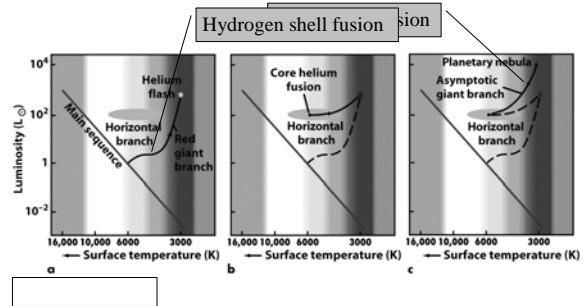


# The Deaths of Stars

## 恆星的衰亡

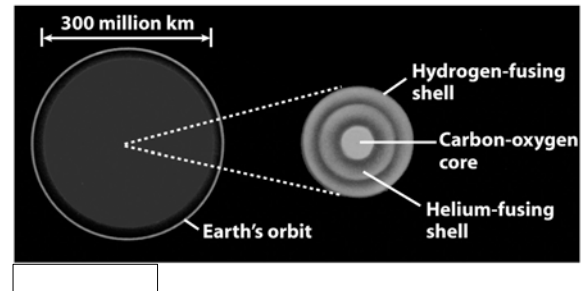
最低質量 ( $< 0.4 M_{\odot}$ ) 恆星不會演化成巨星

### 低質量 ( $0.4$ to $8 M_{\odot}$ ) 恆星晚年



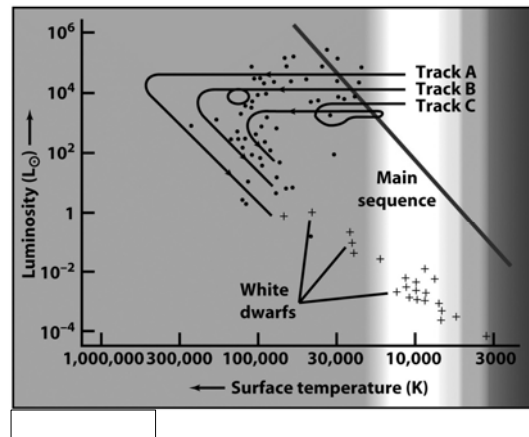
### 低質量 ( $0.4$ to $8 M_{\odot}$ ) 恆星晚年 II

- 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  $\rightarrow$  carbon-oxygen core
- 氦氣殼層融合  $\rightarrow$  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)



### 低質量 ( $0.4$ to $8 M_{\odot}$ ) 恆星晚年 III

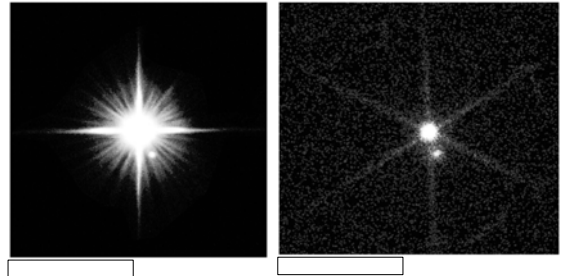
- Triple-alpha process 對溫度很敏感 (e.g., PP chain rate  $\propto T^4$ ; triple- $\alpha \propto T^{40}$ ), 只要溫度升高一點，融合速率便急遽加快  $\rightarrow$  一系列的 helium shell flash (cf 之前在核心的 helium flash)  $\rightarrow$  thermal pulses
- 最後超巨星外圍膨脹，溫度下降，電子與離子復合 (recombine)，放出光子，加上殼層氦閃發出的光子，光壓造成物質向外噴發，冷卻而凝固成塵埃。中心熾熱星體發光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



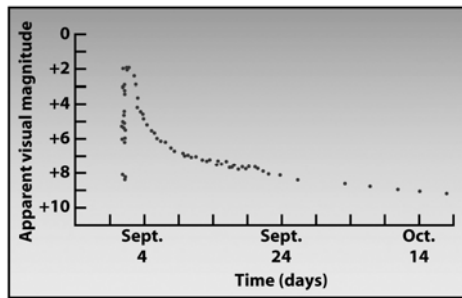
- 低質量恆星的外圍噴發出行星狀星雲，核心則演化成白矮星。
- 白矮星以電子簡併壓力平衡萬有引力
- 質量（萬有引力）的上限稱為 **Chandrasekhar limit（錢氏極限）**  $\sim 1.4 M_{\odot}$ 。
- 白矮星的密度達  $10^9 \text{ kg/m}^3$
- 超過此極限，連電子簡併壓力也無法抵擋引力，核心會繼續塌縮
- Subrahmanyan Chandrasekhar, 1990 Nobel Prize winner



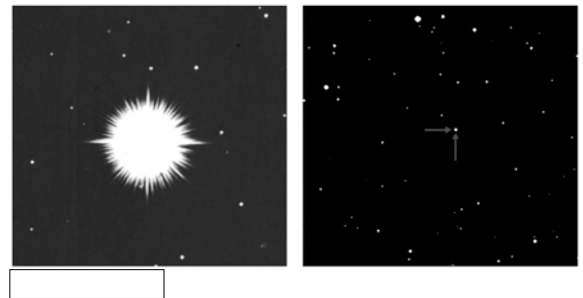
天狼星 (Sirius) 的伴星是顆白矮星。  
 Sirius A (11,000 K), Sirius B (30,000 K)



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



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

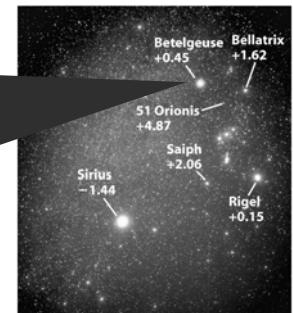


### 中質量 (8 to $25 M_{\odot}$ ) 與 大質量 ( $> 25 M_{\odot}$ ) 恆星晚年

- 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)**  $e^- + p^+ \rightarrow n^0 + \nu$
- 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

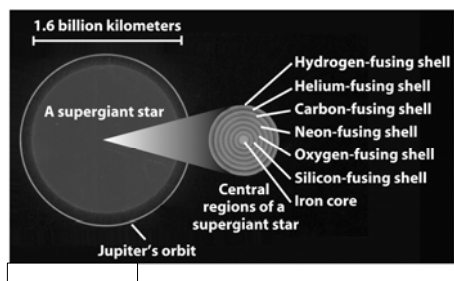
超巨星有強烈恆星風

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



中、大質量恆星演化晚期結構

- 外層成為超巨星，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)



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)

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

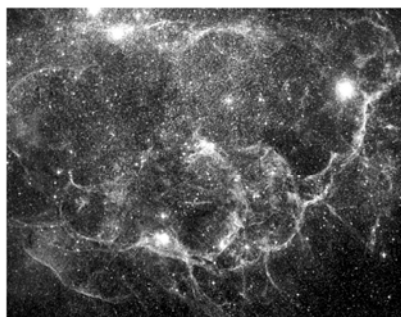
鐵核塌縮溫度達 5 billion K，極高能量的 gamma-ray 光子將鐵原子核光分解 (photodisintegration)

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 × 10<sup>17</sup> kg/m<sup>3</sup> (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

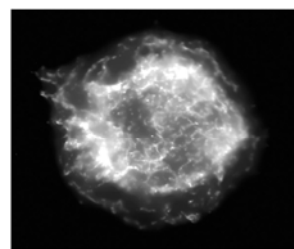
位於金牛座方向的蟹狀星雲 (Crab Nebula)，距離我們6000光年，源於 AD1054年超新星爆發 (當時中國天官記錄有詳細記載，故稱為「中國超新星」。星雲本身的大小約7光年乘以10光年，以每秒1500公里速率向外膨脹



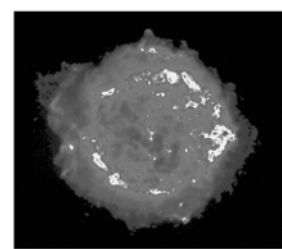
**Gum Nebula**  
是全天空最大的超新星遺骸，來自 11,000 年前的超新星爆發。

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



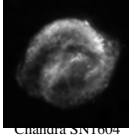
X 射線影像



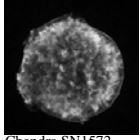
電波影像

## 歷史上的超新星

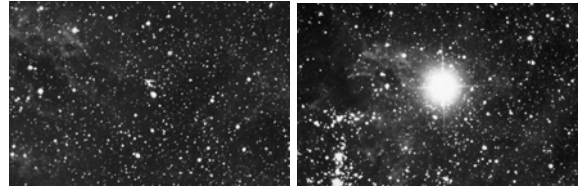
- (200 萬年前 OB association in Scorpius-Centaurus, 當時離地球 < 150 光年, 曾發生超新星爆發)
- 1054AD 中國超新星
- 1572 Tycho supernova
- 1604 Kepler supernova
- 下一個?



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

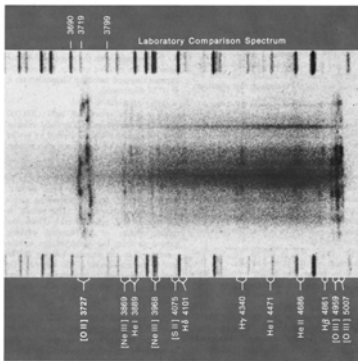


王為豪 拍攝



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

## The Expanding Crab Nebula 1973 to 2001



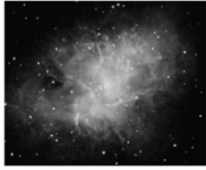
The spectrum of the Crab nebula, obtained at Lick Observatory by N. U. Mayall with the Crossley reflector. The spectrograph slit was aligned with the major axis of the nebula (here vertical), to record velocity differences along that axis. These are best shown by the necktie shape of the 3727-angstrom oxygen line. A laboratory spectrum of palladium, tin, and lead flanks that of the Crab to give a wavelength scale; nebular lines are identified at bottom.

## Introduction to Astronomy

HW080331

due in one week

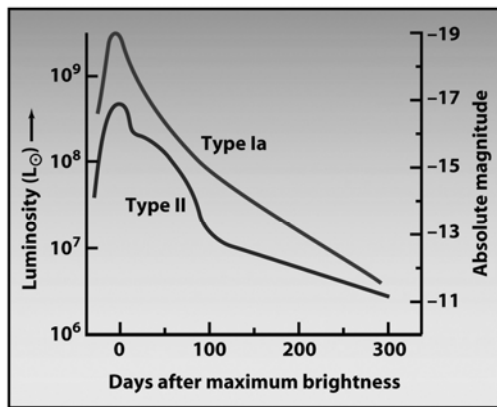
1. Describe the energy source that causes a protostar to shine. How does this source differ from the energy source inside a main-sequence star?
2. In the direction of a particular star cluster, interstellar extinction allows only 15% of a star's light to pass through each kiloparsec (1000 pc) of the interstellar medium. If the star cluster is 3.0 kpc away, what percentage of its photons survives the trip to the Earth?
3. A comparison of the Crab Nebula taken in 1973 and in 2001 can be found with this url, <http://apod.nasa.gov/apod/ap011227.html>. With reference to some "fixed" stars, we can determine the expanding angular speed of the nebula, about 0.15 arcsec/year. Radio observations of the spectral lines indicate a line-of-sight speed of 1500 km/s. Show how these two parameters would allow us to estimate the distance to the Nebula. What assumptions are made in your calculation? How does your answer differ from what is given in the textbook?



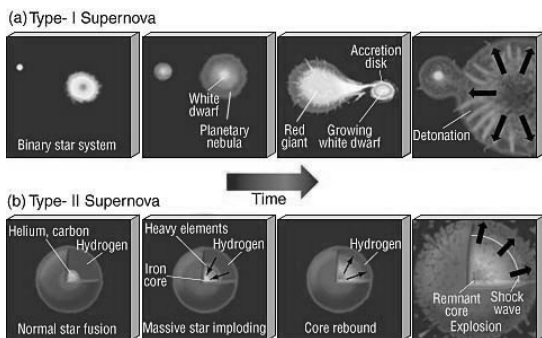
- The star  $\delta$  Cephei is a Type I Cepheid variable. Its apparent brightness varies with a period of 5.4 days, with an average brightness of  $5.1 \times 10^{-13}$  that of the Sun. Approximately how far away is  $\delta$  Cephei?
- The earliest fossil records indicate that life appeared on the Earth about a billion years after the formation of the solar system. Assuming the same evolutionary processes for life, what is the most massive star that has a long enough main-sequence lifetime to permit life to form on one or more of its planets?

## 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



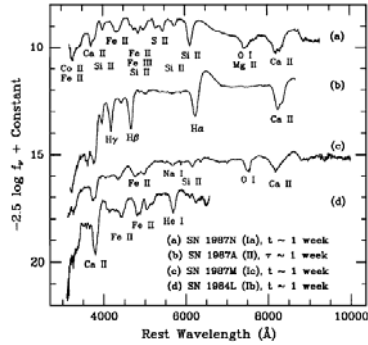
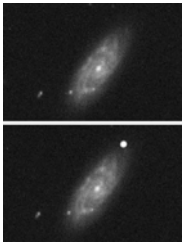
	Type I	Type II
來源	接近 Chandrasekhar 極限的白矮星吸積 → 老年恆星附近	大質量恆星演化的結果 → 年輕恆星附近
光譜	沒有氫氣，有很多其他元素譜線	主要為氫氣
極大光度	-19 to -20	-17
全部爆發能量	$5 \times 10^{43}$ joules	$10^{44}$ joules
噴發出的質量	$0.5 M_{\odot}$	$5 M_{\odot}$
噴發速率	10,000 km/s	5,000 km/s



## 超新星爆發的能量來源

- 以一個  $1.4 M_{\odot}$ ， $R = 15$  km 的星體為例 (也就是中子星) 塌縮成  $R \rightarrow 0$  km
- $E_{\text{grav}} = GM/R = 6.6 \times 10^{11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2 \times (1.4 \times 2 \times 10^{30} \text{ kg})^2 / 15 \times 10^3 \text{ m} = 4 \times 10^{46} \text{ joules}$
- So sufficient to power a SN.

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

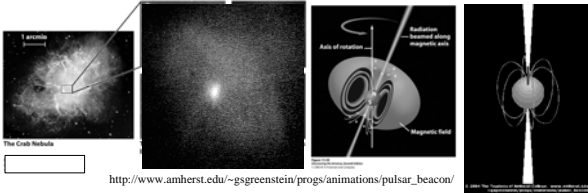
<http://www.arikah.com/encyclopedia/Supernova>

- 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：為什麼沒有看到那麼多呢？

- 中子星比白矮星還小得多。太陽核心成為白矮星，大小約與地球相當
- 中子星更小，直徑只有約10公里（~中壢）
- 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）

<http://www.shalfleet.net/astrophysics/pulsars.htm>



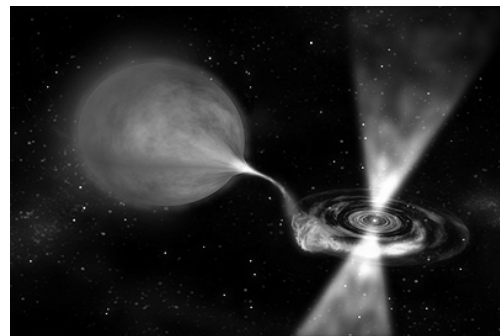
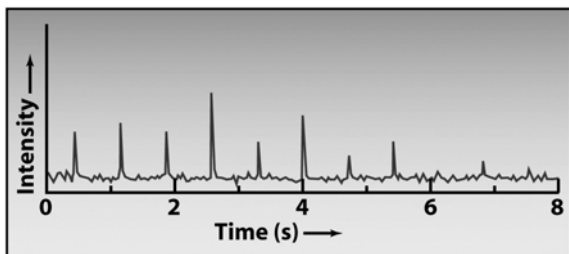
[http://www.amherst.edu/~gsgrinstein/progs/animations/pulsar\\_beacon/](http://www.amherst.edu/~gsgrinstein/progs/animations/pulsar_beacon/)

### Angular Momentum Conservation

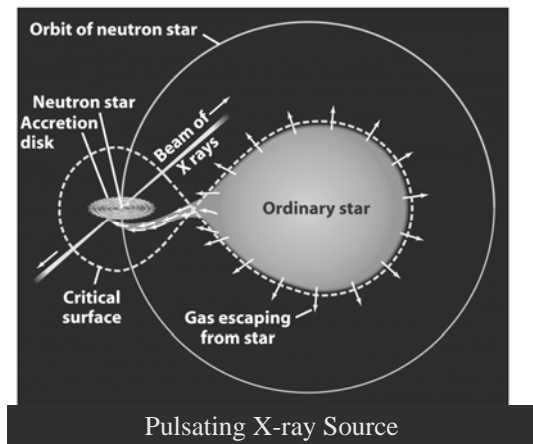
$$J = m \omega r^2$$

- Consider how fast the Sun (rotation period of ~30 days, radius about 700,000 km) would rotate if it were to shrink to  $r \sim 15$  km, if angular momentum is conserved.
- Period =  $2\pi / \omega$
- $P_{\text{after}}/P_{\text{before}} = \omega_{\text{before}}/\omega_{\text{after}} = (r_{\text{after}}/r_{\text{before}})^2$
- $P_{\text{after}} = 30 \text{ days} \times 86400 \text{ s/day} (15/7 \times 10^5)^2 \sim 0.001 \text{ s}$
- Break-up speed  $\rightarrow P > 3.8 \times 10^{-4} \text{ s}$ , so OK

PSR 0329+54  $P \sim 0.714 \text{ s}$



[http://www.esa.int/esaCP/SEMWSAA5QCE\\_index\\_3.html](http://www.esa.int/esaCP/SEMWSAA5QCE_index_3.html)



## 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