

5

夏夜星空



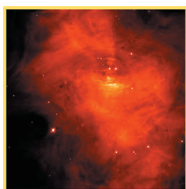
# 第五章 恆星的演化

5-1 恆星家族

5-2 恆星的形成

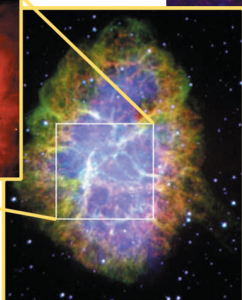
5-3 恆星的演化

5-4 恆星的生命輪迴



## 蟹狀星雲

由巨大恆星爆炸所形成，直徑約為4.5光年，目前正持續往外擴散。星雲中有恆星爆炸後所遺留的一個核心，不斷地放出強烈的輻射能量。



南河三

參宿四



## 薔薇星雲

星雲內部有剛誕生不久的年輕星團



天狼星

## 獵戶座星雲

猶如展翅的飛鳥，星雲受到內部高溫恆星的輻射而被激發，形成紅色光芒的發射星雲。

## 天狼星

為光度相差一萬倍的天狼A與天狼B所組成的雙星。天狼A的質量約為太陽3倍，半徑約為太陽2倍；天狼B的質量與太陽相當，半徑卻只有地球的5倍，為邁入死亡的白色矮星。



絢麗的夜空是恆星和星雲交織的世界（即圖 5-1）。恆星與恆星之間幾近真空，每立方公分的體積只包含約一個物質粒子，以氫氣為主，塵埃顆粒更少。在某些區域，這些星際物質會聚集成濃密的雲氣，常隱伏著許多剛形成的恆星；同時，恆星的劇烈活動也會釋出氣體，散逸在星際間，成為星際物質的一部份。星雲與恆星之間密切的交互作用，在在都展露著宇宙生生不息的契機。

木星

土星

### 畢宿星團與畢宿五

幾顆亮星呈V字型排列，距離地球約130光年，是距離我們最近的星團。位於V字左側頂端的畢宿五，為體積異常膨大的紅色巨星。

### 昴宿星團

由數百顆的年輕恆星所組成，以肉眼就能直接看到其中的六、七顆亮星，俗稱「七姐妹」，整個星團為藍色的反射星雲所籠罩。

### 馬頭星雲

為濃密氣體分子所組成的黑暗星雲，因溫度低，在背後星光的襯托下，才如皮影戲一般，被勾勒出昂首的馬頭外形。



## 5-1 恆星家族

恆星的顏色與表面溫度有關，亮度則受到恆星光度與距離的影響。恆星光度與表面溫度的關係。如圖 5-2 的赫羅圖。從圖中可發現，大部份恆星都座落在從左上角延伸至右下角的帶狀區域，是為**主序帶**；分布在主序帶上的恆星，就是**主序星**，太陽正是主序星中的一員。少部份的星體分布在右上方及左下方，分別稱為**紅巨星**與**白矮星**。分布在赫羅圖上不同區域的星體會有何不同的特性呢？

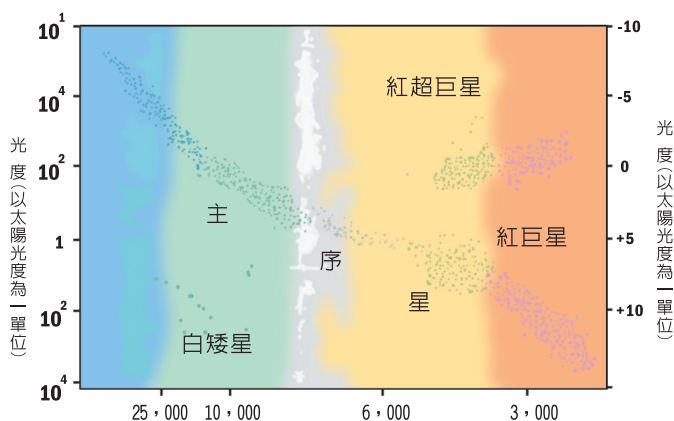


圖 5-2 恆星的赫羅圖分布，其中縱座標的光度與橫座標的表面溫度都是對數值，且習慣上橫軸溫度由右到左愈來愈高。

主序帶從右下角往左上角延伸，恆星的光度和表面溫度都越來越大。恆星的表面溫度愈高，即表示其表面單位面積所通過的輻射能量愈多，紅巨星與表面溫度相當的主序星相較之下，光度大得多，顯示體積應相當龐大，密度非常小；同理，位於圖中更右上方的**紅超巨星**，體積就更大。白矮星與表面溫度相當的主序星相較之下，光度很小，體積通常只有地球般

### 赫羅圖的發現

赫茨史普龍 (E. Hertzsprung) 與羅素 (H. N. Russell) 在 1911 年與 1913 年分別將恆星的絕對星等對應其光譜類型做分析圖，發現恆星在圖中會出現規律性的分布，稱為赫羅圖。恆星的光譜類型主要在反映其表面溫度或顏色。因此，赫氏與羅氏所做的分析，正是恆星光度對應表面溫度的關係圖。恆星在赫羅圖中的位置與其演化的狀態有關。



的大小，密度非常高（圖 5-3）。由恆星在赫羅圖中的所在位置，可概略了解該星體的性質。

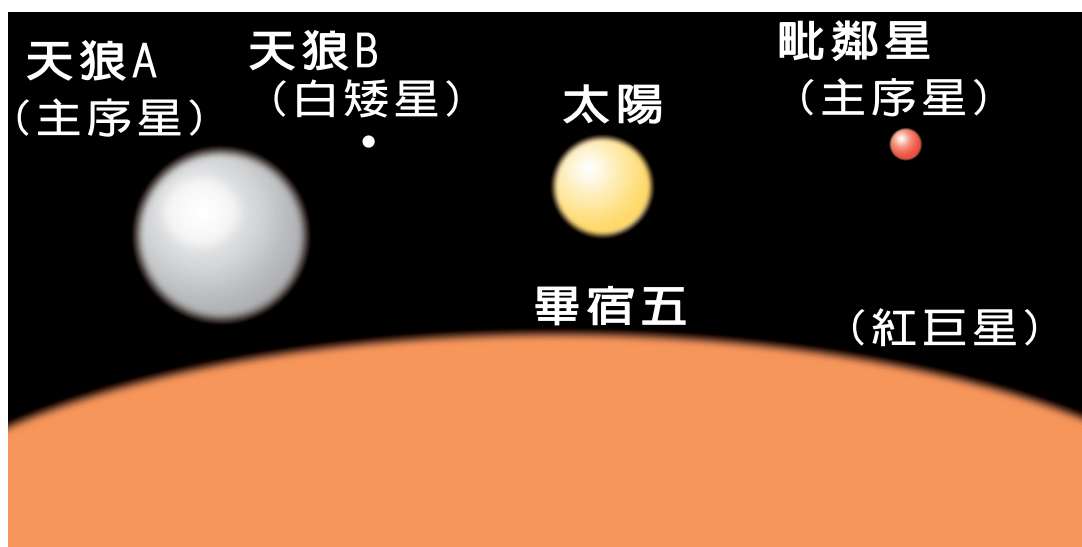


圖 5-3 紅巨星、白矮星與主序星的體積比較 ( $R_{\odot}$  為太陽半徑)。

動動腦：

白矮星的質量通常與太陽相當，但是體積只有地球般大小，那麼其密度是太陽的幾倍呢？相對而言，質量與太陽差不多的紅巨星，其半徑可能相當於地球到太陽的距離，那其密度又是太陽的幾倍呢？

## 5-2 恆星的形成

星際間瀰漫的龐大分子雲往往包含了相當於百萬倍太陽質量的物質。一旦受到附近恆星爆炸或其他因素的擾動，萬有引力會促使分子雲內局部區域凝縮成旋轉的球狀團塊，這些雲團會由中心開始塌縮，在內部形成越來越壓縮的原恆星，如同纏繭的蛹一般，為濃厚的氣體與塵埃所籠罩，在可見光波段無法觀測到，但周圍塵埃受到原恆星的加熱而發射紅外線或微

波，這些輻射比較容易穿越塵埃的障礙，我們可以在這些波段觀測剛誕生的星體（圖 5-4）。

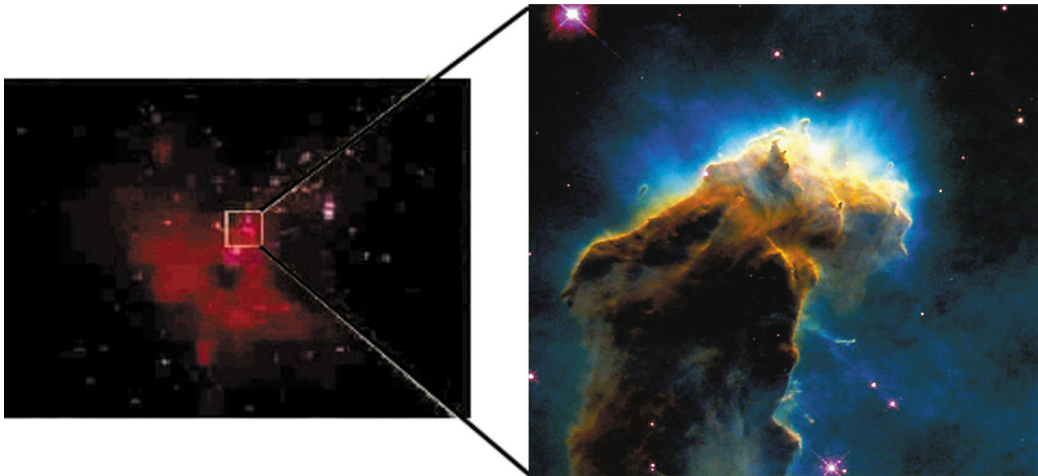


圖 5-4 （左）位於巨蛇座方向的老鷹星雲當中有許多藍白色恆星，其強烈輻射使得星雲綻放出紅色光芒。

當原恆星旋轉收縮時，周圍的雲氣會逐漸沉降在原恆星周圍，形成盤狀結構（圖 5-5）。受到原恆星的萬有引力牽引，外圍物質會沿著盤面旋入，部分物質會落入原恆星，使其質量增加，但體積持續收縮而溫度上升。收縮的原恆星與原來周圍的雲氣逐漸分離，萬有引力使得中央初生星體持續收縮，四周雲氣則漸漸消散。

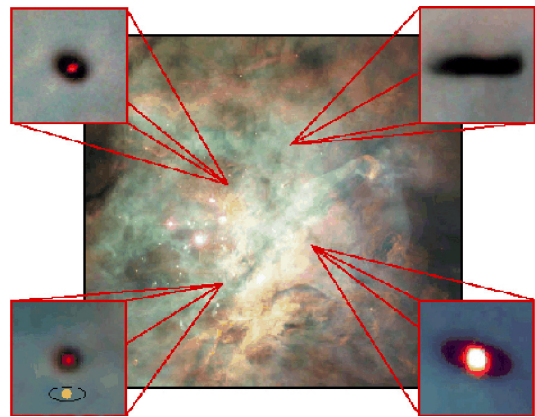


圖 5-5 獵戶星雲中原恆星周圍的盤狀雲氣，因背後發亮的雲氣而襯托出來，有些盤狀雲氣中可能正在孕育行星。

當初生星體核心溫度升高至足以引發氫核融合反應時，便能自行發光，收縮停止，成為主序星。46 億年前太陽可能就是這樣形成的，而在原始太陽周圍的盤狀雲氣裡，塵埃逐漸聚集，終而形成地球和其他行星，仍依照盤狀結構的旋轉方式，繞著太陽公轉。



初生恆星噴發出來的物質以及強烈的輻射會逐步蒸散盤面物質，如果行星凝聚的過程能在盤面物質被蒸散殆盡之前完成，很多恆星周圍可能都伴隨有行星系統。

巨大分子雲內凝縮所成的濃密雲團，可能多達上百，甚至上千顆以上，日後分別生成恆星，而形成星團。有些恆星彼此受到萬有引力的牽引而互繞，成為雙星或三五成群的聚星。

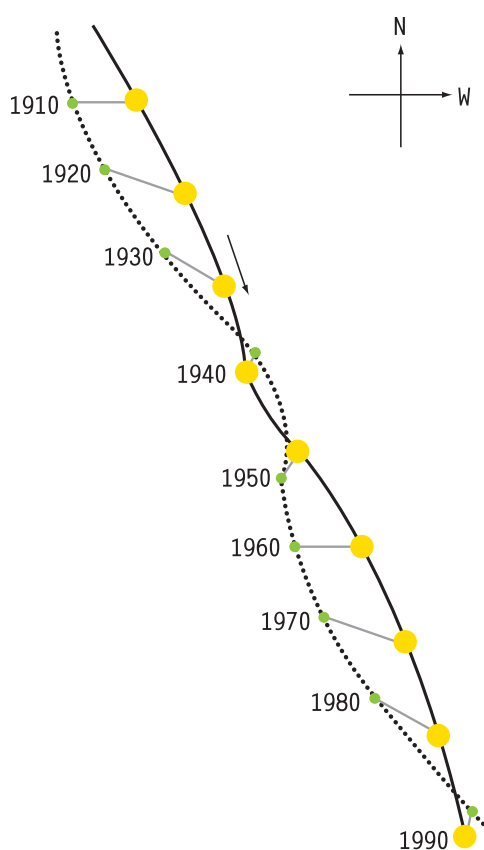
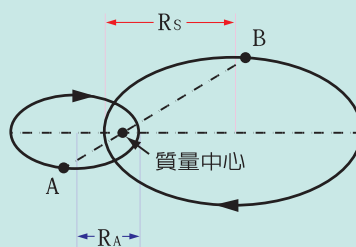


圖 5-6 天狼星是顆藍白色的主序星，與另一顆只有 8.7 星等的伴星互繞，我們看到天狼 A 在天球上的運動因此並非一直線，而似乎做波浪搖擺。

### 應用雙星推算恆星質量

雙星由兩顆恆星所組成，彼此旋繞共同的質量中心，在各自的橢圓軌道上以同樣週期互繞，如下圖所示。



$$M_A + M_B = (R_A + R_B)^3 / P^2$$

$$M_A / M_B = R_B / R_A$$

其中， $M_A$ 、 $M_B$  分別為 A 星與 B 星質量， $R_A$  與  $R_B$  則為 A 星與 B 星軌道的半長軸。P 為雙星的旋轉週期。

藉由雙星互繞軌道的半徑與週期，可得到兩顆恆星的質量。

## 5-3 恆星的演化

太陽是離我們最近的恆星，容易觀測。從太陽的現象可了解一般恆星的性質，而研究其他恆星的演化則可以讓我們預測太陽的未來。

### 5-3.1 恆星的內部

越接近太陽中心，物質的分布越緊密。在太陽最核心的區域，溫度高達 1 千 5 百萬度，是核反應產生能量的地方，所產生的能量以輻射及對流的方式向外傳播。太陽核心進行多種核反應，最主要的反應是由四個氫原子核融合成一個氦原子核。因為四個氫原子核的總質量大於一個氦原子核，核反應前、後所損耗的物質質量，便轉換成輻射能量(圖 5-7)。持續不斷的核反應使得核心區域的氫逐漸消耗，代之而起的是越來越多的氦。

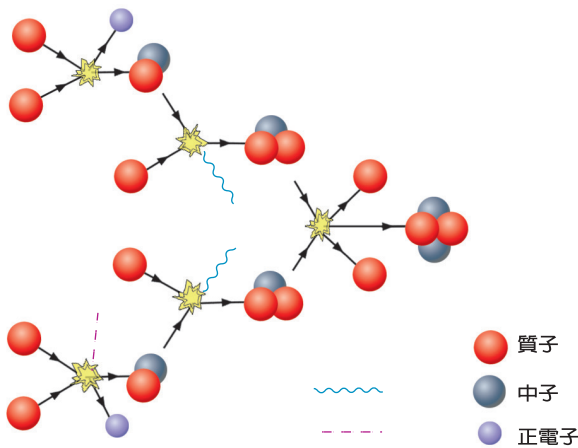


圖 5-7 氫融合成氦的核反應

太陽內部的高溫氣體形成往外的熱壓力，與拉向中心的萬有引力相抗衡(圖 5-8)。若是恆星內部因為某種變化，例如溫度稍微下降，這會造成熱壓力減少，萬有引力使得恆星體積收縮。但是如此一來，核反應便會加速放出能量而增加熱壓力，再度與萬有引力達到平衡。

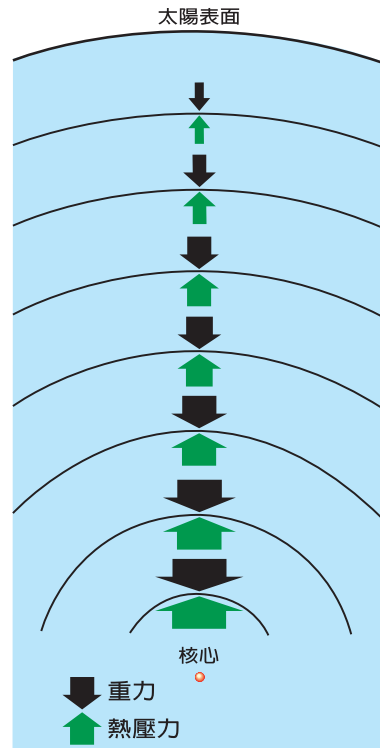


圖 5-8 太陽內部同時受到拉向核心的重力與往外的熱壓力作用，越趨近核心，重力越大，但熱壓力也越強且仍與重力維持平衡。



由核反應所提供的熱壓力與萬有引力之間的巧妙平衡，提供結構的「安全閥」，使得太陽體積因此得以維持穩定。所有的主序星也都是如此，由核心的核反應產生能量，提供氣體壓力與萬有引力達到平衡。由於質量越大的恆星萬有引力越強，核心溫度必須越高才能達到平衡，核反應因此越激烈而釋出大量能量，產生較大的光度與較高的表面溫度。主序星就是在核心區域進行氫核子反應的星體，而赫羅圖上的主序，就是不同質量星球的序列。

### 5-3.2 太陽的未來

當太陽核心的氫耗盡時，不再有氫的核反應提供能量維持足夠的熱壓力，核心因此而收縮，溫度升高，太陽開始離開主序階段。恰位於核心外圍的氣體，原來溫度不足以引發氫核反應，但是現在因為溫度隨著攀升，而得以引發氫核反應，所釋放的能量使得星球外層向外膨脹，表面溫度降低，形成如圖 5-9 的紅巨星。就在外層氣體膨脹的同時，星球的核心還是持續收縮，不斷上升的溫度終於引發氦融合或是更進一步的核反應，形成碳、氮、氧或其他較重的元素。

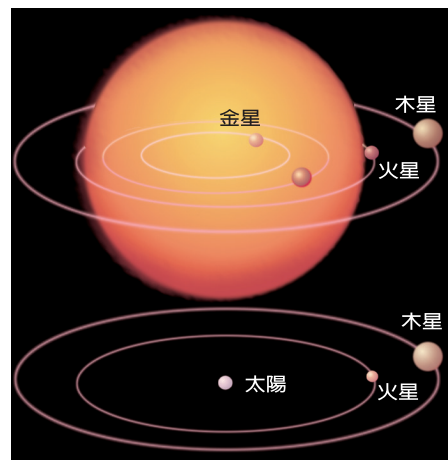


圖 5-9 太陽成為紅巨星時，將擴展至地球的軌道附近，屆時水星、金星及地球都將被太陽吞併。當所有核反應都結束後，太陽將急速收縮成白矮星。

#### 動動腦：

當太陽將進入紅巨星階段時，想像一下生存在地球的生物會面臨怎樣的環境變化嗎？

星球的核反應進入末期時，內部會發生一連串複雜的改變，結構變得極不穩定，體積會反覆膨脹和收縮，造成光度改變，稱為**變星**。星球核心區域的氫融合一旦結束，碳和氧所構成的新核心又會往內塌縮，在核心外

圍的氫氣將升溫而發生核融合，此時，外圍的氣體以每秒數十公里的速率噴出，這些遠離的氣體大多由類似氫氣之類的輕元素所組成，受到中央高溫的星體核心照耀激發而發光，稱為行星狀星雲，如圖 5-10。這些演化末期產生的現象因為在小型望遠鏡中看起來形似行星而得名，實際上與行星完全沒有關係。

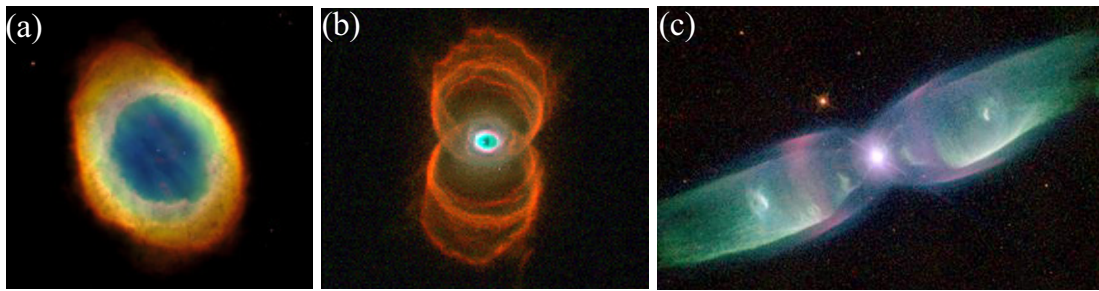


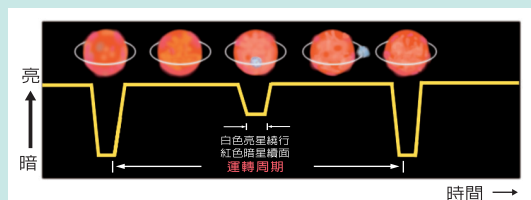
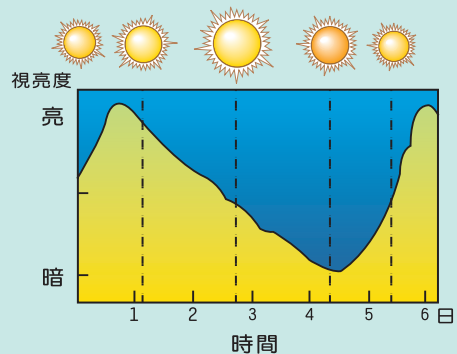
圖 5-10 (a)天琴座環狀星雲、(b)雙環狀的沙漏星雲以及(c)蛇夫座蝴蝶狀星雲都是恆星演化到末期而產生的行星狀星雲。

### 變星

變星是泛指亮度會發生改變的恆星，其中有些呈週期性變化，如造父變星與食雙星。

造父變星的亮度變化源於星體內部結構改變造成規律性的膨脹與收縮。體積與表面溫度的變化造成視亮度的改變。

食雙星的視亮度變化則是兩顆恆星互相遮擋所造成。如下圖所示，當白色星球繞到紅色星球的背後或前面時，整個系統的亮度會發生不同的明暗變化。



噴發出行星狀星雲後所留下的星體核心會往內塌縮成非常緊密的狀態，體積約只有地球般的大小，但無法達到進一步核反應所需要的溫度，核



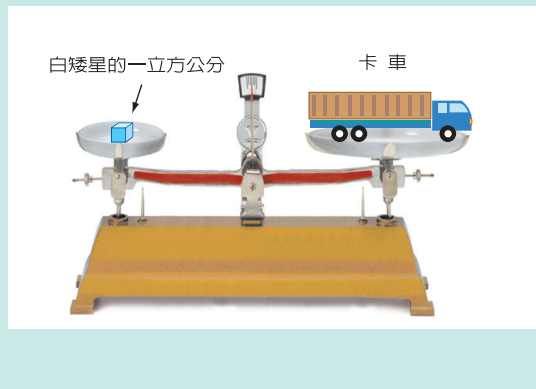
反應就停止。這些體積極度緊縮的核心，便是密度非常大的白矮星，天狼 B 就是第一顆被發現的白矮星。

由於不再有能源，白矮星會逐漸冷卻終而變成黑矮星。另一方面，行星狀星雲受到了白矮星的紫外線激發，持續發出耀眼的光芒，直到消散於星際間。

太陽現今核心的氫融合反應可再持續 50 億年左右。恆星在離開主序之後的演化非常快速，一般而言，在主序星階段所經歷的時間約占其一生的 90%。

## 白矮星

白矮星是快速自轉的高密度天體，可在 10 秒左右自轉一圈。1 立方公分的白矮星物質相當於一輛卡車的質量，表面重力約為地球表面的 10 萬倍。



## 5-4

## 恆星的生命輪迴

太陽是顆中等質量的主序星，太空裡還有許多質量比太陽大的恆星，它們的演化與太陽有何不同呢？

### 5-4.1 星跡殘夢

隨著恆星演化，其內部會進行一系列的核反應。質量與太陽類似的恆星，在氫核反應後就結束了所有的核反應。至於質量為太陽數倍的恆星，內部則會繼續進行其他核融合反應，產生更重的矽、鐵等元素。因此，在整個核融合反應末期，大質量恆星除了輕元素所構成的龐大外圍氣體外，內部是由各種重元素積聚而成的層狀結構，如圖 5-11。

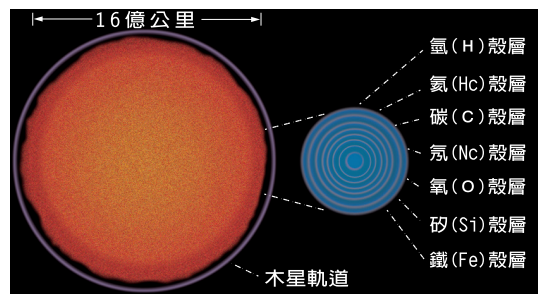


圖 5-11 大質量恆星結束所有核融合反應後，外圍氣體可擴張至木星軌道般大小，核心則由各類元素組成層狀結構，密度由外往內愈來愈大。

大質量恆星的核反應一旦結束，星體會往內急速塌縮，所產生的震波向外反彈，瞬間造成恆星外層結構瓦解，發生所謂的**超新星爆炸**，圖 5-12 即為 1987 年所觀測到的超新星爆炸事件。劇烈的爆炸使得外層氣體因擠壓而發生進一步的核融合反應，產生比鐵還重的元素，散布在星際間。另一方面，超新星爆炸也可能會擾動附近的分子雲，促發新恆星的誕生。

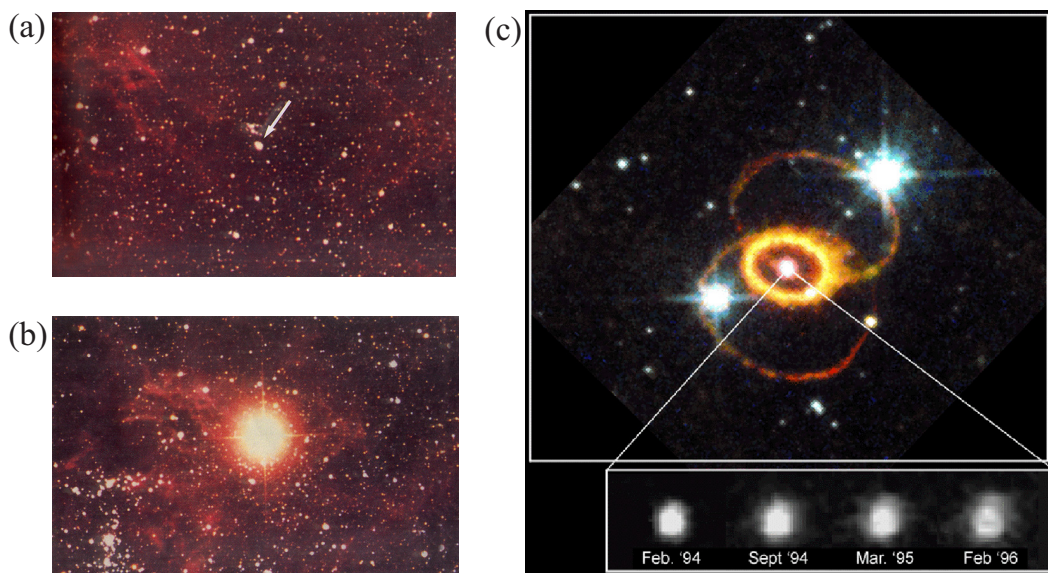


圖 5-12 大麥哲倫星系裡的 1987A 超新星，亮度由(a)爆炸前的 12 星等驟增為(b)爆發時的 5 星等左右，爆發期間所釋放的能量相當於整個銀河系所釋出的能量。圖(c)為哈柏望遠鏡近年所拍攝到的影像，圖底下白色方框內顯示噴出物在四個不同時期的變化，圖中包圍星體的黃色內環與兩個對稱的外環，則是 2 萬年前該星體演化所噴出的物質遺跡。

如第一章所述，中國宋史也曾在金牛座方向記錄超新星事件。爆發時在白天都看得到，亮度持續了一個多月才變暗，過了兩年才完全消失。今日天文學家追溯該星體的位置，發現了蟹狀星雲，也就是超新星爆炸所釋出的外層氣體(見圖 1-21)。後來又發現該蟹狀星雲中間有個天體會發出極規律的脈衝訊號，形成忽隱忽現的**波霎**，如圖 5-13。此星體原來星體的核心部分，在沒有核反應的狀態下，強烈的萬有引力使得物質往內塌縮成緊密的中子狀態，形成**中子星**。中子星的密度極高，像太陽般質量的中子星，其直徑只有約十公里。



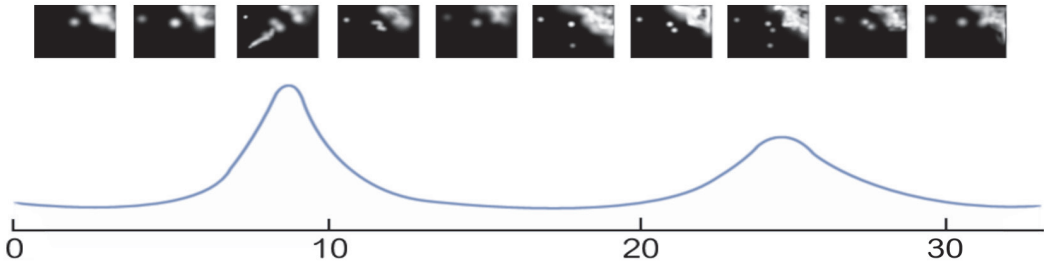


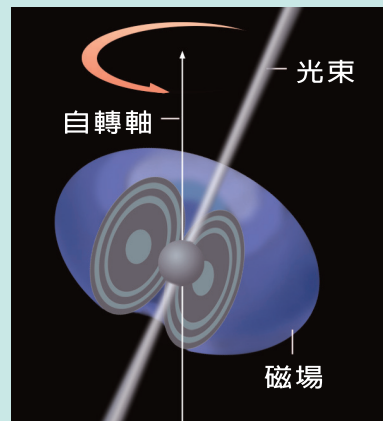
圖 5-13 在上列間隔 1/30 秒的連續照片中，箭頭所指就是蟹狀星雲內的波霎，可見其亮度上的變化。照片下方的曲線為該星體一個週期的亮度變化。

動動腦：

蟹狀星雲的直徑約為 1.35 秒差距，目前正以每秒 1,400 公里的速度在擴散，若星雲的擴散速率一直維持不變，造成該星雲的超新星爆炸事件離現在有多久？

若超新星爆炸後的殘核質量比中子星更大時，殘核會受到更強大的重力，往中心極盡塌縮，連緊密的中子都抵擋不住內縮的巨大力量。這樣的星體在很小的體積裡聚集了極多物質，周圍萬有引力極強，連光線都無法逃脫其重力束縛，因此，我們無法觀測到其內部發出的光線，就稱之為**黑洞**。觀測上可以用間接的方式推測黑洞的存在，例如，黑洞可能會吸積周圍物質而釋放 X 光，或雙星系統中黑

波霎的成因



一般相信波霎是快速旋轉的中子星。當恆星的核心收縮成中子星時，自轉速度勢必增快，若磁軸與自轉軸不平行，沿著磁軸射出的光線，會猶如燈塔的光束一般，在星際間做週期性的掃掠。若光束剛好投向地球的方向，我們就觀測到一明一滅的脈衝訊號。

洞與明亮伴星互繞，藉由觀測亮星而推論黑洞的存在（圖 5-14）。

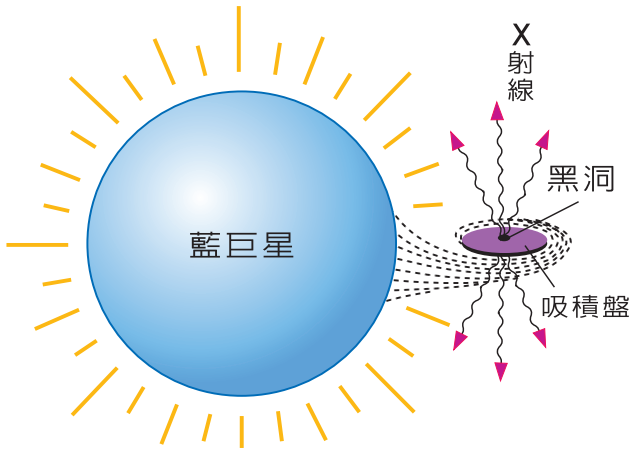


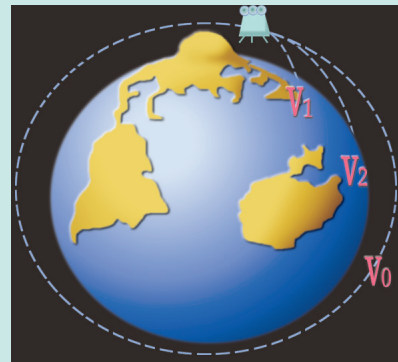
圖 5-14 天鵝座 X-1 由於發射 X 光而得名，是個疑似黑洞的天體。X-1 與一顆藍色巨星以 5.6 天的週期互繞。由於 X-1 的重力吸引，藍巨星的表層氣體沿著旋轉盤面流入 X-1。加速運動的氣體因高溫而輻射出 X 光。

### 黑洞的大小

在地表擊發炮彈，發射的速度愈快 ( $V_1 < V_2 < V_c$ )，炮彈掉落地面的水平距離愈遠。一旦炮彈的速度快於某臨界速度，就能脫離地球萬有引力的束縛，此臨界速度就是地球的**脫離速度**。某個天體的脫離速度等於：

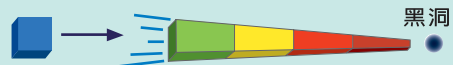
$$V_c = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

其中  $G$  為重力常數  $6.67 \times 10^{-11}$  公尺<sup>2</sup>/秒， $M$  為天體質量， $r$  為天體半徑；若將地球的質量及半徑代入，脫離速度為 11.2 公里/秒。



越靠近天體，脫離速度越大，在距離離黑洞某半徑處，脫離速度會等於光速，此有效半徑稱為史氏半徑  $R_s = \frac{2GM}{C^2}$ ，其中  $C$  為光速。

距離黑洞  $R_s$  的球面稱為事象地平面，如此稱呼的原因是在此之內脫離速度大於光速，光線無法逃逸出來，我們因此無法窺知內部的情形。黑洞質量越大， $R_s$  就越大。太陽質量的物質若擠壓成黑洞，其半徑只有約 3 公里。可是以星球來說，太陽的質量太小，重力不足以將自己縮成黑洞，只能成為白矮星。



## 5-4.2 恆星的壽命

和超新星一樣，還有一種亮度會有瞬間明顯變化的天體(圖 5-15)，稱為**新星**，但是兩者的形成原因不同。新星是由一般恆星與白矮星所構成的雙星系統，但該恆星的表層物質會流向白矮星(圖 5-16)。以紅巨星與白矮星的雙星為例，當紅巨星表層物質流匯至白矮星表面時，激烈的核反應所釋出的能量，相當於萬倍太陽光度，這就是新星突然變亮的原因。雙星系統中的兩顆組成星，照理應該是在相同環境下同時演化而成，但上述的新星中，當其中一顆還在紅巨星階段時，為何另一顆卻已演化為白矮星呢？顯然兩顆星球的演化速率有所差異，究竟是什麼因素影響恆星的演化速率呢？

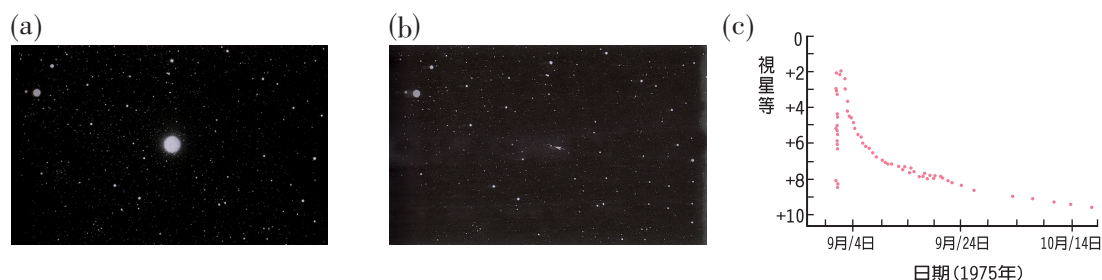


圖 5-15 編號天鵝座 1935 的新星爆發時，亮度由(a)最亮的 2 星等迅速銳減，幾個月後降至(b)11 星等左右(箭頭所指處)。圖(c)所示為此星體的亮度隨時間變化情形。

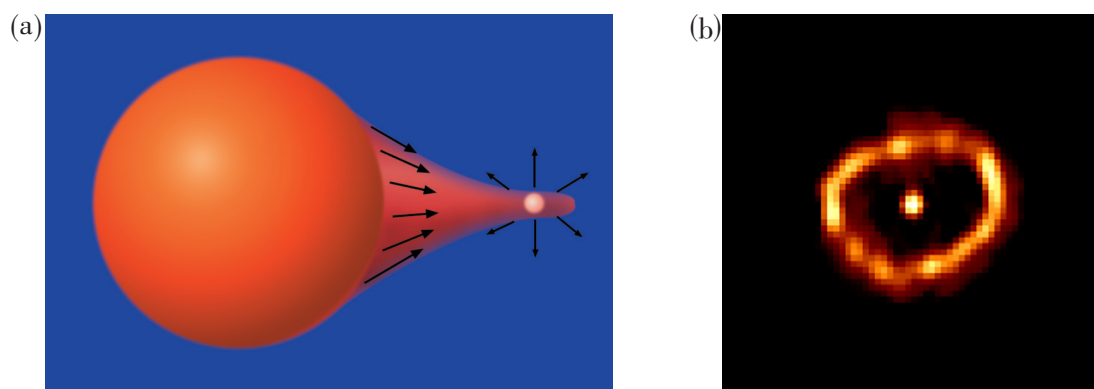


圖 5-16 (a)紅巨星與白矮星所構成的緊密雙星系統中，紅巨星以氫為主的外層氣體，受到白矮星的重力吸引，旋繞流入白矮星。因溫度驟然上升與重力擠壓而引發核反應。往外釋出能量及噴發出物質。  
(b)這些能量會激發鄰近的星際物質促其發光。圖示為編號天鵝座 1992 新星的外圍雲氣環。



主序是星球演化過程中，既穩定又最持久的階段。恆星在主序階段所經歷的時間與質量有關，質量越大，內部核反應的速率越快。因此，質量比太陽大的恆星，不須等到 100 億年就結束主序星階段，邁入後期的演化，有些大質量恆星甚至只維持千萬年而已。位於主序右下方的小質量恆星，則要在主序歷經千億年以上。這現象明顯表現在星團的赫羅圖，其中星團當中越大質量的恆星會越早脫離主序，而成為右上方的紅巨星，因此隨著時間增加，星團的主序會往右下端縮短。故藉由星團的赫羅圖可推測其年齡（圖 5-17）。

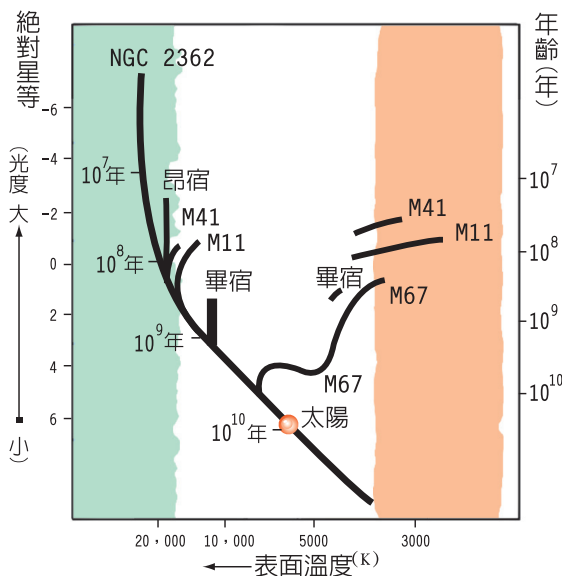


圖 5-17 因大質量恆星快速演化，在赫羅圖上星團的主序會從左上方逐漸變短，並延伸出紅巨星等類星體。位於轉折點上的主序星，內部的氫核融合反應已接近尾聲，故該恆星的主序壽命便接近所屬星團的年齡，各星團可依其轉折點的位置來估計其年齡。

人類窮其有限的一生，看不到某顆恆星從誕生到死亡的漫長演化歷程，但透過研究處於各個不同演化階段的星體，卻可以讓我們了解恆星的過去與未來。如（圖 5-18），恆星的質量影響了其生老病死的過程，然而在整個演化過程，質量並非保持不變。除了核融合的質量虧損外，恆星也有類似太陽風作用的恆星風，將物質拋灑至星際間。超新星爆炸或行星狀星雲也會大規模失去質量。殘餘的核心則依其質量大小個別演化成白矮星、中子星或黑洞等不同星體。至於行星狀星雲或超新星爆炸後擴展的雲氣，攜帶了恆星製造的複雜元素，再度回歸星際物質成為下次恆星形成的材料。隨著恆星一次又一次的生命輪迴，我們的世界才能擁有這麼多樣化的元素，來建構出生命及其賴以維生的環境。

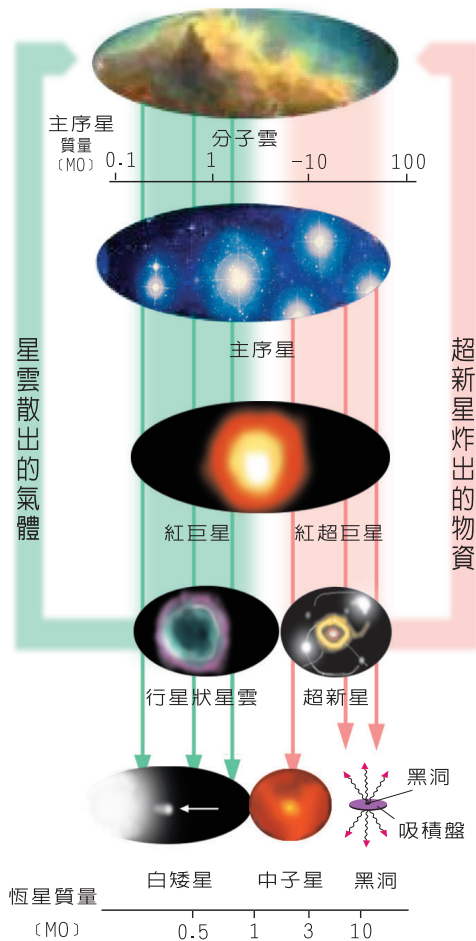
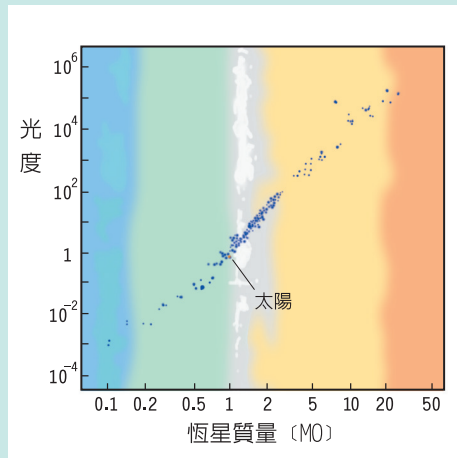


圖 5-18 恆星一生的演化都受其質量影響，上方橫軸表示恆星在主序時的質量 (M<sub>☉</sub> 為太陽的質量)，下方橫軸則是恆星演化至盡頭的殘核質量。當太陽演化成白矮星時，質量會剩不到一半，而 10 倍太陽質量的主序星，最後可能會演化成不足 3 倍太陽質量的中子星，唯有質量更大的星體才有機會變成黑洞。

### 主序星的壽命

恆星的質量 (M) 越大，光度 (L) 就越大，L 約略與 M<sup>3.5</sup> 成正比，如下圖所示。



主序星的光度是核反應速率快慢的表現，與星體核心的氫氣消耗率有關。星球處於主序階段的時間 (T)，即為核心消耗氫所需的時間，也就是正比於星球的質量 (與總共的核燃料有關) 除以光度 (消耗的速率)

$$T \propto M/L = M^{-2.5}$$

所以，4 倍太陽質量的主序星，其光度約為太陽的 128 倍，而處於主序階段的時間只有太陽的 1/32 倍，約為 3 億年左右。

## 作 業

1. 主序星、紅巨星與白矮星分別位於赫羅圖上不同的區域。這三類星體中，哪一類在星空所占的比例最多？為什麼？
2. 從赫羅圖上可發現，紅巨星的光度都很高。它們為何會發出象徵低溫的紅色光芒？反觀白矮星，內部產生的光度很低，它們為何發出高溫的白色光芒？
3. 試在右側赫羅圖上的太陽演化軌跡，填出各個演化階段的星體類別。
4. 請查詢網路或圖書資料，找出在本章頭夏夜星空範圍內的主序星、紅巨星、變星、黑洞、星雲的影像及資料。
5. 太陽形成 40 到 50 億年後才發展出如我們這般的高等文明。如果這也是文明在其他恆星衍生所需的時間，試推斷哪種主序星的附近比較容易發展出文明？

