

杭高天文社社用教材

作者：客星晨出东方



第一章 绪论

第一节 天文总论

[1.1] 何谓天文

天文学是自然科学中的基础学科之一。它的研究对象是广袤无垠的太空中的天体与天体系统，包括天体以外各种形态的物质，以及整个宇宙。天文学是一门基于观测的学科，在天文学中，一切通过理论得到的事实都必须得到观测的检验，天文学观测和研究天体的位置、分布、运动、状态等等。

[1.2] 什么是宇宙？

“宇宙 (universe) 广漠空间和其中存在的各种天体以及弥漫物质的总称。宇宙是物质世界。它处于不断的运动和发展中，在空间上无边无际，在时间上无始无终。”——《中国大百科全书·天文学》“四方上下为宇，古往今来曰宙”宇宙，就是一切时间和空间的总和。

[1.3] 什么是天体？

天体顾名思义就是天上的物体，详细的说就是地球大气外的宇宙空间中一切宏观客体的总称，与高中地理课本上的定义不同，天文学上的天体包括从宇宙空间进入大气的客体（如流星），也包括掉落地面的客体（如陨石），也包括地球本身。对于微观的客体，则不属于天体，如：尘埃，有机及无机分子，基本粒子，电磁波，引力场等等。

[1.4] 天文学的意义

(1) 作为基础学科的作用

- 1.认识客观世界
- 2.推动其他学科的研究

(2) 与生产实际的联系

- 1.时间、历法、年代学
- 2.大地测量、导航
- 3.太阳活动
- 4.宇宙航行
- 5.彗星与小行星的监测

(3) 天文学的哲学意义

- 1.丰富了唯物辩证法的内容
- 2.充实了唯物辩证法的根本规律
- 3.深化了许多具体的哲学范畴

第二节 宇宙概观

[2.1]天文学中的单位

1.天文单位 (AU)：地球与太阳之间的平均距离。一天文单位约等于 1.5 亿千米，记忆时可以通过记住光从太阳运动到地球需要 8 分钟，与光速（三十万千米每秒）相乘即可得。

2.光年 (ly)：光在真空中传播一年所经过的距离，一光年约等于 9.5 万亿千米，记忆时亦可通过 $X=V \cdot T$ 的公式计算。

3.秒差距 (PC)：日地距离在某处的张角为一角秒，此处的距离。 $1PC=1AU/\sin 1''$ ，计算时可以通过把三角函数近似成圆弧来计算，即一角秒的正弦值约等于其对应的弧度值，一秒差距约等于 31 万亿千米，必须注意这是一个单位，即两秒差距等于两倍一秒差距的长度，而不等于日地距离张角为两角秒时的距离。

4. 各单位之间的换算关系

$$1 \text{ pc} = 3.2616 \text{ ly}$$

$$\begin{aligned} &= 206\,265 \text{ au} \\ 1 \text{ ly} &= 0.307 \text{ pc} \\ &= 63\,240 \text{ au} \\ 1 \text{ au} &= 1.5813 \times 10^{-5} \text{ ly} \\ &= 4.848 \times 10^{-6} \text{ pc} \end{aligned}$$

[2.2]宇宙的层次结构

1. 随着人类视野的不断发展，人们看到的空间尺度也越来越多，我们可以把天体分为行星层次，恒星层次，星系层次，宇宙层次四个层次
2. 行星层次：这一层次由大大小小的行星组成，最为典型的代表是地球，行星大多绕恒星运转，最近的研究显示也存在流浪于宇宙空间的行星。
3. 恒星层次：典型代表是太阳，它是离地球最近的一颗恒星，也是太阳系的中心天体。恒星彼此距离非常遥远，离太阳最近的恒星离太阳也有 4.27 光年，部分恒星如太阳拥有恒星系统，也有很多恒星与其他恒星以双星和聚星形式存在。
4. 星系层次：这一层次的代表是银河系，银河系中约有 3000 亿颗恒星。
5. 宇宙层次：尺度最大的一个天体层次是整个宇宙。约在不足一百年之前，天文学家发现在我们的银河系之外，存在许多形态各异的与银河系尺度不相上下的星系，即河外星系。它们的数量达千亿量级，并且构成了星系团、超星系团等系统，最远的星系离我们已超过 100 亿光年。所有星系构成了整个宇宙，也可叫做可观测宇宙。

第三节 各种天体

[3.1]行星和卫星

太阳系有八颗行星，按离太阳远近分别是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星。除了水星和金星，其他行星都有或多或少的卫星。在太阳系外也发现了很多行星，称之为系外行星。

[3.2]恒星

按照现代天文学的认识，恒星是质量大多介于 $0.05 \sim 120$ 太阳质量 (m_{\odot}) 之间，靠自身的能源发出电磁辐射的天体。恒星被称之为恒星是因为它们在天空中几乎观察不到运动，但是，恒星并不是固定不动的，只是距离遥远，使用特殊的工具很容易发现他们在天球中运动。宇宙中有数量惊人的恒星，光光银河系中就有 3000 亿颗以上，而银河系只是宇宙中数千亿个星系的一员。

[3.3]星团

恒星具有集群分布的特性，除了双星和聚星这种简单的恒星系统之外，还存在着由众多恒星组成的更大系统——星团，星团分为两种：疏散星团和球状星团

1. 疏散星团：疏散星团，顾名思义就是其中恒星分布的较为疏散的星团，这类星团均匀的分布在银河系盘面上，也较为年轻。



一个典型的疏散星团：

2. 球状星团：成员非常密集，整体呈球状，其中的成员通常较为年老，球状星团分布在以银心为中心的大球体（银晕）中。



一个典型的球装星团：

[3.4]星云

构成星云的，是各种星际物质，这些物质主要由气体和尘埃构成，它们填充在恒星间的星际空间，星际物质中密度相对较高的构成了星云

星云按照发光机理分类，可分为三种：暗星云，发射星云，反射星云

暗星云：这种星云本身不发光，也无法被直接观测到，但是因为它们遮挡了背景中的星光，所以在空间中如同一个巨大的空洞，故而得名暗星云。



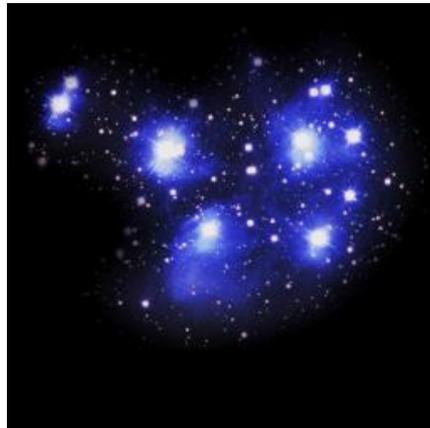
著名的马头星云就是一个暗星云：

发射星云：这类星云中往往有大质量恒星存在，大质量的恒星温度很高，会发出紫外辐射，紫外辐射是一种电离辐射，能够电离星云中的气体，气体被电离后发光，从而被人们看见，得名发射星云，发射星云通常呈红色。



一个典型的发射星云：

反射星云：反射星云和地球之间往往有恒星存在，这些恒星发出的光会照亮反射星云中的尘埃，被反射的光进入观测者的眼睛，从而得名反射星云，反射星云的颜色与照亮它的恒星有关。



图中蓝色的即为反射星云：

除了上述按照发光原因分类的星云，星云按照成因分类还可分为以下几种：

超新星遗迹：这类星云的成因是超新星爆发，在超新星爆发后，大质量恒星的外层被抛出形成了超新星遗迹，这类星云常常被观测到有体积扩大的趋势，超新星遗迹中常含有中子星或者黑洞。



超新星遗迹：

行星状星云：这类星云由中等质量的恒星在生命末期抛出其外壳得到，通常呈均匀的球形，其中常常有白矮星。



行星状星云：

[3.5]星系

星系是宇宙中一种较大的恒星系统，通常由数千万颗恒星构成。

星系按照外形分类，可分为椭圆星系，透镜星系，漩涡星系，棒旋星系，不规则星系

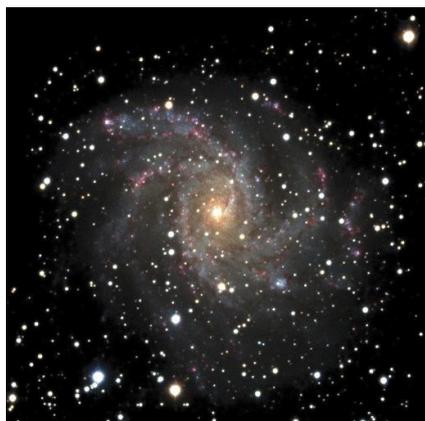
椭圆星系：整体呈椭圆形，按照离心率从小到大分成 E0-E7 8 种，其中 E0 为正圆形，这种星系中年老的恒星较多，星云较少。椭圆星系中质量较大的是宇宙中最大的一种星系，而质量较小的则常为其他星系的卫星星系。



典型的椭圆星系：

透镜星系：这种星系具有盘状结构，但是没有旋臂，被单独归为一类，型号为 S0 型。

漩涡星系：这种星系由圆球状的核心与盘绕在核心周围的旋臂构成，其中核心处的恒星较为年老，旋臂处的恒星较为年轻，漩涡星系中富含星云，质量中等，通常比最大的椭圆星系小。漩涡星系按照旋臂缠绕的从密到疏分为 Sa, Sb, Sc 三型。



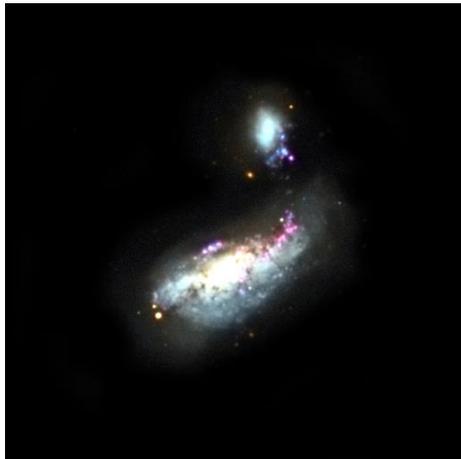
漩涡星系：

棒旋星系：和漩涡星系几乎相同，唯一的区别是棒旋星系中间没有核球而是一个棒状的核心，银河系是一个棒旋星系。



棒旋星系：

不规则星系：这类星系形状不规则，通常不是一开始就形成的，而是被其他星系通过引力干扰发生了形变形成的，银河系的两个卫星星系（大、小麦哲伦云）就是不规则星系。



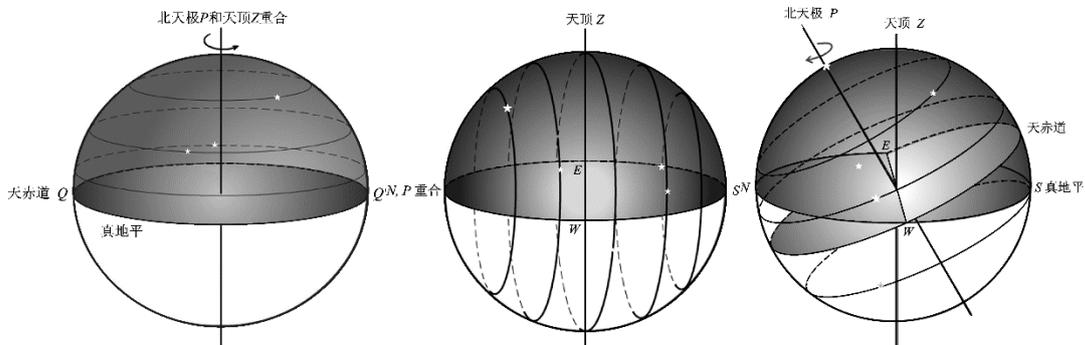
不规则星系：

第四节 四季星空

[4.1]天体的周日视运动

地球在自西向东自转，因为运动的相对性，地球上的人们只能观测到所有天体绕着地轴的延伸（称之为天轴）自东向西运动，周期与地球自转周期一致，为 24 小时左右，这就是天体的周日视运动。

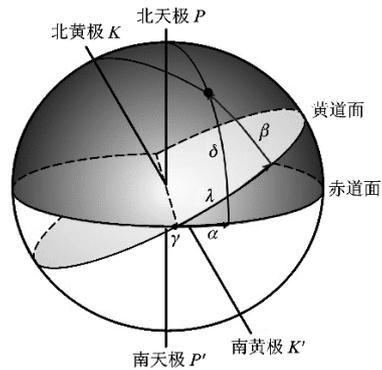
在地球不同纬度的观测者看到的周日视运动形式不同，这是因为不同纬度天极（天轴在天球上的投影）高度不同造成的，如在两极，天极位于天顶，观测者看到的天体都绕着平行于地平线的圆运动；在赤道地区，天极位于地平线上，所有天体沿垂直于地平线的圆运动



三张图分别为两极，赤道，一般地区的情况

[4.2]太阳的周年视运动

由于地球在自转的同时还绕日公转一年里，太阳相对于背景恒星移动一周，而地球自转的平面于公转的平面存在一定夹角，称之为黄赤交角，这导致了太阳每天正午的高度也不同。对于地球上的观测者，把地球赤道面延伸到天球上，称之为天赤道，把地球公转轨道面投影到天球上（即太阳的周年视运动轨迹），称之为黄道，黄道与赤道相交于两点，称之为春分点和秋分点。地球的公转方向是自西向东，故太阳的周年视运动也是自西向东。



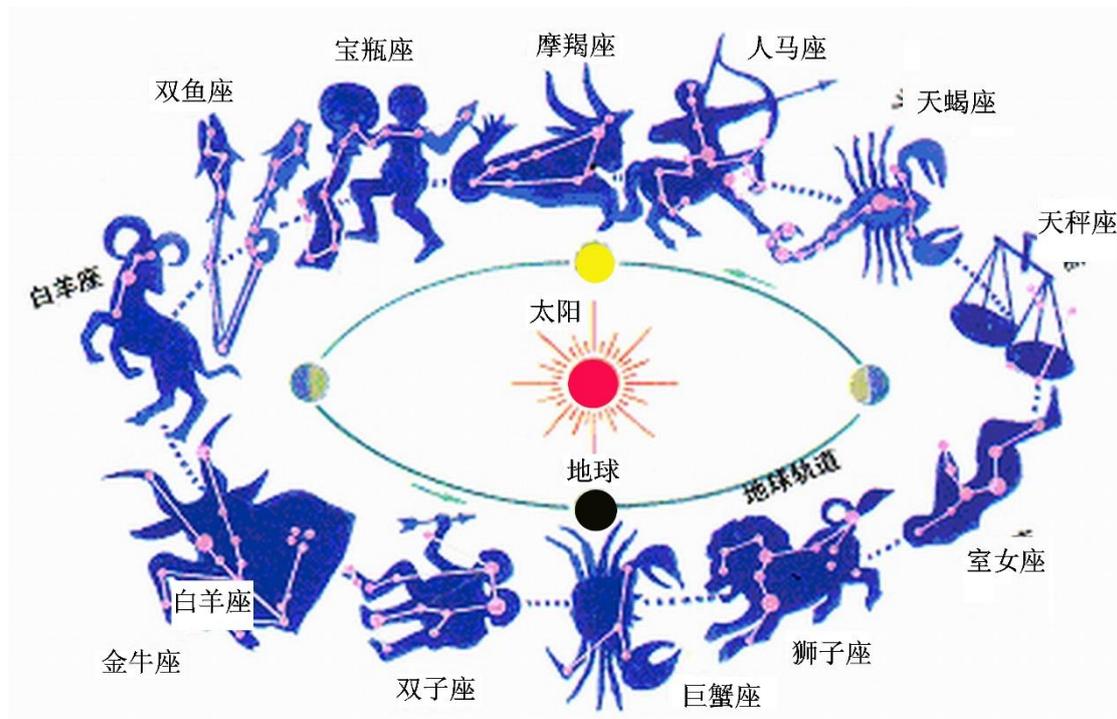
天赤道与黄道的简图：

[4.3]黄道星座

黄道星座指的是黄道经过的星座的总称，俗话说黄道十二星座，但是实际上黄道星座有十三个：双鱼座，白羊座，金牛座，双子座，巨蟹座，狮子座，处女座，天秤座，天蝎座，射手座，摩羯座，水瓶座。

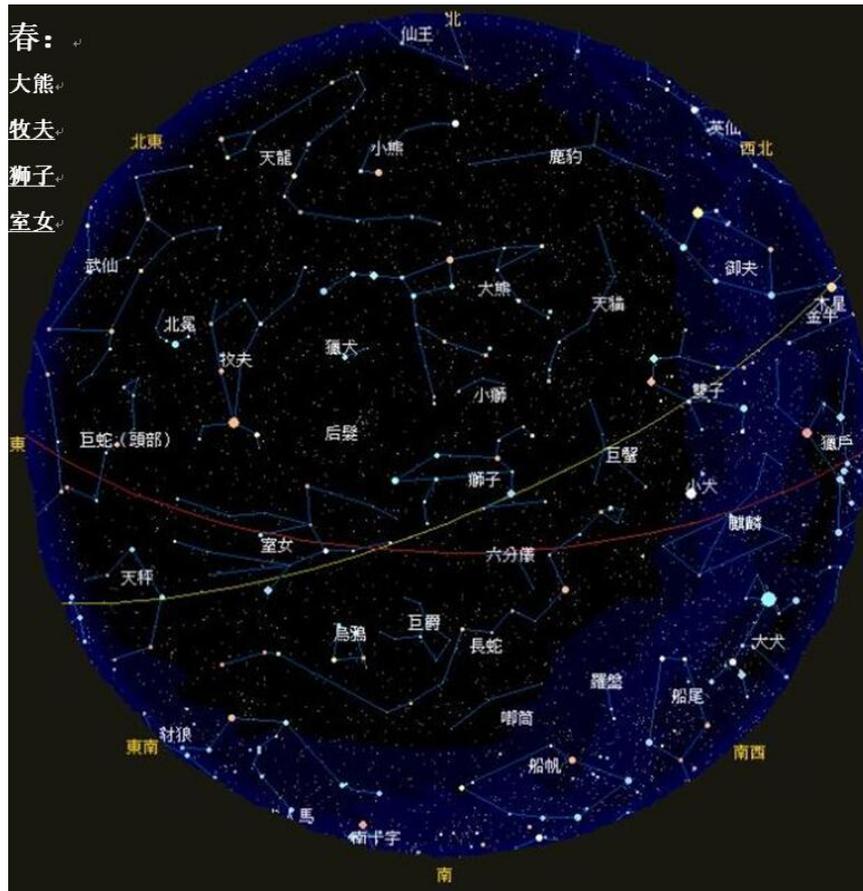
[4.4]四季星空的变化

因为太阳的周年视运动，太阳在星空背景上的位置在不断变化，而星星只能在晚上看到，故而夜晚看到的星座在一年里也在发生不断的变化。

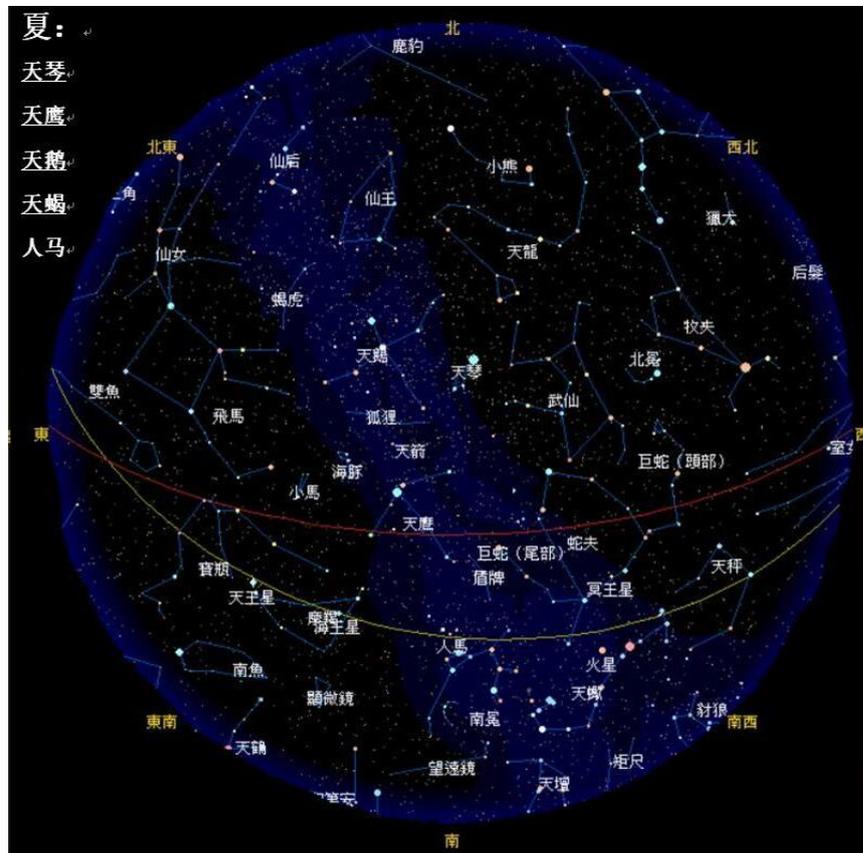


如图所示，如在春季地球上看到太阳在双鱼座，白羊座，金牛座，所以在黑夜人们看到的就是与之相对的处女座，天秤座，天蝎座对应的天区，就是这样，地球上的人们在不同的季节看到不同天空。

[4.5]春季星空



[4.6]夏季星空



第二章 天体物理

第一节 基本天体物理量

[1.1]星等

视星等：视星等是对天体亮度的一种量度，视星等通过对数度量，越小越亮，一坎德拉发光强度的光源在 1km 外的亮度为 1 等。通常认为星等每差五等，其亮度差一百倍，故用公式

写为 $\frac{E_1}{E_2} = 100^{\frac{m_2 - m_1}{5}}$ 其中 m_1, m_2 为视星等， E_1, E_2 为亮度，对这一公式进行变形得

$m_2 - m_1 = -2.5 \lg \frac{E_2}{E_1}$ 这一公式，不同感光元件敏感的波长不一样，测得的星等也有细微差别，故把肉眼观测到的星等称之为“目视星等”，用配置特殊滤光片的照相机测得的星等称之为“仿视星等”，用光电光度计测得的星等称之为“光电星等”，照相底片测得的星等称之为“照相星等”等等。

[1.2]绝对星等：

视星等仅仅表示地球上看到的恒星亮度，但因为不同恒星离地球的距离不同，视星等不能用来表示恒星的绝对亮度，为了比较不同恒星的实际亮度，必须把它们放在同一距离上比较，天文学上，把一颗视星等为 m 的恒星移动到距离为 10 秒差距的位置上，把此时的视星等定义为此恒星的绝对星等 M ，因为观测到的亮度与距离的平方呈反比，所以可以推出公式 $m - M = 5 \lg R - 5$ ， R 为恒星离地球的距离，此公式称之为距离模数公式。实际在天文观测中，还需要考虑到大气对光线的吸收，称之为“大气消光”，大气消光会导致观测的视星等比实际视星等大，天文学上已经有一套详细的处理方法，因为涉及到大量不需要中学生掌握的知识，这里不再赘述。

[1.3]光度

前文中说道绝对星等是对恒星实际发光能力的一种度量，但是星等毕竟是一种对数的量度，不能很好的表示恒星的实际亮度，恒星的实际亮度用光度表示。光度是恒星固有的，表征其辐射能力的量，天文学上使用的亮度单位是太阳光度 L_{\odot} ，一太阳光度约等于 $3.8 \times 10^{33} \text{ erg/s}$ ，知道恒星的绝对星等 M 后，就可以使用距离模数公式与太阳的数据进行比较，得到恒星的光度 L 。

$\lg \frac{L}{L_{\odot}} = \frac{1}{2.5} (M_{\odot} - M)$ 。

[1.4]黑体辐射

黑体是一种吸收所有射向它的辐射的理想物体，黑体吸收辐射后温度升高，辐射出电磁波，这种辐射称之为黑体辐射，黑体辐射是一种连续谱，在一定温度下，黑体辐射在一定波长下存在极值，这就是维恩位移定律， $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$ ， b 为维恩位移常量， $b = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ ， T 为温度单位为开，显然温度越高的物体，其辐射峰波长也就越短。对黑体谱对所有波积分，可以得到温度为 T 的黑体在所有波段上的辐射能量之和 $B = \sigma T^4$ ，其中 σ 为黑体辐射常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ，这一定律称之为斯特藩-玻尔兹曼定律。

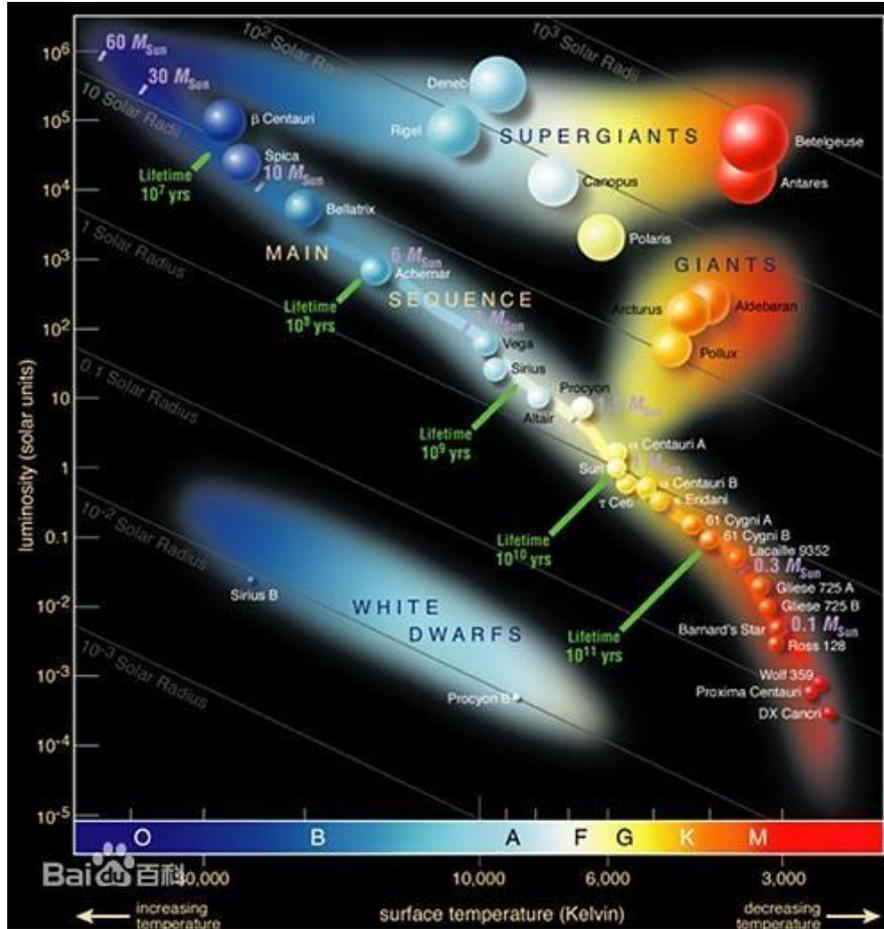
[1.5]恒星光谱型

因为不同恒星表面温度不同，根据维恩位移定律，可以发现恒星的颜色随温度的变化而变化，按照恒星的不同颜色，可以把绝大多数恒星从蓝到红分为 O（蓝白）、B（蓝白）、A（白）、F（黄白）、G（黄）、K（橙）、M（红）七种光谱型，其中 O 型星的颜色最蓝，温度也最高，M 型星颜色最红，温度也最低。我们的太阳是一颗 G 型星。

第二节 基本概念

[2.1]赫罗图

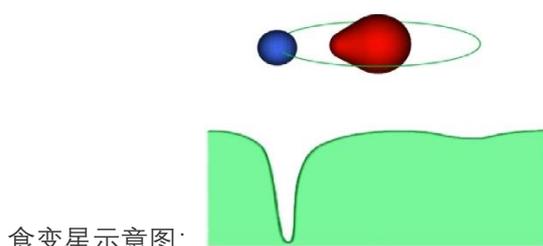
将观测到的所有恒星放置于纵坐标为绝对星等（也有使用太阳光度的），横坐标为光谱型（也有使用表面温度的）的平面直角坐标中，可以观察到恒星在其中集聚在几个区域内。



其中我们把从左下延伸到右上的长条分布带称之为“主序带 (MAIN SEQUENCE)”，分布于其上的恒星称之为“主序星”，主序星是宇宙中绝大多数恒星所处的状态，对于主序带上的恒星，绝对星等越小，表面温度越高；把分布于图片最顶端的长条称之为“超巨星带 (SUPERGIANTS)”，这类恒星光度极大；把分布于超巨星带与主序带之间的称之为“巨星带 (GIANTS)”。

[2.2]变星 2.

1.食变星：食变星是一种处于双星系统中的恒星，因为在绕转时互相遮挡，导致整个系统的亮度发生周期性变化的恒星



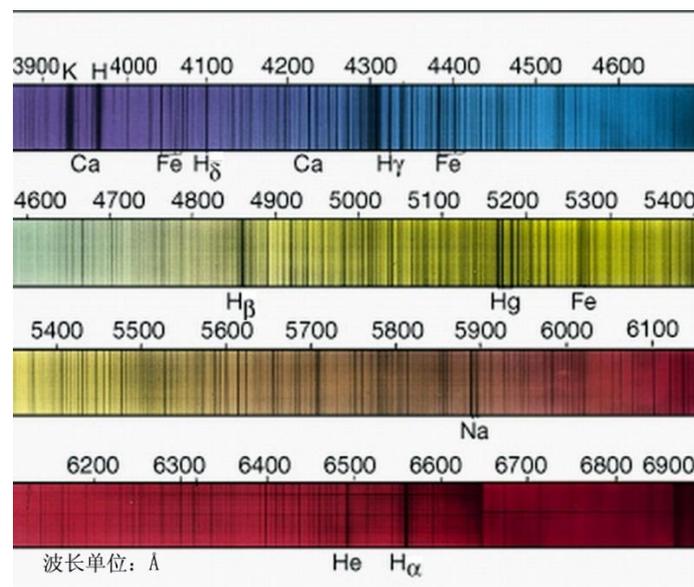
食变星示意图：

2.脉动变星：脉动变星指半径周期性的变化导致其光度与绝对星等发生周期性的改变的一种恒星，这类恒星中最典型的的就是造父变星与天琴座 RR 型星。

3.爆发变星：爆发变星指的亮度爆发性增大，一段时间后就变暗的一种恒星，常见的有新星与超新星。

[2.3]恒星光谱

恒星本质上是一种近似的黑体，因此其发出的光大致是一种黑体谱，连续而均匀，但是实际上使用光谱仪观测到的恒星谱线上常常有大量的吸收线，这种现象是由“基尔霍夫定律”造成的，即“每种化学元素都能在高温下辐射独特的明线光谱；在低温下每种元素都能吸收自己可以发出的谱线，从而在光谱中产生暗线”，因为恒星大气层的温度较低，因此恒星大气中的元素会吸收恒星发出的光线，产生了暗线



一颗恒星光谱中的吸收线：

[2.4]红移

红移指物体辐射的波长发生变长的变化的一种现象，红移定义为 $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ ，其中 z 为红移

值， λ 为红移后波长， λ_0 为原始波长主要分为三种：

1.多普勒红移：物体辐射的波长会因为波源和观测者的相对运动而产生变化。在运动的波源前面，波被压缩，波长变得较短，频率变得较高；在运动的波源后面时，会产生相反的效应。波长变得较长，频率变得较低，这就是多普勒效应，因多普勒效应造成的红移称之为多普勒红移。当相对运动速度较小时，不需要考虑相对论效应，其计算公式可以近似为 $z = \frac{v}{c}$ ，其中 v 为相对运动速度， c 为光速；当相对运动速度较大以至于接近光速时，需要

考虑相对论效应其计算公式为 $z = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$ 。

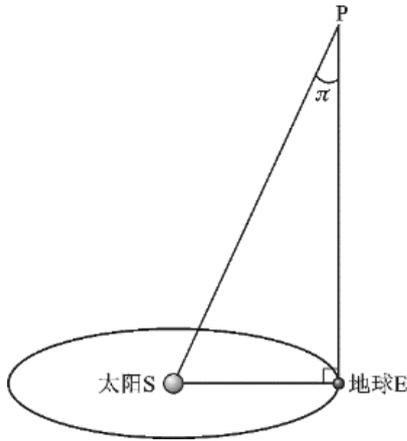
2.引力红移：根据广义相对论，光线从引力场中射出来时，也会发生红移现象，称之为引力红移，对于近似在无穷远处的观测者，引力红移可以近似成 $z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{GM}{r_1 c^2}}} - 1$ ，其中 r_1 为光线发射处距离天体引力中心的距离， G 为引力常数， M 为天体质量。

3.宇宙学红移：因为宇宙空间在膨胀，天体发出的光会被拉长，体现出红移的现象，称之为宇宙学红移。

第三节 天体测距

[3.1]三角视差

随着地球的公转，地球在半年里移动了两个天文单位的距离，这导致了半年后观测到的恒星与半年前的位置相差了一定角距离（下图中的 2π ），要计算天体的距离，就可以通过三角函数（角度较小时可以直接按照圆弧计算，即 $\sin A = \tan A = A(\text{Rad})$, $A \ll 1$ ）的运算求得，这种方法就是三角视差法，三角视差法最远可以测量约 100pc 的距离。

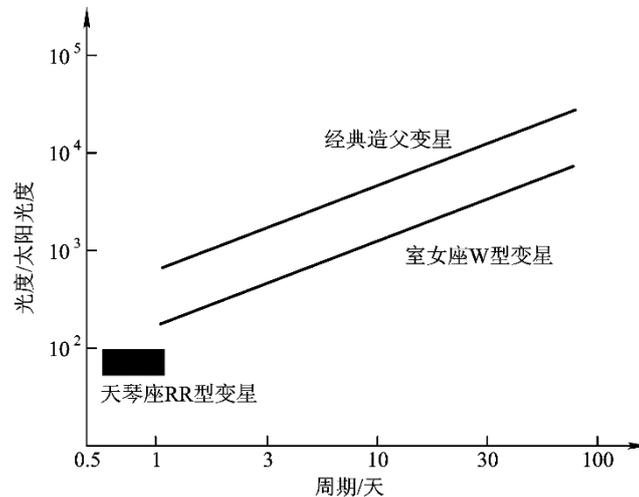


[3.2]分光视差

当距离超过 100pc，就难以观测到恒星的三角视差，这时候就要使用其他方法了。对于主序星，其光谱中总能找到几条吸收线如 Fe I，Sr II 等，它们的强度与恒星的绝对星等相关，这样只要测得恒星的光谱，找到其中的吸收线，就能得到其绝对星等，再结合观测到的视星等，通过 $m - M = 5 \log R - 5$ 公式即可求出距离，这种方法适用于小于 30kpc 的恒星测距，再遥远的主序星光谱难以测量，无法使用此种方法。

[3.3]造父变星周光关系

对于造父变星，可以发现其的光变周期与绝对星等具有一定关系，称之为造父变星的周光关系，这样只要观测到一颗造父变星的光变周期，就可以算出其绝对星等，进而求出距离。这种方法通常用于测量离银河系较近的星系的距离。



造父变星周光关系：

[3.4] Ia 型超新星

Ia 型超新星爆发时具有几乎相同的绝对星等 (-19.3 等, 具体原因载后文中会提到), 这样就可以通过测量其视星等来推算其距离, 这一方法可以测得遥远星系的距离, 但是缺点的是 Ia 型超新星较为罕见, 很难预测会再哪个星系出现。

[3.5]哈勃定律

因为宇宙在膨胀, 而宇宙膨胀的速率是已知的, 就可以通过测量远处的天体的光谱, 通过红移求出其相对运动速度, 进而求出天体距离。

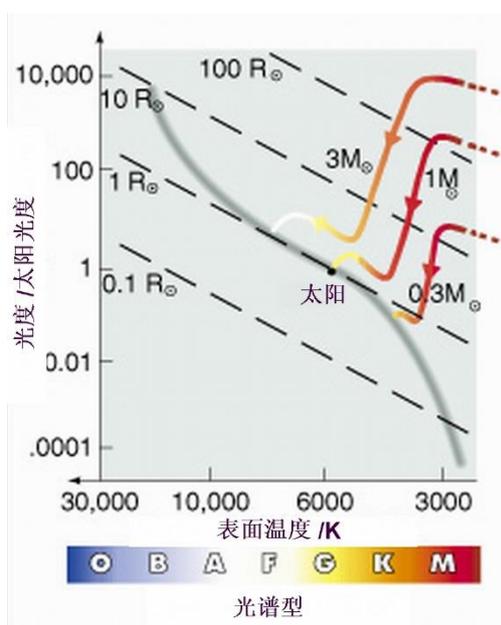
第四节 恒星演化

[4.1]快速收缩阶段

恒星是由气体云坍缩形成的, 当气体云满足质量大于金斯质量时即符合金斯判据 (这一结论感兴趣的同学可以自行查找资料研究) 时, 会快速的坍缩, 碎裂形成原恒星。

[4.2]原恒星阶段

星云快速收缩阶段结束后, 就开始慢速收缩, 这时的星云称之为原恒星。原恒星会缓慢的放出辐射能 (发光), 这一作用的能量来源是引力收缩释放的引力势能。这一时刻, 原恒星已经变得不透明, 辐射只能从其表面溢出, 此时原恒星中心与表面会形成温度梯度, 从而形成对流, 所以原恒星阶段对流层的发展变得十分重要, 对流使得原恒星内部的温度梯度减小, 内部温度降低, 这一演化阶段称之为林忠四郎阶段, 简称林氏阶段。林氏阶段时, 原恒星在赫罗图上的位置下降, 这一几乎垂直的轨迹称之为林氏线, 小质量的恒星对流层较厚, 内部对流充分, 林氏线很明显, 林氏阶段很长, 质量越大的恒星, 对流层越薄, 林氏线不明显, 林氏阶段也较短。



图中斜向下的线就是林氏线:

[4.3]主序星阶段

随着恒星的收缩, 其中心的温度越来越高, 达到 800 万 K 后, 就能进行氢聚变为氦的核反应 (后文中称之为燃烧), 成为一颗主序星, 至此原恒星正式成为了恒星。

主序星的核反应：主序星主要有两种核反应形式：质子-质子链与碳氮氧循环，其中对于小质量恒星核反应以质子-质子链为主，对于大质量恒星，核反应以碳氮氧循环为主。

对于太阳质量的主序星，其最内部是发生核反应的核心，中间为辐射层，在这一层能量通过辐射传播，最外层为对流层，在这一层能量通过对流传播。

恒星在主序星阶段停留的时间，取决于其核心氢燃烧的时间，一般来说，质量越小的恒星，其核反应的速度越慢，寿命也就越长，质量大的恒星，虽然燃料多，但是消耗的也快，所以寿命短。

[4.4]主序后阶段

恒星在核心的氢燃烧完毕后，就进入主序后阶段，不同质量的恒星，其主序后阶段的演化过程也不同：

极小质量恒星（红矮星）($0.08M_{\odot} < M < 0.5M_{\odot}$)：

这类恒星在核心氢燃烧完后，不能进行下一步的核反应，其寿命终止，其外层被抛出形成行星状星云，富含氦的核心则形成了一颗氦白矮星。

小质量恒星 ($0.5M_{\odot} < M < 2.3M_{\odot}$)：

这类恒星在核心氢燃烧完之后，将会形成一个氦的中心核与周围的氢壳层，此时外层的氢壳层依然在燃烧，维持了恒星的能源，但是恒星的核心因为得不到能源，会发生引力坍缩，释放的引力势能向外辐射，将外层的氢壳层吹大，从而导致恒星的体积增大，表面温度降低，体现在赫罗图上就是恒星向右方脱离主星序，演化成亚巨星，然后恒星表面温度不再降低，但是膨胀不会停止，导致恒星表面积不断增大，光度增加，变为一颗红巨星。变为红巨星后，随着氢壳层的继续燃烧，核心的氦质量越来越大，当中心核质量达到 $0.45M_{\odot}$ 时，核心的氦会发生核聚变，聚变为碳，氧等较重的核素，在一开始，中心的氦反应是一种爆炸式的反应，于是中心发生绝热膨胀，这一时段很短，一般只有几秒到几分钟，这一现象称之为氦闪。氦闪产生大量的能量，但对于外部几乎不会导致恒星亮度增加，反而因为星核膨胀，吸热导致光度骤减，进入稳定的氦燃烧阶段，这样对于这颗恒星，其核心是氦的燃烧，其外部氢的壳层依然在燃烧，此时的恒星称之为氦燃烧星，当中心氦核的燃料也用尽的时候，恒星的核心就会变成以碳氧为主从恒星，而临近核心的外壳则是燃烧的氢壳层，再外层则是燃烧的氦壳层，此时的恒星进入双壳层燃烧阶段，这一阶段称之为渐近巨星支 (AGB)，当双壳层的燃料即将耗尽的时候，恒星的能量已经不能维持其核心不发生引力坍缩，此时其碳氧核收缩，释放出引力势能，将外部壳层吹大，导致其光度不断增大，形成红超巨星，红超巨星阶段由于核心对外壳不断做功导致其外壳最终以星风的形式被吹散形成行星状星云，而其核心则坍缩为碳-氧白矮星。

中等质量恒星 ($2.3M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$)：

中等质量的恒星，在核心的氢燃烧完了后，也会形成一个氦核，也会向小质量恒星一样转变为红巨星，但是对于中等质量的恒星，其到达红巨星时，核心温度已经足以让氦燃烧，故氦燃烧直接进入平稳燃烧阶段，而不经氦闪，然后如小质量恒星一样，也会形成双壳层燃烧的结构，进入 AGB 阶段，进入 AGB 阶段的恒星有两种结局，如果其末期的星风足够强大导致其核心质量小于 $1.4M_{\odot}$ ，则其演化路径与小质量恒星一样，如果末期其星风不够强大，导致其核心通过吸积等方式获得了超过 $1.4M_{\odot}$ 的质量，则核心发生失控的碳燃

烧，形成超新星爆炸，这种超新星爆炸与后文中大质量恒星末期的超新星爆炸不是同一种，请各位读者注意区分。

大质量恒星 ($M > 8M_{\odot}$):

大质量恒星与中等质量恒星不同，它们在经过氦燃烧后，中间的碳核心能够被平稳的点火，发生碳燃烧与氧燃烧，形成钠，氖，镁，硫，磷，硅等重元素，在核心碳氧也消耗完时，这些碳氧燃烧产生的废料也会燃烧，生成铁，铁是核比结合能最大的元素，故它不能再燃烧，恒星最终形成了一种多壳层燃烧的结构，如同一颗洋葱头。这种反应模式末期，核聚变的能量不足以维持核心稳定存在，核心即剧烈坍缩，温度剧烈上升，铁原子核随即分裂为氦原子核，一个氦原子核又分解为两个质子与两个中子，这两个质子俘获电子也形成中子，导致核心强烈的中子化，同时上述反应释放大量高能中微子，强大的中微子束对恒星外壳产生巨大的压力，将其吹散，形成超新星爆发，这种由能量主要来源于恒星坍缩释放的引力势能的超新星称之为 II 型超新星，对于坍缩前核心质量小于 $3M_{\odot}$ 的恒星，超新星爆炸后中子核心会留下来，形成中子星，对于坍缩前核心质量大于 $3M_{\odot}$ 的恒星，超新星爆炸后中子核心会继续坍缩形成黑洞。

[4.4]致密星

恒星在核反应停止后即形成致密星，前文中提到的白矮星，中子星，黑洞就是常见的致密星。

白矮星：白矮星不发生核反应，它为什么不会继续发生引力坍缩呢？这是因为当物质的密度达到一定界限时，物质内部除了气体压力与辐射压力外，还会出现简并压力，对于像中子，电子这样的费米子，其自旋量子数为 $1/2$ 的奇数倍，根据泡利不相容原理，一个费米子组成的系统，不能有两个或者两个以上的粒子处于同一量子态，比如当一个自旋为 $1/2$ 的电子处于 p 能级时，只能允许另一个自旋为 $-1/2$ 的电子处在这一能级，这种排斥力称之为简并压力，对于简并气体，由于较低的能级被占满，故粒子的能量高于一般气体，其动量也高于一般气体，粒子动量交换产生的压力也超过普通气体，这就是简并压力。对于白矮星，其内部主要是电子简并，通过量子力学计算，可以得出电子简并能够维持的致密星的最大质量为 $1.4M_{\odot}$ ，这一极限称之为钱德拉赛卡极限。通过吸积的方式超过这一质量的白矮星会剧烈坍缩形成超新星爆炸，自身则被彻底炸散，这种白矮星形成的超新星爆炸称之为 Ia 型超新星。

中子星：中子星也通过简并压力平衡其引力，但此处与白矮星不同，中子星中为中子简并，通过与白矮星类似的计算可以算出中子星质量的上限为 $2.2M_{\odot}$ （静态）/ $2.9M_{\odot}$ （转动），超过这一质量的中子星会坍缩成黑洞。超新星爆炸会赋予中子星极大的角动量，导致其高速自转，常常可以达到几十毫秒一圈，部分中子星具有极强的磁场，在磁场中运动的电子与质子会发出同步加速辐射与曲率辐射，形成一个沿着中子星磁极射出，随着中子星高速自转而转动的射电波束，当这一射电波束扫过地球时，地球上的天线就会接收到一个脉冲信号，这称之为灯塔效应，能够发出这种射电波的恒星称之为脉冲星。

黑洞：质量超过中子星上限的致密星会不可避免的坍缩成黑洞，黑洞的引力非常大，导致其附近的光都无法从中逃出，黑洞周围具有一个范围，在这一范围内的逃逸速度大于光速，即光也无法逃逸，对于不发生自转的黑洞，用逃逸速度公式即可推算出这一半径的计

算公式为 $r = \frac{2GM}{c^2}$ ，其中 G 为引力常数，M 为黑洞质量，这一半径称之为史瓦西半径。经典理论中的黑洞是绝对黑的，不会有任何物质逃逸，但是事实不是这样，这是由于真空极化导致的。量子力学中的真空是所有正能态都空着，而所有负能态都填充一个粒子的状态，但是正负能态之间存在一个禁区，所以真空是稳定的，但是在有外加场（如电场，引力场）存在的情况下，负能态的粒子有概率穿透禁区，从正能态出射，此时负能态少了一个粒子，即出现正能态的反粒子，对于出现在黑洞附近的正反粒子，它们有概率掉入黑洞，正粒子具有正的质量，掉入黑洞导致黑洞质量增加，反粒子具有负的质量，掉入黑洞导致质量减小，通过计算，反粒子掉入黑洞的概率比正粒子大，因此黑洞的质量会因为此种作用减小，而黑洞发生的正离子称之为霍金辐射。