

第四章 基本天体物理量及其测量

§ 4.1 恒星的距离、大小、质量和星等

§ 4.2 恒星的光谱和赫罗图

§ 4.1 恒星的距离、大小、质量和星等

1. 恒星距离及其测定
2. 恒星的大小和质量
3. 恒星的亮度，视星等
4. 恒星的绝对星等和光度

1. 恒星的距离及其测定

测量距离的重要性:

- 我们肉眼只能知道恒星在天球上的投影的位置。

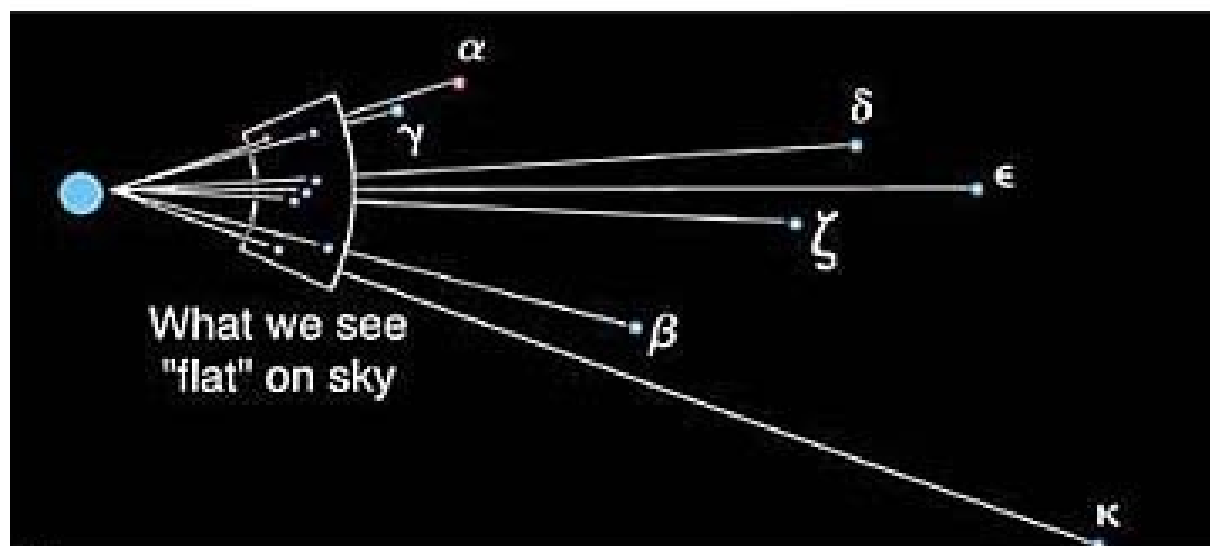
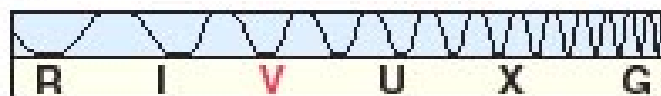
两颗挨得很近的恒星，实际上在纵深方向上可能离得非常遥远，远的暗的星也就可能比近的实际更亮！



(a)



(b)



(c)

- 不知道恒星的距离



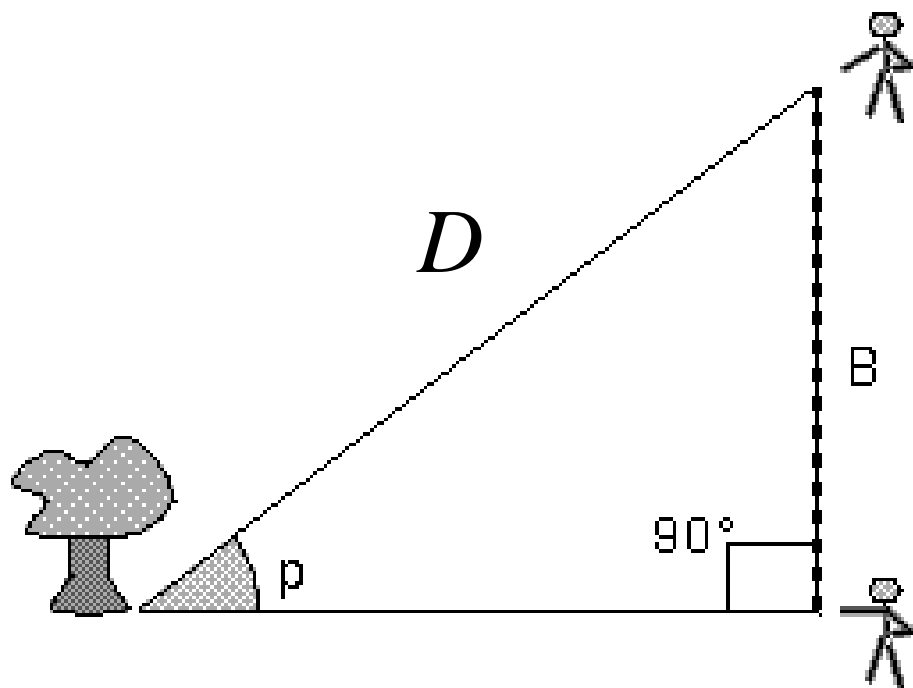
恒星空间的真实分布、运动速度、大小和质量、发射电磁波的真实强度，等等？

不可能



三角视差法 (trigonometric parallax) :

基线越长，可测量的恒星距离越远。

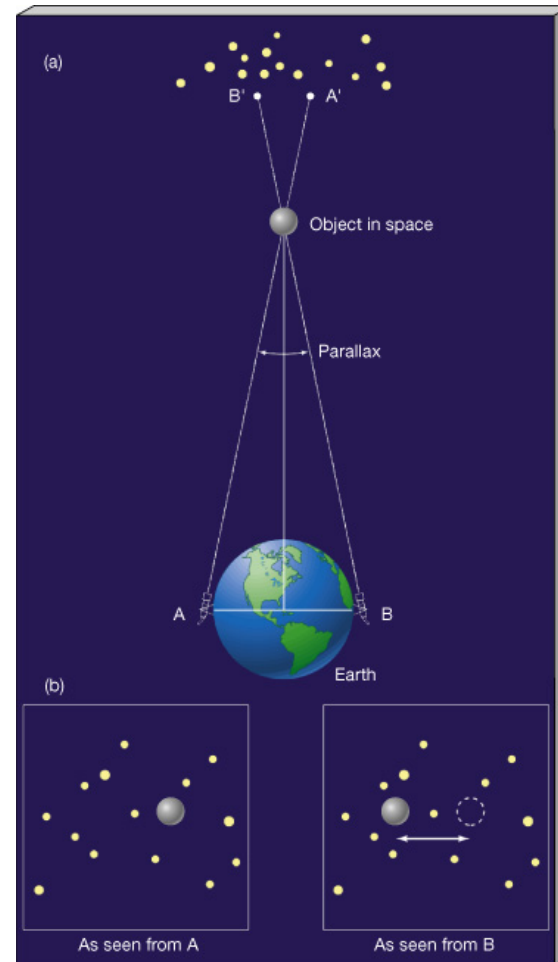
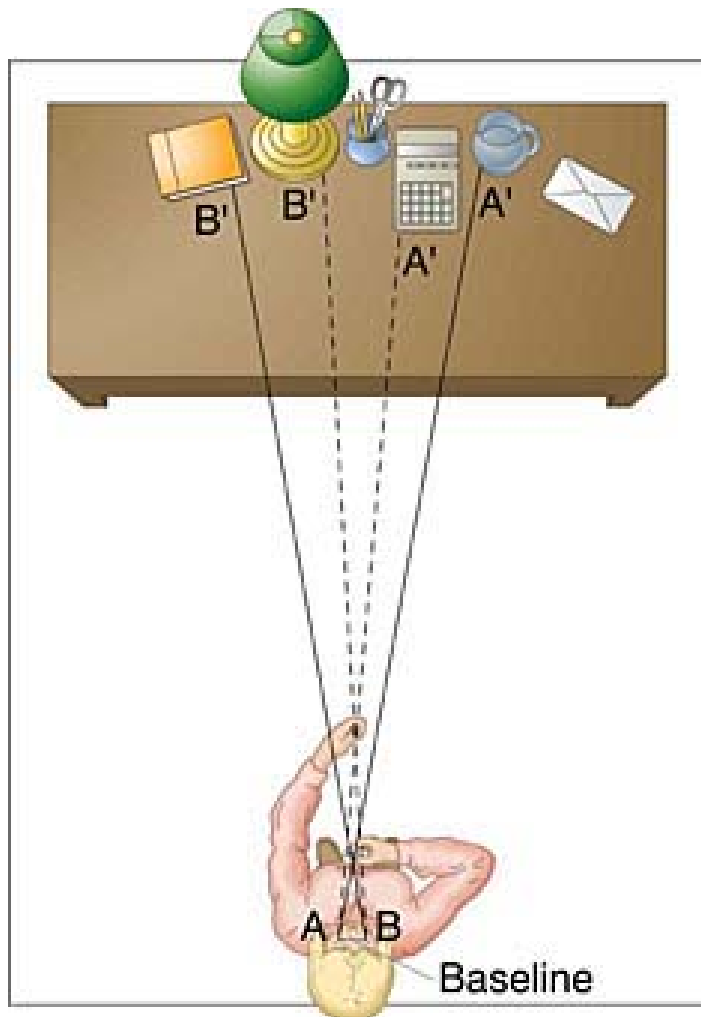


$$\sin \rho = \frac{B}{D}$$

$$D = \frac{B}{\sin \rho}$$

Experiment

what's parallax?



三角视差测量的困难:

恒星太远了，视差角太小

基线要非常长！

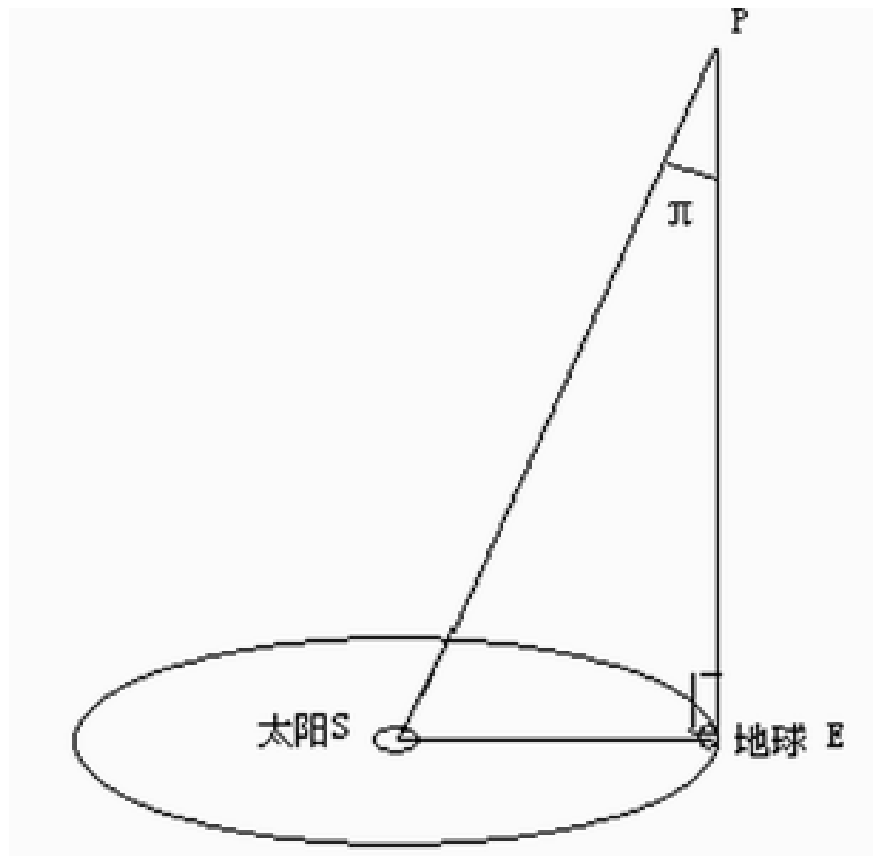
- 地球上的基线太短:

地球直径约1.3万公里 (1.3×10^{-9} 光年)

最近恒星4.3光年，角度太小无法测量

- 地球轨道提供3亿公里基线:

日地平均距离a



周年视差 (annual parallax):

以地球轨道半长径作为基线测量恒星的距离。

周年视差 π 是恒星相对于地球轨道半长径所张的夹角。天文上常简称“视差”。

距离单位

恒星之遥远，远到无法用公里来做单位天文学家特别定义了3把不同的尺子：

1) 天文单位 (AU) :

太阳和地球之间的平均距离称为 1天文单位，
 $1\text{AU}=1.49597870 \times 10^{11}$ 米

2) 光年 (1y):

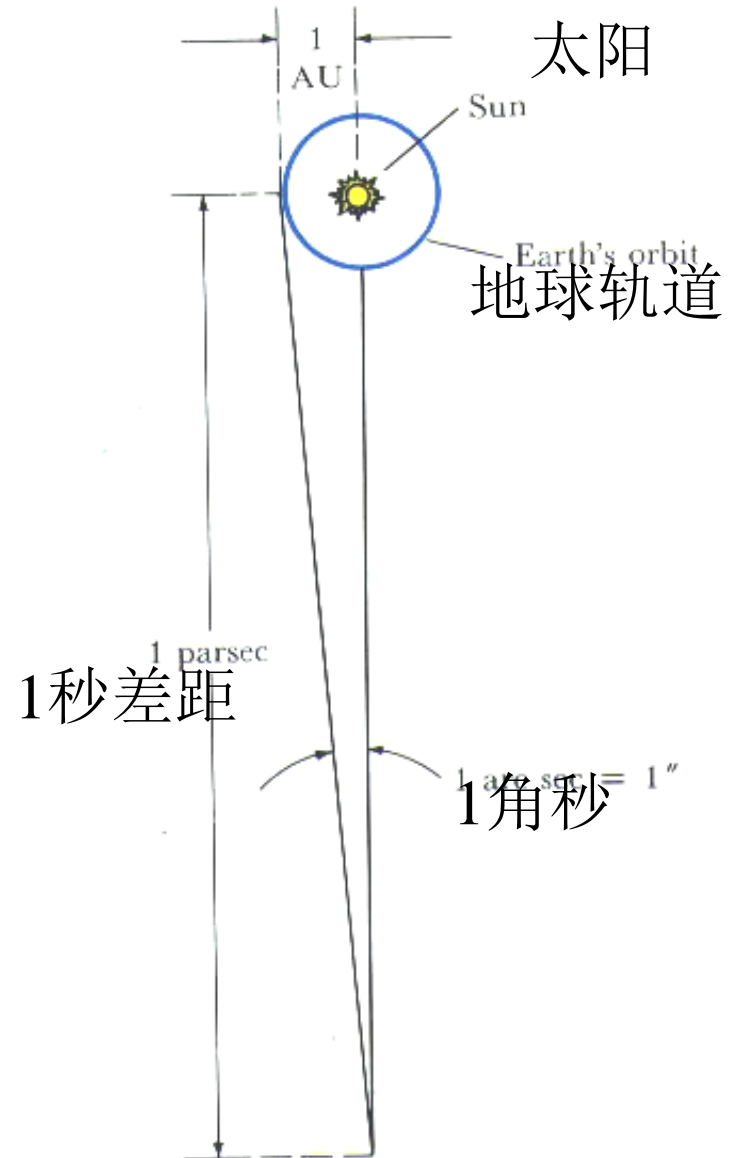
光1年所走的距离， $1\text{y}=0.946053 \times 10^{16}$ 米，
约10万亿公里

天文单位

3) 秒差距 (pc) :

把恒星视差为1角秒时, 恒星所对应的距离作为一种单位:

秒差距



恒星的距离通常以秒差距 (parsec) 或光年 (light year) 作为单位。

$$r = \frac{1}{\pi''}$$

恒星距离和恒星视差成反比

r : 秒差距, π'' : 角秒

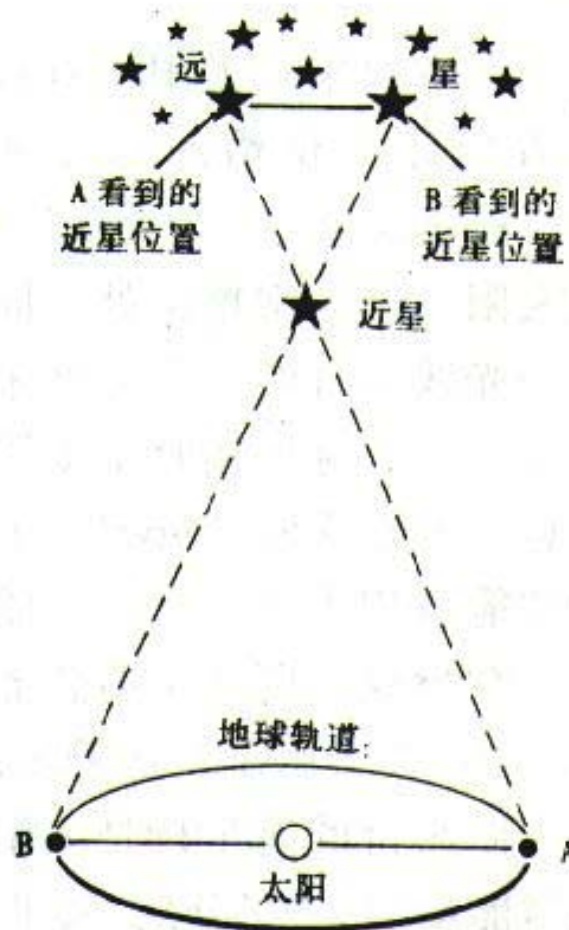
r

1 秒差距是周年视差为1" 的天体的距离。

1 秒差距 (pc) = 3.086×10^{18} 厘米 (cm) = 3.26

光年 (ly) = 206265 天文单位 (AU)

隔半年的两次
观测，观测同
一颗星，其视
位置会发生变
化



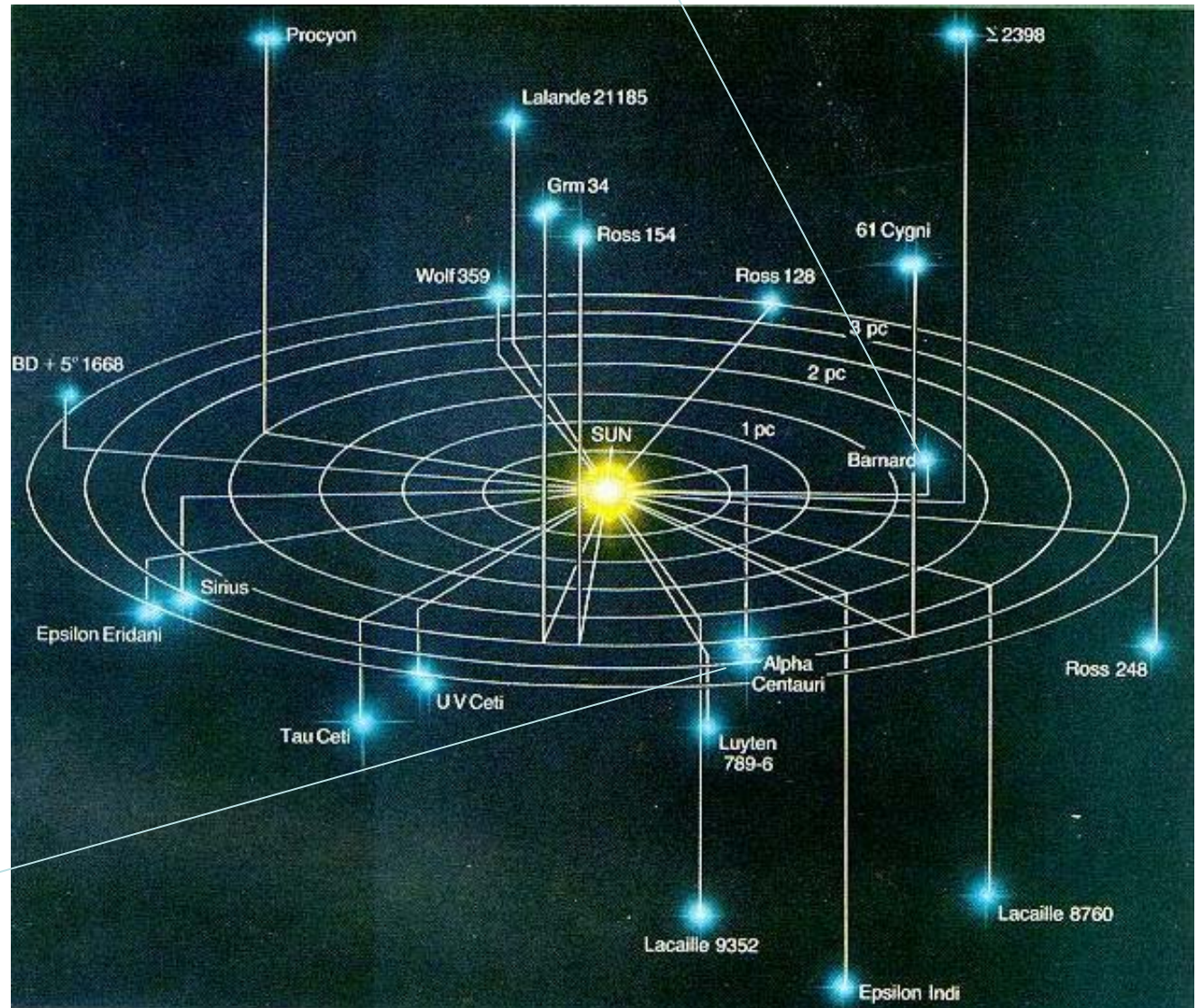
AB: 3亿公里

相对于远星来说，A、B 两位观测者看到的近星在远星背景上的位置是不同的

- 最近的恒星

Barnard星 $\rho = 0.55''$

$r = 1.8 \text{ pc (6.0 ly)}$



α Centauri Proxima

$\rho = 0.76''$

$r = 1.3 \text{ pc (4.3 ly)}$

北斗七星的距离（光年）

大熊 α 75	大熊 β 62
大熊 γ 75	大熊 δ 65
大熊 ε 62	大熊 ζ 59
大熊 η 108	

织女星的视差为 $0''.12$,
则距离 = 8.33 秒差距。

早期视差测量

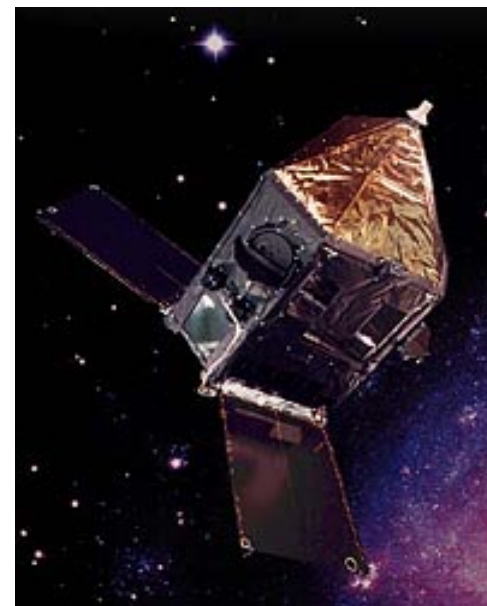
- 恒星距离非常遥远，视差极为微小
- 哥白尼在创立日心学说时，曾尝试测量恒星视差（未成功），以证明地球围绕太阳运转
- 哥白尼之后经过了三百来年的努力，1838年才测量出恒星的视差
如：天鹅座61的视差为 $0''.31$
（现代测量值为 $0''.29$ ，它相当于从12公里处看一个1分硬币所成的张角）

- 限制

- 由于受到地球大气扰动的影响，周年视差的精确测量受到限制。
- 地面望远镜的角分辨本领一般不超过 $0.01''$
- Hipparcos卫星（1989年8月发射）
的角分辨率达到 $0.001''$ ，
测量了约100万颗恒星的距离。

三角测距法只适用于近距离
($\leq 30\text{-}500\text{ pc}$) 的恒星。

恒星的周年视差都小于 $1''$



恒星不恒

- 恒星的相对位置几乎保持不变；
明亮程度也似乎不发生变化；
因而称它们为恒星
- 事实上，恒星有很高的运动速度：
有的可超过每秒一千公里
- 亮度也在发生变化：
各类变星，造父变星是特殊的一类

2. 恒星的大小和质量

□ 恒星的大小:

角直径非常小, 最大的不超过 $0''.05$

线直径范围:

大: 几百到一两千倍 D_{\odot}

小: 白矮星 $10^{-2} D_{\odot}$;

中子星直径只有 20公里

恒星大小的测定

□ 直接测量法

(仅对距离近、体积大的恒星适用)

□ 间接测量法

根据Stefan-Boltzmann定律，恒星的光度

$L = 4 \pi R^2 \sigma T^4$ ，通过测量恒星的光度 L 和表面温度 T 就可以得到它的半径 R

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)^{1/2} \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^{-2}$$

其中 $R_{\odot} = 6.959 \times 10^{10}$ cm, $T_{\odot} = 5770$ K。

$\sigma = 5.67032(71) \times 10^{-5}$ 尔格·厘米⁻²·度⁻⁴·秒⁻¹

结果：

根据恒星体积的大小可以
把它们分成以下几类：

超巨星 $R \sim 100-1000 R_{\odot}$

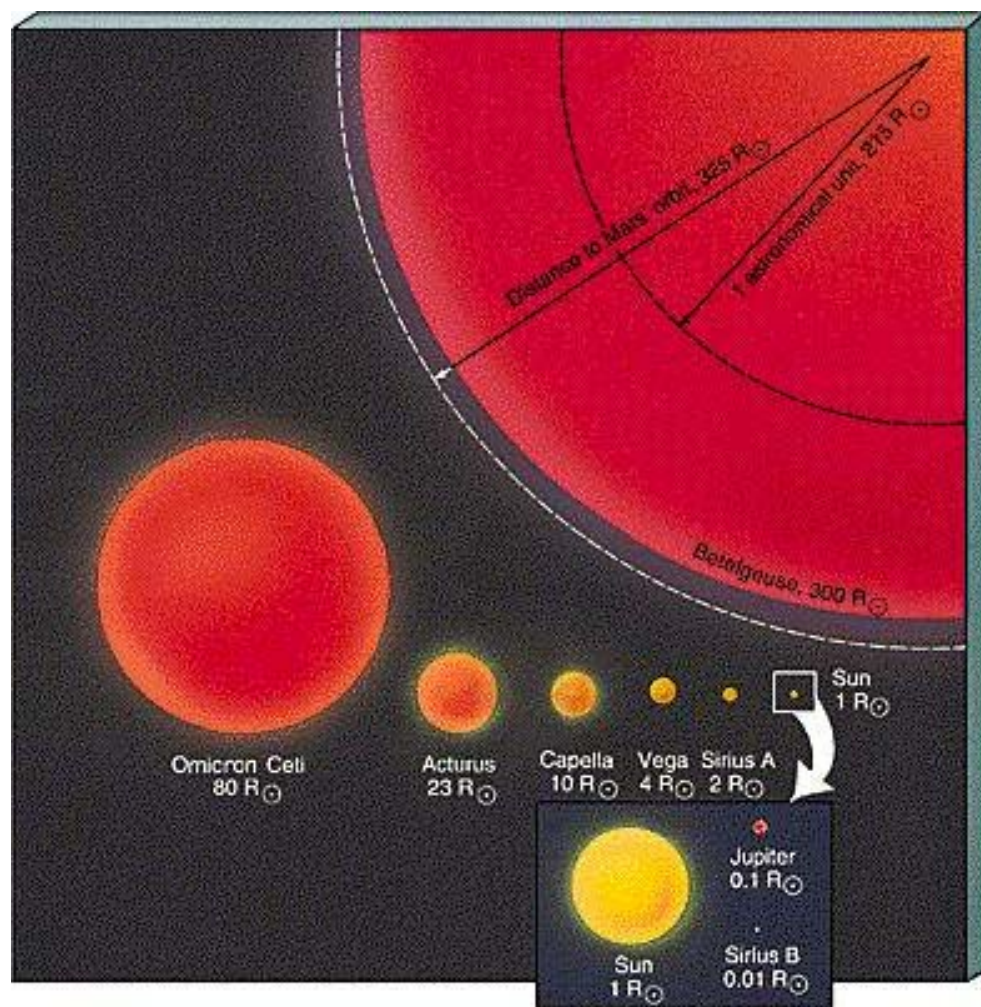
巨星 $R \sim 10-100 R_{\odot}$

矮星 $R \sim R_{\odot}$

恒星的大小分布为：

$10^{-5} R_{\odot}$ (中子星)

$10^3 R_{\odot}$ (超巨星)



- 恒星的质量:

范围（理论）： $65M_{\odot}?$ — $0.08M_{\odot}$

观测验证很好

直接测：太阳和部分双星

3. 恒星的亮度，视星等

- 亮度 (brightness): 在地球上单位时间单位面积接收到的天体的辐射能。

视亮度的大小取决于三个因素:

天体的光度

距离

星际物质对辐射的吸收和散射

- 视星等:

古希腊天文学家希帕恰斯（Hipparchos）在公元前150年左右首先创立表征恒星亮度的系统:

按明暗程度分成6个等级（1等星-6等星）。

- 星等值越大，视亮度越低。

肉眼能见到的约有6000颗恒星。

- 星等值越大，视亮度越低



视星等的科学性:

1850年, 普森发现星等和亮度有一定的关系:
星等按等差级数增加, 亮度按等比级数减小

1等星比6等星亮100倍;

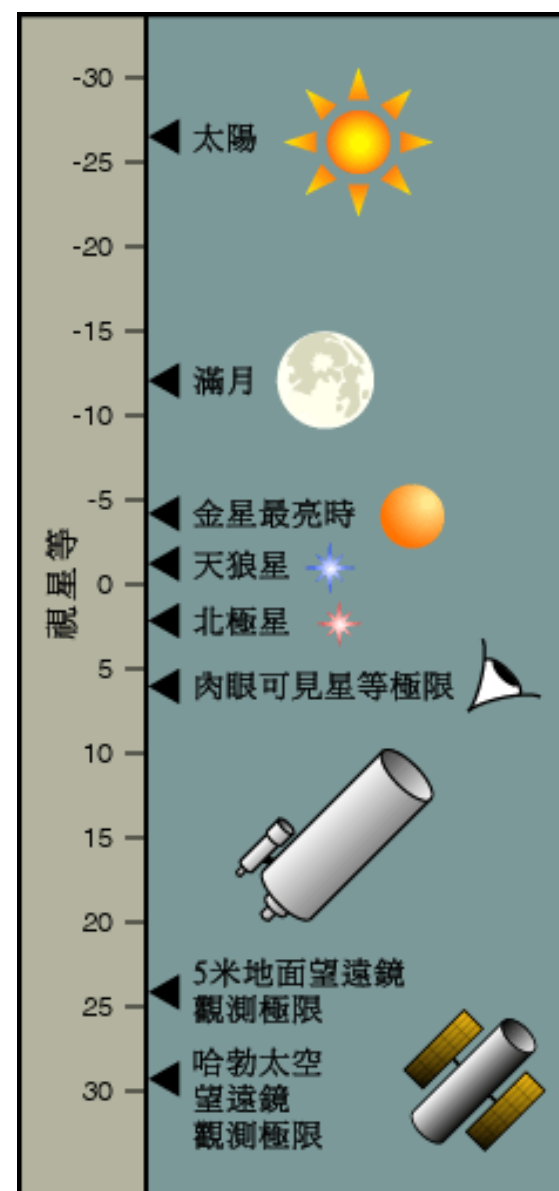
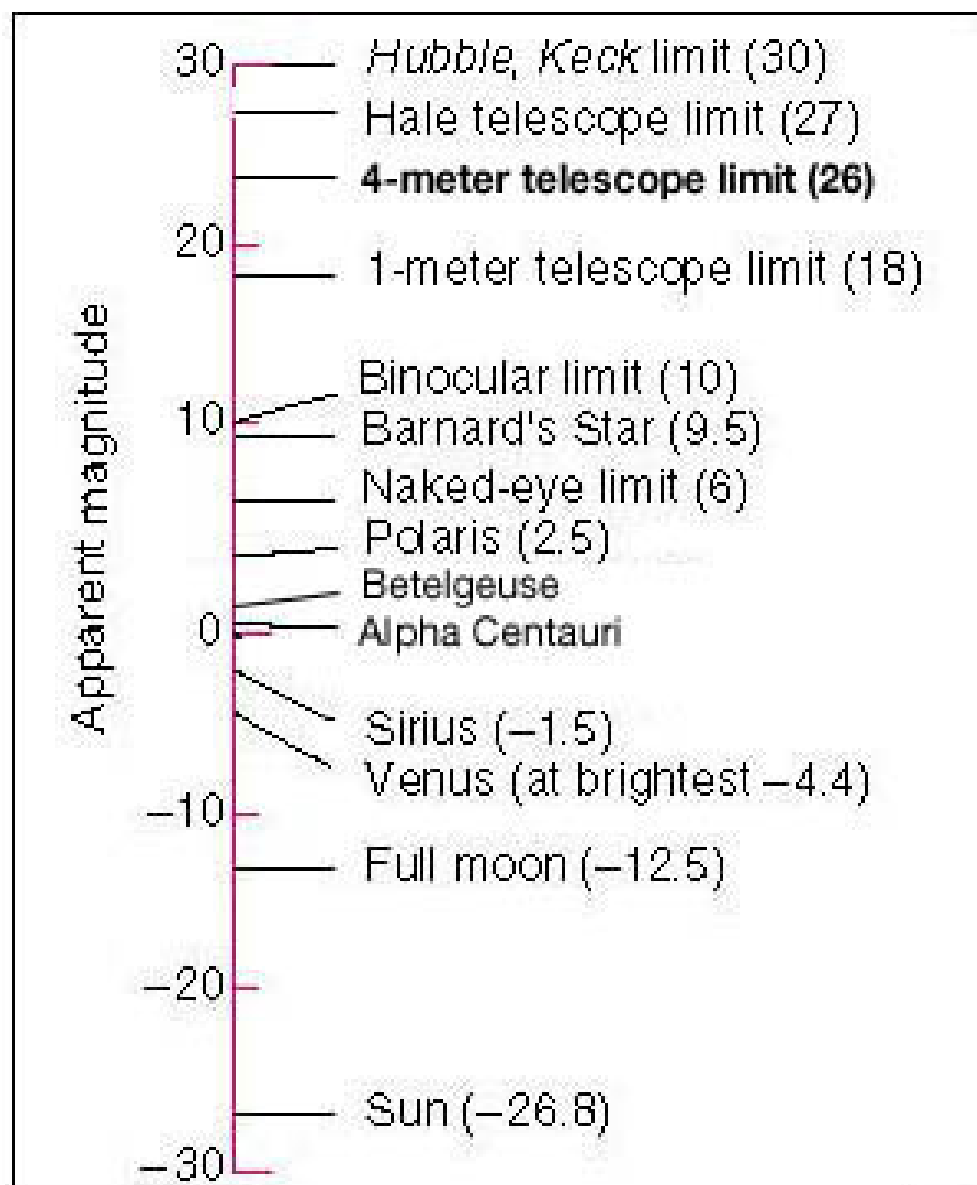
相邻2个星等的亮度差2.512倍: $(100)^{1/5}=2.512$

- 星等分别为 m_1 和 m_2 的恒星亮度 E_1 和 E_2 之比为:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{E_1}{E_2} \longrightarrow m = -2.5 \log E \quad \text{普森公式}$$

视星等越大恒星越暗

部分天体的视星等



视星等的种类:

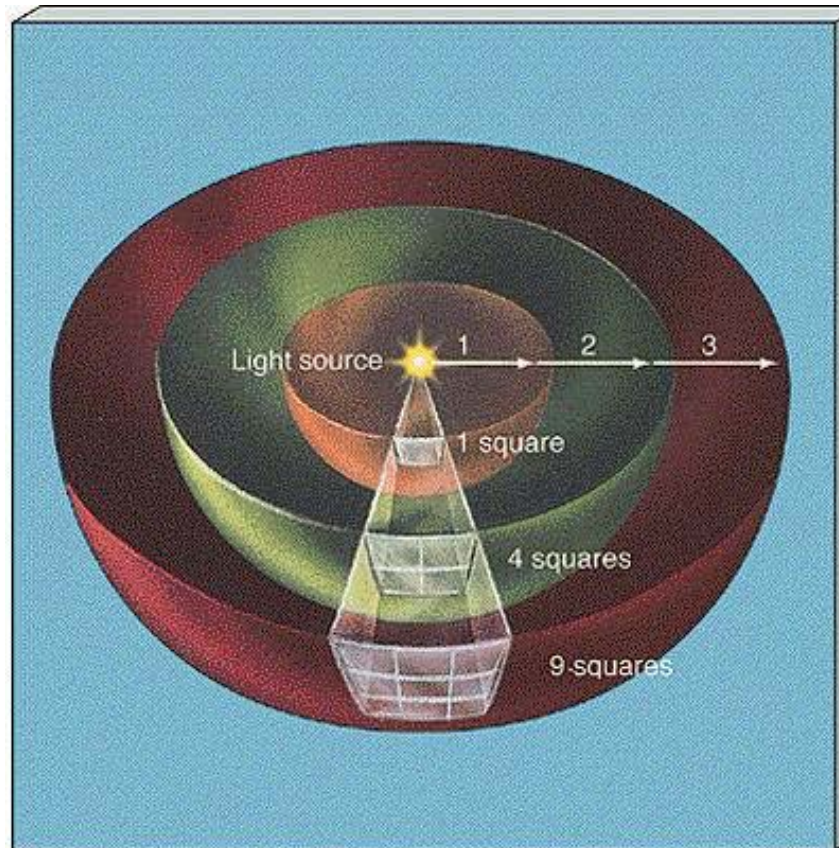
- 视星等的测量通常是在某一波段范围内进行的。
- 根据测量波段的不同，视星等可以分为
 - 目视星等(m_v)
 - 照相星等(m_p)
 - 光电星等
 - 仿视星等(m_{pv})
 - 等等

4. 恒星的绝对星等和光度

- 视星等不是恒星真实发光能力，
视星等表征观测者接收到的能量。
- 光度 L (luminosity): 天体在单位时间内辐射的总能量，是恒星的固有量。
- 绝对星等: 天体位于 10 pc 距离处的视星等，它实际上反映了天体的光度。

绝对星等表征恒星辐射能力。

- 平方反比定律:
单位面积接收到的辐射强度 E 与光源距离 r 的平方成反比: $E \propto r^{-2}$



- 对同一颗恒星:

$$\frac{E_{10}}{E_r} = \left(\frac{10}{r} \right)^{-2}$$

$$M - m = -2.5 \log \left(\frac{E_{10}}{E_r} \right) = 5 - 5 \log r (pc)$$

$$M = m + 5 - 5 \log r (pc)$$

或: $M = m + 5 + 5 \log \pi''$

对不同的恒星:

$$M_1 - M_2 = -2.5 \log \left(\frac{L_1}{L_2} \right)$$
$$M - M_{\odot} = -2.5 \log \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)$$

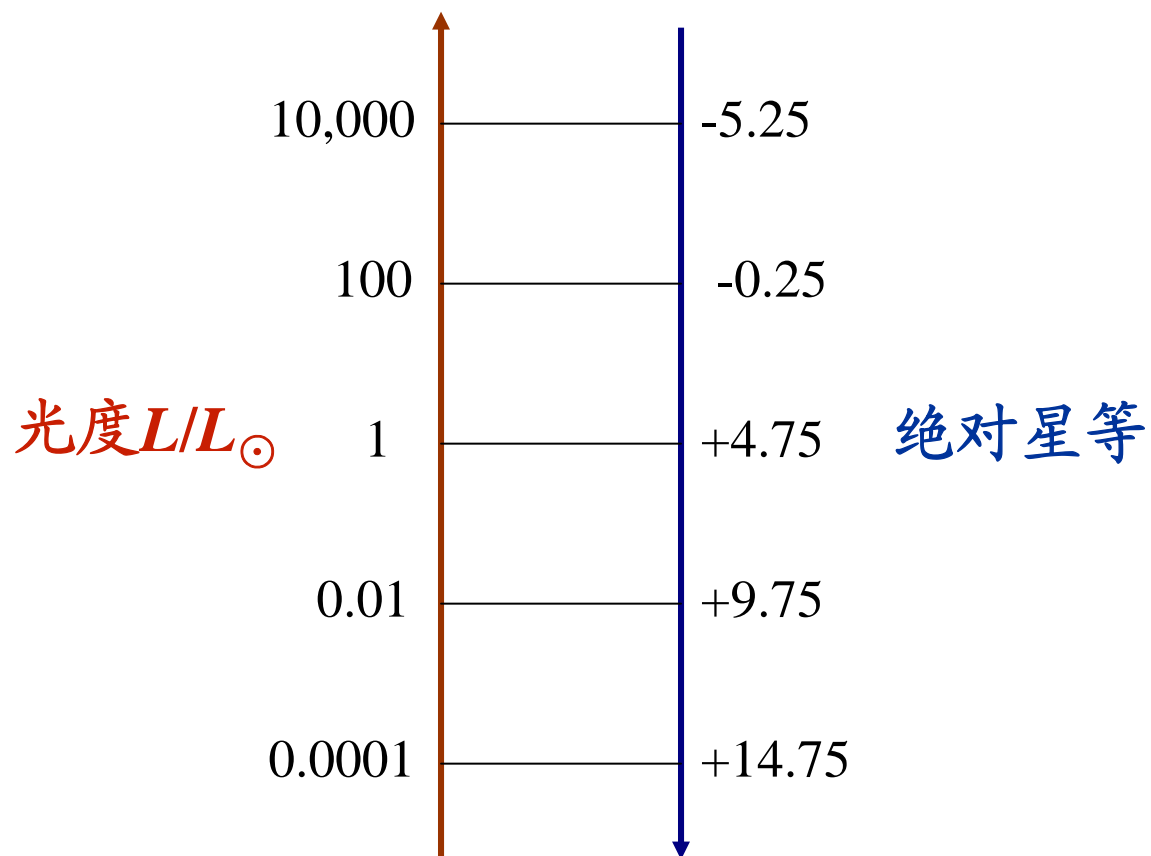
其中 $L_{\odot} = 3.86 \times 10^{33} \text{ ergs}^{-1}$, $M_{\odot} = 4.75^m$

恒星之间的光度差别非常大:

光度最大的恒星比太阳约强 10^6 倍;

光度最小的恒星只有太阳的 10^{-6}

光度与绝对星等之间的关系



§ 4.2 恒星的光谱和赫罗图

1. 氢原子光谱及其线系
2. 恒星观测光谱的分析
3. 黑体辐射和维恩位移定律
4. 多色测光系统和色指数
5. 恒星的光谱分类
6. 赫罗图

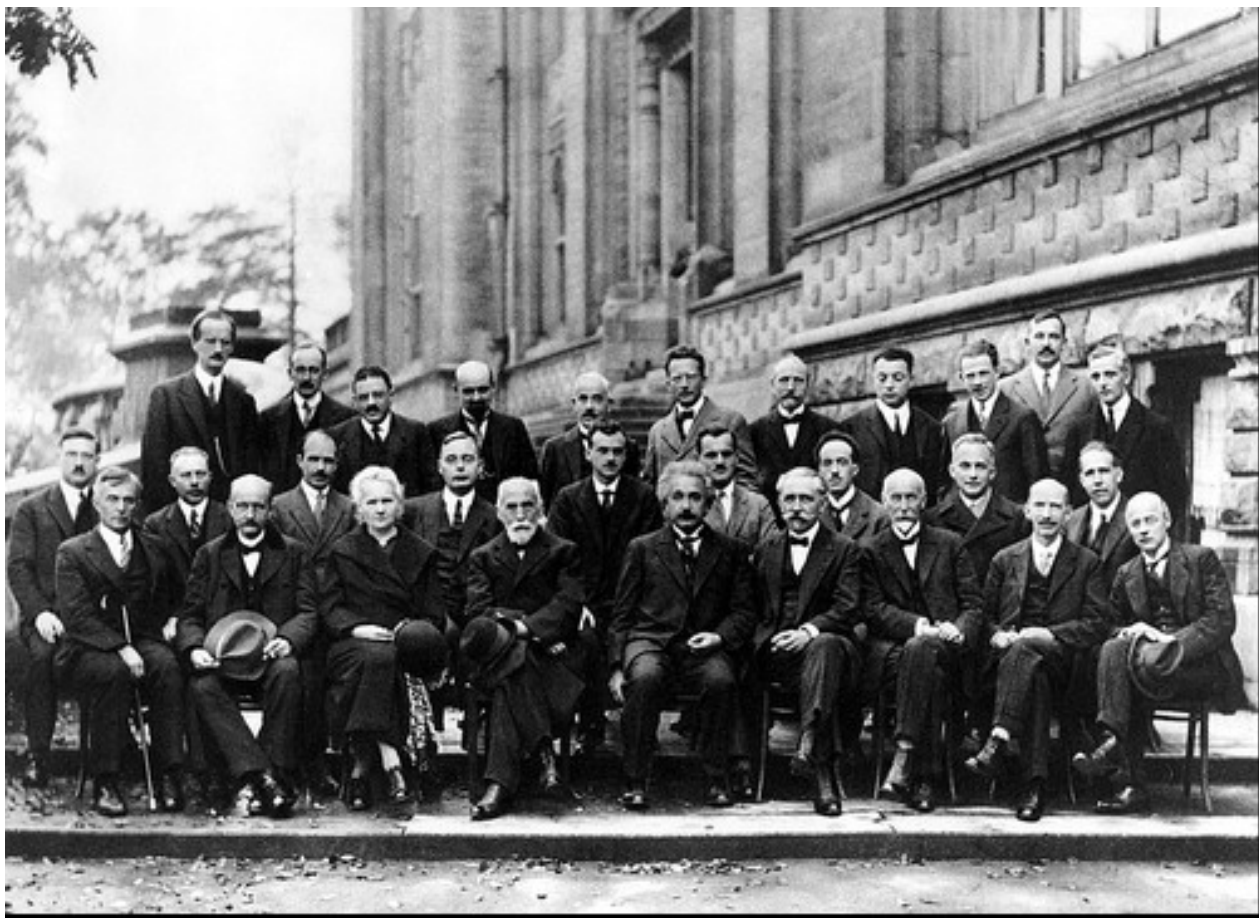
1. 氢原子光谱及其线系

1) 原子的结构和能级:

- 汤姆逊：发现电子
- 卢瑟福：经典原子结构模型（1911年）
- 玻尔：原子结构理论（1913年），“波粒二象性”。

氢原子

- 近代量子力学原子结构模型

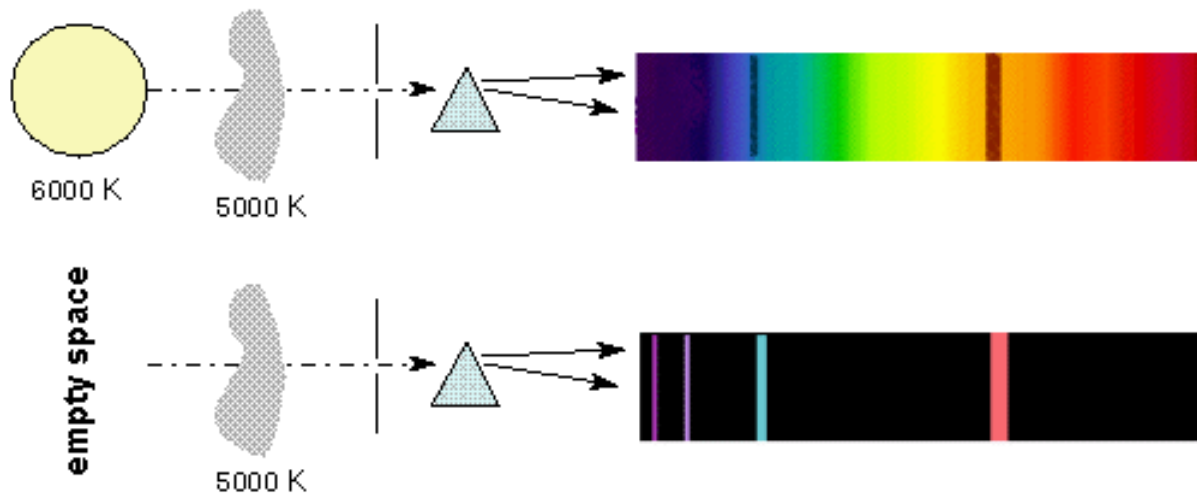
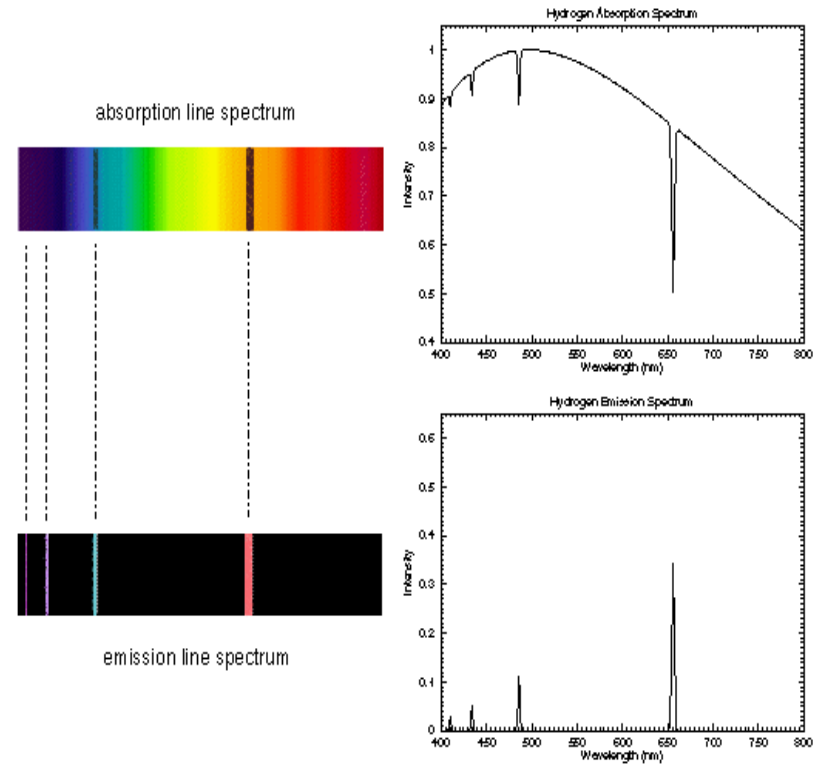


“有史以来最聪明的照片”，1927年10月第五次索尔维会议与会者的合影。从左至右分别是：（第三排）皮卡尔德、亨里奥特、埃伦费斯特、赫尔岑、顿德尔、薛定谔、维夏菲尔特、泡利、海森堡、福勒、布里渊；（第二排）德拜、努森、布拉格、克雷默、狄拉克、康普顿、德布罗意、玻恩、玻尔；（第一排）朗缪尔、普朗克、居里夫人、洛伦兹、爱因斯坦、朗之万、古耶、威尔逊、理查森

电磁波谱

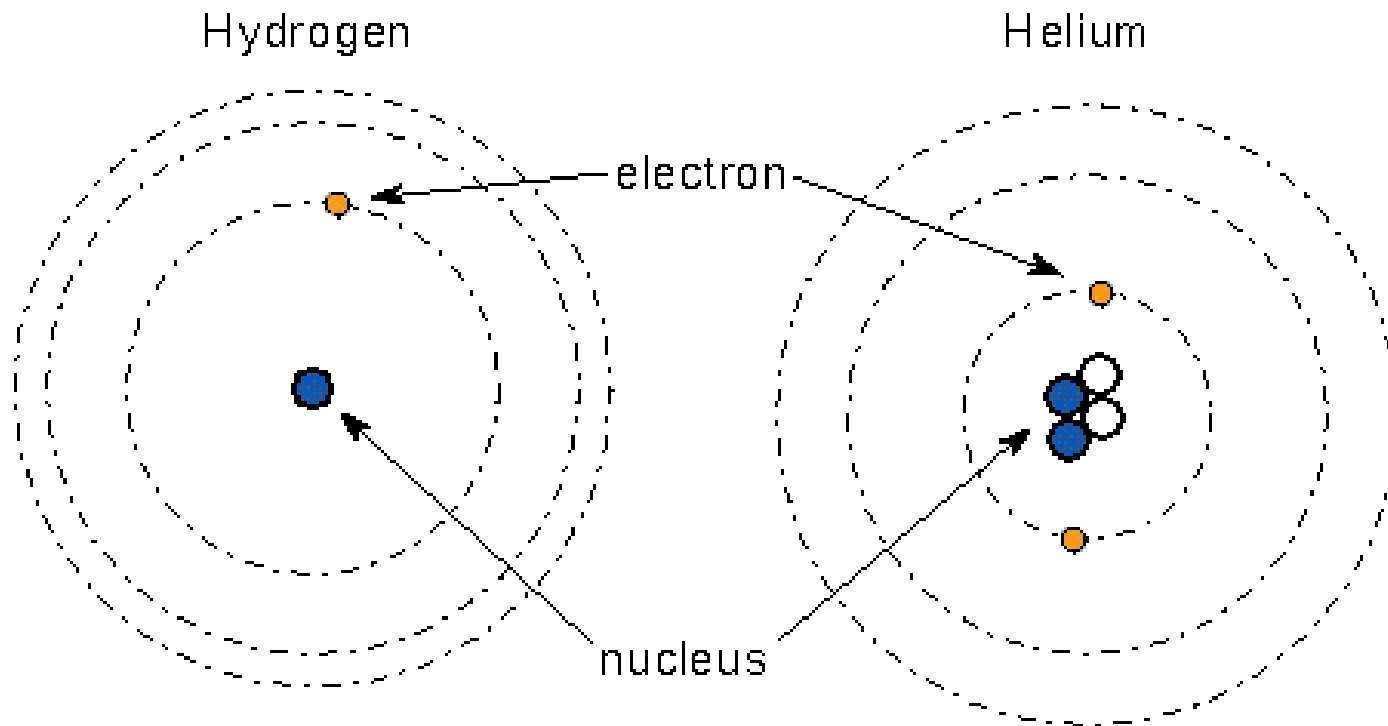
Kirchoff定律

热的、致密的固体、液体和气体产生**连续谱**；
热的、稀薄的气体产生**发射线**；
连续辐射通过冷的、稀薄的气体后产生**吸收线**。

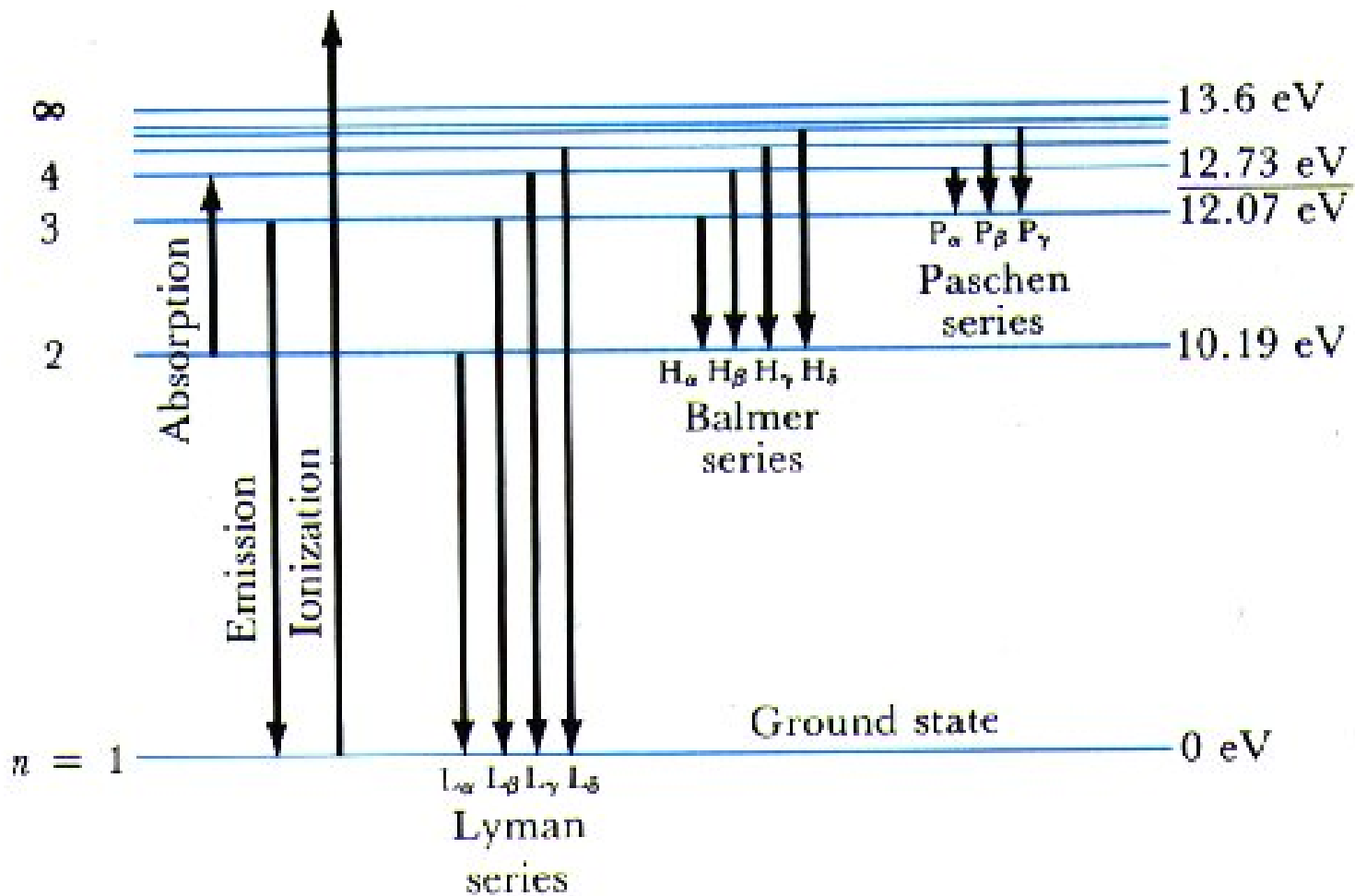


- 原子结构和谱线的形成

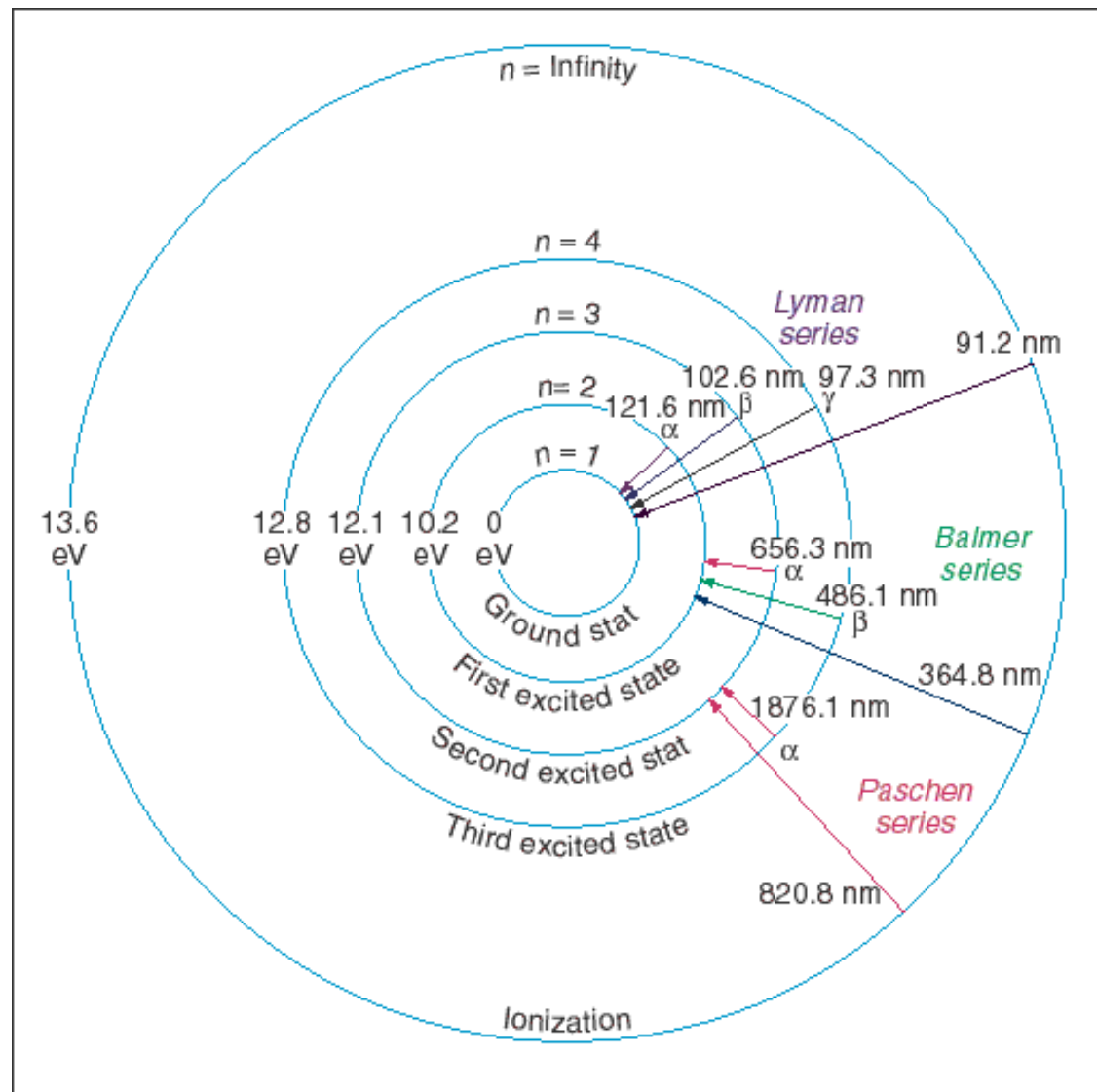
- 原子结构：原子核 + 围绕原子核旋转的电子（云）。
- （量子化的）电子轨道的大小反映了原子能态的高低。

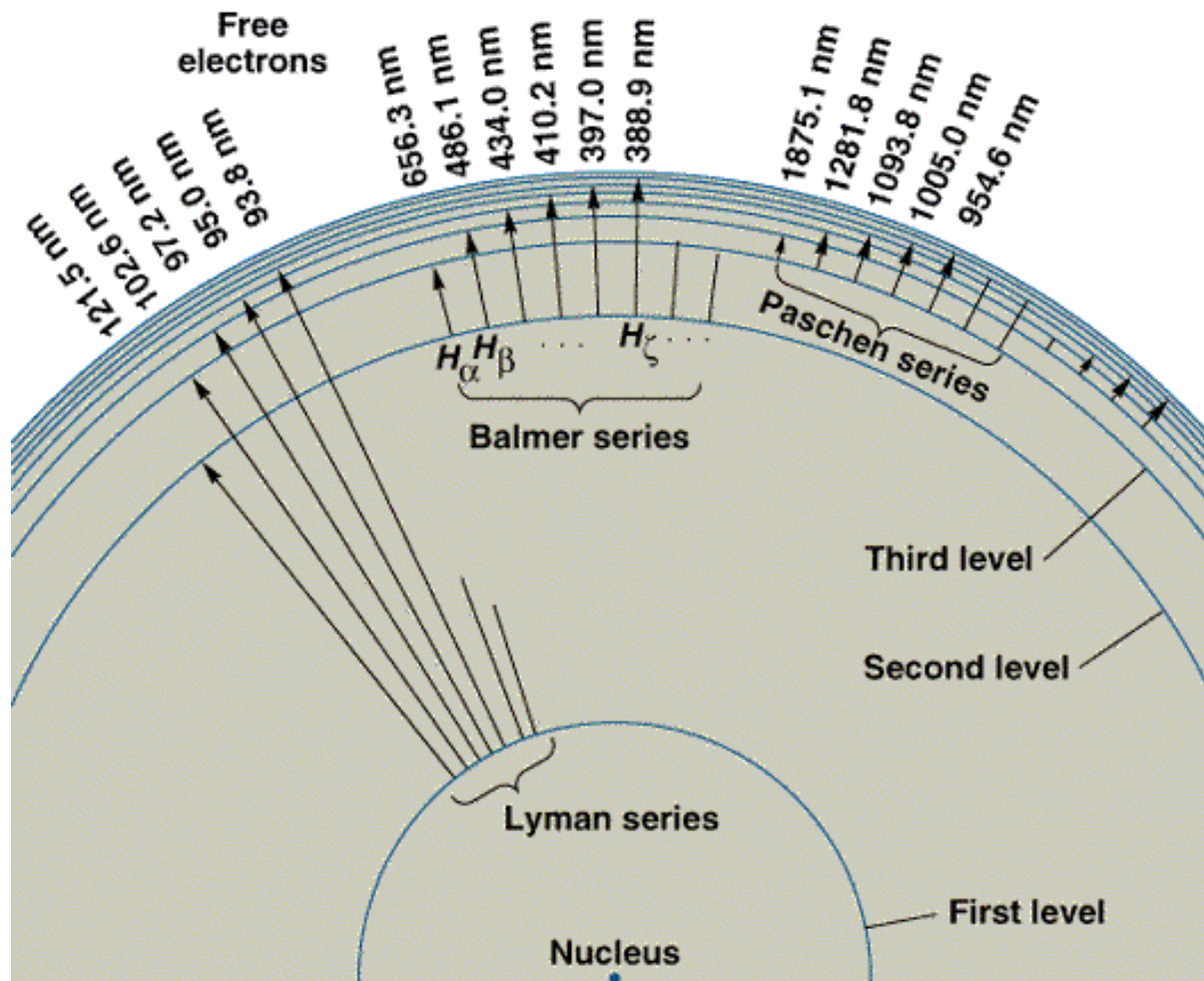


能级和谱线，发射线、吸收线和电离

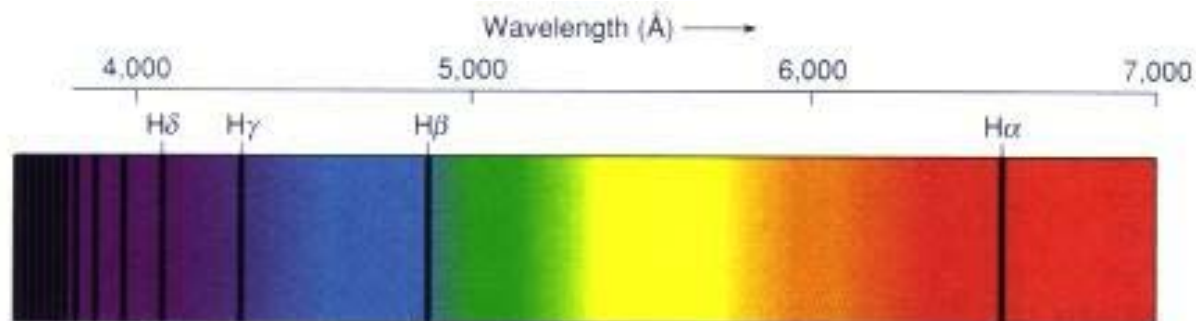


- 氢原子光谱

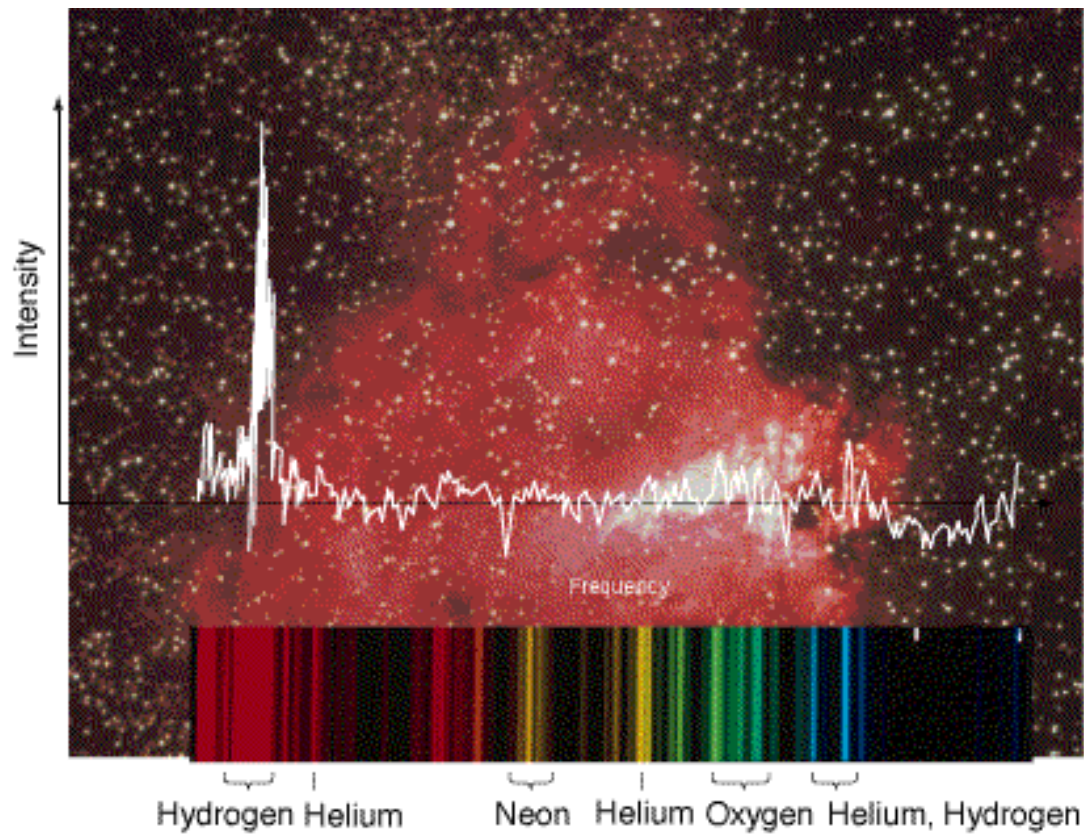




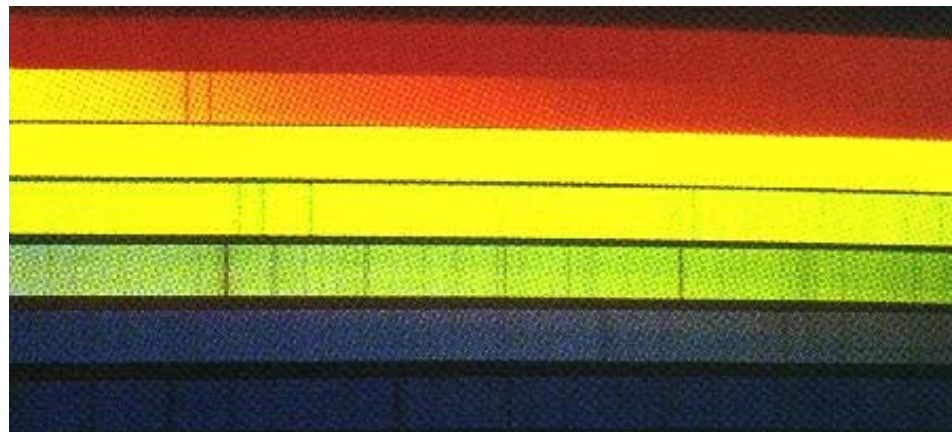
© 1997 Wadsworth Publishing Company/ITP

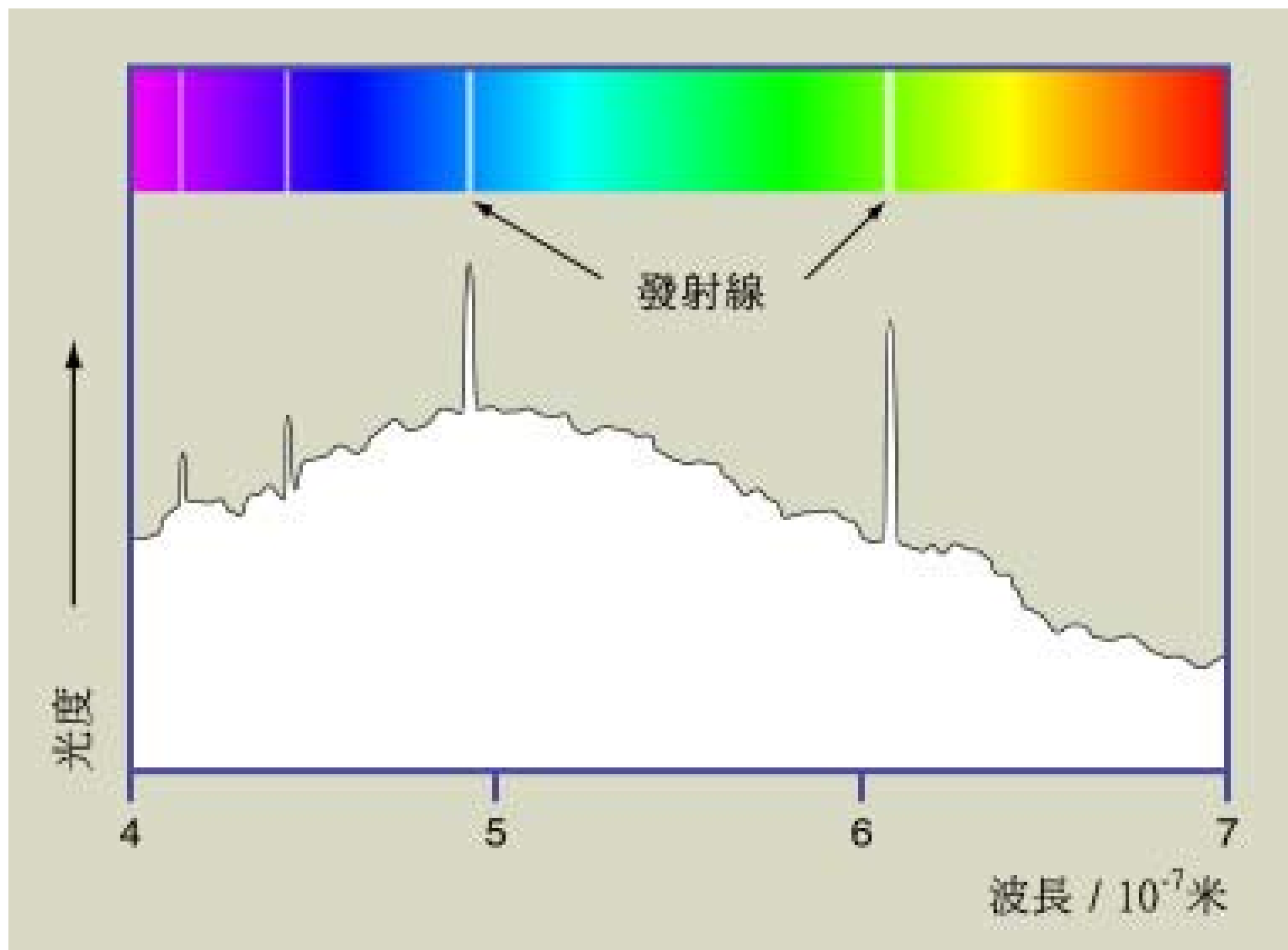


恒星形成区M17中的热气体辐射谱

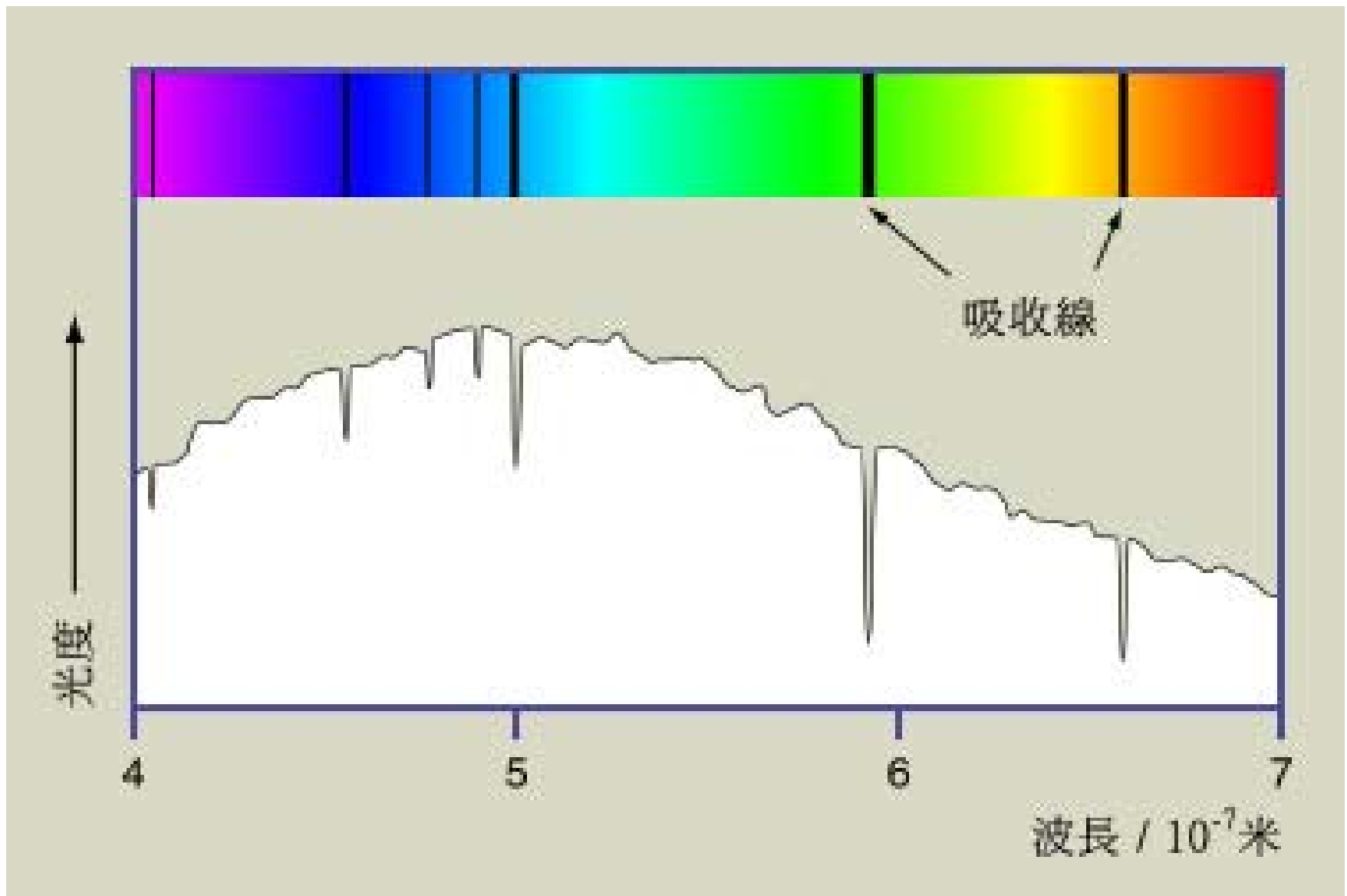


太阳光谱



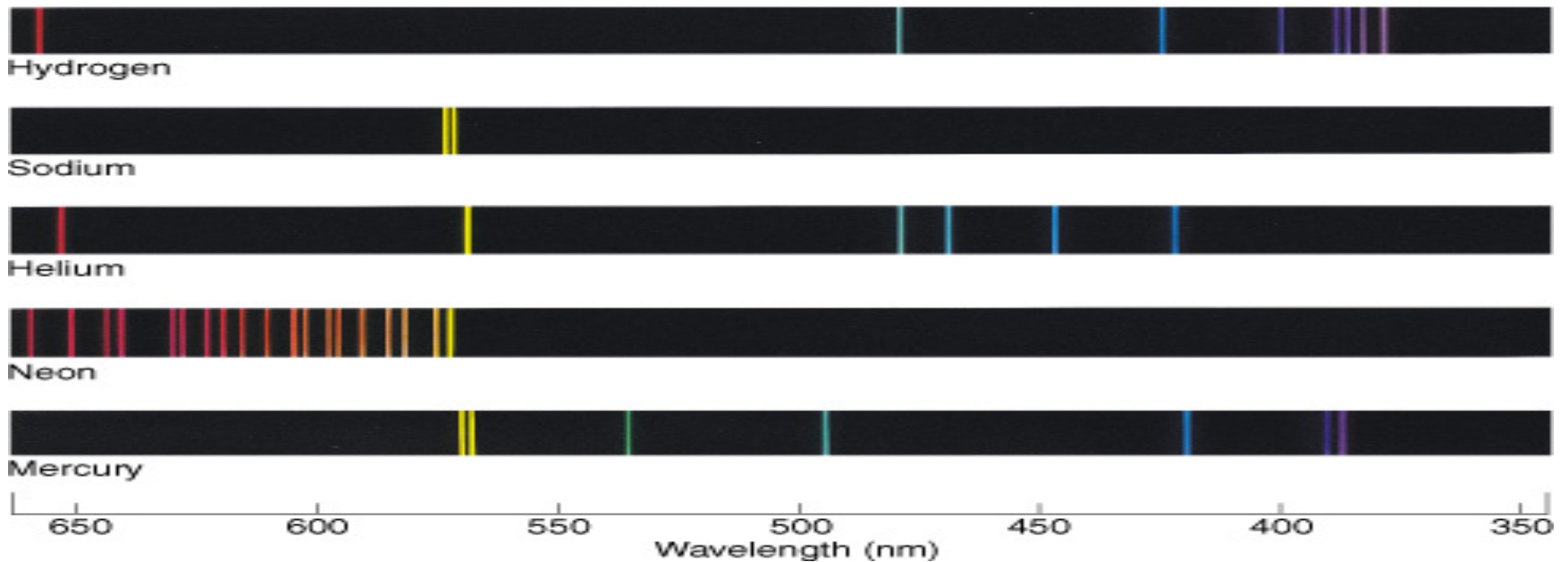


连续光谱和发射线



连续光谱和吸收线

不同元素的原子具有不同的结构，因而有不同的特征谱线。



2. 恒星观测光谱的分析

→ 确定恒星的化学组成和物理性质

□ 难点：不同的光谱的复杂变化

→ 恒星的化学组成和不同的物理量。

→ 温度、大小、质量、密度、视向速度、距离、恒星的自转、磁场以及组成恒星的化学元素等。

光谱分析在天体物理中占据着非常重要的地位

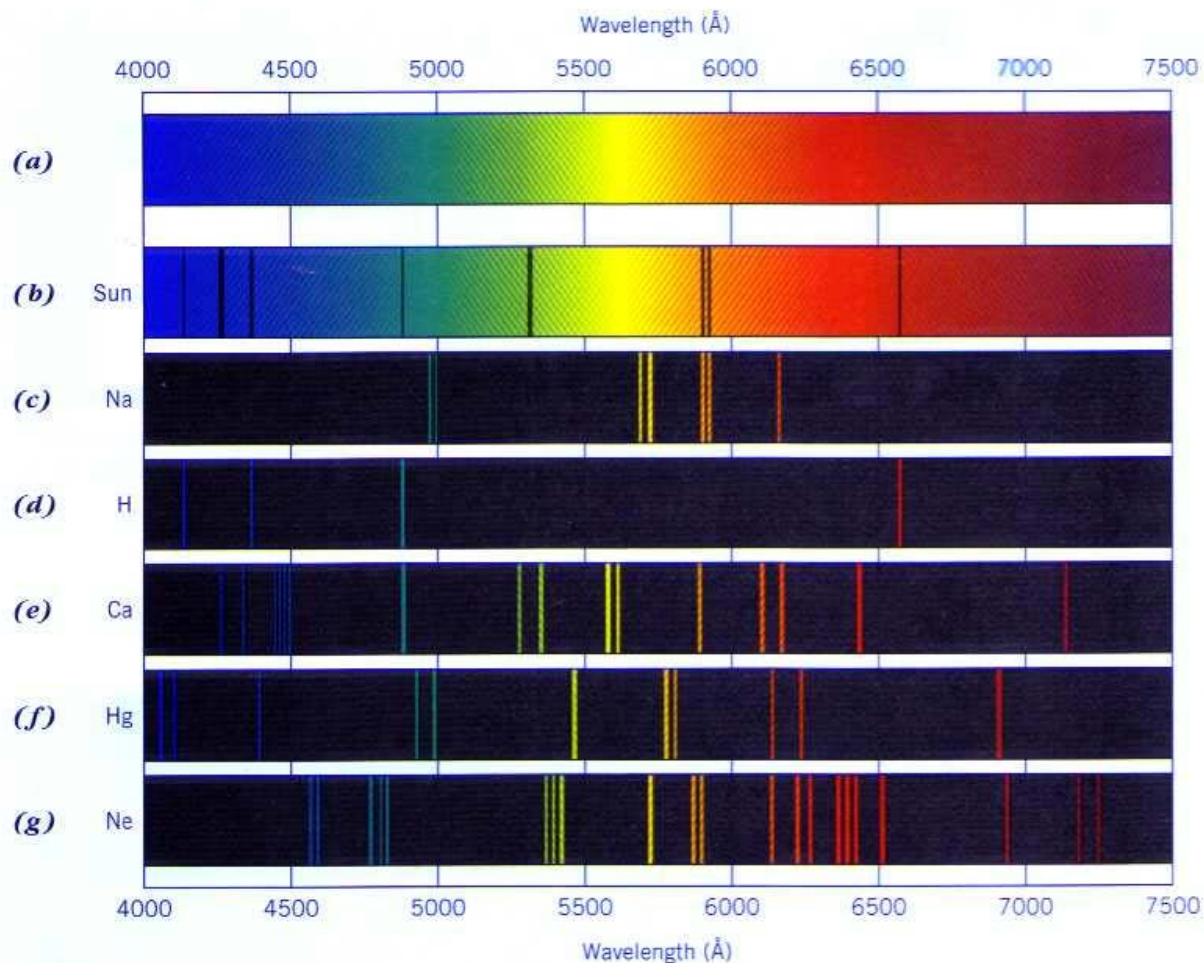
1) 确定恒星的化学组成

定性分析和定量分析

(1) 定性分析: 确认恒星大气中的化学元素, 谱线的证认, 即测定谱线的波长。

- 谱线与恒星的化学成分

不同元素的原子具有不同的结构，因而有不同的特征谱线。

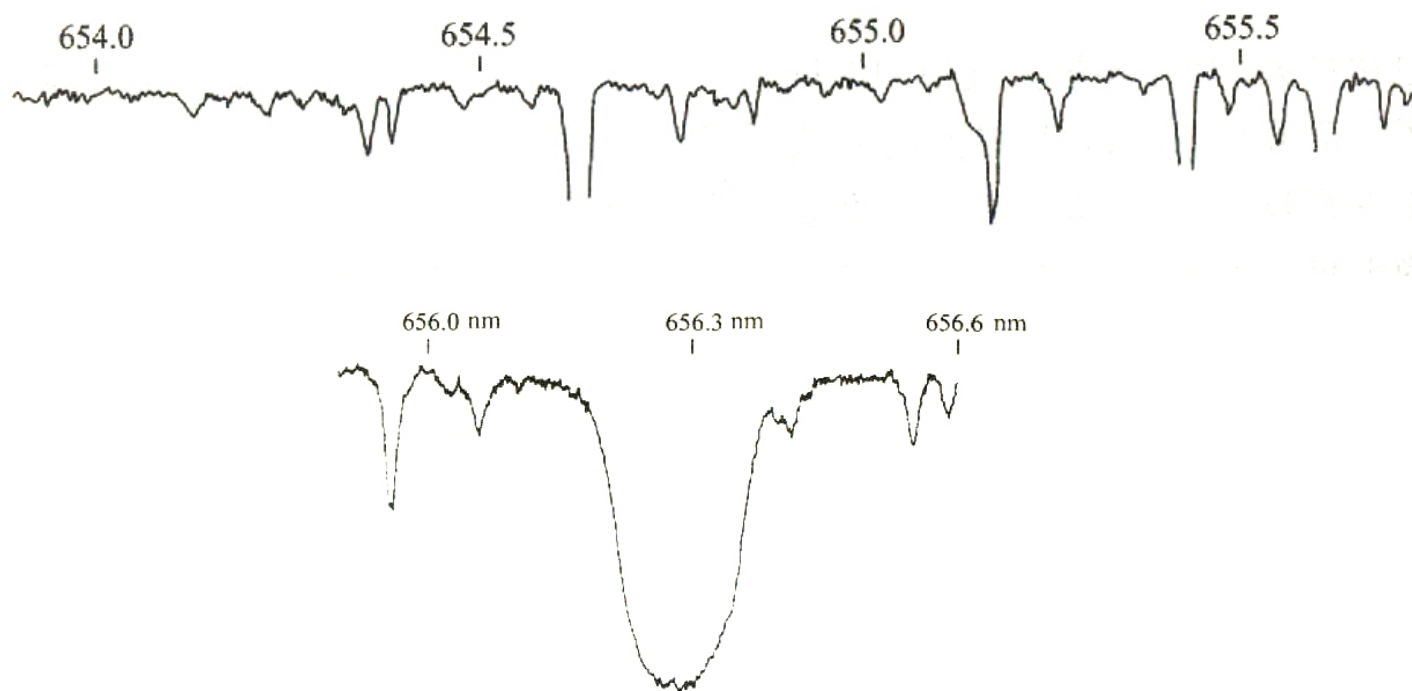


结果:

- 证认出元素周期表中90%左右的天然元素,
- 一些恒星谱线至今未证认出来。

(2) 定量分析：恒星上的化学元素丰度

谱线轮廓：改正了仪器的影响后的谱线的真实形状。



□ 测量结果

化学元素丰度：通常指在同一体积内某种元素的原子数目与氢原子数目之比。

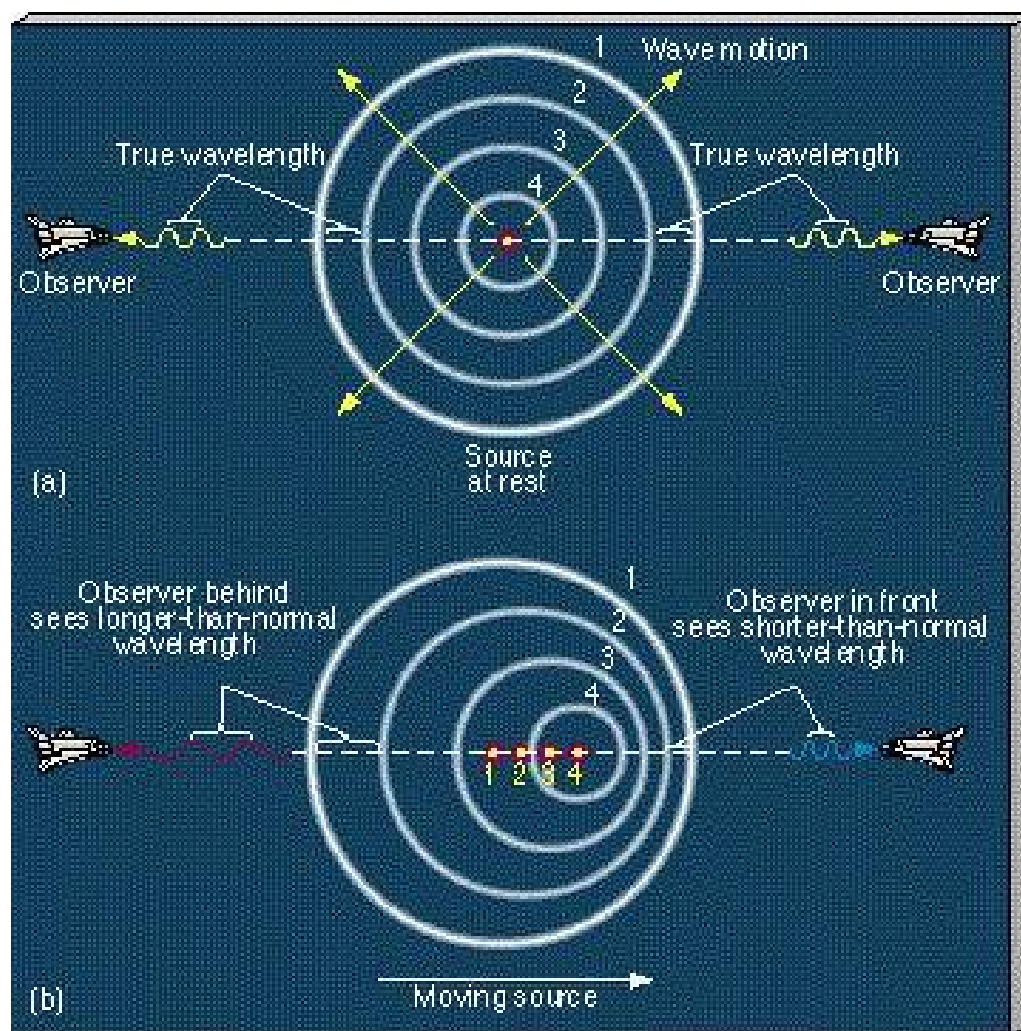
重元素（金属元素）：天文学上习惯把氢和氦以外的所有元素通称为重元素。

太阳的化学组成

元素	质量丰度
Hydrogen	73.5%
Helium	24.8%
Oxygen	0.788%
Carbon	0.326%
Nitrogen	0.118%
Iron	0.162%
Silicon	0.09%
Magnesium	0.06%
Neon	0.16%

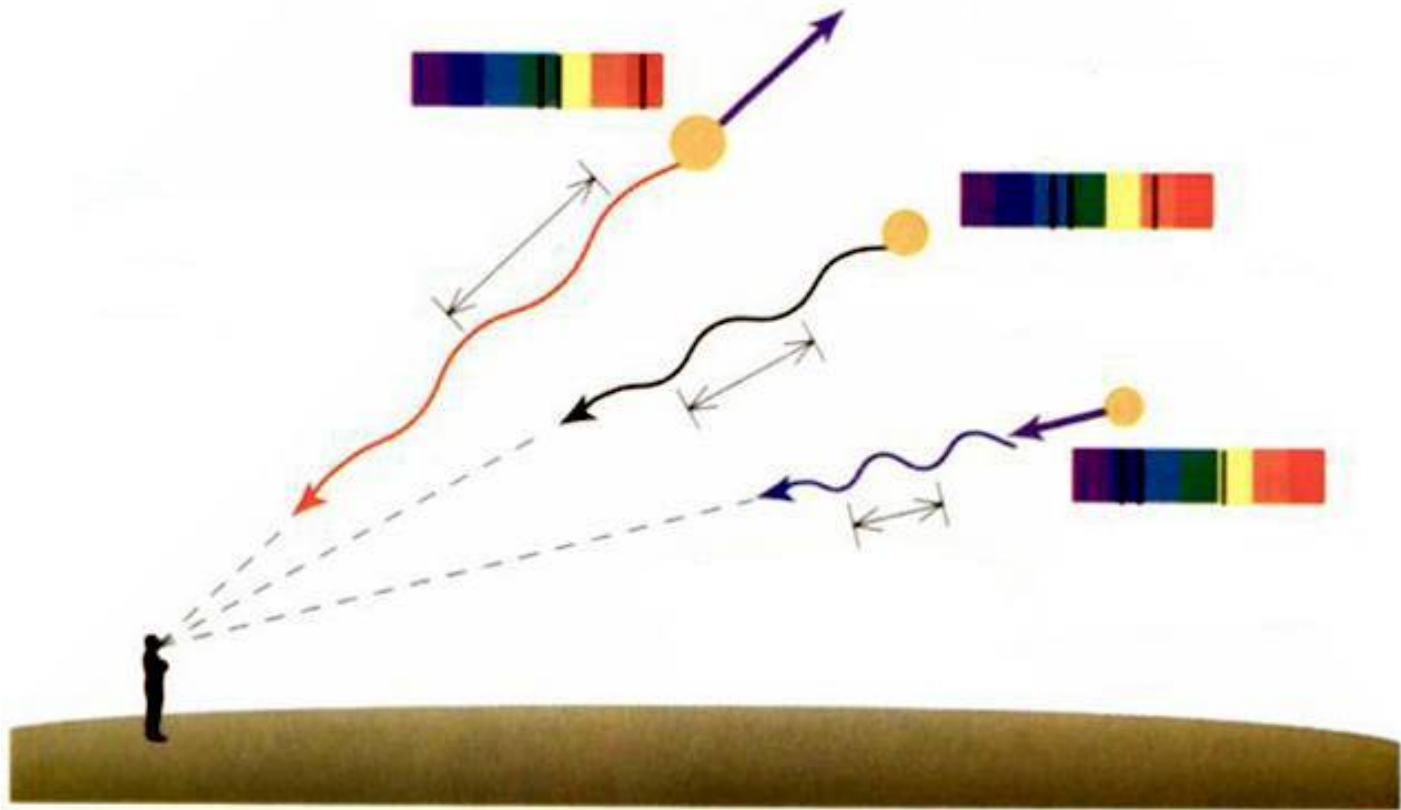
2) 确定天体的视向速度 V_r

□ 多普勒效应



谱线测红移

视向速度会改变光谱中谱线的位置



-
- 恒星**远离**我们：谱线都向波长长的方向移动，即谱线**向红端位移**。
 - 恒星**接近**我们：谱线都向波长短的方向移动，即谱线**向紫端或蓝端位移**；

谱线位移

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \equiv z$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V_r}{c} = z$$

λ_0 : 静止时的原波长, c : 光速,
 $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ 。

远离: $\Delta\lambda > 0$, V_r 取正, 红移,
 $z > 0$ 为红移量;

接近: $\Delta\lambda < 0$, V_r 取负, 紫移,
 $z < 0$ 为紫 (蓝) 移量。

对于 z 值大的情况，根据狭义相对论， z 与 v_r 的关系要用洛伦兹公式：

$$\frac{v_r}{c} = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$$

- 恒星光谱线大多有系统的位移，
通过谱线测定，可求出 $\Delta \lambda$ 值，
从而计算出恒星的视向速度的大小和方向。

河外星系：只有红移而没有紫移，远离而去，
距离越远，红移越大，速度越大，
著名的哈勃定律，

宇宙学研究中非常重要的定律，
宇宙大爆炸理论的有利证据之一。

3. 黑体辐射和维恩位移定律

1) 黑体辐射 (blackbody radiation)

□ (绝对) 黑体 (blackbody)

能吸收所有的外来辐射 (无反射) 并全部再辐射的理想天体。

黑体辐射 (blackbody radiation):
具有特定温度的黑体的热辐射。

- 热辐射: 当吸收与发射的能量达到动态平衡时, 黑体就处于热动平衡温度, 它的辐射只跟温度有关。
- 大部分正常恒星的辐射可以近似地用黑体辐射来表示。

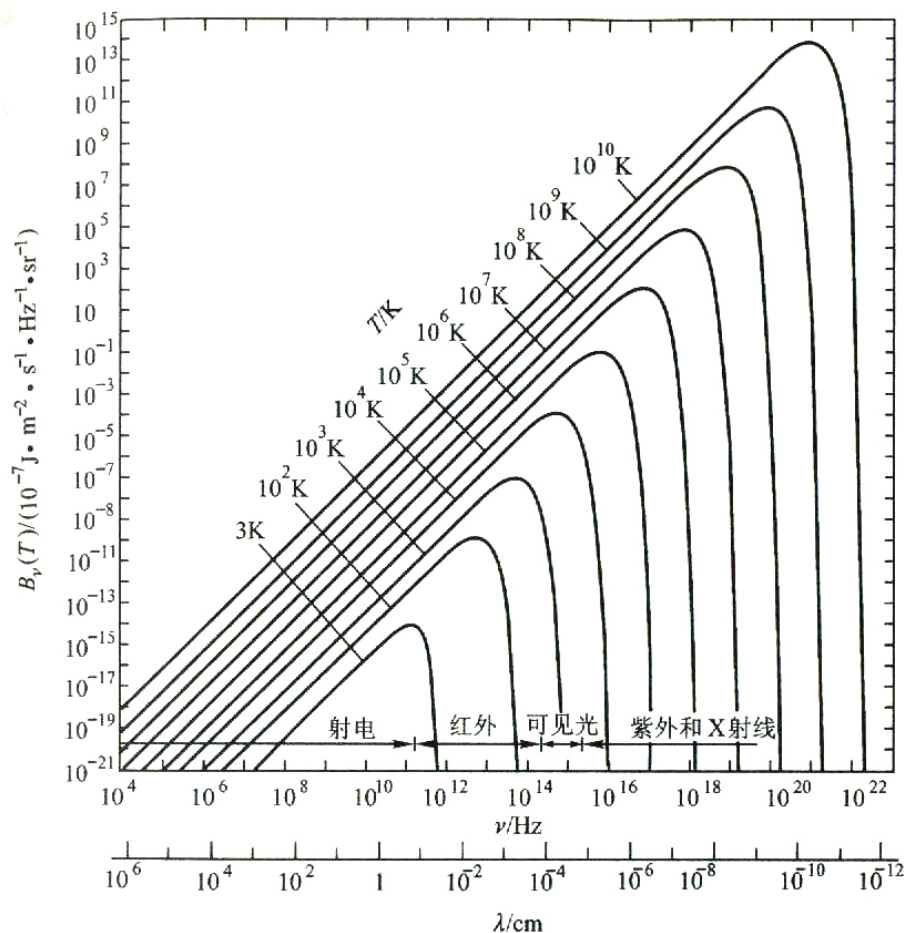
• 普朗克 (Planck) 定律

温度为 T 的黑体在单位面积、单位时间、单位频率内、向单位立体角发射的能量为：

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1}$$

一些温度黑体的辐射谱



2) 维恩位移定律 (Wien定律)

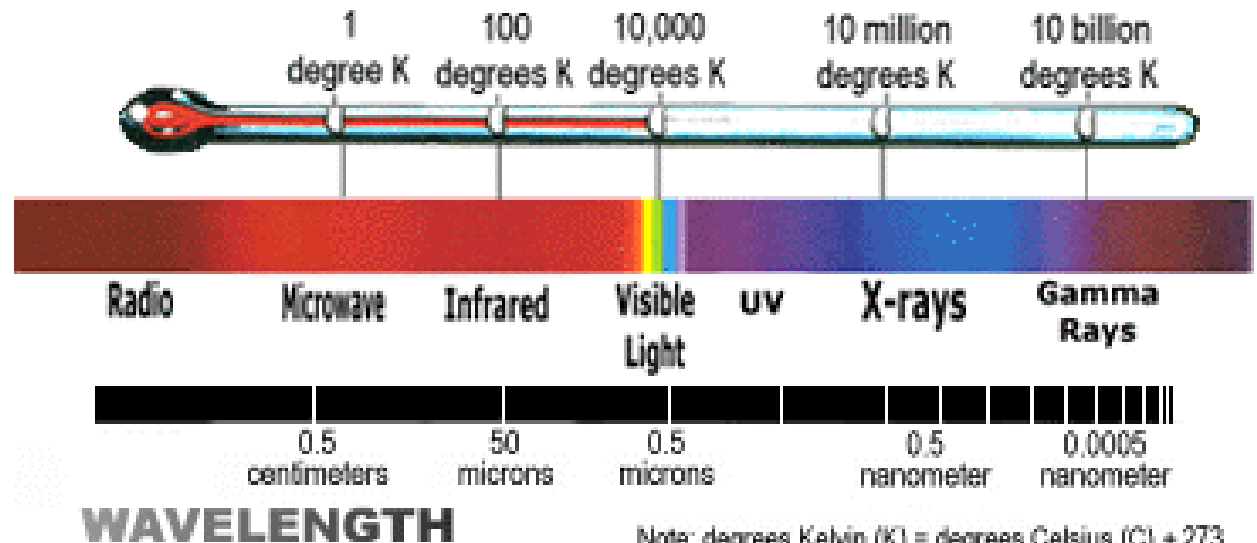
黑体辐射最强处的波长 λ_{max} 与温度之间的关系为:

$$\lambda_{max} T = 0.290 \text{ cm} \cdot \text{K}$$

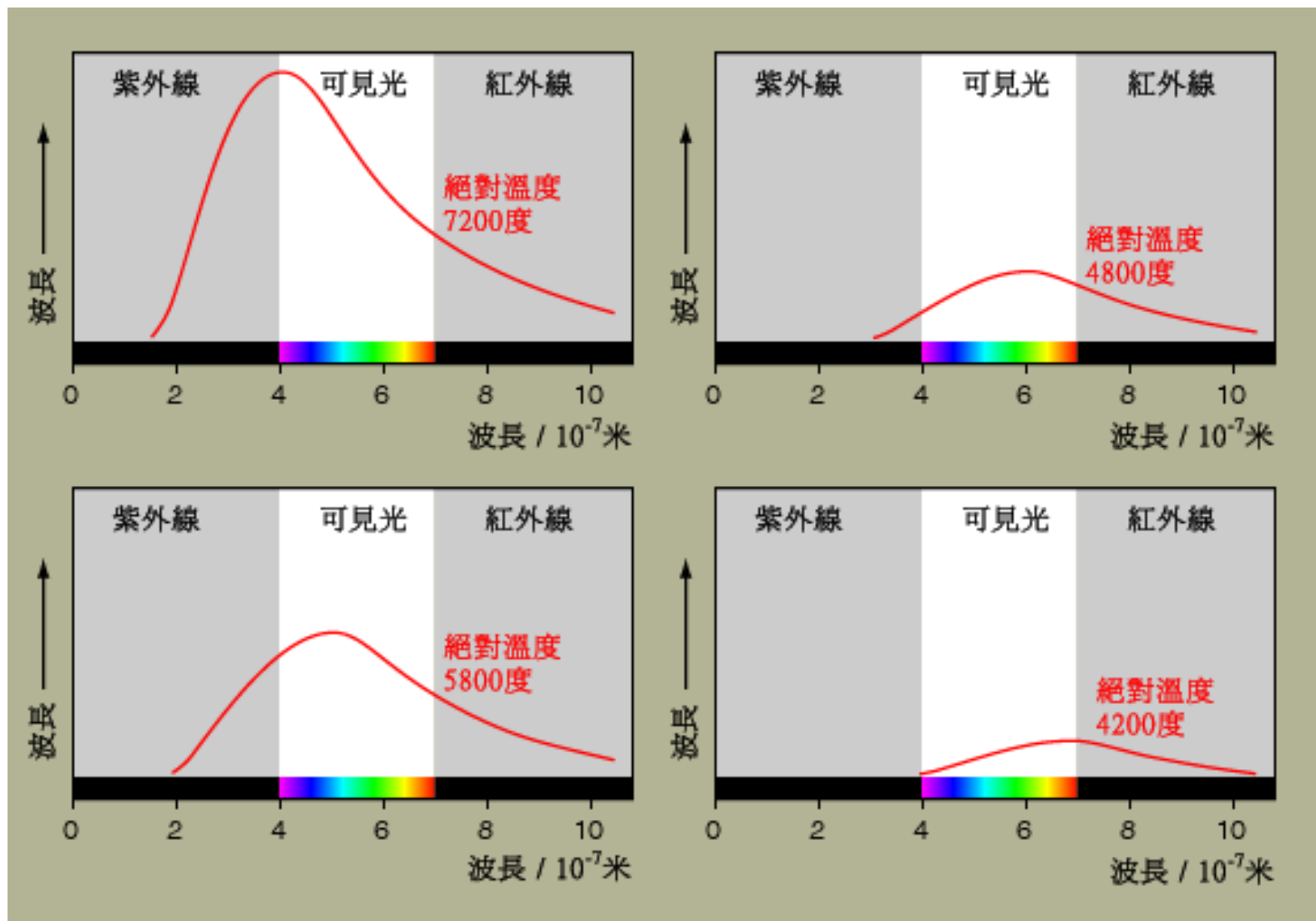
- ①随着温度的升高, 所有的波长都发出更多的辐射;
- ②黑体辐射的峰值对应的波长向短波方向移动。

高温黑体主要辐射短波

低温黑体主要辐射长波

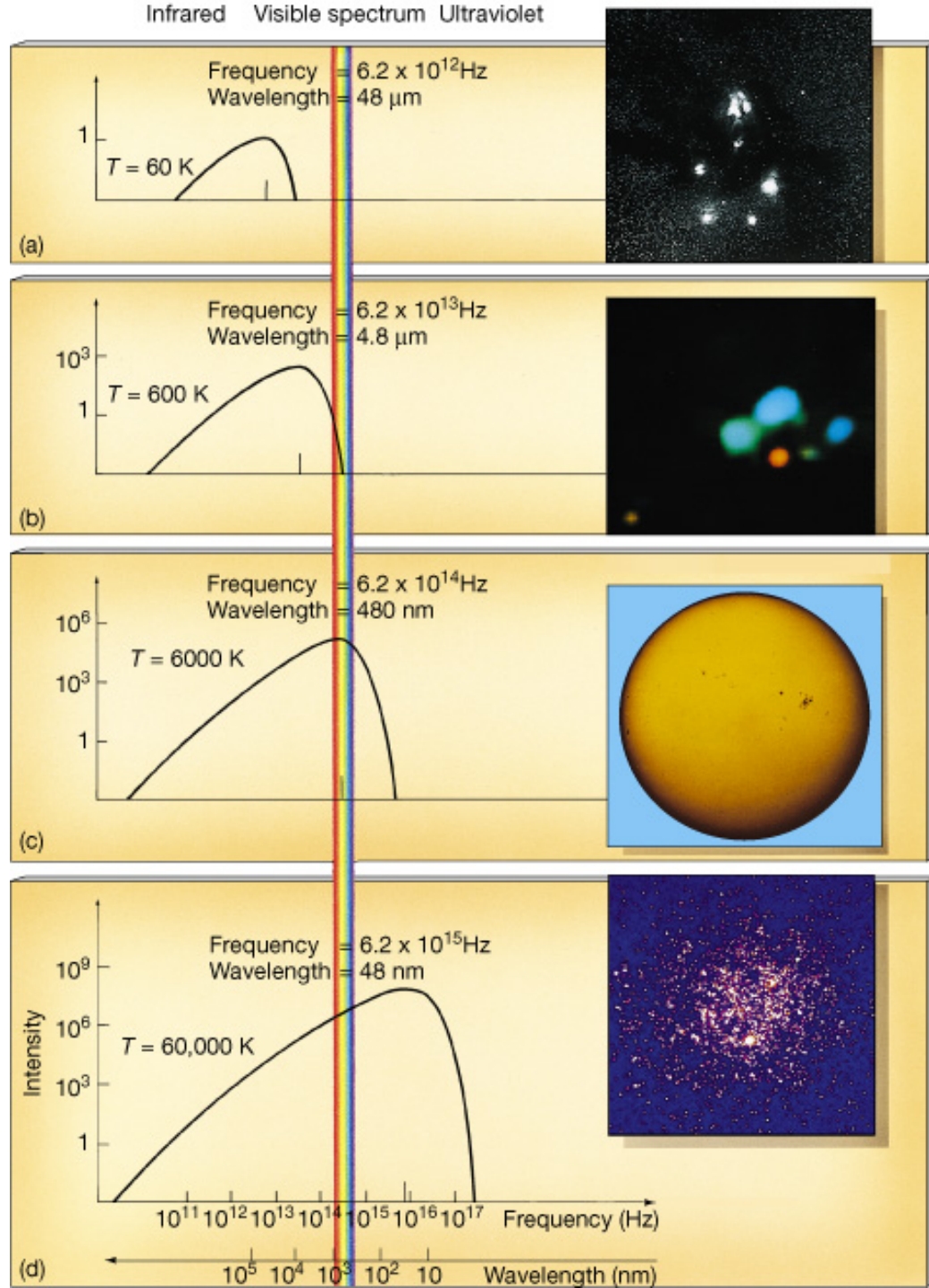


Note: degrees Kelvin (K) = degrees Celsius (C) + 273
01



黑体辐射：峰值波长由温度决定

例如：
不同温度上的
各种天体的
辐射



4. 多色测光系统和色指数

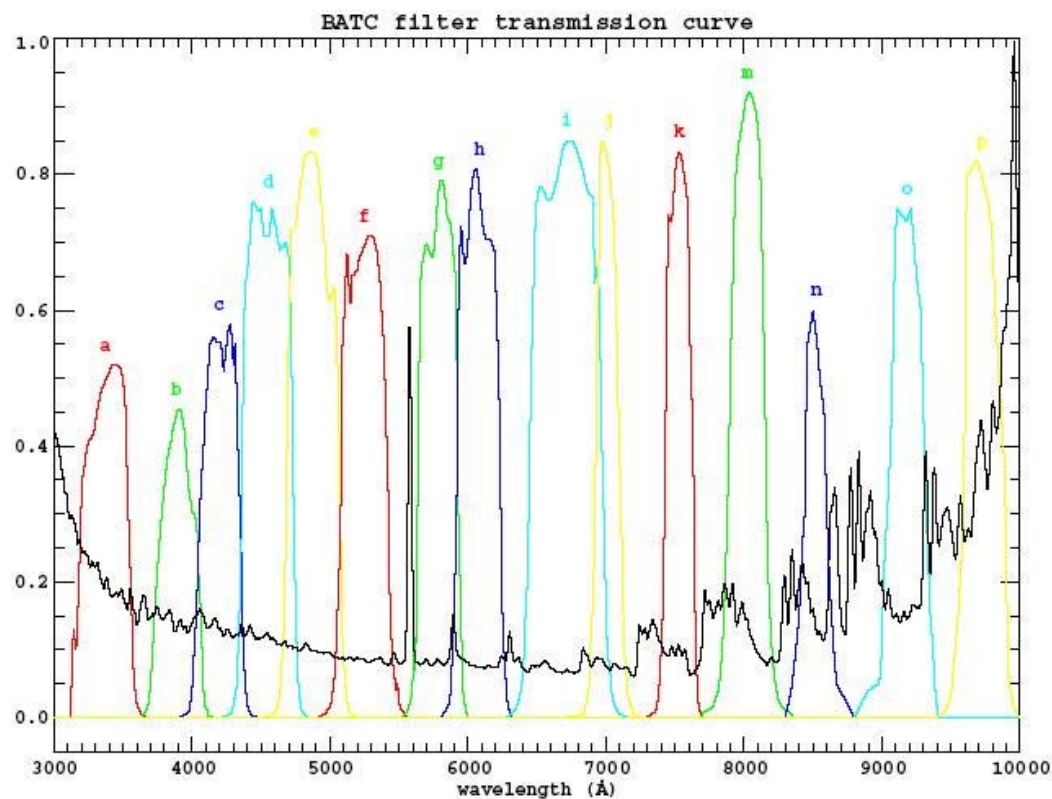
1) 多色测光系统

(multicolor photometric systems)

→ 天体的色指数，色温度，巴尔末跳跃，绝对星等，谱线等值宽度，等等

- UBV 宽带测光系统
- UBVRI 宽带测光系统
- uvby 窄带测光系统

BATC多色测光系统



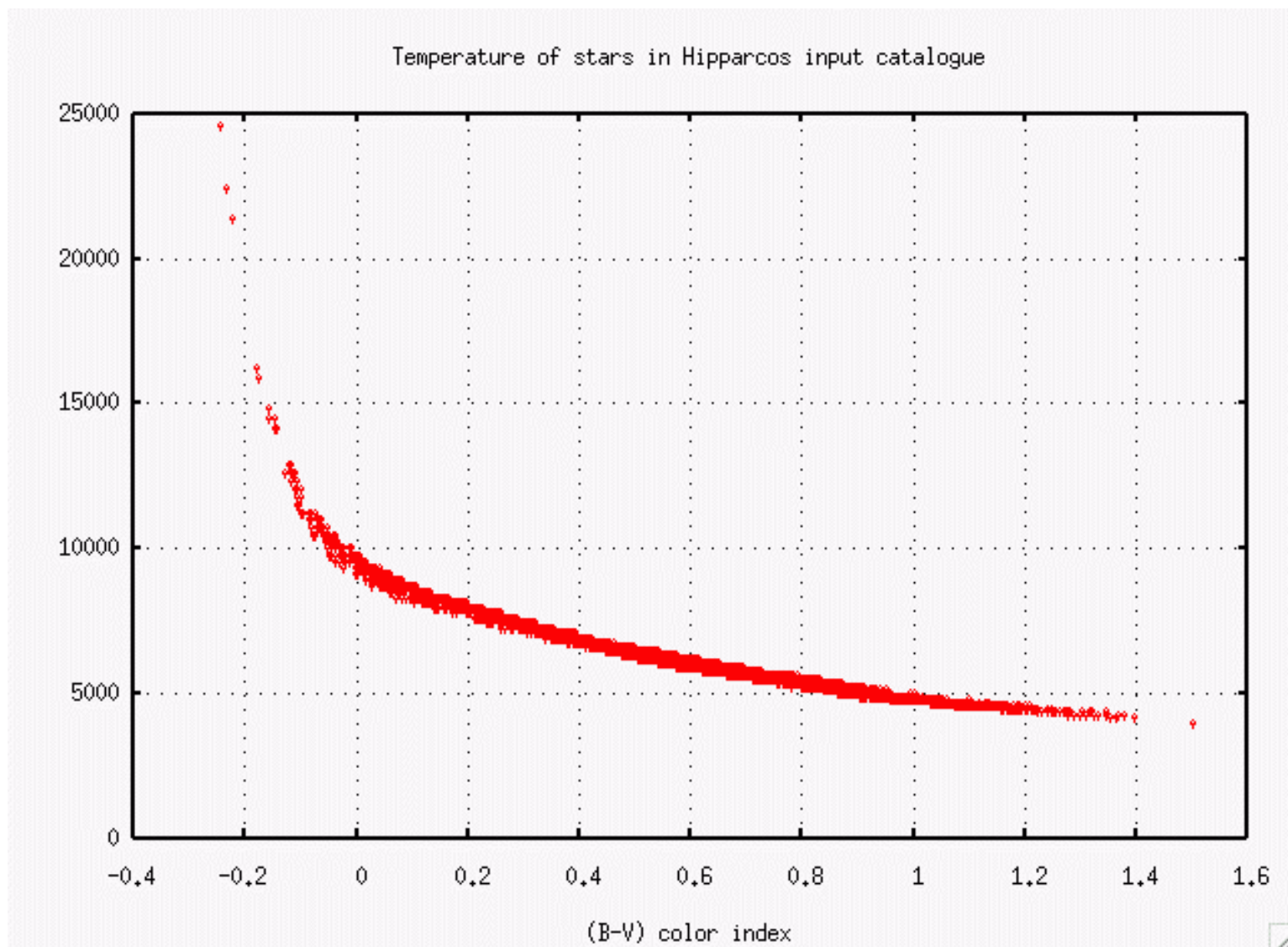
BATC中带滤光片的透过率曲线，图中每个滤光片上所标明的为滤光片代号。同时画出的还有夜天光谱，可以看出BATC滤光片在设计上避免了绝大部分强天光发射线。

2) 色指数(color index)

在不同波段测量得到的星等之差（短波段星等减去长波段星等）

如：U-B, B-V等。

色指数的大小反映了天体的温度



3个温度的概念:

- 色温度

在某一波长范围内，将测得的辐射体的辐射能量分布曲线与黑体的辐射分布曲线相比较，如果辐射体的辐射分布与温度为 T_c 的黑体相近，则称 T_c 为辐射体在该波长范围内的色温度。

- 有效温度:

将待测恒星的辐射的总能量与黑体辐射的总能量相对比, 如待测恒星的辐射总能量

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

正好与温度为 T_e 的黑体辐射总能量相等。则定义 T_e 为恒星的有效温度:

$$T_e = \left(\frac{L}{4\pi R^2 \sigma} \right)^{1/4}$$

$$T_e < T_{\text{真实温度}}$$

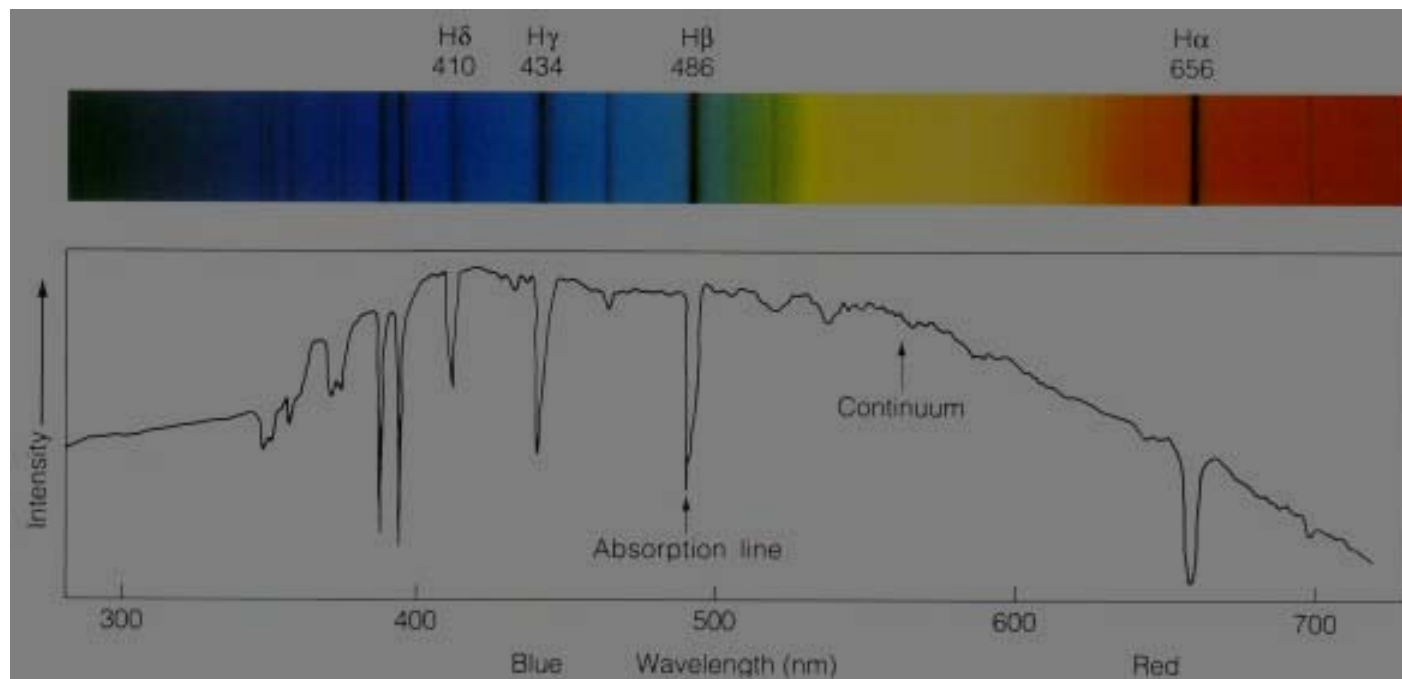
- 亮（度）温度：

在某一波长上，将恒星的辐射与黑体在同一波长上相对比，若其辐射正好等于温度为 T_s 的黑体辐射，则定义 T_s 为恒星在此波长上的亮度温度。

5. 恒星的光谱分类

恒星光谱 (spectrum):

典型的恒星光谱由连续谱和吸收线构成。



Harvard光谱分类：

- Harvard大学天文台的天文学家在1890-1910年首先提出的恒星光谱分类法。



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.)



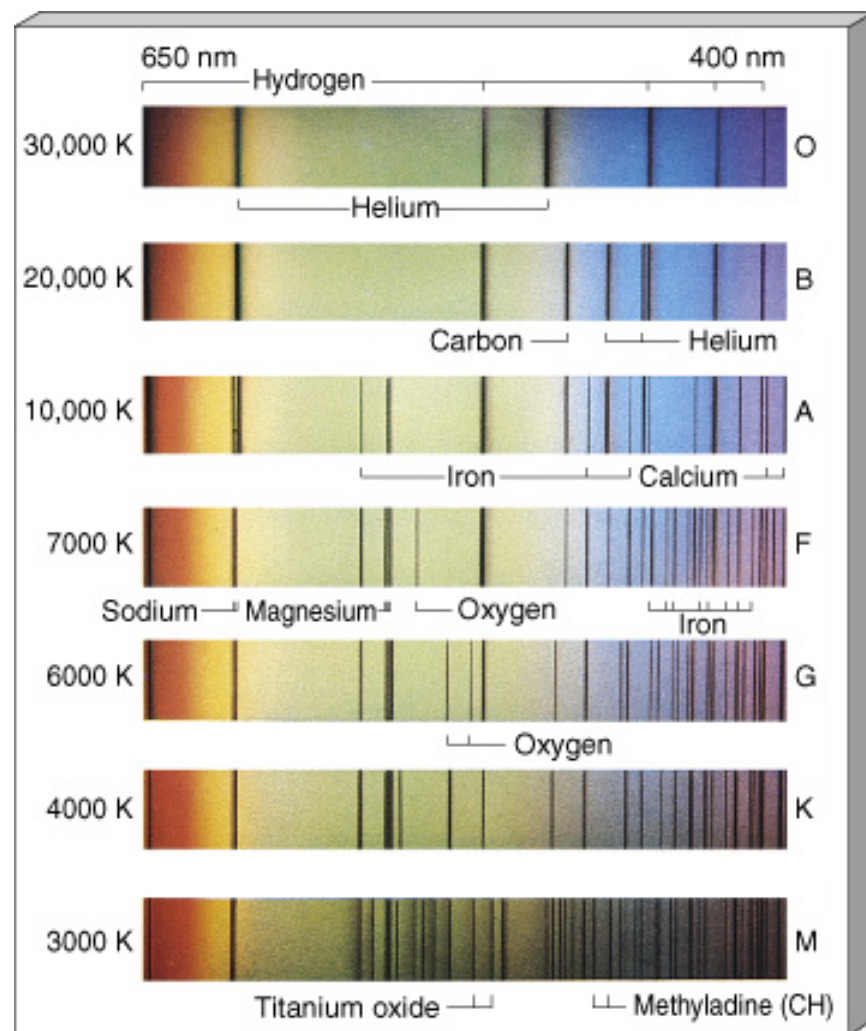
Annie Jump Cannon

- 根据恒星光谱中Balmer线的强弱，恒星的光谱首先被分成从A到P共16类。

- 后来经过调整和合并，按照温度由高到低的次序，将恒星光谱分成O, B, A, F, G, K, M七种光谱型 (spectral type)。

每一种光谱型可以继续分为0-9十个次型

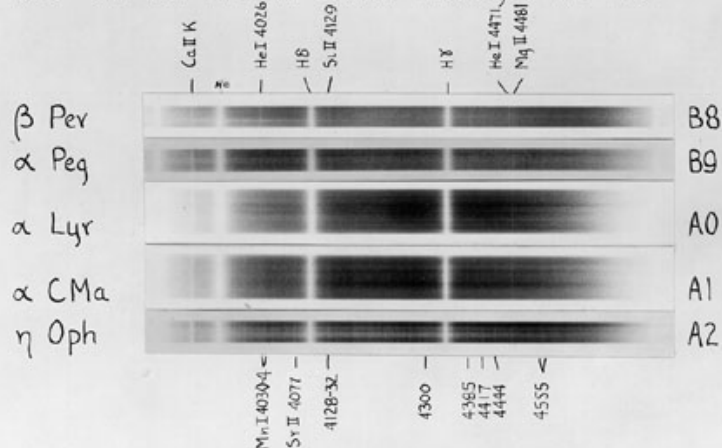
太阳的光谱型为G2



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

Main Sequence B8-A2

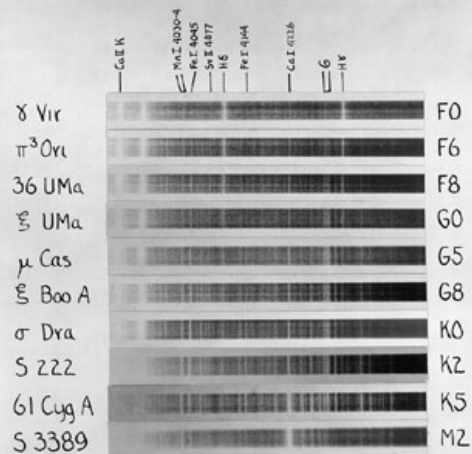
He I 4026, which is equal in intensity to K in the B8 dwarf β Per, becomes fainter at B9 and disappears at A0. In the B9 star α Peg He I 4026 = Si II 4129. He I 4471 behaves similarly to He I 4026.



The singly ionized metallic lines are progressively stronger in α CMa and η Oph than in α Lyr. The spectral type is determined from the ratios: B8, B9: He I 4026: Ca II K, He I 4026: Si II 4129, He I 4471: Mg II 4481. A0-A2: Mg II 4481: 4385, Si II 4129: Mn I 4030-4.

Eastman Process

Main Sequence F0-M2



All stars illustrated are of luminosity class V
 Cramer Hi-Speed Special.

光谱型	典型表面温度(K)	颜色	特征谱线
O	30,000	蓝	强紫外连续谱，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

- Harvard Spectral Classification scheme
(Annie Jump Cannon)

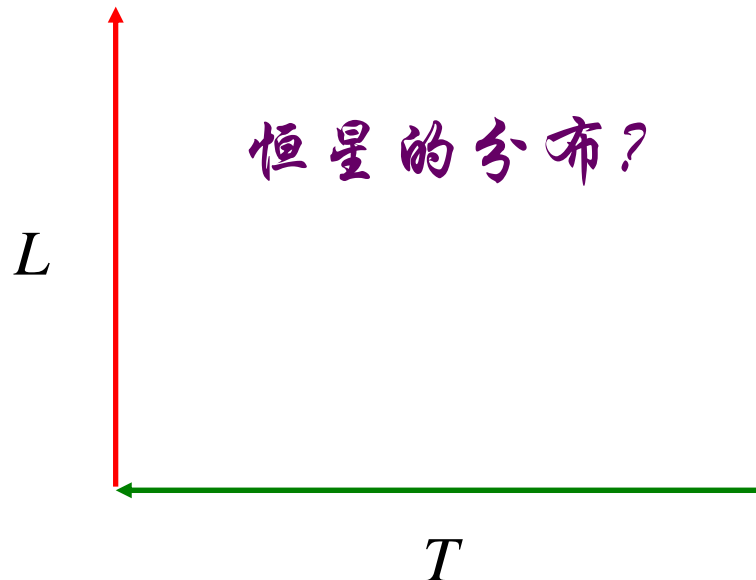
Class	Temperature ^[8] (Kelvin)	Conventional color	Apparent color ^{[9][10][11]}	Mass ^[8] (solar masses)	Radius ^[8] (solar radii)	Luminosity ^[8] (bolometric)	Hydrogen lines	Fraction of all main sequence stars ^[12]
O	≥ 30,000 K	blue	blue	≥ 16 M _☉	≥ 6.6 R _☉	≥ 30,000 L _☉	Weak	~0.00003%
B	10,000–30,000 K	blue to blue white	blue white	2.1–16 M _☉	1.8–6.6 R _☉	25–30,000 L _☉	Medium	0.13%
A	7,500–10,000 K	white	white to blue white	1.4–2.1 M _☉	1.4–1.8 R _☉	5–25 L _☉	Strong	0.6%
F	6,000–7,500 K	yellowish white	white	1.04–1.4 M _☉	1.15–1.4 R _☉	1.5–5 L _☉	Medium	3%
G	5,200–6,000 K	yellow	yellowish white	0.8–1.04 M _☉	0.96–1.15 R _☉	0.6–1.5 L _☉	Weak	7.6%
K	3,700–5,200 K	orange	yellow orange	0.45–0.8 M _☉	0.7–0.96 R _☉	0.08–0.6 L _☉	Very weak	12.1%
M	≤ 3,700 K	red	orange red	≤ 0.45 M _☉	≤ 0.7 R _☉	≤ 0.08 L _☉	Very weak	76.45%

- A one-dimensional temperature sequence
- Originally alphabetical in strength of optical Balmer lines

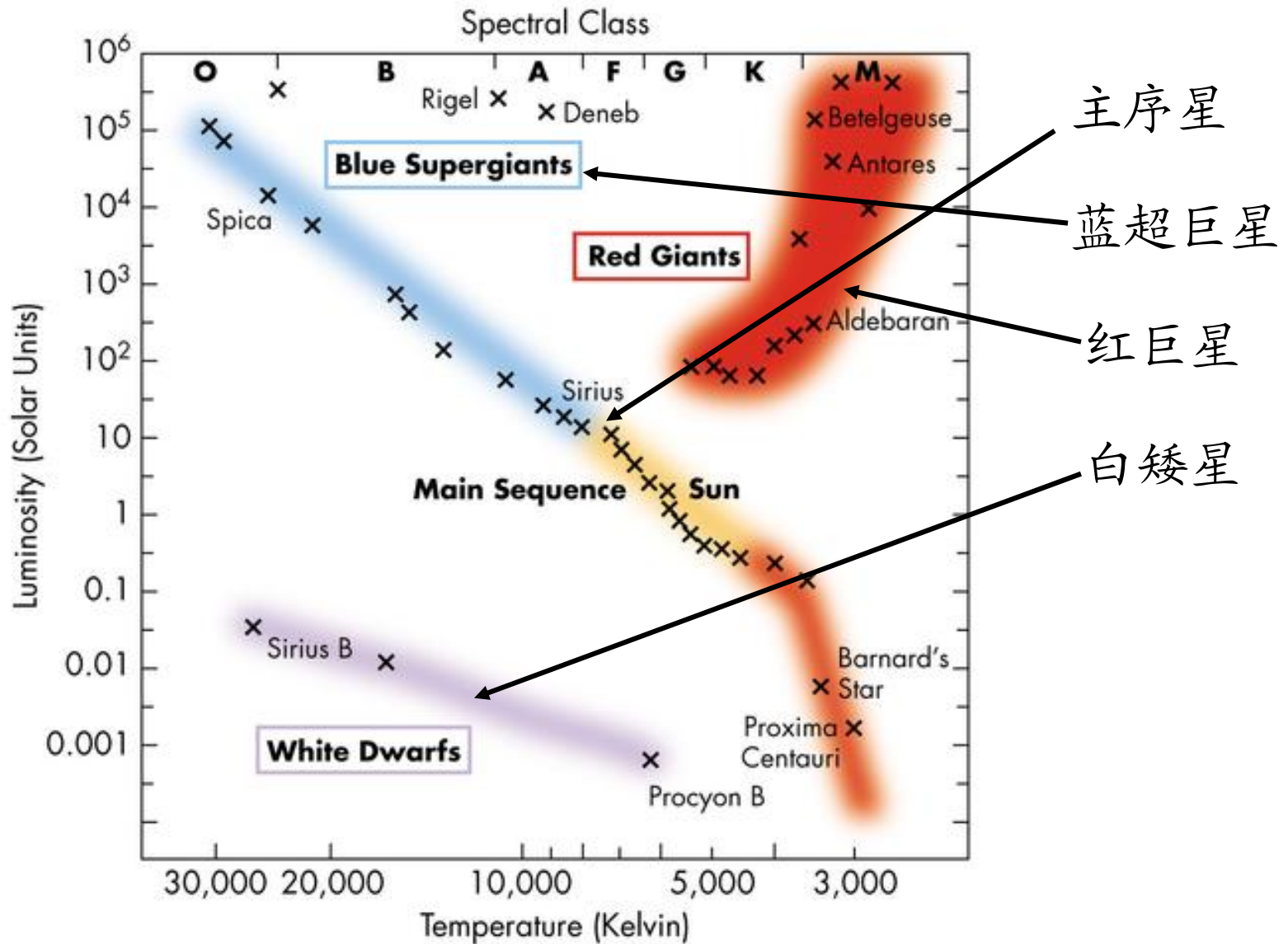
6. 赫罗图 (H-R diagram)

赫罗图:

- 由丹麦天文学家E. Hertzsprung (1911年) 和美国天文学家H. R. Russell (1913年) 创制的恒星的光度—温度分布图
- 赫罗图的横坐标也可用恒星的光谱型、色指数, 纵坐标也可用恒星的绝对星等表示



恒星在赫罗图上的分布特征



- 恒星的二元光谱分类:

根据恒星光度的高低, 将恒星分为I -VII七个光度级

- 光度级数值越小, 表明恒星的光度越高。

Ia—最亮超巨星

Ib—次亮超巨星

II—亮巨星

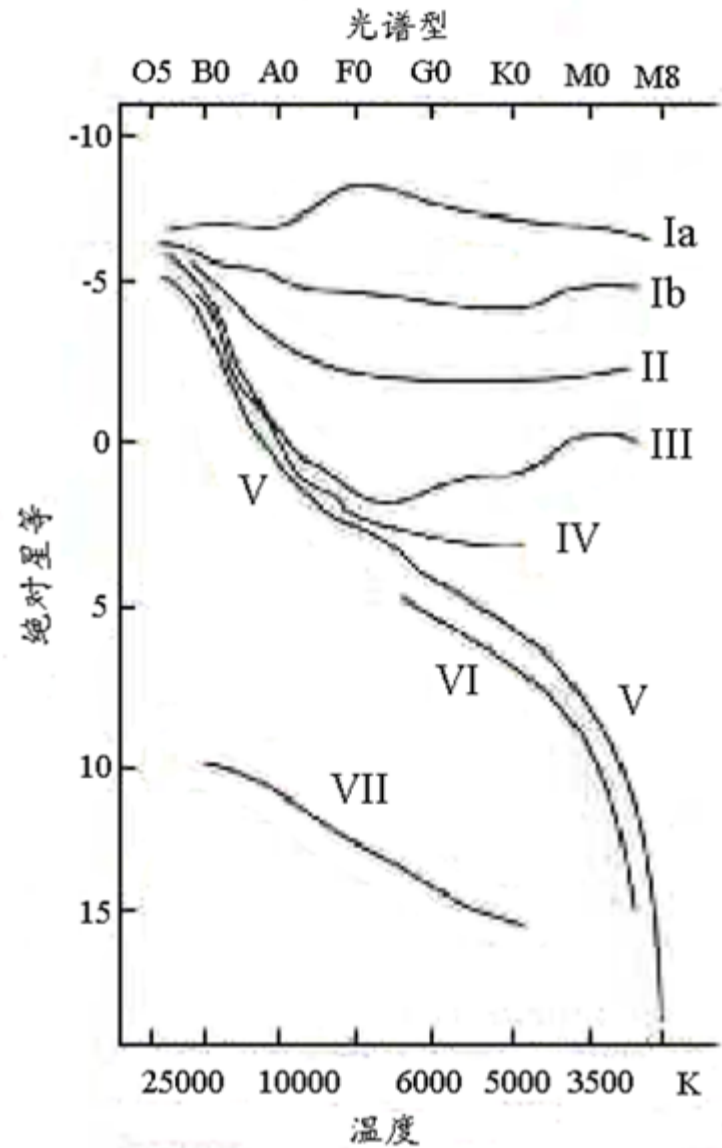
III—巨星

IV—亚巨星

V—矮星

VI—亚矮星

VII—白矮星



太阳的光谱型为G2V

不同质量的恒星在H-R图上的分布

- 恒星的质量决定了恒星在H-R图上的位置。
- 高质量的恒星明亮且高温，位于主序带的上部。
- 低质量的恒星黯淡且低温，位于主序带的下部。

