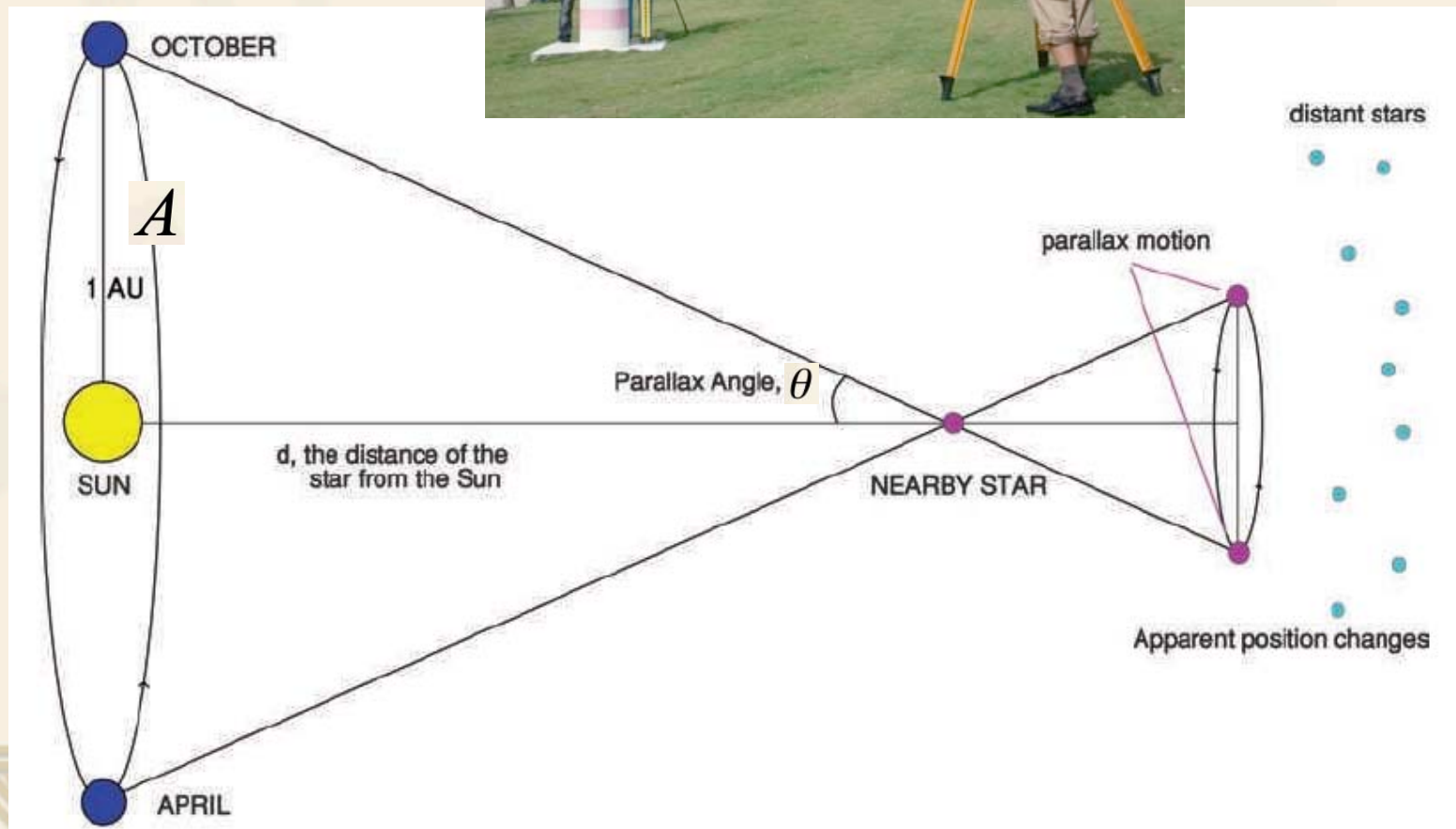


恒星的距离

❖ 三角视差法

$$d = A / \theta$$



一个例子:

$$\theta = 0.1''$$

$$\theta = 0.1 / (3600 \times 57.3) \text{ rad} = 4.85 \times 10^{-7}$$

$$A = 1.49598 \times 10^8 \text{ km}$$

$$d = A / \theta = 1.49598 \times 10^8 / 4.85 \times 10^{-7} \text{ km} = 3.084 \times 10^{14} \text{ km} = 32.6 \text{ ly}$$

$$1 \text{ ly} = 9.46 \times 10^{12} \text{ km}$$

秒差距:

$$d = 1 / p$$

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

最近的恒星:
比邻星

$$\theta = 0.772''$$

$$\begin{aligned} d &= 1 / 0.772 \text{ pc} \\ &= 1.295 \text{ pc} \\ &= 1.295 \times 3.26 \text{ light years} \\ &= 4.22 \text{ light years} \end{aligned}$$

恒星的自行

- ❖ 自行对三角视差法测距的影响
- ❖ 自行（角秒/年）的测定
- ❖ 地面测量了几千个恒星视差， $d < 40 \text{ pc}$
- ❖ Hipparcos卫星（1989.8.8）

- Hipparcos=High Precision Parallax Collecting Satellite

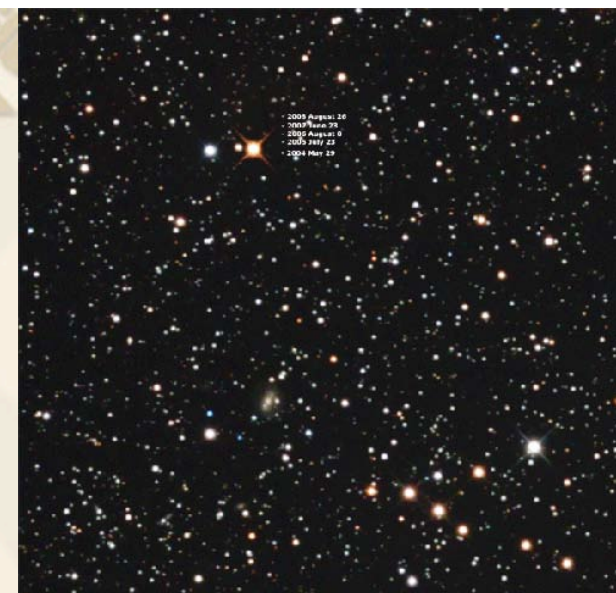
- 位置测量精度： ~ 0.001 角秒

- 3年的观测：118 000个恒星的视差和自行， $d \sim 90 \text{ pc}$

- 帮助预言彗星Shoemaker-Levy 9何时与木星碰撞；另外还表明几十亿年前，银河系吞并了大量的恒星

- ❖ GAIA卫星（2013.12.29）

- 对15等星可达20微角秒位置精度



巴纳德星的自行
2004-2008：每年 $10.3''$

绝对星等

绝对星等的定义：10pc处恒星的视星等

$$R = (d / 10)^2$$

$$M = m - 2.5 \log_{10} R$$

$$2.512^5 = 100$$

参宿七(Rigel):
(蓝超巨星)

$$d = 237 \text{ pc}, m = 0.12$$

$$M = 0.12 - 2.5 \times \log_{10} (237 / 10)^2 = -6.7$$

太阳:

$$d = 4.86 \times 10^{-6} \text{ pc}, m = -26.75$$

$$M = -26.75 - 2.5 \times \log_{10} (4.86 \times 10^{-6} / 10)^2 = 4.82$$

参宿七与太阳光度差：

$$\Delta m = |-6.7 - (+4.82)| \\ = 11.52 \text{ magnitudes}$$

$$R = 2.512^{11.52} \\ = 40\,571$$

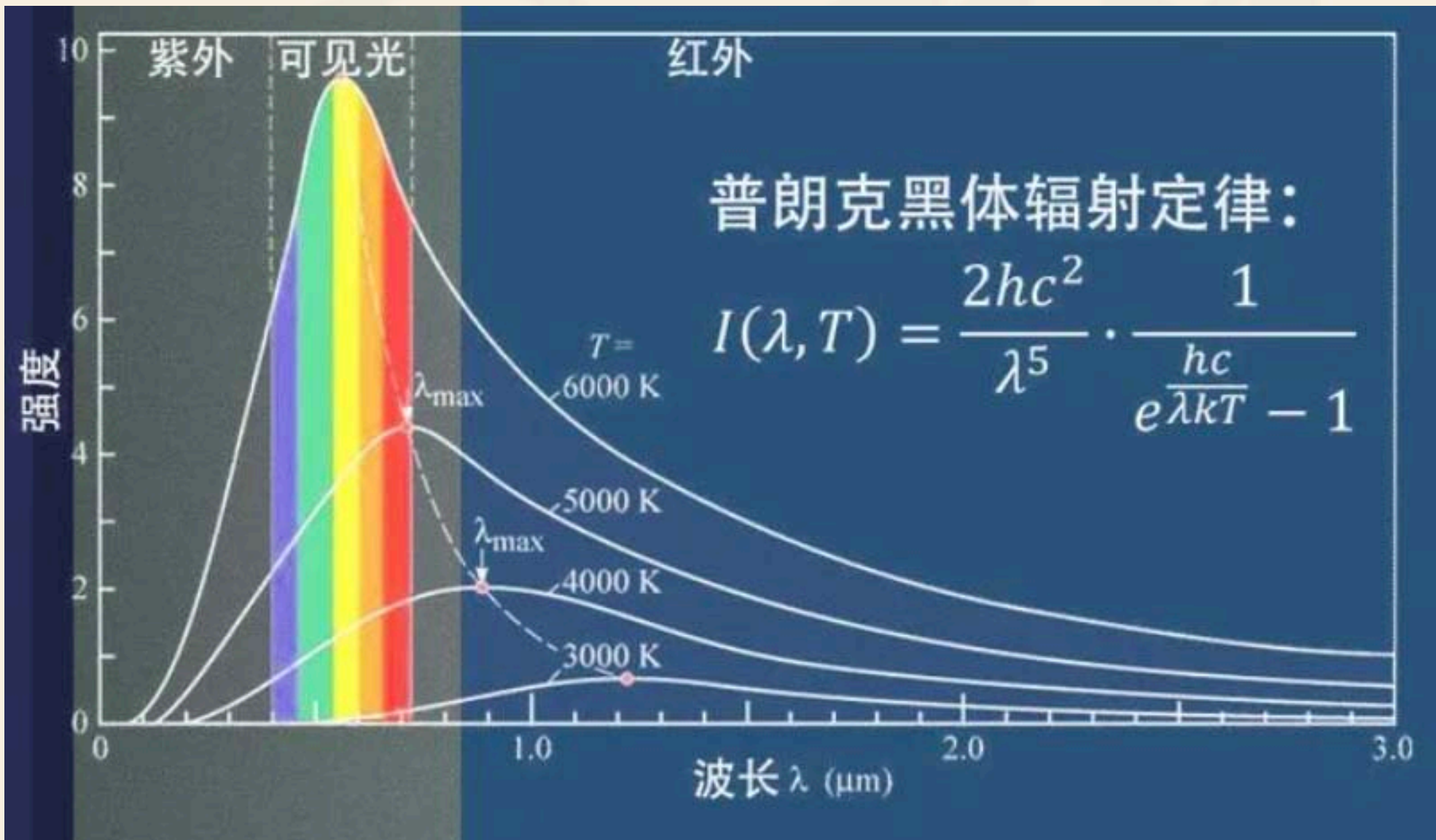
比邻星与太阳光度差：

$$\Delta m = 15.5 - 4.82 \text{ magnitudes} \\ = 10.68 \text{ magnitudes}$$

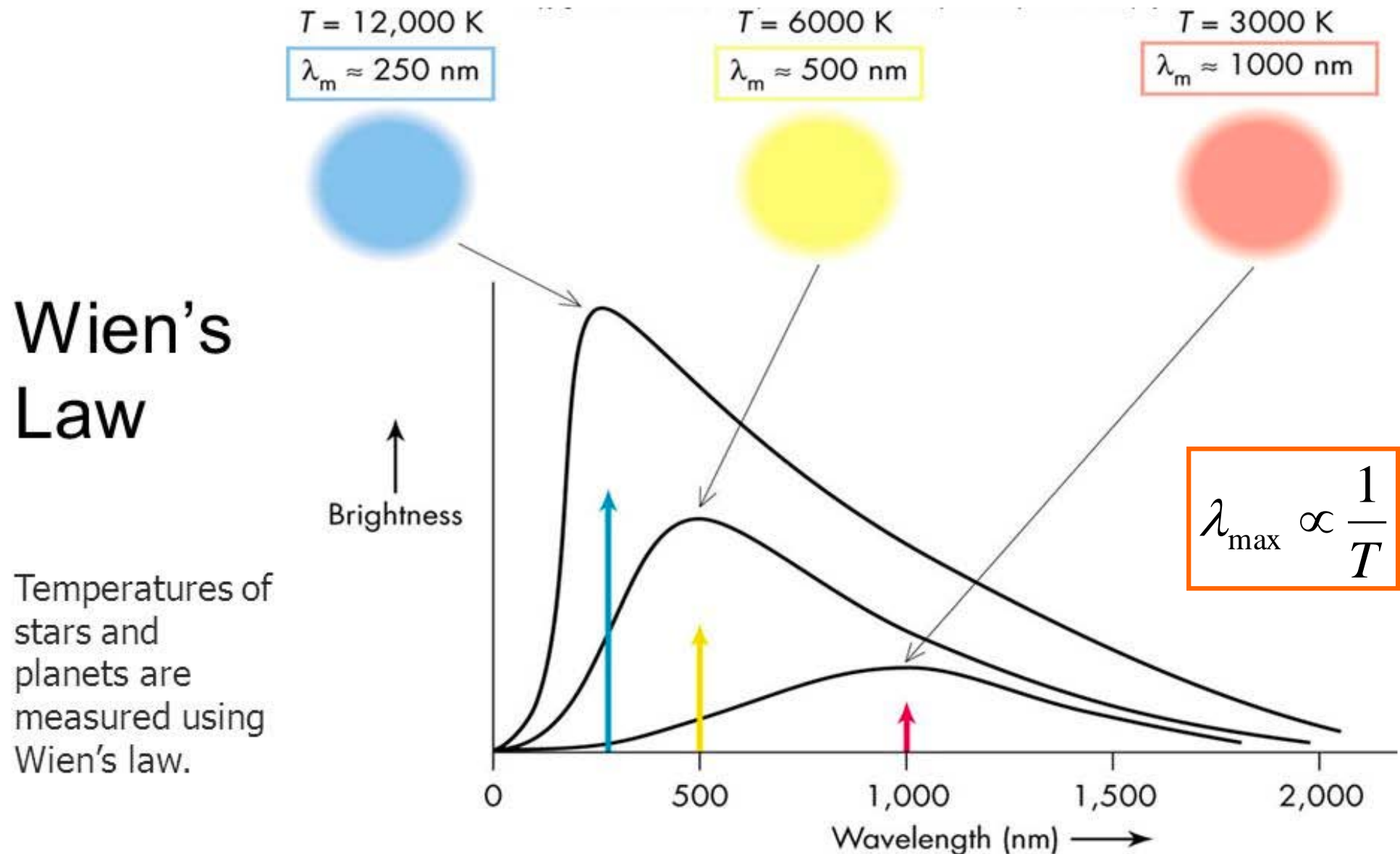
$$R = 2.512^{10.68} \\ = 18\,715$$

比邻星与参宿七光度差：

$$40\,500 \times 19\,000 = 769\,500\,000$$



- The peak wavelength of a blackbody spectrum is inversely proportional to temperature:



比邻星的温度:

$$L = \sim 4 \times 10^{26} / 19\,000\,W \\ = 2.1 \times 10^{22}\,W$$

$$R = 1/7 R_{SUN} \approx 1 \times 10^8\,cm$$

$$L = \sigma AT^4$$

$$= 5.671 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (1 \times 10^8)^2 \times T^4$$

$$T = \{2.1 \times 10^{22} / [5.671 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (1 \times 10^8)^2]\}^{1/4}$$

$$= (2.1 \times 10^{22} / 7.1 \times 10^9)^{-4}$$

$$= 1300\,K$$

1/4

$$T_{PC}/T_{Sun} = [(1/19\,000)/(1/49)]^{1/4}$$

$$T_{PC} = 0.22 \times 5800\,K$$

$$= 1300\,K$$

1/4

参宿七的温度

$$T_{Rigel}/T_{Sun} = (45\,000/3800)^{1/4}$$

$$T_{Rigel} = 1.85 \times 5800\,K$$

$$= 10\,700\,K$$

色指数 (C: 不同波段星等差)

$$C = m_B - m_V$$



$$T = \frac{7200}{C + 0.64} K$$

色温度

别的常用双色测光：照相星等 m_{photo} ，仿视星等 m_V

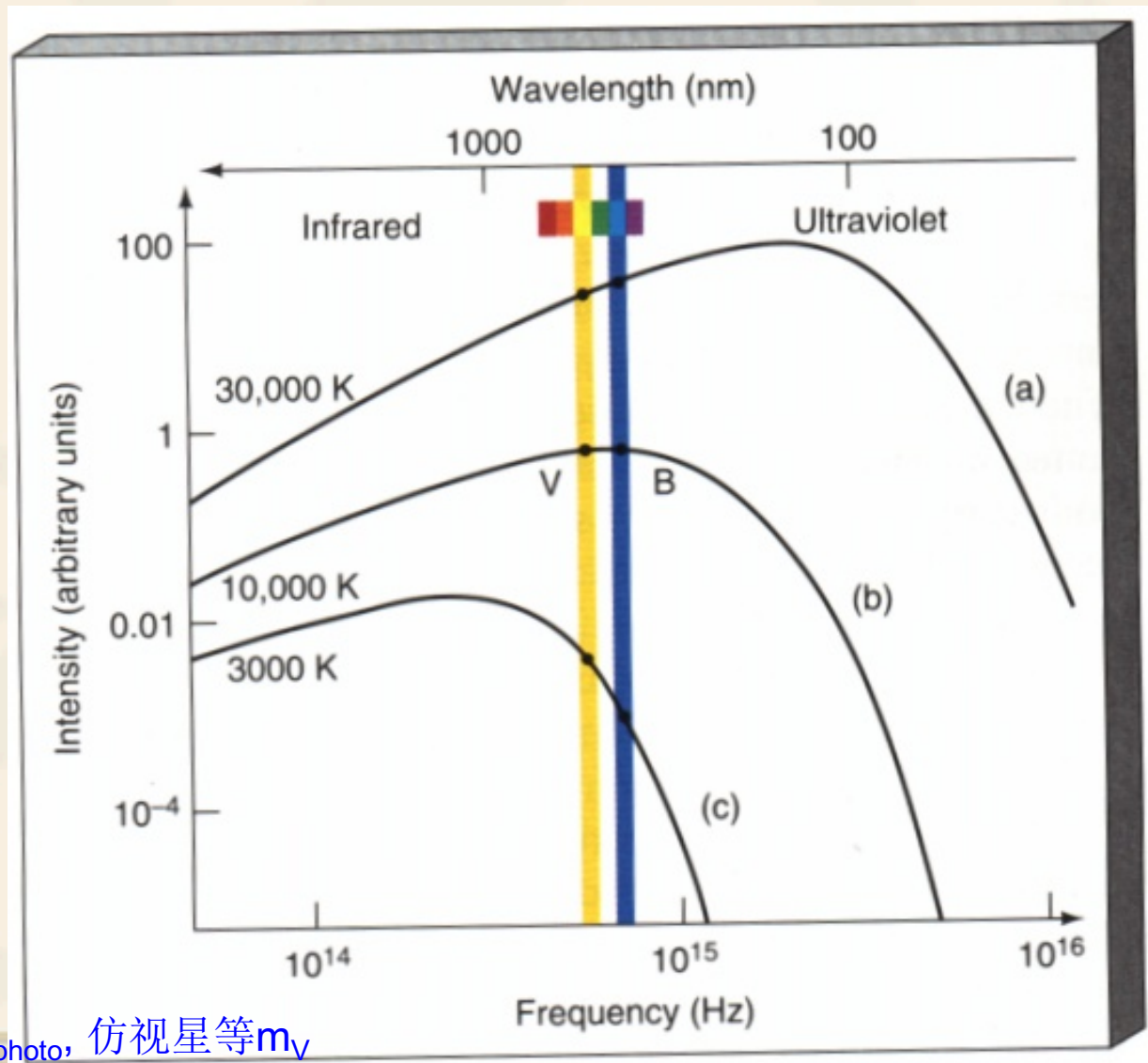
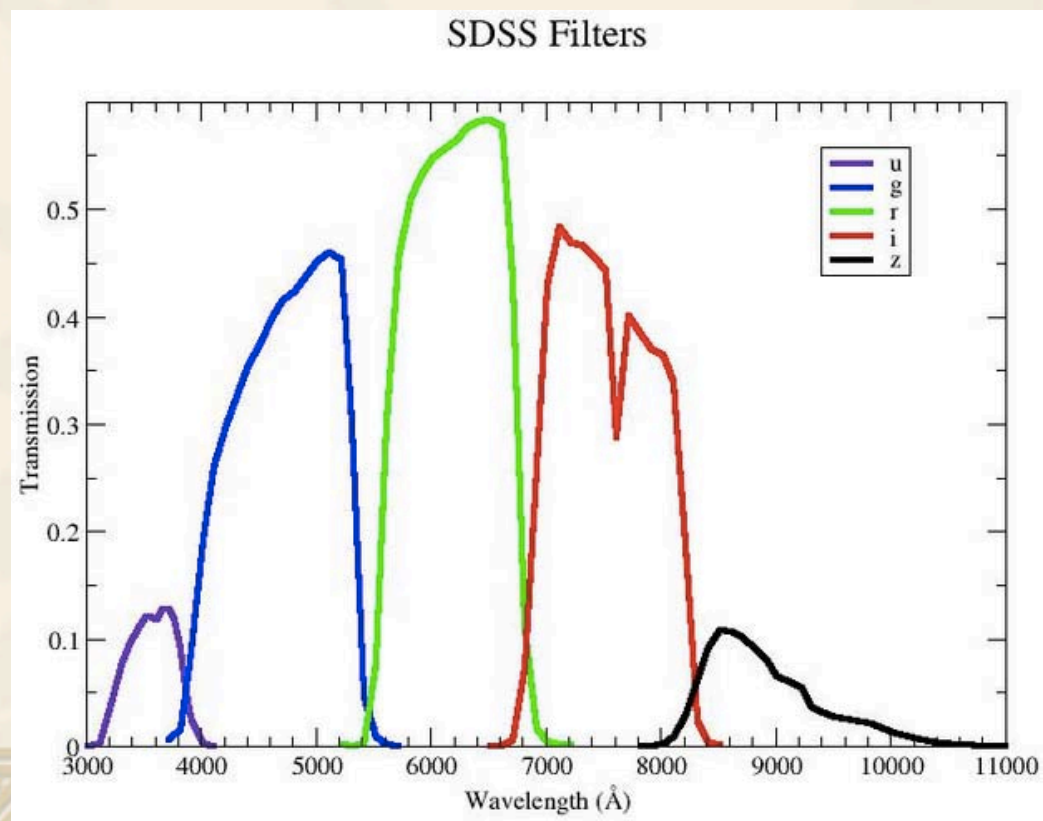


表 2.1 多色测光系统的滤光片参数

滤光片	峰值波长(nm)	滤波宽度(nm)
U	350	70
B	435	100
V	555	80
R	680	150
I	800	150



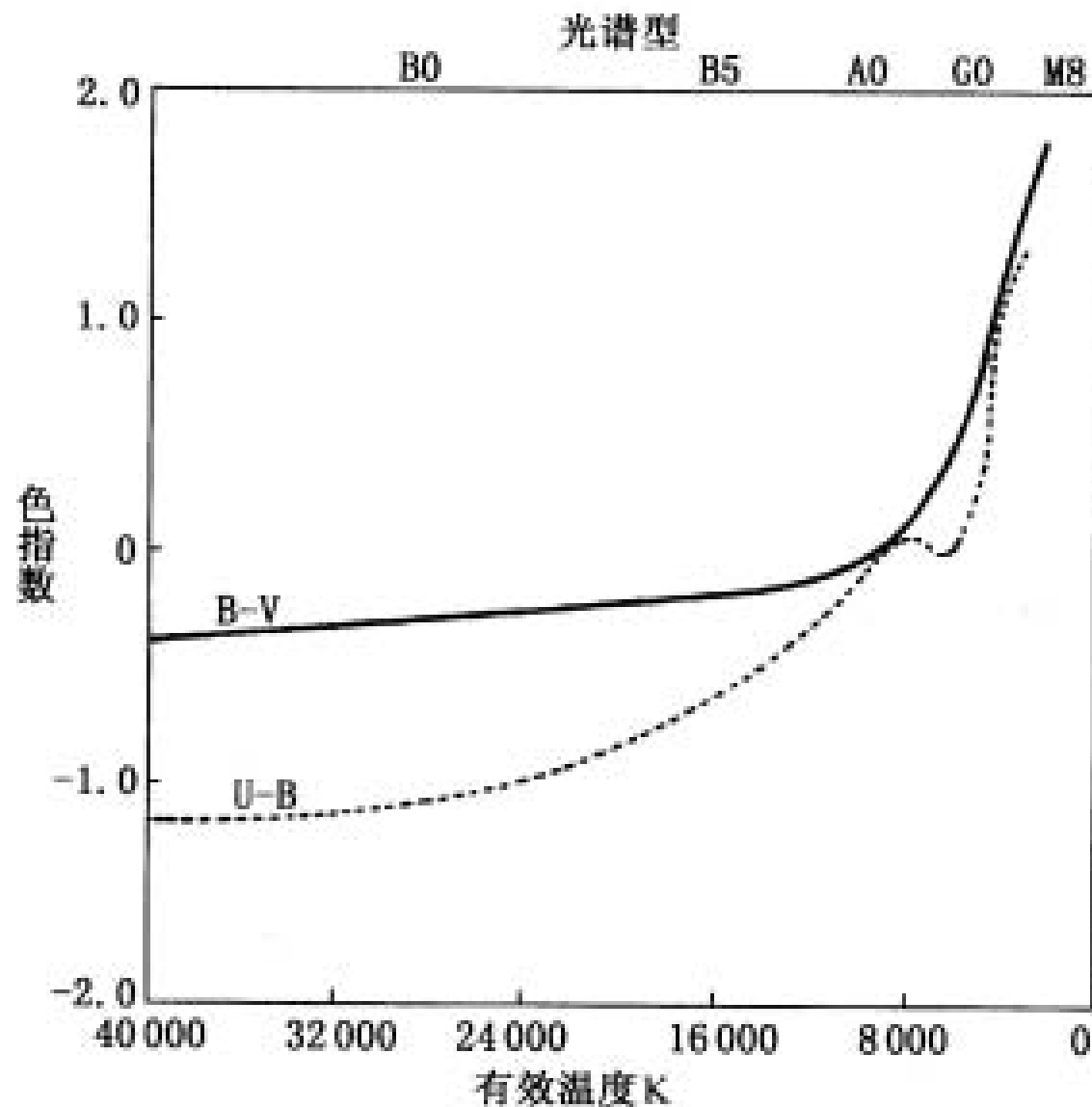


图 8.3 恒星的色指数 B—V 和 U—B 与有效温度(光谱型)的关系

$$T = \frac{7090}{(B-V) + 0.71} \text{ K}$$

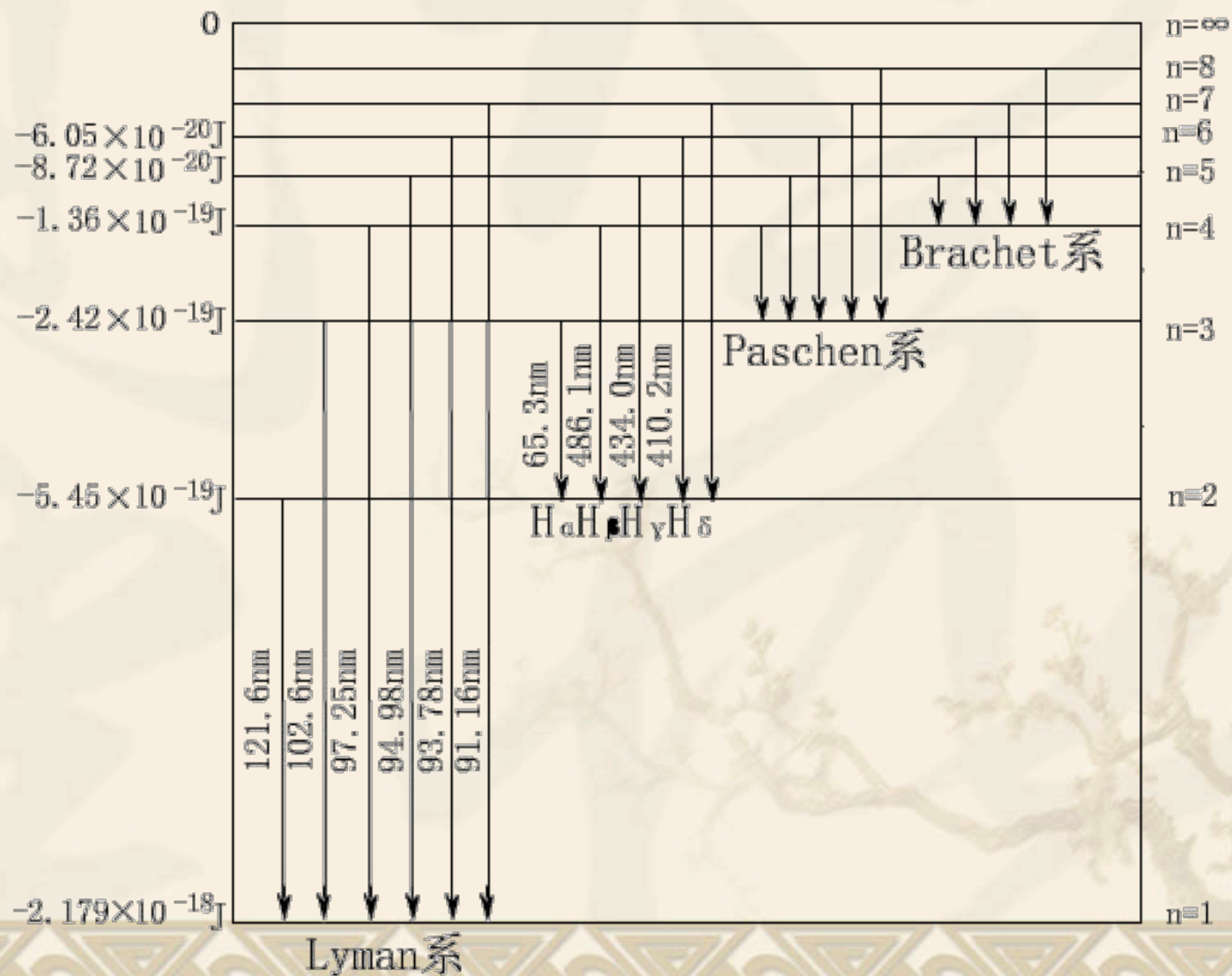
$T \sim 4000-10000 \text{ K}$ 时:

$$T = \frac{8540}{(B-V) + 0.865} \text{ K}$$

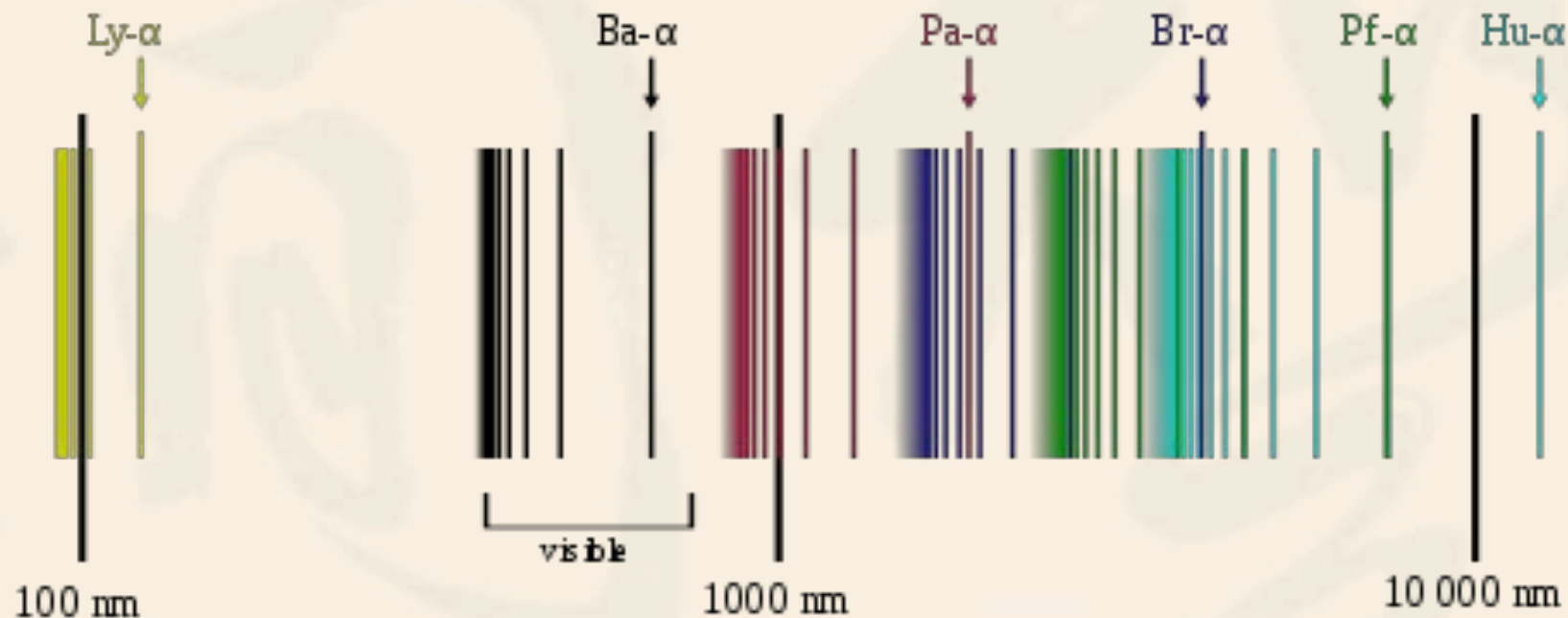
恒星光谱

谱线记号: H I、H II、He I、He II、He III

氢原子光谱



氢原子光谱



来曼系列：位于紫外光波段（ $\rightarrow 1$ ）

巴耳末系列：位于可见光波段（ $\rightarrow 2$ ）

- H α —656.3nm, 红色(3 \rightarrow 2)
- H β —486.1nm, 绿色(4 \rightarrow 2)
- H γ —434.0nm, 中蓝色(5 \rightarrow 2)

帕申系列：位于红外光波段的谱线($\rightarrow 3$)

布拉克系列：位于红外光波段 ($\rightarrow 4$)

蒲芬德系列：位于红外光波段($\rightarrow 5$)

谱线和温度的关系

- $T \sim 9000\text{K}$ ，氢的巴尔末线系 $H\alpha$ 、 $H\beta$ 等谱线最强
- 温度升高，氢电离，氢原子的谱线减弱，甚至消失
- 氦的电离能大得多， HeI 、 HeII 的谱线经常一起出现

哈佛光谱分类

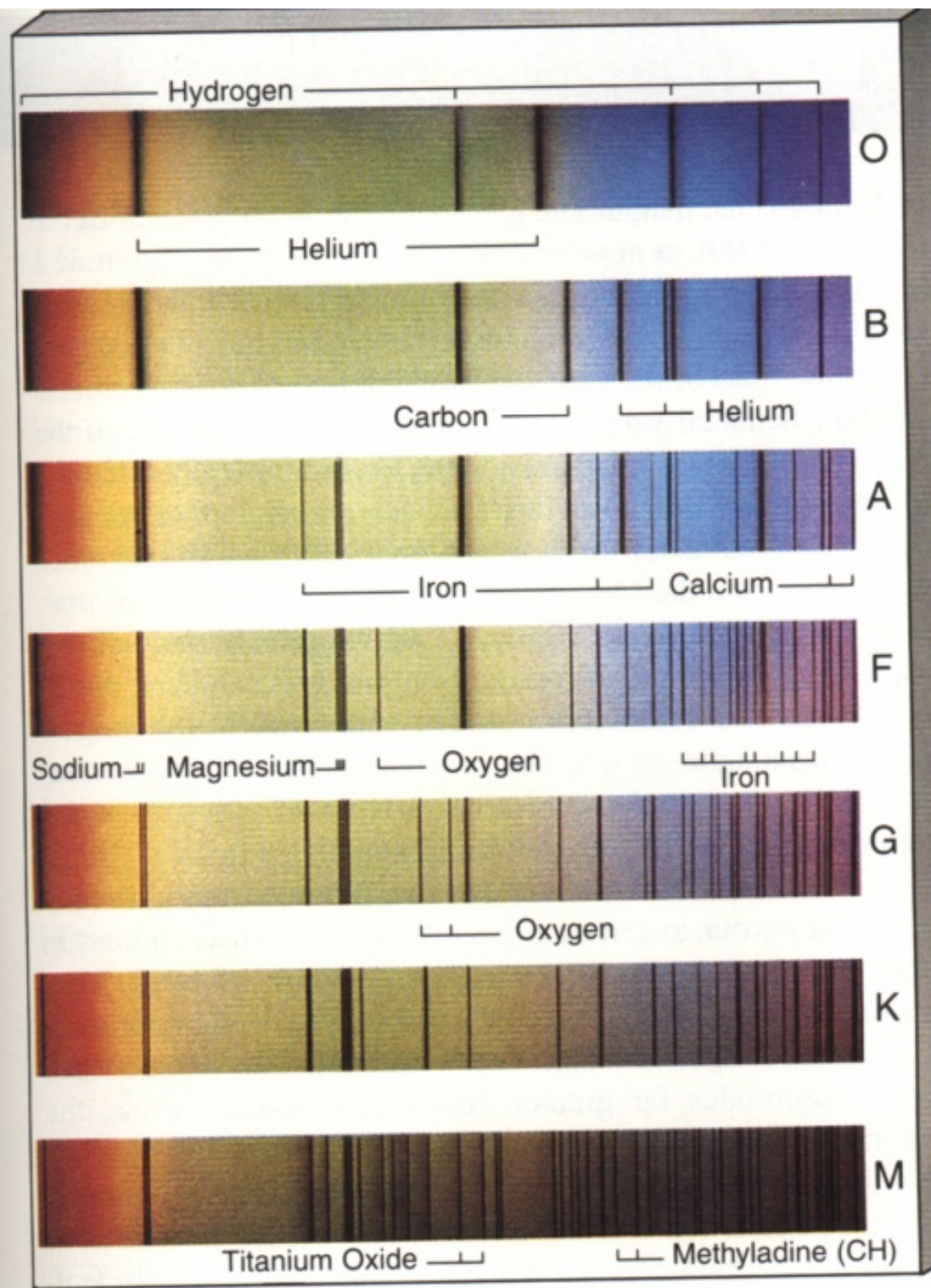
O — B — A — F — G — K — M
 / S
 \ R — N

Oh! Be A Fine Girl/Guy! Kiss Me Right
Now, Sweetheart! (联想记忆法)

R,N: 光谱同K和M型相似，但增加了很强的碳和氢的分子带。后来把它们合称为碳星。**S型**：红色。
光谱同M型相似，但增加了强的氧化锆分子带，常有氢发射线

每一类又分为0-9子类，太阳：G2型

各种光谱型的化学成分



光谱型	颜色	温度	光谱特征
O	蓝白	$T_e \geq 30,000K$	紫外连续谱强，有弱H _e II，H _e I，HI线
B	蓝白	$10,000K \leq T_e \leq 30,000K$	H _e I线在B ₂ 型达到最大，B ₀ 之后H _e II消失，H线逐渐变强
A	白	$7,500K \leq T_e \leq 10,000K$	H线在A ₀ 达到极大，C _a II线增强，出现弱的中性金属线
F	黄白	$6,000K \leq T_e \leq 7,500K$	H线变弱但仍明显，C _a II线大大增强，电离和中性金属线的强度增加
G	黄	$5,000K \leq T_e \leq 6,000K$	属太阳谱型，C _a II线很强，F _e 及金属线强，H线弱
K	橙	$3,500K \leq T_e \leq 5,000K$	金属线主导，连续谱蓝端变弱，分子带（CN，CH）变强
M	红	$T_e \leq 3,500K$	分子带主导，中性金属线强

Table 6.1 The percentages of stars in the differing spectral classes.

Type	Colour	Proportion (%)
O	Blue	0.003
B	Blue-white	0.13
A	White	0.63
F	White-yellow	3.1
G	Yellow	8
K	Orange	13
M	Red	78



G2

类型	温度	约定的颜色	看见的颜色 ^{[5][6]}	质量 (<u>太阳质量</u>)	半径 (<u>太阳半径</u>)	亮度	氢线	<u>主序星</u> 的比例 %
<u>B</u>	10,000–30,000 K	蓝到蓝白色	蓝白色	18 <u>M_☉</u>	7 <u>R_☉</u>	20,000 <u>L_☉</u>	一般	0.13%
<u>A</u>	7,500–10,000 K	白色	白色	3.1 <u>M_☉</u>	2.1 <u>R_☉</u>	40 <u>L_☉</u>	强烈	0.6%
<u>F</u>	6,000–7,500 K	淡黄的白色	白色	1.7 <u>M_☉</u>	1.4 <u>R_☉</u>	6 <u>L_☉</u>	一般	3%
<u>G</u>	5,000–6,000 K	黄色	淡黄的白色	1.1 <u>M_☉</u>	1.1 <u>R_☉</u>	1.2 <u>L_☉</u>	弱	7.6%
<u>K</u>	3,500–5,000 K	橙色	黄橙色	0.8 <u>M_☉</u>	0.9 <u>R_☉</u>	0.4 <u>L_☉</u>	十分弱	12.1%
<u>M</u>	2,000–3,500 K	红色	橙红色	0.4 <u>M_☉</u>	0.5 <u>R_☉</u>	0.04 <u>L_☉</u>	十分弱	76.45%

距离测量—分光视差法

- 基本假设：同一类型的恒星的绝对光度一致
- 例如：某F0型恒星，比邻近的一F0型恒星暗10 000倍，邻近的恒星通过三角视差法测得距离为8pc，则该远处的F0型恒星的距离为800pc
- 某G2型恒星，视星等为+9.8，太阳的绝对星等为+4.8（ $d=10\text{pc}$ ），则该恒星的距离为100pc
- 一LMC中的B8恒星，视星等为+11.7，参宿七的绝对星等为-6.7等，

光度差：

$$2.512^{18.4} = 23 \times 10^6$$

距离：

$$10 \times (23 \times 10^6)^{1/2} \text{ pc} = 10 \times 4800 \text{ pc} = 48\,000 \text{ pc}$$

分光视差法的缺点：

- 同一类型的恒星本征光度不一定一致，还依赖于恒星的金属丰度
- 光谱型和光度之间的相关性不是很好，主序带并不是一个窄线，例如，F0型，差 \pm 一个星等，所以距离差 $\pm (2.512)^{1/2}$
- 星际消光、红化的影响

Hertzsprung-Russell 图

- ❖ 1900s早期, Ejnar Hertzsprung (丹麦)与 Henry Russell (美国)
- ❖ 横坐标: 温度 (高←低) 或光谱型
- ❖ 纵坐标: 光度或绝对星等
- ❖ H-R图, 或颜色-星等图

赫罗图 (Hertzsprung – Russell Diagram)

罗素1913年得到的最早的绝对星等—光谱型图

Henry Norris Russell, reprinted with permission)

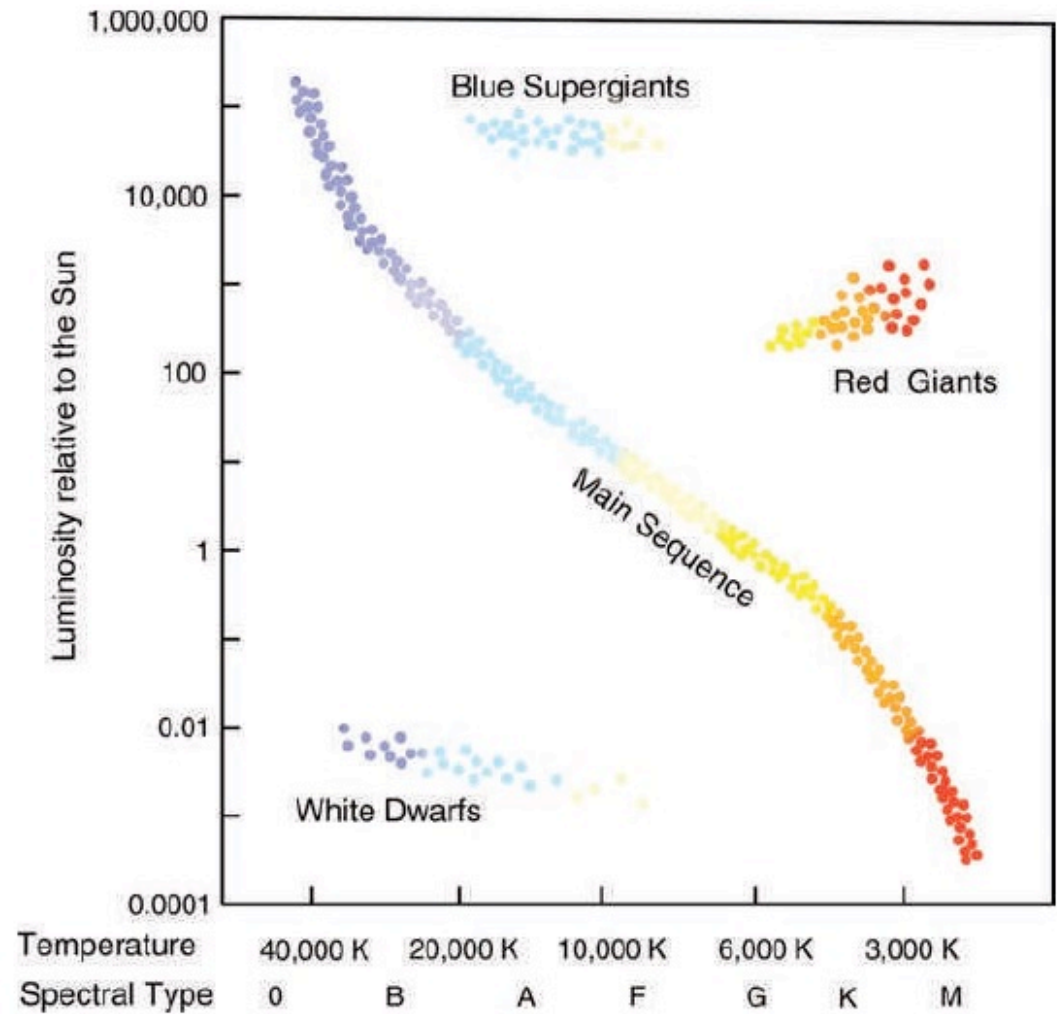
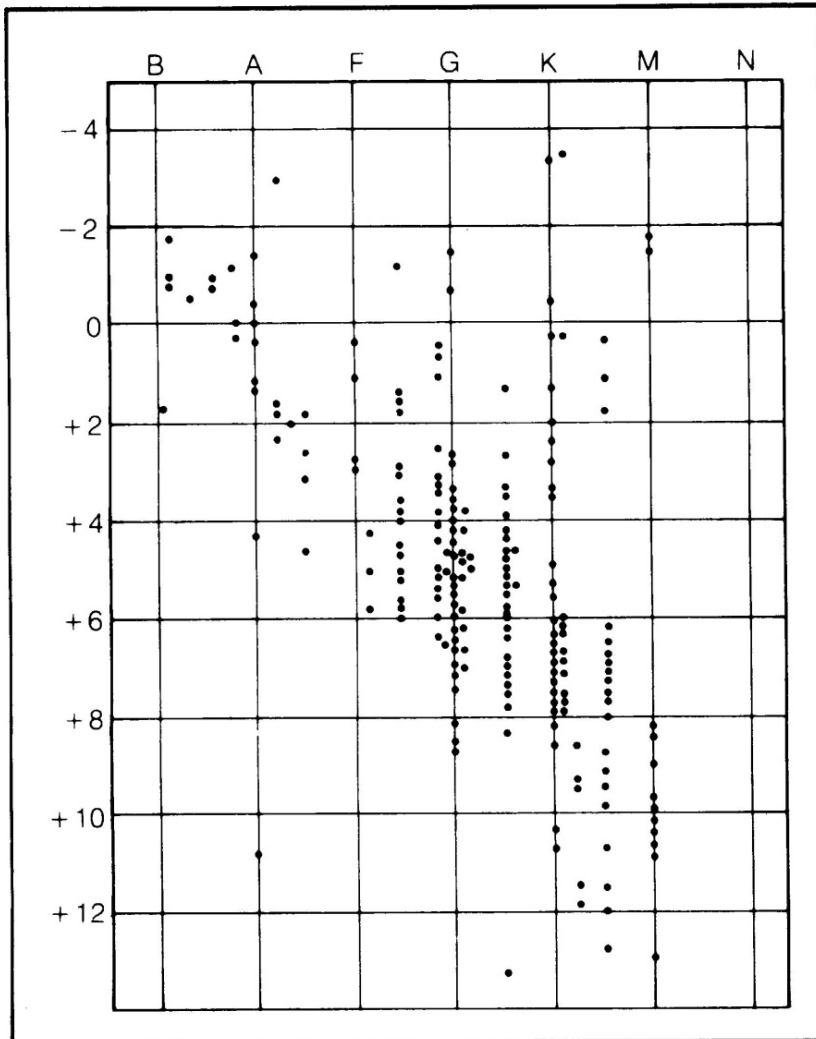
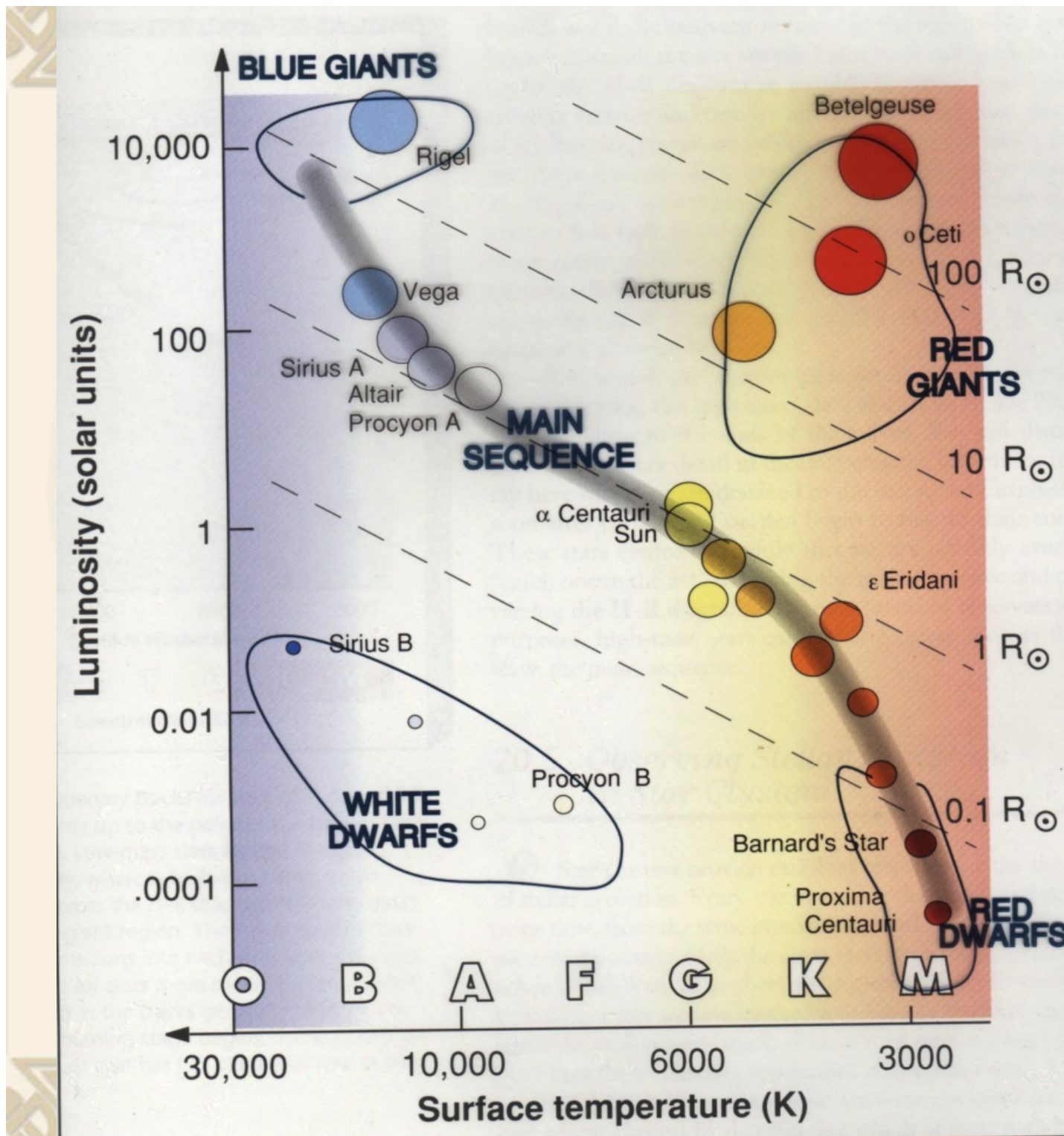


Figure 6.6 The Hertzsprung–Russell Diagram.



如何区分红巨星和红矮星？

谱线压力致宽

恒星大小

直接测量

参宿四
(红超巨星)

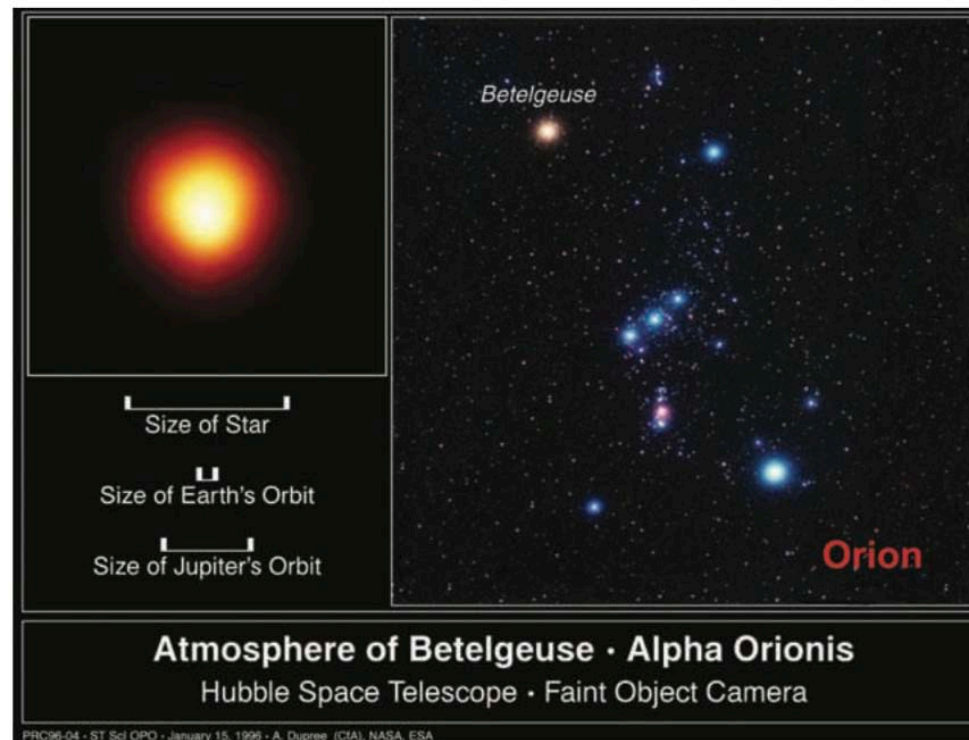


Figure 6.8 Hubble Space Telescope image of Betelgeuse. Image: A. Dupree (CfA), NASA, ESA.



红超巨星参宿四
致暗之谜

$$\theta \sim 0.05'', D = 131 pc$$

$$d = D\theta = 131 \times 3.1 \times 10^{13} \times [0.05 / (3600 \times 57.3)] km$$

$$= 4.1 \times 10^{15} \times 2.4 \times 10^{-7} km = 9.84 \times 10^8 km$$

$$\approx 700 R_{SUN}$$

光学干涉

比邻星的观测：2002年，VLT，2x8.2m，基线长度：~102.4米，等效口径：~100m

$$\theta \sim 1.02 \pm 0.08 \text{ marc sec}, D = 1.3 \text{ pc}$$

$$d = 1.3 \times 3.1 \times 10^{16} \times 1.02 / (1000 \times 3600 \times 57.3)] m$$

$$= 2 \times 10^8 m$$

$$\approx 1/7 R_{SUN}$$

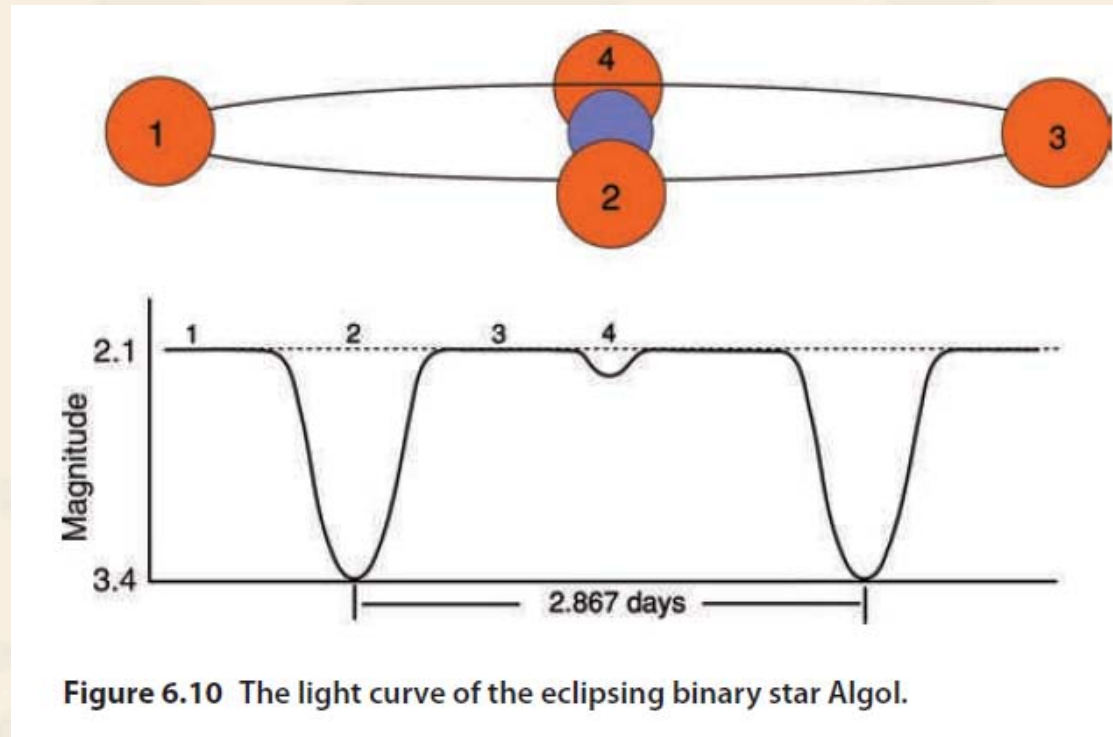
双星掩食法测量恒星大小

英仙β星

小掩食大: ~10h

周期: ~68.8h

两星相距:
~0.062AU



$$A = 0.062 \text{ AU} \approx 9.275 \times 10^6 \text{ km}$$

$$d = 3.1415926 \times 9.275 \times 10^6 \times 10 / 68.8$$
$$= 4.2 \times 10^6 \text{ km} \approx 3D_{\text{SUN}} \quad (\text{小恒星的大小})$$

用Stephan-Boltzman公式估算恒星的大小

参宿七:

$$M = -6.7(SUN : +4.83)$$

$$L / L_{SUN} = 2.512^{11.53} = 41000$$

$$T = 10700 = 1.84T_{SUN}$$

$$A / A_{SUN} = 41000 / 1.84^4 = 41000 / 11.5 = 3500$$

$$D / D_{SUN} = 3500^{1/2} \approx 59$$

参宿四:

$$L / L_{SUN} \approx 60000$$

$$T = 0.6T_{SUN}$$

$$A / A_{SUN} = 60000 / 0.6^4 = 60000 / 0.13 = 460000$$

$$D / D_{SUN} = 460000^{1/2} \approx 679$$

用Stephan-Boltzman公式估算恒星的大小

天狼星A:

$$L / L_{SUN} \approx 26$$

$$T = 9900K = 1.72T_{SUN}$$

$$A / A_{SUN} = 26 / 1.72^4 = 26 / 8.7 \approx 3$$

$$D / D_{SUN} = 3^{1/2} \approx 1.7$$

天狼星B:

$$L / L_{SUN} \approx 1 / 416$$

$$T = 15000K = 2.59T_{SUN}$$

$$A / A_{SUN} = 1 / 416 / 2.59^4 = 1 / 416 / 45 \approx 5.3 \times 10^{-5}$$

$$D / D_{SUN} = (5.3 \times 10^{-5})^{1/2} \approx 0.007$$

与地球半径相仿

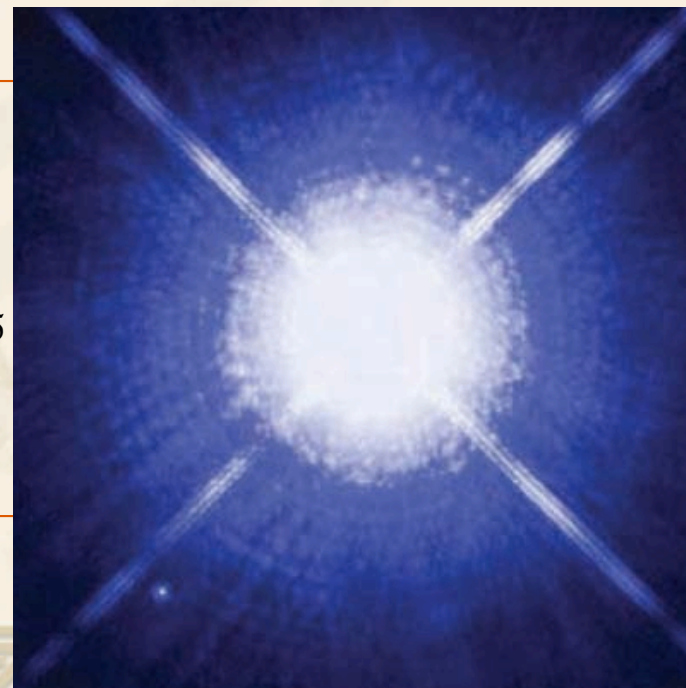
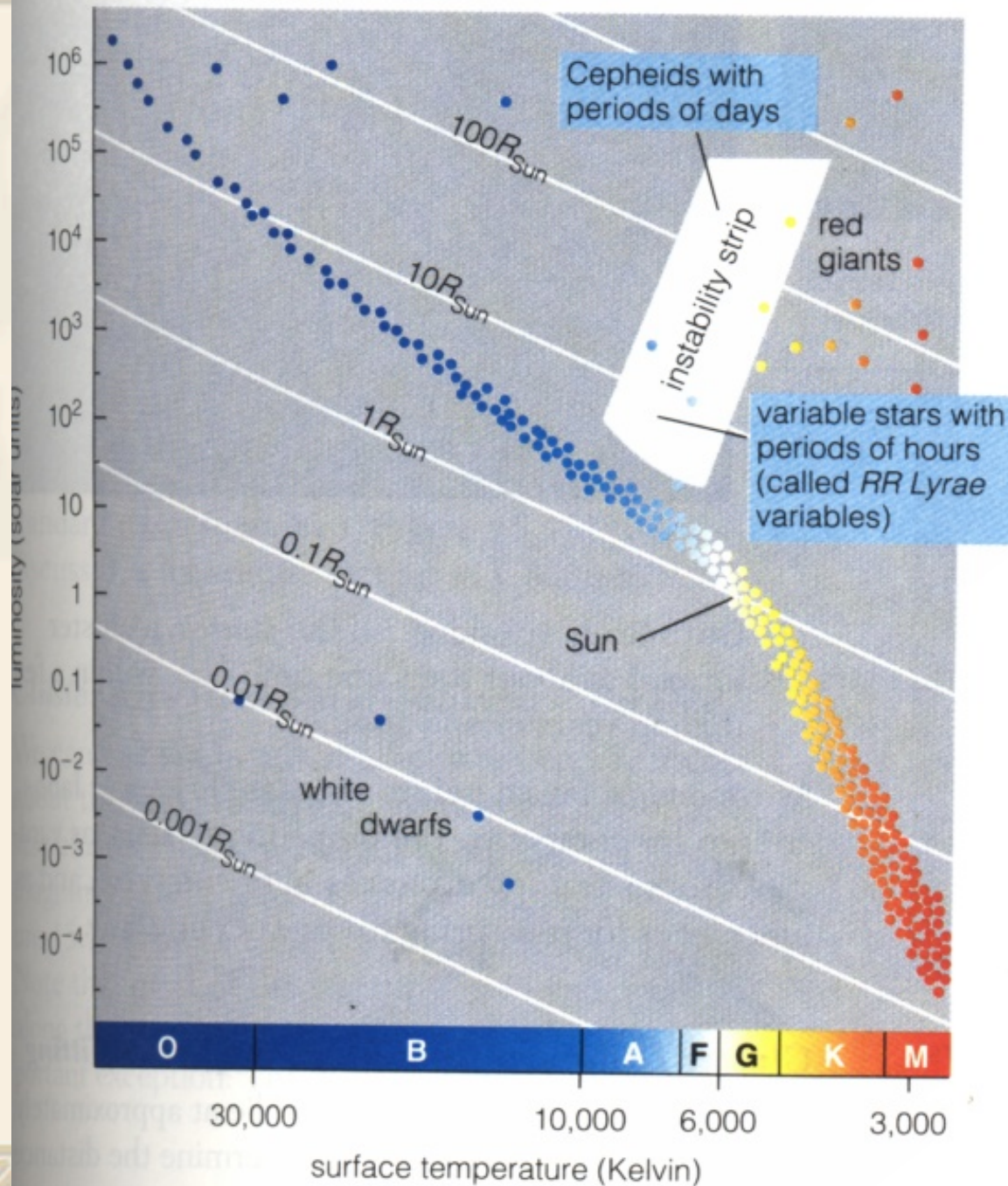


FIGURE 15.14 An H-R diagram with the instability strip highlighted.



赫罗图上的
等半径线

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

恒星的质量和密度

双星系统中：

$$P^2 = [4\pi^2 / G(M_1 + M_2)] a^3$$

- G2+A0双星系统：M=4太阳质量，则：
A0型恒星的质量为3太阳质量
- A0+F2：M=4.5太阳质量，F2型=1.5太阳质量
- 恒星的质量范围：1/15~50倍太阳质量
- 恒星的大小、质量→密度

恒星的质量-光度关系

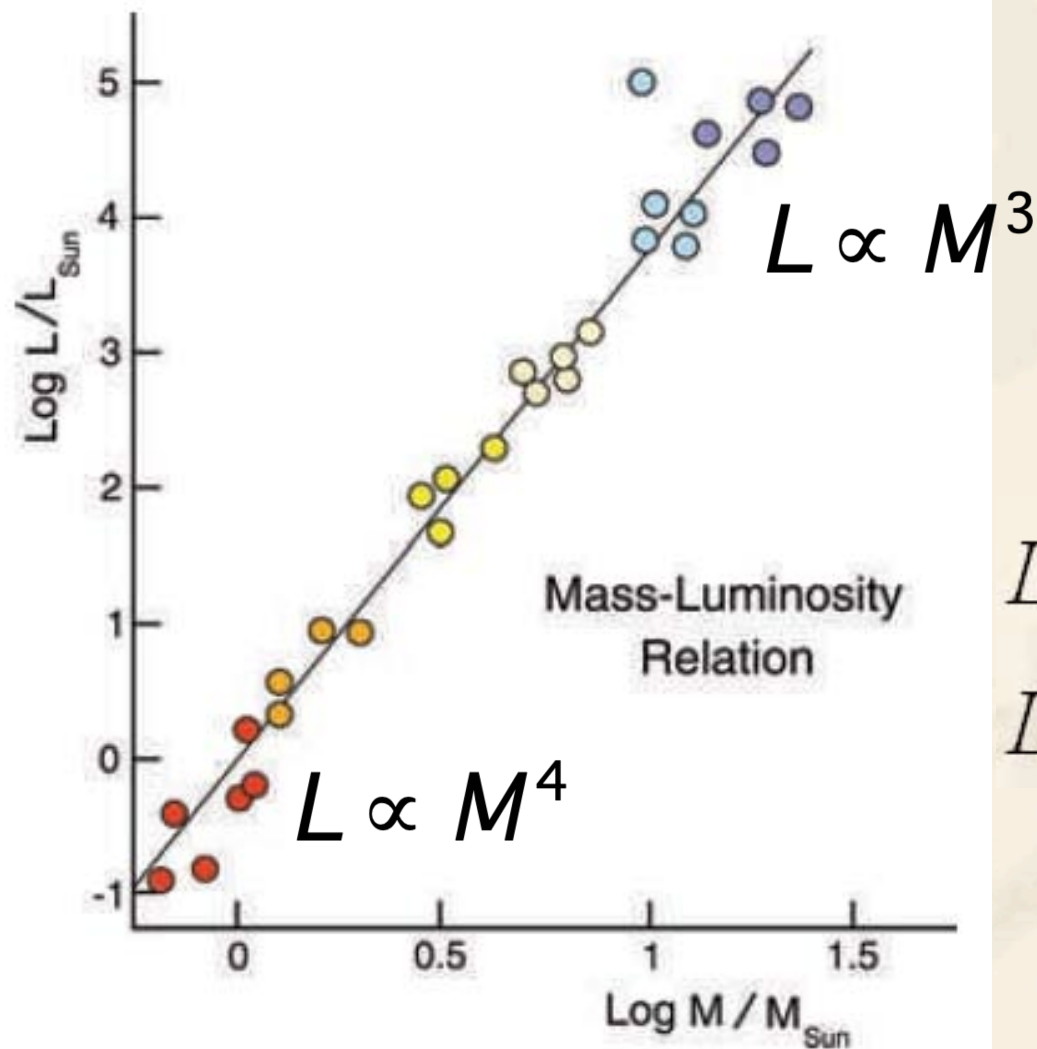


Figure 6.13 The mass-luminosity relationship.

$L \propto M^4$, 低质量恒星
 $L \propto M^3$, 高质量恒星

恒星的寿命

- 恒星内部温度越高，热核反应率越快
- 恒星的质量越大，寿命越短
- 参宿七： $M=17M_{\text{SUN}}, L=41000L_{\text{SUN}}$
 $\rightarrow t=17/41000 t_{\text{SUN}}=1/2600 t_{\text{SUN}} \sim 4$ 百万年

热光度： $L \sim 66000L_{\text{SUN}} \rightarrow t \sim 2.7$ 百万年

- 红矮星： $M=1/5M_{\text{SUN}}, L=1/10000L_{\text{SUN}}$
 $\rightarrow t \sim 2000 t_{\text{SUN}}$

内部对流，更多的H燃烧（太阳只燃烧10%的氢），寿命更长，比宇宙年龄长！