

放射性同位素在医学上的应用

人民衛生出版社

放射性同位素 在医学上的应用

吉川春寿 江藤秀雄

笈 弘毅 著

張 玉 閣 譯

人民衛生出版社

一九五七年·北京

內 容 提 要

本書系由日人吉川春寿等編著的日文“ラジオアイソトープの医学的应用”一書翻譯而成。对放射性同位素在医学上的主要应用和目前在該方面的研究情况作了簡明的介紹。全書約 10 万字,插圖 135 幅,共分四篇:包括放射性同位素的物理学、放射性同位素的示踪应用,及其在診療方面的应用,和安全操作与健康保护,并在附录中提出了关于預防损伤的具体方案,可作为初学者的入門讀物或从事放射性同位素工作人員和进行研究工作与診療工作者的参考。

ラジオアイソトープの医学的应用

东大教授 吉川春寿

东大助教授 江藤秀雄 共 著

东大講師 笥 弘毅

放射性同位素在医学上的应用

開本: 850×1168/32

印張: 4 $\frac{11}{16}$

字數: 122 千字

張 玉 閣 譯

人 民 衛 生 出 版 社 出 版

(北京書刊出版業營業許可証出字第〇四六號)

• 北京崇文區綾子胡同三十六號 •

北京535工厂印刷 • 新华書店發行

統一書號: 14048 • 1330

1957年9月第1版·第1次印刷

定 价: (9) 0.65元

(北京版) 印數: 1-2,100

序

关于应用放射性同位素的研究，在日本是从1940年前后由当时理研仁科研究室以迴旋加速器为中心而部分进行的，由时间的先后来看，日本在这方面的研究，虽然与世界上的最早研究者同时，但由于第二次世界大战与原子反应堆的出现，则已显然落在后面了。

数年前由美英及加拿大等地开始输入放射性同位素以来，才表现出原子能在应用上的发展，在这方面的研究始逐渐展开，其应用在理工农医各部门者，业已参与日本自然科学的复兴工作，尤其是在医学方面可以与显微镜传入后的情况互相比拟，示踪原子已应用在诊断和治疗等方面，并给带来了划时代的成果。依据1953年后半期放射性同位素输入状况而言，应用在医学方面的，无论人数（约330人）和件数（约500件）均占全部的65%，与美国原子能委员会的 Oak Ridge 研究所所作的放射性同位素输出报告几乎相同。输入额每年约达数万美元。

根据上述情况，可知放射性同位素在目前的重要性，可惜有关这方面的书籍在日本还很少，为了弥补这方面的缺点，同人等遂将在医学方面有关重要的应用和目前的研究与诊疗情况，加以概略的叙述。本书中物理问题和示踪技术，以及有关安全操作等方法，不仅限于医学方面，即使在操作或使用放射性同位素的人员，无论属于哪个部分，均应有所了解，尤其是放射性同位素的本质，由于具有种种放射能，可以伤害人体，在已经发生损伤现象的日本，更有充分了解和预先熟知安全操作及保健问题的必要。至于有关使用放射性同位素的操作规程业已制订，即将公布。根据上述诸点，故不揣冒昧，草成此书，以供使用放射性同位素的同道参考，同时希望对今后进行新的研究和诊疗方面的工作者，以及想在这方面获得简单知识的读者也能有些帮助。

著 者 識

1953年10月

目 录

第一篇 放射性同位素的物理	江藤秀雄 1
I. 原子核与同位素	1
II. 放射性元素和元素的人工变换	5
III. 放射綫	11
IV. 放射綫的吸收	19
V. 放射綫的測定(其一)	26
VI. 放射綫的測定(其二)	36
VII. 原子堆和迴旋加速器	46
VIII. 放射性同位素	52
IX. 測定危險度的裝置	59
第二篇 放射性同位素在示踪上的应用	吉川春寿 64
I. 研究物質代謝的旧法和新法——示踪实验	64
II. 示踪实验的历史 (Hevesy 的实验)	66
III. 非放射性同位素的利用	66
IV. 放射性同位素在示踪上的应用	67
V. 示踪实验的原理	67
VI. 放射性同位素的选择	68
VII. 使用放射性同位素时的思想准备	69
VIII. 含有放射性同位素化合物的調制	70
(一) 化学的合成	70
(二) 生物学的合成	71
(三) 直接賦与放射性	71
IX. 应用	72
(一) 物質的移动及分布	72
(二) 用稀釋法来測定物質量	74
(三) 中間代謝的研究	76
(四) 物質代謝活动度的研究	77
第三篇 放射性同位素在诊断及治疗上的应用	寬 弘毅 80
I. 诊断上的应用	80
II. 放射性同位素和治疗医学	81

II. 治疗总論	81
(一)放射綫的种类及其特征	81
(二)治疗方法	82
(三)治疗用放射性同位素的选择	83
IV. 治疗各論	85
(一)治疗用放射性同位素	85
(二)放射性磷 P^{32}	85
(三)放射性碘 I^{131}	87
1. 甲状腺机能亢进症的治疗	88
2. 甲状腺恶性肿瘤的治疗	90
3. 肝臟和胆管癌的治疗	92
(四)放射性金 $Au^{198-199}$	92
(五)放射性镓、砷等 ($Ga^{72}, Ga^{67}, As^{211}$)	94
(六)放射性鈷 (Co^{60}) 和放射性銫 Cs^{137}	95
1. 代用鐳的放射性鈷 Co^{60}	95
2. 鈷的性質	95
3. 放射性鈷的調制和性質	96
4. 放射性鈷 Co^{60} 的綫 (wire) 及針 (needle)	97
5. 用放射性鈷針和綫的治疗	99
6. 放射性鈷的远距离照射	100
主要文獻	103
第四篇 放射性同位素和保健問題(健康管理)	106 笈 弘毅
I. 保健的重要性	106
II. 健康物理学(Health physics)——有关保健的物理学	107
III. 放射綫的损伤	108
(一)放射綫在生物学上的作用	108
(二)由于放射性同位素引起的损伤	109
IV. 放射綫的最大容許曝射	109
(一)最大容許曝射的意义	109
(二)最大容許綫量	110
V. 放射綫损伤的預防	115
(一)防護組織	115
(二)防護設備	115
1. 測量曝射綫量的設備	115

2. 遮蔽放射綫的裝置	118
3. 远距离操作設備	122
Ⅶ. 放射綫損伤的早期發現及其处理法	125
Ⅷ. 关于在实验时防护放射綫損伤的注意事項	127
(一) 实验室	127
(二) 廢弃物品的处理	130
(三) 放射綫事故的处理	131
Ⅷ. 結語	132
主要参考文献	132
附录 預防放射性物質損伤的建議(草案)	134

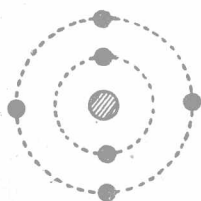
第一篇 放射性同位素的物理

I. 原子核与同位素

(一) 原子是由原子核与电子所組成(圖 1)

所有物質都是由分子所組成，而分子又是由同种或异种的原子結合而成。例如：若把一滴水繼續細分，分到最后就成为一个水的分子。若把这—个分子再进一步分开，就失去水具有的性質而成为二个氢原子和一个氧原子。由此可知，水即是氢和氧两种

元素的化合物。目前已知道的元素共有 98 种^①，每种元素的原子，其中心均有帶正电的原子核，周圍并有若干个电子圍繞。原子的大小其直径仅相当于一厘米的一亿分之一(10^{-8}cm)，原子核則更小得多，其直径大約只有原子的十万分之一，但原子的重量却差不多全部集中于原子核上。圍繞原子核的电子叫作核外电子，或称軌道电子。最重要的一点是原子在普通状态下，其核外电子的电量的总和与原子核所持有的电量绝对值相等，唯其符号不同。原子对于外界表示电的中性(即所謂电中和現象)。



原子模型



圖 I.1 原子是由
原子核和电子而成

(二) 元素的原子序数(圖 2)

把元素按原子重量(即按其原子量)和其化学性質适当地順序排列，此种表示方法称为原子周期表^②。原子周期表按原子量的順序排列，其排列序数称为原子序数(Atomic number)(但其中亦有例外者)。原子序数与原子核外电子数是一致的。电子具有的电

① 作者系指昭和28年(即1953年)时情况。现已知的元素共有101种。

② 元素的化学性質帶有周期性，这一学說，在1869年最初由俄国的化学家門捷列夫所發現，周期表也就是他所創始的。

量为负电的最小单位，亦称为负电量，其电量为整数，并無 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{2}{3}$ 等不整齐现象。今将电子的电量称为 $-e$ ，原子序数称为 z ，则元素的电子电量总和为 $-E = -Ze$ 。

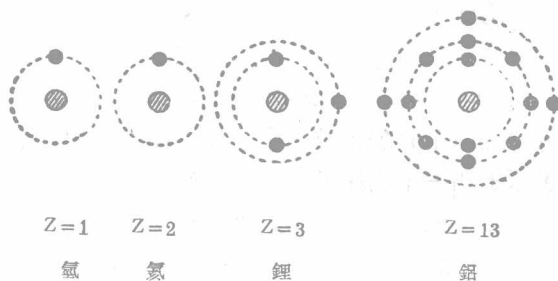


圖 I . 2 原子構造范例

(三)原子系类似太陽系

关于圍繞原子核的核外电子群的物理性狀，目前業已有了明确的理論，但本書的目的不在此，故只用簡單的模型將其概要解釋如下：电子圍繞着原子核的情形，恰如諸行星以太陽为中心，在其周圍特定的軌道上运行。核外电子可以占据的軌道虽有很多，但是它是按着物理定律中的量子律而排列的。整个原子所具有的能量因电子在許可的軌道上所占据的部位不同而异。也就是

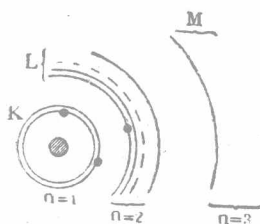


圖 I . 3 原子和电子軌道

說，电子可能占据的各个軌道都具有一定的能量相互对应。这些可能有的軌道分为七層，由离原子核最近的一層起，用K、L、M、N、O、P、Q 的順序来命名，各層均以主量子数(n)来表示。例如K層叫作K-軌道(Orbit)，或者称为K位(Level)，其主量子数为 $n=1$ ；L層的主量子数为 $n=2$ (圖3)。进而在各層上可能各有

几个軌道，其数为 $2n^2$ 。例如氫有一个核外电子，占据在K層軌道上；氦(He)有2个核外电子，它也占据在K層軌道上；鋰(Li)有3个核外电子，其中2个占据K層軌道，另一个占据L層軌道，

表 1

位	K	L	M	N	O	P	Q	原子序数
主量子数	1	2	3	4	5	6	7	
軌道数($2n^2$)	2	8	18	32	50	72	98	
氫	1							1
氦	2							2
氫	2	8	8					18
銅	2	8	18	1				29
鐳	2	8	18	32	18	8	2	88
鈾	2	8	18	32	18	12	2	92

此种情形,如表 1 所示。核外电子在軌道上的移动情形,好比阶梯教室內的各个座位,各阶的席位均有規定,由前方按次入席,当前阶座位坐滿之后,則移往后阶(主量子数大的时候則因各种理由不一定均逐層增加)。(圖 4)

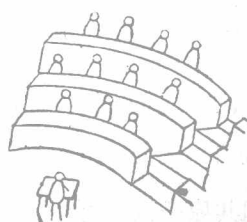


圖 I.4 电子在原子內按規則的排列

(四)原子核由質子及中子所組成(圖 5)

本書敘述的重点为放射性元素的原子核的構成部分,現在的原子核物理学認為原子核是由質子(Proton)与中子(Neutron)二种粒子結合而成。所謂質子,即帶正电的單位电量(正电質量)具有(+e)的粒子,例如氫的原子核本身即是。所謂中子,恰如其名所示,其本身不帶电性者謂之中子(圖 6)。此种粒子是像原子序数为 0 的元素的原子核一样的东西,在 1932 年为英国劍桥大学 Chadwick 氏最初發現。質子与中子为構成原子核的基本粒子,所以称之为核子,兩者的質量几乎相等(約为电子質量的 1,840 倍),直徑相同。某种元素原子核內的質子和中子的質量总和称为

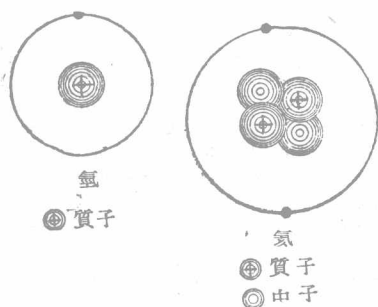


圖 I.5 原子核是由質子與中子而成



圖 I.6 中子與質子的不同點

質量數 (Mass number), 此數為最接近元素的原子量的整數。現以表示原子核特性的原子序數 Z 及質量數 A 為例解述如下: 設某種元素的原子序數為 Z , 此與某元素原子核中的質子數 N_p 相等。

表 2

核子	電荷	質量 (與原子量的單位同)	質量數
質子	$+e$	1.00813	1
中子	0	1.00807	1

為什麼原子核所具有的正電量數用 $N_p \times (+e)$, 其核外電子負電量的總和用 $Z \times (-e)$ 來表示? 此僅為符號上的不同。其質量數為 $A = N_p + N_n$ 。如元素化學符號為 Q 時則其原子核即可用 ${}_ZQ^A$ 來表示。例如氫 ${}_1H^1$, 氦 ${}_2He^4$, 鋁 ${}_{13}Al^{27}$ 等等。(表 2)

(五) 何為同位素

具有同一原子序數在元素周期表裏占有同一位置的元素謂之

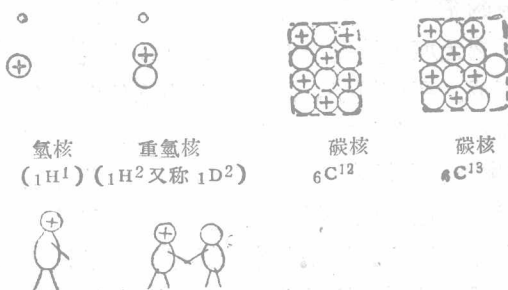


圖 I.7 同位素示意圖

同位素(Isotope)。举例來說，我們一般称碳素的化学原子量为12.010，但实际上，碳素的原子量并非只有一种，而有12.003880及13.007561两种，这是因为其含有的比例有98.9%及1.1%的关系。这两种碳素原子的核外电子数及其排列亦完全相同，所以說其化学性質相同，仅在質量上不同，有如兄弟般似的元素而已。如將这二种碳素原子的質量数各为12及13，而其原子序数同为6，其輕碳

表 3

元 素	含量百分比
氧 $\left\{ \begin{array}{l} {}_8\text{O}^{16} \\ {}_8\text{O}^{17} \\ {}_8\text{O}^{18} \end{array} \right.$	99.757
	0.039
	0.204
鉄 $\left\{ \begin{array}{l} {}_{26}\text{Fe}^{54} \\ {}_{26}\text{Fe}^{56} \\ {}_{26}\text{Fe}^{57} \\ {}_{26}\text{Fe}^{58} \end{array} \right.$	5.81
	91.64
	2.21
	0.34

素的中子为6，重者为7，用上述記号表示时，則为 ${}_6\text{C}^{12}$ 、 ${}_6\text{C}^{13}$ ，因此，所謂同位素，也就是指原子序数相同、質量数相异的元素，或質子数相同、中子数相异的元素而言(圖7)。类似这样同位素，在自然界里知道的已有很多。氫虽为最簡單的元素，但它也有称为重氫(氘)的同位素。普通的氫由两种氫混合而成，其中重氫(氘)的含有率極微[氫为99.9844%，

而重氫(氘)仅为0.0156%]。氧与鉄的同位素如表3所示。此外，亦有質量相等而原子序数不同的元素，謂之同位异性素(Isobar)，如 ${}_{32}\text{Ge}^{76}$ 和 ${}_{34}\text{Se}^{76}$ 。質量数相异而中子数相等的元素，謂之同中子异荷素(Isotone)，如 ${}_{15}\text{P}^{31}$ 和 ${}_{16}\text{S}^{32}$ 。原子序数及質量数完全相等的元素謂之同質异能素(Isomer)。虽然同一原子核，但由于其能量不同，因而其發生放射能的性質亦异，如 Br^{80} 、 UX_2 和 UZ 等。

II. 放射性元素和元素的人工变换

(一)何為放射性元素

在自然界里，除了像碳素那样能合成很多化合物的元素，或像鉄(Fe)和鎳(Ni)那样，均含有磁性很强的元素外，还有各种各样特殊性質的元素，其中的任何一种，都是稳定而永久不易失掉其性質的。例如鋁制的飯盒，到任何时期亦不能变为鋁以外的东西；也不用担心鉄桥会变成銅桥(圖8)。但是在元素里却有一些很不

稳定的、有可能全变为另一个元素的东西，像镭就是其中的代表。例如镭可变为气体的氦(这个过程谓之变换)(圖9)。原子序数在80

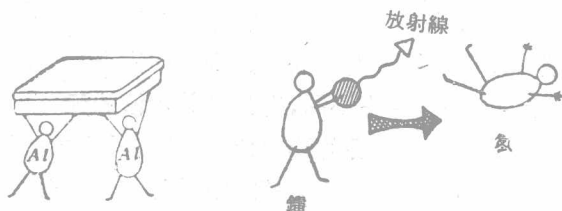


圖 1.8 鋁是穩定的元素

圖 1.9 鐳轉變成氦

以上的重元素里，几乎都具有这种不稳定的性質。借原子彈一躍而成名的鈾也是其中的一种。像这样不稳定元素的特征是当元素变换时放出放射綫，故称为放射性元素 (Radioactive elements)，亦即放出放射綫后而具有变换成其他元素性質的元素，即谓之放射性元素。

(二) 何为放射綫

目前所谓的放射綫，其意义虽被广泛应用，但以前仅指由自然界存在的放射性元素里放射出的三种射綫 (Ray) 而言。現先就狭义的放射綫叙述于下。

此三种放射綫根据 Rutherford 氏的命名为 α 綫、 β 綫和 γ 綫(圖10)。在現代如单独談一个放射綫时，則应將“綫”字改称为“粒子”。 α 粒子本身与氦(He)原子的原子核(${}^4_2\text{He}$)相同，即 $N_p=2$, $N_n=2$ 。 β 粒子的本身是电子。 γ 綫是电磁波的一种，一般是較 X 綫波長短的綫，其波長大約为 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 厘米，也就是可視光綫的十万分之一到一亿分之一的程度。

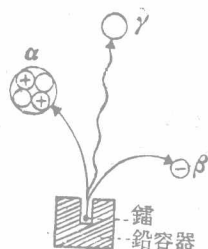


圖 1.10 放射綫的种类
(在磁場里各个帶电粒子向各个反对方向弯曲)

(三) 元素蜕变

鐳是放射性元素的代表物。鐳的原子序数为88，原子量为226，中子数138，为一种灰白色的金屬。此金屬一看似無何特殊样，但它却是不稳定的。假如許多鐳原子能够排列在一起，一个个地来

观察,其中哪一个在何时能突然变化成为氦,事先是无法知悉的。元素的蜕变,发生于原子核的内部,有如镭原子核崩坏后之放出 α 粒子,这种现象谓之元素的蜕变。 α 粒子的本质已如前述系与 ${}_2\text{He}^4$ 相同,因此,新产生出的氦的原子序数为 $(88-2)=86$,质量数为 $226-4=222$,即 ${}_{86}\text{Rn}^{222}({}_{86}\text{Rn}^{222})$,也就是 α 粒子蜕变时,其原子序数减少2,其质量数减少4。上记原子核的反应,用符号记载时,可写成 ${}_{88}\text{Ra}^{226} = {}_{86}\text{Rn}^{222} + {}_2\text{He}^4$ 。放射性元素的氦 (Rn),由于其 α 粒子的蜕变而成为镭 A (${}_{84}\text{RaA}^{218}$),镭 A 的 α 粒子再蜕变则可产生镭 B (${}_{82}\text{RaB}^{214}$)。但镭 B 的元素将 β 粒子放出后变成为镭 C,也就是放射出电子 (β 粒子),失掉一个单位的负电,其结果就成为原子核增加一个带正电电子,所以原子序数也增加了一个。电子的质量非常小,因此其质量数无何变化,于是可记为 ${}_{82}\text{RaB}^{214} = {}_{83}\text{RaC}^{214} + \beta^-$ ①。

由上所述可以见到当 β 粒子蜕变产生新的元素时,其原子序数增加一个,但质量数则无变化。在自然界里存在的放射性元素,不论发生 α 粒子蜕变,抑或发生 β 粒子蜕变,都是一定要发生蜕变的,至于 γ 射线与元素的蜕变有何关系,容后再谈。

(四) 元素在何时蜕变?

假设将放射性元素的原子取出一个,即使常常进行观察,但是它何时开始蜕变仍无法预测,也许在取出时的一瞬间就开始蜕变,也许经过若干年后还不蜕变。但是,若管理很多的原子时,在蜕变后到下一秒的时间内,将有多少的蜕变发生是可以预测的。例如 1 克镭约由 2.7×10^{21} 个原子而成,每秒约有 3.7×10^{10} 个原子开始蜕变而产生氦,了解这种变化,就可按此比例推算得出 1 克镭在 1590 年后可减为一半 (图 11)。像这样,当很多放射性原子存在的时候,由于其蜕变而使原子数减为一半的时间,谓之半衰期 (Half-life) (以下简用“T”代),各个元素的半衰期均有其固有

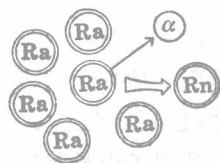


图 1.11 镭的蜕变

① 原子核仅含中子及质子,而无电子,因此关于能放射出 β 粒子的问题尚有疑问,此点容后再谈。 β^- 是电子的记号。

值。

(五)放射性元素根据何種法則而發生蛻變?

原子核蛻變的速度不因溫度、壓力及其他的影響而改變，也就是說，用物理學和化學的方法使其加快或者延緩其蛻變是不可能的。現有 N_0 個原子，它隨着時間而減少的情形如圖 12 內曲線所示，此種曲線謂之蛻變曲線(Decay Curve)。

在 t 秒後原子數是 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ 。 λ = 蛻變常數(Decay Constant)，各元素所有的固有值，如 λ 越大，則其蛻變

速度亦越大。 $N = \frac{N_0}{2}$ 時 t 之值為

T 。如將此關係代入計算時，則 T

$$= \frac{\log_e 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \text{ ①}$$

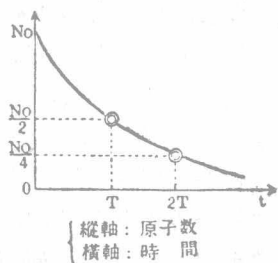


圖 1.12 放射性元素的
減衰曲線

(六)原子的人工轉變

早年有一派煉金師曾經打算把低價的金屬變成黃金，遂在各方面加以努力然而終歸失敗。原子(Atom)一詞，按希臘語的“tom”一字為分開之意，A 為否定之意，二字相連故為不可分開的意思。如果原子是無論如何也不能分開的話，那麼煉金師想把元素變換的事情，永遠也只可成為夢想而已。然而事實上元素是可以變換的，首先是這種能變換的情況由於放射性元素在自然狀態下而被發現，後來根據科學的發展，對於穩定元素認為其不可分開的概念，也到達必須更改的時期。在 1919 年，英國的盧斯福(Rutherford)派發現了由放射性元素鐳 C(RaC)放出的 α 粒子，與空氣中的氮原子核相撞擊後，在原子核內發生某種反應(一般謂之核反應(Nuclear reaction))，產生了氧原子核和質子，即氮原子核被 α 粒子所破

① t 和 $t + dt$ 之間蛻變的原子數與當時存在的原子數 N 成比例，所以 $dN = -\lambda N dt$ ，
 $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$ 。 $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$ ， $\log_e \frac{N}{N_0} = -\lambda t$ ，由此可得 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ 。

例如氡(Rn)的半衰期為 3.825 日，鐳丁(RaD)的半衰期為 22 年。

坏。此种现象在威尔逊云雾室的照像里可以明显地看出（后述）（圖 13）。 α 粒子的轨道在中途分开为二个，其原因是由于在分歧点上发生核反应，氧原子核和质子飞出轨道所致。此种核反应，用以下公式可以表示出来：



继续此实验之后，其他较轻的铝、磷原子也可以被破坏，但还不能说它完全是人工破坏。此后，当质子和重质子用人工使其

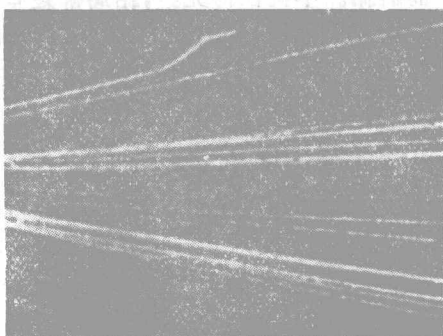


圖 I .13 氮被破坏时的照片（威尔逊雾室）

最上部线是 α 线所致；短而浓的线是氧核所致；
线长者系质子所致。

加为高速度后，可作为击弹之用。实际上，各种原子都可以用人工变换，中子对原子破坏也起很重要的作用，仅靠简单的加热或者化学上的处理，是不能使原子破坏的，因为其实际有效的能量过小，

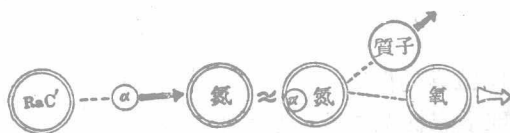


圖 I .14 元素的人工破坏

即使对全体加以大的能量，也不发生作用。 α 粒子像其他粒子一样，其能量均集中在非常小的

的部分，换言之，只有在能量的密度非常大的情形下，才有可能使原子破坏。（圖 14）

（七）何为放射性同位素

如前所述，原子序数在 80 以上者大部都是放射性元素，均属于三大系统的任何一个系列。属于第四系列的镭系在此省略。铀——镭系是由 $Z=92$ 的铀 I 开始，在将 α 、 β 两粒子反复蜕变的中途，经过镭成为稳定的元素 $Z=82$ 的镭 G (RaG 又称为质量数 206 的铅 ${}_{82}\text{Pb}^{206}$) 而结束。钍系是由 $Z=90$ 的钍开始逐步蜕变为 $Z=82$ 的钍 D (ThD 又称为质量数 208 的铅，即 ${}_{82}\text{Pb}^{208}$)。最后的锕系是

由 $Z=92$ 的錒开始,而变为 $Z=82$ 的錒D(質量数207的鉛 ${}_{82}\text{Pb}^{207}$) 而終結。不拘任何元素,結局都是 $Z=82$ 是鉛的同位素。然而在这三大系統中,属于鈾鐳系中的鐳B(RaB , ${}_{82}\text{Pb}^{214}$)及鐳D(RaD , ${}_{82}\text{Pb}^{210}$),属于釷系中的釷B(ThB , ${}_{82}\text{Pb}^{212}$),属錒系中的錒B(AcB , ${}_{82}\text{Pb}^{211}$)等放射性元素,其任何一种都是 $Z=82$ 鉛的同位素,也就是鉛有放射性同位素。此外,鉍(Bi)也有放射性同位素。

此时無論是稳定的鉛或者放射性的鉛,二者的化学性質完全相同,因为二者对于一切的化学过程均起同样的作用。放射性鉛,無論它含有多么微量的放射綫,由于可測出其放射綫,因此得以知道它的存在。(表4,圖15)

表 4

元素名		符 号		比率%
稳定元素	鉛	${}_{82}\text{Pb}^{204}$	$({}_{82}\text{Pb}^{204})$	1.5
	鐳G	RaG	$({}_{82}\text{Pb}^{206})$	23.6
	釷D	ThD	$({}_{82}\text{Pb}^{207})$	22.6
	錒D	AcD	$({}_{82}\text{Pb}^{208})$	52.3
放射性元素	鐳D	${}_{82}\text{RaD}^{210}$	$({}_{82}\text{Pb}^{210})$	
	錒B	${}_{82}\text{AcB}^{211}$	$({}_{82}\text{Pb}^{211})$	
	釷B	${}_{82}\text{ThB}^{212}$	$({}_{82}\text{Pb}^{212})$	
	鐳B	${}_{82}\text{RaB}^{214}$	$({}_{82}\text{Pb}^{214})$	

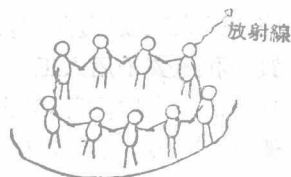


圖 I . 15 放射性同位素的所在处

(八)人工放射性同位素的發現

1934年法国的物理学家約里奧-居里夫妇,將自然的放射性元素釷放在用很薄的鋁箔圍起来的威尔遜云雾室內觀察时,發現了有質子放出(后述)。由釷射出的 α 粒子使鋁的原子核破坏而發生了核反应,經過研究的結果,虽使 α 粒子的冲击停止,但放射出的質子不能立即停止,一直可以持續到数分鐘,好像鋁箔帶有像放射性元素那样的放射能,有放射出放射綫的性質。放射能与自然放射性元素的情形相同,随着指数函数法則而减少。在当时測定的半衰期是 3 分 15 秒(其后測定为 $T=2.55$ 分),經過詳細研究后,由于以下的核反应,明确了它可以产生新的有放射性的磷。

