

你覺得呢？

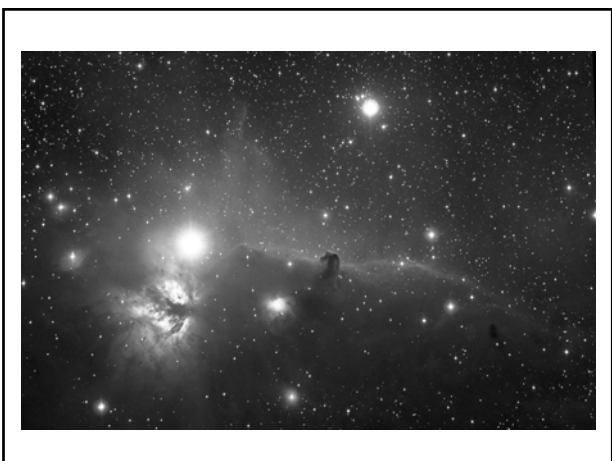
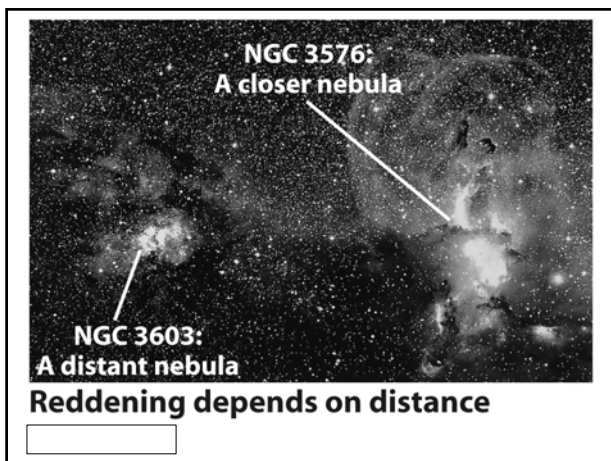
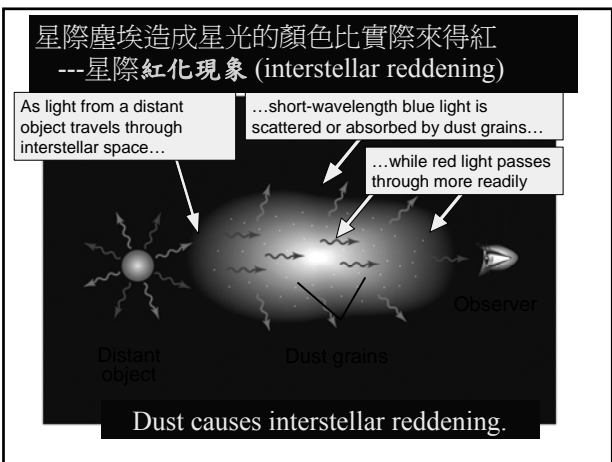
- ❖ 如何知道恆星演化的過程？星團對於瞭解恆星演化扮演何種角色？
- ❖ 何謂星際雲氣？
- ❖ 恆星如何形成？在何處形成？
- ❖ 老年垂死恆星如何觸發新一代恆星形成？

**星際物質 (interstellar medium)**

星星之間有極寬廣的空間  
但是 太空 ≠ 真空

日常空氣  $\sim 10^{19}$  molecules/cm<sup>3</sup>  
星際太空  $\sim 1$ /cm<sup>3</sup>

包含氣體與灰塵的雲氣彼此之間互相吸引，使得雲氣聚集，濃密的灰塵會擋住後面發光的氣體或星球。這些「**星際分子暗雲**」(dark molecular clouds) 密度高 (每 cc 超過數萬個分子)、溫度低 ( $\sim 10$  K, 攝氏零下260幾度)

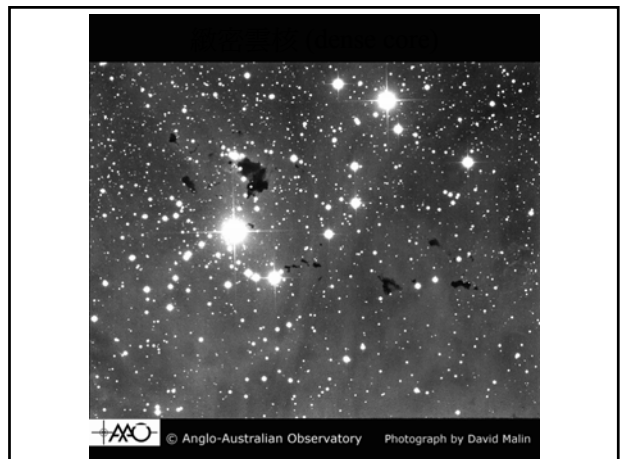
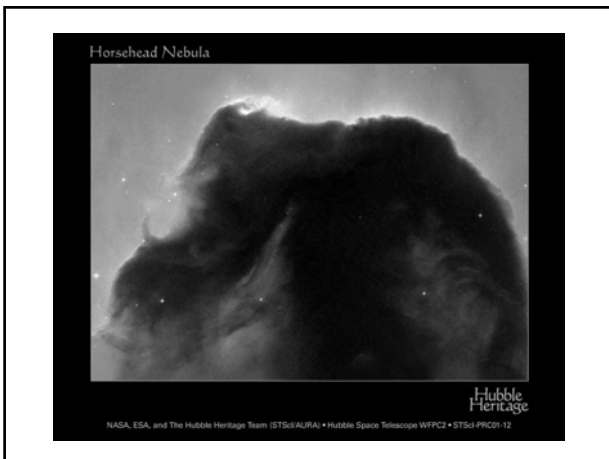
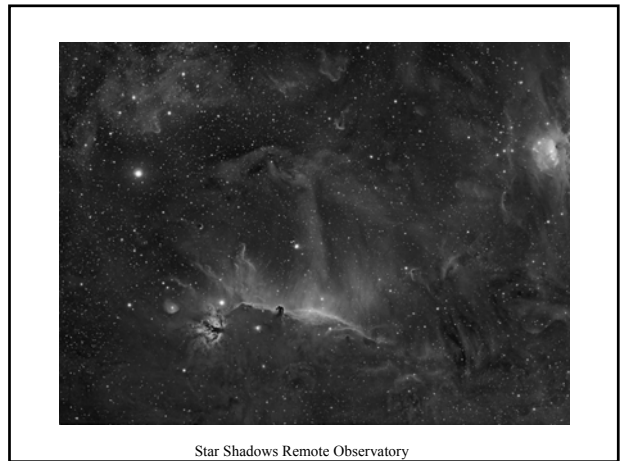
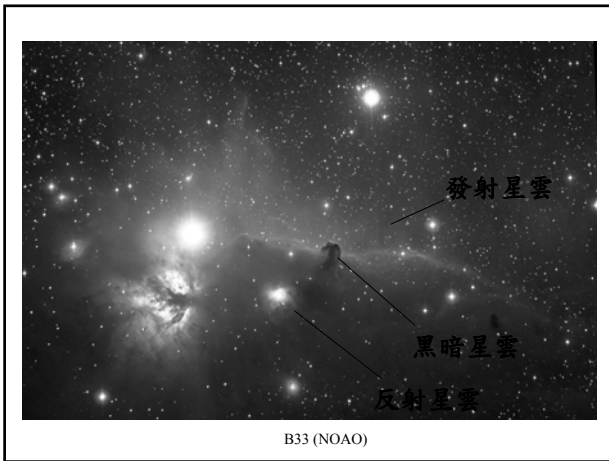


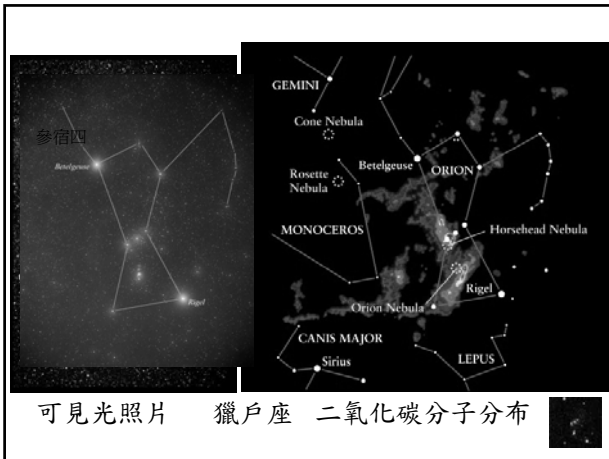


## 星際雲氣

氣體與塵埃

- **發射星雲 (emission nebula)**  
氣體受激發 (星光照射, 或碰撞)  
自己發光。Balmer alpha → 紅色
- **反射星雲 (reflection nebula)** 日光燈發光原理?  
氣體反光。散射 → 藍色
- **黑暗星雲 (dark nebula)**  
塵埃遮住背景光線 (星光或發射  
星雲) → 黑色





- Dense cores 要是密度高（萬有引力強）、溫度低（熱壓力弱），這樣的條件稱為 **Jeans instability** → 可能收縮成為**原恆星** (protostar)

a b c d 前主序星

(a) A dark nebula (b) A hidden protostar within the dark nebula

可見光影像顯示在暗雲中沒有恆星 紅外光影像顯示在暗雲中存在原恆星

位於天鵝座方向的暗雲 L1014

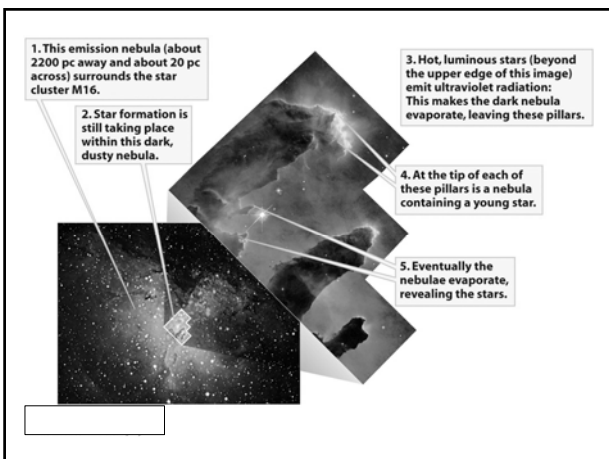
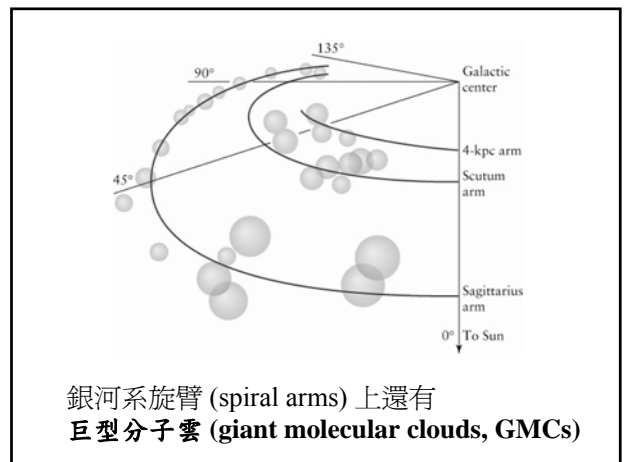
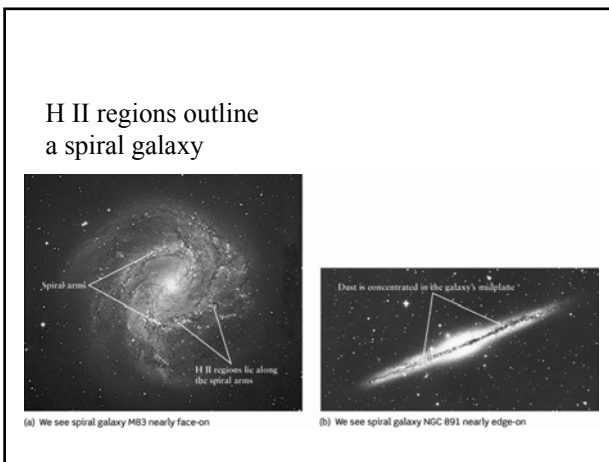
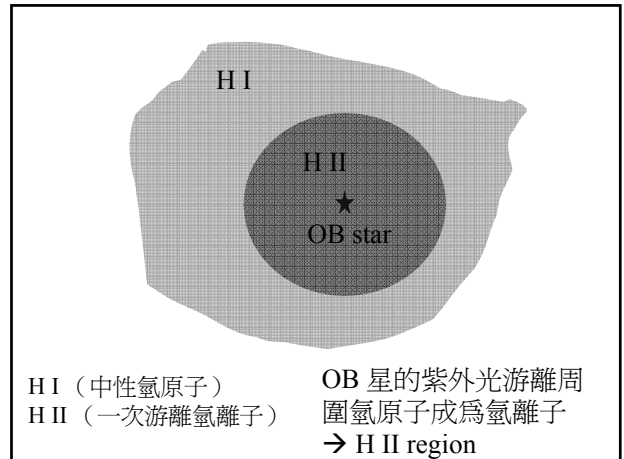
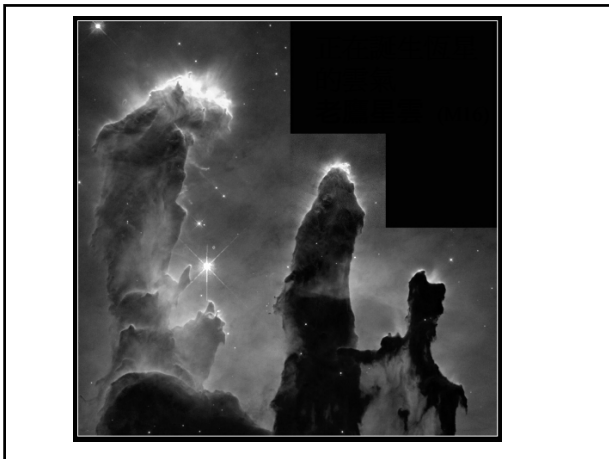
### 恆星與行星皆源於星際雲氣

星際暗雲 初生星球 + 扁盤 + 剩下的塵氣 年輕的太陽 + 盤狀物質 星際塵埃 塵塊 小行星 行星

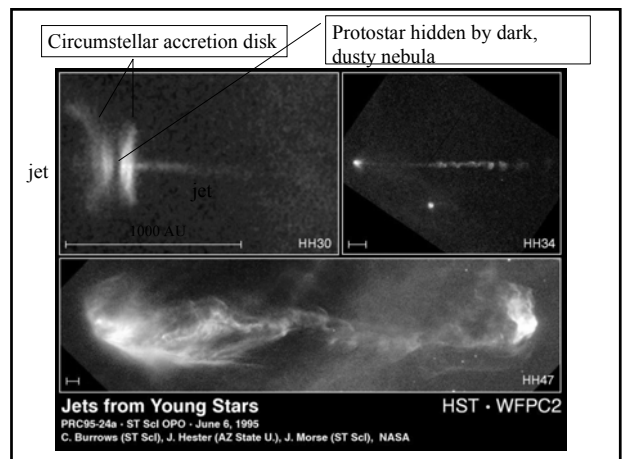
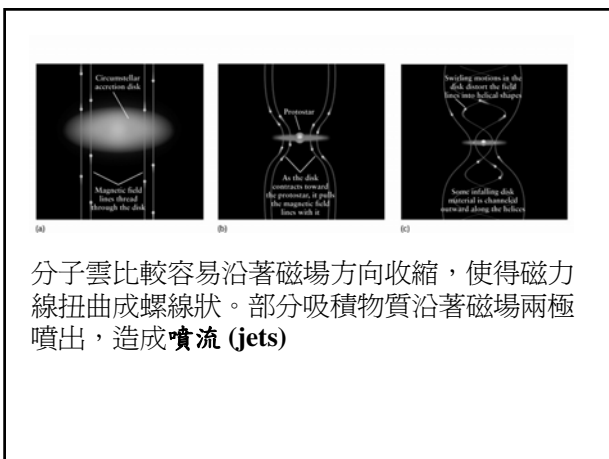
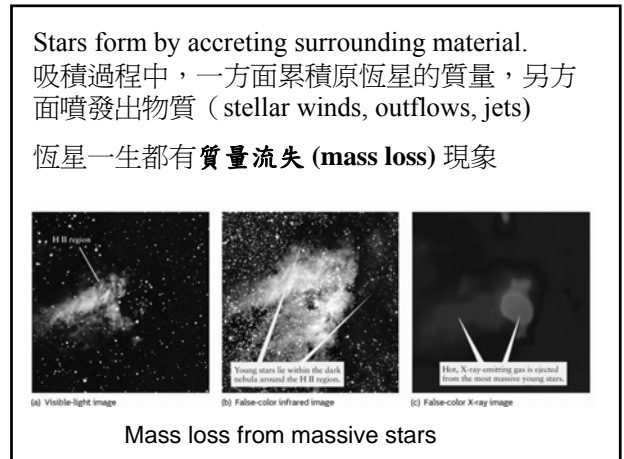
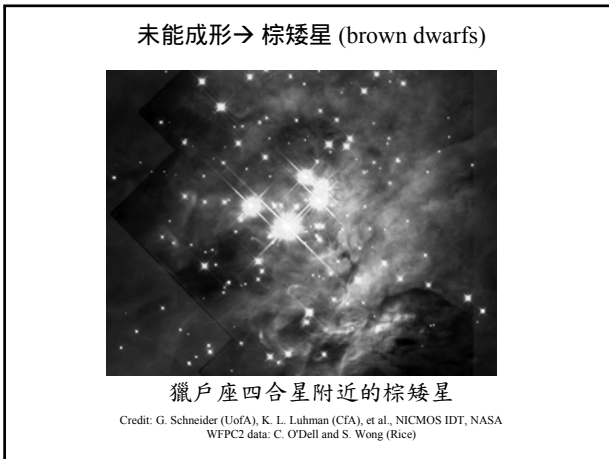
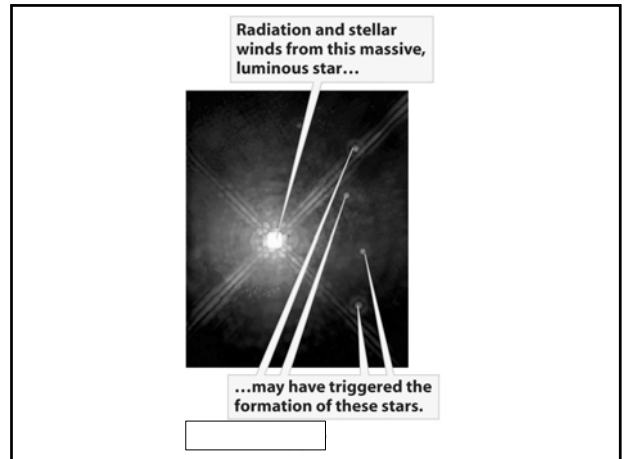
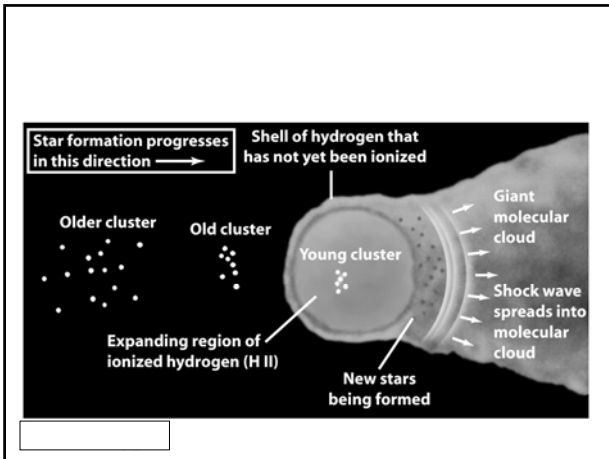
可見光影像 加上紅外線影像

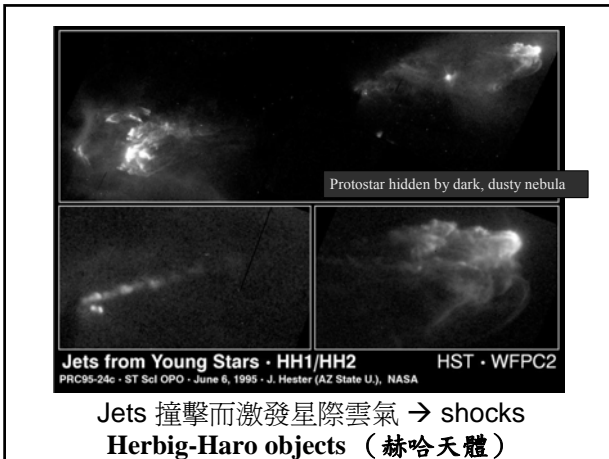
Pre-Collapse Black Cloud B68 (visual view) (VLT ANTU + FORS 1) Seeing Through the Pre-Collapse Black Cloud B68 (VLT ANTU + FORS 1 - NTT + SOPH)

暗雲與初生星團 蕾薇星雲 天鵝座 雙星團



- 大質量的OB恆星一定是年輕恆星，因為大質量恆星主序壽命非常短，因此這些恆星仍存在誕生恆星的雲氣附近
  - OB星成群存在，稱為 OB association (OB 星協)
  - 它們劇烈的恆星風以及強烈的輻射，對周圍雲氣有很大影響，可能吹散雲氣，使得雲氣不再能誕生星球，但也可能觸發下一代恆星形成
- A tour in the Orion molecular cloud





### 太陽（恆星）內部的核反應

簡單的原子核 結合 → 較複雜的原子核

原子核強作用力把自己「抓得」比較緊

→ 放出能量（ $\gamma$ 射線、X射線、光）

例如：（4個）氫原子核 → （1個）氦原子核

這些能量讓氣體高速運動，彼此互推，產生（向外）高壓，抵抗（向內）萬有引力

### Proton-Proton Reaction

$${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$$

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma + 1.02 \text{ MeV}$$

$${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5.49 \text{ MeV}$$

$${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H} + 12.86 \text{ MeV} \quad 2 \times$$

- ${}^3\text{H}$  --- 1個質子，2個中子
- ${}^3\text{He}$  --- 2個質子，1個中子

日冕

輻射層

核心

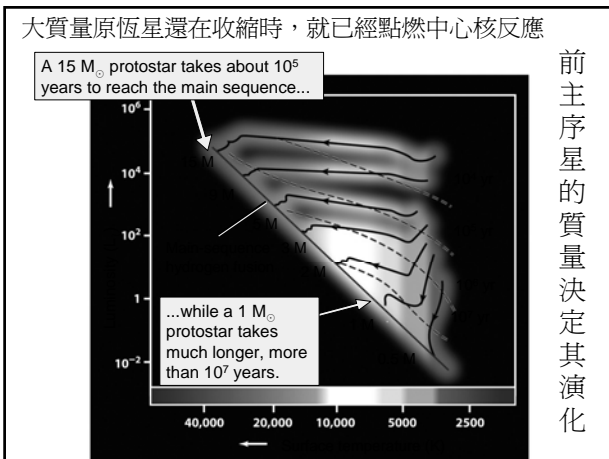
光球

對流層

色球

↓ 質量大大的恆星 ↓ 萬有引力強  
↓ 核反應快才能平衡 ↓ 光度強

只有核心溫度夠高進行核反應  
核心產生的能量以輻射與對流的方式向外傳遞，最後從表面向外輻射



### 恆星內部之能量傳遞

溫度梯度大 → 對流

(a) Mass more than about  $4 M_{\odot}$ : Energy flows by convection in the inner regions and by radiation in the outer regions.

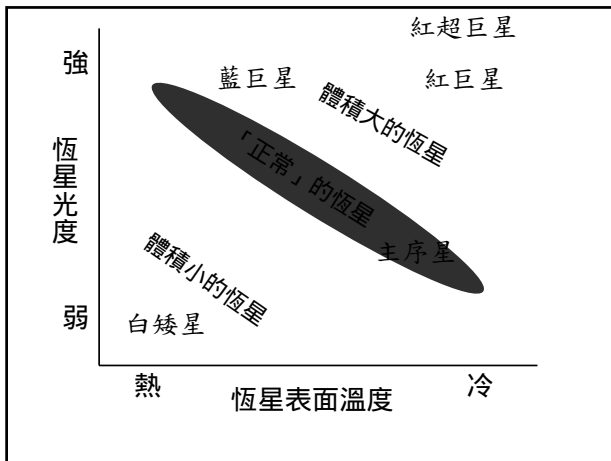
(b) Mass between about  $4 M_{\odot}$  and  $0.4 M_{\odot}$ : Energy flows by radiation in the inner regions and by convection in the outer regions.

(c) Mass less than  $0.4 M_{\odot}$ : Energy flows by convection throughout the star's interior.

$> 4 M_{\odot}$  的恆星內部能量以對流傳遞，外部以輻射傳遞

$0.4 \sim 4 M_{\odot}$  的恆星內部以輻射傳遞，外部以對流傳遞。最表面仍以輻射傳出

$< 0.4 M_{\odot}$  的恆星全部以輻射傳遞。最表面才以輻射傳出



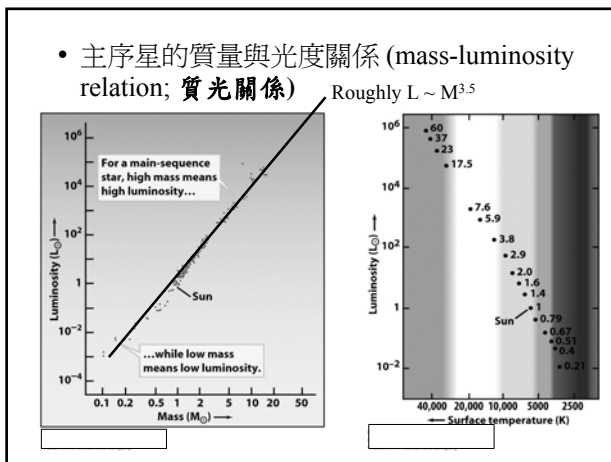
### 恆星璀璨多姿的一生

雲氣收縮→分裂→各自形成恆星→星團

星球質量越大、越明亮、溫度越高、呈藍白色  
 星球質量越小、越微暗、溫度越低、呈橙紅色

耀眼壽命短  
只能活一億年

我們真該慶幸  
平庸壽命長  
太陽已經活了50億年，還可以再活50億年



### Main-Sequence Lifetime

- Massive stars are very luminous,  $L \sim M^{3.5}$
- $L$  [ergs/s] = emitting power (consumption rate)
- $M \rightarrow$  available energy
- $\rightarrow M/L =$  lifetime of energy generation  $\sim M^{-2.5}$

主序星的壽命  $\propto$  (恆星質量) $^{-2.5}$

- 這表示質量越大的恆星，其主序的壽命越短(得多)，例如質量為太陽10倍的恆星 ( $10 M_{\odot}$ ) 其主序壽命只有太陽 (100億年) 的 0.3%，也就是只有數千萬年。

TABLE 12-1 Main-Sequence Lifetimes

Mass ( $M_{\odot}$ )	Surface temperature (K)	Luminosity ( $L_{\odot}$ )	Time on main sequence ( $10^6$ yrs)	Spectral class
25	35,000	80,000	3	O
15	30,000	10,000	15	B
3	11,000	60	500	A
1.5	7,000	5	3,000	F
1.0 (Sun)	6,000	1	10,000	G
0.75	5,000	0.5	15,000	K
0.50	4,000	0.03	200,000	M

Q: 藍白恆星一定是年輕恆星 (為什麼?)

昴宿星團中的藍白恆星只能照耀一億年，當它們形成時，地球上正處於何種生物世代?

## 恆星的質量範圍

- 質量太小 ( $< 0.08 M_{\odot}$ ) 的星體，中央溫度不足以點燃氫核反應
- 質量太大 ( $> 150 M_{\odot}$ ，不很確定) 的星體，核反應太劇烈，萬有引力無法平衡強大的輻射壓力，星體結構不穩定

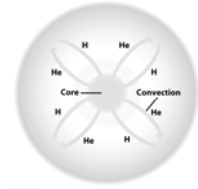
→ 恆星的質量範圍約在  $0.08 \sim 150 M_{\odot}$  之間

## 最小質量的主序星 ( $0.08 \sim 0.4 M_{\odot}$ )

- 恆星輻射的光度取決於核心溫度
- $0.08 \sim 0.4$  太陽質量的主序星稱為**紅矮星** (red dwarfs)，它們中央溫度低、壓力小
- 幾乎整顆星處於對流 (convection) 狀態

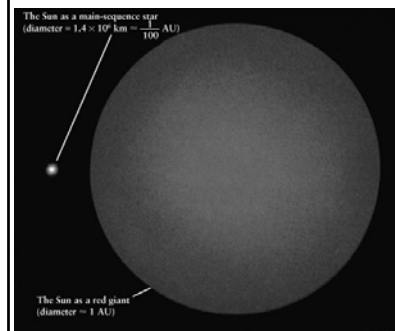
→ 幾乎整顆星的氫都融合成氦

紅矮星核心融合的速率非常慢，主序壽命超過千億年，比宇宙年齡還長！  
最終冷卻成為**黑矮星**

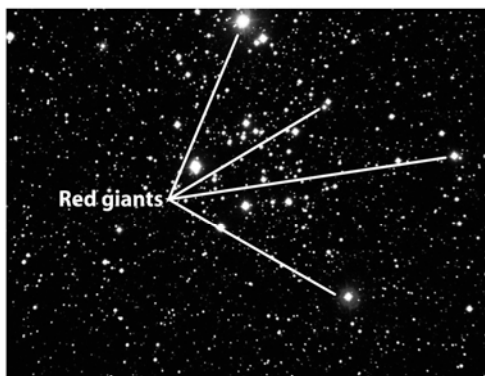


## 太陽 (小質量恆星)

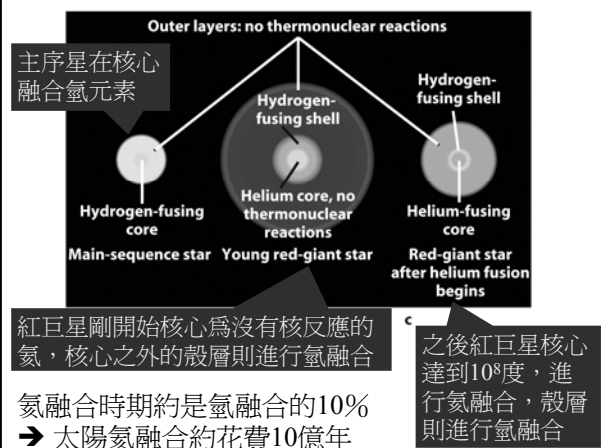
- 核心無法承受萬有引力 → 收縮
- 收縮的核心溫度上升 →  $10^8 \text{ K}$  → 點燃氦核反應  $4\text{He} + 4\text{He} + 4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$  (triple alpha process) 核心再度達到平衡狀態  
→ 外層向外膨脹，溫度下降  
有些星球  ${}^{12}\text{C} + 4\text{He} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma$
- 我們看到外層變大、變冷 (變紅)  
→ **紅巨星 (red giant)**
- 這時期星球結構不穩，收縮、膨脹  
→ 脈動變星，例如**造父變星 (Cepheid variables)**



50億年後太陽核心的氫核子反應停止，核心收縮，外層則膨脹成為「紅巨星」，直徑增大100倍，光度增強2000倍



Red giant stars in the star cluster M50





## 恆星的質量流失 (mass loss)



- 太陽風流失的質量  $\sim 10^{-14} M_{\odot}$
- 紅巨星流失程度大得多  $\sim 10^{-7} M_{\odot}$   
(為什麼?)
- 流失物質的速度約 10 km/s, 可利用光譜線的都卜勒效應測量

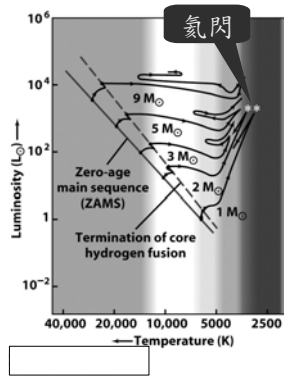
## 核心氦融合的方式

- 核心大於 2~4 倍太陽質量的星體, 氦融合以緩和的方式進行
- 核心小於 2~4 倍太陽質量, 核心密度高, 達到簡併 (degenerate) 狀態, 也就是氣體壓力與溫度無關 (這和一般氣體壓力與溫度成正比不同)。由於不相容原理, 氣體緊密排列, **電子簡併壓力 (electron degeneracy pressure)** 提供向外的壓力。因此, 當核心達到 1 億度, 核心不會膨脹, 沒有了「安全閥」機制, 核反應急遽進行 → **氦閃 (helium flash)**

- Helium flash 時, 核心溫度達到  $3.5 \times 10^8$  K, 再度使氣體成為一般氣體, 也就是  
高溫 → 高壓

- 核心膨脹 → 冷卻
- 融合減慢
- 光度下降
- 外圍收縮
- 再度達到靜力平衡

- 天體變小、變暗、變熱

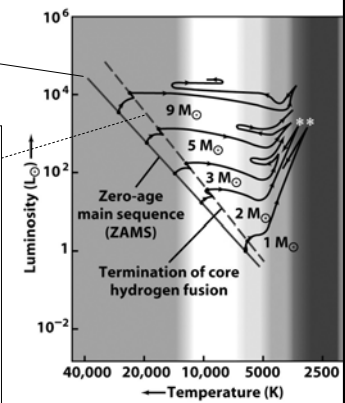


星球剛進入主序  
**零齡主序 (zero age main sequence)**

核心 4 個氫融合成 1 個氦, 密度變小, 溫度必須升高 → 光度增加 (40%)

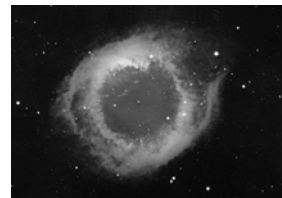
核心收縮, 外層膨脹 (半徑增 6%), 表面溫度稍升 (5500 K to 5800 K)

→ MS 向上移動



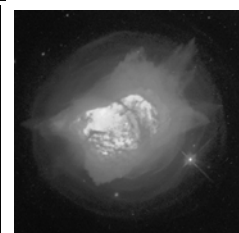
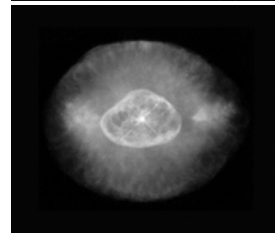
## 太陽步向晚年

- 核心氦用完 → 再收縮 → 再升溫  
→ 點燃碳核子反應?  
核心碳用完 ...  
當再沒有下一級核反應 → 不再有能量來源  
原子原來空蕩蕩 (原子核很小), 被擠壓  
後可以撐住 (不能再擠了, 否則...)  
熾熱的核心 → **白矮星** → 冷卻成黑矮星
- 外層向外擴散, 逐漸與星際物質混合  
→ **行星狀星雲 (planetary nebulae)**
- 雲消霧散後, 露出中央的白矮星



恆星演化晚期噴發出外層大氣, 形成各種形狀的「行星狀星雲」

外觀成雲氣狀而稱之, 實際上與行星無關



- **疏散星團 (open cluster)**  
各種質量成員星分佈在赫羅圖主序上
- **球狀星團 (globular cluster)**  
大質量恆星首先衰亡，然後輪到中等質量恆星，接著依照質量陸續離開主序

星團中的恆星同時、從同一團雲氣形成  
→ 年齡、距離、成分都相同

比**轉折點 (turnoff point)** 質量更大的主序星已經衰亡，成為紅巨星

→ 轉折點的星球主序壽命 = 該星團的年齡

This star cluster is so young that most of its cool, low-mass stars have not yet arrived at the main sequence.

An H-R diagram of the stars in NGC 2264

This star cluster is old enough that all of its cool, low-mass stars have arrived at the main sequence: Hydrogen fusion has begun in their cores.

An H-R diagram of the stars in the Pleiades

### 星族 (stellar Population)

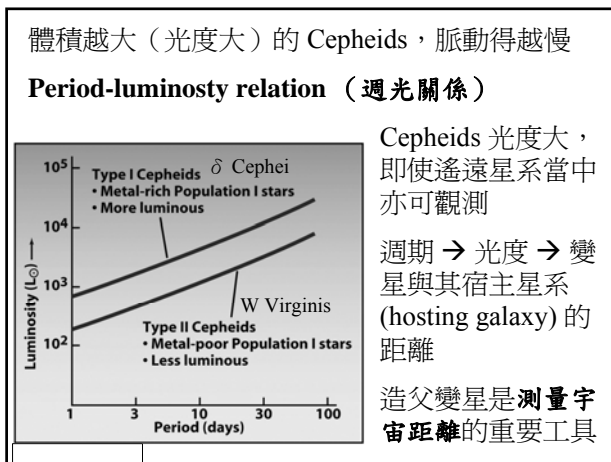
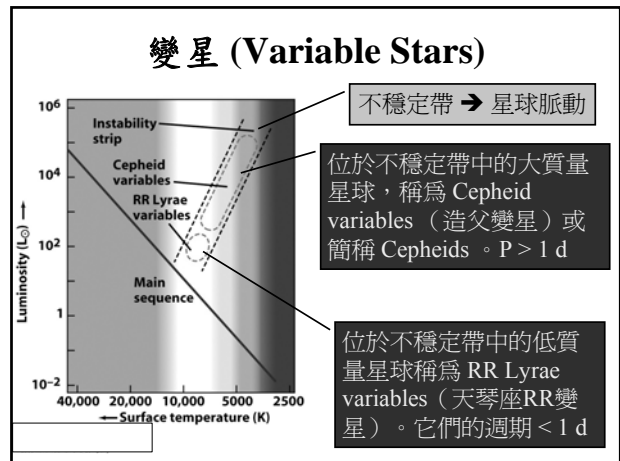
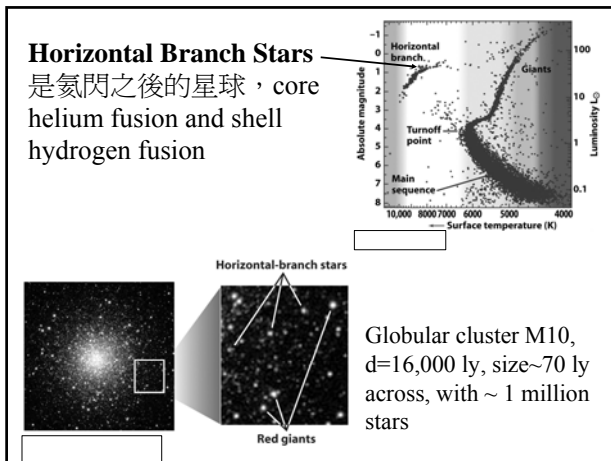
- 疏散星團中的恆星複雜元素含量豐富 (metal rich)，這些元素來自前代恆星爆發死亡後回歸星際物質。 **Population I stars**
- 球狀星團中的恆星「金屬」含量低 (metal poor)，這些恆星很早以前就已經形成。 **Population II stars** (前輩恆星)

The spectrum of this Population II star shows absorption lines of hydrogen (such as H<sub>γ</sub> and H<sub>β</sub>) but only very weak absorption lines of metals ... such a star is metal-poor.

The spectrum of this Population I star has stronger absorption lines of metals ... such a star is metal-rich.

**Hipparcos** 衛星資料

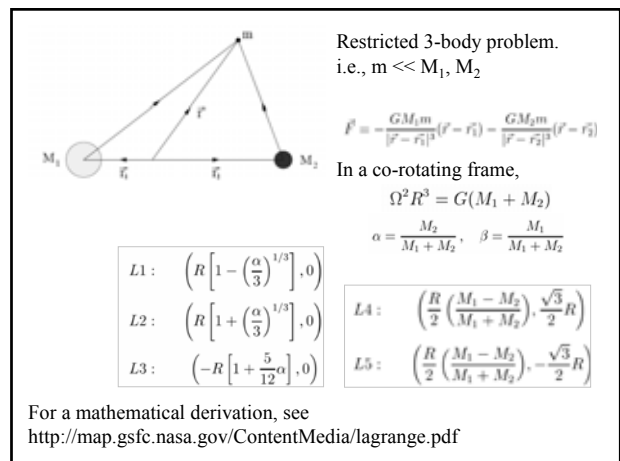
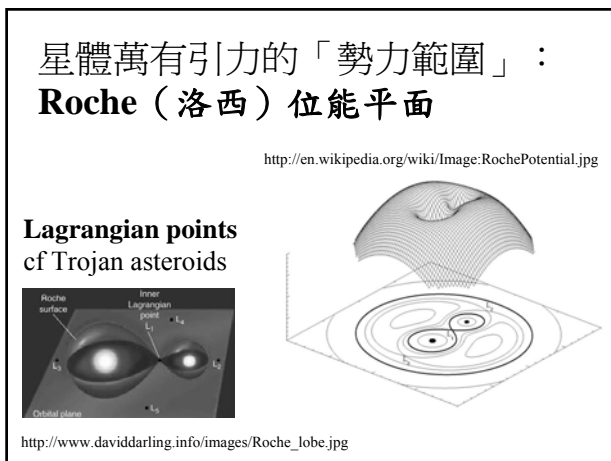
不同星團赫羅圖之示意圖

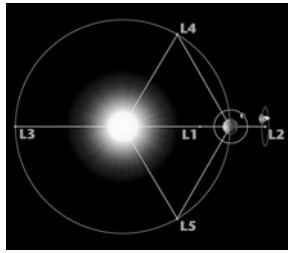


Q：利用 Cepheid variables 測量距離——有多想當然爾？

A：

- 造父變星有週光關係  
光度越大者，變化週期越慢
- 有哪些地方會影響所估計的距離？
  - 只有兩種造父變星？
  - 是否有星際物質吸收，減弱了星球的亮度？
  - ...

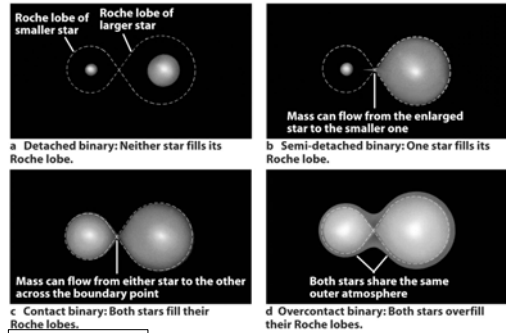




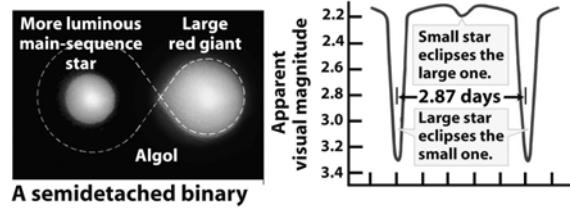
In addition to the *WMAP*, other L2 point missions include *Herschel*, *Gaia*, *JWST*, etc.

[http://map.gsfc.nasa.gov/m\\_mm/ob\\_techorbit1.html](http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm/ob_techorbit1.html)

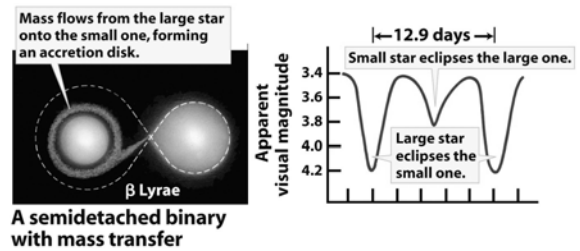
### 緊密雙星 (close binary) 的物質交換 (mass transfer) 會形成特殊的雙星系統



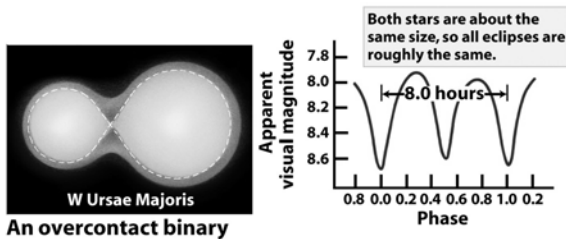
**Algol (Beta Persei)** [大陵五] 英仙座 第二亮星，為食雙星系統，週期為2.87天，其中較亮者是顆 B 型主序星，伴星則是 G 型巨星。當 G 星擋住 B 星時，整個系統的亮度在四小時內由 2.2 等變成 3.5 等，而在最小亮度維持約廿分鐘；B 星擋住 G 星所造成的次極小僅變暗 0.06 等，肉眼無法偵測出。此系統另有週期為 1.862 年的光譜變化，顯示存在第三顆星。電波觀測顯示伴星的質量流往主星，造成間歇性電波強度急遽增大。此類食雙星以 Algol 為名。



**Beta Lyrae** 為半分離雙星，物質轉移在分離的成員星周圍形成「吸積盤」(accretion disk)，擋住了該分離星。



**W Ursae Majoris** 為過度接觸雙星，距離非常接近，以致兩顆成員星共有大氣層。



### 雙星間巧妙的物質互換 (mass exchange)

