

第0章

第1章

1. 前言

哥白尼原理：“人，作为观测者，没有道理处在一个最特殊的位置上。”

2. 太阳系

太阳系的距离标度通过雷达对金星测距来确定

轨道周期：观察其在天空中的位置

行星半径：测量行星的视大小

质量：有卫星的容易测量；水星和金星质量测定不准确

自转周期：表面特征随自转交替变化（困难）

太阳系年龄：47亿年

1天文单位=1.495978707×10¹¹米=8光分

太阳系是巨大的。从太阳到海王星（30AU）轨道以外的柯伊伯带的距离约**50AU**，超过100万倍

地球半径。太阳位于（或非常接近）椭圆（近圆）一焦点，太阳系在100 AU的尺度非常扁平

所有行星绕太阳**公转轨道方向相同**；**除了水星**（与黄道面的夹角大约为7°），行星轨道几乎在**同一平面上**

提丢斯-波得定则 $m=0.4+0.3\times 2^n$ (AU)

水星、金星、地球和火星，与地球的平均密度相仿，它们总体是岩石成分，被称为类地行星

类地行星都有大气，但大气成分和密度不同

地球是唯一在大气中有氧气，在表面上有液态水的行星。地和火有卫星，但水星和金星没有地球和火星自转周期~24h；水星和金星自转周期~几个月；金星的自转方向与其他行星相反

木星、土星、天王星、海王星，密度比类地行星低得多，总体上是由气态或液态的氢和氦组成

类木行星互相之间距离远且远离太阳；是大的气态行星，含有大量的氢和氦

类木行星没有固态表面；稠密的大气随着深度而密度增加，最终与内部的液体融合在一起

类地行星即便有磁场也很微弱；而类木行星都有强磁场

类木行星都含有巨大而高密度的“**类地**”核心，质量大约为10~15倍地球质量

类地行星只有三颗卫星；类木行星**每颗都有许多卫星**；卫星们彼此不一样，跟月球也不一样。

所有的类木行星都有环；而类地行星都没有。

无数结实的岩石和冰块，大多体积较小。它们都绕着太阳转，许多轨道偏心率很高

行星际物质(宇宙中的“碎片”)：小行星、柯伊伯带天体、彗星；弥漫在行星际空间中的行星际尘埃颗粒

太阳系特征：

每颗行星在空间中相对独立。行星的轨道离中心太阳的距离逐渐变大，不聚集在一起。**每个行星到太阳的距离往往是其内侧邻居到太阳距离的两倍**

行星的轨道几乎是**圆形的**。各行星的轨道都接近于一个完美的圆，**除了水星**

行星的轨道**几乎位于同一平面上**。行星轨道划出的平面被准确地对准，仅水星有一点异常

行星的公转轨道方向与太阳自转的方向一致。几乎太阳系中的所有大尺度运动(彗星轨道除外)

都是在同一平面上，具有同样的公转方向

行星系统是**高度分化**的。类地行星密度高、大气适量、自转速度慢，以及很少或根本没有卫星；类木行星密度低，大气浓密

彗星是主要存在于太阳系外围的大块的冰，含有非常早期的太阳系形成演化阶段的线索。

小行星是很古老的，并表现出一系列既不像内行星又不像外行星或它们卫星的特点；是由古老的材料组成的。它们均小于月球。其中大部分在一条位于火星和木星轨道之间带状区域。

柯伊伯带是**超出了海王星轨道**的小行星大小冰天体集合；冥王星是柯伊伯带中最大成员

奥尔特云中的彗星是原始冰质碎片，轨道不在黄道面上，主要存在于距离太阳很遥远的地方；

奥尔特云是外太阳系完全不同的部分

星云理论：大型星云在自身引力影响下开始收缩，变得更密和更热，最终在中央形成一颗恒星（太阳）。随着太阳形成，行星和它们的卫星在星云冷的外围区域形成。行星是恒星形成过程中的副产品。由于角动量守恒，星云随着收缩而旋转加快。离心力倾向于在垂直于旋转轴的方向上反抗收缩，于是导致星云沿旋转轴的坍缩更快。最终形成了一个扁平形状的原始太阳系。

行星从这些旋转的原料中形成。关于太阳星云的崩溃和扁平化的描述是正确的，但**气体盘不会形成后来能演变成行星的物质团块。**

凝聚理论：以星云模型为基础，结合星际化学信息的新理论。关键是**太阳星云中已经存在星际尘埃**。尘埃可以有效地以红外辐射的形式带走热量，有利于气体等冷却。星云冷却，其分子移动速度变慢，内部压力降低，更容易在引力的影响下收缩尘埃作为凝结核，吸附其他原子，形成质量越来越大的尘埃颗粒，加快聚集足够多的原子形成行星。凝聚核的形成加速第一批小团块物质形成过程，小团块吸附其他团块快速成长。团块越长越大，表面积增加，横扫新物质的速度大大加快，形成了几百千米大小的“星子”。

星子的引力拉拽已强大到足以影响它们的邻居，星子的增长速度加快，形成较大的天体；较大的天体有较强的引力，最终几乎所有的原始

材料都被扫成了几颗大的原行星。(类地行星和类木行星之间的区别:原始太阳系在引力作用下收缩,逐渐变热。中心附近的密度和温度最大,外围区域温度则要低得多。而尘埃被摧毁的程度依赖于温度。)

总结: a) 太阳系云收缩后形成一个旋转盘; b) 尘埃颗粒作为凝聚核,与团块物质碰撞,成长为星子,聚合物和星子的成分取决于它们在星云中的位置; c) 经过几百万年,仍然在形成中的太阳的强烈星风开始驱逐云气,而一些在太阳系外围的大质量星子从星云中捕获了气体; d) 星子不断碰撞和成长。气态巨行星形成了,太阳成了一颗真正的恒星; e) 在超过约一亿年的过程中,星子聚合或被抛出,最终留下几个在近圆轨道上运行的大行星。随着原行星的增长,它们强大的引力场导致了許多星子和原行星之间高速碰撞。碰撞产生了大量小碎片,落入较大原行星。只有数量相对较少、大小10~100km的碎片逃脱行星或卫星捕获,成为小行星和彗星。约1000万年后,原始太阳系演变成8颗原行星、几十颗原卫星和1颗居于中心的发光的原太阳。凝聚理论植根于星云理论中,并考虑了**气体星云中含有尘埃和太阳加热**对行星形成过程的影响。太阳星云的位置(温度)决定着星子和行星的成分。

所有行星都被近距离探测过了;自动探测器同时还造访了许多彗星和小行星

金星:比探测任何一个其他行星的探测器都多,苏联、美国、欧洲

木星:先驱者10号、11号和旅行者1号2号。旅行者2号接着探测了天王星和海王星—**引力弹弓**。引力弹弓,即引力辅助在飞行中的示意图。速度变化幅度可以高达两倍行星轨道速度。旅行者2号利用了木星,土星、天王星和海王星的引力弹弓效应。

第2章 (i)

3. 类地行星

地球 近日点:147百万千米;远日点:152百万千米

公转一年=365.25天;自转一天=23小时56分

μ 轨道倾角:23.5度,季节

太阳日比恒星日长4分钟。太阳每24小时在天空中转一圈星星在天空中转一圈的时间要少4分钟,即23小时56分钟恒星在天空中的位置每天都会略有变化:每天升起时间提前4分钟,每月大约有2小时(4分钟 \times 30=120分钟或2小时)

暗淡蓝点:由旅行者1号在距离太阳60亿公里处拍摄的地球照片。没有任何航天器比旅行者1号走得更远:1977年9月5日发射,飞越木星和土星;现在距地球约136天文单位

6个主要区域:核:内核、外核;地幔:厚而黏稠;地壳:大陆、海底;水圈:液态海洋;大气:四个分层;磁场:带电粒子

地球质量为 6.0×10^{24} kg、半径6400km平均密度 ~ 5500 kg/m³

大气:氧气21%,大量氧气的存在,使地球大气在太阳系中显得很独特 大气对流:天文观测视宁度平流层顶部附近有一层臭氧(O₃):臭氧是紫外线的良好吸收剂。气态大气层和磁层低于总质量的0.1%。臭氧层距离地面约25km处:太阳紫外辐射被臭氧吸收,臭氧层保护着地球上的生命免受外太空严酷环境的伤害。

在对流层内,随着海拔的升高,温度迅速降低,其上边界(平流层开始的地方)温度接近冰点以下50°C。

地球大气的起源:初始阶段,大气由**早期太阳系**中最常见气体的组成,包括氢、氦、甲烷、氨和水蒸气;低密度气体在地球形成后的几亿年左右就**逃离**地球进入太空;第二阶段,**火山活动**,地球把内部水蒸气、甲烷、CO₂、SO₂和含氮化合物排出。地球表面**温度下降**,水汽凝结,海洋形成。大部分CO₂、SO₂**溶解在海洋中或结合**在地表的岩石内。由氮气组成的大气慢慢地出现;最后阶段:**生命在海洋中出现**,生物体最终开始生产大气中的氧气;同时,臭氧层形成。**火山释放气体、太阳辐射和生命决定了地球现在的样子**。

温室效应:大气中气体对地球表面发射的红外辐射吸收和捕获,它使地球表面气温升高了40K。主要是因为水蒸气和二氧化碳分子的存在。它们非常有效地吸收红外线,加热地球。6种温室气体:二氧化碳、甲烷、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化合物(HFCs)、全氟碳化合物(PFCs)、六氟化硫(SF₆)。碳达峰,碳中和

地壳:几十千米厚。

地球内部探测:科拉超深钻孔:地球上最深的人造井,12,226米;地震波:地震波:从震中向外传播,携带着信息被地震仪检测和记录。探测内部结构地震主波(P波、纵波)交替扩展和压缩地核或地幔并通过它们传播;地震P波通常以5~6 km/s的速度传播,可以穿过液体和固体。次级波(S波、横波)穿越地球内部的速度为3~4km/s,但是,它们**不能穿过液体**,会被吸收密度和温度随深度增加:中心温度超过5000K;密度可达12 000 kg/m³。非均匀,中心有丰富的铁和镍;地幔铁-镁-硅酸盐混合物。地幔和地核间密度剧烈变化

地球形成于46亿年前,它通过**捕获周围的物质**增长质量。质量增长、引场加强,捕获的击中其表面的小天体越来越多;产生了大量热,地球**全部熔化**;并因为引力**逐渐收缩**;约38亿年前,地球继续被形成过程中遗留下来的碎片**密集轰击**,可能导致其已经冷却的表面再次成为深达几十千米的**完全熔融状态**(风和水的长时间侵蚀慢慢将地球早期阶段的痕迹抹掉)铀、钍、钷等重原子核**放射性衰变**从内部加热地球导致**内部液化**,这一效应允许较重的金属下沉到核心,而重量更轻的岩石则漂浮到表面。**早期的热源随时间减少**,地球逐渐冷却,形成坚硬的地壳和内部层状结构

磁层是环绕行星的一个区域,**太阳风粒子**被该行星的磁场困在该区域。远离地球的磁层被太阳风扭曲,一条长长的“尾巴”延伸至夜间地球一侧。磁层顶是向着太阳方向的磁层边界。地球磁场远远超出了地球表面。来自太阳风的带电粒子被地球磁场困住,磁层包含两个圆形的高能带电粒子带,被称为**范艾伦辐射带**;分别位于地表上空约3000 km和20 000km

地球磁场产生:由转动的、导电的、地球深处的液体金属核产生的。解释行星磁场产生的理

论, 被称为**发电机理论**。地球磁场由地球核心导电流体的快速转动产生, 无磁场保护生命可能永远不会出现

范艾伦辐射带的粒子往往能在靠近磁场线接近垂直地球的**南北磁极处逃出磁层**。它们与空气分子碰撞, 产生极光, 颜色丰富多彩: 大气分子与带电粒子碰撞时被激发, 回到基态, 发出**不同频率的可见光**

月地距离384 000km; 半径 1700km, $\sim 1/4$ 地球半径; 质量 $7.3 \times 10^{22} \text{kg}$, $\sim 1/80$ 地球质量; 平均密度 3300 kg/m^3 , 每年3.8厘米远离地球

中央核心的半径大约为330km, 非镍-铁核心。周围包围着大约400km厚的内月幔在内月幔之上是900km厚的外月幔, 最上方是30km厚的月壳

暗区和浅色区域组成: 黑暗区域不是海洋, 是月球早期的熔岩流动而形成的平坦区域, 称为**月海**。较亮的区域, 比月海高几千米, 称为**月球高地**。有许多陨石撞击形成的**环形山**。高地和月海的**组成及年龄有重要差异**: 高地主要由富含铝的岩石组成, 密度低 (2900 kg/m^3)。月海中的物质含有较多的铁, 颜色深、密度高 (3300 kg/m^3)。月球背面没有大型的月海, 几乎全是高地: 差异原因不清楚

引力太弱, 无大气

原因

月球**自转周期等于其绕地球公转周期**, 约27.3天: 月球在任何时候都保持只以一面对着地球。月地之间**引力相互作用**的必然结果: 正如月球引发地球潮汐一样, 地球也引起了月球上的潮汐隆起。因为地球比月球大得多, 地球对月球的引潮力比月球对地球的大 ~ 20 倍, 月球潮汐隆起相应较大。由于地球的潮汐力, 月球的形状被稍微拉长, 其长轴永远指向地球。月球已经被地球的**潮汐力**锁住了, 地球上永远只能见到月球的正面: 大部分太阳系中的卫星同样被其母星的潮汐力锁定。

地球上的风和水共同侵蚀着地球的表面, 地球表面板块永无止境的运动: 地球表面最古老的历史大多数都丢失了。月球上没有空气、没有水、没有板块构造, 也没有持续的火山或地震活动。月球刚形成时的地貌今天仍清晰可见: 研究月球撞击历史。陨石撞击: 由岩石或金属组成的流星体等星际碎片, 飞近并与月球碰撞, 产生大小不一的**陨石坑** (月球没有大气保护); 利用已知年龄 (放射性年代测定) 的月球岩石, 可以估计过去的撞击率: 发现在约40亿年前, 月球经历了长时间的猛烈的陨石轰击。支持太阳系形成的凝聚理论。

同源说: 月球地球在**密度和组成**方面都不同, 难以说明它们如何能起源于同一行星前物质 X
捕获理论: 月球在远离地球的地方形成, 后来被地球捕获。月球质量相对地球**太大**, 捕获月球是一个非常困难的事件, 甚至可能是完全不可能的 X

分裂说: 地球没有可能以如此之快的速度**自转**, 以至于甩出一个月球那么大的物体 X
撞击理论: 一个**较大的、火星大小的天体**, 与足够年轻的、熔融状态的**地球相撞**。碰撞比正面撞击要斜一些, 导致地球的物质脱落, 然后重新汇聚, 形成月球

如果在地球已经形成了铁芯的时候发生碰撞, 那么月球的确会由类似地球地幔的物质组成。铁芯就会遗留在地球上, 最终成为地球核心的一部分

(月球大小 距离, 视大小, 距离 反射镜, 质量 月球卫星?)

水星: 在其轨道的不同点, 会发生变化。当水星处于其**大距 (最亮位置)**时, 能拍到最好的水星照片 (显示出来“半个水星”, 凸月)。**类地行星中研究最少**

水星轨道半长轴平均 $\sim 0.4 \text{ AU}$, 偏离太阳角度不超过 28° (地球自转速度为 $15^\circ/\text{h}$); 一个晚上最多可见水星两小时 (只在黎明或者黄昏肉眼才可见) 水星角直径为 $13''$, 2440 km 。 ~ 0.38 个地球半径。

水星质量: $3.3 \times 10^{23} \text{ kg}$, 约为0.055倍地球质量 平均密度: 5400 kg/m^3 , 略小于地球 (5500)
水星的表面重力加速度当于地球40% ($0.4g$):

水星没有大气; 水星的逃逸速度为 4.2 km/s , 水星形成初期或稍后在其表面上出现的大气, 都已逃逸。

水星接近太阳, 又没有大气保护, 白天温度可高达 700 K 。晚上降到 100 K 左右。**水星是太阳系所有行星和卫星中昼夜温差最大的天体**。

水星的**环形山**不像月球上的那样密密麻麻; 广阔的、轻微起伏的环形山间平原覆盖了水星约40%的表面。

水星绕太阳公转周期为88个地球日; 水星的自转周期是59天, 是公转周期的 $2/3$: 水星的太阳日 (从中午到下一个中午的时间) 是2个水星年 (176) 之久。**黄道面垂直自转轴**。

固态内核半径 $\sim 1600 \text{ km}$; 液态外核半径 $\sim 2100 \text{ km}$; 水星幔厚度约为 $\sim 350 \text{ km}$ 。内核为巨大的铁芯: 占水星体积60%; 质量的80%; **内核体积占整个星球总体积的比例比太阳系中任何其他天体都大**。巨大的“铁芯”由其位置造成的, 当水星 ~ 46 亿年前形成时, 它位于早期太阳系很热的内部区域, 这些区域**重金属元素比例高**。接下来的5亿年里, 水星遭受了与月球同样激烈的**陨石轰击**。熔融, 重元素沉入中心。

倾斜的轨道; 巨大的金属心脏; 水星地幔中发现了钾和硫等易挥发元素: 原水星最初是一颗更大的行星, 和一颗年轻地球撞击, 体积变小, 进入近日轨道?

(水星公转自转周期为什么不是地月的1:1关系, 如何解释? 太阳水星轨道共振造成水星自转和公转周期 还是锁定, 比例关系)

金星半径 6052 km ; 地球半径95% 金星质量为 $4.9 \times 10^{24} \text{ kg}$; 地球质量82%; 金星平均密度为 5200 kg/m^3 ; 地球 $\sim 5500 \text{ kg/m}^3$

金星似乎是地球的副本: 这两颗行星的大小、密度和化学成分相似; 它们的轨道距离太阳的远近差不多; 在**形成时, 它们没有太明显的区别**。

金星离开太阳最大角度不超过 47° 。只能在**日出之前或日落之后可见** (启明星), 在地平线以上的时间最多只有**3h**。金星是整个天空中**第三亮的天体, 仅次于太阳和月亮**; 比最亮的系外恒星天狼星亮10倍; 亮度源于金星有**很高的反射率** (70% ; 水星 10%) 金星处于“圆满”时, 距地球最远 (1.7 AU), 并且位于太阳的另一侧 (**上合日**); 离我们最近时, 处于“新相”阶段 (**下合日**) 金星的**最大亮度**出现在最接近地球之前或之后的36天左右。此时金星离太阳约 39° , 距离地球约 0.47 AU 。

金星沿**顺时针方向自转**，太阳西升东落；金星的**自转十分缓慢（最慢）**，它的太阳日（从正午到正午）为117个地球日（公转周期225日）：金星的一天比金星的半年只多一点。可能是因为遭遇过类似“大碰撞”的撞击所导致。摩擦。

金星表面比较**平缓**：高地8%（地球的高地占25%）、低地27%、平原占65%。金星上**没有板块构造**。金星的一些区域都有广泛的**火山特征**：大多数火山类型为盾状火山

金星的大气：96.5%CO₂；3.5%N₂；微量的其他气体；**大气质量是地球大气~90倍**，延伸到金星表面上更高的高度。由于金星轨道和反射率，早期认为金星温度与地球应该没有太大不同，严重错误。温度：温室效应：厚厚的CO₂吸收了近99%的从金星表面释放的红外辐射，表面温度高达730 K；成分：开始相同；火山爆发水、CO₂、SO₂等。地球**海洋**将CO₂等溶解在其中，变为地表一部分；而金星CO₂留在大气中。金星下硫酸雨。

金星大气中的大量二氧化碳造成的温室效应是这个行星上目前高温的原因。**金星轨道比地球接近太阳是主因。**

金星与地球相似的大小和密度：它和地球有着相似的内部构造：核、地幔和地壳。金星有磁场，但是比地球微弱：转速过慢不足以产生强磁场。

火星：太阳系中排名第二的适宜生命出现的环境，仅次于地球本身。火星是除了地球和月球之外，人类侦察得最多的天体。

火星半径3394km，地球半径的53%。火星质量 6.4×10^{23} kg，是地球的11%。自转周期24.6小时。赤道平面与其公转轨道平面的夹角为24.0°，类似于地球的倾角23.5°。

火星轨道偏心率较大，近日点距太阳为1.38AU，远日点距离1.67AU。接收日照量变化很大，在近日点比在远日点要高近45%，对火星气候有重大影响。火星合日：从地球上，太阳完全遮蔽火星时，太阳位于火星和地球之间；火星冲日：火星、地球和太阳几乎排列成一线，地球位于太阳与火星之间。火星在夜空中位于**冲日位置时最大和最亮**；约每15年在火星近日点附近发生冲日。**火星亮度比金星暗很多**：距离远；表面积小；反照率低

从地球上，火星表面**最明显的特点是明亮的极冠**。火星极冠主要是由固态二氧化碳（干冰）组成，呈季节性变化。南极大冠大约直径350km，大多是冷冻的二氧化碳；北极大冠直径约1000km，大部分是水冰。火星地貌：有巨大的火山、幽深的峡谷、广袤的沙丘旷野，以及许多其他地质奇观。表面大量铁矿石，由于空气中的灰尘，天空显得苍白偏粉红色。奥林匹斯山：太阳系所有天体中**最大的火山**，比珠穆朗玛峰高3倍。

强有力的证据证明，在火星表面**曾经有流动的水**。今天，火星上的大部分水被锁定在极冠和火星表面下的冻土层里。曾经有水存在的证据：**径流通道**（水流特征）、**流出通道**（较近期的灾难性洪水的遗迹。产生这些山洪的汹涌的水，可能也形成了奇怪的泪滴形“岛屿”，这些岛屿在平原上靠近流出通道的端点处会被发现）和**湖泊三角洲**，过去有流动的水。近期存在流体证据：**地下冰**（撞击坑证据，在表面以下数米，就是多年冻土层或水冰层：撞击产生的爆炸加热和液化了冰，从而导致了喷出物的流体外观）、**极地冰冠**（北极大冠存在水冰，北极陨石坑水冰，西北边缘和壁上没有冰可能是由于该区域由于太阳的方向而接收到更多的阳光）、**冰川**等。深度低于火星平均半径地区，是可能的古代海洋区域；约140km直径环形山的地面被积水侵蚀；分层结构暗示着海滩沙丘。

火星大气相当稀薄（比金星的稀薄超过10 000倍），主要由**二氧化碳**组成（占95.3%），与金星相似。地球：地质和火山活动将二氧化碳返回到大气中，取得稳定的平衡；火星：引力弱+火山活动少。“**反向失控的温室效应**”造成其温度低（CO₂少）

早期，火星环境是温暖的，液态水广泛分布，雨水排入河谷形成径流通道。约40亿年前，火星大气减少，水开始结冰，形成多年冻土和干燥的河床火星保持冻结约10亿年，直到火山活动加热火星表面，地下冰融化，造成山洪爆发，形成了流出通道。火山活动消退，水再次结冰，火星再次干燥。

火星**磁场弱或者没有全球性磁场**：火星自转迅速，缺乏一个全球性磁场，核心必然是**非金属的或非液态的**，或两者兼而有之。火星的核心直径约2500km，主要由硫化铁组成，至少部分地熔融。

卫星：火卫一福波斯和火卫二得莫斯；与火星组成不同，很可能是被捕获的小行星。**类地行星只有地球火星有卫星。**

（为什么火星大气是现在这样的？CO₂，距离）

第2章 (ii)

4. 类木行星

比较行星学：研究类木行星云的高度、风速、气体温度和化学成分，获得对地球的比较性了解，了解地球上不断变化的气候

木星位于距太阳5.2AU；夜空中**第三亮天体**（月亮和金星），**太阳系最大行星**；木星质量M_J是318倍地球质量，太阳的1/1000；半径为11.2倍地球半径。密度为1300 kg/m³；公转周期 T=11.8年。

木星最为显著的观测特征：一系列变幻莫测的**平行于赤道的云带**和一个椭圆形的大气斑点（**大红斑**），地球大小的飓风。木星快速自转：赤道地区9h50m转一圈；高纬度地区9h55m转一圈，不同纬度自转速率发生变化（**较差自转**）。**快速自转**，产生了显著的赤道隆起。行星扁平的形状使得天文学家推断在其内部存在一个大的岩质核心。自转导致**快速运动云带和强磁场**。大红斑是一个缠绕、循环的风区，大红斑的大小在改变；大红斑红色的起源不确定（化学反应？）

木星大气：氢86.1%；氦13.8%；少量CH₄、NH₃和水蒸气木星云层的厚度 < 100km；有着复杂的化学性质。随着温度和压力的增加，气体逐步过渡到液体状态。有**金属氢层**，有**冰/岩石核心**。木星内部的任何地方都没有任何形式的“表面”存在，**只有混合边界**。

木星磁场为太阳系最强；磁层有着近3000万千米的跨度，体积大约有地球磁层的100万倍大。木星有比地球上更大、更有能量的极光。木星的磁层尾超出了土星轨道。木星的磁轴倾斜10°；**自转轴仅倾斜3°**：无春夏秋冬

木星拥有92颗已确认的天然卫星，是**太阳系内拥有最多卫星系统的行星**。伽利略卫星，由伽利略于1610年发现的木星的4颗卫星。

土星平均密度为700kg/m³，太阳系中唯一密度低于水的行星，目视可见最远的行星（5+日月），太阳系第二大行星，最轻的行星。自转周期：赤道为10小时14分钟，高纬度地区10小时40分钟。自转轴与轨道平面夹角27°（光环位于赤道面上）；类似地球、火星。与地球距离 < 8 AU，公转周期 T=29.5年，质量为95倍地球质量，半径为9.5倍地球半径。随着土星绕太阳公转，土星环朝向我们的角度也在改变。

土星大气由分子氢（92.4%）、氦气（7.4%）、甲烷（0.2%）、氨（0.02%）组成。土星大气氨的比例远低于木星（氨下沉到星球中心）土星的大气结构和木星大气类似，缺乏固态表面。土星云层包括氨、硫化氢铵和水冰三层。云层之上有一个薄雾层，是阳光对上层大气的作用形成的。

土星具有与木星相同的内部组成，有岩石核心。但它们的相对比例有所不同：土星的金属氢层较薄，其核心较大。由于土星较低的质量，其与木星相比有着不太极端的核温度、密度和压力。核心的压力大约是木星核心压力的五分之一，或大约是地球中心处压力的 2~3倍。土星上的极光：土星磁场强度是木星的~1/20，~1000倍地球磁场。

所有的类木行星都有光环。光环是由上万亿的从尘埃到巨石大小不等的冰颗粒组成的，仅10~15m厚（原因：天体小，小于10⁻²m；引力势均衡点，角动量）。光环有多个环和缝组成，主要光环由上万个狭窄的细环组成的；细环并不是彼此分离，光环包含同心的、密度高低交替的光环颗粒。

对于任何给定的行星和卫星，卫星在其内就会被破坏的临界距离，被称为潮汐稳定极限，或洛希极限。

土星卫星数目~83颗。大部分都覆盖着冰雪。土卫6 TITAN 为土星最大卫星

（颗粒为什么会形成光环 洛希极限，粉碎之后角动量 土星光环薄 天体小，引力势能均衡点，角动量 光环起源 小行星，小天体）

天王星发现于1781年，海王星发现于1846年：都是通过望远镜观测发现（目视：5颗+日月）。它们的整体性质类似：天王星和海王星的半径分别是地球的4.0倍和3.9倍；质量是地球的14.5倍和17.1倍；平均密度为1300kg/m³和1600kg/m³。它们比木星或土星更小、质量更轻，但密度更高。

天王星元素比例：氢分子84%；氦14%和甲烷（CH₄）。甲烷吸收长波的红光很有效。天王星甲烷少（2%），呈蓝绿色；海王星甲烷多（3%），呈蓝色。跟其他的类木行星一样，天王星也有一个很短的自转周期。天王星自转周期是17.2h。太阳西升东落。

天王星的自转轴接近黄道面，几乎看不出来什么表面特征。海王星虽然离我们更远，但却有清晰大气特征（气温更温暖、霾更少），云层和云带结构更容易被看到（上层大气温度更高，内部能源）。海王星形成了几个风暴系统，在外观上类似我们在木星上看到的。巨行星上的风：风速（显示在水平轴上）和风向随纬度（显示在垂直轴上）而变化。风是相对于行星的内部旋转速度来测量的。

天王星是太阳系中唯一躺着自转的行星，黄赤交角为98°。天王星公转周期84年，南北极交替陷入黑暗。每半个天王星年，南极（或北极）直接指向太阳。天王星与太阳的距离非常遥远：从太阳发出的光到达天王星需要经过2.7小时之久。

天王星和海王星类似木星和土星，都有岩石核心，大小与地球相当，质量可能是地球的10倍。作用在天王星和海王星核心外部的压力远低于木星和土星核心所受到的压力，不足以使氢进入金属态。四颗类木行星都有相似的岩石和冰核心：占总质量的百分比不同。天王星无内部热源（太阳系最冷行星），其他有。

天王星和海王星都具有相当强大的内部磁场，大约比地球磁场强100倍，是土星磁场的1/10。天王星的磁轴相对自转轴倾斜了约60°；磁场线并不是以该行星为中心的：虽然天王星的磁场像一个条形磁铁，但这个“磁铁”并不是位于行星中央，而是偏离中心大约1/3个行星半径；海王星的磁场也相对自转轴有明显的倾斜，角度约46°，并且也大大偏离这颗星球的中心。

所有类木行星都有光环：天王星共9个光环，黑暗、狭窄，间隔很宽。海王星有五个光环。三个非常窄，像天王星的光环，两个广阔而弥漫，像木星的光环。

木卫二和一月球差不多大小，木卫三（太阳系最大卫星）和四与水星差不多大小。大多数木星的卫星都要小得多；很可能是捕获的小型小行星。

土星至少有83颗已知卫星。最大的卫星土卫六泰坦，是唯一拥有大量大气层和表面存在液态碳氢化合物的湖泊或海洋的卫星，除地球之外唯一发现表面有液体存在证据的卫星或行星。

天王星有27个已知的卫星；海王星有14颗已知卫星。其中最有趣的是海卫一（氮冰间歇泉，太阳系中唯一一个与行星自转方向相反的大卫星）

1930年克莱德·汤博发现冥王星并将其视为第九大行星。原先计算结果其与地球或火星质量相当，但冥卫一卡戎的发现允许天文学家首次精确测量冥王星的质量：仅相当于地球质量的0.2%。冥王星的轨道是扁椭圆形，与太阳系黄道面有17度倾角；当它运行至近日点，已经进入了海王星公转轨道内。

冥王星是太阳系已知体积最大、质量第二大的矮行星；阋神星质量比冥王星质量多出27%。行星的轨道必须围绕太阳运转；行星必须有足够的质量通过自身引力成为球形；行星必须清理轨道附近的其他天体（冥只占~7%）

所有四颗类木行星基本上都是巨大的气体球围绕着内部深处较小的岩石球。它们的云顶很冷，靠近内核表面的地方很热，不太可能支持生命。有浮力的、漂浮的生命是否可能出现在中间高度处（那里的温度比较温和）？这些生命形式一定会较小：如果它们太大，它们就会降到内部，然后被“煮熟”；但如果它们太小，它们就会浮到云层的顶部，然后被“冻僵”。

第3章

5. 小天体

太阳系的碎片可能是了解我们行星诞生甚至生命诞生的关键。太阳系除了八大行星，还有数十万其他天体也围绕太阳运行。这些小天体，小行星、彗星、柯伊伯带天体、流星体，都很小，与行星和行星的主要卫星相比，它们质量可以忽略不计。基于统计学推测，估计还有超过10亿

个这样的天体有待天文学家发现。

波得定则，火星和木星的轨道之间的差距过大：失踪的行星？被发现的第一颗小行星，**最大的小行星**：谷神星（ $d=940\text{km}$ ）

小行星相对比较小，主要由岩石构成，围绕太阳转动。轨道和大小与行星不同：一般位于火星和木星之间；大多数小行星很小，可以小到只有 0.1km

光谱性质分类：C型小行星：由大量的碳、硅酸盐和粘土组成；约占75%，反射率低（3%-4%），非常暗（黑）；S型小行星：主要由硅酸盐或岩石物质组成，约占15%，反射率较高（15%）；M型小行星：含有大量的铁、镍等金属成分，比例小。不同成分的小行星分布在距太阳不同距离的地方。S型小行星在小行星带的内侧占主导地位，而随着离太阳越来越远，C型小行星的比例稳步提高。S型和C型都是原始的；M型由分化母体的核心组成。

隼鸟号：人类第一次对地球有威胁的小行星，进行**物质搜集**研究，也是第一个把小行星物质带回地球的任务

已知的小行星总数已超过100万个，超过10万颗已被编目。绝大多数在小行星带区域被发现，位于距太阳 $2.1\sim 3.3\text{AU}$ 之间——大致位于火星轨道（ 1.5AU ）和木星轨道（ 5.2AU ）之间。小行星都以**与行星相同的方向**围绕太阳旋转，并且它们的大部分轨道位于**地球和其他行星环绕的平面**附近。碎裂的行星碎片 or 一直都没能成功地凝聚成一颗真正行星的**原始岩石**？强烈支持后一种观点

绝大多数小行星的轨道偏心率在 $0.05\sim 0.3$ 的范围内，确保它们始终保持在火星和木星轨道间。

越地小行星：极少数偏心率大于 0.4 的小行星，路径可能与地球轨道相交、与地球碰撞。（阿波罗型小行星：轨道半长轴超过 1AU ；平均轨道半径位于地球轨道外，近日点位于地球轨道内；阿登型小行星：平均轨道半径接近 1AU ；远日点大于地球的近日点（ 0.983AU ））

阿莫尔型小行星：轨道位于地球和火星间；经常穿越火星轨道但不会穿越地球轨道

阿波罗与阿登型小行星的轨道会穿越地球轨道，**可能产生撞击的威胁**；而阿莫尔型小行星不穿越地球轨道但却可能距离地球非常近

特洛伊型小行星：在距离木星一定距离的轨道上运行。目前已发现了数百颗这样的小行星。

（拉格朗日计算结果：综合考虑木星和其他较大天体的引力作用，在太阳系中正好有五个位置可供小天体在与**木星**同步的轨道上绕太阳运转（拉格朗日点），只有L4和L5点是稳定的，特洛伊群，超前或落后 60° ）

近地天体是任何其轨道能接近地球的太阳系小天体。一般指轨道近日点（离太阳最近处）小于 1.3AU （距地球轨道 0.3AU 之内）的小行星或彗星。近地小行星： $> 1\text{km}$ ； $140\text{m}-1\text{km}$ （直径大于 140米 的近地天体被称为**潜在威胁天体**）；绝大多数为更小天体。短周期彗星是近地彗星，数目很少， ~ 100 颗

墨子巡天望远镜，主镜口径 2.5米 、视场直径 3° 、 7.5 亿像素；每3晚可以观测北天 2 万平方度天区一次；**全球光学图像巡天能力最强设备**：高效搜寻和监测太阳系小天体，开展近地天体防御已发现的潜在威胁天体，不足估计总数的 $1/31$ 已发现的直径 40米 以上近地天体只占总数的约 3% ！直径更小天体数目众多，指数增长

现在人类还没有有效可行的防御方案，但是技术进步迅速：未来可期

《春秋》：“鲁文公十四年（公元前 613 年）秋七月，有星孛入于北斗”。世界上有关哈雷彗星的最早记录，同时也是**世界上最早的彗星记录**。哈雷彗星：每隔 $75-76$ 年就能从地球上被观测到一次

彗星在一个**椭圆率很高**的轨道上运行，太阳位于椭圆的一个焦点上。轨道通常是很扁的，而且并不局限在黄道面上。当彗星**接近太阳时会增亮**，并出现一个伸长的彗尾。随着彗星离开太阳附近，其亮度和彗尾都会减少，直到它再次去到遥远的地方，成为一个微弱的光点。类似行星，彗星并不发射可见光，而是反射（或再发射）太阳光

彗星是冰质物质的碎片。彗星结构：彗核、彗发、氢包层和彗尾。彗核：冰、尘埃和岩石构成（**固态**）；彗发：彗星周围由**尘埃和气体**形成一个巨大且稀薄区域彗尾：**尘埃尾和离子尾**；彗尾在所有情况下都背向太阳。固体彗核直径一般都**小于 60km** （占彗星的**大部分质量**）；彗发尺寸可能有**数千 km** ~**太阳大小**；彗尾可能延伸长达 **1 个 AU** （一亿五千万公里）。在彗发的外面是看不见的氢包层，伸展开来会跨越**上百万千米**的空间尺度

当彗星靠近太阳时，**太阳辐射加热**，**气体和尘埃从彗核中蒸发流出**形成彗尾。彗尾分为两类：离子尾是由大量电离气体组成，直；尘埃尾通常更广阔、更弥散，略有弯曲。离子尾和尘埃尾的不同形状，是因为**气体和尘埃对星际空间作用力有不同的反应**（尘埃颗粒受太阳引力 $>$ 太阳风，倾向于跟随彗星轨道）

彗星以发现者的姓氏或团队名称命名：一般最多只有两位发现者或团队享有发现权；如Hale-Bopp彗星、哈雷彗星。1995年前：彗星依照每年发现先后顺序以英文小写排列。现在：彗星在一年中以每半个月为单位使用一个字母和数字来指示发现的顺序。为方便识别彗星的状况，于编号前加上标记：P/短周期彗星；C/长周期彗星（周期为 200 年以上）

短周期彗星（周期短于 200 年的彗星），轨道在**黄道面附近**，**逆行**，来自海王星轨道之外的**柯伊伯带**；**大多数彗星为长周期彗星**，轨道可以在**所有的角度和所有的方向**，而且**既可以是逆行也可以是逆行**，从太阳看上去大致均匀地分布在所有的方向。远离太阳的地方，必然有一个巨大的彗星“云”，叫**奥尔特云**，直径可能高达 10 万 AU 。

第一个彗星着陆器罗塞塔：探测到彗星有大量游离分子氧和有机化合物

柯伊伯带天体发现，大大拓展了我们对太阳系边界的认知。柯伊伯带：位于太阳系的海王星轨道外侧，在黄道面附近的天体密集圆盘状区域；距太阳 $30\sim 50\text{AU}$ 。对任何轨道超出海王星的小天体，通称海王外天体。

海王星的影响不足以完全解释天王星运动的异常：未知天体影响。19世纪末理论预言+后期持续观测：发现冥王星。质量相当于地球质量的 0.002 。海王外天体的数量迅速上升，目前数量已经超过了 1600 个，多数在柯伊伯带。柯伊伯带中大小超过 100km 的天体的数量估计将会超过 10 万个。随着海王外天体数量的增加，冥王星与其他外太阳系的小天体并没有明显的不同：冥王星作为行星的地位遇到了麻烦。2006年，国际天文学联合会将冥王星排除出了行星的行列。

流星是划过天空的明亮光线，是行星际小碎片（**流星体**）进入地球大气层造成的。摩擦加热并激发空气中的分子，当它们返回到基态时就会发光，产生特色鲜明的亮线。小行星和流星体都是**岩质的行星际碎片**，区别仅仅是大小。流星体通常的直径小于**100m**（流星体与小行星**分界线**）

较小的流星体主要是分解的彗星的石质残留物。每次彗星经过太阳附近时，一些彗星的碎片会从主体上脱落。彗星碎片是由尘埃或小鹅卵石大小的颗粒组成，沿着与母彗星几乎相同的轨道运行。如果地球的轨道偶然与这样一个年轻的流星群的轨道相交的话，就会出现一场壮观的流星雨。地球的运动，每年最多两次穿过某个给定彗星的轨道。地球每年会在同样时间通过交叉点，特定流星雨出现有规律。所有流星体都以同样速度沿同样方向运动，观察者角度：流星体从辐射点发出。

英仙座流星雨：以英仙座 γ 星附近为辐射点的流星雨。斯威夫特·塔特尔彗星留下的遗迹在英仙座附近；地球运动到该处，彗星遗迹和地球大气相互作用

较大的流星体通常与成群的彗星碎片无关。它们可能是由于小行星之间碰撞，偏离了小行星带的小天体。这些天体造成了月球、水星、金星、火星等表面上大多数**撞击坑**。当这些较大的流星体进入地球大气时，在空中产生明亮的条纹，可能会形成**陨石雨**。大质量的流星体（质量至少1吨，直径至少1m）能够到达地球表面，可以制造出直径在千米量级的**陨石坑**。

如果流星体到达地面，就被称为**陨石**。陨石是起源于外太空天体，并坠落在地面的固体碎片。

目前约有4万颗陨石被发现；**多数陨石很小**

铁陨石：主要由铁和镍构成，高密度；，黑色，不规则形状；石铁陨石：由石头和金属铁的混合物组成；石质陨石：通常有一个**黑暗熔壳**，是其表面在通过大气产生的巨大热量熔化时形成；**碳质球粒陨石**：富含水与有机化合物球粒。**大多数陨石**的主要成分是**岩石**（石质陨石），但有些陨石主要由铁和镍构成（铁陨石）；石铁陨石很少。石质陨石的基本组成与内行星和月球很像。

陨石鉴别：铁陨石和石铁陨石由于其金属含量而最明显是**外星的**；地球上几乎不会自然产生**纯铁**。圆角、熔壳、磁性、拇指印、实心、金属颗粒 **陨石特征**

几乎所有的陨石都很古老，大部分陨石的年龄在44亿~46亿年之间。

太阳系考古。观测限制/约束：运动限制：行星都以相同的方向围绕太阳旋转，并且在太阳自身旋转的平面上，大多数行星的自转方向与公转方向相同；化学限制：木星和土星具有足够的引力，保留它们形成时和形成地点存在气体，成分大致相同（氢和氦），其他行星系统缺乏轻元素。从内到外富金属-->岩石材料-->以冰为主成分（温度序列），小行星代表了过渡岩石成分，具有丰富的暗色、富碳物质；年龄限制：原始陨石的放射性年龄均接近45亿年，认为是行星系统的年龄。

外太阳系彗星或小行星等富水小天体与地球相撞，是地球上水（生命）的可能来源。

第4章

6. 系外行星

太阳系外行星，简称系外行星：位于太阳系之外的行星。目前已经被确认的系外行星总共有5300多颗。太阳系形成于约45亿年前，我们不可能重建这一壮丽事件细节。远离我们的其他行星系统可以帮助我们破译太阳系的起源。搜寻系外宜居的类地行星：地球2.0

系外行星非常暗弱，一般只能观测到它们的母星特性，探测十分困难。视向速度法，掩星法，天体测量法，直接成像法，微引力透镜法。

视向速度法：由于行星绕母恒星运动，导致恒星**来回“摆动”**。**行星质量越大，摆动越大**。如果恒星的摆动发生在沿我们的视线方向，会看到恒星的视向速度发生微小的波动；可以利用多普勒效应进行测量（视向速度：谱线红移或者蓝移）。利用视向速度法测得的是系外行星的质量下限：由于系外行星围绕母星**公转轨道平面和黄道面有夹角**，导致测量结果比真实结果**偏低**。

飞马座51b：**第一颗围绕主序恒星的系外行星**发现，恒星的速度有着规律的50m/s的波动。行星的质量约是木星的一半，体积约是木星的两倍。目前发现系外行星最有效的两种方法之一，优点：适合各种性质的恒星；缺点：无法确知行星的质量，只能知道行星质量下限。无法测量行星直径。

掩星法：如果一颗太阳系外行星正好在我们和它的母星之间经过，那么恒星发出的光会变暗。太空望远镜可以测量微小的亮度变化（优于 $1/10^4$ ）需要恒星、系外行星和观测者三者近乎在同一平面上。随着**开普勒太空望远镜**的升空，掩星法成为**发现系外行星数量最多的方法**。（开普勒太空望远镜，世界首个用于探测太阳系外行星的飞行器，观测10万颗恒星的光度，检测是否有行星凌星现象）变暗的数值取决于行星的大小、恒星的大小等，是发现系外行星第二种有效的方法。凌日法可以提供**行星半径**的信息，有时它还能够透过**光谱**研究行星大气层。

天体测量法：测量恒星在天空中的位置。恒星-行星系统中，行星和恒星围绕公共质心做周运动通过对恒星位置和速度的长时间观测，可以利用天体测量法，计算出影响其运行的行星的参数。对观测精度的要求极为苛刻，只能发现那些**公转周期长，质量大，且离地球较近**的系外行星。

直接成像法：直接对围绕恒星运行的系外行星进行成像。红外波段观测（恒星主要在光学波段）；利用新技术阻挡来自恒星的光线（**星冕仪**）。通过直接成像法探测**质量特别大且轨道远离恒星**的系外行星。通过观测行星大气反射的光谱，能够获得有关**行星组成**信息。缺点：直接成像相当困难。

微引力透镜：发生在恒星级天体中的引力透镜现象。因为引力透镜效应，来自遥远恒星的光会被在其前方运行的较近恒星的引力放大和变亮。背景恒星实际上看起来比实际亮度高很多倍。亮度变化可以表明是否有行星绕着更近的“透镜”恒星运行。由系外行星引起的额外放大峰：发现系外行星。微引力透镜法可以探测**小质量行星**；也可以发现**公转轨道离恒星较远的系外行星**；还可以探测到离地球十分遥远的行星系统；也可以探测到那些不围绕恒星运转的**流浪行星**。缺点：偶然性和不可重复性。

脉冲星的自转速度几乎不变。利用精密仪器来观测脉冲星变化，易便可推断到该脉冲星是否有行星存在，并可通过变化的出现计算行星公转周期。

迄今为止，大约10%的邻近恒星被发现拥有行星；**20%**拥有行星的恒星，拥有**多行星系统**。已知的系外行星质量范围从地球质量到多倍木星质量。随着探测能力和数据分析技术提高，拥有行星的恒星比例会增加，每颗恒星拥有的行星数量也会增加。

类地行星：主要由岩石、金属、硅酸盐组成，拥有固体表面和类似的内部结构
类木行星：由岩石或岩石-冰组成内核，之外是金属氢-氦中间层，外层是分子氢和氦
类海王星：主要成分是冰物质，而不再是液氢和氦
超级地球：质量介于地球到海王星（17M地球）之间的系外行星
热木星：一类行星轨道与母恒星距离在0.5至0.015AU以内（木星轨道半径是5AU），质量接近木星的气态行星。起源：巨行星和它赖以形成的星云盘之间摩擦倾向于使行星螺旋向内运动。持续到星云盘被中央恒星风吹散。
轨道半长轴小于0.1AU被认为是热的。“类木星”和“类海王星”之间的分界线通常采用的值2倍海王星质量或者0.1倍木星质量。2~10倍地球质量的行星被称为“超级地球”；低于2倍地球质量的行星被简单地统称为类地球行星。
类木行星的轨道：距离它们的母星0.15AU以上，系外行星轨道偏心率大。太阳系的所有类木行星的轨道偏心率都不大于0.06。选择效应：偏心轨道往往会产生较大的速度，因此更容易被发现。
目前还不清楚在系外行星系统中像我们太阳系这样的系统是常见的还是稀有的。系外行星系统中包含运行在较远的、圆形轨道上的行星；也有偏心的类木星、热类木星和超级类地球。

太阳系外行星研究的真正目标是探测拥有类似地球环境的类地行星：希望能找到宇宙中其他地方的生命。生命发展的一个关键要求是液态水存在于行星的表面或地下：温度大约在0~100°C范围内。行星的温度取决于它到母星的距离和其母星的固有亮度：每颗恒星周围都有一个宜居带环绕（三维的壳）。在宜居带中，类地行星的表面可能含有液态水。低质量、暗弱的恒星，宜居带较小且靠近恒星；较大质量、较明亮的恒星，宜居带到恒星的距离更远，宽度可以达到1AU或更宽。
开普勒飞船探测到的各种各样的行星：大多是气态行星，其他的可能是有岩质的或湿润的表面。还需要更多的观测来确定这些系外行星的环境。
已知大约有20颗类地球和超级地球的轨道位于其母星的宜居带内，可以保证行星表面有液态水。它们的结构和组成是未知的，但在少数情况下，可以对它们的质量和半径进行测量，推断出的它们的密度与类地行星一致。

第5章

7. 天文观测

目视观测：冬季大三角。天狼星：夜空中最亮的恒星（晚上最亮的恒星是天狼星，最亮的行星是金星，接着是木星；夜间最亮的天体是月亮），大犬座α星；距太阳系约8.6光年。参宿四：猎户座α星；夜空中第十亮的恒星，距离太阳643光年。南河三：小犬座α星；距离地球大约11.44光年。
夏季大三角：织女星：Vega，天琴座α星；天津四：Deneb，天鹅座α星；牛郎星：Altair，河鼓二、天鹰座α星

银河不是银河系，只是银河系的一部分。不同季节看银河，有不同的样子。太阳系黄道面与银河盘面夹角约63度。北半球中纬度地区：欣赏银河最好机会是夏季的深夜和秋季的前半夜。冬季也能看到银河，不过不太明显。春季：夜晚基本看不到银河；只在春末的凌晨（2-3时）能看到银河从东方升起；夏秋季：天一黑，壮丽的夏夜银河就已升起在东方高空；午夜银河贯穿南北天际，大致垂直于地平线；冬季：天黑后不久，银河位于东南高空，且越来越高，银河成东西走向。冬季夜空中亮星多：猎户旋臂

星座：天上是一群恒星的组合。对星座的划分完全是人为的，不同的文明对于其划分和命名都不尽相同。IAU用精确的边界把天空分为88个星座，使天空中的亮恒星都属于某一星座。冬季星空中最著名的星座之一：猎户座（三颗蓝色星；参宿四（冬季大三角之一）；参宿七；猎户座大星云M42）

晴朗夜晚，我们可以看见大约3000个光点。如果包括南半球的恒星，总共大约有6000颗恒星是我们肉眼可见的。人们将最亮的恒星连接搭配在一起，并称之为星座。但是不存在真正的联系。

三垣：北天极附近三个天区，紫微垣、太微垣、天市垣；二十八宿：地球上黄道和天赤道附近的二十八个星座。

中国科学技术大学纬度：31.98368经度：117.34029。通过英国格林威治天文台的地理子午圈叫做本初子午圈。

当地球旋转时，地球上的天体保持彼此相对的位置，绕天极反向视运动。春分点：天球经度开始点

（星轨）夜空延时曝光图：每个弯曲的踪迹都是一颗恒星划过夜空的路径。北半球星轨同心圆以北极星附近为中心。

天体物理中，经常用角度表示天体的尺寸或位置，如太阳直径30角分。角度测量：完整的圆有360度，每1°的变化可以再进一步细分为60角分，一角分被分为60个角秒。1"是非常小的角度测量单位——相当于在大约2km的距离处观看1cm大小的物体时，看起来的张角大小。度、角分、角秒是衡量宇宙中物体大小和位置简单方法；物体角大小取决于它的实际大小和到我们的距离。

初昏时斗柄所指方向与季节关系：东春南夏西秋北冬。把北斗七星斗前二星连接，并朝斗口方向延长约五倍距离即可找到北极星。

太阳在黄道上运动时穿过的12个星座——如果不是被太阳光芒所掩盖，我们在朝向太阳的方向上就会看到这些星座，统称为“黄道十二宫”

地球在进动。地球自转轴随时间改变方向，这种变化被称为“岁差”。在一个完整的岁差运动周期内（大约是26 000年）地球自转轴会描绘出一个锥形的轨迹。

公元前200年，希腊哲学家埃拉托塞尼利用简单的几何推导计算了地球的大小。夏季某一天的正午，西奈的观测者会看到太阳正过头顶，同一天正午时，在亚历山大测量直杆影子的长度：太

阳在亚历山大相对于铅垂线的角位移为 7.2° 。到达地球的光线来自于像太阳这样的很遥远的天体，几乎是平行传播过来的，在亚历山大测得的太阳光与铅垂线之间的夹角，等于从地心处看来西奈与亚历山大之间的夹角。

夏至时巨石阵的日出。从石圈的中心看去，在一年中白天最长的这天，太阳径直升上“柱脚石”。

托勒密：古希腊天文学家。地心说提出者。喜帕恰斯：古希腊天文学家。编制了1022颗恒星表，提出了“星等”概念。

宇宙的地心说模型认为太阳、月球和行星都绕地球运转。其中最成功的模型是托勒密模型。托勒密模型需要的圆的个数不少于80个。均轮运动+本轮运动。行星有时候看起来相对背景恒星会短暂地倒退（不同夜晚位置不同），然后又回到正常的“前进”方向。地心说模型解释逆行是行星在沿绕地球运动的**本轮**上的真实后退运动。哥白尼：地球绕着自己的轴旋转，并且像其他行星一样，绕太阳公转。日心说观点认为，地球像其他所有行星一样，都绕太阳公转。说明了行星的逆行是地球在其公转轨道上运动时超越其他行星所造成的，同时也解释了观测到的行星的亮度变化。如果金星绕太阳运行，其表面的亮度应该像月球一样发生变化；而如果它绕地球运行，则不应该有这样的变化。但是在望远镜发明之前无法检验。

望远镜由荷兰眼镜制造商汉斯·利珀希制造。伽利略：现代观测天文学之父。在没有见过组装好的望远镜的情况下，自己制造了一台望远镜并把它指向了天空。银河系组成、**金星相位**确认，发现木星的四颗最大卫星，土星环的观测和太阳黑子的分析。为支持和强化哥白尼所描绘的太阳系图景发挥了至关重要的作用。确定太阳是太阳系中心。

第谷：望远镜发明之前最伟大的观测者。开普勒：继承了第谷职位和跨越几十年的行星累积观测数据。精炼第谷的观测数据，改进了哥白尼的模型，得出了三大行星运动定律。开普勒第一定律，也称椭圆定律、轨道定律，指每一个行星都沿各自的椭圆轨道环绕太阳，而太阳则处在椭圆的一个焦点中。开普勒第二定律，也称等面积定律，指的是在相等时间内，太阳和运动的行星连线所扫过的面积都是相等的。开普勒第三定律，也称周期定律，指的是各个行星绕太阳公转周期的平方和他们的椭圆轨道的半长轴的立方成正比。

开普勒三定律完全来自对**观测数据**的分析，而不是来自任何理论模型。哥白尼不知道为什么他的日心太阳系模型是有效的。伽利略也不理解为什么行星会绕着太阳运动。

为了解释开普勒定律，**牛顿推定引力将行星吸向太阳**。每一个有质量的物体对其他所有物体都会施以万有引力作用。引力的强度随距离的增加按平方反比定律减小。通过确定某个天体绕另一天体运动所需的引力，**牛顿定律让天文学家能够测量遥远天体的质量**。牛顿三大运动定律和万有引力定律，非常完美地描述了宇宙中的行星、恒星和星系的运动。与托勒密、哥白尼和开普勒的描述性模型不一样，牛顿力学不局限于行星运动，也不局限于我们所处的太阳系中所发生的事件。

威廉·赫歇尔发现天王星。布瓦尔发现天王星的实际位置偏离了推算出的轨道。伽勒在柏林天文台发现了海王星，但是这个发现是根据法国数学家勒威耶的计算做出的。英国天文学界声称亚当斯计算出海王星的位置比勒威耶早。

河南登封观星台：建于元代，是**我国最古老的天文台**，著名的天文科学古建筑物。

北京古观象台是明清两代皇家天文台。八大件：赤道经纬仪、纪限仪、地平经纬仪、地平经仪、黄道经纬仪、天体仪、象限仪、玑衡抚辰仪。

圭表：中国古代根据日影长度变化测定季节、划分四季和推算历法的工具。

浑仪：测定天体赤道坐标、黄道和地平坐标天文仪器。浑仪基本构件是四游仪和赤道环。四游仪由窥管（望管）和一个双重圆环组成。窥管相当于天文望远镜。

简仪是简化浑仪而创造的一种天文测量仪器。浑仪层层交错环圈过于繁复，相互遮挡不少天空视野，且妨碍观测等。取消了黄道环，而且把整个浑仪分成了两部分：赤道经纬仪和地平经纬仪。赤道经纬仪是简仪的主要部分，它由一个赤道环和一个带着望管的四游环组成。

紫金山天文台天球仪：铸造于清代末期，为青铜铸造、可以旋转。其上刻有古代根据天文实测坐标而标记的1449颗恒星，另标有黄道、赤道、银河等。

中国古代天文学家。中国是世界上天文学起步最早、发展最快的国家之一。天文学成就：**天象观察、仪器制作和编订历法**。

天文学是一门观测的科学。对宇宙现象的观测要先于对其本质的理论认识：望远镜。当使用对不同光谱波段敏感的仪器观测时，天空的同一部分看起来会有所不同。

望远镜本质是一个“聚光桶”：主要功能就是在天空中给定的区域内捕捉尽可能多的光子。当来自遥远天体上不同点的光线通过镜面聚焦在略有不同的位置时成像。

折射式望远镜使用透镜集中和聚焦光线；反射式望远镜使用的是镜面。

1) 折射式望远镜里的透镜，会让红光和蓝光聚焦在不同点（色差）；2) 透镜的玻璃会吸收部分光（短波吸收严重）；3) 透镜靠边缘支撑，容易变形；4) 透镜两个面都必须精确地加工和打磨：现代大型望远镜都使用反射镜面作为主要的光线采集装置。

两种望远镜设计实现了相同的目的：来自遥远天体的光被接收并聚焦成像。随着望远镜尺寸多年来的稳步增长，鉴于折射望远镜存在的影响因素，现代望远镜（所有大型）倾向于选择**反射系统而不是折射系统**。

两种类型的望远镜都是用来收集和聚焦电磁辐射。大型望远镜主焦点上形成的图像实际上相当小：整个视场的像可能仅仅只有1cm的跨度。通常，望远镜成的像会通过一个被称为目镜的透镜放大放大后的图像的角直径要远远大于望远镜的视场，能够分辨更多的细节。

反射式望远镜种类：主焦点：大视场。在这里悬挂笨重的装置会带来不便，甚至不可能

牛顿式：小型、多用于天文爱好者望远镜。牛顿焦点距离地面很高，难以放置仪器。

卡塞格林式望远镜：星光汇聚到主镜后面的卡塞格林焦点（**哈勃太空望远镜**）

耐氏、折轴焦点：耐焦地方大，可以放置非常沉重和精密的仪器

聚光能力：镜聚光能力取决于它的接收面积。观测到的天体亮度**直接与望远镜镜面的面积成正比**

比。
分辨能力：衍射极限（瑞利判据） $\theta = 1.22 \lambda / D$ （弧度）； λ 为波长（纳米）， D 为口径（厘米）； $D=1\text{m}$ 口径望远镜1cm射电波长角分辨率为 1° 。（？）

红外波段：1微米到100微米或更长。红外波可以穿透宇宙中被尘埃遮挡区域。

大多数现代望远镜使用电荷耦合器件(CCDs)来收集数据。目视-》照相胶片-》电荷耦合器件(CCD)：1) CCD比照相底片的效率更高，>90%；照相方法<5%；2) CCD产生的是数字化图像，可以直接存储电子设备中，方便使用。CCD：由一块硅晶片构成，晶片被分成许多叫作像素的二维排列的图像元素。CCD由数以百万计微小感光单元（像素）构成。当光线打到某个像素上时，就会在其上累积一个电荷。电荷的多少直接与打到每个像素上的光子数目（光强）成正比。电荷的累积被计算机监控，由此得到二维图像。

光谱仪：天体发出的光经望远镜聚焦在狭缝上；棱镜/光栅将光分散成光谱，然后以电子方式记录

由于天体的辐射到达地面以前要穿过地球的大气层，因此地球大气条件对天文观测有很大的影响。光学近红外：1) 云量会影响观测的时间（晴夜数）；2) 大气吸收会使星光减弱（高海拔）；3) 大气温度和密度的起伏变化，会使大气折射率出现不均匀的状态，引起望远镜中的星像抖动、扭曲或弥散，并减弱进入接受器的星光（视宁度）；4) 人为的因素也影响天文观测：城市灯光污染（远离城市）。

10m口径望远镜在蓝光波段角分辨率应该约为 $0.01''$ 。地球大气中的湍流，使得视线方向上的空气产生的小规模气旋，会使恒星的图像变得模糊。射电和太空望远镜不受这种效应影响，它们的分辨率主要由衍射效应所决定。可利用主动光学和自适应光学技术来大幅度提高望远镜分辨率。

射电波段可以在地面观测；电磁波谱中射电窗口比光学窗口要宽得多。射电天文学领域起源于1931年卡尔·央斯基在贝尔实验室的工作：遇到了一些来自未知来源的神秘射电辐射。发现这种辐射在连续的每一天提前约四分钟达到最强。

射电望远镜口径一般都很大：1) 天体的射电辐射极其微弱；2) 射电望远镜的角分辨率差 $1.22\lambda/D$ ；3) 可以建设大口径射电望远镜（表面的不均匀性需要比探测的波长小得多，如在三十分之一波长，表面反射就不会发生扭曲）

Green Bank Telescope：世界上最大的可操纵射电望远镜，位于美国西弗吉尼亚州，直径105m，高150m。望远镜的原理图：反射望远镜；主焦点。

新疆奇台110米射电望远镜：口径达110米，2022年开始建设，将是世界上最大的单一全可动射电望远镜。

阿雷西博天文台：口径为305米，建成于1963年，落成后即成为世界上最大的单口径望远镜（-2016年）。2020年事故退役。

射电天文优点：可以一天24小时连续观测，在很大程度上不受地球大气、天气或太阳位置影响；开辟了宇宙观测的一个全新窗口（光学弱，但射电辐射可能强的源；对尘埃吸收不敏感）能让天文学家探索电磁波谱和宇宙的全新部分。

缺点：长波长射电波产生的衍射限制了它们的分辨率。

射电干涉阵：干涉仪的有效口径是它最外部的两个天线之间的距离；望远镜分隔开的距离越大—即干涉仪的基线越长—能够达到的分辨率就越高。平方千米阵：有效接收面积可以达到大约1平方公里，由上千台天线组成。

不同的物理过程产生的电磁辐射类型会非常不同，天体在某个波段的外观可能与另一个波段上的外观毫无共同之处。多波段的观测对完全理解天文事件是至关重要的。

地球大气层阻挡了大部分波长短于可见光的辐射，因此我们只能从太空进行直接紫外线、X射线和伽马射线观测。星星在太空中不会“闪烁”，在可见光和红外波长，克服大气的扭曲效应，可以观察到的细节仅受仪器尺寸限制。但是将望远镜放入太空的成本昂贵，而且维修也可能是一项重大挑战。

紫外望远镜的基本外观和结构与光学和红外望远镜非常接近。但是：1) 尽量少用或者不用透镜；2) 专用的适合紫外波段光子的探测器设计。

X射线望远镜里嵌套的镜面排列使X射线以掠射角反射并聚焦成像：X射线不能在任何类型的表面发生反射，这些射线往往会直接穿过，或者是被所接触的任何材料所吸收。然而，当X射线几乎是擦过某个表面时，会在某种程度上发生反射并成像（掠入射）。

对于伽马射线，如X射线的成像设计还没有出现；当前的伽马射线望远镜只是简单地指向某个特定的方向，并记录所收集的光子数目。

LAMOST是我国首个天文重大科技基础设施，大口径（通光口径4.9米）兼大视场（ 5° 视场）光学望远镜；世界之最。首创分小区、双回转并行可控的光纤定位技术，实现了10分钟内4000个光纤定位单元的精确定位，将单次观测获取光谱数提升了一个量级（百级提升到千级），成为世界首个发布光谱超过千万的巡天项目。

墨子巡天望远镜：主镜口径2.5米，视场直径3度。配备大靶面CCD拼接相机后，每3晚可以观测北天2万平方度天区一次。北半球光学图像巡天能力最强设备：高效搜寻和监测天文动态事件，开展时域巡天观测研究。对动态宇宙开展系统监测：发现引力波源电磁对应体；数十个致密天体并合事件（大样本黑洞候选体）；完成外太阳系区域全景普查；力争取得大行星重大发现；开展近地小行星搜寻。

8. 天体测量

天体基本属性：亮度、光度；天体温度；化学成分；距离；大小；质量；年龄。
雷达测距：太阳系内天体距离测量，金星、水星、火星、木星卫星、土星环和几颗小行星（**不能直接测量太阳距离**）。
视差：随着观测者视线的变化，前景物体相对于遥远背景的视位移。不同时刻对同一天空区域拍摄图像，可以确定前景恒星相对于背景恒星的视运动。三角视差法：利用不同观测位置测量同一物体的视差，测定天体距离的方法。日地距离作为基线。 $1\text{AU}/d=\tan(\theta)=\theta$ 。
天文单位：Astronomical Unit, AU。定义地球与太阳之间的平均距离（ $d = 149,597,870\text{ km}$ ），为1天文单位（1AU）；秒差距（parsec, pc）：对1AU的张角，为1角秒处的天体的距离。 $1\text{pc} = 206264.8\text{ AU} = 3.26\text{ ly}$ 。距离(以秒差距为单位)=1/视差(以角秒为单位)。距离地球（即太阳）最近的恒星是半人马座的比邻星（南门二）：视差为0.77"，距离约为 $1/0.77 = 1.3\text{pc}$ ；约为270 000 AU或4.3 光年。第二近：巴纳德星。
最近的恒星的距离可以通过三角视差方法来测量。距离越远的恒星，要获得可分辨的视差，需要更长的基线。**视差小于0.01"将很难区分**：利用三角视差法，在地球上观测 $d > 200\text{pc}$ 的恒星困难。三角视差测量恒星距离：只适合测量太阳周围的恒星。

光度（L），恒星（天体）的固有特性；视亮度，与观测者和恒星之间的距离有关（除以面积）。恒星的视亮度是到达探测器的恒星能量流量，视亮度随距离的平方降低。
天文学家通常使用星等标度来定量描述天体的视亮度和光度，而不用国际单位制：更加方便、更加直观。喜帕恰斯：将其编制的星表中恒星按照亮度分为6个等级：1等（最亮）星到6等星（最暗）。普森发现：**1等星要比6等星刚好亮100倍**。星等和亮度（光度）是对数关系。 $m_1 - m_2 = -2.5\lg(L_1/L_2)$ 。星等数值越大，表示天体越暗；引入负星等。星等将观测到的恒星属性的大范围变化，压缩成更为易读的形式。
太阳光度： $L_{\odot} = 3.845 \times 10^{33}\text{ 尔格/秒}$ ；太阳流量： $F = 1.3608 \pm 0.0005\text{ kW/m}^2$ 。太阳视星等-26.74；绝对星等4.83。
视星等是视亮度的量度。**绝对星等：距天体 $d = 10\text{pc}$ 处 看到天体的视星等**。绝对星等测量恒星（天体）的光度。
 $M = m - 5\lg d(\text{in pc}) + 5$ 。如果恒星的距离已知，可以利用平方反比律，把绝对星等和视星等联系起来； $m - M$ ，称为**距离模数**。

颜色由恒星温度决定（维恩位移定律）：观测恒星颜色，估计恒星温度。
不同颜色的恒星组成了猎户星座：红色亮星是参宿四(猎户座 α 星)，蓝白色的恒星是参宿七(β)。确定恒星温度是天体物理学最重要的课题之一。实测只能获得恒星大气层（**恒星表面**）的温度：黑体辐射+ 维恩位移定律。恒星内部温度则必须通过理论分析来估算。
维恩位移定律： $\lambda_{\text{max}} * T = 3 * 10^6 (\text{nm, K})$
滤光片组合观测不同天体：高温天体透过B滤光片的辐射比透过V滤光片的辐射要多得多，颜色蓝。通过测量恒星通过两个或更多光学滤光片的亮度，然后将结果与黑体曲线匹配，可以测得恒星的温度。（色指数）

恒星的光谱观测为确定恒星温度和恒星组分提供了准确的方法。恒星光谱彼此不同，是因为恒星化学元素组成不同
天文学家曾经根据恒星光谱吸收线对恒星进行分类。现在主要按温度递减的顺序分类。哈佛恒星光谱分类：按照恒星表面温度降低的顺序，分为O、B、A、F、G、K、M。这些恒星类型被称为光谱型。进一步将每个字母光谱类型细分为10个子类，用数字0-9来表示。数字越小，恒星越炽热。太阳被归类为G2型恒星。主要原因是恒星的**温度不同**。

直接测量恒星半径：双星系统的光变曲线：设较小的恒星是较热的恒星，因此它比较大的恒星发射更多的通量。当较小、较热的恒星位于较大恒星的后面时，它的光线被完全阻挡，因此光变曲线会出现强烈的下降。当较小的恒星走到较大的恒星前面时，来自较大恒星的少量光线被阻挡，因此光变曲线的下降较小。只有少数个头足够大、距离足够近的恒星直接法。
间接测量：大多数恒星在天空中都是无法分辨的光点：间接测量。光度正比于半径平方乘温度四次方 $L = 4 * \pi * R^2 * (\text{黑体辐射系数}) * T^4$ 。大多数利用半径-光度-温度关系估计。
恒星光度与恒星光谱型（或温度）的图叫作赫罗图（赫茨普龙-罗素图）。纵坐标，以太阳光度为单位表示（ $3.9 \times 10^{26}\text{W}$ ），从10-4到104。横坐标，表示恒星表面温度，和传统的温度从左到右增加表示方法不同，温度从右到左是增加。天文学家常常使用恒星的颜色来表示它的温度。水平轴画出的光谱型相当于B-V颜色指数。（绝对星等也可以作为纵坐标轴）恒星并不是均匀分布在赫罗图上的：大部分恒星分布在带状区域内，从左上顶端（高温、高光度）沿对角伸展到右下底部（低温、低光度）。被称为**主序带**。近邻恒星赫罗图：大多数恒星位于赫罗图上的主序带。每条沿对角的虚线对应的恒星半径为常数。

光谱型和光度型共同确定恒星在赫罗图的位置。太阳：G2V型。
大气致密或稀薄，造成谱线宽度差异：同一光谱型主序星和红巨星光谱：光度不同，恒星大气密度不同。**更多的碰撞导致更宽的谱线：测不准原理**。温度相同（光谱型）但压力不同的恒星光谱线差异：具有极低压光球层的巨星显示出非常窄的光谱线，而具有高压光球层的较小恒星则显示出更宽的光谱线。巨星的原子分布在很大的体积上 --> 巨星光球层中的粒子密度很低 --> 光球层的压力也很低：1) 密度低，发生碰撞的可能性小，更窄的谱线；2) 密度低碰撞少，粒子在各自能级寿命长， $\Delta E * \Delta t \sim h, \Delta E \ll h$

恒星的质量及成分：共同决定了恒星在主序上的位置；也确定了恒星的内部结构、恒星外貌和恒星演化。可以利用光谱来确定恒星组成成分：物质组成决定了不同谱线强度和谱线种类。
观测恒星对其附近天体（另外的恒星或可能是一颗行星）的引力作用来测量它的质量。目视双星：双星系统的每个成员都清晰可见，可以直接测量周期和间隔，利用牛顿定律计算质量。分光双星：测量两套谱线发生的周期性的多普勒位移。交食双星：如果双星系统的两颗恒星发生互相掩食，通过观测一颗恒星从另一颗恒星前面经过时星光发生的周期性变暗现象，就可以获

得有关它们半径和质量的信息。通过观测双星的实际轨道、谱线的蓝移和红移或是光变曲线的凹陷，天文学家都能测量得到双星的轨道周期和质量。

小的恒星比大的恒星要多。

观测表明，在很大范围内，主序星恒星半径的增加几乎与质量的增加成正比。**主序星的光度与质量关系：光度大致以质量的四次方增加($L \sim M^{3.9}$)。**

1) 不同恒星之间，中心温度的差别相对较小，而光度的变化很大；2) 恒星内部快速的核燃烧在单位时间内释放了巨大的能量。

简单地将可用的燃料（恒星的质量）除以燃料消耗的速度，可以估计一颗主序星的寿命。**恒星寿命正比于（恒星质量/恒星光度）正比于（1/恒星质量立方）**

太阳的寿命大约是100亿年。小质量恒星寿命长。不同质量的恒星，光度、寿命差别很大。

一般而言，恒星处于主序时的温度越高，氢燃烧的速度越快，灭亡的速度也越快。处于主序的蓝色恒星比较年轻，否则它早就已经燃烧殆尽了。反过来红的恒星不代表年纪大。只有在考察大量恒星的时候，这个判断方法才适用（如星系里的所有星球）。恒星全都呈现红色，可以推测：在最近一段时间内，该星系并没有新的星球产生，否则的话应该可以偶尔看到一些年轻的蓝色恒星。

9. 恒星形成演化

行星与恒星区别：能否发生热核反应产生能量。

太阳：一颗恒星，一个由其自身引力支撑的发光气体球，并由其中心的核聚变提供能量。

太阳是一颗相当典型的恒星。太阳的半径约为70万km（地球6400），角尺寸 0.5° （30角分）。太阳的质量为 $2.0 \times 10^{30} \text{kg}$ ，太阳的平均密度约为 1400kg/m^3 （地球5500）。太阳辐射的分布形状近似于一个温度为5800K的黑体辐射（有效温度）。

独一无二的特性：距离我们非常近，比距离我们第二近的邻居，半人马座α星，近约300 000倍半人马座阿尔法星的距离是4.3光年，而太阳距离我们仅有8光分。

太阳外层结构：光球层、色球层、过渡区、日冕层、太阳风；光球层向下：对流层、辐射区、中心核（剧烈的核反应区域）太阳大气层组成（质量百分比）： $\sim 73\%$ 氢， $\sim 25\%$ ，其他 $\sim 2\%$ 光球层为太阳的可见表面。太阳黑子中心典型温度约为3800 K，而光球层的温度约为5800 K。光球层比周围环境温度低，太阳黑子看起来更暗。太阳的“直径”指的是光球层包围的区域的大小。光球层仅从远处看起来清晰。如果你落入太阳，你不会感觉到任何表面，只会感觉到你周围气体的密度逐渐增加。

通过光球层中的米粒组织可见太阳对流层的作用。米粒组织的不同亮度变化，完全源自于温度的不同：上升部分的气体温度高，发出的辐射比冷的、向下运动米粒外缘的气体多。直径为700至1000公里，单个寿命仅为5至10分钟。

太阳大气层的最外层称为日冕。日冕在光球层上方延伸数百万公里，密度非常低。太阳风：太阳大气层产生一股带电粒子流，以每秒约400公里的速度从太阳向外流入太阳系。

太阳向太空各向同性地辐射出大量的能量。让太阳光垂直通过某种光敏装置，能测量得到每平方米的表面每秒钟所接收到的太阳能。假设探测器表面积为 1m^2 放置在地球大气的顶部。那么每秒钟到达该表面的太阳能大小被称为**太阳常数**，其值约为1400瓦特每平方米(W/m^2)

来自于太阳的能量约有50%~70%到达地球表面；剩下的被大气截获（30%）或被云层反射（0~20%）。太阳向所有方向辐射的能量总量：以太阳为中心三维球体，半径为1AU，表面积为 $4\pi \times (1\text{AU})^2$ ，乘以太阳常数得到太阳表面发出能量的总速率，即**太阳光度**，其大小接近 $3.8 \times 10^{26} \text{W}$ or 3.8×10^{33} 尔格/秒。

核区：产能区，高温 $1.5 \times 10^7 \text{K}$ 、高密。

辐射区：温度下降，原子碰撞频率和剧烈程度降低，越来越多的电子被束缚在原子核上。辐射传热；物质没有物理运动。

对流层：在辐射区外边缘，太阳核心产生的所有光子会被吸收掉。炽热气体向外运动，而上部较冷的气体下沉；对流传热。物质有物理运动。

日震学：利用太阳谱线多普勒频移（向下，红移；向上，蓝移）间接研究太阳内部环境。对内部压力波引起的太阳表面振动的研究，提供了进一步洞察太阳结构的知识。

色球层：日全食时可观测区域。日冕：高温，300万K。导致**日冕温度急剧升高**的原因：太阳光球层中的磁场扰动最终加热了日冕？

太阳可见光波段精细光谱：显示了成千上万吸收线，表明太阳大气中存在着处于各种不同激发和电离态的67种不同元素。**夫琅和费线**：夫琅和费认证的太阳光谱中的暗特征谱线。574条谱线，并且以字母A到K标示出主要的特征谱线。D1和D2线是著名的“钠双线”。

太阳黑子：太阳表面的黑暗区域，如地球大小。留存下来最早的太阳黑子观测纪录来自公元前364年：中国天文学家甘德的星表。《汉书·五行志》对公元前28年太阳黑子记录。西方有多次太阳黑子的记录，但都被误解为是行星凌日现象。1612年伽利略才给出正确的解释：黑子。

太阳黑子的存在，表明太阳并不是完美的、一成不变的（太阳转动）。黑子经常成群出现。在任意给定时刻，太阳可能会有成百上千个黑子，也可能没有任何黑子。

太阳黑子是**光球层气体温度低的区域**：本影 $\sim 4500 \text{K}$ ，半影 5500K （光球层 5800K ）；黑子仍然是由炽热气体组成的。

太阳黑子区域光谱中塞曼效应的测量表明它们具有强磁场，比其邻近光球层区域的磁场强约1000倍（正常光球层磁场比地球磁场要强几倍）磁场线方向垂直于进或出太阳；同一太阳半球上，所有黑子对都有同样的磁场构型；不同半球都有相反的磁场构型。

成因：较差自转（赤道快、两极慢）和对流结合，扭曲了太阳磁场（磁力线）分布，决定黑子数量和分布：太阳黑子比周围环境温度低，是因为强大的磁场趋向于阻碍炽热气体的对流运动，而这种对流通常是朝向太阳表面的。与太阳黑子相关的强烈磁场阻止了热物质的向上流动，并形成了一种阻挡热气体的塞子。当塞子上方的材料冷却时它会变得更加致密并向内猛

冲，将更多的气体和更多的磁场吸入其后面。集中的磁场会导致更多的冷却，从而建立一个自我延续的循环，使一个斑点能够存活数周（如果磁场环出现在太阳边缘：日珥）
黑子在日面上的数量和分布存在规律变化：黑子的平均数目每大约11年达到极大。在太阳黑子活动周期内，太阳黑子出现的纬度在发生变化：开始高纬度，结束于低纬度区域。太阳黑子的数目和位置随太阳磁场的增强和减弱以约11年的太阳黑子活动周期变化着。太阳黑子22年磁周期又叫“**海尔周期**”，（11年太阳黑子的磁场极性南北半球对换）1913年发现。

日珥（规模大于地球）太阳耀斑，日冕物质抛射
太阳风暴对地球的破坏：日冕物质抛射到达地球时会扭曲地球的磁场。由于变化的磁场会产生电流，因此CME会加速电子，有时达到非常高的速度。这些“杀手电子”可以深入卫星内部，有时能摧毁卫星的电子设备并使其永久瘫痪。地球磁场的干扰可能会导致通信中断。

太阳的光度是 4×10^{26} 瓦特：难以想象的明亮，比万亿个城市加上上万个100瓦灯泡还要亮。由于太阳已经发光了数十亿年，因此太阳整个生命周期产生的能量总量是惊人的。能量释放缓慢而稳定，提供均匀的和长期性的能量供应：核聚变。
太阳在核心通过核聚变过程将氢转化为氦，并以此产生能量，质能守恒定律要求这些丢失的质量以能量的形式出现，最终产生了我们所见的光芒。 $E=mc^2$ 。由于同种电荷相斥，两个低速运动的质子远离彼此，永远不会靠得足够近而发生聚变反应：要求高速运动的质子，温度 $T > 10^7$ K引发核聚变。四个氢原子核结合生成一个氦4（前者质量大，损失了质量）与两个中微子，并以伽马射线的形式释放出能量。核心产生的太阳核能是以伽马射线形式存在的。当伽马射线穿过太阳内部较冷的层时，光子会被吸收并重新发出。
质子-质子链（p-p链）：质子+质子=氘+正电子+中微子；正电子+电子=伽马射线；氘核+质子=氦3+伽马射线；氦3+氦3=氦4+2质子。总：4质子=氦4+26.20MeV（0.02862u）。温度升高，会发生其他类型的反应，如CNO循环。
太阳核反应发生在太阳深处，能量必须从太阳中心传输到其表面：辐射和对流很重要，而传导通常可以忽略不计。太阳的内部：理论模型预测。

星际空间中同时还存在着弥漫于恒星之间的物质，密度极低，是恒星或者行星密度的亿亿分之一（ $1/10^{24}$ ）。恒星诞生于星际空间之中；恒星死亡之后会将自身物质重新抛射回星际空间之中。新诞生恒星的外观在其90%以上的寿命内不会有太大变化。

距离太阳最近的恒星是半人马座比邻星，约为1.3pc；270 000 AU或4.23光年；太阳系边界约100个AU。恒星之间的典型距离（太阳邻域~1pc）远比恒星本身的大小（~ 10^{-7} pc）要大得多。两颗恒星之间没有其他重要天体：它们之间称为恒星际空间。
明亮区域是无数颗恒星聚集起来的地方，因为肉眼的分辨率不足以分辨出单个恒星，因此这些恒星聚集起来形成了一团模糊的明亮区域。黑暗区域并不是恒星之间的空洞区域：星际介质阻挡了位于其后面的恒星光芒，使本来由恒星组成的平滑明亮区域变成了黑暗空洞。星光的减弱统称为消光。

星际介质：恒星之间的物质集合，成分主要是冷气体（低于100 K）和尘埃颗粒。
气体和尘埃混合在星际空间中，**分布非常不均匀**；**气体占~99%**；**尘埃~1%**。
气体成分主要由原子构成，它们的平均大小约为0.1nm；主要是由原子态或分子态的氢和氦组成。75% H；25% He。星际气体密度非常低：平均密度每立方米 10^6 个原子（最好真空 10^{10} 个原子）
星际**尘埃**由。星际尘埃是由硅酸盐、石墨、铁和“脏冰”组成的（成团的原子和分子）；星际尘埃不同于我们所熟知的粉笔灰、烟尘、煤灰或雾，更小；直径大约为0.1 μ m，平均密度每立方米约 10^{-6} 个尘粒

发射星云（炽热星际介质）；反射星云（尘埃对星光散射）；电离氢区（HII区）；中性氢区（HI区）；暗星云。散射星云：光被尘埃云散射，使视线上的光线偏折，发出蓝光；发射星云：当电子与质子复合形成氢原子时辐射出光子，星云发出红色光芒
星云观测：星云吸收线、发射线比恒星窄暗。真实的光谱往往是由恒星光谱和视线方向上很多其他天体的辐射或吸收混合而成。
尘埃红化。尘埃对光的散射：**星际尘埃对蓝光的散射更有效**，从而使遥远的恒星显得更红，并使恒星附近的尘埃云呈现蓝色。昴星团：恒星周围蓝色反射星云的一个例子。反射星云之所以发光，是因为其中的尘埃散射了附近明亮光源的光。
典型星际尘埃颗粒的大小为0.05微米（头发100微米）成分：氧、碳，氮；镁、硅、铁。尘埃颗粒小尺度上呈线状或圆柱状；但在更大尺度上，尘埃颗粒之间会有复杂的纠缠和卷曲。
尘埃颗粒可以且只会吸收波长小于或者约等于其半径的波长的光。瑞利散射强度反比于波长四次方。

部分星际介质（星际云）在自身引力下坍塌并碎裂成与太阳质量相当的碎片时，恒星便开始形成。冷的星际云会碎裂成许多小的物质团块，最终形成恒星。
引力：几个原子开始向中心聚集；某瞬间偶然聚到一起；热运动：偶然形成的团块很快地消散；当引力作用大于无规则的热运动时，引力会破坏气体云团的平衡，使云团开始收缩，恒星形成开始：经历七个基本演化阶段。
恒星形成：1. 星际云：气体云尺度数十pc，温度~10K，密度约 10^9 个粒子/ m^3 。质量为太阳质量数千倍，在自身引力作用下开始坍塌；2. 云团碎块的坍塌：尺寸为太阳系的100倍，中心密度~ 10^{12} 个粒子/ m^3 。碎块中心的 $T \sim 100$ K。内部密度增加，碎裂过程停止，云团温度上升；3. 碎裂停止：尺寸为太阳系大小；碎块内部区域密度非常大，气体对其辐射来说已经变得不透明了，碎块中心温度剧增，中心温度高达 10^5 K。稠密的、不透明的中心区域被称为原恒星；外部为原恒星盘；4. 原恒星：体积收缩、密度增加，核心和光球层的温度都在增加。中心 $T \sim 10^6$ K < 10^7 K。光度为太阳光度的几千倍；5. 原恒星的演化：当原恒星处于林忠四郎轨迹上，它已经比较接近于主序星。（原恒星向下朝着主序运动，在主序成为一颗真正的恒星）体积收缩到约为太阳的10倍大小，表面温度约为4000K，光度降低至太阳光度10倍左右。原恒星的中心温度达到

5x10⁶K左右，核心的温度仍然不能引发核反应；6. 恒星诞生：在出现大约1000万年之后，原恒星终于演化成为一颗真正的恒星。质量~1倍太阳质量，半径收缩到约106 km。中心温度上升到107K，核心的质子开始聚变成氦原子核，一颗恒星就此诞生。表面温度约为4500 K，光度是太阳光度的三分之二；7. 主序星的最终形成：在这之后大约3000万年的时间内，恒星稍稍会有一点收缩。中心温度上升到1.5x10⁷K，表面温度达到6000K。压力和引力最终趋于平衡。

星云的收缩演化可以用它在赫罗图上的演化轨迹来表示。1-7阶段演化过程所经历的时间约为4000万~5000万年，不到太阳在主序上寿命的1%。主序稳定燃烧100亿年。恒星的质量越大，经历每个阶段所需的时间就越短。**质量是决定一颗恒星特性和寿命的关键属性。**最大质量的恒星有着最短的形成时间和主序寿命。

对于其他质量的星前天体，它们的温度、密度和半径都有着相似的演化趋势，但数值和演化轨迹显著不同。星际云中质量最大碎块倾向于产生质量最大的原恒星，并最终形成质量最大的恒星。小质量碎块产生低质量恒星。不管是什么质量，原恒星演化轨迹的终点都在主序上。

星际云形成主序星所需的时间也强烈地依赖于它的质量：质量最大的云团碎块成为O型恒星只需要几百万年，差不多是太阳所需时间的1/50；对于质量小于太阳质量的星前天体，如一颗典型的M型星，需要将近10亿年才能形成。如果所有气体云团都有正好相同的元素组成，且比例也相同，质量将是决定新生恒星在赫罗图上位置的唯一因素。恒星的化学组成会影响恒星内部结构，进而会影响恒星在主序时的温度和光度。**恒星之间化学组成的差异，造成恒星在HRD位置的变化：主序线->主序带**（一定的弥散）

褐矮星：恒星演化过程中的失败者。它们和恒星一样，形成于星际云的坍缩和分裂，然而它们的质量低于太阳质量的0.08（木星质量的80倍）- 恒星核心点燃氢聚变所需的**临界质量**。

M20区域显示了恒星诞生的三个阶段观测证据：母体星云是第1阶段。收缩云团碎块区域（A、B）介于第1和第2阶段之间。发射星云（M20）源自大质量恒星的形成（第6和第7阶段）。

猎户座部分区域红外波段图像，星云被一个巨大的分子云包裹；分子云的不同部分正在分裂或收缩（2-3），而更小部分正在形成原恒星。显示原恒星存在的一些证据：星云致密区和强烈分子气体射电辐射区（3）。许多被气体和尘埃盘包裹着的年轻原恒星中的其中一颗的高分辨率图像，行星可能最终在这些盘上形成。

原恒星周围的星云盘是酷热并有强烈外向流的地方，它形成一个垂直于盘的双极喷流。随着盘被星风吹走，喷流成扇形向外喷出，最终成为球状星风。恒星形成云团IC 1396：炽热的年轻恒星；强劲星风撕散了环绕着中心恒星的盘；年轻恒星系统 HH30 的两个喷流。年轻恒星系统概念图：两条垂直于气体和尘埃盘的喷流，盘在同时绕着恒星旋转。

恒星形成传播一代又一代恒星的形成：物质极易在发射星云较高的温度和压力驱使下而扩散；随着扩散的物质波（激波）撞击周围的分子云，星际气体会趋向于堆积和被压缩；引力不稳定性开始发挥主导作用，将云团分离为碎块，继而最终形成恒星。

单团云的坍缩和碎裂能够形成数以百计或千计的恒星，它们来自于同一块云，分布于同一空间区域。这种恒星的集合被称为**星团**。由于星团中所有的恒星都同时形成于同一块星际气体云、成长于同样的环境中，因此星团是接近于理想的恒星研究“实验室”。成员恒星具有相同的年龄、化学组成以及诞生环境，唯一能区分同一星团中的不同恒星的参数是质量。质量偏小、更延展的星团被称为星协。

星团可分为疏散星团和球状星团。球状星团：可能包含几百万颗恒星，它们中没有比太阳质量更大的主序星，说明它们是很以前形成的。主要由年老恒星组成，整体成圆形，恒星数目多，中心密集。疏散星团：包含几百到几千颗成员星。它们通常包含许多明亮的蓝色恒星，说明是最近才形成的。由年轻恒星组成，结构松散，形状不规则。

初始质量函数：描述新形成恒星的质量分布。dN为在质量范围dm，时间间隔dt中每单位体积形成的恒星的数量

恒星大多数时间处在主序阶段（核心氢燃烧），后经亚巨星支，红巨星支，水平支，渐进巨星支，行星状星云，白矮星，黑矮星。大质量恒星的演化比低质量恒星的演化更迅速，最终毁于爆炸。

在主序阶段，恒星在其核心中缓慢地将氢聚变成氦：主序星处于流体静力学平衡状态，向外的热压力正好抵消掉向内的引力。任何一个发生小小变化，总是会引起另一个用微小变化来补偿。当核心的氢最终被消耗殆尽时，恒星的内部平衡会发生转变，恒星的内部结构和外观都会开始迅速改变，恒星因此离开主序。一旦一颗恒星开始离开主序，那么它的寿命就已经屈指可数了。恒星演化的主序后阶段——恒星生命的终结——关键取决于恒星的质量。

第8阶段：亚巨星支。在恒星到达主序~100亿年后，中心氢被耗尽，核心温度不能使氢聚合成更重的元素，核区的核反应停滞；主要燃烧区域移动到内核的较外层（氢壳层燃烧阶段）

第9阶段：红巨星支。氢壳层以持续加快的速度聚变成氦，氢燃烧增强而产生的气体压力使恒星不燃烧的外层半径增大。核心不断收缩，质量增加，温度增加。恒星演化成为一颗红巨星。从正常的主序星转变为更老的红巨星大约需要1亿年。

第10阶段：水平支。当中心的密度上升到约10⁸kg/m³，温度达到氦聚变成碳所需的108K，恒星中心的核聚变被重新点燃。氦闪（电子简并压；氦猛烈燃烧）结束，靠近核心稳定的燃烧氦壳层；外部有一个氢聚变的壳层，恒星下降至水平支。

第11阶段：渐进巨星支。内核中的氦会被快速地消耗，死亡中的恒星会再次上升回到巨星支。恒星现在有一个致密的碳内核，被燃烧的氦壳层包裹着，而外面又被燃烧的氢壳层包裹着。恒星的外部不燃烧的包层快速膨胀。

第12阶段：行星状星云。内部的碳内核不再产生能量。内核外部的壳层持续不断地燃烧着氢和氦。中心是一个主要由碳灰烬组成的小且界限明确的内核，炽热、致密并且仍然非常明亮；内核之外不断扩张的尘埃和冷却气体云弥漫到很远的空间。

第13阶段：白矮星。随着包层的消散，原来隐藏在巨星大气面纱下的内核变得可见；内核非常小（地球大小）、质量大约是太阳质量的一半、有着白色的炽热的表面——白矮星（简并恒星）。质量高达约 8Msun 的恒星可以失去足够的质量，最终形成白矮星

第14阶段：黑矮星。一旦一颗孤立的恒星成为白矮星，它的演化就结束了。孤独的黑矮星不断地随时间冷却并变暗。由于**稳定的白矮星无法再通过收缩或核聚变产生能量**，发出的光来自于内部储存的大量热量白矮星逐渐将其所有热量辐射到太空中：数十亿年后，白矮星将不再发光最终将成为一颗黑矮星——一颗冰冷恒星的尸体，质量相当于恒星，大小相当于行星。主要由碳、氧和氦组成，一颗冰冷的、致密的太空中的灰烬。

白矮星的半径随着恒星质量的增加而缩小：质量约为 1.4 M太阳或更大的白矮星的半径为零。

一颗恒星在结束其生命时仍能成为白矮星的最大质量1.4 M太阳，被称为**钱德拉塞卡极限**。
低质量恒星的死亡：观测证据：行星状星云的“环”实际上是三维发光气体壳层；猫眼星云：可能产生自一对都有包层的双星。球状星团M4中心区：两平方光年的小范围内有大约100颗白矮星。

质量比太阳更大的恒星的演化。演化过程不同：大质量恒星的内部碳可以点燃，形成更重的元素；演化时标不同：大质量恒星的内部温度更高；主序星等寿命更短；演化产物不同：大质量恒星通过超新星爆发，形成中子星或黑洞。（当铁最终在核心中产生时，恒星的生命只剩下几分钟了）。

1) 计算不同年龄星团的HRD与观测星团进行比较；2) 利用主序带顶部的位置（拐点）作为星团年龄的衡量标准：球状星团年龄超过110亿年，宇宙年龄很好的约束天体。

对于一颗低质量恒星，白矮星并非必然的归宿。如果它有一颗能提供额外燃料的双星伴星，那么它仍有继续发生剧烈活动的可能。对于大质量恒星而言，**无论存在双星伴星与否**，它们必然在一次爆发中走向死亡。

恒星的洛希瓣：恒星周围的一个空间区域，在这个区域内的物质会受到该恒星的引力约束。银河系中的大多数恒星并不是孤立的，实际上是双星系统的成员如果两颗恒星距离很近，其中一颗恒星的引力可能会严重影响另一颗恒星的包层（演化）。

新星：一颗白矮星，其吸积在表面的氢发生剧烈燃烧，亮度突然增加；整个星体质量没有超过钱德拉塞卡极限（温和）。吸积的气体在白矮星表面堆积，温度超过 10^7K ，氢被点燃，恒星的亮度突然上升。燃料耗尽，光度下降。

双星系统的暴力演化：质量较大的恒星首先演化成红巨星，然后变成白矮星。然后伴星又演化为红巨星，白矮星开始从其伴星吸引物质。最终，白矮星质量获得了超过钱德拉塞卡极限，成为**Ia型超新星**。

超新星：恒星亮度突然急剧上升，然后缓慢下降，最终从视线中消失的现象。新星和碳爆发超新星(SN Ia)都是白矮星吸积物质后突然变亮，但是两种截然不同的现象。超新星的能量更加巨大： 10^{43}J ，太阳在100亿年的整个生命过程中辐射的总能量。由完全不同的物理过程所驱动：SN Ia 碳聚变几乎同时在白矮星的所有地方开始。

SN1006、第谷超新星(SN1572)和开普勒超新星(SN1064)都是Ia型超新星。这些超新星都没有显示出任何在爆炸中幸存下来的恒星遗迹的证据。到目前为止，天文学家还无法识别出这些历史超新星中为白矮星提供吸积物质的伴星。产生Ia型超新星的主要替代机制：**双星系统中两颗白矮星的合并**。

小于8倍太阳质量的小质量恒星，其温度还不够点燃它核心的碳，以一颗碳氧白矮星终结一生。大质量恒星不仅能聚变氢和氦，还能聚变成碳和氧，甚至能合成更重的元素。铁核坍缩：形成铁核后，原子核的结合将增加每个粒子的总质量，吸收能量，聚变不能发生！核反应停止，热压力减小，引力 > 热压力；恒星坍缩引爆。光致蜕变、中子化、报复性膨胀：核坍缩超新星。根据光谱含氢量，天文学家把超新星分为两类，I型和II型：I型超新星为贫氢型；II型超新星为富氢型，在光极大几个月后光变曲线会出现特征性的平台。II型超新星为核坍缩超新星。I型超新星为碳爆燃超新星。白矮星吸积发生的碳爆发超新星为I型；大质量恒星核心区的内爆：爆炸将产生II型超新星。

中心核反应停止时，大质量恒星的核心由电子简并压支撑，就像白矮星一样。虽然核心没有产生能量，但围绕核心的壳层仍然发生聚变。聚变灰烬落到中心核增加M，质量越大意味着核心越小，密度增加到 $4 \times 10^{11}\text{g/cm}^3$ 时，一些电子被挤压到原子核中，电子与质子结合形成中子和中微子；一些电子消失了，核心迅速收缩。最终原子核被中子饱和：简并中子阻止大质量恒星核心塌缩。

比氢重的元素均形成于恒星核合成。比碳更重元素倾向于通过氦（ α 粒子）俘获产生（阿尔法过程）。

铁具有最大核结合能，铁56是最稳定的原子核。**比铁更重的元素在演化后期恒星的核心区里通过中子俘获形成**。中子俘获：通过吸收中子形成更重的原子核。将中子加入原子核，并不会改变它所属的元素，只会产生同一元素的一种更重的同位素。由于加入原子核的中子很多，它最终变得不再稳定，放射性衰变为另一种元素的稳定原子核。s过程：“慢”中子俘获机制， ^{209}Bi 的稳定原子核通过该过程产生；正常恒星演化；r过程：“快”中子俘获机制，产生最重原子核（如钍232、铀238或钷242等，衰变速度和形成速度一样快）的过程。发生于大质量恒星死亡的超新星爆发。

恒星与超新星核反应过程计算得到的元素丰度观测数据每个点都吻合得非常好。典型I型超新星光变曲线的计算结果与观测得到的光变曲线很好吻合。

恒星演化的循环：当星际云的一部分被压缩，直到它无法再抵抗自身的引力时，恒星便开始形成。云团坍缩并碎裂，形成星团。其中最炙热的恒星会加热和电离周围的气体，使激波传遍周围的星云，并可能触发新一轮恒星的形成。恒星在星团中演化。质量最大的恒星演化得最快。它们在核心区产生最重的元素，并在超新星爆发时将其喷入星际介质。小质量恒星演化得时间更长，但它们也创造重元素。当外部包层被作为行星状星云剥离时，小质量恒星也显著地促进了这些重元素在星际空间中的“播种”。新形成元素的产生和爆发性传播都与进一步的激波紧密相随。激波在穿过星际介质的同时，还丰富了星际介质的成分，并通过压缩促发新一轮的恒星形成。

10. 中子星和黑洞

II型超新星（核坍缩超新星）爆发摧毁了母星，会留下一个极度压缩的微小遗迹：中子星（完全由中子构成）。个头非常小（直径20km），质量却非常大（大于太阳质量）：平均密度 $\sim 10^{17}\text{--}10^{18}\text{kg/m}^3$ ，是白矮星密度的10亿倍；宇宙中密度最大的物体。

中子星外部是一个固态的铁外壳，大约厚1千米，密度 $\sim 10^9\text{g/cm}^3$ ；内部几乎完全是中子组成的流体，密度为 $10^{14}\text{--}15\text{g/cm}^3$ （原子核密度）。质量 = $1.3\text{--}2.2 M_{\text{sun}}$ ；表面温度 $10^6\text{--}7\text{ Kelvin}$ ，半径 = $10\text{--}20\text{ km}$ （质量越大，半径收缩得越大），磁场 = 10^{12} Gauss （地球磁极磁场最强， 0.7Gs ）中子星非常致密，预测它们在形成时非常热、具有强磁场并且快速自转。它们很快就冷却，失去大部分磁场，其自转也会随着年龄的增长减缓。

中子的简并压可以使中子星保持平衡。中子星是固体；引力极其强大。除了质量大、体积小以外，新形成的中子星还有两个非常重要属性：自转速度非常快，自转周期不到1s；新生的中子星有很强的磁场；比地球磁场强上万亿倍。角动量守恒，磁通量守恒。坍缩之前：大质量恒星核(大的半径,自转速度小,磁场弱)坍缩之后：中子星(半径小;自转速度快;表面磁场很强)

查德威克在卡文迪许实验室发现中子。郎道提出中子星概念。巴德和兹威基提出，中子星可能是超新星爆发的产物，即超新星爆炸后留下的致密核。奥本海默和沃尔科夫利用理想状态的简并中子气模型建立了第一个中子星模型。Giacconi发射火箭，X-Ray探测器；发现Crab星云为X-Ray源。1967年，第一例中子星被发现（约瑟琳·贝尔）：CP1919的射电辐射强度的规律性变化：0.01s的射电爆发，周期1.34s。贝尔的论文指导老师安东尼·休伊什：脉冲星是自转中子星；获得了1974年的诺贝尔物理学奖。在天空中相距甚远的方向上发现了三个类似的源，“小绿人”。

银河系内已经发现了超过3000颗脉冲星。每颗脉冲星都有自身独特的脉冲周期和持续时间。脉冲星的最好模型：一颗致密的自转中子星周期性地向地球发出辐射中子星从表面的两个“热点”不断地发出辐射：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（热点）。热点位于中子星磁极附近，带电粒子在这里被恒星的旋转磁场加速至具有极高的能量，然后沿着恒星的磁轴发出辐射。**旋转灯塔模型**：由于中子星具有磁性并且在自转，所以它们会将爆发的电磁能量送入太空。被强磁场束缚的带电粒子会形成辐射束。随着中子星的自转，由此产生的辐射束如同一个旋转灯塔扫射太空。如果中子星的朝向恰好使辐射束能扫过地球，那么我们就能看见这颗恒星是脉冲星。

蟹状星云脉冲星SN 1054大质量恒星演化遗迹。主脉冲之后的脉冲可能与远离地球光束有关。如果我们从地球上可以看到辐射束，那么我们称其辐射源为脉冲星。脉冲星的脉冲周期是中子星的自转周期。

所有脉冲星都是中子星，但**并不是所有的中子星都被观测为脉冲星**。首先，使中子星发出脉冲信号的两点要素，快速自转和强磁场，都是随时间减弱的，因此脉冲会逐渐减弱，频率也会减小；第二，即使是明亮、年轻的中子星也不一定会作为脉冲星被观测到。脉冲光束相对较窄，只有中子星恰好以正确的角度朝向我们时，才能看到脉冲。

X射线暴源：20世纪70年代重要发现。每次爆发都比太阳的光度强数千倍，但仅持续几秒钟。大多数恒星都不是孤立的，而是双星系统的成员：双星系统中一颗为中子星。中子星的巨大引力会从伴星表面吸引物质，并聚集在中子星的表面。物质不会直接落到表面上，而是会形成一个吸积盘。吸积盘的内部会变得非常热，并释放出稳定的X射线流。随着气体在中子星表面聚集，温度逐渐上升。温度高到可以进行氢聚变，突然发生快速核燃烧，释放巨大能量，产生一个短暂但强烈的X射线闪耀：X射线暴。

1974年，泰勒和赫尔斯使用305米阿雷西博射电望远镜，通过对脉冲双星PSR1913+16观测，间接证明了引力波的存在。获得1993年诺贝尔物理学奖。利用脉冲星发出的精确性周期脉冲信号，泰勒和赫尔斯计算了双中子星系轨道的半长轴和绕转的周期。根据广义相对论的预言，近距相互绕转的两颗致密中子星将会产生引力辐射，携带辐射能量引力波将向外传播，随着双中子星引力辐射能量减少，双中子星系轨道半径随之变短、周期随之减小。长达30多年的精确观测，他们发现双星系的半长轴每年减少3.5米，绕转周期每年减小78.5微秒，结果与广义相对论预测保持一致。

1982年，毫秒脉冲星被发现：每秒自旋数百次（即脉冲周期是几毫秒）。毫秒脉冲星高速自转：中子星通过从伴星吸积物质使自旋加快。由于向内落下的物质会撞向中子星，它们的运动轨迹几乎平行于中子星表面，因此会让中子星自转得更快。

三分之二的毫秒脉冲星都被发现位于球状星团内，杜鹃座球状星团100多个独立的X射线源超过一半是毫秒脉冲星双星。GC非常古老，年龄至少有十亿年；与II型超新星有关的大质量恒星，会在形成数千万年后爆炸，GC形成之后没有形成任何新的恒星。因此，在很长的一段时间内，GC中并没有形成新的中子星，但超新星产生的脉冲星的自转速度预计在几百万年后会慢下来，100亿年后应该会完全停止自转。解释：双星系统一个大质量超巨星和一个太阳质量恒星相互绕转，大质量恒星爆炸，留下一个中子星：中子星转慢、停止，变成一个冷的中子星。太阳质量恒星发生膨胀，物质流向中子星，吸积物质加速中子星旋转速度：吸积结束，中子星变为毫秒脉冲星。致密的球状星团内部，小质量恒星被踢出，剩下的正常恒星演化：正常恒星演化，中子星吸积物质，中子星变为毫秒脉冲星；循环。

星际航天器搭载的射线探测器在某一时刻同时接收来自三颗以上的脉冲星信号，就能推算出相关定位信息，达到实时导航的目的。优点：提供高精度的参考时间基准；导航精度高；对导航敏感器精度要求较低。天宫二号空间实验室完成中国首次X射线脉冲星导航空间实验。

如果超新星中心核的质量超过3倍太阳质量，引力 > 压力：恒星中心核将一直坍缩下去。超过这一上限，恒星将无法抵抗其自身的引力，并坍缩形成黑洞，即一个没有任何事物能够逃逸的空间区域。质量非常大的恒星在超新星爆发后，会形成黑洞而不是中子星。

逃逸速度：一个物体摆脱另一个物体的引力所需要的速度。同时考虑相对论中两点重要的事实：没有任何物体的速度能超过光速，包括光在内的所有事物都会被引力所吸引。逃逸速度与物体质量除以它的半径的商的平方根成正比 $v=\sqrt{2GM/R}$ 。地球半径 6400km，地球表面的逃逸速度仅为11km/s；太阳表面 618km/s。挤压地球使其半径达到约1cm，逃离地球表面所需的速度将达到 300 000km/s。

没有任何形式的辐射能从葡萄大小的地球强大引力下逃脱，包括射电波、可见光、X射线以及任何波长的光子。由于没有光子能够逃离，我们的星球将不可见，也无法与外界交换信息，没有任何形式的信号可以被发送到地表之外的宇宙。只有它的引力场会保留下来。无论形成黑洞的天体的组成、结构或历史如何，黑洞只有三个物理性质可以从外部测量：黑洞的质量、电量以及角动量。

黑洞内和黑洞附近只能用广义相对论来描述。广义相对论：物质存在使时空结构弯曲。光或电子等进入弯曲时空区域时，路径将与没有该物质时的路径不同：光总是沿着时空的最短路径移动。最短路径不再是直线，而是曲线。爱因斯坦提出的广义相对论三大验证：水星近日点进动；光线偏折；引力红移。

惠勒1967年提出“黑洞”这一名词取代“引力完全塌缩的星球”。在某一半径处，坍缩恒星的逃逸速度等于光速，该半径（事件视界半径）被称为**史瓦西半径**。黑洞周围半径等于史瓦西半径的假想球面叫作视界，首先由卡尔·史瓦西提出。无转动黑洞视界面 $R_s=2GM/c^2$ ，太阳质量的黑洞， $R_s \sim 3 \text{ km}$ 。黑洞视界：黑洞的时空分界面，是光子无法逃逸出去的时空界面（无限红移面）。尽管视界与任何形式的物质都不相关，但我们仍可以把视界认作是黑洞的“表面”。黑洞不会在星际空间游荡，物体在黑洞附近的轨道，与它在一颗质量相同的恒星附近的轨道是基本相同的。只有物体恰好在距离视界几个史瓦西半径通过时，实际轨道与牛顿引力和开普勒定律预测的轨道之间，才会有显著差异。如果物体的轨道恰巧使它非常接近于视界，那么它将

无法逃出黑洞。黑洞只允许物质内向流动，流入黑洞的物质会受到巨大的潮汐力：落入黑洞的任何物质在纵向上拉伸，而在横向上挤压；同时被撕裂并加热到高温。落入黑洞的物质在到达视界之前，会自发发出辐射（黑体辐射）。

接近事件视界：外部观测者：向黑洞中心发送一个坚不可摧的机器人，安装有一个精确时钟和一个已知频率光源。起初，他远离我们，移动得越来越快，就像他正在接近任何大质量恒星一样。当机器人接近黑洞的事件视界时，从我们外部的角度来看，黑洞周围的强大引力场将使他的时钟运行得更慢（引力红移）机器人发出的光红移会越来越大，正好在视界上发出的光会被引力红移至无限长波长。光子仍以光速运动，但没有任何能量。所有落入黑洞的物质在外部观察者看来会冻结停在视界处，并需要无限的时间才能落入视界。外部观测者将不会亲眼看见机器人向下落入视界。

接近事件视界：机器人：从机器人的角度：光源没有发生红移，光的频率不发生变化，时间按照正常的速度流逝，很快、无感穿过事件视界进入黑洞。视界不是物理屏障，而只是空间中的一个区域，时空的曲率使逃逸变得不可能。没有回头路：一旦进入事件视界，发出的任何信号将永远对外部宇宙隐藏。接近黑洞时：奇点作用在他脚上的引力比作用在他头上的引力大，纵向被拉伸；身体左侧会稍微向右拉，右侧会稍微向左拉，横向被挤压。撕裂，最终变为单个原子的集合继续落入奇点。

黑洞的视界内有什么：没人真正知道。广义相对论预言，如果没有什么与引力竞争，大质量恒星的核心残留物必将坍缩成无限挤压点。它的体积为零，密度和引力场是无限的；这样的点被称为奇点。**奇点并非物理性的**。目前的物理定律不足以描述恒星坍缩的最后时刻。

不同种类的天体，都可以形成黑洞。黑洞质量范围很大；包括太阳质量大小的恒星级黑洞；千万个太阳质量大小的超大质量黑洞。有强有力证据表明，包括银河系在内的许多星系中心存在超大质量黑洞。每个星系中心都有一个百万到100亿倍太阳质量的超大质量黑洞。每个星系都存在几百万个小黑洞。

黑洞的观测证据：双星系系统中的黑洞天鹅座X-1是最先被广泛承认为黑洞的候选星体。天鹅座X-1属于一个高质量X射线双星系统，两者相互围绕公转，距离为0.2AU。其质量为太阳质量的14.8倍，事件视界半径约为26公里。光学图像观测，伴星为蓝巨星，质量~25Msun。光学光谱观测，双星轨道周期5.6天，双星系统总质量40Msun。X射线观测，高温气体流向看不见伴星；快速光变，X射线辐射区域非常小。

射电星系延展的喷流：能量巨大的天体能量来自于中央超大质量黑洞对周围恒星和气体的吸积。中等质量黑洞：星系M82中心X射线观测揭示了一系列的亮源，被认为是中等质量黑洞吸积物质的产物。

第一张黑洞照片：**射电照片**，201904，M87黑洞。黑洞全景照片：黑洞、黑洞周围的吸积流以及从吸积盘附近延伸向远处的喷流；充分展现了黑洞和它周围环境的关系。

银河系中心超大质量黑洞观测，挑战：地球距银心约2.8万光年，银盘上充满尘埃：万亿份之一光子可到达地球。近红外波段，对尘埃消光不敏感，发展近红外设备；银河系中心恒星数密度比太阳周围高10亿倍（比邻星：离太阳系最近恒星，距离4.22光年）监测银心单个恒星轨道运动，需要极高分辨率：大望远镜；大气散射；耐心+烧钱。

接近30年持续观测：观测精度不断提高，精确监视恒星运动恒星绕银河系中心运动：在太阳系大小区域里，有4百万倍太阳质量（两个团队数据完美吻合），黑洞存在最强观测证据

目前只能利用运动学方法，探测近邻、少数几个大星系中心的大质量黑洞。长时间：1992-

2020；高分辨：近邻星系；局限性：**只能探测大质量黑洞**。新方法：黑洞潮汐瓦解恒星事件（TDE），恒星运动到黑洞附近被黑洞引力瓦解，黑洞吸积物质，变亮。TDE提供了探测（不同质量）黑洞有效方法。黑洞引力作用范围很小，TDE发生概率低，但宇宙星系数目众多：大天区、快速重复观测，每年可以发现数百个TDE事件（黑洞）（墨子巡天望远镜）

霍金辐射：以量子效应理论推测出的一种由黑洞散发出来的热辐射。霍金辐射能够让黑洞失去质量，当黑洞损失的质量比增加的质量多的时候就会缩小，最终消失。霍金辐射仍未被实际观测证实。 $T=2.1 \times 10^{-67} \cdot (M / (M_{\text{sun}} \times 10^{30} \text{kg}))^{-3} \text{year}^{-1}$ 小黑洞寿命短；大黑洞寿命长。

识别黑洞靠淘汰法：“天体X致密且质量巨大。我们不知道有其他什么东西能如此小且质量大。因此，推断天体X是一个黑洞。”没有明确的证据表明那些所描述的大质量致密天体真的是黑洞。天文学家已经在许多系统中发现了黑洞视界的线索（而不是中子星的坚硬表面），但它们中没有一个被证明是确定的。随着技术的不断改善，我们可以期待更多这样的观测。

11. 星系

夜空有两个令人震撼的特征：第一，恒星几乎均匀地分布在天空中的各个方向；第二，有一条跨越夜空的模糊光带，这就是银河系。银河系只是可见宇宙中千亿星系的一员。**太阳位于距离银河系中心约8.5kpc的地方。**

星系是一个巨大的由恒星、星际介质和暗物质组成的集团，它们孤立于宇宙中，由自身的引力束缚在一起。

因为我们身处银河系中，银河系盘看起来就像是一道穿过天空的亮带。星系中心附近银盘增厚成为核球。银盘被一个充满年老恒星以及星团的近球状银晕所包围。银河系是一个旋涡星系。盘星和晕星在空间分布、年龄、颜色以及轨道运动上都有区别。**银河系可见部分的直径约为30kpc**。仙女座星系（M31）的结构：M31的外观与我们的银河系非常相似；面向星系M101，与银河系和仙女座星系的整体结构相似；侧向NGC 4565：星系盘和中心核球清晰可见。

1785赫歇尔银河系模型：通过统计天空中不同方向的恒星数目（恒星计数），绘制了第一幅银河系的恒星分布图。假设所有的恒星都具有相同的亮度：银河系扁平，呈盘状分布的恒星汇集在银道面上；太阳就在银河系的中心附近。

1906年，卡普坦设计了一个深度银河系巡天计划，观测天空206不同区域内的恒星。分析其中恒星计数、视亮度和自行（距离），得到银河系模型。恒星组成的盘；长度17kpc，厚度3kpc，太阳靠近银盘中心，距离 $d=650\text{pc}$ 。现在观测：银盘面的直径 $>30\text{kpc}$ ，太阳不在中心；错误的原因：不知道星际气体和尘埃对星光存在吸收，1930Robert Julius Trumpler发现星际消光。

1912年勒维特（Leavitt）观测了小麦哲伦云中的25颗造父变星，发现它们的光变周期越长，视星等越小。**脉动变星**与脉冲星没有任何关系。脉冲星是快速自转的中子星，它们自转时会将能量传播到周围的空间中，在某个时刻我们将看到：脉动变星作为“普通”恒星正在经历一个演化过程中暂时不稳定的时期。脉动不稳定带：赫罗图上接近垂直的，脉动变星分布的区域。温度越高、氦（He）电离程度也越大：双电离氦（缺少两颗电子的氦原子； He^{2+} ）比单电离的氦（ He^{+} ）不透明度大（光不容易通过）：温度升高，He电离，不透明度增大。内部能量向外施

加压力，星体变大温度压力变小，循环。

经典脉动变星的光度和脉动周期之间存在着明确的关联性。识别变星并测量其脉动周期；由“周期-光度关系”得到其光度；比较观测得到的变星视星等和光度，得到变星（或者变星所在的星团、星系）距离。

寻找造父变星并测量其周期所涉及的工作量是巨大的。尽管造父变星相当明亮，但世界上最大的地面望远镜只能在大约30个最近的星系中探测到它们：**只能用来测量近邻星系的距离**，因为必须能够解析单个恒星并测量它们的微小变化。

20世纪初期，美国天文学家沙普利利用变星的观测数据取得了关于银河系球状星团的两大重要发现：1) 大多数球状星团距离太阳都非常遥远；2) 太阳与大量球状星团的中心并不重合。太阳的不在银河系（宇宙）的中心。“**二十世纪的哥白尼**”

The Great Debate：1920年4月，美国科学院；威尔逊山天文台的沙普利和利克天文台的希伯·柯蒂斯。焦点：宇宙的尺度（银河系的大小？旋涡星云是否为河外系统？）1923—1924年，**哈勃**利用位于威尔逊山2.5m望远镜在M31中分解出几十个造父变星，证实：1) M31是由恒星组成的系统；2) 由造父变星周光关系估计M31的距离 $d \sim 285 \text{ kpc}$ ；远大于沙普利提出的银河系的大小。1924年哈勃在天文学会介绍了河外星系存在。1925年，河外天文学诞生。

恒星的分布：太阳近邻的银盘，在垂直方向上较薄，**厚度仅300 pc**，大约是银河系直径（30 kpc）的1%垂直盘方向，恒星年龄逐渐增加，金属丰度逐渐降低。银盘内主要是年老的恒星和球状星团，金属丰度更低。银河系三个成分，盘、核球和晕，性质有显著区别：银盘几乎不含气体或者尘埃，与充满星际物质的盘和核球恰好相反。盘、核球和晕星的外观和组成都存在明显的不同；核球和晕中的恒星比盘星明显要更红一些。对其他旋涡星系的观测，发现与银河系有着相同的分布。天文学家经常把年轻的盘星称为**星族I**（年轻、金属富），而把晕星称为**星族II**（年老、金属贫）。应有星族III，最老，无金属丰度，未观察到。

银盘上：小尺度（太阳附近几十秒差距以内）上看到的恒星和云团的运动似乎是随机的，但是大尺度（成千上万秒差距）上的运动却是规则有序的。整个银盘在旋转，恒星、气体和尘埃几乎都在绕着银心做圆周运动，其轨道受到银河系引力场的控制。银盘上的恒星和气体沿着近圆轨道围绕银心运动，**太阳邻域的轨道速度大约是220km/s**；此处物质需要花上2亿2500万年才能完成绕转一周。银河系组成物质的自转周期，取决于于银心的距离：距离越近，周期越短；反之越长（较差自转）。银晕和核球中的恒星：银晕中年老的球状星团和银晕以及核球中暗弱偏红的独立恒星的轨道方向，在很大程度上是随机的。核球内的恒星沿着非常随机的三维轨道运动，反复穿过银盘却没有特定的朝向。

射电图像显示银河系存在旋臂，清晰地揭示了银河系旋臂的形态，而旋臂是发生恒星形成的星际气体最为致密的区域。风车状结构始于核球并延伸到银盘外部。太阳位于这些缠绕着大部分银盘的旋臂中的一条的边缘（射电：长波段射电波基本上不受星际尘埃消光的影响。但是，发射射电辐射的云团（HI）的距离，很难确定）。银盘中的气体：观测发现，星系大部分区域，恒星、气体具有相同的线速度， $w=v/r$ ，靠近星系中心的恒星和气体的角速度大于外部物质的角速度（内部转动比外部快，**较差自转**）；来自视线方向上不同距离的氢物质团的21厘米辐射存在不同的多普勒频移量。切点法测距： $R=R_0 \cdot \sin l$ 。R0是从太阳到GC的距离，d是到太阳的切点距离；R是云块到GC距离。 $V_r=v_0 \cos x - v_s \sin x$ 。

旋臂形成简化模型：显示了旋臂如何由不规则的星际物质云形成，这些物质因整个银河系的不同旋转速度而延伸。距离银河系中心最远的区域，需要更长的时间才能绕其轨道转动一周因此落后于内部区域（较差自转）。如果这是创造旋臂的唯一机制，那么随着时间的推移，旋臂将完全卷起并消失（缠绕问题）。由于许多星系都有旋臂，它们的寿命一定很长，并且一定有其他过程在起作用来维持它们：旋臂的幸存。

尽管存在较差自转，银河系的旋臂仍然能在长时间内保持其结构。1) 旋臂是银盘的一部分，旋臂中发生了恒星形成。2) 银河系的盘以较差方式自转。如果旋臂与银盘物质以某种方式绑定（固定），较差自转会使得旋臂模式结束，并在数亿年的时间内消失。**旋臂的寿命因太短而无法解释今天观测到的旋涡星系的数目**（比例）。

旋臂密度波：密度波理论认为，组成旋臂的物质是不固定的，旋臂可能是在银盘上运动的旋臂密度波，并且在所到之处触发恒星形成。银河系及许多其他旋涡星系中的旋臂，是在星系盘物质中运动的气体压缩（聚集）和恒星形成的波气体从旋臂后方进入，受到压缩并形成恒星；尘埃带、高密度气体区域和新形成的O、B型星勾勒出旋臂的模式；组成旋臂的物质运动速度大于旋臂，组成旋臂的物质不停更替。

宏相旋臂 vs 絮状旋臂：在星系盘某处新形成一些大质量恒星；年轻恒星激发形成发射星云；它们死亡时发生超新星爆发；超新星爆发形成激波，激波压缩周围的气体中，触发新一代恒星的形成。

为银河系称重：围绕银心运动的恒星或气体云的轨道速度仅仅是由轨道内部的银河系质量决定的。观测太阳围绕银心运动：位于太阳轨道内的银河系总质量约为900亿个太阳质量。测量银河系的总质量：观测距离银心更远的天体（气体或恒星）的轨道运动。测量到银心不同距离的银河系的自转速度，得到旋转速度与到中心距离的关系： M 。

银河系自转曲线：恒星或气体自转速度与银心距离之间关系。如果组成银河系物质只有恒星和气体（边界 $r=15 \text{ kpc}$ ），对应的自转曲线不符合实际，实际曲线是在预测线上方，表明在这一半径之外，必然存在其他看不见的物质（暗物质）。暗物质质量 \gg 重子物质质量。

对于其他星系，可以利用银河系一样方法测得它们的自转曲线，计算它们的质量。正常旋涡星系（包括银河系）和巨椭圆星系包含 $10^{11} \sim 10^{12} M_\odot$ 物质；不规则星系质量约 $10^8 \sim 10^{10} M_\odot$ 。矮椭圆星系和矮不规则星系包含至少 10^6 或 $10^7 M_\odot$ 物质；星系总质量是可见发光物质总质量的3-10倍（平均9倍）。银河系与其他星系一样，具有一个不可见的暗物质晕。暗晕包含了比可见物质更多的质量；暗物质成分未知。

要想通过引力束缚住成员星系，星系团必须要有质量：星系团平均速度 1000 km/s ，星系团的半径为 3 Mpc （均为典型值）；星系团的质量： $M = V^2 \cdot r / G = 7 \cdot 10^{14} M_\odot$ （典型值 $10^{14} \sim 10^{15} M_\odot$ ）星系团的总质量，是所有成员星系发光物质加在一起的质量的10到将近100倍。要想束缚住星系团，需要比可见物质多得多的质量。暗物质在其他星系也存在，并以更大的比例在星系团中存在。宇宙中高达90%的物质是黑暗的。且这些物质在电磁波的所有波长上都不能被探测到，而不仅仅是在可见光部分。

子弹星系团：星系团的光学和X射线合成图像。星系团中热X射线发射气体位置，反应重子物质

的分布；利用引力透镜效应，确定星系团物质分布（包括暗物质）。大部分物质并不以热气体的形式存在：星系团中，暗物质的分布不同于“正常”物质。宇宙暗物质存在的最直接证据。

引力透镜效应：当背景光源发出的光在引力场（比如星系、星系团及黑洞）附近经过时，光线会像通过透镜一样，发生弯曲。光线弯曲的程度，主要取决于引力场的强弱，即星系或者星系团质量。利用光的引力偏折，测定质量。强引力透镜方法通过对爱因斯坦环的曲率和多个像的位置的分析，估计测量透镜天体质量的一种方法。

质光比：星系中某一光谱型的恒星的质量和某一特定波长的光度的比值。

暗物质：可能是重子暗物质 or 非重子暗物质两类。重子暗物质参与电磁相互作用，但缺乏发光条件（不发光）。晕族大质量致密天体（Massive Compact Halo Objects, MACHOs）如黑洞、中子星、衰老白矮星、褐矮星（ $M < 0.08M_{\text{sun}}$ ）、行星等。黑洞、中子星：数目太少；黑矮星、褐矮星、行星等：质量太小。观测表明，MACHO占宇宙中暗物质的比例很小；可以忽略。

非重子暗物质：不参与电磁相互作用，因而不会发光。只能通过引力产生的效应得知宇宙中有大量暗物质的存在。大质量弱相互作用粒子（Weakly Interacting Massive Particles, WIMP）暗物质最有希望的候选者，不参与电磁力作用，无法被直接探测；不参与强核力作用，基本上与普通物质不发生相互作用；较大的质量，运动的速度相对缓慢，因而能够成团聚集。寻找“大质量弱相互作用粒子”（WIMPs）暗物质探测实验：直接探测实验：暗物质粒子入射，与探测器靶原子（核）发生散射的信号；间接探测实验：探测宇宙暗物质衰变或湮灭的产物；对撞机探测实验：高能粒子对撞产生暗物质。

银河系的核球密集地分布着几十亿颗恒星，距离银心最近的区域的密度最高。但是我们无法看到银河系的中心区域—银盘的星际介质遮挡了这一本应十分壮观的景象。

a) 银河系中心红外图像：聚集的许多明亮恒星，物质密度是太阳附近的100万倍 b) 银河系中心射电观测，展示了银心附近100pc的区域气体分布；c) 钱德拉卫星图像，中心存在丰富的热气体和许多超新星遗迹；d) 星系中心存在一个只有几pc的旋转物质环或者盘，物质成旋涡状朝中心运动。

中心旋转气体的红外发射线谱线宽度很宽：展宽的程度表明气体的运动速度非常快。为了保持这些气体位于轨道中，无论中心是什么物质，都必然具有极大质量：超过100万倍太阳质量。考虑到需要满足大质量与小尺度的要求，其中一个有力的竞争者就是一个超大质量黑洞，约400万倍太阳质量。2020年诺贝尔物理学奖：Reinhard Genzel和Andrea Ghez：如果确实是一个黑洞，其视界的大小也仍然只有0.02AU。目前，8kpc以外无法分辨如此小的区域。

黑洞搜寻：运动学方法（银河系中心）和TDE（时域天文）。哈勃空间望远镜光谱观测：黑洞模型与观测符合最。近邻星系中心黑洞 - 恒星整体运动。

银河系的全景，大约50kpc的范围；5kpc，几乎被银河系棒和最内层旋臂的巨大旋涡所充满；~500pc，显示了400pc气体环的一部分。暗斑代表巨大的分子云，粉色团块表示与这些云团内部恒星形成相关的发射星云。一个粉色（稀薄温暖）的电离气体区域围绕着红色（更致密、更温暖）的银心，也展示了大量年轻致密的星团，也是银心附近近期恒星形成爆发的证据；5pc，展示了中心星团，周围的恒星形成环，以及围绕着银心的倾斜旋转的热气体（104K）旋涡；巨大旋涡的最核心部分，一个快速旋转、温度高达数百万开尔文的白色炽热气体盘；中心为黑洞。同时还能看到两个可能是被瓦解的星团的残留恒星环。

银盘：年轻恒星和气体；银晕：老年恒星和球状星团；核球：不同年龄恒星。

坍缩模型：银河系可能是由宇宙早期形成的几个较小的系统（矮星系）并合形成的。当第一代银河系恒星以及球状星团形成时，银河系内的气体还没有堆积成盘。相反，它弥漫在一个不规则且非常延展的空间区域内，跨度达到几十kpc（晕星）。从演化早期开始，自转使得银河系内的气体变得扁平并形成一个相对较薄的盘（与太阳星云在太阳系形成时的扁平过程相似，只是物理尺度更大）。银晕中的恒星形成在数十亿年前就停止了，那时的原初物质—气体和尘埃冷却并掉落到银盘上。银盘上持续的恒星形成使它呈现蓝色光泽（年轻恒星），但银晕中生命短暂的明亮蓝星早已熄灭，只剩下寿命较长的红色恒星使银晕呈现出典型的粉色光晕。模型可以很好解释银河系不同区域恒星分布和运动。由于最古老的恒星（银晕和球状星团中的恒星）分布在以银河系核心为中心的球体中，因此可以合理地假设，孕育银河系的原银河系云大致呈球形。银晕中最古老的恒星的年龄为120至130亿年，银河系的形成大约在很久以前就开始了。就像恒星形成的情况一样，原星系云塌陷并形成一个薄薄的旋转盘。云塌陷之前诞生的恒星并没有参与塌陷，而是继续在银晕中绕轨道运行至今。

多重合并模型；银河系的未来：银河系与仙女座星系碰撞。

大多数星系比银河系小，有一些大小差不多，有少数要大很多。许多看起来像银河系一样“正常”；但也有一些星系里面正在发生着爆炸性的事件。这种“活动的”星系可能是由超大质量黑洞驱动的。

星系团图像，几乎每个光斑或光点都是一个单独的星系（有星芒的天体是一颗前景恒星）— 仅在一张照片中就可以看到数百个星系；每个星系由几千亿颗恒星组成。即使通过小型望远镜，星系的样子看起来也跟恒星有显著区别。它们有模糊的边缘，而且很多都是在一定程度上被拉长的—与恒星通常的锐利、点状的图像一点也不像。

1924年，美国天文学家埃德温·哈勃是第一个对星系分类的人，根据外观将他看到的星系分为四个基本类型：**哈勃分类法**。旋涡星系S有扁平的星系盘、中央核球和旋臂；棒旋星系SB包含一个棒状结构；椭圆星系E没有星系盘，冷气体或尘埃的含量很少；不规则星系Irr含有丰富的气体和尘埃，恒星形成剧烈。

旋涡星系M100的旋臂比星系的其他部分更蓝，表明旋臂是年轻的大质量恒星和恒星形成区域；侧向旋涡星系NGC 4565，可以看到星系平面上的尘埃；它看起来很暗，因为它吸收了银河系恒星的光。旋涡星系由大写字母S表示，并根据核球的大小，用小写字母a、b、c分为三个次型从Sa型、Sb型到Sc型，其核球变得越来越小，旋臂也会倾向于越来越松散；星际气体和年轻恒星越来越多。

棒旋星系与普通旋涡星系主要不同：一根细长的，主要由恒星和星际物质组成的，穿过核球的

中央并向两端延伸到星系盘中的棒状结构的存在；SBa型、SBb型和SBc型。

椭圆星系没有旋臂，在大多数情况下，没有明显的星系盘，除拥有一个致密的中心核外，基本上没有表现出任何一点内部结构。如同旋涡星系，恒星的密度在中央星系核附近急剧增加。椭圆星系用字母E表示，根据它们呈现在天空中的椭圆情况分为若干次型。最圆的为E0型，稍扁平为E1型；最细长的椭圆星系类型为E7。椭圆星系中的恒星大多数都是年老、偏红、小质量的；没有冷气体。

不规则星系Irr

星系序列：“音叉图”。哈勃星系分类法没有已知的物理意义（例如演化关系）：星系的确演化，但不是（在任何方向上）沿着音叉图定义的“哈勃序列”演化的。

在天文学中，一直以来，对天体的理解取决于确定它们距离能力。星系测距银河系以外的宇宙中，星系空间分布探测困难：一些星系不包含造父变星；遥远星系中的单个恒星（变星）无法分辨（2500万pc以内）。

标准烛光：容易辨认的天体，其光度已经被明确测定。比较光度和视亮度，可确定天体距离Ia型超新星：双星系统中白矮星的爆炸，最大光度几乎相同，约 4.5×10^9 L_{Sun}。

标准烛光的一个重要替代在20世纪70年代被发现。天文学家发现，距银河系几十兆秒差距内的旋涡星系的旋转速度和光度有密切的关系：塔利-费舍尔关系（以它的发现者命名）。只需要简单地通过观测星系的自转速度有多快。通过比较星系的（真）光度和它的（观测亮度，可以得到星系的距离。2亿pc以内

Vesto M. Slipher: 1914年首次宣布，所有星系都在远离；乔治·勒梅特：1927年首次提出我们生活在一个不断膨胀的宇宙中。星系距离我们越远，远离我们的速度就越快：哈勃定律：遥远的星系正在远离银河系，远离的速度与到我们的距离成正比， $v = H \cdot d$ 。1929年发表在《美国国家科学院院刊》，1931年发表在《ApJ》。退行速度与距离之间的比例常数被称为哈勃常数， $H_0 = 70 \text{ km/(s·Mpc)}$ 。天文学家利用哈勃定律来确定宇宙中最遥远天体的距离（超过一亿pc）；与哈勃膨胀相关的红移被称为宇宙学红移

天文学家已经设计出不同方法来测量星系的距离，它们都给出了相同的答案，准确度约为10%。

星系团由许多互相绕转的星系组成，并被它们自身的引力束缚在一起。

银河系、仙女星系和其他一些较小的星系形成的一个引力束缚星系集合，叫作**本星系群**。本星系群由距我们银河系约1Mpc的50多个星系组成，只有少数是旋涡星系，大部分是矮椭圆星系或不规则星系。银河系有十几个卫星系，包括大、小麦哲伦云和最近发现的“人马座矮星系”，它们几乎就在银河系的平面内。仙女星系（M31）距离我们800 kpc，周围环绕着它自己的卫星系。M33是一个旋涡星系，M32是一个矮椭圆星系。

距本星系群最近的大星系团是为室女星系团，以它被发现的星座的名字命名。室女星系团距银河系约17Mpc，包含的星系超过2500个。它们被引力约束成一个紧密联系在一起的组，跨度约3Mpc。大多数星系是星系群或星系团的成员。星系群一般只包含几个明亮的星系，且形状非常不规则。星系团较大、较“富裕”，像室女星系团，可能包含数千个单独的星系，相对均匀地分布在空间中。

后发座星系团的中央区域直径至少为1000万光年（比室女星系团大得多），距离我们约3亿光年，中心为两个巨椭圆星系，每个椭圆星系的光度约为4000亿个太阳。人们在后发座星系团中已经观测到了数千个星系，但我们看到的星系几乎肯定只是真正存在的星系的一部分。像后发座星系团这样的富星系团，中心附近有大量的椭圆星系，但很少有旋涡星系；旋涡星系通常出现在星系团的外围。

宇宙大尺度结构：超星系团和空洞。星系的大尺度分布很明显不是随机的。星系分布成纤维状，包围着星系相对缺乏的“巨洞”区域。

相当一部分明亮的星系不太适合被分类进“正常”的星系类型。活动星系：可以比正常星系的光度大得多，且在整个电磁波谱都有辐射，其中心能源为黑洞吸积（非热）。（**非热（恒星）辐射，全波段星系能谱分布（SED）**）。三类基本类型。

类星体：1963年，Maarten Schmidt对射电星3C 273的光谱感到困惑。光谱中有很强的发射线，它们之间的间距与氢的巴尔默线相同，更红。如果红移归因于多普勒效应，3C273就会以每秒45,000公里的速度（光速的15%）远离我们。现在已经发现了超过一百万个类星体（有些类恒星天体没有射电发射，现在统称为类星体，QSO），并且有超过十万个类星体的光谱可供使用。

赛弗特星系：1943年卡尔·赛弗特发现的一类活动星系。赛弗特星系的特点为极亮的星系核：赛弗特星系核的亮度比我们银河系的中心亮大约10,000倍。最亮的赛弗特星系核的能量比整个银河系还要强10倍；在全波段有辐射；有的有宽发射线。赛弗特星系3C84光度的不规则变化（时间跨度超过30年）：快速光变（远小于1年的时间里，光度加倍或减半），能量来源于非常小的区域。

射电星系：明亮的射电星系的总光度高达银河系的1000倍，是**宇宙中已知能量最大的天体**。中央能源产生高速物质喷流，喷流与星系际气体相互作用，形成射电瓣。这个星系在我们看来既可能有射电瓣，也可能是一个核主导射电星系，取决于我们与喷流和射电瓣的位置关系。1918年（类星体被发现之前），美国天文学家赫伯·柯蒂斯（Heber Curtis）拍摄到位于室女星系团星系M87星系核喷出的喷流。

活跃星系核（AGN）光变：光变幅度大，时标短（几个月—几天）。如果一个延展的物体突然爆发，它看起来会在一段时间内变亮，该时间等于光从其远端穿过该物体所需的时间：AGN通常会在几个月的时间内发生变化因此产生能量的区域宽度不会超过几个光月。发生变化的区域必须小于光在发生变化所需的时间内传播距离。

活动星系的中央引擎有着高光度，发出的辐射能量比我们银河系中所有恒星的总和还要多。能量发射大多数是非恒星（非热辐射）的：不能被解释为上万亿颗恒星辐射的组合。能量输出可以是高度可变的：意味着它们的能源是从一个小的中央核心发出的，远小于1 pc。一些AGN有接近光速的笔直喷流，其距离远远超出它们所在的星系。可见光谱可能显示出致宽的发射线，说明产能区有快速的内部运动。超大质量黑洞吸积气体，物质在掉落到中央黑洞的过程中释放出巨大的能量。黑洞必须比太阳的质量大数十亿倍。

观测表明，所有具有球形恒星分布的星系——无论是椭圆星系，还是具有核球的旋涡星系——在其中都拥有一个质量巨大的黑洞。黑洞的质量范围从不到一百万倍太阳质量到至少300亿太阳质量。M87中心存在黑洞的证据：A) HST（哈勃）发现M87的旋转气体盘。旋转速度约为每秒550公里，中心存在一个非常巨大的黑洞。b) 2019年，事件视界望远镜生成的第一张关于M87黑洞阴影在其周围吸积盘上的射电图像。

航天器穿过大气层的快速运动压缩并加热了它前面的空气，这反过来又加热了航天器，直到它发出红热的光：快速移动的气体落入类星体（AGN）也会以类似的方式升温。星系中心黑洞（具有强大的引力）吸引物质——恒星、尘埃和气体——在致密的核区域中绕轨道运行，物质飞向旋转的黑洞，并在其周围形成物质吸积盘。随着物质越来越接近黑洞，它会加速并被压缩，温度升至数百万度。炽热的物质在落入黑洞时会辐射出巨大的能量：超大质量黑洞附近的气体温度可达150,000K左右，可以产生X射线辐射。通过这种方式可以释放出巨大的能量：爱因斯坦公式 $E = mc^2$ 。

类星体是由超大质量黑洞驱动的活跃星系核。有超大质量黑洞星系主核和成射电星系。不规则星系核并和形成塞弗特星系。

星系NGC 5128：活跃的星系核为两股喷流提供动力，以相反的方向到达星系的恒星盘之外，并产生两个巨大的热X射线气体瓣。AGN反馈活动星系核在早期宇宙中更为常见，频繁的合并为黑洞吸积提供了新鲜的气体供应。

星系形成演化：自上而下 or 自下而上。单个原星系云塌缩形成 or 通过与其他较小星系合并形成。

观测发现，星系之间的相互作用是常见的。车轮星系可能是碰撞的结果，产生了扩张着的正在进行恒星形成的环，通过星系盘而向外移动。环为一个较小星系穿过一个较大星系的星系盘而形成的密度波造成的。这一扰动现在正在从撞击区域向外扩展，随着它的经过而形成新的恒星。

两个星系每次近距离交会时，星际气体和尘埃云收到引力影响（气体被压缩），恒星形成的爆发会在两个星系中到处出现，结果是形成一个星暴星系。在大约十亿年的时间里，这两个星系可能会合并成一个单一的、更大的星系。一个星系与另一个星系的相互作用：一次近距离交会或者一次实际的碰撞，对星系演化有重要的影响。虽然碰撞会严重破坏所涉及星系的大尺度结构，但却对它们内部的单个恒星毫无影响。

星系碰撞的计算机模拟：从两个旋涡星系合并开始，以单个椭圆星系结束。颜色表示系统中恒星的年龄；相互作用触发大量恒星形成（蓝色）。星系碰撞不仅仅改变星系形状，如果星系含有星际物质，碰撞就会压缩气体，导致恒星形成加速。天文学家将这种恒星形成数量的突然增加称为星暴。

当两个大小接近的星系发生碰撞时，称为星系合并；小星系与大星系相互作用，星系吞食。椭圆星系NGC 1316：怪异黑色尘埃云分布，为蚕食（吃掉）的一个小型伴星系的残余物。人马座矮星系正在走向银河系的中心：较近的星系吞食的例子。吞食过程会留下一个剥离恒星的潮汐流，它们都具有类似的轨道和组成，并依然遵循其父星系轨道。天文学家已经在银河系的晕中发现了多条恒星流：星系吞食遗迹。

HST和钱德拉X射线望远镜拍摄的星系NGC 6240图像：X射线图像显示其有两个相距很近的核，可能是合并前两个星系核心的超大质量黑洞。

星系团中，星系分层效应：亮、红星系位于富团的致密区，而恒星形成活跃的盘星系和不规则星系则位于稀疏区。密度高的区域，早期星系（E/S0）比例高。星系团和星系群，不仅仅只是宇宙空间星系密度较高的地方；在星系形成演化过程中，环境起着十分重要的作用。

JWST图像：迄今为止所见过的最远、最暗和最小的星系，年龄不超过4亿年。110亿光年前HST图像：早期星系尺寸小、颜色蓝、形态不规则。

目前，星系形成的最好理论认为，较大的星系是较小的星系通过碰撞与并合建立的。自下而上星系形成模式：真正巨大的天体是由富含恒星的基本成分通过阶梯式并合而形成的；大多数星系大概在宇宙早期以这种方式发展起来。有史以来获取的宇宙最深处的图像，提供了数百个星系碎片的“化石证据”。部分星系碎片放大图像（每个光斑看上去都是一个约1kpc尺度的扭曲的球体），这些星系碎片可能即将并合形成更大的星系。阶梯式并合：高红移星系明显比近处的星系小很多，且不规则。蜘蛛网星系：发生在大约100亿年前的一次形星系成过程，一个正在通过并合更小更轻的星系而组装起来的巨大且大质量的星系。

星系的形成和演化受到其所在环境的影响，内部恒星演化和星系外部环境，共同影响星系随着时间演化。孑然一身的星系将会缓慢演化、相当稳定，星际气体和尘埃云会变成新一代恒星，主序星演化成巨星，并最终成为致密的残骸——白矮星、中子星和黑洞。星系的整体颜色、成分和外观，随着恒星的周期性演化和星系的星际物质的丰富情况，以多少可预测的方式变化。如果星系是椭圆的，就会缺乏星际气体，随着时间的推移，大质量恒星燃烧殆尽且不被替代，星系会变得暗淡和偏红。对于气体丰富的星系，如旋涡星系或不规则星系，明亮的恒星会导致整体颜色呈蓝色。

制造哈勃序列：高密度区域星系相互作用和并合，触发剧烈的恒星形成，快速消耗完其内部气体，破坏盘结构，形成椭圆星系：恒星形成率高，时标短。相对孤立的星系，相互作用概率低，恒星形成缓慢，星系内部还有气体，形成现在的旋涡星系（旋涡星系在星系密度较高的区域里（如富星系团的中央区域）比较少见）。

星系团的形成：物质分布大尺度均匀+涨落小团块；团块随宇宙膨胀，但向内引力使得质量增加；膨胀停止，形成不规则区域，自下而上合并，形成矮星系或球状星团；团块逐渐聚集形成星系、星系团，并最终形成超星系团；星系碰撞触发黑洞增长和恒星形成。

将活动星系（类星体）和正常星系联系起来。活动星系核的标准模型：超大质量黑洞吸积气体，释放能量。每一个明亮的星系，活动或不活动的，都包含一个中央超大质量黑洞。中央黑洞的质量和和其所在星系的性质之间具有相关性：正常星系和活动星系的演化必然非常紧密地相连。

观测表明，星系中心黑洞质量与宿主星系核球之间存在密切的相关性。暗物质晕和其中的星系通过合并而增长；黑洞通过合并和吸积气体生长。随着星系合并，它们的中央黑洞也会合并，并最终在许多年轻星系的中心形成超大质量的黑洞。

活动星系和正常星系之间的差别主要是燃料供应的问题。当燃料耗尽后，活动星系核熄灭，位于正常星系核心的黑洞处于简单的休眠状态，等待着下一次的相互作用引发新的活动和爆发。活动星系主要出现在宇宙中年时的中间距离处。

12. 宇宙学

我们的视野现在扩展为深入空间几十亿秒差距和回溯时间几十亿年。宇宙开始于大约140亿年前的一个火热的膨胀。这种膨胀一直持续到今天，膨胀的终点是什么目前仍然不明。

宇宙概念在古希腊意指与“混沌”相对的“秩序”(COSMOS)。宇宙：四方上下曰宇，往古来今曰宙（战国末年尸佼《尸子》）。宇宙学(Cosmology)：1730年由Christian Wolff首次提出，1929年哈勃星系红移-距离关系的发现，观测宇宙学真正的开始。**宇宙学**：在最大尺度上对宇宙的起源、结构、演化和结局进行研究的科学。

20世纪30年代，哈勃拍摄了1283个样本区域，在每张照片上，他都仔细地计算了星系的数量，天空每个区域中可见的星系数量大致相同。到目前为止，宇宙在每一个尺度上都展示了它的结构：尘埃和气体形成行星和恒星；恒星形成星团和星系；星系形成星系团，甚至更大的结构——巨洞、纤维、长城。

宇宙学原理：宇宙在大尺度上是均匀的和各向同性的。两种巡天：宽场巡天，如SDSS；铅笔束巡天：小视场，遥远暗弱星系观测（大望远镜）。红移巡天显示，在超过数百Mpc的尺度上，宇宙似乎是大致均匀的（所有地方都一样）和各向同性（在所有方向都一样）的**宇宙中没有大于300Mpc的结构**。；宇宙是均匀和各向同性的；宇宙不会有中心或边缘。

奥伯斯悖论：假设除了均匀和各向同性，宇宙的空间无限，且不随时间变化（20世纪初以前对宇宙的广泛共识），无论你往哪里看，天空应该与恒星的表面一样明亮。为什么夜晚是黑暗的？要么宇宙的年龄、大小是有限的，要么它随着时间的推移而演化。

宇宙的年龄是有限的。1929年哈勃的发现，废除了永远静止的宇宙观：宇宙在不断的膨胀。退行速度 = $H_0 \times \text{距离}$ 。如果所有的星系都在彼此远去，那么在有限的时间以前，这些天体必然聚集在一个极小的空间里。**哈勃时间** $1/H_0$ 。取 $H_0=70\text{km}/(\text{s}\cdot\text{Mpc})$ ，得到的时间 $T_0\sim 140\text{亿年}$ 。这个**时间不依赖于距离**：更远两倍的星系的移动速度也快两倍，所以它们穿越居间距离所需的时间是一样的。宇宙起源于一瞬间：大爆炸。

牧师兼宇宙学家乔治·勒梅特：第一个提出大爆炸模型的人

140亿年前宇宙由一个炙热而密集原始火球构成，在大爆炸后迅速膨胀。所有星系在过去的同一时间从一个“点”膨胀出来。大爆炸并不是在一个原本没有物质的空旷宇宙中发生的爆炸，而是宇宙本身的膨胀，没有中心。大爆炸并不是发生在空间中任何特定的位置，因为在那一瞬间，空间本身被压缩到一个点——大爆炸在所有地方同时发生。绝没有任何一个观测者位于中央。

星系的红移不是多普勒频移（它们相对我们运动的结果），而是空间膨胀效应。随着宇宙膨胀，辐射光子的波长被拉长，引起宇宙学红移。宇宙学红移是宇宙大小变化的结果，与速度无关。

只有引力：从一颗行星表面发射宇宙飞船：如果发射速度超过行星的逃逸速度，飞船将永远不会返回到该行星表面。速度会因为行星的引力而降低，但永远不会达到零。飞船以一个非束缚轨道离开行星。如果发射速度低于逃逸速度，那么飞船将达到一个离开行星的最大距离，然后回落到表面上。宇宙存在物质，物质有引力，膨胀会减速：减速程度取决于物质密度。

飞船发射：飞船的发射速度（宇宙的膨胀率），行星的质量和半径，决定飞船是否会发生逃逸；一个更高密度的行星，具有更高的逃逸速度。**宇宙的密度决定了宇宙的命运**：高密度宇宙包含足够大的质量以停止膨胀并最终导致坍缩；低密度宇宙会一直膨胀下去。**宇宙临界密度**：对应在未来无限远某个时间，膨胀速度减慢至零。 $\rho_0 = 9 \times 10^{-27} \text{kg}/\text{m}^3$ ：一个非常低的密度，每立方米仅仅5个氢原子。（地球真空 10^6 个原子/ m^3 ）

la型超新星：非常明亮，光度相同，作为标准烛光（钱德拉塞卡极限），通过测量它们的距离（不使用哈勃定律）和它们的红移，可以确定在遥远过去的宇宙膨胀速率。假设宇宙是减速膨胀的，膨胀速度随时间下降，宇宙早期（高红移宇宙）形成的遥远天体（la型超新星），会比哈勃定律预期的更亮（距离更近）。1998年，两组天文学家宣布了对遥远la型超新星独立的、系统的巡天结果：发现与宇宙减速的图像相差很远，**宇宙的膨胀不但没有放缓，反而实际上是在加速**。发现了暗能量（2011年诺奖）。这些观测与**“只有引力”的大爆炸模型不一致**，并引发了我们对宇宙看法的重大修改。

暗能量70%：一种存在于整个空间的神秘的排斥力（暗物质25%）。引力的吸引作用会“反抗”宇宙的膨胀，但暗能量的斥力却会加快宇宙的膨胀。随着宇宙膨胀，引力减弱，而暗能量的力量增加。数十亿年前，暗能量开始主宰，宇宙的膨胀开始加速，直到今天。**暗能量的斥力效应正比于宇宙的大小**，它会随着宇宙膨胀而增加：在早期可以忽略不计。但今天，由于观测到的加速非常大，因此它是**控制宇宙膨胀的主要因素**。引力作用随着宇宙膨胀而减弱，尽管暗能量本质还相当的不确定：但可以确定**宇宙将永远膨胀下去**。尽管有令人信服的证据表明暗能量的存在，但我们还不知道这种能量的来源。**暗能量物理本质未知**。

高密度宇宙：宇宙将在未来的某个时候停止膨胀并开始收缩；为封闭宇宙。临界密度宇宙：膨胀会在无限遥远的未来逐渐减缓直至停止，90亿年。低于临界密度：宇宙将继续膨胀，但速度会越来越慢。暗能量宇宙：膨胀速度会随着时间的推移而增加。空宇宙：膨胀不会因引力而减慢，也不会因暗能量而加速，140亿年。没有暗能量的宇宙年龄总是小于 $1/H_0$ ，随着密度增大而减小。没有暗能量，宇宙在过去会比现在膨胀得更快：导致宇宙年龄被低估，小于 $T_0=140\text{亿年}$ 。**暗能量的存在增加了宇宙的年龄（137>90）**。

球状星团的年龄（120亿年-130亿年），与没有暗能量宇宙学模型给出的年龄（90亿年）矛盾：星团比宇宙的年龄年老；它们的年龄与根据有暗能量模型估计的138亿年年龄一致。

今天，宇宙中超过70%的质量-能量以暗能量的形式存在。而剩余的30%几乎都是暗物质。**宇宙临界密度为 $9 \times 10^{-27} \text{kg}/\text{m}^3$ ：暗能量密度 $\sim 6 \times 10^{-27} \text{kg}/\text{m}^3$ ，物质密度 $\sim 3 \times 10^{-27} \text{kg}/\text{m}^3$ ，微波背景的等效密度 $\sim 5 \times 10^{-31} \text{kg}/\text{m}^3$** 。随着宇宙尺度的增加，物质和辐射密度都在下降，膨胀稀释了原子和光子的数目。辐射的能量也因为宇宙学红移而减少：随着宇宙成长，辐射密度下降的速度比物质密度下降的速度更快；随着宇宙的膨胀，与暗能量相关的密度保持恒定。

大爆炸是时空的奇点——物理定律表明，宇宙大小无限接近于零，且有着无限高温和高密度。目前还没有理论能让我们越过宇宙开始时的奇点。没有办法回答“在大爆炸之前是什么”。现在的物理学只能了解大爆炸后非常短的时间——10-43s——之后的宇宙中物理环境。

宇宙在膨胀时会冷却：最初温度高得难以想象；到0.01秒过去时，温度已降至1000亿K；大约3分钟后，温度已降至约10亿K；几十万年后，温度降到了仅仅3000K；宇宙就持续变冷。早期宇宙非常热：宇宙越热，可用于制造物质和反物质的光子的能量就越大。

夸克时代：开始于大爆炸之后大约10-12秒。宇宙充满了夸克、轻子和它们的反物质。大爆炸之后约10-4s，温度 $T < 10^{13}K$ （**创造质子和中子等由夸克组成的最轻的稳定粒子的阈值温度**），夸克时代结束，宇宙主要成分是轻子——μ介子、电子、中微子和它们的反粒子——它们与辐射仍处于热平衡中：轻子时代。

轻子时代，宇宙 $T \sim 3 \times 10^{10}K$ ，大爆炸后约1s，迅速变稀薄的宇宙对中微子透明，中微子可以自由在空间中穿梭：中微子退耦。

当 $t \sim 100s$ 时，轻子时代结束。 $T < 10^9K$ ，正、负电子对开始迅速大量湮灭，宇宙主要成分为光子、中微子和反中微子（辐射时期）

早期宇宙被强烈的辐射场主导，该辐射场的温度随着宇宙的膨胀而稳步下降。两个光子产生一个粒子-反粒子对（如电子和正电子）。通过粒子对的产生，物质从以电磁辐射形式存在的能量中直接创建。同样，一个粒子和它的反粒子相互湮灭并产生辐射。粒子和反粒子可以转换回辐射。辐射场温度越高，光子的能量越大，通过粒子对产生而创建的粒子的质量也越大。**粒子的阈值温度**：高于这个临界温度，粒子对才可能产生。阈值温度随着粒子质量增加而增加。电子的阈值温度 6×10^9K （辐射与正负电子转化）；质子的阈值温度超过 $10^{13}K$ （更早宇宙）。

大爆炸后 $t \sim 100s$ ， $T \sim 10^9K$ ：中子很快与质子一起聚变形成较重的核，完成宇宙轻元素合成（原初核合成时期）。宇宙年龄 $t \sim 15min$ ，很多我们今天所观察到的氦已经形成。**大约25%（以质量计）的物质变成氦**，还有少量的氘、锂和其他氢原子核。

大爆炸后数万年，辐射不再是宇宙的主要组成部分，物质期开始了。在原子时代的开始，物质由电子、质子、氦原子核和暗物质组成。温度为数万K，**对氢原子的存在而言温度过高**（13.6eV）。

在随后的几十万年中又发生了重大变化：宇宙又膨胀了十倍，温度降到几千开尔文，电子和原子核结合形成中性原子。当温度下降到约3000K的时候，宇宙便由原子、光子和暗物质组成：原子核和自由电子结合形成原子的时期被称为退耦时代，背景辐射与正常物质分离开来。电子与原子核结合形成氢原子和氦原子后，由于没有自由电子散射，光子可以自由传播：宇宙变得透明。

早期3000K的黑体辐射，随着宇宙膨胀温度降低，辐射的波长应该在射电波段（遵守维恩定律）：宇宙微波背景辐射CMB。CMB发射后，宇宙继续膨胀和冷却；大爆炸后3至4亿年，第一批恒星和星系已经形成。

大爆炸：原始火球这种红移的遗迹应该有不超过几十开尔文的温度，峰值在微波波段。宇宙微波背景是**各向同性的黑体辐射场**，充满了整个宇宙。它目前的温度大约是3K；微波背景的存在是**宇宙从一个热且致密的点膨胀而来直接证据**；随着宇宙的不断膨胀，最初的高能辐射已经**红移**到了越来越低的温度。

1964年，彭齐亚斯和威尔逊宣布了他们的意外发现：CMB。彭齐亚斯和威尔逊发现射电波长的强度分布与3.5K的温度黑体辐射相对应，且辐射是各向同性的（与宇宙学原理一致）。于1978年因其工作而获得诺贝尔奖。

CMB首次精确测量是利用绕地球运行卫星“宇宙背景探测器（COBE）”进行的：NASA于

1989年11月发射CMB与温度与2.73K的黑体辐射预期非常吻合。

根据理论，CMB的温度不可能完全均匀：CMB是宇宙中粒子在解耦时散射出来的辐射。如果辐射完全平滑，那么所有这些粒子必定绝对均匀地分布在空间中。然而，如果粒子完全平滑地分布，它们就不可能形成现在宇宙中存在的所有大规模结构：星系团和超星系团。CMB最详细的测量结果是由COBE之后发射的两颗卫星获得的：2001年威尔金森微波各向异性探测器（WMAP）和2009年普朗克卫星的测量结果的CMB存在非常细微的温度差异（大约为十万分之一）。

宇宙空间曲率：物质和能量的密度决定了空间的整体几何形状。如果物质的密度高于临界密度，宇宙最终将坍塌。在这样一个封闭的宇宙中，两束最初平行的光线最终会相遇；如果物质密度低于临界值，宇宙将永远膨胀。两束最初平行的光线会发散；在临界密度宇宙中，两条平行光线永远不会相遇，膨胀只会未来无限远的某个时间停止。我们将其称为平坦宇宙。CMB热点和冷点的大小取决于宇宙几何形状，即宇宙总密度。广义相对论：物质可以弯曲空间，并且曲率的大小取决于存在的物质的量。

如果宇宙的密度等于临界密度，那么宇宙微波背景中的热点和冷点的大小通常应约为1度如果密度大于临界值，则典型尺寸将大于1度；如果宇宙的密度小于临界值，那么结构就会显得更小。WMAP和普朗克对CMB的观测证实了早期的实验（气球载仪器BOOMERANG），即**我们生活在一个平坦的、临界密度的宇宙中**。普朗克数据给出的宇宙学参数：宇宙年龄： 137.99 ± 0.38 亿年，哈勃常数： 67.31 ± 0.96 km/s/Mpc，暗能量： 68.5 ± 1.3 %，物质： 31.5 ± 1.3 %，普通物质：4.9%。

宇宙学观测基础：夜空是黑的：奥伯斯佯谬（若宇宙是稳恒且无限的，夜空应该是亮的）；星系大尺度空间分布：宇宙在大尺度上是均匀和各向同性的（宇宙学原理）；星系距离与红移关系：星系退行速度与星系的距离成正比（哈勃定律）；宇宙微波背景辐射：**黑体热谱**， $T_0 = 2.728 \pm 0.004K$ ； $\Delta T/T = 1/10^5$ ；宇宙中元素丰度：**宇宙中绝大部分氦元素是由宇宙早期核反应产生**（alpha beta gamma理论）；宇宙年龄：必定大于宇宙最古老天体年龄，如球状星团（ $T \sim 12Gyr$ ）。

正如恒星形成于星际云的不均匀性——星系、星系团，以及更大的结构，也被认为是从膨胀的宇宙物质中小的密度起伏而成长起来的。根据目前的结构形成理论，它们是极早期宇宙的微观“量子”涨落的结果，并膨胀到宏观尺度。到20世纪80年代初，宇宙学家已经认识到，星系不可能只涉及正常物质的不均匀性收缩而形成：微波背景的微小不均匀性在可用时间里不能成长为星系。

宇宙大尺度结构形成于暗物质的密度波动凝聚成块。暗物质与正常物质和辐射的相互作用非常弱，倾向于在引力作用下聚集和收缩，而不被辐射背景所阻碍：**暗物质会聚集成团形成宇宙大**

尺度结构，正常物质被引力吸引到了密度最高的地区，最终形成了星系和星系团。
宇宙开始膨胀时非常热；有中子、质子、电子和中微子等；宇宙诞生3-4分钟时形成原子核：氦、氦和少量锂；~38万年前，当宇宙比今天小约1100倍时，在~3000K 的温度下，电子与质子结合形成氢原子，背景辐射（**当时还在光学波段**）从物质中退耦，宇宙变得透明；宇宙仍然没有恒星或星系，称为黑暗时代；暗物质密度微小波动逐渐增大，形成引力陷阱，使普通物质集中起来；**在大爆炸后约3-4亿年，星系、恒星开始形成。**