

第三章：地球空间系统

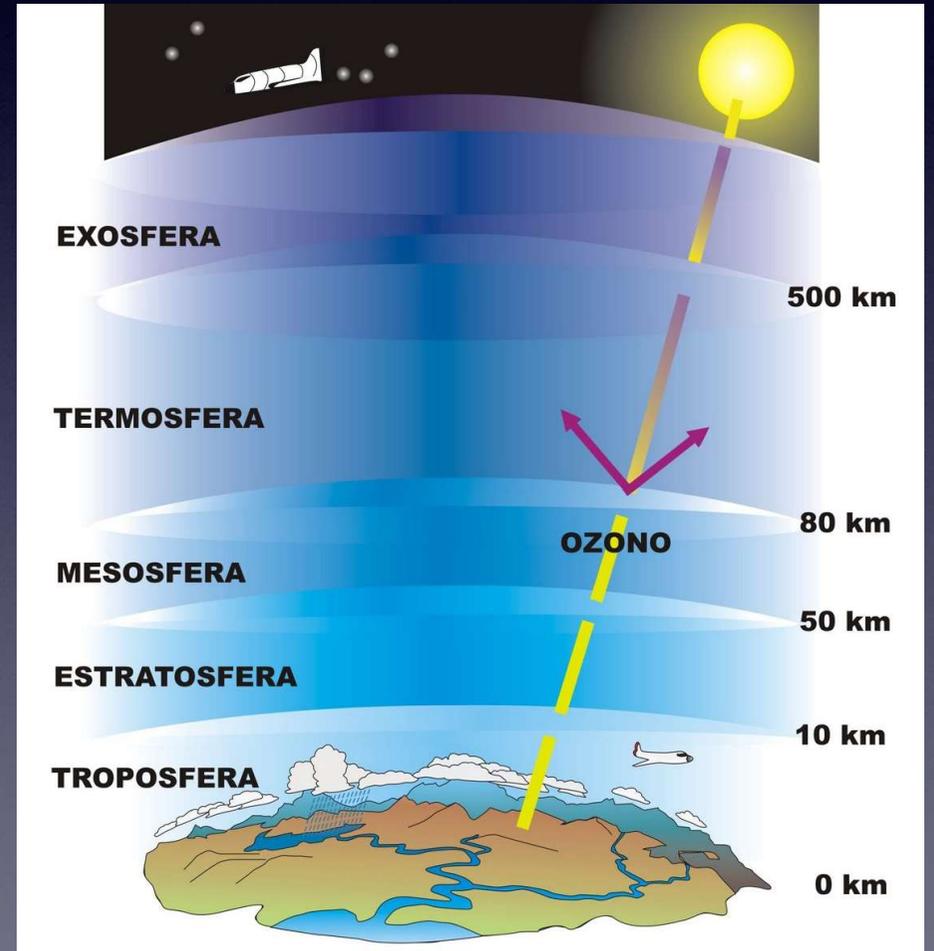
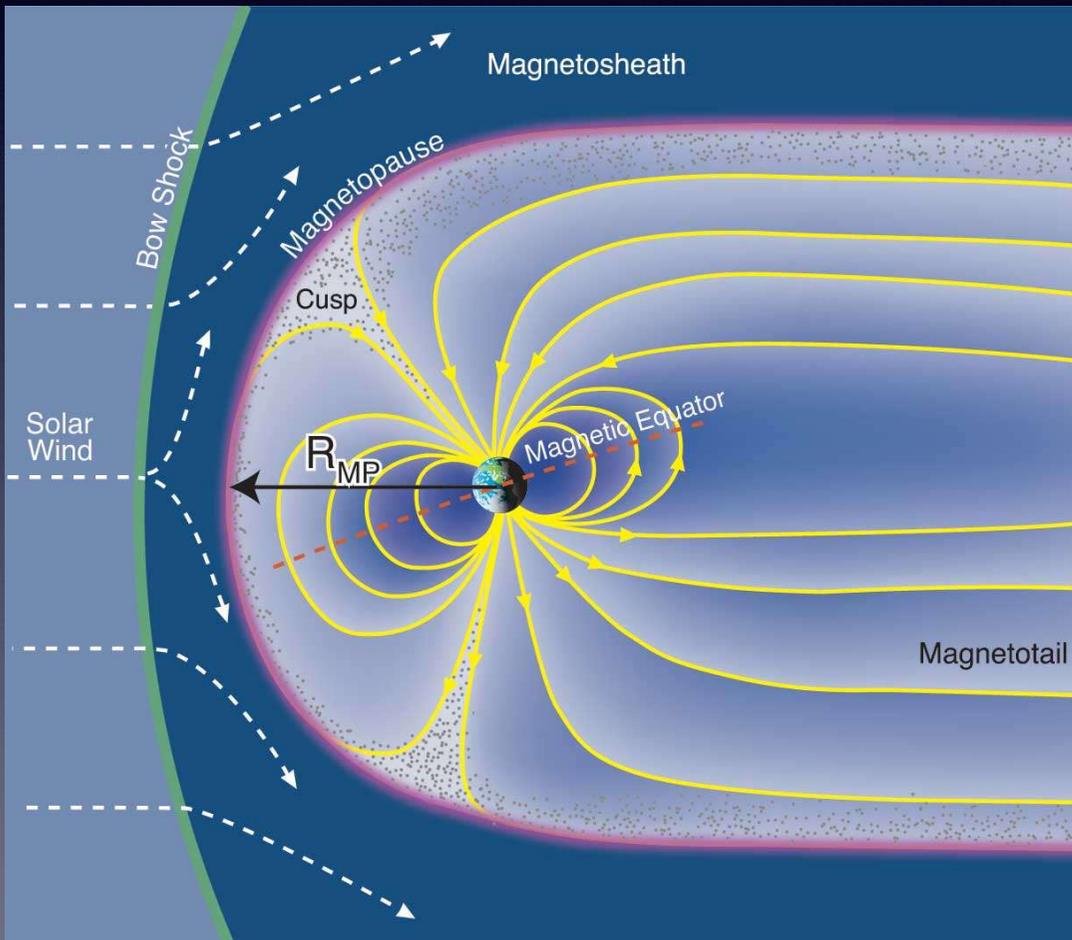
地球空间天气系统

★磁层

★电离层

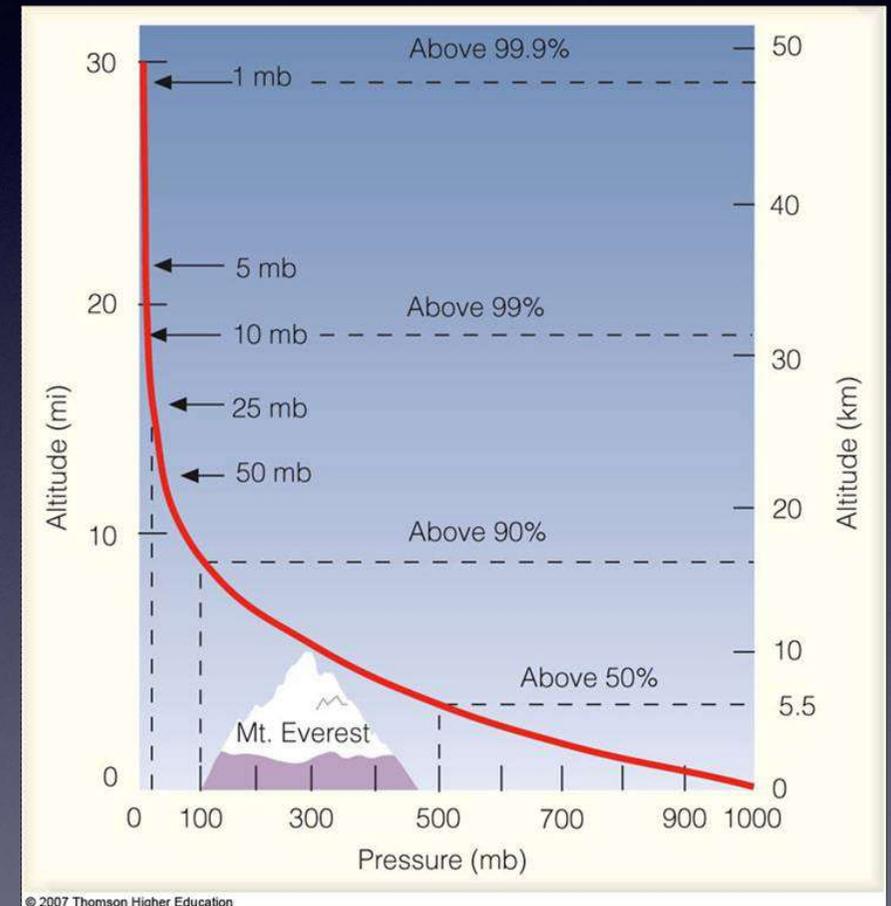
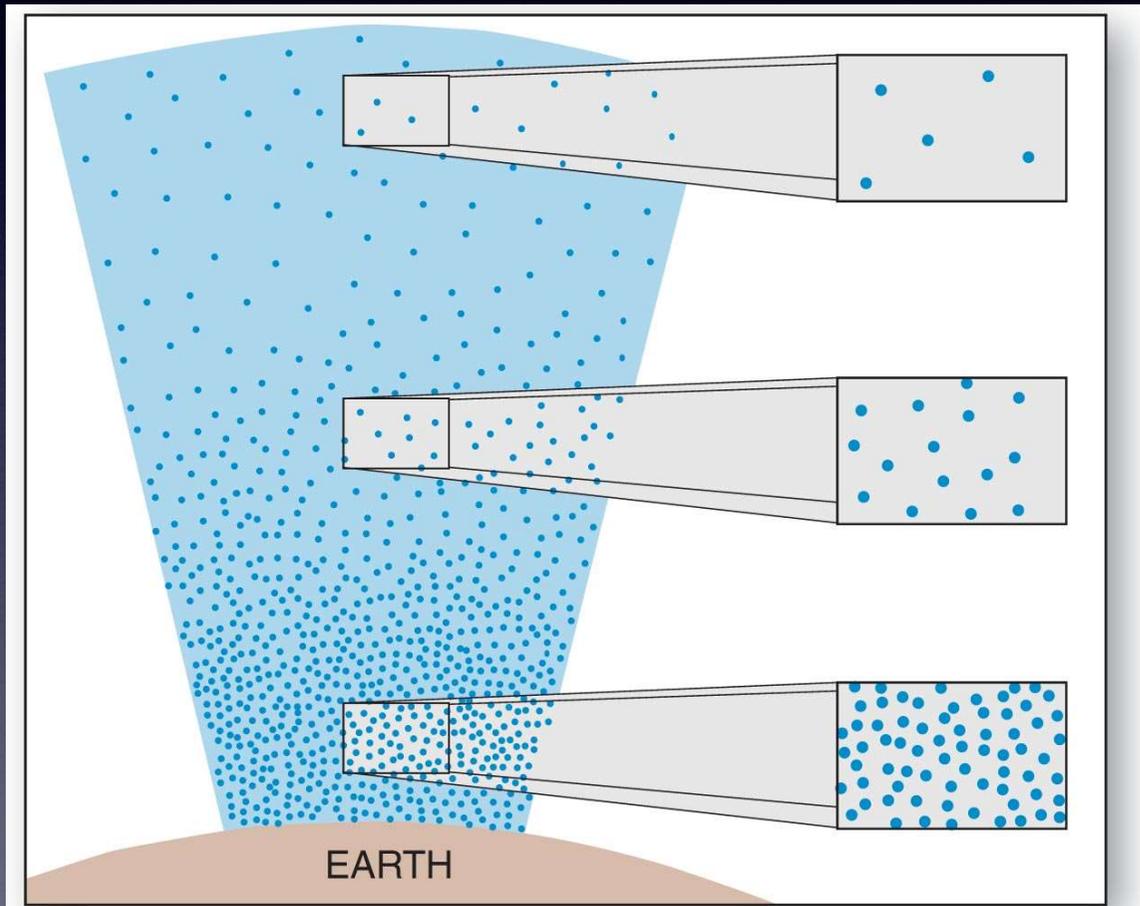
★热层

★高层大气

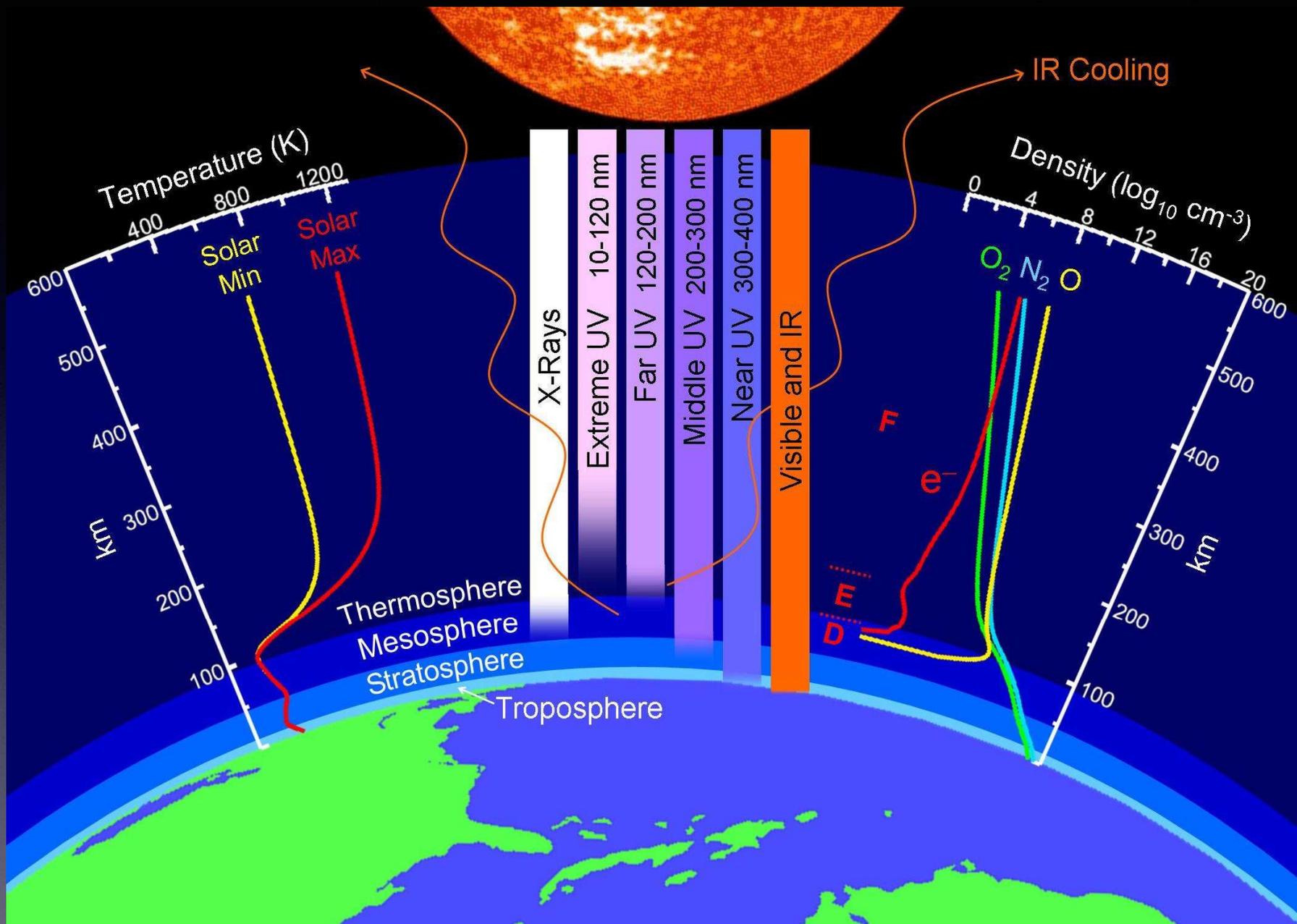


1. 地球大气及其分层

描述静态大气的主要参数：压强(P)、密度(ρ)、温度(T)、成分

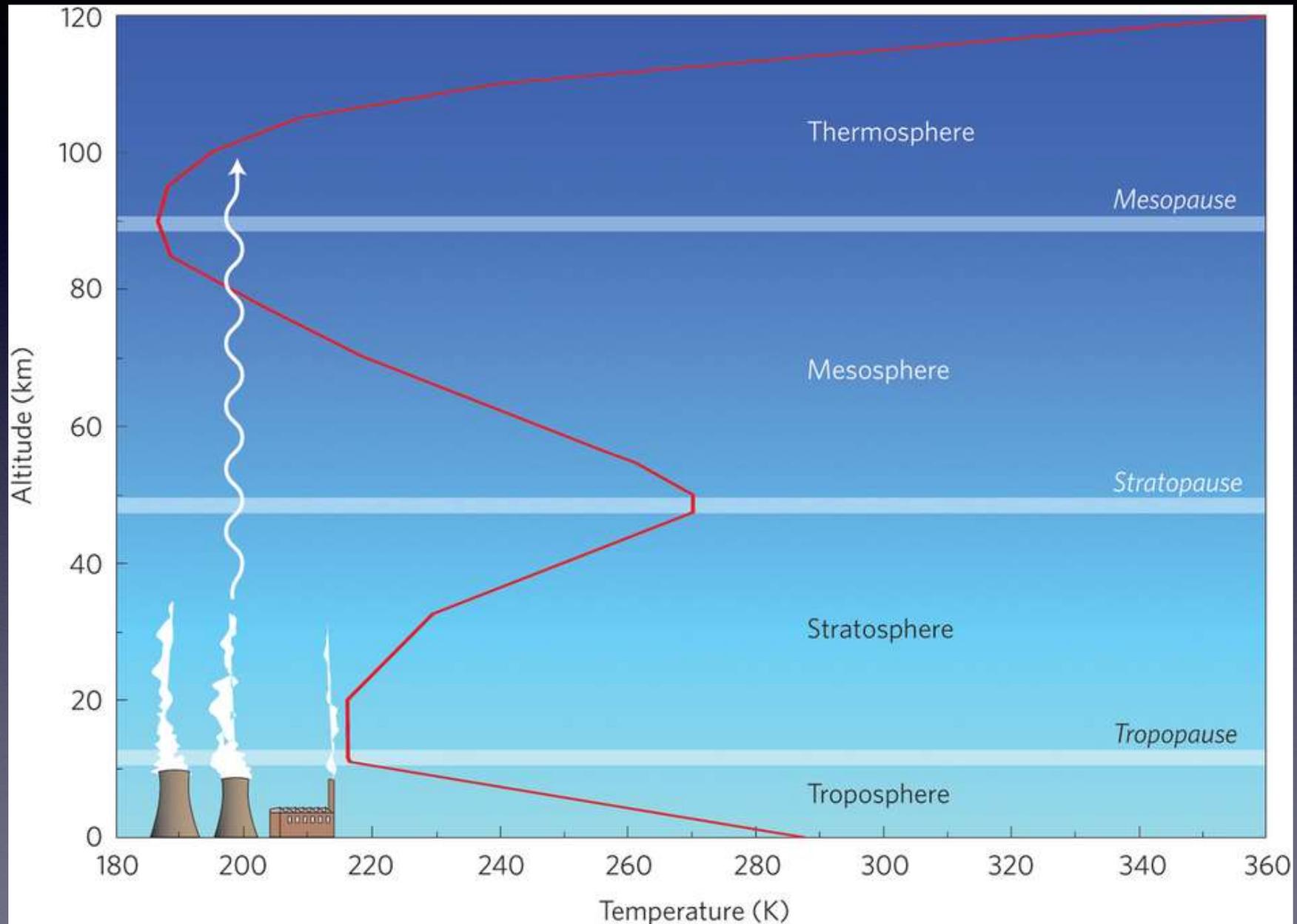


大气密度、压强随高度的变化

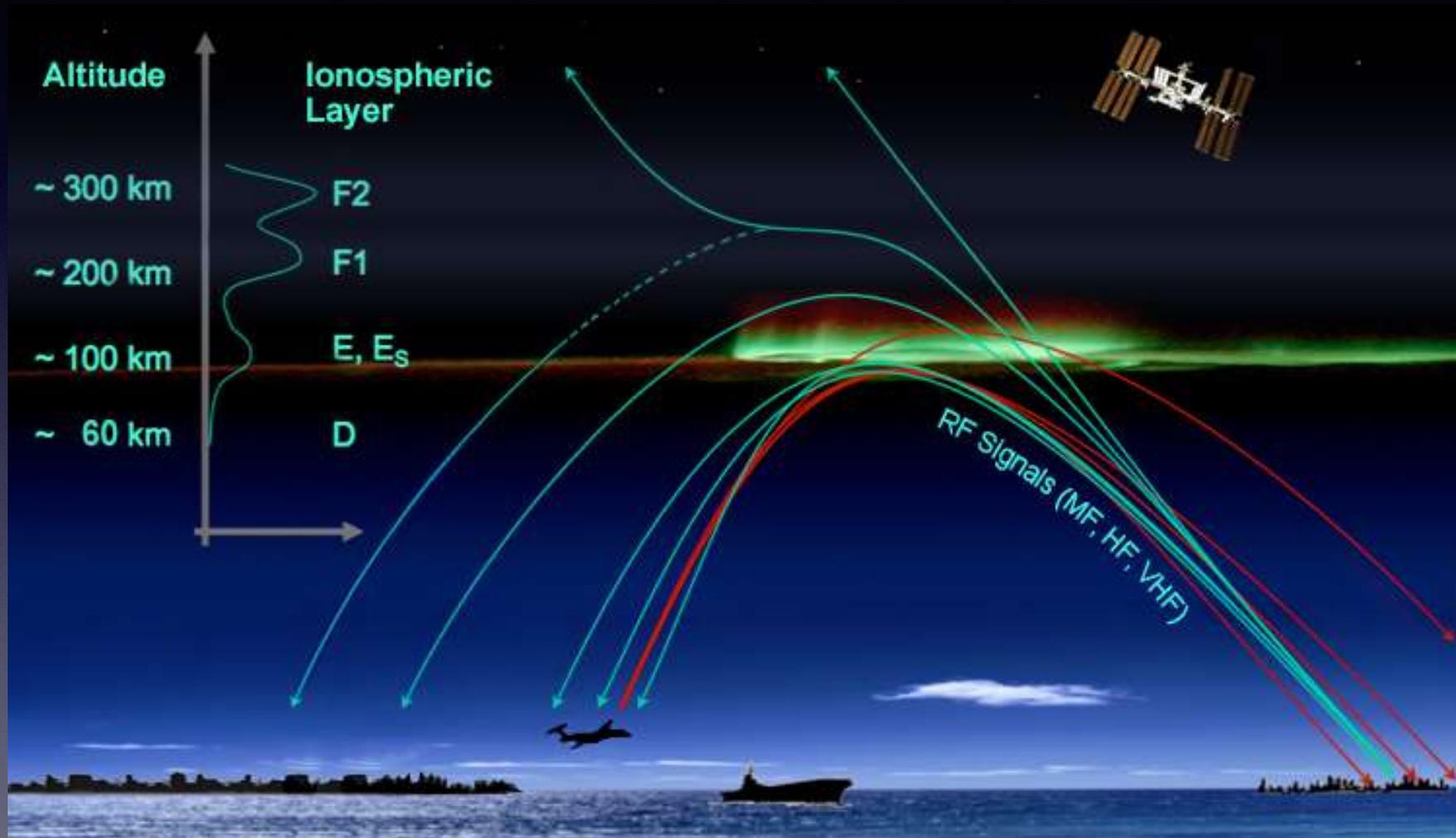


大气温度随高度的变化

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

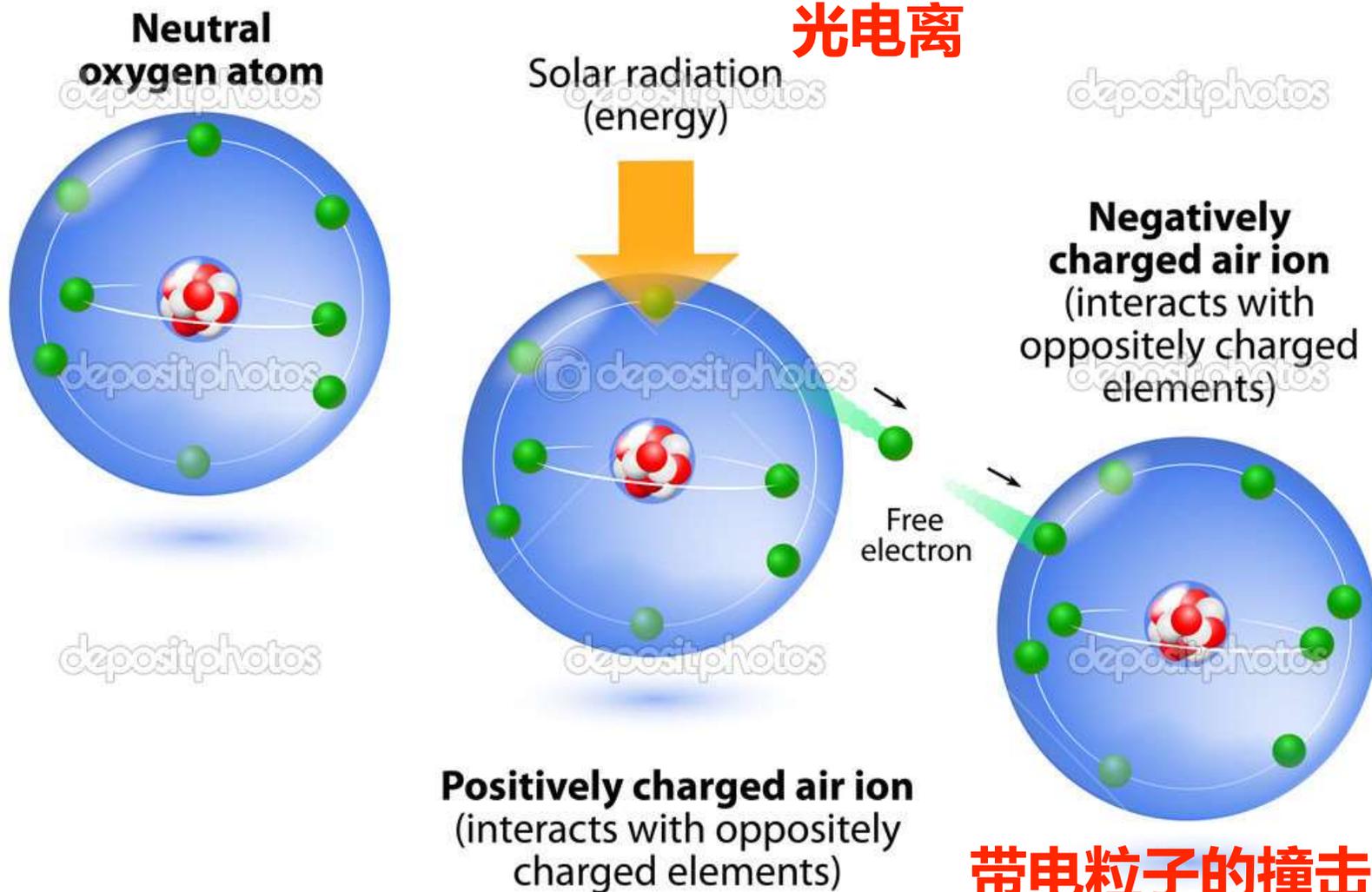


★ <50km 中性层

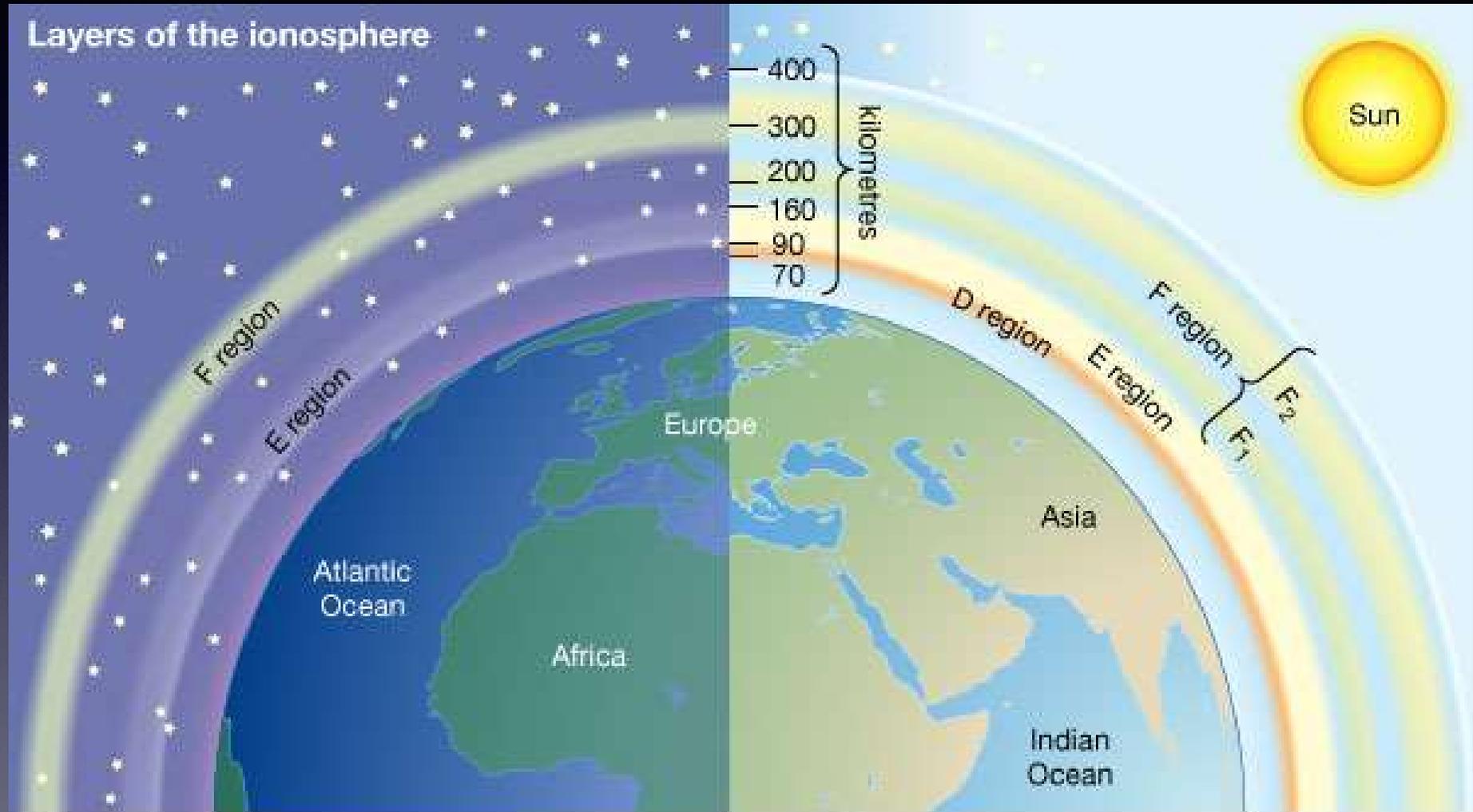
★ 50km ~ 400km 电离层

电离层的形成过程

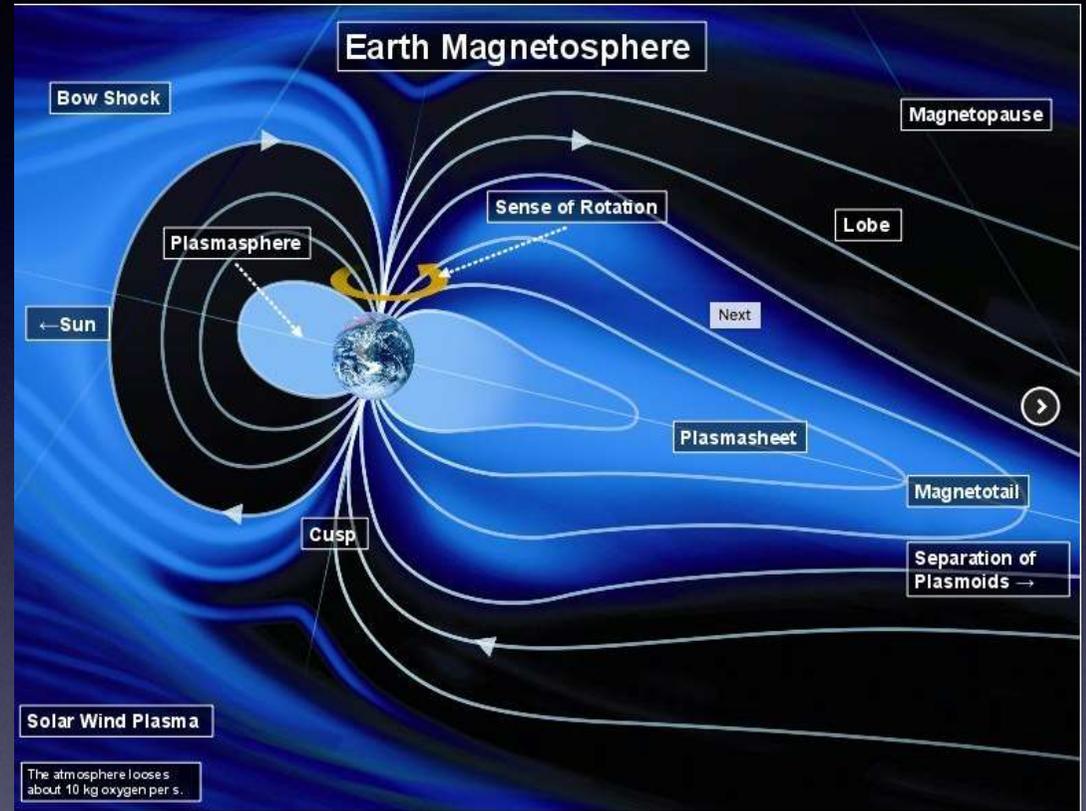
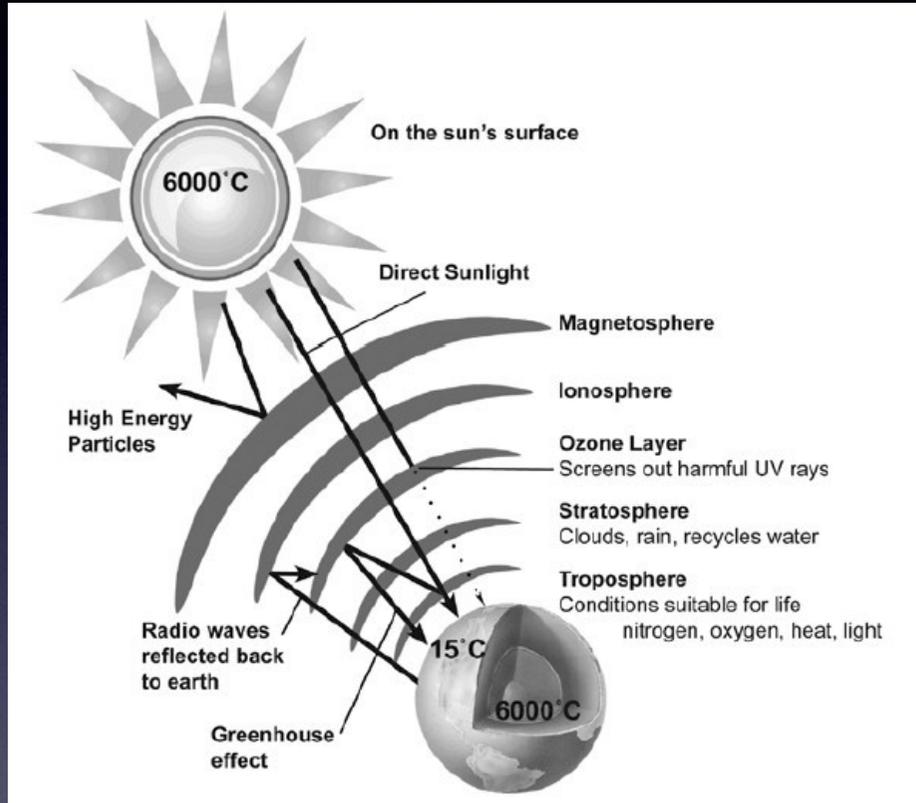
ION FORMATION



电离层的分层



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

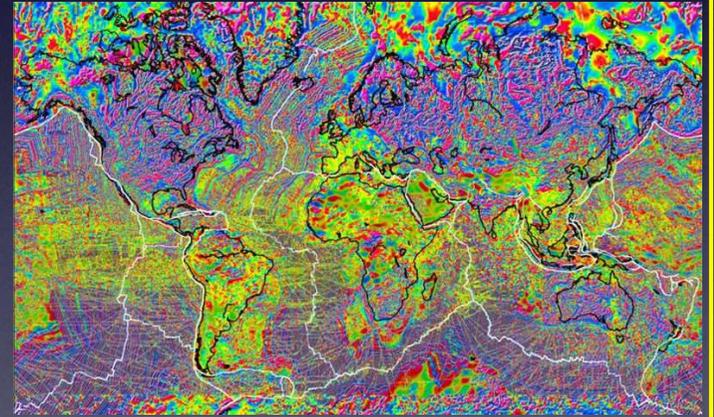
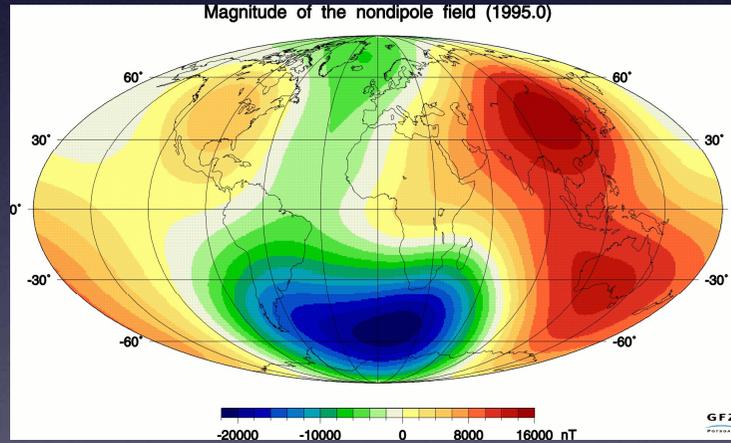
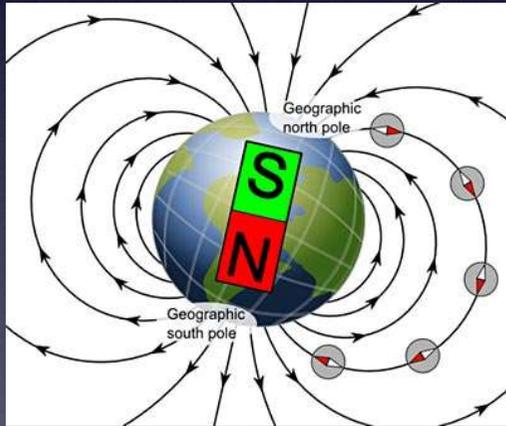
=

基本磁场

+

变化磁场

基本磁场



偶极场

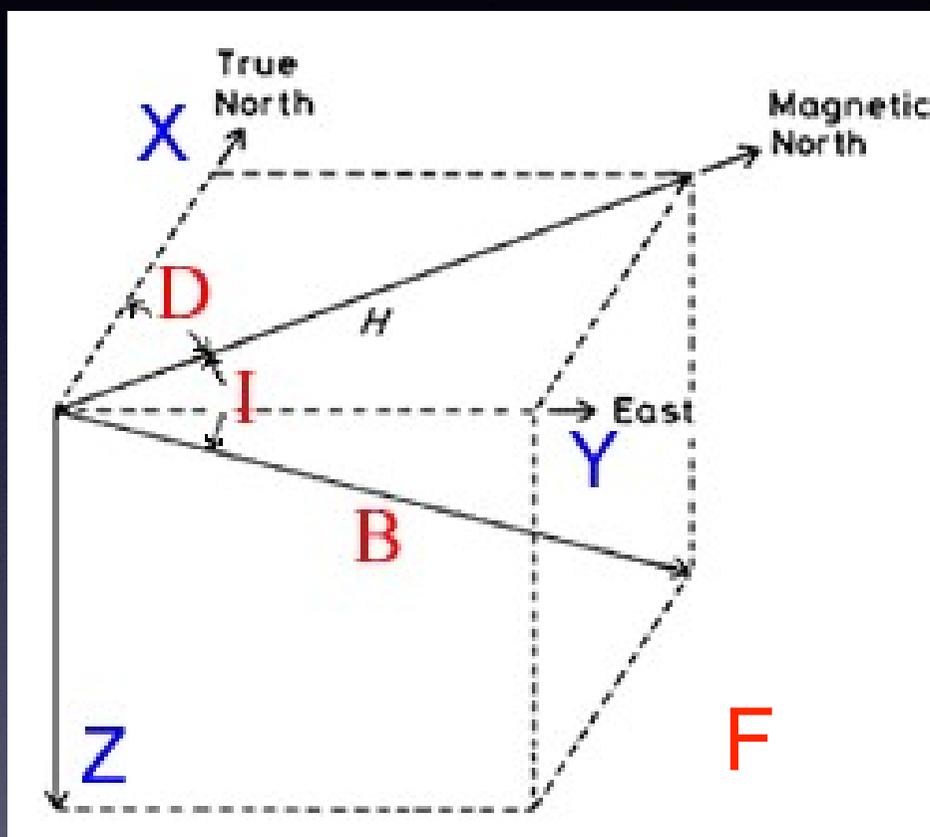
+

非偶极场

+

地磁异常

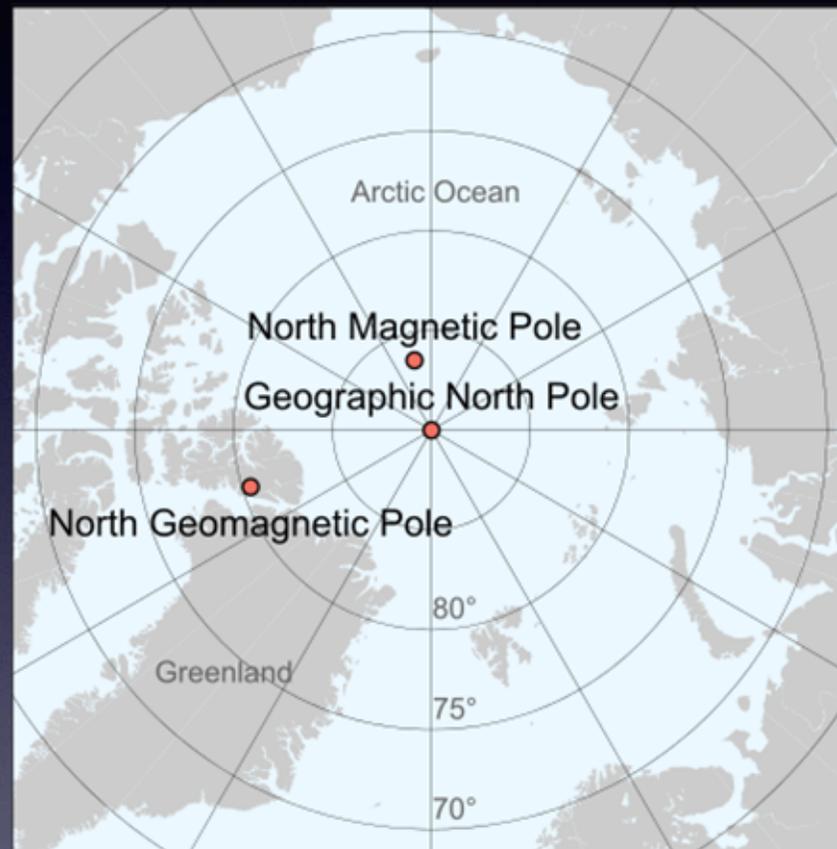
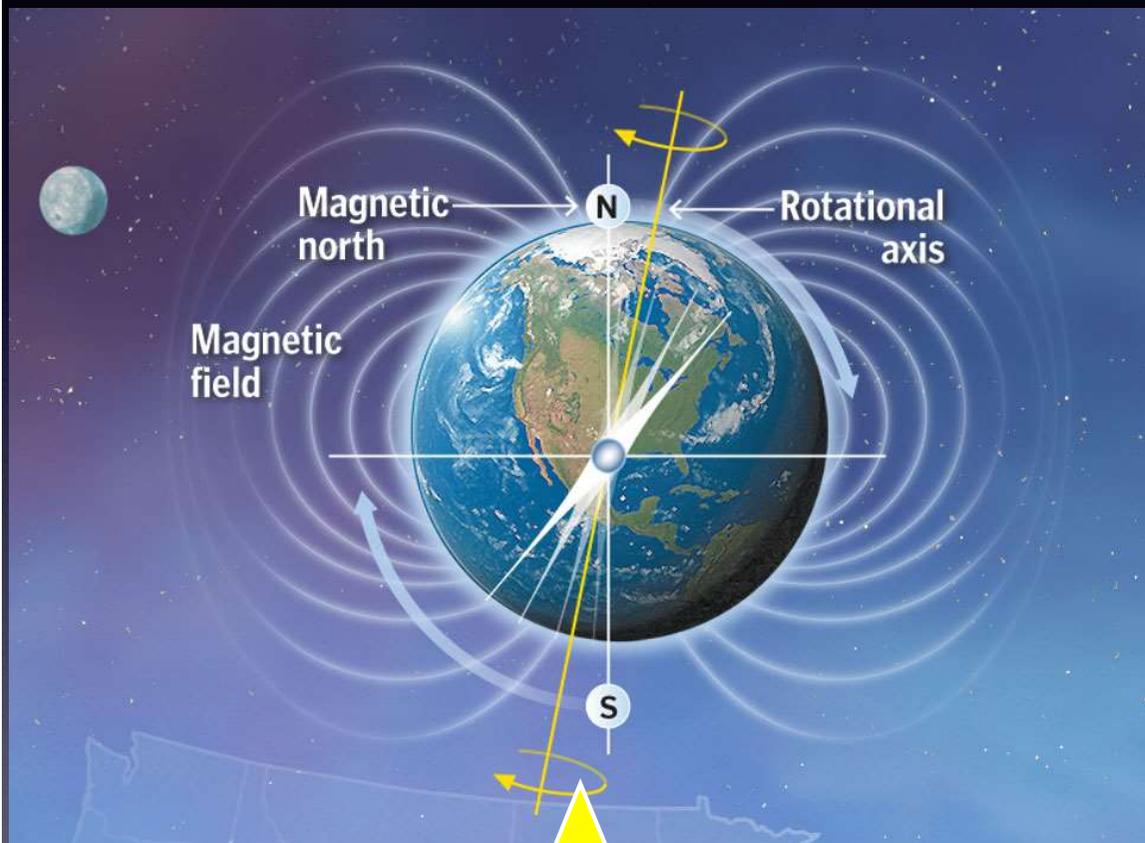
地磁场的基本要素



- 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

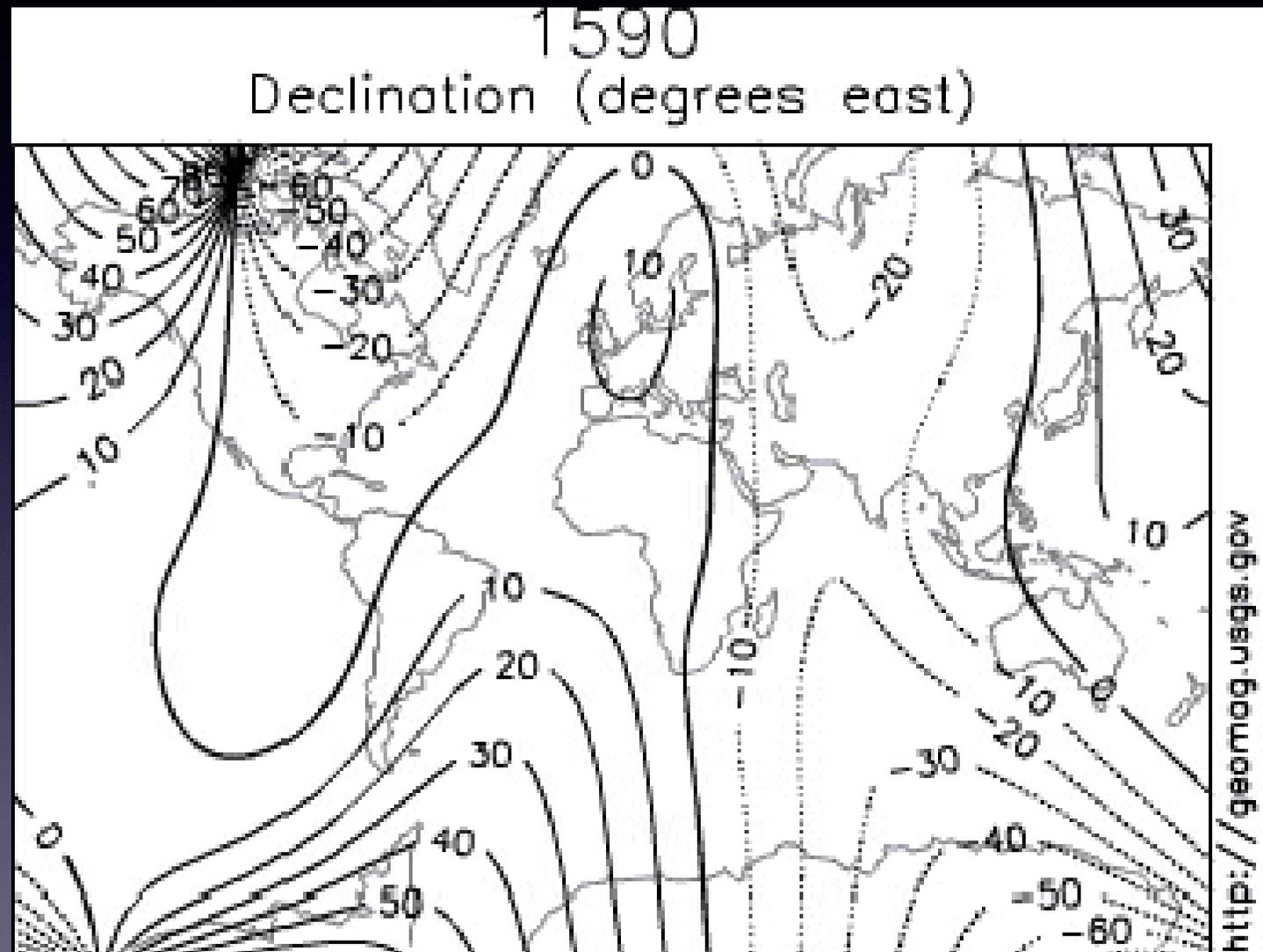
强度单位: Tesla (特斯拉) $1\text{nT}=10^{-9}\text{nT}=10^{-5}\text{G}$

地磁轴



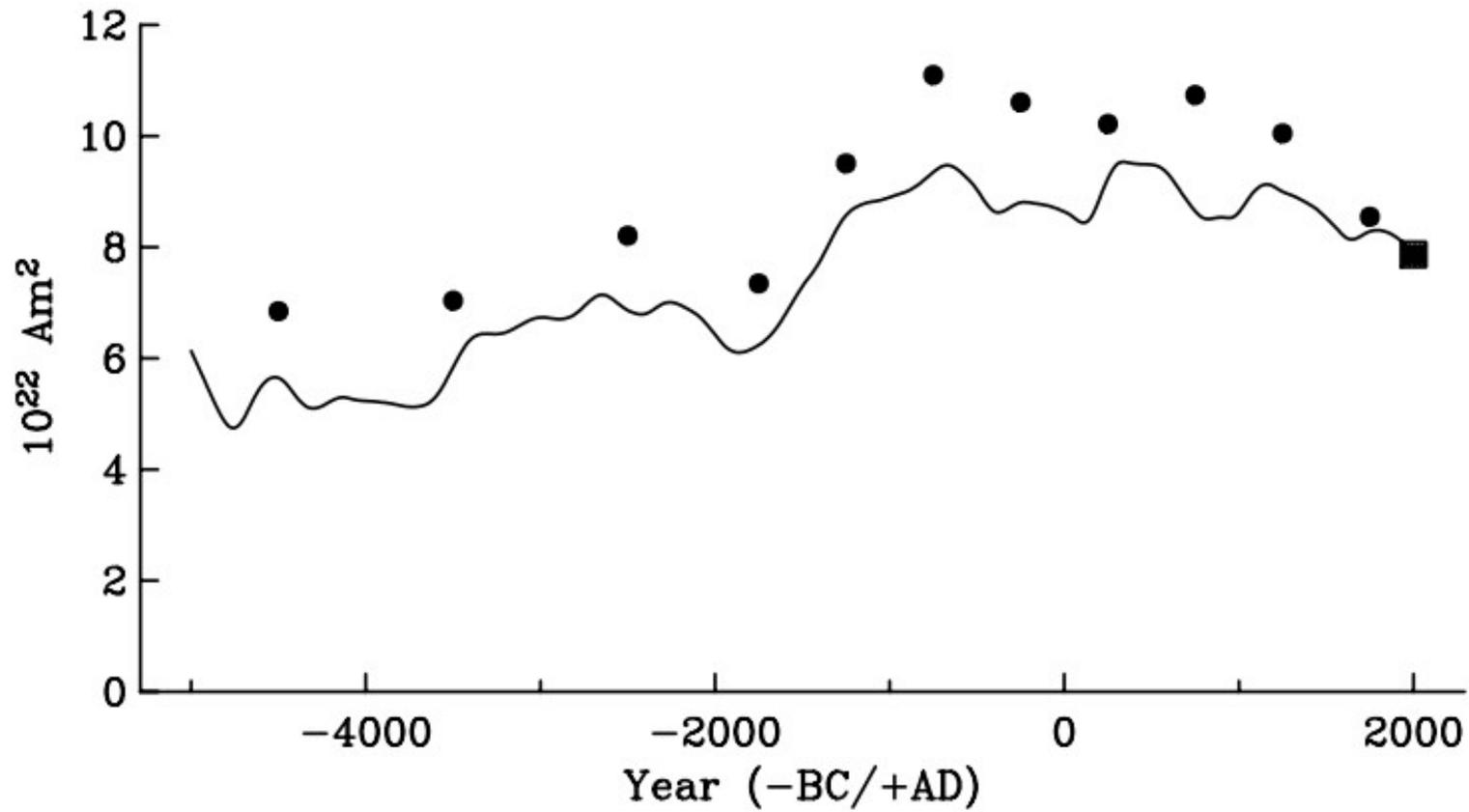
交角： 11°

地磁场的长期变化

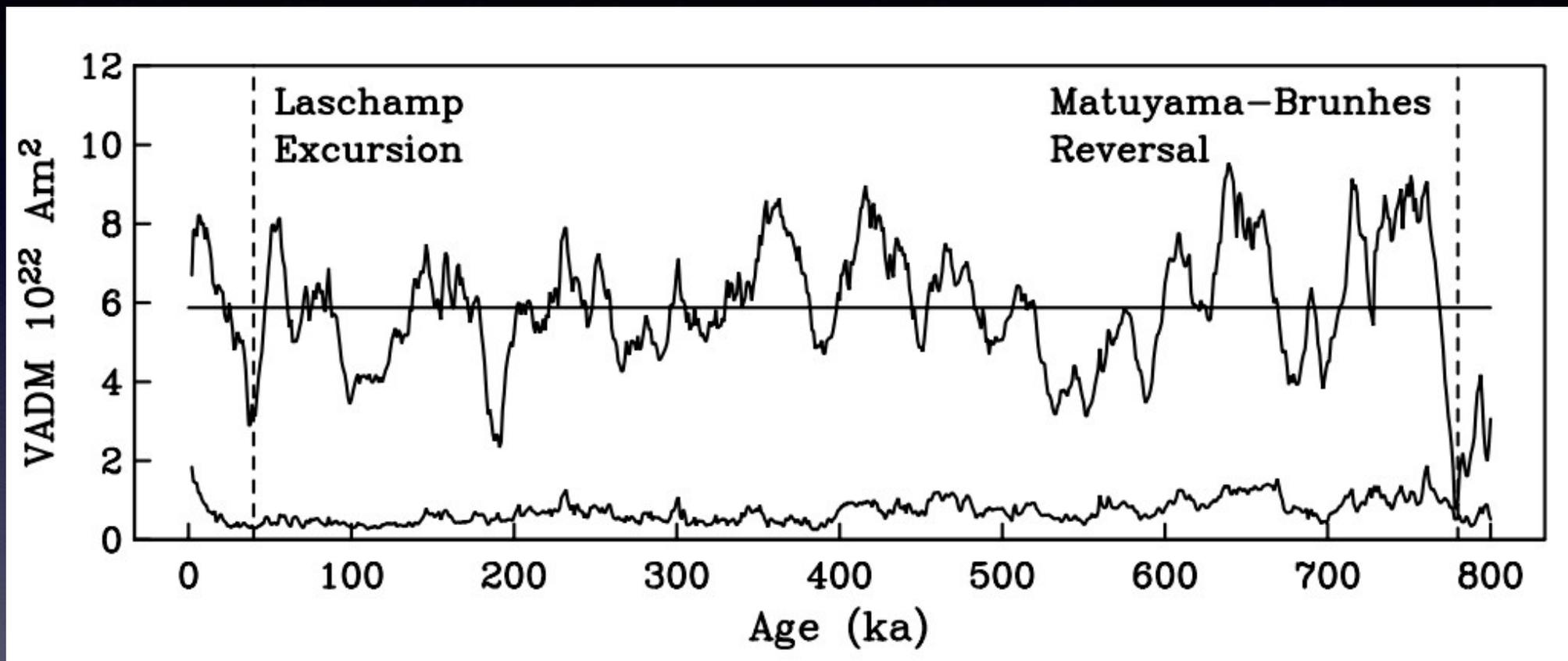


Model by A. Jackson, A. R. T. Jonkers, M. R. Walker,
Phil. Trans. R. Soc. London A (2000), 358, 957-990.

偶极子磁矩的衰減

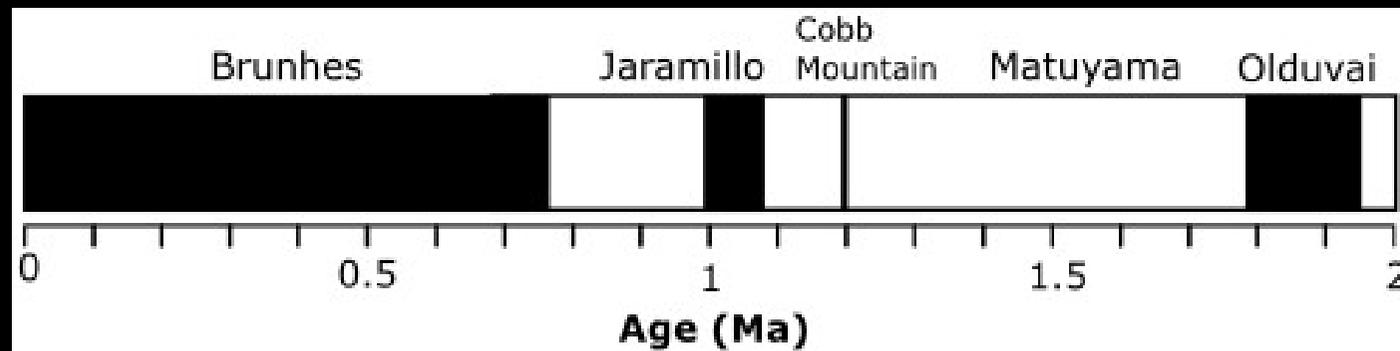
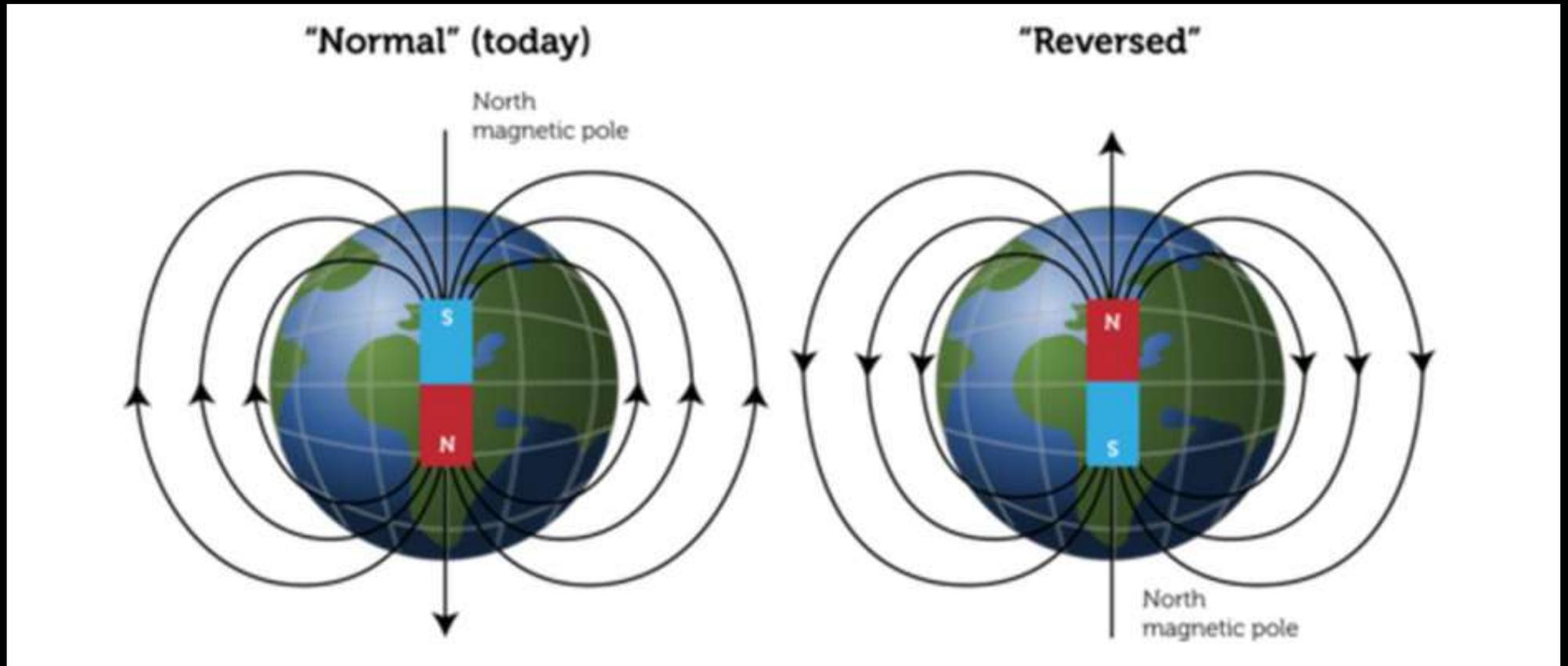


地磁场偶极子磁矩的长期变化



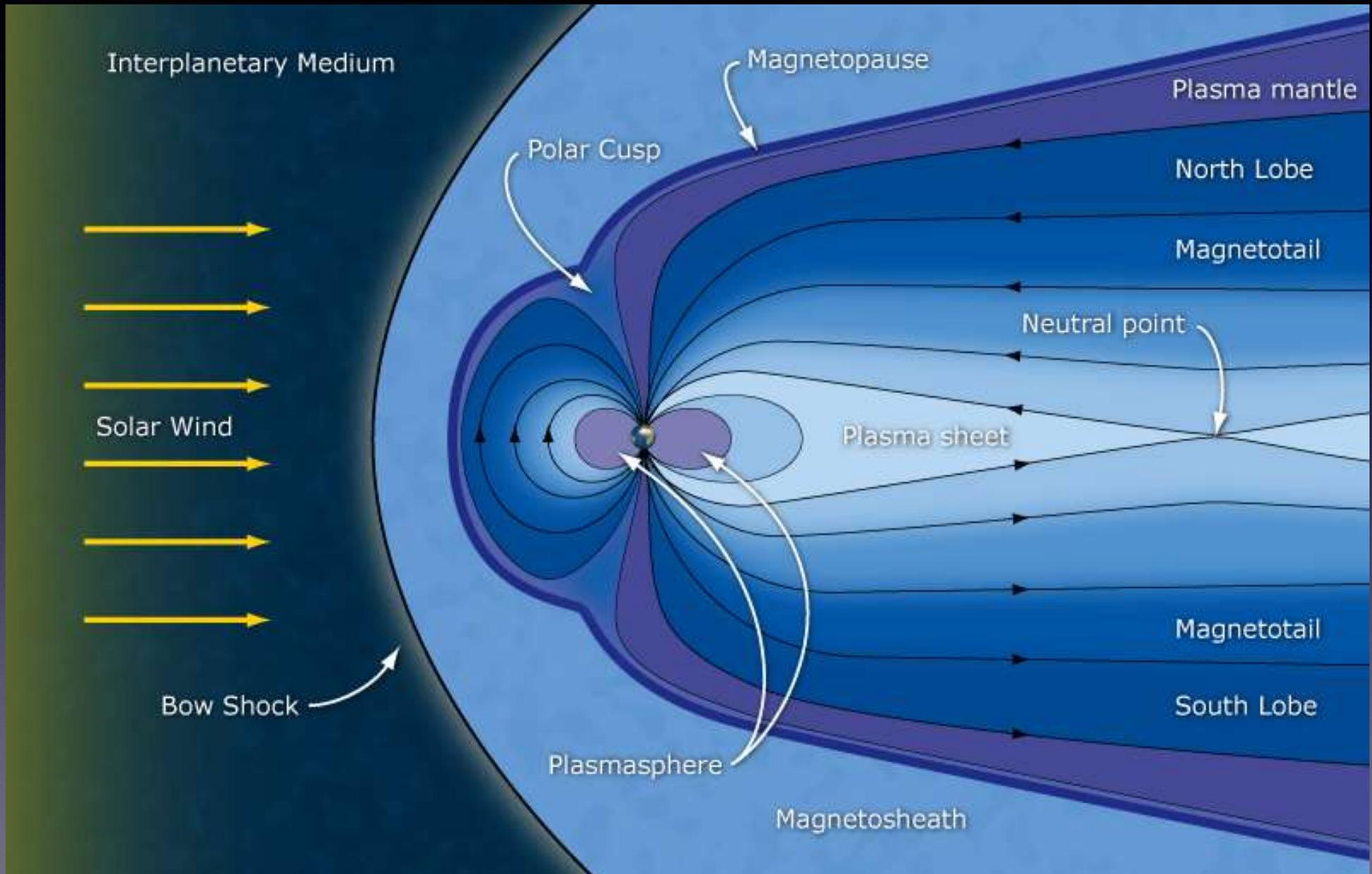
- * years (yrs) before present **bp**
- * thousands (10^3) of years before present, **ka**
- * millions (10^6) of years before present, **Ma**
- * billions (10^9) of years before present, **Ga**

磁场反转

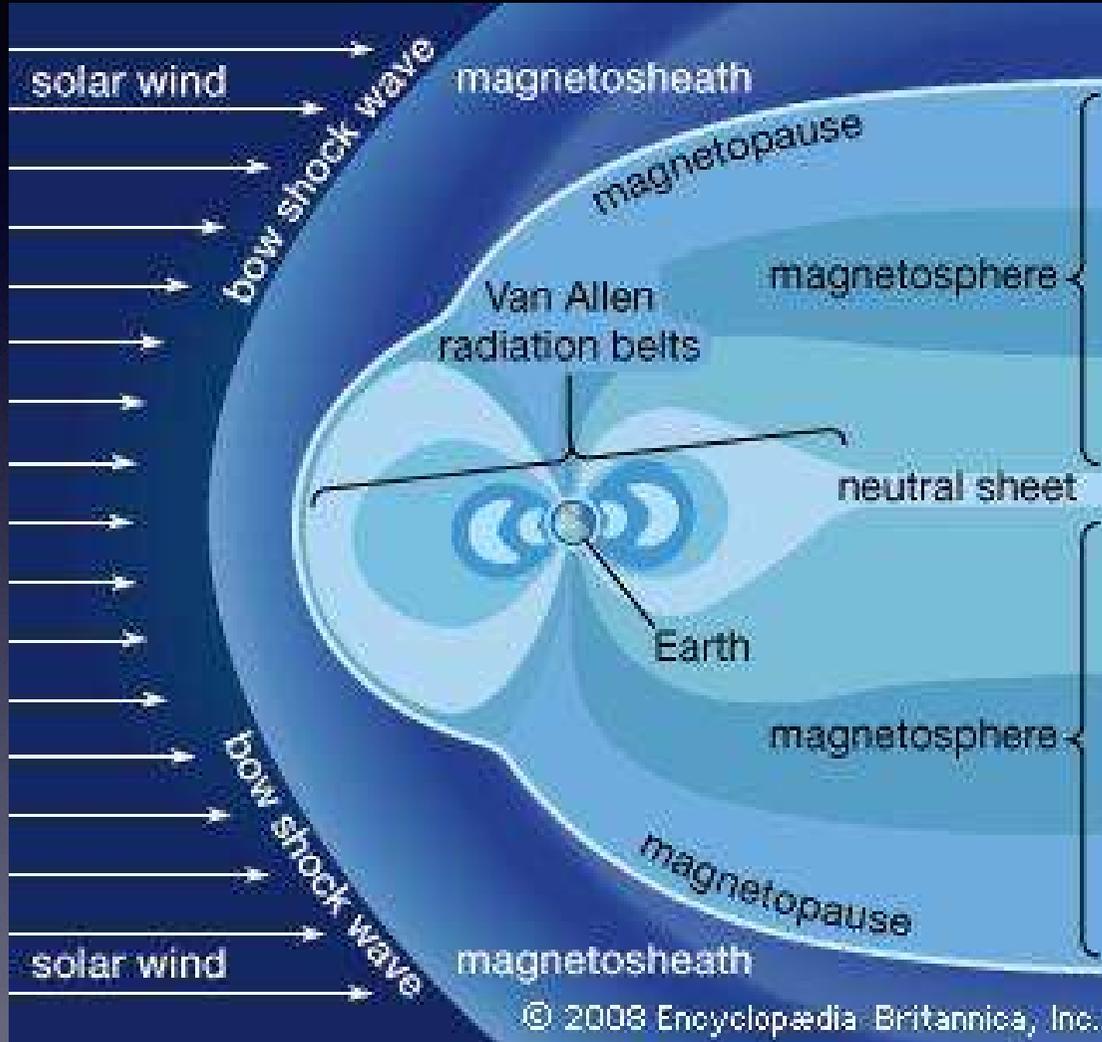




地球磁层



磁层的结构



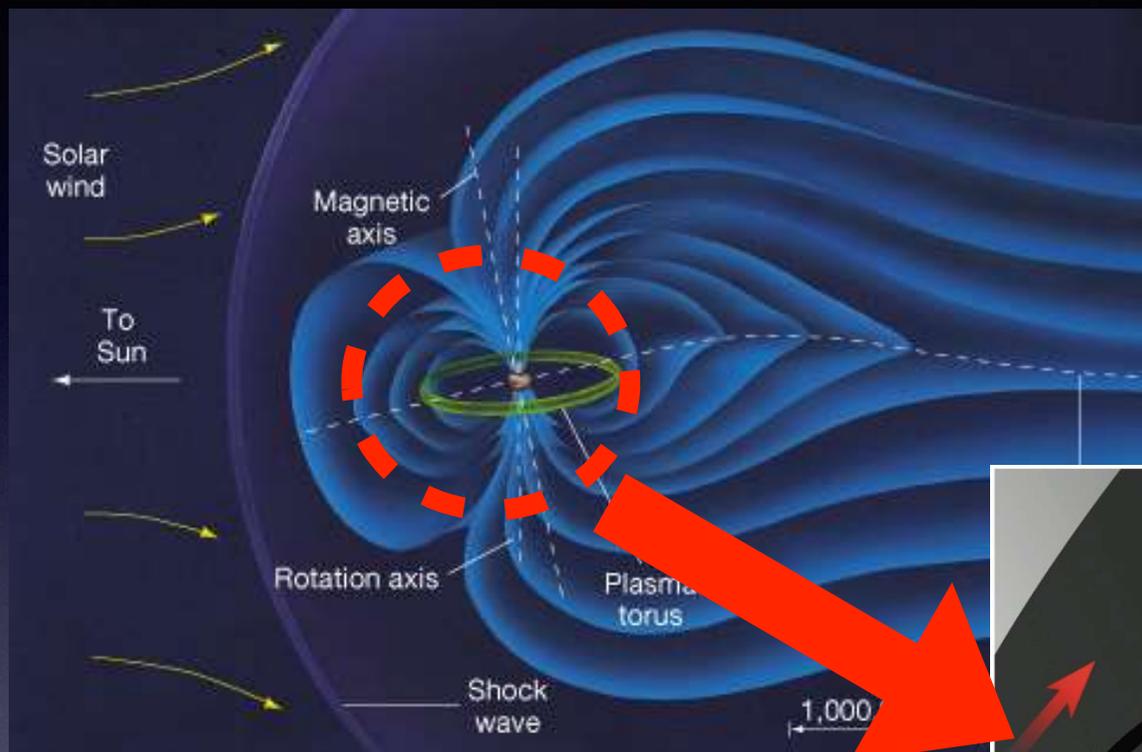
磁层顶: 太阳风和磁层之间的薄薄的边界层

太阳风动压

||

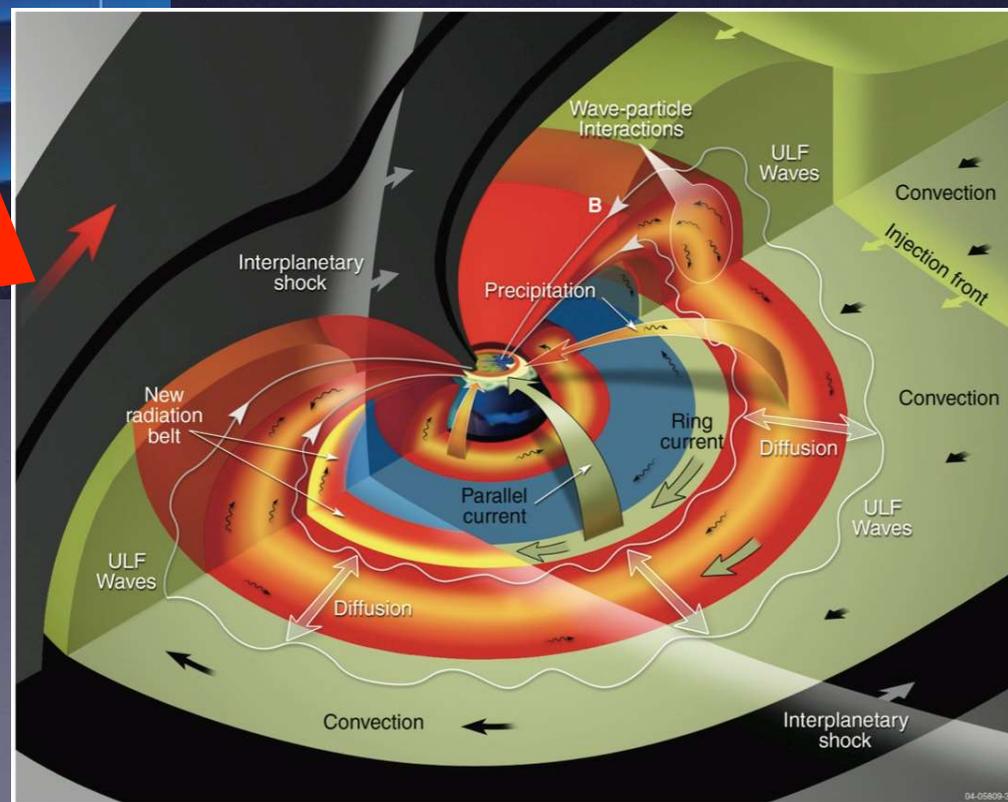
地磁场压强

磁层结构：内磁层

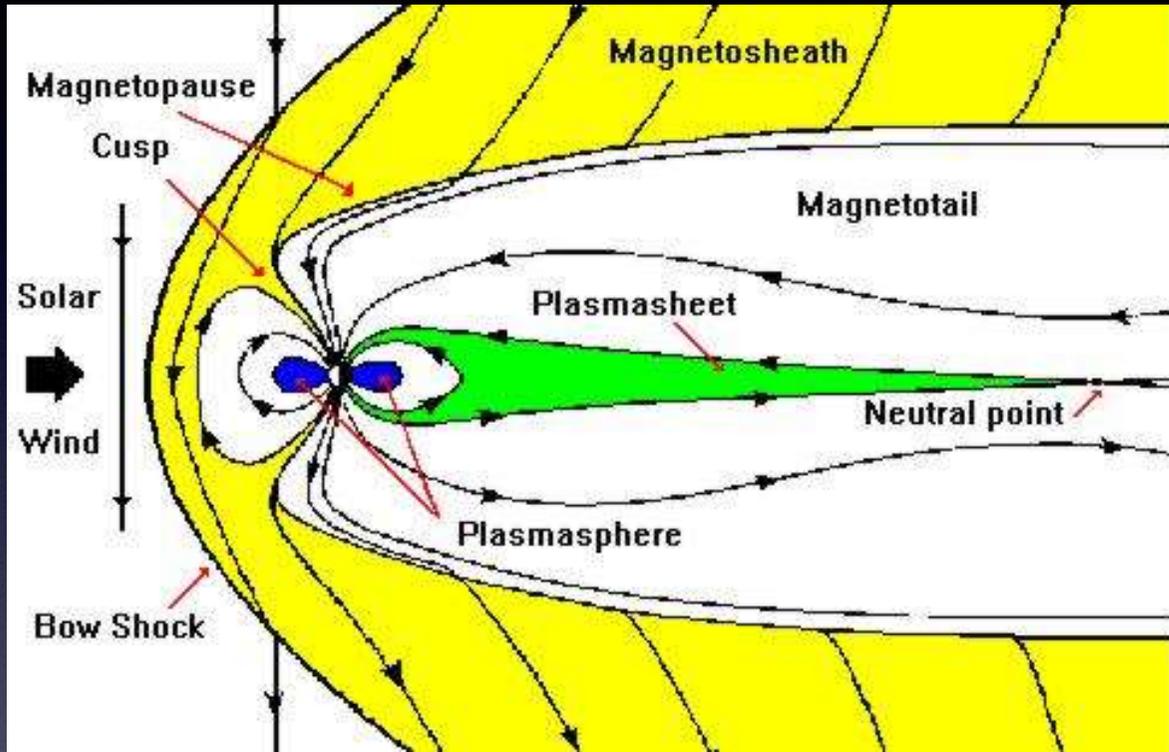


区域： $<10R_E$

- ★ 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。

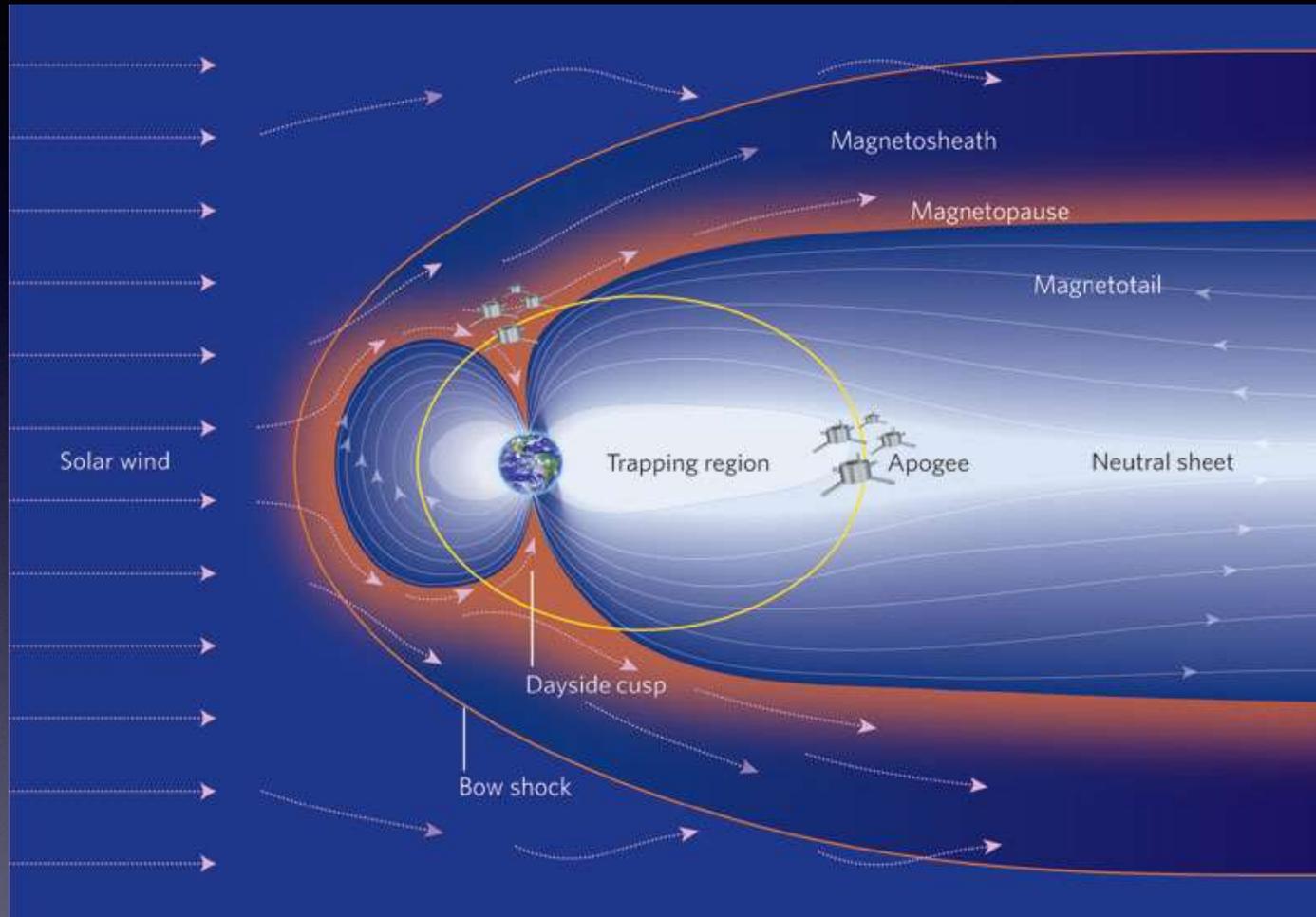
磁鞘

磁层顶

磁尾

开放磁场

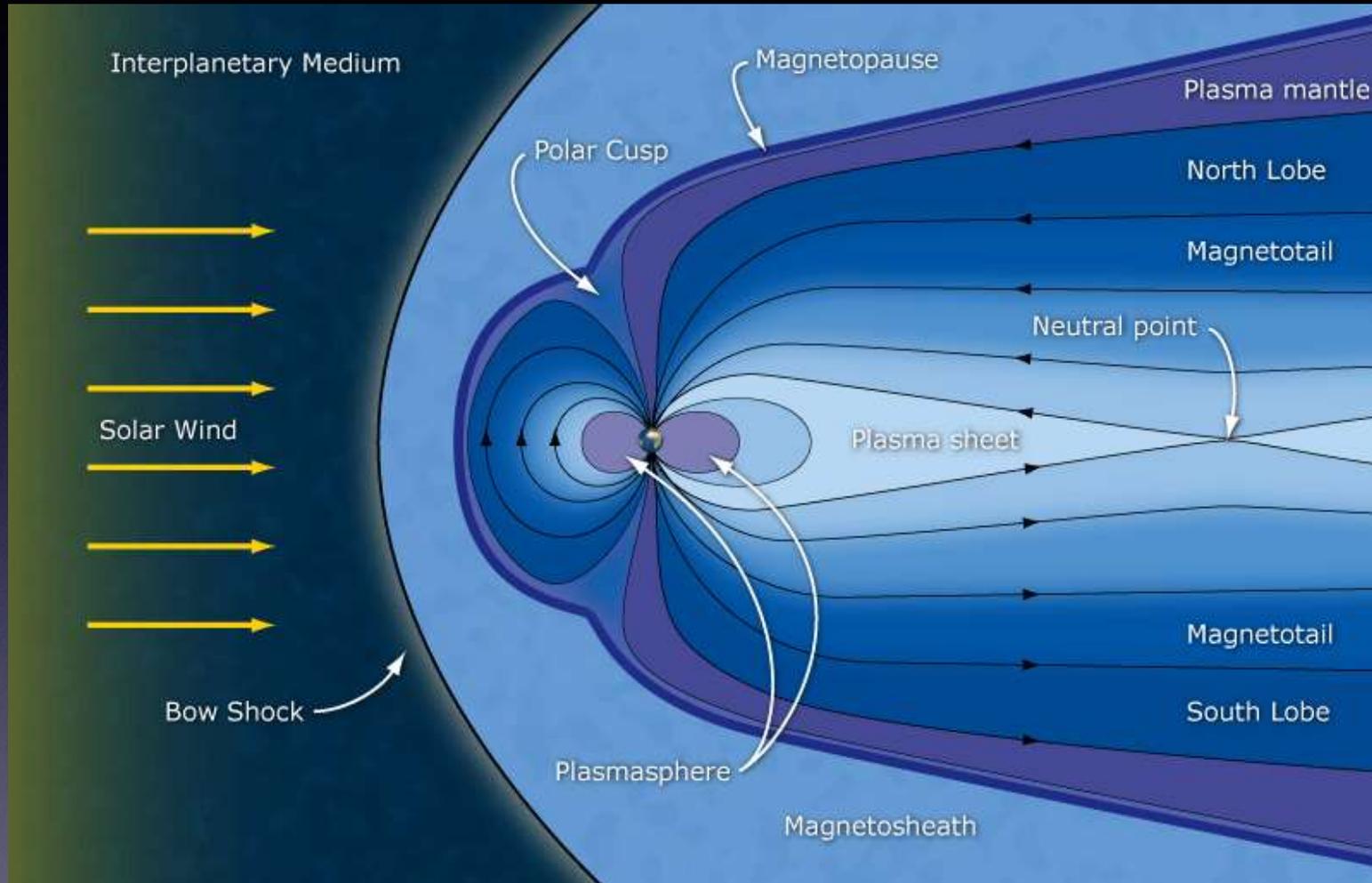
磁层结构：磁鞘



- ★ 主要物质来自太阳风
- ★ 流速比太阳风低

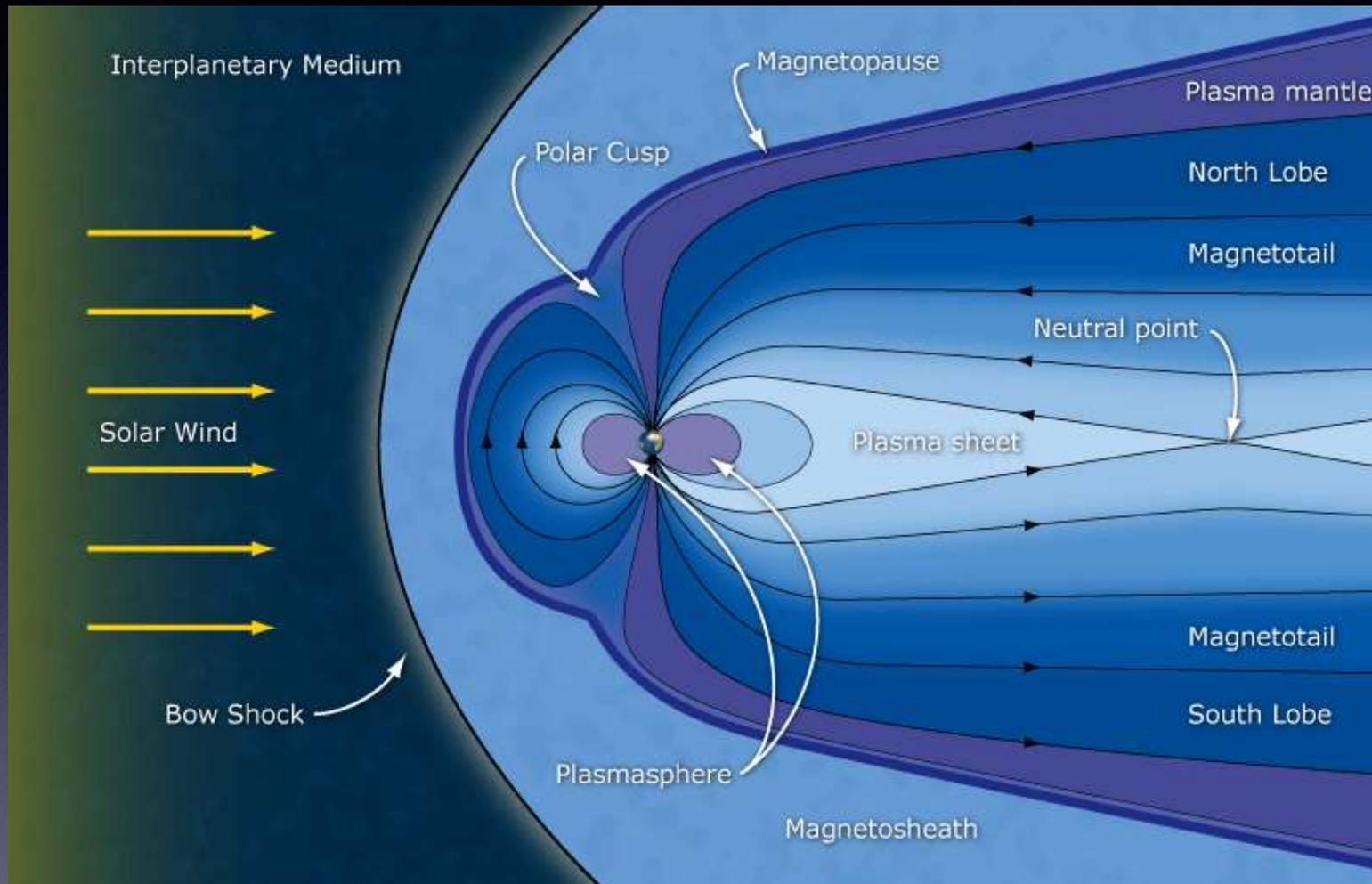
- ★ 流动方向偏离日地连线 20° 以上

磁层结构：等离子体幔



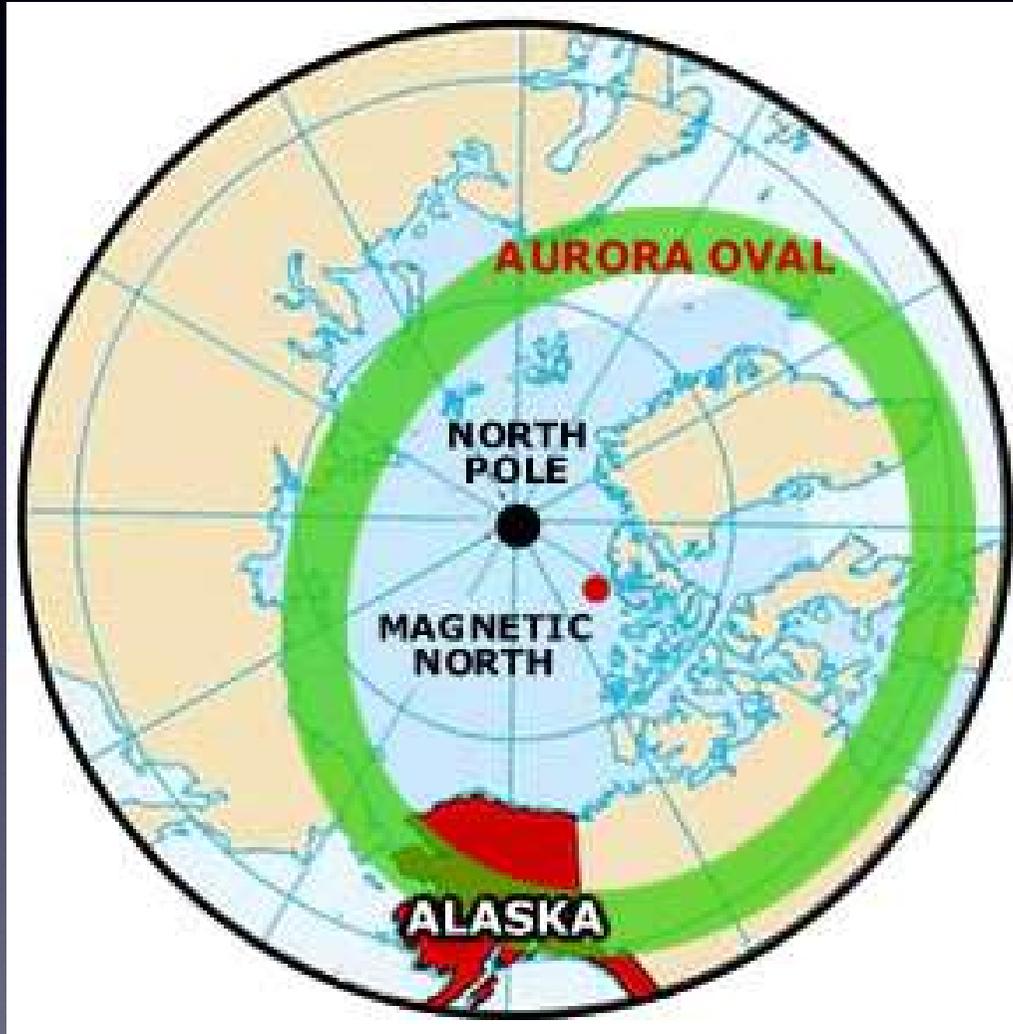
★ 能谱和流速与磁鞘类似的等离子体区域

磁层结构：极尖区



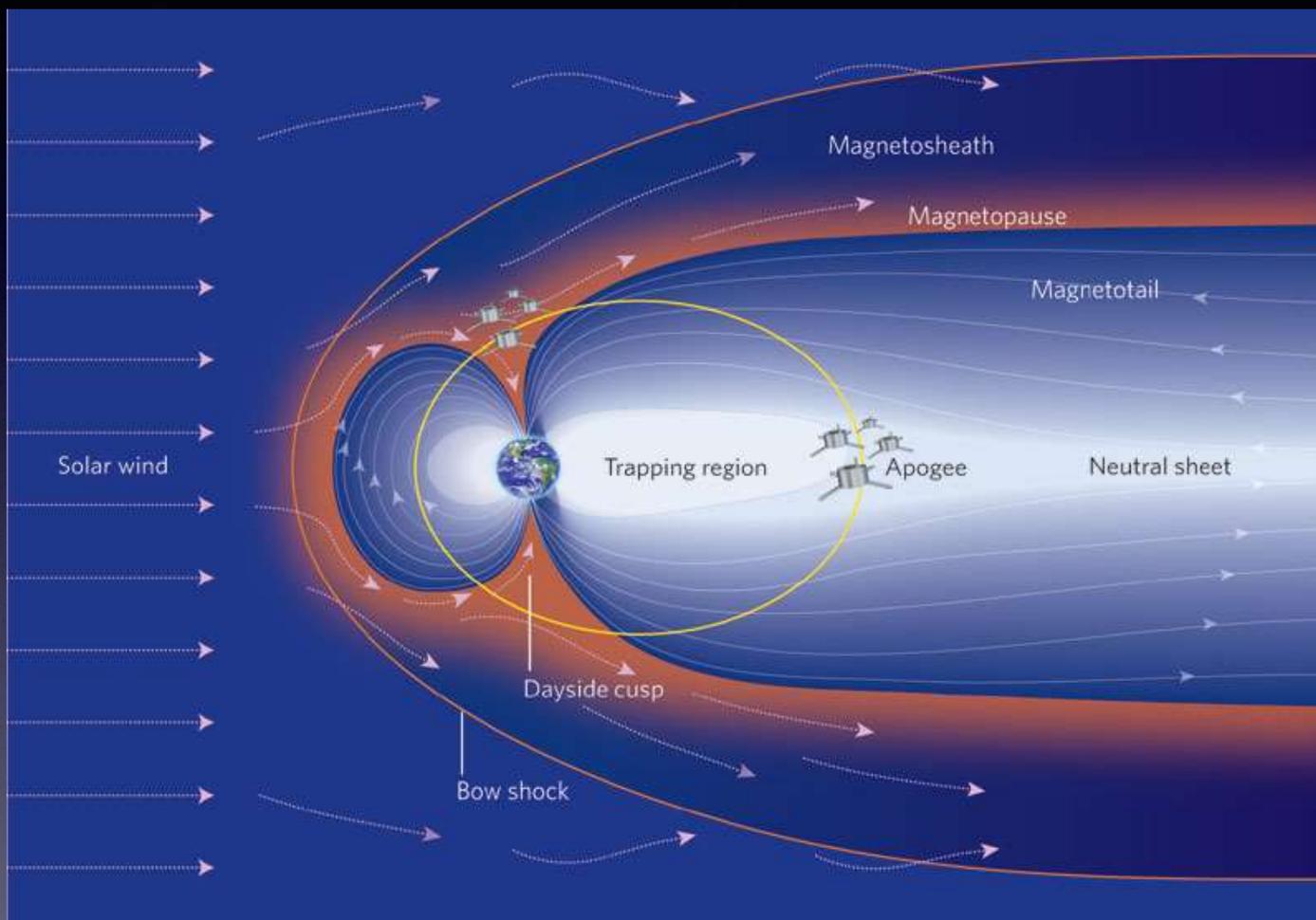
- ★ 总磁场为0的中性点
- ★ 太阳风粒子可直接进入磁层
- ★ 连接地球表面 $\pm 78^\circ$ 附近

磁层结构：极光卵



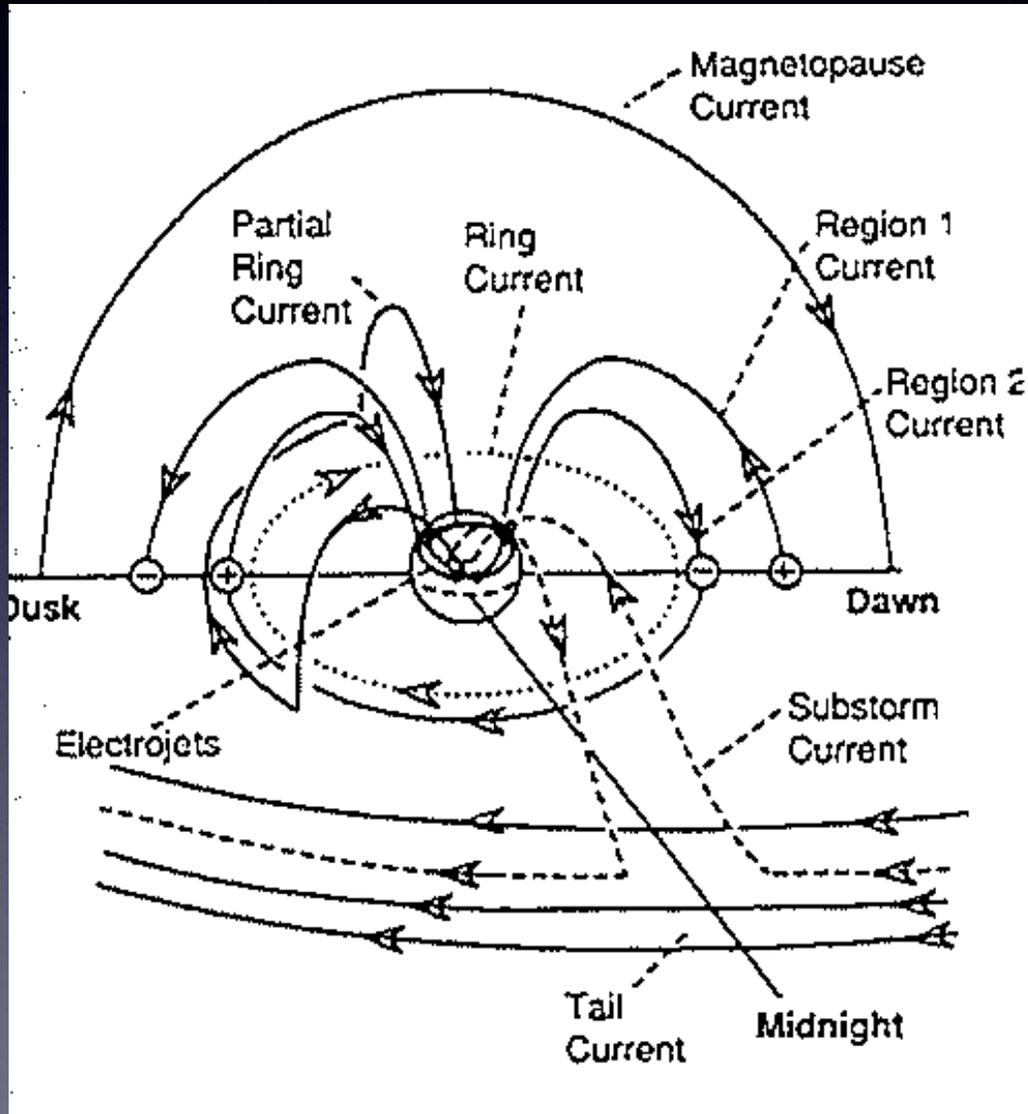
极光卵：带电粒子进入大气层的区域

磁层结构：磁尾



★ 反太阳方向, $>10R_E$

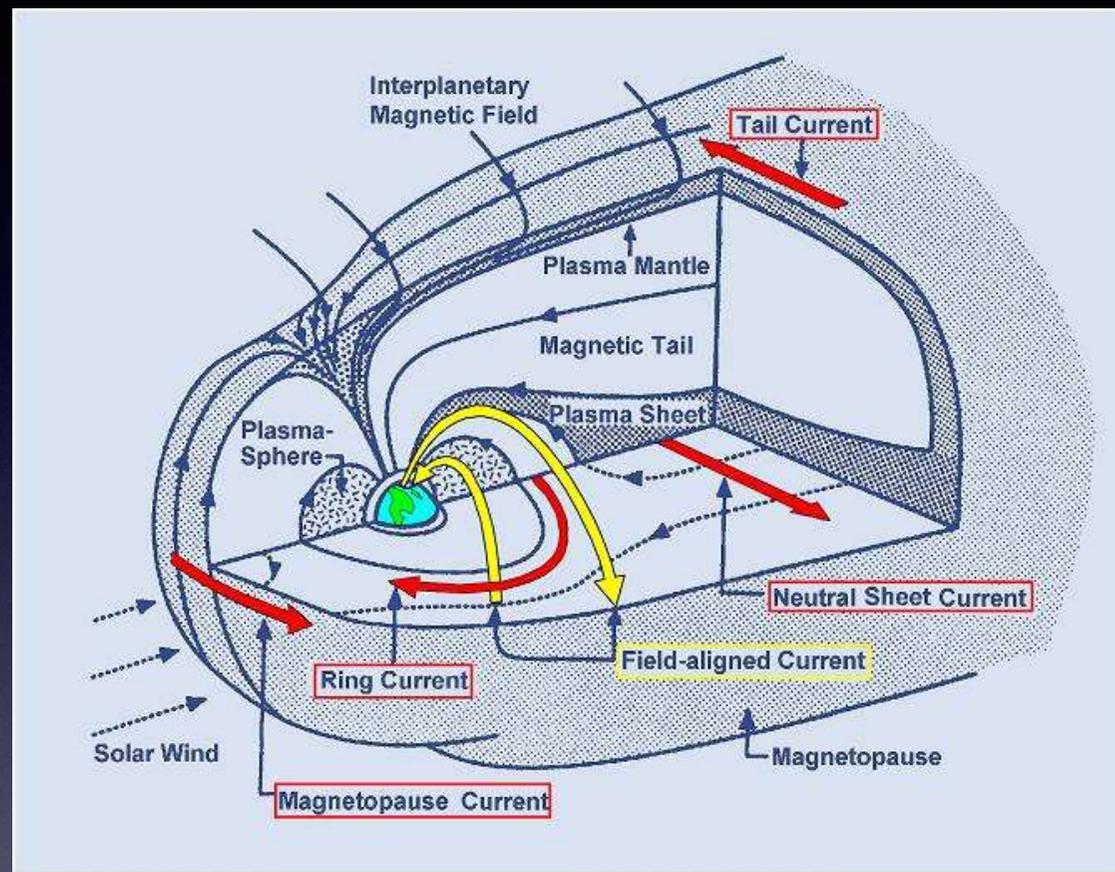
带电粒子在地磁场中的运动



- ★ **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

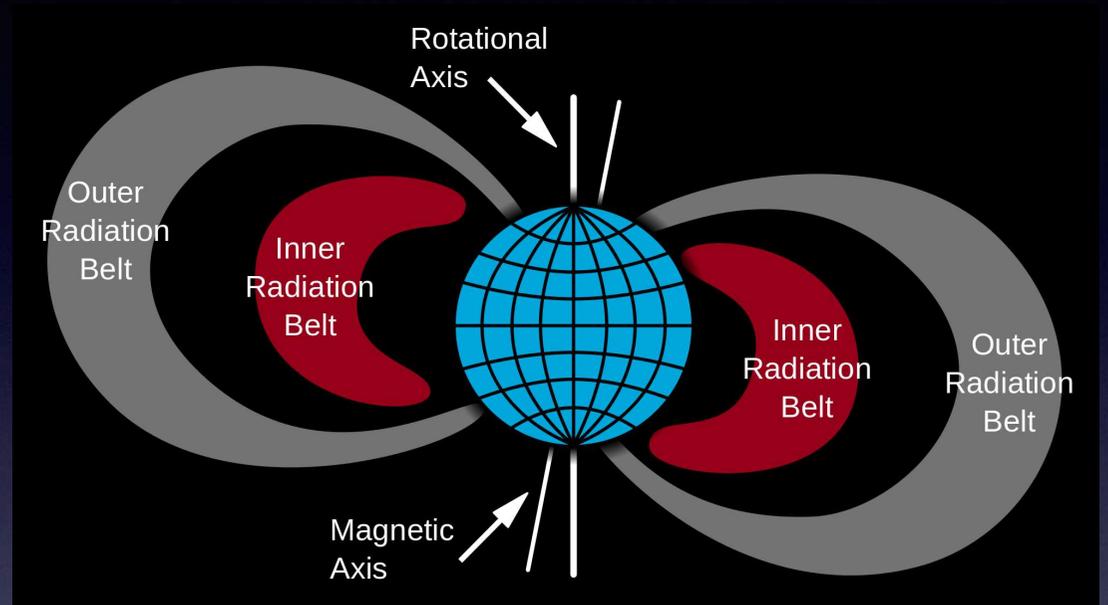
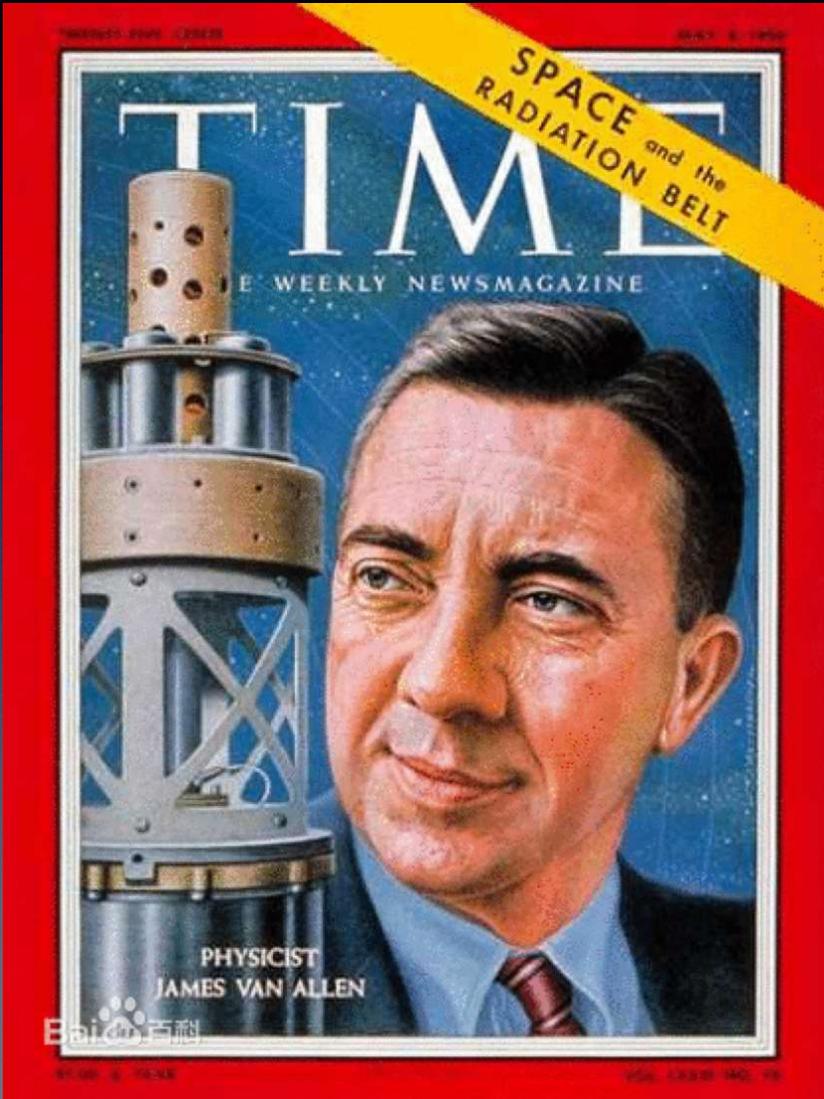
环电流

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流。



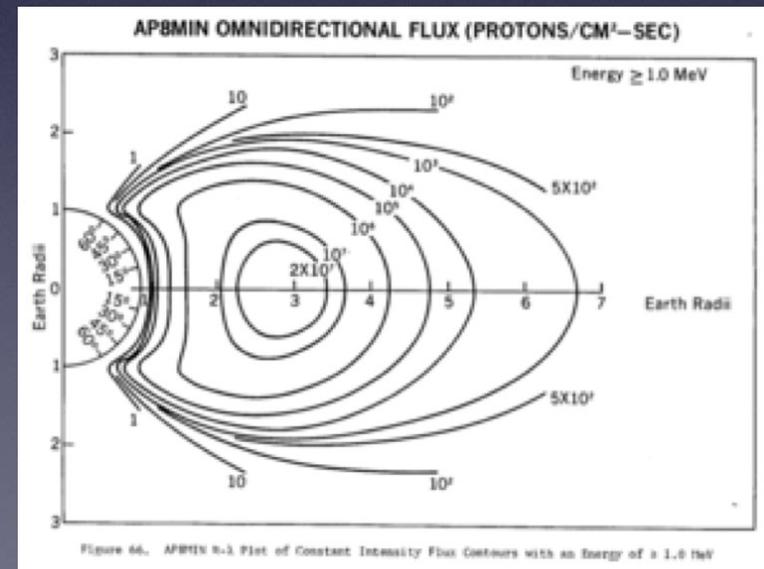
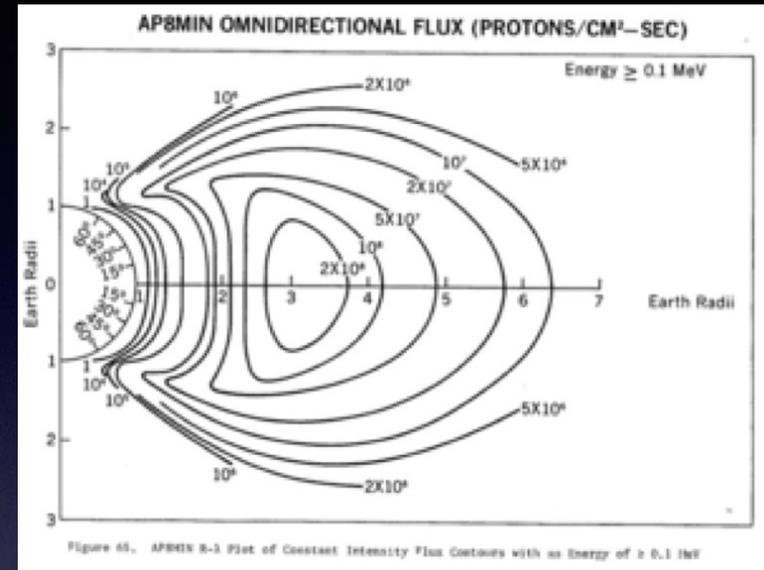
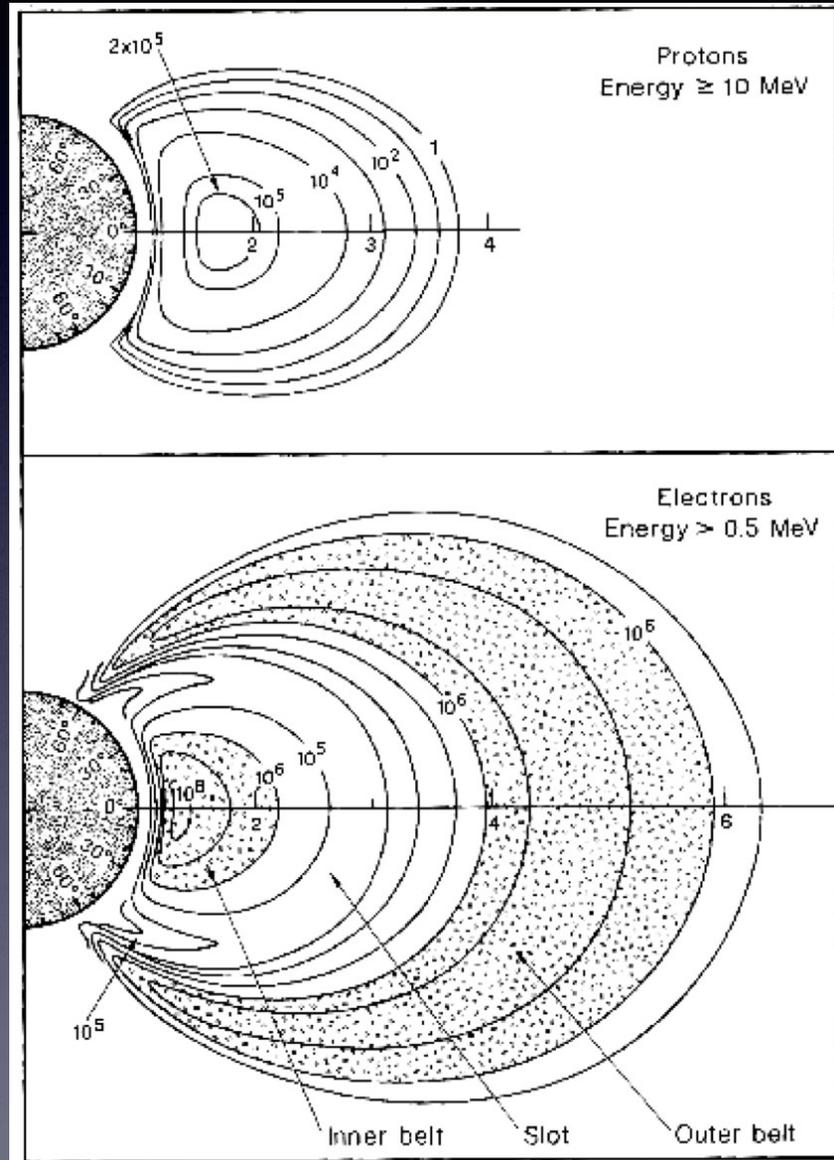
- ★ 离子的混合表明环电流的粒子源不止一个
- ★ alpha粒子是典型的太阳风离子

辐射带

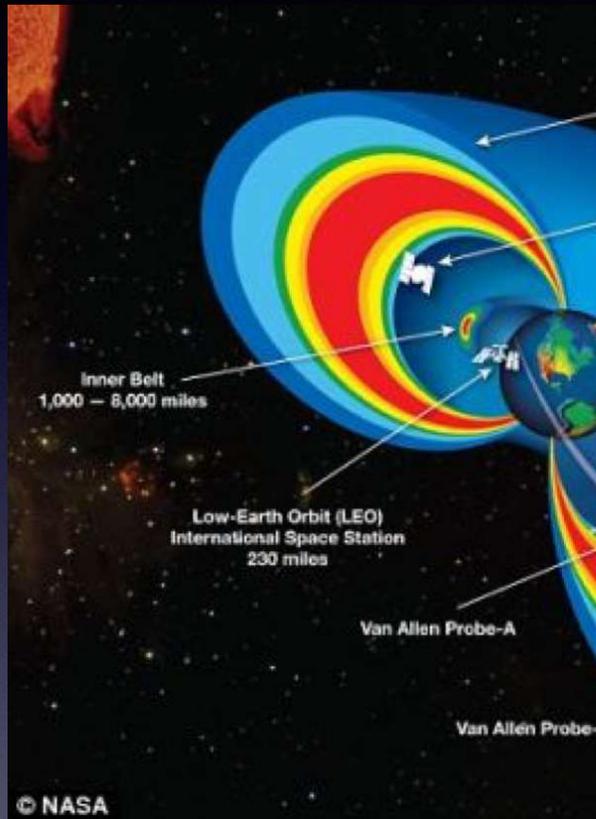


- ★ 内辐射带(1.2-2.0 R_E)
>100MeV protons
- ★ 外辐射带 (3.0-8.0 R_E)
>0.1MeV electrons

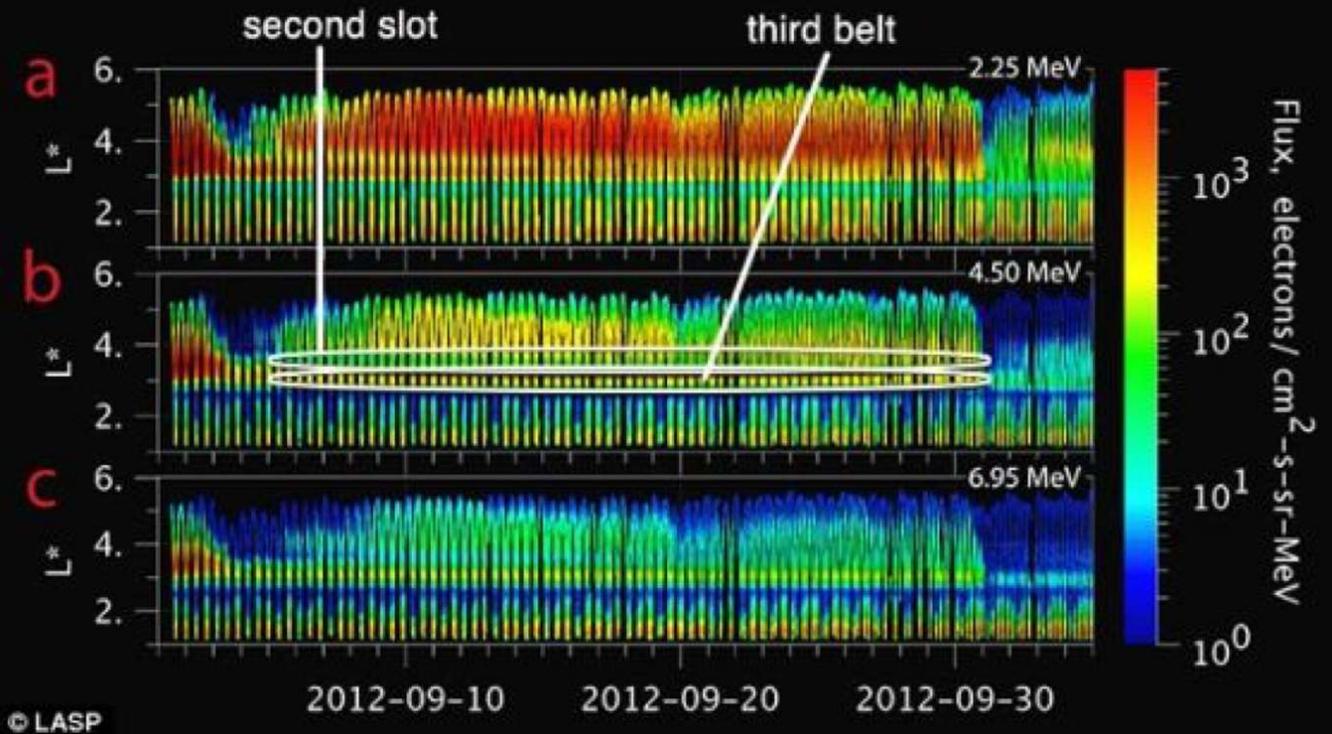
辐射带中的粒子分布

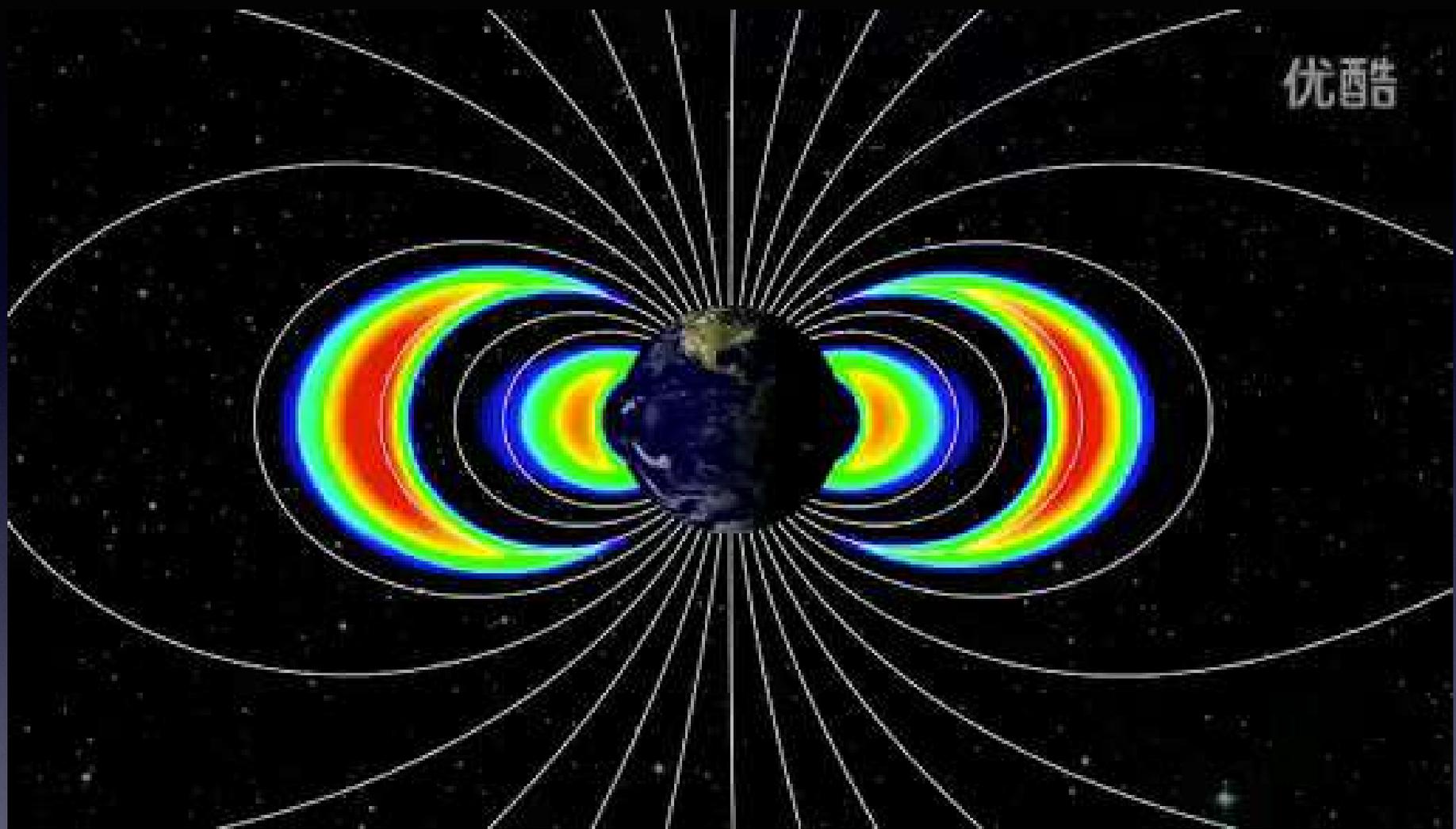


辐射带：第三辐射带



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

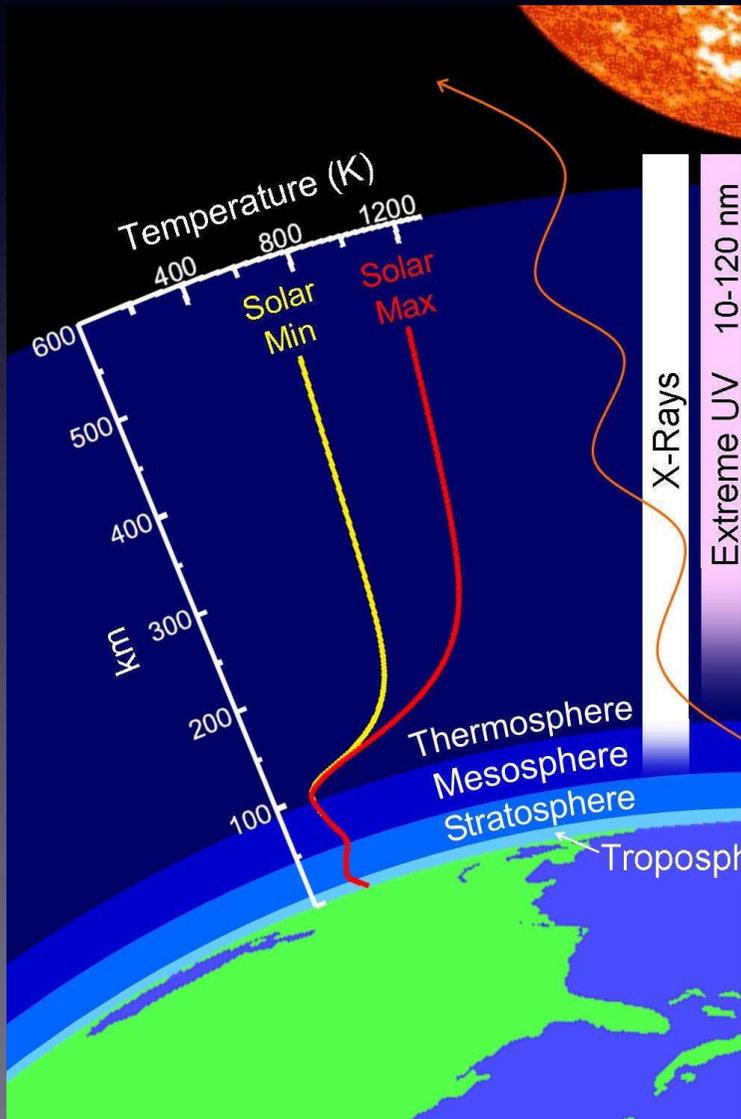




Van Allen卫星探测到的地球辐射带变化

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



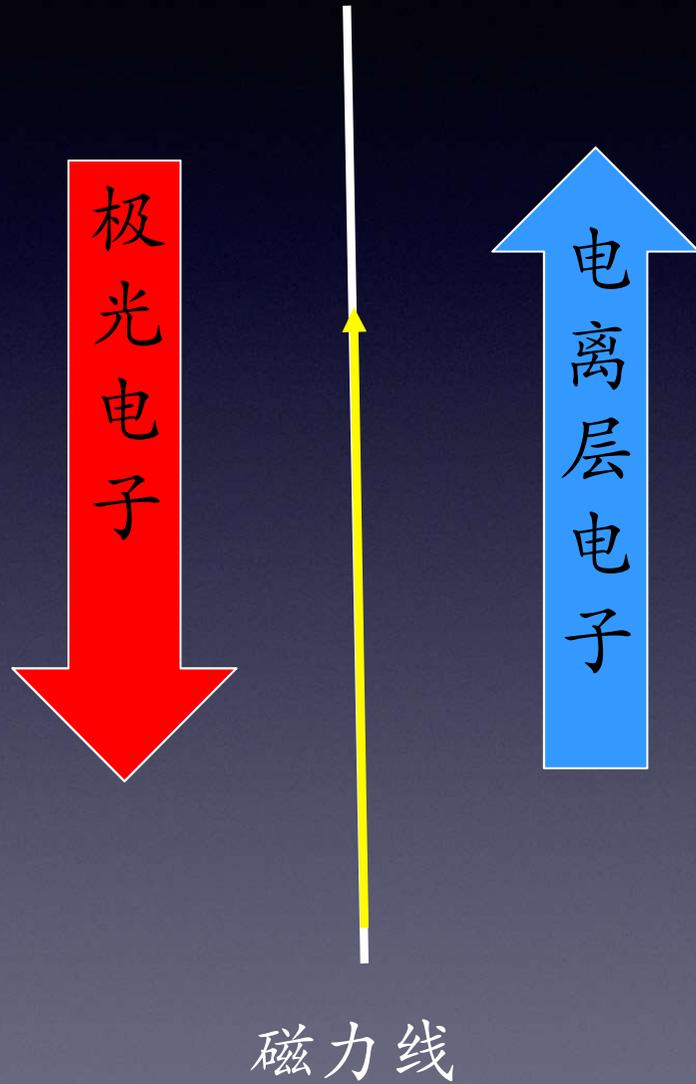
温度密度升高

影响大气特征的主要因素

地磁活动：突发、短促、局部

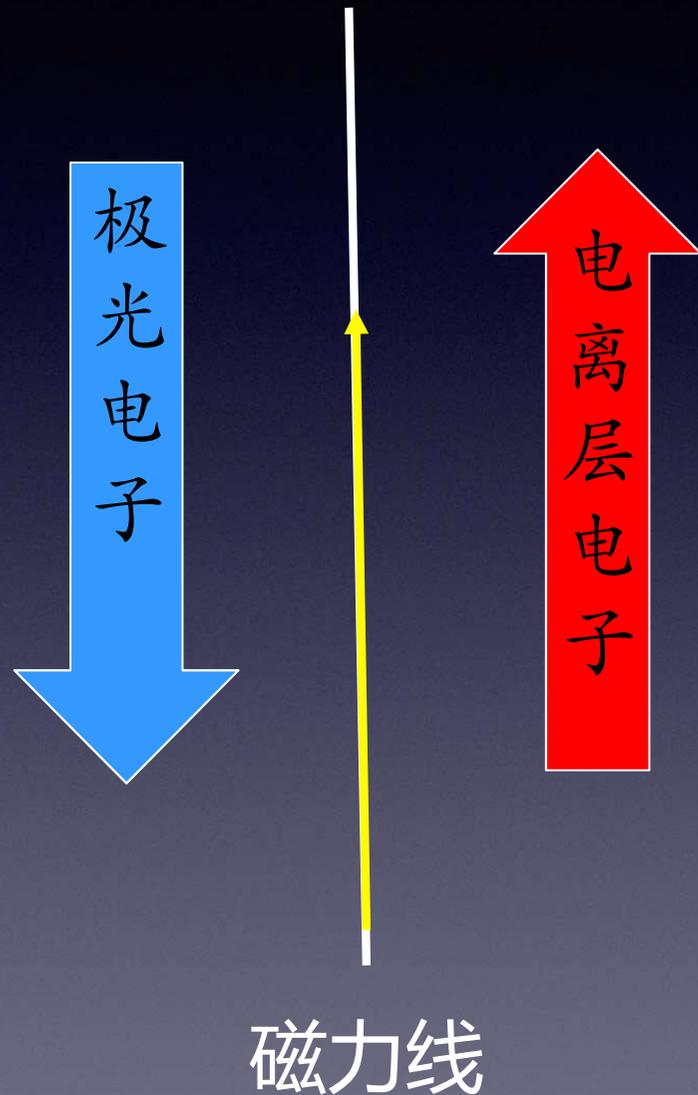
- 在磁扰动期间，高能极光粒子加热大气；
- 太阳风电场从极区向下进入电离层，与地磁场作用驱动电离层电流；
- 粒子碰撞中性大气，驱动一个双涡旋风体系
- 等离子体摩擦加热引起焦耳热；
- 极光带上层大气向上运动，这种运动和对流驱动的中性风产生成分和密度的变化，这种变化从高纬度传播到低纬。

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 $10^{26}/\text{s}$ 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。

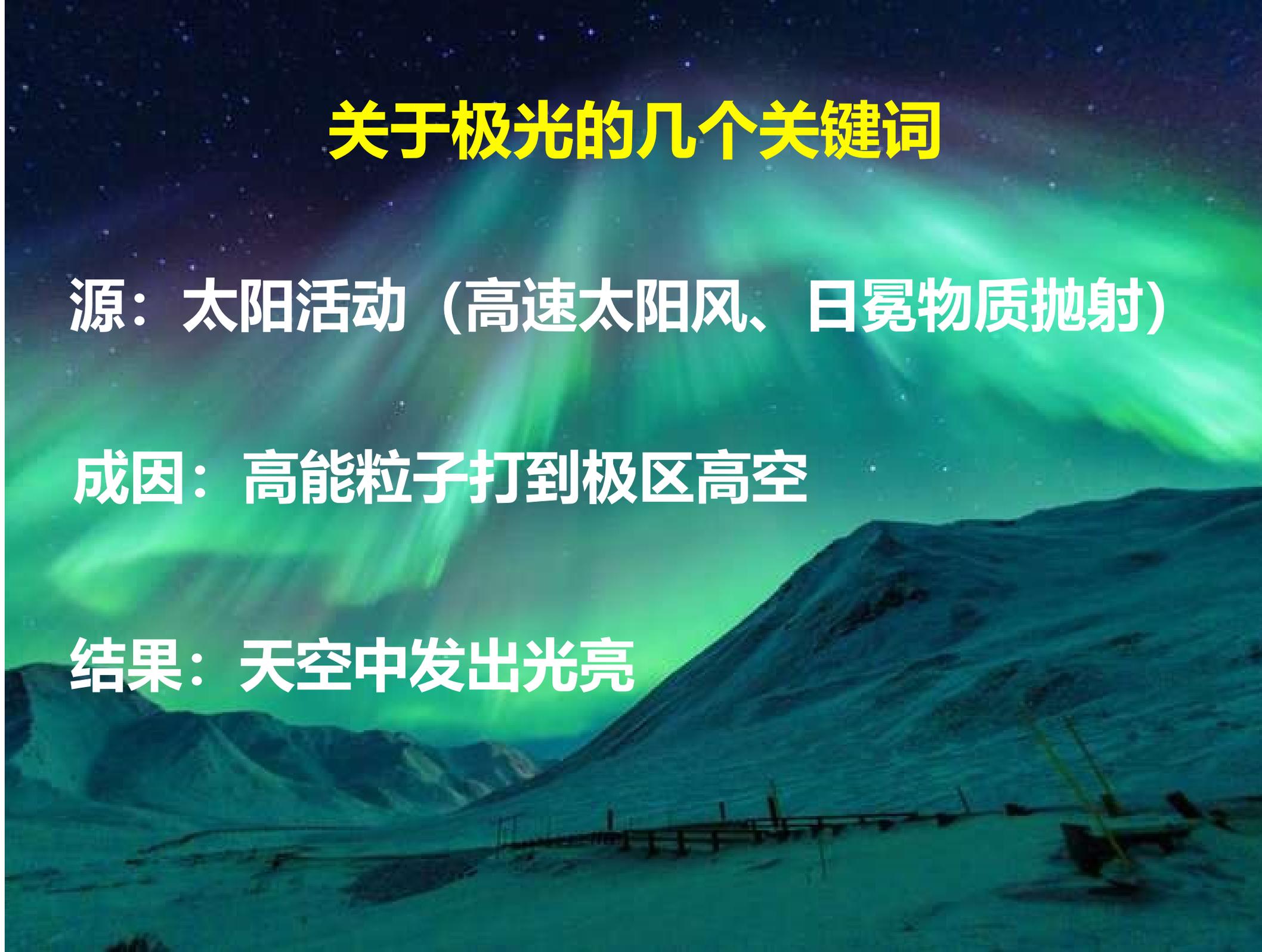


关于极光的几个关键词

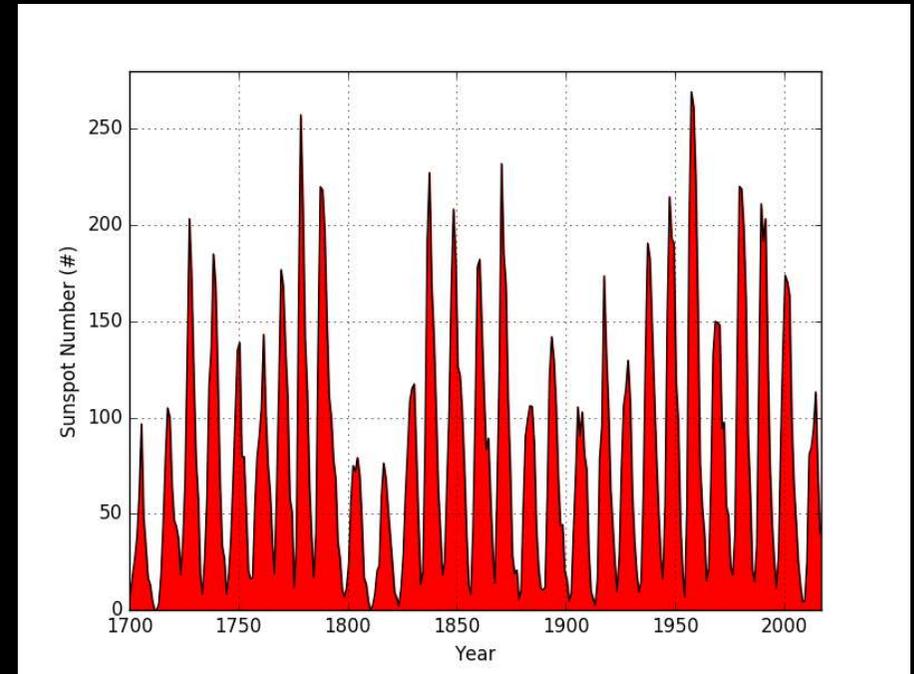
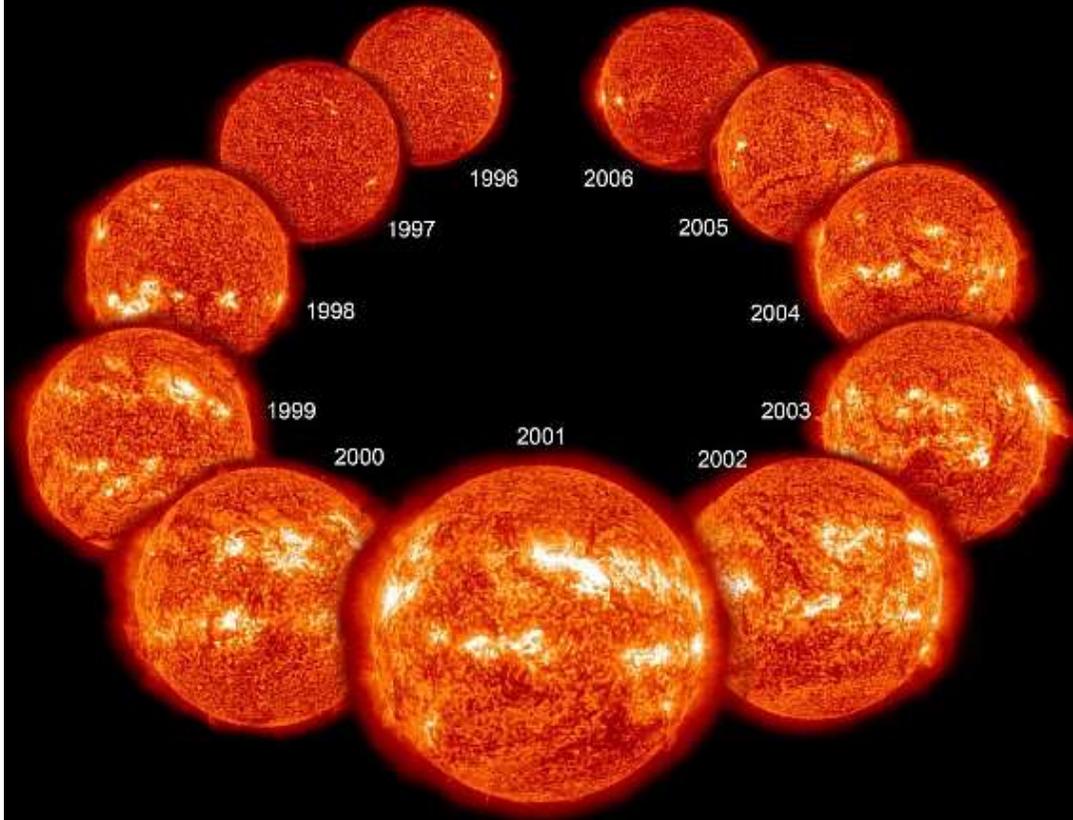
源：太阳活动（高速太阳风、日冕物质抛射）

成因：高能粒子打到极区高空

结果：天空中发出光亮



观看极光时间：太阳活动的周期性



太阳活动周期：~11年

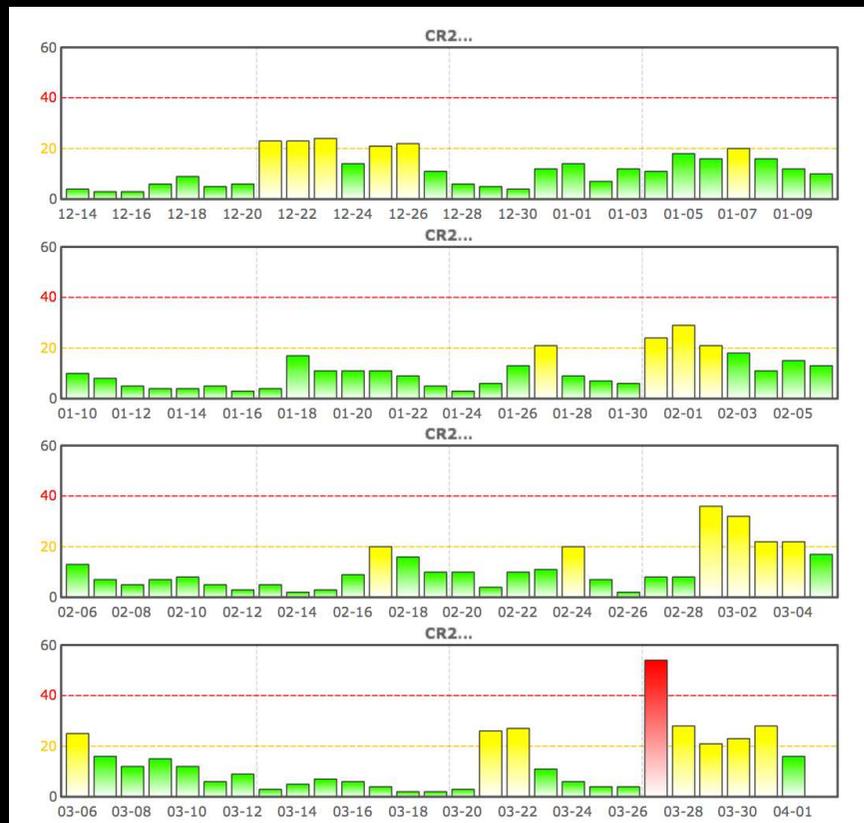
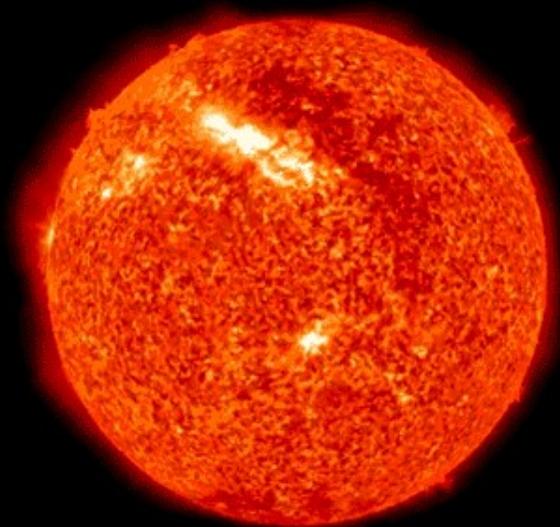
日冕物质抛射爆发
频率周期：~11年

单个日冕物质抛射引起极光预报



日冕物质抛射以 $\sim 1000\text{km/s}$ 的速度传播，可提前1-4天预测

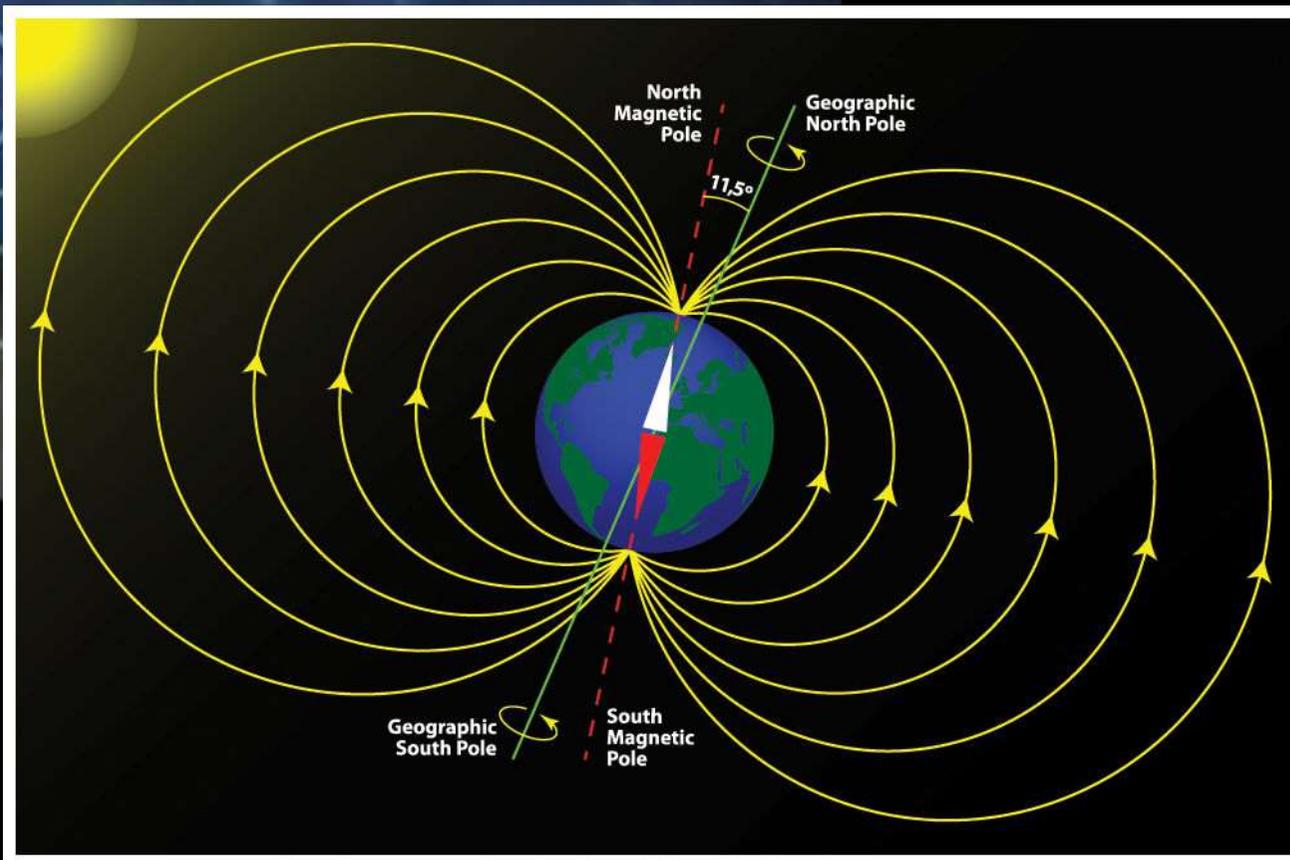
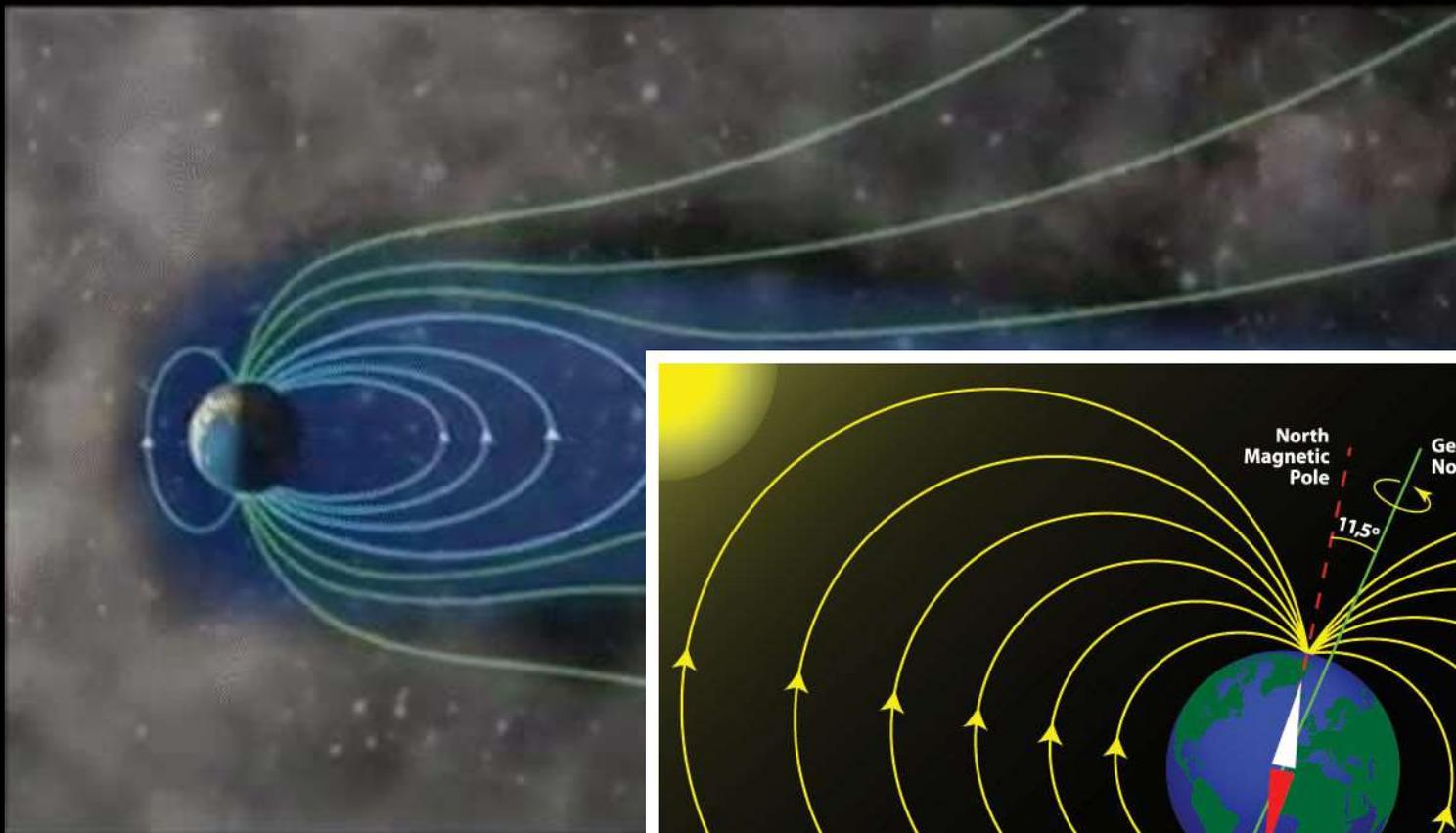
观看极光时间：太阳活动的周期性



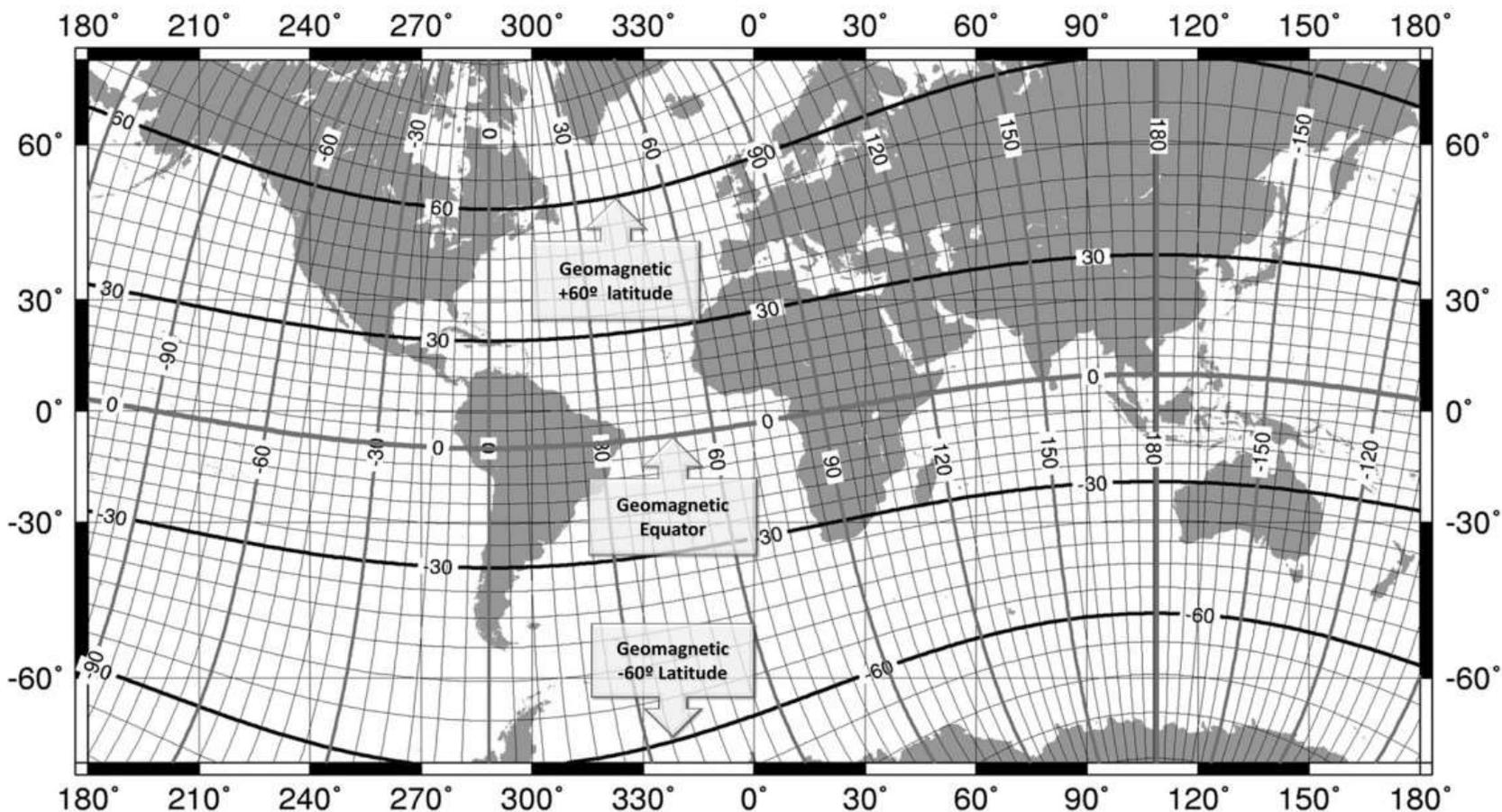
太阳自转周期：27天

高速太阳风到达地球周期：~27天

观看极光位置：高磁纬区域



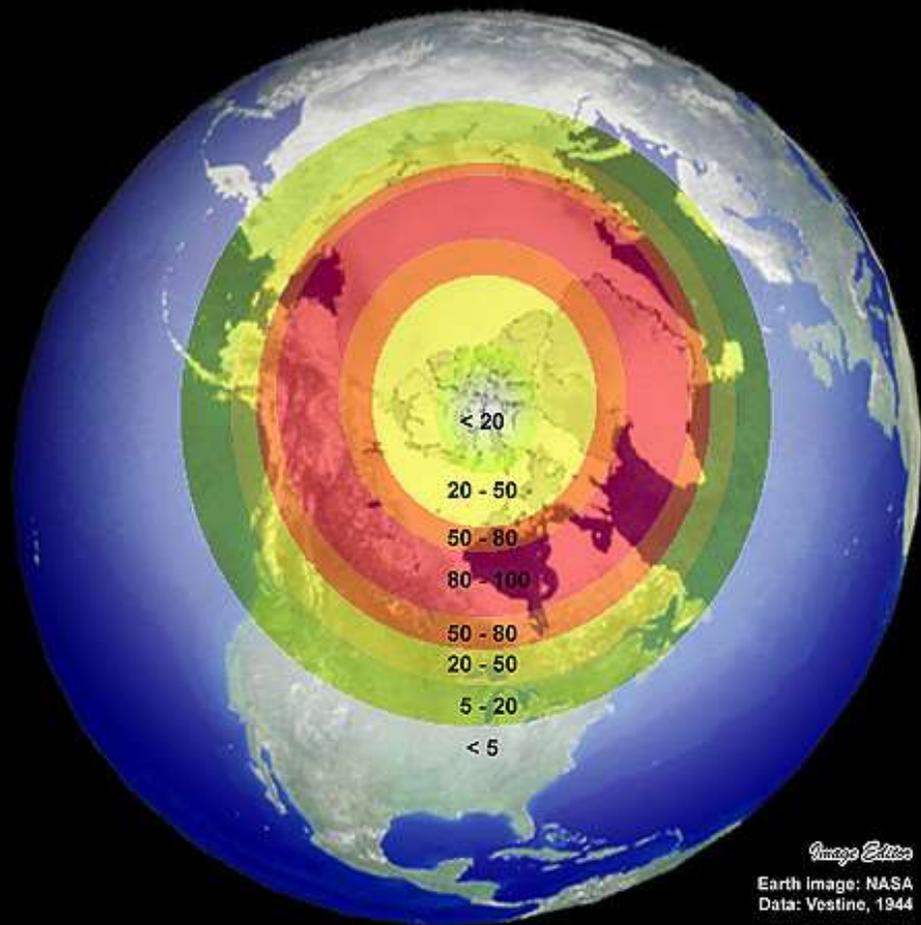
地磁纬度和地理纬度分布图



Units (Declination) : degrees
Contour Interval : 5 degrees
Map Projection : Mercator

极光卵：容易看到极光的区域

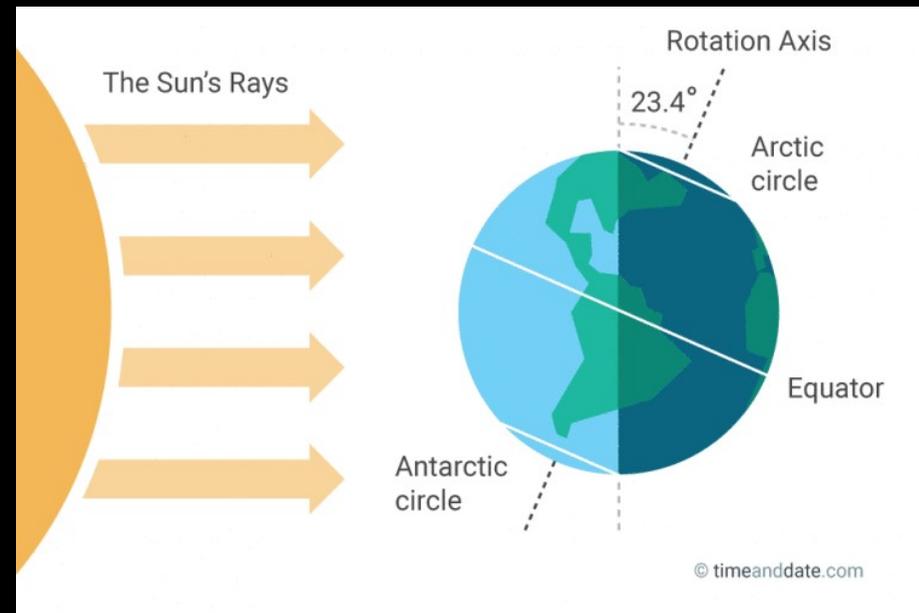
Percentage of Nights with Observable Aurora Borealis
View from Geomagnetic North Pole



磁纬： $\pm 67^\circ$ 附近的区域

冰岛、芬兰
挪威、瑞典
俄罗斯北部、北美

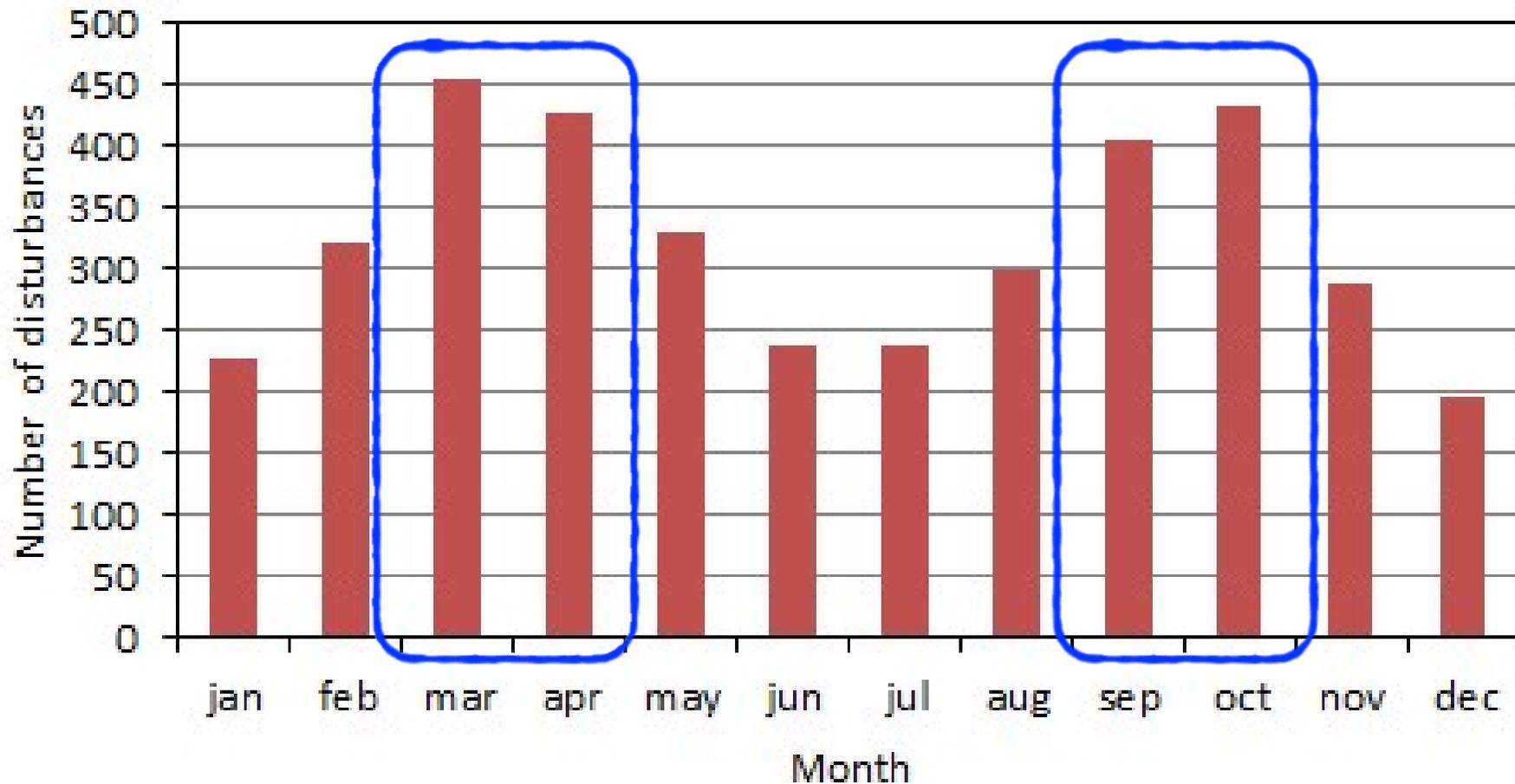
观看极光季节：冬季



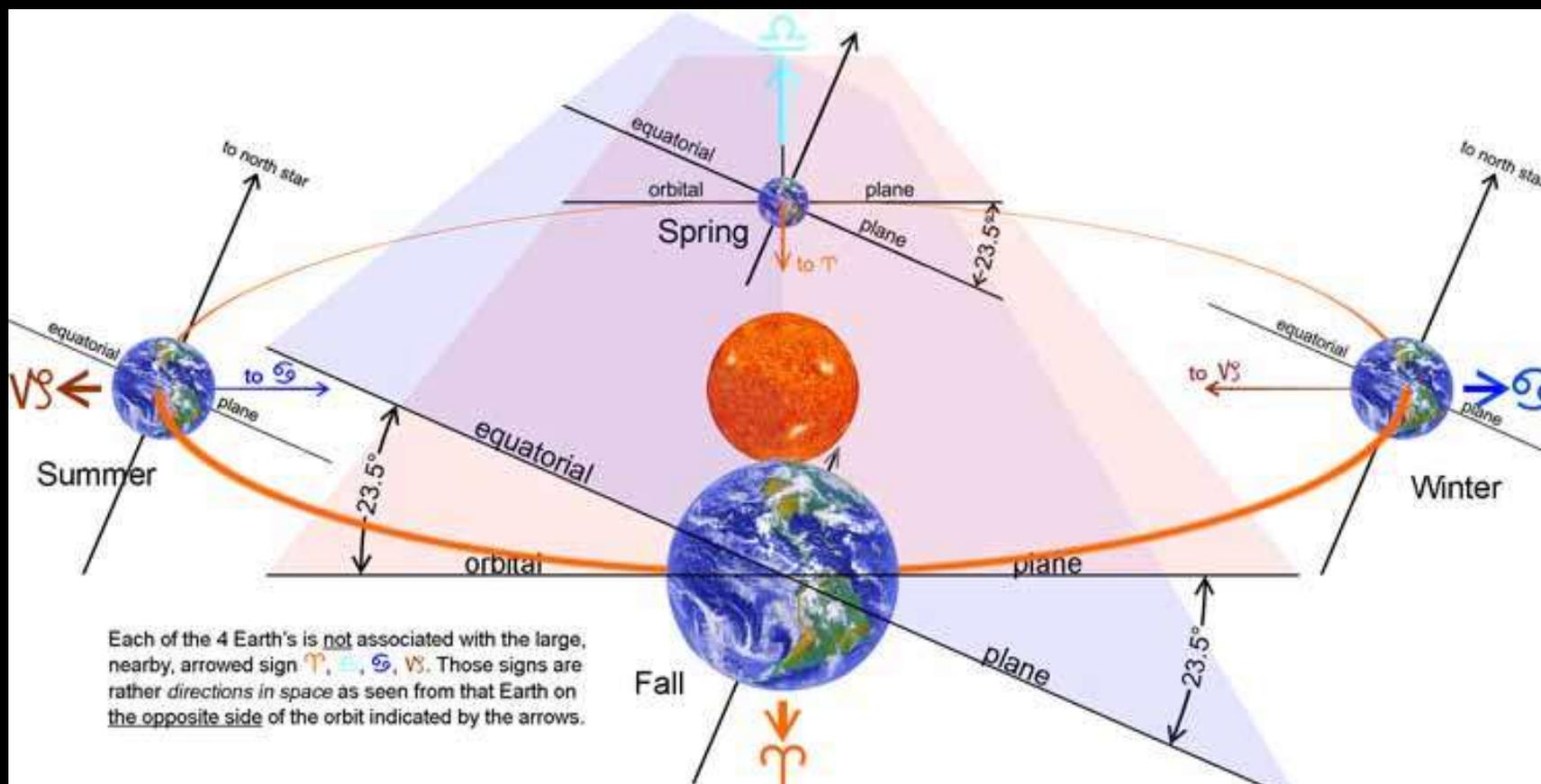
冬季容易出现极夜

观看极光季节：极光活动的季节性

Seasonal distribution of geomagnetic disturbances



观看极光季节：极光活动的季节性

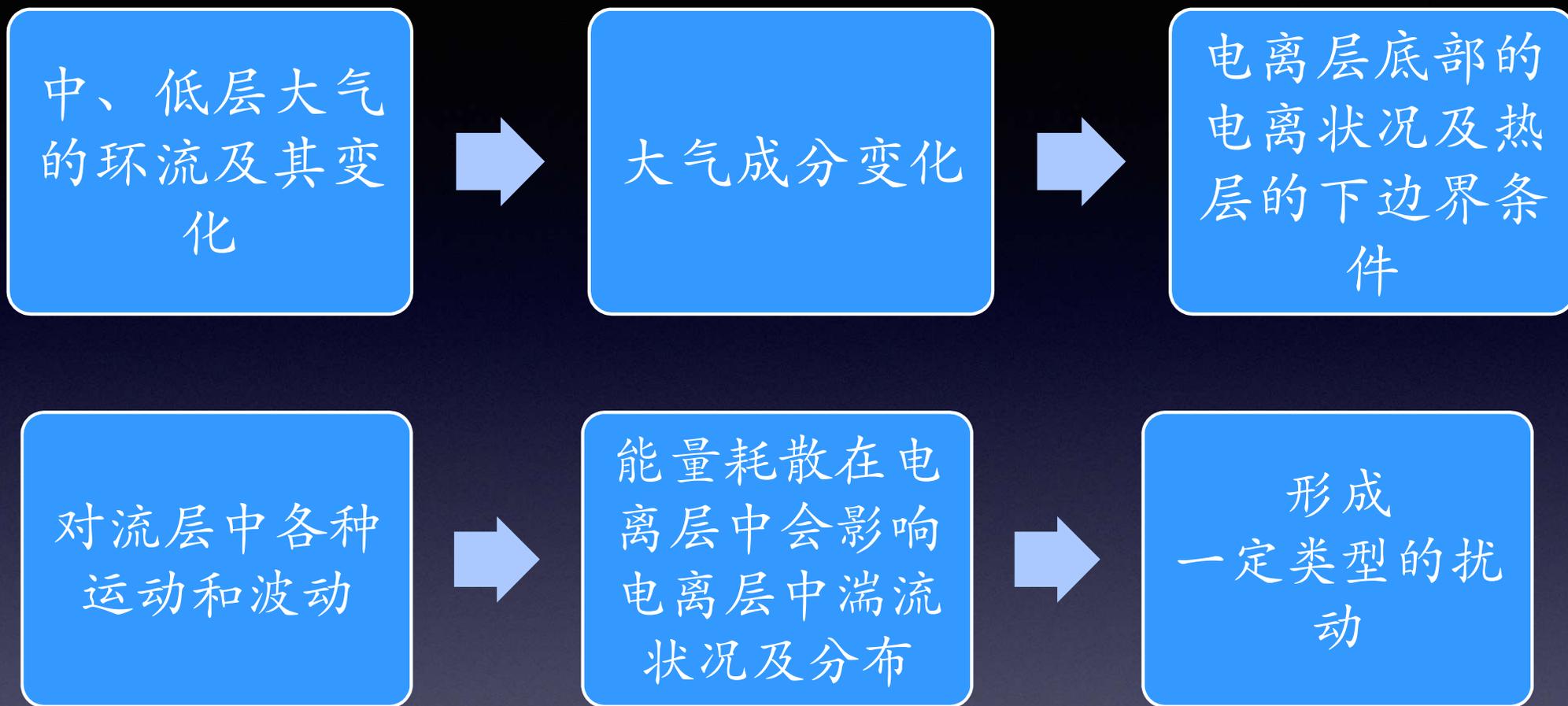


春分、秋分附近更容易看到极光

如何开启极光之旅

J A S O N B R O W N L E E P H O T O G R A P H Y

- ★ 冬季(北半球最好9、10月)
- ★ 冰岛、芬兰、挪威、瑞典、俄罗斯北部、北美等地
- ★ 提前27天可较准确的规划行程

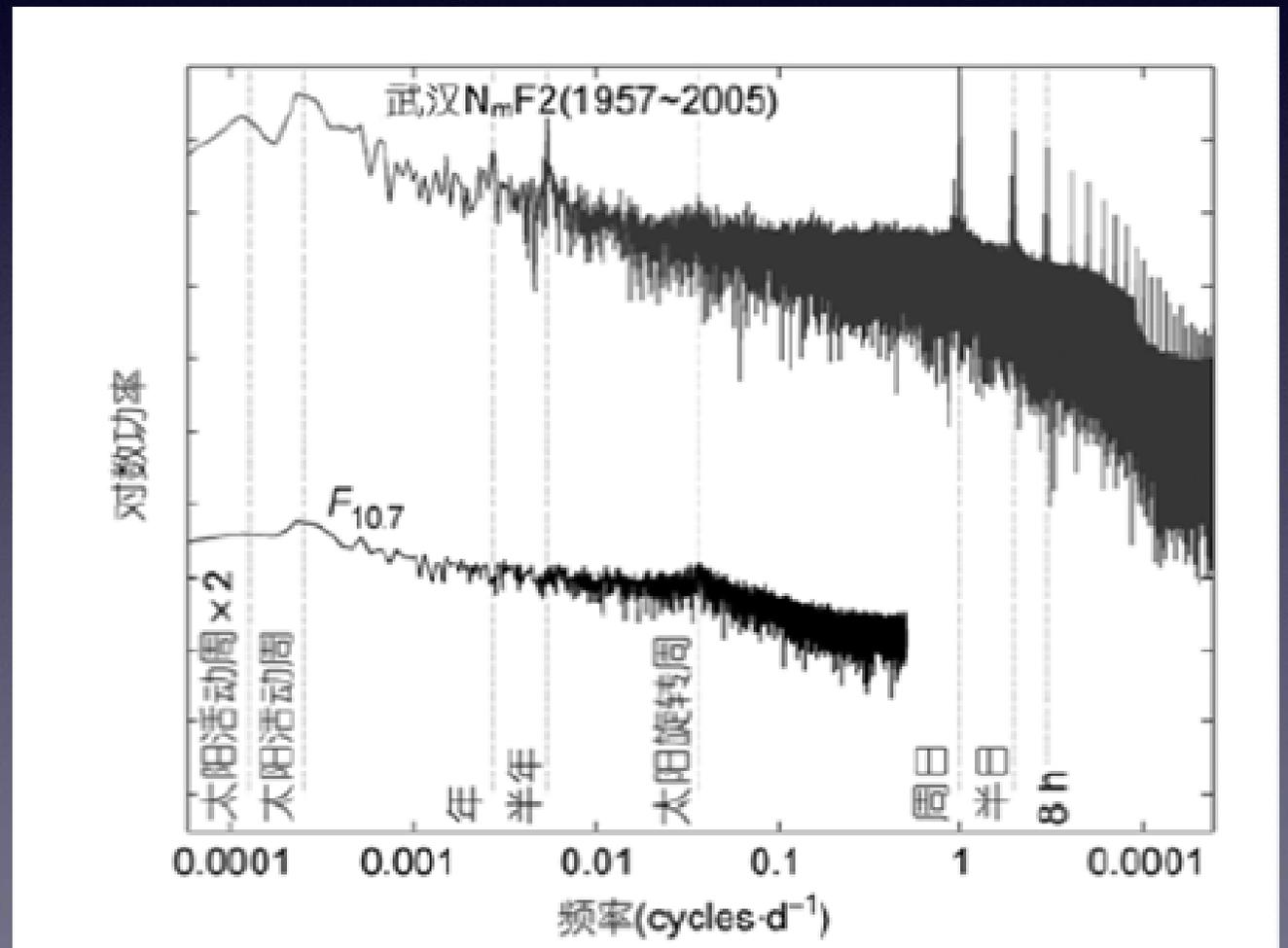


太阳活动与太阳辐射直接影响电离层!

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。

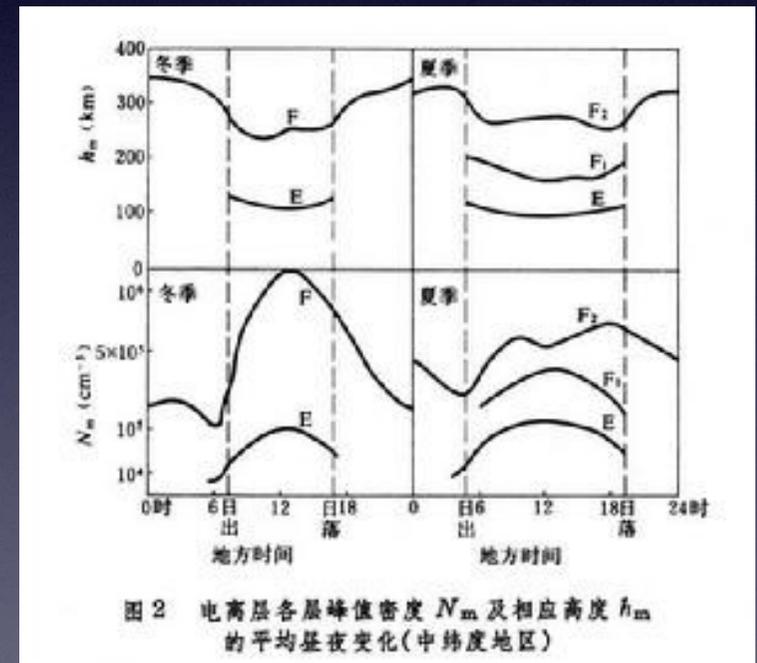
太阳辐射变化的时间尺度涵盖从太阳耀斑爆发、天、太阳自转周到太阳活动周、甚至更长周期的分量。



★**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。

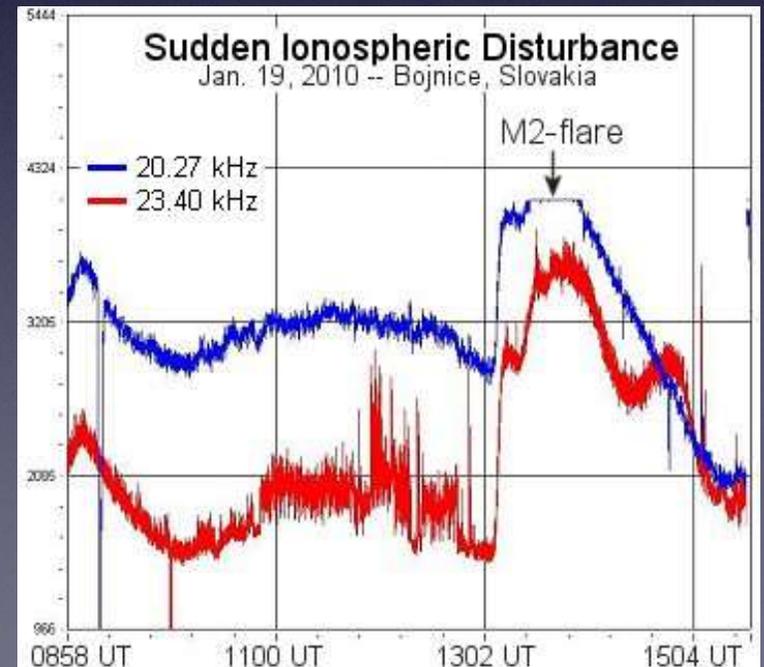
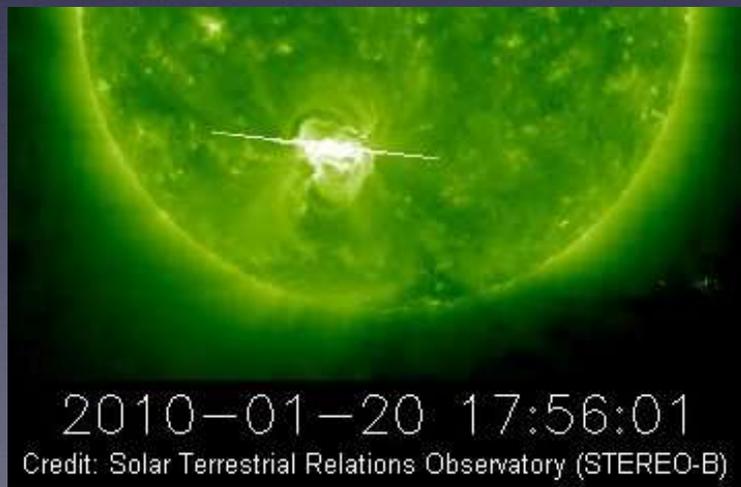
主要来源：太阳电离辐射、太阳风和地磁活动、近地大气扰动、地震活动以及电动力学过程



季节变化、太阳活动周变化、长期变化

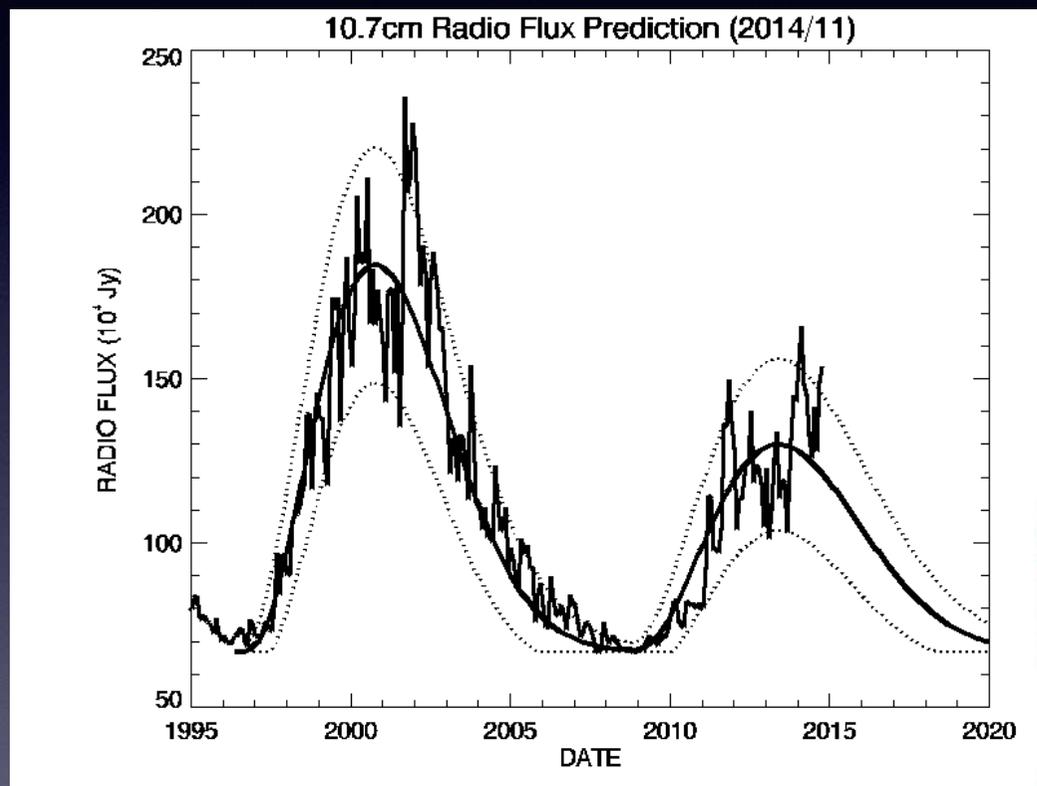
突发电离层骚扰 (SID)

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)。由于短波的效果突出，这种现象也称短波衰落(SWF)。

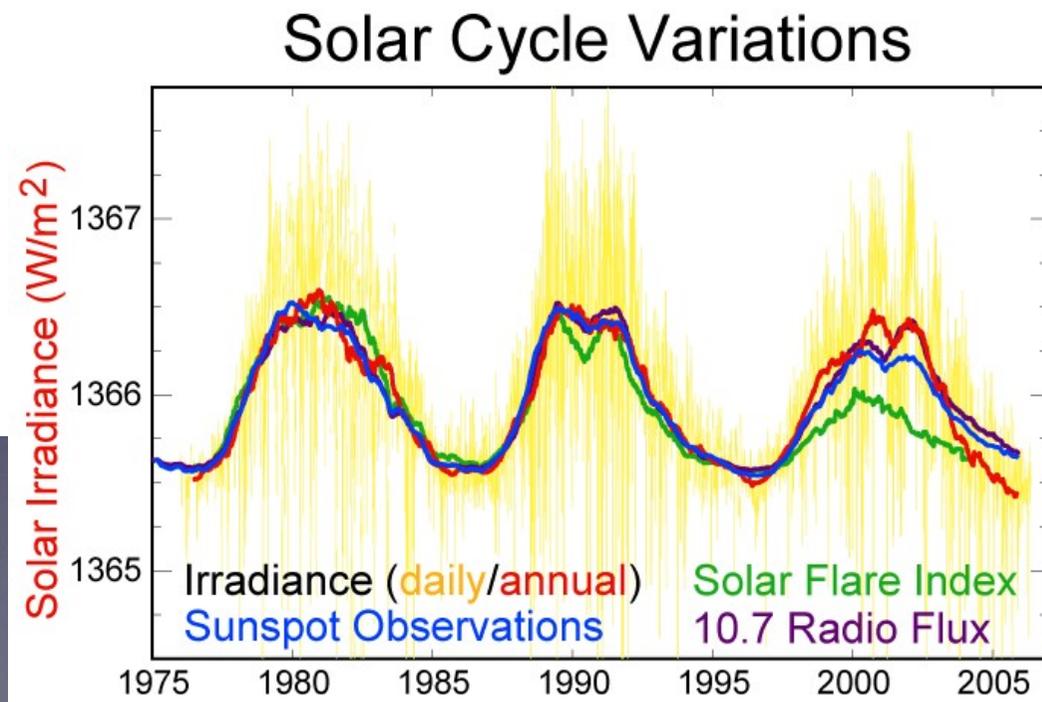


10.7cm的射电通量 (F10.7)

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

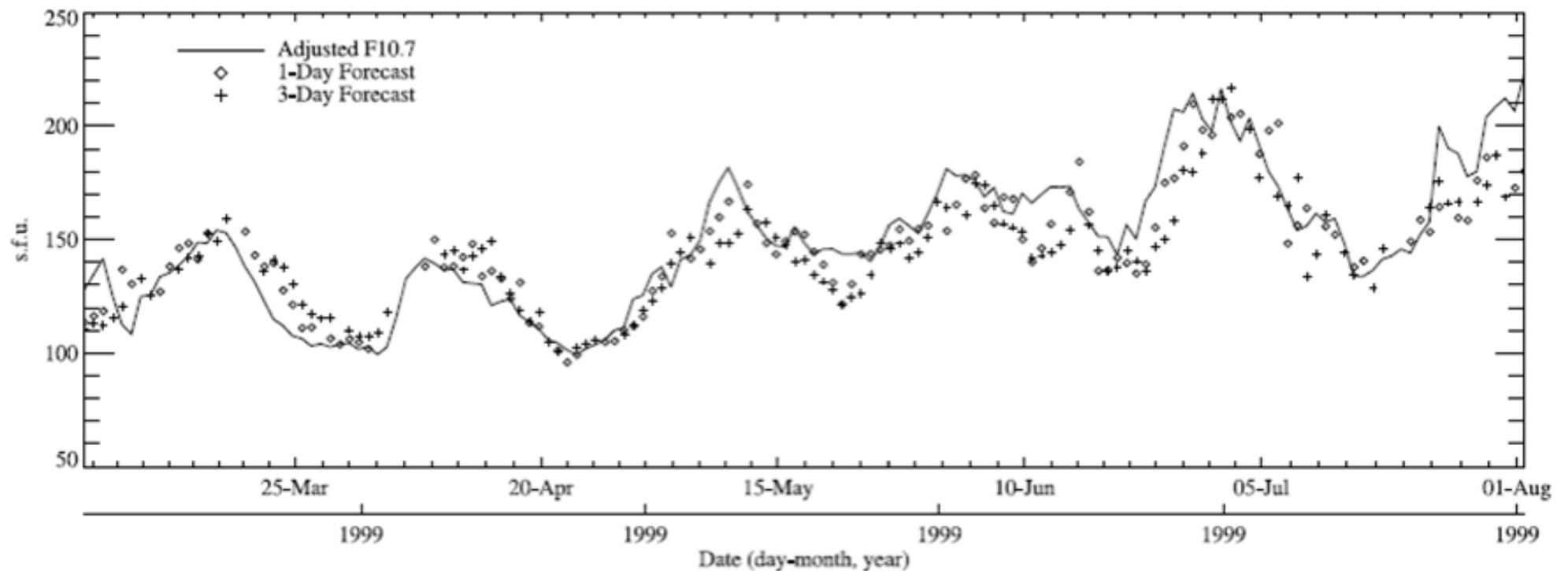


光球层磁场与F10.7指数相关

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

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

C. J. Henney,¹ W. A. Toussaint,² S. M. White,¹ and C. N. Arge¹



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F₂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。