

星的演化

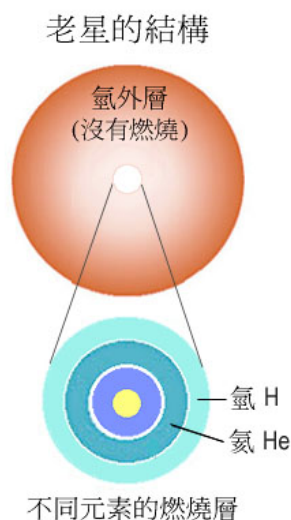
(稿源：義工天文培訓班 --- 第 13 講)

概論 所有星體都由一團以氫為主的氣雲集積而成，集積使氣團核心的壓力和溫度越升越高，到了一千五百萬度左右便觸發第一次的核聚變，氫聚合成氦（氫燃燒），同時發出光和熱，但在核心以外的氫，由於沒有足夠的溫度，不會燃燒。

“主序” (main sequence) 指星光來自核心氫燃燒的階段，在主序的星叫主序星，它的光度和直徑大致穩定。核心的氫燒完後，星脫離主序步入老星階段，這時核心處會累積不同元素的燃燒層（右圖），最外燃燒層必定是氫，下一層是氦，再下層是更重的元素，總層數視乎星的質量而定。

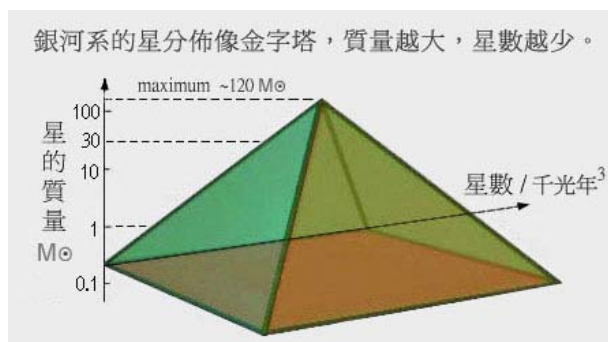
在論述星的演化時，我們不妨把星分為低質量與大質量兩級，低質量 $< 4 M_{\odot}$ (不足四倍太陽質量)，大質量 $> 4 M_{\odot}$ ，要留意的是：

- 主序階段佔星壽命的大部份時間。
- 燃燒層只佔星體積的小部份。
- 星在演化時會拋出物質，特別是晚年，狀態不穩，拋出物質更多，到核能盡失時便壽終，其遺體質量可以比主序時小幾倍。



星的質量和壽命

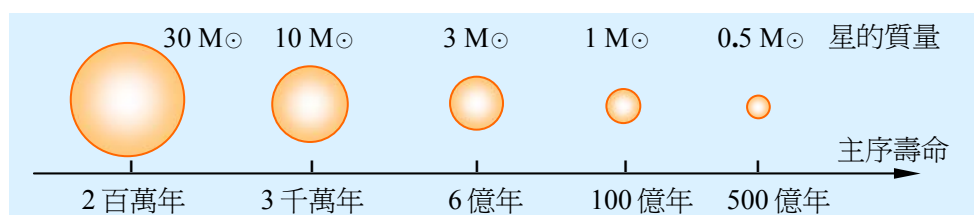
銀河系的星數約 2 ~ 3 千億，分佈有如金字塔，星的質量越大，數目越少，質量低於 $0.08 M_{\odot}$ 左右的星沒有能力激發氫燃燒，沒有可見光不易被發現，但邏輯上它們仍然存在， $1 M_{\odot}$ 以下的星最多，大過 $30 M_{\odot}$ 的星很少。天體物理學指出：星質量大到某程度，它所產生的強烈輻射壓力會驅趕外來的集積物質，星的質量不會無限地遞增，大約到 $120 M_{\odot}$ 便停止了。



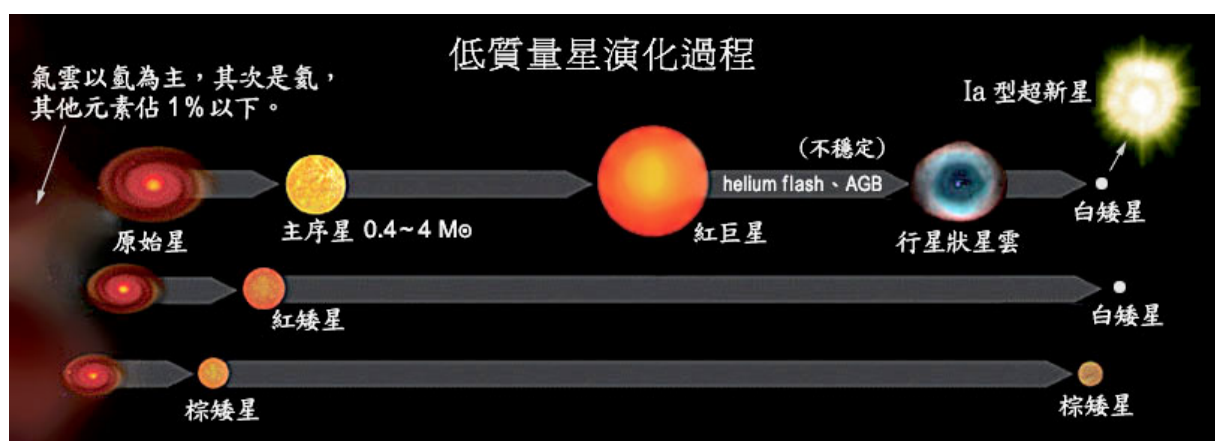
光壓力動畫：

<http://forum.hkas.org.hk/viewthread.php?tid=4076&extra=page%3D8>

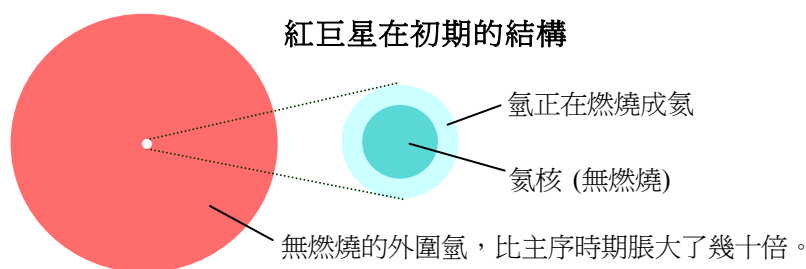
星的一生完全由它的質量決定，質量越大，燒氫越急速，壽命亦以幾何級數劇減。理論上星的主序壽命大約與其質量的 2.5 次方成反比。太陽的壽命約為一百億年，現在是中年，五十億年後它將會失去核能而壽終； $10 M_{\odot}$ 的星，壽命只有三千萬年； $30 M_{\odot}$ 以上的星，壽命不足二百萬年，至於 $0.5 M_{\odot}$ 的星，壽命將有五百億年，比已知宇宙歲數還要持久。



----- 低質量星 -----

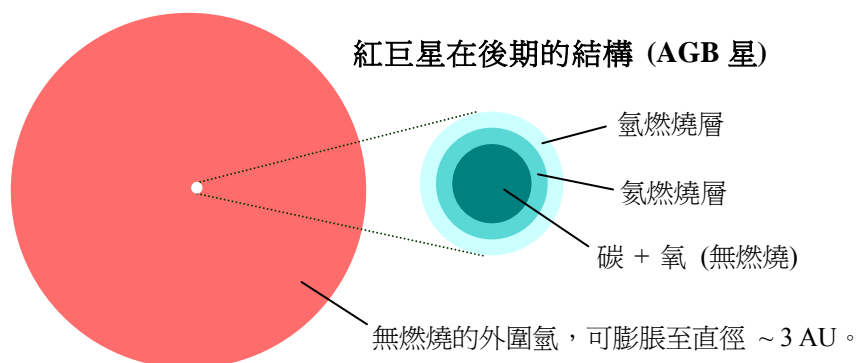


如果主序星在 $0.4 \sim 4 M_{\odot}$ 之間，氫燃燒由質子-質子反應鍊主導，產物是氦，小部份氫則經稍高溫的 CNO 程序燃燒，產物是氦、碳、氮、氧 (見前講義《太陽》)。核心的氫燒完後開始塌縮，核心的溫度變得更高把上層的氫燃點起來，這一層的熱力又令非燃燒的外圍氫盡量膨脹，結果星的直徑擴大了幾十倍，但膨脹會令表面冷卻至 $\sim 4000 \text{ K}$ ，這就是我們認識的紅巨星 (red giant)，例子有金牛座的畢宿五 (Aldebaran)、牧夫座的大角 (Arcturus)。



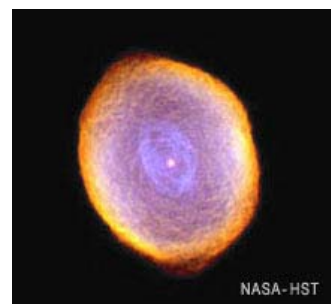
另一方面，在氦核外邊的氫不斷燃燒成氦，氦核的總質量越來越大，中心溫度越來越高，到了一億度便觸發另一種聚變：氦燃燒成碳和氧。如果星的質量偏低，氦燃燒來得很突然，我們稱之氦閃 (helium flash)，它有點像在星核內的小爆炸，不過從表面看不出來。根據理論，氦閃不會使整個星體瓦解，只有 $1.4 M_{\odot}$ 以下的核心才有氦閃，大質量星因為內部壓力較大，氦燃燒是漸進的，因此沒有氦閃。

氦燃燒後約一億年，紅巨星的演化到了後期，在核心的氦已全部變成碳和氧，但溫度不足六億度，碳氧沒有繼續燃燒，在中心外圍的氦層和氫層則繼續燃燒令體積更加膨脹，這時的紅巨星有個特別的稱呼：AGB 星 (asymptotic giant branch star 漸近支巨星)。

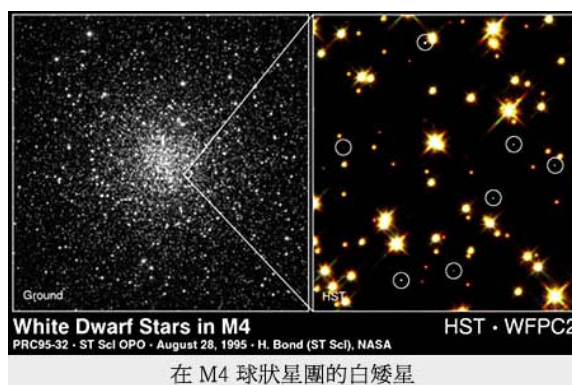
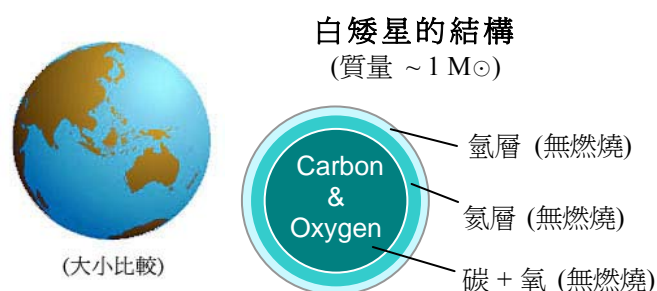


所有 AGB 星的光度都不穩定，因為體內強烈的對流作用把內層物質混合後升上星的表面，特別是 C₂、CH、CN，在分光儀可以見到它們的譜線，那些含炭特多的 AGB 星稱為“碳星”(carbon stars)。

另一方面，星的表面常刮“星風”(stellar wind)，太陽和所有主序星都有星風吹走自身的物質，但質量流失不算嚴重，AGB 星吹的風卻猛烈得多，可以一次過拋出大量物質，多次拋出後，光亮的核心及周邊部份便顯露出來，流失的物質則被吹成氣殼，稱“行星狀星雲”(planetary nebula，請參閱前講義)，過後氣殼散失為星際氣體和宇宙塵，留下的部份稱為“白矮星”(white dwarf)。白表示它的溫度很高，例如天狼伴星有二萬多度；矮表示它的直徑小如地球，不過白矮星是毫無核能的星骸，它會逐漸冷卻直至無光。目前已知最低溫的白矮星仍有五千度，無光的“黑矮星”未曾發現過。



行星狀星雲 IC418 (在天兔座)



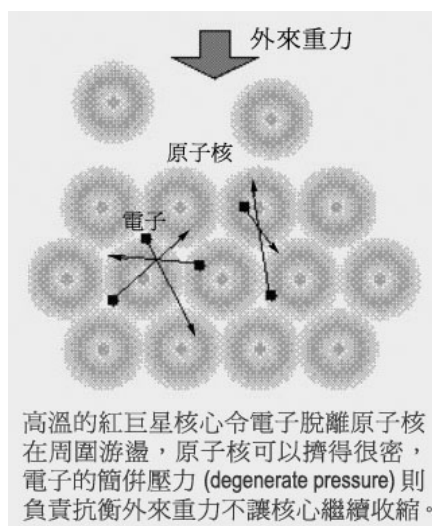
比太陽質量明顯地小，溫度不足 4000 K 的星叫紅矮星 (red dwarf)，它們十分長壽，要今仍在主序，估計它們將會平靜地燃燒，最後變成白矮星，例子有豺狼座的 Gliese 229A、最近我們的比鄰星和第二近的巴納德星。沒有能力燒氫的星叫棕矮星 (brown dwarf)，質量不足 0.08 M_☉，它們的色溫太暗，要靠紅外線才找到。右圖是太陽、紅矮星、棕矮星與木星的比較。



白矮星的密度

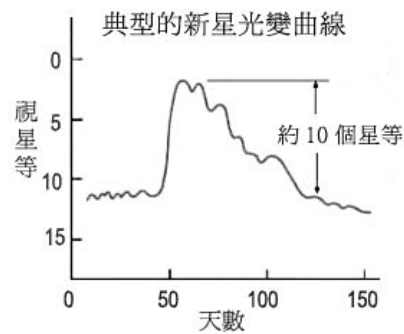
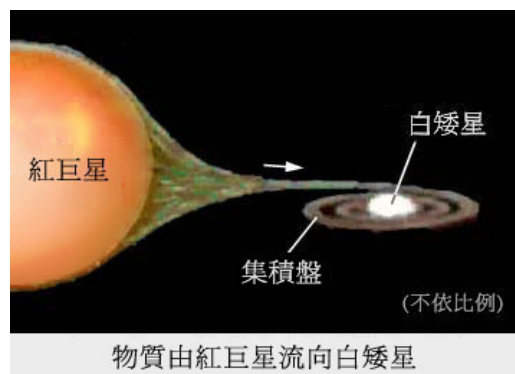
理論證明，白矮星的質量不會大過 1.4 M_☉ (Chandrasekhar Limit 錢德拉塞卡極限)，體積像地球，平均密度 1 公噸 / cc！這樣大的密度如何達成呢？我們不妨再看紅巨星在後期的結構：這時核心溫度超過一億度，所有電子早已脫離原子核在周圍游盪，沒有電子層阻隔，原子核可以擠得比常態更緊密，核心密度達到 1 公噸 / cc 並不出奇。同樣地，在原子核四周的大量電子也擠得很密，到了某個程度，電子因擠得太密而出現一種抗拒外力的壓力 (正式說應是 Pauli exclusion principle *)，稱“電子簡併壓力”(electron degenerate pressure)，它會抗衡核心的重力場縮直至適合的密度為止，但不會遵從氣體的常規，即是**簡併壓力不會跟隨溫度而改變**，即使將來核心變成單獨的白矮星，只要質量不超過 1.4 M_☉，體內的電子簡併壓力仍然足夠抗衡外來重力。

【* Pauli exclusion principle <http://apod.nasa.gov/apod/ap100228.html>】



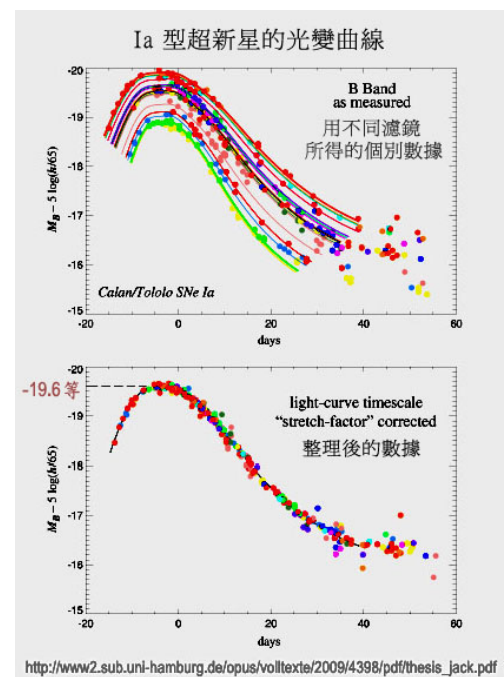
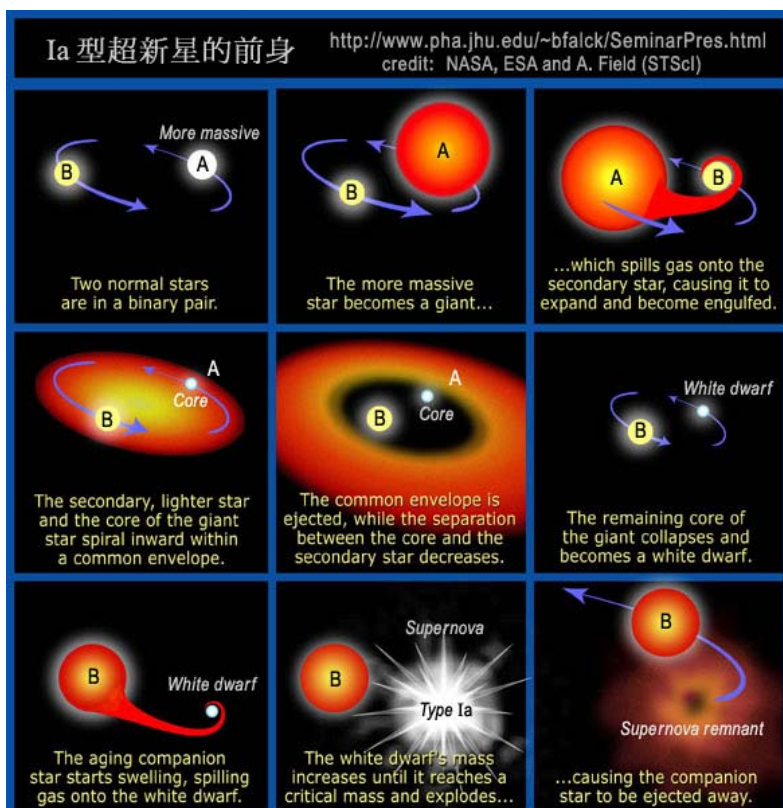
新星、Ia 型超新星 (白矮星可以借屍還魂，或是提早毀滅！)

有一種近密雙星由紅巨星和白矮星組成 (下圖)，當紅巨星膨脹過大時，表面的氫物質會流向白矮星並且累積在其表面上，累積至核聚變的觸發溫度時，在白矮星表面的氫便燃燒起來成為亮度突增的“新星” (nova)，氫燒完後白矮星的亮度回降。由於星體內的電子簡併壓力不受表面氫燃燒的溫度影響，原有的直徑和密度不致受損，所以白矮星仍然完整，也可以重演新星現象，例如蛇夫座的 RS Ophiuchi，二十世紀內曾有四次新星爆發，靜止亮度 12 等，爆發時約 2 等。在銀河系，平均每年有四十次新星爆發。

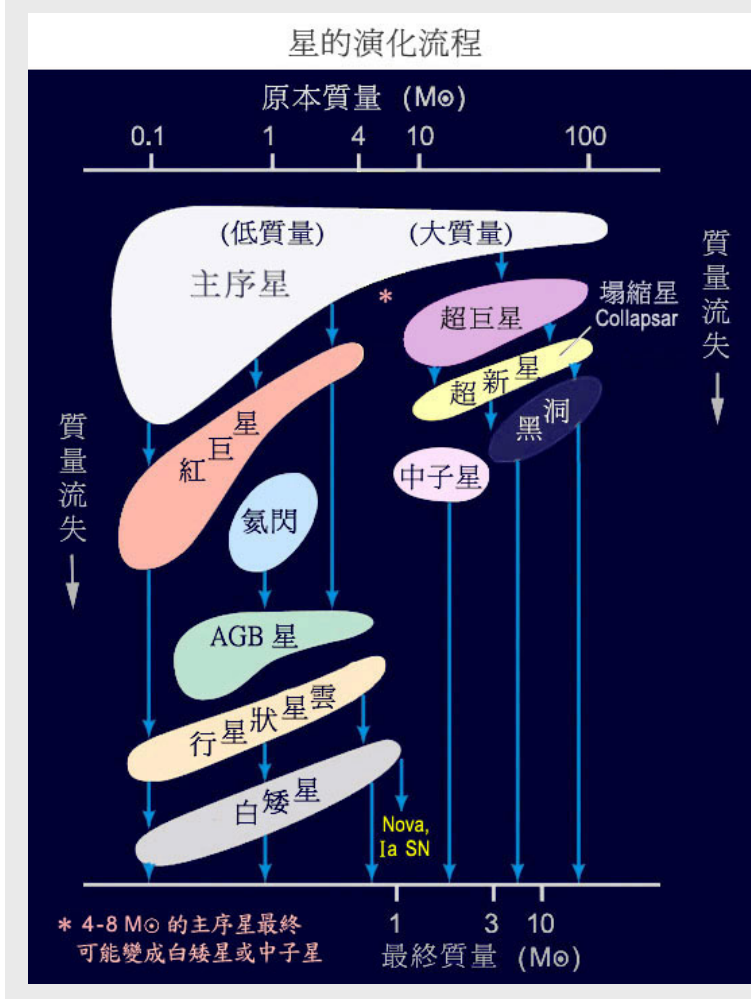


如果上圖的白矮星吸取物質過度令體重接近 $1.4 M_{\odot}$ (錢德拉塞卡極限) 的話，體內的電子簡併壓力就不敵外來壓力了，於是星體再次塌縮產生高溫，到了六億度，碳燃燒開始，與碳同在的氧是極佳的助燃劑，碳氧反應是極端猛烈的，結果白矮星迅速瓦解成為“Ia 型超新星” (Type Ia supernova)，Ia 是超新星分類中的專用型號，也是分類中最光亮的。由於所有白矮星在爆發前的結構和質量 (碳 + 氧 $\approx 1.4 M_{\odot}$) 都差不多，因此 **Ia 型超新星的**最大光度幾乎一樣，相當於絕對星等 **-19.6**，可以作為量天尺，不過 Ia 型的數量有限，這把量天尺不是時常用得着。(量天尺在前講義已介紹過了)

下圖是 Ia 型超新星由前身至爆炸的始末過程：



----- 小結 -----



說到這裡，我們可以把低質量星 ($< 4 M_{\odot}$) 的演化編成流程圖，大質量星 ($> 4 M_{\odot}$) 的演化流程也展示在圖上，它將在下一節論述，現在先重溫這些要點：

- 銀河系的星分佈像金字塔，質量越大，數目越少，星的壽命也越短。
- 星在演化途中一定有質量流失。
- 最終質量決定了星的命運。(白矮星、中子星或黑洞)
- 白矮星的質量不會大過 $1.4 M_{\odot}$ 。
- $4 - 8 M_{\odot}$ 主序星在流程圖上的灰色地帶，演化不明確，最終可能變成白矮星或中子星。

----- 大質量星 -----

大質量星的數量不多，壽命又短，已觀察過的多數是離開主序的超巨星 (supergiants)，它們的顏色有紅有藍，像獵戶座的參宿四和參宿七，兩星的質量相若但顏色和直徑卻截然不同，原因可能是參宿四已經十分衰老，因此呈低溫的紅色，參宿七的前身是藍色大質量星，現在還未衰老到紅色低溫的階段。(實情是否這樣，我們未能肯定。)



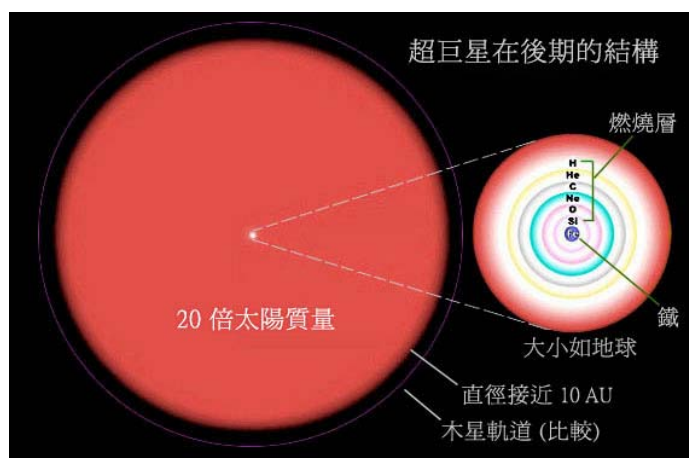
超巨星：參宿四 (Betelgeuse) 和參宿七 (Rigel)

超巨星的核聚變比紅巨星更多樣化，基本次序見下表：核聚變的產物完全由星的質量和核心溫度決定，例如小於 $4 M_{\odot}$ 的星，氫燃燒後便停止，產物有碳、氧； $10 M_{\odot}$ 以上可以令核心溫度更高，核聚變一直到鐵，不過鐵再變需要吸收外來力量，本身不會釋放核能，故此鐵之後便停止聚變了。

星體內的主要核聚變階段

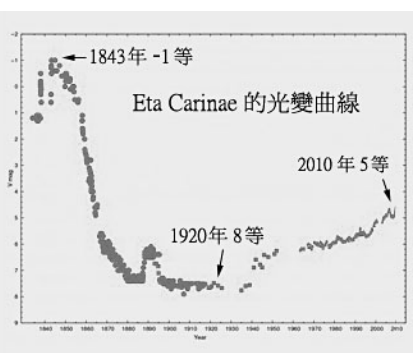
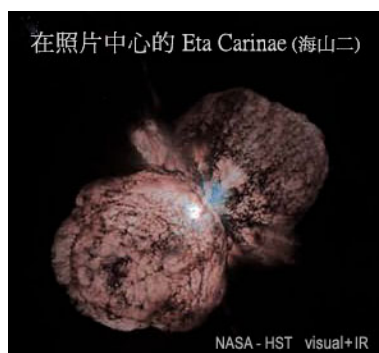
核聚變次序	主要產物	燃燒的條件		燃燒持續時間 (以星質量 $\approx 20 M_{\odot}$ 計)
		最小的星質量	核心溫度	
氫燃燒	氫	$\sim 0.08 M_{\odot}$	$\sim 1.5 \times 10^7 \text{ K}$	700 萬年
氦燃燒	碳、氧	$\sim 0.4 M_{\odot}$	$\sim 1 \times 10^8 \text{ K}$	70 萬年
碳燃燒	氧、氖、鈉、鎂	$\sim 4 M_{\odot}$	$\sim 6 \times 10^8 \text{ K}$	600 年
氖燃燒	氧、鎂	$\sim 8 M_{\odot}$	$\sim 1.2 \times 10^9 \text{ K}$	1 年
氧燃燒	鎂、矽、磷、硫	$\sim 10 M_{\odot}$	$\sim 1.5 \times 10^9 \text{ K}$	半年
矽燃燒	鐵	$> 10 M_{\odot}$	$\sim 2.7 \times 10^9 \text{ K}$	1 天

由於核聚變的先後次序，在後期的超巨星都會呈現像洋蔥的多層結構，以 $20 M_{\odot}$ 為例，核心由外至內的主要層數有氫、氦、碳、氖、氧、矽和鐵，每層形成的時間不等，氫燃燒要經歷約 700 萬年（見上表），氦燃燒要 70 萬年，矽燃燒只須 1 天，矽之後的鐵無法繼續生產核能，於是核心首先進行重力塌縮，在外層的氫也跟隨塌縮，最後核心反彈下塌物質，產生激烈的震波把星體爆炸**，即是我們認識的“超新星”(supernova)。爆炸的極高溫使核心物質蛻變成比鐵更重的元素，包括鋅、銀、錫、金、水銀、鉛、鈾等等，爆炸也把這些重元素擴散到星際空間，所以下一代的星都含有重元素。



【** 震波原理請參閱 <http://forum.hkas.org.hk/viewthread.php?tid=5680&extra=page%3D1>】

在核聚變途中，超巨星內的對流作用會把內部物質帶到星面（見前講義所述的不規則變星），因此星面常刮星風 (stellar wind) 把自身的物質拋出，星的質量不斷流失。那些質量特大 ($> 20 M_{\odot}$)，溫度很高，質量流失多的超巨星有一個專名，稱 WR 星 (Wolf-Rayet stars)，在大犬座的 HD 56925 正是一個例子，現在它的質量仍有 $40 M_{\odot}$ ，拋出的物質形成發射星雲 NGC 2359，星雲裡的氣泡清楚可見。另一罕有的 WR 星是船底座的 Eta Carinae，現時質量約有 $100 M_{\odot}$ (可能是兩顆大質量星之和)，十七世紀時亮度 4 等，1843 年爆發至 -1 等，2010 年時 5 等，照片顯示 Eta Carinae 拋出兩瓣星雲物質，但奇怪沒有完全瓦解，將來它會否變成超新星，無法預料。

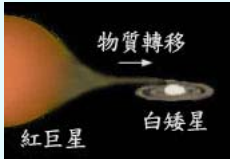


At the picture center is a massive WR star called HD 56925. It is ejecting large amount of mass that forms the surrounding emission nebula NGC 2359 (dubbed Thor's Helmet Nebula / the Duck Nebula).

超新星

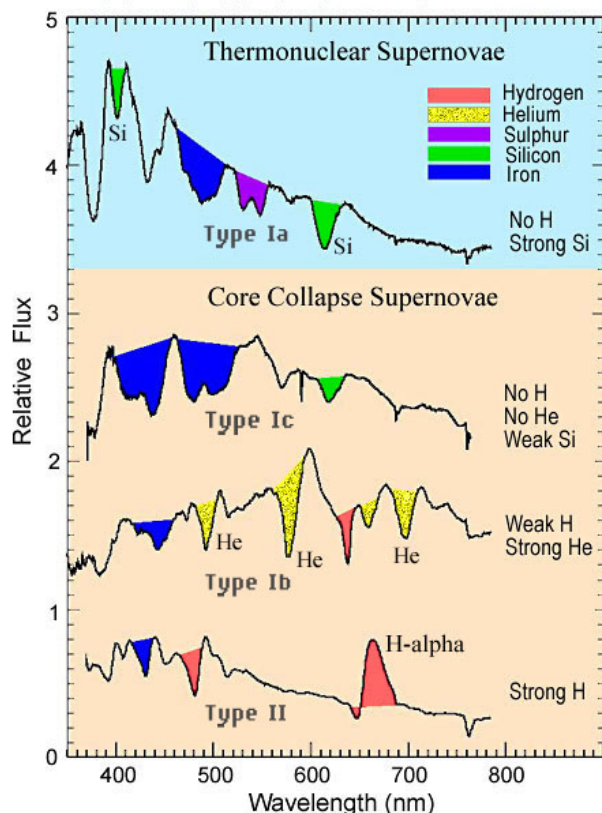
根據前述的演化流程圖，約 $4 M_{\odot}$ 以下的主序星在壽終時不會爆炸，只會變成白矮星，由白矮星而來的 Ia 型超新星是少數例外。 $4 \sim 8 M_{\odot}$ 的星在流程圖的灰色地帶，臨終前可能會爆炸，也可能不爆，如果不爆，它會保留行星狀星雲或白矮星形態。超過 $8 M_{\odot}$ 的星多數會爆炸，臨爆前瞬間會釋放中微子，從爆炸時的光譜，我們可以推斷超新星的前身結構和所屬類型。下表簡列超新星的分類和特徵，留意 Ia 型只與低質量的白矮星有關；Ib、Ic 和 II 型的前身都是大質量的超巨星，分別在於爆前有無流失氫外層或氦外層；超新星並非常見現象。

超新星的特徵

超新星	前身	爆炸成因	爆炸時的光譜特徵	最大光度
Ia 型	在近距雙星系統內的白矮星。 	白矮星向對方搶掠物質過度，引致體內壓力和溫度增加，終於產生激烈的碳氧燃燒而爆炸。	無氫，有明顯電離矽吸收線 (Si II)，矽線是碳氧反應的固有特徵。	約相當於 -19.6 絕對星等，可作為“量天尺”。
Ib 型	超巨星，已流失氫外層。	超巨星核能殆盡，核心首先重力塌縮成為超密度的硬體，外層物質也跟隨塌縮直至被核心的硬體反彈，反彈的震波高速向外伸展令整個星體爆炸。	無氫，有明顯中性氦 (He I)。	比 Ia 型暗。
Ic 型	超巨星，已流失氫、氦外層。		無氫、無氦	
II 型	超巨星，氫、氦外層保持完整。		有明顯 hydrogen- α 發射線	

- Ib、Ic、II 型依光變和光譜的細節再分為 Ibc、IIP、IIL 等次型。
- 在銀河系，超新星平均每 50 年才出現一次 http://www.esa.int/esaMI/Integral/SEMACKOVRHE_0.html

超新星的光譜 <http://supernova.lbl.gov/~dnkasen/tutorial/>



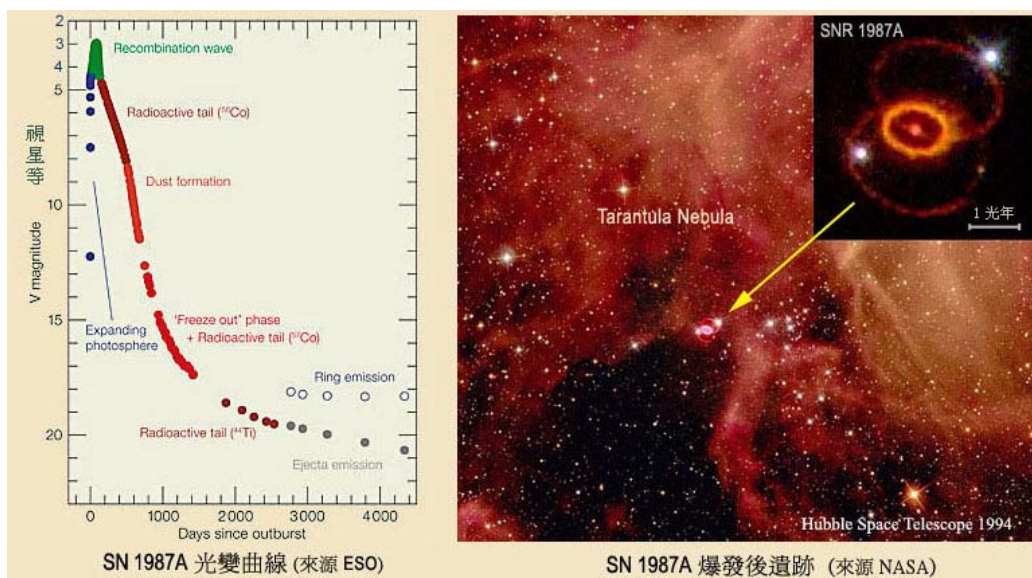
在 M51 渦狀星系的 II 型超新星 SN2011 dh 鐘志民攝於香港上: 2009 年的 M51 下: 2011.06.05 的 M51, 超新星 (SN) 亮度 14 等。



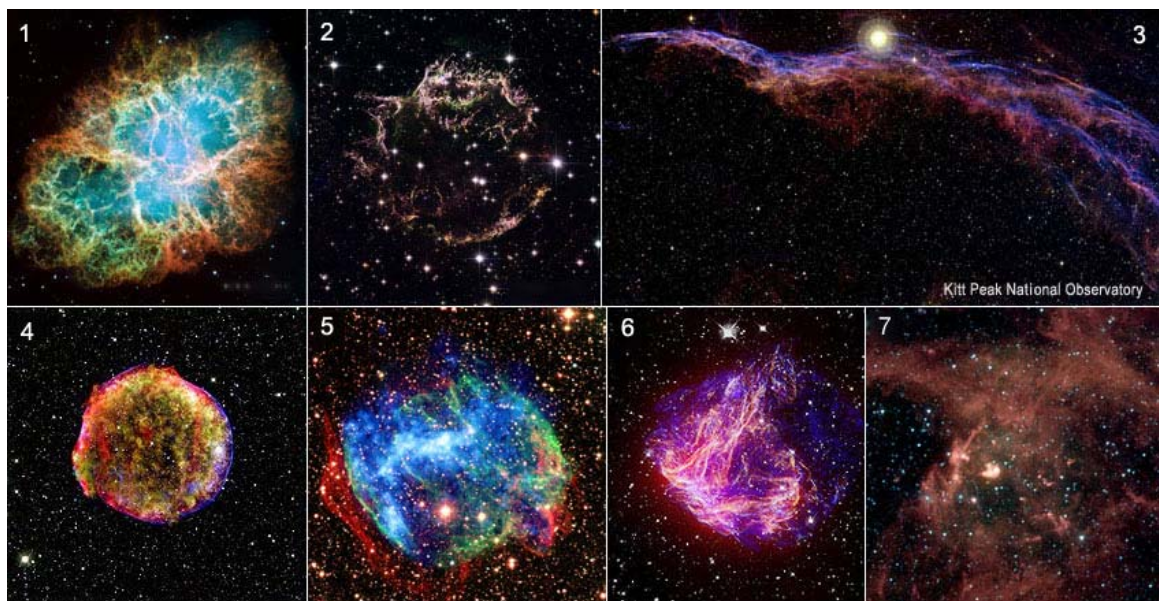
超新星殘骸

超新星爆發後向外擴展的氣體稱為“超新星殘骸” Supernova Remnants，簡稱 SNR，它們的形狀不定，有雲狀、殼狀、環狀等，差異很大。至 2009 年，在銀河系中發現的超新星殘骸有二百餘個，在大、小麥哲倫雲（我們的近隣星系）、仙女座的 M31 星系、三角座的 M33 星系也有發現。大部份的超新星殘骸都很暗，要用很大的望遠鏡才看得見，以下是一些例子：

SNR 1987A ----- 它的前身是 1987 年 2 月爆發的 II 型超新星，位於大麥哲倫雲內蜘蛛星雲 (Tarantula Nebula) 的邊緣，距離地球 16 萬光年，爆發時亮至 3 等，是四百年來肉眼可見的首個超新星，現在已暗至 20 等以下。在 1994 年，哈勃太空望遠鏡首先攝得其殘骸 (下圖)，從照片所見，它好像側看的古代沙漏時鐘 (hourglass)。研究認為超新星最初是近密雙星系統，後來兩星併合成為集積盤，盤心有一顆藍超巨星，當這星爆炸後，外拋物質在途中與星際介質相互作用，結果 SNR 便呈現沙漏時鐘的樣子了，詳見 http://forum.hkas.org.hk/web/SN1987A_Evolution_Hubble.jpg



其他 SNR：



超新星殘骸

1. 蟹狀星雲 (M1) 2. 仙后 A (Cassiopeia A) 3. 面紗星雲 (Veil Nebula)

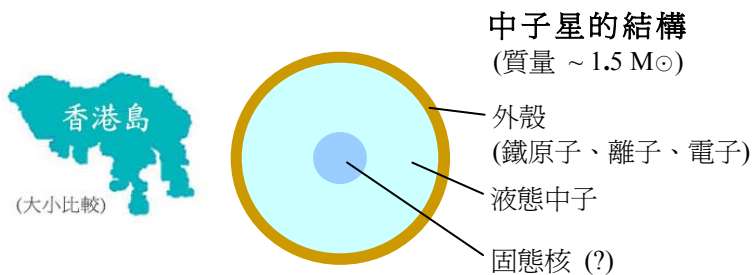
4. SNR 1572 5. SNR W49B 6. SNR N49 7. SNR N63A

圖片 NASA / Kitt Peak

中子星、脈衝星

超新星殘骸除了氣雲之外，在爆源處還可能遺下中子星 (neutron star) 或黑洞 (black hole)，視乎遺體的質量而定。理論上中子星的質量少於 $3 M_{\odot}$ ，黑洞的質量大過 $3 M_{\odot}$ ， $3 M_{\odot}$ 左右的遺體屬“灰色地帶”，它可能是中子星，也可能是黑洞。

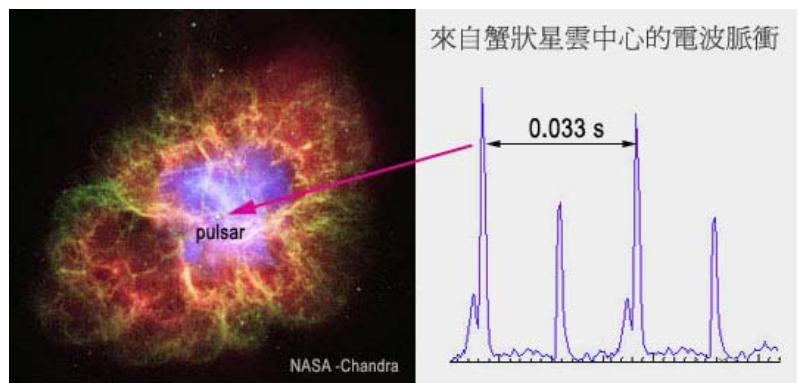
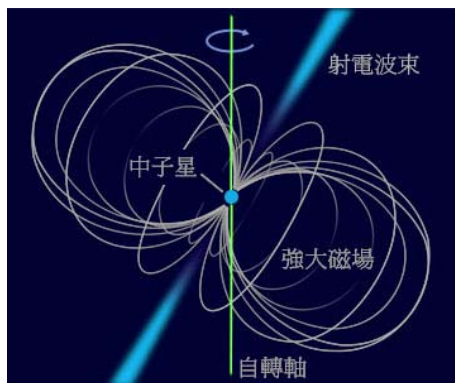
中子星原本是超巨星爆炸前的核心，重力塌縮把核心的電子和質子壓合為極度緊密的中子，換言之，核心變成一個以簡併中子 (degenerate neutrons) 為主的超硬體。電子和質子的結合也釋放大量中微子 (electron + proton \rightarrow neutron + neutrino)，中微子是亞原子粒子，它們差不多不會和任何物質產生反應，所以極易穿透星體直奔地球，它們代表超巨星爆炸的前奏，可惜只維持數十秒，我們很難及時捕獲這瞬間。當下塌物質被超硬的核心反彈時，超巨星隨即爆炸，留下的核心就是那顆中子星，它的結構以中子為主，外殼是散離的電子、質子和鐵原子，直徑約 20 ~ 30 km，平均密度 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ g/cc}$ (比白矮星密一億倍以上)，表面磁場驚人 (比地球強 $\sim 10^{11}$ 倍)。所有中子星都會快速自轉，因為在重力塌縮時超巨星把龐大的角動量轉移至小直徑的中子星身上，例如蟹狀星雲內的中子星，每秒自轉 30 次。



角動量守恆原理：溜冰員張開身體，自轉變慢；收縮身體，自轉加快。



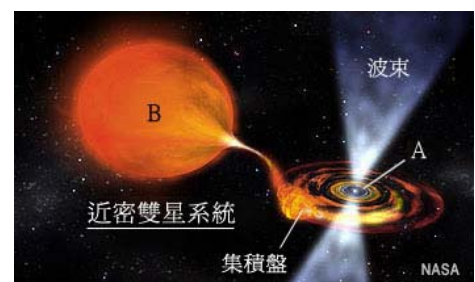
1967 年，英國劍橋大學女生 Jocelyn Bell 從射電發現脈衝星 (pulsar)，後來証實脈衝星即是中子星。中子星有非常強大的磁場，可以產生同步加速輻射，於是體內的電子以近光速沿磁場兩極外洩，形成兩束反向的射電波，如果其中一束指向地球，接收器便出現一個脈衝，如果兩束都在視線內，收到的便是一強一弱的雙脈衝。 動畫 http://forum.hkas.org.hk/web/Pulsar_animation.gif



在近密雙星系統內發現的脈衝星 (中子星)，自轉特別快，例子有 J1023，2007 年用射電觀測，它的自轉週期竟然是 1.69 ms 或每秒 592 次！原因見右圖，這個脈衝星有一個集積盤，盤內的物質旋動甚快，結果星的自轉也加快。

參考

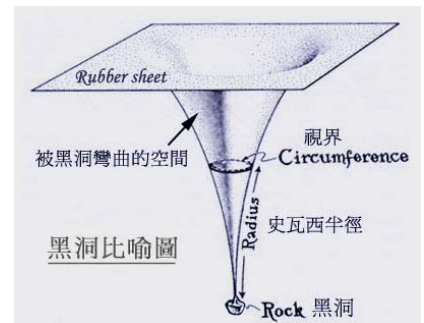
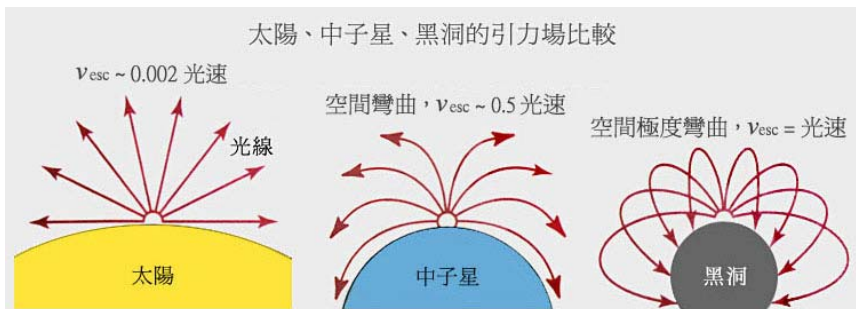
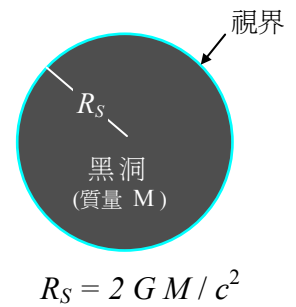
<http://www.astronomynow.com/090522Millisecondpulsarmysterysolved.html>



物質以高速由 B 流向 A (脈衝星 J1023)，結果 A 的自轉也加快至每秒 592 次。

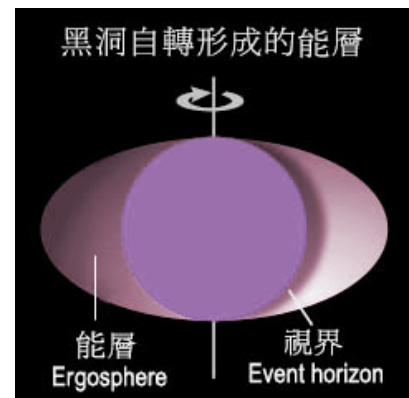
黑洞

根據理論，中子星的質量不會大過 $3 M_{\odot}$ ，由大質量星塌縮或爆炸而成的遺體，如果質量大過 $3 M_{\odot}$ ，它不可能是中子星而是一個有強大引力場但沒有形狀的黑洞。既然黑洞沒有形狀可言，我們只好以“視界”(event horizon) 把黑洞形象化，在視界面上，逃逸速度剛好等於光速 c ，任何物體走進視界之內都被強大的引力場拖進黑洞裡，就連光也無法逃脫出來。如果黑洞無自轉，視界的半徑 $R_S = 2GM/c^2$ ，這條公式由上世紀初德國物理學家史瓦西(Karl Schwarzschild) 提出，因此 R_S 又稱為“史瓦西半徑”，一個十倍太陽質量的黑洞， R_S 只有 30 km。倘若你還記得前講義《開普勒行星定律·牛頓萬有引力定律》，你會發覺 R_S 的公式與星體表面的逃逸速度公式 $v_{esc} = \sqrt{2GM/r}$ 同出一轍，後者的 v_{esc} 等於光速時， r 即是史瓦西半徑。



關於天文的黑洞概念有三：

- 由星演化而來的黑洞都有自轉和角動量，因此在這種黑洞外圍的扭曲空間也跟着自轉，這個空間稱為“能層”(ergosphere)，任何物體進入能層必定被黑洞的角動量牽制着一直旋動而無法停下來，如果這物體有“辦法”逃離能層，它會帶走一些黑洞的能量，如果它不能逃脫，它可能會被捲進視界內，這點正好說明為什麼旋動的黑洞會“吞食”鄰近的物質。
- 由星演化而來的黑洞稱為 stellar black hole，在另一方面，星系核心內的物質也會集積成“特大質量黑洞”(supermassive black hole)，兩者的來源完全不同，質量上更有天淵之別，後者的質量往往比太陽大百萬倍甚至億倍(見銀河系的講義)，所以不要把兩者混淆。為什麼它們的質量相差這樣極端呢？我們可以這樣理解：設一球狀物質(質量 M ，半徑 r) 被壓縮至密度 $\rho = M / (4/3 \cdot \pi r^3)$ ，改寫後 $r = [3M / (4\pi\rho)]^{1/3}$ ，如果 r 是史瓦西半徑，即是說球體變成一個黑洞，那麼



$$r = R_S$$

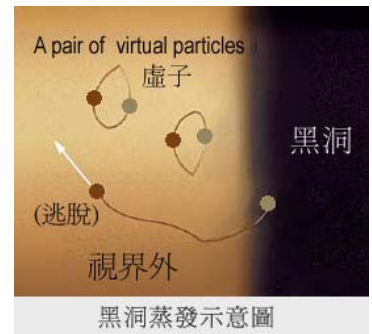
$$[3M / (4\pi\rho)]^{1/3} = 2GM/c^2$$

$$\rho = 3c^6 / (32\pi G^3 M^2)$$

質量 M	$10^9 M_{\odot}$ (2×10^{39} kg)	$10^8 M_{\odot}$ (2×10^{38} kg)	$10 M_{\odot}$ (2×10^{31} kg)
密度 ρ	0.02 g/cc	2 g/cc	2×10^{16} g/cc

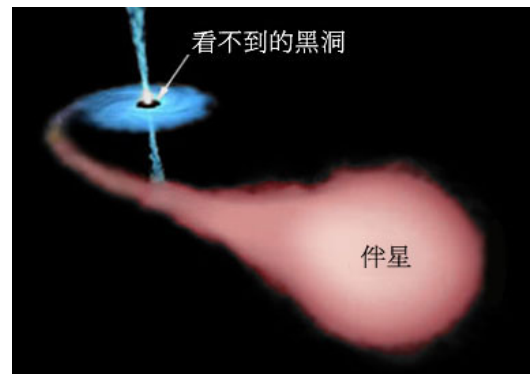
上式中的 ρ 就是物質變成黑洞所需的臨界密度。根據式子的計算，如果質量大到 $10^8 M_{\odot}$ ，臨界密度只需 2 g/cc。由此可見，在星系的核心產生一個特大質量黑洞並非難事，只要讓該處的大量物質集積再塌縮至水密度的兩倍便成。如果質量是 $10^9 M_{\odot}$ ，所須的臨界密度更小至 0.02 g/cc (等同壓縮空氣)。反觀一個 $10 M_{\odot}$ 的超巨星，它要在壽終時塌縮至 2×10^{16} g/cc 才有機會形成黑洞，這個密度比中子星大幾十倍，也說明為什麼比中子星更密的天體不是一堆簡併的中子而是黑洞。

- 根據霍金的理論，黑洞的能量可轉換成一對對的虛子（正、反粒子），平時一對虛子出現後，正反粒子立即結合而湮滅，黑洞的總能量（質量）沒有改變，但如果其中的一粒剛巧在黑洞視界之內而另一粒在視界之外，兩者便不能結合，在視界之外的一粒帶走了黑洞付與的能量成為獨立的真粒子，隨着更多真粒子在視界外產生，最後所有黑洞質量被外逃的真粒子抽盡了（黑洞蒸發）。一個 M 倍太陽質量的黑洞，理論算出它的蒸發時間 $t \approx 10^{66} (M)^3$ 年。一個十倍太陽質量的黑洞， t 大約是 10^{69} 年，遠遠超過宇宙的年齡，從這點考慮，現在的宇宙應有一定數量的星黑洞存在。



但怎樣去找尋來自星演化的黑洞呢？目前還是依賴 X 射線觀測雙星系統內有無黑洞吞食對方的跡象。假如有，它會產生不規則而短暫的 X 射線閃變 (X-ray flickering)，從閃變的持續時間（它反影黑洞的視界半徑）和閃變源的質量，我們便有理據懷疑它是否一個黑洞，目前待確的星黑洞有 Cygnus X-1、Cygnus V404、Monoceros V616、LMC X-3 等，可惜至今仍未有完全確認。

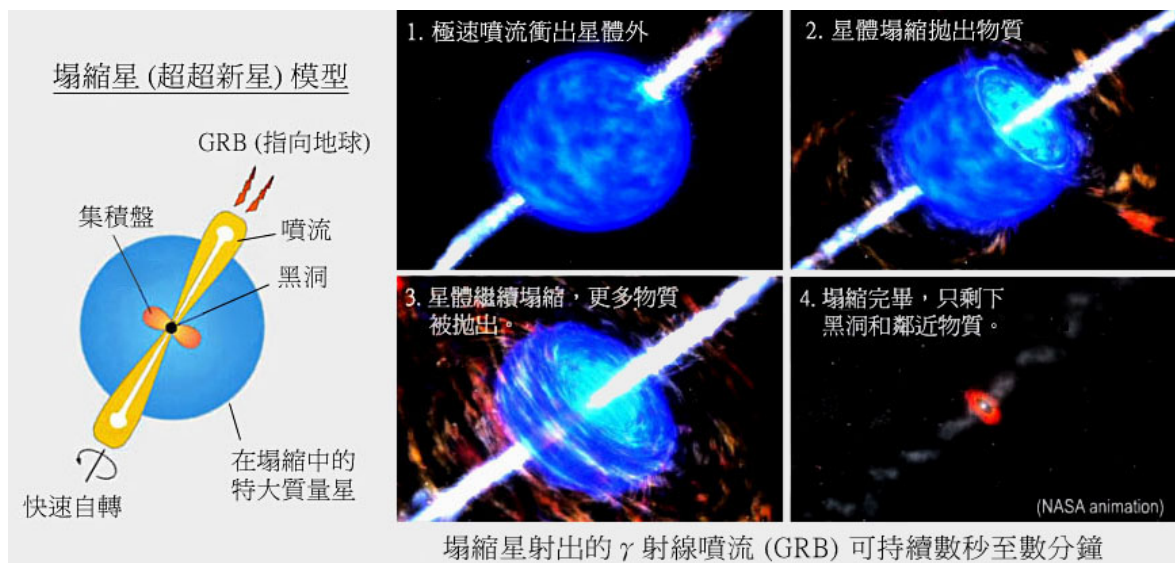
待確星黑洞名單 http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_black_hole



在天鵝座的 V404 是變星，也是近密雙星，主星極可能是 10 ~15 M_{\odot} 的黑洞，它正在吸食伴星。

塌縮星、伽馬射線暴

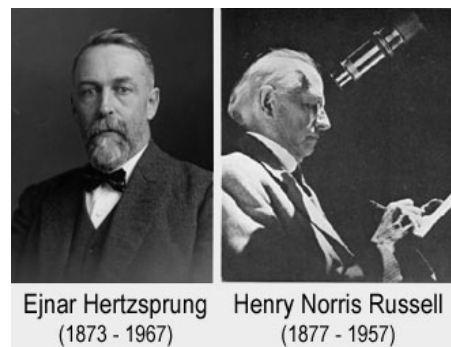
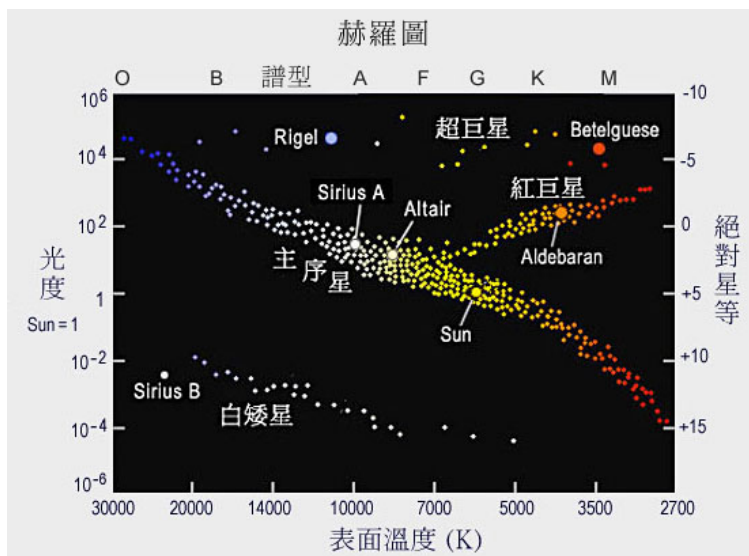
塌縮星 (collapsar) 是理論上塌縮特快的星，又稱超超新星 (hypernova)，它與 GRB (gamma-ray burst) 有密切的關係。GRB 是指在瞬間出現的 γ 射線暴，是目前已知最具威力的爆炸，比普通的超新星釋能多幾十倍。理論認為塌縮星的前身是快速自轉的大質量星 ($> 30 M_{\odot}$)，一旦失去核能，重力塌縮很快把星核壓成黑洞，高速的自轉也將黑洞周邊物質形成小集積盤，星體的部份物質沿自轉方向拋出，另一部份從中心沿着自轉軸的兩端噴出，這些噴流發出強烈的 γ 射線，當它們貫穿星體而又剛好指向地球時，這就是我們觀測到的 GRB。理論又認為持續 2 秒至數分鐘的 GRB 都來自塌縮星，因為在 GRB 遺跡上找到鐵的譜線（只有大質量星才會產生鐵），但不足 2 秒的 GRB，猜測可能來自一對中子星的併合，與塌縮星無關。GRB 在全天的分佈頗為平均，每年大約出現三百餘次。



動畫來源 http://www.nasa.gov/centers/goddard/mov/97789main_GRBstar2.mov

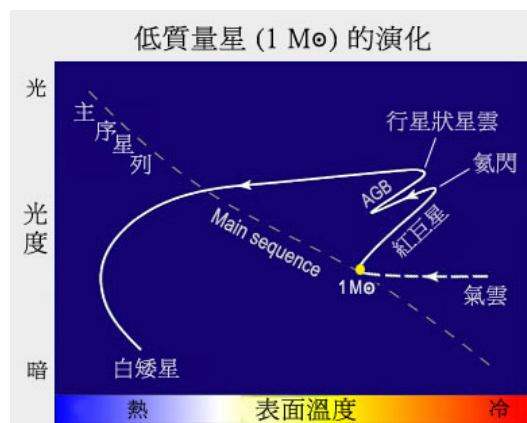
----- 赫羅圖 -----

市民以性別、年齡之類來區分，星星也一樣，它們總有一些性質讓我們識別。二十世紀初，兩位天文學家 Hertzsprung 和 Russell 都不約而同地選了星的光度（輻射功率）和表面溫度為其主要特徵，並且把它們統計在現叫的“赫羅圖”(HR-diagram) 上，圖的刻度可以改用相應量，例如光度由絕對星等代替，表面溫度由譜型或顏色（藍到紅）代替。

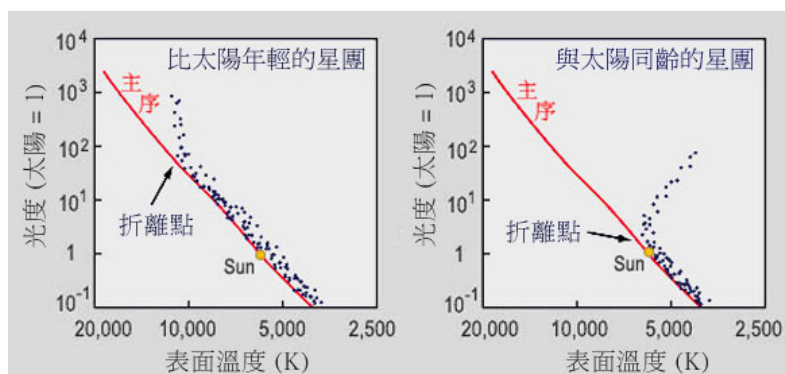


赫羅圖上有四條主要星列：主序星、白矮星、紅巨星和超巨星，每條星列代表一種星的演化階段。赫羅圖的用途甚廣，舉例：

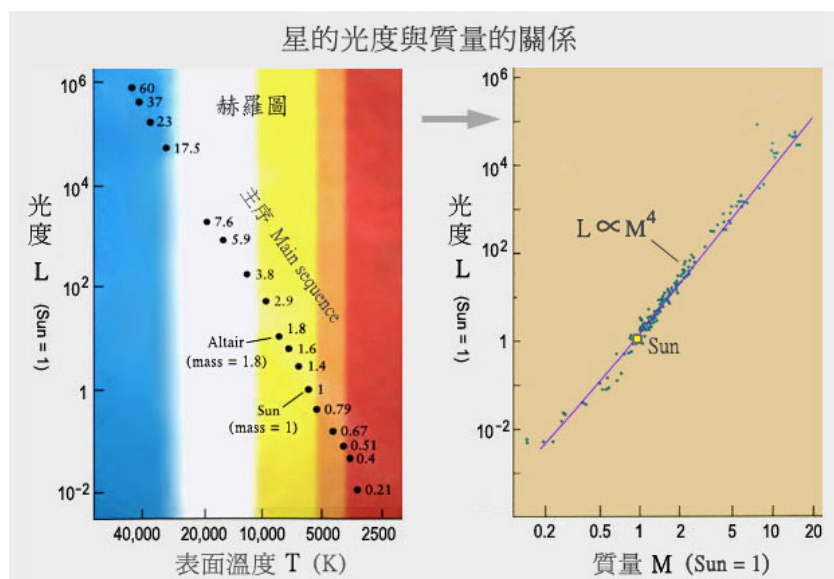
例一： 星的一生可以用右方的赫羅圖說明，一顆與太陽質量相若的星從氣雲集積而來，氫燃燒時它位於主序星列上，約五十億年後，星體將會膨脹為溫度較低的紅巨星，但龐大的直徑令光度提升，這時期的星體並不穩定(氮閃、AGB 階段)，它將會拋出許多物質成為有氣殼的行星狀星雲，然後迅速沿著圖中的左曲線演化，最終變成高溫但低光度的白矮星。



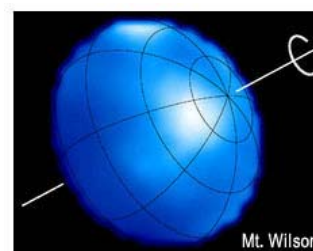
例二： 在同一星團內的星各有不同的質量，但都是同時誕生。當我們把星團的成員以赫羅圖的形式表示時，低質量星由於演化速度慢仍然留在主序，大質量星由於演化速度快便從折離點 (turnoff point) 離開了主序了，在折離點的星年齡，亦即是星團的年齡。



例三：如果把已知主序星的質量標示在赫羅圖上再轉化為 光度 - 質量關係 (下圖)，我們可見到 L 大約與 M 的四次方成正比，可見主序星的光度隨質量以幾何級數激增。



例四：上圖主序的線性部份顯示 $L \propto T^7$ (光度與表面溫度的七次方成正比)，同時 Stefan-Boltzmann 定律又指出 $L = 4 \pi \sigma R^2 T^4$ (R 是星半徑)，因此 $R^2 \propto T^3$ 或 $R \propto T^{1.5}$ ，說明主序星的表面溫度越高，它的半徑越大。以 16 光年遠的牛郎星 Altair 為例，它和太陽同在主序上，從光譜得知牛郎的溫度是 8100 K，太陽的溫度是 5800 K，比較之下牛郎的半徑較太陽大 $(8100 / 5800)^{1.5} = 1.7$ 倍。實際測量的牛郎星像右圖。



快速自轉 (週期 9 hr) 使牛郎星成扁球狀，赤道半徑 1.6 ~ 2.0 R_{\odot}

Q&A

1. 請把以下顏色的相應溫度依高低排列：橙、藍、白、藍白、紅、黃。
2. 為什麼主序星的外層氫不會燃燒？
3. $20 M_{\odot}$ 質量的星比太陽短壽多少倍？有 $200 M_{\odot}$ 的星嗎？
4. 紅巨星為何會膨脹？紅巨星的初期和後期有何分別？
5. 紅矮星與棕矮星有何分別？
6. 白矮星基本由那種元素組成？白矮星有無核動力？為什麼它的密度高達 1 公噸 / cc？
7. 新星和 Ia 型超新星有什麼重要的分別？
8. 某星系內一顆 Ia 型超新星爆發，最大視星等 = 8.6，求這星系的距離。
9. 有沒有藍超巨星，它體內的核聚變可以持續到那元素才停止？
10. 試解釋為什麼右圖的星雲像“紅四方”。
11. 為什麼超新星爆發前會釋放大量中微子？
12. 中子星的密度比白矮星大多少倍？這麼多的中子是怎樣產生的？
13. 設中子星半徑 = 15 km，質量 = 3×10^{30} kg ($1.5 M_{\text{Sun}}$)，求它的表面逃逸速度。
14. 某星自轉週期 = 23 天，塌縮後的半徑只有原來的 1 / 10000，塌縮後的自轉週期 = ？
15. 脈衝星與中子星有何關係？試舉出一顆脈衝星的實例。
16. 怎樣找尋由星演化而來的黑洞？它與星系中心的特大質量黑洞有何區別？
17. 塌縮星與超新星有何區別？GRB 和塌縮星有關係嗎？
18. 怎樣從赫羅圖鑑別星團的年齡？



答案：

1. 以最高溫排先：藍、藍白、白、黃、橙、紅
2. 氫燃燒要 $T \approx 1.5 \times 10^7$ 度，外層氫沒有這個溫度支持燃燒。
3. 約短壽 $20^{2.5} \approx$ 二千倍。
當星體輻射的壓力大過外來集積物的壓力時，星質量不會再增加，星質量的上限約在 $120 M_{\odot}$ ，因此沒有 $200 M_{\odot}$ 的星。
4. 核心外邊開始燒氫，燒氫的熱力使非燃燒的外圍氫膨脹。
在初期的紅巨星，氫還未開始燃燒。到了後期 (即是 AGB 星)，核心的氫已全部變成碳 + 氧，在核心外的氫層開始燃燒，。
5. 紅矮星有氫燃燒，棕矮星沒有氫燃燒。
6. a. 碳和氧 b. 無核動力
c. 星體的高溫使所有電子脫離原子核，原子核可以擠得比常態更緊密。
7. 同一白矮星可以爆發多次新星現象，Ia 型超新星爆發後就瓦解了。
8. 根據公式 $M = m + 5 - 5 \log (d)$ ， $M = -19.6$ $m = 8.6$ $d = 4.36 \text{ Mpc} = 14,000,000$ 光年
9. 有。核聚變會持續到鐵才停止。
10. 見 <http://apod.nasa.gov/apod/ap110323.html>
11. 因為在重力塌縮時，電子與質子被壓合成中子，同時釋放中微子，即是
電子 (electron) + 質子 (proton) \rightarrow 中子(neutron) + 中微子 (neutrino)
12. 大一億倍以上。重力塌縮把大量電子與質子壓合成中子，這些中子亦即是後來中子星的主要內容。
13. 逃逸速度 $v_{esc} = \sqrt{2GM/r} = \sqrt{[2(6.67 \times 10^{-11})(3 \times 10^{30}) / (15 \times 10^3)]} = 1.6 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 0.5$ 光速！
14. 自轉週期 = 0.02 秒，參考 <http://forum.hkas.org.hk/viewthread.php?tid=4619&extra=page%3D3>
15. 脈衝星即是中子星，當中子星的射電束掃向地球時，中子星就叫脈衝星。在蟹狀星雲的中子星也是脈衝星。
16. 用射電觀測雙星內的 X 射線閃變是否與預料中的黑洞一致。
由星演化而來的黑洞質量是 $10 M_{\odot}$ 級，在星系核的特大質量黑洞有十萬倍 M_{\odot} 以上。
17. 塌縮星只是理論上的天體，前身是特大質量的星，自轉很快，重力塌縮時的中心必定是黑洞並且產生噴流，大部份星物質沿自轉方向拋出，小部份物質沿自轉軸的兩極噴出。
超新星是觀測實體，拋出物質像 360° 方向的爆炸，遺體可以是中子星或黑洞。
持續 2 秒至數分鐘的的 GRB 就是地球探測到塌縮星的噴流。
18. 把星團的星繪畫在赫羅圖上，在折離點的星年齡 = 星團的年齡。