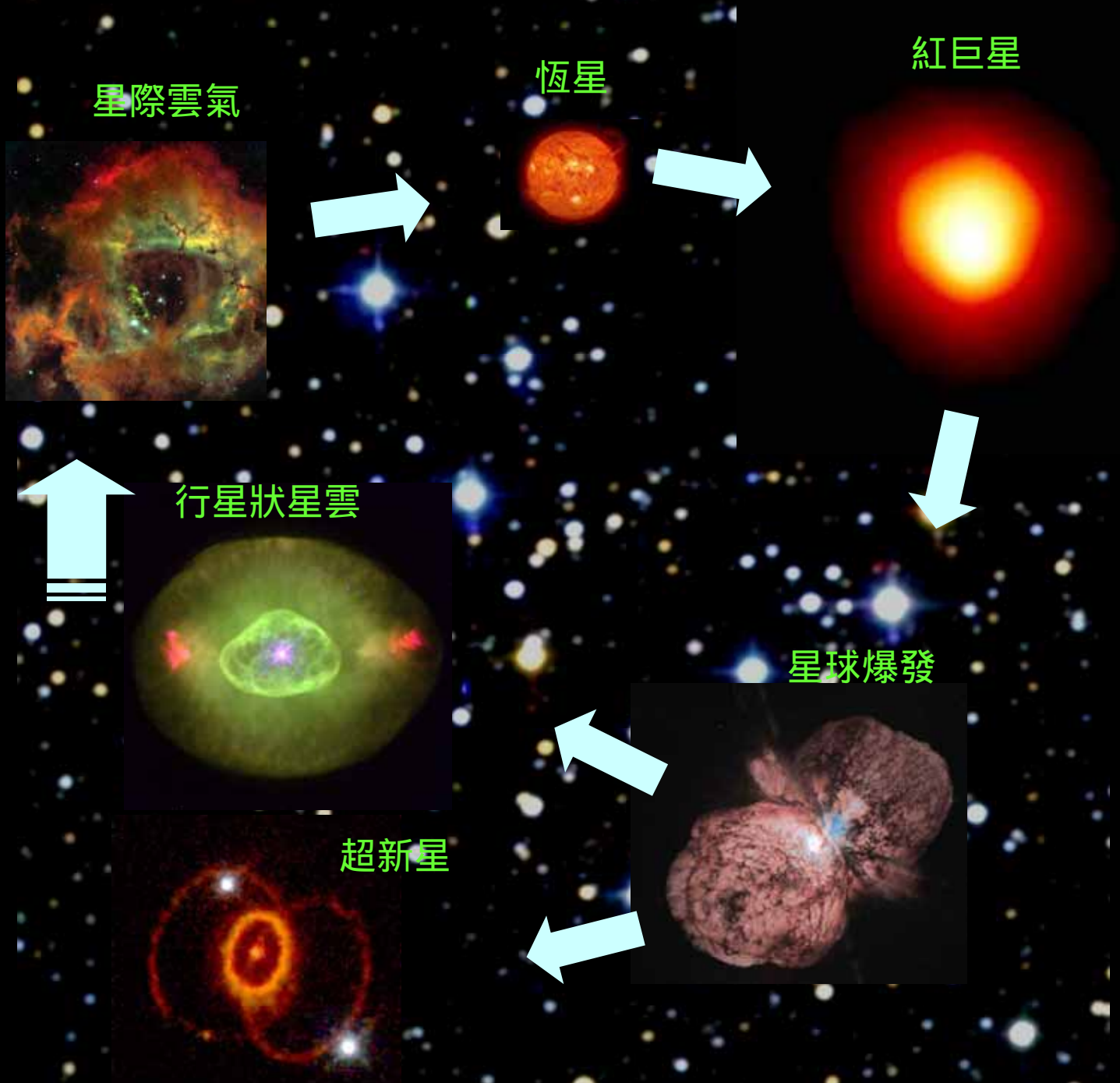


恆星的生老病死



星際雲氣



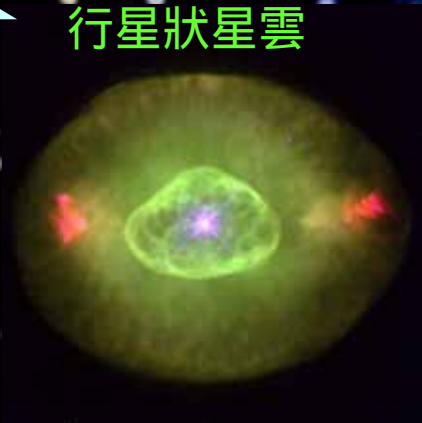
恆星



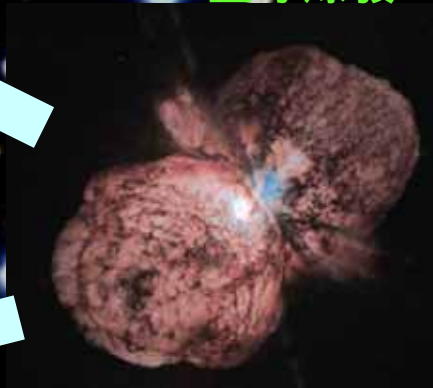
紅巨星



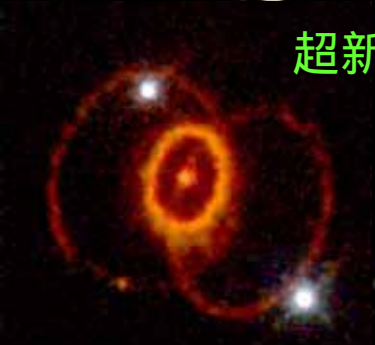
行星狀星雲



星球爆發



超新星



你覺得呢？

- ❖ 天地恆長久？天長地久是多久？
- ❖ 恆星有多遠？有多亮？有顏色嗎？如何形成？現在還有恆星正在形成嗎？恆星的壽命有多長？什麼因素決定呢？
- ❖ 太陽老去後變成什麼？對地球有何影響？
- ❖ 金、銀、銅、鐵從何而來？
- ❖ 超新星是什麼？黑洞呢？

星際物質 (interstellar medium)

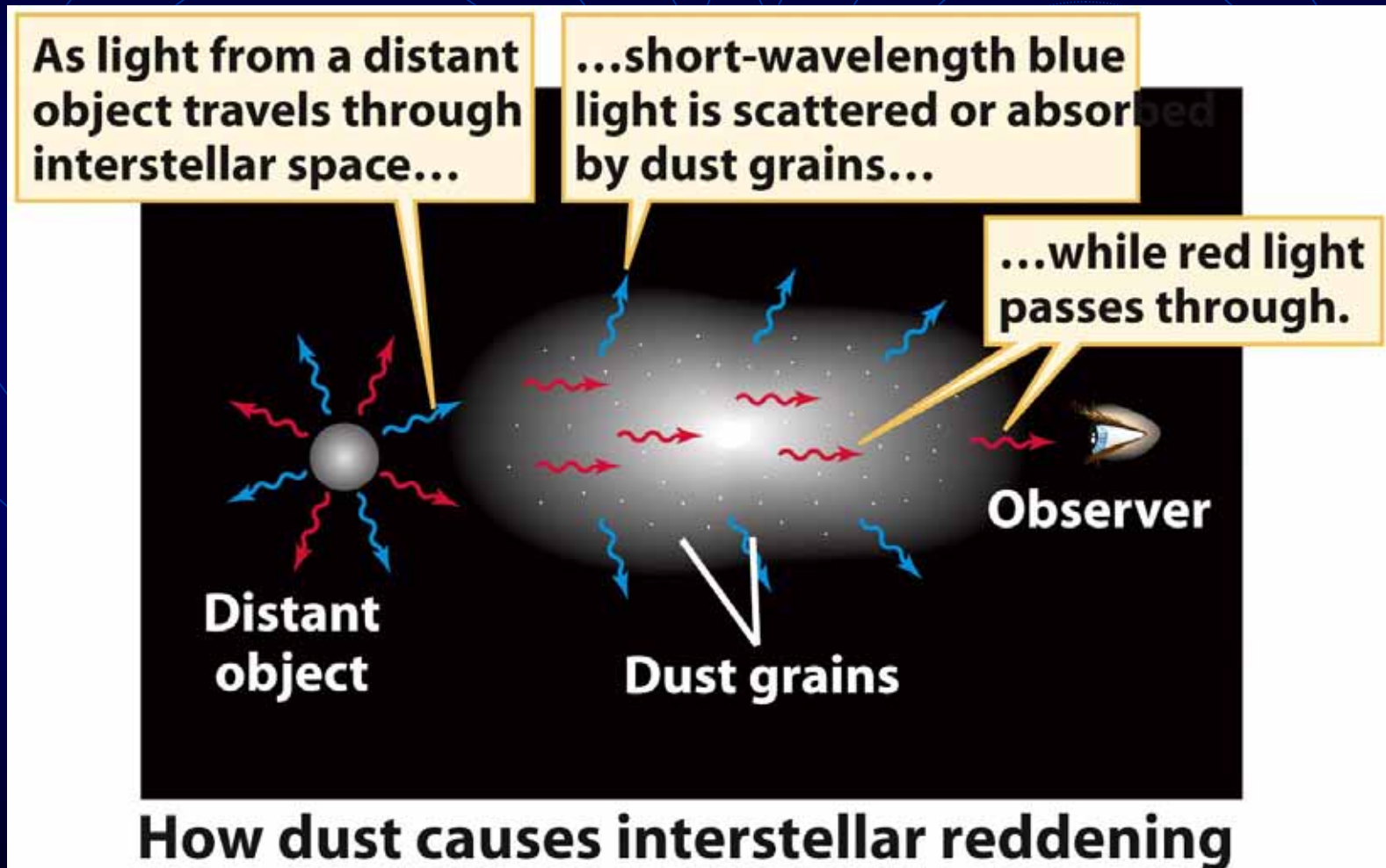
星星之間有極寬廣的空間
但是 太空 \neq 真空

日常空氣每cc約含 10^{19} 個分子
星際太空每cc約含 1 個分子



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 (~ 10 K, 攝氏零下260幾度)

星際塵埃造成星光的顏色比實際來得紅--- 星際紅化現象 (interstellar reddening)

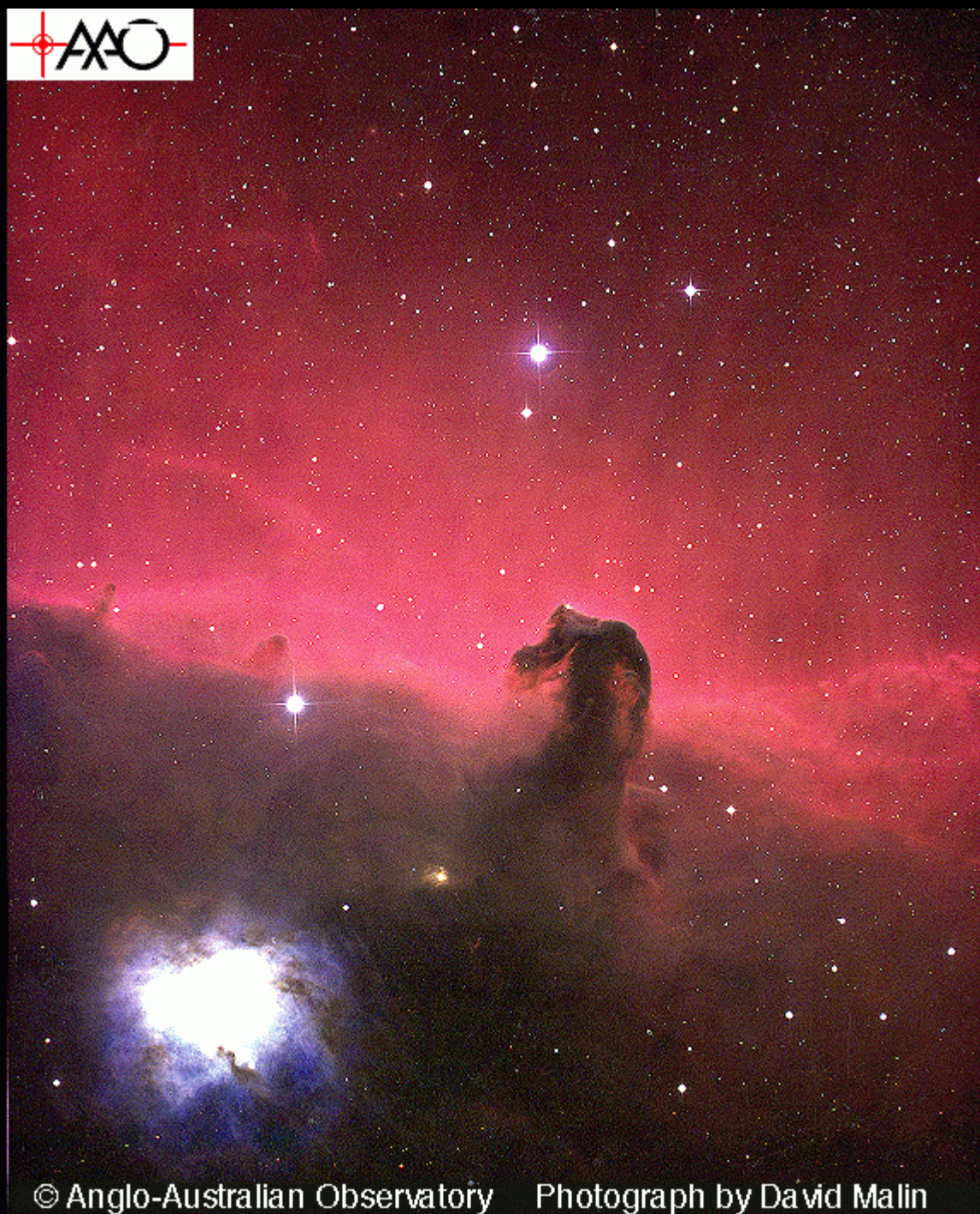




NGC 3576:
A closer nebula

NGC 3603:
A distant nebula

Reddening depends on distance



馬頭星雲

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)**
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



發射星雲

黑暗星雲

反射星雲



Star Shadows Remote Observatory

Horsehead Nebula

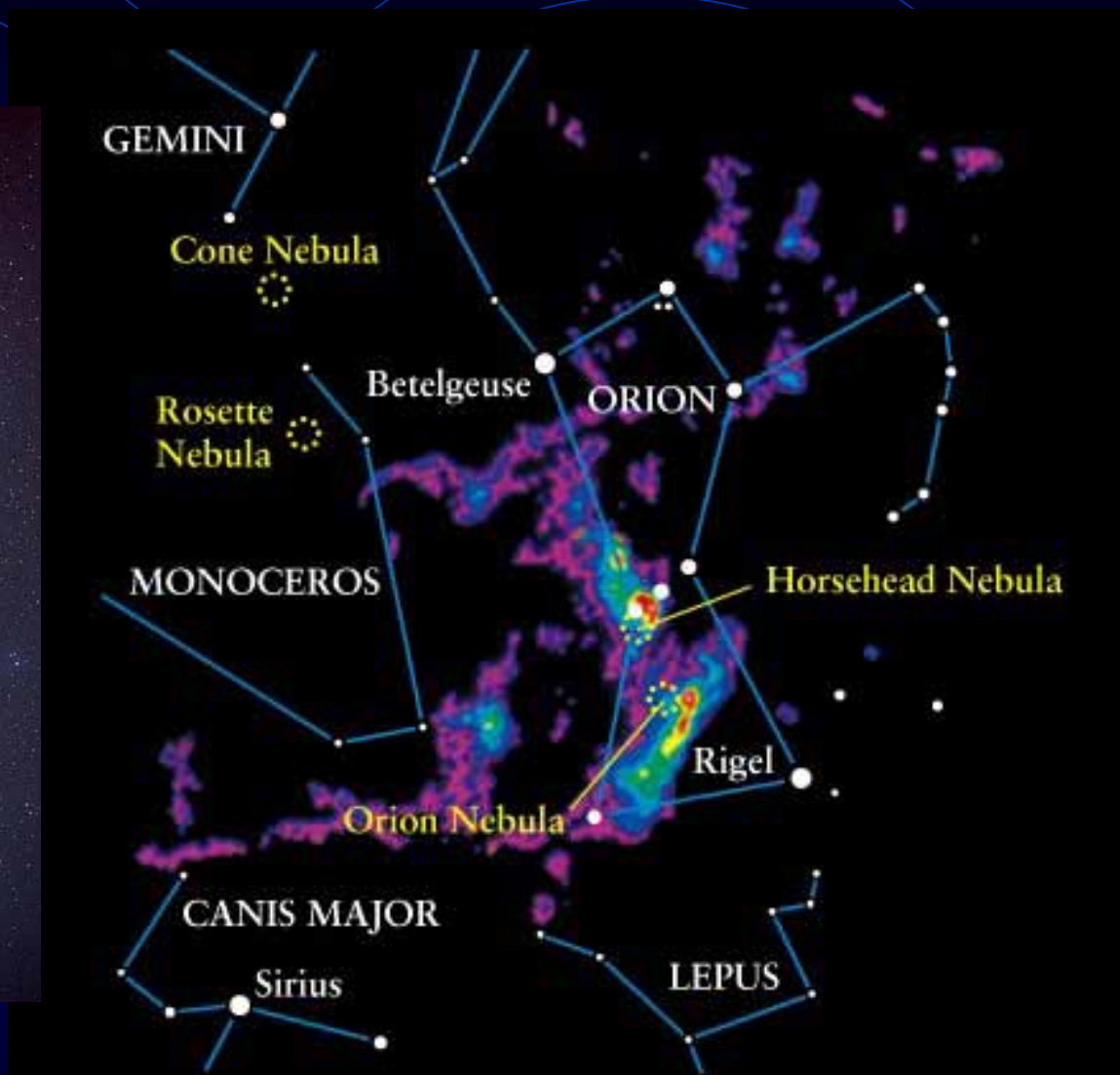


Hubble
Heritage

NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC01-12

緻密雲核 (dense core)



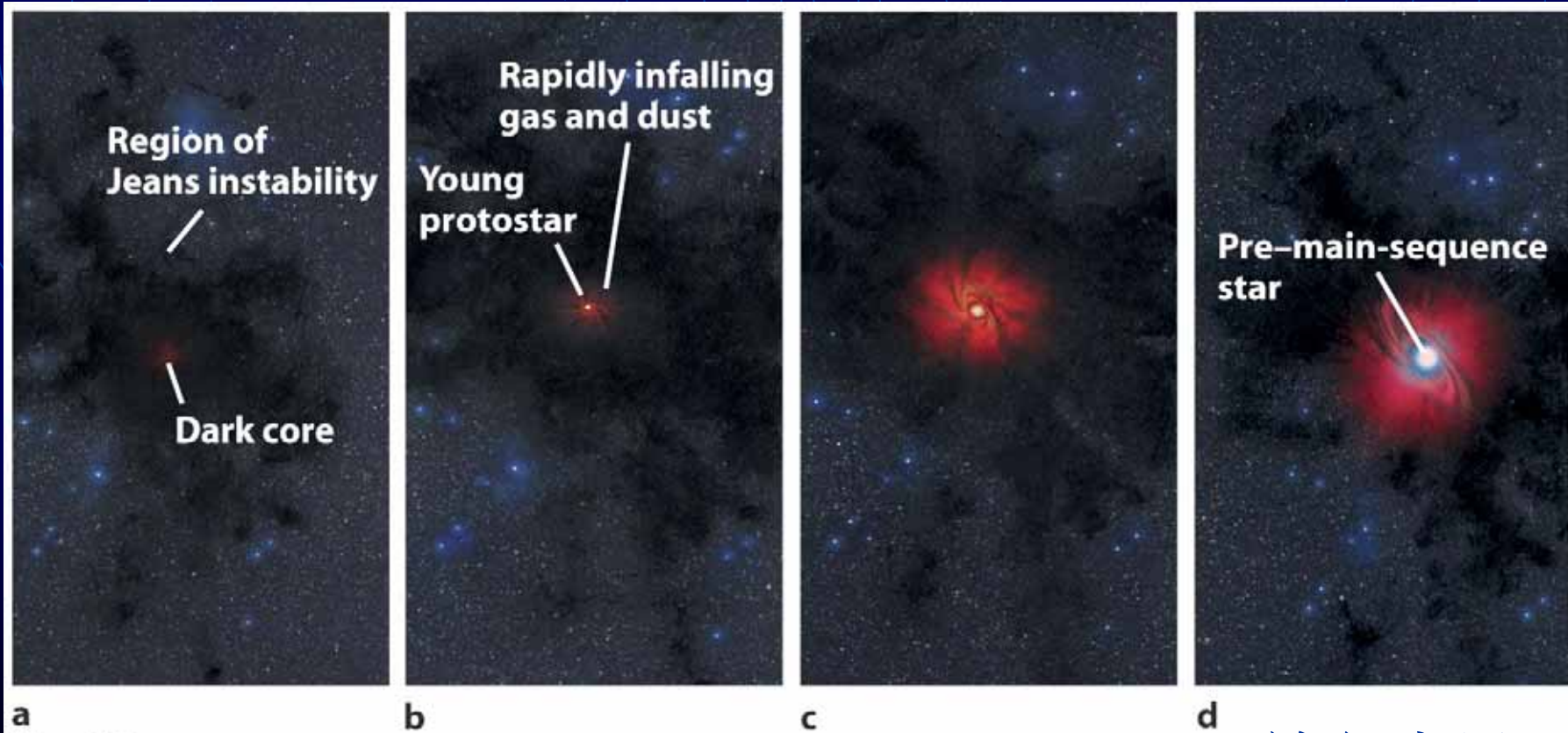


可見光照片

獵戶座 二氧化碳分子分布



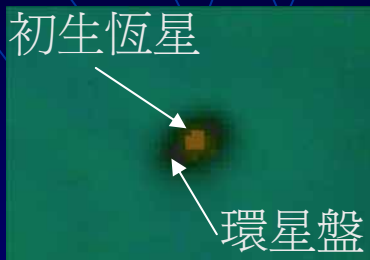
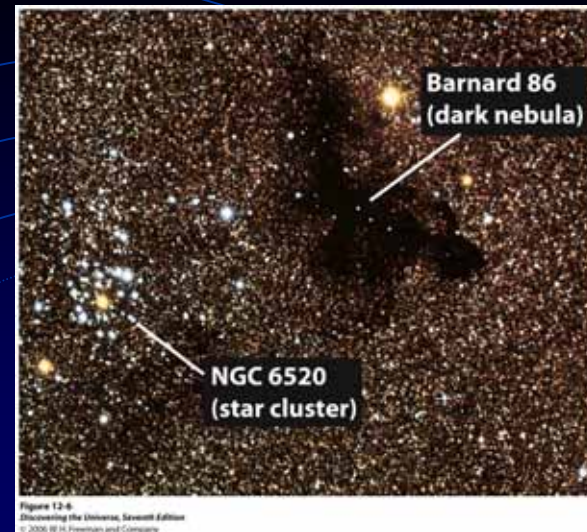
- Dense cores 要是密度高（萬有引力強）、溫度低（熱壓力弱），這樣的條件稱為 **Jeans instability** → 可能收縮成爲 **原恆星** (protostar)



a
Figure 12-9
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

前主序星

恆星與行星皆源於星際雲氣



收縮

星際暗雲

旋轉

初生星球

+ 扁盤 + 剩下的塵氣

溫度上升、塵消氣散

年輕的太陽 + 盤狀物質



星際塵埃

塵塊

小行星

行星

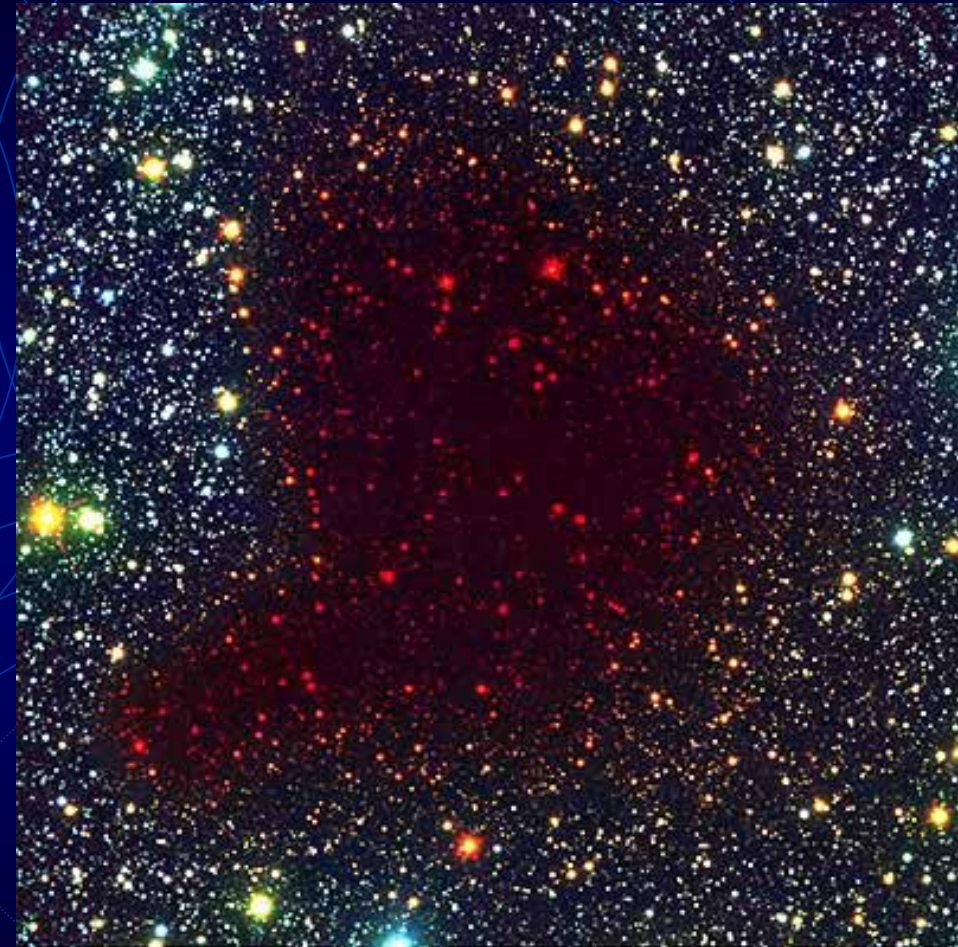


可見光影像

加上紅外線影像

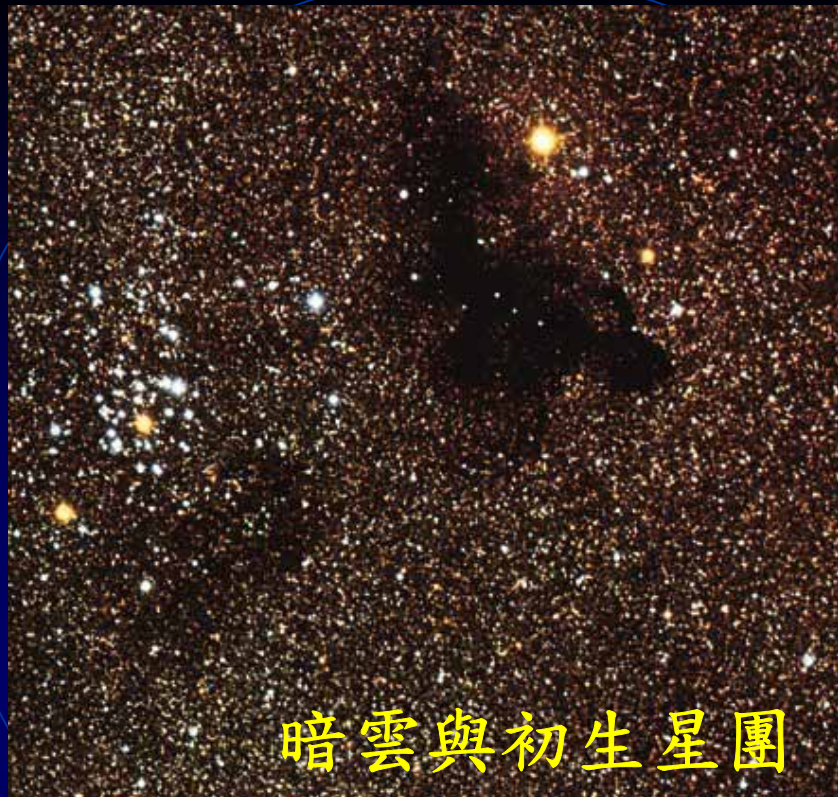


Pre-Collapse Black Cloud B68 (visual view)
(VLT ANTU + FORS 1)



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





暗雲與初生星團

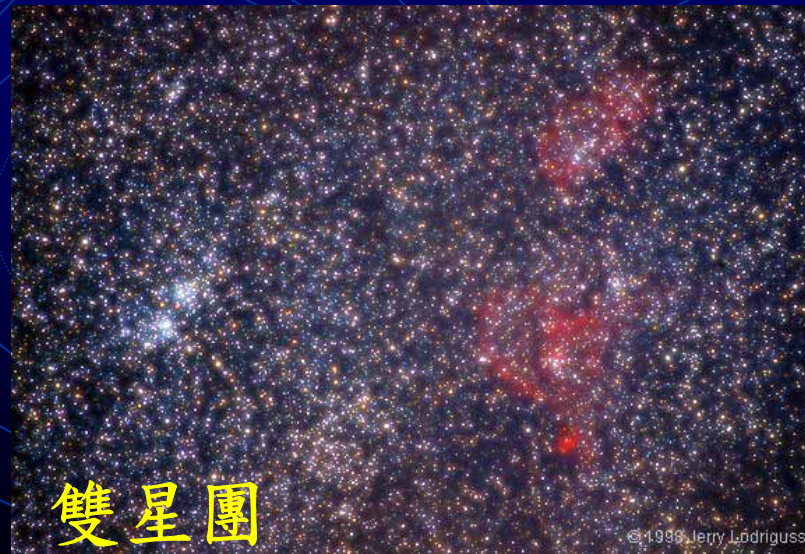


薔薇星雲



天鵝座

© 1998 Jerry Lodriguss

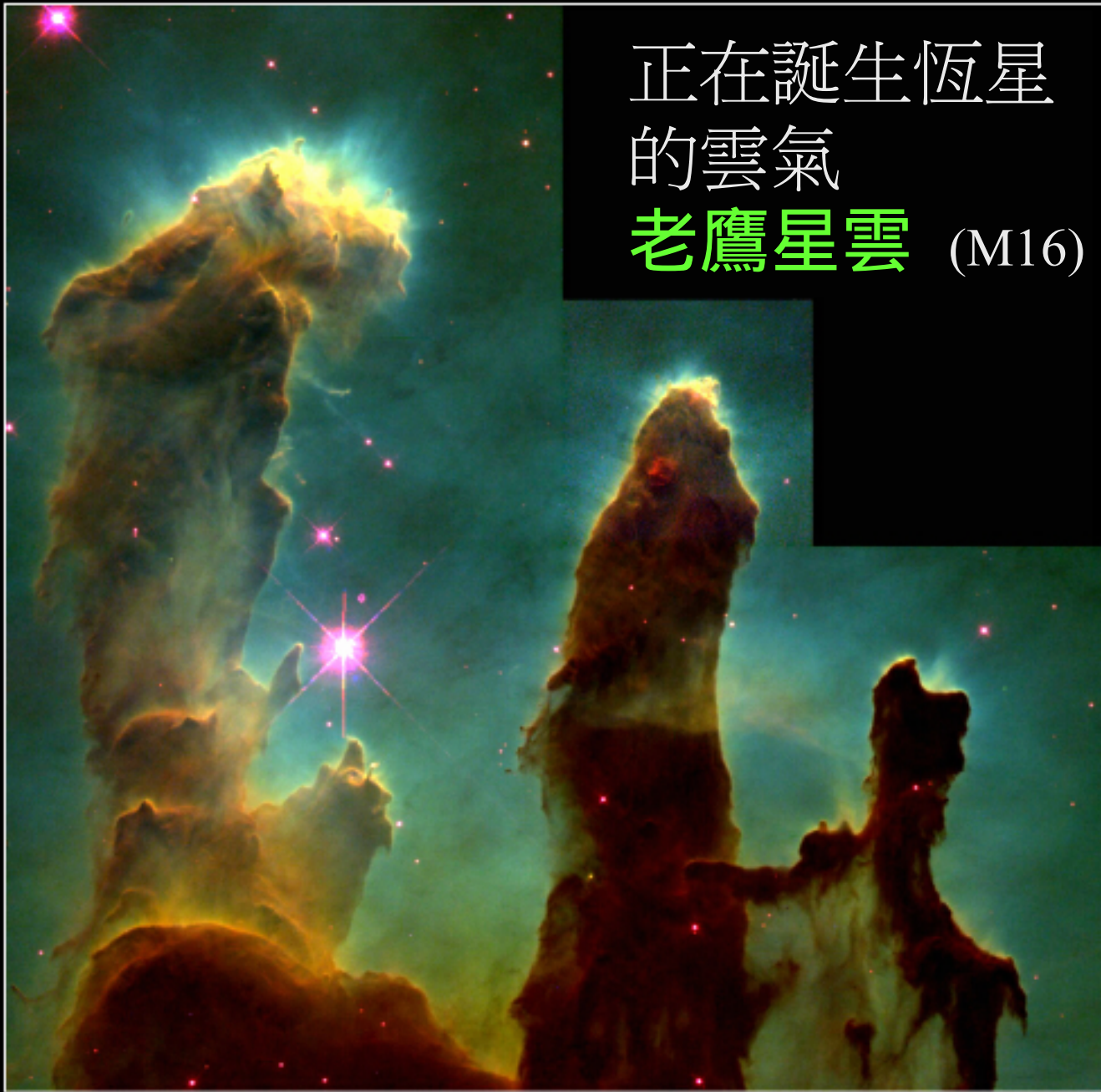


雙星團

© 1998 Jerry Lodriguss

正在誕生恆星
的雲氣

老鷹星雲 (M16)



前主序星的質量決定其演化情形

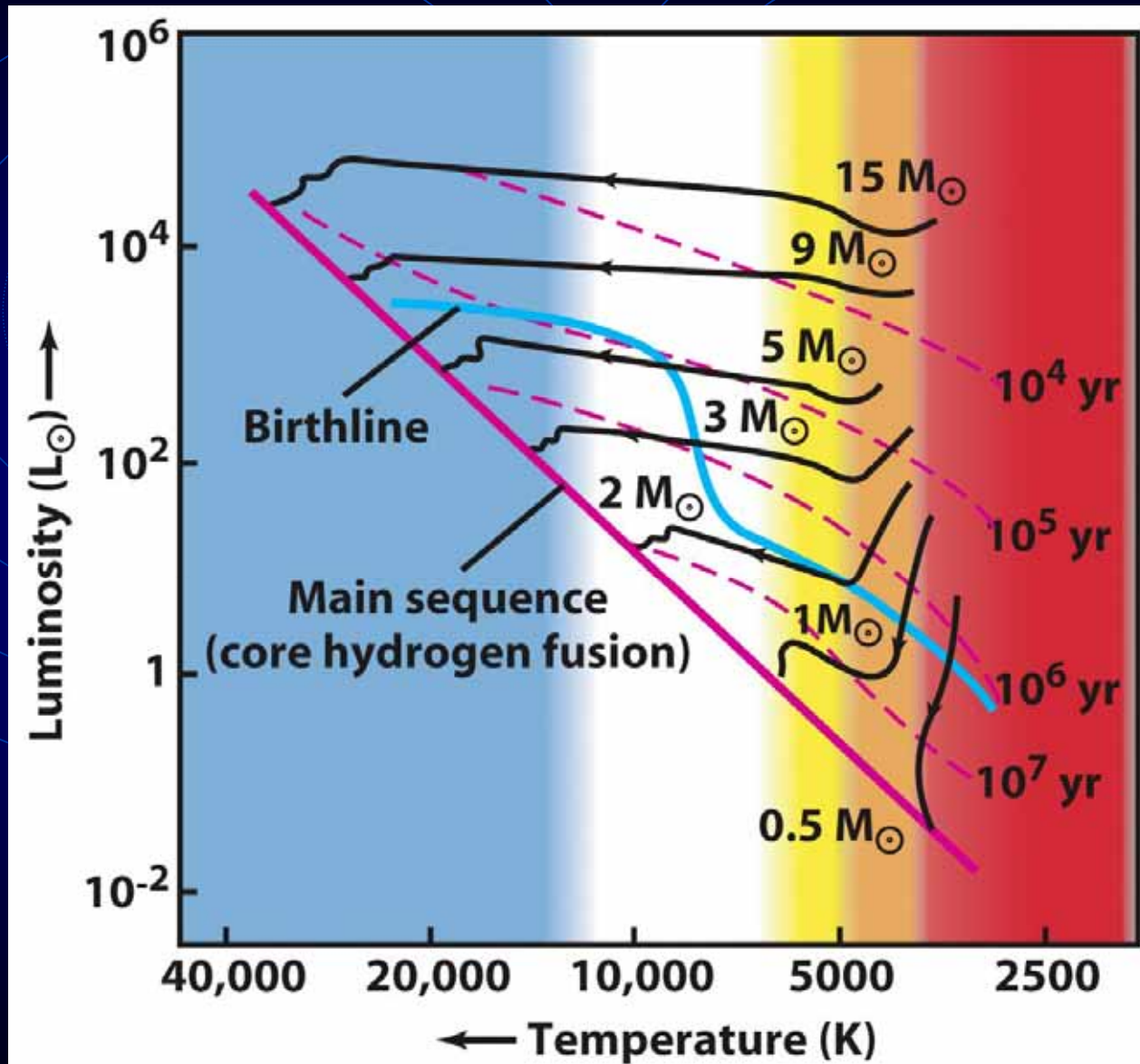
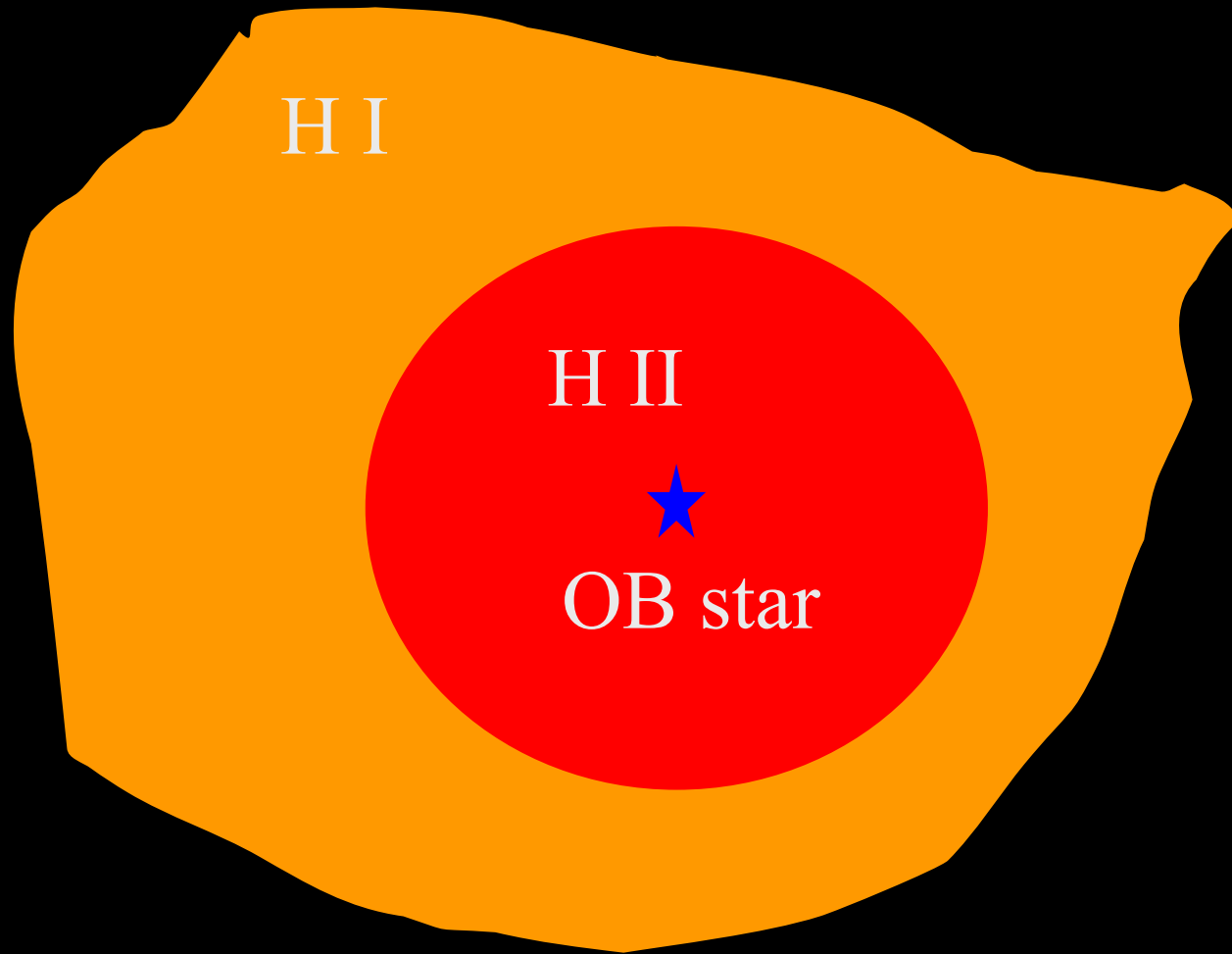


Figure 12-12
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company



H I (中性氫原子)

H II (一次游離氫離子)

OB 星的紫外光游離周圍氫原子成爲氫離子
→ H II region

1. This emission nebula (about 2200 pc away and about 20 pc across) surrounds the star cluster M16.

2. Star formation is still taking place within this dark, dusty nebula.

3. Hot, luminous stars (beyond the upper edge of this image) emit ultraviolet radiation: This makes the dark nebula evaporate, leaving these pillars.

4. At the tip of each of these pillars is a nebula containing a young star.

5. Eventually the nebulae evaporate, revealing the stars.

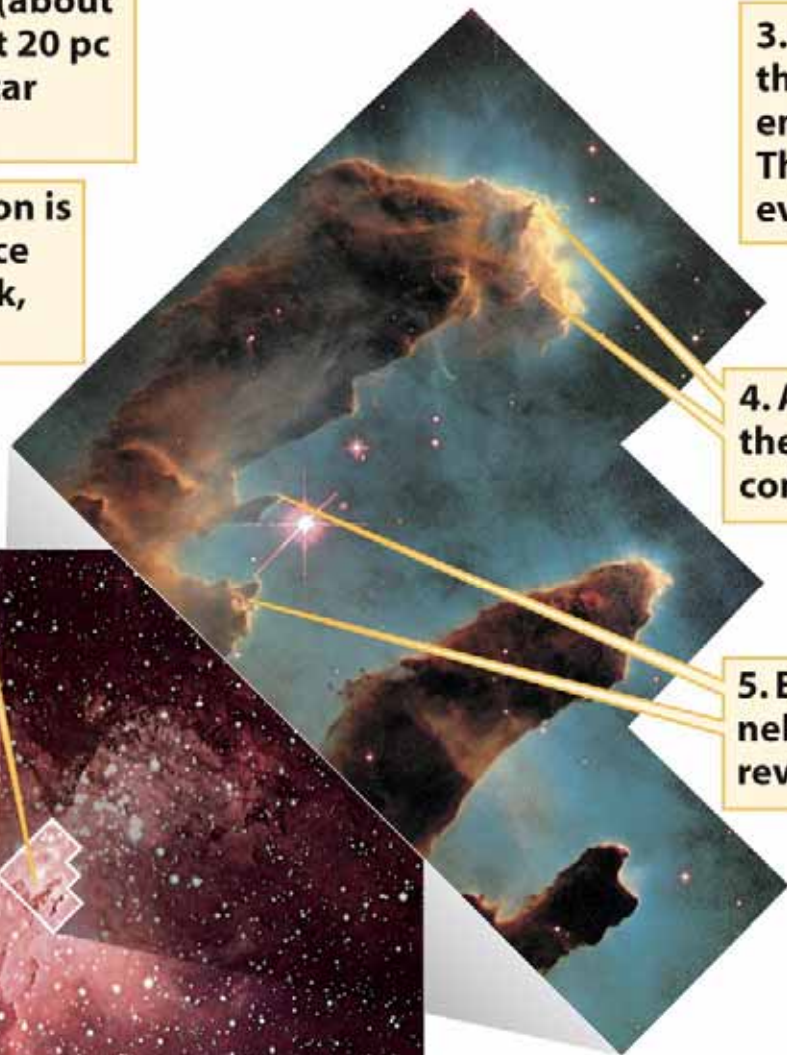
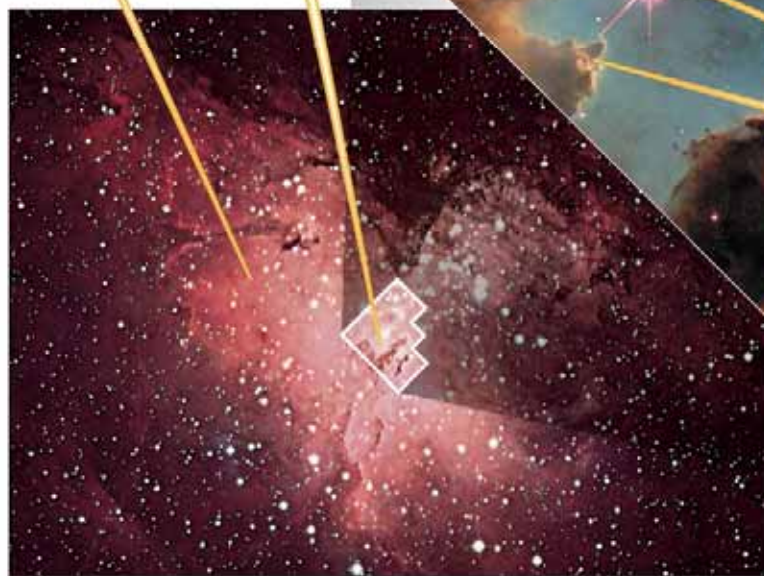


Figure 12-15
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

- 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，稱爲 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

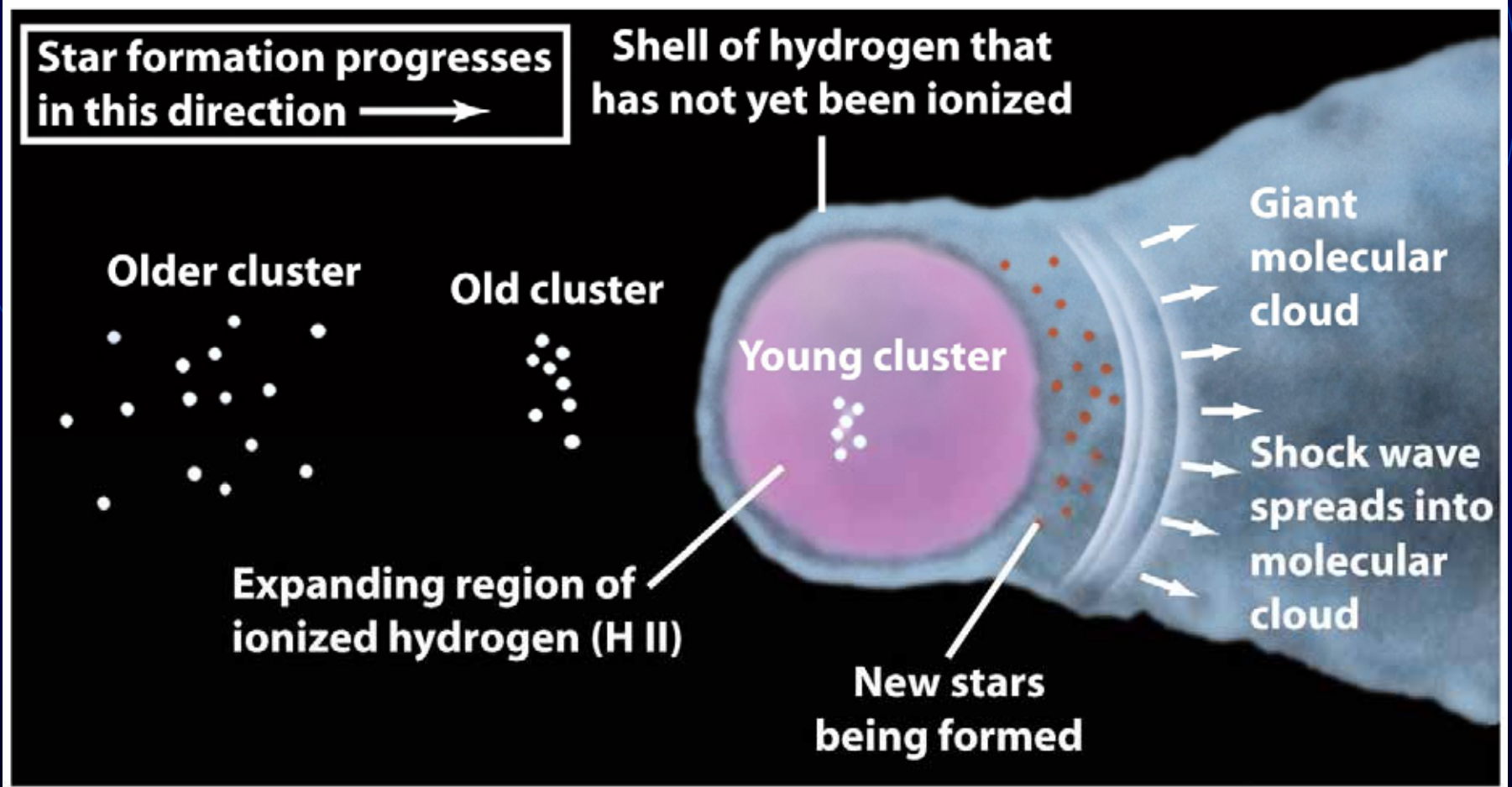


Figure 12-17a
Discovering the Universe, Seventh Edition
 © 2006 W.H. Freeman and Company

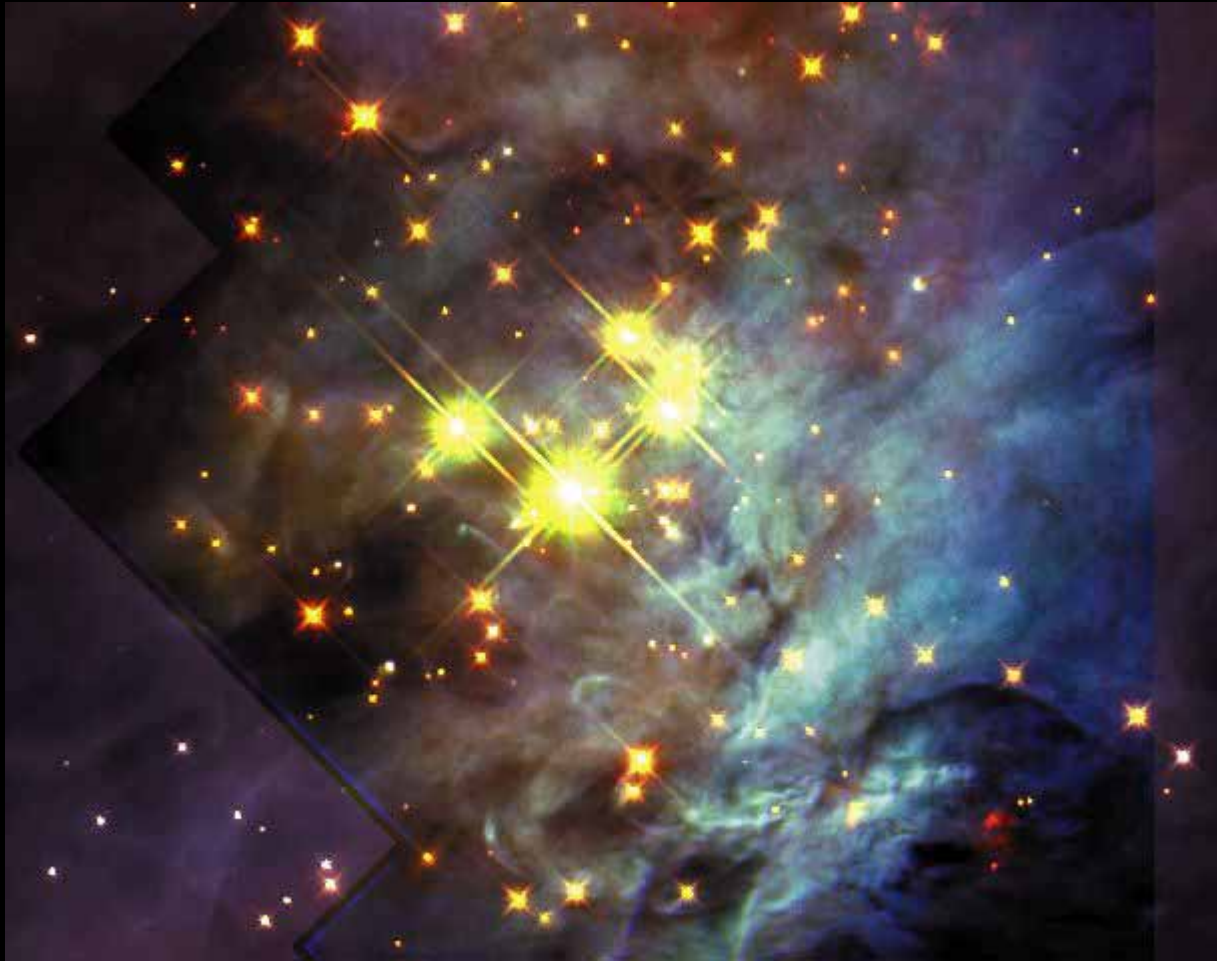
Radiation and stellar winds from this massive, luminous star...



...may have triggered the formation of these stars.

Figure 12-17b
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

未能成形→ 棕矮星 (brown dwarfs)



獵戶座四合星附近的棕矮星

Credit: G. Schneider (UofA), K. L. Luhman (CfA), et al., NICMOS IDT, NASA
WFPC2 data: C. O'Dell and S. Wong (Rice)

HW070319

due in a week

- A star of which spectral type has the strongest Na I absorption lines? At approximately what wavelength is this line normally found?
- What is the approximate mass of a main-sequence star that is 10,000 times as luminous as the Sun? What is the approximate luminosity of a main-sequence star whose mass is 1/10 that of the Sun?
- What if the Sun were an M-type star, rather than a G-type star? Assume the Earth orbiting the M-type Sun had the same composition and orbital distance as it does today. Imagine the difference this would have been in terms of climate, tides, impacts of meteoroids, habitability, etc.

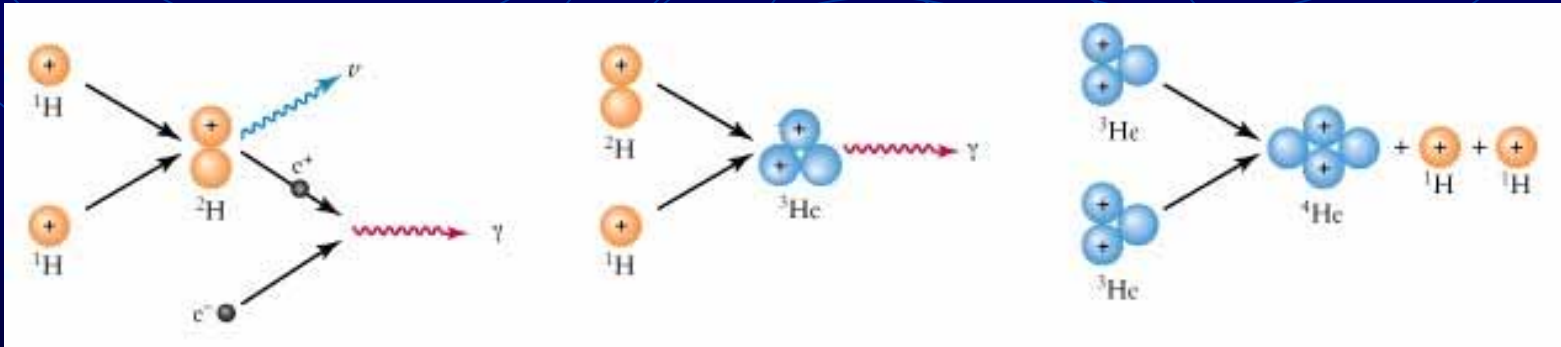
太陽（恆星）內部的核反應

簡單的原子核 結合 \rightarrow 較複雜的原子核

原子核強作用力把自己「抓得」比較緊

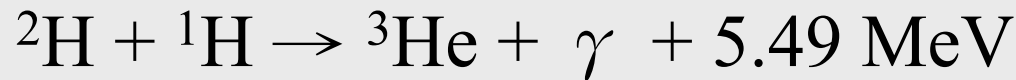
\rightarrow 放出能量（ γ 射線、X射線、光）

例如：（4個）氫原子核 \rightarrow （1個）氦原子核



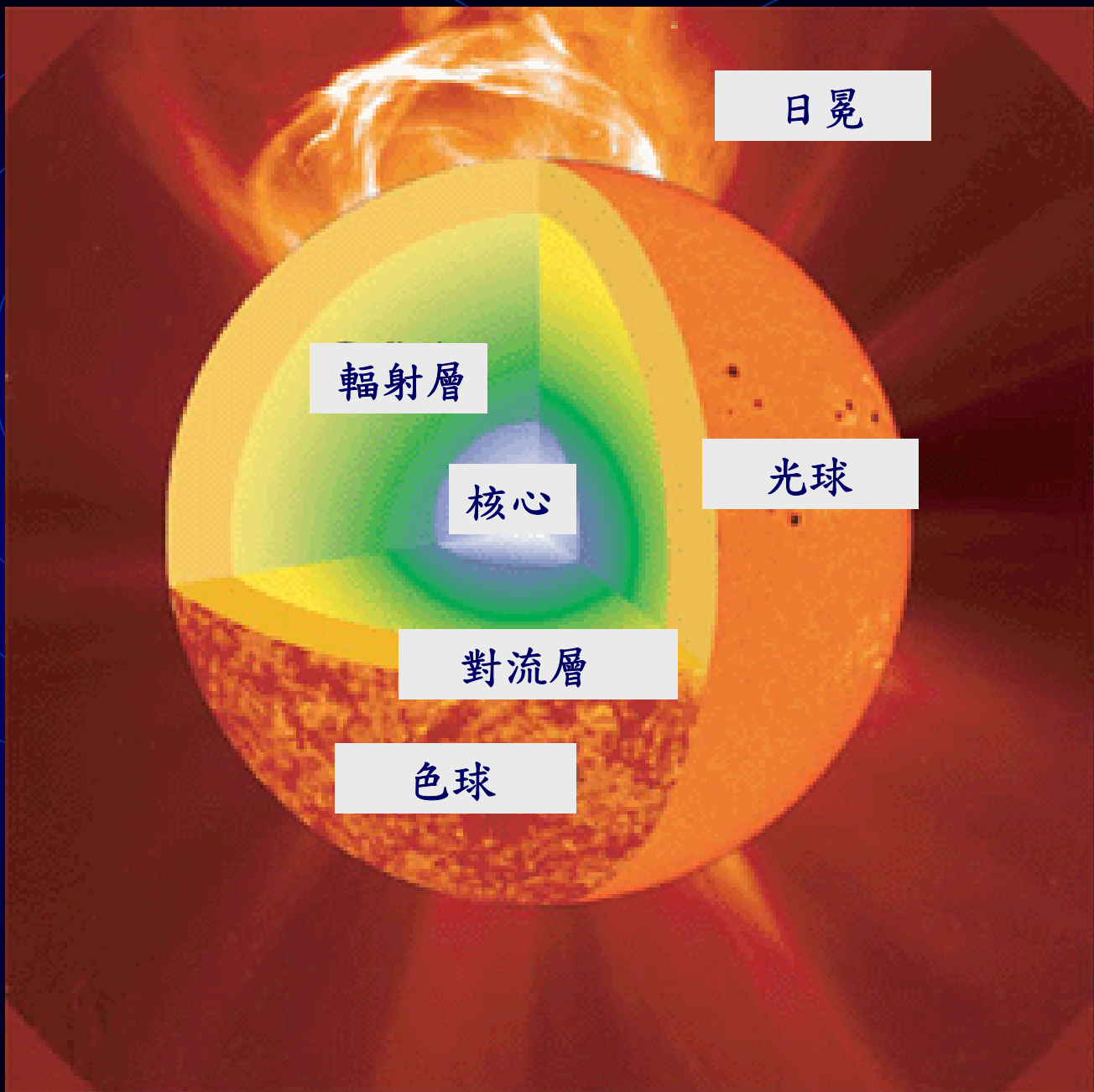
這些能量讓氣體高速運動，彼此互推，產生（向外）高壓，抵抗（向內）萬有引力

Proton-Proton Reaction



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

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



質量大的恆星 ↓ 萬有引力強
↓ 核反應快才能平衡 ↓ 光度強

紅超巨星

強

藍巨星

紅巨星

體積大的恆星

恆星光度

「正常」的恆星

主序星

體積小的恆星

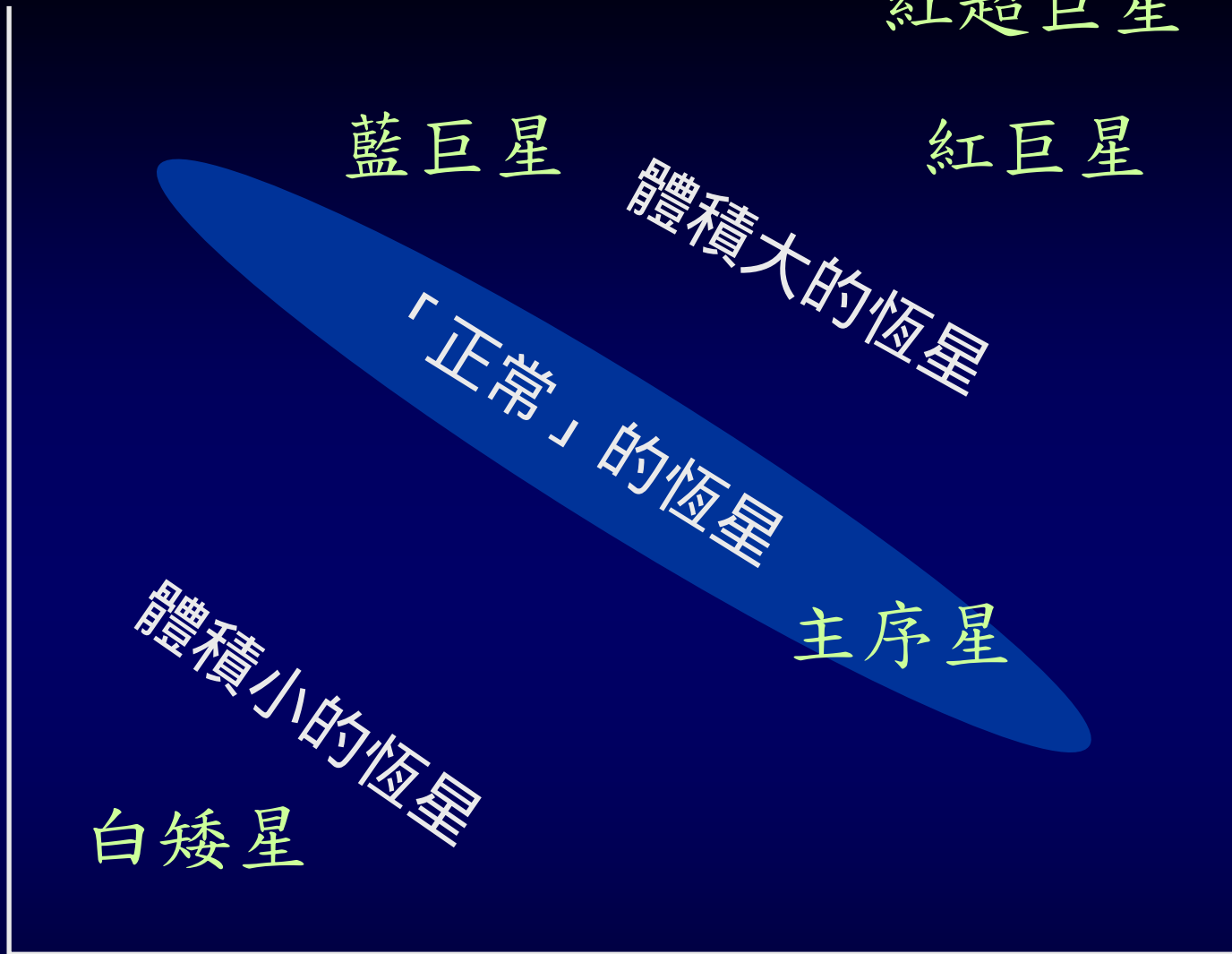
白矮星

弱

熱

恆星表面溫度

冷



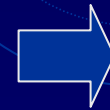
恆星璀璨多姿的一生

耀眼
壽命短

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



只能活
千萬年

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



- 主序星的質量與光度關係 (mass-luminosity relation; 質光關係) $\text{Roughly } L \sim M^{3.5}$

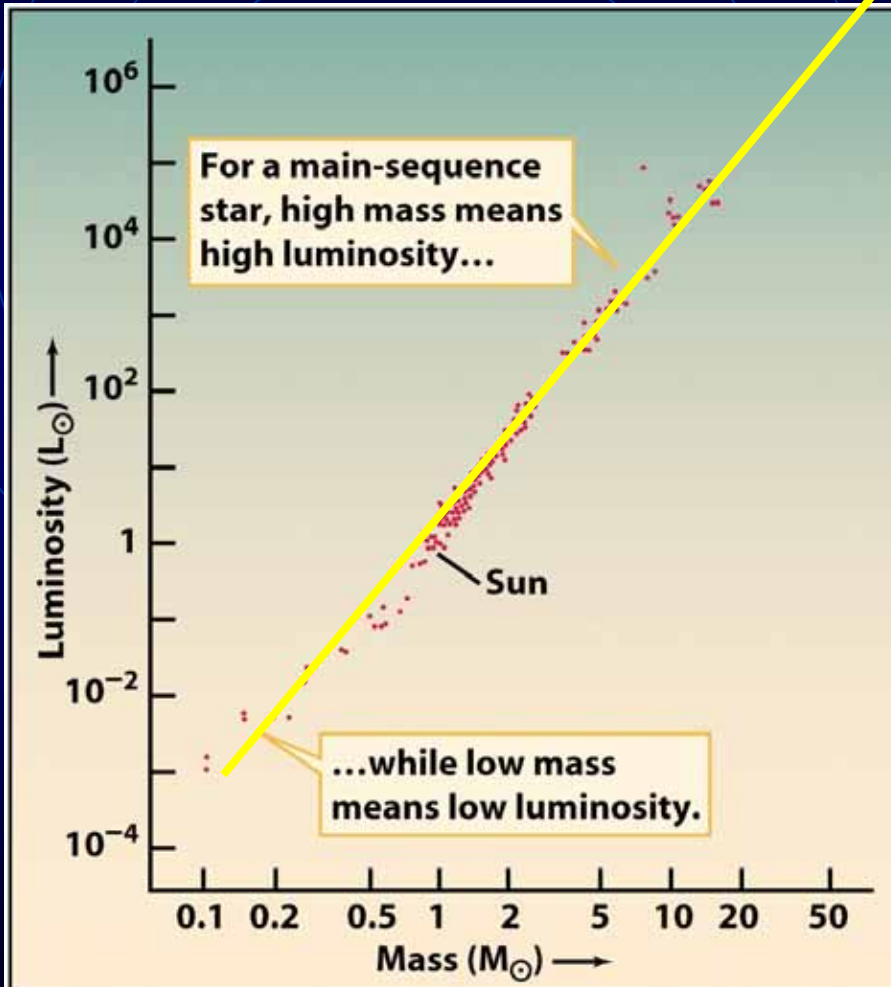


Figure 11-12a
Discovering the Universe, Seventh Edition
 © 2006 W. H. Freeman and Company

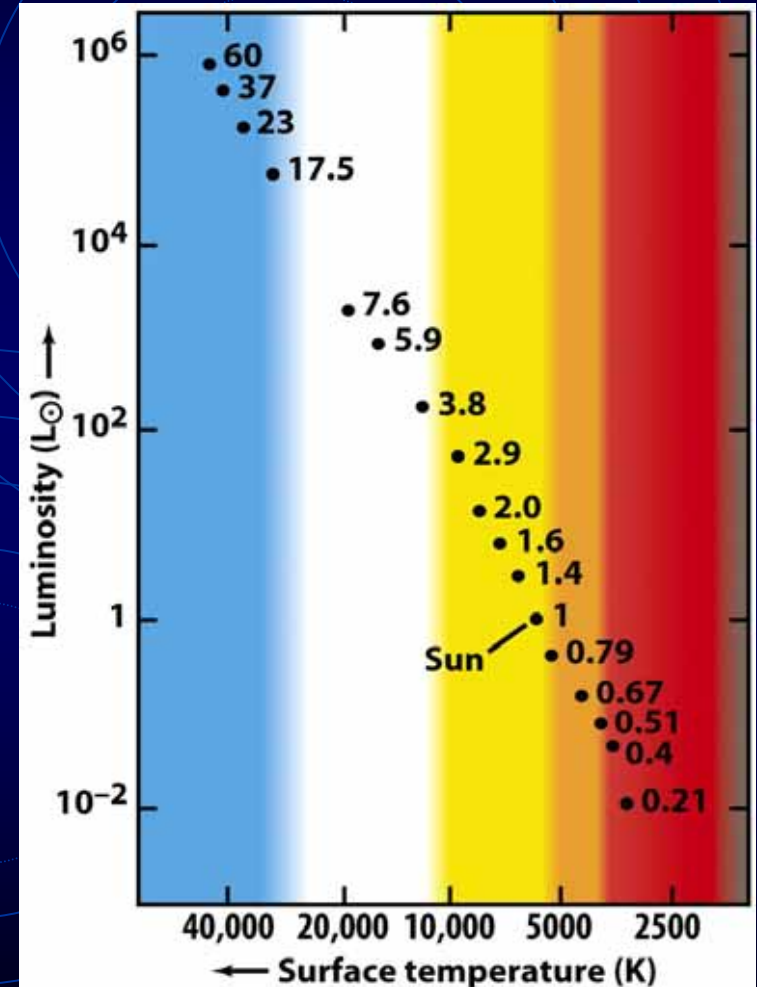


Figure 11-12b
Discovering the Universe, Seventh Edition
 © 2006 W. H. Freeman and Company

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	7000	5	3,000	F
1.0 (Sun)	6000	1	10,000	G
0.75	5000	0.5	15,000	K
0.50	4000	0.03	200,000	M

Table 12-1
Discovering the Universe, Seventh Edition
 © 2006 W. H. Freeman and Company

Q：藍白恆星一定是年輕恆星
（爲什麼？）

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

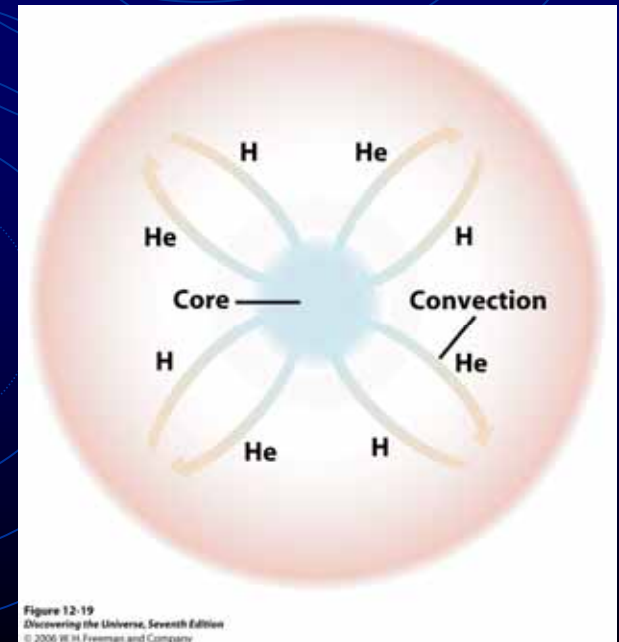
→ 恆星的質量範圍約在 $0.08 \sim 150 M_{\odot}$ 之間

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
- 幾乎整顆星都處於對流 (convection) 狀態

→ 幾乎整顆星的氫都融合成氦

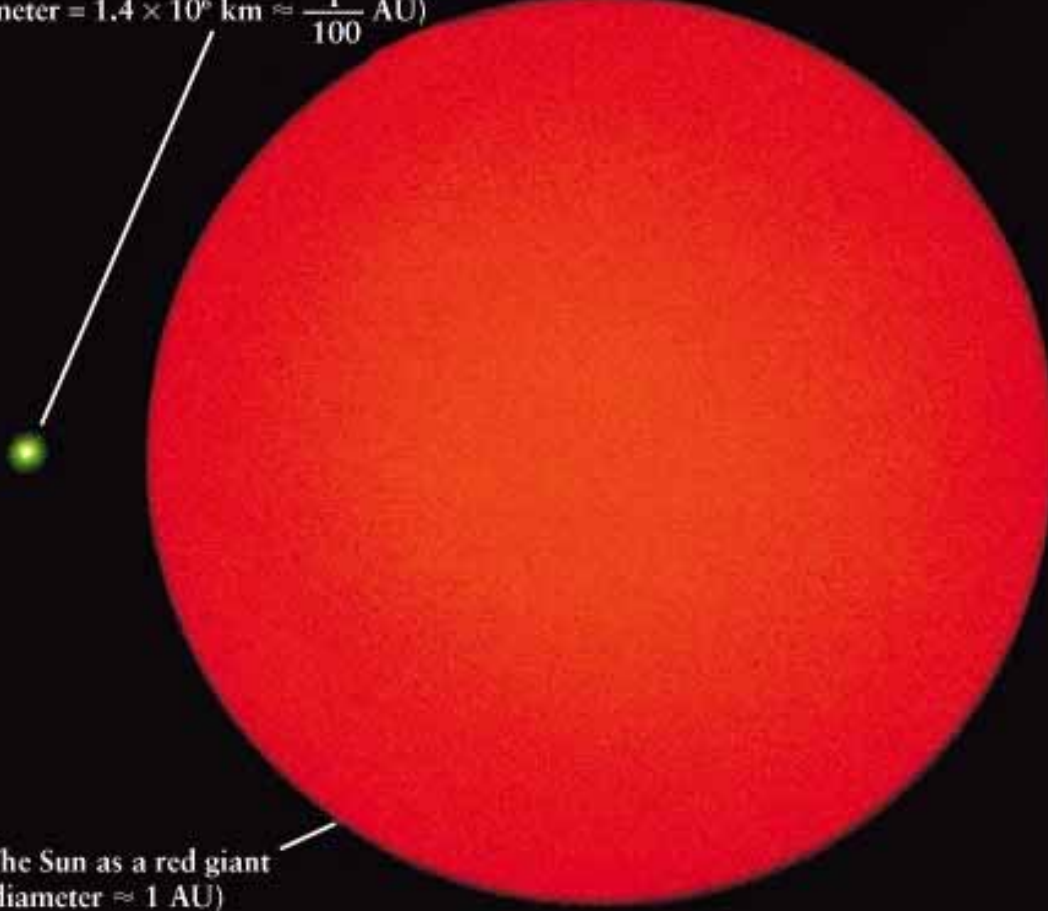
紅矮星核心融合的速率非常慢，主序壽命超過千億年，比宇宙年齡還長！
最終冷卻成爲**黑矮星**



太陽（小質量恆星）

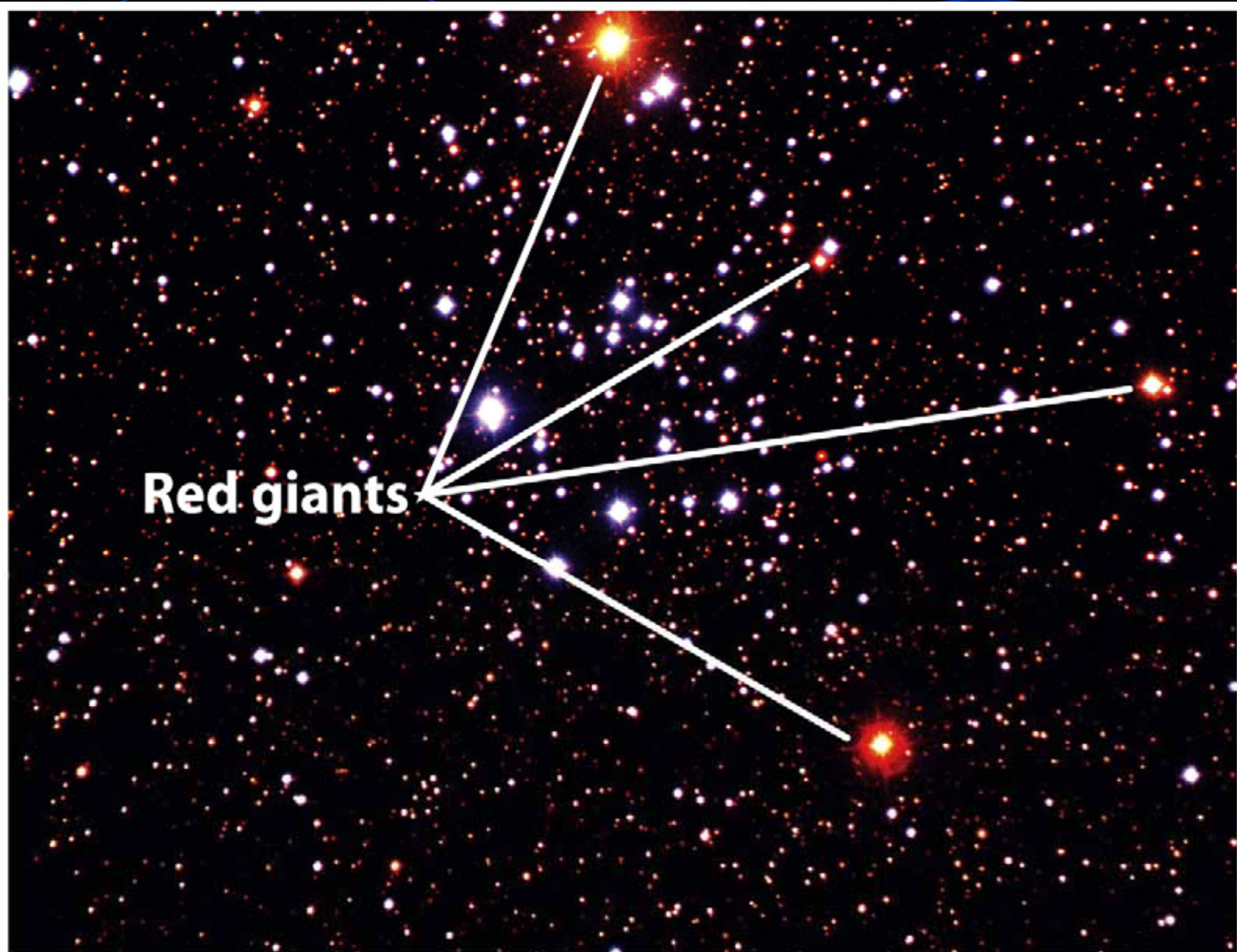
- 核心無法承受萬有引力 → 收縮
- 收縮的核心溫度上升 → 10^8 K → 點燃氦核反應
 $4\text{He} + 4\text{He} + 4\text{He} \rightarrow 12\text{C} + \gamma$ (triple alpha process)
核心再度達到平衡狀態
→ 外層向外膨脹，溫度下降
- 有些星球 $12\text{C} + 4\text{He} \rightarrow 16\text{O} + \gamma$
- 我們看到外層變大、變冷（變紅）
→ 紅巨星 (red giant)
- 這時期星球結構不穩，收縮、膨脹
→ 脈動變星，例如造父變星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

The Sun as a main-sequence star
(diameter = 1.4×10^6 km $\approx \frac{1}{100}$ AU)



The Sun as a red giant
(diameter ≈ 1 AU)

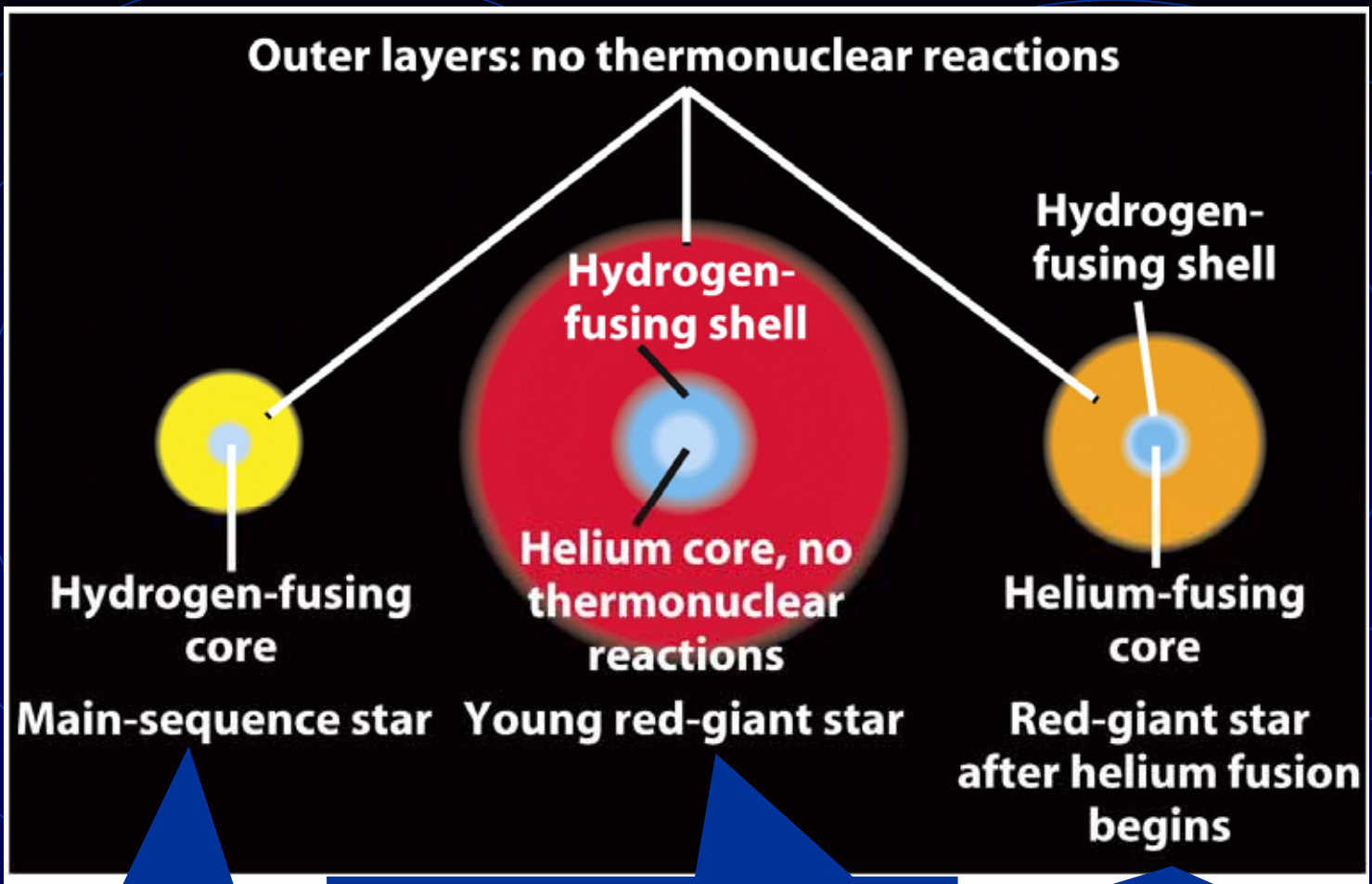
50億年後太陽
核心的氫核子
反應停止，核
心收縮，外層
則膨脹成為
「紅巨星」，
直徑增大100
倍，光度增強
2000倍



Red giants

Red giant stars in the star cluster M50

Figure 12-22b
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company



主序星在核心
融合氫元素

紅巨星剛開始核心
為沒有核反應的
氦

之後，紅巨星核
心達到 10^8 度，進
行氦融合，殼層

氦融合的時期大約是氫融合的10%
→ 太陽氦融合進行僅10億年

則進行氫融合

恆星的質量流失 (mass loss)



Figure 12-21
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

- 太陽風流失的質量 $\sim 10^{-14} M_{\odot}$
- 紅巨星流失程度大得多 $\sim 10^{-7} M_{\odot}$

(爲什麼?)

- 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 $3.5 \times 10^8 \text{ K}$ ，再度使氣體成爲一般氣體，也就是高溫 \rightarrow 高壓
 - \rightarrow 核心膨脹 \rightarrow 冷卻
 - \rightarrow 融合減慢
 - \rightarrow 光度下降
 - \rightarrow 外圍收縮
 - \rightarrow 再度達到靜力平衡
- 天體變小、變暗、變熱

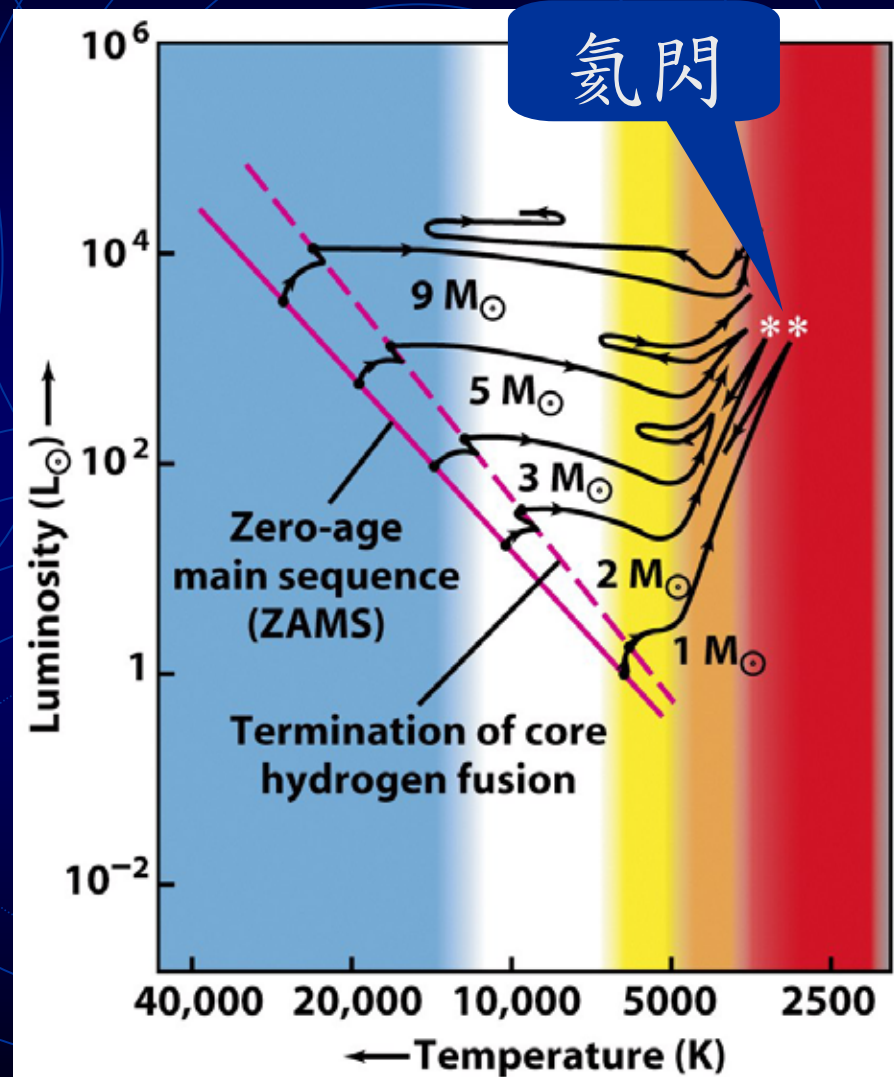


Figure 12-23
 Discovering the Universe, Seventh Edition
 © 2006 W.H. Freeman and Company

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

核心收縮，外層變
大，表面溫度降低
→ 位置移向 HR
圖右上方

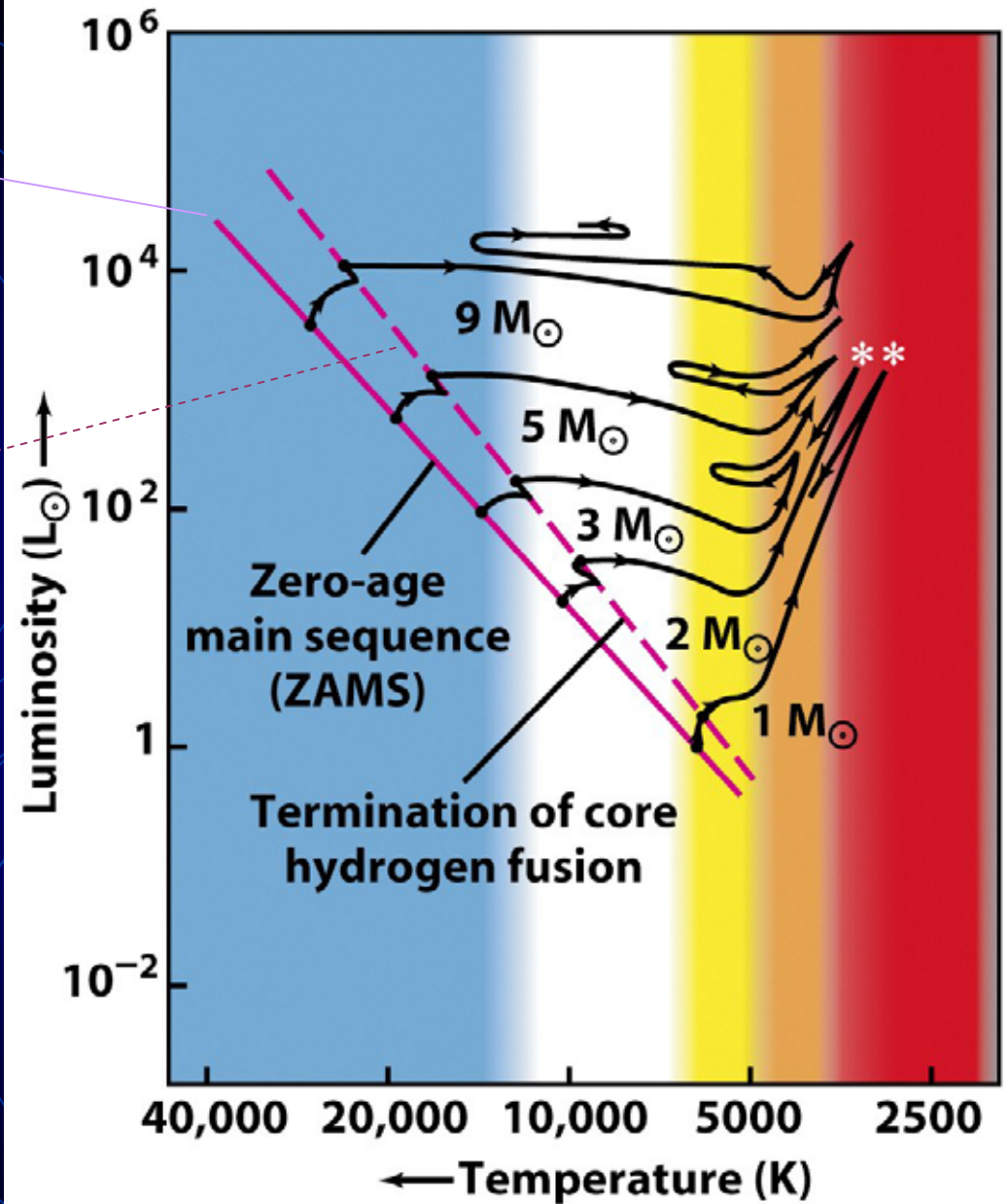


Figure 12-23
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

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



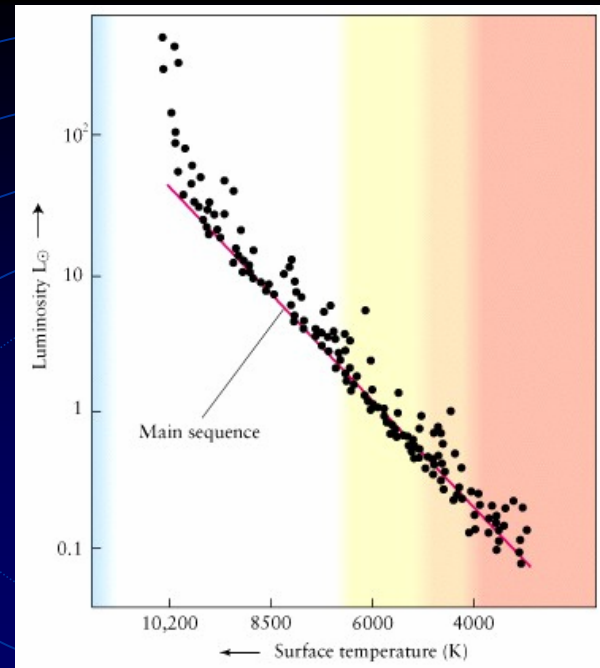
恆星演化晚期噴發出外層大氣，形成各種形狀的「行星狀星雲」

外觀成雲氣狀而稱之，實際上與行星無關



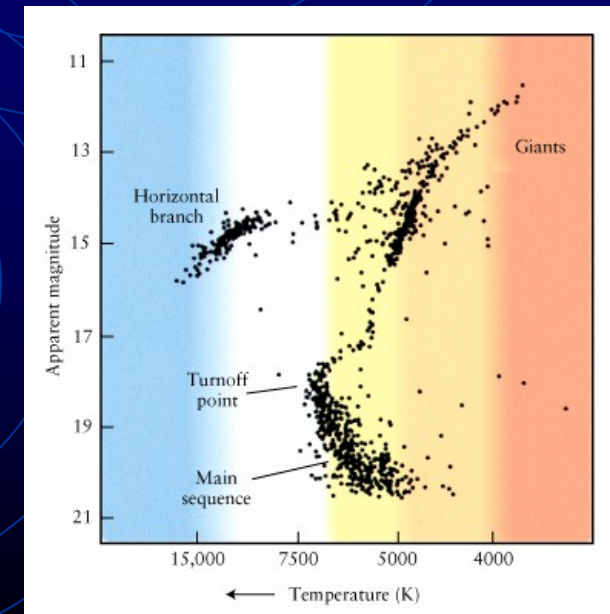
- 疏散星團
(open cluster)

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

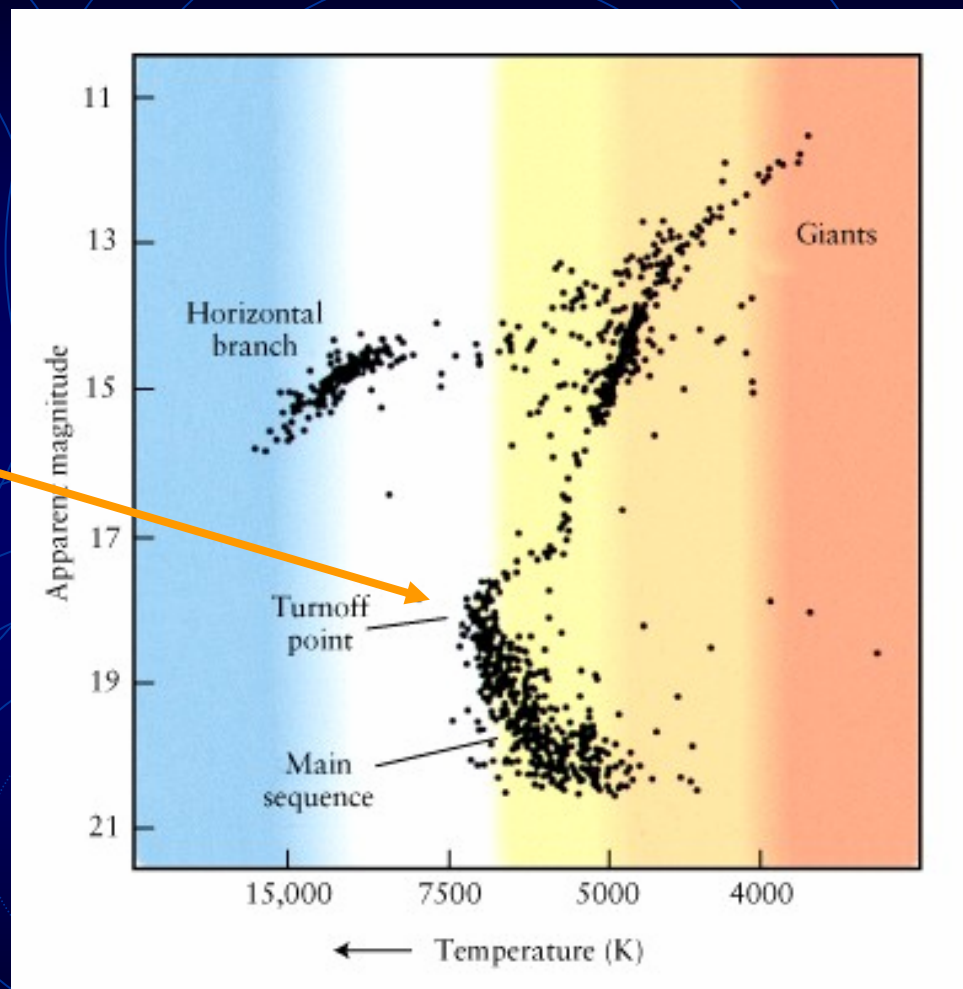


星團中的恆星同時、
從同一團雲氣形成

→ 年齡、距離、
成分都相同

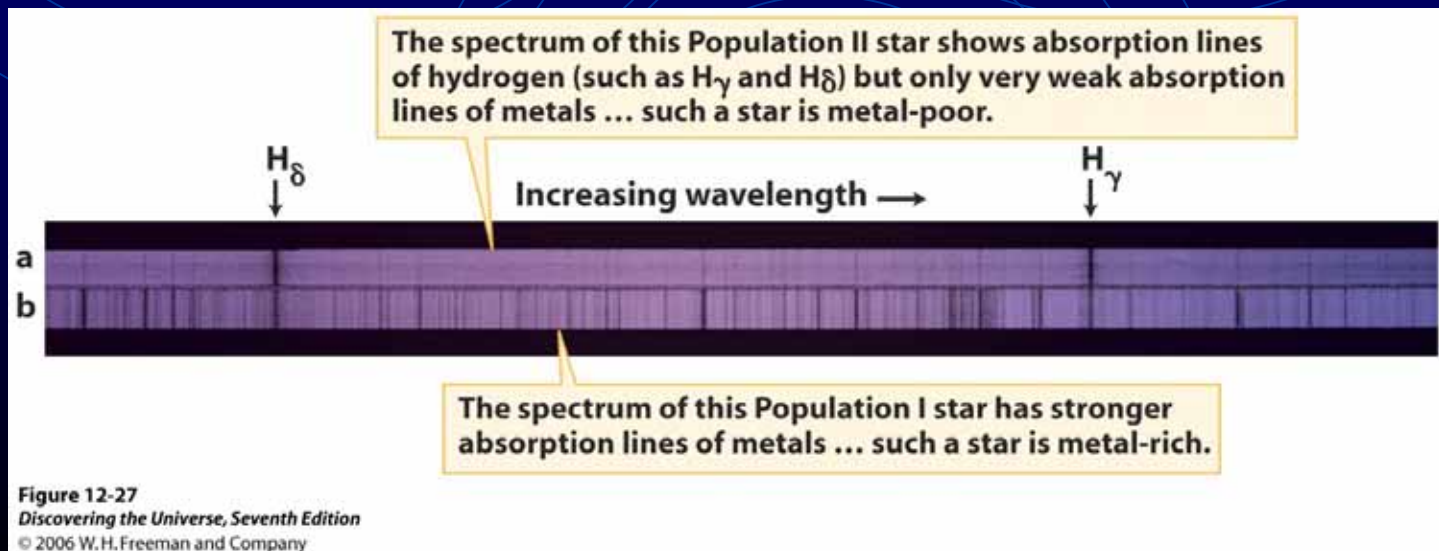
比**轉折點 (turnoff point)** 質量更大的主
序星已經衰亡，成爲
紅巨星

→ 轉折點的星球主序
壽命 = 該星團的年齡



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)，這些恆星很早已前就已經形成。 **Population II stars** (前輩恆星)



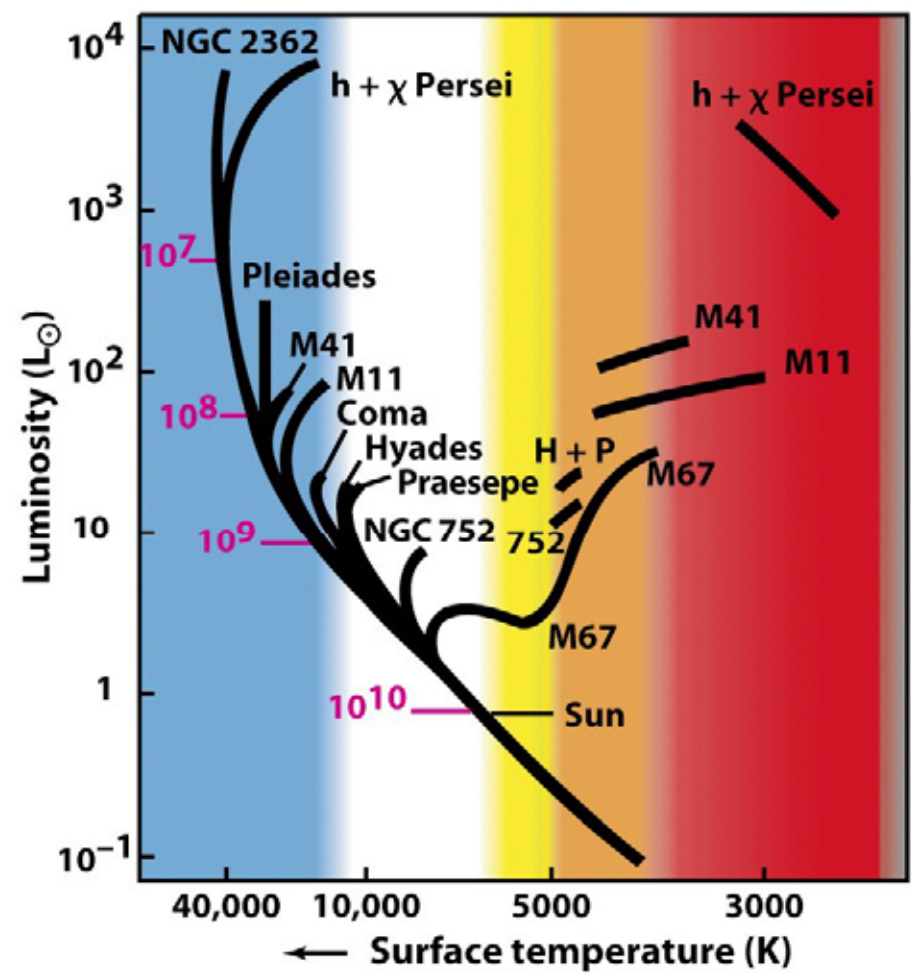
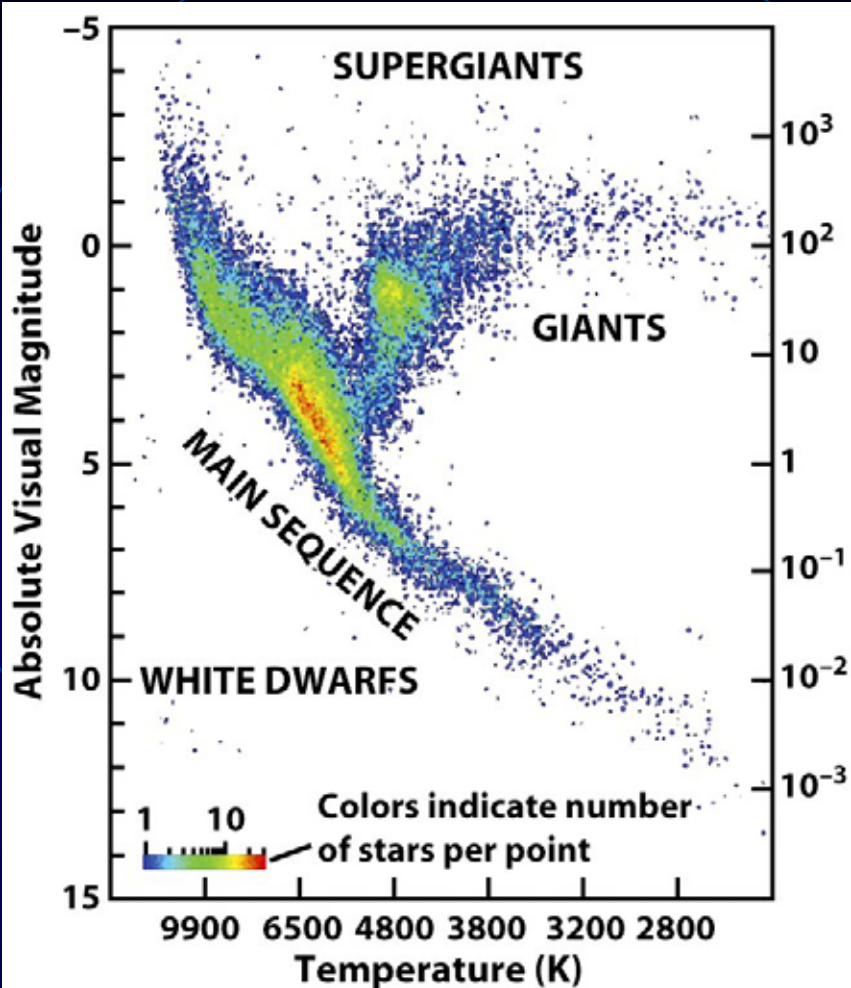


Figure 12-26
Discovering the Universe, Seventh Edition
 © 2006 W. H. Freeman and Company

Hipparcos 衛星資料

不同星團赫羅圖
 之示意圖

Horizontal Branch Stars

是氦閃之後的星球，core helium fusion and shell hydrogen fusion

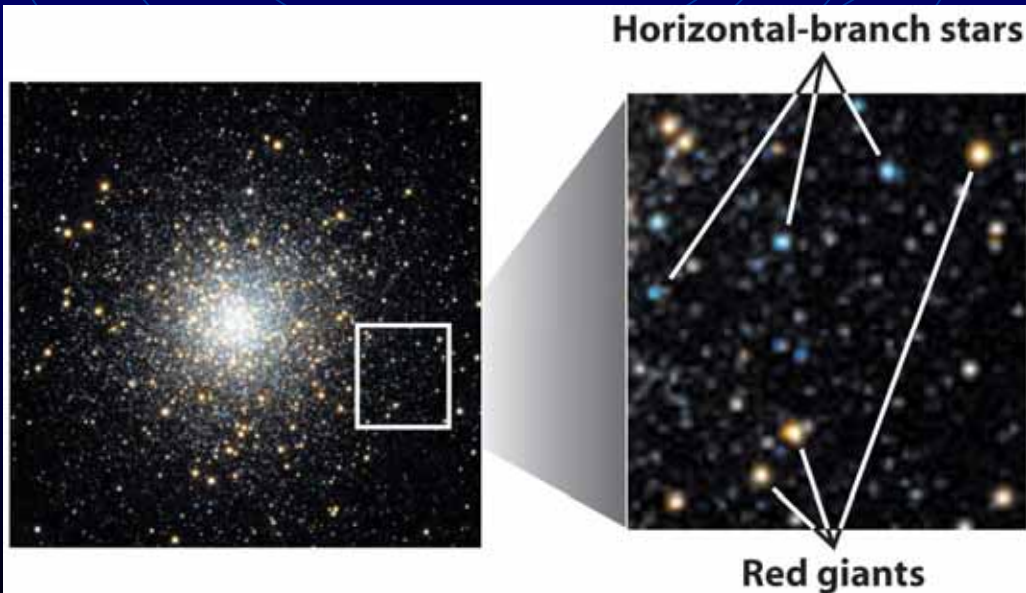
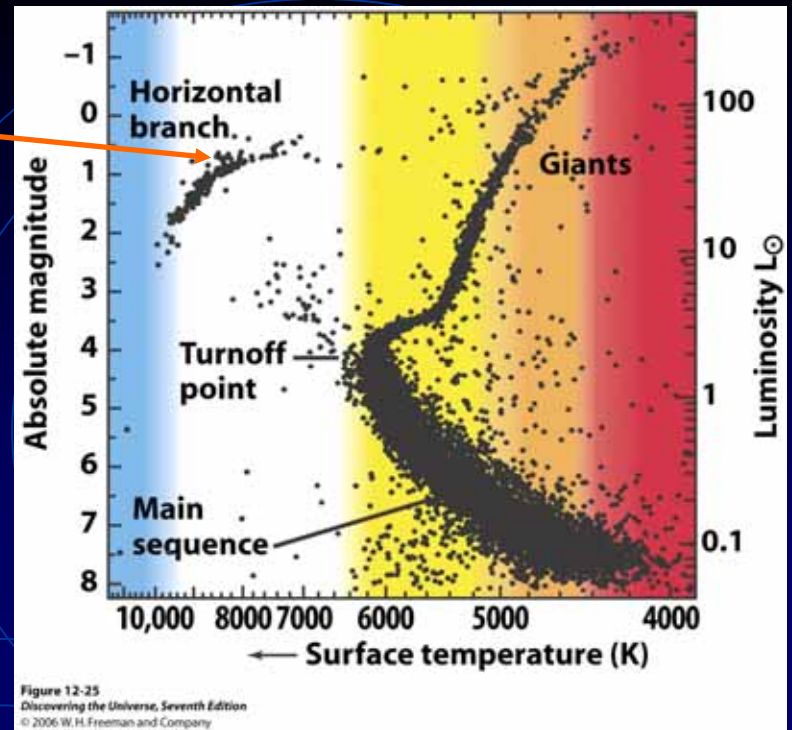
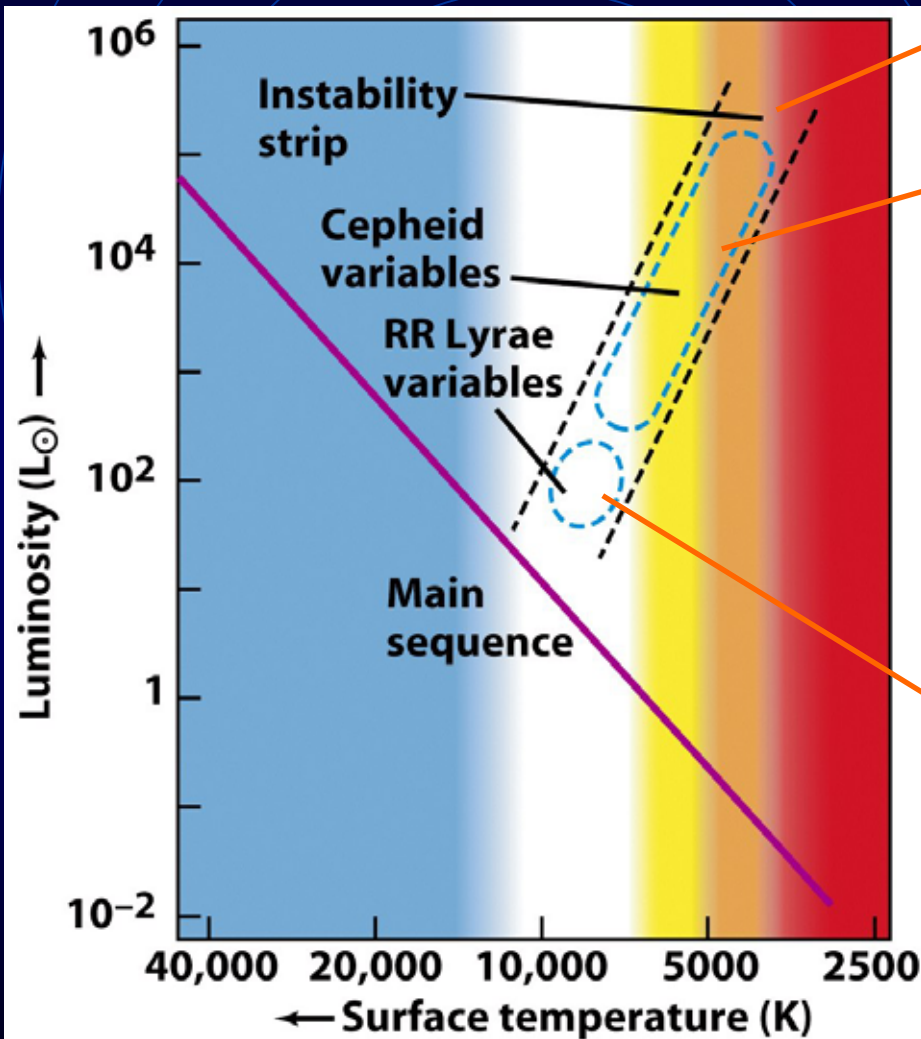


Figure 12-24
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

Globular cluster M10,
d=16,000 ly, size~70 ly
across, with ~ 1 million
stars

變星 (Variable Stars)



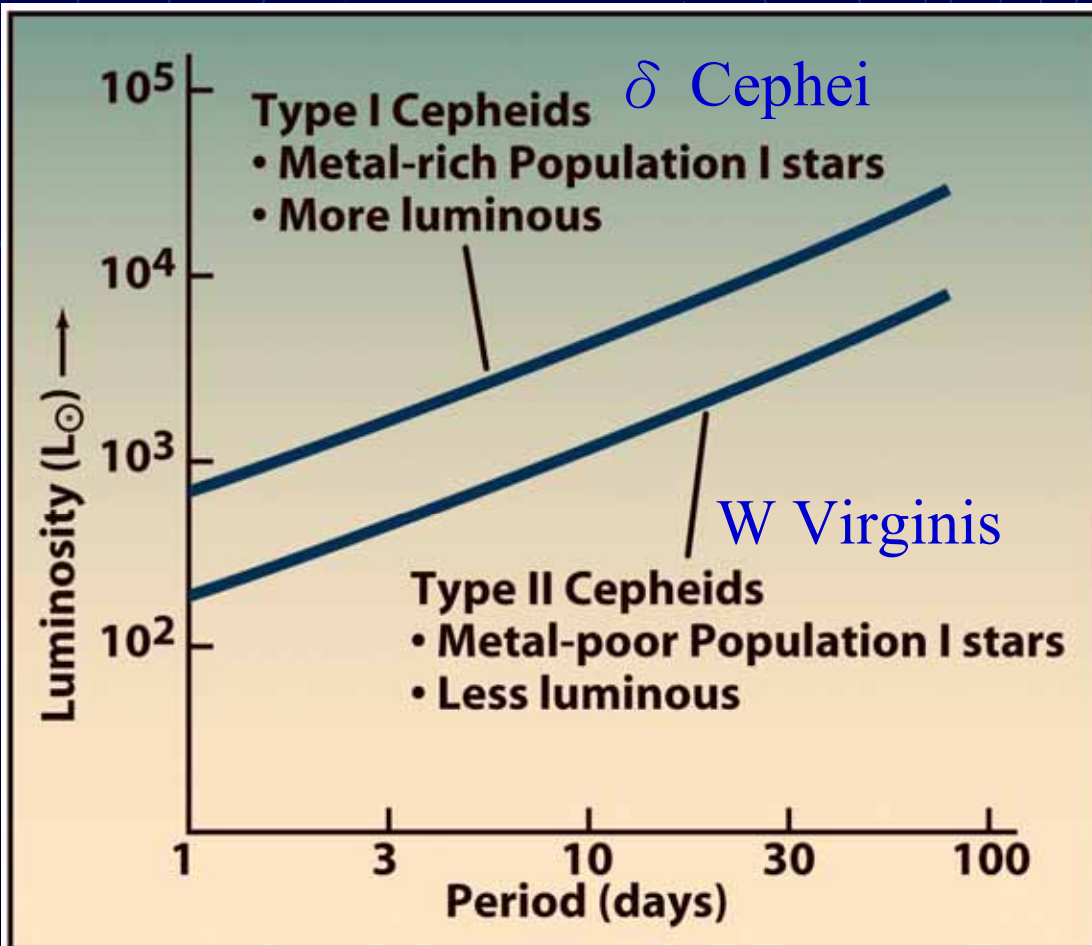
不穩定帶 → 星球脈動

位於不穩定帶中的大質量星球，稱為 Cepheid variables (造父變星) 或簡稱 Cepheids。P > 1 d

位於不穩定帶中的低質量星球稱為 RR Lyrae variables (天琴座RR變星)。它們的週期 < 1 d

體積越大（光度大）的 Cepheids，脈動得越慢

Period-luminosity relation（週光關係）



Cepheids 光度大，
即使遙遠星系當中
亦可觀測

週期 \rightarrow 光度 \rightarrow 變
星與其宿主星系
(hosting galaxy) 的
距離

造父變星是測量宇
宙距離的重要工具

Q：利用 Cepheid variables 測量距離
——有多想當然爾？

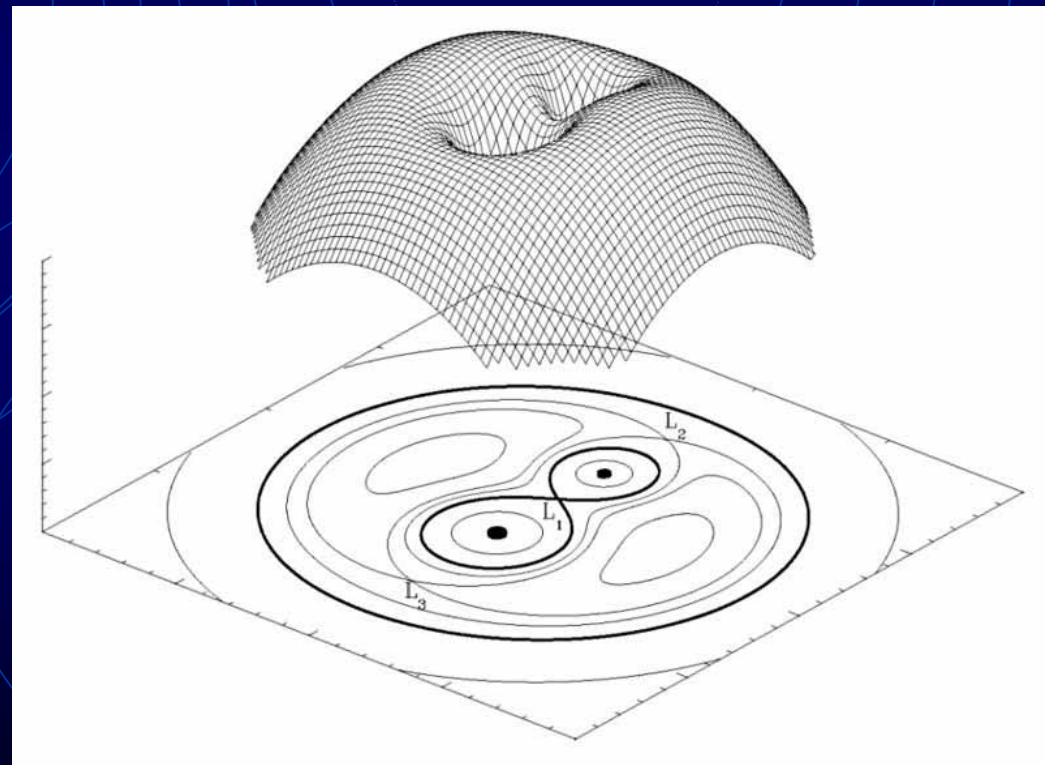
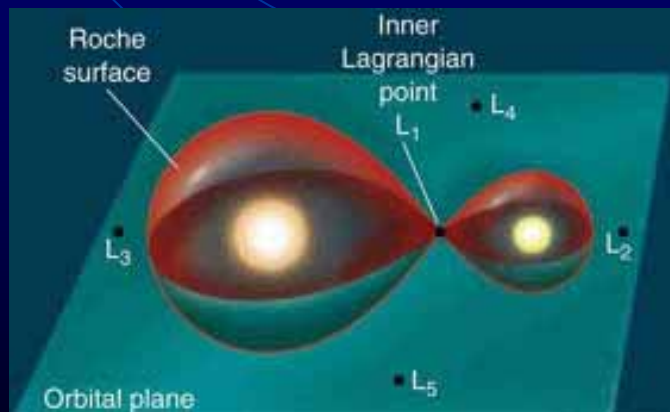
A：

- 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？
 - ...

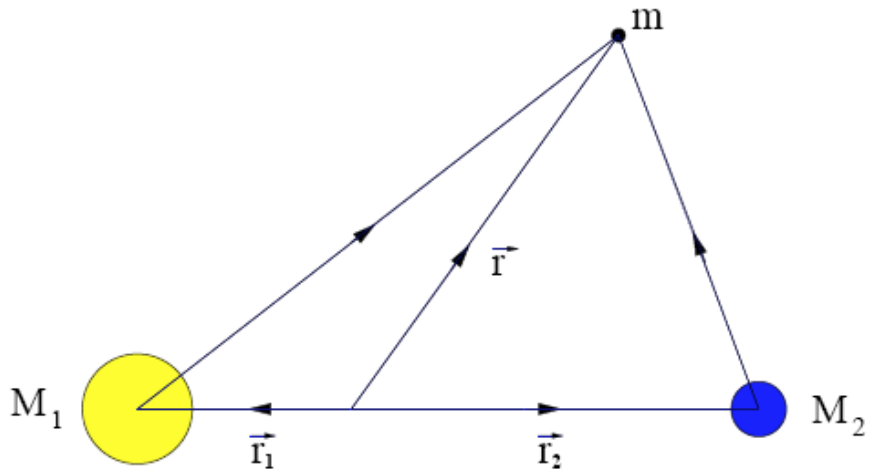
星體萬有引力的「勢力範圍」： Roche (洛西) 位能平面

<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:RochePotential.jpg>

Lagrangian points
cf Trojan asteroids



http://www.daviddarling.info/images/Roche_lobe.jpg



Restricted 3-body problem.
i.e., $m \ll M_1, M_2$

$$\vec{F} = -\frac{GM_1m}{|\vec{r} - \vec{r}_1|^3}(\vec{r} - \vec{r}_1) - \frac{GM_2m}{|\vec{r} - \vec{r}_2|^3}(\vec{r} - \vec{r}_2)$$

In a co-rotating frame,

$$\Omega^2 R^3 = G(M_1 + M_2)$$

$$\alpha = \frac{M_2}{M_1 + M_2}, \quad \beta = \frac{M_1}{M_1 + M_2}$$

$$L1 : \quad \left(R \left[1 - \left(\frac{\alpha}{3} \right)^{1/3} \right], 0 \right)$$

$$L2 : \quad \left(R \left[1 + \left(\frac{\alpha}{3} \right)^{1/3} \right], 0 \right)$$

$$L3 : \quad \left(-R \left[1 + \frac{5}{12}\alpha \right], 0 \right)$$

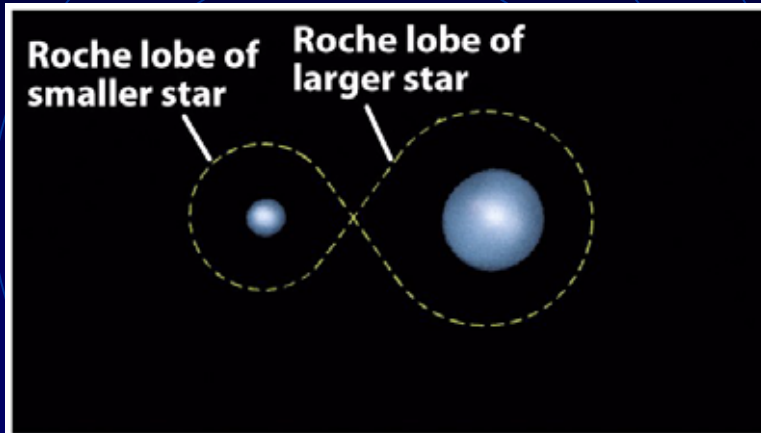
$$L4 : \quad \left(\frac{R}{2} \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} \right), \frac{\sqrt{3}}{2}R \right)$$

$$L5 : \quad \left(\frac{R}{2} \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} \right), -\frac{\sqrt{3}}{2}R \right)$$

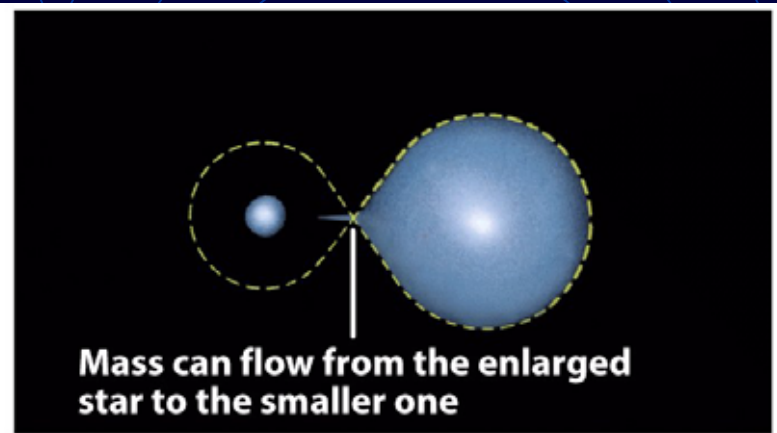
For a mathematical derivation, see

<http://map.gsfc.nasa.gov/ContentMedia/lagrange.pdf>

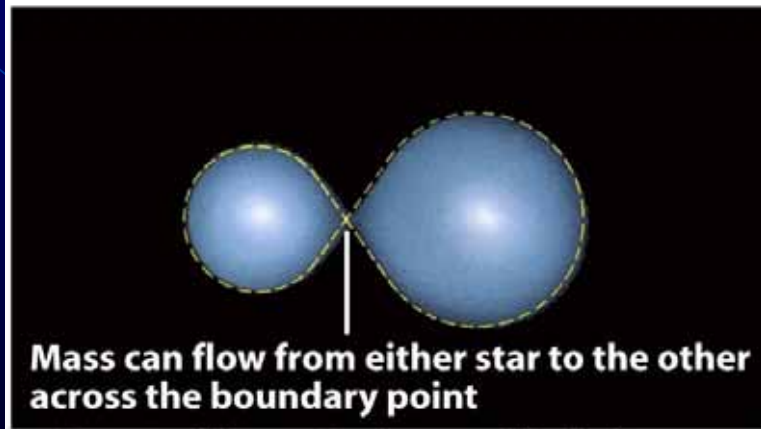
緊密雙星 (close binary) 的物質交換 (mass transfer) 會形成特殊的雙星系統



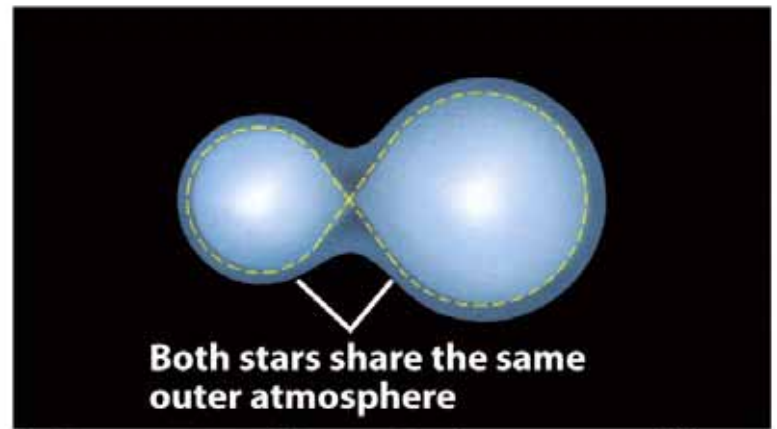
a Detached binary: Neither star fills its Roche lobe.



b Semi-detached binary: One star fills its Roche lobe.

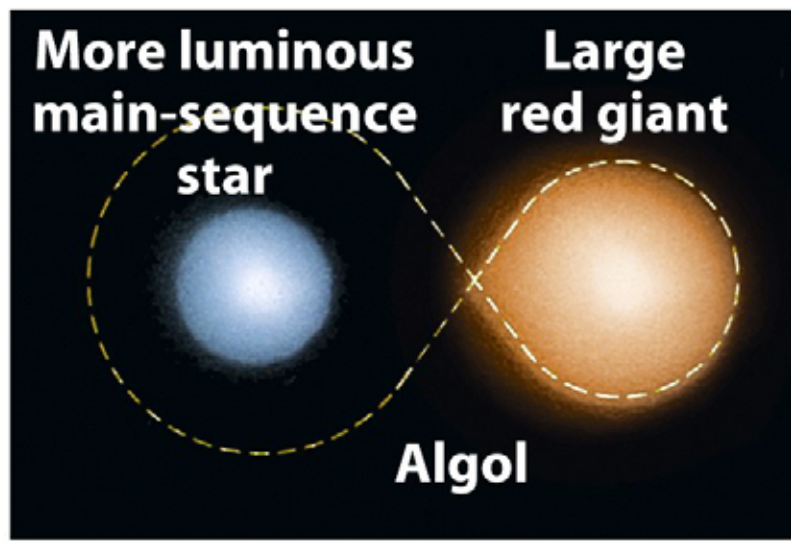


c Contact binary: Both stars fill their Roche lobes.

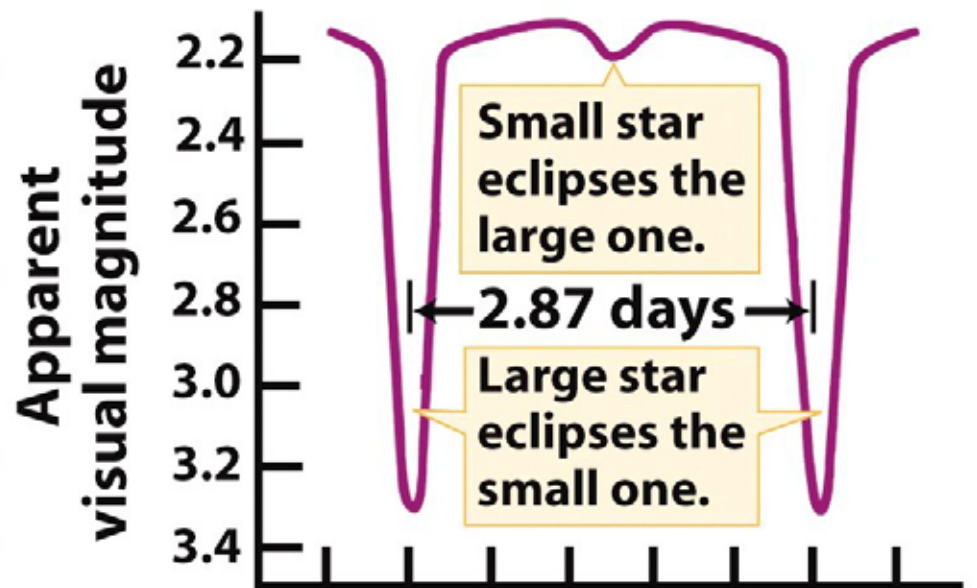


d Overcontact binary: Both stars overfill their Roche lobes.

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。

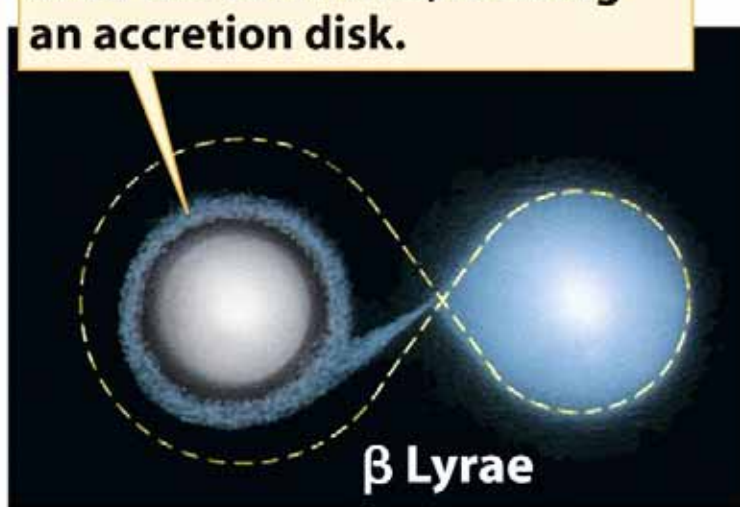


A semidetached binary



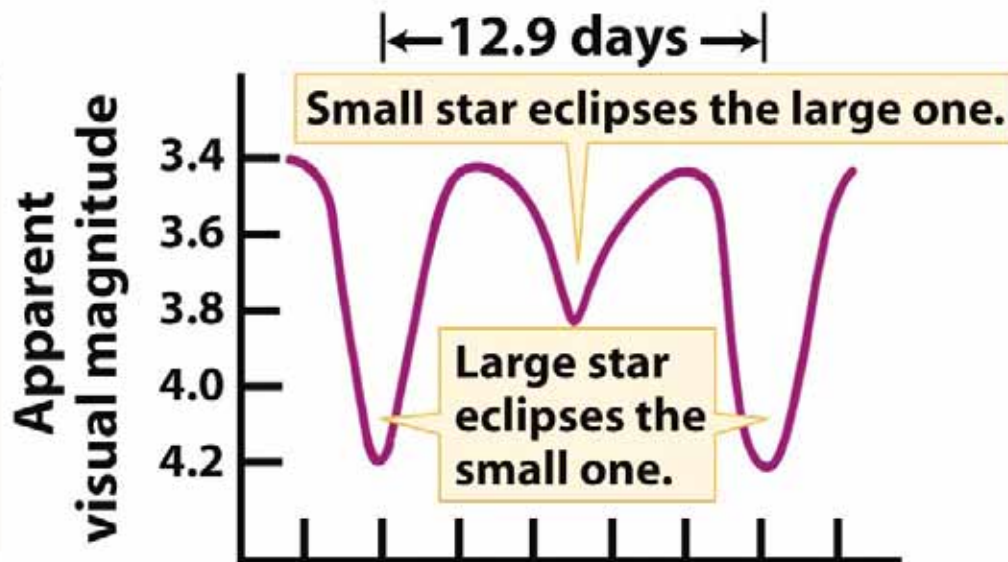
Beta Lyrae 為半分離雙星，物質轉移在分離的成員星周圍形成「吸積盤」(accretion disk)，擋住了該分離星。

Mass flows from the large star onto the small one, forming an accretion disk.

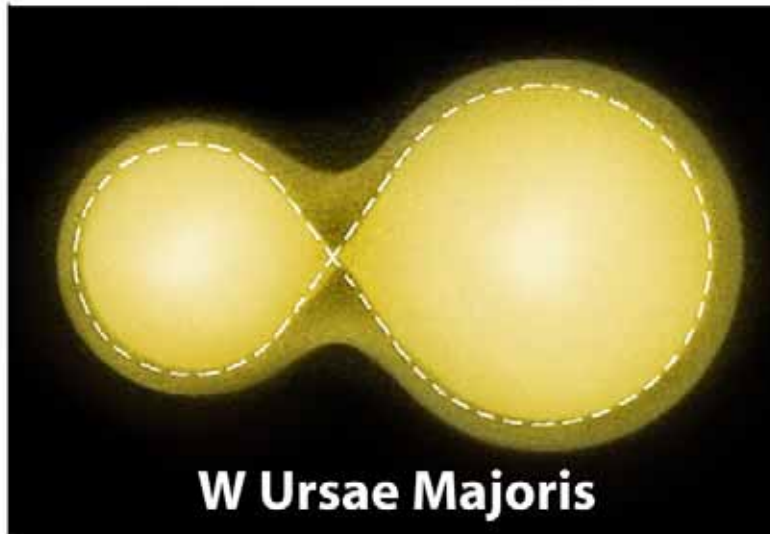


A semidetached binary with mass transfer

Figure 12-32b
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W.H. Freeman and Company



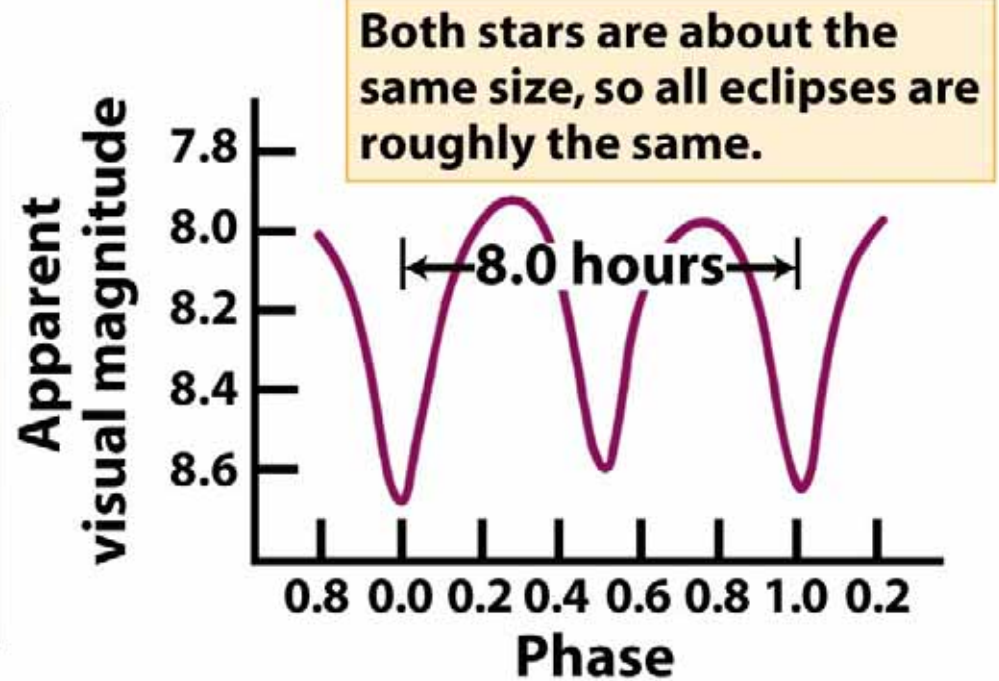
W Ursae Majoris 為過度接觸雙星，距離非常接近，以致兩顆成員星共有大氣層。



W Ursae Majoris

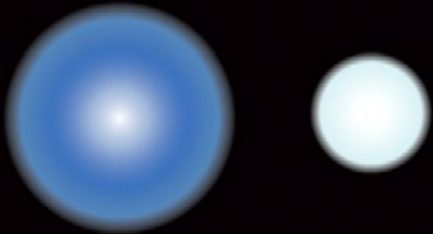
An overcontact binary

Figure 12-32c
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company



雙星間巧妙的物質互換 (mass exchange)

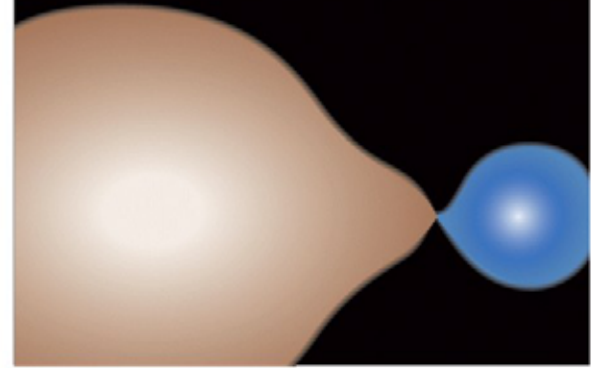
1 Held in a gravitational embrace, the pair of stars in Phi Persei have lived normal lives for the last 10 million years.



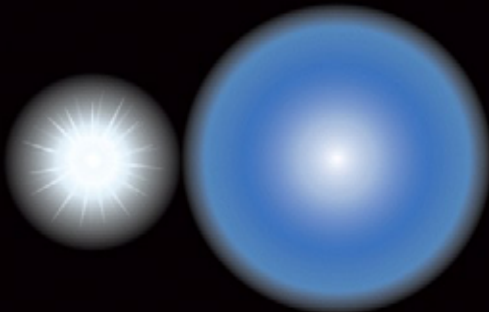
2 The duo's quiet lives end when the more massive star enters its twilight years. The aging star swells as it runs out of the fuel—hydrogen—which powers its thermonuclear furnace.



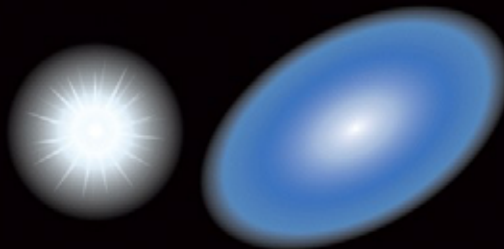
3 As the aging star expands, it begins dumping its mass onto its companion.



4 The once-massive star sheds practically all of its mass, leaving its hot, bright core exposed.



5 The smaller companion, on the other hand, has captured most of its partner's excess mass and changes its identity from a mild-mannered, moderately massive star to a massive, hot, rapidly spinning star.



6 In fact, the star is spinning so rapidly that its shape is distorted into a flattened spheroid. The rapid rotation also causes the star to dump hydrogen gas, which has settled into a broad ring—like the rings of Saturn—around the star.

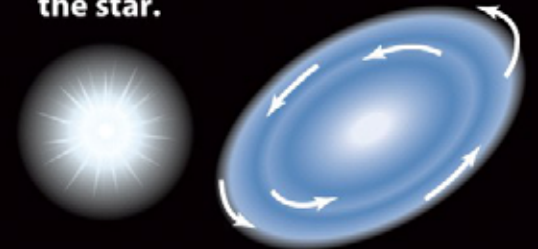


Figure 12-33
Discovering the Universe, Seventh Edition