

# 太阳系的形成

## ❖ 太阳系的年龄

地球  $\rightarrow t \sim 3.9 \times 10^9$  yrs

陨石 (meteorites)  $\rightarrow t \sim 4.6 \times 10^9$  yrs

## ❖ 星云假说 (康德-拉普拉斯)

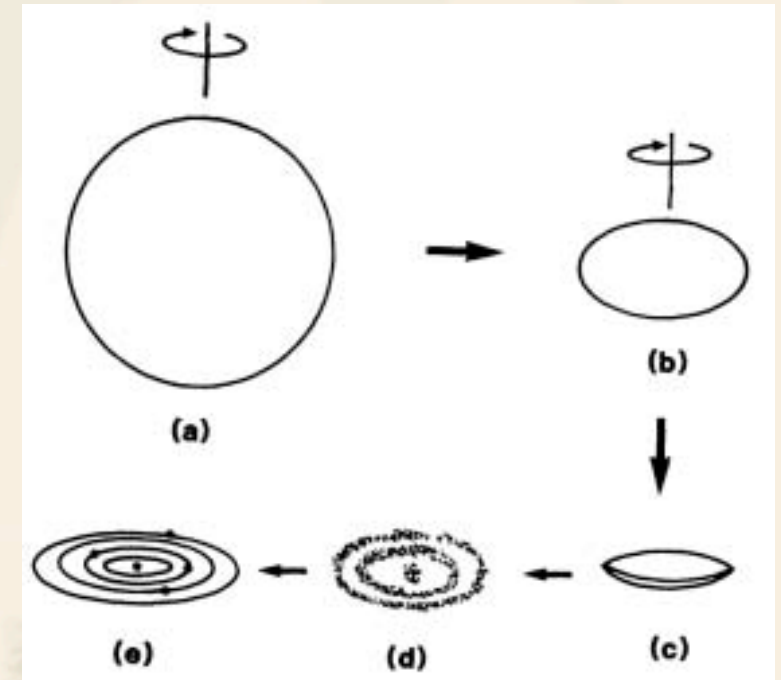
Emanuel Swedenborg 1734

Pierre-Simon Laplace 1796

巨大的分子云  $\rightarrow$  太阳系

## ❖ 分子云中的气体和尘埃

重元素来自恒星内部的核反应：原初的氢和氦  $\rightarrow$  重元素



拉普拉斯的星云假说：a) 一个旋转的星云；b). 星云塌缩并关于旋转轴变扁；c). 形成镜片状结构；4). 物质收缩形成一系列圆环；e). 环中物质凝聚形成恒星与行星。（by 白雪宁）

## ❖ 太阳系的形成过程

- 原初星云：~ 1秒差距(pc) ~ 3.26光年
- 超新星爆炸 → 激波 → 密度增加 → 自引力塌缩

- 原太阳系：

尺度：~ 13,000 AU ~ 0.2光年

质量：~  $2M_{\text{sun}}$

成份：数目上，98% H、He (74%H, 24%He)  
+2%重元素

Hydrogen-1	705 700
Helium-4	275 200
Carbon-12	3032
Nitrogen-14	1105
Oxygen-16	5920
Neon-20	1548
Sodium-23	33
Magnesium-24	513
Aluminum-27	58
Silicon-28	653
Sulphur-32	396
Argon-36	77
Calcium-40	60
Iron-56	1169
Nickel-58	49

## 太阳中元素分布

- 核素为4的整数倍的元素多
- Fe元素多
- 更重元素的产生

## ❖ 星云塌缩的细致过程:

1. 总角动量不为零
2. 塌缩过程中角动量守恒：转动加快
3. 塌缩导致密度增加
4. 碰撞导致温度升高
5. 压力增加
6. 阻止进一步的塌缩
7. 气体冷却：分子冷却，发射红外光子
8. 金斯（Jeans）质量

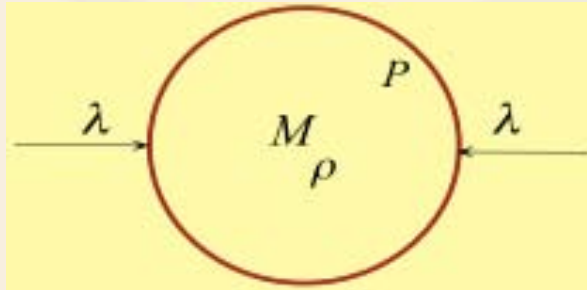


喜大普奔！恒星形成可以比预想的更快！



# 金斯长度、金斯质量

$$\lambda > \frac{v_s}{\sqrt{G\rho}}$$



声速  $v_s \sim (P/\rho)^{0.5}$

自引力加速度超过压力加速度

$$F_g \approx \frac{GM}{\lambda^2} \approx \frac{G\rho\lambda^3}{\lambda^2} > F_p \approx \frac{P\lambda^2}{\rho\lambda^3} \approx \frac{v_s^2}{\lambda}$$

自引力能超过热运动能

$$U \approx \frac{G\rho\lambda^3}{\lambda} > E_T \approx v_s^2$$

(1式乘以金斯长度)

自由下落时标小于压力传播时标

$$\tau_{ff} \approx \frac{1}{(G\rho)^{1/2}} < \tau_d \approx \frac{\lambda}{v_s}$$

(2式除以金斯长度的平方、开方、再倒数)

$$M_J = \frac{\pi}{6} \rho \lambda_J^3 = \frac{\pi}{6} v_s^3 \sqrt{\frac{\pi^3}{G^3 \rho}} \Rightarrow 1.2 \times 10^5 M_\odot \left( \frac{T}{100\text{K}} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{\rho}{10^{-24} \text{g/cm}^3} \right)^{-\frac{1}{2}} \mu^{-\frac{3}{2}}$$

## ❖ 星团中恒星的形成（通常是大量恒星一起形成）

- 金斯质量远大于太阳质量
- 金牛座：毕宿星团（Hyades）昴星团（Pleiades）
- 昴星团：~500 恒星，反射星云-尘埃云

## ❖ 太阳的形成

- 转动的原行星盘：~200AU
- 原恒星
- $t \sim 10^8$  yrs后,中心 $T \sim 10^7$  K,氢开始聚变,产生伽玛光子,辐射压与引力平衡
- 雏星—湍动—抛掉一半的质量—稳定—恒星！  
（T-Tauri相：强的外流从表面喷出，现在变弱为太阳风）

## ❖ 行星的形成

- 新生恒星周围的气体，尘埃吸积(accretion)→行星
- 星子(planetesimals)的形成：直径：1km—10km
- 星子碰撞：星子增大
- 类地行星：太阳辐射的作用  
阻止水和甲烷(methane)的凝聚  
星子小，由熔点高的硅(silicates)、金属等重元素组成  
水星、金星、地球、火星：岩石体行星
- 小行星带：木星潮汐力作用，行星(火星与木星之间)碎裂而成
- 木星与土星（gas giants）：霜线外；外部大量分子氢、氦，核区岩石、金属
- 天王星与海王星（ice giants）：核区冰，外部分子氢、其他气体（氦，甲烷）
- 行星停止生长：原恒星的T-Tauri相
- 卫星的形成（月球起源：分裂/同源/俘获/撞击说）

# 太阳

- ❖ 太阳—典型的恒星（G2光谱型）
- ❖ 太阳的直径：~30角分

$D = R\theta$  (With  $\theta$  in radians and  $R$  is the Earth-Sun distance.)

$$\theta = \frac{30}{60 \times 57.3} \text{ rad} \\ = 8.7 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$D = 1.5 \times 10^8 \times 8.7 \times 10^{-3} \text{ km} \\ = 1\,308\,900 \text{ km}$$

准确值:

$$D = 1,391,978 \text{ km} \\ R_{\text{sun}} \approx 700,000 \text{ km}$$



## ❖ 太阳质量

$$MmG/R^2 = mv^2/R$$

$$M = v^2 R / G$$

$$v = 2\pi R / P$$

$$M = 4\pi^2 R^3 / GP^2$$

$$\begin{aligned} &= 4 \times (3.14159)^2 \times (1.496 \times 10^{11})^3 / 6.67 \times 10^{-11} \times (3.156 \times 10^7)^2 \text{ kg} \\ &= 1.99 \times 10^{30} \text{ kg} \end{aligned}$$

准确值:

$$M = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

M=2,00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 00000 千克

## ❖ 太阳密度

$$\begin{aligned}\text{Volume} &= 4/3 \pi r^3 \\ &= 4/3 \pi (700\,000\,000)^3 \\ &= 1.4 \times 10^{27} \text{ m}^3\end{aligned}$$

So the density is:

$$\begin{aligned}&= M/V \\ &= 2 \times 10^{30} / 1.4 \times 10^{27} \text{ kg m}^{-3} \\ &= 1428 \text{ kg m}^{-3}\end{aligned}$$

## ❖ 太阳光度

$\text{W/m}^2$

$$A = 4\pi(1.5 \times 10^{11})^2 \text{ m}^2$$

$$E = \underline{1370} \times 4\pi(1.5 \times 10^{11})^2 \text{ W} \\ = 3.86 \times 10^{26} \text{ W}$$



## ❖ 黑体辐射与太阳表面温度

- 黑体辐射（空窖辐射）
- 黑体谱
- 1901年：Max Planck找到黑体辐射函数形式
- 1905年：光量子理论→光电效应





$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

(单位: power/surface area/solid angle/freq.)

Wein位移定律:

$$\lambda_{\max} = 2.897 \times 10^{-3}/T \text{ m}$$

$$\lambda_{\max} = 2.897 \times 10^6/T \text{ nm}$$

Stefan-Boltzmann  
定律:

功率  $E = \sigma AT^4 W$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

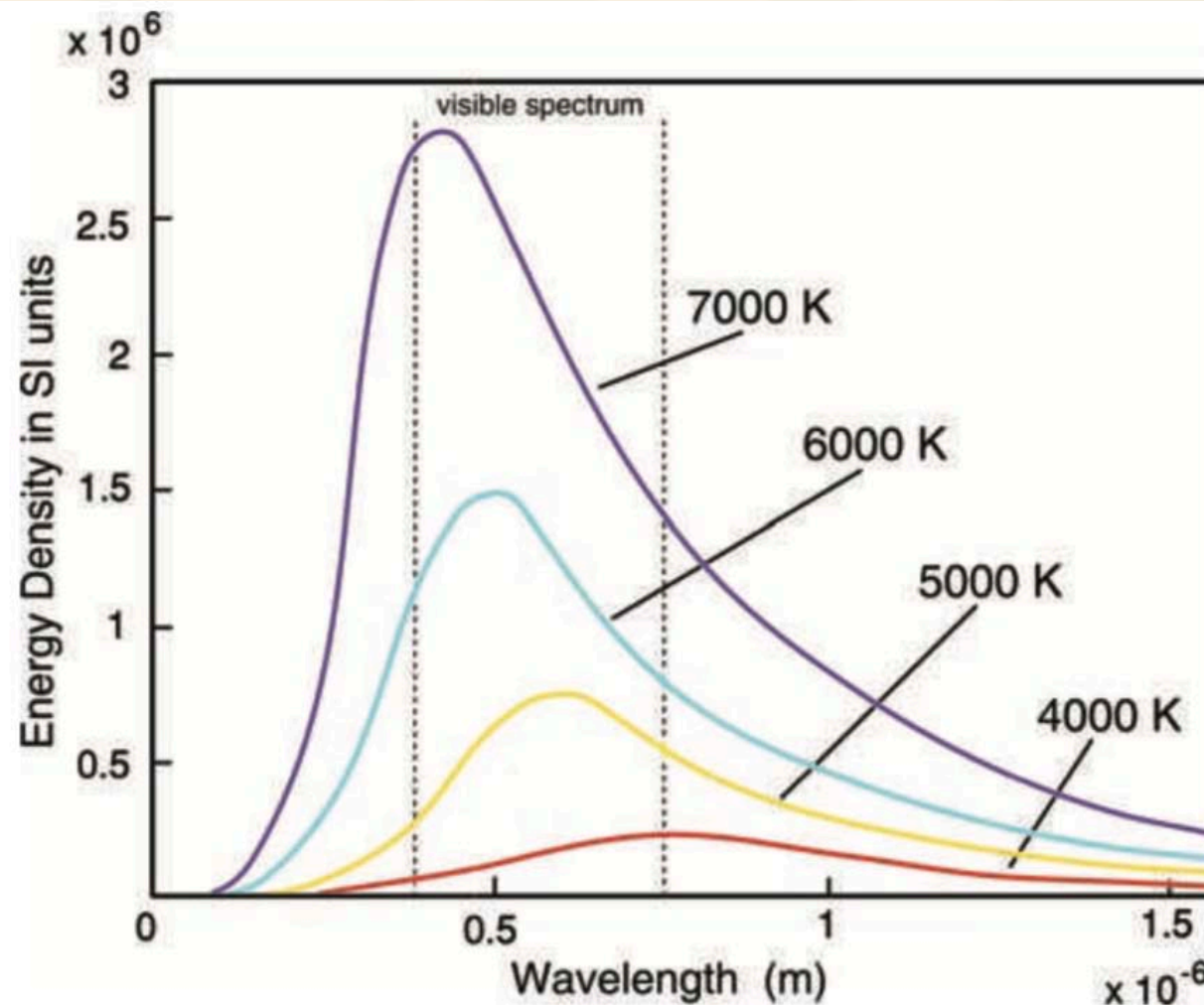


Figure 2.3 Black body radiation curves.



## ❖ 太阳表面温度

$$\lambda_{peak} \approx 500nm$$

$$\begin{aligned} T &= 2.9 \times 10^6 / \lambda_{peak} \text{ K (where } \lambda_{peak} \text{ is in nanometres)} \\ &= 2.9 \times 10^6 / 500 \text{ K} \\ &= 5800 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= \sigma AT^4 \\ &= 5.671 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (6.95 \times 10^8)^2 \times T^4 \\ T &= \{4 \times 10^{26} / [5.671 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (6.95 \times 10^8)^2]\}^{1/4} \\ &= (4 \times 10^{26} / 3.44 \times 10^{11})^{1/4} \\ &= 5839 \text{ K} \end{aligned}$$

精确值:

$$T = 5780K$$

## ❖ 小结：太阳参数

Diameter	$= 1391978 \text{ km}$
Mass	$= 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
Density	$= 1400 \text{ kgm}^{-3}$
Luminosity	$= 3.86 \times 10^{26} \text{ W}$
Surface Temperature	$= 5780 \text{ K}$

# Fraunhofer线

- ❖ 1666年：牛顿用棱镜分解白光
- ❖ 1804年：William Wollaston 发现暗线/吸收线
- ❖ 1911年：Joseph Fraunhofer精确定位暗线
- ❖ Gustav Kirchhoff & Robert Bunsen：暗线与原子的发射线对应：Fraunhofer线



Figure 2.4 The solar spectrum showing the Fraunhofer lines. The peak intensity is in the yellow part of the spectrum close to the strong pair of sodium D lines in the centre of the spectrum.

## ❖ 氦（Helium）元素的发现

Helios – 太阳（希腊语）

## ❖ 为什么没有发射线？

- 视线上的吸收为100%
- 发射线各向同性，仅一小部分落回视线上
- 碰撞退激发

## ❖ 光谱分析（太阳对流）

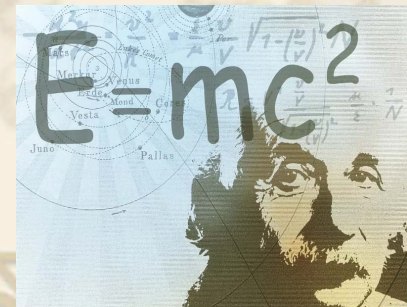
- 71% H（91.2%数目）
- 27.1% He（8.7%）
- 0.97% O（0.078%）
- 0.40% C（0.043%）



# 核聚变

## ❖ 太阳的能源

- 化学能：碳（煤球）？  $t \sim 1000$ 年！
- 收缩释放引力能：1870年，Helmholtz， $t \sim 20,000,000$ 年
- 19世纪，地球上化石的年龄大于20,000,000年
- 核能：
  - 1905年，质能公式
  - 质子和alpha粒子质量的精确测量（ $4p > \text{He}$ ）
  - 热核反应： $T \sim 10^7 \text{K}$ ，量子隧道效应+高能“尾巴”
  - 反应率： $10^9$ 年/质子！
  - 寿命：100亿年！



## 太阳能量主要来源

### PP I 链

$$M \leq 2M_{\odot}$$

$$8 \times 10^6 \text{ K} \leq T_c \leq 2 \times 10^7 \text{ K}$$



总结结果是



$$\Delta E = 4 \times 1.007825 - 4.002603 = 0.02870 \text{ Amu} = 26.73 \text{ MeV}$$

(估计产能率: ~0.7%)

$$\gamma \Rightarrow 26.20 \text{ MeV} \quad \nu \Rightarrow 0.53 \text{ MeV} / 2$$

# PP I 链

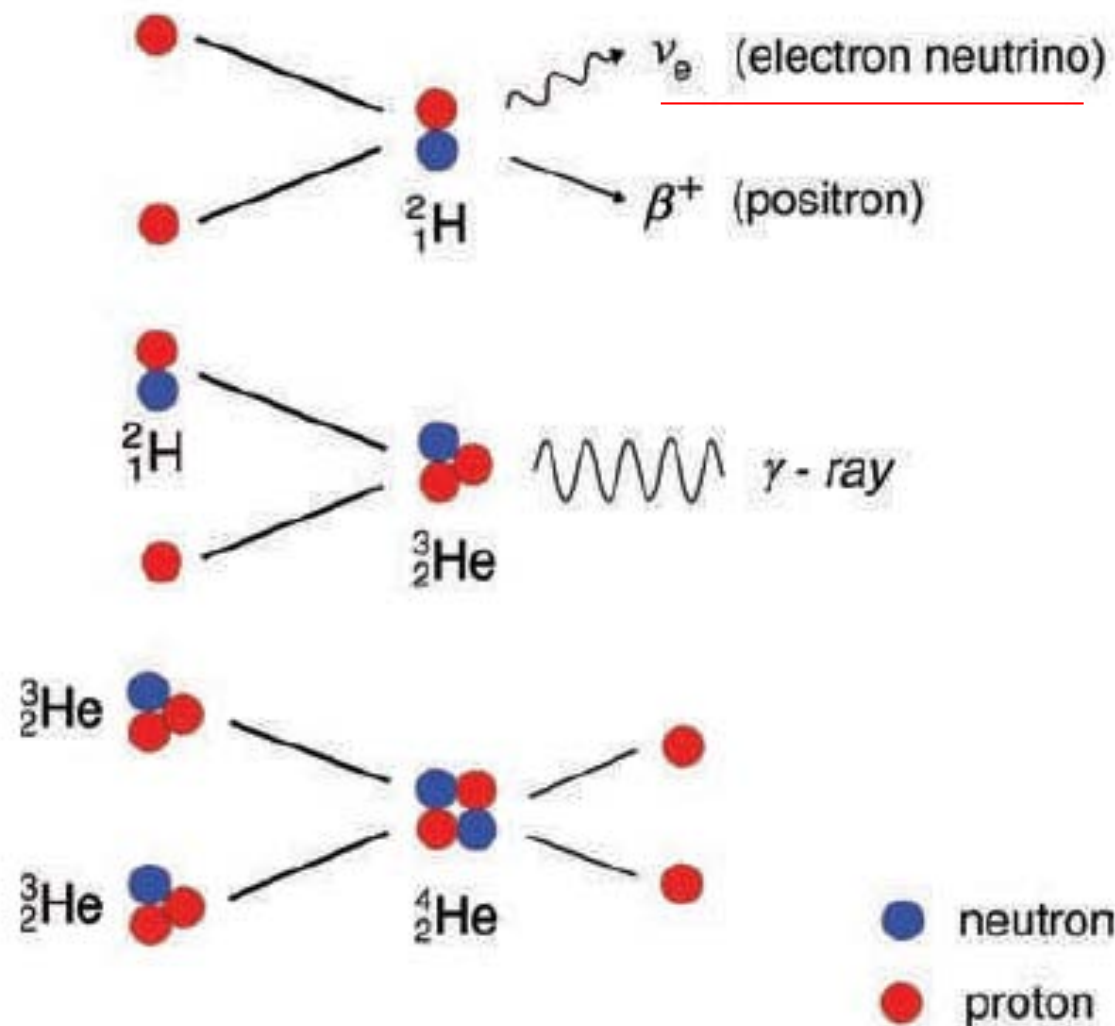
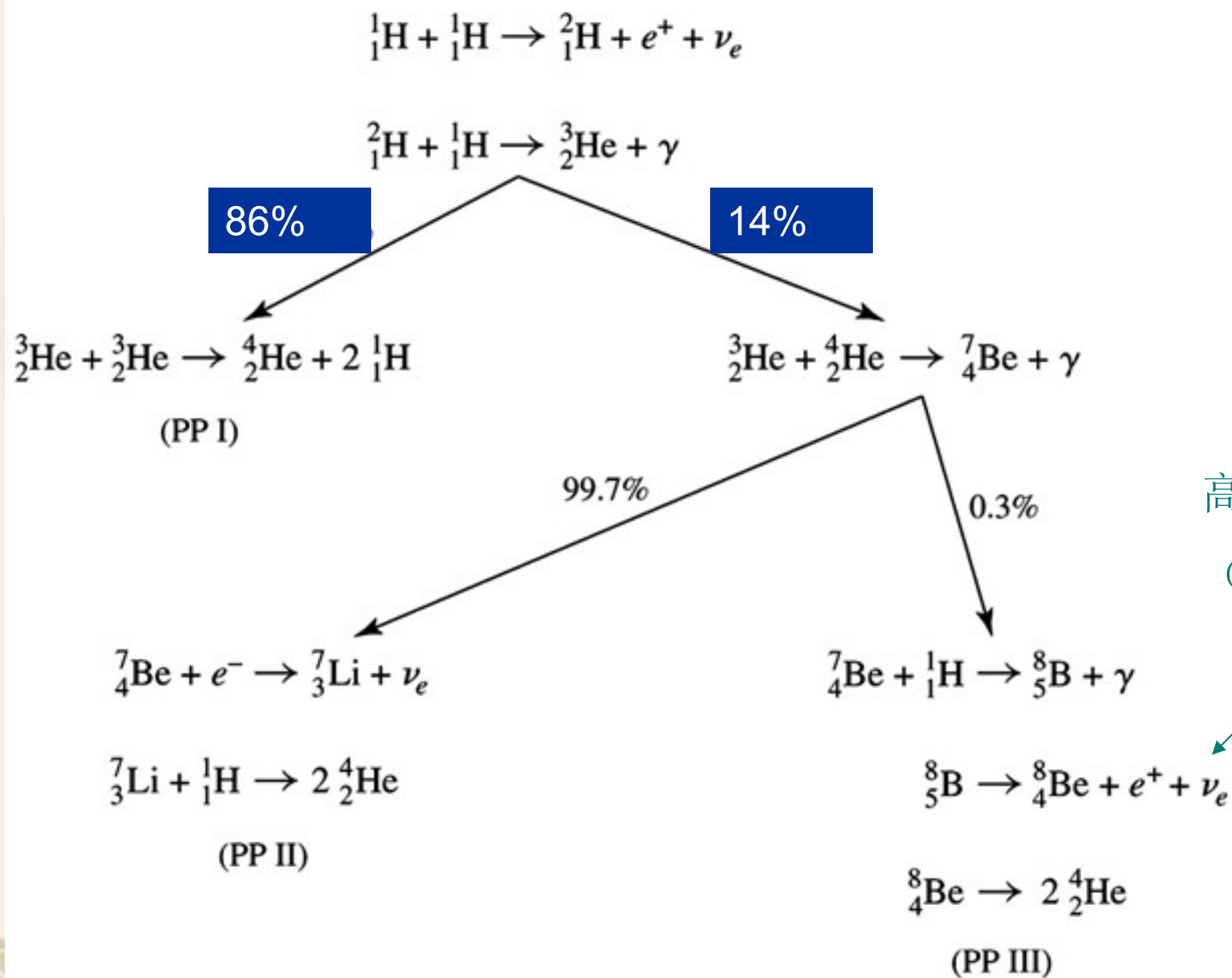


Figure 2.5 The three steps in the proton-proton cycle. Steps 1 and 2 are carried out twice to provide the two  ${}^3\text{He}_2$  nuclei required for the third step.



# PP链的分支

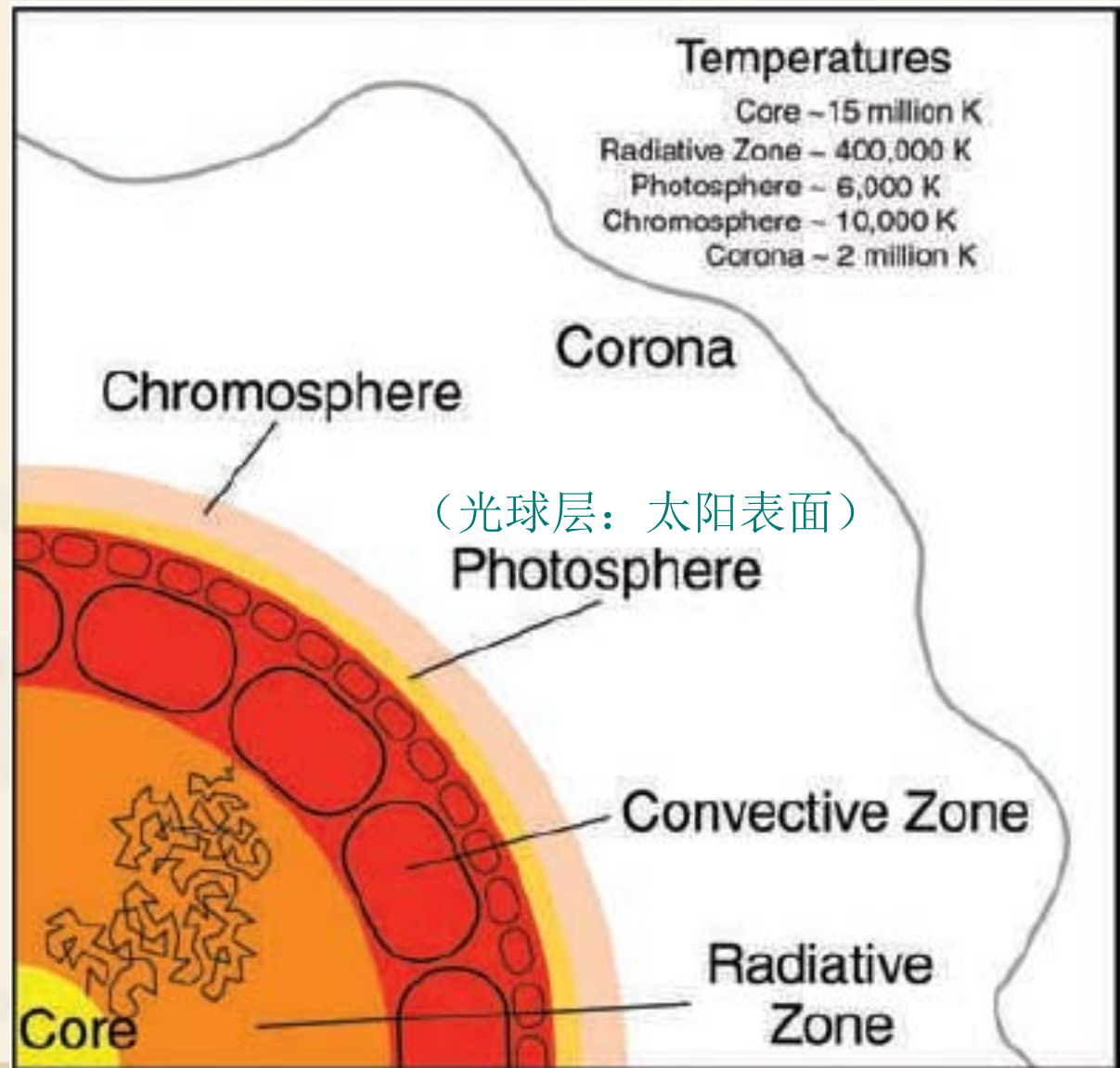


高能电子中微子  
(7-14 MeV)



## ❖ 高能光子的辐射转移—随机行走

- $t \sim 10^5$  年
- 光子能量下降
- 光子与物质热化



## ❖ 太阳核燃烧的质量比

Electron = 0.000549 amu

Proton = 1.007276 amu

Neutron = 1.008665 amu

Helium-4 = 4.0026 amu

$$1\text{amu} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

中子衰变：半衰期~10.5min

氢聚变产能率：

$$\varepsilon = \frac{0.0305}{4.0026} = 0.76\%$$

太阳质量燃烧率（假设100%产能率）：

$$\begin{aligned}\text{Mass loss} &= 3.8 \times 10^{26} \text{ W} / (3 \times 10^8)^2 \text{ kg s}^{-1} \\ &= 4.4 \times 10^9 \text{ kg s}^{-1}\end{aligned}$$

实际太阳质量燃烧率： $4.4 \times 10^9 / 0.76\% = 5.7 \times 10^{11} \text{ kg/s}$

太阳可以燃烧多久？

$$\begin{aligned}\text{Lifetime} &= 2 \times 10^{30} / 5.7 \times 10^{11} \text{ s} \\ &= 3.5 \times 10^{18} \text{ s}\end{aligned}$$

$$1 \text{ billion years is } (365 \times 24 \times 60 \times 60) \times 1 \times 10^9 \text{ s} = 3.15 \times 10^{16} \text{ s}$$

So the lifetime is  $3.5 \times 10^{18} / 3.15 \times 10^{16}$  billion years = ~100 billion years.

只有10%太阳质量（亦即~10%氢）被燃烧： $t \sim 100$  亿年！



“妈呀，要烧100亿年！  
哥烧的不是核燃料，哥烧的是寂寞！”



❖ 中微子产生率:

一次pp链的质量亏损

$$\begin{aligned} &= 0.0305 \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 5 \times 10^{-29} \text{ kg} \end{aligned}$$

pp链的反应率（每秒）

$$4.4 \times 10^9 / 5 \times 10^{-29} = 8.8 \times 10^{37}$$

中微子产生率（每秒）

$$\sim 2 \times 10^{38} / s$$

太阳释放能量 $\sim 2\%$ 由中微子带走，其余为电磁辐射



# 太阳中微子问题

- ❖ 太阳中微子的能量
  - PPI:  $\sim 0.26$  MeV
  - PPIII:  $\sim 7-14$  MeV, 相对易测
- ❖ Ray Davis, 1970s, PPIII中微子



放射性氩: 半衰期 $\sim 34$ 天

- ❖ 每月10个氩元素产生
- ❖ 只有理论预言的三分之一!  
(太阳中微子失踪之谜)



# 中微子探测

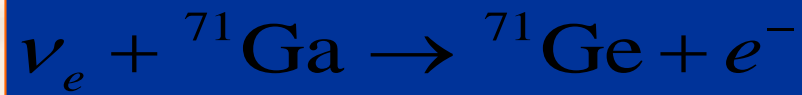
探测中微子，相当于在整个撒哈拉大沙漠中寻找一粒沙子

—— 诺贝尔奖委员会

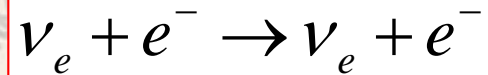


USA, 615吨四氯乙烯

Davis (2002年获诺贝尔奖)

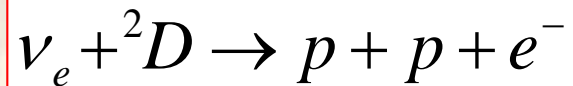


USSR, Italy



日本神冈, 2140吨水

小柴昌俊 (2002年获诺贝尔奖)



Canada & USA, 1000吨重水

太阳中微子之谜

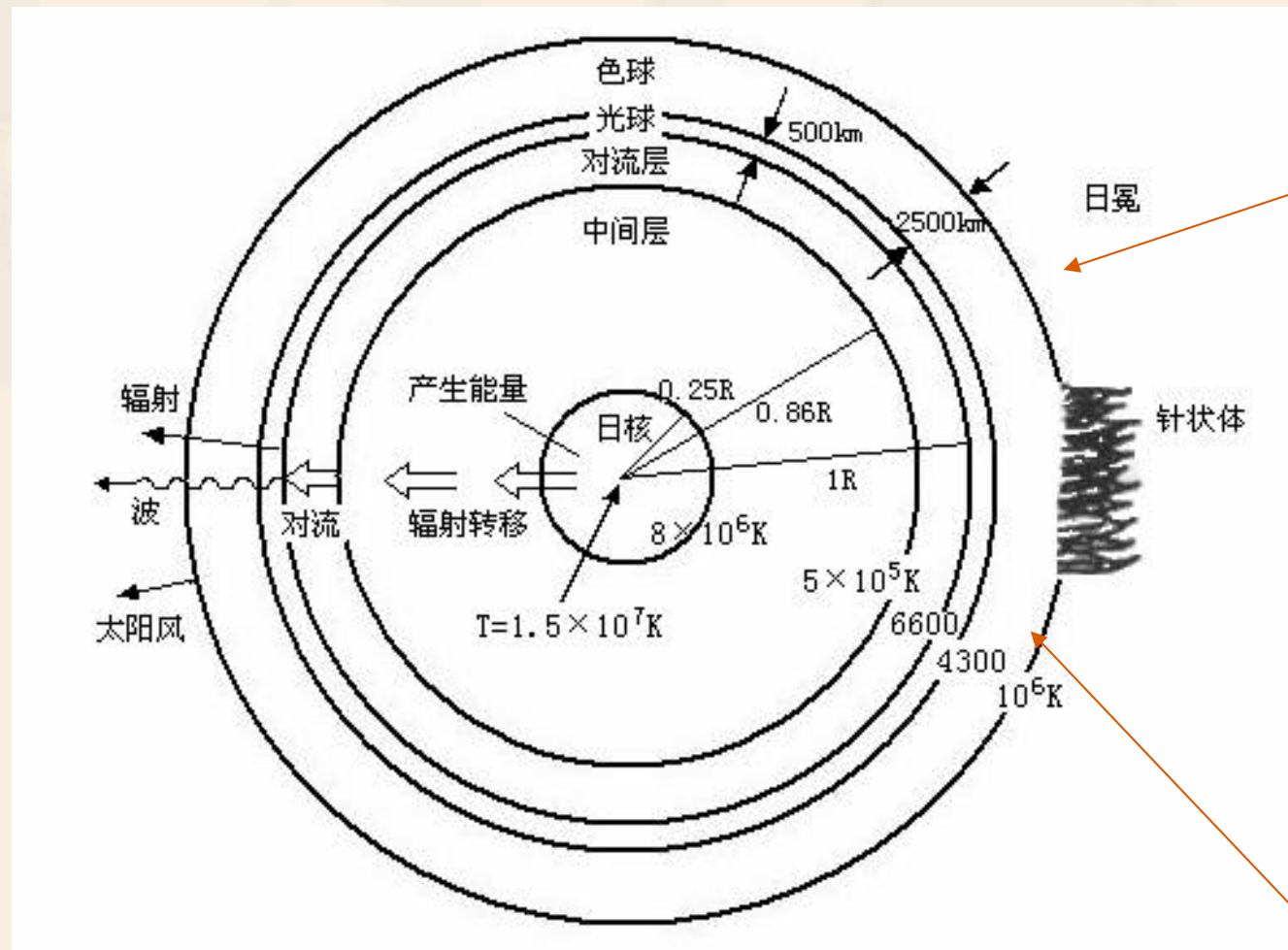
$\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau$  中微子振荡

宇宙暗物质来源之一:

$m_\nu \neq 0 ?$



# 太阳大气:光球层、色球层、日冕

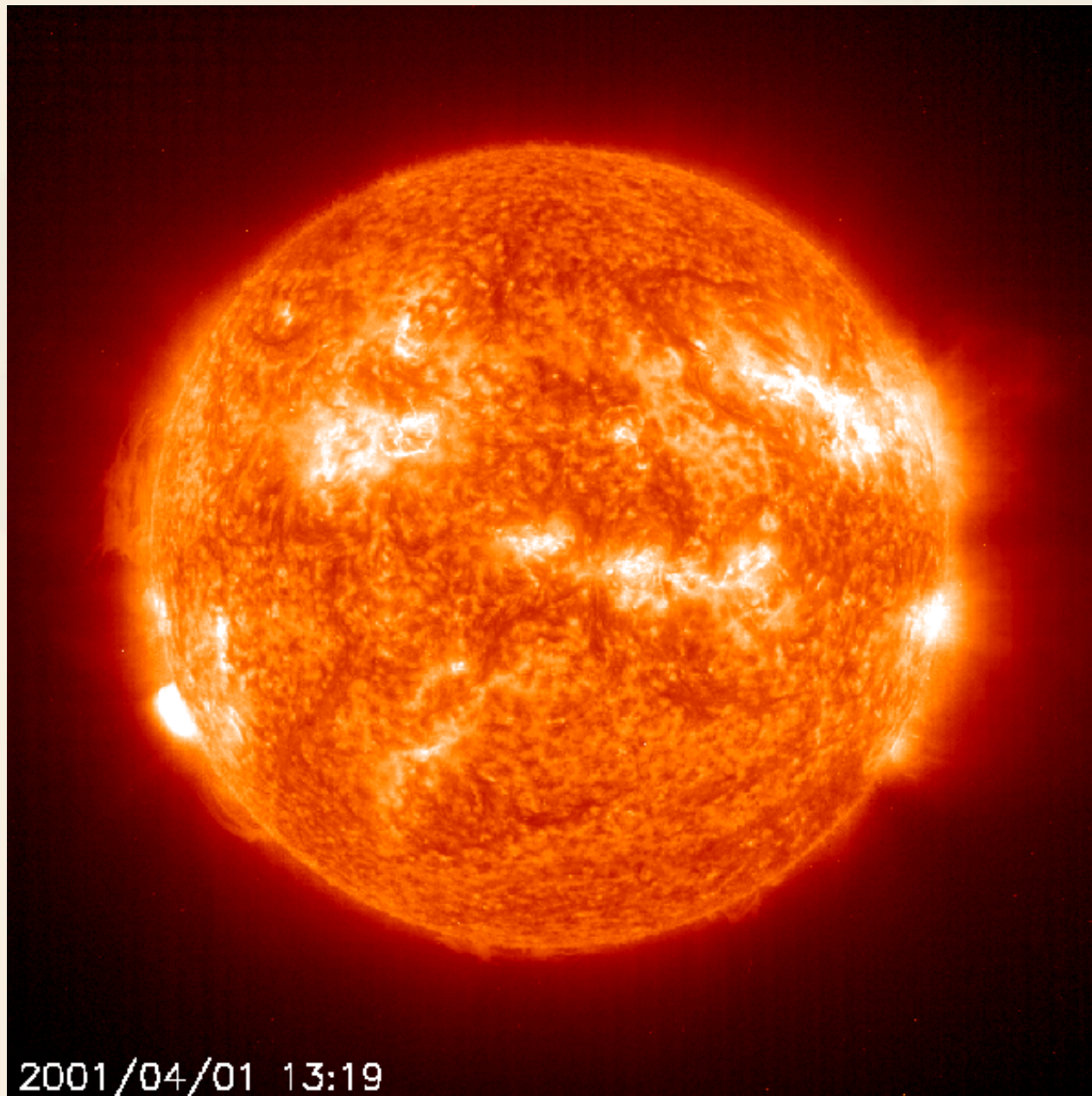


$T \sim 2 \times 10^6 K$

色球层的密度:  
 $10^{-4}$ 光球层密度

转变层

( $\sim 100km$ )



2001/04/01 13:19

太阳耀斑

尺度：  
~1000Km

持续时间：  
5-10分钟



# 日冕



大小依赖于太阳的活动：~几倍的太阳半径

成份：质子、高度电离的离子、高能电子

密度低：~ $10^{-14}$ 地球表面的密度

光度低（可见光）：~ $10^{-6}$  光球层的光度

## ❖ 日冕的观测

- 日全食
- 日冕仪

## ❖ “氦”元素（Coronium）：

- 发射线（日全食时观测）
- 绿线
- 高度电离的铁离子发射线

# 太阳风

(从太阳上层大气射出的超声速等离子体带电粒子流，是一种连续存在，来自太阳并以200-800km/s的速度运动的高速带电粒子流)

- ❖ 存在的证据：彗尾
- ❖ 彗星通常有两个彗尾
  - 尘埃彗尾：太阳光的辐射压
  - 离子彗尾：蓝光，很直，不能用辐射压解释，来自太阳的带电粒子的作用
- ❖ 太阳风的测量
  - $n \sim 7 \times 10^6 / \text{m}^3$  (远远低于地球大气), p, e<sup>-</sup>, 离子
  - $v \sim 200-800 \text{ km/s}$



太阳风单位时间穿过单位面积的质量:

$$1.7 \times 10^{-27} \times 7 \times 10^6 \times 5 \times 10^5 = 6 \times 10^{-15} \text{kg}$$

(1amu \* n \* v)

太阳每年损失的质量:

$$6 \times 10^{-15} \text{kg} \times 4\pi(1.5 \times 10^{11})^2 \times 86\,400 \times 365 = \sim 5 \times 10^{16} \text{kg}$$

太阳质量损失时标:

$$\frac{M_{SUN}}{\dot{M}_{SUN}} \sim 10^{13} \text{ yrs} \gg 10^{10} \text{ yrs}$$

太阳寿命



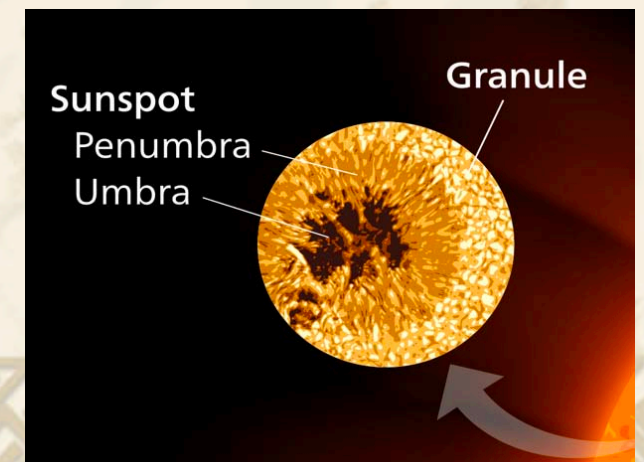
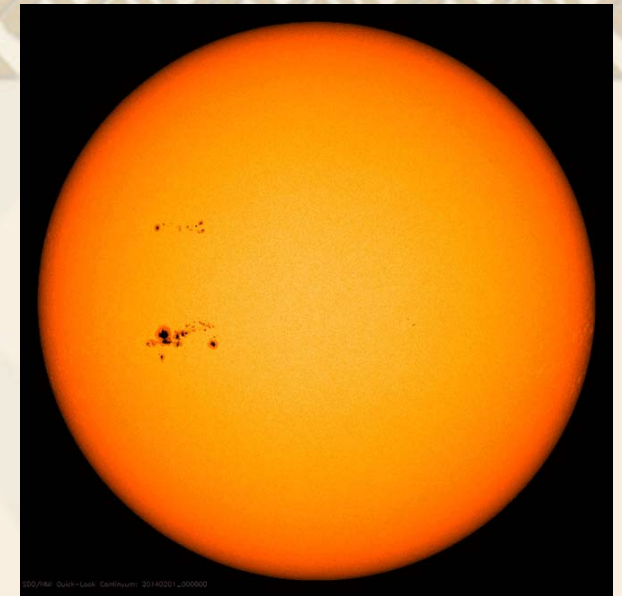
# 太阳磁场和 黑子活动周期

## ❖ 太阳黑子

- 成对或成群出现
- Umbra（本影）：太阳黑子最暗的区域
- Penumbra（半阴影）：太阳黑子周围较浓的浅灰色区域
- 黑子为什么黑？温度低！低1000K
- Plage（白沙滩）：黑子区附近出现的明亮和极热的区域

## ❖ 太阳表面转动速度的测量（利用黑子）

- 赤道：T~ 28 days
- 两极：T~ 35 days
- 较差转动（以利于产生磁场）



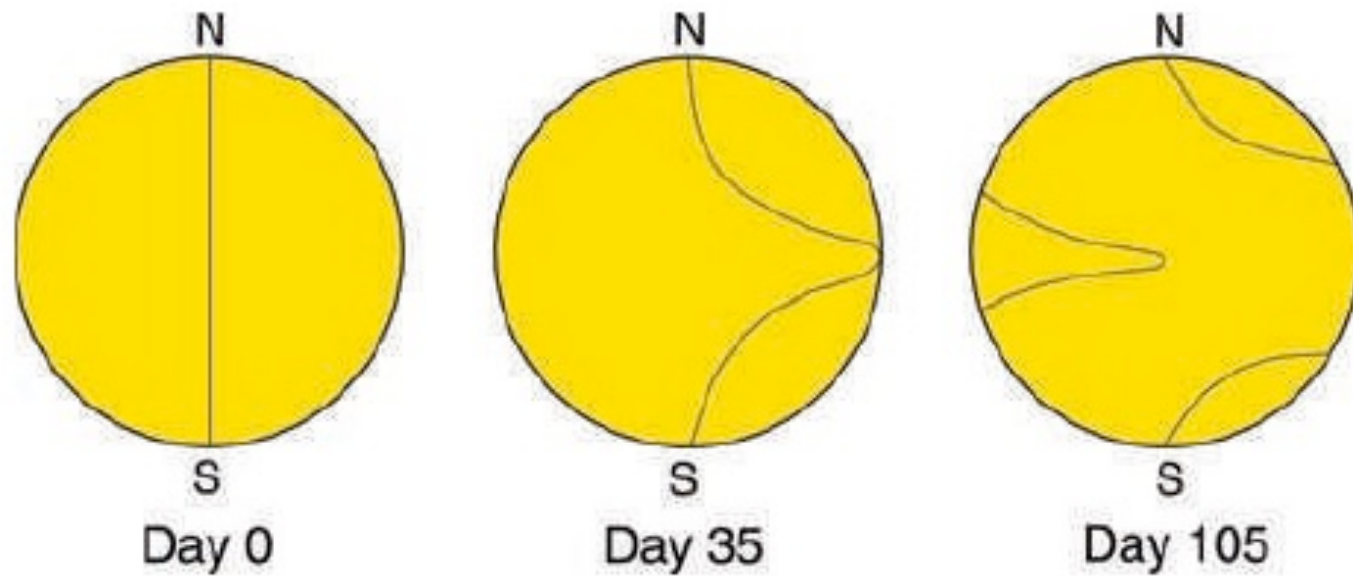


Figure 2.10 The winding of the Sun's magnetic field due to the differential rotation of the Sun.

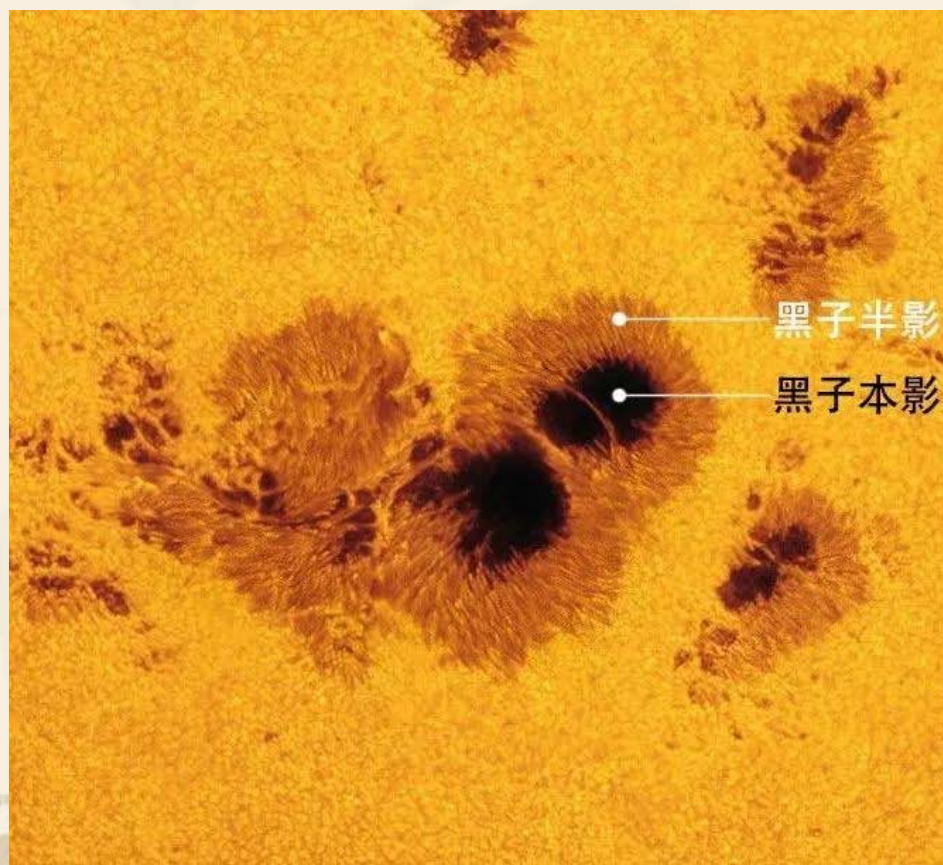
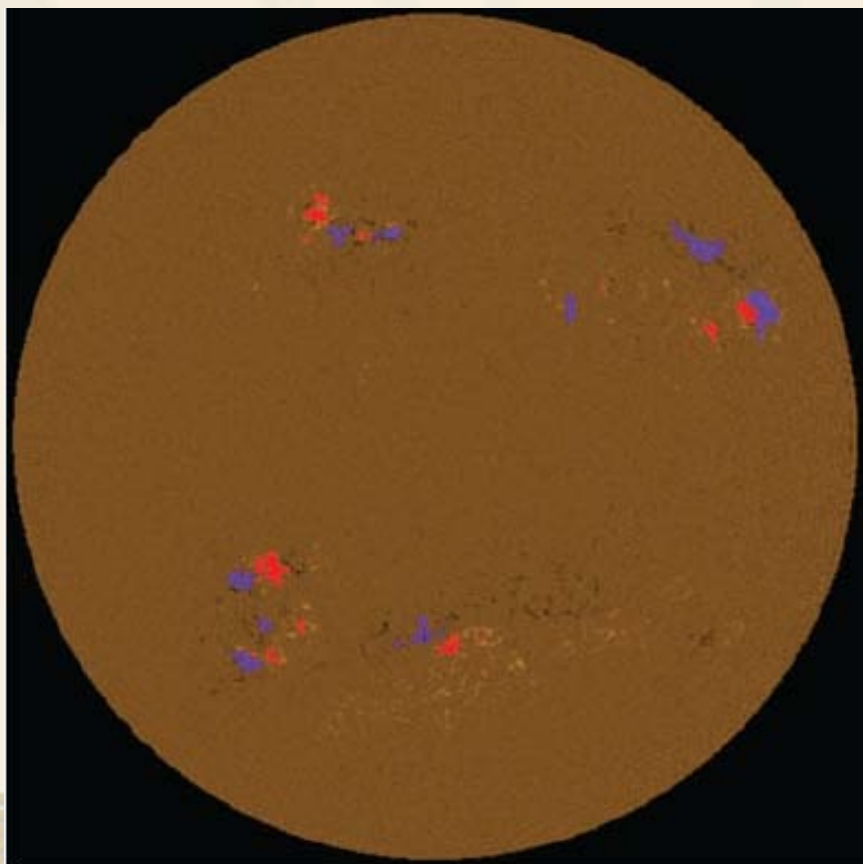
较差转动：磁力线缠绕，磁场放大（对流层带电粒子）

磁浮力：黑子成对产生！



## ❖ 太阳黑子的周期性变化

- 3-4年：黑子增多
- 7-8年：黑子数目减少
- 11年的周期（平均：10.5年）但黑子磁场极性相反
- 21年的周期





## ❖ 太阳耀斑

- 源于冕区：黑子周围活跃区域的上方
- 磁重联释放磁能
- $10^{22}$ - $10^{25}$ J， 分钟-小时
- 加速电子、质子、重离子到相对论性速度



## ❖ 日冕物质抛射（CME）

- 电子、质子、He、O、Fe等
- 最高速度： $v \sim c/2$ ，约十几分钟到达地球
- 危害：宇航员、卫星的子系统、短波通讯、电力系统（Quebec省，1989.3）



## ❖ 极光（Aurora）

- 北极光（Aurora Borealis）
- 南极光（Aurora Australis）
- Aurora—[罗神]曙光女神
- Borealis—[希腊]北极风
- Australis—[拉丁]南

## ❖ 极光特征

- 绿、红光
- 常出现在春分、秋分时

## ❖ 产生机制：太阳风与地球大气中的中性原子的碰撞—激发—退激发



Figure 2.15 An auroral display. Image: Wikipedia Commons.

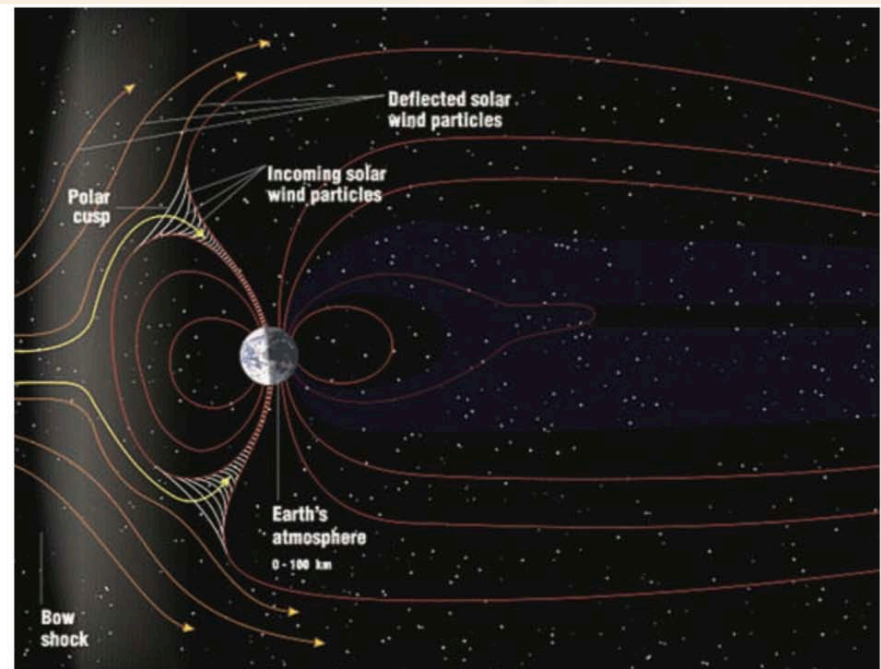
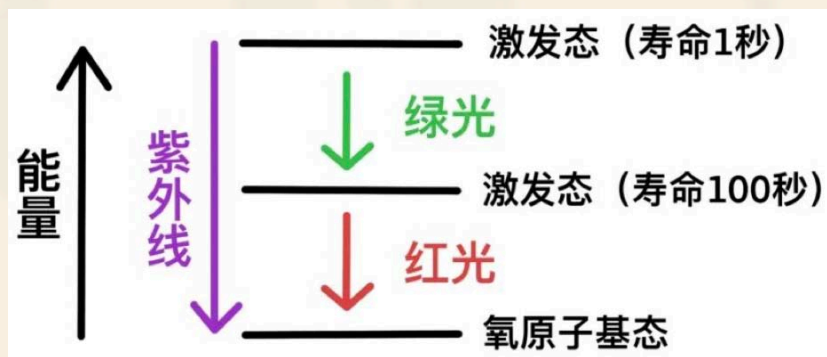


Figure 2.14 The path of solar wind particles towards the polar regions of the Earth. Image: Wikipedia Commons.



## ❖ 发射线:

- O: 波长~557.7nm, 绿
- O: 波长~630.0nm, 暗红
- N: 蓝色
- 分子N: 紫色、暗红

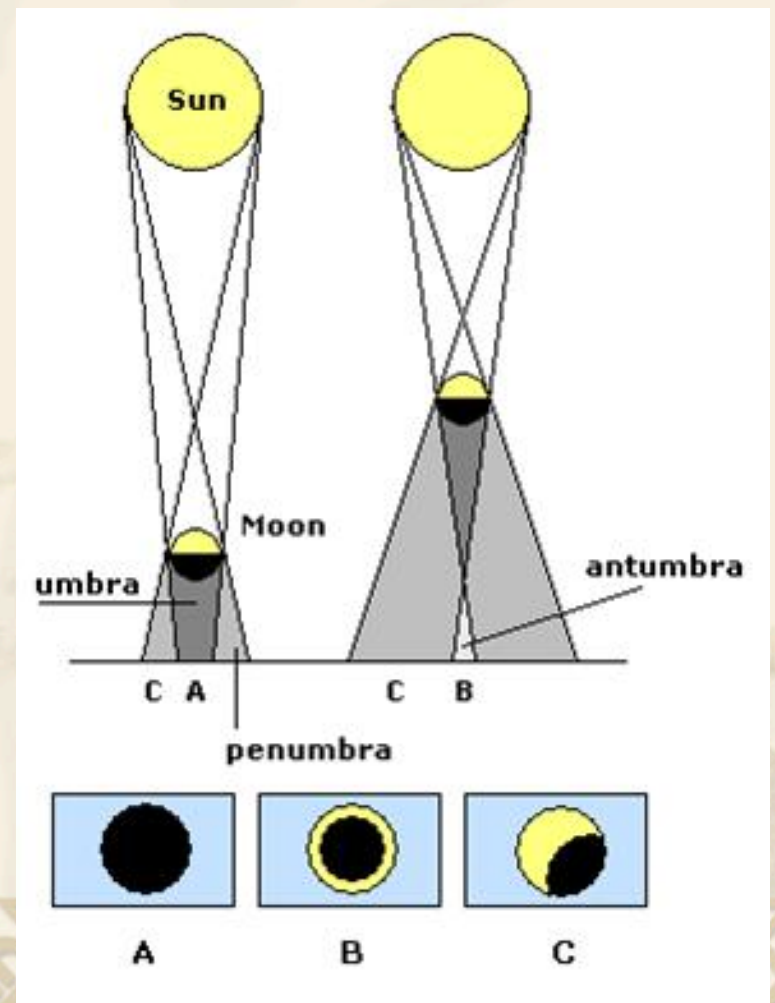
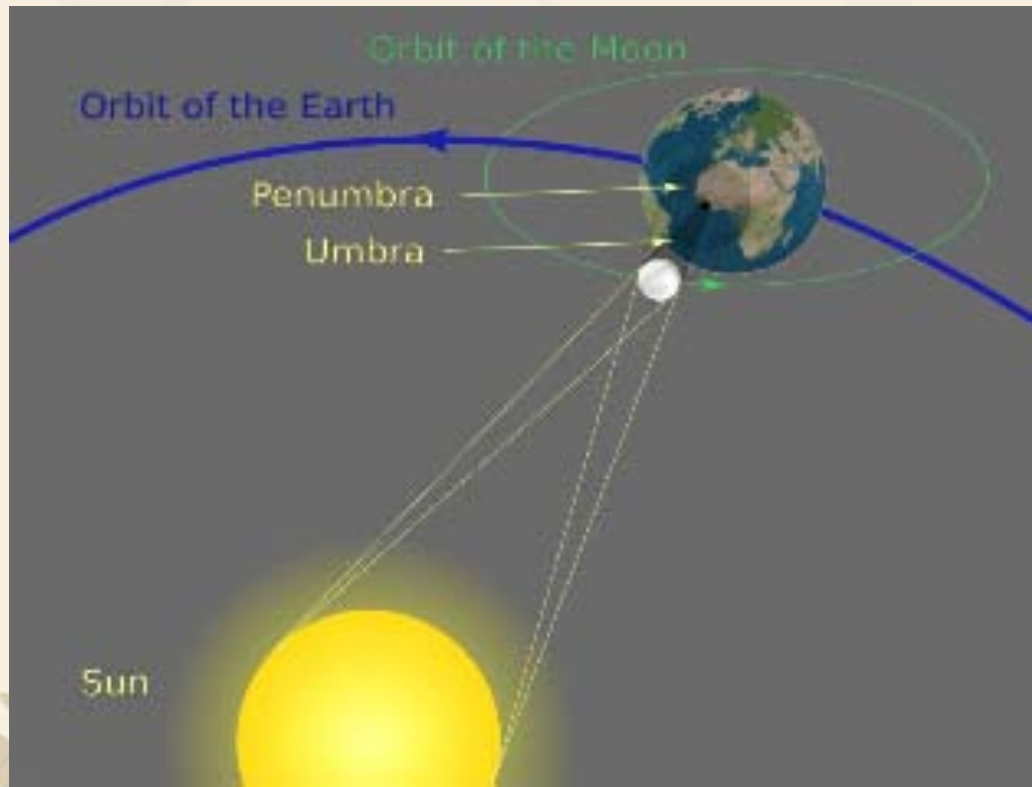
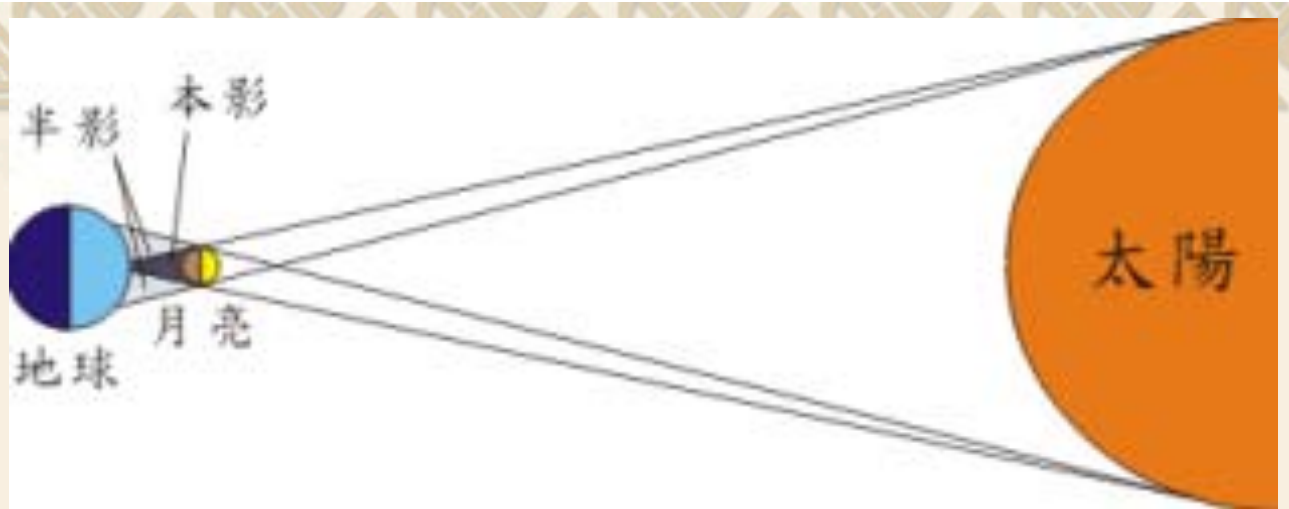




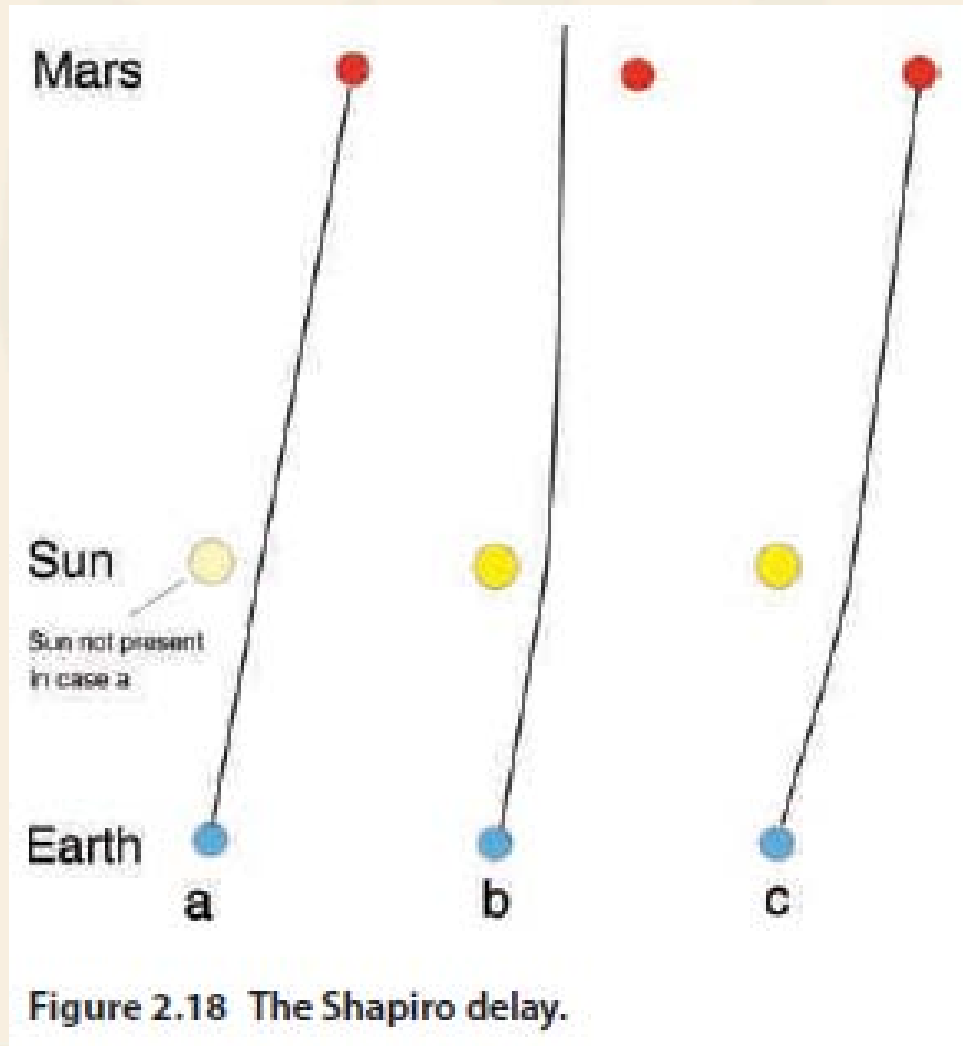
# 日食

- ❖ 月亮的角直径与太阳的角直径相当
- ❖ 月球轨道与地球公转轨道平面夹角约**5度** (~18个月)
- ❖ 都为椭圆轨道：日全食和日环食
- ❖ 日食带
- ❖ 最长的日全食：**7分29秒**（**2186年7月16日**）

# 日食的形成



## ❖ Shapiro时延 (Shapiro Delay)



$$\Delta t \approx 200 \mu s$$

- Irwin A. Shapiro, 1960s
- 火星探测器：海盗号 (viking) 精度： $10^{-3}$
- 卡西尼探测器（土星），精度： $2 \times 10^{-5}$

有作业啦！

