

The Deaths of Stars

恆星的衰亡

最低質量 ($< 0.4 M_{\odot}$) 恆星不會演化成巨星

低質量 (0.4 to 8 M_{\odot}) 恆星晚年

Hydrogen shell fusion

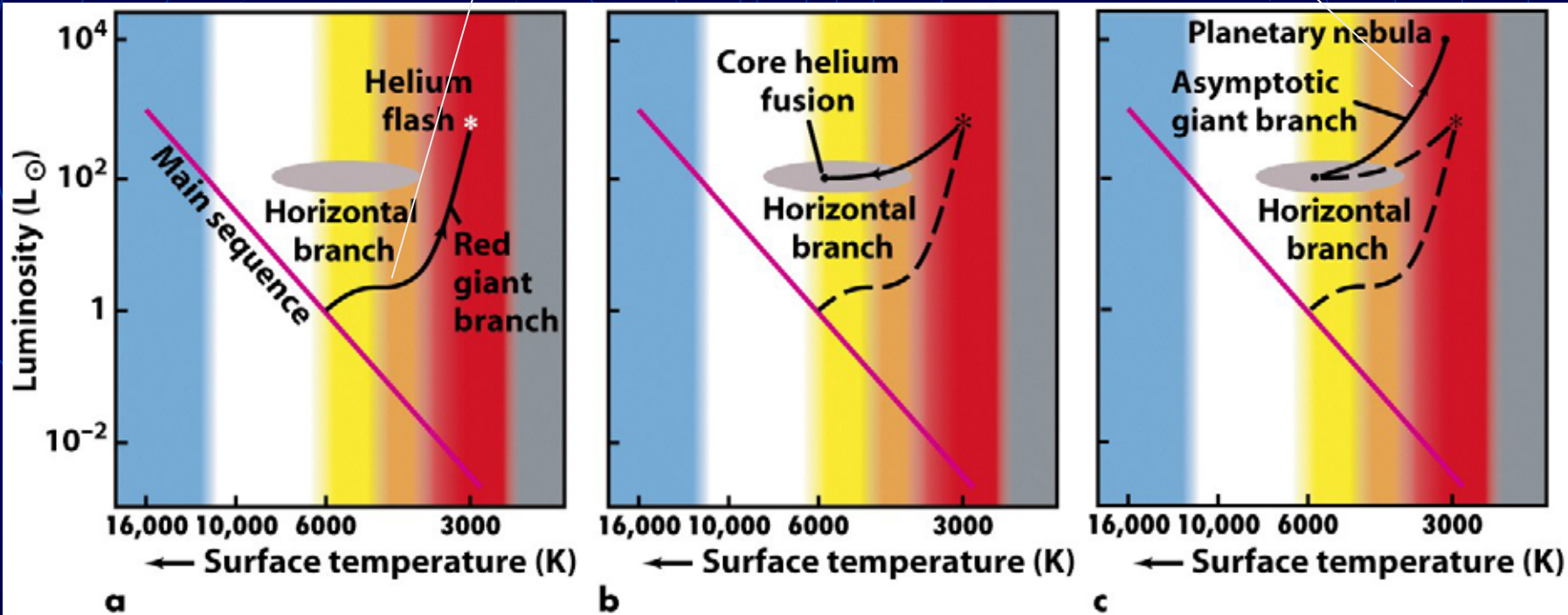


Figure 13-1
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

低質量 (0.4 to 8 M_{\odot}) 恆星晚年 II

- 低質量水平分支的巨星，其核心溫度可約2億 K，不足以點燃需要 6 億 K 的碳與氧的融合反應 → carbon-oxygen core
- 氦氣殼層融合 → 星體再次膨脹。由於有兩層融合反應，這次體積變得更大，成為 **asymptotic giant branch (AGB) star**
- 一顆 8 倍太陽質量的 AGB 星，其大小有如火星軌道，光度達 $10^4 L_{\odot}$
- AGB 之後，星球成為超巨星 (supergiant)

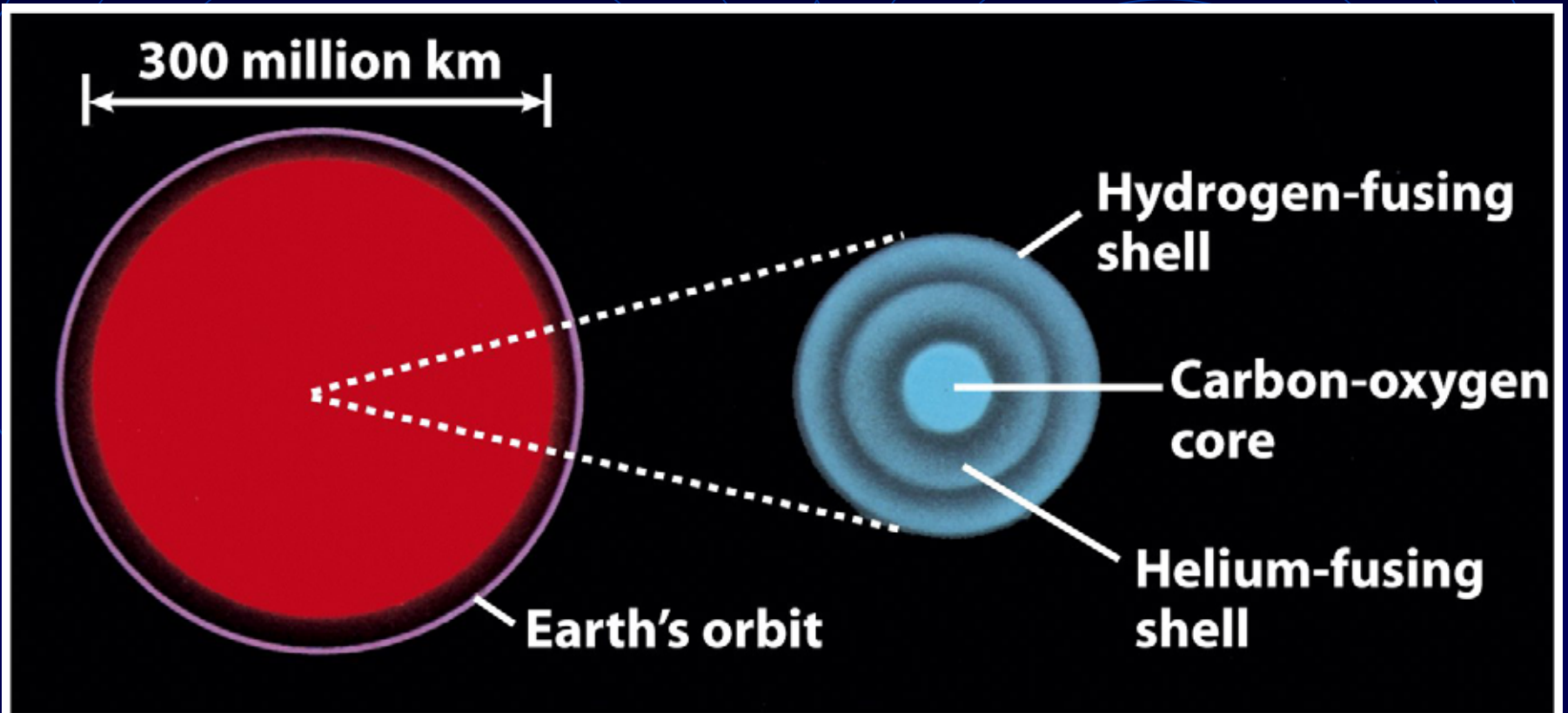


Figure 13-2
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

低質量 (0.4 to $8 M_{\odot}$) 恆星晚年 III

- Triple-alpha process 對溫度很敏感 (e.g., PP chain rate $\propto T^4$; triple- $\alpha \propto T^{40}$), 只要溫度升高一點, 融合速率便急遽加快 \rightarrow 一系列的 helium shell flash (cf 之前在核心的 helium flash) \rightarrow thermal pulses
- 最後超巨星外圍膨脹, 溫度下降, 電子與離子復合 (recombine), 放出光子, 加上殼層氦閃發出的光子, 光壓造成物質向外噴發, 冷卻而凝固成塵埃。中心熾熱星體發光紫外線游離周圍氣體, 使其發光, 成爲行星狀星雲 (planetary nebula) \rightarrow HR 圖上向左移動

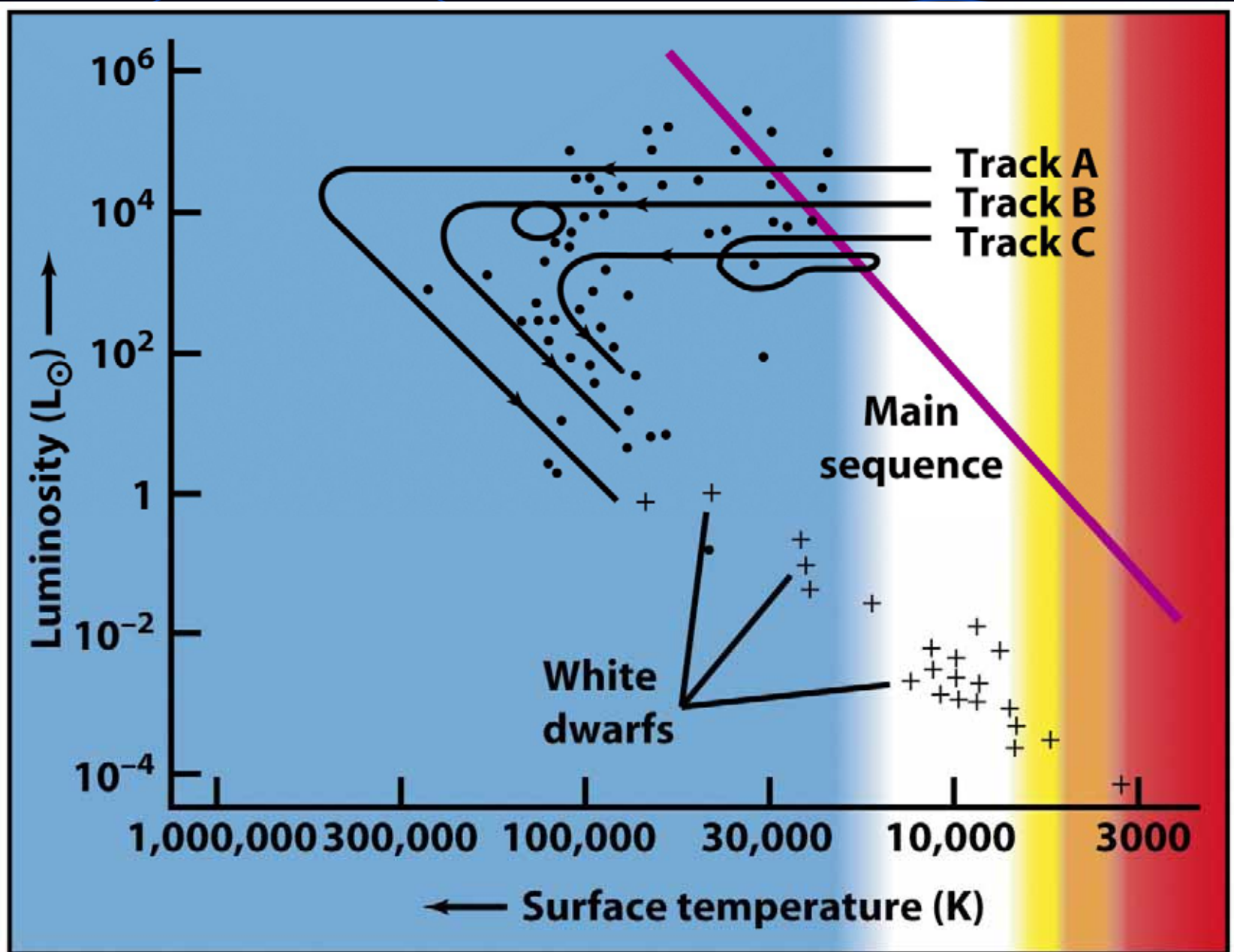
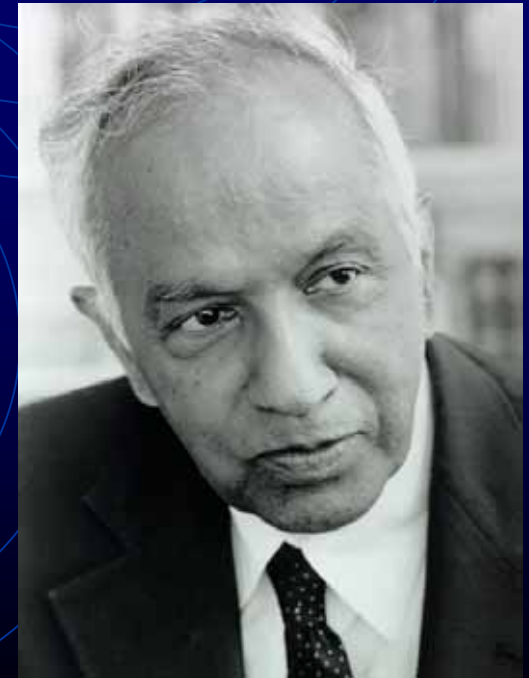


Figure 13-3
Discovering the Universe, Seventh Edition
 © 2006 W. H. Freeman and Company

- 低質量恆星的外圍噴發出行星狀星雲，核心則演化成白矮星。
- 白矮星以電子簡併壓力平衡萬有引力
- 質量（萬有引力）的上限稱爲 **Chandrasekhar limit**（錢氏極限） $\sim 1.4 M_{\odot}$
- 白矮星的密度達 10^9 kg/m^3
- 超過此極限，連電子簡併壓力也無法抵擋引力，核心會繼續塌縮
- Subrahmanyan Chandrasekhar, 1990 Nobel Prize winner



天狼星 (Sirius) 的伴星是顆白矮星。

Sirius A (11,000 K), Sirius B (30,000 K)



Figure 13-6a
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

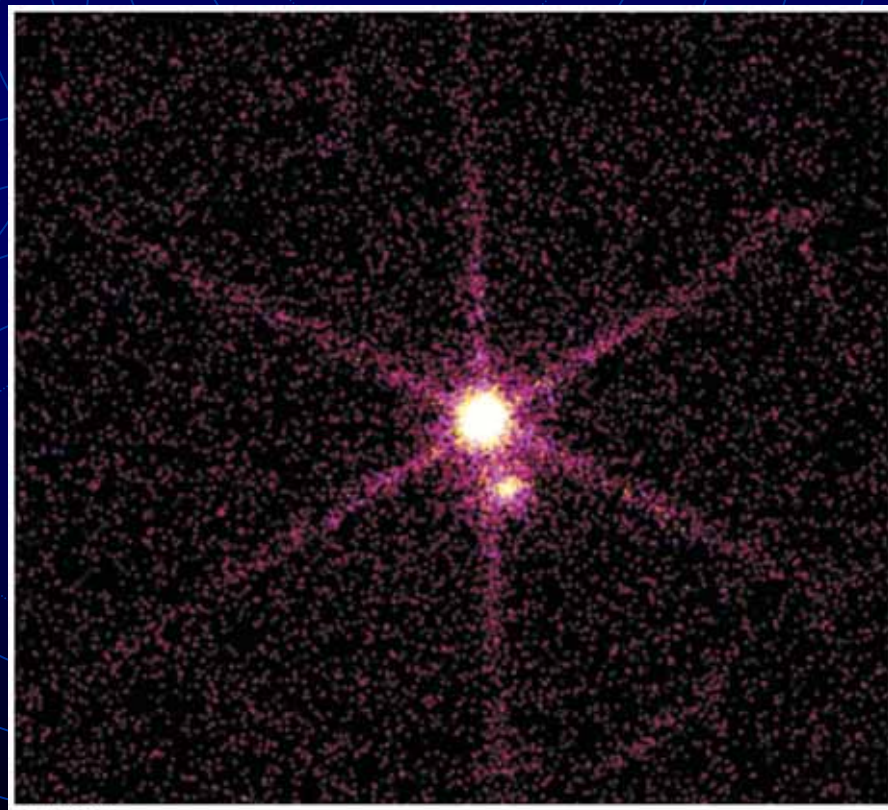


Figure 13-6b
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

Nova (新星) close binary containing a white dwarf. The ordinary companion star fills its Roche lobe so deposits fresh H onto the WD.

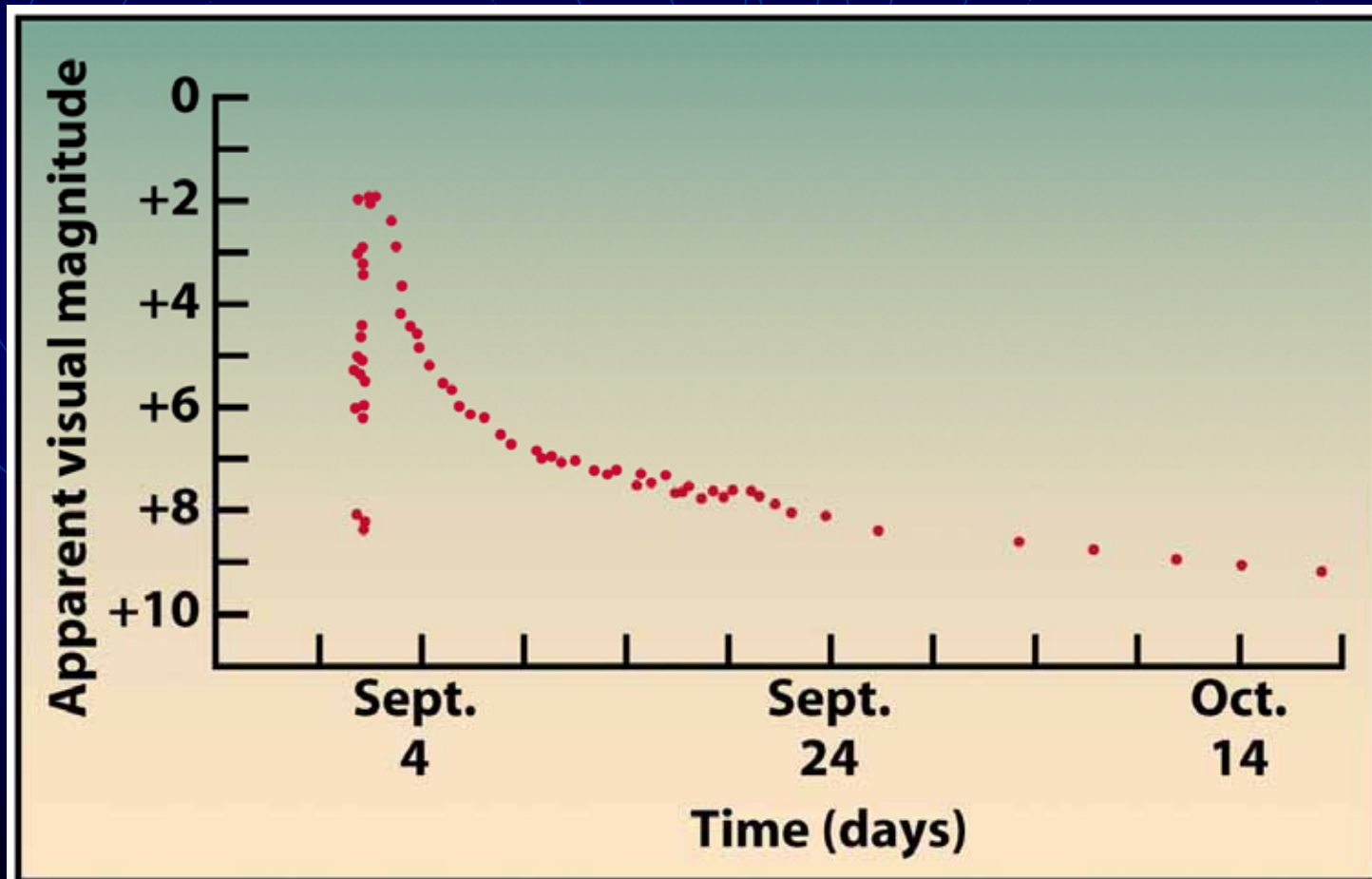


Figure 13-8
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

Nova Herculis 1934 during explosion (magnitude -3 mag) and 2 months later (magnitude $+12$)

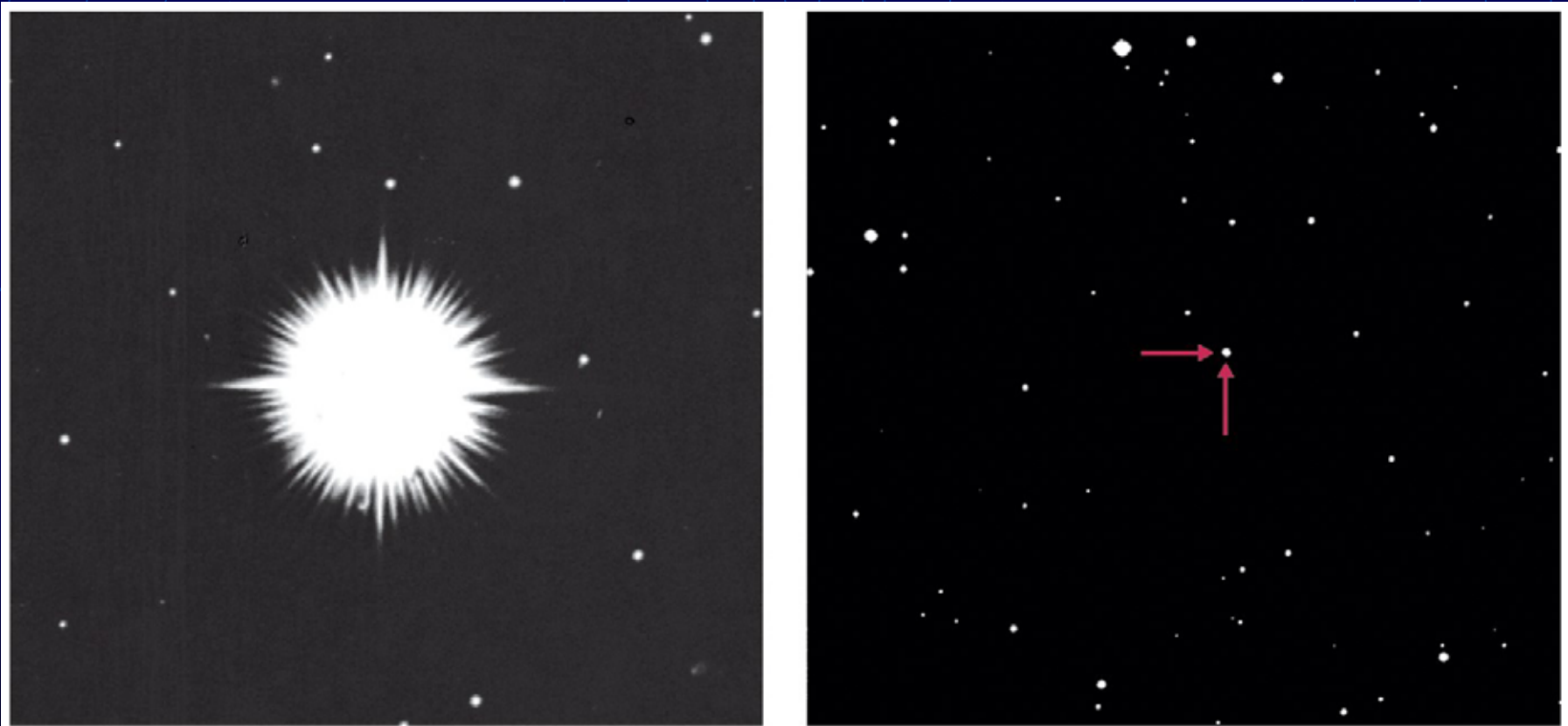


Figure 13-7
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

中質量 (8 to 25 M_{\odot}) 與 大質量 ($> 25 M_{\odot}$) 恆星晚年

- 核心消耗速度快，收縮快，點燃下一級核反應劇烈
- 核心萬有引力強，連擠壓原子的力量都撐不住
→ 原來貼靠在原子核外面的電子被擠進原子核，結合成中子（中子簡併狀態）
→ **中子星 (neutron star)**
- 劇烈收縮造成強力反彈，把外層爆發開
→ **超新星爆發 (supernova explosion)**
- 爆發期間，比整個銀河系還要明亮

超巨星有強烈恆星風

例如 Betelgeuse 每年損失 $1.7 \times 10^{-7} M_{\odot}$ ，物質以 10 km/s 速率噴出，環繞在星球周圍達 1/3 光年。

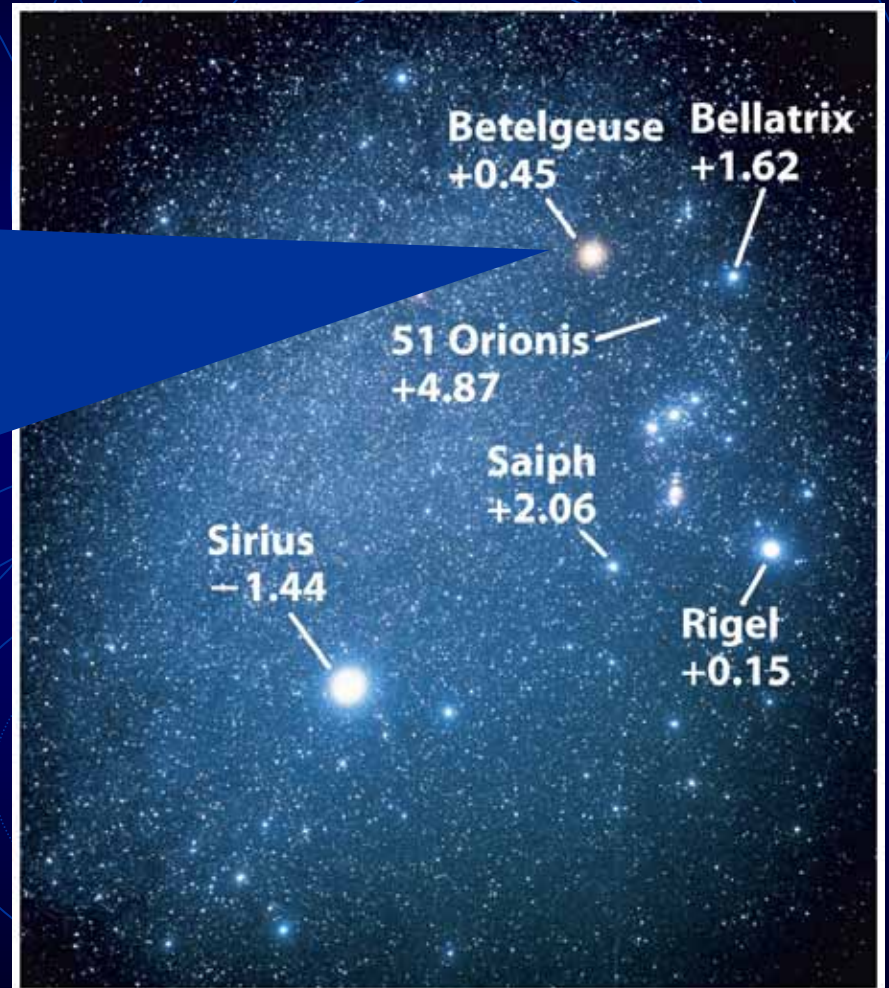


Figure 11-2a
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

中、大質量恆星演化晚期結構

- 外層成爲超巨星，直徑相當於木星軌道
- 核心大小約如地球，有層層核反應（cf 洋蔥）

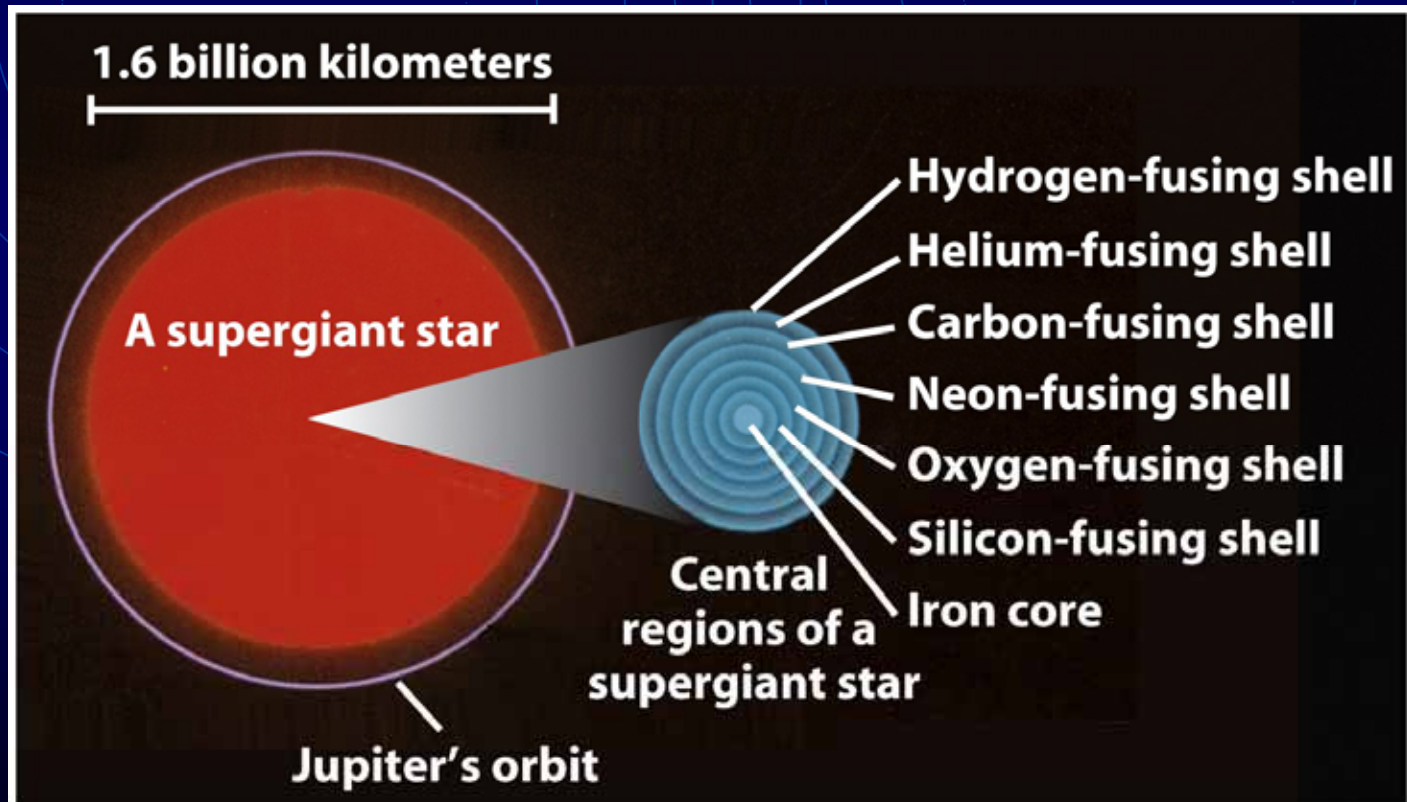


Figure 13-9
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W.H. Freeman and Company

下一級核融合反應越來越快 矽核融合 → 鐵元素
 鐵原子核當中的質子與中子已經縮得很緊，進一步核融合無法再釋放能量 → 鐵核塌縮
 (D ~ 3000 km, collapses in 0.1 s)

TABLE 13-1 Evolutionary Stages of a 25- M_{\odot} Star

Stage	Central temperature (K)	Central density (kg/m ³)	Duration of stage
Hydrogen fusion	4×10^7	5×10^3	7×10^6 yr
Helium fusion	2×10^8	7×10^5	5×10^5 yr
Carbon fusion	6×10^8	2×10^8	600 yr
Neon fusion	1.2×10^9	4×10^9	1 yr
Oxygen fusion	1.5×10^9	1×10^{10}	6 mo
Silicon fusion	2.7×10^9	3×10^{10}	1 d
Core collapse	5.4×10^9	3×10^{12}	0.2 s
Core bounce	2.3×10^{10}	4×10^{17}	milliseconds
Supernova explosion	about 10^9	varies	hours

鐵核塌縮溫度達 5 billion K，極高能量的 gamma-ray 光子將鐵原子核**光分解** (**photodisintegration**)

恆星花了數百萬年在主序上，將氫、氦融合成鐵，然後在不到一秒內，又將鐵元素分解成質子、中子與電子！

核心密度急速增大，在塌縮後1/4秒，密度達 $4 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ （原子核的密度），電子與質子結合成中子，放出大量微中子 (neutrinos)。中子簡併壓力抗拒塌縮

→ **核心反彈 (core bounce)**！ → 超新星

位於金牛座方向的蟹狀星雲 (Crab Nebula)，距離我們6000光年，源於 AD1054年超新星爆發（當時中國天官記錄有詳細記載，故稱爲「中國超新星」。星雲本身的大小約7光年乘以10光年，以每秒1000公里速率向外膨脹





Figure 13-11
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

Gum Nebula

是全天空最大的
超新星遺骸，來自
11,000 年前的
超新星爆發。

Gum Nebula 直徑超過2300光年，跨越天空
60度，離我們最近的部分只有300光年

Cassiopeia A 超新星遺骸，離我們10,000光年。地球應該於300年偵測到爆發事件，但歷史並無記載

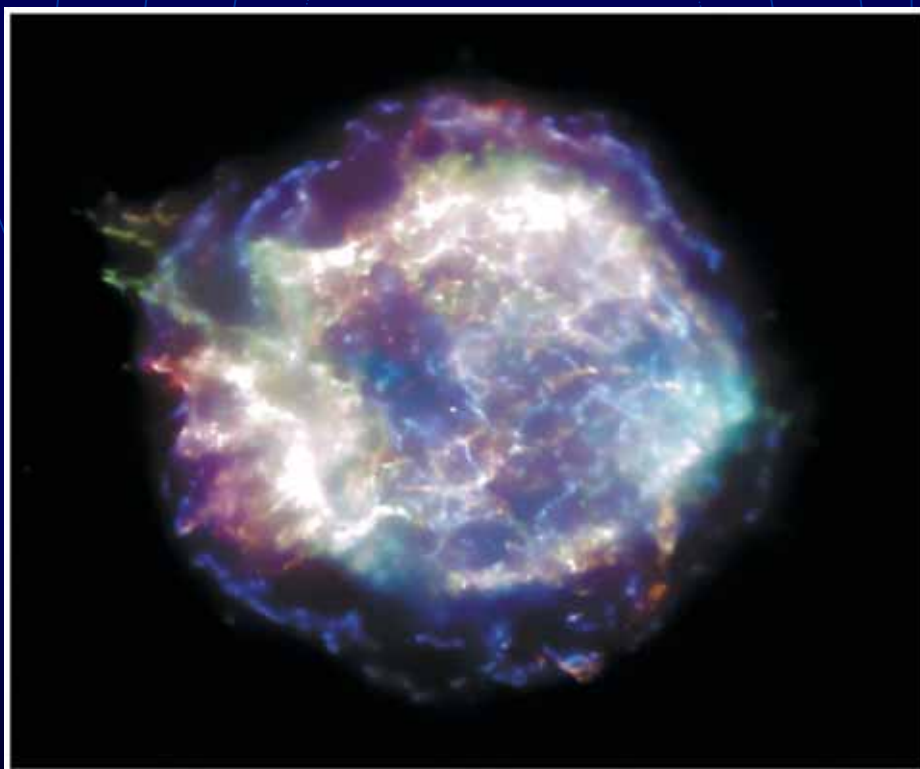


Figure 13-12a
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W.H. Freeman and Company

X 射線影像

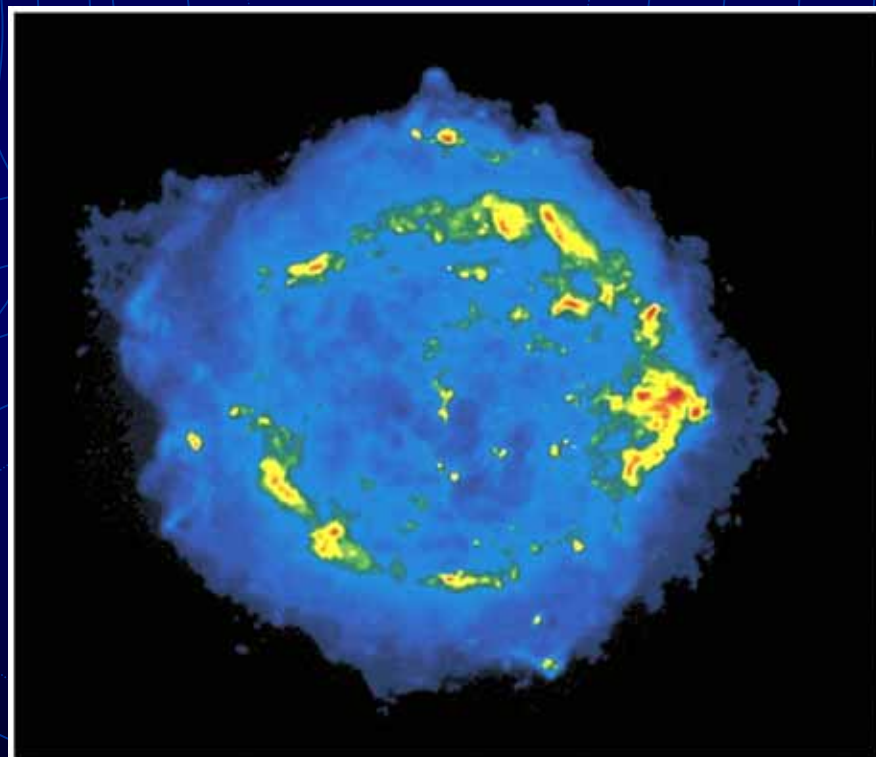
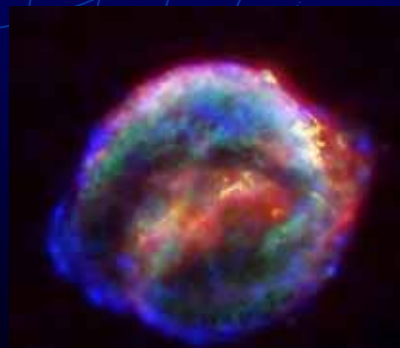


Figure 13-12b
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W.H. Freeman and Company

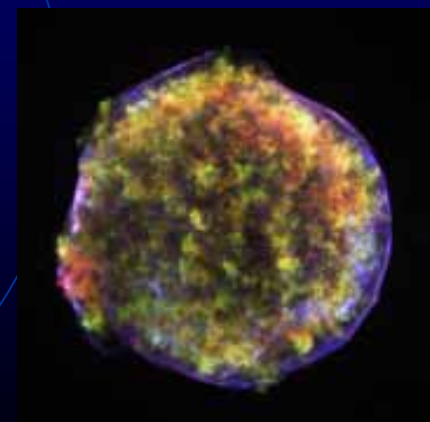
電波影像

歷史上的超新星

- (200 萬年前 OB association in Scorpius-Centaurus，當時離地球 < 150 光年，曾發生超新星爆發)
- 1054AD 中國超新星
- 1572 Tycho supernova
- 1604 Kepler supernova
- 下一個？



Chandra SN1604



Chandra SN1572



SN 1987A 位於銀河系鄰近的星系 Large Magellanic Cloud 當中，原來是不起眼的星體，於1987年2月爆發時耀眼異常



王為豪 拍攝



Image and text copyright © Akira Fujii

<http://www.astrographics.com/GalleryPrintsIndex/GP1614.html>

超新星的種類

- 單一大質量恆星衰亡後，核心變成超新星
 - **Type II supernovae**
 - 光譜裡有明顯氫線
 - 最亮時達絕對星等 -17 等，光度變暗有急緩
- Semi-detached 雙星系統中白矮星可能藉由吸積伴星物質，造成核心碳融合，而引發超新星爆發
 - **Type Ia supernovae**
 - 光譜裡沒有氫線
 - 最亮達 $M \sim -19$ 等，之後緩緩（1 年）變暗

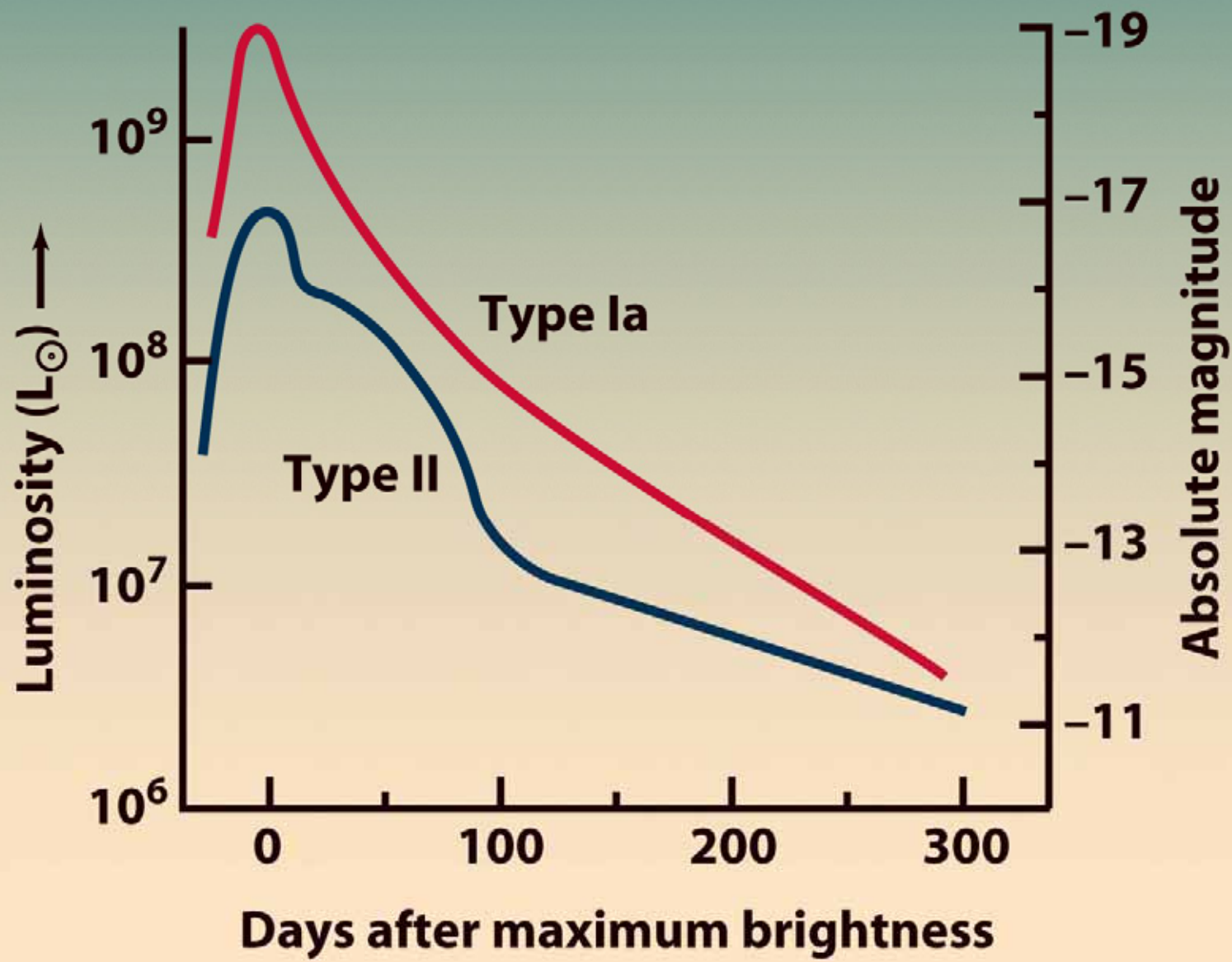
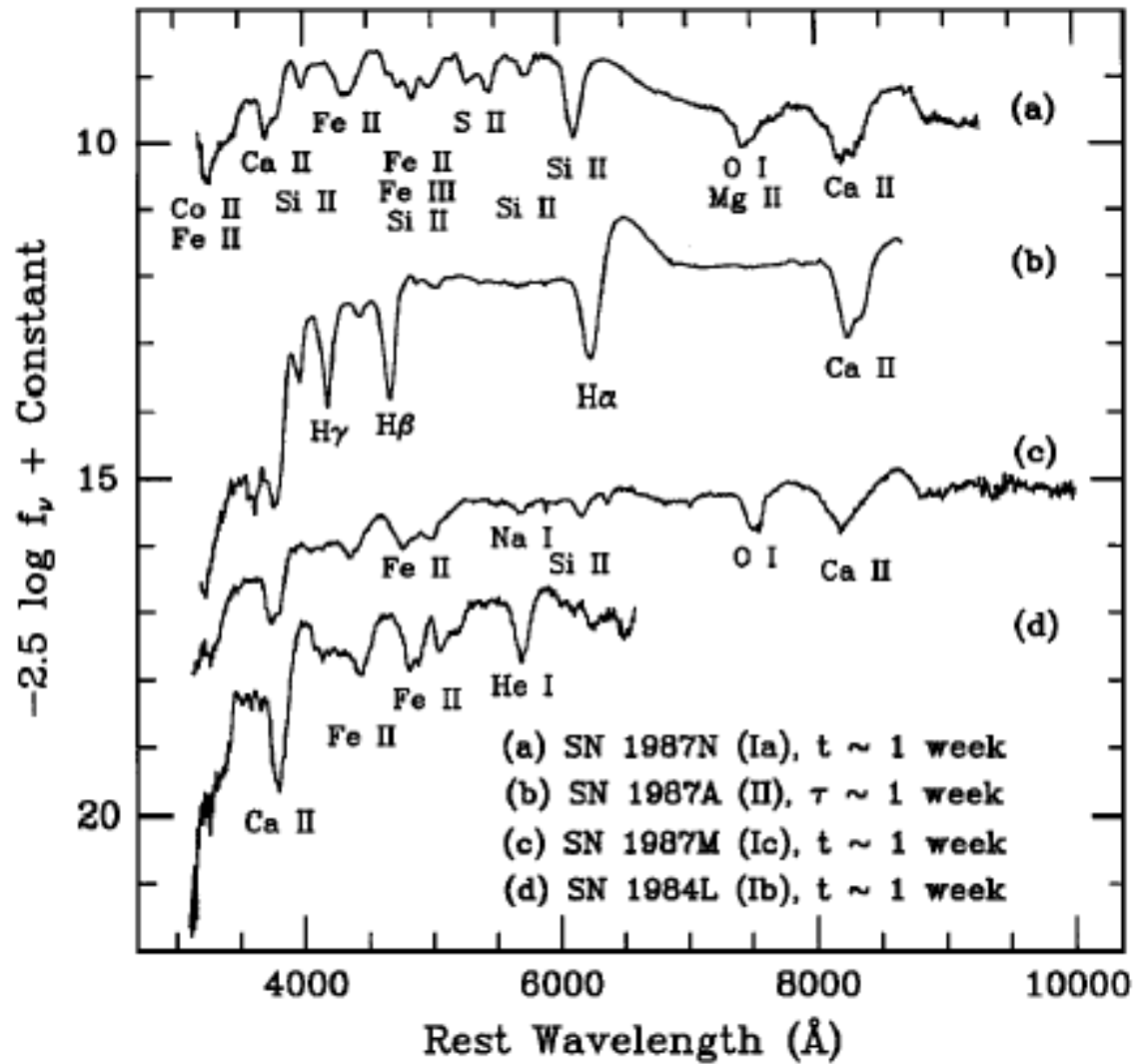
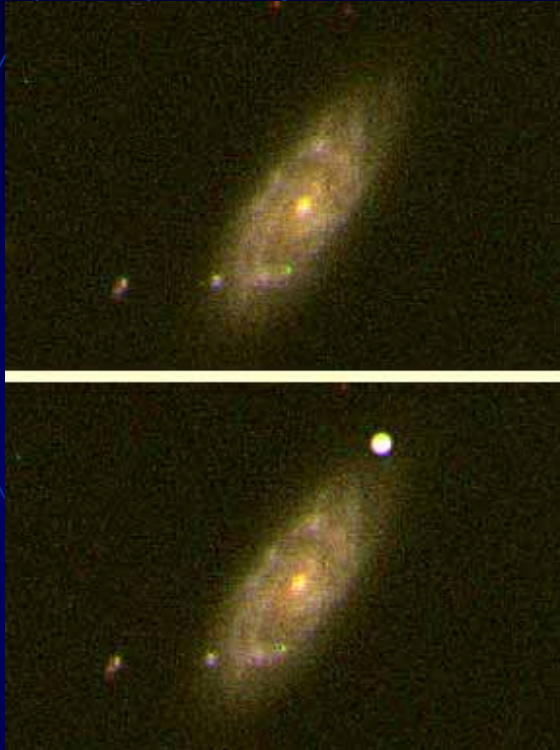


Figure 13-16
Discovering the Universe, Seventh Edition
 © 2006 W. H. Freeman and Company

發現超新星 比對星系影像



超新星爆發早期光譜 (Filippenko 1997, ARAA 35, 309)

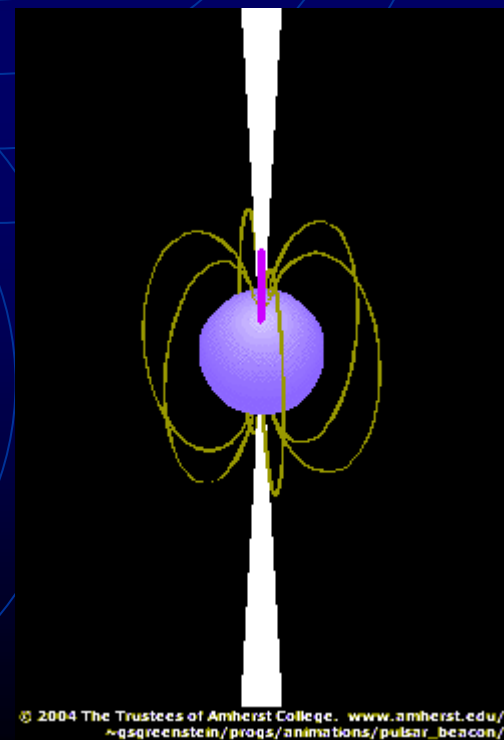
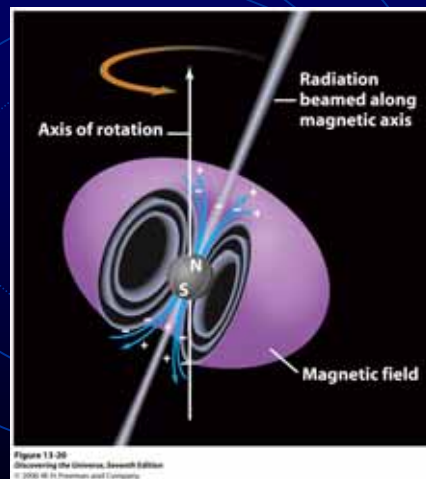
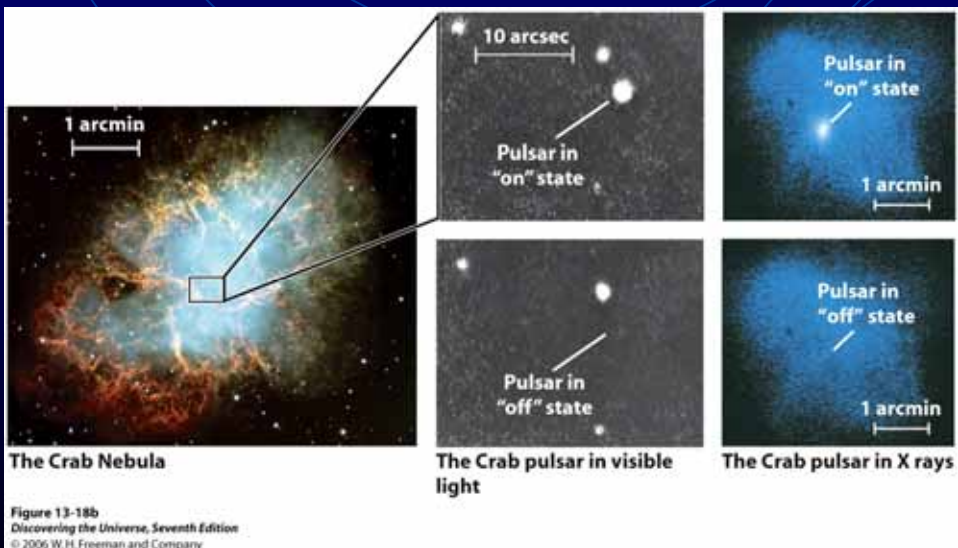
Useful web reference

<http://www.arikah.com/encyclopedia/Supernova>

- Ia 型超新星能量來自核融合，爆發產生多種 radioactive isotopes , e.g., nickel 衰變成 cobalt
- 目前已經觀測到（別的星系中）超過幾千顆超新星
- 銀河系當中應該每 36 年有顆 Type Ia SN，每 44 年有顆 Type II SN
- 那麼每個世紀應該有約5顆超新星才對...

Q：爲什麼沒有看到那麼多呢？

- 中子星比白矮星還小得多。太陽核心成爲白矮星，大小約與地球相當
- 中子星大小只有10公里左右，與中壢市相當
- 磁場巨大，同時旋轉快速 → **脈衝星 (pulsar)**
每秒數百到數千次脈衝（燈塔效應）



PSR 0329 + 54 $P \sim 0.714$ s

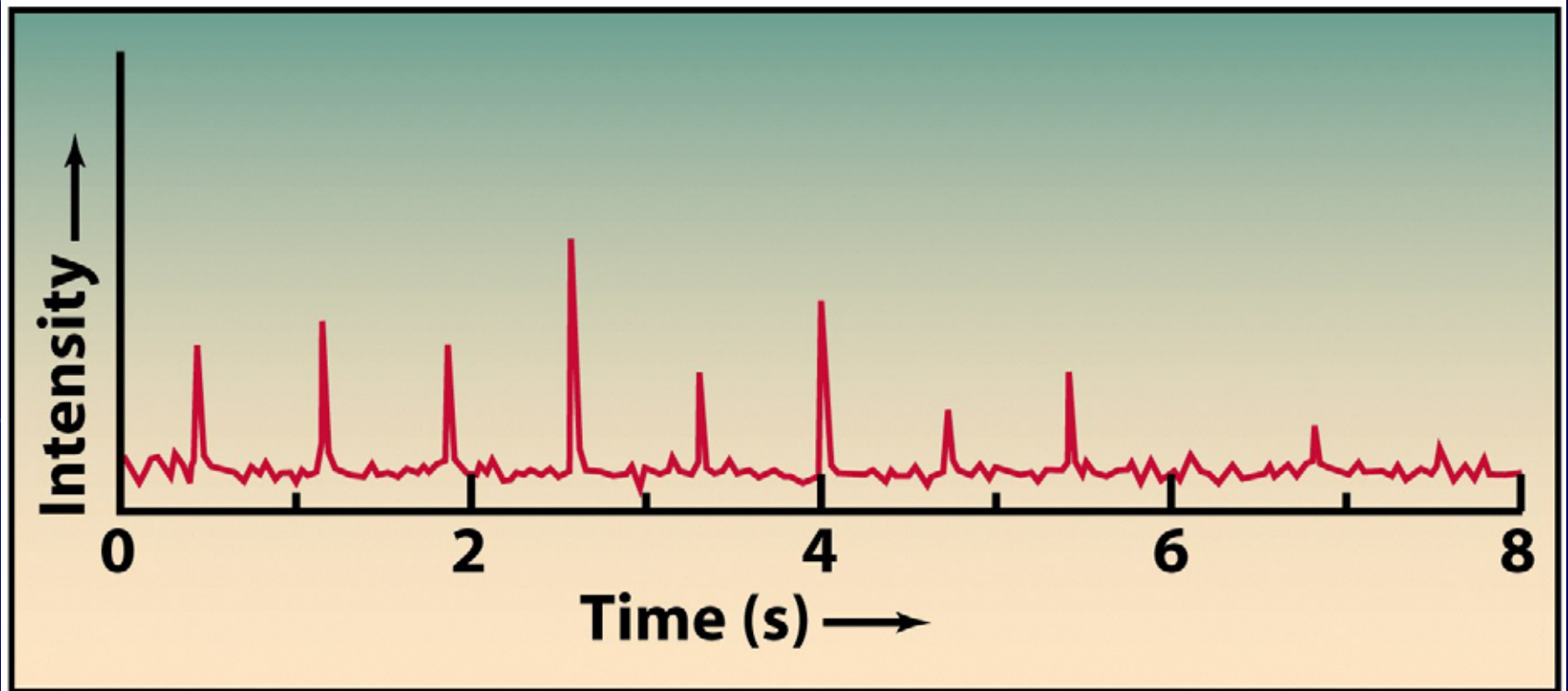
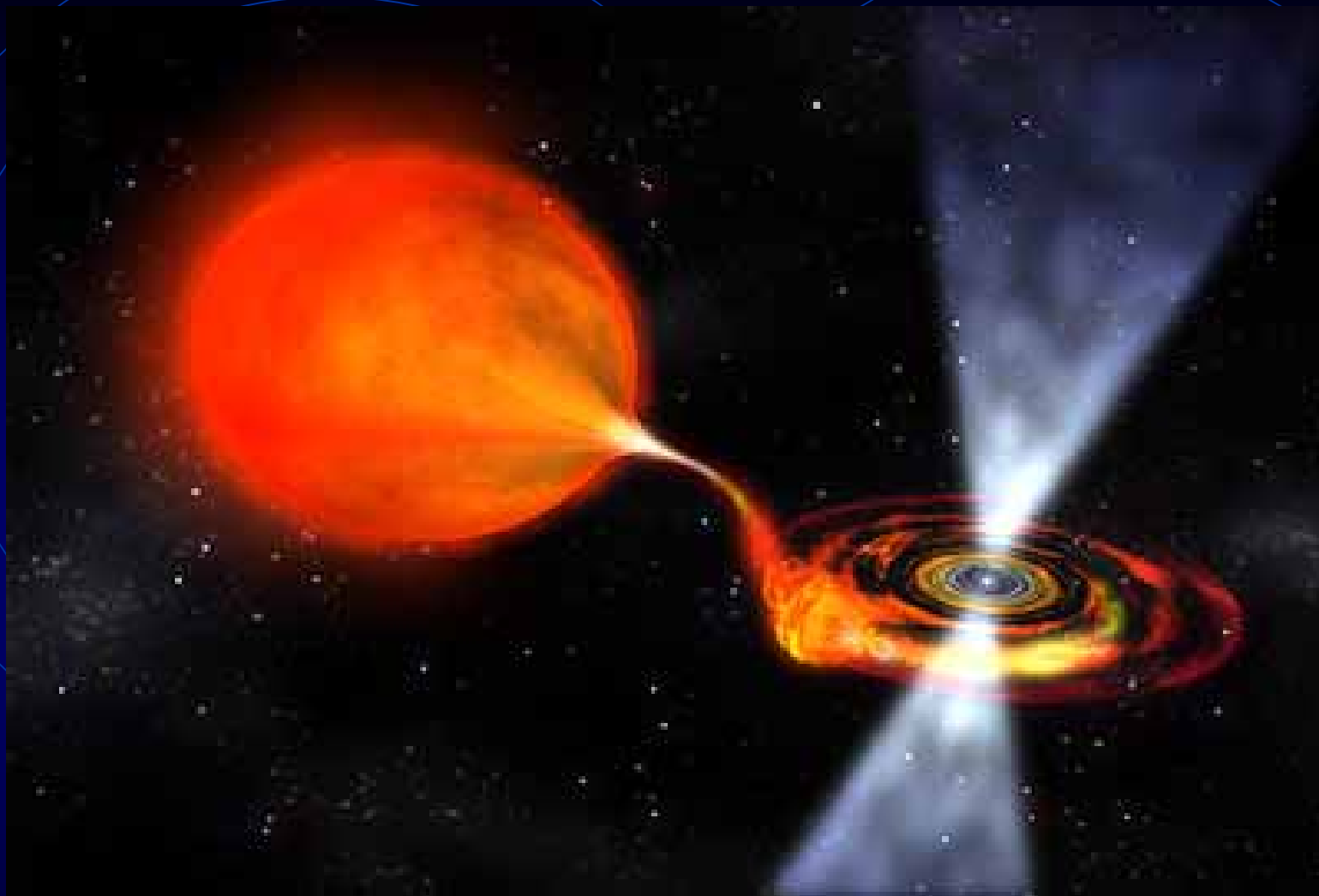
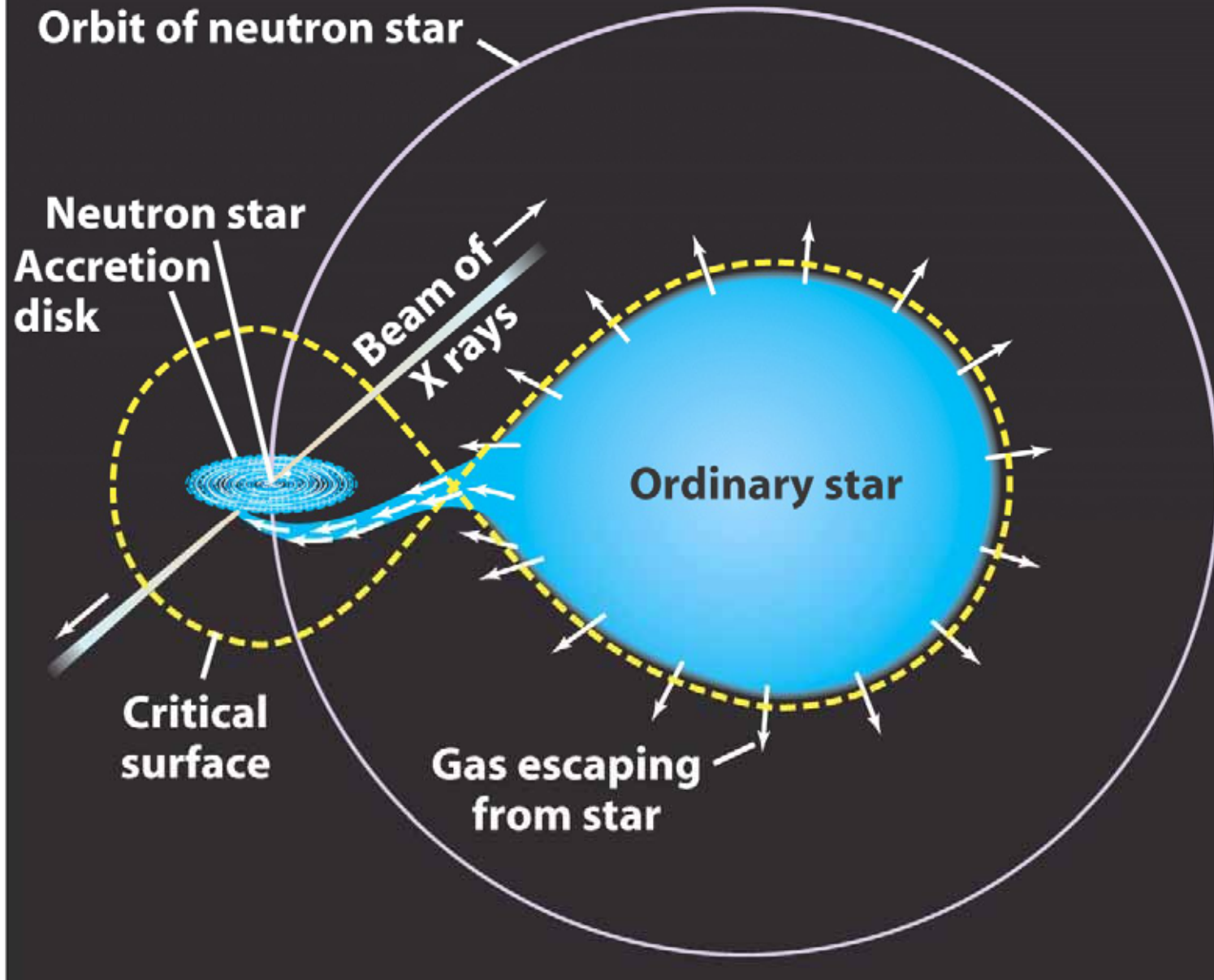


Figure 13-17
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company



http://www.esa.int/esaCP/SEMWSAA5QCE_index_3.html



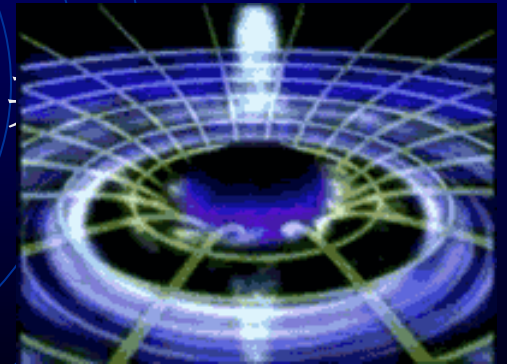
Pulsating X-ray Source

奇怪的天體

- 太空中還可能有更奇怪的天體
- 白矮星的質量上限 —— Chandrasekhar limit
- 中子星也有質量上限 —— **Oppenheimer-Volkov limit** 大約是 $3M_{\odot}$
- 很多基本粒子（包括質子、中子，但不包括電子）由夸克組成
- 如果星體壓力太大，中子分解成 quarks → quark stars 性質仍不清楚，但質量可能與 Oppenheimer-Volkov 相當

大質量恆星晚年

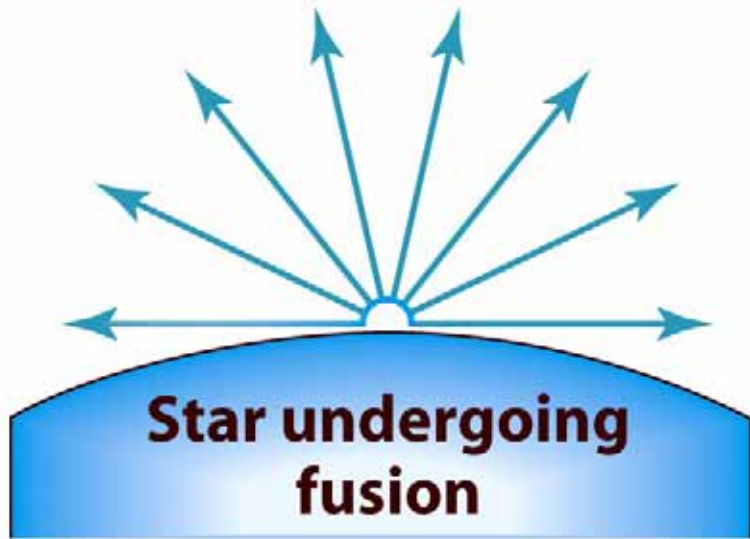
- 例如核心質量大於太陽3倍
- 連中子或夸克的支撐力量都抵擋不住巨大的萬有引力
 - 星體塌縮
- 強大的萬有引力連光線都跑不出來
 - **黑洞 (black hole)**
- 黑洞是種簡單的質能狀態，其「事件面」的逃脫速度等於光速



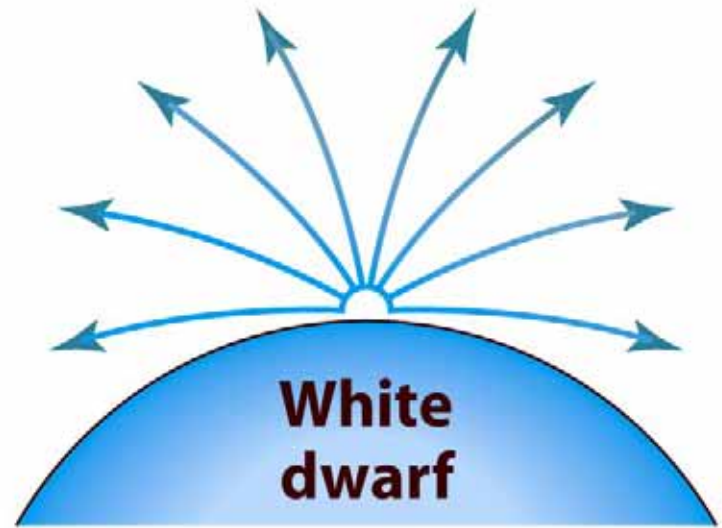
逃脫速度 (escape velocity)

- 拋個銅板向上...銅板向上飛，達到最高點後停止，接著向下飛
- 如果用力拋個銅板向上...
- 但是如果真的很用力（夠快），越高處離地心越遠，引力越弱，便無法讓銅板停止
- 這個開始拋速度稱做「逃脫速度」
- 地球的 escape velocity 為 40,200 km/h 或 11 km/s；大於這個速度毋須額外力量就可脫離地球

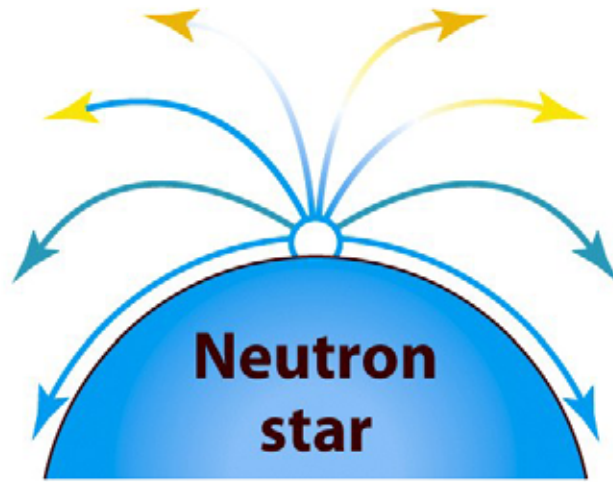




a

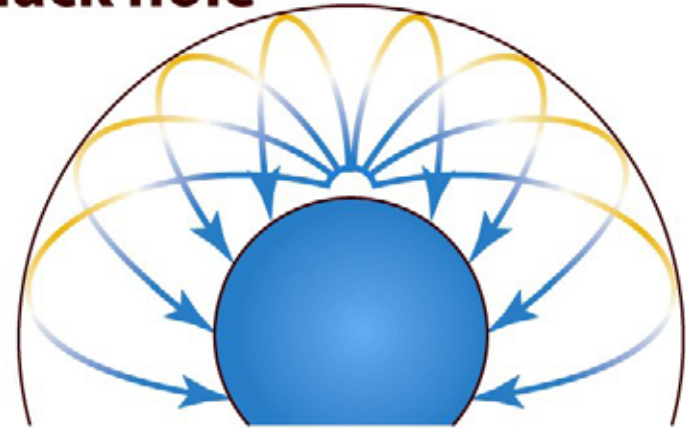


b



c

Boundary of
black hole

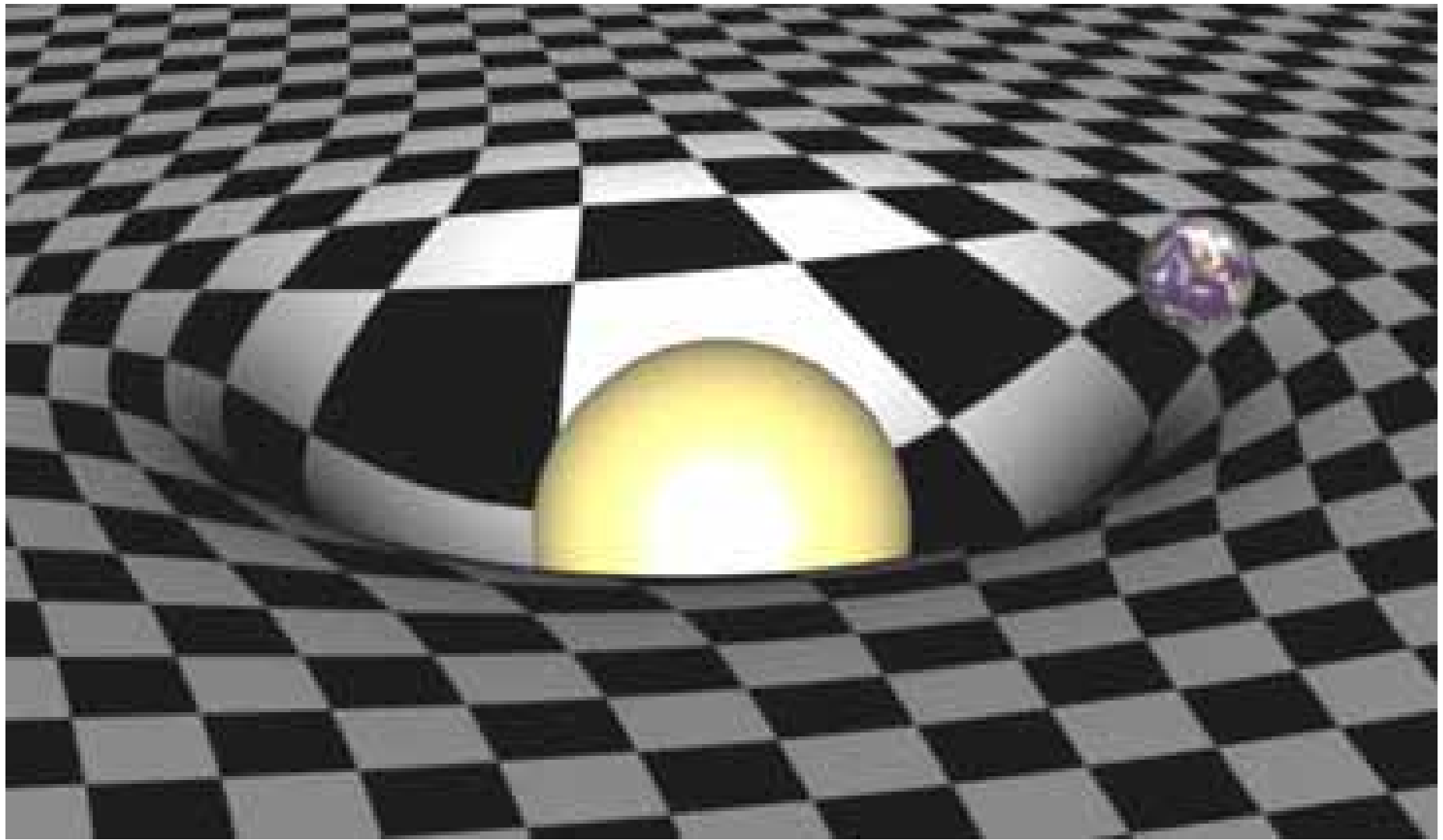


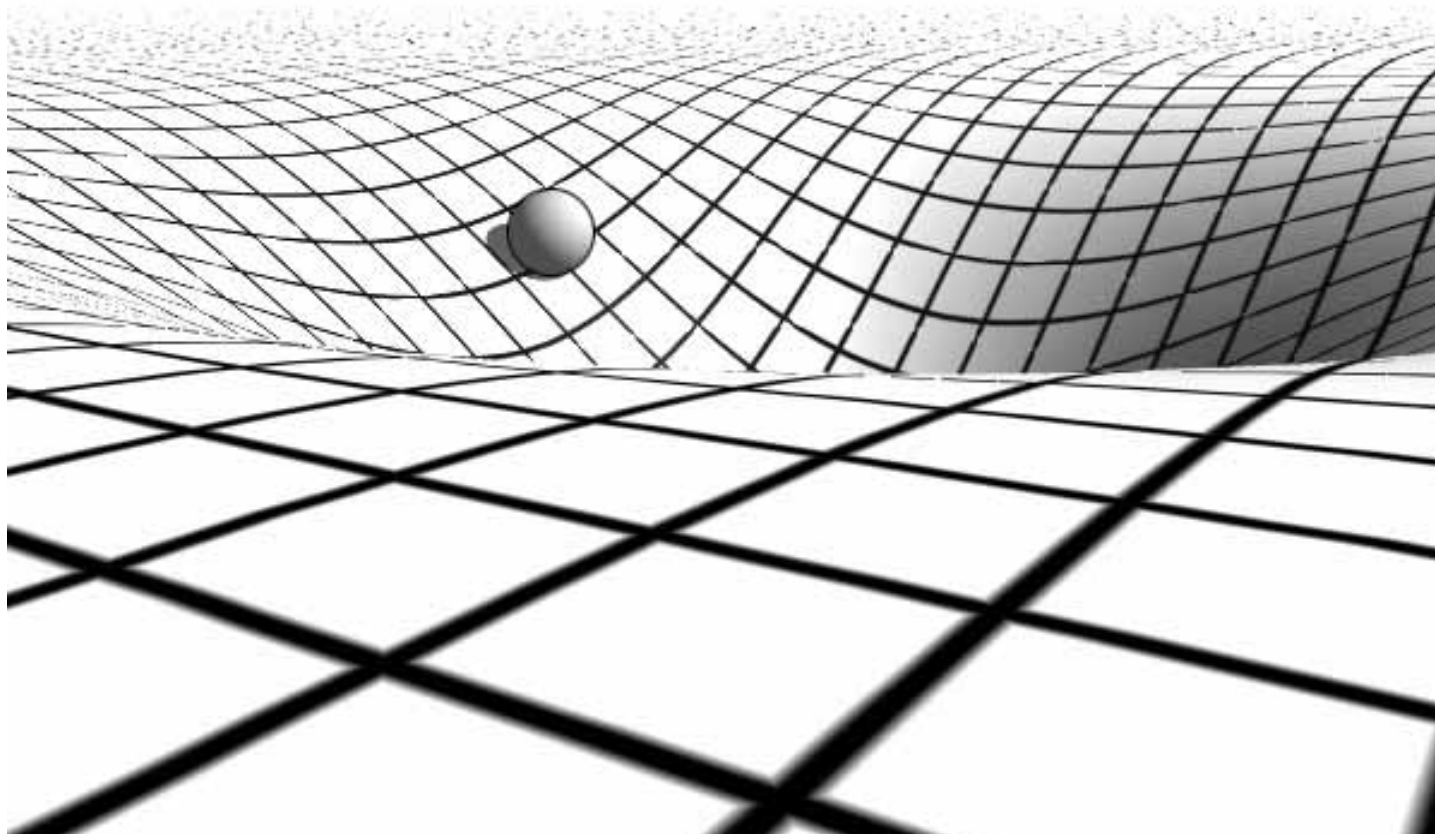
d

Figure 14-8
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

Q：如果太陽塌縮成了黑洞，
對地球有何影響？

- 會被吸進去嗎？
- 不再有春、夏、秋、冬？
- 從此適合天文觀測？



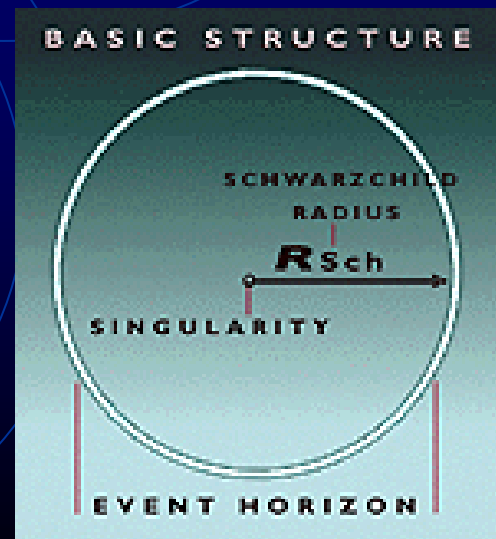


物質決定空間如何彎曲
空間決定物質如何運動

- 決定某個天體逃脫速度的因素包括它的質量以及大小（直徑）

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

- 若某天體相對於體積，質量很大，逃脫速度等於光速 → 黑洞
- 該半徑稱為 **Schwarzschild radius**（**史瓦茲半徑**），該球面稱為**事件地平面 (event horizon)** 其內的訊息跑不出來



史瓦茲半徑有多大？

- $R_{\text{Sch}} \sim 2 G M / c^2 \sim 3 (M / M_{\odot}) [\text{km}]$

其中 M 代表黑洞的質量， M_{\odot} 為太陽質量

→ 如果太陽成爲黑洞，半徑約爲 3 公里

→ 如果地球成爲黑洞，半徑約爲 1 公分

→ 如果喜馬拉雅山變成黑洞，大小有多大？

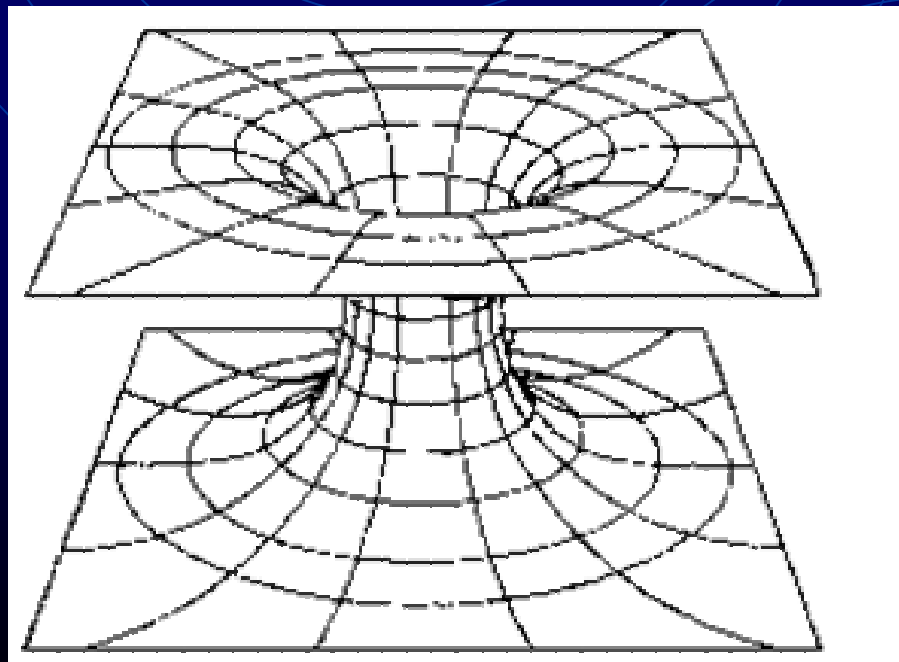
→ 質量爲太陽質量 1 億倍的黑洞，其大小爲...

這相當於多大？（和地日距離比）

密度呢？

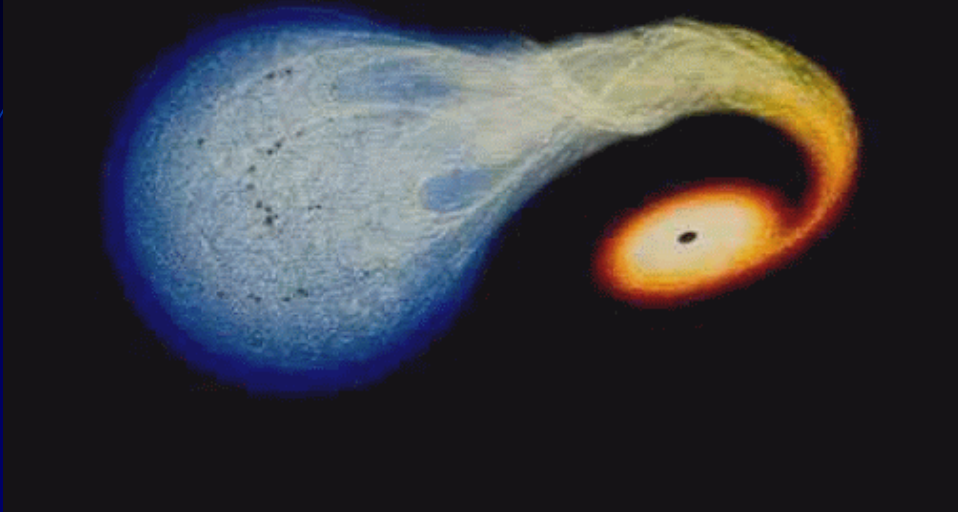
時空扭曲，
可以成為
「捷徑」，
通往宇宙其
他角落？

時空旅行？

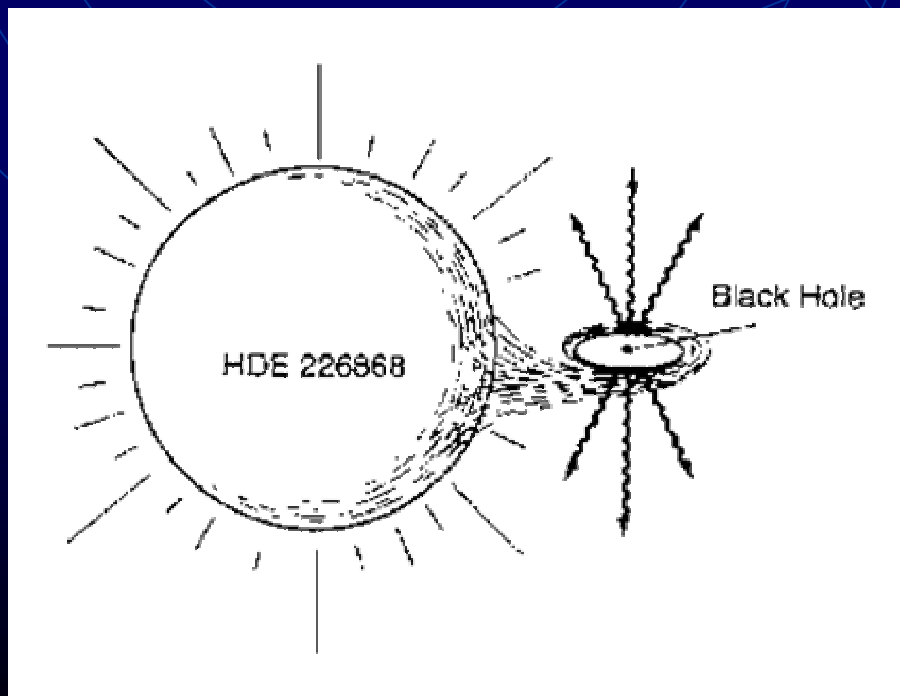
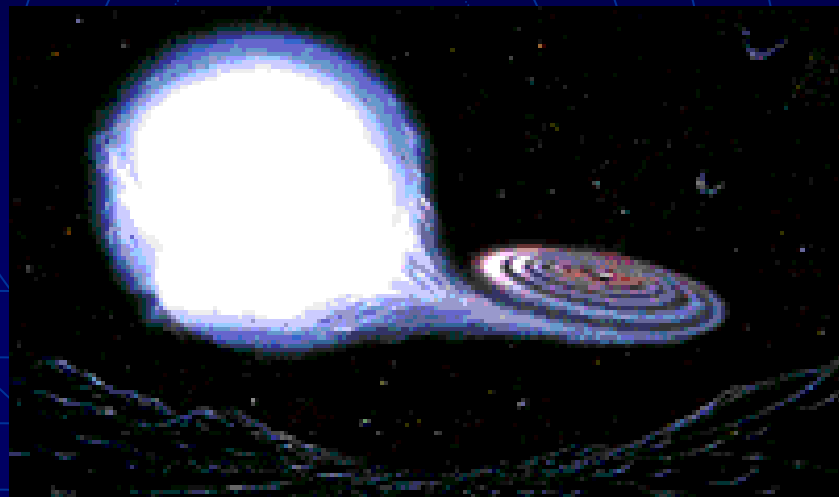


Cygnus X-1 black hole
C2

© 1993, Loch Ness Productions
markpet@scicom.alphacdc.com
Artist: Tim W Kuzniar



利用黑洞對伴星的引力作用，藉以發現黑洞存在

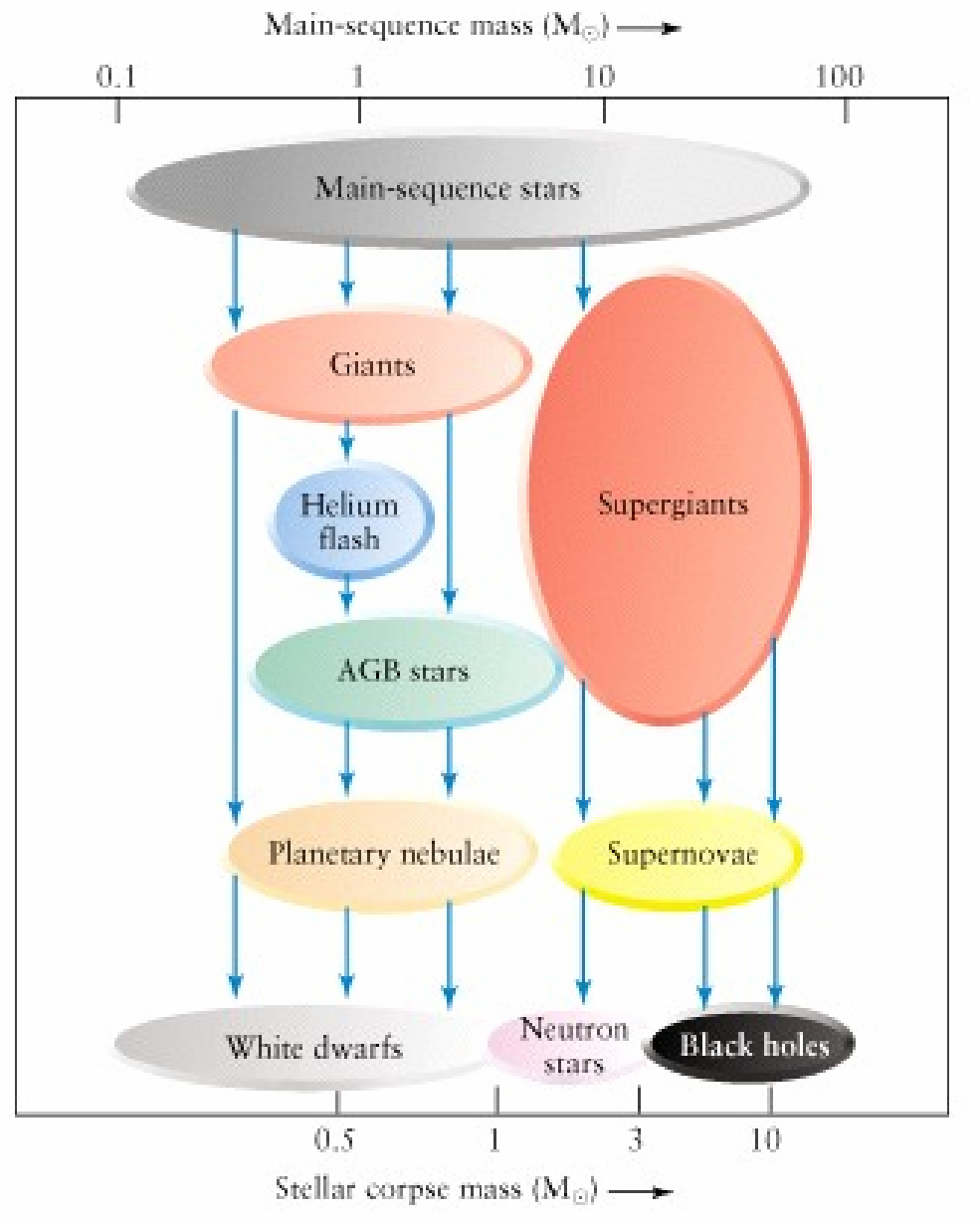


© 2000 W. H. Freeman and Company
Illustration of the Cygnus X-1 system

恆星在主序時的質量

質量流失

恆星死亡時的質量



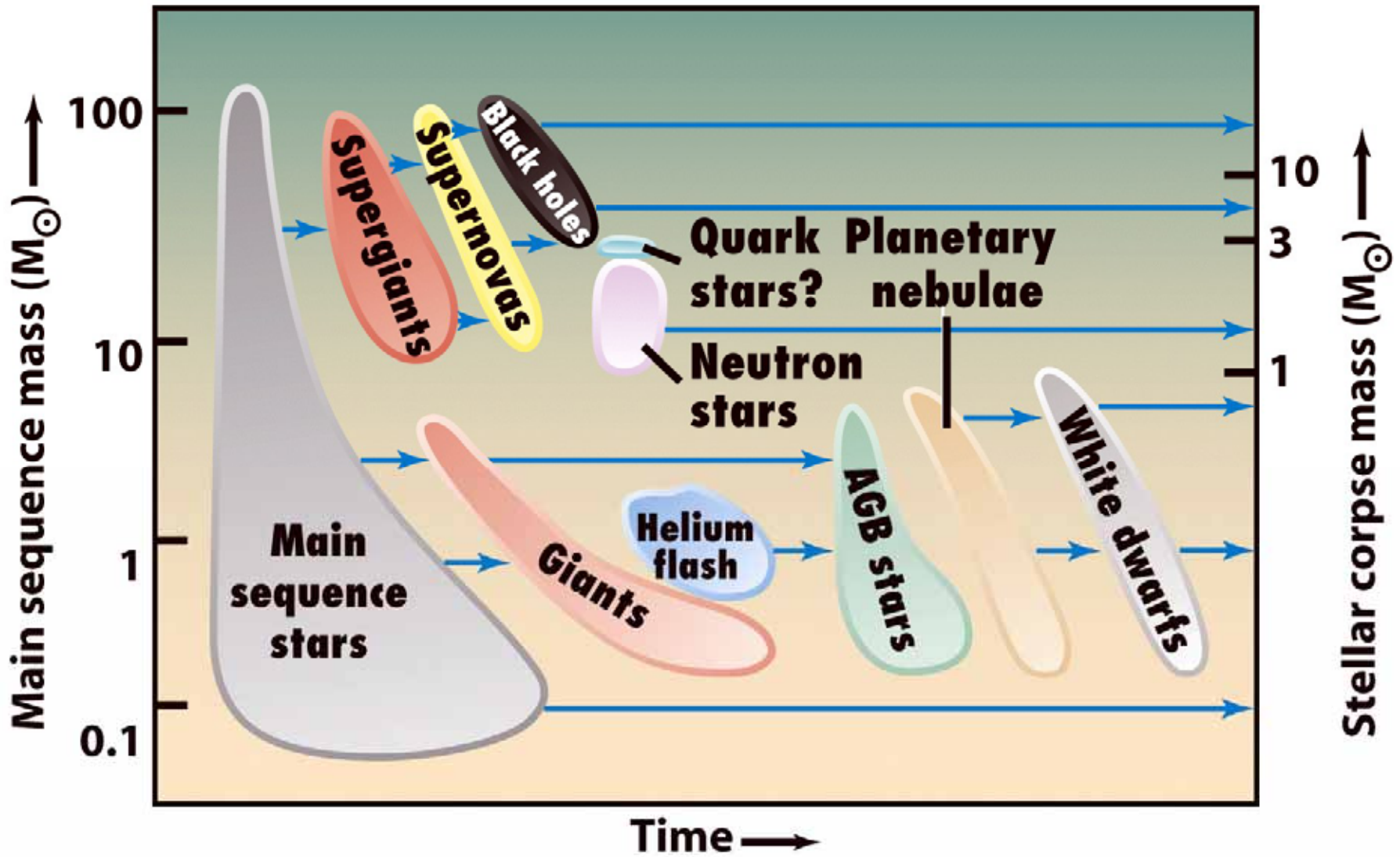


Figure 13-27a
Discovering the Universe, Seventh Edition
 © 2006 W. H. Freeman and Company

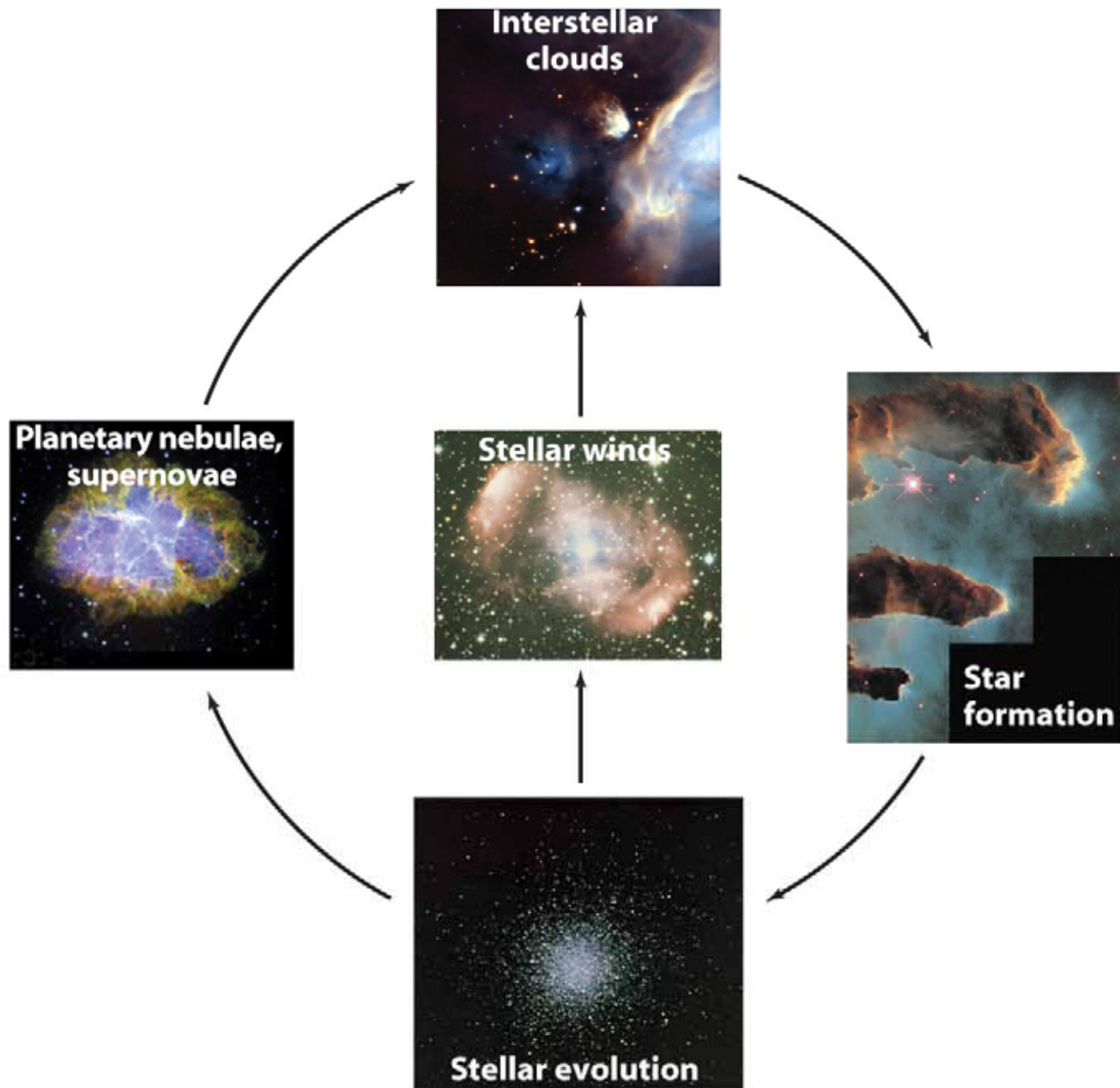


Figure 13-27b
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

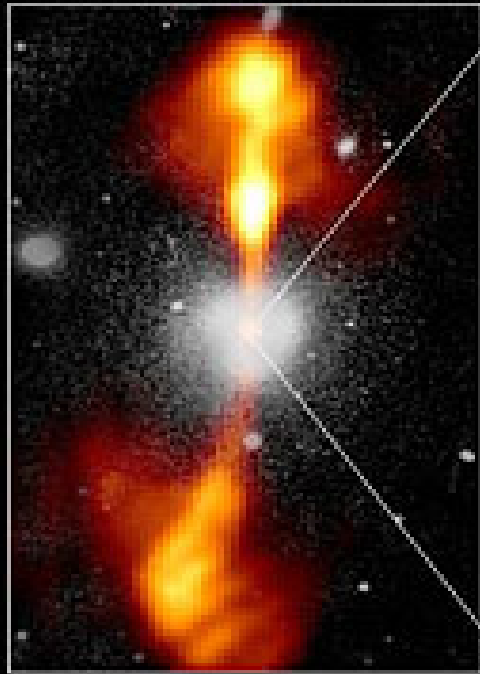
一些星系的核心可能也有超大質量黑洞

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

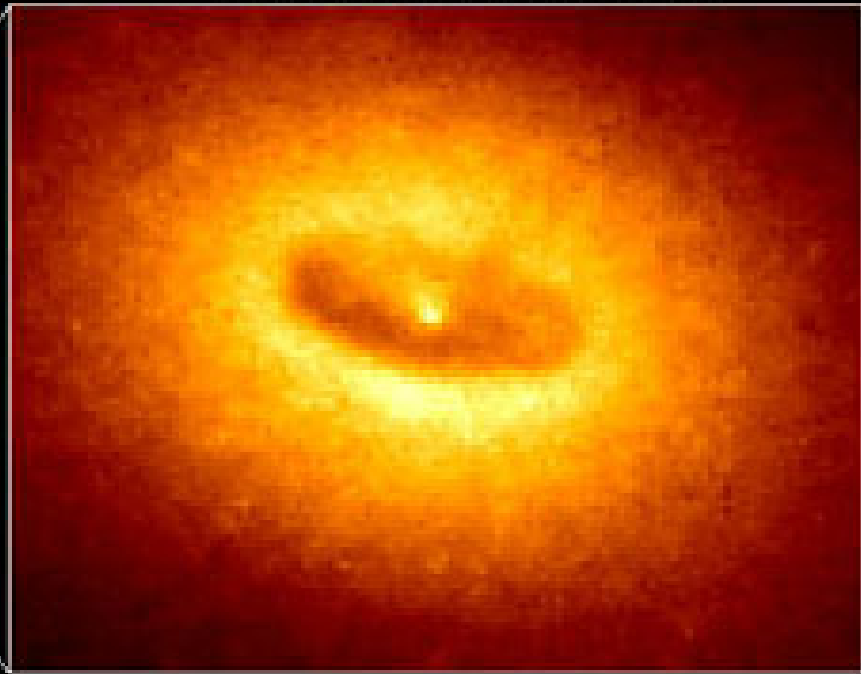
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
68,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS