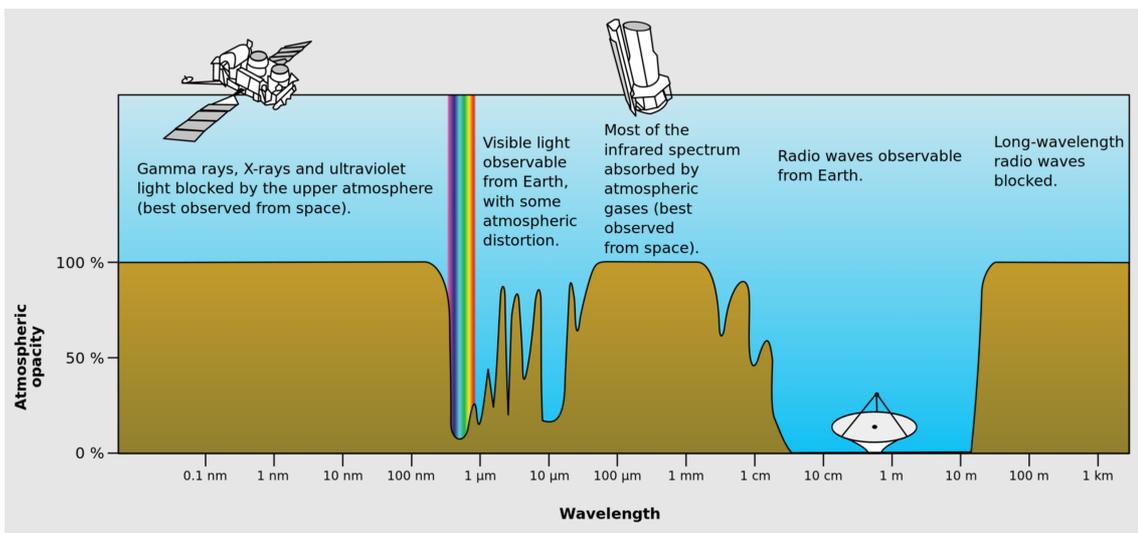
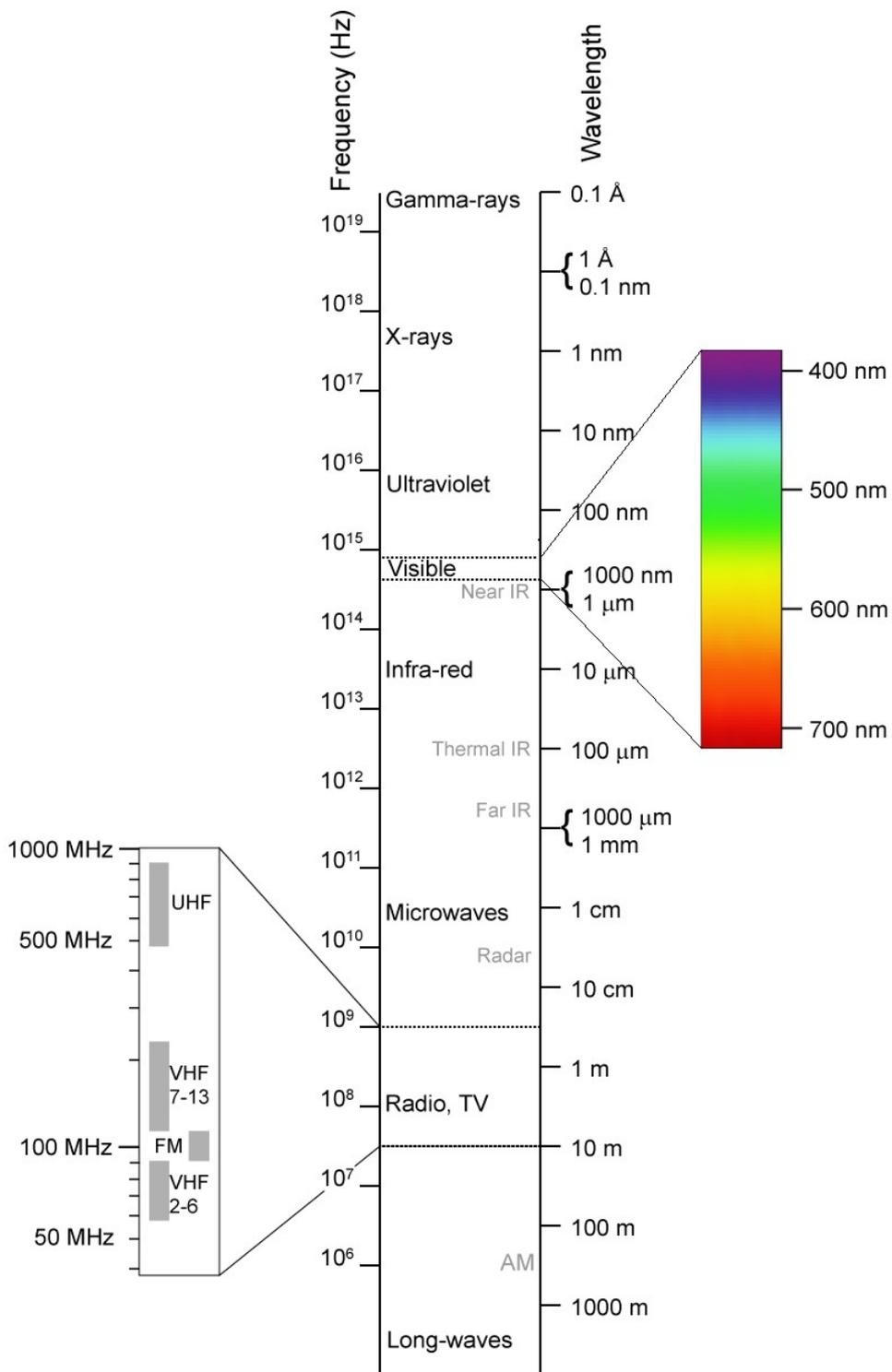


天体物理概论笔记

PB21151823 杨景硕

一些常识

- $1yr \approx \pi \times 10^7 s$
- $1AU \approx 1.50 \times 10^{11}m$, $1ly \approx 9.46 \times 10^{15}m \approx 63240AU$, $1pc \approx 206265AU \approx 3.26ly$
- $M_{\odot} \approx 2 \times 10^{30}kg$, $L_{\odot} \approx 3.86 \times 10^{26}W \approx 3.86 \times 10^{33}erg/s$, $R_{\odot} \approx 6.96 \times 10^8m$
- Ly $_{\alpha}$: 121.6nm, H $_{\alpha}$: 656.3nm, 1eV的光子波长约为1240nm, 计算时注意能量与波长成反比
- $v^2 = GM/r$, if measuring v in km/s, M in M_{\odot} , and r in pc, $G = 4.3 \times 10^{-3}$
- 距离太阳最近的恒星是比邻星 (半人马座 α 星), $d = 1.3pc = 4.25ly$
- 太阳到银心距离8kpc, 绕银心旋转速度220km/s
- 星系中恒星数目 10^{11} 量级 (《千亿个太阳》)
- 星际尘埃尺度 $< 1\mu m$, 在200 μm 处辐射
- 星系尺度kpc, 星系群/星系团尺度Mpc
- At $z = 0.6 - 4$, 7 - 8 kpc/arcsec
- 宇宙年龄13.7Gyr
- 电磁波谱和大气窗口



黑体辐射

设单位体积的辐射场中分布在以某一方向为轴的立体角元 Ω 内的能量为 w , 则

$$\text{能量密度(energy density)} u = \int w d\Omega = 4\pi w$$

$$\text{能流密度(intensity)} I = cw = \frac{c}{4\pi} u$$

$$\text{通量密度(flux)} F = \int I \cos\theta d\Omega = \pi I = \frac{c}{4} u$$

$$\text{光度(luminosity)} L = F4\pi r^2$$

Stefan-Boltzmann law:

$$u = aT^4, F = \frac{c}{4} aT^4 = \sigma T^4$$

Wein's law:

$$\frac{dI}{d\lambda} = 0 \rightarrow \lambda_{max} T = 0.29 \text{ cmK}$$

$$\frac{dI}{d\nu} = 0 \rightarrow h\nu_{max} = 2.8kT$$

$$\lambda_{max} \nu_{max} \neq c$$

康普顿效应

康普顿散射可看作是X射线或伽马射线中的光子和自由电子间的弹性碰撞过程, 光子因失去能量而导致波长变长

康普顿频移公式 [编辑]

康普顿本人引用[光电效应](#)和[狭义相对论](#)来解释这一现象，并依据[余弦定律](#)推导出康普顿频移公式

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

其中的符号对应如下

λ_0	撞前波长
λ	撞后波长
m	电子质量
θ	光子方向转动角（碰撞前后的路径夹角）
h	普朗克常数
c	光速

推导要件:

\mathbf{p}_0	撞前光子动量
\mathbf{p}	撞后光子动量
\mathbf{v}	撞后电子速度
$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (\mathbf{v}/c)^2}}$	
$\mathbf{p}_0 = \mathbf{p} + \gamma m \mathbf{v}$	动量守恒
$ \mathbf{p}_0 c + mc^2 = \mathbf{p} c + \gamma mc^2$	能量守恒
$ \mathbf{p} = \frac{h}{\lambda}$	物质波公式

推导如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_0^2 + \mathbf{p}^2 - 2 |\mathbf{p}_0| |\mathbf{p}| \cos \theta &= (\mathbf{p}_0 - \mathbf{p})^2 = (\gamma m \mathbf{v})^2 \\ &= (\gamma mc)^2 - (mc)^2 = (|\mathbf{p}_0| + mc - |\mathbf{p}|)^2 - (mc)^2 \\ &= (|\mathbf{p}_0| - |\mathbf{p}|) (|\mathbf{p}_0| + 2mc - |\mathbf{p}|) \\ &= \mathbf{p}_0^2 + \mathbf{p}^2 - 2 |\mathbf{p}_0| |\mathbf{p}| + 2mc (|\mathbf{p}_0| - |\mathbf{p}|) \end{aligned}$$

移项得:

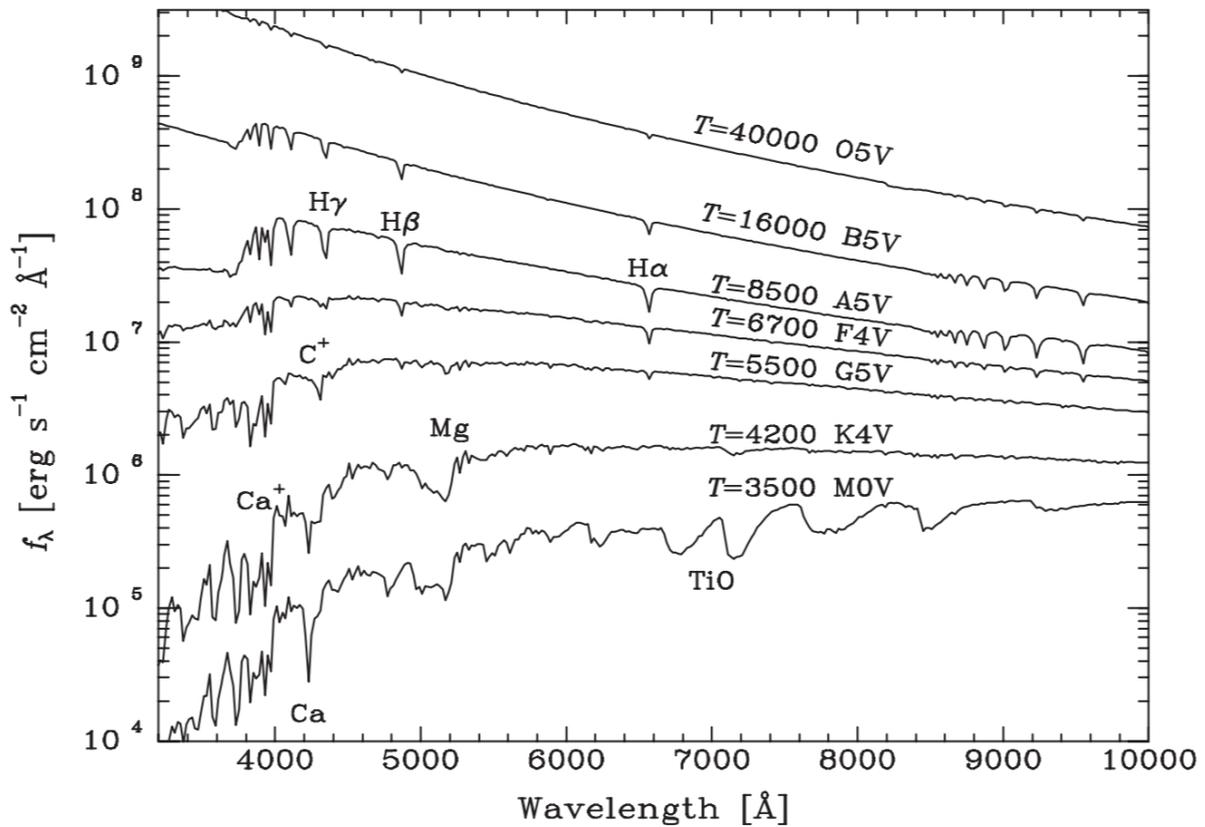
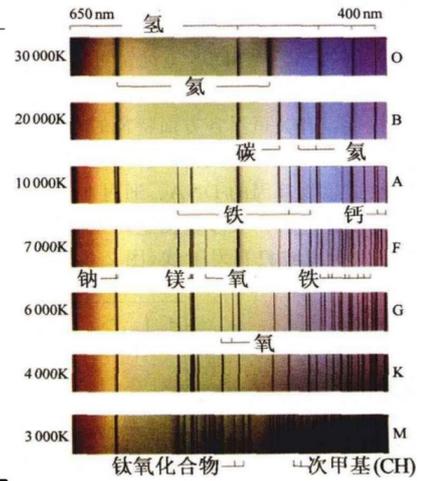
$$\frac{1 - \cos \theta}{mc} = \frac{|\mathbf{p}_0| - |\mathbf{p}|}{|\mathbf{p}_0| |\mathbf{p}|} = \frac{1}{|\mathbf{p}|} - \frac{1}{|\mathbf{p}_0|} = \frac{\lambda}{h} - \frac{\lambda_0}{h}$$

也就是

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

恒星的光谱型

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 He II, He I, H I 线
B	蓝白	$10\,000\text{ K} \leq T_e \leq 30\,000\text{ K}$	He I 线在 B2 型达到最大, B0 之后 He 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 A0 达到极大, Ca 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, Ca 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, Ca II 线很强, Fe 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



在哈佛序列中靠前的称为早型星, 靠后的称为晚型星, 从早型到晚型谱线总的特征是: 氢线强甚至有氦线出现 → 金属线强 → 分子线强。不同光谱型谱线特征的成因:

- 只有当足够多的原子处于激发态时谱线才会很强
- 温度越高, 处于激发态的原子占比越多
- 但温度足够高时, 原子会发生电离, 且温度越高, 电离度越高
- 一般来说, 原子的电离能越大, 激发态和基态的能级差就越大, 各元素的第一电离能变化趋势如下图所示
- 金属线中像镁 (24)、钙 (40)、铁 (56) 的吸收线比较明显, 因为它们的核子数是氢 (4) 的倍数, 在核合成过程中容易形成, 故丰度较高

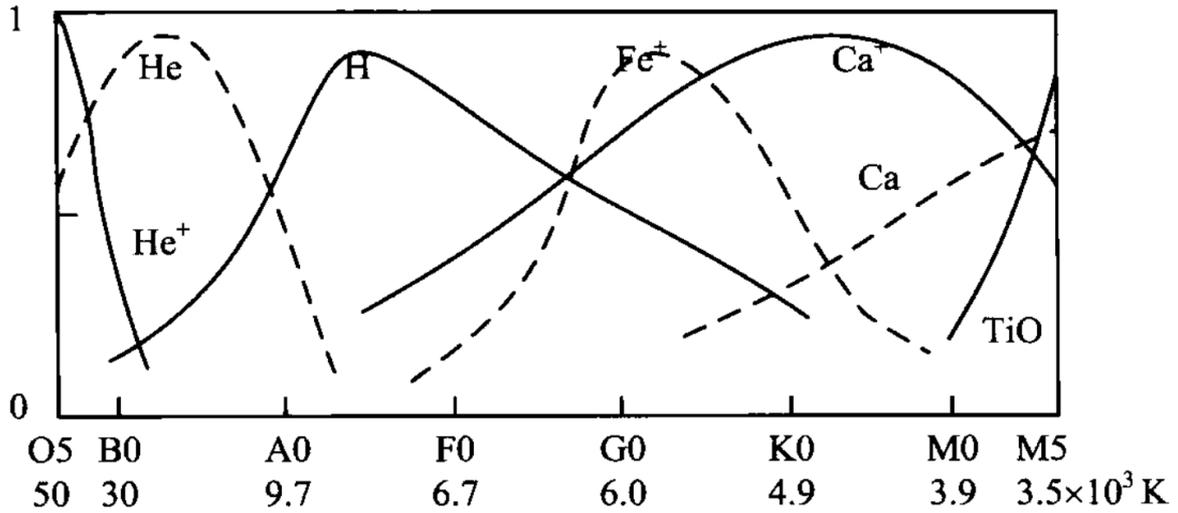
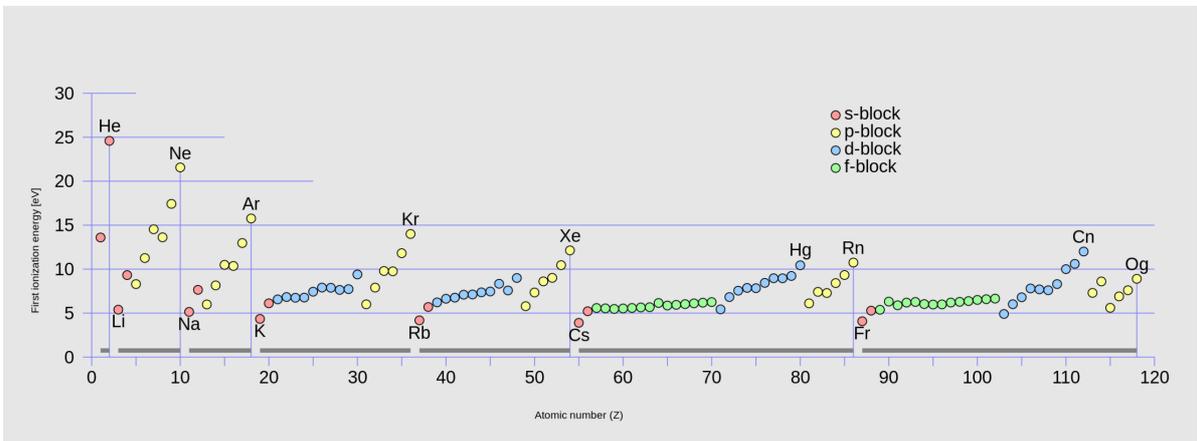


图 2.6 几种典型原子(离子)谱线的相对强度与光谱型的关系

恒星的演化

核心引力收缩	→	核心温度升高	→	元素燃烧聚变
↑				↓
内部压力不足		恒星的演化循环		提供辐射压, 压力与引力平衡
↑				↓
元素燃料耗尽, 核聚变停止	←	核心温度不再升高	←	核心停止收缩

主序星阶段: 核心温度达 10^7K , 氢核燃烧, 聚变为氦, 核聚变提供辐射压, 气压和辐射压与引力平衡, 核心停止收缩。

红巨星阶段: 核心氢耗尽, 核聚变停止, 内部压力不足, 氢核引力收缩, 核心温度升高。外层氢燃烧膨胀, 表面温度下降, 光度增加。此阶段恒星重力较小, 外层物质流失形成恒星风。

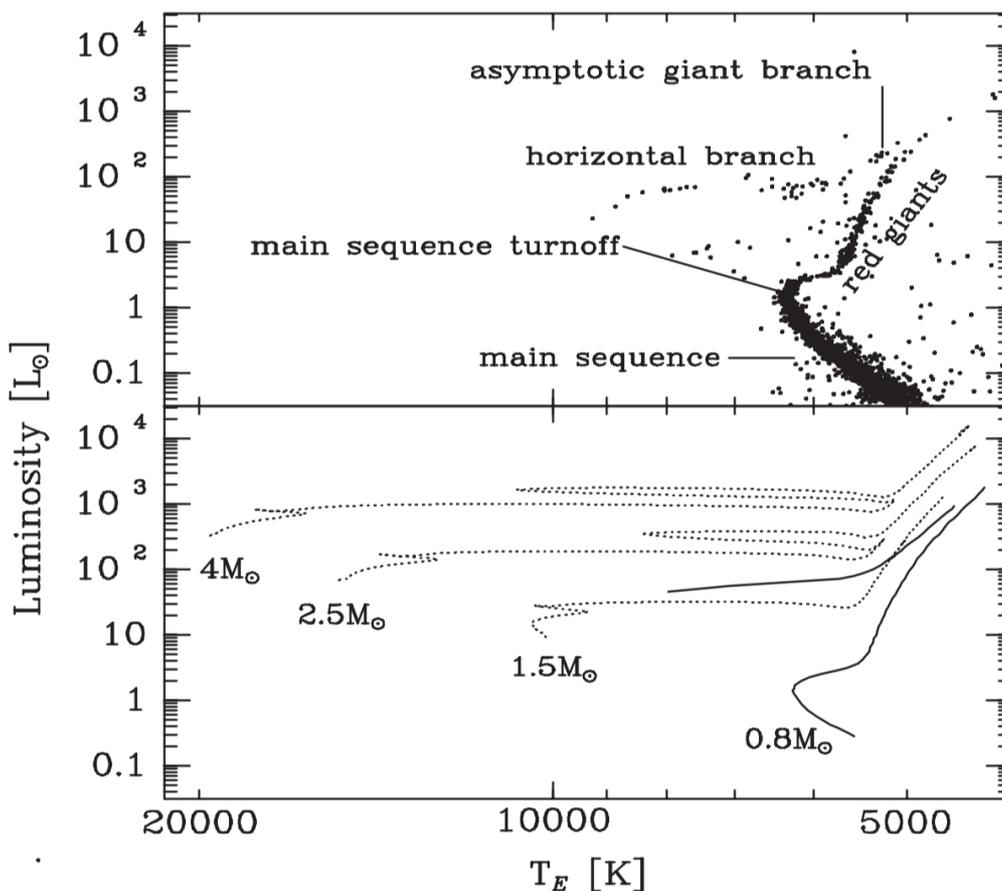
- $0.6M_{\odot} - 2M_{\odot}$ 的小质量恒星经历氦闪: 电子简并, 氦核燃烧, 聚变为碳, 核心温度上升, 绝热膨胀, 氦核“爆炸”后吸热膨胀, 光度骤减, 电子退简并。

红群聚或水平分支: 核心温度达 10^8K , 氦核燃烧, 聚变为碳、氧, 核聚变提供辐射压, 气压和辐射压与引力平衡, 核心停止收缩。外层氢燃烧。

- $> 2M_{\odot}$ 的中高质量恒星可能成为造父变星。

渐进巨星分支：核心氦耗尽，核聚变停止，内部压力不足，碳-氧核引力收缩，核心温度升高。外层氦、氢燃烧膨胀，表面温度下降，光度增加。此阶段恒星重力较小，外层物质流失形成恒星风。结束阶段形成红超巨星。

- $> 8M_{\odot}$ 的大质量恒星核心温度达 10^9K ，碳燃烧，碳耗尽后引力收缩，核心温度升高，氧燃烧，然后是氦、镁、硅燃烧……最终形成铁中心核，核聚变停止，内部压力不足，铁核引力收缩，核心温度升高。
- $0.6M_{\odot} - 8M_{\odot}$ 的中低质量恒星演化结果：核心辐射将恒星风的喷射物电离，形成**行星状星云**。核心电子简并，简并压力与引力平衡，核心停止收缩，形成**白矮星**。
- $> 8M_{\odot}$ 的大质量恒星演化结果：核心温度达 $5 \times 10^9\text{K}$ ，铁核光致分解，核心中子化，产生中微子，吸热使温度骤降，内部压力不足，核心引力坍塌。核周围的物质掉落到核表面，产生反弹的冲击波，核表面的高能中微子束将外层物质吹散，形成**I型超新星爆发**。核心中子简并，简并压力与引力平衡，核心停止收缩，形成**中子星**。或核心引力坍塌，形成**黑洞**。



天体距离的测定

- 三角视差：地球围绕太阳的运动在天空中产生了相对于更遥远的恒星的运动。垂直于地球轨道平面（称为黄道平面）方向的恒星在一年的时间里会在天空上画出一个圆（见Fig. 2.3），而黄道平面方向的恒星会在天空上画出一条折回一倍的线段。在其他方向上，恒星会画出一个椭圆。椭圆的半长轴的角半径是

$$\alpha = \frac{d_{\odot}}{d}$$

其中 d_{\odot} 是地球到太阳的距离， d 是到恒星的距离。这样，只要测出恒星的周年视差 α ，我们就能算出 d 。

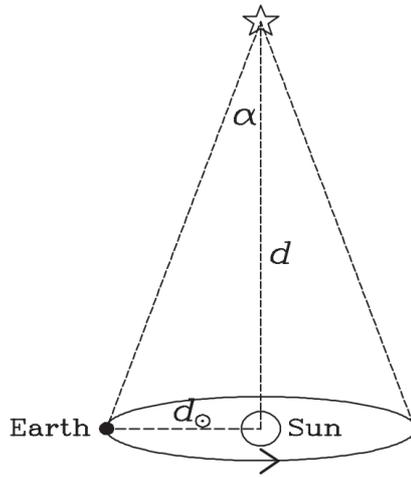


Figure 2.3 Schematic view of the apparent parallax motion of a nearby star, situated in the direction above the ecliptic plane, due to the Earth's circular orbit around the Sun.

- 天琴座RR型变星：天琴座RR型变星在脉动，半径交替变大或变小，亮度也在以0.2至1天为周期变化。天琴座RR型变星的光度都近似为 $50L_{\odot}$ ，与观测到的通量进行比较，就可以求出它的距离。
- 造父变星：在疏散星团的恒星中有时会有称为造父变星的脉动恒星。造父变星的径向脉动导致光度的周期性变化，周期约为1至100天，是恒星平均光度的函数（见Fig. 8.1）。我们可以得到造父变星的周期-光度关系，作为标准烛光。这样，知道了一颗造父变星的光变周期，就可以得到光度，与观测到的通量进行比较，从而求出它的距离。

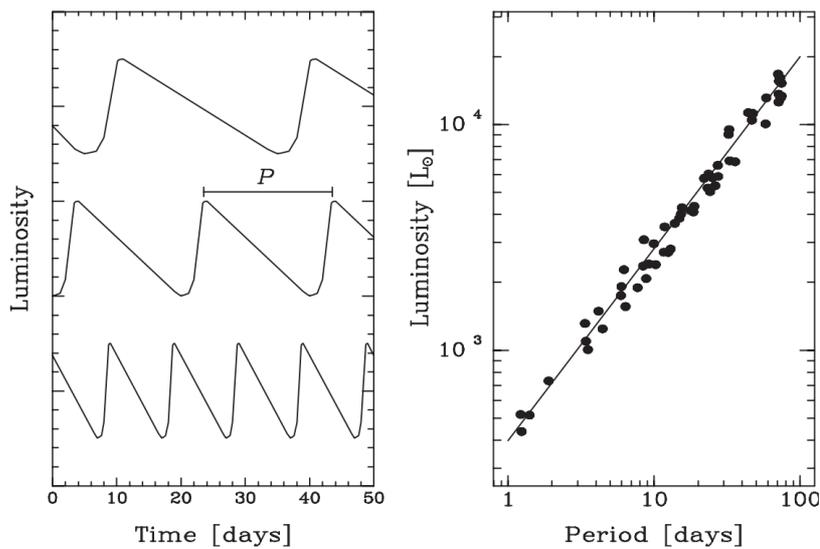


Figure 8.1 Illustration of Cepheid properties. *Left*: Schematic time series for Cepheids of different luminosities. *Right*: Schematic Cepheid period–luminosity relation. Once the relation is calibrated for nearby Cepheids, it can be used to determine the luminosity of Cepheids with measured periods in another galaxy. Comparison of the derived luminosity to the observed Cepheid flux then yields the distance to the galaxy.

- 食变分光双星：在食变分光双星系统中，根据径向速度曲线和光变曲线，我们可以分别得到两颗恒星的轨道半径和质量。从观测到的光谱能量分布中得到了每颗恒星的有效温度 T_E 。每颗恒星的光度于是为 $L = 4\pi r^2 \sigma T_E^4$ ，系统的总光度可与观测到的通量进行比较，从而得到该系统的距离。
- 超新星回光：在大麦哲伦星系的超新星1987A周围曾观测到超新星回光，在超新星爆发后大约240天，超新星前身恒星在其演化的前一阶段喷出的星周物质环被爆炸产生的紫外线辐射闪光光电离。这个环开始在典型的光电离气体的发射线中发光，随着原子的重新结合，它正在慢慢变暗。观测到环的角半径 $\theta = 0.85$ 角秒。240天的延迟 Δt ，是由于光从超新星到环的传播时间：

$$\Delta t = \frac{R}{c} = \frac{\theta D}{c}$$

其中R是环的半径，D是我们到大麦哲伦星系的距离。

- Tully-Fisher关系和Faber-Jackson关系：Tully-Fisher关系是漩涡星系的光度和大半径处的旋转速度之间的经验关系：

$$L \propto v^\alpha$$

α 取决于发射线宽度，谱线展宽的原因是气体云环绕星系中心做轨道运动产生的多普勒频移。因此，通过测量一个遥远星系的旋转速度，可以推断出它的光度，与观测到的通量进行比较，并得出距离。

类似的Faber-Jackson关系是椭圆星系的光度和速度弥散之间的经验关系。在邻近的星系中，球状星团和行星状星云的光度分布有一个明确的峰值。通过测量这类天体在遥远星系中的通量分布，确定分布峰值对应的通量，并与本地星系中分布峰值的光度进行比较，可以推断出距离。

- 表面亮度波动：假设从覆盖星系一部分的小立体角（以观察者为中心）发出的光是由N颗恒星发出的，在星系中许多小区域的样本上测量的表面亮度（单位立体角的通量）的相对波动将是

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{N}} \propto \frac{1}{D}$$

D是我们到星系的距离，显然 $N \propto D^2$ 。比例常数可以在附近的星系中校准，然后这个关系可以推导出到其他表面亮度波动被测定的星系的距离。

- Ia型超新星：Ia型超新星在其最大亮度时的变化范围很窄，根据超新星随时间变亮和变暗的速率对光度进行校正，可以得到峰值亮度时的光度，将这些超新星变成标准烛光。测量在遥远的星系中这样一颗超新星的峰值亮度时的通量，可以得出到宿主星系的距离。
- 哈勃定律：星系远离我们的视向速度v与距离D成正比，遵循哈勃定律：

$$v = H_0 D$$

其中v可以通过星系光谱中发射或吸收特征线的多普勒频移测量， H_0 称为哈勃常数。