：与氮碰撞





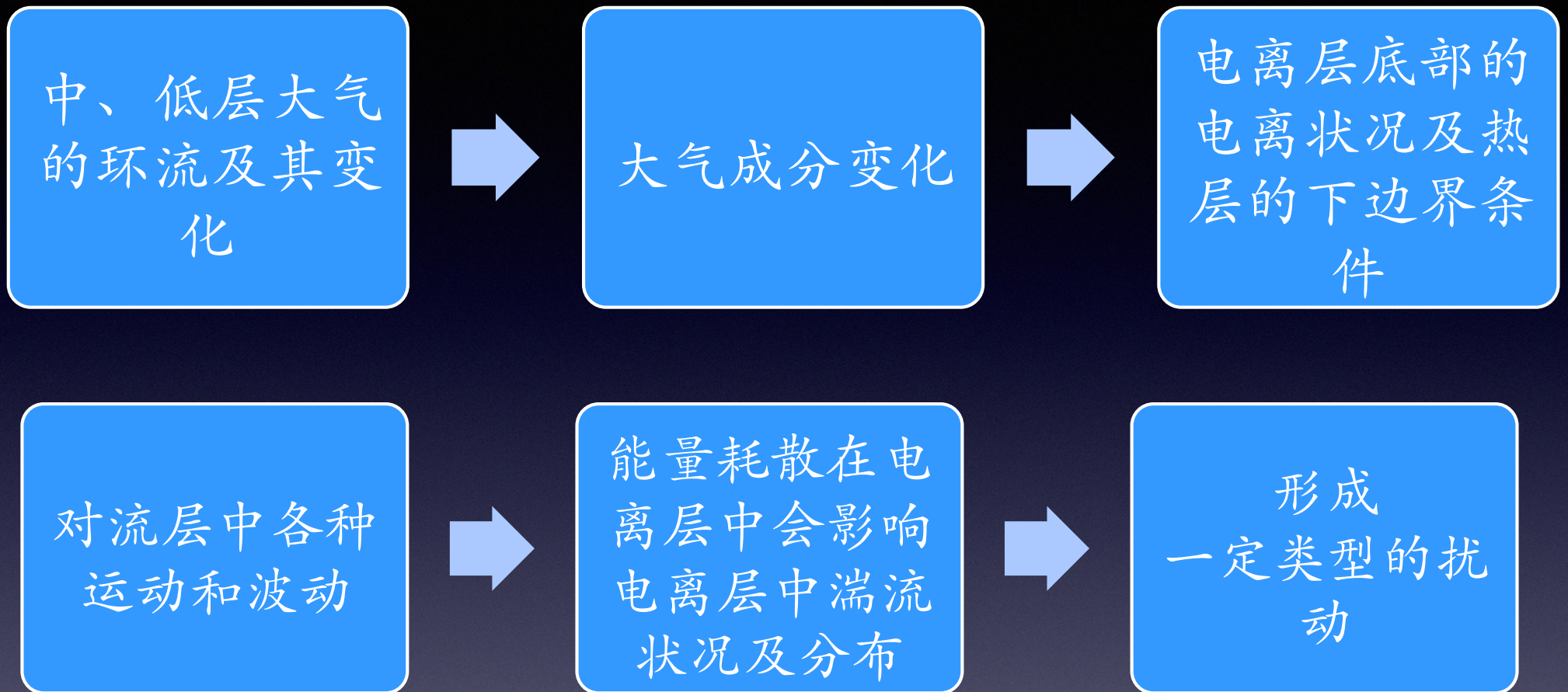
**极光高度：** 100 – 300km，最低可到60km，最高可到900km

极光通常出现在南北纬60-70°的区域，即极光带。

由于地球磁轴与自转轴存在约11°的偏离，在相同地理纬度条件下，北欧和北美的地区因为磁纬度高更容易看到极光，而我国则比较难看到极光，只有在漠河与新疆的山口地区有可能看到极光。







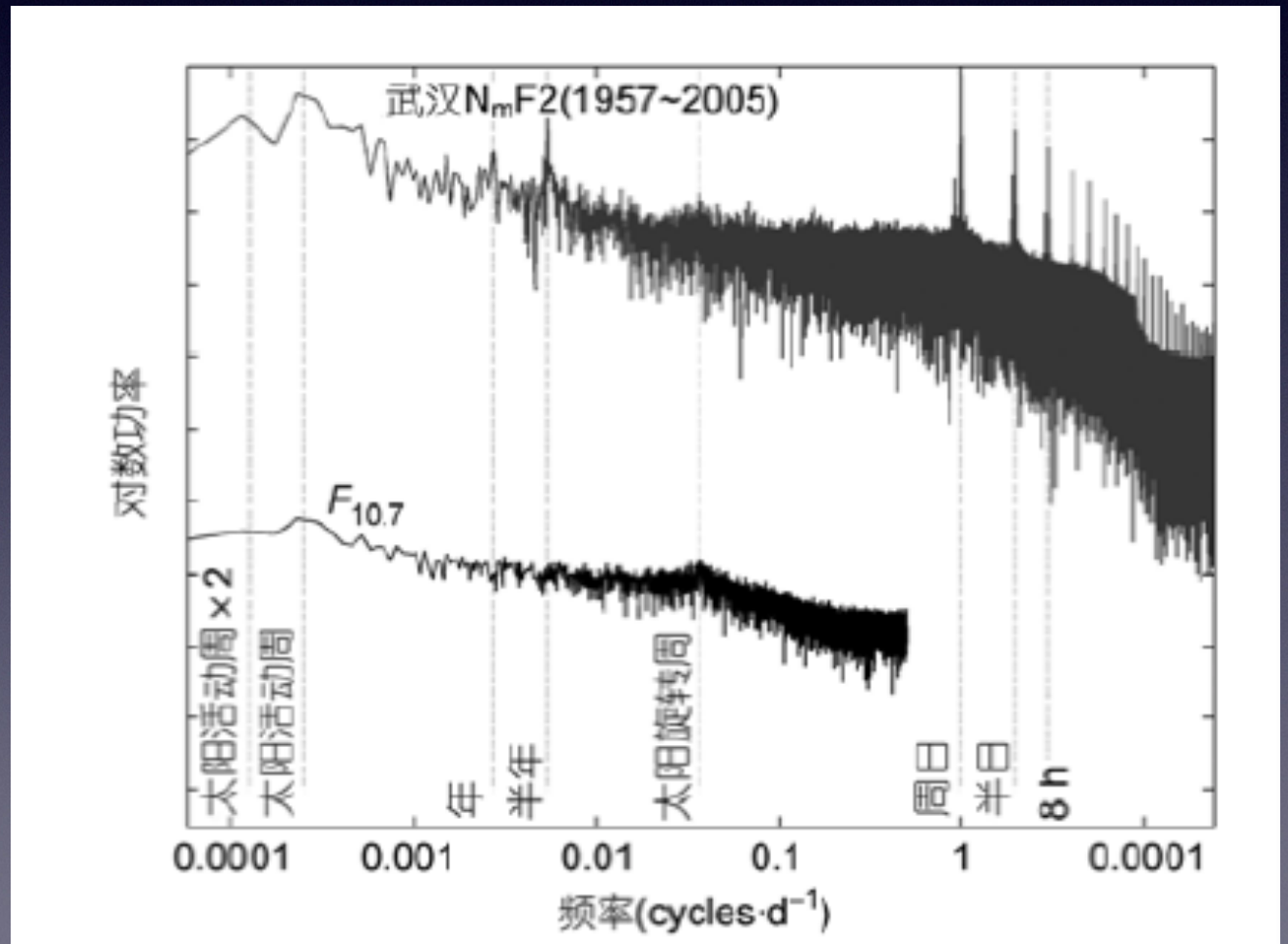
太阳活动与太阳辐射直接影响电离层!



# 电离层和热层天气

**电离层的变化性：** 电离层的基本形态在很大程度上随太阳天顶角变化，表现出明显的纬度、地方时和季节变化特性。也受太阳辐射变化的影响。

太阳辐射变化的时间尺度涵盖从太阳耀斑爆发、天、太阳自转周到太阳活动周、甚至更长周期的分量。





★**周日变化**：受光照影响。电离层F2层受太阳辐射控制，周日变化最明显。日出在光电离作用下电子密度快速增加；随后，白天的电子浓度缓慢增加，在午后达到最大。在日落后随着光电离源的小时二逐渐衰减。

★**逐日变化**：变化强度在夜间比白天大，冬季比夏天大，太阳低年比高年大，极区比赤道和中纬度地区大。

**主要来源**：太阳电离辐射、太阳风和地磁活动、近地大气扰动、地震活动以及电动力学过程

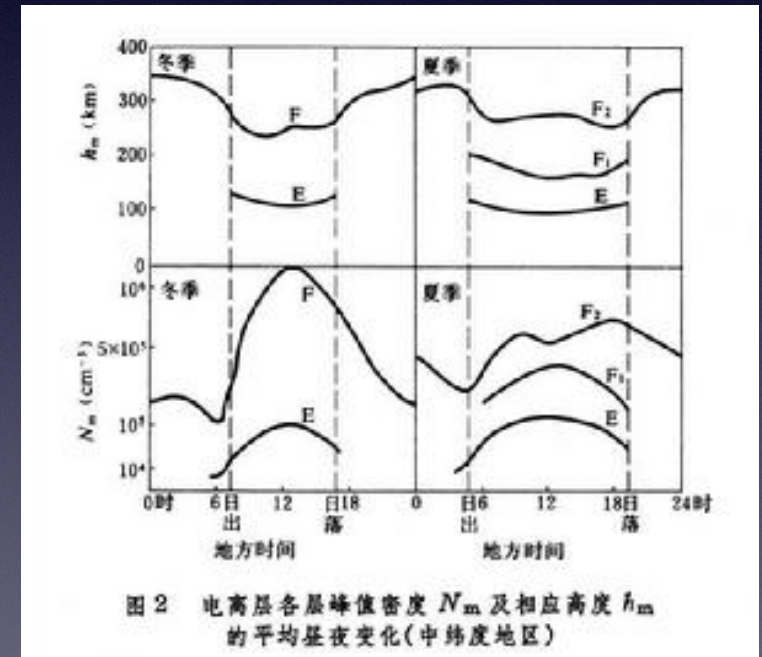


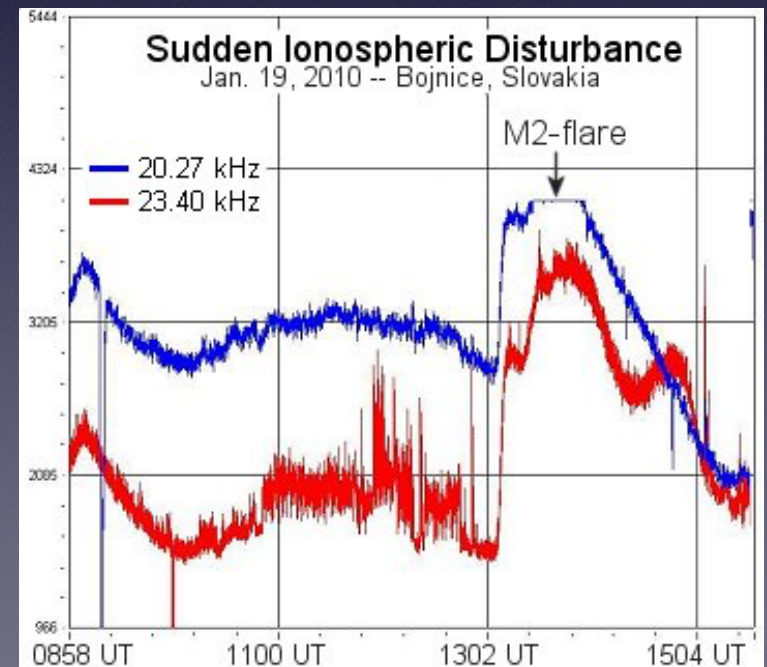
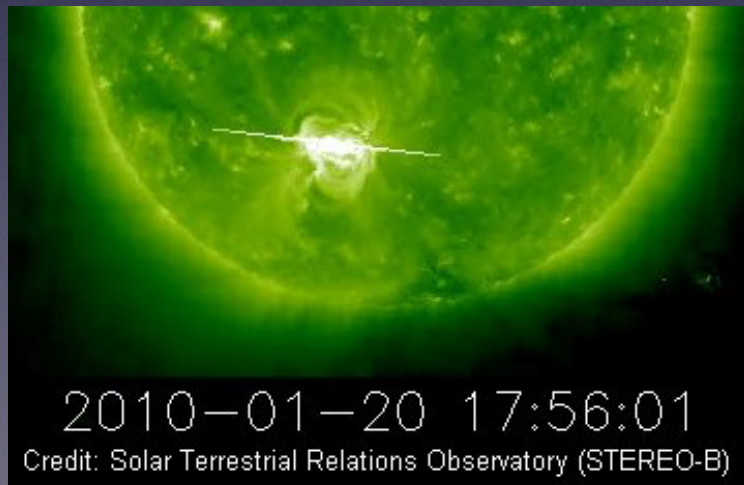
图2 电离层各层峰值密度  $N_m$  及相应高度  $h_m$  的平均昼夜变化(中纬度地区)

季节变化、太阳活动周变化、长期变化



# 突发电离层骚扰 (SID)

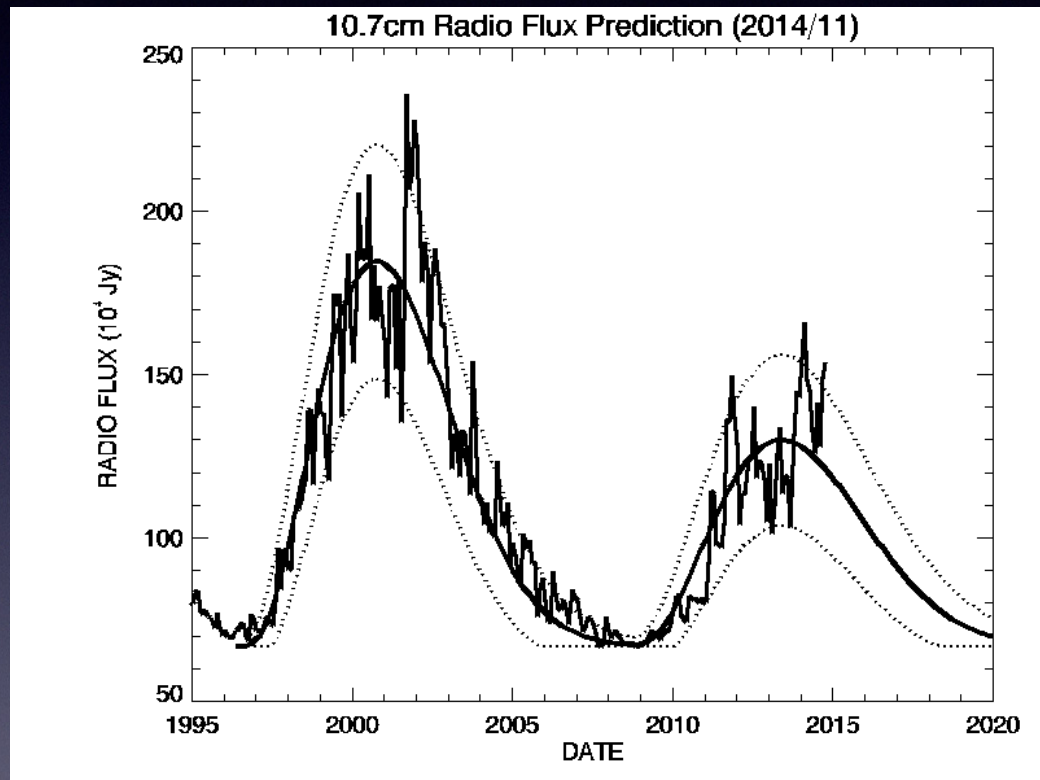
高层大气对太阳耀斑紫外和X射线暴的直接响应是几分钟到几小时时间在向阳半球电离的突然增加，短波无线电信号立即衰落甚至完全中断，这种现象称突然电离层骚扰 (SID)。由于短波效应突出，这种现象也称短波衰落(SWF)。





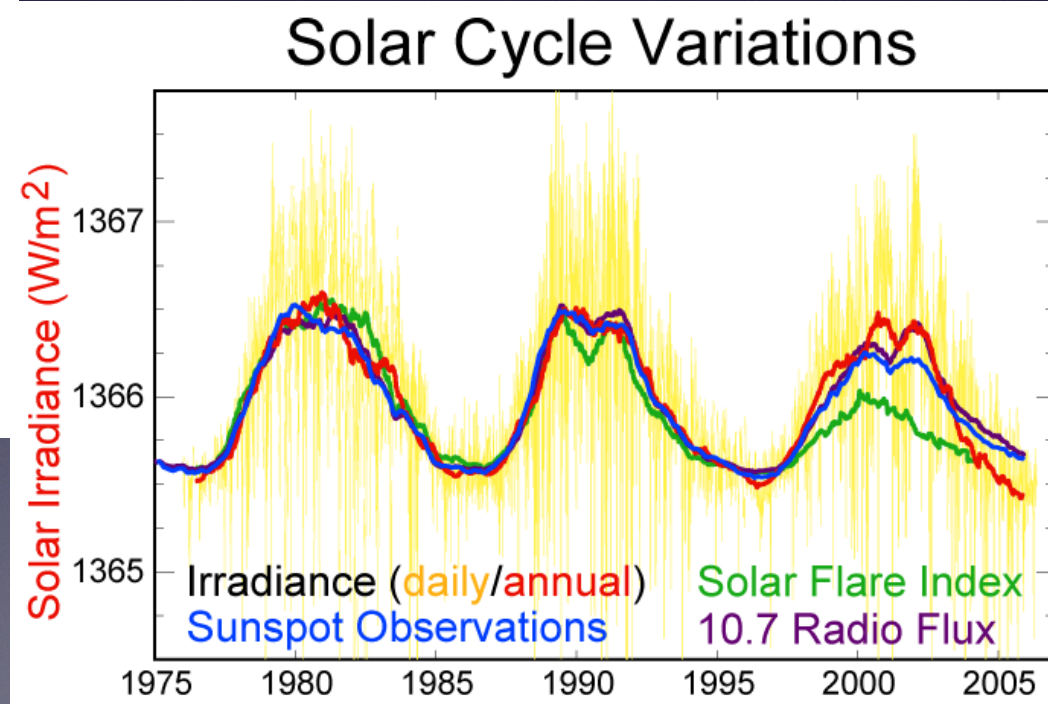
# 10.7cm的射电通量 (F10.7)

太阳10.7cm波长(2800MHz): 描述宁静太阳辐射强度的一个重要参量,其大小称为太阳F107指数.



单位: 太阳通量单位(SFU)

取值范围: 60 - 300



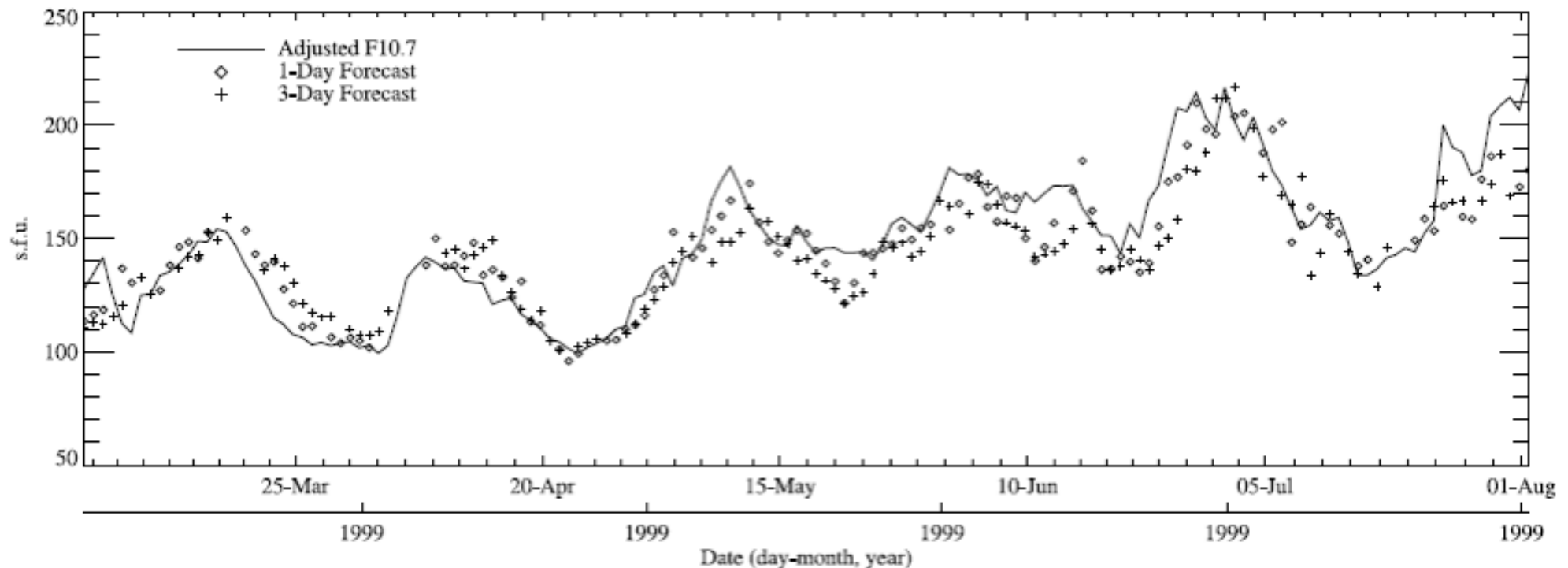


# 光球层磁场与F10.7指数相关

SPACE WEATHER, VOL. 10, S02011, doi:10.1029/2011SW000748, 2012

## Forecasting $F_{10.7}$ with solar magnetic flux transport modeling

C. J. Henney,<sup>1</sup> W. A. Toussaint,<sup>2</sup> S. M. White,<sup>1</sup> and C. N. Arge<sup>1</sup>





## 质子：极冠吸收

耀斑同时也释放高能质子。这些质子在耀斑爆发后15分钟至2小时内到达地球。这些质子沿地球磁场线螺旋在磁极附近撞击地球大气层，提高D层和E层的电离。极冠吸收可以持续一小时至数日，平均持续24至36小时。

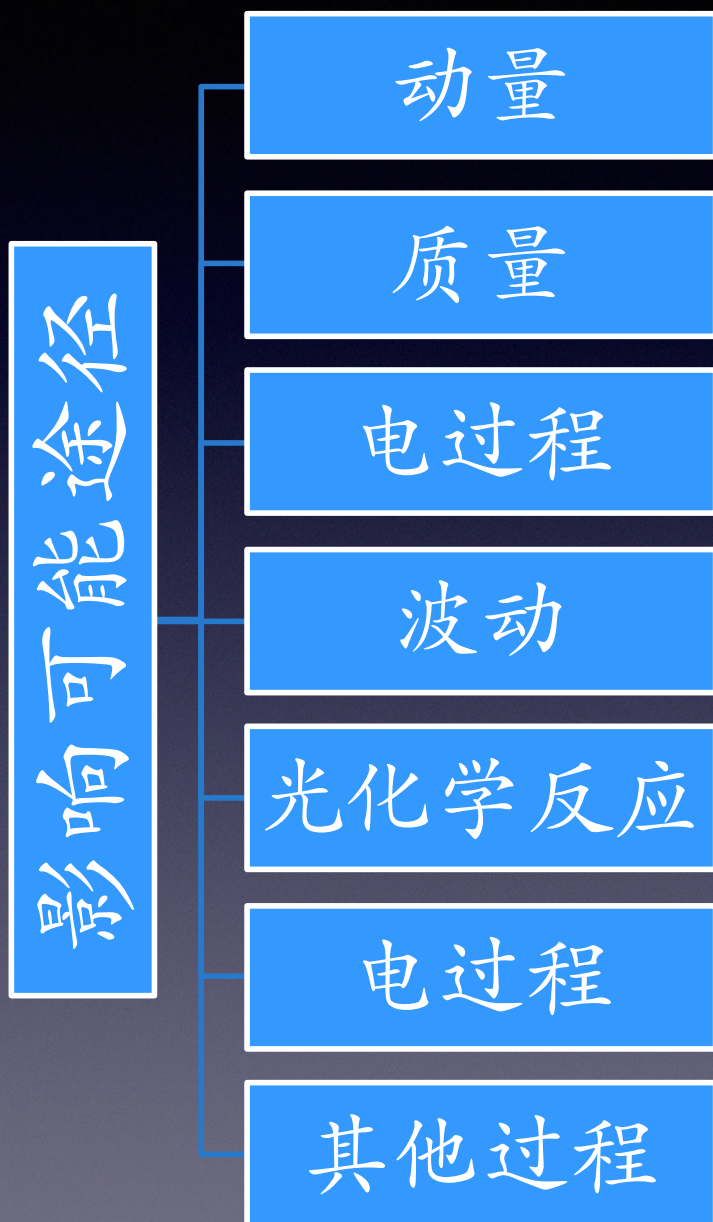
## 地磁风暴

地磁风暴是地球磁场暂时的、剧烈的骚扰。

- 地磁风暴时F<sub>2</sub>层非常不稳定，会分裂甚至完全消失。
- 在极地附近会有极光产生。



# 空间天气与对流层天气



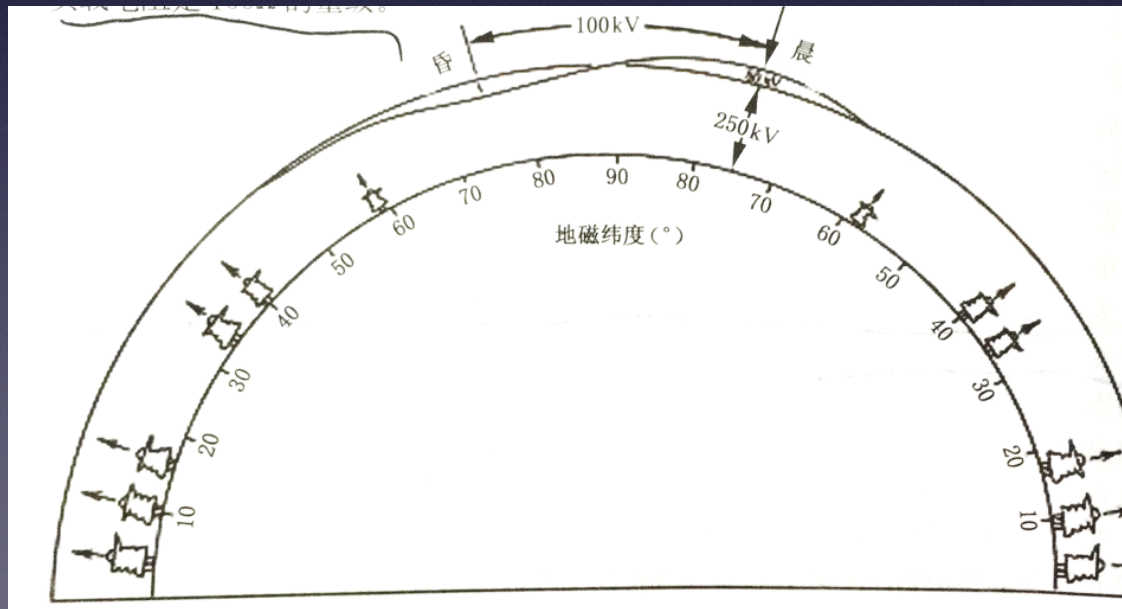
## 几个问题:

- ★**能量不足**: 太阳活动传给地球大气的能量远远小于气象现象所包含的能量→可能的触发机制→电过程导致的参数变化
- ★**传输途径能否一直到低层大气**→电的影响可以很容易的传到全球的低层大气
- ★**响应时间**→电过程可以有很快的响应时间



# 全球大气电路

- 地球表面晴天电导率： $10^{-14}$  mho/m
- 两级之间电导率随指数增加，标高为7km

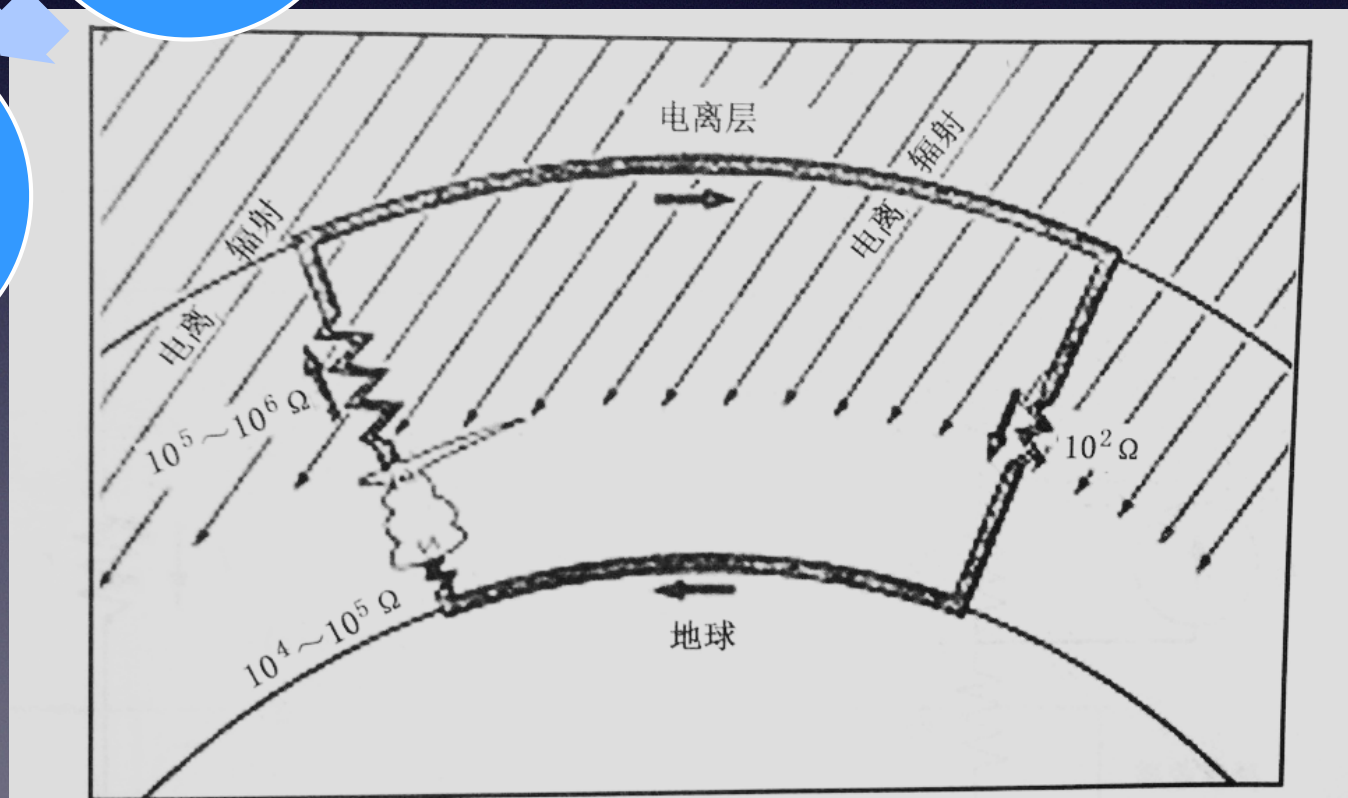
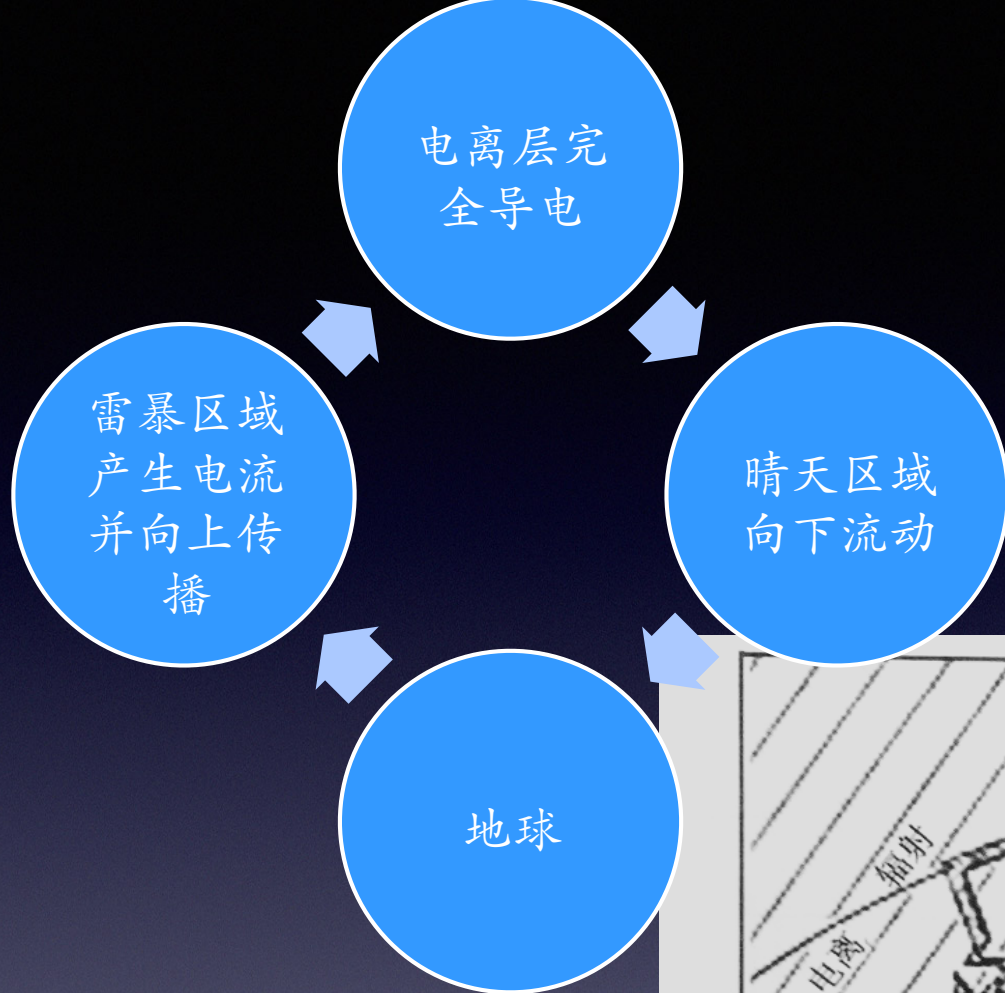


全球大气电路的球形电容器模型

- ✓ 60km以下：由银河宇宙线产生的正负离子
- ✓ 60km以上：自由电子
- ✓ 80km以上：电导率由于地磁场的影响变为各项异性

- ★ 电离层相对地面来说约有250kV的正电位
- ★ 电流由雷暴产生
- ★ 1A电流/每个雷暴





由磁层作用包围的全球大气电路



一般可将电离层看成等位面，相对于地球约250kV。

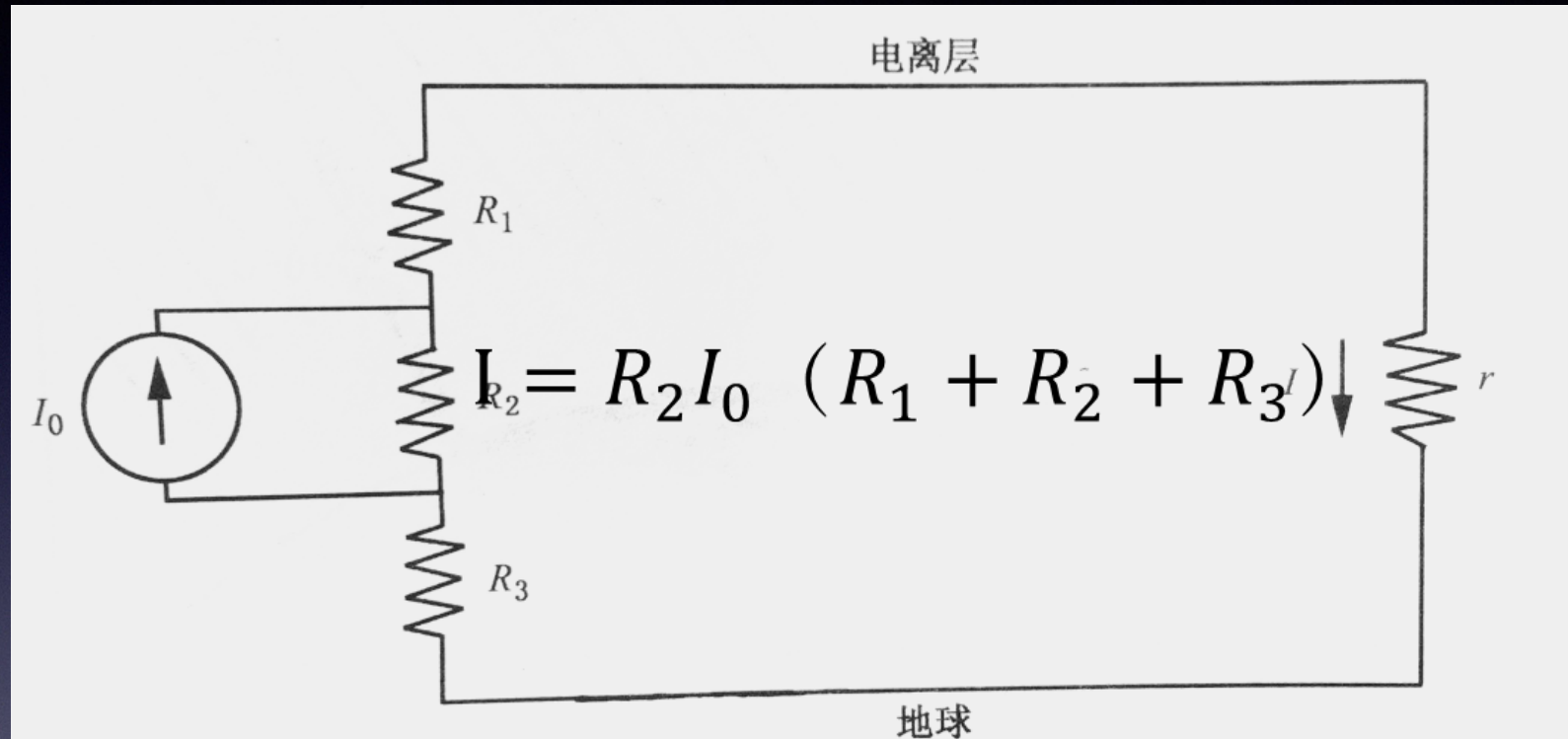
其他因素导致全球尺度看并不是等位面：

- 跨越极盖区有一个约100kV的晨昏电位降，这是由太阳风与磁层相互作用产生的
- 伴随着极光/磁层过程的电位差
- 由于地球磁场旋转，赤道相对于极区的电位约-91kV
- 电离层的发电机作用，如平静日发电机 (Sq)过程产生的电位达20kV



# 大气电流

$$I = R_2 I_0 (R_1 + R_2 + R_3)$$



简化后的大气等效电路图



地球表面与电离层间的电容：

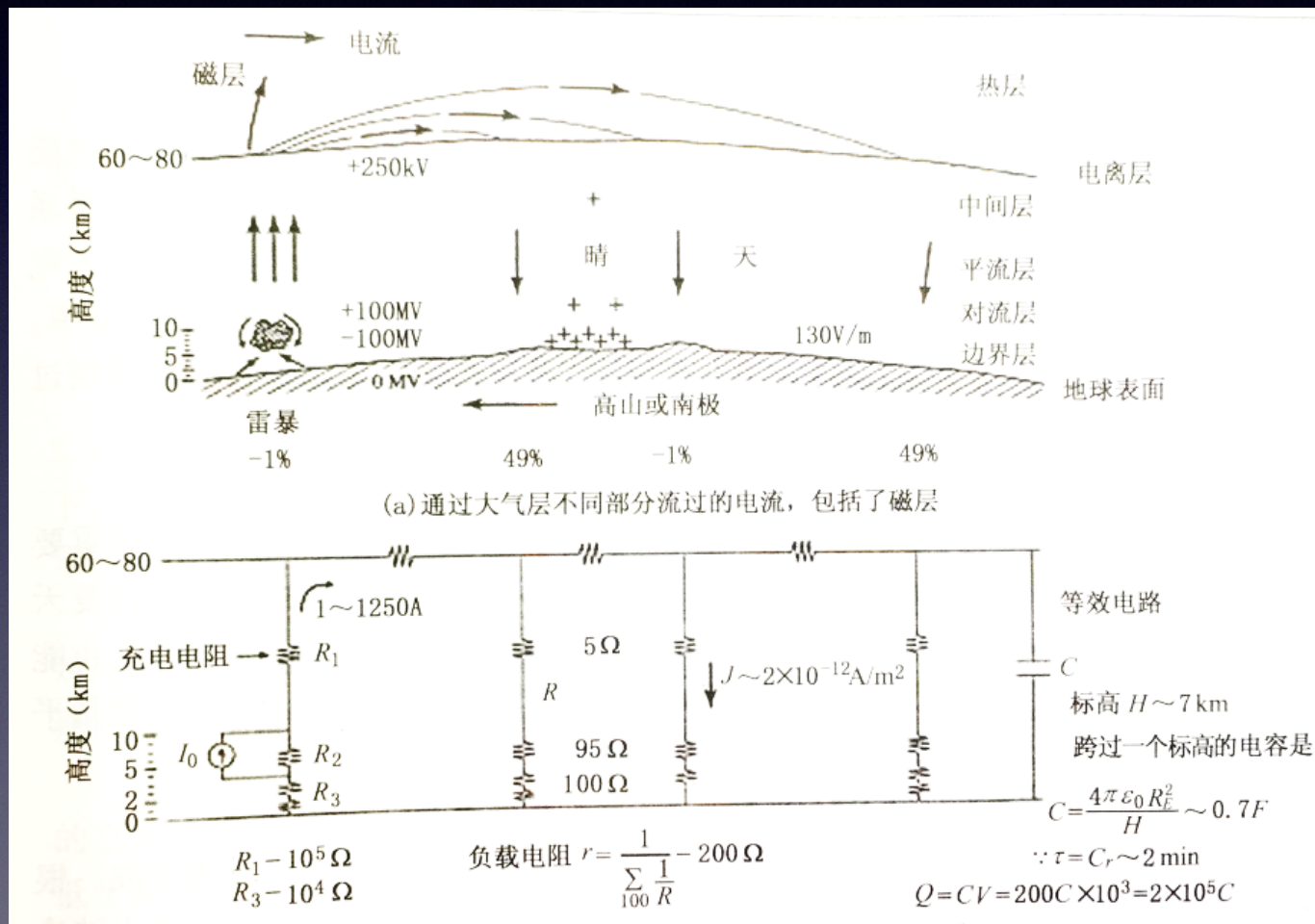
$$C = 4\pi \frac{\epsilon_0 R_E^2}{H} \approx 0.7F$$

全球大气电路的时间常数：

$$\tau = Cr \approx 2min$$

全球大气具有的总能量：

$$W = \frac{CV^2}{2} \approx 2 \times 10^{10}J$$



地表电场：100V/M  
20km，晴天垂直电场1V/m  
50km， $10^{-2}V/m$

全球大气电路示意图



# 空间天气与中性大气电耦合的途径

## ➤ 电离层电位向低层大气的映射

电离层电位可以不衰减的一直传到25km高度

## ➤ 大气电过程的向上传递

对流层大气中的大雷暴能够在磁层的赤道区产生电场，其数值可达到磁层过程所产生电场的1%-10%

## ➤ 场向电流的作用

在极光区通过焦耳加热沉积的能量

## ➤ 极光电急流产生在重力波



## 太阳活动影响 气象过程的 机制

太阳活动影响气象过程

大气电场影响水滴凝结过程

高能带电粒子对凝结核的影响

太阳高能粒子对大气参数的调制

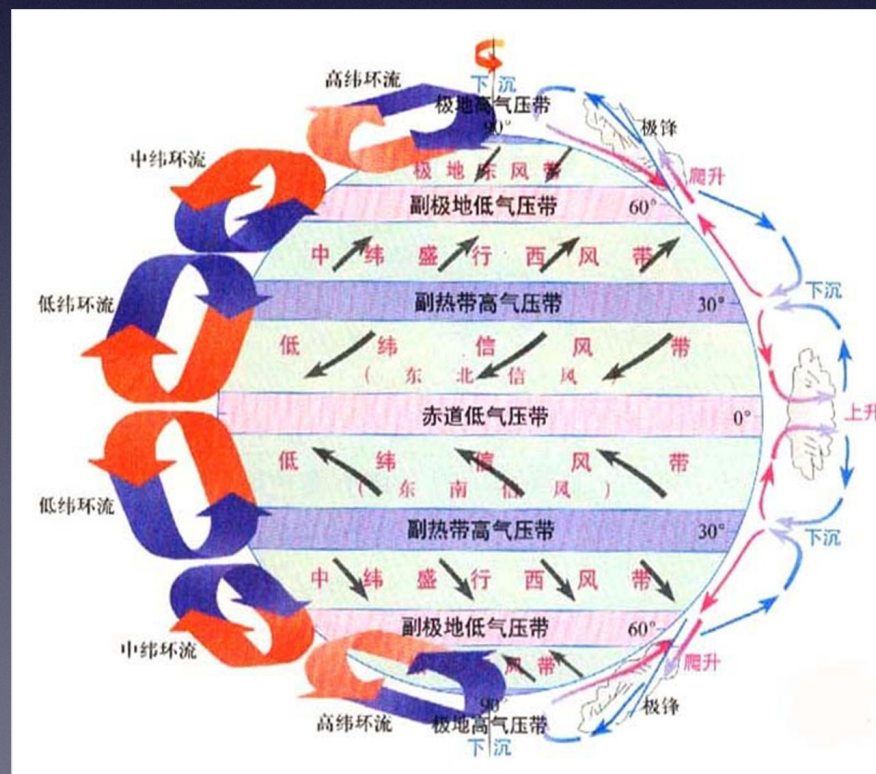
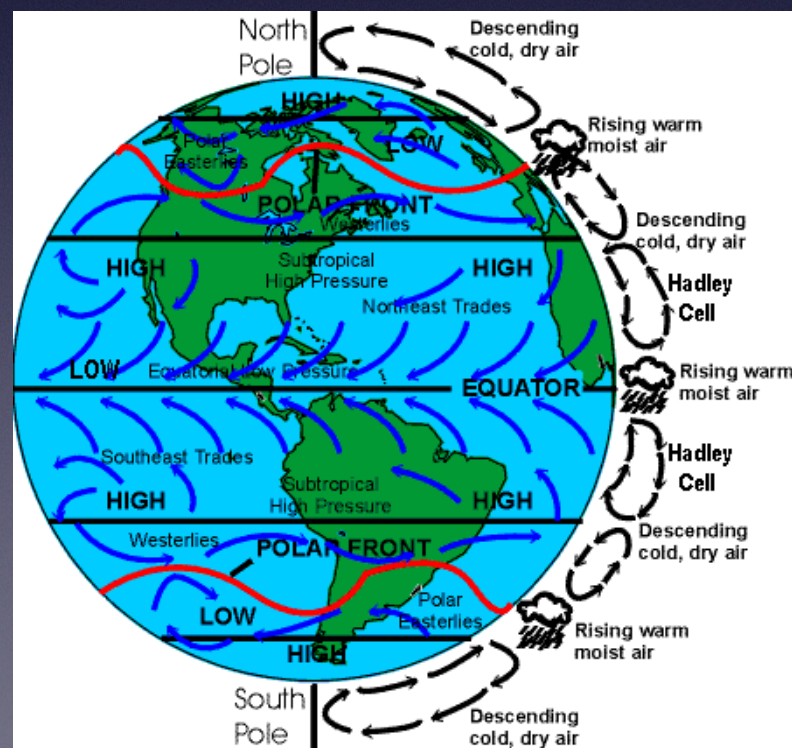
大气电场影响大气的化学反应



## 3.2 磁层天气

**环流：**空气沿一封闭的轨迹移动，或沿着某一封闭轨迹循环运动的倾向。

**大气环流：**指的是全球范围内，水平尺度横跨数千公里，垂直尺度延伸数10km以上，时间尺度 $10^5$ s以上的平均运动





# 磁层环流

磁层是由完全电离的等离子体组成，其运动状态主要受太阳风和它所携带的行星际磁场支配。

## 磁层环流驱动机制

粘性机制

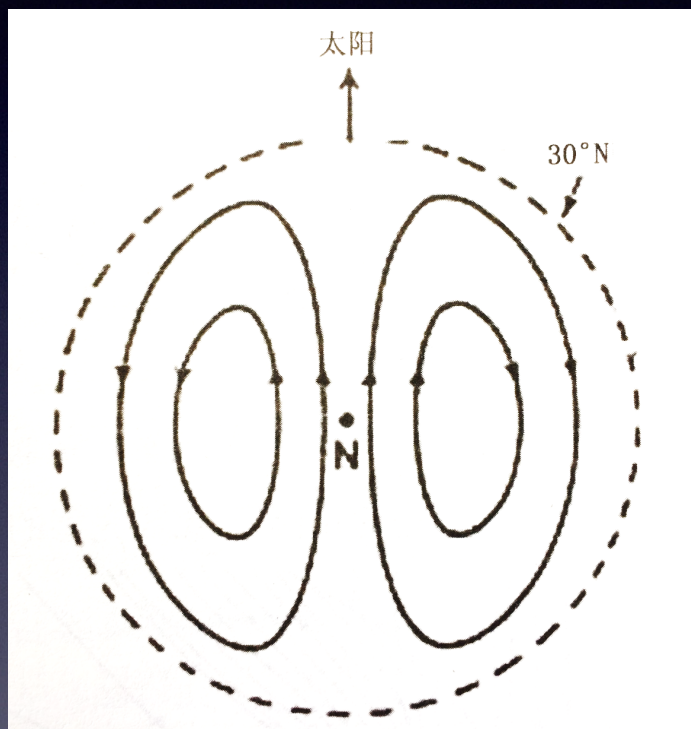
+

磁重联机制

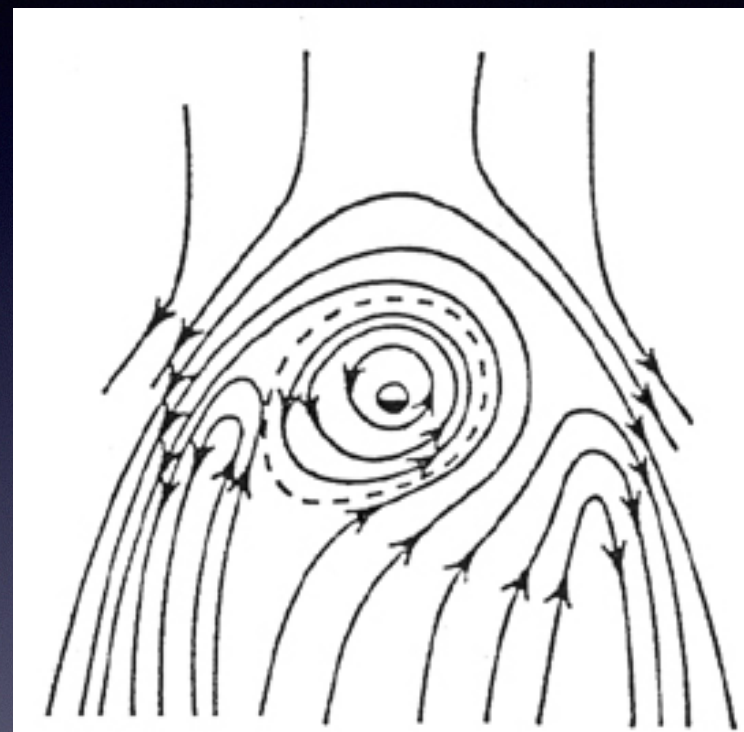


# 粘性机制

太阳风通过粘性相互作用把能量和动量传播到磁层中，引起整个系统作环流运动。



$S_q^p$ 电流系的基本形式

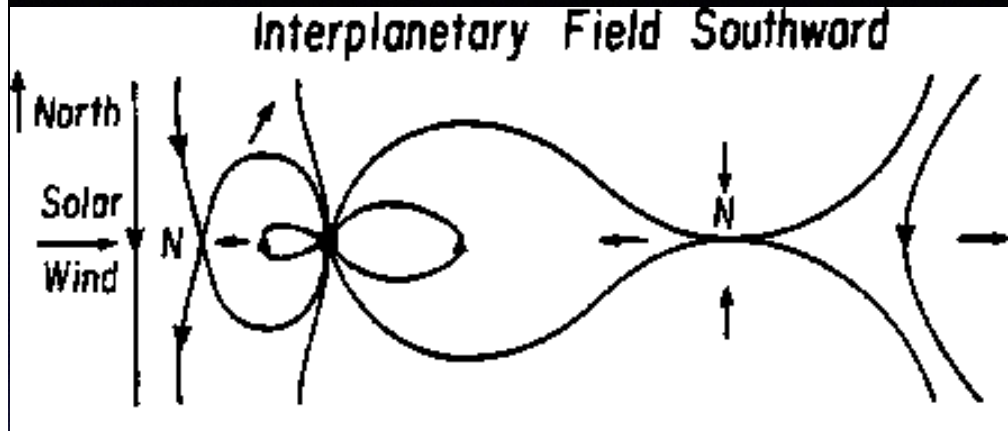


考虑自转的赤道平面磁层环流

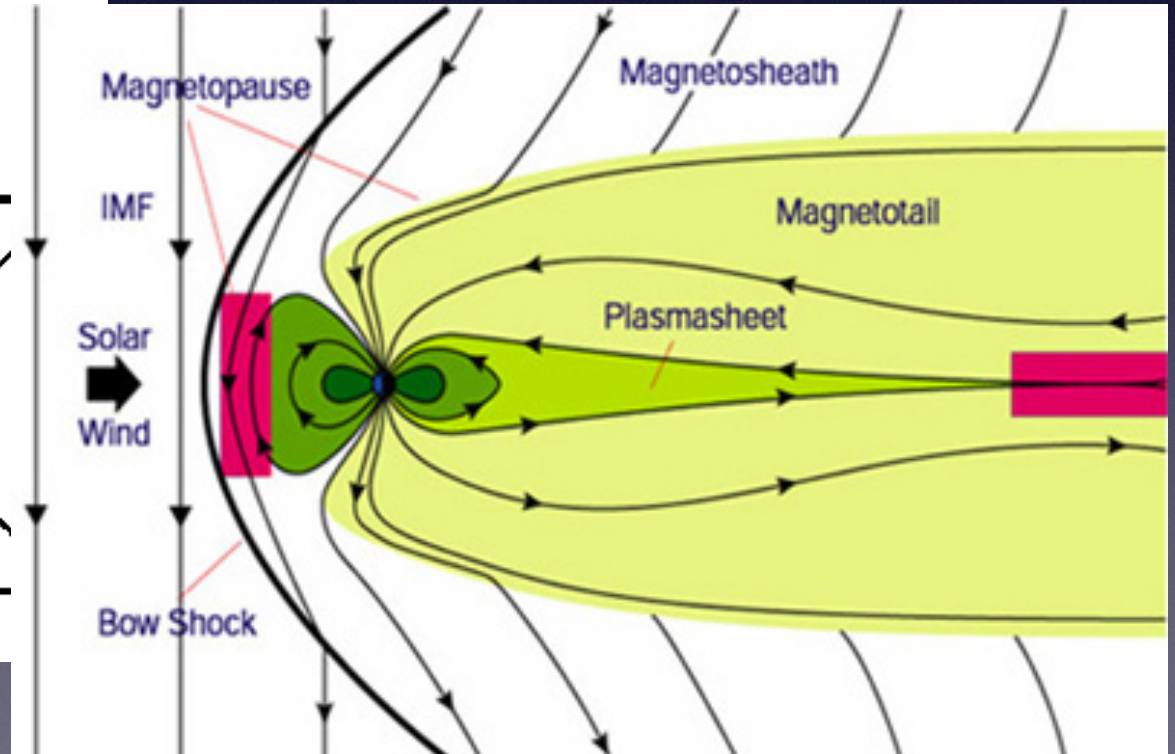
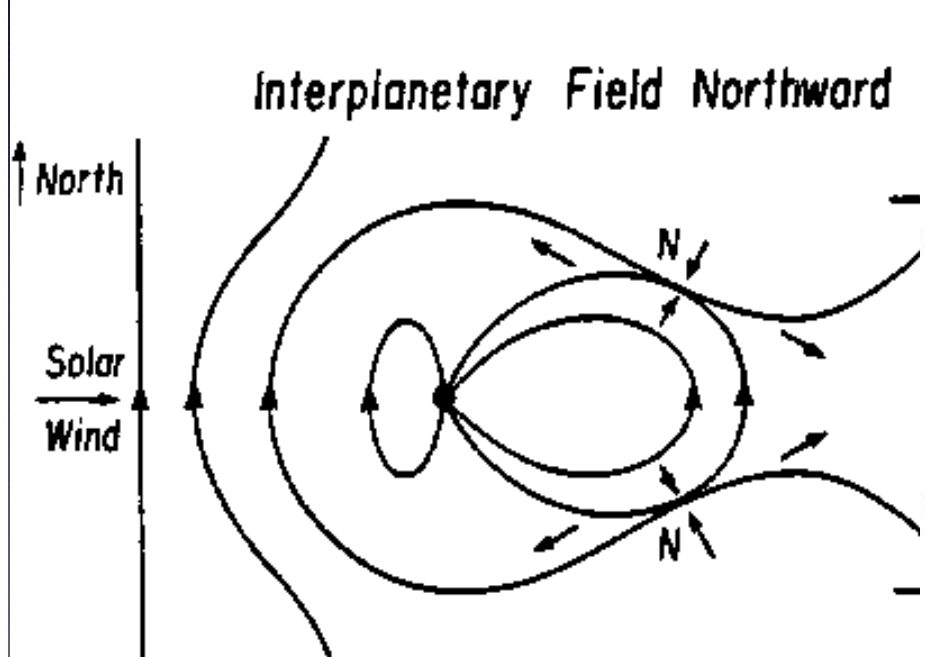
**$S_q$ 电流系**：太阳平静日期间，潮汐风带动离子在高层大气中产生的电流系。 $S_q^p$ 电流系是 $S_q$ 电流系的极区部分。



# 磁场重联： IMF磁力线与磁层顶在白测短暂地相互连接起来



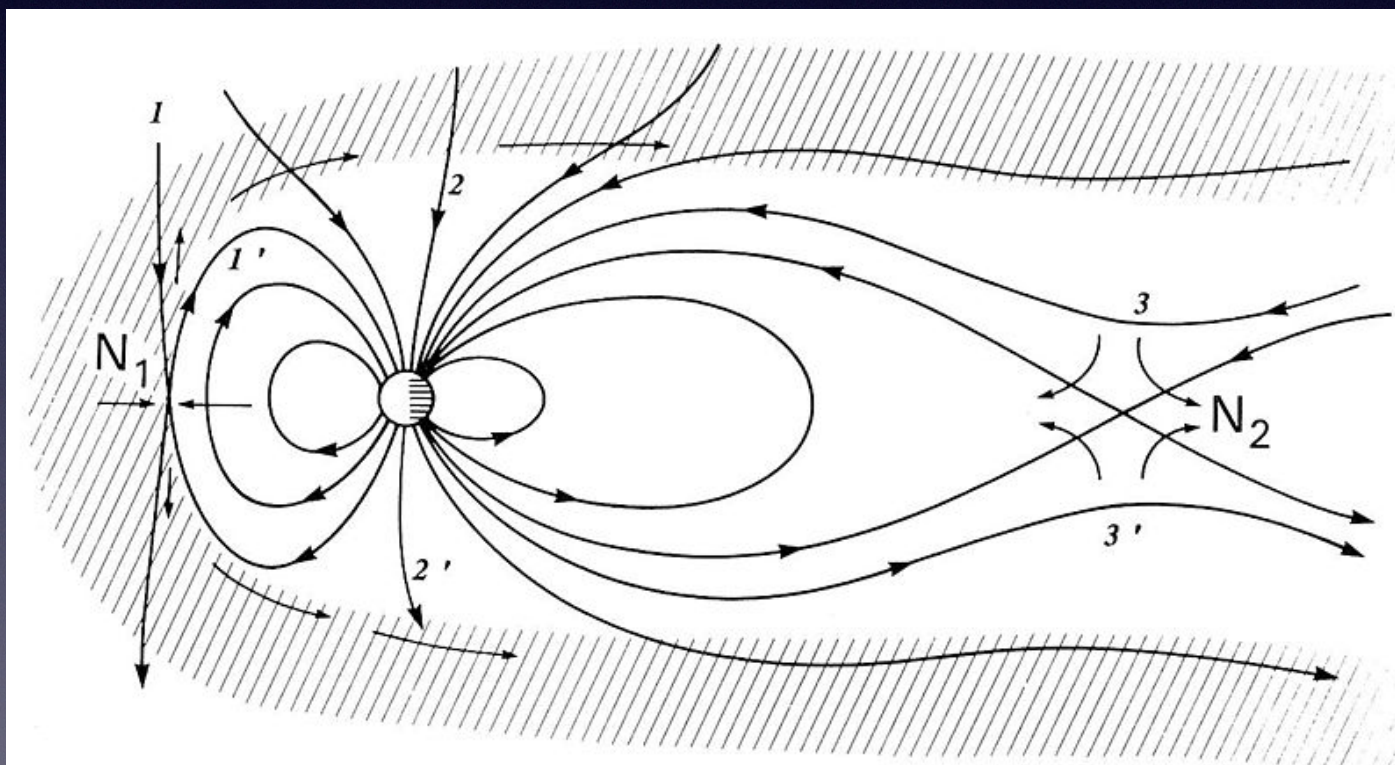
IMF具有南向分量时最充分





# 磁层亚暴：从白昼一侧的磁重联到黑夜一侧的磁重联到极光过程

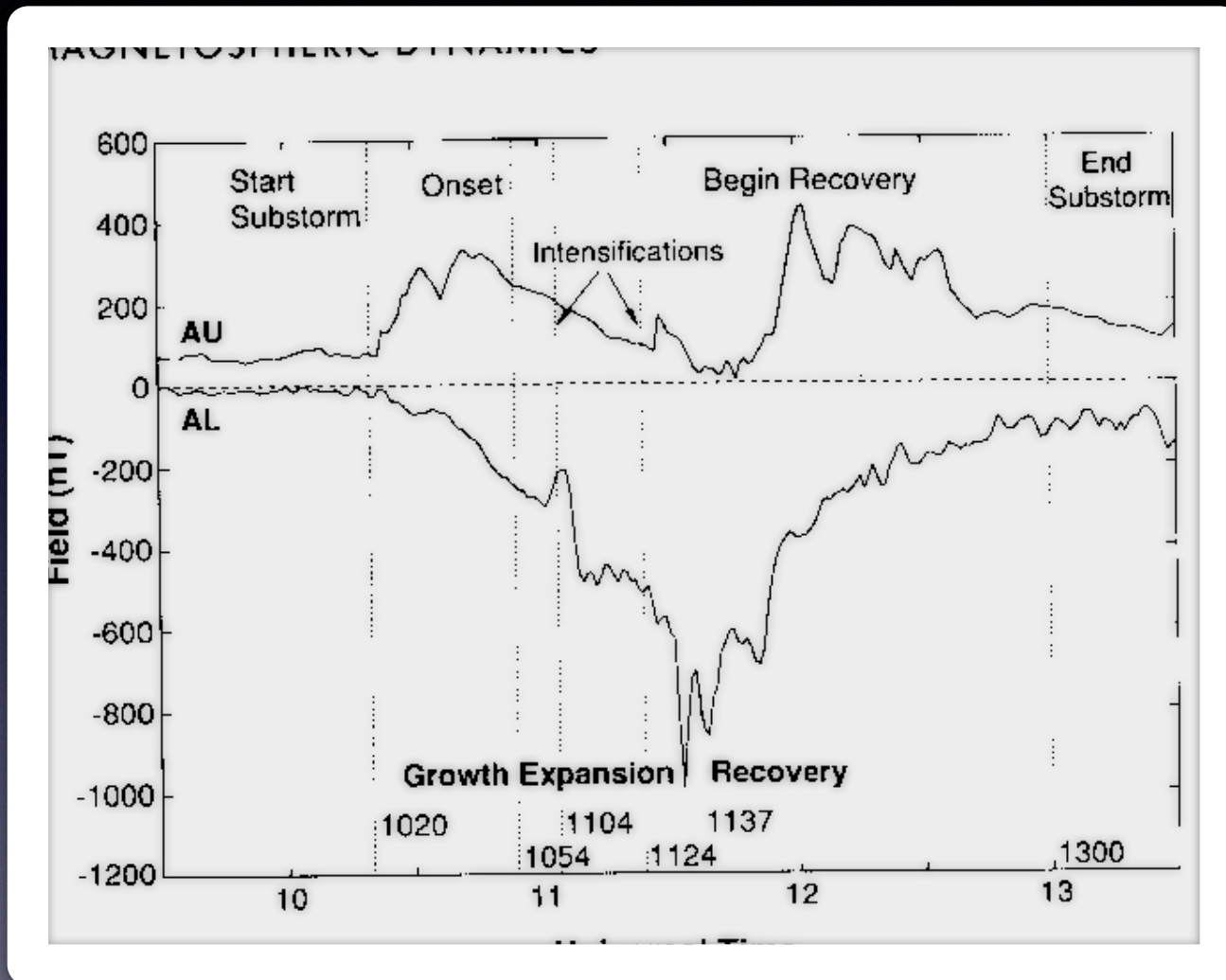
- 能量注入磁层空间；
- 粒子注入使得环电流增强，这种增强时地磁暴的典型标志



磁层亚暴发生率每天几次，每次持续1-3小时



# 磁层亚暴的过程



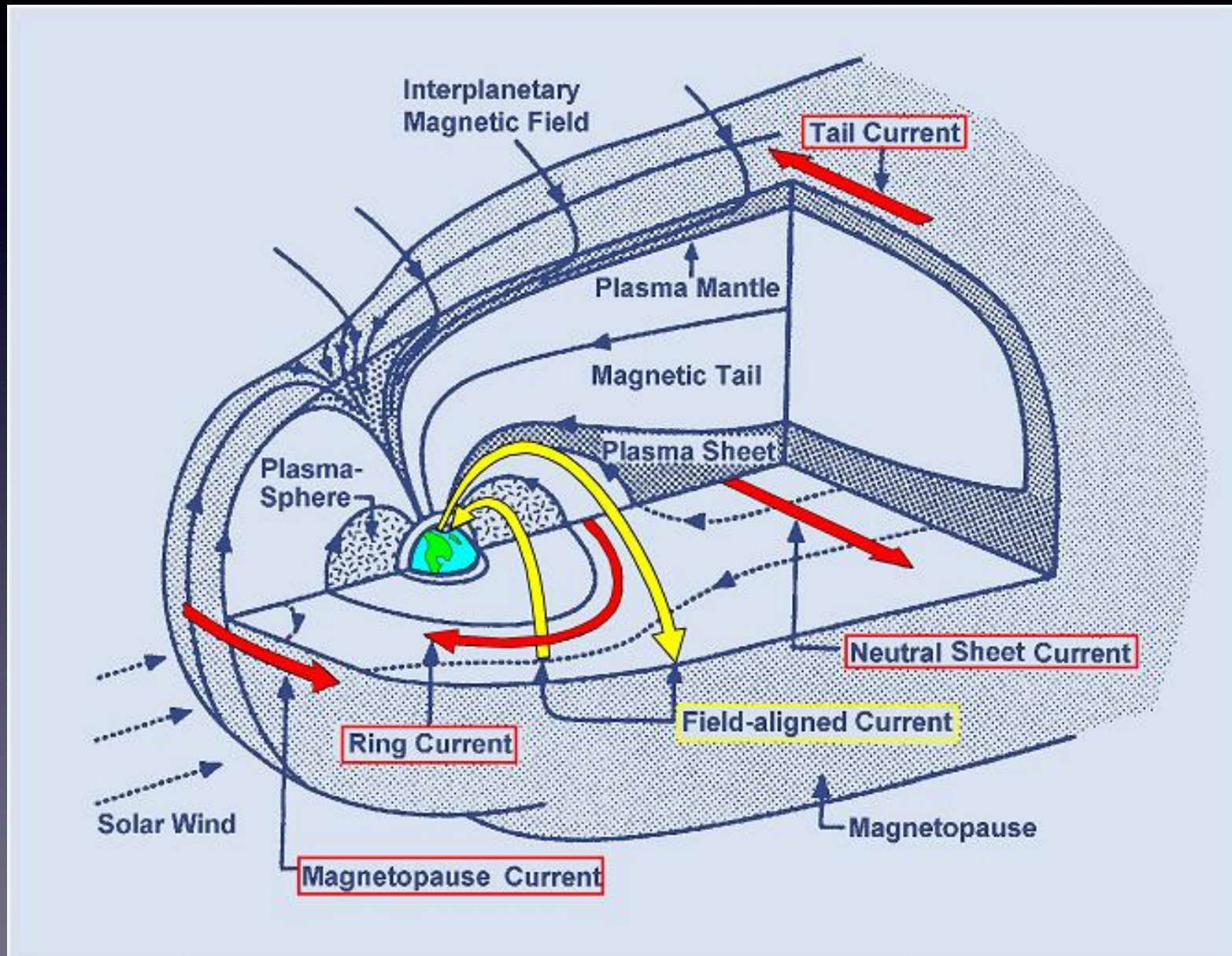
- 增长相
- 膨胀相
- 恢复相

磁层中的大尺度动力学事件，导致高能（几十到几百keV）电子和粒子投射到内磁层以及磁层磁场的全球重构。亚暴发生在IMF南向时。

**发生区域：**地面，近磁尾、中磁尾、远磁尾、极光区和地球同步轨道



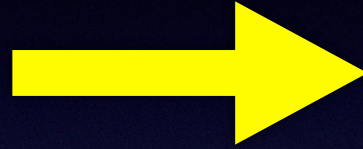
# 地球磁层内的电流体系





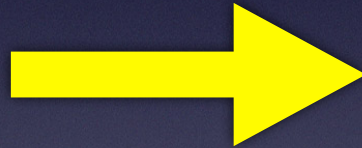
# 不同行星际磁场下的影响

南向IMF



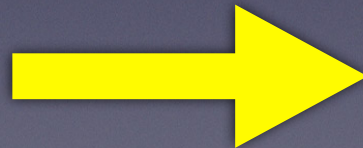
增强磁层环电流

东西向IMF



影响极区对流的对称性

北向IMF



不发生地磁活动



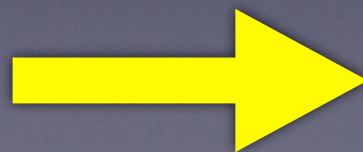
## 亚暴和磁暴的关系

- 磁暴是由分立的、间歇的极区扰动组成，寿命通常为1小时或几小时。我将这些称为极区亚暴。虽然极区亚暴常常发生在磁暴期间，但他们也出现在没有明显的磁暴暴时。

[Chapman, 1962]

- 在国际地球物理年期间研究强磁暴的第一个发现，是磁暴期间极光经历了几次规则的变化，从平静到很扰动，然后又恢复到平静。最使我们惊讶的是，即使在磁暴主相期间，极光也可以是平静的。[Akkasofu, 1991]

亚暴期间形成部  
分环电流



频繁亚暴发生导致  
对称环电流形成



# 亚暴和磁暴的关系

- 磁暴可能由强的亚暴组成
- 暴时亚暴和发生在没有明显Dst增加时的亚暴没有明显的差别，只是大多数强的亚暴通常在磁暴的主相发现。
- 在没有亚暴发生时没有观测到磁暴
- 特别高的地磁活动总是发生在磁暴期间。



# 辐射带的动态变化

- 长期变化、太阳周期变化、太阳旋转和暴时
- 外带变化最大（外带的MeV电子因对航天器的严重效应被称为“杀手电子”）
- 粒子输运、产生和损失起因于大气层的电荷交换、库伦碰撞过程和由波粒相互作用过程产生的投掷角扩散以及伴随磁暴和亚暴的大尺度磁和静电脉冲引起的辐射扩散，各种扩散系数的值是了解和预报辐射带演化的关键。



# 辐射带的动力学

源

运输过程

能量化

损失

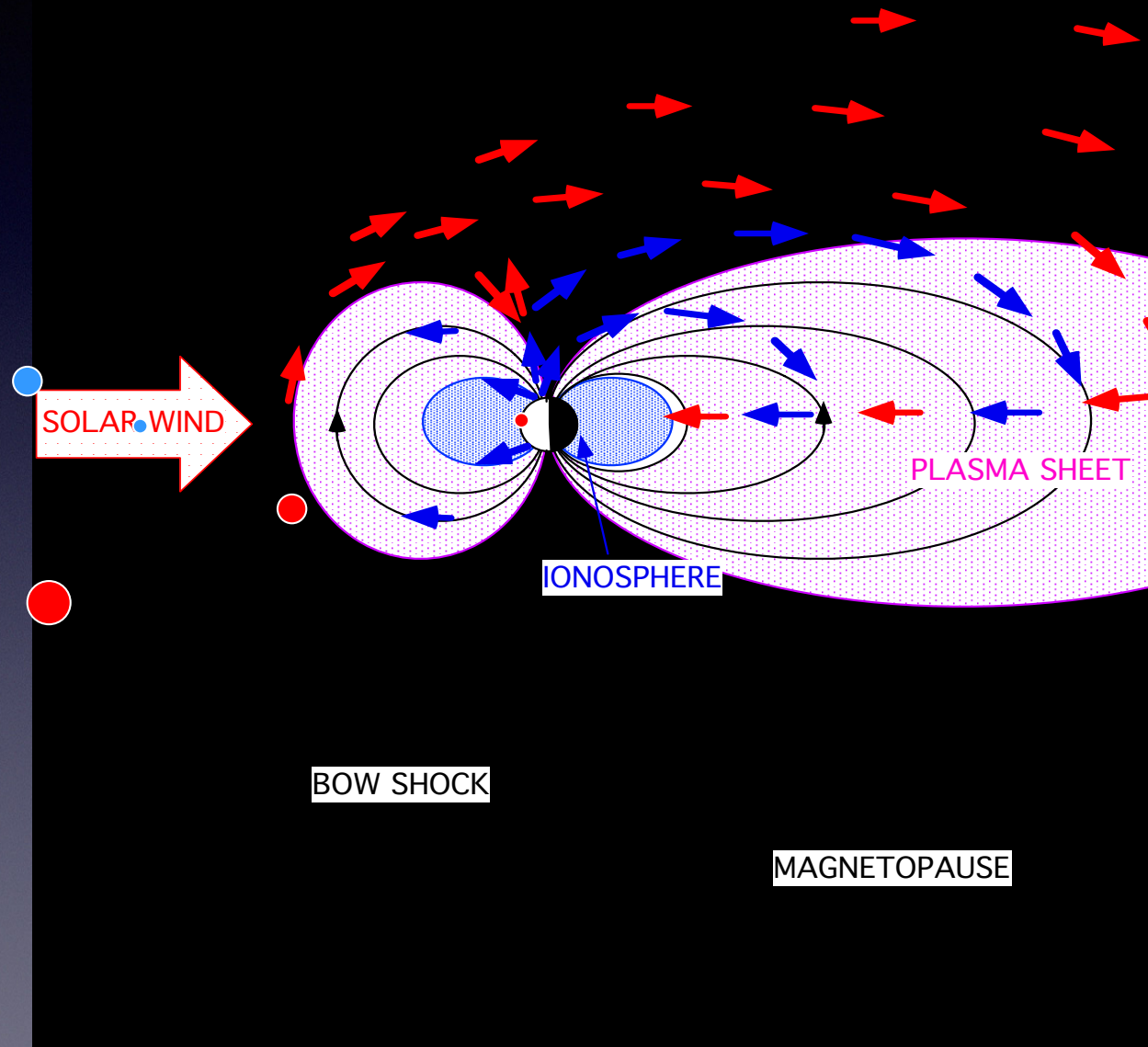
不同的时间尺度!



# 磁层粒子的源

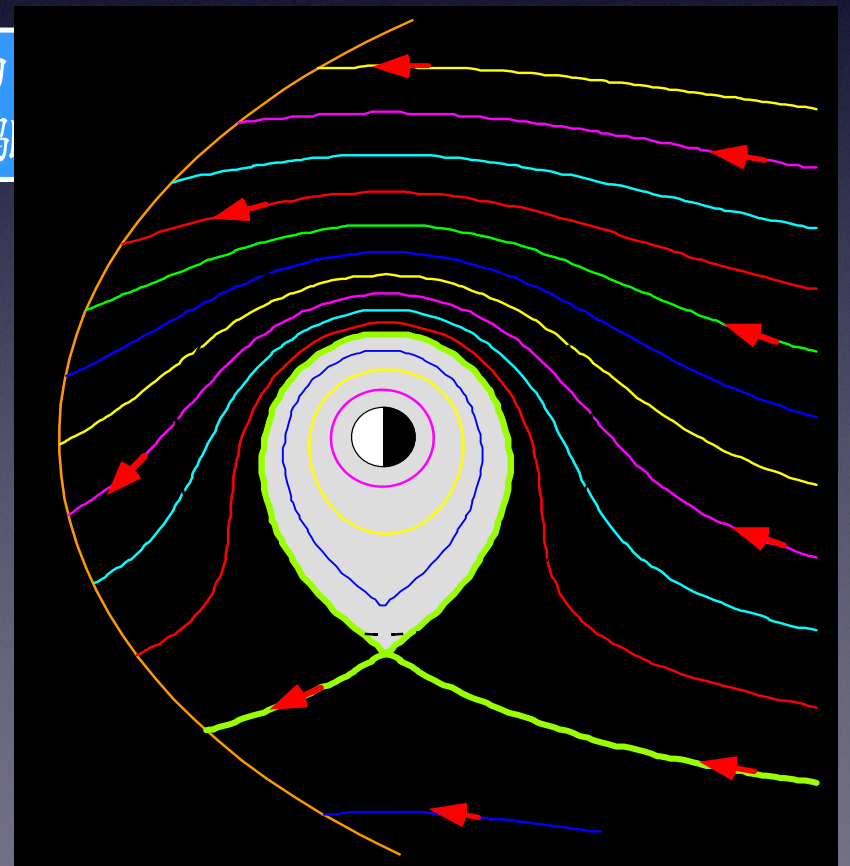
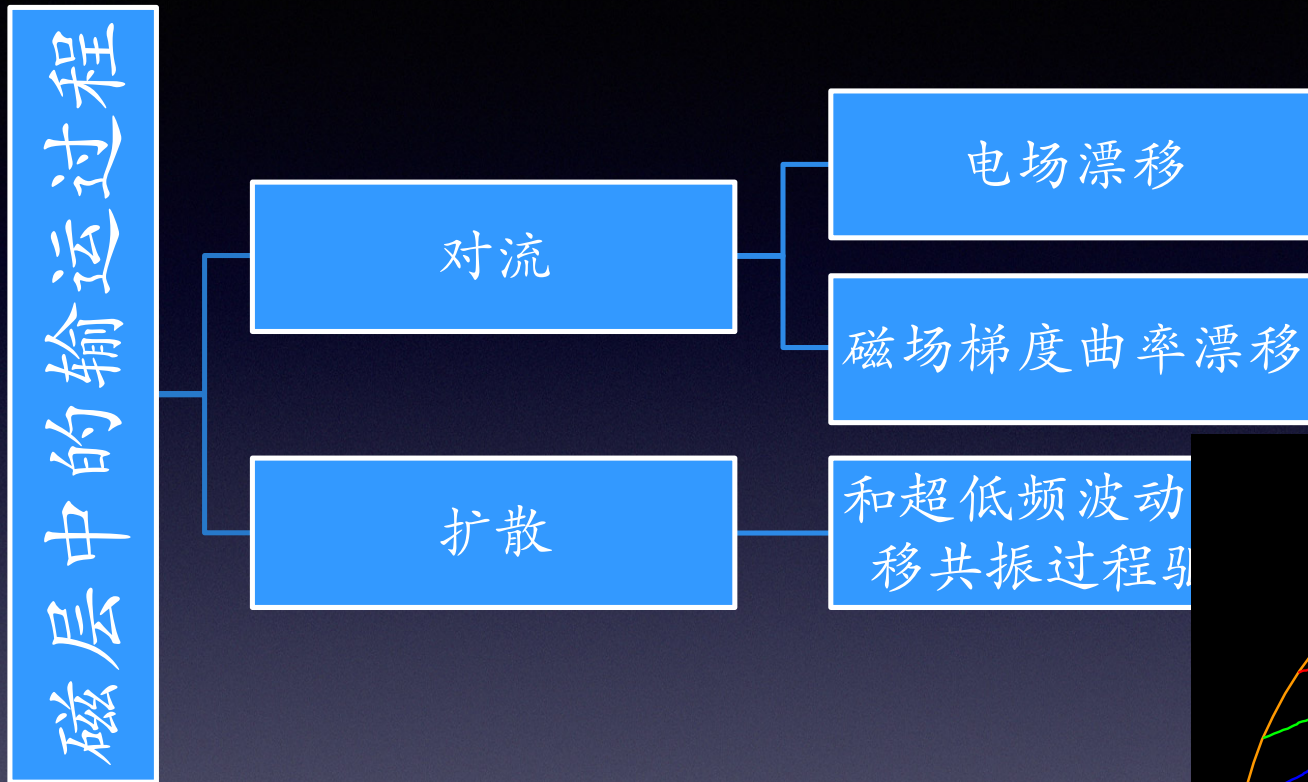
太阳  
风

高层  
大气





# 磁层中的运输过程





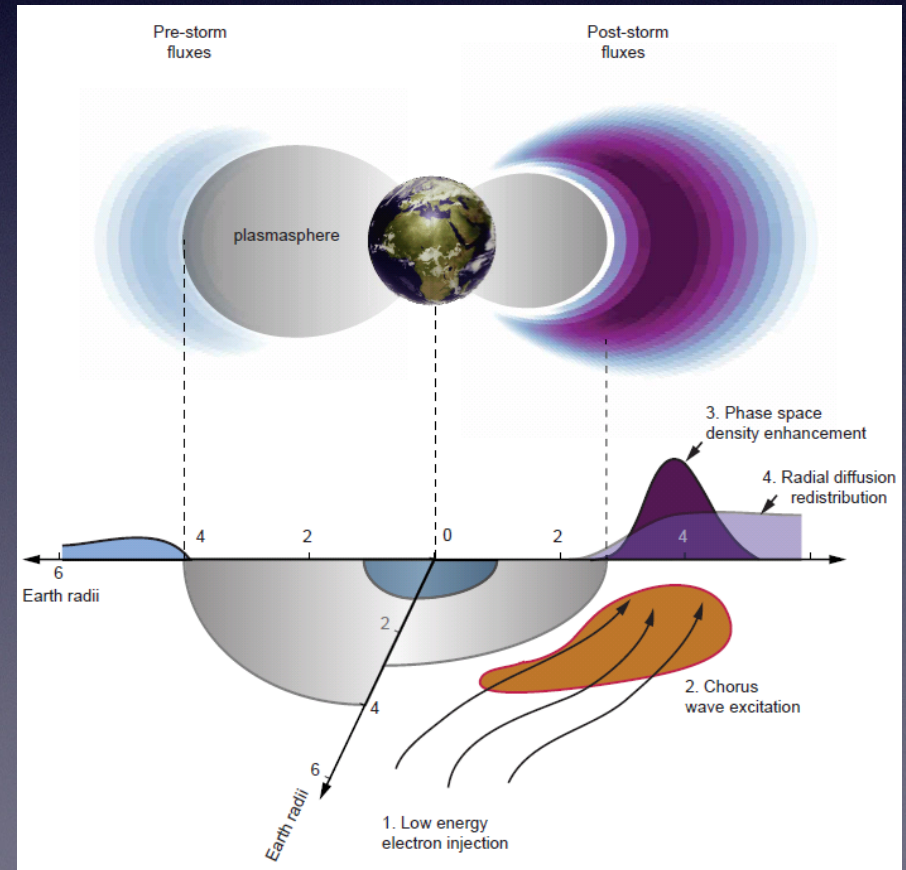
# 不同区域粒子的特征能量

- Ionosphere ~ few eV
- Solar wind ~ 1000 eV,
- Plasmasheet ~ 10-100keV
- Radiation belt ~ MeV

## 加速过程

运输过程的加速

局地的加速，主要是各种波动驱动的回旋共振

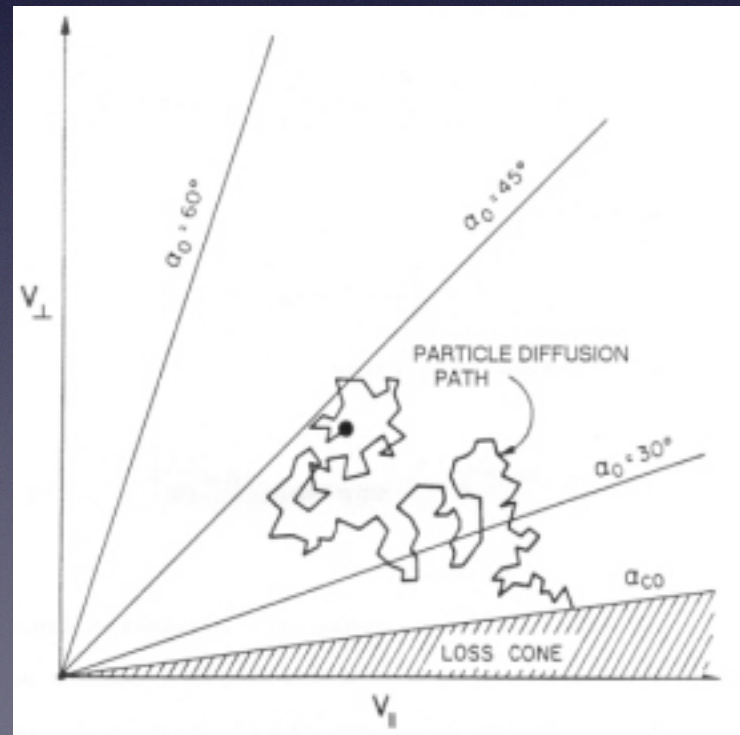
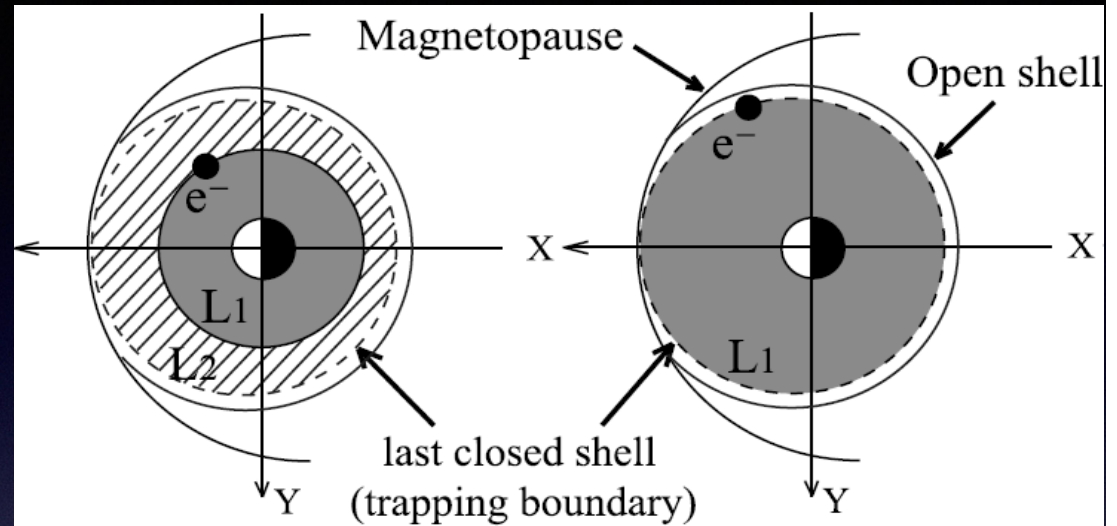




# 损失过程

磁层顶阴影效应

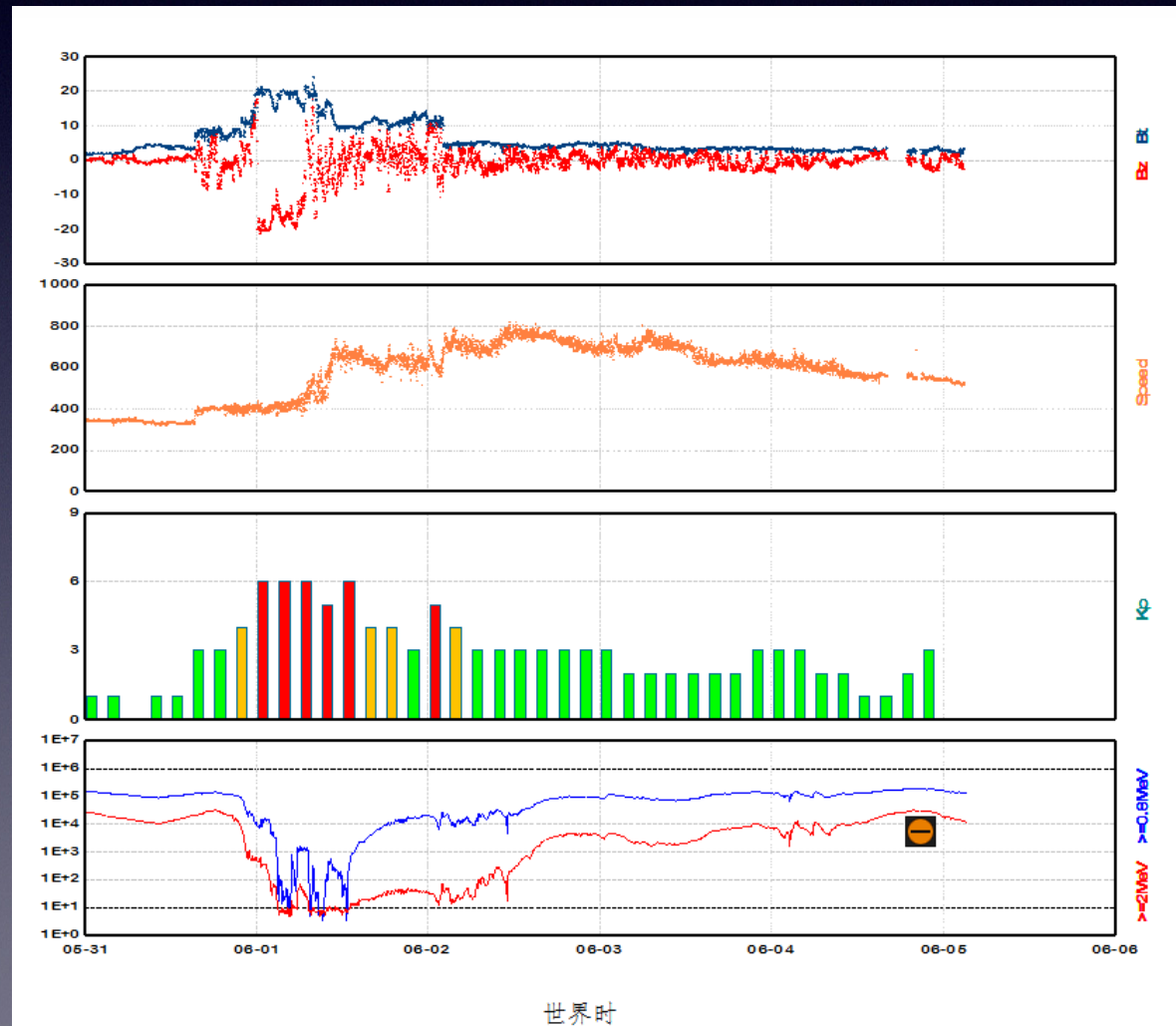
投掷角散射，是波粒相互作用驱动的随机过程





# 高能电子暴

**高能电子暴：**指辐射带中能量高于数百keV到数MeV的电子通量突增的事件。





# 高能电子暴

## 突发型电子暴

磁暴急始后辐射带高能粒子通量突然增加2个数量级以上

行星际激波到达地球后对中能电子加速

## 滞后型电子暴

在磁暴开始1-2天后 $4 < L < 6$ 的外辐射带范围内，相对论电子强度逐步增强1-2个数量级，维持数天乃至1-2个星期

???

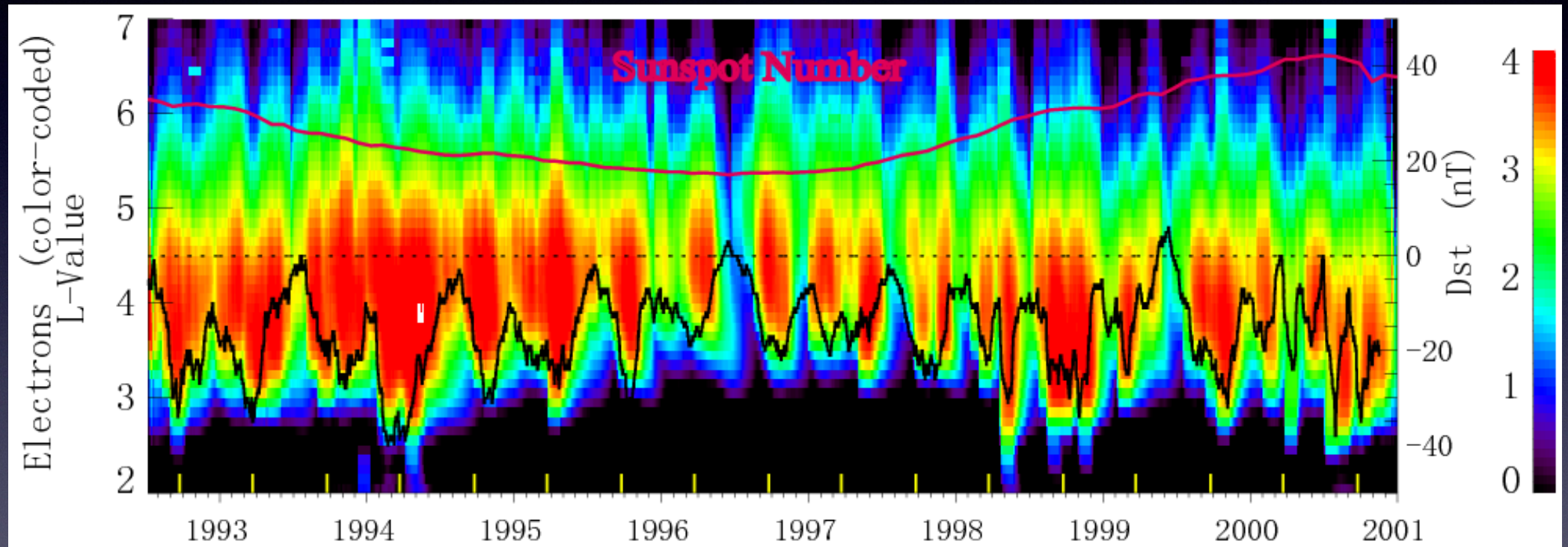


## 滞后型电子暴的观测特征

- 大多数发生在太阳风有高速流时
- 出现在缓始型磁暴期间，大多数具有27天重现性
- 加速区位于 $4 < L < 6$ 的内磁层，加速时间为8-10小时
- 电子加速发生在磁暴恢复项期间，时空变化同时具有绝热过程和非绝热过程的特征
- 出现率大致与大磁暴强度成正相关关系；但不少缓始磁暴不伴随有电子暴
- 不同能量的电子通量都等比例增高

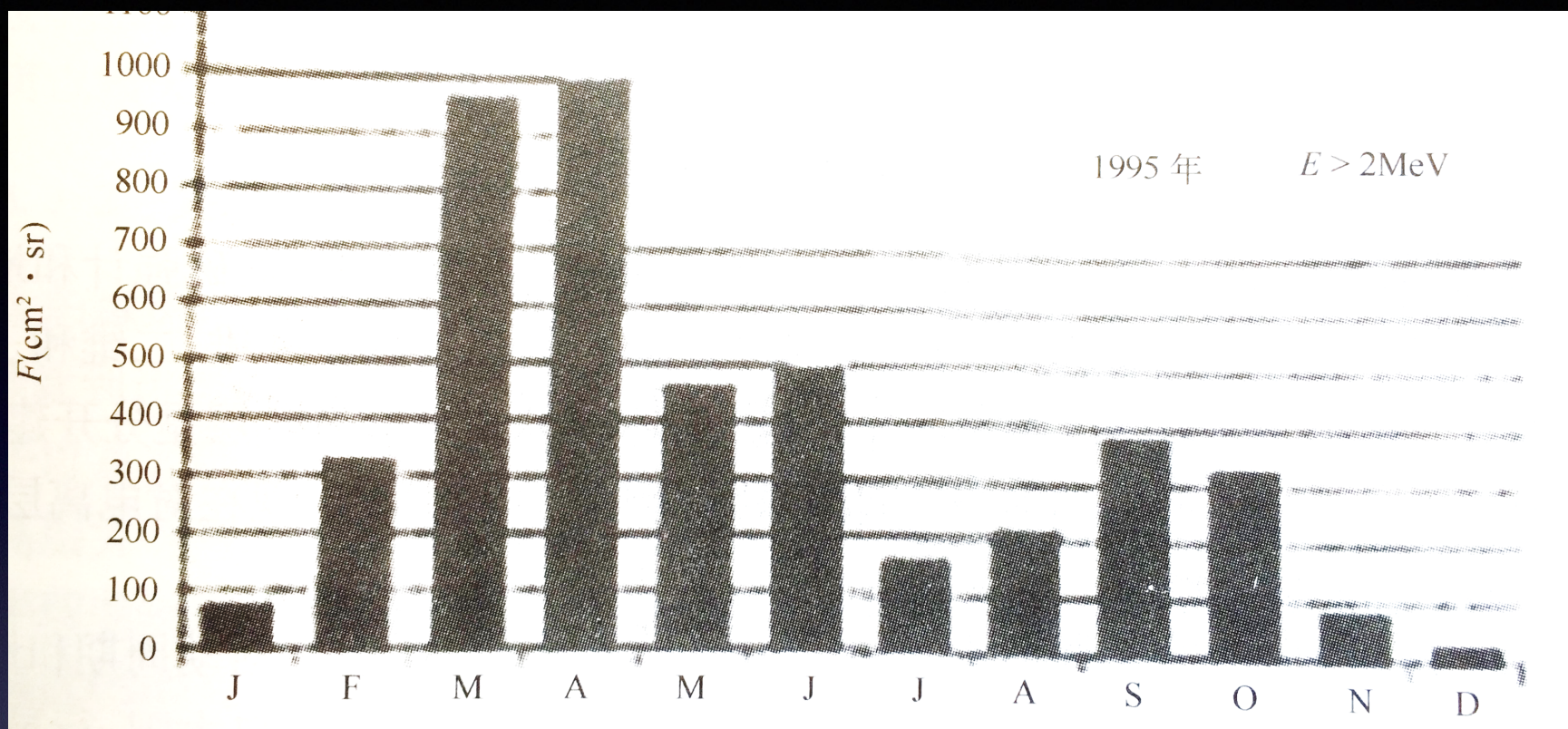


1992 年至2001 年间SAMPEX 卫星观测到的30 天平均的2 – 6 MeV 电子通量及其对应的Dst 指数和太阳黑子数 [Li et al., 2001a]



- 半年周期变化：春分/秋分点处最强
- 太阳周期变化：太阳活动极小年最弱，上升期/下降期达到最大值



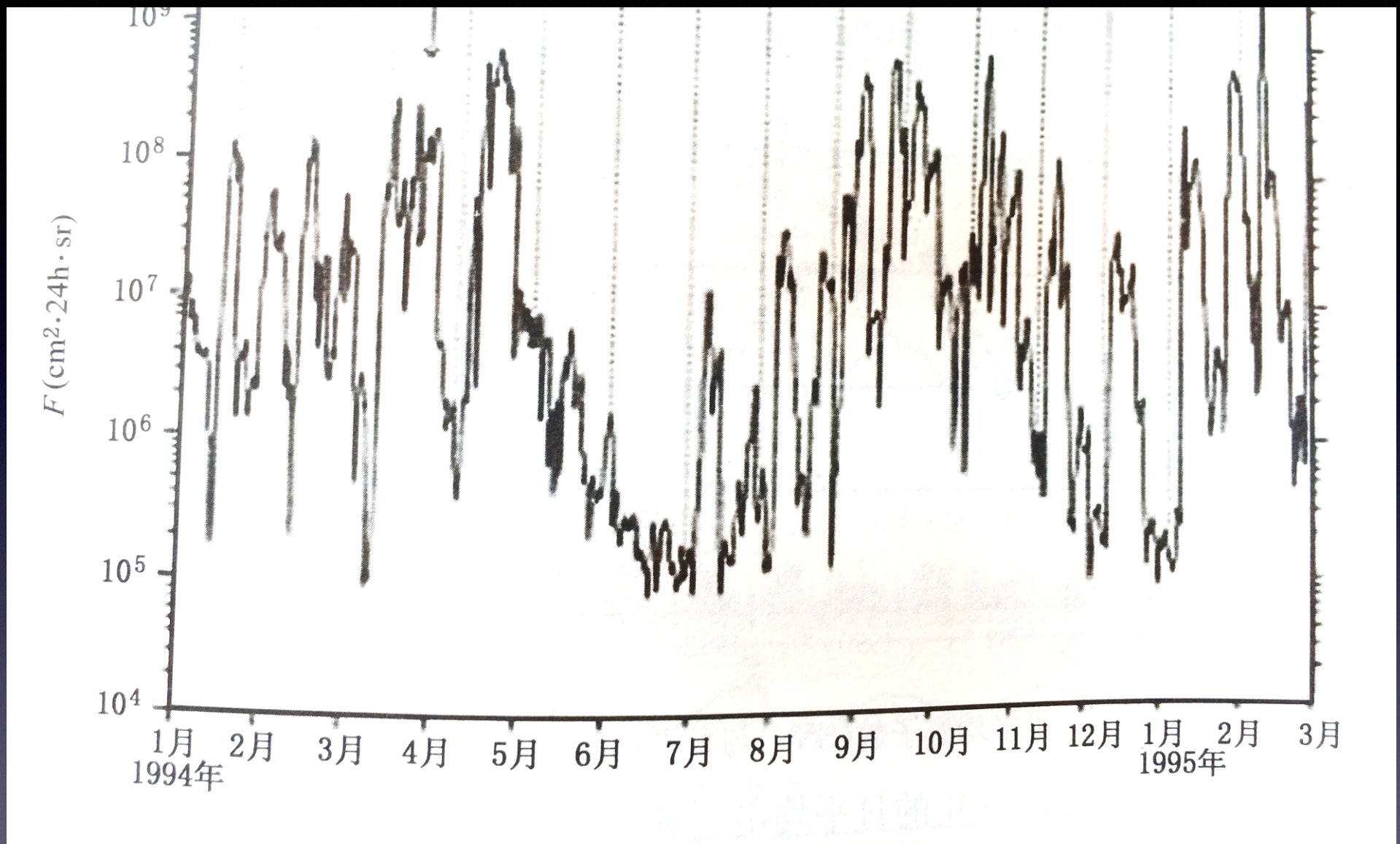


## 日平均电子流量随季节的变化

电子流量在春分时达到峰值，且季节效应的特征逐年变化。

Russel-McPherron效应：最大的IMF有效南向分量发生在每年的4月5日和10月5日[RUSSELL AND R. L. MCPHERRON, JGR, 1973]。

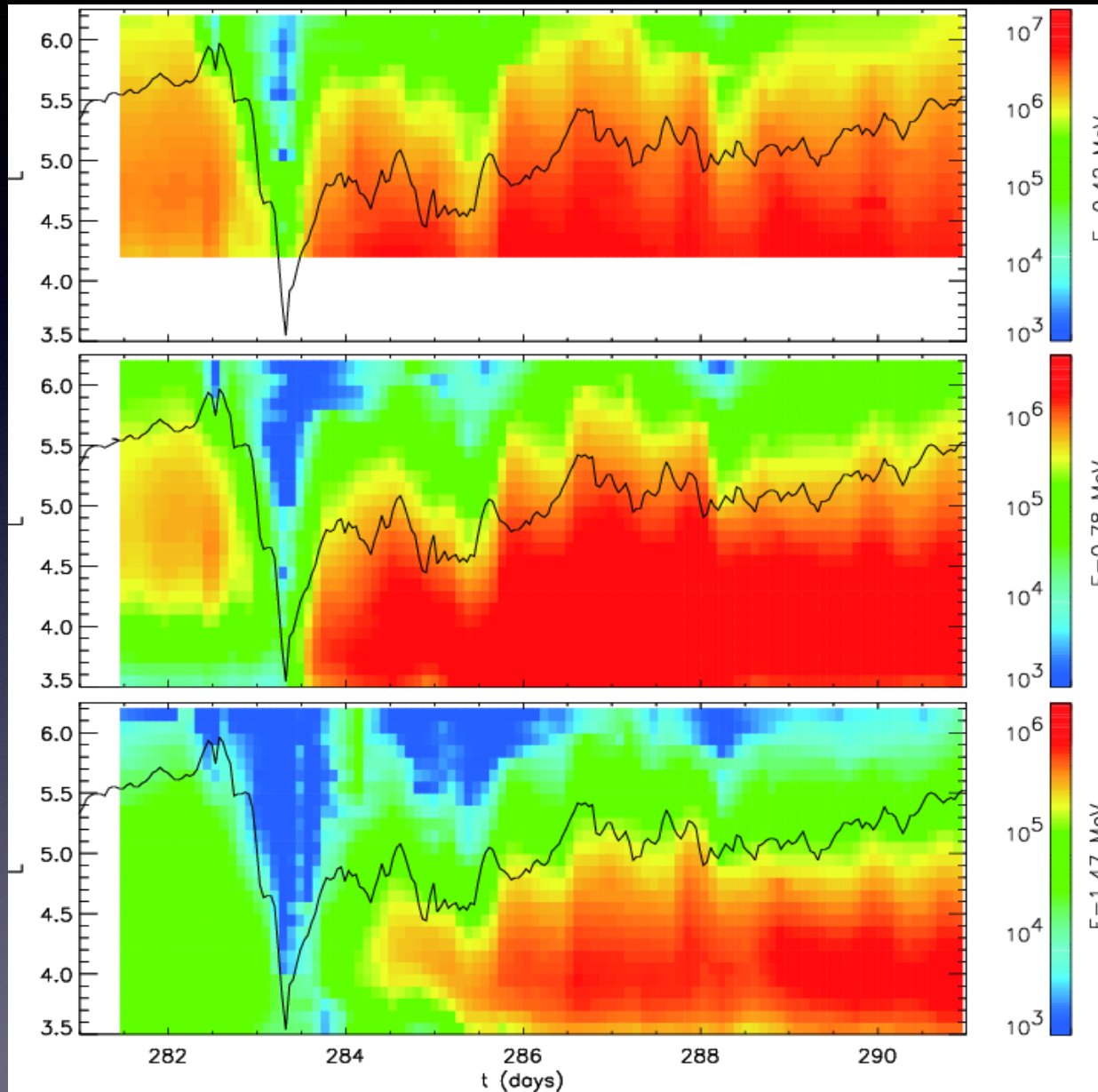




高能电子通量的27天周期



# 辐射带对磁暴响应



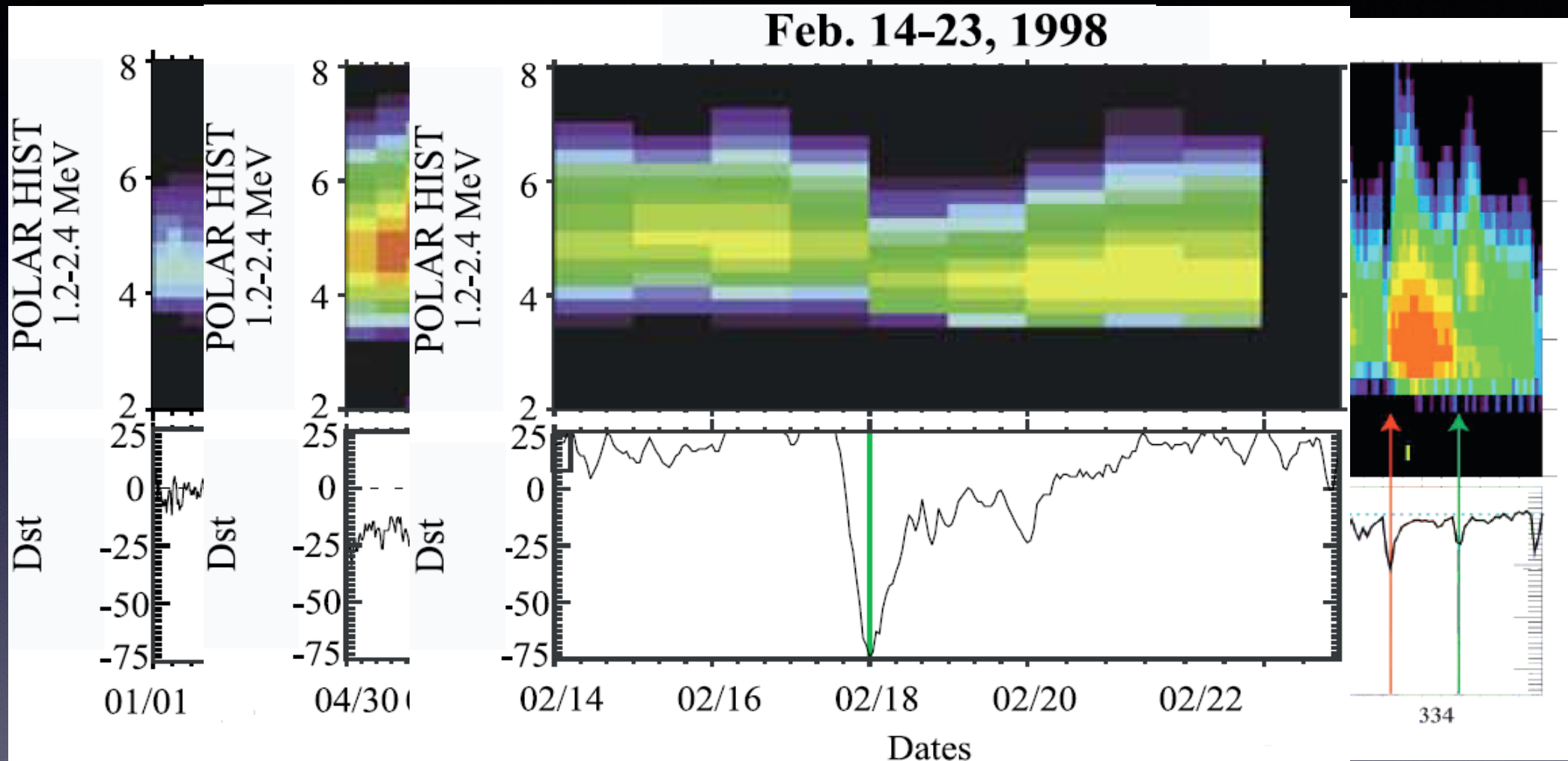
★主相：快速下降

★恢复相：逐步上升

1990年10月8日磁暴期间CRRES卫星观测结果  
[Albert et al., 2009]



# 磁暴前后辐射带电子通量的净变化



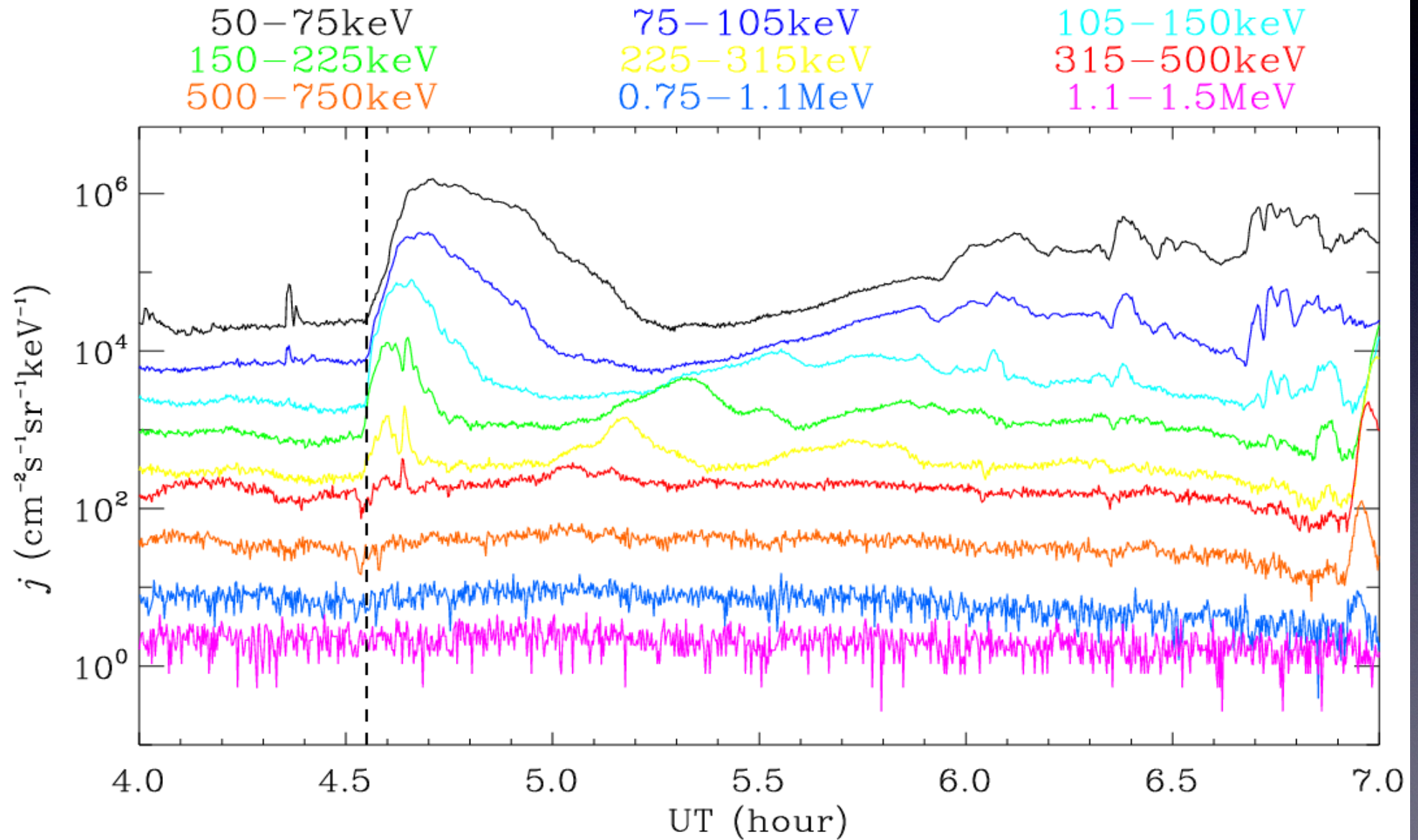
50% 净增加 + 25% 净衰减 + 25% 无变化

[Reeves et al., 2003]



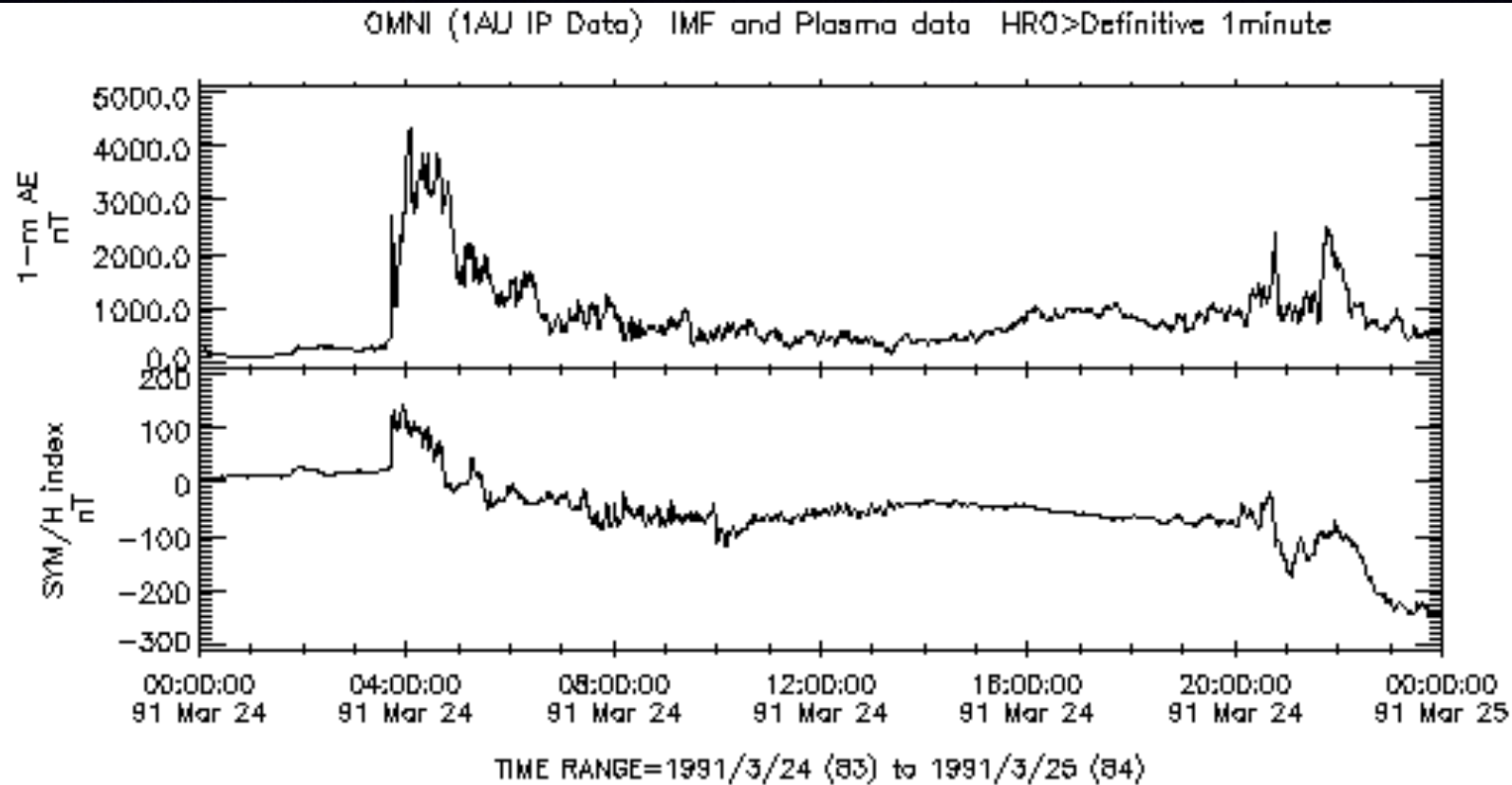
# 辐射带对亚暴响应

1997/01/10 LANL SOPA Data





# 辐射带对行星际激波的反应



Please acknowledge data provider, J.H. King, N. Papatashvili  
at AdnetSystems, NASA GSFC and CDAWeb when using these data.  
Generated by CDAWeb on Thu Sep 18 20:50:31 2014



# CREES observations

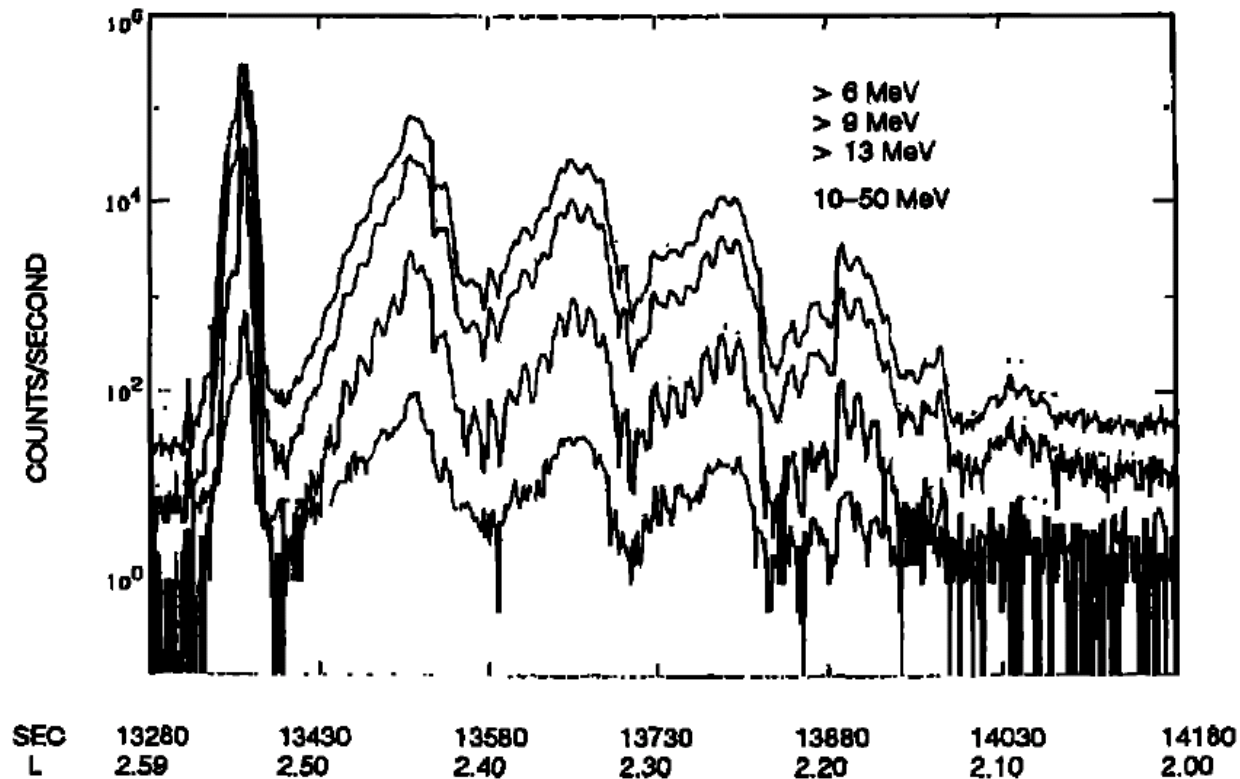


Fig. 3. The countrates as a function of time of the four electron channels are shown around the time of the injection event.



# CREES observations

