第一章:天文学—观测科学

- 本章内容：
  - 天文学特点：既古老又年轻、（几乎）只能观测
  - 天文学优点：极端状态
    例如：强引力 ← Einstein的广义相对论
  - 16世纪两个主要的观测成就
    - 日心说（← 地心说）
      -- 穿插介绍星座、星等、天球坐标系、时间的概念
    - 行星的运动规律
      -- 开普勒三大定律
      -- 牛顿力学理论 → Einstein的广义相对论

实验室天体物理 （Laboratory Astrophysics）

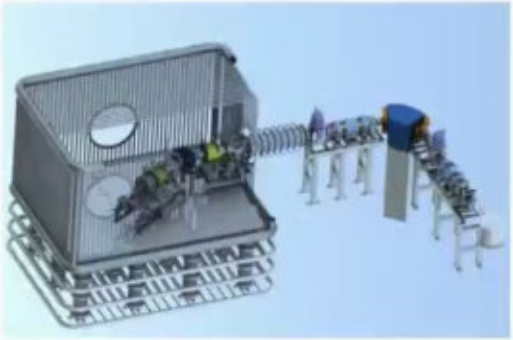
利用地面实验装置，构建天体物理环境，研究相关天体问题

（1）用粒子加速器研究核天体物理，核参数的测定

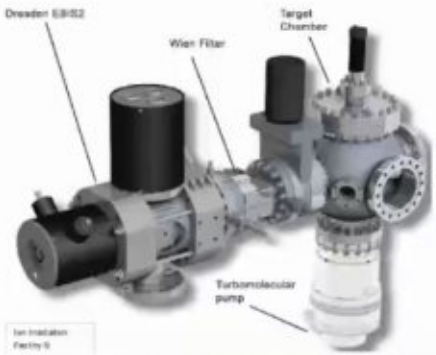
（2）用电子束离子阱研究恒星冕区光谱，原子基本参数测定

（3）用极高真空、极低温度环境研究星周/星际介质分子化学反应

（4）用强激光、箍缩装置，研究天体等离子体流体动力学过程



锦屏深地核天体物理JUNA



国家天文台电子束离子阱

奥胡斯大学天体化学反应装置

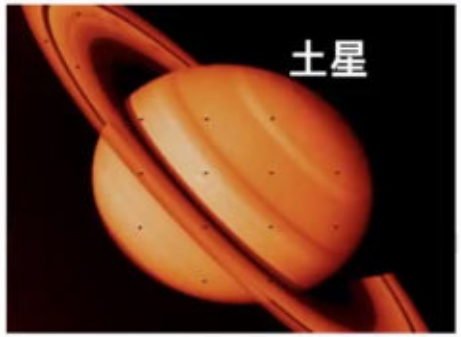
实验室天体物理研究前沿科学问题

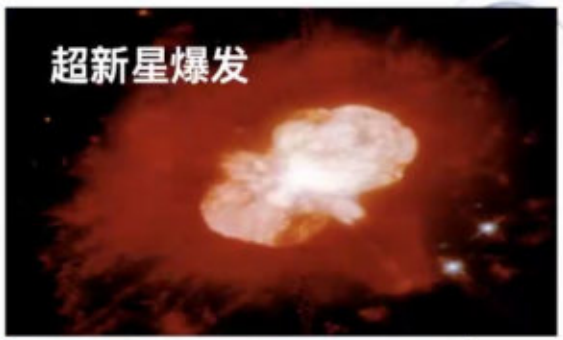
（仲佳勇
北京师范大学）

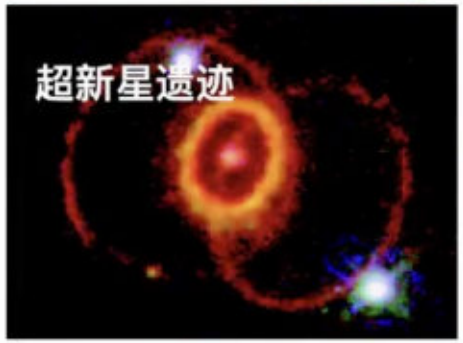
不透明度：恒星演化，中子星大气

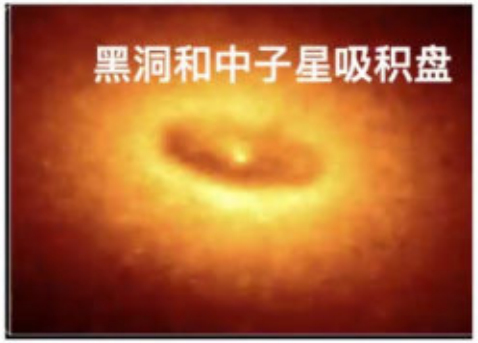
物质的状态方程：行星内部

3. 天体等离子体光谱：恒星冕区
4. 光电离等离子体：黑洞中子星吸积盘
5. 喷流的产生过程：原恒星，星系
6. 流体不稳定性：磁场对其的影响？
7. 无碰撞冲击波：超新星遗迹，宇宙线
8. 磁重联物理：太阳耀斑、空间、吸积盘
9. 磁场产生和放大
10. 湍流等离子体：星系磁场，太阳磁场
11. 粒子加速：宇宙线、磁场
12. 激光核天体物理



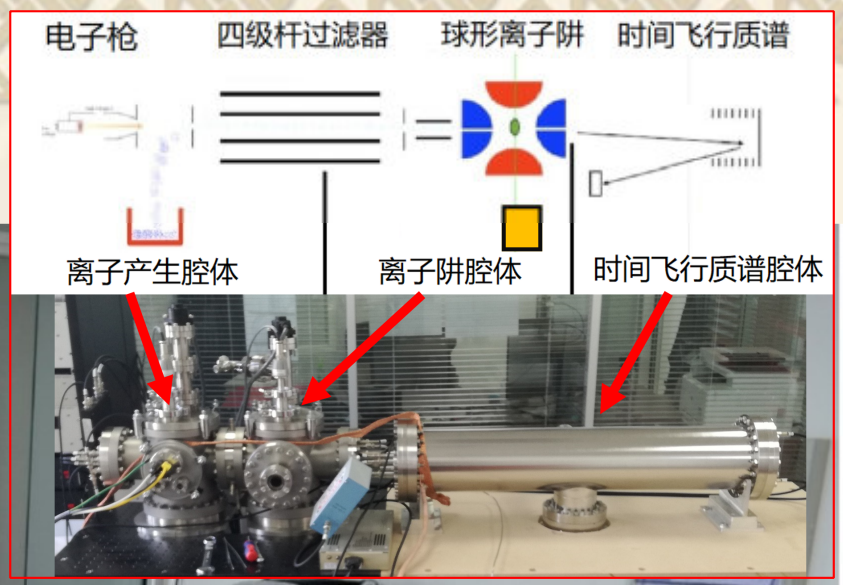


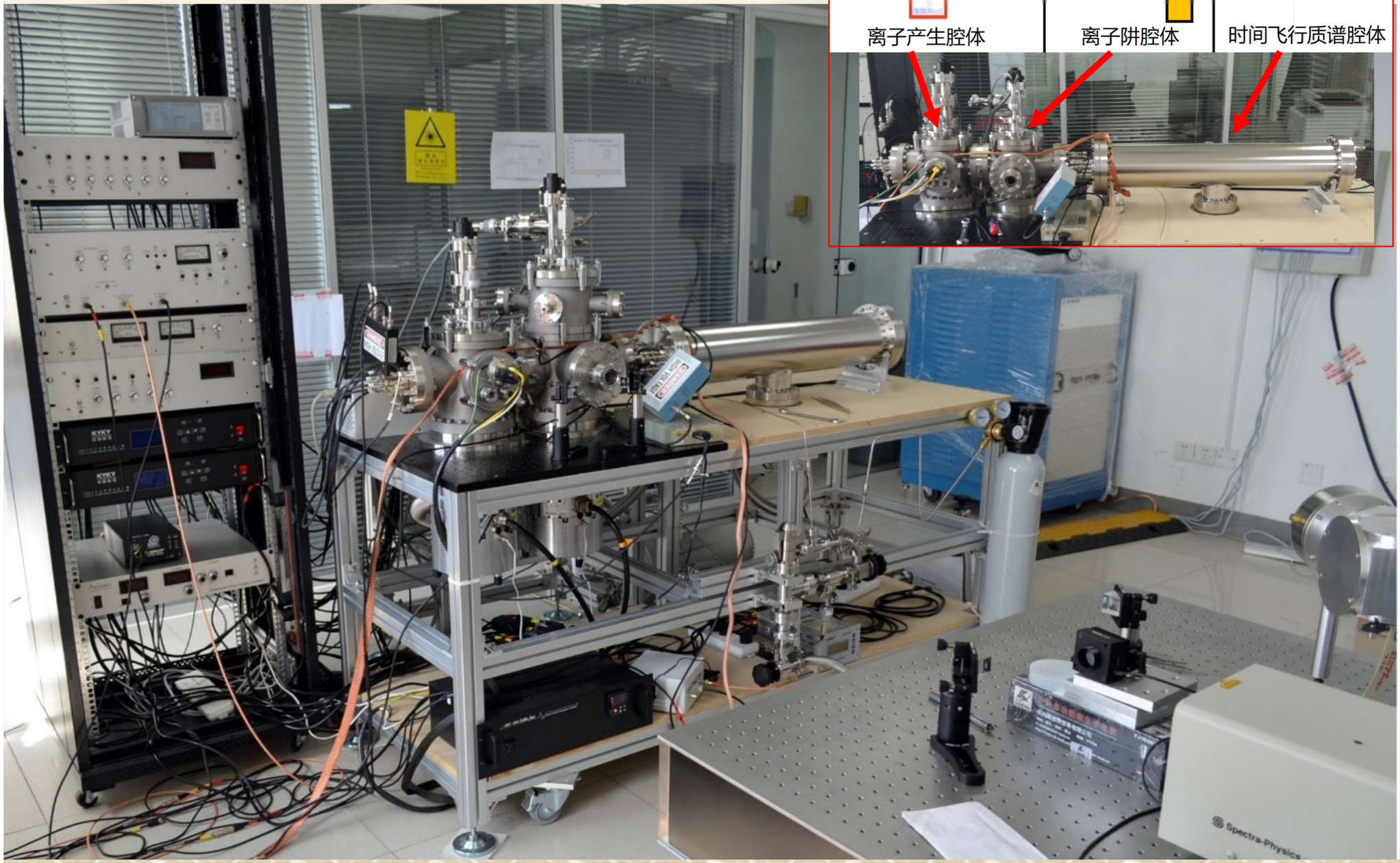




高能量密度
实验室天体物理研究进展
（北京师范大学 仲佳勇）

天体化学实验室

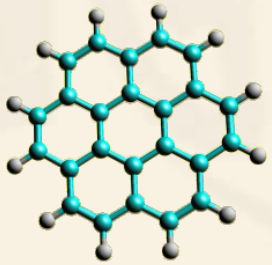

电子枪
四级杆过滤器
球形离子阱
时间飞行质谱
离子产生腔体
离子阱腔体
时间飞行质谱腔体

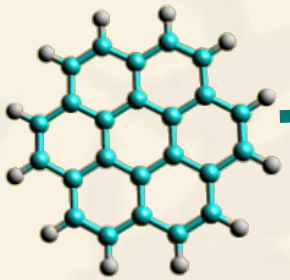

Spectra-Physics

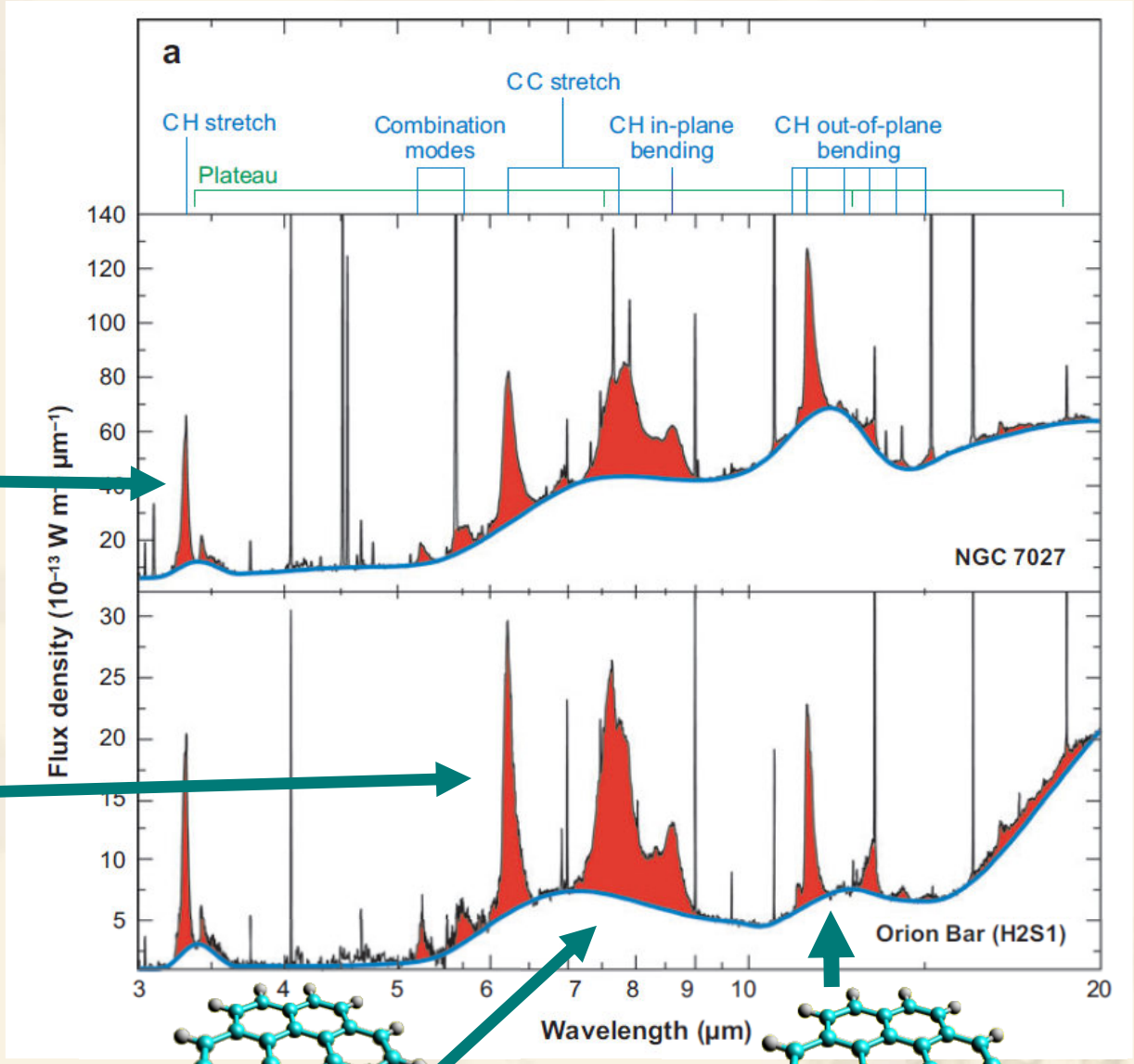
星际大分子的形成和演化研究

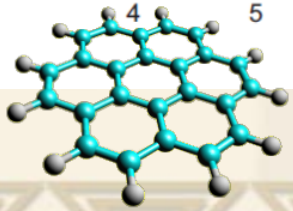
分子星云的红外发射光谱：这些谱带的载体主要是星际大分子（以多环芳香烃化合物为主）

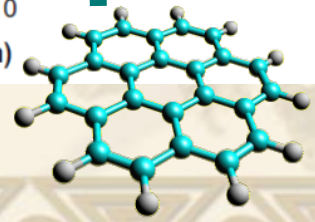
星际空间中发现的最大的分子:C_{60}







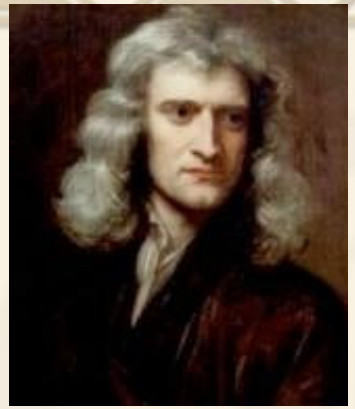




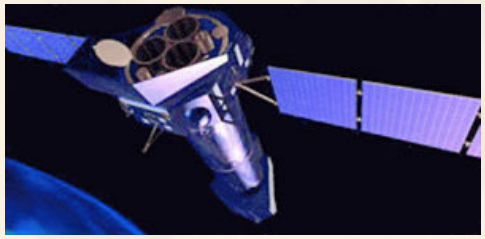
Tielens, A. G. G. M., 2013, Review of Modern Physics, 85, 1021

超高压手段→超级地球的内部过程及其宜居性

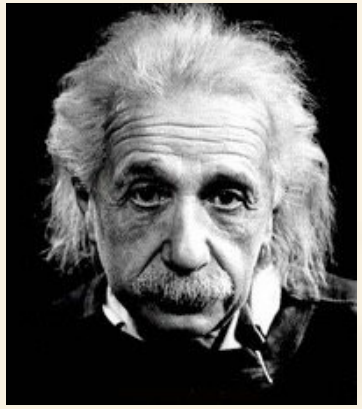
牛顿 → 爱因斯坦

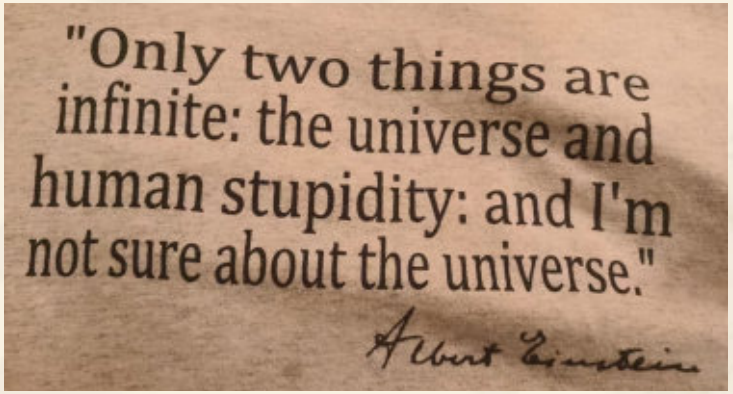


"If I have seen further it is by standing on the shoulders of Giants."
— Isaac Newton, The Correspondence Of Isaac Newton

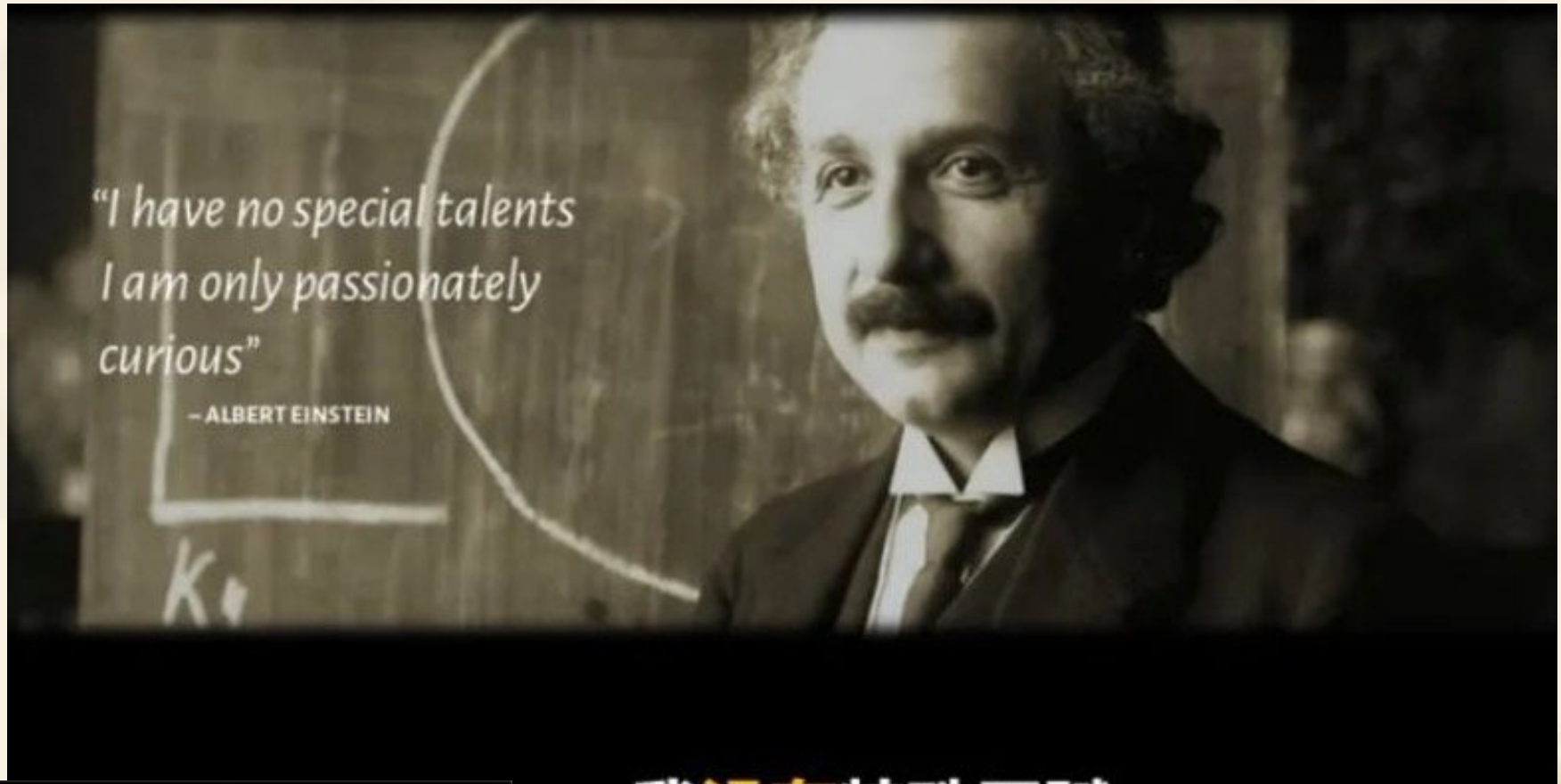


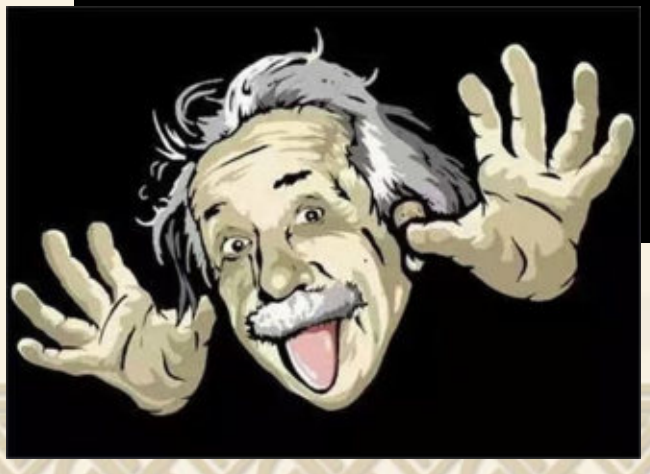
"I do not know what I may appear to the world, but to myself I seem to have been only like a boy playing on the sea-shore, and diverting myself in now and then finding a smoother pebble or a prettier shell than ordinary, whilst the great ocean of truth lay all undiscovered before me."
— Isaac Newton





"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



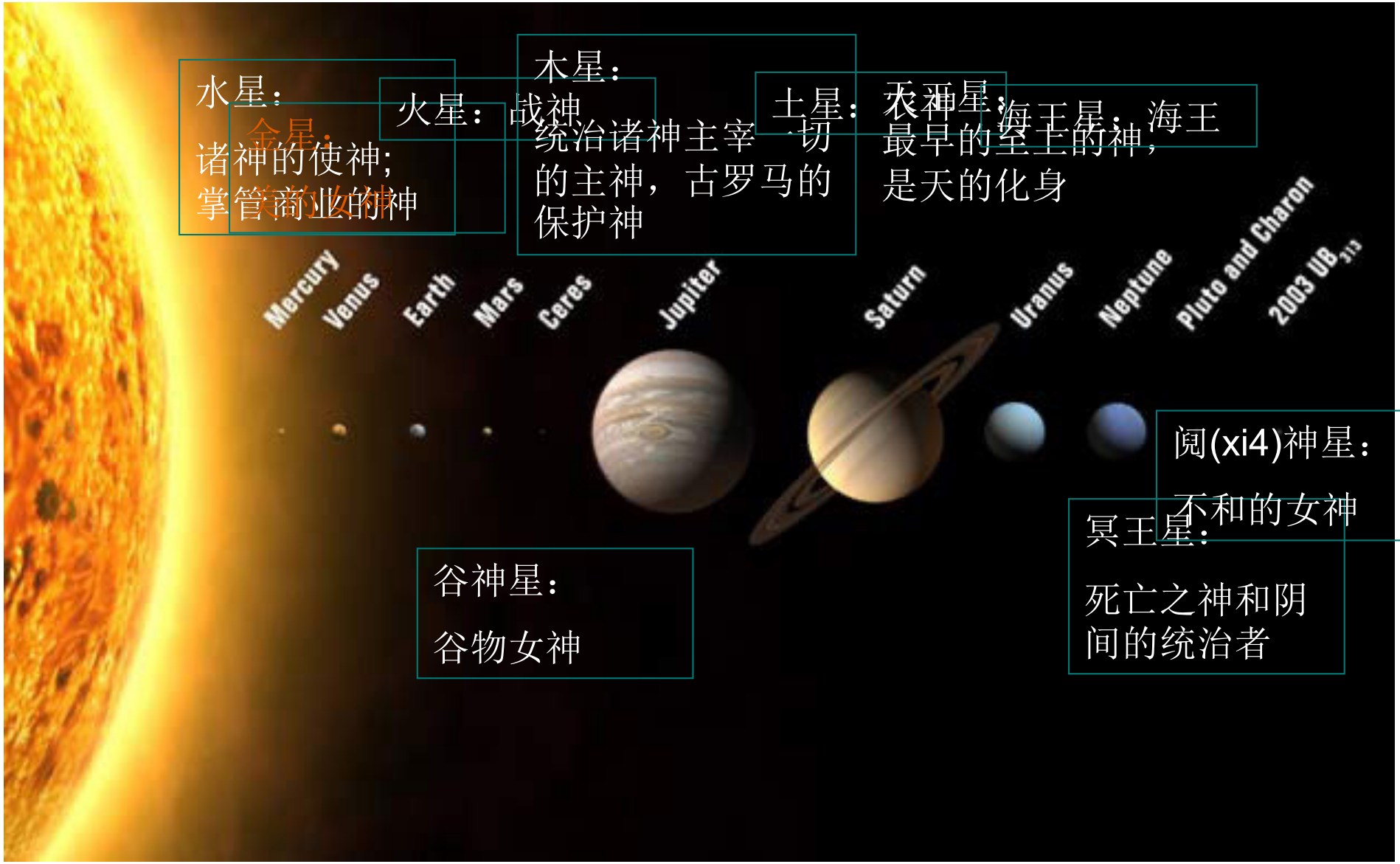


我没有特殊天赋，

我只是极为好奇罢了！

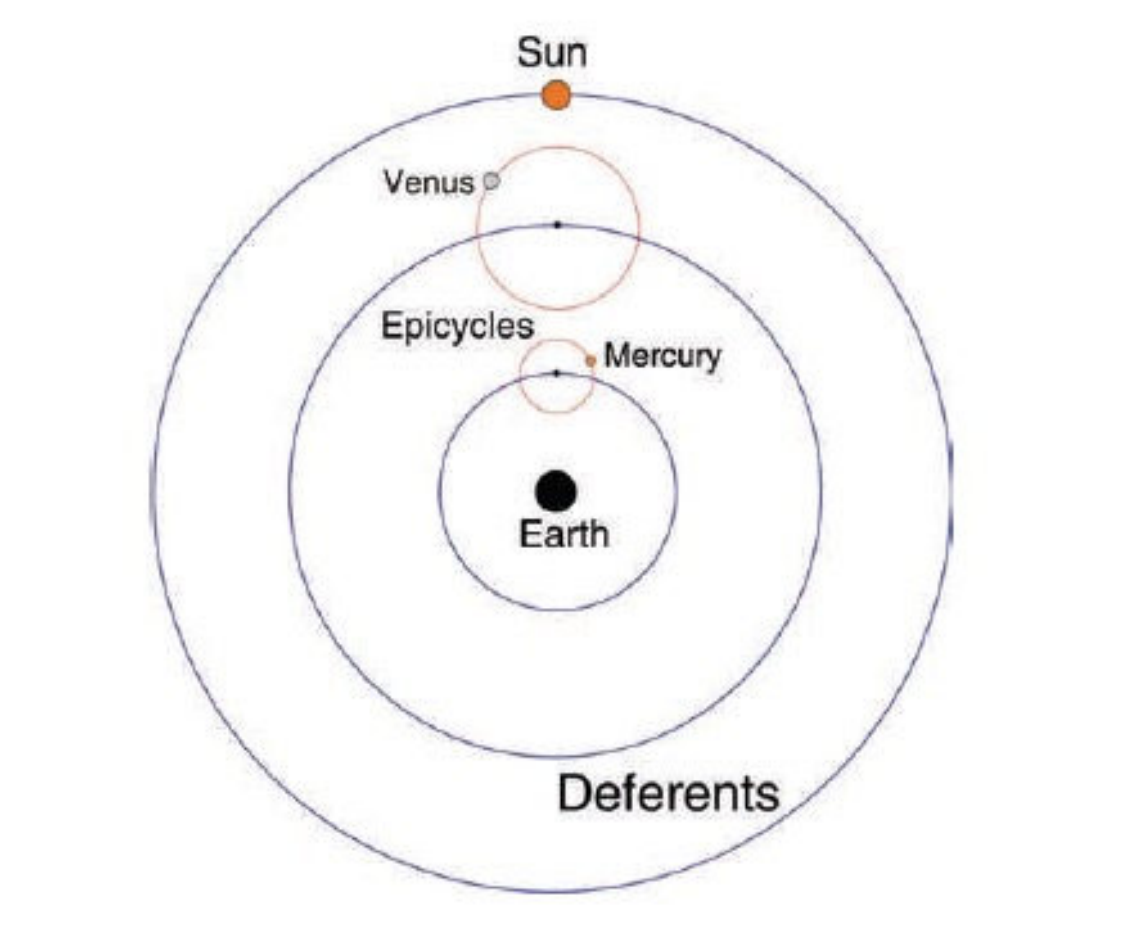
从观测/了解太阳系开始：

❖ Solar system



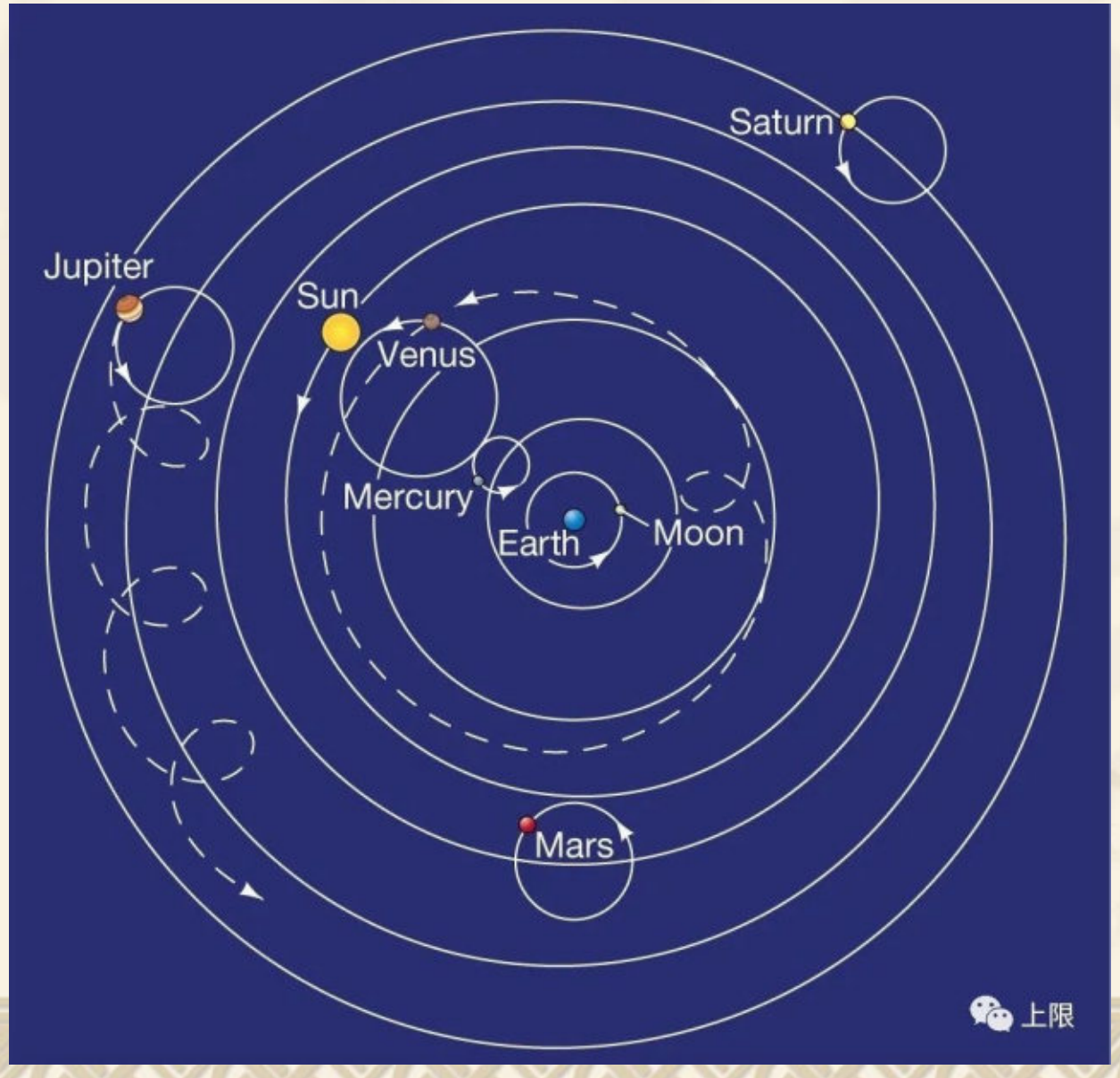
托勒密的地心说

- 本轮（epicycle）
- 均轮（deferent）
- 太阳与水星、金星本轮中心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



地心说中，水星比金星离地球近？

“当古希腊人根据各种观察现象推测出自己居住的大地是一个球时，托勒密就把地心说发挥到了极致，发展出了一套把地球当成为宇宙中心的天文学：太阳绕着地球转，轨道一个圈。五大行星也绕着地球转，轨道成了大圈套小圈，魔力圈上圈。”　　----九维空间



“圆（圈）圆（圈）”
相“抱”
（冤冤相报何时了 :）

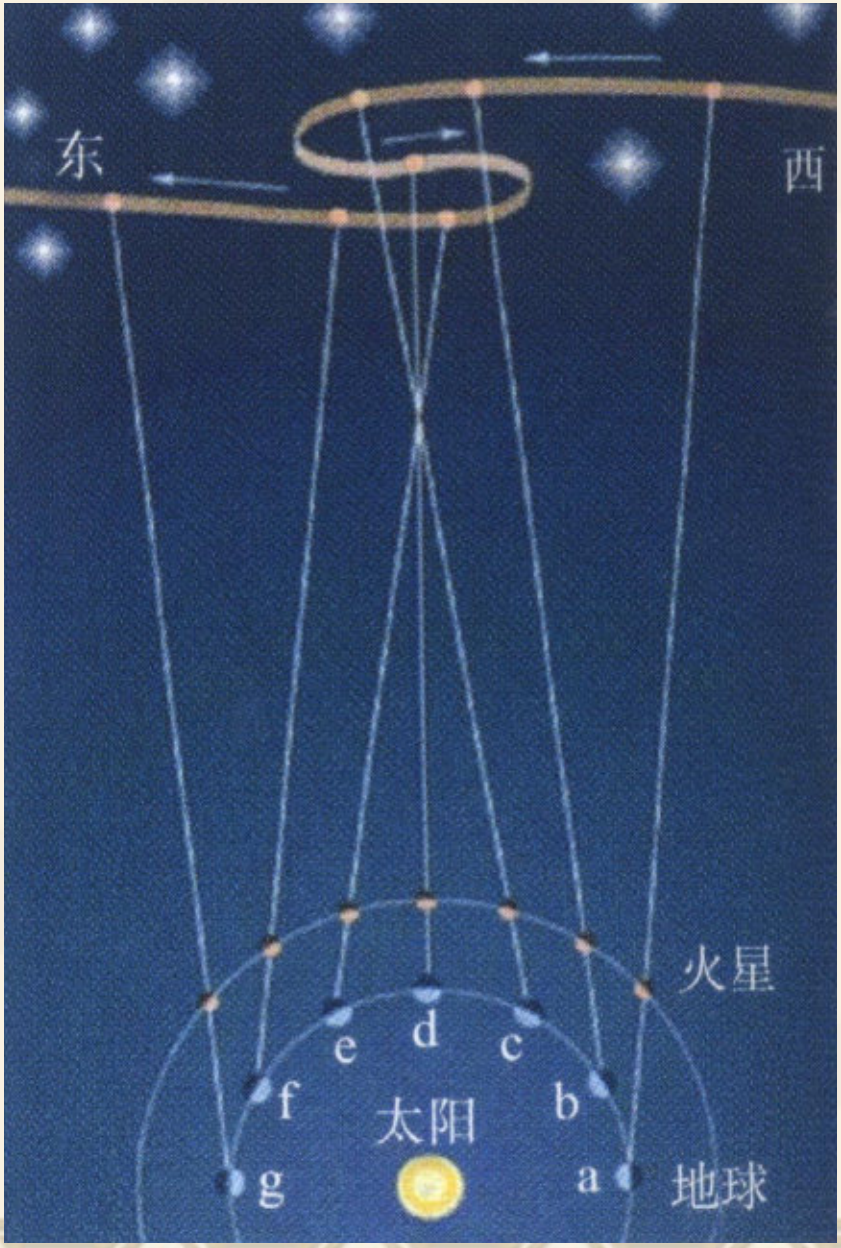
“这个模型修修补补用了一千多年，直到有一天一位叫哥白尼的天文学家无法忍受，第一个站了出来。他发现只要把太阳当成宇宙中心，地球当成太阳的一颗行星，那么五大行星就是正常的椭圆轨道，不再需要圈上加圈。哥白尼的日心说对人类中心论是一个致命的打击，却让人恍然大悟，布鲁诺因宣传它而被烧死，伽利略也因支持它而坐牢。

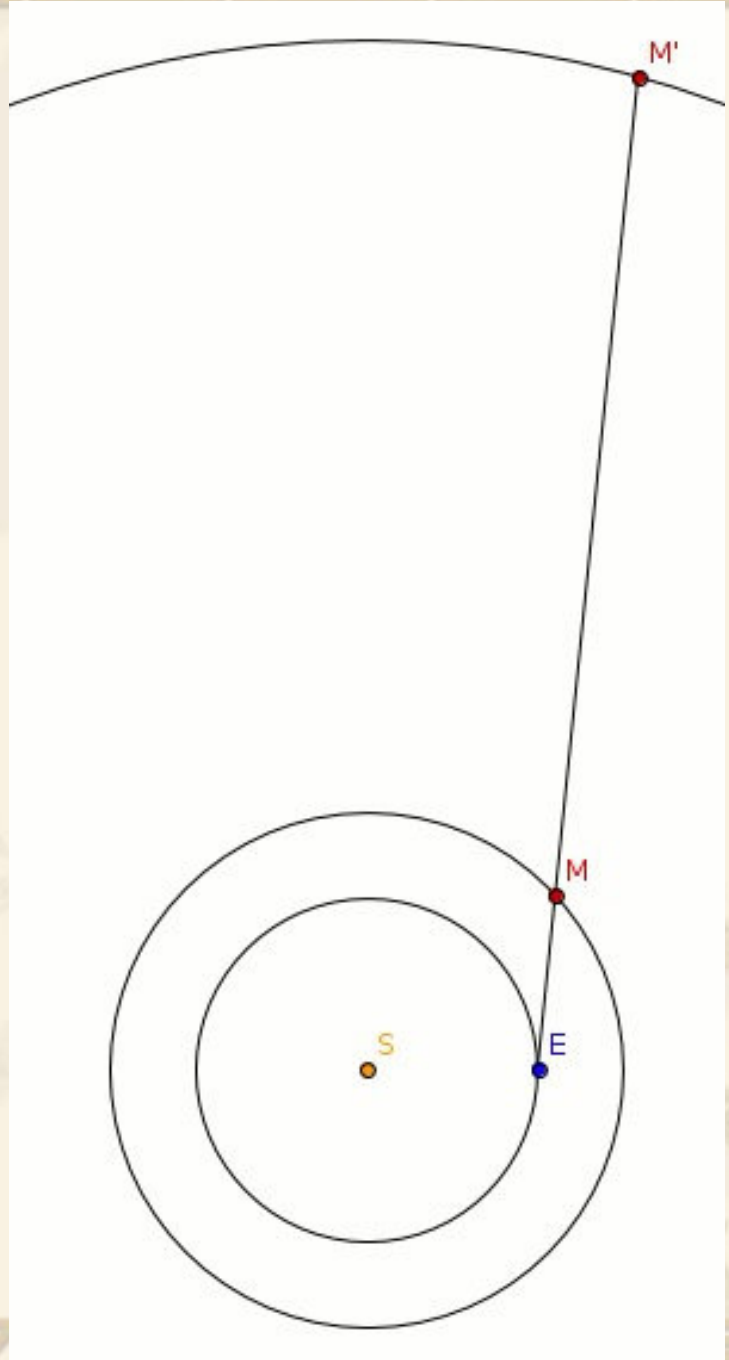
此后的天文学迅速发展，进一步发现太阳也不是宇宙中心，而是银河系里一颗普通的行星，人类离“天选之子”的地位越来越远。最终在达尔文等人的双重打击下，人类发现自己在地球的生物里也不再是“天选之子”，而是自然演化而来。

为了纪念哥白尼，宇宙学上把人类的去中心化称为哥白尼原理——即整个宇宙各个地方都是平庸的，没有任何一个点是特殊的。”

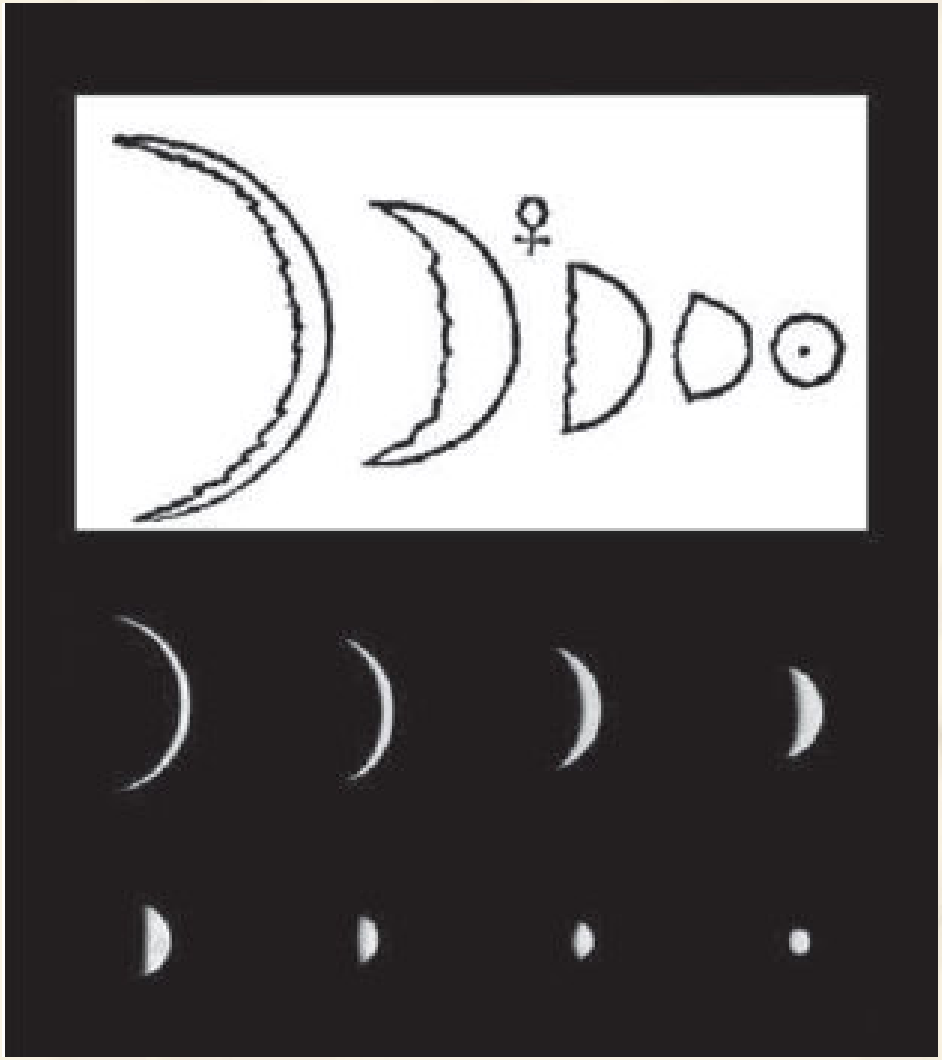
---九维空间

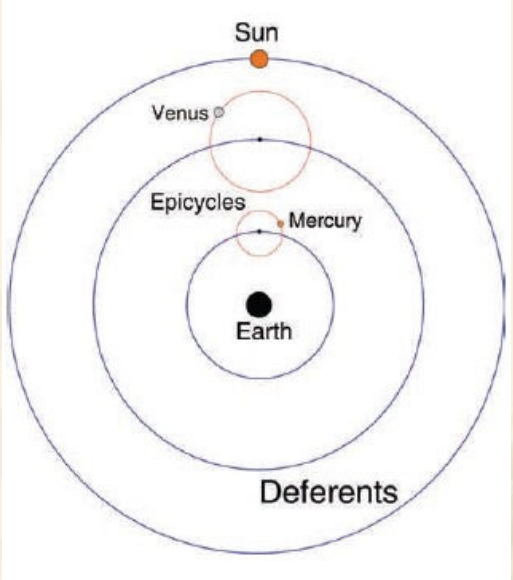
日心说：行星的退行





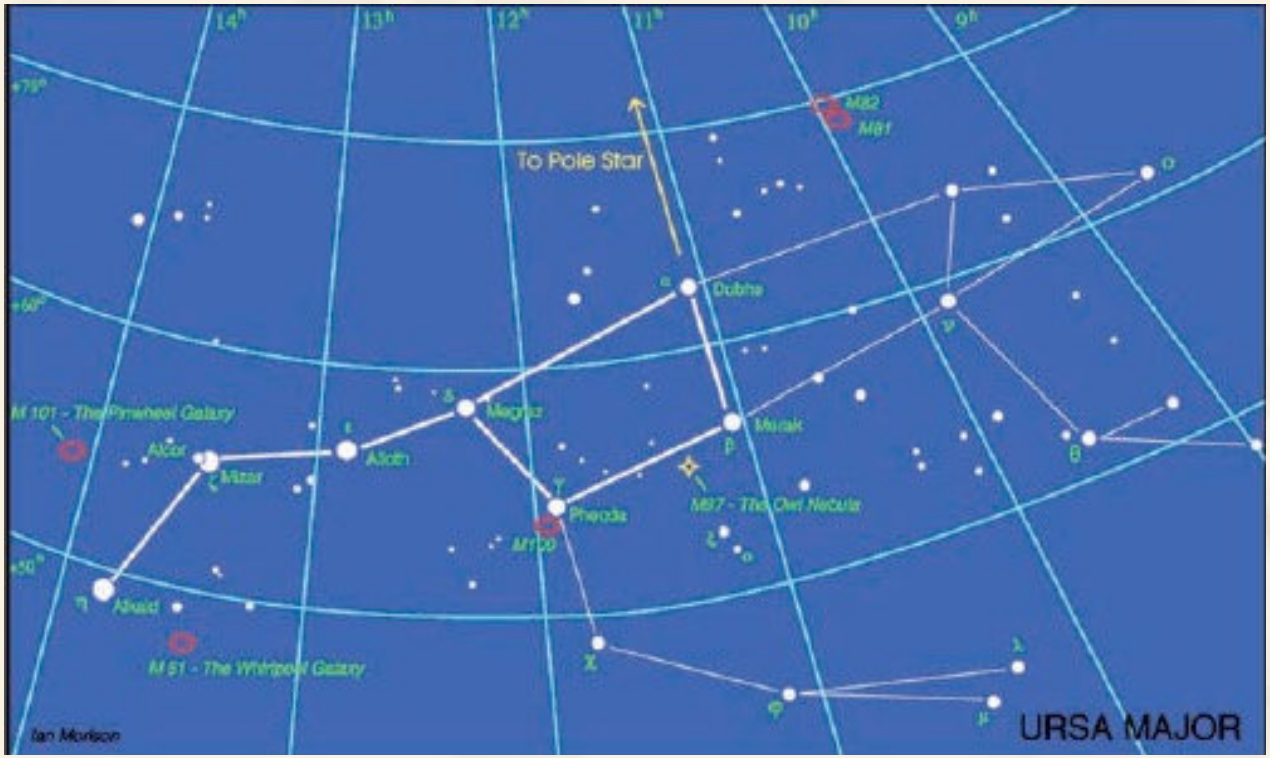
Galileo给出日心说证据：金星的相





星座、星等（ **stellar magnitudes** ）与天球（ **celestial sphere** ）

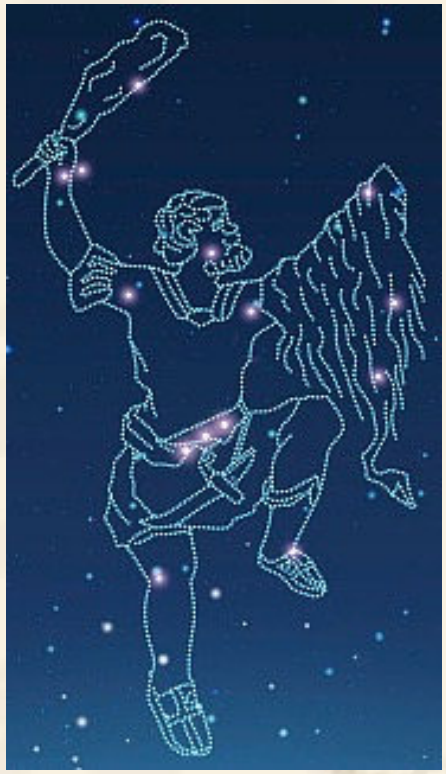
❖ 星座

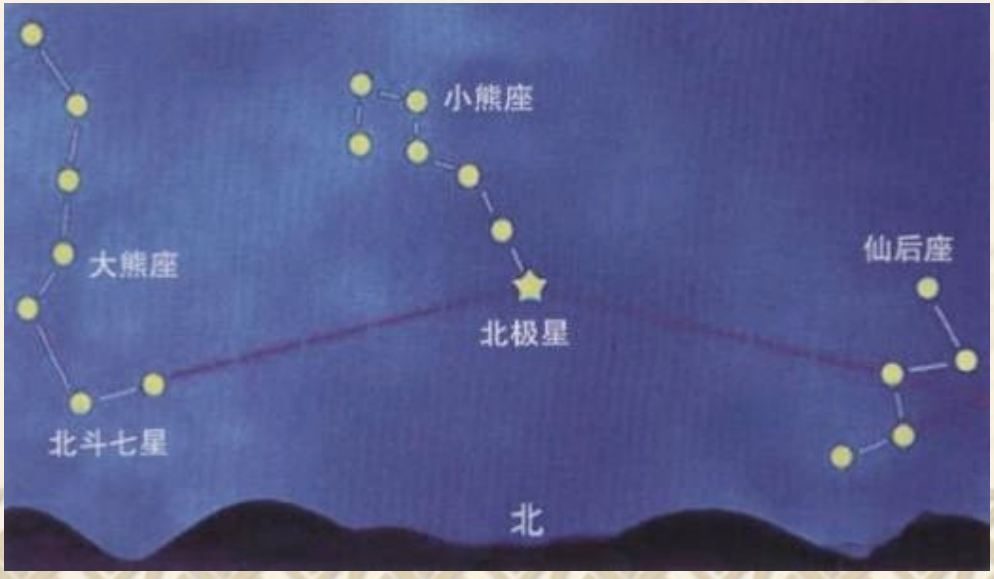


大熊座

天罡北斗阵

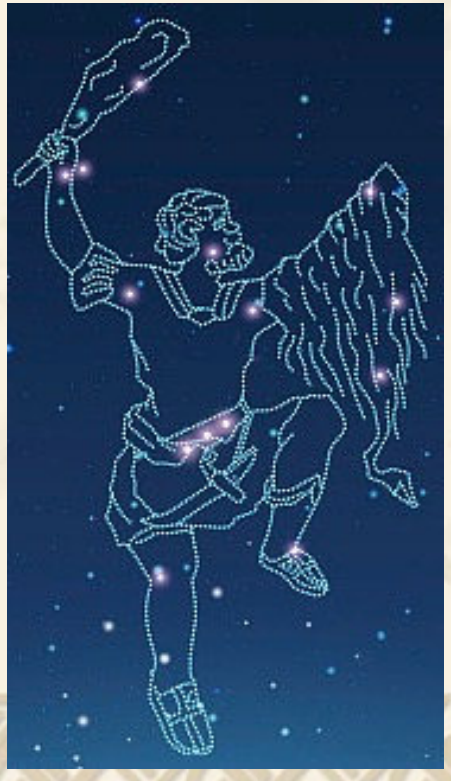
- 星座由亮星构成：
  - Orion：猎户座
  - Cassiopeia：仙后座
  - Taurus：金牛座
  - Cygnus：天鹅座
  - Lyra：天琴座
  - Plough（Big Dipper）：北斗七星





如何找北极星？

ORION



它是要爆炸了吗？要知道，超新星爆发是宇宙中最为壮观的现象之一。

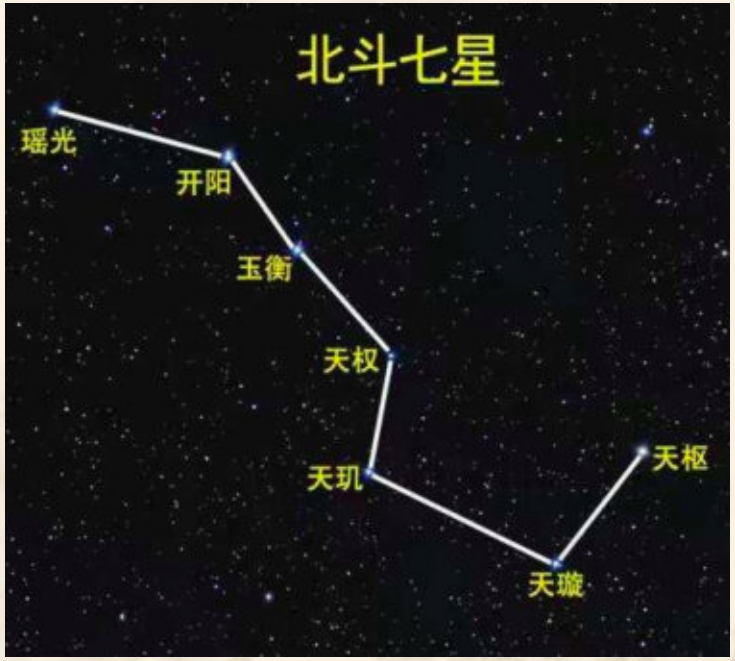
参·宿·四

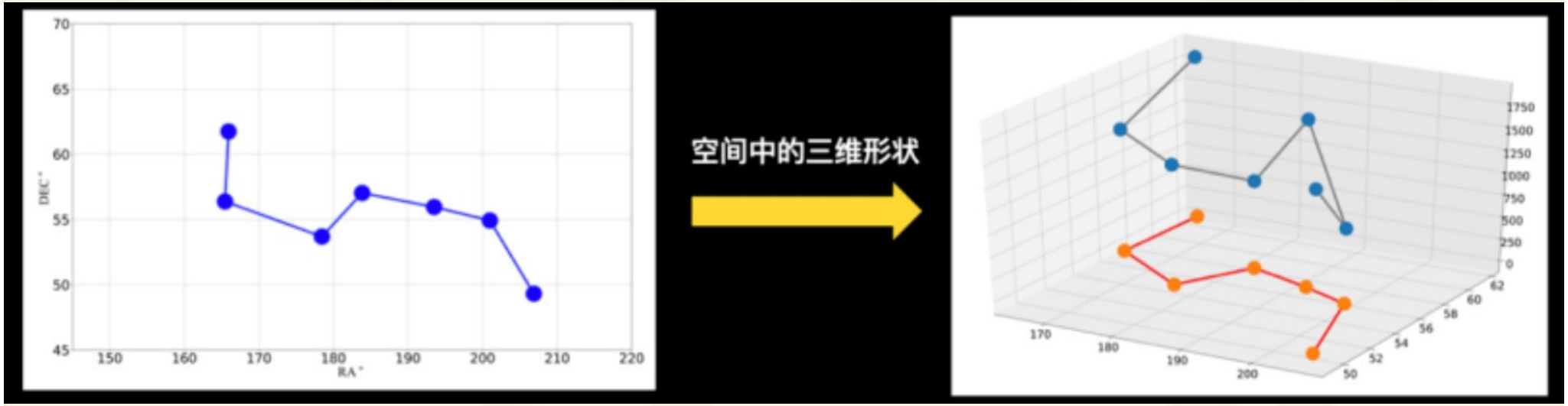
红超巨星参宿四
致暗之谜

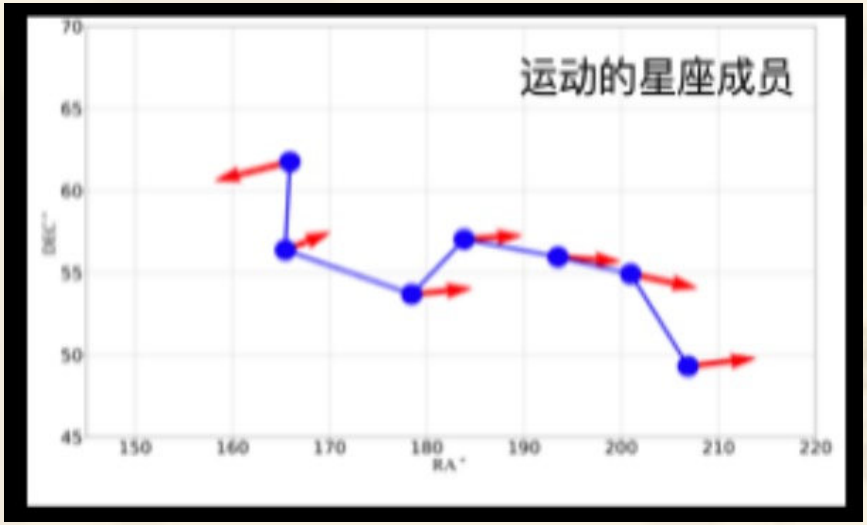
d=430光年
已知最大恒星之一

图1 夜空下的猎户座，图中最明显的红色恒星即为参宿四，位于猎户座的左肩。图片来源：NASA/Matthew Spinelli

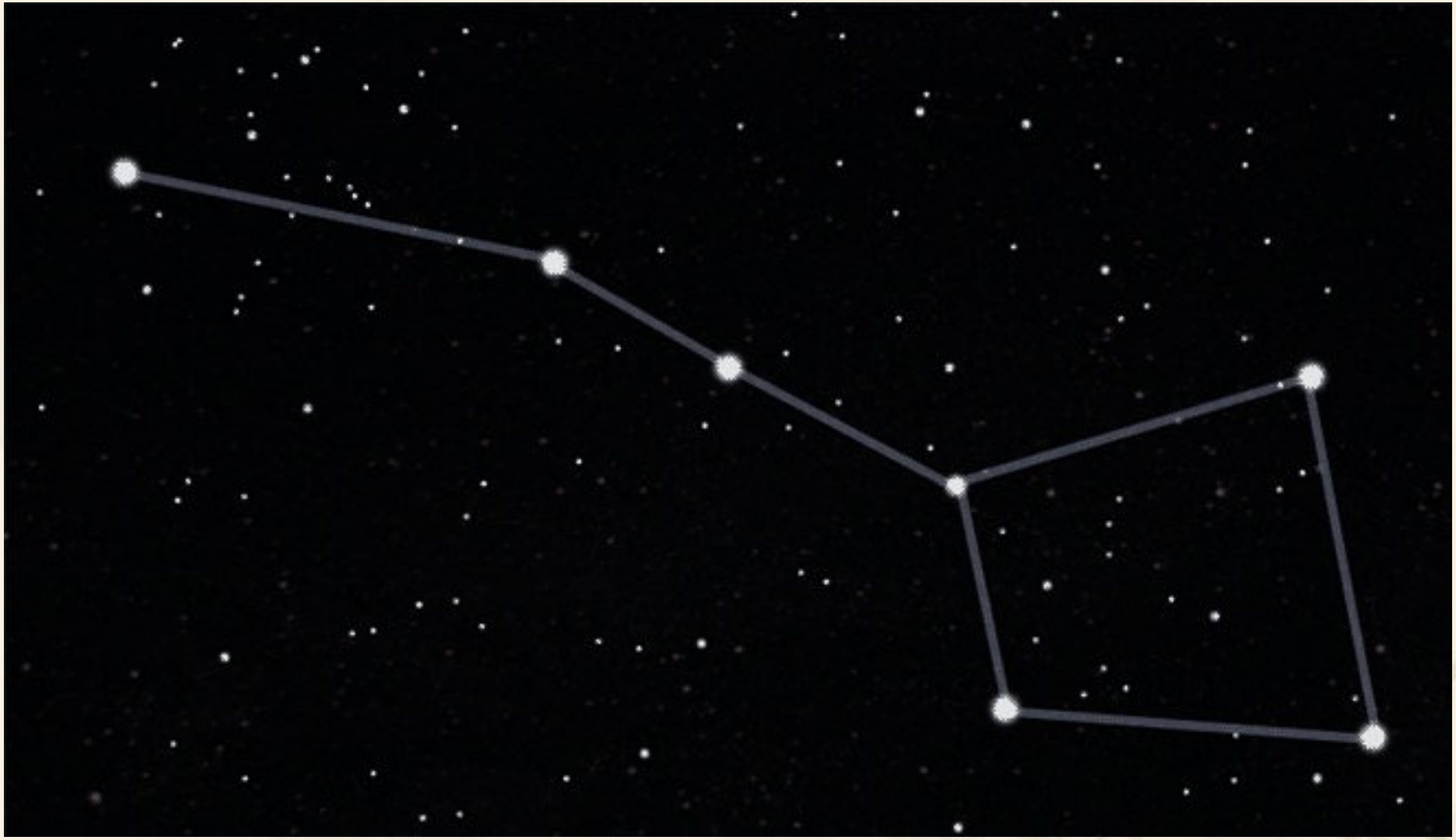
大熊星座（图片来源：hubblesite.org）







（廖石龙 中国科学院上海天文台）



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

敦煌壁画中的十二星座

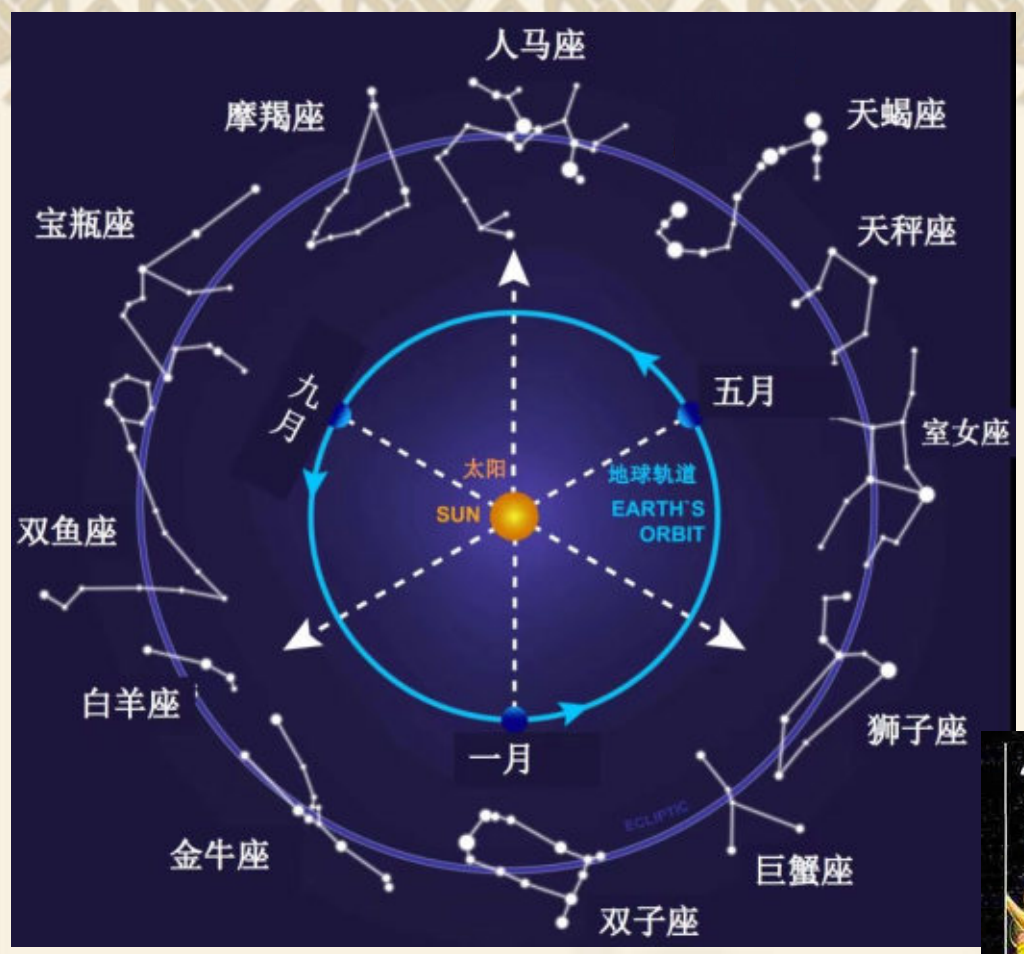
十二宫（zodiac）一词来自希腊语zodiakos，意思是动物园。在希腊人眼里，星座是由各种不同的动物形成，这也就是十二个星座名称的由来。在天文学上，以地球为中心，太阳环绕地球所经过的轨迹称为“黄道”（太阳轨迹所在的球称为天球）。黄道宽18度，环绕太阳一周为360度，黄道面包括了所有行星运转的轨道，也包含了星座，恰好约每30度范围内各有一个星座，总计为十二个星座。

在历法学上，黄道十二宫的划分本身是一种太阳历，以春分点为起点，太阳在黄道带上视运动每运转30度为一宫，其实是一个太阳月。需要指出的是，黄道十二宫的宫名是借用附近的星座名字，就像是中国干支历法当中的十二地支借用十二种动物的形象一样，与实际的星座是不同的。黄道十二星座在古巴比伦时代就已定名，巴比伦人又把整个黄道从春分点开始均分为12段，每段称为一“宫”，各以所在的星座命名，称“黄道十二宫”。

这些概念后来被古希腊人吸纳，到公元前后，“黄道十二宫”概念从希腊传入印度，6世纪随佛经进入中国。目前见到的关于黄道十二宫汉译名最早的文献是《大方等日藏经》，这是隋开皇初年天竺法师那连提耶舍从梵文翻译的。译文将“白羊”和“金牛”译作“特羊”、“特牛”，“特”是“雄性”的意思；“双子宫”被释为男女二人，大约是“在天愿为比翼鸟”的联想，所以被译为“双鸟”；“人马宫”是半人半马射箭的造型，梵文原文为“弓”，故译作“射”；“宝瓶”是人倾斜水瓶的形象，故译为“水器”；至于羊身鱼尾的动物形象称“摩竭”，则是梵文makara的音译(后来为了切合羊身的形象改为羯，羯是阉割过的羊)，这也是后来88星座中唯一保留音译的星座。

到明清时期，黄道十二宫的译名基本稳定，除“阴阳”、“双女”外，其他与现用名完全相同。直到康有为的《诸天讲》，才将“阴阳”“双女”分别译为“双子”“处女”，与现代所用名更为接近。

莫高窟第61窟于五代时期开凿，甬道则是后代重修绘制的，学界一说是元代，一说是西夏时期。虽然甬道壁画中的黄道十二宫距今时久，但现在依然能看的非常清楚。


人马座
摩羯座
天蝎座
宝瓶座
天秤座
九月
五月
室女座
太阳
SUN
地球轨道
EARTH'S ORBIT
双鱼座
白羊座
狮子座
一月
ECLIPTIC
金牛座
巨蟹座
双子座

ARIES MOO
TAURUS ALDEBARAN
GEMINI ARES
CANCER DEATHMASK
LEO AIORIA
VIRGO SHAKA
LIBRA ROSHI
SCORPION MIRO
SAGITTARIUS AIOROS
CAPRICORN SHURA
AQUARIUS CAMUS
PISCES APHRODITE

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将裸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

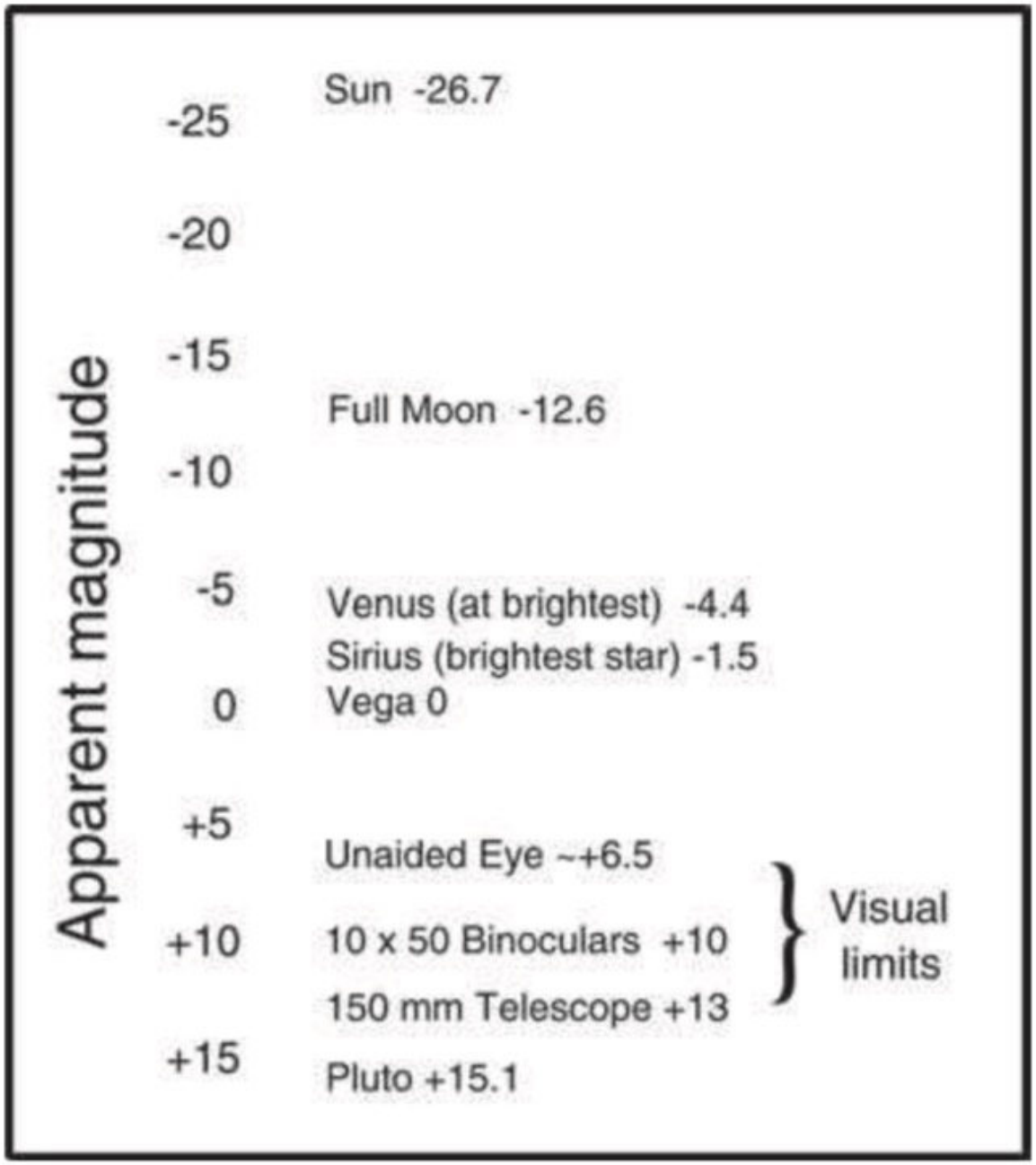


Figure 1.5 Some examples of apparent magnitudes.

❖ 星等的计算

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

$$\begin{aligned}
\mathrm{Log}_{10} R &= \mathrm{Log}_{10}(2.512) \times \Delta m \\
\mathrm{Log}_{10} R &= 0.4 \times \Delta m \\
\Delta m &= \mathrm{Log}_{10} R / 0.4 \\
\Delta m &= 2.5 \times \log_{10} R
\end{aligned}$$

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

North Celestial pole

(Sun at Autumnal Equinox)

Dec

Earth

Dec=0

Celestial Equator

RA

First Point of Aries
(Sun at Vernal Equinox)

Ecliptic

地球经纬度：旋转
赤经与赤纬：固定

Dec=-90

South Celestial pole

赤纬(DEC):Declination

赤经(RA): Right Ascension

黄赤交角：23.5度

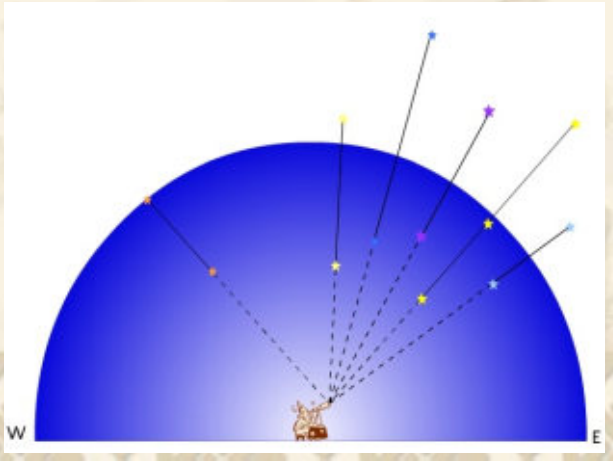
本初子午线(Prime Meridian):

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

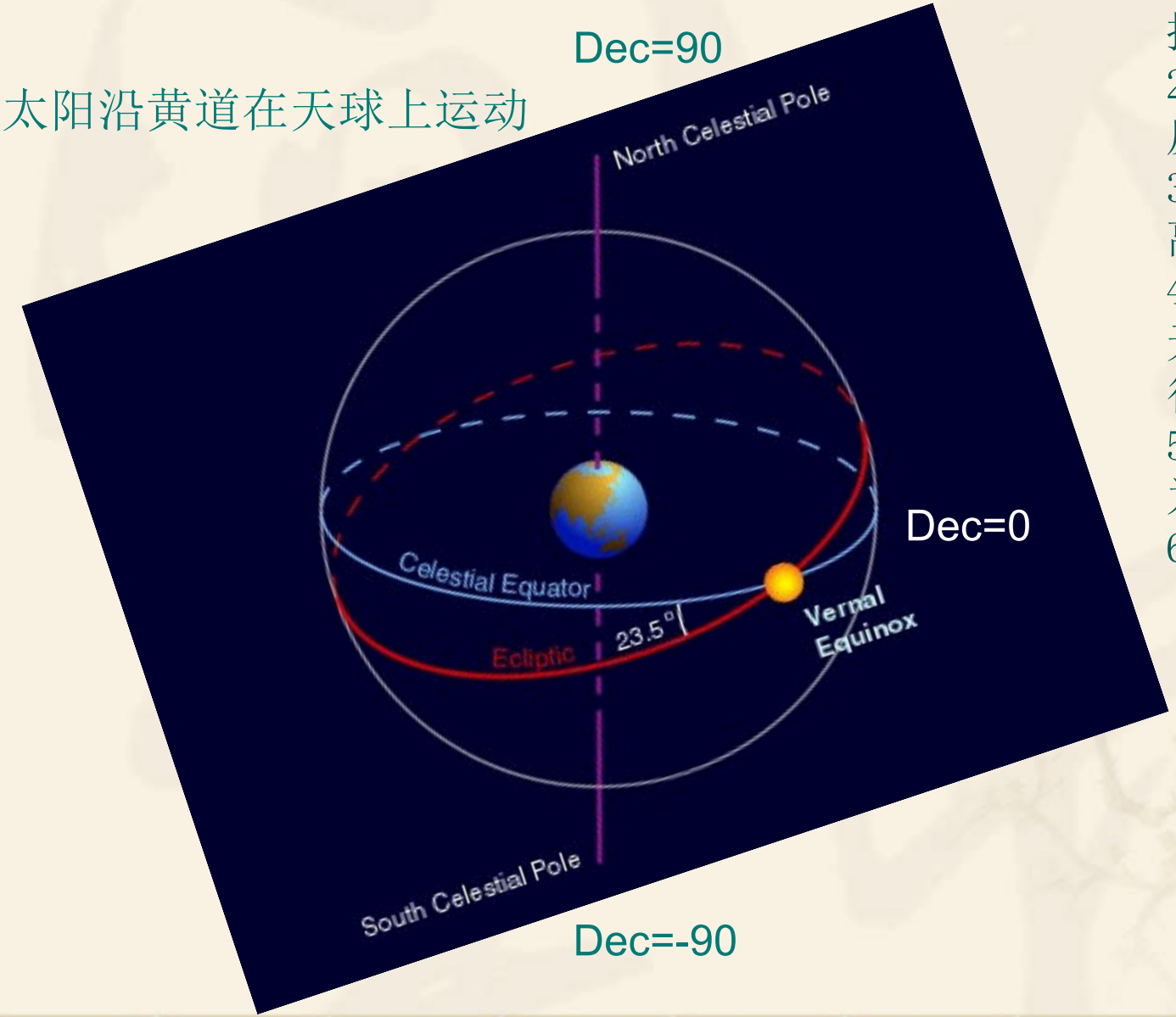
24h=360度

1度=60角分=3600角秒



❖ 天球坐标系

太阳沿黄道在天球上运动



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，任意长为半径

6、观测者“由内向外”看

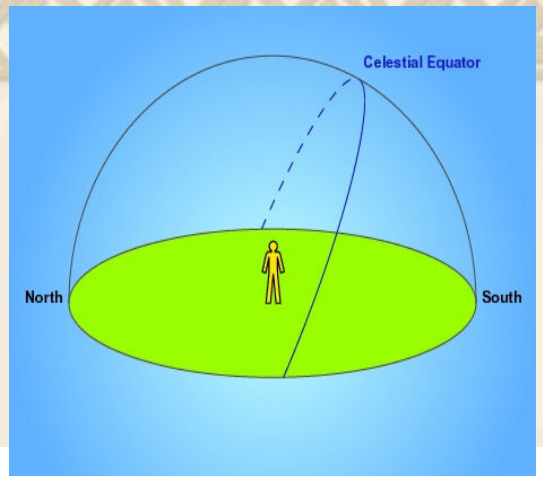
RA=恒星时，一般以时间为单位

24h=360度

太阳运动：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。



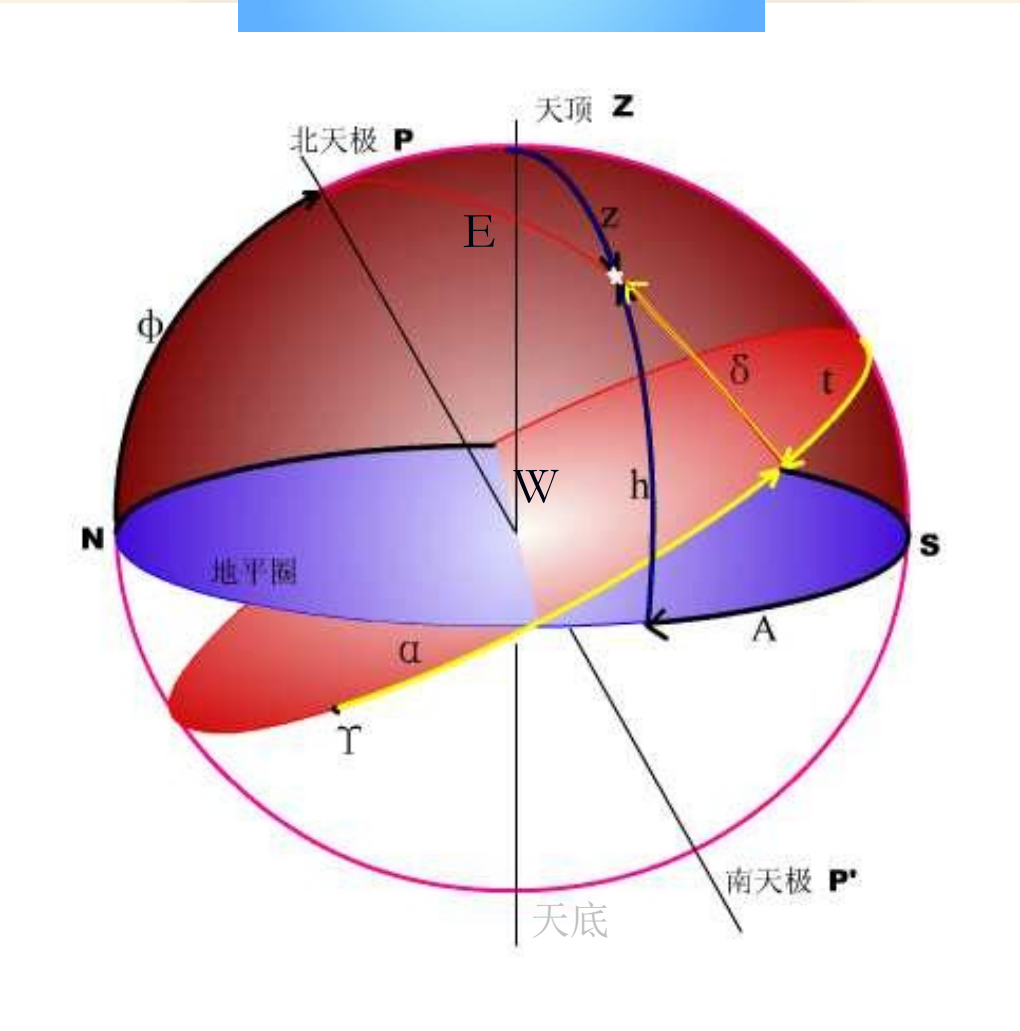
天底(nadir)：Z'，与天顶相对的另一交点为天底。

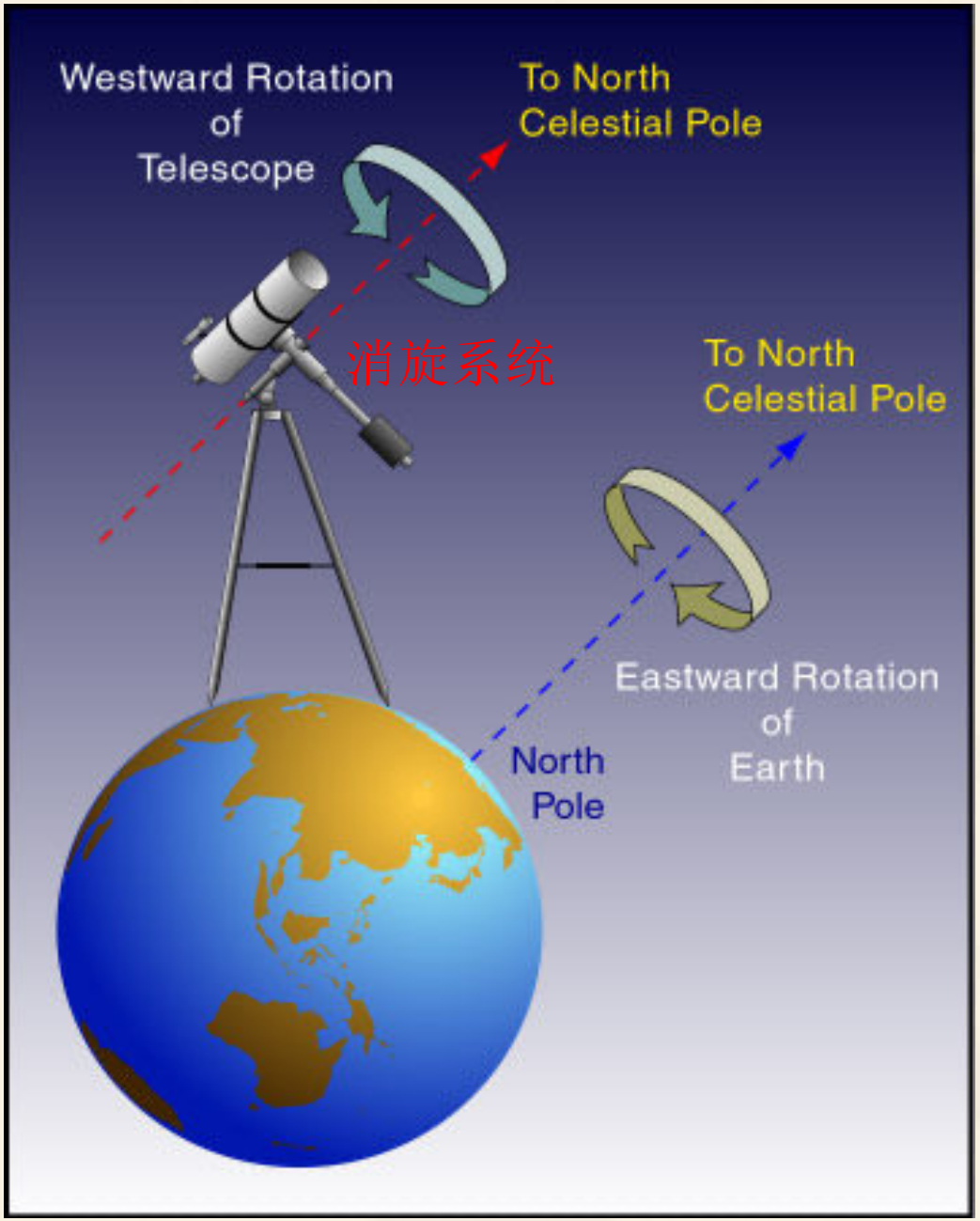
真地平(horizon)：过天球中心做一与铅垂线垂直的平面，与天球相交的大圆为真地平（地平圈）。

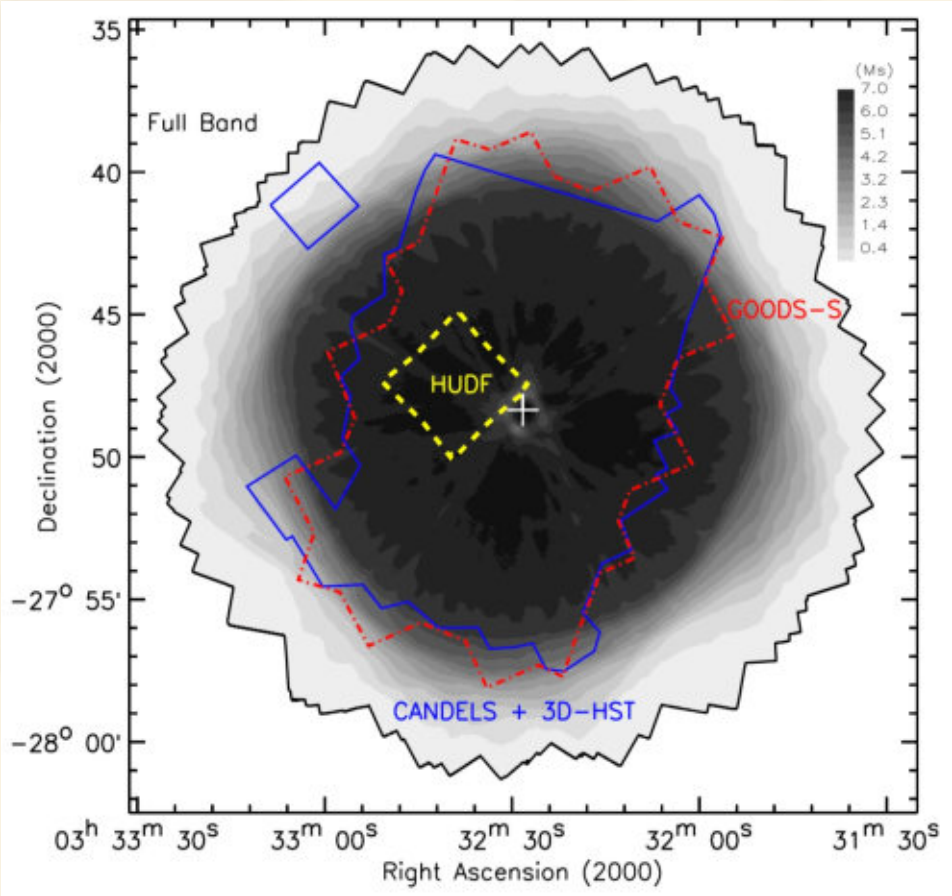
天子午圈：过天极和天顶的大圆。

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°-h：天顶距
alpha：赤经
delta：赤纬

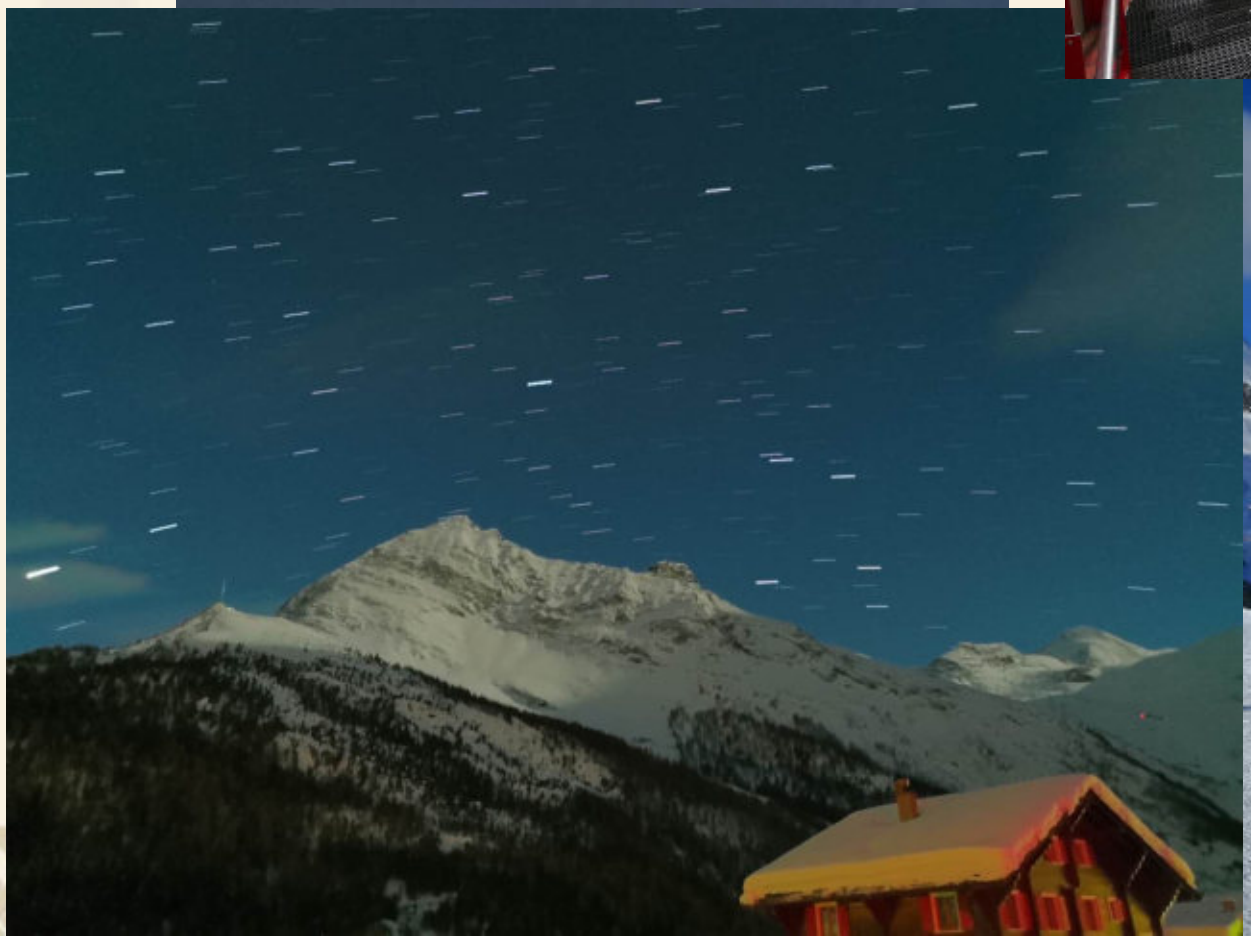


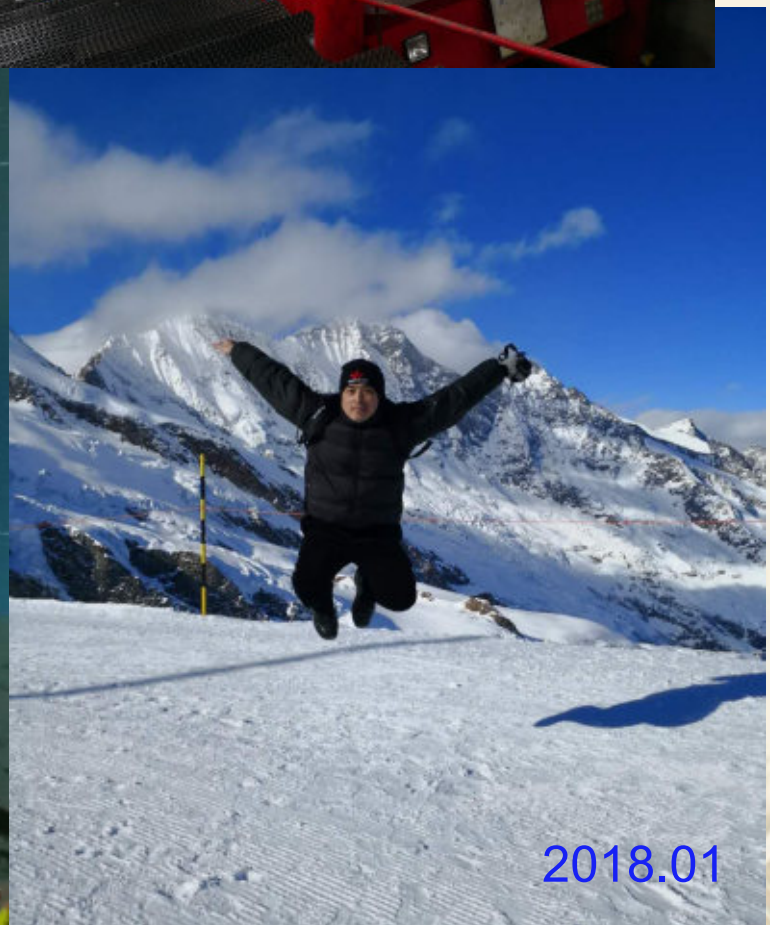

Westward Rotation
of
Telescope
To North
Celestial Pole
消旋系统
To North
Celestial Pole
Eastward Rotation
of
Earth
North
Pole


Full Band
(Ms)
7.0
6.0
5.1
4.2
3.2
2.3
1.4
0.4
GOODS-S
HUDF
CANDELS + 3D-HST
35
40
45
50
−27° 55'
−28° 00'
Declination (2000)
03h 33m 30s
33m 00s
32m 30s
32m 00s
31m 30s
Right Ascension (2000)

FREIE FERIENREPUBLIK
RÉPUBLIQUE LIBRE DES VACANCES
FREE REPUBLIC OF HOLIDAYS
Saas-Fee

Saas-Fee




2018.01

美丽的星轨（邓李才 国家天文台）

❖ 岁差（Precession，地球的进动）

进动周期：~26000 年（星表：指明时间“J2000.0”）

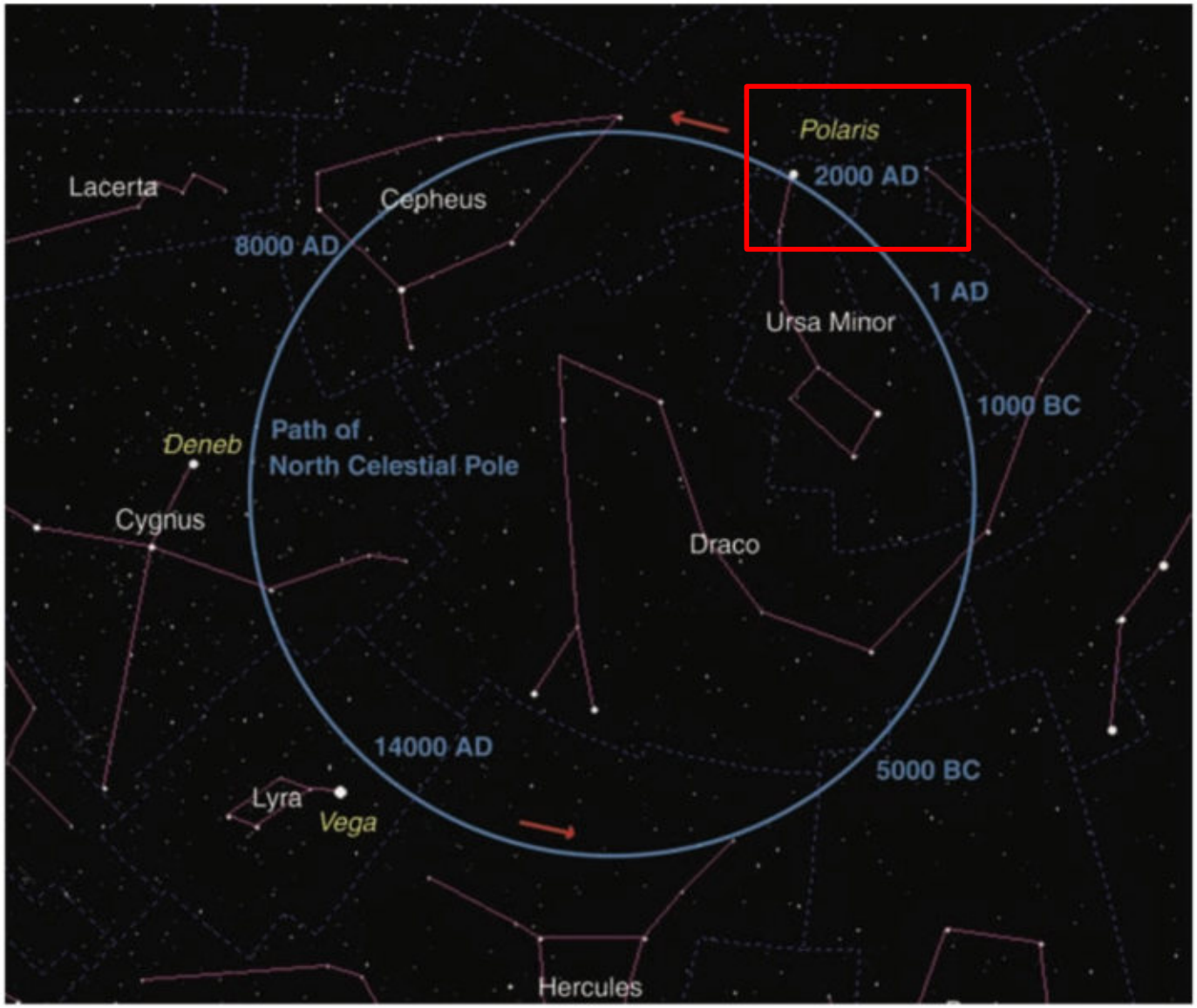


Figure 1.7 The path of the North Celestial Pole through the heavens.

日长变化中的新信号 ——上海天文台在地球自转变化研究中取得重要进展

（中国科学院上海天文台）

2020年5月10日

昼夜交替，日月星辰东升西落，背后的原因是地球自西向东的自转。地球围绕一条通过地心、连接南北极的假想轴转动，这就是地球自转，那根假想轴被称作自转轴。

地球自转一直是恒定的吗？答案当然是否定的！**地球的自转一直在变化，而且变化得相当复杂，既有岁差-章动，还有极移和日长变化，物理上用自转轴指向参数（Earth Orientation Parameters; EOP）表示。**它们都反映了地球的整体运动及其随时间变化的重要信息。EOP被认为是除地震学之外，另一种研究地球深内部物理学的重要手段，是天文学为研究地球内部而特制的“望远镜”，**一直是科学家们重点测量和研究的对象之一。**

近日，中国科学院上海天文台天文地球动力学研究中心地球自转变化课题组、中国科学院行星科学重点实验室的科研人员在EOP参数之日长变化研究方向取得了新进展，**首次发现了日长变化中存在显著的约8.6年周期的振幅增强信号，并首次发现该振荡的极值时刻与地磁场快速变化的发生存在密切的对应关系。**

该团组研究结果表明，**日长亚十年变化中实际存在两个主成分的周期信号，周期分别为6年及8.6年。这两个信号的叠加可以很好地解释观测到的日长亚十年变化的时频域特征。**前人工作未能澄清日长亚十年变化的不同物理起源问题，他们的研究表明，**日长变化中周期为约8.6年的信号很可能与液核表面赤道附近的扭转阿尔芬波振荡有关。**

地球内部充满磁场，如果将磁场的磁力线想象成一根根琴弦，当磁场收到扰动时，磁力线这些琴弦就会振荡，振荡会沿着磁场传播出去，便形成了阿尔芬波。当磁力线聚集成一个个称作‘磁流管’的管状结构时，在磁流管中传播的阿尔芬波就是扭转阿尔芬波。该扭转波向外传播，与地幔发生耦合作用，从而导致日长中出现同样周期的波动信号。研究者们预测在最近的1~2年内很可能会有一次新的地磁急变事件发生。

“我们的工作否定了目前国际上已被广泛接受的日长变化亚十年周期信号中仅存在周期为6年的信号的观点，**我们首次发现了日长亚十年变化中存在显著的约8.6年周期的振幅增强信号，也阐明了该振荡的极值时刻与地磁急变的发生之间存在密切的对应关系。**”段鹏硕总结说。

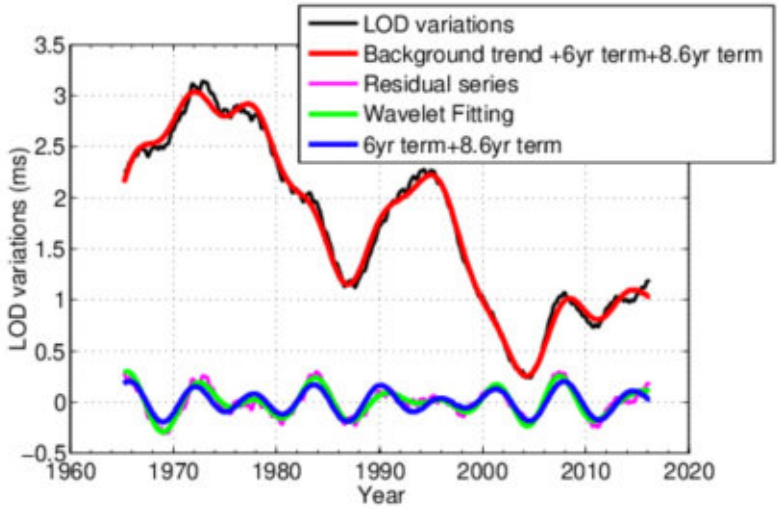


图1. 利用本文所提方法(NMWT+BEPME)提取的日长亚十年振荡结果（红线）与原始信号（黑线）的比较：两曲线总体上非常吻合，表明日长亚十年变化特征可以很好的由6年和8.6年两种频率信号的叠加解释

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（秒的定义）
- 时间方程： GMT和格林尼治天文台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），由于地球公转，所以恒星日比太阳日短一些，为23h56m4.09s（赤经以恒星时而非太阳时为单位）

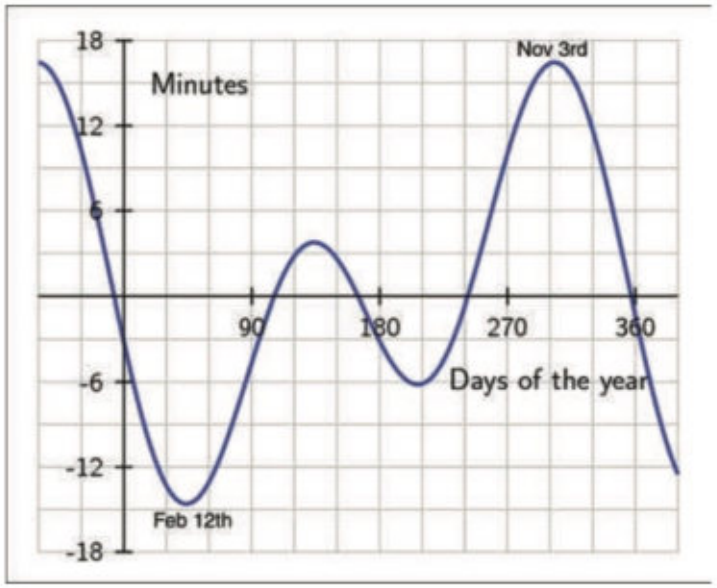
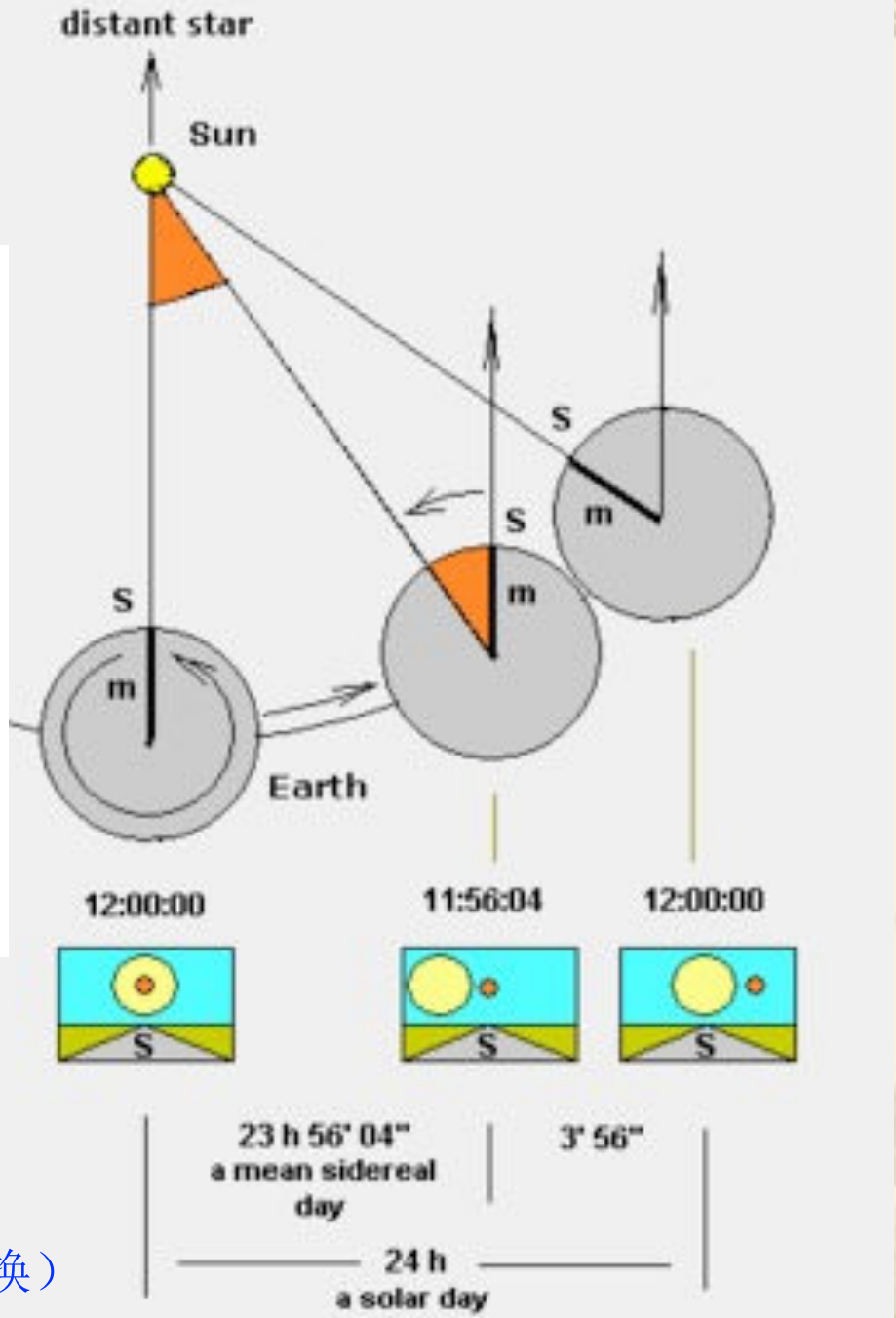


Figure 1.8 The 'Equation of Time' – the difference between GMT and Local Solar Time at Greenwich Observatory. Image: Wikipedia Commons.



RA使用恒星时
（注意太阳时与恒星时的转换）

叶叔华：从“北京时间”到浩瀚星海丨先生

中科院之声 2022-10-04 08:00 发表于北京

先生

叶叔华

叶叔华，1927年6月出生于广州，今年95岁，天文学家，中国科学院院士，中国首位女天文台台长，曾任国际天文学联合会副主席。她主持建立和发展了中国综合世界时系统，被誉为“北京时间之母”。她倡导将射电甚长基线（VLBI）技术应用于空间探测，在探月工程中发挥了极为重要的作用。1997年，紫金山天文台把小行星3241号命名为“叶叔华星”。

定了！这个导致互联网崩溃的东西，2035年取消！

原创 莎士比利 果壳 2022-11-22 20:00 发表于四川

闰秒即将成为历史。

现行公历中，除了有闰年，还有偶尔出现的“闰秒”，**每当闰秒来临，全球的“协调世界时”都会同时增加一秒**。

然而就在18日，法国巴黎举行的度量衡大会（CGPM）上，科学家和政府代表**投票决定取消闰秒**。这项决议到2035年开始实施，具体细节还在讨论中。

加拿大哈利法克斯计量研究中心负责人乔吉特·麦克唐纳（Georgette Macdonald）评价道，闰秒破坏了基于精确计时的时间系统，可能在数字时代造成严重的破坏。

就在不久前，Facebook母公司Meta的工程师们也联名发表了一篇博客，**呼吁取消闰秒**。包括微软、谷歌和亚马逊在内的科技巨头纷纷表示赞同，美国和法国的计时机构也认同了这一请愿。

由于地球的自转受到海洋、大气、地核运动等多种因素影响，所以**闰秒的增加时机不确定**，无法被提前写进系统

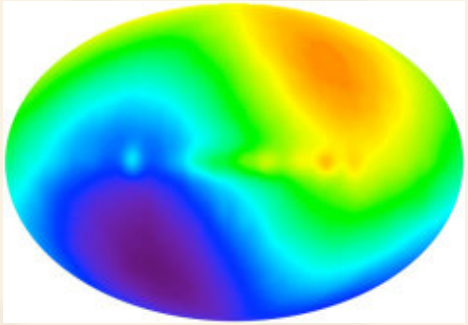
POSTED ON JULY 25, 2022 TO PRODUCTION ENGINEERING

It’s time to leave the leap second in the past

虽然闰秒即将退出历史舞台，但世界时与原子时之间的微小差异仍然存在，解决方案仍在讨论中。

有专家认为，可以等时间差异累计到一分钟的时候再做统一更改，也有人认为可以把太阳时和协调世界时分离开，各走各的。但可以确定的是，当时间差异拉大到一秒以上，我们就能有更多的余裕去调和这种差异。

- 宇宙时：绝对时间标准

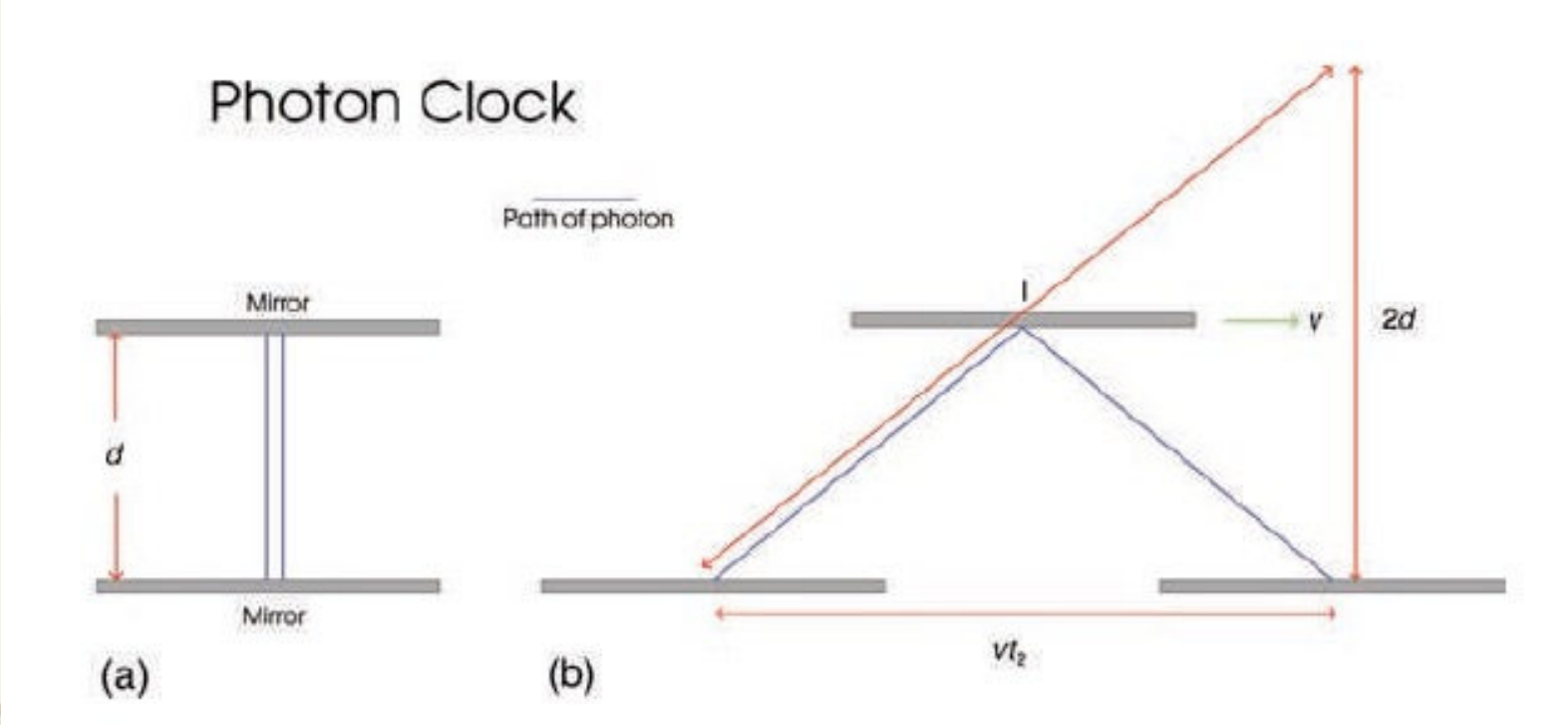


地球相对宇宙微波背景的运动速度

朝向Leo（狮子座）, v ~ 650km/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）

$$t_1 = 2d/c$$

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

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

$$t_2^{\,2}c^2 = 4d^2 + v^2t_2^{\,2}$$

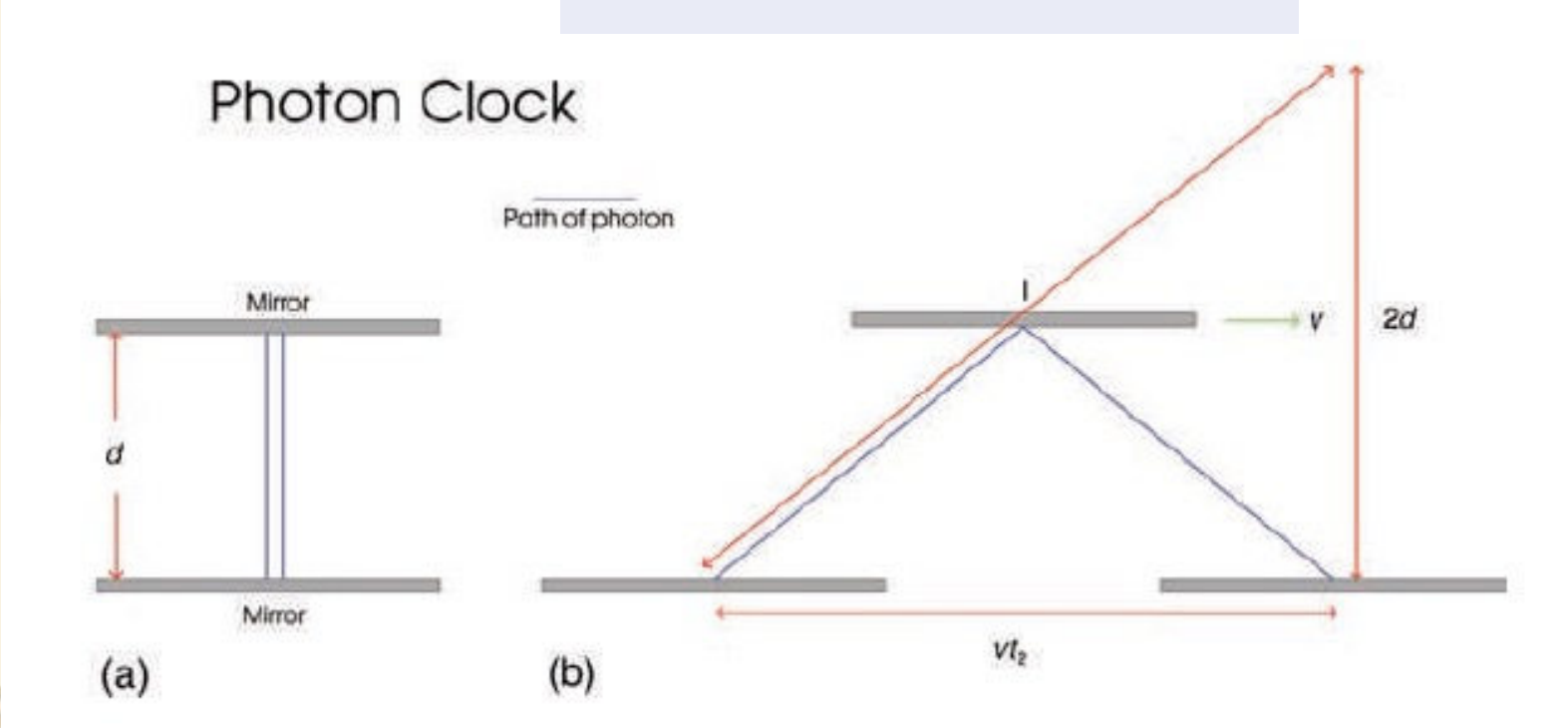
$$t_2^{\,2}c^2 = t_1^{\,2}c^2 + v^2t_2^{\,2}$$

$$t_2^{\,2}(c^2 - v^2) = t_1^{\,2}c^2$$

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

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

t2/t1=1.0000023



时间，精确到千亿亿分之一！潘建伟团队取得量子精密测量重大突破

原创 王佳 墨子沙龙 2022-10-05 23:20 发表于上海

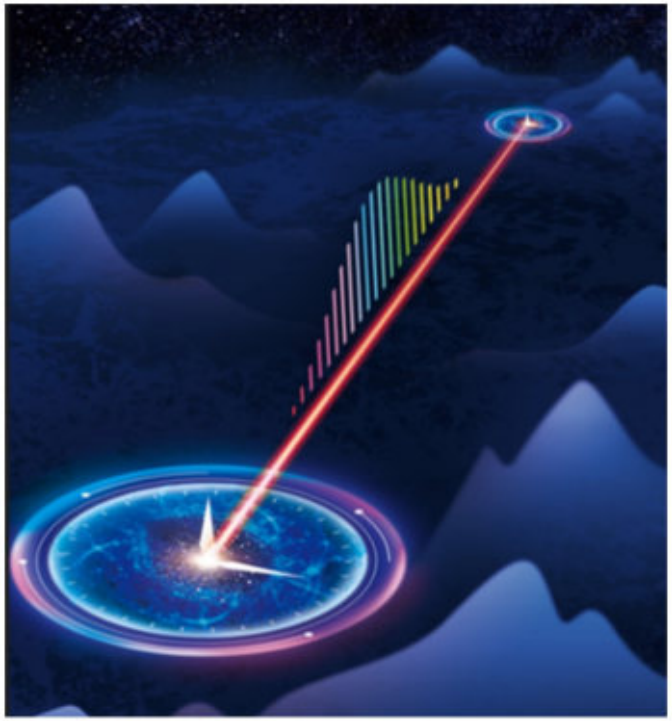
中国科学技术大学潘建伟团队首次在国际上实现百公里级的自由空间高精度时间频率传递实验，时间传递稳定度达到飞秒量级，频率传递万秒稳定度优于4×10^{-19}，相关论文于2022年10月5日23点在线发表于国际著名学术期刊《自然》杂志。

铯原子钟的频率在微波波段，现在科学家们又开发了锶、镱等新型原子钟，它们的频率要更高，在光学波段，因此被称作“光学原子钟”，简称“光钟”。光钟的测量精度现在已经可以做到**千亿亿分之一，即10^{-19}**，在整个宇宙年龄的时间尺度上，误差还不到1秒。

光给予我们精度10^{-19}的时间标准，如何实现精度10^{-19}的时间传递呢，我们同样求助于光。在这个世界上，有不同的光源，比如太阳光是遍布各种频率的连续光、我们常见的激光是单一频率的光源，还有另一种神奇的激光——光学频率梳，即**光梳**。

光梳是一种超短脉冲激光，其光谱具有很奇特的性质：含有一系列不同的频率信号，而且这些频率是离散、等间距的。这些光学频率信号就像一个个梳齿，因此这种激光得名“光梳”。在时间上，光梳相邻脉冲的间隔比普通脉冲激光也具有更高的精度。

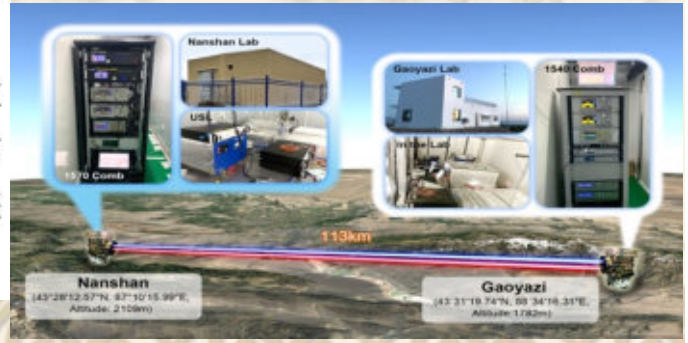
随着光钟技术的发展，光钟很有可能成为下一代时间频率标准。全球性光钟网络的建立，亟需高精度的自由空间时频传递技术。光梳在其中发挥着关键作用。**最近，中国科学技术大学团队基于光梳技术成功实现了自由空间中相距113公里的时频传递，精度达到10^{-19}水平，满足了目前最高精度光钟的需求。**



（墨子沙龙 制作）

地面附近自由空间的环境远比光纤中要复杂、要嘈杂，大气中的各种扰动和湍流、链路损耗、环境变化等等因素给自由空间中的长距离时频传递带来了极大困难。之前，自由空间中的光频传输技术只能实现10公里量级的传输距离。

中国科大团队向这一难题发起挑战——在光源方面，研制出**高功率高稳定度光梳**，在光信号收发信道方面，研制出**高稳定性且高效率的光收发望远镜系统**，另外采用**线性光学采样**的干涉测量方式实现高精度的时间测量。经过一系列技术攻关，最终基于双飞秒光梳和线性光学采样，在**相隔113公里**的新疆南山天文台和高崖子天文台之间实现了万秒10^{-19}量级稳定度的时频传递。



光钟以及光频传递技术的发展，有望让人们重新定义“秒”。

Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Pierre Agostini

Prize share: 1/3

Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Ferenc Krausz

Prize share: 1/3

Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Anne L'Huillier

Prize share: 1/3

"for experimental methods that generate attosecond pulses of light for the study of electron dynamics in matter"

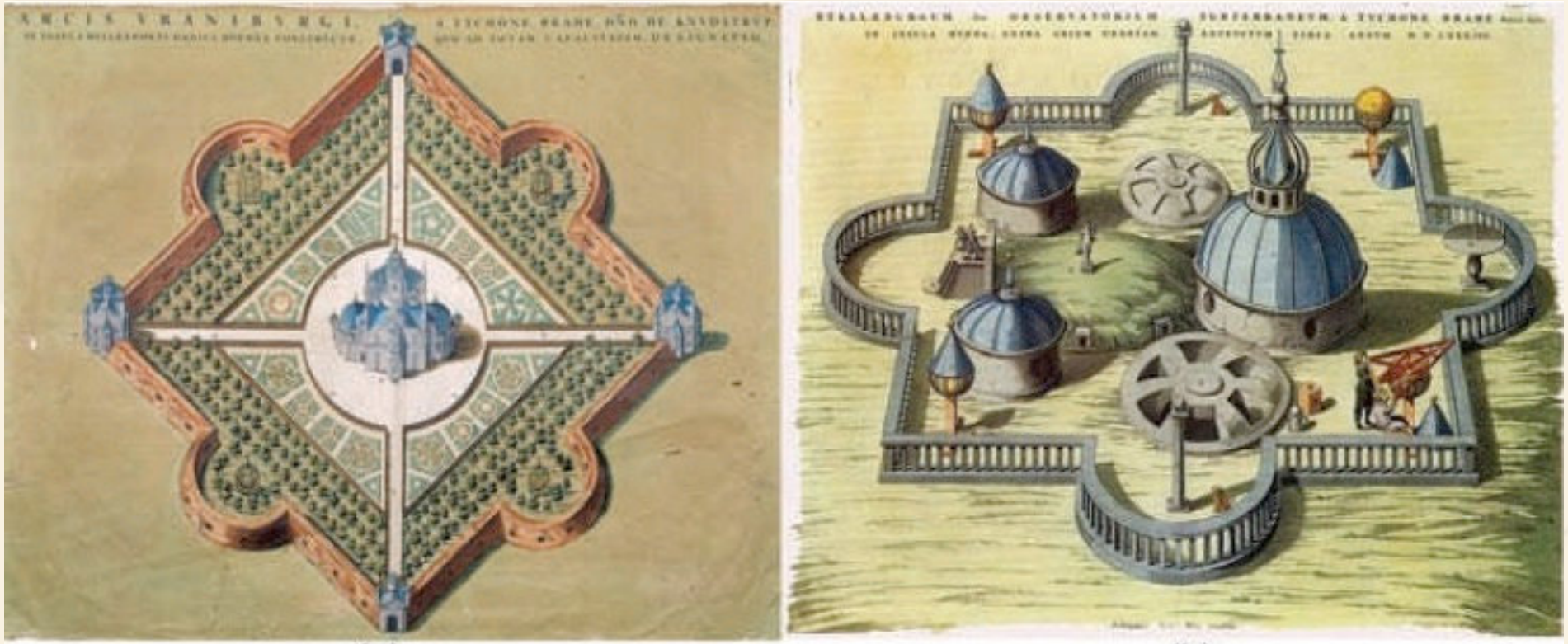
Experiments with light capture the shortest of moments

The three Nobel Laureates in Physics 2023 are being recognised for their experiments, which have given humanity new tools for exploring the world of electrons inside atoms and molecules. Pierre Agostini, Ferenc Krausz and Anne L'Huillier have demonstrated a way to create extremely short pulses of light that can be used to measure the rapid processes in which electrons move or change energy.

▲ 哥白尼开始的天文学革命

❖ 行星的运动规律

➢第谷对天空的观测（肉眼）



(a) (b)

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

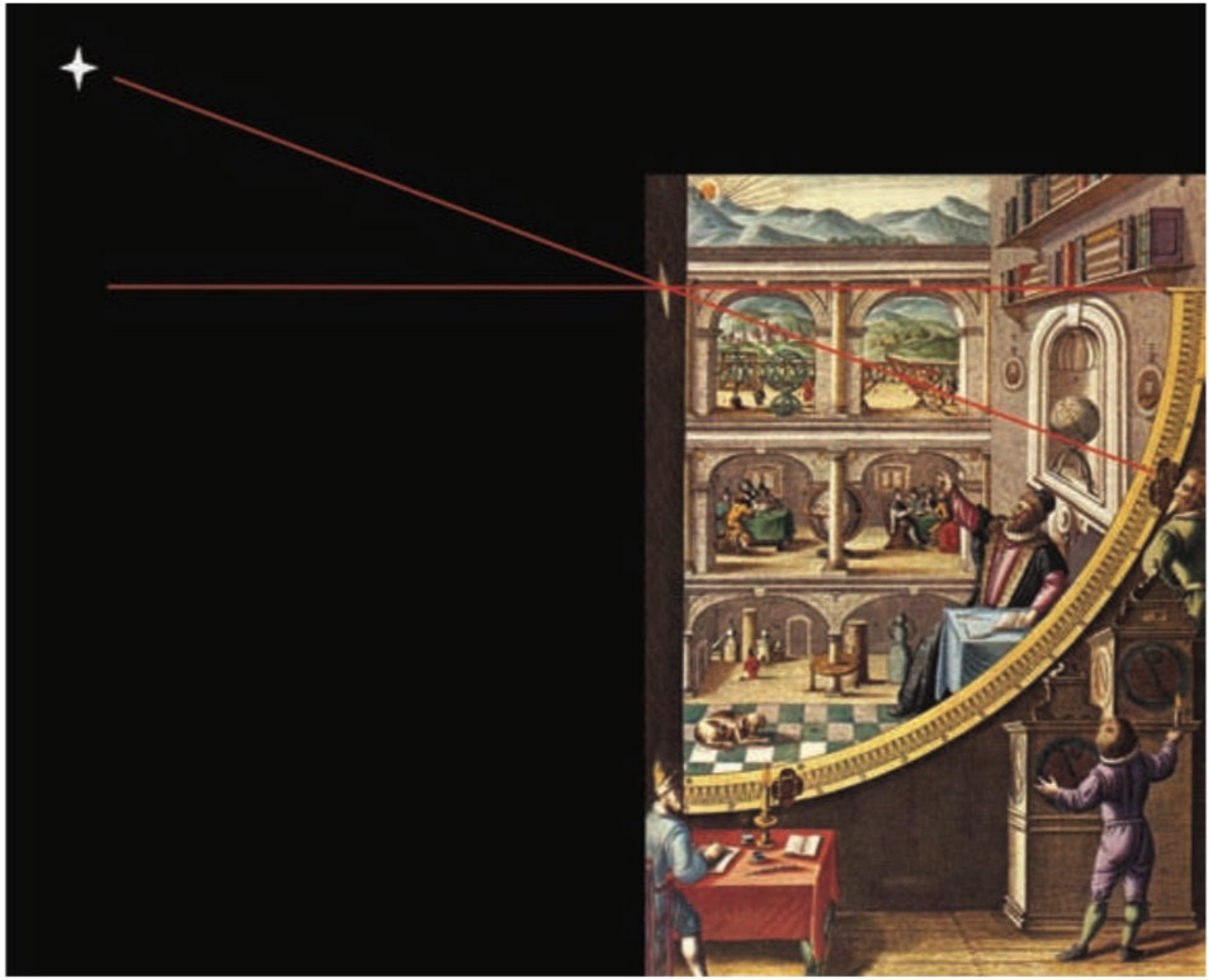


Figure 1.11 Observing the elevation of a star as it transited due south. Observatory image: Wikipedia Commons. Note, on the original, the window is too high.

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Elevation+Latitude=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。

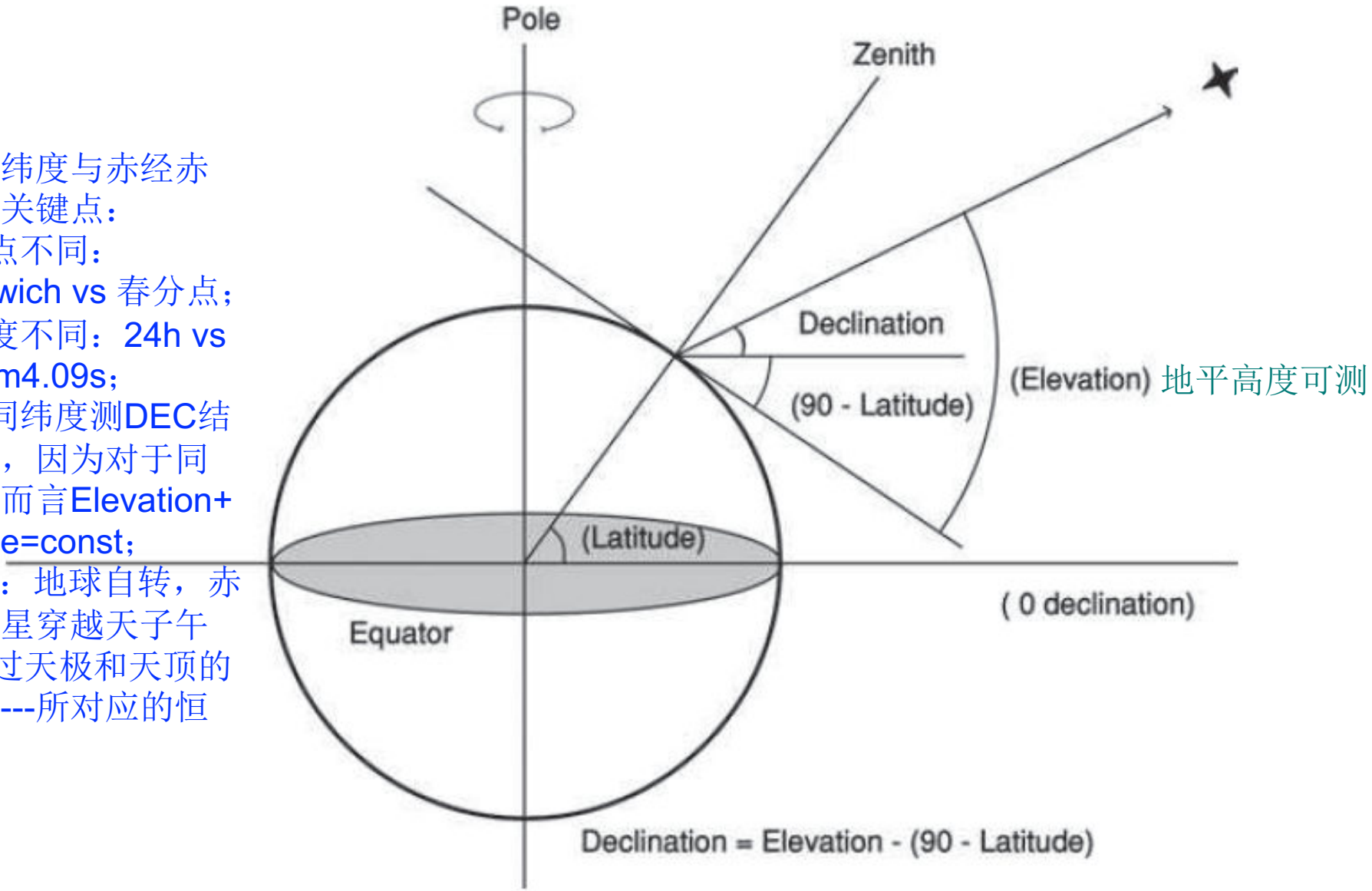


Figure 1.12 The geometry showing how the declination of a star is derived. The zenith is the point directly above the observer.

SYDNEY OBSERVATORY

Measuring time
the transit circle telescope

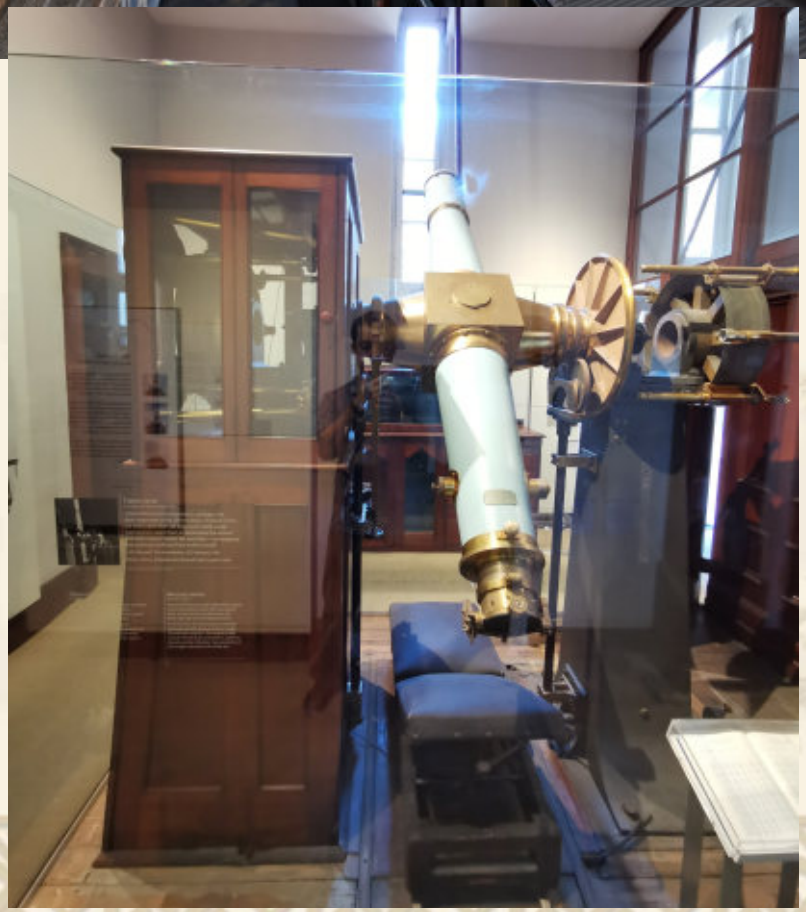
As in any 19th-century observatory, the telescope in this room was at the heart of the work of Sydney Observatory. Known as a transit circle, it was used by astronomers to find the exact time, the positions of the stars and the geographical coordinates of the Observatory.

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.

可测赤经与地平高度

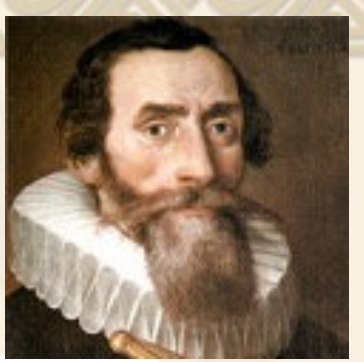
(Top) Astronomer Henry Alfred Lenehan observing through the transit circle at Sydney Observatory, about 1907.

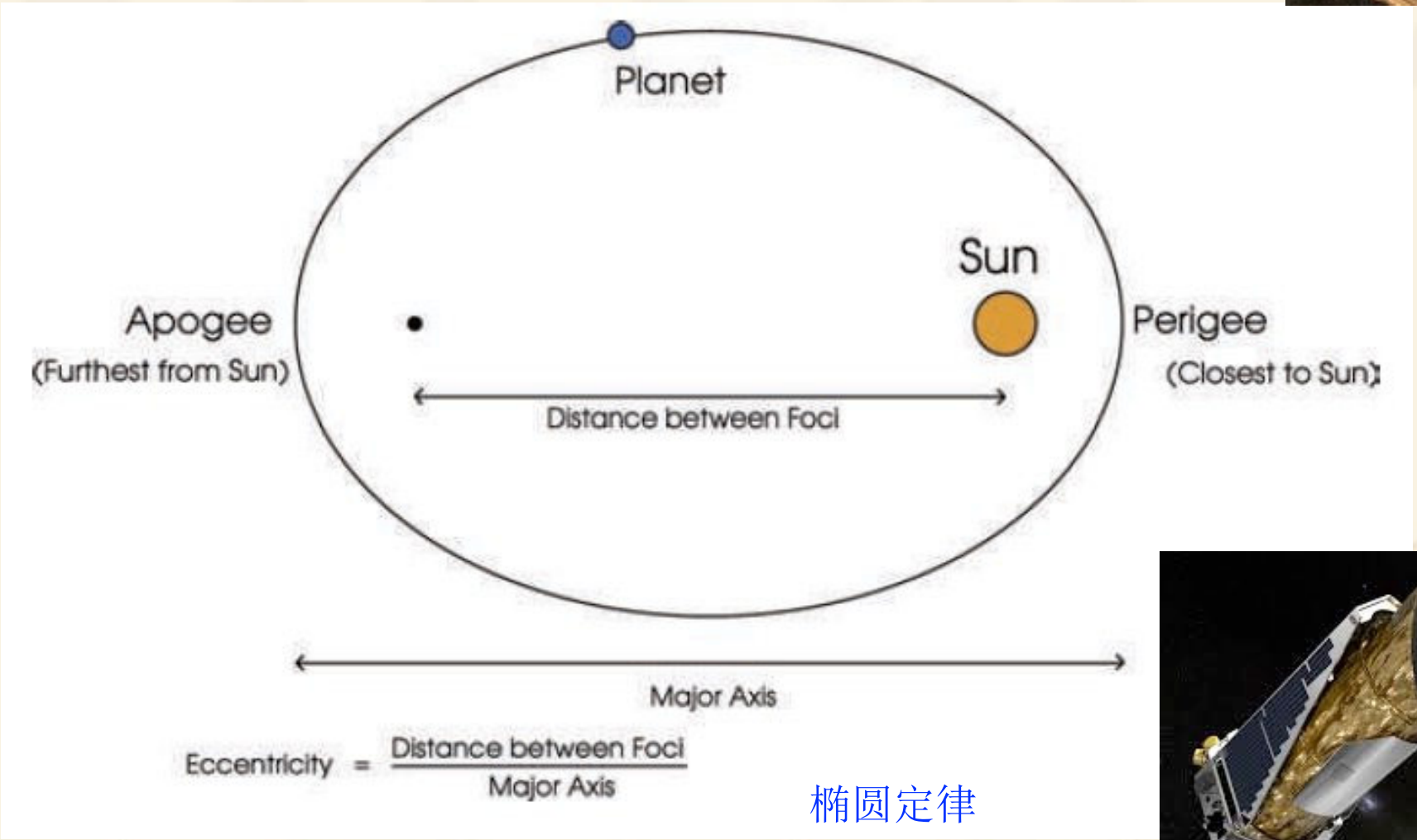
(Bottom) The grand astronomical clock dial on the 'Strasburg' clock model, made in 1889, on display in the Powerhouse Museum.



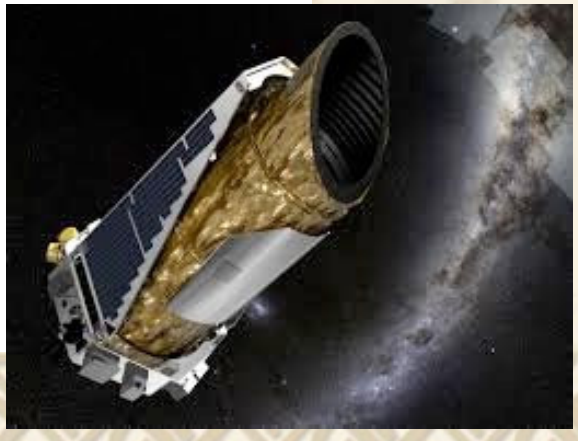
❖ 行星运动规律：开普勒三大定律

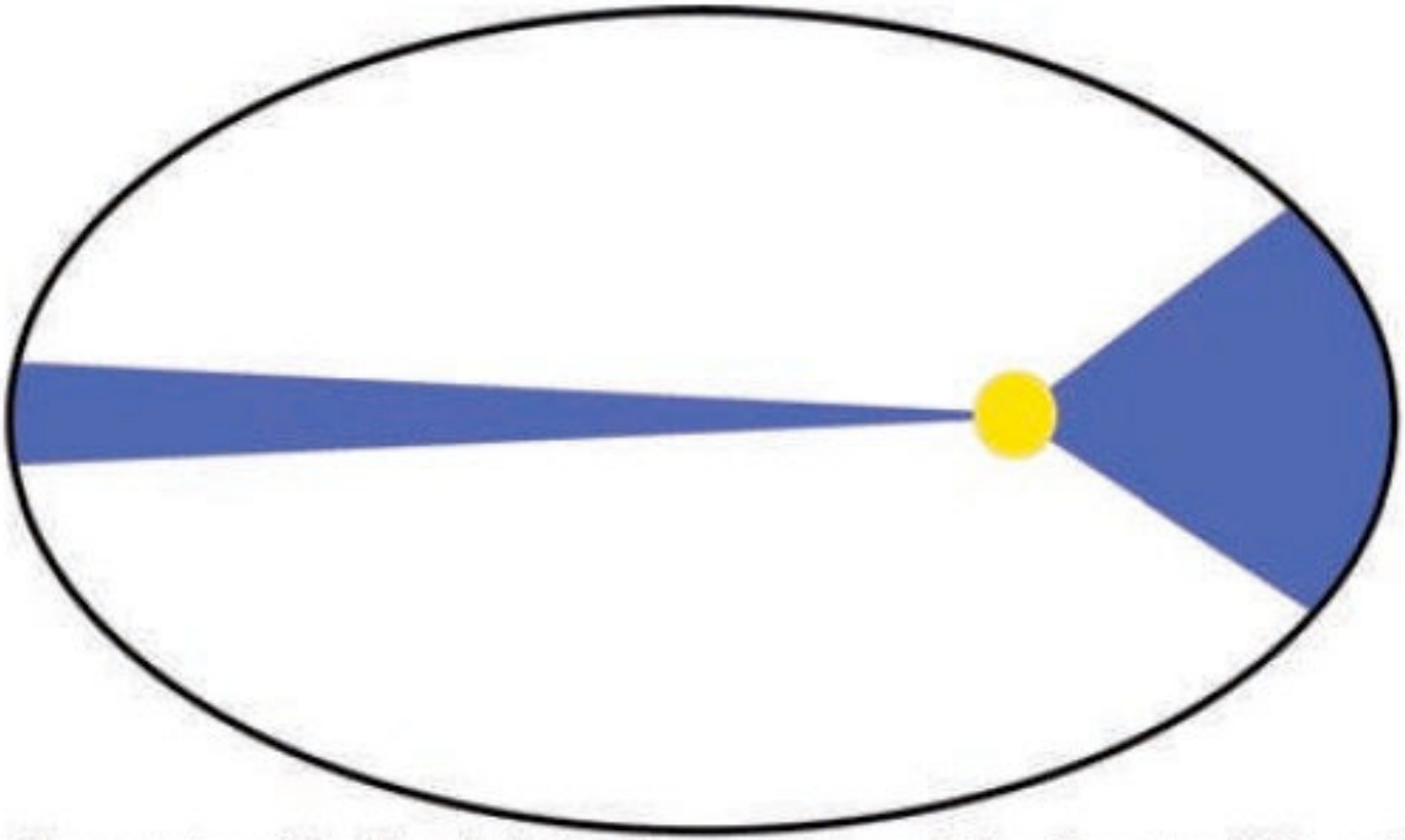
开普勒：太空立法者





椭圆定律





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

面积定律

周期定律
（恒星、行星质量差异大）

Keplerian第三定律：

$$T^2 \alpha a^3$$

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

（地球：T=1年，a=1AU ➔ k=1）

例如：谷神星
（T=4.60年）

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

giving $a = 2.77\,\mathrm{AU}.$

月亮距离地球的距离：

（a=384400km,T=27.32d）

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

地球同步轨道卫星：

（T=1d）

$$1 = k \times a^3$$
$$a = (1/k)^{1/3}$$
$$= 42\,377\,\mathrm{km}.$$

- 日地距离（AU）测量：周期定律

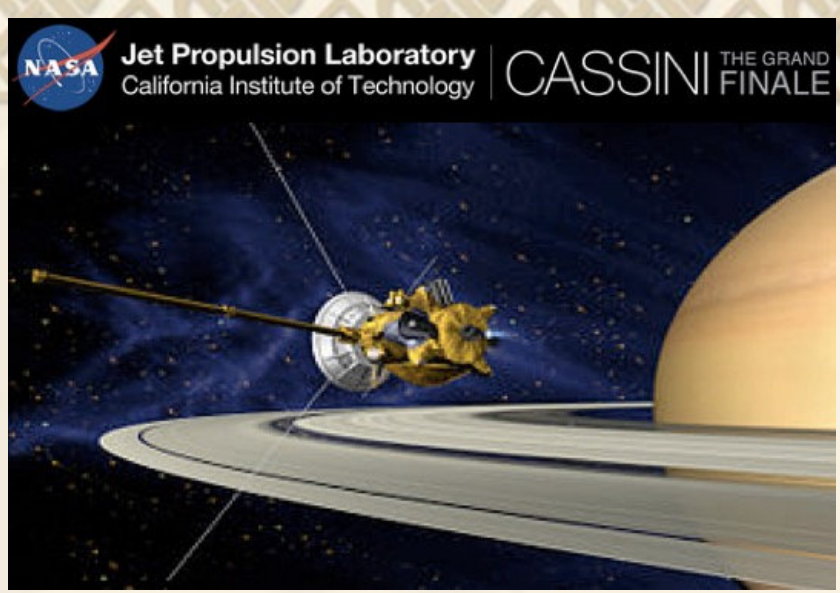
  1AU=149 597 870.691 km

  - 三角视差法：地球-火星距离

    -- 1672：卡西尼等人估计

    1AU=1.4亿km

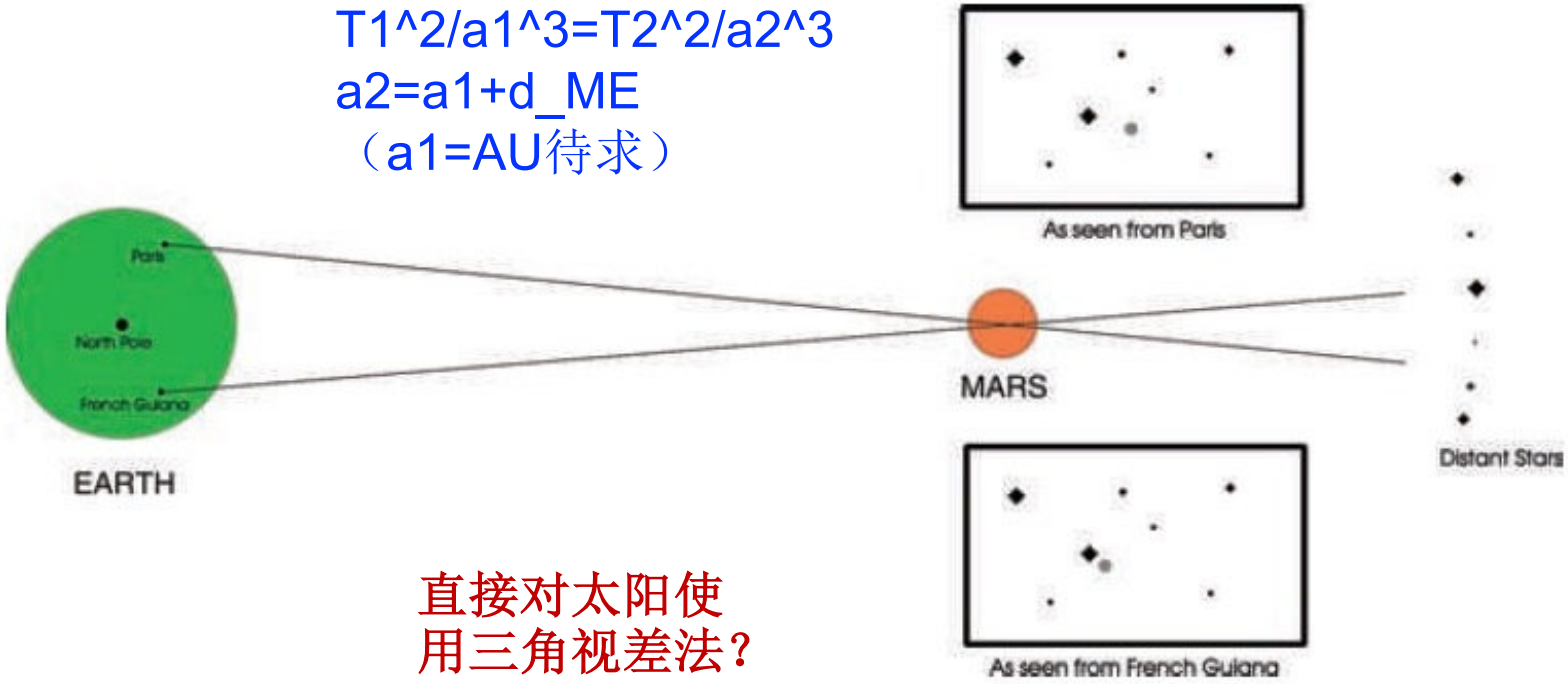
  - 金星凌日：地球-金星距离



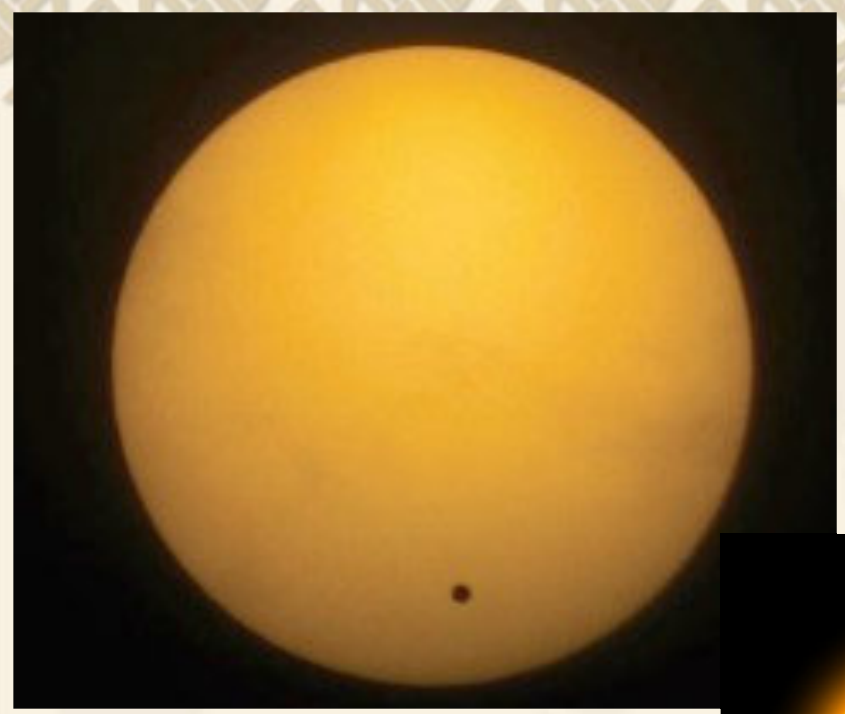
T1^2/a1^3=T2^2/a2^3

a2=a1+d_ME

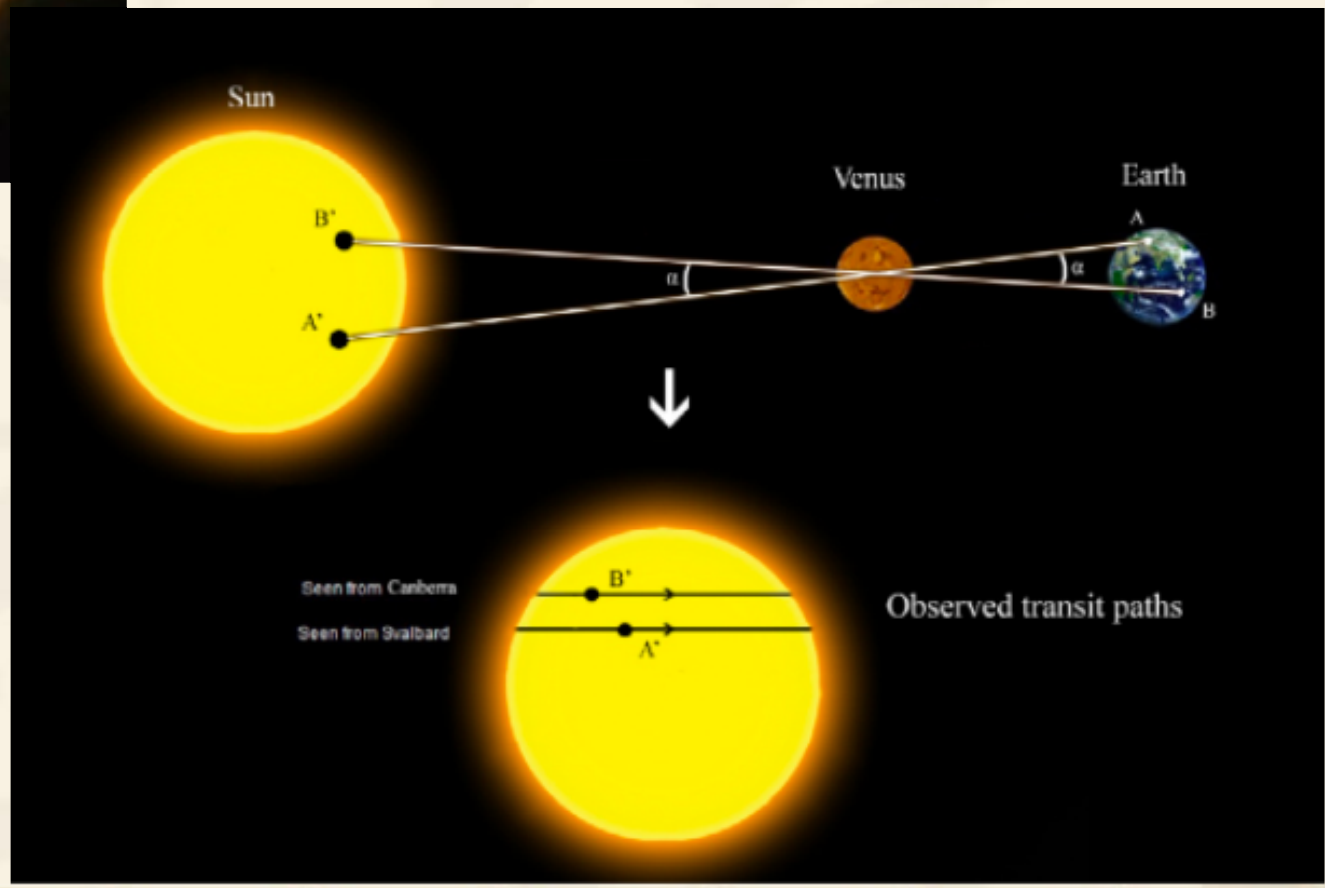
（a1=AU待求）



直接对太阳使用三角视差法？

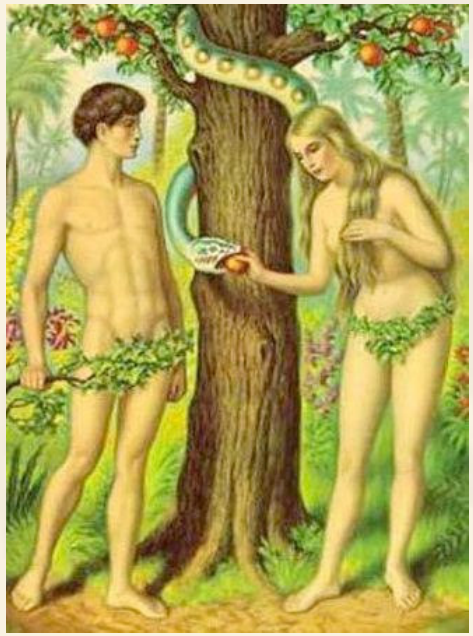


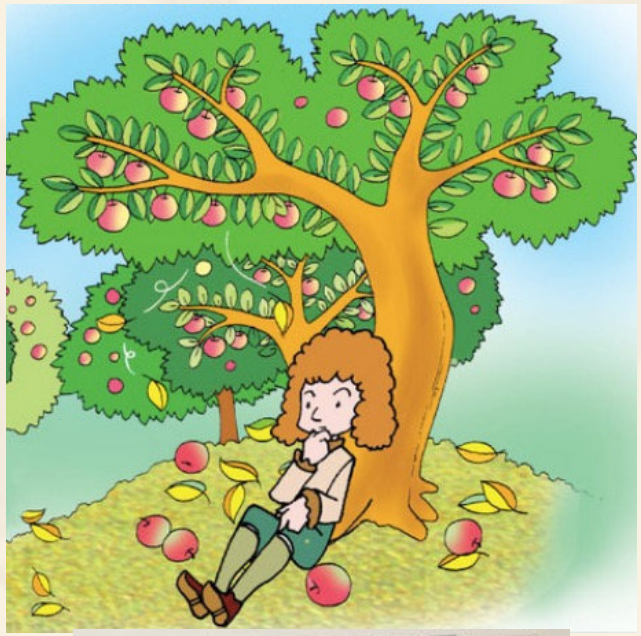
18世纪时的估计：1AU=1.524亿km

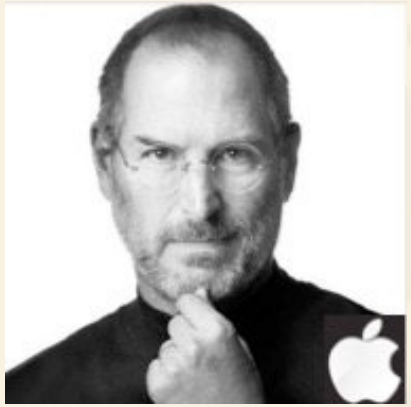


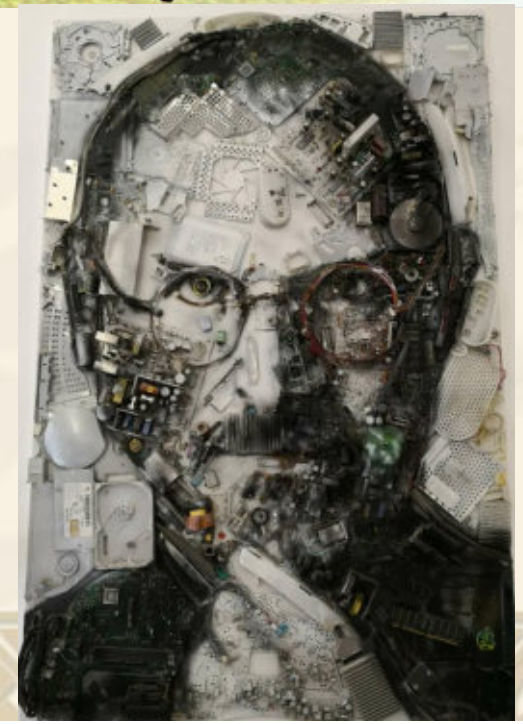
(后来，在1962年：雷达测金星精确距离→AU)

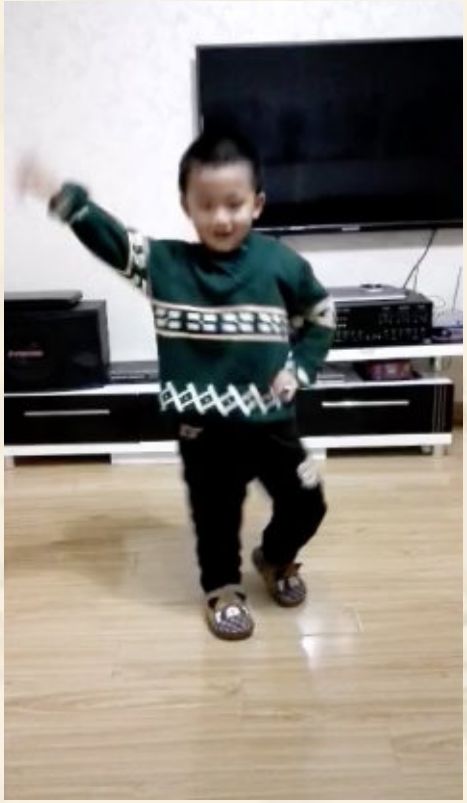
❖ 牛顿万有引力定律（我们和苹果之间不得不说的故事）





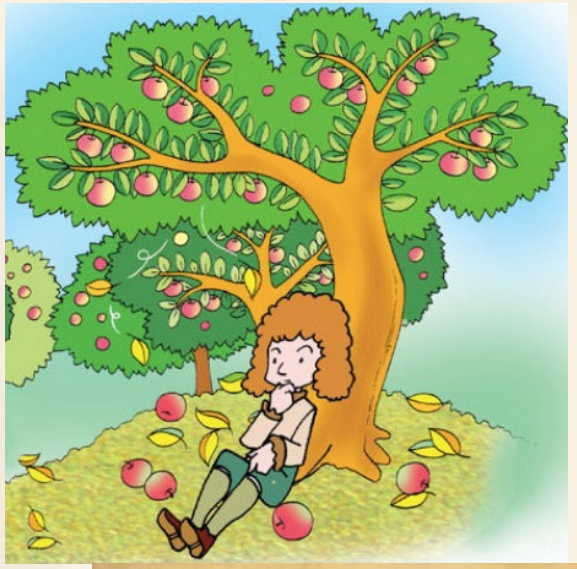


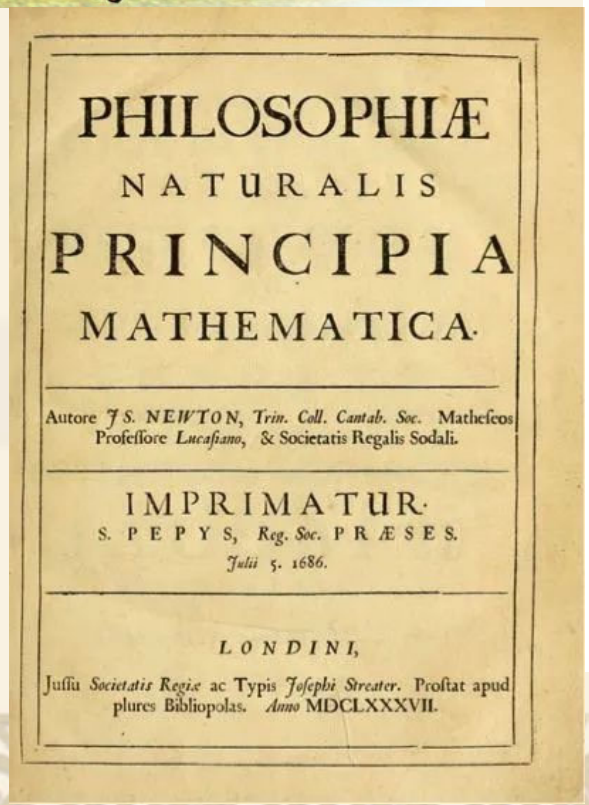




(4.5-yr-old Larry @ 中班@ 2014/12)

❖ 牛顿万有引力定律（我们和苹果之间不得不说的故事）





PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheſeos Profeſſore Lucaſiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Juſſu Societatis Regiæ ac Typis Joſephi Streater. Proſtat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

牛顿《自然哲学的数学原理》第一版

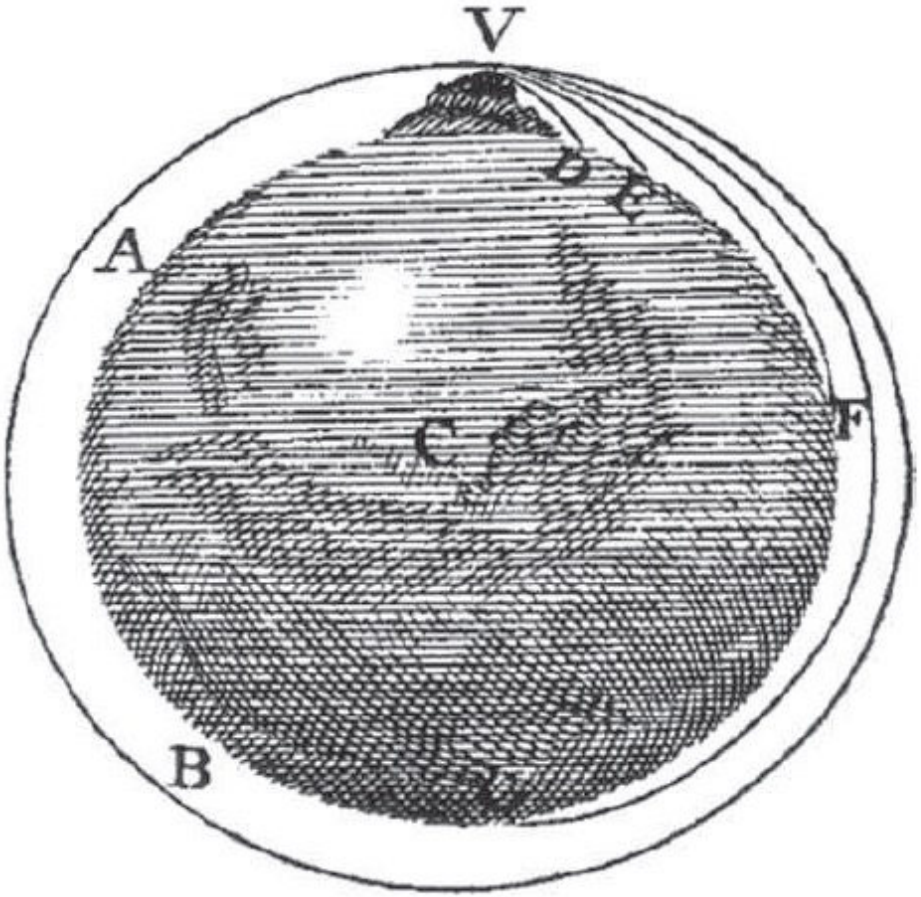


Figure 1.17 Newton's thought experiment using a cannon ball.

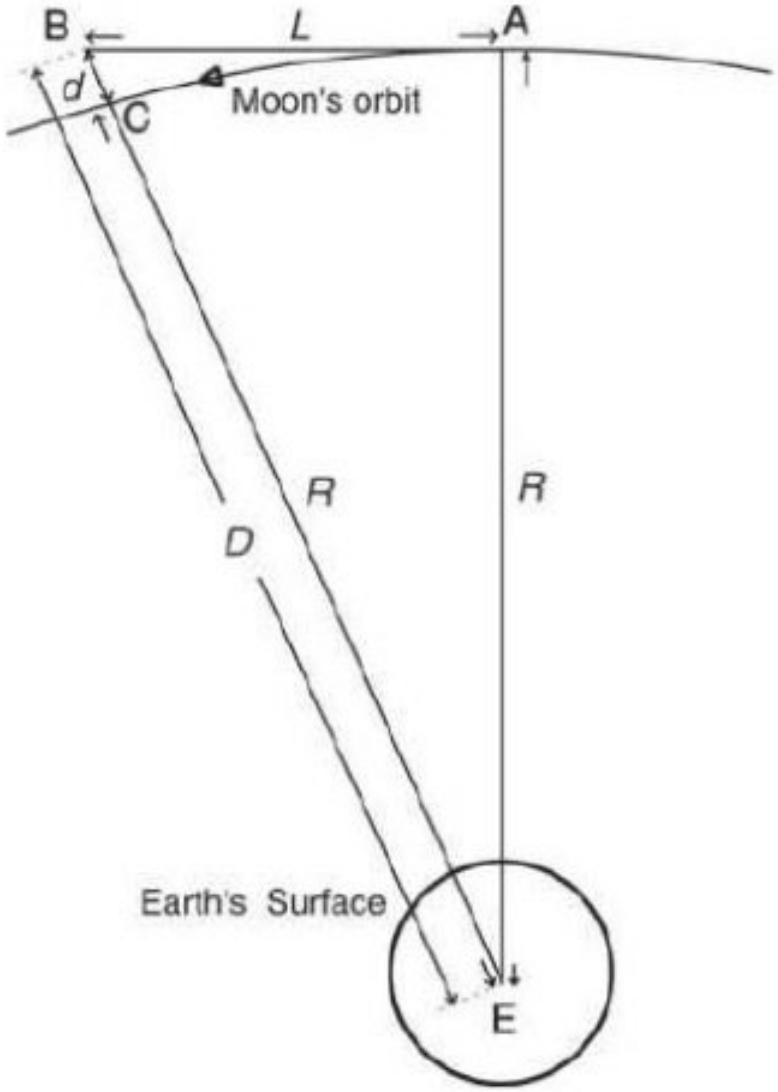


Figure 1.18 Geometry of the Earth–Moon system.

在1秒的时间里：

$$\theta = (1/2.36 \times 10^6) \times 2 \times \pi = 2.66 \times 10^{-6}\ \text{rad.}$$
$$L = 1.022\ \text{km.}$$

（月球公转周期27.32天=2.36E6秒）

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

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

$$\begin{aligned} d &= R \times \theta^2/2 \\ &= [3.84 \times 10^8\,\text{m} \times (2.66 \times 10^{-6})^2]/2 \\ &= 1.36 \times 10^{-3}\,\text{m.} \end{aligned}$$

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

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

不是平方反比律的世界会是怎样的呢？

MOND

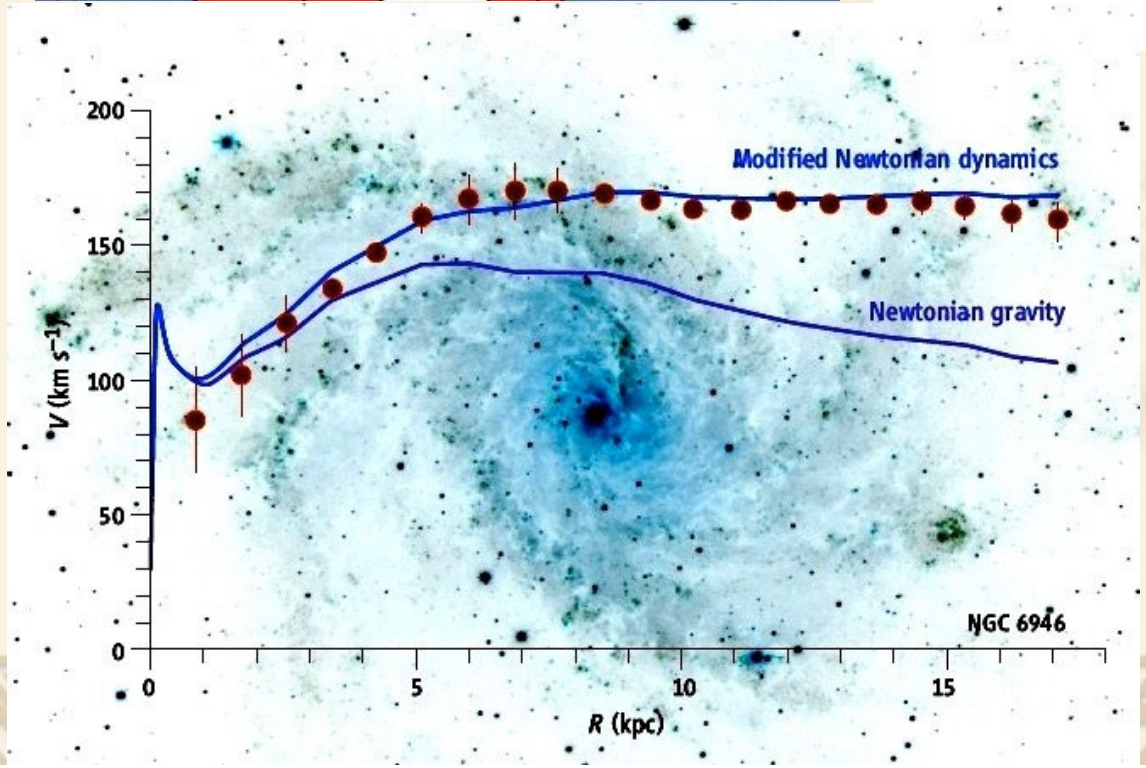
- In 1983, Milgrom proposed a modified Newtonian dynamics in which F=ma is modified to F=maμ, which μ is 1 for large acceleration, becomes a/a_0 when a is small.

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

- To explain the rotational curve, one can choose

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

$$a_0 \sim 1.2 \times 10^{-10}\ \mathrm{m/s^2}.$$



以色列物理学家Mordehai Milgrom

当加速度极小时：

F=ma^2 vs. F=ma

F~1/r vs. F~1/r^2

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

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

开普勒知其然不知其所以然，牛顿知其所以然，站在巨人巨人肩上（开普勒为其中之一）

开普勒第三定律的推导：

$$a = v^2/r \qquad F = m\,a \qquad m_p v^2/r = G\,m_s m_p/r^2.$$

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

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

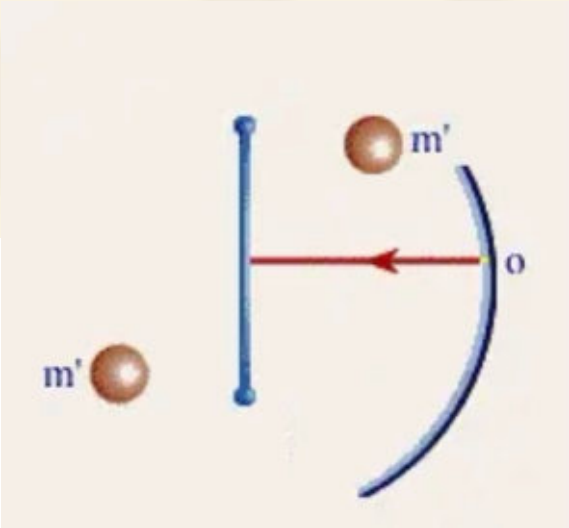
Dividing both sides by Gm_s and swapping sides gives:

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

(m_s>>m_p；近似为圆周运动）

❖ 引力常数（G）的测定

$G=6.75\times10^{-11}\ N\ m^2\ kg^{-2}$ （今天的测量值6.67…）



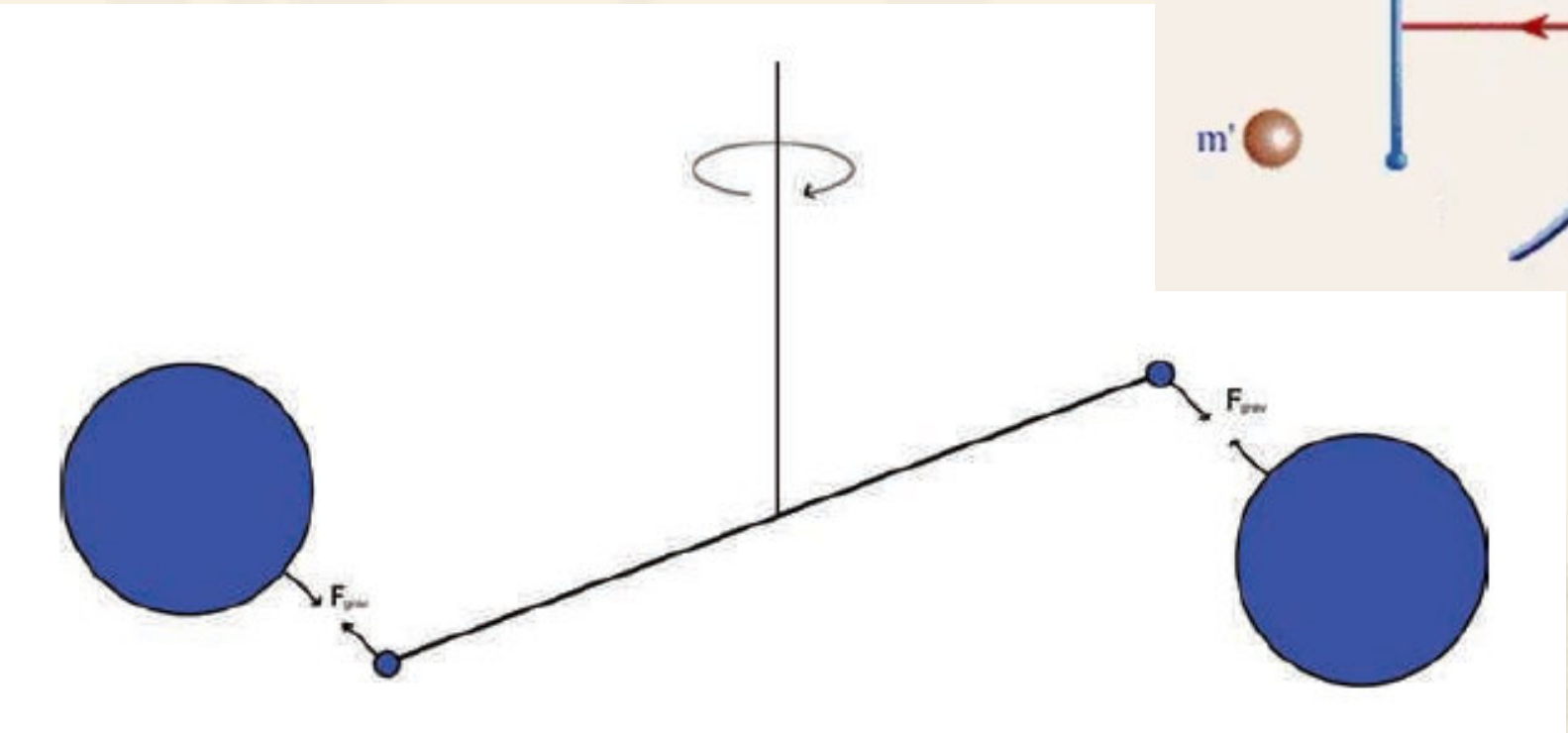


Figure 1.19 The Cavendish Experiment.

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

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

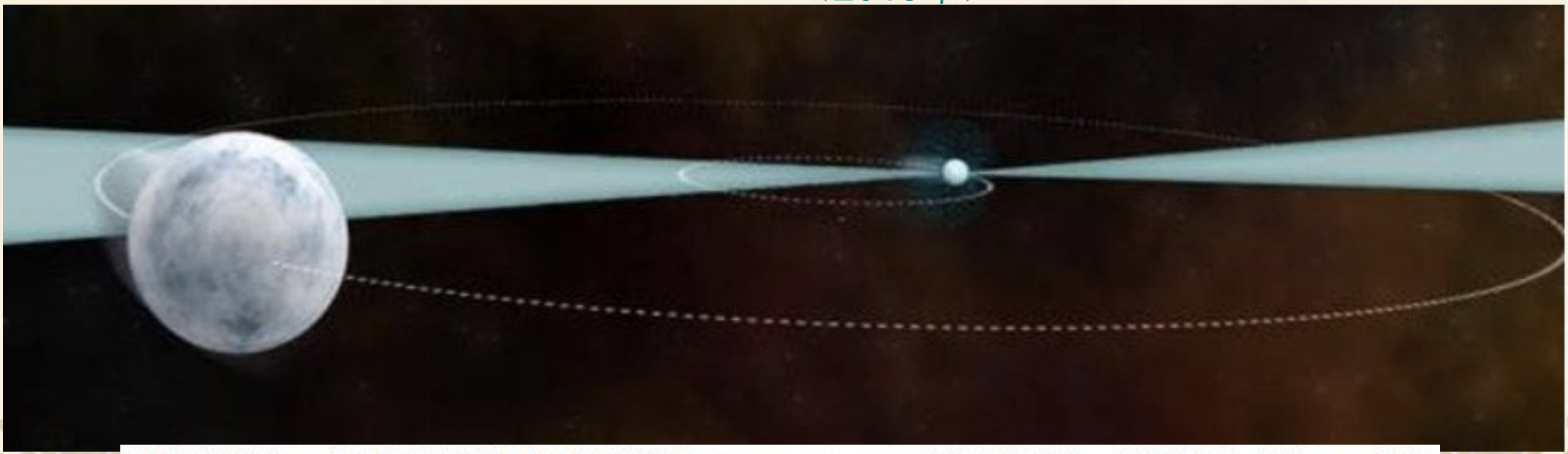
（神秘的地球报道）据腾讯太空（罗辑/编译）：天文学家对太阳系外的天体系统进行研究后发现，进一步证实万有引力常数在宇宙中具有普适性，一组天文学家使用美国国家科学基金会的“绿岸”射电望远镜和阿雷西博天文台对一个脉冲星和白矮星构成的系统进行了长达21年的研究，最终证实了一个宇宙学上的基本问题，引力在太阳系之外也具有同样的物理性质，至少到目前为止这个答案似乎是肯定的。这颗被科学家花费二十多年时间连续观测系统为PSR J1713+0747脉冲星系统，距离地球大约3750光年。

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。

（2015年）



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（牛顿→爱因斯坦 ）

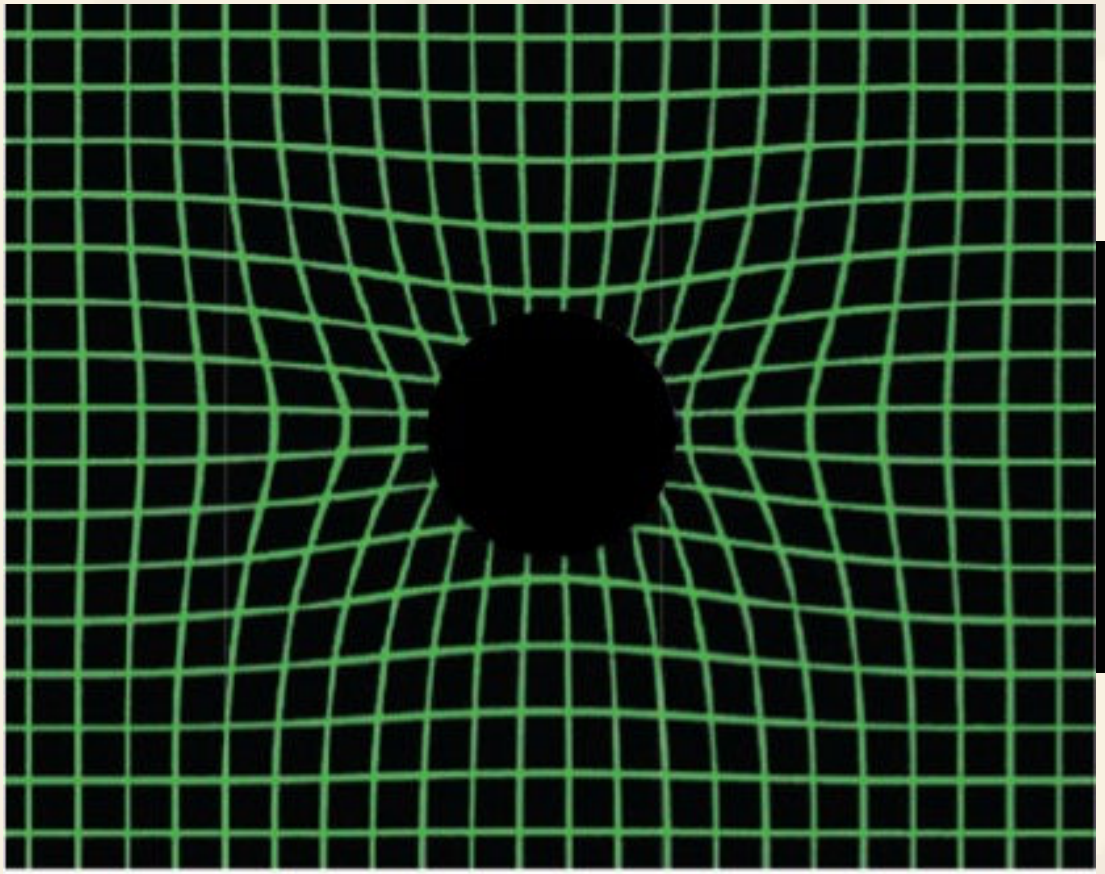
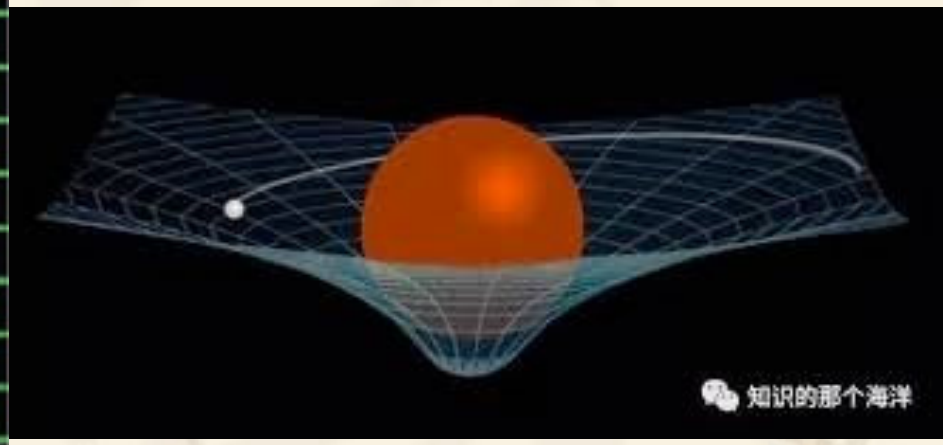


Figure 1.20 A rubber sheet analogy of the distortion of space–time by mass.



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

模拟引力场

NATURE | NEWS

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 Castelvecchi

03 October 2017

PDF | Rights & Permissions

同学们，别忘了

第一次作业

（两个部分：有参考答案的和没有参考答案的作业）

来啦！

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.