

第六章

Solar Atmosphere

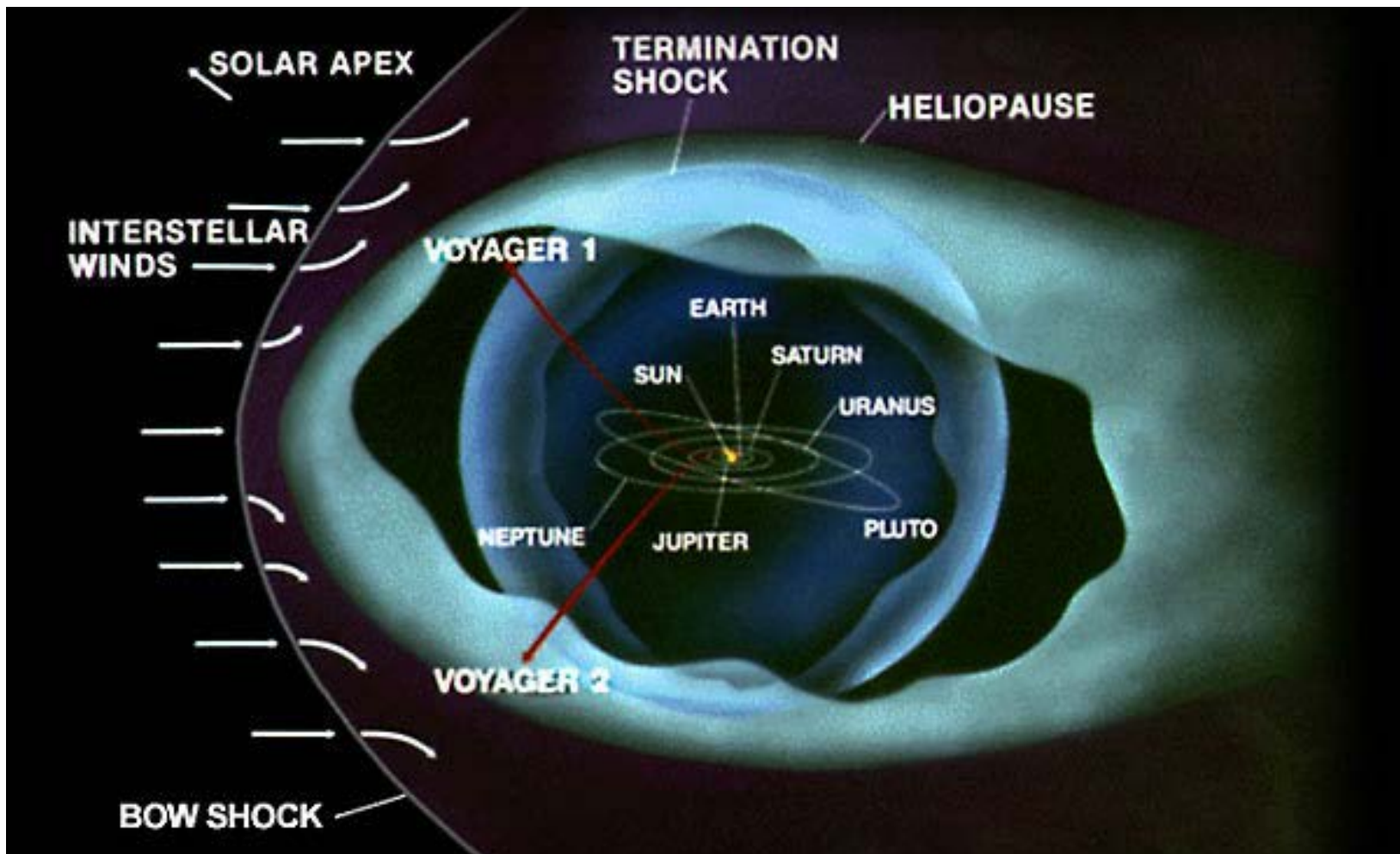
程鑫

天文楼407

xincheng@nju.edu.cn

Outline

- 太阳的分层结构.
- 太阳辐射.
- 太阳活动与宁静太阳.
- 太阳的磁场.

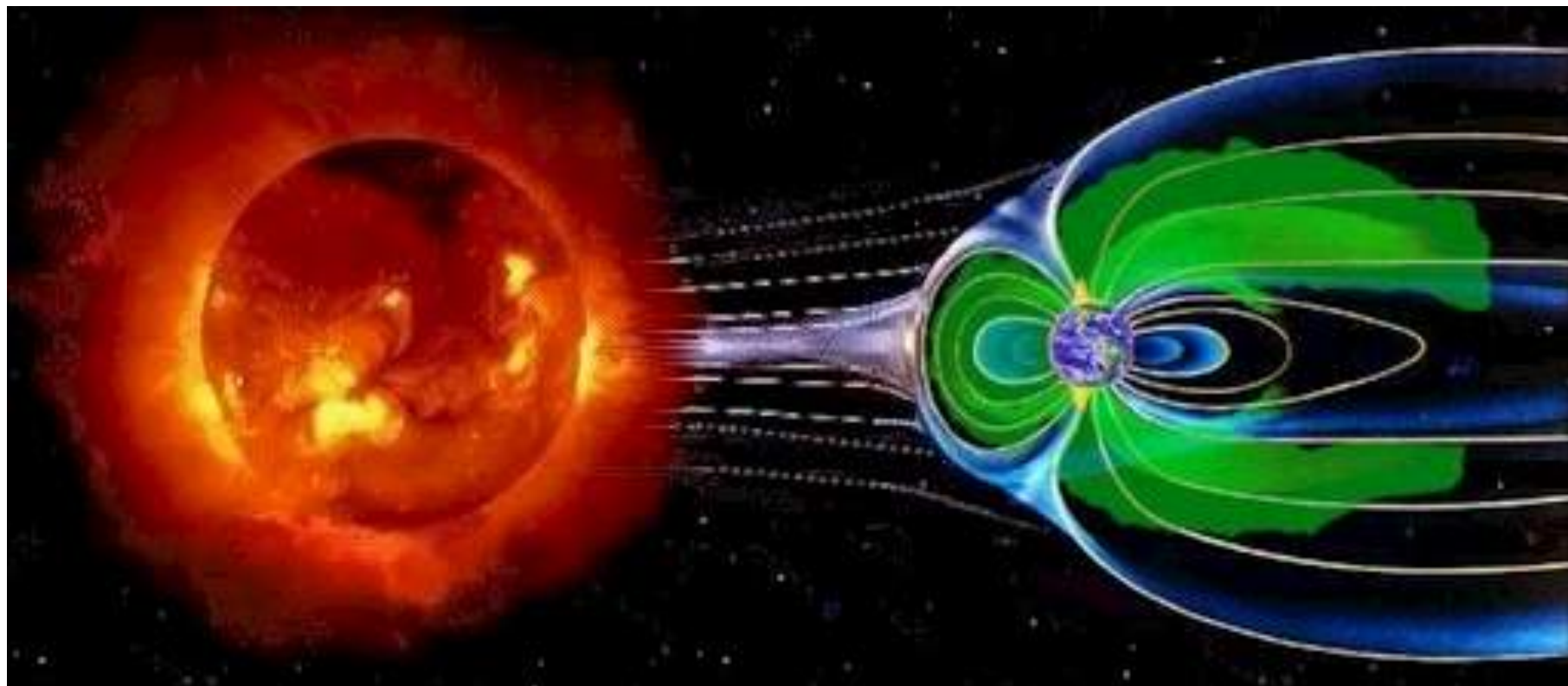


日球层三维结构透视示意图

在星际风的作用下，太阳系内天体又被“包裹”在一个巨大的“卵形”结构中，称为**日球层**。

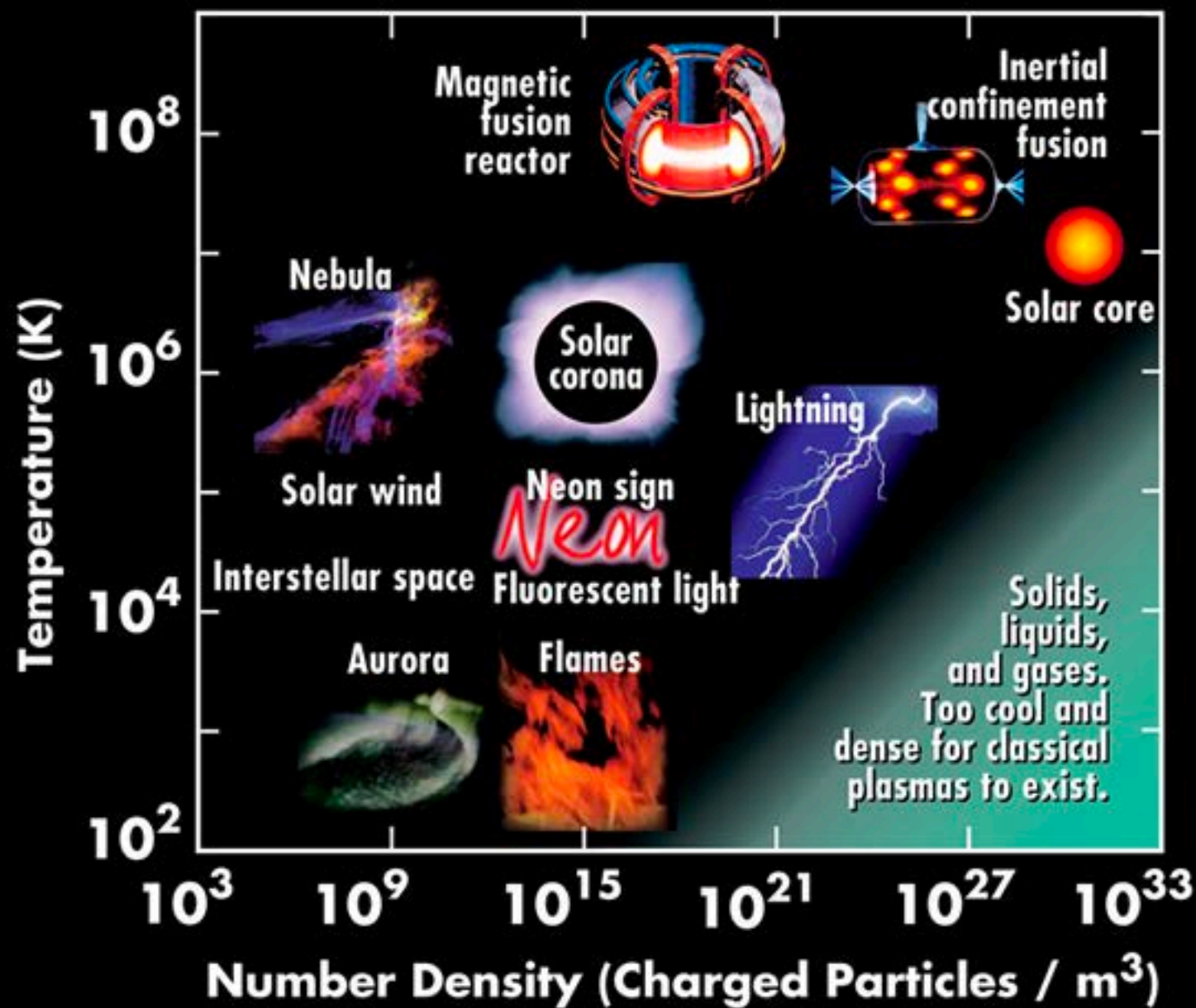
研究太阳的意义

- 太阳是人类生存的基础以及日地空间环境扰动最重要的源。



日地关系与结构示意图

- 太阳是一颗普通的恒星，其研究结果在恒星世界具有普遍意义。
- 太阳是巨大的天体物理实验室：太阳提供了一高温、强磁场以及大尺度的物理环境，对它的研究促进了某些基础物理学学科的发展。
- 空间环境安全！

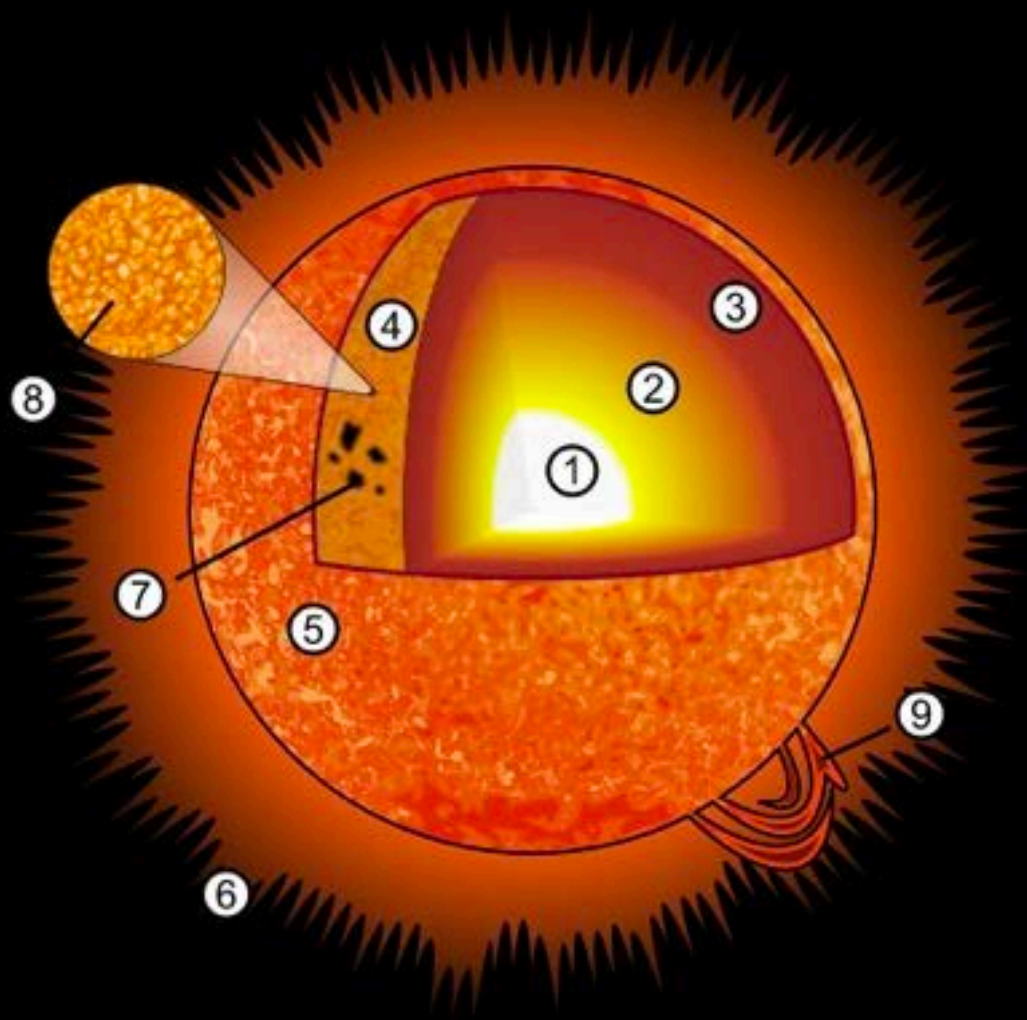


What do you want to know about the Sun?

太阳大气的分层结构

Structure of the Sun

1. **Core**- The Sun's nuclear "furnace," where fusion reactions initially combine hydrogen atoms to produce helium, yielding energy in the process.
2. **Radiative Zone**- Energy moves through a surrounding envelope of gas toward the Sun's surface.
3. **Convection Zone**- Big "bubbles" of hot gas transport energy to the surface.
4. **Photosphere**- The Sun's visible surface.
5. **Sunspot**- A magnetic "storm" on the Sun's surface.
6. **Solar Flare**- An eruption of hot gas that can extend thousands of miles into space.
7. **Corona**- The Sun's outer atmosphere, which is heated by the magnetic field to millions of degrees.



太阳外部大气模型:

光球层

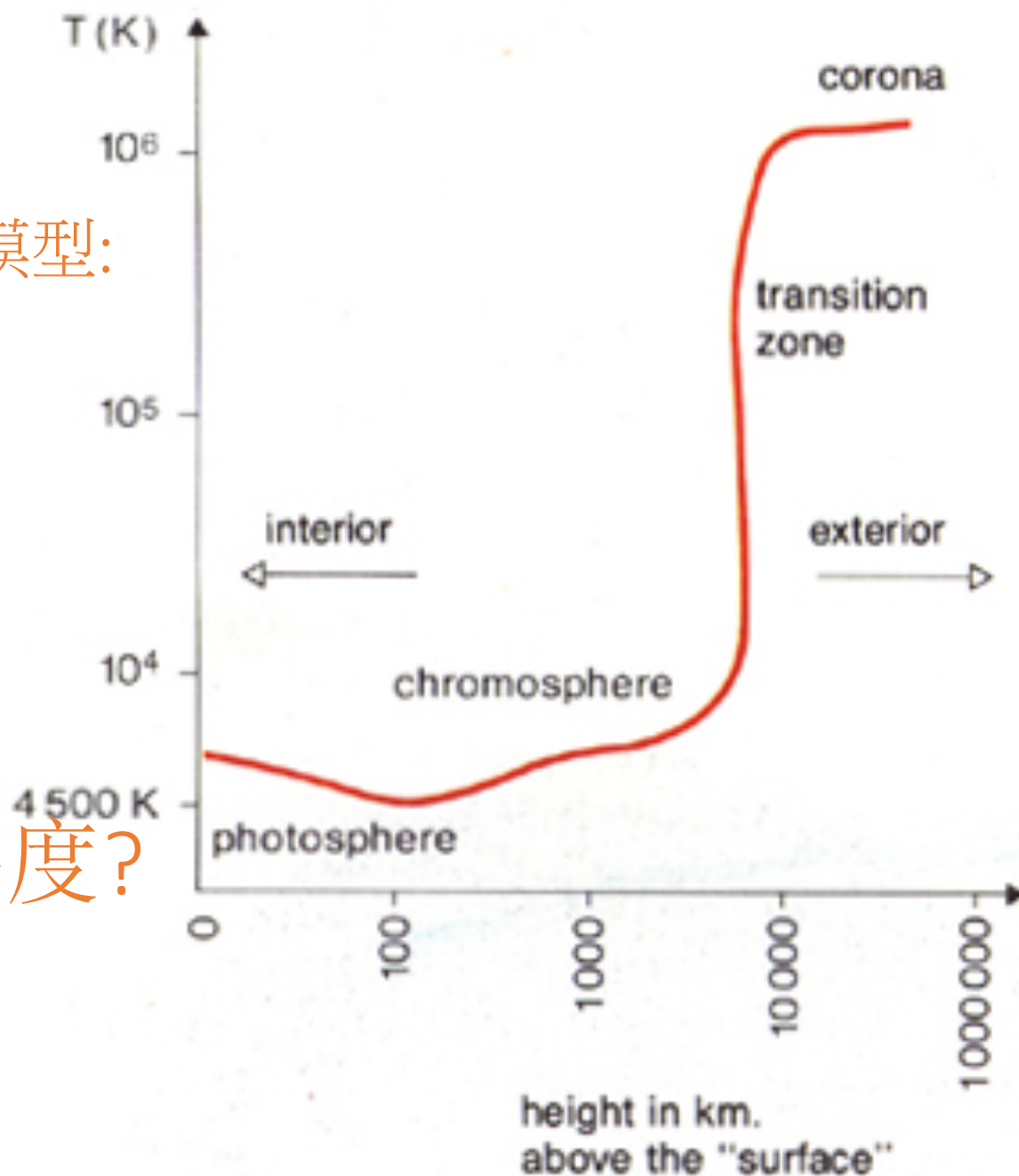
色球层

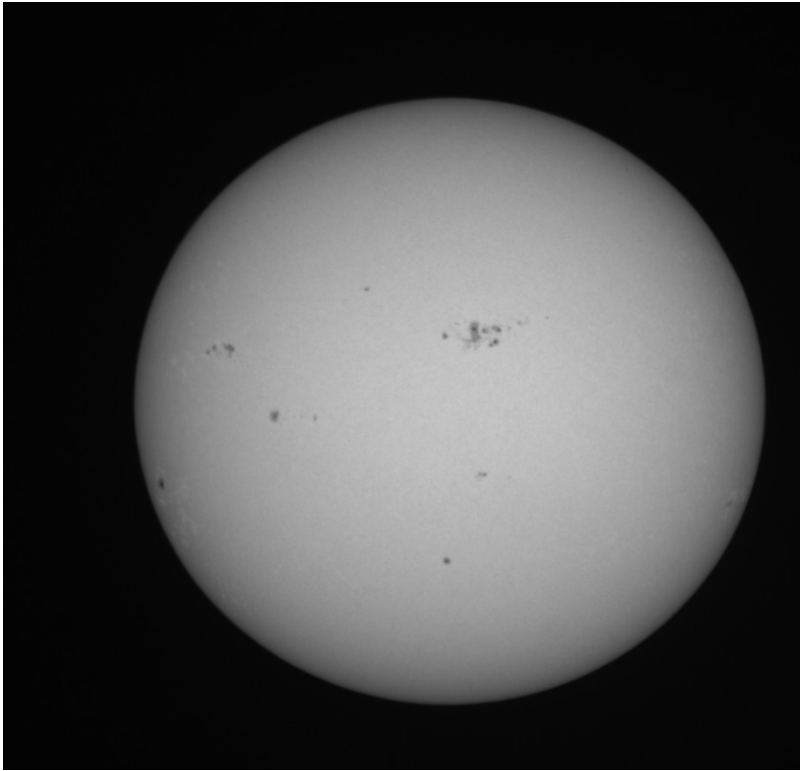
过渡区

日冕

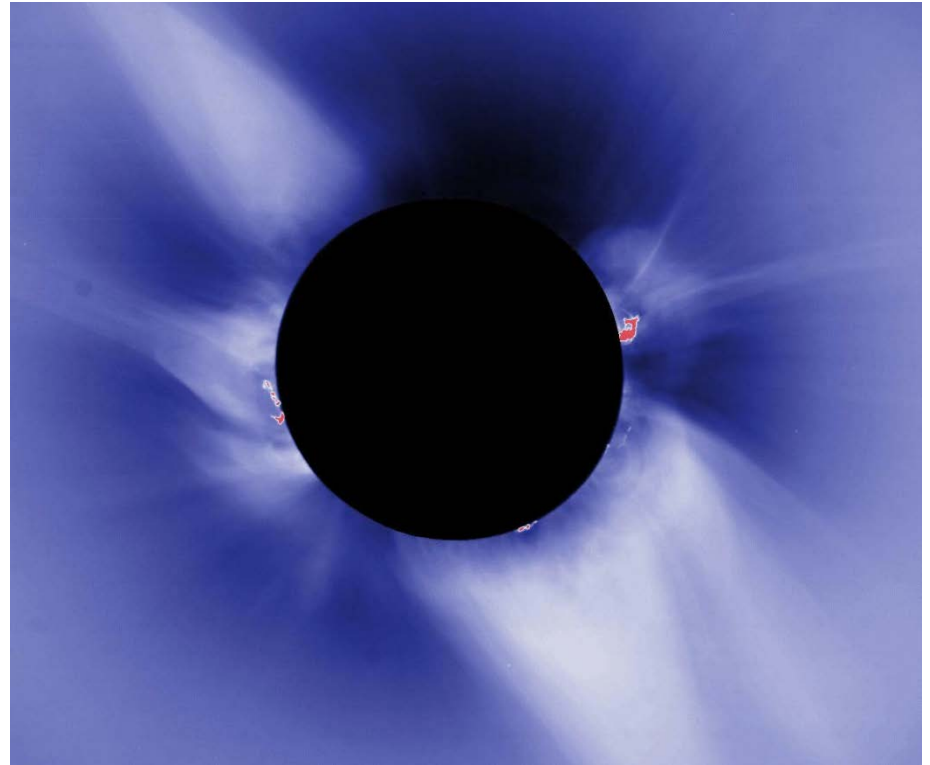
密度?

why 温度梯度?





普通的太阳白光照片
(光球层)



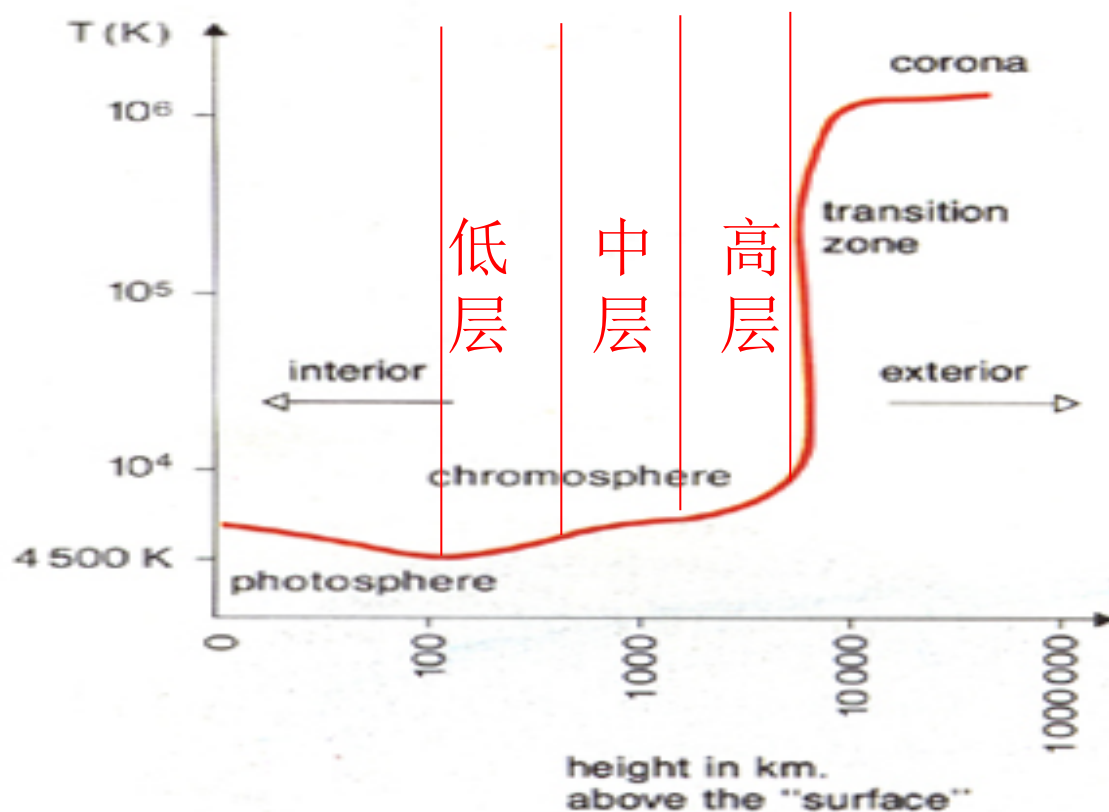
日全食时的太阳白光照片
(日冕)

变化的太阳：用不同谱线的光，在不同的时间，我们看到的太阳的样子往往也不一样。

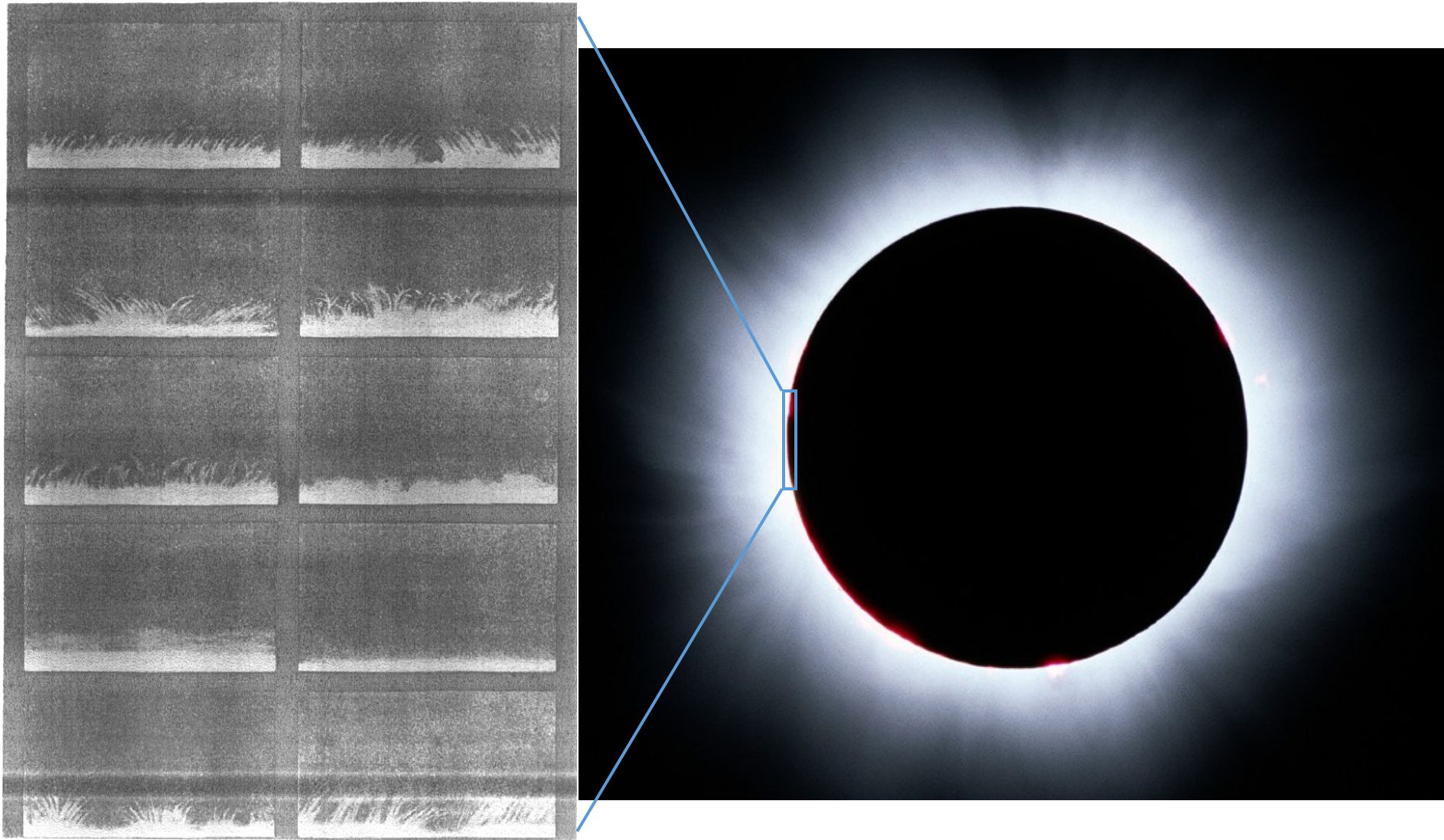
色球的位置和温度

位置：太阳大气中层，介于光球和过渡区之间，厚度约为2000km，底部位于极小温度区。

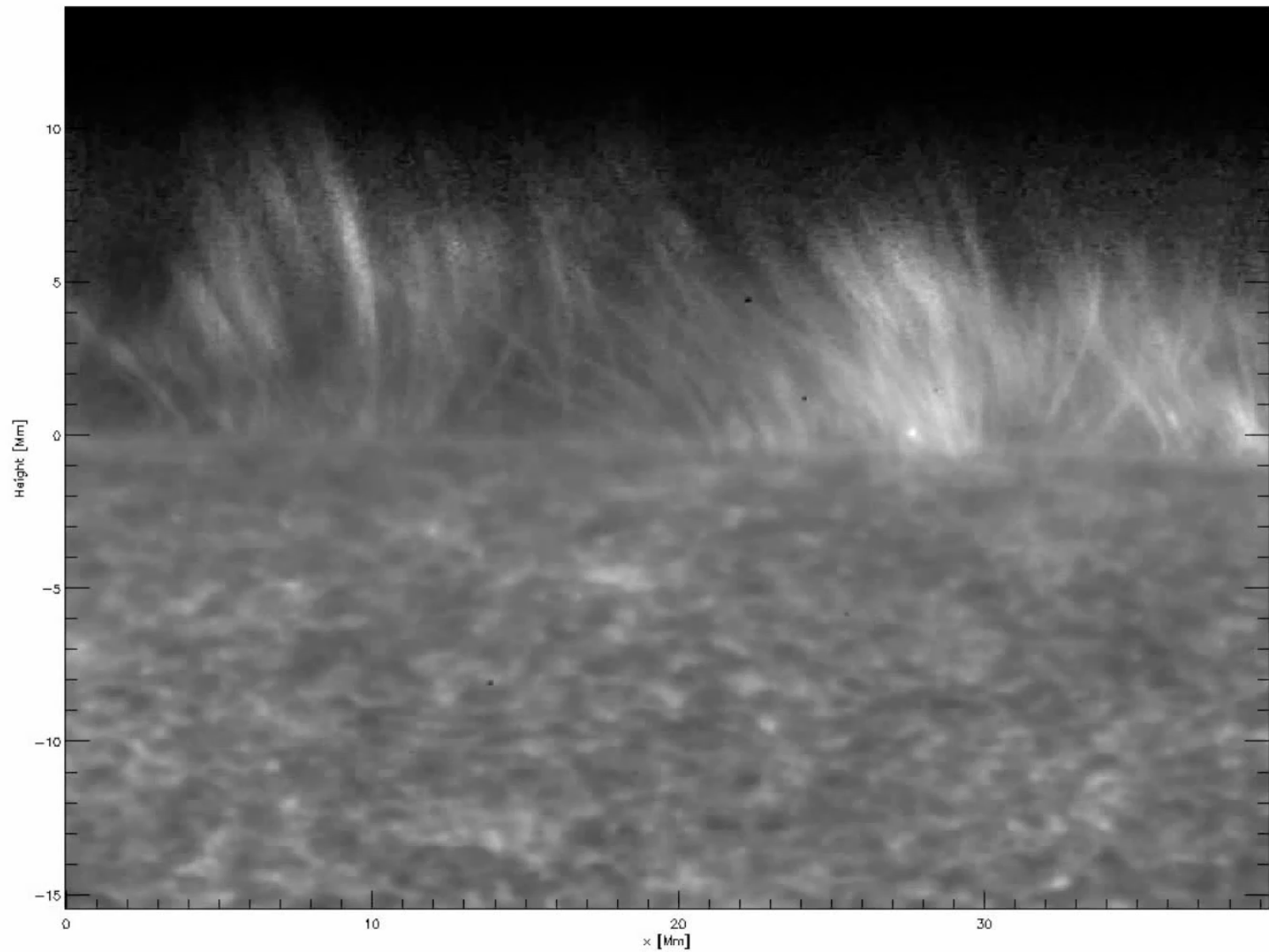
温度：从约4600度上升到几万度。



日全食观测的色球



Hinode/SOT对针状物的高分辨率观测

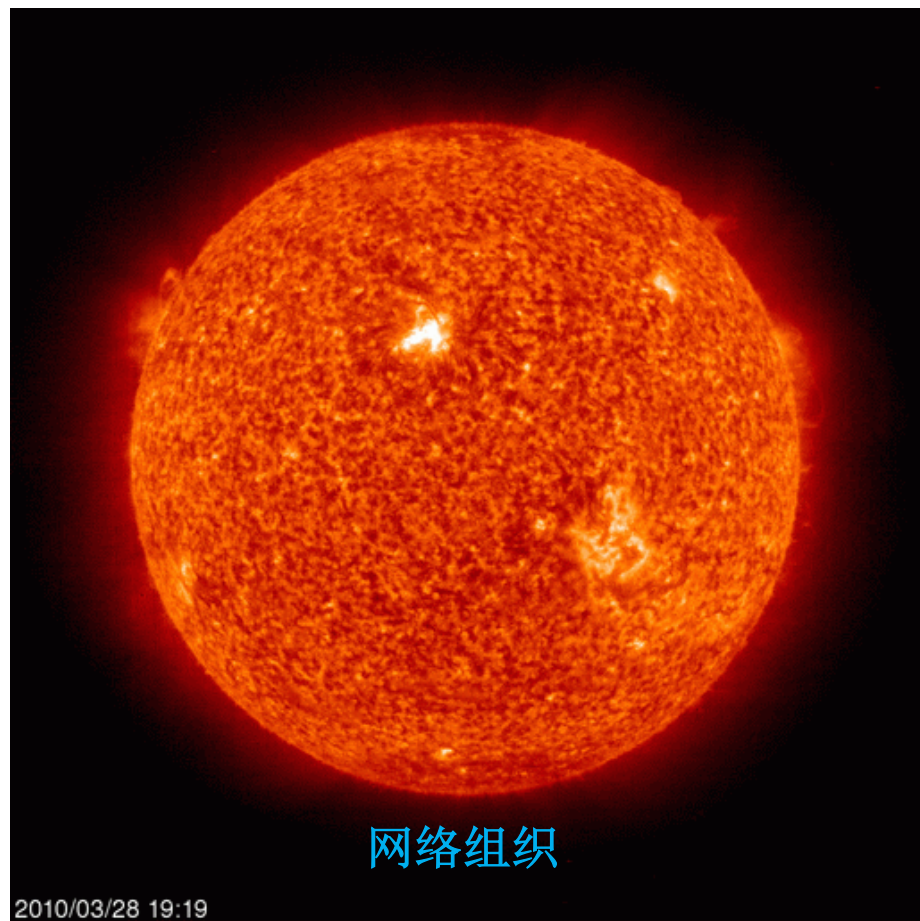


色球望远镜观测的色球

Kanzelhöhe Solar Observatory, H-alpha 6563 Å
November 07, 1998 at 09:15

暗条

谱斑

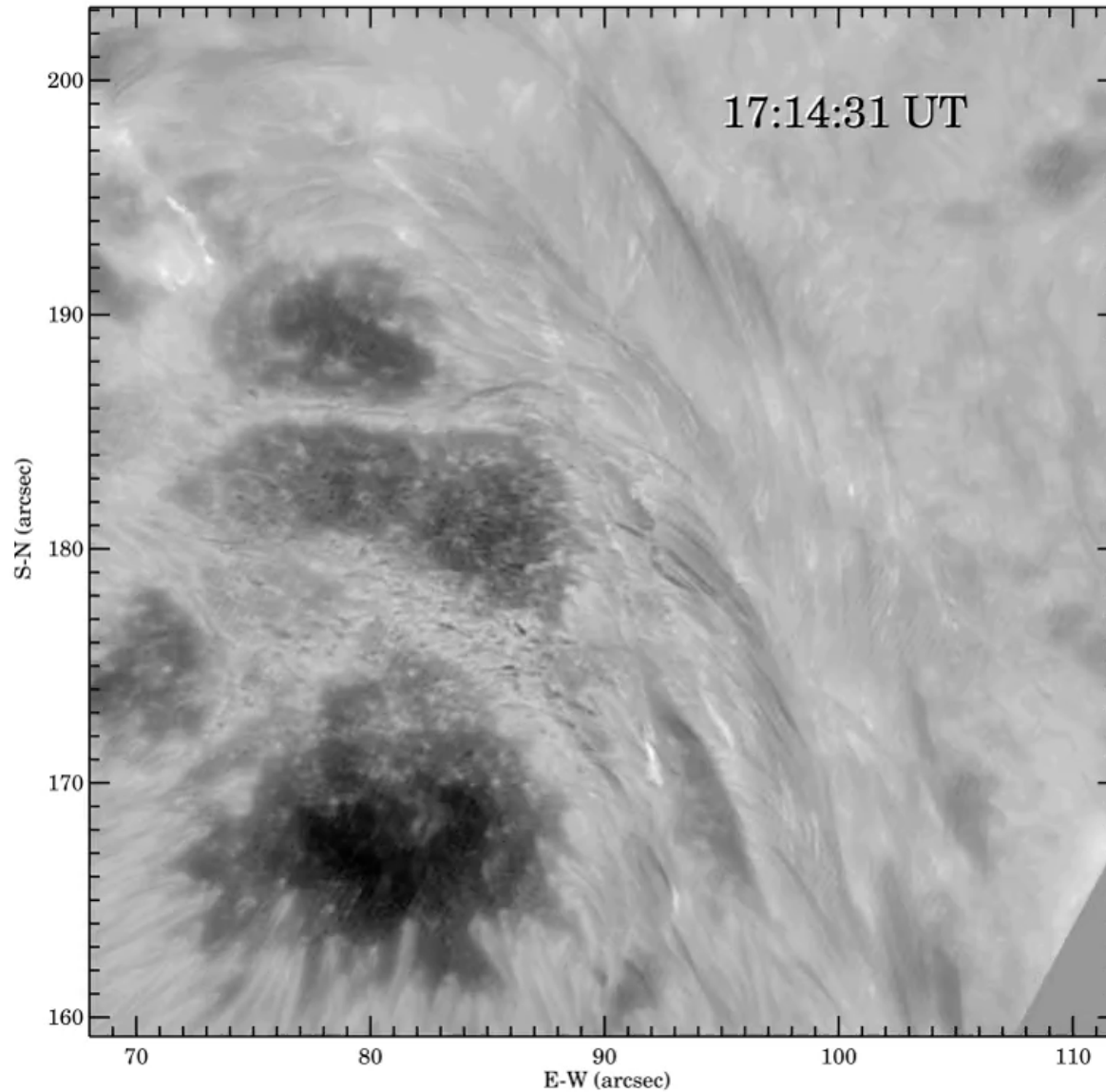


2010/03/28 19:19

网络组织

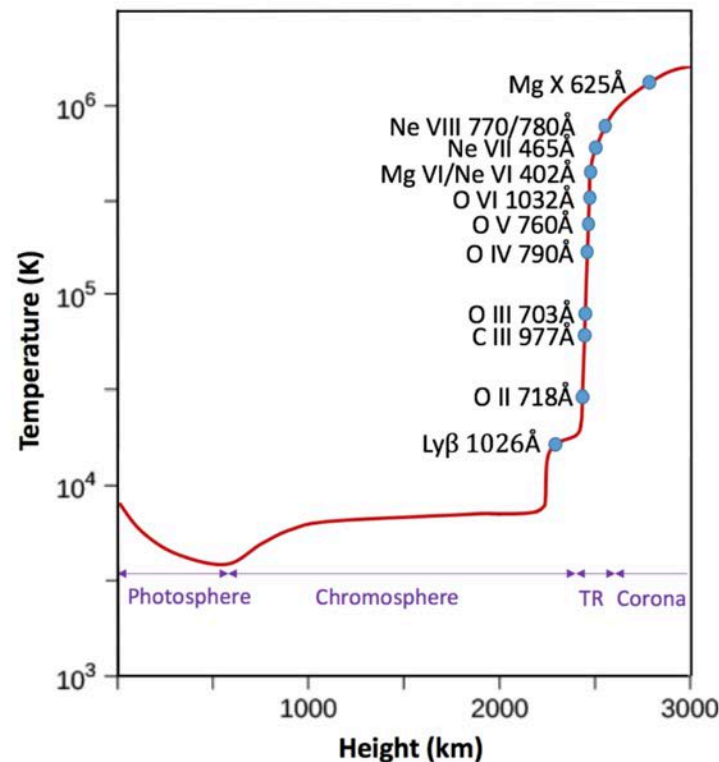
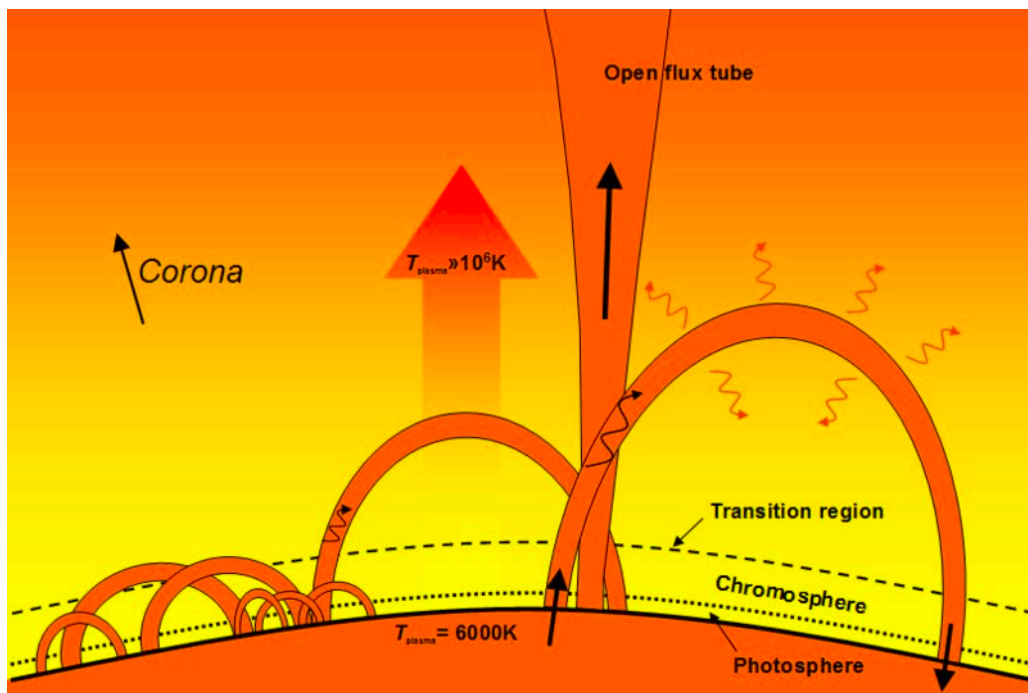
SOHO/EIT He II 304 Å

高分辨下的色球像



Wang et al. 2017 NA

色球-日冕过渡区



过渡区：指太阳大气温度从 10^4k 上升至 10^6k 之间的气层，高度范围约为几百公里，是非常不均匀和动态的。

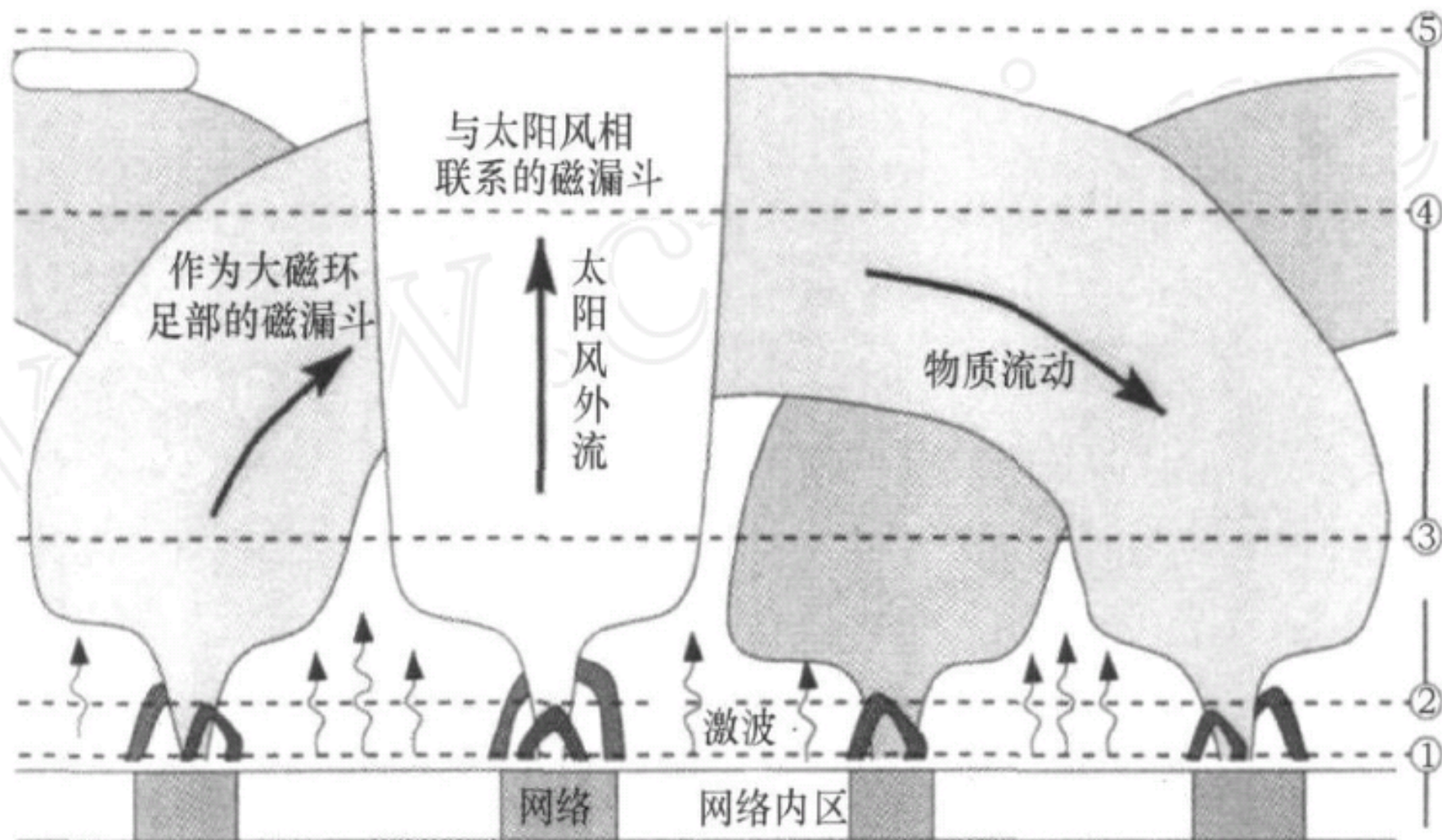


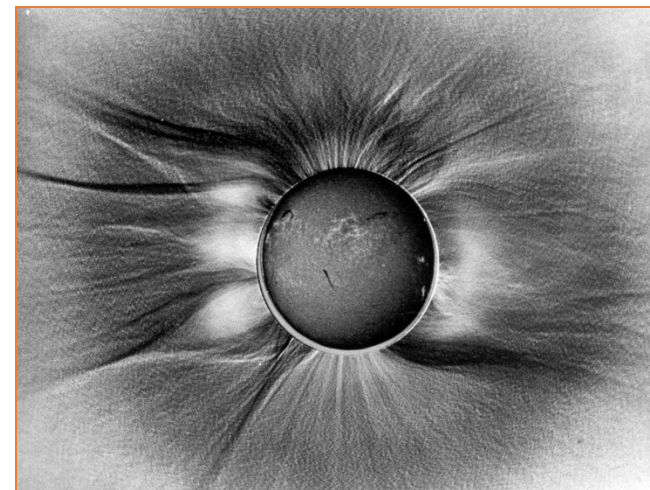
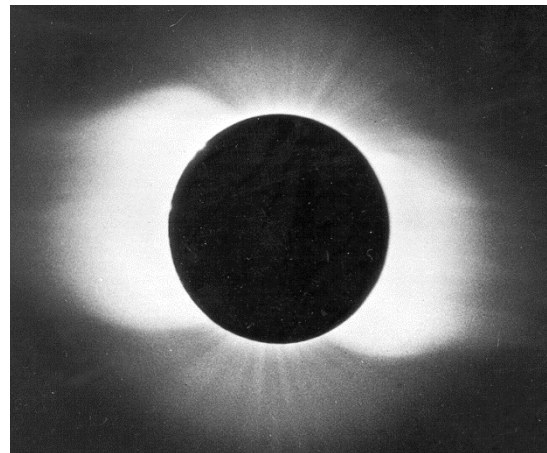
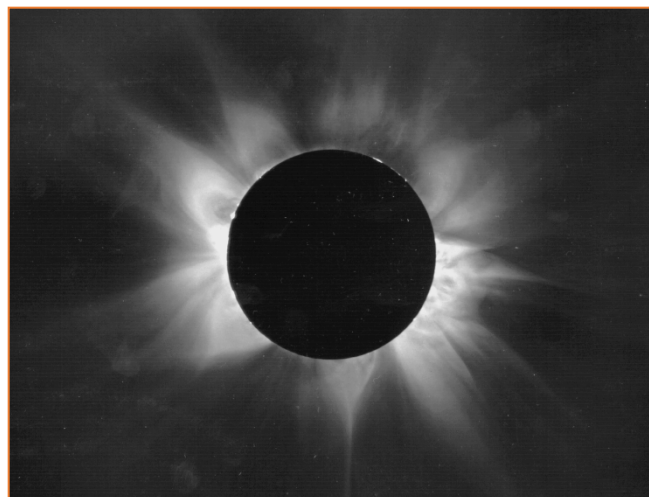
图 3 过渡区结构 [29]

Peter, 2002; 田晖等, 天文学进展, 2009

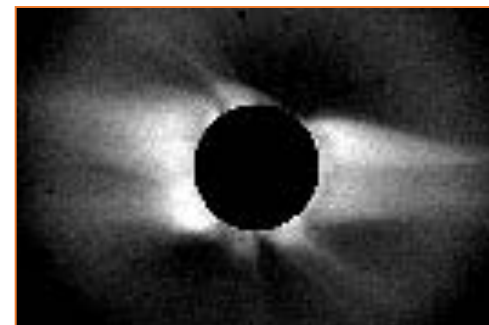
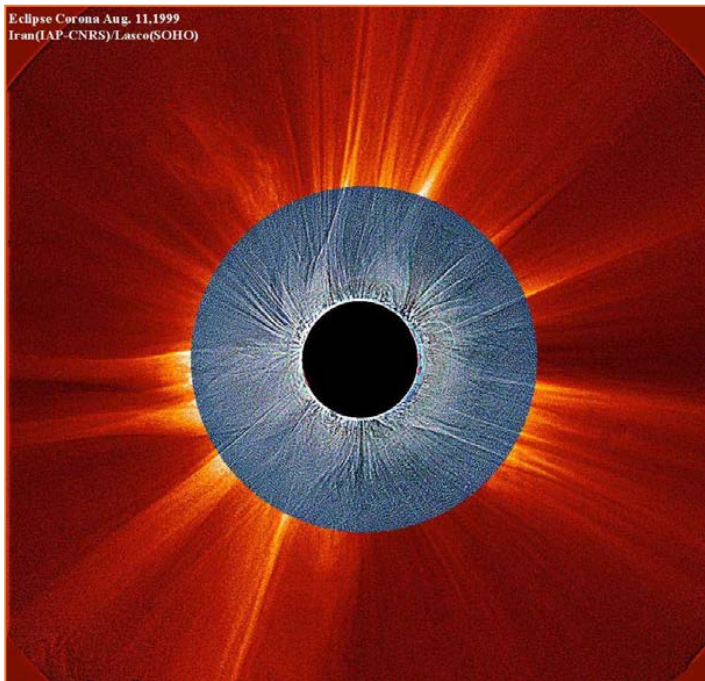
太阳日冕



太阳日冕照片



Eclipse Corona Aug. 11, 1999
Iran (IAP-CNRS) Lasco (SOHO)



日冕的观测手段

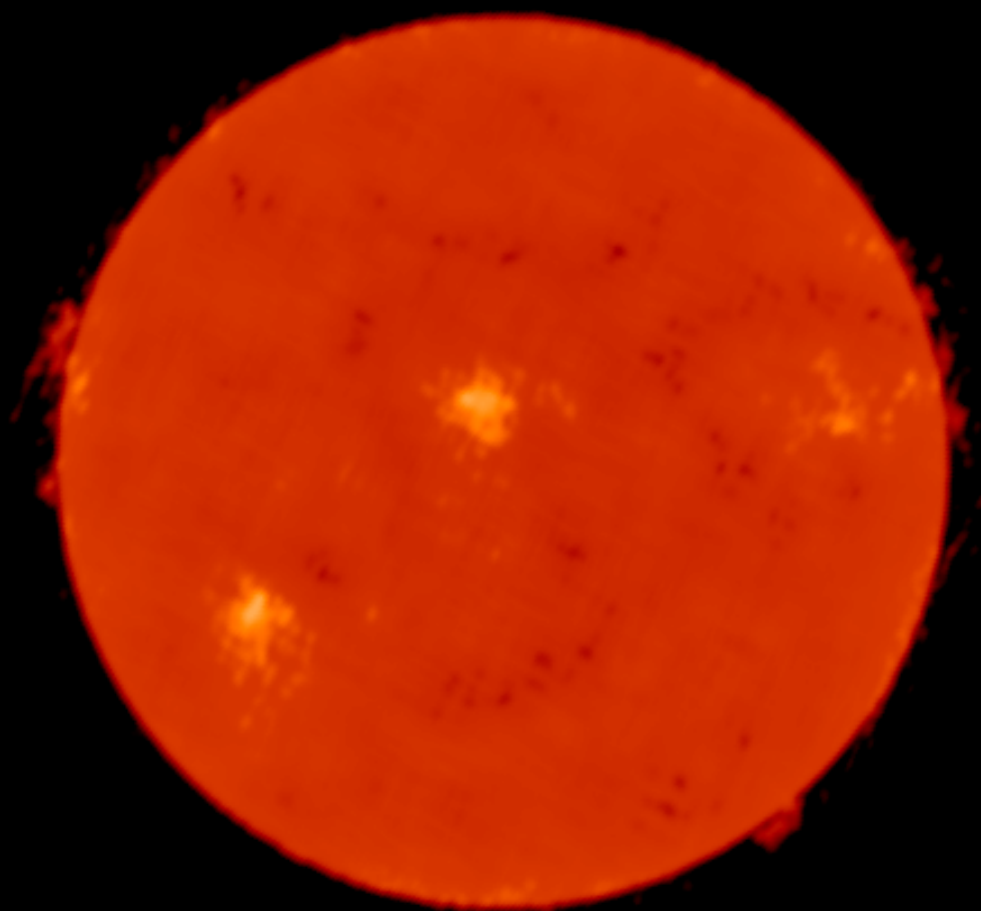
- 日冕仪观测
 - 高山地区： $r=1-1.3 R_s$ 范围内。
 - 空间： 观测范围可到几十个太阳半径。
- 射电观测
 - 毫米到10米波的射电辐射可以通过地球大气层，其中分米和米波段辐射来自日冕。(分辨率低)。
- 空间观测
 - X光和极紫外(EUV)观测、白光日冕仪观测。
 - 观测卫星： Skylab(1973-1974), Helios(1975-1983), P78-1 Solwind(1979-1985), SMM(1980-1989), Yohkoh(1991~), SOHO(1995~), TRACE(1997~), Hinode(2006~), Stereo(2006~), SDO(2010~)

The Nobeyama (Japan) radioheliograph



对日冕进行射电望远镜成像观测，需要非常大的射电天线阵

NOBEYAMA RADIO HELIOGRAPH 17GHz (R+L)



2016-10-07 02:44:35.564

SOLAR NORTH IS UP

CENTER

(257 , 257)/ PIXEL

PEAK

30822 K

PIXEL SIZE

4.911 (ARCSEC)

SOLAR RADIUS

971.546 (ARCSEC)

SOLAR POLAR ANGLE

26.2354 (DEGREE)

SOLAR B0

6.3812 (DEGREE)

DATA

LOGSCALE

MAX=1E4.8 : MIN=1E3



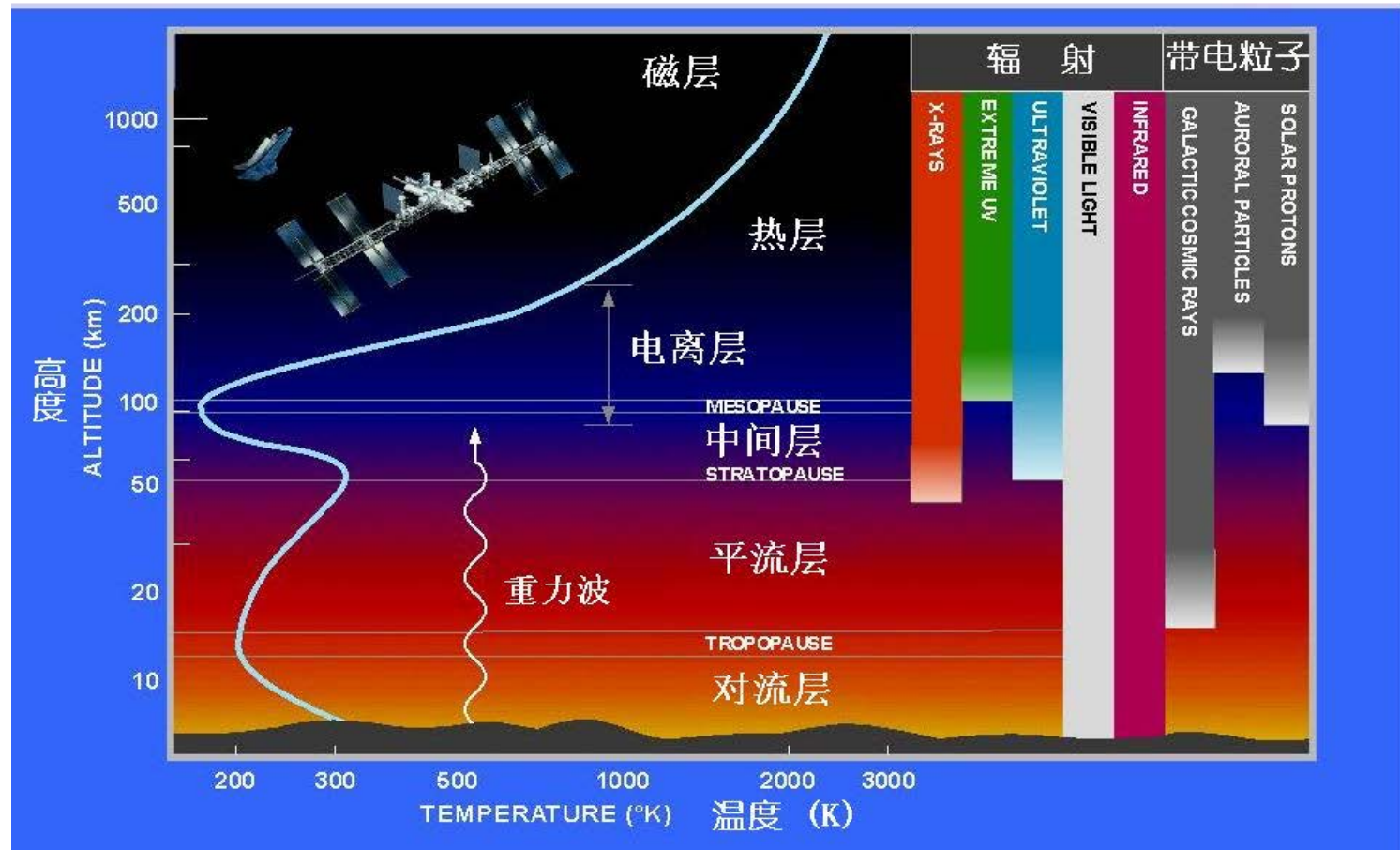
中国射电日像仪由40面4.5米天线和60面2米天线分别组成分米波和厘米波两个射电综合孔径阵列，分布在10平方公里的范围内，最长基线3公里。位于内蒙锡林郭勒盟正镶白旗明安图镇。



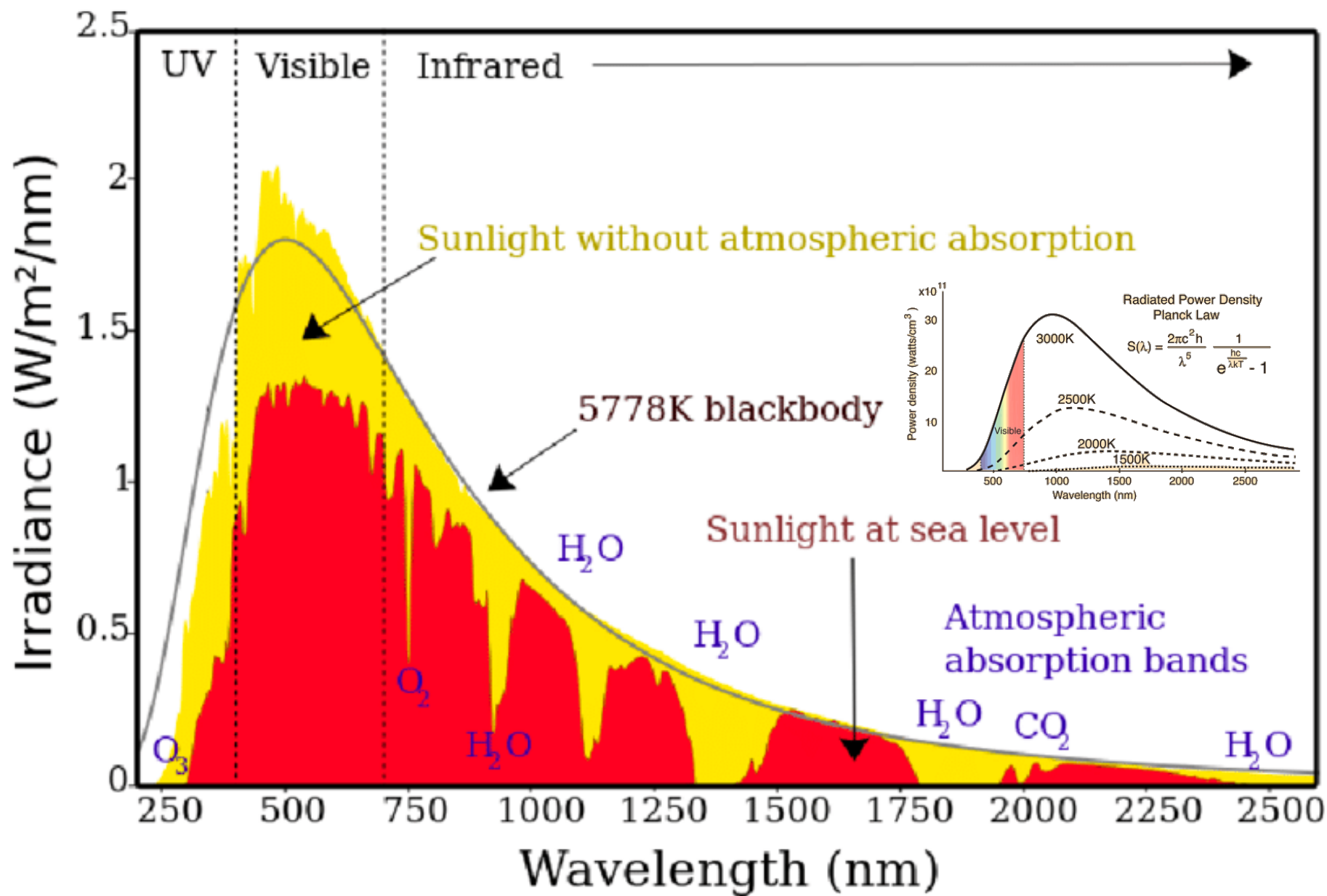
太 阳 辐 射

你知道那些辐射？

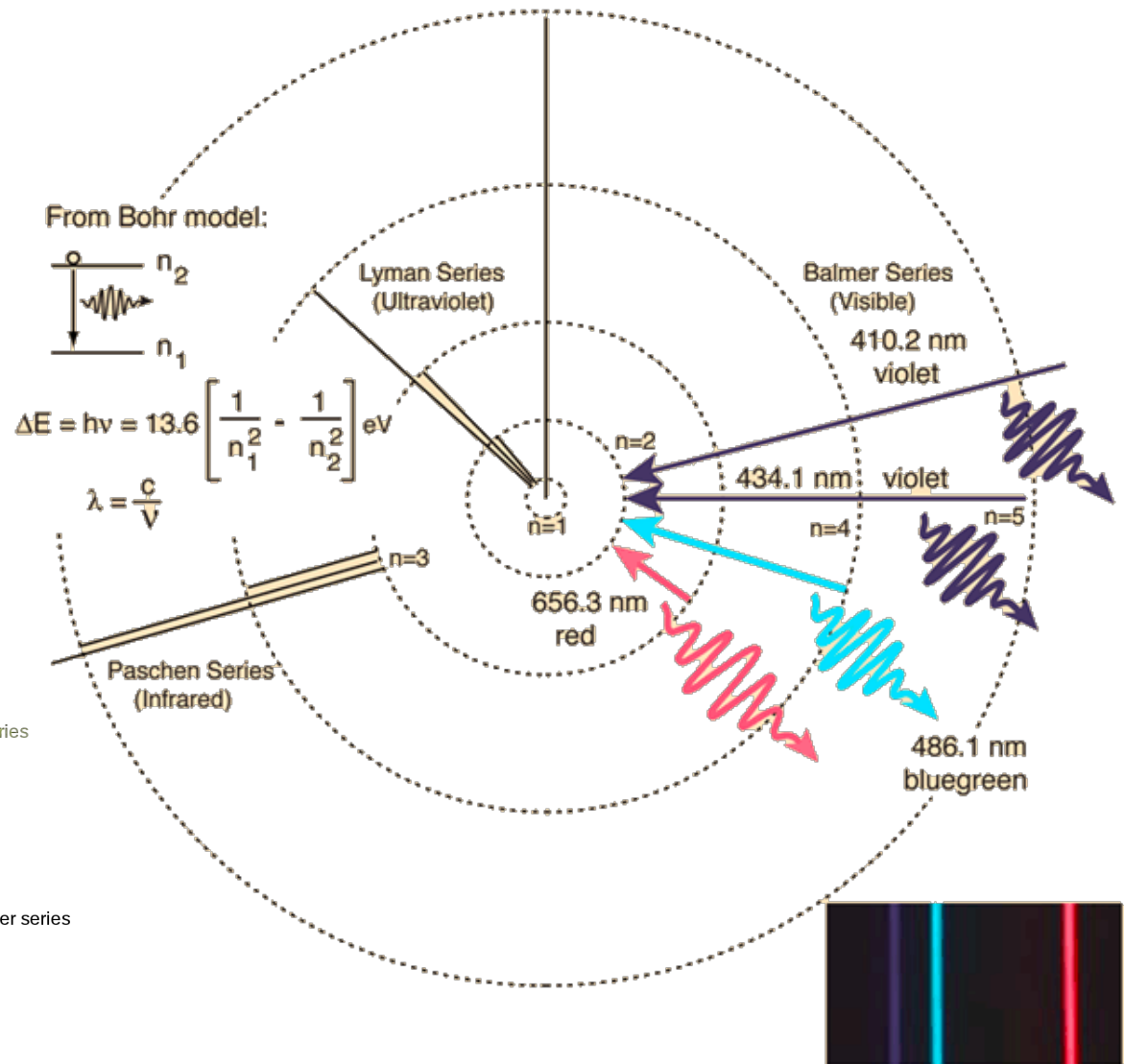
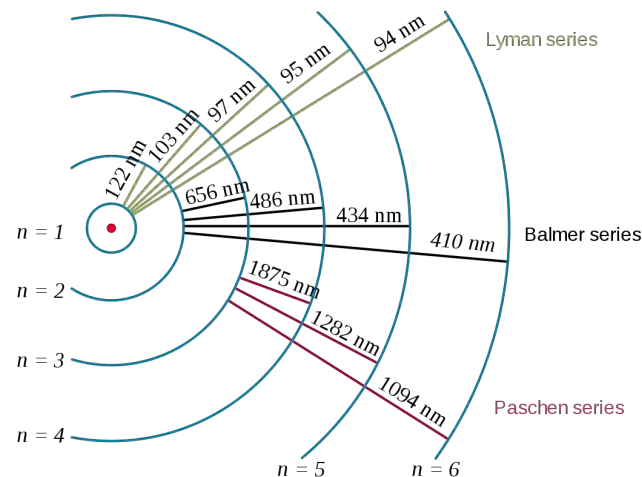
太阳辐射：太阳的电磁波辐射，波长可测范围从 γ 射线、X光、紫外、可见光、红外，直到射电波段的米波区。



太阳各种辐射能够到达地球大气的高度。



Hydrogen emission spectrum



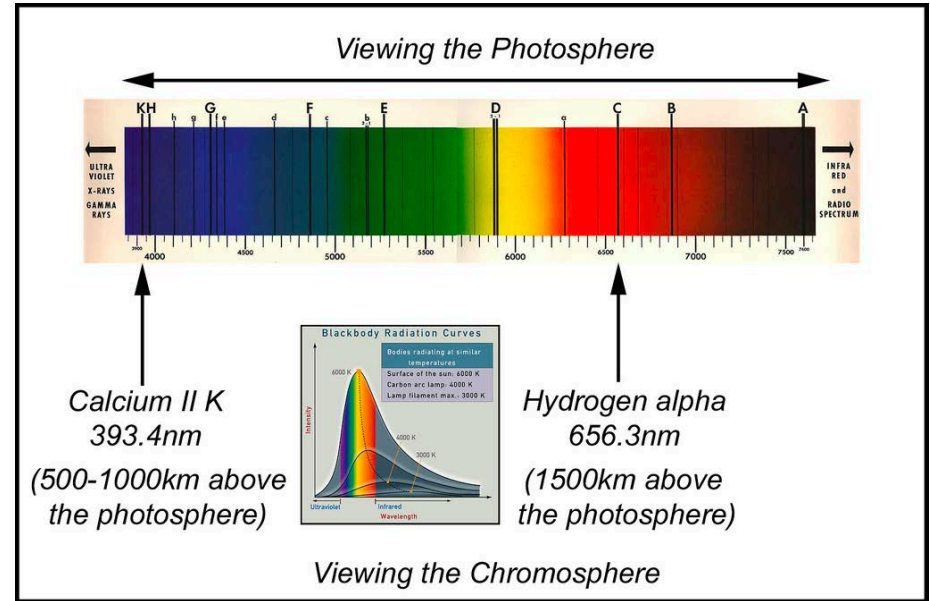
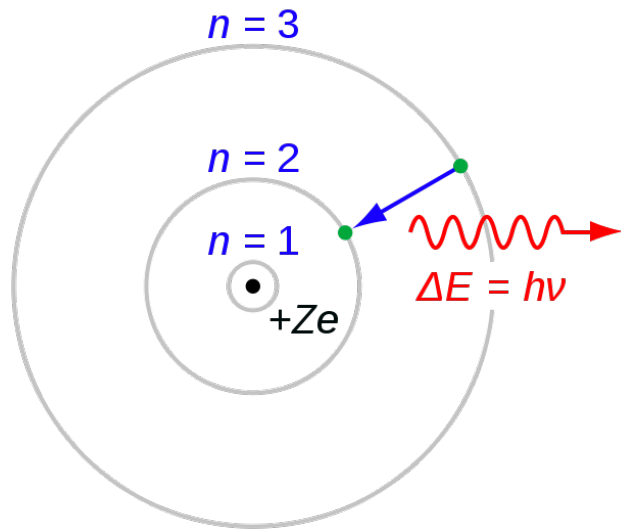
太阳大气元素丰富

Atomic number	Element	Ionization potential, eV	Photospheric abundances	Coronal abundances	FIP bias
1	H	13.6	12.00	12.00	1
2	He	24.6	10.93	10.93	1
6	C	11.3	8.52	8.52	1
7	N	14.5	7.92	7.92	1
8	O	13.6	8.83	8.83	1
10	Ne	21.6	8.11	8.11	1
11	Na	5.1	6.32	6.92	4
12	Mg	7.6	7.58	8.18	4
13	Al	6.0	6.49	7.09	4
14	Si	8.2	7.56	8.16	4
16	S	10.4	7.33	7.33	1
18	Ar	15.8	6.59	6.59	1
20	Ca	6.1	6.35	6.95	4
26	Fe	7.9	7.50	8.10	4
28	Ni	7.6	6.25	6.85	4

第一电离势

日冕和太阳风中的第一电离势增强。

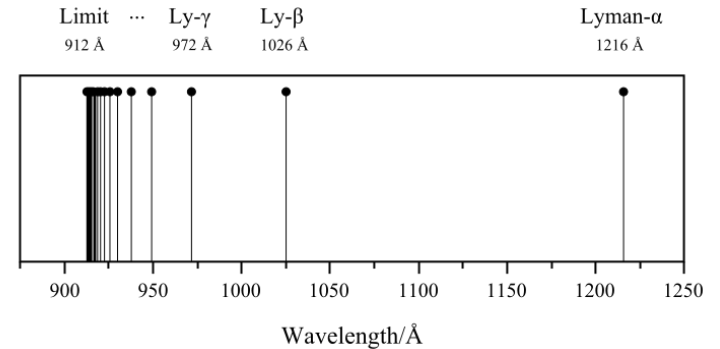
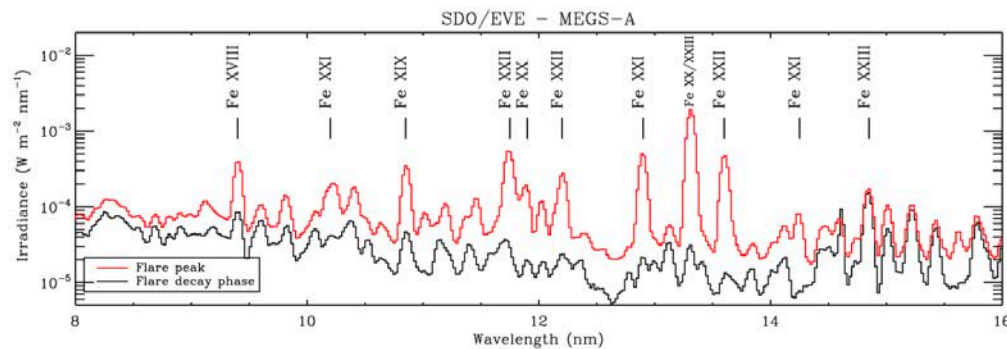
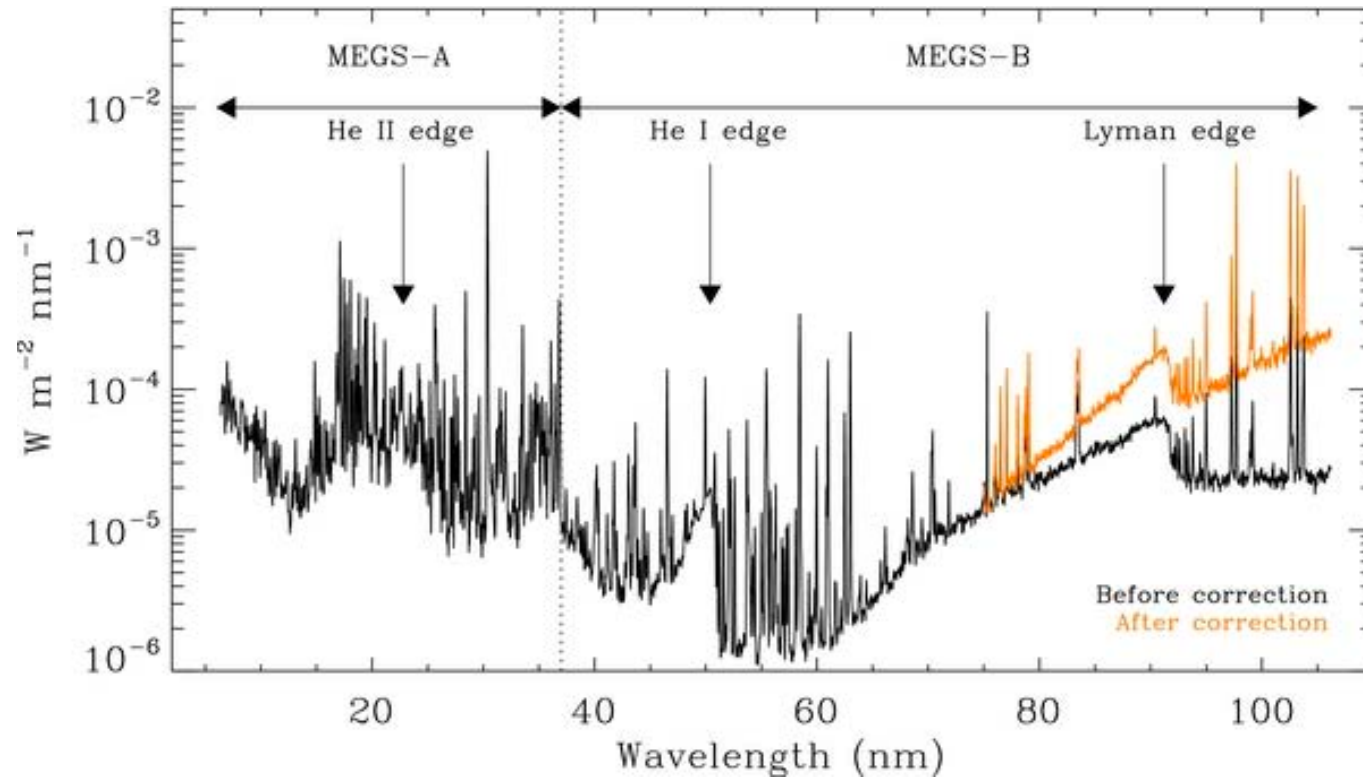
Visible 辐射



The Balmer series is characterized by the electron transitioning from $n \geq 3$ to $n = 2$, where n refers to the radial quantum number or principal quantum number of the electron. The transitions are named sequentially by Greek letter: $n = 3$ to $n = 2$ is called H- α , 4 to 2 is H- β , 5 to 2 is H- γ , and 6 to 2 is H- δ . As the first spectral lines associated with this series are located in the visible part of the electromagnetic spectrum, these lines are historically referred to as "H-alpha", "H-beta", "H-gamma" and so on, where H is the element hydrogen.

Transition of n	3→2	4→2	5→2	6→2	7→2	8→2	9→2	$\infty \rightarrow 2$
Name	H- α / Ba- α	H- β / Ba- β	H- γ / Ba- γ	H- δ / Ba- δ	H- ϵ / Ba- ϵ	H- ζ / Ba- ζ	H- η / Ba- η	Balmer break
Wavelength (nm)	656.45377 ^[2]	486.13615 ^[3]	434.0462 ^[3]	410.174 ^[4]	397.0072 ^[4]	388.9049 ^[4]	383.5384 ^[4]	364.6
Energy difference (eV)	1.89	2.55	2.86	3.03	3.13	3.19	3.23	3.40
Color	Red	Aqua	Blue	Violet	(Ultraviolet)	(Ultraviolet)	(Ultraviolet)	(Ultraviolet)

EUV and UV 辐射



各波段的基本特征

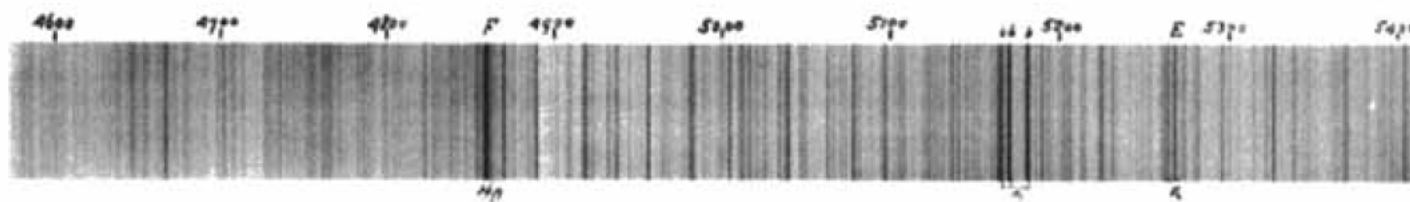
- $\lambda=200\sim 10,000\text{ nm}$:

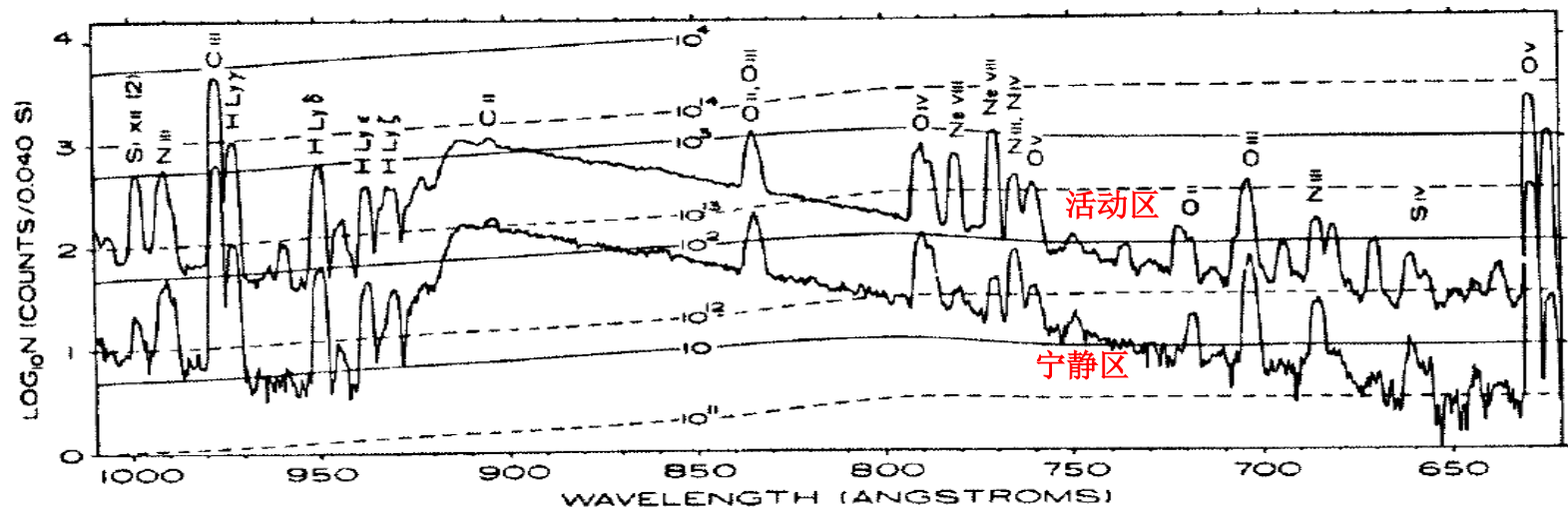
连续谱 + 2万多条吸收线（夫琅禾费谱线）

来源： 光球

谱线形成机制： 光球粒子的选择吸收

例外谱线： H_{α} ($6562\text{ \AA}$), Ca K ($3933\text{ \AA}$) 和 H ($3698\text{ \AA}$)
(来自色球)





- $\lambda < 150 \text{ nm}$:

弱的连续谱 + 发射线

连续谱来源:

(100~150 nm, 色球) ; ($\lambda < 100 \text{ nm}$, 日冕)

形成机制:

谱线—中性和电离原子的 b-b 跃迁

连续谱—f-b 和 f-f 跃迁, 自由电子的散射

- $\lambda > 1 \text{ mm}$:

射电连续谱和各类射电暴

来源:

- 宁静色球，毫米波和厘米波， $10^4 - 10^5 \text{ K}$ 的黑体辐射
- 宁静日冕，分米波和米波， 10^6 K 的黑体辐射
- 色球和日冕中太阳活动产生的高能电子激发的射电暴辐射

$$\omega > \omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \propto n_e^{1/2}$$

温度

- a) **有效温度**——某辐射源的总辐射通量和某一温度为 T_{eff} 下算得的黑体表面的总辐射通量相等 ([Stefan–Boltzmann law](#)), 则该温度 T_{eff} 成为这个辐射源的有效温度。

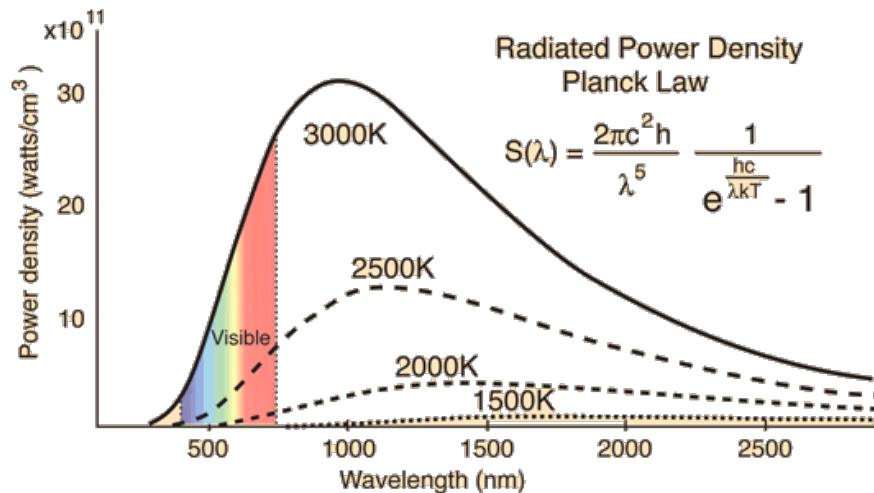
$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4, \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-4}$$

$$T_{eff} = 5770 \text{ K}, \quad L = 3.845 \times 10^{26} \text{ J.s}^{-1}$$

b) 亮温度——若某辐射源在波长为 λ 处的辐射强度 I_λ 和某一温度 T_b 下由普朗克公式算出的热平衡辐射强度相等，则称该温度 T_b 为这个辐射源的亮温度。

$$I_\lambda = B_\lambda(T_b)$$

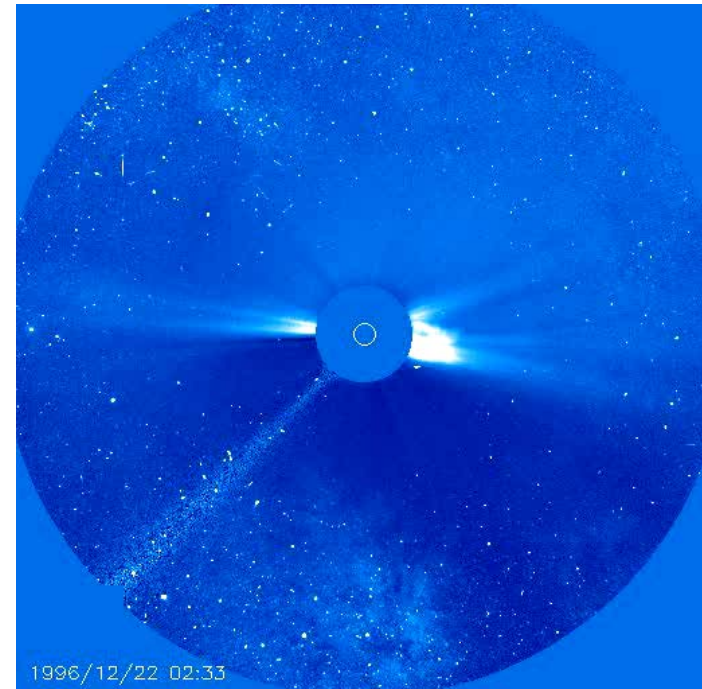
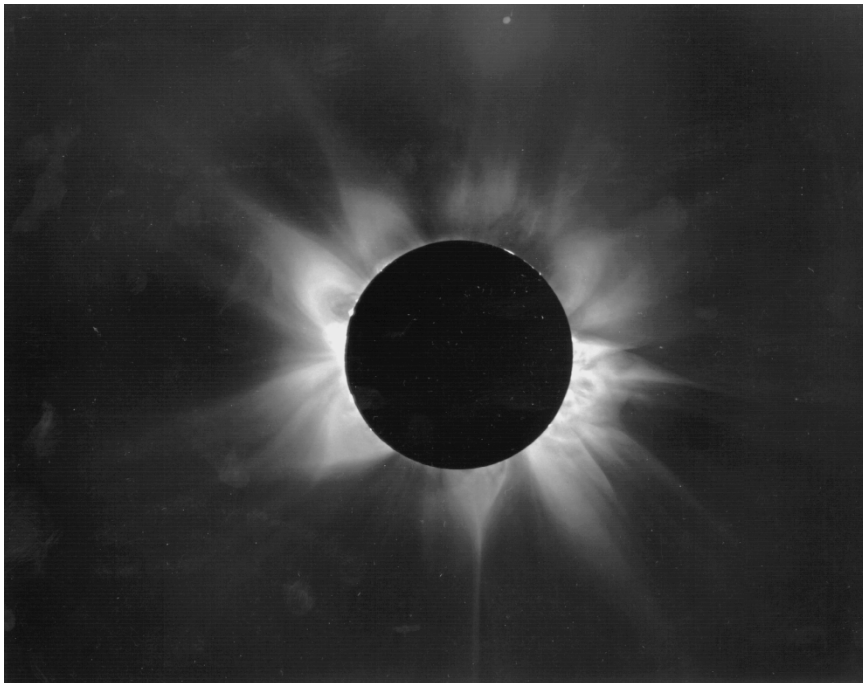
$$T_b = 5857 \text{ K}, \quad \lambda_{\max} = 0.495 \mu\text{m}$$



日冕辐射的多种成份

1. K 冕 (*kontinuierliches Spektrum*):

- 日冕电子对光球辐射的散射(*Thompson-scattering*),
- 强度和视线方向上电子的总积分浓度成正比, 可用于测日冕的电子密度分布
- 光线是偏振的, 偏振度**20-70%**
- 在地面, 只有在日全食或者天空视宁度极好的高山用日冕仪才能观测到。



日冕辐射的多种成份

2. F 冕 (*Fraunhofer corona*)

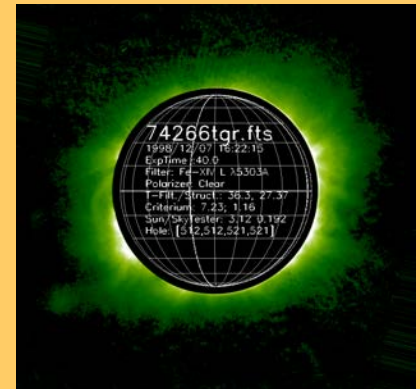
- 行星际尘埃对光球辐射的散射 (*Rayleigh-scattering*)
- 偏振很低
- 又名：黄道光 (*Zodiacal light*) , 适当的条件下用肉眼在早晨或黄昏可看到。

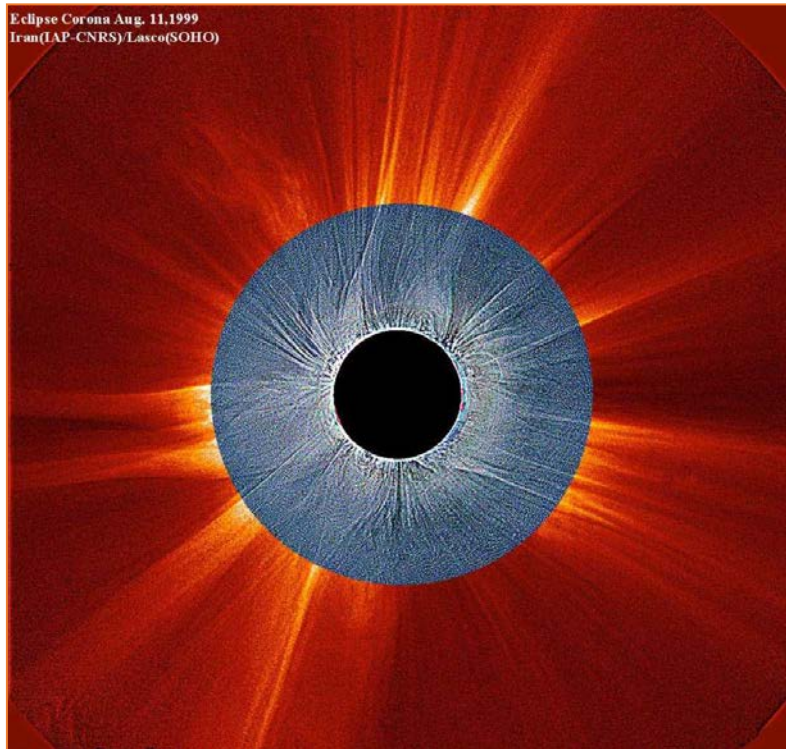
3. E冕或发射日冕 (*emission line corona*)

- 来自于日冕原子或离子自身在光学波段的发射: **b-b, f-b, f-f**跃迁等,
- 可见光区最强的谱线: **530.3 nm (FeXIV) (the green line)**, 除了**656.3 nm**的 **H-alpha** 线 (色球中冷的中性氢原子的辐射),
- 紫外 (**UV**) 最强的谱线: **Lyman-alpha at 121.6 nm** (来自中性氢原子),
- 在紫外 (**UV**) 和极紫外 (**EUV**) 还有其它很多谱线,
- 径向的梯度很陡,
- 可在日全食时用光谱仪进行观测, 也可用日冕成像仪进行观测。

4. T冕 (*thermal corona*), 很难观测到

- 来自于被加热尘埃粒子的热辐射,
- 连续的远红外光谱, 因为尘埃粒子的温度较低。





白光日冕
(散射日冕、K冕和F冕)



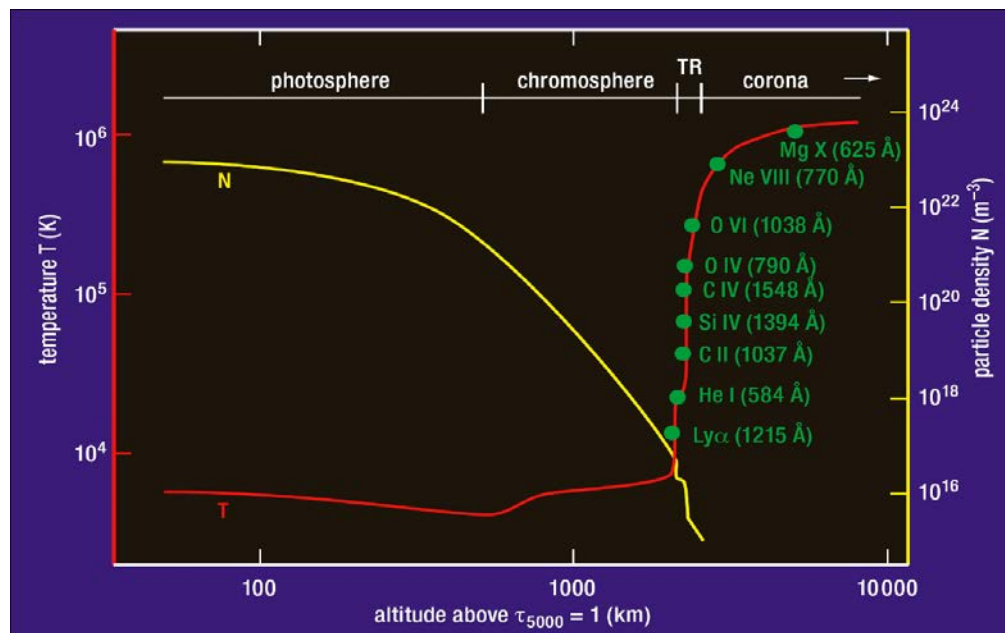
发射日冕
(E冕)

日冕温度

- 根据密度求温度
- 根据谱线对
- 根据谱线宽度

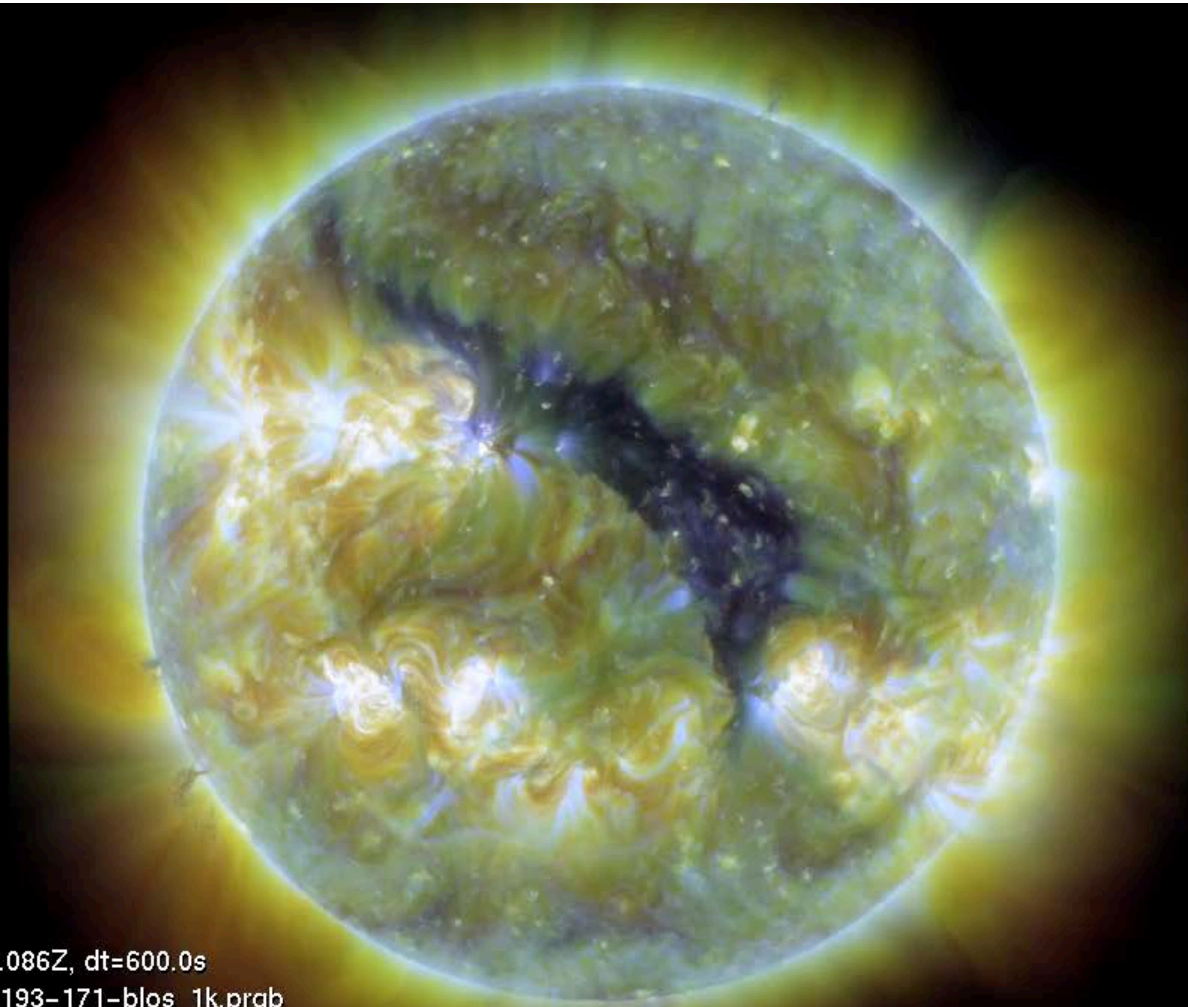
$$\frac{dP}{dr} = -\rho g$$

日冕密度



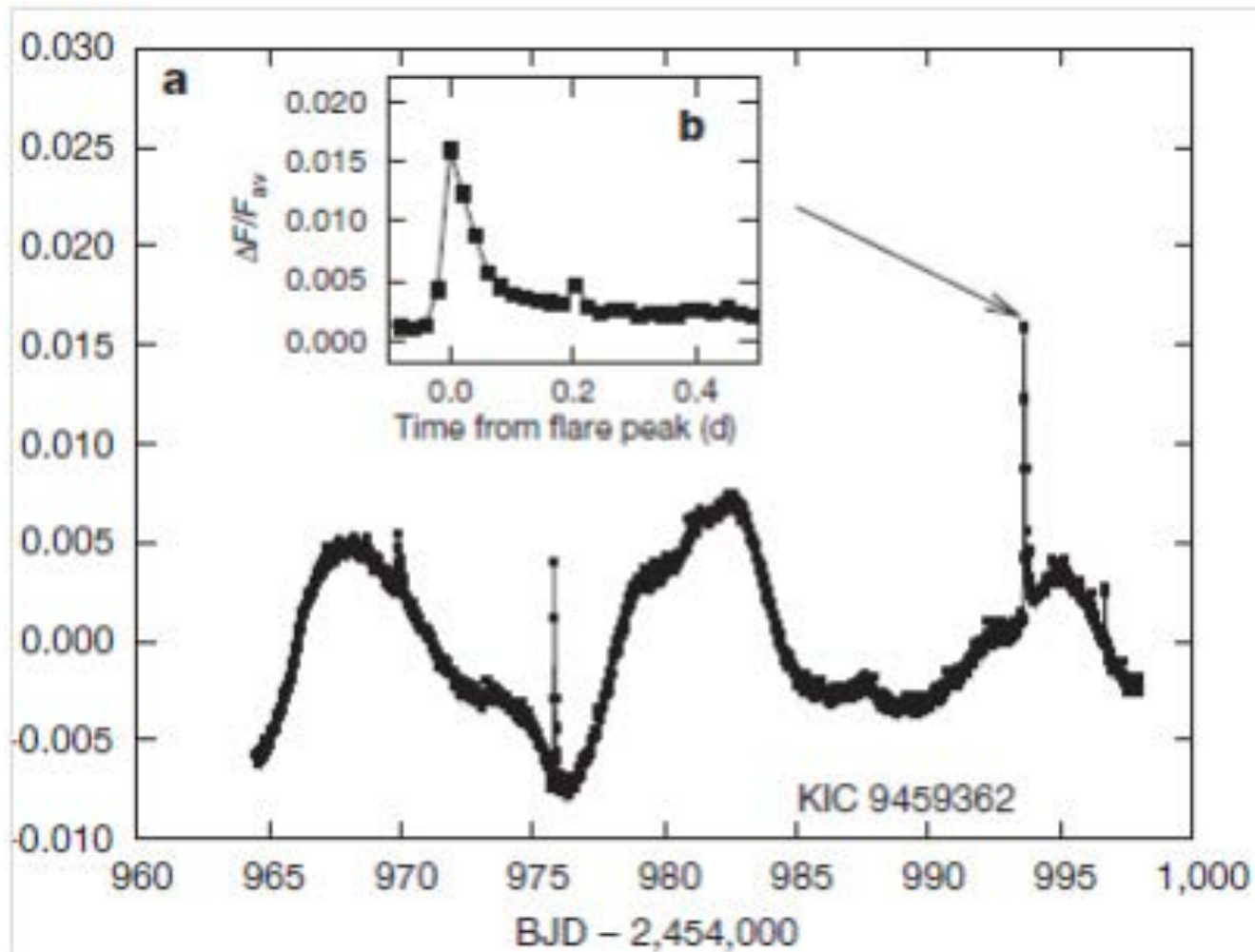
太阳活动与宁静太阳

- **宁静太阳**：时间上相对稳定的，空间上球对称和均匀辐射的理想太阳。变化时标为太阳演化时标。
- **太阳活动**：局部区域的、短时标的现象。变化时标为从小于几分钟到几十年。包括：黑子、谱斑、日珥、暗条、耀斑以及CME等。

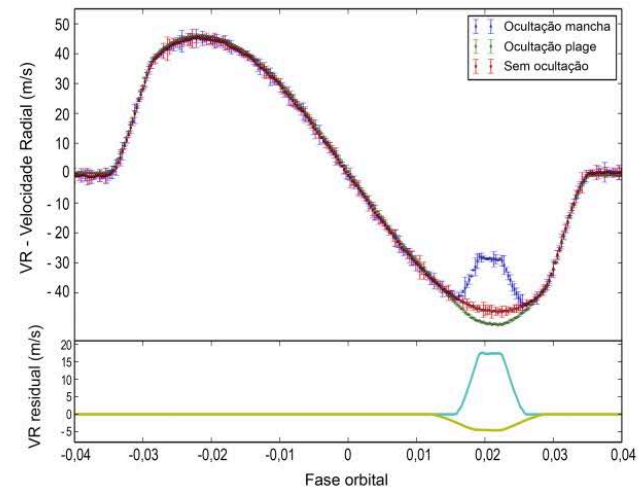
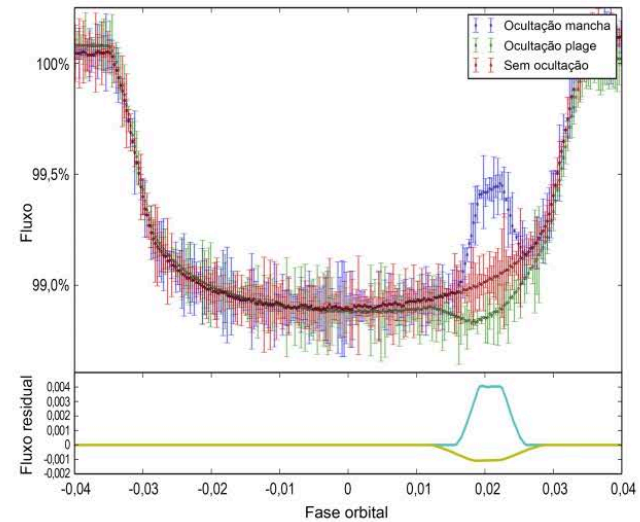
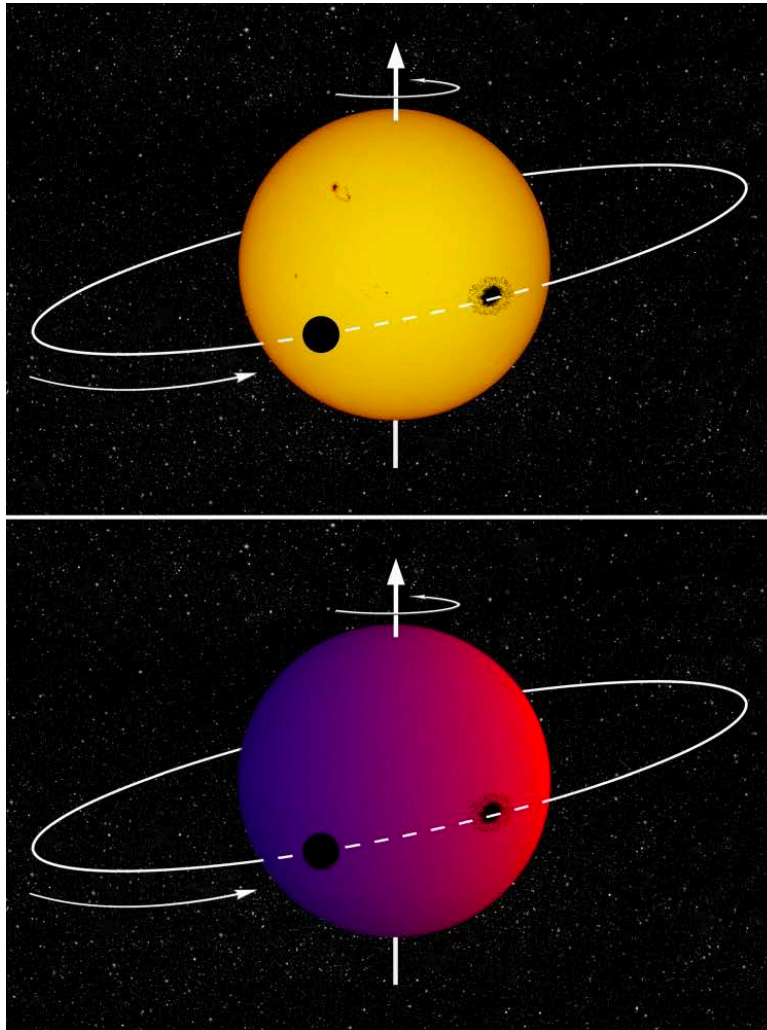


Time: 2012-07-01T00:01:48.086Z, dt=600.0s
aia_20120701T000148_211-193-171-blos_1k.prgb
channel=211, 193, 171, source=AIA,AIA,AIA,HMI

Stellar flare

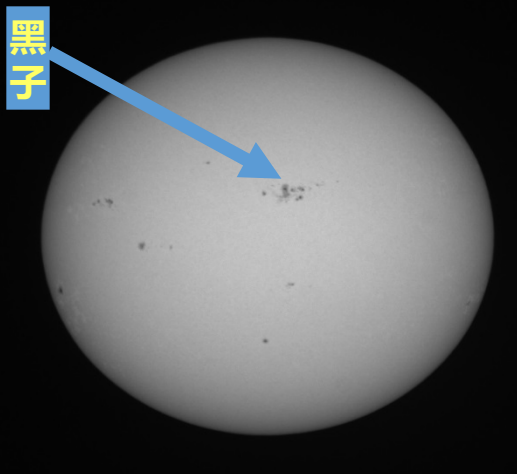


Searching for Earth 2.0

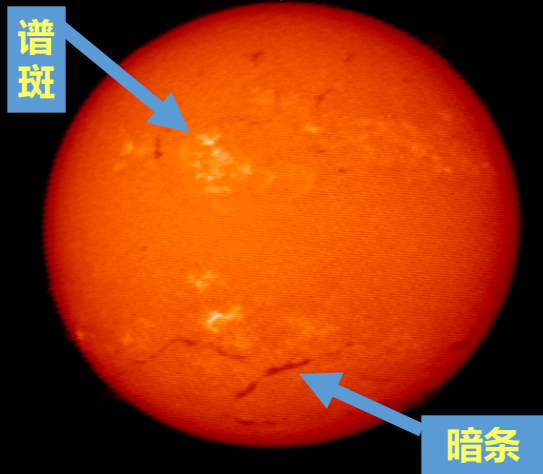


(Oshagh et al. 2016 A&A)

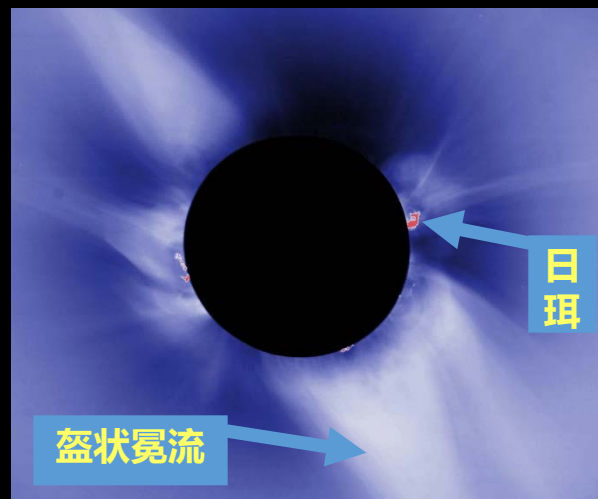
各种太阳活动现象



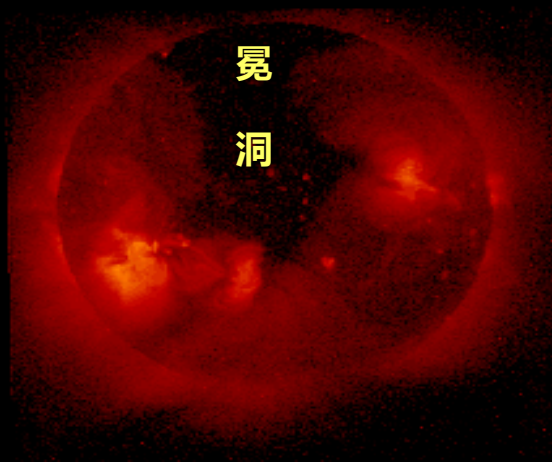
(a) 普通白光的全日面观测



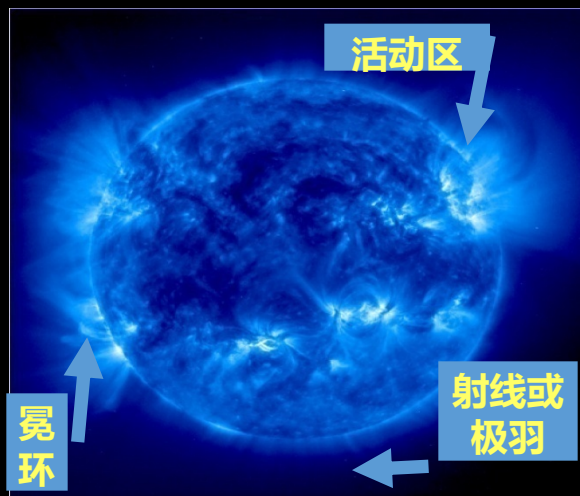
(b) H-Alpha 线的全日面观测



(c) 日全蚀时白光日冕仪观测



(d) Yohkoh 软X射线观测



(e) SOHO/EIT 远紫外线 Fe IX/X 171Å 观测



(f) SOHO/EIT 远紫外线 He II 304Å 观测

当我们用不同波长的光去观测太阳时，会发现太阳大气的结构是很丰富多彩的，完全不像我们平常肉眼看到的那样“平淡无奇”。这是因为这些谱线的形成温度或来源区域不同，反映了太阳大气不同层次的结构信息。上面是某些谱线观测的结果及其对应的典型特征物。

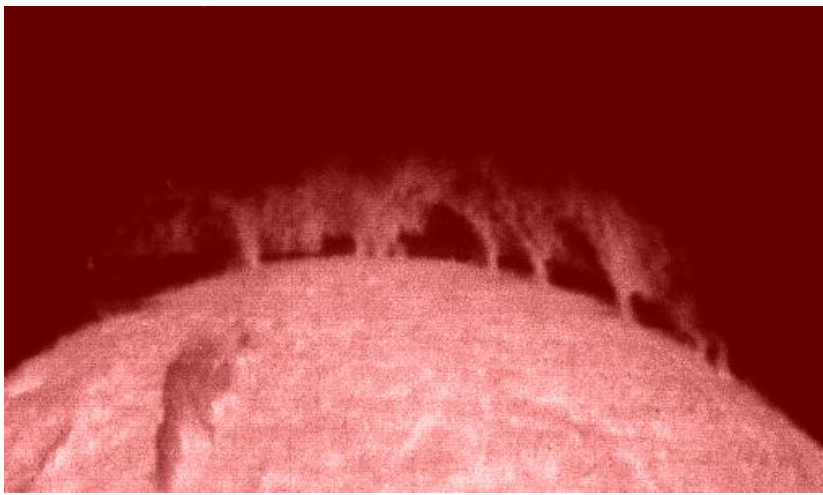
日珥的形态特征

日珥和暗条：悬浮在太阳大气中的一团冷而密的物质。一般地，其温度比周围低2个数量级，密度比周围高2个数量级。

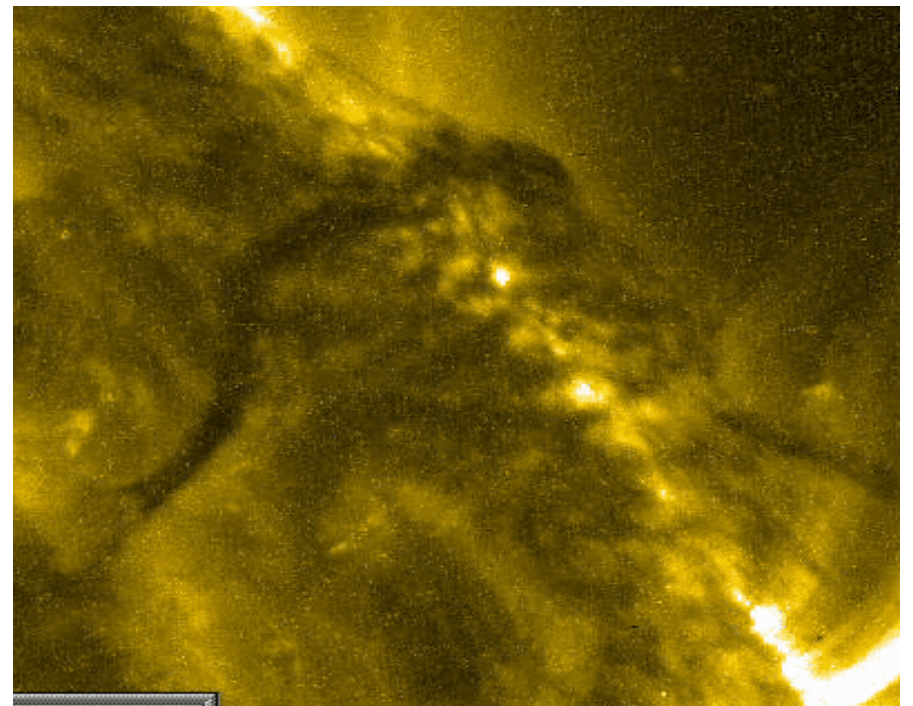
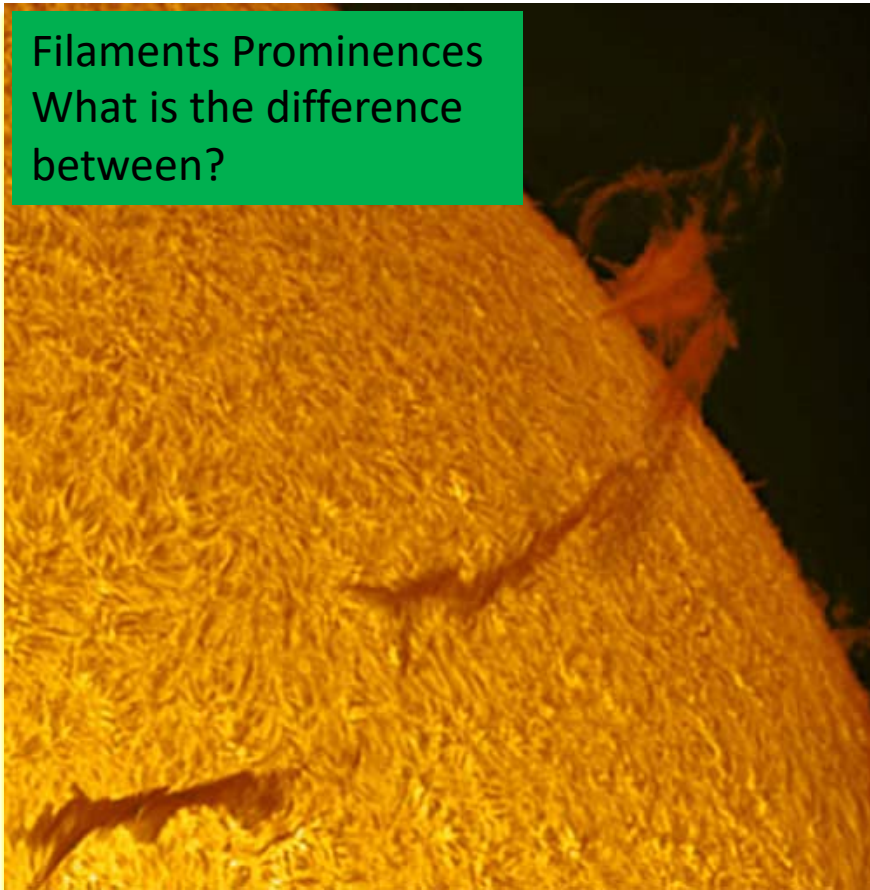
1. **形状：**浮云、喷泉、圆环、拱桥、火舌等各式各样。

2. **分类：**

- **活动日珥：**较小，位于活动区或黑子附近，寿命几分钟到几小时，平均温度和磁场比宁静日珥高许多。
- **宁静日珥：**较大、较稳定，寿命从半天到几个月，经常出现在活动区发展的后期阶段。长度： 6×10^4 - 6×10^5 公里；高度： 10^4 - 10^5 公里；厚度： 4×10^3 - 1.5×10^4 公里；密度： 10^{10} - 10^{11}cm^{-3} ；温度：5000-8000k；磁场：5-200Gauss；
- **爆发日珥：**某些宁静日珥或活动日珥突然发生猛烈的爆发性膨胀或向外抛射，形成爆发日珥。



Filaments Prominences
What is the difference
between?



日珥稳定（支撑）的磁场位型

1、正常极性。

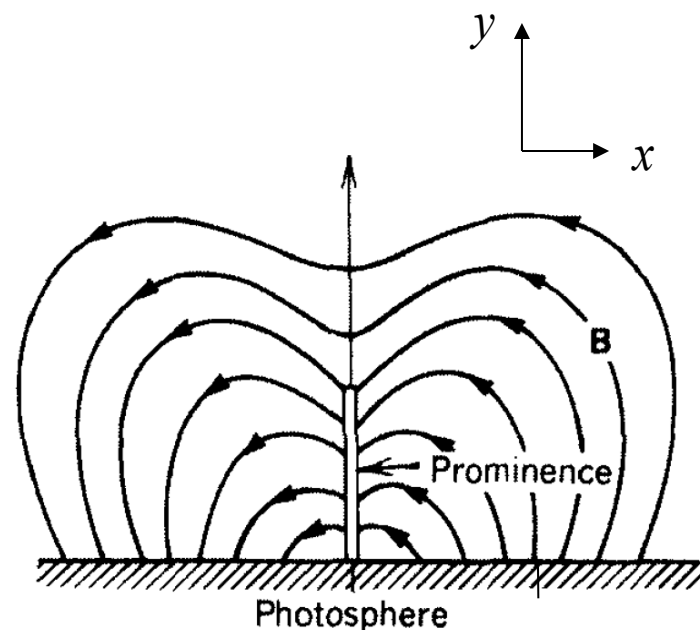
Kippenhahn-Schlüter(1957)提出。

$$B_y = B_y(\infty) \tanh \left[\frac{B_y(\infty)}{B_x} \frac{x}{2H} \right]$$

$$B_x \approx \text{const}$$

$$\rho = \frac{mB_y^2(\infty)}{8\pi kT} \left[1 - \tanh^2 \left(\frac{B_y(\infty)}{B_x} \frac{x}{2H} \right) \right]$$

其中 $H = \frac{kT}{mg}$ 为日珥内的大气标高。

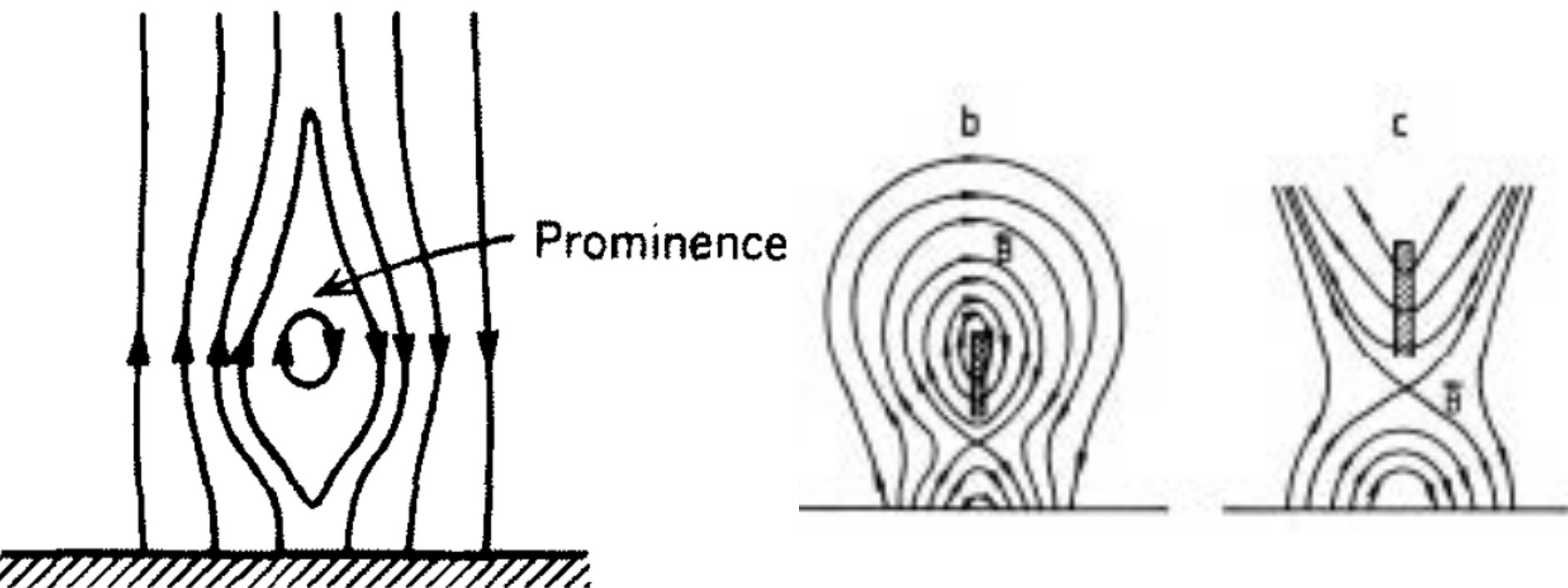


正常极性：支撑日珥磁场的方向和由势场模型得到的方向相同。

日珥稳定（支撑）的磁场位型

2. 反常极性。

Kuperus-Roadu(1974)提出。

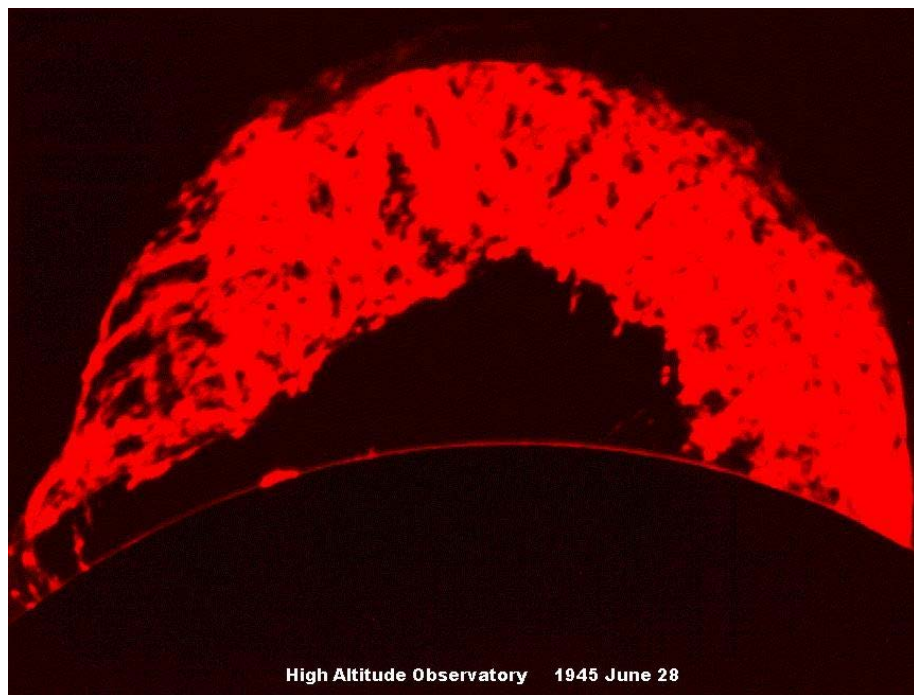


反常极性：支撑日珥磁场的方向和由势场模型得到的方向相反。

日珥稳定（支撑）的磁场位型

3. 通量管模型。

Chen J. 1996



一个观测的爆发日珥

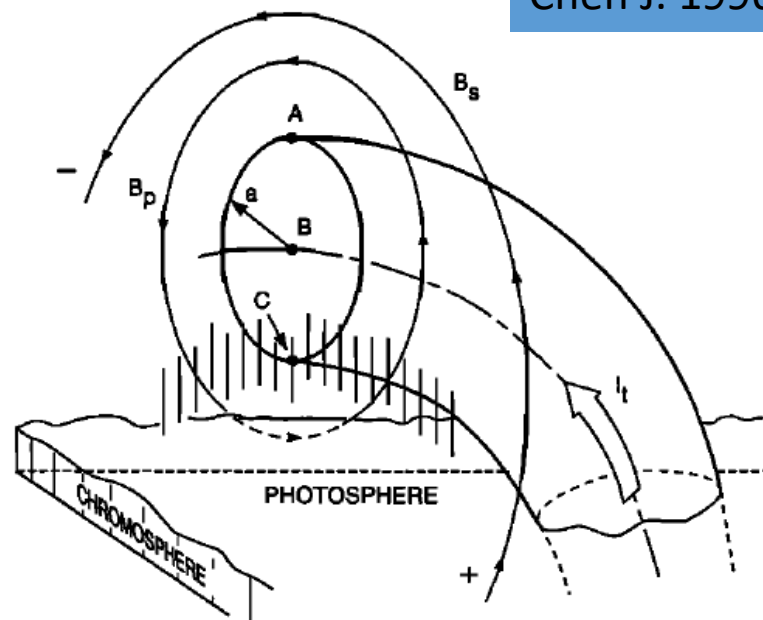


Figure 2. Geometry of a flux rope, a model prominence-cavity structure. The top (point A), the center of mass (point B), and the trailing edge (point C) are indicated. The prominence is indicated by the vertical hash lines. The overlying ambient field B_s demarcates the boundary of the flux rope.

一种日珥的磁通量管模型，磁环的不稳定性，可能导致日珥的爆发和消失

日珥的形成

1. 来自于色球物质向上的喷射或蒸发到日冕而形成, 比如冕环的两个足点压力不平衡, 导致虹吸流。
2. 日冕自身物质, 由于某种热不稳定性, 冷却、凝聚而形成。

温度随时间变化的能量方程

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{cond}} + \nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{rad}} + \dots$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{cond}} = -K \nabla^2 T, \quad \nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{rad}} = -n_e^2 \Phi(T)$$

方程右边第一项为热传导项, 第二项为辐射冷却项, 辐射冷却函数 Φ 是温度的函数。

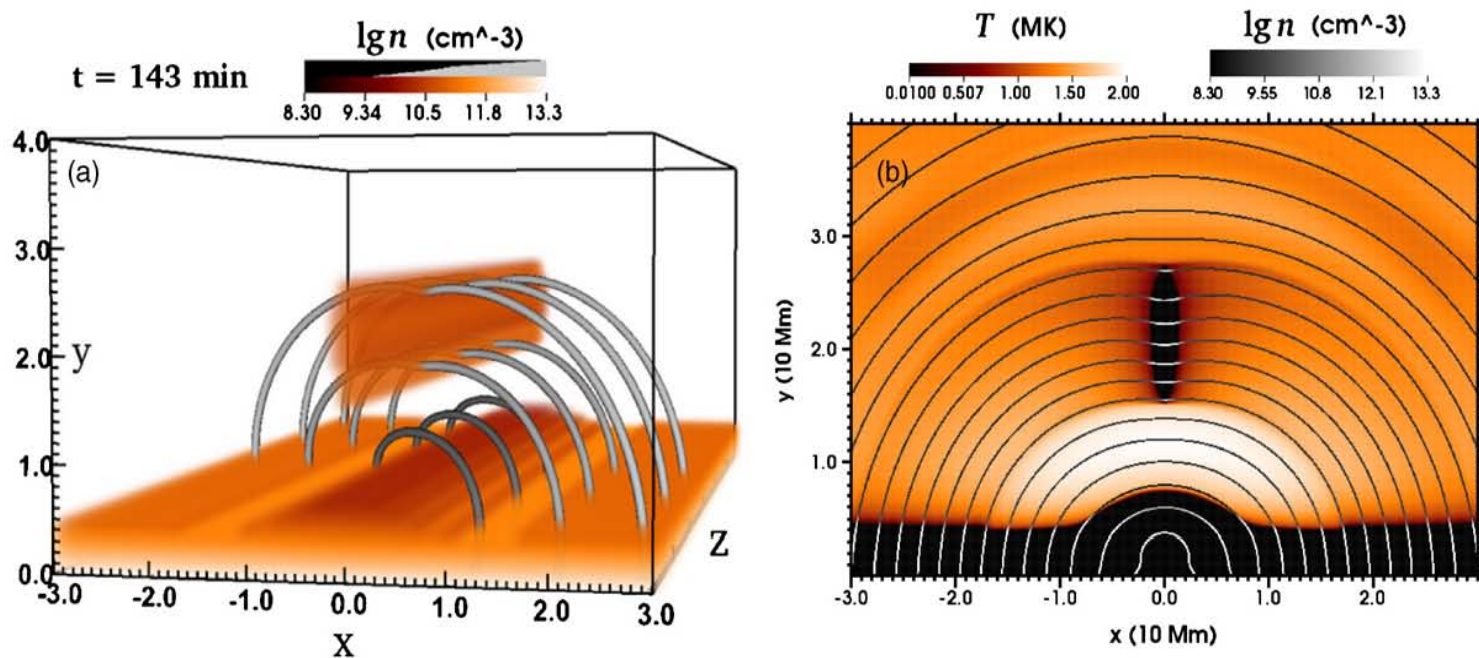


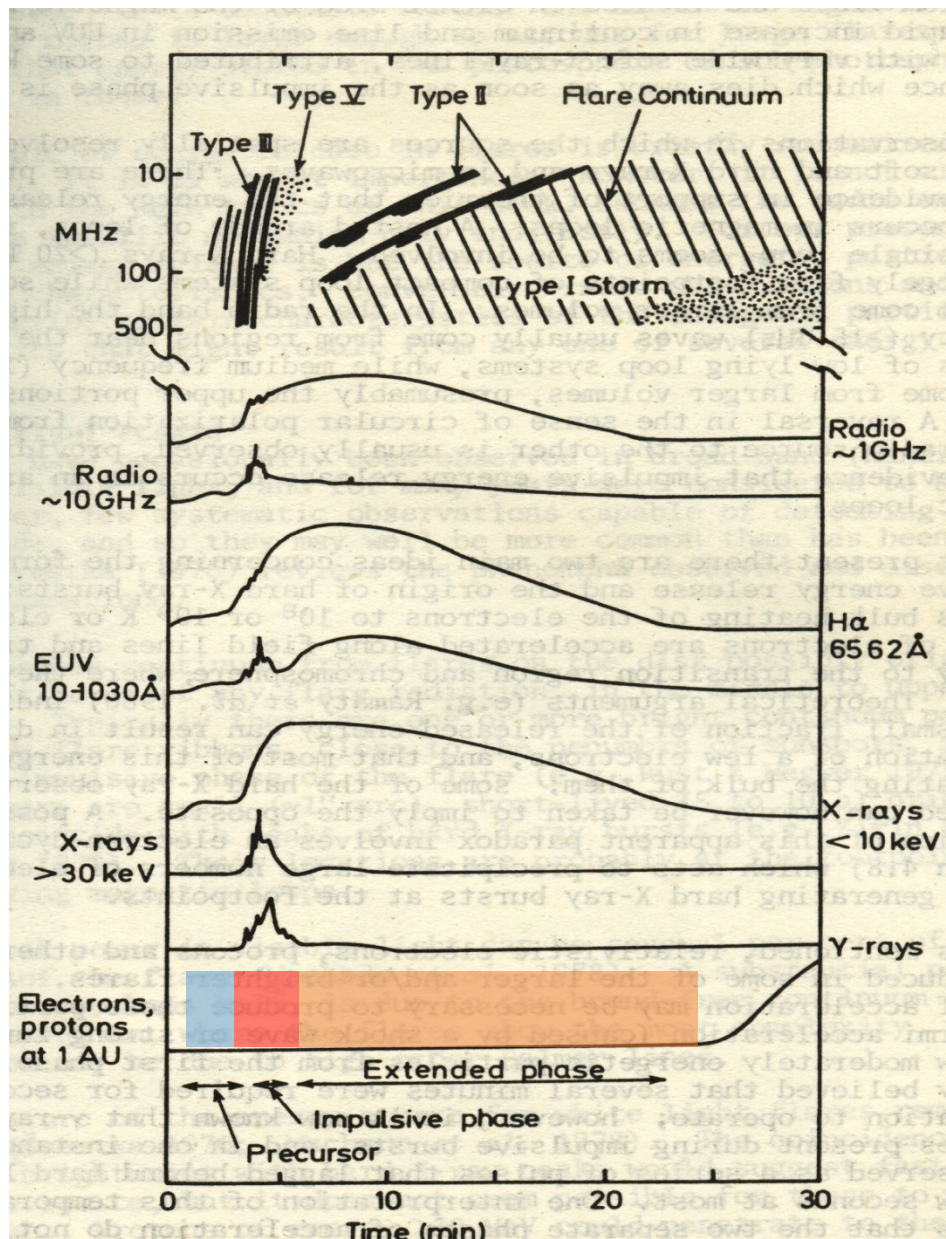
Figure 3. K-S prominence at $t = 143$ minutes. (a) 3D impression of the prominence shown by the number density and selected magnetic field lines. The bar above the color bar shows the opacity of corresponding colors. (b) The temperature and the projected field lines colored according to the local density.

(A color version of this figure is available in the online journal.)

Xia, Chen & Keppens等（2012）的模拟：色球加热导致色球物质蒸发，蒸发的物质通过热不稳定性在日冕冷却凝聚，形成日珥。

太阳耀斑

- 发生在太阳表面局部区域中突然和大规模的能量释放过程，伴随一系列的各类粒子和辐射增强。
- 包括几乎全波段的电磁辐射增强；发射能量从 10^3eV - 10^{11}eV 的各种粒子流；以及大规模的物质运动和抛射现象(CME)。
- 一个太阳大的爆发事件，往往同时有耀斑和CME。耀斑强调的是通过磁场重联产生的高能粒子及其激发的各种辐射增强等次级效应；CME强调的是大量等离子体团的抛射及其驱动的激波、粒子加速等效应。



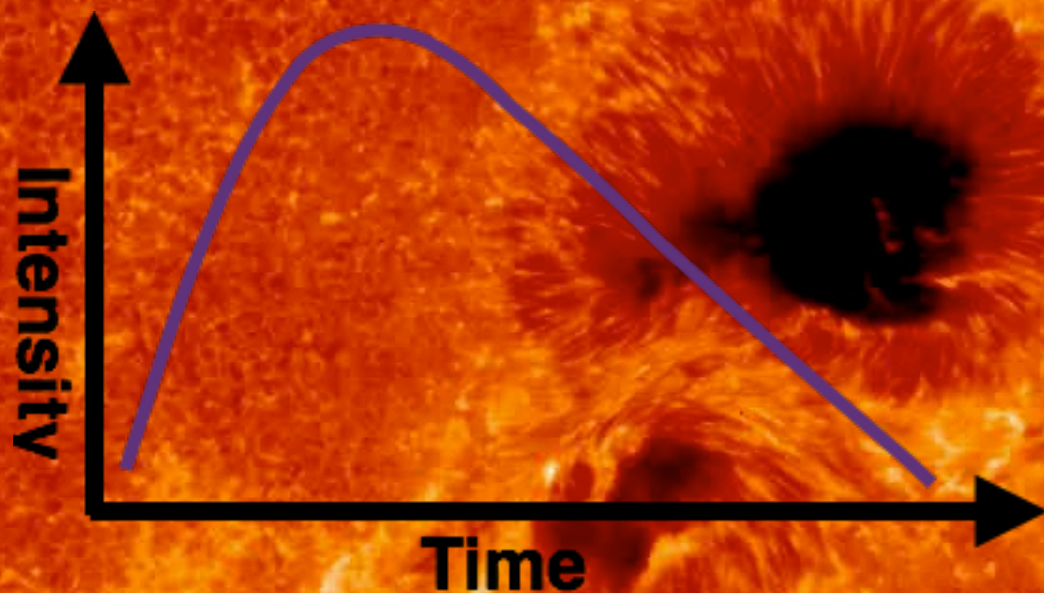
耀斑前相： 磁场能量的累积和“缓慢”释放。

脉冲相： 磁场重联产生的快速能量释放及高能粒子加速。

延伸相（或衰减相）： 高能粒子和被加热的热粒子激发的各种电磁辐射及其衰减。

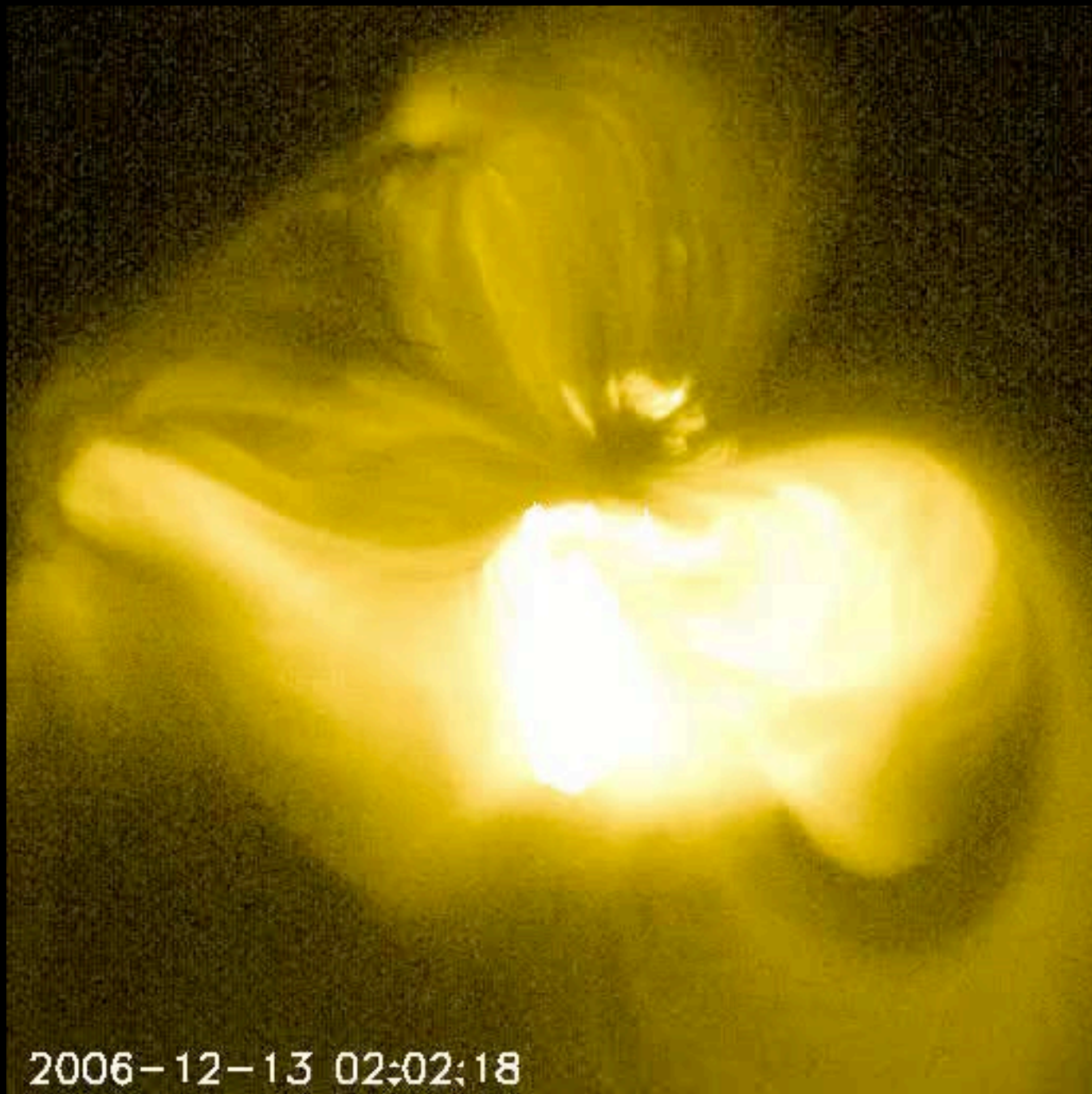
一次大耀斑发生过程中各种电磁辐射和粒子发射随时间的变化，可将其分为耀斑前相、脉冲相和延伸相。

太阳耀斑-能量快速释放



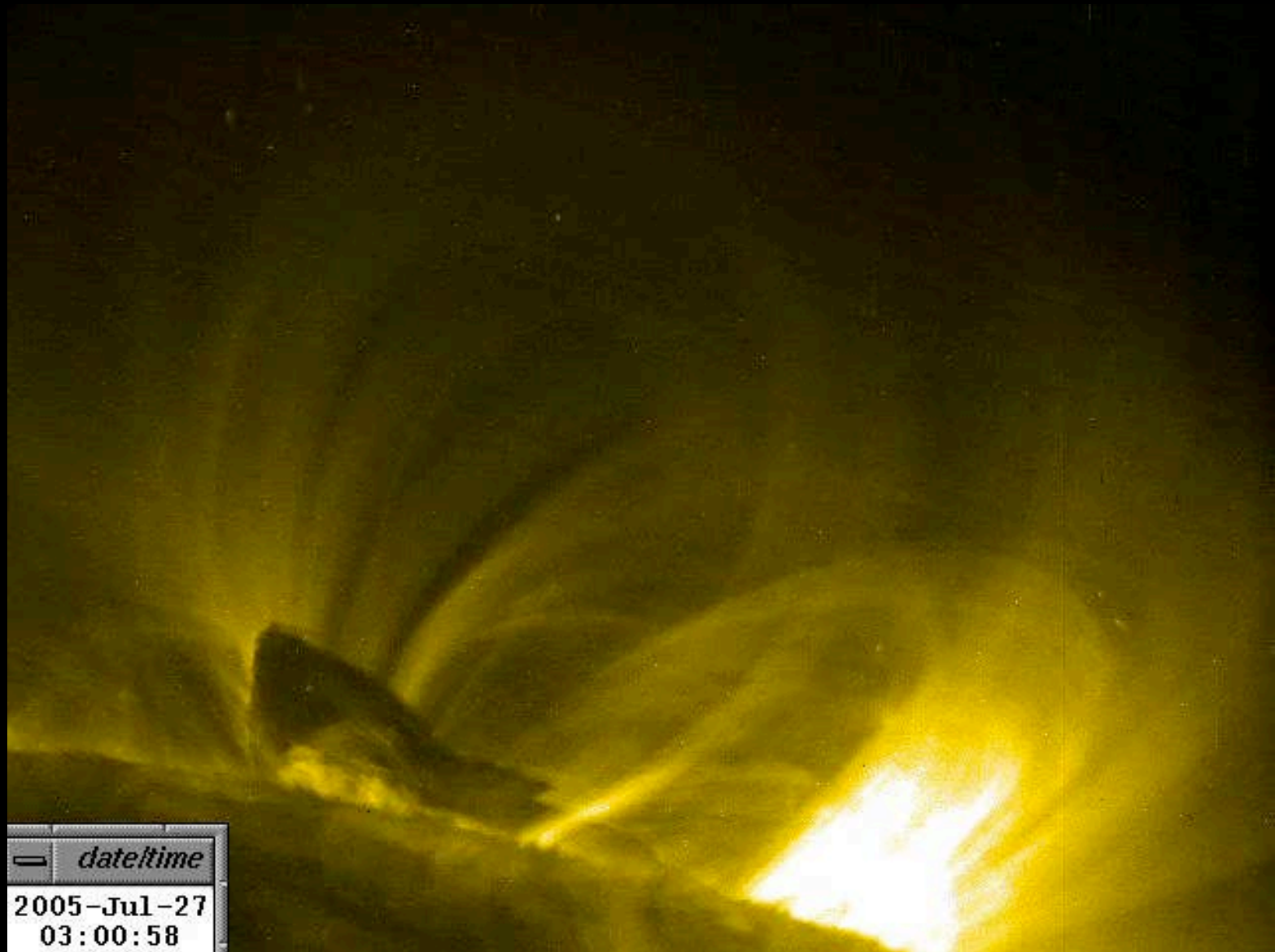
2006-12-13 00:00:21

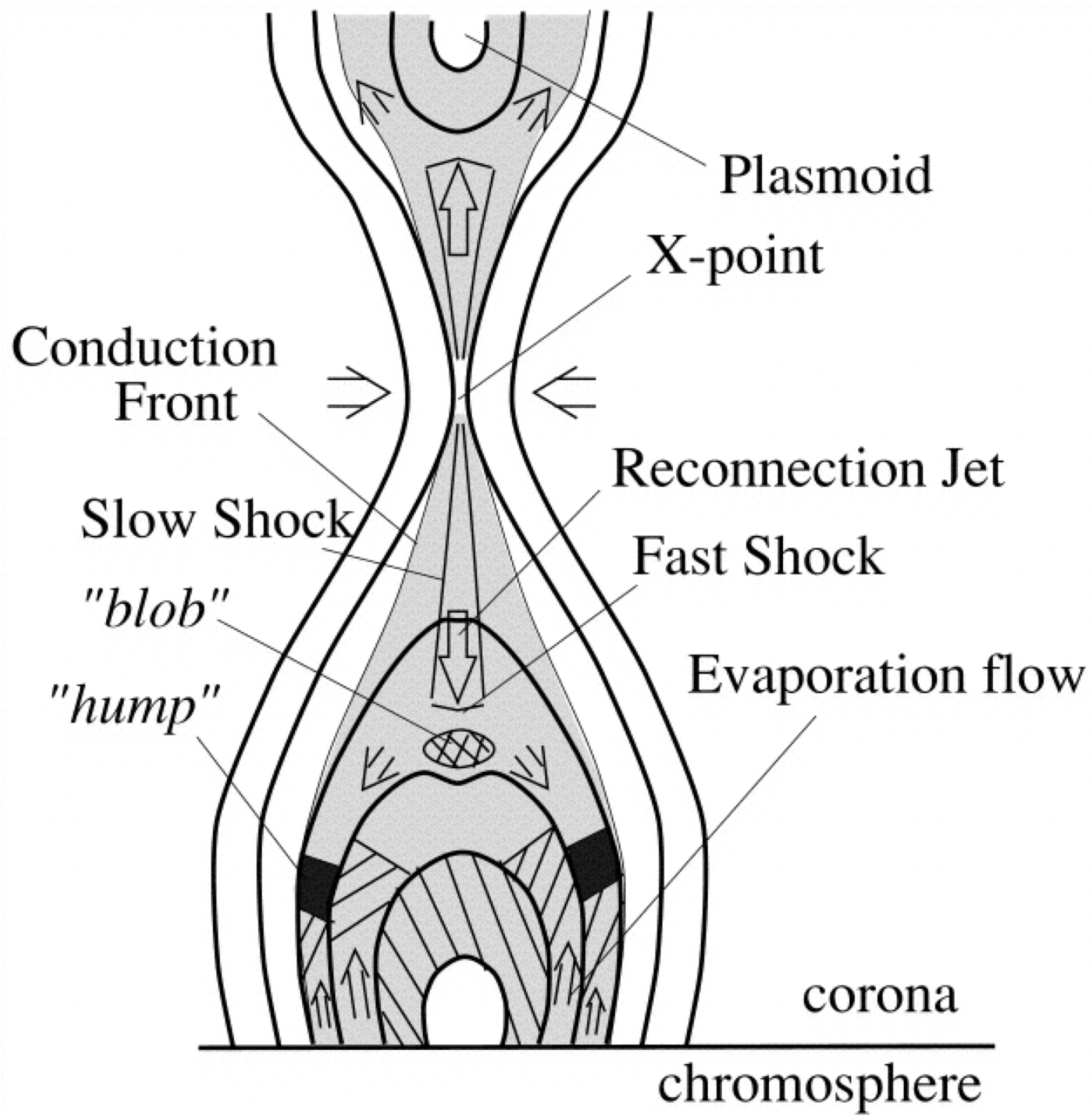
上一个 耀斑的 X射线 图像



2006-12-13 02:02:18

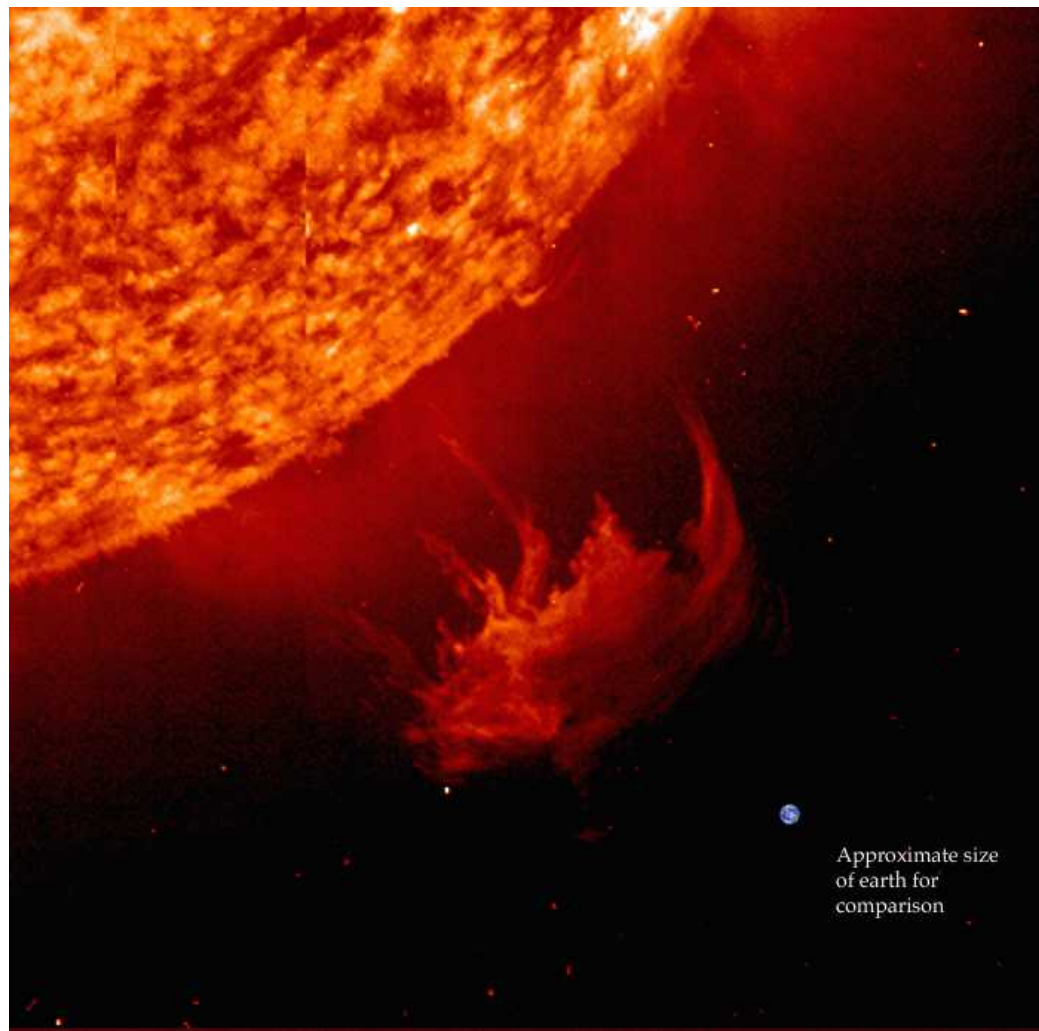
物质的不断蒸发充满磁环





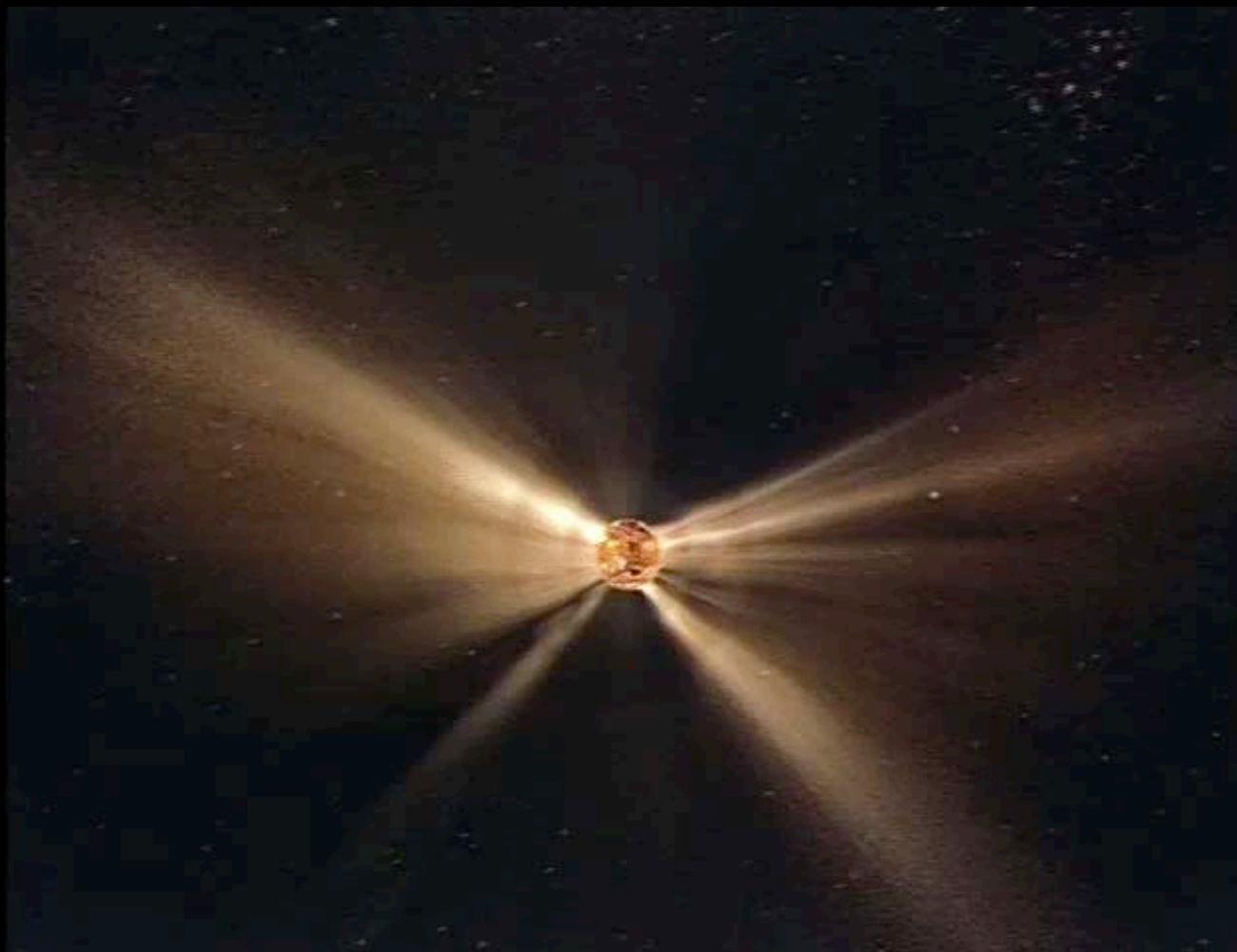
CME

- 大尺度的磁化等离子体从太阳大气中的抛射过程。
- 抛射的磁化等离子体一直传播到行星际空间并撞击太阳系中的行星，是日地空间环境扰动最重要的源之一。
- CME的驱动机制仍未被完全了解，但一般认为正是磁力将CME中的物质推离太阳的引力作用。

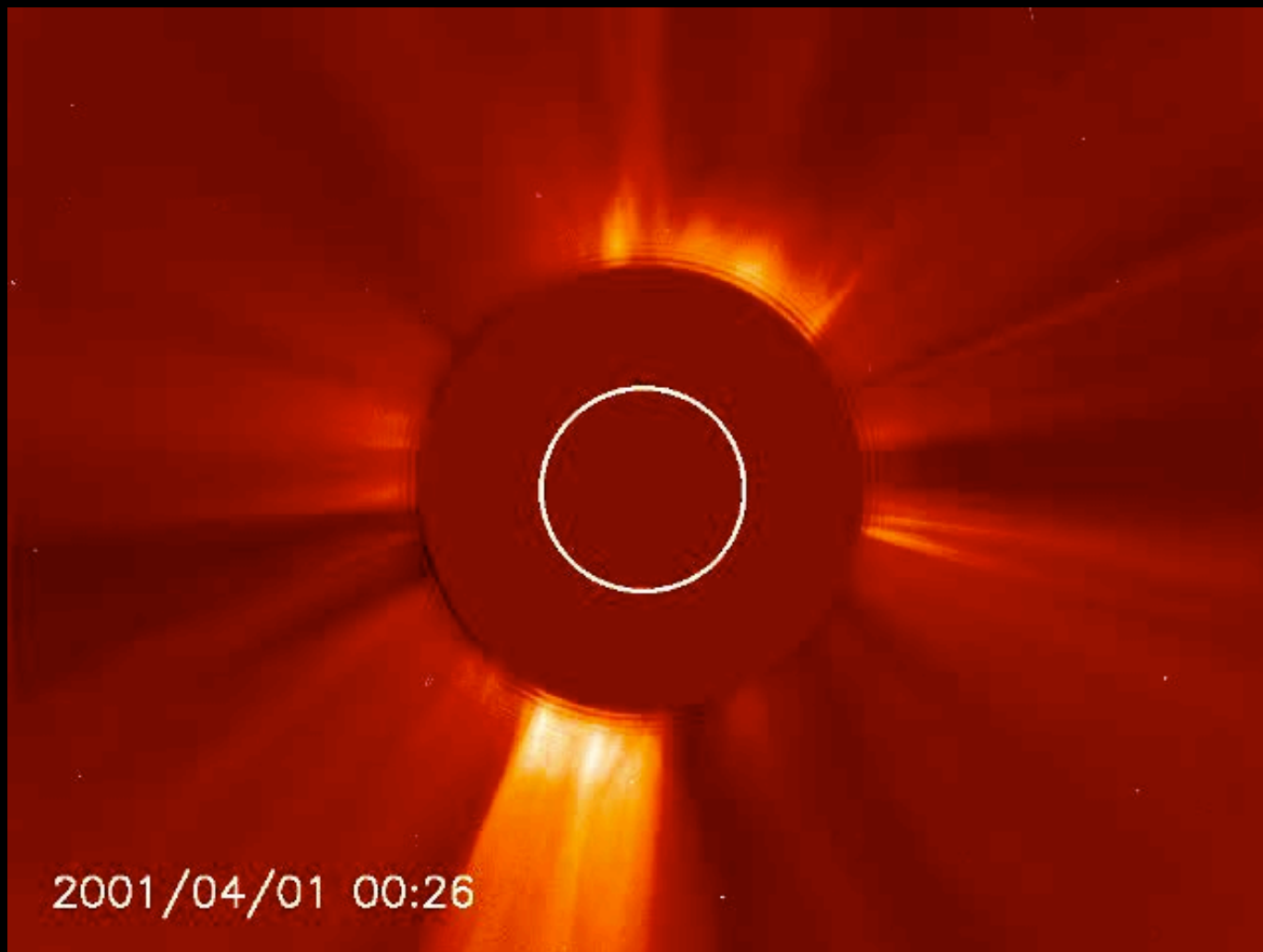


地球和CME大小的比较

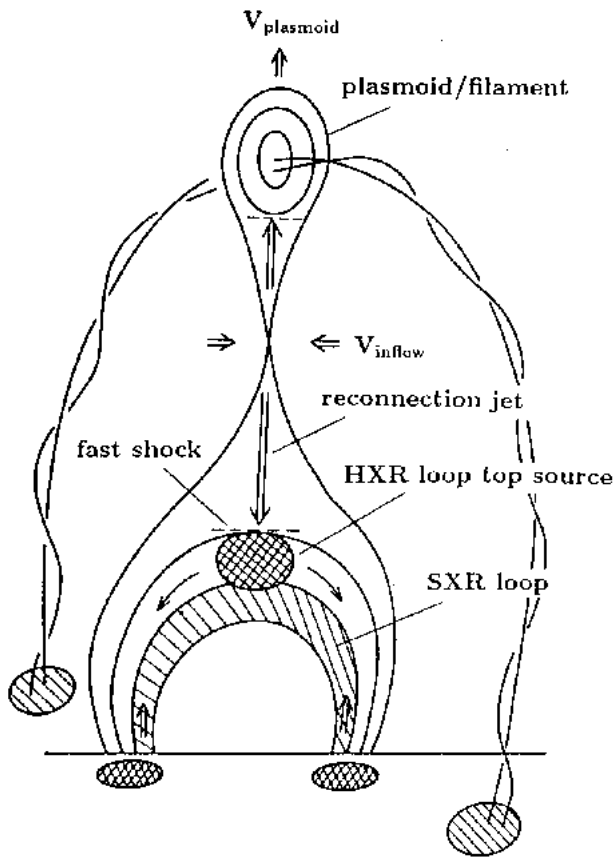
太阳活动向行星际空间喷射物质



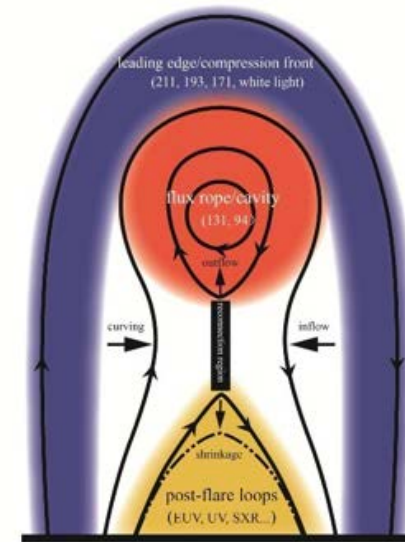
太阳风暴会击中地球



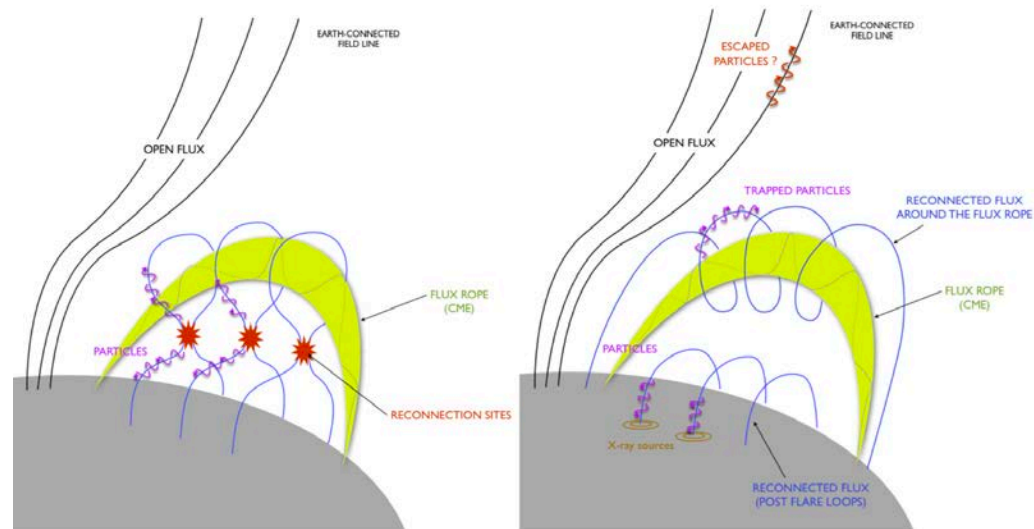
日冕物质抛射模型



(Shibata et al. 1995)

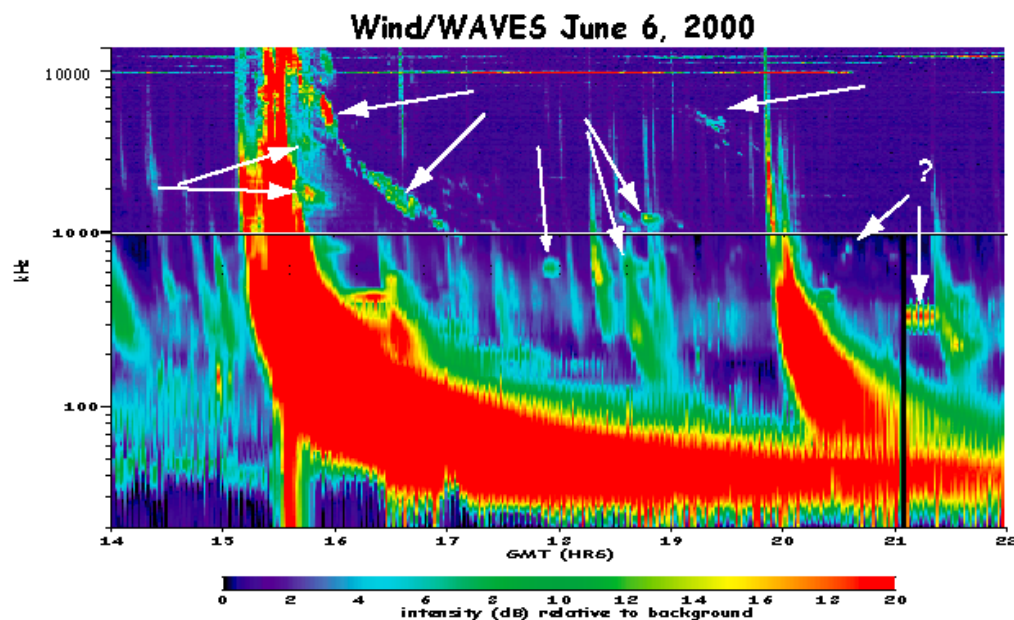
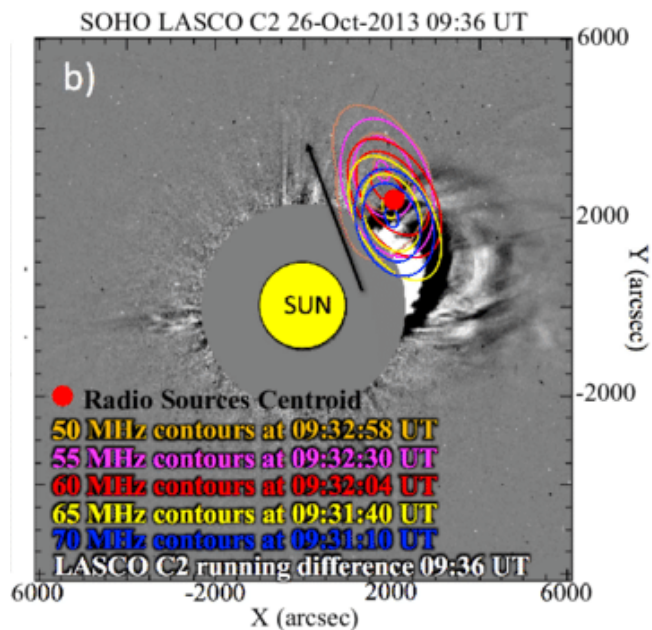
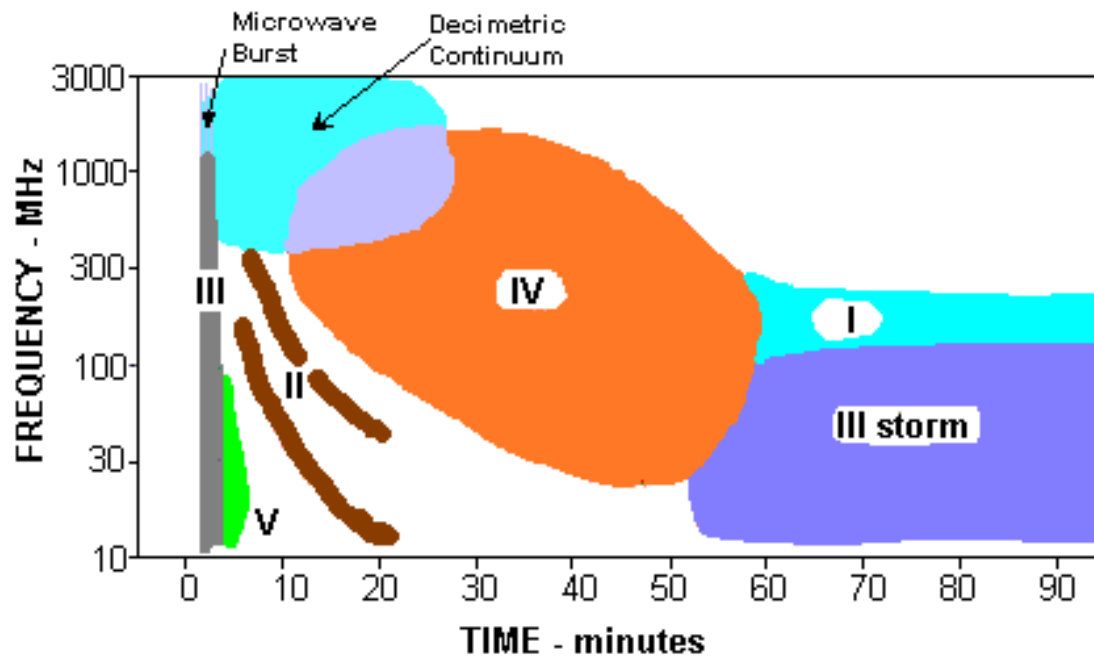


(Cheng et al. 2011b)



(Masson et al. 2013)

射电爆发



太阳的磁场

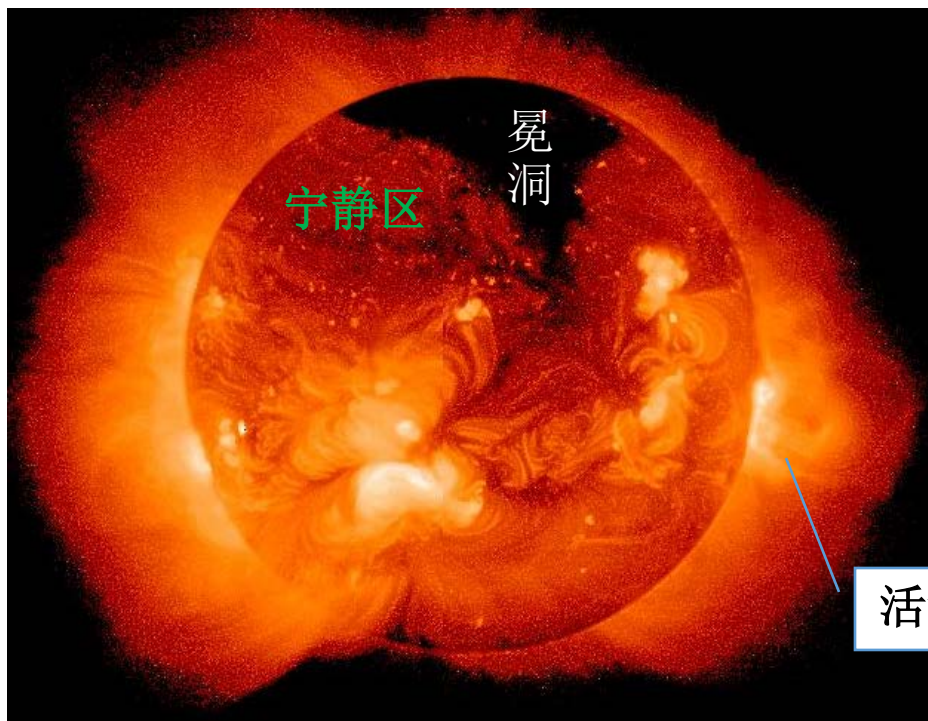


太阳大气中磁场结构示意图

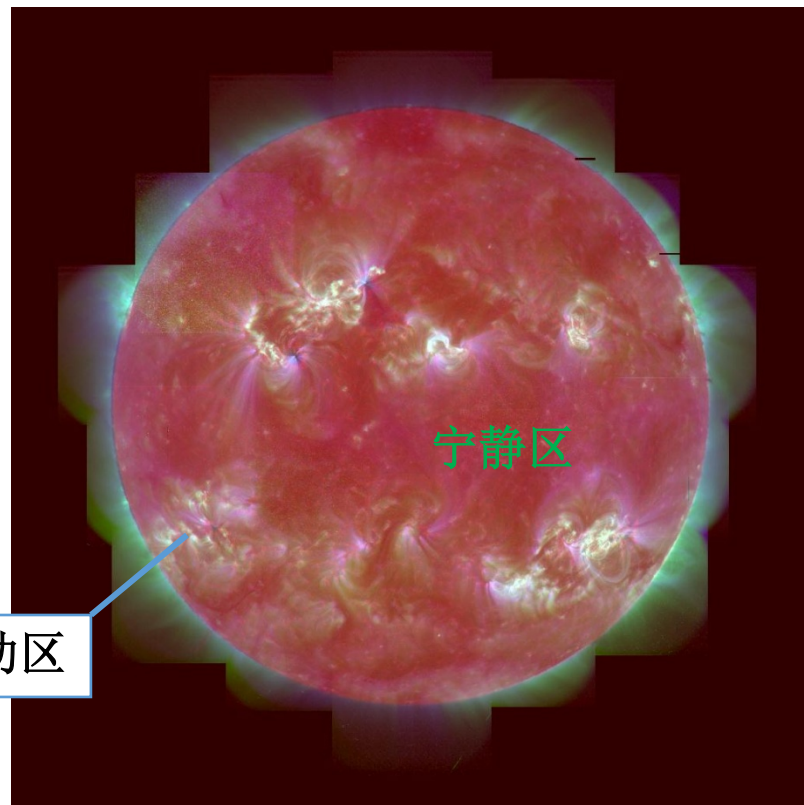
太阳大气中存在丰富的磁场结构，大气中的每一部分都由不同起源和结构的磁力线纵横交错在一起。太阳大气中的各种结构和活动现象均与其磁场的拓扑结构、磁能的存储及释放过程等直接相关。

在2-3个太阳半径以上，由于太阳风的作用，太阳磁场基本为开放场。

在2-3个太阳半径以下，日冕磁场主要由冕洞中开放场和活动区磁环组成；光球磁场则主要由强的黑子磁场，以及极区和宁静区的网络磁场组成，表现为“离散”的分布。



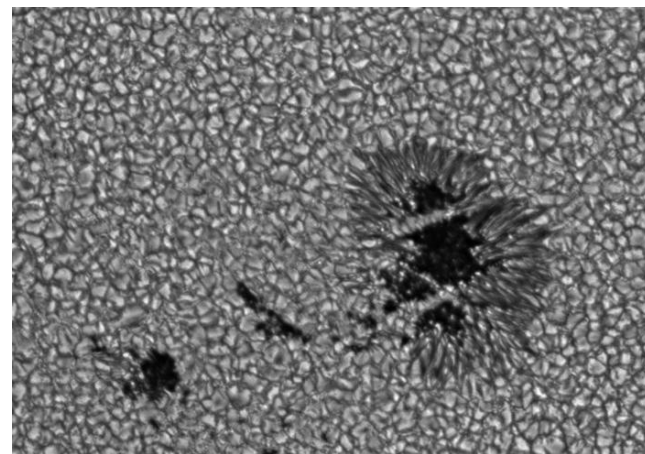
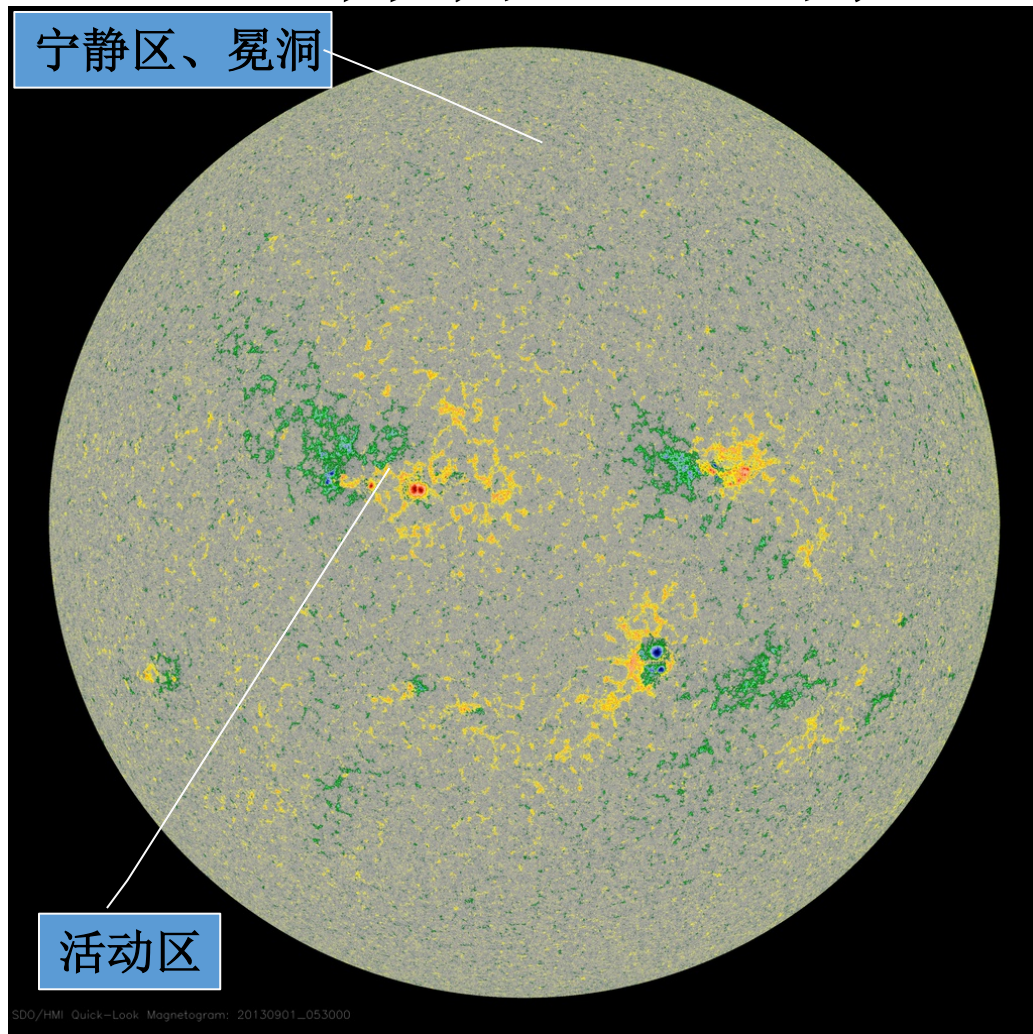
太阳的软X线成像



太阳的极紫外成像

太阳大气中的活动区和宁静区。

1、活动区磁场

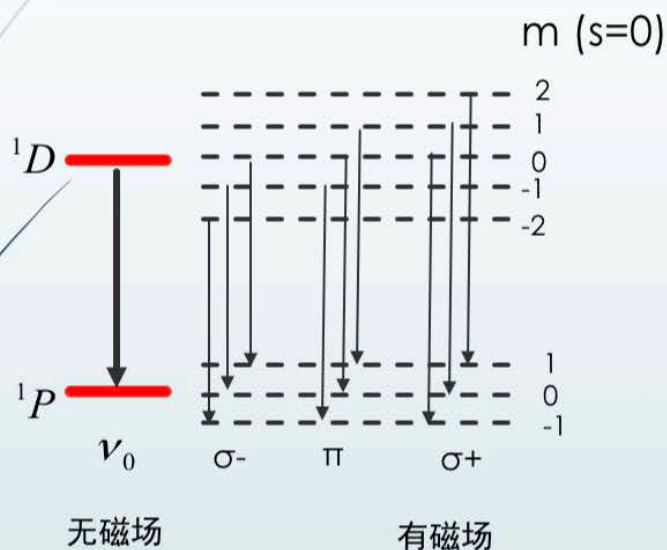


强度	黑子: 1000-4000Gs 色球: 10-200 Gs
极性	多极性, 双极性为主
位置 范围	几万~几十万公里 纬度 < 50度

SDO卫星测得的光球表面磁场

磁场 \ 散射 \ 高能粒子束碰撞 ... --- 各向异性的“场”破坏了原子态的某种简并度

以“磁场”为例：



• **谱线分裂** — 谱线：能级跃迁。

能级分裂后：**单**次跃迁变为**多**次跃迁，单条谱线变为多条谱线。（注意：允许跃迁次数 $\neq$ 谱线条数；例如左图 9种跃迁，但只有3条谱线）

$$\omega = \frac{E_{n,l,m} - E_{n',l',m'}}{\hbar} = \omega_0 + \frac{eB_s}{2\mu c} \Delta m \xrightarrow[\text{跃迁规则}]{(\Delta m = +1, -1, 0)} \omega = \omega_0, \omega_0 \pm \frac{eB_s}{2\mu c}$$

或写为大家熟悉的样子（裂距）

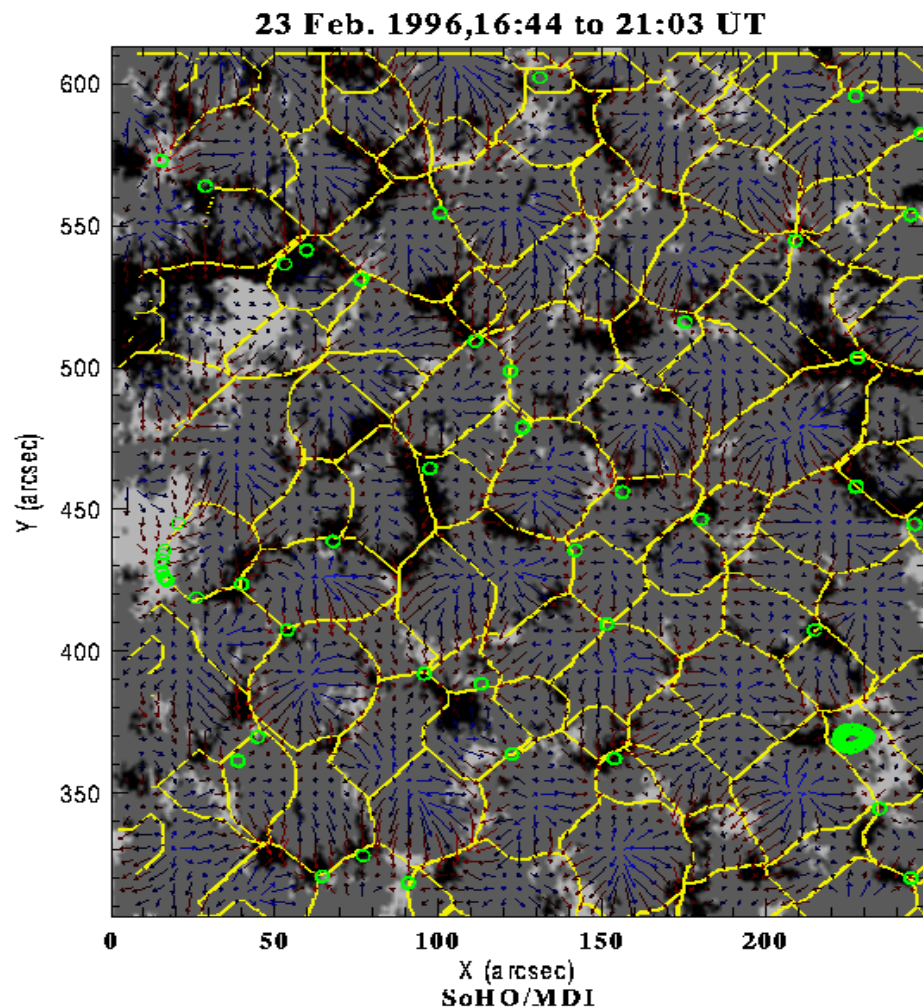
$$\lambda = \lambda_0; \lambda_0 \pm \lambda_B$$

$$\lambda_B = \frac{\lambda_0 v_L}{c} = 4.67 \cdot 10^{-13} g \lambda_0^2 B$$

（两个 σ 分量的波长裂距哈！）

Zeeman 裂变或效应...此处省略1000字详情

2、网络磁场



观测的光球**网络磁场**：箭头代表流向；黑白代表磁场的极性和强度，灰色区域磁场最弱。

磁元—太阳表面很小区域的高强度磁通量管，半径约100-300公里，磁场强度1000-2000Gs.

“离散”的多极性分布

在一般宁静区：两种极性的磁流相当；

在冕洞：一种极性为主。

3、极区（冕洞）磁场

强度	平均1-5 Gs
极性	一种极性为主，南北两极极性相反
位置	纬度 > 55度

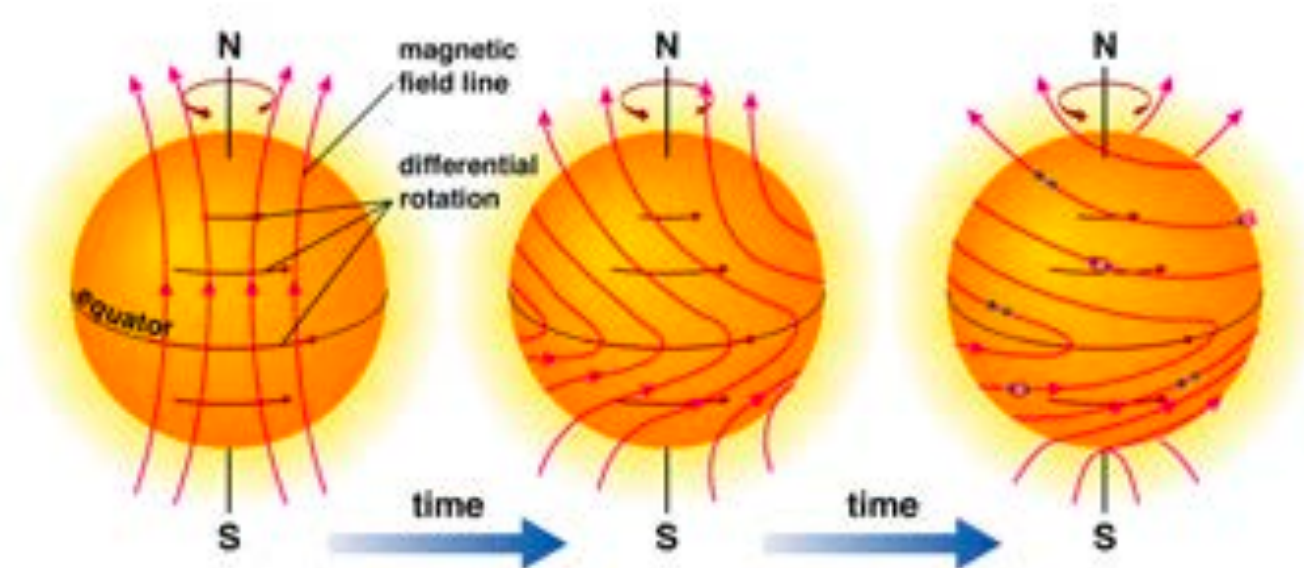
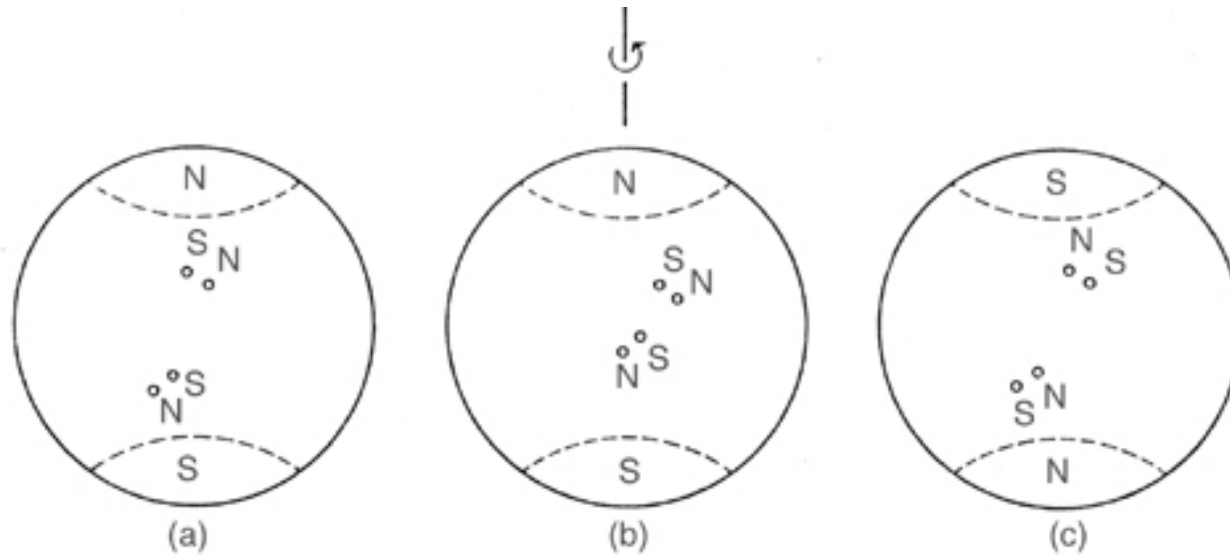
- 存在22年的演化周期，平均11年两极区磁场极性反转一次

1957-1958，北极 N→S, 南极 S→N

1971-1972，北极 S→N, 南极 N→S

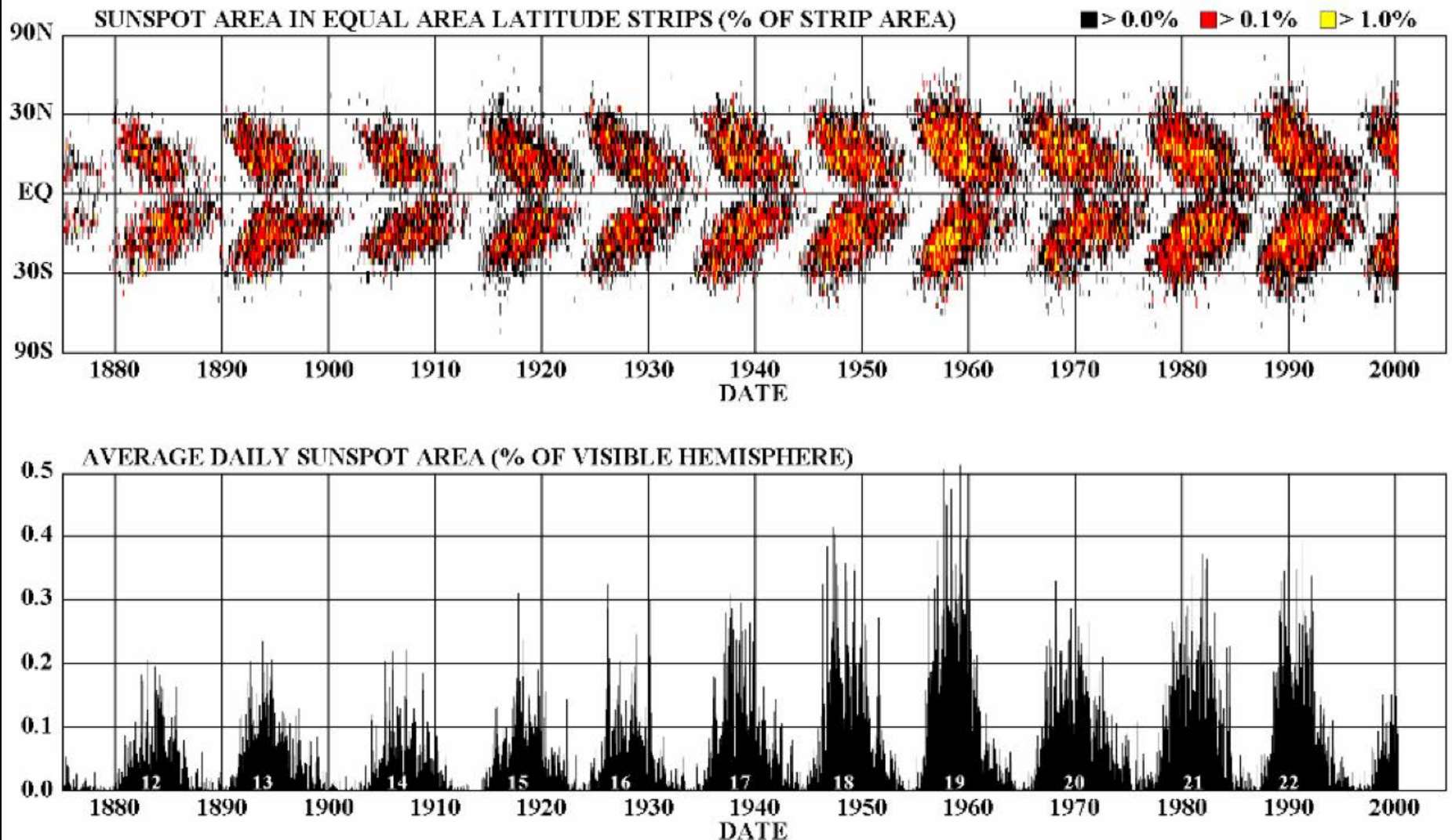
22-years Solar Cycle

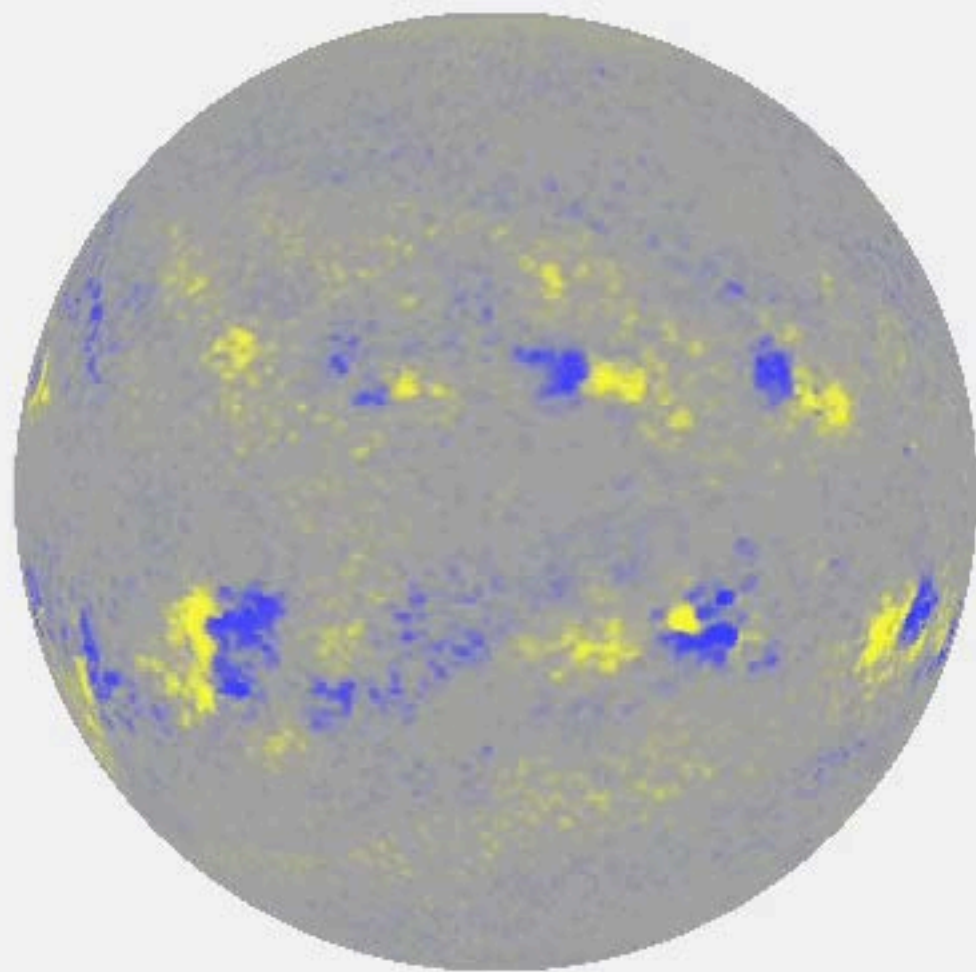
Based on Leading Sunspot Magnetic Polarity

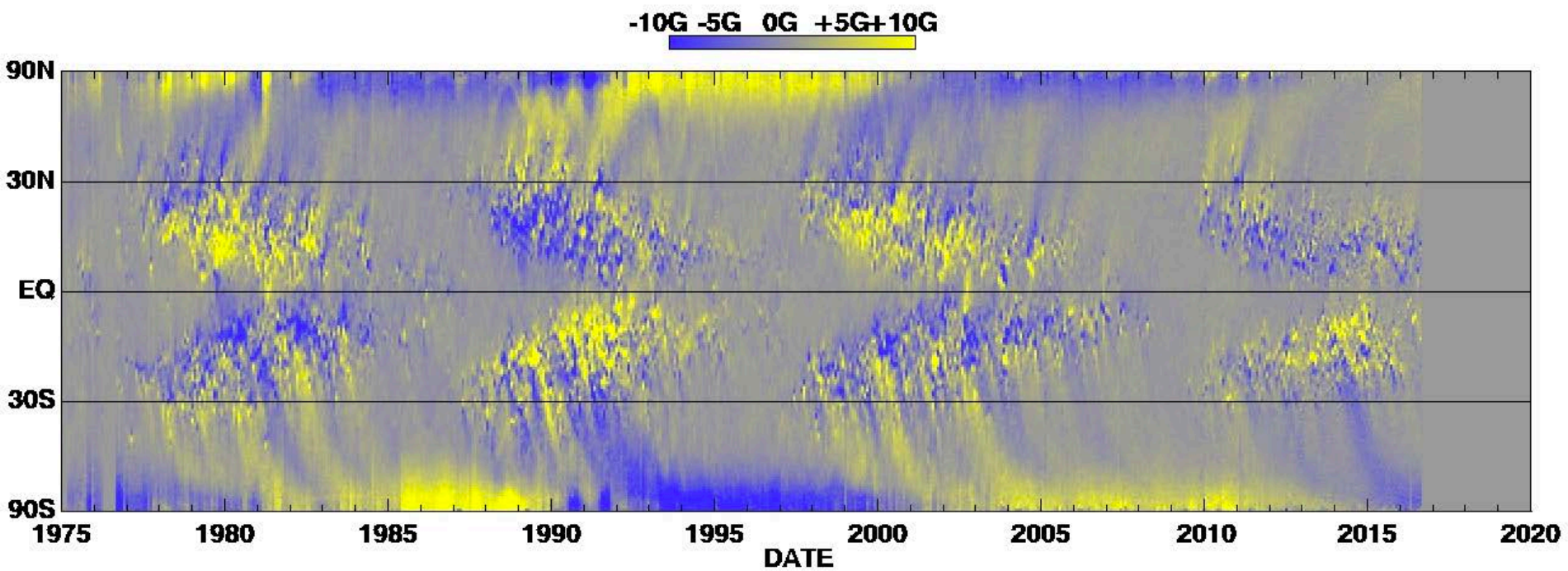


太阳黑子有11年周期变化

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS

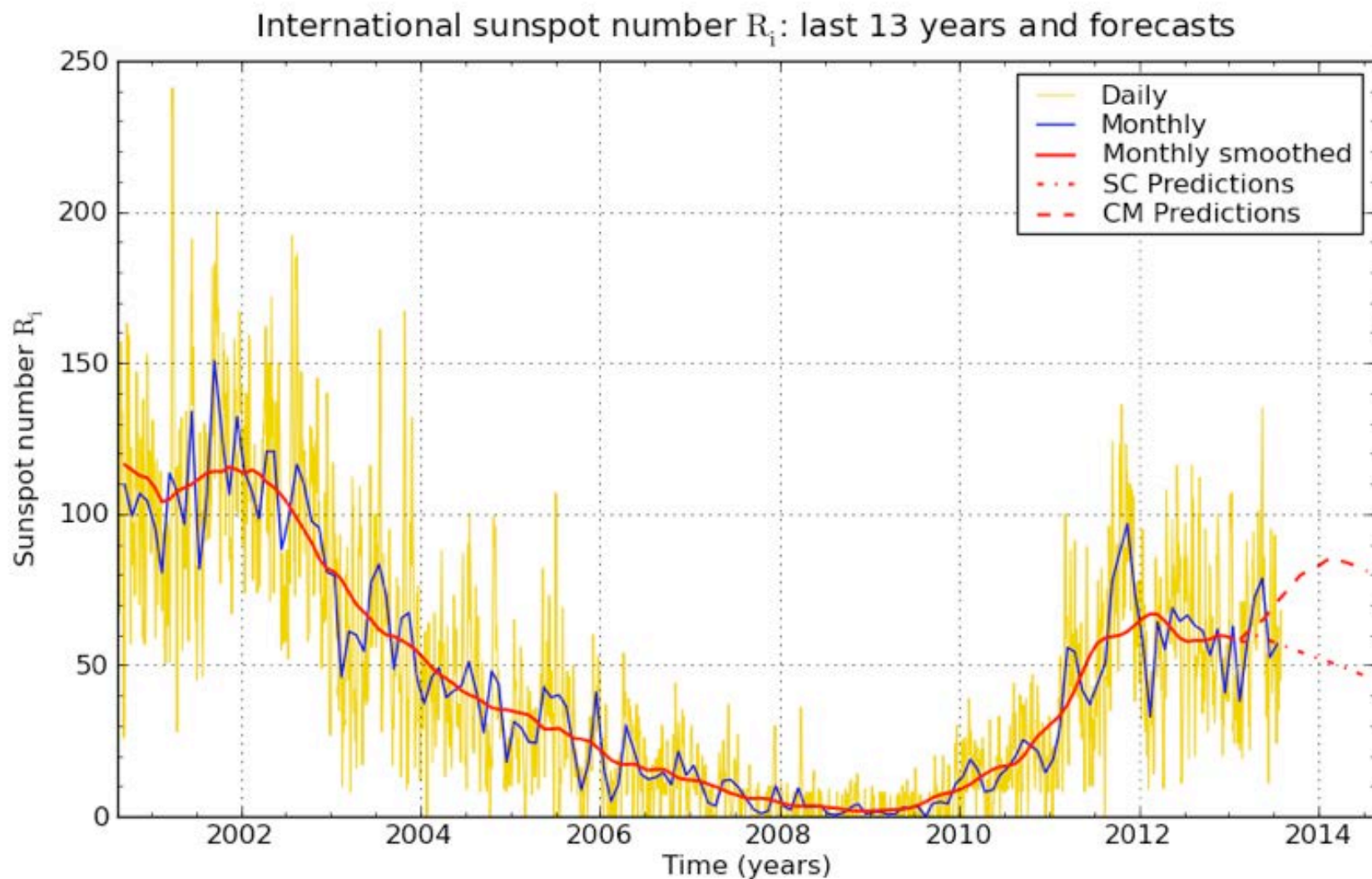




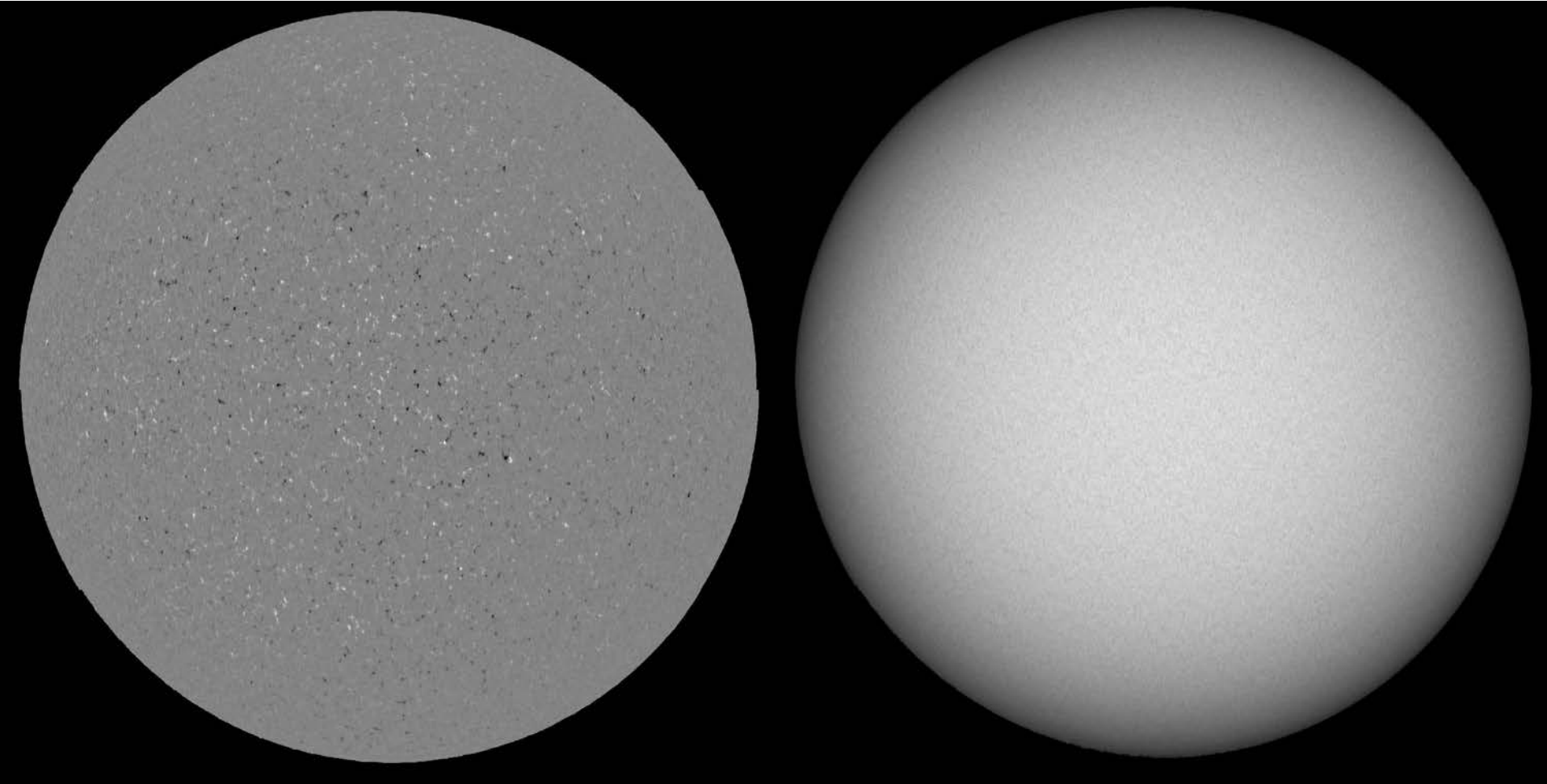


Hathaway NASA ARC 2016/10

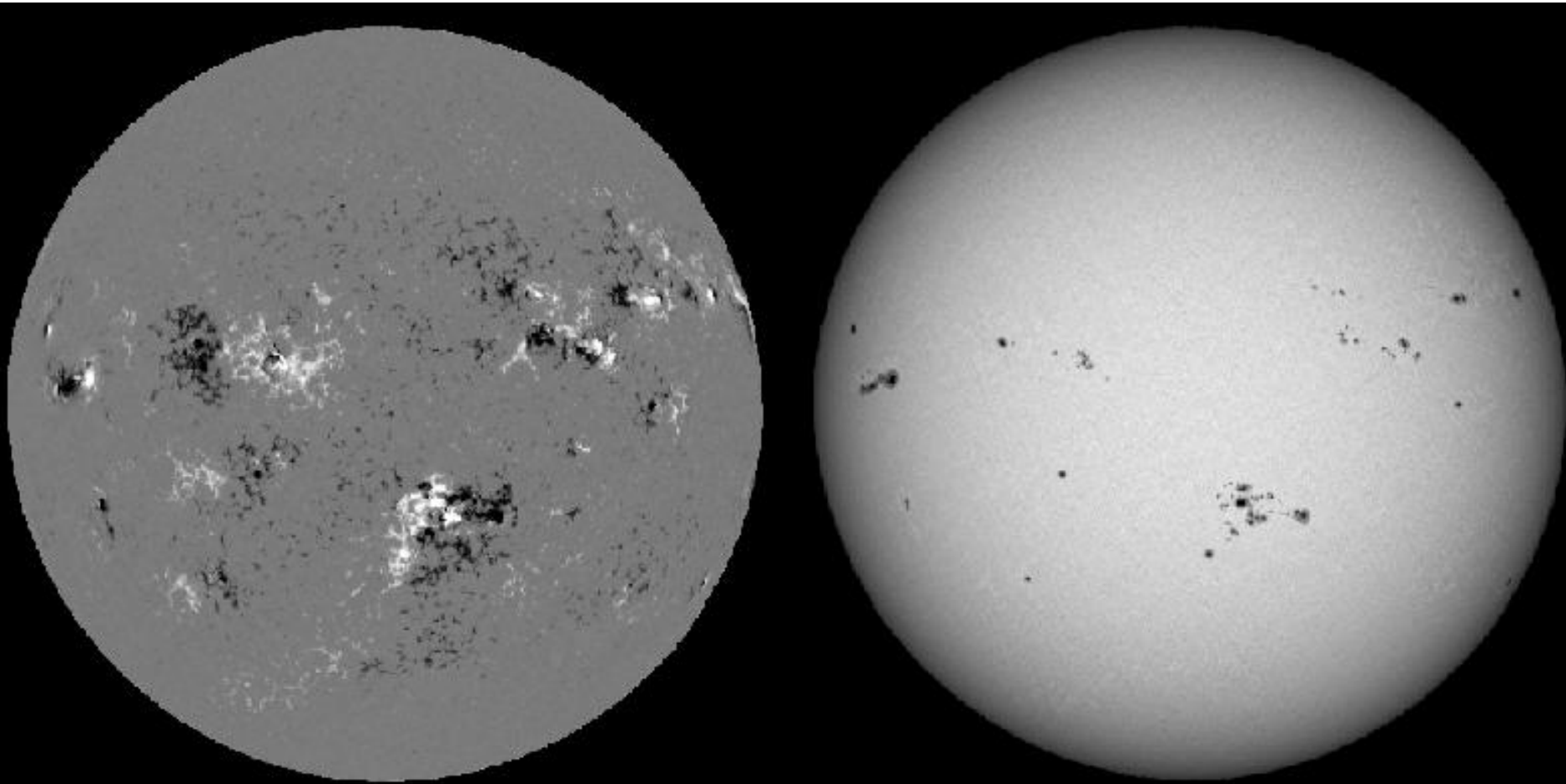
24周峰年从2008年1月4日开始

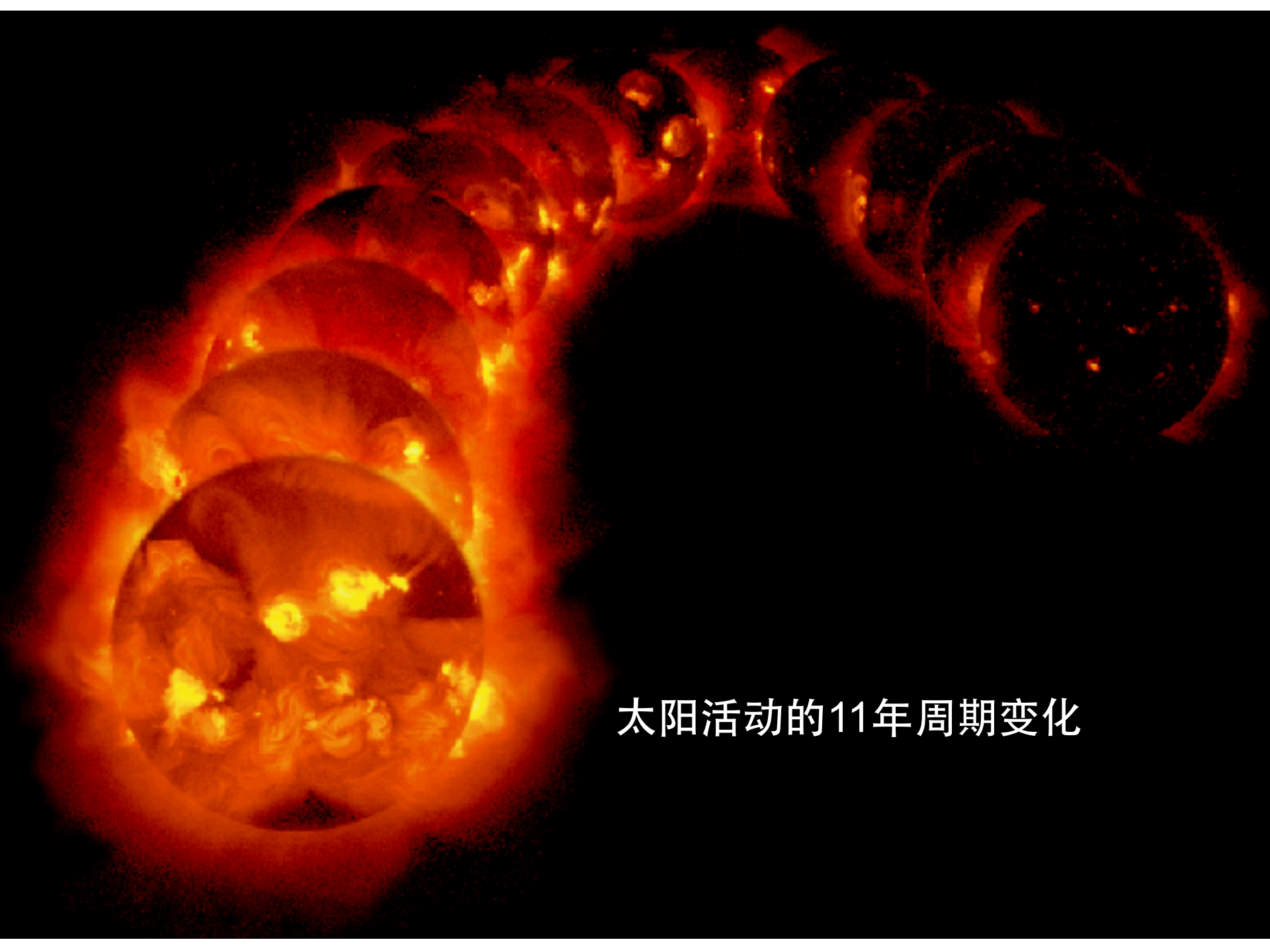


太阳极小年



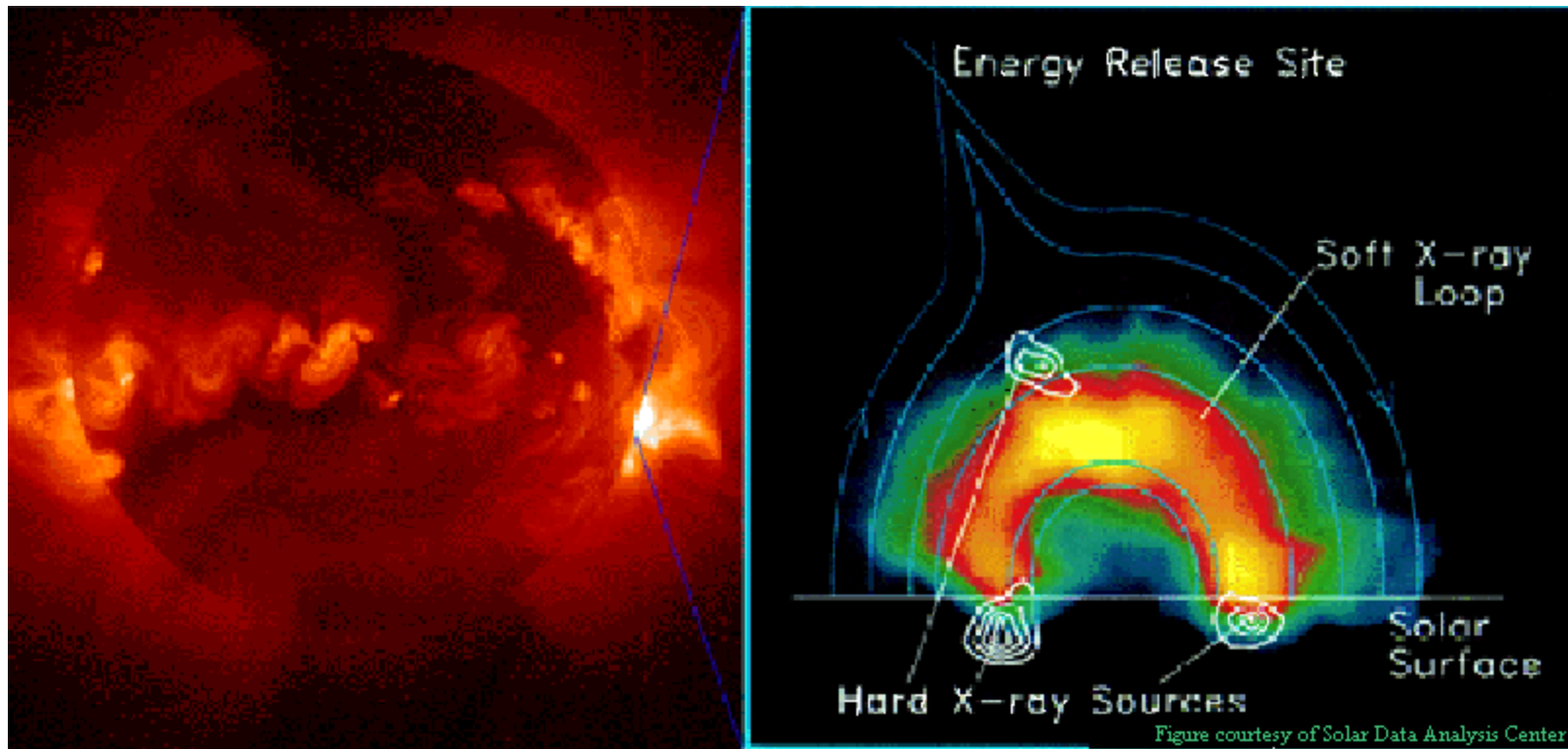
太阳极大年





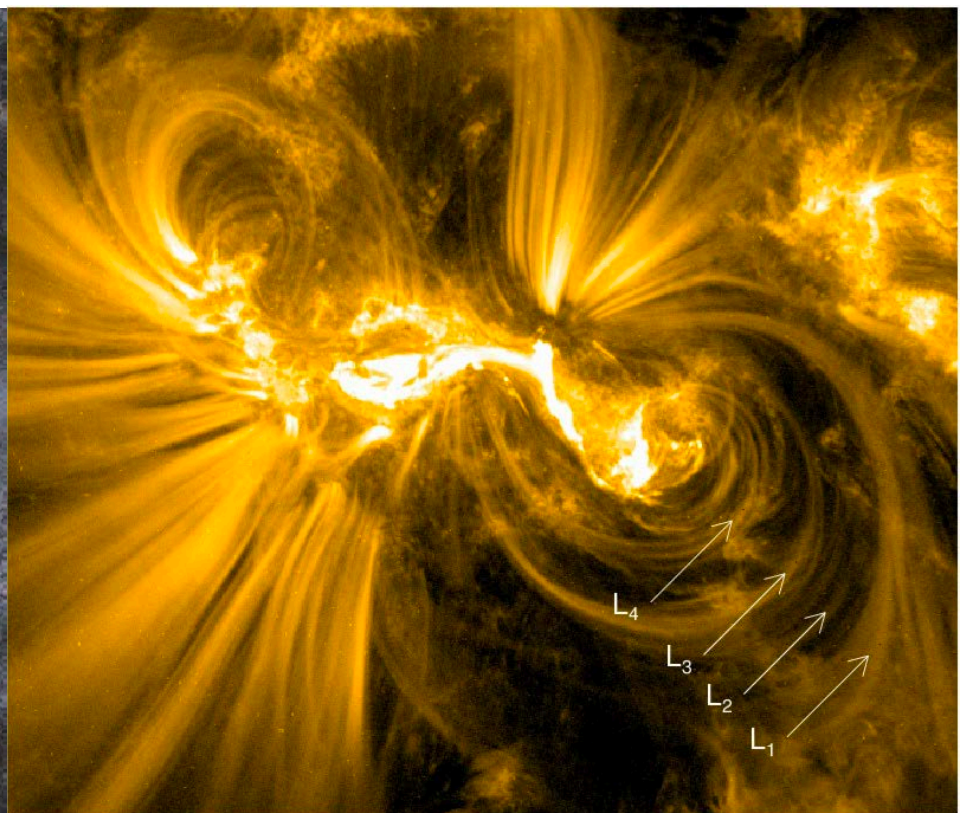
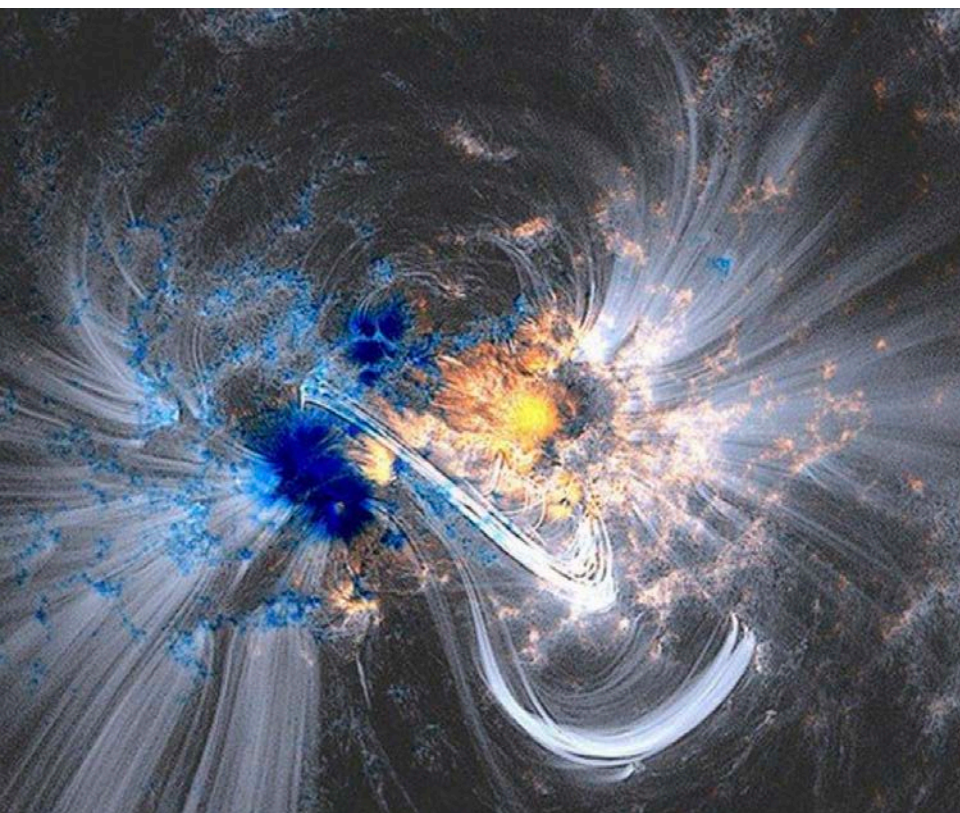
太阳活动的11年周期变化

4、磁环或冕环 (物理本质？)



日本阳光卫星软X射线成像仪观测到的日冕及其环状结构。图中蓝线为磁场结构的示意，白色等值线为耀斑爆发时观测到的硬X射线强度分布。目前，我们还不能直接测量日冕的磁场。

Coronal Loops in EUV passbands

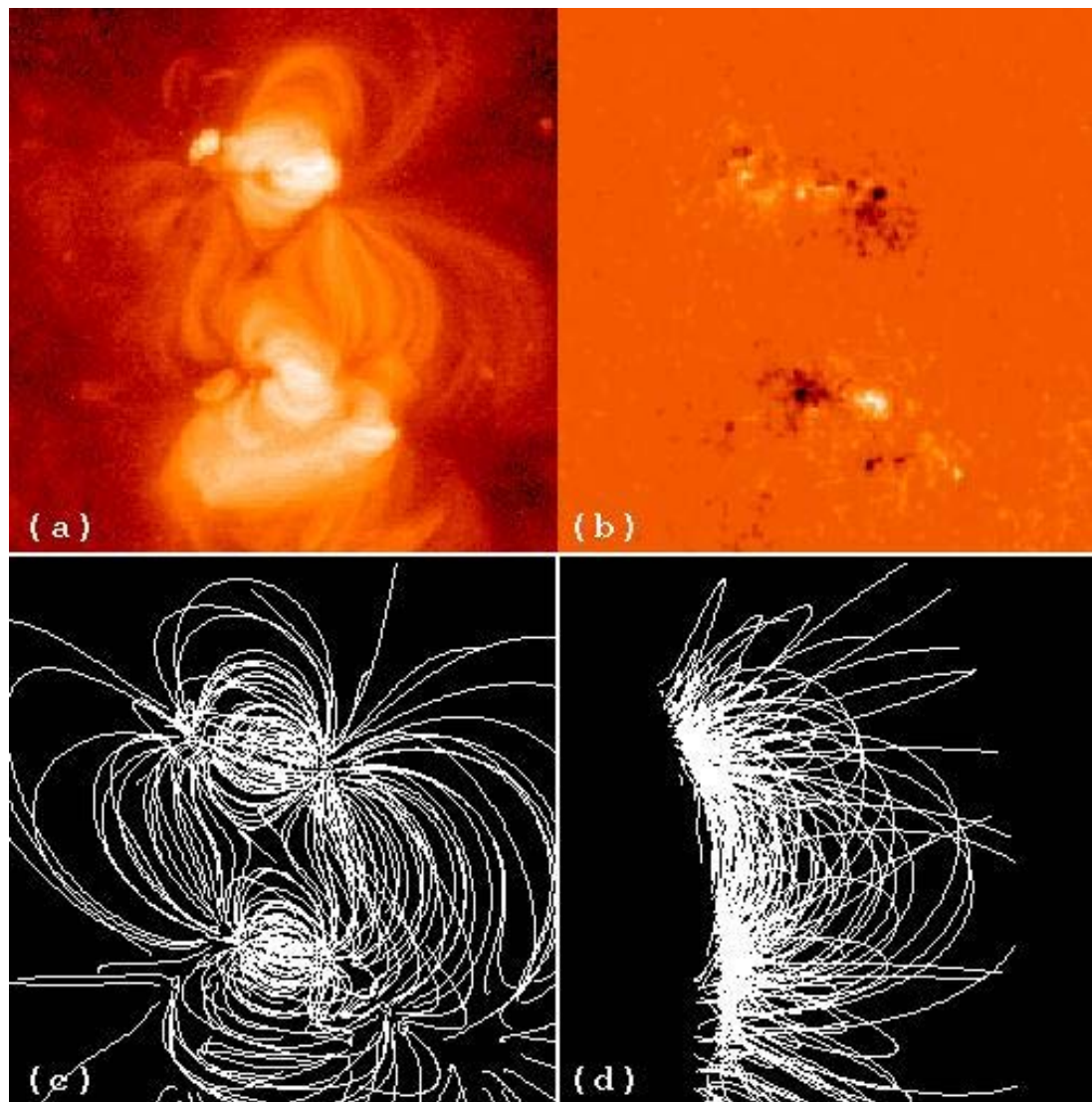


5、磁场与等离子体的耦合关系

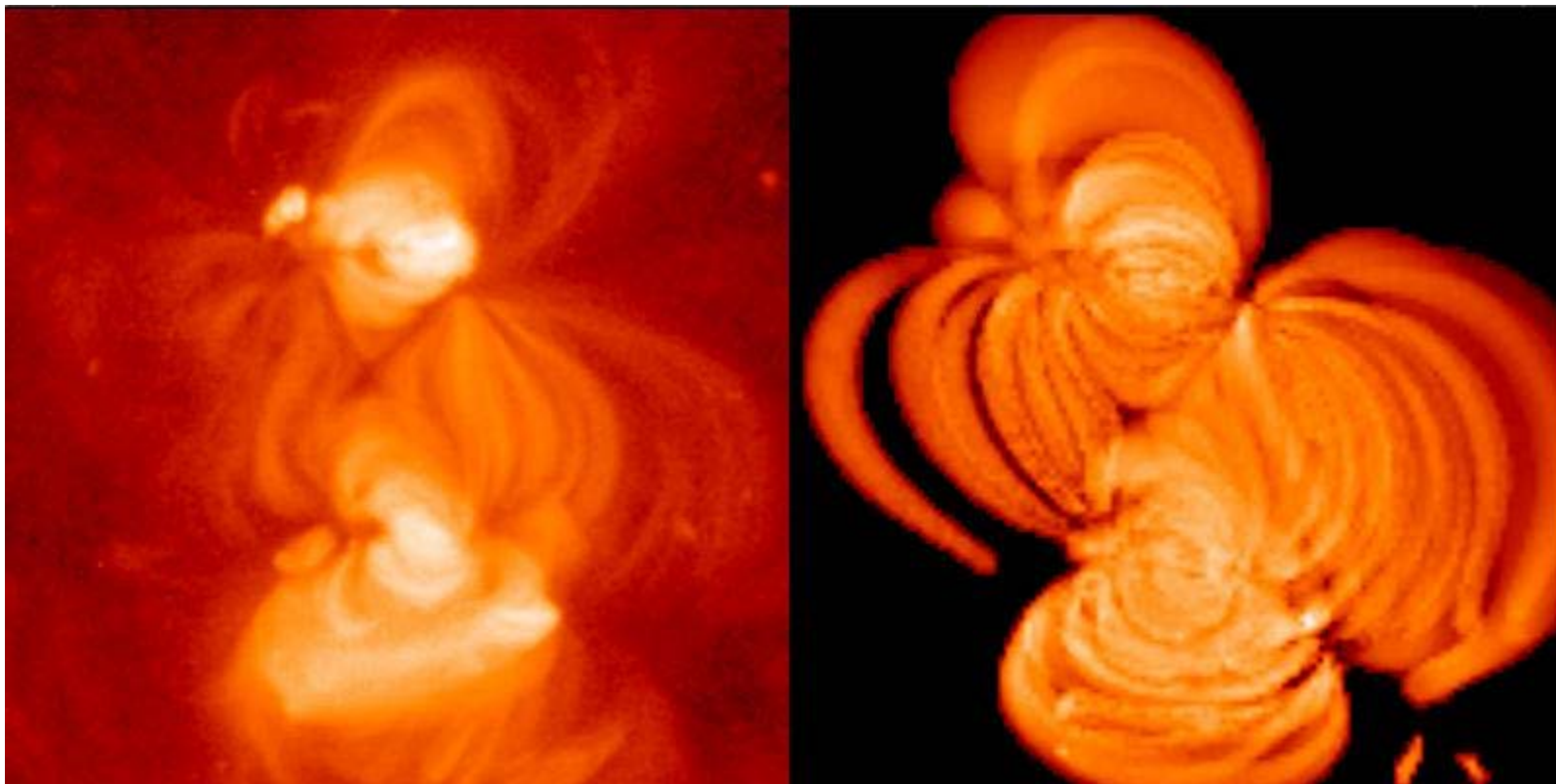
$$\beta = \frac{P}{B^2 / 2\mu_0} \quad \begin{array}{ll} > 1, & \text{光球} \\ \ll 1, & \text{中、低日冕, 黑子, 活动区} \\ \approx 0.1 \sim 1 & \text{高日冕, 行星际太阳风} \end{array}$$

光球：等离子体运动带动磁场运动

中低日冕：磁场位型和能量释放决定等离子体的行为



由观测的光球磁场（右上） 数值外推计算得到的日冕
磁场结构（下） 和观测冕环结构（左上）的对比图。



左图为观测的冕环图象，右图为根据外推磁场得到的冕环观测想象图。

如何由观测的光球磁场外推计算日冕的磁场，仍是太阳物理的重要问题之一。

PFSS模型

磁场
方程

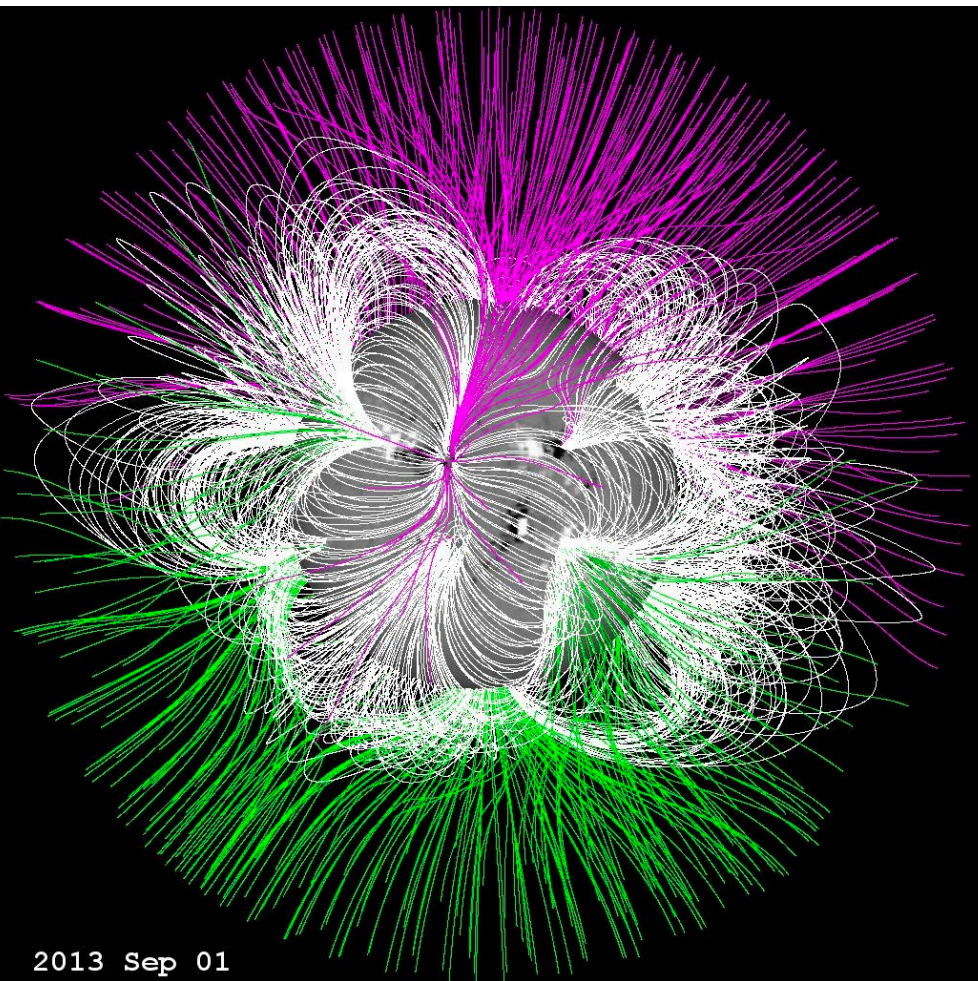
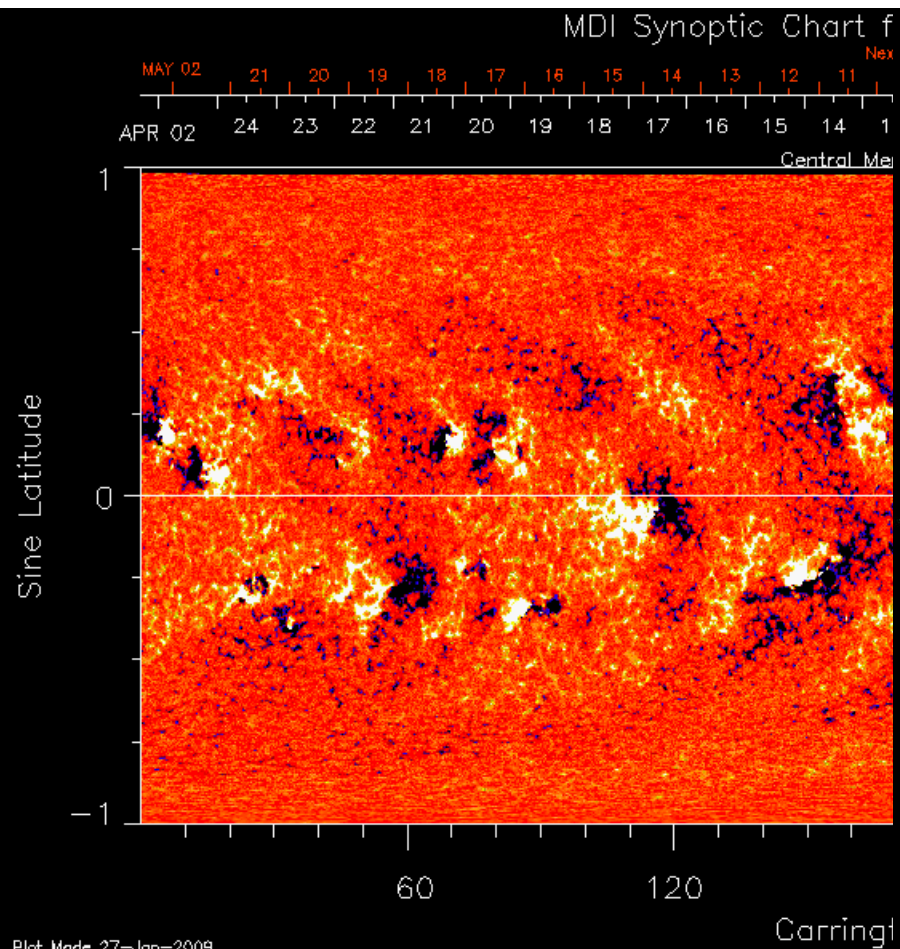
$$\vec{B} = -\nabla\Psi,$$

$$\nabla^2\Psi = 0.$$

边界
条件

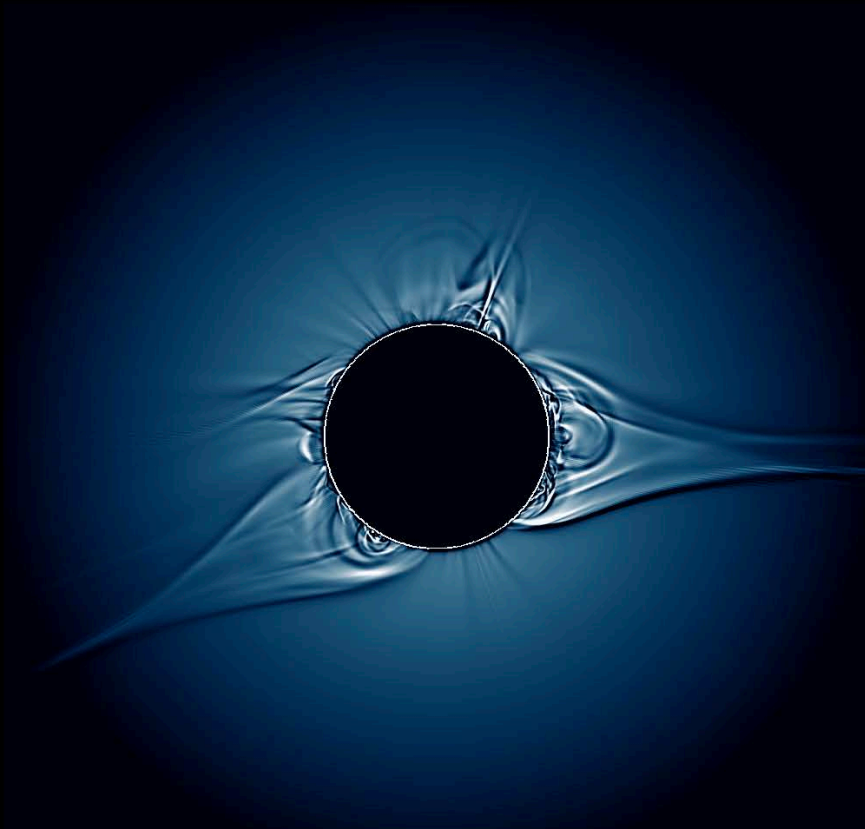
B (R=1.0Rsun) from Synoptic map
B becomes radial at 2.5Rsun

全球磁场结构



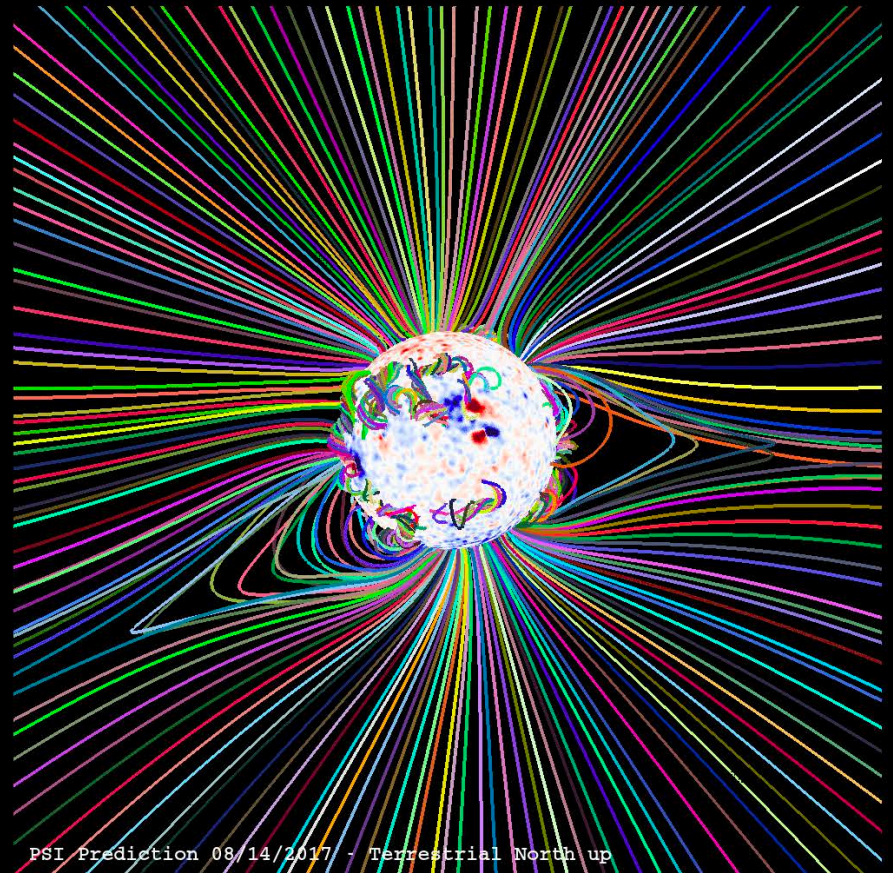
Observations VS Simulations

Polarized Brightness (Wavelet Filtered)



PSI Prediction 08/14/2017 - Terrestrial North up

Magnetic Field Lines



PSI Prediction 08/14/2017 - Terrestrial North up

Project: 三维全球磁场计算和可视化

- **Method 1**

SSW PFSS package

<https://www.lmsal.com/~derosa/pfsspack/#sect1.2>

- **Method 2**

[https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/modelinfo.php?
model=PFSS](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/modelinfo.php?model=PFSS)

