

天文学导论（III） 恒星

第06讲：太阳

第07讲：恒星

第08讲：星际介质与恒星形成

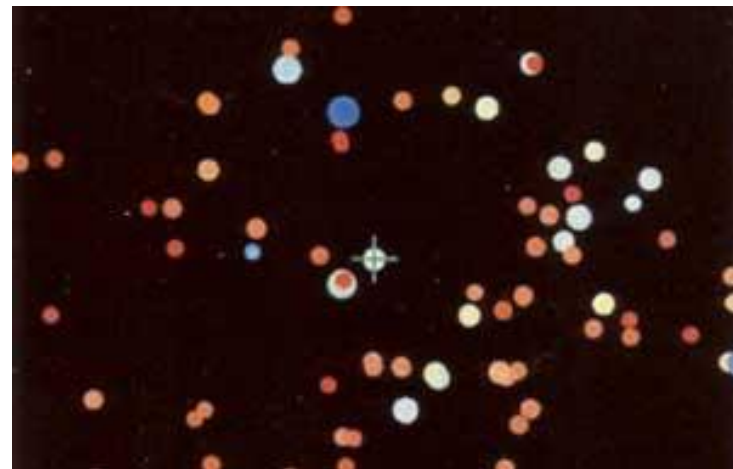
第09讲：恒星的演化

第10讲：致密星

天文学导论

第07讲

恒星的基本性质



*To man, that was in th'evening made,
Stars gave the first delight;
Admiring, in the gloomy shade,
Those little drops of light.*

Edmund Waller (1606-1687)

本讲内容

1. 恒星的距离、亮度与光度
2. 恒星的温度、大小与化学成分
3. 双星与恒星质量的测量
4. 恒星的分类
5. 赫-罗图

教材学习

Chapter 13: Taking the Measure of Stars

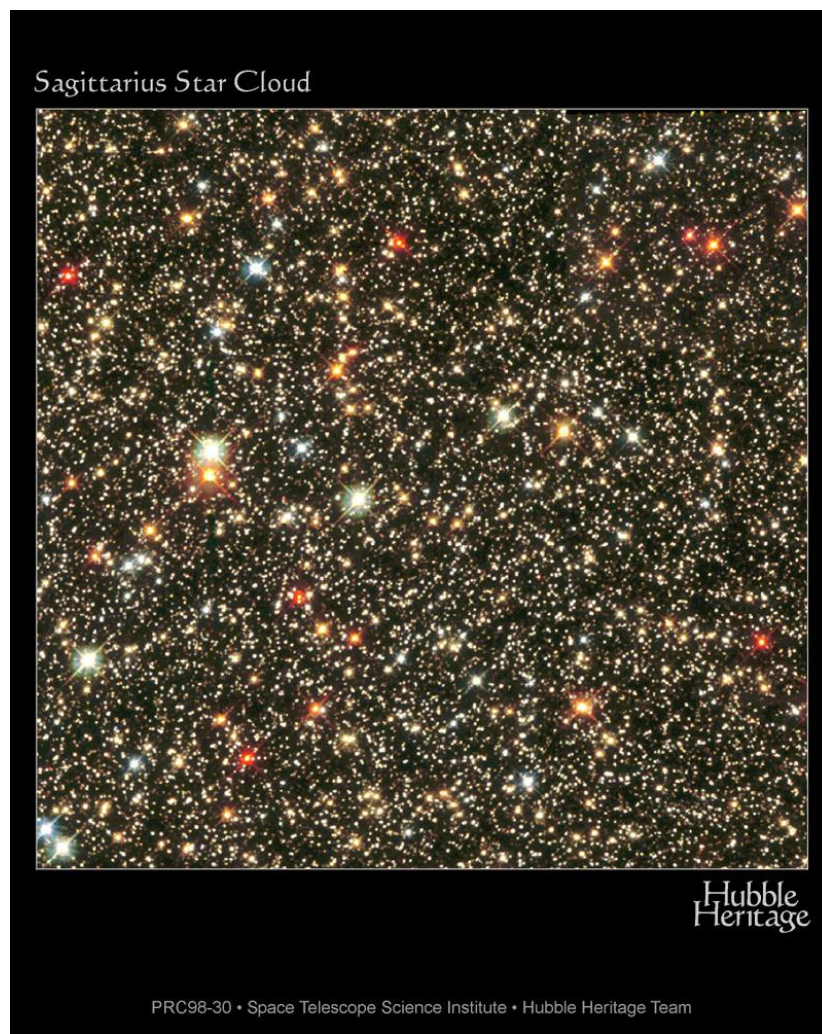
学习目标

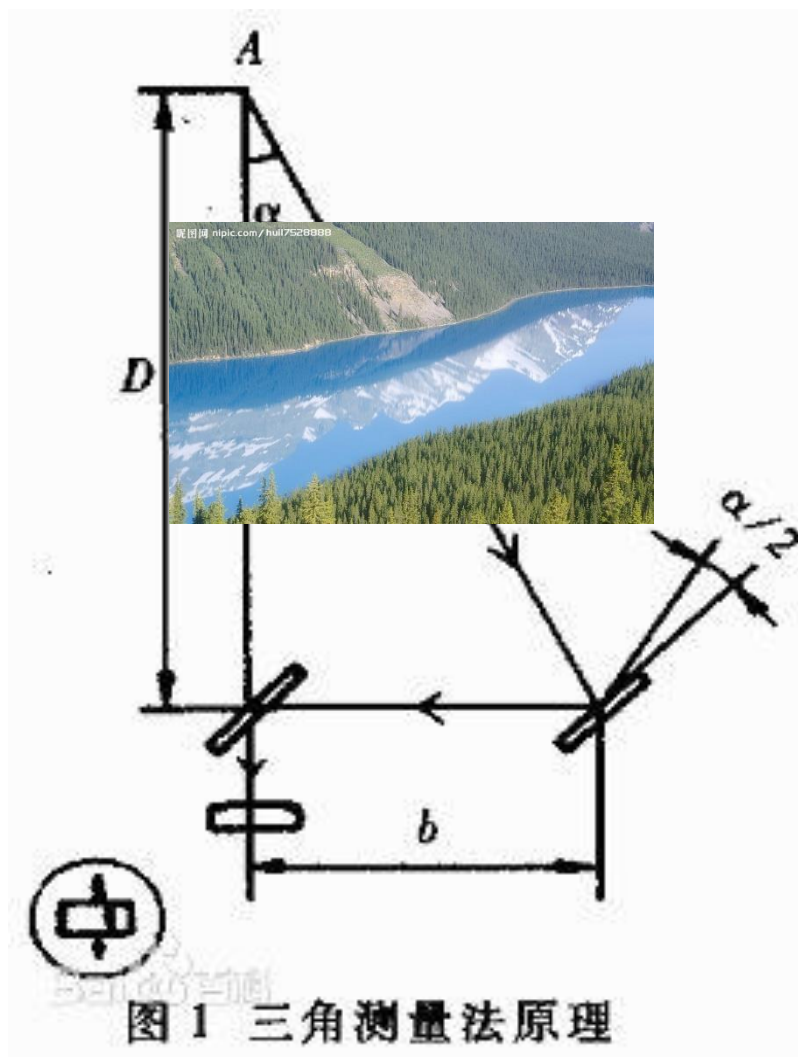
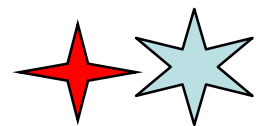
- 视差法测近邻恒星的距离，亮度(视星等)与光度和距离之关系
- 测量恒星的温度、大小与化学成分的原理
- 双星的类型，恒星质量的测量方法
- 恒星的分类（光谱型），及其性质的主要差别
- 赫-罗图，主序恒星测距离的原理

恒星是一个自引力束缚的气态球，其质量要大至足以在其核心发生热核聚变反应，为其辐射提供能源



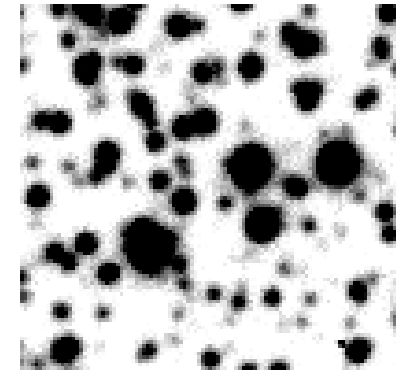
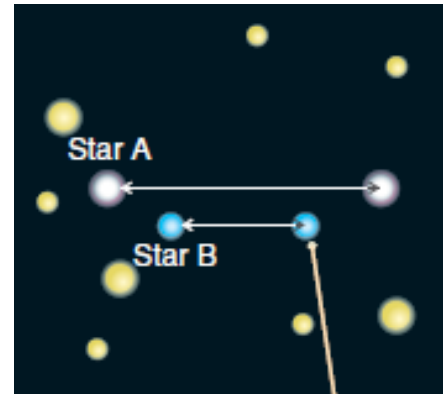
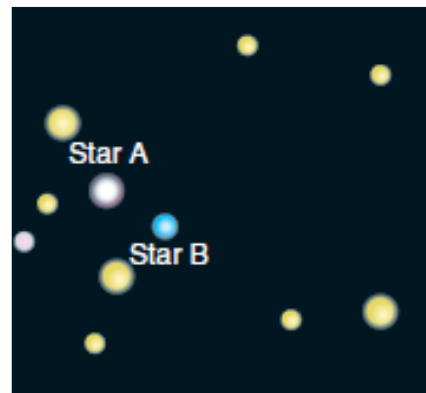
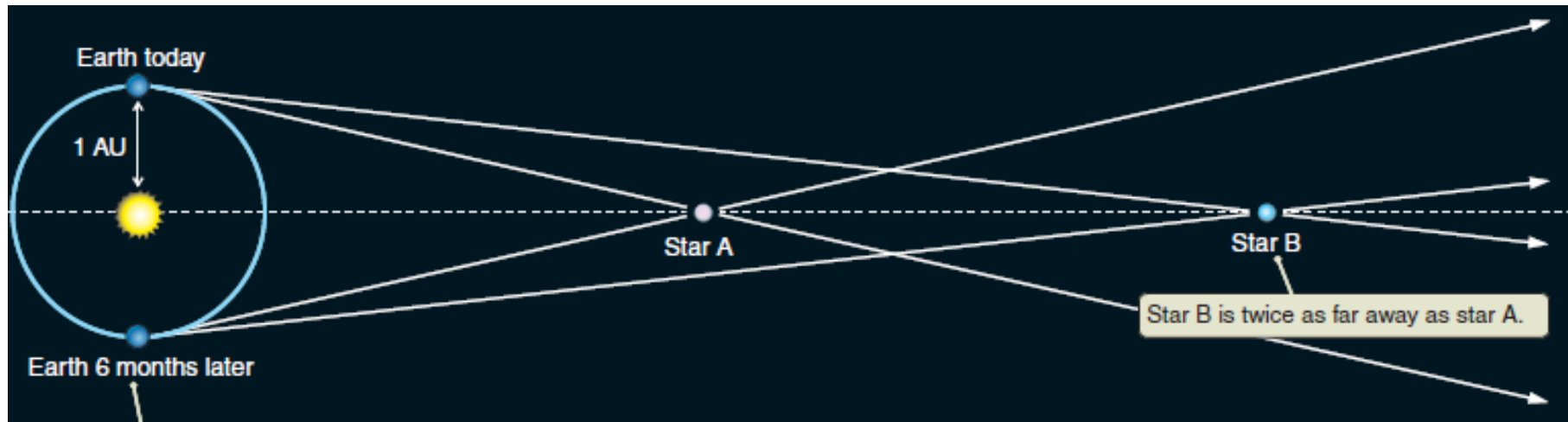
1、恒星的距离、亮度与光度





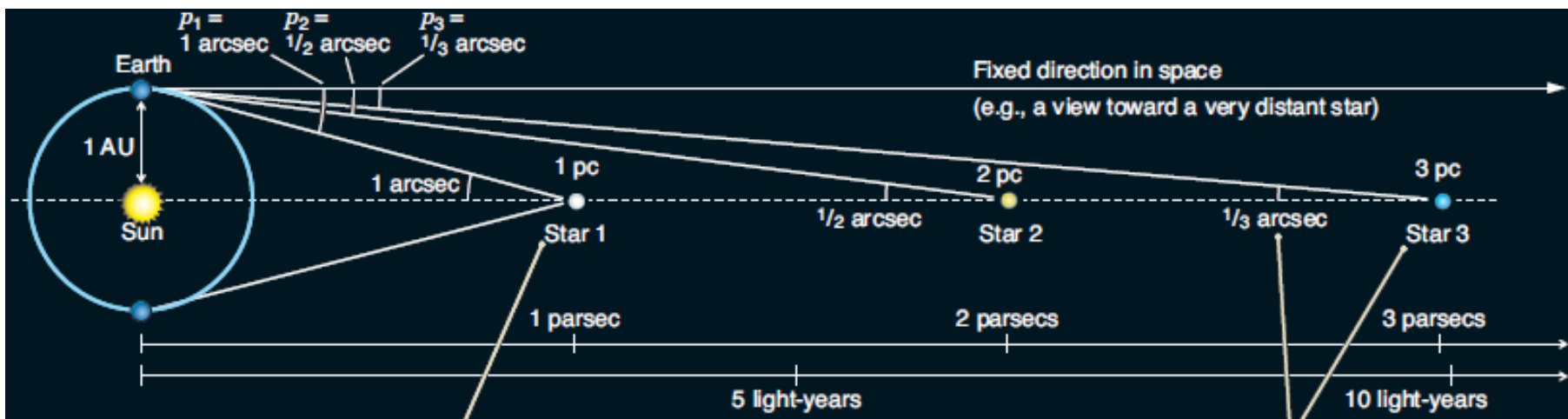
恒星的视差

在相隔半年时间内，恒星视位置变化的角大小的一半称为恒星的视差（ p ），以角秒/arcsec为单位



$p=1$ 角秒所对应的距离定义为1秒差距(parsec, pc)

- $1\text{pc} = 3.26\text{光年} = 2.06 \times 10^5 \text{ AU} = 3.09 \times 10^{16} \text{ 米}$



恒星的距离为其视差的倒数
$$d(\text{pc}) = \frac{1}{p(\text{arcsec})}$$

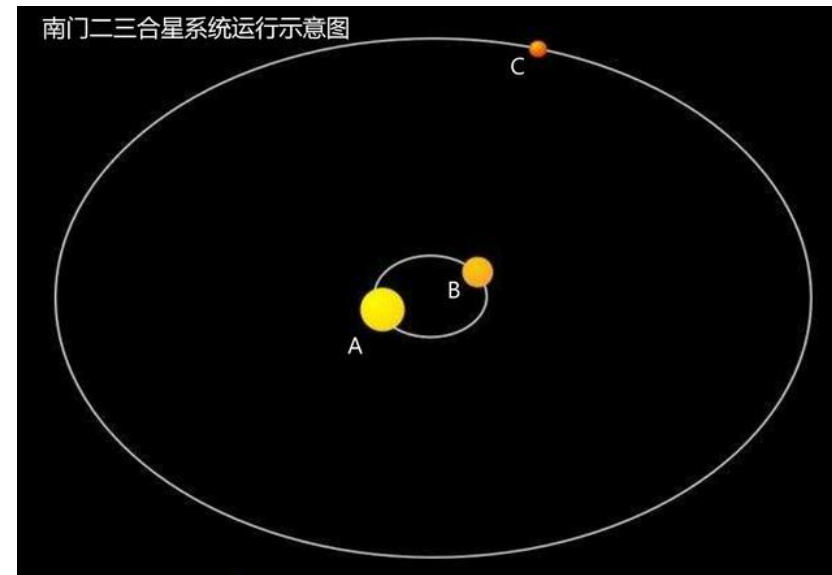
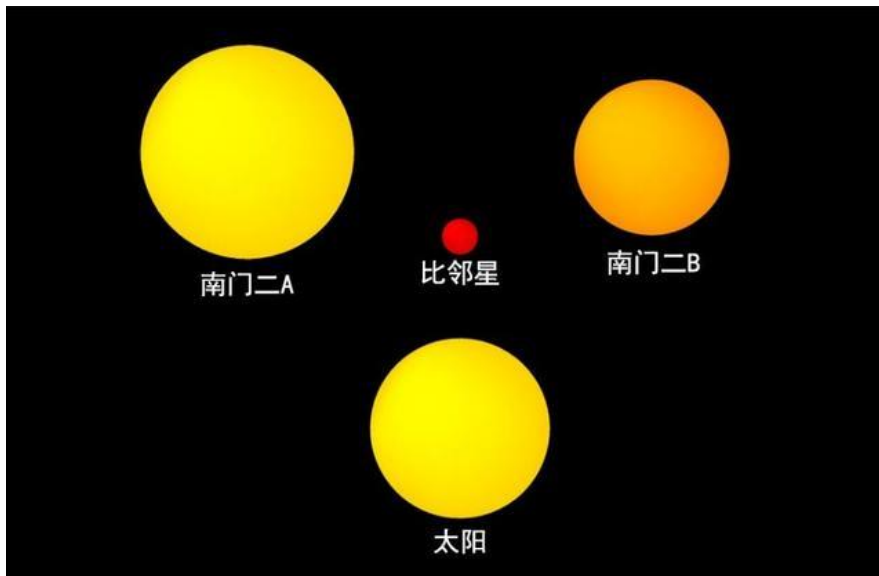


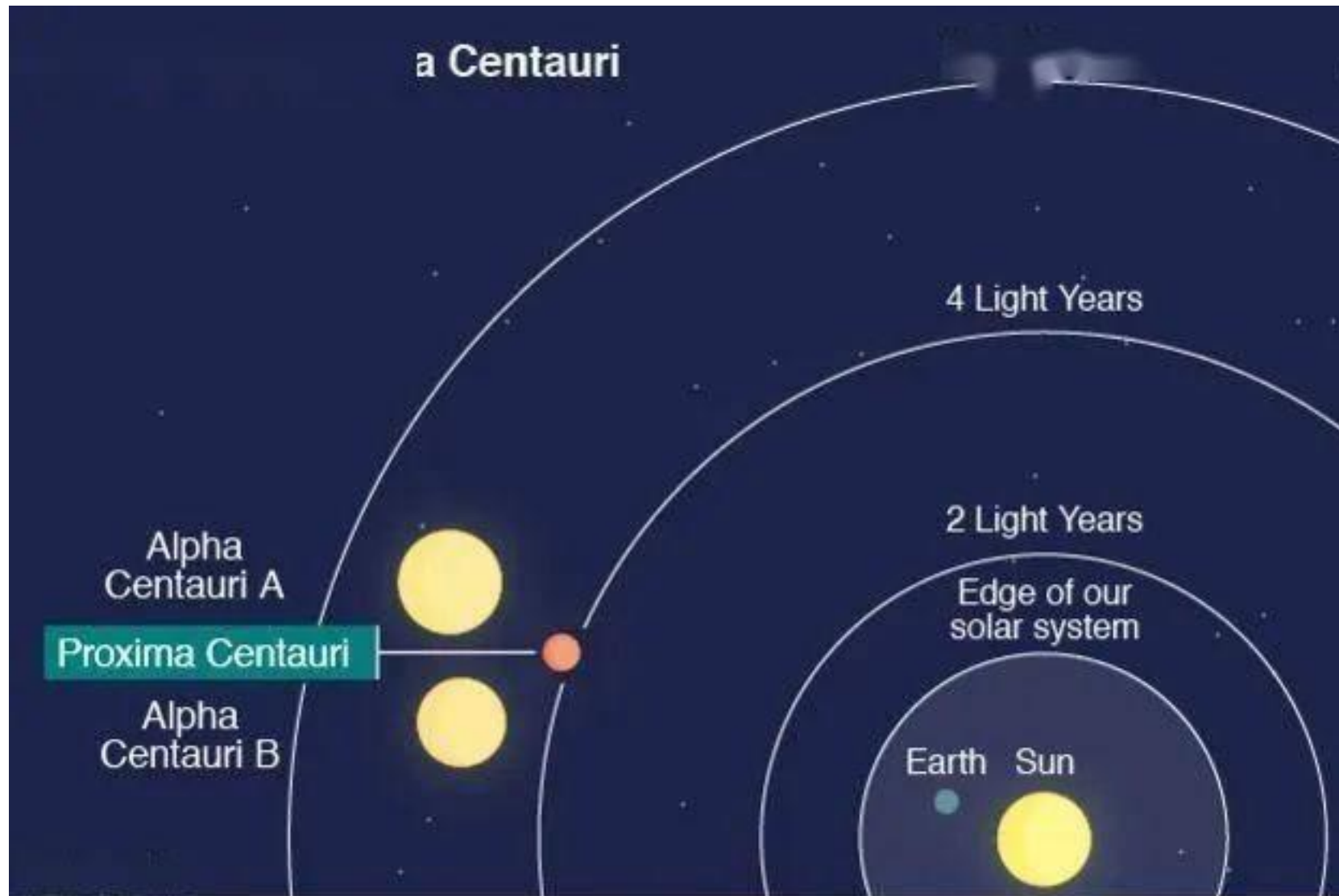
Alpha Centauri AB

Proxima Centauri

比邻星的距离

- 最近的恒星，红矮星，三合星半人马座 α 星成员
 - (α -Cen C)
- 视差 $p = 0.77''$
- 距离 $d = 1/(0.77) = 1.29 \text{ pc}$
 $= 1.29 \times 3.26 \text{ 光年} = 4.22 \text{ 光年}$





恒星的[视]亮度

- 恒星（天体）的[视]亮度：恒星在单位时间照到接收设备单位面积上的辐射能量
- 150 BC, 喜帕恰斯/依巴谷标定肉眼可见的恒星为6个视亮度等级，1等星最亮，6等星最暗
- 定义：1等星的亮度是6等星的100倍
 - 星等差1，亮度差2.512倍

$$2.512^{(m_2 - m_1)}$$

- 恒星视亮度用视星等表示，即以恒星视亮度 b 的对数来表示

$$m = -2.5 \log_{10} (b / b_0)$$

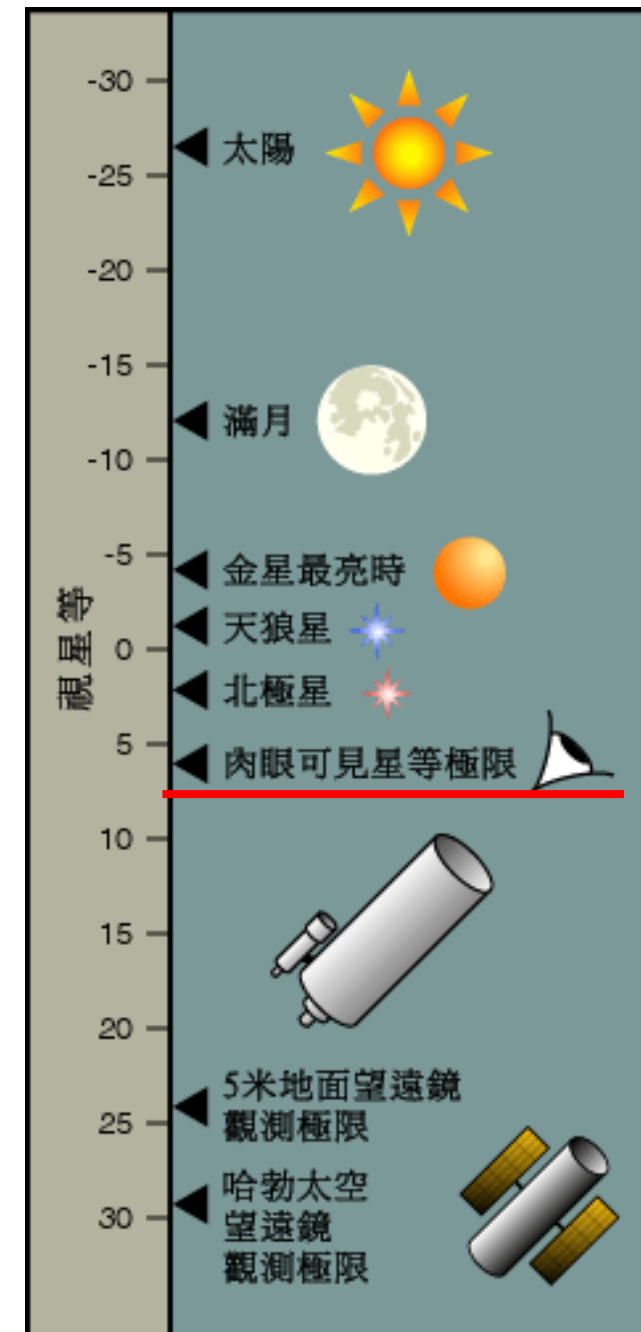
- 定标值 b_0 即为0等星的视亮度
 - 织女星的视星等为0.03，其亮度非常（最）接近 b_0

$$m_2 - m_1 = -2.5 \log_{10} \left(\frac{b_2}{b_1} \right)$$

$$\frac{b_2}{b_1} = 10^{-0.4 \times (m_2 - m_1)}$$

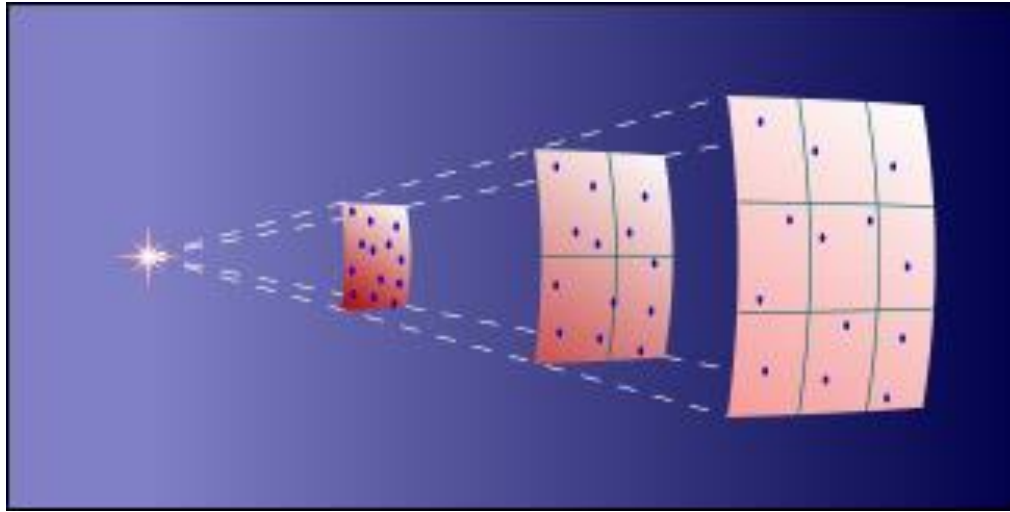
常见天体的视星等

- 太阳: -26.7^m
- 满月: -12.6^m
- 金星最亮: -4.4^m
- 天狼星: -1.46^m
- 最大地面望远镜可观测最暗星等: 25^m
- HST可观测最暗星等: 30^m
- 天体的观测亮度跟有效波段有关, 产生不同的星等系统



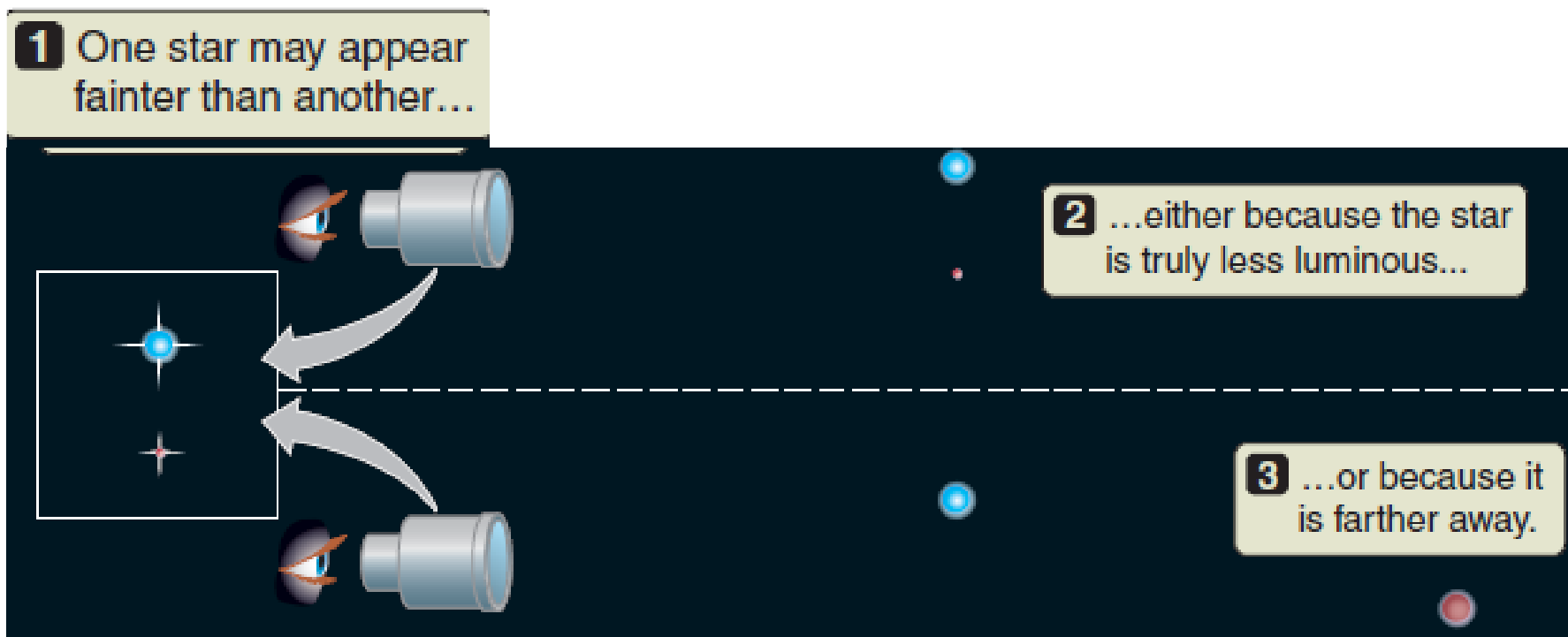
辐射的距离平方反比定律

$$\text{Brightness} = \frac{\text{Total light emitted per second}}{\text{Area of a sphere of radius } d} = \frac{\text{Luminosity}}{4\pi d^2}$$



如果恒星的距离倍增，亮度变为原亮度的1/4，则视星等增加 ~1.5

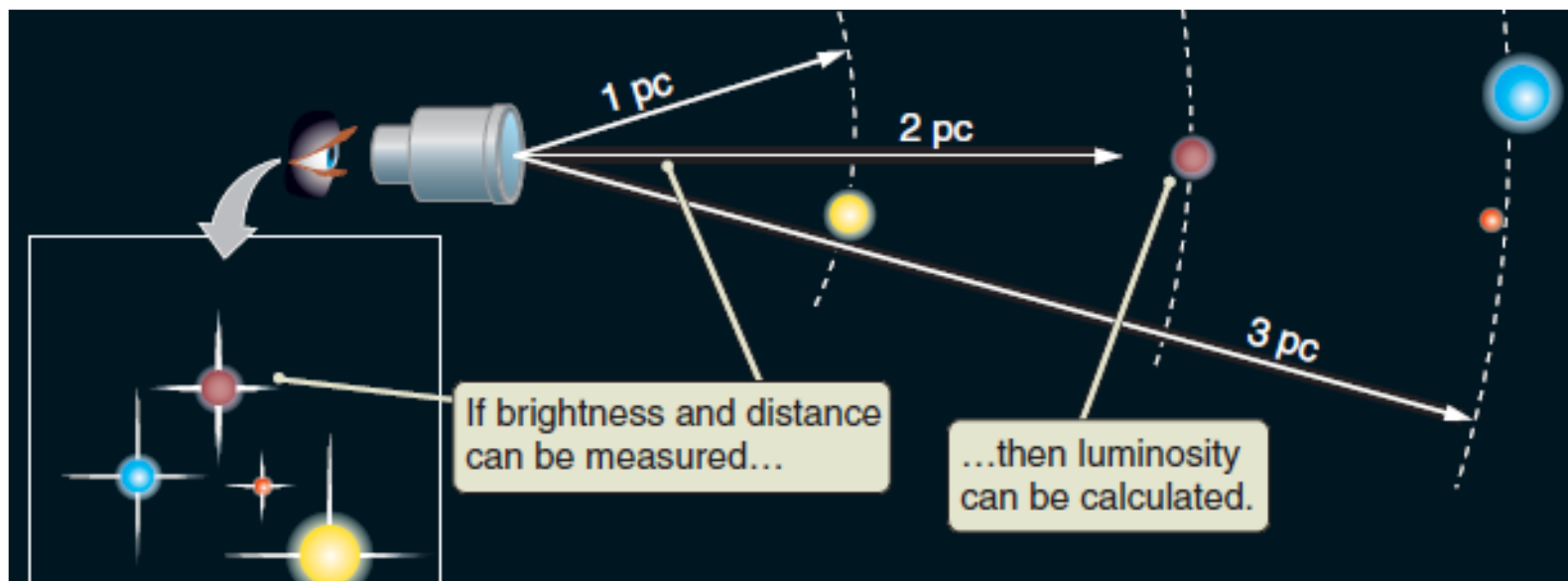
视亮度（视星等）没有直接的物理意义



恒星的光度

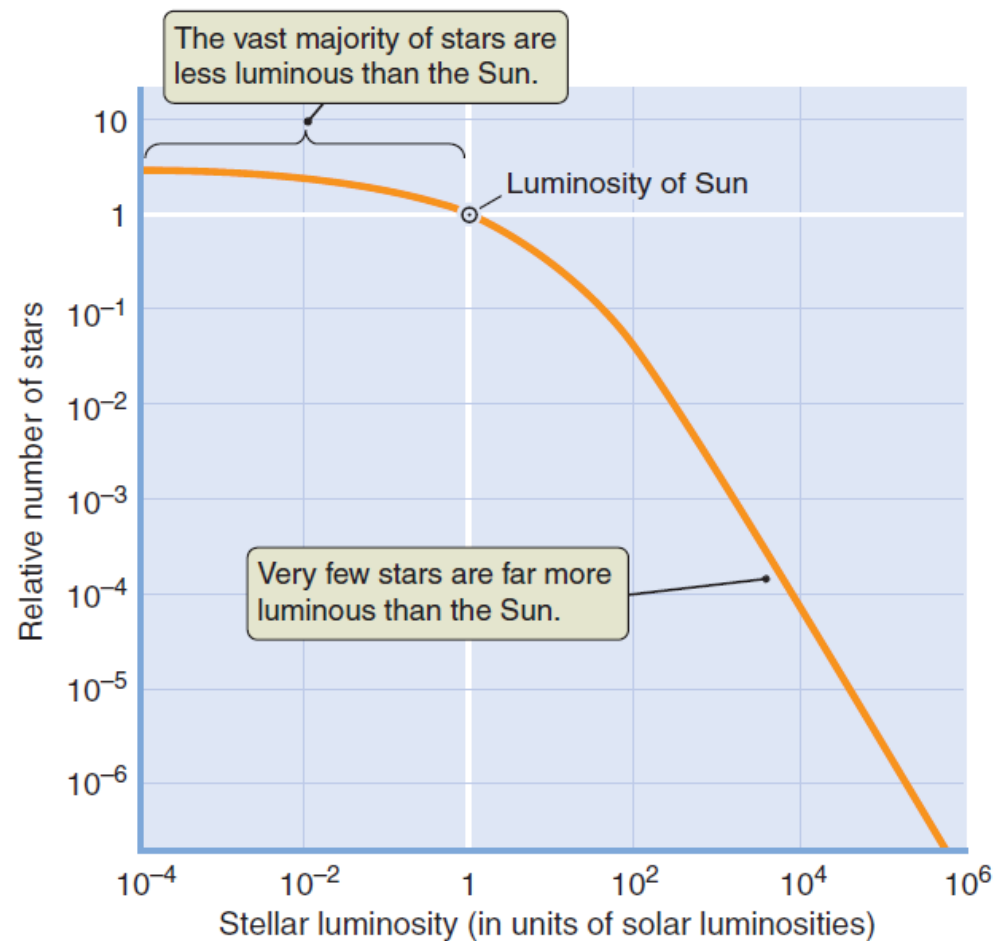
- **光度**（L）是恒星表面每秒所发出的辐射（总功率），表征恒星的固有特征
- 如距离和亮度已知，可得光度：

$$\text{Luminosity} = 4\pi d^2 \times \text{Brightness}$$



- 太阳光度用 L_{\odot} 表示
- 恒星光度范围: $10^6 L_{\odot}$ $0.0001 L_{\odot}$

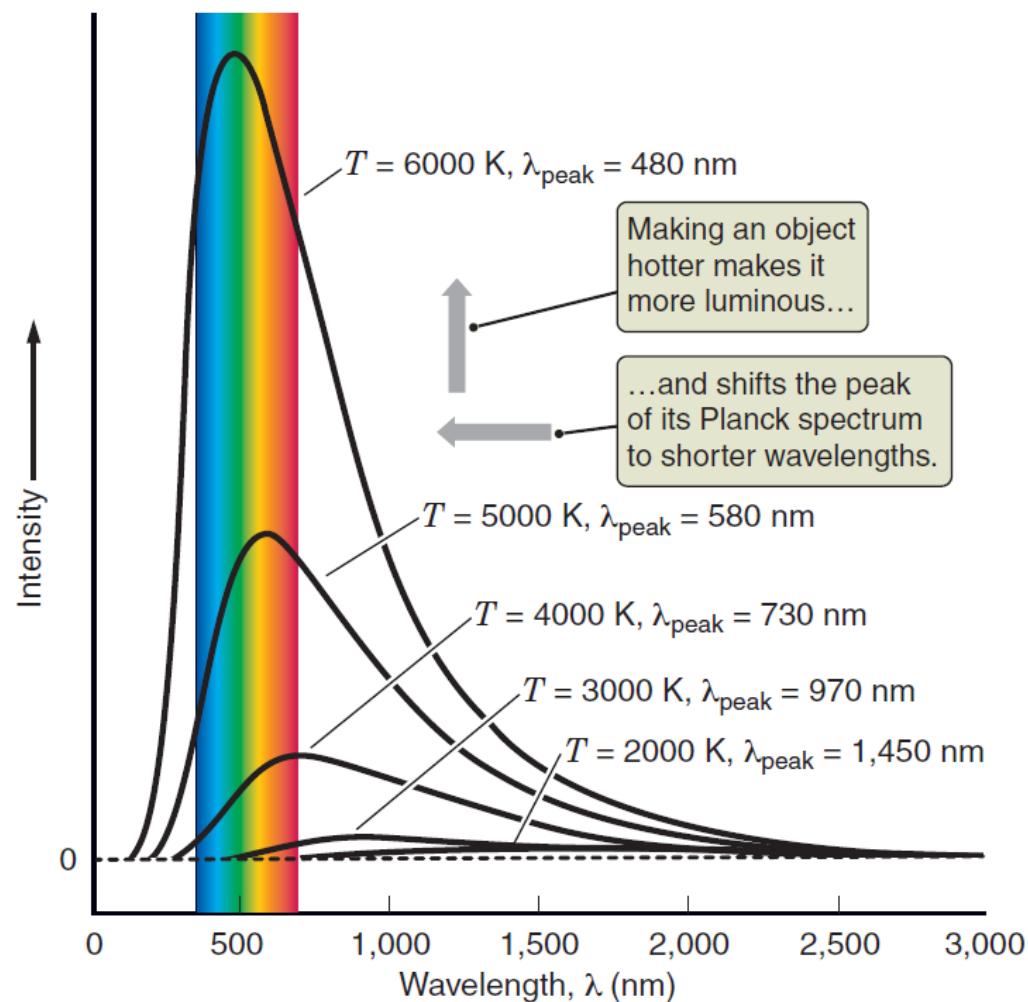
低光度恒星数量比高
光度恒星数量多得多



光度常用绝对星等替代

- 绝对星等是恒星在标准距离（即10秒差距）的视星等，用 M 表示
- 太阳： $m = -26.9$ ，但 $M = 4.8$
- 距离模数： $m - M = 5 \log(d) - 5$

2、恒星的温度、大小与化学成分

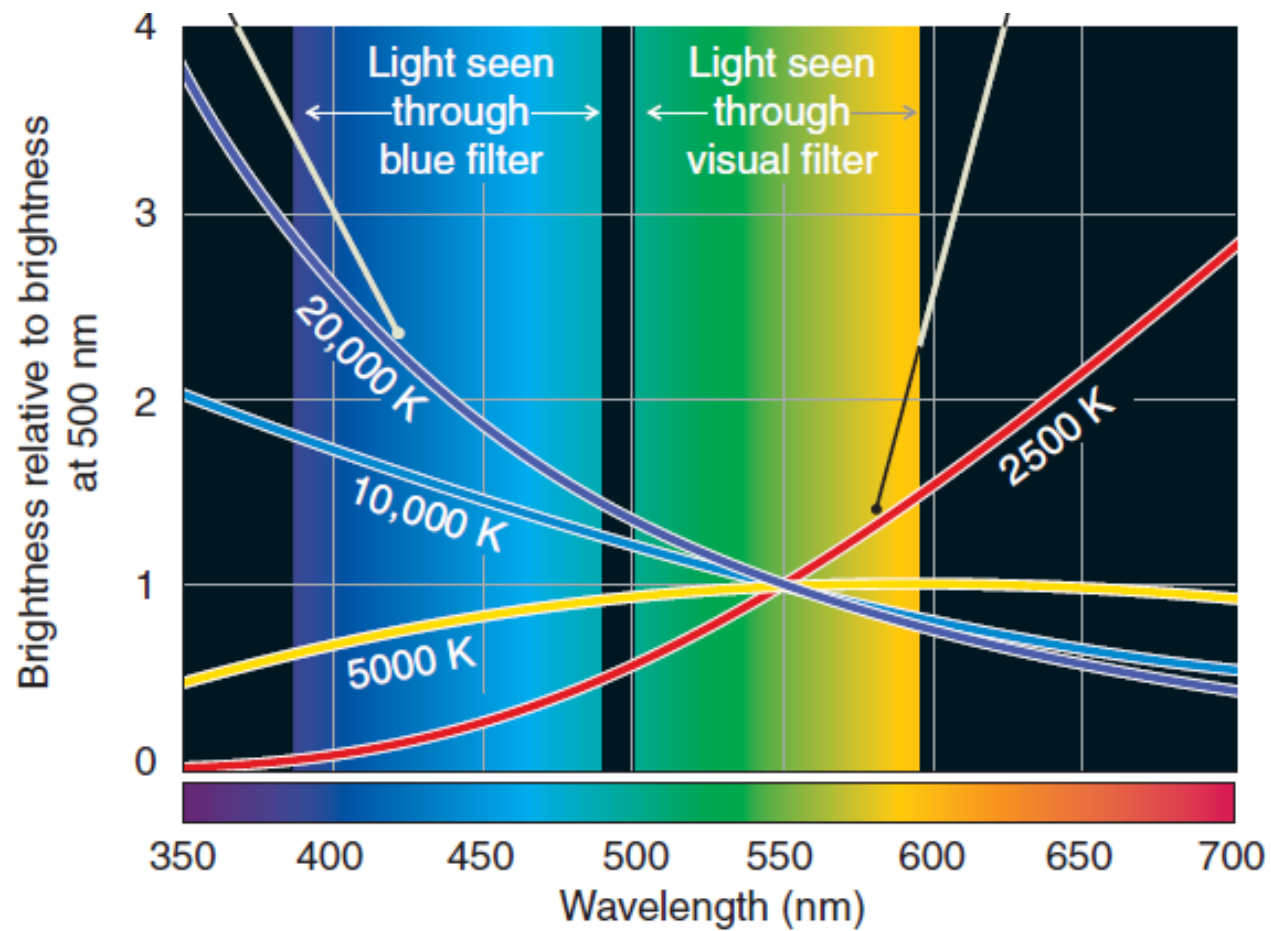


维恩位移定律测恒星表面温度

$$T = \frac{2900}{\lambda_{peak}} \quad (\lambda \text{ in } \mu\text{m}, T \text{ in K})$$

- 由恒星的“完整”光谱（通过黑体谱拟合）可确定恒星的表面温度
- 恒星的颜色代表恒星的表面温度
- 低温恒星比高温恒星恒星数量多得多

通常用两个波长（通过滤光片）亮度的比值测量恒星的表面温度：蓝色 [B] 滤光片（~440纳米）vs 黄绿 [V] 滤光片（~550纳米）



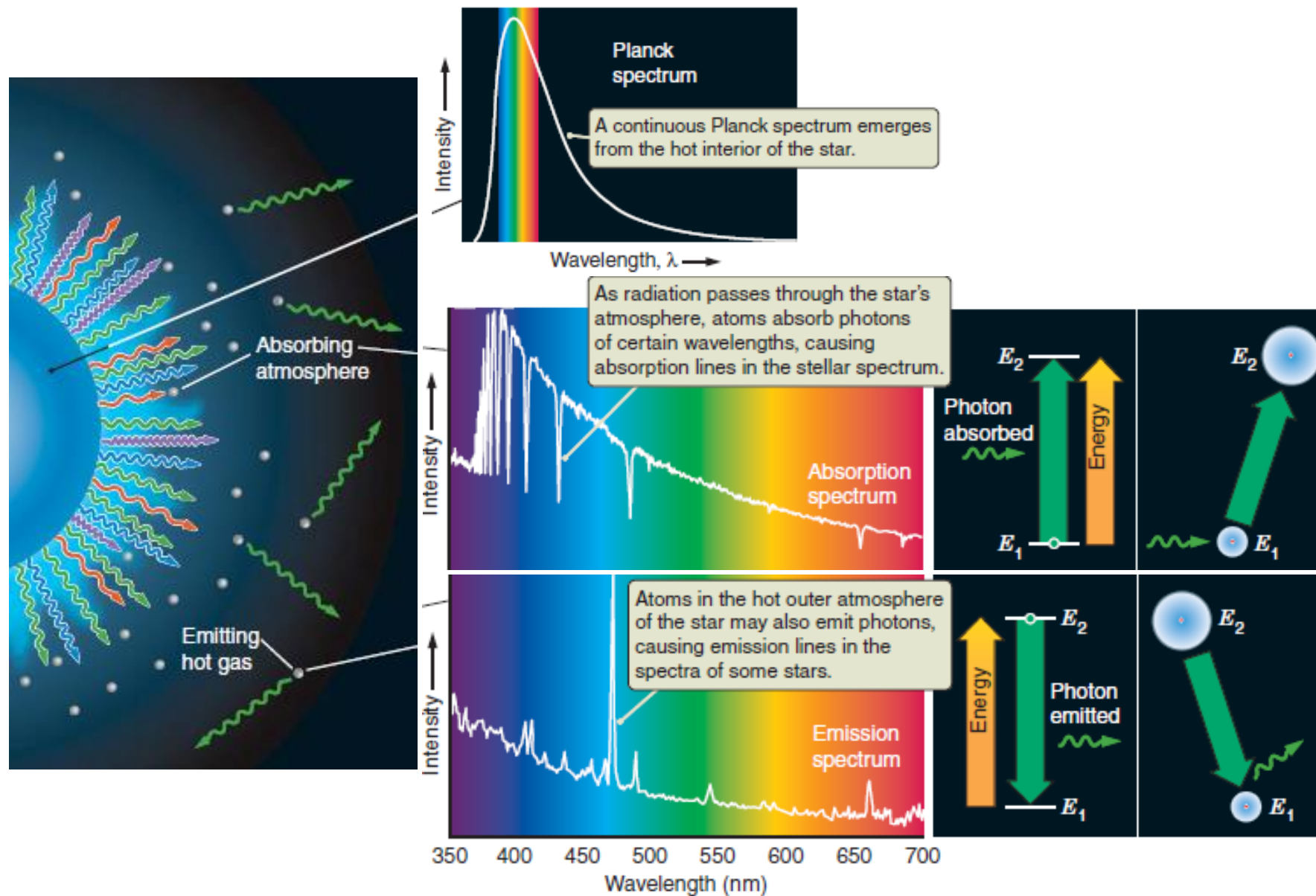
色指数 Color Index

- 色指数 = 不同颜色（波段）视星等的差

$$B - V \text{ color} = m_B - m_V = \underbrace{-2.5}_{\uparrow} \log_{10} (b_B/b_V)$$

- 色指数 ~ 两个波段亮度之比的对数 ~ 表面温度
- 恒星越兰, b_B/b_V 越大 \rightarrow B-V 越小

恒星的光谱不是平滑连续的黑体谱



- 谱线可测量恒星的化学成分
(及其它物理特征)
- 不同吸收线表明原子种类
- 不同吸收线的强度表明不同原子的丰度
- 恒星主要由氢(~90%)和氦(~10%)构成
- 重元素的含量多少提供化学元素的起源及宇宙的化学演化

TABLE 13.1 | The Chemical Composition of the Sun's Atmosphere*

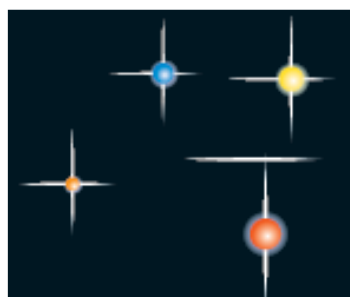
Element	Percentage by Number [†]	Percentage by Mass ^{††}
Hydrogen	92.5	74.5
Helium	7.4	23.7
Oxygen	0.064	0.82
Carbon	0.039	0.37
Neon	0.012	0.19
Nitrogen	0.008	0.09
Silicon	0.004	0.09
Magnesium	0.003	0.06
Iron	0.003	0.16
Sulfur	0.001	0.04
Total of others	0.001	0.03

*The relative amounts of different chemical elements in the atmosphere of the Sun.

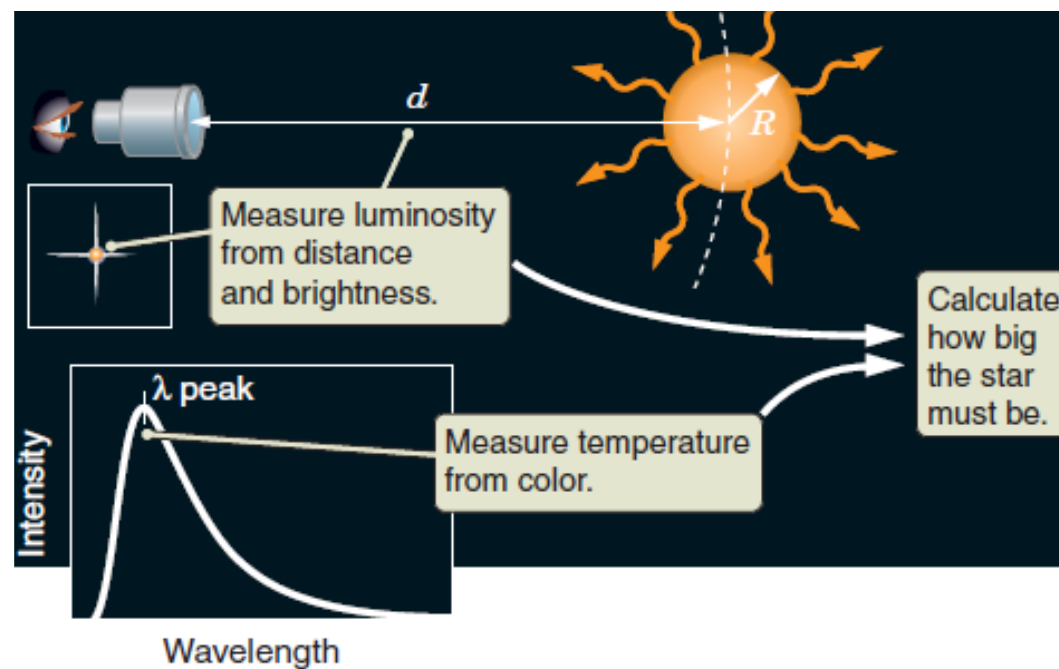
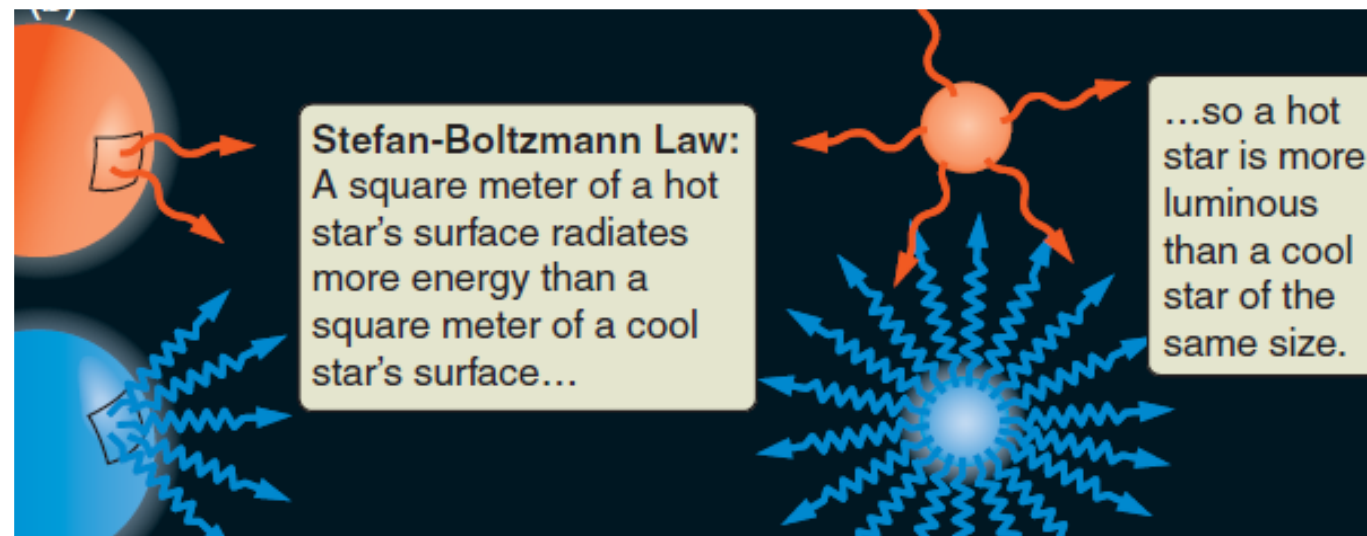
[†]The percentage of atoms in the Sun accounted for by the listed element.

^{††}The percentage of the Sun's mass consisting of the listed element.

斯-玻定律确定恒星的半径



Wien's Law:
Blue stars are hot,
red stars are cool.



- 通过距离和亮度测光度

$$L = 4\pi d^2 \times \text{Brightness}$$

- 维恩定律确定恒星的表面温度

$$T = \frac{2900}{\lambda_{peak}} \quad (\lambda \text{ in } \mu\text{m}, T \text{ in K})$$

- 斯-玻定律确定恒星半径

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

$$R = \sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma}} \times \frac{1}{T^2}$$

光度-温度-半径关系

红超巨星参宿四的半径

$$\frac{L_{\text{star 1}}}{L_{\text{star 2}}} = \frac{R_{\text{star 1}}^2}{R_{\text{star 2}}^2} \times \frac{T_{\text{star 1}}^4}{T_{\text{star 2}}^4}$$

$$\frac{R_{\text{star 1}}}{R_{\text{star 2}}} = \sqrt{\frac{L_{\text{star 1}}}{L_{\text{star 2}}}} \times \frac{T_{\text{star 2}}^2}{T_{\text{star 1}}^2}$$

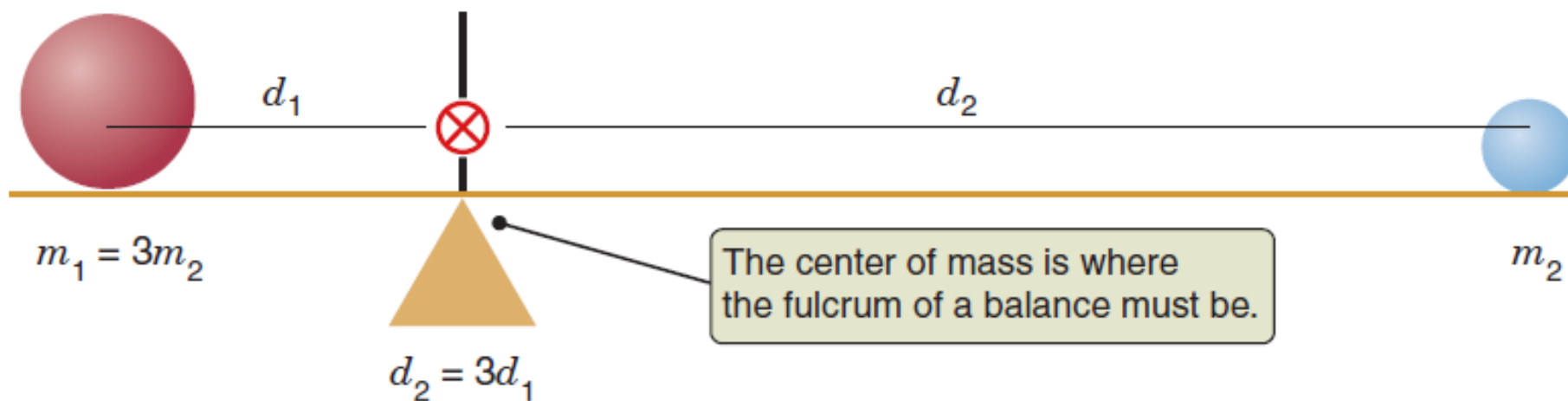
$$\begin{aligned} \frac{R_{\text{Betelgeuse}}}{R_{\text{Sun}}} &= \sqrt{\frac{L_{\text{Betelgeuse}}}{L_{\text{Sun}}}} \times \frac{T_{\text{Sun}}^2}{T_{\text{Betelgeuse}}^2} \\ &= \sqrt{\frac{140,000}{1}} \times \frac{5,800^2}{3,500^2} = 374 \times 2.7 = 1,030 \end{aligned}$$

小恒星数量远多于大恒星数量



3、双星与恒星质量的测量

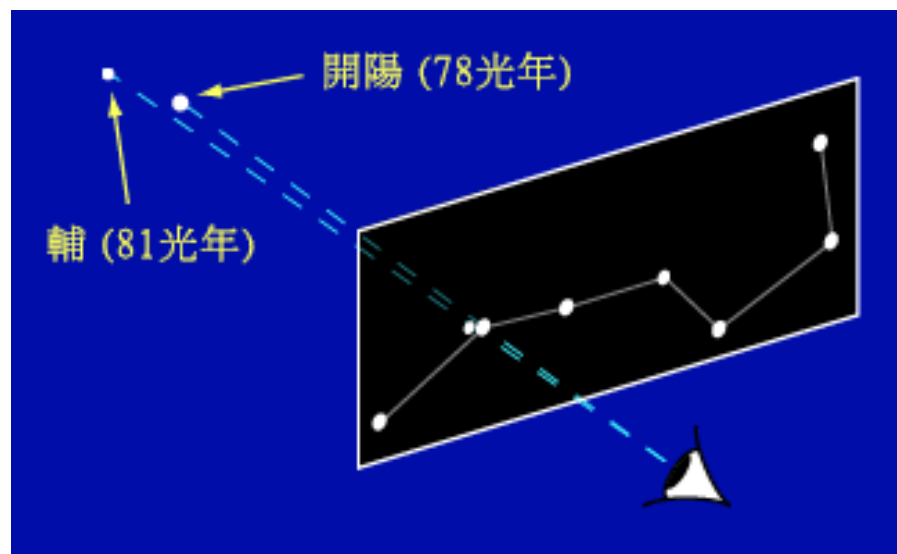
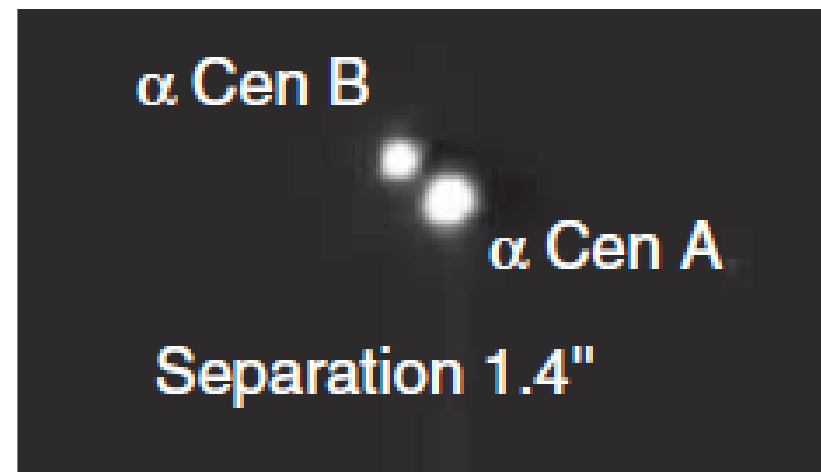
- 恒星往往组成双星系统
- 双星围绕其质心的轨道运动提供了测量恒星质量的机会



双星的分类

- 根据发现的方法，双星分为4类：
 - 目视双星
 - 分光双星
 - 食双星
 - 天体测量双星
- 一个双星可属于多个类型

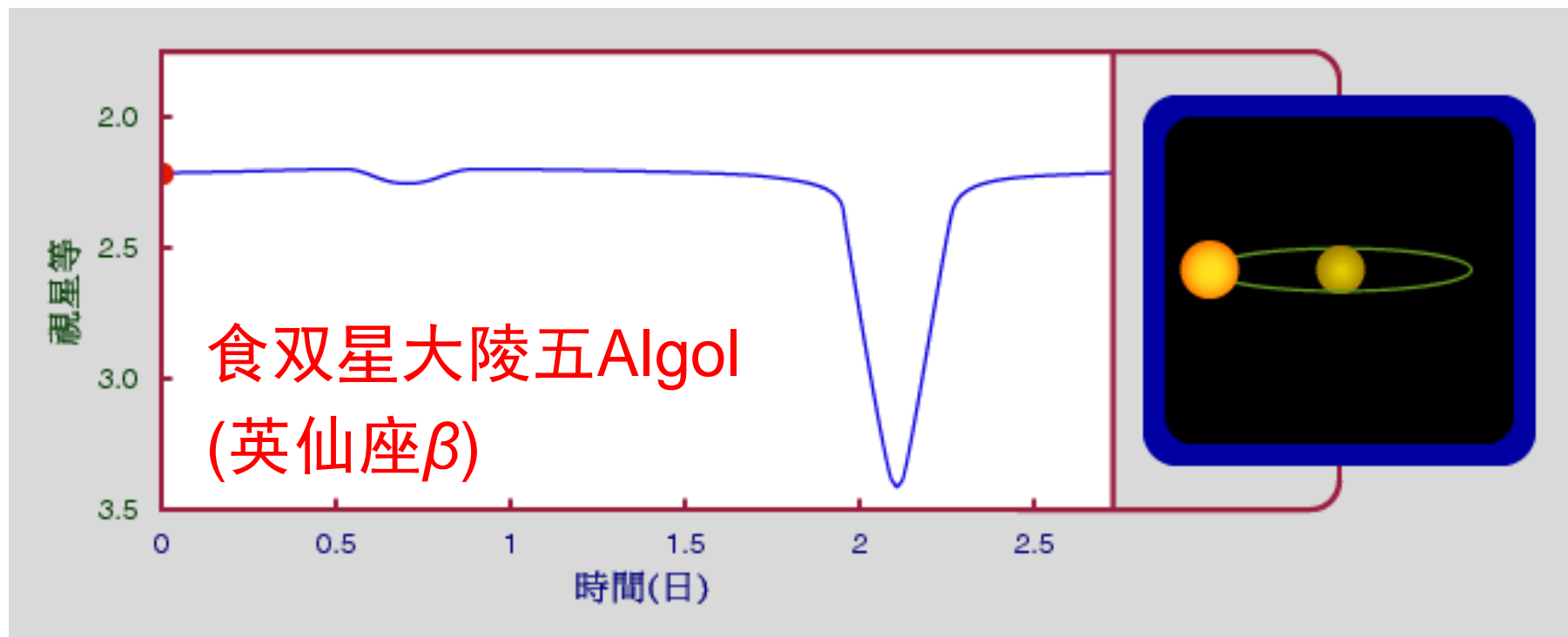
目视双星：双星系统的两个成员星可以直接分辨开



假光学双星

食双星

如果轨道侧对我们，双星中的每个成员都会从另一颗星的前方经过，遮挡部分光线，引起双星〔总〕亮度的周期性变化



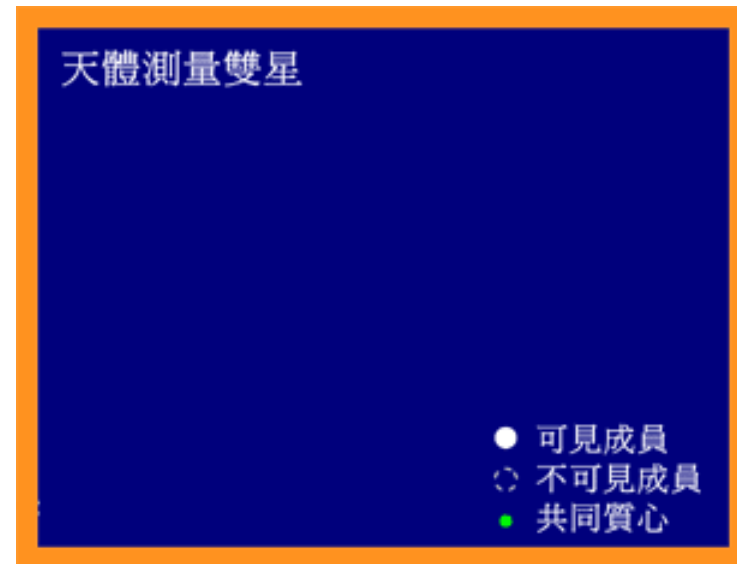
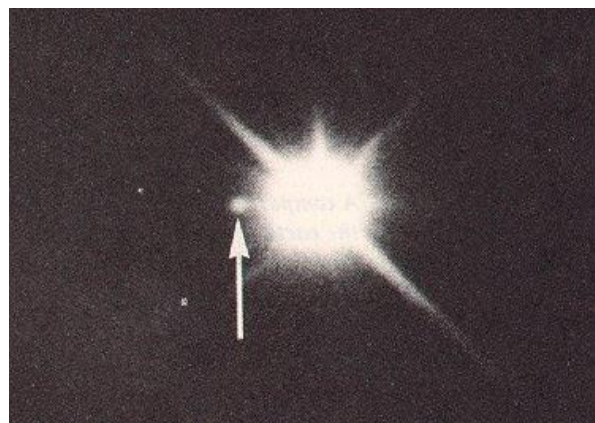
分光双星

- 尽管不能直接分辨，但可从光谱认定它们是双星
- 双星系统的轨道运动所造成的多普勒效应使光谱中的（两套）吸收线发生周期性的位移
- 双星的视向速度曲线（例子见后）

天体测量双星

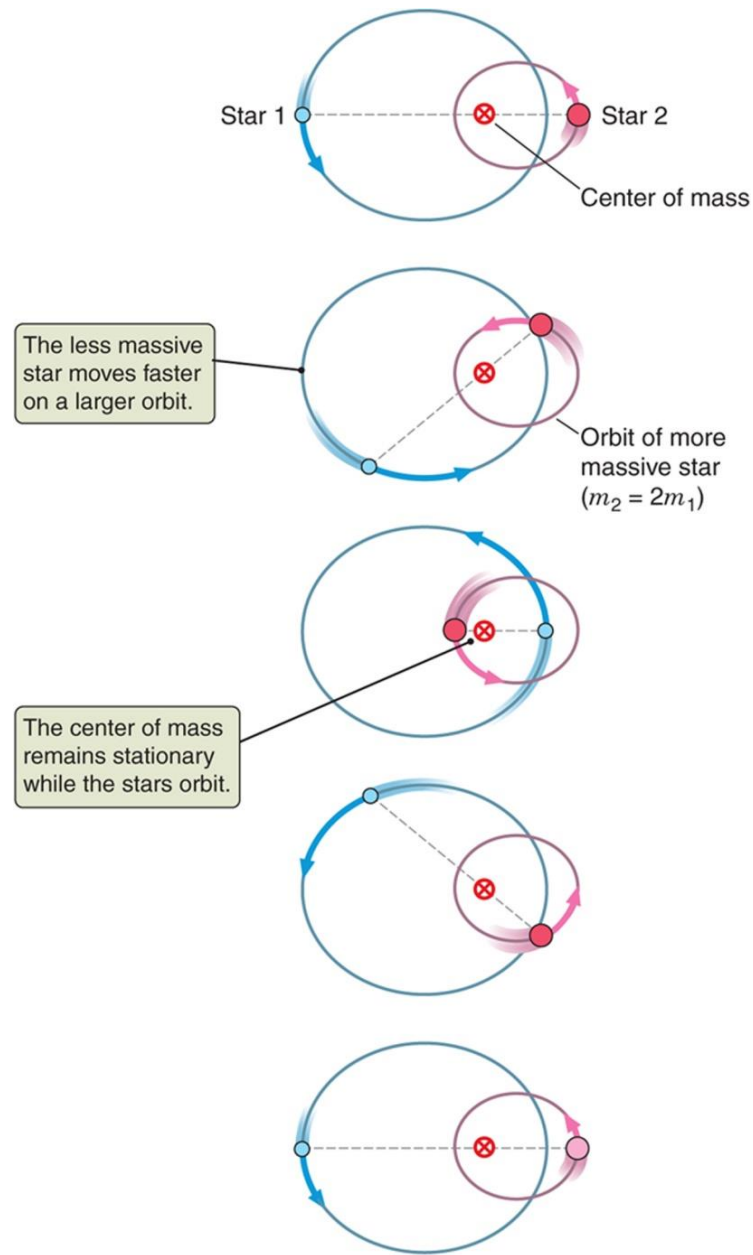
- 有时双星中的一个成员由于暗弱不可见，但可通过可见恒星的移动情况得知其伴星的存在
- 由于双星围绕其质心运动，所以假若某星有隐形伴侣，它便以波浪形而非一般的直线运动

天狼星及其白矮星伴星



双星的轨道特征

- 每个恒星都在围绕它们的质心做椭圆轨道运动
- 质心为两个椭圆轨道的共同焦点，保持固定
- 两个恒星总是位于质心的两侧，运动方向总是相反
- 大质量恒星的椭圆轨道小，小质量恒星的椭圆轨道大，但形状和周期相同

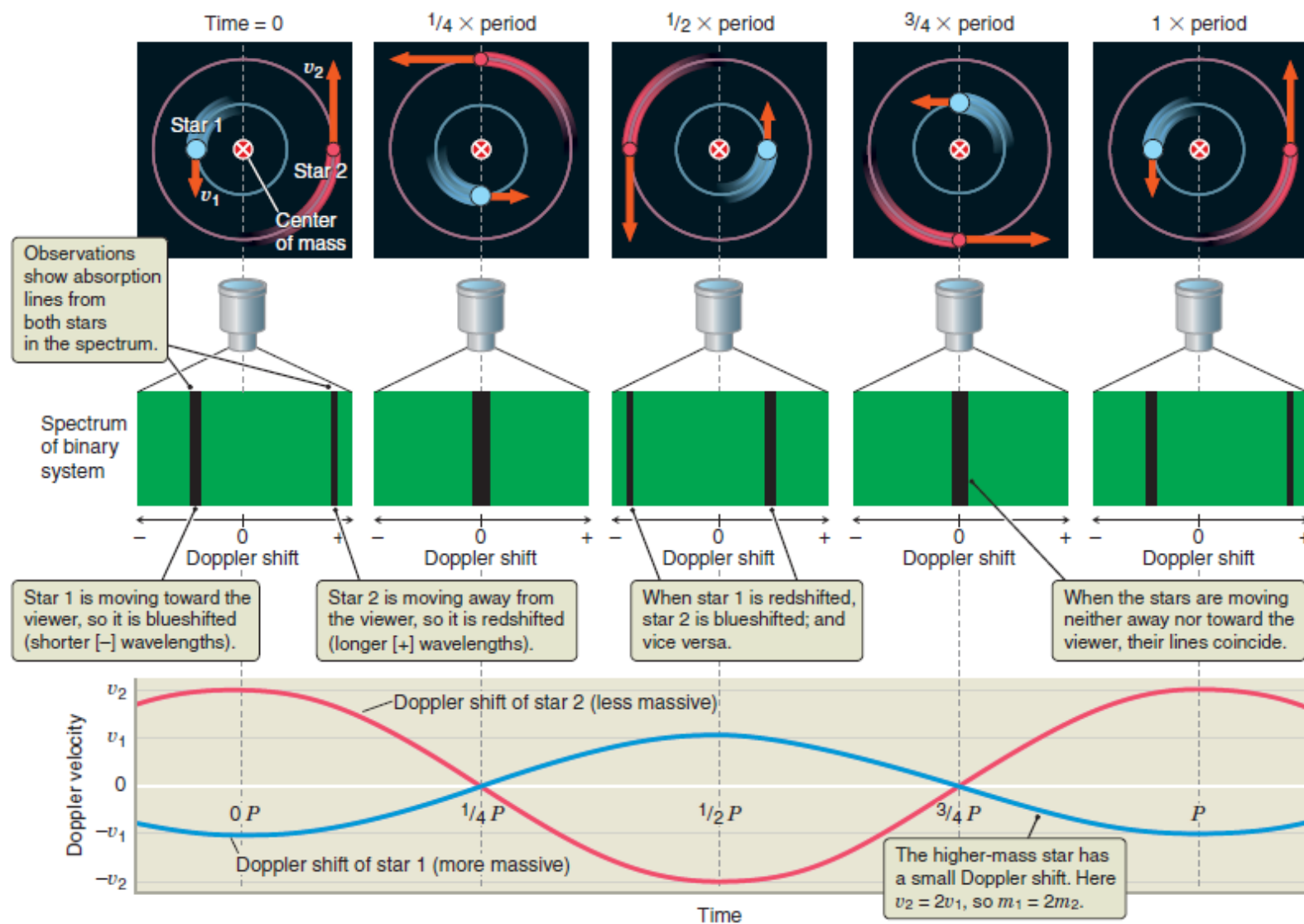


双星的质量比

- 小质量恒星的轨道大，因此必定运动快
- 恒星的轨道周长与其质量成反比
- 恒星的运动速度与其质量成反比

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

多普勒位移的比值给出恒星的速度比



双星的总质量

开普勒第三定律确定双星系统的总质量

$$P^2 = \frac{4\pi^2 A^3}{G(m_1 + m_2)}$$

A: 椭圆轨道半长轴之和 (AU)

P: 轨道周期 (年)

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{G} \times \frac{A^3}{P^2}$$

$$m_1(M_{sun}) + m_2(M_{sun}) = \frac{(A_{AU})^3}{(P_{years})^2}$$

由总质量与质量比可确定每个恒星的质量

$$\frac{m_1}{M_{\odot}} + \frac{m_2}{M_{\odot}} = \frac{(A_{\text{AU}})^3}{(P_{\text{years}})^2} \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

需要测量的轨道参数

- ✓ 恒星的速度比
- ✓ 轨道周期
- ✓ 轨道半长轴之和

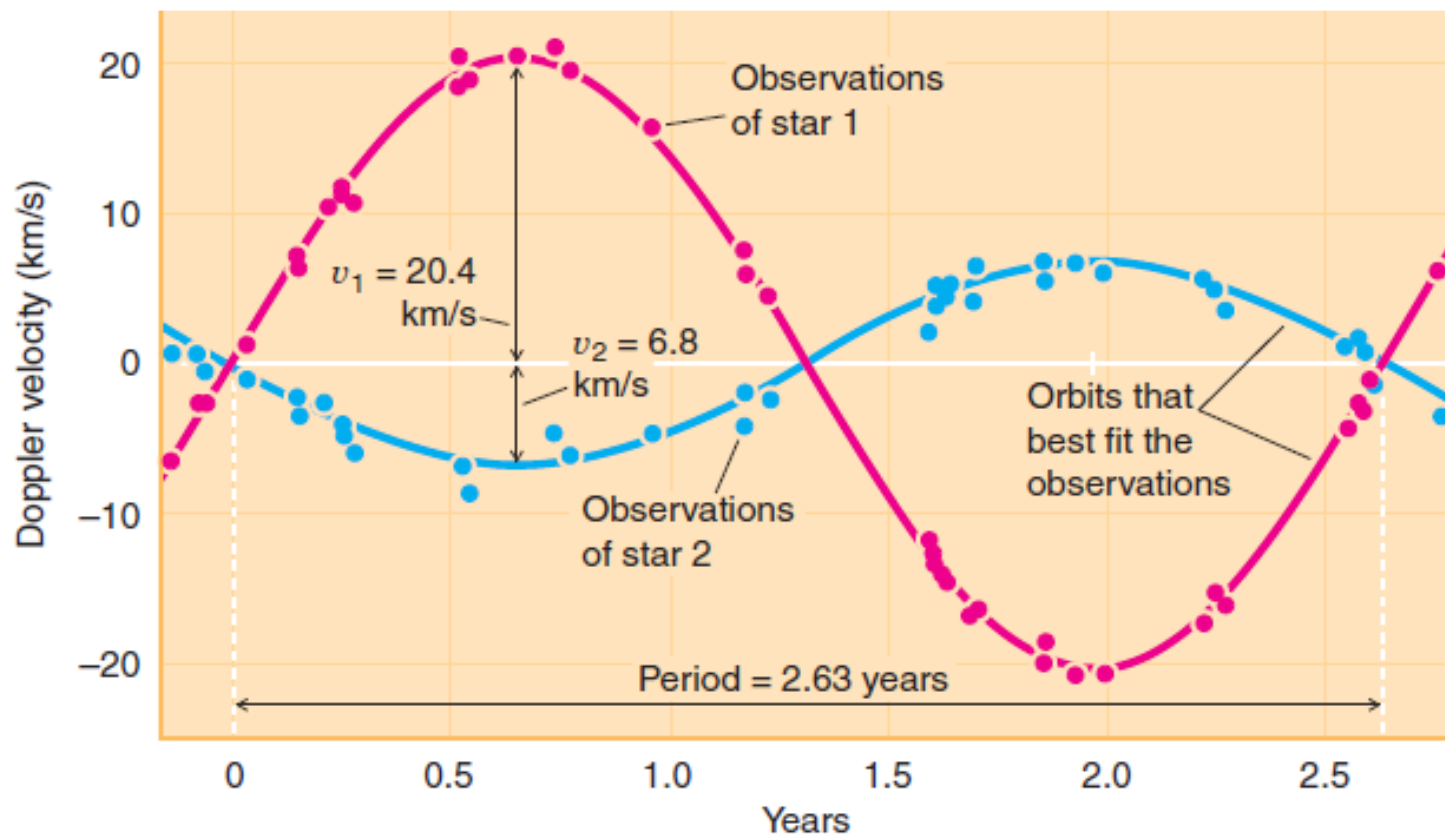
测量轨道参数的方法

- 目视双星：直接测量轨道的形状、周长和周期
 - 轨道周长比 \rightarrow 速度比
 - 轨道半长轴之和
- 多普勒位移：
 - 吸收线的多普勒位移之比给出恒星轨道的【视向】速度之比
 - 最大多普勒位移的周期给出轨道周期
 - 轨道周长 = 速度 * 周期
 - 轨道形状 = 最大红移与兰移的比值 \rightarrow 半长轴之和

测量轨道参数的方法

- 食双星：轨道周期
 - “真实” 轨道速度
 - “真实” 质量
- 通常：质量下限（轨道倾角）

例子：食双星的观测数据



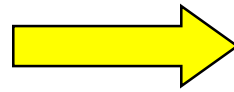
视向速度曲线

例子：食双星的观测数据

1. 食双星 \rightarrow 轨道侧对 \rightarrow 真实速度 \rightarrow 真实质量
2. 轨道周期为 2.63 年
3. 恒星1 的多普勒速度在 $+20.4 \text{ km/s}$ 与 -20.4 km/s 之间变化
4. 恒星 2的多普勒速度在 $+6.8 \text{ km/s}$ 与 -6.8 km/s 之间变化
5. 多普勒速度是**对称**的 \rightarrow 圆轨道

例子：食双星的质量

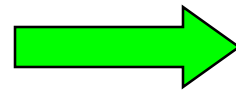
$$\begin{aligned}A_1 &= \frac{v_1 \times P}{2\pi} = 1.8 \text{ AU} \\A_2 &= \frac{v_2 \times P}{2\pi} = 0.6 \text{ AU} \\A &= A_1 + A_2 = 2.4 \text{ AU}\end{aligned}$$



$$m_1 + m_2 = \frac{(A_{\text{AU}})^3}{(P_{\text{years}})^2} = 2M_{\text{sun}}$$



$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{v_1}{v_2} = 3$$



$$\begin{aligned}m_1 &= 0.5M_{\text{sun}} \\m_2 &= 1.5M_{\text{sun}}\end{aligned}$$

恒星的质量范围

- 0.08 [氢燃烧] – ~150 [辐射压] 倍太阳质量
- 小质量恒星数量远多于大质量恒星数量
- 恒星质量比：~1000
- 恒星光度比：~100亿
- 恒星质量范围远小于恒星光度范围
- 光度-质量经验关系： $L \sim M^{3-4}$
 - 可用于估算（孤立）恒星的质量

4、恒星的分类



列
维
特

坎
农

恒星依据表面温度（光谱型）分类

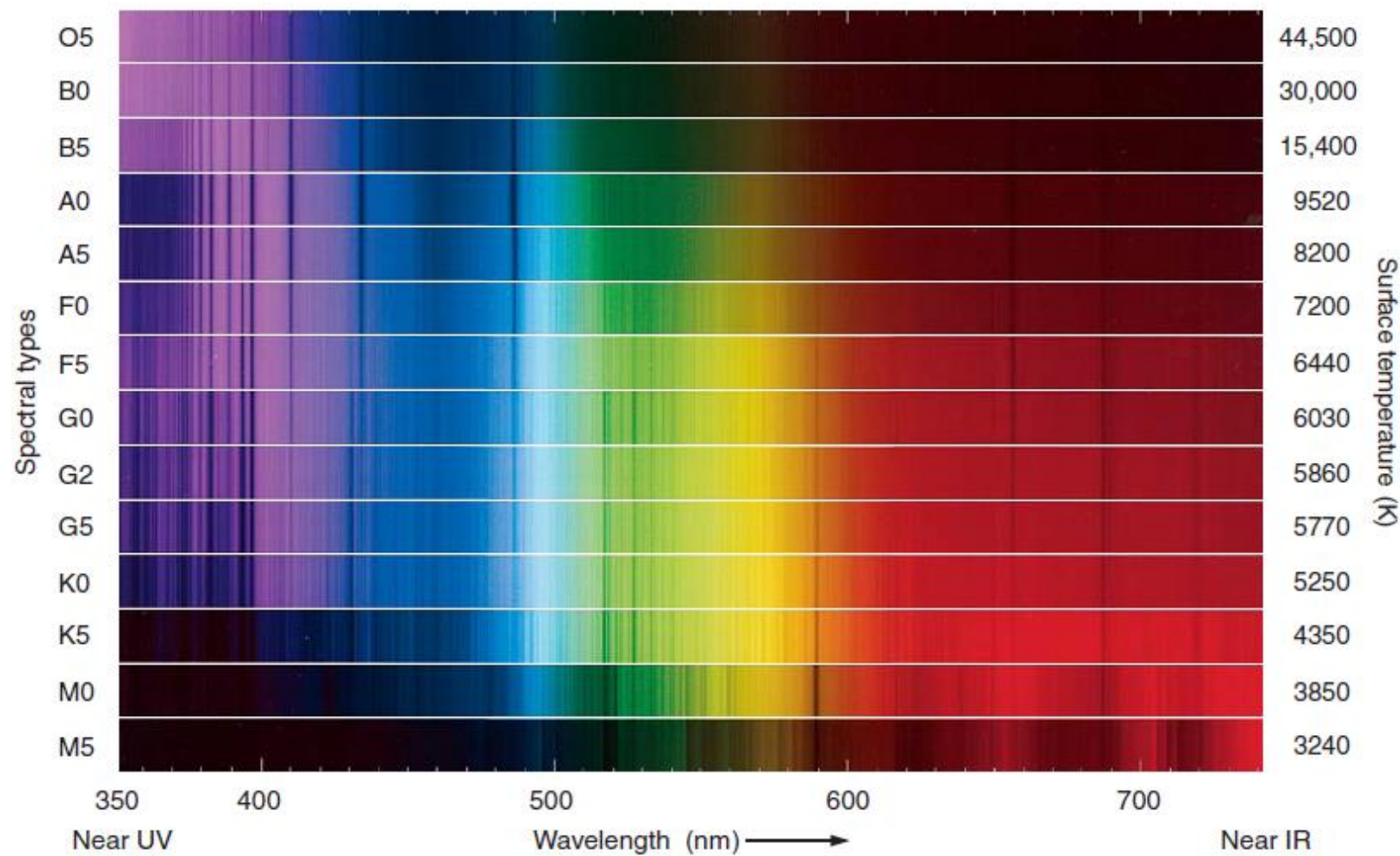
1901, 哈佛天文台的坎农等按由热到冷（30,000 -2,800K）的**光谱序列**把恒星分类为 O, B, A, F, G, K, M等**光谱型**

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

- 每一光谱型又根据谱线的相对强弱分成10个次型，例如
B0, B1,, B9
- 太阳为G2型



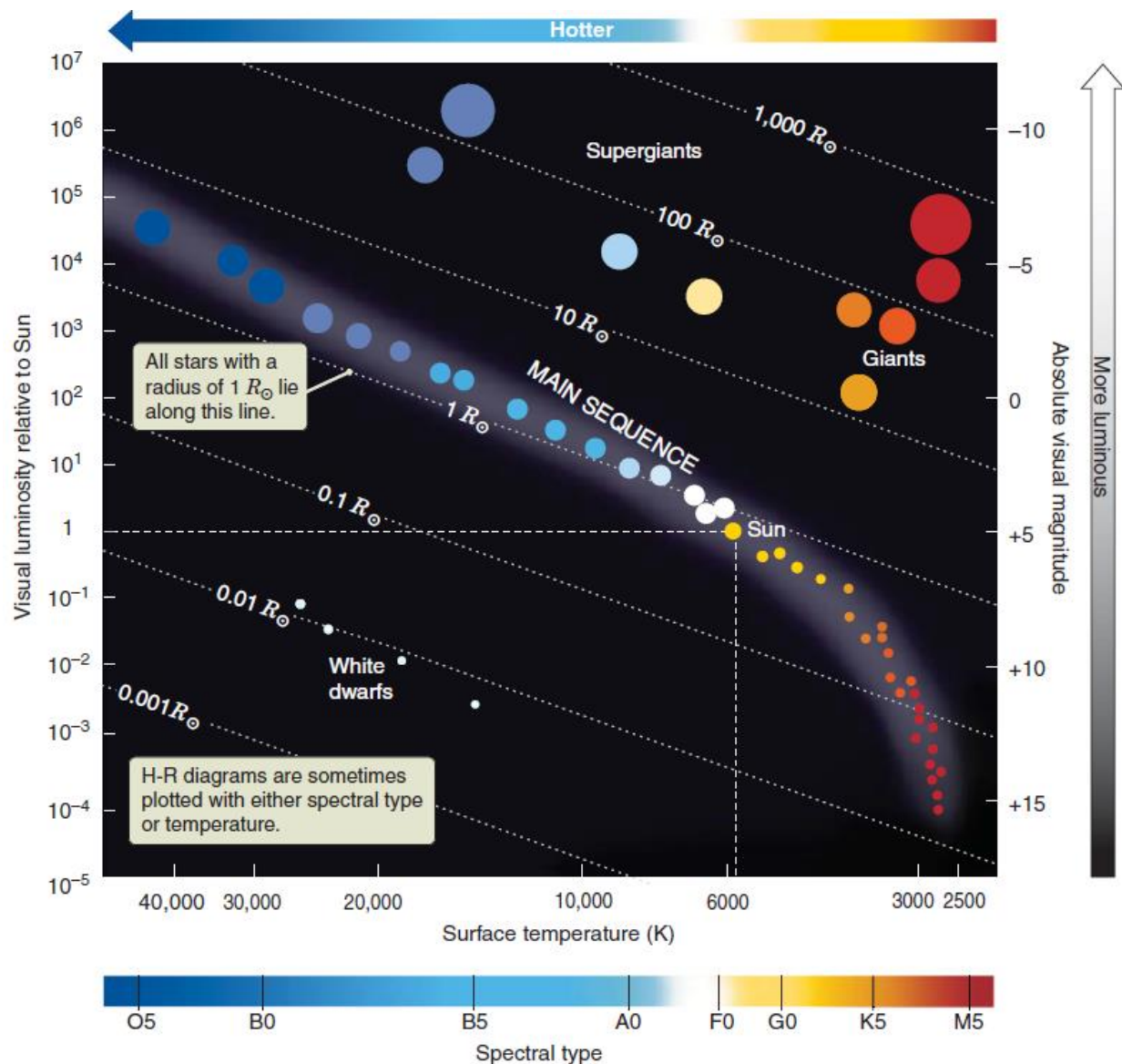
- 恒星越热，在短波越亮（兰）
- 恒星越冷，吸收线 [原子、分子] 越复杂



5、赫-罗图

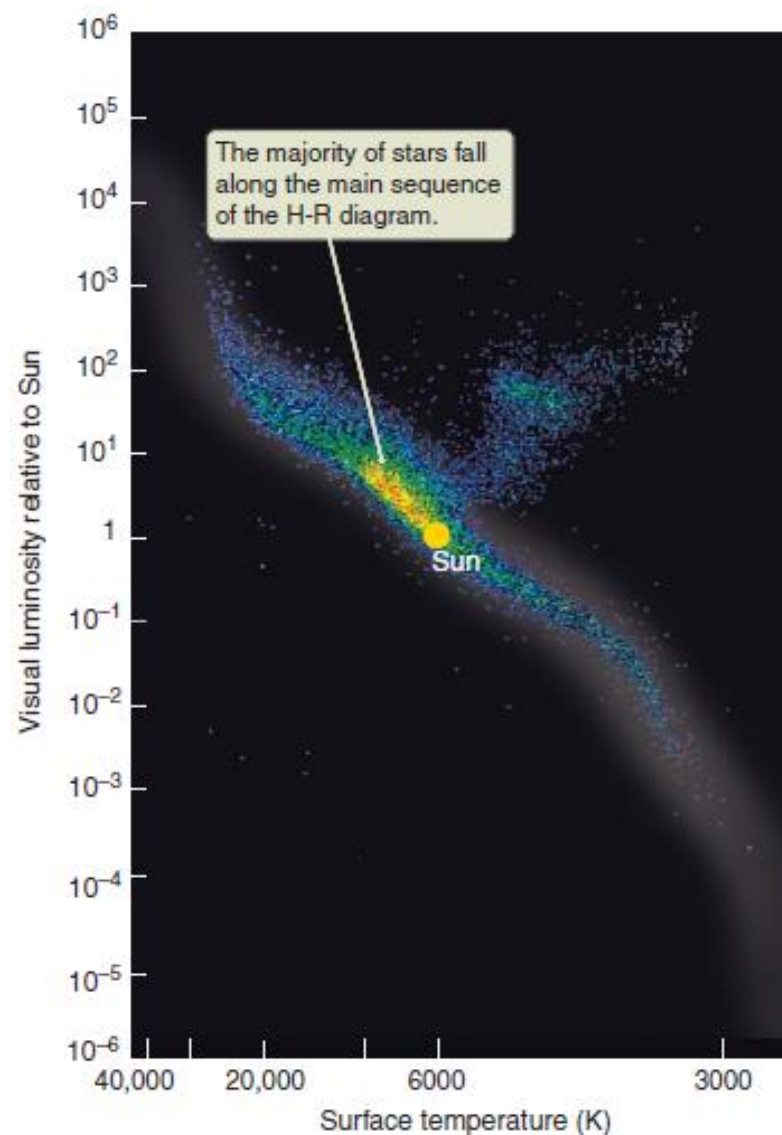
- 从1906年到1913年，赫茨普龙 (Ejnar Hertzsprung) 和罗素 (Henry Norris Russell) 分别独立研究了恒星的光度和其表面温度的关系
- 这一关系图称为赫-罗图 (H-R diagram)，其重要性在于，揭示恒星的物理本质，并给出恒星一生的演化信息

- 由HR图可知恒星的
 - 光度（绝对星等）
 - 温度（颜色、光谱型）
 - 半径？
- 思考：等半径线的斜率？



主序 (main sequence, MS) 恒星

- 恒星并非散落在HR图上
- 约90%的恒星位于从右下到左上的主序带上，称为主序恒星



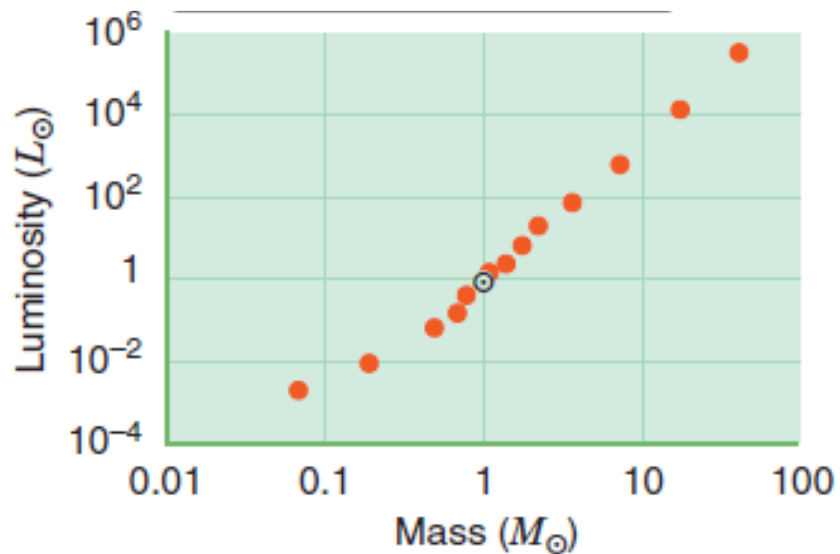
用主序恒星测距离—分光视差法

- 主序恒星在主序带上的位置由其表面温度（惟一）确定，可作为测量距离的**标准烛光**
- 因此，**温度已知的主序恒星**，意味着它的光度已知
- 由辐射的距离平方反比定律可得距离

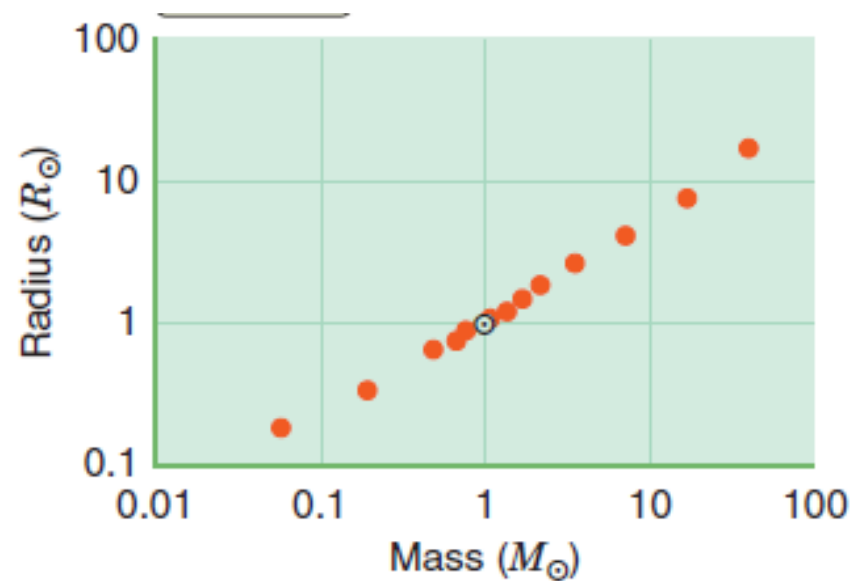
$$L = 4\pi d^2 \times \text{Brightness}$$

- 由恒星视差得到主序恒星的光度与其表面温度的关系是此方法的基础

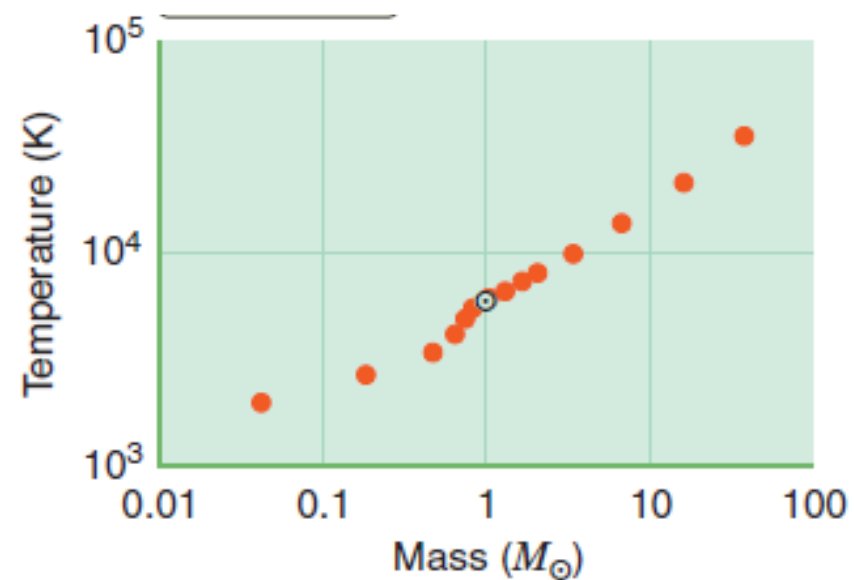
MS恒星的质量关系



质光关系 $L/L_{\text{Sun}} = (M/M_{\text{Sun}})^{3.5}$



$$R/R_{\text{Sun}} = (M/M_{\text{Sun}})^{0.8}$$

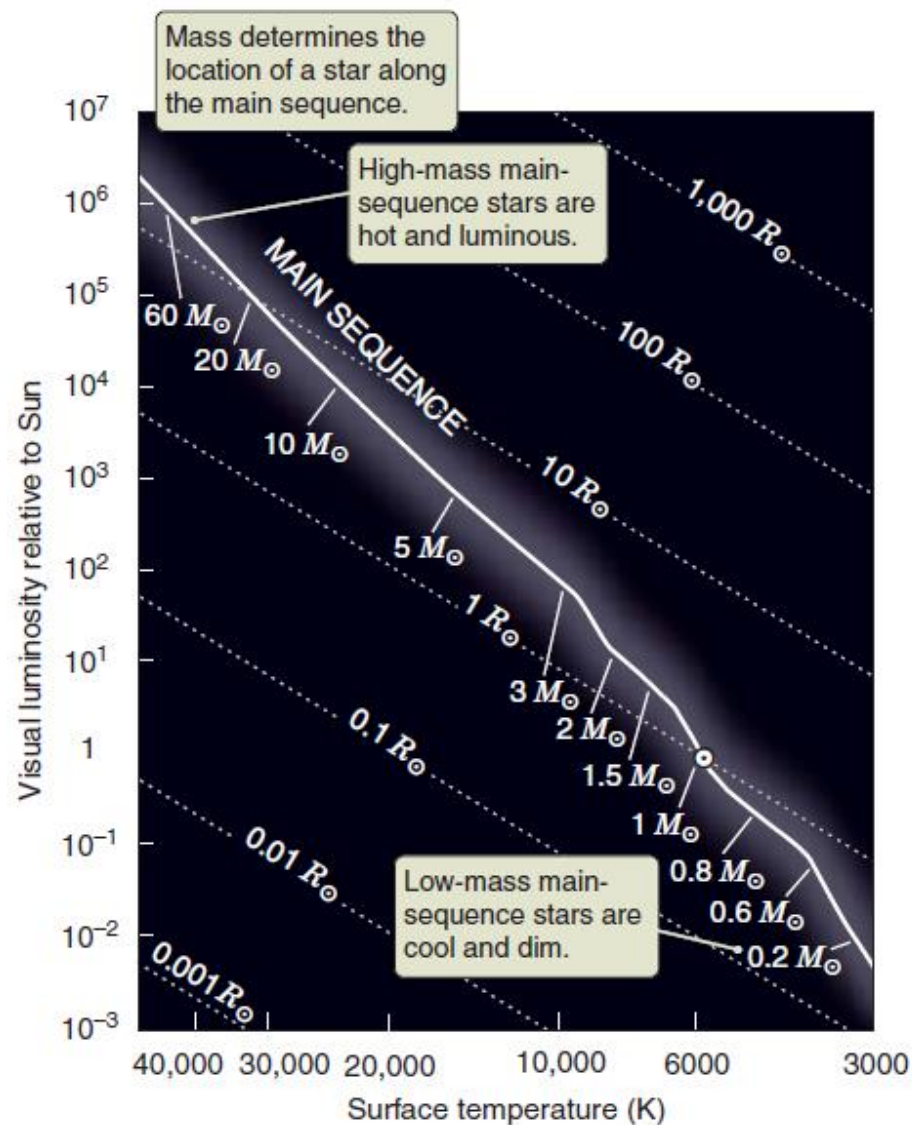


主序恒星的性质主要由质量决定

Spectral Type	Temperature (K)	Mass (M_{\odot})	Radius (R_{\odot})	Luminosity (L_{\odot})
O5	42,000	60	13	500,000
B0	30,000	17.5	6.7	32,500
B5	15,200	5.9	3.2	480
A0	9800	2.9	2.0	39
A5	8200	2.0	1.8	12.3
F0	7300	1.6	1.4	5.2
F5	6650	1.4	1.2	2.6
G0	5940	1.05	1.06	1.25
G2 (Sun)	5780	1.00	1.00	1.0
G5	5560	0.92	0.93	0.8
K0	5150	0.79	0.93	0.55
K5	4410	0.67	0.80	0.32
M0	3840	0.51	0.63	0.08
M5	3170	0.21	0.29	0.008

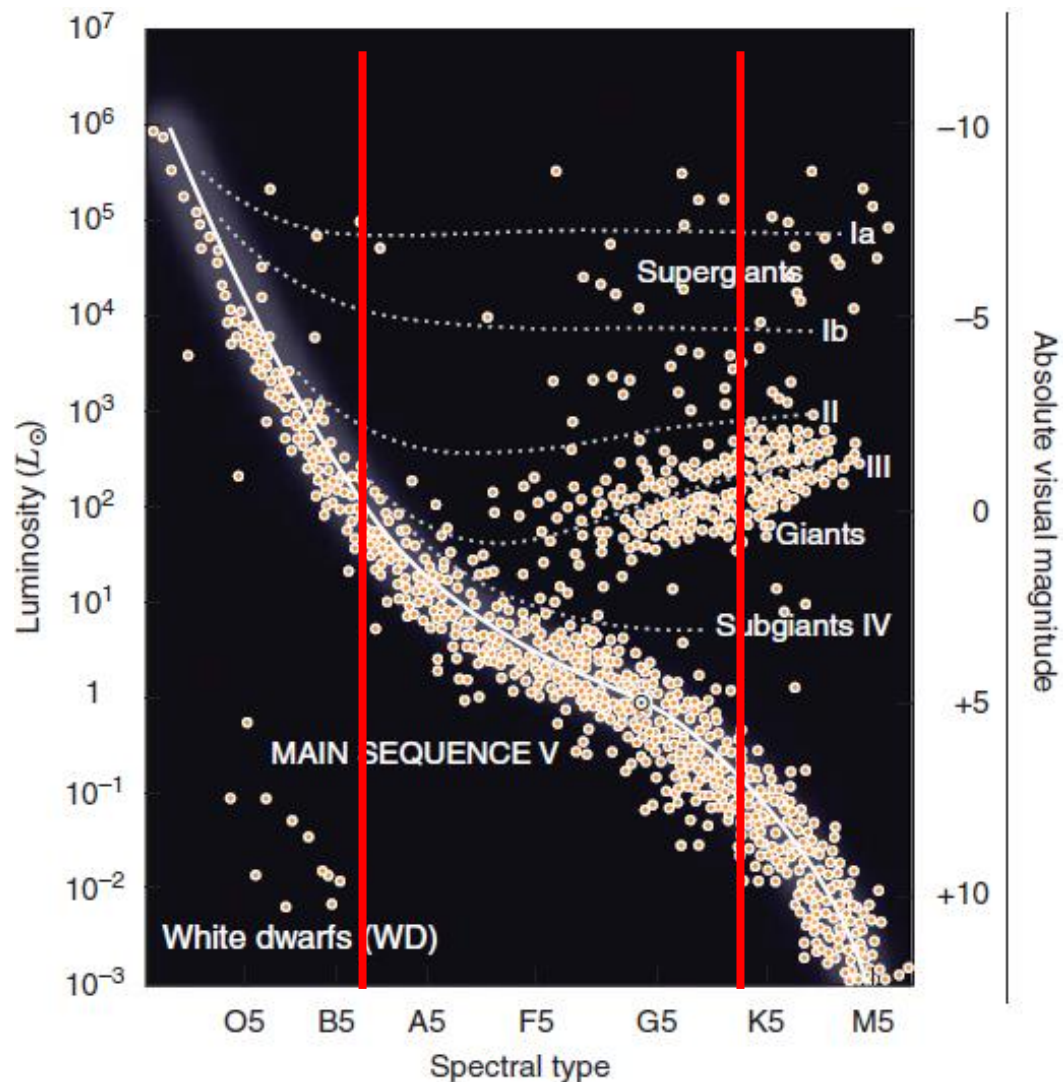
HR图的主序序列是关于恒星质量的序列

- 质量确定主序恒星在主序带上的位置
- 即，质量确定主序恒星的近似表面温度、大小与光度



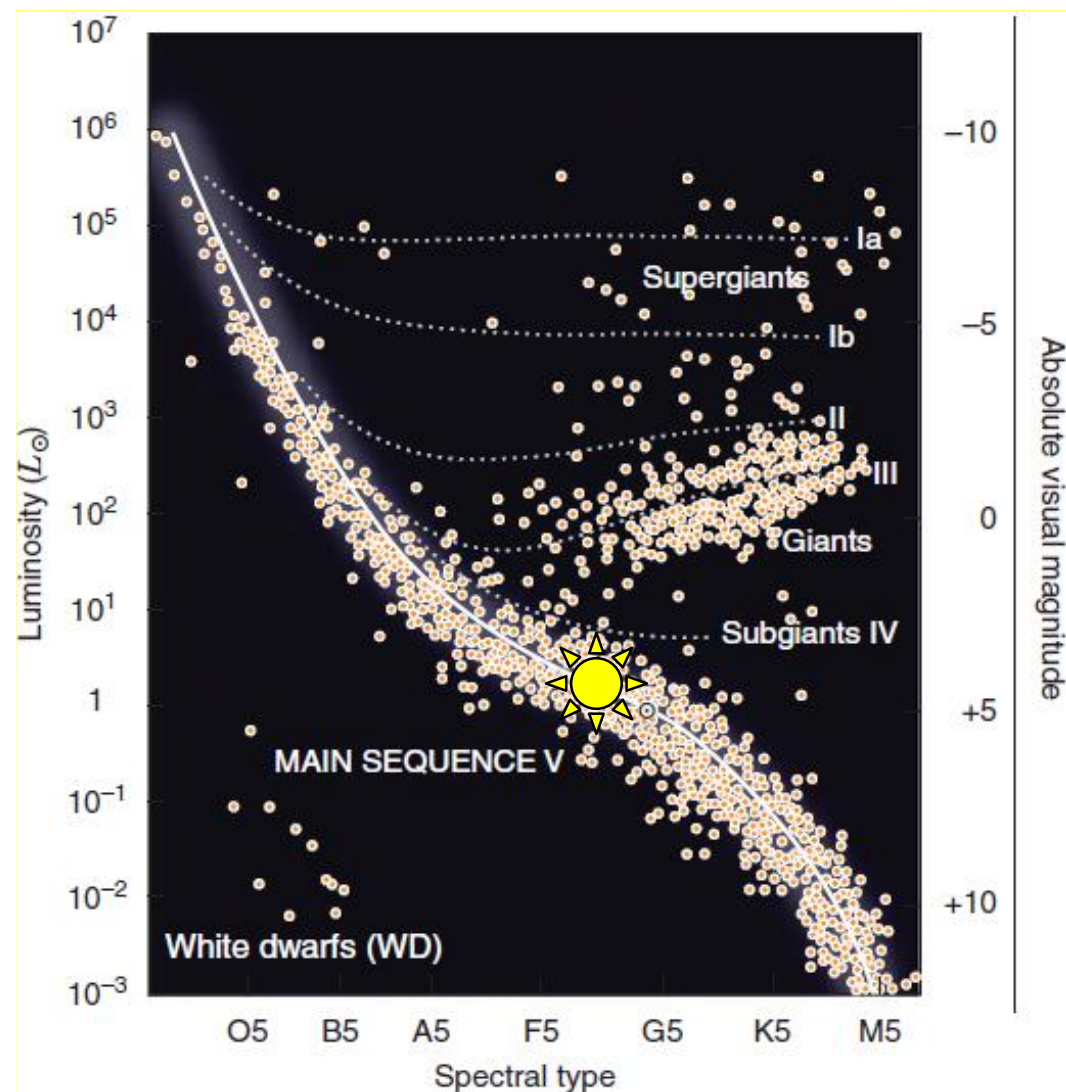
恒星的光度级

- 非主序恒星的鉴别方法：
 - [相同温度的] 光度
 - [相同温度的] 光谱：
谱线宽度表征恒星大气的
密度与压力
 - 谱线宽度等效光度级



太阳光谱型：G2V

- 完备的恒星**光谱分类**应包括
 - 光谱型 → 恒星表面温度（颜色）
 - 光度级 → 恒星大小（主序、非主序）
- **主序恒星**揭示恒星的属性及运行机制
- **非主序恒星**揭示恒星如何形成、演化及消亡



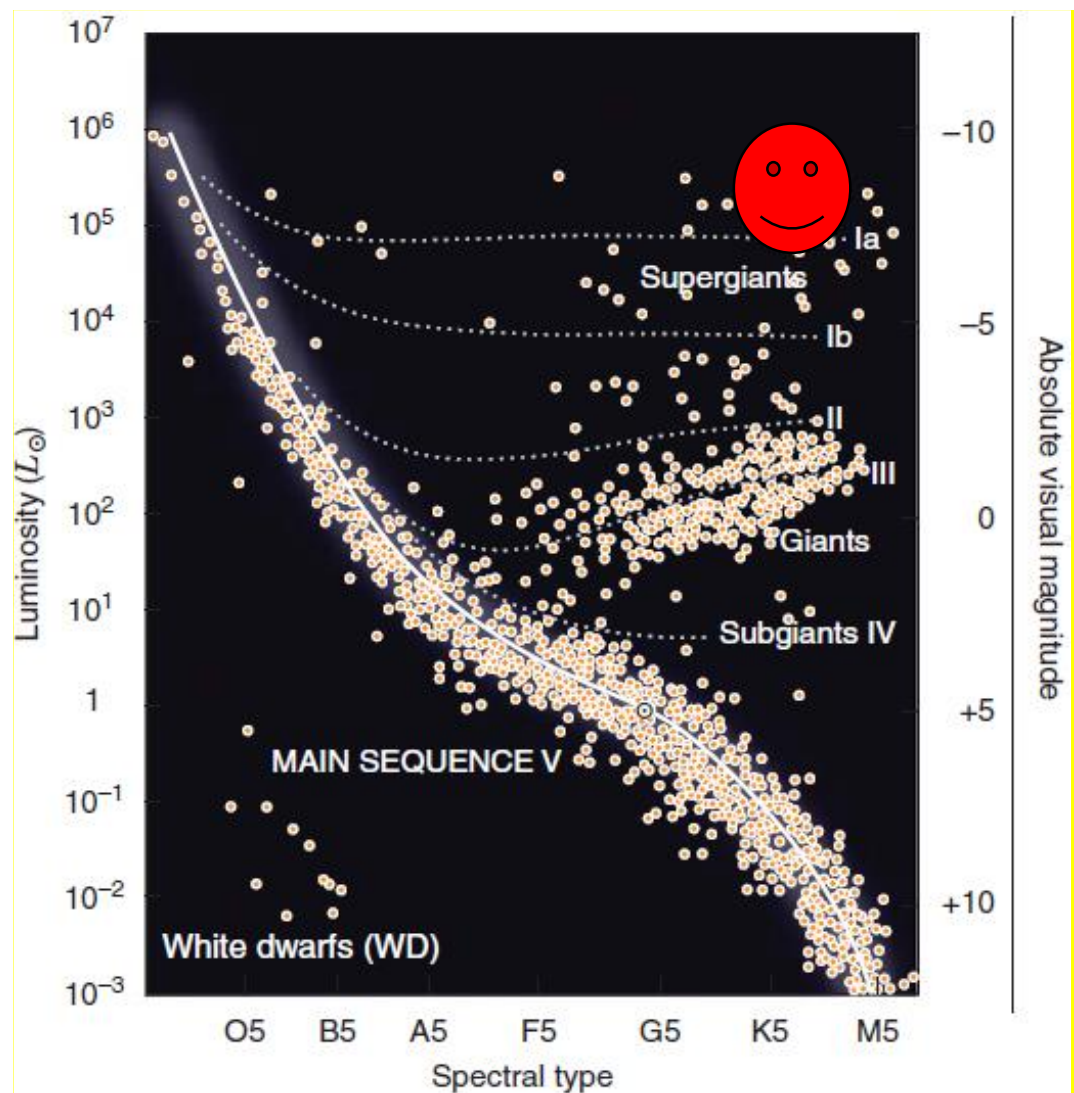
红超巨星参宿四在HR图的位置？

表面温度~3500K

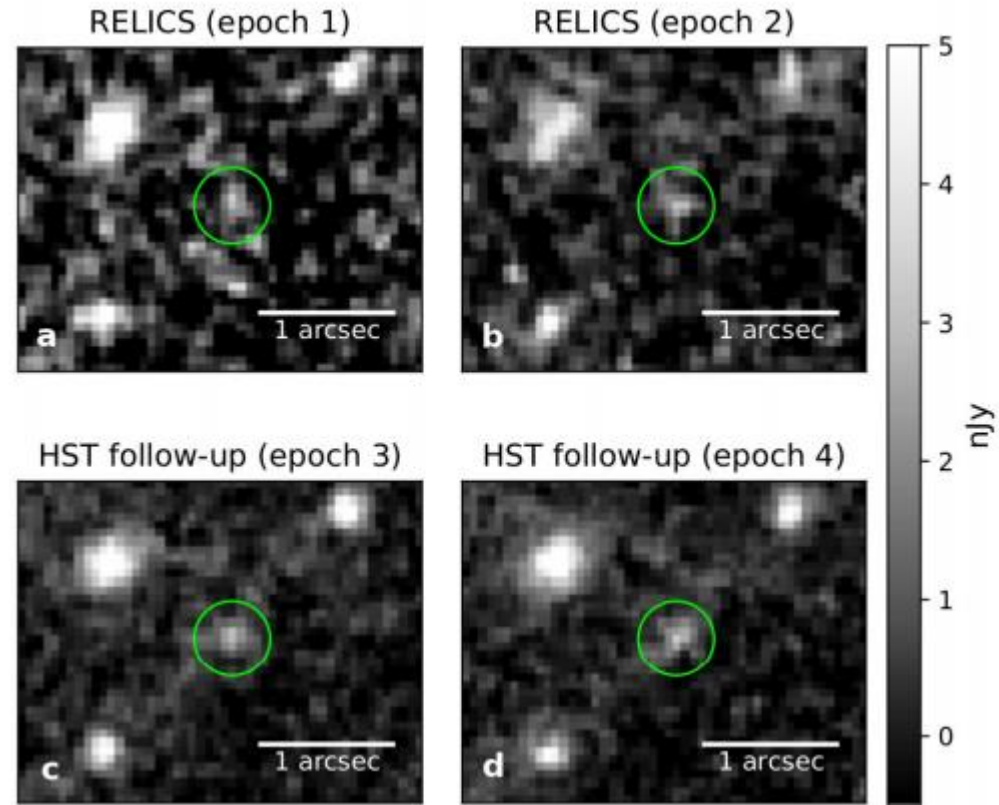
14万倍太阳光度

完备分类？

M1(-2)Ia(-ab)



A Highly Magnified Star at Redshift 6.2



Galaxy clusters magnify background objects through strong gravitational lensing. Typical magnifications for lensed galaxies are factors of a few but can also be as high as tens or hundreds, stretching galaxies into giant arcs^{1;2}. Individual stars can attain even higher magnifications given fortuitous alignment with the lensing cluster. Recently, several individual stars at redshift $z \sim 1 - 1.5$ have been discovered, magnified by factors of thousands, temporarily boosted by microlensing^{3;4;5;6}. Here we report observations of a more distant and persistent magnified star at redshift $z_{\text{phot}} = 6.2 \pm 0.1$, 900 Myr after the Big Bang. This star is magnified by a factor of thousands by the foreground galaxy cluster lens WHL0137–08 ($z = 0.566$), as estimated by four independent lens models. Unlike previous lensed stars, the magnification and observed brightness (AB mag 27.2) have remained roughly constant over 3.5 years of imaging and follow-up. The delensed absolute UV magnitude $M_{UV} = -10 \pm 2$ is consistent with a star of mass $M > 50M_{\odot}$. Confirmation and spectral classification are forthcoming from approved observations with the *James Webb Space Telescope*.