星系天文学

冯帅
河北师范大学物理学院

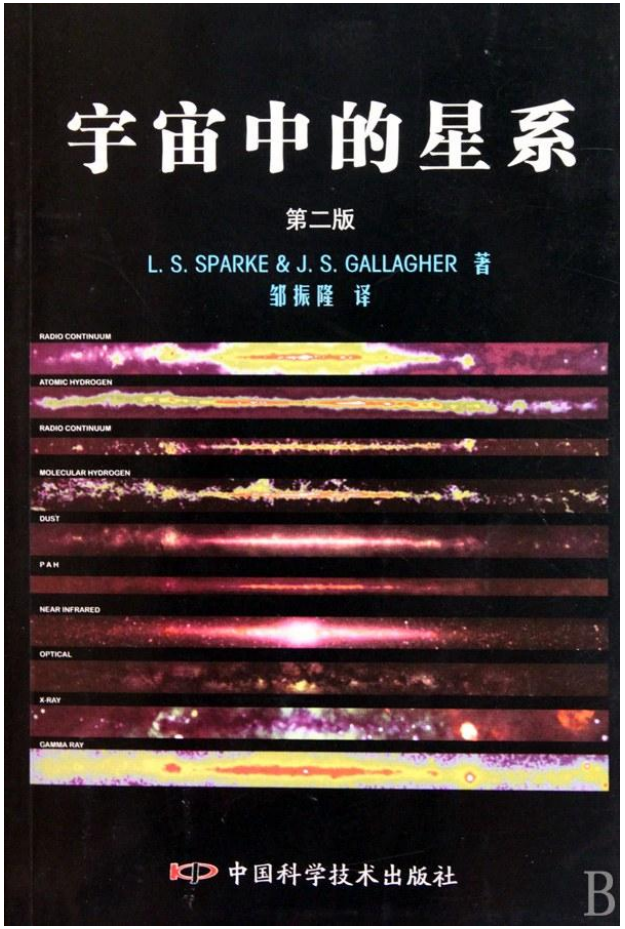
2021-2022学年第2学期

课程说明

- **上课时间：**
  - **周一下午5-7节**

- **考核**
  - **期末课程报告：50%（最后一节课）**
    - 15分钟口头报告（12分钟报告+3分钟提问）
  - **平时成绩：50%**
    - 出勤/课堂表现 ~ 15%
    - 文献调研报告 ~ 35%

参考教材



- 教材

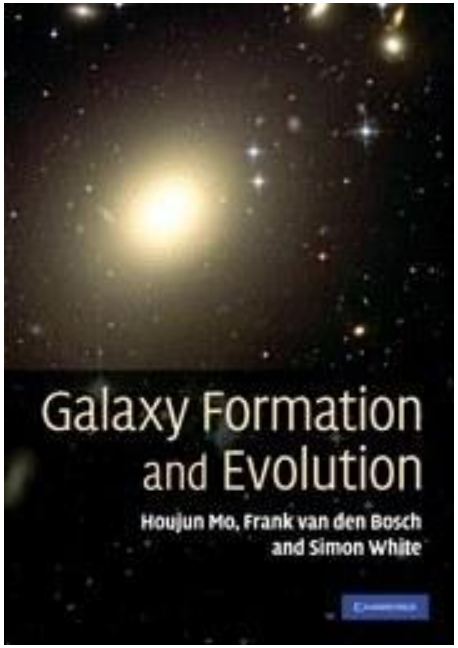
宇宙中的星系（第二版）

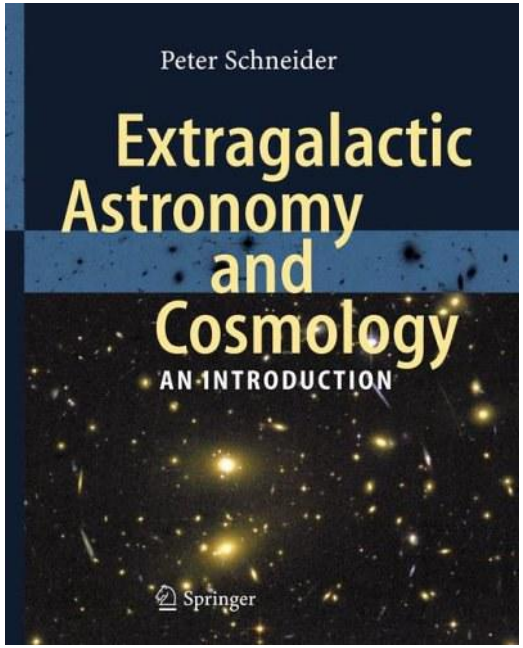
L. S. Sparke & J. S. Gallegher 著

邹振隆 译

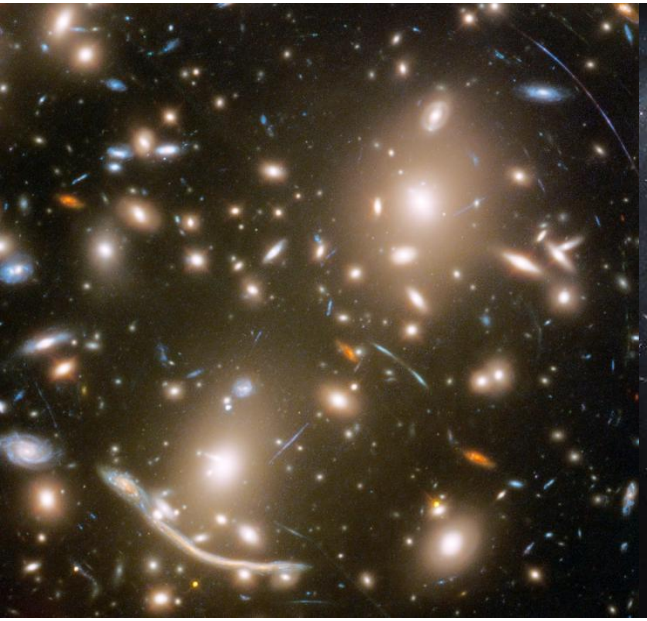
中国科学技术出版社

参考教材



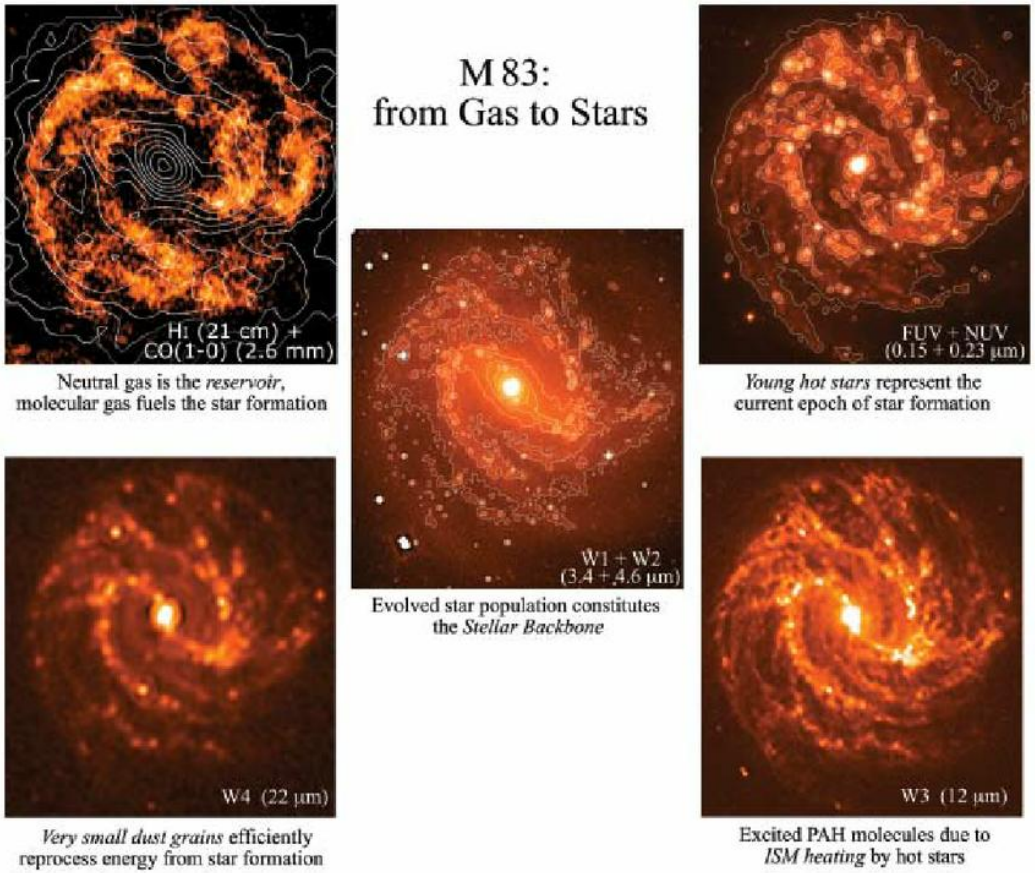


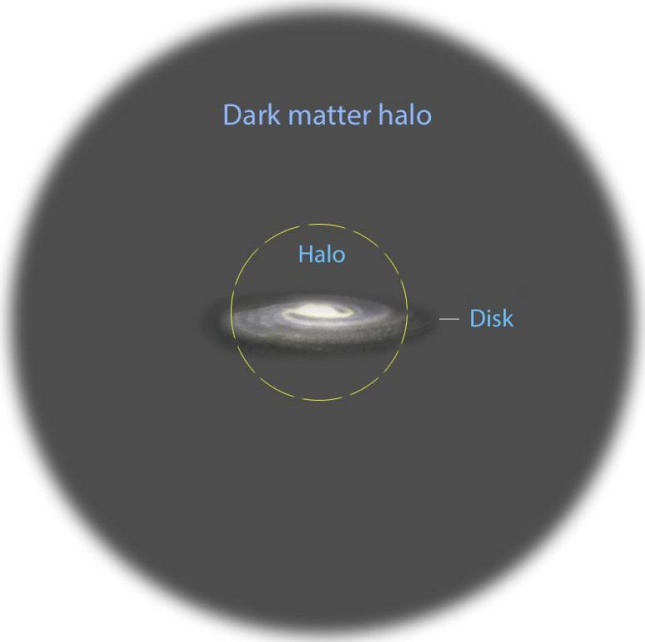
- 《星系天文学 》J. Binney & M. Merrifield 著 赵刚 译
- 《Galaxy Formation and Evolution》Houjun. Mo, Frank. van den Bosch, Simon White
- 《Extragalactic Astronomy And Cosmology》Peter Schneider



第1章 导论

星系是什么？



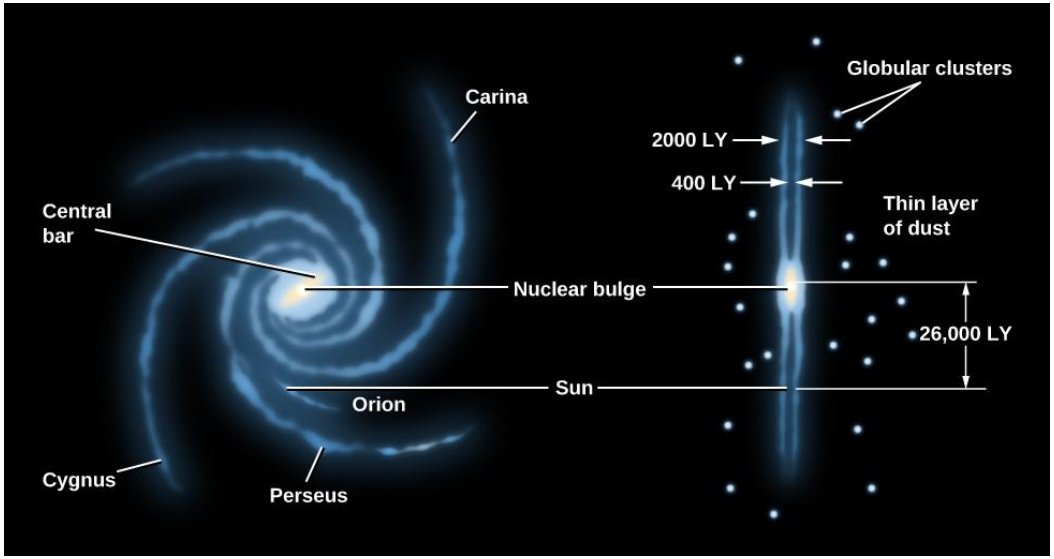


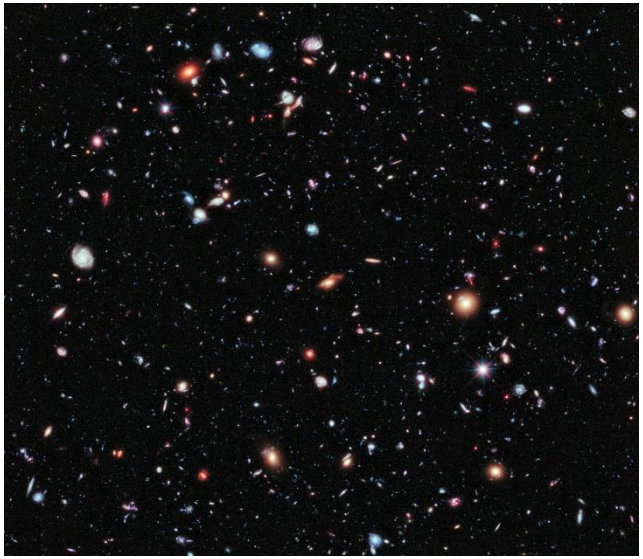
Milky Way model

星系：由恒星、气体、尘埃和暗物质组成的，受到引力束缚的系统。典型星系内有～10^{10}个恒星。

研究对象

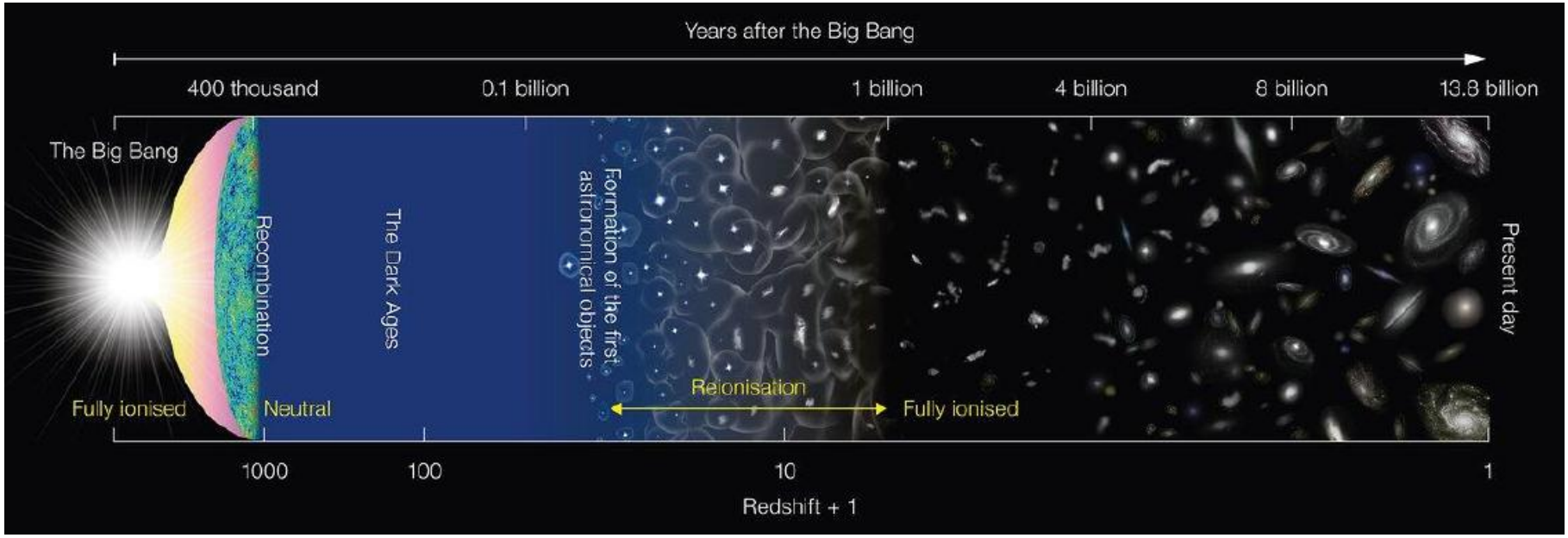
- 星系天文学是天文学的一个重要分支，是以星系和星系际空间为研究对象的学科 。
  - 研究星系的形成、结构、组成、运动、相互作用
  - 研究星系、星系团的空间分布、以及和环境的关系





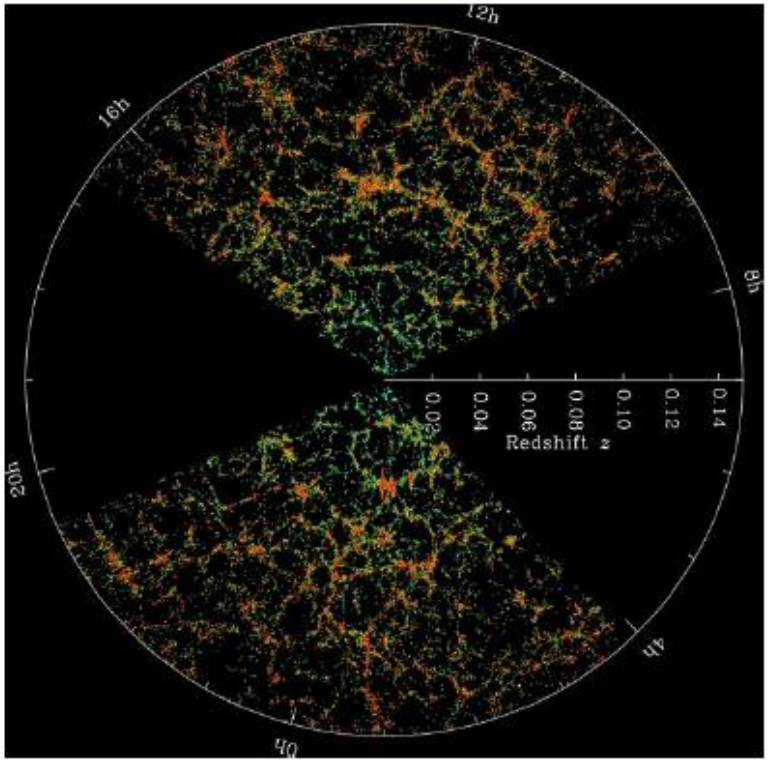
研究意义

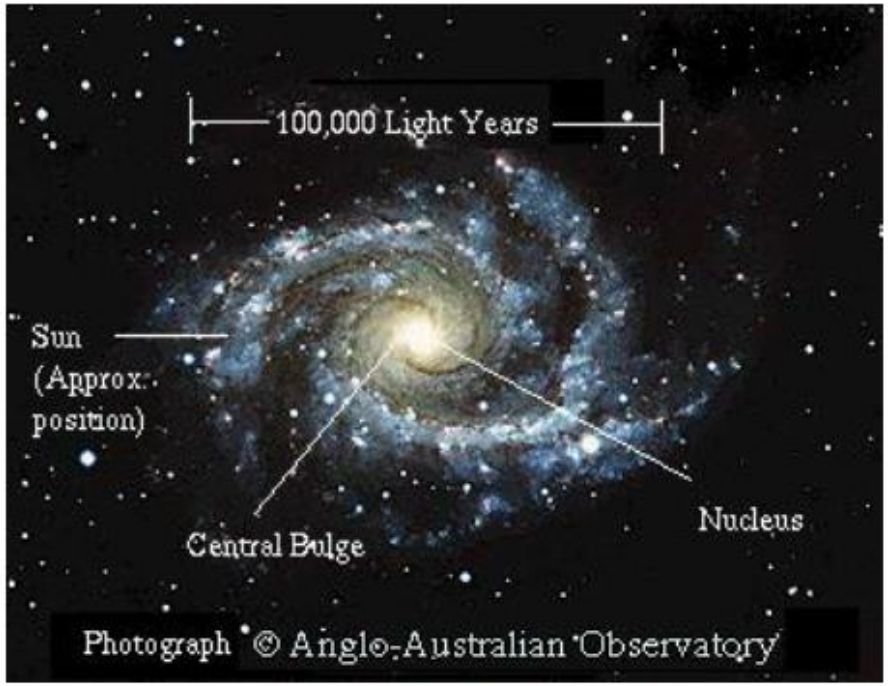
大爆炸 → 第一代结构 → 现在



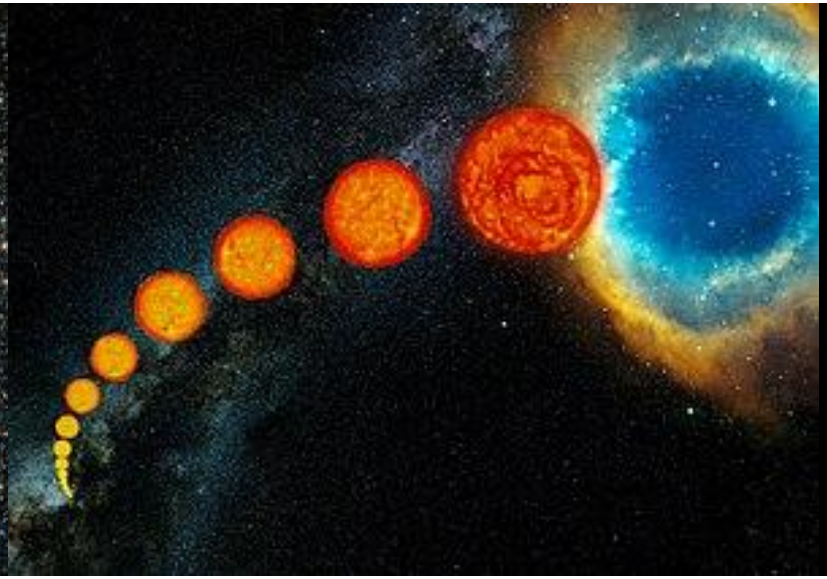
恒星、星系、宇宙学 – 桥梁

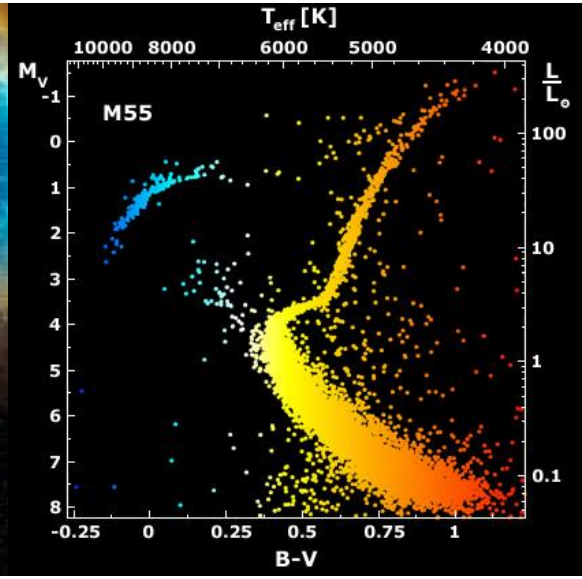
星系是观测宇宙学的基石 ： 了解宇宙组成（暗物质、暗能量），研究宇宙如何随时间演化的直接观测对象。





- 星系：横跨成千上万光年的巨大发光云团；每一个星系都包含着百万至万亿颗恒星
- 导论部分：观测和研究星系所需要的基础知识 - 恒星知识、星系简介

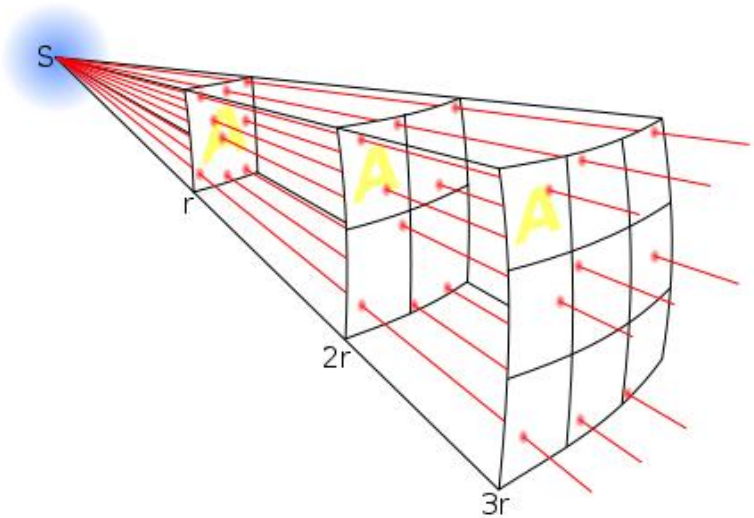



T_{eff} [K]
10000 8000 6000 5000 4000
M_V
M55
$\frac{L}{L_\odot}$
100
10
1
0.1
-1 0 1 2 3 4 5 6 7 8
-0.25 0 0.25 0.5 0.75 1
B-V

1.1 恒星

1.1.1 恒星的基本观测量

- 光度(L)
  - 恒星在单位时间内辐射总能量
  - 恒星的固有量，与其距离无关
  - 单位：瓦，或每秒尔格 erg/s
- 亮度(L)
  - 又称视亮度，或恒星的流量
  - 观测者单位时间接收到的恒星所辐射的能量，非内禀量
  - 单位： W/m^2 或 $erg/s/cm^2$
- 恒星光度： $10^{-3}L_\odot \sim 10^4 L_\odot$
  - 太阳热光度 （总光度，所有波长辐射累积）
  - $L_\odot = 3.86 \times 10^{33} erg/s$

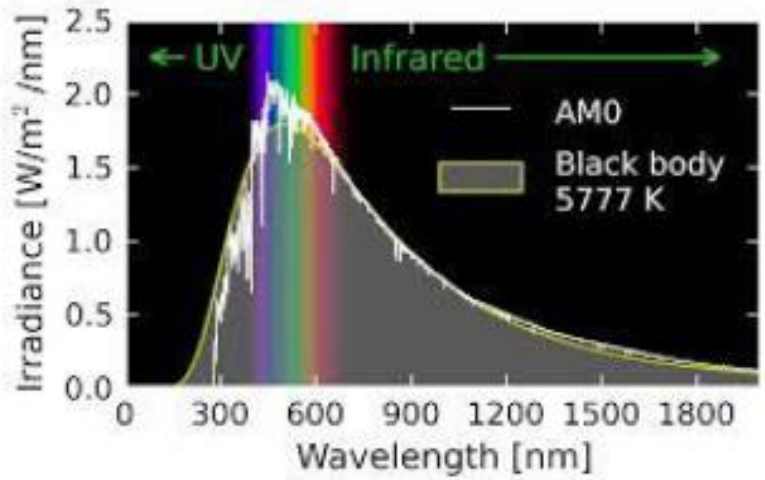


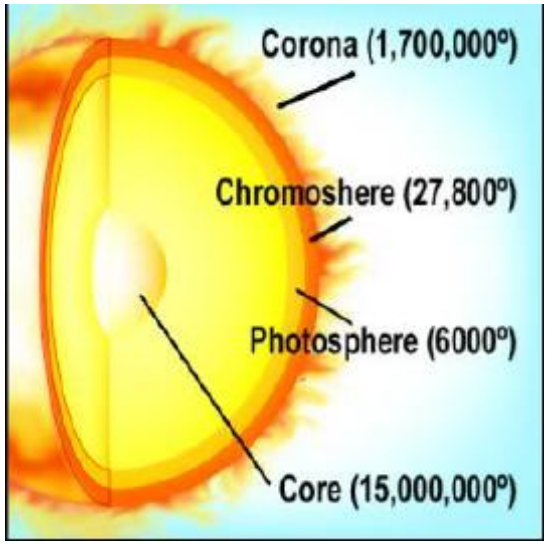
$$F = L/4\pi d^2$$

各向同性：用平方反比定律从距离 d 和流量 F估计光度 L

有效温度

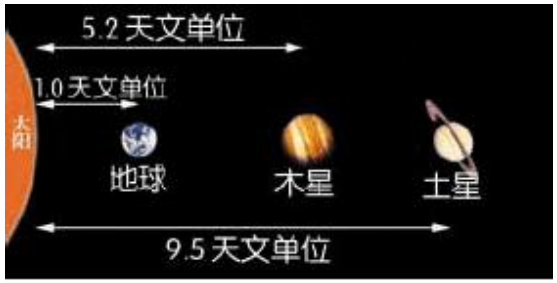
- 恒星的有效温度 T_{eff}
- 恒星辐射近似于黑体辐射
  - 温度为T、半径为R的黑体，光度 L：$L = 4\pi R^2 \sigma_{SB} T^4$
  - σ_{SB}称为斯特藩-玻尔兹曼常数
- 黑体辐射近似
  - 光度L，半径R的恒星，其有效温度 T_{eff} 定义为具有相同半径 R，辐射相同光度L的对应黑体的温度 T_B
  - $T_{eff} = T_B$
- T_{eff}通常接近恒星表面温度，即光球层气体温度的平均值
  - 太阳的有效温度： $T_{eff} \approx 5780$ K

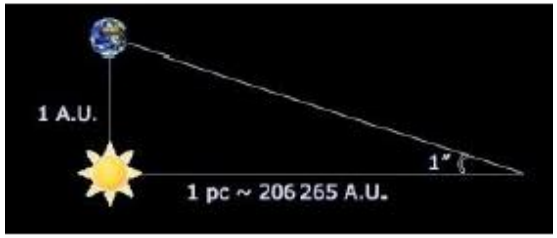


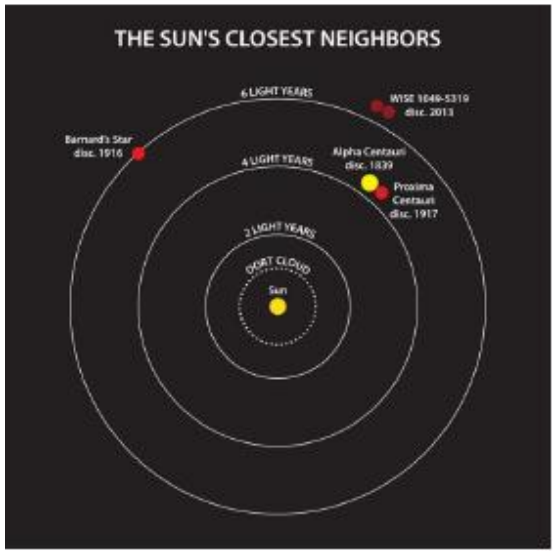


恒星的距离

- 地球与太阳距离：d = 149,597,870 km
- 天文单位： Astronomical Unit, AU 。定义地球与太阳之间的平均距离，为 1 天文单位（1AU）
- 秒差距： parsec, 缩写 pc
  - 对 1AU 的张角，为 1 角秒处的天体的距离







$$1\text{AU} = 1.49597870 \times 10^{11}\text{米}$$

$$1\text{ly} = 9.4605536 \times 10^{15}\text{米} = 63239.8\text{AU}$$

$$1\text{pc} = 206264.8\ \text{AU} = 3.26\text{ly}$$

◆ 距离太阳最近的恒星是比邻星（Proxima Centauri 半人马座）：
d = 399233亿公里=4.25 ly=1.3 pc

恒星的大小

- 能否利用望远镜，直接测量恒星的直径?
- 恒星的半径很难直接测量太阳除外
  - 太阳半径 $R = 6.96 \times 10^5 km$，角直径~30角分
  - 距离太阳最近的恒星是半人马座α星 $d = 4.2ly$
  - $\theta = D/d = 6.96 \times 10^5 km/4.2ly$ (假定它的半径同太阳)

    $= 3.6 \times 10^{-3}$角秒
- 望远镜观测的星像中，没有一个恒星显示为圆盘状
- 最大恒星张角也只有~0.05角秒 (HST~0.03”)

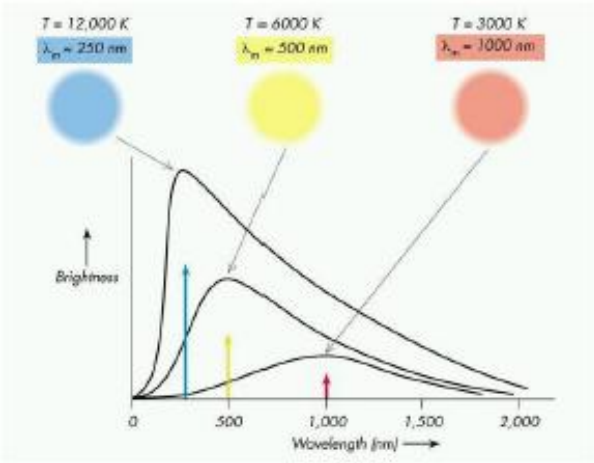
恒星的大小

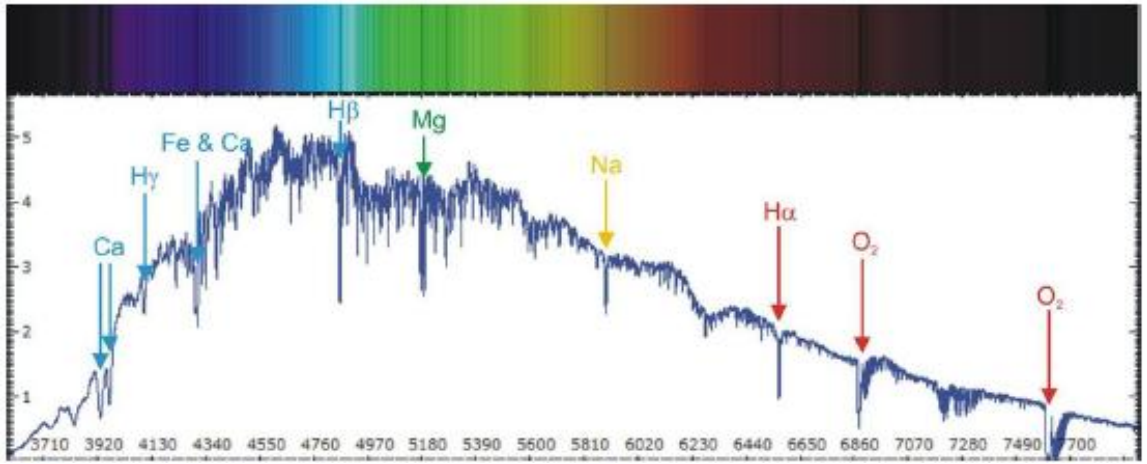
- 恒星大小测量：利用间接方法 $L = 4\pi R^2 \sigma_{SB} T^4$
  - 恒星光度：与恒星的表面温度、恒星表面积有关
  - 如果知道恒星的温度和光度，可以计算恒星半径$0.1R_\odot \sim 1000R_\odot$

$$\frac{L}{L_\odot} = \left(\frac{R}{R_\odot}\right)^2 \left(\frac{T}{T_\odot}\right)^4$$

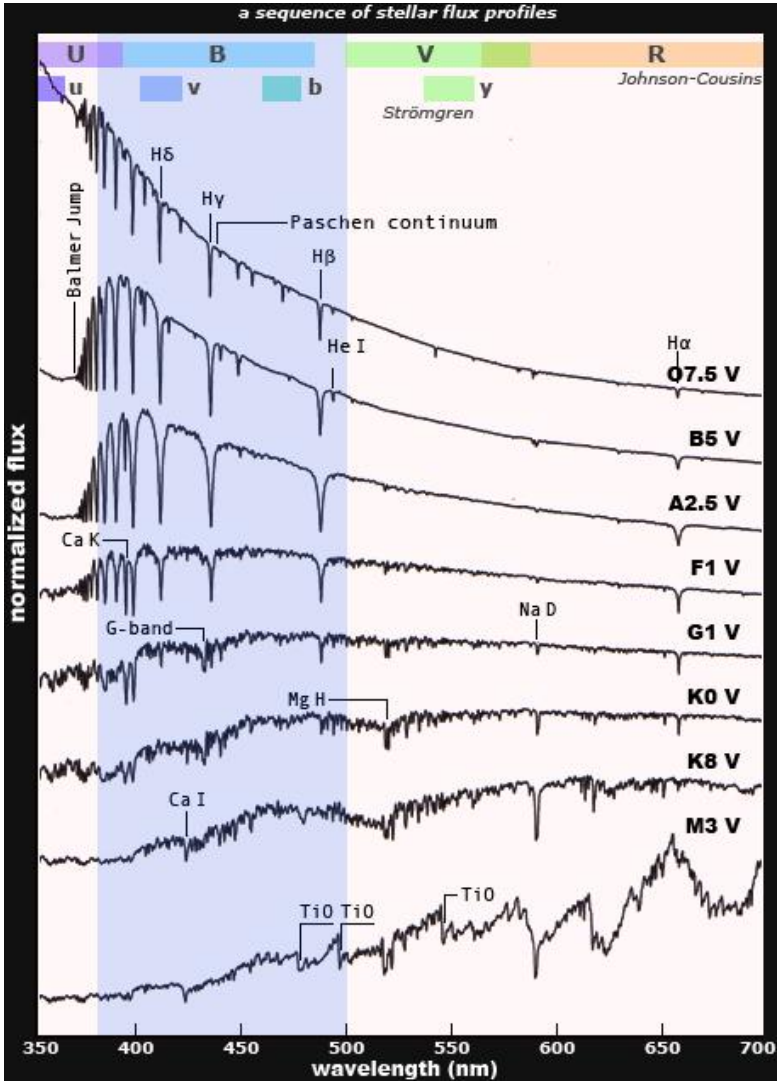
1.1.2 恒星光谱

- 一般并不能测量一颗恒星发射的全部光(热光度)，而只测量特定波长或频率间隔内发射的光
- 单位波长的流量：F_λ，$F_\lambda(\lambda)\Delta\lambda$表示波长在$\lambda$和$\lambda+\Delta\lambda$之间接收到的光能
  - 流量F_λ的单位： $\mathrm{W\,m^{-2}\,Å^{-1}}$或者$\mathrm{erg\,s^{-1}cm^{-2}\,Å^{-1}}$
- 单位频率的流量： F_ν，$F_\lambda=(\nu^2/c)F_\nu$， $\lambda F_\lambda=\nu F_\nu$



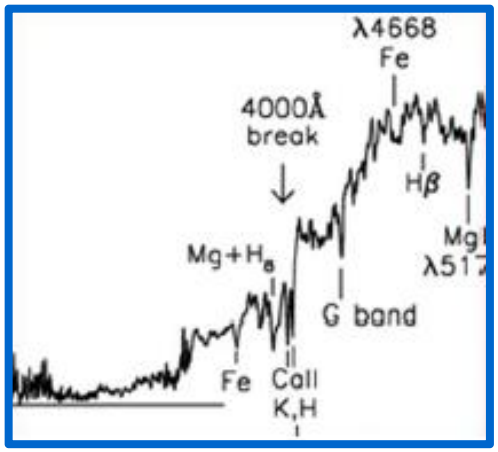


恒星光谱



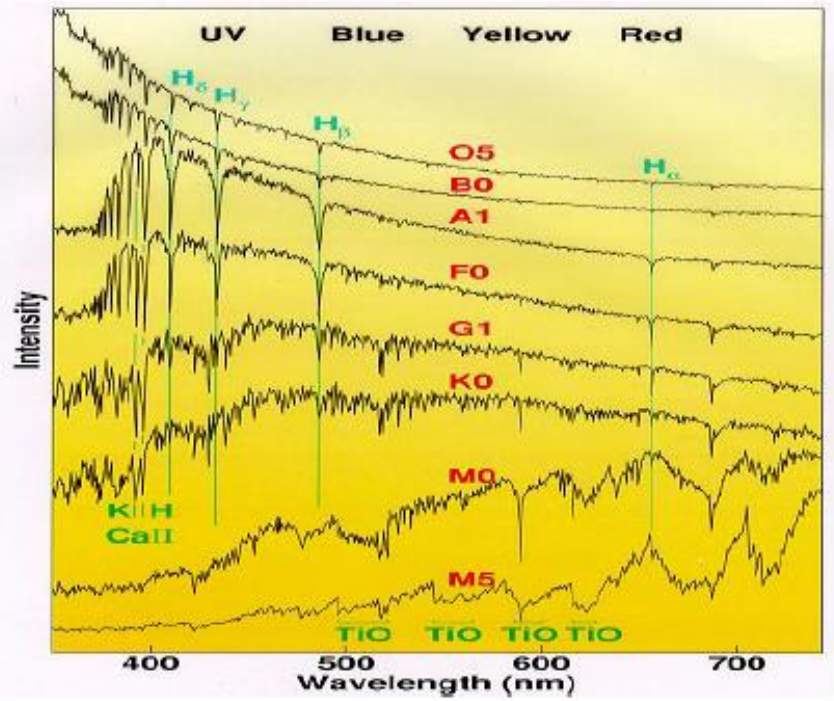
- 恒星光谱：连续谱上叠加有吸收线极少有发射线
- 不同的恒星，辐射最强处的波长λ_{max}有差异：维恩定律
- 不同的恒星，光谱的谱线种类和强度有差异：谱线强度(激发)与温度有关
- 光谱中可能存在跃变，如Balmer 跃变和4000Å跃变

光谱在λ<4000Å处，金属线吸收了许多光 → 4000Å跃变



恒星光谱的

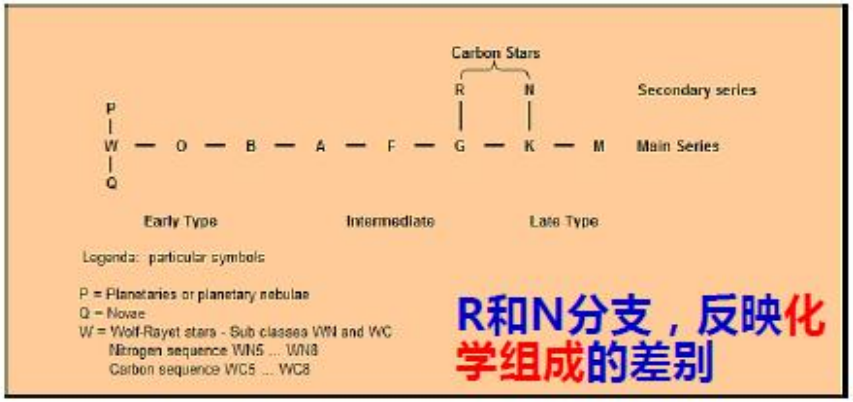
PLATE 8. The Harvard College Observatory was known in the 1890s for the many women it employed to classify stellar spectra. Among those shown here in 1892 are Henrietta S. Leavitt (third from left), Williamina P. Fleming (standing), and Annie Jump Cannon (far right). (*New England Magazine*, n.s. 6 [1892]:166.)



- 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
  - 哈佛分类系统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!

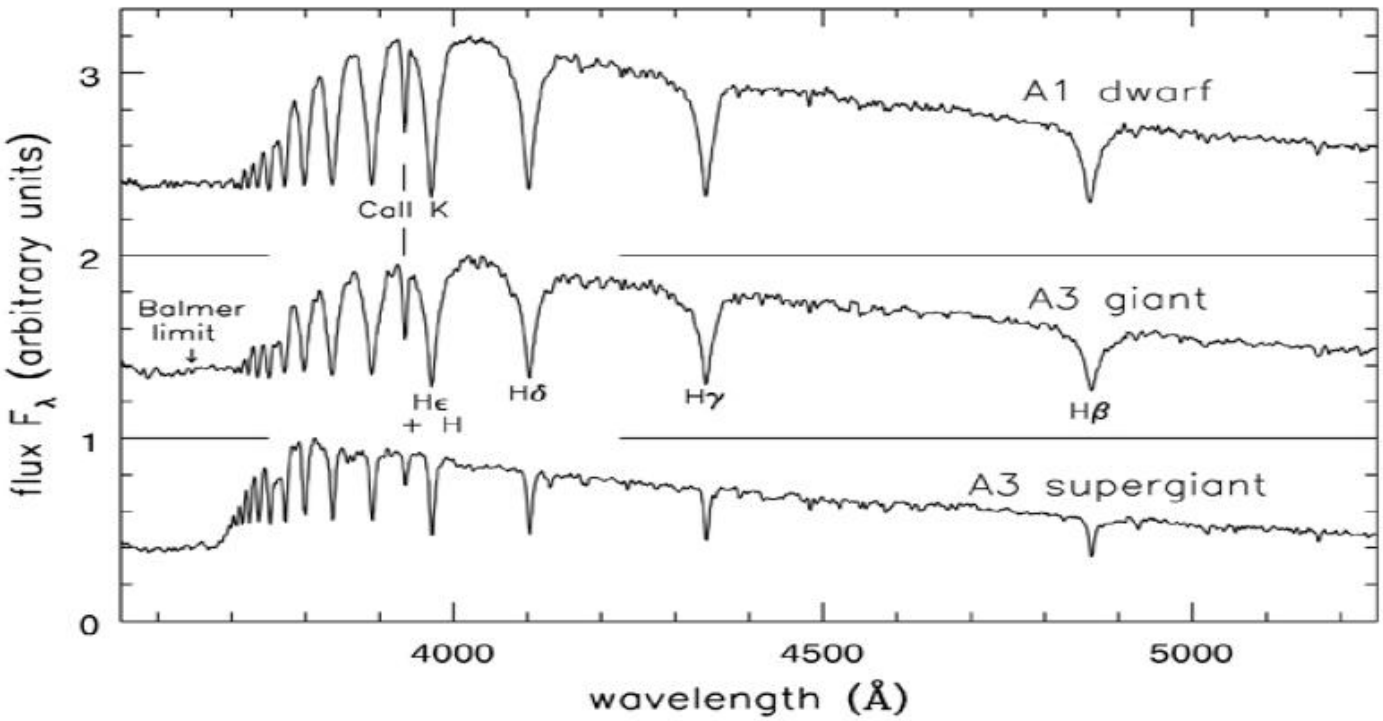
恒星分类 - 哈佛光谱分类系统

- 分类判据：光谱中的某些特征谱线和谱带,以及它们的相对强度，同时也考虑了连续谱的能量分布
- 光谱型用拉丁字母表示，组成如下的序列：OBAFGKM (RN)
- 每型又分为十个次型，用阿拉伯数字表示：O0,…,O9；B0,…,B9；…。
- 常把O、B、A型叫作早型，K、M型叫作晚型，F、G型叫作中型



光谱型	表面温度(K)	颜色	特征谱线
O	30,000	蓝	强电离He线，重元素多次电离线
B	20,000	蓝白	中性He线，重元素一次电离线，H线
A	10,000	白	H线，重元素一次电离线
F	7,000	黄白	重元素一次电离线，H线和中性金属线
G	6,000	黄	重元素一次电离线，中性金属线
K	4,000	红橙	中性金属线，重元素一次电离线
M	3,000	红	中性金属线，分子带

表面重力的影响



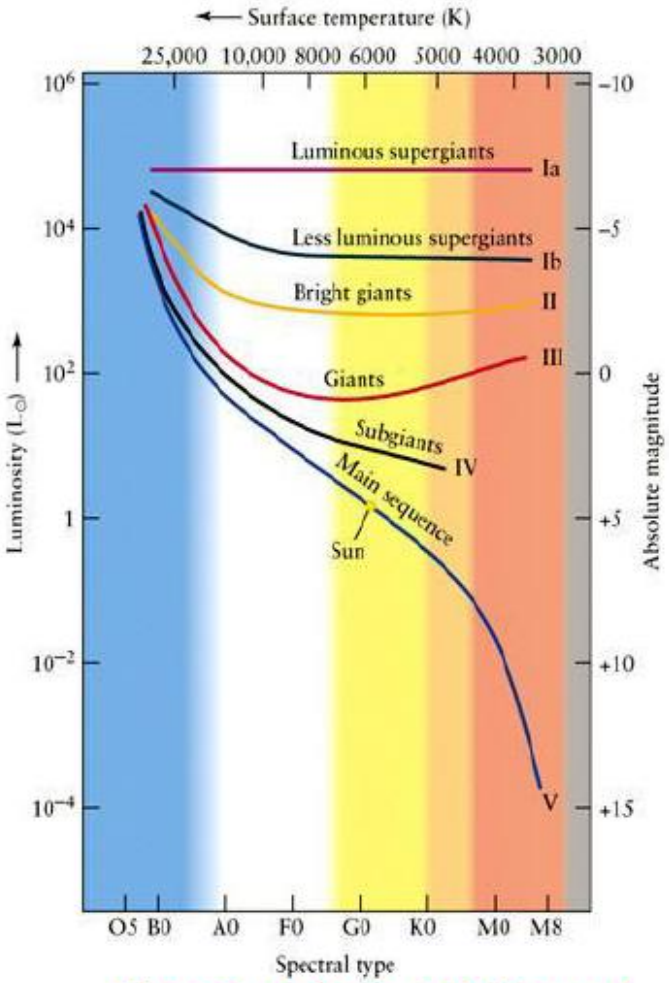
- 3种A型恒星光谱：吸收线强度相似，但是矮星的巴耳末线比在巨星和超巨星中更宽（物理起因？）
- 矮星、巨星、超巨星差异：恒星光度分类, Yerkes spectral classification

恒星分类－光度

- 同一光谱型的恒星（有效温度一样），在赫罗图上光度差异很大（L）
- Morgan, Keenan and Kellman (MKK, 1943) 引入了2参数分类法：温度和光度

光度分类 Yerkes分类

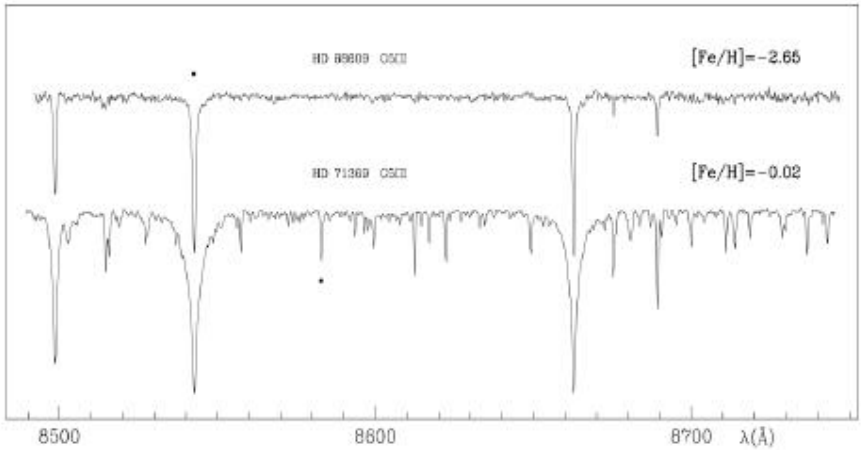
TYPE	Star
Ia	Very luminous supergiants
Ib	Less luminous supergiants
II	Luminous giants
III	Giants
IV	Subgiants
V	Main sequence stars (dwarf stars)
VI	Subdwarf
VII	White Dwarf

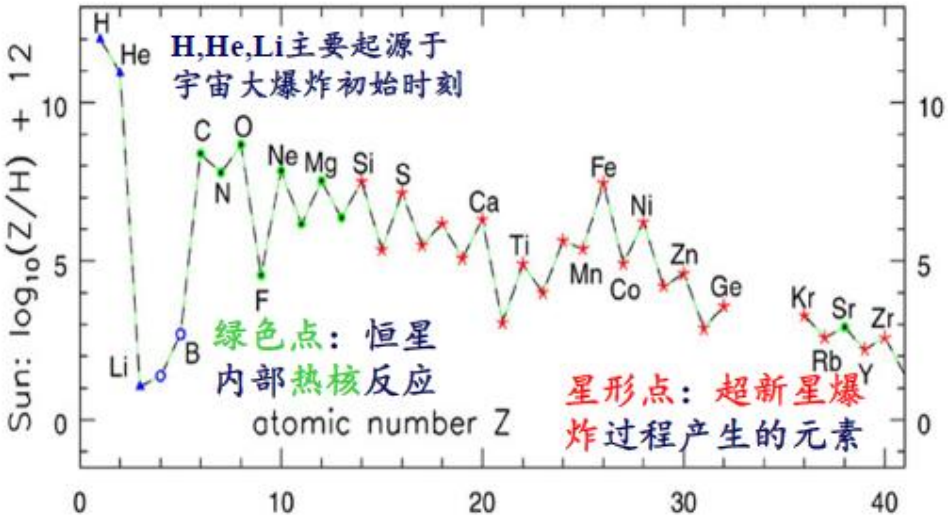


The Sun is a G2V star!

恒星光谱－元素丰度

- 谱线的强度，取决于形成该谱线的恒星层的温度，也取决于各种元素丰度。
- 质量比例(1)：按质量计，太阳的表面层约有72%氢，26%氦，所有其他元素约为2% (称重元素或金属)。表示为Z = 0.02
- 金属元素：除氢和氦元素之外的所有元素总称
- 元素原子数目比(2)：$\log(Z/H) + 12 = \log(N_Z/N_H) + 12$
- 太阳：12+log (O/H) = 8.66



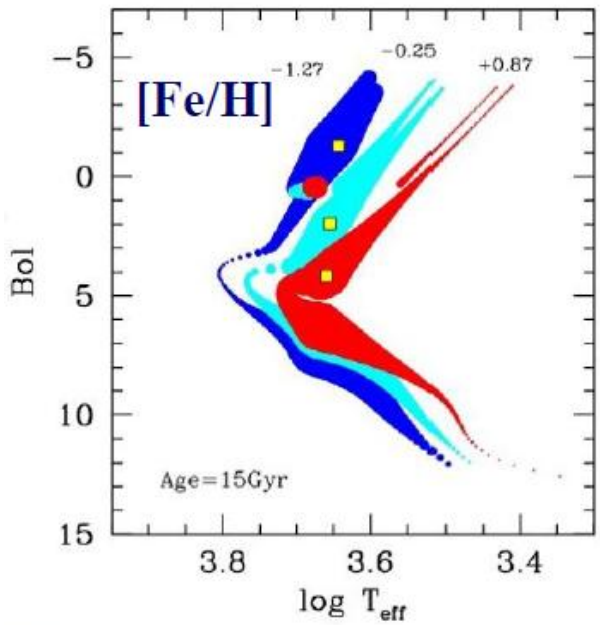


恒星光谱－元素丰度

- **相对丰度(3)：表示一颗恒星中某一种特定的元素，与太阳中的同一元素的丰度比值，例如氧的比例**

$$[A/B] \equiv \log_{10}\left\{\frac{(\text{number of A atoms/number of B atoms})_\star}{(\text{number of A atoms/number of B atoms})_\odot}\right\}$$

- **[Fe/H]= -2 的恒星，其重元素丰度就是太阳的1%**
- **[Fe/H]通常用来表示一颗恒星相对于太阳的平均重元素丰度；它并不是指测量到的铁含量**

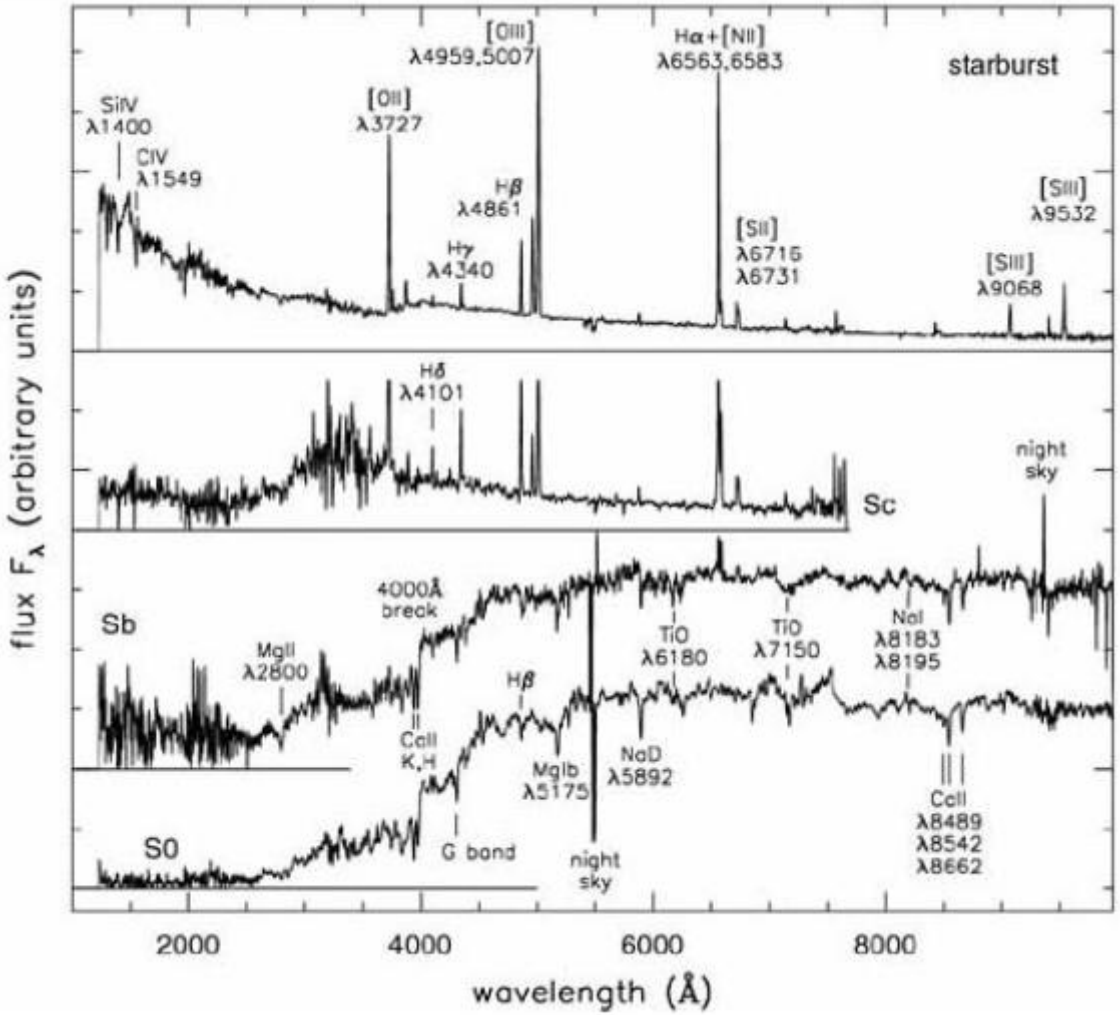


$$[\mathrm{Fe/H}] = \log\frac{(\mathrm{Fe/H})_*}{(\mathrm{Fe/H})_\odot} = \log(\mathrm{Fe/H})_* - \log(\mathrm{Fe/H})_\odot$$

$$[\mathrm{Fe/H}] = \log_{10}\left\{\frac{(N_{Fe}/N_H)_*}{(N_{Fe}/N_H)_{sun}}\right\} \qquad [\mathrm{Fe/H}] = \log_{10}\left(\frac{Z}{0.02}\right)$$

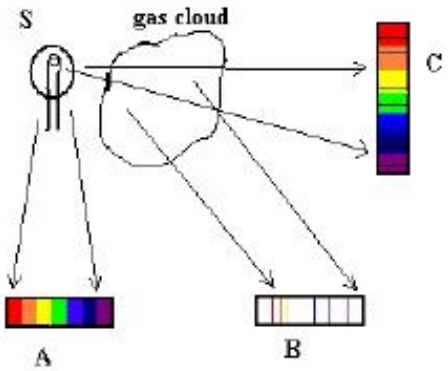
$Z_{sun}=0.02$

星系光谱



星系光谱是由不同温度恒星光谱混合而成：

- 较热的恒星贡献了大部分蓝光；
- 较冷的恒星产生了红光的大部分



A: continuous spectrum

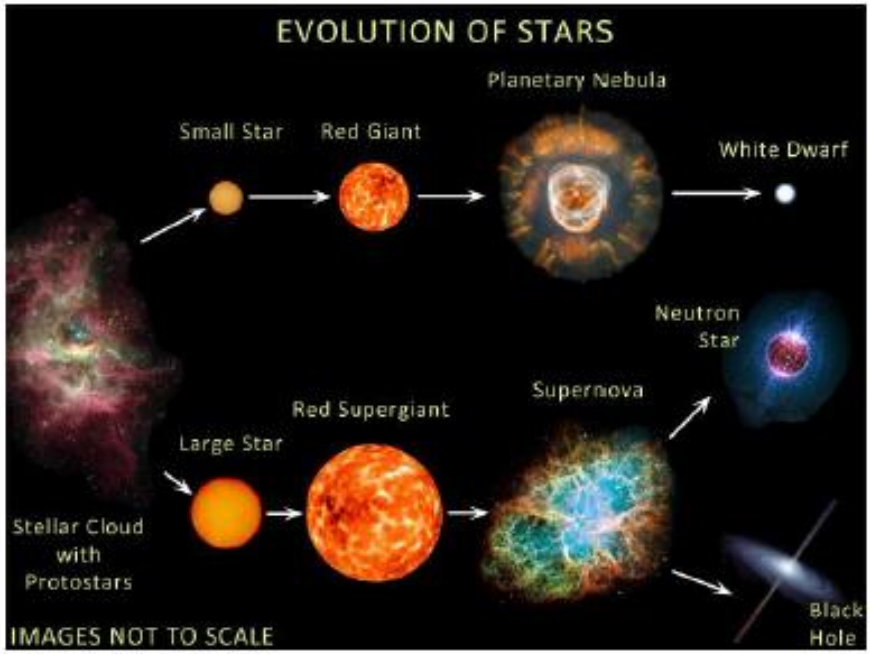
B: bright line spectrum

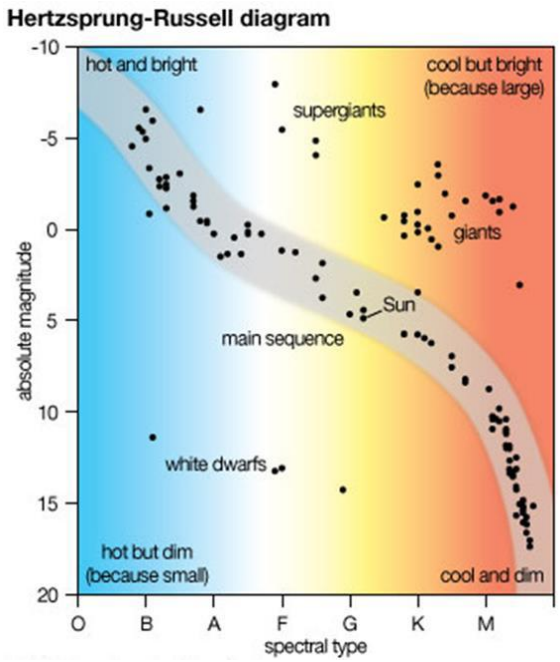
C: absorption spectrum

S: incandescent source

1.1.3 恒星演化

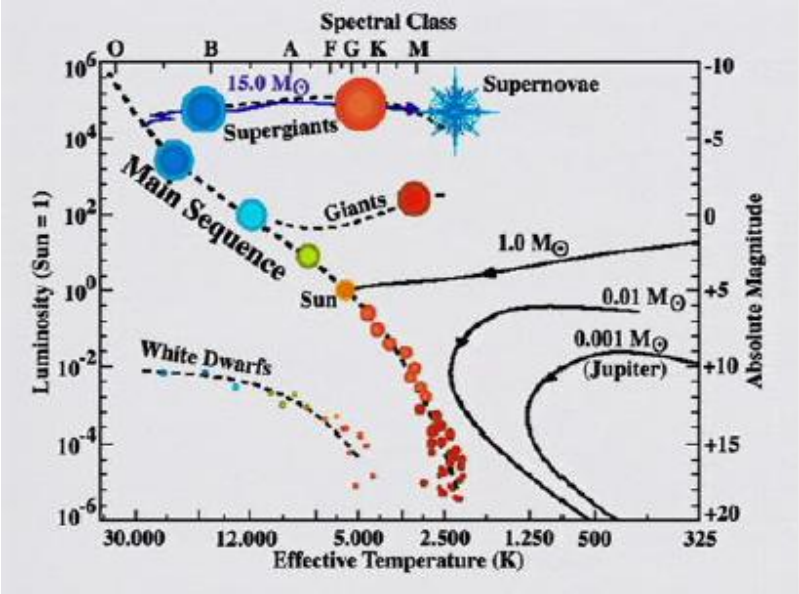
- 对恒星演化的理解，是20世纪后半叶天体物理学的重大成就之一
- 恒星演化：原恒星气体云 → 恒星 → 白矮星而消亡，或是在超新星爆炸中火化（恒星特性纷繁复杂）



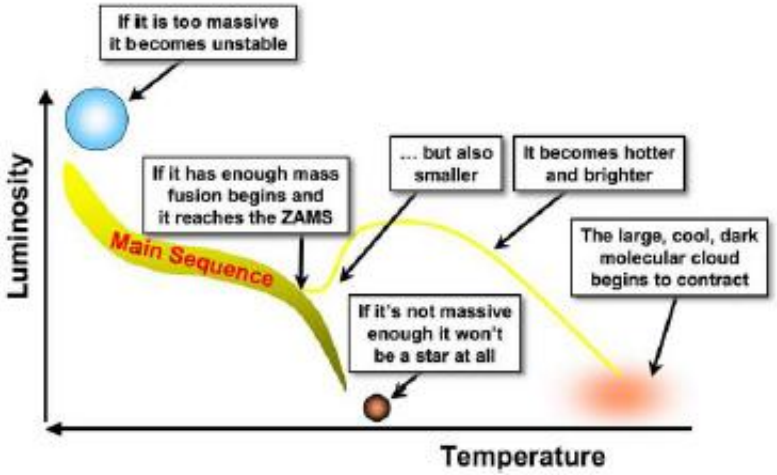


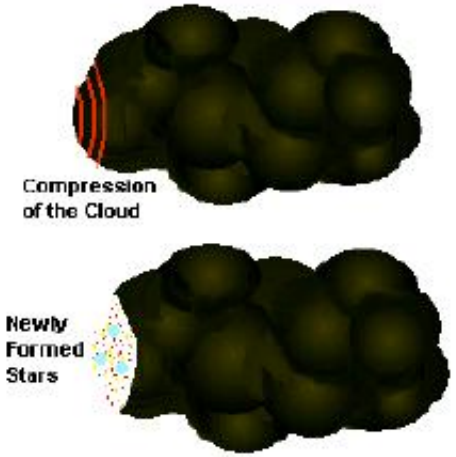
- 纷繁复杂的不同类型恒星，可清楚的显示在“谱型-光度”图上
- 由丹麦天文学家赫茨普龙及由美国天文学家罗素分别于1911年和1913年各自独立提出：赫罗图

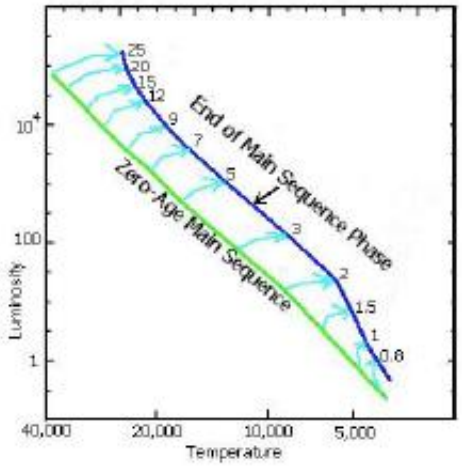
HRD不同位置：恒星不同的演化阶段



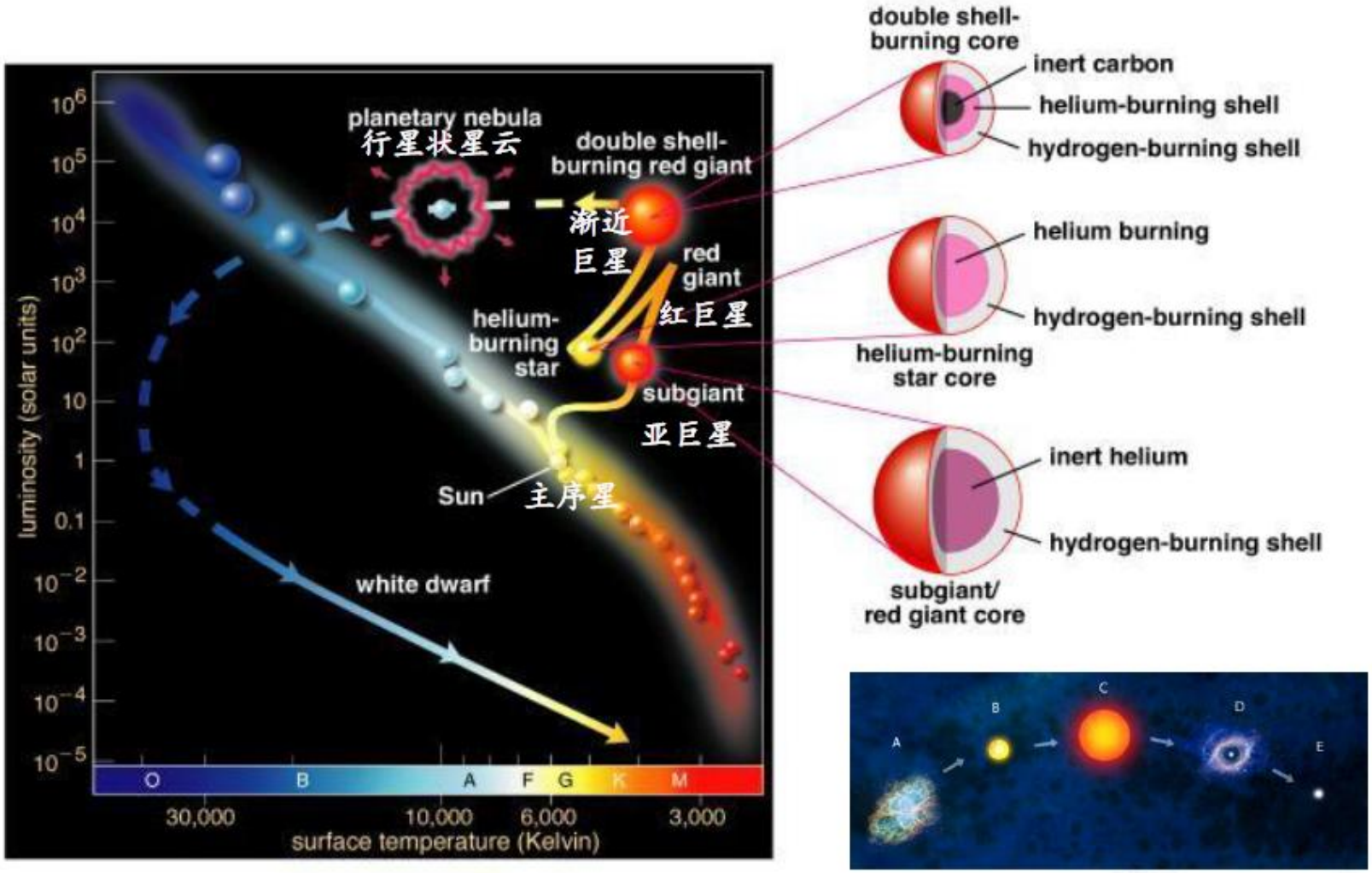
- 主序带：观测发现，绝大部分恒星在HRD中的位置落在一条窄带上
- 主序带恒星的性质：
  - 均匀的化学组成
  - 核心氢燃烧
  - 完全流体静力学平衡
  - 质量范围：0.08 -120 $M_\odot$
- 零龄主序：刚刚开始核心H燃烧的恒星，在H-R图上主序带的左侧



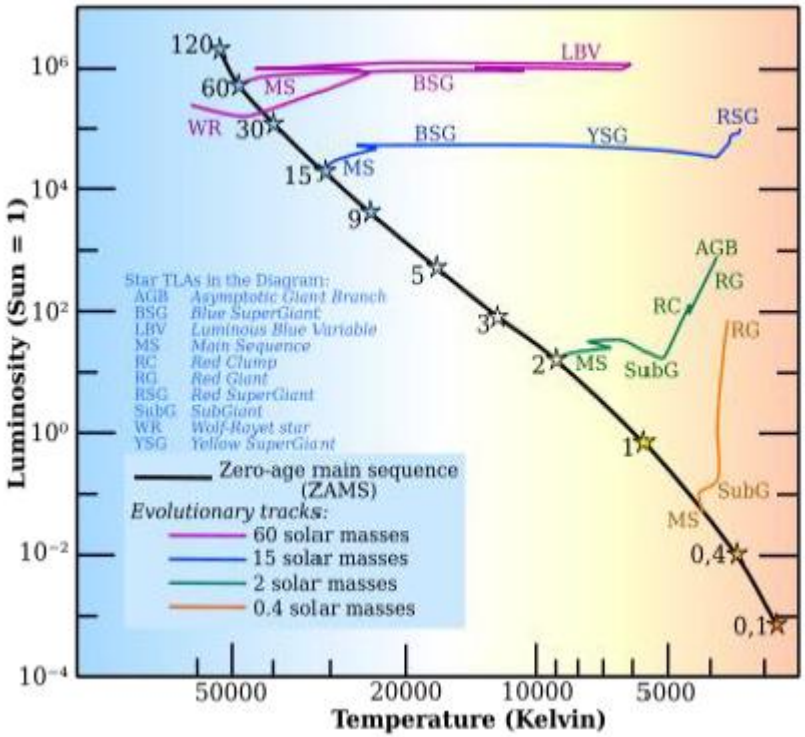


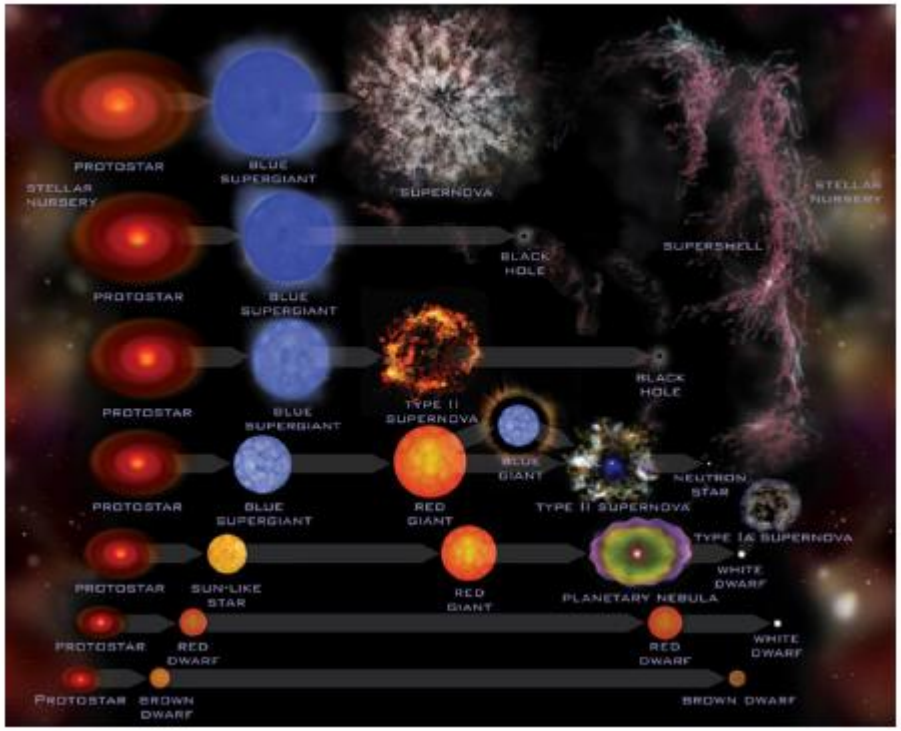


太阳类恒星的演化


planetary nebula
行星状星云
double shell-
burning red giant
渐近
巨星
red
giant
红巨星
helium-
burning
star
subgiant
亚巨星
Sun
主序星
white dwarf
luminosity (solar units)
surface temperature (Kelvin)
O
B
A
F
G
K
M
30,000
10,000
6,000
3,000
double shell-
burning core
inert carbon
helium-burning shell
hydrogen-burning shell
helium burning
hydrogen-burning shell
helium-burning
star core
inert helium
hydrogen-burning shell
subgiant/
red giant core
A
B
C
D
E

不同质量恒星演化





主要区别

- 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

不同质量恒星的基本参数

Table 1.1 Stellar models with solar abundance, from Figure 1.4

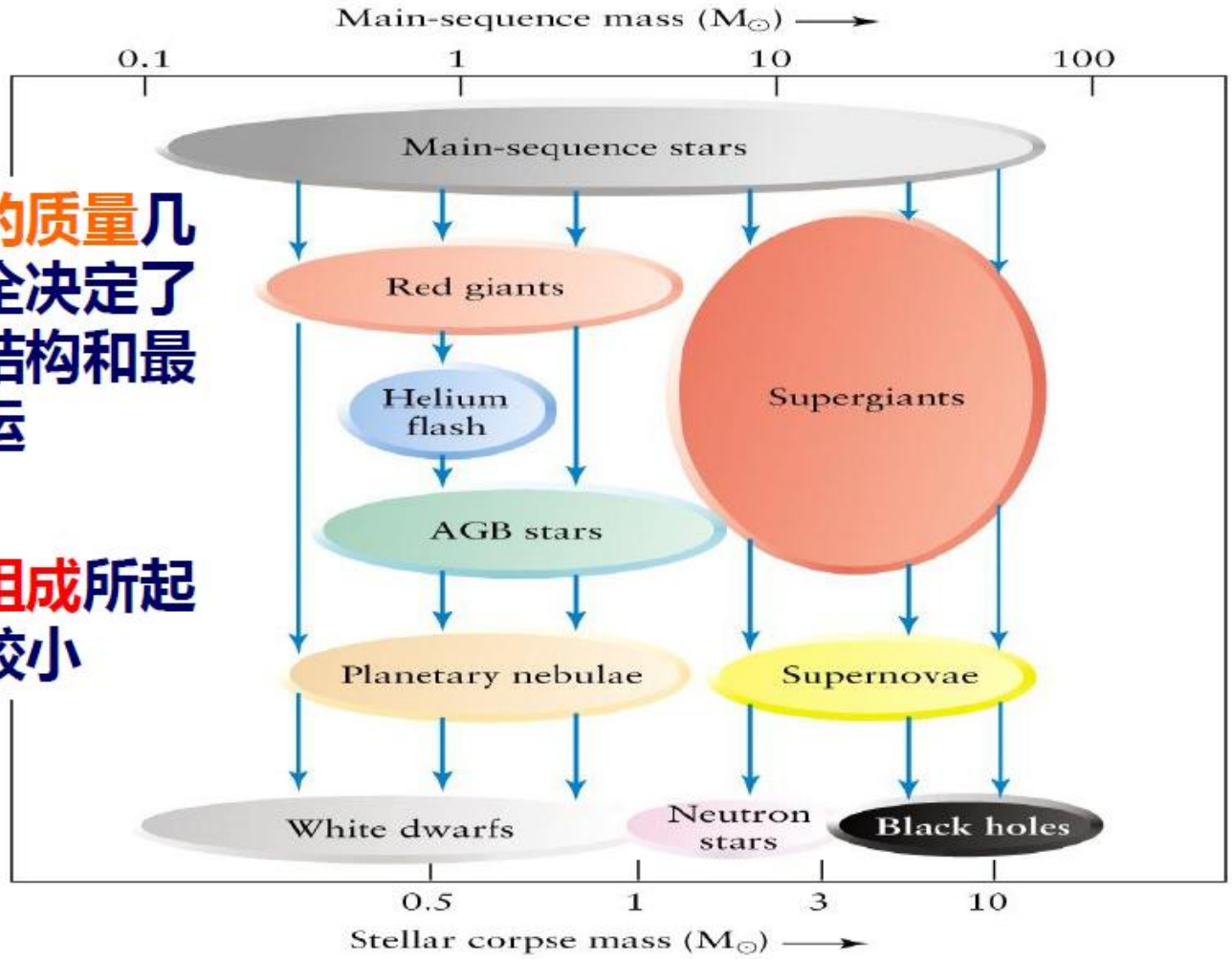
Mass ($\mathcal{M}_\odot$)	$L_{\rm ZAMS}$ ($L_\odot$)	$T_{\rm eff}$ (K)	*Spectral type*	$\tau_{\rm MS}$ (Myr)	$\tau_{\rm red}$ (Myr)	$\int(L\,{\rm d}\tau)_{\rm MS}$ (Gyr × $L_\odot$)	$\int(L\,{\rm d}\tau)_{\rm pMS}$ (Gyr × $L_\odot$)
0.8	0.24	4860	K2	25 000		10	
1.0	0.69	5640	G5	9800	3200	10.8	24
1.25	2.1	6430		3900	1650	11.7	38
1.5	4.7	7110	F3	2700	900	16.2	13
2	16	9080	A2	1100	320	22.0	18
3	81	12 250	B7	350	86	38.5	19
5	550	17 180	B4	94	14	75.2	23
9	4100	25 150		26	1.7	169	40
15	20 000	31 050		12	1.1	360	67
25	79 000	37 930		6.4	0.64	768	145
40	240 000	43 650	O5	4.3	0.47	1500	112
60	530 000	48 190		3.4	0.43	2550	9
85	1 000 000	50 700		2.8		3900	
120	1 800 000	53 330		2.6		5200	

Note: L and $T_{\rm eff}$ are for the zero-age main sequence; spectral types are from Table 1.3; $\tau_{\rm MS}$ is main-sequence life; $\tau_{\rm red}$ is time spent later as a red star ($T_{\rm eff} \lesssim 6000$ K); integrals give energy output on the main sequence (MS), and in later stages (pMS).

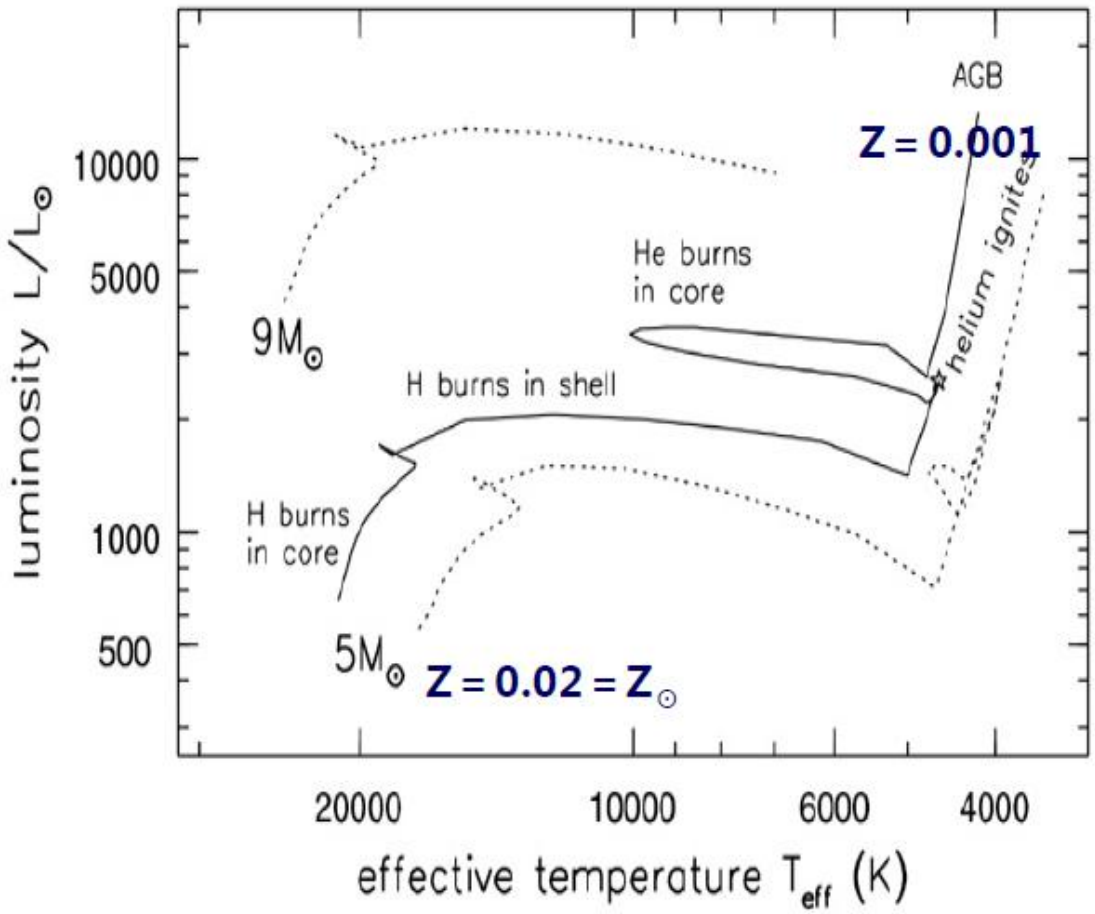
恒星演化图景

恒星的质量几乎完全决定了它的结构和最终命运

化学组成所起作用较小

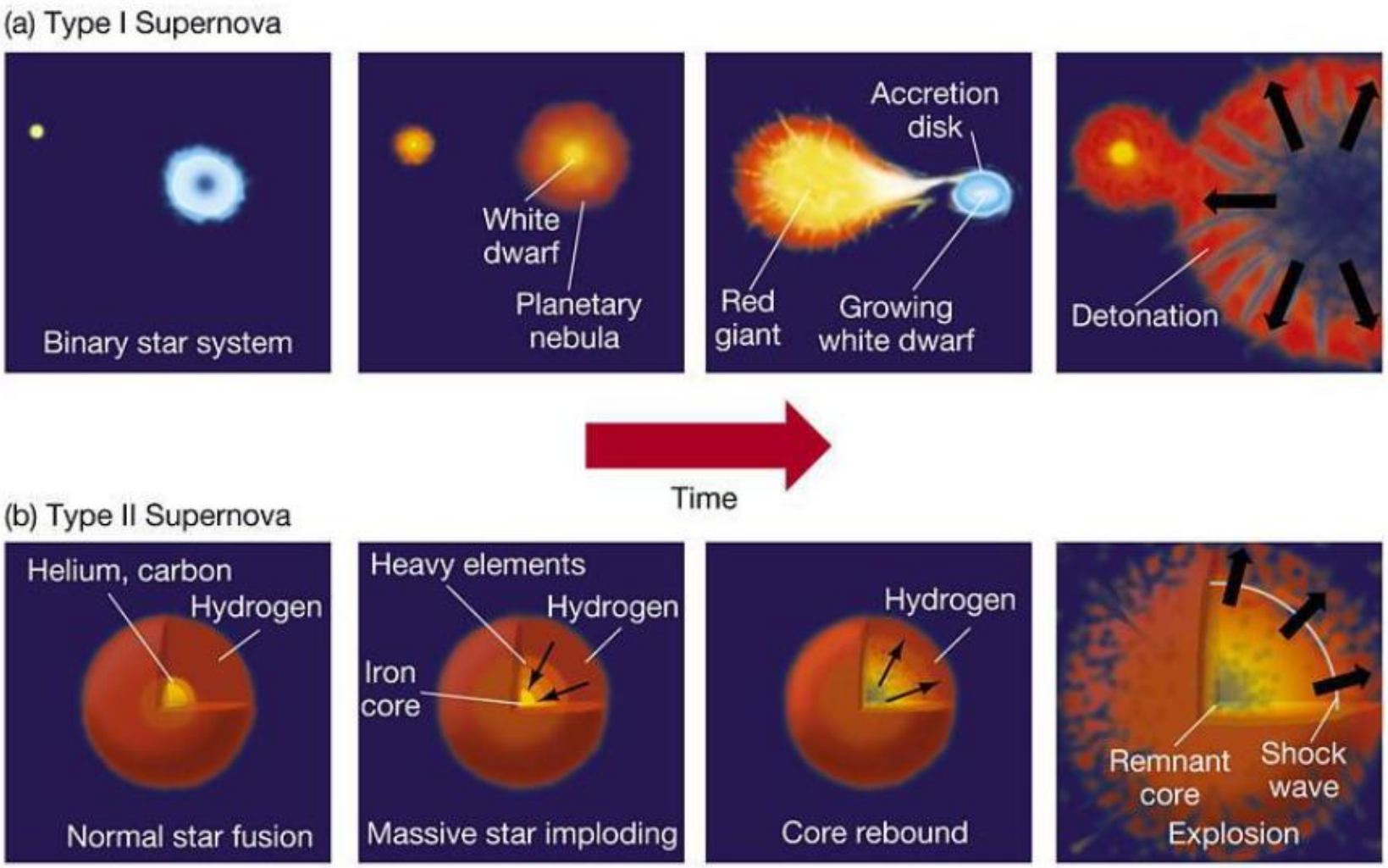


金属丰度的影响



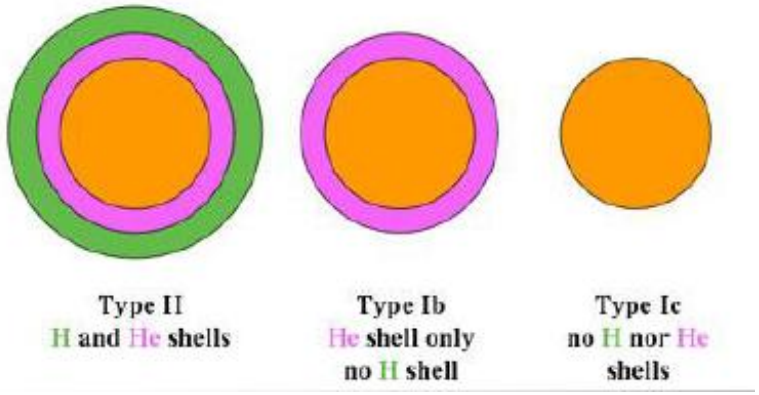
- 金属丰度低，恒星中的尘埃较少
- 尘埃少，不透明度低；光子运动到恒星表面就比较容易
- 贫金属星更致密，核心一定更炽热，并产生更多的能量
- 贫金属恒星更快用完它的核燃料
- 贫金属星更蓝、更亮、寿命更短

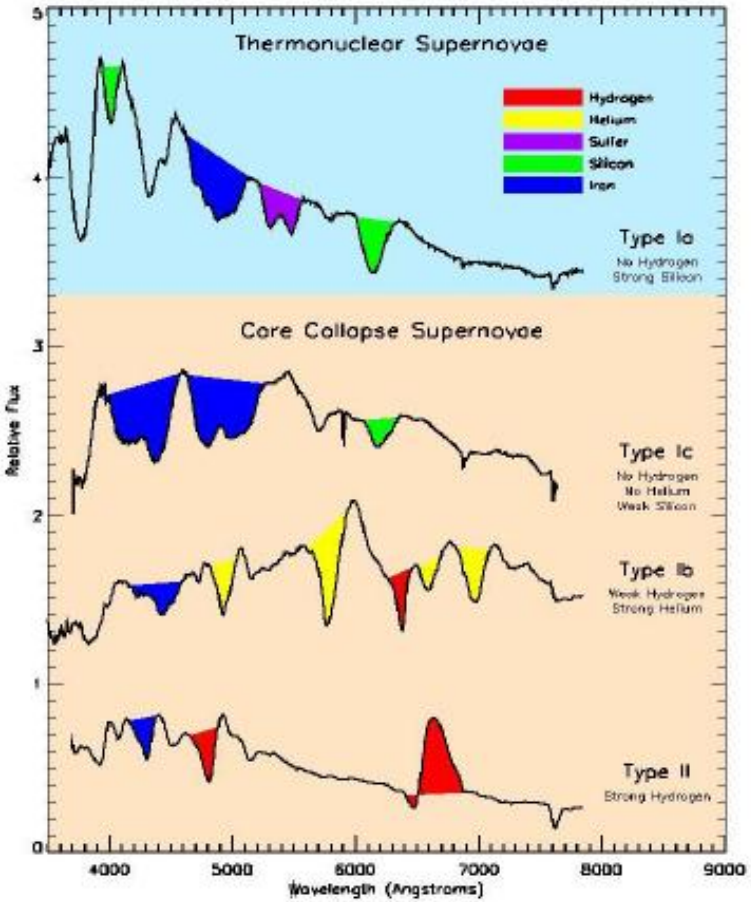
超新星


(a) Type I Supernova
Binary star system
White dwarf
Planetary nebula
Accretion disk
Red giant
Growing white dwarf
Detonation
Time
(b) Type II Supernova
Helium, carbon
Hydrogen
Normal star fusion
Heavy elements
Hydrogen
Iron core
Massive star imploding
Hydrogen
Core rebound
Remnant core
Shock wave
Explosion

超新星的分类

- **II型超新星**
  - 光谱中有氢的吸收线；大质量恒星临终产物;
- **I型超新星**
  - 光谱中没有氢的吸收线
  - Ia型：没有氢、氦，有硅吸收线；白矮星吸积伴星物质(双星)发生爆炸
  - Ib型：弱氢吸收线，有强氦吸收线
  - Ic型：没有氢和氦线，弱硅吸收线

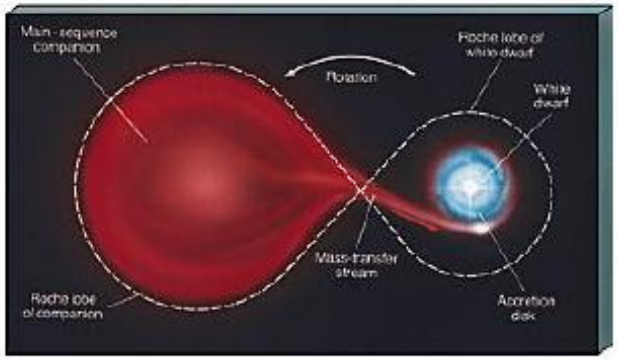




SN Ib、Ic: 大质量恒星外包层被剥离后的核，塌缩的超新星

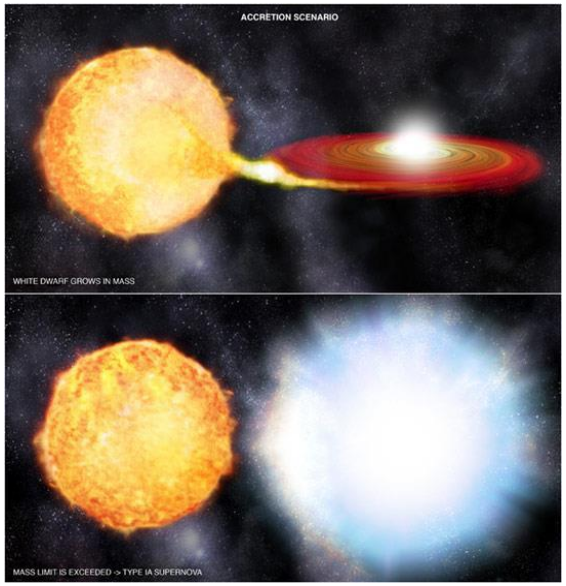
双星

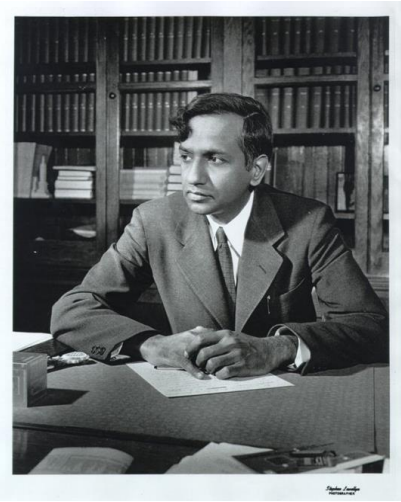
- 大多数恒星不是孤立出现的；它们处于双星或聚星系统中
- 双星是由两颗绕着共同质心旋转的恒星组成。两者互相围绕，并且互相之间有引力作用
- 密近双星
  - 定义：一颗子星影响另一颗子星演化的双星系统
  - 在密近双星系统中，一颗致密星（白矮星、中子星），可以从另一颗子星（红巨星或AGB星）移走物质
  - 现象：新星、X射线源、Ia型超新星等



钱德拉塞卡极限

- Ia型超新星：双星系统中的白矮星吸积伴星物质，质量超过钱德拉塞卡极限，导致白矮星坍缩；坍缩开始，核区温度、密度急剧上升，C、O核开始发生剧烈的热核反应，导致整个星体瓦解
- 钱德拉塞卡极限：一个质量M大于1.44$M_\odot$的星体（演化晚期的质量），当其氢核燃尽，将不可能变成白矮星，而会继续坍塌收缩，变成更致密的天体(中子星、黑洞)
- 对白矮星而言，电子简并压力是其抵抗重力（引力）的唯一力量，因此这个值也是白矮星的质量上限
- 主序星质量若超过8倍的太阳质量，在演化结束前不能抛掉足够的质量成为稳定的白矮星，最终演化为中子星或黑洞





Subrahmanyan Chandrasekhar

1983 Physics
Subrahmanyan Chandrasekhar
October 19, 1910 - August 21, 1995
Citizenship- US

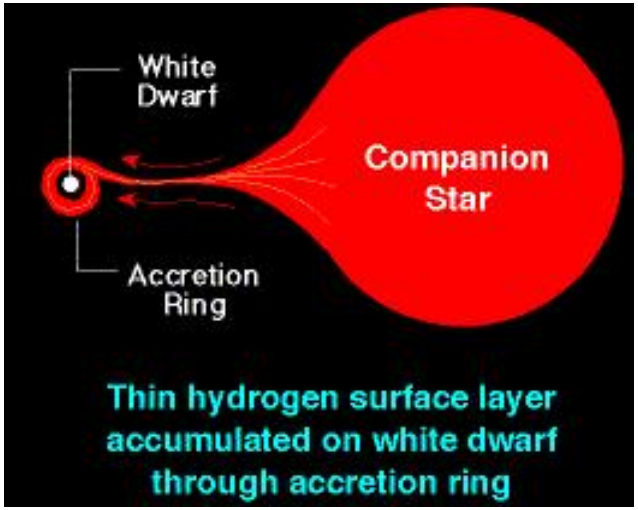
1910年10月19日1995年8月15日

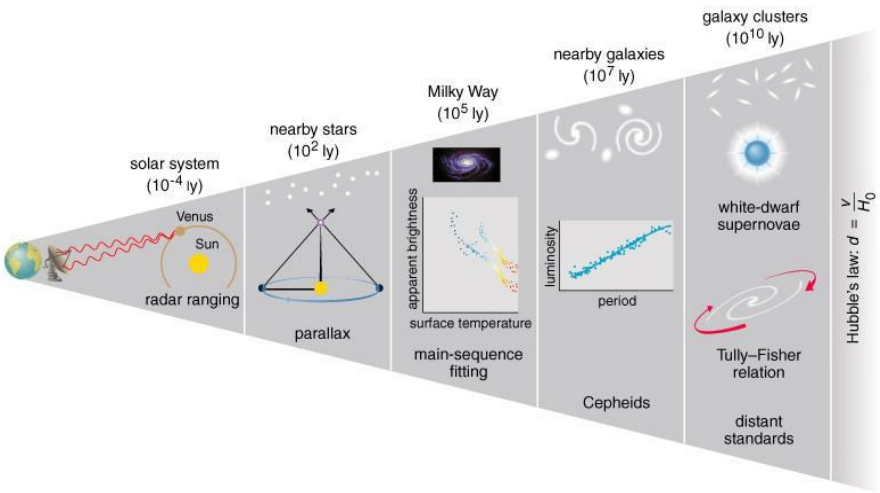
- **1910年出生在印度拉合尔（现在的巴基斯坦）**
- **1930年7月获得印度政府奖学金，前往英国剑桥大学深造：3个月的行程，白矮星**
- **1937年1月芝加哥大学：校刊变成国际天文顶级期刊（ApJ）（1952-1971主编）**
- **200英里，暴风雪，教室只有2名学生：1957年获得诺奖的李政道和杨振宁。**

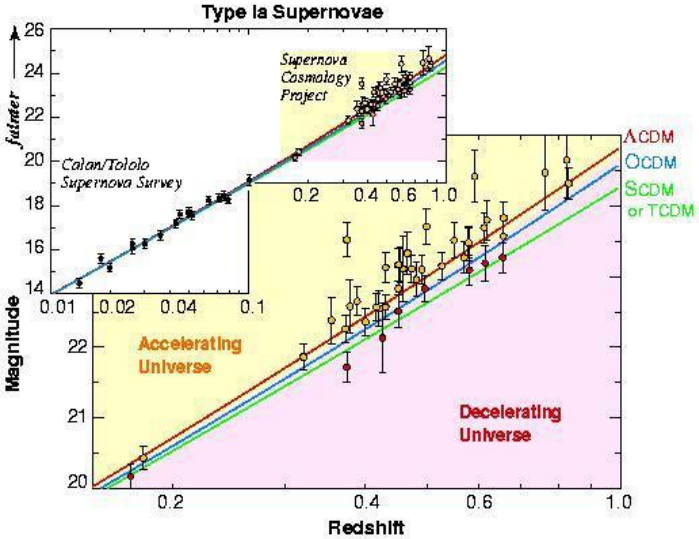
钱德拉X射线天文台

SN Ia：密近双星系统中吸积白矮星爆轰

- 与大质量恒星晚期SN不同，白矮星中有热核反应燃料；短时间内整个星体C、O被耗尽，释放大量能量
- 白矮星主要是碳氧元素组成，H很少：所以光谱中没有氢线
- Ia型超新星在极亮时的绝对星等大约都是-19.5等：标准烛光－宇宙学测距

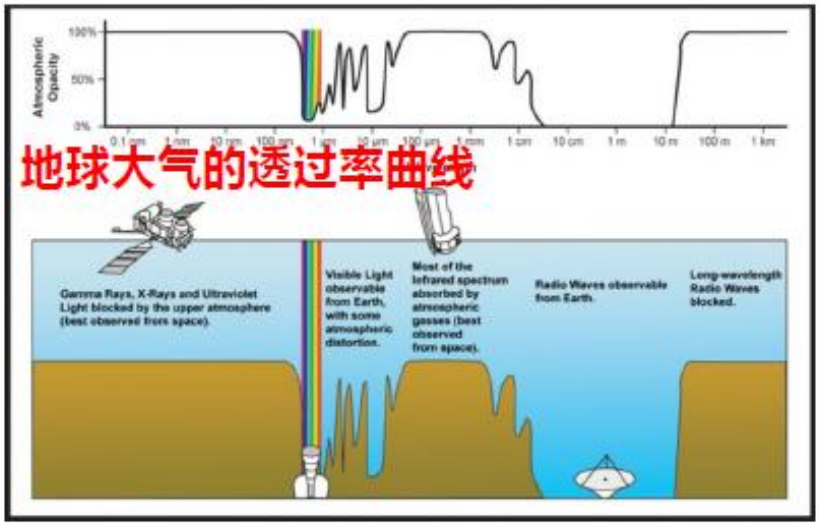


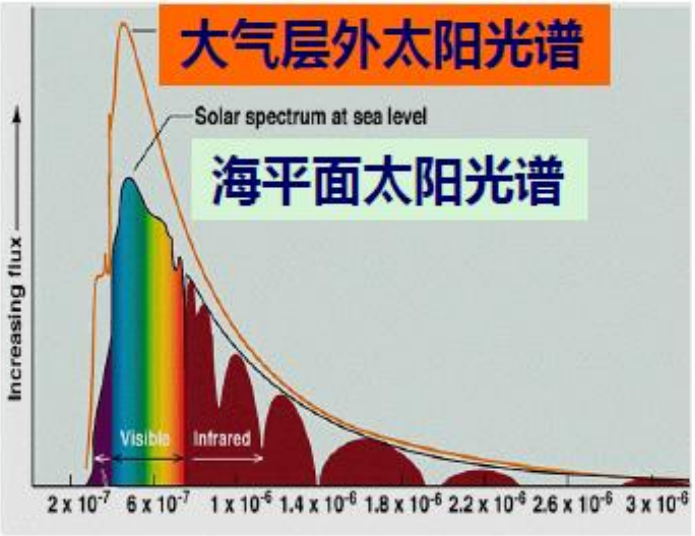




1.1.4 星等系统

- **光谱观测：**
  - 信息丰富(吸收线、连续谱、发射线)；
  - 但是分光拍摄观测只能对较亮的恒星，且观测所需要的时间长
- **热光度(bolometric)观测**
  - 热光度：天体在整个电磁波段辐射的总光度，全波段测量困难！
  - 大气吸收：只能在特定的波长窗口开展观测，如光学、近红外

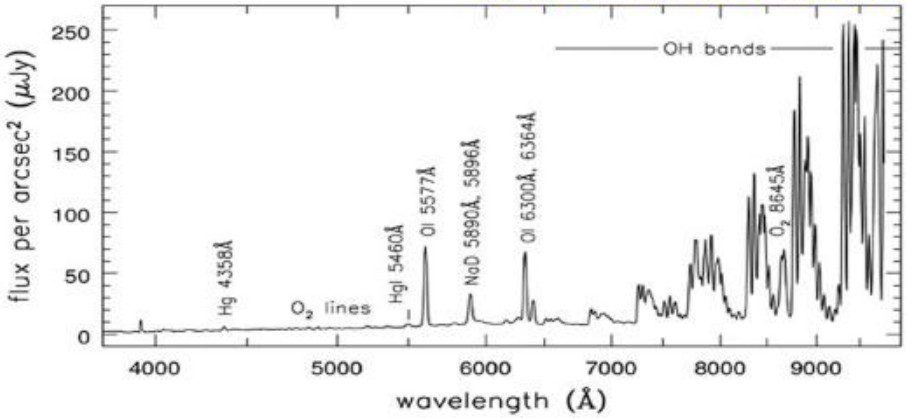




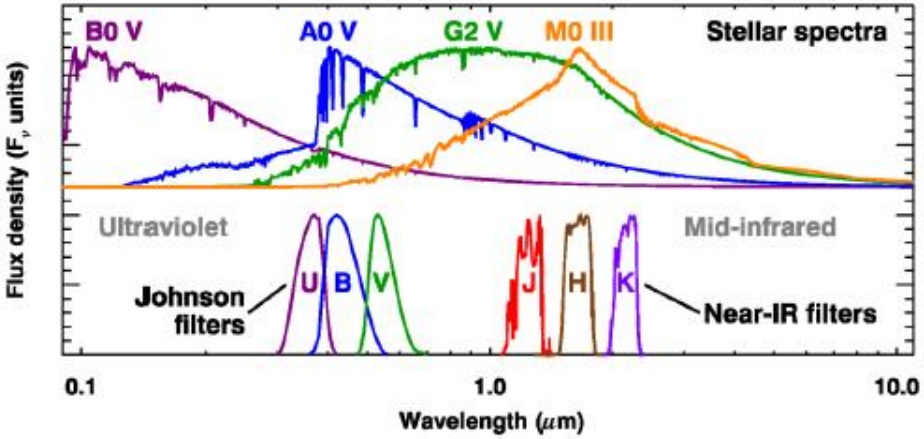
➢ 大气发射：人类造成的光污染；夜天本身也会发光（如黄道光）

人类造成的光污染

可见光区域的天空发射



- 解决办法
  - 测定在某一特定波长区间内天体辐射
  - 滤光片：只能透过某些特定波长区间的光



测光波段

热星等对应的视亮度(流量)：$F=L_{bol}/4\pi d^2$

The apparent brightness F is the integral over all frequencies or wavelengths:

$$F \equiv \int_0^{\infty} F_\nu(\nu)\,\mathrm{d}\nu = \int_0^{\infty} F_\lambda(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda. \qquad (1.4$$

由滤光片T_{BP}描述的恒星在带通中的视亮度：

The star's apparent brightness in the bandpass described by the filter $\mathcal{T}_{BP}$ is then

$$F_{BP} \equiv \int_0^{\infty} \mathcal{T}_{BP}(\lambda)F_\lambda(\lambda)\mathrm{d}\lambda \approx F_\lambda(\lambda_{eff})\Delta\lambda, \qquad (1.11)$$

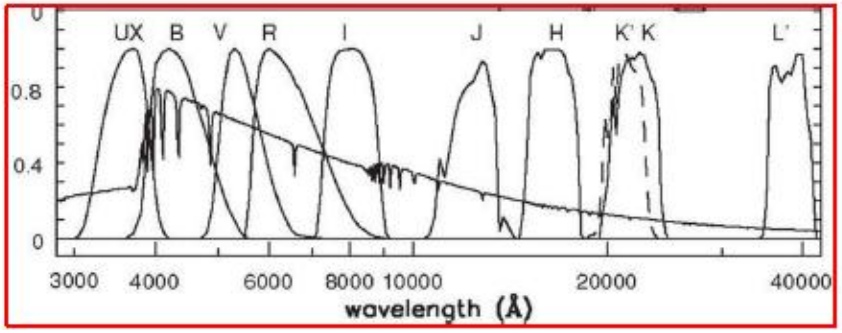
where the effective wavelength λ_{eff} and width $\Delta\lambda$ are defined in Table 1.2. The

λ_{eff}：有效波长；$\Delta\lambda$：滤光片带宽

滤光片带通(bandpasses，BP)：由滤光片在波长λ处透过(transmit)光的比例 $0 \le T(\lambda) \le 1$ 确定

若所有星光都透过滤光片，则T = 1；而T = 0意味着在这个波长处没有光能够透过

模板A0型星的流量；T(λ)是一些标准滤光片透过率曲线



滤光片

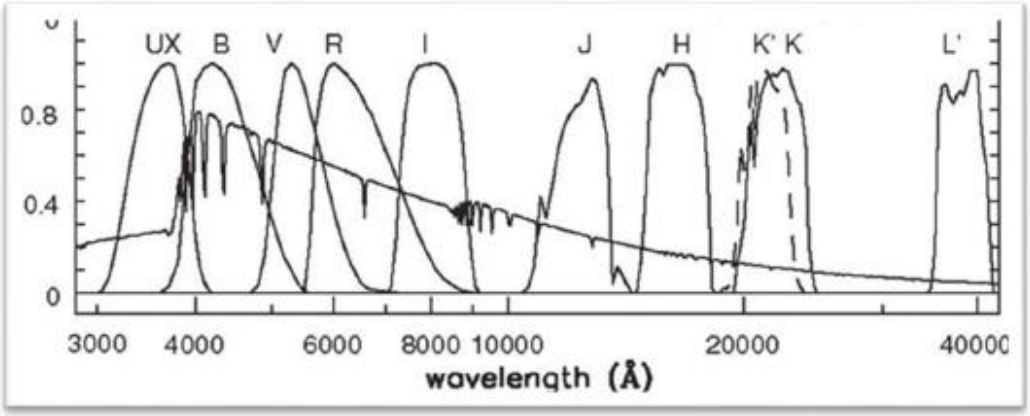
Table 1.2 Fluxes of a standard A0 star with $m = 0$ in bandpasses of Figure 1.7

	UX	B	V	R	I	J	H	K	L'
$\lambda_{\rm eff}$	3660 Å	4360 Å	5450 Å	6410 Å	7980 Å	1.22 μm	1.63 μm	2.19 μm	3.80 μm
F_λ	4150	6360	3630	2190	1130	314	114	39.6	4.85

$$F_{\rm BP} \equiv \int_0^\infty \mathcal{T}_{\rm BP}(\lambda) F_\lambda(\lambda) {\rm d}\lambda \approx F_\lambda(\lambda_{\rm eff})\Delta\lambda, \qquad (1.11)$$

$$\lambda_{\rm eff} \equiv \int \lambda \mathcal{T}_{\rm BP} F_\lambda(\lambda)\,{\rm d}\lambda \Big/ \int \mathcal{T}_{\rm BP} F_\lambda(\lambda)\,{\rm d}\lambda \qquad \Delta\lambda = \int \mathcal{T}_{\rm BP}\,{\rm d}\lambda$$

宽带：带宽 > 30 nm；
中带：带宽 10-30 nm；
窄带：带宽 < 10 nm



天体星等

- 星等：用于描述星体在天空中相对亮度的单位
- 视星等：表示观测仪器所观测得到的天体视亮度
  - 视星等最早由古希腊天文学家喜帕恰斯hipparchus制定
  - 自编星表，包括1022颗恒星
  - 按照亮度划分为6个等级：1等星到6等星。1等最亮，6等最暗
- 1850年，英国天文学家普森发现1等星要比6等星亮100倍。根据这个关系，星等被量化。
- 但1到6级星等并不能描述当时发现的所有天体亮度，天文学家延展本来的等级－引入负星等概念

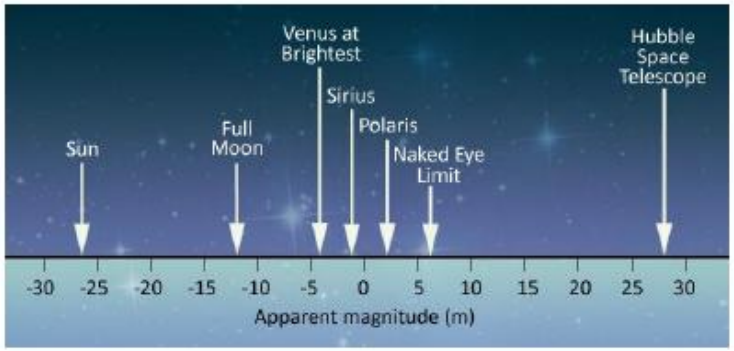
$$\frac{f_2}{f_1} = 100^{(m_1-m_2)/5}$$

or

$$\boxed{m_1 - m_2 = -2.5\log_{10}\left(\frac{f_1}{f_2}\right)}$$

$$\Delta m = 5 \rightarrow 100:1$$

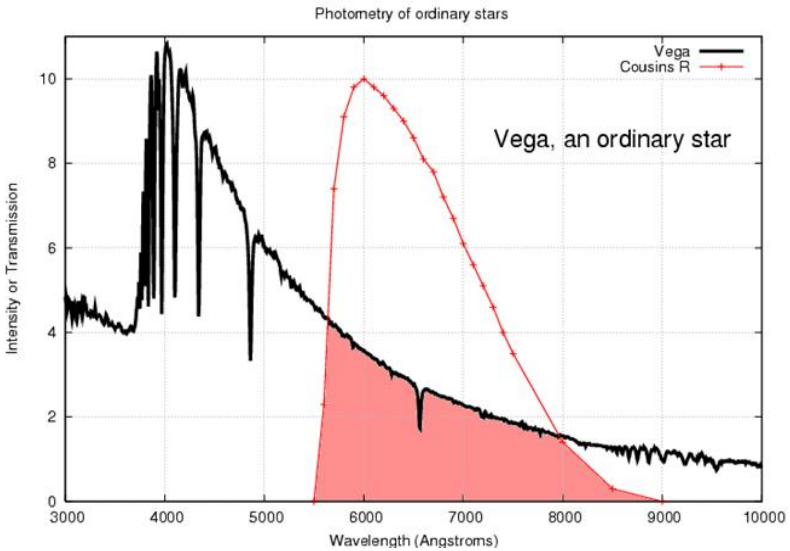
$$\Delta m = 1 \rightarrow (100)^{\frac{1}{5}}:1 \sim 2.512:1$$



Vega星等

- 星等原初定义：两颗恒星的相对亮度比较，不需要零点
- 如果设置了星等零点，每个天体的星等可单独表示：
  - 天狼星是夜空中最亮的恒星，其视星等$m_V = -1.46$
  - 老人星是夜空中第二亮星，视星等为-0.72等
  - 如果无星等零点，则需表示为天狼星比老人星亮0.74等
- Vega Magnitude System
  - 定义织女星（Vega，A0型恒星）在所有滤光片的视星等m = 0

$$m_1 - m_2 = -2.5\log(f_1/f_2)$$



$$m - 0 = -2.5\log f + 2.5\log f_0$$

V-band: $f_0 = 3630\times10^{-12}$ erg/s/cm^2/Å

Table 1.2 Fluxes of a standard A0 star with $m = 0$ in bandpasses of Figure 1.7

	UX	B	V	R	I	J	H	K	L'
λ_{eff}	3660 Å	4360 Å	5450 Å	6410 Å	7980 Å	1.22 μm	1.63 μm	2.19 μm	3.80 μm
F_λ	4150	6360	3630	2190	1130	314	114	39.6	4.85

零点星等

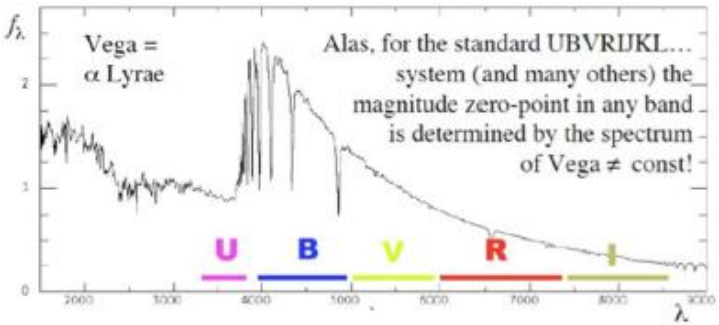
Table 1.2 Fluxes of a standard A0 star with $m = 0$ in bandpasses of Figure 1.7

	UX	B	V	R	I	J	H	K	L'
$\lambda_{\rm eff}$	3660 Å	4360 Å	5450 Å	6410 Å	7980 Å	1.22 μm	1.63 μm	2.19 μm	3.80 μm
F_λ	4150	6360	3630	2190	1130	314	114	39.6	4.85
F_ν	1780	4050	3635	3080	2420	1585	1020	640	236
Zero point ZP_λ	−0.15	−0.61	0.0	0.55	1.27	2.66	3.76	4.91	7.18
Zero point ZP_ν	0.78	−0.12	0.0	0.18	0.44	0.90	1.38	1.89	2.97

Note: the bandpass UX is defined in Figure 1.7; data from Bessell *et al.* 1988 *AAp* **333**, 231 and M. McCall. For each filter, the effective wavelength $\lambda_{\rm eff} \equiv \int \lambda \mathcal{T}_{\rm BP} F_\lambda(\lambda)\,{\rm d}\lambda / \int \mathcal{T}_{\rm BP} F_\lambda(\lambda)\,{\rm d}\lambda$, while the effective width $\Delta\lambda = \int \mathcal{T}_{\rm BP}\,{\rm d}\lambda$.

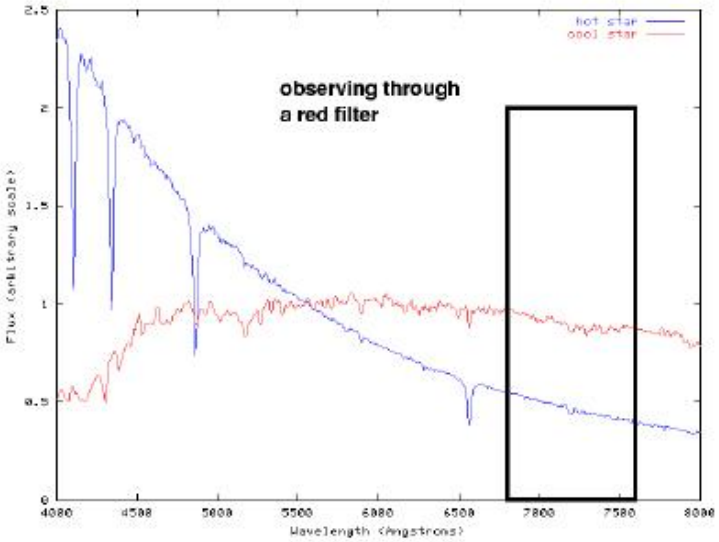
F_ν is in janskys, F_λ is in units of 10^{-12} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1} or 10^{-11} W m^{-2} μm^{-1}.

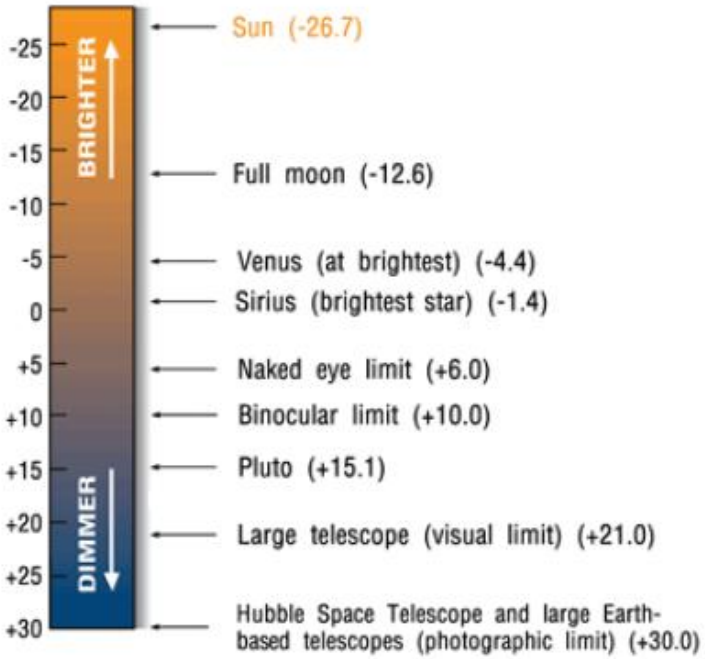
Zero point ZP: $m = -2.5\ \log_{10} F_\lambda + 8.90 - \mathrm{ZP}_\lambda$ or $m = -2.5 \log_{10} F_\nu + 8.90 - \mathrm{ZP}_\nu$ in these units.



$$m - 0 = -2.5\log f + 2.5\log f_0$$

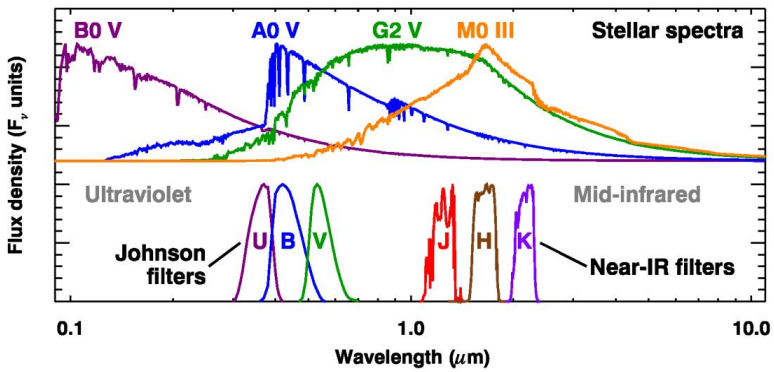
Any star that is brighter than Vega is labeled with a negative number for its apparent magnitude.





AB星等系统

在紫外、远红外等波长区间，没有准确测量的标准星组来定义星等系统，发展了‘基于流量’的星等系统来代替:



$$m_{\rm BP} = -2.5\log_{10}\left(\frac{\langle F_{\rm BP}\rangle}{\langle F_{V,0}\rangle}\right), \qquad \text{where } \langle F_{\rm BP}\rangle \equiv \frac{\int \mathcal{T}_{\rm BP}(\lambda)F_\lambda(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int \mathcal{T}_{\rm BP}(\lambda)\mathrm{d}\lambda}$$

Here $\langle F_{V,0}\rangle \approx 3.63\times10^{-9}$ erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1}, the average value of F_λ over the V band of a star which has $m_V = 0$. Equivalently, when $\langle F_{\rm BP}\rangle$ is measured in erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1}, we have

$$m - 0 = -2.5\log f + 2.5\log f_0$$

$$m_{\rm BP} = -2.5\log_{10}\langle F_{\rm BP}\rangle - 21.1;$$

$$2.5\log(3630\times10^{-12}) = -21.1$$

$$m_{AB} = -2.5\log(f_\nu) - 48.60$$ f_ν的单位: erg sec^{-1} cm^{-2} Hz^{-1}

星等总结

- Magnitude is defined as

  $m = -2.5 \times \log(\text{flux}) + \text{zeropoint}$

  $m_1 - m_2 = 2.5 \times \log(f_2/f_1)$
- The Vega system: $m_{vega} = 0$ in all passbands.
- The AB system (by Oke & Gunn 1983):

  $m_{AB} = m_{vega} = 0$ at the V-band

  constant zeropoint in f_ν (erg/s/cm^2/Hz)

  $m = 25 - 2.5 \times \log(f_\nu/0.363)$, f_ν is given in units of μJy

A0 V-band : $f_\nu = 3635\text{Jy} = 0.3635\text{x}10^{10}\text{mJy}$

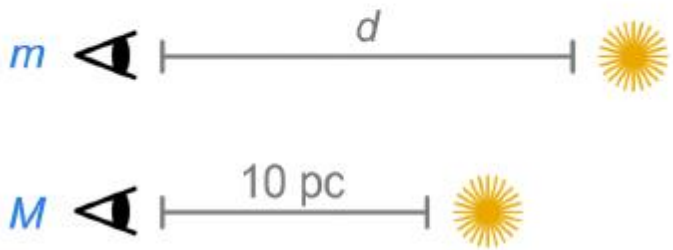
- *Don't confuse magnitude systems and filter systems*
- Any filter can be used in any magnitude system
- Any magnitude system can be used for any filter

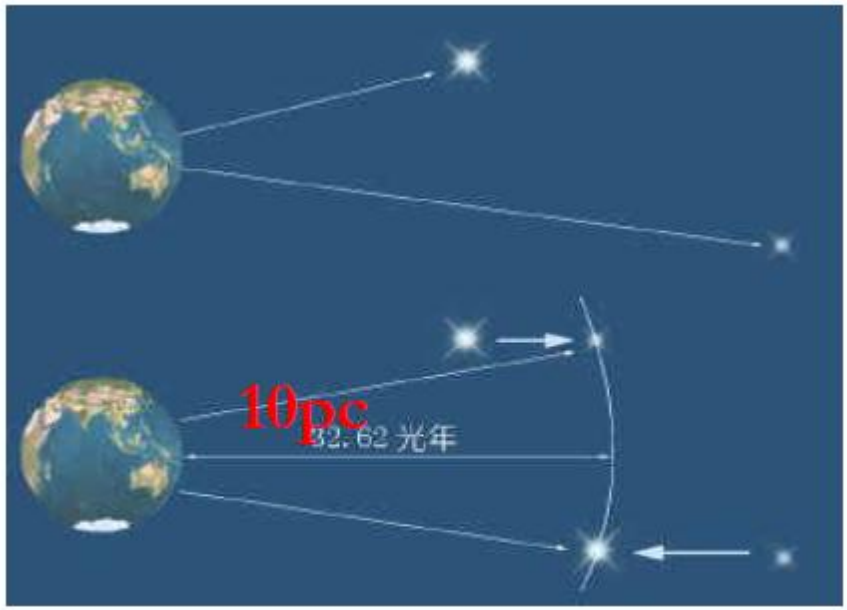
绝对星等

- 视星等是人们从地球上观测星体亮度的度量；因为不同恒星与地球的距离不同，所以视星等并不能指示出恒星本身的发光强度
- 绝对星等：是在距天体d = 10pc 处，所看到天体的视星等

$$M = m - 5\log d(\text{in pc}) + 5$$

m-M distance modulus
距离模数

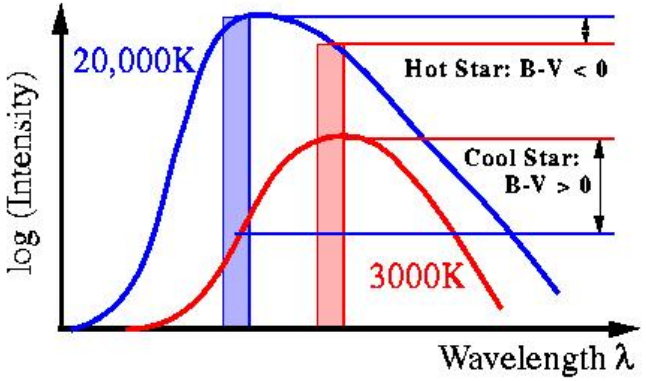


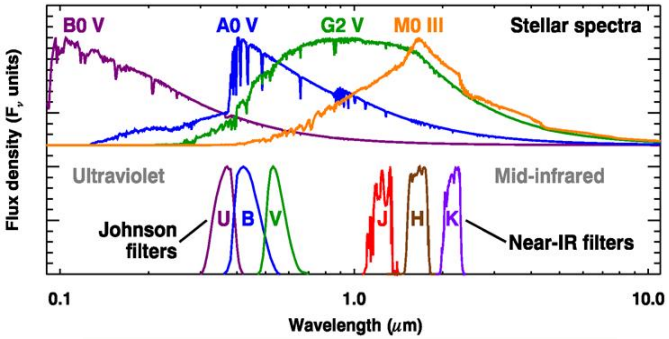


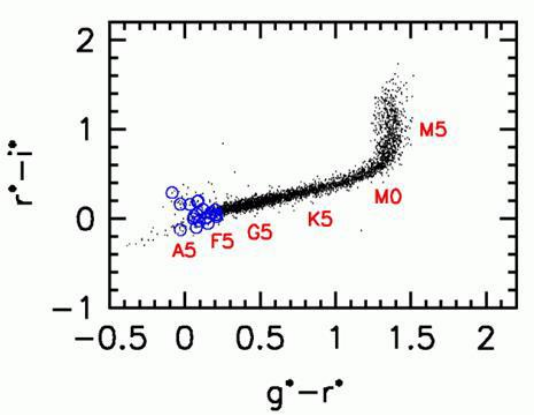
$M_V(\text{sun}) = 4.8\text{mag}$；$m_V(\text{sun}) = -26.7\text{mag}$

恒星的颜色

- 定义为两个带通(滤光片)中分别收到光量之间的差值
- 总是为从短波带通的视星等减去长波带通的视星等
  - 蓝星在短波段发出较多的光，mB小，mR大：颜色为星等之差mB－mR
  - B-R数值小，蓝色恒星；数值大是红星
- 恒星光谱型、颜色、有效温度之间相关：颜色与有效温度相关
  - B－V颜色蓝是A、F和G型早型恒星好的示踪；但是不适合冷M型恒星（辐射主要在红端，B-V颜色基本不变）
  - V－K是M型恒星子类间以及其他晚型恒星的良好指标颜色

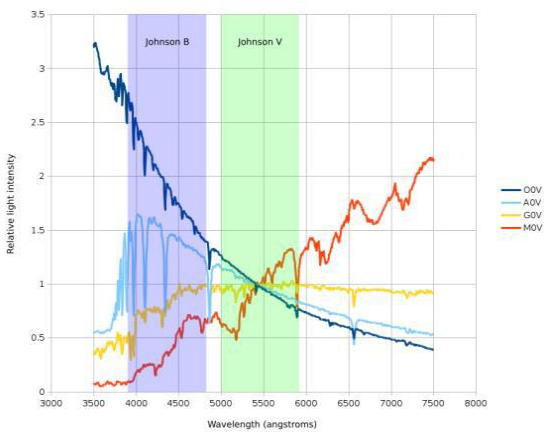






热改正

- 热光度：L_{bol}，来自一颗恒星的所有波长积分的总能量，理论模型一般会给出热光度
- 实际观测，一般不能测量一颗恒星的所有光（热光度）；只能用恒星大气模型来求得在不能直接观测的区域发射出来的能量
- 热改正Bolometric Correction：把绝对星等（M_V）换算成热星等须加的改正值$BC=M_V-M_{bol}$
- 标度的零点通过将太阳的绝对热星等定为$M_{bol,\odot}=4.76$来设定，太阳的$BC\approx 0.07$



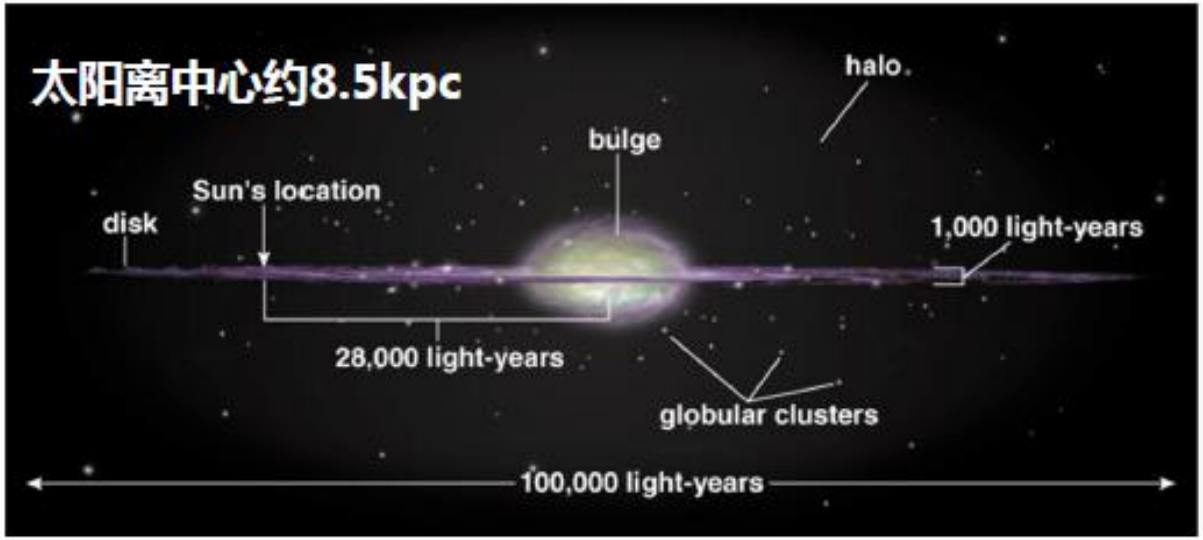
对于辐射峰值主要在蓝、绿部分的恒星，热改正很小。对于热星、冷星，热改正较大。

	M_V	BC
O3	−5.8	4.0
O5	−5.2	3.8
O8	−4.3	3.3
B0	−3.7	3.0
B3	−1.4	1.6
B6	−1.0	1.2
B8	−0.25	0.8
A0	0.8	0.3
A5	1.8	0.1
F0	2.4	0.1
F5	3.3	0.1
G0	4.2	0.2
Sun	4.83	0.07
G5	4.93	0.2
K0	5.9	0.4
K5	7.5	0.6
K7	8.3	1.0
M0	8.9	1.2
M2	11.2	1.7
M4	12.7	2.7
M6	16.5	4.3

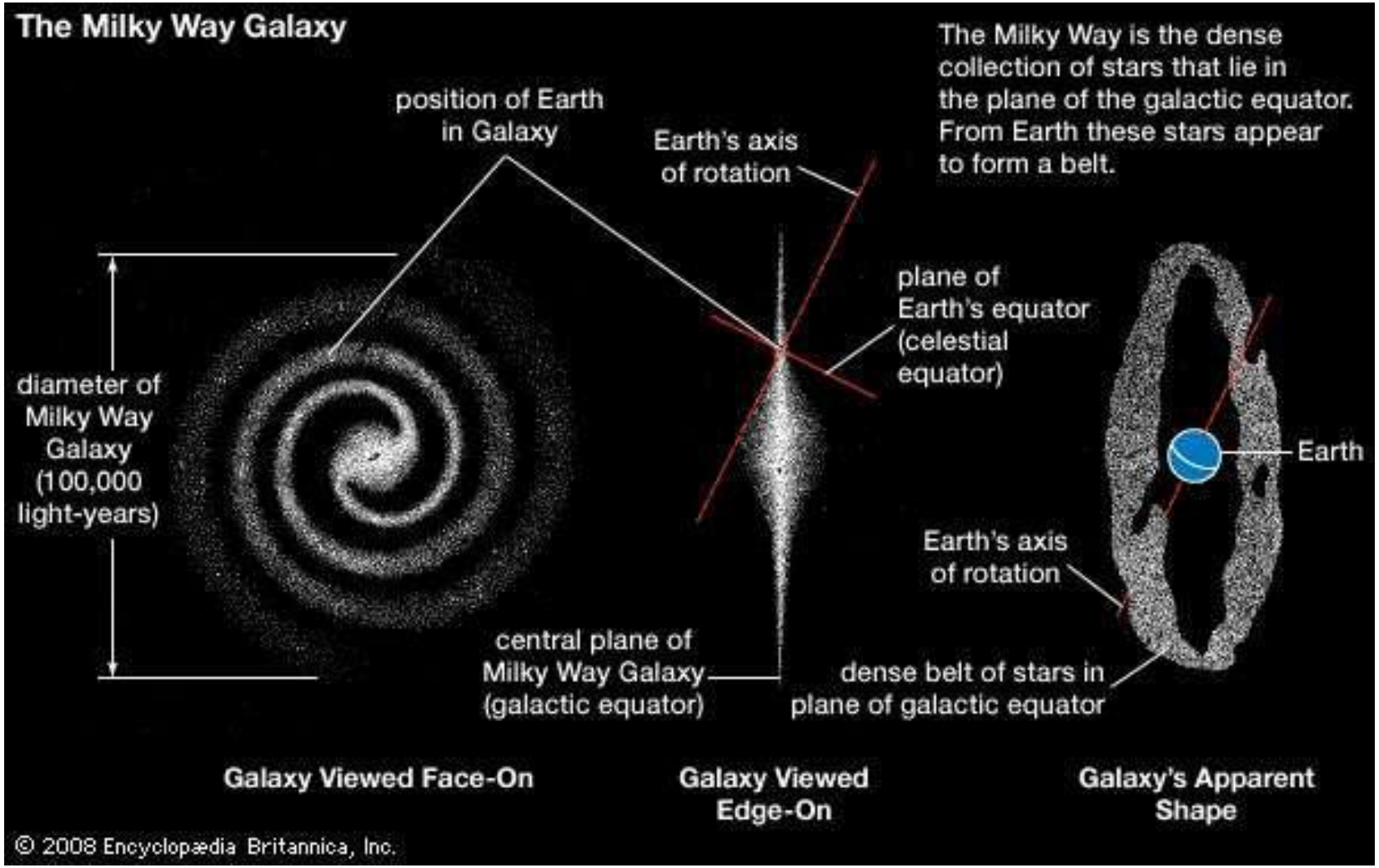
1.2 银河系

银河系的形态

- 银河系是一个旋涡星系。
- 地球（太阳系）在银河系中，可近距离观测研究银河系物质分布：恒星、气体、尘埃、暗物质。

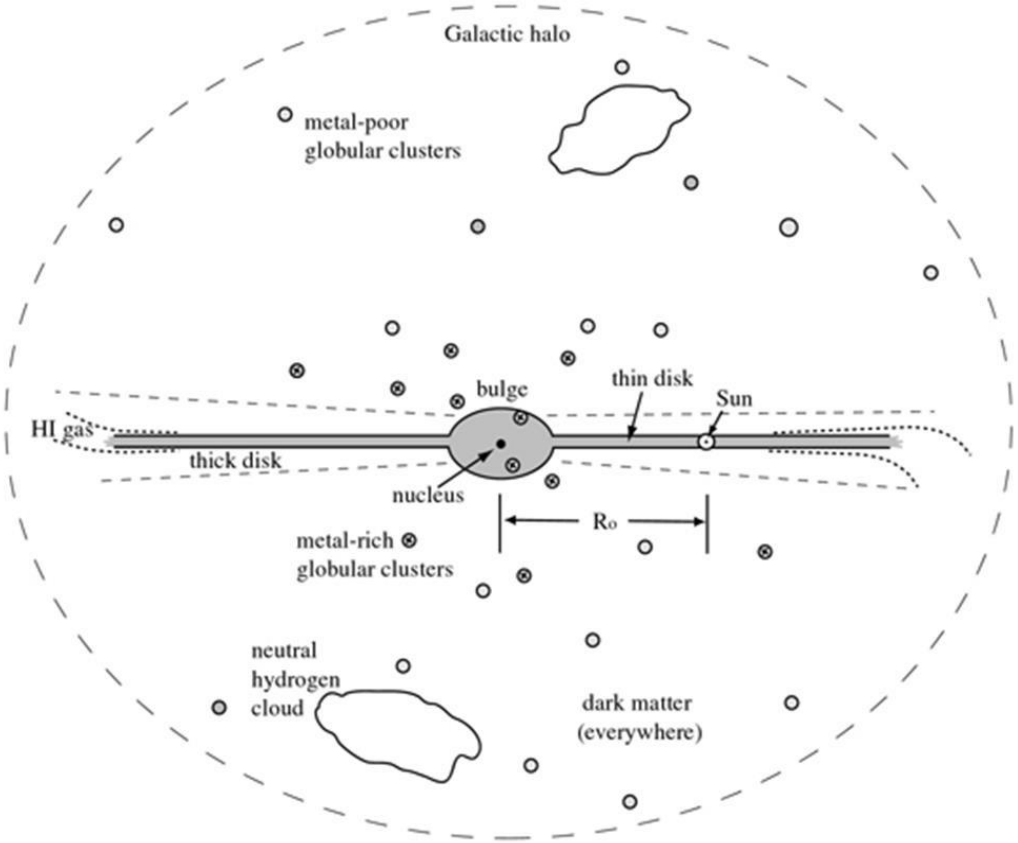


银河系的形态


The Milky Way Galaxy
The Milky Way is the dense collection of stars that lie in the plane of the galactic equator. From Earth these stars appear to form a belt.
position of Earth in Galaxy
Earth's axis of rotation
plane of Earth's equator (celestial equator)
diameter of Milky Way Galaxy (100,000 light-years)
Earth
Earth's axis of rotation
central plane of Milky Way Galaxy (galactic equator)
dense belt of stars in plane of galactic equator
Galaxy Viewed Face-On
Galaxy Viewed Edge-On
Galaxy's Apparent Shape
© 2008 Encyclopædia Britannica, Inc.

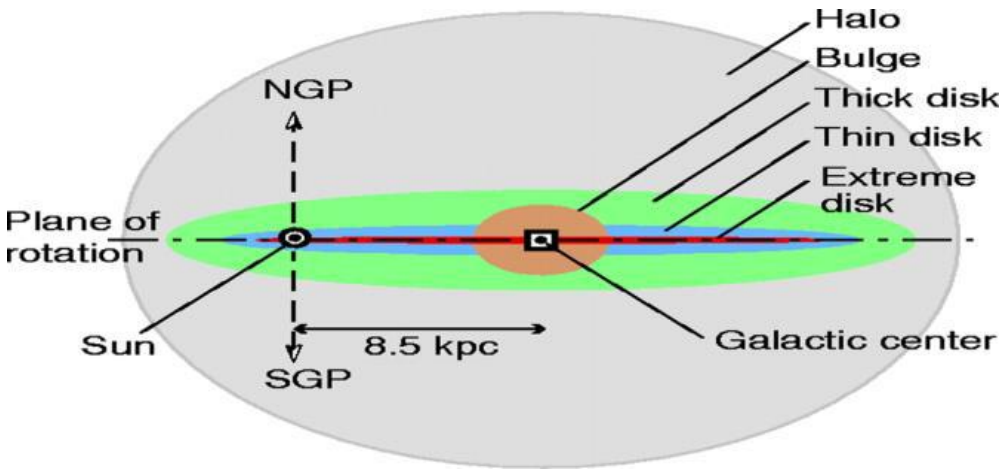
银河系结构 - 银盘

- 银河系是一个有旋臂结构的盘星系
- 银河系构成：银盘disk；旋臂spiral arm；核球bulge；银晕halo



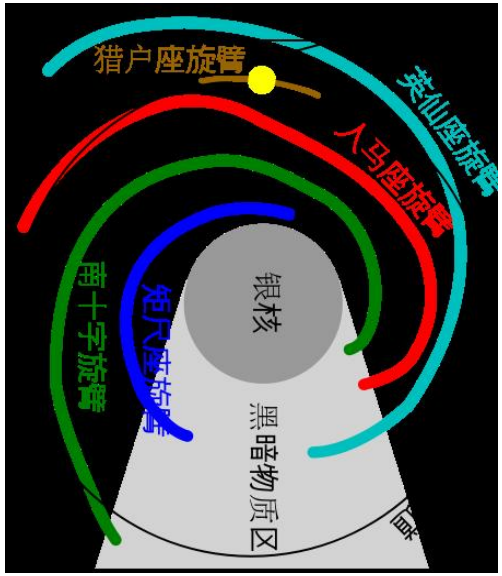
银河系结构 - 银盘

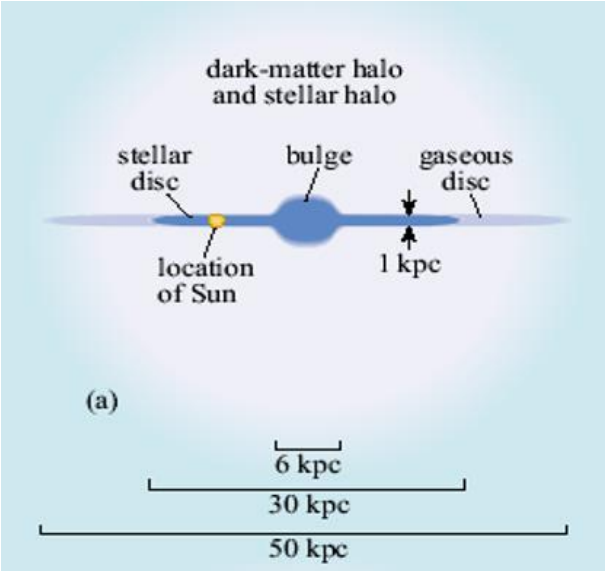
- 银盘disk:
  - 恒星的径向数密度变化可表示为：$n(R) \propto \exp(-R/h_R)$
  - 标长h_R：即沿半径R向外移动距离为hR时，盘上恒星数密度n下降为原来的1/e
  - 标高h_z：即垂直于星系盘方向恒星数密度下降1/e倍所移动的距离
- 银盘可分为厚盘和薄盘。厚盘的恒星比薄盘恒星形成的早，重元素较贫乏。
  - 薄盘的标高是h_z ~ 300－400pc，下降快；厚盘的标高是h_z ~ 1kpc
  - 薄盘包含了盘星总数的95%；年轻大质量恒星在薄盘中

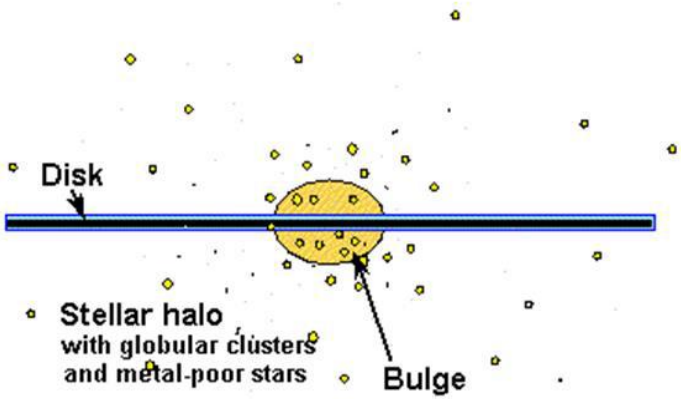


银河系结构-其它

- 旋臂：4条主要旋臂（矩尺、南十字、、人马、英仙）；太阳位于猎户座旋臂（小）的内侧
- 核球：呈椭球形；内部气体和尘埃少，恒星形成活动弱；主要是年老的恒星、分布十分密集
- 银心：在人马座方向；银河系中心可能存在黑洞
- 银晕：由稀疏分布的小质量恒星、球状星团和星际物质组成的球状区域；恒星密度很低，为银盘的2%；冷气体和尘埃少；存在大量的热气体

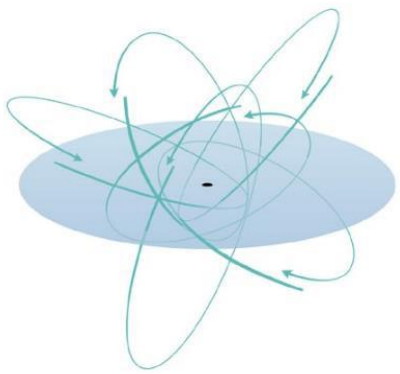


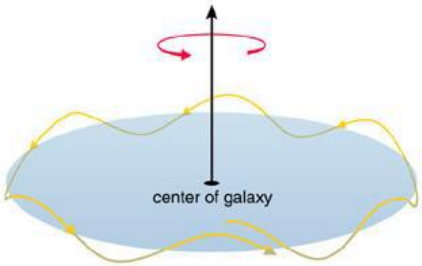


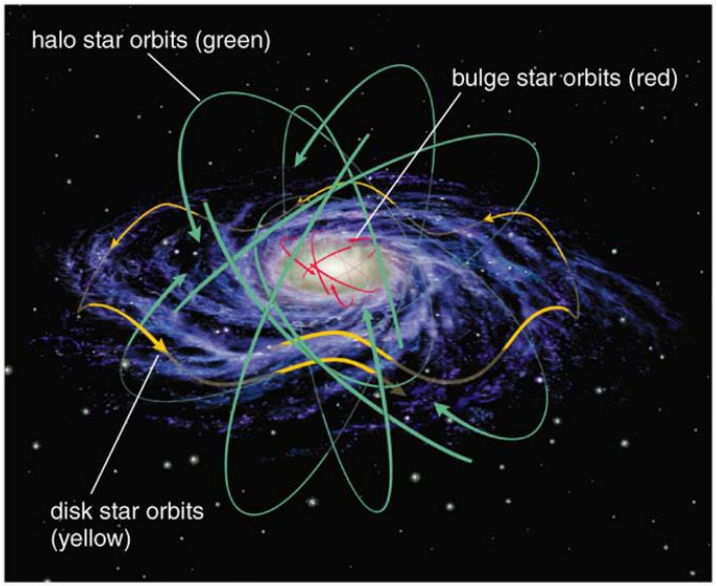


恒星运动

- 银河系中，星系晕中的恒星和星系盘上的恒星运动轨道截然不同
- 晕星：随机的椭圆轨道，有不同倾角；晕中，运行慢；盘附近运行快；晕星不随着星系一起转动，无规则
- 盘星：盘星随星系一起绕轴转动；转动时，恒星轨道在星系盘的上下穿越

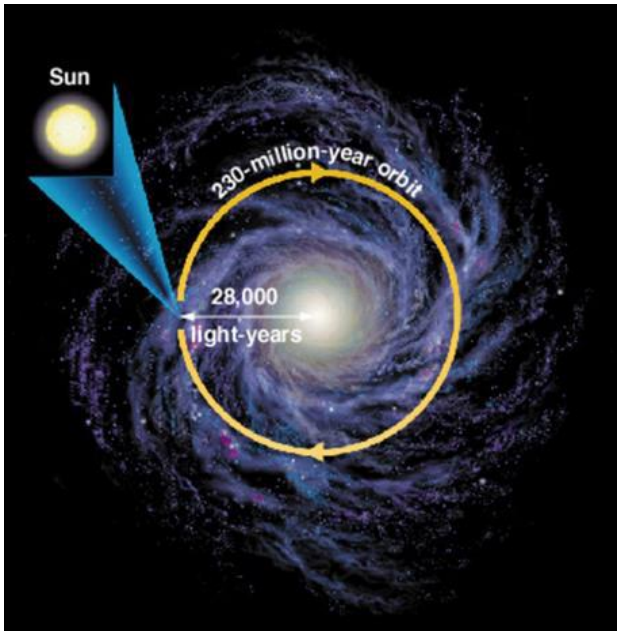






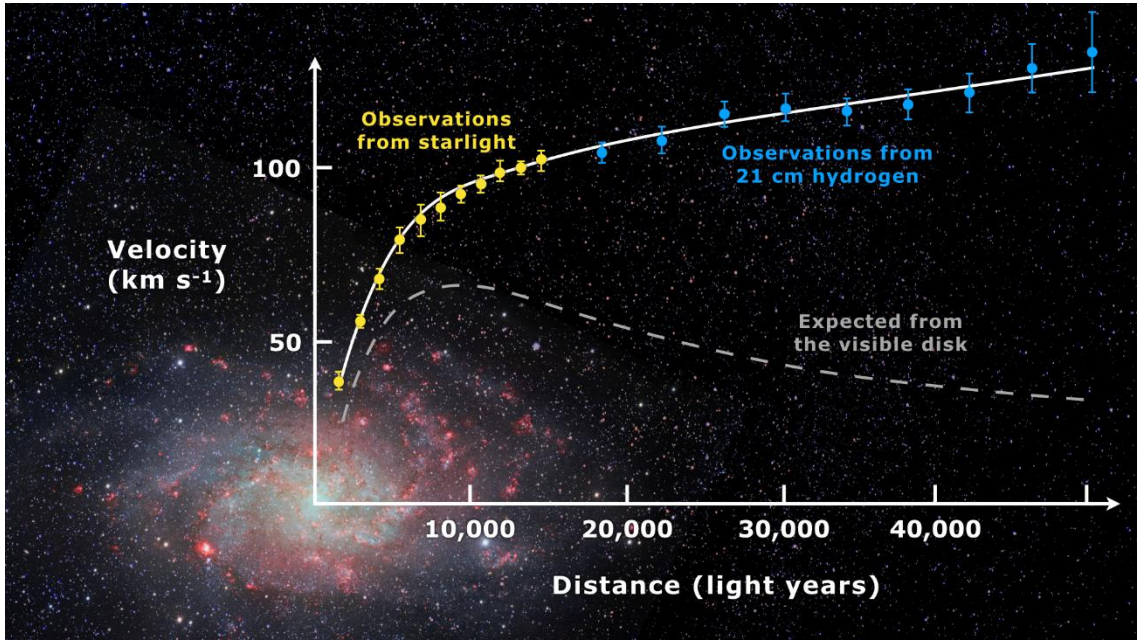
恒星运动

- 太阳绕银心的轨道大致是椭圆形(因受质量分布不均匀影响而略有偏离)
- 太阳约每2.3－2.5亿年绕银心运行一圈；太阳已经绕银心运动了约20周



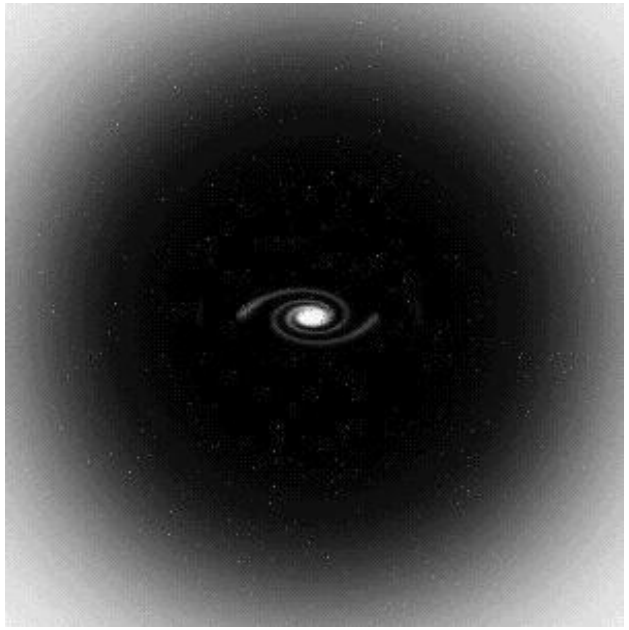
银河系结构 - 暗物质

- 如果所有质量都集中在星系中心，轨道速度将随半径的增加而下降
- 观测表明，轨道速度并没有随半径增加而下降：在星系发光区域之外，存在大量不可见物质－暗物质(dark matter)
- 暗物质：银晕中不可见物质质量>> 可见物质质量



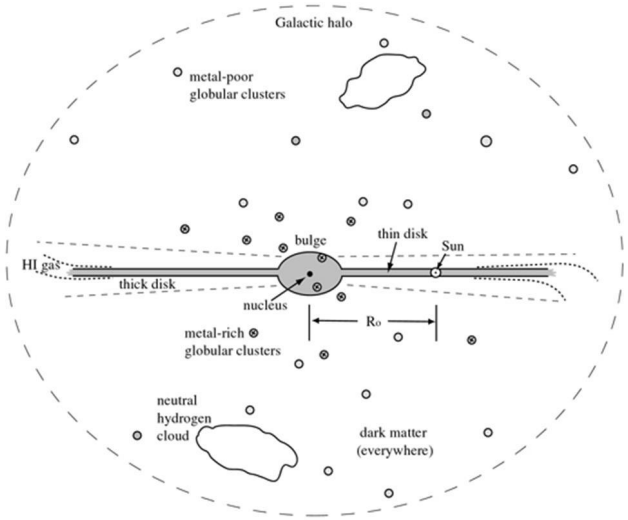
银河系结构 - 暗物质

- 星系盘：光度 $L \sim (15-20) \times 10^9 L_\odot$；恒星质量 $M \sim 60 \times 10^9 M_\odot$
- 核球：光度 $L \approx 5 \times 10^9 L_\odot$；恒星质量 $M \sim 20 \times 10^9 M_\odot$
- 晕星：$< 10^9 M_\odot$；只占银河系质量的很小一部分
- 银河系质量的大部分看来是处于离中心10kpc以外，而那里的恒星却相当稀少：暗物质



1.2.2 银河系中的气体

- 距离太阳最近的恒星，是半人马座比邻星，距离d = 4.25光年
- 每10pc^{3}有一颗恒星；恒星的直径 d ~ 10^{-7} pc。恒星之间存在大量的空间
- 星际介质：恒星之间存在大量的稀薄气体和尘埃
  - 尘埃：吸收和散射穿过的星光，或者本身产生热辐射，而被探测
  - 气体：被电离的原子、中性原子和分子气体的辐射



- 气体和尘埃分布在盘很薄的层内
- 在太阳位置附近(8kpc)，大多数中性氢气体(HI)分布在银盘中平面的d < 100pc之内
- 星系中的气体层厚度∝距银心的距离：外厚、内薄

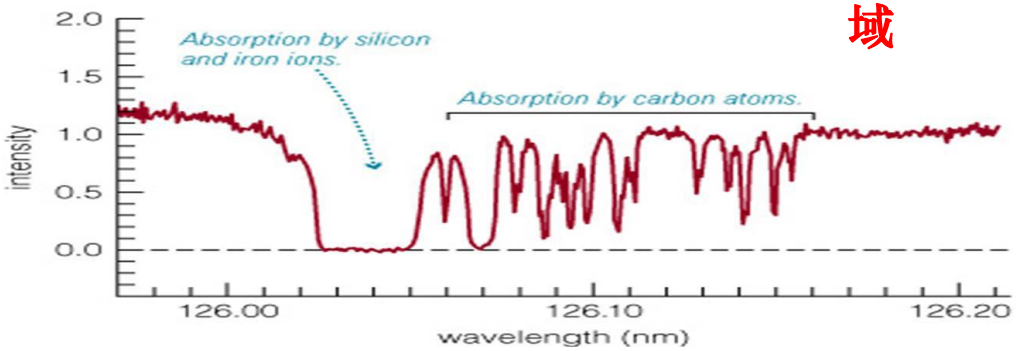
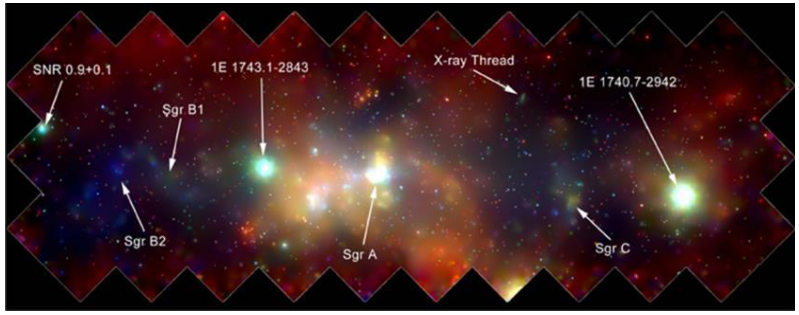
星际介质的组成

- 利用恒星光谱中的吸收线可研究星际气体的成份
  - 星际气体：>60% H、~ 25% He
  - 星际尘埃（C、Si等）占星际介质总质量~1%
- 星际介质在空间分布非均匀
  - 气体密度：n ~ 42 （冷）or 0.25（温）atom/cm^3
  - 地球最高真空度：~32000 atom/cm^3

INTERSTELLAR CLOUD PROPERTIES FOR TYPICAL CONDITIONS

Average Cloud Properties	Cold Cores	Warm Ionized Component
Hydrogen density, n (cm^{-3})	42	0.25
Fractional ionization, x	...	0.68
Assumed temperature, T (K)	80	8,000
Filling factor, f	0.024	0.23
Intercloud distance, λ (pc)	88	12
Cloud radii (pc):		
Largest	10.0	10.8
Mean*	1.6	2.1
Smallest	0.38	2.1
Column densities (10^{19} cm^{-2}):		
Largest	173	.22
Mean*	27	.22
Smallest	0.5	.22

* Weighted by cloud area.



X-rays辐射：银河系中心有高温热气体的区域