

第十二章 恆星的形成與演化

12-1 節 恆星的形成與主序星

12-2 節 太陽型恆星的末期演化

12-3 節 超新星與中子星

---研讀本章內容後，學習者應能達成下列目標。

1. 能說出恆星是由星際介質所形成。
2. 知道主序星屬於恆星的穩定期。
3. 知道太陽正處於主序星階段。
4. 知道重質量恆星結局之一可能是中子星或黑洞。
5. 能明白中子星是超新星事件的產物。

摘要

恆星如同生物一樣，有生老病死的一生；而且不同質量的恆星，有不同的演化結局。恆星由低溫的分子雲在重力潰縮過程下形成，當中心區域溫度達到攝氏一千萬度時，促發氫融合反應，一顆恆星於焉誕生，度過短暫的「嬰兒期」後，成為穩定的主序星。

恆星的質量直接關係著表面溫度與一生的壽命。主序星的質量愈大，表面溫度愈高，其壽命也愈短。太陽是一顆質量中等的主序星，壽命可長達一百億年，如今已度過一半。

太陽型恆星形成後，度過漫長的一生，在演化末期膨脹成為紅巨星，最後成為一個白矮星，體積如同地球大小，密度卻為水的百萬倍。重質量恆星的壽命比較短，甚至不到數千萬年，其演化末期可能形成超新星爆炸，中心形成中子星或黑洞。

天文學家相信無線電脈動星便是快速自轉的中子星。在眾多超新星事件中，1054年發生的中國超新星爆炸事件是最著名的，而蟹狀星雲便是此一事件的產物。蟹狀星雲中有一個脈動週期0.33秒的電波源，被確認是一顆每秒自轉三十三次的中子星。

關鍵詞彙

星際介質

重力潰縮

主序星

紅巨星

白矮星

新星

超新星

中子星

黑洞

行星狀星雲

自我評量試題

1. 名詞解釋：重力潰縮，主序星。
2. 簡單敘述太陽的一生。
3. 說明超新星與中子星的關聯。
4. 上網或找科普讀物，完成蟹狀星雲的報告。

12-1 節 恆星的形成

當我們觀望星空時，會覺得星空中除了發光的星點外，空無一物。但是天文學家利用光譜與攝影技術，發現群星之間並不是空空蕩蕩的，充滿了氣體、塵埃或兩者的混合物(圖12-1);有些恆星甚至與這些氣體塵雲混雜在一起(圖12-2)。天文學家將這些恆星之間的物質稱為「星際介質」。有些星際介質溫度很高，發出可見的光芒，形成發光星雲(圖12-3)。有些是聚集成一團的低溫暗星雲，只能在明亮的背景襯托下被發現(圖12-4)，或在紅外線觀測下現出蹤跡。

天文物理學家相信這些低溫的星際塵雲，便是形成恆星的素材。如果低溫的星際介質體積與密度夠大，或是被某些外力壓擠，使得星雲靠著本身的重力持續的收縮，就形成所謂的「重力潰縮」(gravitational collapse)，是恆星形成的必要條件。能夠壓縮星雲的外力有多種，例如星際磁場、銀河系的密度波、鄰近超新星爆炸產生的震波…。

當一個星雲產生「重力潰縮」時，體積隨著重力壓擠而縮小，中心區的溫度也隨著壓擠而增高。當中心區的溫度高至攝氏一千萬度時，氫原子核彼此之間的碰撞力壓過了靜電排斥力，產生了劇烈而持續氫融合反應，將四個氫原子核融合在一起形成氦原子核，釋放出大量的光與熱。一顆恆星就此誕生。

剛形成的恆星仍然包裹在暗星雲中，形成「星繭」。此時恆星所發出的輻射與恆星風(註一)將周圍的星雲逐漸吹開，最後吹散露出星雲中的恆星(圖12-5、圖12-6)。這時的恆星是一顆處於「嬰兒期」的新生恆星，並不穩定，體積膨脹收縮不定。最後，熱膨脹力與收縮的重力達成穩定狀態，便進入了「主序星」階段，穩定的發出光與熱。

主序星處於恆星的穩定期，約佔其一生中的百分之八十五以上。產生光與熱的能源主要是由氫融合反應所供應。如果恆星的質量比較大，重力也比較大，中心區受到較大的壓擠，溫度也會比較高。溫度雖然高一點點，但核融合反應的速率卻會急遽加快，產生比較多的光與熱，形成表面溫度高的恆星。反過來說，質量比較低的恆星，中心區的溫度也比較低，核融合反應速率慢的多，形成低溫星。

因此主序星的表面溫度高低反映了質量的大小。但是主序星的質量並不會相差太大，太陽是一顆黃顏色的G型主序星，表面溫度約為攝氏六千度；溫度最高的O型主序星，表面溫度約為攝氏兩萬度，質量約為太陽的三十倍；溫度最低的M型主序星，表面溫度約為攝氏三千度，質量約為太陽的百分之一。

依據天文物理學家的計算，供給我們光與熱的太陽，是由一個稱為「原始太陽星雲」約在五十億年前所形成。太陽穩定的發出光與熱已有五十億年之久，由於如此長期的穩定，才能在地球上發生生命，並演化成高等哺乳類。科學家相信，長壽的主序星是高等生命發生與演化的必備條件。因此，當天文學家監聽附近恆星的無線電波時，主要選擇長壽的低溫主序星，而不是壽命不到數十億年的高溫恆星。

物理學家證明一顆恆星所發出的光與熱，與其表面溫度息息相關，與溫度的四次方成比例（註二）。例如太陽的表面溫度是攝氏六千度，M型星的表面溫度約為攝氏三千度，所以太陽所發出的光與熱是M型星的十六（即二的四次方）倍。很容易瞭解，表面溫度越高，消耗的光與熱越多，長期下來差距越來越大，但恆星質量卻沒有差距如此大。簡單的說，主序星的質量越大（表面溫度越高），其壽命越短；質量越小（表面溫度越低），其壽命越長。

太陽型恆星的壽命長達一百億年。織女星表面溫度僅攝氏一億度，其壽命不到一億年。M型星表面溫度最低，只有攝氏三千多度，發出少量的光與熱，壽命遠比一百億年長許多。（參見表一）

光譜型	表面溫度	質量	壽命
O5	44000K	60	五十多萬年
B0	30000K	10	兩百多萬年
A0	9500K	3	四億年
F0	7200K	1.5	二十億年
G2	5700K	1	一百億年
K0	5250K	0.8	一百四十多億年
M0	3850K	0.5	五百億年
M5	3000K	0.2	一千五百億年

表一 各型恆星的表面溫度、質量與壽命（註三）

12-2節 太陽型恆星的末期演化

太陽的壽命長達一百億年，目前已經度過五十億年，再過五十億年，太陽將度過一生的黃金歲月而進入晚年。同樣的，所有的恆星遲早都會邁入晚年，經過將近半世紀的研究，天文物理學家已經描繪出恆星演化末期的輪廓。

恆星持續不斷的發出光與熱，經過漫長的歲月後，終於耗盡核心區域的氫，這時恆星便進入演化末期，也就是恆星晚年了。依據理論，太陽型恆星與重質量恆星的結局十分不同。本節先描述太陽型恆星的末期演化。

太陽型恆星的質量比較小，核心區域的氫元素約佔全部的百分之十，經過數十億年至一百多億年的氫融合反應，已經全部耗盡了，成爲一堆氦原子核灰燼。氫融合反應被推擠到氦原子核灰燼之外層進行。

由於氦的密度比氫大四倍，所以彼此間的重力吸引也大四倍。在末期，核心區域的氦累積到足以產生重力收縮。核心區域收縮產生的熱散佈到外層，加上此階段的氫融合反應層比較靠近表面，使得恆星外層慢慢受熱膨脹，其發光散熱的表面積也隨之增加，表面積擴大後所增加的散熱面積要大於所額外供給的熱，所以恆星表面溫度也隨著膨脹而逐漸降低到攝氏三千度，成爲一顆低溫的「紅巨星」。

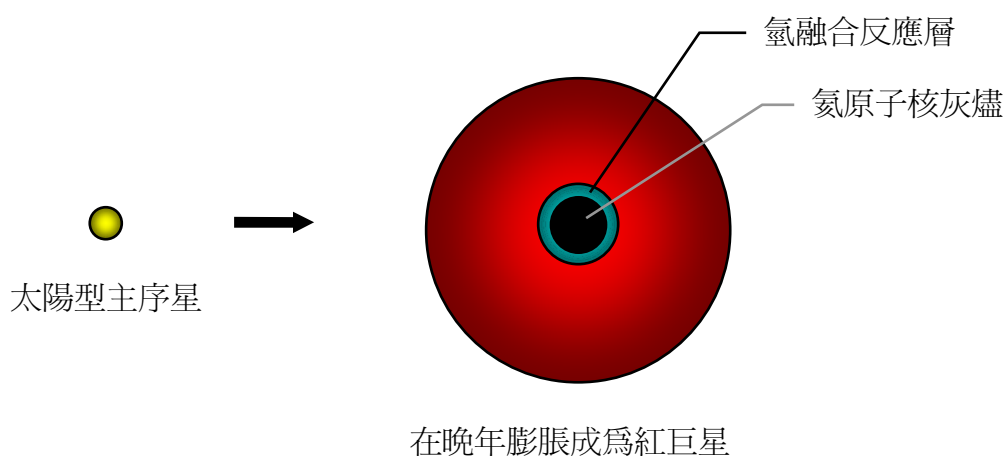


圖12-7 太陽型恆星在晚年成爲一個紅巨星

總結前面的描述，太陽型恆星在演化末期，核心區域收縮產生的熱導致外殼膨脹，變成一顆紅巨星。當恆星處於晚年紅巨星階段時並不穩定，它會產生膨脹收縮的脈動。

天文物理學家計算的結果，顯示當核心區域的溫度增高至攝氏一億度時，會引發氦融合反應，把三個氦形成一個碳原子核。氦融合反應的威力，遠比氫融合反應的威力大，釋放出更多的光與熱。使得恆星第二度急速膨脹，形成體積爲現今太陽百萬倍以上的紅色超巨星。

一般說來，太陽型恆星在晚年第一次膨脹時，膨脹的幅度比較小，體積只有現今太陽的數十萬倍，範圍達到水星的軌道；也就是說，太陽在晚年時膨脹階段，會將水星吞進去。整個太陽看起來像一個巨大無比紅色火球，日升或日落的時間須要兩小時多。

太陽型恆星在晚年第二度膨脹時，表面吞進地球，超過火星軌道，幾乎接近

木星的軌道。這真是地球末日了。

膨脹成超巨星的恆星，表面膨脹速率大約為每秒數十公里。最後，經由尚未瞭解的機制，超巨星的外殼剝離而去，形成「行星狀星雲」。由行星狀星雲的觀測，顯示可能有多重爆發過程，而且在爆發過程中由兩極區射出強勁的噴流，以超音速向外激射。另外，爆發產生的震波，以超音速膨脹，壓擠周圍的物質形成環狀壁。

行星狀星雲中心有一顆高溫星，溫度往往高達攝氏五萬度以上，有的甚至高達攝氏二十幾萬度。相信是外殼爆發後，裸露的內核。爆發的外殼形成行星狀星雲，逐漸膨脹散去，大約經過數萬年以後，便消散了。而中心星逐漸領卻，最後形成「白矮星」。

在行星狀星雲中心星的冷卻過程中，中心區域的碳逐漸累積，碳的密度比氦大三倍，所以收縮的重力也更大。但是當所有的電子都被重力擠壓到碳原子核周圍時，達到最緊密的階段。就像是沙子全部都附在鐵球周圍而無法再壓擠至鐵球內的情形一樣。經過量子力學的計算，太陽型恆星的質量不夠大，因此在此一階段收縮的重力不足以勝過碳原子核緊密靠在一起的壓力。也就是說，這種緊密的壓力擋住了重力，而此階段的溫度還沒有高到可以產生碳融合反應的地步。

在這個階段，形成一個體積小、密度極高（約為水的百萬倍以上）的特殊星球。核心區域不再收縮，也沒有任何核融合反應來提供光與熱；但是溫度仍然很高，靠著殘熱繼續發光。

德國天文學家貝賽爾（F. W. Bessel）在一八四四年，發現天狼星在天上的運行呈現波動狀，表示有另外一個看不見的伴星在影響它。美國望遠鏡製造商克拉克（A. Clark）在一八六二年測試口徑四十六公分的新折射鏡時，發現天狼星有一顆約九星等的伴星。習慣上，將天狼星稱為天狼A，其伴星稱為天狼B。依據分析的結果，天狼B的質量與太陽差不多，但是體積相當於地球大小，表示它的密度是水的百萬倍；也就是說，一湯匙的天狼B物質重約一公噸。種種跡象顯示天狼B符合這種體積小、密度極高的特殊星球，因天狼B的溫度高達攝氏兩萬多度，顏色呈白色，因此稱這種星球為「白矮星」。

天狼B是第一個被發現的白矮星，後來又發現數百個白矮星，星色並不都呈現白色，但仍然保留了白矮星的名稱。

印度天文物理學家錢德拉沙哈（Subrahmanyan Chandrasekhar 1910-1995）在1931年推論，白矮星的質量必須比一點四個太陽質量小，否則星球的重力會超過

碳原子核的臨界壓力而持續收縮。因此，將一點四個太陽質量上限稱為錢氏極限 (Chandrasekhar's limit)。

白矮星如同燒盡的煤炭，溫度越來越低，愈來愈暗，經過漫長的歲月，最後變成一顆不發光的死寂星球，天文學家稱為黑矮星。

12-3節 超新星與中子星

數千年來，太陽在天空中照耀大地，人類一直認為明亮耀眼的太陽與晚上閃爍的恆星，是兩種不同的天體。直到西方文藝復興時期以後，才認識到夜空中的恆星與太陽是同一種天體。也就是說，太陽是天上眾多恆星之一。

經過大約半世紀的研究，天文物理學家大致了解恆星的形成與演化。雖然各恆星的壽命有長有短，從數百萬年至數百億年都有，其中重質量恆星經由超新星爆炸事件的結局，仍然是最激動人心的故事。一般說來，質量比太陽大五倍以上的恆星，稱為重質量恆星。它們的結局與太陽型恆星截然不同。

恆星的一生也和人類一樣，太陽型恆星有如年老體衰，成為白矮星默默以終，保留一個全屍。但是有些重質量恆星卻戲劇性的以壯烈的爆炸形式，光輝燦爛的宣告死亡。

基本上，恆星的質量大小，在百分之一的太陽質量到三十個太陽質量範圍之間，只有極少數的情況下，恆星的質量會達到太陽質量的一百倍。因此，恆星質量的差異不過數千倍，但是，恆星發光發熱的消耗量，卻是相差數萬倍以上。結果低質量恆星發光發熱少，壽命可以長達數百萬年。重質量恆星在數百萬年至數億多年便耗盡核反應的原料而進入演化的末期，成為紅巨星。

當重質量恆星進入演化末期時，如果質量比錢氏極限一點四個太陽質量高，則收縮的重力將超過物質的緊密壓力而持續潰縮下去，導致溫度一路攀升，當溫度高到足以進行碳融合反應時，產生更大的熱膨脹力來抵擋潰縮的重力。

同樣的情形反覆上演著。碳融合反應形成氧，當恆星核心區域累積足夠的氧時，重力再度獲勝，使核心區域收縮→溫度升高→觸發下一階段的核融合反應，……。其順序大致為：碳、氧、鎂、矽、…鐵。星球在這一階段的結構像洋蔥似的，核融合反應區域一層層由內至外為…、矽、氧、碳、氦、氫，最外層則是一般恆星物質。

依據核物理的實驗結果，鐵原子核的束縛力量最大，即鐵原子核是所有原

子核中最緊密的。因此，如果鐵原子核與鐵原子核產生融合反應的話，無法得到更緊密的原子核，因此不會產光與熱，反而還會吸收熱，所以一連串的核融合反應到鐵元素便終止了。這就像揮霍的浪子，當用完盤纏後，便向家裡拿錢，拿到最後，所有家當都拿光了，只好舉債度日。

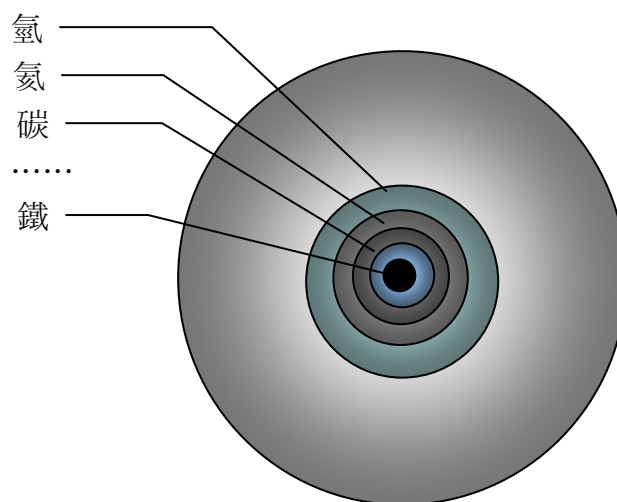


圖12-8 重質量恆星在演化末期之結構示意圖

在恆星演化末期，是靠著下一階段的核融合反應所產生的熱膨脹力，來抵擋越來越強大的重力。最後，核融合反應序列到鐵元素便終止了，在沒有足夠的熱膨脹力來抵擋強大的重力時，核心區域只有潰縮一途了。當電子全都被壓擠到原子最內層時，產生原子物質最緊密的狀態。如果還擋不住強大的重力，那麼電子便只好被壓擠進原子核中。

原子核事由質子與中子組成，質子帶正電，中子不帶電。帶負電的電子便與帶正電的質子結合形成中子。幾乎所有的原子核都在一瞬間崩潰分解形成中子。這是已知物質中最緊密的狀態了，中子的直徑要比原子小十萬倍，因此所有物質都成為中子時，體積小的驚人，密度也大的驚人，抗壓力比原子還大數千萬倍以上。

中子是在1932年被物理學家查瑞克(James Chadwick)發現。很快的，瑞士美籍天文學家朱維基(Fritz Zwicky)和其研究夥伴貝德(Walter Baade)兩人便在1934年提出密度比白矮星大數百萬倍以上的中子星理論。依據理論，重質量恆星在演化末期，核心區域的質量如果在一點四至三個太陽質量之間，則強大的重力會把物質壓擠成為中子。此時星球直徑約為三十公里左右，其強大的中子緊密抗壓力擋住了重力，星球不再縮收而成為一個中子星。

當重質量恆星核心區域的物質全被轉換成中子時，著強大的重力以接近光速的速度陷向中心，產生強大的反彈力形成向外傳播的震波。震波以超音速往外傳，壓擠外層物質使溫度急遽升高，引發一層層的氫、氦、碳、…等核融合反應，將整個星球炸碎，形成「超新星」爆炸事件，擴張範圍可達數十光年之遠，是銀河系中最壯觀的事件了。

超新星爆炸的殘骸散逸在太空中，逐漸擴散，數萬年後融入星際介質中。天文物理學家對超新星爆炸的結果有兩種看法，有的認為超新星爆炸一定產生中子星。有些學者確認為超新星爆炸也可能「屍骨無存」，沒有留下中子星或黑洞。對這問題，仍然沒有決定性的證明。

中子星與波霎

理論物理學家早在一九三零年代，便提出有關白矮星、中子星、黑洞這類性質奇異的天體，但是並沒有引起重視，認為在真實的世界中，並不會存在這些奇特的天體。但是，白矮星在一八六二年被確定，波霎在一九六七年被發現，認為是快速自轉的中子星所發出。

當電波天文學蓬勃發展時，為了精確獲得天體所發出的電波訊號，必須將電波通過太陽系空間時，受到干擾閃爍情形加以修正。英國劍橋大學電波天文學家休許(Antony Hewish)和他的研究生喬斯琳·貝爾(Jocelyn Bell)建構了一座電波望遠鏡，用來研究這種電波閃爍的現象。結果，喬斯琳在1967年發現到一個非常詭異的現象，她得到一個穩定以1.33730119秒的週期出現的脈動波。

幾個星期後，劍橋大學的研究群又發現了其他三個不同週期的脈動波，這種發出電波脈動的天體被稱為電波脈動星，簡稱「波霎」。休許認為波霎來自一個小而快速轉動的電波源，他由於波霎的發現與理論而獲得1974年諾貝爾物理獎。

一般相信波霎就是快速自轉的中子星。就像溜冰好手將兩手由伸張縮回時，轉速立即加快的道理一樣。當巨無霸似的紅巨星成為直徑數十公里的中子星時，中子星的自轉也會加快到大約幾秒鐘便轉一周。位於金牛座的波霎一秒鐘脈動三十三次，表示中子星甚至每秒鐘自轉三十三次。

中子星具有強大的磁場，高達數百萬高斯，使得無線電波或可見光只能由磁極發出。但是磁極與自轉軸並不重疊，所以磁極繞著自轉軸轉動時，便形成燈塔般的效果；面對我們時才能看見，轉離時就看不見，形成脈動的現象。

中國超新星與蟹狀星雲

在中國曆史文獻中，常有許多異常的天象記錄，其中一種稱為「客星」，是描述天上原來沒有這顆星，突然出現了。過了一陣子又消失了，像作客一樣，所以稱為客星。經過考據，發現其中有些客星是指彗星，或語焉不詳；但是有些確定是超新星的記錄，其中最著名的是1054年宋朝所記錄的「天關客星」。

我國史書《宋史會要》分別在西元1054年與1056年詳細記載了天關客星發生與消逝的經過。司天監（相當於國家天文台長）楊惟德在西元1054年7月4日看見一顆超新星，出現在金牛座牛角尖的「天關」附近，最亮時像金星一樣亮，在最初的二十三天連白天都可以看見，經過約兩年才逐漸暗淡至看不見。

英國人貝文(John Bevis)在1731年注意到金牛座牛角尖附近有一個黯淡的星雲。法國業餘天文家梅西爾(Charles Messier)也發現同一星雲，而且在其1764年出版的星雲目錄中，編為第一號，因此稱為M1。羅斯爵士(Lord Rosse)用當時巨大的七十二吋反射鏡，觀測到M1有許多絲狀體，看起來像蟹腳；1848年出版的一份天文目錄上用了「蟹狀星雲」的字眼，便一直沿用到現在。

天文學家在1968年發現蟹狀星雲中有一個無線電脈動星，第二年發現它也是一個可見光脈動星，脈動周期約為0.033秒。綜合一切線索，天文學家認為蟹狀星雲便是九百多年前中國天關客星的殘骸。

蟹狀星雲寬約十光年，距離我們約七千光年。哈伯太空望遠鏡拍攝的蟹狀星雲影像中，顯示環繞「波霎」的區域十分複雜，具有結塊與一縷一縷的絲狀結構。這些絲狀結構以光速二分之一的速度由波霎往外流出，幾天內就改變了外形。

黑洞

黑洞是天文物理史上，最引人注目的題材。報章媒體、科幻小說、甚至電影中都常以黑洞為素材。重質量恆星在演化過程中，藉著輻射、恆星風、小規模爆發事件，質量一直在流失中。如果重質量恆星在進入演化末期以前，仍然保有足夠的質量，則在發生超新星爆炸時，內核區域的物質大於二或三個太陽質量時，則理論上沒有任何物質可以抵擋住強大的重力。此時，強大的重力迫使物質一路縮下去。物質緊密集中在一個極小的區域，重力強大到連光線都無法逃離的程度。理論物理學家將這個連光線都無法脫逃的範圍，稱為「黑洞」(black hole)。

依據理論計算，像太陽質量大小的物體，半徑必須壓縮到三公里以內，才能形成黑洞。但是太陽無法產生這樣大的壓縮力量；只有比二或三個太陽質量還大的物體在超新星爆炸時，所產生的壓擠力量才能迫使物質進入重力壓倒一切的勢力範圍而形成黑洞。

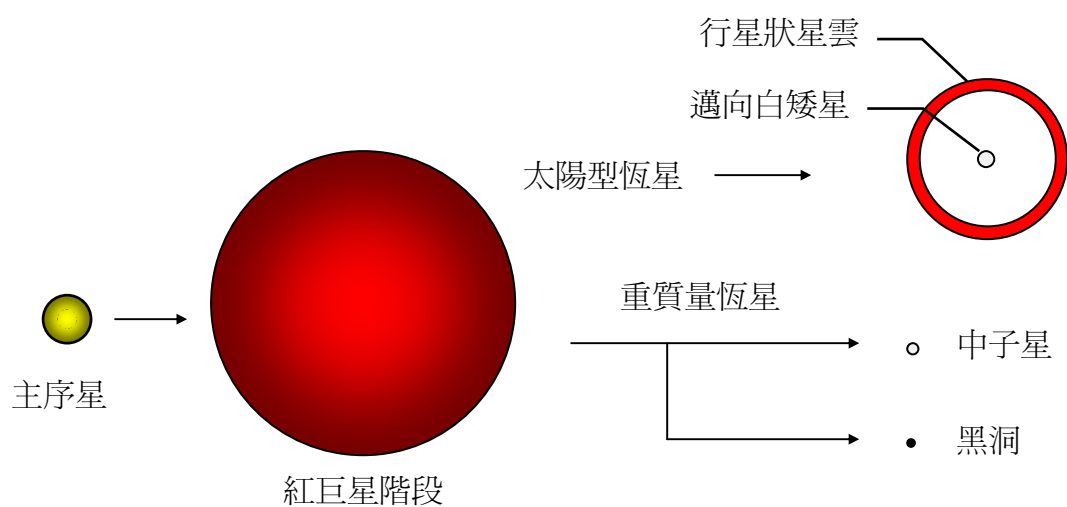


圖12-9 不同質量恆星演化末期的結局

註一：恆星風是由恆星發出的高速帶電粒子，主要為質子與電子。太陽所發出的高速帶電粒子稱為「太陽風」。

註二：正確的說，此處的溫度是指絕對溫度（用凱氏溫標 K 表示），而不是攝氏溫標所標示的溫度。攝氏溫標減去 273 度即為絕對溫標。例如攝氏 0 度為凱氏 273 度，攝氏 6000 度為凱氏 5723 度。恆星溫度都在攝氏三千度以上，因此使用攝氏溫標與凱氏溫標相差不多，約有百分之幾的誤差。

註三：本表主要參考 Unsold 與 Baschek 所著之 *The New Cosmos*（第四版，英譯本）一書，Springer-Verlag 1991 年出版。