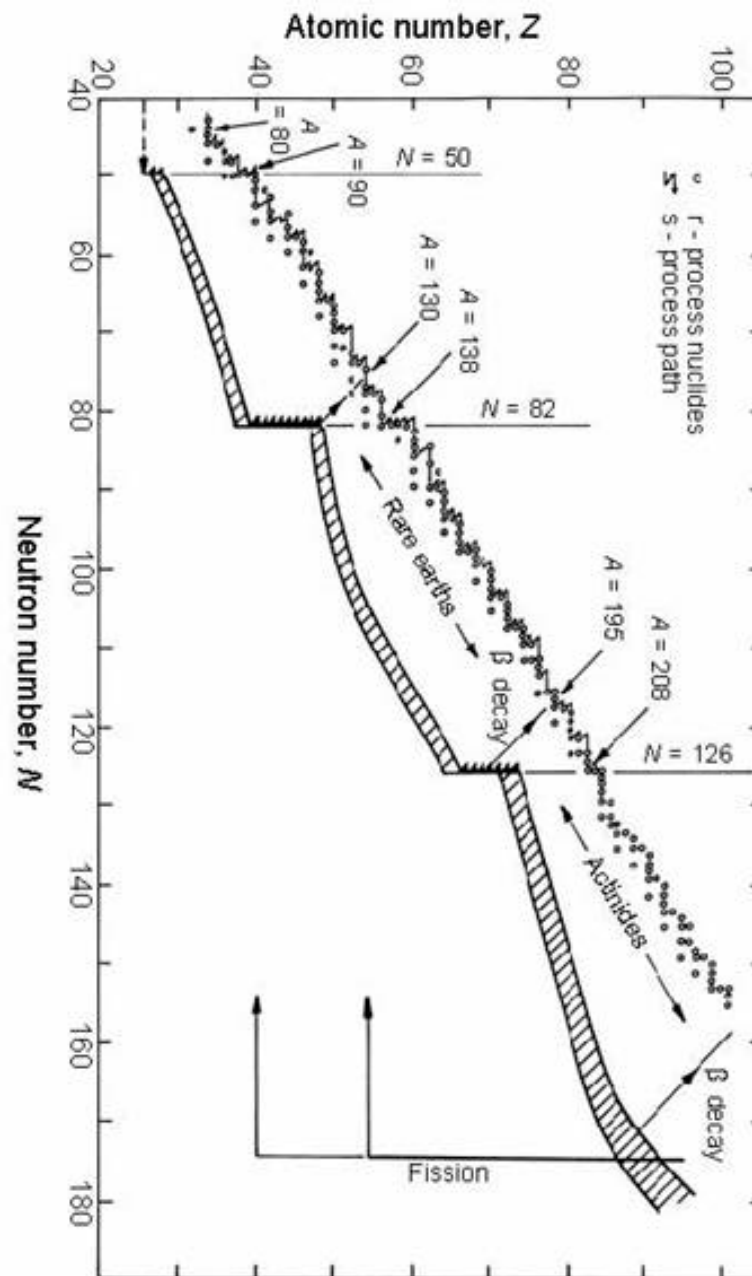


巧奪天工：117 號新元素

◇ 高崇文教授



↑各元素的 α 和 β 衰變示意圖

大家在國中時都學過周期表，甚至還背過它，但是你有注意過原子序最高的是哪一個元素嗎？其實你如果比翻你國中化學課本裡的周期表，你有發現到它跟現在的周期表有所不同嗎？甚至於如果你在家裏的舊書堆，找到哥哥姐姐甚至叔叔阿姨用過的化學課本，你會赫然發現他們當年讀的周期表少了好多元素呢！

這些近年來所合成的新元素稱之為超重元素(Super Heavy element, SHE)。超重元素的背後隱含了哪些有趣的物理？為何合成超重元素是相當困難的事？為何物理學家千方百計要挑戰原子序更高的超重元素？這些都是大哉問呀！希望這篇介紹性的短文能拋磚引玉，喚起大家對這個在臺灣相對冷門的領域的一些興趣。

大家記得，原子核由質子與中子組成。質子數相同而中子數不同的原子被稱為同位素(isotope)。由於電子數與質子數相同，同位素的化學性質完全相同，然而同位素之間的物理性質卻可能相差甚多。

其實周期表中，天然的元素只到銻(原子序 94)以及它的同位素。為什麼大自然沒有原子序比銻高的元素呢？這要從質子與中子如何形成原子核說起。

質子與質子之間存在著庫倫斥力，而中子又不帶電，所以電磁力是無法解釋原子核的形成。事實上，原子核的形成是由於核子間強大的吸引力所造成的。這個作用力被稱為強作用力(the strong interaction)。

強作用力雖然非常強大，作用範圍卻是非常短。以強作用力的媒介， π 介子，為例，它重達 140 MeV。依照測不準原理可以估計其作用範圍只有幾個費米(fm, 即 10^{-15}m)。所以當原子核大到一個地步的時候，每個核子只能藉強作用力吸引周圍的幾個核子。於是，質子間的長距離的庫倫斥力使原子核變的極不穩定，進而導致核分裂。這就是為什麼，巨大原子核的壽命遠短於其它衰變方式所預測的壽命。

然而物理學家也發現，某些原子核的平均束縛能特別大：也就是說這些原子核相較原子序接近的其他原子核，顯的格外穩定。為什麼呢？

1949 家邁耶(Maria Goeppert Mayer)和延森(Hans Jensen)等人建立了原子核的殼層(shell)模型。他們兩人因此獲得 1963 年的諾貝爾物理獎。核子之間有種非常強的“自旋—軌道”耦合機制(spin-orbital coupling)。根據這項機制，原子核擁有類似原子中電子的“殼層”結構。這些殼層被填滿的原子核，會特別穩定。

殼層允許的能階數稱為“魔數”或“幻數”(Magic number)。目前已經確認的幻數有：2、8、20、28、50、82、126 這七個幻數。自然界廣泛存在的氦、氧、鈣、鎳、錫、鉛元素的質子或中子數，分別對應 2 到 82 的幻數。當質子數與中子數都是“幻數”時被稱為“雙幻核”。例如自然界存在質子數 82、中子數 126 的鉛同位素 ^{208}Pb ，就具有雙幻數，也的確顯得異常穩定。

1960 年代晚期，Glenn Theodore Seaborg 延伸原子核的殼層模型延伸而提出“穩定島”(island of stability)理論。他認為即使對非常巨大的原子核，只要質子數是所謂幻數，那麼殼層帶來的穩定作用，足以抵銷庫倫斥力，而避免發生核分裂，並改以別的方式來衰變。於是半衰期長得

足以及在實驗室中被觀測到。如果我們可以找到適當的輕核讓它們產生碰撞，製造出幻核產物，甚至雙幻核產物，就形成了半衰期相對較長的超重元素。之所以可能人工合成超重元素，就是這樣。

然而要在實驗室合成超重元素其實困難重重：首先科學家發現巨大的原子核會產生變形，所以殼層模型需要被修正，而相應的“幻數”也會改變。這樣一來我們需要足夠好的理論來選擇適當的靶與粒子束；適合當作靶的同位素通常必須有較高的中子數，但他們往往要不是非常不穩定，要不然就是很難在實驗室製造出足夠的量。所以有時候科學家必需費盡心思才能合成新的超重元素。

更慘的是通常合成的新元素，很快就會循各種途徑衰變掉。要確定新元素正確的質子數與中子數，得先確定衰變產物(稱之為子同位素，daughter isotope)。可是往往這些衰變產物常常是首次被製造出來，這使得確定衰變產物往往困難重重。偏偏這又是決定性的一個步驟。

歷史上最著名的就是當年費米(Erico Fermi)用中子轟擊鈾而誤以為自己造出超鈾元素，當時只有女化學家 Ida Noddack 力排眾議，認為費米得到的並非是超鈾元素。但是當時大家都接受費米的主張；費米還因此獲得 1938 年的諾貝爾物理獎呢！後來才發現費米得到的只是核分裂的產物。所以要確定合成新的元素要非常謹慎，否則是會鬧笑話的！

順帶一提，筆者接觸到超重元素是在德國法蘭克福大學理論物理所擔任宏博學者的時候。當時的所長曾建議筆者去計算質子數與中子數都為 120 的原子核性質。他認為，既然 α 粒子是由兩個質子與中子所組成，如果形成類似碳 60 (巴克球) 的足球形結構，恰好能使質子數與中子數都為 120，應該可以非常穩定。不過筆者雖然花了不少工夫參詳文獻，卻發現整個計算非常龐雜就跑去作別的題目啦！

以下讓我們看看新元素 117 是如何歷經千辛萬苦才成功合成的故事：

一開始是位於俄羅斯莫斯科州 Dubna 的聯合核研究所(JINR)的一個團隊，於 2004 年提議進行合成 117 號元素的實驗。(JINR 粒子加速器是世界上用於合成超重元素的最強大的粒子加速器) 他們嘗試用 ^{48}Ca 粒子束轟擊 ^{97}Bk (鉍) 的靶。為什麼非用鈣和鉍元素不可呢？因為要產生高能離子束，需要較輕的同位素。 ^{48}Ca 是具有多個過剩中子的穩定同位素中，最輕的。次輕的同位素則是鈣-68，其質量比鈣高出許多，會讓實驗難以進行。要與含有 20 個質子的鈣結合成原子序為 117 的同位素，就需要含有 97 個質子的鉍。

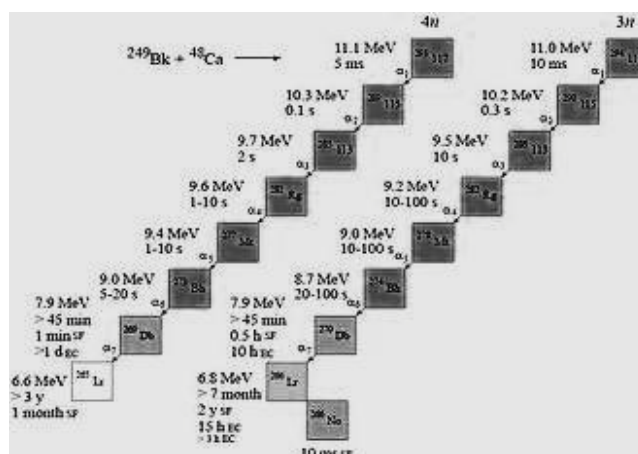
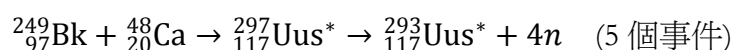
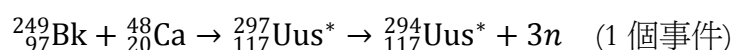
但由於美國橡樹嶺(Oak Ridge)國家實驗室是世界上唯一能夠製成鉍的實驗室，而他們宣稱產量不足，未能提供這一元素。俄羅斯團隊決定轉而用鈣轟擊 ^{98}Cf (鈾)，嘗試合成 118 號元素。之後他們宣稱成功合成 118 號元素，但 IUPA 至今尚未正式認可。

後來美國團隊在 2008 年重啟了製造鉍的計劃，並與俄羅斯團隊建立了合作關係。該計劃產生了 22 微克的鉍——這樣的量足以進行 JINR 提議的實驗。鉍樣本經 90 天被冷卻，再經 90 天的化學純化過程後，必須及時送往俄羅斯，因為鉍-249 的半衰期只有 330 天(每 330 天因衰變

而減半)。實驗必須在鈾靶運輸算起的六個月之內進行，否則當樣本量過小時實驗就無法進行了。

2009 年夏，這些鈾被裝在五個鉛製容器中，“搭上”紐約至莫斯科的航班送到俄羅斯。令人傻眼的是俄羅斯海關居然兩次以文件不全為由拒絕了樣本的通關，因此樣本前前後後五次飛越大西洋，一共花費了幾天時間。成功通關之後，它被送往烏里揚諾夫斯克州季米特洛夫格勒 (Dimitrovgrad, Ulyanovsk Oblast)，在那裡鈾被固定在鈦薄片上，然後火速運往杜布納，安裝在 JINR 粒子加速器上。

實驗在 2009 年 6 月展開。到了 2010 年 1 月，弗廖洛夫核反應實驗室(Flerov Laboratory of Nuclear Reactions)的科學家首次在內部宣佈成功探測到原子序為 117 的新元素的放射性衰變。總共兩條衰變鏈，一個是奇數－奇數同位素，一個是奇數－偶數同位素。前者經 6 次 α 衰變後自發核分裂；後者經 3 次 α 衰變後自發核分裂。這兩條衰變鏈分別屬於 ^{294}Uus 和 ^{293}Uus 同位素，其合成反應分別為



↑Uus 的衰變路徑圖

其中 Uus 是 Ununseptium 的簡寫。這是根據 1979 年國際純粹與應用化學聯合會(IUPAC)發佈了有關新元素命名的建議而為 117 號元素命名的暫名。

2010 年 4 月 9 日，團隊在《物理評論快報》(Physical Review letter)上刊登該項發現的正式論文。由於當時所有 Uus 的子同位素都尚未被發現，所以這項結果不能用於向 IUPAC/IUPAP 聯合工作小組(JWP)申請證實元素的發現。

終於等到了 2011 年時 Uus 的其中一個衰變產物 Uup-289 被直接合成，其性質與合成 Uus 時所測得的數據相符。有趣的是當 JWP 在 2007 至 2011 年審閱各種原子序比 $_{112}\text{Cn}$ (鎢)還大的元素時，竟然發現杜布納團隊並沒有向 JWP 提出申請。杜布納團隊在 2012 年成功重複了實驗，其結果與先前的實驗吻合，之後也補交了發現新元素的申請書。目前 JWP 正在審閱這一申請。

好消息是在 2014 年 5 月 2 日，德國 Darmstadt 的亥姆霍茲重離子研究中心(GSI Helmholtz Center for Heavy Ion Research)的科學家宣佈，證實了 Uus 的發現。不僅如此，他們還發現了新的 $^{266}_{103}\text{Lr}$ (鏷)同位素。該同位素是 $^{270}_{105}\text{Lr}$ (鉷) α 衰變產物(在杜布納進行的實驗中 $^{270}_{105}\text{Lr}$ 進行的是自發裂變)。半衰期為 11 小時，它是所有超重元素的已知同位素中，壽命最長的了。鏷-266 可能就位於穩定島的“岸邊”。這使得 Uus 的存在幾乎無庸置疑。

由於 Uus 屬於元素週期表中的 17 族，五個鹵素的正下方(氟、氯、溴、碘和砹)，他們都具有 7 個價電子，形成 ns^2np^5 價電子分布，所以 Uus 的許多性質都會接近鹵素。但是 Uus 和鹵素之間還有不少顯著的差別。

其中一個最大的因素是自旋—軌道作用。這一作用在超重元素中特別強，因為它們的電子運動速度比輕元素快得多，而且軌道半徑非常長。對於 Uus，該作用降低了 7s 和 7p 電子能階，使這些電子更加穩定。

Uus 的放射性半衰期小於 1 秒，但這仍然比預測值高。杜布納團隊相信，這一元素的成功合成直接證明了穩定島的存在。量子穿隧模型的計算預測，到 ^{303}Uus 為止，有多個 Uus 的同位素都能進行半衰期長達 40 毫秒的 α 衰變，其中以 ^{296}Uus 最為顯著。另一項利用液滴模型的研究得出了相似的結果，而且還發現，質量比 ^{301}Uus 高的同位素有穩定性增加的趨勢。這些都是以鼓舞科學家繼續嘗試合成更重的超重元素。

也許再過幾年你打開你小孩的化學課本，你會發現周期表又變長了呢！

■高崇文是國立台灣大學物理系學士，美國馬里蘭大學物理博士。現任中原大學物理系教授，專長高能物理。