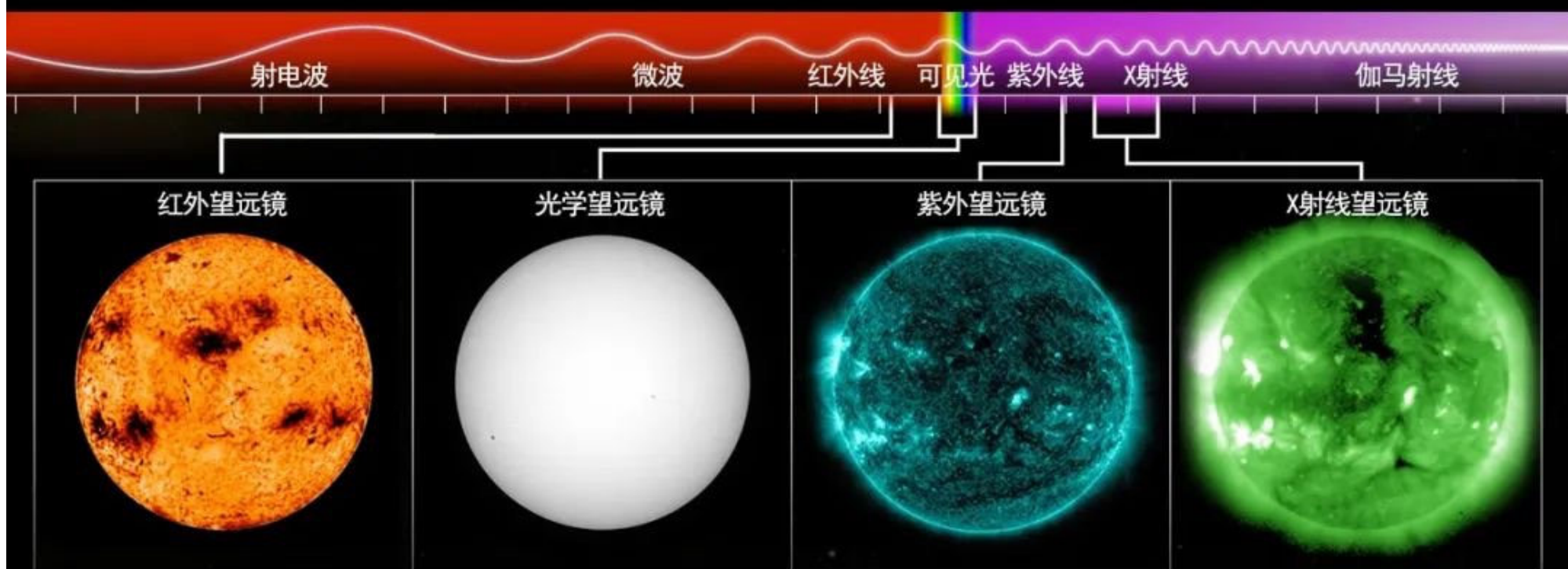
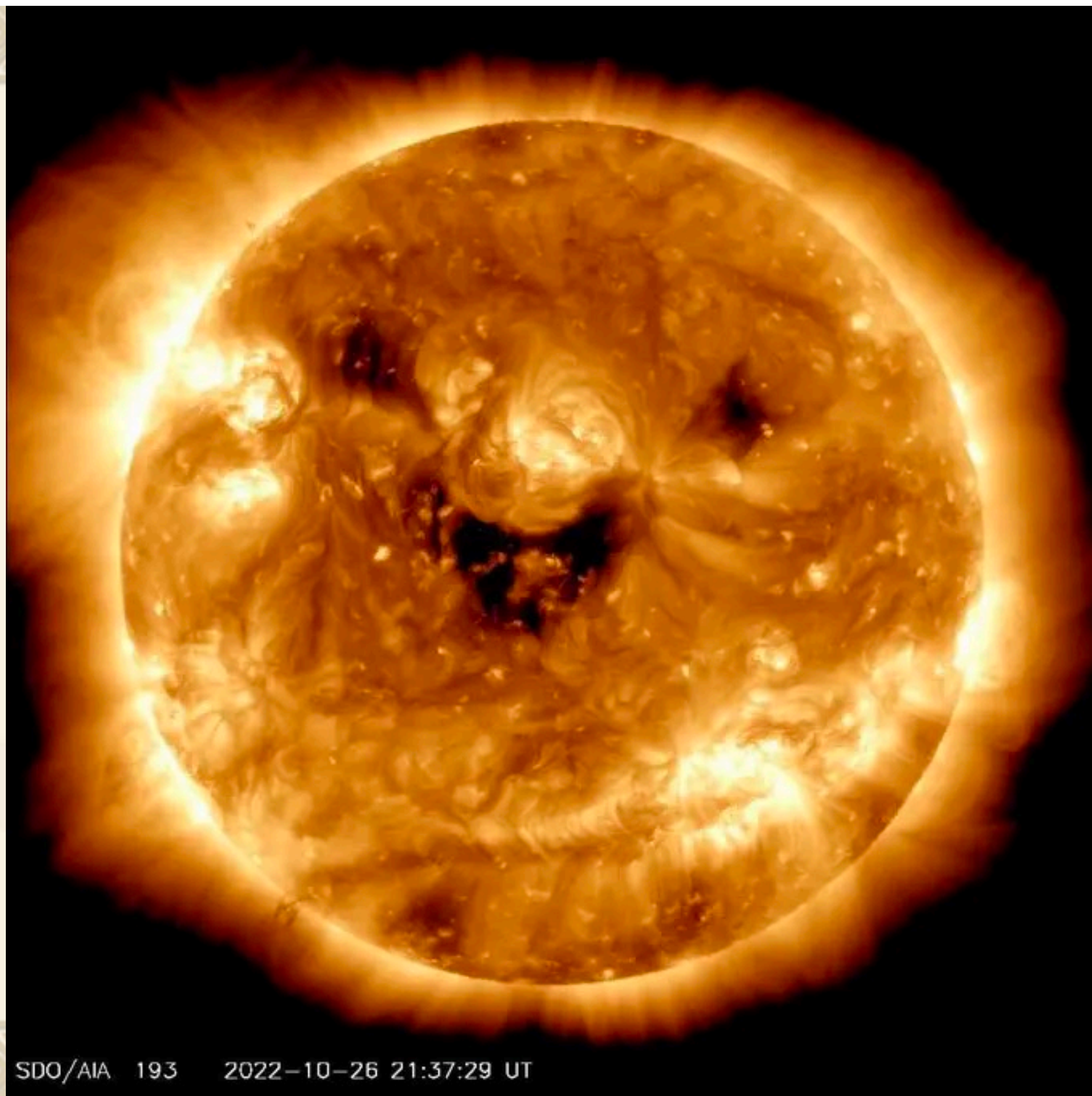


第二章:我们的太阳系1—太阳

多波段下的太阳



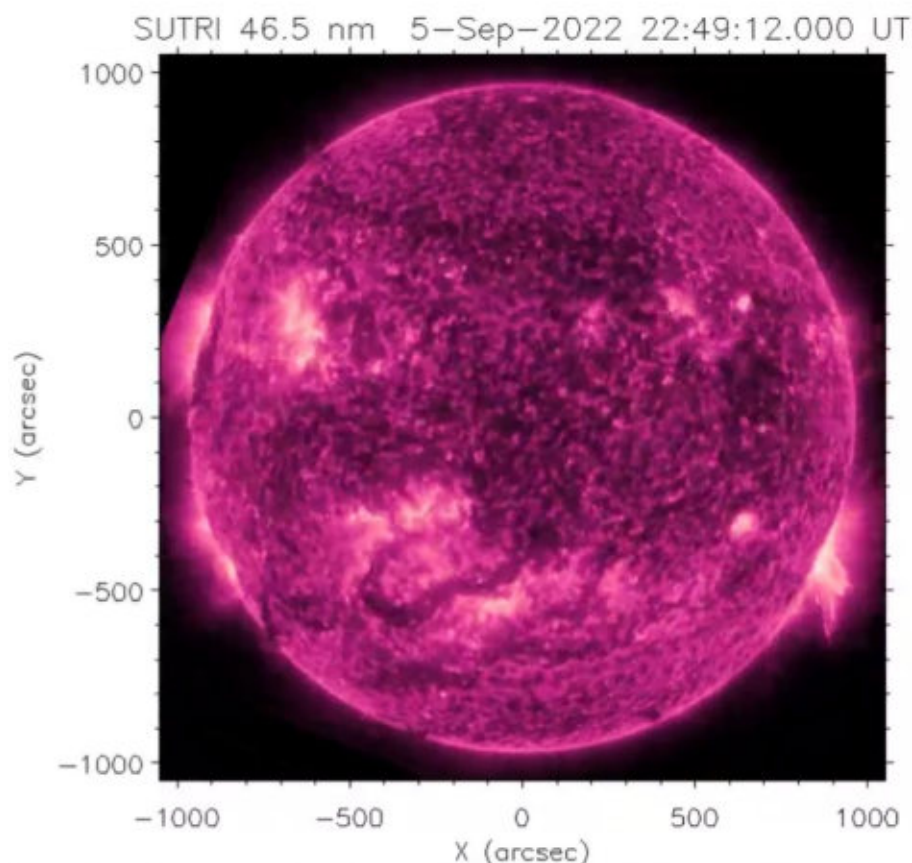
远紫外
(日冕洞)



SDO/AIA 193 2022-10-26 21:37:29 UT

(NASA)

太阳物理学科及其研究意义



用物理、数学等基础学科的理论与方法研究太阳内部结构及其演化、太阳大气各种活动现象的发生发展规律及其对行星际空间环境的影响

- 多尺度过程并存的天然等离子体实验室
- 唯一可通过高分辨率（空间、时间、光谱）、高偏振精度及多视角开展全波段探测的恒星
- 太阳爆发活动驱动空间天气，影响人类航天、通讯、导航、电力等高技术系统

我国46.5nm极紫外太阳成像仪(SUTRI)拍摄的太阳图像

（田晖 北京大学）

本章内容：

- 太阳系如何起源？
- 太阳的属性如何测量？
- 太阳的能量如何产生？
- 太阳的大气有哪些组成部分？
- 太阳风如何与地球发生作用？
- 如何利用日全食检验广义相对论？

太阳系的形成

❖ 太阳系的年龄

地球上的岩石 $\rightarrow t \sim 3.9 \times 10^9$ yrs

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

❖ 星云假说 (康德-拉普拉斯)

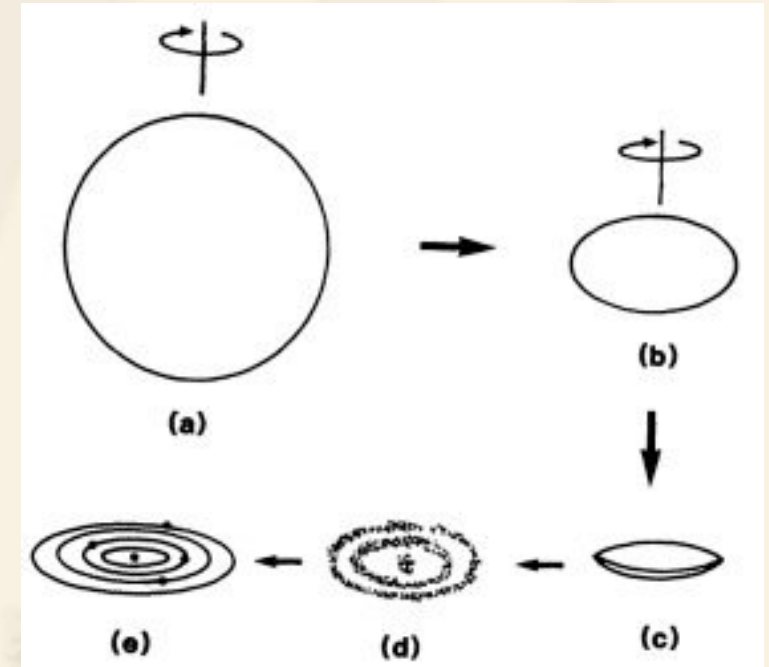
Emanuel Swedenborg 1734

Pierre-Simon Laplace 1796

巨大的分子云 $\rightarrow$ 太阳系

❖ 分子云中的气体和尘埃

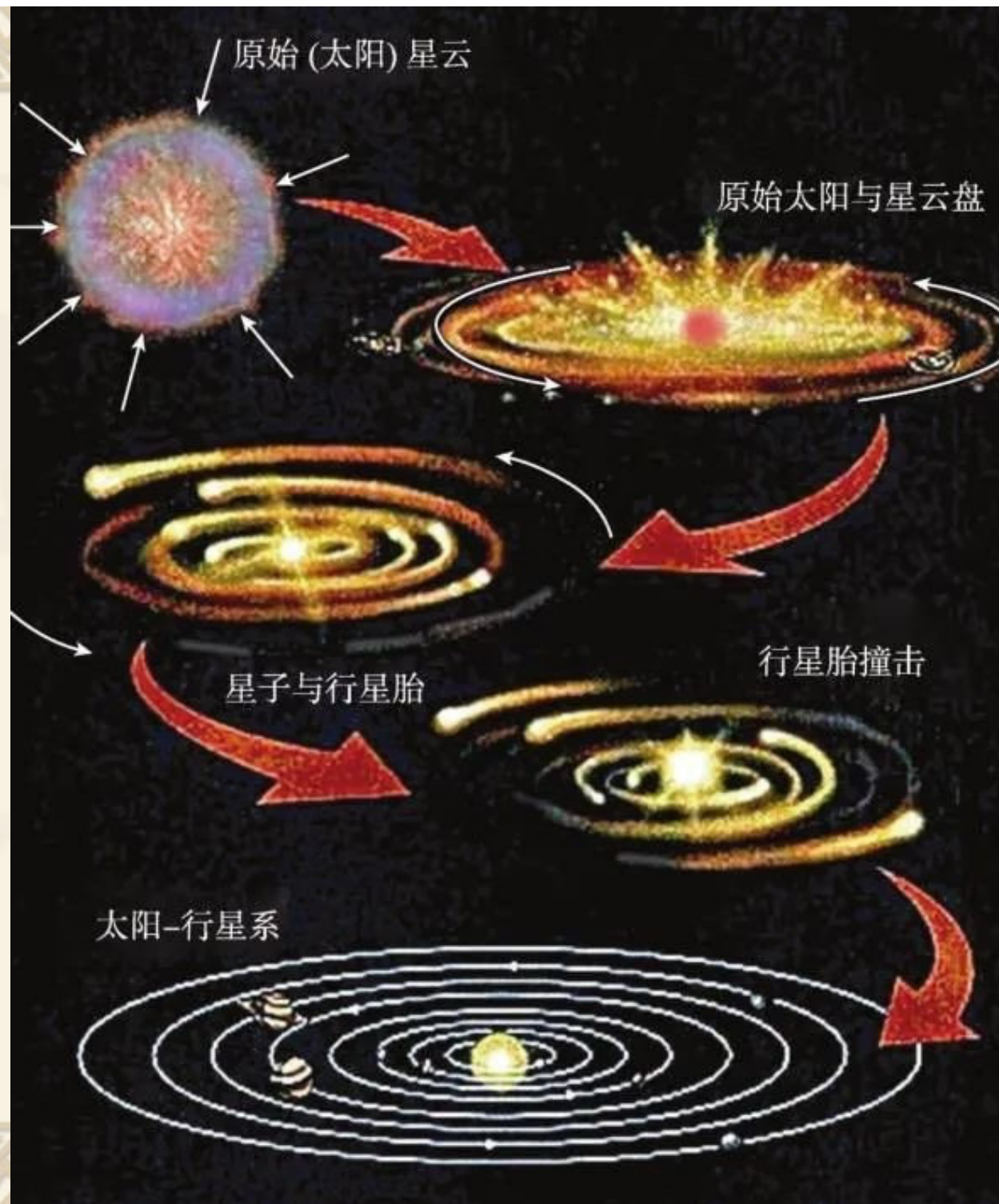
重元素来自恒星内部的核反应：原初的氢和氦 $\rightarrow$ 重元素

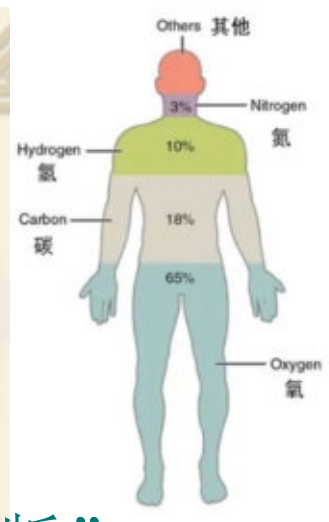


拉普拉斯的星云假说：a) 一个旋转的星云；b). 星云塌缩并关于旋转轴变扁；c). 形成镜片状结构；4). 物质收缩形成一系列圆环；e). 环中物质凝聚形成恒星与行星。（by 白雪宁）

❖ 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、碎裂
- 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





“来自星星的你——英文完全版”：

“Every atom in your body came from a star that exploded. And, the atoms in your left hand probably came from a different star than your right hand. It really is the most poetic thing I know about physics: You are all stardust. You couldn't be here if stars hadn't exploded, because the elements - the carbon, nitrogen, oxygen, iron, all the things that matter for evolution and for life - weren't created at the beginning of time. They were created in the nuclear furnaces of stars, and the only way for them to get into your body is if those stars were kind enough to explode. So, forget Jesus. The stars died so that you could be here today.”

— Lawrence M. Krauss

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:

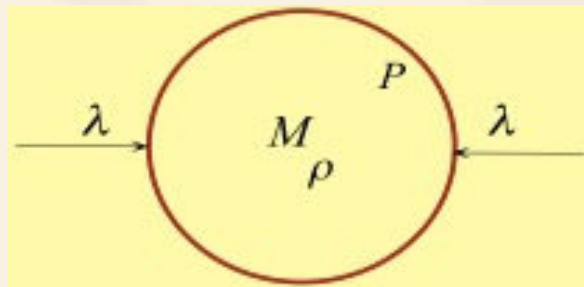
1. 总角动量不为零
2. 塌缩过程中角动量守恒：转动加快
3. 塌缩导致密度增加
4. 碰撞导致温度升高
5. 压力增加
6. 阻止进一步的塌缩
7. 气体冷却：分子冷却，发射红外光子
8. 金斯（Jeans）质量



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

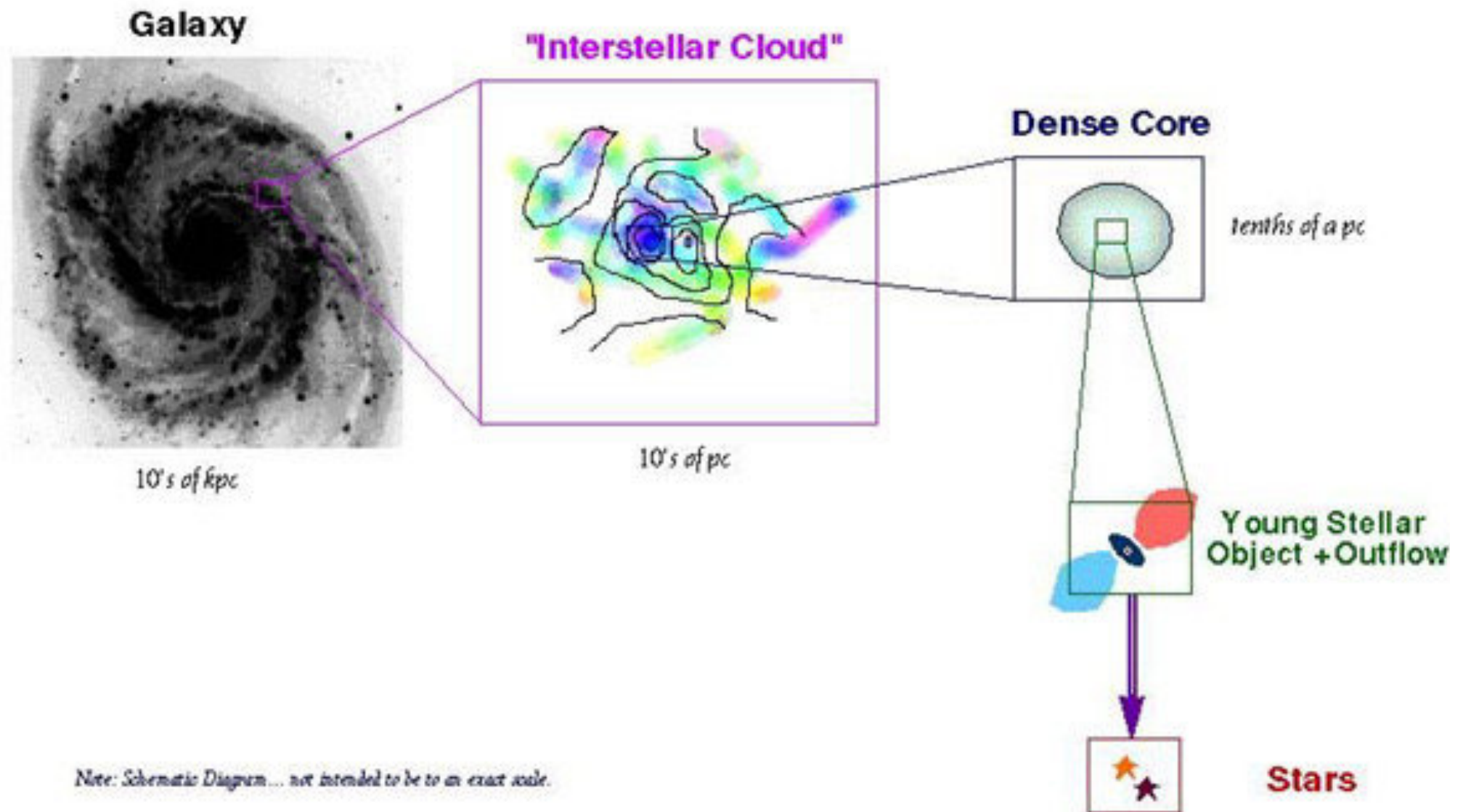
- 转动的原行星盘：~200AU
- 中心稠密区域：原恒星
- $t \sim 10^8$ yrs后,中心 $T \sim 10^7$ K,氢开始聚变,产生伽玛光子,辐射压与引力平衡
- 雏星—湍动—抛掉一半的质量—稳定—恒星！
（T-Tauri相：强的外流从表面喷出，现在变弱为太阳风）

昴星团（反射星云）



Figure 2.1 The Pleiades cluster. Image: Digitized Sky Survey NASA/ESA/AURA/Caltech.

Star Formation in the Interstellar Medium



IC 2631

J1672835.29-763111.64



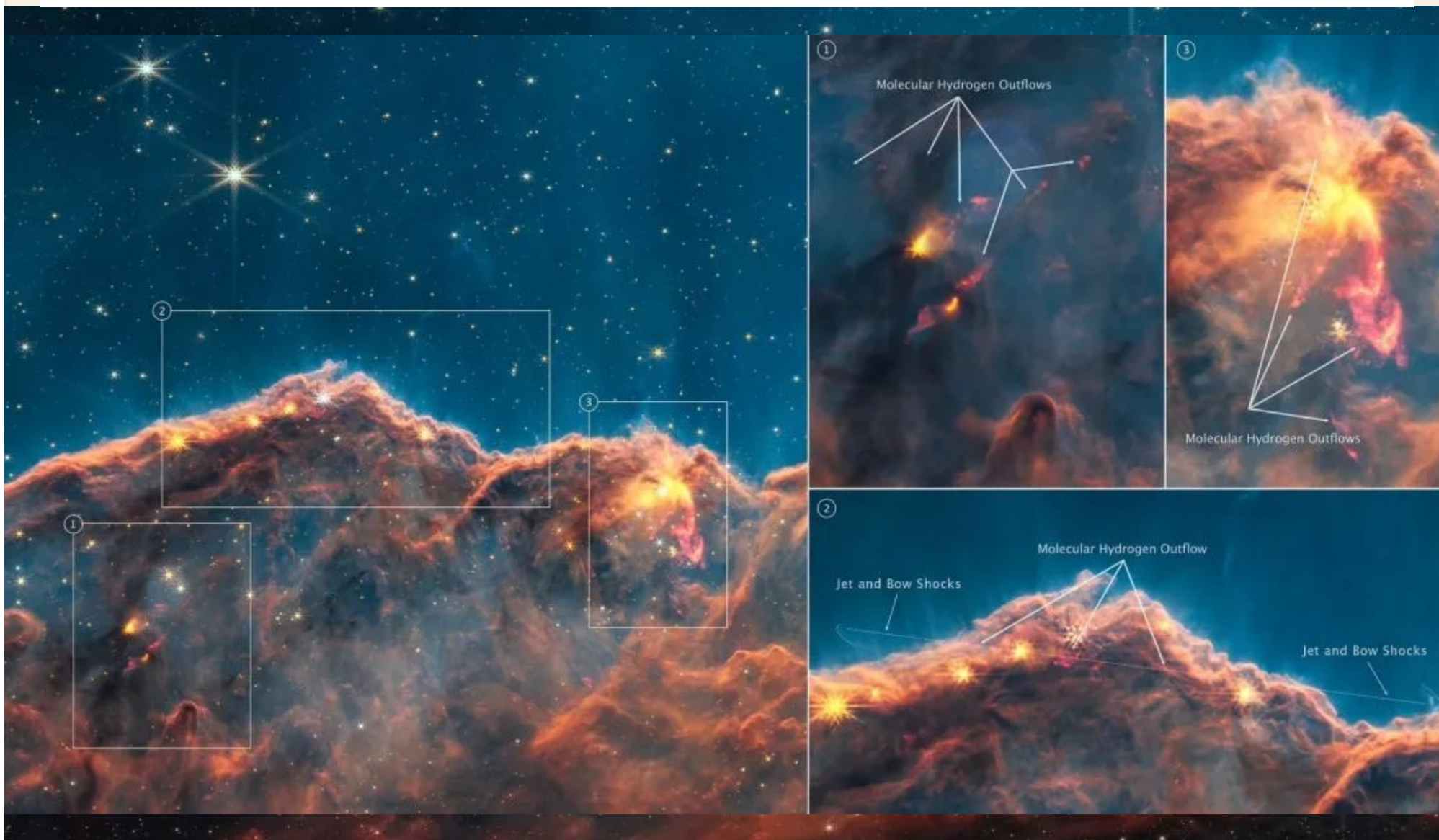
图为反射星云IC 2631中名为J1672835.29-763111.64的原恒星。

<https://scx2.b-cdn.net/gfx/news/2021/image-hubble-spies-new-1.jpg>

新观测发现埋藏在星云内的新的“恒星胚胎”（原恒星）

原创 王善钦 天文之心 2022-12-20 12:30 发表于广西

最近，天文学家宣布，他们在韦布拍摄的这个星云的4.7微米波段的近红外图像中找到了此前未被发现的二十多个喷流与外流（下图）。 [\(NASA, ESA, CSA, and STScI\)](#)

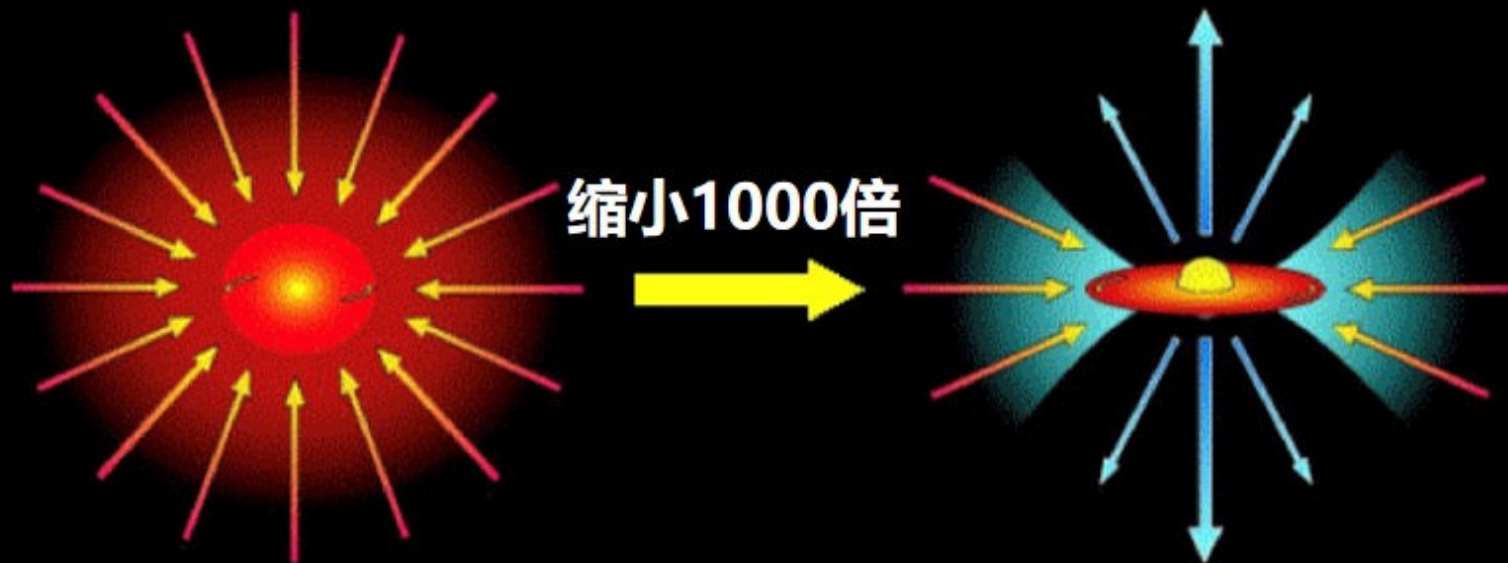


❖ 行星的形成

- 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）

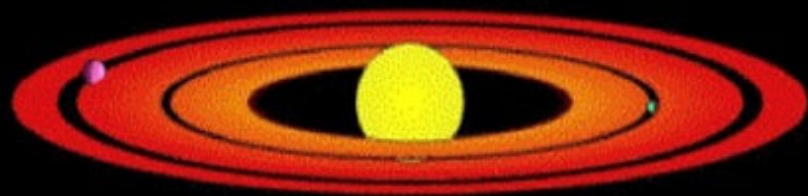


行星形成的基本过程

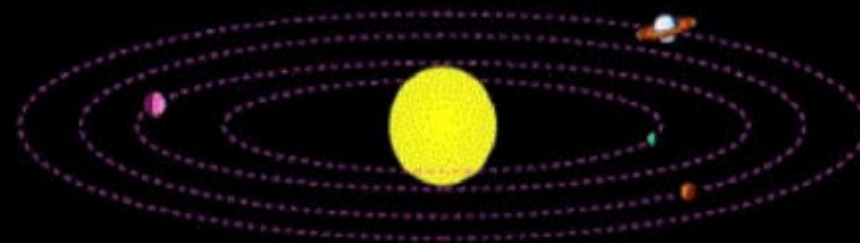


分子云塌缩

形成吸积盘



行星和盘相互作用

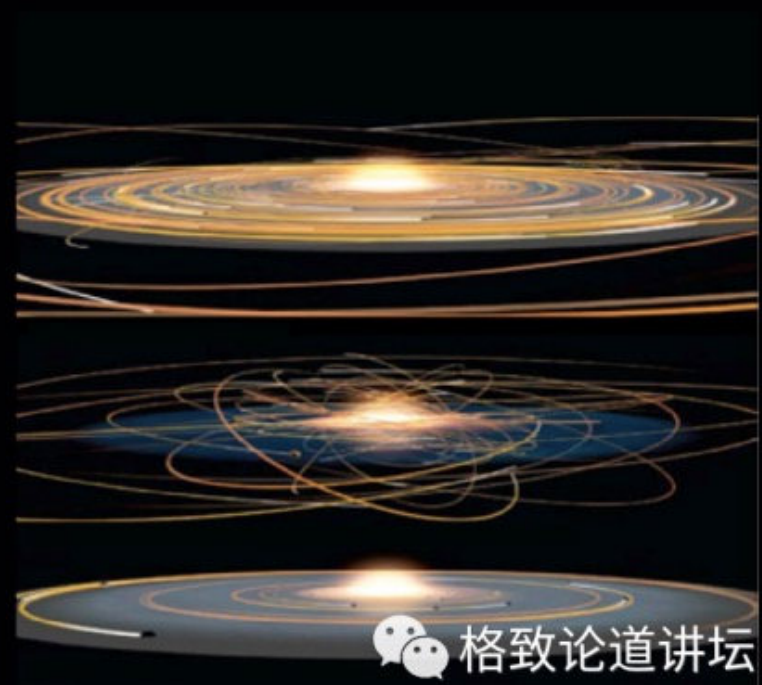
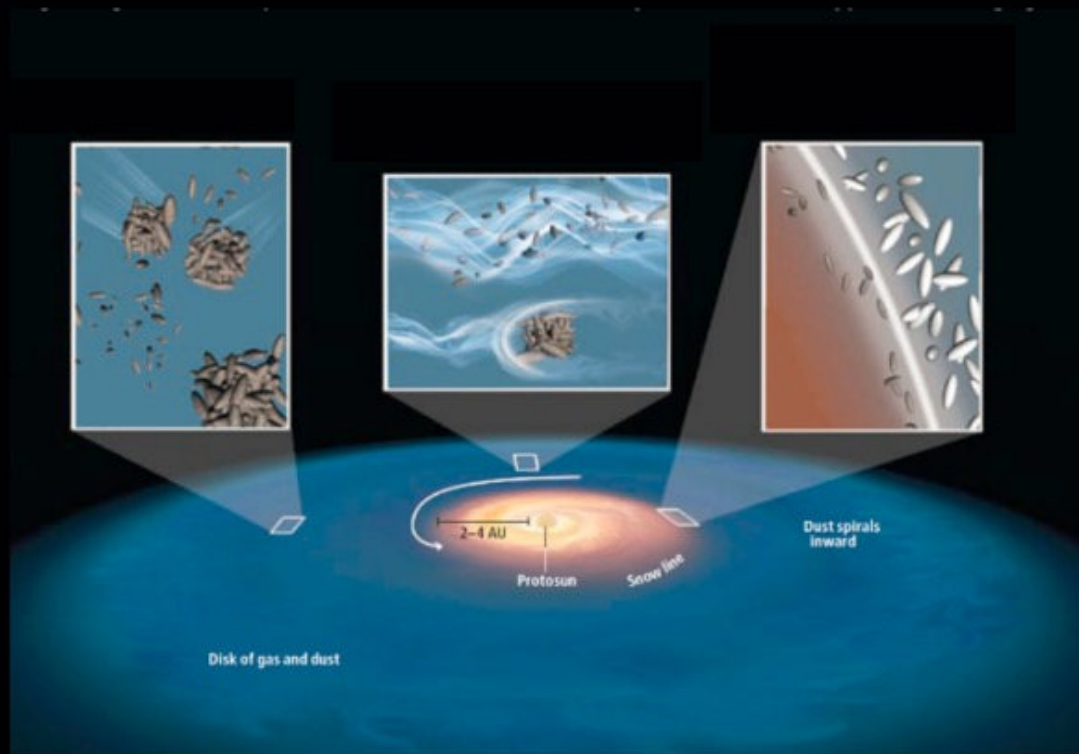


气体盘消散

(余聪 中山大学)

格致论道讲坛

尘埃 → 星子 → 行星胚胎



格致论道讲坛

(余聪 中山大学)

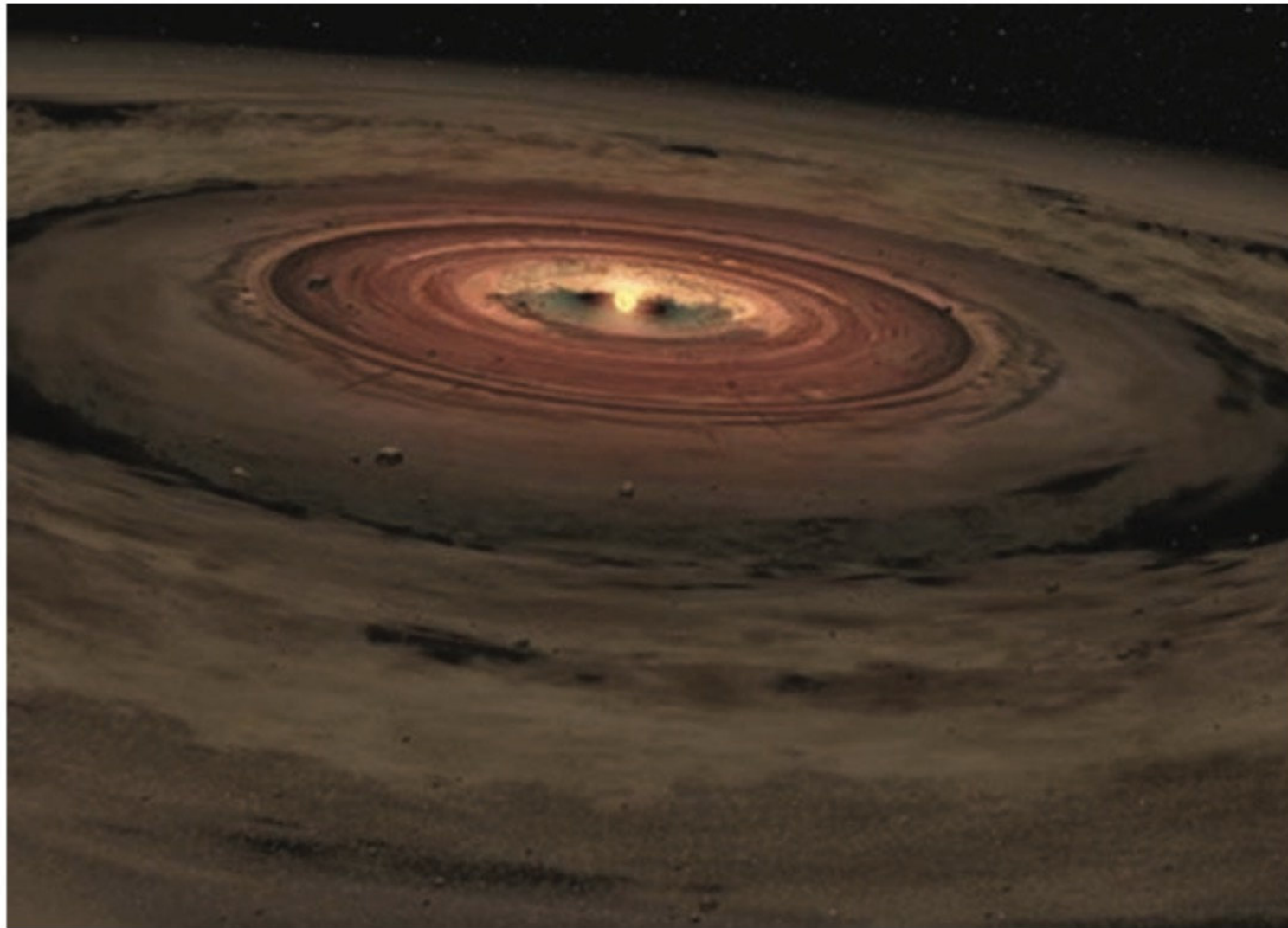
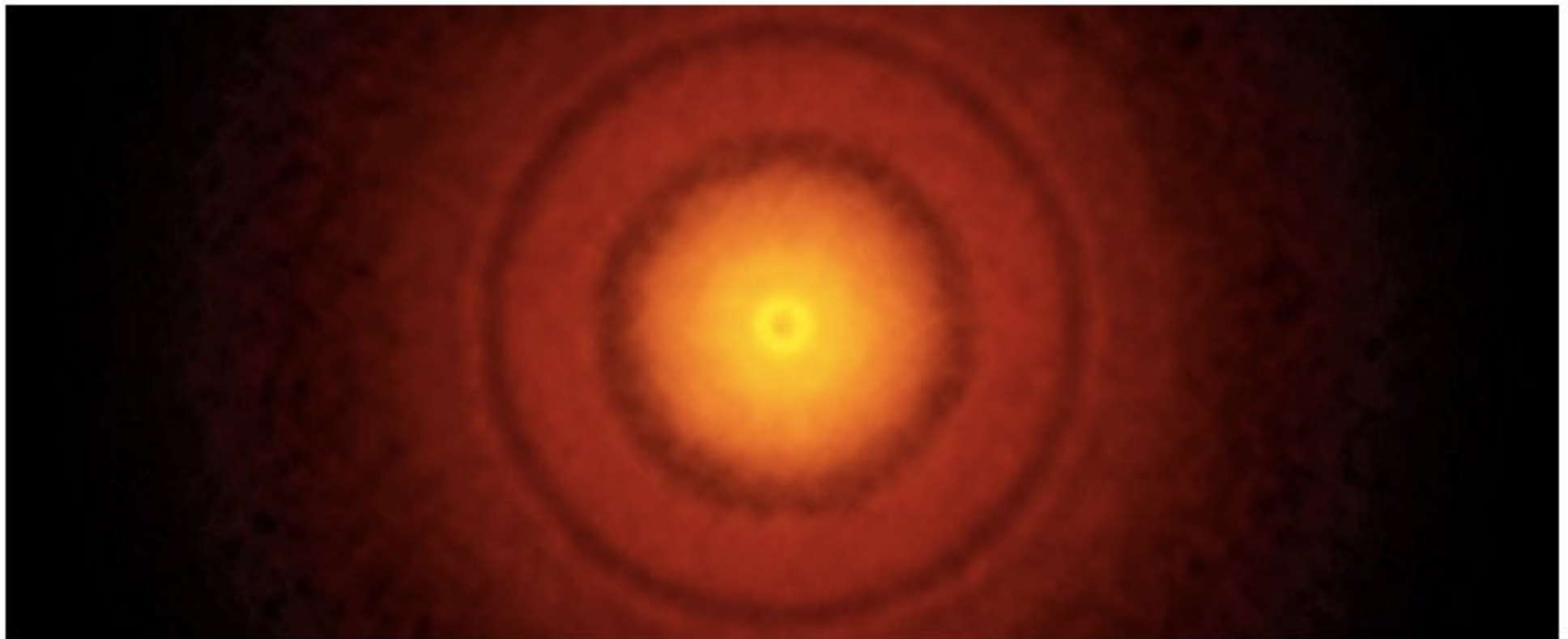


Figure 2.2 Artist's impression of the solar nebula. Image: Ames Research Centre, NASA.

ALMA's Most Detailed Image of a Protoplanetary Disc

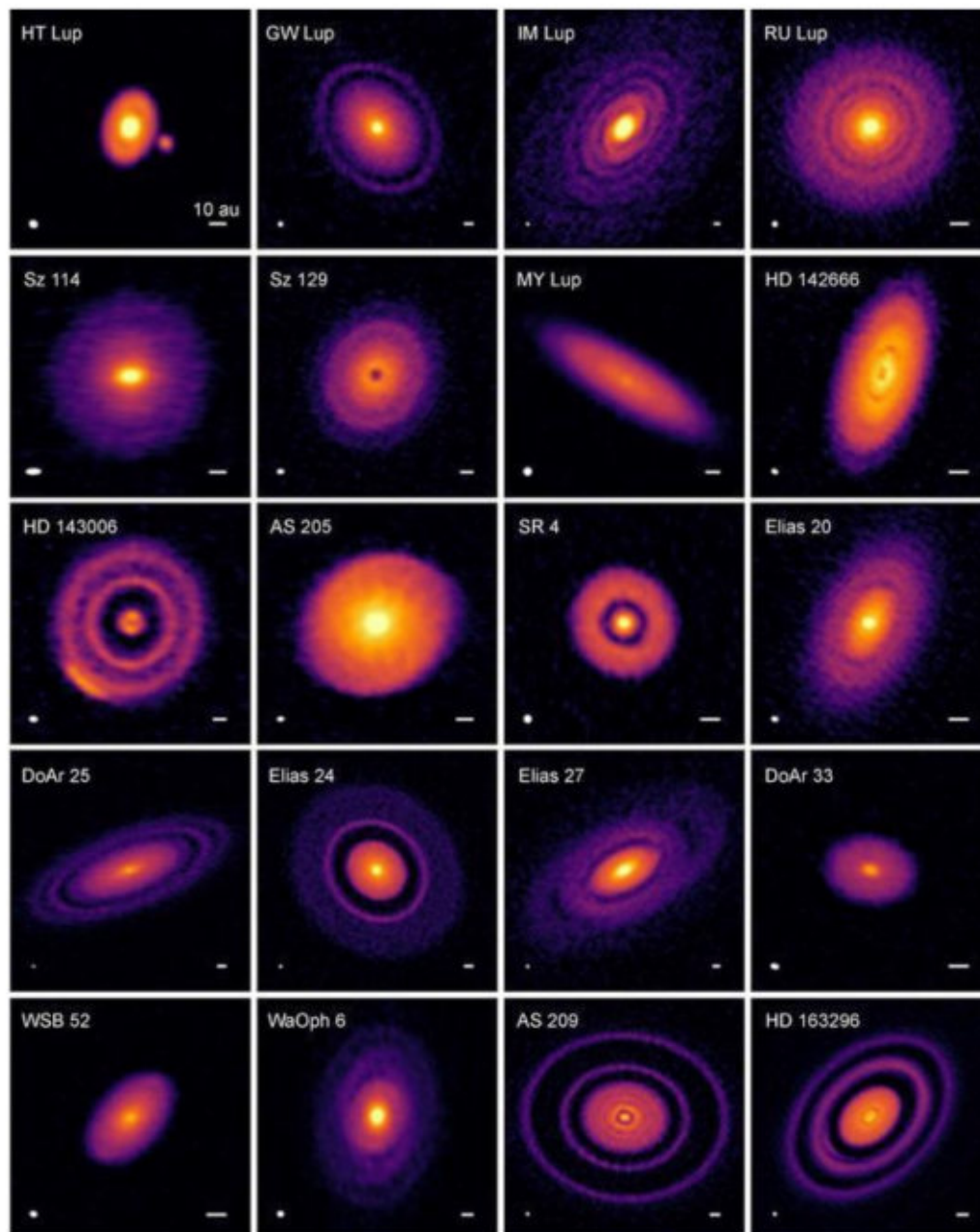
Evidence for planet formation in Earth-like orbit around young star

31 March 2016



This new image from the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) shows the finest detail ever seen in the planet-forming disc around the nearby Sun-like star TW Hydrae. It reveals a tantalising gap at the same distance from the star as the Earth is from the Sun, which may mean that an infant version of our home planet, or possibly a more massive super-Earth, is beginning to form there.

太阳系诞生于一片星云，这个说法最早是德国哲学家康德提出来的，几十年后法国物理学家、数学家拉普拉斯独立提出了这一假说，因此又称康德-拉普拉斯星云说！尽管早期这些都是猜测，但事实上现代天文非常认可这个说法！



DSHARP 项目观测到的20个原行星盘的240GHz尘埃连续谱 (Andrews et al. *ApJ*, 869, L41, 2018)

形成过程中的原始行星盘

原标题：天文学家首次“看见”银河系中心的“恒星摇篮”原恒星盘 2022.06.01

新华社上海6月1日电天文学家继首次“看见”银河系中心超大质量黑洞之后，又成功实现对银河系中心的原恒星盘的直接成像，首次“看见”银河系中心的“恒星摇篮”。

该成果来自中国科学院上海天文台与云南大学、美国哈佛-史密森天体物理中心、德国马克斯普朗克研究所合作进行的一项最新研究，于5月30日发表在权威学术期刊《自然·天文》。

据这一合作项目牵头人、中国科学院上海天文台吕行副研究员介绍，在恒星形成过程中，环绕着新生恒星的周围会产生吸积盘。这个吸积盘，也被称为“原恒星盘”，是恒星形成过程中的关键一环，因此又被称为恒星诞生和成长的“摇篮”。

在以往的研究中，天文学家对于类似太阳的小质量恒星的原恒星盘，观测和理论研究都较为丰富。但对于更大质量的恒星，尤其是30倍太阳质量以上的“早型O型星”，目前尚不清楚其形成过程中是否也存在原恒星盘。

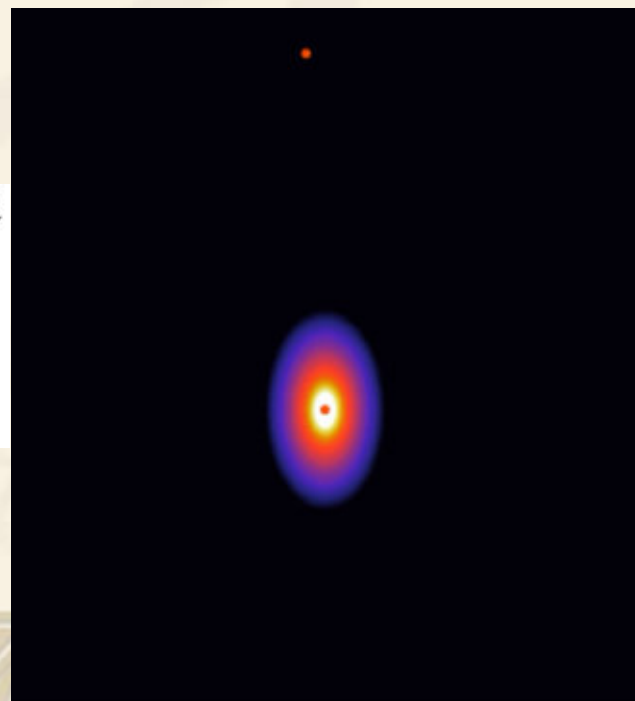
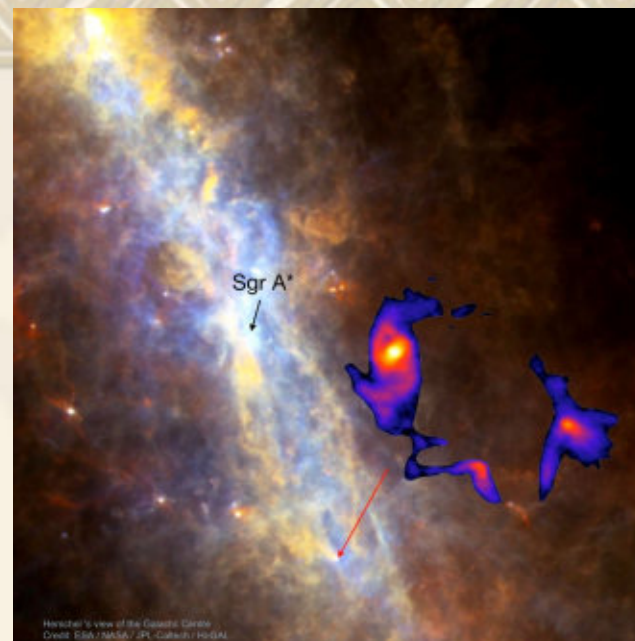
- ALMA: 40mas分辨率
- 32倍太阳质量的早型O型星的原恒星盘具有旋臂结构，由外部天体飞掠作用的扰动而产生
- 观测+模拟：吸积盘+飞掠作用

科研团队利用位于智利阿塔卡马高原的ALMA干涉阵，对银河系中心区域开展了长基线观测，分辨率达到了约40毫角秒。在这样分辨率下的观测精度，相当于站在上海能清楚地看到北京的一个足球。

借助高分辨率、高灵敏度的观测，研究人员在银河系中心附近区域，发现了一个直径约4000天文单位的原恒星盘，正围绕着一颗32倍太阳质量的“早型O型星”转动，这个原恒星盘还有一对明显的旋臂结构。进一步深入研究认为，旋臂结构是受到外部天体飞掠作用的扰动而产生的。

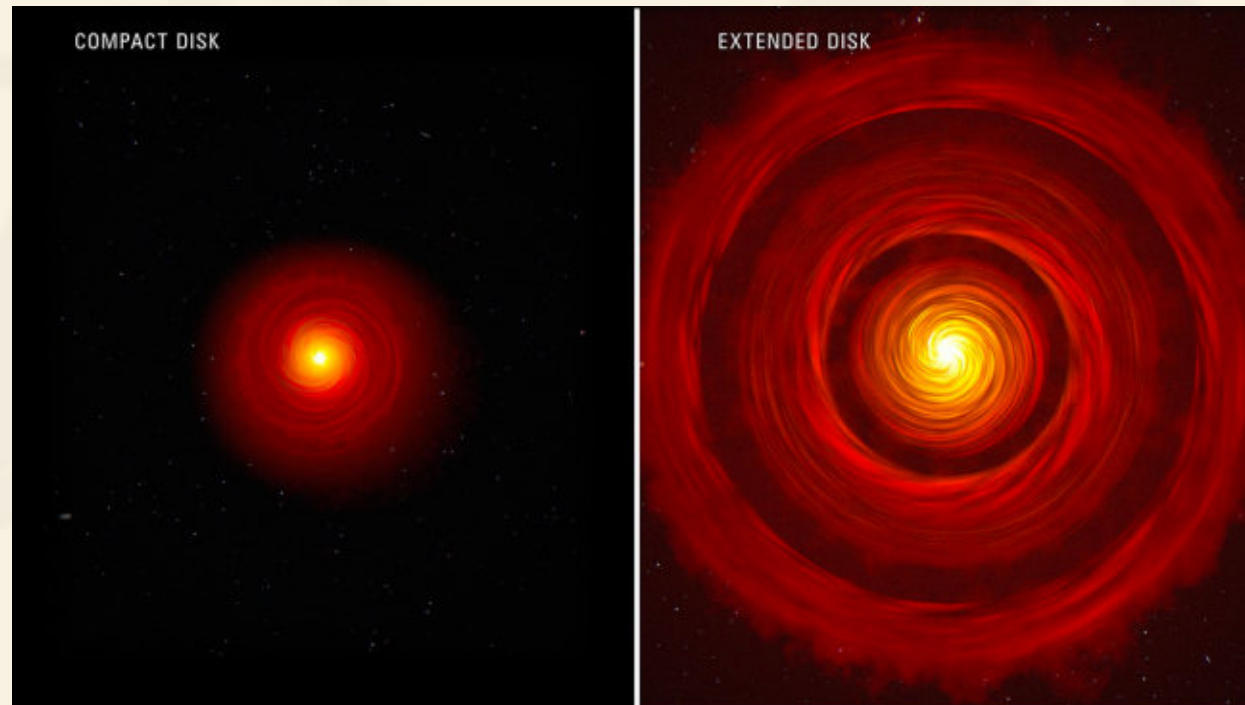
通过对ALMA干涉阵的大量观测数据进行定标、校正、处理和分析，科研人员获得了这个原恒星盘的图像。这是目前发现质量最大的有吸积盘的原恒星之一，也是天文学家首次对银河系中心的原恒星盘实现直接成像。

“这项研究表明，尽管恒星质量有大小之分，但恒星形成过程中的一些物理机制是统一的，都有吸积盘和飞掠作用的参与，这为解开大质量恒星形成之谜提供了重要线索。”吕行说。



NASA's Webb Findings Support Long-Proposed Process of Planet Formation

November 08, 2023 10:00AM (EST) | Release ID: 2023-144



Drifting pebbles deliver water to the inner regions of planet-forming disks

How are planets born? Scientists have long proposed that ice-covered pebbles are the seeds of planet formation. These icy solids are thought to drift toward the newborn star from the cold, outer reaches of the disk surrounding it. The theory predicts that, as these pebbles enter the warmer region closer to the star, they would release significant amounts of cold water vapor, delivering both water and solids to nascent planets.

Now, the James Webb Space Telescope has witnessed this process in action, revealing the connection between water vapor in the inner disk and the drifting of icy pebbles from the outer disk. This finding opens exciting, new vistas into the study of rocky planet formation.

太阳的属性

- ❖ 太阳—典型的恒星
- ❖ 太阳的直径
- ❖ 太阳质量
- ❖ 太阳密度
- ❖ 太阳光度
- ❖ 黑体辐射与太阳表面温度

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 θ in radians and R is the Earth-Sun distance.)

$$\begin{aligned}\theta &= \underline{30}/(60 \times 57.3) \text{ rad} \\ &= 8.7 \times 10^{-3} \text{ rad}\end{aligned}$$

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

准确值:

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

太阳质量

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

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

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

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

准确值:

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

[illegible]

❖ 太阳密度

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

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

W/m²

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

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



❖ 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 $E = \sigma A T^4 W$

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

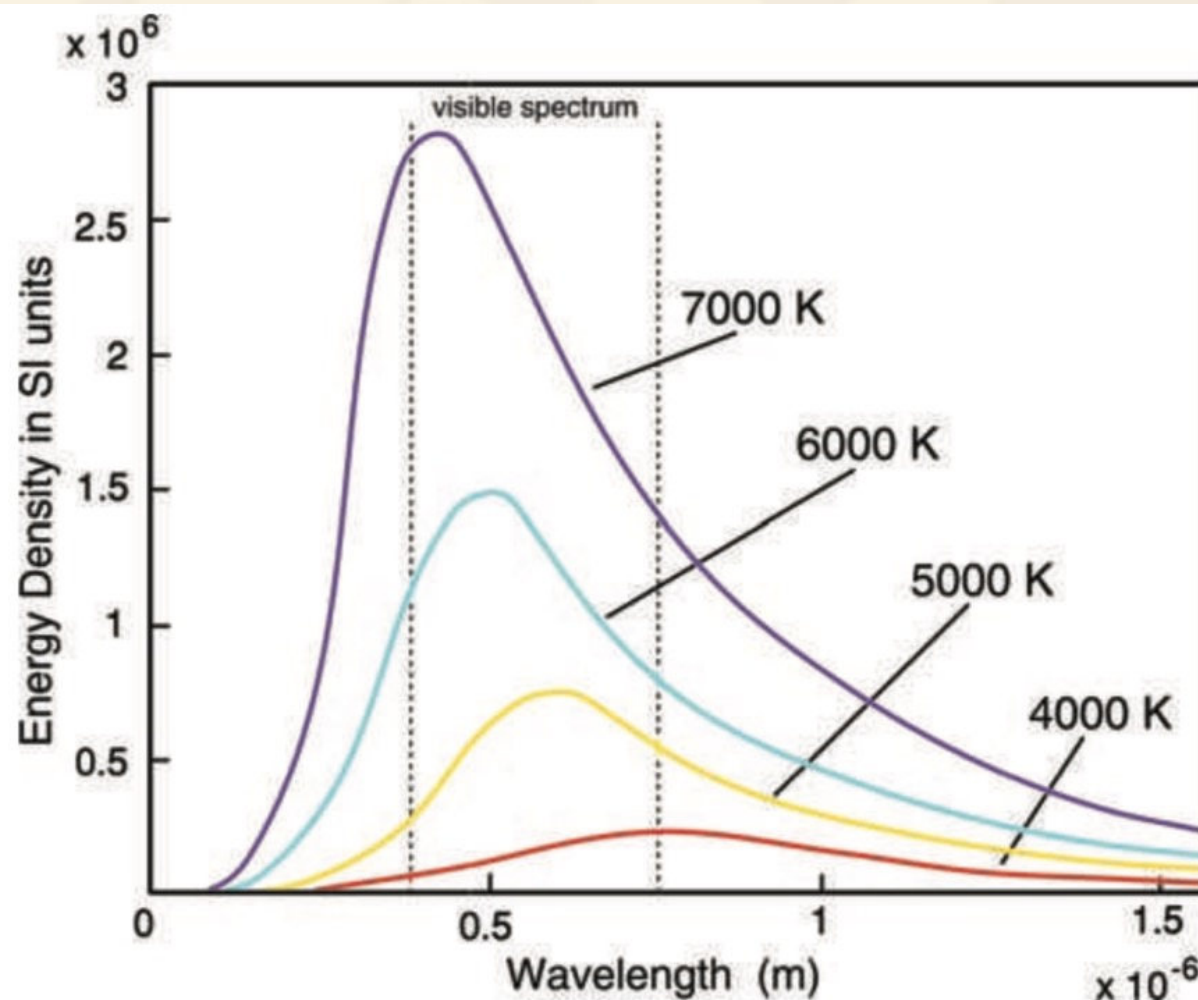


Figure 2.3 Black body radiation curves.

❖ 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 km

Mass = 2×10^{30} kg

Density = 1400 kg m^{-3}

Luminosity = 3.86×10^{26} W

Surface Temperature = 5780 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

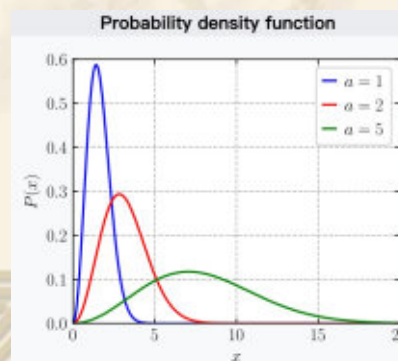
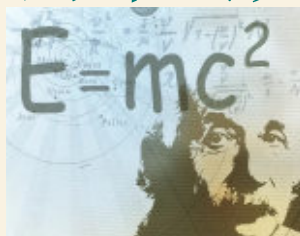
❖ 光谱分析（太阳对流）

- 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！



Maxwell-Boltzmann distribution

$$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{x^2}{a^3} \exp\left(\frac{-x^2}{2a^2}\right)$$

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%)

$$\gamma \Rightarrow 26.20 \text{ MeV}$$

$$\nu \Rightarrow 0.53 \text{ MeV} / 2$$

PP I 链

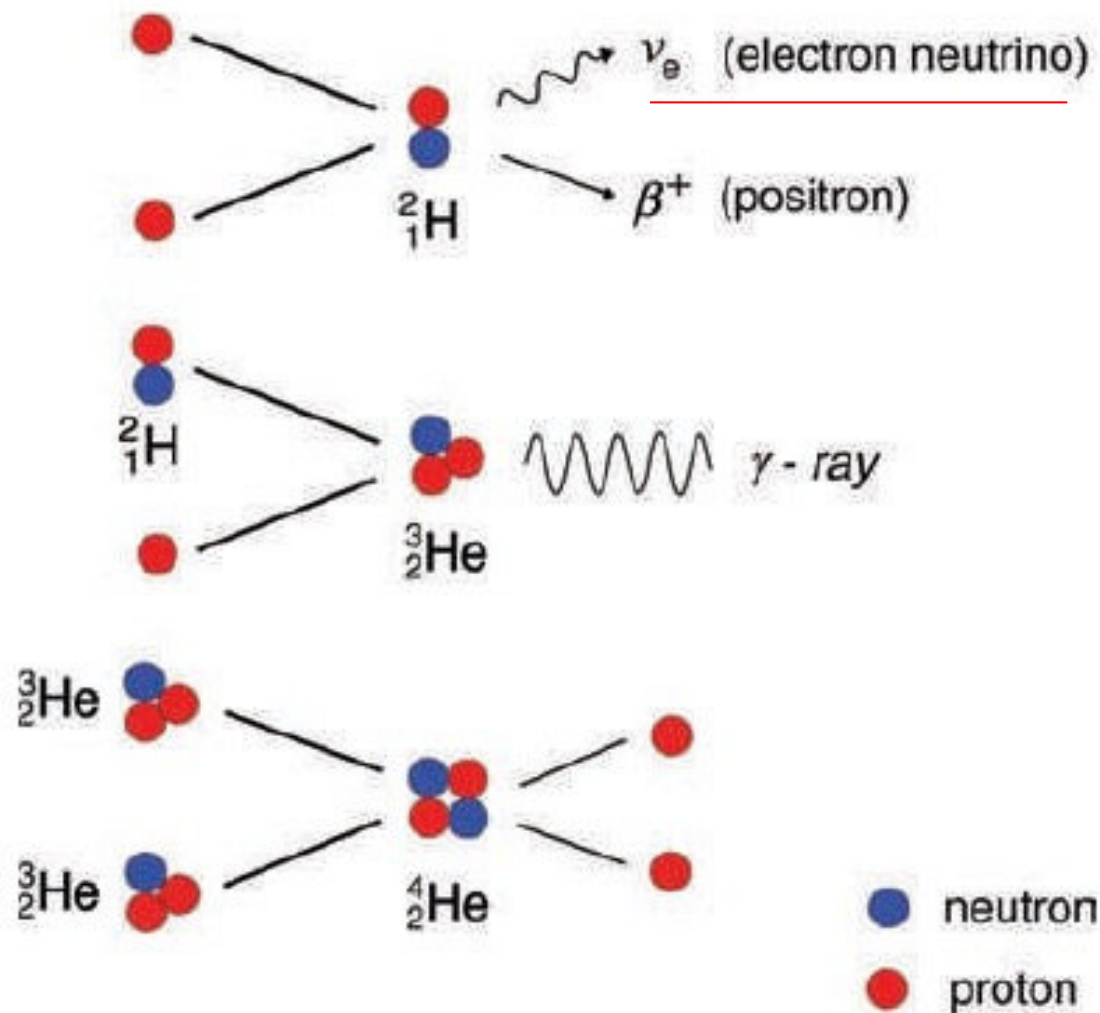
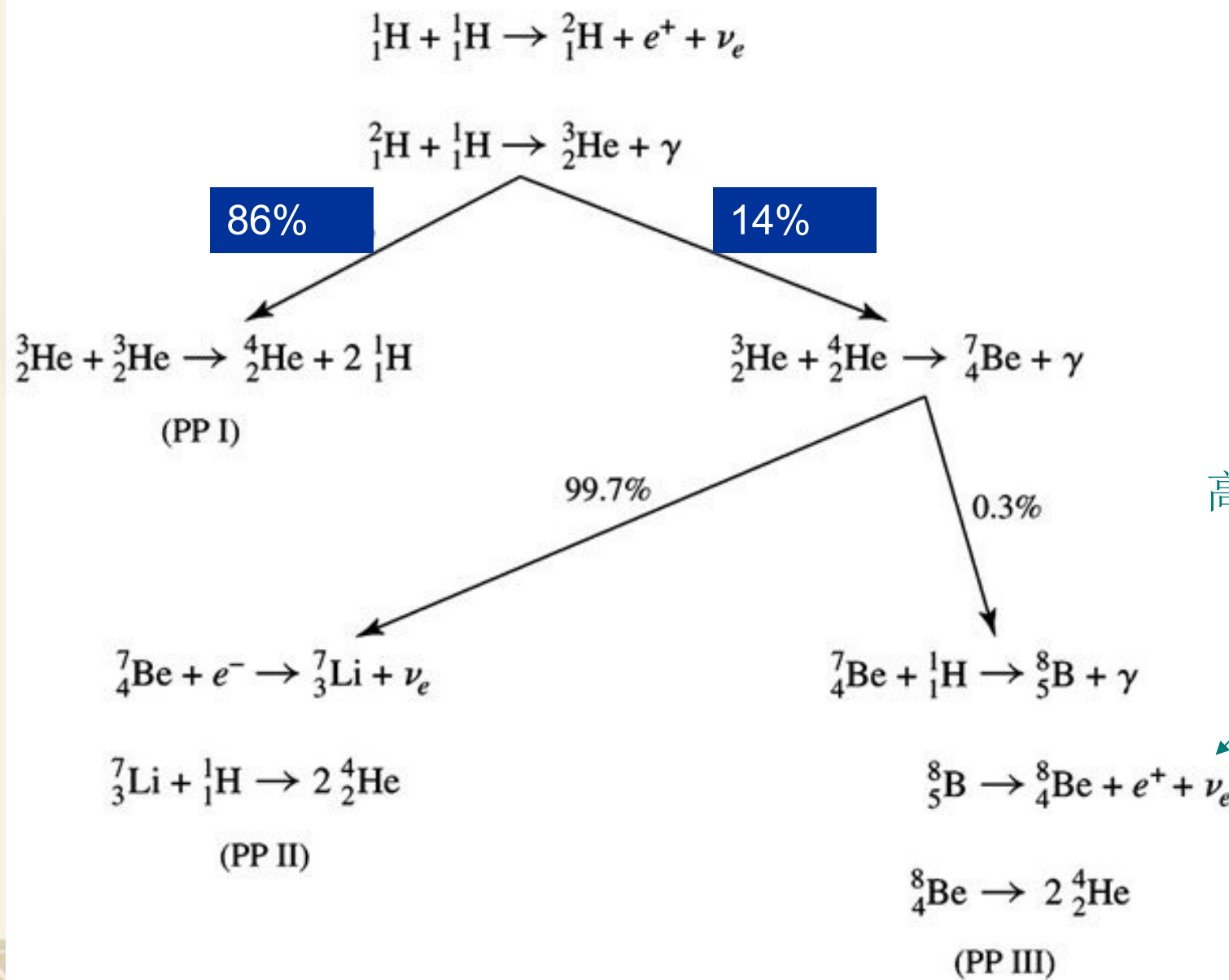
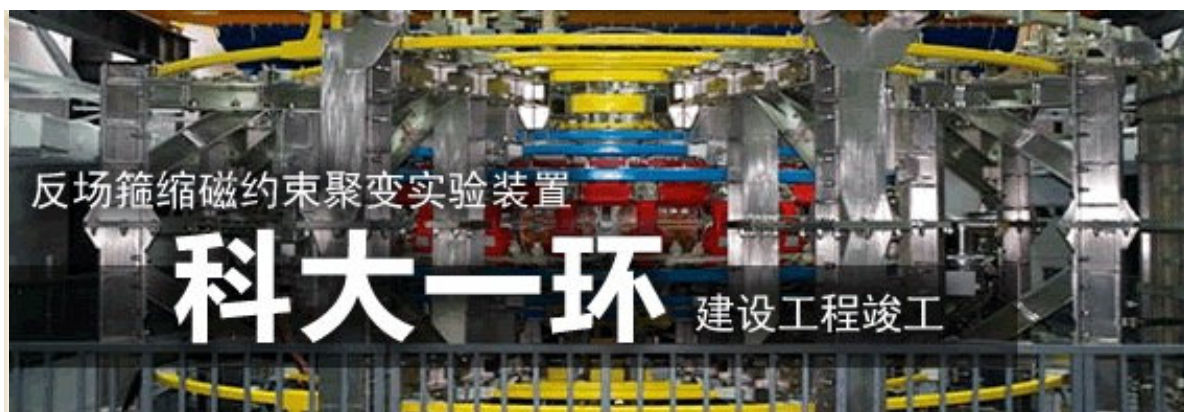


Figure 2.5 The three steps in the proton-proton cycle. Steps 1 and 2 are carried out twice to provide the two ${}^3\text{He}_2$ nuclei required for the third step.

PP链的分支



高能电子中微子
(7-14 MeV)



中国科技大学：“科大一环”建设取得重大进展

2015年05月04日09:10

来源：中国教育报

手机看新闻

打印

网摘

纠错

商城

分享

推荐

人民微博



字号 + -

原标题：中国科技大学：“科大一环”建设取得重大进展

中国科技大学：“科大一环”建设取得重大进展

经过三年多的艰苦努力，随着两个巨大的半环形主体真空室组件的顺利合龙，我国首台大型反场箍缩磁约束聚变实验装置KTX各系统的部件研制建造工作近日在合肥全面完成，进入装置最后整体安装调试阶段。装置设计的各项指标均达国际同类装置先进水平。

聚变能被认为是最有希望彻底解决人类能源问题的根本出路之一，目前全球最大的国际大科学工程——国际热核聚变实验堆计划，其目的就是探索和验证磁约束核聚变科学技术的可行性。

反场箍缩磁约束聚变实验装置（KTX，中文简称“科大一环”）是科技部“国家磁约束核聚变能发展研究专项”支持的大型装置建设项目。据项目工程总指挥、中国科大物理学院刘万东教授介绍，反场箍缩是有别于托卡马克、仿星器形式的另一类环形磁约束聚变装置，是先进磁约束聚变方式探索研究的重要平台。（校报记者 杨保国）



逐聚变能源美梦始于足下之足下

（刘万东教授与侯建国院士）

中国人造太阳首次实现1亿度运行

2018.11.13 08:57:47

全超导托卡马克核聚变实验装置

支持 ← → 键翻阅图片

列表查看



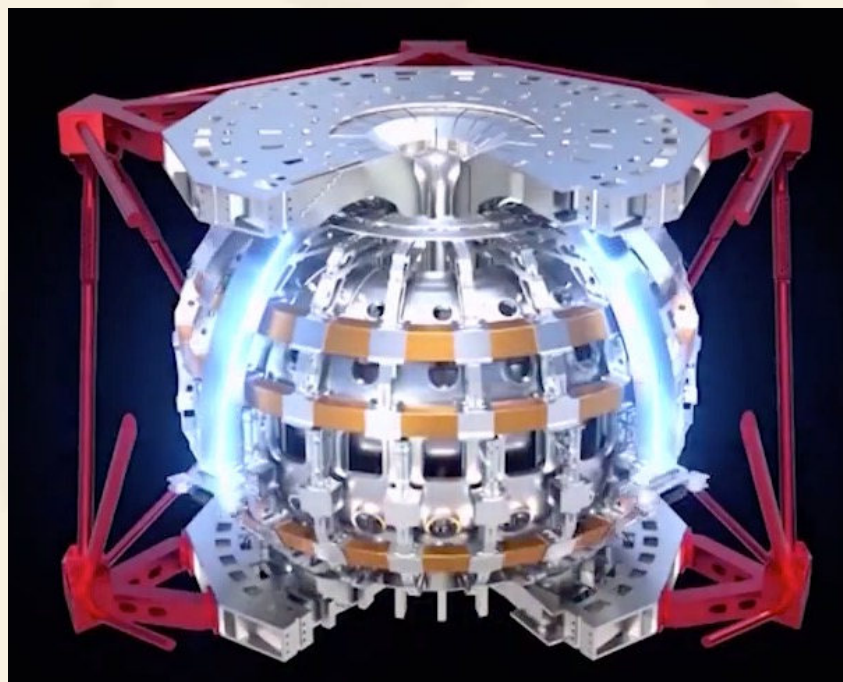
© 视觉中国

1 / 4 我国“人造太阳”（EAST）近日首次实现等离子体中心电子温度达1亿度，获得的实验数据为人类开发清洁核聚变能源奠定重要基础。EAST是中科院等离子体所自主设计研制的磁约束核聚变实验装置，此次实验成果标志着中国未来聚变反应堆实验的运行迈出了关键一步。



2,220

中国“人造太阳”显神威，相当于太阳芯部温度的近10倍！



2020年12月4日，一个应该载入世界核聚变史册的日子。核聚变关键装置“中国环流器二号M装置”首次放电，标志着我国自主掌握了大型先进托卡马克装置的设计、建造和运行技术。

开发聚变能源是全球核聚变人一代代接力奔跑，致力于照亮人类未来的终极能源梦想。而“中国环流器二号M装置”是目前我国规模最大、参数最高的新一代磁约束聚变实验研究装置，它的等离子体离子温度可达到1.5亿度，相当于太阳芯部温度的近十倍。



EAST装置实现1056秒的长脉冲高参数等离子体运行

文章来源：合肥物质科学研究院

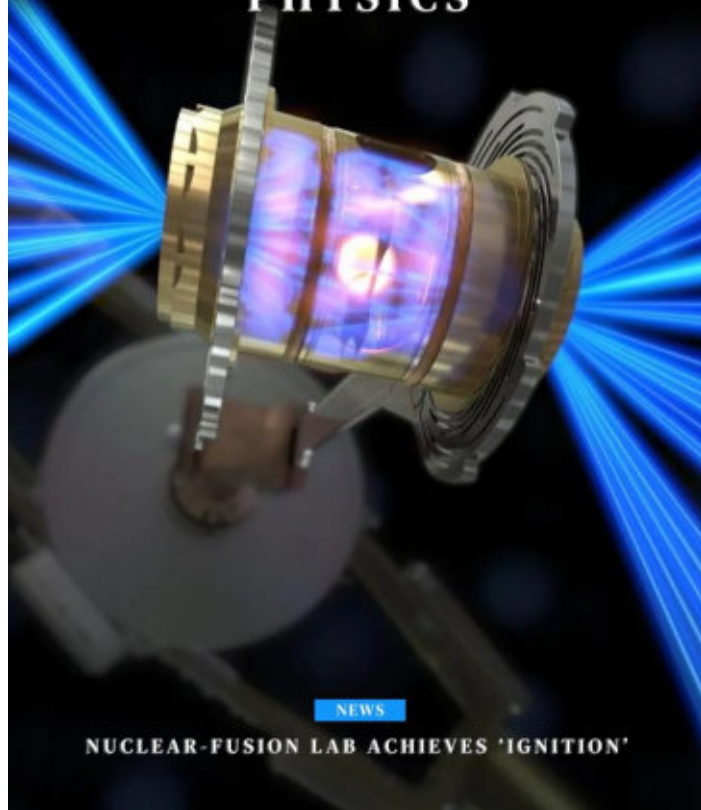
发布时间：2021-12-31



2021年12月30日晚，中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所EAST控制大厅里，正在运行的国家重大科技基础设施EAST全超导托卡马克装置（又称“东方超环”）再次创造新的世界纪录，在注入能量达到1.73吉焦的条件下，实现电子温度近7000万摄氏度的长脉冲高参数等离子体运行1056秒，这是目前世界上托卡马克装置高温等离子体运行的最长时间。

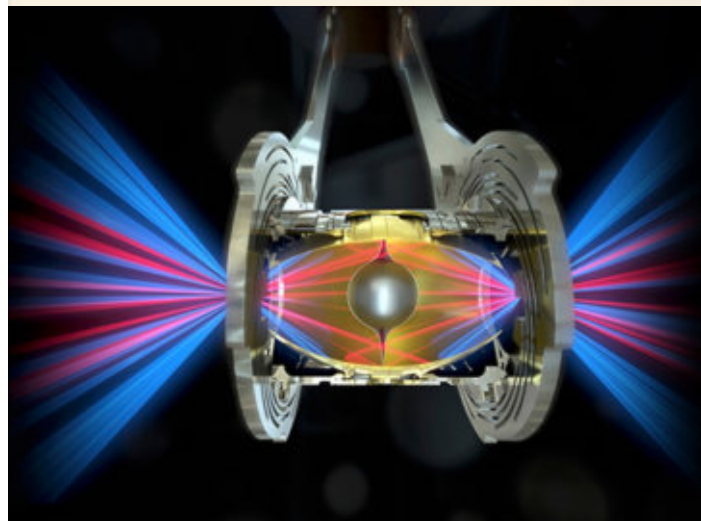
EAST装置运行15年来，先后实现了1兆安、1.6亿度、1056秒的等离子体运行，通过开放共享的建制化管理模式，全面实现了EAST设计参数指标，在稳态等离子体运行的工程和物理上继续保持国际引领。EAST装置取得的系列创新成果，为自主建造聚变工程实验堆提供了重要实验基础。近年来，在合肥综合性国家科学中心等支持下，EAST装置进行了系列性能升级，本轮实验于2021年12月初开始，将持续至2022年6月，EAST大科学团队将在未来聚变堆类似条件下向高参数稳态高约束等离子体运行等科学目标发起冲击。

PRINCIPIA PHYSICS



NEWS

NUCLEAR-FUSION LAB ACHIEVES 'IGNITION'



输出能量大于输入能量！

2022.12.05

这是核聚变领域的科学家在过去60多年里一直追逐的目标。在经历不懈地努力后，12月5日凌晨1点，位于美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）的国家点火装置（NIF）终于迎来了激动人心的时刻：研究团队将**2.05兆焦耳**的激光聚焦到一个胡椒粒大小的聚变燃料丸上，产生了**3.15兆焦耳**的聚变能量输出！

什么是核聚变点火？

所谓核聚变点火，指的是当聚变反应所产生的能量等于或大于输入能量的时刻。具体来说，在聚变反应堆中，一旦达到合适的条件，聚变反应就会释放出一些粒子，其中包括 α 粒子，这些粒子会与周围的等离子体发生相互作用，进一步加热等离子体，加热后的等离子体会释放出更多的 α 粒子，最终形成一个能够自我维持的反应。

NIF是个什么样的设备？

现有的聚变反应堆可以分为两大类，一种是**惯性约束聚变**反应堆，还有一种是**磁约束聚变**反应堆。国家点火装置（NIF）是一个有着体育场大小的惯性约束聚变实验装置。它是世界上最精确、最可重复的激光系统。

NIF能精确地对多达192束强大的激光进行引导、放大、反射和聚焦，让它们在十亿分之一秒的时间内，射向一个只有厘米大小的被称为**腔靶**的空心圆柱体。在腔靶中，悬浮着一颗**胡椒粒大小**的燃料丸，燃料丸内装有氢同位素——**氘**和**氚**。

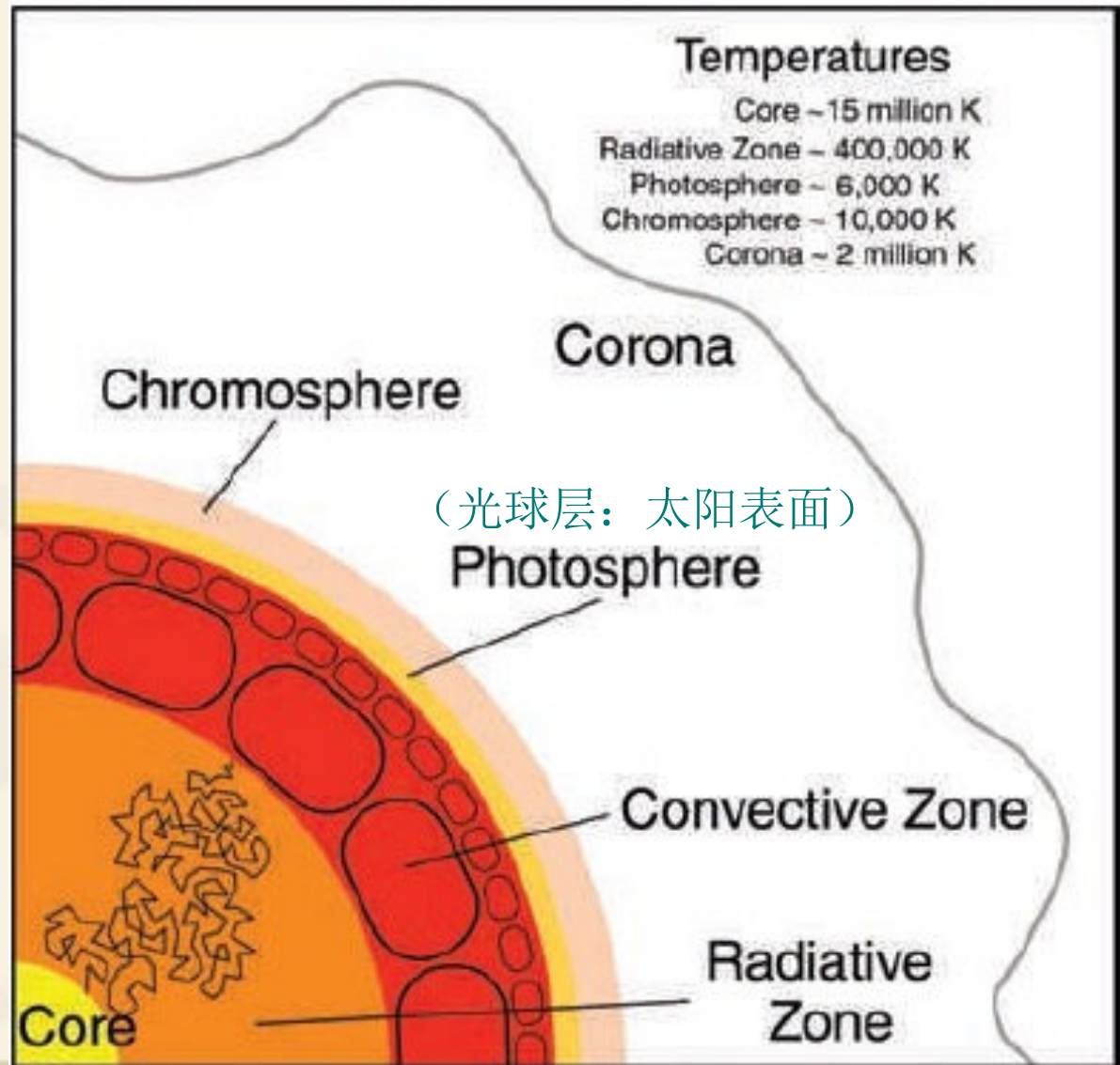
这一结果意味着什么？

近半个世纪以来，核聚变能源一直是能源领域的“圣杯”。约1.5倍的增益是一个真正历史性的科学突破，表明**NIF已经成功地实现了点火**。

但是，虽然NIF可以实现点火，它却并非一个真正的聚变能源装置。一个真正的聚变能源装置需考虑的不仅仅是激光和燃料之间的单一能量比，还需考虑整个系统的能耗。**3.15兆焦耳**的聚变能虽然高于**2.05兆焦耳**的激光能，但在这个过程中，**NIF的192个激光器**消耗了**300兆焦耳**的能量。这意味着科学家还需努力提高效率。

❖ 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）

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

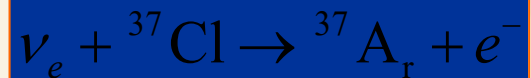
中微子产生率（每秒）

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

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: ~ 0.26 MeV
 - PPPII: $\sim 7-14$ MeV, 相对易测
- ❖ Ray Davis, 1970s, PPPII中微子



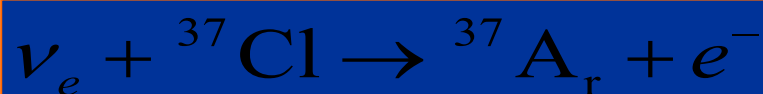
放射性氩: 半衰期 ~ 34 天

- ❖ 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)



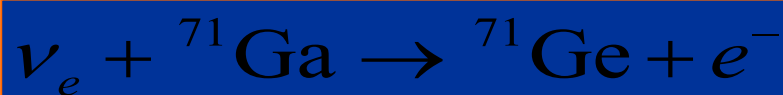
中微子探测

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

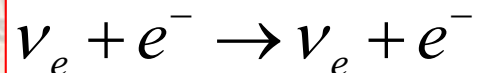


USA, 615吨四氯乙烯

Davis (2002年获诺贝尔奖)

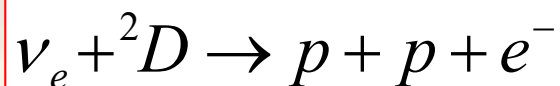


USSR, Italy



日本神冈, 2140吨水

小柴昌俊 (2002年获诺贝尔奖)



Canada & USA, 1000吨重水

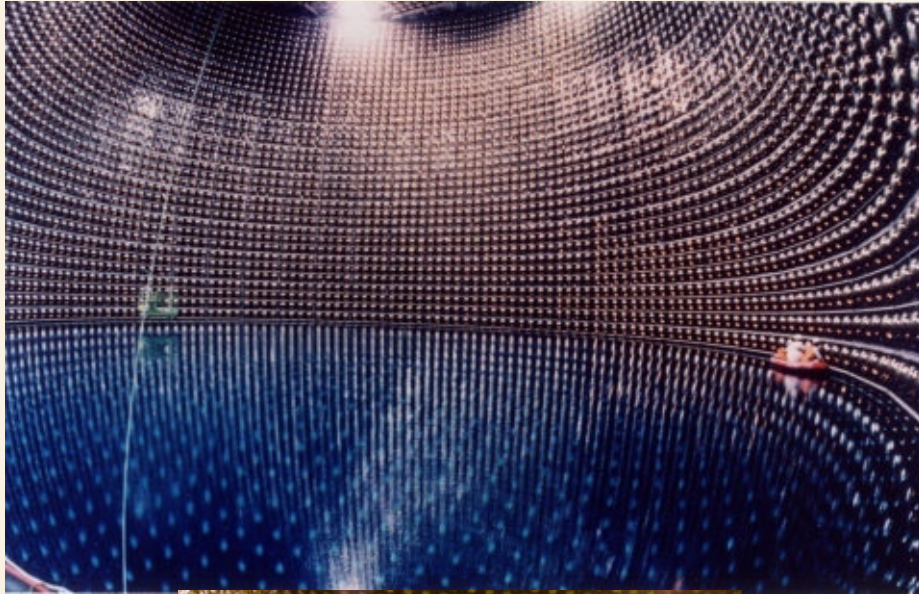
太阳中微子之谜

ν_e ν_μ ν_τ 中微子振荡

宇宙暗物质来源之一:

$m_\nu \neq 0$?

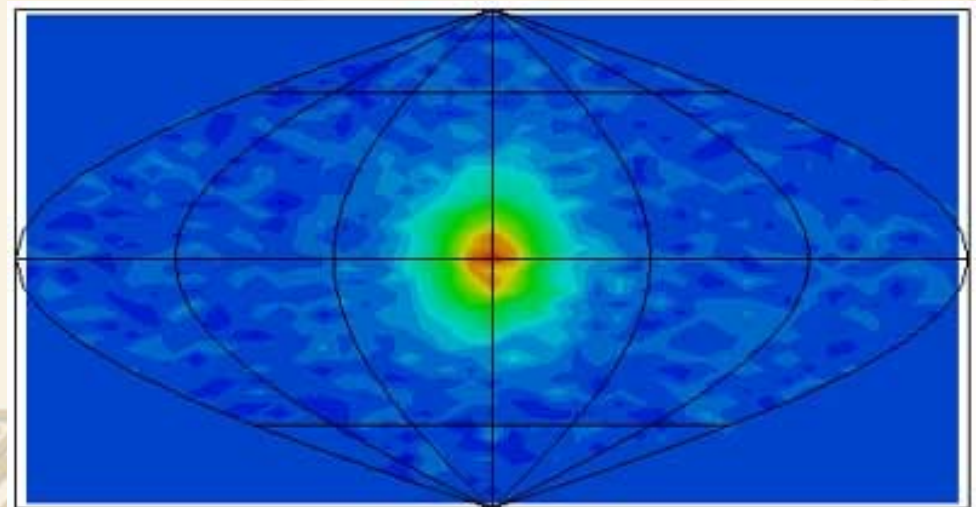
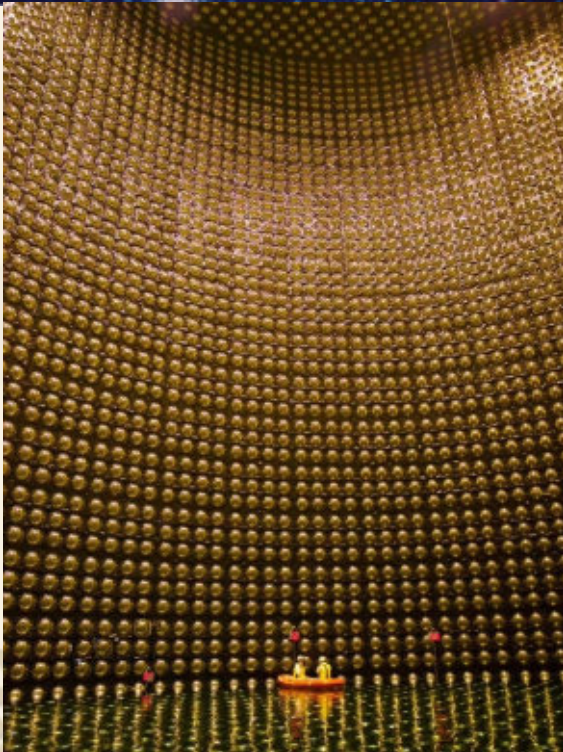
神岗中微子探测器（Kamiokande）



$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$

日本神冈, 2140吨水

中微子短缺！





小柴昌俊

1926年 - 2020年11月12日



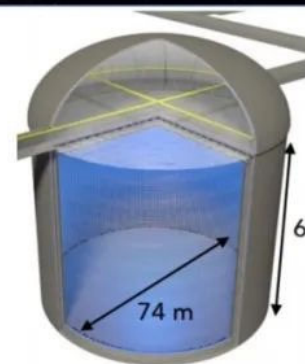
神冈

3千吨, 1983



超级神冈

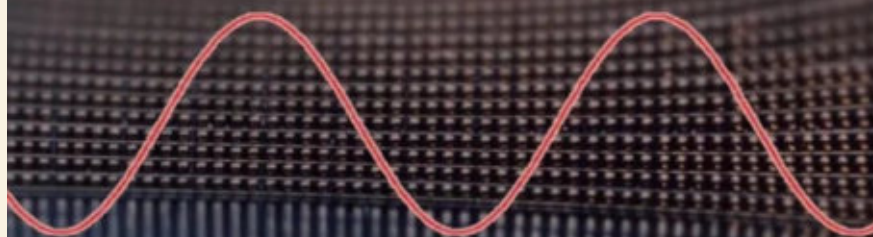
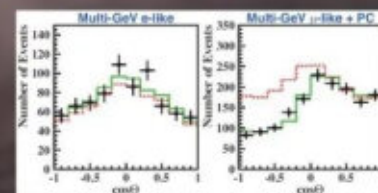
5万吨, 1996



顶级神冈

26万吨, 2027
格致论道讲坛

1998年超级神冈发现中微子振荡



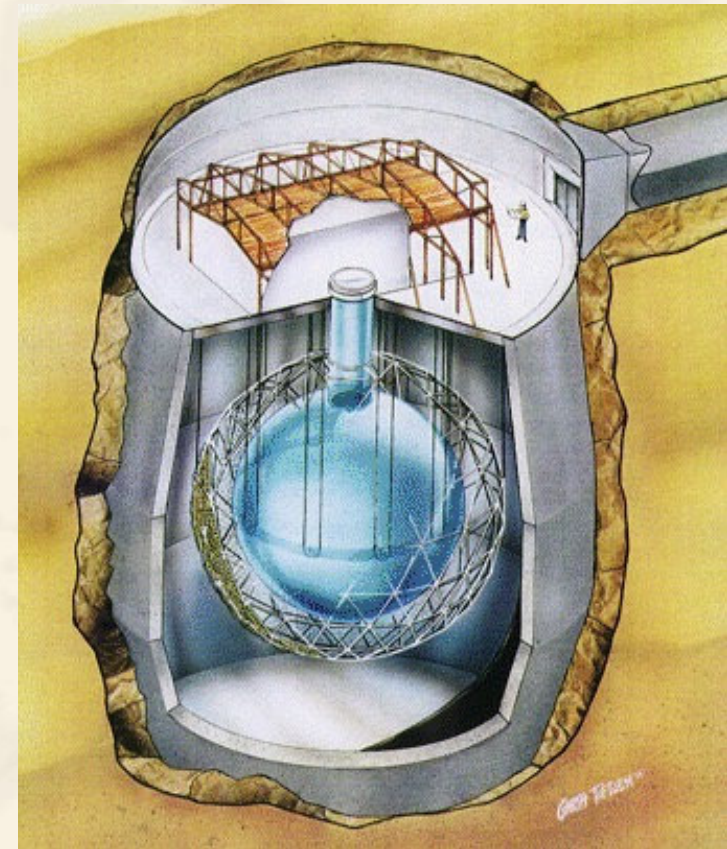
$\sin^2 2\theta$

从一种类型转变成另一种

格致论道讲坛

Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

2001年SNO重水探测器，利用中微子-电子散射，可以区别 $\nu_e + {}^2\text{H} \rightarrow 2p + e^-$ 以及 $\nu_x + {}^2\text{H} \rightarrow p + n + \nu_x$ 两种过程。实验证明有 2/3 的太阳中微子(ν_e)转换成了其他中微子，给出中微子振荡的有力证据。



把高纯度盐加入水中，提高对mu和tau中微子探测灵敏度



KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

English
[English \(pdf\)](#)

Swedish
[Swedish
\(pdf\)](#)

Press Release

6 October 2015

[The Royal Swedish Academy of Sciences](#) has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2015 to

Takaaki Kajita

Super-Kamiokande Collaboration

University of Tokyo, Kashiwa, Japan

and

Arthur B. McDonald

Sudbury Neutrino Observatory Collaboration

Queen's University, Kingston, Canada

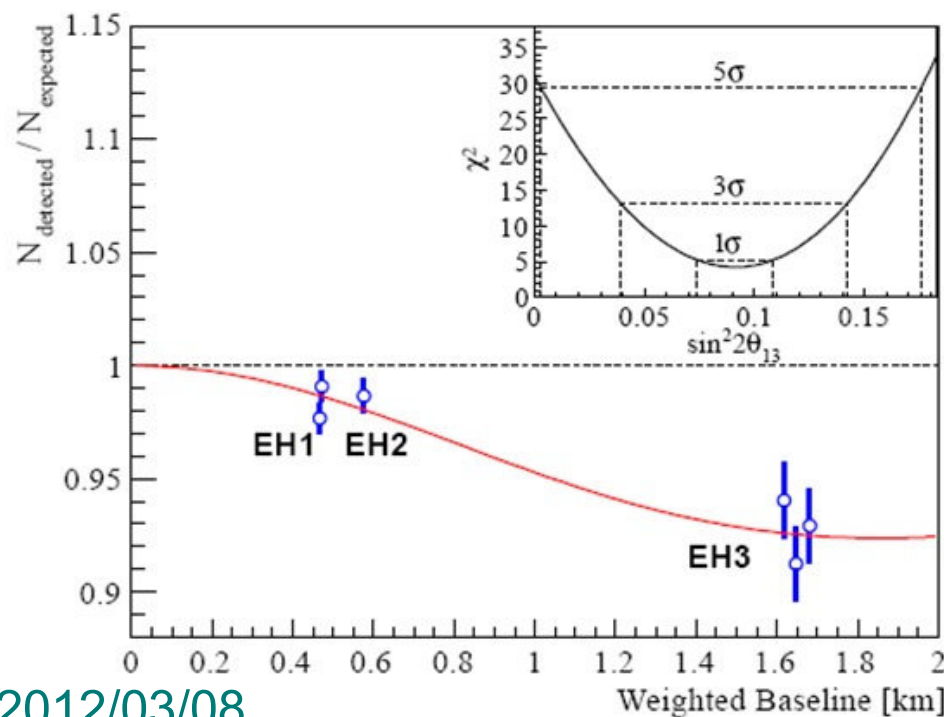
"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"



中国的大亚湾中微子实验



大亚湾中微子实验



2012/03/08

2015/11/10: 王贻芳作为负责人获科学突破奖

The Innovation | 大亚湾实验发布中微子振荡最精确测量结果

原创 Y Nakajima TheInnovation创新 2022-11-25 00:01 发表于浙江

导读

为什么宇宙万物都是由物质而非反物质组成，为什么又和物质世界最小组成单元之一中微子质量不为零的问题联系上呢？中微子的研究已经获得了四次诺贝尔物理学奖，但仍存在很多待解决的重大问题。中国的大亚湾中微子实验2012年首次发现第三种中微子振荡模式，2022年6月大亚湾实验公布了迄今最精确的中微子振荡参数结果，为未来解决这些重大问题提供了必须输入。

2022年6月，大亚湾实验在“中微子和粒子天体物理2022”国际会议上公布了最新结果，对混合角和质量平方差的测量精度分别达到了2.8%和2.3%，均为国际最精确测量。其中对混合角 θ_{13} 的测量精度在可预见的未来难以被突破。测量精度的改进不仅受益于统计数据量的积累，物理学家也在不断地改进系统误差，包括多个探测器之间的相对能量标度以及绝对能量响应等。

总结与展望

大亚湾实验精确测量的 θ_{13} 将成为中微子研究史上的标志性成果，也是未来中国江门中微子实验、日本顶级神冈实验和美国深地中微子实验确定中微子质量顺序和轻子CP破坏的必须输入。随着这些大型实验装置的服役，和中微子振荡相关的物理参数可能会在二十一世纪三十年代被全部破解。



Bruno Pontecorvo



Born	22 August 1913 Marina di Pisa, Italy
Died	24 September 1993 (aged 80) Dubna, Moscow Oblast, Russia
Citizenship	Italy, Britain, Soviet Union
Alma mater	University of Rome La Sapienza
Known for	Neutrino oscillation Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata matrix

neutrinos. In a 1959 paper, he argued that the [electron neutrino](#) (ν_e) and the [muon neutrino](#) (ν_μ) were different particles. [Solar neutrinos](#) were detected by the [Homestake Experiment](#), but only between one third and one half of the predicted number were found. In response to this [solar neutrino problem](#), he proposed a phenomenon known as [neutrino oscillation](#), whereby electron neutrinos became muon neutrinos. The existence of the oscillations was finally established by the [Super-Kamiokande](#) experiment in 1998. He also predicted in 1958 that [supernovae](#) would produce intense bursts of neutrinos, which was confirmed in 1987 when [Supernova SN1987A](#) was detected by [neutrino detectors](#).

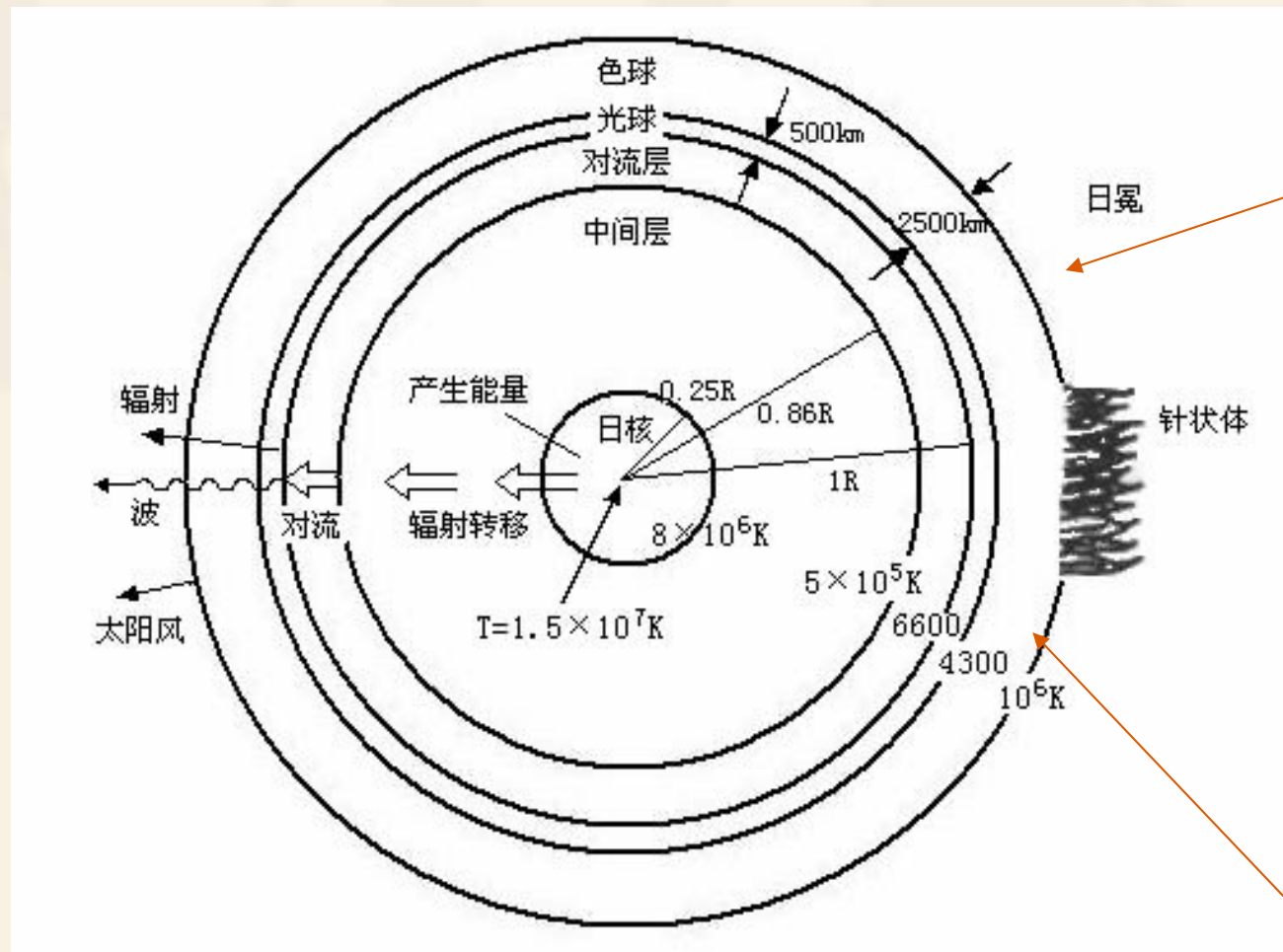
布鲁诺·庞蒂科夫奖(Bruno Pontecorvo Prize)由俄罗斯杜布纳研究所于1995年设立，旨在纪念中微子“教父”——意大利物理学家布鲁诺·庞蒂科夫 (Bruno Pontecorvo)，表彰为基本粒子物理学做出重大贡献的科学家。面向全球中微子实验领域的科学家，每年颁发一次。

2017年2月27日，国际布鲁诺·庞蒂科夫奖评审委员会宣布授予中国科学院高能物理研究所研究员王贻芳、韩国首尔大学教授 KIM Soo-Bong 和日本高能加速器研究机构 (KEK) 教授 NISHIKAWA Koichiro 2017 年庞蒂科夫奖(Bruno Pontecorvo Prize)，以表彰他们在中微子振荡现象的研究和分别在大亚湾实验、RENO 实验和 T2K 实验中精确测量出中微子混合矩阵的 θ_{13} 所做出的突出贡献。 [2]



多信使时代的深海
中微子观测（中山
大学 杨莉莉）

太阳大气：光球层、色球层、日冕

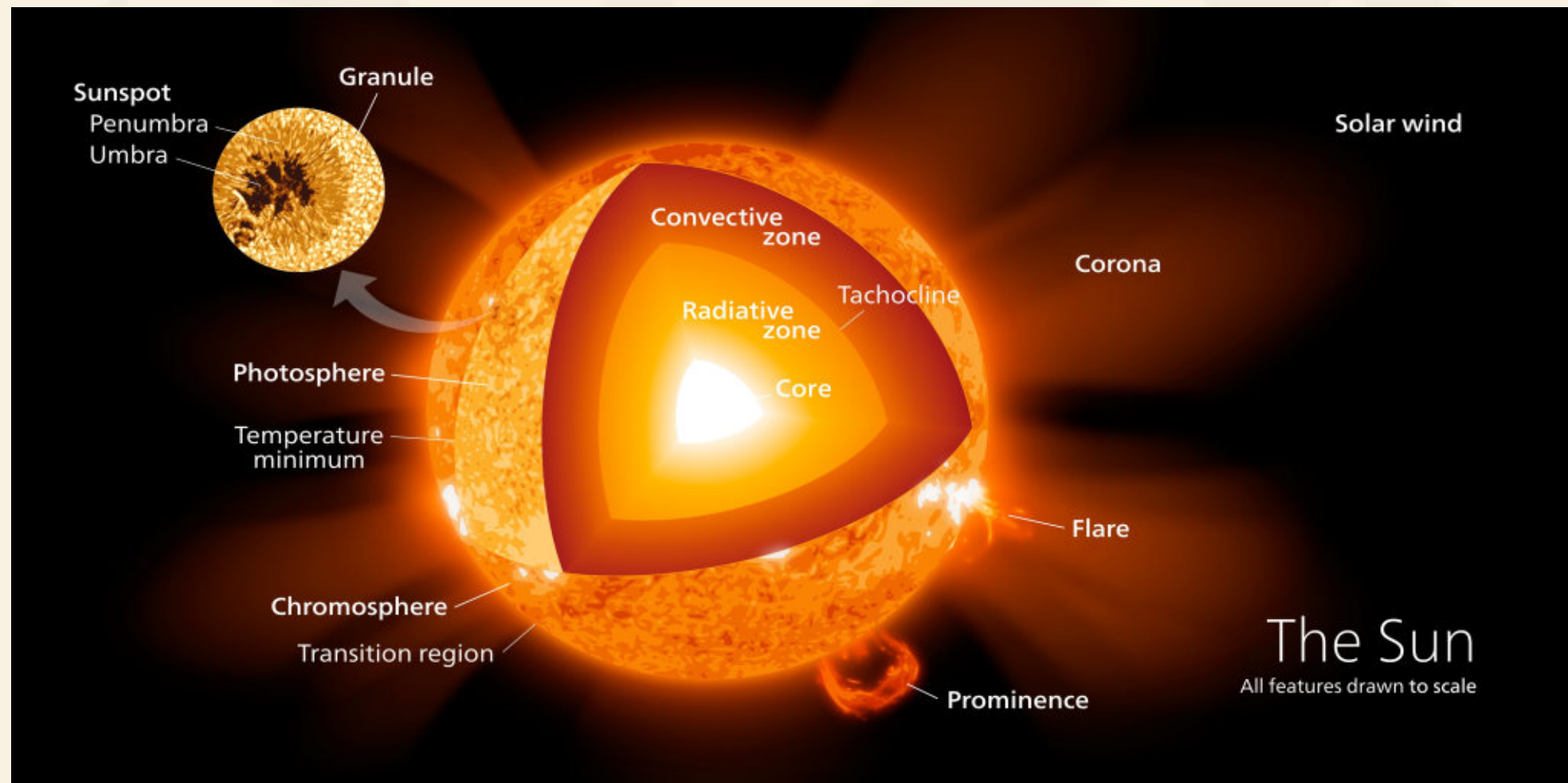


$T \sim 2 \times 10^6 K$

色球层的密度：
 10^{-4} 光球层密度

转变层

($\sim 100 km$)



色球层（玫瑰红辉光——氢线H α 主导；日全食时观测）

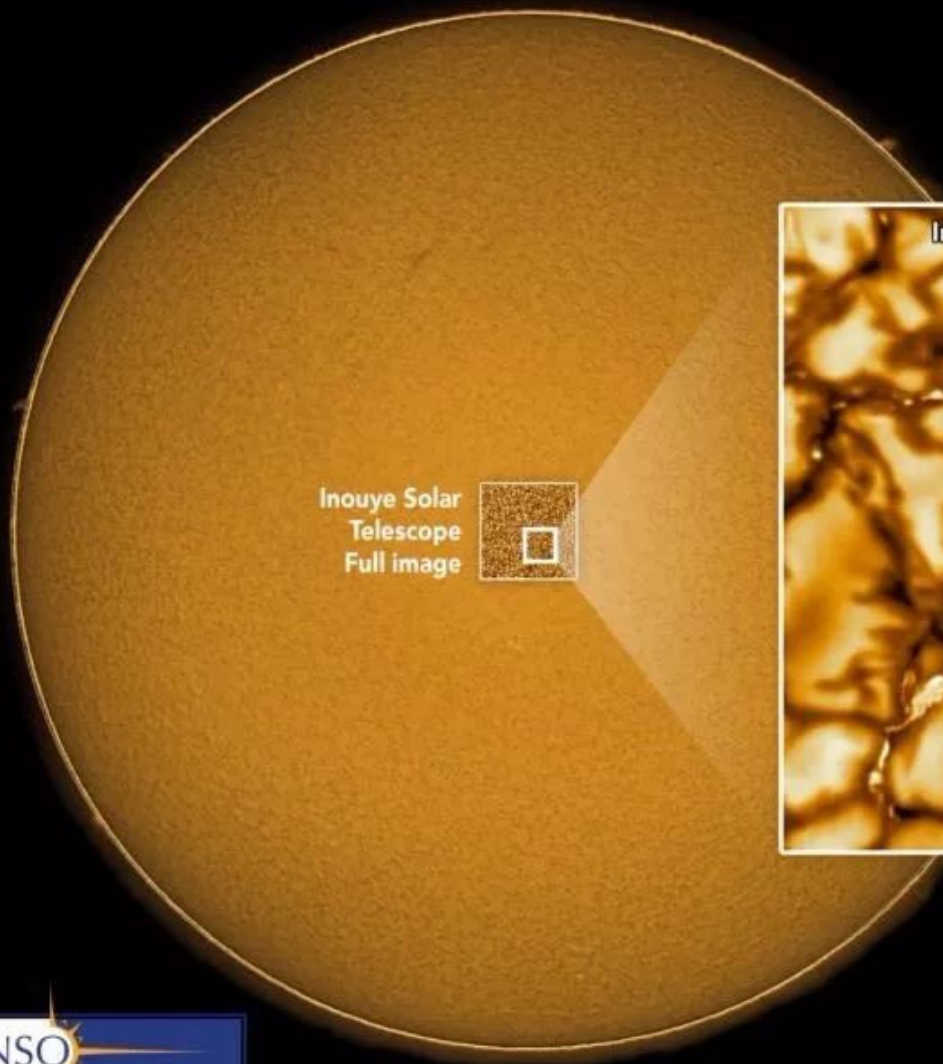


National
Science
Foundation

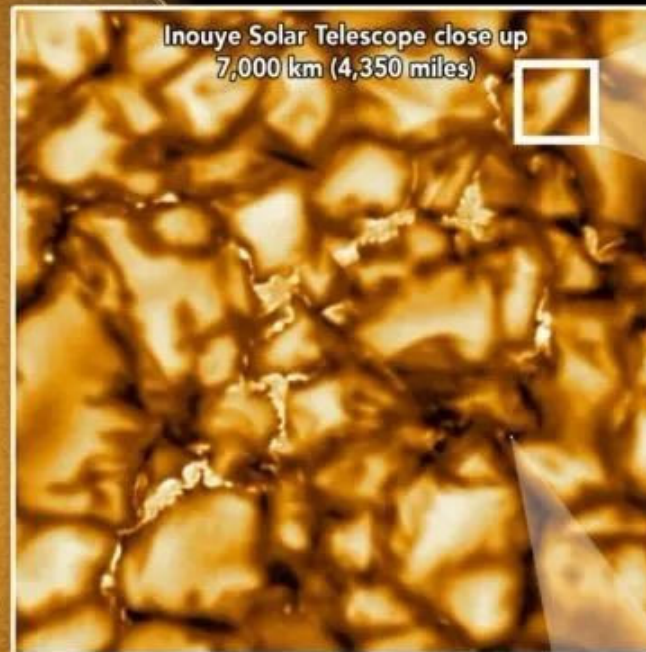
Daniel K. Inouye Solar Telescope

2020/02

The Inouye Solar Telescope sees large bubbling cells the size of Texas but can also see tiny features as small as Manhattan Island. This is the first time these tiny features have ever been resolved. The Inouye Solar Telescope is showing us three times more detail than anything we've ever seen before. For more information about this telescope, visit www.nso.edu



Inouye Solar
Telescope
Full image

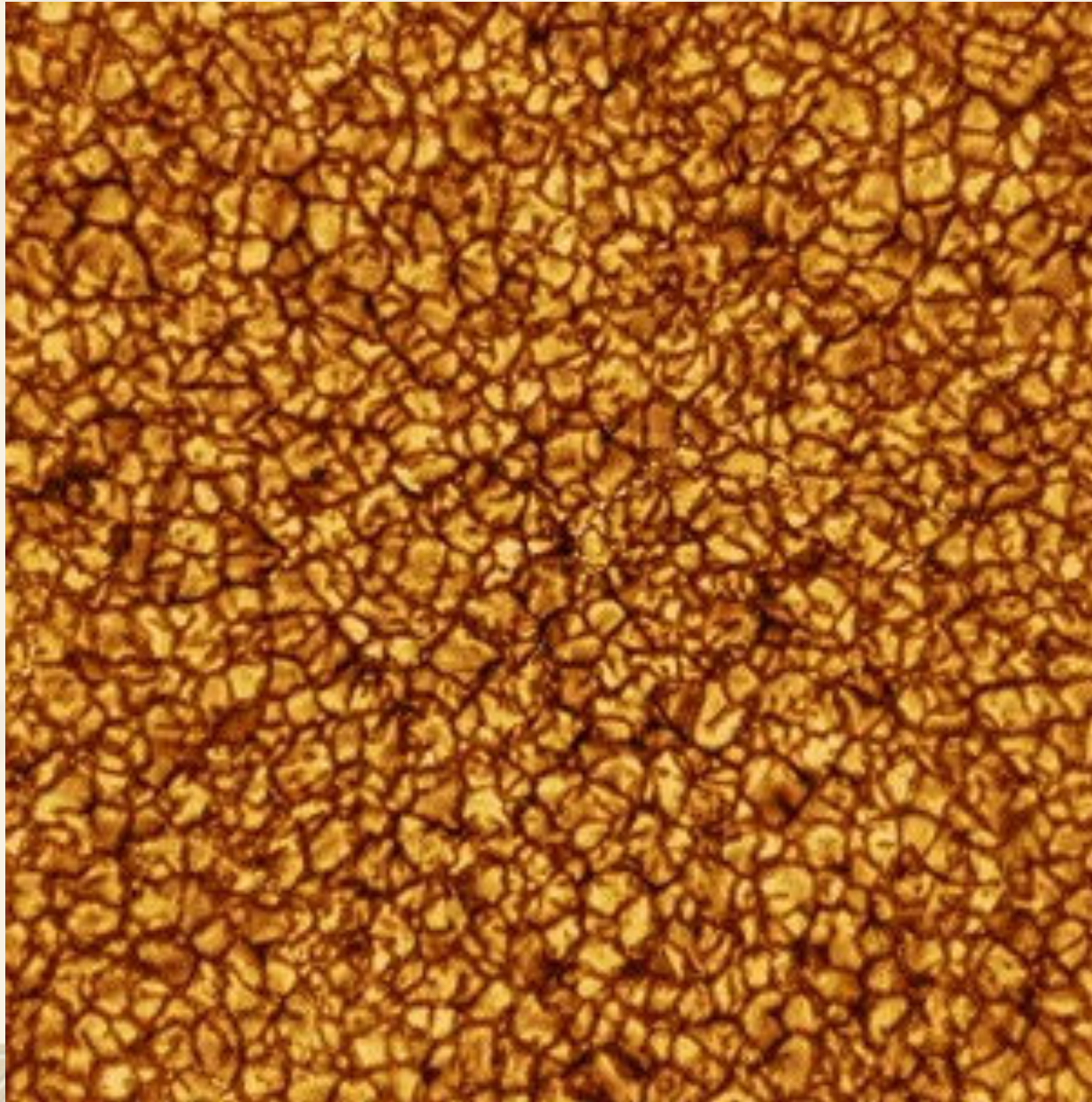


Inouye Solar Telescope close up
7,000 km (4,350 miles)



目前最大的太阳望远镜（D=4m）：35km的空间分辨率！

好吃不膩的太阳牌爆米花——“太阳米粒”





太阳黑子

2001/03/29 09:36 UT



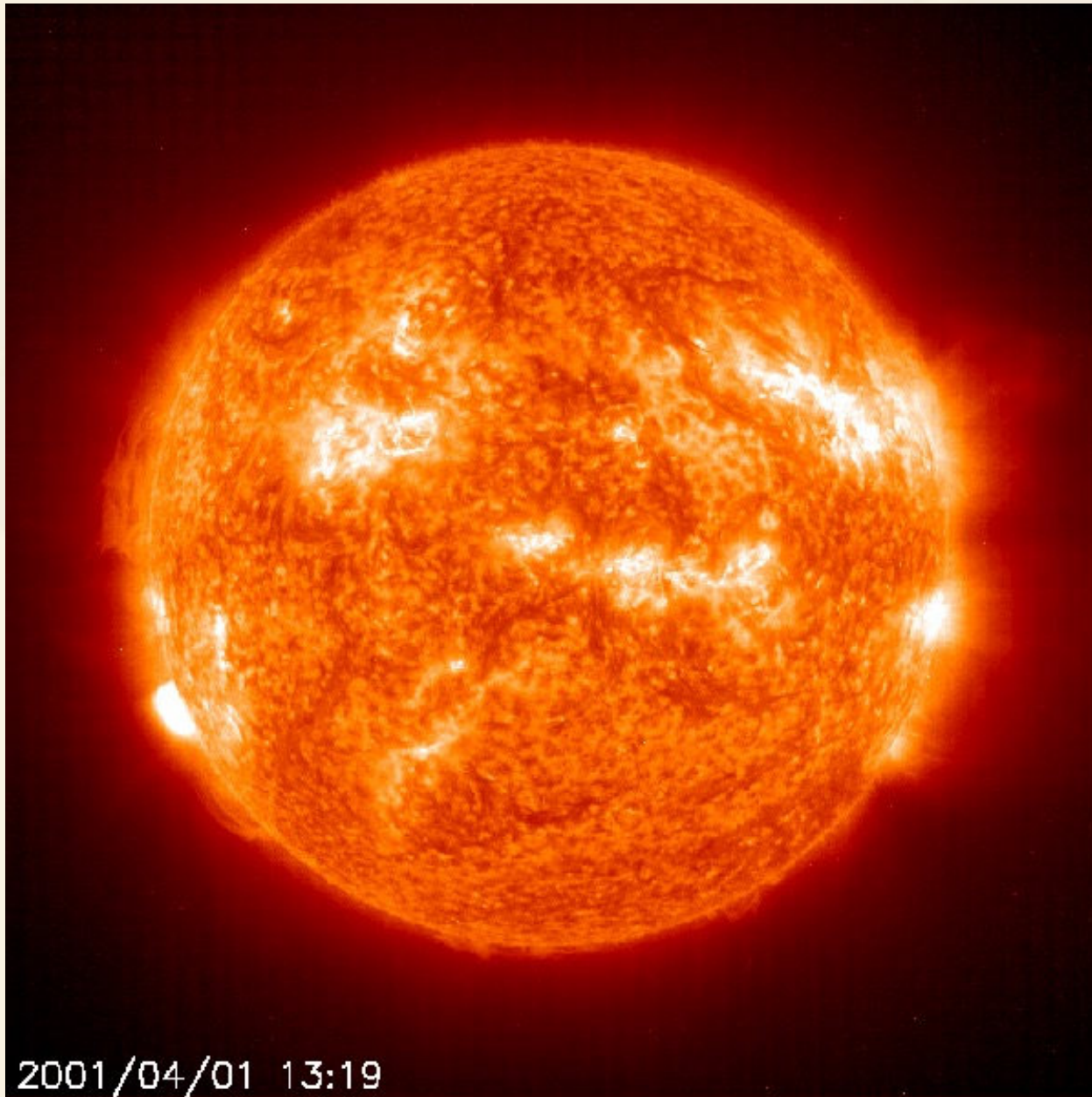
National
Science
Foundation

Daniel K. Inouye
Solar Telescope

太阳黑子



Conservatory / JRA / NSF



2001/04/01 13:19

太阳耀斑

尺度：
~1000Km

持续时间：
5-10分钟



THE SUN

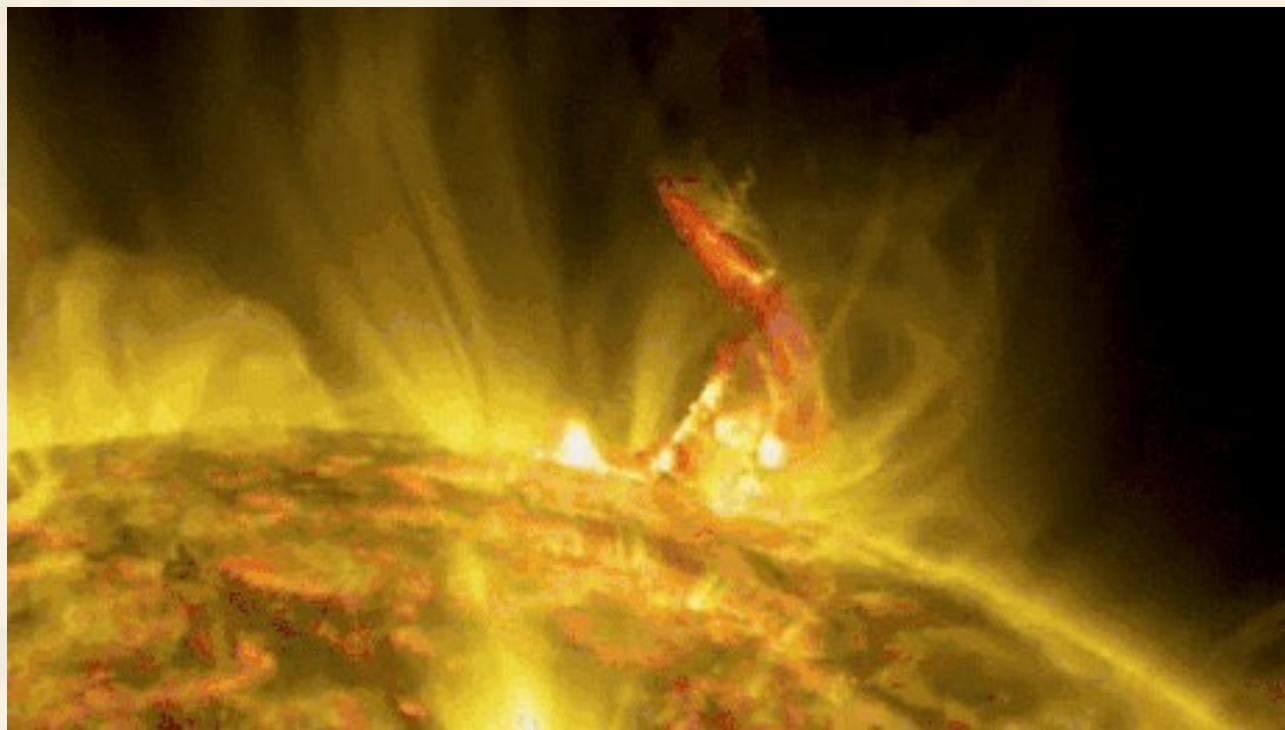
explore at solarsystem.nasa.gov/sun



THE SUN

explore at solarsystem.nasa.gov/sun

太阳耀斑



The Innovation | “蝌蚪”撞日

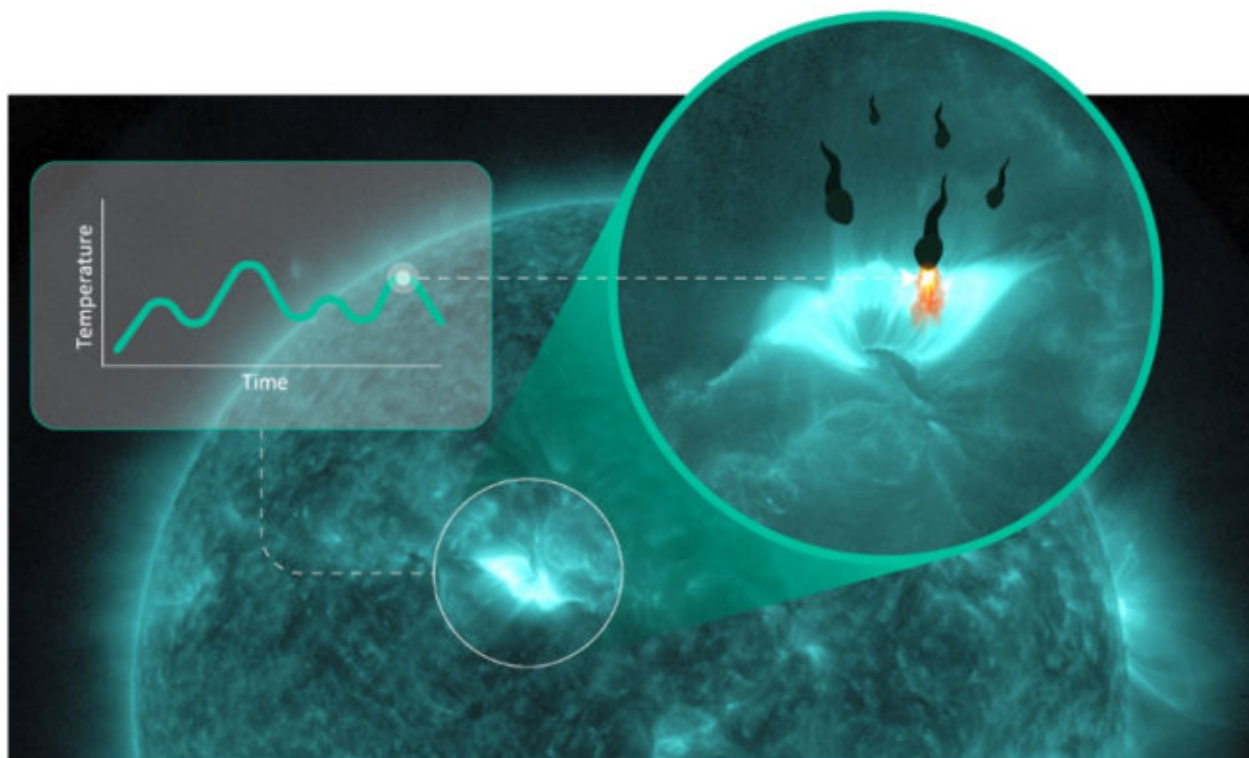
原创 Hui Tian TheInnovation创新 3天前

2021.01.20

导读

太阳耀斑是太阳上的一种剧烈爆发现象。在极紫外和软X射线观测中，耀斑区通常表现为明亮的半环状结构。**环顶之上，经常可见形如“蝌蚪”的暗黑结构朝向太阳运动**。这些小“蝌蚪”很可能蕴含耀斑能量释放的重要信息，但人们对其涉及的具体物理过程还知之甚少。我们发现许多“蝌蚪”非常罕见地直接撞向环顶，撞击之处温度明显升高，并伴有增强的极紫外和X射线辐射。由于不同“蝌蚪”撞日时间不同，辐射的增强是间歇性的，这为太阳和恒星耀斑期间经常观测到的准周期脉动提供了一种新的解释。

蝌蚪撞日，
撞击处升温，
可能产生
温度的准周
期脉动



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： $\sim 10^{-14}$ 地球表面的密度

光度低（可见光）： $\sim 10^{-6}$ 光球层的光度

云南天文台提出探讨日冕加热问题的新线索

文章来源： 云南天文台

发布时间： 2020-04-02

太阳日冕的温度高达百万度，远远高于光球层大约6000度的温度。研究日冕如何被加热到如此高的温度是一个理解恒星大气的问题。日冕中阿尔芬波的耗散可能是日冕加热所需的能量来源，但是否有足够能量的阿尔芬波在日冕中产生，仍然是具有争议的问题。中国科学院云南天文台毕以等人的一项研究认为，日珥中匀速下落的等离子体团在日冕中激发的阿尔芬波可能对太阳宁静区日冕加热有贡献。近日这项研究发表于*The Astrophysical Journal Letters*（《天体物理杂志-通讯》）。

这项研究的关键数据来源于云南天文台的一米新真空太阳望远镜（NVST）的观测。NVST主要进行太阳高分辨率的太阳成像、光谱以及磁场观测。目前，在H α 波段的日珥成像观测是这台望远镜的重要特色之一。附图展示了这项工作研究的日珥图像，图中以彩色标示了研究者们识别到的下落的等离子体团。

该项研究首次尝试估算了日珥中匀速下落的等离子体团的重力势能损失，并把单位时间内的重力势能损失与日冕加热所需的能量作比较。通过识别和分析日珥中数千个下落的等离子体团的大小、速度及路径，研究者们推测这些下落的等离子体团损失的重力势能相当于整个太阳宁静区日冕加热所需能量的约1/2000。考虑到这些等离子体团很可能在消失于NVST的H α 线心像以后继续匀速地下落，直到到达太阳表面附近才彻底瓦解，他们进一步推测其重力势能损失可达加热宁静区日冕所需能量的约1/320。假设日珥中的匀速下落等离子体团能够有效地激发日冕中的阿尔芬波，从而把其重力势能转化为日冕中的波能，进而转化为热能，那么这些日珥物质的下落运动对日冕加热有不可忽略的贡献。

研究者们认为NVST以及下一代太阳望远镜的光谱数据将便于精确地测算这些日珥中的等离子体团的密度，从而更准确地估算这些下落物质对日冕加热的贡献。相关的数值模型工作可能有助于验证和理解相关的能量转化过程。

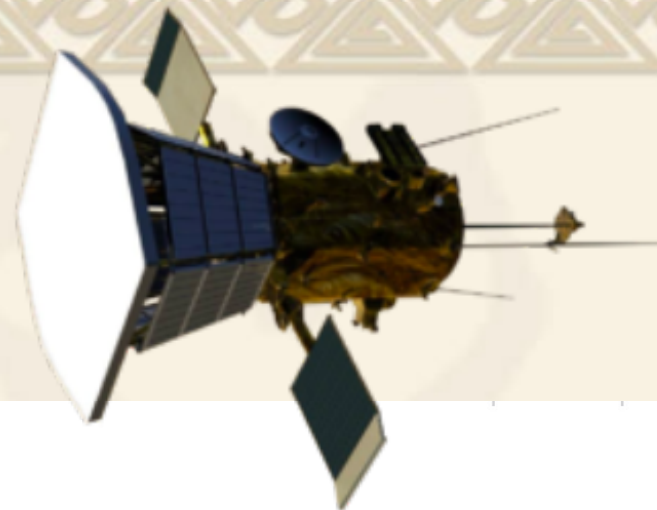
❖ 日冕的观测

- 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

如果没有磁场，太阳将变得枯燥无味。
—— 帕克 (Eugene Parker)



帕克太阳探测器

编辑

讨论

22

“帕克太阳探测器”，是以太阳风科学先驱、芝加哥大学名誉教授、天文学家尤金·帕克命名的航天器，是NASA第一次以健在人物命名的航天器。太阳探测器(SP)是第一个飞入太阳日冕的飞行器，仅仅位于太阳表面上方9个太阳半径处。太阳探测器的仪器探测它们遇到的等离子体、磁场和波、高能粒子和尘埃。它们也对太阳探测器轨道附近以及日冕底部的偶极结构的日冕结构成像。

2017年5月31日，美国宇航局在芝加哥大学威廉·埃克哈特研究中心宣布，将于2018年夏天发射“帕克太阳探测器”，它将装备厚达12厘米的碳复合外衣，可承受高达1400摄氏度的炽热和辐射，在最靠近太阳的地方以每小时72万公里的速度飞行。

2018年8月11日，美国宇航局预计发射“帕克”太阳探测器 (Parker Solar Probe)，这是人类首次直接“触摸”太阳。^[1]但由于氮气容器压力警报，发射被推迟24小时，预计在8月12日同一时间发射。^[2]

2018年8月12日15:31，“帕克”太阳探测器发射成功，将从前所未有的近距离上对太阳进行观测，是首项将穿越日冕的太阳观测任务。10月29日，帕克太阳探测器同日打破阿波罗2号于1976年创下的（距太阳表面4,273万公里）纪录，成为有史以来最接近太阳的人造物体。^[3]其将继续前进，预计11月上旬飞至预定位置（将距离太阳表面2,400万公里）

2019年9月1日，美国国家航空航天局 (NASA) “帕克号”太阳探测器第三次飞过轨道近日点。^[4]

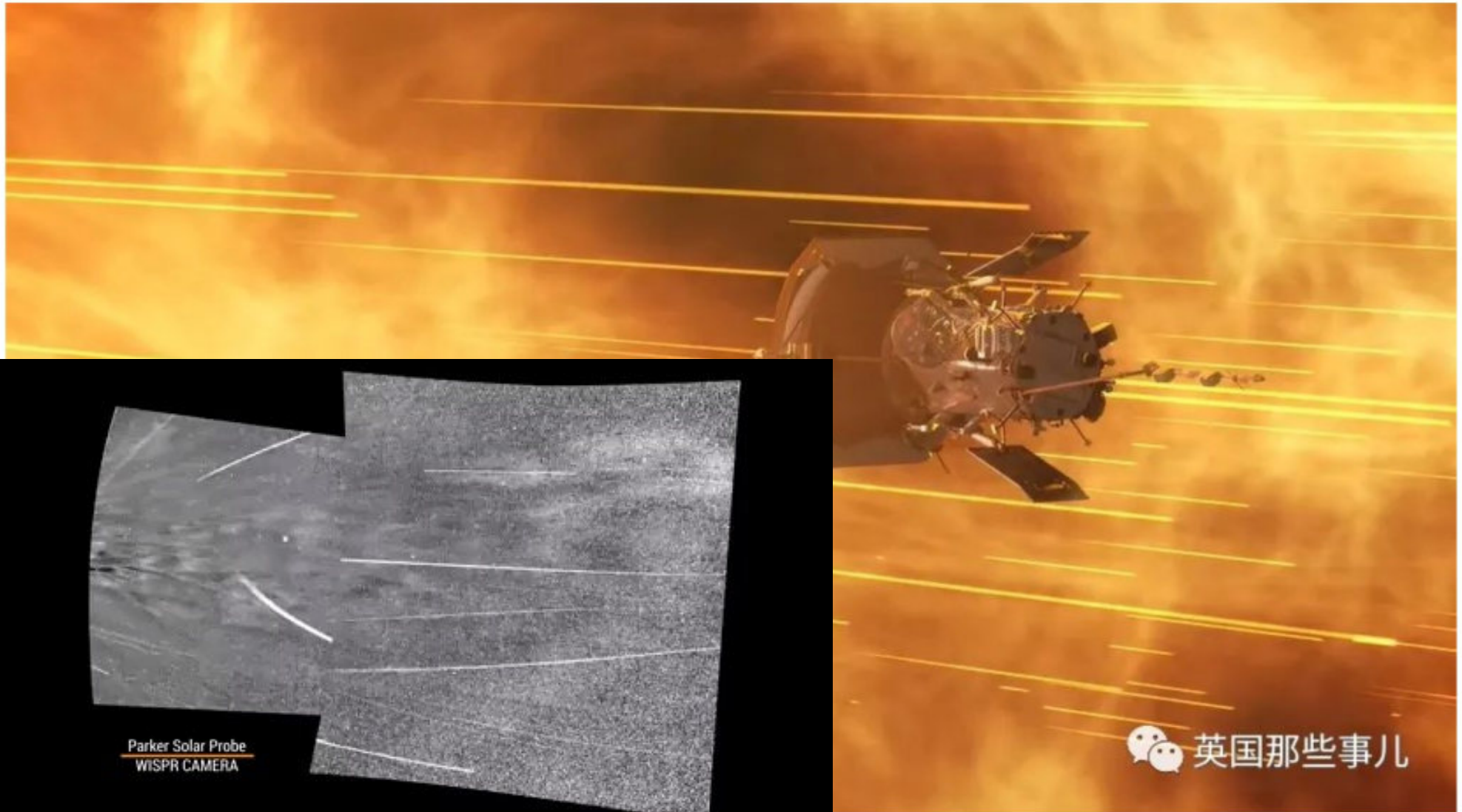
NASA's Parker Solar Probe becomes first spacecraft to 'touch' the sun



By [Ashley Strickland](#), CNN

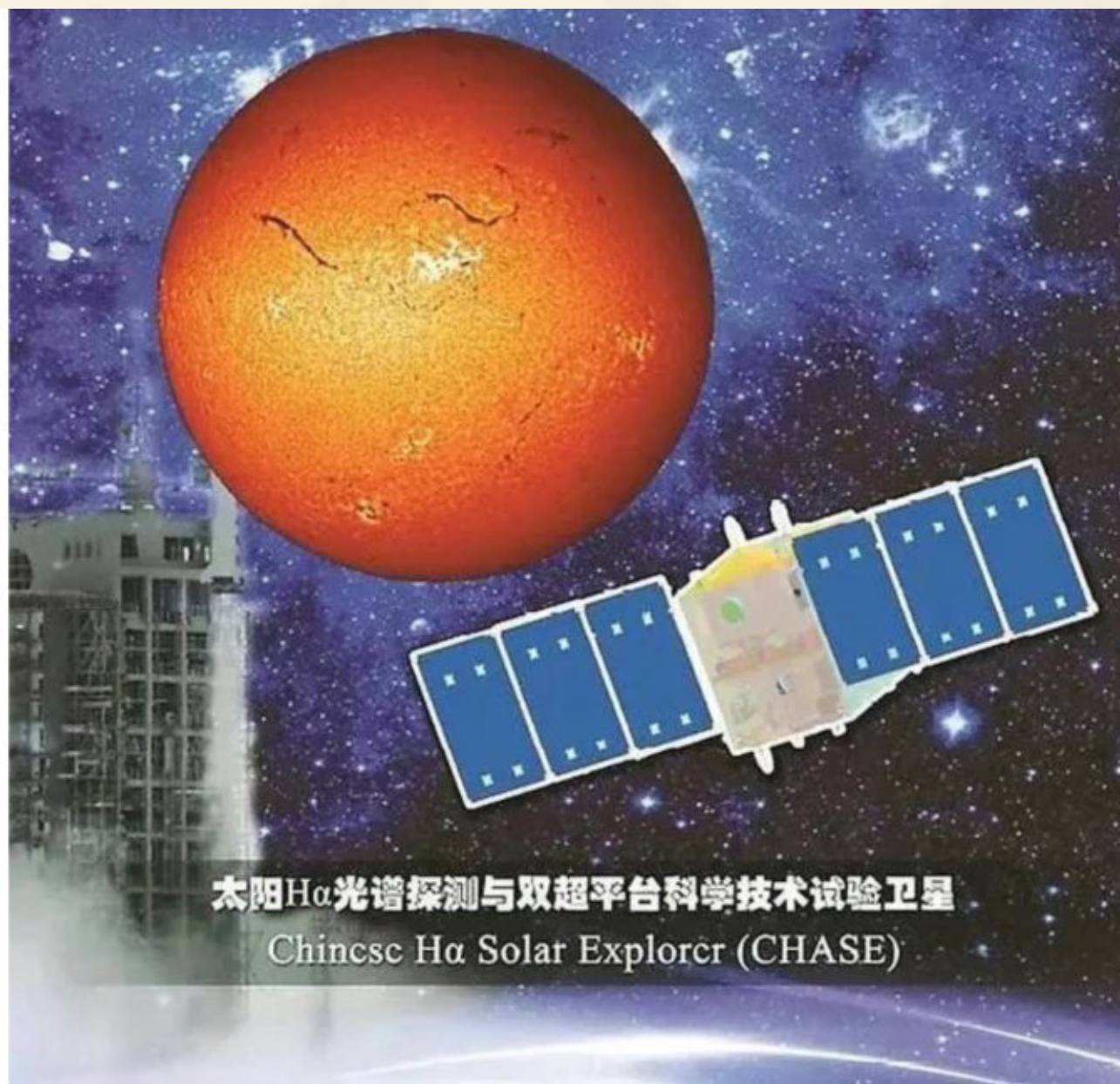
🕒 Updated 0343 GMT (1143 HKT) December 15, 2021

英国那些事儿



英国那些事儿

10月14日18时51分，我国在太原卫星发射中心成功发射首颗太阳观测卫星“羲和号”——“太阳H α 光谱探测与双超平台科学技术试验卫星”，标志我国正式进入“探日时代”。



太阳H α 光谱探测与双超平台科学技术试验卫星
Chinesc H α Solar Explorer (CHASE)

中国“太阳H α 光谱探测与双超平台科学技术试验卫星”

20211014：我国今天发射成功的“太阳H α 光谱探测与双超平台科学技术试验卫星”，运行在高517公里高的太阳同步轨道上。其主要科学载荷是带有H α 滤光片的太阳H α 成像光谱仪。它将在国际上首次实现对太阳H α 波段的光谱成像观测，填补太阳爆发源区高质量观测数据的空白。

当“夸父”开始逐日 | 我国综合性太阳探测卫星发射成功 |

原创 中科院之声 中科院之声 2022-10-09 08:14 发表于北京



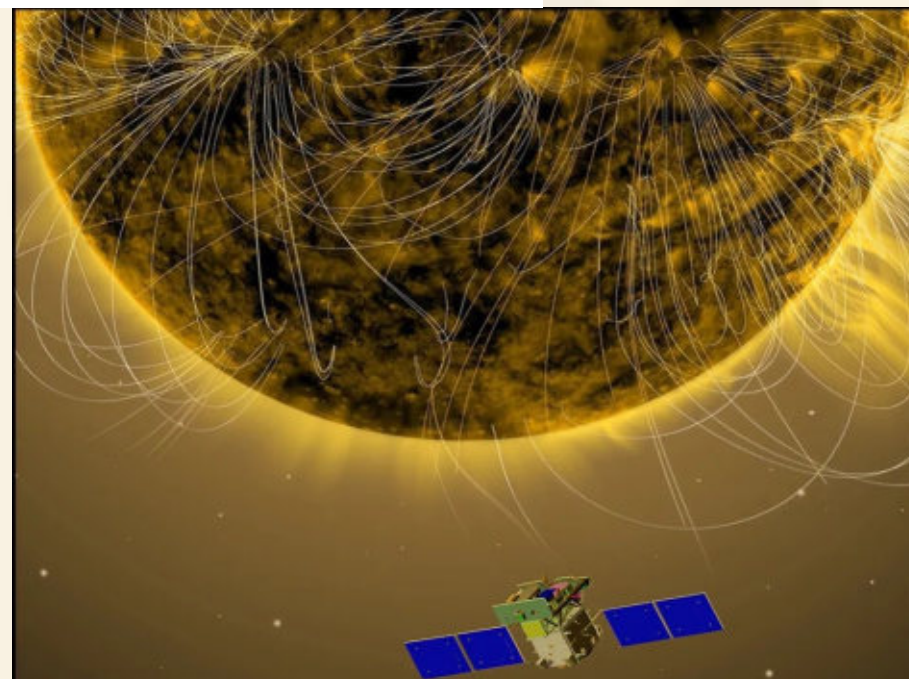
“夸父一号” 紫金山天文台供图



中科院

先进天基太阳天文台ASO-S

(中文昵称: **夸父一号**)



- 1 研究耀斑和日冕物质抛射的相互关系和形成规律。
- 2 研究耀斑爆发和日冕物质抛射与太阳磁场之间的因果关系。
- 3 研究太阳爆发能量的传输机制及动力学特征。
- 4 探测太阳爆发，为我国空间天气预报提供支持。

科学
目标

ASO-S卫星的主要科学目标是一磁两暴，即观测和研究太阳磁场、太阳耀斑和日冕抛射三者之间的关系。

“夸父”与“悟空”能否结伴而行？

原创 朱昕雷 中国科学院紫金山天文台 2022-10-11 19:59 发表于江苏

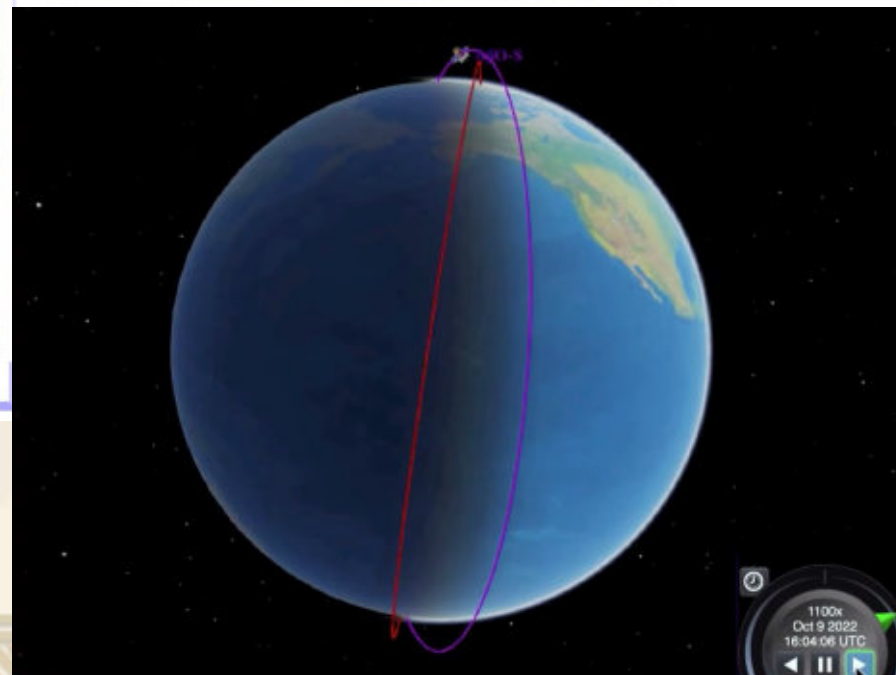
北京时间10月9日上午7点43分，“夸父一号”先进天基太阳天文台（ASO-S）成功发射，实现了我国太阳探测卫星跨越式突破。同时，我国空间科学卫星系列首发星“悟空号”暗物质粒子探测卫星（DAMPE）已在轨运行近7年。中国科学家们正在把一个个神话变成现实。



“悟空号”
高度：500 km
倾角：97.39°
周期：94.4 min
速度：7.63 km/s



“夸父一号”
高度：720 km
倾角：98.27°
周期：99.3 min
速度：7.49 km/s



“悟空号”（红）与“夸父一号”（紫）卫星轨道仿真动画

近圆形的晨昏太阳同步轨道

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⁻, 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

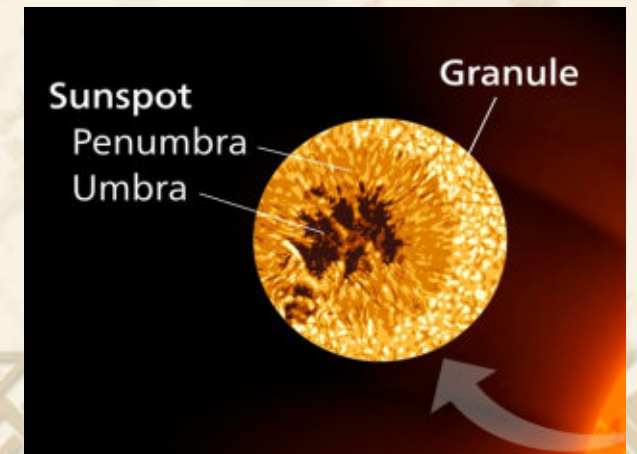
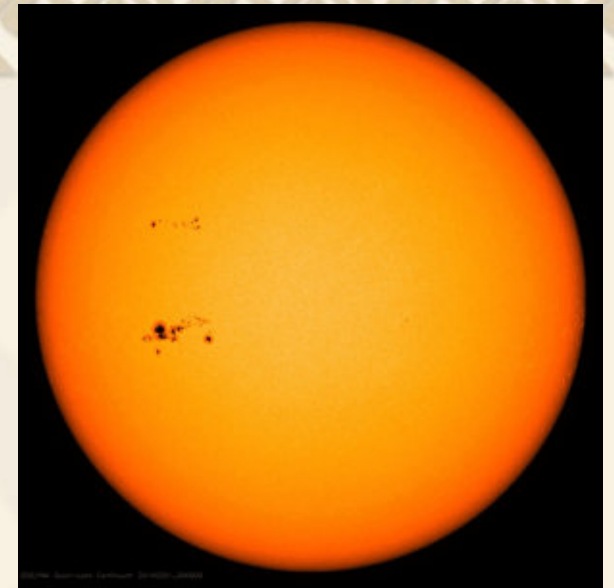
太阳磁场和 黑子活动周期

❖ 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）



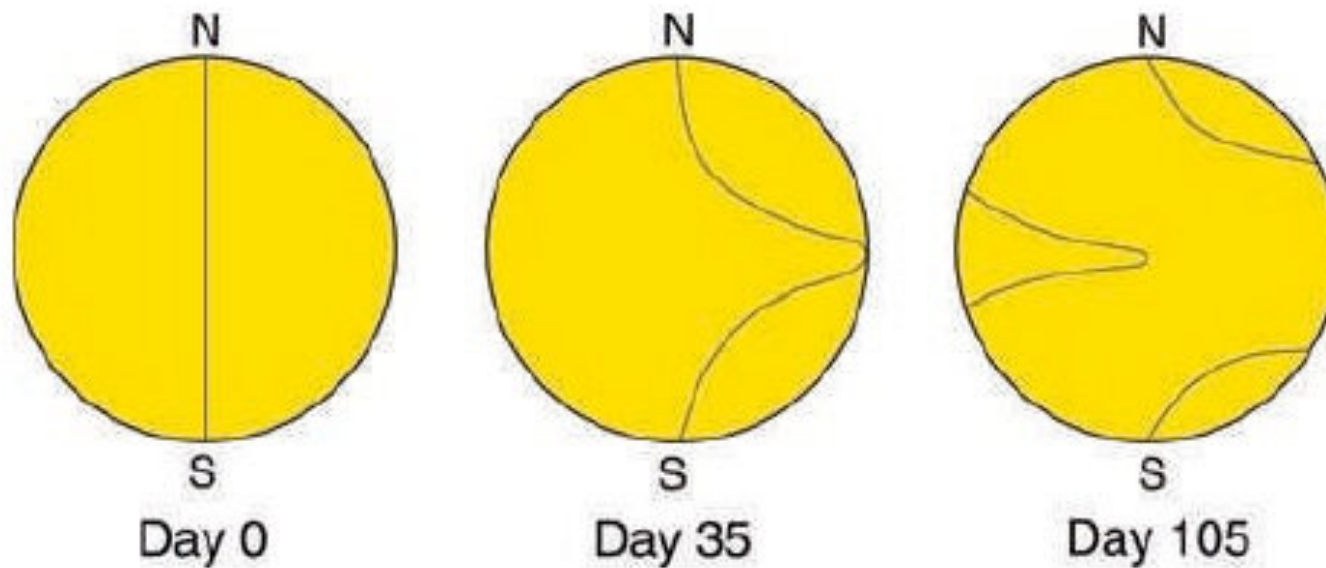
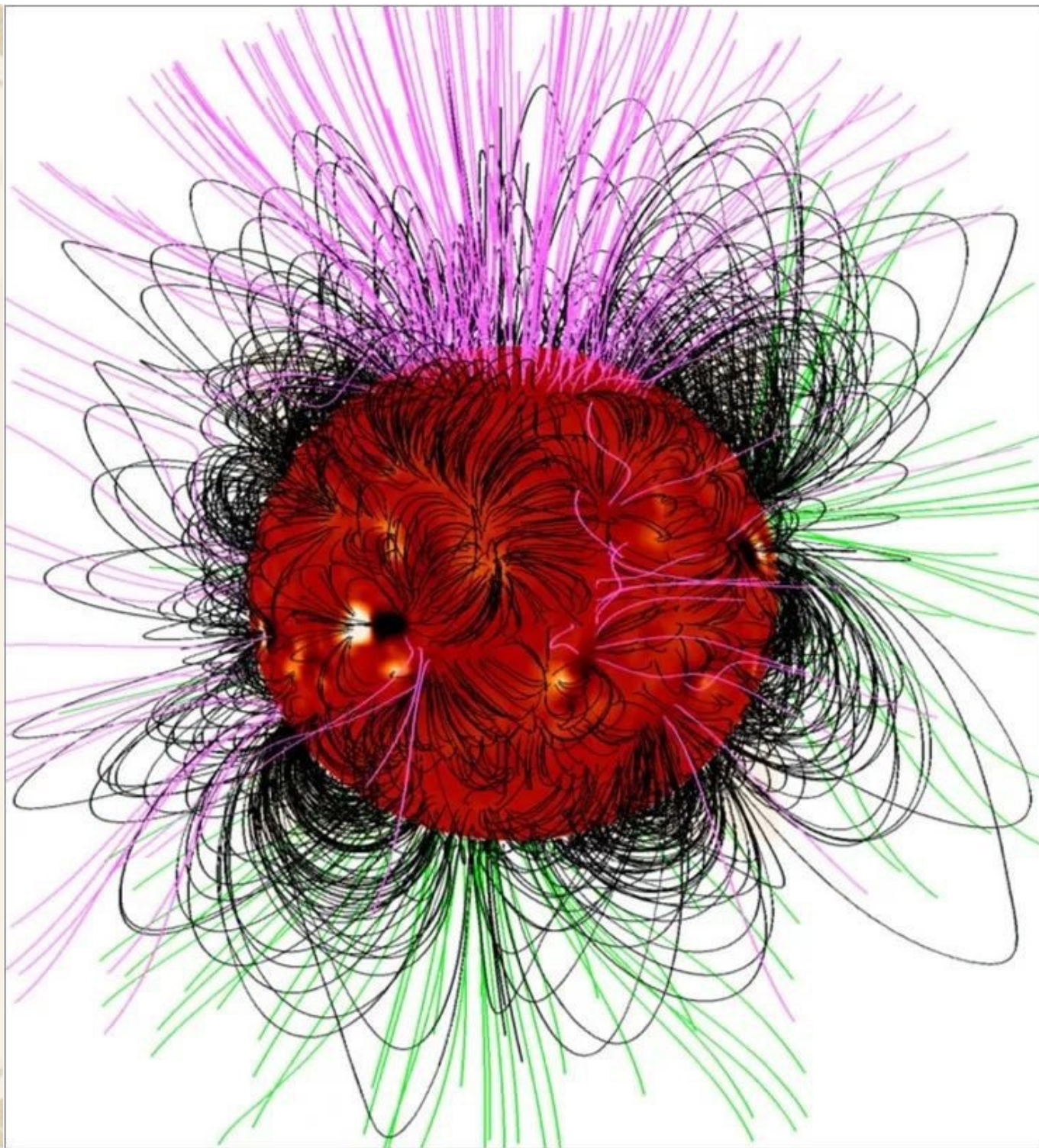


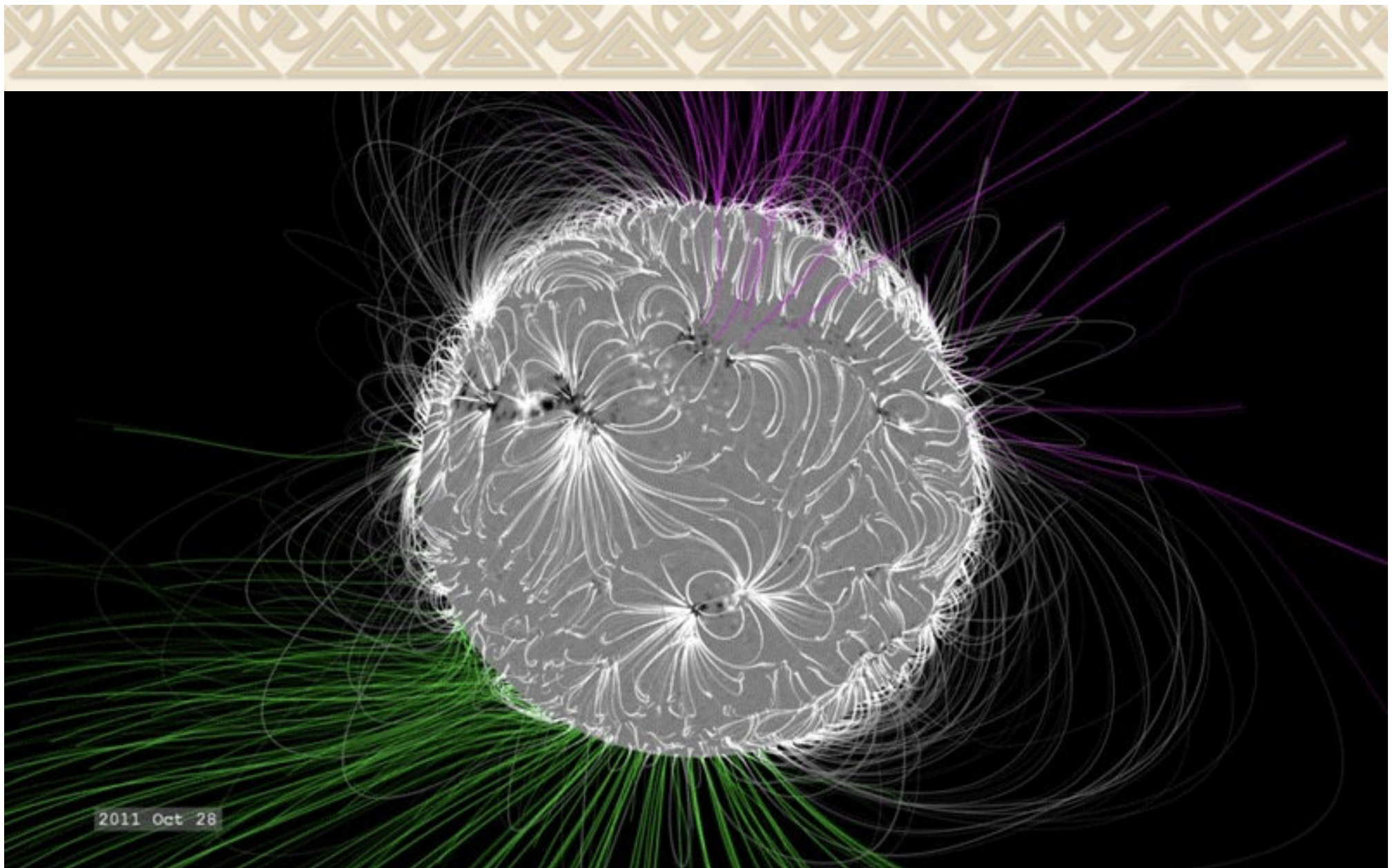
Figure 2.10 The winding of the Sun's magnetic field due to the differential rotation of the Sun.

较差转动：磁力线缠绕，磁场放大（对流层带电粒子产生磁场）

磁浮力：黑子成对产生！

理论计算的
三维太阳磁场

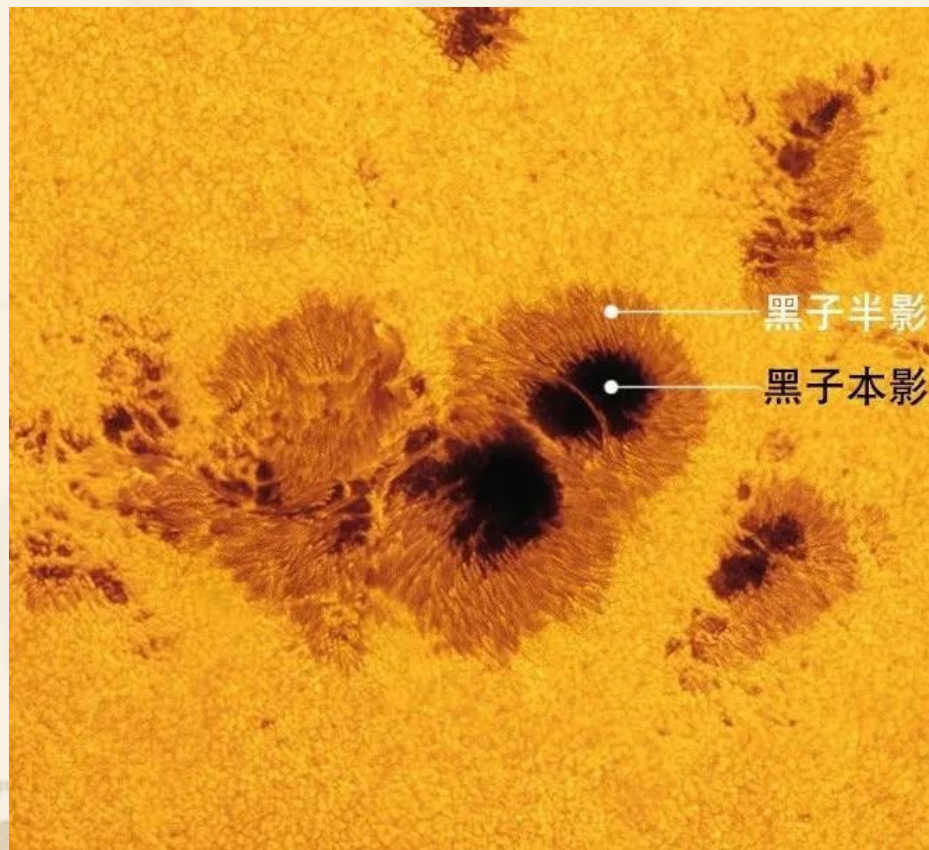
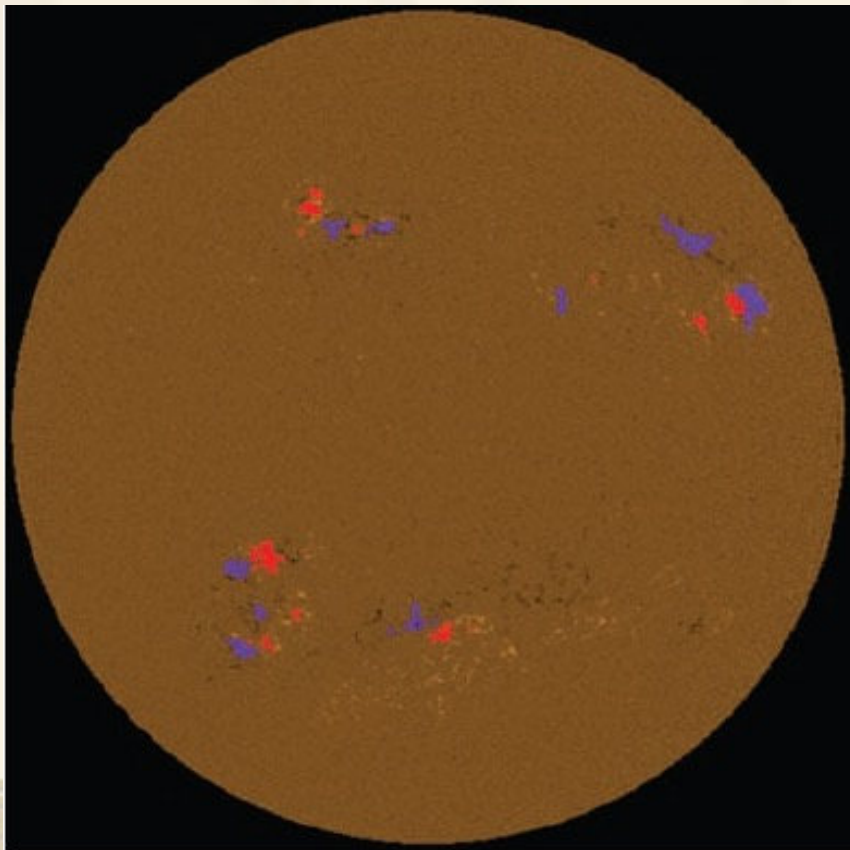


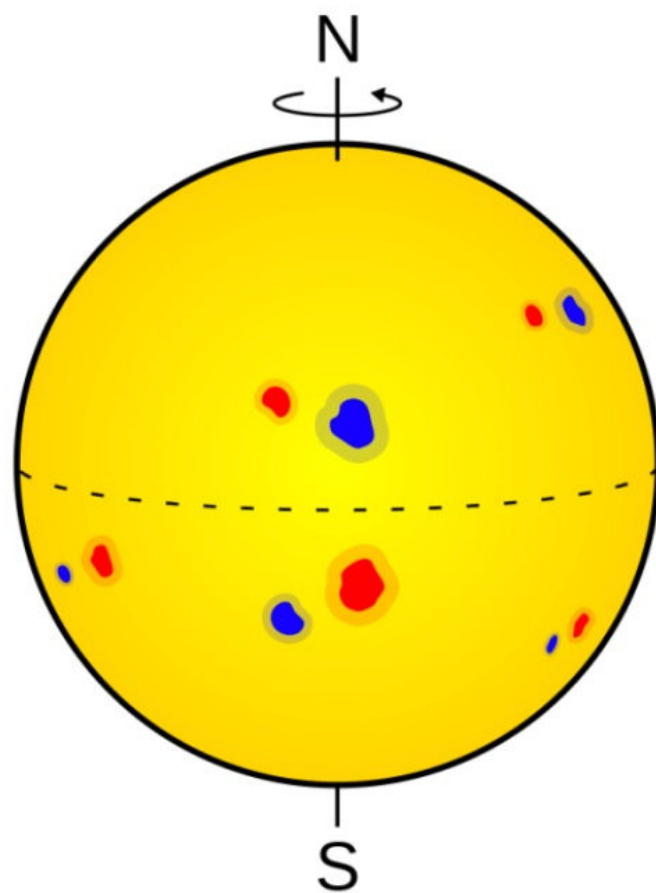


○ 在太阳不同的区域存在不同的磁场方向和强度；即使在同一区域，磁场在不同的时间也是不同的。图中显示了太阳磁场在不同时间的变化。| 图源：NASA

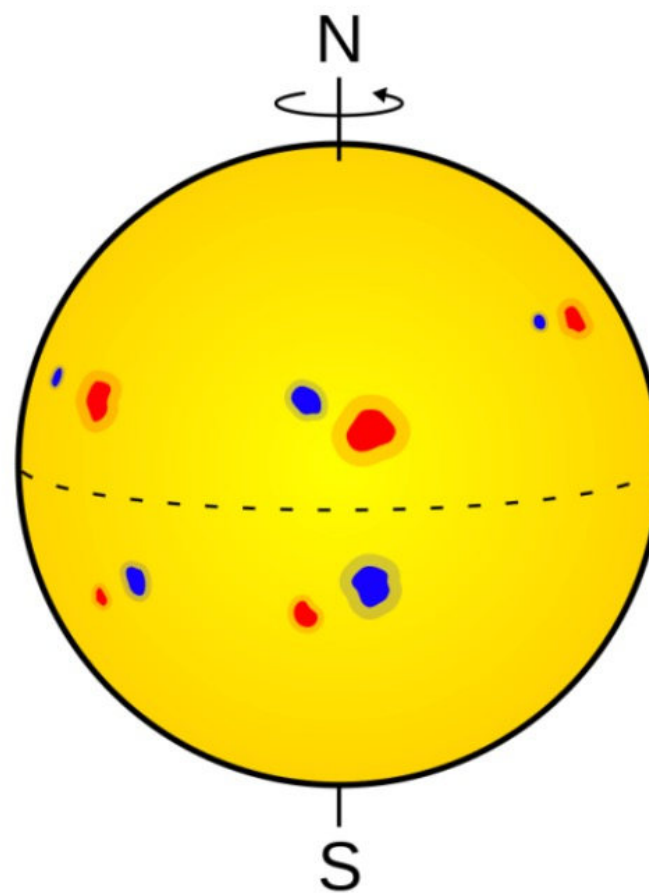
❖ 太阳黑子的周期性变化

- 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





Cycle n



Cycle n+1

海耳周期示意图 | Wikipedia

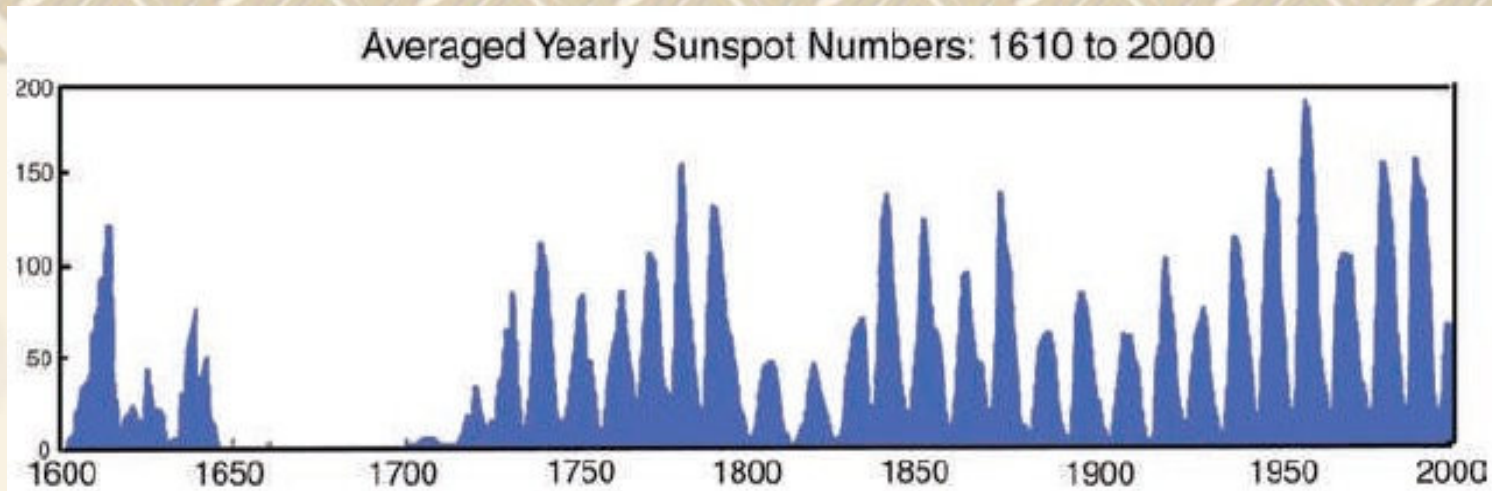
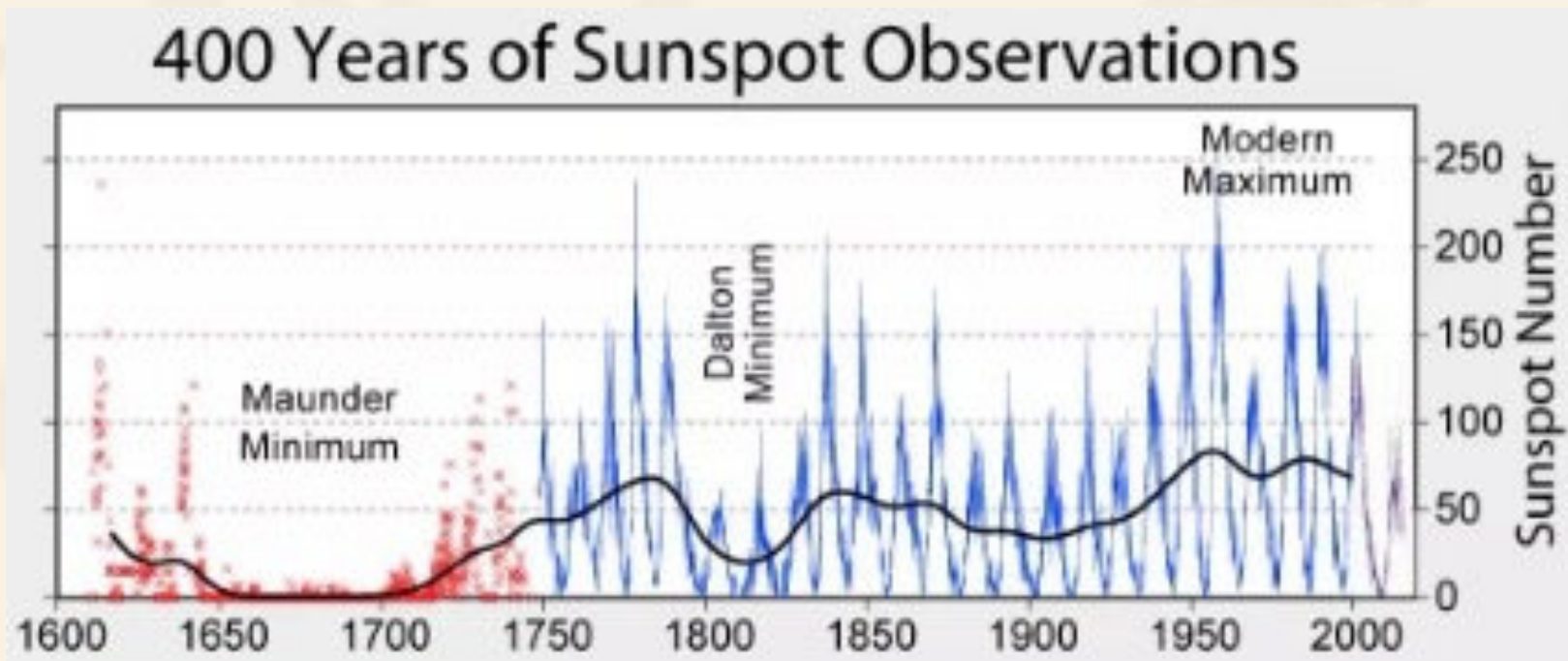
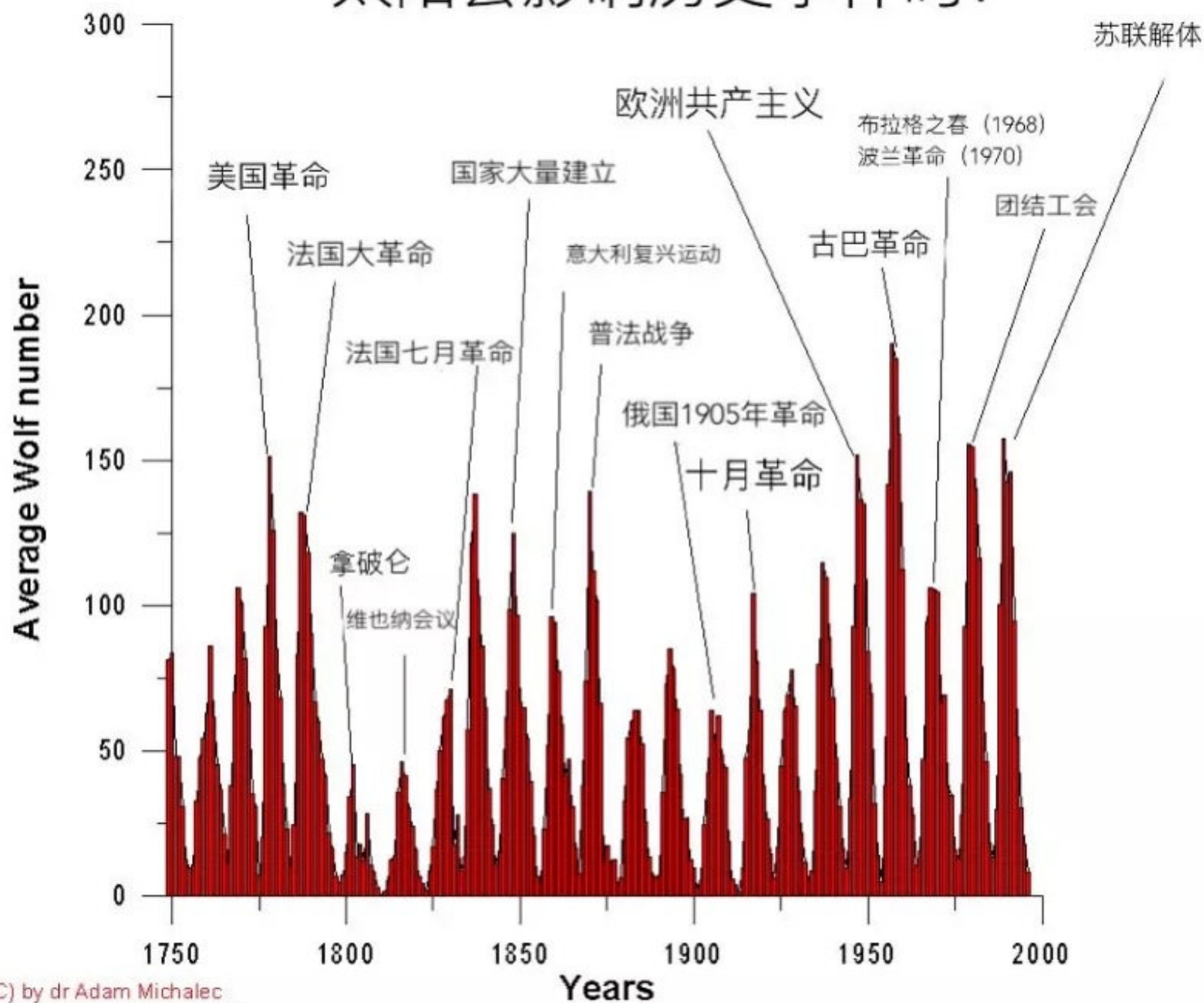


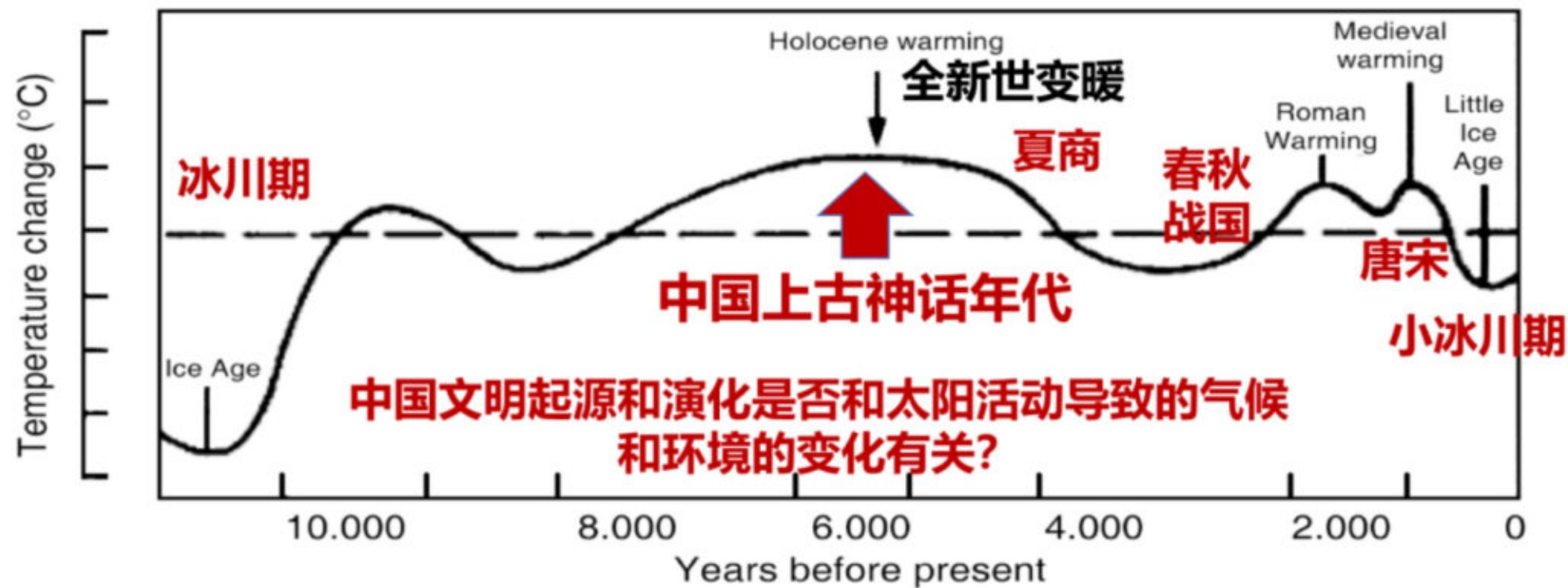
Figure 2.12 The averaged sunspot numbers over the last 400 years.



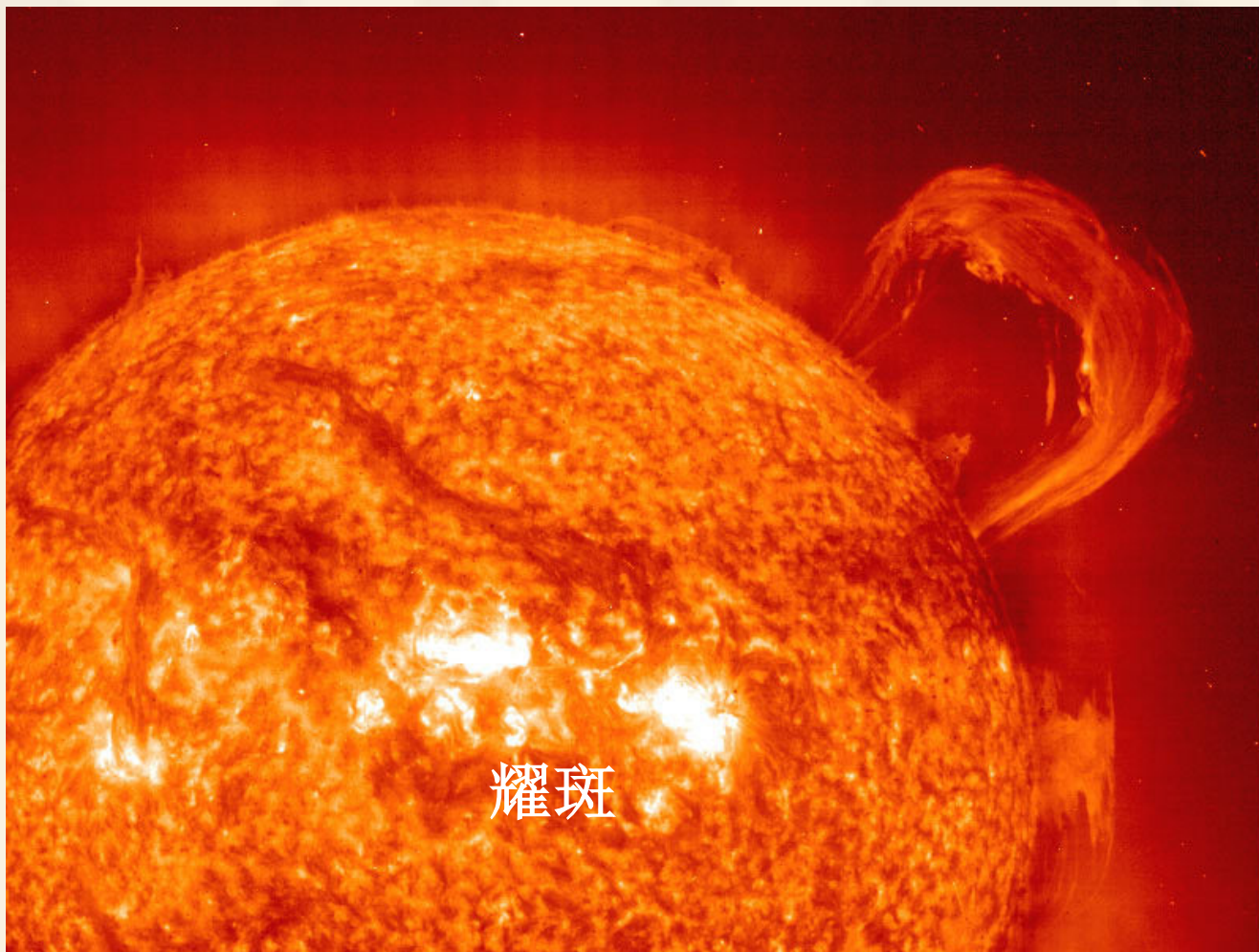
太阳活动与全球气候变暖的关系？

太阳会影响历史事件吗？





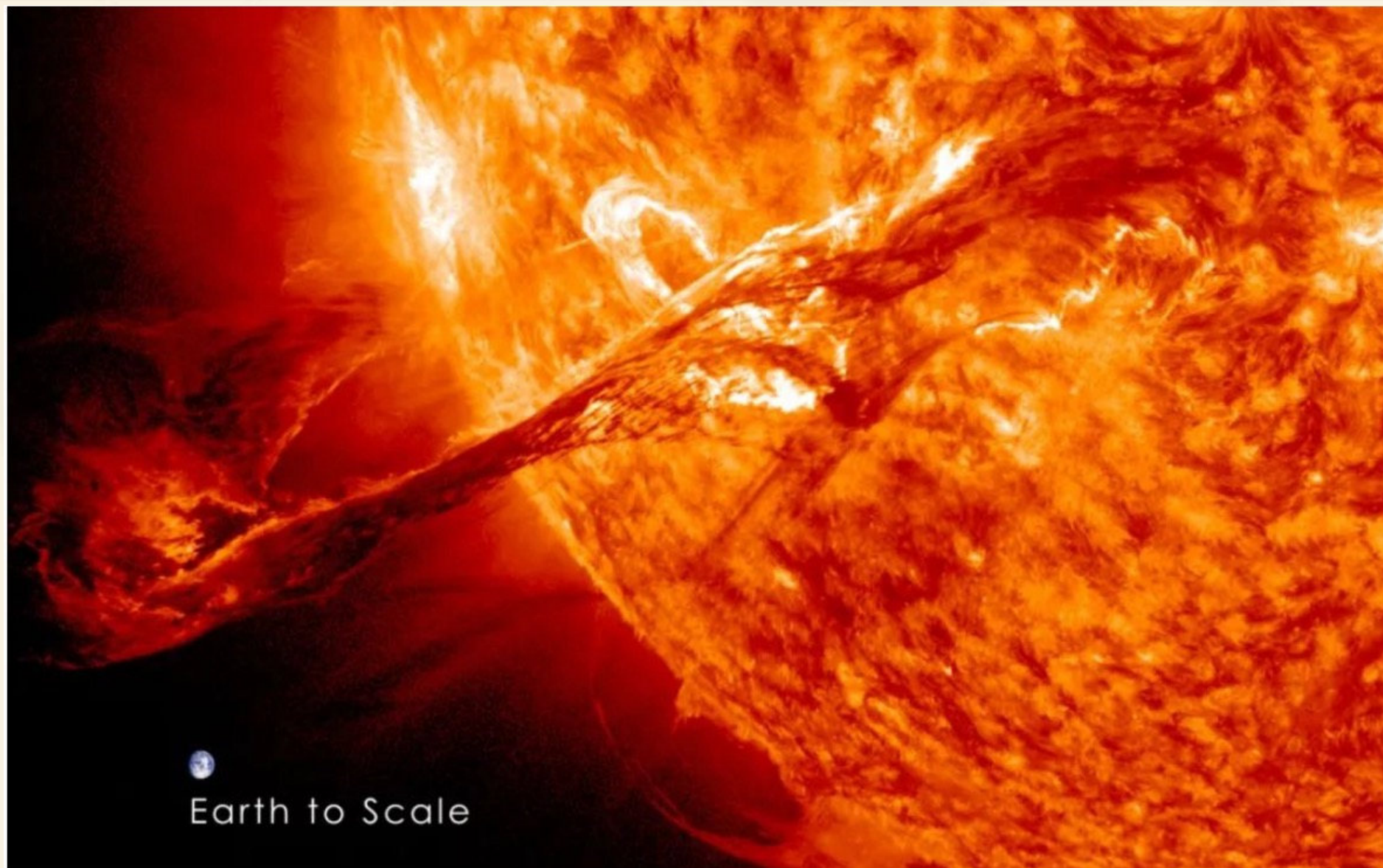
日珥、太阳耀斑、太阳风与地球磁层的作用



耀斑

日珥

H α 6563A 观测



悬浮在日冕中的日珥，其部分结构在日面上，表现为暗条。明亮的区域为耀斑。

❖ 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)



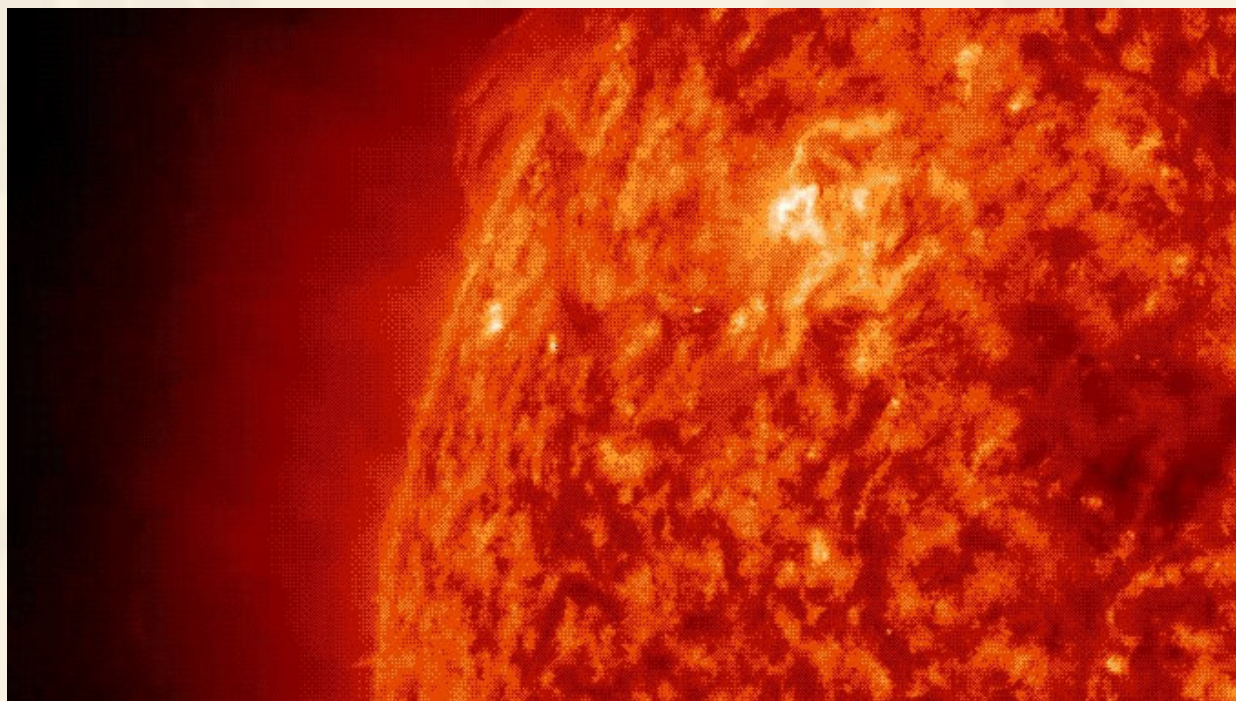
The Sun Unleashed: Monster Filament in Ultraviolet

太阳耀发

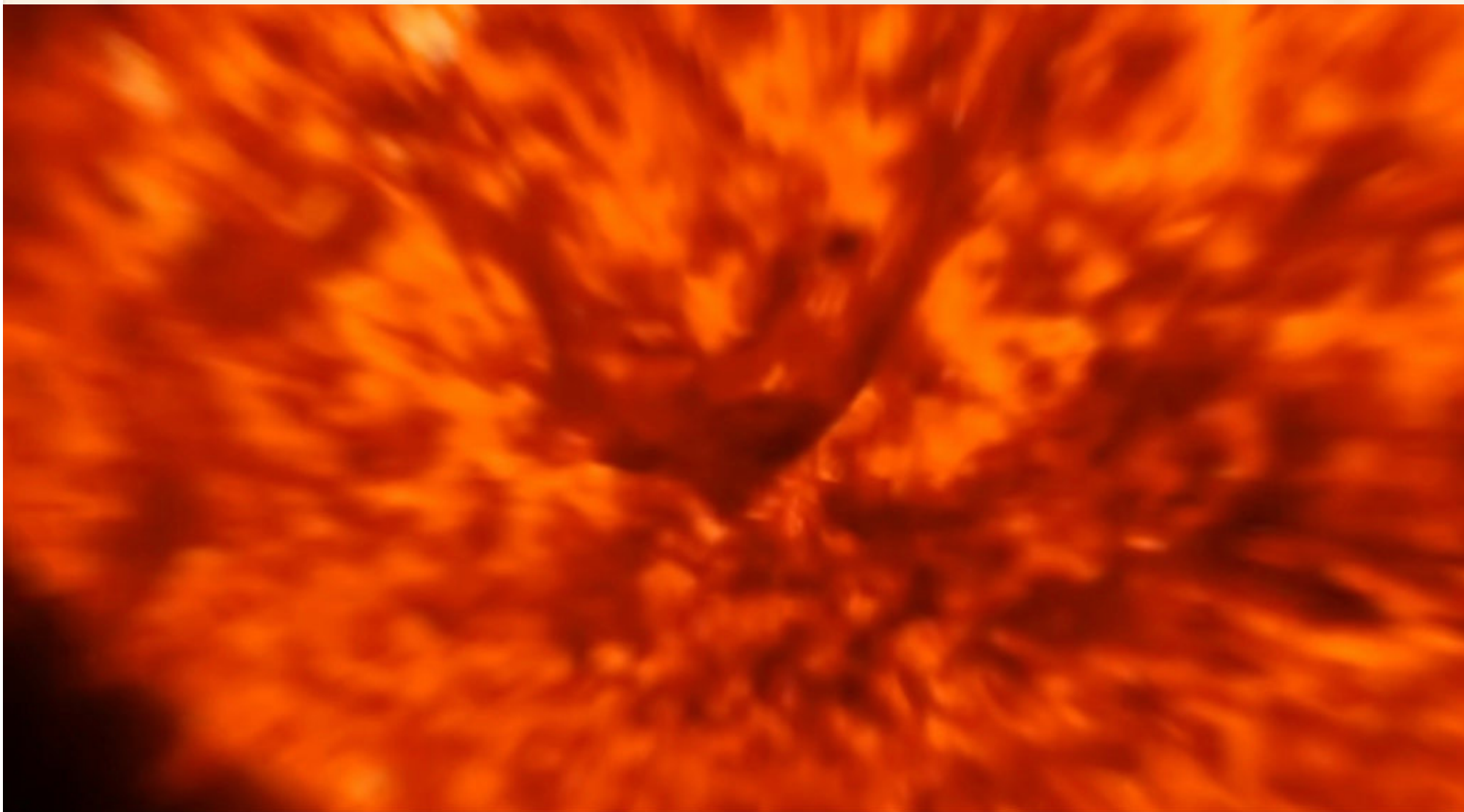


0:00 / 0:13

太阳喷发物质

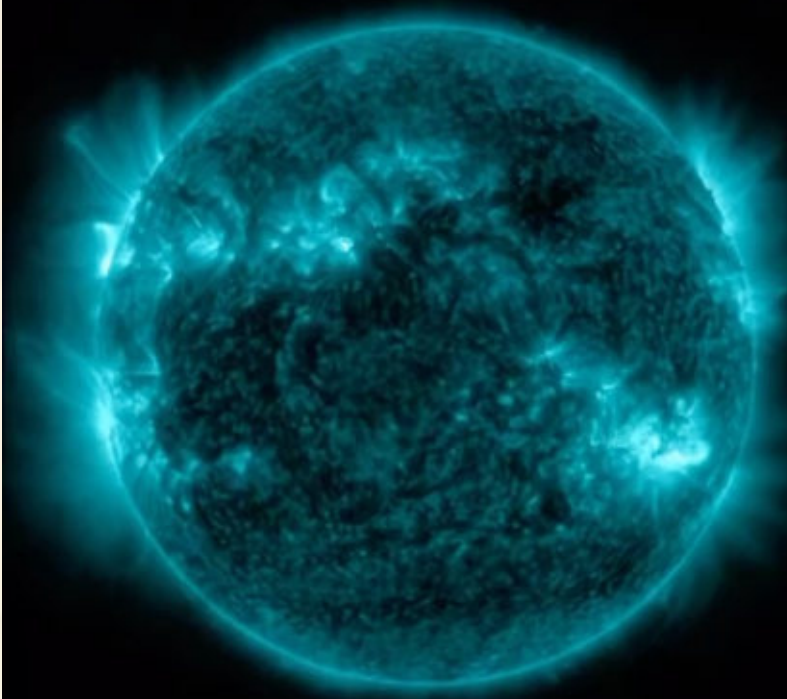


NASA检测到大规模太阳磁绳喷发



中等尺度的太阳耀发

On July 19, 2012
a medium-size flare
occurred on the sun

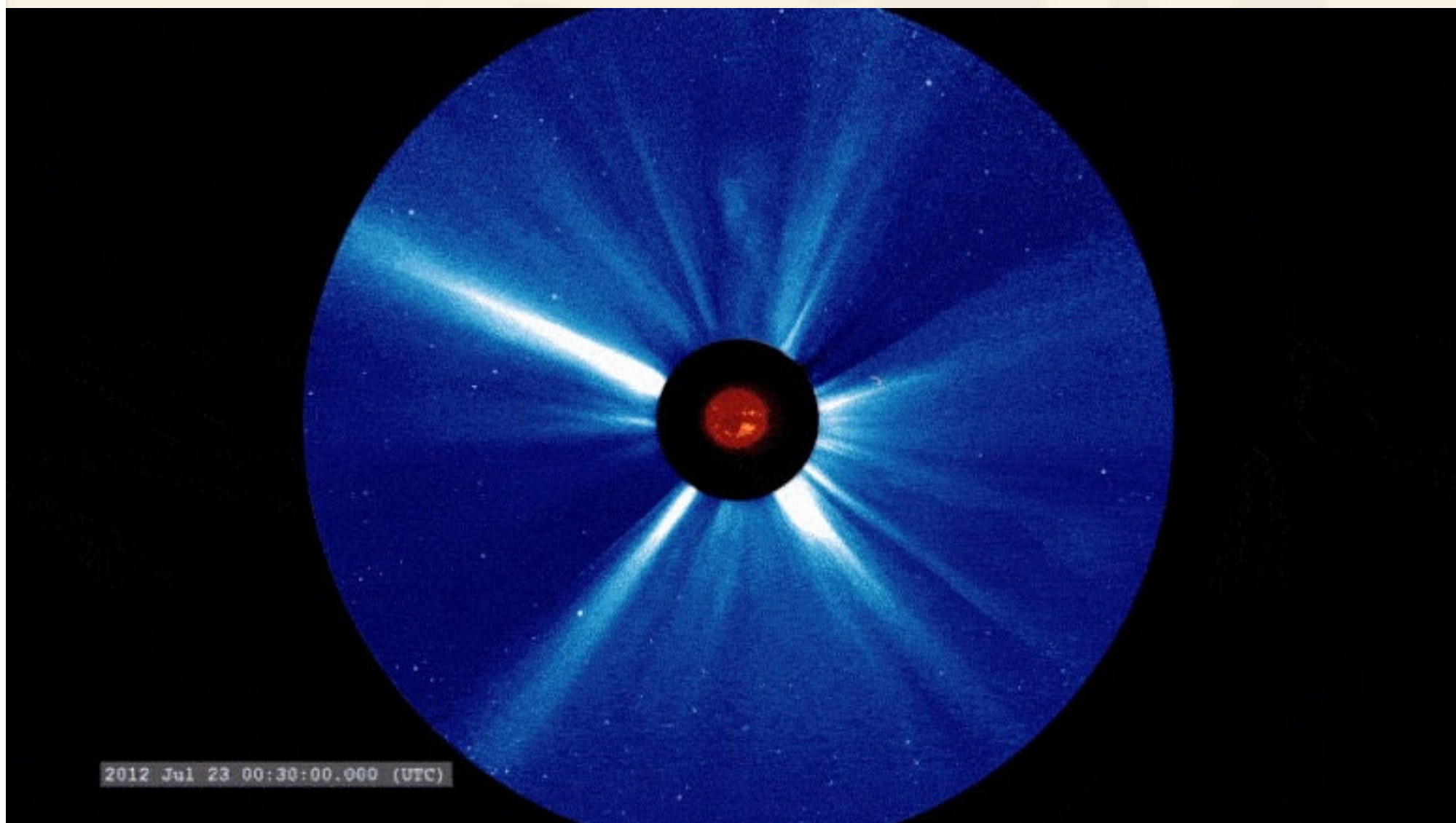


SDO/AIA 131 2024-05-10 23:46:08 UT

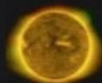
沈悦：“这次大范围低纬度极光现象的罪魁祸首——一次极大的太阳风暴耀斑爆发释放总能量相当于上亿颗原子弹爆炸。爆发产生大量高能带电粒子轰击太阳系。如果地球没有磁层保护的话，大家就都歇菜了。对宇宙要充满敬畏，哪怕是小小的太阳系，危险无处不在。”

2024：太阳活动极大年

日冕物质抛射（CME）



组图4.日冕物质抛射（coronal mass ejection, CME）是来自于太阳日冕区域的大量等离子体和磁场的爆发现象。（来源: STEREO-A/EUVI + COR2）



田晖

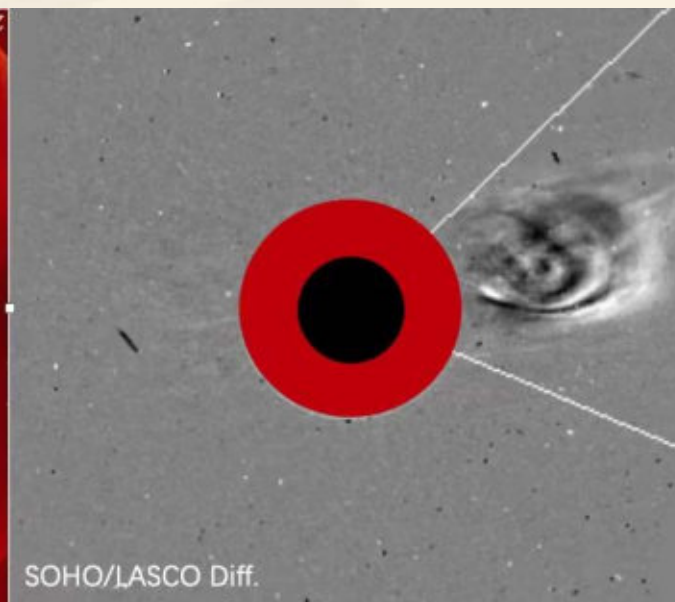
12月14日南美日全食发生时，正巧太阳上有重达数亿吨的大团物质抛离太阳

(CME)，这是1860年以后首次在日食期间观测到CME。顺便提一下，20世纪90年代以后，我们已认识到CME（而不是耀斑）是太阳系最大规模的爆发现象，是地球空间环境和人类高技术系统的最大威胁。呼吁中小学教科书尽快改正相关表述，呼吁更多天文学者不要只讲恒星等天体的耀发（或称耀斑），因为这些天体的CME跟耀发一样频繁，甚至威力更大，对系外行星的宜居性也有重要影响，只不过因为辐射强度的变化不明显而没那么容易观测到而已（探测系外天体的CME必定是未来望远镜的重点目标之一）

2020/12/14

CME是太阳系最大规模的爆发，是空间环境的最大威胁；CME会影响地外行星的宜居性

田晖: 通过极紫外光谱等手段探测恒星CME等活动，才能实质性地推动恒星高层大气研究和系外行星的"空间天气宜居带"研究





薛永泉

2021/10/21 21:58:51

田晖，你好！请教一下哈，CME出来的物质和太阳风是什么关系呢？



田晖 (田晖)

2021/10/21 22:04:30

cme叠加在太阳风背景之上

田晖 (田晖)

2021/10/21 22:04:41

太阳风只是背景



薛永泉

2021/10/21 22:07:01

太阳风有大致的周期（黑子周期），对吗？cme没有？cme的粒子流可达几分之几光速，远高于太阳风的几百千米每秒，对吧



田晖 (田晖)

2021/10/21 22:09:42

太阳风的纬度分布有约十一年周期，CME的发生频次有十一年周期。速度相差不大，都是每秒几百到一两千公里每秒，远小于光速

田晖 (田晖)

2021/10/21 22:11:08

CME可以加速少数粒子到几分之一光速，产生太阳高能粒子



薛永泉

2021/10/21 22:14:10

为什么说太阳风是背景呢？因为太阳风几乎时时存在，而cme具有间歇性？



田晖 (田晖)

2021/10/21 22:14:46

对。不是几乎，是肯定

田晖 (田晖)

2021/10/21 22:15:26

cme的密度和磁场都比太阳风高一个数量级

學問

圆环阵太阳射电成像望远镜

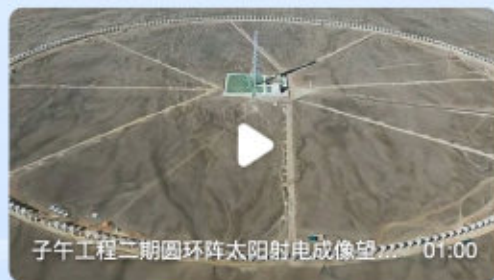
国家重大科技基础设施空间环境地基综合监测网组成部分

播报

编辑

讨论

上传视频



秒懂百科
一看就懂的视频百科

圆环阵太阳射电成像望远镜，位于四川甘孜稻城噶通镇合监测网（子午工程二期）标志性设备。^[5]

圆环阵太阳射电成像望远镜是由313台直径6米的天线构成，圆环中心100米高的定标塔为整个观测链路提供定标基准。

位于四川稻城的圆环阵太阳射电成像望远镜又称“千眼天”，是全球规模最大的综合孔径射电望远镜。^[12]

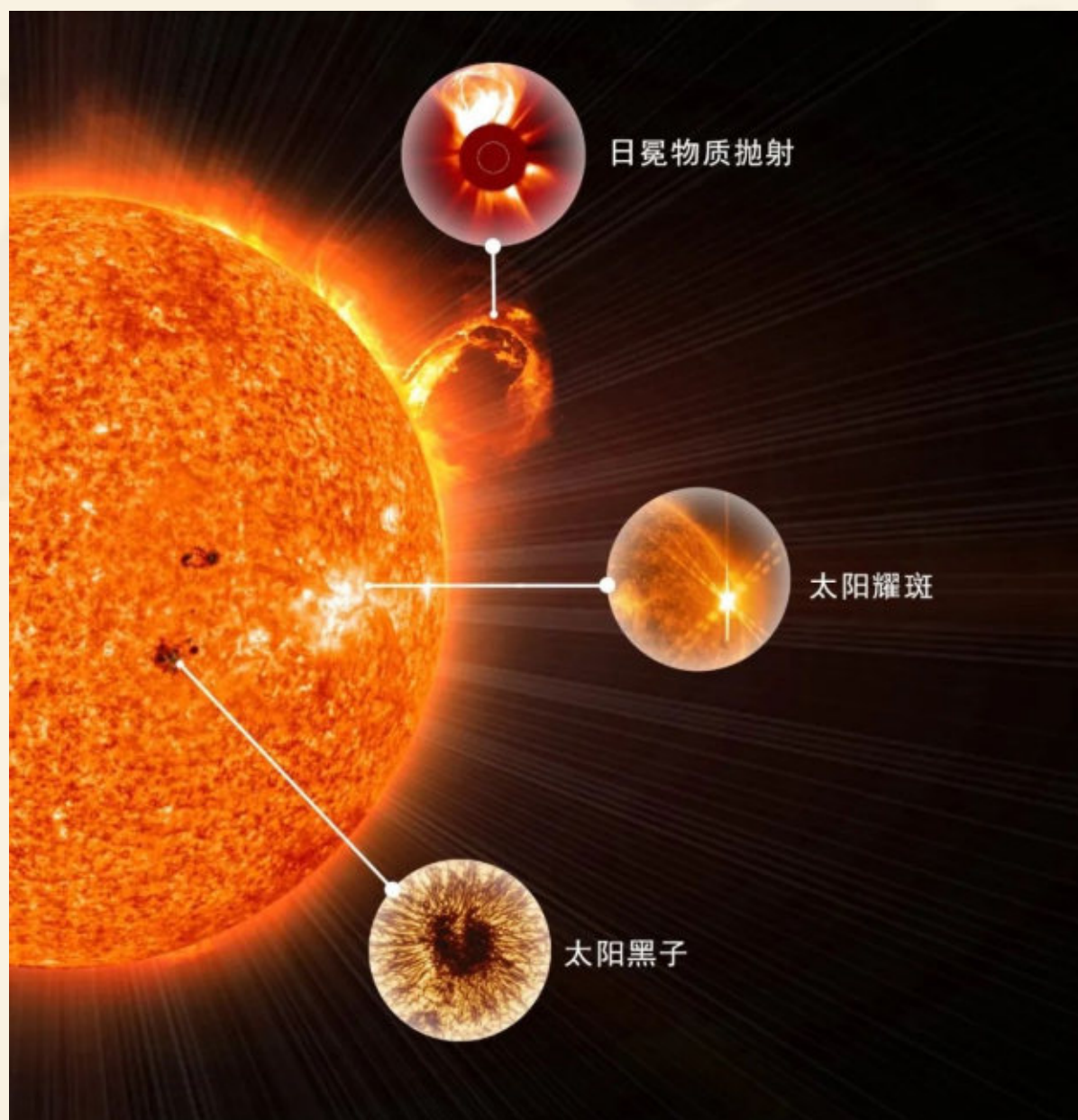
2023年9月27日，圆环阵太阳射电成像望远镜顺利通过验收。

价值意义

圆环阵太阳射电成像望远镜的建成能够实现实时监测太阳活动，对行星际的全过程，对子午工程二期探索高时空分辨的日夜天文研究领域发挥重要作用。项目的建成还将成为重要的



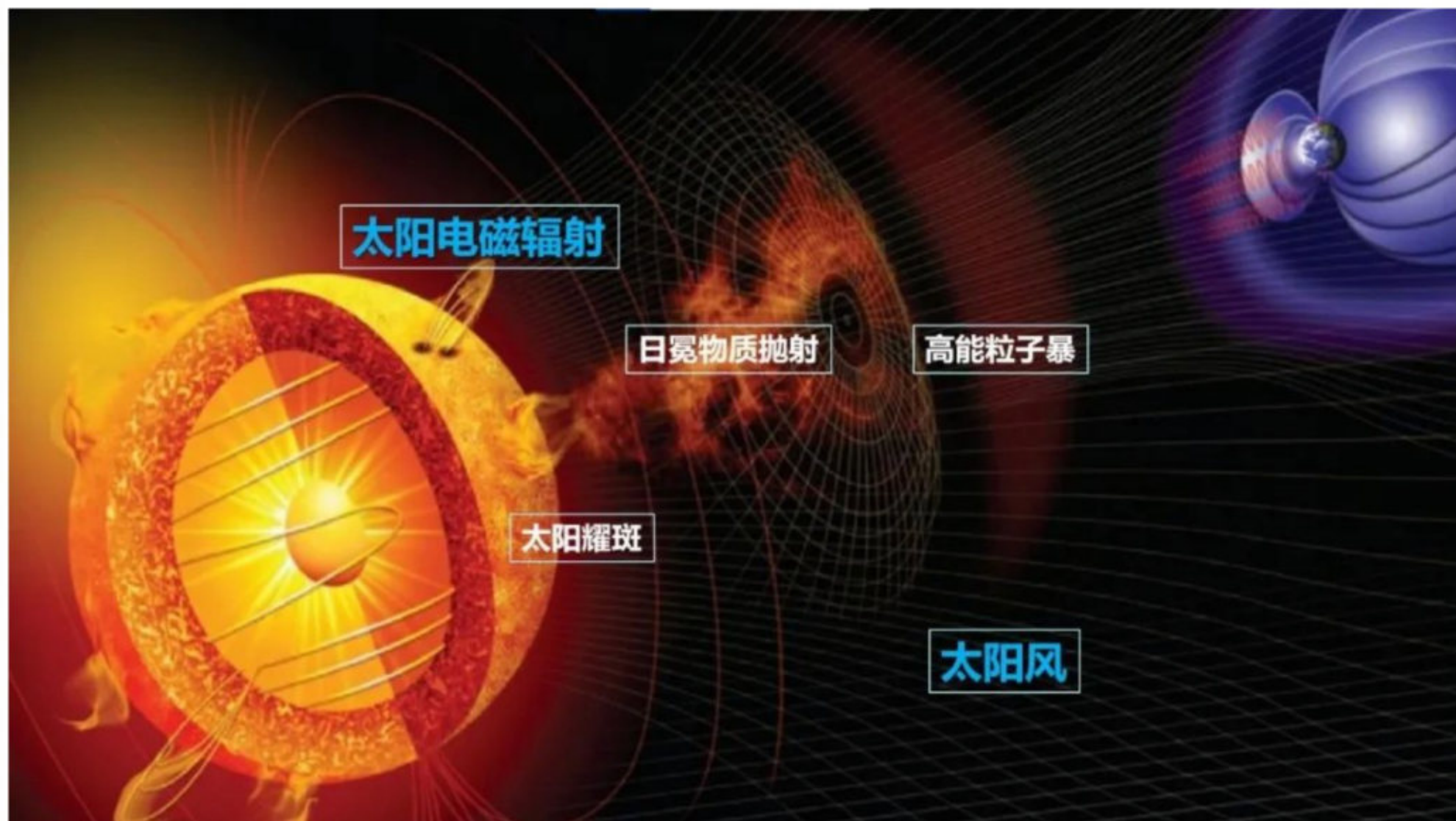
Bai 百科



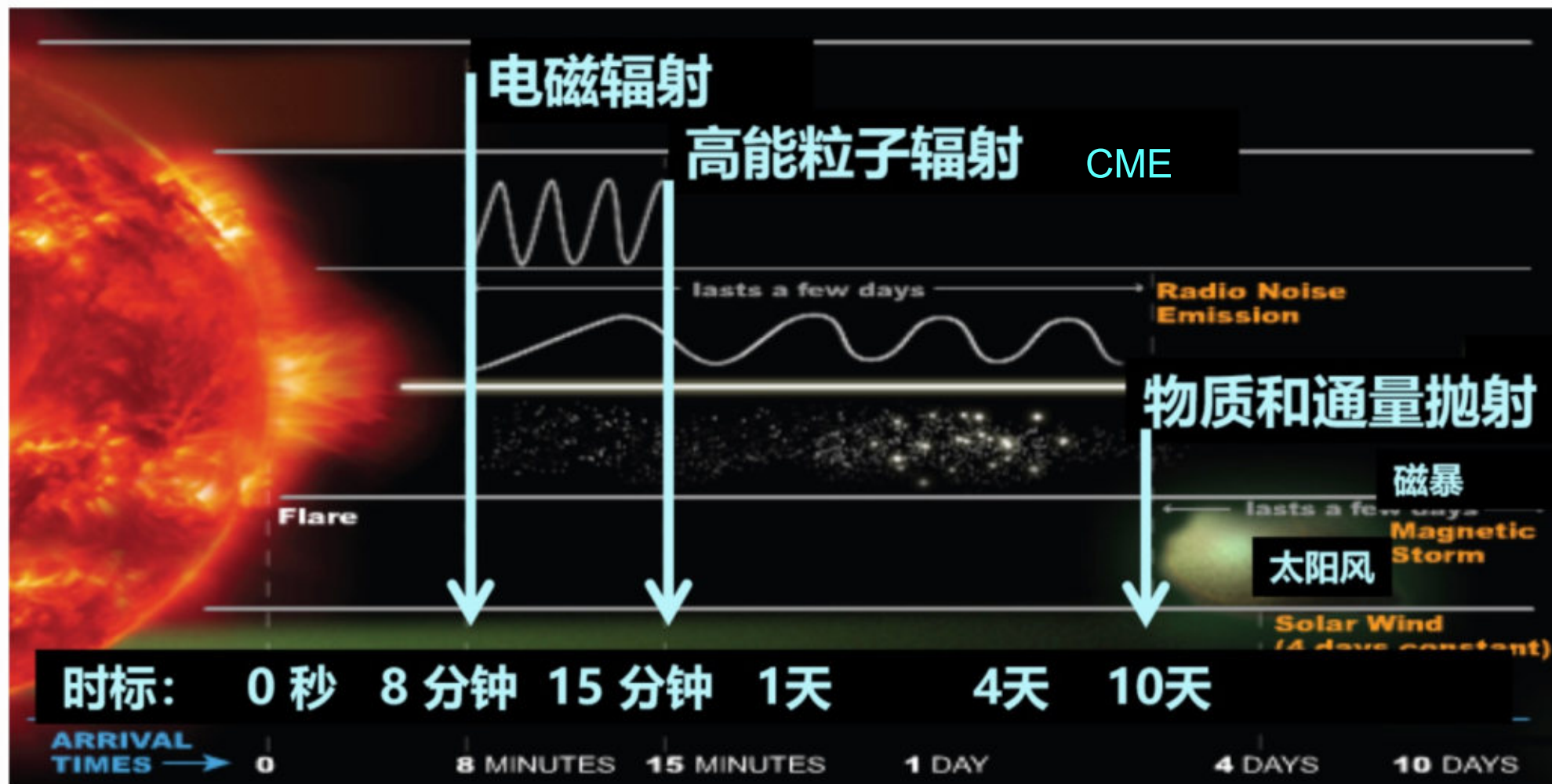
日冕物质抛射

太阳耀斑

太阳黑子

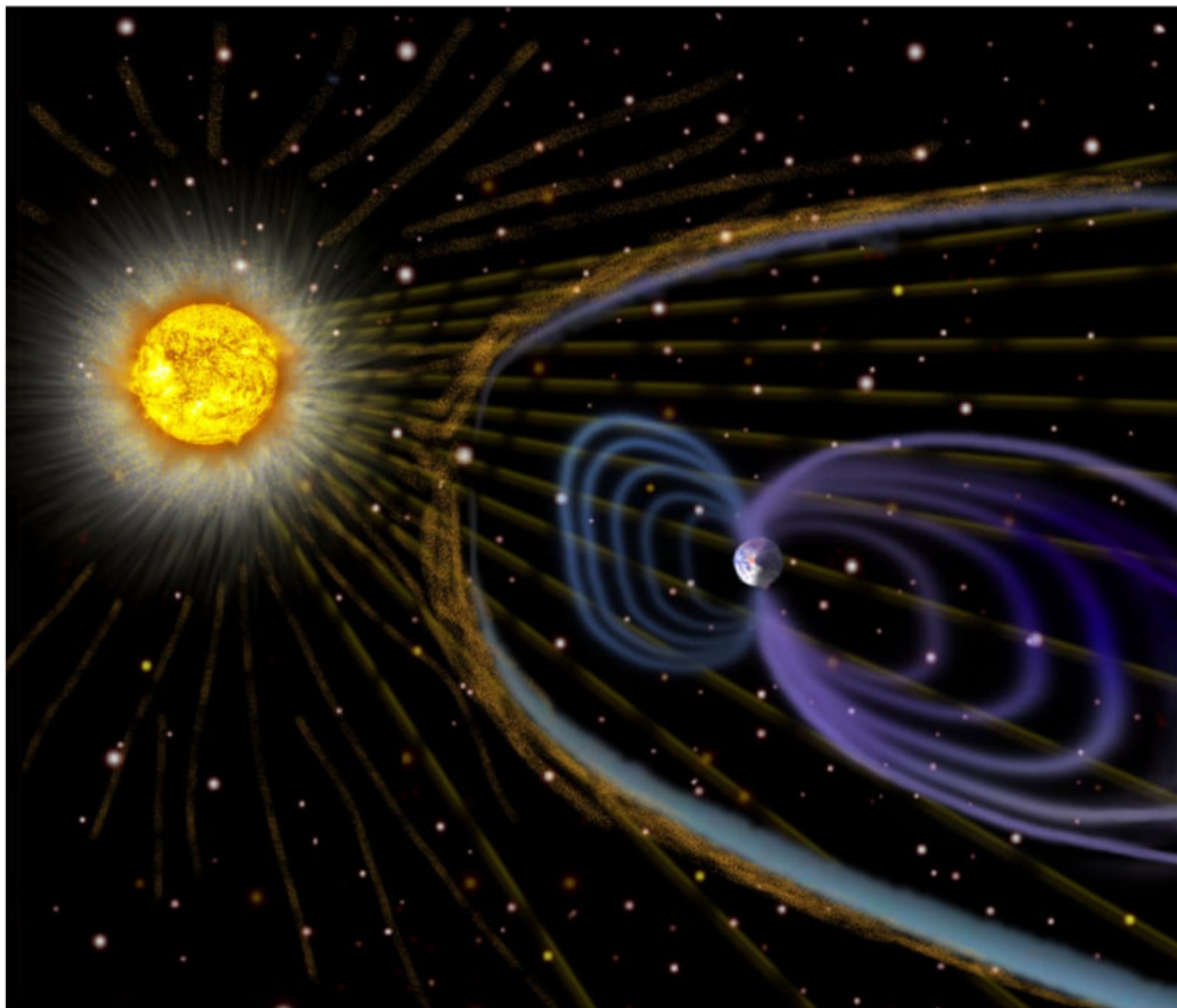


▲ 太阳与地球的联系和太阳的爆发



▲ 太阳对近地环境和日球空间的影响

太阳的“三连击”（张宇宗、周桂萍 中国国家天文）



太阳活动爆发和太阳风会向外输送大量带电粒子，地球的磁场可以保护地球免受这些粒子的冲击侵害。来源 / NASA



太阳爆发活动可能对地球空间天气导致的各种影响。版权 / ESA

❖ 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.

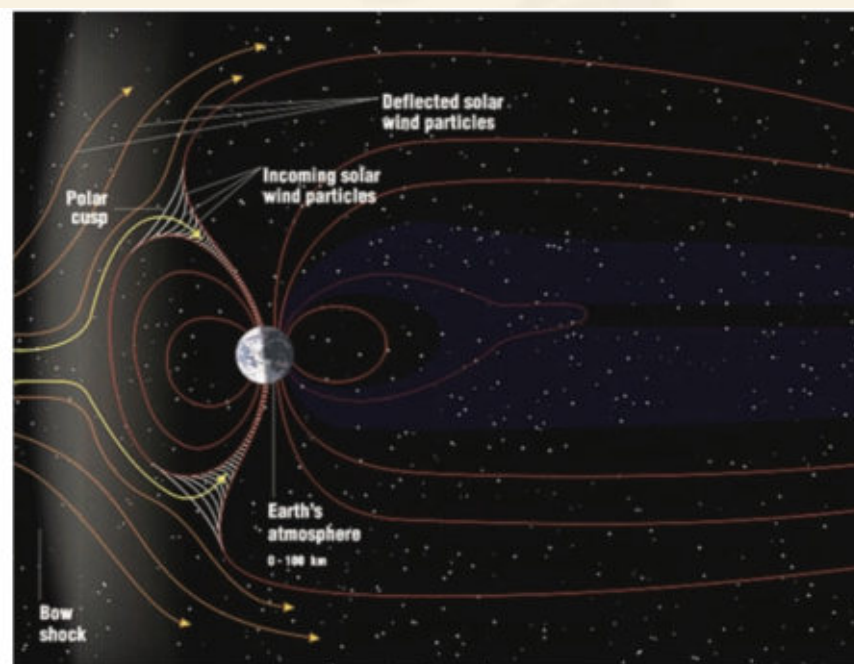
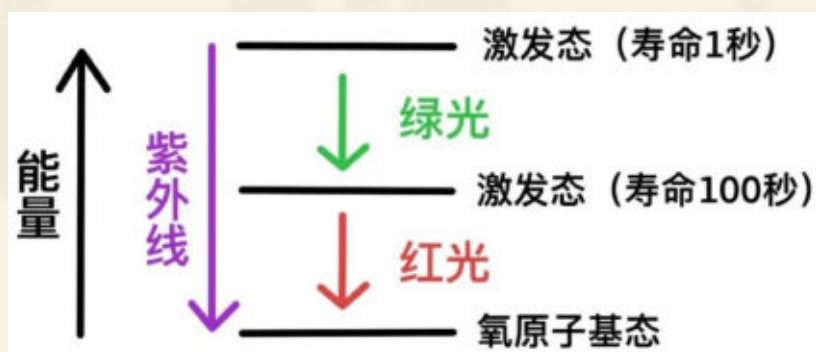
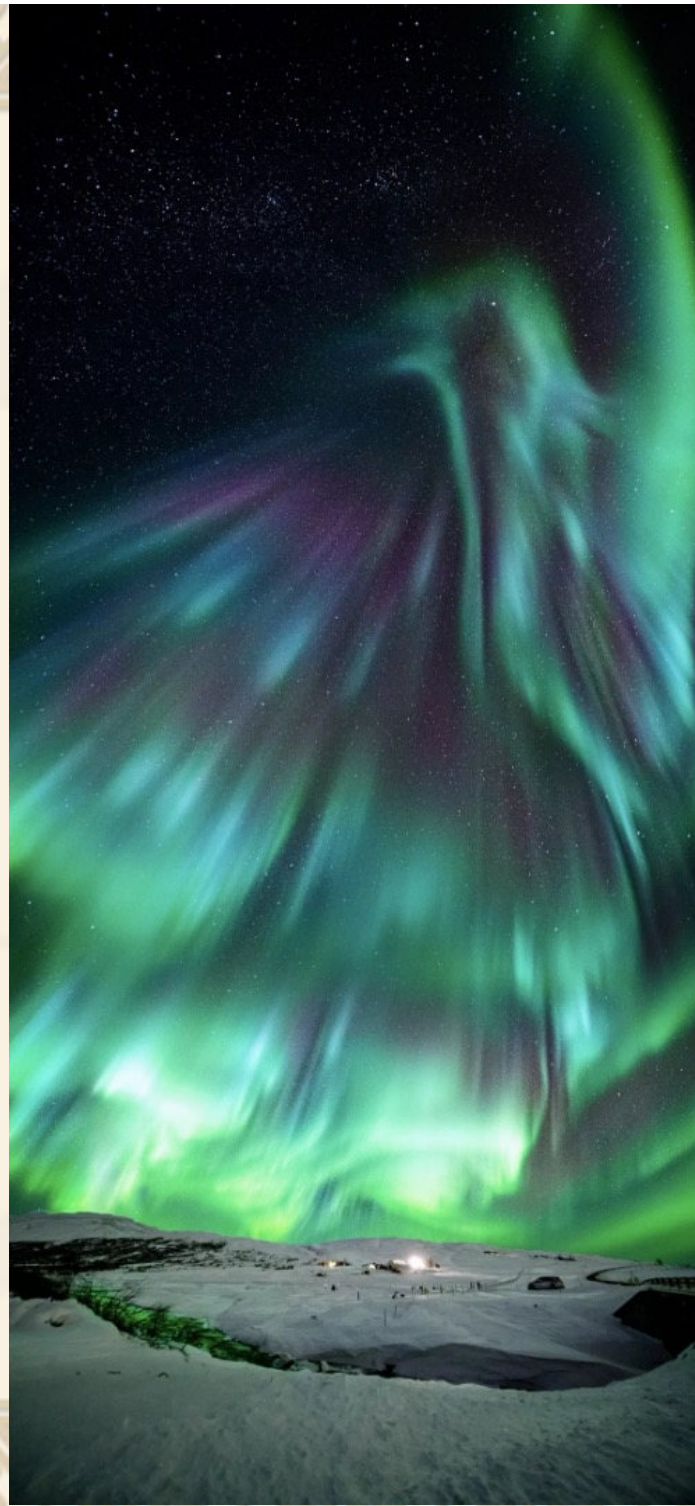


Figure 2.14 The path of solar wind particles towards the polar regions of the Earth. Image: Wikipedia Commons.

❖ 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





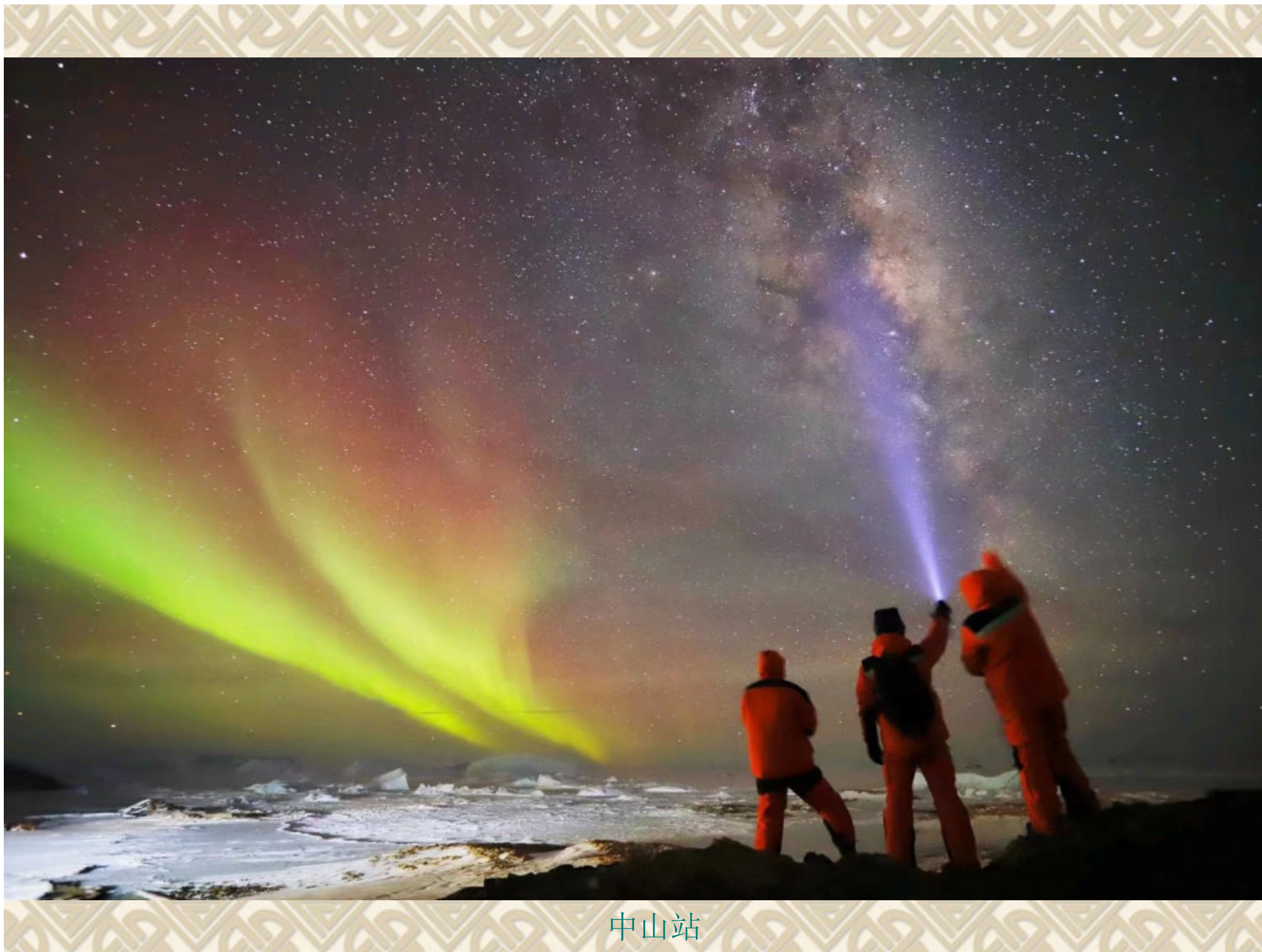


ZhongShan Station,CHINA

2016-07-01 18:05

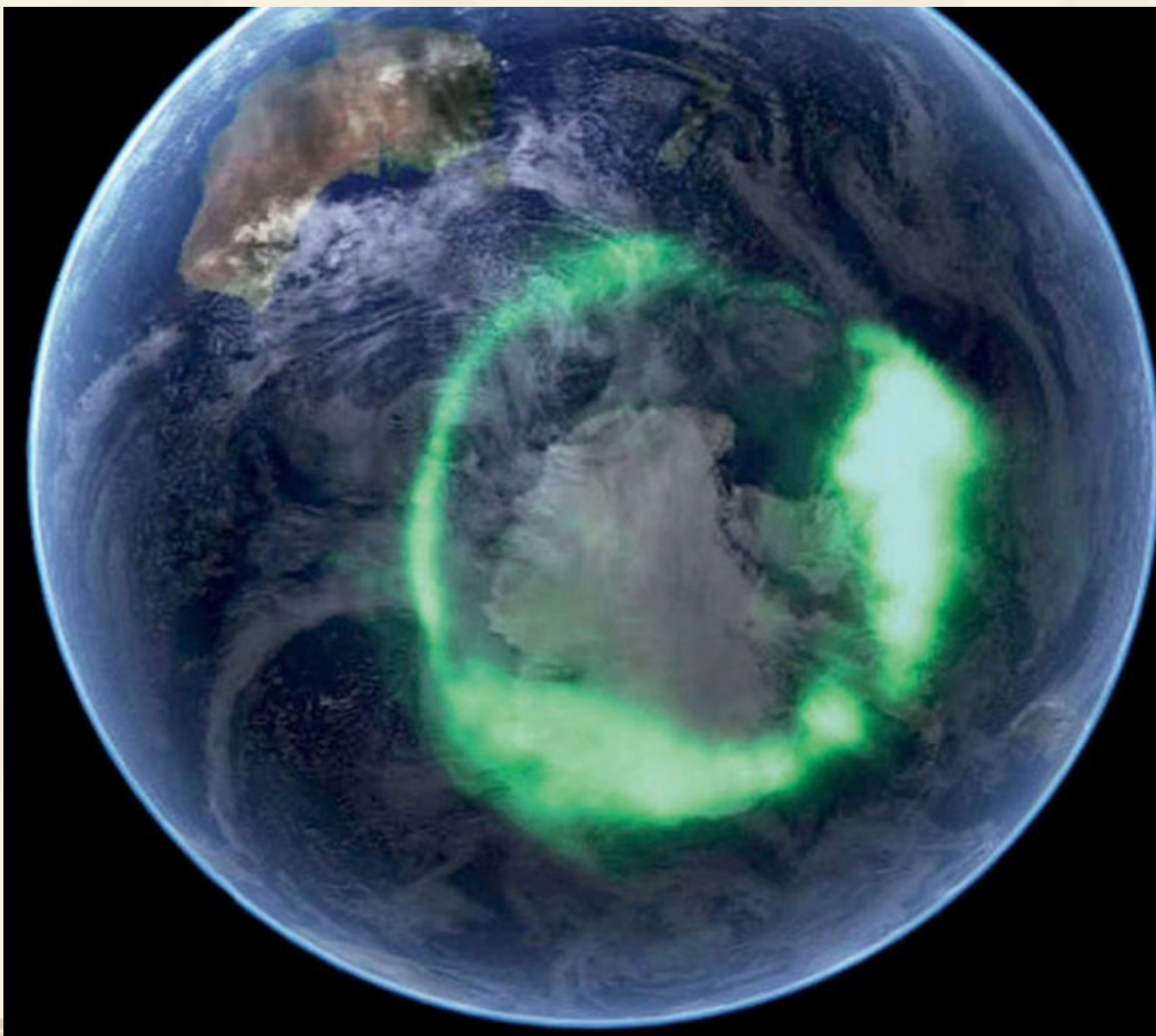


Yunnan Observatories,CAS and PRIC



中山站

NASA/IMAGE卫星：“上帝视角”下的地球极光





均匀带状极光



条纹带状极光



皱褶带状极光



卷曲带状极光

红色极光
RED LIGHTS

深红色: 氧原子 630nm 发射

240 km



帷幕极光

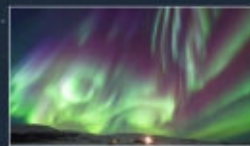


弥漫极光

绿色极光
GREEN LIGHTS

蓝色: 氮原子 427.8nm 发射

160 km



冕形极光



弧形极光

蓝紫色极光
BLUE LIGHTS
PURPLE LIGHTS

绿色: 氧原子 557.7nm 发射

95 km

淡紫色: 氮分子 670nm 发射+391.4nm 发射



Steve极光

极光“宝藏”

图像版权/ 苏铁 张敬宜 Dave Markel
制图 / 天文台资讯

Excited atomic
oxygen at high
altitudes

Only visible under intense
solar activity due to low
concentration of oxygen
at high altitudes.

Above
150 miles or
241.4 km

Excited atomic
oxygen at lower
altitudes

Green light is emitted
instead of red due to
higher concentration
of oxygen.

Up to
150 miles or
241.4 km

Ionized molecular
nitrogen

The reaction involve
molecular nitrogen
because atomic oxygen
is uncommon at low
altitudes. Similar to red,
blue and purple is
associated with intense
solar activity.

Above
60 miles or
96.6 km

Up to
60 miles or
96.6 km

(郑学琛拍摄)

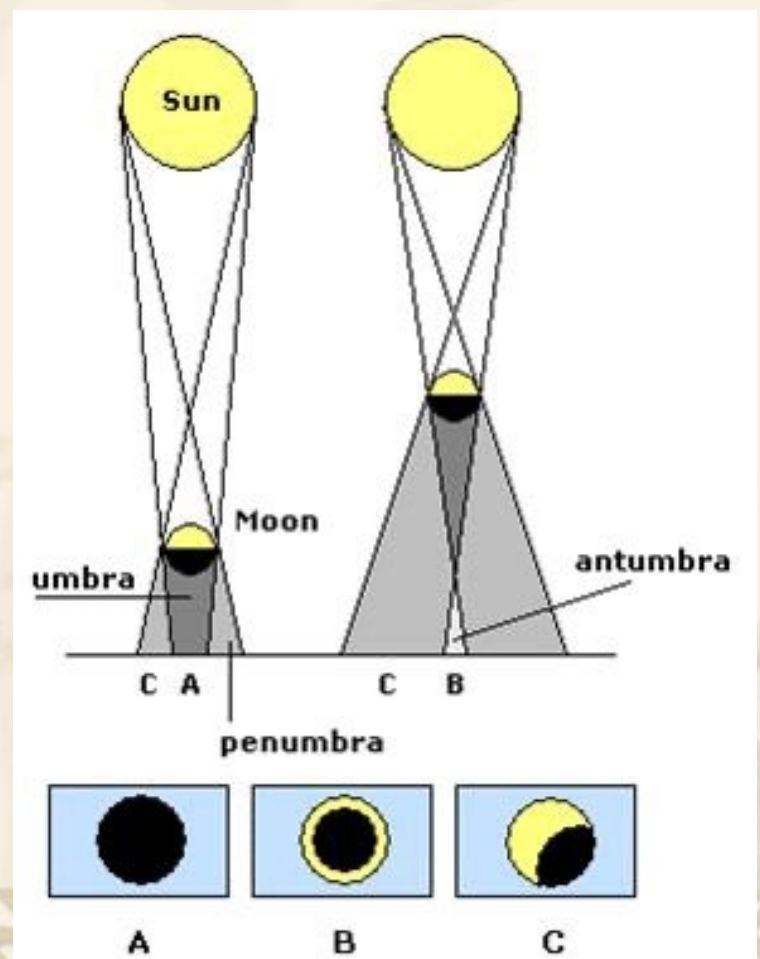
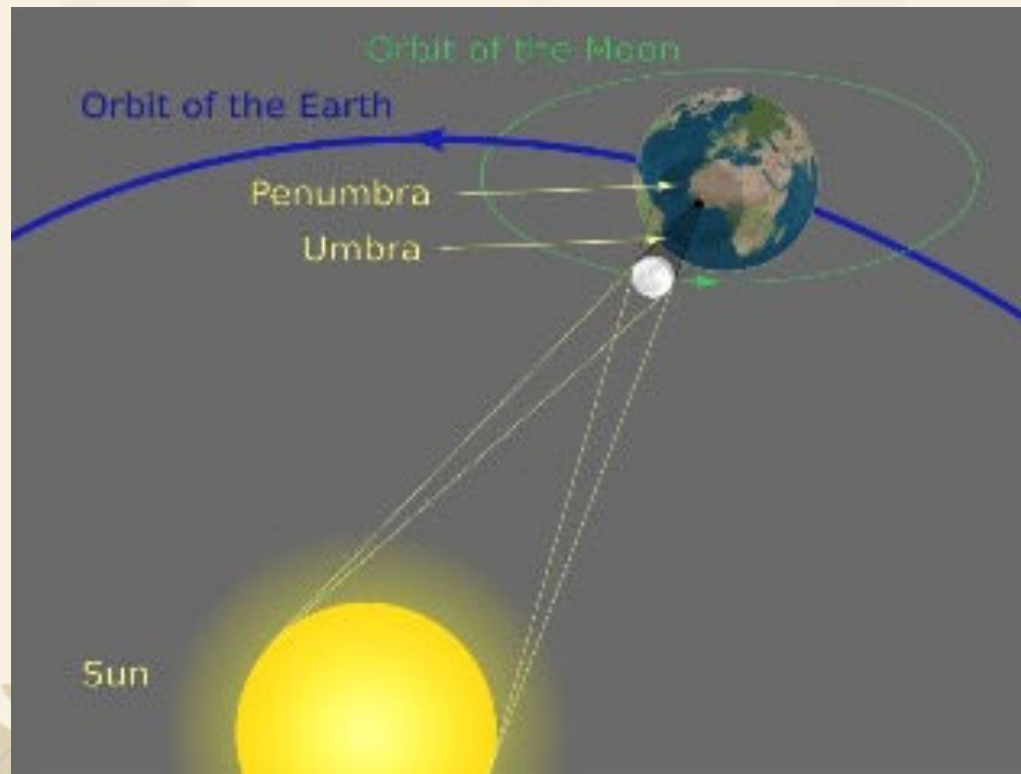


百度百科：日晕，又叫圆虹，一种大气光学现象，是日光通过卷层云时，受到冰晶的折射或反射而形成的。当光线射入卷层云中的冰晶后，经过两次折射，分散成不同方向的各色光。

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**）

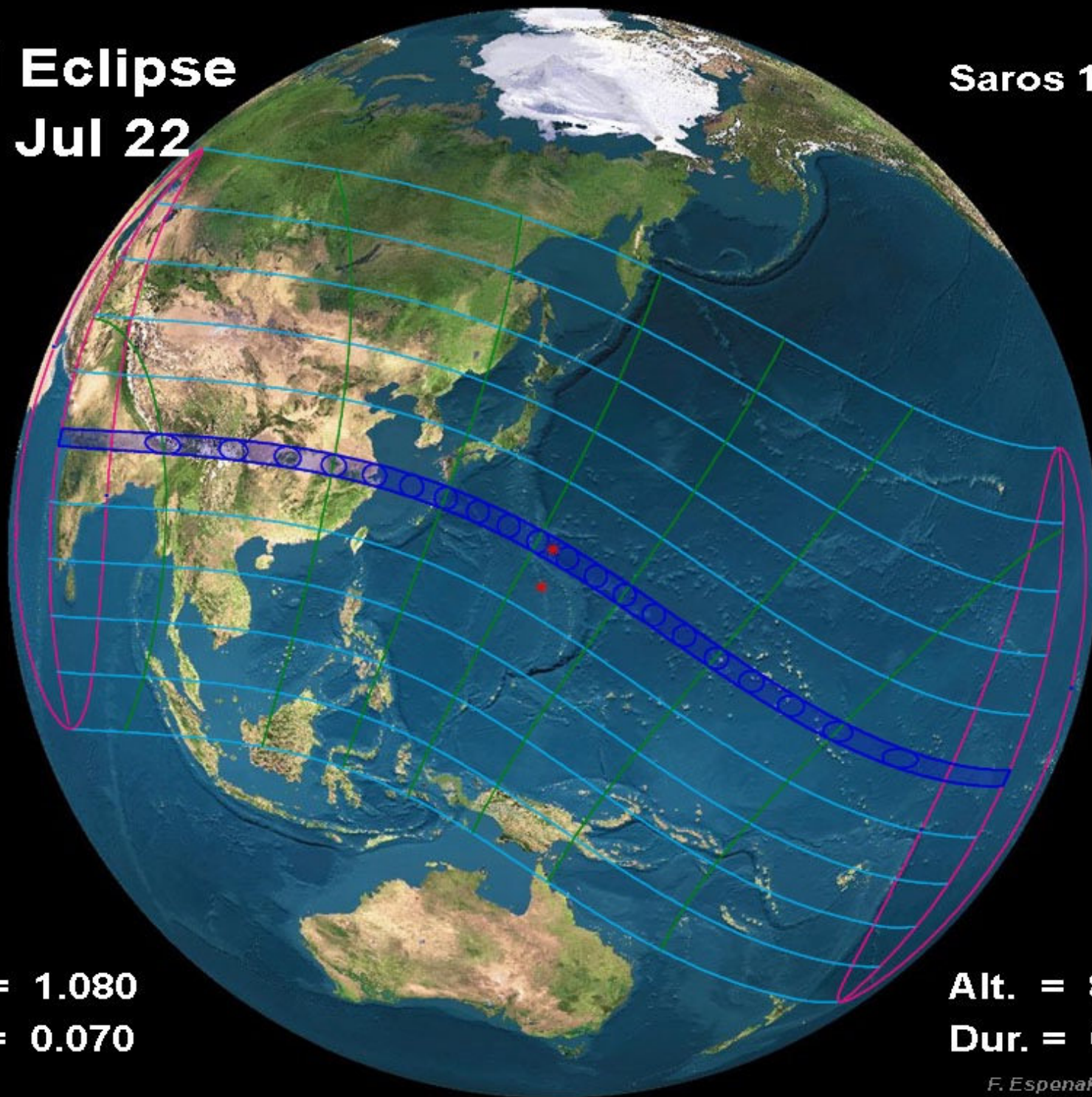
日食的形成





Total Eclipse 2009 Jul 22

Saros 136



Mag. = 1.080
Gam. = 0.070

Alt. = 86°
Dur. = 6^m 39^s

F. Espenak, NASA's GSFC

2009年7月22日日全食观测地点：

安徽·桐城

拍摄：李广兴





(2017年8月21日的日全食:

<https://apod.nasa.gov/apod/ap170912.html>)

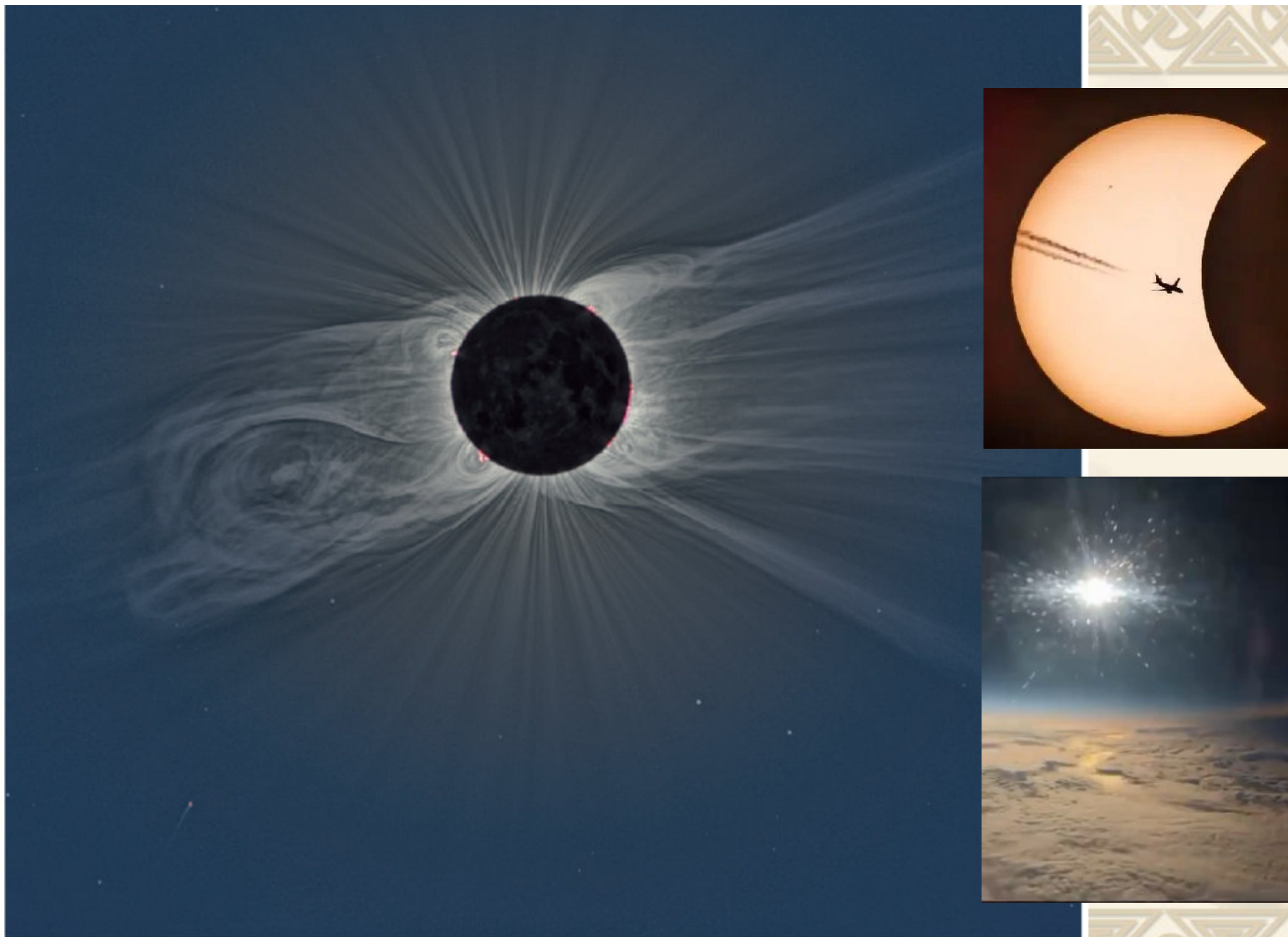


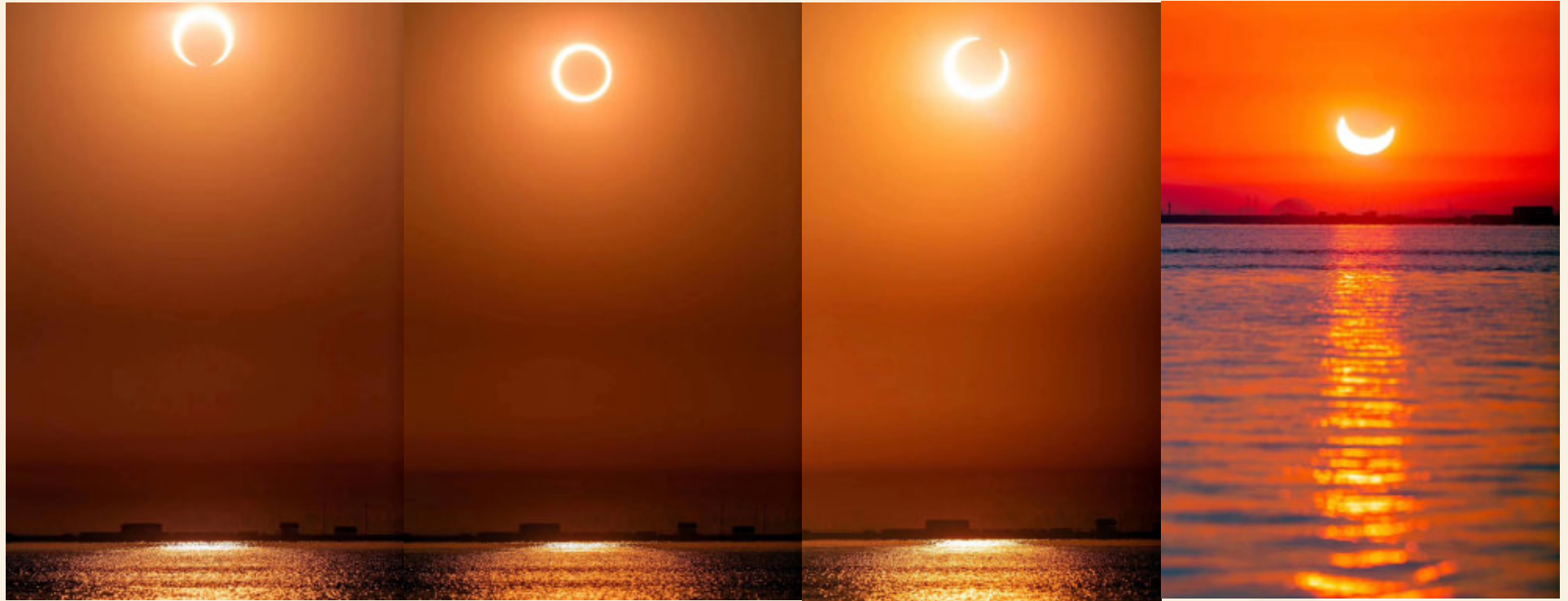
图1 捷克的德鲁克缪勒博士于2020年在阿根廷日全食期间拍摄的日冕照片

Annular Solar Eclipse over Utah

Image Credit & Copyright: [MaryBeth Kiczenski](#)

Explanation: Part of the [Sun](#) disappeared earlier this month, but few people were worried. The missing part, which included the center from some locations, just went behind the [Moon](#) in what is known as an [annular solar eclipse](#). Featured here is an [eclipse sequence](#) taken as the Moon was overtaking the rising Sun in the sky. The foreground hill is [Factory Butte](#) in [Utah, USA](#). The rays flaring out from the Sun are not real -- they result from camera [aperture diffraction](#) and are known as [sunstar](#). The Moon is [real](#), but it is artificially brightened to enhance its outline -- which helps the viewer better visualize the Moon's changing position during this [ring-of-fire eclipse](#). As stunning as this [eclipse sequence](#) is, it was considered just practice by the astrophotographer. The reason? She hopes to use this experience to better photograph the [total solar eclipse](#) that will occur over [North America](#) on April 8, 2024.





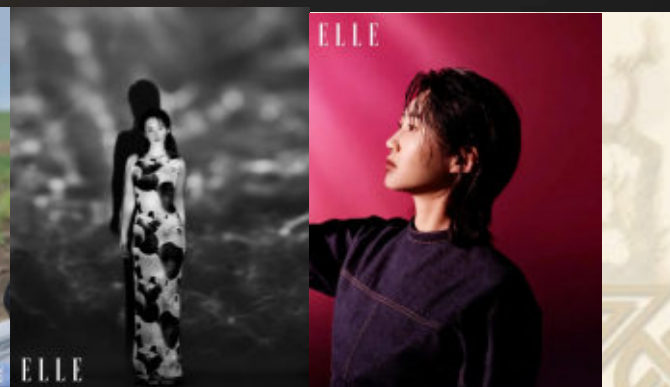


2021.6.10 日偏食

呼伦贝尔伊敏河镇

BGM: Huun-Huur-Tu - Mezhegey

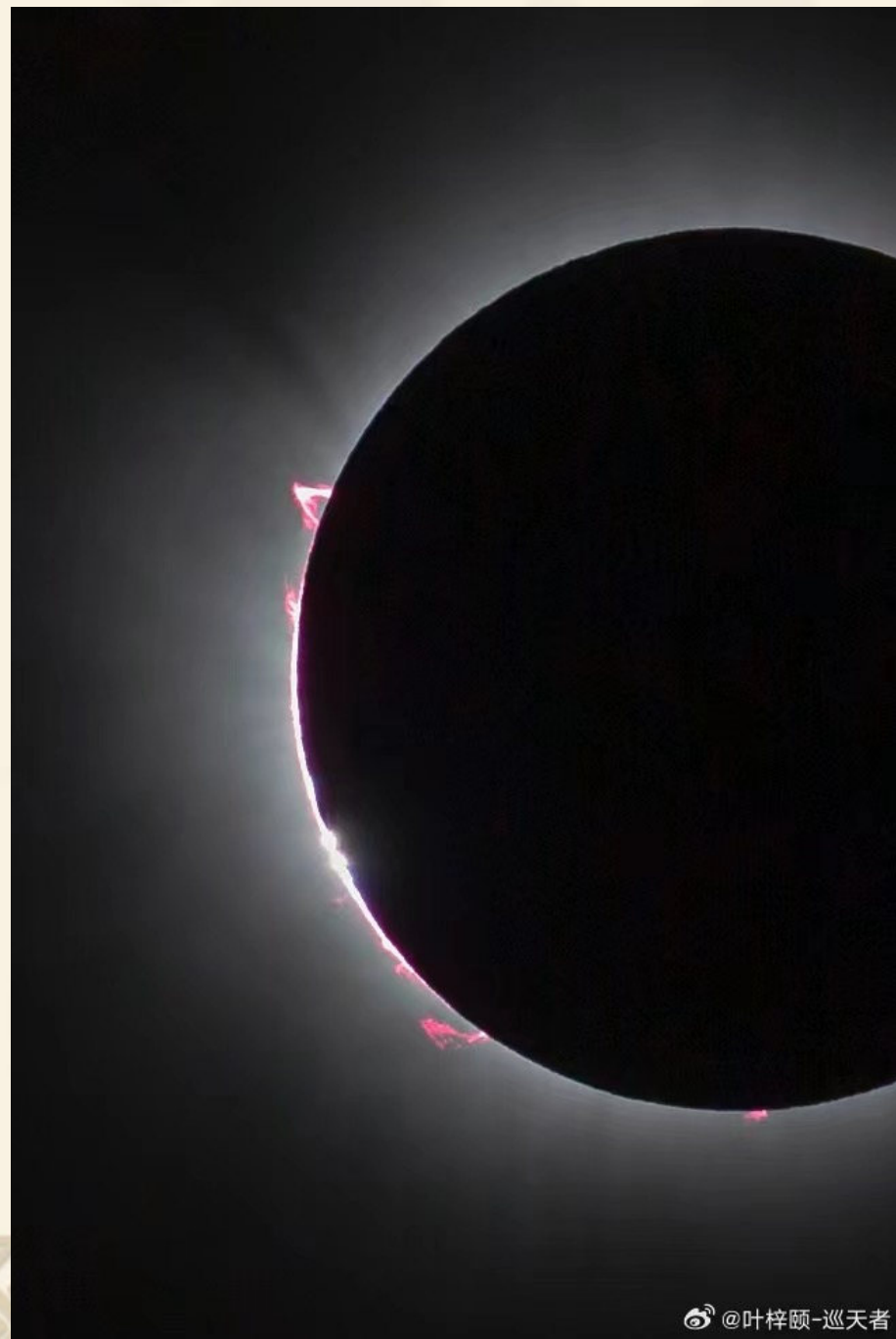
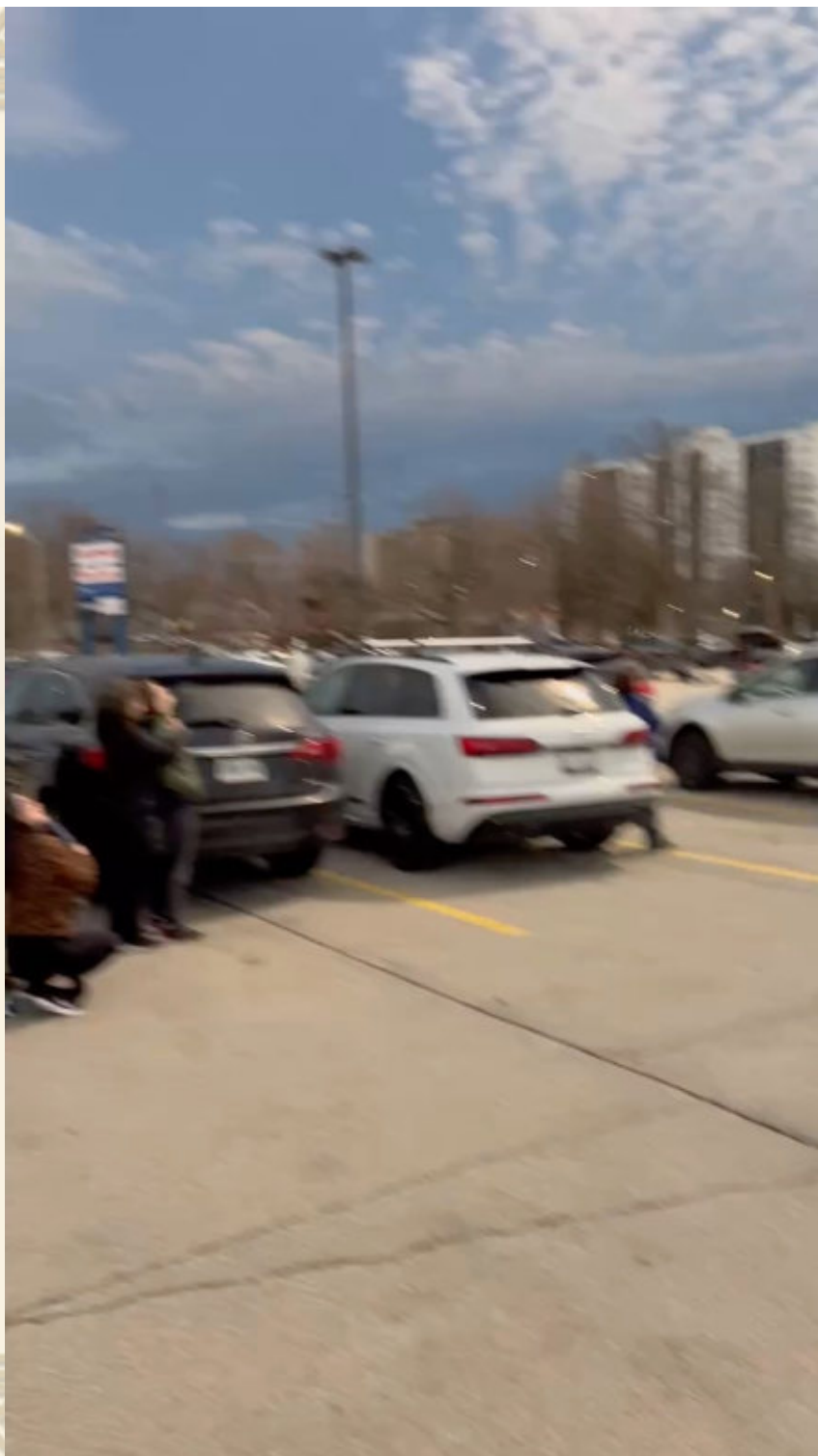
@巡天者-叶梓颐



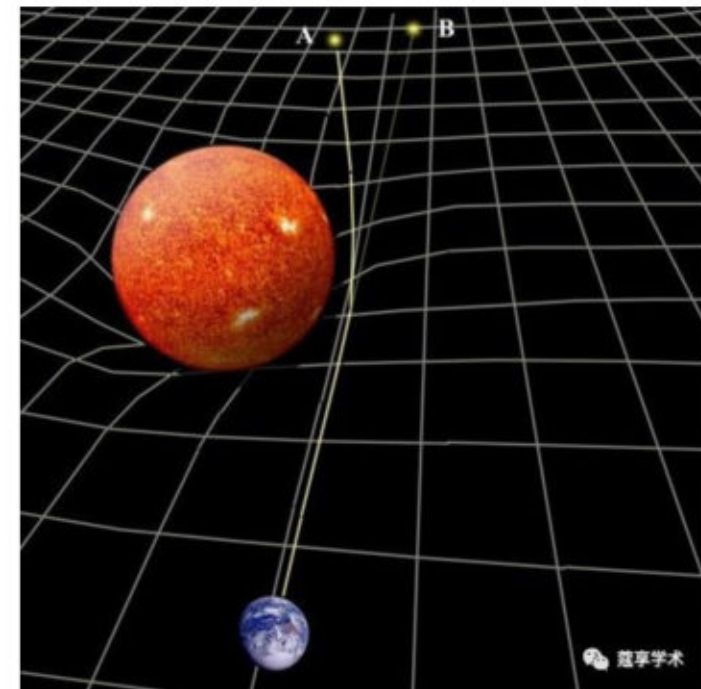
2008年的日全食



2024年的日全食



利用日全食检验GR:



图：天体的质量导致周围的时空弯曲，本来应该走直线的光在弯曲时空中走曲线；天体质量越大，周围的时空与光的路线弯曲的越厉害；天体半径越小，周围的时空与光的路线弯曲的越厉害。（图来源：网络）

光线偏折量含有因子 $(1+r)/2$ ： r 为空间曲率
（牛顿力学 $r=0$ ，GR为 $r=1$ ）





利用日全食检验GR:

1919: Sir A.Eddington

西非: Principe

南美: 巴西0.93 (仪器故障? 弃用)

理论值: 1.75角秒

观测值: 1.62, 1.98 $\pm$ 0.12

1922: W. Campbell

观测值: 1.72 $\pm$ 0.11

利用依巴谷卫星和VLBI:

依巴谷: $\sim$ 0.3%

VLBI: $\sim$ 0.02%

爱丁顿爵士是世界上第一个测量光线偏折的科学家。当时有一个记者问他：爱丁顿爵士，听说这个世界上只有三个人懂爱因斯坦的广义相对论。

爱丁顿一愣，除了我和爱因斯坦，谁是第三个呢？



爱丁顿爵士

“谁是第三人？”

格致论道讲坛

从这件事中可以看到，广义相对论是非常难的。

❖ Shapiro时延 (Shapiro Delay)

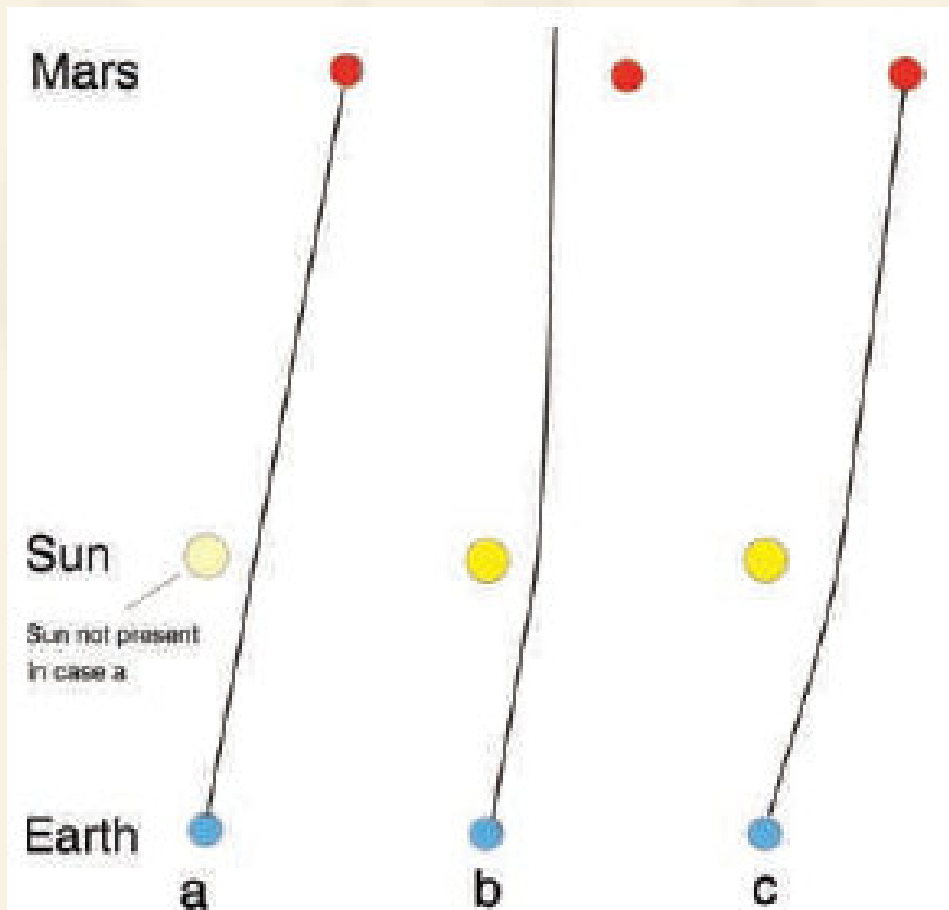


Figure 2.18 The Shapiro delay.

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

- 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： 2×10^{-5}

又有作业啦！

