

元素

是如何生成

魏和祥

私立淡江大學化學系

一、緒 言

我們都知道，古代的中國與希臘的哲學思想家、到近代的化學家、物理學家，都認為元素是構成物質的基本單位。但是，自從放射線的發現之後，人類才真正瞭解，元素並不是自無限時間以前就有存在的，而是每一種元素，都有其誕生的日期及壽命。然而，自然界的元素是如何生成的？要解答這個問題，首先要從自然界，宇宙中元素存在度（比例）的情形及核物理理論的引證來推斷。

二、元素之相對存在度 (The relative abundance of the chemical elements)

關於元素的相對存在度，最早在1889年，克拉克 (F. W. Clarke) 根據地球表面岩石之成份分析所得之結果加以比較所得。這只能代表地球表面元素之平均組成而已，不能代表宇宙整體的元素存在度。因此1950年代，由於同位素比

及核物理之理論相繼建立，1956年蕭斯 (H. E. Suess) 與尤列 (H. C. Urey) 兩位提出較為可靠的所謂“Suess-Urey 宇宙元素存在度”，如圖1所示。此元素存在度之建立，乃是根據①較輕之元素之存在量，是由太陽光譜分析所得，②較重之元素，是根據石質隕石之定量分析所得。其他即由地殼或他種隕石之分析所得。

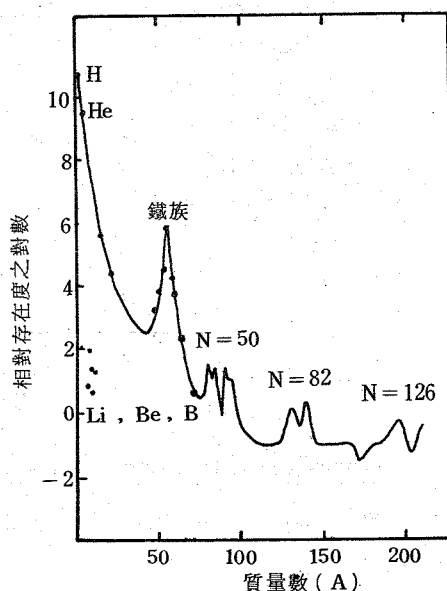


圖1 Suess-Urey 宇宙元素存在度
(以 $\text{Si} = 10^6$ 為準)

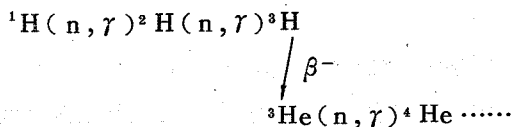
根據元素存在度圖，我們可以指出下列幾項特性：

- (1) 氫元素之存在量特別多，而且，依元素之重量增加而其存在量減少。
- (2) Li, Be, B 等三種元素特別稀少。
- (3) Fe 元素周邊之元素之存在量呈現特別多，而且在質量數56處有一頂峯。
- (4) 比 Fe 重的元素之存在度，彼此間相差不大，但是，在中子數目為巧數 (magic number) 時，(即 $N = 50, 82, 126$)，元素之存在量特別高。

三、元素創生的始末

(1) Big-Bang 理論

這是Gamov氏於1948年，根據宇宙膨脹論所提出的，他認為：宇宙空間充滿高密度之中子（n）、質子（p）與電子（e），當初持 $n \rightleftharpoons p + e$ 之平衡狀態，而後以此產生爆炸（Big-Bang），則在爆炸後20多分鐘之間，進行下列元素之合成：



（此處 ${}^1\text{H}(n, \gamma){}^2\text{H}$ 代表 ${}^1\text{H} + n \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma$ 反應之簡式），雖然Gamov的推論，對從輕元素逐漸生成重元素，容易瞭解，但是，對於元素之安定性及存在度，不易說明，如質量數為5，8的同位元素之不安定性，甚至沒存在，却很難解釋。

(2) B²FH理論

B²FH，是物理、天文、宇宙論科學家，Burbidge, Burbidge, Fowler 及 Hoyle等，取姓之頭一字母併合而成的。在1957年，他們綜合提出所謂“元素之大部分是由恒星之進化過程中的核反應所生成”。由於此理論能說明 Suess-Urey 之宇宙元素之存在度，固被認為元素生成始末，最可信賴的理論。因此，可以從星球進化與核反應過程中，追尋元素誕生的根源。

四、星球之進化與核反應元素之合成

首先，我們來看看星球進化的模式圖，如圖2所示，可以將元素生成的步驟說明如下：

(1) 氫氣之凝集與燃燒 在我們的銀河系

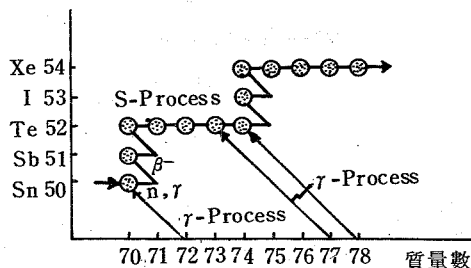
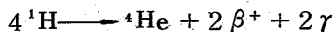


圖2 重元素生成之過程

，有無數的星球存在，在天空那些亮晶晶的星星，最原始，是由氫氣為主體所凝聚而成的。由於重力的作用，氫氣就開始收縮，而此重力能以熱的方式放出，於是內部溫度上升，溫度達 1.7×10^7 K 程度，足夠成為熱核反應的進行。（其實現在的太陽也正進行著此熱核反應），將氫元素融合成氦（He）元素。

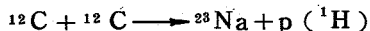


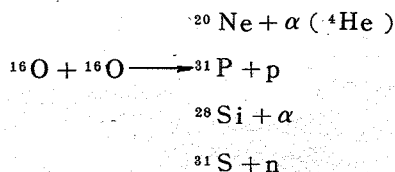
(2) 氫氣之燃燒 由於中心部分，氫原子生成氦原子，氫之濃度逐漸降低，因此，再開始收縮。內部溫度也再升高，達 10^8 K 以上時，He 原子開始燃燒。此時其反應為



即 $3\alpha ({}^4\text{He})$ 之反應。由於 2α 反應生成 ${}^8\text{Be}$ ，理論上很不安定。因此大部分都越過此反應而達到生成很穩定的 ${}^{12}\text{C}$ 元素。然後再與一個 ${}^4\text{He}$ 反應融合生成 ${}^{16}\text{O}$ 。不久，內部也一度停止收縮。

(3) 重離子熱核反應 當氫元素燃燒完了之後，內部開始又收縮，溫度也再升高。但是星球外部的溫度比內部溫度低，因此熱核反應也較緩慢。當內部溫度達到 7×10^8 K 時， ${}^{12}\text{C}$ 彼此間的熱融合反應也就開始進行。溫度再升至 10^9 K 時 ${}^{16}\text{O}$ 彼此間也進行融合反應。例如：



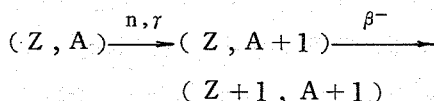


這些反應，是生成質量數 32 以下（比 Si 輕之元素）之元素。這種過程稱為重離子熱核反應（也稱為 α -過程）。

(4) 平衡熱核反應 重離子熱核反應進行生成元素之後，欲再由兩個較重元素融合成更重的元素時，各元素必須增加運動能以克服更高的核間庫倫能障壁。而此階段之熱能不足以促成較重元素之熱核反應。不過，與前階段一樣，內部之收縮，使溫度再上升，達 $3 \times 10^9 \text{ K}$ 時，原子核激發狀態增加，隨之 γ -線也增加，此時 ${}^{28}\text{Si}$ 等被 γ -線照射進行光核反應而產生多量的質子、 α -粒子，再加上重離子反應生成之原有 α 粒子、質子，濃度升高，再與 ${}^{28}\text{Si}$ ， ${}^{32}\text{S}$ 撞擊而生成更重的元素。但這種過程達到質量數 56，即鐵元素附近，達到一高峯，此時熱核能反應達到平衡，星球內部鐵元素之濃度較高，但並非完全變成鐵元素，這要考慮到熱核反應速度的問題。由於上述的過程是一熱能平衡反應故稱為 e -過程（equilibrium process）。

(5) 緩慢過程（slow time scale, s-process）

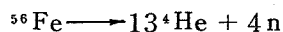
當到達熱核平衡之後，由於內部及四週有多量之荷電之中子，容易被原子核吸收，而進一步進行 (n, γ) 反應，以及 β^- 衰變，增加質量，原子序等。



（此處， Z 代表原子序， A 表示質量數）。例如圖 3 所示，從原子序 50 號 Sn 元素到 54 號 Xe

元素生成之過程。

(6) 超新星的爆發與重元素的生成 經過這漫長時間及過程之後，星球中心部分的鐵元素濃度極高，如此是否再促成溫度上升而再進行高能熱核反應呢？事實不然，由於收縮所產之重力，在溫度達 $7 \times 10^9 \text{ K}$ 時，鐵原子就開始分解，這如同物質（分子）的熱分解一樣，原子核內核子間之結合也會因高溫之下產生裂解。



不過，這是一吸熱反應，因此吸收周圍的熱，而致內部溫度下降，而打破重力及熱運動之間的平衡，於是原子核擠向中心部，這種現象稱為爆縮（Implosion）。而另一方面，重力能隨之大量放出，而轉變產生爆發。在天文學上稱為超新星的爆發。當爆發產生時，隨之而來的高能衝擊波，從星球之中心往外輪激進。在衝擊波通過的領域內，促成高溫環境，而使中子生成反應加速，於是中子束（等於中子密度 $\times$ 中子速度）升高，約一般原子爐的 10^{18} 倍。而使此領域內的重元素捕獲多量的中子，而形成很不穩定的重核元素，接著做 β^- 衰變，達到安定核。因為中子捕獲是快速反應（ $10 \sim 1000$ 秒），故稱為 r -過程（rapid time scale process）。

以上，是星球一生的經歷，也是元素製造的過程。可是，特別要附帶說明的是，即並非所有的超新星，都會產生爆發事故，這要看這顆超新星的質量大小，來決定它的命運。一般超新星的質量達到太陽質量的 1.4 倍以上，方能產生爆發。事實上超新星的爆發，我們的銀河系內，在歷史上有所記載，最古是在 1054 年牛星座就發生過爆發。

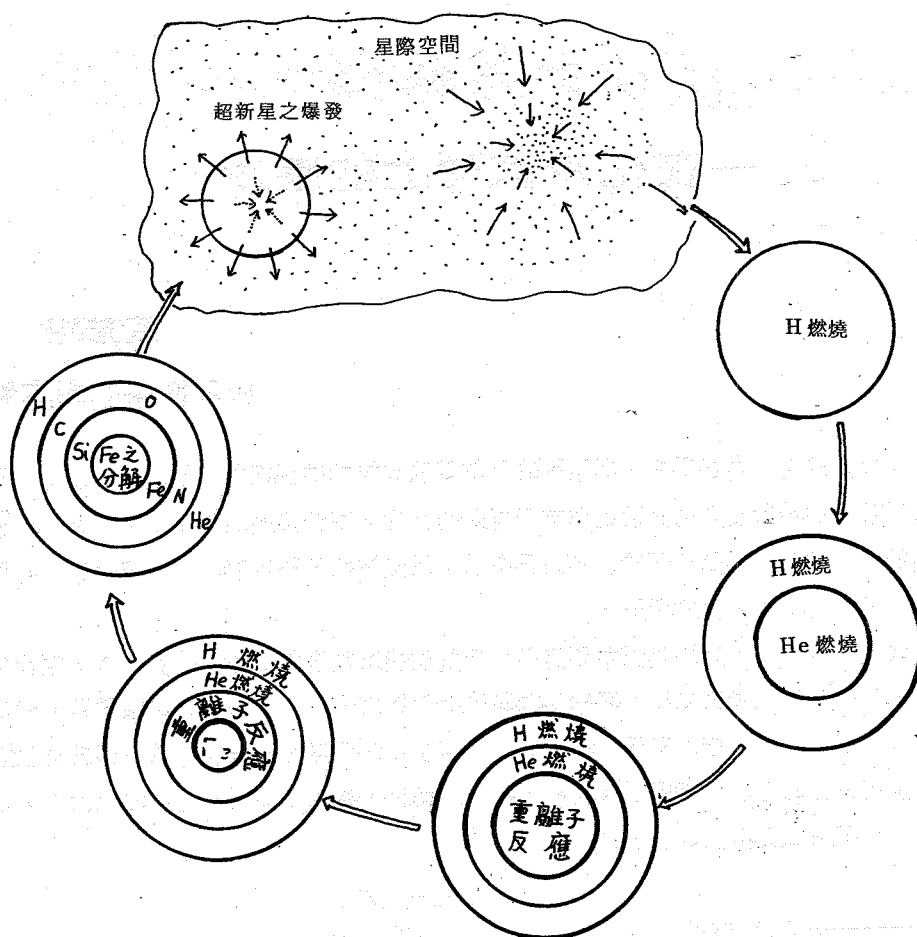


圖 3 星球進化模式圖

五、結 語

以上是根據 B^2FH 之機構，敘述元素之生成，可以說能用基礎科學的知識，對元素生成所做的說明。當然，在初高中科學教學中，或許會遭遇到這些問題。可以用上述就是一標準答案。留下待解答的問題，可能是元素的安定性與壽命問題，這必須有更高的核物理理論方能勝任，並非在中學教育內所要急切知道的。或許更進一

步的疑問，就是礦物及生物分子的起源與生成了，這些問題，在化學領域，我們稱為化學進化。在中等科學教育中，這門學問或許可以粗略而簡單的講授。例如在宇宙空間，構成生命的基本分子之生成，可能對學生來說，是較有趣而且容易接受的領域，下次筆者再來介紹。