

# 天文学导论 (III) 恒星

第06讲：太阳

第07讲：恒星

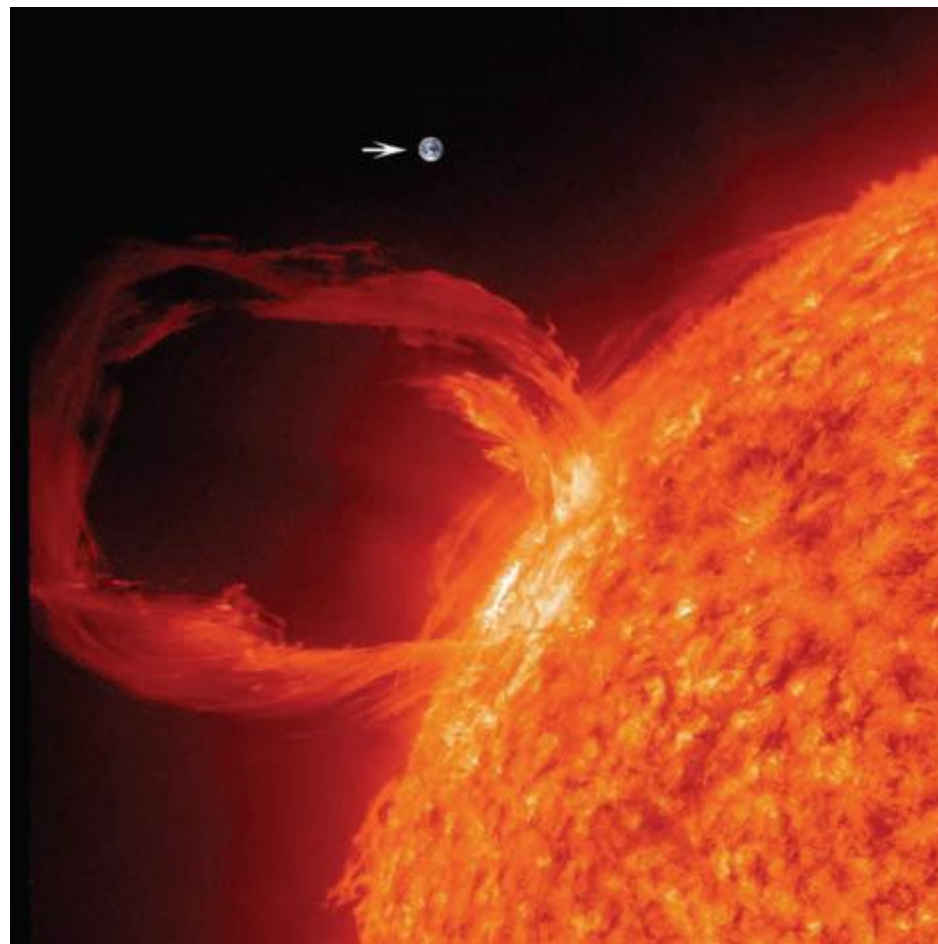
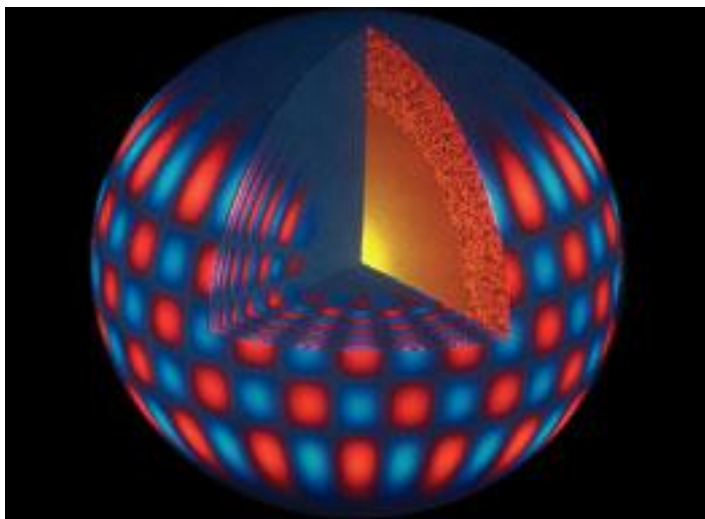
第08讲：星际介质与恒星形成

第09讲：恒星的演化

第10讲：致密星

# 天文学导论

## 第06讲 太阳



# 教材学习

- Chapter 14: Our Star—The Sun

# 本讲内容

1. 太阳为什么是稳定的？
2. 太阳为什么（怎样）发光？
3. 能量是怎样从太阳内部转移到太阳表面的？
4. 怎样知道太阳内部发生了什么？
5. 太阳外部是什么？
6. 太阳大气为什么活动？

# 学习目标

- 决定太阳结构的力的平衡
- 太阳核心能源产生的过程以及维持时长
- 太阳内部的物理模型，能量从太阳核心到太阳表面的  
运输方式
- 太阳中微子和太阳表面日震的观测如何检验太阳内部  
的模型
- 太阳活动的周期，与太阳磁场变化的关系

# 太阳作为天文学的标准

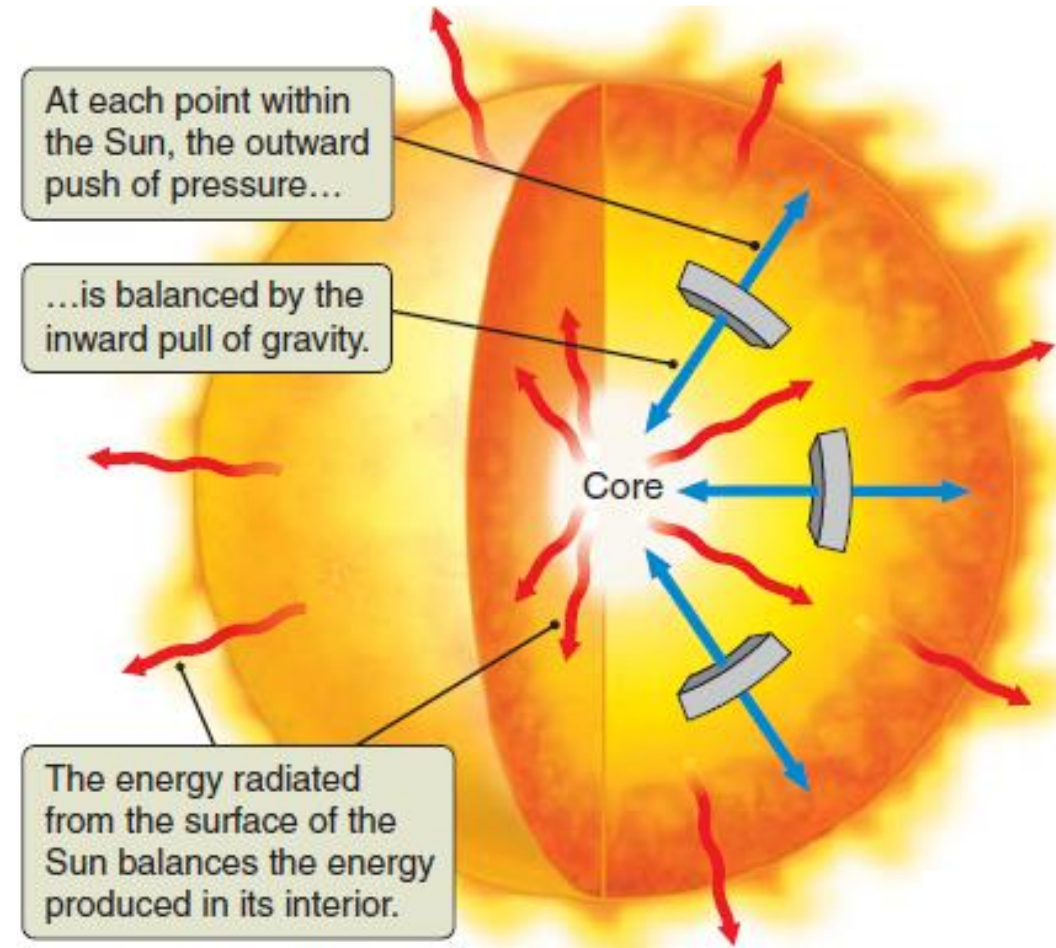
- 太阳的质量：  $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ 
  - $\sim 3 \times 10^5 M_{\text{Earth}}$
- 太阳的半径：  $R_{\odot} \sim 7 \times 10^5 \text{ km}$ 
  - $\sim 100$  倍地球半径
  - 体积 $\sim 130$ 万倍地球
- 太阳的光度：  $L_{\odot} \sim 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ 
  - $\sim$ 地球人类50万年的用电量
- 太阳的化学元素丰度：  $Z_{\odot} \sim 2\%$ （质量）重元素

# 1、太阳为什么是稳定的？



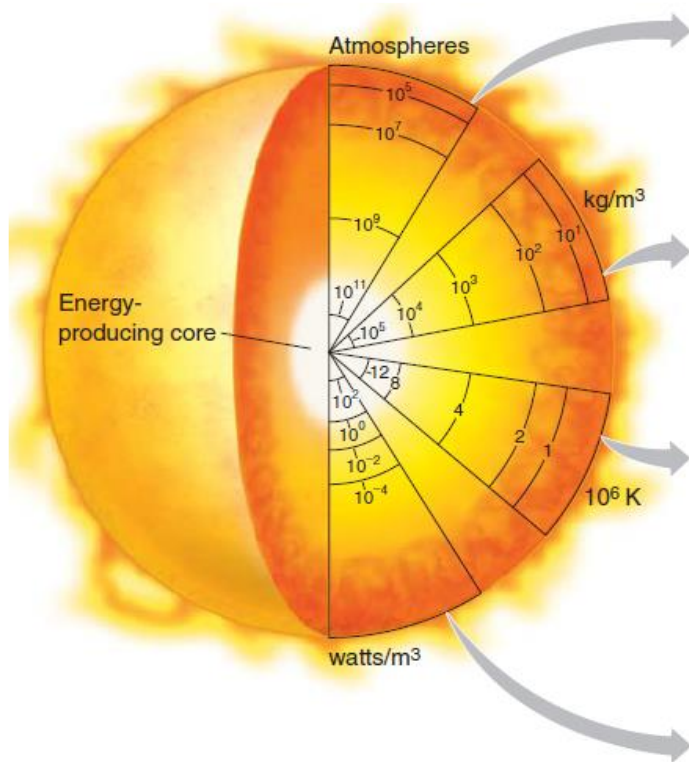
# 太阳的（动态）平衡

- 流体静力学（引力）平衡
- 能量平衡

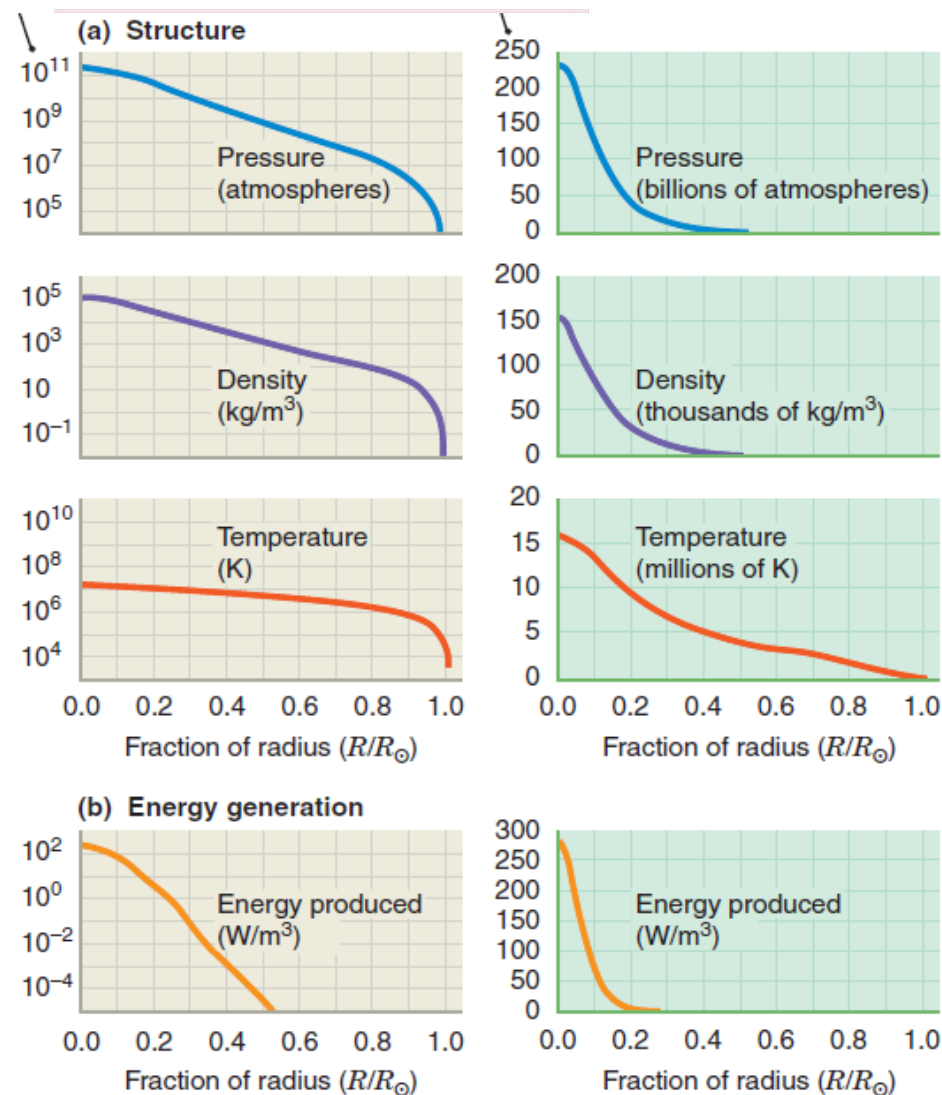




# 太阳的结构是向外压力与向内引力平衡的结果



- 压力（密度与温度）向太阳中心增加
- 能量产生于核心

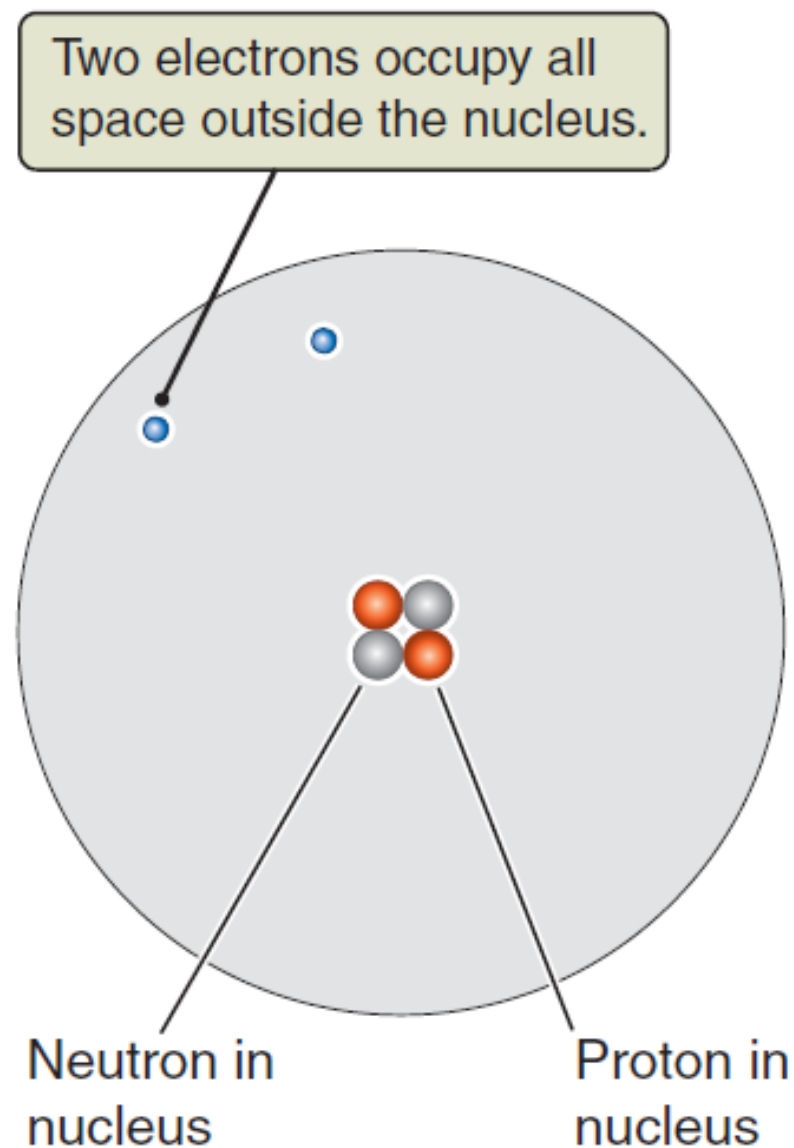


## 2、太阳为什么（怎样）发光？

- 古人：煤或木的化学燃烧
- 19世纪晚期：引力坍缩，维持太阳~2千万年
- 1905年， $E=mc^2$ 
  - 微小的质量蕴含巨大的潜在能量
- 1930s，太阳通过热核聚变把（亏损的）质量转化为能量

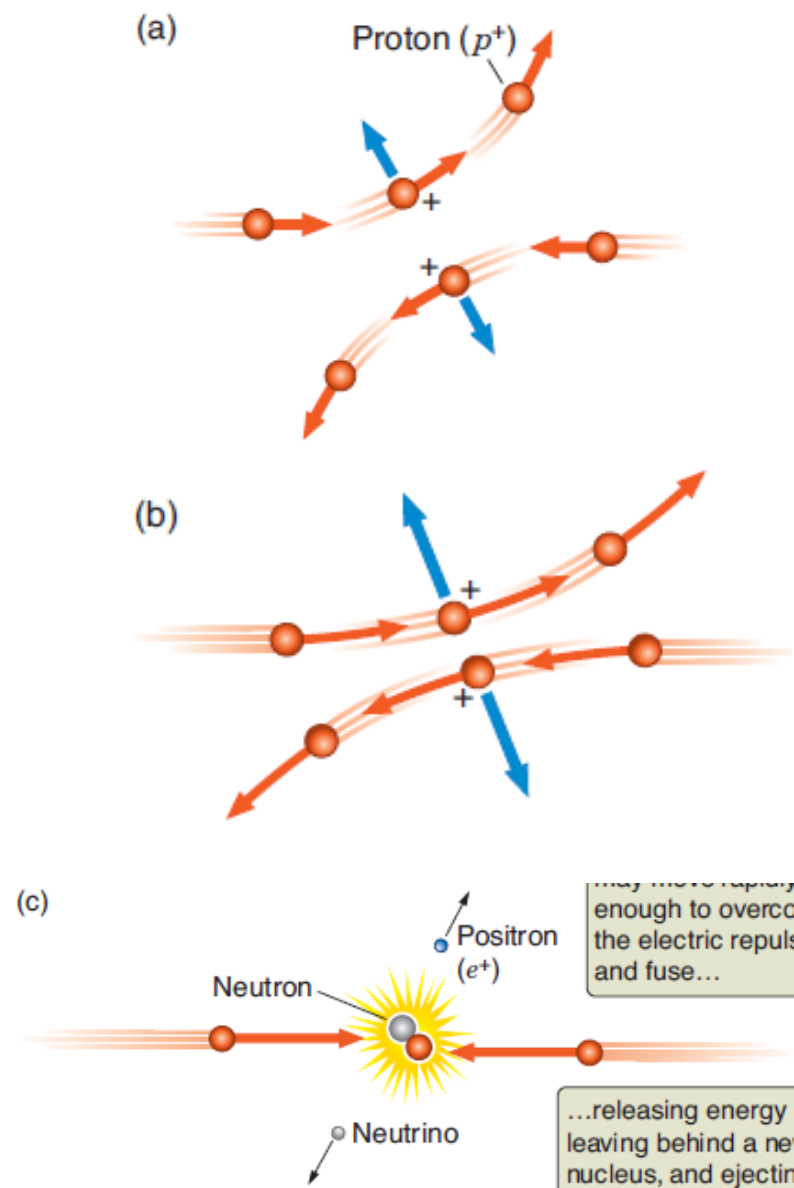
# 太阳的能量来自热核聚变

- **核聚变**是把两个质量较小的原子核结合为一个质量较大的原子核的过程
- **强核力**把质子和中子“胶合”为原子核
- 强核力仅在  $\sim 10^{-15}$  米尺度上起作用



# 电排斥力是核聚变的障碍

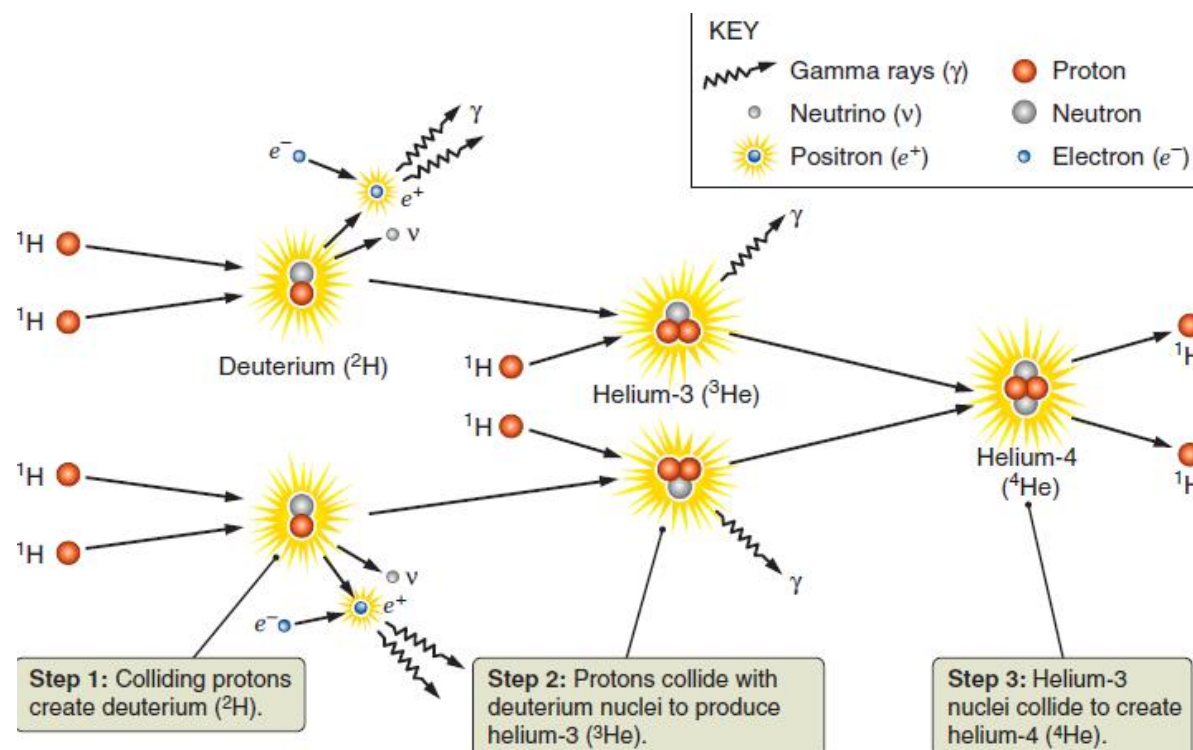
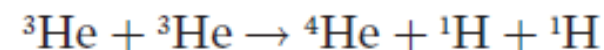
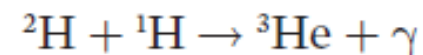
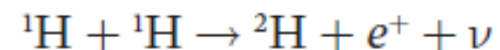
- 慢运动质子靠近时被电排斥力推开
- 运动越快，靠得越近
- 在太阳核心，温度与密度足够高，质子速度足够快，强烈碰撞克服电排斥力而靠得足够近，**强核力**起作用，从而发生聚变，产生新原子核与其它粒子，**释放能量**



经历3个过程的**质子-质子（PP）链**是太阳（小质量主序恒星）通过核聚变产生能量的主要方式



汉斯·贝特（1906-2005），  
1967年诺物奖，因发现恒星  
能源以及对核反应理论的贡献



# 氢燃烧的能量转换效率

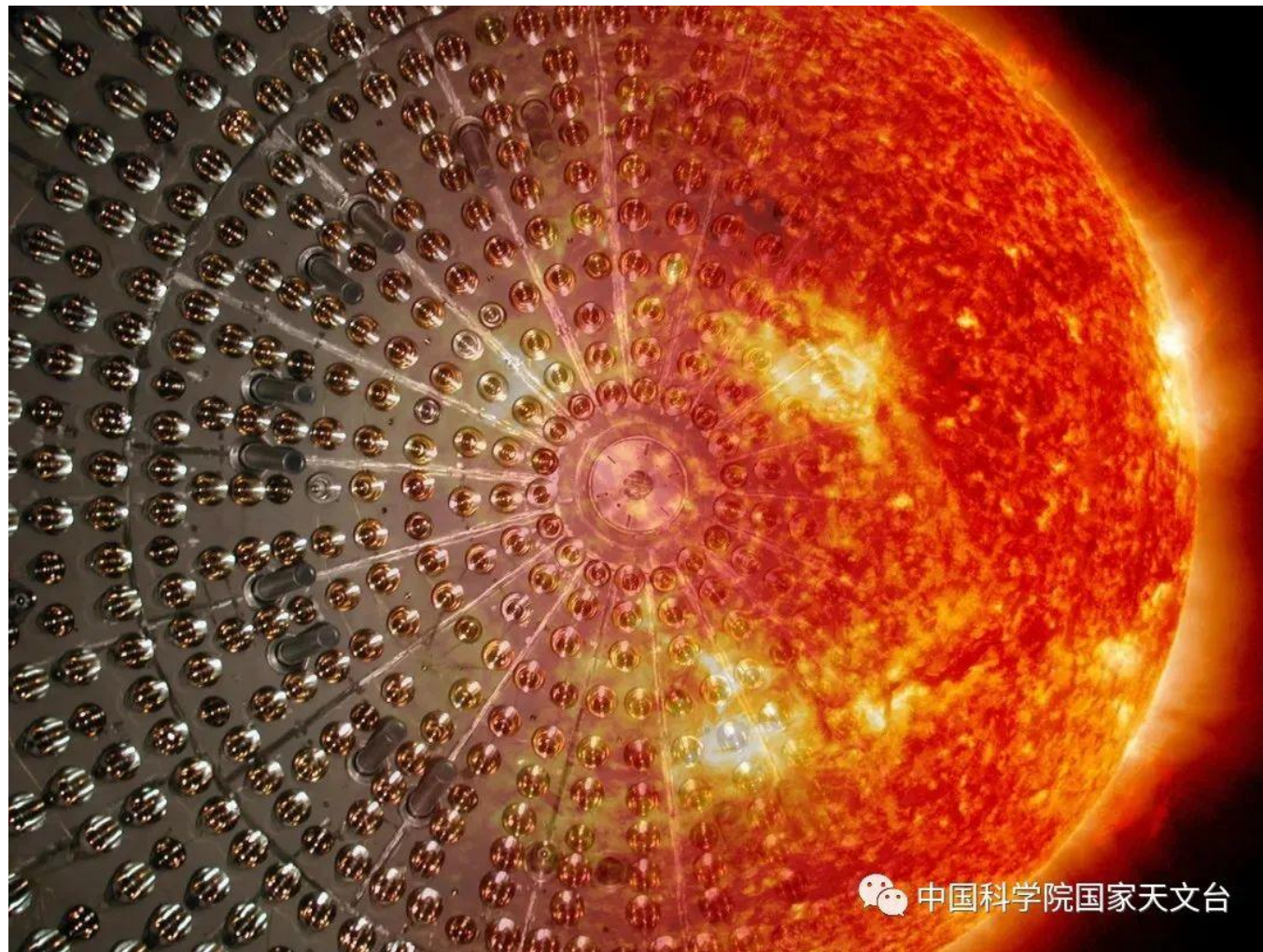
- 质子-质子链的净过程是把4个氢原子核聚变为一个氦原子核的氢燃烧
- 由于4个质子的质量是一个氦原子核质量的1.007倍，所以氢聚变为氦的能量转换效率为0.7%

$$E = mc^2$$



## 【2020】 CNO循环贡献太阳能源~1%

意大利格兰萨索国家地下实验室太阳中微子探测器



# 太阳的能源消耗率

- 4个质子的质量 – 一个氦原子核的质量

$$\begin{aligned} m &= 6.6904 \times 10^{-27} \text{ kg} - 6.6447 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 0.0457 \times 10^{-27} \text{ kg} = 4.57 \times 10^{-29} \text{ kg} \end{aligned}$$

- 每个核反应产能

$$E = mc^2 = (4.57 \times 10^{-29} \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 4.11 \times 10^{-12} \text{ J}$$

- 每克核反应产能

$$6 \times 10^{11} \text{ J}$$

- 太阳的光度表明太阳每秒要燃烧~6千亿千克的氢，其中~42亿千克转化为能量

$$\frac{\text{Luminosity of Sun}}{\text{Energy per kilogram}} = \frac{4 \times 10^{26} \text{ J/s}}{6.3 \times 10^{14} \text{ J/kg}} = 6.2 \times 10^{11} \text{ kg/s}$$



# 太阳的主序寿命~100亿年

- 太阳质量的10%，即  $2 \times 10^{29} \text{ kg}$  是可用的核燃料
- 太阳每年燃烧氢

$$\begin{aligned} M_{\text{year}} &= (600 \times 10^9 \text{ kg/s}) \times (3.16 \times 10^7 \text{ s/yr}) \\ &= 1.90 \times 10^{19} \text{ kg/yr} \end{aligned}$$

$$\longrightarrow \text{Lifetime} = \frac{M_{\text{fuel}}}{M_{\text{year}}} = \frac{2 \times 10^{29} \text{ kg}}{2 \times 10^{19} \text{ kg/yr}} = 10^{10} \text{ yr}$$

- 46亿岁的太阳已经燃烧氢

$$M_{4.6 \text{ BY}} = (4.6 \times 10^9 \text{ yr}) \times (1.90 \times 10^{19} \text{ kg/yr}) = 8.7 \times 10^{28} \text{ kg}$$

- 太阳的可用核燃料氢已被消耗掉约一半了

# 与太阳能源相关的真相

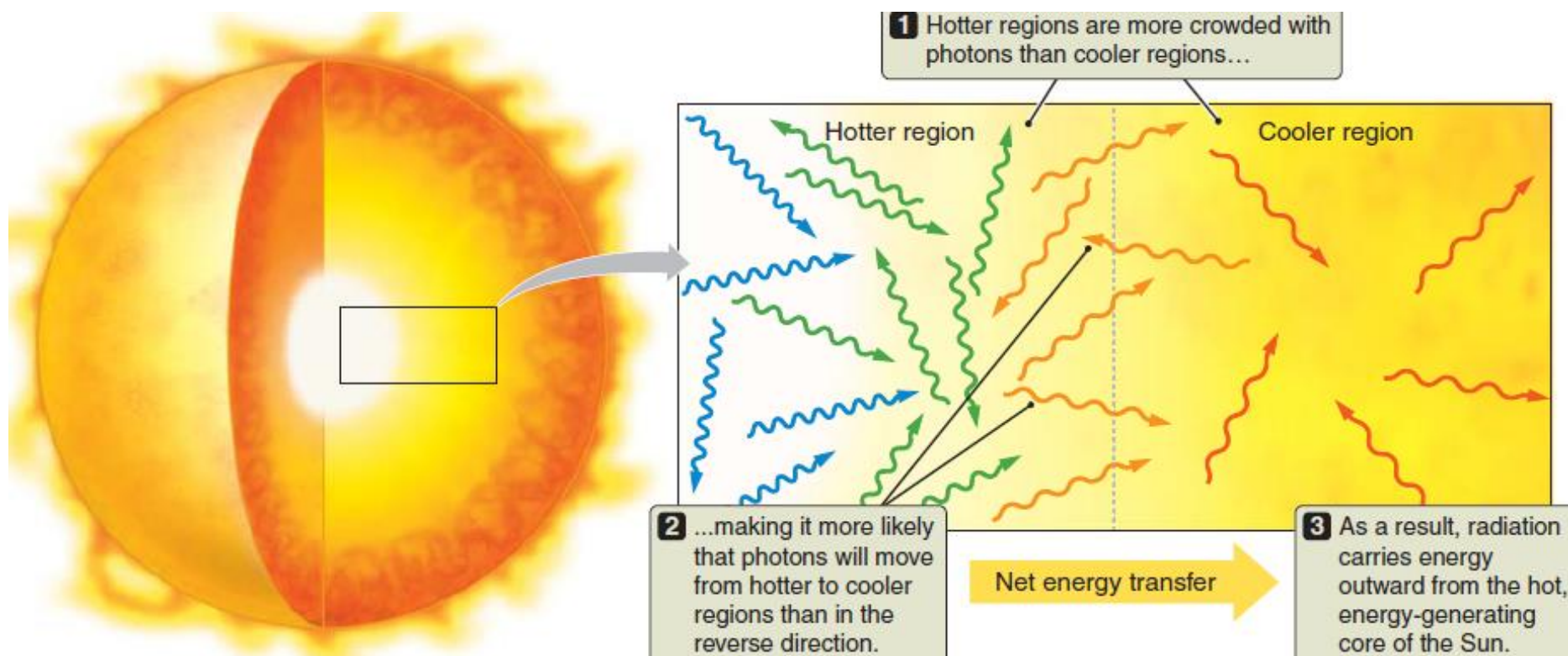
- 太阳的能量只能在其核心产生
  - 核聚变十分敏感于气体的温度与密度
  - 太阳核心的密度为水的~150倍
  - 太阳核心的温度为~1.5千万K
  - 约一半的能量在太阳的9%半径以内产生
- 氢最丰富，氢燃烧是主序恒星最重要的能源
- 氢是最容易聚变的原子核
- 稳定太阳的自我微调
- 缓慢变亮的主序太阳：光度已增加~30%

### 3、能量是怎样从太阳内部转移到太阳表面的？

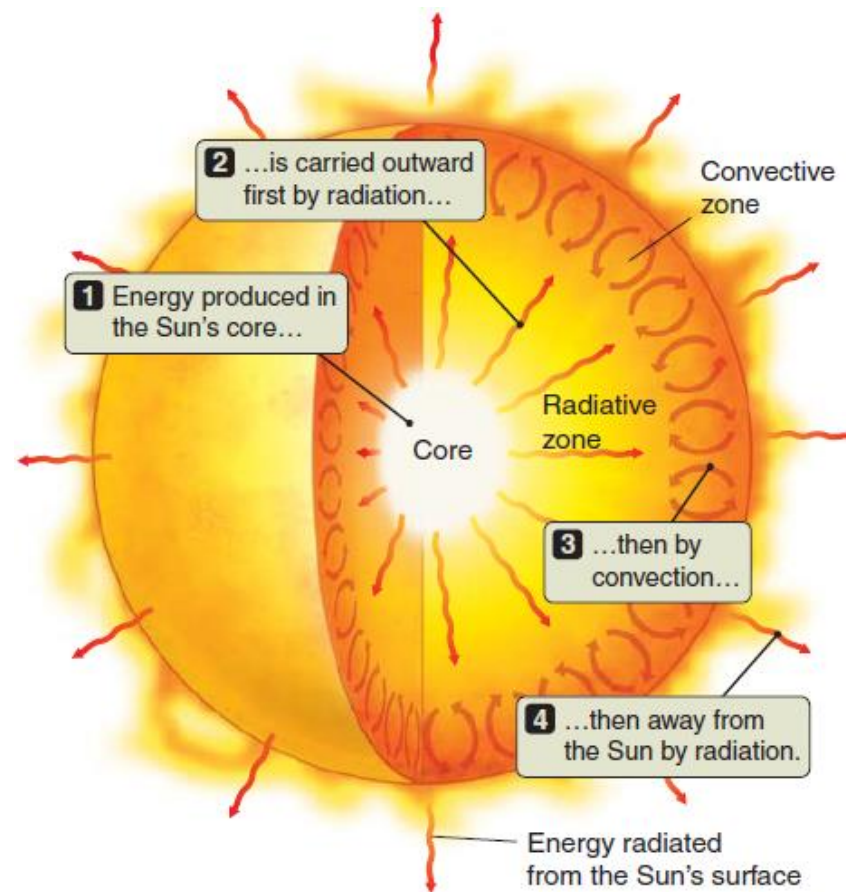
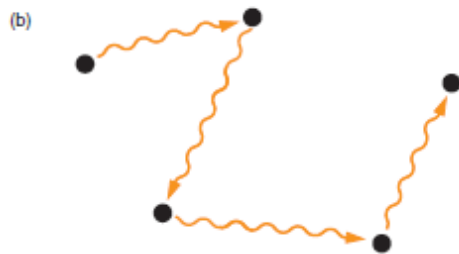
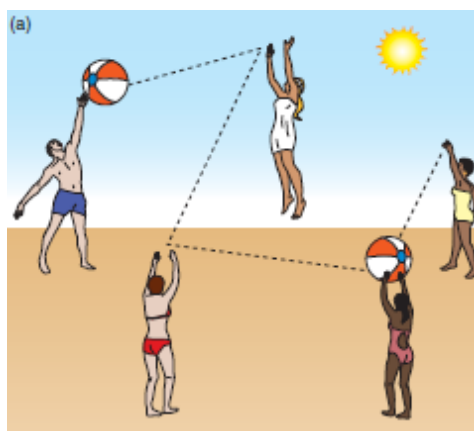
- 氢燃烧产生的能量
  - 中微子直接逃逸到宇宙空间
  - 加热太阳内部 → 向外转移到太阳表面
- 能量运输方式：
  - （热传导：通过固体中原子和分子的热振动运输能量）
  - 辐射：以光子的形式传输能量
  - 对流：以气体泡的模式传输能量
- 从内到外随着气体温度和密度的降低，能量运输经历辐射、对流，再到辐射的变化

# 辐射区

- 太阳内部以（辐射）光子形式把能量从高温区向低温区转移的区域
- 延伸至太阳半径的71%处



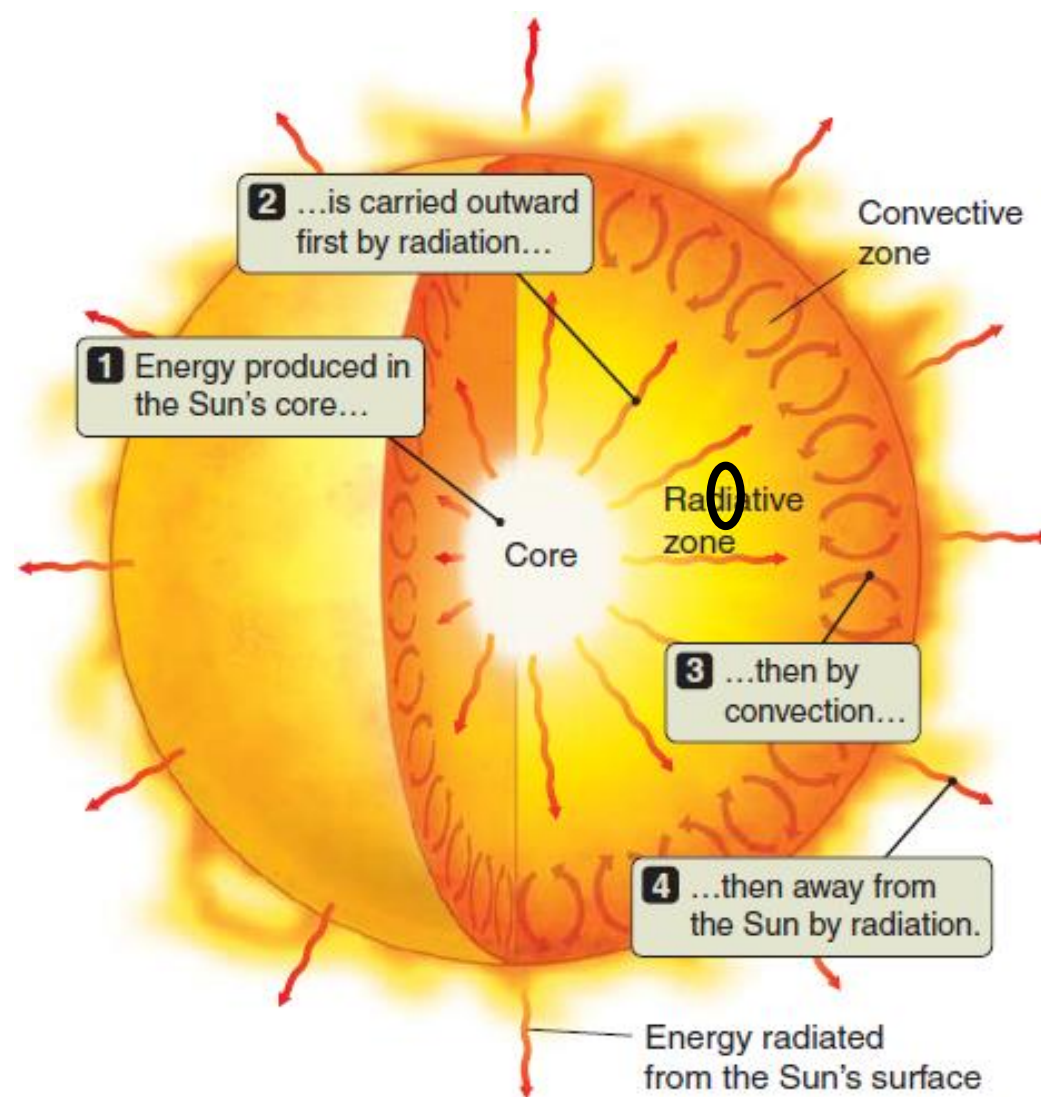
- 辐射区是太阳内部**不透明度**相对较低的区域
- 光子在与电子碰撞前，传播距离极短，并被偏折到一个新的随机的方向（辐射扩散）



# 对流区

从辐射区外边界到太阳表面的  
太阳内部，温度降低很多，气  
体不透明度更大 →

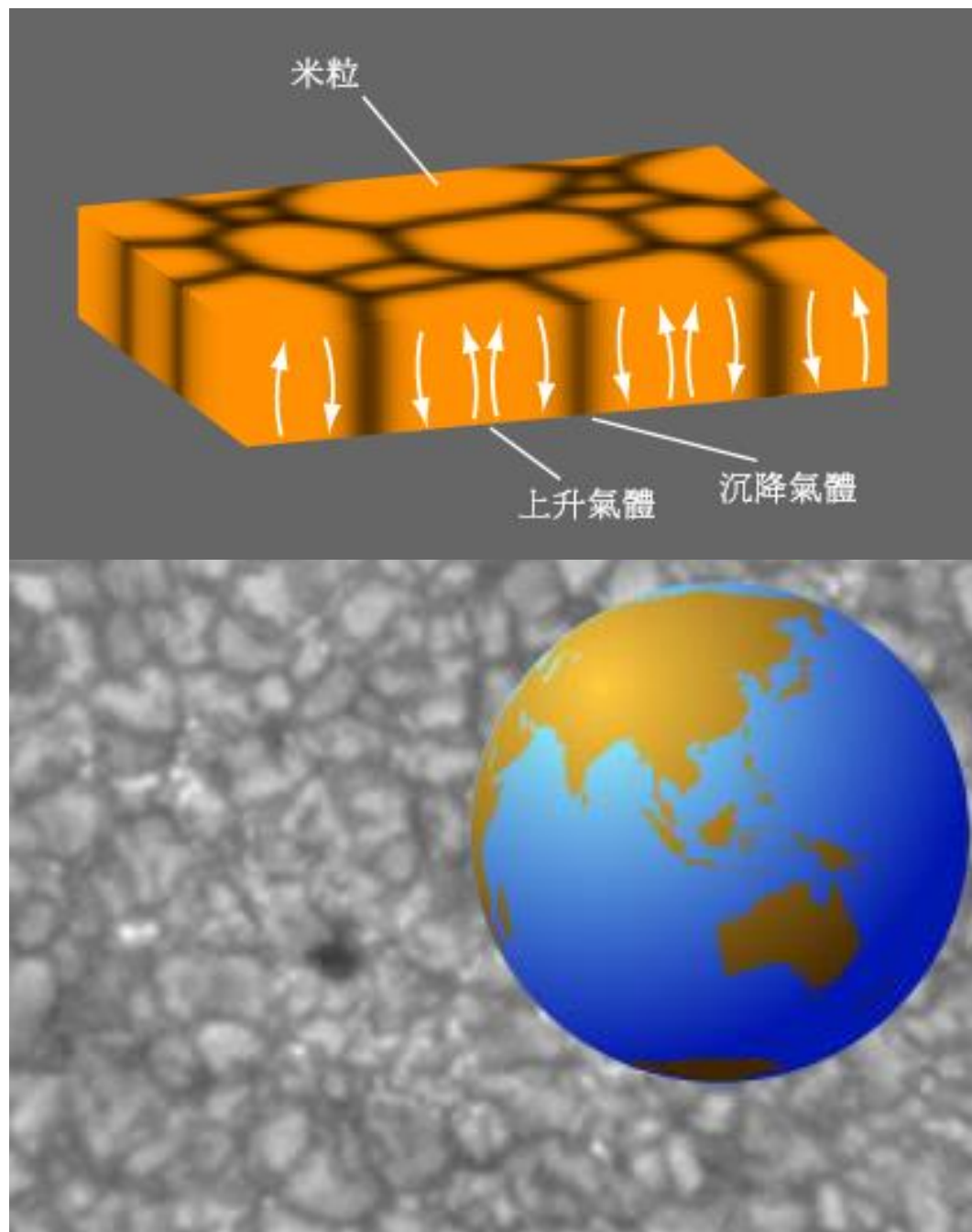
辐射运输能量不再有效，能量  
堆积形成热气体泡，使得对流  
成为传输能量的主要方式



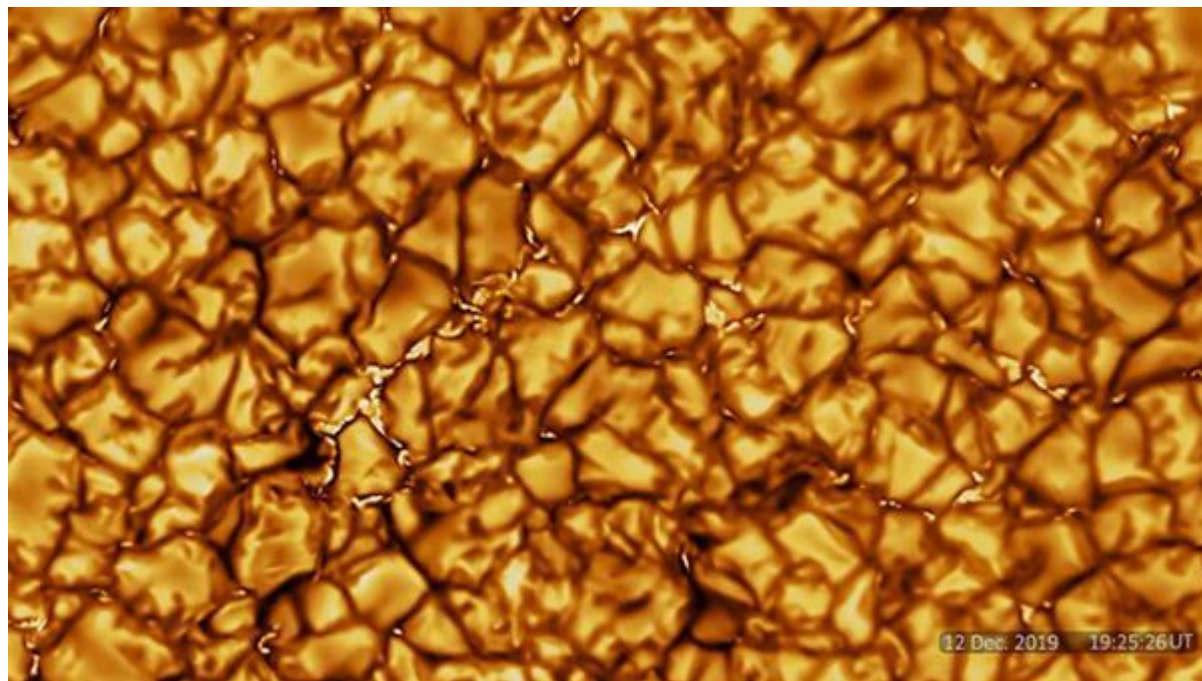


气体的对流运动在太阳表面形成被称为**日面米粒组织**的斑驳图像：许多由较暗区域（冷气体）所环绕的亮斑（热气体）

对流导致太阳表面不同位置的温度有显著的变化



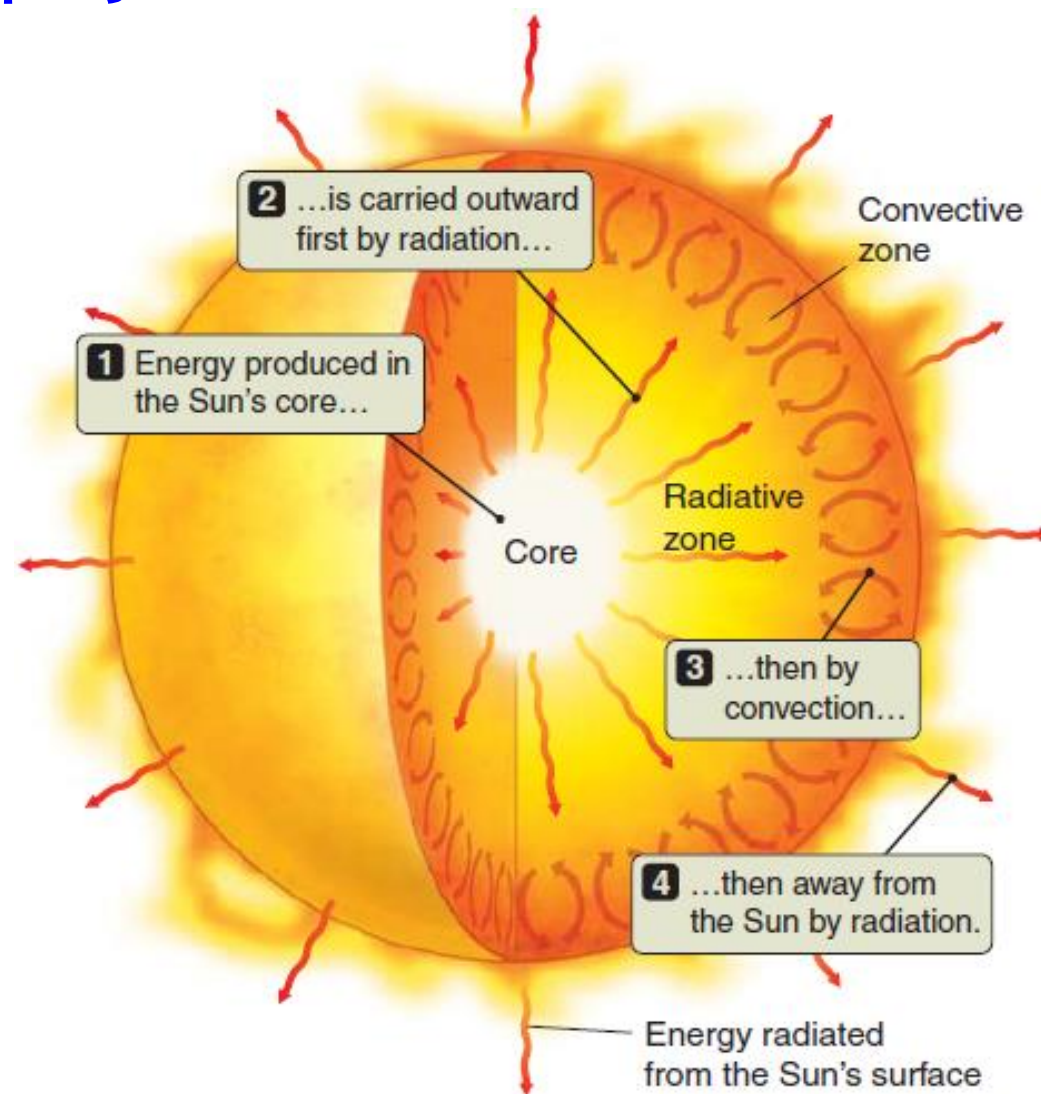
# 世界最大太阳望远镜DKIST





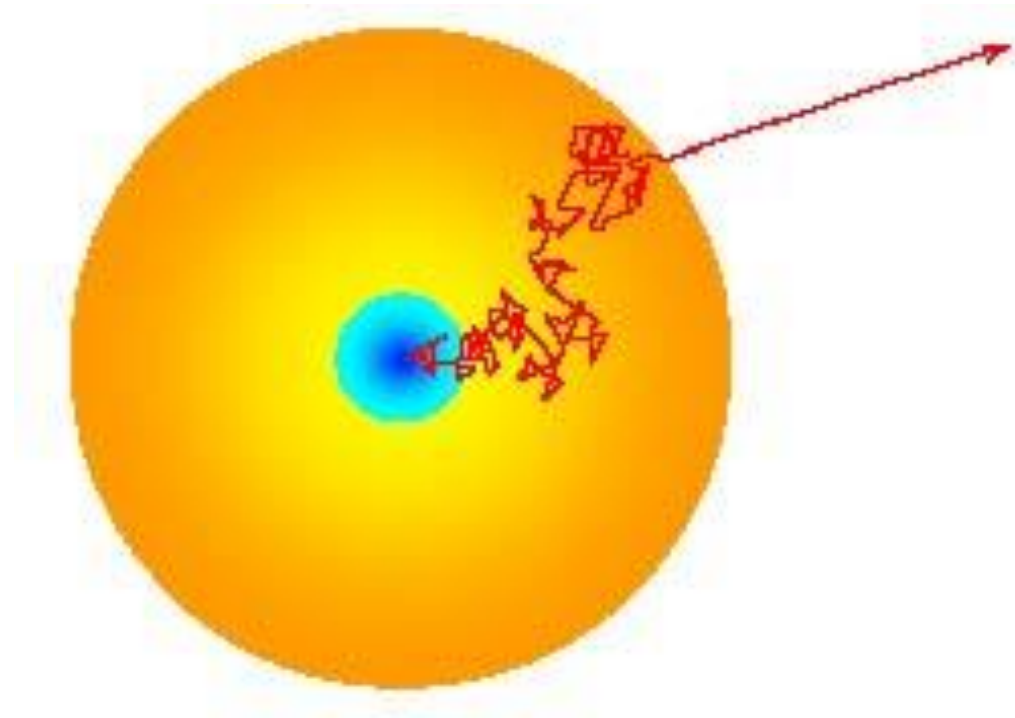
# 阳光的年龄是~8.3分钟吗？

对流区以外的区域（**太阳大气**），由于气体很稀薄，光子基本自由地逃逸到宇宙空间，辐射再次成为能量传输的方式



# 阳光有多老？

一个在核心处产生的伽马射线光子，需数万（10,000-170,000）年才能以数千个低能量（主要是可见光和红外波段）光子的形式到达太阳表面（光球层）



## 4、怎样知道太阳内部发生了什么？

- a. 建立太阳的模型
- b. 太阳中微子观测
- c. 太阳表面振荡观测

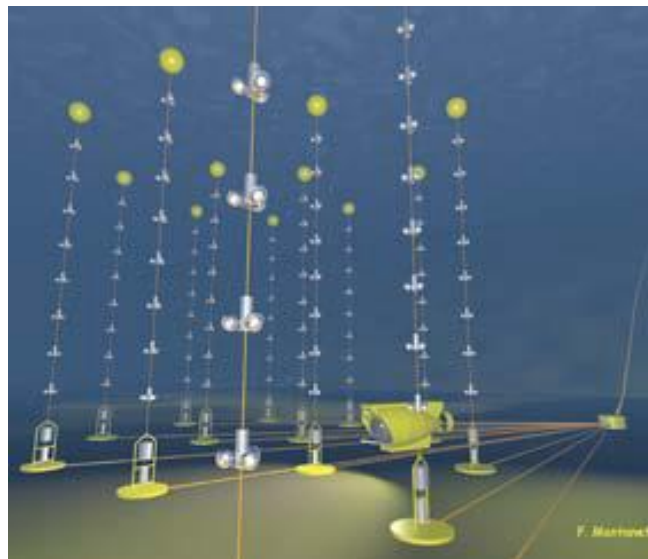
## 4a、太阳的数学模型

- 基于观测到的化学成分和质量，利用物理定律建立太阳能描述内部的引力平衡、自我调节和能量输运率的数学模型，计算出太阳内部的温度、压力和密度的结构以及核心的核聚变率
- 太阳模型的预言与太阳的观测特征一致
  - 半径
  - 表面温度
  - 光度
  - 年龄
  - .....

## 4b、太阳中微子观测

- 质子-质子链产生大量的中微子
- 中微子自由地从太阳核心逃出
- 探测中微子是困难的
- 中微子数量巨大，探测并非不可能

# 中微子探测器

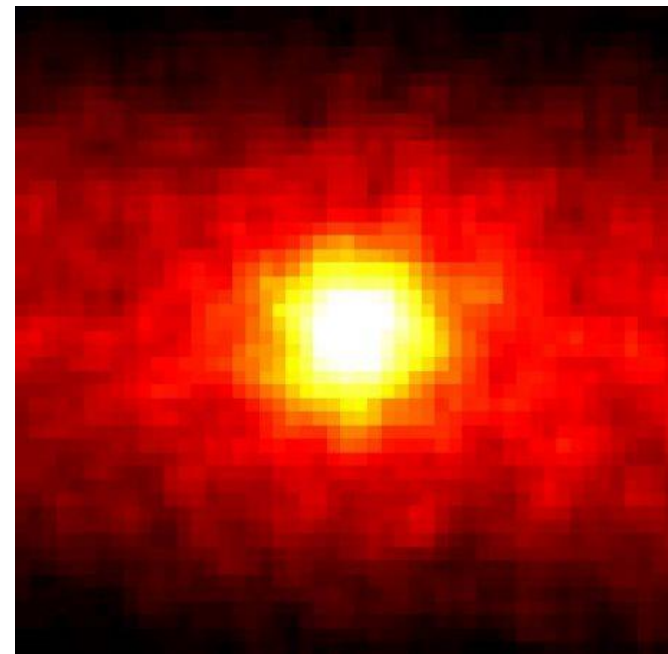
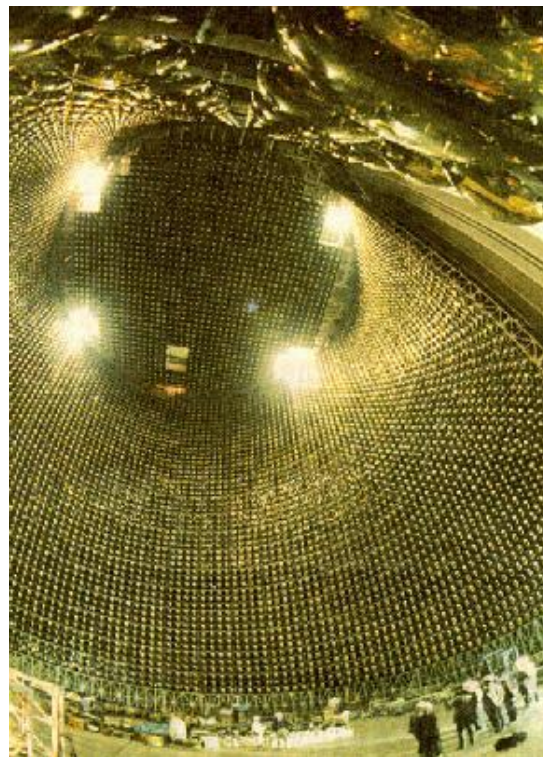
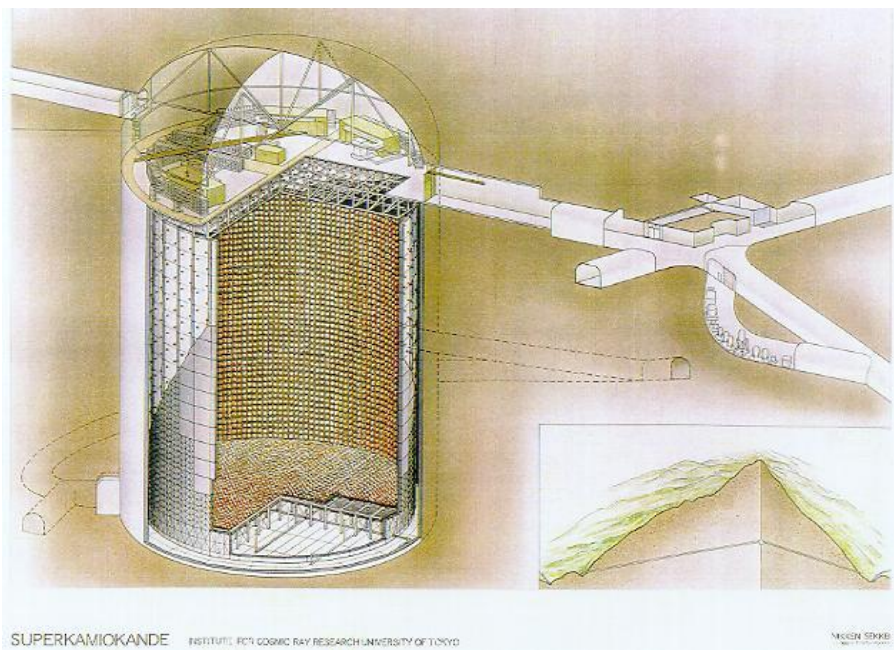


# 太阳中微子问题

- 1960s, 观测到的太阳中微子数量只是太阳核心的核聚变模型预言的~1/3
  - 对太阳核心的核聚变的理解不正确?
    - 已成功预言太阳的许多观测特征
  - 对中微子的理解有问题? 一些中微子逃脱了探测器
    - 中微子非零质量预言 **中微子振荡**: 太阳核心产生的电子中微子在传到太阳表面的旅途中转变成了其它类型的 ( $\mu$ 子和 $\tau$ 子) 中微子



# 太阳中微子图像



日本的超级神冈



## The 2002 Nobel Prize Laureates in Physics



**Raymond  
Davis Jr.**



**Masatoshi  
Koshihara**

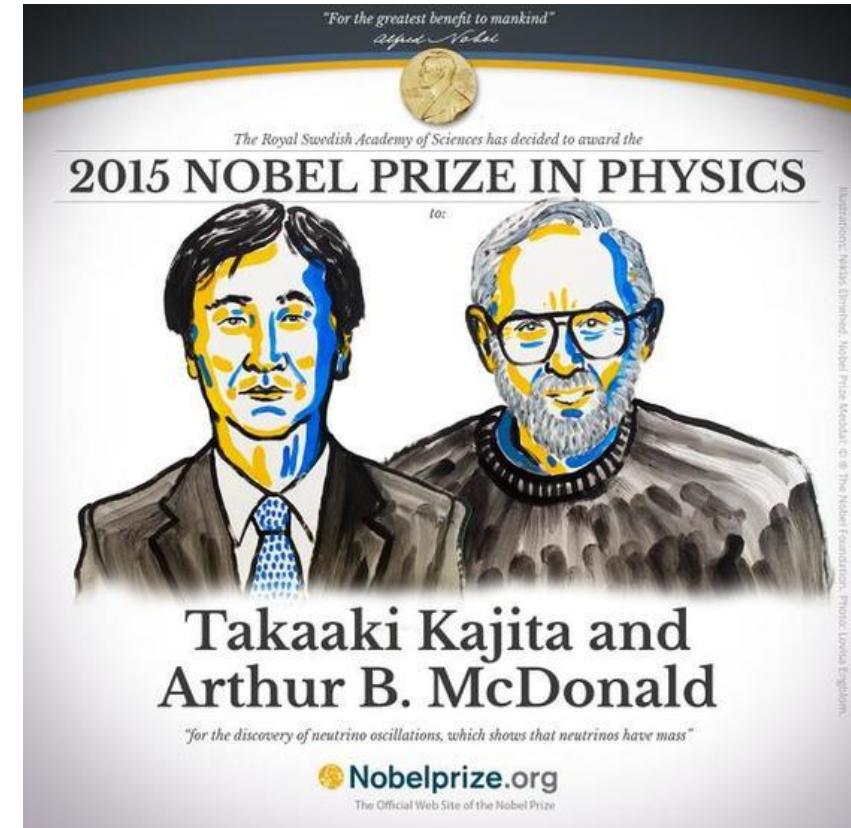


**Riccardo  
Giacconi**

"for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"

"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

“对天体物理学，特别是对探测宇宙中微子的开拓性贡献”

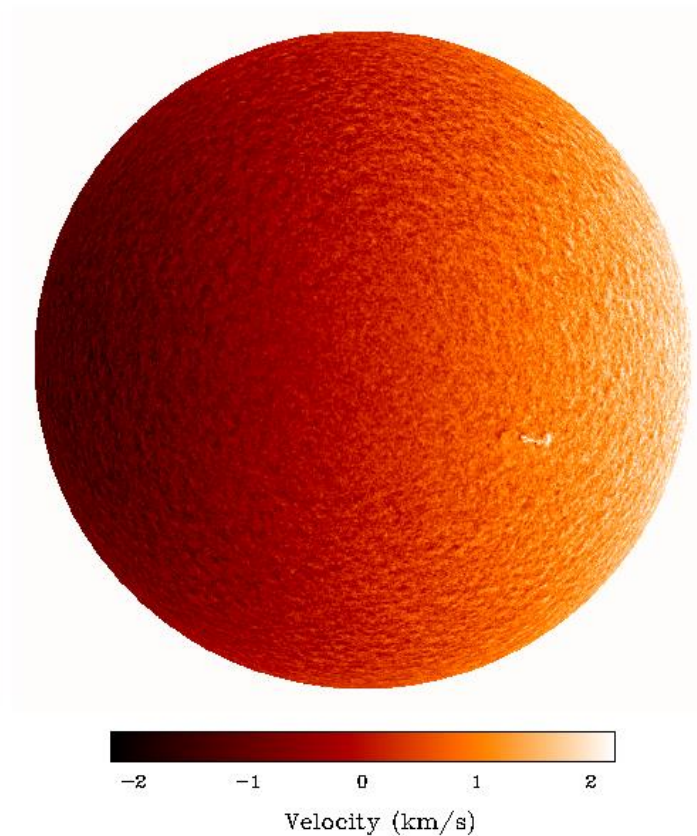


“发现中微子振荡，表明中微子有质量”

## 4c、太阳表面振荡的观测

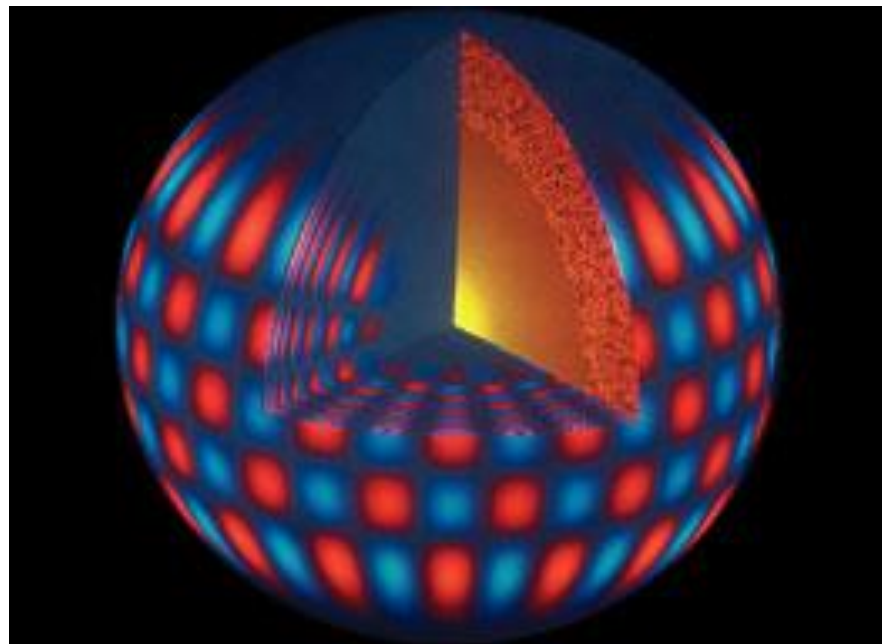
太阳表面不同的小区域同时  
发生很多不同频率的振荡

Full-disk Dopplergram  
9 July 1996, 9:00:00



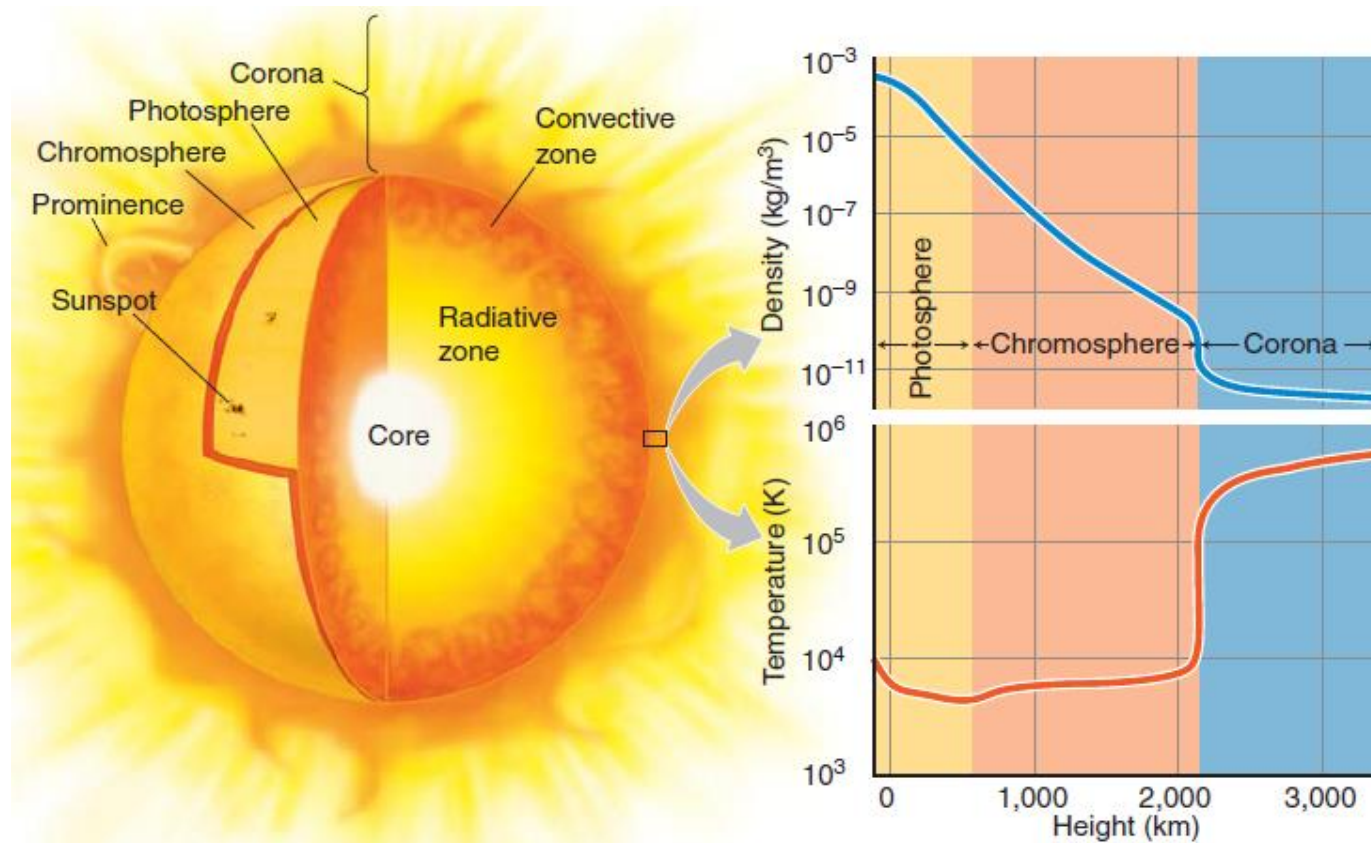
# 日震学

- 利用多普勒效应，通过观测太阳光球层的振荡来研究太阳的内部结构
- 由太阳表面振荡的观测数据得到的太阳内部的温度、密度等参数与数学模型一致



# 5、太阳外部是什么？

直接观测到的太阳现象与活动来自对流层之上的被称为**光球层**、**色球层**和**日冕**的**太阳大气**

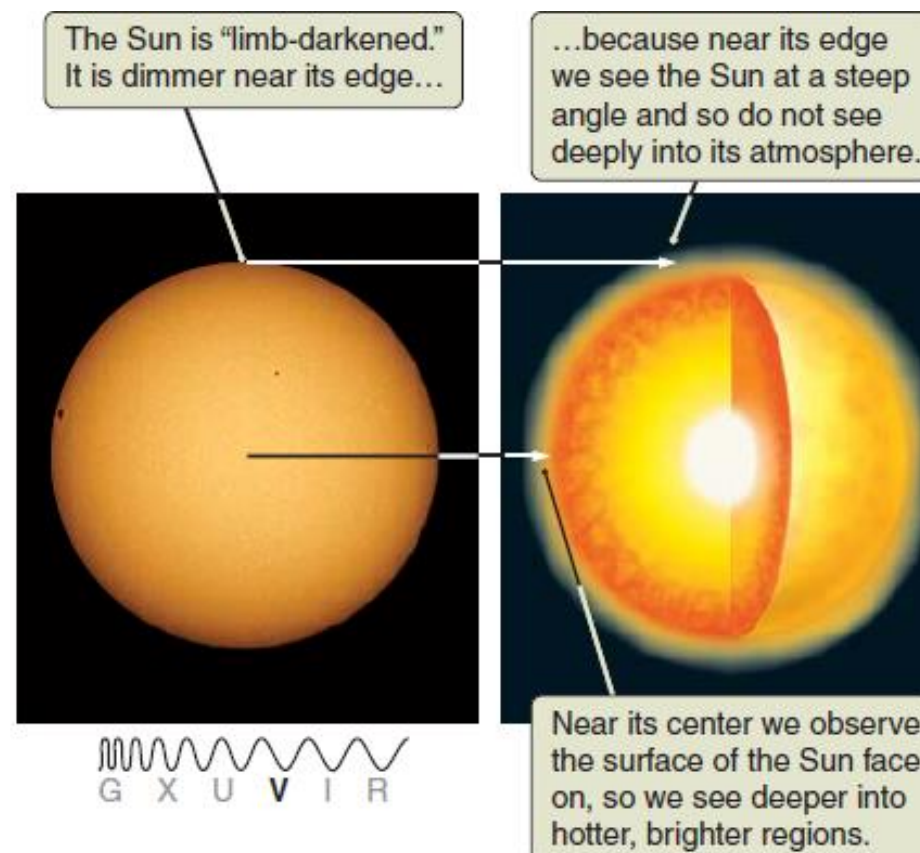




# 光球层（发光的球体）：太阳的可视表面

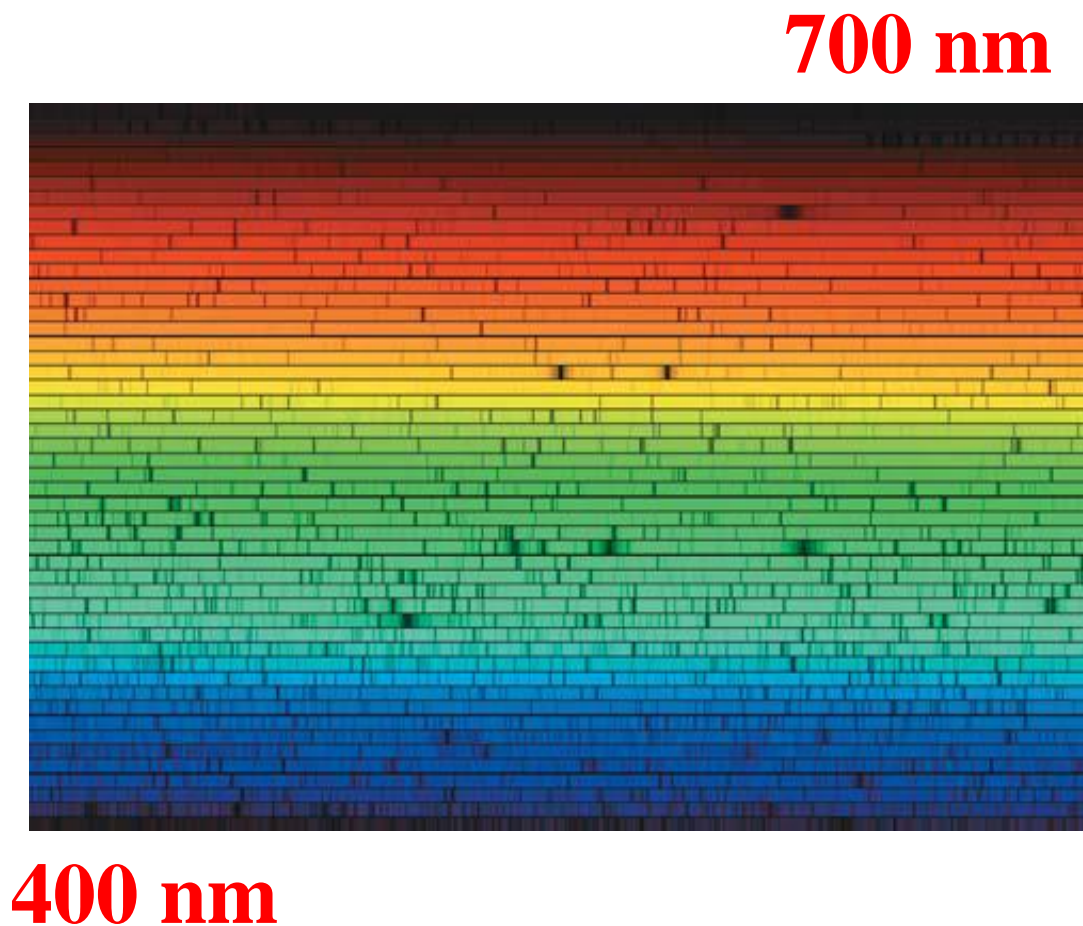
- 厚500千米，气体密度为地球大气的10%
- 有效温度：5780 K [6600 K - 4400 K]

**临边昏暗**：太阳圆盘的亮度由圆盘中心向圆盘边缘减弱  
圆盘边缘的光子仅来自**浅的**光球层区域，其温度低，因而看起来暗



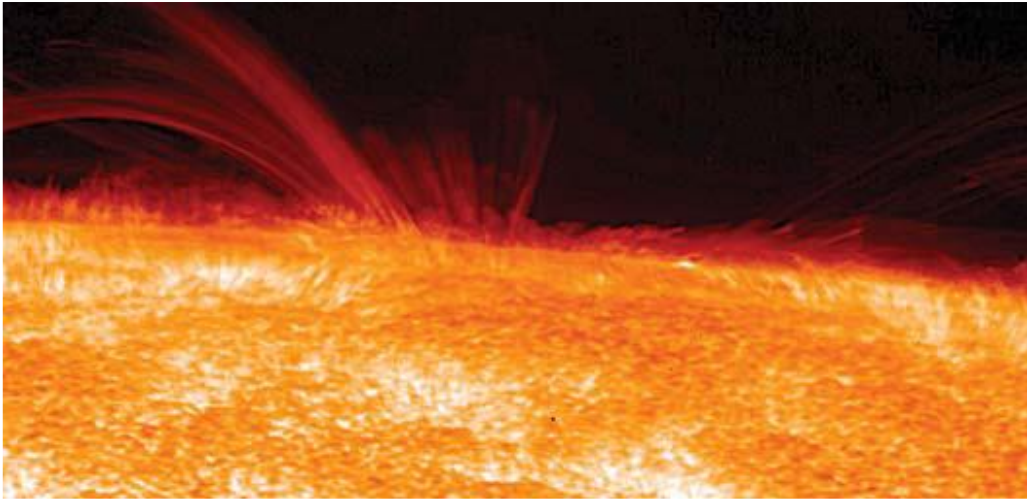
# 太阳光谱

- 从光球层发出的光必须通过太阳大气
- 大气中的原子吸收特定波长的光，形成离散的**吸收线**
- 超过70种**元素**的吸收线已得到证认

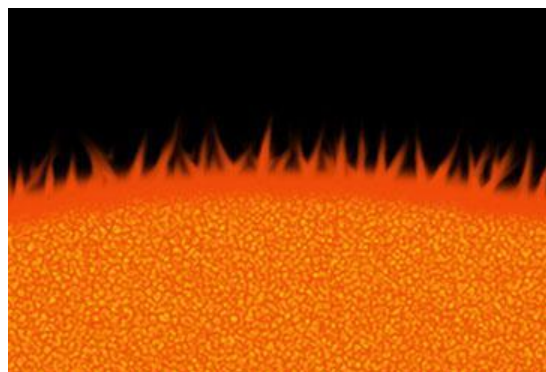


# 色球层

- 光球层之上的1500公里厚的区域称为色球层，温度从4500K缓慢上升至6000 K
- 色球层以发射线为主，特别是H $\alpha$ 线构成色球层的深红色
- He元素的发现就是来自太阳色球层的光谱观测



- 色球层比光球层暗得多，所以通常只能在日全食时才能看见它(色球仪)
- 色球层并非球形，而且有很多称为针状体的细小突起（等离子喷泉）





# 日冕

- 在色球层上部的约100 km的区域（**过渡区**），气体温度急剧上升，在此区域之上是太阳大气的最外层：

## 日冕

- 日冕密度非常低
- 日冕温度高达1-2百万K，辐射X射线，气体高度电离
- 日冕延伸至太阳半径的~10倍之远



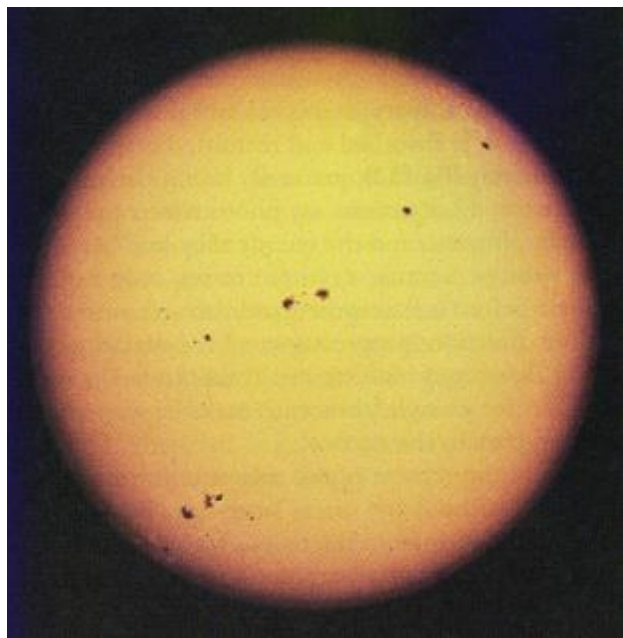
日冕只能在日全食时才能看到（**日冕仪**）

## 6、太阳大气为什么活动？

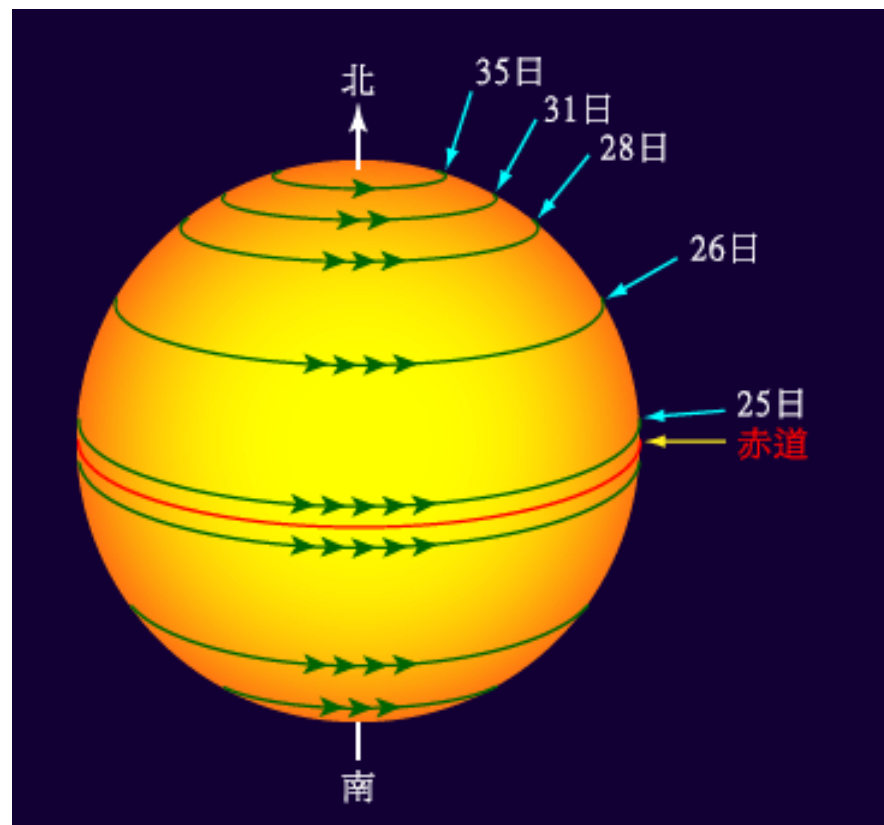
- 太阳活动：太阳表面特征随时间的变化
  - 太阳黑子、日珥、太阳耀斑、拱形冕环
  - 与磁场关联
  - 较差自转和对流的联合作用产生复杂的太阳磁场结构

# 太阳黑子

- 看起来黑暗，是因为它们没其周围区域亮
- 没那么亮，是因为它们更冷些



17世纪，太阳黑子的观测  
导致太阳较差自转的发现



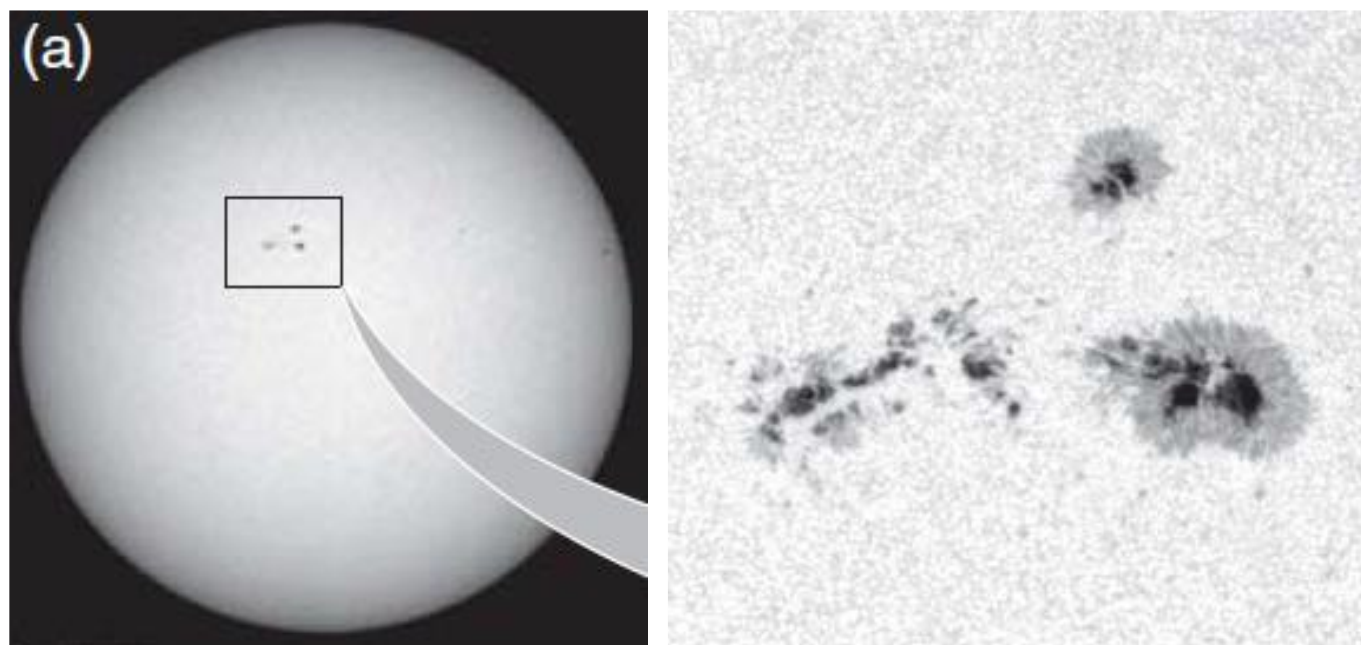
太阳黑子的亮度是光球层其它区域亮度的~1/3

$$\frac{\mathcal{F}_{\text{spot}}}{\mathcal{F}_{\text{surface}}} = \frac{\sigma T_{\text{spot}}^4}{\sigma T_{\text{surface}}^4} = \frac{T_{\text{spot}}^4}{T_{\text{surface}}^4} = \left( \frac{T_{\text{spot}}}{T_{\text{surface}}} \right)^4$$

$$\frac{\mathcal{F}_{\text{spot}}}{\mathcal{F}_{\text{surface}}} = \left( \frac{4500 \text{ K}}{6000 \text{ K}} \right)^4 = 0.32$$

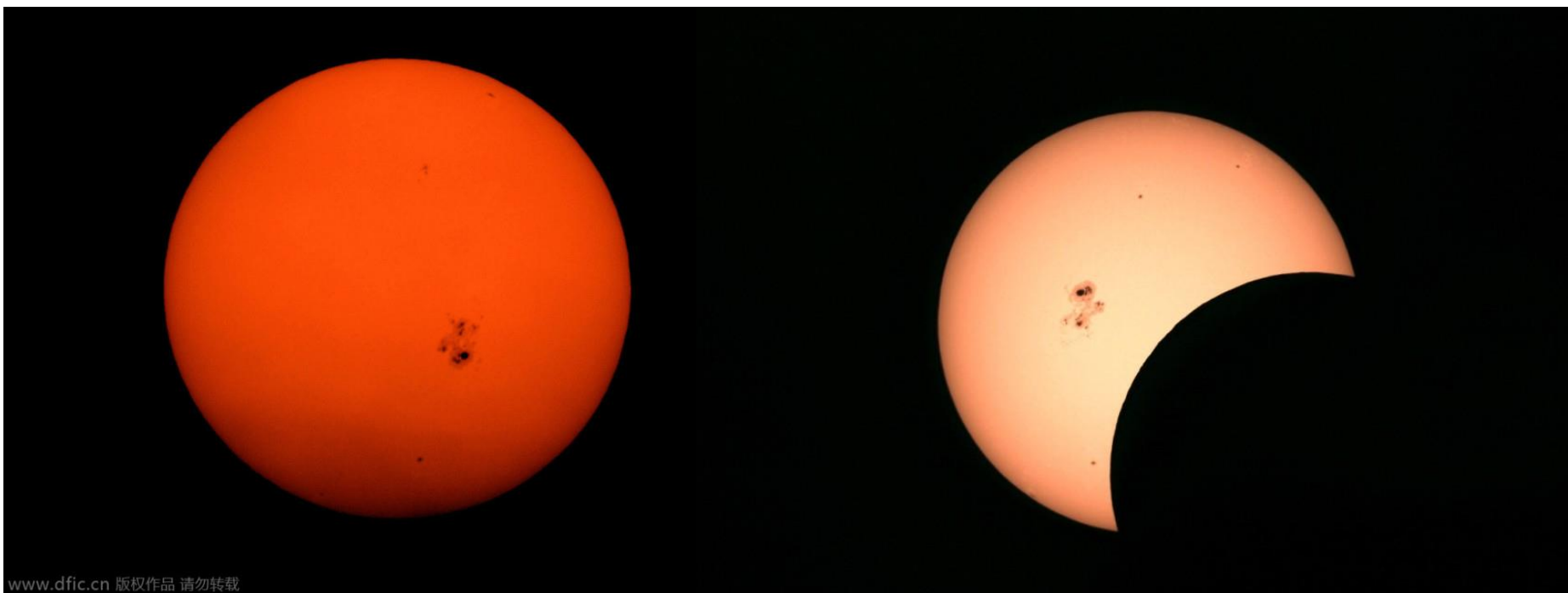
$$\mathcal{F}_{\text{spot}} = 0.32 \mathcal{F}_{\text{surface}}$$

- 太阳黑子尺度小到几十千米
- 复杂的黑子群可包含数十个黑子，尺度可达15万千米



2010年的太阳黑子群

# 2014年的巨型太阳黑子群

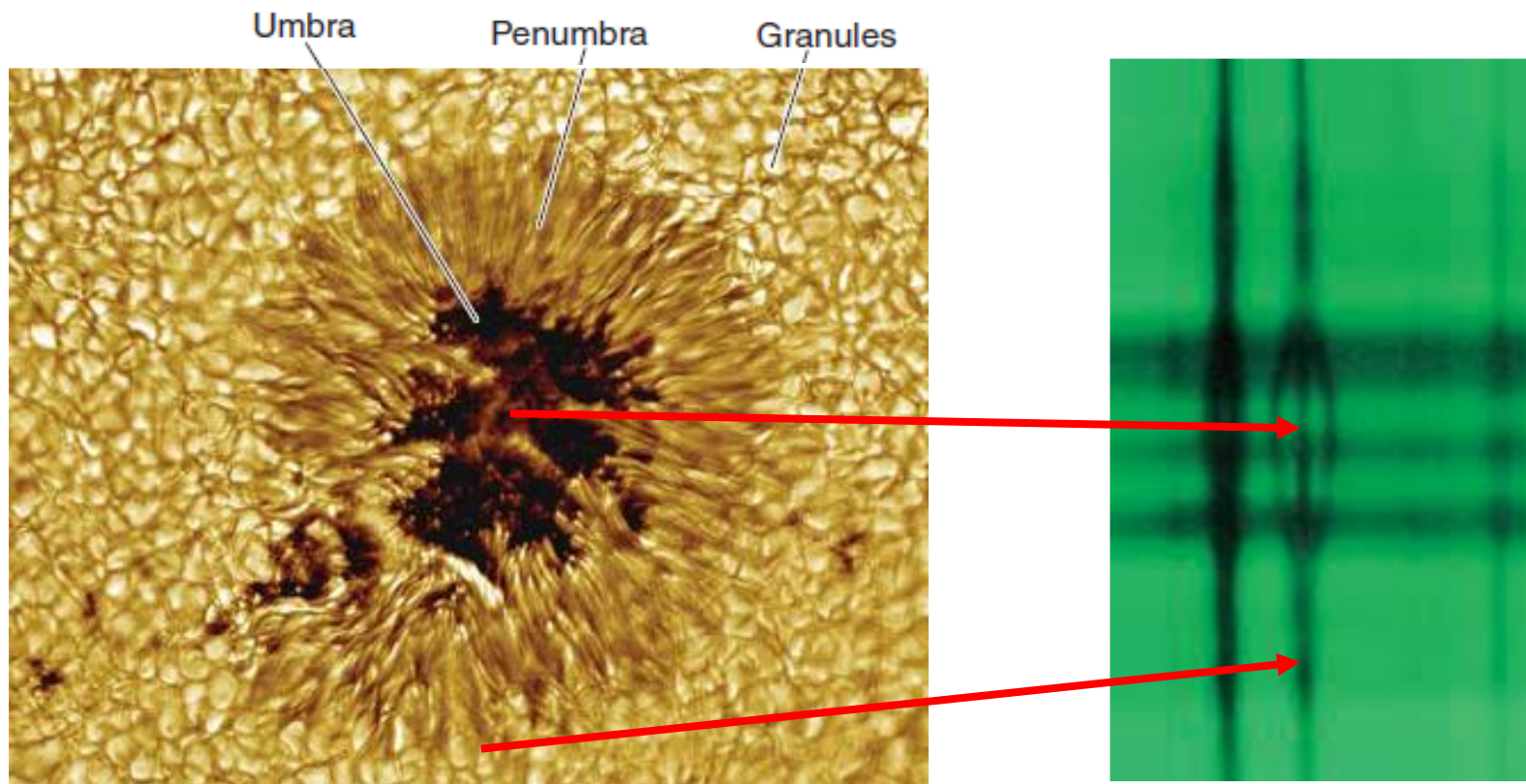


左：10月22日，青岛，透过雾霾

右：10月24日，北美，日偏食

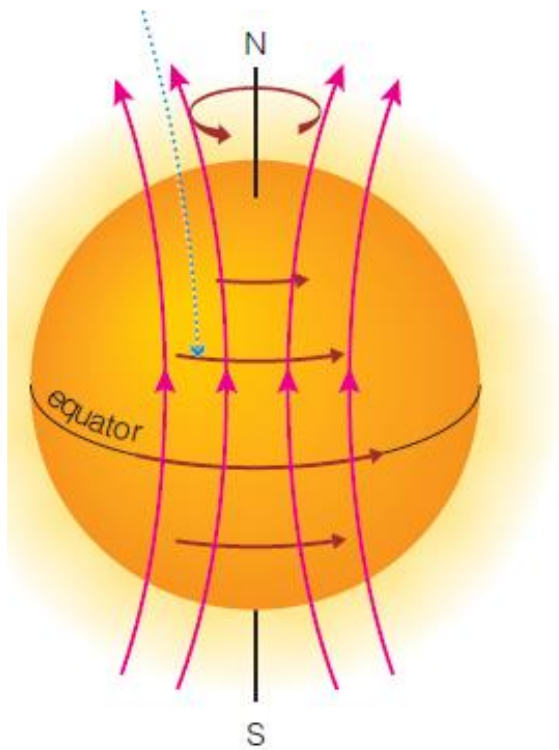


# 太阳光谱观测表明太阳黑子磁场很强

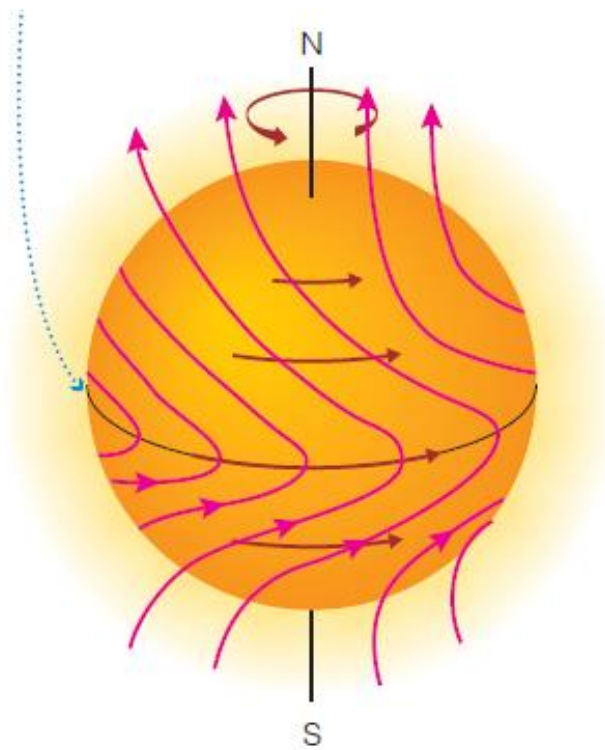


**塞曼效应：** 磁场改变原子和离子的能级 → 某些谱线分裂成两三条波长相差不大的谱线

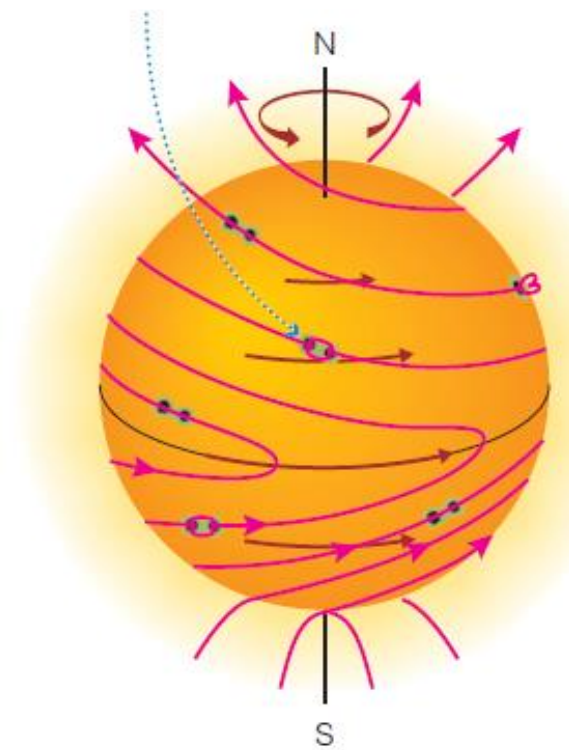
# 太阳磁场和太阳活动周期的发电机模型



差旋层的极向（耦  
极）磁场

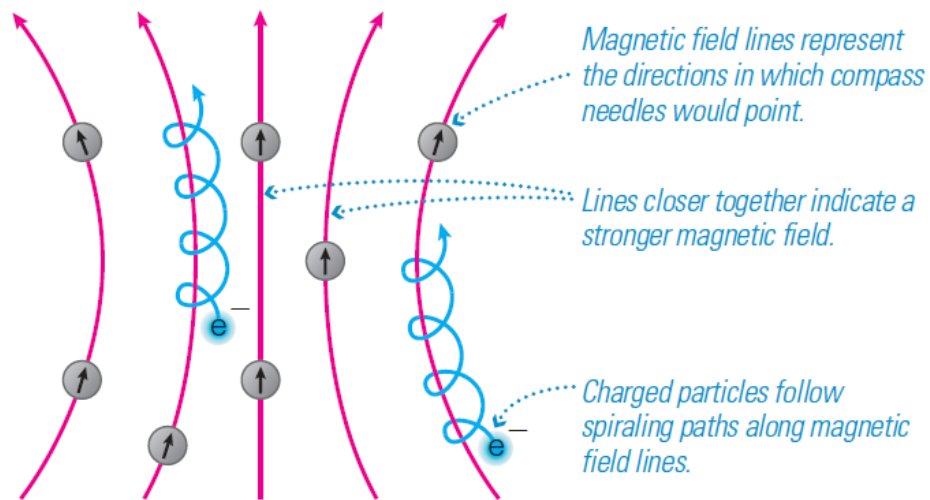


较差自转拉伸  
形成环向磁场

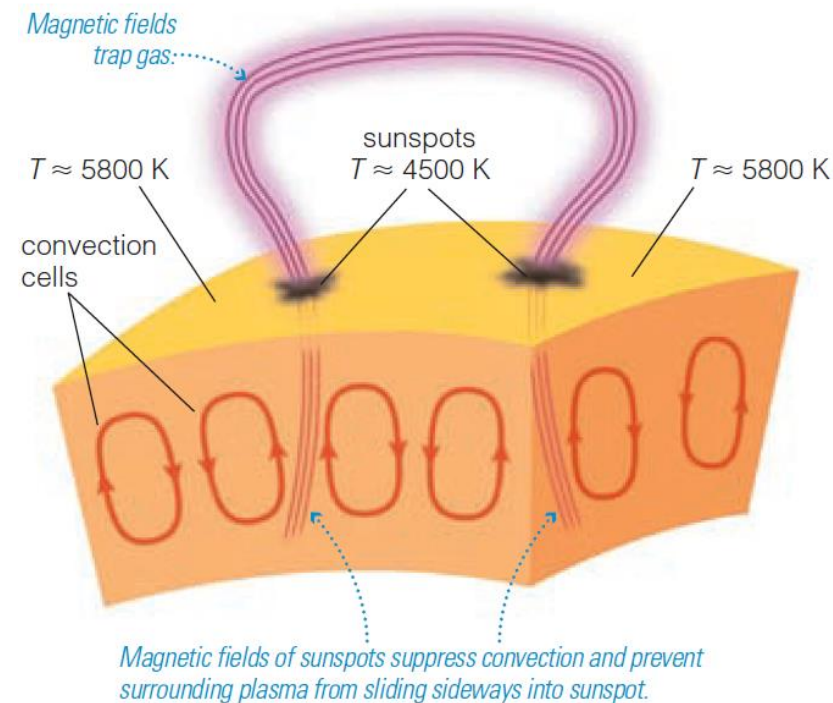


各种运动形成磁流  
管，上浮

# 为什么太阳黑子的温度更低？

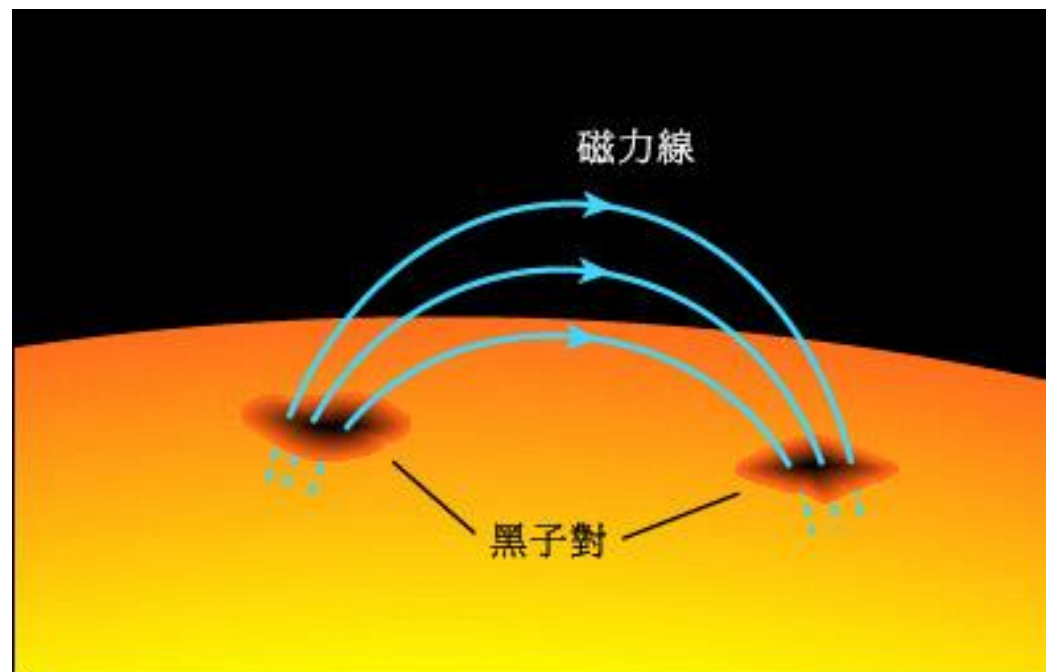
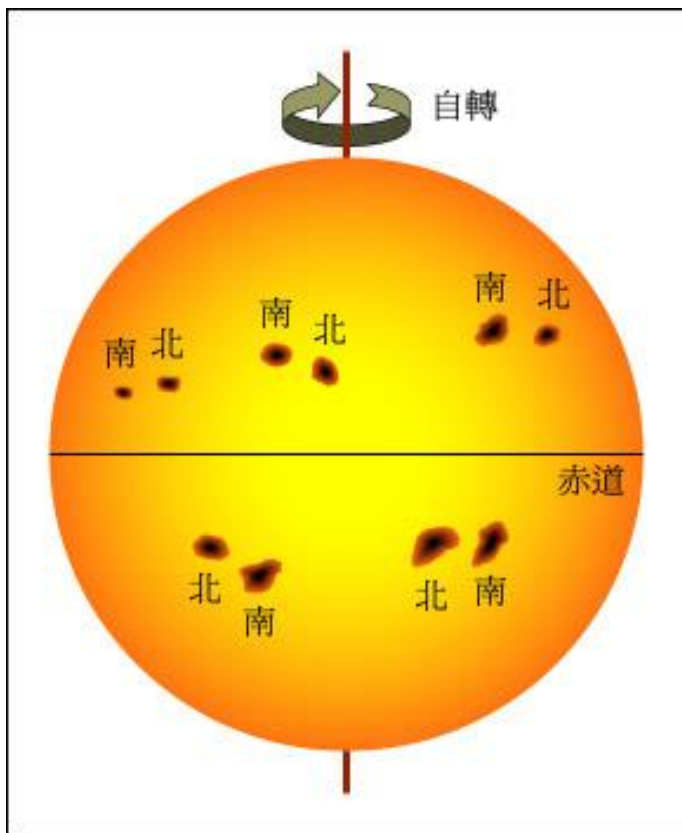


磁场不仅压制黑子区域的对流，而且阻碍周围的热等离子体气体流入黑子 → 黑子温度变低



太阳大气的湍流扭曲磁场。磁场几乎垂直进出的地方出现黑子；磁场变弱时黑子消失

- 黑子经常成对出现。每对黑子皆有在太阳表面上方的拱形磁力线相连
- 南北半球黑子极性相反





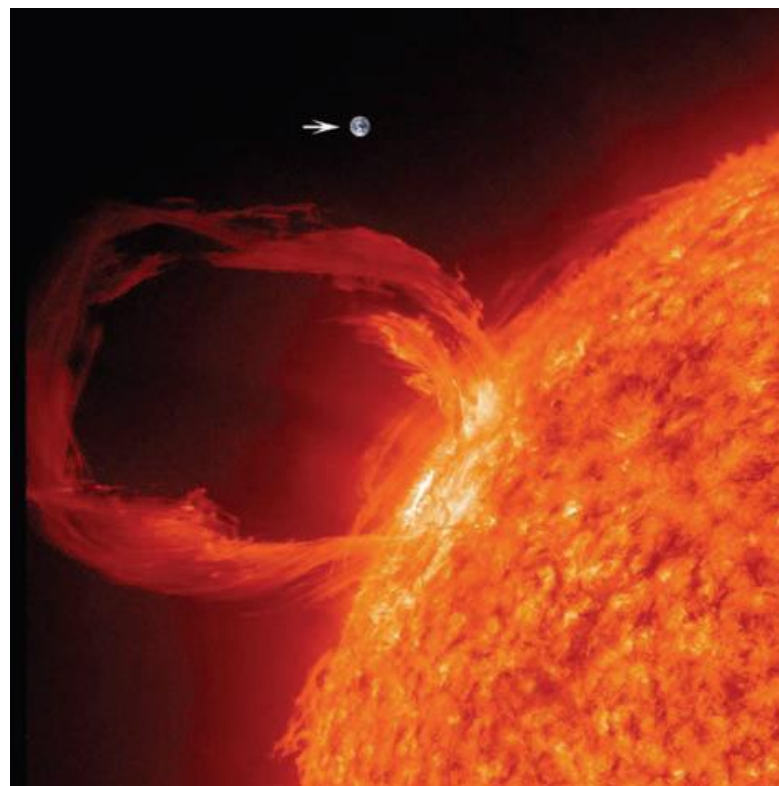
# 太阳大气的热气体由磁场束缚

冕环是被称为**磁流管**（连接两个黑子群的拱形磁力线）的磁场结构的表现，日冕物质沿磁力线流动



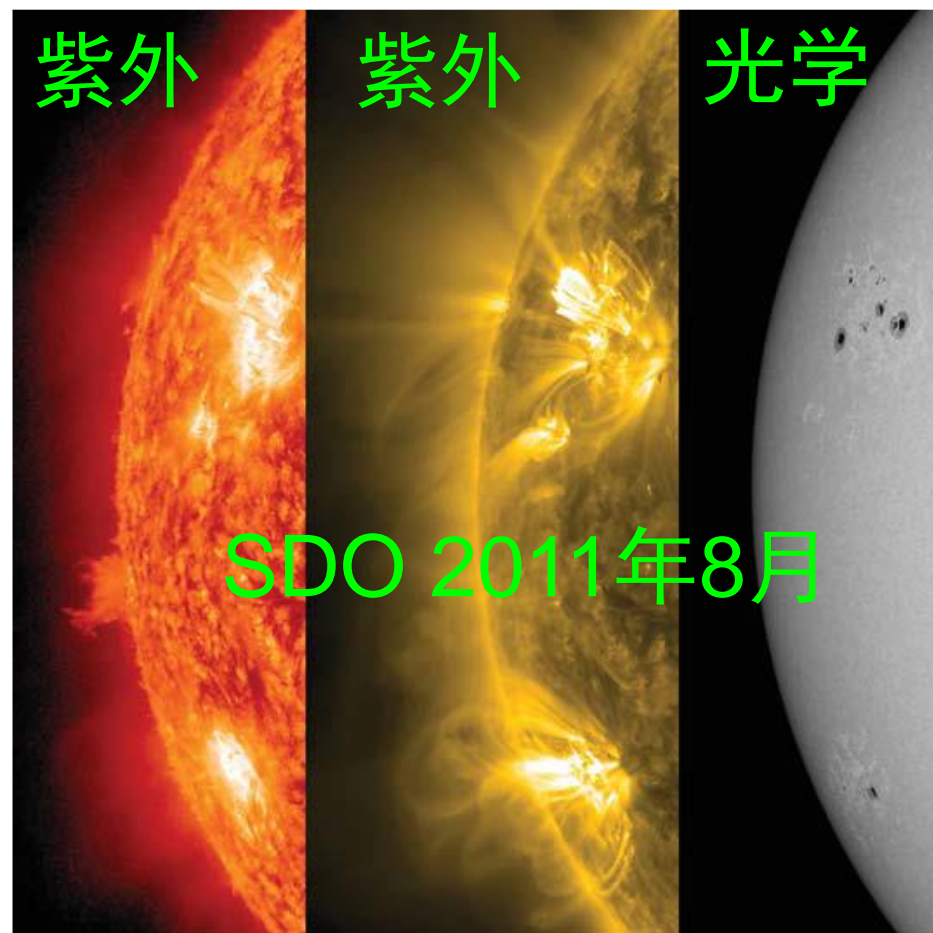
- **太阳活动区**：黑子（群）所对应的色球层区域增亮。最清新可见的是发射线，如  $H\alpha$
- 在色球和日冕中形成的呈巨型拱形环的**日珥**，是被磁流管束缚的**相对冷但致密**的气体，上升至百万K高温的日冕气体中

日珥锚定在活动区，高高耸至太阳表面之上百万km，以1,000 km/s的速度向日冕喷射物质



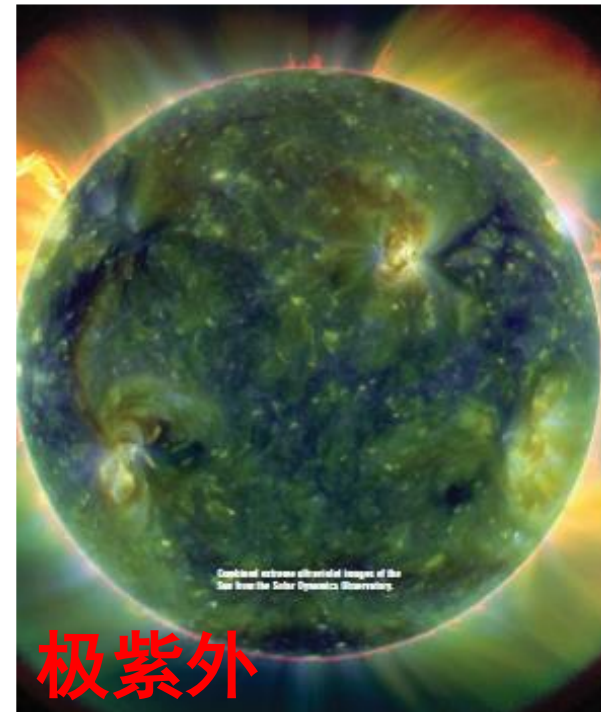
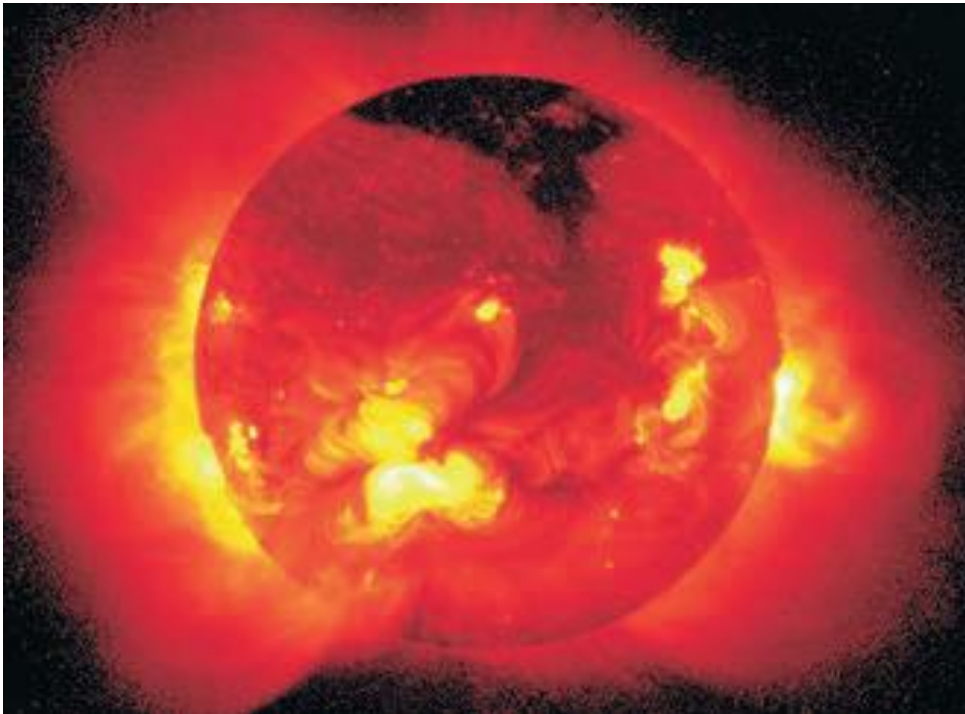


- **太阳耀斑**是最剧烈的太阳活动形式
  - 在几分钟到几个小时内喷发巨大磁能
  - 加热气体至2千万K，是强X射线和伽马射线源
  - 从耀斑发出的热等离子体速度可达1,500 km/s



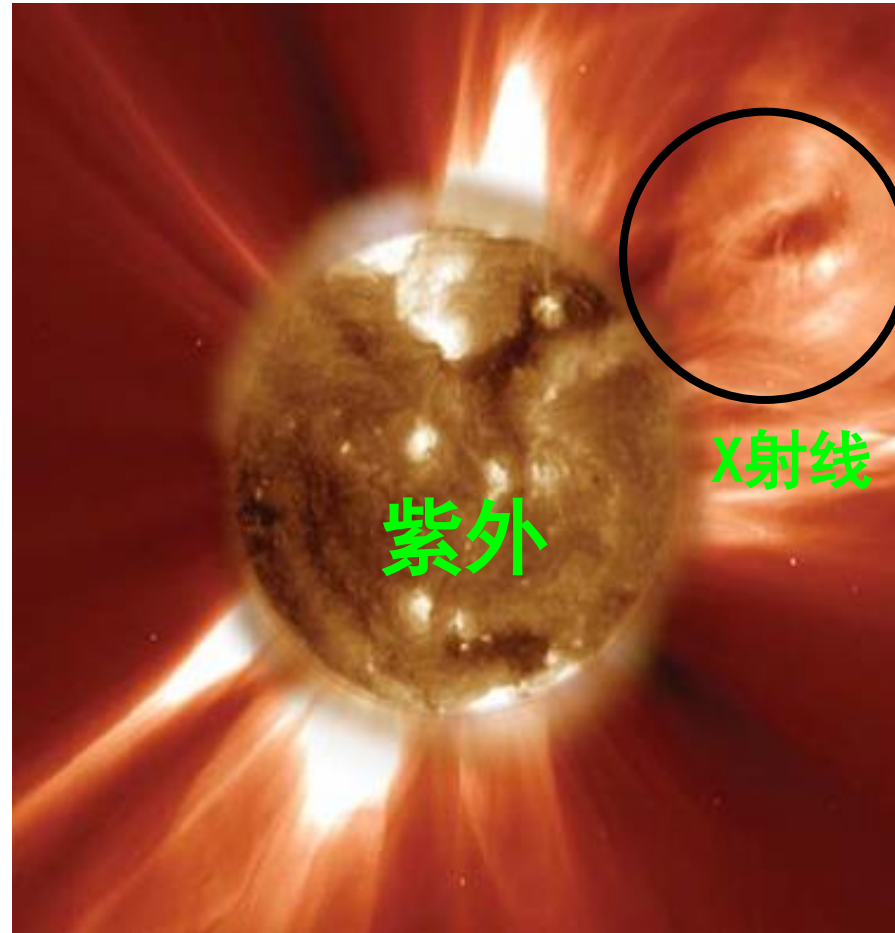
磁场增强的太阳黑子群是太阳活动的源泉

- 黑子的强磁场把能量从沸腾的太阳表面输运到色球和日冕，加热那里的气体，辐射高能辐射
- 有些日冕区域几乎无高能辐射，称为（几乎无**热**气体的）**冕洞**，**磁场指向外部**，日冕物质沿磁力线流向行星际空间，形成**太阳风**。太阳风粒子约几天抵达地球



极紫外

磁场加速大量带电粒子到极高速度，产生称之为**日冕物质抛射**（巨型气泡）的高能粒子的强烈爆发（有时与耀斑和日珥相伴）

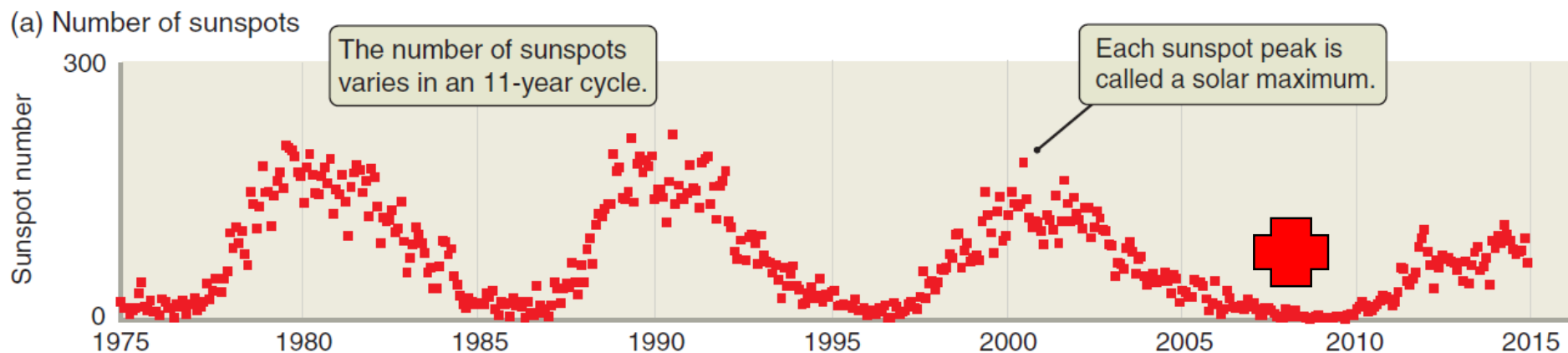


# 太阳活动对地球的影响

- 射向地球的日冕物质抛射破坏地球磁层，产生地球磁暴
  - 极光、破坏电网、影响通讯、破坏卫星的电子设备
- 得到加速的高能粒子是人类探索太空的最大危险之一
- 高能辐射和高能粒子的增强，加热并引起地球上层大气膨胀，空气密度的升高增加低轨道空间飞行器运行的大气阻力，空间飞行器高度下降
- 监测太阳：SOHO、SDO、夸父一号

# 太阳活动随时间怎样变化？

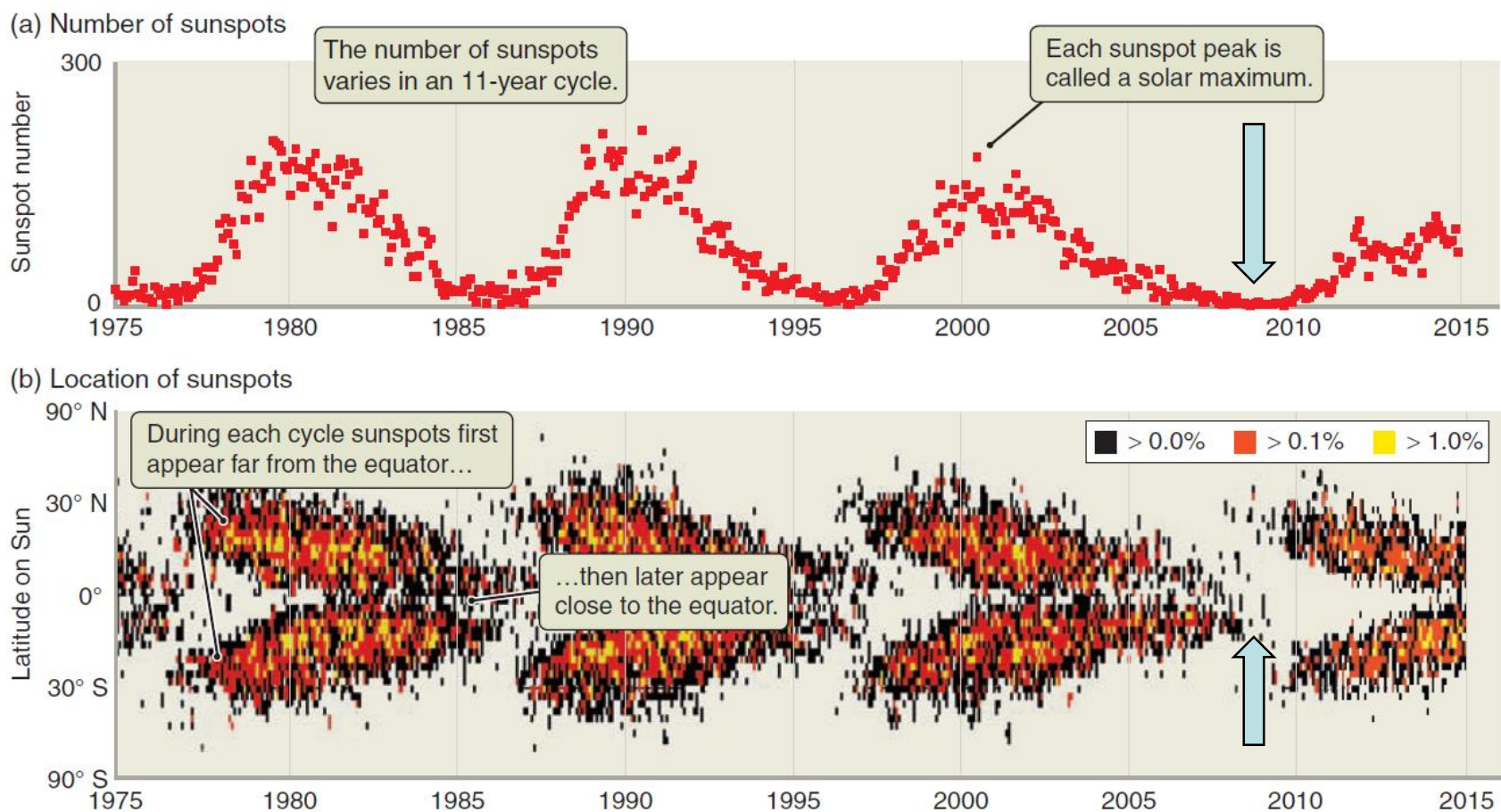
- 黑子寿命：大部分  $< 11$  天
- 太阳黑子周期：太阳黑子数的变化有一个约11年的周期
- 每个周期中，黑子数最多的年份称为太阳峰年





# 太阳黑子纬度分布的蝴蝶图

每个周期开始，黑子大都出现在中纬度的地方，随着黑子数不断增加，其位置向赤道靠拢。当仅少数黑子接近赤道时，本次周期结束

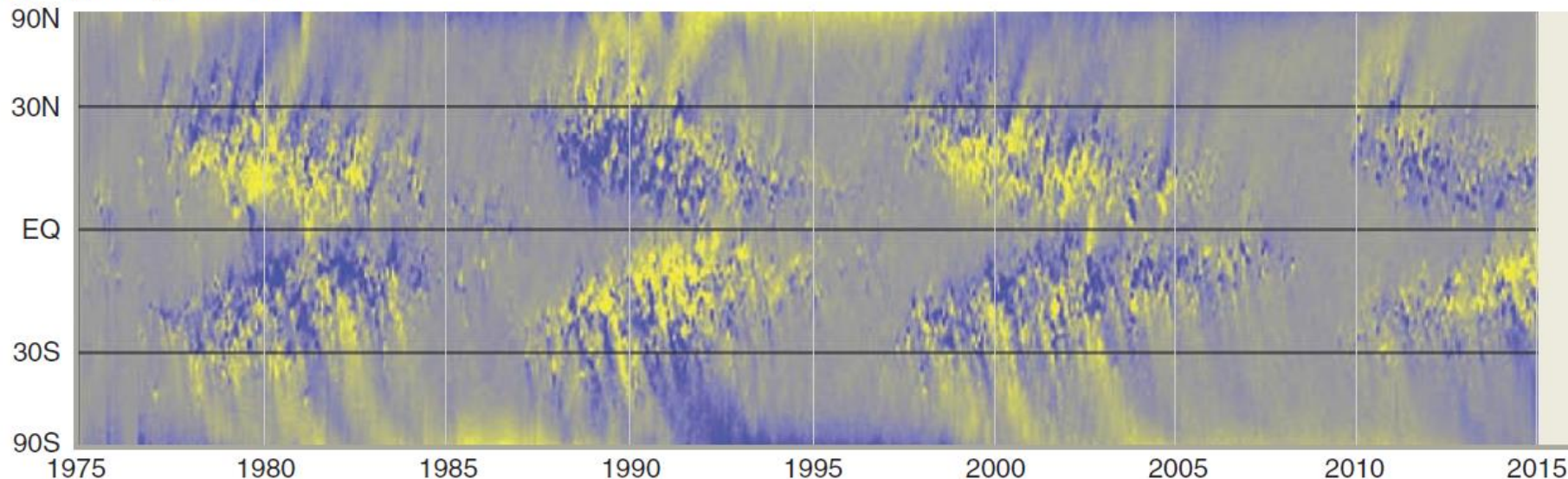




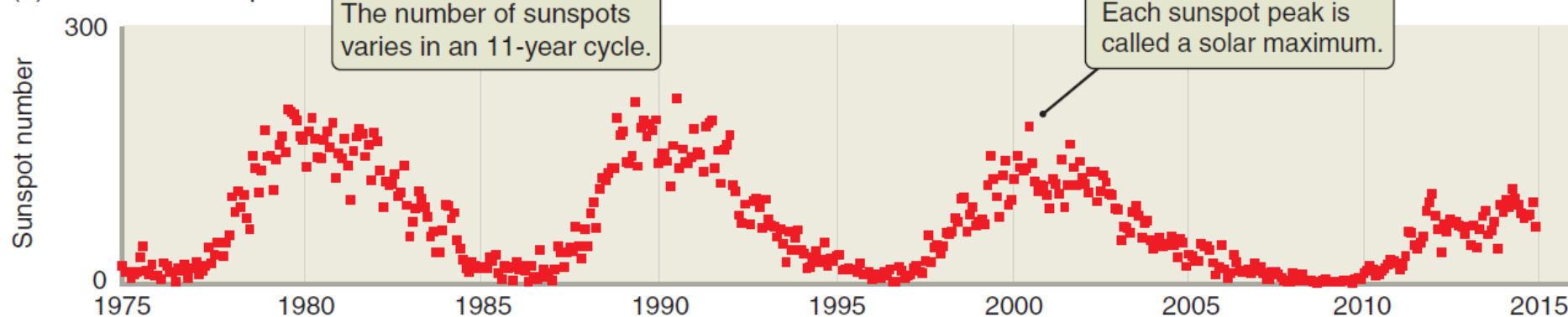
# 太阳具有22年的磁周期

太阳磁极每11年翻转一次，黑子周期是磁周期的一半

(c) Average magnetic field

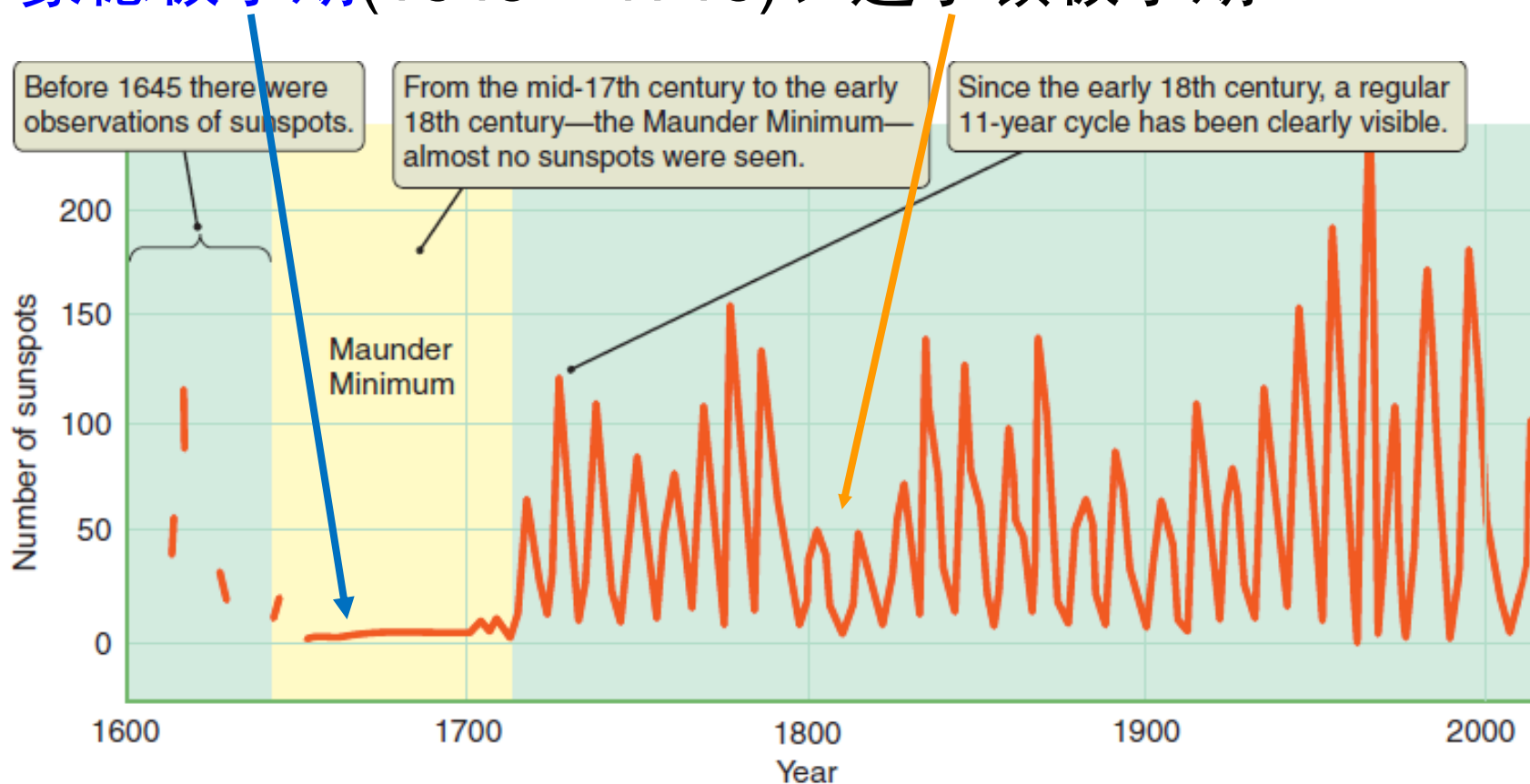


(a) Number of sunspots

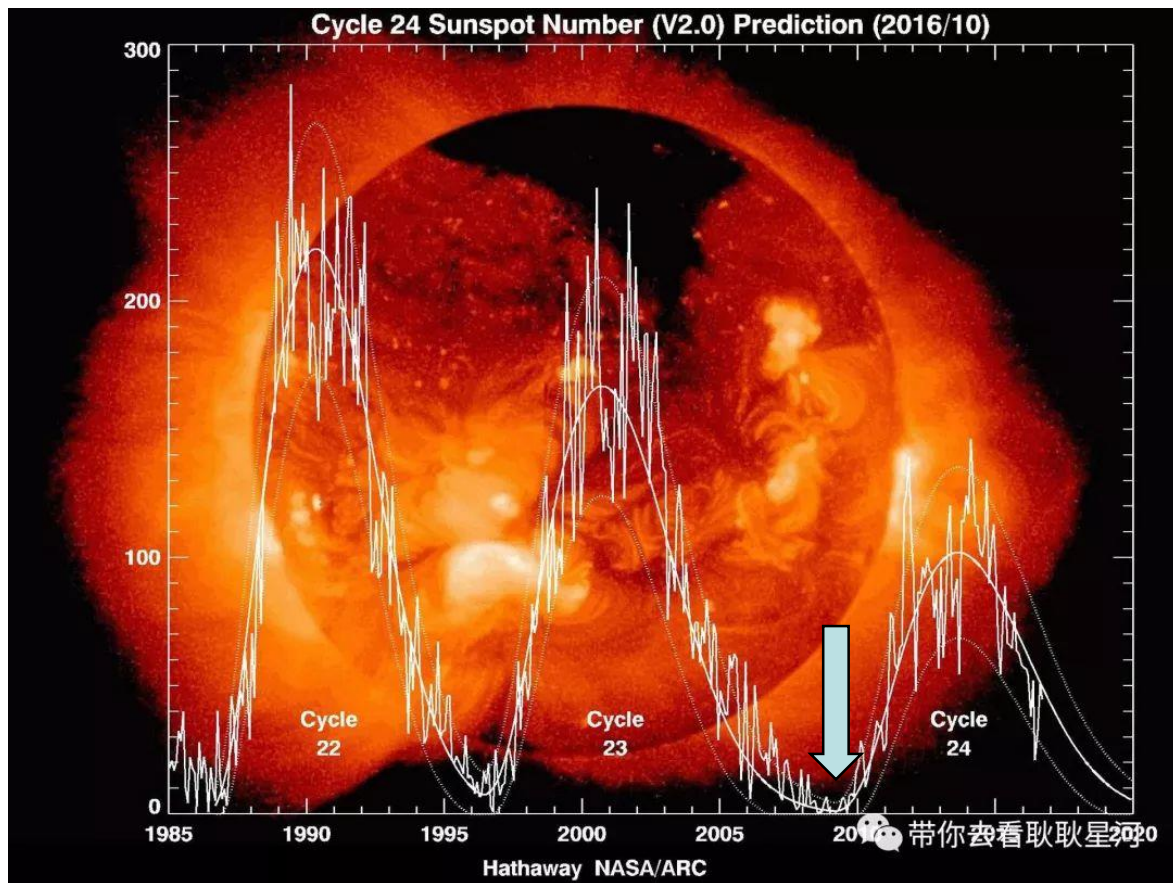


# 黑子周期并不具有严格的周期

- 周期~9.7-11.8年
- 不同周期的黑子数变化显著
- 蒙德极小期(1645 – 1715)、道尔顿极小期



# 太阳黑子周期会影响地球的气候吗？



小冰河期  
周期性干旱

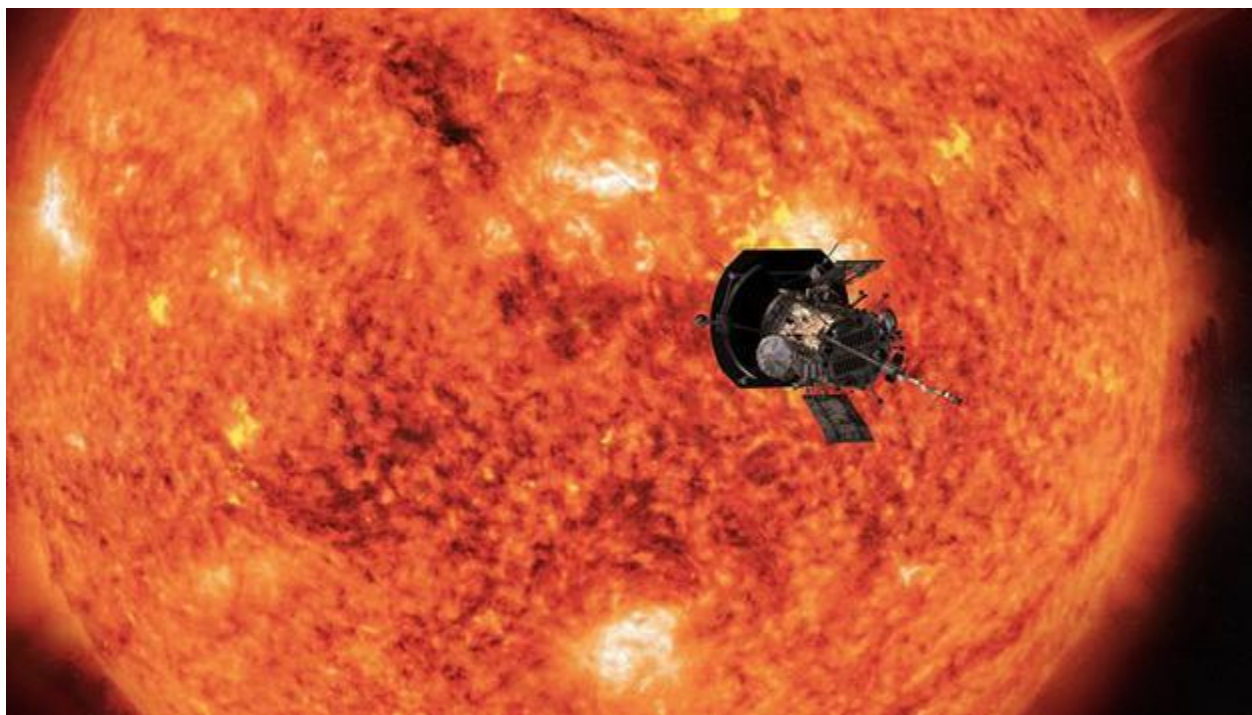
.....





# “帕克” 卫星 “触摸太阳”

- 2018年8月4日发射
- 到太阳距离640万千米（比水星近~14倍）
- 探测太阳风粒子加速和日冕超高温之谜，保护地球及人造物



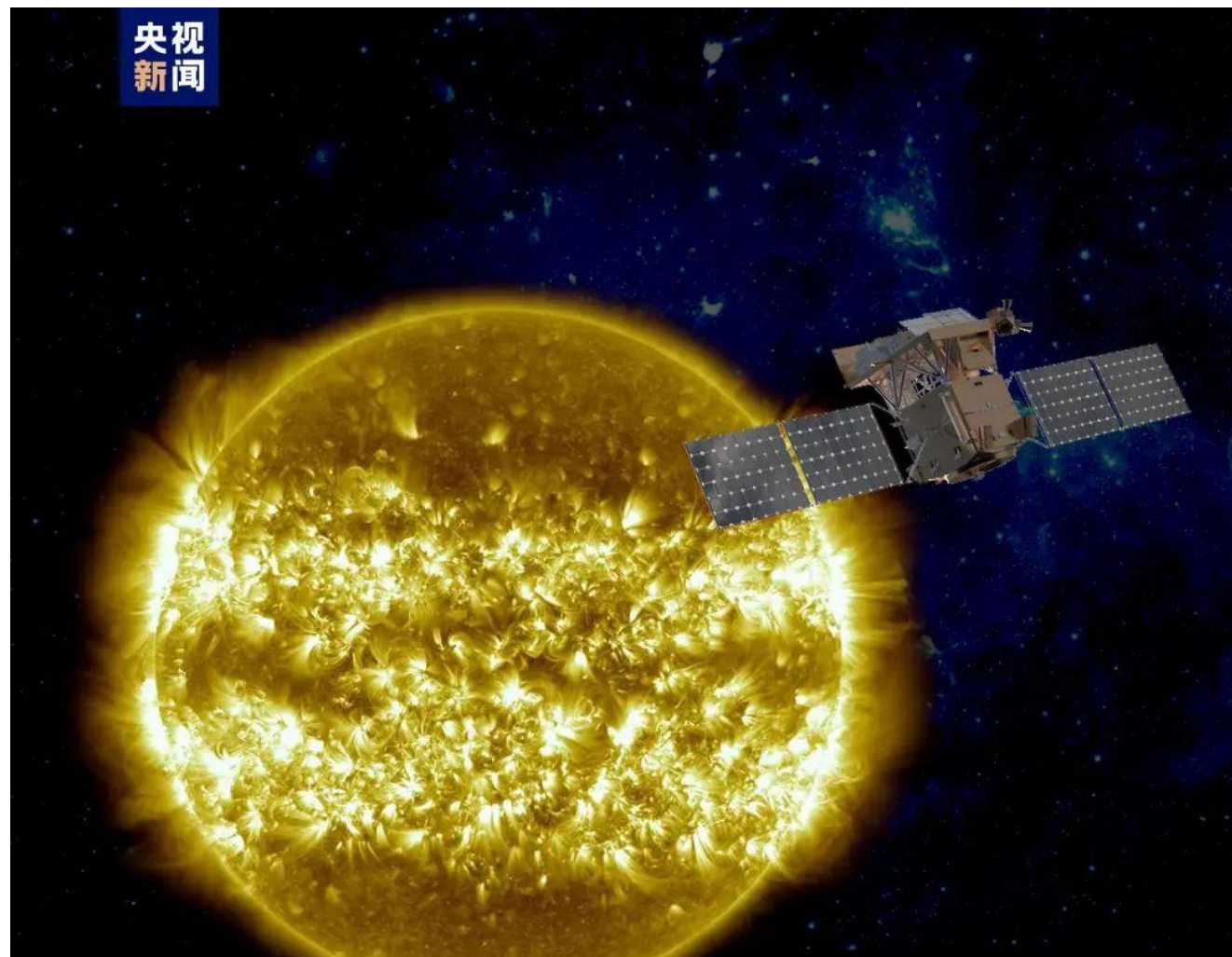
2021年10月14日，“羲和号”卫星发射升空，“追日”而行，开启了中国探索浩瀚宇宙的又一次“追梦”之旅！

“太阳H $\alpha$ 光谱探测与双超平台科学技术试验卫星”，简称太阳双超卫星 Chinese H $\alpha$  Solar Explorer (CHASE “追”)。



# 夸父一号

- 2022年10月9日
- 先进天基太阳天文台（Advanced Space-based Solar Observatory, 简称ASO-S）
- 一磁两暴：
  - 太阳磁场结构
  - 太阳耀斑和日冕物质抛射





# 夸父一号：2024-2025太阳活动高峰

- **综合性太阳探测专用卫星**，配置三台载荷：全日面矢量磁像仪（FMG）、莱曼阿尔法太阳望远镜（LST）和太阳硬X射线成像仪（HXI），将对太阳上的“**一磁两暴**”进行观测。
- 独特的有效载荷组合，将首次实现在一颗卫星上同时观测太阳全日面矢量磁场、太阳耀斑高能辐射成像和日冕物质抛射的近日面传播。
- **瞄准当代太阳物理领域重大前沿科学问题——太阳磁场、太阳耀斑和日冕物质抛射三者之间的关系**，揭示太阳磁场演变导致太阳耀斑爆发和日冕物质抛射的内在物理机制。

# SDO太阳照片作为主题邮票

