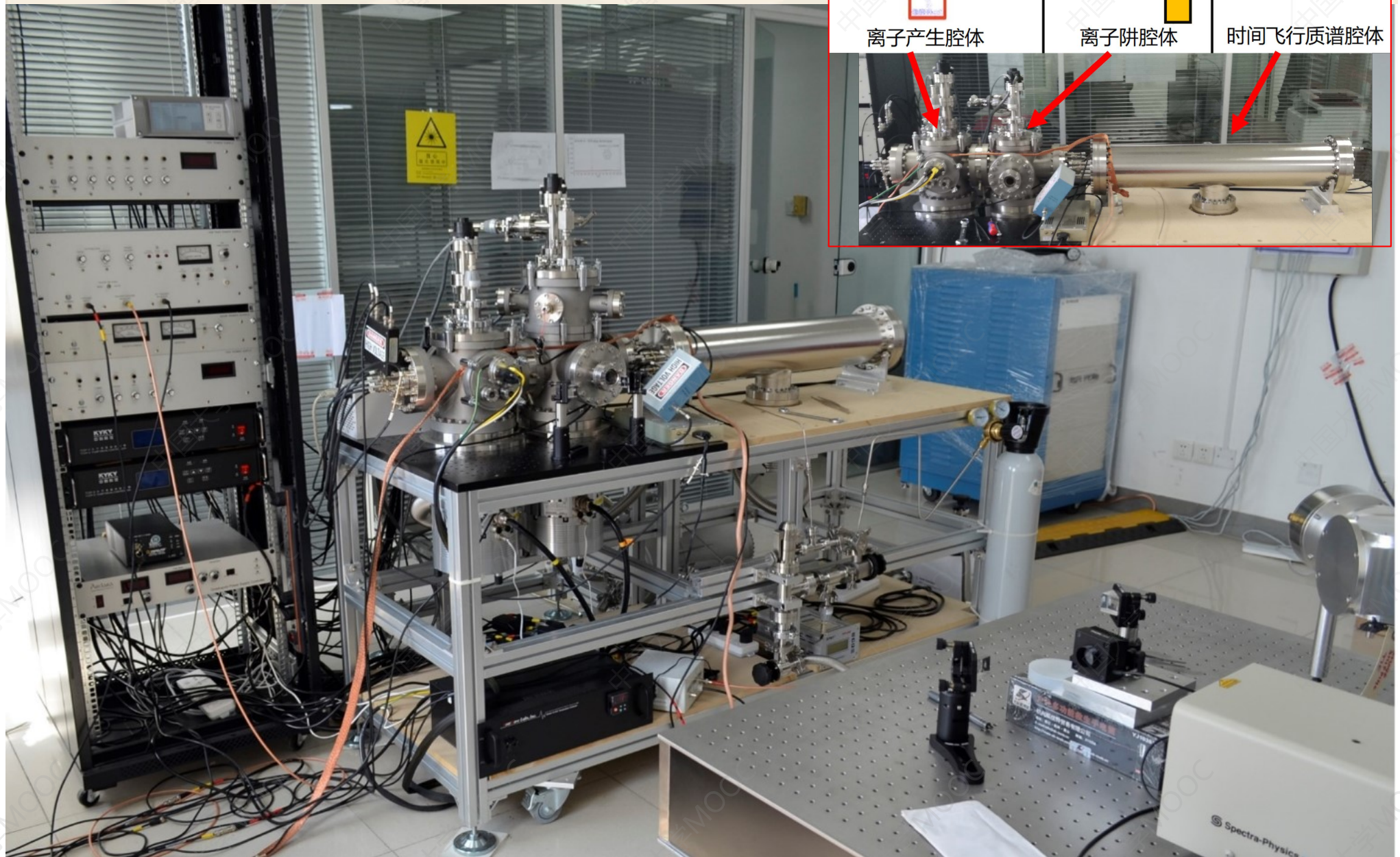
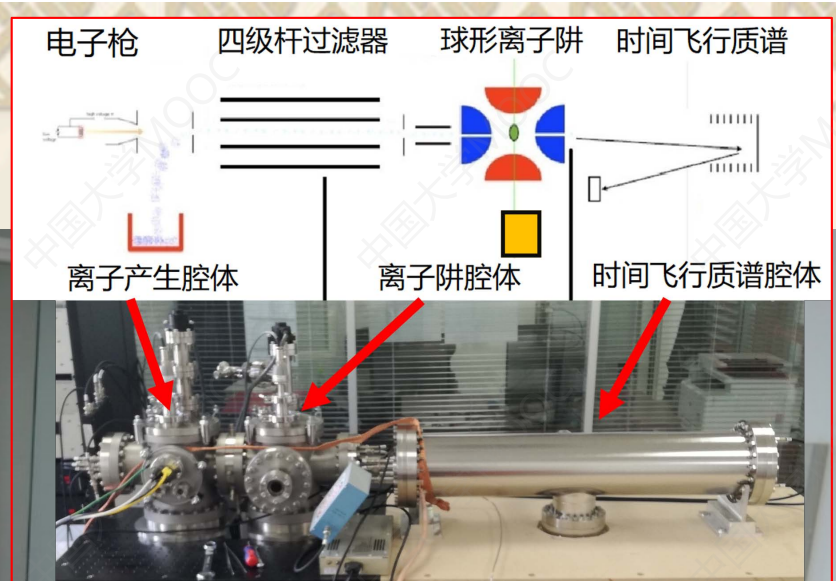


## 第二章:天文学—观测科学

### ❖ 引言

- 最古老的科学
- 优点: 极端状态
- 缺点: 只能观测 (实验室天体物理)

# 天体化学实验室





# 超高压手段→超级地球的内部过程及其宜居性



1958-2018  
USTC  
UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences  
中国科学院—清华大学联合研究所

赵九章·侯德封大师讲堂  
地球和空间科学杰出讲座系列

## 实验室模拟太阳系外行星

Explore exoplanets by laboratory simulations



费英伟

华盛顿卡内基研究所资深研究员  
美国地球物理学会会士  
地球化学学会会士  
欧洲地球化学协会会士

时 间：9月25日（周二）下午15:00  
地 点：东区学生活动中心五楼报告厅  
主办单位：地球和空间科学学院

截至目前，已经发现超过3500颗太阳系外行星（系外行星），这彻底改变了我们对宇宙的看法，特别是对行星的形成及生命在太阳系外生存的可能性的看法。这些系外行星的快速发现对了解这些大质量行星特别是超级地球的一般性质和内部过程提出了更大的挑战。在这里，我将介绍一个新的研究领域，利用最新的超高压手段来探索超级地球的内部过程以及它们的宜居性。

Abstract: Recent discovery of over 3500 extra-solar planets (exoplanets) has revolutionized our view of the universe, particularly the formation of planets and their habitability. The fast-pace of discovery poses a great challenge to scientists who need to know more about the general properties and interior processes of these massive planets, particularly the rocky super-Earths. Here I introduce a new research field of exogeology and powerful static and dynamic compression techniques to explore interior processes of super-Earths and their habitability.

穿插介绍：

➤ 一些重要的天文概念

➤ 16世纪两个主要的观测成就

- 日心说

- 行星的运动规律

牛顿力学理论 → Einstein的广义相对论

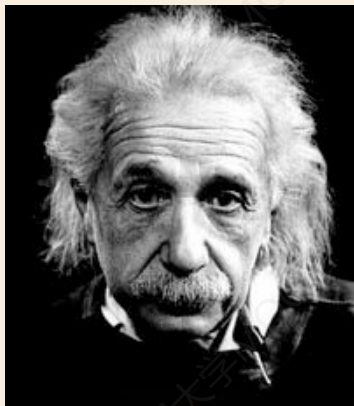




**"If I have seen further it is by standing on the shoulders of Giants."  
— Isaac Newton, The Correspondence Of Isaac Newton**



**"I do not know what I may appear to the world, but to myself I seem to have been only like a boy playing on the sea-shore, and diverting myself in now and then finding a smoother pebble or a prettier shell than ordinary, whilst the great ocean of truth lay all undiscovered before me."  
— Isaac Newton**



**"Two things are infinite: the universe and human stupidity; and I'm not sure about the universe."  
— Albert Einstein**



**"I am enough of an artist to draw freely upon my imagination. Imagination is more important than knowledge. Knowledge is limited. Imagination encircles the world."  
— Albert Einstein**

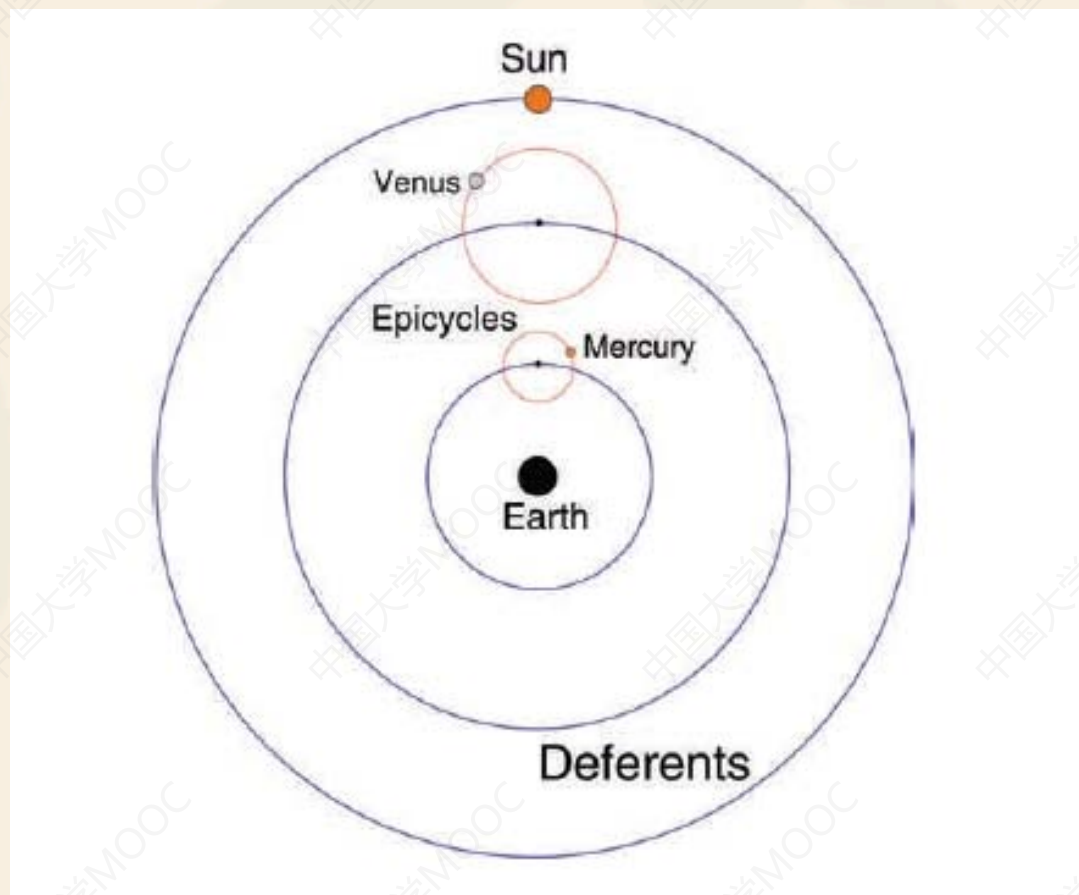
## ❖ 太阳系



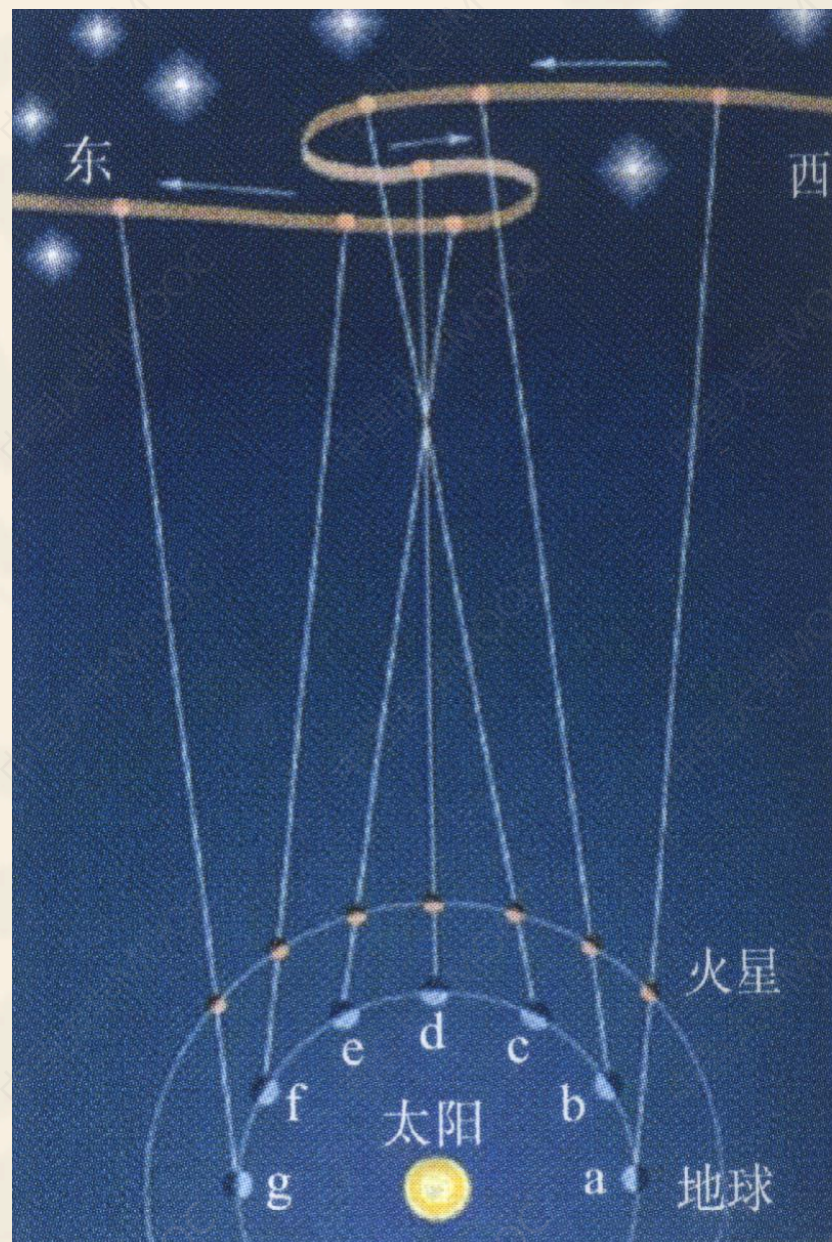


## 托勒密的地心说

- ❖ 本轮（epicycle）
- ❖ 均轮（deferent）
- ❖ 太阳与行星绕地球的角速度一样
- ❖ 可以解释行星的退行（retrograde motion）
- ❖ 可以解释金星与水星随太阳的运动

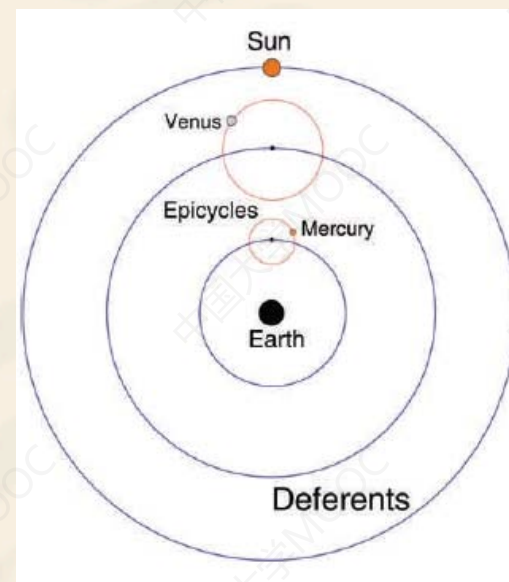
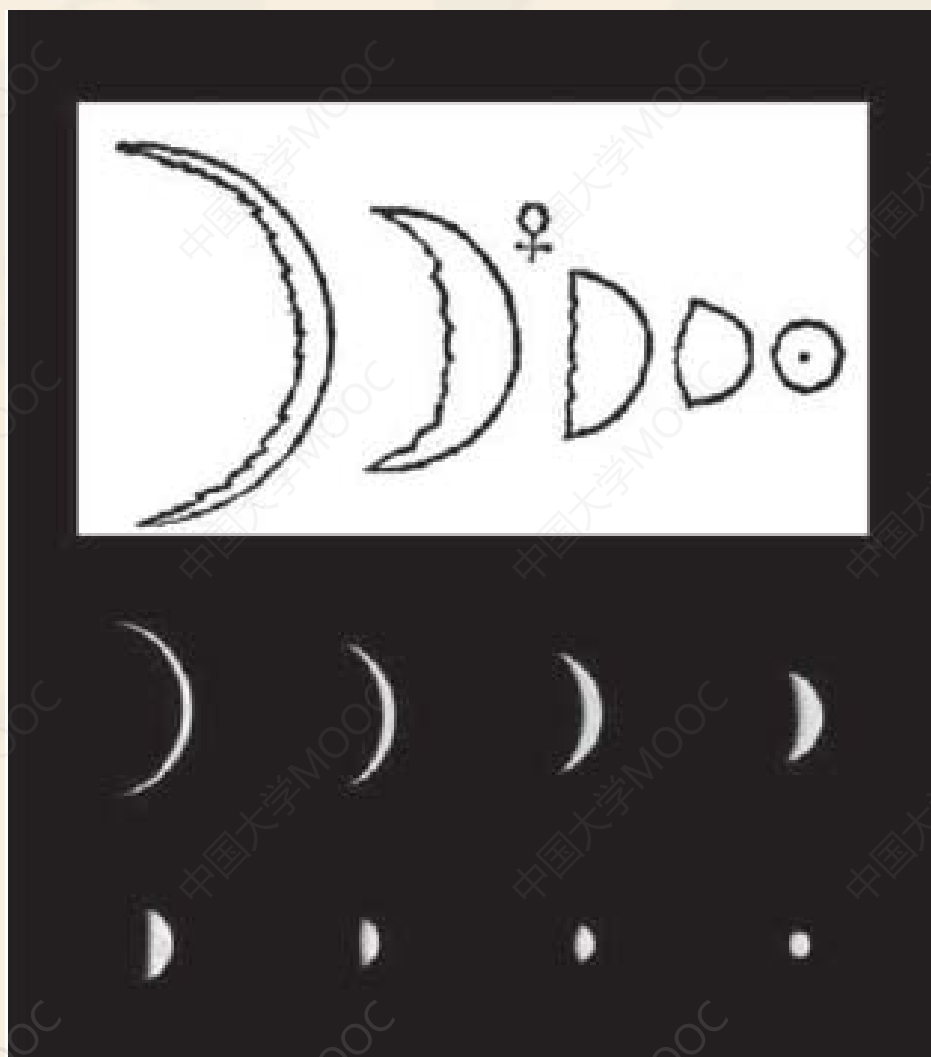


“圆圆”相“抱”（冤冤相报）何时了：)





# Galileo给出日心说证据：金星的相



# 天球（ **celestial sphere** ）与 星等（ **stellar magnitudes** ）

## ❖ 星座

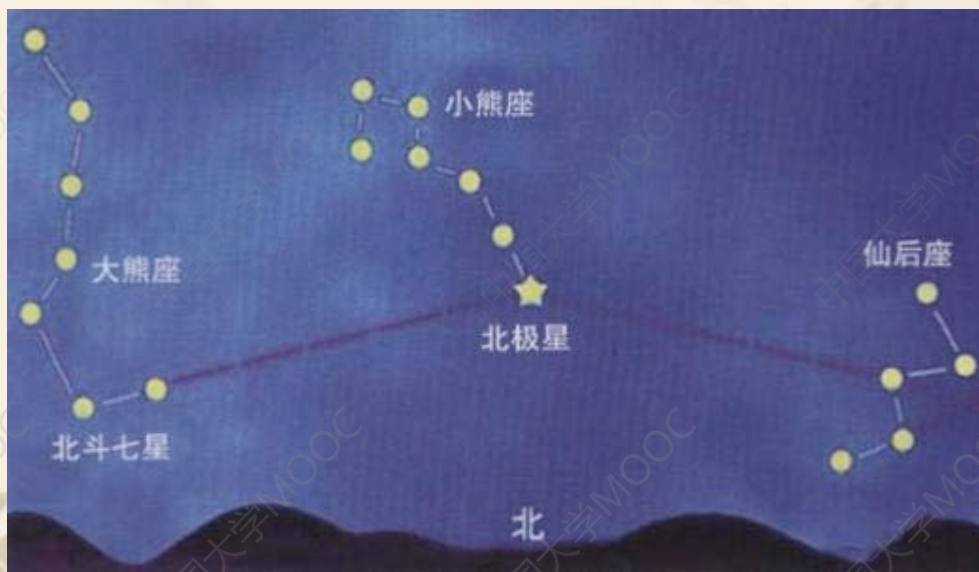


大熊座



## ❖ 星座由亮星构成：

- Orion: 猎户座
- Cassiopeia: 仙后座
- Taurus: 金牛座
- Cygnus: 天鹅座
- Lyra: 天琴座
- Plough (Big Dipper): 北斗七星





# 如何找到北极星

北极星

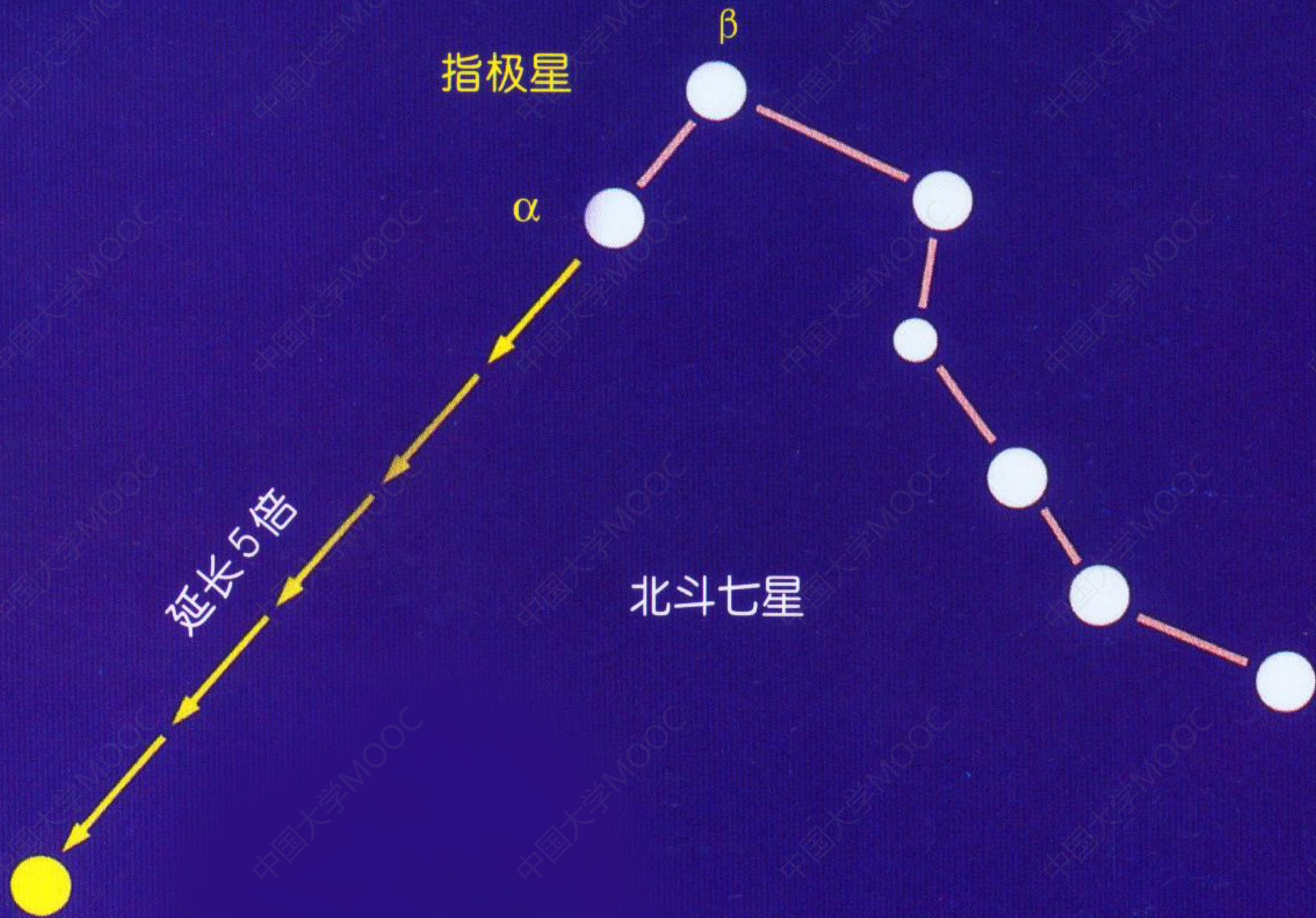
延长5倍

指极星

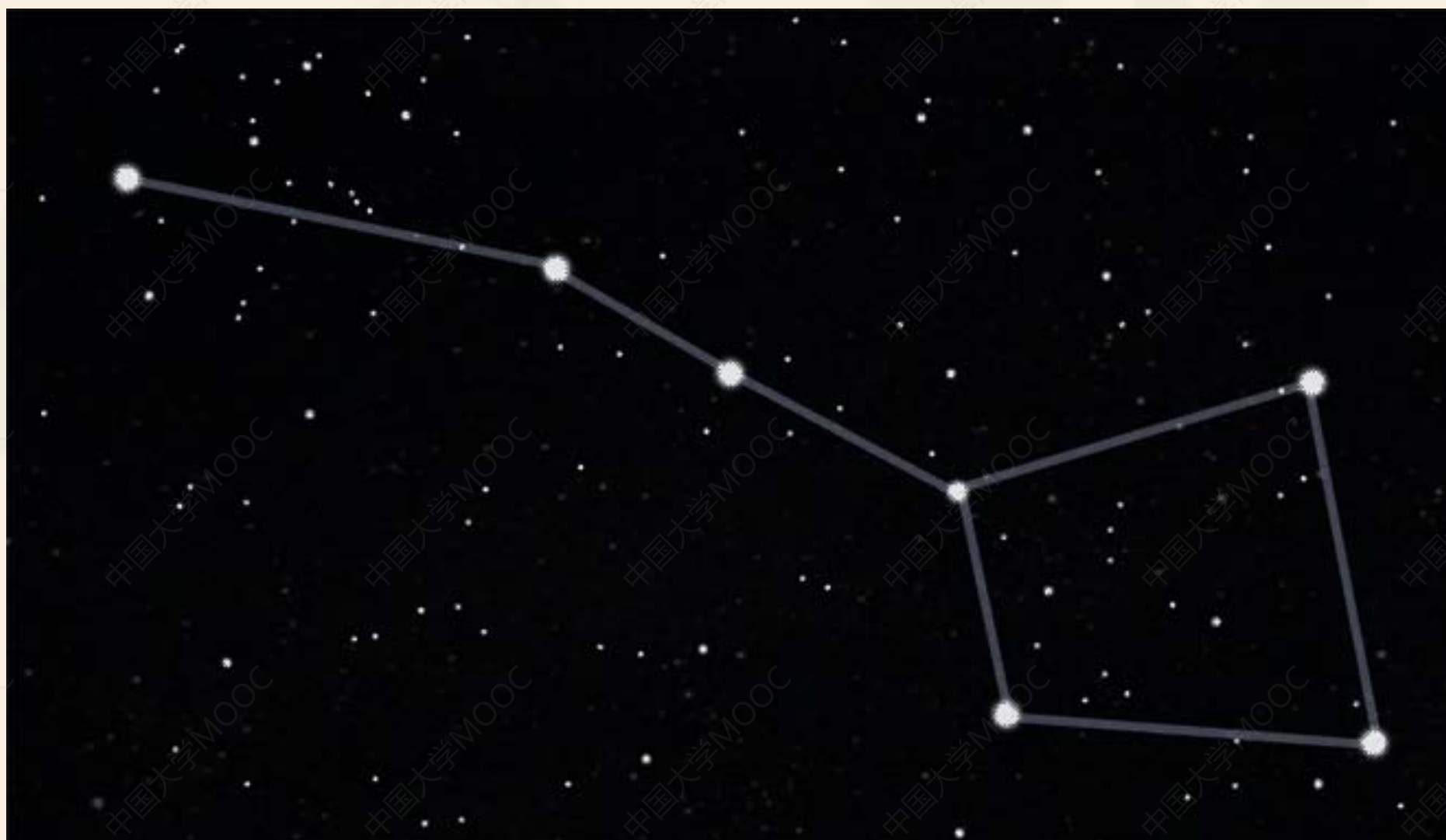
$\alpha$

$\beta$

北斗七星







THE BIG DIPPER CHANGING OVER TIME, FROM 100,000 BCE TO PRESENT-DAY TO 50,000 CE TO 100,000 CE, GIF: MARTIN VARGIC

## ❖ 星等

➤ 星表：Hipparchos（依巴谷），130-160 BC；

《甘石星经》更早约200年，121个星；

Ptolomy（托勒密）：150 AD, 1028个星

➤ Hipparchos将肉眼可见的星按亮度分为1-6等

● 1等星亮，6等星暗

● 差1等星：约2.5倍；差5等星：约100倍

➤ Norman Pogson（Oxford）给出定义：1854

$$R^5 = 100$$

$$\log_{10} R = 2/5 = 0.4$$

$$R = 10^{0.4} = 2.512$$

参考星（0等）：Polaris（北极星，变星）→ Vega（织女星）



- ❖ 视星等:
- 仿视星等
- 色星等

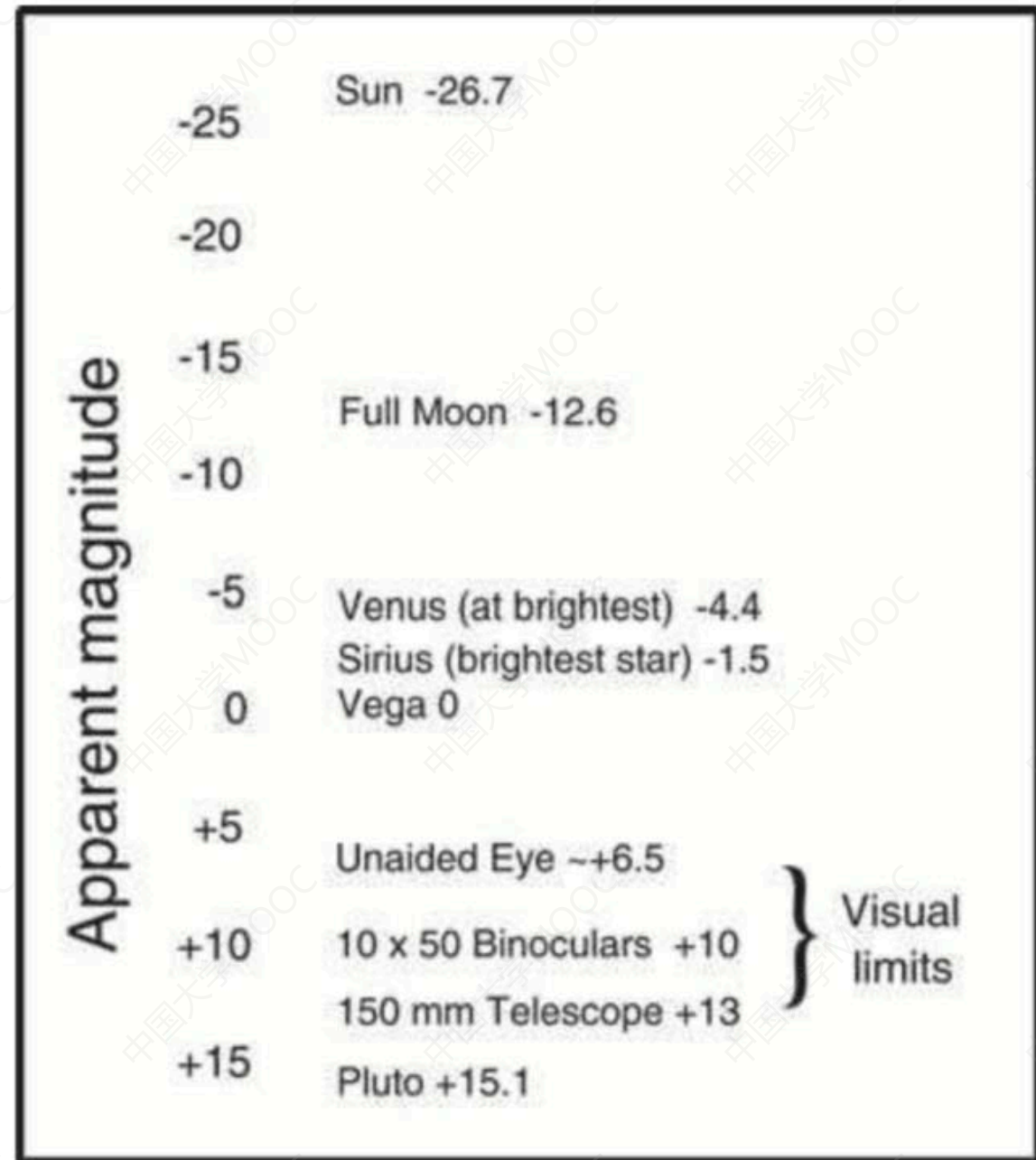


Figure 1.5 Some examples of apparent magnitudes.

## ❖ 星等的计算

$$R = 2.512^{\Delta m}$$

$$\text{Log}_{10} R = \text{Log}_{10}(2.512) \times \Delta m$$

$$\text{Log}_{10} R = 0.4 \times \Delta m$$

$$\Delta m = \text{Log}_{10} R / 0.4$$

$$\Delta m = 2.5 \times \log_{10} R$$

月亮与太阳亮度差：

$$\begin{aligned} R &= 2.512^{14.1} \\ &= 436\,800 \end{aligned}$$

两天体亮度差  
10000倍：

$$\begin{aligned} \Delta m &= 2.5 \times \log_{10}(10\,000) \\ &= 2.5 \times 4 \\ &= 10 \end{aligned}$$



# ❖ 天球坐标系

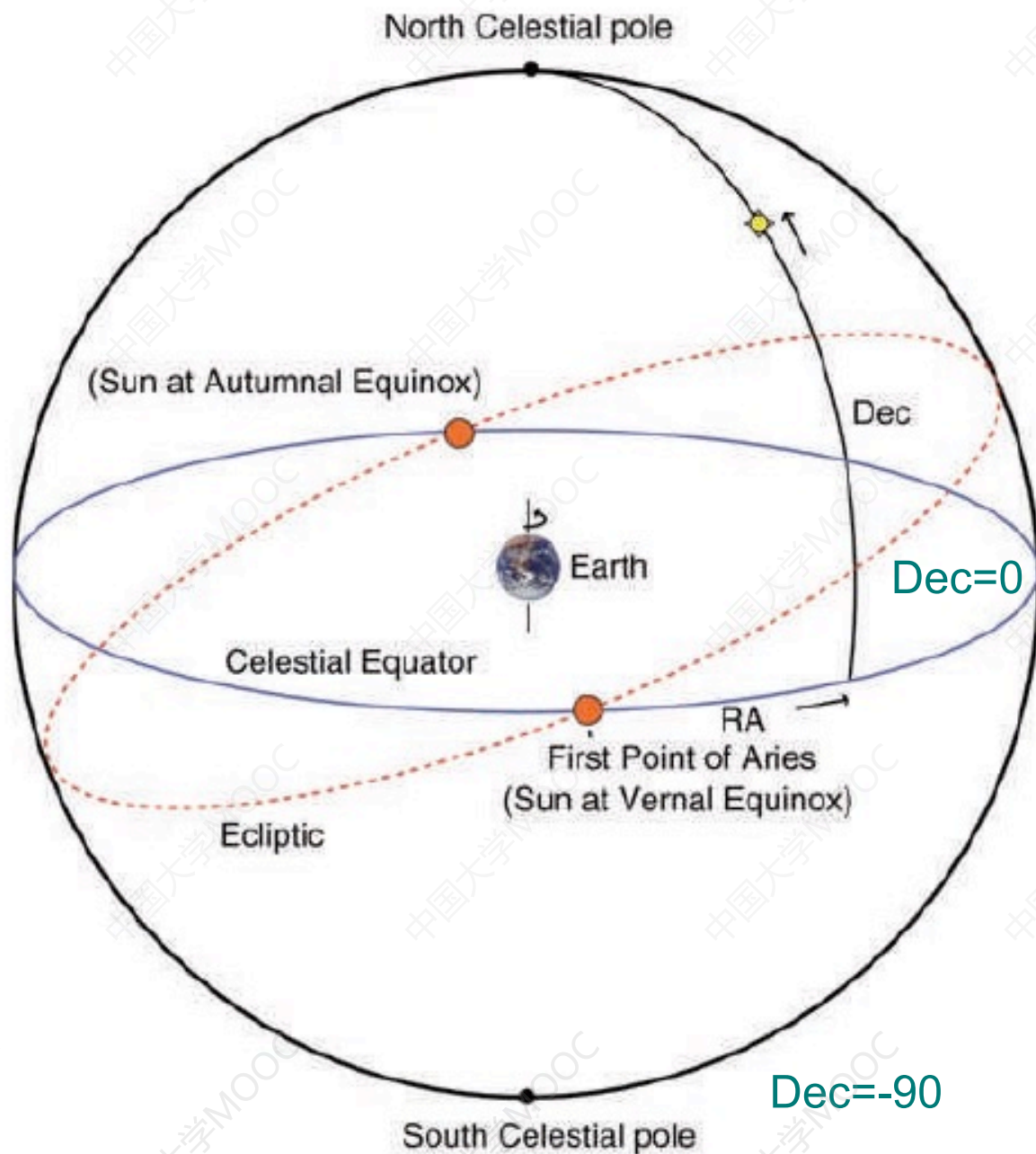
Dec=90

黄赤交角: 23.5度

赤纬(Dec): Declination

赤经(RA): Right Ascension

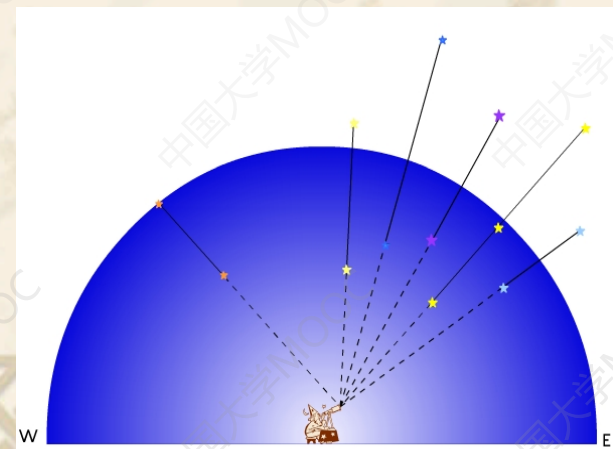
本初子午线(Prime Meridian):  
Greenwich 天文台



RA以春分点为原点（恒星时为0）往东进行计量，常以时间(恒星时)为单位

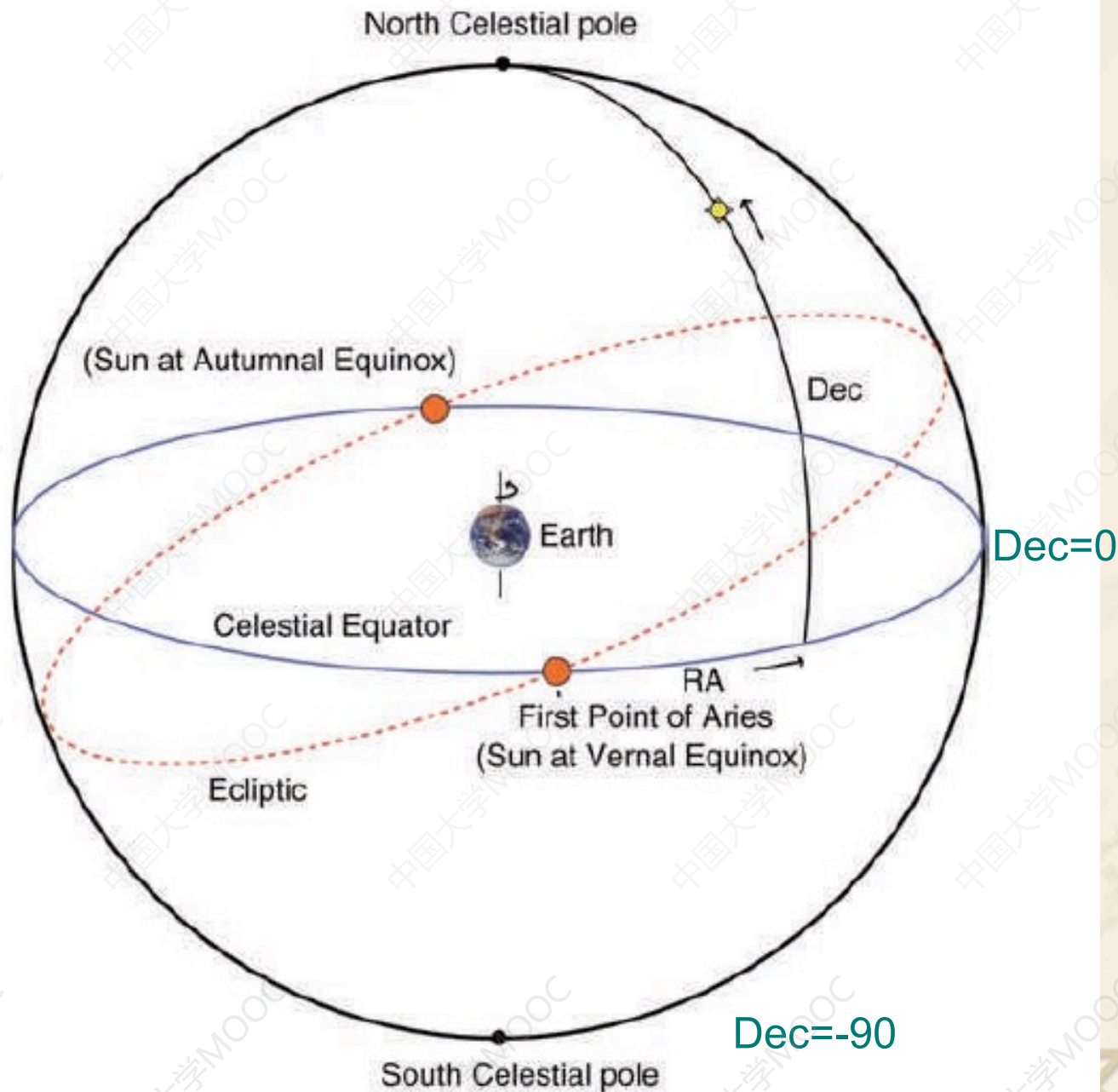
24h=360度

1度=60角分=3600角秒



# ❖ 天球坐标系

Dec=90



假想圆球:

- 1、与直观感觉相符的科学抽象
- 2、天体在天球上的位置只反映天体视方向的投影
- 3、天球上任意两天体的距离用其角距表示
- 4、地面上两平行方向指向天球同一点（恒星的光是平行光）
- 5、任意点为球心
- 6、观测者“由内向外”看

**RA=恒星时**，一般以时间为单位

**24h=360度**

春分、夏至、秋分、冬至

球面天文学



天顶(zenith)：Z 过天球中心做一直线与观测点的铅垂线平行，交天球于两点，位于观测者头顶的一点称天顶。

天底(nadir)：Z' 与天顶相对的另一交点为天底。

真地平(horizon)：过天球中心做一与铅垂线垂直的平面，与天球相交的大圆为真地平(地平圈)。

天子午圈：过天极和天顶的大圆。

恒星过天子午圈时的恒星时=赤经

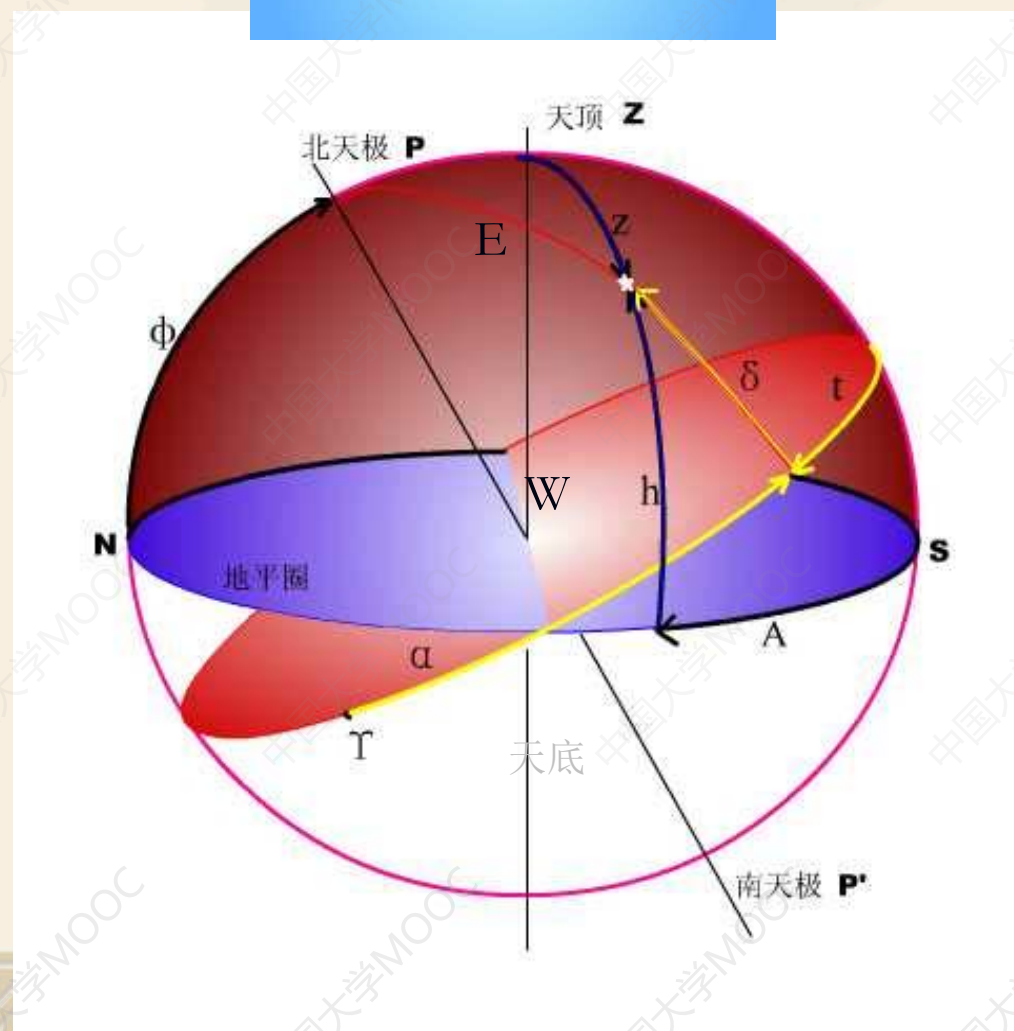
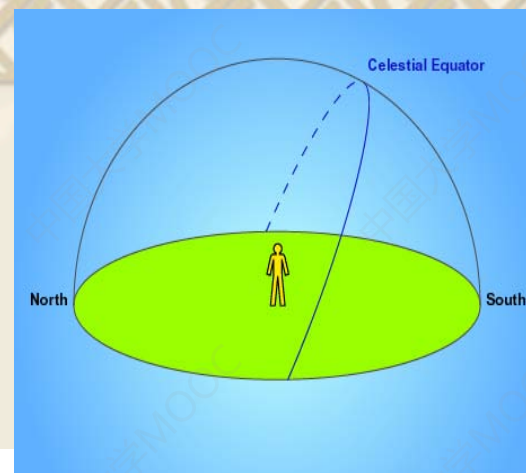
gamma: 春分点

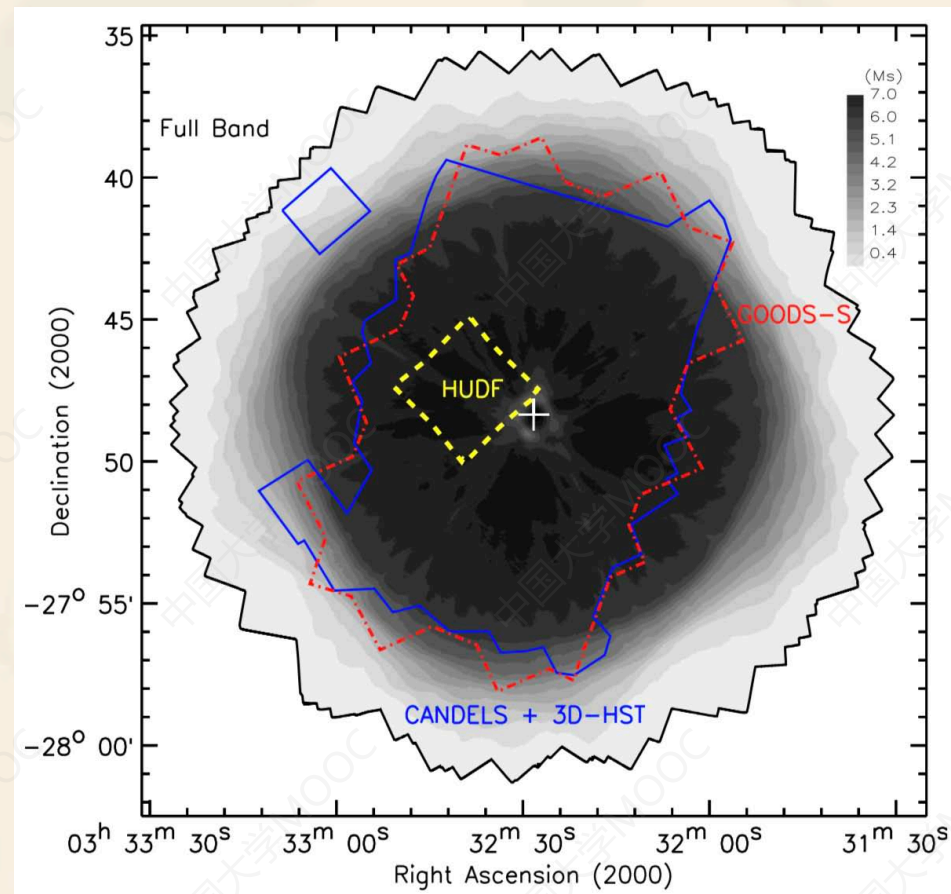
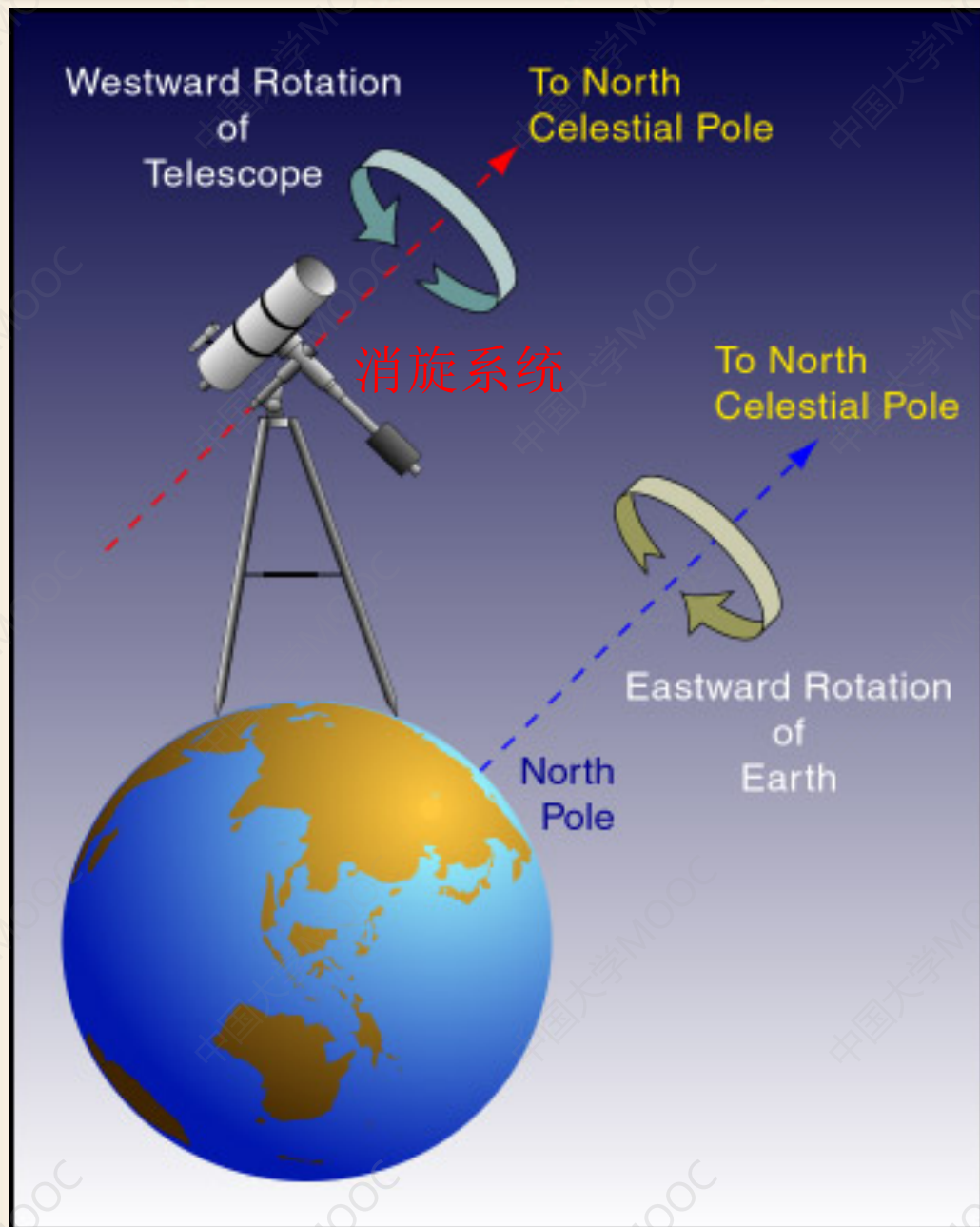
h: 地平高度

$Z=90^\circ-h$ : 天顶距

alpha: 赤经

delta: 赤纬







## ❖ 岁差（Precession, 地球的进动）

进动周期：~26000 年（星表：指明时间“J2000.0”）

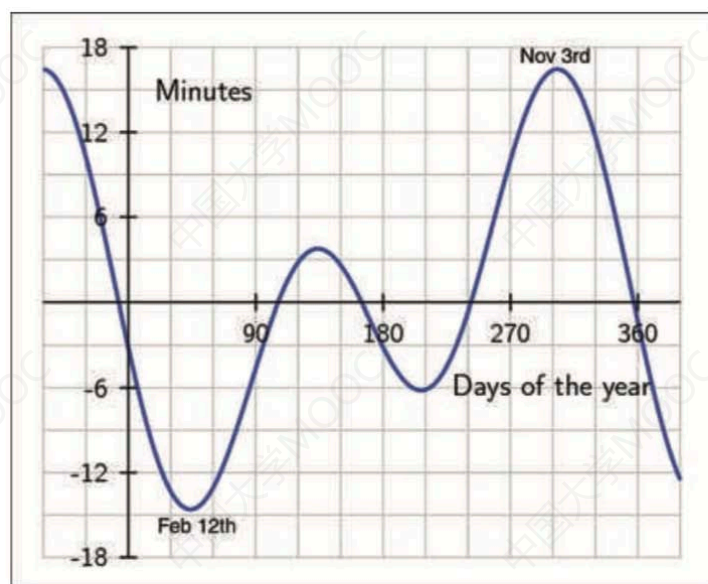


Figure 1.7 The path of the North Celestial Pole through the heavens.

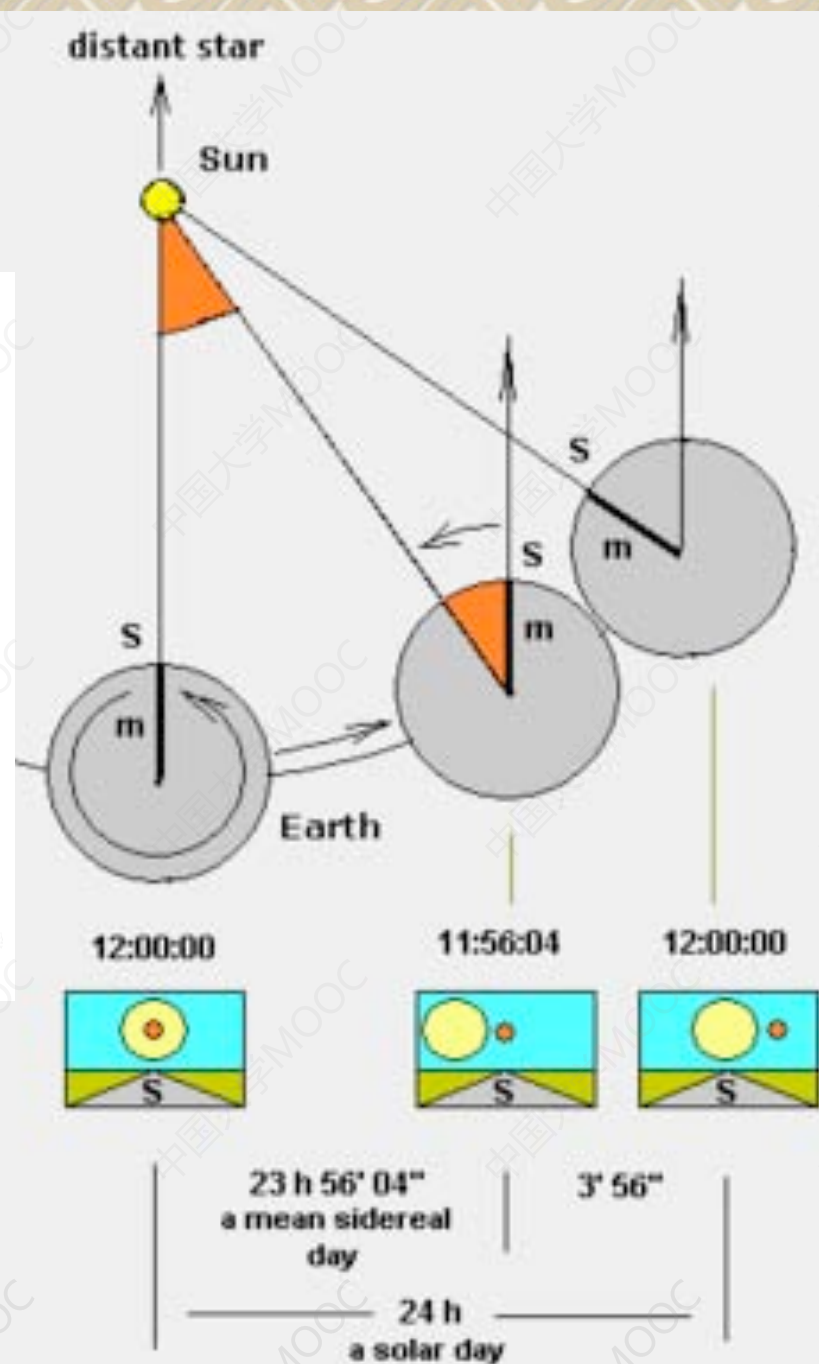
# 时间

- ❖ **当地太阳时：** 太阳两次过同一位置（天顶）的时间差，（定义为约）**24小时**；  
各地时间不同
- ❖ **格林尼治时间（GMT）：** 地球轨道椭圆，日长变化，定义**24小时**为一年中天的平均长度
- ❖ **时间方程：** GMT和当地太阳时之间的差别
- ❖ **世界时（UT）：** 1928年UT取代GMT，但直到1967年秒的定义发生变化时才真正有别于GMT
- ❖ **原子钟（Cs）：** 铯133原子超精细能级间跃迁周期的**9 192 631 770**倍为1秒；  
地球自转变慢→闰秒
- ❖ **恒星时：** 以遥远恒星为标准（恒星平行光），地球公转，所以比太阳日短一些  
**23h56m4.09s**



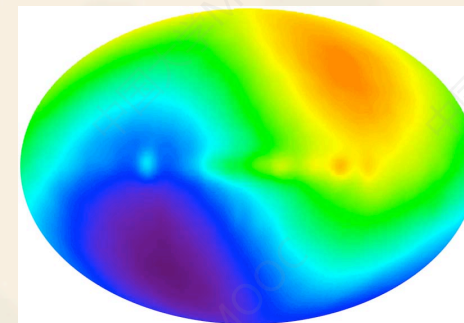


**Figure 1.8** The 'Equation of Time' – the difference between GMT and Local Solar Time at Greenwich Observatory. Image: Wikipedia Commons.

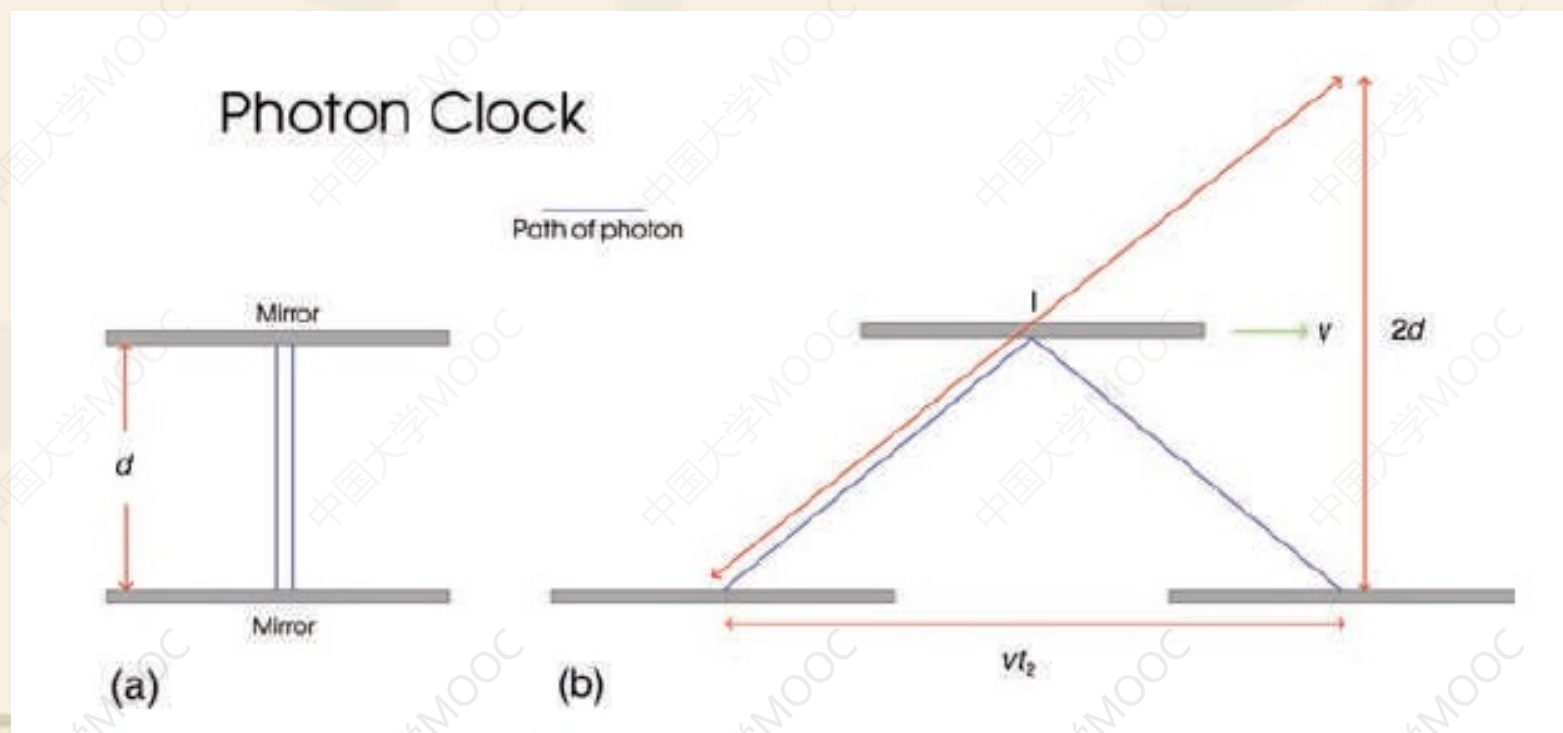


## ❖ 宇宙时：绝对时间标准

地球相对宇宙微波背景的运动速度  
朝向Leo（狮子座）， $v \sim 650\text{km/s}$



时间膨胀（time dilation）：动钟变慢(GPS修正)  
（Einstein）光钟





❖ 光钟：秒定义为光子一个往返（对比静钟和动钟里秒的长度）

$$t_1 = 2d/c$$

$$l = [(2d)^2 + (vt_2)^2]^{1/2}$$

$$t_2 = l/c = [(4d^2 + v^2 t_2^2)/c^2]^{1/2}$$

$$t_2^2 c^2 = 4d^2 + v^2 t_2^2$$

$$t_2^2 c^2 = t_1^2 c^2 + v^2 t_2^2$$

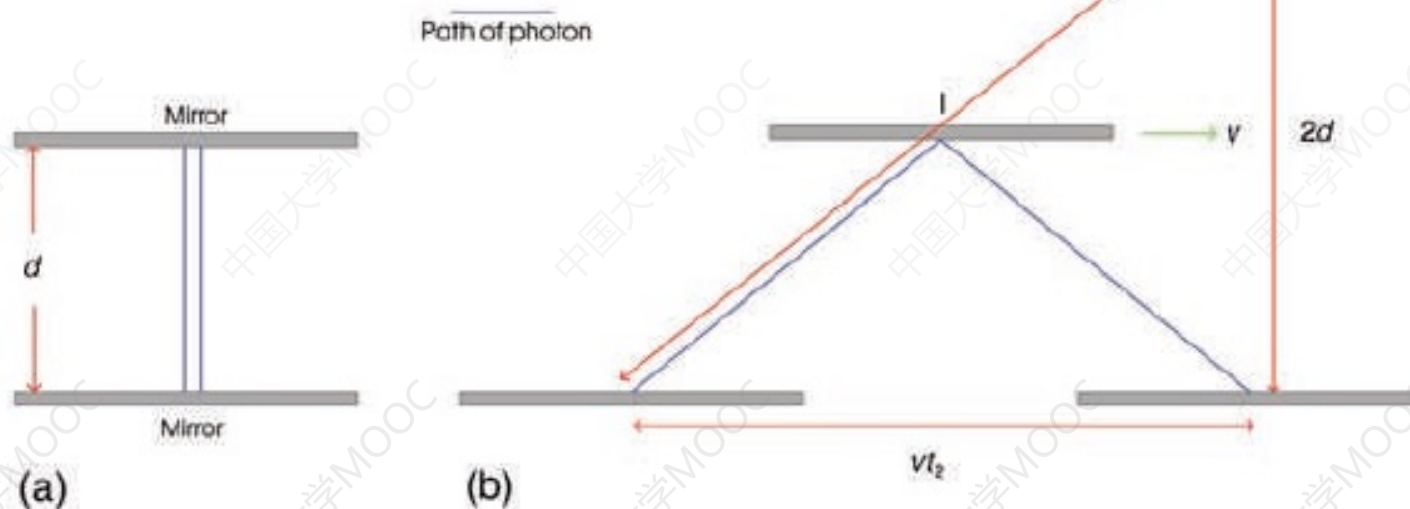
$$t_2^2 (c^2 - v^2) = t_1^2 c^2$$

$$t_2/t_1 = [c^2/(c^2 - v^2)]^{1/2}$$

$$t_2/t_1 = 1/[1 - (v^2/c^2)]^{1/2}$$

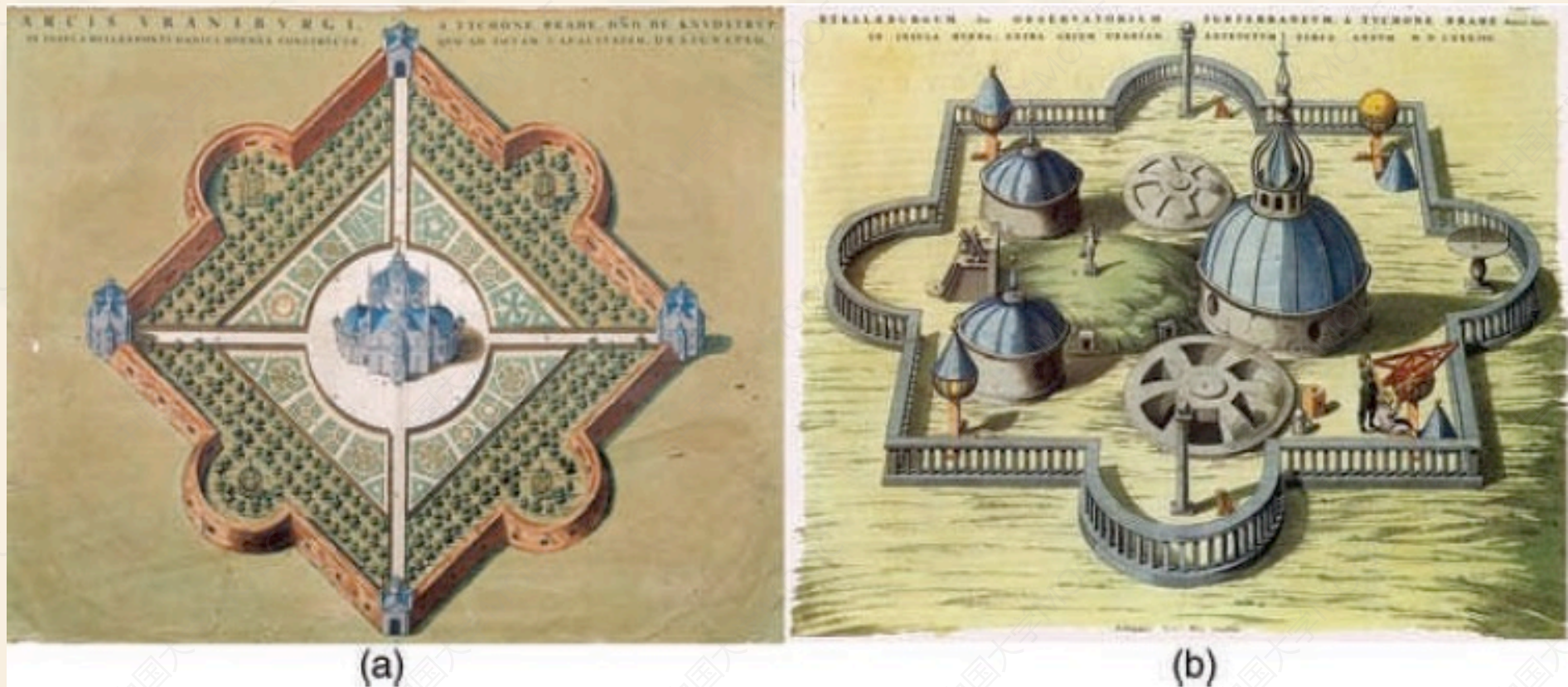
$$t_2/t_1 = 1.0000023$$

### Photon Clock



## ❖ 行星的运动规律

### ➤ 第谷对天空的观测（肉眼）



**Figure 1.10** Tycho Brahe's castle, Uraniborg (a), and his observatory, Stjerneborg (b), on the Island of Hven. Image: Wikipedia Commons.



## 测量地平高度



**Figure 1.11** Observing the elevation of a star as it transited due south. Observatory image: Wikipedia Commons. Note, on the original, the window is too high.

地球经纬度与赤经赤纬区别关键点:

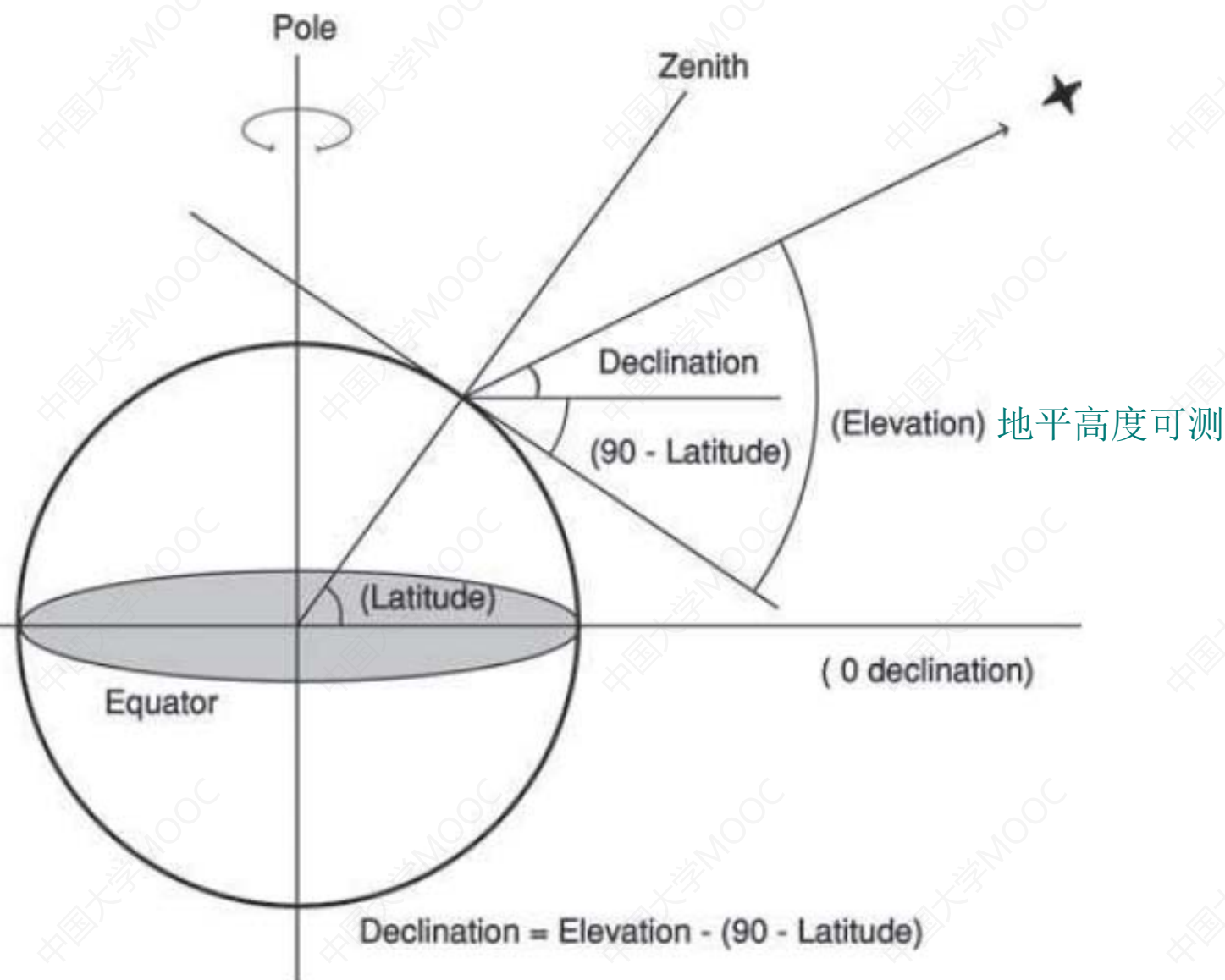
1、原点不同:

Greenwich vs 春分点;

2、刻度不同: 24h vs 23h56m4.09s;

3、不同纬度测DEC结果一致, 因为对于同一天体而言  $\text{Elevation} + \text{Latitude} = \text{const}$ ;

4、ra: 地球自转, 赤经为恒星穿越天子午线——过天极和天顶的子午圈---所对应的恒星时。



**Figure 1.12** The geometry showing how the declination of a star is derived. The zenith is the point directly above the observer.



## Measuring time the transit circle telescope

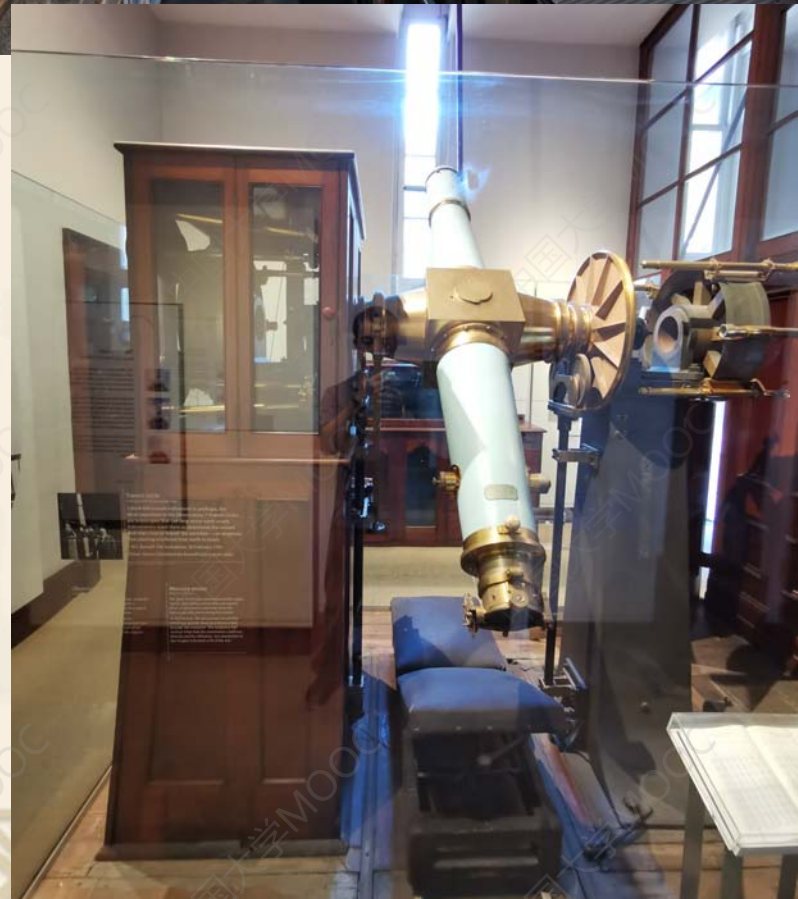
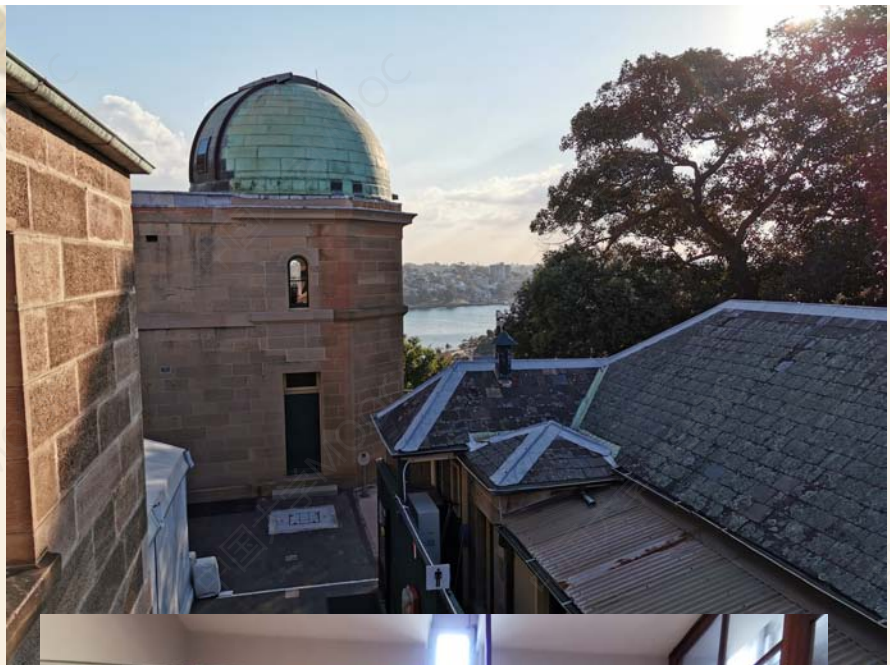
As in any 19th-century observatory, the telescope in this room was at the heart of the work of Sydney Observatory. Known as a transit circle, it was used by astronomers to find the exact time, the positions of the stars and the geographical coordinates of the Observatory.

To find the time, the transit circle telescope relied on the regular daily spin of the Earth. As the Earth spun, stars passed through the field of view of the eyepiece. Imagine a giant clock with only one hand: the stars are then the numbers on the clock face and the telescope is the hand showing the time.



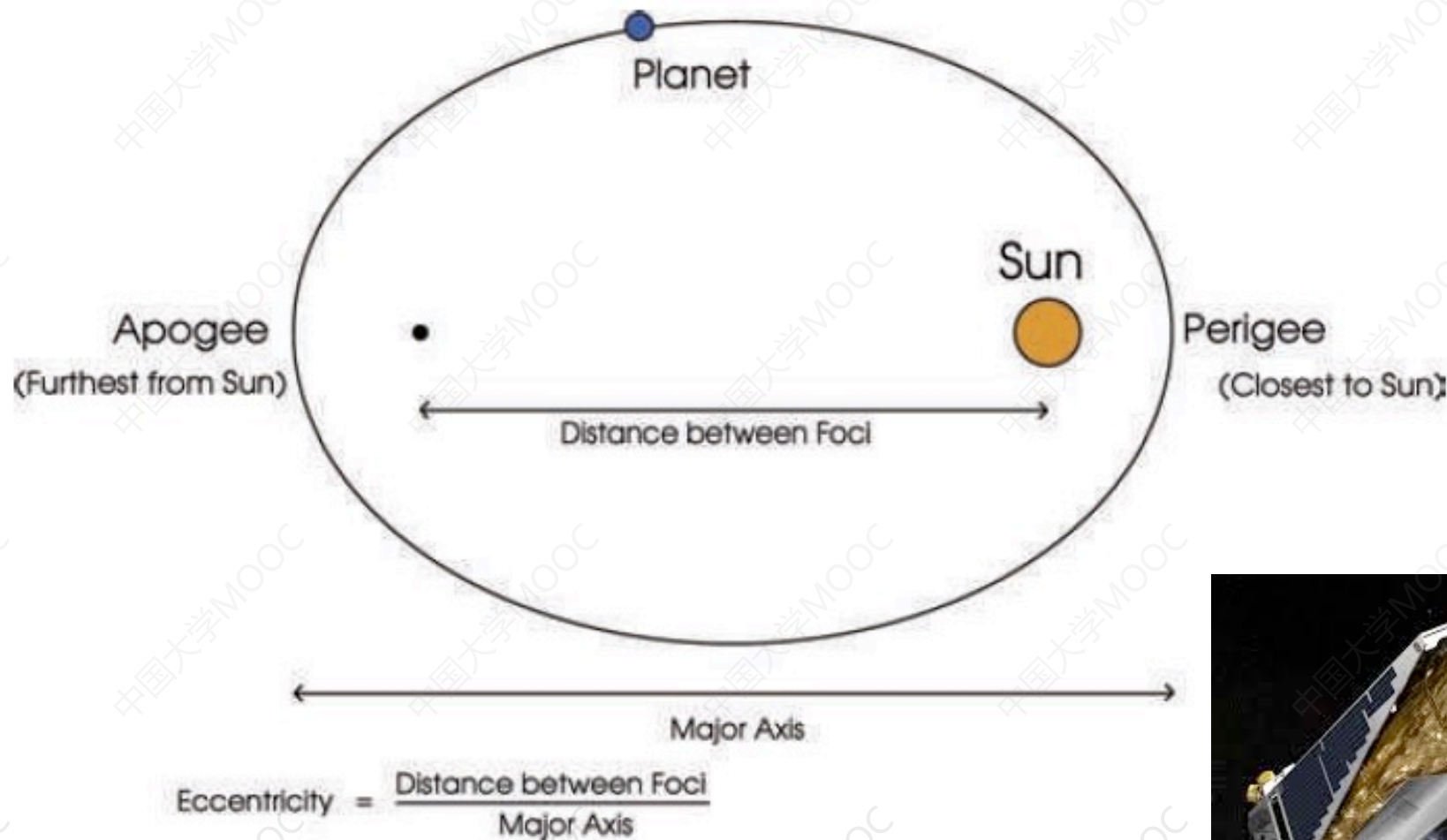
(Top) Astronomer Henry Alfred Lenehan observing through the transit circle at Sydney Observatory, about 1907.

(Bottom) The grand astronomical clock dial on the 'Strasburg' clock model, made in 1889, on display in the Powerhouse Museum.

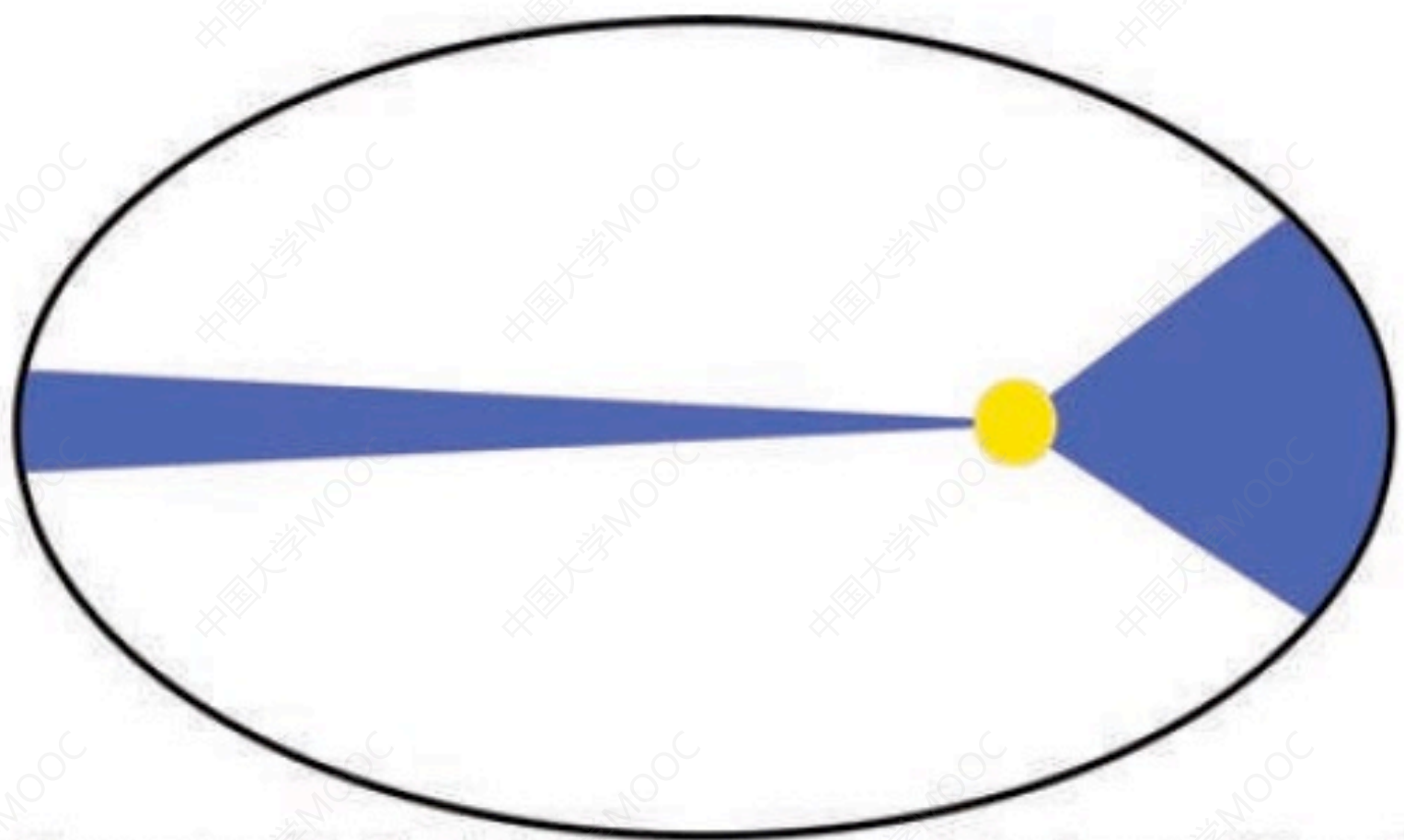


# ❖ 行星运动规律：开普勒三大定律

## 开普勒：太空立法者







**The radius vector (the line joining the centres of the Sun and Planet) sweeps out equal area in equal times**

Keplerian第三定律:

$$T^2 \propto a^3$$

$$T^2 = k \times a^3$$

(地球:  $T=1$ 年,  $a=1\text{AU}$   $\rightarrow k=1$ )

例如: 谷神星  
( $T=4.60$ 年)

$$a = T^{2/3}$$

$$\text{giving } a = 2.77\text{AU.}$$

月亮距离地球的距离:

( $a=384400\text{km}$ ,  $T=27.32\text{d}$ )

$$k = (27.32)^2 / (384\,400)^3 \\ = 1.314 \times 10^{-14}.$$

地球同步轨道卫星:

( $T=1\text{d}$ )

$$1 = k \times a^3$$

$$a = (1/k)^{1/3}$$

$$= 42\,377\text{ km.}$$

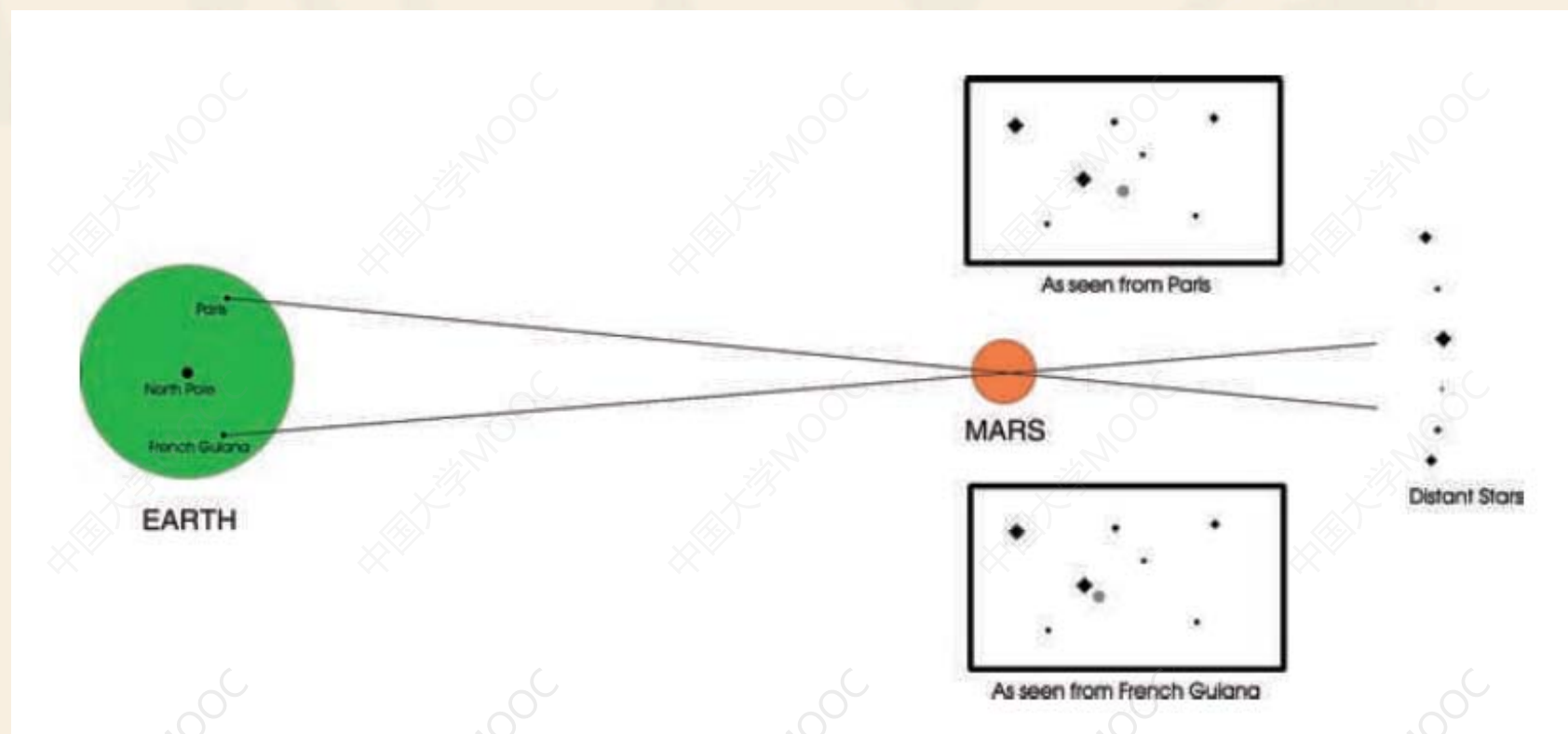
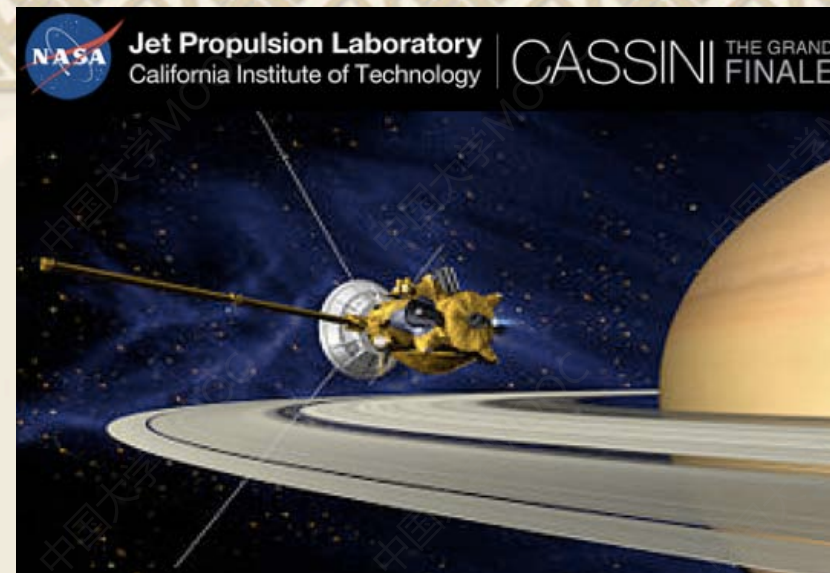


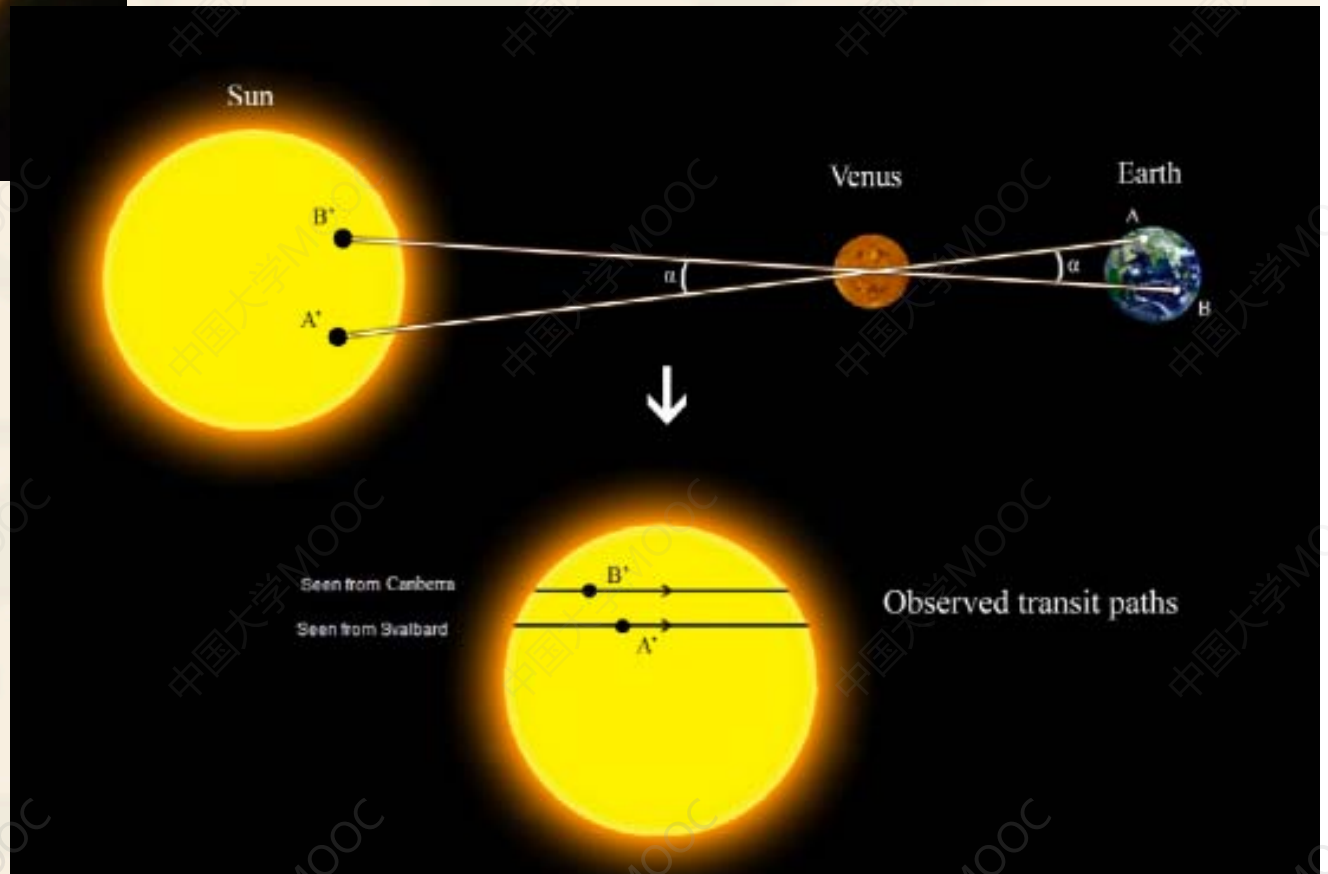
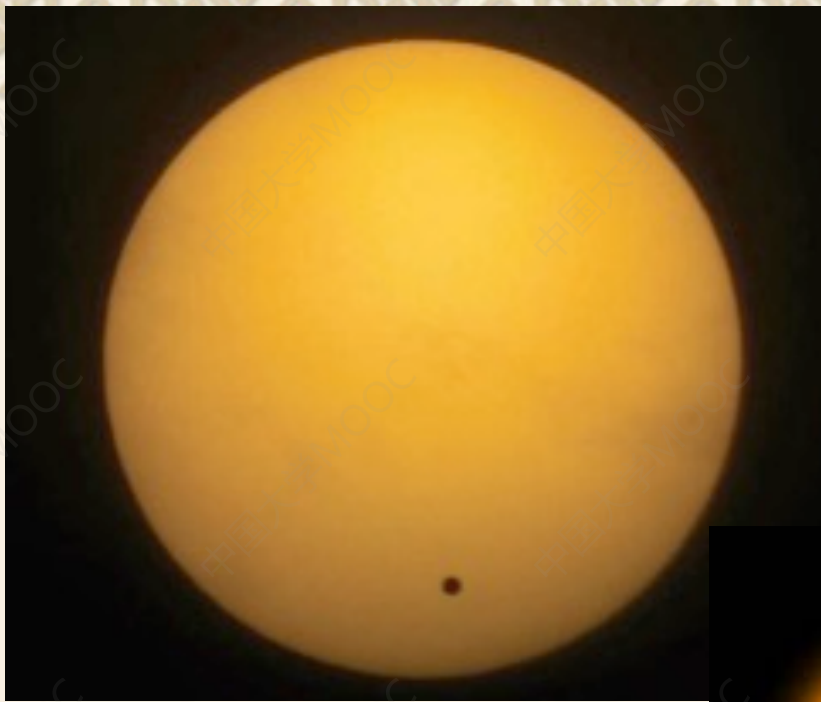
❖ 日地距离（AU）测量：周期定律

$1\text{AU} = 149\,597\,870.691\text{ km}$

➤ 三角视差法：地球-火星距离

➤ 金星凌日：地球-金星距离

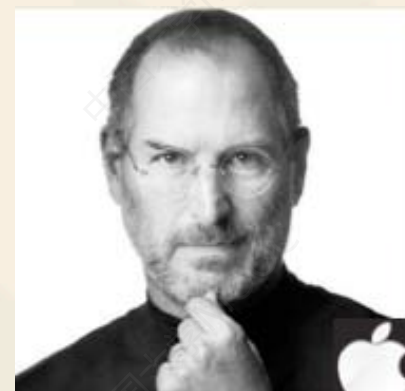
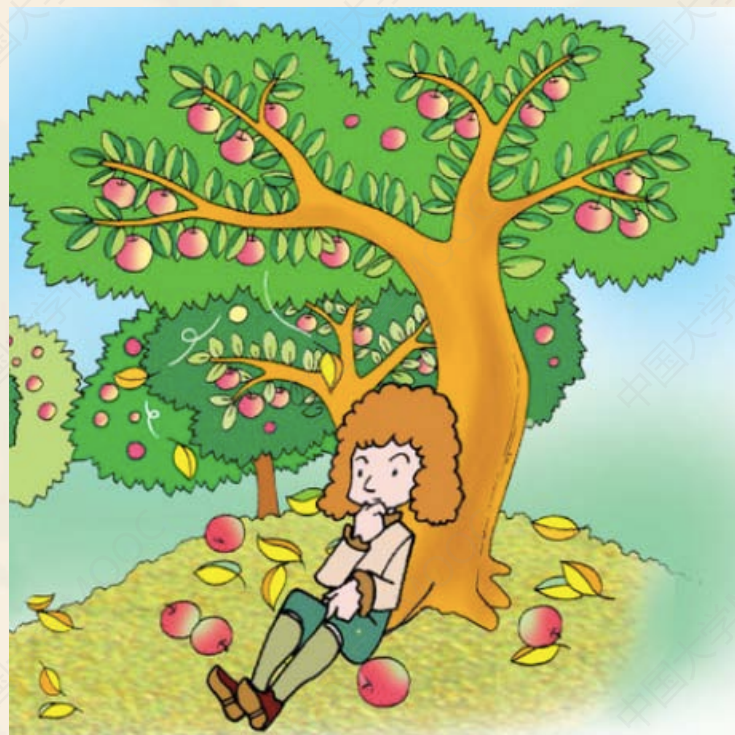




(后来，在1962年：雷达测金星精确距离→AU)



# ❖ 牛顿万有引力定律（我们和苹果之间不得不说的故事）





## ❖ 牛顿万有引力定律（我们和苹果之间不得不说的故事）

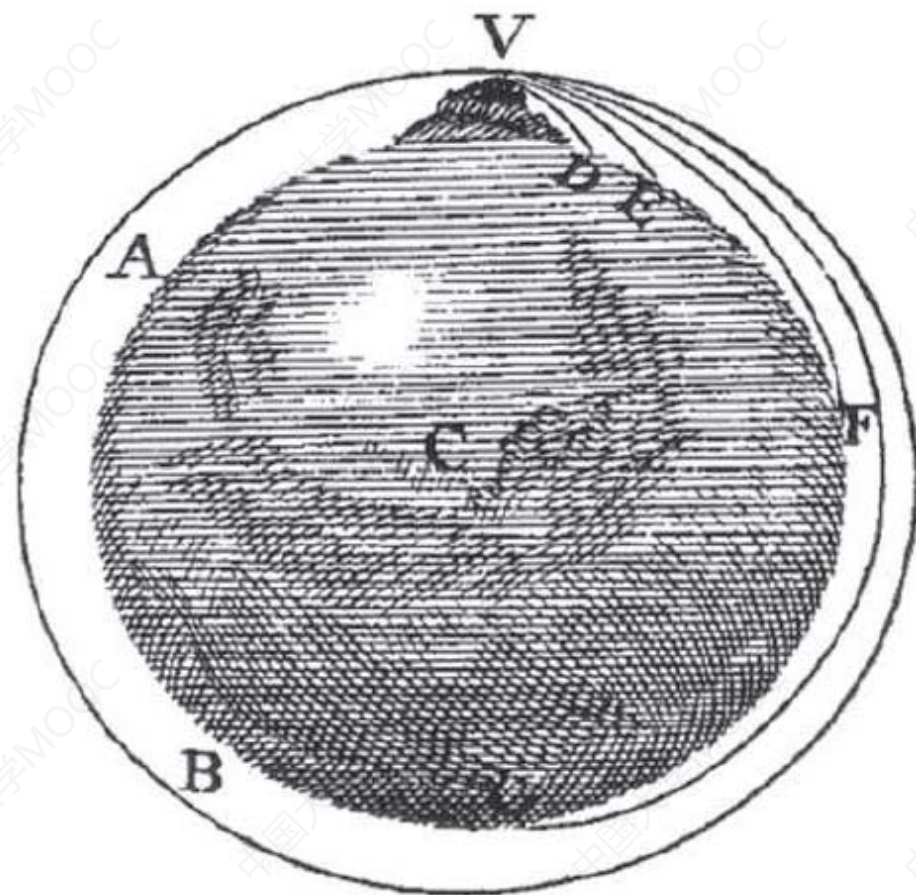
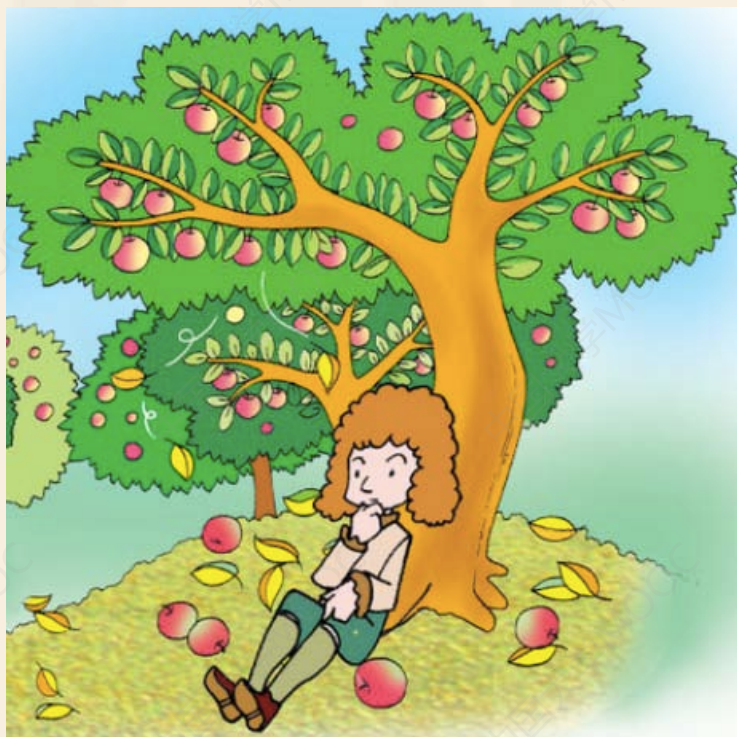


Figure 1.17 Newton's thought experiment using a cannon ball.



在1秒的时间里:

$$\theta = (1/2.36 \times 10^6) \times 2 \times \pi = 2.66 \times 10^{-6} \text{ rad.}$$

$$L = 1.022 \text{ km.}$$

$$d = D - R = R/\cos \theta - R = R [(1/\cos \theta) - 1].$$

$$1/\cos \theta = 1 + (\theta^2/2).$$

$$d = R \times \theta^2/2$$

$$= [3.84 \times 10^8 \text{ m} \times (2.66 \times 10^{-6})^2]/2$$

$$= 1.36 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

$$g_m \text{ is } 0.00272 \text{ m s}^{-2}.$$

$$g_m / g_e = \frac{1}{3606} = \left( \frac{R_e}{R} \right)^2$$

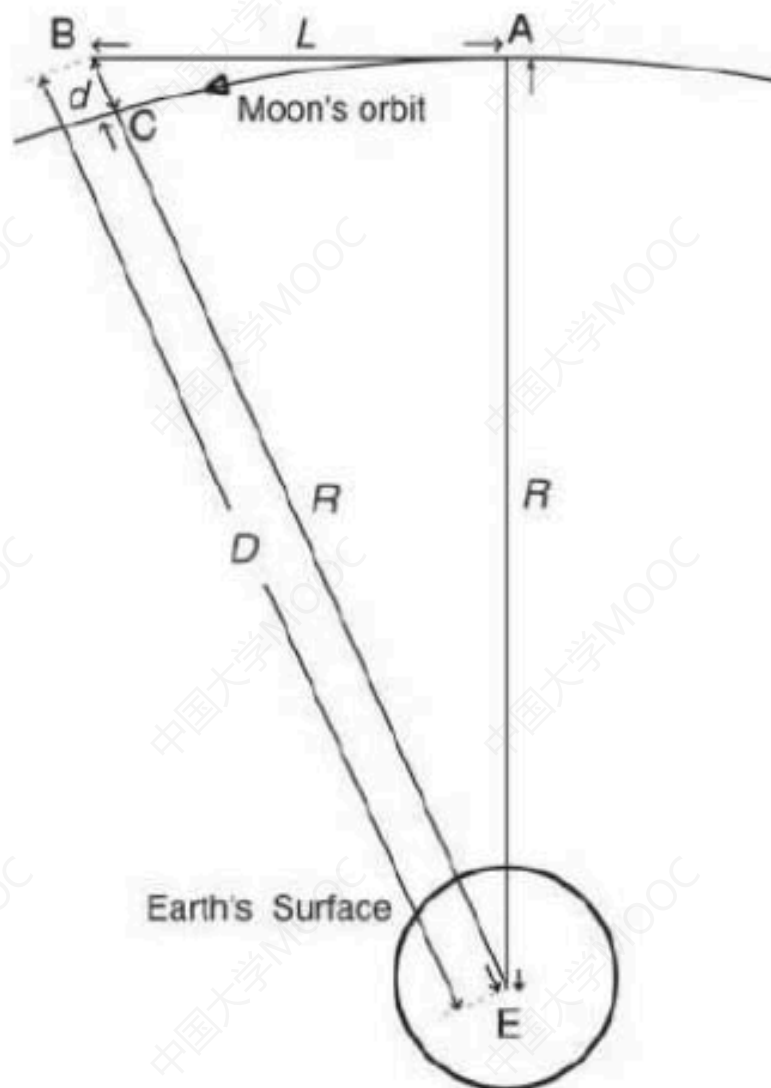
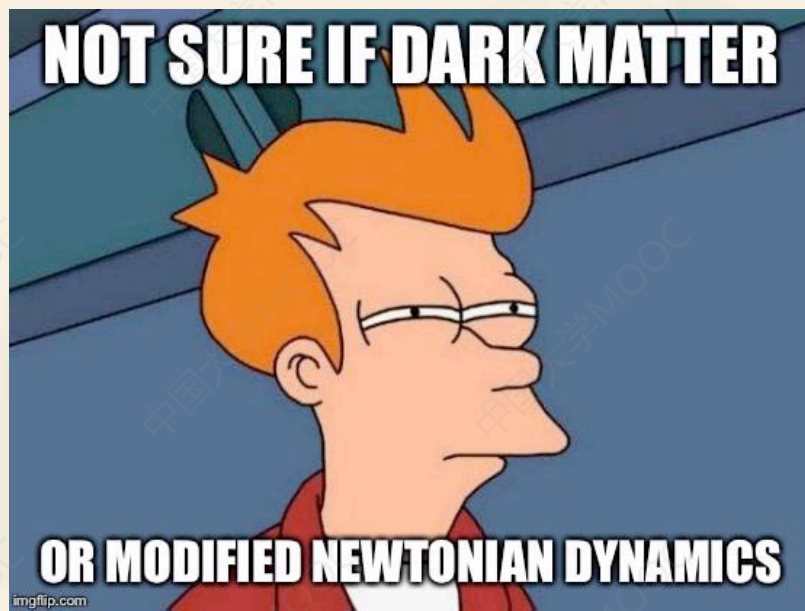


Figure 1.18 Geometry of the Earth-Moon system.

不是平方反比律的世界会是怎样的呢？



## MOND

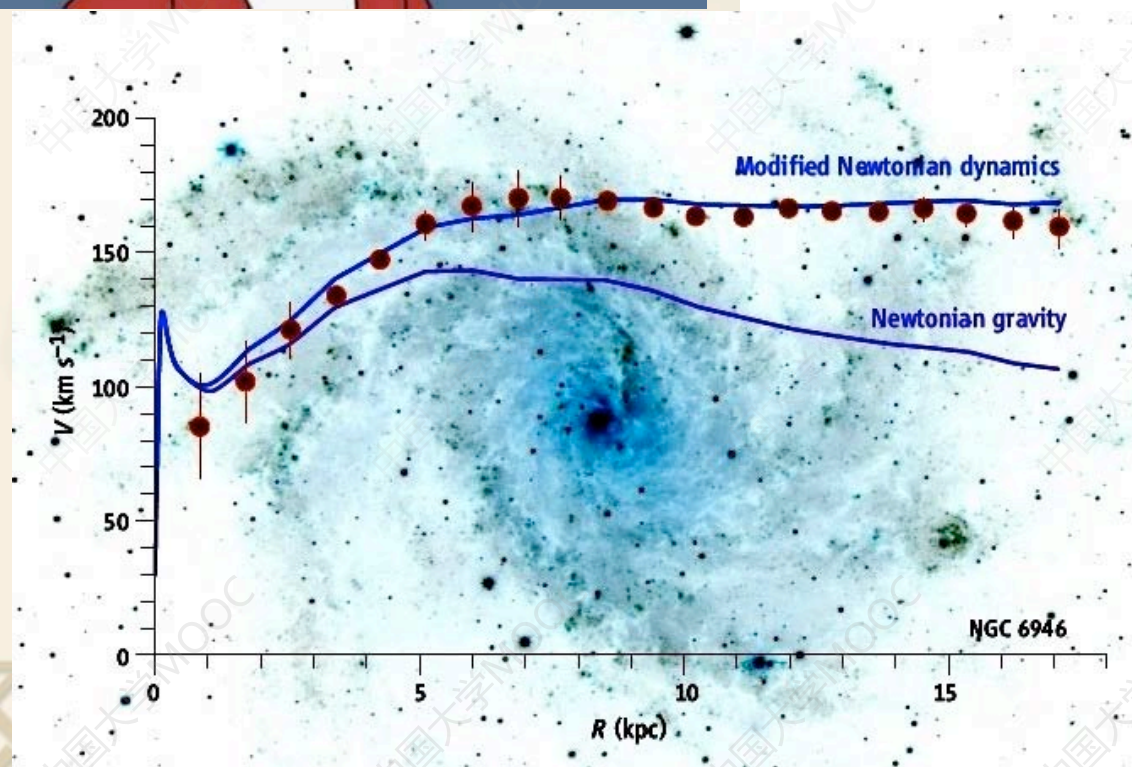
- In 1983, Milgrom proposed a modified Newtonian dynamics in which  $F=ma$  is modified to  $F=ma\mu$ , which  $\mu$  is 1 for large acceleration, becomes  $a/a_0$  when  $a$  is small.

$$F = \frac{GMm}{r^2} = ma\mu, \quad a = \frac{\sqrt{GMa_0}}{r}.$$

- To explain the rotational curve, one can choose

$$\frac{\sqrt{GMa_0}}{r} = \frac{v^2}{r} \implies v = (GMa_0)^{1/4}.$$

$$a_0 \sim 1.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2,$$



$F=ma^2$  vs.  $F=ma$   
 $F \sim 1/r$  vs.  $F \sim 1/r^2$



$$F \propto M_1 M_2 / d^2$$

$$F = G \times M_1 M_2 / d^2$$

开普勒第三定律的推导：

$$a = v^2 / r$$

$$F = m a$$

$$m_p v^2 / r = G m_s m_p / r^2.$$

Cancelling  $m_p$  and  $r$ , we get:

$$v^2 = G m_s / r$$

The period  $P$  of the orbit is simply  $2\pi r / v$ , so  $v = 2\pi r / P$ .

Thus,  
Giving:

$$4\pi^2 r^2 / P^2 = G m_s / r$$

$$4\pi^2 r^3 = G m_s P^2$$

$(m_s \gg m_p)$

Dividing both sides by  $G m_s$  and swapping sides gives:

$$P^2 = (4\pi^2 / G m_s) r^3.$$

## ❖ 引力常数（G）的测定

$$G=6.75 \times 10^{-11} \text{ M m}^2\text{kg}^{-2}$$

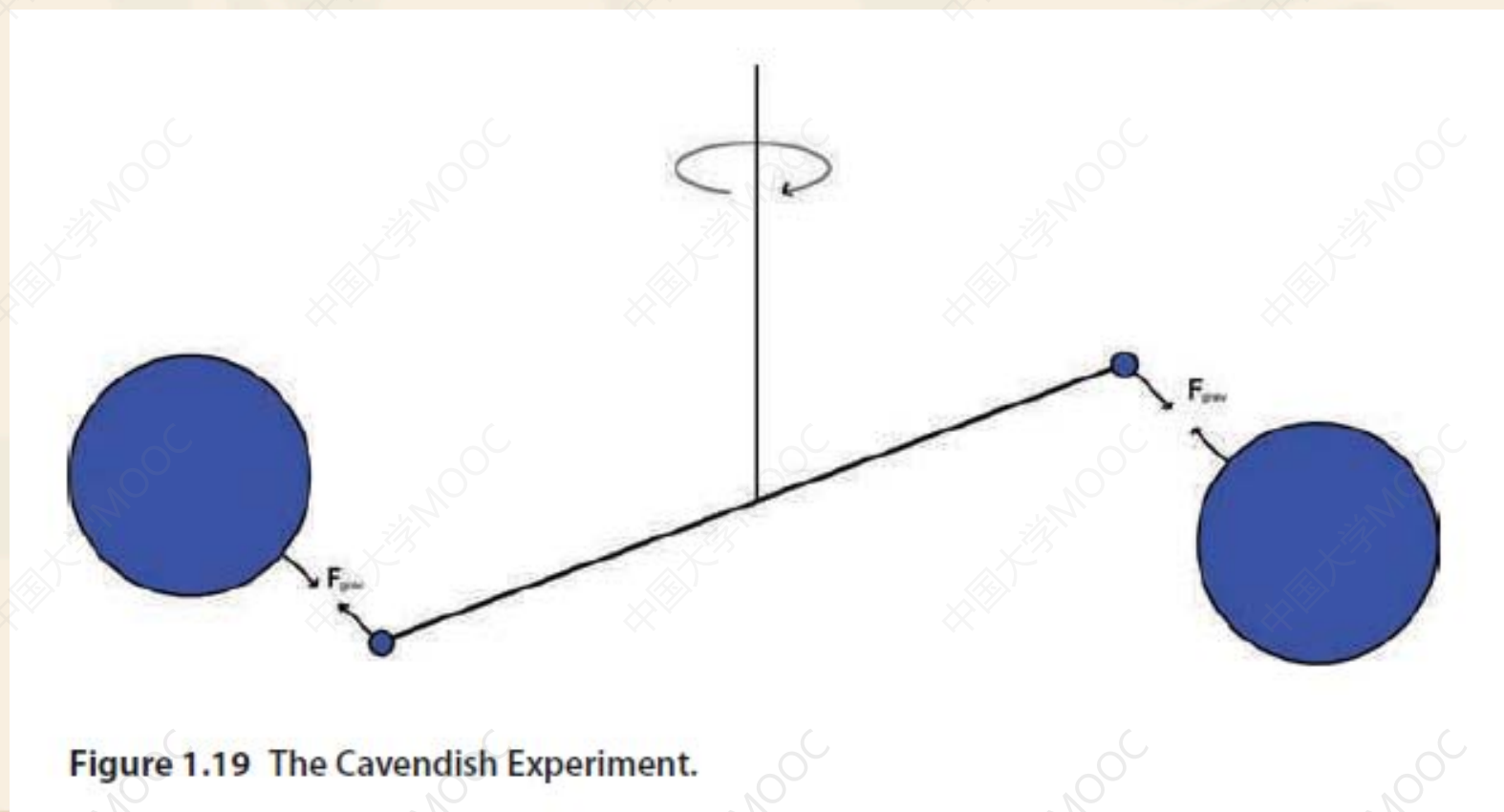


Figure 1.19 The Cavendish Experiment.



# 中大罗俊团队核心成员揭秘最精确万有引力常数G测量过程

小数点后添1位 他们潜心30年

2018-09-01 07:40 来源：南方网 钟哲

A<sup>-</sup> A<sup>+</sup>

南方网讯（全媒体记者/钟哲 实习生/关键 通讯员/刘艳玲）8月30日，《自然》杂志刊发了中科院院士、中山大学校长罗俊团队最新测量的万有引力常数G值结果。这是目前国际精度最高的G值，实现了对国际顶尖水平的赶超。昨日，南方日报记者赶赴珠海，在中山大学天琴中心采访该团队核心成员，揭秘这一项世界级成果的研究历程。

万有引力常数G是人类认识的第一个基本常数，但是G值的测量精度是目前所有基本常数中最差的，以往国际上不同实验小组的G值测量的相对精度虽然接近 $10^{-5}$ ，相互之间的吻合程度仅达到 $10^{-4}$ 的水平，因为精度问题很多与之相关的基础科学难题至今无法解决。此次罗俊院士团队采用两种不同方法测G，精度均达到国际最好水平，吻合程度接近 $10^{-5}$ 的水平，这将为提升我国在基础物理学领域的话语权、为物理学界确定高精度的引力常数G的推荐值做出实质性贡献。

罗俊团队从上世纪80年代就已开始采用扭秤技术精确测量万有引力常数G，历经10多年的努力于1999年得到了第一个G值，被随后历届的国际科学技术数据委员会（CODATA）录用。科学探索的脚步没有就此止步，该团队对实验方案进行了一系列优化以及对各项误差进行更深入的研究，并于2009年发表了新的结果，相对精度达到26ppm。该结果是当时采用扭秤周期法得到的最高精度的G值，也被随后的历届CODATA所收录命名为HUST-09。如今，罗俊团队再次一鸣惊人，采用两种不同方法测G，给出了目前国际上最高精度的G值，相对不确定度优于12ppm，实现了对国际顶尖水平的赶超。





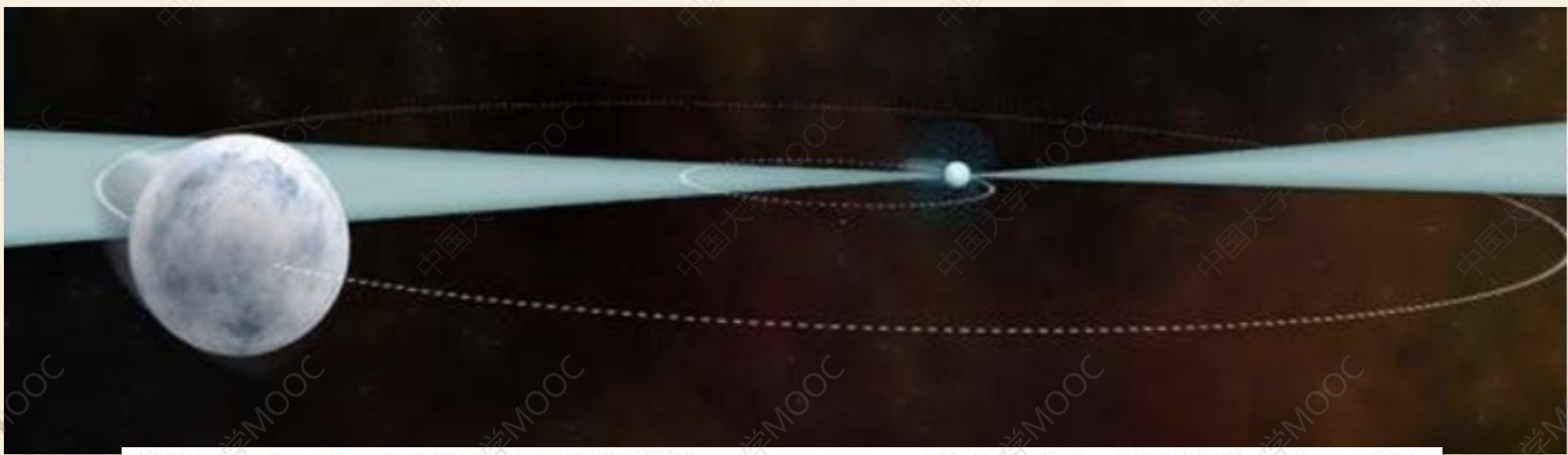
# 新研究证实万有引力常数在宇宙中具有普适性

（神秘的地球报道）据腾讯太空（罗辑/编译）：天文学家对太阳系外的天体系统进行研究后发现，进一步证实万有引力常数在宇宙中具有普适性，一组天文学家使用美国国家科学基金会的“绿岸”射电望远镜和阿雷西博天文台对一个脉冲星和白矮星构成的系统进行了长达21年的研究，最终证实了一个宇宙学上的基本问题，引力在太阳系之外也具有同样的物理性质，至少到目前为止这个答案似乎是肯定的。这颗被科学家花费二十多年时间连续观测系统为PSR J1713+0747脉冲星系统，距离地球大约3750光年。

引力作为宇宙中的四大基本作用力，是宇宙学上非常重要的基础理论，此前有科学家怀疑在太阳系之外引力是否一样无处不在？有没有可能在宇宙的某个角落存在不同的时空？或者说引力可以随着宇宙演化、时间推进而出现改变？这些问题的回答需要我们对遥远天体系统进行观测，因为我们所捕捉的星光都来自遥远的过去，从中可以发现引力是否随时空的变化而变化。科学家选择了一个脉冲星系统，这是恒星爆发后遗留的超致密天体。

脉冲星虽然只有20至25公里的直径，但密度非常大，其自转速率与地球上最好的原子钟相当，是宇宙实验室中的特殊天体。此前的观测发现，这颗脉冲星大约每68天与白矮星伴星完成一次周期运动，这意味着它们共享一个不寻常的扁平轨道。由此，科学家推算出该系统中引力常数，进一步确定了引力常数在宇宙中的普适性。

位于弗吉尼亚州的国家射电天文台科学家斯科特认为，引力是恒星、行星和星系维持的一种力量，虽然它在太阳系内似乎是恒定的，但也有一些理论认为引力可能随时间发生改变。本次长达21年的实验证明了即便在遥远的恒星系统中，引力常数也是不变的。



科学家花费二十多年时间连续观测系统为PSR J1713+0747脉冲星系统，距离地球大约3750光年



## ❖ Einstein广义相对论

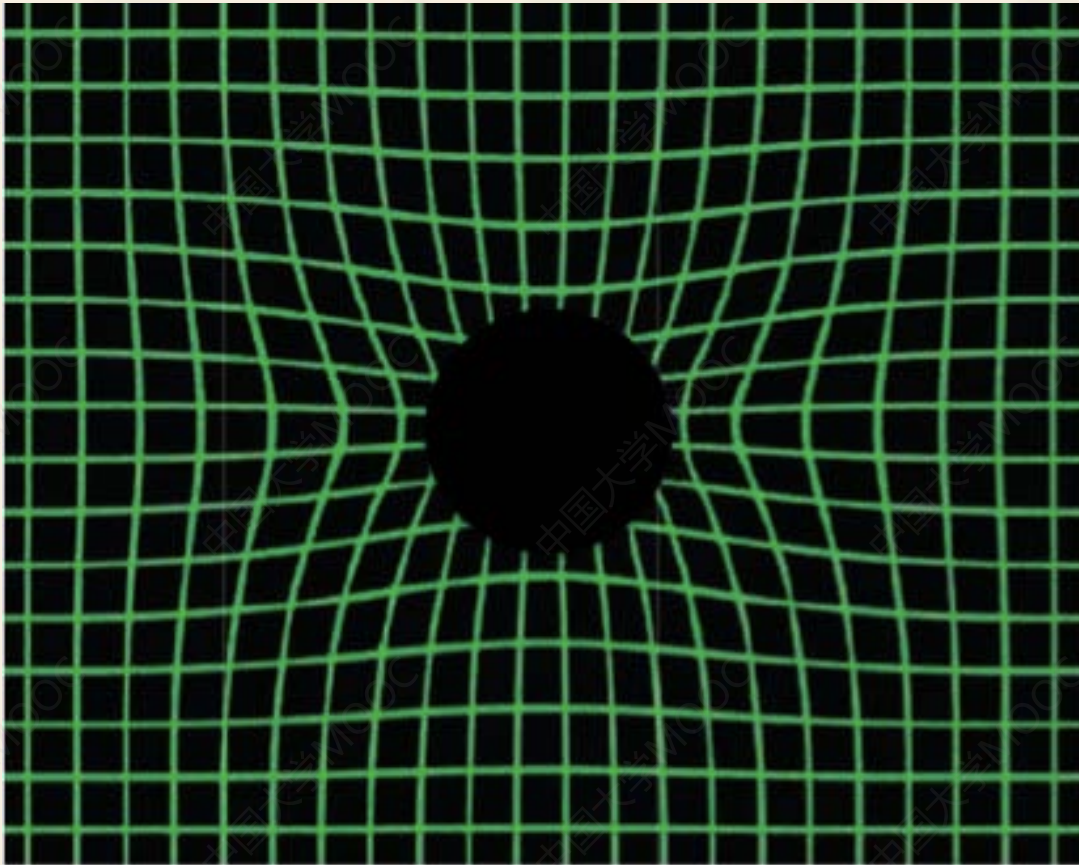
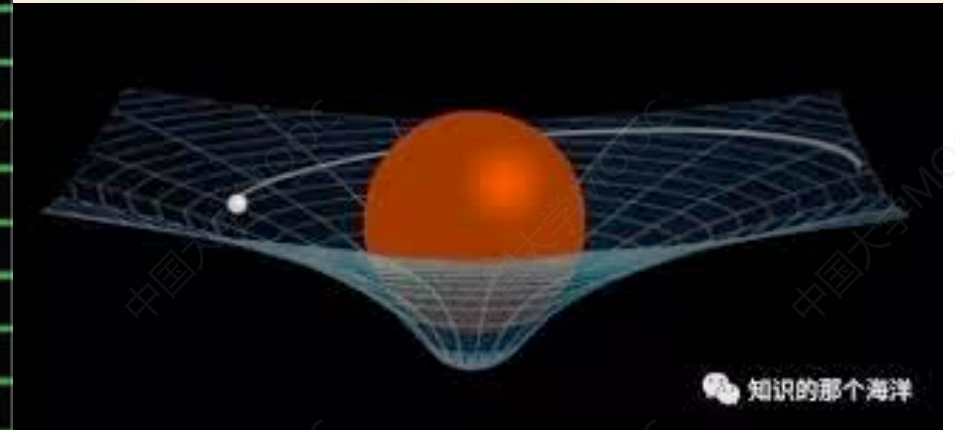


Figure 1.20 A rubber sheet analogy of the distortion of space-time by mass.



Matter tells spacetime how to curve; spacetime tells matter how to move.

# Gravitational wave detection wins physics Nobel

Rainer Weiss, Barry Barish and Kip Thorne share the 2017 prize for their work at LIGO to detect ripples in space-time.

Davide Castelvechi

03 October 2017



PDF



Rights & Permissions



Left: Bryce Vickmark/MIT. Centre: Caltech. Right: Caltech Alumni Assoc.

Rainer Weiss (left), Barry Barish (centre), and Kip Thorne (right), who led work to detect gravitational waves.

引力波——时空的涟漪，在GR预言的100年后于2015被首次直接探测；引力波时代正式开幕：天文学家从此有了听觉