

放射性輻射的防护及剂量学

(内部资料·注意保存)

科学出版社

放射性輻射的防护及剂量学

瓦采夫著 錢紹鈞譯

(內部資料·注意保存)

科學出版社

1961

內 容 簡 介

原子能的和平利用为人类带来了巨大的好处:反应堆提供了新的能源,同位素则开辟了许多新的科学研究的途径。但是,从反应堆和同位素发出的各种辐射会对人体起有害的作用,小则引起病变,大则造成死亡。因此,每一个参加利用原子能工作的人都必须熟知各种辐射的特性及防护办法。

本书的任务就在于为读者提供这样一些知识。书中首先介绍了放射性辐射及其与物质的相互作用的一般知识,讨论了辐射对生物的作用、可能引起的病变及严重性,然后分别介绍了防护各种辐射的方法,最后还给出了关于应用放射性同位素的实验室及工作人员所应遵守的各项规则,并简单地讨论了剂量测量学。

本书可供所有应用同位素进行工作的人及反应堆工作人员阅读。

放射性辐射的防护及剂量学

瓦采夫著 錢紹鈞譯

科学出版社出版 (北京朝阳门大街 117 号)

北京市书刊出版业营业许可出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 科学出版社发行

1961 年 6 月第 一 版

1961 年 6 月第一次印刷

(京) 0001-3,500

书号: 2348 字数: 276,000

开本: 787×1092 1/27

印张: 12 14/27

定价: 1.70 元

序 言

大家都知道，無論在外部照射或特別是在放射性物質進入人體內部的情況下，放射性輻射都能給人體以有害的影響。放射性物質在科學、技術和工業中迅速擴展着的应用以及原子核力能學的發展，使愈來愈多的人參加到使用放射性物質的工作中來。

在極為多種多樣的科學、技術和工業部門中，都必須在這樣或那樣的程度上與放射性輻射發生關係。這些工作包括：

1. 放射性礦物的開采、精煉和提純。
2. 核反應堆：a) 用來獲得原子核燃料的反應堆；б) 用來獲得能量的反應堆；в) 用來獲得放射性同位素的反應堆。
3. 原子武器的製造。
4. 放射化學實驗室以及使用示蹤原子的實驗室。
5. 放射性物質在機器製造業、地質學、醫學等等方面的应用。

在所使用的放射性物質的數量對人體具有危險性的地方，必須採取一系列的防護措施及防護規則，做到這一些，就有了保證安全的勞動條件。

本書的任務在於為讀者提供這樣一些知識，這些知識是科學工作者、工程師以及其他專業的实际工作者們在使用放射性元素時所必須知道的。

目 录

序言.....	i
第一章 放射性.....	1
§ 1 一般性的知識	1
§ 2 放射性蜕变的規律	4
§ 3 放射性的单位	6
§ 4 人造放射性	11
§ 5 放射性同位素的蜕变图	14
第二章 輻射与物质的相互作用	18
§ 6 小引	18
§ 7 电子与物质相互作用的基本过程	20
§ 8 运动着的质子、 α 粒子、分裂碎片及其他荷电粒子与物质的 相互作用	33
§ 9 γ 射线与物质的相互作用.....	49
§ 10 中子与物质的相互作用	82
第三章 放射性輻射的生物作用及輻射的最大允許标准···	100
§ 11 生物机体組織的基本特性	101
§ 12 輻射与生物机体的相互作用	103
§ 13 伦琴——伦琴射线和 γ 射线的剂量单位	106
§ 14 伦琴与源的放射强度之間的关系	108
§ 15 物理当量伦琴	111
§ 16 生物当量伦琴	112
§ 17 照射所引起的病症	116
§ 18 致电离輻射的生物作用的生物化学基础	121
§ 19 照射的最大允許程度	128
第四章 放射性輻射的防护	151
§ 20 γ 輻射的防护	151

§ 21 β 輻射的防护	167
§ 22 中子的防护	171
§ 23 中子和 γ 輻射的联合防护	174
第五章 操作放射性同位素的安全技术, 工作的組織, 卫生	
条例及标准	183
§ 24 小引	183
§ 25 設計實驗室的基本原則	185
§ 26 建立實驗室的一般要求	186
§ 27 强的 γ 放射源的操作	203
§ 28 热實驗室	204
§ 29 去放射性	208
§ 30 放射性废物的清除	210
§ 31 放射性同位素的操作規程	217
§ 32 个人卫生及保持个人卫生的規則, 个人的防护办法	221
§ 33 卫生-生产須知	223
§ 34 剂量监督	223
第六章 致电离輻射剂量学的方法	225
§ 35 小引	225
§ 36 γ 射綫的剂量学	226
§ 37 β 及 α 輻射的剂量学	230
§ 38 中子剂量学	232
附录	238
I 一些常用的表	238
II 苏联操作放射性同位素的卫生条例及标准	301
参考文献	327

第一章

放射性

§ 1. 一般性的知識

我們周圍所有的各种各样的物体是由不多的几种不同的原子所組成的, 这些不同种类原子的区别在于其結構不同。每一个原子是由一个具有正电荷的核以及一些圍繞着核运动着的帶負电的电子組成的, 这些电子由于电的吸引力而被維持在核的附近。圍繞着原子核的电子聚結成一些所謂电子壳层。

原子的化学性質决定于其电子壳层的构造, 尤其是离原子核最远的外壳层的构造。属于同一化学元素的原子具有同样的电子壳层的构造以及同样的化学性質。現在已經知道約一百种不同的化学元素。

随着原子的电子壳层的复杂化, 不同原子的外电子壳层的构造周期性地重复着, 因而在元素的性質方面出現了有規律的周期性。这个規律性还在 1869 年, 即还在对原子的构造进行研究以前, 就已被德·依·門捷列夫(Д. И. Менделеев)发现, 并被用于建立元素周期表。

按照現代的概念, 原子核是由二种質量几乎相同的基本粒子构成的, 其中的一种帶有正电荷, 其电荷的数量等于电子的电荷, 这种粒子称为質子。另一种电中性的粒子称为中子。

質子和中子被称为重粒子, 有时也称为核子(出自拉丁字 nucleus——核), 以与輕粒子电子相区别, 电子的質量只有質子的質量的 $\frac{1}{1836.5}$ 。

应当指出，目前除了那些根据我們現有的概念是原子的基本組成部分的基本粒子(电子、質子和中子)外，尚有以輻射的形式出現的其它基本粒子。在表 1 中給出关于基本粒子的綜合性的材料(見表 1)。

表 1

基本粒子的种类	符 号	电 荷	靜止質量· (原子質量单位)	以电子質量为 单位的质量
光 子	γ	0	0.0010 γ ($\epsilon_{\gamma} = 1.0$ 兆电子伏特)	0
电 子	$\beta^{-}(e^{-})$	-1	0.0005486	m_e
正 子	$\beta^{+}(e^{+})$	+1	0.0005486	m_e
μ 介子	$\mu^{\pm}$	± 1	—	$\sim 209 m_e$
π 介子	π^{+}	+1	—	$\sim 276 m_e$
	π^{-}	-1	—	$\sim 276 m_e$
	π^0	0	—	$\sim 266 m_e$
τ 介子	$\tau^{\pm}$	± 1	—	$\sim 967 m_e$
質 子	p	+1	1.00753	1836 m_e
反質子	p^{-}	-1	1.00753	1836 m_e
中 子	n	0	1.00893	1838 m_e
中微子	ν	0	0	0

原子的主要質量集中在核內，原子核可以設想成一個球形的特殊的核“液滴”，這個液滴的半徑可用公式

$$R = r_0 A^{1/3}$$

很好地表示出來，式中 A 是原子核中的核子數，而 $r_0 = 1.4 \times 10^{-13}$ 厘米。由這一表式可知，對所有的核而言，核物質的密度是相同的。在這樣一個概念中，質子和中子起着組成液滴的分子的作用。它們處於不間斷的運動中，並且，儘管帶同樣符號電荷的質子間有靜電斥力，但由於短程核力的作用 ($\sim 10^{-13}$ 厘米)，它們仍然穩定地留在核中，這種核力的性質至今還不知道。

研究處於較低激發態的輕核，使我們有理由假定有一定的核的殼層結構存在。

核的正電荷(用基本電荷的大小表示)等於核中的質子數。相應於元素在德·依·門捷列夫周期表中所占方格的號碼、並以符

号 Z 表示的元素的原子序数等于核中的质子数，也就是等于核电荷。在中性的原子中，原子的电子壳层中的电子数等于原子核中的质子数，因此原子中的电子数也等于元素的原子序数。

原子质量的数量级为 10^{-22} — 10^{-24} 克，因此原子质量是用专门的单位来量度的。在原子物理学中采取所谓原子质量单位 (a. m. u.)。按照定义，一个原子质量单位等于氧的主要同位素的原子质量的 $1/16$ ，它相当于 1.6603×10^{-24} 克。用原子质量单位时，质子的质量等于 1.00758，中子的质量则等于 1.00898。

正如上面已经指出的，原子的主要质量集中在原子核中。电子的贡献只占原子总质量的万分之几。采用原子质量单位时，所有的原子的质量都接近整数，因为组成原子核的质子及中子的质量仅在小数点后第三位才与 1 有所差别。这些整数显然决定了核中重粒子的总数。但是应当注意到，原子核就其质量而言总是比它的各个组成部分的质量的总和小一些。关于这个被称为质量亏损的现象的原因，我们在这里不准备加以论述。

原子核中重粒子的数目以符号 A 表示，并称为质量数。

氢原子的核由一个质子组成，其质量数等于 1；重氢原子(氘)的核由一个质子和一个中子组成，其质量数等于 2。因为原子的化学性质决定于包含于核内的质子数 Z ，所以氢和氘的化学性质是一样的。这样，同一种化学元素的不同原子核间可以有这样的区别，即在該元素的各种不同的核中有数目不同的中子(中子数等于 $A - Z$)，也就是说，有不同的重粒子的数目 A 。

具有同样的原子序数 Z ，但有不同的质量数 A 的原子称为同位素。

大多数元素都有几种稳定的同位素，因此用原子质量单位来表示的元素的平均原子质量(人们称之为原子量)有时与整数相去很远。例如，在天然的氯的混合物中含有 75.4% 原子质量为 34.980 的稳定同位素 ($A = 35$)，而原子质量为 36.977 ($A = 37$) 的同位素占 24.6%，因此由天然矿物中得到的氯的原子量为 35.5。因此，在原子核物理学中取质量数为 16 的氧的同位素的原子质量

的 $1/16$ 为原子质量单位,因为氧还有 $A = 17$ 和 $A = 18$ 的稳定同位素。在化学中取各种同位素天然组成的氧的原子量的 $1/16$ 为原子质量单位。同位素以元素的符号表示,并且在右上角标出质量数 A ,而在左下角标出原子序数。例如, $A = 16$ 的氧同位素可写为 ${}^{16}_8\text{O}$,有时,表示原子序数的标号可以省略。我们还要引进描述原子核的一些符号。具有同样的质量数 A 而有不同的原子序数 Z 的原子称为同量异位素,如 ${}_{56}\text{Ba}^{140}$ 和 ${}_{57}\text{La}^{140}$ 。具有同样的中子数 $N = A - Z$ 而有不同的质量数 A 的原子称为同中子异位素,如 ${}_{15}\text{P}^{31}$ 和 ${}_{16}\text{S}^{31}$ 。

除了稳定同位素外,所有的元素都还有不稳定同位素。它们的核在发生自发的蜕变的同时,变成了另一些元素的原子核。这样的同位素称为放射性同位素。它们当中有大部分正是由于自己的不稳定性在自然界中没有被发现,而只能用人工的方法获得。目前已经知道的约有900种这样的同位素,其中包括几十种天然放射性同位素。正是由于研究这些天然放射性同位素,才导致了放射性蜕变现象的发现。

§ 2. 放射性蜕变的规律

在放射性蜕变时显示出一个对于一切元素普遍成立的规律:平均而言,在单位时间内蜕变的某放射性同位素的原子的数目总是占还未蜕变掉的原子总数的一定的份额,这个份额的大小是该同位素的特征。在数学上这一规律可以写成如下关系式:

$$-\Delta N = \lambda N \Delta t; \quad (1.1)$$

在一个很小的时间间隔 Δt 内在初始的 N 个原子中蜕变掉的原子的数目 ΔN 正比于 N 和 Δt 。比例因子 λ 称为蜕变常数,并且是该放射性同位素所特有的一个常数。 λ 表示在单位时间内一个原子蜕变的几率。

简单的放射性蜕变规律的积分公式具有指数关系的形式:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.2)$$

其中 N_0 是在起始时刻(即 $t = 0$ 时)的原子数, N 是到 t 时刻尚剩

留下来的原子数。

但是,通常都使用另一个表征放射性蜕变速度的量,即所谓半衰期 T 。

半衰期是这样一個時間間隔,在这一時間間隔內一定量的放射性物质减少一半。

由公式(1.2),我們得到

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T},$$

由此得

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}. \quad (1.3)$$

在蜕变过程中,核发出射线。除半衰期外,辐射的性质也是放射性同位素的重要特征。就其本性而言,放射性辐射一般有三种类型,即区分为 α 、 β 和 γ 射线。除了这些主要形式的放射性辐射外,核的蜕变可以伴随着放出伦琴射线的特征谱和轫致谱。

α 射线就是快速飞行的氦核(确切些說,就是同位素 ${}^4_2\text{He}$ 的核)的流。

β 辐射是由核放出的电子(β^-)或正子(β^+) (正子是质量与电子相同、但具有正电荷的粒子)的流。按照现代的概念,在原子核中沒有“現成”的 β 粒子,它們是在核的变化过程中产生的,就象物质的原子所发出的光是由于原子的电子壳层中的一些过程而产生的一样。大部分放射性同位素都是 β 辐射体。

γ 射线是一种类似于伦琴射线和光线的辐射。这种辐射是核在由一个激发态跃迁到另一激发态或基态能级时放出的。 γ 辐射常常伴随着 α 蜕变和 β 蜕变而出现,成为这一蜕变的次级效应。一般說来, γ 射线是由放出 α 或 β 粒子后形成的新的元素的激发原子核放出的。

放射性辐射的能量常用专门的单位来量度。在原子物理中采用的单位是电子伏(eV, эВ),这就是电子在电场中穿过1伏特的电势差时所获得的能量。千电子伏(KeV, КэВ)(等于 10^3 电子伏)

和兆电子伏 (MeV, MэВ) (等于 10^6 电子伏) 是它的导出单位。因为电子的电荷等于 4.8×10^{-10} 绝对静电单位, 而 1 伏特等于 $1/300$ 绝对静电单位, 所以 1 电子伏 $= \frac{4.8 \times 10^{-10}}{300} = 1.60 \times 10^{-12}$

尔格, 1 兆电子伏 $= 1.6 \times 10^{-6}$ 尔格。

由放射性物质放出的 α 粒子的能量通常等于数兆电子伏, 而 β 粒子的能量则可从 0 到数兆电子伏。 γ 光子的能量则在几千到几兆电子伏的范围内, 这相当于波长从几埃 (1 埃 $= 10^{-8}$ 厘米) 到千分之几埃。

现在已知, 电磁辐射的波长与光子的能量间的关系为

$$\epsilon = h\nu. \quad (1.4)$$

此处 h 是普朗克 (Planck) 常数, 等于 6.62×10^{-27} 尔格·秒, ν 是辐射的频率。因为 $\nu = \frac{c}{\lambda}$ (其中 c 是真空中光速, 等于 300000 公里/秒), 所以波长 λ 与光子能量的关系为 $\epsilon = \frac{hc}{\lambda}$ 。假如 λ 用埃来表示, 而 ϵ 用千电子伏表示, 则波长 λ 埃相当于光子能量

$$\epsilon = \frac{12.395}{\lambda} \text{ 千电子伏}. \quad (1.5)$$

电磁辐射不仅以波长和光子的能量为特征, 而且也以一定的动量、因而也以一定的质量为其特征。由爱因斯坦公式

$$\epsilon = mc^2 \quad (1.6)$$

可以得到质量与所联系的能量之间的关系; 式中 c 是真空中光速。关系式 (1.6) 使我们能够确定与一定质量单位相联系的能量。原来

1 原子质量单位所具有的能量 $= 931$ 兆电子伏。

与电子或正子的静止质量相联系着的能量等于 0.511 兆电子伏。

§ 3. 放射性的单位

放射性样品的放射性强度是它的一个重要的性质。在单位时

間內蛻變的原子數稱為該樣品的放射性強度 a ：

$$a = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N. \quad (1.7)$$

由關係式(1.7)可以看到，放射性強度就等於乘積 λN 。知道了放射性強度及蛻變常數，就可以確定任何時刻該放射性物質的總原子數。

放射性的基本單位是居里。

起初，居里的意義是指與自己的蛻變產物處於平衡狀態的 1 克鐳每秒鐘所發生的蛻變的數目，大約相當於每秒鐘內氡的 3.71×10^{10} 個蛻變行為。

在應用居里這一單位來測量非鈾-鐳系的放射性元素的放射性時，存在着原則性的困難。問題在於，計算相當於 1 居里的蛻變數目的精確度是有限的，例如，對於鐳，精確度為 1—5%。最近的測定表明，在 1 克鐳蛻變時每秒鐘放出 $(3.61 \pm 0.03) \times 10^{10}$ 個 α 粒子。以後新的測量可能再改變上面給出的那個數字。對於鈾-鐳系的元素而言這種情況並不使我們在表示它們的放射性時要有所改變，但是對於其它的放射性元素而言則須要重新計算。

目前根據國際鐳標準委員會的建議，把 1 居里的放射性規定為每秒鐘恆定的蛻變數，即每秒鐘 3.71×10^{10} 次蛻變。

各種 α 及 β 輻射體的放射性的大小就是根據這一建議用居里這一單位來表示的。

對於小的放射性常用毫居里 (mC, мкюри) 和微居里 (μ C, мккюри) 這兩個單位：

$$1 \text{ 居里} = 10^3 \text{ 毫居里} = 10^6 \text{ 微居里},$$

$$1 \text{ 微居里} = 10^{-3} \text{ 毫居里} = 10^{-6} \text{ 居里}.$$

由於居里這單位的規定性質，不久前曾建議另一個測量 α 及 β 放射性的單位——盧瑟福。盧瑟福是這樣多的放射性物質的放射性，在這些放射性物質中每秒鐘發生 1×10^6 次蛻變。較小的單位為毫盧瑟福（即每秒鐘內有 1×10^3 次蛻變）和微盧瑟福（每秒鐘有 1 次蛻變）。符號為：盧瑟福——rd，毫盧瑟福——mrd，微盧

瑟福—— μrd .

1 居里 = 37×10^3 卢瑟福.

但是这一单位制还没有得到广泛的应用 (在苏联没有被正式地采用).

在液体中和气体中放射性物质的浓度单位为

1 居里/升 = 2.2×10^{12} 蜕变数/分钟·升,

1 爱玛 = 10^{-10} 居里/升 = 220 蜕变数/分钟·升,

1 马赫 = 3.64×10^{-10} 居里/升 = 780 蜕变数/分钟·升.

对于铀、钍和镭而言, 体积浓度一般用每升多少克表示.

马赫 (махе) 这一单位早先是用以测定天然水的放射性的, 现在常用爱玛 (эман) 这一单位 (1 马赫 = 3.64 爱玛).

各种各样的把居里这一单位用来描述放射源的 γ 放射性的做法都会引起混乱, 因而必须停止使用.

γ 放射性样品的强度通常由被研究的样品所产生的电离作用的大小来确定. 在苏联采用毫克镭当量为 γ 样品的放射性的单位. 毫克镭当量是任何这样的放射性样品的放射性, 这个样品的 γ 辐射在同样的测量条件下在空气当量的电离室中产生的电离与 1 毫克苏联国家镭标准的镭所产生的电离相同.

1 毫克与蜕变产物处于平衡状态的镭的点源经过 0.50 毫米的铂的初步过滤后, 在空气中距源 1 厘米远处产生的剂量率为 1 小时 8.4 伦琴 (不用铂过滤时为 9.7 伦琴/小时).

伦琴单位是这样数量的伦琴射线或 γ 射线, 它在穿过标准状态的纯空气时在每立方厘米中产生 1 绝对静电单位的正电荷和 1 绝对静电单位的负电荷.

这样, 1 毫克镭当量就相当于任何这样的放射性物质的 γ 放射性, 其点源在 1 厘米远处产生的物理剂量率为 8.4 伦琴/小时.

有时采用每小时每米伦琴为 γ 放射性单位 (伦琴/小时·米). 每小时每米伦琴是这样—个源的 γ 放射性, 它在 1 米远处产生的物理剂量率为 1 伦琴/小时. 在苏联伦琴/小时·米并没有被正式采用. 我们用毫克镭当量来表示在 1 米远处产生的物理剂量率为

1 伦琴/小时的源的放射性。1 毫克镭当量在 1 厘米远处产生的剂量率为 8.4 伦琴/小时，而在 1 米远处为 $8.4 \cdot 10^{-4}$ 伦琴/小时。要在 1 米远处产生 1 伦琴/小时的物理剂量率，放射源必须强 $\frac{1}{8.4 \cdot 10^{-4}} \cong 1.2 \times 10^3$ 倍，也就是说源应为 1200 毫克镭当量 = 1.2 克镭当量。

现在我们来求放射性为 1 居里的放射性元素的重量(用克为单位)。

由(1.7)和(1.1)可以得到这样的结论：对于一定的样品，在单位时间内蜕变掉的原子数

$$a = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N,$$

因为对 1 居里而言 $a = 3.71 \times 10^{10}$ 蜕变数/秒， $N = \frac{Q}{A} N_0$ ，其中

N_0 是阿伏伽德罗数 6×10^{23} 原子/克原子量， Q 是用克为单位的放射性元素重量(不计载体重量)， A 是原子量， T 是半衰期，

并且 $\lambda = \frac{0.693}{T}$ ，所以 $3.71 \times 10^{10} = \frac{0.693}{T} \cdot \frac{Q}{A} \times 6 \times 10^{23}$ ：

$$\left. \begin{aligned} Q &= 8.9 \times 10^{-14} AT (T \text{ 用秒为单位}), \\ Q &= 5.3 \times 10^{-12} AT (T \text{ 用分为单位}), \\ Q &= 3.2 \times 10^{-10} AT (T \text{ 用小时为单位}), \\ Q &= 7.7 \times 10^{-9} AT (T \text{ 用天为单位}), \\ Q &= 2.8 \times 10^{-6} AT (T \text{ 用年为单位}). \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

例 计算 1 居里 Ca^{45} 的重量 ($A = 45, T = 152$ 天)。

$Q = 7.7 \times 10^{-9} \times 45 \times 152 = 52.7 \times 10^{-6}$ 克 = 52.7×10^{-3} 毫克 = 52.7 微克。

1 克任意的放射性物质的放射性 c (用居里为单位)可由下列公式来确定：

$$\begin{aligned}
c &= \frac{1.13 \times 10^{13}}{AT} \quad (T \text{ 以秒为单位}), \\
c &= \frac{1.88 \times 10^{11}}{AT} \quad (T \text{ 以分为单位}), \\
c &= \frac{3.10 \times 10^9}{AT} \quad (T \text{ 以小时为单位}), \\
c &= \frac{1.30 \times 10^8}{AT} \quad (T \text{ 以天为单位}), \\
c &= \frac{3.57 \times 10^5}{AT} \quad (T \text{ 以年为单位}).
\end{aligned} \tag{1.9}$$

例 确定 1 克 Ca^{45} 的放射性 ($A = 45$, $T = 152$ 天)。

$$c = \frac{1.30 \times 10^8}{45 \times 152} = 1.9 \times 10^4 \text{ 居里/克}$$

在使用放射源的时候, 随时都应该考虑到源的放射性的逐渐减弱。这主要是对短寿命的同位素而言的。我們上面已經指出过, 放射性样品的放射性的改变由下面的公式决定:

$$c_t = c_0 e^{-\lambda t} = c_0 e^{-\frac{0.693t}{T}},$$

其中 c_0 是 $t = 0$ 时源的放射性, c_t 是经过时间间隔 t 后源的放射性。

假如在某一定时刻 t 时的放射性 c_t 为已知, 则在 t 时间前的初始放射性 c_0 可由下式确定:

$$c_0 = c_t e^{\lambda t} = c_t e^{\frac{0.693t}{T}}.$$

假如 c_1 是母元素的放射性, 则子元素的放射性 c_2 在时间 t 内的增长按下面的规律进行:

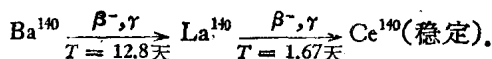
$$c_2 = c_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}),$$

其中下标 1 和 2 分别代表母元素和子元素。

在所有上面列举出来的公式中, T , t 和 λ 应当用同样的单位来表示。

我們举一个计算放射链中的放射性同位素钍和镭的对比关系

的例子,放射鏈为



現在要确定在起初只含有 Ba^{140} 的样品中經過 30 天后 Ba^{140} 和 La^{140} 的相对含量为多少.

設在 $t = 0$ 时 Ba^{140} 原子的数目等于 N_0 , 那么, 經過 30 天后, 镧原子的数目将等于

$$\begin{aligned} N_{\text{La}} &= \frac{\lambda_{\text{Ba}} N_0}{\lambda_{\text{La}} - \lambda_{\text{Ba}}} (e^{-\lambda_{\text{Ba}} t} - e^{-\lambda_{\text{La}} t}) = \\ &= \frac{0.054 N_0}{0.415 - 0.054} (e^{-0.054 \times 30} - e^{-0.415 \times 30}) = 0.03 N_0, \end{aligned}$$

$$(\lambda = \frac{0.693}{T}; \lambda_{\text{Ba}} = \frac{0.693}{12.8} = 0.054;$$

$$\lambda_{\text{La}} = \frac{0.693}{1.67} = 0.415).$$

也就是說,放射性的镧(La)原子的数目等于钡(Ba)原子的初始数目的 $\frac{3}{100}$.

經 30 天后,钡原子的数目为

$$N_{\text{Ba}} = N_0 e^{-\lambda_{\text{Ba}} t} = N_0 e^{-0.054 \times 30} = 0.2 N_0.$$

为了确定放射性随时间的相对改变($c_t/c_0 = e^{-\frac{0.693t}{T}}$), 使用給出作为 $\frac{t}{T}$ 的函数的 $\frac{c_t}{c_0}$ 的表是很方便的(參看附录 I 中的表 I.1).

§ 4. 人造放射性

正如上面已經講过的, 放射性元素的主要部分是用人工方法取得的.

应当把鉀 ($_{19}\text{K}^{40}$), 銣 ($_{37}\text{Rb}^{87}$), 釷 ($_{62}\text{Sm}^{147}$), 镥 ($_{71}\text{Lu}^{176}$) 和鐿 ($_{75}\text{Re}^{187}$) 归入种类很少的天然放射性元素之列.

有时样品是由几种在起源上相互有关的放射性物质組成的.