

人造元素是撞擊出來的一漫談合成超鈾元素的歷史

文·圖—劉冠任

建立元素週期表的過程是一段漫長的科學探究歷程。許多科學家前仆後繼、彼此接力又互相競爭，藉由對看不見的光線，以及對不同物質的顏色、體積、重量、溫度或密度等理化現象的靈敏觀察與測量，試圖瞭解與建構元素的性質，並猜測或預測下一步的可能發展。當門得列夫發表週期表後，科學家們一路從探知陰極射線、探查X射線、發現放射性、命名同位素、探究原子核、合成超鈾元素及建立基本粒子的「標準模型」，直至想像、驗證元素及宇宙如何生成與交互作用，就是一場絢麗科學表演的寫照。

紐西蘭物理學家拉塞福(Ernest Rutherford, 1871-1937, 1908年諾貝爾化學獎得主) 繼1911年發表「拉塞福模型」，開啟了探討原子內部的領域後，1919年接續進行了 α 粒子射入純氮氣的實驗，結果得知：運用 α 粒子撞擊氮原子，可以獲得氦原子核。當這些氦原子核碰撞硫化鋅屏幕時，會產生閃爍的信號，而顯示出氦原子核的位置，據以推斷氮原子內肯定含有氦原子核。另外，基於他認同「普羅特假設」(Prout's Hypothesis) —「所有元素的原子都是由不同數量的氦原子所構成」的觀點，拉塞福認為「氦原子核是所有其他原子的基礎材料」，因此命名這種帶正電的氦原子核為“Proton”，希臘文的字意為「第一」，由於這項重要的研究成果，拉塞福被後世公認為質子的發現者。

質子被發現後，許多科學家認為原子核內除了質子之外，似乎還有其他東西。1920年，拉塞福接著提出「質子-電子模型」假設，他認為一種原子的原子量與其原子序數的差異可以用原子核內尚存在一種電中性的粒子來解釋，而這種電中性的粒子是由一個電子環繞一個質子所構成的，用以抵消質子間相互的排斥力。不過，由於這種說法沒有直接的證據，並且所提出的中性粒子也很難在原子核內被偵測出來而被科學家們擱置。

1930年代，德國科學家博特(Walther Bothe, 1891-1957, 1954年諾貝爾物理獎得主) 與其學生們運用鈾(Po)衰變所獲得的 α 粒子去撞擊鈹(Be)箔，用以瞭解原子核內的物理現象，因而獲知一種全新的、不尋常的，且具有很強穿透力的高能射線，推測是由高能量的質子所組成。1932年，居禮夫人的長女及女婿伊倫和弗雷德里克·約里奧-居里(Irène and Frédéric Joliot-Curie, 同為1935年諾貝爾化學獎得主) 使用由鈾(Po)衰變而獲得的 α 粒子去撞擊鈹(Be)箔，所產生的放射線再去轟擊石蠟的標靶，因而成功地撞開氦原子核(質子)。他們倆人認為這種輻射是伽瑪射線(光子)，而不是高能量的質子束。但是，拉塞福的學生—英國物理學家查兌克(Sir James Chadwick, 1891-1974) 並不贊同這種解釋，其理由是光子沒有質量，不會把石蠟靶中的粒子撞出來，他認為可能是之前拉塞福所提出的中性粒子。於是查兌克同年(1932)又做了類似的實驗，以 α 粒子轟擊硼，而得到氦的同

位素(N-13) 及一種新射線，並確認所產生的放射線是一種未帶電荷的粒子，其質量大約比質子的質量多一點點。由於電中性的特質，讓這種粒子不僅很難以電磁場來加速、減速或是被束縛控制，並且其穿透性強，讓人無法直接進行觀察，所以很難被偵測到，最後，查兌克因「發現中子」這項艱鉅的研究而獲得1935年諾貝爾物理獎。

1935年諾貝爾化學獎得主—伊倫和弗雷德里克·約里奧-居里在探索中子的過程中，雖然同樣察覺到撞開氦原子核(質子)的新射線，但由於詮釋錯誤而與「發現中子」失之交臂。不過，他們倆人持續進行類似的研究，除了證實中子的存在外，也因「合成了新的放射性元素」，證實可由人工產生磷(P)放射性同位素而同樣獲得諾貝爾桂冠，這是繼1903年居里夫婦獲獎後，又一樁夫婦同時獲獎的美談，並且具母女親緣關係。其次，查兌克發現中子，一方面證實了拉塞福對「原子核內尚存在一種電中性粒子」的推測，不過，另一方面卻也因發現中子的質量太大，同時否定了拉塞福提出的「質子-電子模型」假設。

人工合成同位素的相繼發現使人們對「化學元素」的概念有了新的認識，意謂化學元素不再只代表一種原子，而是代表幾種相似的原子。同位素之間其原子量、放射性和存在的時間長短不同，但化學性質及反應卻極為相似。在查兌克發現中子後，人們才意識到所有同位素之間，各原子核內有相同個數的質子，但不同個數的中子。中性原子中，原子核內質子個數和中子個數的總和稱為「質量數」(或稱核子數)，是整數值，而「原子



圖1 親子觀眾聚精會神欣賞化學演示

量」則是質子和中子的質量之和，質子的數目決定了原子序數。也由於原子電中性的緣故，同時決

定了核外的電子數目，是決定元素化學性質的主要因素，亦即所有相同元素中的各原子核內，其中子數目不同，但只影響原子量，而不影響其化學性質。此外，在研究同位素的過程中，又發現了另外一種情況：有一些元素間具有相同的質量數，但化學性質卻截然不同，這些元素在周期表中無法納入同一個位置，因此被稱為「同量異序素」。此「同量異序素」的發現，又引起科學家們對同位素的另一種探討。

在查兌克發現中子的前1年(1931)，美國物理學家勞倫斯(Ernest Orlando Lawrence, 1901-1958) 從挪威工程師所發表的論文中獲得靈感，在如何運用電子撞擊氣體原子使其游離化的研究基礎上，發明出一種獨特的圓形粒子加速器，即是著名的「迴旋加速器」。第一部加速器的直徑只有4.5吋，可以將氦離子加速至8萬電子伏特(eV)的能量，之後加速器從11吋、37吋、60吋、184吋漸漸改進加大，一直到目前歐洲核子研究組織(CERN)所擁有的大型強子對撞機(Large Hadron Collider, LHC)，它建造在圓周為27公里的圓形隧道內。而加速能量則從1百萬電子伏特(MeV) 不斷增加到13兆電子伏特(TeV)，這是目前全世界最大的粒子

加速器。勞倫斯迴旋加速器的發展幫助人類改變對自然與物質的認知，從幫助科學家探究更多的同位素，以及對生物醫學、物質粒子世界更多的研究與理解，直至幫助人們更瞭解人體新陳代謝的過程，甚至到後來的製備超鈾元素等，不勝枚舉。最後，勞倫斯因「對迴旋加速器的發明和發展，並以此獲得有關人工放射性元素的研究成果」獲得1939年諾貝爾物理獎。

查兌克發現中子後，科學家們開始研究如何運用中子來探查未知的元素，而粒子加速器就是一項重要的工具。當時已知放射性金屬鈾(U)是自然界中存量較多、又可運用的最重原子，因此利用中子撞擊鈾原子核的方式就成為科學家們最先想到的方法，不過，轟擊後產生的巨大能量也引發了第二次世界大戰的武器研發競賽，美國「曼哈坦計畫」就是著名的例子，而英國籍的查兌克也參與其中。

1940年，美國化學家麥克米蘭(Edwin Mattison McMillan, 1907-1991) 在勞倫斯所主持的「柏克萊輻射實驗室」運用迴旋加速器發現了半衰期約139萬年的鈹10同位素(^{10}Be)。同年，麥克米蘭與研究夥伴運用迴旋加速器產生的低速中子撞擊鈾(U)，經過23分鐘的 β 衰變後，產生了半衰期僅有2.4天的銻239同位素(^{239}Np)，這短暫的發現正式宣布了首次被發現，也是首次被人工合成的鈾系超鈾元素。超鈾元素指的是原子序數在92(鈾)以後的重元素，目前在自然界中無法被發現，其可能的原因之一是它們在自然界中極不穩定，半衰期又很短。其次，他們另一項共同的特性是：都具有不同數目、又為數

眾多的放射性同位素。在銻(Np)元素被發現之前，當時的元素週期表中並未列有鈾



圖2 觀眾聆聽解說之餘仍不忘拍下礦物精品

(Ac)系這一系列元素表，因此鈾(Th)、鏷(Pa)和鈾(U)分別列在銦(Hf)、鉭(Ta)和鎢(W)之下，未知的銻(Np)元素也在銻(Re)以下，據推測其化學反應的性質應該與鎢(W)或銻(Re)相似。門得列夫於1871年提出的元素週期表中，在鈾(U)之後的許多位置均標示一條橫線“—”，顯示有許多尚未發現的元素，也表示門得列夫曾察覺到超鈾元素的存在。1944年，曾經是勞倫斯的助手，後來擔任美國加州柏克萊大學校長的西博格(Glenn Theodore Seaborg, 1912-1999) 提出鈾系理論，類比英國物理學家莫斯利(Henry Moseley, 1887-1915) 提出鈾系稀土金屬元素的觀點，預言鈾(Ac)與之後比它重的14種連續元素，在週期表中屬於同一個系列，稱為「鈾系元素」，並陸續發現與合成原子序數95到102的各種新元素。由於「發現了超鈾元素」卓越的貢獻，麥克米蘭與西博格兩人同時獲得1951年諾貝爾化學獎。

本館「百變化學—元素週期表150年」特展將延展至4月26日止。在展場中，將持續呈現其他有關元素週期表的精彩故事或有趣的教育活動(圖1、2)，歡迎有興趣的社會大眾把握機會，蒞館參觀。