

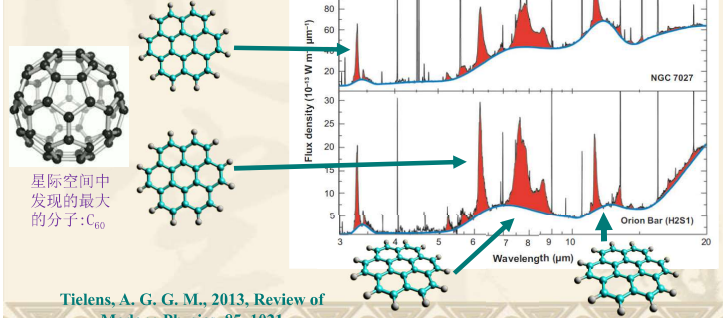
第一章:天文学—观测科学

❖ 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

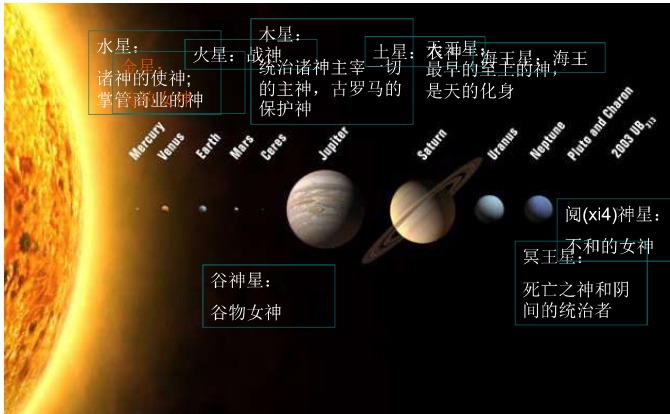
星际大分子的形成和演化研究

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)



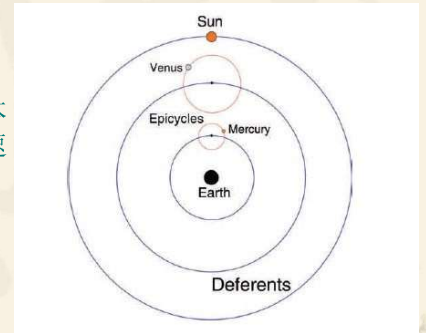
从观测/了解太阳系开始:

❖ 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
- ❖ 可以解释行星的逆行 (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:)

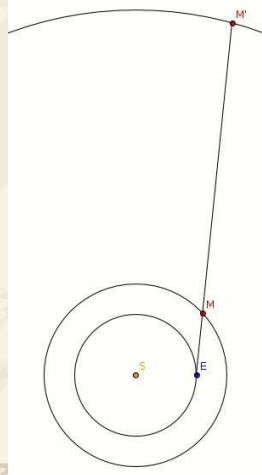
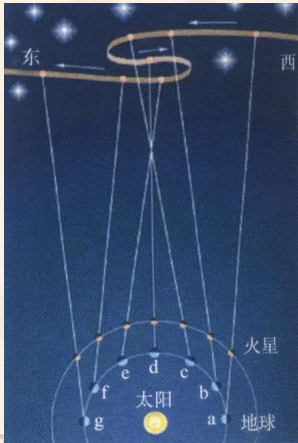
“这个模型修修补补用了一千多年, 直到有一天一位叫哥白尼的天文学家无法忍受, 第一个站了出来。他发现只要把太阳当成宇宙中心, 地球当成太阳的一颗行星, 那么五大行星就是正常的椭圆轨道, 不再需要圈上加圈。哥白尼的日心说对人类中心论是一个致命的打击, 却让人恍然大悟, 布鲁诺因宣传它而被烧死, 伽利略也因支持它而坐牢。”

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。

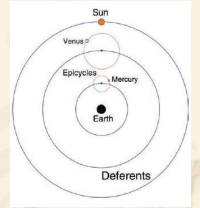
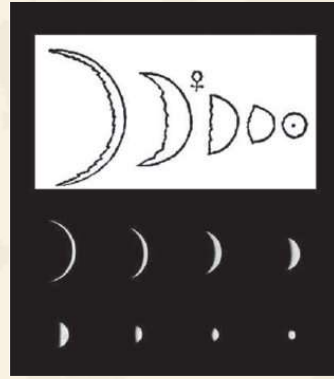
为了纪念哥白尼, 宇宙学上把人类的去中心化称为哥白尼原理——即整个宇宙各个地方都是平庸的, 没有任何一个点是特殊的。”

——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

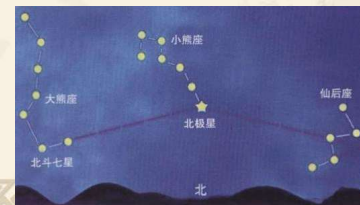


天罡北斗阵

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



如何找北极星？

❖ 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

-25	Sun -26.7	
-20		
-15	Full Moon -12.6	
-10		
-5	Venus (at brightest) -4.4	
0	Sirius (brightest star) -1.5	
	Vega 0	
+5	Unaided Eye +6.5	} Visual limits
+10	10 x 50 Binoculars +10	
	150 mm Telescope +13	
+15	Pluto +15.1	

Figure 1.5 Some examples of apparent magnitudes.

❖ 星等的计算

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

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

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

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

$$\Delta m = 2.5 \times \text{log}_{10} R$$

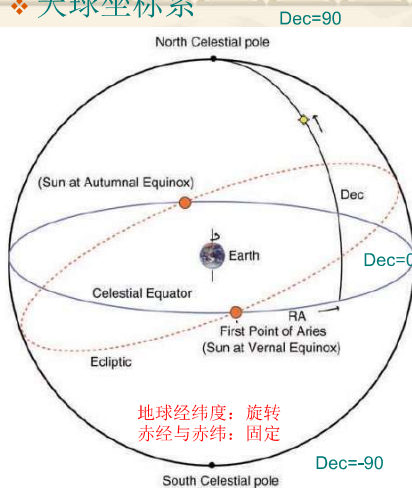
月亮与太阳亮度差:

$$R = 2.512^{14.1} = 436\ 800$$

两天体亮度差 10000倍:

$$\Delta m = 2.5 \times \text{log}_{10}(10\ 000) = 2.5 \times 4 = 10$$

❖ 天球坐标系



赤纬(DEC): Declination

赤经(RA): Right Ascension

黄赤交角: 23.5度

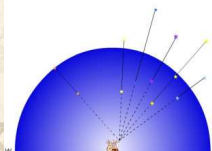
本初子午线(Prime Meridian):

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

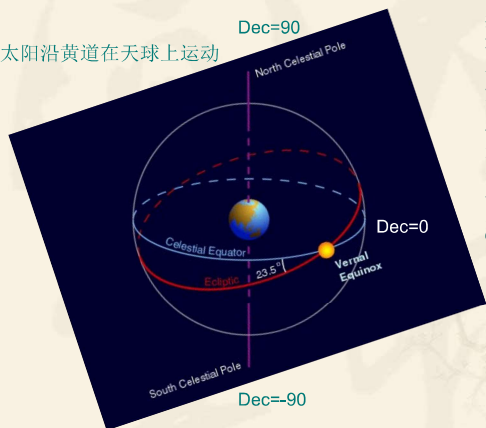
24h=360度

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

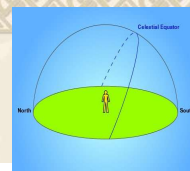
RA=恒星时, 一般以时间为单位

24h=360度

太阳运动: 春分、夏至、秋分、冬至

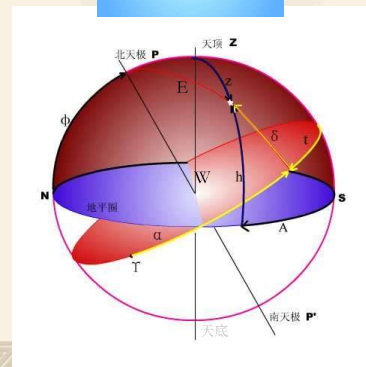
球面天文学

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

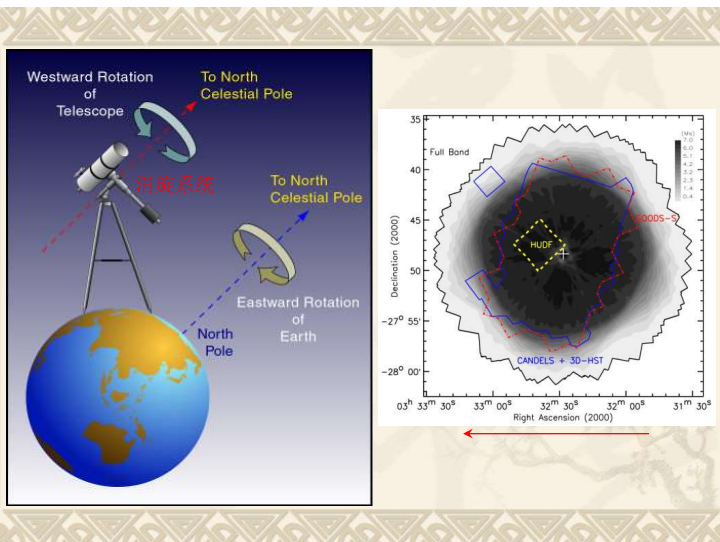
gamma: 春分点

h: 地平高度

Z=90°-h: 天顶距

alpha: 赤经

delta: 赤纬



❖ 岁差 (Precession, 地球的进动)

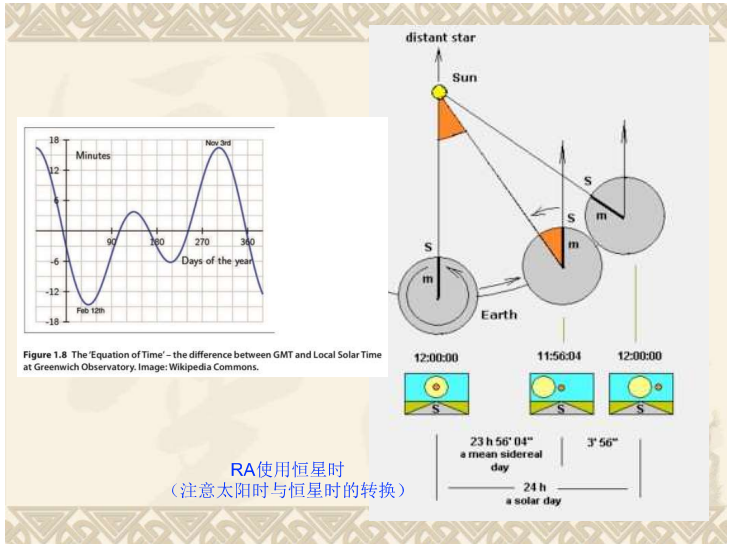
进动周期: ~26000 年 (星表: 指明时间“J2000.0”)



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

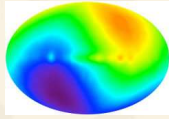
时间

- ❖ **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 (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)

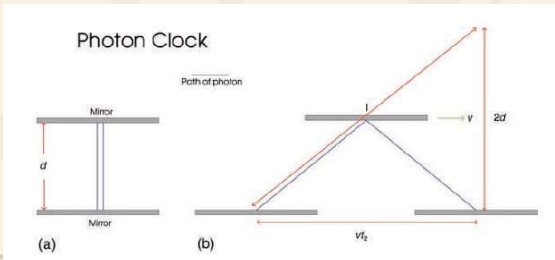


宇宙时: 绝对时间标准

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)

$$t_1 = 2d/c$$

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

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

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

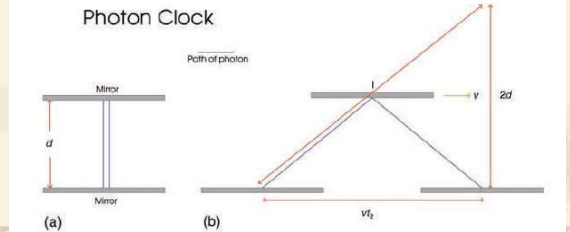
$$t_2 = l/c = [(4d^2 + v^2 t_2^2)/c^2]^{1/2}$$

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

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

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

$t_2/t_1 = 1.0000023$



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。

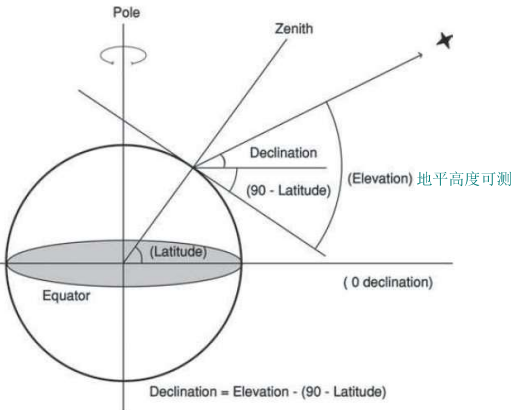
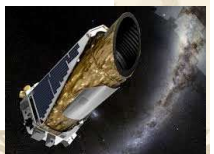
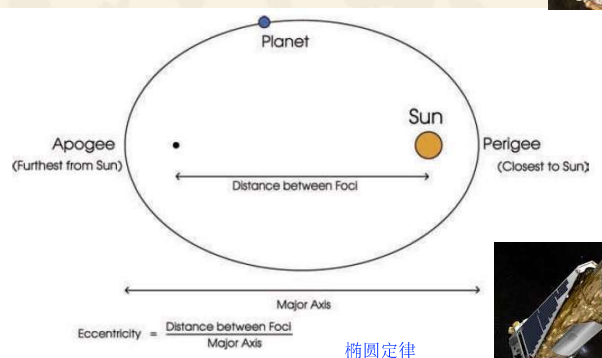
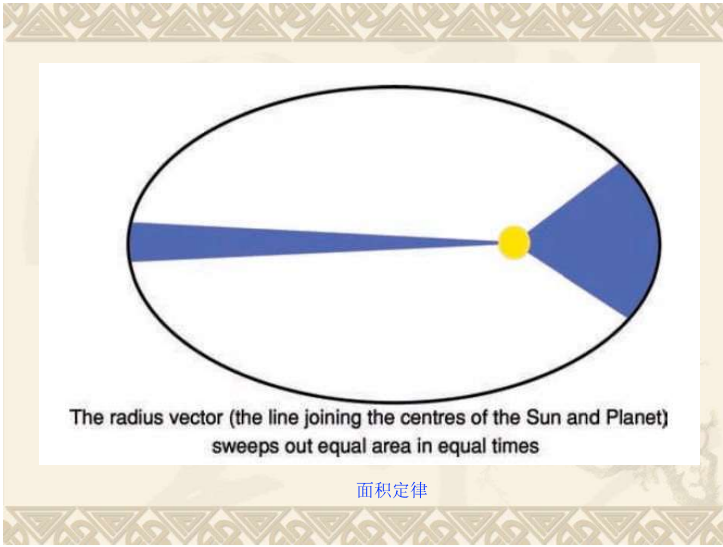


Figure 1.12 The geometry showing how the declination of a star is derived. The zenith is the point directly above the observer.

行星运动规律: 开普勒三大定律

开普勒: 太空立法者





Keplerian第三定律: $T^2 \propto a^3$ (恒星、行星质量差异大)

$T^2 = k \times a^3$ (地球: $T=1$ 年, $a=1$ AU $\rightarrow k=1$)

例如: 谷神星 ($T=4.60$ 年)

giving $a = T^{2/3} = 2.77$ AU.

月亮距离地球的距离: ($a=384400$ km, $T=27.32$ d)

$k = (27.32)^2 / (384400)^3 = 1.314 \times 10^{-14}$.

地球同步轨道卫星: ($T=1$ d)

$1 = k \times a^3$
 $a = (1/k)^{1/3} = 42377$ km.

❖ 日地距离 (AU) 测量: 周期定律
 $1\text{AU} = 149\,597\,870.691$ km

- 三角视差法: 地球-火星距离 -- 1672: 卡西尼等人估计 $1\text{AU} = 1.4$ 亿 km
- 金星凌日: 地球-金星距离

$T_1^2/a_1^3 = T_2^2/a_2^3$
 $a_2 = a_1 + d_{ME}$ ($a_1 = \text{AU}$ 待求)

直接对太阳使用三角视差法?

Figure 1.18 Geometry of the Earth-Moon system.

在1秒的时间里:

$\theta = (1/2.36 \times 10^6) \times 2 \times \pi = 2.66 \times 10^{-6}$ rad.
 $L = 1.022$ km. (月球公转周期27.32天=2.36E6秒)

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

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

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

g_m is 0.00272 m s^{-2} .

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

$F \propto M_1 M_2 / d^2$

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

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:

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

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

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

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

($m_s \gg m_p$; 近似为圆周运动)

第二章: 我们的太阳系1—太阳

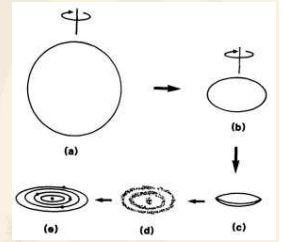
多波段下的太阳

射电波 微波 红外线 可见光 紫外线 X射线 伽马射线

红外望远镜 光学望远镜 紫外望远镜 X射线望远镜

太阳系的形成

- ❖ 太阳系的年龄
 - 地球上的岩石 → $t \sim 3.9 \times 10^9$ yrs
 - 陨石 (meteorites) → $t \sim 4.6 \times 10^9$ yrs
- ❖ 星云假说 (康德-拉普拉斯)
 - Emanuel Swedenborg 1734
 - Pierre-Simon Laplace 1796
 - 巨大的分子云 → 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 → 重元素



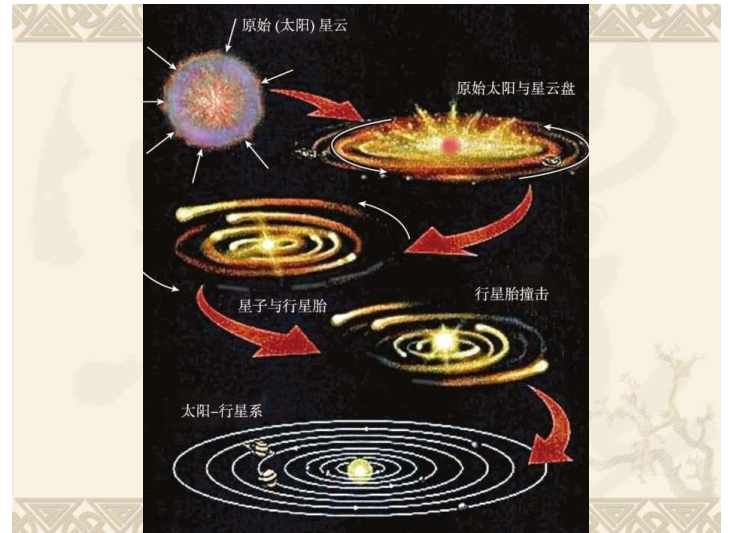
拉普拉斯的星云假说: a) 一个旋转的星云; b) 星云塌缩并关于旋转轴变扁; c) 形成镜片状结构; d) 物质收缩形成一系列圆环; e) 环中物质凝聚形成恒星与行星。(by 白雪宁)

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: $\sim 13,000$ AU ~ 0.2 光年
 - 质量: $\sim 2M_{\text{sun}}$
 - 成份: 数目上, 98% H、He (74%H, 24%He) + 2%重元素



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

太阳中元素分布

- 核素为4的整数倍的元素多
- Fe元素多
- 更重元素的产生

❖ 星云塌缩的细致过程:

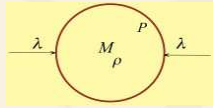
1. 总角动量不为零
2. 塌缩过程中角动量守恒: 转动加快
3. 塌缩导致密度增加
4. 碰撞导致温度升高
5. 压力增加
6. 阻止进一步的塌缩
7. 气体冷却: 分子冷却, 发射红外光子
8. 金斯 (Jeans) 质量



喜大普奔! 恒星形成可以比预想的更快!

金斯长度、金斯质量

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



声速 $v_s \sim (P/\rho)^{0.5}$

自引力加速度超过压力加速度

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

自引力能超过热运动能

$$U \approx \frac{G\rho\lambda^3}{\lambda} > E_T \approx v_s^2 \quad (\text{1式乘以金斯长度})$$

自由下落时标小于压力传播时标

$$\tau_{ff} \approx \frac{1}{(G\rho)^{1/2}} < \tau_d \approx \frac{\lambda}{v_s} \quad (\text{2式除以金斯长度的平方、开方、再倒数})$$

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

❖ 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

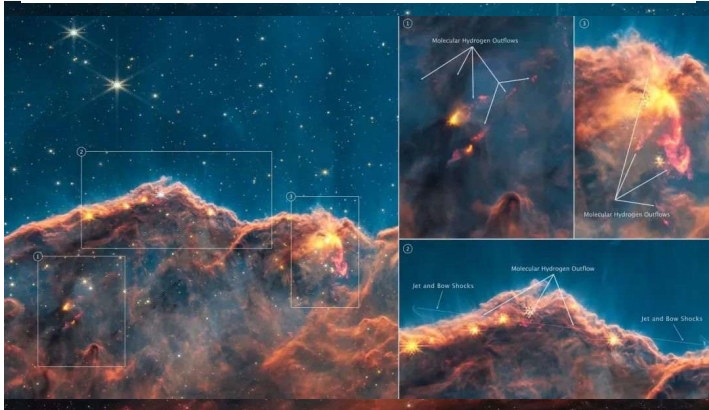
❖ 太阳的形成

- 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)

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

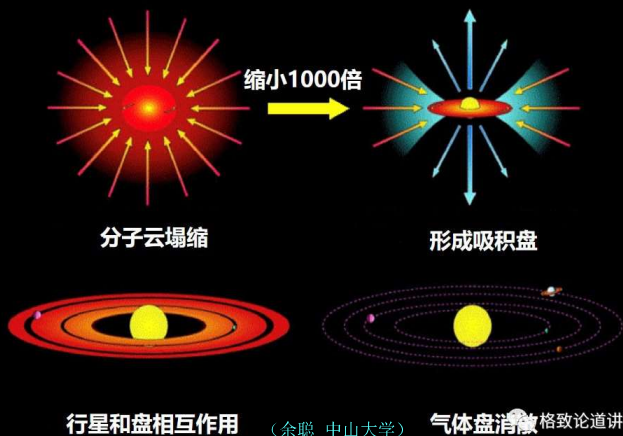
最近,天文学家宣布,他们在韦布拍摄的这个星云的4.7微米波段的近红外图像中找到了此前未被发现的二十多个喷流与外流(下图)。 (NASA, ESA, CSA, and STScI)



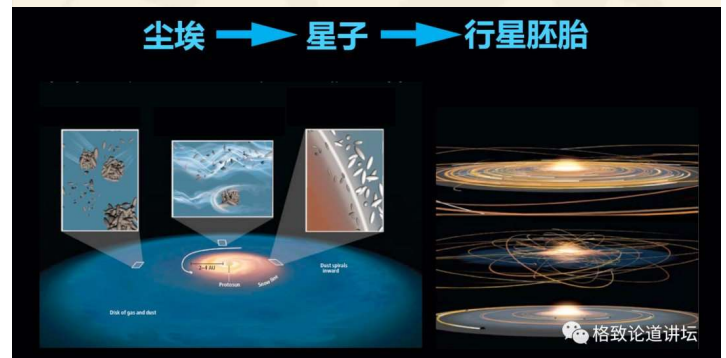
❖ 行星的形成

- 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(氨,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



尘埃 → 星子 → 行星胚胎



(余聪 中山大学)

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

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

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

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

准确值:

$$D = 1,391,978 \text{ km}$$

$$R_{\text{sun}} \approx 700,000 \text{ km}$$

- ❖ 太阳质量

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

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

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

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

准确值:

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

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

- ❖ 太阳密度

$$\text{Volume} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi (700\,000\,000)^3 = 1.4 \times 10^{27} \text{ m}^3$$

So the density is:

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

- ❖ 太阳光度

W/m²

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

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



- ❖ 黑体辐射与太阳表面温度

- 黑体辐射 (空腔辐射)
- 黑体谱
- 1901年: Max Planck找到黑体辐射函数形式
- 1905年: 光子理论→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.)

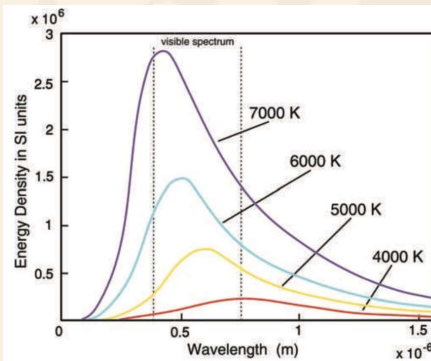


Figure 2.3 Black body radiation curves.

Wein位移定律:

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

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

Stefan-Boltzmann 定律:

$$\text{功率 } E = \sigma AT^4 W$$

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

❖ 太阳表面温度

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

$$T = 2.9 \times 10^6 / \lambda_{peak} \text{ K (where } \lambda_{peak} \text{ is in nanometres)}$$

$$= 2.9 \times 10^6 / 500K$$

$$= 5800K$$

$$E = \sigma AT^4$$

$$= 5.671 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (6.95 \times 10^8)^2 \times T^4$$

$$T = \{4 \times 10^{26} / [5.671 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (6.95 \times 10^8)^2]\}^{1/4}$$

$$= (4 \times 10^{26} / 3.44 \times 10^{11})^{1/4}$$

$$= 5839K$$

精确值:

$$T = 5780K$$

❖ 小结: 太阳参数

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

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 Kirchoff & 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)

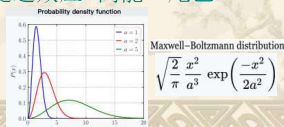
- 71% H (91.2%数目)
- 27.1% He (8.7%)
- 0.97% O (0.078%)
- 0.40% C (0.043%)

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 $E=mc^2$
 - 质子和alpha粒子质量的精确测量 ($4p > He$)
 - 热核反应: $T \sim 10^7$ K, 量子隧道效应+高能“尾巴”
 - 反应率: 10^9 年/质子!
 - 寿命: 100亿年!

$$E=mc^2$$

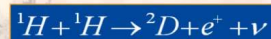


太阳能量主要来源

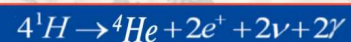
PP I链

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

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



总结果是

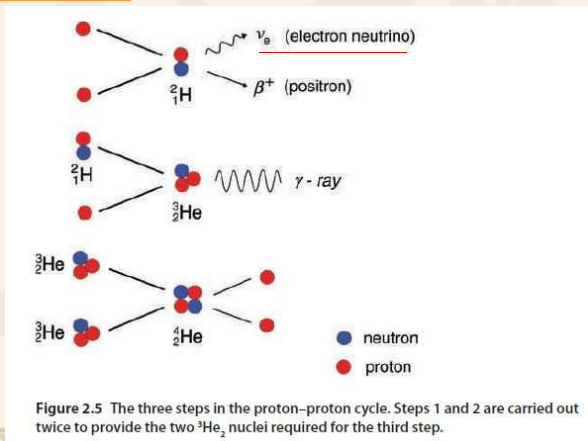


$$\Delta E = 4 \times 1.007825 - 4.002603 = 0.02870 \text{ Amu} = 26.73 \text{ MeV}$$

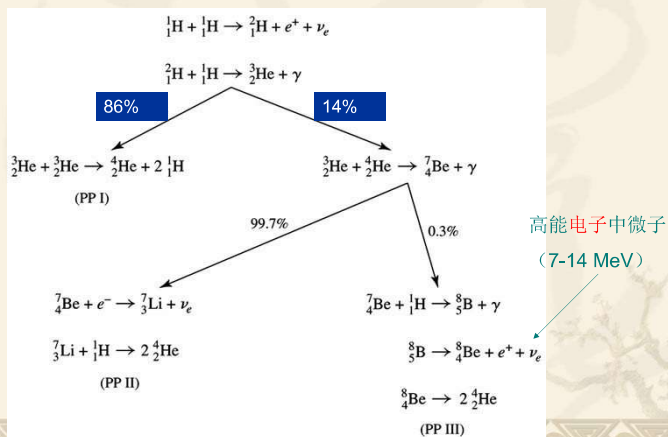
(估计产能率: ~0.7%)

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

PP I 链

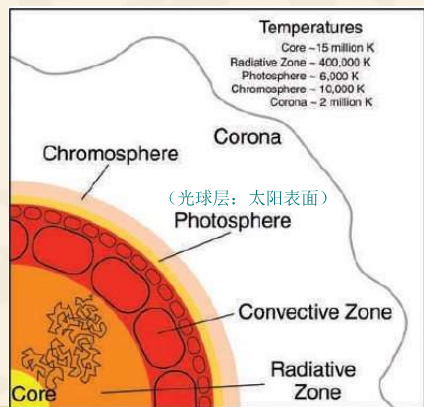


PP链的分支



❖ 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



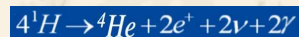
❖ 太阳核燃烧的质量比

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:



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

太阳质量燃烧率 (假设100%产能率):

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

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?

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

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

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

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

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

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)

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

太阳释放能量~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
 - PPIII: ~7-14 MeV, 相对易测
- ❖ Ray Davis, 1970s, PPIII中微子
 - $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$
 - 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)

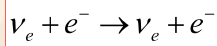
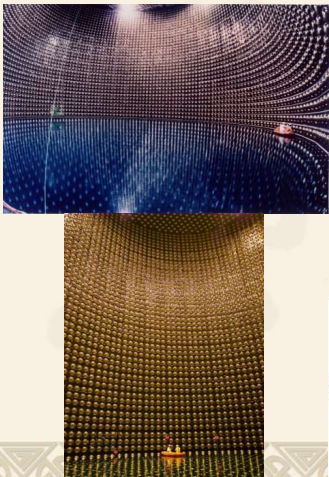


中微子探测

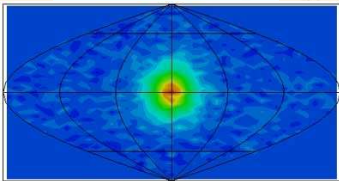
探测中微子, 相当于在整个撒哈拉大沙漠中寻找一粒沙子
—— 诺贝尔奖委员会

- $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ USA, 615吨四氯乙烯
Davis (2002年获诺贝尔奖)
- $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ USSR, Italy
- $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ 日本神冈, 2140吨水
小柴昌俊 (2002年获诺贝尔奖)
- $\nu_e + {}^2\text{D} \rightarrow p + p + e^-$ 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)



日本神冈, 2140吨水
中微子短缺!



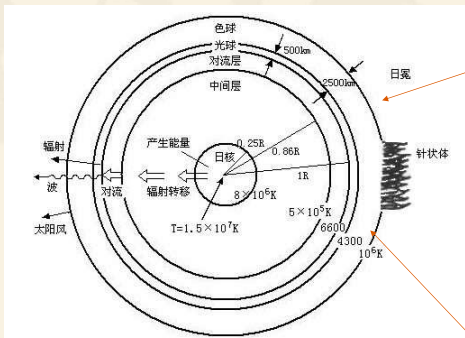
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

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

太阳大气: 光球层、色球层、日冕



$T \sim 2 \times 10^6 \text{K}$

色球层的密度:
 10^{-4} 光球层密度

转变层
(~100km)

色球层 (玫瑰红辉光——氢线Alpha主导; 日全食时观测)



NSF 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 the telescope, visit www.nso.edu.

Inouye Solar Telescope close-up 2,000 km (4,350 miles)

Inouye Solar Telescope Full image

目前最大的太阳望远镜 (D=4m) : 35km的空间分辨率!

NSO AURA

好吃不腻的太阳牌爆米花——“太阳米粒”

NSF National Science Foundation Daniel K. Inouye Solar Telescope 太阳黑子

Observatory / URA / NSF

太阳耀斑

尺度：
~1000Km

持续时间：
5-10分钟

2001/04/01 13:19

日冕

磁重联加热

大小依赖于太阳的活动：~几倍的太阳半径
成份：质子、高度电离的离子、高能电子
密度低：~ 10^{-14} 地球表面的密度
光度低（可见光）：~ 10^{-6} 光球层的光度

www.HrEllipses.com © 2004 F. Frenck

- ❖ 日冕的观测
 - 日全食
 - 日冕仪
- ❖ “氦”元素（Coronium）：
 - 发射线（日全食时观测）
 - 绿线
 - 高度电离的铁离子发射线

太阳风

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

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

太阳风单位时间穿过单位面积的质量：

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

(1amu * n * v)

太阳每年损失的质量：

$$6 \times 10^{-15} kg \times 4\pi(1.5 \times 10^{11})^2 \times 86400 \times 365 \approx 5 \times 10^{16} kg$$

太阳质量损失时标：

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

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)

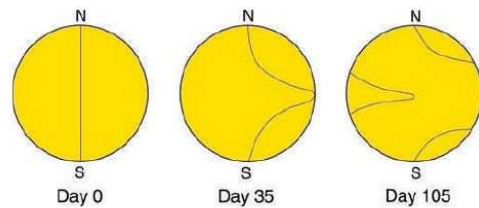
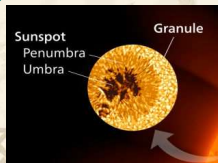
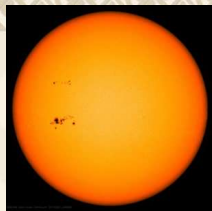


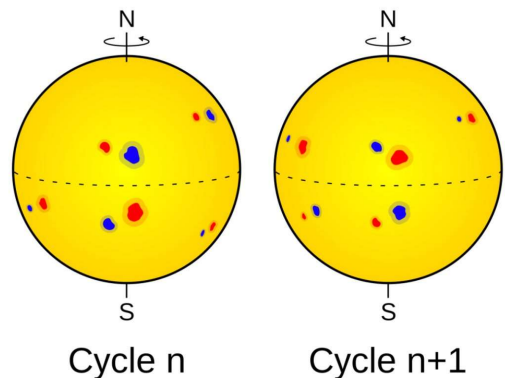
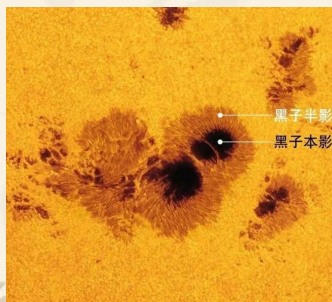
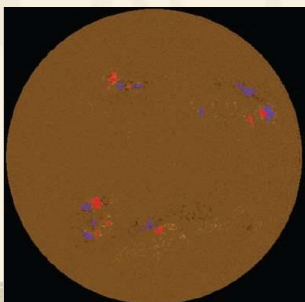
Figure 2.10 The winding of the Sun's magnetic field due to the differential rotation of the Sun.

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!

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



海耳周期示意图 | Wikipedia

日珥、太阳耀斑、太阳风与地球磁层的作用



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)



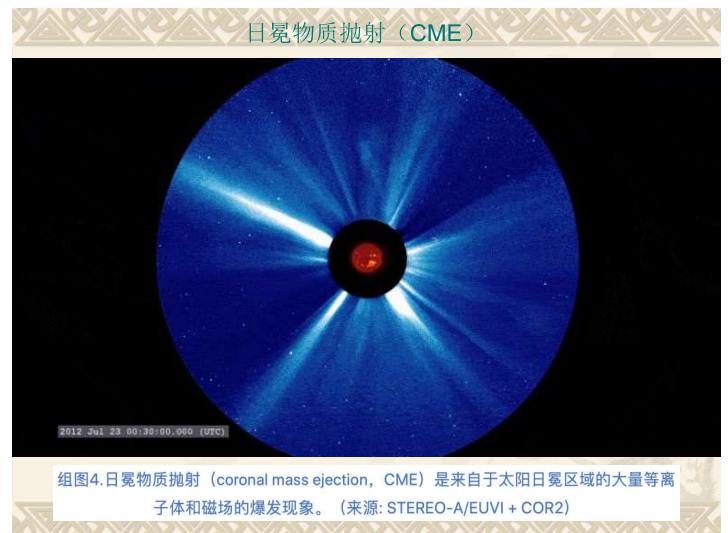
The Sun Unleashed: Monster Filament in Ultraviolet

太阳耀发



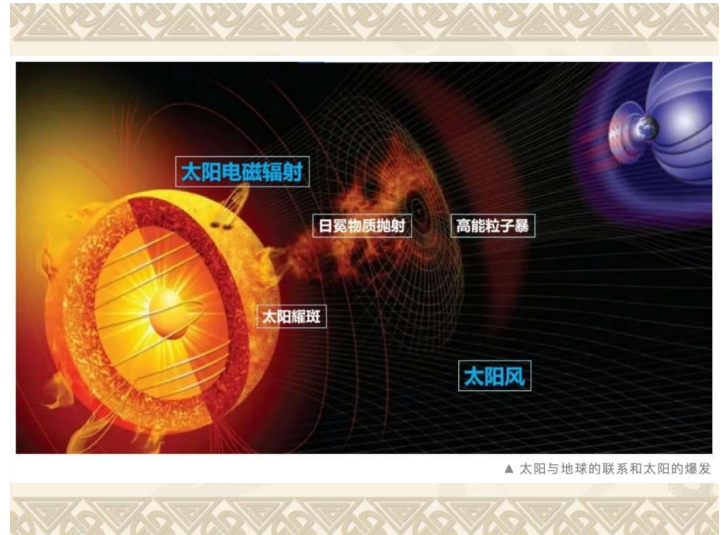
沈悦：“这次大范围低纬度极光现象的罪魁祸首——一次极大的太阳风暴耀斑爆发释放总能量相当于上亿颗原子弹爆炸。爆发产生大量高能带电粒子轰击太阳系。如果地球没有磁层保护的话，大家都歇菜了。对宇宙要充满敬畏，哪怕是小小的太阳系，危险无处不在。”

2024：太阳活动极大年

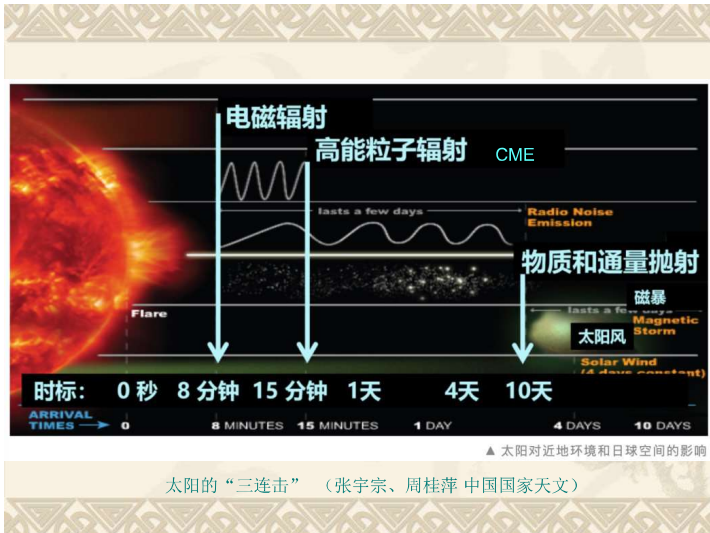


日冕物质抛射 (CME)

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)



▲ 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)

- ❖ 极光 (Aurora)
 - 北极光 (Aurora Borealis)
 - 南极光 (Aurora Australis)
 - Aurora—[罗神]曙光女神
 - Borealis—[希腊]北极风
 - Australis—[拉丁]南
- ❖ 极光特征
 - 绿、红光
 - 常出现在春分、秋分时
- ❖ 产生机制: 太阳风与地球大气中的中性原子的碰撞—激发—退激发



Figure 2.15 An auroral display. Image: Wikipedia Commons.

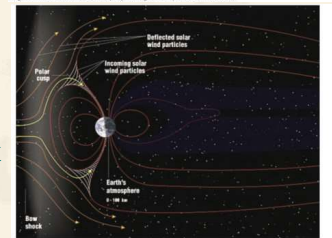


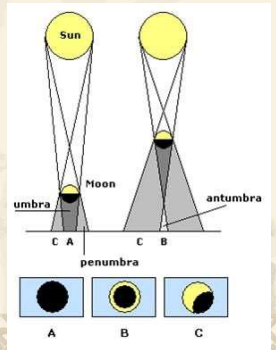
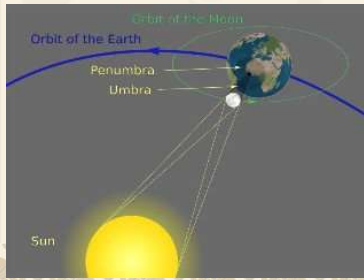
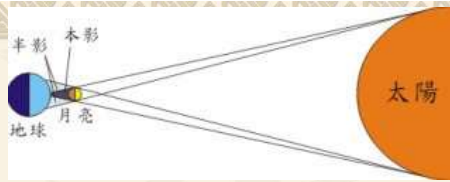
Figure 2.14 The path of solar wind particles towards the polar regions of the Earth. Image: Wikipedia Commons.

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

日食

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

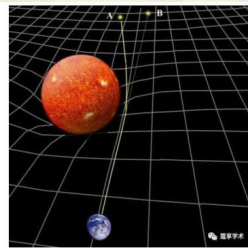
日食的形成



日全食过程



利用日全食检验GR:



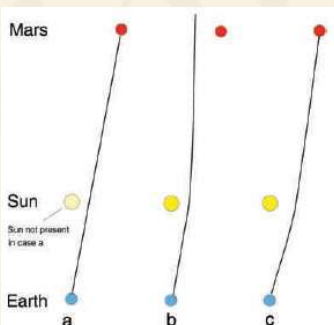
图：天体的质量导致周围的时空弯曲，本来应该是直线的光在弯曲时空中走曲线；天体质量越大，周围的时空与光的曲线弯曲的程度更；天体半径越小，周围的时空与光的曲线弯曲的程度更。（图片来源：网络）

光线偏折量含有因子(1+r)/2; r为空间曲率(牛顿力学=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 +/- 0.12
- 1922: W. Campbell
- 观测值: 1.72 +/- 0.11
- 利用依巴谷卫星和VLBI:
- 依巴谷: ~0.3%
- VLBI: ~0.02%

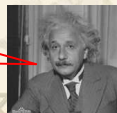
Shapiro时延 (Shapiro Delay)



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

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

又有作业啦!



第三章: 我们的太阳系2—行星

本章内容:

- 如何定义行星?
- 如何测量行星的属性?
- 太阳系内的天体各自有哪些特点?
 - 八大行星
 - 小行星带、近地天体
 - 冥王星、Eris
 - 彗星
 - 流星
 - 星际天体



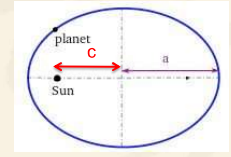
行星轨道

❖ 行星的定义

- 2003UB313的发现 (2005) : Eris
比冥王星略大, $D=96.7AU$
- 冥王星被开除(不符合下面的第三个条件)
大的椭圆轨道, 大的轨道倾角
- 行星的定义 (IAU大会 2006.8)
 - 绕太阳公转
 - 质量足够大, 近球形, 流体静力学平衡
 - 轨道附近不存在其它质量大致相同的天体
- 矮行星的定义 (满足条件一二, 不满足三, 非卫星)

❖ 椭圆轨道: $e=c/a$, a

- 近日点= $a(1-e)$
- 远日点= $a(1+e)$



❖ 离心率

- 金星: 0.007
- 水星: 0.205
- 海王星: 0.01
- 冥王星: 0.249
- 地球: 0.017
- Eris: 0.441

冥王星有时可以比海王星离太阳还近!

火星与地球的距离变化

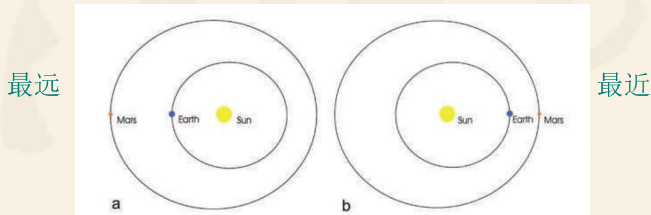
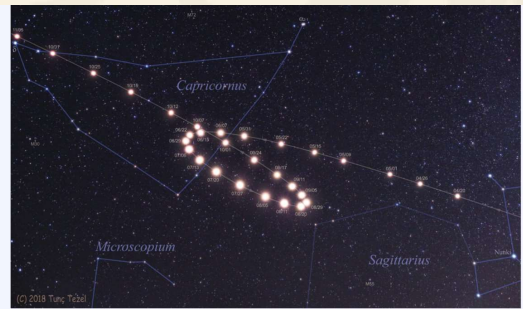


Figure 3.2 The situations when Mars is seen with the smallest (a) and largest (b) angular sizes when at opposition. (此图为特例: 冲日时的情形)

2003.8.27 → 2012.3.3 → 2018.7.27

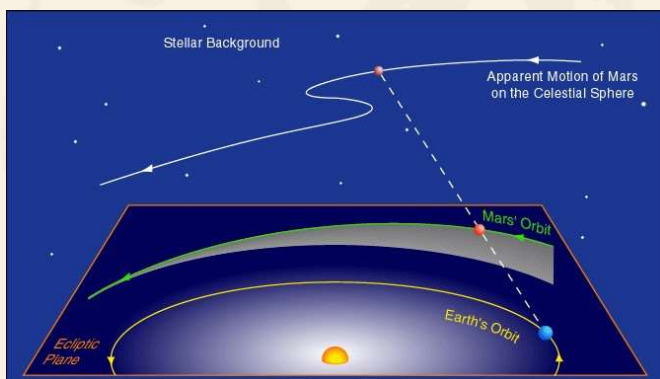
25" → 13.89" → 24.31"

火星的逆行



Mars in the Loop
Image Credits & Copyright: Tom Ivers (TWAN)
Explanation: This composite of images spaced some 5 to 9 days apart, from late April (bottom right) through November 5 (top left), traces the retrograde motion of reddish-colored Mars through planet Earth's night sky. To connect the dots and draw in this 2018 Mars retrograde loop, just slide your cursor over the picture (and check out the animation). But Mars didn't actually reverse the direction of its orbit. Instead, the apparent backwards motion with respect to the background stars is a reflection of the motion of the Earth itself. Retrograde motion can happen each time Earth overtakes and laps planets orbiting farther from the Sun, the Earth moving more rapidly through its own relatively close orbit. On July 27, Mars was near its favorable 2018 perihelion opposition, when Mars was closest to the Sun in its orbit while also opposite the Sun in Earth's sky. For that date, the frame used in this composite was taken during the www.nasa.gov link below.

火星的逆行



轨道倾角:

- 地球: 0度
- 水星: 7度
- 冥王星: 17度
- Eris: 44.2度
- 其它行星的轨道倾角很小

行星的属性

❖ 质量的测定

- 存在天然的卫星：地球、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星（Charon）、Eris（Dysnomia）
- 在轨人造卫星：麦哲伦宇宙飞船绕金星
- 人造卫星飞经：如水手10号飞经水星

火星质量的测定

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

Phobos: $T=7h39.2m=27552s$, $a=9.3772 \times 10^6 m$

$$M = 4 \times (3.14159)^2 \times (9.3772 \times 10^6)^3 / [6.67 \times 10^{-11} \times (2.7552 \times 10^4)^2] kg = 6.43 \times 10^{23} kg$$

❖ 行星的密度

土星：等效半径 $\sim 59\,000\ km$

$$V = 7.76 \times 10^{23} m^3, \quad M = 5.7 \times 10^{26} kg$$

平均密度 = $662\ kg\ m^{-3}$ (准确值 $687\ kg\ m^{-3}$)

比水的密度还小!

❖ 转动周期

- 表面有“标志”：火星（大峡谷）、木星（大红斑）、土星（长圆形特征）
- 行星雷达
 - 水星：模糊不清
 - 金星：有云覆盖



多普勒展宽：转动速度

金星：1960s, $T=243.01$ 天，比公转周期长18.3天！而且反转（逆行：另有天王、冥王星）

❖ 行星的温度

- 宇宙飞船直接测量：金星、火星
- （黑体）辐射测量
 - 水星：射电测量
 - 地球轨道外面行星：红外辐射测量
- 理论计算：接受太阳的辐射 \leftrightarrow 辐射能量
(假设100%吸收率)

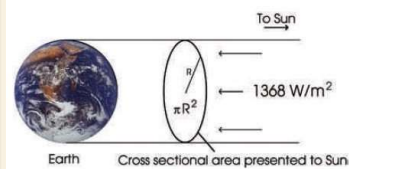


Figure 3.4 The Earth's effective area for absorption of solar energy.

$$\pi R^2 SC = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$T = (SC/4\sigma)^{1/4} = [1368 / (4 \times 5.7 \times 10^{-8})]^{1/4} = 278\ K$$

地球~50%为云，~77%的吸收率

$$T_{\text{地球}} \sim 260\ K$$

温室效应： CO_2 、 CH_4 、 H_2O

$$T_{\text{地球}} \sim 288\ K$$

适合人类居住！

❖ 全球气候变暖

- 大气中主要成份 N_2 、 O_2 不是温室气体：它们既不吸收也不发射红外辐射
- CO_2 是主要的温室气体
 - 过去几十万年内二氧化碳比例稳定
 - 矿物燃料燃烧产生二氧化碳 \rightarrow 全球气候变暖
- H_2O ：占36%-66%的温室作用，但作用稳定
- CH_4 ：比 CO_2 作用强20倍！
人类活动： $\sim 5 \times 10^8$ 吨/年
- N_2O ：
人类活动： $\sim (7-13) \times 10^6$ 吨/年
- 地球平均温度增加2度，后果非常严重！

❖ 反照率

- 地球: ~0.37
- 金星: ~0.7
- 火星: ~0.15

但是, 存在大量的CO₂, 温室效应, 温度高!

但是, 大气中CO₂非常少(慢慢失去大气), 只有地球的1/100, 目前的温度低!

历史上, 火山喷发: 水蒸气、二氧化碳、甲烷, 温室效应, 可能曾经温度适宜生命生存。

行星实际温度: 太阳辐射吸收率、反照率、温室气体作用

❖ 行星大气

- 原初大气: H₂、He (非类地行星)
- 类地行星: 温度高、引力小, 轻元素逃逸

$$1/2mv^2 = 3/2kT \quad k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$v = (3kT/m)^{1/2}$$

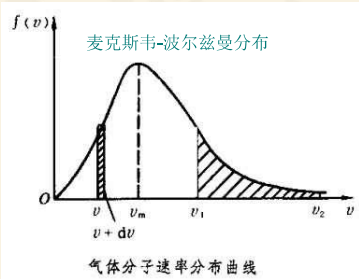
氮气的平均速度 (T=300K):

$$v = [(3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300) / 4.68 \times 10^{-26}]^{1/2} = 0.515 \text{ km s}^{-1}$$

氧气的平均速度: ~0.48 km/s

地球的逃逸速度: $v_{\text{esc}} \sim 11.2 \text{ km/s}$

$$f(v)dv = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) v^2 dv$$



- $v > 3v_m: \sim 0.5 \times 10^6$
- $v > 5v_m: \sim 1.0 \times 10^{16}$
- $v_{\text{esc}} \geq 6v_m: \text{No-Escaping}$

地球大气:

$$v_{N_2}, v_{O_2} \leq \frac{1}{6} v_{\text{esc}}$$

$$v_{H_2} \sim 2 \text{ km/s} > \frac{1}{6} v_{\text{esc}}$$

无氢气!
(0.000055%)

月球:

$$v_{\text{esc}} = 2.4 \text{ km/s}, \sim T = 300 \text{ K}$$

$$v_{N_2}, v_{O_2} \approx \frac{1}{5} v_{\text{esc}}$$

无大气!

水星:

$$v_{\text{esc}} = 4.2 \text{ km/s}, \sim T = 700 \text{ K}$$

$$v_{N_2}, v_{O_2} \approx 0.8 \text{ km/s} \geq \frac{1}{6} v_{\text{esc}}$$

无大气!

木星:

$$v_{\text{esc}} = 60 \text{ km/s}, \sim T = 100 \text{ K}$$

$$v_{H_2} \approx 1 \text{ km/s} \leq \frac{1}{6} v_{\text{esc}}$$

主要为氢气!

小结:

- ① 水星、月球以及所有的卫星 (除了 *Titan* 以及 *Triton*) 无大气, 水星有少量的俘获太阳风的临时大气 (氢、氦)
- ② 类地行星: 无氢、氦, 原初大气逃逸
- ③ 地外行星 (质量大、温度低): 保留了原初的氢、氦; *Titan* 以及 *Triton* 温度太低, 大气中主要为氮气
- ④ 矮行星: 冥王星、*Eris*, 温度低, 氮气等在表面冻结

❖ 次级大气

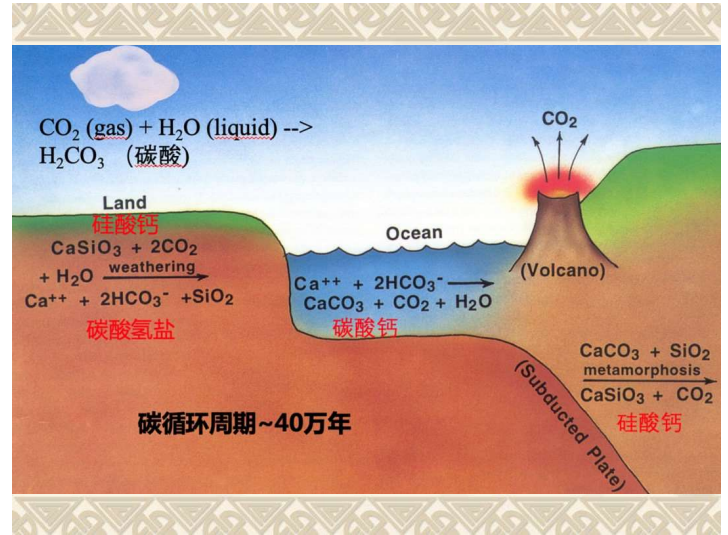
- 金星、地球、火星: 火山喷发 (水蒸气、二氧化碳、二氧化硫、硫化氢、氨气、氮气以及氧化氮等)
- 地球: 早期1%为原初大气
- 金星和火星中外层大气中的水分子受到紫外光线的照射分解为H+OH, 从大气层中逃逸 (因而无水气)

2022.01
汤加火山
~1000颗广岛原子弹



地球大气的演化

- 原初大气：氢气和氦气，逃逸
- 次级大气：火山喷发，二氧化碳、水蒸气以及一些氮气，无氧气，是目前大气密度的100倍
- 地球变冷：二氧化碳融入海洋，沉淀为碳酸盐
- 33亿年前，产氧细菌产生氧气，持续大概几十亿年；细菌、氧气以及氨气相互作用，产生氮气；紫外光照射氨气，光解离产生氮气
- 植被增加，产生更多氧气，臭氧层开始形成，吸收紫外光，保护生命在陆地上以及海洋中形成
- 2亿年前，大气的成份：~35%氧气，剩下主要是氮气以及次级气体（不容易融入水）
- 火山活动循环：补充大气，其中有大量二氧化碳，地球变暖，适合生命生存；二氧化碳融入水（碳酸盐及海洋生物产生的碳酸钙沉入大海），地球运动（火山）又释放到大气中

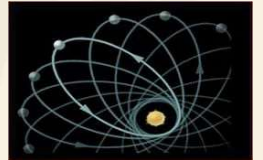


太阳系中的行星

- ❖ 主要通过空间探测（绕、落、飞过）了解行星的特性
- ❖ 水星

Mass	3.3 × 10 ²³ kg	0.055 that of Earth
Mean radius	2439.7 km	0.383 that of Earth
Escape velocity	4.25 km s ⁻¹	
Rotation period	58.646 days	
Semi-major axis of orbit	57 909 068 km	0.387 AU
Average orbital speed	47.87 km	
Eccentricity	0.2053	
Period	87.97 days	
Orbital inclination	7°	

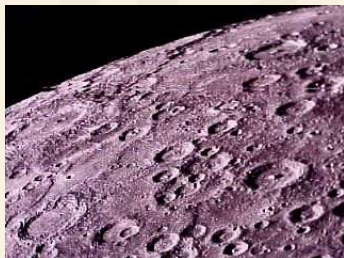
Mercury



- ❖ Closest planet to Sun
- ❖ Very elliptical orbit (e~0.21)
- ❖ Only 3000 miles (~5000 km) in diameter
- ❖ Rotation locked to Sun: 3 rotations in 2 orbits
- ❖ Moon-like on the outside (craters: 环形山)
- ❖ Earth-like on the inside (dense core, magnetic field)

Mercury has Craters

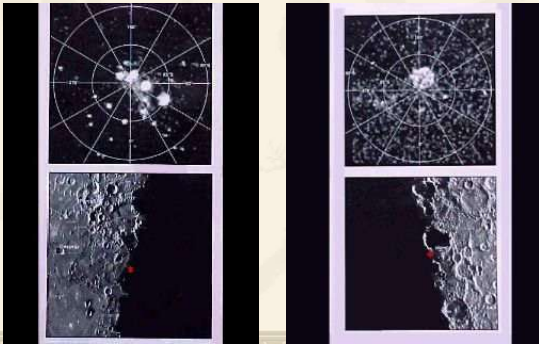
- ❖ Not as dense as on Moon
- ❖ Most of Mercury covered with lava plains (intercrater plains)



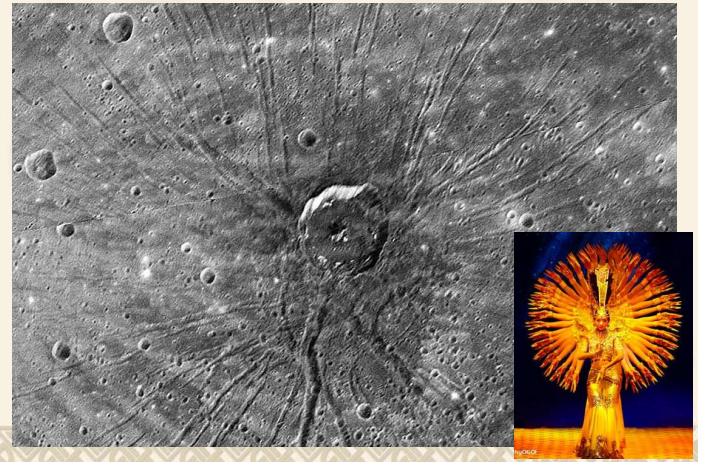
And Mercury has the last thing you'd expect to find: ice caps



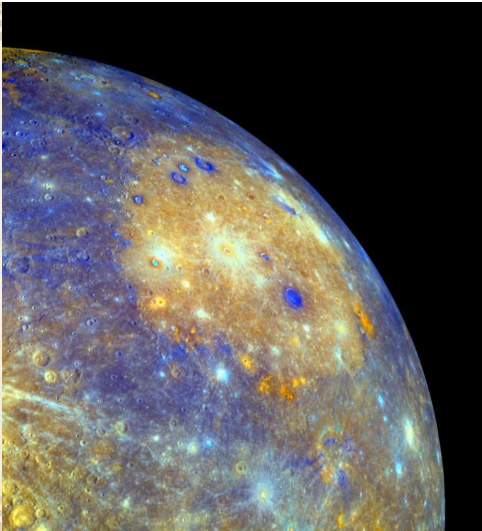
Mercury's ice seems to be hiding in polar craters



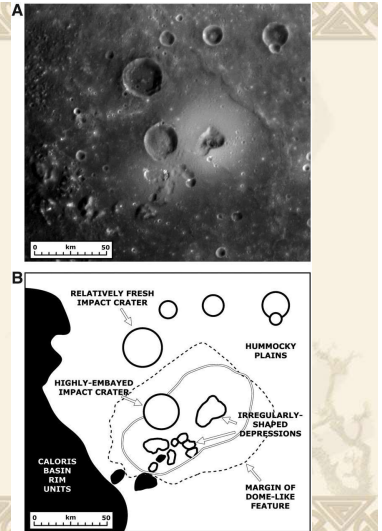
"Spider" Crater



Mercury has a huge impact basin, the Caloris Basin



Volcano on Mercury



Venus

Mass	4.8685×10^{24} kg	0.815 that of Earth
Radius	6051.8 km	0.95 that of Earth
Escape velocity	10.46 km s^{-1}	
Rotation period	-243 days (The minus sign indicates retrograde rotation.)	
Axial tilt	<u>177.35°</u>	
Semi-major axis of orbit	108 208 930 km	0.7233 AU
Average orbital speed	35.02 km s^{-1}	
Eccentricity	0.0068	
Period	<u>224.7 days</u>	
Orbital inclination	3.39°	



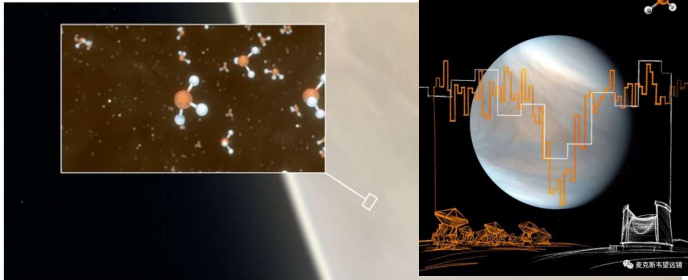
Venus

- ❖ Only a bit smaller than Earth
- ❖ Nearest planet (26 million miles)
- ❖ Shows phases as it orbits the Sun
- ❖ No magnetic field (only planet)
- ❖ 金星凌日：每120年发生
- ❖ Atmosphere mostly Carbon Dioxide
 - ~90 times as dense as Earth
 - Runaway Greenhouse Effect
 - Surface Temperature 450 C (850 F)
 - High winds within a highly turbulent atmosphere
 - Albedo (反照率) ~0.7, mag ~-4 (after Moon)



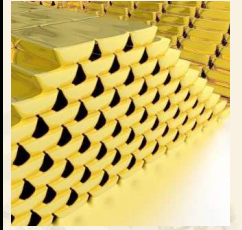
Possible Marker of Life Spotted on Venus

14 September 2020

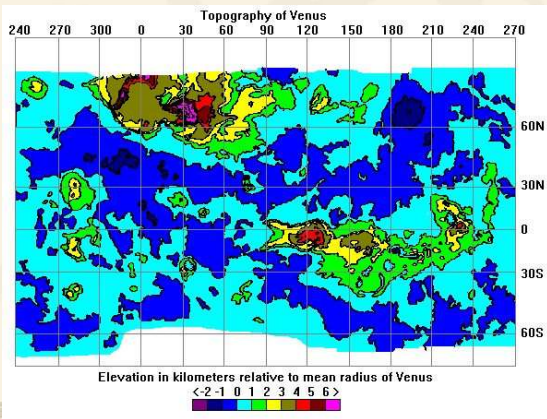


An international team of astronomers today announced the discovery of a rare molecule — phosphine — in the clouds of Venus. On Earth, this gas is only made industrially or by microbes that thrive in oxygen-free environments. Astronomers have speculated for decades that high clouds on Venus could offer a home for microbes — floating free of the scorching surface but needing to tolerate very high acidity. The detection of phosphine could point to such extra-terrestrial “aerial” life.

Venus from Pioneer Venus Orbiter



Venus Topography



Venus Radar Image (Magellan)

(98% surface in 4.5 yrs)



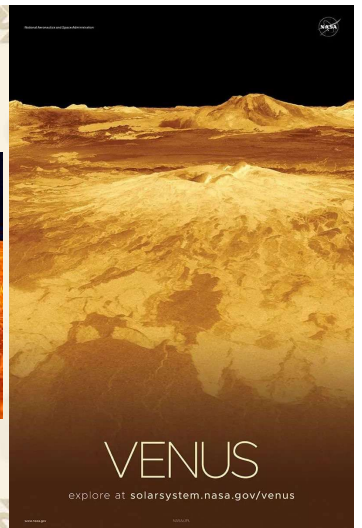
Venus Has Craters



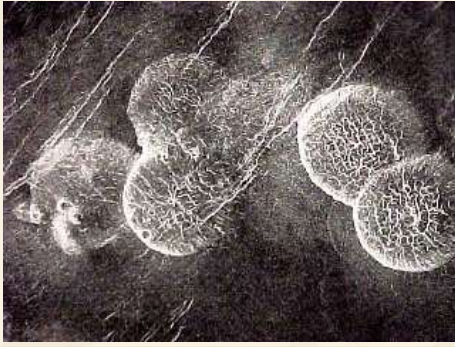
Venus has Large Volcanoes



167个尺寸大于100km的火山



Venus has Unusual Small Volcanoes



D~50km, H~1km

Venus Differs from Earth in One Important Way:

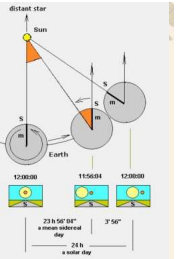
- ❖ Venus has no Plate Tectonics (板块结构)
- ❖ Earth's internal heat causes hot material to rise within Earth and plates to move
- ❖ Venus' crust is too rigid
- ❖ Heat builds up and escapes in planet-wide volcanic activity

Why Venus Has No Plate Tectonics

- ❖ It's *hot!* We'd expect hot rocks to be *less* rigid, not more!
- ❖ But it's also *dry!* Dry rocks are ten times stronger at high temperatures than wet rocks.
- ❖ Earth is wet. That affects not just the outside, but the inside as well.

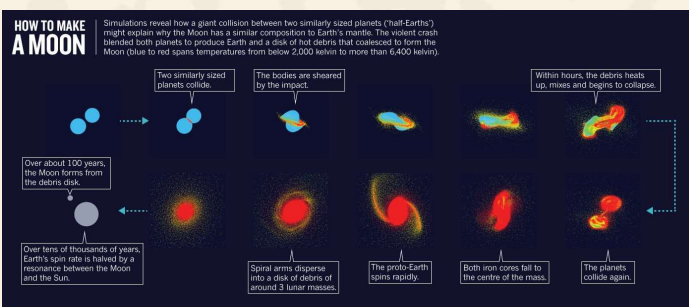
地球

Mass	5.9736×10^{24} kg	
Radius (mean)	6371 km	
Escape velocity	11.18 km s^{-1}	
Day length	1 day	
Rotation period	<u>23 h 56 min 04 s</u> (sidereal day)	
Axial tilt	23.44°	
Semi-major axis of orbit	149 597 887.5 km	1 AU
Average Orbital Speed	<u>29.78 km s^{-1}</u>	
Eccentricity	0.0167	
Period	365.256366 days	
Orbital inclination	0° (Our orbit provides the reference plane.)	



❖ 地月系统（双行星）的形成

类似M_{地球}天体与地球相撞



(Robin Canup, Nature, 2013)

(撞击说, 分裂说, 同源说, 俘获说)

地月系统（双行星）的形成



❖ 地月系统（双行星）的形成

类似M_{地球}天体与地球相撞

❖ 地球大气

火山喷发：次级大气→水（部分来自彗星）凝结→海洋
→4x10⁹年：生命起源→光合作用：吸收太阳能并产生氧气
→臭氧层形成吸收大量紫外辐射：保护生命

❖ 生命起源

- 地球板块运动：形成大陆--生命活动场所
- 寒武纪（5.4-5.1亿年前）：多细胞生命开始繁荣
- 生命灭绝：随后的5.35亿年发生过5次生命大灭绝
- 最近的一次：6.5千万年前，小行星或彗星撞击地球（D~10公里），恐龙灭绝，~70%生命灭绝，小的哺乳类动物幸存下来→人类



❖ 地球的构造：地核、地幔和地壳



- 赤道略大：ΔR~43 km
- 最高峰—喜马拉雅山珠峰；最低谷--Mariana 海底峡谷
- 地核温度：~7000K
放射性物质衰变加热：放射性同位素（钾、铀、钍），半衰期：~1x10⁹年
- 岩浆对流-板块运动-火山喷发-二氧化碳重新进入大气
- 大气成分（78%氮气，21%氧气，1%水蒸气、二氧化碳、臭氧、甲烷、其它微量气体）：温室效应利于生命存在



❖ 地外生命？

- 地球是普通的一个行星：地外生命？
- 地球的特殊之处
 - 地球的板块运动：海底的二氧化碳（温室气体）释放到大气中
 - 木星降低小行星和彗星撞击地球的概率
 - 月亮使地球的自转轴稳定

9 STROKES OF LUCK PRODUCED OASIS EARTH

Our hospitable world should not exist. If Earth had not collided with another planet, it would have been barren today—and that is only one of many ifs. As scientists zero in on alien worlds, they are realizing that Earth may be the luckiest planet in the entire universe.

1. A planet suitable for life.
2. A planet with the amount of liquid water needed by life.
3. Earth orbiting in the "habitable zone."

→ EARTH FORMS

4. A planet with the right amount of water.
5. The right amount of oxygen.
6. Active geology on Earth's surface.

→ LIFE BECOMES POSSIBLE

7. A planet with the right amount of water.
8. The right amount of oxygen.
9. The right amount of active geology.

→ LIFE IS PROTECTED

10. A planet with the right amount of water.
11. The right amount of oxygen.
12. The right amount of active geology.

0.0000 00000 00781 25%*

with the likelihood of Earth developing conditions that could support life. Scientists estimate that makes us one planet in 40 quadrillion. One Earth in 40 quadrillion of 40 quadrillion.

地球形成：超新星提供热，土星阻止木星可能造成的破坏，地球形成一个很窄的“地段”生命成为可能；地月碰撞使得地球尺寸完美，月球使得地球四季稳定，活跃的地质活动是地球的恒温器生命受到保护；免费的氧气供应，木星防止小行星撞击，地球形成时保留住了磁场

月球

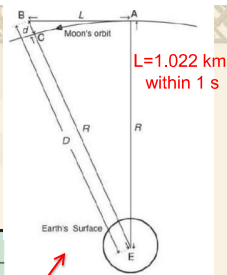
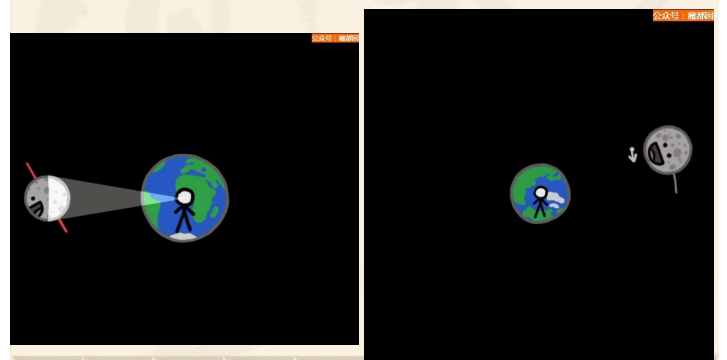


Figure 1.18 Geometry of the Earth-Moon system.

Mass	7.3477 × 10 ²² kg
Radius (mean)	1737.1 km
Rotation period	27.3216 days (in synchronous rotation)
Semi-major axis of orbit	384 399 km
Eccentricity	0.0549
Orbital period	27.3216 days
Average orbital speed	1.022 km s ⁻¹
Synodic period	29.5306 days (from new moon to new moon)
Orbital inclination	5.145° (with respect to the ecliptic)

地球潮汐锁定月球



❖ 基本特性

- 半径：约为地球半径的1/4
- 目前距离地球：~30倍地球直径
- 表面引力加速度：~1/6地球值
- 椭圆轨道：角尺寸~12%的变化（0.5548度→0.4923度）
- 月天平动（Libration）：~59%表面可观测
 - 椭圆轨道
 - 轨道倾角
 - 不同空间位置观测月升、月降
- 反照率：很小，~8%（类似于煤块）

❖ 月貌

- 月陆（亮）和月海（暗）：肉眼可见
- 月球正面：~32%月海；反面：~2%月海（苏联 Luna 3, 1959）
- 月海表面覆盖玄武岩：很多撞击坑，火山熔岩进入凝结；但不像月陆那样多坑，表明其形成于太阳系形成的后期（天体撞击开始减少）
- 为什么月球正面月海多？
 - 正面半球放射性物质多、加热：火山喷发，富含放射性元素的熔岩填入碰撞盆地
 - 正面地壳薄：易于火山喷发
 - 地球的引力作用，天体容易撞击正面
- 为什么月陆比月海高？--密度小

月球表面“月貌”成因：撞击



● 环形山

北极有些地方常年有日照：太阳能发电
在极冠区某些环形山底部：常年无日照，冰湖（水冰、氧气、氢气：月球基地？）---雷达探测，但仍有争议

● 月球坑/环形山

- 数量：50万直径大于1km
- 最大：D~2240km, 13km深
- 著名：第谷环形山和哥白尼环形山
- 月壤：~3-5m(月海)；~10-20m(月陆)
- 岩石床：月壤之下，~10-40km厚
- 壳(~50km)、幔和核(~350km，至少部分熔化)：阿波罗放置的月震仪测量

2020/10/26

NASA's SOFIA Discovers Water on Sunlit Surface of Moon

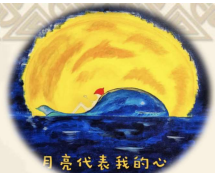


数据显示，一立方米的月球表面土壤中，水的浓度为百万分之100至百万分之412——大致相当于一瓶12盎司（约340克）的水。

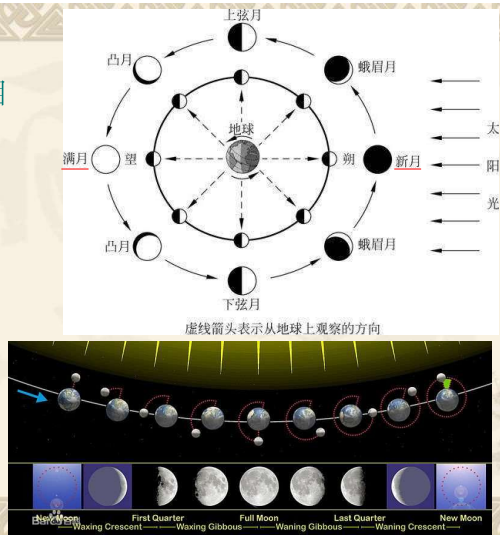
据NASA官网介绍，该机构的“索菲亚平流层红外天文台”(SOFIA)首次证实，受到阳光照射的月球表面有水存在。“这一发现表明，水可能分布在月球表面，而不仅限于寒冷、阴暗的地方。”

❖ 潮汐

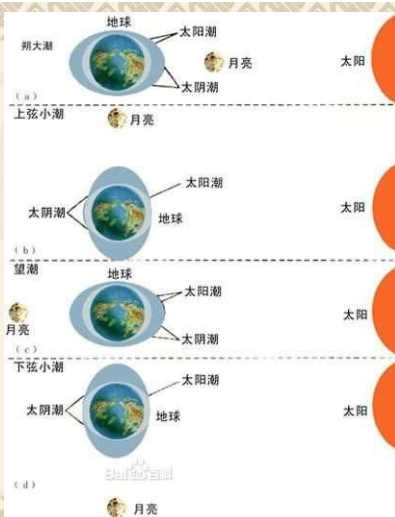
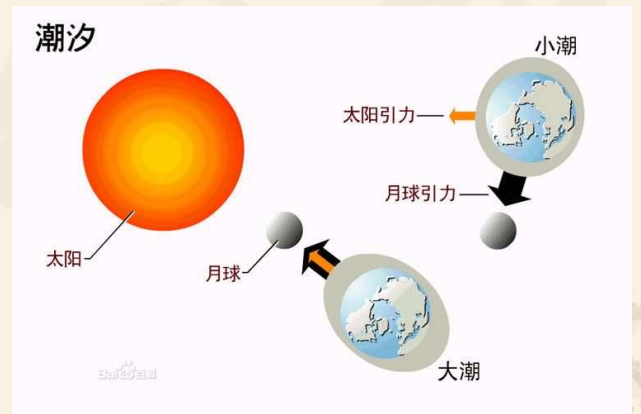
- 潮汐力：~1/r³
- 一天两潮：地球自转
- 每天大概推迟~50分钟：月球公转
- 太阳潮汐力：~46%月球
- 新月和满月时加强
- 地球近日点（冬天）：加强
- ❖ 月球与海洋的引力耦合
 - 地球自转导致潮汐鼓包并不直接指向/背离月球
 - 角动量从地球往月球转移
 - 月球远离地球：~3.8cm/年



月相



潮汐



❖ 月食

- 月亮并不完全暗：地球大气层散射光照到月球
- 如果地球火山喷发，大气中尘埃遮蔽，月球非常暗灰；否则橘红色

❖ 月球探测

- 着陆：1965年Lunar 9, lunar rovers, NASA Surveyor
- 阿波罗计划：六次12人登月 (Apollo 11,12,14-17)
- 取样回地球：Luna 16, 20, 24
- Apollo: 400kg岩石和月壤；中国嫦娥工程
- Apollo留下科学装置：热流计、磁场仪、地震仪、反射器



月全食时的照片

火星

Mass	6.4185×10^{23} kg	0.107 that of Earth
Radius (equatorial)	3,396 km	0.533 that of Earth
Radius (polar)	3,376 km	0.531 that of Earth
Escape velocity	5.027 km s^{-1}	
Rotation rate	<u>1.026 days</u>	
Axial tilt	<u>25.19°</u>	
Semi-major axis of orbit	227 936 637 km	1.52 AU
Average orbital speed	24.077 km s^{-1}	
Eccentricity	0.0934	
Orbital period	686.96 days	1.8808 Julian years
Orbital inclination	1.85°	

❖ 基本特性

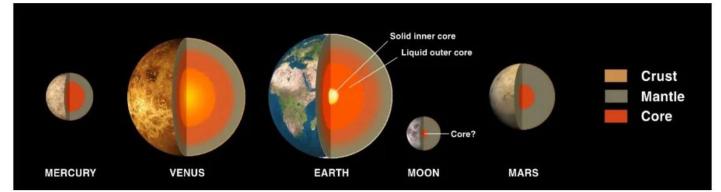
- 红色星球，岩石星球
- 半径：地球一半
- 质量：地球十分之一
- 红色：铁的氧化物，赤铁矿
- 大气层很薄：1/100地球大气（磁场很弱、质量小）
CO₂: 95%; N₂: 3%; Ar: 1.6%, 微量H₂O和O₂
- 自转倾角与地球相似：一年四季，1火星年~2地球年
- 温度：-140度→20度
- 沙尘暴：有时覆盖整个火星表面
- 两极冠地区：主要为水冰，覆盖一层干冰
- 火星有生命吗？
- 火星的卫星：Phobos (D=22km), Deimos (D=6km)，被俘获的小行星？

如果信念有颜色
那一定是红



红
星
是
谁
！
理
管
交
迎
！
郭
沐
若

类地行星的内部结构



行星的内部结构一般为核、幔、壳组成的层状结构

❖ 谷神星和小行星

● Titius-Bode定律

$$\text{Distance} = i^0.3 + 0.4, i = 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64$$

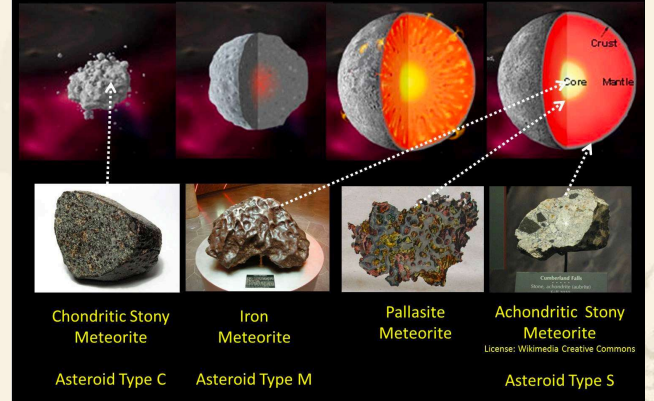
(海王星不符合)

0.4	0.7	1.0	1.6	2.8	5.2	10	19.6
The planets then known fell at distances:							
0.39	0.72	1.0	1.52	?	5.2	9.5	19.2
This suggested that a planet might exist at a distance of ~2.8 AU.							

- 1768年Bode预言
- 发现了一些小行星
- 1801.1.1: 发现谷神星，含1/3小行星带中质量 (>170 000具有计算好的轨道)

Different Asteroid & Meteorite Types

Source: Smithsonian Museum of Natural History http://www.mnh.si.edu/earth/text/5_1_4_0.html



小行星与陨石的材质分类

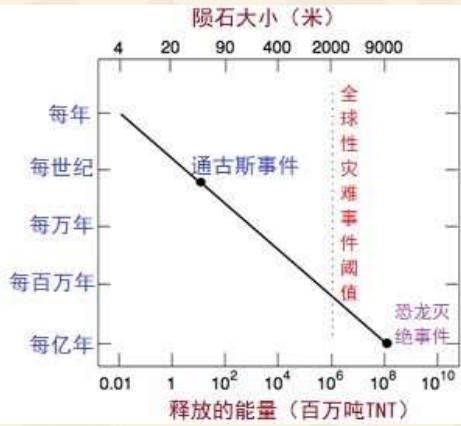


近地天体



- ❖ 小行星在带内引力作用及木星引力扰动下获得内太阳系轨道，撞击地球
- ❖ NEO (near earth objects): 小行星、彗星、陨石 (D<50m); >5000颗已探测
- ❖ NASA监测: D>1km的所有NEO; >800颗
- ❖ 1908年6月: 北西伯利亚通古斯大爆炸, 1000倍广岛原子弹, D~50m; >20万类似NEO, 碰撞几率: ~1/500年
- ❖ 最近的预测: 2880年3月16, 1950DA, D=1km, 1/300的概率撞击地球

不同大小的陨石撞击地球的几率分布



(陈鹏飞 南京大学)

木星

Mass	1.9×10^{27} kg	317.8 times that of Earth
Radius (equatorial)	71 492 km	11.21 times that of Earth
Radius (polar)	66 854 km	10.52 times that of Earth
Rotation period	9.925 h	
Axial tilt	3.13°	
Semi-major axis of orbit	778 547 199 km	5.2 AU
Orbital period	4334.5 days	
Average orbital speed	13.07 km s^{-1}	
Eccentricity	0.049	
Orbital inclination	1.3046°	

❖ 基本特性

- 巨气体行星：太阳千分之一质量；2.5倍其它行星质量
- 成份：~71%氢气；~24%氦气；其余重元素
- 结构：致密核+液体金属氢+外层氢气（1000km厚）
- 云：永久覆盖，~50km厚，氨晶体-显灰白色
- 橘红色，棕色：磷、硫化物在太阳紫外照射下
- 大红斑：大于两倍地球，为恒定反气旋风暴（木星自转较快导致强风暴~100m/s）；位置变化，自转周期6天；基本稳定；最早于1831年观测到
- 小红斑：三个小斑并合而成，颜色由白逐渐变红

❖ 木星环：很暗（三个组分）

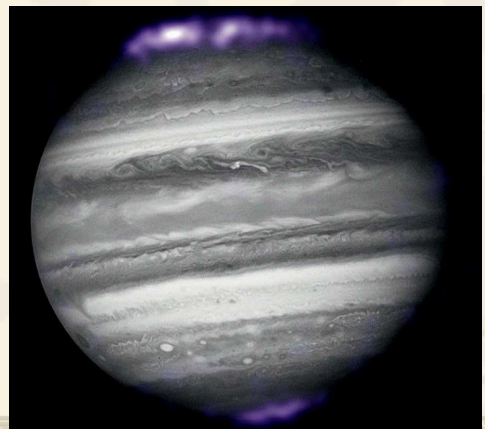
- 内晕
- 亮的主环：尘埃，来自两颗卫星被陨星撞击的抛射物（潮汐力瓦解彗星等小天体？）
- 外部的“薄纱”环：尘埃，来自另外两颗卫星被陨星撞击的抛射物（潮汐力瓦解彗星等小天体？）

❖ 彗木相撞

- 1994年7月发生：Shoemaker-Levy 9的碎裂物
- 被木星俘获（60s-70s），临时卫星，周期~2年
- 1992年7月7日，达到Roche极限，潮汐力瓦解
- 发现：1993年3月24日
- HST观测：裂片尺寸几百米→2km（彗星~5km）
- 一周内23裂片（A to W）连续相撞

- 撞击发生在木星边缘：地球不可直接看到撞击过程，蘑菇云
- Galileo飞船：1994年7月16日，观测撞击产生的火球，T~24000 K
- 地面观测
 - ~3000km高的烟
 - 回落物质形成的暗斑：和地球差不多大，F&G碎片
 - 最后撞击：7月22日，W碎片

NASA/Chandra: 木星的极光



❖ 木星的Galileo卫星

- 四个大的卫星：Io, Europa, Ganymede & Callisto：和月亮差不多大
- 历史意义：1610年Galileo发现，支持哥白尼太阳系模型
- 测量光速：Christensen Roemer (1676)
 - 利用Io被木星掩食的周期(42.5小时)作为时间的标准
 - Io周期在地球相对木星的不同速度运动下不一样，多普勒效应(朝向木星运动的40个掩食周期的总长短了22分钟)：
 - $v/c \sim 11/(42.5 \times 40 \times 60) \sim 1/9300$, $v \sim 30 \text{ km/s}$ → $c \sim 279\,000 \text{ km/s}$
- Io
 - 太阳系第四大卫星
 - 直径：~3642km
 - >400火山：木星潮汐力加热，内部熔化
 - 结构：熔化的铁、硫化铁核+硅岩石壳层；表面大部为红橙色的硫化物，白色的SO₂霜冻；表面100座山，有的比喜马拉雅山高

● Europa

- 太阳系第六大卫星
- 直径：~3000km
- 结构：铁核+硅岩石内层+冰壳层
 - 冰面非常光滑，裂开又由新冰溶合，在液体海洋上，可能宜居

土星

Mass	$5.68 \times 10^{26} \text{ kg}$	95.15 times that of Earth
Radius (equatorial)	60 268 km	9.45 times that of Earth
Radius (polar)	54 364 km	8.55 times that of Earth
Rotation period	10h 32 min to 10h 47 min	
Axial tilt	26.73°	
Semi-major axis of orbit	1 433 449 370 km	9.58 AU
Orbital period	10 832.327 days	29.66 years
Average orbital speed	9.69 km s^{-1}	
Eccentricity	0.056	
Orbital inclination	2.485°	

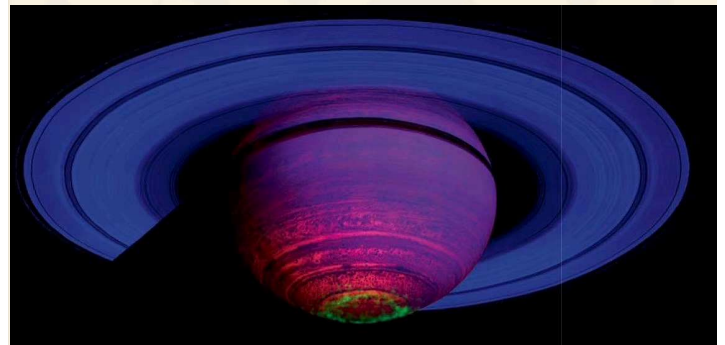
❖ Galileo发现“土星耳朵”，1610年

- Galileo的困惑：土星吃掉自己的孩子？
- 三个东西，相互接触，中间大，外面两个小且在一线上
- 两年后外面的两个消失
- 1613年又出现
- ❖ 惠更斯(1655)：光环系统
- ❖ Cassini(1675)：由很多环组成--Cassini环缝
- ❖ 环的特性：小颗粒，<1km厚，~93%水冰，~7%非晶质碳
- ❖ 从远及近：C、D、F、A、B
 - B和A最明亮、宽，中间为Cassini环缝，B和A实际上由很多狭小的环组成
- ❖ 环的起源：潮汐力瓦解卫星、彗星或陨星
- ❖ 环缝的形成：众多卫星的引力共振，卫星清除缝中粒子



卡西尼环缝、恩克环缝和土卫十八，由SpaceEngine生成 / G. Cataldo, 2015

NASA卡西尼探测器：土星的极光 (大气氢原子受激发)



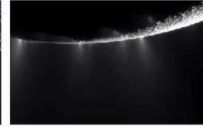
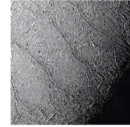
❖ 土卫六 (Titan)

- 太阳系第二大卫星：比水星大
- 唯一具有稠密大气的卫星：~98%氮气，地球大气压1.5倍，大气中存在有机分子：低等生命？
- 表面有液体：极冠区的碳氢化合物（如甲烷）湖
- Tidally locked：同一表面面向土星
- 结构：岩石核+水冰壳层

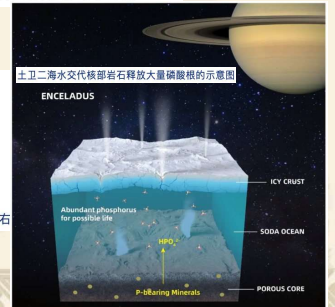
PNAS|土卫二冰下海洋中有丰富的磷供给生命

原创 郝记华 化学星球 2022-09-21 08:00 发表于安徽

近日，中国科学技术大学地球和空间科学学院的郝记华研究员与美国西南研究院的Christopher Glein研究员等学者合作，构建模拟土卫二海水化学，发现土卫二碱性、高碳酸盐的水体中含有很丰富的溶解态磷酸根，可以支持潜在地外生命的起源与繁盛。相关研究成果以“Abundant phosphorus expected for possible life in Enceladus's ocean”发表在国际一流学术期刊《Proceedings of the National Academy of Sciences, USA》上。该发现首次揭示了生命关键营养元素磷在土卫二冰下海洋中可以积累较高浓度，填补了土卫二海洋宜居性研究的重要空白。



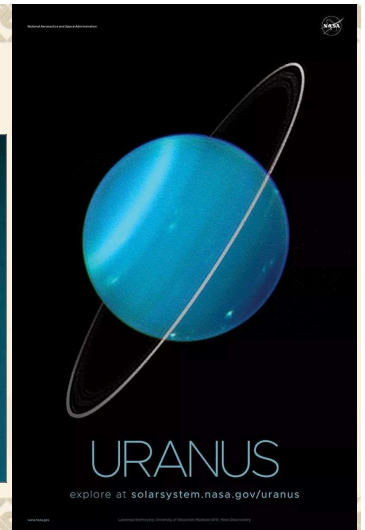
卡西尼号观测到的土卫二冰壳上的老虎纹(左)和南极的水冰羽(右)



天王星

Mass	8.68×10^{25} kg	14.536 times that of Earth
Radius (equatorial)	25 560 km	
Radius (polar)	24 973 km	
Rotation period	0.378 days	
Axial tilt	97.77°	
Semi-major axis of orbit	2 876 697 082 km	19.23 AU
Orbital period	30 799 095 days	84.32 years
Average orbital speed	6.81 km s^{-1}	
Eccentricity	0.0444	
Orbital inclination	0.772°	

天王星



- ❖ 星等：~5.5，移动慢，不易与恒星区分
- ❖ 1781年William Herschel证认为行星
- ❖ 公转周期：~84年
- ❖ 自转：~9h，表面云层可以转得更快（大风）
- ❖ 自转轴：基本在轨道平面内（“滚着”）
- ❖ 巨冰球：~14.5地球质量，密度比水大一些，岩石核（~2M_{地球}）+冰壳层（~11 M_{地球}，水，氨，甲烷等）+外部大气层（~1M_{地球}，氢气和氦气）
- ❖ 冰占大部分质量，常作为ice giant而非gas giant

❖ 天王星的环

- 1977年3月10日：天王星掩食恒星，发现光环，5个环，最外面的最厚，最大的环：R~44, 000km
- 1986年1月：旅行者2号发现11个环
- 2005年12月：HST发现13个环

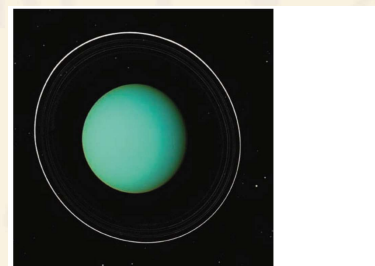
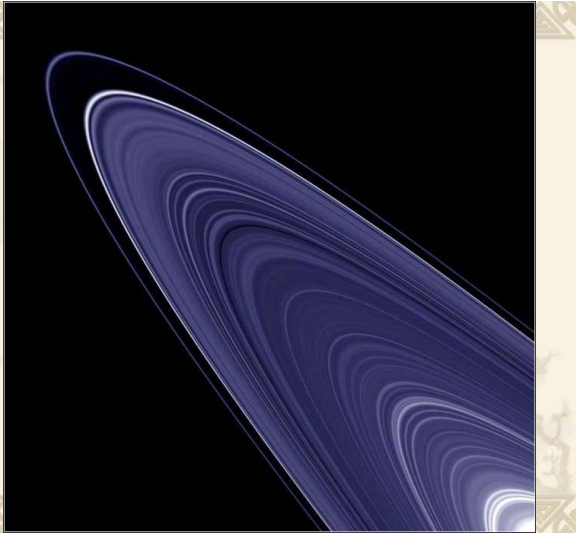


Figure 3.21 An image of Uranus and its rings taken by the Voyager 2 spacecraft in 1986. Image: Voyager 2, NASA.

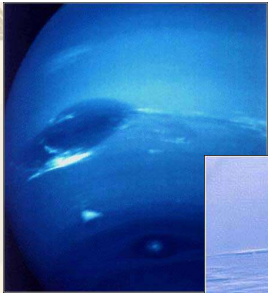
天王星的光环



海王星

Mass	1.0243×10^{26} kg	17.147 times that of Earth
Radius (equatorial)	24 764 km	3.883 times that of Earth
Radius (polar)	24 341 km	3.829 times that of Earth
Rotation period	16 h 6 min 36 s	
Axial tilt	28.32°	
Semi-major axis of orbit	4 503 443 661 km	30.1 AU
Orbital period	60 190 days	164.79 years
Average orbital speed	5.43 km s^{-1}	
Eccentricity	0.0112	
Orbital inclination	1.77°	

海王星局部



海王星大黑斑



海王云

行星上的最大风速: ~2000 km/h

海王星的卫星



(王善钦 天文之心)

韦布空间望远镜的近红外相机拍摄的海王星近红外图像。图中也显示出海王星的多层环与14颗卫星中的7颗：海卫一（Triton）、海卫六（Galatea）、海卫三（Naiad）、海卫四（Thalassa）、海卫五（Despina）、海卫八（Proteus）与海卫七（Larissa）。由于海卫一呈点状且较亮，因此衍射效应导致的六角芒很明显。

图片来源与版权：NASA, ESA, CSA, STScI

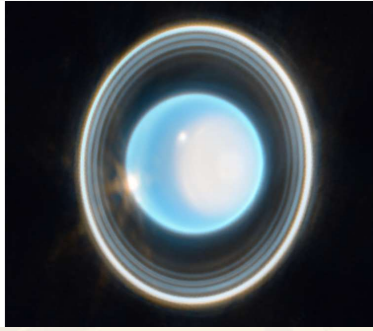


“旅行者”探测器于1989年（左）、哈勃望远镜于2021年（中）和韦布望远镜于2022年（右）拍摄的海王星照片（美联社）

Webb's infrared image highlights the planet's dramatic rings and dynamic atmosphere.

The planet Uranus is an oddball in our solar system, tilted on its side as it orbits the sun, causing extreme seasons. While the planet's atmosphere appeared nearly featureless when visited by the Voyager 2 spacecraft in 1986, subsequent observations from the ground and in space have shown turbulent storms.

NASA's James Webb Space Telescope recently observed Uranus, and the resulting image highlights a complex system of rings as well as a bright polar cap and likely storm clouds.



Uranus (NIRCam Image)

- ❖ 星等: ~7.84m
- ❖ 1612年12月28日: Galileo, 认为是行星
- ❖ John Herschel: 认为是恒星
- ❖ 理论预言: Admas & Verrier (1845年) 对天王星的摄动
- ❖ Berlin天文台, Galle于1846年9月23日发现
- ❖ William Lassell 发现卫星: Triton

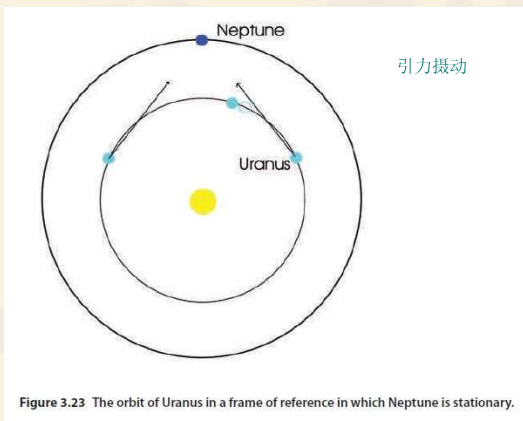


Figure 3.23 The orbit of Uranus in a frame of reference in which Neptune is stationary.

- ❖ 基本特性
 - 太阳系第四大、第三重行星, 比天王星略重
 - 大气: H, He + 1% CH₄ → 蓝色
 - 风: ~2000 km/h! 行星上的最大风速
 - 大黑斑 (旅行者2号)
 - 温差大: ~55K(云) → ~7000K(核)
 - 自转: ~16.11恒星时, 自转倾角和地球差不多
 - 巨冰球 (ice giant)
 - 结构: 核 (~1M_{地球}, 岩石、冰) + 幔 (~12M_{地球}, 冰、氨、甲烷)
 - 存在多个光环
 - 13个卫星, Triton最大呈球形, 反转---引力俘获自Kuiper Belt, 面向海王星, 缓慢旋入, 最终被潮汐力瓦解成环

冥王星

Mass	1.305 × 10 ²² kg	0.0021 that of Earth
Radius (mean)	1,195 km	0.19 that of Earth
Rotation period	-6.387 days (The minus sign signifies retrograde rotation.)	
Axial tilt	119.59°	
Semi-major axis of orbit	5 906 376 272 km	39.48 AU
Orbital period	90 613 days	248.09 years
Eccentricity	0.249	
Orbital inclination	17.142°	

- ❖ 发现
 - 1905年, Percival Lowell 理论预言
 - 业余天文学家Clyde Tombaugh发现 (1930.2.18)
 - 轨道公布: 1930.3.13
 - 命名: Pluto, PL=Percival Lowell
 - 卫星Charon的发现: 1978.6.22, James Christy
 - 1990年,HST分辨出Pluto和Charon
 - 2005年发现了卫星Nix, Hydra
 - 2006年1.18: "New Horizons"离开地球, 2007年2.28经过木星的加速 (引力弹弓效应), 2015年7月到达冥王星, 之后进入Kuiper Belt
- ❖ 基本特性
 - 质量: ~0.2%M_{地球}
 - 轨道倾角大: ~17度



Eris

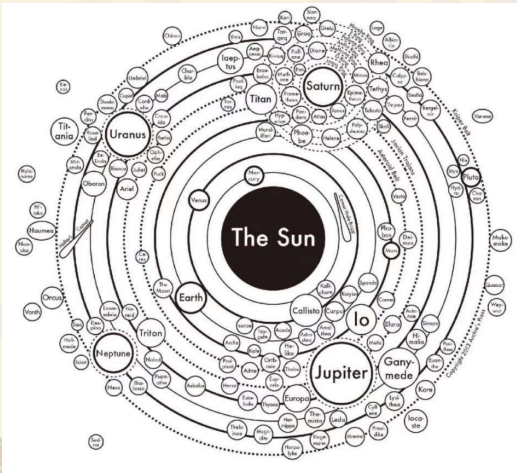
Mass	1.66×10^{22} kg	
Radius (mean)	1300 km (+200/-100 km)	
Rotation period	>8h?	
Semi-major axis of orbit	10.12×10^9 km	67.67 AU
Orbital period	203 600 days	557 years
Eccentricity	0.442	
Orbital inclination	44.2°	

- ❖ 2003年被Palomar天文台发现：2003UB₃₁₃
- ❖ 高的反照率：~0.86，冰面的反射
- ❖ 卫星Dysnomia被发现
- ❖ 质量比冥王星略大：~ +27%
- ❖ 矮行星

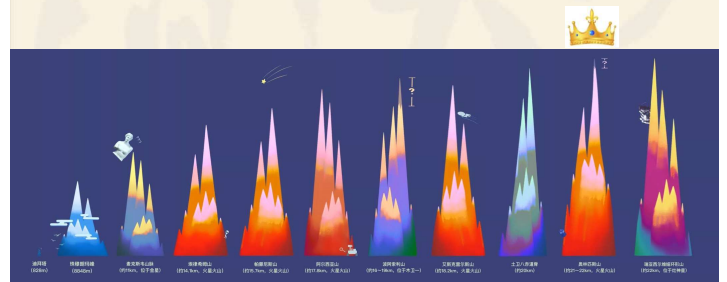
苟利军

太阳系内的第五大矮行星终于有了名字，而且这一次是中国人名，那就是怒撞不周山的水神“共工”，它的卫星被命名为共工的大臣“相柳”。“共工”星的直径大约是1230公里，是月球直径的35%，但是质量仅仅只有月球质量的2.4%，距离太阳的距离是67.38天文单位（地球和太阳直径的距离）。前四大的矮行星分别为：冥王星(Pluto)、阍神星(Eris)、妊神星(Haumea)、鸟神星(Makemake)。

卫星数目大比拼

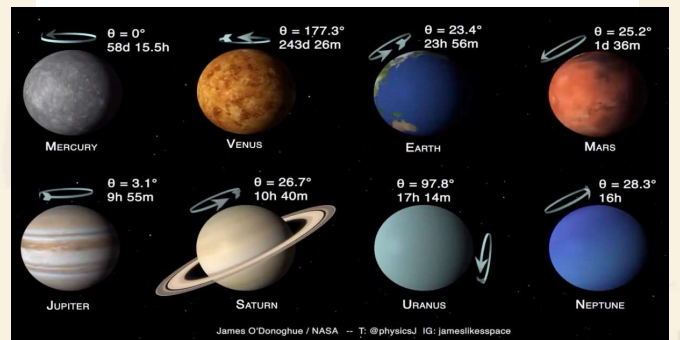


太阳系高山大比拼



太阳系八大行星的自转快慢与倾斜角

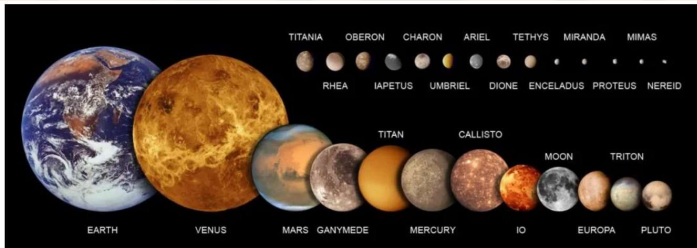
天文之心 2022-09-18 08:00



太阳系八大行星的自转快慢与倾斜角。其中最快的是木星，最慢的是金星。此外金星的自转方向还是逆着来的，所以金星上太阳打西边出来。天王星直接躺平了自转，而且“头”比“脚”还“低”一点。

来源与版权：NASA；

动画：James O'Donoghue (JAXA)



类地行星与较大卫星按体积从大到小的排列图 | 来源：wikipedia

彗星

- ❖ 第谷仔细观测了彗星1577，发现其比月亮远至少4倍
- ❖ 1687年，牛顿利用1680/1681亮彗星的轨道数据，证明其轨道为双曲线（太阳为一焦点）
- ❖ 哈雷彗星
 - 计算了1337-1698年，24个彗星的轨道
 - 哈雷彗星1P/Halley: ~76年周期，1531-1607-1682-1757(?)，1758年圣诞被观测到！
 - 1066, 1910年，亮、壮观，1985/1986: 远，暗，肉眼依稀可见（下一次2061年）
 - 第一次被拍：1910
 - 最早可能于1301年被发现

哈雷彗星



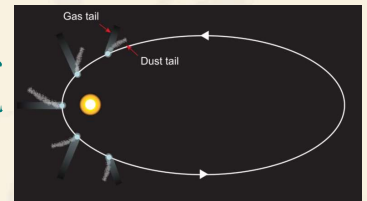
彗星

- 小的太阳系天体，近日时大气扩散，可成彗尾
- 彗核 (D~10km, 尘埃、水冰和气体冰)、彗发 (彗核物质升华的云状物)、彗尾
- 脏雪球: 岩石、尘埃，被冰覆盖
- 长周期彗星: 来自Oort云 ($r \sim 1 \text{ l.y.}$, $\sim 10^{12}$ 彗星; Kuiper belt之外)，通常可见一次
- 短周期彗星 (周期 < 200年)
 - 来自Oort云的彗星受木、土星的引力影响 (近日轨道)
 - 多数被认为来自Kuiper带
- 目前发现约: ~3000 彗星，其中几百个为短周期
- 平均一年一个肉眼可见彗星

彗核

- 大小: ~ 0.5-50km
- 成份: 岩石、尘埃、冰、冻的气体: 二氧化碳、一氧化碳、甲烷、氨，以及一些有机分子: 甲醇、甲醛、乙醇、乙烷，甚至氨基酸

- 形状不规则: 引力太小
- 远离太阳时基本不可见
 - 小
 - 低的反射率
- 彗尾



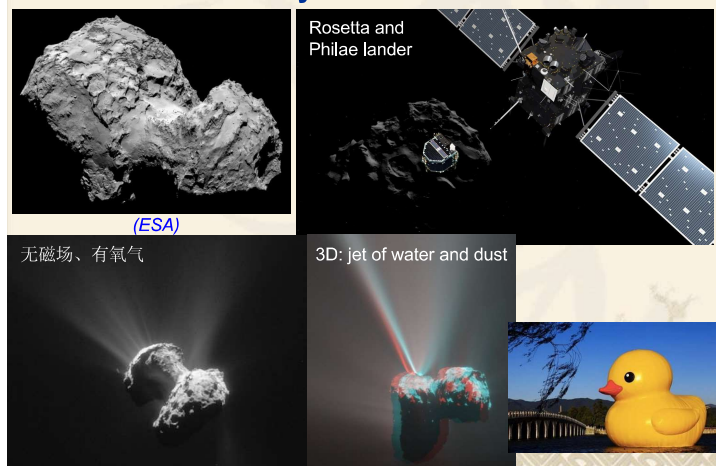
离子尾 (Gas tail) 和尘埃尾 (Dust tail) 方向示意图 | 维基

- 离子气体尾 (太阳风)，背离太阳，蓝色 (氧)
- 尘埃尾 (辐射)，黄色，沿轨道弯曲

彗发

- 彗发可能比太阳还大; 彗尾可达 ~ 1AU
- 质量损失厉害: 最后化为尘埃或小行星状的石块
- ❖ 对地球的影响
 - 给地球带来水以及有机物! 甚至生命起源!

彗星67P/Churyumov-Gerasimenko

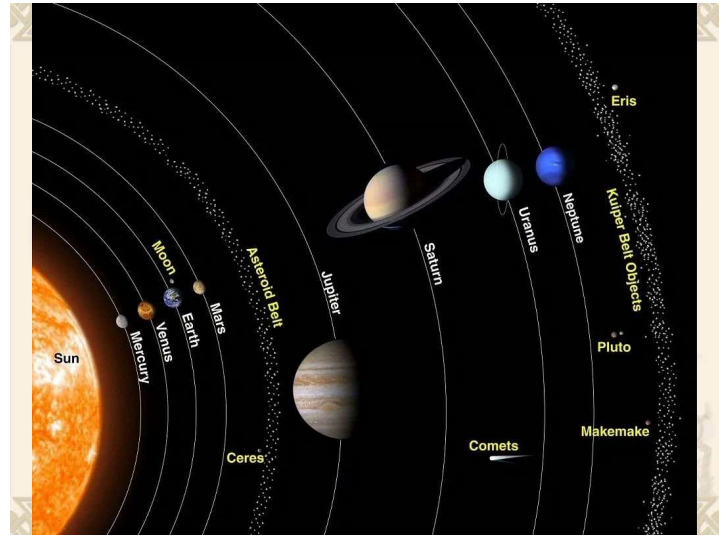


(ESA)

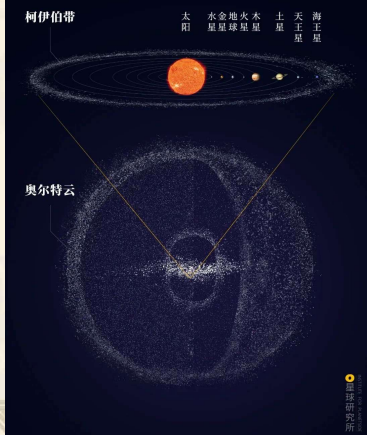
无磁场、有氧气

3D: jet of water and dust

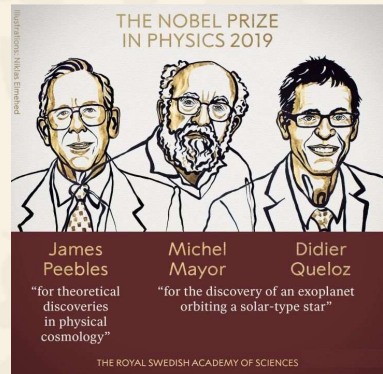
流星雨



太阳系结构示意图



第四章：太阳系外行星



本章内容

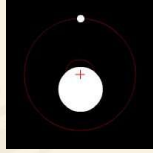
- ❖ 行星如何形成？
- ❖ 系外行星的主要搜寻方法有哪些？
- ❖ 什么是宜居带？
- ❖ 系外行星的发现空间是怎样的？
- ❖ 发现系外行星的主要望远镜有哪些？
- ❖ 存在宜居系外行星甚至是地外文明吗？

❖ 主要探测方法

- 动力学方法
 - 视向速度法
 - 脉冲星计时法
 - 天体位置测量法
- 凌日法（掩食）
- 微引力透镜方法
- 直接成像法

动力学方法

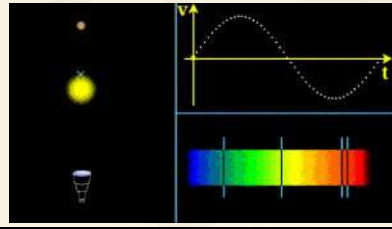
- 视向速度法
- 脉冲星计时法
- 天体位置测量法



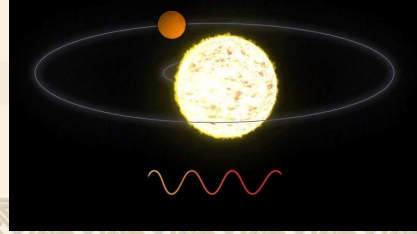
原理

- 行星围绕恒星运动
- 恒星也围绕质心运动（轨道半径小）
- 恒星的运动比行星的运动好测量

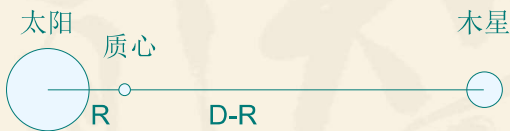
视向速度法/多普勒方法



基于高精度视向速度的系外行星研究（清华大学 王雪松）



视向速度法/多普勒方法



$$M_{\text{Sun}} R = M_{\text{Jupiter}} (777\,547\,199 - R)$$

$$M_{\text{Sun}} / M_{\text{Jupiter}} \sim 1000$$

$$R = 776\,770 \text{ km} > R_{\text{sun}} = 695\,500 \text{ km}$$

- 主要的行星在太阳的一侧（1980s）：质心离太阳中心更远
- 木星与其他行星位于太阳的两侧：质心靠近太阳中心
- 在 $\sim 0.3 - 2 R_{\text{sun}}$ 之间，平均： $\sim 1.25 R_{\text{sun}}$

太阳绕质心的运动速度（太阳-木星系统）

太阳绕质心运动的轨道周长：

$$2 \times \pi \times 7.77 \times 10^5 \text{ km} = 4.9 \times 10^6 \text{ km} = 4.9 \times 10^9 \text{ m.}$$

太阳绕质心运动的轨道周期：

$$\sim 11.86 \text{ 年} = 3.74 \times 10^8 \text{ s}$$

太阳绕质心运动的轨道速度：

$$4.9 \times 10^9 / 3.74 \times 10^8 = 13 \text{ ms}^{-1}.$$

太阳绕质心运动的轨道速度差： $\sim 26 \text{ m/s}$

目前的探测精度： $\sim 0.5\text{-}1 \text{ m/s}$, Doppler法，需要谱线
将来有望提高到： $\sim 0.1\text{-}0.5 \text{ m/s}$ 甚至更好

视向速度法/多普勒方法小结

原理

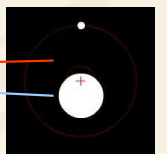
- 恒星相对我们有径向运动
- 产生红移和蓝移



优点
• 目前最敏感的测量方法

缺点

- 只对大质量行星敏感
- 小的、快速的轨道
- 看不到行星



- 至少探测到半个或整个周期：大轨道行星难探测
- 如果轨道平面与视向垂直，无法探测
- 往往会低估行星质量：如果轨道倾角不知道
- 如果是圆轨道，Doppler曲线为sin函数，如果是椭圆轨道，稍复杂，但依然存在周期性
- 多行星系统：Doppler曲线复杂，理论分析仍可以证认每个行星的存在
- 地球-太阳系统： $\sim 0.1 \text{ m/s}$ ，需要用其它方法发现，更长时间径向速度监测可能探测到

行星51 Pegasi b的质量估算

轨道周期: 4.23天~365 472秒

轨道周长: $57 \times 365\ 472 = 20\ 831\ 904\ \text{m}$

轨道半径: 3 315 500 m

行星的轨道半径:

$$a = (GM P^2 / 4\pi^2)^{1/3}$$

$$= [6.67 \times 10^{-11} \times 2.12 \times 10^{30} \times (365\ 472)^2 / 4\pi^2]^{1/3} = 7.82 \times 10^9\ \text{m} \quad 0.052\text{AU}$$

行星的质量: $M_{\text{planet}} \times 7.81 \times 10^9 = M_{\text{star}} \times 3\ 315\ 500$

$$M_{\text{planet}} = 2.12 \times 10^{30} \times (3\ 315\ 500 / 7.81 \times 10^9)\ \text{kg} = 9 \times 10^{26}\ \text{kg} \quad 0.47M_{\text{木星}} \text{ 最小质量}$$



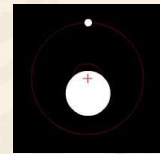
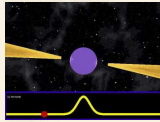
Figure 4.4 Artist's impression of 51 Pegasi b orbiting its star. Image: Wikimedia Commons.

- ❖ 大质量的气体行星 (Gas Giant) 没有预计在恒星附近被发现
- ❖ 在远处形成, 向内迁移?
- ❖ 抛射恒星附近的小的行星?
- ❖ 这样的恒星系统不太可能存在生命

脉冲星计时法

原理

- 脉冲星发射周期性非常好的信号
- 脉冲星相对地球的速度略有变化
- Doppler效应测量可到极高精度



优点:

- 非常灵敏
- 容易
- 可探测小质量的行星

缺点:

- 仅对脉冲星系统适用

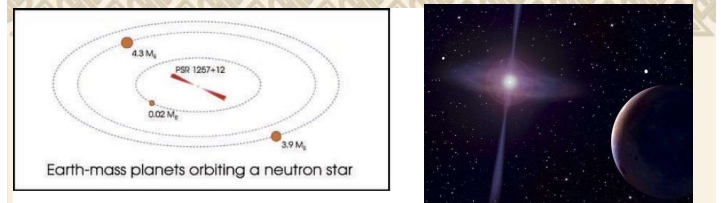


Figure 4.2 Planets orbiting the pulsar PSR 1257+12 at distances of 0.19, 0.36 and 0.46 AU.

- ❖ 脉冲星-行星系统很少: 难于存活于超新星爆发?
- ❖ 脉冲星周围存在环绕的气体盘: 2006年Spitzer, 4U 0142+61, 存在行星?
- ❖ 脉冲星的辐射强, 不适合生命的存在 (也没“太阳”光)
- ❖ PSR B1257+12, 1992年发现两个行星, 质量: 4.3, 3.9地球质量, 在水星轨道之内; 随后又发现了两个小质量的行星 (0.004, 0.02地球质量)
- ❖ PSR B1620-26, 发现一个2.7倍木星质量的行星
- ❖ 其它三个脉冲星系统存在一至三个行星, 但还没有确认

天体位置测量法

原理

- 短期内绕银心运动近似直线; 双星或行星系统中恒星会有额外微小圆形或椭圆运动



优点

- 对大的轨道更敏感

缺点

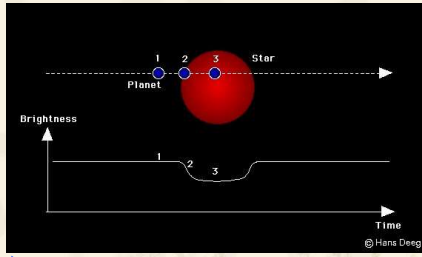
- 需要极高位置精度
- 大质量的行星
- 大的轨道需要长的观测时间

- ❖ 目前还没有通过天体位置测量法探测到新的系外行星
- ❖ 难观测: 例如, 太阳-木星系统位于30光年远
 - $R \sim 776\ 770\ \text{km}$
 - $D \sim 30\ \text{光年} \sim 3 \times 10^{14}\ \text{km}$
 - 角径 $\sim 7.77 \times 10^5 / 3 \times 10^{14} \sim 2.6 \times 10^{-9}\ \text{rad} \sim 0.00054\ \text{角秒}$
 - HST分辨率: $\sim 0.05\ \text{角秒} \rightarrow 0.0005\ \text{角秒位置精度}$
- ❖ 幸运的例外: HST通过天体位置测量法证实了Gliese 876中行星 (之前由视向速度法发现)
- ❖ Gliese 876: $D \sim 15.6\ \text{光年}$, HST两年的位置监测 (+ 视向速度观测), 确定轨道平面, 确定行星质量
- ❖ NASA空间干涉项目 (SIM): 位置测量精度: $\sim 0.000001\ \text{角秒}$!

凌日（掩食）法

原理

- 行星阻挡了恒星光，使恒星变暗

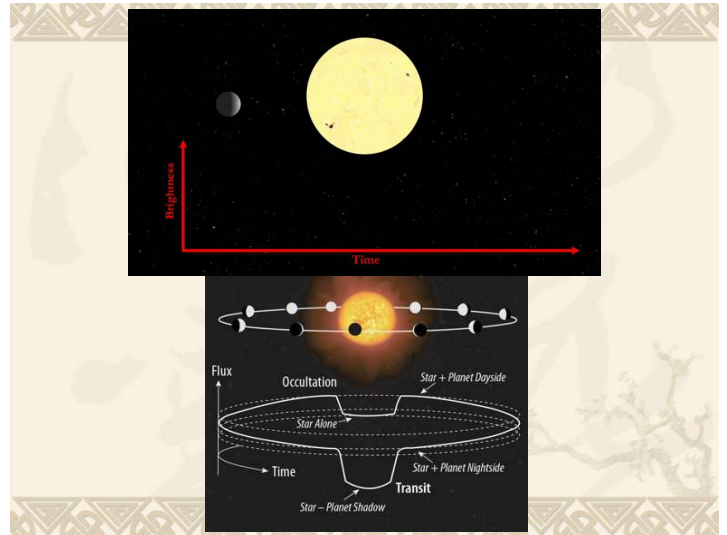


缺点

- 观测几率小

优点

- 空间观测容易进行
- 观测恒星（被行星大气）吸收光谱
- 测量行星大气



掩食：太阳-木星系统

- 木星的半径约为太阳半径的1/10
- 掩食时，太阳的发光面积减少了1/100（设面亮度均匀）
- 太阳的光度变化：
$$\Delta m = 2.5 \log_{10}(0.99) = -0.011 \text{ magnitudes.}$$

掩食法发现行星

- 1999 11.5: HD 209469（最早被径向速度法发现），亮度下降了1.7%
- 2002, OGLE-TR-56B发现，后被径向速度法确认
- 2006, HST搜寻了180000个恒星（在26 000光年范围），发现了16个候选者，3个被证认。若16个都被证认，银河系中可能存在~60亿个木星大小的行星！

- 类地球-太阳系发生掩食的概率：~0.5%
- 空间项目：Kepler & COROT
- 掩食法可以测量行星的大小，加上质量，可以估算行星的密度，研究行星的结构
- 可以通过恒星的吸收光谱分析，得到行星的大气成份：HST观测

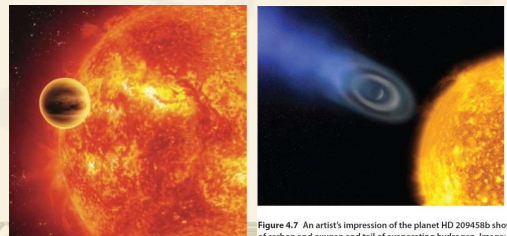


Figure 4.7 An artist's impression of the planet HD 20945b showing an extended envelope of carbon and oxygen and tail of evaporating hydrogen. Image: ESA and Alfred Vidal-Madjar (Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS, France).

微引力透镜

技术

- 广义相对论 – 光线在引力场中弯曲
- 微引力透镜效应：恒星的亮度增加



- 仔细观测遥远恒星的亮度，可以探测透镜恒星周围有没有行星

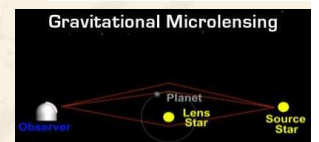
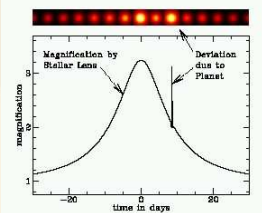
微引力透镜

缺点

- 透镜事件很少
- 几乎无法重复、后续观测
- 得到的行星的信息很少

优点

- 可以很“便宜”监测很多恒星
- 对小质量的行星敏感



直接成像法

缺点:

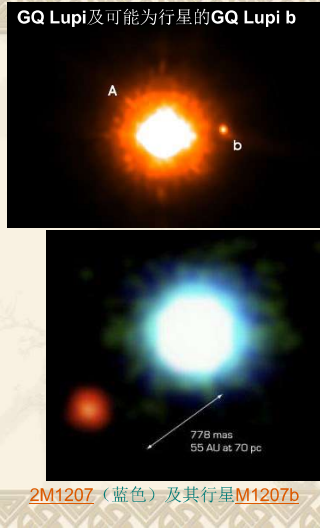
- 恒星与行星亮度对比度大
- 一般依赖空间观测

优点:

- 估计行星的大小 (?)
- 可以研究行星的光谱

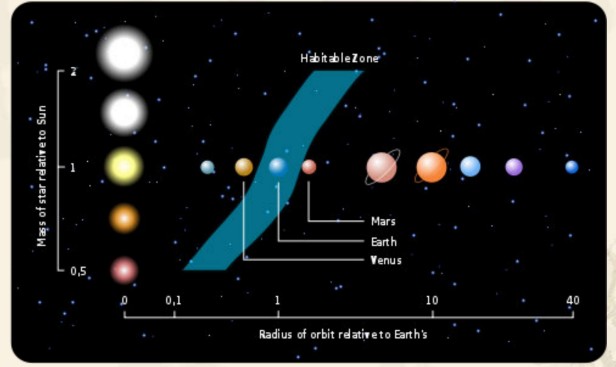


明星“走光”图



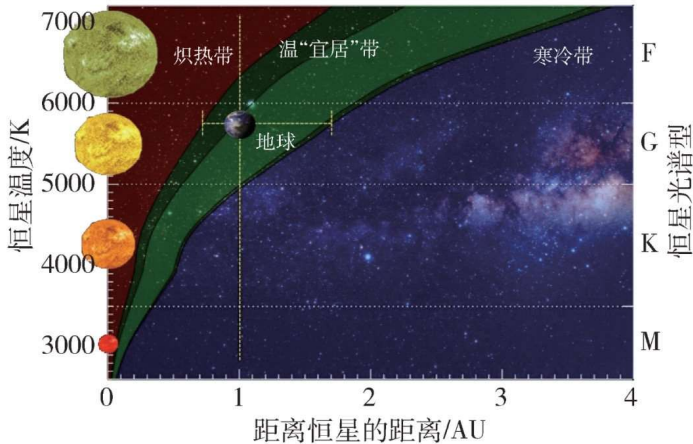
2M1207 (蓝色) 及其行星M1207b

可居住带



(假设和我们类似的生命形式)

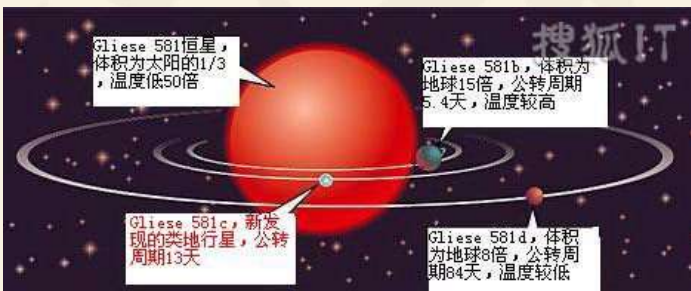
主序星的宜居带



地球上为什么存在生命?

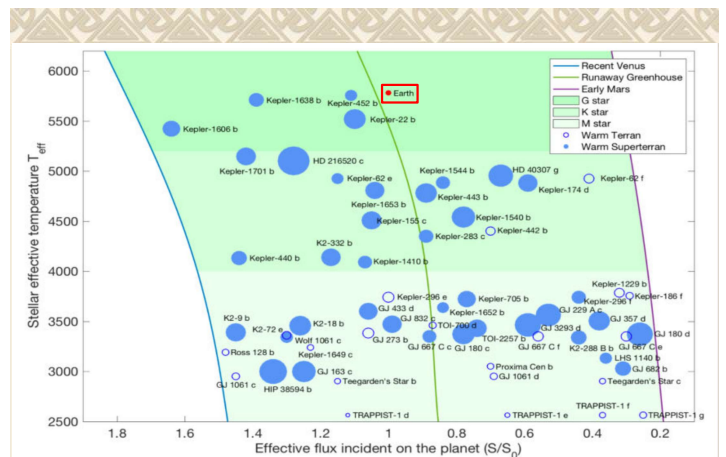
- 足够长的恒星和行星寿命
- 适宜的恒星光度 (行星距离)
- 稳定的低偏心率行星轨道
- 适宜的自转倾斜度
- 具有合适成分的行星大气
- 具有磁场
- 月球稳定地球自转轴
- 附近存在一个大质量木星

第一颗在宜居区发现的类地行星



• 格利泽581c是由瑞士日内瓦天文台的 **Stephane Udry** 所领导的团队所发现，他们使用 **欧洲南天文台** 位于智利 **La Silla** 的3.6米的**望远镜** 上的**HARPS** 仪器

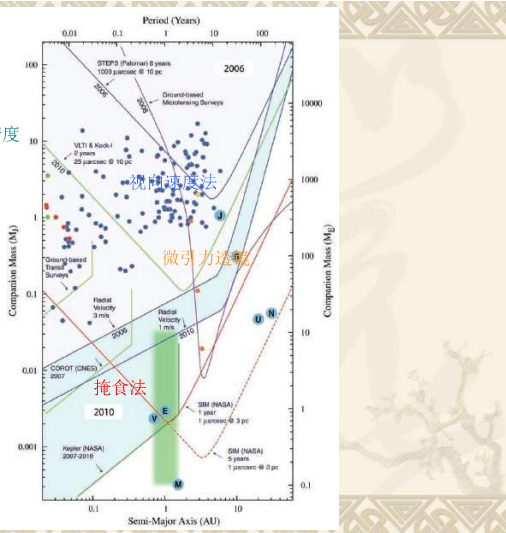
• 比地球大50%，重5倍，表面温度0-40度，可能存在液态水



已发现的宜居带类地行星 (Ji et al. 2022)

发现空间

天体位置法精度



(2007年版本)

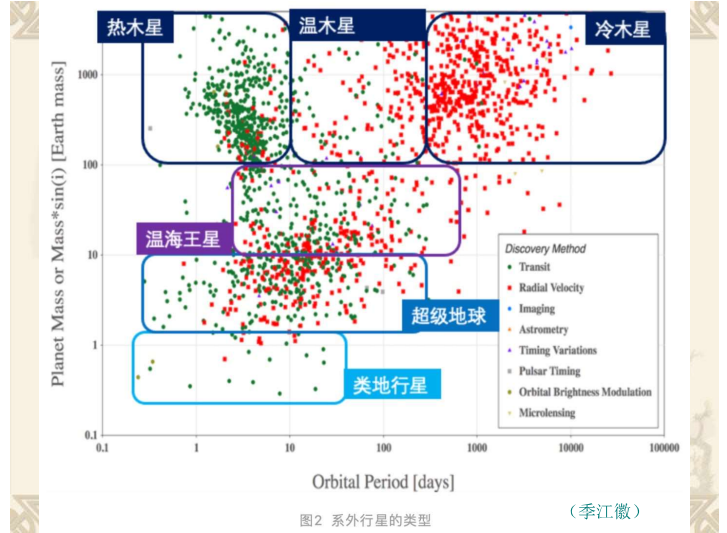
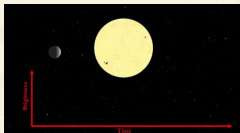


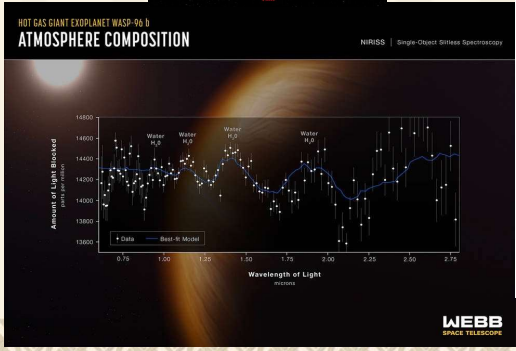
图2 系外行星的类型

(季江徽)

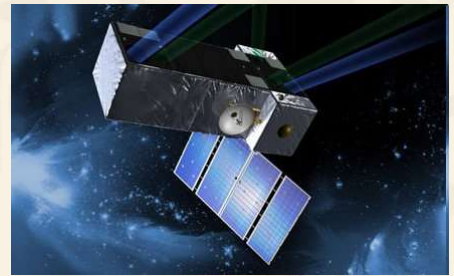
JWST : 热气体巨行星WASP-96b的红外光谱



- 0.48倍木星质量, 1.2倍木星半径
- 围绕类太阳恒星, 1150光年处
- 轨道周期3.5天
- 凌星时大气分子在恒星谱留下吸收特征, 与无遮挡时的恒星谱对比, 得系外行星大气透射谱
- 水分子的清晰信号, 表面700多度
- 云雾存在及变化的证据
- 前所未有的分析数百上千光年外系外行星大气的的能力



空间光学干涉望远镜(SIM)

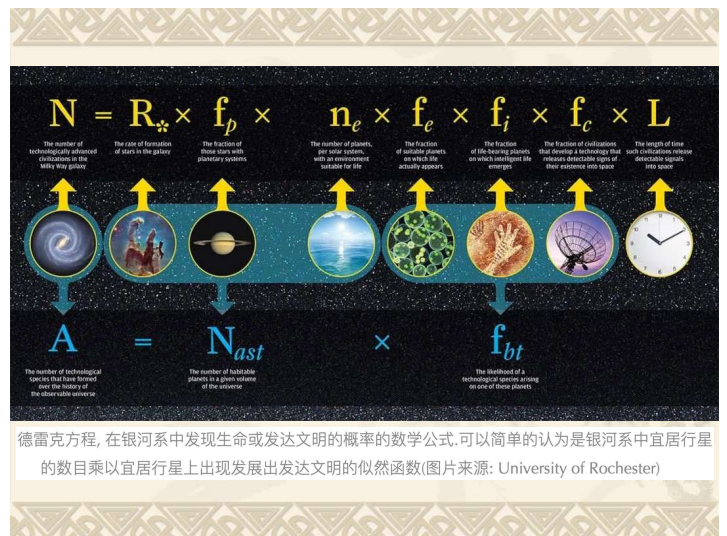


- 发射时间: ? ? ? ?
- 位置测量精度: ~1微角秒
- 探测方法: 天体位置测量法



图6 系外行星探测任务。图片来源: (b-d)NASA; (a), (e-j) ESA

(courtesy of J.H. Ji, PMO)

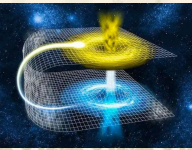
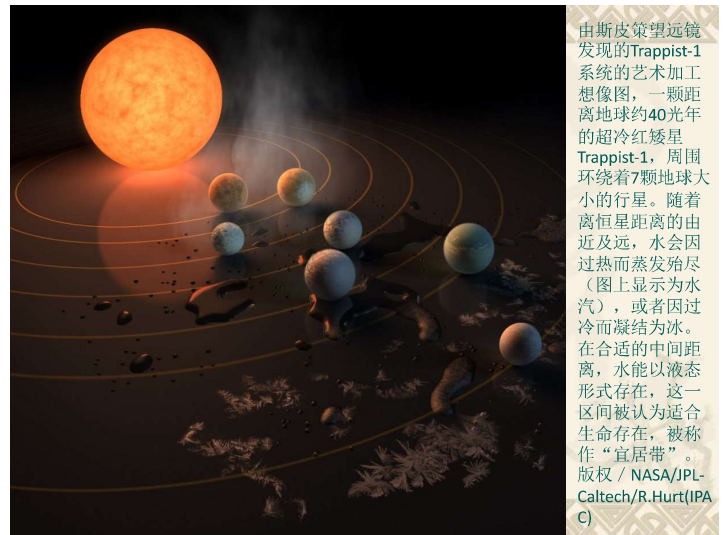


德雷克方程, 在银河系中发现生命或发达文明的数学公式. 可以简单的认为是银河系中宜居行星的数目乘以宜居行星上出现发展出发达文明的似然函数(图片来源: University of Rochester)

$$N = N_s \times F_p \times F_l \times F_i \times L_c / L_s$$

N is the number of civilizations in the Milky Way today.	N_s is the number of stars in the Milky Way.	F_p is the fraction of stars with habitable planets.	F_l is the fraction of habitable planets with life.	F_i is the fraction of life-bearing planets where intelligent civilizations arise.	L_c is the typical life-time of a civilization in years.	L_s is the typical life-time of a star (10 billion years for Sun-like stars).
银河系地外文明总数目	银河系恒星总数目	具有宜居行星的恒星比率	有生命存在的宜居行星比率	有生命的宜居行星上高等文明出现的比率	高等文明存在的典型时间	恒星的典型寿命

我们可以和高等外星文明有效交流吗？

第五章：观测宇宙

--望远镜的基本原理

实际上的望远镜观测……



HP 观测中心 | 帕洛玛望远镜控制中心 | ALMA 控制中心
(戴昱 国家天文台)

本章内容

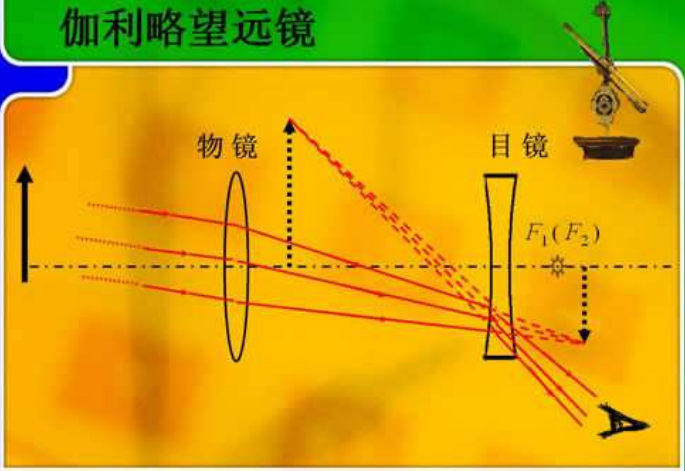
- ❖ 早期望远镜类型
- ❖ 一些光学原理
- ❖ 如何选取好的天文台址？
- ❖ 望远镜分辨率、放大率、视场
- ❖ 近现代望远镜类型
- ❖ 各个波段的一些代表性望远镜
- ❖ 宇宙线观测
- ❖ 引力波观测

望远镜的发明

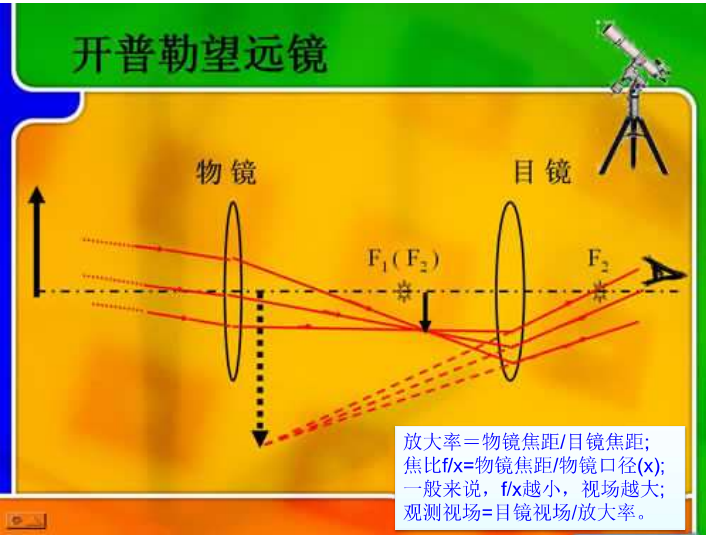
- 1608年夏末 荷兰的眼镜匠汉斯·黎波塞发明
- 1609年 伽利略将望远镜用于天文观测
- 2009 国际天文年




伽利略望远镜



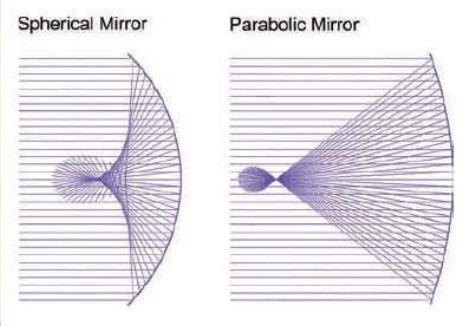
开普勒望远镜



放大率=物镜焦距/目镜焦距;
 焦比 f/x =物镜焦距/物镜口径(x);
 一般来说, f/x 越小, 视场越大;
 观测视场=目镜视场/放大率。

光学原理

❖ 光波: 强度和位相, 矢量叠加



❖ 焦点: 光线相干叠加 (射电望远镜为例)

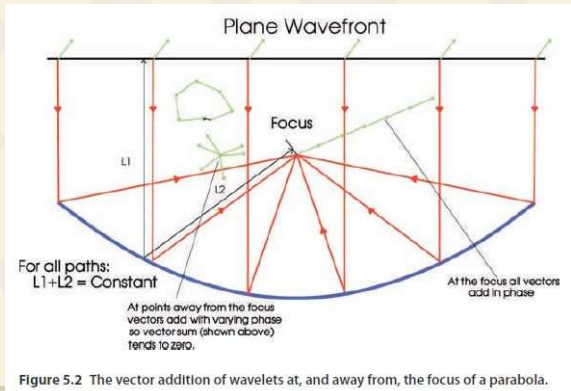


Figure 5.2 The vector addition of wavelets at, and away from, the focus of a parabola.

❖ 旋转抛物反射镜面为什么存在“好的”焦点?

$$y = (1/4a) x^2$$

$$l_1 = a - y$$

$$l_2 = [x^2 + (a-y)^2]^{1/2}$$

$$l_2 = (4ay + a^2 - 2ay + y^2)^{1/2}$$

$$= (a^2 + 2ay + y^2)^{1/2}$$

$$= [(a+y)^2]^{1/2}$$

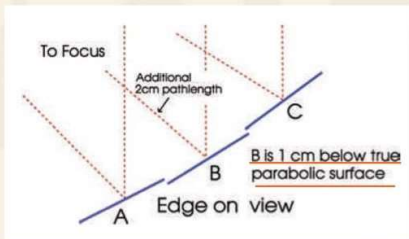
$$= (a+y)$$

$$l_1 + l_2 = (a-y) + (a+y)$$

$$= 2a$$

Figure 5.3 The geometry of a parabola.

❖ 对镜面的要求:



假设波长为:
8cm
 位相差:
90度

对镜面的要求: $< 1/20$ 波长

存在的问题: 离开轴向, 彗形像差, 点光源变成彗星形状

❖ 薄透镜: 焦距与镜面曲率半径的关系

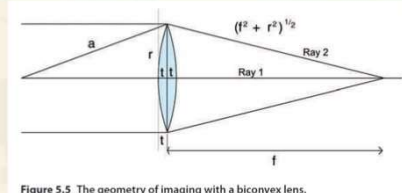


Figure 5.5 The geometry of imaging with a biconvex lens.

$$(f^2 + r^2)^{1/2} + t = (f-t) + 2nt$$

$$= f + t(2n-1)$$

$$(f^2 + r^2)^{1/2} = f + t(2n-2)$$

$$(f^2 + r^2)^{1/2} = f + 2t(n-1)$$

$$a^2 = (a-t)^2 + r^2$$

$$a^2 = a^2 - 2at + t^2 + r^2$$

$$2at = r^2$$

$$a = r^2/2t$$

$$f^2 + r^2 = f^2 + 4ft(n-1) + [2t(n-1)]^2$$

$$r^2 = 4ft(n-1)$$

$$f = r^2/4t(n-1)$$

$$f = a/2(n-1)$$

透镜设计方程

❖ 色差

$$f = a/2(n-1)$$

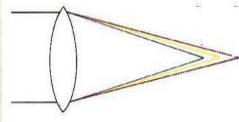
Table 5.1 The refractive indices of crown and flint glass at three wavelengths.

	Blue 486.1 nm	Green-yellow 589.3 nm	Red 656.3 nm
Crown 冕牌	1.524	1.517	1.515
Flint 燧石	1.639	1.627	1.622

波长（色）不同，折射率不同：

设a=1000mm
(Crown)

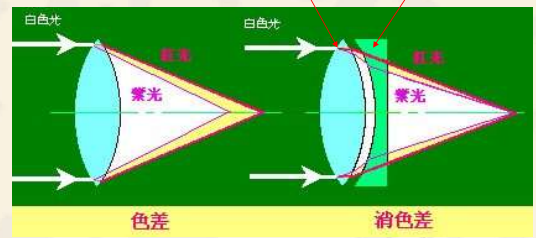
$$\begin{aligned} f_{\text{blue}} &= 954 \text{ mm} \\ f_{\text{green-yellow}} &= 967 \text{ mm} \\ f_{\text{red}} &= 970 \text{ mm} \end{aligned}$$



色差现象：在绿光的焦平面上，亮的绿色光斑周围有紫色的环（蓝色+红色）

❖ 消色差双合透镜

冕牌玻璃：折射率小
燧石玻璃：折射率大



- John Dolland 1758 专利
- Chester Moore Hall 1733 首次制造

消色差双合透镜原理

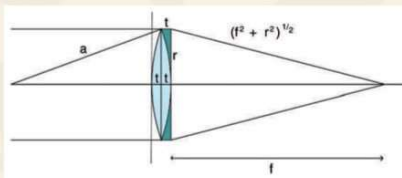


Figure 5.6 An achromatic doublet.

$$\begin{aligned} f + 2n_1t &= t + n_2t + (f^2 + r^2)^{1/2} \\ f + t(2n_1 - n_2 - 1) &= (f^2 + r^2)^{1/2} \end{aligned}$$

$$f^2 + 2ft(2n_1 - n_2 - 1) + [t(2n_1 - n_2 - 1)]^2 = f^2 + r^2$$

$$f = r^2/2t(2n_1 - n_2 - 1) \quad 2at = r^2$$

$$f = a/(2n_1 - n_2 - 1)$$

❖ 消色差双合透镜原理

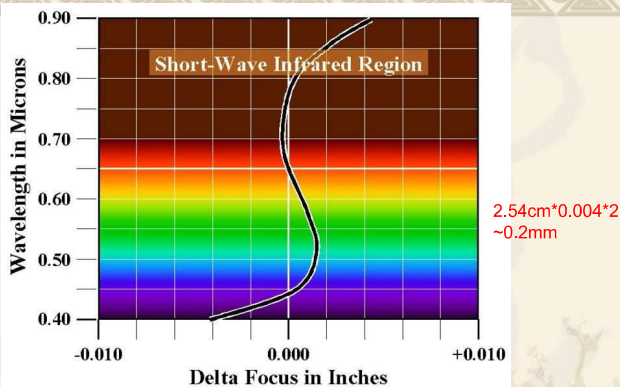
设a=393.6mm

Blue	0.409	962.3 mm
Green-yellow	0.407	967.0 mm
Red	0.408	964.6 mm

$$f = a/(2n_1 - n_2 - 1)$$

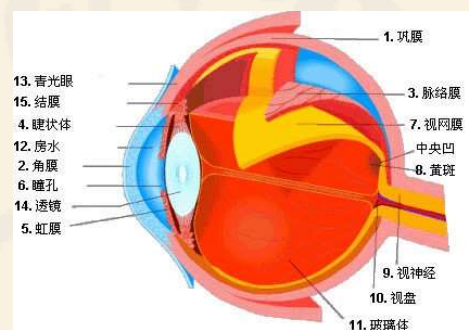
$$2n_c - n_f - 1$$

- 复消色差透镜：基本->完全消除色差
- 消色差三合透镜：Peter Dollond 1763



复消色差透镜将三种波长/颜色的光汇聚在同一个焦平面上

人眼—光学系统 很好的探测器/接收器



❖ 眼睛适应夜晚

- 瞳孔放大，进光量增加，需要~20s。白天：尺寸~2.5-3 mm；昏暗：~5-7 mm；老人：~5 mm，面积减少一半！
- 没有亮光进入视网膜，维生素A首先转变为视黄醛，再转变为视紫醛，明显提高rods（视觉杆状细胞，昏暗光线）和cones（视觉锥状细胞，光线和色彩，集中于中央凹）的灵敏度
- Cones感受色彩需要一定的光强，所以晚上很难分辨色彩
- Rods对色彩不敏感，但对光强敏感

❖ 尘埃和水汽的影响：

- 吸收和散射星光
- 散射地面的光到人眼—光污染
- 理想状况（黑暗地点加透明天空），人眼能看6-6.5等星

好的天文台址非常重要！战略资源！

nature > articles > article

MENU **nature**

Article | Published: 29 July 2020

Night-time measurements of astronomical seeing at Dome A in Antarctica

Bin Ma, Zhaohui Shang, Yi Hu, Kejiang Hu, Yongjiang Wang, Xu Yang, Michael C. B. Ashley, Paul Hickson & Peng Jiang

Nature 583, 771–774(2020) | Cite this article

2019年1月，在我国第35次南极科考期间，国家天文台在南极冰穹A昆仑站安装了两台视宁度测量望远镜（KL-DIMM）。他们经历了冰霜的考验，也经历了零下70多度的低温，在极夜里顽强地工作。他们首次测量并获得了最佳的夜间大气视宁度，证明昆仑站所在的冰穹A地区的光学天文观测条件优于已知的其他任何地面台址，包括夏威夷和智利北部。这项研究成果证明了昆仑站有珍贵的天文观测台址资源，为我国进一步开展南极天文研究奠定了科学的基础。

在南极冰穹A，大气湍流主要集中在近地表的大气边界层，而在边界层之上，就是非常稳定的自由大气。KL-DIMM的数据分析表明，自由大气视宁度的中值只有0.31角秒，最佳值达到0.13角秒，并且在离地面8米的高度，就有31%的时间可以获得自由大气视宁度；在离地面14米的高度，有近一半的时间可以获得自由大气视宁度。相比较而言，同在南极的冰穹C，在30米的高度，才有一半的时间可以获得自由大气视宁度。天文观测对成像质量要求极高，目前世界上最好的望远镜集中在夏威夷和智利北部优良的台址上，视宁度一般在0.6-0.8角秒。

视宁度示意图。左：视宁度差，星象晃动厉害、眨眼，拍摄图像不清晰；右：视宁度好，拍摄图像清晰。

Why do Stars Twinkle?
Light from a star
The Earth's Atmosphere (with moving pockets of cold and warm air)

KL-DIMM观测到的图像，两只眼睛看到的同一颗星（老人星），从抖动引起的星象之间的距离变化可以计算出视宁度。星象的抖动反映的就是大气湍流引起的抖动。

(商朝晖 国家天文台)

极限星等

- ❖ 150mm的望远镜：(150/7)²~460

$$\Delta m = 2.5 \times \log_{10}(460) = 6.65$$

该望远镜的极限星等：~ 6.5+6.65=13.15

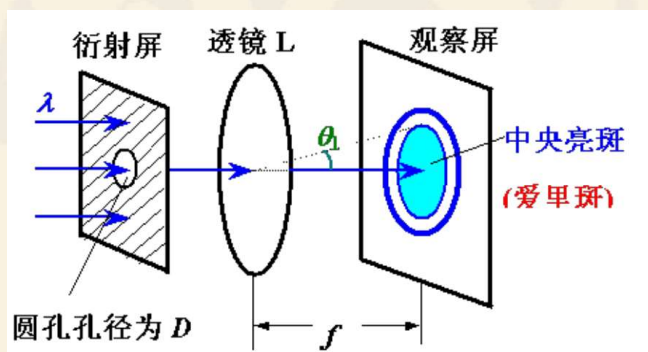
❖ 望远镜效率

- 折射式望远镜：~98%
- 反射式望远镜：~86%，两个镜子：~74%；
现代多层镀膜技术：~97%，两个镜子：~94%

❖ 望远镜半径增加1.58倍，极限星等增加1等

❖ 大气视宁度（单位为角秒）的影响

圆孔衍射



望远镜分辨率

❖ 衍射极限：Airy斑-望远镜分辨天体的极限

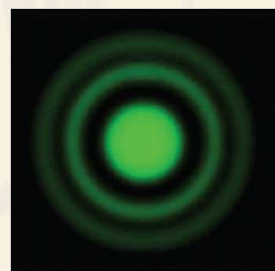


Figure 5.8 The Airy disc.

$$\Delta \theta = 1.22 \lambda / D$$

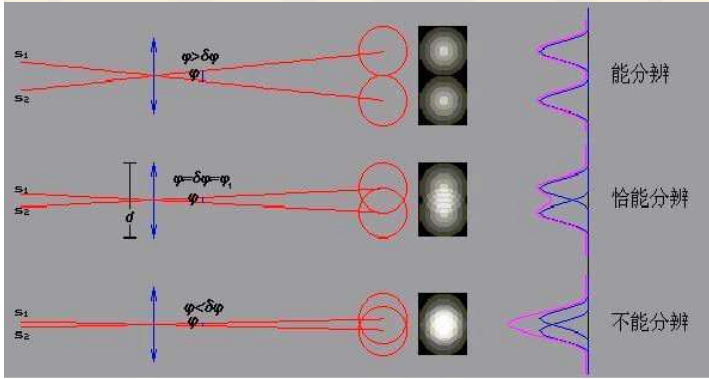
(定量理解)

- 84%光集中于中心斑
- 第一个环的半径大概是中心斑的两倍，集中了大部分剩余的光

(实际分辨率受大气视宁度的影响)

望远镜分辨率

$$\Delta\theta = 1.22 \lambda/D$$

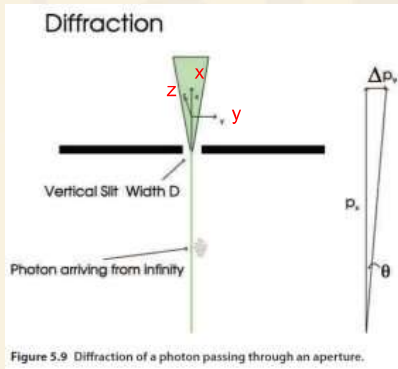


源的混淆与灵敏度的关系: XMM-Newton vs. Chandra

望远镜为什么越大越好?

- 收集光线的面积大: 能看到很遥远, 很暗弱的天体
- 分辨本领高: 能看到很小的细节

❖ Airy斑/角分辨率的定性推导



$$p_x = h/\lambda$$

$$\Delta p_y D = h$$

$$\Delta p_y D = p_x \lambda$$

$$\Delta p_y / p_x = \lambda/D$$

$$\Delta\theta = \Delta p_y / p_x$$

$$\Delta\theta = \lambda/D$$

(两个方向受限, 系数变成1.22)

- ❖ 衍射例子: 月亮激光反射器
- ❖ 不是单一、大面积的反射器; 而是100个, 3.8cm见方的三面直角反射棱镜, 组成一个边长46cm的方阵

大反射器:

$$\Delta\theta = \sim 1.22 \lambda/D$$

$$= \sim 1.22 \times 5.5 \times 10^{-7} / 0.46$$

$$= \sim 1.5 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

$$d = \sim 1.5 \times 10^{-6} \times 378\,000$$

$$= \sim 0.57 \text{ km}$$

$$d_t = 2 \times \pi \times [6780 \times \cos(40)] \times 2.5 / (24 \times 3600)$$

$$d_t = 0.94 \text{ km}$$

小反射器: 反射斑的直径 $\sim (46/3.8) \times 0.57 = 6.9 \text{ km}$

❖ 望远镜的分辨率: D=150mm, 绿光

$$\Delta\theta = 1.22 \lambda/D$$

$$= 1.22 \times 5.5 \times 10^{-7} / 0.15 \text{ rad}$$

$$= 4.4 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

$$= 4.4 \times 10^{-6} \times 57.3 \times 3600 \text{ arcsec}$$

$$= 0.9 \text{ arcsec}$$

❖ 大气视宁度 (seeing) 的影响

- 一般seeing: 1-3 arcsec
- 最好: $\sim 0.5 \text{ arcsec}$; 口径大的望远镜, 影响大
- HST: D=2.4m, $\sim 1/20$ 角秒@可见光

❖ 望远镜的放大率

- 物镜焦距/目镜焦距
- 在光路中靠近目镜插入一个凹透镜 (Barlow透镜), 增加放大率: $\sim 2-4$ 倍

❖ 望远镜的视场

像质在轴上好, 偏轴则变差, 所以视场有限, 以保证一定像质

$$D = 2 \times f \times \theta / 2 = f \times \theta$$

$$\theta = D / f$$

$$D = 12 \text{ mm} \quad f = 1200 \text{ mm}$$

$$\theta = 1/100 \text{ rad} = 0.573^\circ$$

放大率 = 物镜焦距/目镜焦距;
焦比f/x = 物镜焦距/物镜口径(x);
一般来说, f/x越小, 视场越大;
观测视场 = 目镜视场/放大率。

月亮角直径 ~ 0.5 度

D = 视场光阑直径 (CCD大小)

(对于类似光路设计的目镜) $\theta = D/f$

❖ 视场光阑(field stop)直径与目镜焦距大致正比

- 目镜焦距越小，放大率越大，但观测视场越小
- 标准目镜：Plossl目镜，由两个消色差双合透镜组成
- 宽视场目镜：给定焦距，使用五个或以上光学器件，视场大，价格高

❖ 肉眼看望远镜放大率越大越好？~100-200倍

- 眼睛的衍射极限
- 视网膜上视觉细胞的数量足够多
- 大气视宁度

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= 1.22 \lambda / D \\ &= 1.22 \times 5.5 \times 10^{-7} / 0.003 \text{ rad} \\ &= 2.24 \times 10^{-4} \text{ rad} \\ &= 2.24 \times 10^{-4} \times 57.3 \times 60 \text{ arcmin} \\ &= 0.77 \text{ arcmin} \end{aligned}$$

(设瞳孔D=3mm)

❖ 像的对比度

镜筒、面等散射星光：黑->暗灰，降低对比度。

折射式望远镜要好于反射式望远镜。

通过镀膜提高反射率，可以看到更暗的天体，并且降低散射光，提高对比度。

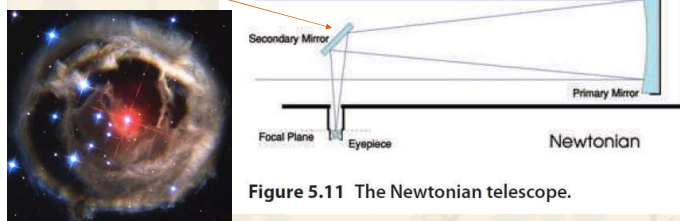
反射式望远镜

(牛顿)



经典牛顿式望远镜

次镜小且需要悬挂



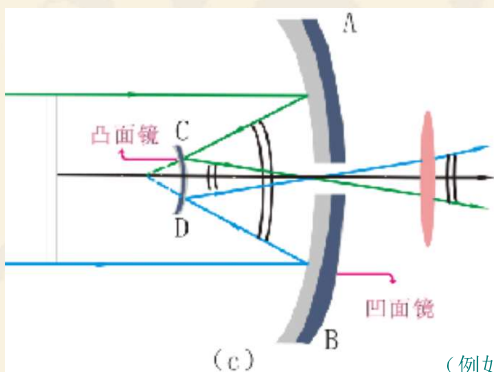
$$D/F = d/k$$

$$\begin{aligned} d &= D \times k / F \\ &= 200 \times 125 / 1600 \\ &= 15.6 \text{ mm.} \end{aligned}$$

D—主镜的直径
F—主镜的焦距
k—像平面距离望远镜中心轴
d—次镜的短轴

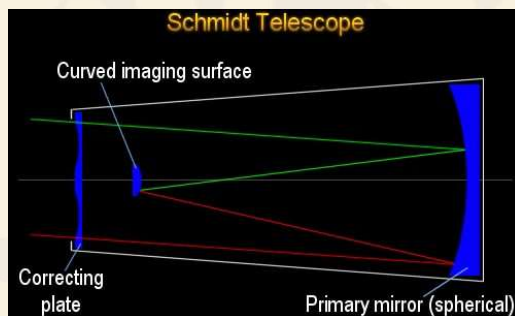
Figure 5.11 The Newtonian telescope.

卡塞格林式望远镜



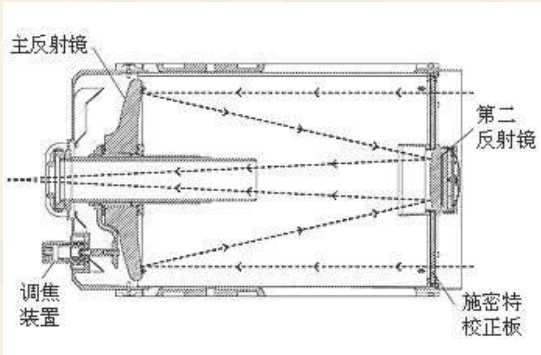
(例如HST)

折反射望远镜

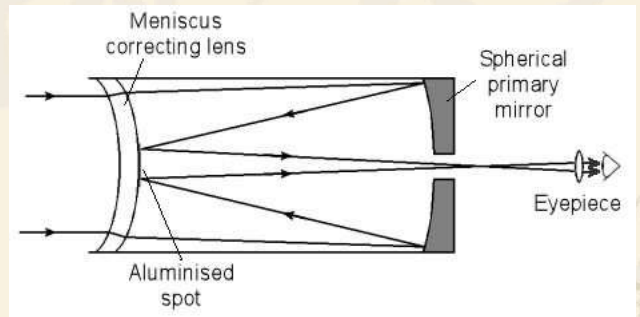


B.V. Schmidt 1930, 球面反射镜，宽视场，小的焦比

❖ Schmidt-Cassegrain 望远镜

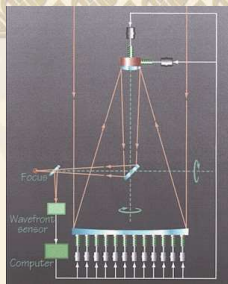


❖ Maksutov-Cassegrain 望远镜



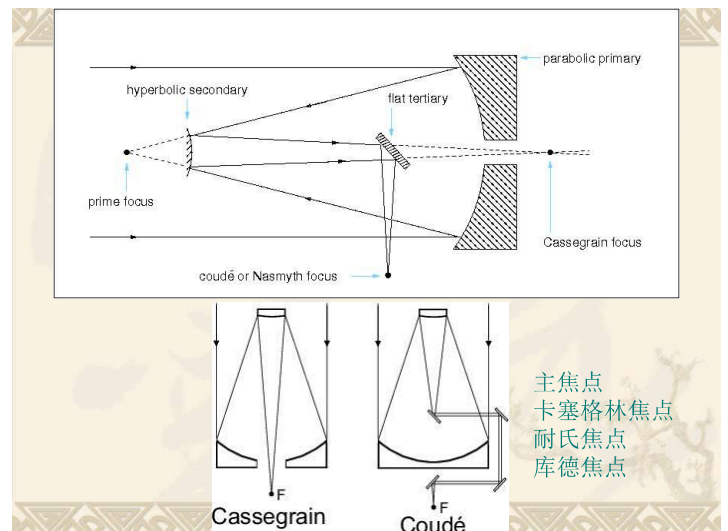
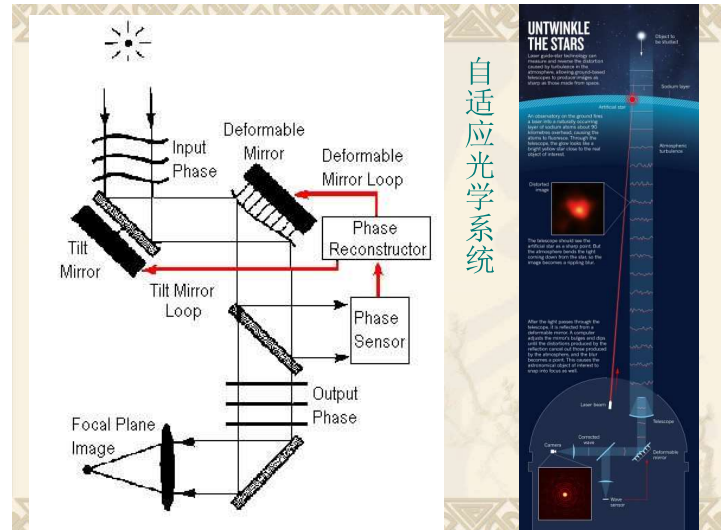
❖ 主动光学望远镜

主动光学的校正是低频的，主要用于修正主镜由于自重和热胀冷缩所造成的形变，其触动物一般位于主镜的后面



❖ 自适应光学望远镜

自适应光学的校正是高频的，主要修正大气湍流对星光波前的扭曲，其触动物位于校正光路中的弹性镜面后方。自适应光学在红外波段效果最佳，在光学波段也有显著效果；通常需要大功率激光器所产生的人造定标星。



一些代表性的光学望远镜

双子座望远镜 (Gemini North & South Telescope)



Figure 5.14 The Gemini North telescope. Note the open sides of the dome to allow the telescope to remain in thermal equilibrium with the outside air. Image: Neelon Crawford, Polar Fine Arts, courtesy of Gemini Observatory and National Science Foundation.

- Gemini North: Mauna Kea, Hawaii 海拔: 4214 m
- Gemini South: Cerro Pachon, Chile 海拔: 2737 m
- 口径: 8.1m x 2
- 红外特性好, 镀银 (比铝更能反射红外光)
- 圆顶侧面通风, 减少热不稳定性



薄镜面技术——双子座望远镜 (Gemini Telescope) 两台望远镜, 主镜均为8.1米, 厚度仅为20厘米。/ NOAO

Keck双胞胎望远镜

Mauna Kea, Hawaii, 4200m, 世界最大的光学和红外望远镜, 主镜口径10m, 由36块六边形的子镜组成。白天圆顶内温度冷却至接近零度 (夜晚温度; 减少热不稳定性)。主动光学 (每秒2次, 4nm) 和自适应光学系统 (15cm变形镜, 每秒670次)。



Figure 5.15 The twin Keck telescopes. Image: Courtesy W. M. Keck Observatory.

南非大望远镜 (SALT)

- 南半球最大, 10m球面镜
- 由91片六边形子镜子组成
- 固定倾斜角37度, 只可轴向转动
- 附镜可移动, 主镜可调整
- 造价低廉 (<1/5费用)

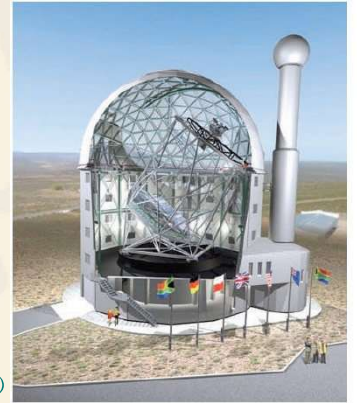


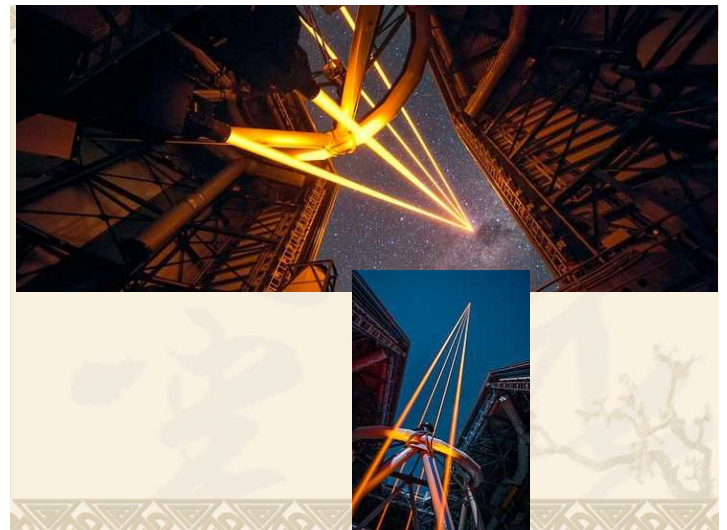
Figure 5.16 The South Africa Large Telescope. Image: SALT Consortium.

甚大望远镜 (VLT)

ESO, 位于智利, 海拔2600m, 4X8.2m (~16m), 4X1.8m副镜: 提高角分辨率, NUV-25um

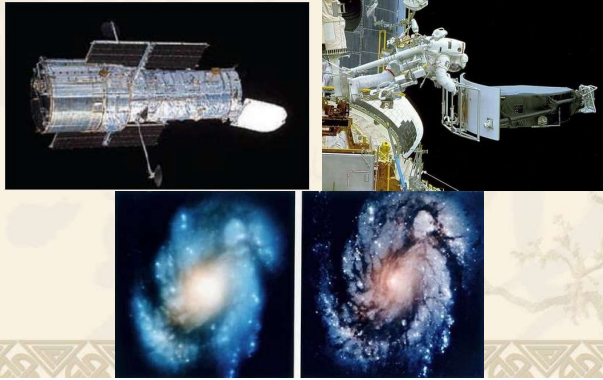


Figure 5.17 The four 8.2-m telescopes of the VLT, with the four 1.8-m auxiliary telescopes in the foreground. Image: Courtesy of the European Southern Observatory.



Hubble空间望远镜 (HST)

1990年4月发射，远紫外到红外 (0.12-2.4 μm)，
主镜：2.4m，角分辨率：~1/20 角秒



100m望远镜-OWL → ELT (39 m)

E S O，角分辨率：~1毫角秒

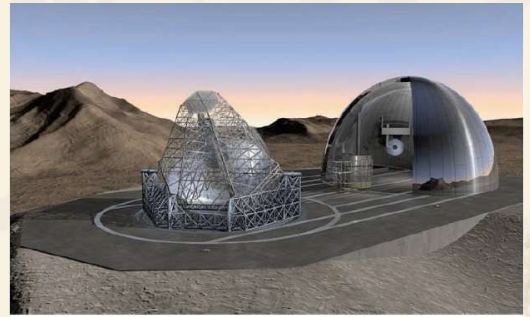


Figure 5.19 Artist's Impression of the 100-m optical telescope concept. Image: European Southern Observatory.

表 3 望远镜项目列表

项目名称	所属单位	主科学目标	镜面结构	口径/m	
建成项目	50BIN	西华师范大学、中国科学院国家天文台	疏散星团时域测光巡天	双筒单镜面	0.5
	PAST	中国科学院地质与地球物理研究所	太阳系行星系统成像观测(窄带)	单镜面, 紫外优化	0.8
	WFST	中国科学技术大学、中国科学院紫金山天文台	墨子望远镜大视场测光巡天	单镜	2.5
	SONG	中国科学院国家天文台	恒星震动、系外行星专用望远镜	奈焦幸运成像, 库特光谱	1.0
	AIMS	中国科学院国家天文台	用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统	离轴望远镜	1.0
在建项目	MUST	清华大学	大视场光纤光谱巡天	单镜	6.5
	MASTA	中国科学院紫金山天文台	多应用巡天望远镜	多望远镜(单镜)	有效口径 0.5
	JUST	上海交通大学	光纤光谱巡天	主镜拼接	4.0
	EAST	北京大学	通用望远镜平台	主镜拼接	8.0
	Tido	南京大学	多望远镜	反射、折射	最大 1.0
	TINTIN	中国科学院地质与地球物理研究所	木星内部结构与木卫一地质活动观测望远镜	通用平台	1.8
	紫金山天文台 4 m	中国科学院	通用光学望远镜	单镜	4.0
规划项目	司天计划	中国科学院国家天文台	大视场时域多色巡天阵列	多望远镜(单镜)	1.0
	大口径(名称待定)	中国科学院国家天文台	通用望远镜平台	主镜拼接	14.5
	LM-II	中国科学院国家天文台	大视场光纤光谱巡天	主、副镜拼接	8.0

射电望远镜

- ❖ 大气射电窗口：0.75m(408MHz)—1cm(22GHz)
 - 低频电离层吸收
 - 高频水蒸气吸收
- ❖ 射电的优势：不被尘埃吸收，可观测银河系中心
- ❖ 射电光路设计
 - 接收机在主焦点
 - Cassegrain式



射电望远镜天线技术

❖ 射电望远镜：馈源和低噪声放大器

- 馈源收集镜面的射电波
- 通过低噪声的放大器（低温至接近绝对零度，降噪）放大收集的信号

❖ 射电噪声：

- 冷却的放大器：~8K
- 宇宙微波背景：~3K
- 来自银河系相对论电子的同步辐射
- 大气中分子的辐射，特别是水蒸气（高频）
→ 高海拔或南极
- 地面的黑体辐射（~290K）被散射

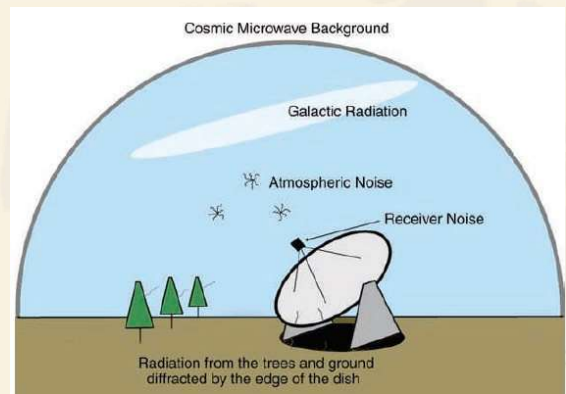


Figure 5.20 The contributions to the total system noise which is typically 25K.

射电噪声

❖ 射电接收机

- 探测射电信号，记录信号强度
- 模拟信号，数字信号
- 射电分辨率：带宽（Beam width）

镜面：76m，波长：21cm

1.6

$$\begin{aligned} \text{Beam width} &= \Delta\theta = 1.22 \lambda/D \\ &= 1.22 \times 0.21/76 \text{ rad} \\ &= 3.4 \times 10^{-3} \text{ rad} \\ &= 3.4 \times 10^{-3} \times 57.3 \times 60 \text{ arcmin} \\ &= 11.6 \text{ arcmin} \end{aligned}$$

比人眼在可见光波段的分辨率还要低12倍！

❖ 望远镜的设计



Figure 5.21 The 76-m Lovell Telescope – a prime focus design. Image: Ian Morrison.



Figure 5.22 The 32-m Cambridge Telescope – a Cassegrain design. The cone houses a carousel supporting four receivers. Image: Ian Morrison.

主焦面设计（低频）

Cassegrain设计

❖ 主焦面设计与Cassegrain设计的优缺点

- Cassegrain设计的优点：焦平面转盘，可以放许多接收机，便于多频转换
- 主焦面设计的优点：适合低频

❖ 主动光学式的设计

- 镜面转动，引力场导致变形，调整到抛物面（例如FAST）
- 焦点位置改变，需移动馈源
- 焦平面放置激光光源，用于测量镜面的形变



Figure 5.24 The 305-m Arecibo Telescope. Image courtesy of the NAIC – Arecibo Observatory, a facility of the NSF.

主镜球面镜；次镜25m！源移动就移动接收机进行跟踪

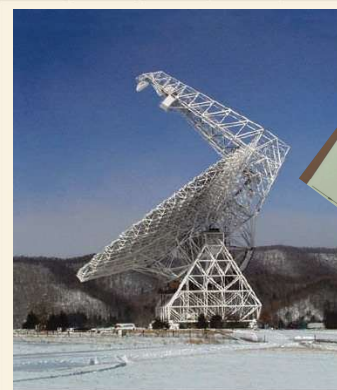


Figure 5.23 The 105-m Robert C. Byrd Green Bank Telescope. Image: National Radio Astronomy Observatory.

单偏置天线

Offset-feed 系统
避免光路上的辐射散射产生的噪声

大的固定式的射电望远镜：305m Arecibo 望远镜



Figure 5.24 The 305-m Arecibo Telescope. Image courtesy of the NAIC – Arecibo Observatory, a facility of the NSF.

主镜球面镜；次镜25m！源移动就移动接收机进行跟踪

500米口径球面射电望远镜（FAST）



- 球面反射面被照明部分实时拟合成一个瞬时抛物面
- 反射面由三四千个11米边长的正三角形单元拼合而成。
- 改正了球差，简化了馈源，克服了球反射面线焦造成的窄带效应。
- 利用贵州南部独特的天然喀斯特洼坑可大大降低望远镜工程造价

天线阵

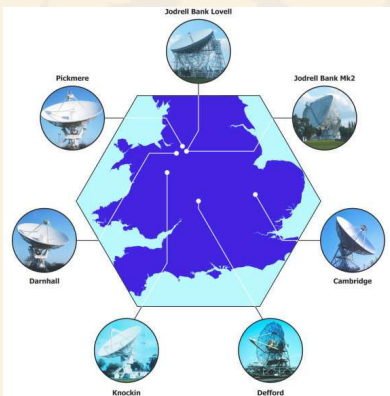
- ❖ 地球转动综合孔径技术
- ❖ 三个主要的天线阵
 - Very Large Array (VLA)
 - MERLIN
 - Giant Metre Radio Telescope (GMRT)

VLA



- 美国新墨西哥州
- Y型：25m X 27
- 最长：36 km
- 工作波长：0.7-400 cm

MERLIN



- 英国
- 总尺度：217 km
- 5x25m+32m+76m
- 工作波长：1.3-74cm

$$\Delta\theta = 1.22 \lambda / D$$

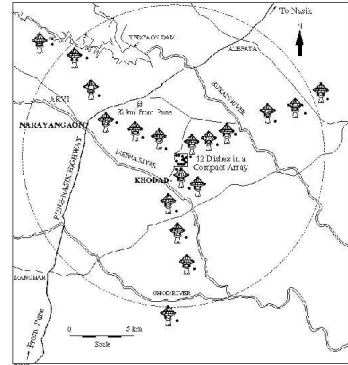
$$= 1.22 \times 0.05 / 217\,000 \text{ rad}$$

$$= 2.8 \times 10^{-7} \text{ rad}$$

$$= 2.8 \times 10^{-7} \times 57.3 \times 3600 \text{ arcsec}$$

$$= 0.06 \text{ arcsec}$$

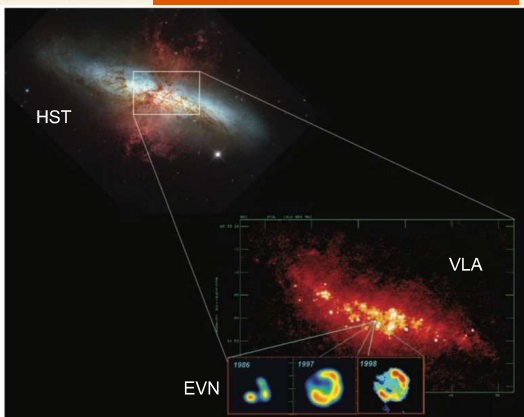
LOCATIONS OF GMRT ANTENNAS (30 dishes)



GMRT

- 印度
- 30x45m, 14个在1 km²之内, 其它16个呈Y型
- 最大尺度：25km
- 工作波长：6m-21cm

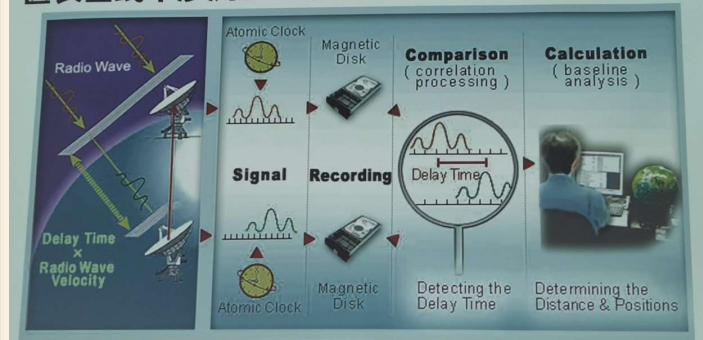
甚长基线干涉仪 (VLBI)



- EVN (欧洲VLBI网络)
- 原子钟
- 角分辨率可以达到：1毫角秒

Figure 5.26 The starburst galaxy M82. Upper left: Hubble Space Telescope image of M82 in visible light. Lower right: VLA and MERLIN radio image of the central part of M82 with, below, EVN images of an expanding supernova remnant. Image: Hubble Space Telescope Institute, NASA and the University of Manchester.

Very Long Baseline Interferometry 甚长基线干涉测量 - 最高分辨率天文观测技术



ALMA: Atacama Large Millimeter Array



- 智利Atacama沙漠
- 海拔：5000 m（水蒸汽少）
- 工作波长：0.3-10 mm
- 66个天线，最大相距16公里
- 观测宇宙中气体云和尘埃，恒星形成细节(0.01角秒)

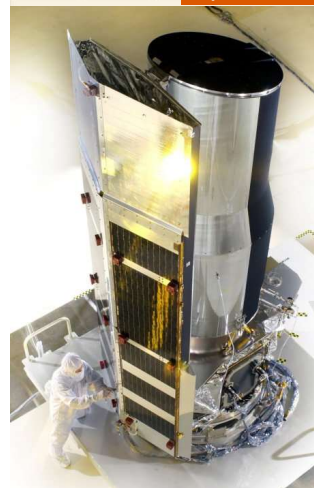
其它电磁波段的观测

- ❖ 红外
- ❖ 亚毫米波
- ❖ 紫外
- ❖ X射线
- ❖ 伽玛射线

❖ 红外

- 很多望远镜的观测波长延伸到红外
- 专门的红外望远镜，例如：United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT), Mauna Kea, Hawaii, 3.8m, 阶梯光栅光谱仪
- 年轻的恒星被气体和尘埃包裹，近红外不可见，中红外可以
- 褐矮星：“失败”的恒星

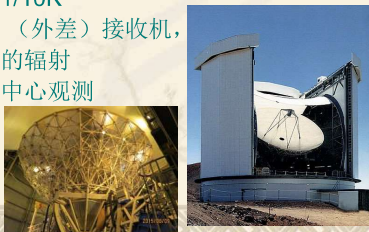
Spitzer 空间望远镜



- 3-180微米（大多不是大气窗口）
- 口径：0.85 m
- 冷却剂冷却三个科学仪器至接近绝对零度
- 遮阳板
- 轨道：跟在地球后面足够远的地方，快速冷却，且无需大量冷却剂

❖ 亚毫米波

- 红外与射电之间的波段
- 来自宇宙中冷物质---例如气体和尘埃（Interstellar medium, ISM）---的辐射
- ISM: 恒星形成的温床，恒星死亡抛射物质到ISM
- James Clark Maxwell Telescope (JCMT) :
 - 15m, Mauna Kea, Hawaii (干燥)
 - 探测器: SCUBA, 探测尘埃颗粒 (~-240摄氏度) 的热辐射, 液氮降温至1/10K
 - 接收机: heterodyne (外差) 接收机, 探测空间气体云的辐射
 - 恒星形成区、银河系中心观测



紫外



- HST可以观测紫外，但视场太小
- IUE: 1978-1996

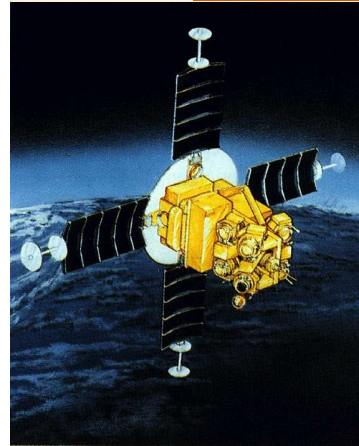
- 航天飞机搭载: Astro
- WSO/UV

极端远紫外



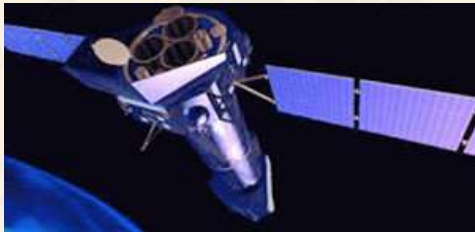
- ISM吸收厉害，科学家不太情愿建造极端远紫外卫星
- Extreme Ultraviolet Explorer (EUVE) 却观测到太阳周围气体和尘埃相对稀少 (bubble in local ISM) !

紫外/X射线边界



- The Array of Low Energy X-ray Imaging Sensors (ALEXIS; 1995)
- 尽管名字含X-Ray,其实是X-ray射线非常低能段,被认为为极端远紫外

XMM-Newton



XMM-Newton

X-ray Multi-Mirror (ESA)

寿命: 1999年12月 - (计划10年寿命; 仍在工作中)

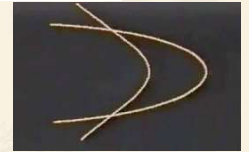
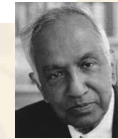
波段: 0.1 - 15 keV

特性: 大的有效面积; X射线谱和光学观测同时进行

Chandra X射线天文台



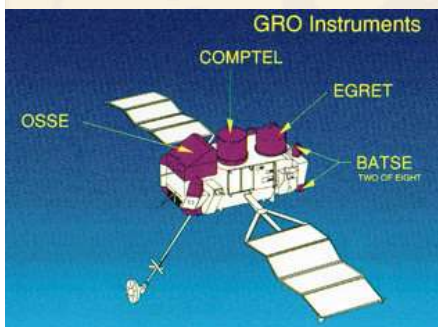
X射线高能天体物理的观测研究: 个人研究回顾



•掠射式成像原理, 工作波段: 0.1 - 10 keV, 空间分辨率: 0.5角秒 (1999年底-至今)

•重要成果举例: 超新星遗迹中心致密天体、银河系中心黑洞、哈勃常数的测定、碰撞超团: 暗物质存在的证据

伽玛射线-Compton Gamma-Ray Observatory

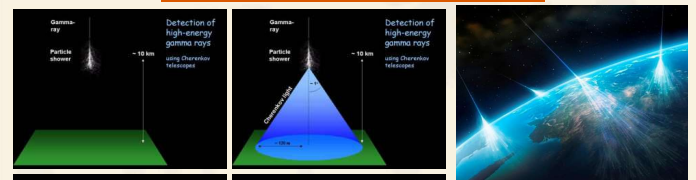


•工作波段: 20 keV - 30GeV

•1991.4.5 - 2000.6.4

•主要发现: 伽玛射线暴的各向同性

TeV (Cherenkov) 望远镜



基本原理:

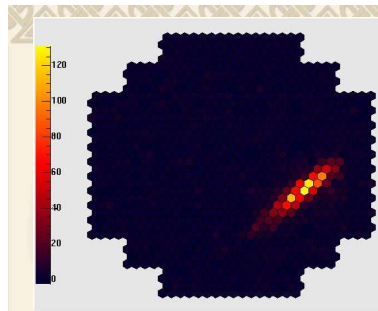
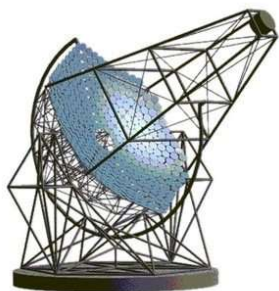
- 高能伽玛光子产生大气簇射
- 簇射粒子运动速度接近光速
- 产生Cherenkov光: 暗蓝光

- Cherenkov 光池直径: 250m, 对 10^{12} eV光子: $\sim 100/m^2$, 时间: 纳秒

High Energy Stereoscopic System (HESS)



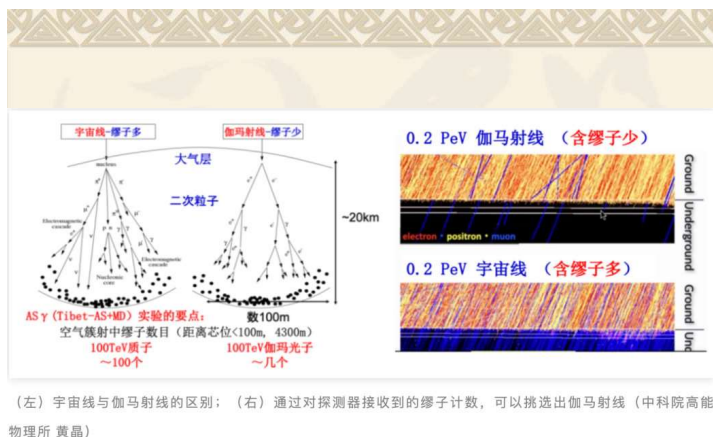
- 100 GeV-100 TeV
- 位置：纳米比亚



其它的Cherenkov望远镜：
CANGAROO, H.E.S.S. ,
MAGIC, MILAGRO and
VERITAS等



VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System)



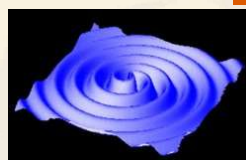
非电磁辐射

- ❖ 中微子
- ❖ 宇宙线
- ❖ 引力波

宇宙线

- ❖ 宇宙线的成分：90%质子+9%氦核+1%电子+少量的重核
- ❖ 方向随机，最高能量达 10^{20} eV! (大型重子对撞机：~10几个TeV)
- ❖ 宇宙线的起源：大多来自银河系中的旋转中子星、超新星(遗迹)、黑洞；最高能量的粒子来自超大质量黑洞周围、喷流；银心；低能粒子来自太阳
- ❖ 宇宙线的分类：初级粒子和次级粒子
 - 初级粒子：氧核、碳核(产自恒星，超新星爆发抛出)
 - 次级粒子：锂、铍、硼，初级粒子与ISM作用的结果
- ❖ 对全球温度的可能影响：宇宙线流量改变地球云层覆盖程度
- ❖ 大气簇射：与大气中的氧、氮作用，形成数十亿个轻的粒子!
- ❖ 中子碰撞 ^{14}N ，产生放射性的 ^{14}C (半衰期：5730年)，大气中 ^{14}C 的比例稳定：定树木的年龄
- ❖ μ 子衰变，检验狭义相对论(半衰期1.6us/10km高/1%光速/到达地面概率1/(3M) \rightarrow 7.8us/概率1/20)

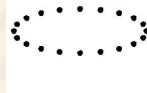
引力波



$$\frac{\Delta L}{L} \sim 10^{-21}$$

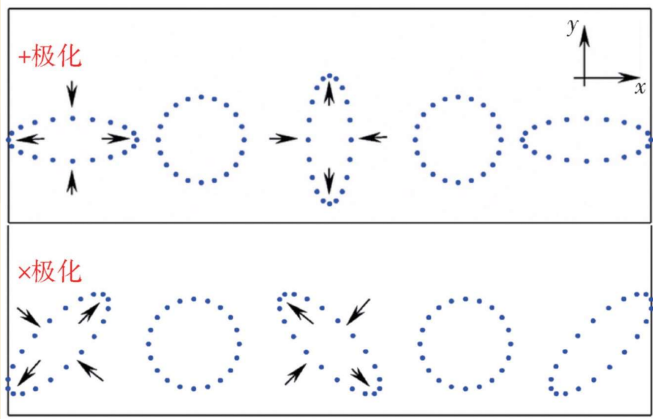


当引力波抵达地球后，会造成非常轻微的拉伸和挤压。



引力波效应：两种偏振模式

引力波的振动方向与传播方向垂直，因此是一种横波



(蔡荣根 等人)

Weber 共振棒

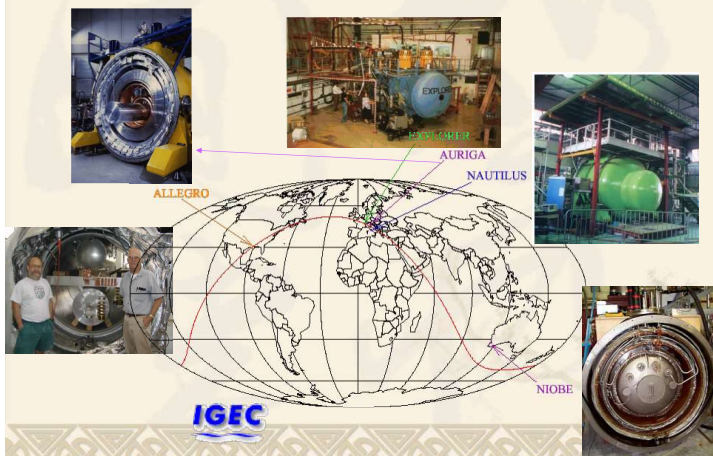


- 金属铝棒：固有频率~1660Hz
- 压电传感器

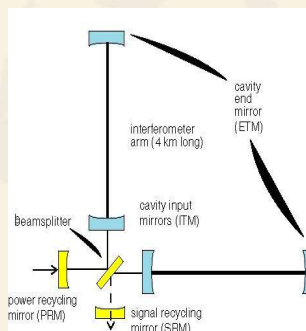
现代改进

- 更好的低温冷却
- 超导量子干涉仪测振动

Bar detectors: IGEC国际引力波探测合作



激光干涉引力波天文台 (LIGO)



致密天体的并合：黑洞/中子星

LISA: 激光干涉空间天线



- 太阳辐射压与太阳风的影响
- 探测中等质量黑洞的并合：宇宙残留引力波（原初引力波）



引力波的波型—数值计算

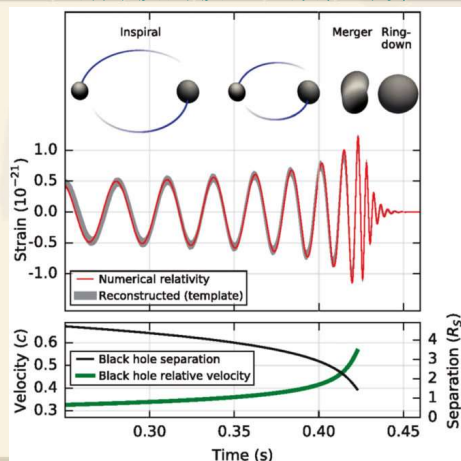
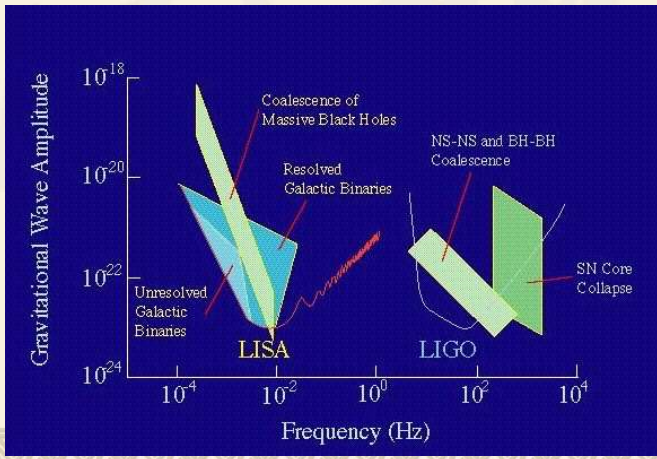


图1: GW150914在引力波探测器中的波形及轨道演化示意图, 图片来源: 文献[2].



引力波天文学进展：信号搜索与黑洞铃宕分析

探测极限与引力波源



第六章：恒星的性质

本章内容

- ❖ 恒星的各种性质是怎样的？如何测量？
 - 光度
 - 距离
 - 颜色、表面温度
 - 光谱及分类
 - 赫罗图
 - 大小、质量、密度
 - 寿命

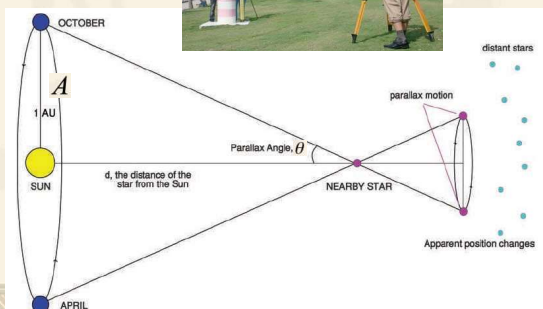
恒星光度

- ❖ 恒星的本征光度(热光度)：所有频率辐射能量的总和
- ❖ 太阳的光度： $L_{SUN} = 3.86 \times 10^{26} W$
- ❖ 视光度（视星等）并不反映恒星的本征光度，还依赖于恒星的距离

恒星的距离

- ❖ 三角视差法

$$d = A / \theta$$



一个例子：

$$\theta = 0.1''$$

$$\theta = 0.1 / (3600 \times 57.3) \text{ rad} = 4.85 \times 10^{-7}$$

$$A = 1.49598 \times 10^8 \text{ km}$$

$$d = A / \theta = 1.49598 \times 10^8 / 4.85 \times 10^{-7} \text{ km} = 3.084 \times 10^{14} \text{ km} = 32.6 \text{ ly}$$

$$1 \text{ ly} = 9.46 \times 10^{12} \text{ km}$$

秒差距：

$$d = 1 / p$$

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ ly}$$

最近的恒星：
比邻星

$$\theta = 0.772''$$

$$d = 1 / 0.772 \text{ pc}$$

$$= 1.295 \text{ pc}$$

$$= 1.295 \times 3.26 \text{ light years}$$

$$= 4.22 \text{ light years}$$

恒星的自行

- ❖ 自行对三角视差法测距的影响
- ❖ 自行（角秒/年）的测定
- ❖ 地面测量了几千个恒星视差， $d < 40 \text{ pc}$
- ❖ Hipparcos卫星（1989.8.8）



巴纳德星的自行
2004-2008: 每年 $10.3''$

- Hipparcos=High Precision Parallax Collecting Satellite
- 位置测量精度: ~ 0.001 角秒
- 3年的观测: 118 000个恒星的视差和自行, $d \sim 90 \text{ pc}$
- 帮助预言彗星Shoemaker-Levy 9何时与木星碰撞; 另外还表明几十亿年前, 银河系吞并了大量的恒星
- ❖ GAIA卫星（2013.12.29）
- 对15等星可达20微角秒位置精度

绝对星等

绝对星等的定义: 10 pc 处恒星的视星等

$$R = (d/10)^2$$

$$M = m - 2.5 \log_{10} R$$

$$2.512^5 = 100$$

参宿七(Rigel):
(蓝超巨星)

$$d = 237 \text{ pc}, m = 0.12$$

$$M = 0.12 - 2.5 \times \log_{10} (237/10)^2 = -6.7$$

太阳:

$$d = 4.86 \times 10^{-6} \text{ pc}, m = -26.75$$

$$M = -26.75 - 2.5 \times \log_{10} (4.86 \times 10^{-6} / 10)^2 = 4.82$$

参宿七与太阳光度

差:

$$\Delta m = |-6.7 - (+4.82)| = 11.52 \text{ magnitudes}$$

$$R = 2.512^{11.52} = 40\,571$$

比邻星与太阳光度差:

$$\Delta m = 15.5 - 4.82 \text{ magnitudes} = 10.68 \text{ magnitudes}$$

$$R = 2.512^{10.68} = 18\,715$$

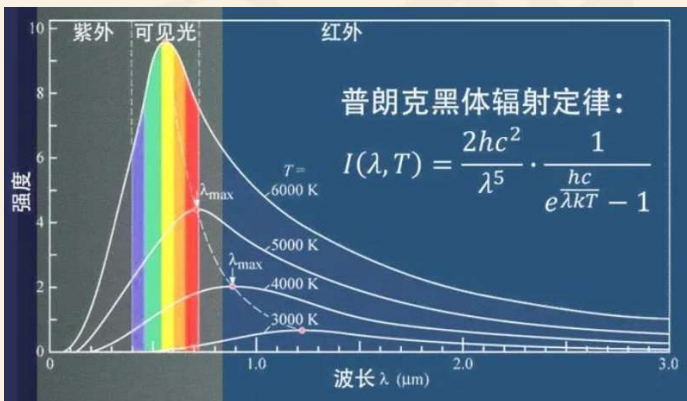
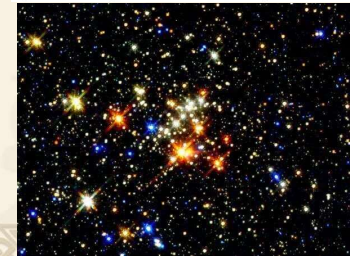
比邻星与参宿七光度差:

$$40\,500 \times 19\,000 = 769\,500\,000$$

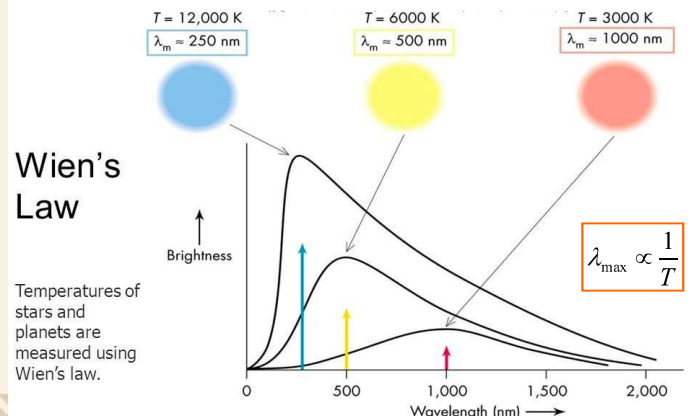
恒星的颜色和表面温度



Figure 6.3 Impression of Brocchi's Cluster. The effect of a 'soft-focus' filter has been used to spread the stellar images so that star colours are more easily seen.



- The peak wavelength of a blackbody spectrum is inversely proportional to temperature:



比邻星的温度:

$$L = \sim 4 \times 10^{26} / 19\,000\,W = 2.1 \times 10^{22}\,W$$

$$R = 1/7 R_{SUN} \approx 1 \times 10^8\,km$$

$$L = \sigma AT^4 = 5.671 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (1 \times 10^8)^2 \times T^4$$

$$T = \{2.1 \times 10^{22} / [5.671 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (1 \times 10^8)^2]\}^{1/4} = (2.1 \times 10^{22} / 7.1 \times 10^9)^{-4} = 1300\,K$$

$$T_{PC} / T_{Sun} = [(1/19\,000) / (1/49)]^{1/4}$$

$$T_{PC} = 0.22 \times 5800\,K = 1300\,K$$

$$T_{Rigel} / T_{Sun} = (45\,000 / 3800)^{1/4}$$

$$T_{Rigel} = 1.85 \times 5800\,K = 10\,700\,K$$

参宿七的温度

色指数 (C: 不同波段星等差)

$$C = m_B - m_V$$

$$T = \frac{7200}{C + 0.64}\,K$$

色温度

别的常用双色测光:
照相星等 m_{photo} , 仿视星等 m_V

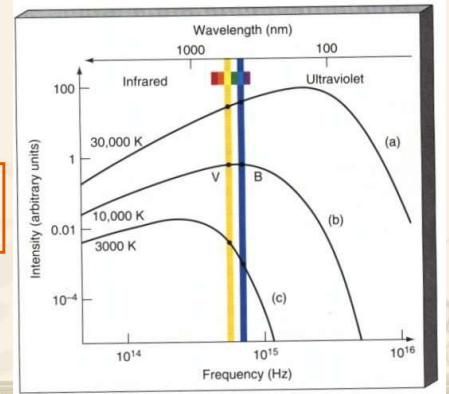
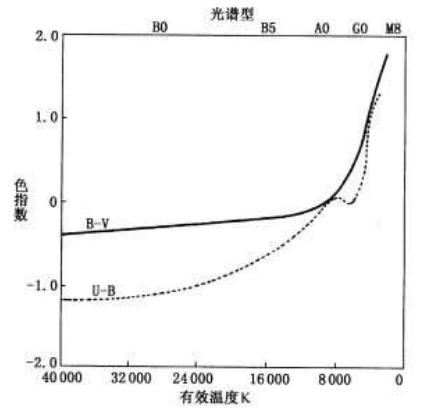
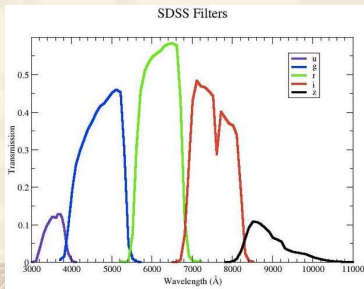


表 2.1 多色测光系统的滤光片参数

滤光片	峰值波长(nm)	滤波宽度(nm)
U	350	70
B	435	100
V	555	80
R	680	150
I	800	150



$$T = \frac{7090}{(B-V) + 0.71}\,K$$

$T \sim 4000-10000\,K$ 时:

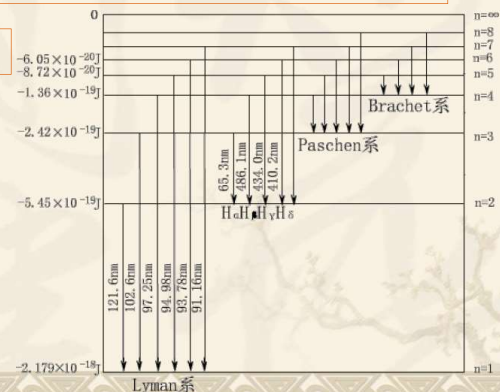
$$T = \frac{8540}{(B-V) + 0.865}\,K$$

图 8.3 恒星的色指数 B-V 和 U-B 与有效温度 (光谱型) 的关系

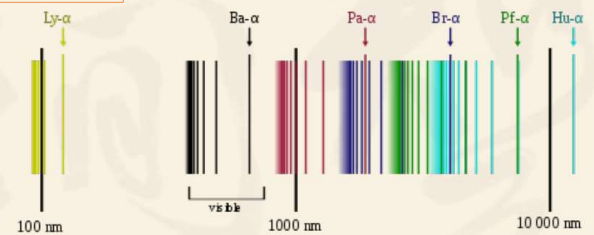
恒星光谱

谱线记号: H I, H II, He I, He II, He III

氢原子光谱



氢原子光谱



来曼系列: 位于紫外光波段 ($\rightarrow 1$)

巴耳末系列: 位于可见光波段 ($\rightarrow 2$)

- H α —656.3nm, 红色(3 \rightarrow 2)
- H β —486.1nm, 绿色(4 \rightarrow 2)
- H γ —434.0nm, 中蓝色(5 \rightarrow 2)

帕申系列: 位于红外光波段的谱线($\rightarrow 3$)

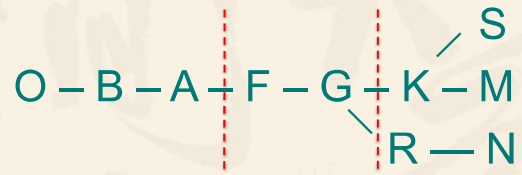
布拉克系列: 位于红外光波段 ($\rightarrow 4$)

蒲芬德系列: 位于红外光波段($\rightarrow 5$)

谱线和温度的关系

- $T \sim 9000\text{K}$, 氢的巴尔末线系 $H\alpha$ 、 $H\beta$ 等谱线最强
- 温度升高, 氢电离, 氢原子的谱线减弱, 甚至消失
- 氢的电离能大得多, HeI、HeII 的谱线经常一起出现

哈佛光谱分类

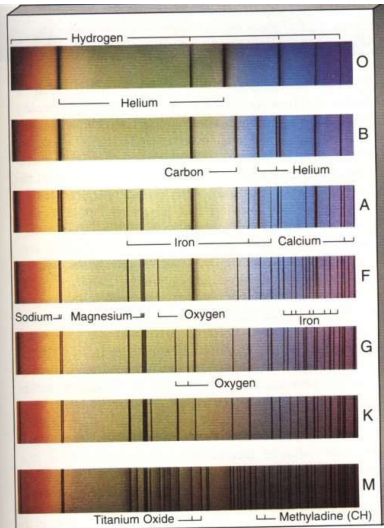


Oh! Be A Fine Girl/Guy! Kiss Me Right Now, Sweetheart! (联想记忆法)

R, N: 光谱同 K 和 M 型相似, 但增加了很强的碳和氢的分子带。后来把它们合称为碳星。**S 型**: 红色。光谱同 M 型相似, 但增加了强的氧化钛分子带, 常有 X 射线

每一类又分为 0-9 子类, 太阳: G2 型

各种光谱型的化学成分



光谱型	颜色	温度	光谱特征
O	蓝白	$T_e \geq 30,000\text{K}$	紫外连续谱强, 有弱 H_{II} , H_{II} , H_{II} 线
B	蓝白	$10,000\text{K} \leq T_e \leq 30,000\text{K}$	H_{II} 线在 B_2 型达到最大, B_0 之后 H_{II} 消失, H 线逐渐变强
A	白	$7,500\text{K} \leq T_e \leq 10,000\text{K}$	H 线在 A_0 达到极大, C_{II} 线增强, 出现弱中性金属线
F	黄白	$6,000\text{K} \leq T_e \leq 7,500\text{K}$	H 线变弱但仍明显, C_{II} 线大大增强, 电离和中性金属线的强度增加
G	黄	$5,000\text{K} \leq T_e \leq 6,000\text{K}$	属太阳谱型, C_{II} 线很强, F_e 及金属线强, H 线弱
K	橙	$3,500\text{K} \leq T_e \leq 5,000\text{K}$	金属线主导, 连续谱蓝端变弱, 分子带 (CN, CH) 变强
M	红	$T_e \leq 3,500\text{K}$	分子带主导, 中性金属线强

类型	温度	约定的颜色	看见的颜色 [510]	质量 (太阳质量)	半径 (太阳半径)	亮度	氢线	主序星的比例 %
B	10,000–30,000 K	蓝到蓝白色	蓝白色	18 M_{\odot}	7 R_{\odot}	20,000 L_{\odot}	一般	0.13%
A	7,500–10,000 K	白色	白色	3.1 M_{\odot}	2.1 R_{\odot}	40 L_{\odot}	强烈	0.6%
F	6,000–7,500 K	淡黄的白色	白色	1.7 M_{\odot}	1.4 R_{\odot}	6 L_{\odot}	一般	3%
G	5,000–6,000 K	黄色	淡黄的白色	1.1 M_{\odot}	1.1 R_{\odot}	1.2 L_{\odot}	弱	7.6%
K	3,500–5,000 K	橙色	黄橙色	0.8 M_{\odot}	0.9 R_{\odot}	0.4 L_{\odot}	十分弱	12.1%
M	2,000–3,500 K	红色	橙红色	0.4 M_{\odot}	0.5 R_{\odot}	0.04 L_{\odot}	十分弱	76.45%

距离测量—分光视差法

- 基本假设: 同一类型的恒星的绝对光度一致
- 例如: 某 F0 型恒星, 比邻近的一 F0 型恒星暗 10 000 倍, 邻近的恒星通过三角视差法测得距离为 8pc, 则该远处的 F0 型恒星的距离为 800pc
- 某 G2 型恒星, 视星等为 +9.8, 太阳的绝对星等为 +4.8 ($d=10\text{pc}$), 则该恒星的距离为 100pc
- 一 LMC 中的 B8 恒星, 视星等为 +11.7, 参宿七 (B8) 的绝对星等为 -6.7 等,

$$\text{光度差: } 2.512^{18.4} = 23 \times 10^6$$

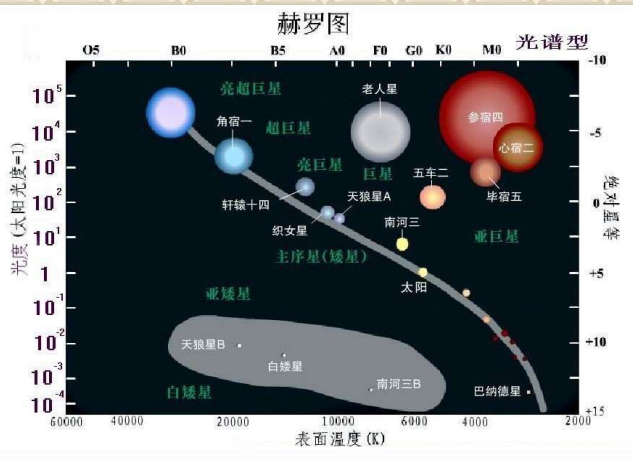
$$\text{距离: } 10 \times (23 \times 10^6)^{1/2} \text{ pc} = 10 \times 4800 \text{ pc} = 48\,000 \text{ pc}$$

分光视差法的缺点:

- 同一类型的恒星本征光度不一定一致, 还依赖于恒星的金属丰度
- 光谱型和光度之间的相关性不是很好, 主序带并不是一个窄线, 例如, F0型, 差+/-一个星等, 所以距离差+/- $(2.512)^{1/2}$
- 星际消光、红化的影响

Hertzsprung-Russell 图

- ❖ 1900s早期, Ejnar Hertzsprung (丹麦)与 Henry Russell (美国)
- ❖ 横坐标: 温度 (高←低) 或光谱型
- ❖ 纵坐标: 光度或绝对星等
- ❖ H-R图, 或颜色-星等图



恒星大小

直接测量

参宿四
(红超巨星)



红超巨星参宿四
致暗之谜

Figure 6.8 Hubble Space Telescope image of Betelgeuse. Image: A. Dupree (CfA), NASA, ESA.

$$\theta \sim 0.05'', D = 131 pc$$

$$d = D\theta = 131 \times 3.1 \times 10^{13} \times [0.05 / (3600 \times 57.3)] km$$

$$= 4.1 \times 10^{15} \times 2.4 \times 10^{-7} km = 9.84 \times 10^8 km$$

$$\approx 700 R_{SUN}$$

光学干涉

比邻星的观测: 2002年, VLT, $2 \times 8.2m$, 基线长度: $\sim 102.4m$, 等效口径: $\sim 100m$

$$\theta \sim 1.02 \pm 0.08 \text{ mas}, D = 1.3 pc$$

$$d = 1.3 \times 3.1 \times 10^{16} \times 1.02 / (1000 \times 3600 \times 57.3) m$$

$$= 2 \times 10^8 m$$

$$\approx 1/7 R_{SUN}$$

双星掩食法测量恒星大小

英仙β星
小掩食大: $\sim 10h$
周期: $\sim 68.8h$
两星相距:
 $\sim 0.062AU$

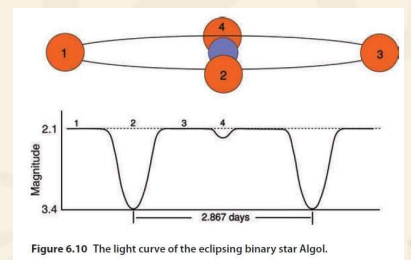


Figure 6.10 The light curve of the eclipsing binary star Algol.

$$A = 0.062 AU \approx 9.275 \times 10^6 km$$

$$d = 3.1415926 \times 9.275 \times 10^6 \times 10 / 68.8$$

$$= 4.2 \times 10^6 km \approx 3 D_{SUN} \text{ (小恒星的大小)}$$

用Stephan-Boltzman公式估算恒星的大小

参宿七:

$$M = -6.7(\text{SUN} : +4.83)$$

$$L / L_{\text{SUN}} = 2.512^{11.53} = 41000$$

$$T = 10700 = 1.84T_{\text{SUN}}$$

$$A / A_{\text{SUN}} = 41000 / 1.84^4 = 41000 / 11.5 = 3500$$

$$D / D_{\text{SUN}} = 3500^{1/2} \approx 59$$

参宿四:

$$L / L_{\text{SUN}} \approx 60000$$

$$T = 0.6T_{\text{SUN}}$$

$$A / A_{\text{SUN}} = 60000 / 0.6^4 = 60000 / 0.13 = 460000$$

$$D / D_{\text{SUN}} = 460000^{1/2} \approx 679$$

用Stephan-Boltzman公式估算恒星的大小

天狼星A:

$$L / L_{\text{SUN}} \approx 26$$

$$T = 9900\text{K} = 1.72T_{\text{SUN}}$$

$$A / A_{\text{SUN}} = 26 / 1.72^4 = 26 / 8.7 \approx 3$$

$$D / D_{\text{SUN}} = 3^{1/2} \approx 1.7$$

天狼星

B:

$$L / L_{\text{SUN}} \approx 1 / 416$$

$$T = 15000\text{K} = 2.59T_{\text{SUN}}$$

$$A / A_{\text{SUN}} = 1 / 416 / 2.59^4 = 1 / 416 / 45 \approx 5.3 \times 10^{-5}$$

$$D / D_{\text{SUN}} = (5.3 \times 10^{-5})^{1/2} \approx 0.007$$

与地球半径相仿



恒星的质量和密度

双星系统中:

$$P^2 = [4\pi^2 / G(M_1 + M_2)] a^3$$

- G2+A0双星系统: $M = M_1 + M_2 = 4$ 倍太阳质量, 则:
A0型恒星的质量为3倍太阳质量
- A0+F2: $M = 4.5$ 倍太阳质量, F2型=1.5倍太阳质量
- 恒星的质量范围: $\sim 1/15$ -50倍太阳质量
- 恒星的大小、质量 \rightarrow 密度

恒星的质量-光度关系

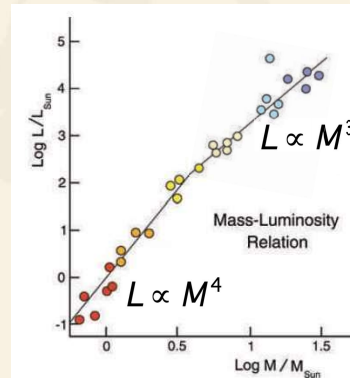
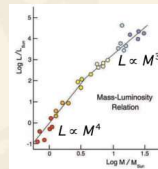


Figure 6.13 The mass-luminosity relationship.

$L \propto M^4$, 低质量恒星
 $L \propto M^3$, 高质量恒星

恒星的寿命

- 恒星内部温度越高, 热核反应率越快
 - 恒星的质量越大, 寿命越短
 - 参宿七: $M = 17M_{\text{SUN}}, L = 41000L_{\text{SUN}}$
 $\rightarrow t = 17 / 41000 t_{\text{SUN}} = 1/2600 t_{\text{SUN}} \sim 4$ 百万年
热光度: $L \sim 66000L_{\text{SUN}} \rightarrow t \sim 2.7$ 百万年
 - 红矮星: $M = 1/5M_{\text{SUN}}, L = 1/10000L_{\text{SUN}}$
 $\rightarrow t \sim 2000 t_{\text{SUN}}$
- 内部对流, 更多的H燃烧 (太阳只燃烧10%的氢), 寿命更长, 比宇宙年龄长!



第七章: 恒星的演化 — 恒星的一生和死亡

本章内容

- ❖ 小质量恒星如何演化？
- ❖ 中等质量恒星如何演化？
(涉及变星、行星状星云、白矮星)
- ❖ 大质量恒星如何演化？
(涉及超新星、中子星、黑洞，扩展至活动星系核、伽玛暴、快速射电暴)



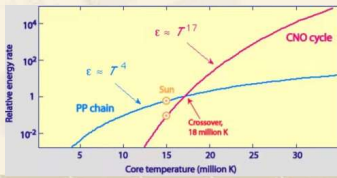
利用时域光学观测
搜寻致密天体 (厦
门大学 顾为民)

小质量恒星：0.08-0.5太阳质量

- 氢聚变点火温度： $\sim 10^7\text{K}$ ，要求 $M > \sim 0.08 M_{\text{sun}}$
- 大部分的 ($>10\%$) 氢通过对流燃烧，年龄大于宇宙年龄，聚变结束到底发生什么不能通过观测，只能通过数值计算预计
- 质量太小，不能发生氦聚变 ($>10^8\text{K}$)
- 数值模拟：对于 $M \sim 0.1 M_{\text{sun}}$ ，氢聚变成氦约持续 6×10^{12} 年，经过几个 10^{11} 年，塌缩成白矮星，再经过几个 10^{12} 年，冷却成黑矮星

中等质量恒星：0.5-8.0太阳质量

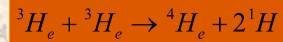
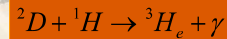
- 氢聚变，共同结局：白矮星
- $M < 2 M_{\text{sun}}$ ：产能的主要方式，pp链+CNO循环 (1-2%)
- $M > 2 M_{\text{sun}}$ ：CNO循环占主导，CNO循环使得氢聚变更有效！恒星光度更大，变蓝 (根据赫罗图)
- CNO循环的提出：
 - 1938: Carl von Weizsacker
 - 1939: Hans Bethe



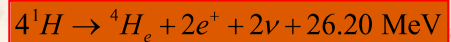
PPI链

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

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



总结果是

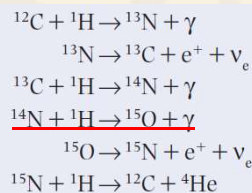
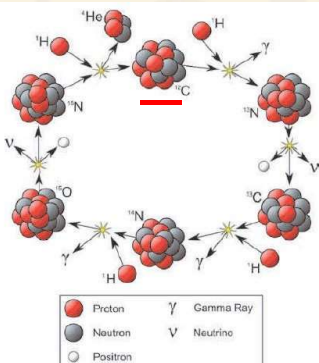


$$\Delta E = 4 \times 1.007825 - 4.002603 = 0.02870 \text{ Amu} = 26.73 \text{ MeV}$$

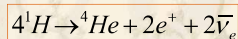
$$\gamma \Rightarrow 26.20 \text{ MeV} \quad \nu \Rightarrow 0.53 \text{ MeV}$$

CNO循环

$$(M \geq 2 M_{\odot} \quad T_c \geq 2 \times 10^7 \text{K})$$



总结果是

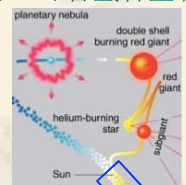


反应平衡时，N丰度高

Figure 7.1 The carbon-nitrogen-oxygen cycle. Image: Wikipedia Commons.

- 在主序带上的上移

- 氢聚变 (pp或CNO)，平均分子量增加，为了维持压强，温度升高
- 核反应率正比于温度的四次方，尽管氢含量有所下降，但光度仍然增加
- 恒星的表面温度增加
- 恒星在主序带上向左上移

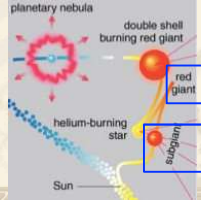


- 太阳刚诞生时，光度比现在少 $\sim 30\%$ ， $\sim 10^9$ 年之后，光度再增加 $\sim 10\%$ ，地球的温度升高，不再适合人类的生存

•中心氢烧完，形成氦中心核与氢丰富外层，此时中心温度没有高到氦聚变（“冷核”），外层氢继续燃烧，维持恒星大部分辐射

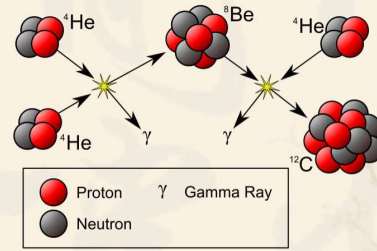
•氦核质量增大一定程度后，由于内部压力不足开始引力收缩，势能转化为热辐射能，注入到氢外层，膨胀、半径增大；同时，外层气体膨胀导致表面温度下降，恒星脱离主序，在赫罗图向右上移动，成亚巨星

•外层气体阻挡光子逃逸，表面温度下降到一定程度停止，但膨胀继续，表面积（光度）增大而温度几乎不变，在赫罗图中几乎垂直上升到红巨星



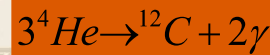
3alpha过程

中心氦核质量不断增大，塌缩，温度升高，当 $T \sim 10^8 K$ 时，3alpha过程开始发生，氦核点燃



8Be 极端不稳定：半衰期仅为 $10^{-19}s$ ，衰变回两个氦核

最早由E. Opik, E. Salpeter在1951年提出



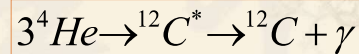
对地球智慧生命演化的意义

- 氢聚变所需要的温度： $\sim 1.5 \times 10^7 K$
- 3alpha过程所需要的温度： $\sim 10^8 K$
- 太阳在主序带上可以以相对稳定的光度待上较长的时间，使得地球上温度稳定长达数十亿年，有利于地球上智慧生命的演化

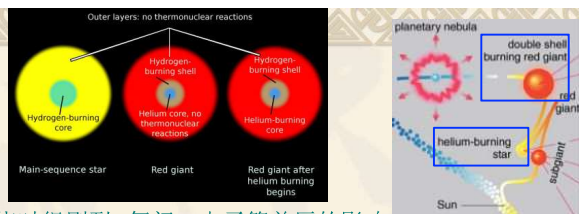
•3alpha过程能否发生存在疑问：参与反应的粒子温度高，容易将碳核打碎；而碳核在宇宙中普遍存在

•1950s: Fred Hoyle根据“人择原则”预言：存在碳核的激发态：核共振的影响，反应率增加 10^7 倍！所需的温度也降低（ $4 \times 10^8 K \rightarrow 10^8 K$ ）

•1940s，核物理实验显示碳的激发态存在的迹象，但认为源于实验错误；Hoyle坚持它的存在，后由William Fowler (Caltech) 做实验证实了它的存在，而且激发态的能量在5%的精度内与Hoyle预言的一致！Fowler获得Nobel物理奖

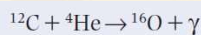


氦闪



•氦开始燃烧时很剧烈--氦闪：电子简并压的影响

•氦闪（~30s）之后，产生大量的热量，温度升高，密度基本不变，氦核内的电子变为非简并；星核膨胀、温度下降、光度下降，恒星在H-R图上的位置下降，进入稳定的氦燃烧（主要为3alpha过程）



•进一步碳燃烧：
•氦燃烧产能率只有氢燃烧产能率的~10%，所以氦燃烧阶段的时间只有氢燃烧阶段时间的~10%；在赫罗图中位置上升

•中心氦闪后进入稳定氦燃烧，核周围是氢燃烧壳层，这种核心烧氦（形成冷的碳核）、壳层烧氢的状态为水平分支

变星

•恒星演化的晚期，变得不稳定，甚至大小周期性振荡

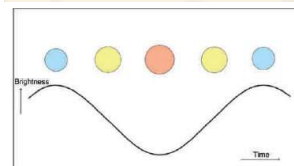


Figure 7.3 The changes in colour and brightness of a variable star.

- 星风损失
- 天琴RR型变星：0.5Msun, 0.2-2d周期，氦燃烧，四五十倍太阳亮，周光关系
- 造父变星：更亮

标准烛光！

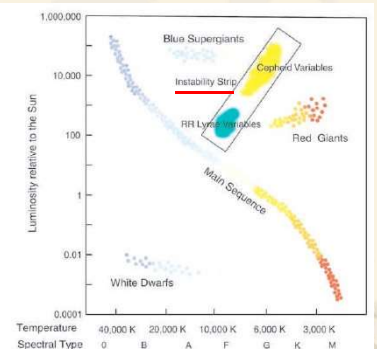
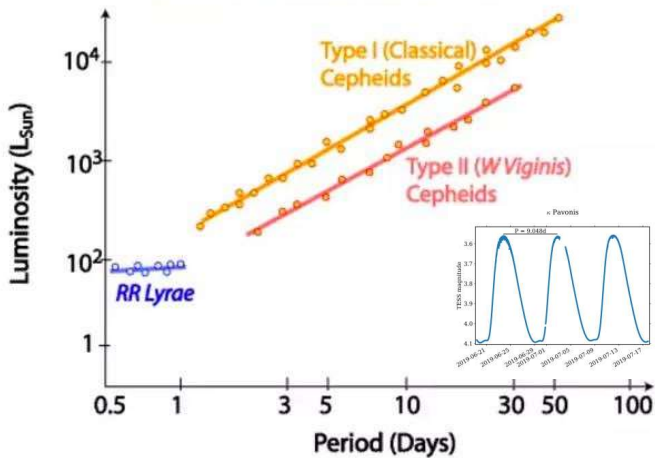


Figure 7.4 The region where variable stars are found in the H-R diagram.

PERIOD - LUMINOSITY RELATIONSHIP



行星状星云

- 行星状星云：恒星演化晚期很不稳定，抛射外壳
- 已知的数目：>1500，银河系中估计有>50000
- 特性：大、稀薄、膨胀的气体壳层， $v \sim 10 \text{ km/s}$ ，含一些尘埃， $M \sim 1/10 - 1/5 M_{\text{sun}}$
- 形成率 ~ 10 个/年， $\sim 1 M_{\text{sun}}$ /年物质进入ISM



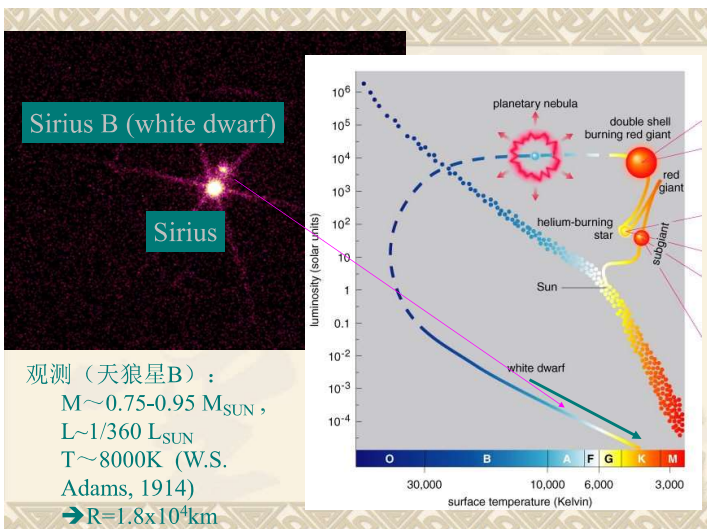
白矮星

- 行星状星云中心存在一暗的、白-蓝白的星：白矮星
- 电子简并压支撑：R.H. Fowler, 1926
- 钱德拉塞卡极限：1931年，19岁，1983年Nobel奖
- 白矮星：
 - $R \sim 0.008 - 0.02 R_{\text{sun}}$ ，与地球半径相当 ($0.009 R_{\text{sun}}$)
 - $M \sim 0.17 - 1.33 M_{\text{sun}}$
- 白矮星的发现：
 - 1783年，三星系统40 Eridani中，William Herschel
 - Sirius B, 自行，双星系统，Friedrich Bessel: 1862

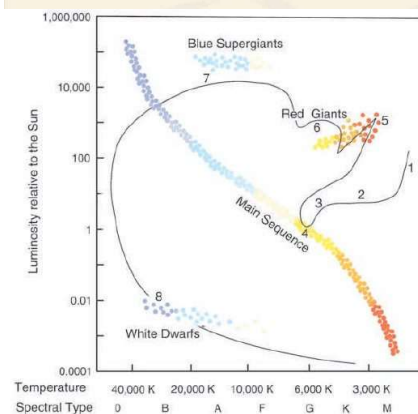
白矮星的未来

- 白矮星的温度：4 000—150 000K，橙色—蓝白色
- 辐射源于存储的热能，或者吸积伴星物质
- 表面积小，冷却慢；冷却，变红，光度下降
- 温度越低，冷却率越小：20000 \rightarrow 5000 K 与 5000 \rightarrow 4000K，需要的冷却时间差不多
- 宇宙年龄不足以使得白矮星冷却到显著 < 4000K
- 目前最低温度的白矮星：WD 0346+246, $\sim 3900 \text{ K}$

黑矮星



类太阳恒星的演化



- 1: 原恒星，开始发红光，体积大，光度大；进一步收缩，光度下降
- 2: 半径减小，温度升高，光度基本是常数
- 3: T Tauri阶段：剧烈，一半质量损失
- 4: 主序星，氢燃烧
- 5: 红巨星，氢燃烧
- 6: 碳燃烧，不稳定，光度和颜色变化
- 7: 核反应停止，外壳层抛射，行星状星云
- 8: 核心区：冷却坍缩成白矮星

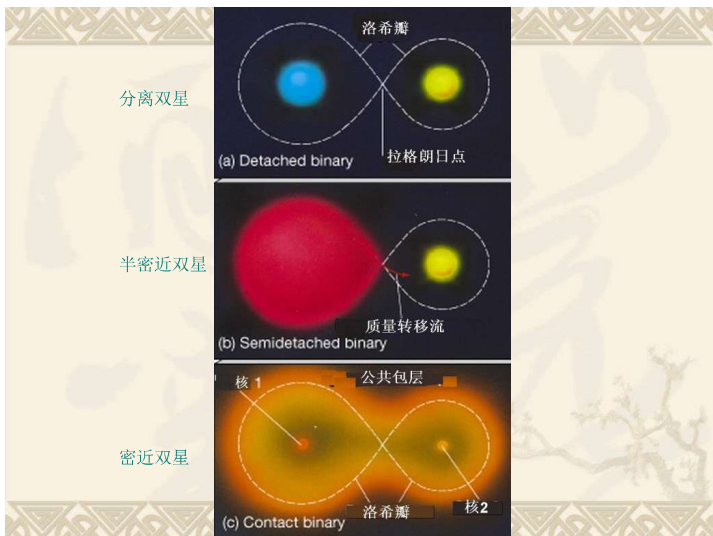
Figure 7.6 The evolutionary track of a 1 solar mass star on the H-R diagram.



密近双星中恒星的演化—Algol佯谬

- Algol, 英仙座β星: 3.7太阳质量的主序星+0.8太阳质量的亚巨星
- 质量交换!

Roche Lobes



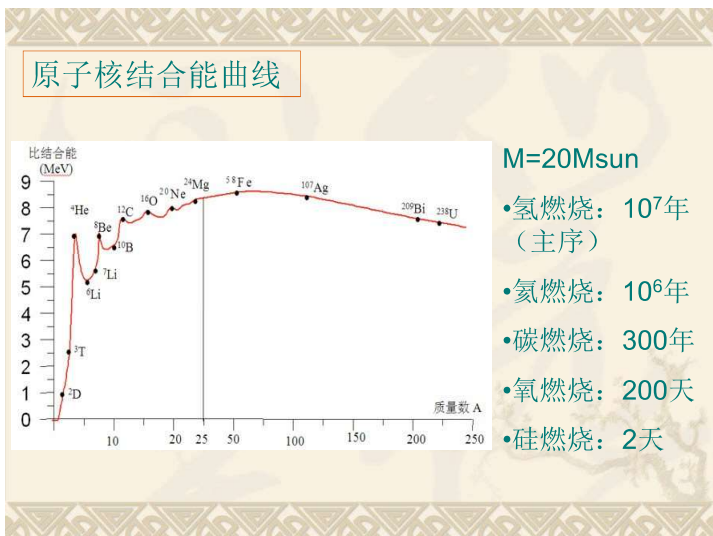
大质量恒星: >8.0太阳质量

$$^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$$

$$(^{28}\text{Si} \rightarrow ^{32}\text{S} \rightarrow ^{36}\text{Ar} \rightarrow \dots \rightarrow ^{56}\text{Ni})$$

硅燃烧的温度: $3 \times 10^9\text{K}$ 洋葱结构

FIGURE 16.16 The multiple layers of nuclear burning in the core of a high-mass star during the final days of its life.



光致解离

M~15Msun, 铁核温度: T~8x10⁹K, 光子能量足够高

$$^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13\ ^4\text{He} + 4n$$

$$^4\text{He} + \gamma \rightarrow 2\text{p}^+ + 2n$$

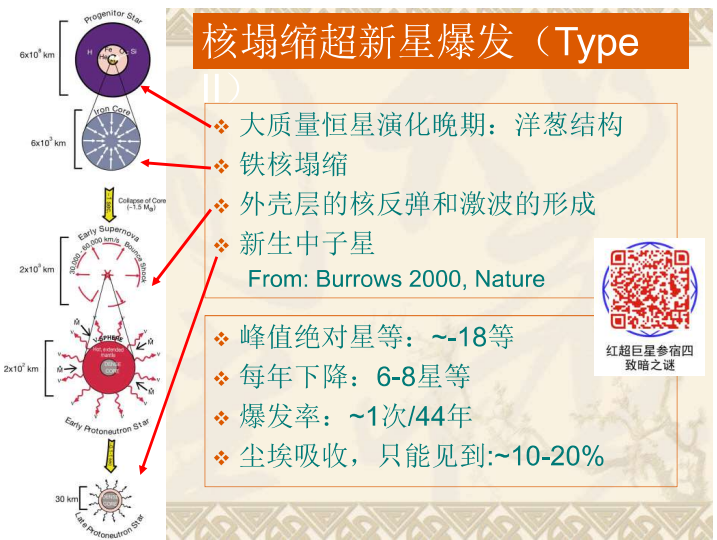
吸热, 温度急剧下降, 铁核塌缩, 中子化, 形成中子星

$$\text{p}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{n} + \nu_e$$

中微子带走大量能量, 核心一秒之内极速塌缩, 外壳层坍塌打在核上, 中子简并压导致反弹, 形成激波—超新星爆发

超新星爆发光度: ~10⁹Lsun, 和整个星系的光度相当!

核塌缩超新星爆发 (Type II)



- ❖ 大质量恒星演化晚期：洋葱结构
- ❖ 铁核塌缩
- ❖ 外壳层的核反弹和激波的形成
- ❖ 新生中子星
From: Burrows 2000, Nature
- ❖ 峰值绝对星等：~-18等
- ❖ 每年下降：6-8星等
- ❖ 爆发率：~1次/44年
- ❖ 尘埃吸收，只能见到：~10-20%

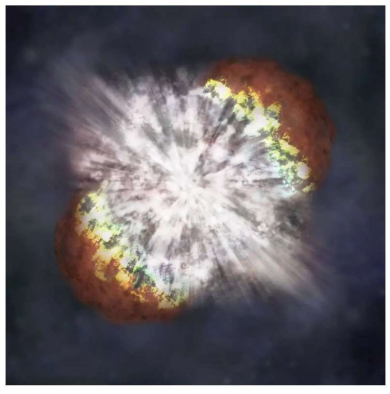


大质量恒星演化到末期，核心不再产生辐射，星体在自身引力的作用下收缩，将核心压缩为一个中子星，外层物质被核心反弹，向外爆发。



核塌缩型超新星SN 1993J 爆发后的艺术想象图。| 来源：NASA, ESA, and G. Bacon (STScI) NASA, ESA, and G. Bacon (STScI)

质量超过140个太阳的超大质量恒星演化到末期，核心产生的光子能量过高，成对转化为电子与反电子，一部分又成对地转变为中微子与反中微子，恒星迅速收缩升温，然后迅速将自身炸毁。



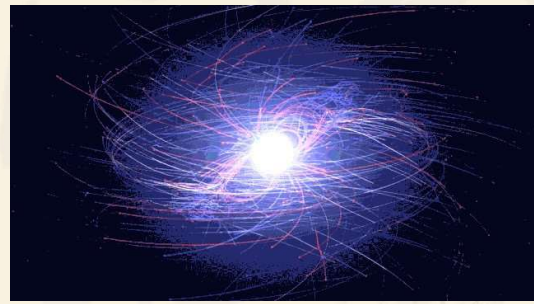
对不稳定超新星爆发的艺术想象图。| 来源：NASA/CXC/M. Weiss

蟹状星云与SN 1054



蟹状星云 (Type II SNR) 的现状：

- 膨胀：v~1500 km/s
- L~10 000 Lsun, ~8.4星等
- 辐射来自相对论电子在磁场中的同步辐射
- 相对论电子同步辐射的时标很短，能量注入？
- 中心存在一中子星 (1969年发现)，不断注入高能电子
- 最近的著名超新星：SN1987A (LMC)，第谷超新星 (1572)，开普勒超新星 (1604) --I型超新星



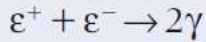
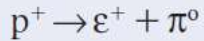
在一项计算机模拟中，自旋中子星周围的强大电磁场将带电粒子“抽”得团团乱转。来源：NASA戈达德太空飞行中心

超新星 SN 1987A 的中微子记录

探测器地点	中微子数目	持续时间
日本神冈, 铅矿	11	12.439s
美国俄亥俄, 莫顿盐矿	8	5.58s
前苏联, 巴克衫	5	~5s
意大利, Gran Sasso	之后在光学被观测到	(中微子比光学爆发提前4.6h, 但其他组为3h)

建造Kamioka, 为了测量质子的衰变 (GUT理论预言)

(强、弱+电磁)



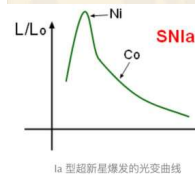
但能观测中微子, 现在反而成了中微子探测器

观测到来自SN1987A的24个中微子的意义:

- 1) 验证了核塌缩超新星爆发的图像:
爆发可产生 $\sim 10^{58}$ 个中微子
- 2) 得到了中微子质量的上限: $\sim 7-16\text{eV}$

1960年, 霍伊尔 (Fred Hoyle, 1915-2001) 与福勒 (William Alfred Fowler, 1911-1995) 合作写了一篇论文, 提出: 有一些超新星来自白矮星的爆炸。这个想法是正确的。现在的理论研究和观测研究都表明: 如果白矮星堆积物质的速度太快却没有及时喷发出去, 就会迅速收缩、变热, 然后彻底炸毁自身, 成为“热核爆炸超新星”, 对应的分类是Ia型。^[8]两颗白矮星并合在一起, 也会爆炸为Ia型超新星。

(王善钦)



Ia 型超新星爆发的光变曲线

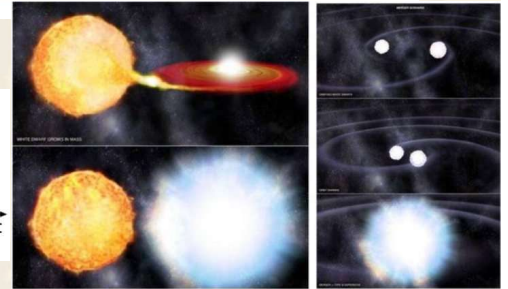


图: 单个白矮星堆积伴星物质后爆炸为超新星 (左) 与两颗白矮星并合后爆炸为超新星 (右) 的艺术想象图。

(Credit: NASA/CXC/M. Weiss)

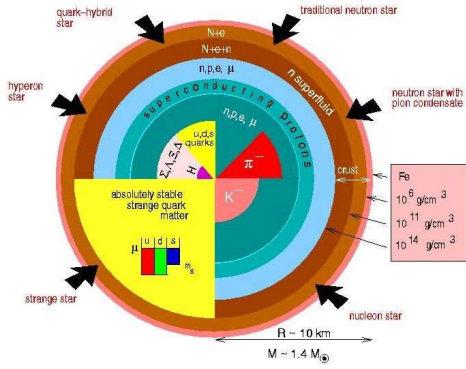
Ia型超新星的亮度演化比较有规律, 通过某些方法可以将众多远近不同的Ia型超新星的亮度演化曲线统一为同一个模板, 定出其修正后的最亮值, 这个值基本上是一样的。利用这个性质, 可以将Ia型超新星作为标准烛光, 探测几十亿光年之外的距离。1998年, 两个互相竞争的小组据此推断出远处的Ia型超新星比正常膨胀的宇宙模型给出的亮度低一些, 据此判断出宇宙在加速膨胀, 进而给出了暗能量存在的证据。

中子星

- ❖ 1932: Chadwick发现中子
- ❖ 1932: Landau提出中子星的概念
- ❖ 1934: Baade & Zwicky提出中子星诞生于超新星爆发
- ❖ 1939: Oppenheimer首次计算了中子星的结构 (基于Tolman-Oppenheimer-Volkoff方程)
- ❖ 1962: Giacconi发射火箭, X-Ray探测器
- ❖ 1964: 发现Crab星云为 X-Ray源
- ❖ 1967: Hewish & Bell发现第一个脉冲星

- ❖ 1968: Gold, Gunn, Ostriker & Gunn提出脉冲星为快速转动的强磁场中子星
- ❖ 1968: 在蟹状星云中发现了一个脉冲星
- ❖ 1970: Uhuru卫星发射升空 (NASA) 发现了300多个X-Ray双星
- ❖ 1970s: 10个其它的卫星发射
- ❖ 1975: Hulse & Taylor发现双射电脉冲星 PSR1913+16
- ❖ 1979: 软重复爆发1979.3.5
- ❖ 1982: Backer, Kulkarni, Heiles, Davis, & Goss发现第一个毫秒脉冲星 PSR1937+215
- ❖ 1987: SN1987A发现

中子星的内部结构

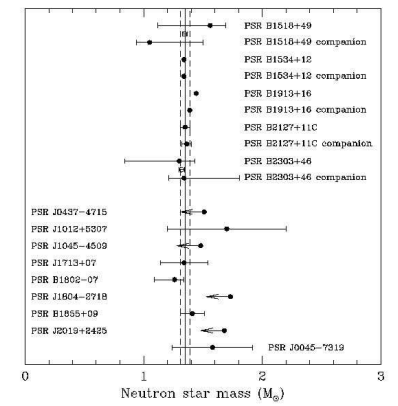


通过界面模式探测中子星相变 (马怡秋 华中科技大学)

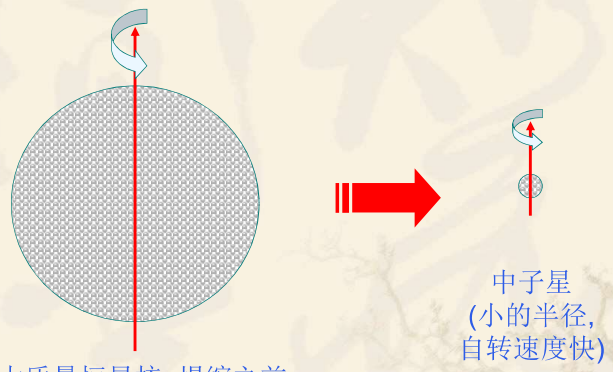
From: astro-ph/0207053

中子星的特性

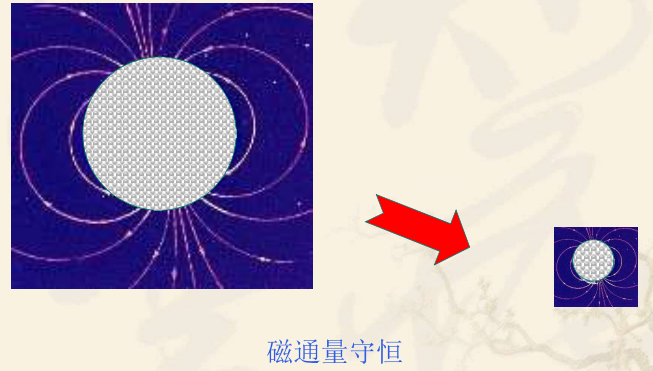
- ❖ 质量大多
~ 1.3-1.5 M_{sun}
($3 \cdot 10^{30}$ kg)
- ❖ 半径 ~ 10 km
- ❖ 密度 ~ 10^{14} g/cc
- ❖ 磁场 ~ 10^{8-12} Gauss



* 中子星的自转很快: 最小的周期1.39ms



* 中子星一般表面磁场很强...



脉冲星是宇宙中最精确的时钟。因为这个原因，脉冲星是天文学的重要研究对象之一。脉冲星是向地球发出周期信号的中子星，直径大约二十千米，质量和太阳差不多，非常致密，是大质量恒星死亡的产物，在银河系中主要分布在银道面上和球状星团（分布在银河系各处，及呈球状或椭球状的星团）中；在近邻的大小麦哲伦星系中也有发现。年轻的脉冲星具有较快的自转速度，比如蟹状星云中的脉冲星每秒钟会旋转约30圈。脉冲星通过旋转将自身动能转化成其它形式的能量，比如电磁波，向宇宙空间释放，并因此越转越慢，并在数千万年后由于自转太慢而不能发射电磁波。如果脉冲星存在物质吸积，如存在于双星系统中，伴星物质可能会受到脉冲星吸引而落向脉冲星。物质吸积同时给脉冲星带来了外界的能量，使得脉冲星自转速度的减慢率下降，甚至可以加速脉冲星的自转。毫秒脉冲星是自转周期30毫秒(也有定义为20毫秒)以下的脉冲星，就是物质吸积产生的。这样的外界能量注入可以使得脉冲星，尤其是毫秒脉冲星，能在甚至诞生百亿年后依然发射出电磁波并被探测到。

(钱磊、潘之辰, 中国科学院国家天文台)

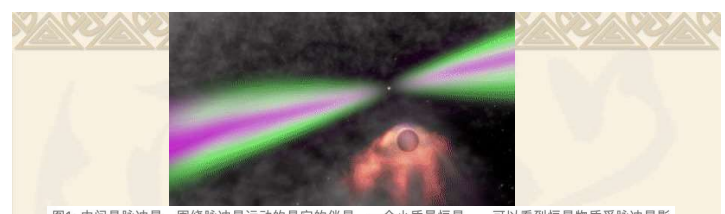


图1: 中间是脉冲星, 围绕脉冲星运动的是它的伴星, 一个小质量恒星., 可以看到恒星物质受脉冲星影响正在脱离, 随后被脉冲星吸积或者向宇宙空间布散。图片来源: NASA. <https://svs.gsfc.nasa.gov/11215>



图4, 蓝色的是脉冲星, 红色的是一个低质量恒星。可以看到恒星的物质被脉冲星吸积。而在双星轨道运动过程中, 存在恒星遮挡脉冲星的情况, 即有掩食发生。图片来源: NASA. <https://svs.gsfc.nasa.gov/10625>

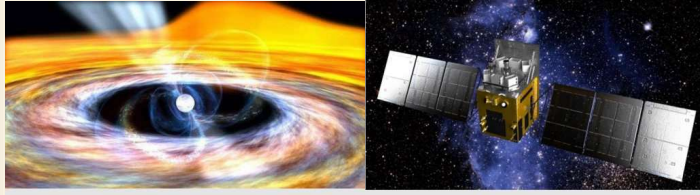
慧眼卫星直接测量到宇宙迄今最强磁场

文章来源：高能物理研究所

发布时间：2020-09-07

硬X射线调制望远镜卫星（即慧眼卫星）团队通过对X射线吸积脉冲星的详细观测，采用直接测量的方法得出其最强磁场，这是迄今为止，人类直接且非常可靠地测量到的宇宙中的最强磁场。该结果于8月10日在国际期刊 *Astrophysical Journal Letters* 上发表。

2017年8月，科研人员利用慧眼卫星对X射线吸积脉冲星GR0 J1008-57的一次暴发活动进行了详细观测，首次在其X射线能谱中以高于20倍标准偏差的高置信度在90千电子伏特 (keV) 附近发现了一条回旋吸收线。根据理论推断，该回旋吸收线对应的中子星表面磁场强度高达约10亿特斯拉，比目前地球实验室中能够产生的几十特斯拉的最强磁场高几千万倍。该项研究工作主要由中国科学院高能物理研究所与德国图宾根大学合作完成。



吸积脉冲星艺术图

慧眼卫星艺术图

寻找中子星

中子星表面应该很热： $T \approx 10^6 \text{ K}$

$$\text{光度} = \text{表面面积} \times \sigma T^4$$



小



很小!



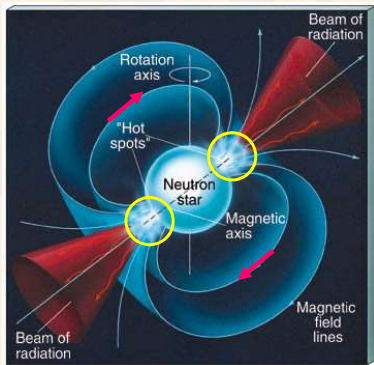
非常高



中子星与
热吸积流

转动能转化为电磁辐射

- 转动磁场产生电场
- 电场沿着磁力线加速电子
- 电子辐射 — 主要在磁场很强的区域

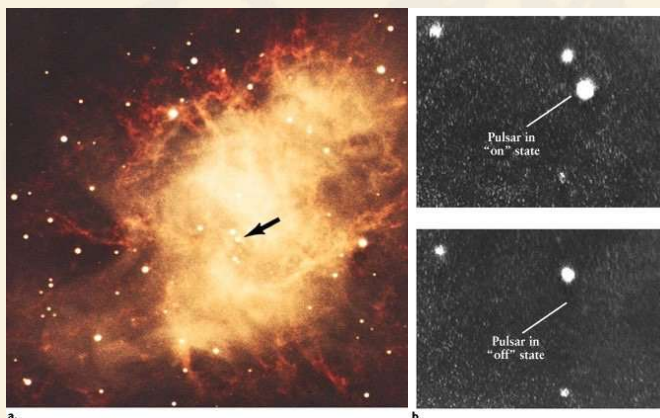


https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_NICER_Constraints_on_the_Dense_Matter_Equation_of_State

这两个团队的结果意味着这颗脉冲星的南极区域至少有两个热斑，甚至可能有三个热斑。此前公认的理论假定中子星只有两个磁极，因此应该只有两个热斑。而此次发现仅在该脉冲星的南半球就发现了三个热斑。磁极总是成双成对的出现，因此，这颗脉冲星整体上至少应有四个热斑甚至可能有六个热斑（三个在南极，另外的热斑会出现在北极），对应的是四个甚至六个磁极，这简直是三头六臂的脉冲星。这个结果直接颠覆了此前教科书里公认的中子星拥有两个磁极的磁场结构模型。



蟹状星云脉冲星



蟹状星云脉冲星：Chandra观测

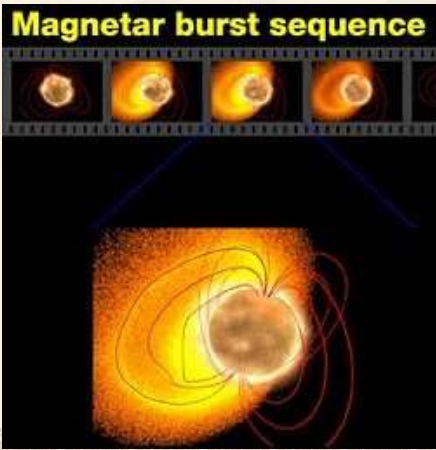


X射线脉冲星极冠区吸积过程 (中山大学 纪龙)



理解独特的高能脉冲星

磁星/磁陀星 (Magnetars)

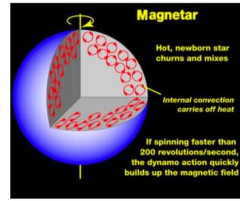


磁场极强 ($\sim 10^{15}G$), 在中子星表面产生星震
星震产生巨大的X射线和γ射线爆发
爆发的能源来自磁能

Formation mechanism of magnetars

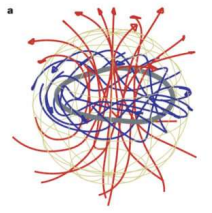
Dynamo origin

- (Thompson & Duncan 1993; Heger + 2005)
- rapid initial spin $P < \sim 5$ ms
- energetic supernova $\sim 10^{52}$ erg
- very massive stars ($M > 25 M_{\text{sun}}$)



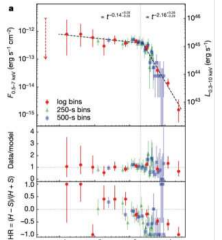
Fossil field origin

- (Ferrario & Wickramasinghe 2006)
- descendants of stars with very high magnetic fields



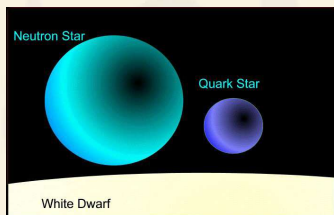
Double NS merger

- (Bruno & Rosalba 2013; Xue et al. 2019)
- do not produce a lot of intermediate-mass elements



Braithwaite & Sprui 2004

发现了“Quark”星?



mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$
charge	2/3	2/3	2/3
spin	1/2	1/2	1/2
	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom

轻 (u, d) 重 (c, s, b, t)

RX J1856.6-3754: Drake et al (2002)
Is it a Quark Star?
仍然有争议

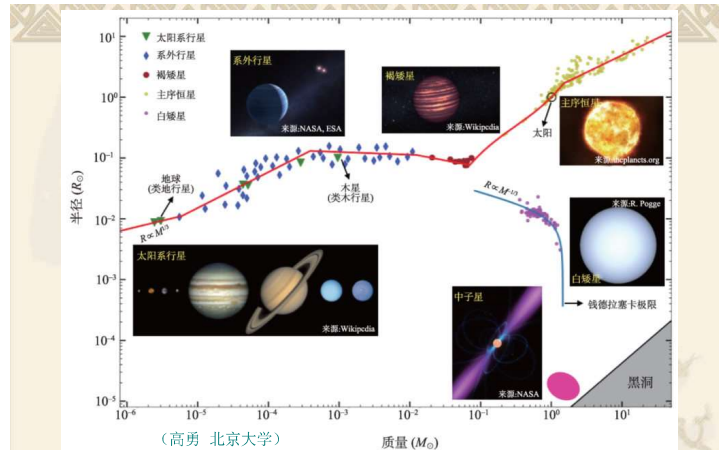


图1 各类星体的质量 M 和半径 R 之间的关系, 不同颜色的散点分别代表太阳系行星、系外行星、褐矮星、白矮星和主序恒星的观测数据, 省去了质量和半径的测量误差。类地行星随着质量增大, 密度基本不变, $R \propto M^{1/3}$ 。类木行星内部电子简并压开始扮演重要作用。从大质量行星到褐矮星, 随着质量增大半径变化不大, 这是电子简并压和库伦排斥共同作用的结果。主序恒星随着质量增大半径逐渐增大。红色的曲线大致描绘了各类星体的质量半径关系。白矮星由电子简并压主导, 低质量时满足 $R \propto M^{-1/3}$, 随着质量增大达到钱德拉塞卡极限。中子星主要由强相互作用主导的超核物质构成, 其质量半径关系将在后面的小节介绍。

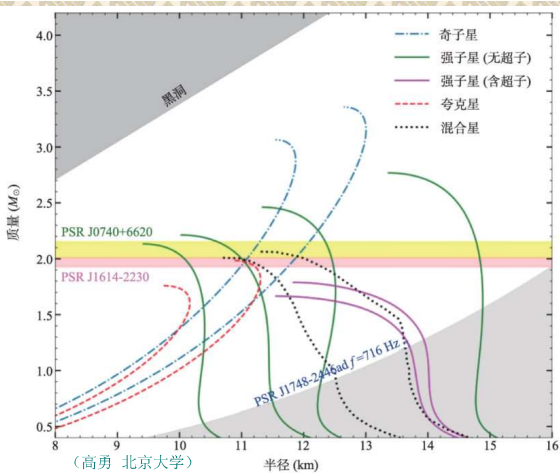
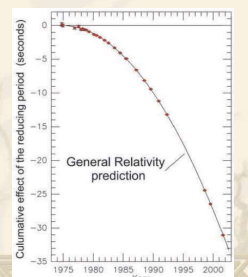


图3 不同物态模型对应的质量半径关系。右下方的阴影是由目前已知的自转最快的中子星(自转频率为716 Hz)排除的区域, 左上方阴影区为黑洞, 中间黄色和粉色的带是目前观测到的质量最大的中子星

脉冲星的研究意义

- ❖ 自转非常稳定且慢地变慢: 宇宙中最好的钟 导航
- ❖ 超致密物质: 自转速率突然增加 (glitch)
- ❖ 星际介质: 色散 距离
- ❖ 空间分布: 自行 ($\sim 500-1100 \text{ km/s}$)
源于 natal kick
- ❖ 检验广义相对论:
双脉冲星系统
Taylor & Hulse, 1993 Nobel

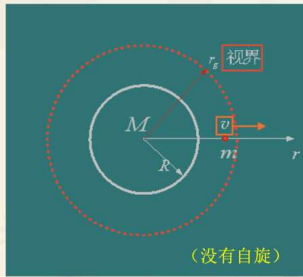


黑洞的基本概念

逃逸速度 $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GmM}{r} \Rightarrow v^2 = \frac{2GM}{r}$

$v=c \Rightarrow r_g = \frac{2GM}{c^2}$ 与R无关!

如果 $r < r_g \Rightarrow v > c$ 光子都不能逃逸



(没有自旋)

引力红移

$$h\nu = h\nu_0 - \frac{GM}{r} \left(\frac{h\nu_0}{c^2} \right)$$

$$= h\nu_0 \left(1 - \frac{GM}{rc^2} \right)$$

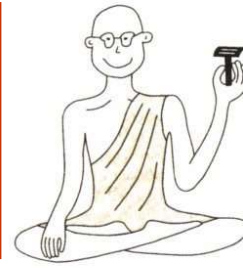
牛顿引力红移 $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \left(1 - \frac{GM}{rc^2} \right)^{-1} - 1$

广义相对论结果 $z = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1$

黑洞无毛发

经典黑洞只有三个参量:

- 质量 M
- 角动量 J
- 电荷 Q



(简单、光滑、均匀的时空结构)



基本特性

- ❖ 黑洞并不吞噬所有的物质 (除了视界之内)
- ❖ 远离黑洞, 其引力与任何其它质量的天体并没有什么不同



探索黑洞的方法

(举例)

- 1. 追踪恒星**
通过追踪绕核心黑洞旋转的恒星轨道, 可以揭示黑洞是否会如广义相对论所预测那样弯曲空间和和时间。
- 2. 拍摄**
通过拍摄黑洞的照片, 科学家可以检验许多东西, 比如黑洞的形状可以用来检验无毛定理。
- 3. X射线**
在一个X射线双星系统中, 伴星的物质会落在黑洞上, 并形成炽热的吸积盘。吸积盘会释放出可被探测到的X射线。
- 4. 捕捉引力波**
当两个黑洞相互靠近、合并时, 就会产生时空的涟漪——引力波。

在什么地方发现?

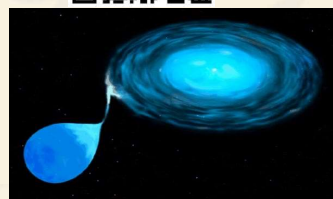


用黑洞X射线数据
检验广义相对论
(复旦大学
Cosimo Bambi)



星系中心

1 BIG BH per galaxy
million-billion x mass of sun
formation not fully understood



双星系统

millions of 'little' BHs per galaxy
~ 10 x mass of sun
formed by collapse of a massive star

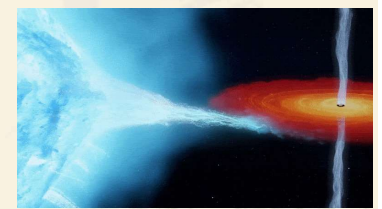
X射线双星



黑洞X射线
双星的时变
与能谱性质

1. Gases from the supergiant are captured into an accretion disk around the black hole.
2. As gases spiral toward the black hole, they are heated by friction: Just outside the black hole, they are hot enough to emit X rays.

气体落入黑洞的过程中释放引力势能, 加热气体, 辐射大量X射线



If two stars orbit close enough to each other, mass gets pulled from one and falls (accretes) onto the other. The smaller the target object, the faster the gas moves and the hotter it gets.

如何知道它是黑洞?

❖ 致密星：白矮星、中子星或黑洞?

❖ 通过伴星测质量

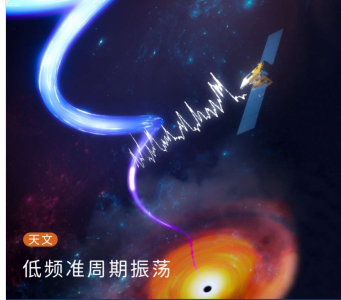
质量 > 3倍太阳质量
⇒ 黑洞!



Chandrasekhar

❖ 目前发现几十个黑洞候选者 (冰山一角)

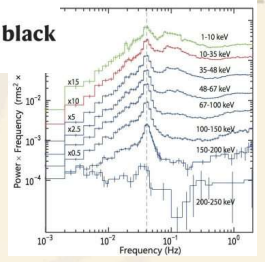
Discovery of oscillations above 200 keV in a black hole X-ray binary with Insight-HXMT



天文
低频准周期振荡

原理@principia 1687
科学，照亮黑暗的角落。

中国慧眼卫星发现了迄今为止能量最高的低频准周期振荡现象。

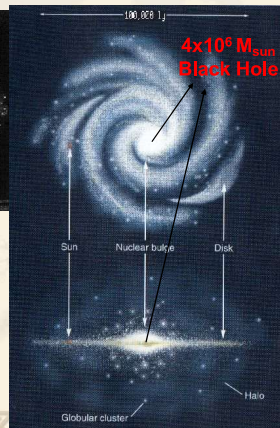
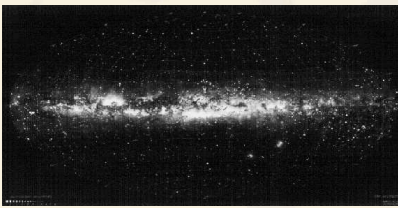


黑洞的自转会对黑洞周围的空间产生拖曳效应，这就导致了黑洞视界附近的喷流发生进动。研究人员认为，观测到的低频QPO很可能起源于围绕黑洞的喷流的进动。

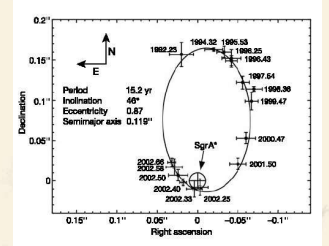
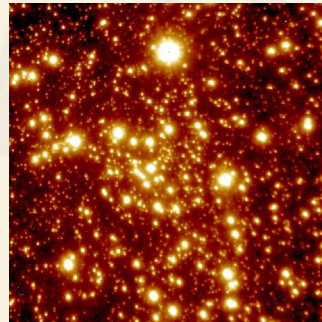
这一次，慧眼卫星的观测将喷流的源头定位到距离黑洞上百公里（几倍黑洞视界半径）的区域，这是迄今为止观测到的距离黑洞最近的相对论喷流！

此次的观测为解决一直以來存在争议的低频QPO物理起源问题提供了重要依据，对于研究黑洞附近的广义相对论效应、物质动力学过程和辐射机制等也都具有重大意义。

银河系中心存在大质量黑洞

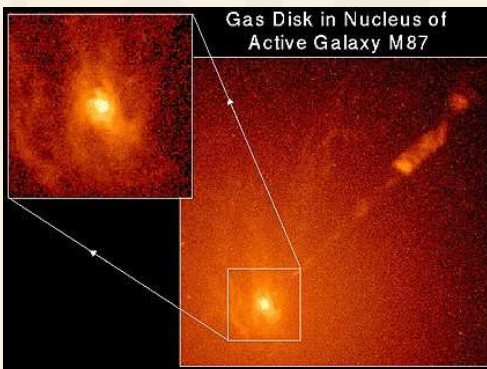


银河系中心（光年）的恒星



检测恒星的运动得到中心黑洞的质量约为4百万太阳质量

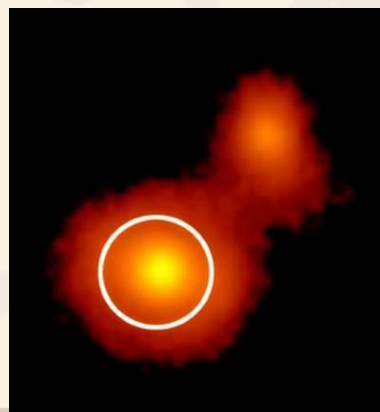
超大质量黑洞: M87



Relativistic beaming
Doppler boosting
Doppler deboosting

Credit: STScI WFPC2.

超大质量黑洞撕裂恒星



潮汐撕裂恒星事件的光学、紫外与射电辐射（上海天文台 邵德福）

黑洞的类型

恒星级黑洞

在大质量恒星的生命末期，恒星的核心会坍缩形成恒星级黑洞。

超大质量黑洞

几乎所有星系的中心都包含着一个超大质量黑洞，其质量是太阳质量的数百万倍，甚至是数十亿倍。

中等质量黑洞

质量介于恒星级黑洞和超大质量黑洞之间。

原初黑洞

形成于宇宙大爆炸之后的微型黑洞。



原初黑洞：声速共振宇宙学简介



当今黑洞研究的热点问题

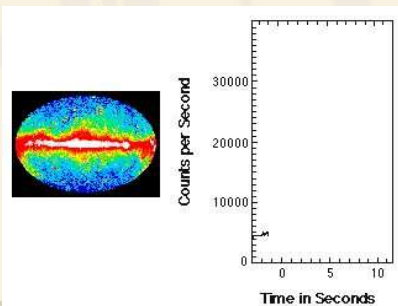
- ❖ 黑洞视界存在的观测证据
- ❖ 测量黑洞的质量与自旋
- ❖ 超大质量黑洞的起源与演化
- ❖ 种子黑洞的形成和演化
- ❖ 超大质量黑洞的演化与星系形成和演化的关系
- ❖ 吸积盘的物理性质以及喷流如何形成
- ❖ 黑洞吸积作为许多高能天体物理现象的中心引擎？



揭秘宇宙致密物质之王——超大质量黑洞

伽马射线暴

❖ 60's年代发现 (Vela)

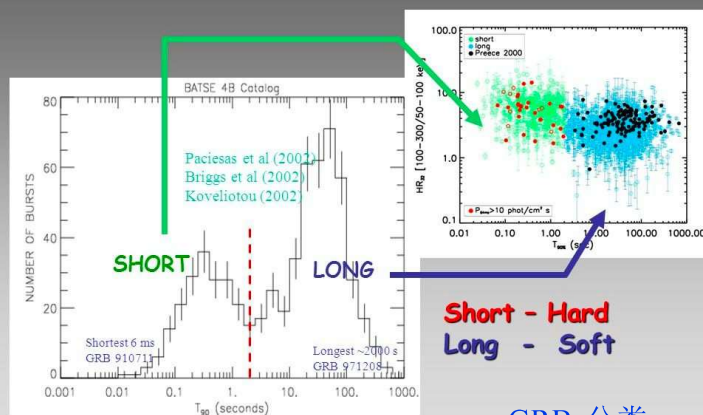


宇宙伽玛射线暴的多信使研究



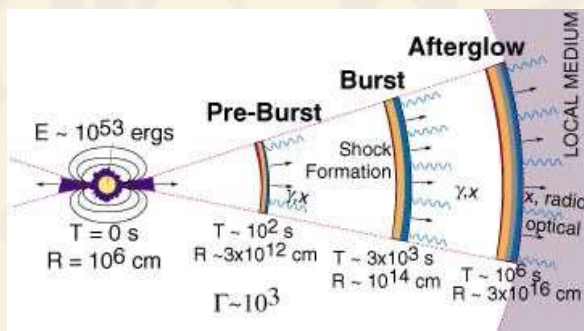
大质量恒星死亡的最强“回光返照” (薛永泉)

Two flavours, long and short



• GRBs分类

火球—激波模型



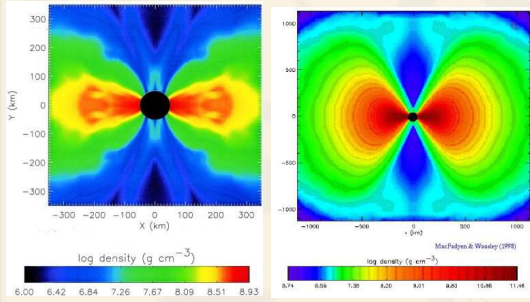
Afterglow研究的成功

余辉观测证明了：

- ❖ 火球模型很好地描述了GRBs
- ❖ GRBs 在宇宙学距离上
- ❖ GRB ejecta 作相对论性运动
- ❖ GRBs 发生在星系中
- ❖ GRBs 可能和大质量恒星的死亡有关
- ❖ GRBs 可能是成束的collimated喷流

中心引擎??

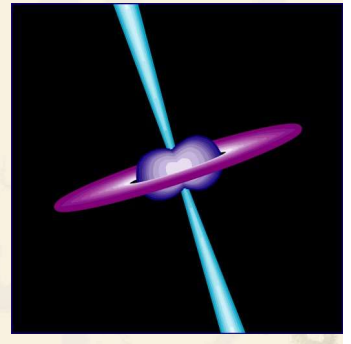
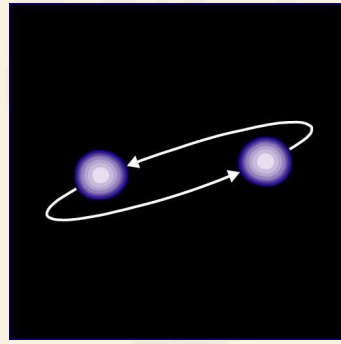
❖ Collapsar模型-长GRBs: 大质量, 转动恒星塌缩成黑洞
常与SNR成协



黑洞吸积与爆发天体 (厦门大学 刘彤)

MacFadyen & Woosley ApJ, 524, 262, (1999)

❖ 中子星-中子星并合? --短GRBs



扑朔迷离的伽玛暴起源

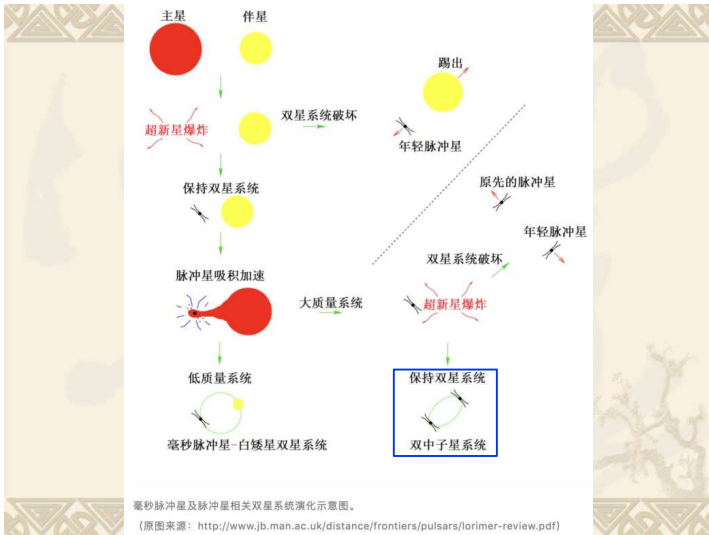
Article | Published: 07 December 2022
A long-duration gamma-ray burst with a peculiar origin
Authors: Shunshu Li, Binbin Zhang, Bing Zhang, Yi-Zhi Liu, Kangyue Wang, Yuchen Tang, Yuchen Yin, Ye Li & Hui-Jian Lu | Nature 612, 232–235 (2022)

It is generally believed that long-duration gamma-ray bursts (GRBs) are associated with massive star core collapse¹, whereas short-duration GRBs are associated with mergers of compact star binaries². However, growing observations^{3–6} have suggested that oddball GRBs do exist, and several criteria (prompt emission properties, supernova/kilonova associations and host galaxy properties) rather than burst duration only are needed to classify GRBs physically⁷. A previously reported long-duration burst, GRB 060614 (ref. 3), could be viewed as a short GRB with extended emission if it were observed at a larger distance⁸ and was associated with a kilonova-like feature⁹. As a result, it belongs to the type I (compact star merger) GRB category and is probably of binary neutron star (NS) merger origin. Here we report a peculiar long-duration burst, GRB 211211A, whose prompt emission properties in many aspects differ from all known type I GRBs, yet its multiband observations suggest a non-massive-star origin. In particular, substantial excess emission in both optical and near-infrared wavelengths has been discovered (see also ref. 10), which resembles kilonova emission, as observed in some type I GRBs. These observations point towards a new progenitor type of GRBs. A scenario involving a white dwarf (WD)-NS merger with a post-merger magnetar engine provides a self-consistent interpretation for all the observations, including prompt gamma rays, early X-ray afterglow, as well as the engine-fed^{11,12} kilonova emission.

- 南京大学、内华达大学拉斯维加斯分校、紫金山天文台、广西大学的研究人员
- 发现了一例观测上具有特殊意义的伽玛暴GRB 211211A, 通过详尽的数据分析得出这一长伽玛暴与千新星成协的证据, 并原创性地提出了这一事件背后的特殊物理起源, 指出其前身星可能为白矮星-中子星并合系统
- 成果于2022年12月7日发表于国际科学期刊《自然》



(图片: 雷晗雨、陈静)



毫秒脉冲星及脉冲星相关双星系统演化示意图。
(原图来源: <http://www.jb.man.ac.uk/distance/frontiers/pulsars/forimer-review.pdf>)

北大学者提出长时标伽马暴GRB211211A等起源于黑洞-中子星并合

原创 北大天文 北大天文 2022-12-11 11:30 发表于北京

人们相信, 双中子星并合或黑洞-中子星并合事件会产生引力波, 以及伽马射线暴 (简称伽马暴) 和千新星现象。2017年8月17日, LIGO-Virgo引力波探测器首次探测到一次双中子星并合事件的引力波信号, 而空时伽马射线望远镜和地面大型望远镜也分别探测到与之成协的短标伽马暴 (持续时间小于2秒) 和千新星, 由此证实了引力波、短标伽马暴和千新星三者统一起源于双中子星并合的理论。关于黑洞-中子星并合, 科学家也持续研究和报导所产生的引力波、伽马暴和千新星信号, 但在观测上一直没有证实。直到2020年初, 由黑洞-中子星并合产生的两例引力波信号 (GW200105和GW200115) 首次在O3时期 (即引力波探测第三次运行) 被LIGO-Virgo探测到, 但是科学家并没有观测到预期的伽马暴和千新星。

理论上, 黑洞-中子星并合只在黑洞拥有很大自旋时才会潮汐瓦解系统中的中子星, 并由吸积产生明亮的伽马暴, 以及由并合喷射物产生千新星辐射。与双中子星并合不同的是, 黑洞较大的引力可能会使并合后抛出一部分物质重新回落, 形成高能吸积辐射——导致伽马暴持续时间延长。据理论估计, 这些可以在发生潮汐瓦解的系统中存在黑洞-中子星并合事件中的占比小于20%, 引力波观测结果证实GW200105和GW200115引力波事件中黑洞的自旋都非常小, 这意味着它们没有观测到预期的伽马暴和千新星。

另一方面, 大质量恒星塌缩一般被认为是绝大部分长标伽马暴 (持续时间大于2秒) 的起源, 并且伴随产生明亮的超新星爆炸辐射。然而, 近年科学家陆续发现了3个长标伽马暴 (GRB 060614, 211211A和211227A), 它们的起源存在争议, 其特征展示更可能起源于致密星并合。它们爆发的时间均不在引力波探测运行的时期内, 无法通过引力波观测直接证实它们的真实起源。这3个伽马暴都没有显示出明亮的超新星辐射, 但是其中两个 (GRB 060614和GRB 211211A) 被探测到了疑似的千新星辐射。

北大天文一个高能天体物理研究小组系统地研究了这3个长标伽马暴事件, 从几方面提出证据证明它们可能的黑洞-中子星并合起源。他们发现这3个伽马暴早期的伽马射线辐射和X射线辐射余辉中都包含了精确的回落吸积信号, 与理论预言的黑洞-中子星并合事件导致的回落吸积辐射一致 (见论文)。其次, 对这三个伽马暴辐射特征进行理论分析发现, 它们产生的辐射功率可以达到1倍太阳质量 (对GRB 211211A的千新星是吸积体光变曲线的拟合宽度)。模拟计算表明, 这么大量级的辐射物质几乎只能由极高自旋的黑洞与中子星并合才能产生。还有, 基于这3例伽马暴事件的光度和探测率, 研究小组还估计了它们在宇宙中的爆发率, 与理论上的高自旋黑洞和中子星并合事件率一致。这些结果都证实了长标伽马暴和回落的千新星辐射可能起源于黑洞-中子星并合。随着引力波探测能力的进一步提升, 研究小组预计在O4和O5这两个运行时期, 黑洞-中子星并合事件引起的引力波和电磁信号的联合探测率分别为每年0.1例和1例。近日, 这些结果以“源于快自旋黑洞-中子星并合的长标伽马暴辐射和成功的千新星辐射” (Long-duration Gamma-Ray Burst and Associated Kilonova Emission from Fast-spinning Black Hole-Neutron Star Mergers) 为题发表于美国《天体物理学杂志快报》 (Astrophysical Journal Letters)。此研究为解释特殊的伽马暴事件提出了新的理论, 也在黑洞-中子星并合研究方面做出了具有重大意义的观测预言。

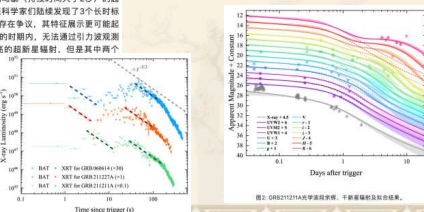


图2 GRB211211A X射线谱拟合, 千新星辐射拟合及总拟合。

图3 三例伽马暴并合事件在长标伽马暴中的辐射特征对比, 虚线为理论模型拟合。

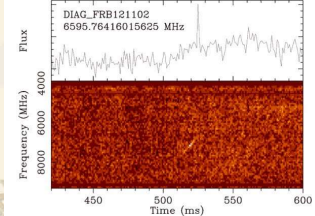
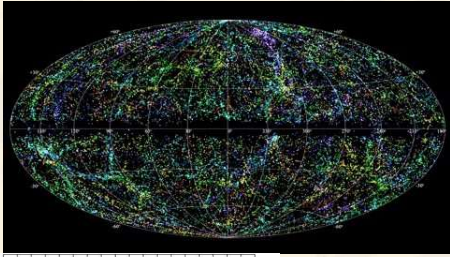
伽马暴导致生命大消亡?

过程和证据

- $O_2 + N_2$ 在伽马射线作用下生成 NO_2
- $NO_2 \Rightarrow$ “遮天避日”, “臭氧破坏”
- 紫外光, 酸雨, 寒冷 \Rightarrow 生命大消亡
- 奥陶纪生命大消亡 (在4.43亿年前) 是5亿年里五次最大生命大消亡之一
- 证据: 海洋表面浮游层生物曾大量死亡, 而在深海区域的生物却能幸存 (Melott, Lieberman et al. 2003, New Scientist)

(courtesy of Z.G. Dai, USTC)

快速射电暴 (FRB)



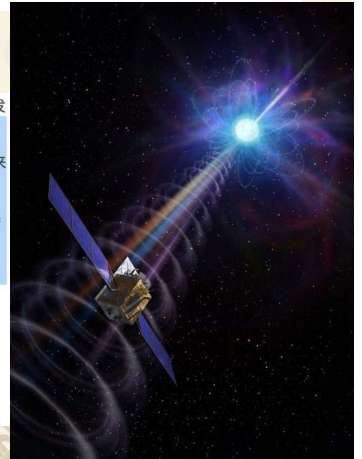
单次暴 (双中子星并合?)
vs.
重复暴 (周期性、非周期性)

GRB
FRB
GWB

人类首次! 中国慧眼卫星确认快速射电暴来自于磁星

来源: 央视新闻 | 2021年02月19日 12:02

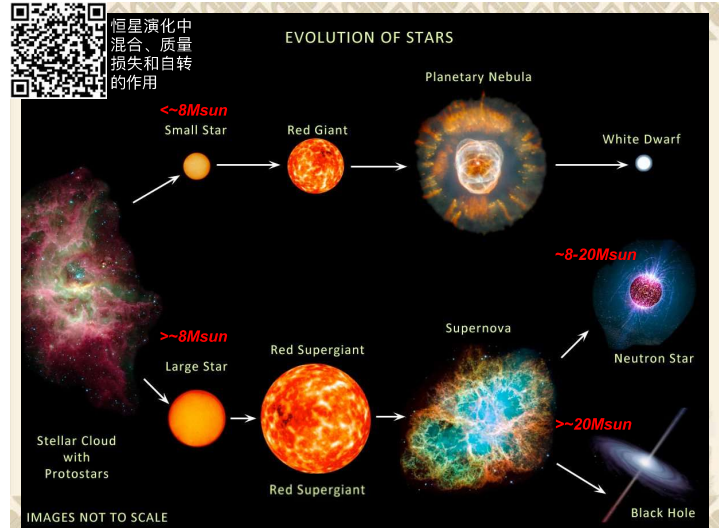
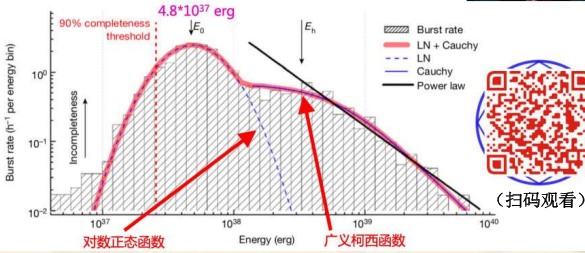
2月19日, 中国科学院高能物理研究所举行新闻发布会, 发布了慧眼卫星最新观测结果: 慧眼卫星发现首个跟神秘的快速射电暴相关联的X射线暴, 确认其来自银河系内的磁星SGR J1935+2154, 并在国际上首先证认该X射线暴包含的两个X射线脉冲是快速射电暴的高能对应体。这一发现, 与国际上其他望远镜的观测一起, 证明快速射电暴可以起源于磁星爆发, 破解了快速射电暴的起源之谜, 并为理解快速射电暴的辐射机制和磁星的爆发机制提供了至关重要的数据。这一研究工作主要由中国科学院高能物理研究所、北京师范大学、美国内华达大学、清华大学等单位完成, 并与19日在国际著名期刊《自然·天文学》发表。



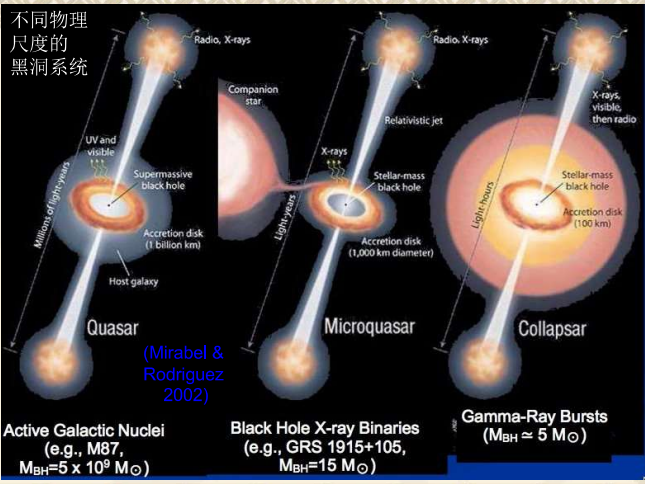
具有“双重人设”的重复快速射电暴FRB 121102

FAST对FRB 121102的观测发现

- 1652次爆发, 峰值事件率122次/小时
- 爆发能量分布呈双峰结构 → 双重人设
- 不存在周期处于1毫秒至1000秒的周期性



不同物理尺度的黑洞系统



Common key ingredients: BH, AD, jets

第八章: 星系与宇宙的大尺度结构



本章内容

- ❖ 我们是如何逐步认识我们的银河系的？
- ❖ 其他星系/河外星系是怎样的？
- ❖ 不规则星系是怎样的？
- ❖ 如何对星系的形态进行分类？
- ❖ 如何测量星系距离从而了解宇宙的结构？
- ❖ 星暴星系与活动星系核是怎样的？
- ❖ 星系群、星系团、星系超团乃至宇宙大尺度结构是怎样的？

银河系

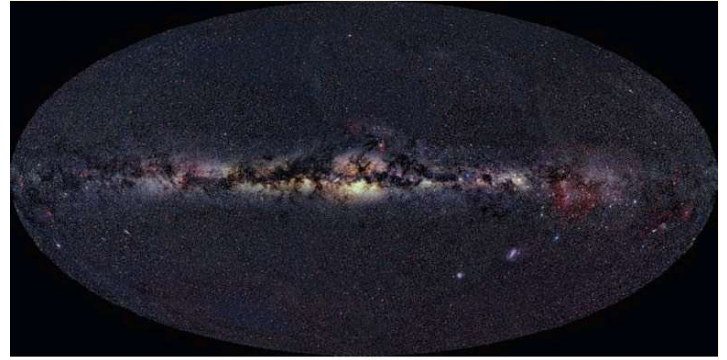


Figure 8.1 All-sky image of the Milky Way. Image: Axel Mellinger.

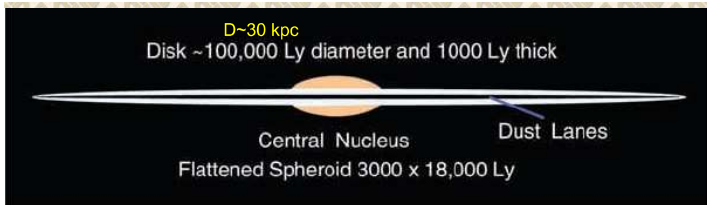
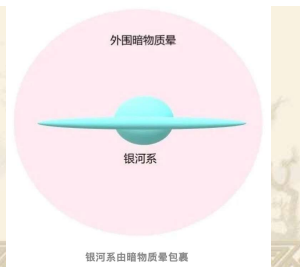


Figure 8.2 Cross-section of our Galaxy.

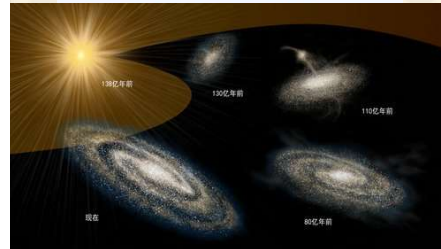
- 可见物质：恒星（96%）
+ 气体（3%）
+ 尘埃（1%）
- 暗物质



天文学家基于LAMOST数据揭示银河系早期形成和演化历史 (国家天文台)

发表日期：2022-03-24 【放大 缩小】

北京时间3月24日，国际科学期刊《自然》以封面文章形式发布了德国马普天文研究所的研究人员向茂盛博士和Hans-Walter Rix教授合作的一项重大成果。基于中国科学院国家天文台运行的国家重大科技基础设施郭守敬望远镜（LAMOST）和欧空局天体测量卫星盖亚望远镜（Gaia）的巡天观测数据，研究人员获取了迄今最为精确的大样本恒星年龄信息，按照时间序列清晰还原了银河系幼年 and 青少年时期的形成与演化图像，改写了人们对银河系早期形成历史的认知。



银河早期集成和演化图像示意图：138亿年前宇宙大爆炸，130亿年前厚盘开始形成，110亿年前银晕形成，80亿前至今银河薄盘形成。（图源：喻京川）



疏散星团（开团，open star clusters）

- 恒星成团：疏散星团与球状星团
- 疏散星团：由巨大的尘埃和气体团中形成大量的恒星而形成，位于银河系盘面
- 由数百颗至上千颗由弱引力联系的恒星组成，恒星密度比球状星团低很多，直径<数十光年
- 位于恒星活跃形成区，年轻，一般只有数百万年历史
- 可能仍然含有分子云的残迹，星团产生的光形成HII区，星团在辐射压作用下逐渐散开
- 其中恒星的年龄和化学成分相近，适合研究恒星演化
- 例子：金牛座中的毕（宿）星团（Hyades），昴星团（Pleiades）；英仙座中的双重星团

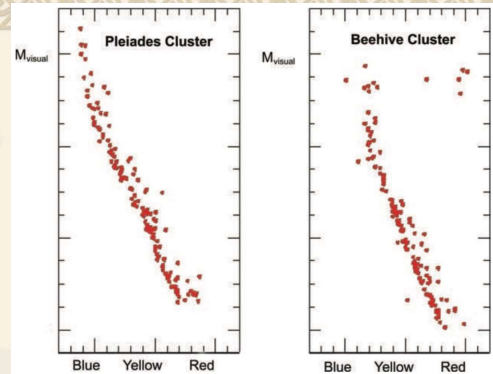


Figure 8.3 Hertzsprung-Russell diagrams of two open clusters.

昴星团：年龄 ~ 115 Myrs

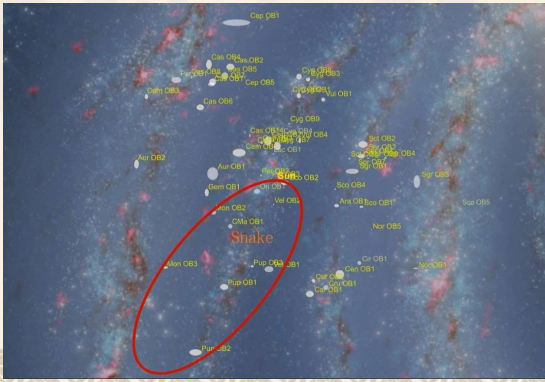
蜂巢星团（Beehive）：
年龄 ~ 750 Myrs



疏散星团中快速自转恒星的星震学观测



恒星“蛇”： 整体结构与特征



太阳附近的拥有超过1万个成员恒星的球状星团，包含13个疏散星团

球状星团 (Globular clusters)

- 引力紧紧束缚，外形呈球形，恒星高度向中心集中
- 恒星比较年老，由20000-1百万个恒星组成，直径~200光年
- 一般位于星系晕中
- 银河系约有170个，另外可能还有10-20个因尘埃遮蔽未被发现
- 在星系最初的恒星形成时期产生？
- 例子：武仙座中的M13；半人马ω球状星团

星际介质(ISM)和发射星云



富中性氢超弥散星系中的分子气体

- ISM：气体和尘埃组成
- 大多数ISM不明显可见，但也会有发射星云、暗星云
- 发射星云：气体发光，猎户大星云 (Great Nebula of Orion)，恒星形成，紫外光形成HII区，质子和电子复合释放波长之一：6563Å-粉红、红
- 暗星云：气体遮蔽了星系的光，煤袋星云 (Coal Sack)
- 两种星云常常同时存在：鹰状星云 (巨蛇座，Serpens)；马头星云 (猎户座)

下图为我们展示了宇宙尘埃的生命循环。尘埃在恒星中形成，并在恒星演化的最后阶段释放到星际介质中（恒星的星风或大质量恒星的爆炸中被吹走）。然后，尘埃在恒星之间的气体云中被“回收”，聚集成云，尘埃颗粒通过辐射过程冷却，再通过凝结而增大，再形成行星的种子。当新一代恒星开始形成时，其中一些尘埃被消耗掉。随着新一代恒星演化到脱离主星序时，这个周期又开始了。

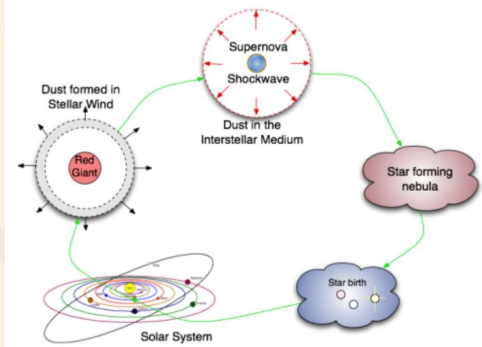
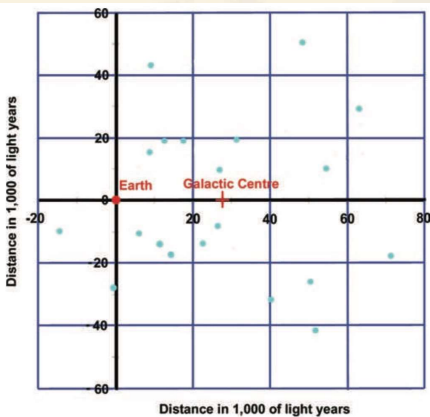


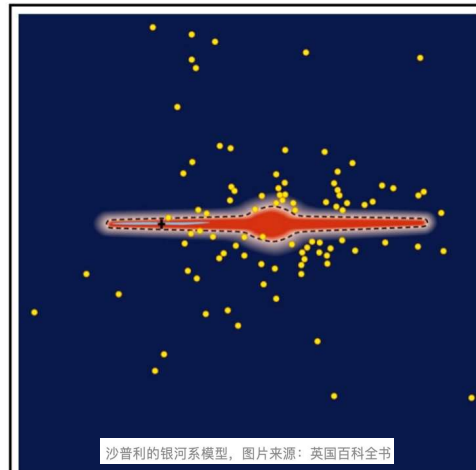
图6. 宇宙尘埃的生命循环
Credit: the website of Herschel Space Observatory

银河系的大小和形状



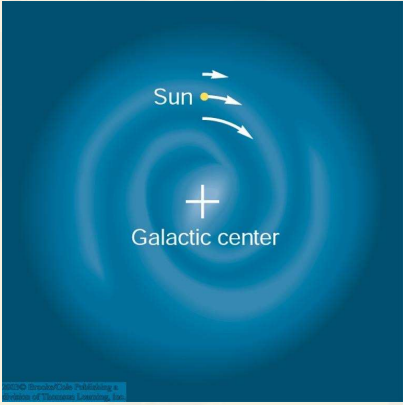
Shapley测量了银河系100个球状星团的距离
结论：球形分布，球心为银心；给出太阳距离银心距离以及银河系的尺度

Figure 8.7 The distribution of globular clusters as observed by Harlow Shapley.



沙普利得到的银河系球状星团的分布：
黄色圆点代表已知的银河系球状星团；太阳的位置在图中以黑色加号表示；黑色虚线表示银河系的可能轮廓。

沙普利的银河系模型。图片来源：英国百科全书



太阳距离银心的距离：
~8.3kpc

太阳绕银心的速度：
~220 km/s

环绕周期：
~230 百万年

MW旋转曲线（速度 vs 距离）：
~刚体（中心区域）

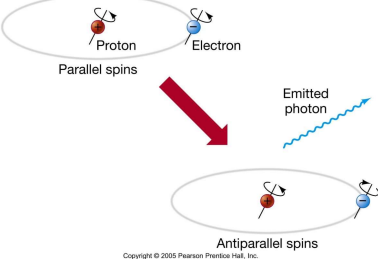
银河系的结构

- 中性氢发射21cm射电辐射：气体成团
- 中性氢云团的速度：多普勒效应
- 云团分布图：
--漩涡结构



氢线的观测

21cm氢线的产生机制及观测优势



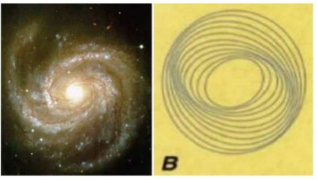
平方公里阵列时代的21厘米线宇宙学

跃迁几率： $2.9 \times 10^{-15}/s$

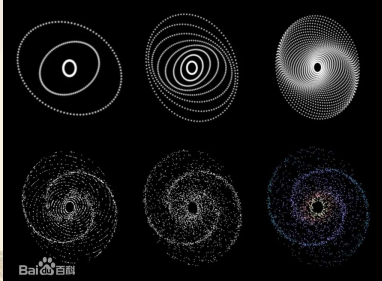
第一次观测：哈佛大学的Edward Purcell教授与他的研究生Harold Ewen, 1951, 角型天线

1942年瑞典天文学家林德布拉德提出**密度波理论**。1964年以来，美籍科学家林家翘建立了系统的密度波理论。

密度波理论认为，星系的螺旋结构是一种波动图案。旋臂区域里恒星密集，引力场强。但恒星并不是永远停留在旋臂上。恒星按照近于圆形的轨道绕星系中心旋转。在运动过程中，恒星将进入，然后再走出旋臂。恒星进入旋臂后由于旋臂区恒星密集和引力场强而减慢速度。但另一方面，速度的减慢又使恒星挤在一起，密度增大，引力场加强，因此，一旦出现了旋臂图案，这种图案将自行维持。密度波理论成功地解释了星系螺旋结构的本质和能够长期维持的原因，并说明了许多观测事实。密度波的一个重要特点是：旋臂中的星不是一成不变的，恒星有进有出，川流不息，而旋臂图案却保持不变，旋臂不会缠卷起来。



左：漩涡星系的照片。右：漩涡密度波的概念示意图。在一个以固定（角）速度旋转的参照系里，物质的质线以各自的速度在封闭的椭圆轨道上旋转，但椭圆长轴角度快速变化产生了表面密度的集中区域，其产生的引力偏转反之地能自洽地解释流线和圆周运动的偏离。



银河系中心

在可见光波段被气体和尘埃严重吸收

Extinction by 30 magnitudes
⇒ Only 1 out of 10^{12} optical photons makes its way from the GC towards Earth!

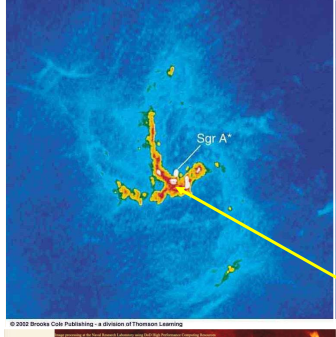


Galactic center

Wide-angle optical view of the GC region

银心的射电观测

Many supernova remnants; shells and filaments




Sgr A*

Sgr A

Sgr A*: 银心

银河系中心存在一个大约4百万太阳质量的黑洞

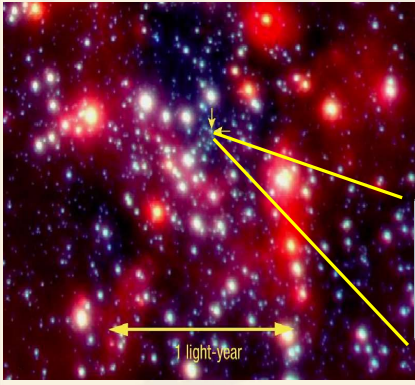


银心分子云区的GeV-TeV粒子组分与宇宙线海壁垒

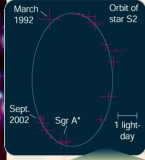
银河系中心的黑洞



探索银河系中心的超大质量黑洞及其环境中的恒星形成历史



恒星动力学测量黑洞的质量



Our solar system is half a light-day in diameter.

see <http://www.astro.ucla.edu/~jlu/gc/pictures/orbitsMovie.shtml>

银心的X射线观测

银心区域包含很多的黑洞和中子星双星系统



银心的超大质量黑洞在X射线波段很暗

Chandra X-ray image of Sgr A*

其它星系/河外星系

- 原先被称之为“白星云”
- 世纪之争：银河系之外还是银河系之内？
- Cepheid变星定距离：银河系之外！
- Edwin Hubble分类
- 星系群（最多~100星系）；星系团（~100-1000星系）



椭圆星系



Figure 8.12 The giant elliptical galaxy, ESO 325-G004, in the Abell cluster S0740. Image: J. Blakeslee (Washington State University), NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

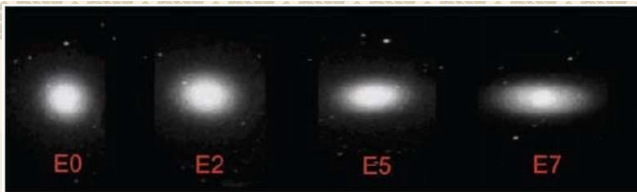
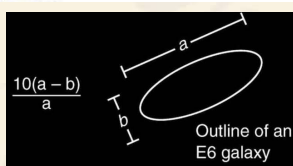
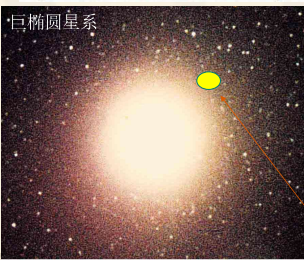


Figure 8.13 Classification of elliptical galaxies.



银河系的相对大小

椭圆星系

- 在大的星系团的中心，经常观测到一个或者更多的巨椭圆星系：~10¹³太阳质量，~300 000光年（面积约为银河系九倍），很多星系并合的结果；数量不多
- 椭圆星系：~10⁷⁻¹³太阳质量
- 一般来说，年轻恒星很少，恒星形成基本停止，气体基本用完
- 椭圆星系占了宇宙中总星系数目的~1/3

旋涡星系

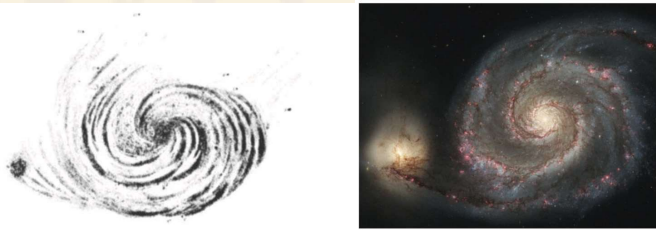


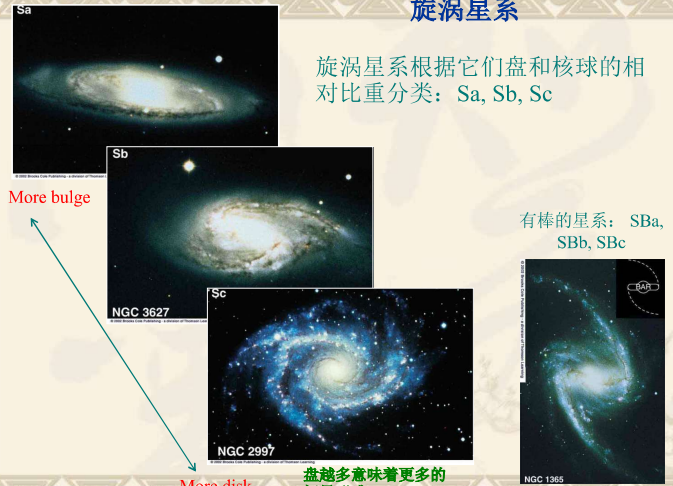
Figure 8.14 M51, the Whirlpool Galaxy, as drawn by the Third Earl of Rosse using the 72in telescope at Birr Castle in County Offaly, Ireland.

Figure 8.15 Hubble Space Telescope image of M51. Image: NASA, ESA, S. Beckwith (STScI), and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

1840s

旋涡星系

旋涡星系根据它们盘和核球的相对比重分类: Sa, Sb, Sc



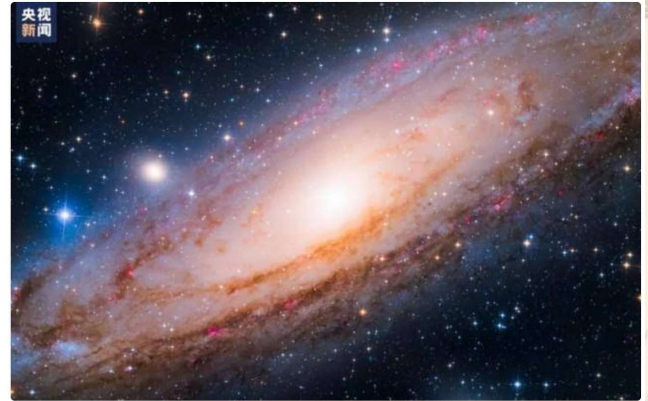
有棒的星系: SBa, SBb, SBc

盘越多意味着更多的恒星形成



Figure 8.16 M81 in Ursa Major. Image: NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

- 核区: 恒星年老, 颜色: 黄、橘红、红
- 旋臂: 恒星年轻, 颜色: 蓝色 (这类恒星相对数目少, 但很亮)



△摄影作品《仙女座星系: 邻居》

英国格林尼治皇家天文台主办的2022年度天文摄影师大赛青年组冠军: 杨瀚文、周泽震 (均为14岁)

NGC 1300 (棒旋星系)



距离地球6130万光年

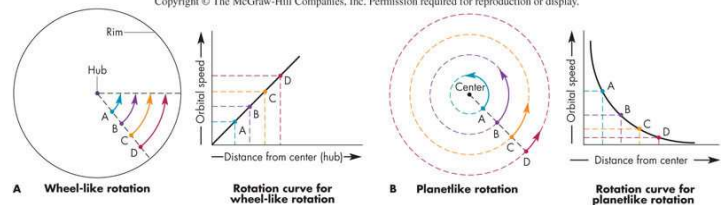
旋涡星系中的暗物质

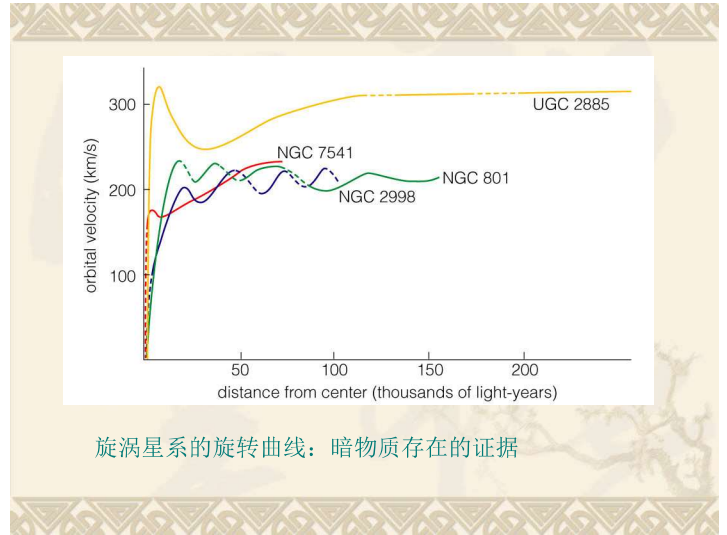
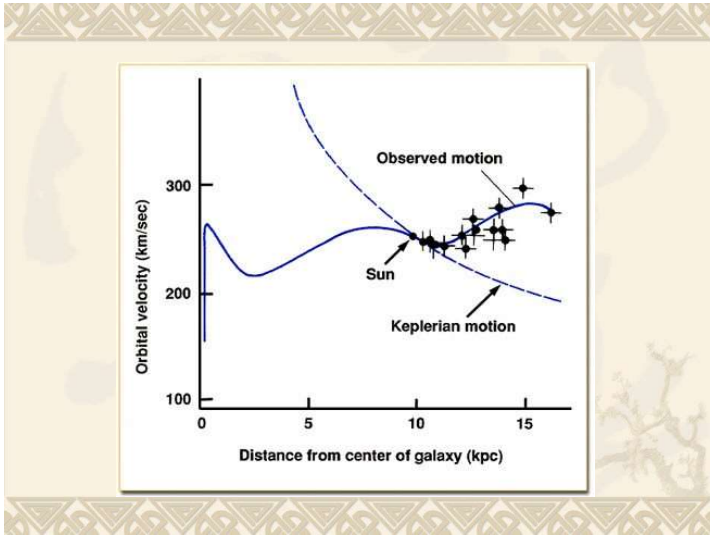
- 1970s, Vera Rubin通过观测旋涡星系中的HII区深红色的H α 谱线的移动, 来测量星系的转动曲线: 偏离开普勒运动!

- 暗物质? 修正的牛顿动力学(MOND)?

$$\text{当加速度极小时: } F=ma^2 \text{ vs. } F=ma \\ F \sim 1/r \text{ vs. } F \sim 1/r^2$$

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.





旋涡星系的旋转曲线：暗物质存在的证据

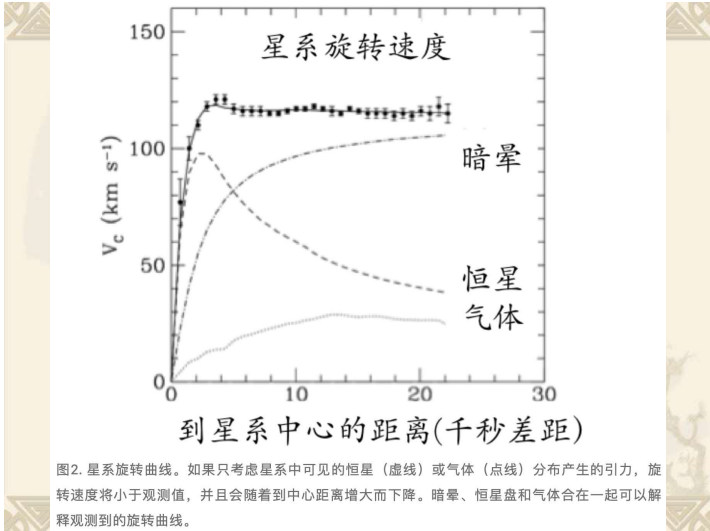


图2. 星系旋转曲线。如果只考虑星系中可见的恒星(虚线)或气体(点线)分布产生的引力, 旋转速度将小于观测值, 并且会随着到中心距离增大而下降。暗晕、恒星盘和气体合在一起可以解释观测到的旋转曲线。

暗物质的替代理论通过了重大考验

MODIFIED NEWTONIAN DYNAMICS

2021/10/20

当加速度极小时:
 $F=ma^2$ vs. $F=ma$
 $F\sim 1/r$ vs. $F\sim 1/r^2$

当前研究人员寻求一种非传统的宇宙学观点, 即不考虑暗物质, 发展出可以匹配宇宙微波背景(CMB)观测结果的模型[1]。这里宇宙微波背景(CMB)指的是大爆炸的残余辉光。这个无暗物质模型是所谓的MOND(牛顿动力学修正)理论的延伸, 该理论假设星系尺度上的引力与标准牛顿引力不同。之前基于MOND的模型无法重现CMB, Skordis和Zlošnik表示, 他们的模型可以通过对星系团引力的观测进一步验证。

MOND理论最早是在30多年前提出来的, 用来解释星系旋转数据, 而不引入神秘暗物质的存在[2]。MOND的支持者提出了另一个谜题, 即当加速度小于 $10^{-10}m/s^2$ 的阈值时, 引力会发生变化。这个想法并非源于任何潜在的理论, 但令人惊讶的是, 相同的加速度阈值适用于几乎所有的星系, 无论星系大还是小, 年轻还是年老。

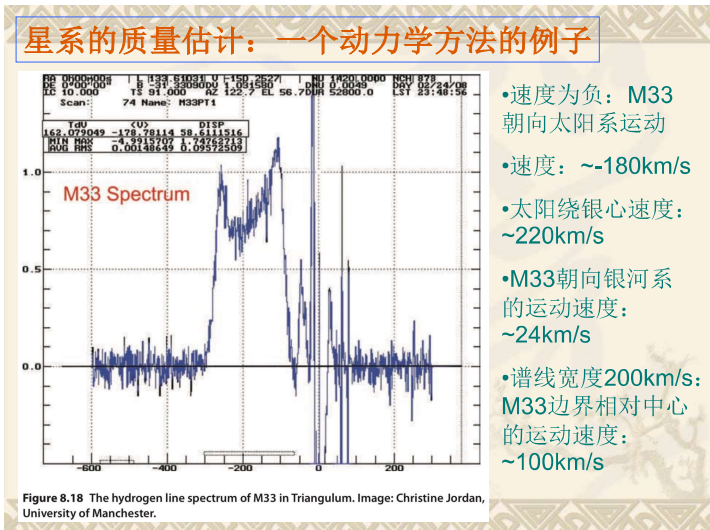
暗物质比MOND更受欢迎的主要原因是暗物质与更大范围的天体物理观测相一致。例如, 暗物质可以解释星系团来自遥远天体的光造成弯曲(引力透镜效应), 而最初形式的MOND则不能。不过研究人员已经发展出所谓的相对论性MOND模型, 该模型可以符合引力透镜的观测[3]。但到目前为止, 该理论的这些修正版本都无法重现CMB的数据。捷克科学院的Constantinos Skordis说: “如果这个理论不能做到这一点, 那么就不值得进一步考虑”。

Skordis和来自自然科学院同事Zlošnik现在构建了一个受MOND启发的模型。该模型修正了宇宙微波背景辐射, 同时也与引力透镜观测和引力波速度测量一致。该模型延续了MOND最近的研究成果, 即假设存在两个场, 这两个场弥散于整个空间, 它们共同作用就像一个额外的引力。其中一个场是一个标准场, 类似于与暗物质颜色相关的暗物质场, 另一个是矢量场, 它在空间中的每一点都有一个方向, 有点像磁场。

Skordis和Zlošnik设置了模型的参数, 以便在早期宇宙中, 让引力修正场产生类似暗物质的引力效应。以这种方式模拟暗物质确保了观测到的CMB模式得以重现。这些场随着宇宙时间的推移而演化, 最终引力会遵守最初的MOND模型。

Skordis说, 这个模型类似于其他被提出用来解释暗能量的替代引力模型(见观点: Reining in Alternative Gravity)。他说, 所有的宇宙学模型都会添加一些东西(新粒子或新场)来解释观测结果。他承认, 暗物质模型不同于通常基于基本对称原理的模型, 新模型并没有考虑到潜在的理论。然而, 这种理论基础可能会被新的MOND模型所揭示。

之前的MOND无法解释CMB结果, 现在有可能了



- 假设M33是圆形的: 观测为 $\sim 71 \times 45$ 角分, 星系的倾角: $\arcsin(45/71) \sim 39^\circ$
- 速度改正: $100/\cos(39) = 129\text{km/s}$
- M33的直径: ~ 71 角分, $71/(60 \times 57.3) = 0.020$ 弧度

The radius of M33 is thus $\sim 0.5 \times 0.020 \times 2.36 \times 10^{22} \text{ m}$
 $\sim 2.4 \times 10^{20} \text{ m}$.

$G M m / r^2 = m v^2 / r$

$M = r v^2 / G$
 $= 2.4 \times 10^{20} \times (1.29 \times 10^5)^2 / 6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}$
 $= 6 \times 10^{40} \text{ kg}$
 $= 6 \times 10^{40} / 2 \times 10^{30} \text{ solar masses}$
 $\sim 30 \text{ thousand solar masses}$.

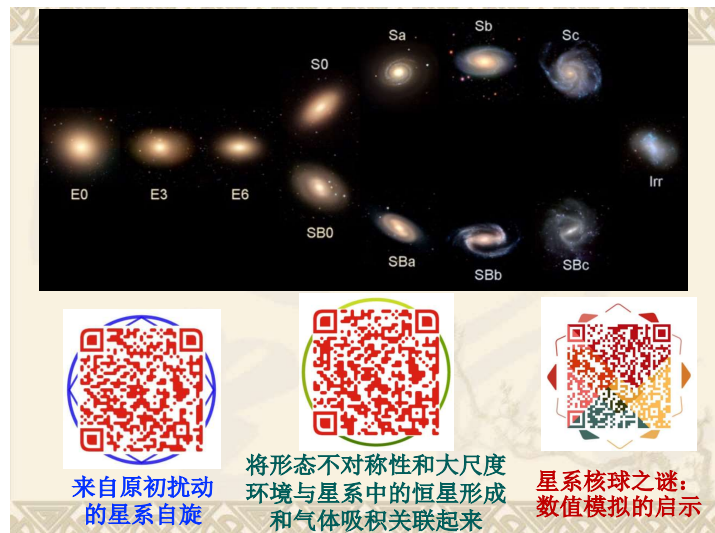
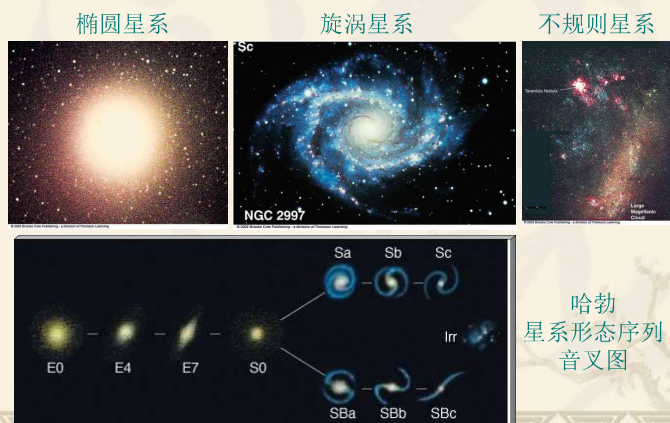
$\sim 30 \times 10^9$ 太阳质量

- 根据质光关系定M33中发光物质的质量
 - 太阳的绝对光度：4.8；M33绝对光度：-19.5
 - 光度差： $2.512^{24.3} \sim 5.2 \times 10^9$
 - M33中发光物质的质量： $\sim 5.2 \times 10^9$ 太阳质量（假设为太阳质光关系），只有动力学质量的1/6!
 - 进一步的改正：不发光的气体和尘埃，恒星质光关系的改正，银河系的质光关系：1.5
 - M33中的重子物质： $\sim 8 \times 10^9$ 太阳质量，仍然只有动力学质量的1/4!!
- M33里暗物质质量是正常物质的4倍（粗略估计）

不规则星系

- 一小部分星系没有明显外形特征：不规则星系
- 例子：SMC；LMC，略有棒旋特征
- 星系小，不太亮，能被观测到的不多，实际上应该是最常见的星系类型
- 气体足够多→恒星形成，尘埃比银河系少
- 30 Doradus（剑鱼）--狼蛛星云（Tarantula）- LMC中最大的恒星形成区，含有很多的年轻恒星—其中一个归宿为SN1987A

星系的哈勃分类



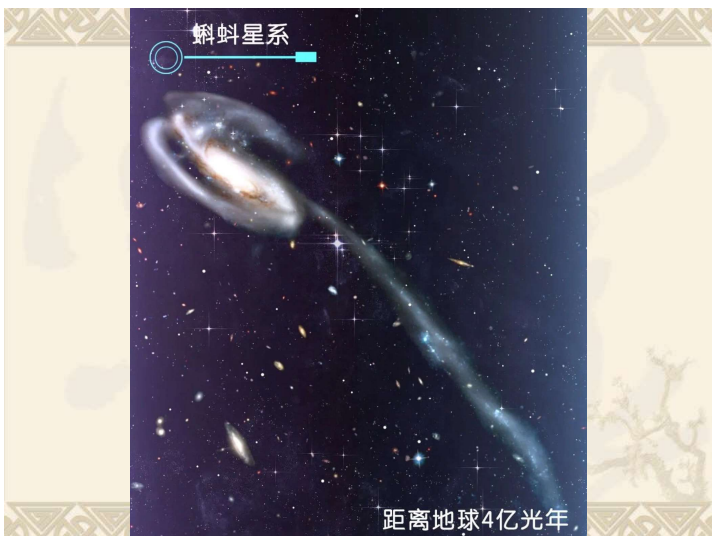
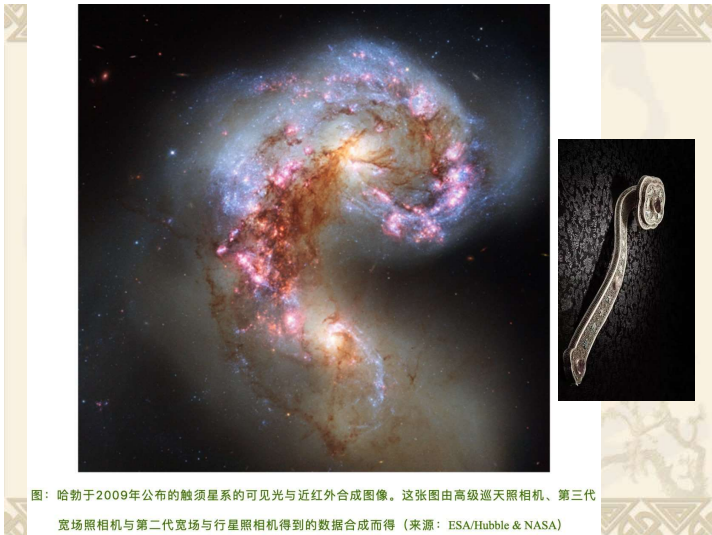
NGC 7049
(透镜状星系)

距离地球1.5亿光年

某些特殊星系的尘埃盘是扭曲的



图一：ESO510-13星系的翘曲图，左右两端都有翘起的特征（来源：STScI/NASA）。



宇宙

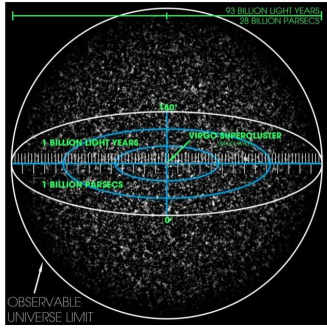
- 可观测宇宙：对应光从宇宙诞生至今所能传播的距离（465亿光年！）
- 宇宙距离尺子：
 - 测量星系距离 → 了解宇宙尺度
 - 宇宙距离阶梯：量天尺-造父变星的周光关系



LMC、SMC距离的精确测量

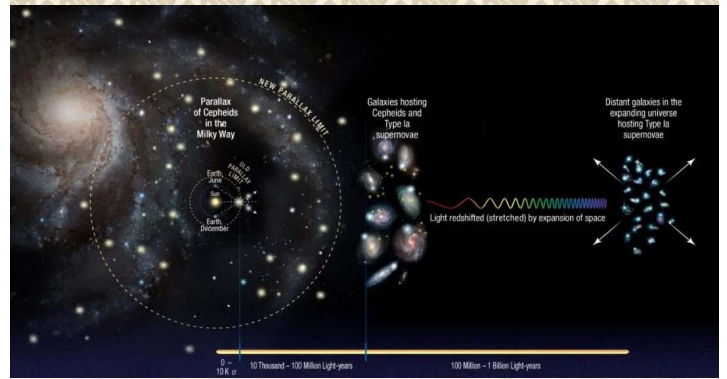
测量距离的方法：
三角视差、分光视差、周光关系、
SNIa、光谱红移。。。SEAMBH, RM+R-L。。。。

宇宙诞生自138亿年前，而可观测宇宙半径达465亿光年



然而模拟出的可观测宇宙直径大约为930亿光年，远大于上述数值 / Andrew Z. Colvin

得到可观测宇宙的半径为138亿光年，**隐含了一个假设：宇宙空间是静止的**，既没有膨胀，也不会收缩。在这样的空间中，假设这种情况下有一个光子从宇宙诞生之初就存在，旅行到今天，它走过的路程才是138亿光年；进而，宇宙的可观测半径的大小也就是138亿光年。但事实并非如此。宇宙自诞生以来就一直在膨胀。这意味着什么呢？实际上在考虑到宇宙空间膨胀的修正后，光的速度看起来是大于30万公里每秒的。所以，可观测宇宙的大小会大于138亿光年。



复杂的“宇宙距离阶梯”(cosmic distance ladders)：**第一级台阶**由我们银河系内部的恒星以及被称为“标准烛光”的天体确定(比如造父变星)。标准烛光具有明确的光度，而且离我们足够近，足以产生视差——这是不需要旅行到那里就能确定物体有多远的唯一方法！然后，天文学家将这些被视差法标定的标准烛光的亮度与附近星系中较暗的标准烛光的亮度进行比较，以推算较暗较远的标准烛光的距离——这些遥远的标准烛光构成了宇宙距离梯度中的**第二级台阶**。如果第二级台阶中星系中包含罕见而明亮的Ia型超新星，那么通过测算它们的距离，宇宙学家就可以估算出包含更暗的Ia型超新星的较遥远星系的相对距离——这构成了**更高级的宇宙距离阶梯**。(简单根据这些遥远星系的退行速度与其距离之比可得出宇宙膨胀率，也就是哈勃常数。)

利用SN1987A来测量LMC的距离

- SN爆发后经过dt，其前身星喷出的环状物被照亮；若theta=90度，则环会被同时照亮， $R=c \cdot dt$
- 真实情况：theta非90度，B在爆发后75天被照亮(对应 dT_n)，A在390天后被照亮(对应 dT_f)

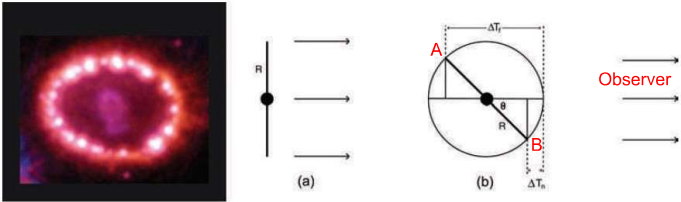


Figure 8.20 The geometry of the ring surrounding Supernova 1987A. Image: NASA, P. Challis, R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) and B. Sugerman (STScI).

$$\Delta T_n = (R - R \cos \theta) \text{ days after we first see the supernova. Radius of the ring} = 232.5 \times 3 \times 10^5 \times 3600 \times 24 \text{ km} = 6 \times 10^{12} \text{ km}$$

$$\Delta T_f = (R + R \cos \theta) \text{ days after we first see the supernova. } D = d/\theta \text{ (where } \theta \text{ is in radians)}$$

$$= 6 \times 10^{12} / (0.86 / (3600 \times 57.3)) \text{ km}$$

$$= 6 \times 10^{12} / 4.2 \times 10^{-6} \text{ km}$$

$$= 1.4 \times 10^{18} \text{ km}$$

$$= 1.4 \times 10^{18} / 3.1 \times 10^{13} \text{ pc}$$

$$= 46 \text{ 100 pc}$$

(准确值: 51.5+/-1.2kpc)

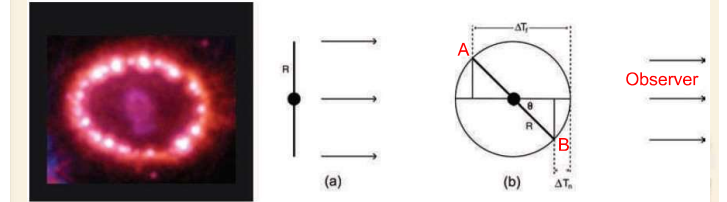


Figure 8.20 The geometry of the ring surrounding Supernova 1987A. Image: NASA, P. Challis, R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) and B. Sugerman (STScI).

量天尺-造父变星

- 周光关系: Henrietta Leavitt, 1912
- 星系、星系团的标准烛光

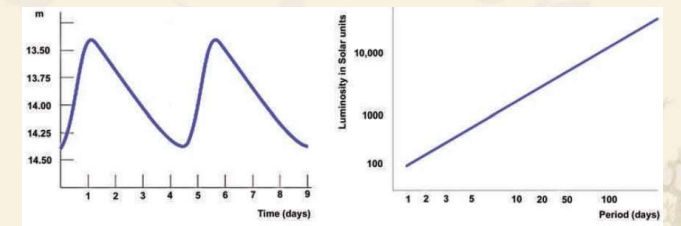
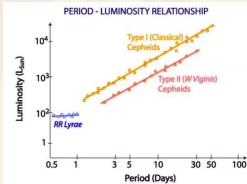
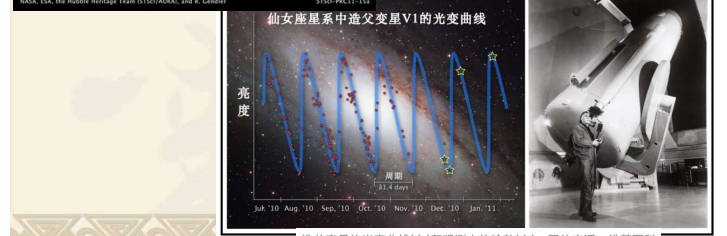


Figure 8.21 (a) A Cepheid variable light curve and (b) the period-luminosity relationship.



周期→光度→距离 (消光改正)
(内禀缺陷+统计弥散)



例子：利用造父变星测量M81距离

- 一颗LMC中的造父变星有 $\log P=1.4$ 与 $\text{mag}=13.9$
- 其在M81中有 $\text{mag}=22.8$ ，暗 $22.8-13.9=8.9\text{mag}$
- 对应亮度比 $2.512^{8.9}=3632 \rightarrow$ 距离比 $(3632)^{0.5}=60.2$
- M81距离为： $51.5 \times 60.2=3104\text{kpc}=10.1\text{MLy}$

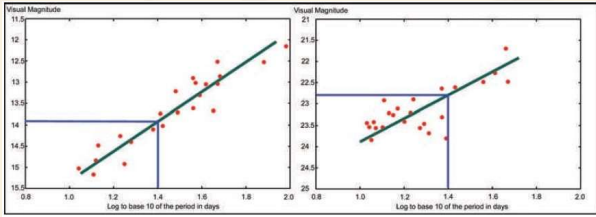


Figure 8.22 Plots of visual magnitude against \log_{10} of the period for Cepheid variables in the Large Magellanic Cloud (a) and M81 (b).

星暴星系

- 辐射更多的红外和射电
- 恒星形成剧烈，年轻恒星的辐射加热星系中的尘埃，辐射红外辐射；如果有些地方尘埃少，可以直接看到非常热的恒星的紫外辐射
- HII区恒星形成，辐射强的射电辐射
- 大质量恒星演化快，超新星爆发，激波加速电子至接近光速 \rightarrow 射电辐射
- 在星系的中心，超新星遗迹在光学波段不可见，但是在射电波段可见

星暴星系：M82



Figure 8.23 M82 in Ursa Major – a starburst galaxy. Image: J. Gallagher (University of Wisconsin), M. Mountain (STScI), and P. Puxley (National Science Foundation), NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

- 和其邻居M81的“亲密接触”（close passage）导致星暴
- 射电观测：中心有 >50 个SNR
- SNR气体壳层速度：可高达 $\sim 20000\text{km/s}$
- 最年轻的SN： ~ 40 年前，藏于尘埃中

活动星系核（AGNs）



(University of Warwick, retrieved from bordermail.com.au)

- Tremendous amounts of energy from the center of a galaxy
- Excess emission across almost all wavelengths
- Accretion of mass onto SMBH ($\sim 1E6-1E10 M_{\text{sun}}$)
- Most luminous persistent sources of electromagnetic radiation
- Three key components



变幻莫测的
超大质量黑洞



快速多样的
活动星系核之旅

化学能（煤燃烧）

核聚能：1克氘 ~ 10 吨煤

黑洞吸积：1克物质 ~ 300 吨煤

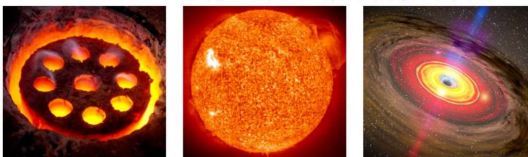
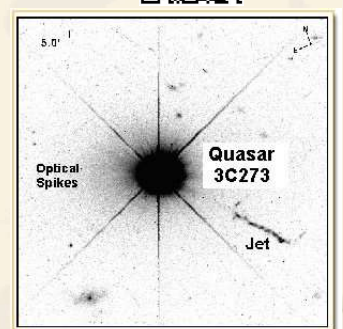
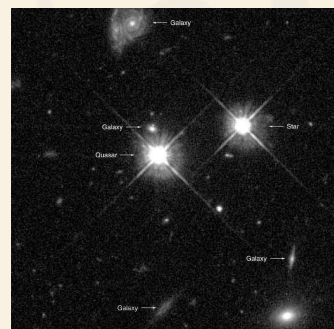


图1：化学反应、核聚变，以及黑洞吸积三类过程所释放能量效率的对比。我们常见的煤燃烧释放的是化学能，能量释放率相对较低。恒星内部核反应释放的是核能，氢核聚变的能量释放率约为0.7%，1克氘核聚变产生的能量与燃烧约10吨煤相当。而黑洞吸积过程导致的能量释放率可达约10%，效率约为核聚变的几十倍（能量释放率=释放的能量/ mc^2 ，量级估算，图中数字不要太过真哦）。图片来源：NASA

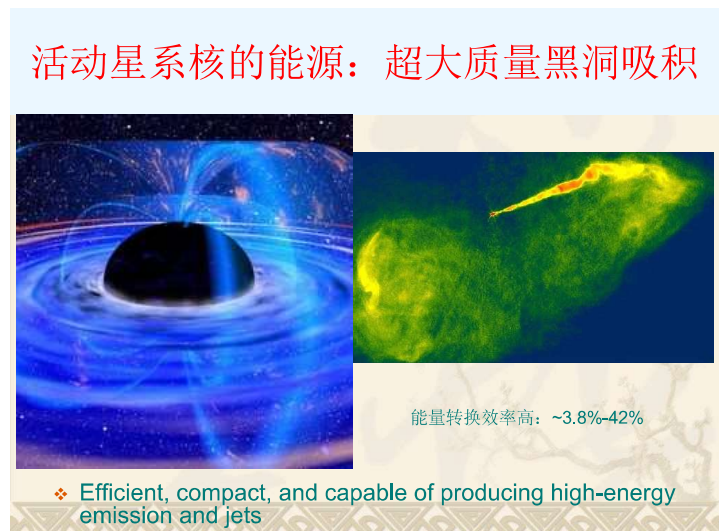
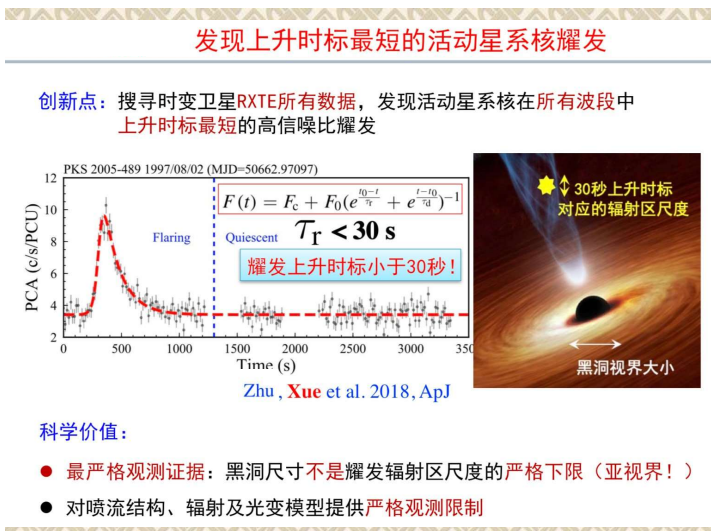
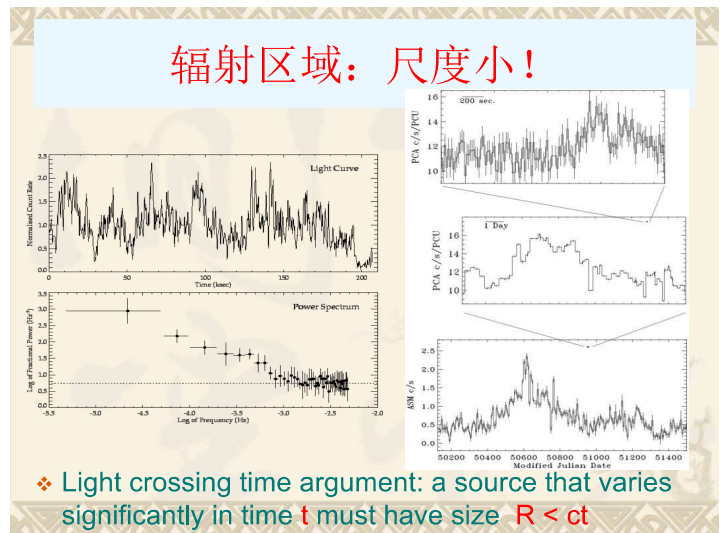
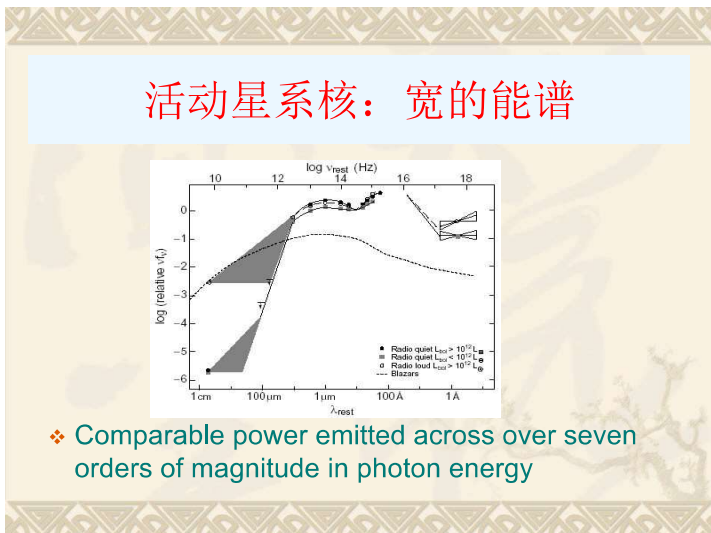
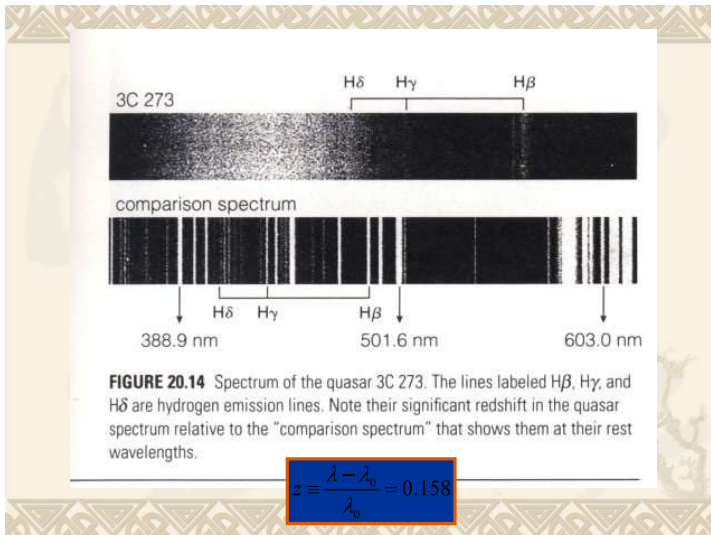
类星体



“千人一面”
的类星体



Quasar is short for Quasi-stellar object. Note how star-like this quasar appears compared to the star.



黑洞质量测量例子

- M84: 吸积盘中的气体团距离中心~26Ly
旋转速度400km/s (HST观测)

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

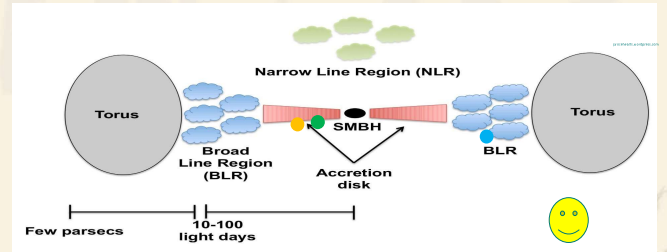
$$26 \text{ Ly} = 26 \times 9.46 \times 10^{15} \text{ m} = 2.4 \times 10^{17} \text{ m}, v = 4.0 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$$

This gives:

$$\begin{aligned}
 M &= 2.4 \times 10^{17} \times (4 \times 10^5)^2 / 6.67 \times 10^{-11} \text{ kg} \\
 &= 5.9 \times 10^{38} \text{ kg} \\
 &= 5.9 \times 10^{38} / 2 \times 10^{30} M_{\text{sun}} \\
 &= 2.93 \times 10^8 M_{\text{sun}} \\
 &= \sim 300 \text{ million } M_{\text{sun}}
 \end{aligned}$$

Reverberation Mapping 反响映射

Small variability, big wisdom



Reverberation Mapping 反响映射

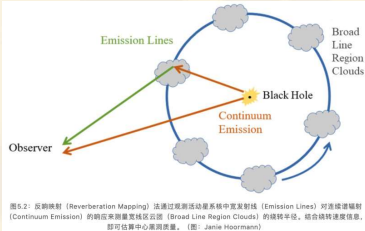
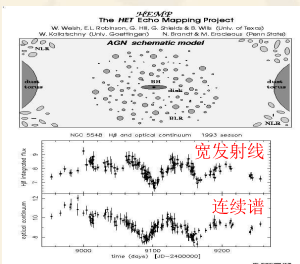


图2: 反响映射 (Reverberation Mapping) 是通过观测活动星系核中宽发射线 (Emission Lines) 对连续谱辐射 (Continuum Emission) 的响应来测量宽发射线区 (Broad Line Region Clouds) 的半径, 结合旋转速度信息, 即可估算中心黑洞质量。(图: Jamie Hoormann)

$$GM_{\bullet} = f R_{\text{BLR}} (\Delta V)^2$$

- ❖ Measure the time lag in response of BLR clouds to changing ionizing flux from the accretion disk
- ❖ Implied sizes range from light weeks in low power AGN to light years in powerful ones
- ❖ Size plus velocity yield black hole mass

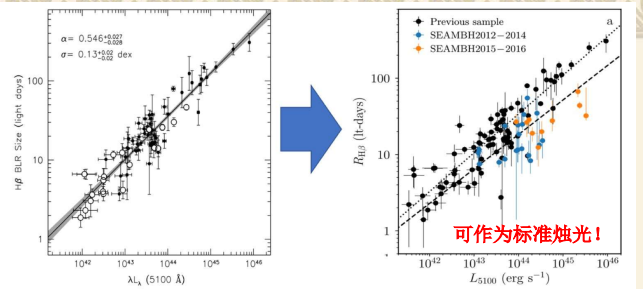


图1 宽线区的尺度-光度关系。左图取自 Bentz et al. (2013), 右图取自 Du et al. (2018)。高吸积率的 AGN 显著偏离传统的 R_BLR-L_5100 关系。

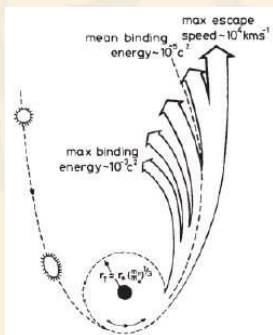


高吸积率活动星系核的反响映射

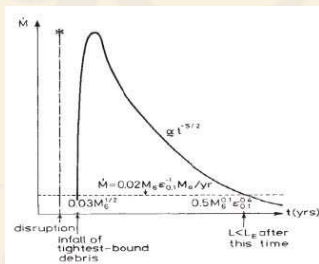


活动星系核连续谱反响映射 (上海天文台 郭恒潇)

超大质量黑洞潮汐瓦解恒星

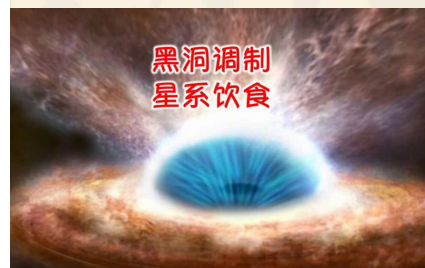


$$R_t \approx 7 \times 10^{12} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^6 M_{\odot}} \right)^{1/3} \left(\frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right)^{-1/3} \frac{R_{\star}}{R_{\odot}} \text{ cm}$$

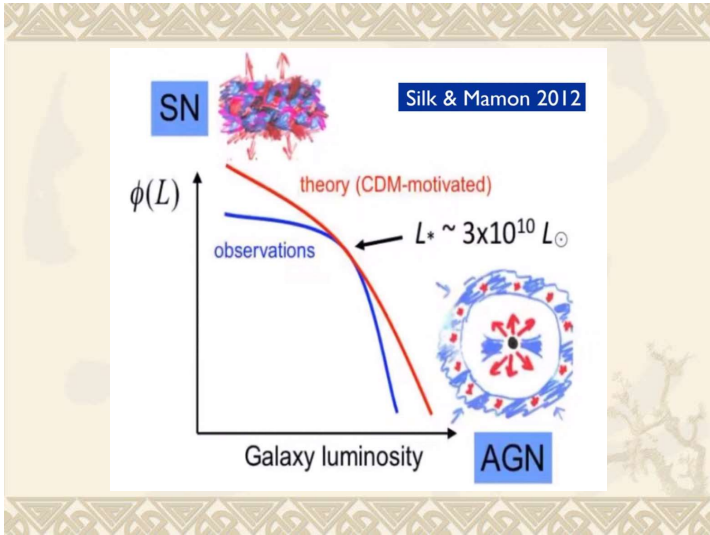


- ❖ 发现、观测宁静SMBH的有效手段
- ❖ 发生率~1E-6至1E-4/galaxy/yr
- ❖ Dual SMBHs中发生率会显著变大

黑洞调制星系饮食



- 南京大学研究人员领衔的国际研究团队
- 创新性地从探索近邻星系的黑洞质量与星系中原子氢气体的含量之间的关系入手, 首次揭示了星系中心黑洞的质量是调制星系中原子氢气体含量的最关键的物理量; 中心黑洞质量越高的星系其原子氢气体含量越低; 对星系中心黑洞是否影响和如何影响星系中的冷气体含量及恒星形成提供了重要的观测证据, 同时也对中心黑洞对宿主星系具体的反馈机制也作出了重要限制
- 成果于2024年8月14日发表于国际科学期刊《自然》



双超大质量黑洞之舞

小黑洞撞向OJ 287星系中心黑洞吸积盘的示意图 (图片来源: NASA/JPL-Caltech)

在距离我们35亿光年的OJ 287星系中心, 是迄今发现的最大黑洞之一, 它的质量相当于太阳质量的180亿倍。在观测这颗黑洞时, 天文学家发现其光变曲线呈现出有趣的周期性变化: 每12年, 其光度会出现两次峰值。但峰值在周期内的时间分布及间隔, 似乎没有规律可循。进一步研究认为, 周期性的光度变化, 是由另一颗围绕其运行的黑洞导致的——虽然远逊于OJ 287中心的黑洞, 但它的质量依然达到了1.5亿倍太阳质量。较小的黑洞以12年为周期, 绕中心大黑洞运行。每当它撞上大黑洞的吸积盘, 会产生耀眼的光芒——其光度甚至超过了整个银河系。

但是, 要准确预测这团“焰火”出现的时间, 对天文学家来说却是一个难题。我们知道, 黑洞巨大的引力形成时空涟漪, 影响周围天体的运动轨迹。因此, 在这个双黑洞系统中, 小黑洞的运行轨道非常不规则。

Black Hole Orbit in Center of Galaxy OJ 287

The flares occur irregularly because the physics of this double black hole system is complex.

Simplified Orbit Model

Timing of Flares by Year

1959 1960 1961 1962 1963 1964 2010

相对论性运动: 视超光速运动

- “Superluminal” velocities ($v \sim 3$ to $10 c$)
- Due to time dilation when a relativistic jet is pointing close to the line-of-sight
- “Doppler boosting”: we often see only the approaching side of the twin jet

$$\Delta x_{||} = \beta c \Delta t \times \cos \theta$$

$$\Delta x_{\perp} = \beta c \Delta t \times \sin \theta$$

$$\Delta t_{\text{obs}} = \Delta t - \frac{\Delta x_{||}}{c} = (1 - \beta \cos \theta) \times \Delta t$$

$$(V_{\perp})_{\text{app}} = \frac{\Delta x_{\perp}}{\Delta t_{\text{obs}}} = \frac{\beta c \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}$$

(详情见Wiki)

星系群和星系团

通过化学丰度来研究近场宇宙

孤立中央星系周围的小质量卫星星系与暗弱延展恒星晕

- 星系群: ~几十个星系
- 星系团: 最多~几千个星系
- 本星系群: ~40星系 (包括银河系) 尺度~3百万光年
- 三个主要的星系: 都为旋涡星系, MW (质量第二大), M31 (仙女星系, 质量最大), M33 (质量第三大)
- M31与MW质量和大小相仿, 经过几十亿年之后, 将和MW合并, 变成一个椭圆星系
- 许多矮椭圆星系: 例如M31的两个卫星星系
- M32—小的E2星系; NGC205 (M110) E5/E6
- 几个大的不规则星系: SMC/LMC; 至少10个矮的不规则星系
- 可能有别的成员: MW挡住>20%的天空



Figure 8.26 The Virgo cluster of galaxies. Image: Space Telescope Science Institute, NASA.

室女星系团 (Virgo) : ~2000星系
 后发星系团 (Coma); 武仙星系团 (Hercules)
 星系团: ~50-1000星系; 6-35百万光年大小; 10^{14} - 10^{15} Msun



利用恒星运动学和星族来揭示天炉座星系团中星系的组装历史



用流体模拟探究理解星系群和星系团

引力透镜

遥远星系的图像被前景透镜天体的引力场扭曲

Weak lens

通过对一小片天区的星系计算平均畸变率来测量

Strong lens

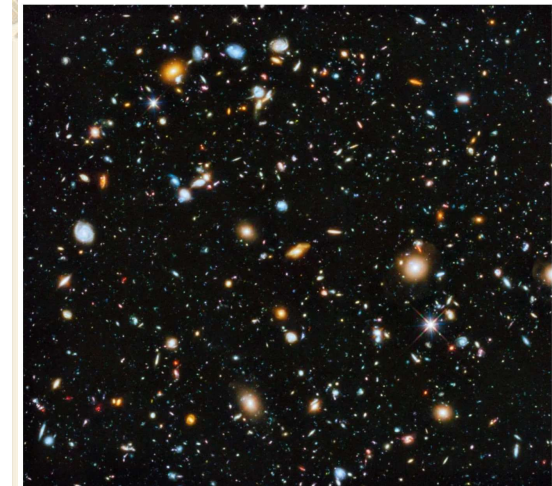
肉眼可见的图像扭曲巨弧、爱因斯坦环

利用弱引力透镜连接星系演化的“亮面”与“暗面”

通过小暗物质晕引力透镜的引力波来探索暗物质的本质

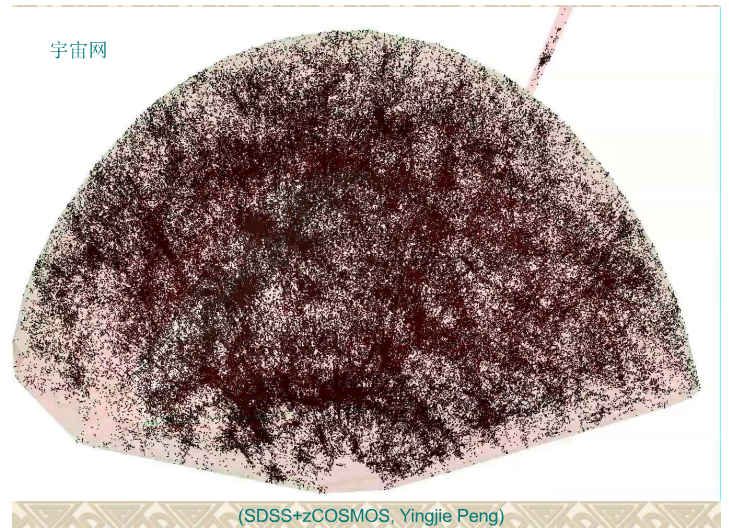
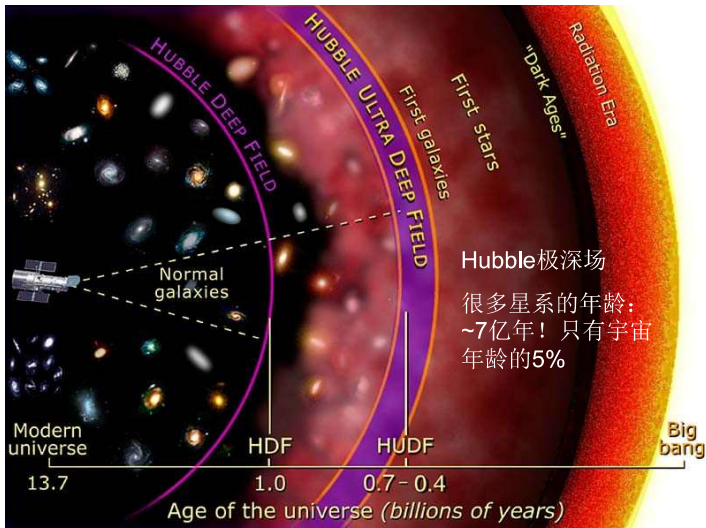
超团

- 小的星系团和星系群可能组成更大的结构: 超团
- 超团: ~300百万光年 (100倍本星系群)
- 一般有一个富星系团为中心, 加上其他的小星系群
- Virgo超团: 150百万光年; Virgo星系团为中心, 本星系群在边界上
- Coma超团: ~330百万光年; Coma星系团: ~1000星系



Hubble极深场
 很多星系的年龄: ~7亿年!
 只有宇宙年龄的5%

哈勃的超深场图像显示了一些当前技术可以看到的最近远的星系, 每个星系都由数千亿颗恒星组成。(观测图像面积约为满月的1/79) / NASA



宇宙的结构

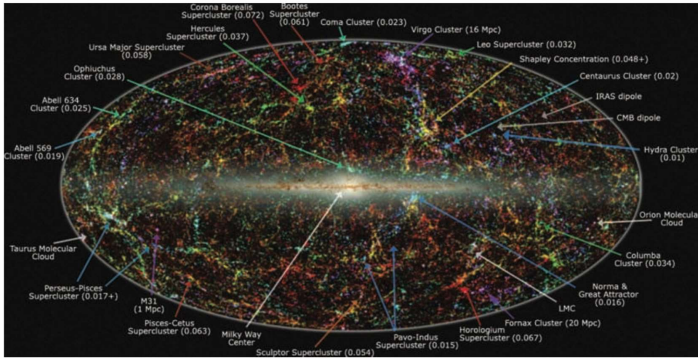
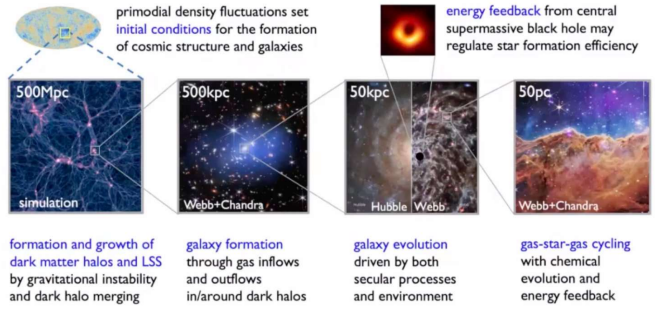


Figure 8.28 The structure of the local universe. Image: T. Jarett (IPAC/Caltech), Wikipedia Commons.

近邻宇宙的结构：星系-群-团-超团；~100Mpc以上，近似均匀

Galaxies form and evolve in evolving dark matter halos

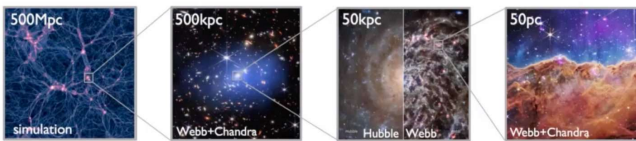


从空间和时间上剖析星系生态系统 (清华大学 李成)

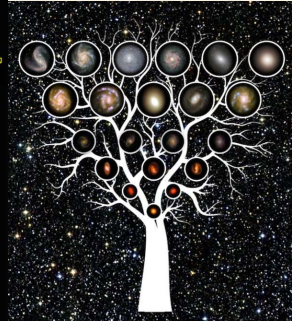
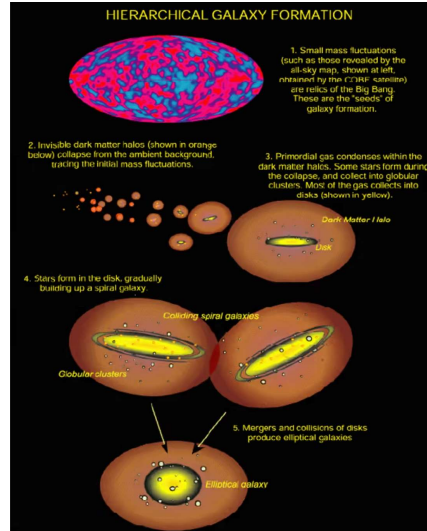


Galaxies are complex, diverse and evolving ecosystems

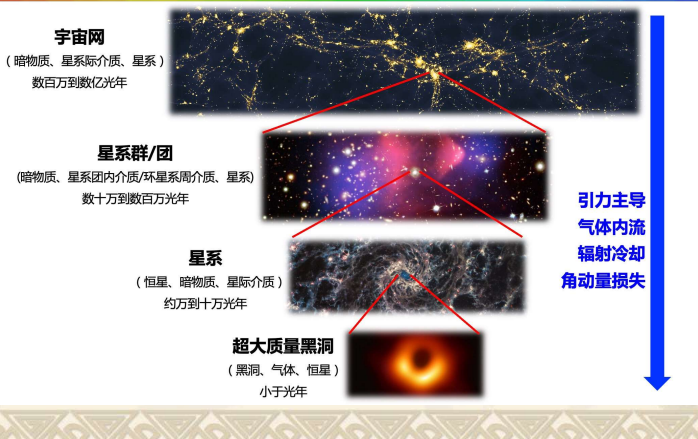
- **Multi-component:** stars, dust, neutral/ionized gas, metals, black hole, CGM, IGM, ...
- **Multi-scale:** large-scale structure, dark matter halo, galaxy-wide, sub-galactic regions
- **Multi-physics:** different physical processes work at different scales
- **Multi-epoch:** different processes play different roles at different cosmic epochs



从空间和时间上剖析星系生态系统 (清华大学 李成)



星系-黑洞宇宙生态系统



第九章 宇宙学——宇宙的起源和演化



本章内容

- ❖ 几个代表性的宇宙观/模型
- ❖ 人们如何认识到宇宙是膨胀的?
- ❖ 热大爆炸宇宙学如何提出、有何观测证据?
- ❖ 暗物质与暗能量是什么?
- ❖ 什么决定了宇宙适合智慧生命的生存?
- ❖ 宇宙的命运是怎样的?
- ❖ 《天文学导论》课程结语

牛顿宇宙观

受牛顿力学规律支配的宇宙，在时间和空间上都是无限的；宇宙是永恒的、稳定的；宇宙中的物质分布是不均匀的。

绝对空间，就其本性而言与任何外界情况无关，始终保持相似和不变。

问题：物质不均匀、存在中心→宇宙不稳定→引力→宇宙坍缩
(均匀球体(R,ρ)边缘处单位质量的引力势：
 $-GM/R = -4/3 \pi G \rho R^2$)

解决办法：修改牛顿理论
 放弃经典时空概念



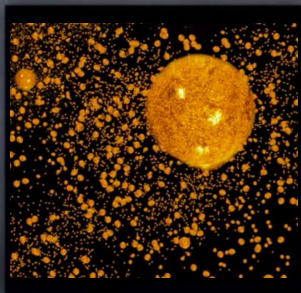
Isaac Newton

宇宙是静态的吗?

奥伯斯佯谬有四个假设：

- 宇宙是**无穷大**的
- 宇宙是**永恒**的
- 宇宙空间是**平坦**的
- 宇宙构成是**静止**的

我们的夜空应该是无限亮的……



Einstein的相对论宇宙学模型

- ❖ 1915年爱因斯坦的广义相对论发表

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

(里奇张量：空间弯曲状况；
 时空度规张量：基本特性，时空间隔；
 能动应力张量：物质分布与运动状况)

- ❖ 1917年Einstein将广义相对论引力场方程应用于宇宙的结构
- Einstein发现方程的解是不稳定的，表明宇宙在膨胀或者收缩。

- ❖ 静态的宇宙←加入起斥力作用的“宇宙学常数”项
 爱因斯坦的宇宙观：静态、有限无边，没有中心

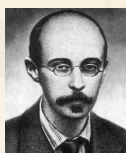
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$$



Einstein稳态解是不稳定的！Einstein's greatest blunder?

Friedman膨胀宇宙模型

- ❖ 1922年，俄国气象学家、数学家A. Friedman求得不含“宇宙常数”项的引力场方程的均匀的和各向同性的通解。
- ❖ 宇宙从一个“奇点”开始膨胀，膨胀宇宙的演化取决于宇宙中的物质自引力或密度ρ的大小



A. Friedman

宇宙的命运

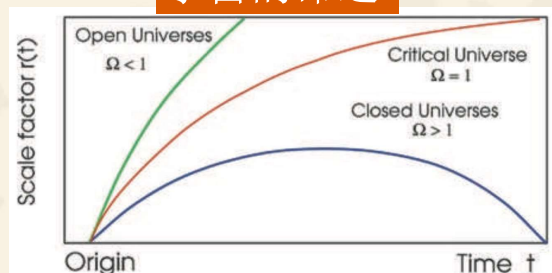
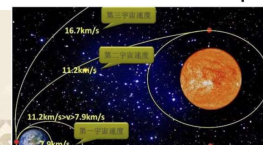
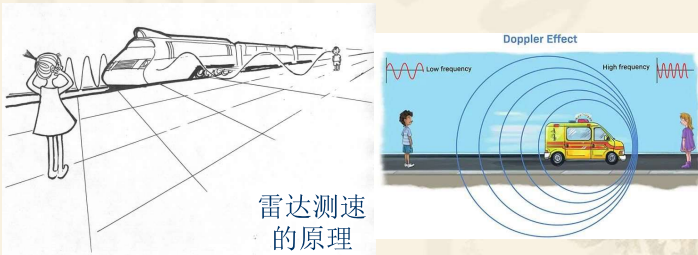
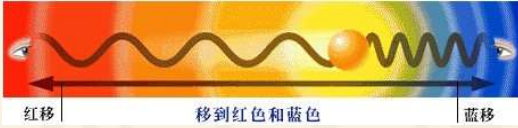


Figure 9.2 The Friedmann models of an expanding universe.



星系的红移和蓝移



❖ 红移—速度测量（多普勒红蓝移vs.宇宙学红移）

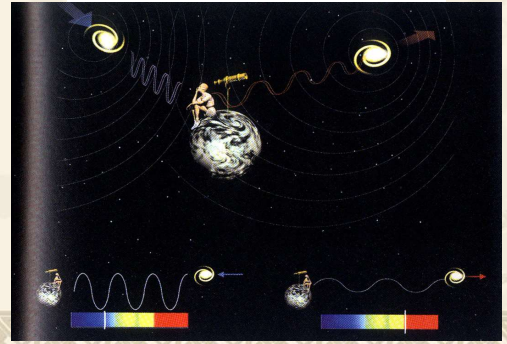
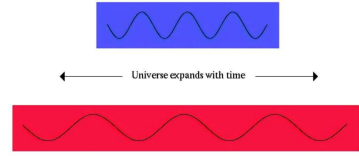
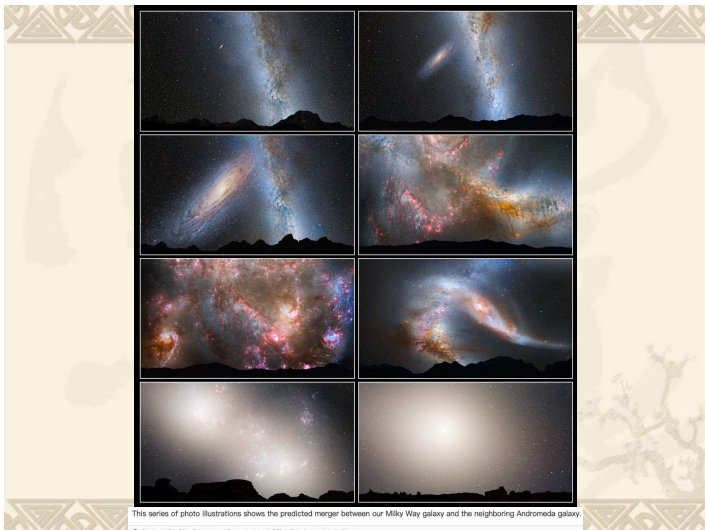


Figure 9.3 The redshift in the spectral lines from a distant galaxy (below) relative to those observed in our Sun (above). Image: Wikipedia Commons.

$$\Delta f/f = \Delta \lambda/\lambda = v/c \quad (\text{退行或接近的 } v \text{ 远小于 } c \text{ 时, } z=v/c)$$

星系红移和蓝移早期观测

- ❖ 美国天文学家：Vesto Slipher
- ❖ 1913年，Slipher发现Andromeda（仙女座星系）的蓝移为： $\sim 300\text{km/s}$ ，太阳绕银河系中心的速度为： $\sim 220\text{km/s}$ ，仙女座星系与银河系的靠近速度约为： $\sim 100\text{km/s}$
- ❖ 1915年，Slipher测量了15个星系，其中11个红移，两年以后，发现另外6个星系存在红移
- ❖ 基本结论：仅近邻星系（本星系群之内）显示蓝移；给出星系退行或接近的速度



This series of photo illustrations shows the predicted merger between our Milky Way galaxy and the neighboring Andromeda galaxy.

河外星系

- ❖ “星云”的发现
- ❖ 哈勃测定了星云的距离
 - ☞ 利用造父变星
 - ☞ 发现星系在退行

宇宙在膨胀！！



Hubble常数的测定

✓Walter Baade用Mt Wilson 100in Hooker 望远镜，发现仙女座星系中存在两类造父变星，Hubble观测到的造父变星比那些用于距离定标的造父变星亮四倍（实际距离应变大两倍）：→ $H_0 \sim 250 \text{ km/s/Mpc}$

✓HST：观测到19个星系（最远： $t \sim 1.08$ 亿光年）中 ~ 800 个造父变星：→ $H_0 \sim 72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$

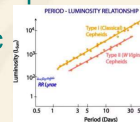
✓引力透镜观测：→ $H_0 \sim 71 \pm 6 \text{ km/s/Mpc}$

✓WMAP：→ $H_0 \sim 73.5 \pm 3.5 \text{ km/s/Mpc}$

✓WMAP+其它观测：→ $H_0 \sim 70.8 \pm 1.6 \text{ km/s/Mpc}$

✓PLANCK (2013)：→ $H_0 \sim 67.3 \pm 1.2 \text{ km/s/Mpc}$

Hubble年龄： ~ 140 亿年，平坦宇宙年龄： ~ 93 亿年



宇宙的实际年龄应该小于Hubble年龄，因为宇宙在过去膨胀速度更快。

对平坦宇宙：

$$t = \frac{2}{3H_0} \sim 13 \text{ 亿年}$$

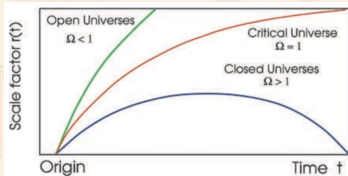


Figure 9.2 The Friedmann models of an expanding universe.

宇宙的年龄问题：

- 太阳系的年龄： ~ 45 亿年
- 一些恒星的年龄： $\sim 100-120$ 亿年（Hoyle等）
- 球状星团的年龄： ~ 120 亿年

宇宙学红移

✓红移的定义：
(多普勒效应)

$$z = \frac{\lambda_{\text{observed}} - \lambda_{\text{emitted}}}{\lambda_{\text{emitted}}} \quad z = \frac{f_{\text{emitted}} - f_{\text{observed}}}{f_{\text{observed}}}$$

$$1+z = \frac{\lambda_{\text{observed}}}{\lambda_{\text{emitted}}} \quad 1+z = \frac{f_{\text{emitted}}}{f_{\text{observed}}}$$

✓宇宙学红移的解释：宇宙在膨胀，尺度在增加

$$1+z = \frac{a(t_{\text{obs}})}{a(t_{\text{em}})}$$

例： $z=6.4$ QSO, $a \sim a_{\text{obs}}/(1+6.4)$

✓退行速度（ z 比较小的时候）： $v = cz$

例： $3c273@z=0.158$, $v \sim cz \sim 47000 \text{ km/s}$,
 $d \sim v/H_0 \sim 650 \text{ Mpc}$, 比仙女座星系远1000倍

稳恒态宇宙学模型

✓出发点：膨胀宇宙学模型中的年龄问题；不喜欢宇宙起源于某瞬时

✓1948: Herman Bondi, Thomas Gold, Fred Hoyle

✓完美的宇宙学原理：在任何时刻，在宇宙的任何位置，宇宙都是一样的，宇宙没有中心

✓宇宙在膨胀，星系在分离，新的物质（氢原子）不断在中间产生，最后形成新的星系，星系的密度不变

✓宇宙既没有开始，也没有结束

稳恒态还是大爆炸？

✓60年代，观测检验：比较不同红移处星系的密度

✓剑桥大学的Martin Ryle，发现过去射电星系的密度要高于现在射电星系的密度，不支持稳恒态模型

✓1963年，宇宙微波背景的发现，支持宇宙的大爆炸模型

大爆炸宇宙学

- ❖ 1940s Gamov和Alpher首先提出宇宙起源于约100-150亿年前一次猛烈的巨大爆炸
- ❖ 宇宙的爆炸是空间的膨胀，物质则随着空间膨胀（宇宙是无中心的）
- ❖ 随着宇宙膨胀和温度降低，构成物质的原初元素相继形成
- ❖ $t \sim 38$ 万年，光子与电子退耦，那时， $z \sim 1100$, $T \sim 3000 \text{ K}$, 目前： $\sim 3 \text{ K}$ 温度的宇宙背景辐射 (Gamov: $\sim 5 \text{ k}$)



George Gamov

宇宙微波背景的发现 (138亿年前宇宙的化石)

- R.H迪克60年代寻找5K CMB
- 1963年, 彭齐亚斯、威尔逊探测到信号
- 1964年, 排除噪声
- 1965年, 确认为宇宙的背景辐射($\sim 3.5 \pm 1.0 \text{K}$)
- 1978年获诺贝尔物理学奖

有心栽花花不开, 无心插柳柳成荫

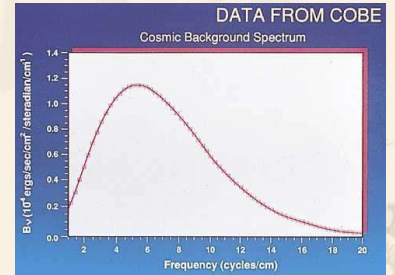


COBE卫星

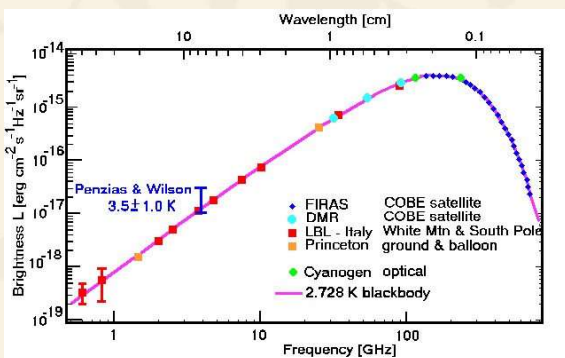
- ❖ 1989年发射的宇宙背景探测仪(COBE)对0.5毫米-10厘米波段的宇宙背景辐射进行观测
- 高度各向同性
- 2.73 K黑体辐射



Cosmic Background Explorer



宇宙微波背景辐射的谱



暴涨 (Inflation)

- ✓ 1970s, 发现大爆炸宇宙学模型存在一些问题

1. 平坦性问题
2. 视界问题



- ✓ 暴涨模型 (能量标量场主导): Alan Guth 1979

1. 可见的宇宙起初的大小和质子差不多大
2. 10^{-35} 秒之后, 开始指数膨胀, 10^{-32} 秒时, 宇宙尺度约为1米, 增长了 10^{26} 倍 (原初扰动→大尺度结构的种子)!
3. 暴涨之前, 可见宇宙足够小, 热平衡; 暴涨使得空间“变平” (类比膨胀气球表面)、粒子视界指数膨胀

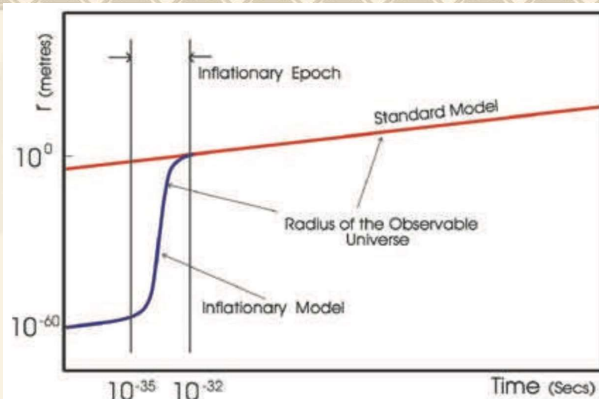


Figure 9.7 The inflationary epoch in the early universe.

大爆炸与原初轻元素的合成

- ✓ 暴涨是大统一破缺引起的宇宙真空态相变 (假真空态→真真空态), 释放大能量, 过程中能量密度基本不变, 驱动宇宙尺度因子指数膨胀, 再转化为基本等量的物质和反物质粒子

$$\frac{n_B - \bar{n}_B}{n_B} \sim 10^{-9}$$

- ✓ 随着宇宙的膨胀, 正反物质湮灭: 少量的重子物质 (主要以夸克形式存在), 处于高温辐射场中
- ✓ $t \sim 1\text{s}$, 夸克形成基本等量的质子和中子
- ✓ 自由中子不稳定, 随着宇宙膨胀, 中子数会少一些
- ✓ $t \sim$ 三分钟, 质子和中子形成He核+剩余的质子+电子
- ✓ 原初核合成: 质量丰度25%He+75%H (“原初”孤立小星系)

Nature封面：宇宙物质起源的证据找到了！12国团队耗时十年，中微子不对称揭示宇宙秘密

关注前沿科技 量子位 4月16日

2020/04/16

CP表示电荷共轭和宇称联合变换

人们已经找到了正物质最终如何击败反物质的原因之一。

来自日本、美国、俄罗斯等12国的T2K团队，经过十年的累计观察发现，是中微子打破了这种对称性，而宇宙终极的不对称性可能就藏在中微子的不对称中。



前苏联原子物理学家安德烈·萨哈罗夫 (Andrei Sakharov) 曾就宇宙物质起源问题提出过一种机制。

他猜想的原因之一，就是物质和反物质的对称性并不完美，分子表现出的特性略有不同。这种差异可能导致宇宙大爆炸后的冷却过程中，物质过剩。如果宇宙后来的正反物质不一样多，就需要满足“萨哈罗夫条件”，其中的一条就是CP对称性的破坏。

CP对称性的意思是，把一个粒子的电荷换成与之相反的电荷，同时把粒子的自旋（自转方向）翻转过来，物理定律应该保持不变。

如果正反物质不一样多，必须在宇宙诞生初期CP对称性被破坏。

其实1960年代以来，物理学家已经发现了CP对称性破坏，但多是其他一些较少的粒子。

科学家们期望着有更大的CP不对称被发现，直到最新中微子实验结果的发表。

而来自T2K合作组织的这项最新研究成果，在极大程度上满足了这一假设条件。

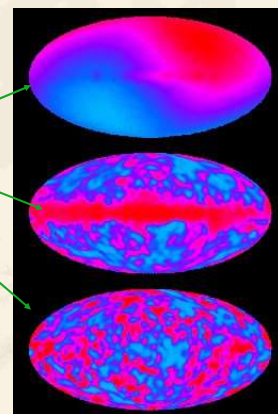
这是人类首次捕捉到中微子中的CP破坏现象。在中微子中发现CP对称性破坏，暗示着更大的不对称性正在早期的宇宙中发挥作用。但中微子本身还是太渺小了，无法完成这项工作。

但是三种“味道”的中微子都可能与一种叫做“惰性中微子”的暗物质联系在一起，它们之间的相互作用会打破宇宙的平衡。

微波背景辐射的各向异性

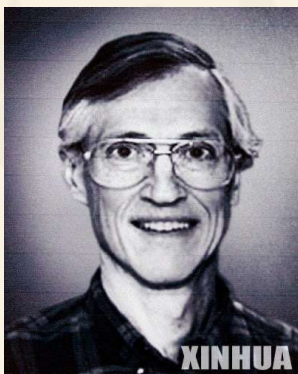
扣除微波背景辐射的偶极不对称和银河系尘埃辐射的影响后，微波背景辐射表现出大小为十万分之几的温度变化： $\sim 6 \times 10^{-5} \text{K}$ 。

这种细微的温度变化表明宇宙演化早期存在微小的不均匀性，正是这种不均匀性导致了星系的形成。



$\Delta T \sim 6 \times 10^{-5} \text{K}$

2006 诺贝尔物理学奖：约翰·马瑟和乔治·斯穆特 宇宙微波背景辐射的黑体形式和各向异性



约翰·马瑟



乔治·斯穆特

✓ $t \sim 38$ 万年，光子能量足以电离原子，等离子态

1. 辐射场与物质处于热平衡，辐射场为黑体谱
2. 等离子体非常均匀，因为光子“搅拌”

✓ 冷却，氢原子形成，光子退耦。开始时物质均匀分布，均匀物质在引力的作用下开始成团，形成恒星和星系 ($6E-5 \rightarrow$ 需要 $t \sim 80-100$ 亿年)。但实际上，星系在 $t \sim 4$ 亿年的时候 (甚至更早时) 已经存在！

✓ 暗物质—非重子物质，与辐射场无相互作用，大爆炸之后就开始在引力的作用下成团，重子物质和辐射场退耦之后，重子物质开始在暗物质的引力势阱中快速成团，形成星系

CMB的不均匀性—暗物质的影响

✓ Sachs-Wolfe效应(1967): CMB光子在暗物质引力势阱中的引力红移效应

✓ 对应毫米波观测，受水蒸汽吸收影响。卫星：COBE、WMAP、Planck；气球观测：Boomerang和Maxima；高海拔的沙漠：CBI和VAS；南极：DASI、SPT



Figure 9.9 The cosmic background imager in the Atacama Desert, Chile. Image: CBI/Caltech/NSF.

观测CMB可以给出宇宙曲率的信息

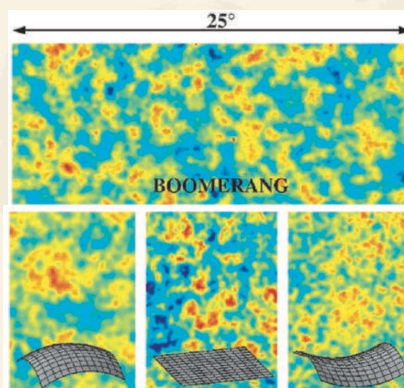


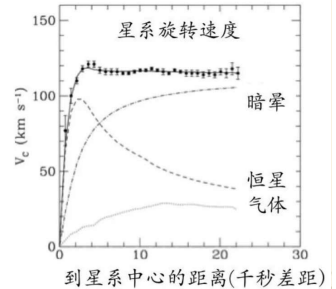
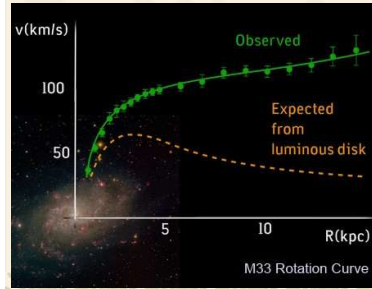
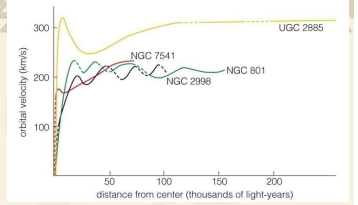
Figure 9.10 Boomerang observed fluctuations in the CMB that are consistent with space being 'flat'. -(Above) Boomerang map. (Below) What would be observed with positively curved, flat and negatively curved space. Image: The international BOOMERANG consortium.

暗物质

- ✓ 暴涨和CMB观测给出宇宙是平坦的，如果精确测量 H_0 ，就可以给出可见宇宙的平均密度和总质量
- ✓ 宇宙中总的发光物质只占总质量的~1%!99%看不见!
- ✓ Massive Astronomical Compact Halo Objects (不发光的重子物质 褐矮星、中子星、黑洞等?)
- ✓ 重子物质只占: ~4%
 1. 大爆炸产生的轻元素(氢、氦、锂及其同位素)的相对丰度依赖于重子/光子比, 给出~4%上限
 2. 如果有大量MACHOs, 会产生微引力透镜, 最终被观测到(但是没有); 无法解释missing matter.

暗物质的证据

- ✓ 漩涡星系的旋转曲线



暗物质的证据

- ✓ 漩涡星系的旋转曲线
- ✓ 星系团的动力学 (Zwicky 1930s, Coma)
- ✓ 星系中的热气体俘获: 椭圆星系NGC4555中的总质量10倍于恒星的质量, 300倍于气体云的总质量

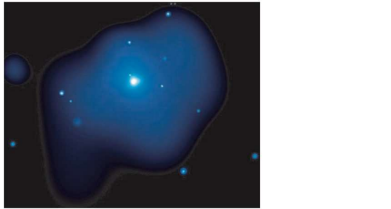
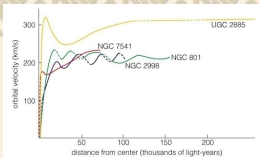


Figure 9.11 NASA's Chandra X-ray satellite image of hot gas surrounding the galaxy NGC 4555. Image: NASA/CXC/E.O'Sullivan et al.

引力透镜

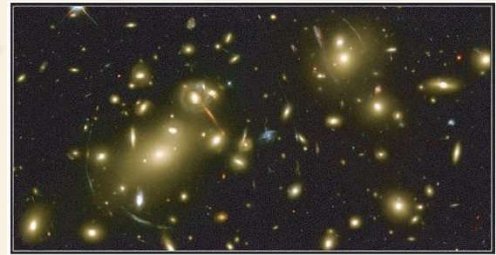


Figure 9.12 The Abell 2218 cluster imaged by the Hubble Space Telescope. Image: NASA, A. Fruchter and the ERO team, STScI.

- ✓ 暗物质的比例: 最直接的方法为分析CMB fluctuations, ~23%; 剩下的~73%是什么?

暗物质是什么?

- ✓ 目前仍然不清楚!
- ✓ 粒子物理的标准模型没有预言暗物质的存在, 新物理?
- ✓ 热暗物质(中微子?)和冷暗物质
- ✓ 宇宙结构形成的模拟与CMB的不均匀性都需要冷暗物质占主导
- ✓ 轴子(?): 轻、中性, Peccei-Quinn理论预言(1977), 数密度: $\sim 10^{13}/\text{cm}^3$, 在强磁场中可以与光子相互转化
- ✓ WIMP(?): Weakly Interacting Massive Particles (例如: neutralino未被发现)



图9. NGC-1052-DF2 (<https://hubblesite.org/contents/media/images/2018/16/4139-image.html?news=true>)



暗物质缺失的矮星系

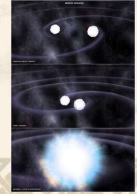
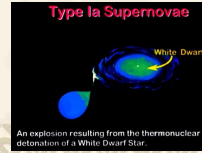


基于大规模星系巡天刻画暗物质分布大图

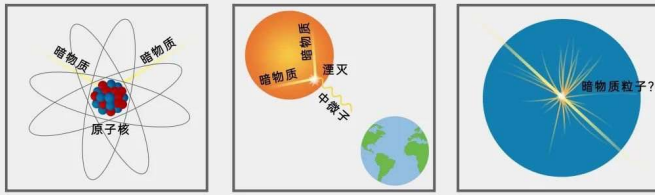
2016年, 耶鲁大学的Van Dokkum等人发现了一些面积不小但亮度却很低的星系, 他们称之为超暗星系 (ultra faint galaxy)。在测量了这些星系的质量后发现, NGC1052-DF2 和NGC1052-DF4 这两个星系很奇特——它们的质量几乎等于其中发光恒星的质量, 也就是说其中并没有暗物质。暗物质理论可以假设这些星系在之前的某种相互作用中丢失了暗物质晕, 从而导致了这一现象。

暗能量

- ✓ 宇宙中~70%是暗能量：斥力，会使宇宙加速膨胀
- ✓ 开始时，辐射场占主导，接着物质占主导，在这两个阶段，宇宙减速膨胀。再接着暗能量占主导（近~60亿年以来），宇宙加速膨胀
- ✓ 暗能量存在的证据：用SNIa作为标准烛光定距离（SNIa具有基本确定的绝对光度和光变曲线），SNIa光度很大，可以测量~1000Mpc的距离（造父变星：~10-20Mpc）



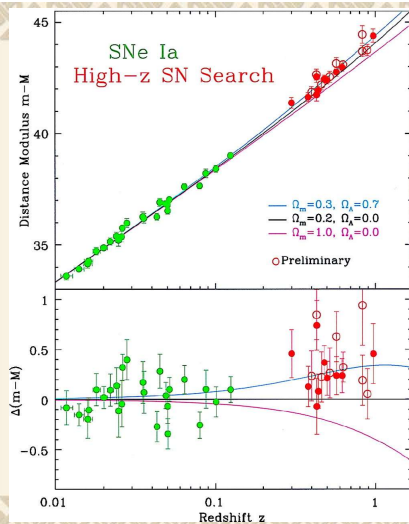
探测暗物质粒子的三种途径



直接探测：
在地下实验室捕捉暗物质与原子核碰撞的证据

间接探测：
在伽马射线和中微子等数据中寻找暗物质粒子的湮灭或衰变的产物

对撞机探测：
在对撞机中让高能粒子束对撞，直接产生暗物质粒子



2011诺奖：观测遥远超新星发现宇宙加速膨胀



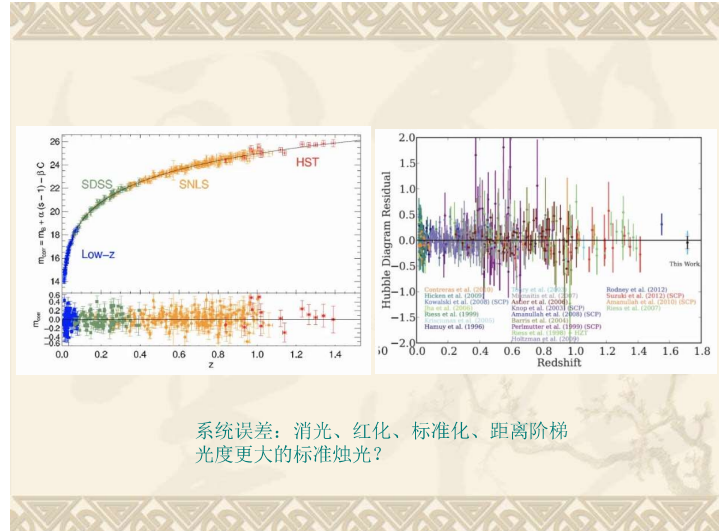
珀尔马特



施密特



里斯

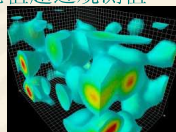


暗能量的本质

- ✓ 暗能量均匀，密度极低~ $10^{-30}g/cm^3$ ，仅有重力（斥力）作用，很难探测
- ✓ 真空能？Heisenberg不确定原理允许粒子不断产生和消失，真空不是一无所有，而是充满虚粒子对！理论值超过观测值120个数量级！

$\Delta E \times \Delta T$ is of order $h/2\pi$
where h is Planck's constant ($6.626 \times 10^{-34} m^2 kg s^{-1}$).

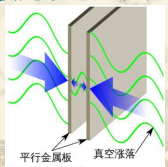
1. 例如：虚质子对， $E=3 \times 10^{-3} erg, t \sim 3 \times 10^{-25} s$
2. 真空能实验：Casimir效应，真空中两金属板足够近，小于虚粒子对的波长，两金属板之间相互吸引



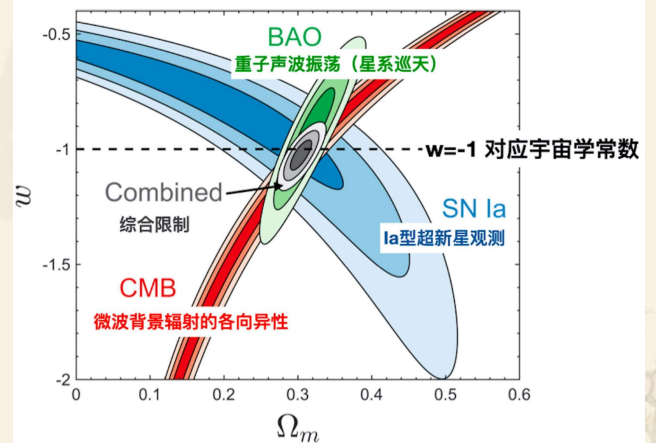
- ✓ 最简单的解释-真空能就是宇宙学常数：

Λ CDM模型

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$$



暗能量的状态方程参数



需要更多更好的天文观测来限制暗能量状态方程及其演化

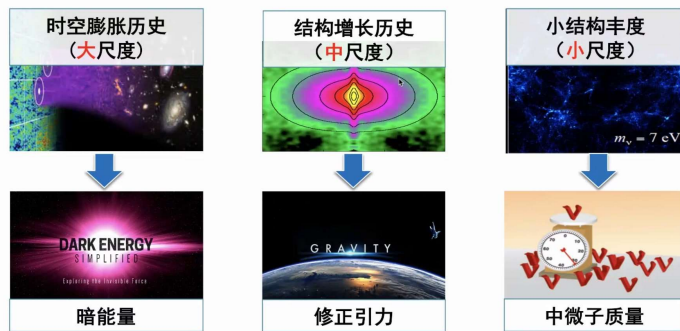
暗能量之谜是众多宇宙学观测项目的主要驱动之一

更精确地限制暗能量参数

- 通过探测宇宙的膨胀历史（距离-红移关系）
 - 标准烛光（Ia型超新星）
 - 标准尺子（重子声波振荡）
 - 标准汽笛（双星合并引力波）
 -
- 通过探测宇宙的结构形成历史（成团性-红移关系）
 - 大尺度结构的弱引力透镜效应
 - 星系成团性的红移畸变效应
 -

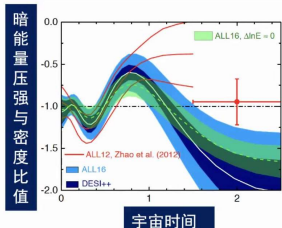
(credit: Zheng Zheng)

光谱星系巡天：关键的宇宙探针



(赵公博)

首次在国际上发现暗能量动力学观测证据



nature astronomy LETTERS
 DOI: 10.1038/s41550-017-0261-6
Dynamical dark energy in light of the latest observations **Zhao et al, 2017, Nature Astronomy, 1, 627**
 Gong-Bo Zhao^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Marco Raveri¹¹, Levan Pogosian¹¹, Yuting Wang¹¹, Robert G. Crittenden¹¹, Will J. Handley¹², Will J. Percival¹³, Florian Beutler¹⁴, Jonathan Brinkmann¹⁵, Chia-Hsun Chuang¹⁶, Antonio J. Cuesta¹⁷, Daniel J. Eisenstein¹⁸, Francesco-Siu Kitaura¹⁹, Kazuya Koyama²⁰, Benjamin L. Haughey²¹, Robert C. Nichol²², Matthew W. Page²³, Sergio Rodriguez-Torres^{24,25}, Ashley J. Ross²⁶, Graziano Rossi²⁷, Ariel G. Sánchez²⁸, Arman Shafieloo^{29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}, Rita Tojeiro³⁵, Jose A. Vazquez³⁶ and Hanyu Zhang³⁷

首次发现暗能量动力学性质 (3.5σ)
 引用 300+ 次
 目前引用最高的BOSS一作论文



(赵公博)

宇宙的组成



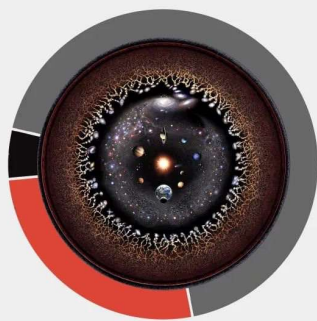
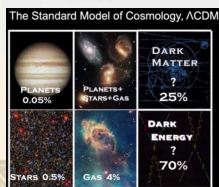
宇宙成分：
 源于CMB、SNIa、H0、星系空间分布等观测结果

宇宙平均质量/能量密度：5.7质子每立方米

宇宙的组成

根据爱因斯坦著名的方程 $E=mc^2$ ，能量 (E) 和质量 (m) 有着深刻的联系。因此，天文学家通常会用质量和能量密度来描述宇宙的成分。

- 暗能量：69%
- 普通物质：5%
- 暗物质：26%

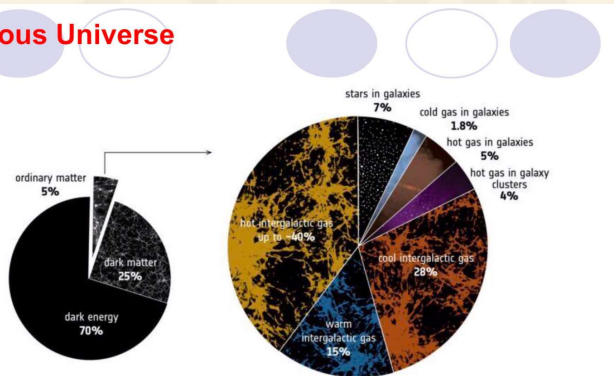


图片来源来源：Wikimedia commons user Unismooobjeto

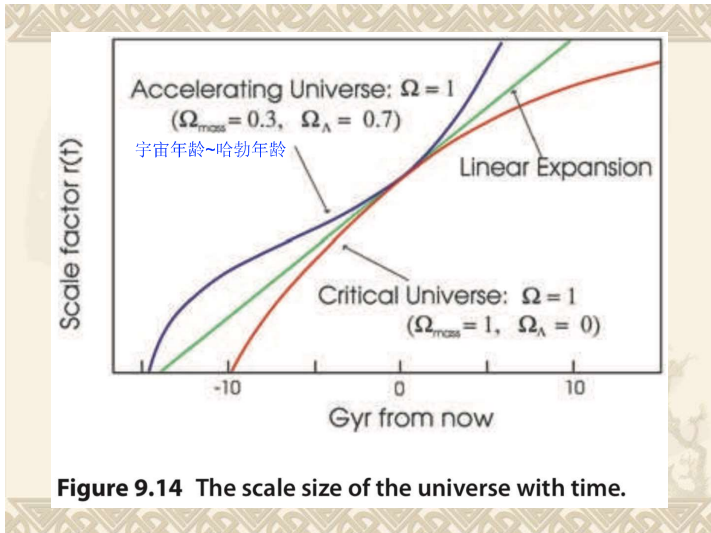
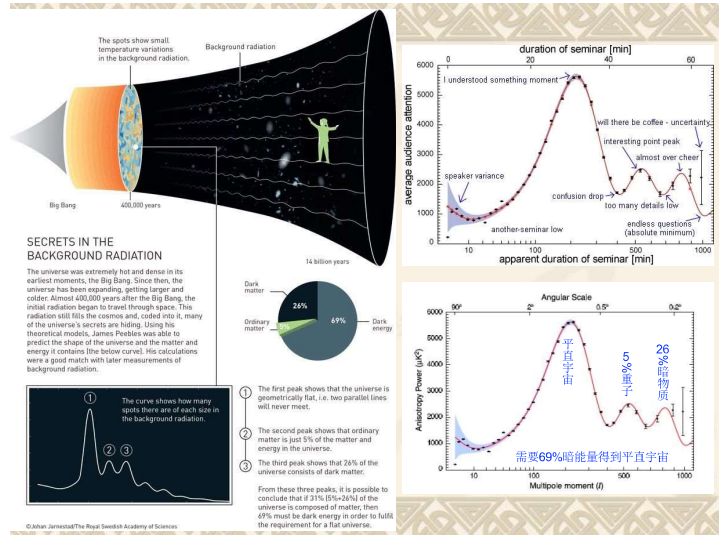
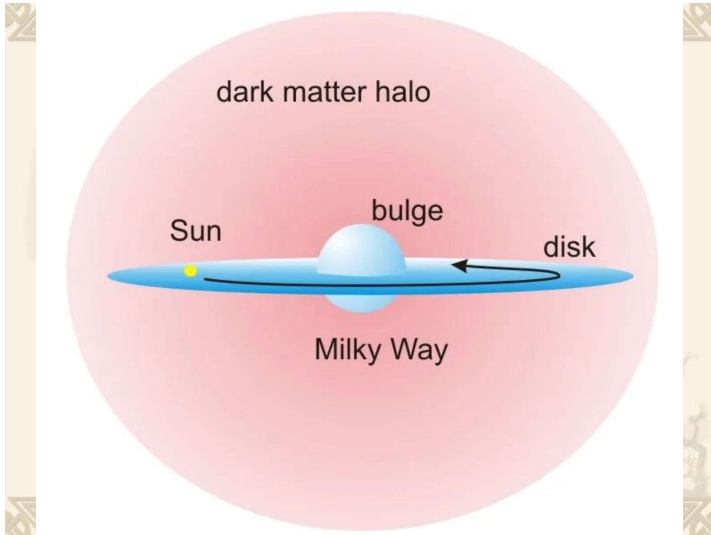


宇宙中的随机场与BINGO望远镜 (Filipe Batoni Abdalla 伦敦大学学院)

Gaseous Universe



<https://sci.esa.int/web/xmm-newton/-/60430-the-cosmic-budget-of-ordinary-matter>



适合智慧生命生存的宇宙

✓ 人择原则: *Just Six Numbers* by Martin Rees

我在故我思——人择原理

宇宙之所以像现在这样运转，是因为如果不这样，我们便不会在这里提出这个问题……

——布莱恩·葛林

(蔡一夫 中科大)

适合智慧生命生存的宇宙

✓ 人择原则: *Just Six Numbers* by Martin Rees

- ✓ 1、 Ω : 如太大，宇宙很快塌缩，生命没时间演化；如太小，星系与恒星不能够形成
- ✓ 2、 Λ : 如太大，阻止恒星与星系的形成
- ✓ 3、CMB的不均匀性-涨落 ($\sim 10^{-5}$): 如太小，暗物质的聚集度更小更松散导致星系的结构比较松散，恒星的形成不有效，行星系统就不能形成；如 $< 10^{-6}$ ，星系就根本不能形成！如太大，比星系更大的结构将随处形成，并塌缩成超大质量黑洞（没有生存处）！
- ✓ 4、空间的维数3维: 2维/4维度都不适合生命存在

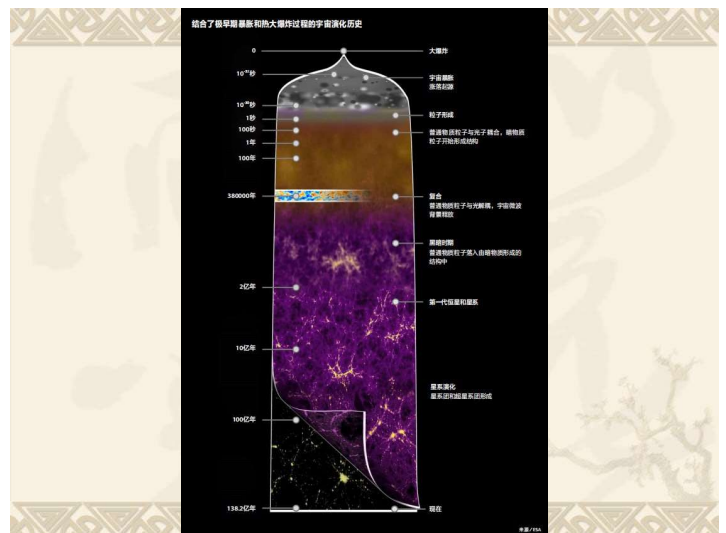
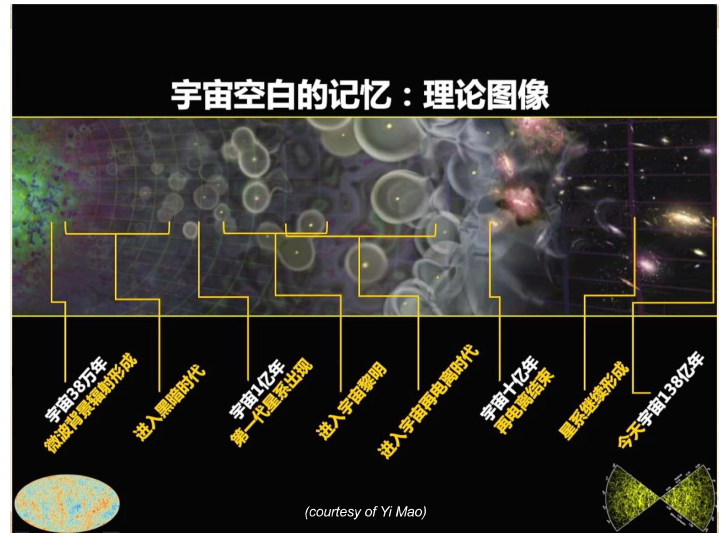
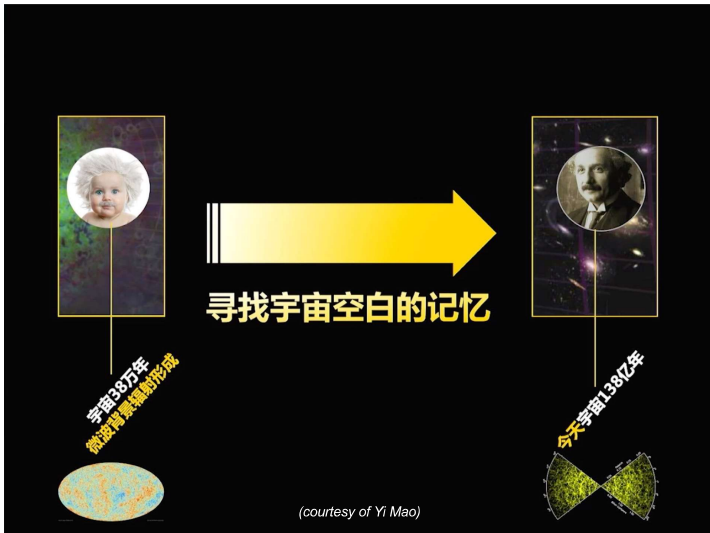
- ✓ 5、引力常数G: 引力/电磁力 $\sim 10^{-36}$, 如太大，太阳和行星变小，星系很小、挤满恒星，恒星相互作用，不适合行星的形成；小恒星很快耗尽核燃料，生命来不及演化
- ✓ 6、氢聚变产能率 ~ 0.007 ; 如太小， ~ 0.006 ，氦不稳定！反应进行不下去；如太大， ~ 0.008 ，核力比电磁力强，质子-质子在一起，不能留下氢原子，作为恒星的燃料；影响3 α 过程，从而影响C的形成，生命需要碳！
- ✓ 多重宇宙（尚无观测证据）？为什么物理常数恰好适合生命的演化？多重宇宙，在我们宇宙的境界之外，我们的宇宙是其中最幸运的一个！

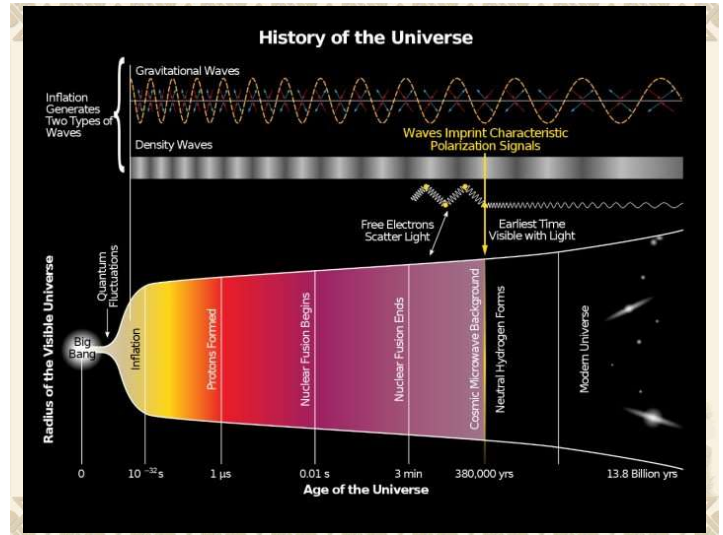
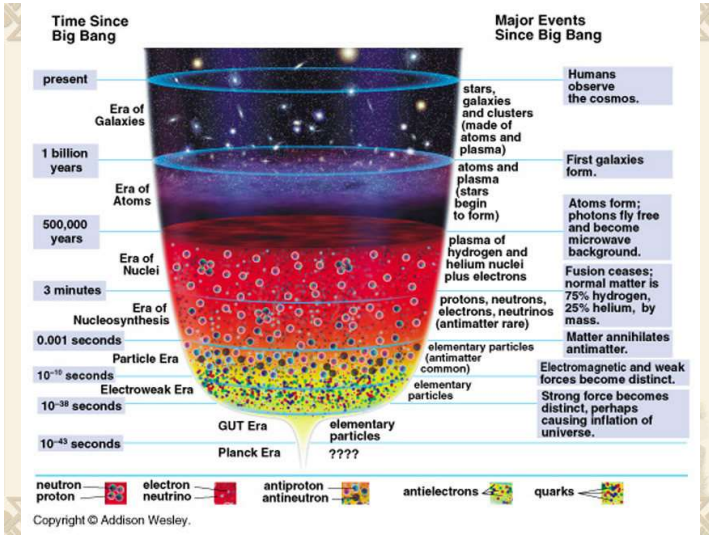
“解释不通，穿越时空。逻辑不够，平行宇宙。☺”



宇宙的命运

- ✓ 目前宇宙加速膨胀
- ✓ 假设在 $t \sim 1000$ 亿年，我们将看到更远处，但其它星系由于宇宙加速膨胀早已移出我们的视界，除了自己的星系（本星系群合并成一个星系），宇宙空无一物！
- ✓ 那个时候无法了解宇宙的信息：CMB温度太低、信号太弱，无法探测
- ✓ 可以从星系的化学丰度知道星系的年龄，但是，无法知道宇宙的演化（仅有自己的星系），如是否起源于Big Bang
- ✓ 目前暗物质和暗能量相当，且CMB易测，我们从而推知暗能量存在及宇宙从大爆炸以来的演化和将来失控膨胀的命运
- ✓ 如果宇宙太年轻，暗能量不起主要作用，无法知道暗能量的存在；如果太老，无法知道宇宙的膨胀及暗能量的存在，恒星都已死亡，关于宇宙形成与演化的所有证据都已消失！





论文标题: Planck evidence for a closed Universe and a possible crisis for cosmology
 作者: Eleonora Di Valentino, Alessandro Melchiorri, Joseph Silk
 期刊: *Nature Astronomy*
 发表时间: 2019/11/04

瓦伦蒂诺等人最近的论文分析了观测宇宙微波背景辐射的普朗克卫星的数据。普朗克卫星的望远镜测量了过去138亿年中，宇宙微波背景辐射“引力透镜化”的程度，以此测量宇宙的平均密度。具体而言，他们研究的是这些宇宙微波背景辐射光子。这些光子在飞向地球的过程中，遇到的物质越多，它们的方向就越无法清晰地反映它们在早期宇宙中的起点。在卫星观测数据中，这样的现象呈现的是模糊的效果。根据他们对数据的分析，宇宙的平均密度可能比以前估计的临界密度高5%，也就是说，在宇宙中平均每立方米有6个质子质量，而不是5.7个。

根据这项研究，宇宙空间可能是一个封闭的三维球面。而在此之前，基于WMAP卫星对宇宙微波背景辐射的观测结果，以及2013年普朗克卫星的第一批数据，物理学家建立了名为LAMBDA-CDM的宇宙学标准模型。在那个模型中，宇宙是平坦的。因此我们可以说，最新的研究提出的结论是颠覆性的。

- 大撕裂: 宇宙中的所有物质最终将瓦解为不受束缚的基本粒子和辐射**
 “大撕裂” (Big Rip) 假说认为如果暗能量的密度随着时间增加而增加，不管宇宙的空间结构是闭合、平直还是开放的，随着宇宙的不断膨胀所有物质（甚至时空本身）最终都会被逐渐撕碎。如果暗能量是状态方程小于-1的“幽灵暗能量” (phantom dark energy)，那么它的密度随着时间的推移而不断增加，从而导致宇宙膨胀的速度越来越快，最终就会使得宇宙中的所有物质都瓦解为不受束缚的基本粒子和辐射。
- 大冻结: 宇宙温度最终将趋于绝对零度**
 “大冻结” (Big Chill/Big Freeze) 也被称为“热寂” (heat death)。这种假说认为随着宇宙的膨胀，气体作为恒星形成所必需的材料，变得越来越稀薄，最终会不足以支撑新的恒星形成。随着恒星形成的停止，宇宙温度越来越低，并最终演化到一种没有热力学自由能的状态，也就是达到热力学平衡（即具有最大熵），同时宇宙温度也将趋近（但并未达到）绝对零度（零下273.15摄氏度），从而任何宏观物理过程和生命都不复存在。
- 大坍塌: 物质的引力作用使得宇宙最终停止膨胀并发生坍塌**
 “大坍塌” (Big Crunch) 假说认为由于物质的引力作用宇宙的膨胀速度会不断变慢，从而最终将停止膨胀并发生坍塌。然而在坍塌之后又将发生什么尚不能确定。其中一种可能性就是宇宙坍塌到它的初始状态并再次发生大爆炸，从而使得宇宙处于“大爆炸”到“大坍塌”再到“大爆炸”这样一种循环的状态。从目前的宇宙学观测来看，产生负压的暗能量肯定存在，而且它的密度高于物质的，因此宇宙的膨胀不会停止，“大坍塌”是不太可能发生的。

示意图展示了宇宙终结的三种可能方式。

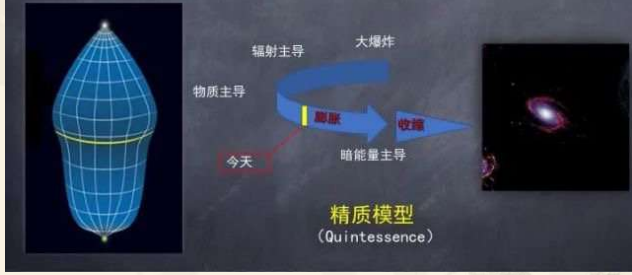
反弹宇宙学 (马潇汉, 蔡一天 中科大)

扰动理论在暴胀宇宙学的研究过程中不断发展，在宇宙学理论中扮演着至关重要的角色，是连接理论与观测的重要桥梁。此外，随着对暴胀的深入理解，物理学家逐渐意识到，在这个学说中，大爆炸奇点依然是不可避免的。这意味着暴胀本身是不完整的理论，我们不知道暴胀如何开始，也不知道在此之前又发生了什么。同时，人们也开始反思，暴胀是不是描述极早期宇宙的唯一可能？

在这个背景下，一系列的替代图像应运而生，其中最具有代表性的就是反弹宇宙学。实现反弹宇宙学图像的理论模型有很多，例如加拿大麦吉尔大学的罗伯特·布兰登伯格 (Robert Brandenberger) 教授与英国朴茨茅斯大学的大卫·沃兹 (David Wands) 于1999年提出物质反弹模型、中国科学院高能所的张新民研究员及团队于2007年提出的精英反弹模型等。反弹学说同样可以解释热大爆炸宇宙学所面临的初始条件疑难。在这类理论图像中，大爆炸之前的宇宙处于一个收缩过程，体积越来越小，直到某一时刻宇宙收缩到一个极小值，然后反弹进入标准的热大爆炸膨胀阶段。由此可见，反弹学说不仅继承了热大爆炸宇宙学的成功之处，还避免了那个会让宇宙学家头皮发麻的时空奇点，进一步推动了热大爆炸宇宙学的理论发展。

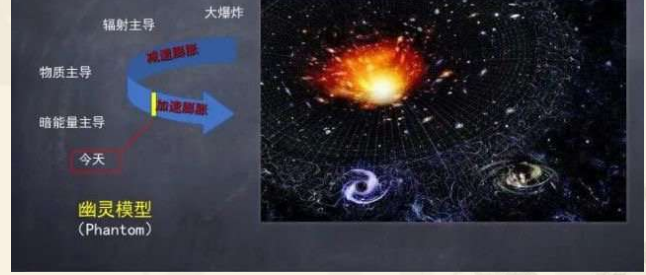
反弹宇宙学 / Bonoguore

宇宙的终极命运——大坍缩



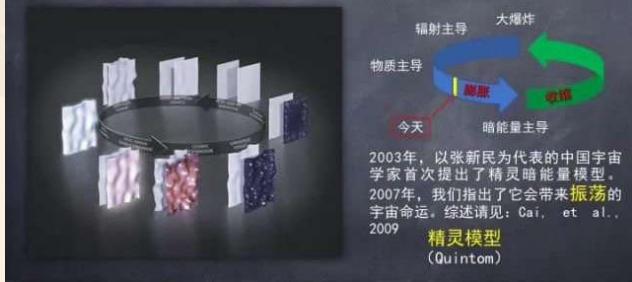
(蔡一夫 中科大)

宇宙的终极命运——大撕裂

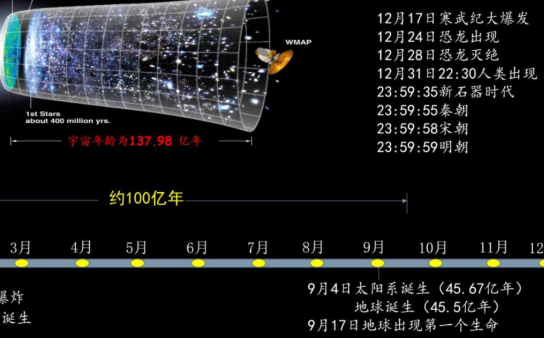
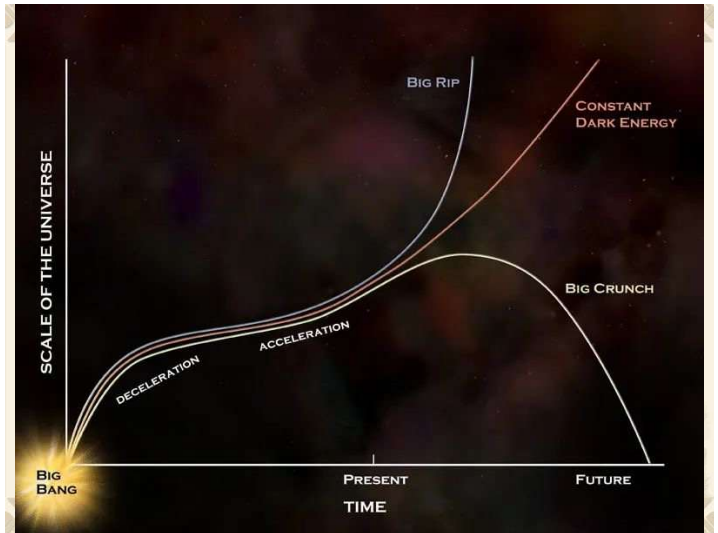


(蔡一夫 中科大)

宇宙的终极命运——循环/振荡宇宙



(蔡一夫 中科大)



宇宙的形成演化时标示意图 | 图源: 改编自NASA

(蒋云 紫金山天文台)