

核子輻射及其應用

陳經時編譯 · 商務印書館

56
8

核子輻射及其應用

陳經時編譯 · 商務印書館

核子輻射及其應用

陳經時編譯

出版者 商務印書館香港分館
香港皇后大道中三十五號
印刷者 商務印書館香港印刷廠
香港九龍炮仗街七十五號
* 版權所有 *

1978年5月初版

目 錄

一、同位素·····	1
二、核子輻射與衰變·····	12
三、輻射的測量·····	52
四、核反應與人工放射現象·····	80
五、帶電粒子加速器·····	91
六、同位素之分離·····	108
七、放射性同位素與輻射的應用·····	123
八、輻射的生物效應及防護·····	168

一、同位素

同位素是指同一種化學元素的原子變種，它們具有同樣的原子核電荷，但是質量數不同。各種同位素在原子核中質子數相同，中子數不同。它們的化學性質幾乎是相同的。例如： ${}_{92}\text{U}^{234}$ 和 ${}_{92}\text{U}^{235}$ 是鈾(U)的同位素。

同位素的發現，是在研究放射性元素的過程中引致的。放射性衰變的產物具有放射性，至於衰變產物的情況，則按其母體或子體的不同形式而定。例如：釷(${}_{90}\text{Th}^{230}$) α 蛻變，產生鐳(${}_{88}\text{Ra}^{226}$)；鐳(${}_{88}\text{Ra}^{226}$) α 蛻變生成隋性氣體氡(${}_{86}\text{Rn}^{222}$)。釷的 α 蛻變產生鐳的同位素(${}_{88}\text{Ra}^{228}$)，第二次 α 蛻變的結果生成氡的同位素(${}_{224}\text{Rn}^{86}$)。釷和錒的化學性質非常相似。事實上，錒與釷相互混合後不能夠採用化學方法分離開，因為它們在光譜學上是一致的。如果有系統地研究放射性元素，就可以知道錒的原子量為230，而釷為232。所以同位素命名之由來，也因為它們在週期表上共處同一位置的意思。

一般說來，原子序數為偶數的元素，有許多穩定同位素。例如：鋁就有十多個同位素。原子序數為奇數的元素，只有一個同位素，能有兩個同位素的較少。

通過質譜儀或質量分光計的精巧測量，我們可以發現同位素混合物的組成。

例如：根據標度的化學原子量

$$\text{氧原子 } [\text{O}] = 16.00000$$

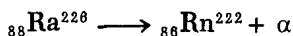
應用質譜儀發現天然氧含有三種同位素；

$$O^{16} = 99.759\%, O^{17} = 0.037\%, O^{18} = 0.204\%$$

照物理原子量標度與質量分光計的應用，氧中分量最豐富的是 O^{16} ，其原子量是 16.0044。依照兩標度關係可看出：化學原子量 $\times 1.000375 =$ 物理原子量。

移 位 律 羣

同位素是在研究放射性衰變過程中被發現的。元素之放射性衰變可用核子方程式表示。例如：鐳 α 衰變產生氡和 α 微粒。



同位素鐳 228 β 蛻變產生錒：



移位律羣 (Group displacement law) 是說：當 α 微粒在放射變換中發射時，產物在週期表中所佔位置在其母體的左面第二格；而 β 微粒發射的結果，子體將佔據母體右邊的第一個位置。因為元素在週期表中的位置是按照其原子序數循序排列的，移位律羣應用於 α 微粒變換是原子序數減少兩單位，而 β 微粒發射則增加原子序數一單位。

圖一說明在三個天然放射性衰變系中原子序數和原子質量數的變換。 α 衰變使原子質量減低四單位，而 β 微粒發射却不變更質量，正符合圖中的程序。

α 射綫之變換用向左下方方向的斜箭矢代表，而 β 射綫之遷移用向右橫方向的箭矢代表。那些元素的原子序數範圍為 81 至 92。處於圖中任何一垂直綫上的元素，都具有相同的原子序數，它們在週期表中佔據同一位置。例如：原子序數 84 的七個同位素，雖然它們各有不同的放射性質，但都與鉛元素配合在同一位置上。運用這個方法可將一切已知的放射性元素分配到週期表上應

有的位置。

在週期系中佔相同位置的元素是同位素。如鈾的同位素有A
鐳、C' 鐳、A 錒、C' 錒、A 釷、C' 釷等。還有同位素可寫成：

Pb^{206} , Pb^{207} , Pb^{208} , Pb^{210} , Pb^{214} 等。

同位素與核子結構

按照移位律的概念，任何放射性元素經發射一顆 α 微粒和兩顆 β 微粒後，其子體與母體應有相同原子序數，即與母體同位。我們以鈾系開端的三個蛻變階段— α ， β ， β —為例，可說明這一點。鈾系放射性衰變所得第四個元素鈾 I (U I)，與鈾系第一個元素U I (${}_{92}\text{U}^{238}$) 同位。鈾系第一個元素發射 α 微粒後，照移位律，產物是鈾 $X_1(\text{UX}_1)$ 即 ${}_{90}\text{Th}^{234}$ 。鈾 X_1 發射 β 微粒後得到產物鈾 $X_2(\text{UX}_2)$ 即 ${}_{91}\text{Pa}^{234}$ 。UX₂ 發射 β 微粒得出鈾 I (U I) 即鈾元素。所以U I 和U I 同位，具有相同的原子序數92 (見圖一)。

由於 α 微粒發射的後果令原子核損失兩中子和兩質子，而每 β 微粒發射後果令原子核損失中子但獲得質子；所以隨同一 α 和兩 β 微粒的發射，原子核變換程序如下：

	中子	質子
α 微粒的發射	-2	-2
兩 β 微粒的發射	-2	+2

經過三階段放射性蛻變(α ， β ， β)，結果令原子核損失四個中子，但質子數，即核電荷數却與初元素相同。由上可知，同位素的分別在於原子核包含不同數量的中子，但有同數量的質子。

在上面所考慮的同位素類型中，質量數相差四單位；但是這不過是為推導一般結果而選擇的特殊結論而已。現可從圖一看出

質量數	原子序數											
	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U
238												UI
234											UX ₁ →UX ₂ →	UII
230											UZ →	
226											Io	
222								Ra				
218								Rn				
214								RaA → At				
210								RaB → RaC → RaC'				
206								RaC'' → RaD → RaE → RaE				
								RaG				

鈾系
(4n+2)

235												
231												AcU
227												UY → Pa
223												Ac → RaAc
219												AcK → AcX
215								An				
211								AcA → At				
207								AcB → AcC → AcC'				
								AcC'' → AcD				

錒系
(4n+3)

232												
228												Th
224												MsTh ₁ → MsTh ₂ → RaTh
220												ThX
216												Th
212												ThA
208												ThB → ThC → ThC'
												ThC'' → ThD
質量數	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
原子序數	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U

釷系
(4n)

圖1 原子序數

鈾同位素的質量數分別為 218, 216, 215, 214, 212, 211 和 210, 同位素間質量數相差不是四單位。又因為其原子核都含有 84 個質子 (原子序數 84), 所以中子數分別為 134, 132, 131, 130, 128, 127 和 126。

元素的化學性質大部分是由核外電子的排列和數量而決定的。由於同位素有相同核電荷, 它們應有相同數目的核外電子, 無疑地又以相同的方式排列。可能這就是同位素在化學上一致性的原因。同樣地, 一切基本上依核外電子而定的性質, 像光譜與 X 射綫譜, 對所有的同位素形式也是相同的。

放射性則明顯地與原子核的微粒數有關。同位素具有相同質子數不同中子數, 因而顯示不同的放射性質。例如, ${}_{92}\text{U}^{234}$ 和 ${}_{92}\text{U}^{235}$ 。同中子異荷素 (Isotones) 和同量異位素 (Isobar) 的放射性質也不相同。同中子異荷素具有相同的中子數不同的質子數, 例如鐳和錒; 同量異荷素的核中包含相同的總核子數, 但質子數和中子數都不相同。

關於由放射性元素試驗同位素存在的實驗, 無論是應用單體元素或同位素混合成的元素, 都確實獲得同位素。事實上, 大多數元素都是同位素的混合物, 同位素的原子質量近於整數, 所以科學家阿斯頓 (Aston) 創出了整數律 (whole number rule)。此定律修正了普勞特假說 (Prout's hypothesis)。該假說指出一切原子量都近於整數 (integer), 分數原子量是由於用化學方法測量兩種或多種同位素之結果。

關於原子核的組成問題, 按照現代觀點, 原子核中包含 (A - Z) 個中子, 和 Z 個質子, A 是元素的質量數, Z 等於核子電荷, 或原子序數。核子的質量數, 等於中子和質子數的總和。同一元素的同位素, 差別只在於原子核中的中子數。

α 微粒即是氦核, 是由兩中子和兩質子組成的。因此, 如果

放射母體發射 α 微粒之後，子體元素的中子和質子數各減 2，質量數減 4，而核子電荷或原子序數也減 2。

在 β 微粒發射中，子體的中子數增加一，質量數保持不變，而原子序數則增加一。

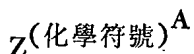
元素之同位素成分

攝譜儀與分光計，這兩種儀器用於測量同位素的質量和它們的相對比例。儀器設計者阿斯頓與寧司特，曾經實驗過許多元素，其中包括金屬、非金屬和原子量近於整數的同位素混合物。

由表一可看出其中二十多種元素是單類；其他則是包含兩個或多個不同質量的同位素。

表中記錄二百八十多種同位形式的穩定元素，若是加上四十種有放射性的同位素，總和應是多於三百二十種同位類。目前大約認為已有一千四百多種同位素。

核素 (Nuclide) 一詞已被廣泛應用代替同位素。核素指由其核子分配決定特性的原子類。同樣地，放射類也就是放射性核素。一個同位素是兩個或多個有着同原子序數(或同質子數)的核素組的一個成員。像鈹與鋁等元素只有一類天然存在着，這種元素叫單穩定核素而不是單穩定同位素。核素通常用如下符號表明：



Z 是原子序數，A 是質量數。例如 ${}_{30}\text{Zn}^{70}$ ，是鋅的五個同位素之一，代表有 30 個質子和 70 個核子的核素，中子數是 (A - Z) 為 40 個。

表一 穩定同位核和它們的百分豐度表

原子序數	元素符號	同位素 (質量數)	同位成分 (相對豐量) %	原子序數	元素符號	同位素 (質量數)	同位成分 (相對豐量) %
Z		A	%	Z		A	%
1	氫 H	1	99.985	14	矽 Si	29	4.70
1	氘 D	2	0.015			30	3.09
2	氦 He	3	$\sim 10^{-5}$	15	磷 P	31	100.00
		4	~ 100	16	硫 S	32	95.00
3	鋰 Li	6	7.4			33	0.76
		7	92.6			34	4.22
4	鈹 Be	9	100.00			36	0.014
5	硼 B	10	18.8	17	氯 Cl	35	75.53
		11	81.2			37	24.47
6	碳 C	12	98.89	18	氬 Ar	36	0.337
		13	1.11			38	0.063
7	氮 N	14	99.63			40	99.60
		15	0.37	19	鉀 K	39	93.10
8	氧 O	16	99.759			40	0.012
		17	0.037			41	6.88
		18	0.204	20	鈣 Ca	40	96.97
9	氟 F	19	100.00			42	0.64
10	氖 Ne	20	90.92			43	0.145
		21	0.257			44	2.06
		22	8.823			46	0.003
11	鈉 Na	23	100.00			48	0.185
12	鎂 Mg	24	78.70	21	鈾 Sc	45	100.00
		25	10.13	22	鈦 Ti	46	7.93
		26	11.17			47	7.28
13	鋁 Al	27	100.00			48	73.94
14	矽 Si	28	92.21			49	5.51

(續上表)

22	鈦	Ti	50	5.34	32	鍺	Ge	74	36.54
23	鈮	V	50	0.23				76	7.75
			51	99.77	33	砷	As	75	100.00
24	鉻	Cr	50	4.31	34	硒	Se	74	0.87
			52	83.76				76	9.02
			53	9.55				77	7.58
			54	2.38				78	23.52
25	錳	Mn	55	100.00				80	49.82
26	鐵	Fe	54	5.82				82	9.19
			56	91.66	35	溴	Br	79	50.54
			57	2.19				81	49.46
			58	0.33	36	氬	Kr	78	0.354
27	鈷	Co	59	100.00				80	2.266
28	鎳	Ni	58	67.77				82	11.56
			60	26.23				83	11.55
			61	1.20				84	56.90
			62	3.66				86	17.37
			64	1.14	37	鉀	Rb	85	72.2
29	銅	Cu	63	69.10				87	27.8
			65	30.90	38	銻	Sr	84	0.56
30	鋅	Zn	64	48.89				86	9.86
			66	27.81				87	7.02
			67	4.11				88	82.56
			68	18.57	39	鈮	Y	89	100.00
			70	0.62	40	鈷	Zr	90	51.46
31	鎵	Ga	69	60.20				91	11.23
			71	39.80				92	17.11
32	鍺	Ge	70	20.52				94	17.40
			72	27.43				96	2.80
			73	7.76	41	鈮	Nb	93	100.00

(續上表)

42 鉬 Mo	92	15.84	48 鎘 Cd	114	28.86	
	94	9.04		116	7.58	
	95	15.72		49 銦 In	113	4.28
	96	16.53			115	95.72
	97	9.46		50 錫 Sn	112	0.96
	98	23.78			114	0.66
	100	9.63			115	0.35
43 錳 Tc	—	—	116		14.36	
44 鈳 Ru	96	5.51	117		7.50	
	98	1.87	118	24.03		
	99	12.72	119	8.58		
	100	12.62	120	33.00		
	101	17.07	122	4.72		
	102	31.61	124	5.94		
	104	18.58	51 銻 Sb	121	57.25	
103	100.00	123		42.75		
45 銑 Rh	103	100.00	52 碲 Te	120	0.09	
46 鈳 Pd	102	0.96		122	2.46	
	104	10.97		123	0.87	
	105	22.23		124	4.60	
	106	27.33		125	6.99	
	108	26.71		126	18.71	
	110	11.81		128	31.79	
	109	48.10	130	34.50		
47 銀 Ag	107	51.90	53 碘 I	127	100.00	
	110	12.39		54 氙 Xe	124	0.096
48 鎘 Cd	106	1.215	126		0.090	
	108	0.875	128		1.92	
	110	12.39	129		26.44	
	111	12.75	130		4.08	
	112	24.07				
	113	12.26				

(續上表)

54	氙	Xe	131	21.18	62	釷	Sm	149	13.83
			132	26.89				150	7.44
			134	10.44				152	26.72
			136	8.87				154	22.71
55	銫	Cs	133	100.00	63	鎔	Eu	151	47.82
56	鋇	Ba	130	0.102				153	52.18
			132	0.098	64	釷	Gd	152	0.20
			134	2.42				154	2.15
			135	6.59				155	14.73
			136	7.81				156	20.47
			137	11.32				157	15.68
			138	71.66				158	24.87
57	鐳	La	138	0.089				160	21.90
			139	99.911	65	鐳	Tb	159	100.00
58	鈾	Ce	136	0.19	66	鐳	Dy	156	0.0525
			138	0.250				158	0.09
			140	88.49				160	2.2975
			142	11.07				161	18.88
59	鐳	Pr	141	100.00				162	25.53
60	釷	Nd	142	27.11				163	24.97
			143	12.17				164	28.18
			144	23.85	67	釷	Ho	165	100.00
			145	8.30	68	鐳	Er	162	0.136
			146	17.22				164	1.56
			148	5.73				166	33.41
			150	5.62				167	22.94
61	鉅	Pm	—	—				168	27.07
62	釷	Sm	144	3.09				170	14.88
			147	14.97	69	鐳	Tm(Tu)	169	100.00
			148	11.24	70	鐳	Yb	168	0.135

(續上表)

70	鐳	Yb	170	3.03	77	銨	Ir	193	62.70
			171	14.31	78	鉑	Pt	190	0.0127
			172	21.825				192	0.78
			173	16.13				194	32.90
			174	31.84				195	33.80
			176	12.73				196	25.30
71	鐳	Lu	175	97.40				198	7.21
			176	2.60	79	金	Au	197	100.00
72	鈷	Hf	174	0.18	80	汞	Hg	196	0.146
			176	5.20				198	10.02
			177	18.50				199	16.84
			178	27.14				200	23.13
			179	13.75				201	13.22
			180	35.24				202	29.80
73	鉭	Ta	181	100.00				204	6.85
74	鎢	W	180	0.135	81	銻	Tl	203	29.50
			182	26.41				205	70.50
			183	14.40	82	鉛	Pb	204	1.48
			184	30.64				206	23.60
			186	28.41				207	22.60
75	錒	Re	185	37.07				208	52.30
			187	62.93	83	鉍	Bi	209	100.00
76	銨	Os	184	0.018	90	釷	Th	232	100.00
			186	1.59	91	鐳	Pa	231	100.00
			187	1.64	92	鈾	U	234	0.0051
			188	13.30				235	0.71
			189	16.10				238	99.28
			190	26.40					
			192	41.00					
77	銨	Ir	191	37.30					

二、核子輻射與衰變

α 微粒即是氦核，可用符號 ${}^2\text{He}^4$ 表示。氦核帶電荷 $+2e$ ，其數值為質子電荷的兩倍；質量約有 4.0017 原子質量單位。

速度極高的氦核，通稱為 α 射綫。在許多核子反應或放射性衰變中都會放射出 α 射綫，也可以借助加速裝置將氦核加速而成為 α 射綫。

放射性物質發射 α 微粒的速度通常是在 $1\sim 2\times 10^9$ 每秒厘米之間。許多放射性物質發射的 α 微粒是在兩個或多個分立的能量組，由 4 至 6MeV (兆電子伏特)，有時會低到 2MeV，也會高到 10MeV。

α 微粒

α 微粒與物質交互作用

α 微粒經過物質時會引起電離作用，因而要消耗能量。電離作用 (Ionization) 是最容易探測的，同時也常用於測量 α 微粒。

因為 α 微粒在降低速度的過程中，在物質中會行經短暫路程，而在電離作用中所消耗的能量約為 34 至 35eV (電子伏特——對於空氣中形成的每對離子偶而言)，所以到達徑道末端時， α 微粒的能量和速度就大大地降低。

從母核發射的 α 微粒有電荷 $+2e$ 。當經過電子雲 (Electron cloud) 的發射原子，和留在路程中的原子時， α 微粒能够俘獲

一顆或兩顆電子，產生一種單電離或呈中性的氦原子。其後，快速移動着的原子受到別的原子碰撞又迅速電離。單 α 微粒在路程中約有 1000 次這樣的交互作用，其原來所具有的速度會在接近於射程末端時即緩減。

當 α 微粒的平均電荷少於 $2e$ 時，速度自然也隨着減低。如平均電荷 \bar{e} 為 $1.99e$ 時，速度為 1.6×10^9 厘米/秒； \bar{e} 為 $1.5e$ 時速度為 0.56×10^9 厘米/秒； \bar{e} 為 $0.05e$ 時速度為 0.16×10^9 。當 α 微粒到達射程末端時，速度等於零。

α 微粒的射程

在標準狀態下（通常是攝氏十五度和一大氣壓），自放射源發出的 α 微粒行經空間一段距離到達某點不再產生電離作用，這一段距離就是 α 微粒的射程。

布喇克（W. H. Bragg）曾證實到 α 微粒的準確射程。他的實驗是用電離室的電離比值，即是 α 微粒在其路程中每單位長度上產生的離子偶數目。圖二的曲線表明，在空氣與 α 源的不同距離處，每單位路線離子對數目的情形，圖中曲線稱為布喇克曲線。當 α 微粒與發射源的距離增大時，電離比值也增大。開始時慢慢增加，然後快速升高，達到了頂點後就頓挫降落至零。這是因為 α 微粒與電子接觸後，形成中性原子，對空氣所產生的電離作用就大大減少的緣故。

曲線下降至近末端時略向右傾斜，這是由於 α 微粒在路程中與空氣分子相遇，並沒有全部失去同數的能量，也沒有在路程中全部停止產生電離作用。在這一段路程中所起的變化，是一種漫射作用，部分是由於一電子附連於 α 微粒，使這 e^+ 離子的組織還具有電離力，在它們遇合第二顆電子成為中性前，促使射程略為延長。圖中R點相應的距離表示由給定放射性元素發出的 α 微粒