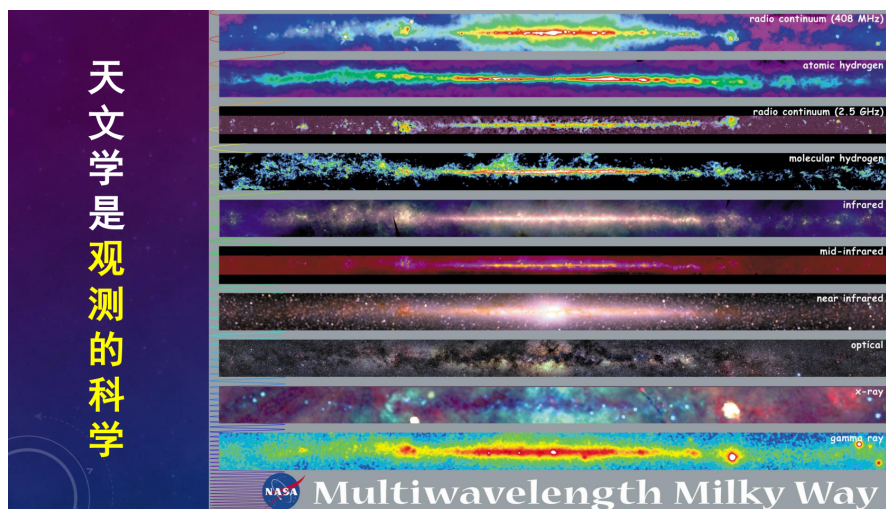


物理笔记 | 基础天文学

Siyan Dong

什么是天文学？数量级对了就对啦！！



可能对大众来说的天文—天文观测



实际上天文还有大量的 coding 工作；

或许对大众的“不准确”的印象还有许多，比如目前教材、书上对银河系的示意图都有些问题，因为相对距离太长不能画在一张纸上；下面给出一个可视化网站：

https://joshworth.com/dev/pixelspace/pixelspace_solarsystem.html

中科院也写过文章进行科普：<https://mp.weixin.qq.com/s/BT5Jp-AmKl1lEaCsbVPkCA>



图 1: 课程导图

第 1 章 恒星

1.1 恒星的辐射: 电磁波

Maxwell.E.q 可推导 (过程略):

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

这是一个波动方程: $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$ (1.1)

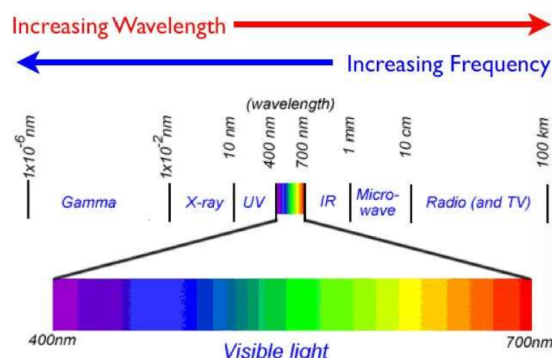
恒星的辐射: 电磁波

光是一种电磁波

光的颜色由其频率决定

光的波长: $1 \text{ nm} = 10 \text{ \AA}$

$$c = \lambda \nu = 299792458 \text{ m/s}$$



1.2 黑体辐射定律

黑体: 若物体在任何温度下, 能吸收一切外来的电磁辐射, 则称此物体为黑体.(绝对黑体)

单色辐射出射度: 单位时间内物体单位面积发出频率/波长在 ν/λ 附近单位频率区间内电磁波能量.

1.2.1 维恩位移定律

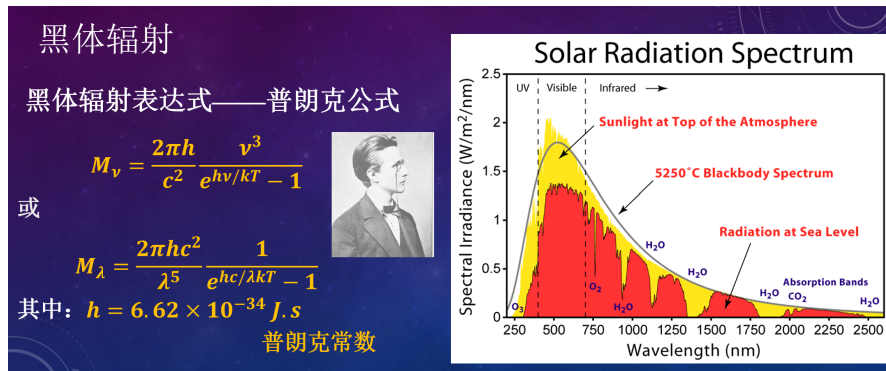
发出热辐射 (黑体辐射) 的物体具有均匀的表面温度, 其辐射强度的峰值对应的波长满足维恩位移定律:

$$\lambda_m T = b \quad \text{where } b = 0.002897 \text{ mK} \quad (1.2)$$

1.2.2 斯特藩—玻尔兹曼定律

实验表明：发出热辐射（黑体辐射）的物体具有均匀的表面温度，它和物体的表面平均辐射强度满足斯特藩—玻尔兹曼定律：

$$\frac{L}{4\pi R^2} = \sigma T^4 \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4) \quad (1.3)$$



对其求导，可得 Wien 位移定律；

1.3 原子和辐射

辐射的粒子性：光电效应（相关略）；辐射（光）既具有波动性，又具有粒子性，辐射的这种性质称之为波粒二象性。辐射在传递过程中，波动性较为显著（干涉、衍射）；辐射与物质相互作用时，粒子性比较显著。

1.4 恒星的光谱

以原子物理知识为基础，谱线产生的原因：氢光谱；最先发现的氢的谱线又称为 Balmer 线系（巴尔末线系），经验公式、跃迁等略去；

恒星的光谱

远离（接近）观测者辐射源发出的电磁辐射波长变长（短），称为谱线的红移（蓝移），在非相对论性的条件下，谱线波长的变化与视线方向天体的相对运动速度关系为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V_r}{c}$$

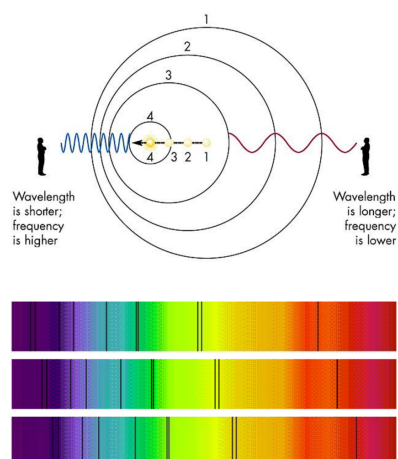


图 2: Doppler 谱线位移

发射线：特定原子的外层电子从能级较高的激发态朝能级较低的激发态（或基态）跃迁所发出的单色光；
吸收线：特定原子的外层电子从能级较低的激发态（或基态）朝能级较高的激发态跃迁而吸收的单色光。
产生发射线的天体是光学薄的，产生吸收线的天体是光学厚的。

基尔霍夫定律:

热的, 致密的固体、液体或气体产生连续谱

热的稀薄气体产生发射线

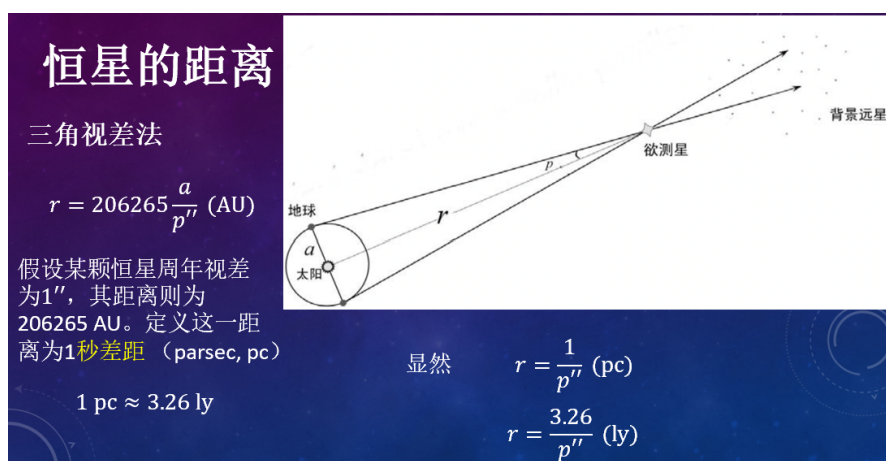
冷且稀薄的气体吸收连续谱中特定波长的辐射, 产生吸收谱。

恒星自转导致的谱线展宽, 略

1.5 恒星的距离和光度

1.5.1 三角视差法

令待测恒星距离太阳为 r , 日地距离为 a (远小于 r)。在太阳、地球和待测恒星构成的直角三角形中, 小的直角边对应的角为 p , 称之为周年视差。



1.5.2 星等

光度 (L): 整颗恒星每秒发射出的所有波段辐射的能量; 单位: W , $L_O = 3.828 \times 10^{26} W$

视星等 (m): 描述观测到天体的视亮度 (f) 的量: $f \propto \frac{L}{r^2}$

令两颗星的视亮度分别为 f_1 和 f_2 , 规定两颗星的视星等之差为:

$$m_2 - m_1 = -2.5 \lg \frac{f_2}{f_1} \quad (1.4)$$

规定织女星的视星等为 $m_{\text{vega}} = 0 \text{ mag}$;

对于任何恒星, 其视星等可以通过与织女星比较得到

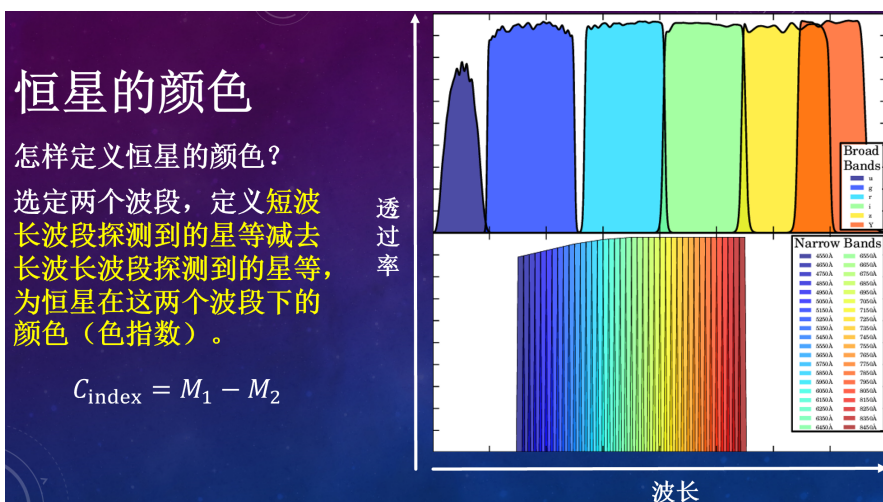
绝对星等 (M) 天体在 10 pc 处观测到的视星等

$$M = m + 5 - 5 \lg r \quad (1.5)$$

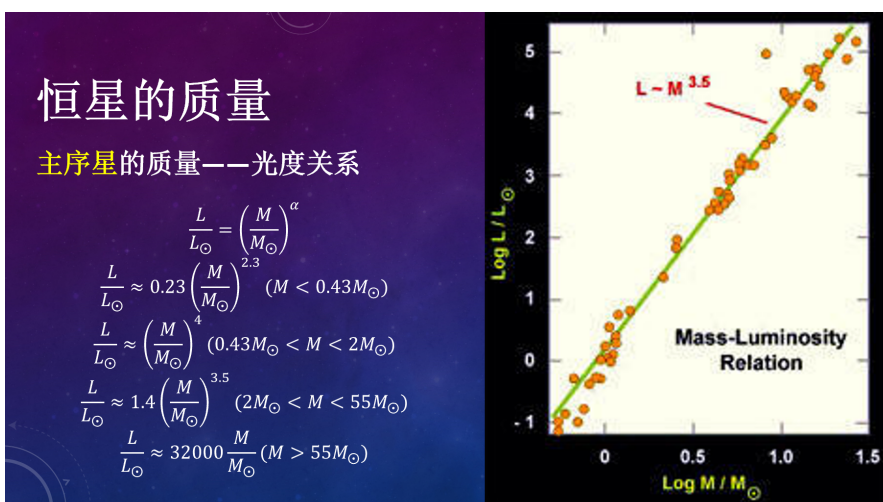
1.5.3 恒星大小

恒星的辐射近似于黑体辐射 $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$

1.5.4 恒星颜色



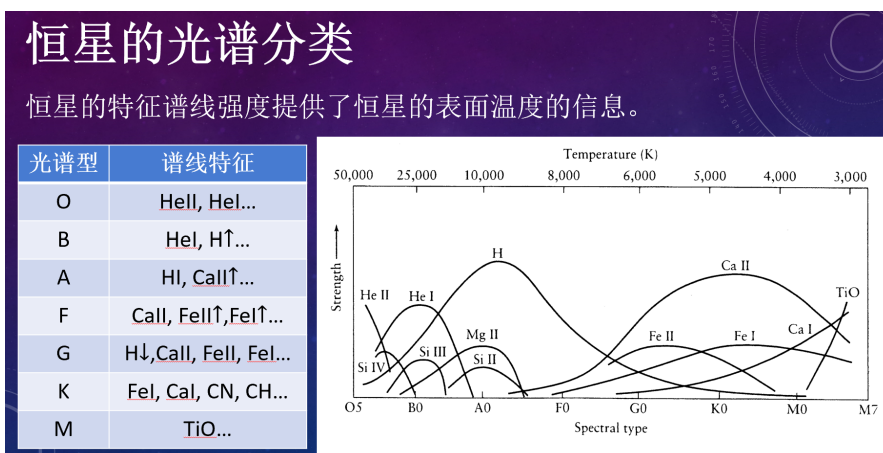
1.5.5 恒星质量



1.5.6 恒星光谱分类

哈佛恒星光谱分类：哈佛大学天文台天文学家在 1890-1910 年首先提出的恒星光谱分类法，是以温度为主要参量的一元分类。光谱序列是按恒星表面温度降低的顺序来排列：

Oh, Be A Fine Guy (Girl), Kiss Me!

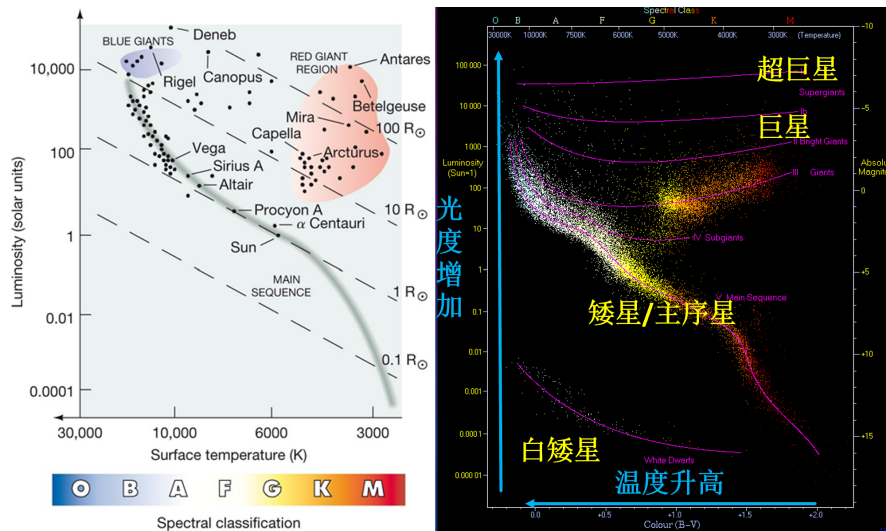


恒星的特征谱线强度提供了恒星的表面温度的信息：



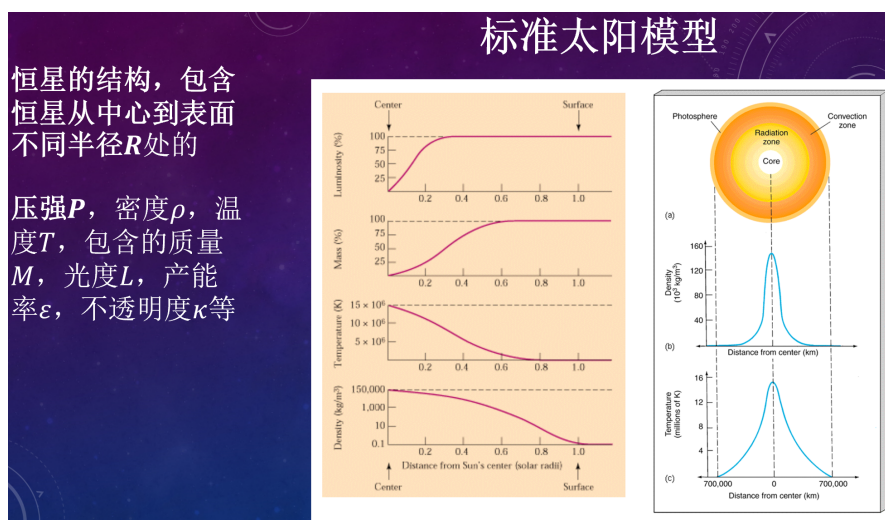
1.6 赫罗图

—恒星的光度-表面温度分布图。注意变化 L,T,R 密度规律。



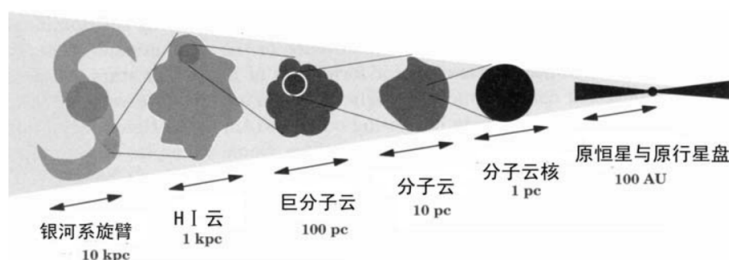
经常围绕此图考察，后续补充；

1.7 恒星的内部结构



第2章 恒星形成与演化

2.1 恒星的形成



在自引力和热运动 + 湍流 + 角动量 + 磁场平衡下的分子云，受到外部扰动开始分层级碎裂 + 坍塌，一部分云核通过释放引力能促发内部热核聚变，形成原恒星/恒星（参见可视化视频）

- 什么情况下会形成恒星？

—当气体云的热压力不足以抵抗引力时，会在引力的作用下发生塌缩，这一现象称之为金斯不稳定性；要打破流体静力学平衡，则必然有球层所受的压力差小于其所受的重力，因此要么气体云在给定的温度下质量特别大，或者分子云在给定的质量下温度特别低（从而气压低）；



- 什么是自由降落时标？

它指的是一团气体云（或一颗恒星），在完全没有向外压力的抵抗时，自由坍塌到引力中心所需要的时间

$$t_{ff} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}} \quad (2.1)$$

- 什么是热时标？

热时标（开尔文-赫姆赫兹时标）：一个天体以当前的光度释放掉其包含的所有动能所需的时标。

$$t_{KH} = \frac{U}{L} \sim \frac{GM^2}{RL} \quad (2.2)$$

2.2 恒星的演化

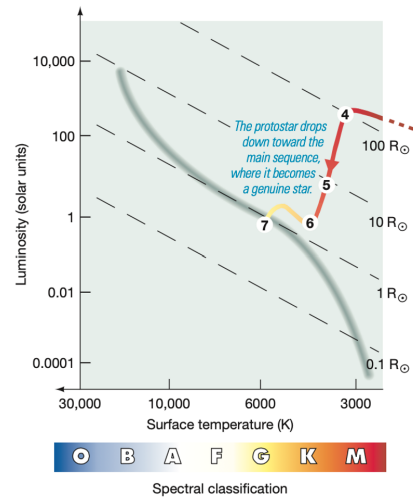
2.2.1 原恒星的演化

原恒星的演化

恒星在**赫罗图**上，是怎么来到主序上的？

林忠四郎迹(Hayashi track)：原恒星绝热坍塌早期，在赫罗图上趋于向下演化的轨迹

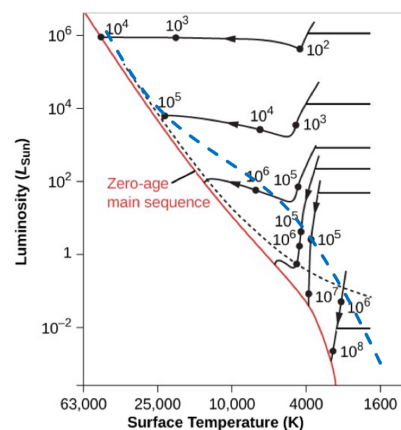
原恒星继续收缩，核心的对流停止，表面温度持续升高，在赫罗图上朝左演化。



原恒星的演化

恒星在**赫罗图**上，是怎么来到主序上的？

不同质量的原恒星演化速度不同，大质量的原恒星演化速度较快，率先进入主序阶段。同一时间形成的不同质量恒星，在初期会形成**前主序星 (PMS)** 序列。（图中蓝色虚线代表的形成时间为**1 Myr**时的**等时线**）



2.2.2 主序星的演化

主序星的演化

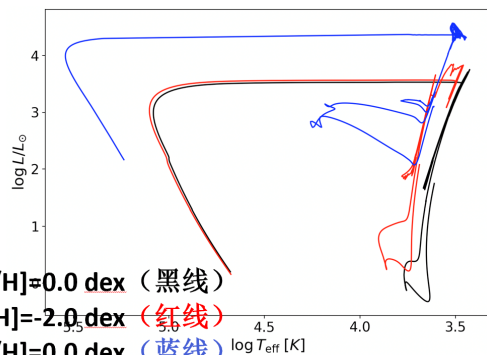
罗素—沃克定理：恒星的结构以及结构的演化，由其初始质量和化学丰度唯一决定。

质量为 $1M_{\odot}$ ，金属丰度为 $[Fe/H] \approx 0.0 \text{ dex}$ （黑线）

质量为 $1M_{\odot}$ ，金属丰度为 $[Fe/H] = -2.0 \text{ dex}$ （红线）

质量为 $5M_{\odot}$ ，金属丰度为 $[Fe/H] = 0.0 \text{ dex}$ （蓝线）

在赫罗图上的演化轨迹



原恒星点燃核氢燃烧，讲入零年龄主序，成为主序星。主序星的生命正比于其所可供燃烧的氢元素，反比于其燃烧氢元素的速率（光度） $t \propto \frac{M}{L}$
由主序星的质量—光度关系

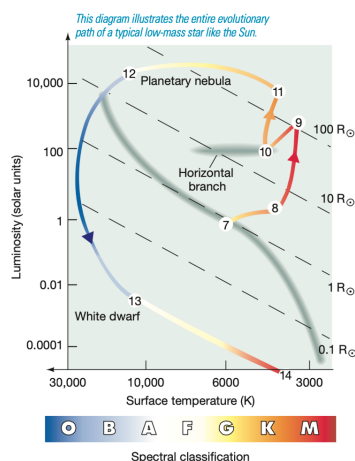
$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{M}{M_0} \right)^\alpha$$

所以

$$t \propto M^{1-\alpha}$$

2.2.3 主序后的演化

类太阳恒星的演化为例 (不同质量演化结果如表 1):



1. 壳层氢燃烧阶段 (7—8): 核心氢元素燃烧殆尽, 氢元素占比增加, 氢核收缩。氢核收缩释放引力势能点燃核心周围的氢元素, 恒星的氢壳层开始燃烧。恒星逐渐变亮, 恒星核心收缩, 壳层膨胀, 恒星体积增大, 表面温度降低。恒星进入亚巨星阶段, 在赫罗图上向右 (上) 移动。
2. 壳层氢燃烧阶段 (8—9): 核心继续收缩, 氢燃烧壳层不断外移, 燃烧效率持续增加。恒星对流层扩大, 恒星的表面温度变化缓慢。恒星继续加速变亮, 体积变得更加巨大, 恒星表面温度几乎维持不变, 进入红巨星阶段, 恒星向赫罗图上方爬升。
3. 氦闪 (阶段 9): 中心密度持续增加至 10^8 kg m^{-3} , 温度上升至 10^8 K , 氦聚变开始。由于此时恒星的氦核处于简并状态, 燃烧变得极不稳定, 在几个小时内恒星从赫罗图上发生几乎跳跃式的移动 (9—10), 温度急剧升高, 同时内核膨胀, 能量输出迅速降低。
4. 核心氦燃烧阶段 (阶段 10): 恒星内核的氦元素和壳层氢元素同时稳定燃烧, 由于红巨星阶段的恒星风, 阶段 10 的恒星剩余质量大不相同。恒星在这一阶段具有几乎相同的光度, 构成赫罗图上的水平分支, 而表面温度与恒星的剩余质量成反比。
5. 壳层氦燃烧阶段 (阶段 10—11): 核心氦元素被消耗完, 恒星内部的碳核心持续收缩, 壳层氢和氦同时燃烧。恒星再次朝巨星分支演化, 恒星进入渐进巨星支。氢氦同时聚变的壳层燃烧更加猛烈, 恒星的半径和光度进一步爬升。

理论上上述过程有可视化是最好的 (之前的视频没有解说);

【新人 up 爆肝半年带你 15 分钟走完恒星的 100 亿年!!!】

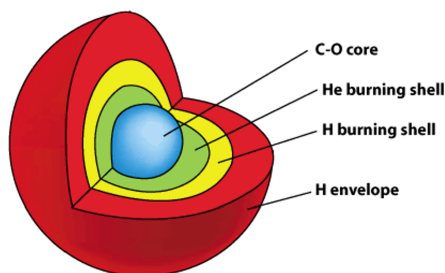
如果你喜欢歪果的 (可视化比大小): <https://www.youtube.com/watch?v=i93Z7zljQ7I>

恒星的“死亡”

类太阳恒星的演化

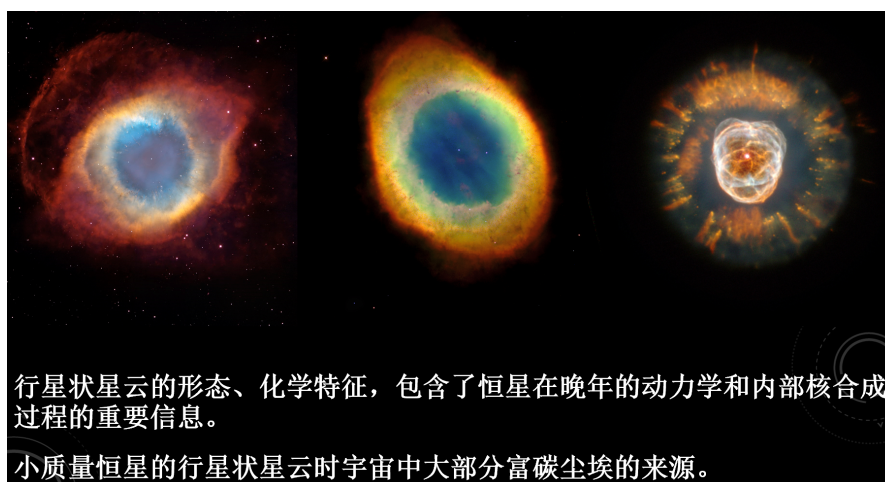
核心能够继续收缩，点燃碳聚变吗？

密度达到约 $10^{10} \text{ kg m}^{-3}$ ，核心电子再次简并，核心不再收缩，温度不再上升，恒星达到**最大压缩状态**。



渐进巨星的内部结构，从内到外，1、不燃烧的碳核心；2、边缘通过碳和氢聚变形成一些氧；3、正在燃烧的氦壳层；4、正在燃烧的氢壳层。

1. 行星状星云阶段（11—12）：核心熄灭，氢氦壳层燃烧，恒星包层不断膨胀并冷却。氢燃烧壳层产生高压，引发对温度敏感的爆发性氦壳层闪光，能量传递到最外层，引发恒星包层剧烈活动，恒星开始脉动。
2. 白矮星阶段（13）：小质量恒星演化的最终阶段，行星状星云消散后，裸露出恒星熄灭的核心。依赖其储存的热量，白矮星继续发光并逐渐冷却，在赫罗图的主序左侧朝右下方移动。

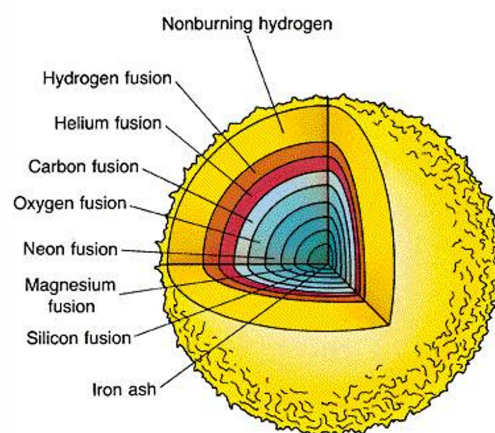


行星状星云的形态、化学特征，包含了恒星在晚年的动力学和内部核合成过程的重要信息。

小质量恒星的行星状星云时宇宙中大部分富碳尘埃的来源。

大质量恒星恒星内部物理过程

→核心H枯竭→壳层H燃烧
 →核心He燃烧→核心He枯竭
 →壳层He和H燃烧
 →核心C燃烧→核心C枯竭
 →壳层C、He和H燃烧
 →O, Ne, Si燃烧 ...
 →Fe核



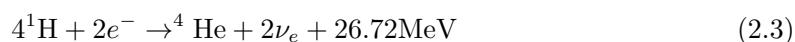
2.3 恒星核合成

从主序阶段开始，恒星内部开始核合成。

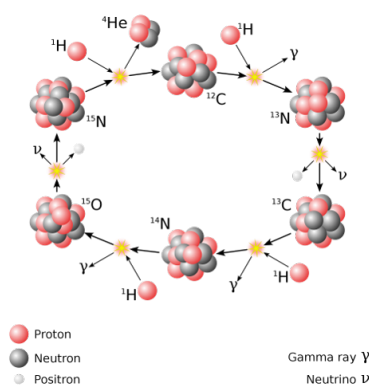
表 1: 不同质量恒星的演化结局

恒星初始质量 ($M_{\odot}$)	演化结局
$0.08 < M < 0.25$	He 白矮星
$0.25 < M < 8$	CO 白矮星
$8 < M < 12$ (?)	ONeMg 白矮星
$12 < M < 25$ (?)	超新星 $\rightarrow$ 中子星
$M > 25$ (?)	超新星 $\rightarrow$ 黑洞

1. 主序/主序后阶段: 核心/壳层氢燃烧 (pp 链反应 (pp1)):



2. CNO 循环 (略)



3. 主序后阶段: 核心/壳层氢燃烧 3α 过程:



4. 主序后阶段: 核心/壳层碳、氧燃烧 (发生在至少 $8M_{\text{sun}}$ 的恒星内部)

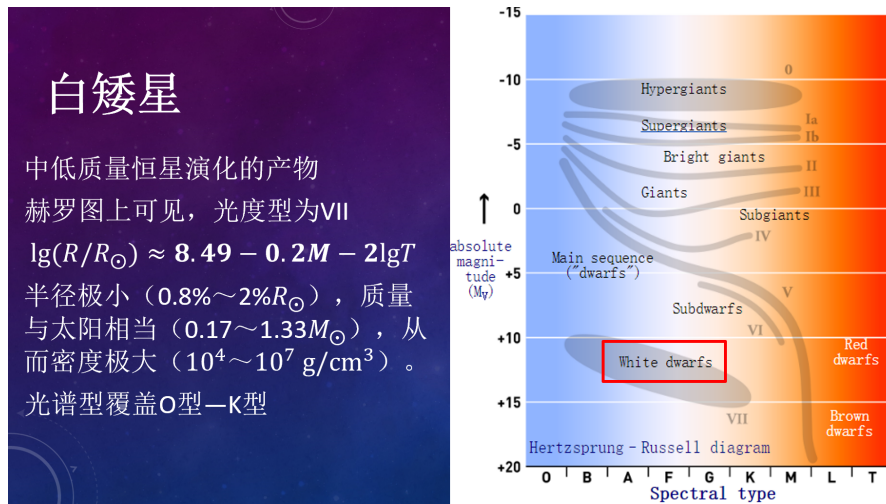
恒星能够形成比铁更重的元素吗?

—中子俘获核合成: 核子通过俘获游离的中子 (分快慢) 形成另一种核子的过程, 根据其俘获中子的效率, 这一过程将与不稳定核子自发的 β 衰变产生竞争, 从而在核素图上沿着不同的路径演化。(个人认为了解内容, 详细学习可参看课件)

PERIODIC TABLE - ORIGIN OF ELEMENTS																	
1 H	2 He																
3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne										
11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar										
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi			
			84 Po	85 At	86 Rn												
			87 Fr	88 Ra	89 Ac												
			90 Th	91 Pa	92 U												

第3章 致密天体

3.1 白矮星



电子简并压：由于泡利不相容原理导致的电子之间相互排斥，从而产生抵抗引力坍塌的压力；白矮星的电子简并压仅与电子气的密度有关，而与气体的温度无关：

$$p \propto \rho^{5/3} \quad (\rho^{4/3}, \text{ 考虑相对论效应}) \quad (3.1)$$

结合恒星物理基本方程，白矮星的质量越大，半径反而越小。

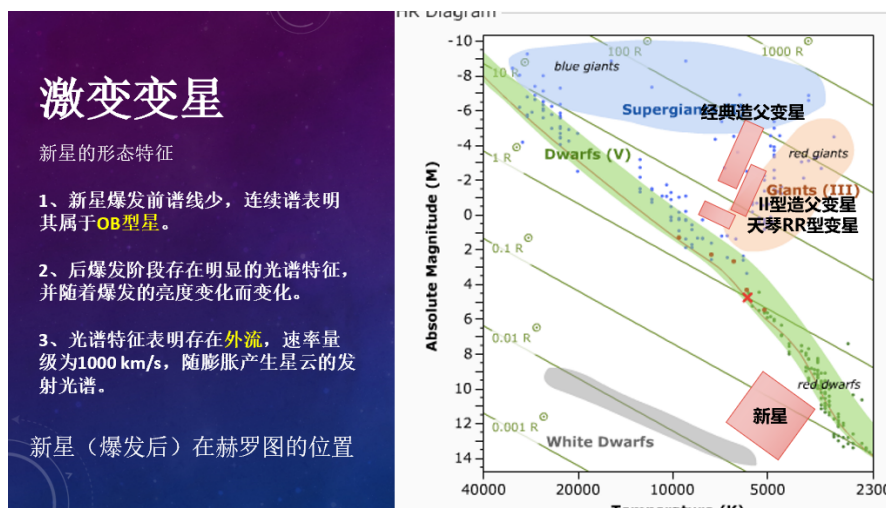
白矮星存在一个质量上限：钱德拉塞卡极限 ($1.44M_{\text{sun}}$ (He 白矮星))

同时可以计算以下数值：根据斯特藩-玻尔兹曼定律，在赫罗图上，白矮星的半径是太阳的 1% 量级（约地球半径）；白矮星的中心压强对应大约是太阳中心压强的 1 亿倍；热时标（略）

3.2 激变变星

- 猛烈爆发的恒星，亮度在短时间内突然剧增，然后逐渐变暗恢复宁静状态

3.2.1 新星



激变变星

新星的形态特征

- 1、新星爆发前谱线少，连续谱表明其属于**OB型星**。
- 2、后爆发阶段存在明显的光谱特征，并随着爆发的亮度变化而变化。
- 3、光谱特征表明存在**外流**，速率量级为**1000 km/s**，随膨胀产生星云的发射光谱。

新星（爆发后）在赫罗图的位置

探测极限：两颗恒星能够被望远镜分辨开？（之前光学笔记有讲到）

光变机制：周期短——密近双星；主星体积小，密度大；伴星温度低，应是较冷的巨星或主序星。白矮星吸积物质，引力势能转化为热能，促发白矮星表面热核反应，导致外层爆发，形成新星。

3.2.2 超新星

- 爆发规模远超新星的激变变星，光度增幅为新星的数百至数百万倍。



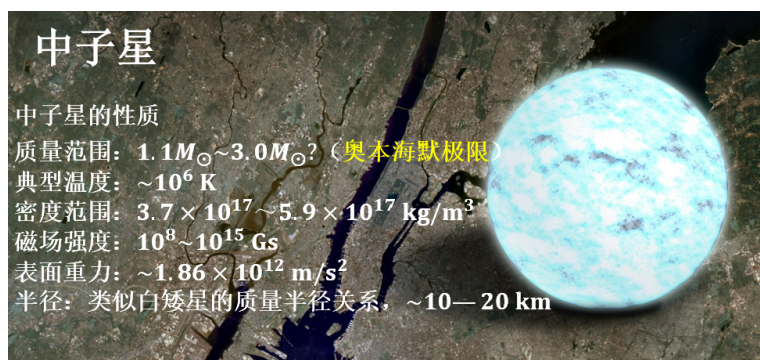
图 3: 蟹状星云，超新星 1054 残骸

Ia 超新星的模型——单简并模型 (略)——见下面视频

应用：Ia 超新星作为标准烛光

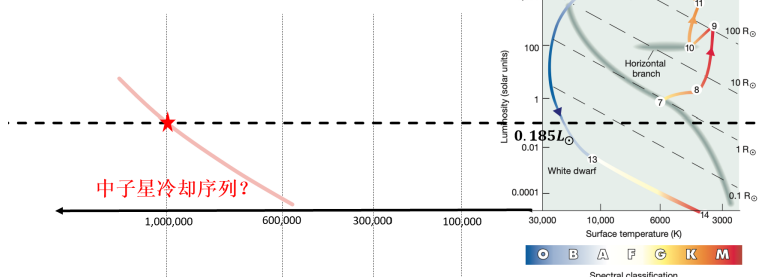
3.2.3 中子星

- 超过钱德拉塞卡极限的恒星，无法通过电子简并压抵抗自身引力，电子进一步被压缩到核子中，通过电子俘获过程形成中子。达到临界密度后中子从原子核中滴出，成为自由中子，通过中子简并压抗衡自引力，这样的恒星称之为中子星。



中子星在赫罗图的什么位置？

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \sim 7.13 \times 10^{25} W \sim 0.185 L_{\odot}$$



中子星全部能量都集中在X射线波段，在赫罗图上基本不可见。

3.2.4 脉冲星

脉冲星的主要特征:

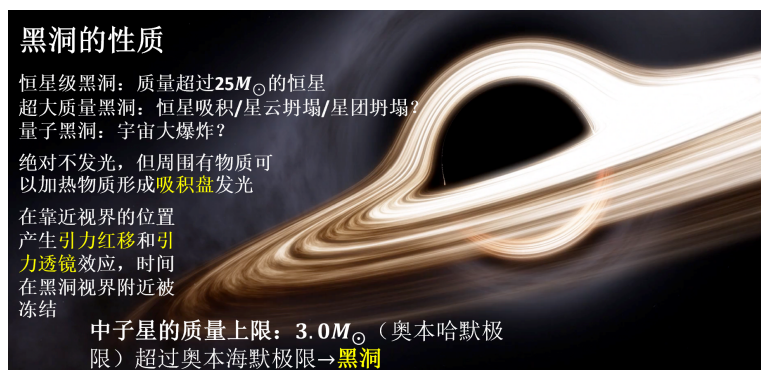
- 脉冲周期短 (几毫秒到几秒), 脉冲窄
- 自转缓慢减速, 周期 P 变长
- 脉冲高度偏振, 具有强磁场

脉冲星的本质: 高速自转的中子星

注意力学稳定的恒星自转周期满足下式 (这个是显然的, 高中都证明过)

$$P \geq \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}} \quad (3.2)$$

3.2.5 黑洞



- 质量为 M 的天体, 达到多小的临界半径时, 可以形成黑洞?

当天体达到形成黑洞的临界半径 (史瓦西半径) 时, 逃逸速度等于光速:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} \quad (3.3)$$

第4章 双星

宇宙中的绝大部分恒星都是以双星形式存在, 早型星几乎全部都是双星

4.1 双星的发现与分类

- 目视双星: 能够通过光学望远镜分辨开的双星
- 天测双星: 只能观测到主星受伴星引力摄动, 但看不到伴星的双星。
- 分光双星: 能够测量的两颗子星光谱的视向速度的双星 (分单双谱双星)。
- 食双星: 能够通过掩食现象观测到系统光变曲线的双星系统
- 测光双星: 观测上由于望远镜不可分辨导致的双星相对于普通恒星在赫罗图上分离 (统计上常用)

4.2 恒星和轨道参数的测定

- 通过双星解轨测定恒星系统的质量:

对于目视双星系统，开普勒第三定律为：

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_1 + M_2)} a^3 \quad (4.1)$$

注：若测得目视双星轨道半长轴的角距离 a'' ，视差 ξ'' ，则双星轨道半长轴的物理距离为 $a = a''/\xi''$

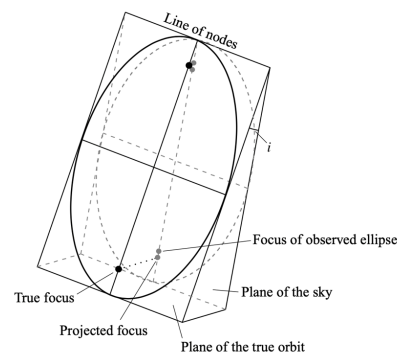
恒星和轨道参数的测定

对于双谱分光双星，可以定出 $m_1 \sin^3 i$ 和 $m_2 \sin^3 i$ ，其中 i 是双星轨道平面相对观测者的倾角。

对于单谱分光双星，只能解出 $m_1 \sin^3 i$ 和 $m_2 \sin^3 i$ 以及它们的质量函数

$$f(m_1, m_2, i) = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{P}{2\pi G} v_{1r}^3$$

若对于包含大量双星的系统，且可以假设它们的轨道倾角随机分布，上述表达式依然具有统计上的科学意义。



若能用独立方法（如质光关系，光谱型拟合等）测得两子星系统的质量，则可以反推双星系统的视差，称之为力学视差。（利用 4.1 式反解 ξ'' ）

- 恒星尺寸的测定:

恒星尺寸的测定

如果双星之间能够发生完全掩食，可以通过光变曲线不同特征时刻的值确定恒星的尺寸。

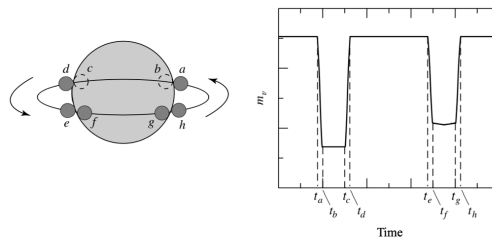
假设圆轨道且 $i \sim 90^\circ$

对于较小的恒星

$$r_s = \frac{v}{2} (t_b - t_a)$$

对于较大的恒星

$$r_l = \frac{v}{2} (t_c - t_a) = r_s + \frac{v}{2} (t_c - t_b)$$



【应用举例】首次接触时间点和首次光极小时间点相差约 11.7 h，整个光极小持续时间为 164 d。

利用系统的光变曲线

$$r_s = \frac{v}{2} (t_b - t_a) = \frac{v_s + v_l}{2} (t_b - t_a) = 1.1 R_\odot$$

$$r_l = \frac{v}{2} (t_b - t_a) = \frac{v_s + v_l}{2} (t_c - t_b) + r_s = 369 R_\odot$$

这是一颗巨星 + 矮星组合的双星系统

- 恒星温度的测定

恒星温度的测定

假设恒星为黑体辐射，其单位面积的辐射本领为

$$F = \sigma T_{\text{eff}}^4$$

两颗星完全可见时，发出的总辐射流量为

$$B_0 = \pi r_l^2 F_l + \pi r_s^2 F_s$$

较小的恒星被完全遮挡时

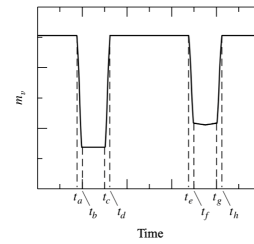
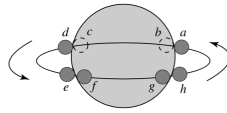
$$B_P = \pi r_l^2 F_l$$

较大的恒星被部分遮挡时

$$B_S = \pi r_l^2 F_l - \pi r_s^2 F_l + \pi r_s^2 F_s$$

据此可以得到两颗恒星的温度比为

$$\frac{B_0 - B_P}{B_0 - B_S} = \left(\frac{T_s}{T_l} \right)^4$$



4.3 密近双星

- 密近双星：两子星距离很近，因引力相互作用使得子星发生畸变甚至物质转移的双星系统。密近双星的恒星演化并不独立，每一颗恒星的演化都强烈依赖于伴星的相对位置和相对演化阶段。

注意与致密双星区分，后者指至少其中一颗成员星是致密天体（白矮星、中子星或黑洞）的系统。

(4.2)