

The Nature of the Stars 恆



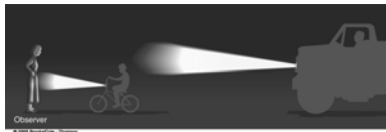
<http://www.darksky.org/info/hts/is120.html>

本章學習重點

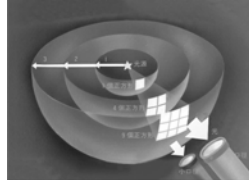
- 如何測量恆星的距離
- 如何測量恆星的亮度與光度（這兩個差別何在？）
- 如何表達亮度與光度（單位）
- 如何估計恆星的表面溫度
- 如何得知恆星的化學成分
- 如何估計恆星的大小、質量

恆星的亮度 (brightness)

星星看起來的亮度 = 實際光度 + 距離



With greater distance from the star, its light is spread over a larger area and its apparent brightness is less.



- 天文學家以**視星等 (apparent magnitude)** 表示星星「看起來」的亮度。**越明亮的星，星等數字越小**。例如 1 等星比 2 等星亮；19 等星比 30 等星明亮（很多）

天體	視星等
太陽	-26.8
天狼星	-1.5
織女星	0.0
參宿四	0.4

- 1 等星比 6 等星亮 **100 倍整**，也就是**差一個星等**，**亮度差約 2.51 倍**。 $\sqrt[5]{100} \approx 2.512$
- 裸眼能見最暗約 6 等星，全天空可見大 5000~6000 顆星，任一時刻天空出現約 2000~3000 顆。
- 使用雙筒望遠鏡，集光面積比瞳孔大，可以看到 10 等星，約 10,000 顆
(集光能力 \propto 面積 = 口徑²)

- 兩顆星亮度比與星等差的關係

$$m_1 - m_2 = 2.5 \log b_2/b_1$$

- Q1: 三等星的亮度和一等星如何相比？
- Q2: 天狼星的視星等為 -1.5，它有顆伴星稱為 Sirius B，其亮度是天狼星的萬分之一（哪些性質決定恆星的亮度呢？），試估計天狼B星的視星等。
- Q3: 假設一般人瞳孔直徑約 7 mm，試估計要用多大的望遠鏡，可以用肉眼觀測 12 等星。
- Q4: 假設使用大型望遠鏡仔細觀測該 12 等星，發現它其實是由兩顆星所組成，亮度比為 3 比 1，試算這兩顆星各自的星等。

Q1: 三等星的亮度和一等星如何相比？

A: $(2.512)^2 \approx (2.5)^2 \approx 6.25 \approx 6$ times fainter

Q2: 天狼星的視星等為 -1.5，它有顆伴星稱為 Sirius B，其亮度是天狼星的萬分之一，試估計天狼B星的視星等。

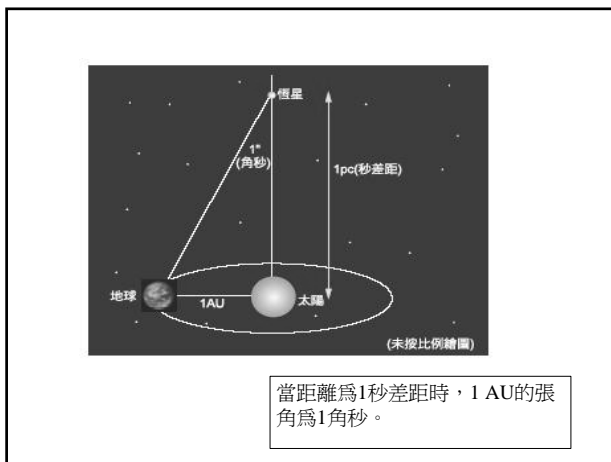
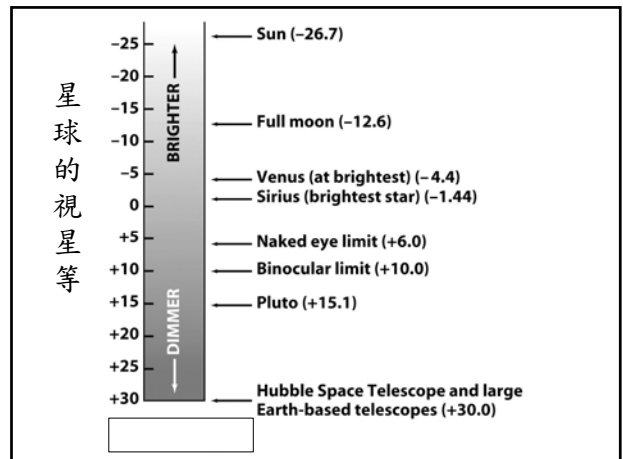
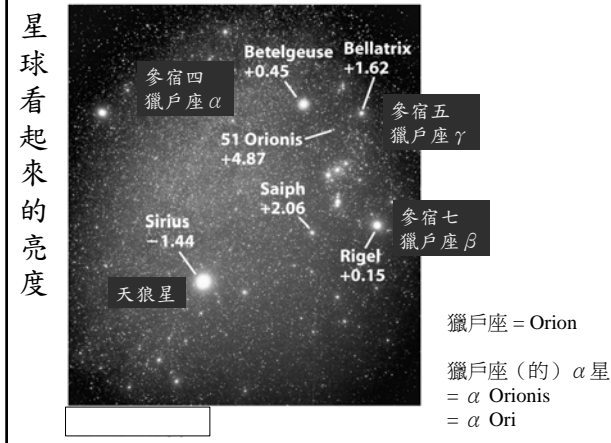
A: 100 times of flux \rightarrow 5 mag difference, so 10,000 times fainter \rightarrow 10 mag larger, \therefore Sirius B has $m = -1.5 + 10 = 8.5$ mag

Q3: 假設一般人瞳孔直徑約 7 mm，試估計要用多大口徑的望遠鏡，可以用肉眼直接觀測 12 等星。

A: naked eye limit = 6 mag, so 12 mag is $(2.5)^6 \approx 250$ times fainter \therefore telescope aperture should be $> 7 \text{ mm} \times 16 = 110 \text{ mm}$

Q4: 假設使用大型望遠鏡仔細觀測該 12 等星，發現它其實是由兩顆星所組成，亮度比為 3 比 1，試算這兩顆星各自的視星等。

A: $b_1/b_2 = 3/1$, so $(b_1+b_2)/b_2 = 4/1$, $m_{1+2} - m_2 = 2.5 \log 4 \approx -1.5$
 $\therefore m_2 = 12 + 1.5 = 13.5$ mag; likewise $m_1 = 12 + 0.3 = 12.3$ mag



- 把星星放在同一距離，比較視星等，得到的便是光度大小。
 - 距離 \equiv 10 pc 註：1 pc = 3.26 ly (光年)
 - 假想星星位於 $d = 10$ pc 處，其視星等 (m) 稱為絕對星等 (M , absolute magnitude)
- $$m - M = 5 \log d - 5 \quad \text{derivation}$$
- Note: $m = M$ when $d = 10$ pc
- Q: 太陽的視星等約為 $m = -27$ ，試估計太陽的絕對星等 (M)。

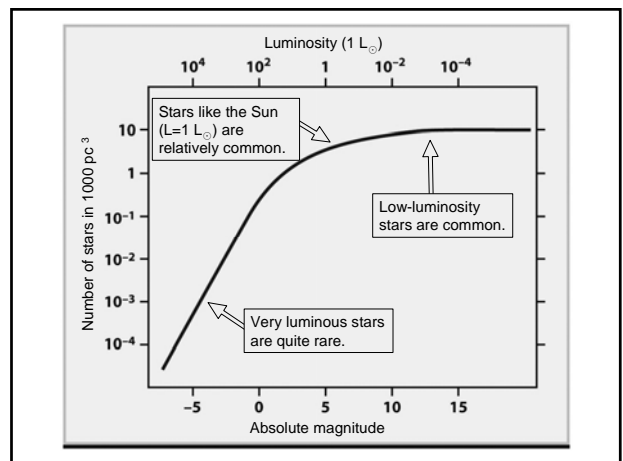
Q: 太陽的視星等約為 $m = -27$ ，試估計太陽的絕對星等 (M)。

$$m - M = 5 \log d - 5$$

A: $m = -27$ mag, and $d = 1$ AU = $(206265)^{-1}$ pc
 $\rightarrow 5 \log d - 5 \cong -31.6, \therefore M \cong 4.6$ mag

Q: ϵ (Epsilon) Eridani is 3.23 pc from Earth. As seen from Earth, the star appears only 6.73×10^{-13} as bright as then Sun. Estimate the luminosity of ϵ Eridani compared with that of the Sun.

A: $L/L_{\odot} = (d/d_{\odot})^2 (b/b_{\odot})$
 $3.23 \text{ pc} = 3.23 \times 206265 \text{ AU/pc} = 6.66 \times 10^5 \text{ AU}$
 $\rightarrow L/L_{\odot} = (6.66 \times 10^5)^2 (6.73 \times 10^{-13}) = 0.30$



Inverse-Square Law

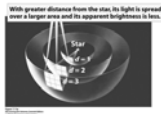
- b : apparent brightness, in W/m^2
- L : a star's luminosity, in W
- d : distance to the star, in meters

$$b = \frac{L}{4\pi d^2}$$

- For the Sun,

$$b_{\odot} = \frac{3.90 \times 10^{26} \text{ W}}{4\pi(1.50 \times 10^{11} \text{ m})^2} = 1370 \text{ W m}^{-2}$$

This is called the Earth's **Solar Constant**.

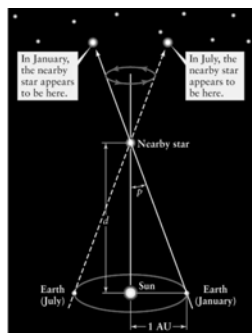


恆星的距離

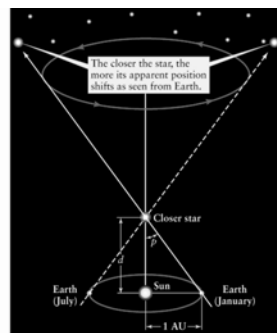
視差現象 (parallax)



相對於遙遠的物體，近距離的東西在不同地方觀測，看起來相對位置似乎會改變



(a) Parallax of a nearby star



(b) Parallax of an even closer star

$$d \text{ (pc)} = 1/p \text{ (arcsec)}$$

Distance Determination by Parallax

例如夜空最亮的天狼星，其周年視差角 (annual parallax) 為0.38角秒，因此天狼星距離我們約2.6 pc，相當於 8.6光年

受到大氣擾動以及儀器精確度的限制，利用 parallax 方法，大約可以估計 $< 1 \text{ kpc}$ 天體的距離

太空觀測（尤其比AU更長的基線）可以有效提高精確度

估計恆星的基本性質

視差法 \rightarrow 距離 \rightarrow 看起來的亮度 \rightarrow 實際光度

恆星是發光氣體，顏色 \rightarrow 表面溫度
 \rightarrow 每塊面積發光能力 \rightarrow 總面積 \rightarrow 直徑

恆星處於靜力平衡狀態 向外熱壓力 vs 向內重力

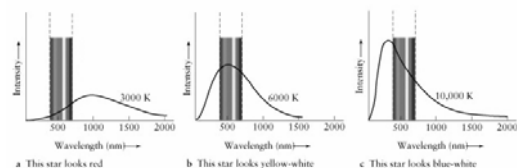
質量大 \rightarrow 萬有引力強 \leftrightarrow 核心溫度高、壓力大
 \rightarrow 核子反應快 \rightarrow 發光強 \rightarrow 表面溫度高

\therefore 恆星 表面溫度 $\uparrow \rightarrow$ 光度 \uparrow

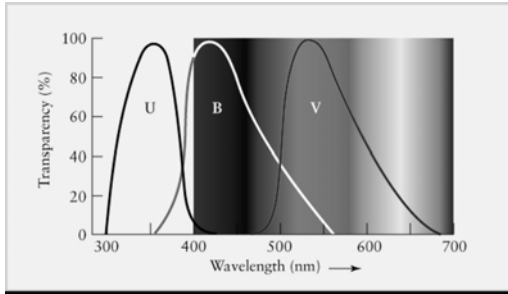
輻射體溫度高 \rightarrow 放出較多能量高的光
 例如X射線、紫外光、藍光等
 （這些輻射震盪—也就是頻率—比較快）

輻射體溫度低 \rightarrow 放出頻率低（也就是波長比較長）的輻射，例如紅光、紅外線、微波等

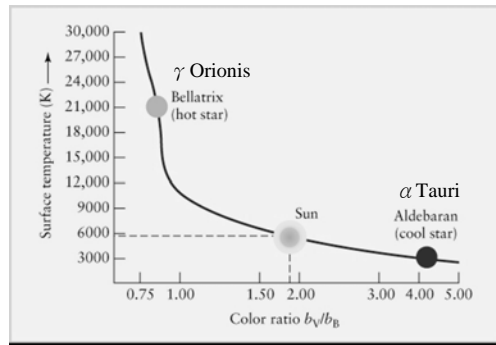
天文學習慣上以紅表示低溫、藍或白表示高溫



特殊設計的濾光片(e.g., UVB) 測量恆星亮度,
 例如在藍光 (blue) 與綠光 (visual) 亮度的比值
 → 輻射在這兩個波段之間的斜率 → 輻射體溫度



V與B兩個波段之間的亮度比 → 恆星表面溫度



原子的激發與去激——軌道量子化

軌域

複雜(例如碘)原子

原子光譜

YAHOO! 新聞

元宵節除了月圓 晚7:50 天象土星合月

更新日期: 2008/02/19 13:00

今年的元宵節2月21號,除了月圓之外,當天晚上七點五十分左右,也正是土星合月的時刻,只要天氣狀況良好,民眾觀賞月圓,也可以觀賞到土星就在月亮附近,尤其這個月的24號土星會到達衝的位置,是一年中土星最亮、視直徑最大、最接近地球的難得時刻。(林麗玉報導)

台北市立天文教育館表示,元宵節2月21號晚間七點五十分,正好會遇到土星合月,土星會位在月亮北邊2.84度的位置。另外土星2月24號,也會達到今年最佳的觀測時刻土星「衝」,天文館研究員葛必揚表示,民眾只要在沒有光害的空曠地點,從傍晚開始到清晨,都可以同時觀賞月圓及土星距離最近的景觀。

台北市立天文館表示,土星合月是指土星及月亮落在同一個經度座標值上,至於今年的土星衝會發生在24號晚間,而這一天的土星,是一年中最大、最亮、最接近地球,而且整夜都可以觀測得到。

19世紀末 Harvard College Observatory 的一批女性天文學家發展出以光譜為恆星分類

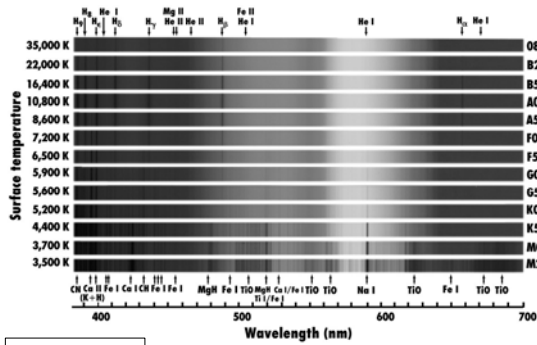
Annie Jump Cannon 為恆星光譜分類之先驅

光譜型態與表面溫度

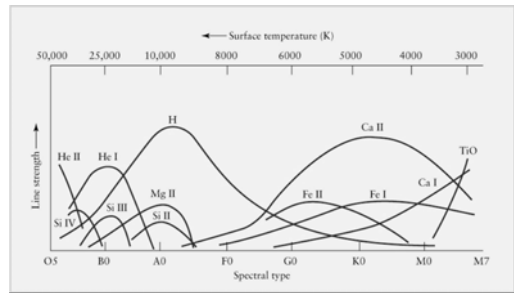
- 以光譜中氫元素的譜線明顯程度,將恆星分類,最強的為 A,依序為 B, C, ...
- 後來發現在眾多影響氫譜線強度的因素中,溫度最重要
- 若以溫度由高到低排列,光譜型態的順序為 O-B-A-F-G-K-M。O型恆星表面溫度最高,達30,000~50,000; M型恆星只有2500~4000度
- 太陽是顆G型恆星,屬於中等光度

Oh, Be A Fine Guy/Girl, Kiss Me!

不同溫度、成分 → 不同激發程度 → 不同譜線

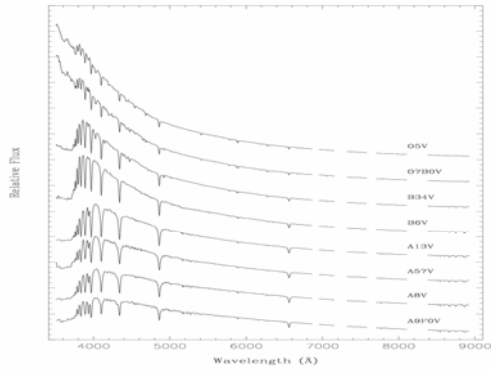


恆星表面溫度 → 吸收線強度

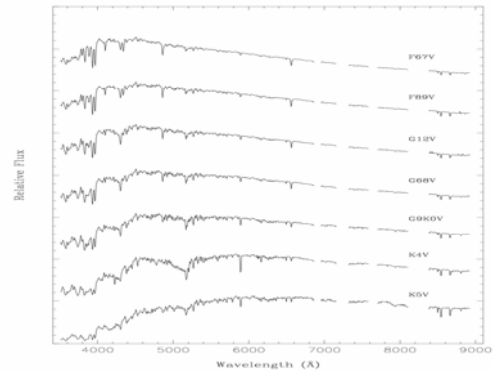


I : 中性原子 ; II : 一次游離 ; III : 兩次 ...

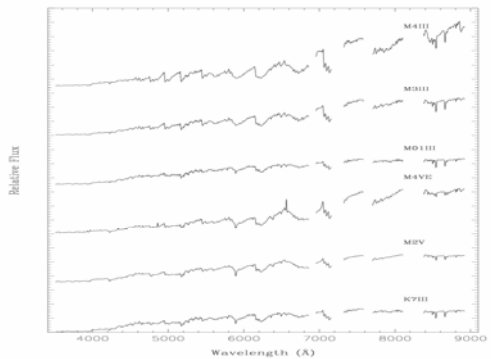
高熱的恆星——短波強、長波弱；氫線、氦線



溫熱的恆星——短波、長波相當；氫線明顯

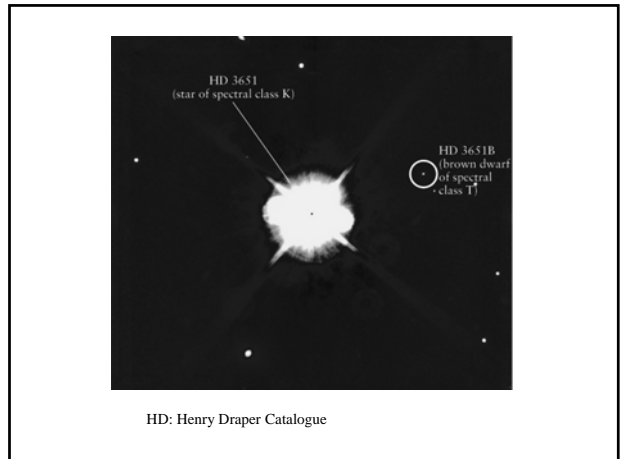
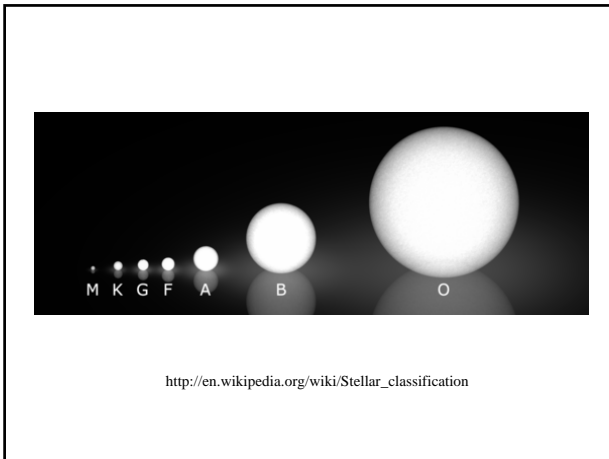


低溫的恆星——短波弱、長波強；分子線明顯



The Spectral Sequence

Spectral class	Color	Temperature (K)	Spectral lines	Examples
O	Blue-violet	30,000–50,000	Ionized atoms, especially helium	Naos (ζ Puppis), Mintaka (δ Orionis)
B	Blue-white	11,000–30,000	Neutral helium, some hydrogen	Spica (α Virginis), Rigel (β Orionis)
A	White	7,500–11,000	Strong hydrogen, some ionized metals	Sirius (α Canis Majoris), Vega (α Lyrae)
F	Yellow-white	5,900–7,500	Hydrogen and ionized metals such as calcium and iron	Canopus (α Carinae), Procyon (α Canis Minoris)
G	Yellow	5,200–5,900	Both neutral and ionized metals, especially ionized calcium	Sun, Capella (α Aurigae)
K	Orange	3,900–5,200	Neutral metals	Arcturus (α Bootis), Aldebaran (α Tauri)
M	Red-orange	2,500–3,900	Strong titanium oxide and some neutral calcium	Antares (α Scorpii), Betelgeuse (α Orionis)
L	Red	1,300–2,500	Neutral potassium, rubidium, and cesium, and metal hydrides	Brown dwarf Teide 1
T	Red	< 1,300	Strong neutral potassium, and some water	Brown dwarf Gliese 229B



恆星幾乎和黑體一般
輻射 $L = (\sigma T^4)(4\pi R^2)$

Stefan - Boltzmann constant $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

有時使用太陽單位很方便 $\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4$

Q: Betelgeuse (Alpha Orionis) is 60,000 times more luminous than the Sun and has a surface temperature of 3500 K. What is its radius?
A: $R/R_{\odot} = (5800 \text{ K}/3500 \text{ K})^2 (6 \times 10^4)^{1/2} = 670$
The Sun's radius is $6.96 \times 10^8 \text{ km}$, so $R_{\text{Betelgeuse}} \sim 3 \text{ AU}$!
This is beyond the orbit of Mars in the solar system.

恆星光度與表面溫度的關係 Hertzsprung-Russell diagram

赫羅圖

1911 by Ejnar Hertzsprung (Denmark) & 1913 by Henry Norris Russell (USA)

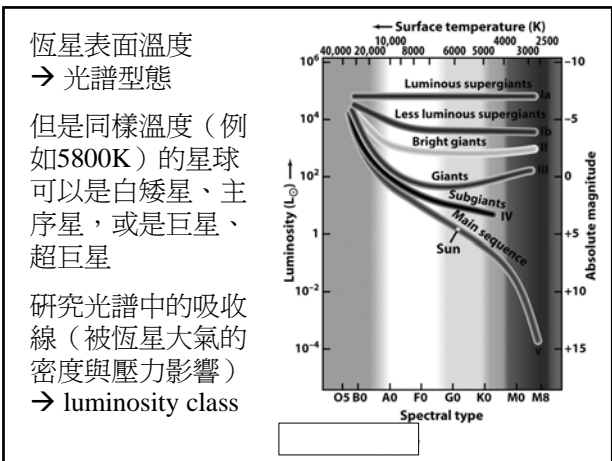
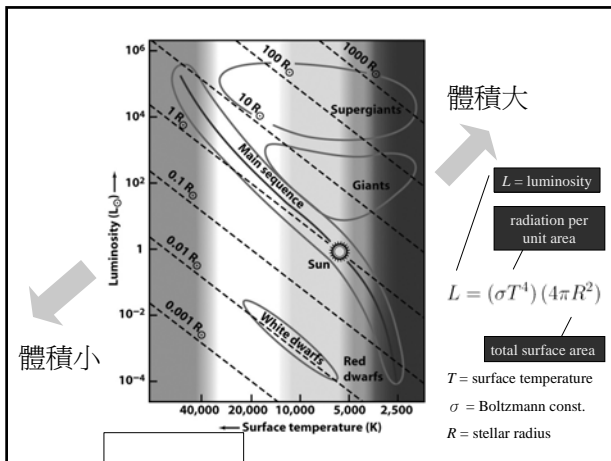
H-R diagram --- An astronomer's "tool of the trade"

在 H-R diagram 上，90%的恆星集中在一條帶狀分佈，稱為「主序」(main sequence)，這些恆星遵循「表面溫度越高，光度越強」的關係

高 ← 表面溫度 → 低
O B A F G K M Spectral type

解讀「赫羅圖」(H-R diagram)

- 赫羅圖為研究天體的基本重要工具
- 「正常」的星球，也就是平衡、穩定的恆星 → 主序星 (main-sequence stars)
- 赫羅圖右上角的星球，溫度低、光度非常明亮 → 紅巨星 (red giants)、紅超巨星 (red supergiants)
- HR圖左下角的星球，溫度高、光度非常微弱 → 白矮星 (white dwarfs)



- 主序星就是核心在進行（氫）核反應的星球 → 穩定平衡，有如安全閥機制
- 一旦核心的氫用完，失去提供氣體壓力的能量來源，再也不能與萬有引力平衡 → 恆星走向衰亡
- 我們的太陽已經穩定發光了約50億年，預計還可以存活50億年

這時恆星結構上分成兩部分：核心的氫（核燃料）已經用完，但是外層卻還有很多氫

估計恆星的距離

- 視差法（直接，最遠距離目前限於 < 1 kpc）
- 類比法（外觀類似，其他性質也相似）
 - 光譜型態 (O, B, A, F, G, K, M)
 - + 光度分類 (I, II, III, IV, V)

→ 絕對星等
↓
視星等 → 距離

光譜型態與光度分類皆來自光譜觀測，故此方法也稱為**光譜視差法 (spectroscopic parallax)** 但其實沒有量任何角度

估計恆星的質量

- 恆星最重要的性質，因為質量決定（自我）萬有引力大小
- 質量決定星際雲氣是否產生恆星，產生哪種恆星，日後也決定恆星如何衰亡
- 對於主序星（以內部核反應達到靜力平衡的穩定星體）而言，質量決定核反應快慢（光度）以及表面溫度的高低（光譜型態）
- 雙星 (binary) 可用來估計恆星質量

Animations --- <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Movies/>

雙星的種類

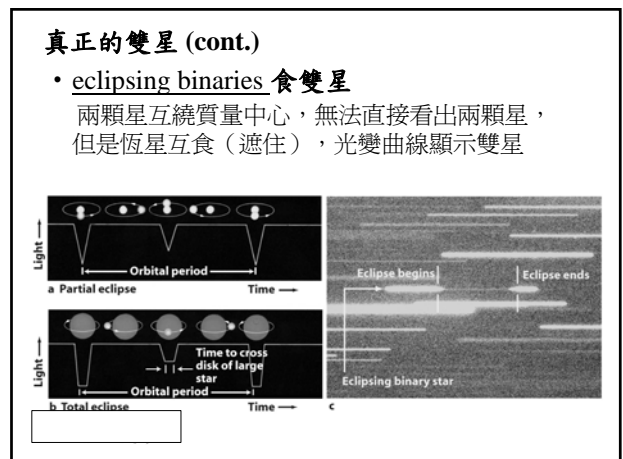
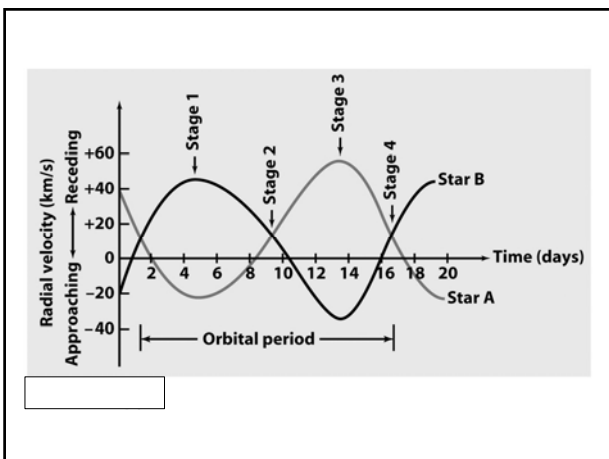
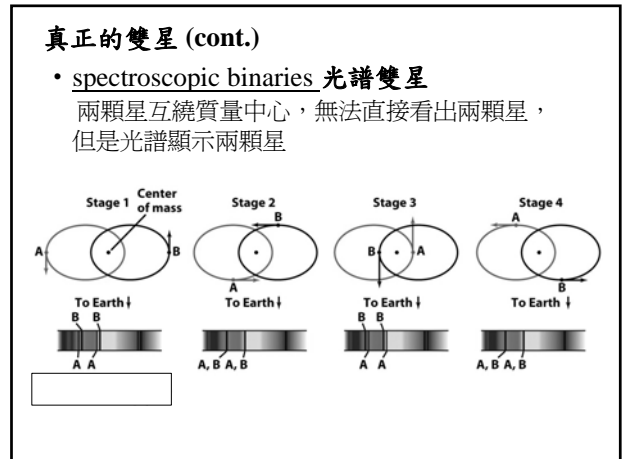
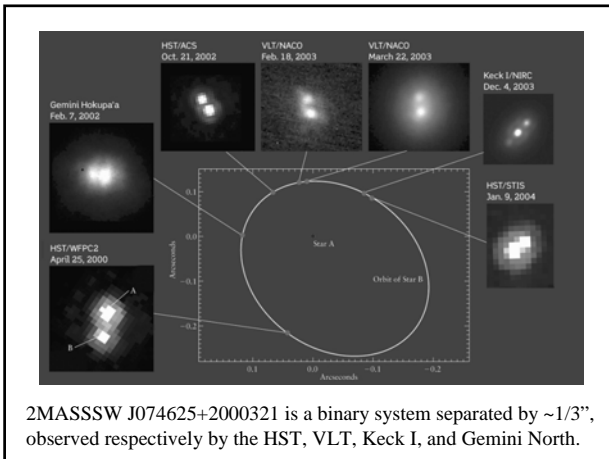
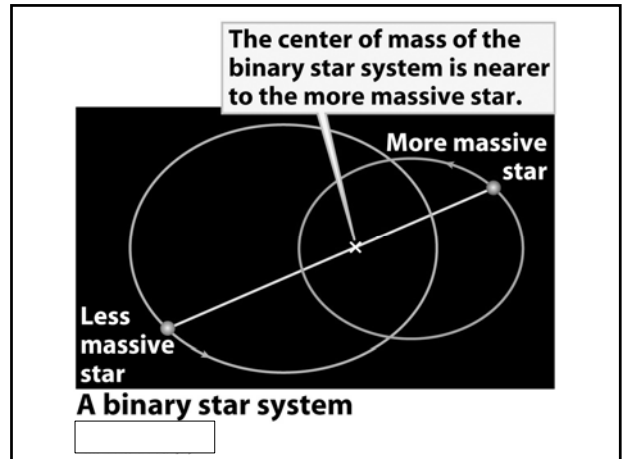
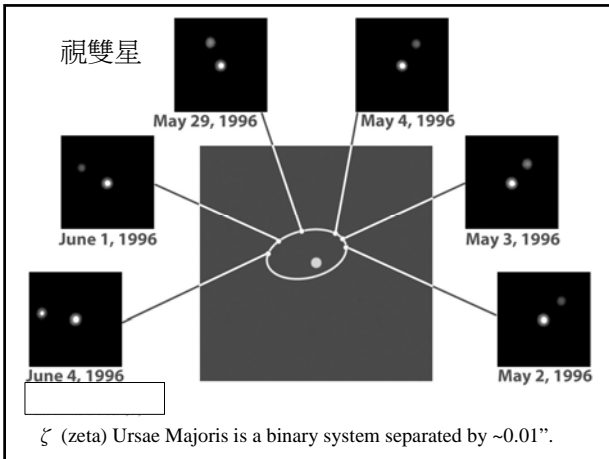
- optical doubles (apparent binaries) 光學雙星
兩顆星恰巧在天球上角度很近，其實彼此無關
- 真正的雙星
 - visual binaries 視雙星
兩顆星互繞質量中心，且兩顆星都看得到

$$M_1 + M_2 = a^3 / P^2$$

M 以太陽質量為單位； a 軌道半長軸以 AU 為單位
 P 軌道週期以年為單位

例：某雙星其中一顆星的橢圓軌道半長軸為 4 AU，週期為 2.5 年，則兩顆星的質量和為

$$M_1 + M_2 = 4^3 / 2.5^2 = 10.2 M_{\odot}$$



- 主序星的質量與光度關係 (mass-luminosity relation; 質光關係)

Roughly $L \sim M^{3.5}$

