

放射核種之半衰期必定是常數嗎？

中央研究院地球科學研究所 扈治安

放射衰變(radioactive decay)是一個機率的問題；半衰期(half life)的長或短反映衰變機率的低或高。傳統的認知(conventional wisdom)總以為放射性核種之半衰期是各該核種之特定常數(characteristic constant)，不會隨物理或化學條件之變化而改變。一般教科書也一直是這樣在教導(或誤導)普羅大眾。如果根據核物理之理論來嚴格評判，這個觀念頗有可議之處，尤其是對以電子捕獲(electron capture)進行蛻變的核種來說。如果一個質量小的電子捕獲核種受到非常高的壓力，它 K 軌道之電子與原子核之距離可能會有一定程度的縮短，使其被原子核捕獲之機率增加。如果是化學環境的改變造成化學鍵的變更，也可能會調整軌道電子與原子核間之相對作用力，而改變電子捕獲之機率。

其實，早於半世紀前，就有物理學家及化學家提出改變放射衰變機率的可能方法[1-2]，並利用 ^7Be 進行相關實驗[3-11]，一直到三十年前為止[12]。這些實驗之所以選擇 ^7Be ，有幾個原因；主要是因為它是原子量最小的電子捕獲核種，只有四個電子($1s^2 2s^2$)，沒有多層電子軌道之屏蔽，使其 K-shell 之電子直接受周遭環境之影響。其次是， ^7Be 之半衰期為五十多天；很適合實驗觀測。再者， ^7Be 是由宇宙射線撞擊大氣中之氣體原子所產生，在自然環境中普遍存在，是研究地球表面一些傳輸過程非常有用的核種。然而在那個時代裡，量測 ^7Be 蛻變之貝他粒子或加瑪射線所用的工具，不是游離腔(ionization chamber)就是碘化鈉晶體偵檢器(NaI detector)；以這類儀器偵測 ^7Be 半衰期，其誤差一般在 0.1-1% 間，很難分辨出微妙但確實存在的差異。幸好在過去二十年來，由於半導體技術之長足進步，碘化鈉晶體已被高純度之銻偵檢器(HPGe detector)所取代，量測精密度大幅提高，提供了解決以往懸而未決之問題的良機。筆者在執行國科會計畫「以多示蹤劑法探討東海之沉積動力學」時，因為有最先進之 HPGe 加瑪能譜儀量測 ^7Be ，趁勢順便進行了此項附帶且屬於基礎科學的研究，已發表三篇 SCI 文章[13-15]，以下為所得結果之概述。

為進行此實驗，我們特別向原子能委員會

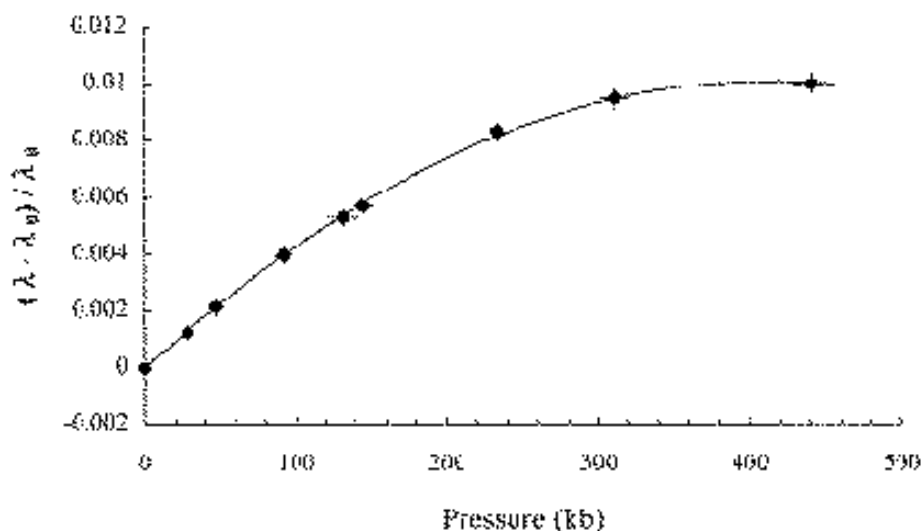
申請輸入許可，自美國 Brookhaven 國家實驗室購得一個毫居禮(1 mCi)的 ^7Be ，利用鈹之穩定同位素 ^9Be 當載體(carrier)製備了三種不同的化學形態： $\text{Be}^{2+}(\text{OH}_2)_4$ ， $\text{Be}(\text{OH})_2$ 及 BeO ，然後利用效率為 100%(相對於 $3\times 3\text{ NaI}$)之井型高純銻偵檢器(EG&G ORTEC GWL-100230)及數位加瑪能譜儀(EG&G ORTEC DSPec™)持續監測三個樣本中 ^7Be 於 477.56keV 之光子強度隨時間之衰退，前後長達四個月，求得 ^7Be 在上述三個化學相中之半衰期分別為 53.69 天，53.42 天，及 54.23 天。乍看之下，好像差不多，但 ^7Be 在 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 中之半衰期比在 BeO 中短了 1.5%(即 0.81 天)。此差異比起實驗誤差(約 0.006 天)高出兩個數量級，其真實性不容置疑，意義非常重大。當此結果以「特快信」(Express Letter)刊登於 1999 年九月份之 Earth & Planetary Science Letters 後 [13]，筆者巧於九二一集集大地震當天接獲 Science 雜誌之資深主筆 Richard Kerr 之電話專訪，有關內容於當年十月二十九日之 Science 報導[16]。

在觀察化學效應對 ^7Be 半衰期影響之同時，筆者亦與本所特聘研究員劉玲根先生合作，利用不需另加壓力介質(pressure medium)即可達成接近靜水壓(hydrostatic)之 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 進行高壓實驗。我們以各式的鑽石鉗(diamond anvil cell)將樣本加壓後，根據紅寶石螢光譜進行壓力量測，然後以效率為 150%(相對於 $3\times 3\text{ NaI}$)之高純銻偵檢器(EG&G ORTEC GEM-150200)監測樣本中 ^7Be 之衰退。我們發現當壓力由常壓升至 400 kb (約 4×10^5 大氣壓) 時， ^7Be 之衰變率增加約 1%(即半衰期降低 1%)。值得注意的是：衰變率隨壓力升高之增加並非線性，而是呈拋物線的趨勢(圖一)，經迴歸分析得：

$$(1-l_0)/l_0 = (4.87\times 10^{-5})P - (5.9\times 10^{-8})P^2$$

方程式中， P 為壓力(以 kb 為單位)， l 為壓力 P 下 ^7Be 之衰變率， l_0 為常壓下 ^7Be 之衰變率。

如果電子捕獲核種之半衰期非一般所認定的常數，則其對地球科學及環境科學之定年或定率研究將可能造成衝擊。例如 ^{26}Al ， ^{36}Cl ， ^{40}K



圖一 鉍七之衰變率(λ)隨壓力變化之關係圖

這些重要的地質定年計(geochronometer)或示蹤劑(tracer)都是電子捕獲核種；它們在地球內部深處，或在不同化學環境下，衰變率是否會變？如何變？有多大的變化？這是很重要的問題。但不幸的是，這種實驗比較適合用在半衰期在一至三個月左右的核種，太短或太長都不妥。太短的話，實驗步驟會追趕不上；太長的話，則一方面實驗時間需要拉長，另一方面不容易於鑽石鉗有限的空間中置入足夠活度的射源，而增大計測誤差。筆者繼 ^7Be 之後，以 ^{83}Rb 作實驗，在花了比 ^7Be 實驗更長的時間後(因為 ^{83}Rb 之半衰期比 ^7Be 長很多)，沒有量出任何變化。是否當核種之原子量大到 83 這個地步時，我們目前在實驗室中所能模擬出來的物理及化學條件的改變對電子捕獲速率的影響就消失了 [14-15]？如果真是如此的話，原子量大小對此議題之效應是否也有某種定律或函數關係？筆者很渴望知道答案，下一步擬挑選 ^{51}Cr 來作實驗，不知道是否適當？會不會又和 ^{83}Rb 的實驗一樣，落得徒勞無功？這種實驗一旦開始著手，就會教人騎虎難下，輒需夜以繼日、焚膏繼晷才能克竟全功。如果沒有一點把握抓住些許準頭，最好不要冒然嘗試，浪費時間、資源與精力。筆者是搞地球科學的，缺少核物理的理論基礎，很希望有此方高手和我們合作，為我這個「苦行僧」指點迷津，使理論與實驗能亦步亦趨，漸臻佳境。

參考文獻

- [1] E. Segré, *Phys. Rev.*, **71**, 274 (1947).
- [2] R. Daudel, *Rev. Sci.*, **85**, 162 (1947).
- [3] R. Bouchez, R. Daudel, P. Daudel and R. Muxart, *J. Phys. Radium*, **8**, 336 (1947).
- [4] R. Bouchez, P. Daudel, R. Daudel and R. Maxart, *Compt. Rend.*, **227**, 525 (1948).
- [5] R. Bouchez, P. Daudel, R. Daudel, R. Muxart and A. Rogozinski, *J. Phys. Radium*, **10**, 201 (1949).
- [6] P. Benoist-Gueutal, R. Bouchez, P. Daudel, R. Daudel and A. Rogozinski, *Phys. Rev.*, **76**, 1000 (1949).
- [7] R. F. Leininger, E. Segré and C. E. Wiegand, *Phys. Rev.*, **76**, 897 (1949).
- [8] R. F. Leininger, E. Segré and C. E. Wiegand, *Phys. Rev.*, **81**, 280 (1951).
- [9] E. Segré and C. E. Wiegand, *Phys. Rev.*, **81**, 284 (1951).
- [10] J. J. Kraushaar, E. D. Wilson and K. T. Bainbridge, *Phys. Rev.*, **90**, 610 (1953).
- [11] R. Bouchez, J. Tobailem, J. Robert, R. Muxart, R. Mellet and R. Daudel, *J. Phys. Radium*, **17**, 363 (1956).
- [12] H. W. Johlige, D. C. Aumann and H.-J. Born, *Phys. Rev.*, **C2**, 1616 (1970).
- [13] C.-A. Huh, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **171**, 325 (1999).
- [14] L. Liu and C.-A. Huh, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **180**, 163 (2000).
- [15] C.-A. Huh and L. Liu, *J. Radioanalytical & Nuclear Chemistry*, **246**, 229 (2000).
- [16] R. A. Kerr, *Science*, **286**, 882 (1999).