

科學圖書大庫

原子核與放射性

江 紀 成
李 琳 合譯 王 唯 農 校閱

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

原子核與放射性

江 紀 成
李 琳 合譯 王 唯 農 校閱

徐氏基金會出版

作者簡介

本書原作者葛瑞戈雷·蕭賓 (Gregory Choppin)，於1949年畢業於紐奧連斯的羅約拉大學。1953年自德克薩斯大學獲得哲學博士學位。自1953到1956年間，蕭賓博士參加勞倫斯放射研究所 (Lawrence Radiation Laboratory) 的研究工作。除了在1962—1963年間，蕭賓博士以客座科學家的身份參加比利時原子核研究中心 (Center d'Études de l'Énergie Nucléaire Belgique) 外，他都在佛羅里達州立大學任教授。

蕭賓博士在核子化學方面有60多篇關於鈾系與錒系元素錯離子、離子交換的論文。此外在1955年他在勞倫斯放射研究時，是發現原子序為101的元素Md的一員。蕭賓博士是美國化學學會及西格馬·克西 (Sigma Xi) 會的會員。

作者原序

促使第二次世界大戰結束的戲劇性事件，使原子核科學深入了大眾的意識。世界各國對原子核武器的長期爭論，原子核科學與技術在軍事上及科學上的迅速發展，以及因放射性同位素的利用，在醫藥、農業上所獲得的重大利益，都增加了大眾對原子核科學的興趣。學生們對原子核化學所表現的興趣是大一普通化學教師都具有的經驗。但因受教材的限制：簡短的章節只能對原子核化學作有限的介紹，幾乎所有的教材，對這方面的討論都嫌簡略；像原子核光譜學（**Nuclear Spectroscopy**）及核反應等極其重要的部份，幾乎都沒有提及。

作者在本書中希望能把原子核科學中重要的原理以及主要的實驗工具加以描述，尤其着重於與現代原子核化學有關的實驗及理論上的研究。作者編寫本書的目的是作為大一普通化學的補充教材，所以內容不至過分深澀，為使本書的篇幅不致過長，某些專題及本人的方法均予節略或刪除。如果作者寫本書的目的幸能達成，還能引起讀者對原子核化學挑戰的興趣。作者希望讀者能够繼續研究書末所列的參考書籍。

葛雷戈瑞·蕭賓

一九六三年於美國

佛羅里達州達拉哈斯城

常 數

光速	$C = 2.99776 \times 10^{10}$ 厘米/秒
法拉第常數	$F = 96500$ 絕對庫倫/克當量
電子電荷	$e = 4.8025 \times 10^{-10}$ 絕對靜電單位 $= 1.60203 \times 10^{-19}$ 絕對庫倫
蒲朗克常數	$h = 6.624 \times 10^{-27}$ 爾格一秒
亞佛加德羅常數	$N = 6.0228 \times 10^{23}$ 克分子量 ⁻¹
電子質量	$m = 9.1066 \times 10^{-28}$ 克
電子之原子量	$m = 5.4862 \times 10^{-4}$ (物理標)
單位原子量之質量	$M_o = 1.66035 \times 10^{-24}$ 克
原子核半徑	$R = 1.4 \times 10^{-13} A^{1/3}$ (A = 質量數)

原子量

氫

$$M_H = 1.00814$$

氮

$$M_N = 4.00387$$

中子

$$M_n = 1.00899$$

能當量

$$1 \text{ 原子質量單位 (1 amu)}$$

$$= 931 \text{ 百萬電子伏特}$$

$$= 3.56 \times 10^{-11} \text{ 卡}$$

$$1 \text{ 電子質量} = 0.510 \text{ 百萬電子伏特}$$

$$1 \text{ MeV} = 1.07 \times 10^{-3} \text{ amu}$$

$$= 1.60 \times 10^{-6} \text{ 爾格}$$

$$= 3.82 \times 10^{-14} \text{ 卡}$$

$$1 \text{ eV/分子} = 23.06 \text{ 仟卡/克分子量}$$

目 錄

作者簡介.....	V
原作者序.....	Vi
I 原子核	1
1-1 阿伐粒子散射實驗.....	2
1-2 羅德福之解釋.....	2
1-3 原子核的質量.....	4
1-4 原子核束縛能.....	6
1-5 原子核之半徑.....	8
1-6 原子核庫倫障壁.....	9
1-7 核 力.....	11
摘 要.....	12
習 題.....	13
II 放射性	15
2-1 中子數與質子數的比.....	15
2-2 不同型式原子核之豐度.....	16
2-3 阿伐衰變的特性.....	18
2-4 阿伐粒子的穿隧性.....	18
2-5 負子放射.....	20
2-6 貝他衰變能.....	20
2-7 貝他能譜.....	21
2-8 正子放射及電子捕獲.....	23

IV

2-9	衰變計算的規則	23
2-10	放射性衰變方程式	25
2-11	天然放射性	28
2-12	親—子關係	28
2-13	地球的年齡	31
	摘要	33
	習題	34
III	輻射之檢測	36
3-1	輻射與物質的作用	36
3-2	每一離子對所損失的能量	39
3-3	阿伐粒子	40
3-4	貝他粒子	41
3-5	伽瑪射線	42
3-6	底片乳膠法	46
3-7	雲室及泡室	48
3-8	游離室計數器	50
3-9	比例計數器	50
3-10	蓋氏計數器	51
3-11	閃爍計數器	52
	摘要	53
	習題	54
IV	核分裂	55
4-1	自發核分裂	55
4-2	液滴模型	55
4-3	誘發核分裂	58
4-4	熱中子導致的核分裂	59
4-5	核分裂能	60
4-6	核分裂中質量的分佈	62

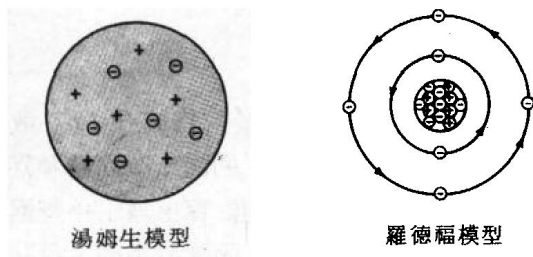
4-7	對稱核分裂與非對稱核分裂	63
4-8	核反應器	65
	摘要	67
	習題	67
V	加速器	69
5-1	范得高夫發電機	71
5-2	直線型加速器	72
5-3	迴旋加速器	74
5-4	同步加速器	76
	摘要	78
	習題	78
VI	核光譜學與核反應	79
6-1	衰變圖	79
6-2	殼層模型	81
6-3	集合模型	82
6-4	複核理論	85
6-5	複核的生存期	86
6-6	截面積	87
6-7	直接交互作用	88
6-8	核反應之能	90
6-9	原子核儕的產物	93
6-10	熱核融合反應	95
	摘要	97
	習題	98
VII	放射性同位素的用途	99
7-1	示踪劑使用的基本假設	100
7-2	輻射分析	101

7-3	同位素稀釋.....	102
7-4	活性分析.....	104
7-5	反應速度與機構.....	106
7-6	分子構造之研究.....	107
7-7	擴散之研究.....	108
7-8	人工元素.....	109
7-9	有機反應.....	111
7-10	光合作用.....	112
7-11	放射性同位素之考古學.....	114
	摘 要.....	117
	習 題.....	117
	參考書目.....	119
	附錄A：輻射的生物效應.....	120
	附錄B：同位素表.....	122
	名詞解釋.....	128
	索 引.....	131

I

原子核

今天，每一個能讀報紙的人，對原子核以及它對人類所具有的潛能都知道得十分清楚。即使說，將來人類的文明將受制於原子核，也未嘗不可。我們可以利用原子能由地球而到達其他的星球，也能用它來毀滅自己。然而，僅僅在半個世紀前，原子核的存在却無人知曉。到1911年，放射現象已發現了十五年，在這段時期裡，居理夫婦以及其他的科學家們也藉着放射性物質，做了許多重要的研究。物理學家和化學家們半信半疑地接受了1908年湯姆生（J.J. Thomson）假設的原子模型（Atom Model），這種模型將原子的構造定為帶負電的質點——電子——依某種次序排列於一帶有連續正電荷的球體內；這種情形極像置於一水果盤中的葡萄（第1-1圖）。假如你們的祖父輩曾在大學裡讀過物理，他們所學的原子很可能就是這種模型，這也就是我們在這裡把這個模型重提一下的理由。遠在人類瞭解原子的真像之前，人類已知道如何飛行，使用電力以及製造汽車了。



第1-1圖 湯姆生及羅德福所提議之原子模型圖

原子核的發現

1-1 阿伐粒子散射實驗 (Alpha-Particle-Scattering Experiment)

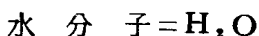
放射性物理界領導人之一的羅德福 (Ernest Rutherford) (1871 - 1937) 是生於紐西蘭的物理學家，他曾在英國及加拿大工作，由於他在科學上的成就，而被封為爵士。羅德福等人發現：由天然放射性物質，如鈾或釷的鹽類，所放射的阿伐粒子束，於穿過金屬薄片後，在照像底片上所留下的像，邊緣的線條都不明晰，有擴散的現象。這種現象表示，某些阿伐粒子在穿過金屬時，有偏折及散射 (deflected and scattered) 的現象發生。尤其令人感到有趣的是大部分穿過金屬箔的粒子，並無偏折及散射的現象，僅只少數質點發生甚大的偏折——每 8000 個質點中有一個質點的偏折角度超過 90° (圖 1-2)。由羅德福早期所作的研究，阿伐粒子已為人們所瞭解，阿伐粒子帶有兩個正電荷，其質量為氫質量的 4 倍。如此重的帶電質點在湯姆生的原子模型中發生了偏折，實在令人難以置信。如羅德福說的：「這好像要你相信，用十五英吋口徑的巨炮對着一張薄紙開火，結果炮彈反彈回來，打到你自己一樣。」在湯姆生的原子中，沒有大到足以吸引 (負電場) 或拒斥 (正電場) 阿伐粒子的靜電場存在，而能使入射的粒子束產生如此大的偏折。

1-2 羅德福之解釋

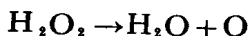
1911 年羅德福發表了一篇論文以解釋阿伐粒子散射實驗，促成了原子核物理學 (Nuclear Physics) 的誕生，同時奠定了近代物理學的基礎。根據這篇論文可以很容易地計算出原子中輕而帶負電之電子，無法使重而帶正電的阿伐粒子，因受兩不同電荷間 (例如：NaCl 結晶中的 Na^+ 與 Cl^- 間) 的庫倫引力作用，而發生大角度的偏折。因此，羅德福假設這種偏折是由於帶正電荷的阿伐粒子受到另一

體。(此時存在着另一種氫氧化合物叫過氧化氫其氫氧之重量比為1:16)。

定比定律是由英國化學家，道爾頓 John Dalton (1766~1844)，所提出的，說明在化合物形成中，原子與原子結合的情形。爲了要解釋上述關於水與過氧化氫的事實，我們可以假定氫原子與氧原子的重量比為1:16。在過氧化氫裏相對於每一氧原子就有一氫原子存在，但在水的情形却是每一氧原子就相當有二個氫原子存在。因此用H代表氫原子，O代表氧原子，並且使用一個寫在字母下方的小數字代表每一種類的原子個數，我們可以表示這二種物質的化學組成如下：



過氧化氫分子 = HO (或 H_2O_2 ，它能用其他方法證明) 用第二種方式表示過氧化氫，指出了這種分子比最普通的化合物——水，多了一個氧原子。而實際上，過氧化氫是一種不穩定的物質，它同時會依照下列方程式自然地分解：



在這個反應過程中放出的自由氧原子具有極強的氧化性質，這種性質使 H_2O_2 得以用在各種漂白的過程，而且它能使一個黑髮女孩變成一個淡金髮的女孩而已。

同樣的，氧與碳結合產生二氧化碳 CO_2 ，或者，在氧不足夠情形下燃燒，產生一氧化碳 CO 。與過氧化氫相反的是一氧化碳缺少了一個氧原子，極欲從那些不能緊緊抓住氧原子的分子中搶奪額外的氧原子。在一氧化碳裏，碳與氧重量比為3:4，也可寫成12:16。因為氧原子量訂為16(即：它為氫原子重量的16倍，目前我們可以把氫原子的重量當作單位重量。) 碳的原子量為12，碳與氧結合，而成一種叫「甲烷」(methane)或「沼氣」(marsh gas)的氣體。在甲烷裏，碳與氧之比為1:3或4:12，但是，12是一個碳原子的重量，所以甲烷的分子式為 CH_4 ，現在讓我們考慮一個比較複雜的例子；分析乙醇(ethyl alcohol)，知其具有52.5百分比的碳，34.8百分比的氧和13.0百分比的氫。由於 $52.5/34.8$ 的比是1.50，而碳與氧的原子量的比僅為0.75，我們可以得知相對於每一個氧原子必有二個碳原子存在。如果每一氧原子僅相當於一個氫原子的存在，則二者百分比的比例是 $1/16 = 0.0625$ ，但實際上的比例數是 $13.0/34.8 = 0.375$ ，即六倍大。因此，對每一氧原子必須相當有六個氫原子對應存在，故乙醇的分子式應為 C_2OH_6 。

原子與一個或更多的原子結合的能力稱為「化學原子價」(chemical

原子核之結構

早期對原子核的描述，一般都認為原子核僅由質子（Protons）與電子所構成。以原子序（Atomic Number）為7、質量數（Mass Number）為14的氮原子為例；其原子核認為係由14個單位質量的質子及7個電子組成，而帶7個正電荷，與核外7個電子平衡。但早在1920年，羅德福等人已對此原子核模型發生了懷疑，並曾加討論。至1932年，查德威（James Chardwick）證明了中子的存在，而使一較令人滿意的原子核模型的基礎得以建立；即原子核由中子與質子組成。這個模型我們一直沿用至今。依照這種模型，則氮的原子核乃由7個質子與7個中子組成，因中子不帶電荷，其質量又與質子相同，所以原子核帶7個正電荷，總質量數為14，核外圍繞7個電子。原子核中的質子數稱為原子序（Atomic number）以 Z 表之，中子數以 N 表之，質量數 A 為 Z 與 N 之和；即 $A = N + Z$ = 原子核內核粒（Nucleons）的總數（即核內粒子之總數）。元素的同一性（Elemental identity）由原子序而定，例如任何原子中如含有19個質子，且僅含19個質子，就稱為鉀原子，自然界中發現的鉀原子，其原子核中必含19個質子，而其中子數或為20（ $A = 39$ ），或為22（ $A = 41$ ）；雖然它們的質量數不同，但因為原子序相同，所以這些原子都是具有相同化學性質的鉀原子。這種 Z 相同， A 不同的原子稱為此元素的同位素（Isotopes）。

原子核的性質

在下面我們將要討論原子核的主要性質——質量、能量、大小、庫倫場及使原子核中各核粒子聚合在一齊的力。

1-3 原子核之質量

在化學反應中，由兩元素結合成的化合物，其穩定性可由反應時

放出熱量的多寡計算。如放出的熱量愈多，則此化合物的穩定性也愈大。在碳與氧化合生成 CO_2 的化學反應中，由實驗知：每化合成一克分子量的 CO_2 ，放出 94.03 仟卡的熱量。即：



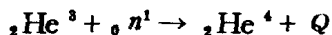
如用愛因斯坦 (Einstein) 關係式 $E=mc^2$ ，可計算出在 $\text{C} + \text{O}_2$ 的反應中，產生 94.03 仟卡熱量所損失的質量。依愛因斯坦關係式 1 仟卡 $\approx 4.7 \times 10^{-11}$ 克，則損失的總質量應為 4.4×10^{-9} 克，雖然科學家們不懷疑在化學反應進行中，確有質量的損失，但到今日為止，還沒有一種儀器的靈敏度可以量度如此微小的質量改變。

在核反應中，能量的改變，遠比化學反應為大。例如：設 1 克分子量，質量數為 3 的氦同位素（即 He^3 ）與 1 克分子量的中子相加，形成 1 克分子量、質量數為 4 的氦同位素（即 He^4 ），放出 4.7×10^8 仟卡的熱量，相當於減少 0.022 克的質量；現有的儀器已能很容易地觀察到這種變化。事實上，克分子量不適於討論核反應，因為在所有的實驗室中，個別反應的數量遠低於 6.02×10^{23} ，故以單獨反應中質能的改變值代替。在熱化學 (Thermochemistry) 中所使用的單位，用於核反應中實嫌過大，不切實用，所以定一新的單位，稱為原子質量單位 (Atomic Mass Unit, 簡記為 amu)，作為質量單位。1 amu 為 O^{16} 原子質量的 $1/16$ ，等於 1.66×10^{-24} 克。中子的質量為 1.00893 amu，氫原子的質量為 1.00812 amu，至於能量單位，則用電子伏特 (Electron Volt, 簡記為 eV)；即一單位電荷受一伏特電位差加速所得之能量。1 eV 等於 3.8×10^{-20} 卡。電子伏特與卡間的關係式可表之如

$$1 \text{ eV/分子} = 23.06 \text{ 仟卡/克分子量} \quad (1-1)$$

仟電子伏特 (KeV = 10^3 eV) 及百萬電子伏特 (MeV = 10^6 eV)，也是原子核科學中常用的能量單位。

現在讓我們再回頭去看氦的反應。核反應方程式與化學方程式非常相似，方程式兩端 Z 的總數及 A 的總數必須平衡，氦反應式寫如



Q 值為 20.5 MeV，因 1 amu = 931 MeV，故改變的質量應為

20.5 / 931 amu 或 0.022 amu。如定原子核中核粒子的質量近似為 1.000 amu，則恰與每一反應中產生之 0.022 amu 之能量相合，將質量值列表如下：

$$\begin{array}{rcl} M_{\alpha} & = & 3.0170 \\ M_n & = & 1.0089 \\ \hline \text{總和} & = & 4.0259 \end{array} \quad M_{\alpha} = 4.0039$$

$$\begin{aligned} \text{故 } \Delta M &= (M_{\alpha} + M_n) - (M_{\alpha}) = (4.0259) - (4.0039) \\ &= 0.0220 \text{ amu} \end{aligned}$$

這種結果與依照**質量與能量守恒定律**必有之結果完全吻合。

同樣的計算方式，也可應用於自動蛻變 (spontaneous disintegration)，如 U^{238} 放射阿爾發粒子之衰變作用：

$$\begin{aligned} {}_{92}U^{238} &\rightarrow {}_{90}Th^{234} + {}_2He^4 + Q \\ \Delta M &= (M_U^{238}) - (M_{Th}^{234} + M_{He}^4) \\ &= (238.1249) - (234.1165 + 4.0039) = 0.0045 \text{ amu} \end{aligned}$$

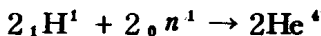
損失的質量變為 α 衰變的動能

$$Q_{\alpha} = 931 \Delta M = 931 \times 0.0045 = 4.2 \text{ MeV}$$

原子的質量要比原子核的質量便於利用，因以實驗方法求原子質量遠比求原子核質量要容易。方程式兩邊的電子數如維持平衡，則以原子質量代替原子核質量，不會有太大誤差。在 U^{238} 的阿伐衰變反應中，左邊 U^{238} 有 92 個電子，右邊 Th^{234} 及 He^4 共有 90+2 個電子，此外還有許多由實驗所得，或由計算所得的繁雜的原子量，Segre 氏集於實驗原子核物理第一卷 (Vol. 1 Experimental Nuclear Physics) 中是一很好的參考。

1-4 原子核束縛能 (Nuclear Binding Energy)

假定 He^4 由兩個中子與兩個氫原子所形成

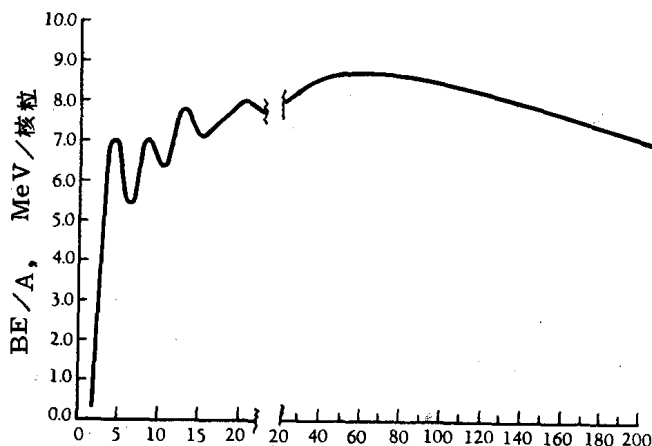


減少的能量為

$$\begin{aligned}
 \Delta M &= 2M_n + 2M_p - M_{\text{He}}, \\
 &= (2 \times 1.0090) + (2 \times 1.0081) - (4.0039) \\
 &= 0.0303 \text{ amu}
 \end{aligned}$$

上式表示，在這個過程中有 931×0.0303 或 28.1 MeV 能量放出，雖然這現象與兩個中子及兩個質子同時相撞瞬即形成 He^4 的情形不同，但這種計算却非常有用，因為由此顯示，如要將 He^4 分裂成其基本成分核粒子，至少須要 28.1 MeV 的能量；這是個巨額的能量，也由此證明， He^4 為一相當穩定的原子核，依同樣的計算方法可以算出氫的同位素 $A=2$ 的氘，其束縛能僅為 2.22 MeV ，這個表示很容易將氘 (H^2) 核分解成一中子及一質子。

將原子核分解為單一的**成分核粒子**(Component nucleons)所需要能量稱為**束縛能**，束縛能在原子核科學與化學熱力學中之生成熱 (heat of formation) 具有相同的意義。束縛能除以核粒子總數 A ，即得每一核粒子的束縛能 (BE/A)，常用於計算原子核的穩定性。 He^4 之 BE/A 值為 $28.1/4 = 7.0 \text{ MeV}$ ， H^2 為 $2.22/2 = 1.11 \text{ MeV}$ 。圖 1-3 中所示，為穩定原子核的 BE/A 值與質量數 A 之函數關係。



第 1-3 圖 單位核粒子的束縛能 (BE/A) 與質量數 A 之關係。

由圖 1—3 可以看出，直到 $A \approx 60$ 為止，曲線是上升的；即在這範圍內，當兩較輕原子核合成一較重原子核時，重原子核的 BE/A 值大於兩輕原子核的 BE/A 值，表示在結合時有能量放出。這種由輕原子核結合（熔合）而形成的能量釋放源（source of energy release）就是氫彈原理之依據。圖 1—3 中，當 A 大於 60，曲線下降；也就是說，在此範圍中的兩輕原子核熔合成一重原子核時，不但放不出能量反而吸收能量；這種由一重原子核分裂成兩輕原子核，使 BE/A 值由低值變為高值，而放出能量的分裂過程為原子彈及核反應器中能量的來源。

圖 1—3 中另一特性為當 $A > 3$ ， BE/A 之值均在 5 與 8 MeV 之間，幾可視為一常數。

因 $BE/A \sim \text{常數}$

則 $BE \sim (\text{常數}) \times A$

或 $BE \propto A$ (1—2)

換句話說，原子核的總束縛能大約與核內的核粒總數成比例。這種現象對原子核與原子核間的連繫力的重要性將在 1—7 節中詳細討論。

1—5 原子核之半徑

由實驗量度的結果知道，原子核的大小與原子核內核粒子的總數成正比，即 $V \propto A$ 。因球體體積

$$V \propto R^3$$

R 為球體的半徑，則

$$R^3 \propto A$$

或 $R \propto A^{1/3}$ (1—3a)

令 R_0 為比例常數，得

$$R = R_0 \cdot A^{1/3} \quad (1-3b)$$

羅德福由他的散射實驗證明，原子核的體積僅佔原子體積的一小部份。由概略地估計，原子核半徑約為原子半徑的 $1/10,000$ 至 $1/100,000$ ，表示原子大小的單位為埃 ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$)，而原子核大小的單位為費米 (fermi, $1 f = 10^{-13} \text{ cm}$)。