

科技文化

原子核、恆星與宇宙

● 王榮平 呂南姚 馮達旋

提爾曼 (Friedrich-Karl Thielemann)

相對於日常尺度(1m = 100cm)，原子核(10^{-13} cm)是極端微小，恆星(10^{11} cm)和宇宙(10^{28} cm)則是極端龐大的事物。然而，這三者之間，卻有極其直接而密切的關係。這關係使得我們有信心根據核子理論去詳細推算宇宙的誕生、星球的演化，以及各種元素合成的過程。而且，推算結果是可以用觀測數據證實的。

事實上，目前我們對宇宙起源，可能比對太陽系的形成更了解；對太陽內部結構，比地球內部知道得更確切。這主要是由於：誕生之初的宇宙和星球的內部溫度極高(10^7 – 10^{11} K)，所以處於比較簡單，相類於氣體的等離子(plasma)狀態，而地球內部則溫度較低(約3000K)，以複雜得多的熔巖形式存在。

恆星

本文所謂「星」(star)是指恆星，它和行星、彗星都全然不同。太陽是一顆典型的恆星：半徑 7×10^{10} cm；質量 2×10^{33} g；密度約 1gcm^{-3} ，和水相近；中心溫度 10^7 K(K指絕對溫度，即攝氏度加273度)。它基本上是一團熾熱的氣體，從光譜分析測定的質量成分是：73%氫，25%氦，2%重元素。常規恆星的特徵是它內部有核反應產生能量，從而補充表面發光所引致的能量流失。

*本文原文(英文)為作者應中國《物理》雜誌而作，並將於該刊翻譯發表；嗣經作者及《物理》編輯部同意，由本刊另為翻譯、改編並補充背景資料發表，謹此致謝。

運用基本定律和數學推理來了解迥不相同的現象(例如物體墜地和行星繞日這兩個現象),這是物理學的精義。用實驗室中所測度得的粒子和原子核性質,去解釋億萬光年之外,尺度與之相差20至40個數量級的天文現象,也就是說,用粒子和核子物理學來建立天文物理學和宇宙學,可以說是把物理學的精神發揮到極致了。本文所要介紹的,正就是體現上述精神的所謂「核天文物理學」(nuclear astrophysics)。

歷史回顧

歷史上,天文物理學的起源可以追溯到「超新星」(supernova)現象的觀察,特別是1054年(北宋仁宗至和一年)中國天文學家對超新星的著名記載——那次爆發在巨蟹座所留下的殘迹,至今仍然清晰可見(圖1)。現代天文物理研究,則以1812年夫琅和費(Joseph von Fraunhofer)在太陽光譜中發現黑線,從而結合天文學和原子物理學為開端。至於「宇宙學」(cosmology)的出現,卻要等到一個多世紀之後,韋錫克(Carl von Weizsäcker)提出氫球假說(1934年)的時候了。

韋錫克認為,宇宙起源於一個超巨型的「氫球」,所有化學元素都是在球內由氫「燃燒」(即發生核反應)產生;後來這球發生爆炸,其中各種元素像碎片一樣飛散到太空中。但在1948年,伽莫夫(George Gamow)、貝特(Hans Bethe)和阿爾法(R.A. Alpher)三人證明,前述超巨型球體是極不穩定的,而且,在熱平衡狀態產生的元素豐量(abundance)與觀測值相去甚遠,所以早期宇宙不

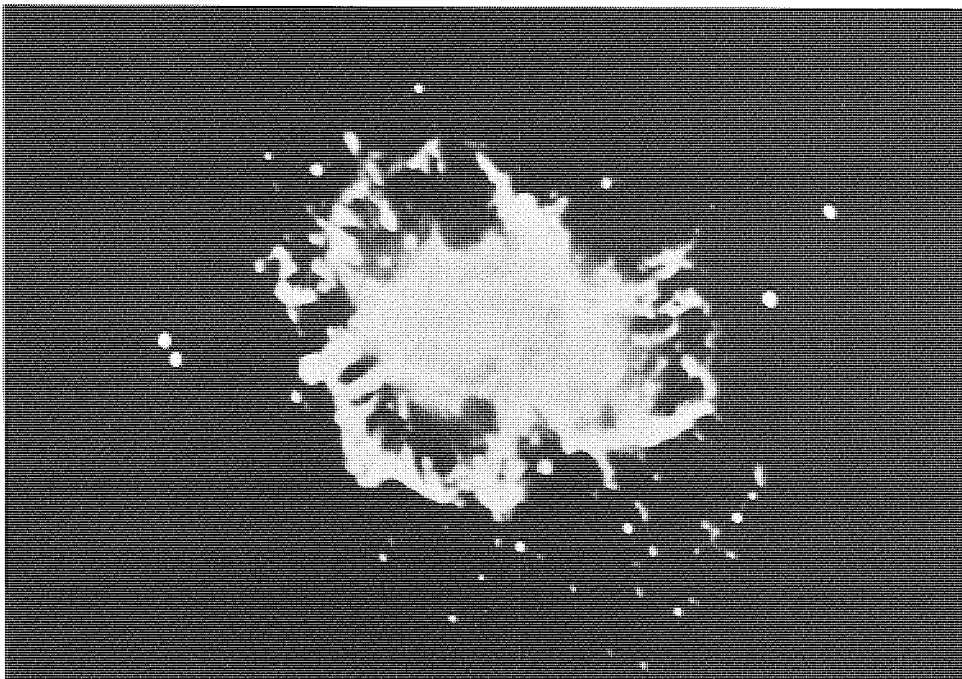


圖1 巨蟹座星雲(Crab Nebula),它是宋代中國天文學家所觀察到的超新星爆炸的殘餘,其中央所形成的中子星也已經被發現。

Palomar Observatory提供

宇宙的膨脹

宇宙間大約有 10^{10} 個星雲(galaxy, 亦翻譯為「星系」); 每個星雲由大約 10^{10} 顆星通過彼此間的重力互相吸引而形成, 直徑大約是 $10^{21} - 10^{22}$ cm。例如太陽系所處的銀河系(The Milky Way)便是典型的星雲。本世紀初哈勃(Edward Hubble)發現所有遠方星雲都在以高速度後退, 而且後退速度與距離成正比, 這就是所謂宇宙的膨脹。

可能有這麼一個靜態「燃燒」的階段。取而代之的, 是他們所提出來的另一個模型, 它後來發展成為目前大家熟知的標準模型, 也就是戲劇性地被稱為「大爆炸」(Big-Bang)的模型。許多天文觀測事實, 諸如宇宙中的2.7K背景輻射、輕原素的原始豐量(primeval abundance)、宇宙的膨脹等等, 都可以用這模型作出滿意解釋。

根據這模型, 早期宇宙在誕生後 0.01 秒的時候, 溫度高達 10^{11} K, 內部則充滿高能光子 γ 以及具相對論性(relativistic)能量的輕子(leptons)和強子(hadron), 即電子 e^- 、正電子 e^+ 、中微子 ν 、反中微子 $\bar{\nu}$ 、質子 p 、中子 n 等等。質子和中子之間的「熱平衡」是通過它們與電子、正電子、中微子及光子的作用而維持的, 而二者數目的比例則由波茲曼因子 $e^{-\frac{\Delta M}{kT}}$ (ΔM 是中子與質子的質量差)決定。宇宙誕生後 1 秒時, 溫度降到 10^{10} K, 這時 $\Delta M \sim kT \sim 1$ Mev, 因此中子:質子比凍結在 1:6, 從此以後這個重要宇宙參數的改變就只受中子衰變的影響了。要注意的是, 至此為止核合成(nucleosynthesis)的作用還微不足道, 因為在高溫下光氣體所產生的光致離解(photo-dissociation)作用阻遏了合成。事實上, 要等到宇宙誕生200秒, 也就是光氣體溫度降到 10^9 K, 中子質量比例跌到 1:7 的時候, 「原始」(primordial)核合成才開始。通過一連串 (n, γ) , (p, γ) , (d, p) 和 (d, n) 反應, 氫和氦的同位素 H^3 、 He^3 和 He^4 出現了。這其中 He^4 質量和束縛能都最大, 豐量也最高。

根據這想法, 伽莫夫假定其他重元素也是通過同類機制產生的。但這立刻就碰到了嚴重困難, 因為質量數為5或8的穩定原子核並不存在, 所以氦核 He^4 不能「捕獲」一粒質子或另一粒氦核來形成新的穩定原子核。因此, 原始核合成

粒子 (particles)

是組成物質的基本成分, 最普通的有質子、中子、電子和光子。物質是由原子組成, 原子由原子核和電子組成, 原子核則由質子和中子組成。在核衰變(decay)或粒子互相碰撞過程中會產生許多其他粒子, 例如中微子(neutrino)、 π 一介子(π meson)等。輕子和強子是粒子的分類: 前者指質量, 後者則指具有強作用。

原子核 (nucleus)

由不同數目的質子和中子組成: 它屬於何種元素由質子數 Z 決定, 例如氦核 $Z=2$, 氧核 $Z=8$ 。但同一元素可以有不同中子數 N 和質量數 $A (=Z+N)$ 的核, 這就是所謂同位素(isotope)。例如 He^3 指 $A=3$ 的氦核 ($Z=2, N=1$), He^4 指 $A=4$ 的氦核 ($Z=2, N=2$)。

核反應 (reaction)

是指兩個不同的核A和B經碰撞作用而產生另外兩個新的核C和D這一過程： $A+B \rightarrow C+D$ ，它往往又記作 $A(B, C)D$ 。(B, C)則指B被吸收和C最後出現的整一類核作用。所謂核燃燒(nuclear burning)是指釋出能量的核反應，例如氫的「燃燒」方式之一是下文提到的pp核反應： $H^1+H^1 \rightarrow D^2+e^++\nu$ ，即兩個氫核融合為氘(D^2 ，亦即 H^2)並釋出1.44Mev能量這一過程；它和氫原子氧化成水那種化學作用完全不同。核合成(nucleosynthesis)則指兩個或多個輕的核通過連串反應融合成為重的、穩定的核；上述pp反應就是合成過程中的一環。

到了 He^4 便會終止，合成更重元素元素的唯一途徑似乎是「三體作用」，但那要在比當時密度大得多的環境中才有可能。伽莫夫的想法因此破產了。有些理論學者假定重元素是在宇宙間某些質量不均勻的區域產生的，但近來的研究已經證明這種效應不足以解釋例如太陽系中各類元素的豐量(圖2)。因此，氦以上各種元素究竟如何產生，就成了核天文物理學的主要課題。

由於重元素應該是在溫度和密度特高的區域合成的，這很自然地帶引理論學者去研究恆星內部，並且立即逼使他們面對當時天文學家最感頭痛的問題，即恆星發光所需的大量能量究竟是怎樣產生的。許多著名天文物理學家，包括愛丁頓(Arthur Eddington)在內，都曾為此大傷腦筋。到1938年，貝特和韋錫克同時各自提出星球內部的p-p核作用是恆星能量的來源，從而獲得突破，初次確切展示了元素合成的途徑。

到50年代初期，素彼得(Edwin Salpeter)和海路(Fred Hoyle)才解決 He^4 燃燒怎樣產生重元素的問題。1957年E.M.玻必治(E.M. Burbidge)、G.R.玻必治

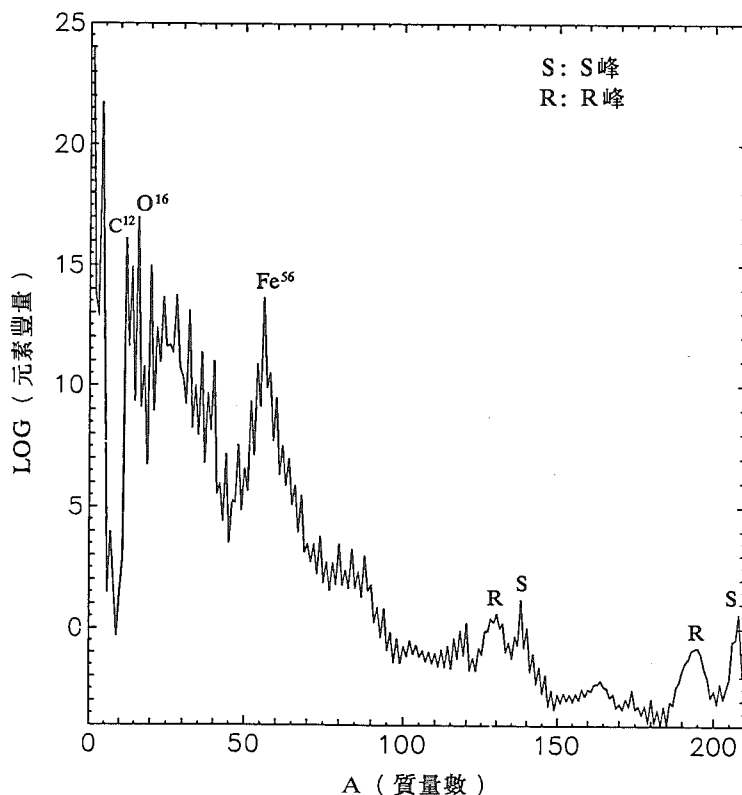


圖2 太陽系各元素豐量的觀測值。注意圖中Y-軸所示是豐量的對數，所以豐量本身數值相差很大，有20-30個數量級〔據E. Anders and N. Grevesse, *Geochim. Cosmochim. Acta* **53**, 197(1989)〕。

(G.R. Burbidge)、浮勒(W.A. Fowler)和海路等四人(合稱BBFH)以及金默崙(A.G.W. Cameron)各自同時提出恆星內部的「核燃燒」如何合成至鐵核為止所有重元素的途徑。這是天文物理學的一個里程碑，而BBFH和金氏的工作也成了這一領域的典範。

恆星的演化與構造

在大爆炸理論中，宇宙誕生後幾百秒的時候只有質子、中子、電子、光子、中微子和少量通過原始核合成產生的輕元素(如 H^2 , He^3 , He^4 , Li^7 等)以「雲氣」(gaseous cloud)形式存在。經過大約 10^9 年，也就是目前宇宙年齡的10%之後，原來相當均勻的雲氣密度和溫度大大減低，它的重力場和熱能分佈開始出現不均勻、不穩定狀況，因此星雲和第一代恆星開始形成。這些恆星的成分只有氫和氦，重元素是它們在演化過程中產生的。但即使到目前，重元素最多也只不過佔宇宙質量的2%而已。恆星的質量一般不能低於 $0.1M_{\odot}$ (M_{\odot} 指太陽質量)，否則它不會有足夠內部溫度和壓力去產生核融合，也不會發光而成為常規恆星。

初始階段的恆星即胚星(proto-star)是濃密的雲氣，它在自身重力吸引下收縮，勢能轉變成動能，內部溫度逐漸增加，當達到 $1-4 \times 10^7$ K時，帶正電的原子核就會有足夠能量，在碰撞過程中克服庫倫斥力而互相接近，核融合從而開始。廣泛地說，融合過程可分為兩大類：(甲)「燃燒過程」，即藉着釋熱(exothermic)核反應形成鐵 Fe^{56} 及「以下」(即質量數A更小)元素的過程；(乙)「中子俘獲過程」，即輕原子核通過「俘獲」(capture)自由中子這樣的吸熱(endothermic)核反應，形成鐵以上的重元素的過程。這兩個過程之所以以鐵核為分界，是由於鐵核是最「穩定」，亦即質均束縛能最大的原子核(圖3)。目

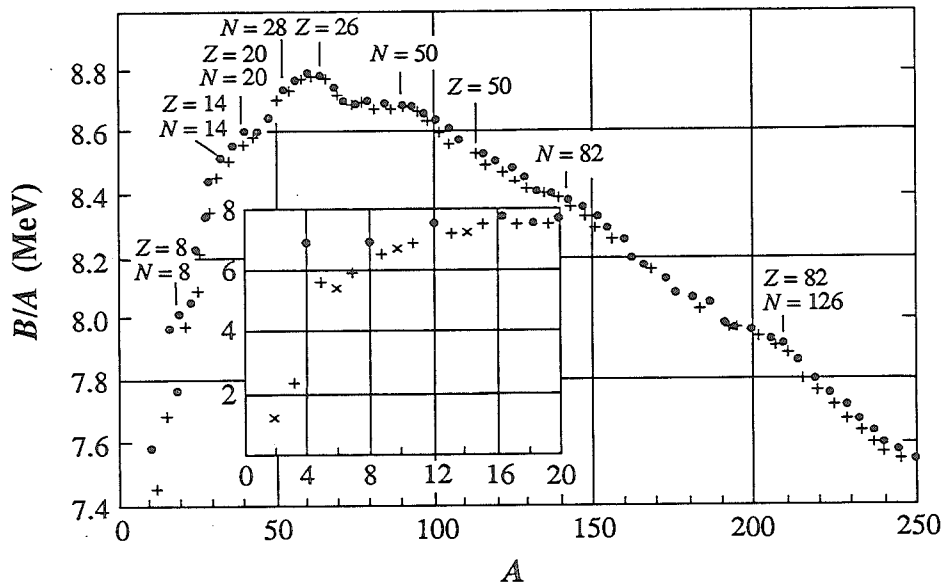


圖3 穩定元素的質均結合能。A是原子量，B是核結合能(nuclear binding energy)。(取自Donald D. Clayton。(見參考資料)Fig. 7-1)。

前我們研究得比較詳細的是燃燒過程，它也是決定星的構造和演化的主要過程。中子俘獲過程則是合成重元素的關鍵，但為時短暫，並且對星的影響較微弱，因此較少可資對比的觀測證據，目前還屬於研究工作的前緣範圍。

甲 輕元素合成過程：核燃燒

核燃燒是輕核融合成重核的過程。這過程釋出的大量能量，提高了星的內部溫度和外向的熱壓力，後者和星本身內向的萬有引力達到平衡，「頂住」了星體在本身重力吸引下「塌縮」(collapse)的傾向。

星溫度上升後，內部核融合產生的能量通過表面的黑體輻射發光而流失。例如太陽的發光率(luminosity)大約是 4×10^{33} erg/s，即以每克質量計，達到2 erg/s。所以，星的內部溫度、核融合率和表面發光率三者互相關聯，處於共同平衡狀態，也就是說，在相當一段時間內三者都是相當穩定的。而且，由於不同的核融合過程需要不同溫度(一般來說重核所帶的正電荷大，互斥力強，所以相互作用所需的能量和溫度相應提高)，因此在某一穩定溫度下只有特定幾個融合過程會出現。

然而上述穩態不能永遠維持下去，因為核融合會逐漸耗竭「燃料」，即核反應中被「燃燒」的核。這時融合過程輸出的能量減低，內部熱壓力不足以抗拒萬有引力，星的核心區就會收縮，並且因為收縮而進一步提高溫度和壓力。溫度上升之後原來融合過程的「產物」就會變為可燃，從而導致進一步的核融合，產生更重的核。由是星的內部反應進入另一個階段，內部溫度和表面發光率也相互達到新的平衡和穩態。

所以，如表1所示，燃燒過程有好幾個半穩階段，各自以不同的溫度和主要核反應為特徵。質量在太陽質量8倍($M < 8M_{\odot}$)以下的星只有「主序」(main

階段	核融合過程中的「燃料」和主要「產物」	溫度(K)	期間 (以 $M=25M_{\odot}$ 為例)	結局
(1) 主序	$H^1 \rightarrow He^4$	$1-4 \times 10^7$	7×10^6 年	中小型星($M < 8M_{\odot}$) 在紅巨星階段後演化為白矮星，但中型星($1.5M_{\odot} < M < M_{\odot}$) 可能要先經過一個爆炸階段。
(2) 紅巨星	$He^4 \rightarrow C^{12}, O^{16}$	$1.5-2.3 \times 10^8$	6×10^5 年	
(3) 碳燃燒	$C^{12} \rightarrow Ne^{22}, O^{16},$ $\rightarrow Ne^{23}, Mg^{25}$	$6-9 \times 10^8$	600 年	巨型星($M > 8M_{\odot}$) 經過左列階段後發生急速劇烈變化(例如超新星爆炸)，至終演化為中子星或黑洞。
(4) 氖、氧燃燒	$Ne^{22} \rightarrow Mg^{25}, Si^{28},$ $O^{16} \rightarrow Si^{28}, S^{31}$	$1.4-1.7 \times 10^9$ $1.7-2.1 \times 10^9$	1 年	
(5) 硅燃燒	$Si^{28} \rightarrow$ 所有 $A=28-65$ 的核	3×10^9	1 日	

表1 星內部核燃燒過程的五個階段

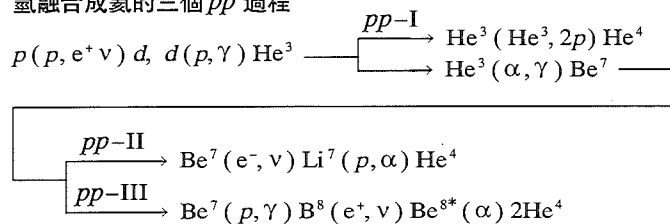
sequence)和「紅巨星」(red giant)兩個階段。在這兩階段之後，質量和太陽相近的「小型星」重力不足以產生碳和氧核燃燒所需的壓力和溫度，因此內部核反應慢慢停止，星體逐漸縮小，內部在巨大壓力下進入電子簡併態，由是成為「白矮星」(white dwarf)。另一方面，質量在太陽數倍至8倍之間的「中型星」，則大致會在「紅巨星」階段末期由於碳氧核心區和氫氦外殼區的對流混合而發生一次爆炸，從而「射脫」(eject)外殼，失去大部分原有質量，然後才收縮成為白矮星。至於「巨型星」($M > 8M_{\odot}$)則複雜得多了：它會經歷另外三個更高溫的階段，即碳、氧氦和硅的燃燒階段，然後發生猛烈爆炸，射脫大部分質量，核心部分則以「中子星」(neutron star)或「黑洞」(black hole)形式留存下來。

白矮星和中子星

二者內部都不再產生能量：因此它們不是以熱壓力，而是分別以電子(前者)和核子(後者)在簡併態(degenerate state)所產生的零點壓力(即範圍於某一體積內的粒子由於測不準原理而生的外向壓力)來抗拒重力，使星體不致塌縮。倘若星體質量超過大約 $1.5M_{\odot}$ (這是兩者的所謂Chandrasekhar質量界限)，零點壓力就再不足以抗拒重力，那它就有塌縮成黑洞的可能。白矮星密度約 10^6gcm^{-3} ，半徑和地球相若，它是1914年首先由W.S. Adams發現的。中子星密度約 10^{12}gcm^{-3} ，半徑只有數公里，1968年它以「脈衝星」(pulsar)形式初次被觀察到。至於黑洞，則是1970-73年由Uhuru X-射線觀測衛星初次測到的，它表現為質量 $> 3M_{\odot}$ 的一個極狹小的無規則X-射線源。這三者是常規恆星到了演化末期由於質量不同而可能出的不同結局。

在表1中，各階段的實際核反應是相當複雜的。例如「主序」(main sequence)階段是氫融合成氦的階段：它先由兩顆質子及一顆中子融合成氦的同位素 He^3 ，再由後者通過三條不同途徑融合成穩定的氦 He^4 。又例如氫融合成碳 C^{12} 的所謂「三 α 過程」以及碳俘獲 α 演變為氧 O^{16} 的過程這二者，反應速率都和所謂核反應的共振(resonance)現象有密切關係，非此不足以解釋圖2中 C^{12} 和 O^{16} 峰的出現。

氫融合成氦的三個 pp 過程



在太陽中， pp -I過程佔86%： pp -I, II, III三過程所釋出的能量分別是20.20Mev, 25.66Mev和19.17Mev。

一顆星的演化軌迹可以很方便地在所謂「赫羅圖」(Hertzsprung-Russell diagram)，即以表面溫度和發光度的對數作為座標的圖上表示出來(圖4)。氫燃燒溫度較低，所以這過程較為緩慢，一顆星生命90%的時間都處於這階段，也就是說我們觀測到的星大部分是「主序」星——這就是「主序」名稱的由來。至於紅巨星則在主序星的右上方，這是由於它膨脹之後表面溫度降低，但發光量增加(「巨」是指發光量大)而引致的現象。白矮星表面積小，發光量低，但表面溫度極高，所以在主序的左下方。赫羅圖本來是天文學家以直接觀測所得數據來把星加以分類的手段，但同時也成了討論星的演化的一種方法。

乙 超新星——巨型星生命的結束

質量超過 $8M_{\odot}$ 的巨型星由於內部壓力和溫度極大，所以會依次達到碳燃燒成氧、氦，後者燃燒成相對穩定的硅，硅又再燃燒成鐵和鄰近元素這三個階段。在硅燃燒這極其迅速猛烈的最後階段，可以有許多核反應一起進行，在同一時間形成原子量A在28至65之間(包括鐵和鎳)的數十種不同元素。這時，在 3×10^9 K的高溫下，星內部產生大量 γ 一射線，其中相當一部分足以解裂原子核，由是令不同核子之間產生新的平衡，較穩定的核豐量因此相對增加，這就是所謂「光致解裂重整」(photo-disintegration rearrangement)。高溫的另一個

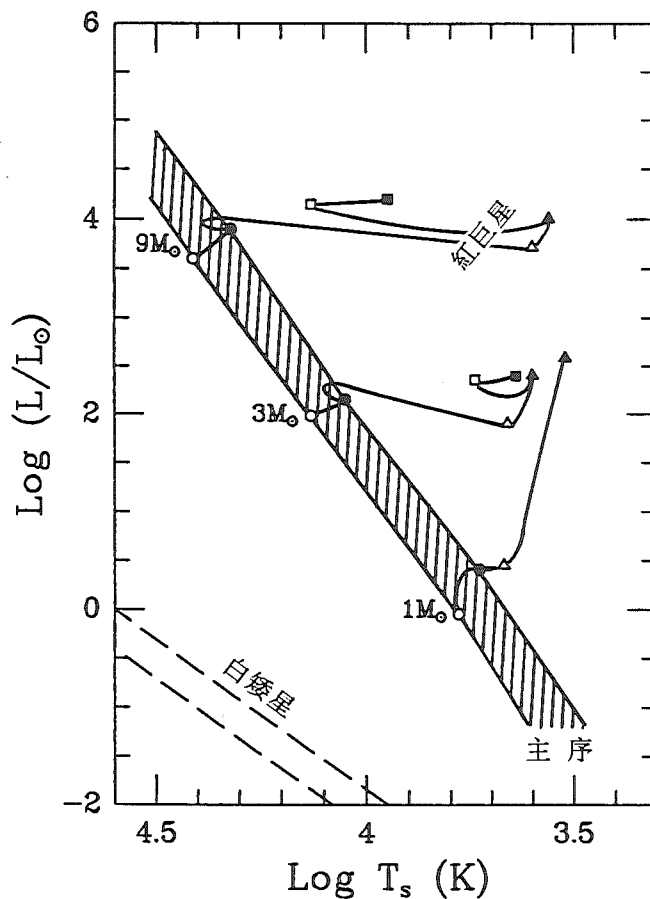


圖4 赫羅圖： T_s 是表面溫度， L 是發光度， L_{\odot} 是太陽光度。圖中三條軌迹分別由不同質量的星在演化過程中形成，它們都經過主序階段的開始(○)和結束(●)。紅巨星階段的開始(△)，氦在星中心區開始燃燒(▲)、穩定燃燒(□)和結束燃燒(■)等幾個階段。

後果是：由於光子與電子碰撞($\gamma + e^- \rightarrow \gamma' + e^- + \nu + \bar{\nu}$)，電子對的湮沒(annihilation: $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$)以及中心區的等離子震盪等效應，星內部能量大量轉化成中微子 ν ， $\bar{\nu}$ 形式。由於中微子只有弱作用，它可以迅速穿透星體(換言之，星體對中微子的透明度大)，逃逸到外部空間，從而代替表面發光，成為星內部能量流失的主要機制。這是高溫燃燒階段雖然進行得特別快，卻不致立即引起壓力急升和外殼爆炸的原因。

經過短至數以日計的高溫燃燒過程後，巨型星核心的氦消耗淨盡，星內部再沒有其他釋放能量的機制(因為鐵 Fe^{56} 以上的核融合都是吸收能量的)可以繼續產生高溫、高壓來抵抗重力。因此整顆星就以近乎自由落體的速度向中心塌縮。結果是：星的核心部分進入核簡併態——也就是說，密度達到 10^{12}gcm^{-3} ，即核子(nucleon)互相「接觸」、擠壓，從而制止塌縮，形成一顆「中子星」；密度較低的外殼內層則在碰上這核心部分時形成反彈的外向衝擊波，從而將整個外殼射脫(這過程的機制直到最近才被真正了解，見說明方塊)，形成壯觀的「超新星」(supernova)爆炸現象。

超新星爆炸的機制

一直是困擾天文物理學家的主要問題。這問題直到近五年才由於理論進展配合1987年超新星的觀察(圖6)而大體解決，關鍵則在於中微子的作用。目前的了解是：繼正文中提及的初始衝擊波之後1秒鐘，還有第二輪衝擊波。這是星核心區產生的大量中微子以彌散(diffuse)方式逸出密度極高($10^{12}-10^{13} \text{gcm}^{-3}$)的核心區之後，在離核心表面100-200公里處為殼層的中子和質子吸收，從而將之急速加熱而產生的。有足夠能量 $\{(6-7) \times 10^{50} \text{erg}\}$ 射脫外殼，形成超新星爆炸的是這第二波，並不是最初由於外殼塌縮而產生的第一波。這樣形成的是所謂「第二類超新星」。

丙 重元素合成過程：中子俘獲

倘若在氦燃燒過程結束後恆星的演化就完結了，那麼在鐵以上的重元素，例如錫、稀土系和鈾系元素等是怎麼樣形成的呢？重元素形成的基本過程是最近幾年才逐漸推斷出來的，它有兩步：

- (i) 鐵核 Fe^{56} 通過連串中子俘獲(neutron capture)，成為不穩定的更重元素；
- (ii) 後者通過連串 β -衰變成為同原子量的其他重元素。

這個機制又視乎核俘獲中子所需的特徵時間 $\tau_{n\gamma}$ 和核發生 β -衰變的特徵時間(即半衰期) τ_{β} 這兩者的相對大小，而分為「慢俘獲」(S過程： $\tau_{n\gamma} \gg \tau_{\beta}$)和「迅俘獲」(R過程： $\tau_{n\gamma} \ll \tau_{\beta}$)兩種過程。

「慢俘獲」是在星的氦燃燒階段，亦即紅巨星階段就開始發生的。在這階段恆星裏怎麼會有鐵核和中子流呢？原來這時星本身的演化雖還未曾產生鐵核，

但它形成之初的原質中可能包含少量「前代」巨型星在硅燃燒過程中形成(而其在超新星爆炸中散佈到太空)的各種元素,包括鐵核。這就是所謂「籽核」(seed nuclei)。另一方面,由於 C^{13} 和 Ne^{22} 核出現(在這階段它們的形成頗為間接複雜,這裏不詳細討論),它們可以俘獲氦核而放出能量在30 keV左右的慢中子:即發生 $C^{13}(\alpha, n)O^{16}$ 和 $Ne^{22}(\alpha, n)Mg^{25}$ 這兩個反應,因此,星內出現了微弱的($\sim 10^6 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)中子流。在這情況下,鐵核 Fe^{56} 相繼俘獲三顆中子成為 Fe^{59} 之後,有足夠時間發生 β -衰變成為 Co^{59} ,後者又會一再以同樣模式吸收中子並繼而蛻變為更重的穩定元素:最後,這過程終止於 Bi^{209} 核(Bi^{210} 核由於 α 衰變期很短,十分不穩定)。當恆星內部演化到鐵核開始形成的時候,這過程自然就隨鐵核增加而大大加強。所以,「慢俘獲」所能產生的核基本上質量小於 Bi^{210} ,且限於「 β -穩定區谷」之內,它的蛻變軌迹也就在這區谷內蜿蜒(圖5)。從元素豐量在穩定核的幾個峰值看(圖2中的S峰),這過程多少可以得到證實。

然而, S峰之前8-12個質量數處的另一些闊峰(R峰)須另謀解釋:慢過程也不可能產生 Bi^{209} 以上的許多元素,特別是銻系中極長壽的「紀年」放射元素 Th^{232} , U^{235} , U^{238} 等。解決這些問題有賴於了解「快俘獲」過程,亦即核處於強中子流($> 10^{20} \text{ cm}^{-3}$),核俘獲中子所需時間($\tau_{nr} \sim 10^{-4} \text{ s}$)遠短於 β -衰變特徵時間($\tau_{\beta} \sim$ 數秒)的過程。這過程以中子俘獲為主,所以,從鐵核開始,過程的蛻變軌迹就脫離 β -穩定區谷,大體沿着核的同位素方向(即質子數 Z 不變,中子數 N 增加)前進,以迄遇到有極迅速 β -衰變的核,或者核的光解裂時間(即 (γ, n) 反應所需時間)變得比中子俘獲時間更短(這通常在比穩定同位素大20-30個質量數的位置發生),然後才改變方向(圖5)。由於整個過程十分迅速,而且是由強中子流推動,所以在這軌迹上形成的核雖然極不穩定,它們彼此之間還是會達到豐量平衡。在 β -穩定區谷和所謂「中子流失線」之間,幾乎同時介入「迅俘獲」過程的各種不同的核,可能達到3,000-7,000個之多。

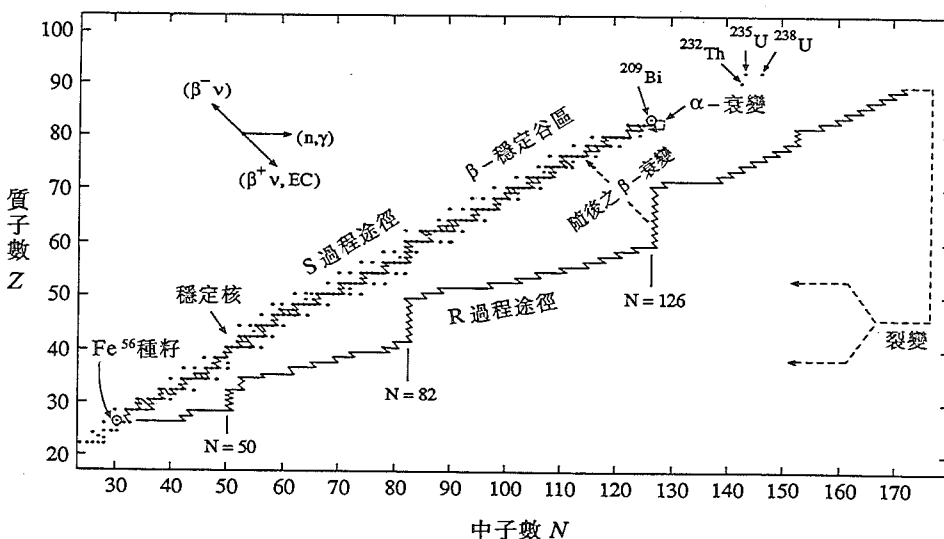


圖5 S和R中子俘獲過程的途徑。注意這原子核圖(nuclear chart)的兩軸是中子數 N 和質子數 Z 。

R過程所需要的強中子流($>10^{20}\text{cm}^{-3}$)和高溫($>10^9\text{K}$)只可能在超新星爆炸(圖6)那樣極端猛烈的環境,特別是在被「射脫」的星外殼的最內層存在,那是溫度、密度最高,中子也最豐富的部分。一旦外殼內層膨脹到某一程度,溫度和中子密度減到臨界值以下,R過程便會中止,而沿着它軌迹形成的許多不穩定核便有機會各自通過 β -衰變回到 β -穩定區谷。據粗略估計,整個R過程前後歷時只有1秒鐘左右,所以, Bi^{209} 以上的重元素,都是巨型星在它生命最後幾秒極其猛烈而壯觀的爆炸中產生的。

丁 太陽和地球的成分

太陽是處於演化初期的主序星,它的成分雖然以氫和氦為主,但也包含少量其他重元素,包括硅和鐵(見第一說明方塊)。這說明太陽的原質中包含了早幾代恆星演化的產物,所以,從太陽元素豐量(圖2),我們多少可以推斷處於不同演化階段的恆星的元素成分。

當然,地球和太陽成分迥然不同:在地球上,重元素是很普遍而為人熟悉的。地殼的主要成分硅,和地球核心的主要成分鐵、鎳,明顯地是巨型星燃燒階段末期的產品,所以地球(和其他行星)很可能是一次超新星爆炸中射脫的外殼殘片。地球和太陽雖然屬於同一重力系統,但在起源上可能是沒有直接關係的。

問題與前瞻

自1957年以來,我們對星的演化和重元素的融合已經獲得很深刻的認識。星的初期演化與核融合可以說是天物理學裏面研究得最詳盡清楚的部分。然而,正如所有急速發展中的學科一樣,困難、疑惑和懸而未決的問題還所在多有,這是我們要在這一節介紹的。

問題中最引人注目的,應算是太陽中微子缺少問題。根據標準的理論,我們可以相當確定地計算太陽內部核作用所產生的中微子流,從而推斷地球上可以測得的中微子流。但20年來實測的結果,卻只有理論數值的1/3左右。這驚人差別引起了各種推測和特殊假設,但都不能令人滿意。最近美蘇合作的SAGE實驗和歐洲的GALLEX實驗不再去測定高能(因此和太陽內部溫度變化有密切關係)中微子,改為測定低能中微子流。在最近發表的實驗結果似乎證實,這問題解決有望了。這是十分令人鼓舞的一個好消息。

另一個存在已久的問題是,理論上清楚顯示應該在 $Z=114, N=164$ 這區域存在的穩定超重元素島區至今還沒有任何實測證驗基礎。目前我們只能揣測這是由於「迅俘獲」過程的軌迹向右上角伸展(圖5)的時候碰上了一個極迅速,近於100%的裂變(fission)區,它實際上「截斷」了R過程。這揣測是否有理,則有

待於發展「飽含中子」(neutron-rich)核的裂變理論。

當然，我們不可忘記，到目前為止，整個R過程本身還只不過是純理論計算。R過程發生於超新星爆炸的外殼內層這一點便只是推測；而且，它還涉及大量極度不穩定，目前還未了解透徹的核。這些核的反應、衰變、裂變以及中子俘獲截面(cross-section)等各種性質目前都是用Hauser-Feshbach統計模型推算出來，而這模型所涉及的許多輸入數據，特別是能級密度和反應Q值，又必須從核的質量計算出來。所以，從原子核的層殼理論(shell theory)出發，把這大量不穩定核的質量和其他性質一一仔細確定，可以說是建立了解整個R過程所需的龐大動態理論架構的前提。

同樣，恆星演化末期的迅猛過程目前也還未完全了解。例如中型星射脫外殼和巨型星發生超新星爆炸時到底如何和把那一部分融合成的物質投射到太空，成為星際物質？中子星到底在何種質量限制下會塌縮成黑洞而不發生第二類超新星爆炸？這些都還是有待研究的急迫問題。

而且，在更大的空間尺度，星的演化和星雲乃至宇宙的構造都是息息相關的。在目前，支持宇宙形成的「大爆炸」理論最堅強實測證據是精密確定的極度均勻和各向同性的2.73K宇宙微波背景輻射，但這輻射則和星雲形成理論以及觀測得的超星雲大構造有觀念上的矛盾。同時， H^2 、 He^3 、 He^4 和 Li^7 對氫 H^1 的實測比例間接限制了整個宇宙的重子質量密度 Ω_b ——目前這密度它只有所謂「膨脹宇宙模型」(inflationary universe model)所需的臨界密度的15%。要「提高」 Ω_b 會引出其他問題，例如宇宙間究竟有多少無從觀測的「黑物質」(dark matter)的問題，後者的解決則有賴於更深刻了解小型星的元素成分和巨型星的結局，以使得「褐矮星」(brown dwarf)和黑洞的數目可以估計。同樣，星雲的演化也是和其中恆星的形成、種類以及星際物質的成分息息相關的。

我們相信，90年代將是核天文物理學飛躍進步的一個時代。這一方面是由於超級計算機的廣泛應用在質量上大大提升了綜合和計算能力，另一方面則因為嶄新的觀測和實驗設備，例如將在本世紀末進入太空的紅內線望遠鏡(圖7)和擬議中的「同位旋量實驗室」(Iso Spin Laboratory)，行將完全改變核天文物理學的面貌，把以前所無從觀測的領域全面打開。從二十世紀天文物理學的大量驚人發現看，二十一世紀將會是更令人目眩神迷的。

部分專業參考文獻

天文物理學

- (1) Donald D. Clayton: *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis* (The University of Chicago Press, 1983).
- (2) R. Kippenhahn and A. Weigert: *Stellar Structure and Evolution* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990).
- (3) S.L. Shapiro and S.A. Teukolsky, ed.: *Highlight of Modern Astrophysics: Concepts and Controversies* (John Wiley and Sons, Inc., 1986).
- (4) Claus E. Rolfs and William S. Rodney: *Cauldrons in the Cosmos* (The University of Chicago Press, 1988).

核融合過程

- (5) W. David Arnett and James W. Truran, ed.: *Nucleosynthesis: Challenges and New Developments* (The University of Chicago Press, 1985).

大爆炸理論

- (6) Joseph Silk: *The Big Bang* (Freeman and Comany, San Francisco, 1980).

中子俘獲過程

- (7) F. Käppeler, H. Beer and K. Wisshak: *Rep. Prog. Phys.* 52, 945, 1989.
 (8) J.J. Cowan, F.-K. Thielemann and J.W. Truran: *Phys. Reports*, 267, 208 (1991).
 (9) G.J. Mathews and J.J. Cowan: *Nature*, 345, No. 6275, 491 (June 7, 1990).

超新星現象與機制

- (10) Marschall, L.A.: *The Supernova Story* (Plenum, New York / London, 1988).
 (11) H.A. Bethe: *Review of Modern Physics*, 62, 4(1990).

王榮平 南京大學畢業，Drexel University物理系博士生。

呂南姚 南京大學畢業，Cornell University天文學系博士生。

馮達旋 廣東人，在星加坡成長，1972年在美國University of Minnesota獲博士學位，先後任教於University of Manchester及University of Texas at Austin；自1976年開始任教於Drexel University，現為該校M. Russell Wehr物理學講座教授，自1987年開始出任蘭州大學現代物理學客座教授。馮教授的研究工作以原子核結構和核天文物理學為主，並旁及於量子紊亂理論問題。

提爾曼(Friedrich-Karl Thielemann) 1980年獲 Technische Hochschule Darmstadt博士學位，先後於California Institute of Technology, Max Planck Institut, University of Chicago, University of Illinois任研究員，自1986年開始於Harvard University天文學系及Harvard-Smithsonian Center出任天文學副教授。提爾曼教授之工作以天文物理學，特別是大爆炸理論及超新星爆炸為主。

Acknowledgment Nuclear physics research conducted in Drexel University is supported in part by the United States Science Foundation.

以下各位同仁對本文提出寶貴意見及建議，謹致衷心謝意：Richard Boyd, Rick Casten, John J. Cowan, 方勵之、Moshe Gai, Mike W. Guidry, 韓小玲、太田滋生、Edwin Salpeter, 王鎮華及吳成禮。本文作者王榮平及呂南姚並對南京大學師友之鼓勵與幫助表示感謝。

圖6(右上) 1987年初次出現的超新星 SN1987A。圖中央是星體爆炸產生的碎片，其周圍的黃色橢圓光環成因不明，兩側的恆星與超新星無關。

圖7(右下) 美國擬議中的高靈敏和長壽(五年)太空紅外線望遠設備，它可用於探測原始星雲。